สเปกตรัมของผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง

นายศิริพล ศิริพละ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-53-1679-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RESPONSE SPECTRA WITH CONSIDERATION OF BI-DIRECTIONAL EXCITATION EFFECTS

Mr. Siripol Siripala

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2004
ISBN 974-53-1679-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สเปกตรัมของผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง
โดย	นายศิริพล ศิริพละ
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาณัติ เรืองรัศมี)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพบูลย์ ปัญญาคะโป)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี)

ศิริพล ศิริพละ : สเปกตรัมของผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง. (RESPONSE SPECTRA WITH CONSIDERATION OF BI-DIRECTIONAL EXCITATION EFFECTS) : อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี, 161 หน้า. ISBN 974-53-1679-2

ในการวิเคราะห์โครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหว จะพิจารณาแรงที่กระทำกับโครงสร้างในแต่ละทิศทางที่ตั้งฉากกันโดยแยกจากกัน ซึ่งในความเป็นจริงแผ่นดินไหวกระทำในทุกทิศทางพร้อมกัน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง โดยจำลองโครงสร้างในระบบขั้นความเสรีเท่ากับสอง ซึ่งเคลื่อนที่ได้สองทิศทางในแนวราบ โดยนำเสนอสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่สูงสุดซึ่งเรียกว่า “ สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง ” ในการศึกษาได้ใช้คลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้จำนวน 30 คลื่น ที่บันทึกจากสถานีวัดที่มีลักษณะดินประเภทหิน ดินแข็งและดินอ่อน โดยพิจารณาผลของทิศทางที่คลื่นแผ่นดินไหวกระทำกับโครงสร้างโดยรอบทิศทาง และได้เสนอผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปของสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ คือเป็นอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีกับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนเดียว และเสนอสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่สอดคล้องกับระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี สุดท้ายได้เสนอสมการเพื่อการใช้งานในการออกแบบ

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าระยะเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีส่วนใหญ่เกิดเมื่อมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดกระทำในแกนที่มีคาบของโครงสร้างมากกว่า โดยปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ คือคาบของโครงสร้างในแต่ละแกนและมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างโดยทิศทางของการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีจะเอียงไปทางแกนที่มีคาบมากกว่าเป็นหลัก ค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 1.1-1.7 สำหรับหิน 1.1-1.6 สำหรับดินแข็งและ 1.1-1.4 สำหรับดินอ่อน โดยขนาดของแผ่นดินไหวและระยะทางไม่มีนัยสำคัญกับสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ......วิศวกรรมโยธา...... ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา ......วิศวกรรมโยธา...... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....

ปีการศึกษา ......2547......

4570563021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD : RESPONSE SPECTRA / BI-DIRECTIONAL EXCITATION / NEAR FAULT GROUND MOTION

SIRIPOL SIRIPALA: RESPONSE SPECTRA WITH CONSIDERATION OF BI-DIRECTIONAL EXCITATION EFFECTS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. ANAT RUANGRASSAMEE, Ph.D.,

161 pp, ISBN 974-53-1679 -2

In seismic design of structures, excitations are usually applied separately in two perpendicular directions of structures. In fact, the two component of ground motions occurs simultaneously. This thesis clarifies the effects of bi-directional excitations on structures and proposes the response spectra called " response spectra with consideration of bi-directional excitation effects ". A simplified analytical model of a two-degree-of-freedom system is employed. In the development of the spectra, 30 horizontal ground motion records from rock, stiff soil and soft soil sites are considered. The effect of directivity of ground motions is taken into account by applying strong motion records in all directions. The analytical results are presented in the form of the displacement ratio response spectrum defined as the radial displacement response spectrum normalized by a conventional displacement response spectrum. In addition, the direction response spectrum is also presented to identify the direction of the maximum radial displacement. Finally, regression analysis was carried out to formulate the response spectra for design purposes.

The result shows that maximum radial displacement occurs in the angle with the highest spectrum intensity of a ground motion acting in the longer period axis. It is found that a natural periods in two horizontal axes of the structure and the angle of a ground motion significantly affect the radial displacement spectrum and the direction response spectrum. The maximum radial displacement tends to occur in the axis of a longer period. The average displacement ratio response spectra have values about 1.1-1.7 for rock sites, 1.1-1.6 for stiff soil sites and 1.1-1.4 for soft soil sites. The effects of earthquake magnitude and the epicentral distance are not significant.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ……CIVIL ENGINEERING…… Student's signature ………………………………

Field of study ……CIVIL ENGINEERING…… Advisor's signature ………………………………

Academic year ……2004……

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาณัติ เรืองรัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย ซึ่งข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในพระคุณของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งจึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปณิธาน ลักคุณะประสิทธิ์ ในฐานะประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพบูลย์ ปัญญาคะโป และอาจารย์ ดร.ฉัตรพันธ์ จินตนาภักดี ในฐานะกรรมการสอบที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จเรียบร้อยสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับเงินสนันสนุนการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนทั้งในอดีตและปัจจุบันและที่สำคัญผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องทุกคนที่คอยให้กำลังใจรวมทั้งรุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่านที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญรูป ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา 1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 17
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย 17
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 17
บทที่ 2 นิยามของสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวองทิศทาง 19
2.1 การพิจารณาผลของทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง 19
2.2 แบบจำลองในการวิเคราะห์ 21
2.3 นิยามของสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง 23
2.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ 24
2.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์ 25
2.6 การประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง 30
บทที่ 3 ผลของทิศทางแผ่นดินไหวต่อลักษณะของสเปกตรัมผลตอบสนองในแกนเดียว 33
3.1 ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละทิศทางที่ตั้งฉาก 39
3.2 รูปร่างของสเปกตรัมผลตอบสนอง 37
3.3 สเปกตรัมผลตอบสนองเมื่อพิจารณาทุกมุม 45
บทที่ 4 ลักษณะของสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง 49
4.1 ตัวอย่างสเปกตรัมการผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995 49
4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี 54

หน้า

4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ 59
4.4 การเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีเมื่อพิจารณาแผ่นดินไหวที่กระทำในทุกทิศทาง 61
4.5 ผลของขนาดของแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางต่อสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ 64
บทที่ 5 ค่าเฉลี่ยและสมการของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และทิศทางการเคลื่อนที่ 66
5.1 ค่าเฉลี่ยและสมการของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ 66
5.2 ค่าเฉลี่ยและสมการทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง 71
5.3 การออกแบบโดยพิจารณาแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง 79
5.4 การเปรียบเทียบผลกับข้อกำหนด 84
5.5 ข้อจำกัดของสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอ 92
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 93
6.1 สรุปผลการวิจัย 93
6.2 ข้อเสนอแนะ 95
รายการอ้างอิง 96
ภาคผนวก 98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 161

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 หลักการพื้นฐานในการออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหว (ATC-32) 3
1.2 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาของ Hisada, 1988 3
1.3 คาบสำหรับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ที่ขนาดแผ่นดินไหวและดินประเภทต่าง ๆ 11
1.4 การเคลื่อนที่ที่ขนาดแผ่นดินไหวและดินประเภทต่าง ๆ (Bommer, 1998)........................ 12
1.5 สัมประสิทธิ์ของระยะทาง(Bommer, 1998)... 12
1.6 สัมประสิทธิ์ความหน่วง(Bommer, 1998) 12
1.7 อัตราส่วนระหว่าง PGV/PGA และ PGD/PGV (Malhotra, 1999).................................. 13
2.1 การจำแนกประเภทของดิน 25
2.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมผลตอบสนอง... 31
5.1 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y ของคลื่นแผ่นดินไหว Takatori, Kobe , 1995..................... 89
5.2 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y ของคลื่นแผ่นดินไหว Morgan hill, 1984............................ 91

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว El centro ในแต่ละแกน (Hisada, 1988) 2
1.2 (ก) อัตราส่วนของ $Sa_{x+y}(T)/ Sa_x(T)$ (ข) อัตราส่วนของ $Sa_{x+y}(T)/ Sa_y(T)$ (Hisada,1988) 3
1.3 อาคาร 10 ชั้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของทิศทางแผ่นดินไหว (Cheng, 1990) 4
1.4 (ก) แบบจำลองอาคาร 1 ชั้น โดยที่ CR คือ จุดศูนย์กลางความแข็ง CM คือ จุดศูนย์กลางมวล (ข) ค่าโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเมื่อแผ่นดินไหวกระทำในมุมต่าง ๆ กัน (Lopez, 1997) 4
1.5 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดสองแกน (Takizawa, 1976) 5
1.6 รูปแบบการทดสอบเสาโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ (ก) ควบคุมการเคลื่อนที่ในแกนเดียว (ข) ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แกน (Takizawa, 1976) 5
1.7 เปรียบเทียบวัฏจักรของแรงและการเคลื่อนที่ในแกน X (ก) ควบคุมการเคลื่อนที่ในแกนเดียว (ข) ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แกน (Takizawa, 1976) 6
1.8 โครงสร้างเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลองของ (Clough, 1987) 7
1.9 แรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ภายใต้แรงดัดแกนเดียวกับแรงดัดสองแกนของเสาชั้น 1 (Clough, 1987) 7
1.10 (ก) โมเมนต์ดัดในสองทิศทางในมุมต่างๆ (ข) โมเมนต์ดัดในแกน X (ค) โมเมนต์ดัดในแกน Y (Zeris, 1991) 8
1.11 รูปแบบการเคลื่อนที่ในการทดลองเสากลม (Priestley, 1993) 9
1.12 แสดงวัฏจักรของเสาคุณสมบัติเดียวกันรับแรงดัดสองแกนในรูปแบบต่างกัน (Priestley, 1993) 9
1.13 สเปกตรัมความเร่งใน Uniform Building Code (1997) 10
1.14 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในรูปเชิงเส้น (Bommer, 1998) 11
1.15 (ก) คลื่นแผ่นดินไหวที่ไม่มีลักษณะการกระตุก (pulse-like) (ข),(ค),(ง) คลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะการกระตุก (pulse-like) (Malhotra, 1999) 13
1.16 สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวในกราฟ tripartite (Malhotra, 1999) 14
1.17 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ระหว่างชั้นกับจำนวนชั้นของโครงสร้างโดยที่ $T = 0.15N$ (Malhotra, 1999).. 14
1.18 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในชั้นหลังคากับจำนวนชั้นของโครงสร้างโดยที่ $T = 0.15N$ (Malhotra, 1999).. 15

รูปที่ หน้า

1.19 สเปกตรัมผลตอบสนองของแกนที่ตั้งฉากและแกนที่ขนานกับรอยเลื่อน
(ก) Northridge 1994 คลื่นระยะใกล้ (7.5 กม.จากแหล่งกำเนิด)
(ข) Taft 1952 คลื่นระยะไกล (43 กม.จากแหล่งกำเนิด) (Chopra, 2001) 15
1.20 สเปกตรัมผลตอบสนองที่ทำการหารด้วยค่าสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหว(ก) Northridge 1994 (ข) Taft 1952 (Chopra, 2001) 16
1.21 (ก) คลื่นแผ่นดินไหวที่สร้างขึ้นจำนวน 4 รอบ (ข) สเปกตรัมผลตอบสนองที่ทำการหารด้วยค่าสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่สร้างขึ้นจำนวนรอบ n= 1,2,3 และ 4 (Chopra, 2001) 16
2.1 คลื่นแผ่นดินไหวในแนวราบทั้ง 2 แกนและแกนของโครงสร้าง 19
2.2 คลื่นแผ่นดินไหวโกเบที่มุม 0° (ก) คลื่นแผ่นดินไหวในแกน x (ข) แกน y 20
2.3 คลื่นแผ่นดินไหวโกเบที่มุม 35° (ก) คลื่นแผ่นดินไหวในแกน x (ข) แกน y 20
2.4 ค่าสัมบูรณ์ของความเร่งสูงสุดเมื่อหมุนคลื่นแผ่นดินไหวไปเป็นมุมตั้งแต่ 0-360 องศา 21
2.5 แบบจำลองการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานภายใต้แผ่นดินไหว 2 ทิศทาง 21
2.6 การรวมผลตอบสนองในแกน x และ y 27
2.7 การเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง ในแกน x และ y 27
2.8 การเคลื่อนที่กับเวลาในแกน x และ y. 28
2.9 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x และ y 28
2.10 การเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y 28
2.11 สเปกตรัมผลตอบสนอที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, 1995 29
2.12 สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่($R(T_x,T_y)$)สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe............ 29
2.13 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่($\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$)สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe 29
2.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเสาเมื่อเกิดแผ่นดินไหวใน 2 ทิศทาง........................ 30
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว 36
3.2 สเปกตรัมผลตอบสนองในแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุด(แกนหลัก)และแกนที่ตั้งฉาก(แกนรองและแกน x และ y สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995........................ 37
3.3 ค่าอัตราส่วน $SR(T)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA kobe,1995........................ 38
3.4 ค่าเฉลี่ย $SR(T)$ สำหรับหิน ดินแข็งและดินอ่อน 39
3.5 สเปกตรัมผลตอบสนองที่นอร์มัลไลซด์ด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน (คลื่นแผ่นดินไหว Kobe, 1995) 40

รูปที่ หน้า

3.6 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน สำหรับหิน 41

3.7 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน สำหรับดินแข็ง 42

3.8 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน สำหรับดินอ่อน 43

3.9 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน เปรียบเทียบดินประเภทต่าง ๆ 44

3.10 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่เมื่อทิศทางแผ่นดินไหวกระทำเป็นมุม 0-90 องศา 45

3.11 ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ของสเปกตรัมผลตอบสนองและสเปกตรัมผลตอบสนองในแกน x และ y ที่คลื่นแผ่นดินไหวทำมุม 0 องศากับโครงสร้าง (คลื่นแผ่นดินไหว Kobe,1995) 46

3.12 อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนอง (คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995) 47

3.13 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนอง ในดินประเภทต่าง ๆ 48

4.1 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตั้งแต่ 0-180 องศา สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe,1995 51

4.2 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกมุม $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995 52

4.3 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x ($\tilde{S}_d^x(T_x,T_y)$) ที่ใช้ในการหาร 52

4.4 สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ $R(T_x,T_y)$ 52

4.5 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตั้งแต่ 0 – 180 องศา สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995 53

4.6 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe,1995 54

4.7 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y ($T_x = 0.9\,s, T_y = 1.2\,s$) คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe ($\theta = 0^\circ, I_d^x / I_d^y = 1.22$) 55

4.8 ค่า $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ สำหรับแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น 57

4.9 ค่า $\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ สำหรับแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น 58

4.10 ทิศทางของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ($T_x = T_y$) 59

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่กับอัตราส่วนคาบของโครงสร้างและอัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x และ y จำนวน 30 คลื่นแผ่นดินไหว 61

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ หน้า

4.12 มุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดกับจำนวน
โครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสดที่มุมนั้นสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe, 1995 62
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x กับมุมของ
คลื่นแผ่นดินไหว สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe,1995... 63
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีกับ
ค่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในแกน x จำนวนคลื่นแผ่นดินไหว 30 คลื่น 64
4.15 ผลจากขนาดแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับค่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่...... 65
4.16 ผลจากขนาดแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของ
โครงสร้าง 65
5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินแต่ละประเภท... 66
5.2 ค่าเฉลี่ยบวกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินแต่ละประเภท 67
5.3 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ (หิน) 68
5.4 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ (ดินแข็ง) 68
5.5 ค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ (ดินอ่อน).. 69
5.6 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินแต่ละประเภท...................... 70
5.7 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้างในลักษณะดินแต่ละประเภท 71
5.8 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง (หิน) 72
5.9 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง (ดินแข็ง).. 72
5.10 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง (ดินอ่อน).. 73
5.11 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของทิศทางการเคลื่อนที่ (หิน) 76
5.12 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y 76
5.13 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของทิศทางการเคลื่อนที่ (ดินแข็ง)............................ 77
5.14 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y 77
5.15 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของทิศทางการเคลื่อนที่ (ดินอ่อน)............................ 78
5.16 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y 78
5.17 สะพานตัวอย่างในการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว 80
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับการเปลี่ยนแปลงความโค้งจากโปรแกรม XTRACT........... 81
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดในทั้งสองแกนของเสา
คอนกรีตเสริมเหล็ก (Interaction diagram) โดยที่ M_{x-x} คือ โมเมนต์รอบแกน x................. 83

รูปที่ หน้า

5.20 เปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จาก ข้อกำหนด (หิน) 85
5.21 เปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จาก ข้อกำหนด (ดินแข็ง)........ 86
5.22 เปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จาก ข้อกำหนด (ดินอ่อน)........ 87
5.23 การเคลื่อนที่ในแกน x กับ y คลื่นแผ่นดินไหว Takatori, Kobe , 1995 89
5.24 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่นดินไหว Morgan hill,Coyote lake dam,1984 90
5.25 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y ของคลื่นแผ่นดินไหว Morgan hill, 1984 91

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

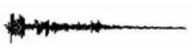
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในขั้นตอนการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า (equivalent static force) ซึ่งเป็นการคำนวณแรงเฉือนที่ฐานของโครงสร้าง ด้วยสเปกตรัมของความเร่งซึ่งได้มาจากการหาผลตอบสนองของโครงสร้างในคาบที่แตกต่างกันภายใต้แผ่นดินไหว เป็นการพิจารณาจากคลื่นแผ่นดินไหวในทิศทางเดียว ซึ่งในความเป็นจริงแล้วแผ่นดินไหวนั้นกระทำในทุกทิศทาง ถ้าพิจารณาถึงพฤติกรรมของเสาแล้ว จะเกิดโมเมนต์ดัดในทั้งสองแกนและจากผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่า เสาที่ทดสอบภายใต้แรงแผ่นดินไหวในทั้งสองแกน เกิดความเสียหายมากกว่าเสาที่ถูกกระทำภายใต้แรงแผ่นดินไหวในทิศทางเดียว (Clough 1987, Mahin 1991, Priestley 1993) ทั้งในด้านการลดลงของกำลังและสติฟเนส อย่างไรก็ตามในหลักเกณฑ์การออกแบบของประเทศต่าง ๆ เช่น UBC(1997), Eurocode(1994), Caltrans(2001) ได้พิจารณาถึงผลตอบสนองของแผ่นดินไหวในแกนราบสองแกน โดยกำหนดให้เพิ่มผลตอบสนองเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวในอีกแกนหนึ่งที่ตั้งฉากกันเข้าไปอีก 30 % ในแกนที่พิจารณา ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่แยกพิจารณาในแต่ละแกนอิสระจากกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ควรพิจารณาแผ่นดินไหวใน 2 ทิศทางพร้อมกันจะให้ค่าที่ถูกต้องกว่า

หลักการพื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวที่คำนึงถึงสมรรถนะของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวที่มีขนาดแตกต่างกันอาจแสดงได้ดังตารางที่ 1.1 (ATC-32) คือในแผ่นดินไหวขนาดเล็กโครงสร้างจะยังมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติก แต่เมื่อแผ่นดินไหวมีขนาดใหญ่ขึ้นโครงสร้างเริ่มจะมีความเสียหายคือพฤติกรรมของโครงสร้างจะเป็นแบบอินอีลาสติก โดยในการออกแบบจะต้องให้โครงสร้างมีความปลอดภัยต่อแผ่นดินไหวทั้งสองระดับ ในงานวิจัยจึงมุ่งพัฒนาสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง ซึ่งโครงสร้างมีพฤติกรรมอยู่ในช่วงอีลาสติกเพื่อออกแบบให้มีสมรรถนะต้านทานแผ่นดินไหวที่เกิดบ่อยและมีขนาดไม่ใหญ่มาก โดยพิจารณาความแตกต่างของคาบธรรมชาติของโครงสร้างใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน โดยผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวให้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมจริงมากยิ่งขึ้น

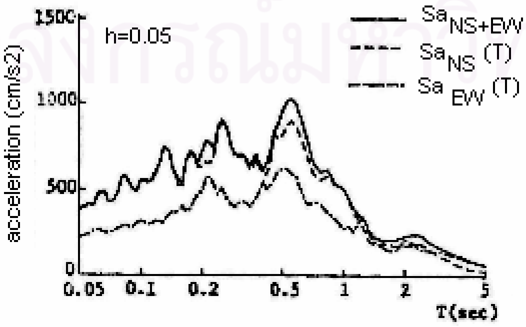
ตารางที่ 1.1 หลักการพื้นฐานในการออกแบบสะพานต้านทานแผ่นดินไหว (ATC-32)

Ground Motion at site	Level of Post-Earthquake		Level of Damage	
	Ordinary Bridge	Important Bridge	Ordinary Bridge	Important Bridge
Fuctional-Evaluation Ground Motion 	Immediate	Immediate	Reparable	Minimum
Safety-Evaluation Ground Motion	Limited	Immediate	Significant	Reparable

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

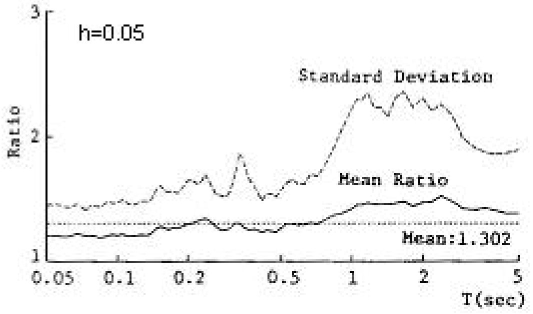
1.2.1 **ผลกระทบของส่วนประกอบของแผ่นดินไหวและทิศทางที่กระทำ** (seismic component and input direction)

Hisada และคณะ (1988) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของแกนที่ตั้งฉากกัน (Orthogonal effects) ของโครงสร้างจากแผ่นดินไหวและผลตอบสนองต่อโครงสร้าง โดยทำการศึกษาทางสถิติโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว 75 คลื่น ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และมีพื้นฐานอยู่บนการหาสเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่งจากคลื่นแผ่นดินไหวในแกน N-S และ E-W ดังรูปที่ 1.1 โดยให้คาบที่ทำการผันแปรในแกน x และ y เท่ากัน แล้วนำมารวมกันแบบเวกเตอร์ โดยทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณในสองแกนกับแกนเดียว พบว่าค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมเท่ากับ 1.3 ดังรูปที่ 1.2 โดยที่ Sa_x และ Sa_y คือความเร่งสูงสุดในแนวแกน x และ y ส่วน Sa_{x+y} คือ ความเร่งสูงสุดในแนวรัศมี

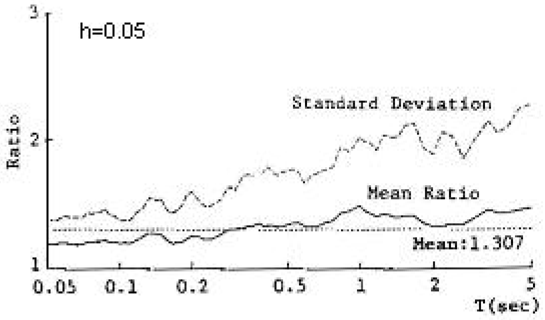


รูปที่ 1.1 สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหว El centro ในแต่ละแกน(Hisada, 1988)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)



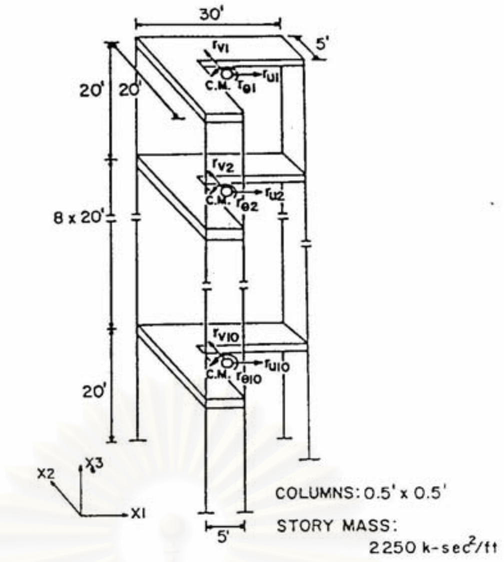
(ข)

รูปที่ 1.2 (ก) อัตราส่วนของ $Sa_{x+y}(T)/ Sa_x(T)$ (ข) อัตราส่วนของ $Sa_{x+y}(T)/ Sa_y(T)$ (Hisada, 1988)

ตารางที่ 1.2 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการศึกษาของ Hisada, 1988

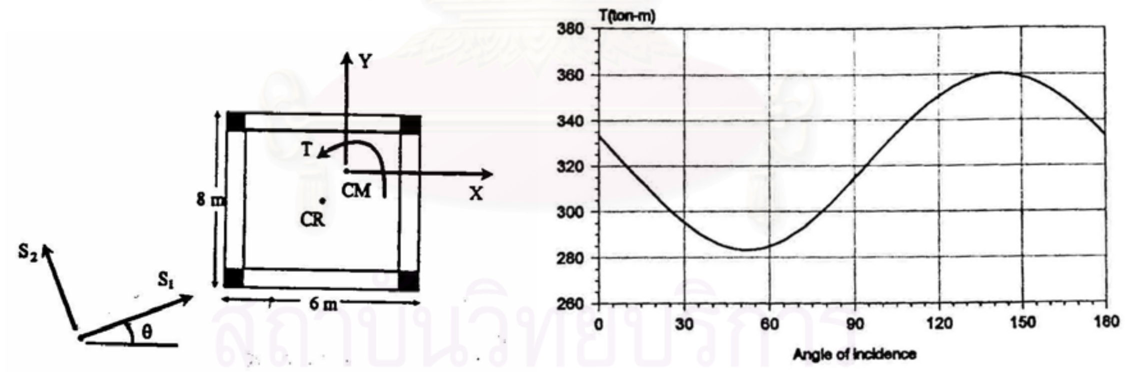
Categoly	Parametr	Number of Records
Nation	Japan USA	12 63
Magnitude	$5.3 \leqq M < 6$ $6 \leqq M < 7$ $7 \leqq M < 7.9$	8 53 14
Epicentral Distance(km)	$2 \leqq \Delta < 25$ $25 \leqq \Delta < 50$ $50 \leqq \Delta < 100$ $100 \leqq \Delta < 280$	10 47 10 8
Maximum Acceleration (gal)	$100 \leqq A < 150$ $150 \leqq A < 200$ $200 \leqq A < 1055$	43 20 12

Cheng และ Ger (1990) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของส่วนประกอบของแผ่นดินไหวและทิศทางที่กระทำกับโครงสร้าง 3 มิติ จึงได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองอาคารสูง 10 ชั้น ดังรูปที่ 1.3 โดยการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์รูปที่ 1.3 อาคาร 10 ชั้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของทิศทางแผ่นดินไหว (Cheng, 1990) พบว่าส่วนประกอบของแผ่นดินไหวและทิศทางที่กระทำนั้นมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับผลตอบสนองของระบบโครงสร้างที่มีความอ่อนไหวในด้านการบิด การให้คลื่นแผ่นดินไหวในแกนอ้างอิงจากโครงสร้างให้ค่าผลตอบสนองที่ต่ำไป เพราะว่าผลตอบสนองโครงสร้างที่มากสุดขึ้นอยู่กับทิศทางและขนาดของแผ่นดินไหวที่ใส่เข้าไป



รูปที่ 1.3 อาคาร 10 ชั้นที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลของทิศทางแผ่นดินไหว (Cheng, 1990)

Lopez และ Torres (1997) ได้ทำการศึกษามุมวิกฤติของคลื่นแผ่นดินไหวที่จะทำให้เกิดผลตอบสนองมากที่สุดภายใต้แผ่นดินไหวทั้งสองแกนในแนวราบ โดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองในวิเคราะห์และรวมผลของแต่ละโหมดการสั่นด้วย CQC โดยได้เสนอเป็นสมการในการคำนวณหามุมวิกฤติและการหาผลตอบสนองที่มากที่สุด



(ก) (ข)

รูปที่ 1.4 (ก) แบบจำลองอาคาร 1 ชั้น โดยที่ CR คือ จุดศูนย์กลางความแข็ง CM คือ จุดศูนย์กลางมวล (ข) ค่าโมเมนต์บิดที่เกิดขึ้นเมื่อแผ่นดินไหวกระทำในมุมต่าง ๆ กัน (Lopez, 1997)

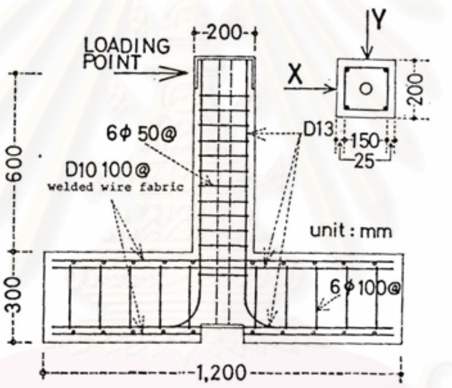
รูปที่ 1.4 แสดงการวิเคราะห์อาคาร 1 ชั้นในภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Elcentro (1940) ในทิศทางต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่ามุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างเมื่อกระทำในทิศทางต่างๆ กันไปทำให้เกิดผลตอบสนองที่แตกต่างกันไป โดยมุมวิกฤติของคลื่นในแนวราบที่ทำให้เกิดผล

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

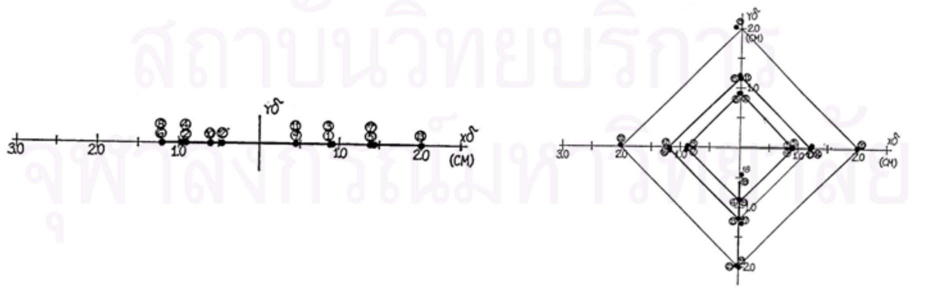
ตอบสนองมากที่สุดนั้น ขึ้นอยู่กับคลื่นแผ่นดินไหวในทั้งสองแกนของแนวราบและพารามิเตอร์ของโครงสร้างเช่นจุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางความแข็ง

1.2.2 พฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงกระทำจากแผ่นดินไหวหลายแกน

Takizawa และ Aoyama (1976) ได้ทำการศึกษาผลของแรงดัดสองแกน โดยทำเปรียบเทียบกับผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กดังรูปที่ 1.5 โดยการควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ในแกนเดียวและสองแกนดังแสดงในรูปที่ 1.6 พบว่าพฤติกรรมของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงดัดสองแกนมีการลดลงของกำลังมากกว่าเสาภายใต้แรงดัดในแกนเดียว จากรูปที่ 1.7 จะเห็นได้ว่าที่ระยะการเคลื่อนที่ในแกน x เดียวกัน เสาภายใต้การเคลื่อนที่สองทิศทางมีการลดลงของกำลังมากกว่าเสาภายใต้การเคลื่อนที่ในแกนเดียว



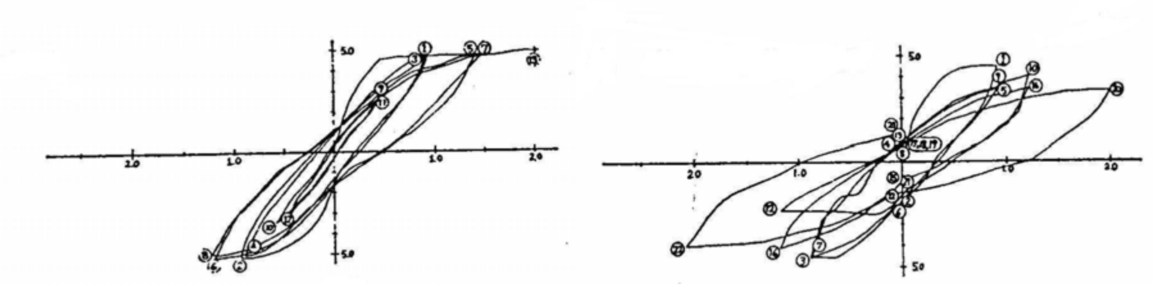
รูปที่ 1.5 การทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรับแรงดัดสองแกน (Takizawa, 1976)



(ก) (ข)

รูปที่ 1.6 รูปแบบการทดสอบเสาโดยการควบคุมการเคลื่อนที่ (ก) ควบคุมการเคลื่อนที่ในแกนเดียว (ข) ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แกน (Takizawa, 1976)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

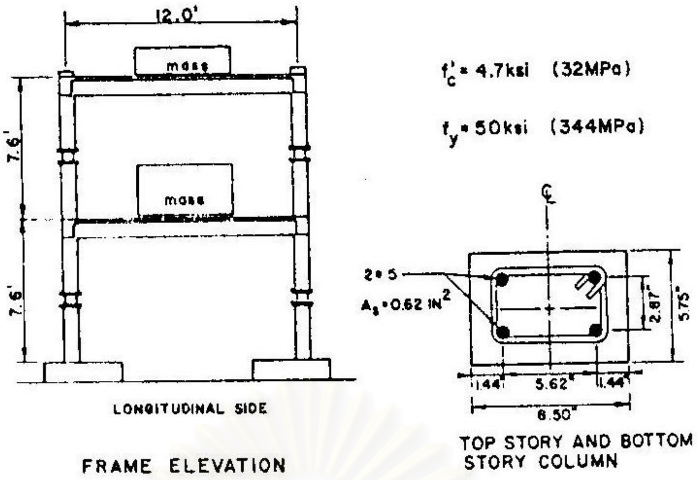


(ก) แกนเดียว (ข) สองแกน

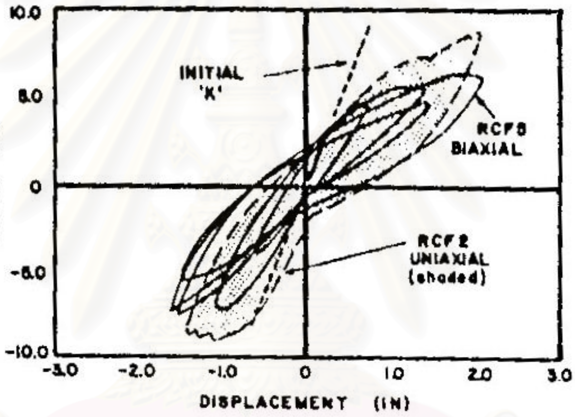
รูปที่ 1.7 เปรียบเทียบวัฏจักรของแรงและการเคลื่อนที่ในแกน X (ก) ควบคุมการเคลื่อนที่ในแกนเดียว (ข) ควบคุมการเคลื่อนที่ทั้ง 2 แกน (Takizawa, 1976)

Olivia และ Clough (1987) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองในทั้งสองแกนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการทดลองด้วยเครื่องจำลองแผ่นดินไหว (shaking table) และทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองในแกนเดียวเพื่อทำการเปรียบเทียบผลกับการวิเคราะห์ในสองแกน โดยการทดลองด้วยเครื่องจำลองแผ่นดินไหว จะทำการติดตั้งโครงสร้างเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 ระนาบ อัตราส่วน 7/10 ของขนาดจริง ดังรูปที่ 1.8 โดยวางทำมุม 25° กับแกนราบของเครื่องจำลองแผ่นดินไหว และใช้คลื่นแผ่นดินไหว 1952 Taft N69W ในการทดลองโดยแปรผันค่าขนาดของคลื่นให้แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าได้ทำการสรุปโดยเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้แรงในทั้งสองแกนกับผลตอบสนองที่ได้จากแรงกระทำในแกนเดียว พบว่าการเคลื่อนที่ในช่วงไม่ยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเสาต้นมุมที่เกิดการคราก สามารถเกิดการครากได้โดยขึ้นกับความสัมพันธ์ของแรงดัดที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งสองแกนและแรงในแนวแกนที่มีการเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการพลิกคว่ำ (overturning) ซึ่งเมื่อเกิดการครากขึ้นในเสาแล้วการลดลงของสติฟเนสจะเกิดขึ้นตามมาและทำให้ความต้องการในการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนเพิ่มมากขึ้น จากรูปที่ 1.9 จะเห็นว่าช่วงเริ่มต้นเสาทั้งสองแบบยังมีสติฟเนสเท่ากัน ต่อมาเสารับแรงดัดสองแกนจะเกิดการครากที่ระดับต่ำกว่าเสารับแรงดัดแกนเดียว และเมื่อสังเกตจากส่วนที่แรงเงา เสารับแรงดัดสองแกนมีการสลายพลังงานต่ำกว่าหรือมีพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงและการเคลื่อนที่น้อยกว่า

และพบอีกว่าผลตอบสนองจริงที่เกิดขึ้นในระบบโครงสร้าง 3 มิติไม่สามารถทำนายได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ในแกนเดียว เนื่องจากการวิเคราะห์ในแกนเดียวไม่ได้คิดผลของแรงดัดสองแกนและแรงแนวแกน โดยเสาที่รับแรงทั้งสองแกนเกิดการครากที่โมเมนต์ต่ำกว่าเสาที่รับแรงแกนเดียว ซึ่งเกิดจากผลของแรงดัดทั้งสองแกน แรงแนวแกน การพลิกคว่ำทั้งสองทาง (biaxial overturning) และแรงบิดที่เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อเสาครากจะทำให้การเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นและทำให้ค่าสติฟเนส ลดลง ดังนั้นการวิเคราะห์แบบแกนเดียวจึงให้ค่าผลตอบสนองโดยประมาณในด้านที่ต่ำกว่า

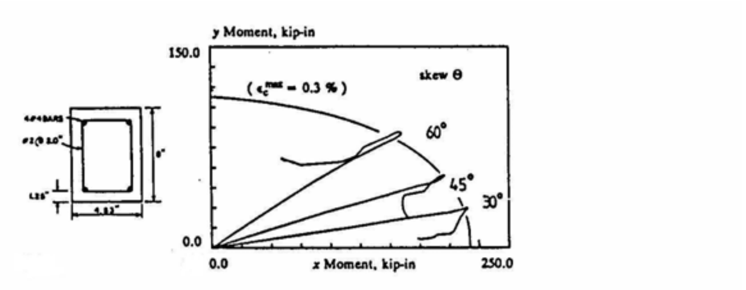


รูปที่ 1.8 โครงสร้างเฟรมคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดลองของ (Clough, 1987)

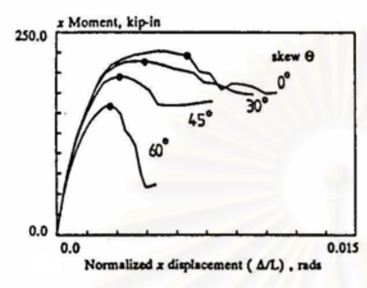


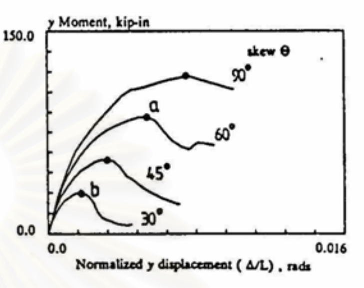
รูปที่ 1.9 แรงเฉือนกับการเคลื่อนที่ภายใต้แรงดัดแกนเดียวกับแรงดัดสองแกน
ของเสาชั้น 1 (Clough, 1987)

Zeris และ Mahin (1991) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายใต้แรงกระทำสองแกนโดยได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟเบอร์ขึ้นเพื่อทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้าง โดยทำการวิเคราะห์เสารูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าภายใต้แรงสถิตและแรงพลศาสตร์โดยทำการควบคุมการเคลื่อนที่ไปในมุม 0° 30° 45° 60° 90° กับแกน X โดยกำหนดให้มีการเคลื่อนที่เท่ากันแสดงให้เห็นว่าแรงดัดสองแกนในเสามีผลในการลดลงของกำลัง (Reduction of strength) และการลดลงของสติฟเนสของการดัด เมื่อเทียบกับแรงดัดแกนเดียวดังแสดงในรูปที่ 1.10



(ก)

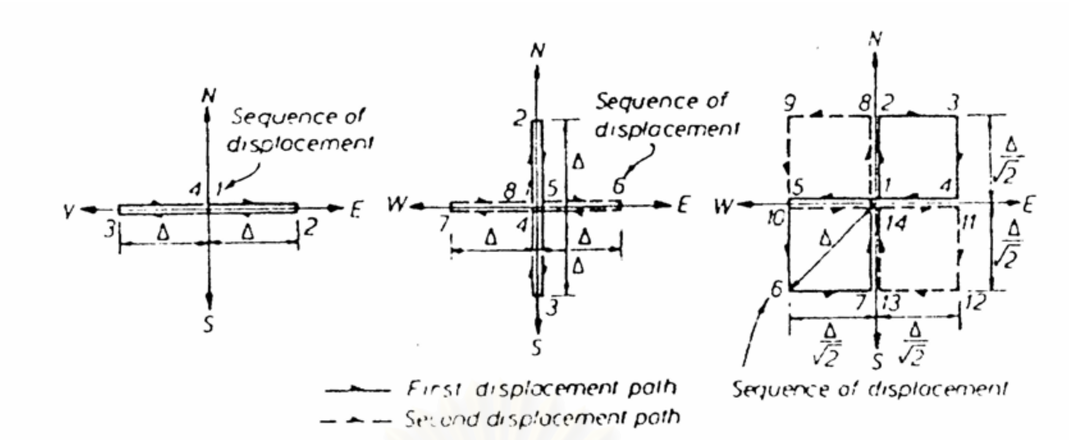




(ข) (ค)

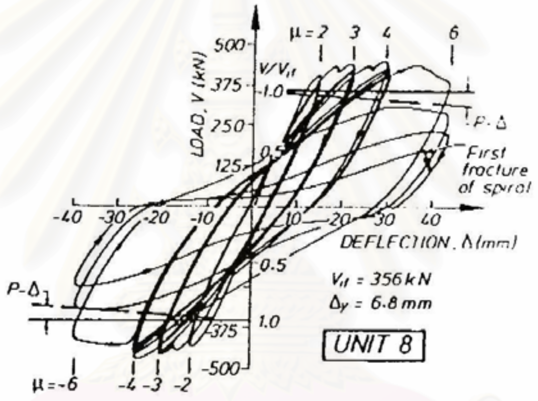
รูปที่ 1.10 (ก) โมเมนต์ดัดในสองทิศทางในมุมต่างๆ (ข) โมเมนต์ดัดในแกน X (ค) โมเมนต์ดัดในแกน Y (Zeris, 1991)

Paulay และ Priestley (1993) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กรูปวงกลมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหวในหลายทิศทาง โดยได้ทำการทดลองเสากลม 16 ต้นซึ่งได้ทำการจำแนกรูปแบบของการเคลื่อนที่เป็น 4 แบบดังแสดงในรูปที่ 1.11 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนที่แบบแกนเดียวกับสองแกนพบว่ารูปแบบการเคลื่อนที่แบบสองแกนทำให้เกิดการลดลงของกำลังและสติฟเนส มากกว่าแบบแกนเดียว และพบว่าค่าความเหนียวจากการเคลื่อนที่มีค่าต่ำกว่าที่ได้จากการให้การเคลื่อนที่แกนเดียว ความแตกต่างในผลตอบสนองของเสาที่มีคุณสมบัติเดียวกันแต่รูปแบบการเคลื่อนที่แตกต่างกันคือในรูปแบบ b กับ s พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากดังรูปที่ 1.12 จะเห็นว่าเสาที่รับแรงกระทำทั้งสองรูปแบบให้ผลตอบสนองค่อนข้างคงที่เมื่อค่าความเหนียวเท่ากับ 3 แต่จะเริ่มลดลงเมื่อค่าความเหนียวเท่ากับ 4 และมีการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อค่าความเหนียวเท่ากับ 5 ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างผลตอบสนองของเสาที่รับแรงกระทำทั้งสองรูปแบบ

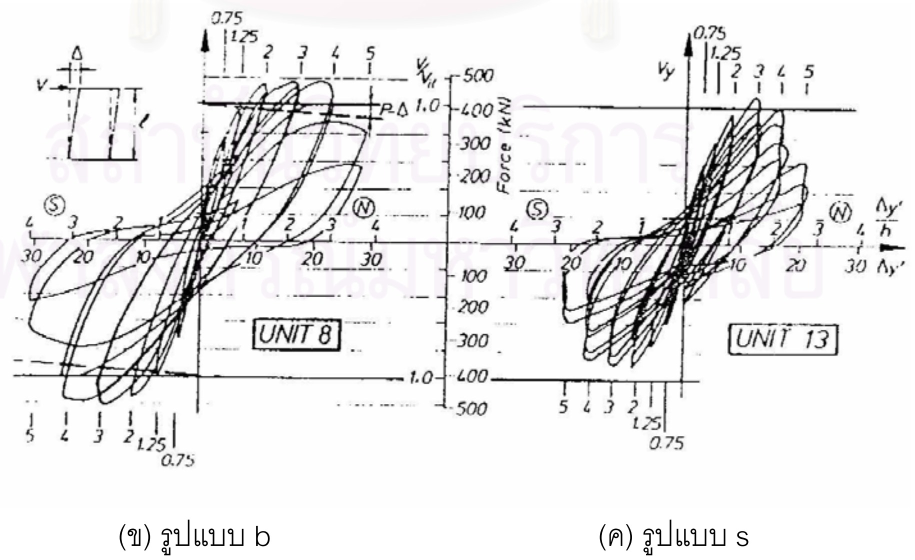


(ก) แกนเดียวรูปแบบ u (ข) สองแกนรูปแบบ b (ค) สองแกนรูปแบบ s

รูปที่ 1.11 รูปแบบการเคลื่อนที่ในการทดลองเสากลม (Priestley, 1993)



(ก) รูปแบบ u



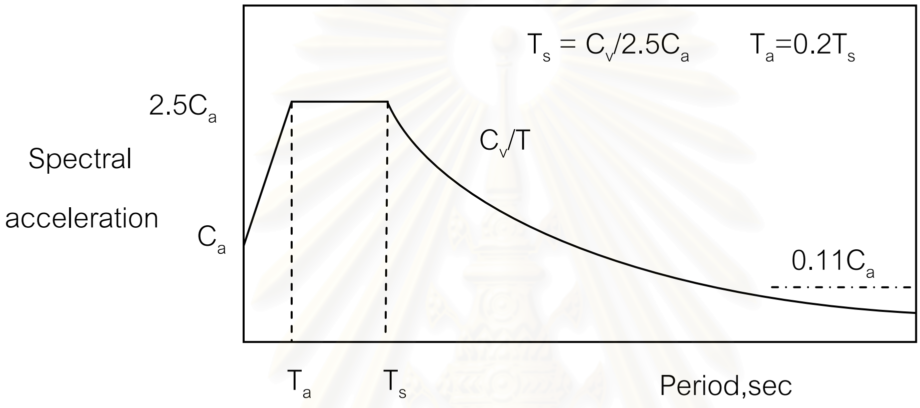
(ข) รูปแบบ b (ค) รูปแบบ s

รูปที่ 1.12 แสดงวัฏจักรของเสาคุณสมบัติเดียวกันรับแรงดัดสองแกนในรูปแบบต่างกัน (Priestley, 1993)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2.3 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับออกแบบต้านภัยแผ่นดินไหว

Uniform Building Code (1997) ได้กำหนดสเปกตรัมความเร่งสำหรับใช้ในการออกแบบด้วยวิธีแรงสถิตเทียบเท่า ซึ่งได้มาจากการวิเคราะห์เชิงความน่าจะเป็นของความเสี่ยงภัยแผ่นดินไหวโดยความน่าจะเป็นที่จะเกินเท่ากับ 10 % ใน 50 ปี โดยได้แบ่งตามลักษณะของดินและเขตพื้นที่ของอาคารที่ตั้งอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 1.13 โดยที่ ค่า C_a และ C_v ขึ้นอยู่กับชนิดของดินและเขตพื้นที่ของอาคารที่ตั้งอยู่



รูปที่ 1.13 สเปกตรัมความเร่งใน Uniform Building Code (1997)

Bommer และ Elnashai (1998) ได้ทำการศึกษาสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่นดินไหวในแถบยุโรป ใช้คลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 180 คลื่น โดยได้เสนอเป็นสมการสำหรับหาสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ $S_d(T,\xi)$ ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นดินไหวระยะห่างจากจุดกำเนิดสภาพและชนิดของชั้นดิน ดังสมการที่ 1.1

$$\log\left[SD(T,\xi)\right]=C_1+C_2M_s+C_4\log(r)+C_AS_A+C_SS_S+\sigma P \qquad (1.1)$$

โดยที่

$$r=\sqrt{(d^2+h_0^2} \qquad (1.2)$$

d คือ ระยะทางจากแหล่งกำเนิด

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

P คือ ตัวแปร มีค่าเท่ากับ 0 สำหรับค่าเฉลี่ยของ SD

เท่ากับ 1 สำหรับ 84 เปอร์เซนไทร์

S_A คือ ตัวแปรมีค่าเป็น 1 สำหรับดินแข็ง

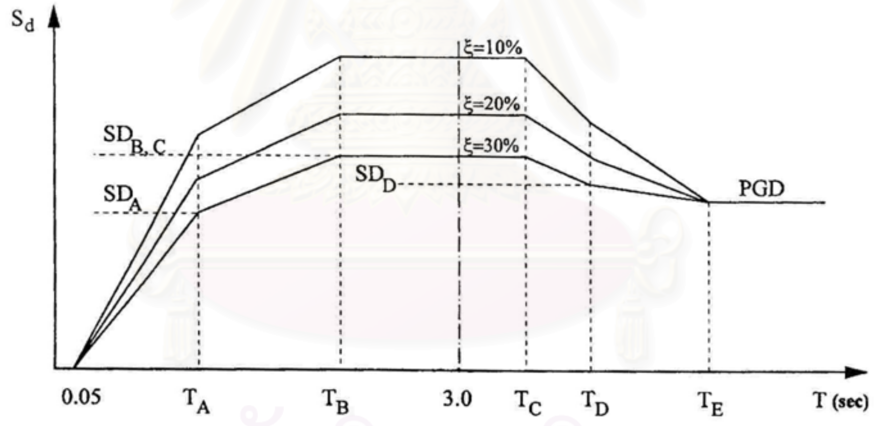
เป็น 0 สำหรับหินและดินอ่อน

S_S คือ ตัวแปรมีค่าเป็น 1 สำหรับดินอ่อน

เป็น 0 สำหรับหินและดินแข็ง

C_1, C_2, C_4, C_A, C_S และ h_o หาได้จากการทำวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis)

จากนั้นได้เสนอสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่สำหรับออกแบบในรูปเชิงเส้นโดยดังรูปที่ 1.14 ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ได้กำหนดดังแสดงในตารางที่ 1.3-1.6 โดยที่ค่า T_A, T_B แสดงในตารางที่ 1.3 ค่า SD_A, SD_B แสดงในตารางที่ 1.4 จากรูปที่ 1.14 จะเห็นว่ารูปร่างของสเปกตรัมขึ้นกับขนาดของแผ่นดินไหวและลักษณะของดิน ส่วนระยะทางนั้นมีผลน้อยมากและพบว่าการลดลงของสเปกตรัมตามระยะทางค่อนข้างคงที่ในทุก ๆ คาบและและทุกลักษณะดินและขนาดแผ่นดินไหว โดยสัมประสิทธิ์ของระยะทางแสดงดังตารางที่ 1.5 โดยการนำไปคูณกับพิกัดสเปกตรัมที่ได้จากตารางที่ 1.3 และ 1.4 ในส่วนของอัตราส่วนความหน่วงก็เช่นเดียวกันโดยค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วงแสดงดังตารางที่ 1.6



รูปที่ 1.14 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในรูปเชิงเส้น (Bommer, 1998)

ตารางที่ 1.3 คาบสำหรับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ที่ขนาดแผ่นดินไหวและดินประเภทต่าง ๆ

	T_A			T_B		
M_s	Rock	Stiff	Soft	Rock	Stiff	Soft
5.5	0.75	0.75	0.75	2.00	2.30	2.70
6.0	0.85	0.85	0.85	2.15	2.30	2.80
6.5	1.00	1.00	1.00	2.30	2.50	2.90
7.0	1.40	1.40	1.40	2.50	2.70	3.00*
7.5	1.90	1.90	1.90	3.00	3.00*	3.00*

*Actual control period probably slightly greater than 3.0 seconds.

ตารางที่ 1.4 การเคลื่อนที่ที่ขนาดแผ่นดินไหวและดินประเภทต่าง ๆ(Bommer, 1998)

	SD_A			SD_B		
M_s	Rock	Stiff	Soft	Rock	Stiff	Soft
5.5	2.2	3.1	4.0	3.1	4.6	5.8
6.0	3.7	5.0	6.5	5.8	8.4	11.0
6.5	6.7	8.7	11.2	10.8	15.9	20.8
7.0	14.8	20.1	25.0	20.3	28.7	38.6
7.5	34.1	46.7	55.0	37.0	55.8	70.0

ตารางที่ 1.5 สัมประสิทธิ์ของระยะทาง(Bommer, 1998)

d (km)	0	5	10	15	20	30	40	50
F_d	1.00	0.621	0.352	0.245	0.187	0.127	0.095	0.075

ตารางที่ 1.6 สัมประสิทธิ์ความหน่วง(Bommer, 1998)

ξ (%)	5	10	15	20	25	30
F_ξ	1.90	1.55	1.35	1.20	1.10	1.00

Housner(1952) ได้ทำการกำหนดคำนิยามของความรุนแรงของแผ่นดินไหวเพื่อใช้ในการเป็นเกณฑ์วัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดความเสียหายในระบบโครงสร้างอีลาสติกนั่นในแต่ละเหตุการณ์หรือในแต่ละคลื่นแผ่นดินไหวโดยใช้ค่าพื้นที่ใต้กราฟสเปกตรัมความเร็ว ดังสมการที่ 1.3

$$SI(\xi,T) = \int_{T_1}^{T_2} S_v(\xi,T)dT \qquad (1.3)$$

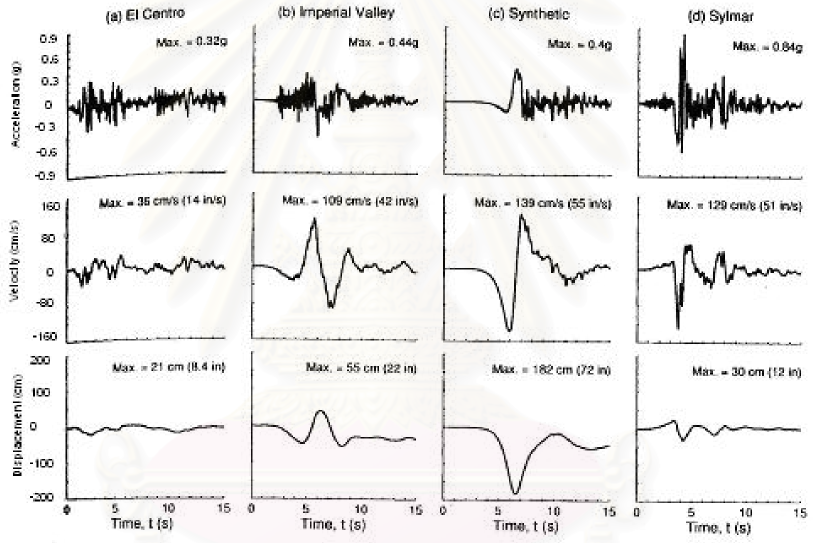
โดยที่ S_v คือสเปกตรัมของความเร็วและกำหนดให้ใช้ค่า T_1=0.1 T_2=2.5 เนื่องจากเป็นช่วงคาบธรรมชาติของโครงสร้างทั่วไป โดยการวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวด้วยวิธีนี้จะมีประโยชน์ในการเปรียบเทียบความรุนแรงของแผ่นดินไหวต่างเหตุการณ์กัน

1.2.4 ลักษณะของสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแผ่นดินไหวระยะใกล้และระยะไกล

เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวมีลักษณะแตกต่างกันตามชนิดของดิน ขนาดของแผ่นดินไหวระยะทางจากแหล่งกำเนิดและตัวกลางที่คลื่นแผ่นดินไหวเคลื่อนที่ผ่าน สเปกตรัมผลตอบสนองก็แตกต่างกันไปตามปัจจัยดังกล่าวจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยเน้นไปที่ลักษณะและผลตอบสนองของโครงสร้างของคลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้และระยะไกล ดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Malhotra (1999) ได้ทำการศึกษาผลตอบสนองของโครงสร้างภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้ที่ลักษณะของคลื่นมีการกระตุก (pulse-like) ในความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่กับเวลา โดยคลื่นที่ใช้คือคลื่นแผ่นดินไหว Imperial valley,1979 Sylmar,1994 และคลื่นที่ทำการสังเคราะห์ขึ้นเอง (Synthetic) โดยทำการเปรียบเทียบกับคลื่นระยะใกล้แต่ไม่มีลักษณะของการกระตุกคือ El centro, 1940 ดังแสดงในรูปที่ 1.15 พบว่าคลื่นที่มีลักษณะกระตุกนั้น มีความกว้างในช่วงที่อ่อนไหวต่อความเร่งมากกว่า (Acceleration-sensitive region) โดยที่ช่วงที่อ่อนไหวต่อความเร่งหมายถึงช่วงที่ผลตอบสนองของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับความเร่งผิวดินเป็นส่วนใหญ่ กล่าวคือเมื่อความเร่งผิวดินเพิ่มผลตอบสนองของโครงสร้างจะเพิ่มตาม ในรูปที่ 1.16 แสดงความกว้างของช่วงที่อ่อนไหวต่อความเร่ง โดยสังเกตได้จากค่าอัตราส่วนระหว่าง PGV/PGA ดังตารางที่ 1.7 โดยที่ PGA และ PGV คือความเร่งและความเร็วที่ผิวดิน



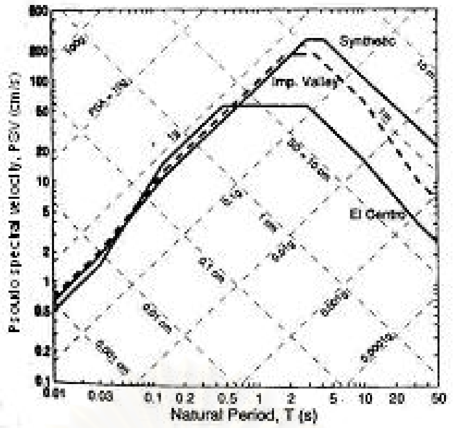
(ก) (ข) (ค) (ง)

รูปที่ 1.15 (ก) คลื่นแผ่นดินไหวที่ไม่มีลักษณะการกระตุก (pulse-like)
(ข),(ค),(ง) คลื่นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะการกระตุก (pulse-like) (Malhotra, 1999)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

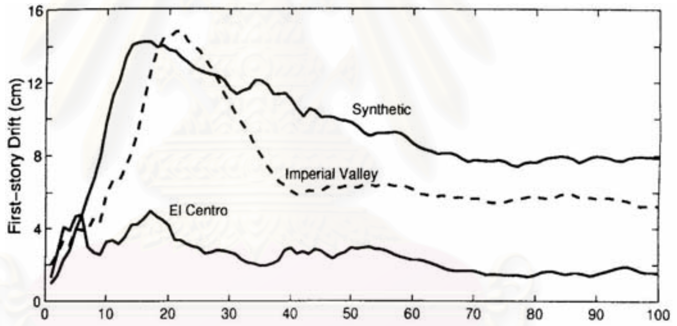
ตารางที่ 1.7 อัตราส่วนระหว่าง PGV/PGA และ PGD/PGV (Malhotra, 1999)

Ground motions	PGV/PGA	PGD/PGV
1940 El Centro	0·12 s	0·58 s
1979 Imperial Valley	0·25 s	0·50 s
Synthetic[9]	0·35 s	1·31 s
1994 Sylmar	0·16 s	0·23 s

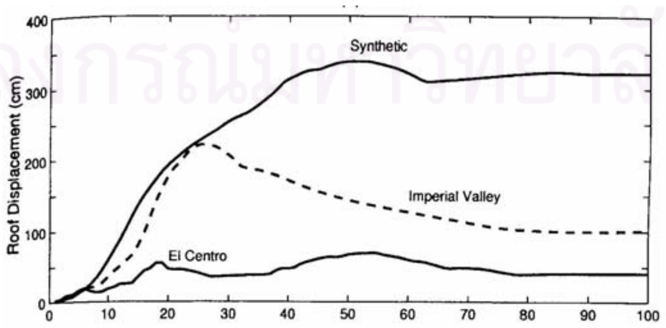


รูปที่ 1.16 สเปกตรัมผลตอบสนองของคลื่นแผ่นดินไหวในกราฟ tripartite (Malhotra, 1999)

ซึ่งผลกระทบของคลื่นที่มีความกว้างในช่วงที่อ่อนไหวต่อความเร่งนั้น ทำให้เกิดค่าแรงเฉือนที่ฐาน การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างชั้น และการเคลื่อนที่ที่ชั้นหลังคาของโครงสร้างมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่น El centro 1940 ดังแสดงในรูปที่ 1.17-1.18



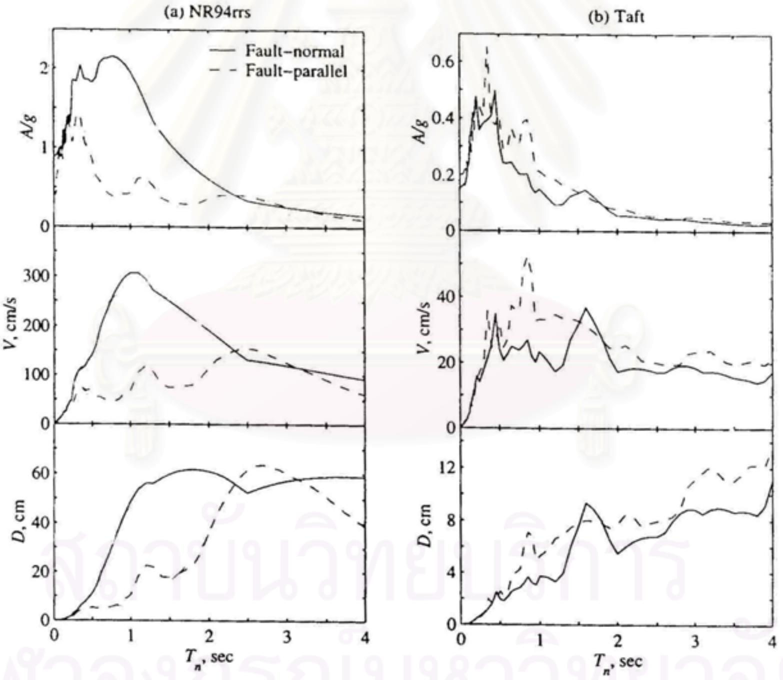
รูปที่ 1.17 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ระหว่างชั้นกับจำนวนชั้นของโครงสร้างโดยที่ $T = 0.15N$ (Malhotra, 1999)



รูปที่ 1.18 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในชั้นหลังคากับจำนวนชั้นของโครงสร้างโดยที่ $T = 0.15N$ (Malhotra, 1999)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chopra และ Chintanapakdee (2001) ได้ทำการศึกษาความแตกต่างคลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้และระยะไกล โดยศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมแบบอีลาสติกและอินอีลาสติกของโครงสร้างระดับขั้นความเสรีเดี่ยว(single-degree-of-freedom) จากรูปที่ 1.19 พบว่า ในแกนที่ตั้งฉากกับรอยเลื่อน (Fault-normal component,FP) ของคลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้(Near-fault) ส่วนใหญ่มีค่าความเร่งความเร็วและการเคลื่อนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแกนที่ขนานกับรอยเลื่อน(Fault-parallel component,FN) ในคลื่นแผ่นดินไหวระยะไกล(Far-fault) แกนที่ตั้งฉากและแกนที่ขนานกับรอยเลื่อน มีค่าความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน จากรูปที่ 1.20 แสดงค่า PSA, PSV, PSD ที่หารด้วยค่าความเร่ง ความเร็ว การเคลื่อนที่ผิวดิน ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อนอร์มัลไลซ์แล้วค่าสูงสุดของ FN ต่ำกว่า FP ซึ่งเพื่อให้ทราบถึงเหตุผลที่ค่า $\frac{A}{\ddot{u}_{go}}$ ต่ำกว่าจึงได้ทำการตรวจสอบโดยสร้างคลื่นจำลองขึ้นมาโดยกำหนดให้มีจำนวนรอบของคลื่นแผ่นดินไหวตั้งแต่ 1-4 รอบและมีคาบเท่ากับ 1 วินาที จากรูปที่ 1.21 จะเห็นได้ว่าค่า $\frac{A}{\ddot{u}_{go}}$ จะมากขึ้นเมื่อจำนวนรอบของคลื่นมีมากขึ้น



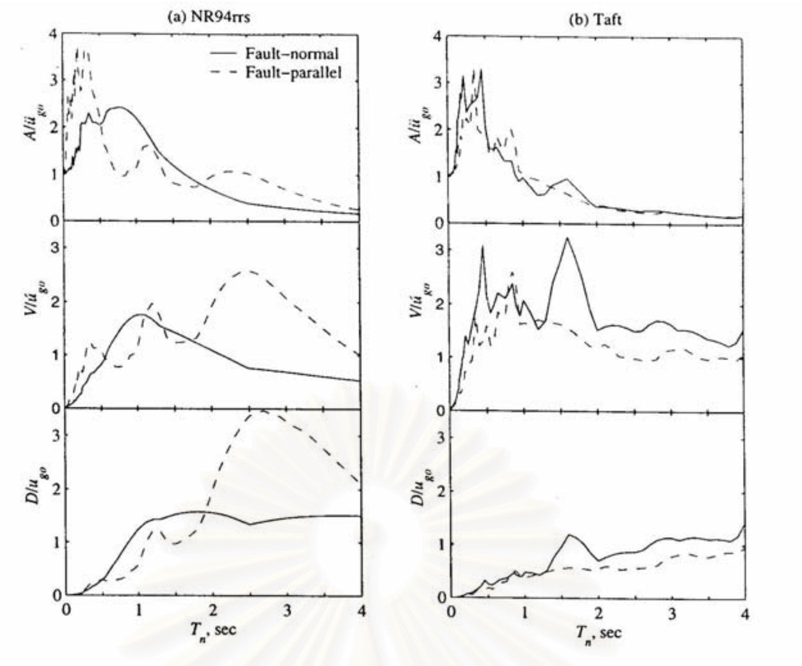
(ก) (ข)

รูปที่ 1.19 สเปกตรัมผลตอบสนองของแกนที่ตั้งฉากและแกนที่ขนานกับรอยเลื่อน

(ก) Northridge 1994 คลื่นระยะใกล้ (7.5 กม.จากแหล่งกำเนิด)

(ข) Taft 1952 คลื่นระยะไกล (43 กม.จากแหล่งกำเนิด) (Chopra, 2001)

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

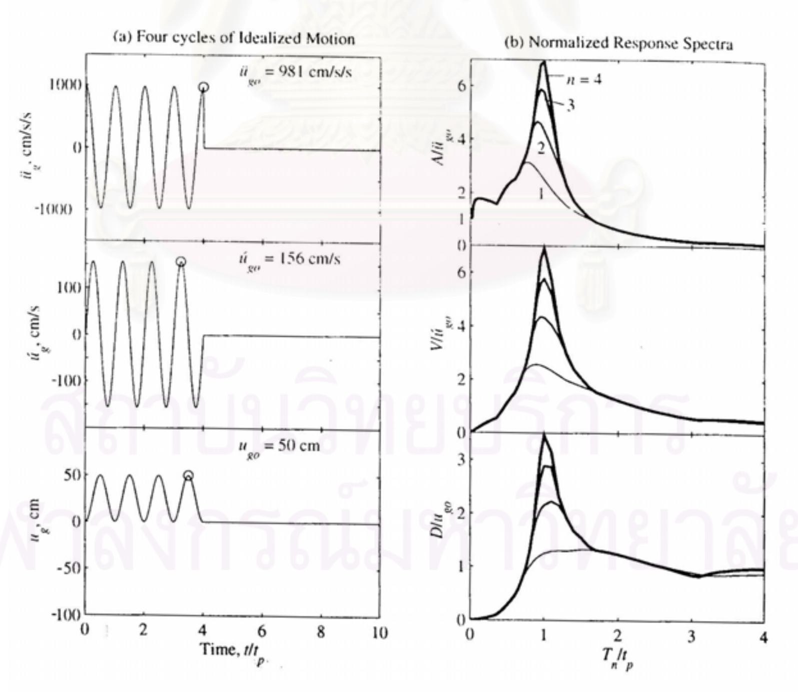


(ก) (ข)

รูปที่ 1.20 สเปกตรัมผลตอบสนองที่ทำการหารด้วยค่าสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหว

(ก) Northridge 1994 (ข) Taft 1952 (Chopra, 2001)

(ข)



(ก) (ข)

รูปที่ 1.21 (ก) คลื่นแผ่นดินไหวที่สร้างขึ้นจำนวน 4 รอบ (ข) สเปกตรัมผลตอบสนองที่ทำการหารด้วยค่าสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวที่สร้างขึ้นจำนวนรอบ n= 1,2,3 และ 4 (Chopra, 2001)

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1.3.1 พัฒนาสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง ในแนวราบที่ตั้งฉากกัน

1.3.2 นำเสนอสมการของสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่เพื่อการออกแบบโครงสร้างที่พิจารณาแผ่นดินไหว 2 ทิศทางในแนวราบที่ตั้งฉากกัน

1.3.3 นำเสนอสมการทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่พิจารณาแผ่นดินไหว 2 ทิศทางในแนวราบที่ตั้งฉากกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการอยู่ภายใต้ขอบเขตดังต่อไปนี้

1.4.1 ในการหาสเปกตรัมผลตอบสนองทำการศึกษาจากคลื่นแผ่นดินไหว 2 ทิศทางในแนวราบที่ตั้งฉากกันเท่านั้น

1.4.2 ทำการศึกษาสเปกตรัมผลตอบสนองในช่วงอีลาสติก

1.4.3 จำลองโครงสร้างเป็นระบบที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสองคือมวลเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน

1.4.4 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นคลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีวิธีการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.5.1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.5.2 ศึกษาโปรแกรม Matlab และเขียนโปรแกรม

1.5.3 ทำการวิเคราะห์หาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของคลื่นแผ่นดินไหวใน 2 ทิศทาง

1.5.4 เสนอสมการในการออกแบบที่พิจารณาแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

1.5.5 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อกำหนด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.5.6 สรุปการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ

1.5.7 เขียนวิทยานิพนธ์

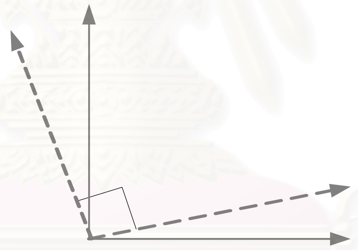
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

นิยามของสเปกตรัมผลตอบสนอง ที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

2.1 การพิจารณาผลของทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง

ในการออกแบบโครงสร้างทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำโดยทั่วไปจะถูกใส่เข้าไปที่แกนอ้างอิงของโครงสร้าง แต่ในความเป็นจริงการเกิดแผ่นดินไหวนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทุก ๆ ทิศทาง ดังนั้นการผันแปรทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวไปในทิศทางต่าง ๆ ที่สามารถมีโอกาสเกิดขึ้นได้ ก็จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของผลตอบสนองของโครงสร้าง รูปที่ 2.1 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวในแนวราบทั้ง 2 แกนและแกนของโครงสร้าง กำหนดให้คลื่นแผ่นดินไหวในแกน 1 มีความรุนแรงกว่าในแกน 2 โดยคลื่นแผ่นดินไหวในแกน 1 และ 2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 2.1 คลื่นแผ่นดินไหวในแนวราบทั้ง 2 แกนและแกนของโครงสร้าง

จากรูปที่ 2.1 สามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \ddot{u}_g^x(\theta,t) \\ \ddot{u}_g^y(\theta,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_g^1(t) \\ \ddot{u}_g^2(t) \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

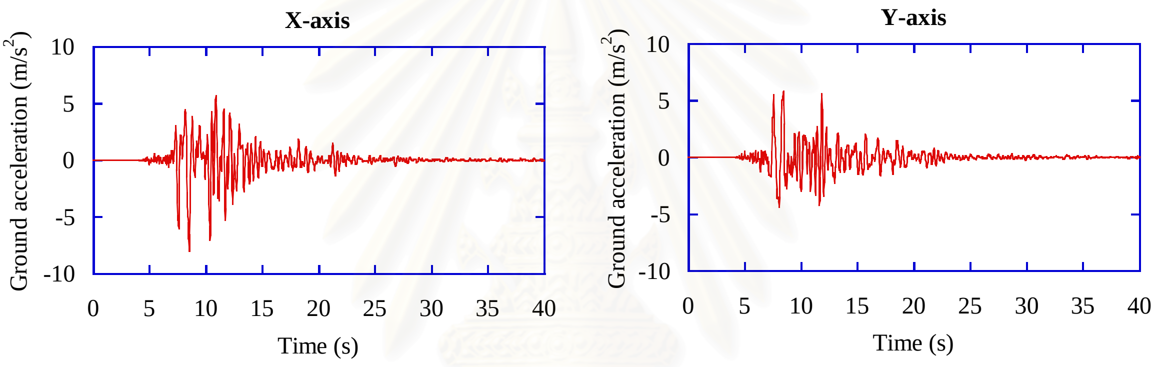
โดยที่ 1 และ 2 คือ แกนที่คลื่นแผ่นดินไหวกระทำ

x และ y คือ แกนของโครงสร้าง

θ คือ มุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง

2.1.1 ตัวอย่างการแปลงคลื่นแผ่นดินไหว

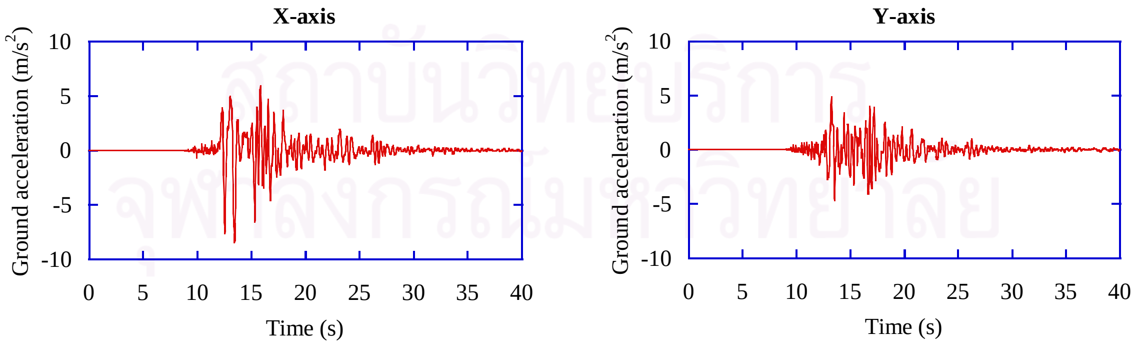
รูปที่ 2.2 แสดงคลื่นแผ่นดินไหวเมื่อมุม 0 องศา ความเร่งที่ผิวดินสูงสุดในแกน x เท่ากับ 8.17 m/s^2 ในแกน y เท่ากับ 6.17 m/s^2 เมื่อทำการทดลองหมุนคลื่นแผ่นดินไหวเข้าไปที่มุมต่าง ๆ เริ่มตั้งแต่ 0-360° โดยเพิ่มขึ้นทีละ 5 องศาจะพบว่าค่าความเร่งที่ผิวดินมากที่สุด เกิดขึ้นเมื่อทำการหมุนคลื่นไปที่มุม 35 องศากับแกน รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบของคลื่นเมื่อทำการหมุนไปเป็นมุม 35 องศา จะเห็นว่าค่าความเร่งที่ผิวดินสูงสุดเท่าในแกน x กับ 8.47 m/s^2 ในแกน y เท่ากับ 4.83 m/s^2 ในรูปที่ 2.4 แสดงค่าสัมบูรณ์ของความเร่งที่ผิวดินสูงสุดเมื่อหมุนคลื่นแผ่นดินไหวไปเป็นมุมตั้งแต่ 0-360 องศา โดยมุมวิกฤติ (θ_{cr}) ที่เกิดจะทำให้เกิดค่าความเร่งสูงสุดในแกน x และเมื่อเพิ่มค่ามุมไปเป็น $\theta_{cr}+90°$ จะทำให้เกิดค่าความเร่งสูงสุดในแกน y



(ก) แกน x (ข) แกน y

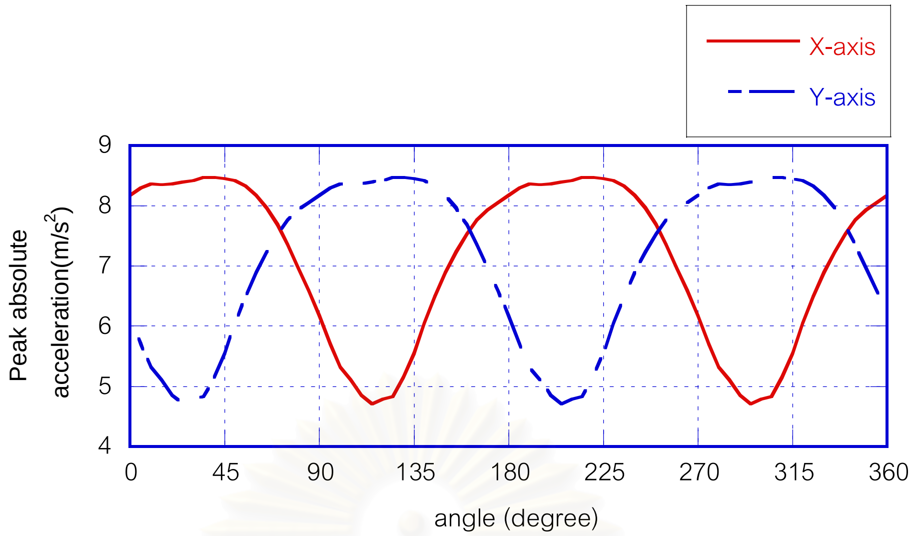
รูปที่ 2.2 คลื่นแผ่นดินไหวโกเบที่มุม 0° (ก) คลื่นแผ่นดินไหวในแกน x (ข) แกน y

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) แกน x (ข) แกน y

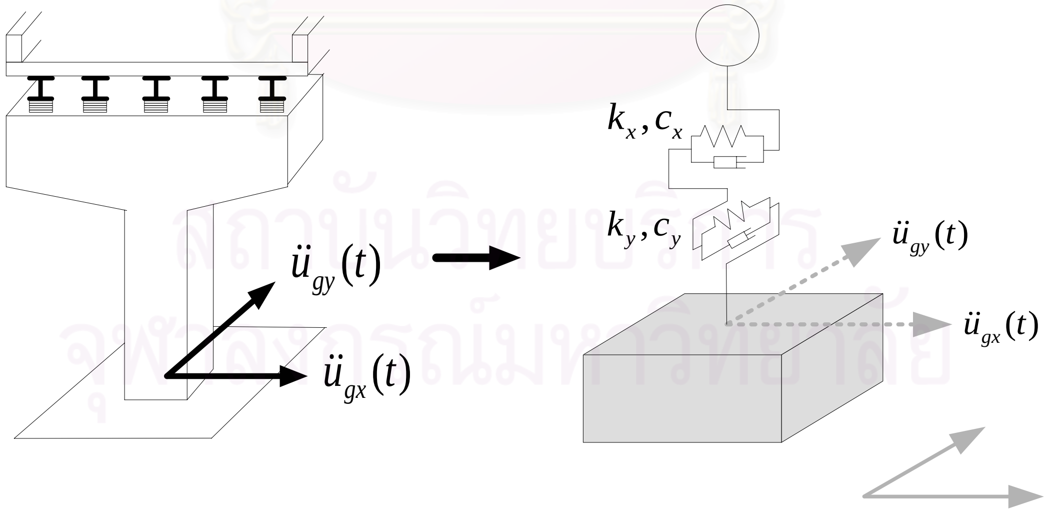
รูปที่ 2.3 คลื่นแผ่นดินไหวโกเบที่มุม 35° (ก) คลื่นแผ่นดินไหวในแกน x (ข) แกน y



รูปที่ 2.4 ค่าสัมบูรณ์ของความเร่งสูงสุดเมื่อหมุนคลื่นแผ่นดินไหวไปเป็นมุมตั้งแต่ 0-360 องศา

2.2 แบบจำลองในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์โครงสร้างสะพานที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว 2 ทิศทางสามารถสร้างเป็นแบบจำลองที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 คือมวลเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกันดังแสดงในรูปที่ 2.5 จะประกอบด้วยมวลของโครงสร้าง m สติสเนส k_x และ k_y และความหน่วงของโครงสร้างในแกน x และ y มีค่าสัมประสิทธิ์ของความหน่วงเท่ากับ c_x และ c_y



(ก) โครงสร้างสะพาน (ข)แบบจำลองในการวิเคราะห์

รูปที่ 2.5 แบบจำลองการวิเคราะห์โครงสร้างสะพาน

ภายใต้แผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

สำหรับโครงสร้างที่มีพฤติกรรมอีลาสติกจากรูปที่ 2.5 สามารถเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{u}_x(t) \\ \ddot{u}_y(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} c_x & 0 \\ 0 & c_y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{u}_x(t) \\ \dot{u}_y(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_x(t) \\ u_y(t) \end{bmatrix}=-\begin{bmatrix} m\ddot{u}_{gx}(t) \\ m\ddot{u}_{gy}(t) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

โดยที่ m คือ มวลของโครงสร้าง

c_x, c_y คือ สัมประสิทธิ์ความหน่วงของโครงสร้างในแกน x และ y

k_x, k_y คือ สติฟเนสของโครงสร้างในแกน x และ y

$u_x(t), u_y(t)$ คือ การเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของมวลเทียบกับฐานในแกน x และ y

$\dot{u}_x(t), \dot{u}_y(t)$ คือ อนุพันธ์ของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาในแกน x และ y

$\ddot{u}_x(t), \ddot{u}_y(t)$ คือ อนุพันธ์ของ $\dot{u}_i(t)$ เทียบกับเวลาในแกน x และ y

$\ddot{u}_{gx}(t), \ddot{u}_{gy}(t)$ คือ ความเร่งที่ฐานของโครงสร้างเนื่องจากแผ่นดินไหวในแกน x และ y

จากสมการที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าแกน x และแกน y ไม่มีความสัมพันธ์กันดังนั้นในการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสองด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Fourth-order Runge-Kutta method) จึงสามารถแยกคิดในแต่ละแกนอิสระต่อกันได้ โดยมีวิธีการดังนี้

$$\mathbf{u_{i+1}} = \mathbf{u_i} + h[\frac{1}{6}(\mathbf{k_1} + 2\mathbf{k_2} + 2\mathbf{k_3} + \mathbf{k_4})] \quad (2.3)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \mathbf{k_1} &= \mathbf{f}(t_i, u_i) \\ \mathbf{k_2} &= \mathbf{f}(t_i + \frac{1}{2}h, \mathbf{u_i} + \frac{1}{2}h\mathbf{k_1}) \\ \mathbf{k_3} &= \mathbf{f}(t_i + \frac{1}{2}h, \mathbf{u_i} + \frac{1}{2}h\mathbf{k_2}) \\ \mathbf{k_4} &= \mathbf{f}(t_i + h, \mathbf{u_i} + h\mathbf{k_3}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของ $u_0 = 0$ และ $\dot{u}_0$ =0 และ h เท่ากับความห่างของแต่ละขั้นในการคำนวณ โดยกำหนดให้เท่ากับขั้นเวลาของคลื่นแผ่นดินไหวที่บันทึกได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Matlab 6.5 โดยใช้ฟังก์ชัน Simulink ช่วยในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 นิยามของสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

2.3.1 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี

สเปกตรัมผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีที่เสนอเป็นการนำค่าสูงสุดของการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี โดยมีความสัมพันธ์กับคาบธรรมชาติในแกน x และ y และทิศทางที่คลื่นแผ่นดินไหวกระทำ โดยที่ $u_x(T_x,\theta,t)$ และ $u_y(T_x,\theta,t)$ ซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี (u_r) หาได้ดังสมการที่ 2.5

$$u_r(T_x,T_y,\theta,t)=\sqrt{\left(u_x(T_x,\theta,t)\right)^2+\left(u_y(T_x,\theta,t)\right)^2} \qquad (2.5)$$

สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี (S_d^r) หาได้จากการนำค่าสูงสุดในแนวรัศมีเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 2.6

$$S_d^r(T_x,T_y,\theta)=\max\left|u^r(T_x,T_y,\theta,t)\right| \qquad (2.6)$$

ซึ่งสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีเมื่อพิจารณาผลของทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างโดยพิจารณาค่าสูงสุด $(\tilde{S}_d^r)$ จะได้ดังสมการที่ 2.7

$$\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)=\max\left|S_d^r(T_x,T_y,\theta)\right| \qquad (2.7)$$

2.3.2 สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่เป็นการนำสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีหรือ $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$ ที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวที่กระทำในทุกมุม มาทำการหารด้วยค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแกนเดียว ซึ่งนิยามการเคลื่อนที่ในแกนเดียวด้วยการใช้คลื่นในแกน x ที่มุมของคลื่นแผ่นดินไหวเท่ากับ 0 องศา กระทำในแกน x และ y ดังสมการที่ 2.8 เพื่อประโยชน์ในการนำไปทำการเฉลี่ยกับสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในแผ่นดินไหวอื่น ๆ

$$R(T_x, T_y) = \frac{\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)}{\tilde{S}_d^x(T_{x,y})} \tag{2.8}$$

โดยที่ $\tilde{S}_d^x(T_{x,y}) = \max\left|S_d^x(T_x, \theta = 0°), S_d^x(T_y, \theta = 0°)\right|$

2.3.3 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่

ทิศทางของการเคลื่อนที่ของโครงสร้างสามารถหาได้จากการเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y ในขณะที่เกิดการเคลื่อนที่ในแกนรัศมีสูงสุด ดังสมการที่ 2.9

$$\alpha(T_x, T_y, \theta) = \tan^{-1}\left(\frac{u_y(T_y, \theta, t : \max\left|u^r\right|)}{u_x(T_x, \theta, t : \max\left|u^r\right|)}\right) \tag{2.9}$$

โดยที่ α คือ ทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างเทียบกับแกน x

และทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดเมื่อพิจารณาผลของทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครสร้าง จะได้ดังสมการที่ 2.10

$$\tilde{\alpha}(T_x, T_y) = \alpha(T_x, T_y, \theta : \max S_d^r) \tag{2.10}$$

2.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์

2.4.1 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์ทั้งหมดจำนวน 30 คลื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งคลื่นแผ่นดินไหวที่นำมาวิเคราะห์ได้จากการคัดเลือกจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้ (Somerville, 2003, Papageorgiou, 2003 และ Bray, 2004) โดยกำหนดให้ระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงสถานีตั้งแต่ 0-20 กิโลเมตร มีขนาดของแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์ตั้งแต่ 6.0-7.6 โดยเป็นคลื่นที่ได้จากการเก็บบันทึกในดินประเภทต่าง ๆ คือ หิน(Rock) จำนวน 10 คลื่น ดินแข็ง (Stiff soil) จำนวน 10 คลื่นและดินอ่อน(Soft soil) จำนวน 10 คลื่น

การจำแนกประเภทของดินแต่ละประเภทจะอ้างอิงจากในฐานข้อมูลของคลื่นแผ่นดินไหวของเว็บไซท์ http://peer.berkeley.edu/smcat/index.html โดยหลักในการแบ่งประเภทของดินจะใช้ตาม USGS กล่าวคือแบ่งประเภทของดินด้วยค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นเฉือนที่ความลึก 30 เมตรขึ้นไป ดัง

แสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งในการวิจัยนี้กำหนดให้ดินประเภท hard rock, rock , soft rock รวมกันเรียกว่าหิน และ stiff soil เป็นดินแข็ง และ soft soil เป็นดินอ่อน

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทของดิน

ลักษณะดิน		ความเร็วคลื่นเฉือน (ฟุตต่อวินาที)	ความเร็วคลื่นเฉือน (เมตรต่อวินาที)
หิน	hard rock	> 5000	>1500
	rock	2500-5000	750-1500
	soft rock	1200-2500	360-750
ดินแข็ง	stiff soil	600-1200	180-360
ดินอ่อน	soft soil	< 600	<180

2.4.2 **ทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง** (θ)

เนื่องจากทิศทางของแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างมีความไม่แน่นอนโดยอาจเกิดได้ในทุกทิศทาง ในการวิเคราะห์จึงทำการแปรผันทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง ตั้งแต่ 0-180 องศา ครั้งละ 5 องศา ดังนั้นจำนวนคลื่นต่อหนึ่งแผ่นดินไหวจึงเท่ากับ 36 คลื่น ในทั้งสองแกนดังแสดงในหัวข้อที่ 2.1 และเนื่องจากโครงสร้างมีความสมมาตรสองแกน จึงไม่จำเป็นต้องแปรผันจนถึง 360 องศา

2.4.3 **คาบของโครงสร้างในแกน x และ y** (T_x, T_y)

ในการวิเคราะห์กำหนดให้ใช้คาบธรรมชาติในแกน x และ y ตั้งแต่ 0.05-4 วินาที โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.05 วินาที ทั้งหมดจำนวน 80 ค่าในแต่ละแกน

2.4.4 **อัตราส่วนความหน่วง** (ξ_x, ξ_y)

ในการวิเคราะห์กำหนดให้ใช้ค่าอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.05 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนความหน่วงของโครงสร้างคอนกรีตโดยทั่วไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 ตัวอย่างการวิเคราะห์

2.5.1 ตัวอย่างการหาผลตอบสนองภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

กำหนดให้โครงสร้างมีคาบ T_x = 1 และ T_y = 2.50 และมีอัตราส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.05 ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, 1995 รูปที่ 2.6 แสดงการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ในแกน x และ y และแสดงการรวมผลตอบสนองในแต่ละขั้นเวลา เพื่อให้เกิดเป็นการเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่งในแนวรัศมี รูปที่ 2.7 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่งของโครงสร้างในแกน x และ y ในมุมมองด้านบน

2.5.2 ตัวอย่างการหาสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง

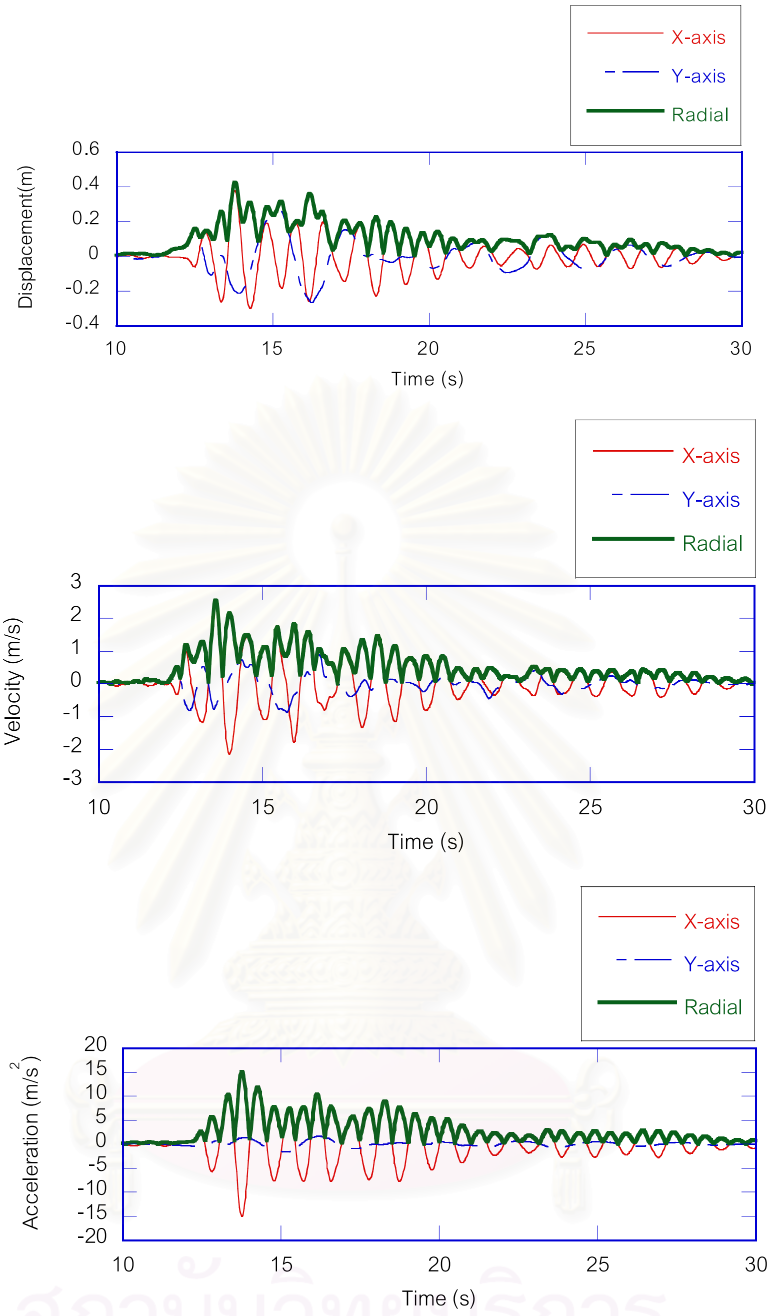
โดยปรกติในการวิเคราะห์หาสเปกตรัมผลตอบสนองในแกนเดียวได้จากการนำค่าสูงสุดของผลตอบสนองที่คาบต่าง ๆ กันมาเขียนเป็นสเปกตรัมผลตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 แต่ในสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอนั้นได้จากการนำเอาค่าสูงสุดที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีมาเขียนเป็นสเปกตรัมผลตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีอาจจะไม่ได้เกิดในขณะที่เกิดการเคลื่อนที่ในแกน x และy มากที่สุดพร้อมกัน นั้นคือค่าการเคลื่อนที่ในแกน x,y ขณะที่เกิดการเคลื่อนที่มากที่สุดในแนวรัศมีนั้นน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าการเคลื่อนที่ในสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x หรือ y (S_d^x, S_d^y)

รูปที่ 2.11(ก) แสดงสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe 1995 ที่ทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหว $\theta = 0$ องศาหรือ $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0°)$ จะเห็นได้ว่าที่คาบธรรมชาติ T_y =0 ค่า $S_d^r(T_x, T_y = 0, \theta = 0°)$ จะเท่ากับ $S_d^x(T_x, \theta = 0°)$ ในทำนองเดียวกัน ที่คาบธรรมชาติ T_x =0 $S_d^r(T_x = 0, T_y, \theta = 0°)$ จะเท่ากับ $S_d^y(T_y, \theta = 0°)$

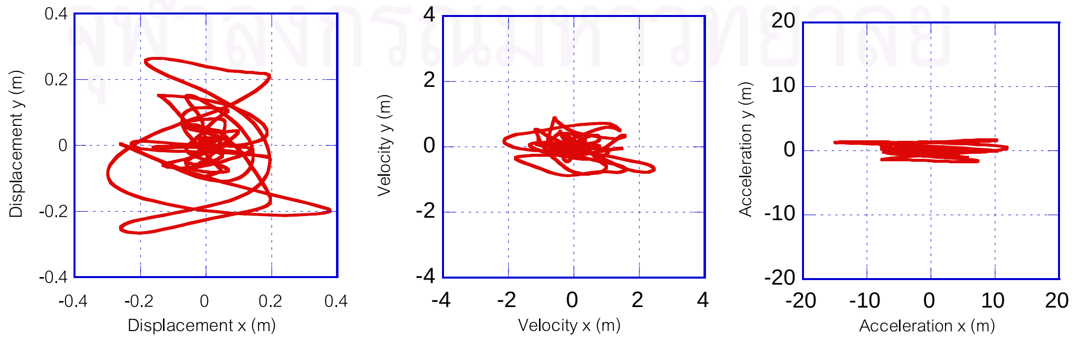
ในรูปที่ 2.11(ข) แสดงสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ ในมุมของคลื่นแผ่นดินไหว 0 องศา ($\alpha(T_x, T_y, \theta = 0°)$)จะเห็นได้ว่าที่ T_x เข้าใกล้ศูนย์คือแกน x โครงสร้างมีความแข็งมาก ในขณะที่ T_y มีค่าใด ๆ จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่จะเท่ากับ 90 องศาคือเอนไปในทางแกน y เช่นเดียวกันถ้า T_y เข้าใกล้ศูนย์ทิศทางการเคลื่อนที่จะเท่ากับ 0 องศา

ในรูปที่ 2.12 แสดงสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe จะเห็นได้ว่ามีค่าอัตราส่วนประมาณ 1.5

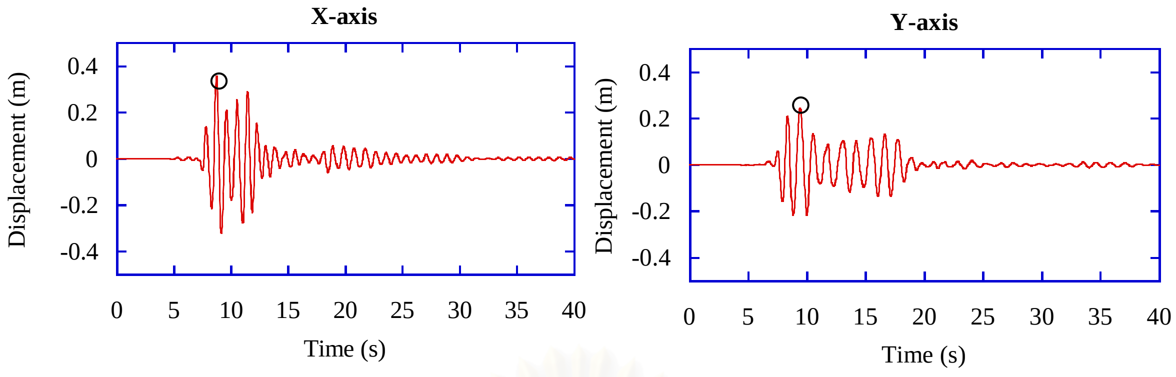
ในรูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดเมื่อพิจารณาผลของทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครสร้าง($\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$)



รูปที่ 2.6 การรวมผลตอบสนองในแกน x และ y

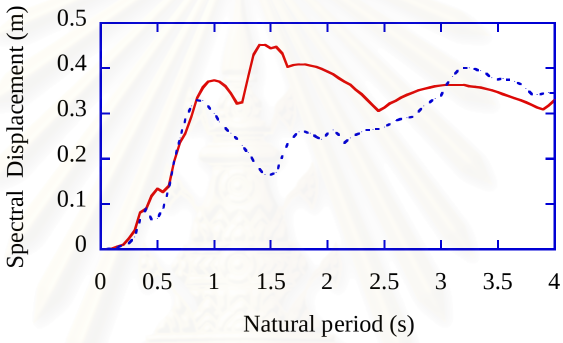


รูปที่ 2.7 การเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง ในแกน x และ y

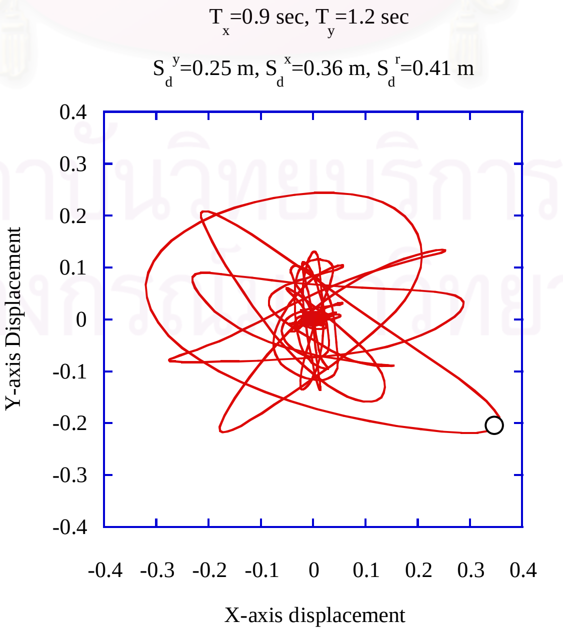


(ก) แกน x　　　　　　　　(ข) แกน y

รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่กับเวลาในแกน x และ y

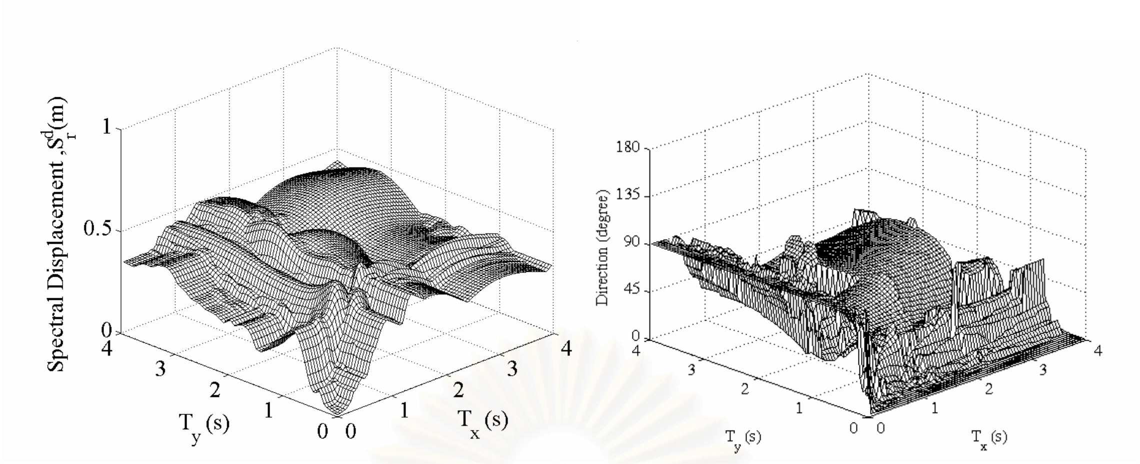


รูปที่ 2.9 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x และ y



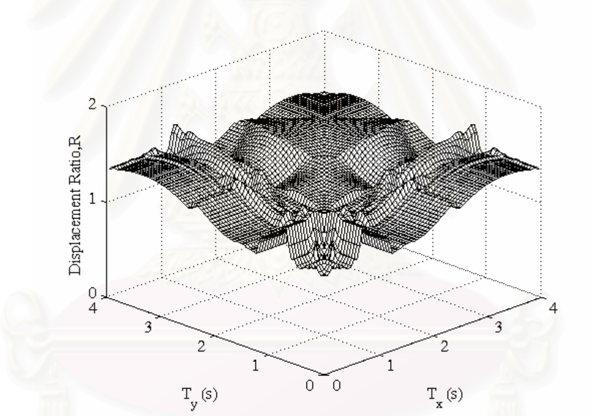
รูปที่ 2.10 การเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



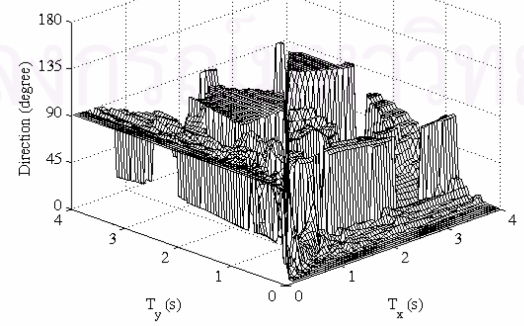
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0°)$ (ข) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0°)$

รูปที่ 2.11 สเปกตรัมผลตอบสนอที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่($R(T_x, T_y)$)สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่($\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$)สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวJMA Kobe

2.6 การประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสาภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

1. คำนวณหาคาบของโครงสร้างในแกน x และ y

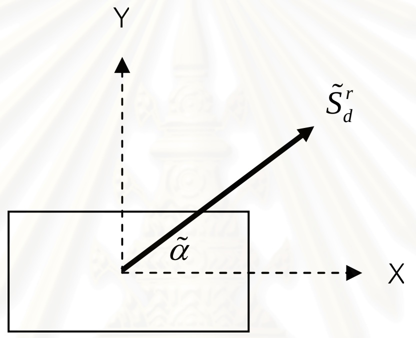
2. คำนวณค่าการเคลื่อนที่มากที่สุดในแต่ละแกนจากสเปกตรัมผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน S_d^x จากสเปกตรัมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน

3. คำนวณค่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี โดยการคูณด้วยค่า $R(T_x,T_y)$ ที่ได้จากกราฟรูปที่ 2.12 กับสเปกตรัมแกนเดียวทั่วไป (S_d^x)

$$R(T_x,T_y)\times S_d^x(T_x)=\tilde{S}_d^r(T_x,T_y) \qquad (2.9)$$

โดยที่ T_x มีค่ามากกว่า T_y

4. คำนวณหาทิศทางของค่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ จากรูปที่ 2.13(ข)



รูปที่ 2.14 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเสาเมื่อเกิดแผ่นดินไหวใน 2 ทิศทาง

5. คำนวณการเคลื่อนที่ในการ x และ y โดยการฉายค่าการเคลื่อนที่มากที่สุดในแนวรัศมีลงบนแกน x และ y

6. คำนวณแรงด้านข้างจากการเคลื่อนที่ในแกน X และ Y และคำนวณโมเมนต์ดัดในแต่ละแกน

7. ตรวจสอบโมเมนต์ดัดด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดในทั้งสองแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Interaction diagram)

ตารางที่ 2.2 คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมผลตอบสนอง

Earthquake	Date	Magnitude (M_w)	Station	Distance to fault rupture (km)	Site	Component No.	Direction	PGA (m/s^2)
Parkfield	6/27/1966	6.1	Temblor	9.9	Rock	205	X	3.51
						295	Y	2.66
San fernando	2/9/1971	6.6	Pacoima Dam	2.8	Rock	164	X	12.03
						254	Y	11.37
Imperial valley	5/19/1940	7	117 El Centro Array # 9	8.3	Stiff	180	X	3.07
						270	Y	2.11
Imperial valley	10/15/1979	6.5	El centro Array # 6	1	Stiff	140	X	4.31
						230	Y	4.03
			Meloland	0.5	Stiff	000	X	3.08
						270	Y	2.91
			El centro Array # 3	9.3	Soft	140	X	2.61
						230	Y	2.17
Morgan hill	4/24/1984	6.2	Coyote lake dam	0.1	Rock	285	X	12.74
						195	Y	6.97
			Anderson Dam (Downstream)	2.6	Rock	250	X	4.15
						340	Y	2.84
			Gilroy Array #1	16.2	Rock	320	X	0.96
						230	Y	0.68
Loma prieta	10/17/1989	6.2	LGPC	6.1	Rock	090	X	5.94
						000	Y	5.53
			Gilroy Array #1	11.2	Rock	090	X	4.64
						000	Y	4.03
Erzincan	3/13/1992	6.7	Erzican	2	Stiff	N-S	X	5.05
						E-W	Y	4.86
Northridge	1/17/1994	6.7	Rinaldi receiving station	7.1	Stiff	228	X	8.22
						318	Y	4.63
			Sylmar converter station	6.2	Stiff	142	X	8.80
						052	Y	6.01
			NewHall fire station	7.1	Stiff	360	X	5.79
						090	Y	5.72
			90011 Montebello - Bluff Rd.	12.3	Soft	206	X	1.76
						296	Y	1.26

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) คลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัมผลตอบสนอง

Earthquake	Date	Magnitude (M_w)	Station	Distance to fault rupture (km)	Site	Component No.	Direction	PGA (m/s^2)
Kobe	1/17/1995	6.9	JMA	0.6	Rock	000	X	8.06
						090	Y	5.87
			Takatori	0.3	Soft	090	X	6.04
						000	Y	6.00
			Nishi-Akashi	11.1	Soft	000	X	5.00
						090	Y	4.93
			Shin-Osaka	15.5	Soft	000	X	2.40
						090	Y	2.08
			Takarazuka	1.2	Soft	090	X	6.80
						000	Y	6.80
			OSAJ	8.5	Soft	000	X	0.77
						090	Y	0.62
Kocaeli	8/17/1999	7.4	Gebze	17	Rock	000	X	2.40
						270	Y	1.35
			Duzce	12.7	Stiff	270	X	3.51
						180	Y	3.06
Chi-Chi	9/21/1999	7.6	TCU0068	1.09	Stiff	N-S	X	5.55
						E-W	Y	4.53
			TCU110	12.56	Soft	N-S	X	1.77
						E-W	Y	1.76
			TCU116	11.86	Soft	E-W	X	1.81
						N-S	Y	1.45
			CHY025	18.79	Soft	E-W	X	1.56
						N-S	Y	1.50
Duzce	11/12/1999	7.1	Bolu	17.6	Stiff	090	X	8.07
						000	Y	7.14
Whittier Narrows	1/10/1987	6	Alhambra, Fremont School	13.2	Rock	270	X	4.06
						180	Y	3.26

บทที่ 3

ผลของทิศทางแผ่นดินไหวต่อ
สเปกตรัมผลตอบสนองในแกนเดียว

สเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวทั้งสองทิศทางที่เสนอ เป็นการพิจารณาโดยการใช้คลื่นแผ่นดินไหว 2 ทิศทางที่ตั้งฉากมาทำการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ ดังนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์สเปกตรัมผลตอบสนองสองทิศทาง จึงได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อสเปกตรัมผลตอบสนอง

โดยปรกติสเปกตรัมผลตอบสนองที่ได้จากคลื่นแผ่นดินไหวจากแต่ละสถานีหรือแต่ละเหตุการณ์ มีความแตกต่างอย่างมากทั้งในด้านค่าของสเปกตรัมผลตอบสนองและรูปร่างของสเปกตรัม ความแตกต่างนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น พลังงานที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิด ระยะทางจากแหล่งกำเนิด ความลึกของแหล่งกำเนิด ลักษณะทางธรณีวิทยาที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางที่คลื่นแผ่นดินไหวเดินทางมา ขนาดของแผ่นดินไหว ลักษณะของชั้นดินที่สถานีตรวจวัด ดังนั้นสเปกตรัมผลตอบสนองสามารถเขียนอยู่ในรูปดังสมการที่ 3.1 (Clough,1993)

$$\mathrm{S} = S(SM, ED, FD, GC, M, SC, \xi, T, \theta) \tag{3.1}$$

โดยที่ *SM* คือ กลไกของแหล่งกำเนิด (source mechanism)
- *ED* คือ ระยะจากแหล่งกำเนิด (Epicentral distance)
- *FD* คือ ความลึกของแหล่งกำเนิด (Focal depth)
- *GC* คือ ลักษณะทางธรณีวิทยา (Geological condition)
- *M* คือ ขนาดของแผ่นดินไหว (Magnitude)
- *SC* คือ ลักษณะของดิน (Soil condition)
- ξ คือ อัตราส่วนความหน่วง (Damping ratio)
- *T* คือ คาบการสั่นไหว (Period)
- θ คือ ทิศทางที่แผ่นดินไหวกระทำกับโครงสร้างหรือเครื่องตรวจวัด

ผลของกลไกการเกิดแผ่นดินไหว (*SM*) และลักษณะทางธรณีวิทยา (*GC*) ในด้านของค่าของสเปกตรัมและรูปร่างของสเปกตรัมปัจจุบันยังไม่ชัดเจน ดังนั้นผลของปัจจัยดังกล่าวจึงยังไม่สามารถกำหนดในเชิงปริมาณเพื่อจุดประสงค์ในการออกแบบ ผลของระยะจากแหล่งกำเนิด(*ED*) ความลึก

(*FD*) และขนาดของแผ่นดินไหว (*M*) ถูกใช้การพิจารณาในด้านของระดับความรุนแรงของสเปกตรัม อย่างไรก็ตามผลกระทบดังกล่าวมีผลในด้านของรูปร่างของสเปกตรัมพอสมควรแต่ยังไม่เด่นชัดนัก ในทางกลับกันลักษณะของดิน (SC, ξ) มีผลกระทบอย่างชัดเจนทั้งในด้านของค่าความรุนแรงของสเปกตรัมและรูปร่างของสเปกตรัม จากที่กล่าวมาในด้านต้นดังนั้นในการพิจารณารูปร่างของสเปกตรัมในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้พิจารณาเฉพาะผลของลักษณะดินเท่านั้น โดยจะทำการกำหนดความรุนแรงให้มีค่าเท่ากันด้วยการหารด้วยค่าสูงสุดของความเร่ง ความเร็ว การเคลื่อนที่ที่ผิวดิน ดังนั้นรูปร่างของสเปกตรัมผลตอบสนองสามารถเขียนอยู่ในรูปของตัวแปร ลักษณะของดินและอัตราส่วนความหน่วง คาบธรรมชาติและทิศทางที่แผ่นดินไหวกระทำดังสมการที่ 3.2

$$\mathrm{S} = S(SC, \xi, T, \theta) \tag{3.2}$$

โดยในการวิเคราะห์จะกำหนดให้คาบธรรมชาติของโครงสร้าง (T) อยู่ระหว่าง 0-4 วินาที อัตราส่วนความหน่วง (ξ) เท่ากับ 0.05 และ ทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวตั้งแต่ 0-360 องศา โดยการวิเคราะห์รูปร่างของสเปกตรัมผลตอบสนองจะแสดงในหัวข้อที่ 3.2

3.1 **ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละทิศทางที่ตั้งฉาก**

เป็นที่ทราบดีว่าคลื่นแผ่นดินไหวในแกนที่ตั้งฉากกับรอยเลื่อนมีความรุนแรงกว่าคลื่นแผ่นดินไหวในแกนที่ขนานกับรอยเลื่อน แต่ไม่จำเป็นต้องเกิดความเร่งหรือเกิดผลตอบสนองมากที่สุดในแกนที่ตั้งฉากกับรอยเลื่อน ดังนั้นในการศึกษาความรุนแรงของแผ่นดินไหวทั้งสองแกนจึงพิจารณาแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางต่าง ๆ ตั้งแต่ 0-180 องศาจนได้ค่าความรุนแรงของแผ่นดินไหวมากที่สุด โดยการกำหนดให้ค่าความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละแกน จะใช้ค่าพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่เป็นตัวกำหนดความรุนแรงของแผ่นดินไหว เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$ และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแต่ละแกน $S_d^x(T_x, \theta)$ จึงได้นิยามความรุนแรงของแผ่นดินไหวกำหนดดังสมการที่ (3.3) (Housner,1959)

$$I_d(\theta) = \int_{T_1}^{T_2} S_d(T, \theta) dT \tag{3.3}$$

โดยในการวิเคราะห์กำหนดให้ T_1=0.05 วินาทีและ T_2=4 วินาที และกำหนดให้สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนที่เกิดความรุนแรงของแผ่นดินไหวมากที่สุดแทนด้วย S_d^{major} และสเปกตรัมระยะ

เคลื่อนที่ในแกนที่ตั้งฉากกับแกนที่เกิดความรุนแรงมากที่สุดแทนด้วย S_d^{minor} แสดงดังสมการที่ (3.4)

$$S_d^{major}(T) = S_d(T,\theta^*) \tag{3.4}$$

$$S_d^{minor}(T) = S_d(T,\theta^{**})$$

โดยที่ $\theta^* = \theta_{\ at\ \max[I_d(\theta)]}$

$$\theta^{**} = \theta^* + 90^\circ$$

ในการวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว(Intensity measure) โดยใช้คลื่นแผ่นดินไหวที่เก็บได้มาทำการแปรผลในรูปแบบต่าง ๆ กันไปเพื่อเป็นดัชนีในการวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้มีการเสนอกันอย่างกว้างขวางด้วยกันหลายวิธี โดยวิธีที่นิยมใช้คือ Arias intensity (Arias, 1970) เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับขนาด (amplitude) , ความถี่ (frequency content) และระยะเวลาการสั่นไหว (Duration) ของคลื่นแผ่นดินไหวโดยมีวิธีการคำนวนดังสมการที่ 3.5

Arias intensity
$$I_a = \frac{\pi}{2g}\int_0^\infty [a(t)]^2\, dt \tag{3.5}$$

โดยที่ I_a คือ Arias intensity มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที และ $a(t)$ คือ ความเร่งของผิวดินกับเวลามีหน่วยเป็น เมตร/วินาที^{2} และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ 9.81 เมตร/วินาที^{2}

อีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากคือ Velocity spectrum intensity, I_v ซึ่งเสนอโดย Housner, 1959 โดยเป็นการอินทิเกรตสเปกตรัมความเร็ว ในช่วงคาบธรรมชาติตั้งแต่ 0.1 วินาที ถึง 2.5 วินาที ดังแสดงในสมการที่ 3.6 โดยจะเห็นได้ว่า I_v มีความสัมพันธ์กับขนาด (amplitude), ความถี่ (frequency content) ซึ่งแตกต่างจาก Arias intensity ที่มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาการสั่นไหวด้วย

Velocity spectrum intensity
$$I_v = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi,T)\,dT \tag{3.6}$$

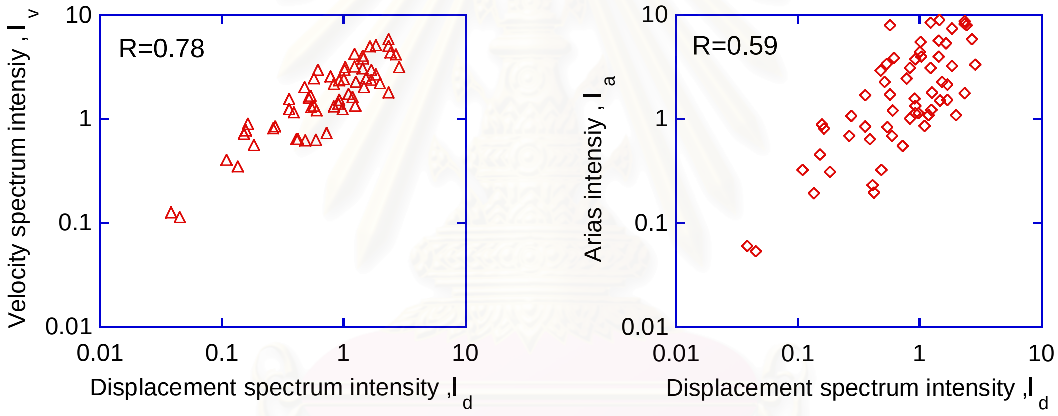
โดยที่ I_v คือ Velocity spectrum intensity มีหน่วยเป็น เมตร และ S_v คือ สเปกตรัมความเร็ว มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที ξ คืออัตราส่วนความหน่วง และ T คือ คาบธรรมชาติ

หลังจากนั้นมาทำการเปรียบเทียบกับวิธีวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่ได้ทำการเสนอคือ Displacement spectrum intensity เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการที่เสนอกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 30 คลื่น ทั้งคลื่นในแกน x และ y (เป็นคลื่นที่ไม่ได้ทำการแปรผันมุมของแผ่นดินไหว, $\theta = 0^\circ$) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) และ (ข)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 3.1(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธี Velocity spectrum intensity กับ Displacement spectrum intensity โดยจุดหนึ่งในรูปที่ 3.1(ก) เป็นการพิจารณาค่า I_d และ I_v ของคลื่นแผ่นดินไหว 1 คลื่น จะเห็นได้ว่าการวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหวด้วยวิธี Velocity spectrum intensity กับ Displacement spectrum intensity มีความสัมพันธ์กันพอสมควรคือเมื่อค่า I_d เพิ่มขึ้นค่า I_v จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient, R) เท่ากับ 0.78

จากรูปที่ 3.1(ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธี Arias intensity กับ Displacement spectrum intensity จะเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์กันพอสมควร โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.59 โดยความแตกต่างกันนั้นเนื่องจากถ้าสังเกตจากสมการของ I_a จะขึ้นอยู่กับขนาดของความเร่งที่ผิวดินและระยะเวลาของการสั่นไหวเป็นส่วนใหญ่ แต่ใน I_d และ I_v ขึ้นกับขนาดของความเร่งที่ผิวดินและความถี่ของคลื่น จะเห็นได้ว่าทั้ง I_a , I_d และ I_v มีปัจจัยที่แตกต่างกันอยู่ฉะนั้นจึงเกิดความแตกต่างขึ้นได้ แต่ถ้าสังเกตจากแนวโน้มแล้วมีความสัมพันธ์กันคือเมื่อ I_d เพิ่มขึ้น I_v , I_a จะเพิ่มขึ้นด้วย



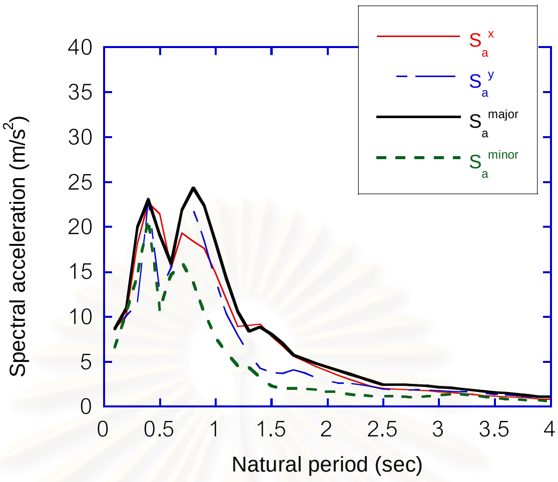
(ก) I_d กับ I_v (ข) I_d กับ I_a

รูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดความรุนแรงของแผ่นดินไหว

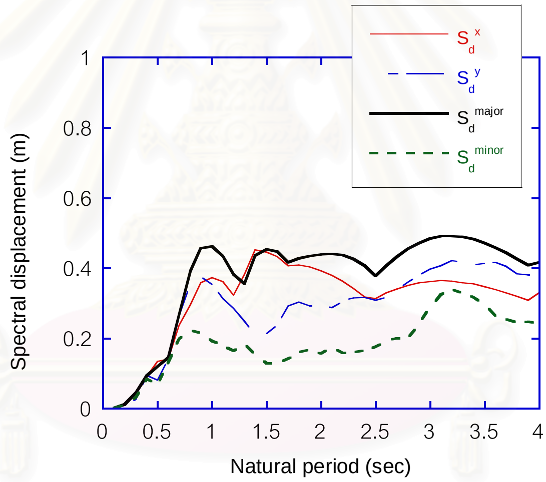
หลังจากนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ความรุนแรงของแผ่นดินไหวในทั้งสองทิศทาง โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ใช้ความรุนแรงของแผ่นดินไหวด้วยค่า I_d โดยทำการโดยกำหนดแกนหลักและแกนรองดังแสดงในสมการที่ 3.4

จากรูปที่ 3.2 แสดงสเปกตรัมความเร่งและการเคลื่อนที่เนื่องจากแผ่นดินไหวในทิศทาง 0 องศา (S_d^x, S_d^y) และทิศทางที่เกิดความรุนแรงสูงสุด(S_d^{major}, S_d^{minor}) จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการหมุนคลื่นแผ่นดินไหวไปในมุมต่าง ๆ จนได้แกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุดและแกนที่ตั้งฉากกัน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของสเปกตรัมผลตอบสนองในแกนที่เกิดความรุนแรงมากที่สุด แต่ในแกนที่ตั้งฉากกันมีค่าลดลง โดยเทียบกับสเปกตรัมผลตอบสนองในมุม 0 องศาซึ่งความแตกต่างของสเปกตรัมผลตอบสนองระหว่างแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุดกับแกนที่ตั้งฉากกัน มีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว โดยที่

ผลตอบสนองของโครงสร้างในมุมที่คลื่นแผ่นดินไหวเกิดความรุนแรงสูงสุดนี้จะทำให้เกิดผลตอบสนองในสองทิศทางมากที่สุดด้วยซึ่งจะกล่าวถึงในบทต่อไป



(ก) สเปกตรัมความเร่ง

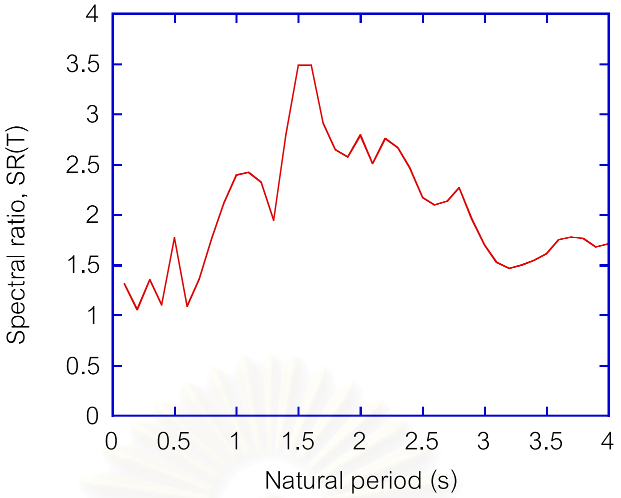


(ข) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 3.2 สเปกตรัมผลตอบสนองในแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุด(แกนหลัก)และแกนที่ตั้งฉาก (แกนรอง)และแกน x และ y สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA kobe,1995

เพื่อทำการเปรียบเทียบความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกนหลักและแกนรองจึงได้ทำการเปรียบเทียบโดยใช้อัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนหลักกับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนรองแสดงดังสมการที่ (3.5)

$$SR(T) = \frac{S_d^{major}(T)}{S_d^{minor}(T)} = \frac{S_a^{major}(T)}{S_a^{minor}(T)} \tag{3.5}$$

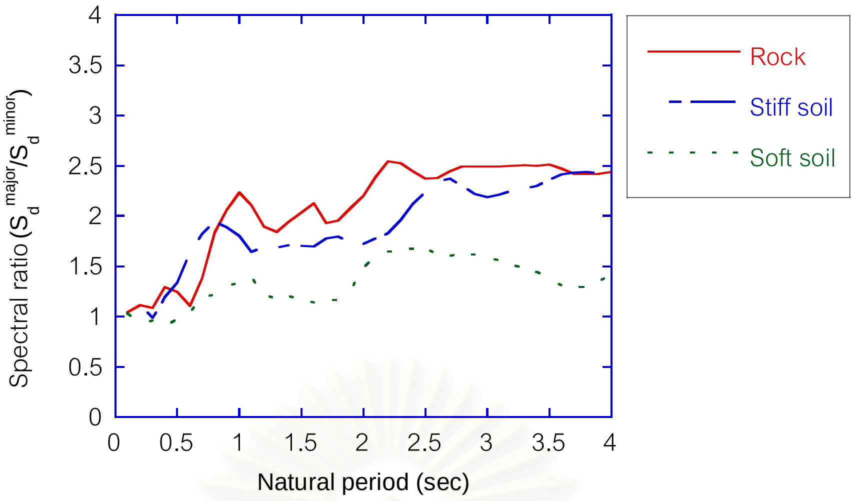


รูปที่ 3.3 ค่าอัตราส่วน $SR(T)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA kobe,1995

จากรูปที่ 3.3 แสดงอัตราส่วน $SR(T)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, 1995 ของแกนหลักกับแกนรองจะเห็นได้ว่ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.5

หลังจากนั้นจึงได้ทำการวิเคราะห์ในคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น ทั้งสองทิศทาง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมแกนหลักและแกนรอง จากรูปที่ 3.4 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระหว่างสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุดกับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนที่ตั้งฉากกับแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุด $(SR(T))$ ซึ่งทำการเฉลี่ยโดยแบ่งตามลักษณะดินแต่ละประเภทได้แก่ หิน ดินแข็ง ดินอ่อน จะเห็นได้ว่าในดินทุกประเภทค่าอัตราส่วนสเปกตรัมผลตอบสนองในแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุดกับแกนที่ตั้งฉาก มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อคาบเพิ่มขึ้น โดยในหินมีค่า $SR(T)$ เพิ่มขึ้นตามคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.54 ในดินแข็งค่า $SR(T)$ เพิ่มขึ้นตามคาบที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.45 ในดินอ่อนมีค่า $SR(T)$ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.68 จะเห็นได้ว่าในลักษณะของดินประเภทดินอ่อน ความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมผลตอบสนองมีค่าน้อยกว่าในหิน และดินแข็ง

ซึ่งค่า $SR(T)$ สามารถนำไปประยุกต์กับในการวิเคราะห์โครงสร้างต้านทานแผ่นดินไหวสองทิศทาง โดยสร้างสเปกตรัมผลตอบสนองในอีกแกนที่ตั้งฉากกัน ด้วยการนำค่า $SR(T)$ จากรูปที่ 3.4 ไปปรับแก้จากสเปกตรัมผลตอบสนองที่ใช้ในปัจจุบันได้



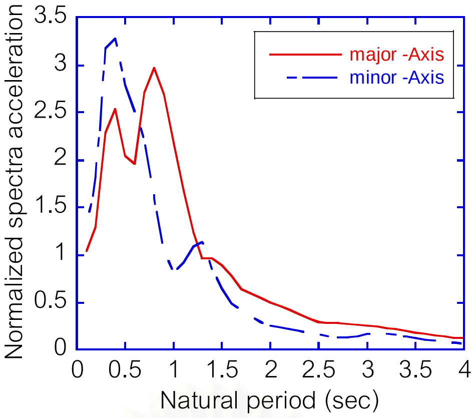
รูปที่ 3.4 ค่าเฉลี่ย $SR(T)$ สำหรับหิน ดินแข็งและดินอ่อน

3.2 รูปร่างของสเปกตรัมผลตอบสนอง

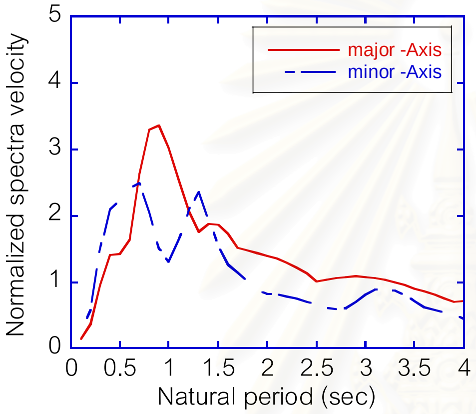
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นรูปร่างของสเปกตรัมผลตอบสนองจะขึ้นอยู่กับลักษณะของดินเป็นหลัก โดยในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาโดยมุ่งเน้นไปที่รูปร่างของสเปกตรัมในแกนที่เกิดความรุนแรงของแผ่นดินไหวมากที่สุดกับแกนที่ตั้งฉากกัน เพื่อศึกษารูปร่างของสเปกตรัมในแกนที่เกิดความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงสุด(แกนหลัก)และแกนที่ตั้งฉากกัน(แกนรอง) โดยแกนหลักและแกนรองนิยามไว้ดังสมการที่ 3.4 ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วแกนรองจะมีความรุนแรงของแผ่นดินไหวน้อยที่สุด สังเกตได้จากรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.5 แสดงสเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวJMAKobe,1995 ที่หารด้วยค่าความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่สูงสุดที่ผิวดินตามลำดับ โดยแกน major คือ แกนที่มีความรุนแรงสูงสุดและ แกน minor คือ แกนที่ตั้งฉากกับแกน major จะเห็นได้ว่ารูปร่างของสเปกตรัมความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่ ในทั้งสองแกนมีรูปร่างใกล้เคียงกัน

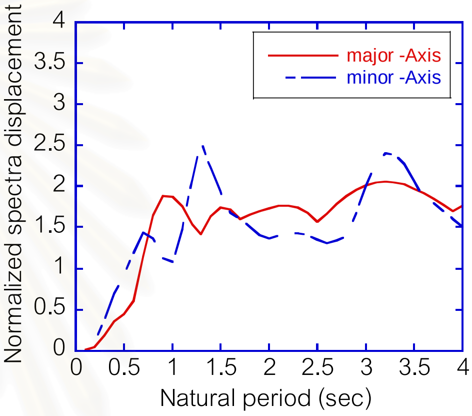
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) สเปกตรัมความเร่ง



(ข) สเปกตรัมความเร็ว

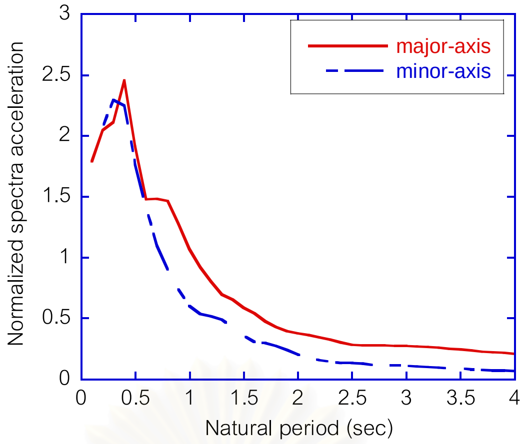


(ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

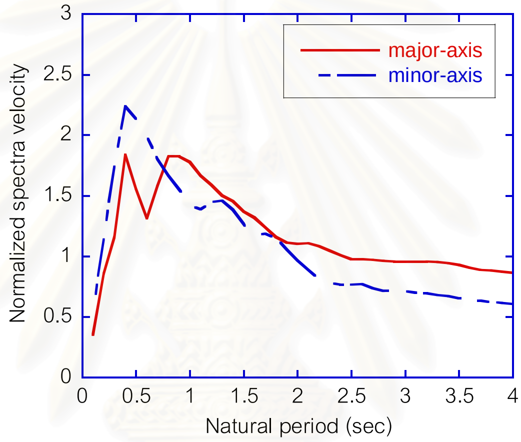
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมผลตอบสนองที่นอร์มัลไลซด์ด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน (คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, 1995)

จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 30 คลื่น โดยทำการหาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามลักษณะของดิน โดยแบ่งเป็นหิน 10 คลื่น ดินแข็ง 10 คลื่น ดินอ่อน 10 คลื่น รูปที่ 3.6-3.8 (ก),(ข),(ค) แสดงค่าเฉลี่ยของสเปกตรัมผลตอบสนองของความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่ ที่หารด้วยค่าความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่สูงสุดที่ผิวดิน ตามลำดับ ในลักษณะของดินประเภทหิน ดินแข็ง ดินอ่อน จะเห็นได้ว่าในลักษณะดินประเภทเดียวกันรูปร่างของสเปกตรัมผลตอบสนองทั้งความเร่ง ความเร็วและการเคลื่อนที่ ในแกนหลักและแกนรองมีความรูปร่างใกล้เคียงกันในทุก ๆ คาบธรรมชาติ

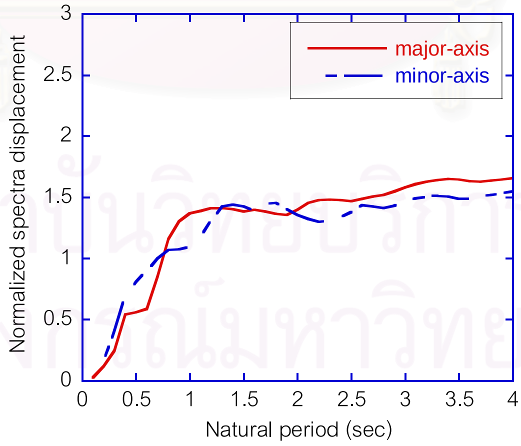
ส่วนในลักษณะของดินต่างประเภทกัน รูปร่างของสเปกตรัมจะแตกต่างกัน โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อตามลักษณะดินแต่ละชนิดคือ หิน ดินแข็ง ดินอ่อน ตามลำดับ ดังในรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่าในสเปกตรัมความเร่งที่คาบธรรมชาติเดียวกันในหินจะมีค่าต่ำสุด ตามด้วยดินแข็ง และสูงสุดในประเภทดินอ่อน ซึ่งเป็นไปตามลักษณะของสเปกตรัมที่นักวิจัยหลายท่านได้เสนอไว้ (Bommer and Elnashai,1998)



(ก) สเปกตรัมความเร่ง



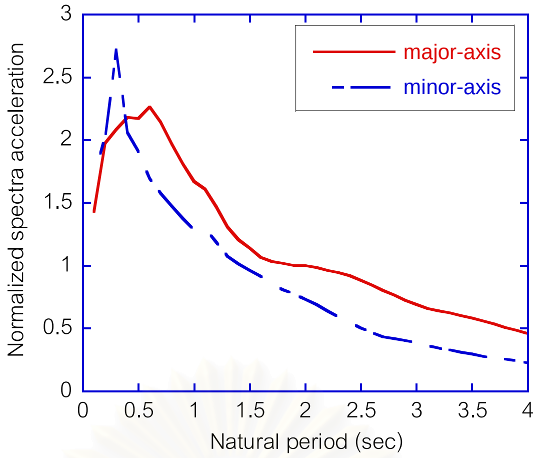
(ข) สเปกตรัมความเร็ว



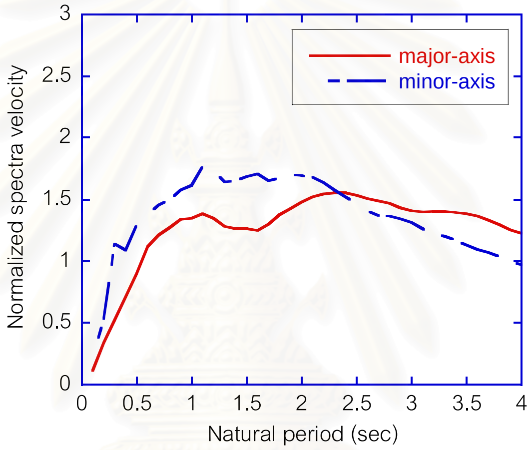
(ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 3.6 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน สำหรับหิน

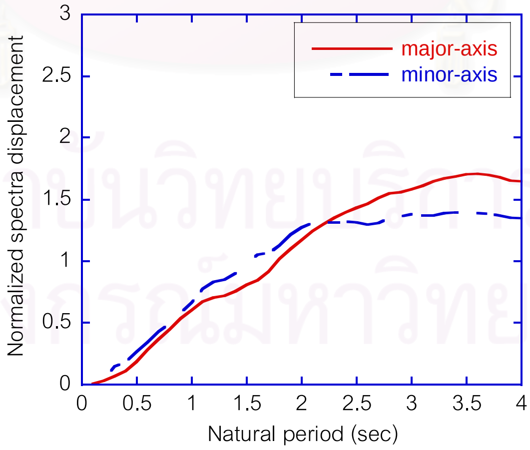
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) สเปกตรัมความเร่ง



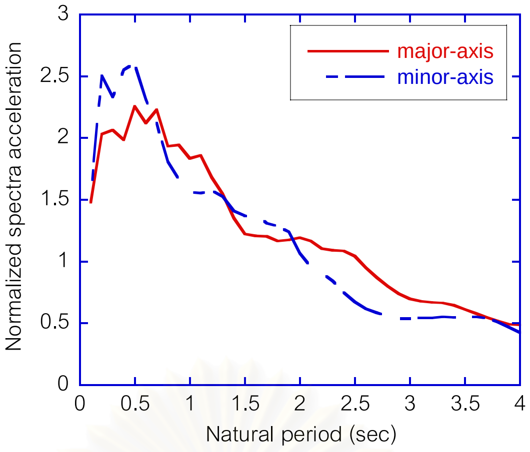
(ข) สเปกตรัมความเร็ว



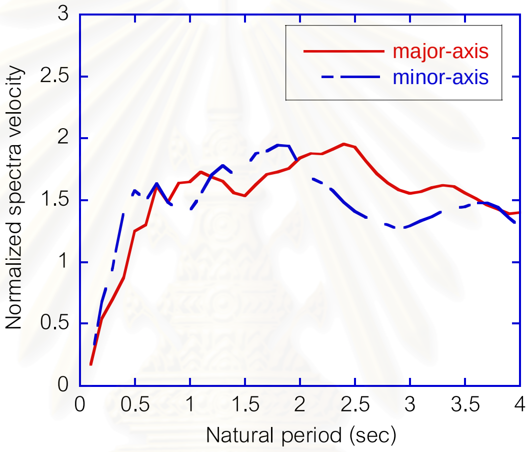
(ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 3.7 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน สำหรับดินแข็ง

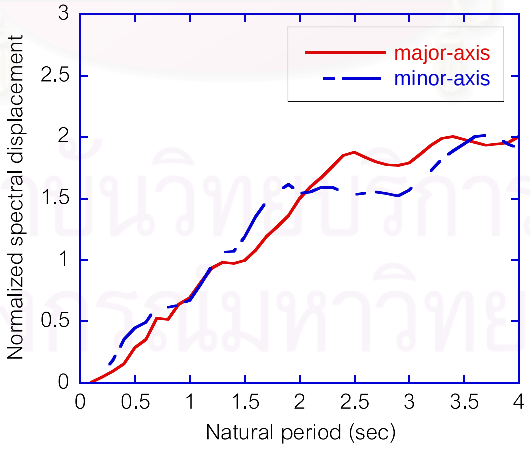
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) สเปกตรัมความเร่ง



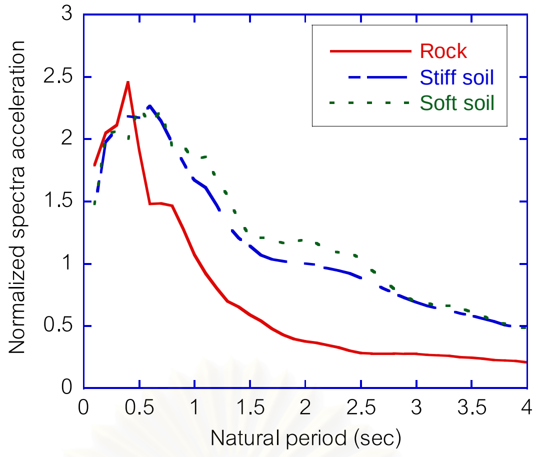
(ข) สเปกตรัมความเร็ว



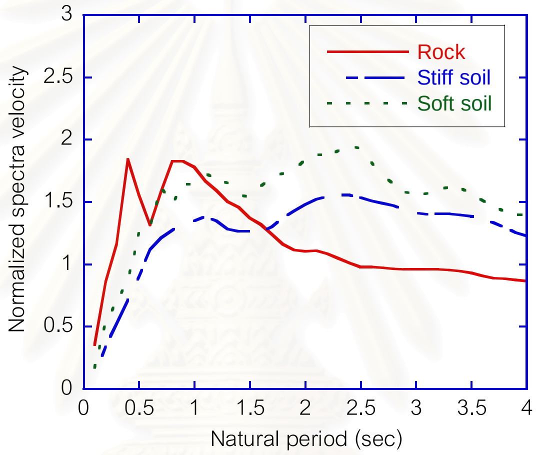
(ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 3.8 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน สำหรับดินอ่อน

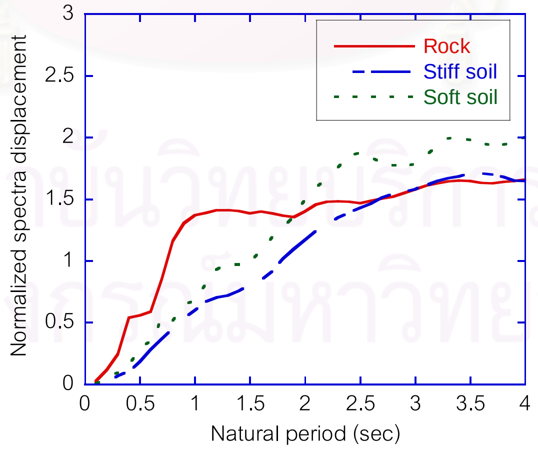
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) สเปกตรัมความเร่ง



(ข) สเปกตรัมความเร็ว



(ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 3.9 สเปกตรัมผลตอบสนองที่หารด้วยค่าสูงสุดที่ผิวดิน เปรียบเทียบดินประเภทต่าง ๆ

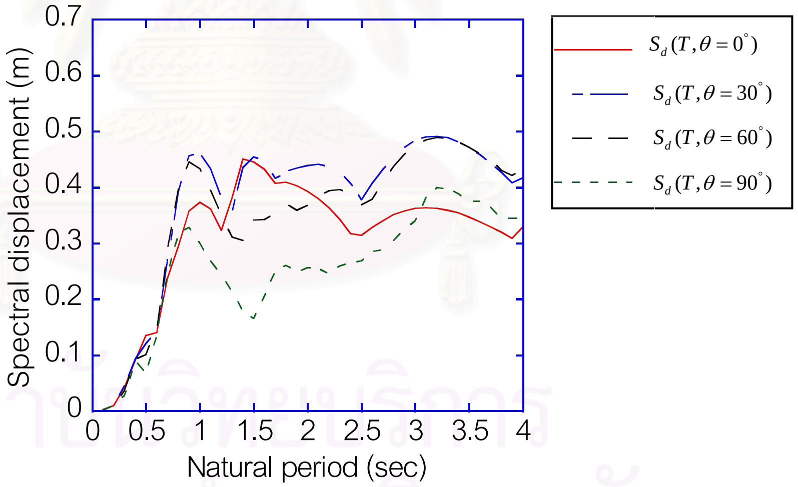
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 สเปกตรัมผลตอบสนองเมื่อพิจารณาทุกมุม

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของสเปกตรัมผลตอบสนองเมื่อทำการหมุนคลื่นแผ่นดินไหวไปในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งคล้ายคลึงกับในหัวข้อที่ 3.2 แต่แตกต่างกันที่ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาค่าสูงสุดของและค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนองเมื่อหมุนมุมไป 0- 360 องศา เมื่อเปรียบเทียบในคาบธรรมชาติเดียวกัน ดังสมการที่ (3.5) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงโอกาสที่จะเกิดผลตอบสนองสูงสุดและต่ำสุดเมื่อพิจารณาคลื่นแผ่นดินไหวกระทำให้ทุกทิศทาง

$$
\begin{aligned}
S_d^{max}(T) &= \max \left| S_d(T,\theta) \right|_{all\,\theta} \\
S_d^{min}(T) &= \min \left| S_d(T,\theta) \right|_{all\,\theta}
\end{aligned} \tag{3.5}
$$

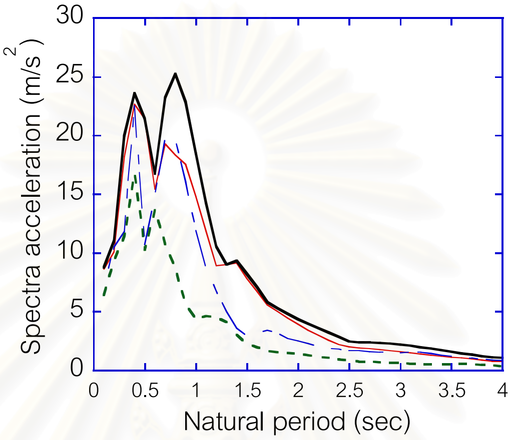
จากรูปที่ 3.9 แสดงสเปกตรัมความเร่ง ความเร็ว และการเคลื่อนที่ เมื่อทิศทางแผ่นดินไหวกระทำ 0, 30, 60, 90 องศา จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อคลื่นแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางต่าง ๆ กัน โดยในมุมๆ เดียวอาจทำให้เกิดค่าสูงสุดของการเคลื่อนที่ ที่คาบธรรมชาติค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้



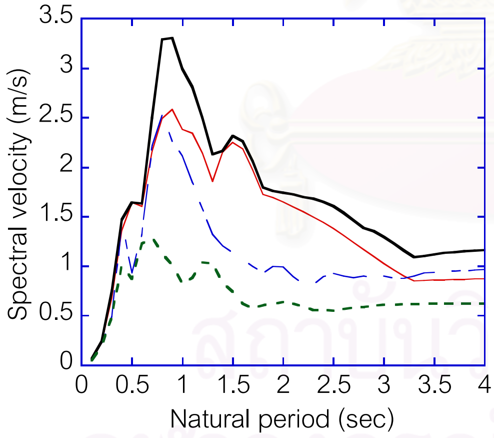
รูปที่ 3.10 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่เมื่อทิศทางแผ่นดินไหวกระทำเป็นมุม 0-90 องศา (คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995)

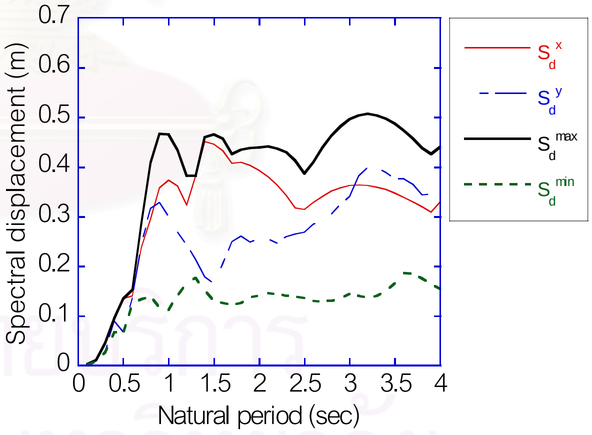
จากรูปที่ 3.11 (ก) (ข) และ (ค) แสดงค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ของสเปกตรัมผลตอบสนองและสเปกตรัมผลตอบสนองในแกน x และ y ที่คลื่นแผ่นดินไหวทำมุม 0 องศากับโครงสร้าง (คลื่นแผ่นดินไหว Kobe,1995) จะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดมีความแตกต่างกันพอสมควรซึ่งในการวัด

ความแตกต่างของสเปกตรัมค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ใช้ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดของสเปกตรัมการเคลื่อนหารด้วยค่าต่ำสุดของสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่หรือ $S_d^{max}(T)/S_d^{min}(T)$ จากรูปที่ 3.12 แสดงค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนองในคลื่นแผ่นดินไหวโกเบ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคาบธรรมชาติที่เปลี่ยนไป



(ก) สเปกตรัมความเร่ง

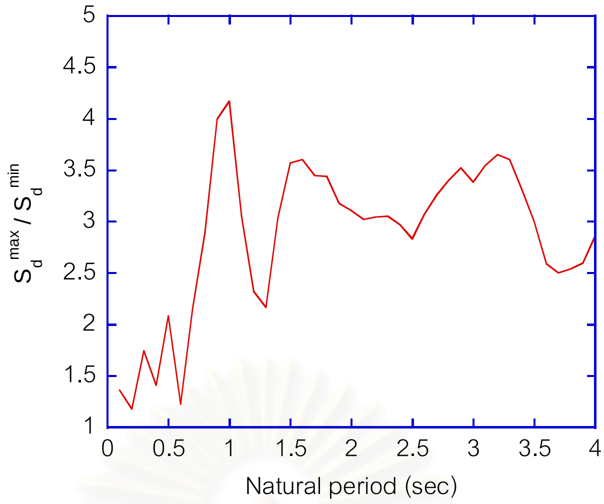




(ข) สเปกตรัมความเร็ว (ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

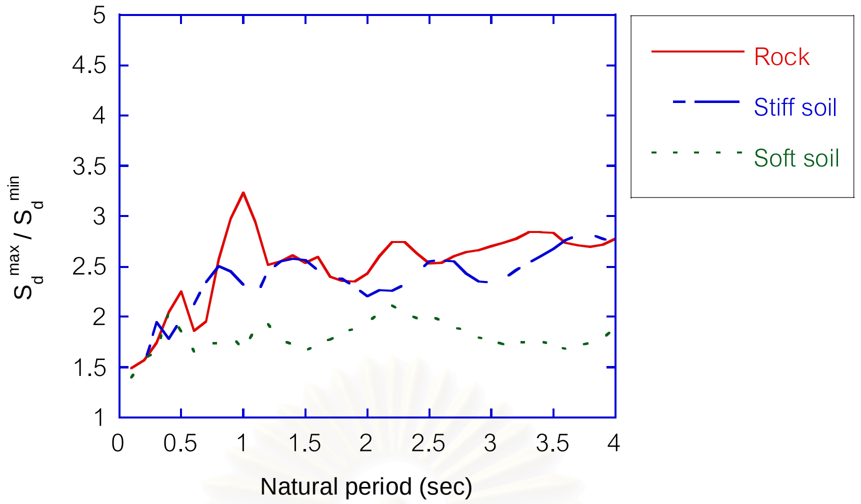
รูปที่ 3.11 ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ของสเปกตรัมผลตอบสนองและสเปกตรัมผลตอบสนองในแกน x และ y ที่คลื่นแผ่นดินไหวทำมุม 0 องศากับโครงสร้าง (คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.12 อัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนอง (คลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995)

จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์คลื่นแผ่นดินไหวทั้งหมด 30 สถานี ซึ่งได้แสดงการวิเคราะห์แต่ละคลื่นแผ่นดินไหวไว้ในภาคผนวก ก โดยทำการหาค่าเฉลี่ยโดยแบ่งตามลักษณะของดิน โดยแบ่งเป็นหิน 10 สถานี ดินแข็ง 10 สถานี ดินอ่อน 10 สถานี จากรูปที่ 3.13 จะเห็นได้ว่าในลักษณะของดินทุกประเภท ค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนอง มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามคาบธรรมชาติ โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อคาบธรรมชาติเพิ่มขึ้น โดยค่าอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนอง ในหินมีค่ามากที่สุด ตามด้วยดินแข็งและดินอ่อน โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.52 , 2.38, 1.81 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในลักษณะดินประเภทหิน คลื่นในทั้งสองแกนที่ตั้งฉากกัน มีความแตกต่างกันมาก เมื่อทำการหมุนคลื่นไปในทิศทางต่าง ๆ จึงทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดมาก ส่วนในดินอ่อน คลื่นในทั้งสองแกนที่ตั้งฉาก มีความแตกต่างกันน้อยทำให้เมื่อทำการหมุนคลื่นแล้วความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดจึงมีค่าน้อย



รูปที่ 3.13 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของสเปกตรัมผลตอบสนองในดินประเภทต่าง ๆ

บทที่ 4

ลักษณะของสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณผลของ แผ่นดินไหวสองทิศทาง

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง โดยนำค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีและทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีเสนอในรูปแบบของสเปกตรัม ซึ่งได้พบพฤติกรรมต่าง ๆ ที่สำคัญซึ่งแตกต่างจากการวิเคราะห์สเปกตรัมผลตอบสนองในทิศทางเดียว ในบทนี้จึงทำการอธิบายลักษณะต่าง ๆ ของสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง

4.1 ตัวอย่างสเปกตรัมการผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทาง สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995

4.1.1 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$ และสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ $R(T_x,T_y)$

รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกระทำในทิศทาง 0,30,60,90,120,150,180 องศา สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe จะเห็นได้ว่า $S_d^r(T_x,T_y,\theta)$ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่เปลี่ยนไป โดยจะมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับคาบธรรมชาติของโครงสร้างในแต่ละแกน และคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำในทิศทางนั้น ๆ และเมื่อทำการเปลี่ยนทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวจาก 0 จนถึง 180 องศา ค่าสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจะได้ค่าเท่ากัน

รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีโดยนำค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกมุมแล้วดังสมการที่ 2.5 หรือแทนด้วย $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe,1995 จะเห็นได้ว่ากราฟมีความสมมาตรเมื่อทำการพิจารณาทุกๆ ทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวแล้ว

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x หรือแทนด้วย $\tilde{S}_d^x(T_x,T_y)$ ที่นำมาใช้ในการหารสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี เมื่อหาร $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$ ด้วย $\tilde{S}_d^x(T_x,T_y)$ แล้วจะได้สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่หรือแทนด้วย $R(T_x,T_y)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าที่ค่า $R(T_x,T_y=0)$ หมายถึงการเพิ่มขึ้นของการเคลื่อนที่ในแกน x เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ไปในทุกทิศทางค่าการเคลื่อนที่ในแกน x จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่มีค่าสูงสุด 1.6 และต่ำสุด

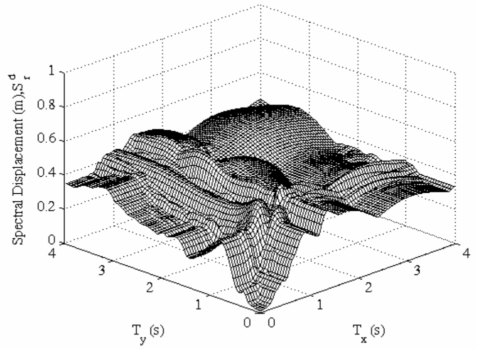
เท่ากับ 1.2 จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ มีความสมมาตรรอบแกน $T_x = T_y$ หลังจากที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวในทุกทิศทางแล้ว

4.1.2 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่

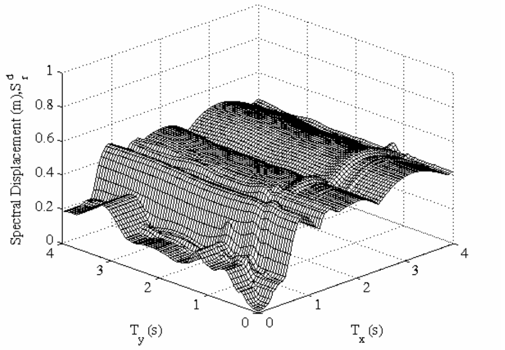
จากรูปที่ 4.5 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างภายใต้แผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตั้งแต่ 0-180 องศา จะเห็นได้ว่า $\alpha(T_x, T_y, \theta)$ มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่เปลี่ยนไป โดยจะมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง ขึ้นอยู่กับคาบธรรมชาติของโครงสร้างในแต่ละแกน และคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำในทิศทางนั้น ๆ เมื่อ $T_y = 0$ ค่า $\alpha(T_x, T_y = 0, \theta)$ จะเท่ากับ 0 องศาเนื่องจากคาบของโครงสร้างในแกน y น้อยมากทำให้การเคลื่อนที่เอียงไปทางแกน x แกนเดียว ในทางกลับกันเมื่อเมื่อ $T_x = 0$ ค่า $\alpha(T_x = 0, T_y, \theta)$ จะเท่ากับกับ 90 องศาเนื่องจากคาบของโครงสร้างในแกน x น้อยมากทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ในแกน x และเมื่อทำการเปลี่ยนทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวจาก 0 จนถึง 180 องศา ค่าสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่จะได้ค่าเท่ากัน

จากรูปที่ 4.6 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เกิดค่าการเคลื่อนที่สูงสุดหรือ $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$ จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดเมื่อพิจารณาทุกมุม มีความแตกต่างกันไปตามคาบของโครงสร้างในแกน x และ y โดยในกรณีที่ $T_x = 0$ หรือ $T_y = 0$ ค่า $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$ จะเท่ากับ 90 และ 0 ตามลำดับ โดยเมื่อ T_x, T_y มีค่าใดๆ ที่ไม่เท่ากับ 0 ค่าทิศทางการเคลื่อนที่จะแปรเปลี่ยนไปพอสมควร เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ที่ได้นั้นได้จากมุมของคลื่นแผ่นดินไหวคนละมุมกัน ขึ้นกับว่ามุมของคลื่นแผ่นดินไหวมุมไหนจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีมากกว่ากัน ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อสเปกตรัมที่ทางการเคลื่อนที่จะอธิบายอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 4.3

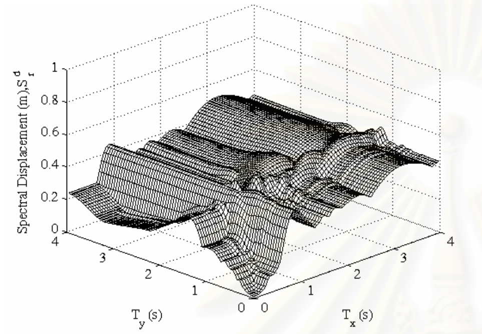
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



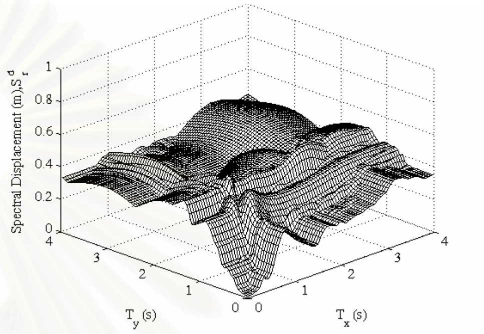
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^{\circ})$



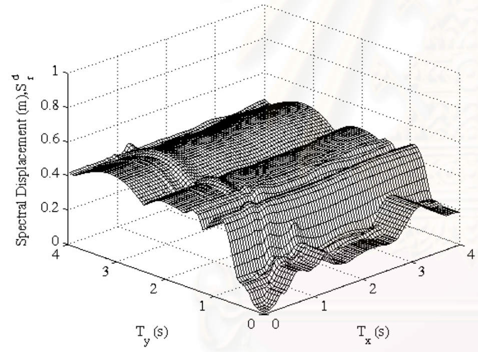
(ข) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=30^{\circ})$



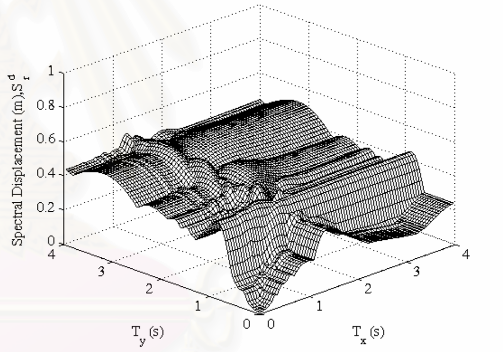
(ค) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=60^{\circ})$



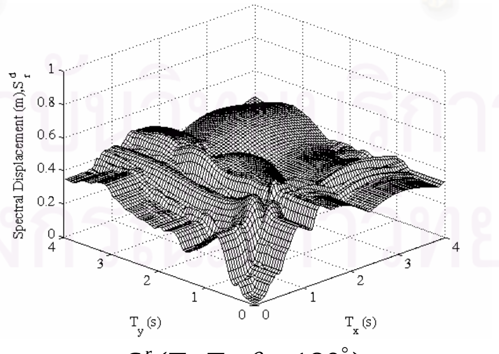
(ง) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=90^{\circ})$



(จ) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=120^{\circ})$



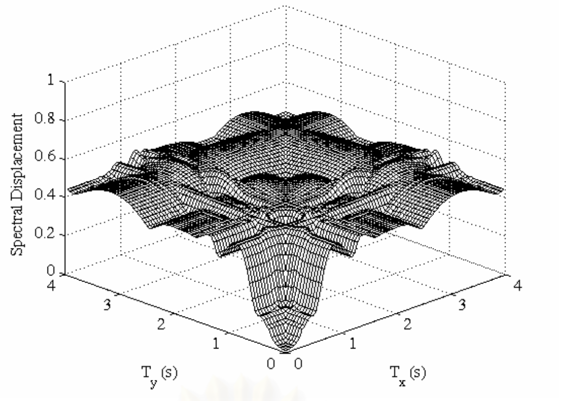
(ฉ) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=150^{\circ})$



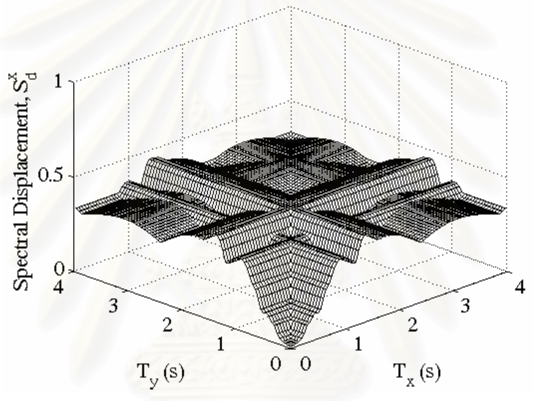
(ช) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=180^{\circ})$

รูปที่ 4.1 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตั้งแต่ 0-180 องศา สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe,1995

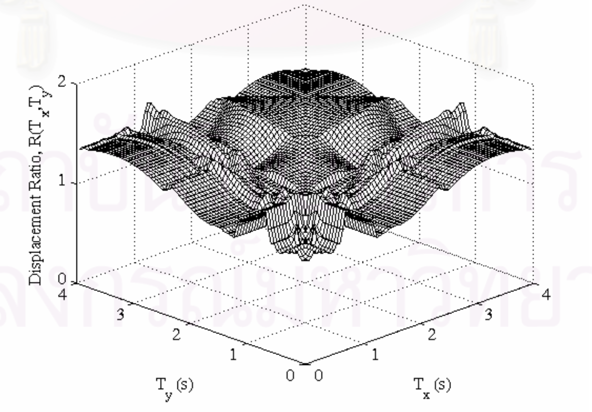
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกมุม $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995

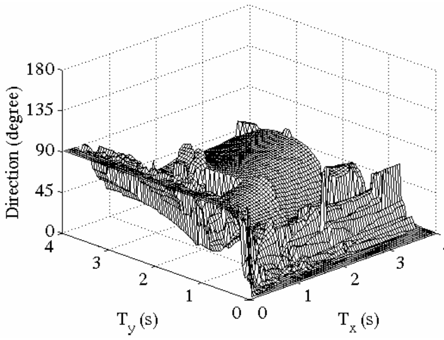


รูปที่ 4.3 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x ($\tilde{S}_d^x(T_x,T_y)$) ที่ใช้ในการหาร

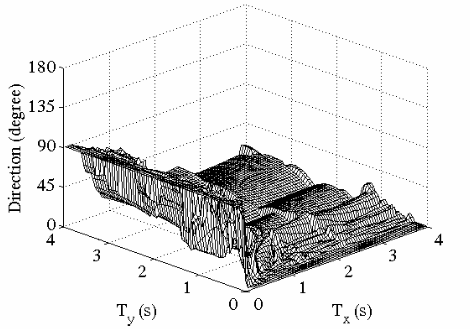


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ $R(T_x,T_y)$

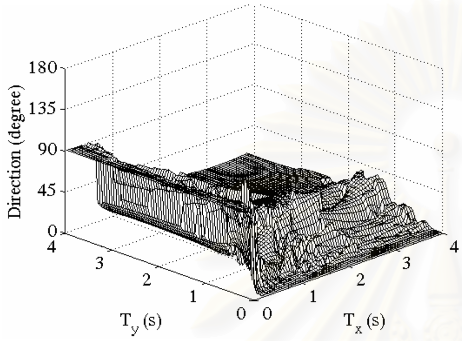
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



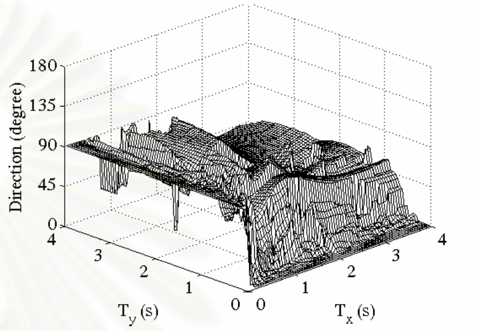
(ก) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^{\circ})$



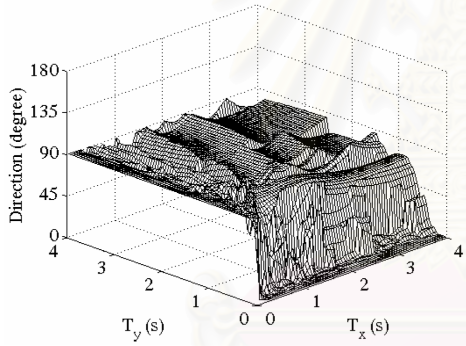
(ข) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 30^{\circ})$



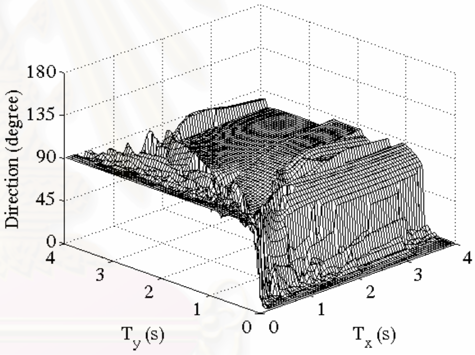
(ค) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 60^{\circ})$



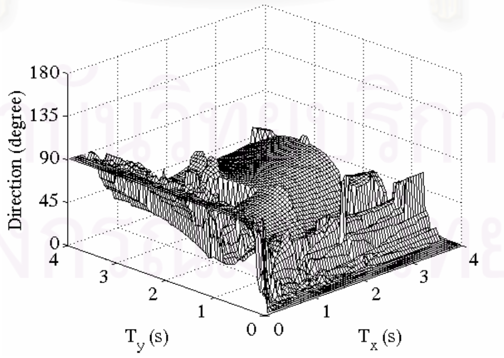
(ง) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 90^{\circ})$



(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 120^{\circ})$

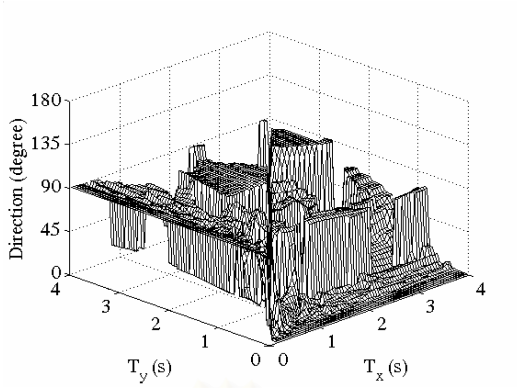


(ฉ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 150^{\circ})$



(ช) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 180^{\circ})$

รูปที่ 4.5 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหวกระทำในทิศทางตั้งแต่ 0 – 180 องศา สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe,1995

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี

จากที่ตัวอย่างที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อ $S_d^r(T_x,T_y,\theta)$ อย่างชัดเจนก็คือคาบของโครงสร้างในแกน x และ y และมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการแสดงผลของคาบธรรมชาติในแกน x และ y และมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีต่อสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี

4.2.1 มุมของคลื่นแผ่นดินไหว

ความหมายของมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างสำหรับคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละคลื่นนั้นไม่เหมือนกัน เช่นคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe กระทำที่มุม $\theta = 10^\circ$ กับคลื่นแผ่นดินไหว Parkfield กระทำที่มุม $\theta = 10^\circ$ นั้นมีค่าไม่เท่ากัน ฉะนั้นในการเปรียบเทียบกันในแต่ละคลื่นแผ่นดินไหวจำเป็นต้องมีค่ากลางที่ใช้ในการอธิบายมุมของคลื่นแผ่นดินไหว ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ใช้ค่าอัตราส่วนความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในแกน x และ y หรือ I_d^x / I_d^y เป็นตัวแทนของ θ ที่มุมต่าง ๆ กันของคลื่นแผ่นดินไหวต่าง ๆ กัน ซึ่งนิยามของ I_d^x, I_d^y แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.1 ซึ่งจะสามารถเขียนสมการสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี(สมการที่ 2.4) ในรูปใหม่ได้ดังนี้

$$S_d^r(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y}) = S_d^r(T_x,T_y,\theta) \qquad (4.1)$$

โดยที่มุมของคลื่นแผ่นดินไหวหนึ่งมุมจะมีค่า $\frac{I_d^x}{I_d^y}$ หนึ่งค่า ซึ่งหมายความว่าถ้า $\frac{I_d^x}{I_d^y} > 1$ ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่กระทำในแกน x ของโครงสร้างมีค่ามากกว่าในแกน y ในทาตรงกันข้าม

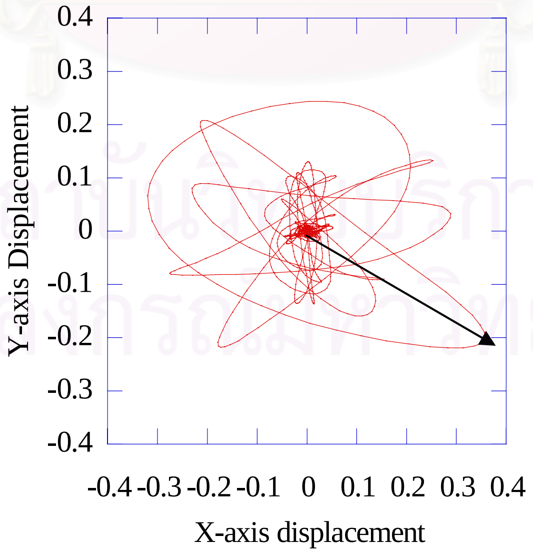
ถ้า $\frac{I_d^x}{I_d^y} < 1$ ความรุนแรงของแผ่นดินไหวที่กระทำในแกน x มีค่าน้อยกว่าแกน y ซึ่งสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับคลื่นแผ่นดินไหวอื่น ๆ ได้ดีกว่าการใช้ θ ซึ่งไม่สื่อความหมายเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับคลื่นแผ่นดินไหวอื่น ๆ

4.2.2 คาบของโครงสร้างในแต่ละแกน

สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีเกิดจากการเคลื่อนที่ในแกน x และ y ซึ่งจะแตกต่างจากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนเดียว เนื่องจาก ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีหรือ S_d^r การเคลื่อนที่ในแกน x และ y อาจจะไม่เท่ากับค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแกน x และ y หรือค่า $S_d^x(T_x), S_d^y(T_y)$ ก็ได้ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบค่าการเคลื่อนที่ในแกน x ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีกับการเคลื่อนที่สูงสุดในแกน x ดังสมการที่ 4.2 และรูปที่ 4.7

$$\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y}) = \frac{u_x(T_x,\frac{I_d^x}{I_d^y},t:\text{at}\max\left|u_r(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y},t)\right|}{S_d^x(T_x,\frac{I_d^x}{I_d^y})}\times 100$$

$$\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y}) = \frac{u_y(T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y},t:\text{at}\max\left|u_r(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y},t)\right|}{S_d^y(T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})}\times 100 \quad (4.2)$$



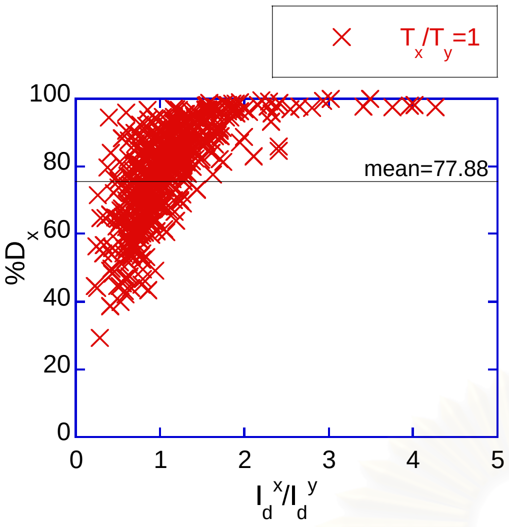
รูปที่ 4.7 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y ($T_x = 0.9\,s, T_y = 1.2\,s$) คลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe ($\theta = 0^\circ, I_d^x / I_d^y = 1.22$)

ในรูปที่ 4.7 แสดงการเคลื่อนที่ในแกน x และ y จะเห็นได้ว่าค่า $S_d^x(T_x,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ เท่ากับ 0.36 เมตร และ $S_d^y(T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ เท่ากับ 0.25 เมตร ซึ่งค่า u_x, u_y ณเวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดแนวรัศมีเท่ากับ 0.36 และ 0.20 เมตร ตามลำดับ ฉะนั้นค่า $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ จะเท่ากับ 0.36/0.36=1 และ $\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ จะเท่ากับ 0.20/0.25=0.80 จะเห็นได้ว่าค่าการเคลื่อนที่ ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีนั้นไม่จำเป็นต้องเกิดจากการเคลื่อนที่ในแกน x สูงสุดและ y สูงสุดพร้อมกัน

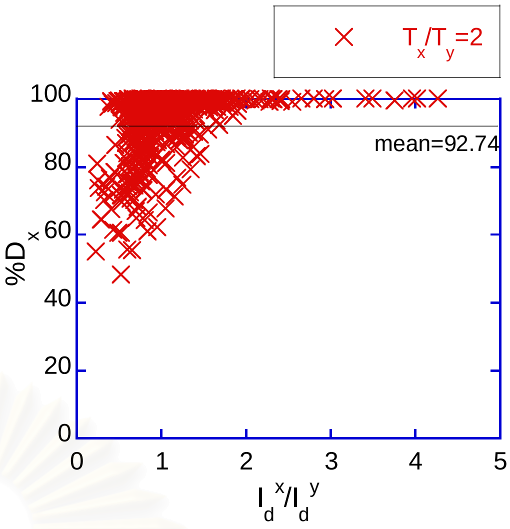
รูปที่ 4.8 แสดงค่า $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ สำหรับแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่นโดยแสดงเป็นอัตราส่วนของคาบแกน x และ y โดย T_x/T_y มีค่า 1, 2, 3 และ 4 กับ $\frac{I_d^x}{I_d^y}$ มีค่าตั้งแต่ 0-5 โดยหนึ่งจุดในรูป4.8(ก)หมายถึงค่า $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ ที่อัตราส่วนคาบ $T_x/T_y=1$ (โดยเฉลี่ยค่า $\%D_x$ ที่ $T_x/T_y=1$ เหมือนกัน) และที่ $\frac{I_d^x}{I_d^y}$ มีค่าใดๆ เช่นเดียวกับในรูปที่ 4.8(ข)-(ง) จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 4.8 (ก) ถึง (ง) เมื่ออัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ จะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนคาบของโครงสร้างจาก 1 ถึง 4 ค่า $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ ก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีเอียงไปทางแกน x มากขึ้น เมื่อคาบของโครงสร้างในแกน x มากกว่าแกน y มากขึ้น และความรุนแรงในแกน x มากกว่าแกน y มากขึ้น

รูปที่ 4.9 แสดงค่า $\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ สำหรับแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่นที่ T_x/T_y มีค่า 1, 2, 3 และ 4 จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 4.9 (ก) ถึง (ง) เมื่ออัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า $\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ จะมีค่าลดลง ในขณะที่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนคาบของโครงสร้างจาก 1 ถึง 4 ค่า $\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ ก็มีค่าเฉลี่ยลดลงด้วย เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีเอียงไปทางแกน x มากขึ้น เมื่อคาบของโครงสร้างในแกน x มากกว่า y มากขึ้น และความรุนแรงในแกน x มากกว่า y มากขึ้น

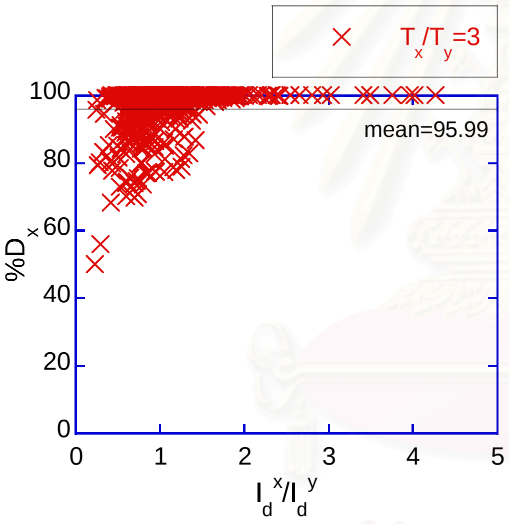
จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของ $\%D_x(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ เพิ่มขึ้นเมื่อ T_x/T_y มีค่าเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 77%, 93%, 96%, 97% เมื่อ T_x/T_y มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, 4 ตามลำดับ ในทางกลับกันค่าเฉลี่ยของ $\%D_y(T_x,T_y,\frac{I_d^x}{I_d^y})$ ลดลงเมื่อ T_x/T_y มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 77%, 54%, 43%, 37% เมื่อ T_x/T_y มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, 4 ตามลำดับ



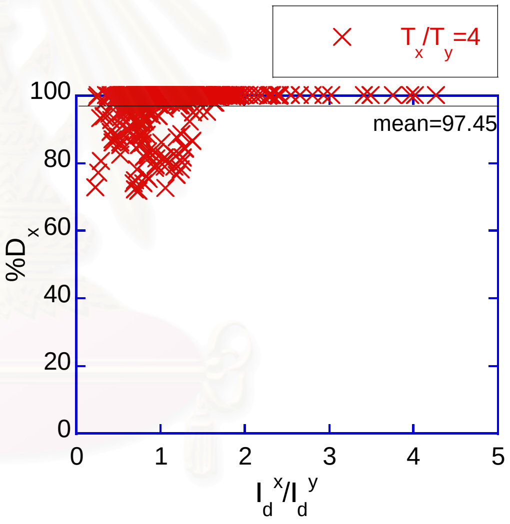
(ก) $T_x/T_y = 1$



(ข) $T_x/T_y = 2$



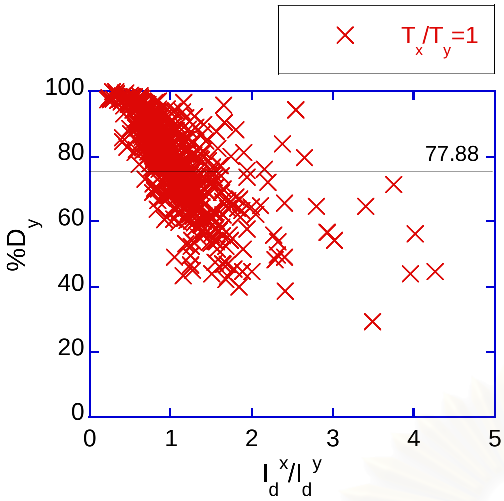
(ค) $T_x/T_y = 3$



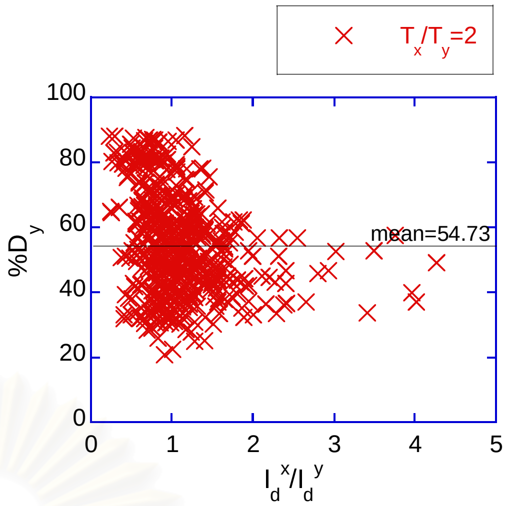
(ง) $T_x/T_y = 4$

รูปที่ 4.8 ค่า $\%D_x(T_x, T_y, \frac{I_d^x}{I_d^y})$ สำหรับแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น

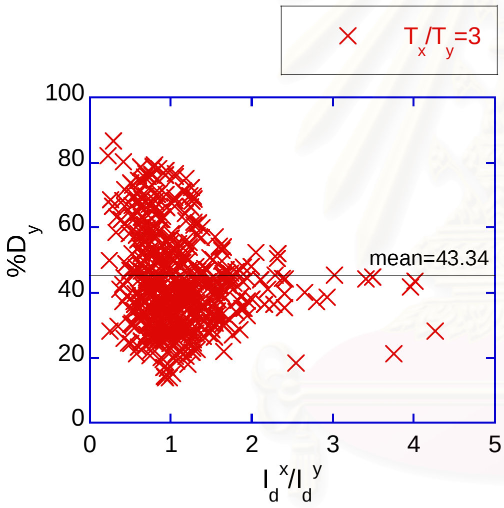
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



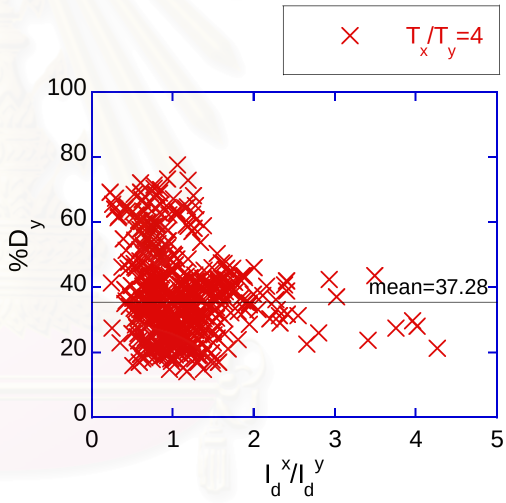
(ก) $T_x / T_y = 1$



(ข) $T_x / T_y = 2$



(ค) $T_x / T_y = 3$



(ง) $T_x / T_y = 4$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.9 ค่า $\%D_y(T_x, T_y, \frac{I_d^x}{I_d^y})$ สำหรับแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น

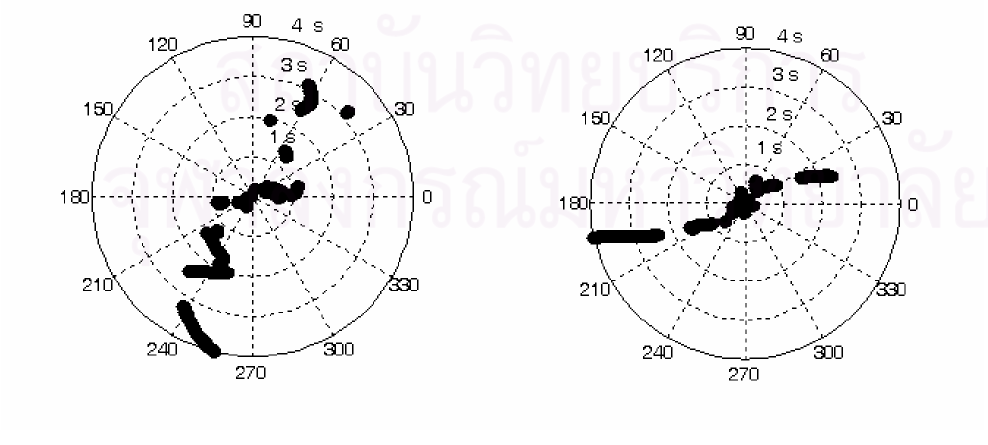
4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่

ทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีผลโดยตรงต่อการนำไปใช้คำนวณการเคลื่อนที่ในแกน x และ y เมื่อทราบค่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีที่เสนอ ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาถึงผลของคาบของโครงสร้างและมุมของคลื่นแผ่นดินไหวต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

4.3.1 มุมของคลื่นแผ่นไหว

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 มุมของคลื่นแผ่นดินไหวมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละแกน และจะแตกต่างกันไปในแต่ละคลื่นแผ่นดินไหว ซึ่งทำให้โครงสร้างมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่แตกต่างกันไป ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแสดงให้ถึงความสัมพันธ์ของความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละแกนกับทิศทางการเคลื่อนที่ โดยที่กำหนดให้คาบธรรมชาติในแกน x เท่ากับ y เพื่อพิจารณาเฉพาะผลของความรุนแรงของแผ่นดินไหว (I_d^x, I_d^y) ในแต่ละแกน

จากรูปที่ 4.10 (ก),(ข),(ค),(ง) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง โดยคาบธรรมชาติในแต่ละแกนเท่ากัน จะเห็นได้ว่าในคลื่นแผ่นดินไหวเดียวกันทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างที่เกิดผลตอบสนองมากที่สุดมีทิศทางใกล้เคียงกันโดยแตกต่างกันเล็กน้อยในแต่ละคาบธรรมชาติ ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กันอย่างเห็นได้ชัด ในรูที่ 4.10 (ง) จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้างเอียงไปในแนวแกน y เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากความรุนแรงในแกน y (I_d^y) มีค่ามากกว่าความรุนแรงในแกน x (I_d^x) มาก

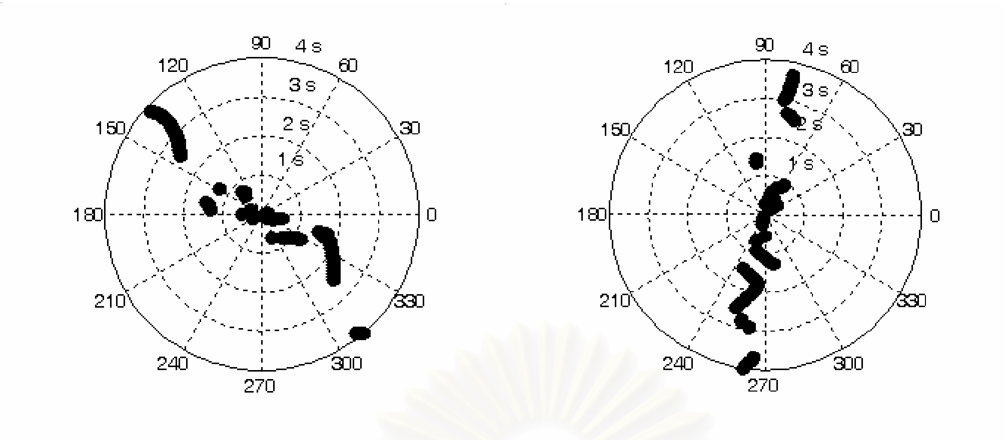


$I_d^x = 0.15, I_d^y = 0.18$ $I_d^x = 1.45, I_d^y = 0.56$

(ก) Parkfield ,Temblor 1966   (ข) San Fernando Pacoima Dam, 1971

รูปที่ 4.10 ทิศทางของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ($T_x = T_y$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



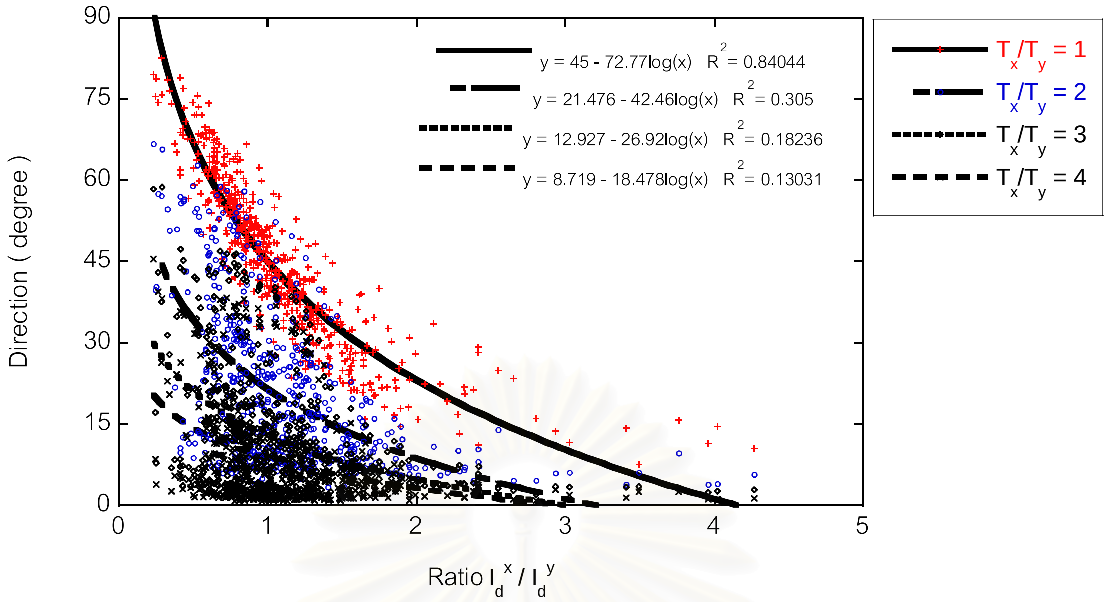
$I_d^x = 1.24, I_d^y = 1.02$ $I_d^x = 0.83, I_d^y = 2.44$

(ค) Kobe JMA,1995 (ง) Lomaprieta, LGPC,1989

รูปที่ 4.10(ต่อ) ทิศทางของการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ($T_x = T_y$)

4.3.2 คาบของโครงสร้างในแต่ละแกน

ในความเป็นจริงความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละแกนที่ตั้งฉากกันไม่เท่ากันและคาบของโครงสร้างในแต่ละแกนก็แตกต่างกันด้วย จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่กับอัตราส่วนคาบของโครงสร้างและอัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x และ y โดยหนึ่งจุดในรูปคือค่า $\alpha(T_x, T_y, I_d^x, I_d^y)$ ที่ T_x / T_y มีค่าตั้งแต่ 1-4 (โดยเฉลี่ยค่า α ที่ T_x / T_y มีค่าเท่ากัน) และที่ $\frac{I_d^x}{I_d^y}$ มีค่าใดๆ พบว่าทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับคาบของโครงสร้างและความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละแกน กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนคาบของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 1 และอัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าเท่ากับ 1 ทิศทางการเคลื่อนที่มีค่าประมาณ 45 องศา โดยเมื่ออัตราส่วนคาบของโครงสร้างหรืออัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่ามากขึ้น (มากกว่า1) ทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะเข้าใกล้แกน x มากขึ้นแปรผันตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน เมื่ออัตราส่วนคาบของโครงสร้างหรืออัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวมีค่าลดลง (น้อยกว่า 1) ทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะเข้าใกล้แกน y มากขึ้นโดยแปรผันตามอัตราส่วนที่ลดลง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่กับอัตราส่วนคาบของโครงสร้าง และอัตราส่วนความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x และ y จำนวน 30 คลื่นแผ่นดินไหว

4.4 การเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีเมื่อพิจารณาแผ่นดินไหวที่กระทำในทุกทิศทาง

จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.2 และ 4.3 เป็นการแสดงปัจจัยที่มีผลต่อสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งปัจจัยที่มีผลก็คือคาบขอโครงสร้างในแต่ละแกน และมุมของคลื่นที่กระทำกับโครงสร้างตั้งแต่ 0-180 องศา แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเฉพาะค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีเมื่อเปรียบเทียบกับทุกมุมของคลื่นแผ่นดินไหวมาเขียนเป็นสเปกตรัมหรือ $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)=\max\left|S_d^r(T_x,T_y,\theta)\right|$ ซึ่งพบว่ามุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดส่วนใหญ่เป็นมุม ๆ เดียว ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงถึงมุมของคลื่นแผ่นดินไหวว่ามุมใดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี

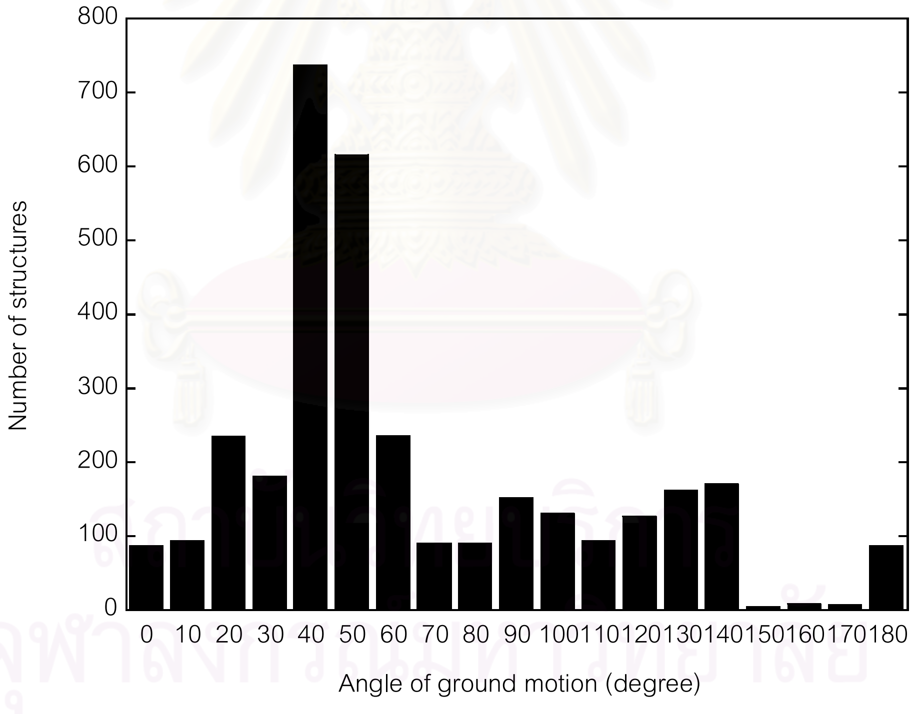
4.4.1 ตัวอย่างมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMAKobe

จากรูปที่ 4.12 แสดงมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีมากที่สุด กับจำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดที่มุมนั้น ของคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, 1995 โดยพิจารณาเฉพาะในช่วงคาบของโครงสร้างในแกน x มากกว่าแกน y $(T_x > T_y)$ ฉะนั้นจำนวนโครงสร้างทั้งหมดที่พิจารณาจะมีค่าเท่ากับ 3120 โครงสร้าง โดยที่คู่ T_x,T_y 1 คู่เท่ากับ 1 โครงสร้าง (T_x,T_y ตั้งแต่ 0.05 ถึง 4 วินาที เปลี่ยนแปลงครั้งละ 0.05 วินาทีและพิจารณาเฉพาะในช่วงคาบธรรมชาติในแกน x มากกว่าคาบธรรมชาติในแกน y เนื่องจากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมี มีความสมมาตร

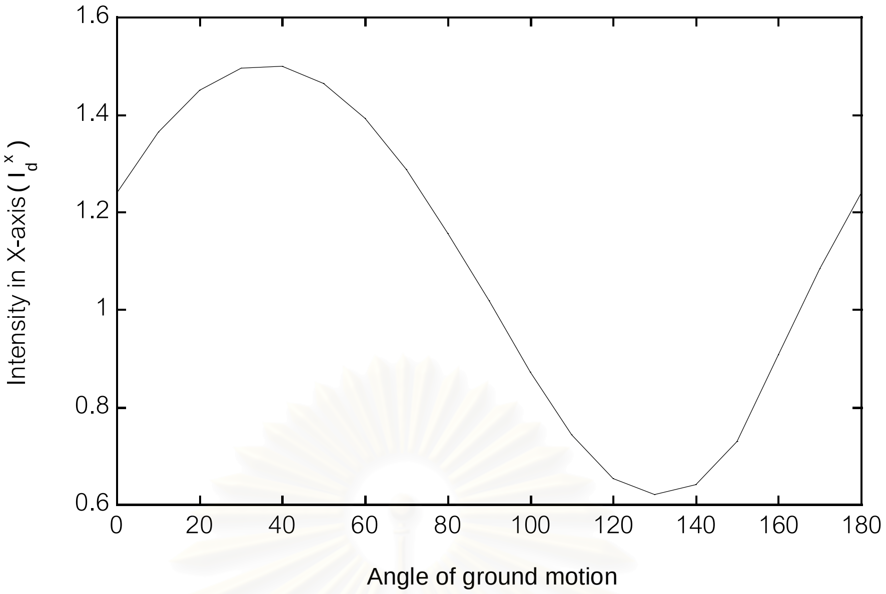
กัน) จะเห็นได้ว่าที่มุมของคลื่นแผ่นดินไหวกระทำกับโครงสร้างเท่ากับ 40 องศา เป็นมุมที่มีจำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี กล่าวคือเป็นมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดผลตอบสนองสูงสุดเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่มุมอื่น ๆ จำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีน้อยกว่าในมุมนี้

ดังนั้นจึงทำการพิจารณาสาเหตุที่ทำให้การเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมนี้เป็นส่วนใหญ่ โดยพิจารณาความรุนแรงของแผ่นดินไหว (I_d) ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการหมุนคลื่นแผ่นดินไหวไปเป็นมุม 0-180 องศา

จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x กับมุมของคลื่นแผ่นดินไหว พบว่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในแกน x มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง โดยเกิดค่าสูงสุดที่มุม 40 องศาและต่ำสุดที่ 130 องศา จะเห็นได้ว่ามุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด มีความแตกต่างกันเท่ากับ 90 องศา โดยจะมีค่าความรุนแรงเท่ากันเมื่อมุมแตกต่างกัน 180 องศา



รูปที่ 4.12 มุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุดกับจำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสดที่มุมนั้นสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe, 1995



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x กับมุมของคลื่นแผ่นดินไหว สำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA Kobe,1995

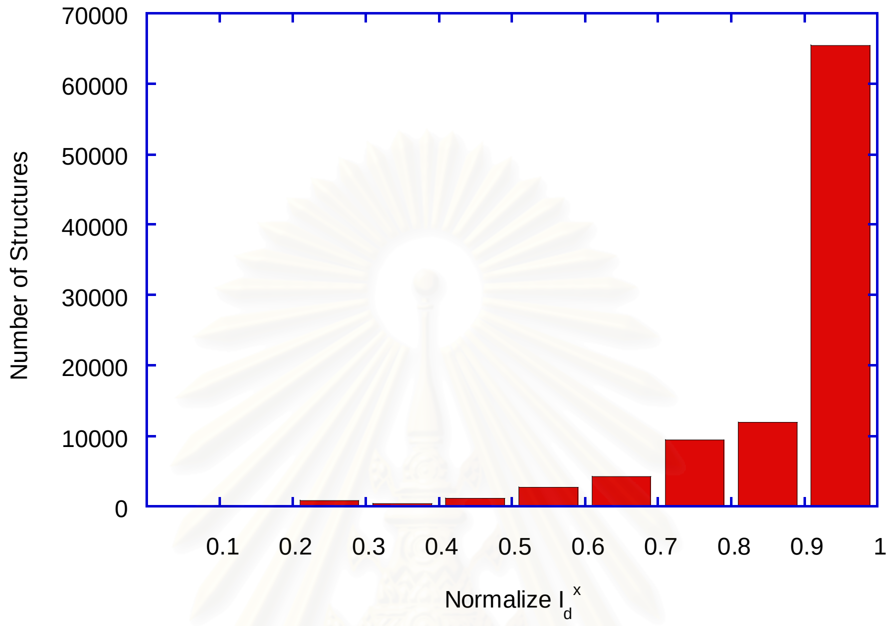
4.4.2 มุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี พิจารณาคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น

จากรูปที่ 4.12-4.13 จะเห็นได้ว่ามุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีส่วนใหญ่คือมุมที่คลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ความรุนแรงสูงสุดในแกน x (ในกรณีที่ $T_x > T_y$) ในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาเช่นเดียวกับในรูปที่ 4.12 โดยจะพิจารณาในคลื่นแผ่นดินไหวจำนวน 30 คลื่น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมของคลื่นแผ่นดินไหวกับจำนวนของโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี ซึ่งในการพิจารณาในทุกคลื่นแผ่นดินไหวเพื่อเปรียบเทียบกัน มุมของคลื่นแผ่นดินไหวจะแทนด้วยความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหว โดยปรับค่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวแต่ละคลื่น ด้วยการหารด้วยค่าความรุนแรงสูงสุดของคลื่นแผ่นดินไหวนั้น ๆ (normalize I_d^x)

จากรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีกับค่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในแกน x ในทุกคลื่นแผ่นดินไหว จำนวนโครงสร้างทั้งหมดที่พิจารณาจะเท่ากับ 3120x30=93600 โครงสร้าง จะเห็นได้ว่าจำนวนโครงสร้างมีจำนวนน้อยเมื่อความรุนแรงของคลื่นในแกน x มีน้อย และเมื่อความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแกน x มีค่ามากขึ้นจำนวนของโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีก็มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และมีจำนวนสูงสุดเมื่อความรุนแรงในแกน x สูงสุด (normalize I_d^x=1)

จากที่กล่าวมาจึงสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่คาบของโครงสร้างในแกน x มากกว่าแกน y การเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีนั้นส่วนใหญ่เกิดในมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ความรุนแรงของแผ่นดินไหว

(I_d) ในแกน x มากที่สุด ในทำนองเดียวกันกรณีที่คาบของโครงสร้างในแกน y มากกว่าแกน x การเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีส่วนใหญ่ก็จะเกิดในมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ความรุนแรง (I_d) ในแกน y มากที่สุดด้วย

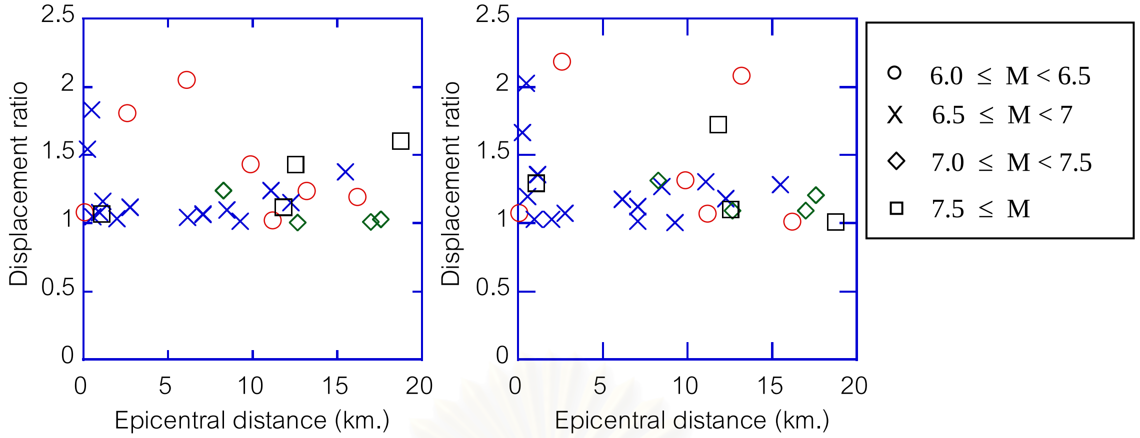


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโครงสร้างที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีกับค่าความรุนแรงของคลื่นแผ่นดินไหวในแกน x จำนวนคลื่นแผ่นดินไหว 30 คลื่น

4.5 ผลของขนาดของแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางต่อสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่

4.5.1 สเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

รูปที่ 4.15 แสดงผลจากขนาดแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับค่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ โดยขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ 6.0<M<6.5, 6.5<M<7.0, 7.0<M<7.5, 7.5<M จะเห็นได้ว่าจุดในรูปมีการกระจัดกระจาย ไม่ขึ้นกับระยะทางและขนาดของแผ่นดินไหวที่เปลี่ยนแปลงไป ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่กับขนาดของแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง

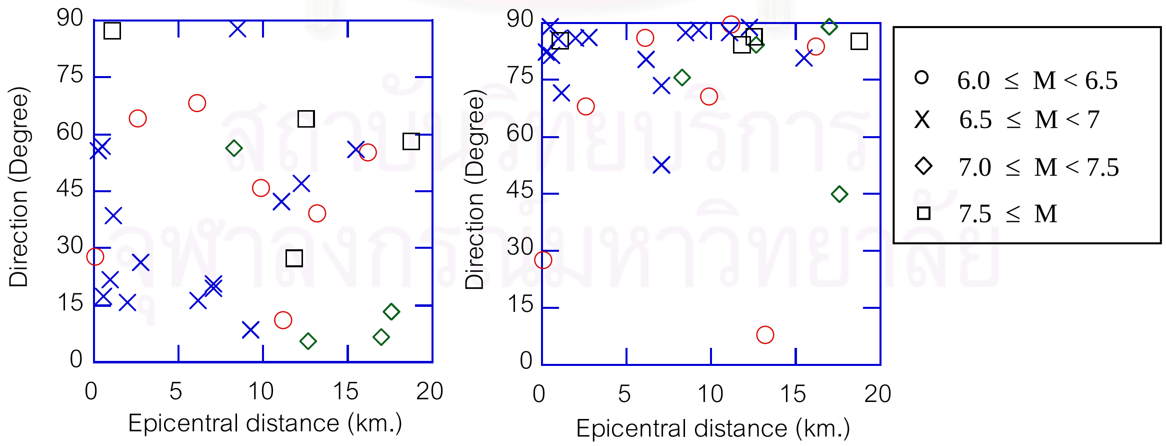


(ก) T_x =1.5 sec , T_y =1.5 sec (ข) T_x =1 sec , T_y = 2 sec

รูปที่ 4.15 ผลจากขนาดแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับค่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

4.5.2 สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง

รูปที่ 4.16 แสดงผลจากขนาดแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับทิศทางที่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุด โดยขนาดของคลื่นแผ่นดินไหวตามมาตราริกเตอร์แบ่งเป็น 4 ส่วน คือ 6.0<M<6.5, 6.5<M<7.0, 7.0<M<7.5, 7.5<M จะเห็นได้ว่าจุดในรูปมีการกระจัดกระจาย ไม่ขึ้นกับระยะทางและขนาดของแผ่นดินไหวที่เปลี่ยนแปลงไป ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางของโครงสร้างกับขนาดของแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง



(ก) T_x =1.5 sec , T_y =1.5 sec (ข) T_x =1 sec , T_y = 3 sec

รูปที่ 4.16 ผลจากขนาดแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

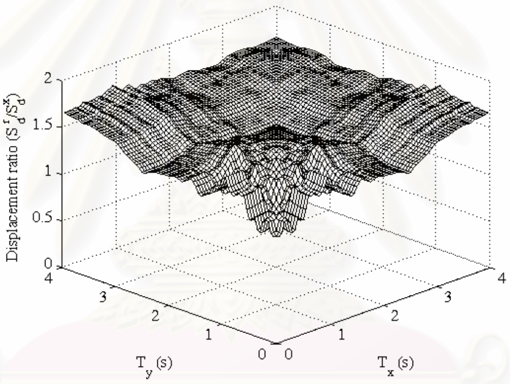
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

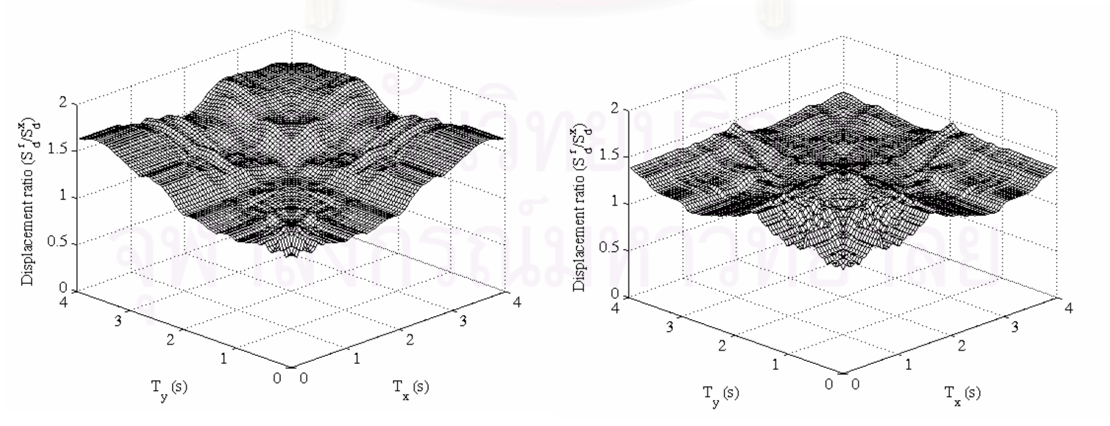
ค่าเฉลี่ยและสมการของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และทิศทางการเคลื่อนที่

5.1 ค่าเฉลี่ยและสมการของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่

ตามที่แสดงในหัวข้อที่ 4.5 ผลของขนาดของแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ ฉะนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ของโครงสร้าง โดยแบ่งตามลักษณะของชั้นดินทั้ง 3 ประเภท คือ ชั้นหิน ดินแข็งและดินอ่อน รูปที่ 5.1 แสดงค่าเฉลี่ยอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ ในลักษณะของชั้นดินแต่ละประเภท จะเห็นได้ว่ากราฟมีความสมมาตรกันรอบแกน $T_x = T_y$ และมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะของชั้นดินพอสมควร ค่าโดยประมาณที่ T_x =2 วินาที, T_y =2 วินาที ในดินแต่ละประเภทเท่ากับ 1.44, 1.25,1.3

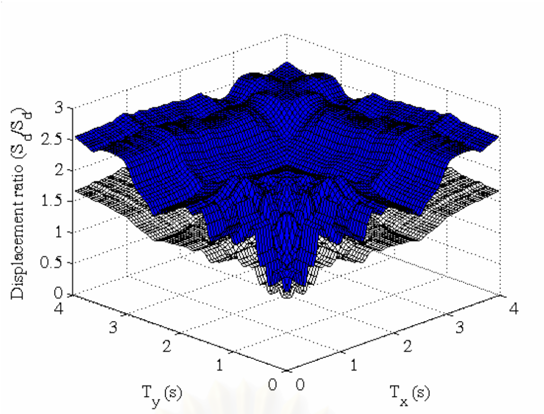


(ก) หิน

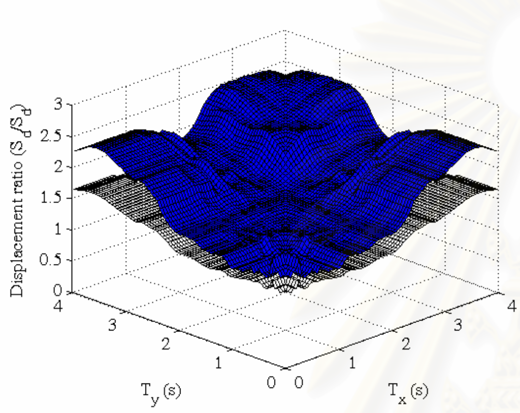


(ข) ดินแข็ง (ค) ดินอ่อน

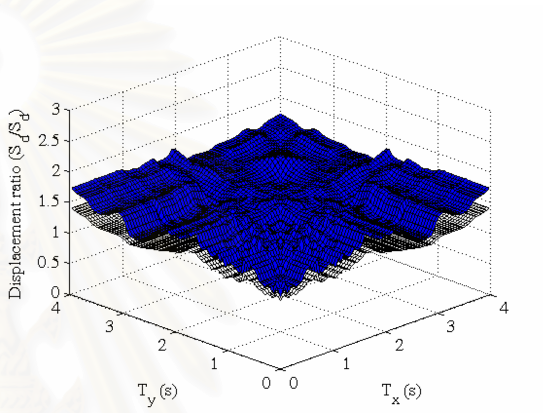
รูปที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินแต่ละประเภท



(ก) หิน



(ข) ดินแข็ง

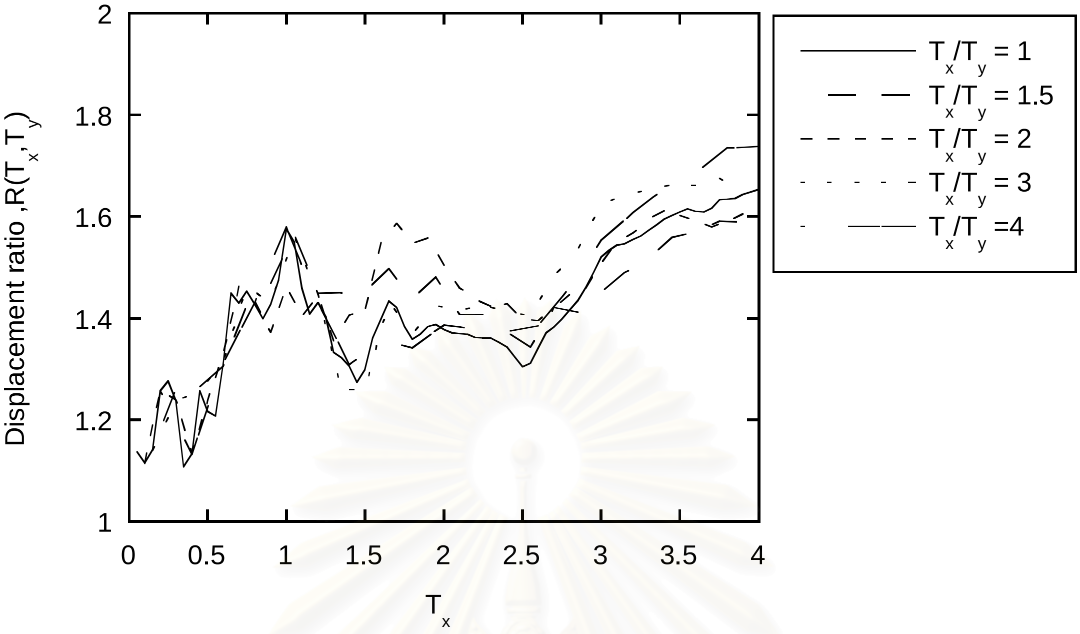


(ค) ดินอ่อน

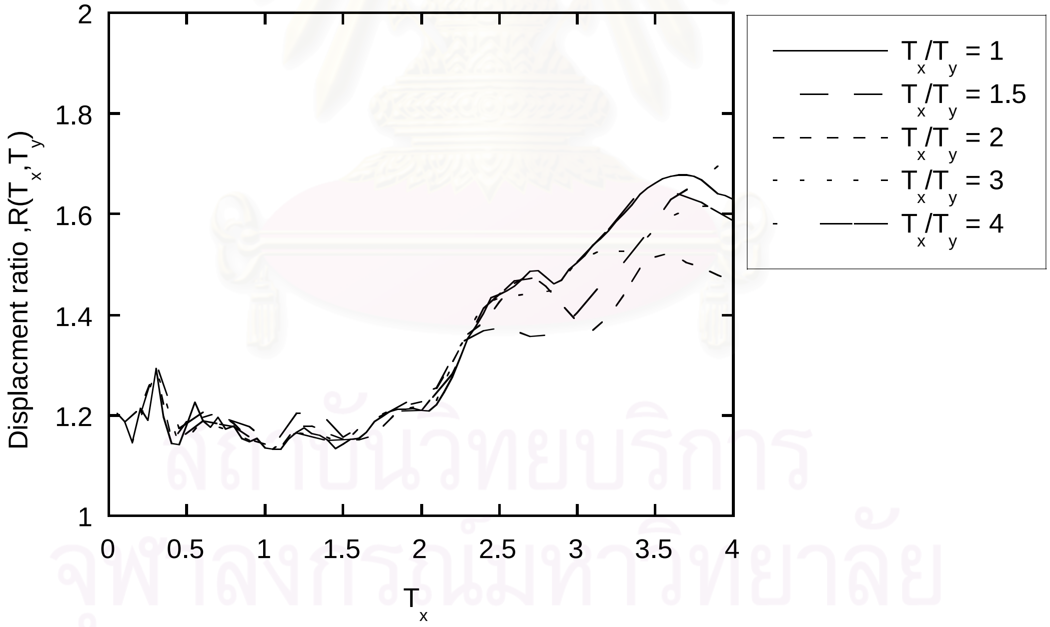
รูปที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยบวกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินแต่ละประเภท

จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยบวกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินประเภทหินมีค่ามากที่สุดตามด้วยดินแข็งและดินอ่อน ซึ่งหมายความว่าข้อมูลมีความแปรปรวนสูงในลักษณะดินประเภทหิน เนื่องจากค่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่หรือ $R(T_x, T_y)$ เป็นการนำการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีไปหารด้วยการเคลื่อนที่ในแกน x โดยที่ค่าการเคลื่อนที่ในแกนรัศมี เกิดจากการเคลื่อนที่ในแกน x และ y ซึ่งในหินสเปกตรัมในแกน x กับ y มีโอกาสแตกต่างกันได้มากที่สุดในหินตามด้วยดินแข็งและดินอ่อนดังที่แสดงในบทที่3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

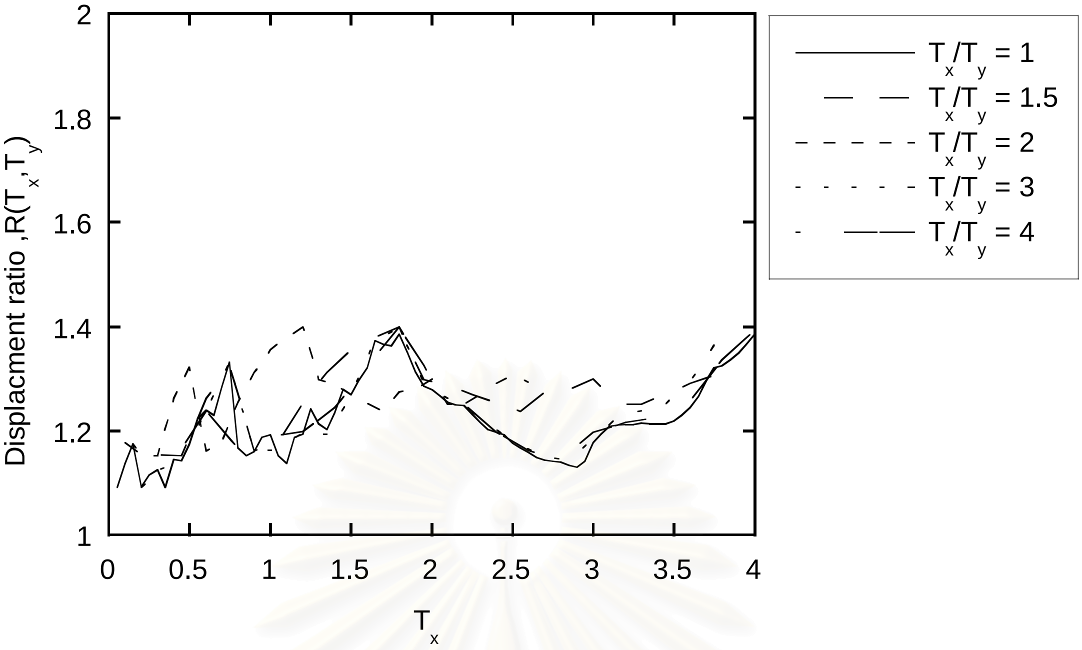


รูปที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ (หิน)



รูปที่ 5.4 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ (ดินแข็ง)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ (ดินอ่อน)

จากรูปที่ 5.3-5.5 เป็นการนำรูปที่ 5.1 มาเขียนอยู่ในรูปแบบสองมิติ โดยนำเสนอเฉพาะในช่วง $T_x > T_y$ เนื่องจากมีความสมมาตรกันรอบแกน $T_x = T_y$ จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่มีค่าสูงสุดในลักษณะดินประเภทหิน ตามด้วยดินแข็งและดินอ่อน ซึ่งลักษณะดังกล่าวอธิบายไว้ในบทที่ 3 กล่าวคือในลักษณะดินประเภทหิน สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y มีความแตกต่างกันมากกว่าในดินแข็งและดินอ่อน นั่นหมายถึงสเปกตรัมการเคลื่อนทีในแนวรัศมี ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ในแกน x และ y ก็จะมีความแตกต่างกับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x มากด้วย เช่นเดียวกันในดินอ่อนสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y มีความแตกต่างกันน้อย สเปกตรัมการเคลื่อนทีในแนวรัศมี กับสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x จึงมีค่าแตกต่างกันน้อยด้วย และจากรูปที่ 5.3-5.5 จะเห็นได้อีกว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในลักษณะดินประเภทหินและดินแข็งจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคาบของโครงสร้างในแกนx (T_x) เพิ่มสูงขึ้นด้วย อธิบายได้จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y มีความแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อคาบของโครงสร้างมีค่ามากขึ้น ซึ่งในดินอ่อนความแตกต่างดังกล่าวมีค่าน้อยเมื่อค่าคาบของโครงสร้างสูงขึ้น จึงทำให้อัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินอ่อนมีค่าเพิ่มขึ้นน้อยกว่าในหินและดินแข็งเมื่อคาบสูงขึ้น

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์กับคาบในแกน x และ y ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่กับคาบในแกน x และอัตราส่วนคาบในแกน x และ y ดังสมการที่ 5.1

$$R(T_x,\frac{T_x}{T_y},SC)=R\left(T_x,T_y,SC\right) \quad (5.1)$$

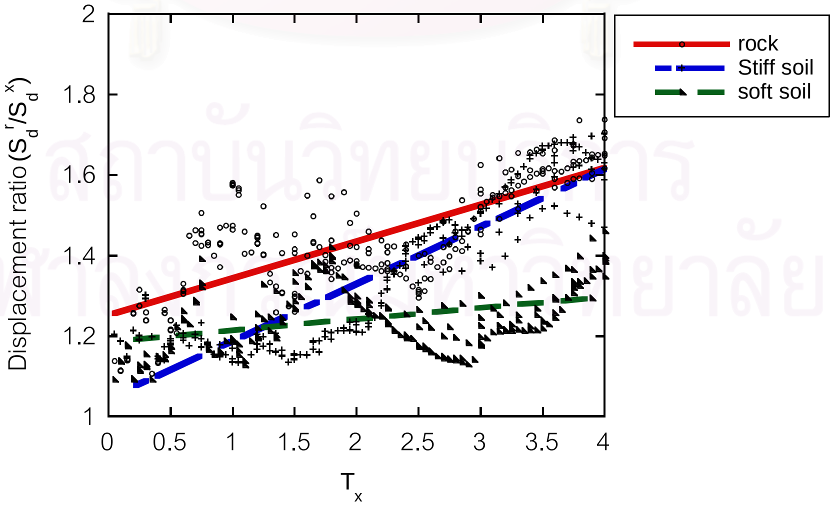
โดยที่ SC คือ ลักษณะของดินแต่ละประเภท

จากรูปที่ 5.3-5.5 จะเห็นได้ว่าที่ T_x/T_y มีค่า 1-4 ค่า $R(T_x,T_y)$ มีค่าใกล้เคียงกัน ฉะนั้นค่า $R(T_x,T_y)$ มีค่าขึ้นกับ T_x/T_y น้อยมากเนื่องจากการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีส่วนใหญ่เกิดในทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวที่มีความรุนแรงสูงสุดกระทำในแกนอ่อนและความรุนแรงต่ำสุดกระทำในแกนแข็ง ฉะนั้นตัวที่ควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีคือการเคลื่อนที่ในแกนอ่อน จึงสามารถเขียนสมการที่ 5.1 ให้อยู่ในรูปของคาบของโครงสร้างในแกน x เพียงอย่างเดียวดังสมการที่ 5.2

$$R(T_x,SC)=R(T_x,\frac{T_x}{T_y},SC) \quad (5.2)$$

จากการทำวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression analysis) โดยแบ่งตามประเภทของดินจะได้ดังสมการที่ 5.3

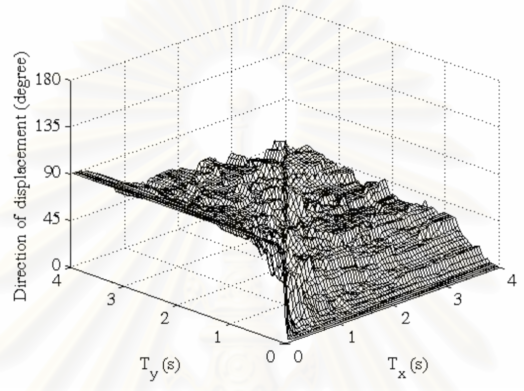
$$R(T_x,SC) \begin{cases} =1.25+0.09(T_x) & \text{สำหรับ หิน} \\ =1.04+0.15(T_x) & \text{สำหรับ ดินแข็ง} \\ =1.20+0.02(T_x) & \text{สำหรับ ดินอ่อน} \end{cases} \quad (5.3)$$



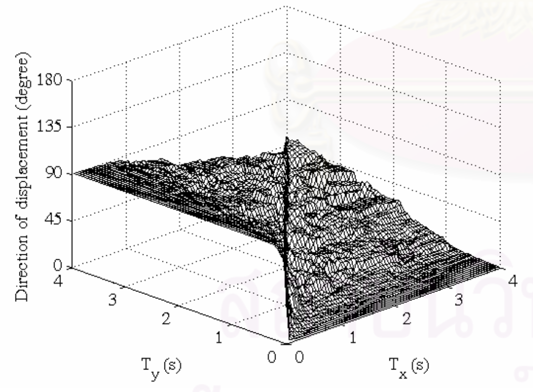
รูปที่ 5.6 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ในดินแต่ละประเภท

5.2 ค่าเฉลี่ยและสมการของทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง

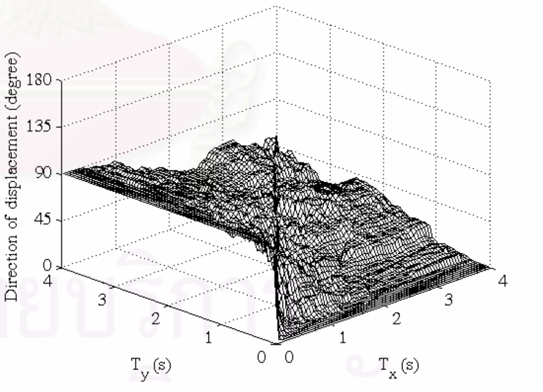
เนื่องจากผลของขนาดของแผ่นดินไหวและระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไม่มีความสัมพันธ์กับทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างอย่างเด่นชัด ฉะนั้นจึงทำการหาค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้าง ในลักษณะของชั้นดินทั้ง 3 ประเภท คือ ชั้นหิน ดินแข็งและดินอ่อน รูปที่ 5.7 แสดงค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง ในลักษณะของชั้นดินแต่ละประเภท



(ก) หิน



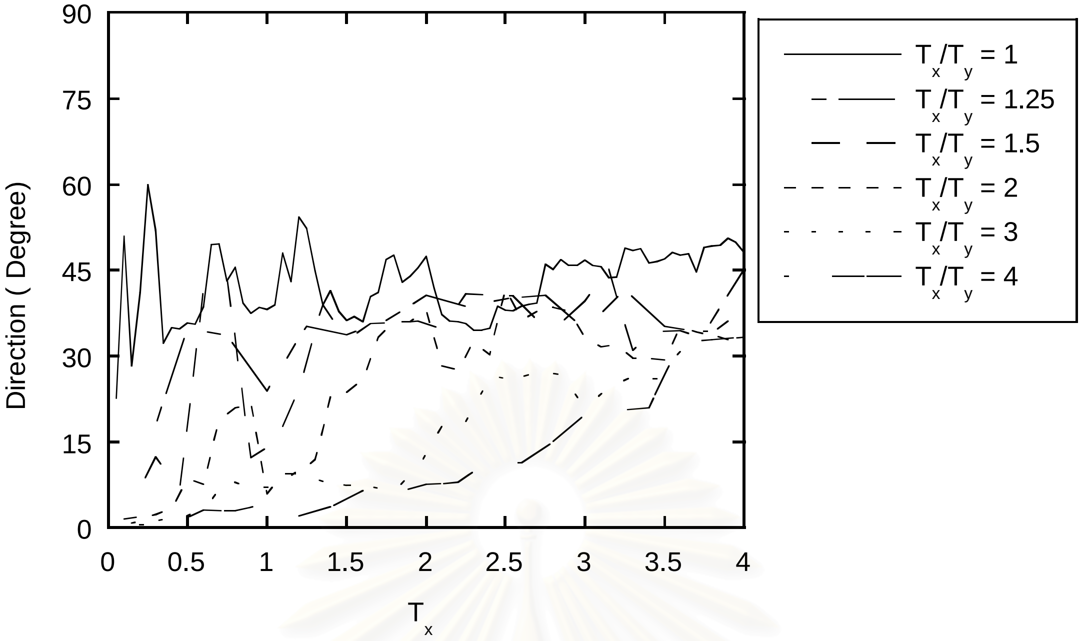
(ข) ดินแข็ง



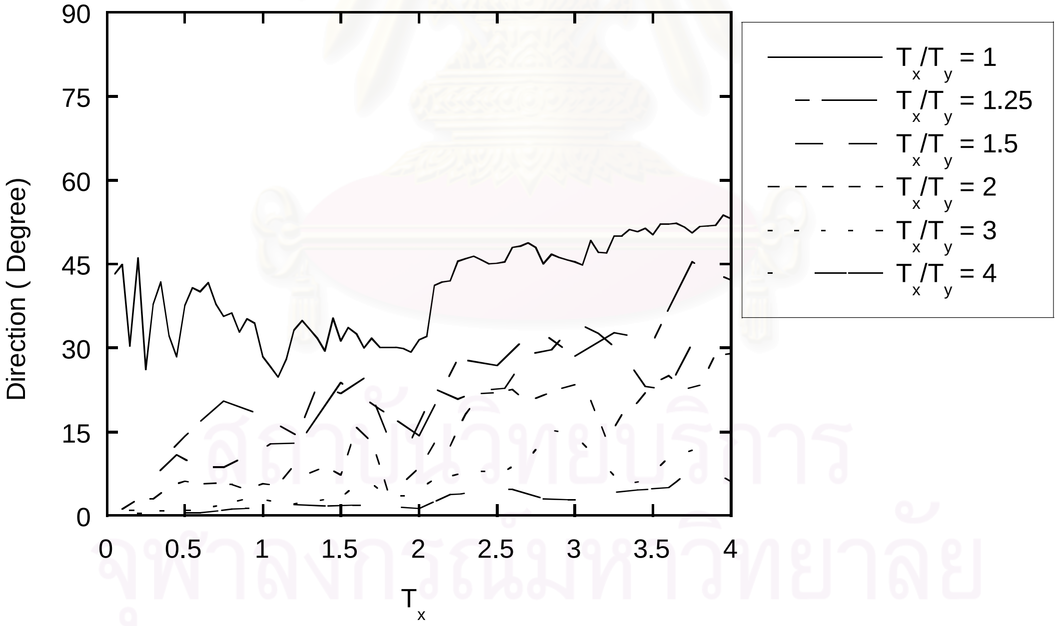
(ค) ดินอ่อน

รูปที่ 5.7 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้างในลักษณะดินแต่ละประเภท

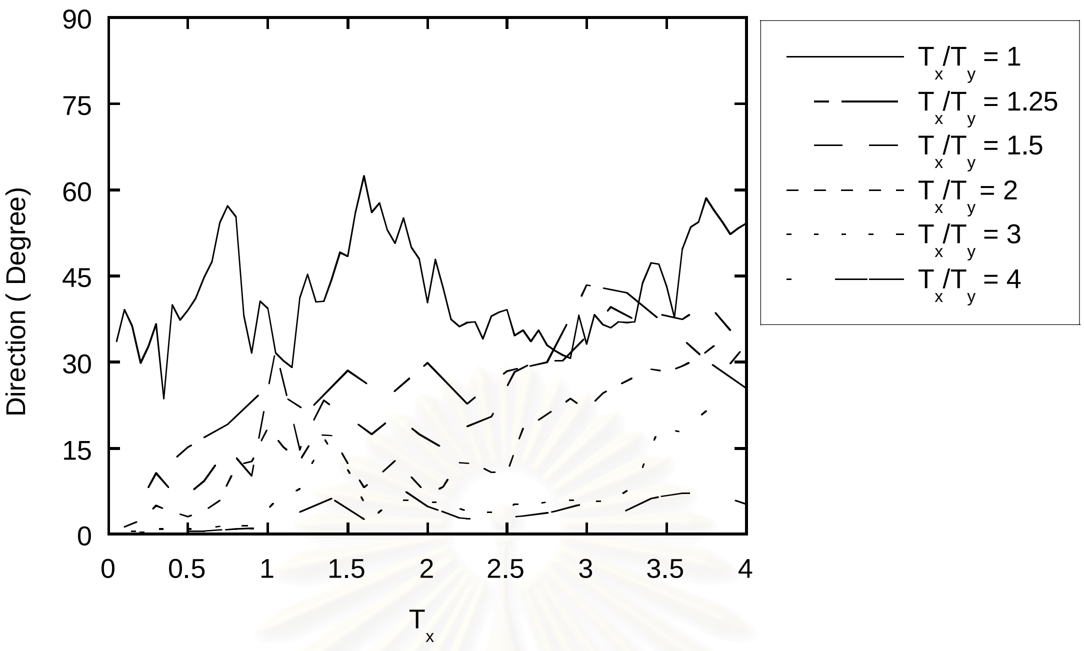
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง (หิน)



รูปที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง (ดินแข็ง)



รูปที่ 5.10 ค่าเฉลี่ยของทิศทางการเคลื่อนของโครงสร้าง (ดินอ่อน)

จากรูปที่ 5.8-5.10 แสดงค่าเฉลี่ยทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในลักษณะดินประเภทต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่มีแนวโน้มลักษณะเดียวกัน กล่าวคือเมื่ออัตราส่วนของคาบในแกน x และ แกน y (T_x/T_y) เพิ่มขึ้นมุมที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดจะเข้าใกล้ศูนย์เพิ่มขึ้นหรือโครงสร้างเอียงไปในทางแกน x มากขึ้น

ในรูปที่ 5.8 แสดงค่าเฉลี่ยทิศทางการเคลื่อนในหิน จะเห็นว่าที่เส้นค่า T_x/T_y เดียวกัน เมื่อคาบของโครงสร้างในแกน x สูงขึ้นมุมที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดจะเพิ่มขึ้นด้วย สามารถอธิบายได้ด้วยรูปที่ 3.8 (ค) จะเห็นได้ว่าสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในหิน กราฟมีความชันสูงในช่วงคาบของโครงสร้างต่ำ ($T<1$) และมีความชันต่ำลงเมื่อคาบของโครงสร้างสูงขึ้น ($T>1$) ทำให้ในช่วงคาบของโครงสร้างในแกน x ต่ำ (เช่น T_x=1, T_y=0.5, T_x/T_y= 2)ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนที่ในแกน x และ y จึงมีมาก ทิศทางการเคลื่อนที่จึงเข้าใกล้ศูนย์มาก ในขณะที่ในช่วงที่คาบของโครงสร้างในแกน x มีค่าสูง (เช่น T_x=4, T_y=2, T_x/T_y= 2) ความแตกต่างระหว่างการเคลื่อนที่ในแกน x และ y มีค่าน้อย ทิศทางการเคลื่อนที่จึงมีค่าสูงขึ้น ในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ในดินแข็งและดินอ่อนทิศทางการเคลื่อนที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับในหิน กล่าวคือที่ T_x/T_y เดียวกัน มีการเพิ่มขึ้นของทิศทางการเคลื่อนที่เมื่อคาบของโครงสร้างในแกน x เพิ่มขึ้น แต่มีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าในหิน อธิบายได้จากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในรูปที่ 3.9(ค) ในช่วงคาบต่ำ ๆ มีความชันของกราฟใกล้เคียงกับในช่วงคาบสูง ๆ

ในกรณีที่ T_x/T_y =1 ไม่ว่าแผ่นดินไหวจะเข้ามากระทำในทิศทางใดก็ตามจะได้ค่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีเท่ากันทุกมุมของคลื่นแผ่นดินไหว แต่จากรูปที่ 5.8-5.10 เป็นค่าเฉลี่ยทิศทางการเคลื่อนที่

ที่ได้จากคลื่นแผ่นดินไหวกระทำในมุม 0 องศา เพราะฉะนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างในกรณีที่ T_x/T_y =1 เมื่อทำการเฉลี่ยในทุก ๆ ทิศทางของคลื่นแผ่นดินไหวจะได้มุมเท่ากับ 45 องศา ดังนั้นในการวิเคราะห์แบบถดถอยของทิศทางการเคลื่อนที่จึงกำหนดให้ใช้ทิศทางการเคลื่อนที่ในกรณีที่ T_x/T_y =1 เท่ากับ 45 องศา สำหรับในกรณีที่ทราบความรุนแรงของแผ่นดินไหวในแต่ละแกนในสามารถหาค่าทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจากรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 5.8-5.10 จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่มีความสัมพันธ์กับ T_x และ T_y ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่กับคาบในแกน x และอัตราส่วนคาบในแกน x และ y ดังสมการที่ 5.6

$$\tilde{\alpha}(T_x,\frac{T_x}{T_y},SC)=\tilde{\alpha}\left(T_x,T_y,SC\right) \tag{5.4}$$

โดยที่ SC คือ ลักษณะของดินแต่ละประเภท

เนื่องจากกราฟมีลักษณะกระจายรอบเส้นตรง จึงทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้น (linear regression analysis) ดังแสดงในรูปที่ 5.11, 5.13 และ 5.15 โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tilde{\alpha}(T_x,\frac{T_x}{T_y},SC)=C_1T_x+C_2 \tag{5.5}$$

โดยที่ค่า C_1 และ C_2 มีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนคาบของโครงสร้าง (T_x/T_y) และลักษณะของดินแต่ละประเภท

ในการทำวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของสมการทิศทางการเคลื่อนที่มีการกำหนดขอบเขตจำกัด (boundary condition) คือ ในกรณีที่ค่า C_2 มีค่าน้อยกว่า 0 จะกำหนดให้เส้นแนวโน้มผ่านจุด 0,0 และในกรณีที่ T_x/T_y =1 กำหนดให้ C_1 =0 และ C_2 =45

รูปที่ 5.12(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x/T_y และรูปที่ 5.12(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x/T_y ในลักษณะดินประเภทหินซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 5.6 ดังนี้

หิน

$$C_1=\frac{42(\frac{T_x}{T_y}-1)}{4+(\frac{T_x}{T_y}-1)^{2.5}} \quad ; \quad C_2=\frac{1}{0.022\left(\frac{T_x}{T_y}\right)^{2.41}} \tag{5.6}$$

รูปที่ 5.14(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x/T_y และรูปที่ 5.14(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x/T_y ในลักษณะดินประเภทดินแข็งซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 5.7

ดินแข็ง

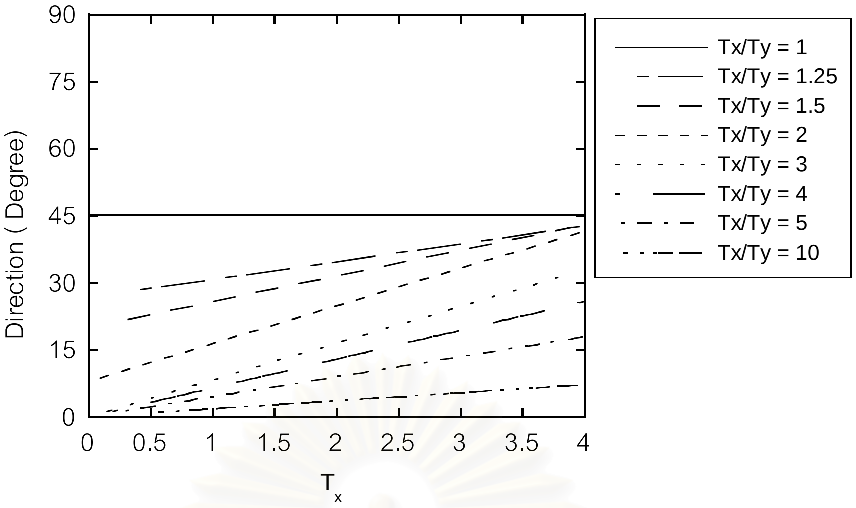
$$C_1 = \frac{91.46(\frac{T_x}{T_y} - 1)}{1.83 + 16.14(\frac{T_x}{T_y} - 1)^2} \quad ; \; C_2 = \frac{1}{0.022\left(\frac{T_x}{T_y}\right)^{7.33}} \tag{5.7}$$

รูปที่ 5.16(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y และรูปที่ 5.16(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y ในลักษณะดินประเภทดินอ่อนซึ่งสามารถเขียนแทนได้ด้วยสมการที่ 5.8

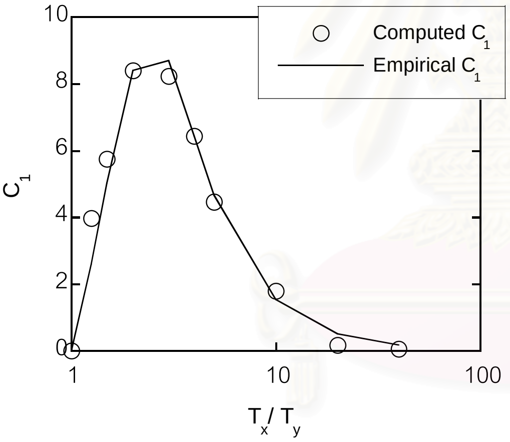
ดินอ่อน

$$C_1 = \frac{60\left(\frac{T_x}{T_y} - 1\right)}{2.43 + 5.81\left(\frac{T_x}{T_y} - 1\right)^{2.53}} \quad ; \; C_2 = \frac{1}{0.022\left(\frac{T_x}{T_y}\right)^{4.98}} \tag{5.8}$$

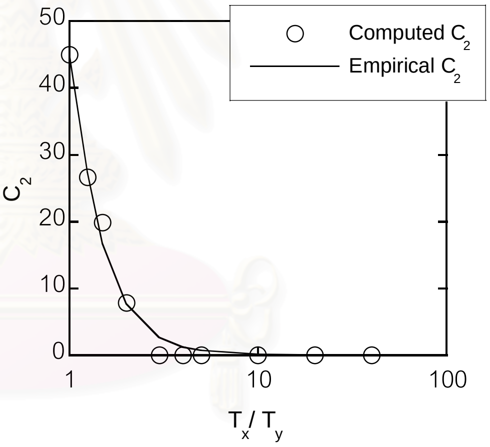
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.11 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของทิศทางการเคลื่อนที่ (หิน)

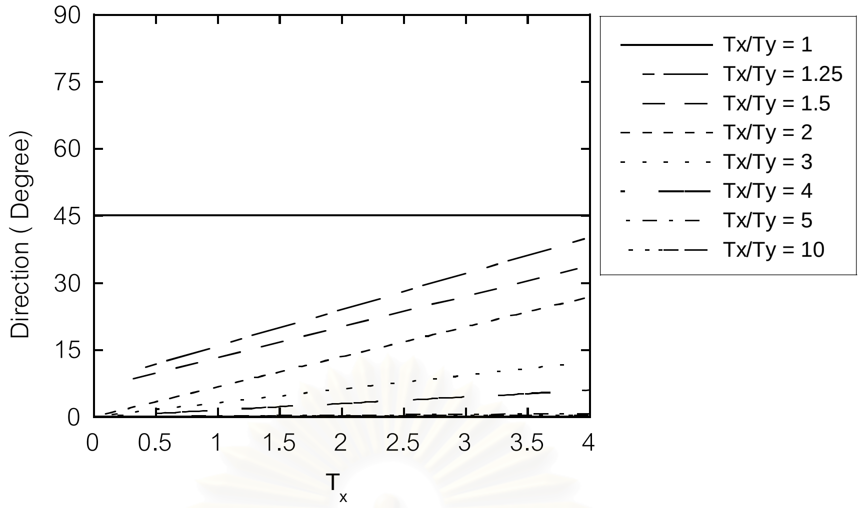


(ก) C_1 กับ T_x / T_y

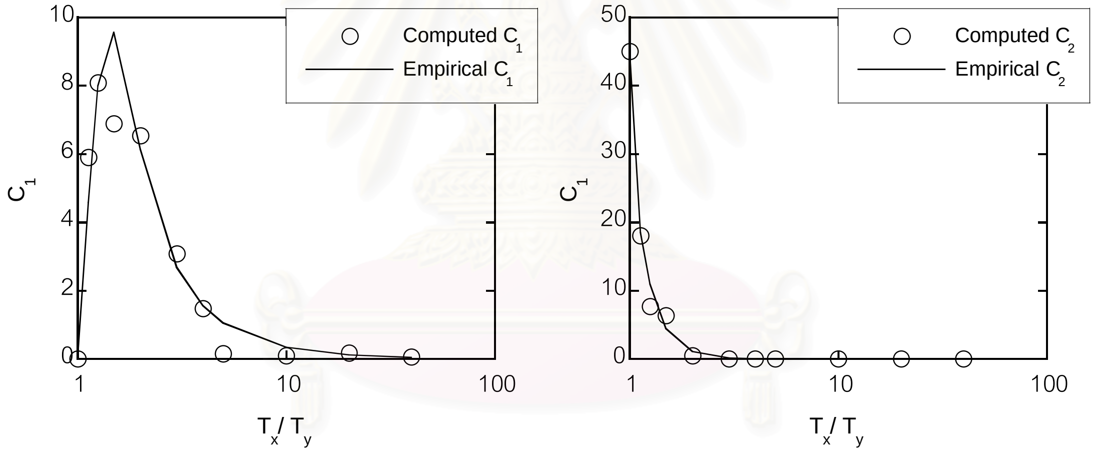


(ข) C_2 กับ T_x / T_y

รูปที่ 5.12 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y



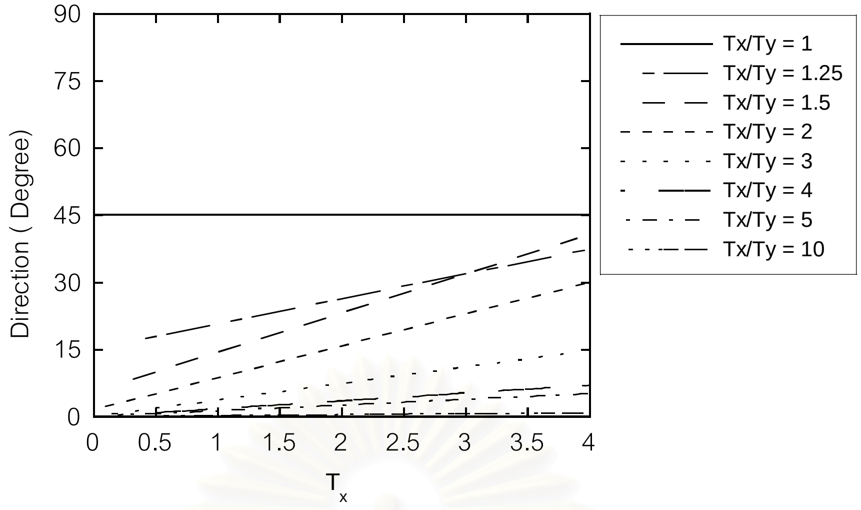
รูปที่ 5.13 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของทิศทางการเคลื่อนที่ (ดินแข็ง)



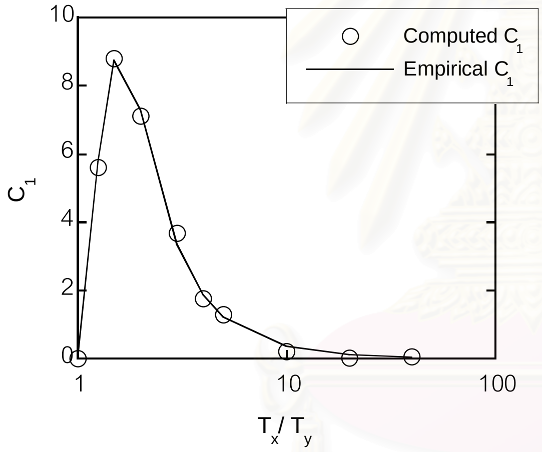
(ก) C_1 กับ T_x / T_y (ข) C_2 กับ T_x / T_y

รูปที่ 5.14 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y

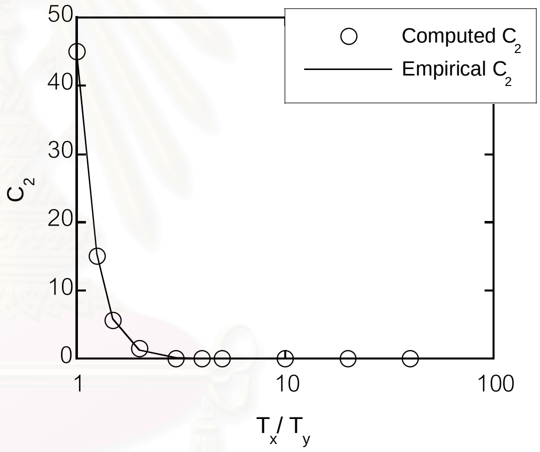
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.15 การวิเคราะห์การถดถอยแบบเชิงเส้นของทิศทางการเคลื่อนที่ (ดินอ่อน)



(ก) C_1 กับ T_x / T_y



(ข) C_2 กับ T_x / T_y

รูปที่ 5.16 (ก)ความสัมพันธ์ระหว่าง C_1 กับ T_x / T_y (ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง C_2 กับ T_x / T_y

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 การออกแบบโดยพิจารณาแผ่นดินไหว 2 ทิศทาง

5.3.1 การออกแบบโดยข้อกำหนด

ในการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวสองทิศทางพร้อมกัน ปัจจุบันในหลาย ๆ ข้อกำหนด เช่น UBC1997 , AASHTO(2002), Eurocode 8 ได้กำหนดให้คิดผลของแผ่นดินไหวอีกแกน เพิ่มไปอีก 30 % และในอีกหลาย ๆ ข้อกำหนดเช่น ATC-32 กำหนดให้พิจารณาผลของแผ่นดินไหวอีกแกนเพิ่มไปอีก 40% โดยการพิจารณาดังกล่าวแบ่งเป็น 2 กรณี ดังแสดงในสมการที่ 5.9 และ 5.10 กำหนดให้ M_x^T, M_y^T คือ โมเมนต์รอบแกน x และ y ตามลำดับ ภายใต้แรงกระทำในแนวขวาง (Transverse loading) และ M_x^L, M_y^L คือ โมเมนต์รอบแกน x และ y ตามลำดับ ภายใต้แรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal loading)

กรณีที่ 1

$$\begin{aligned} M_x &= M_x^T + 0.3M_x^L \\ M_y &= M_y^T + 0.3M_y^L \end{aligned} \qquad (5.9)$$

กรณีที่ 2

$$\begin{aligned} M_x &= 0.3M_x^T + M_x^L \\ M_y &= 0.3M_y^T + M_y^L \end{aligned} \qquad (5.10)$$

เมื่อพิจารณาในเทอมของการเคลื่อนที่และโครงสร้างสมมาตรกันทั้งสองแกนดังนั้นแรงในแกน x จะไม่ทำให้เกิดผลตอบสนองในแกน y ซึ่งการเคลื่อนที่ในแกน x และ y สามารถหาได้ดังสมการที่ 5.11 และ 5.12

กรณีที่ 1

$$\begin{aligned} D_x &= S_d(T_x) \\ D_y &= 0.3 \times S_d(T_y) \end{aligned} \qquad (5.11)$$

กรณีที่ 2

$$\begin{aligned} D_x &= 0.3 \times S_d(T_x) \\ D_y &= S_d(T_y) \end{aligned} \qquad (5.12)$$

5.3.2 การออกแบบโดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอ

ในการออกแบบโดยใช้สเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอจะแตกต่างกับการออกแบบจากข้อกำหนดตรงที่การคำนวณการเคลื่อนที่ในแกน x และ y จะคำนวณจากสเปกตรัมอัตราส่วน $R(T_x,T_y)$ และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 5.13 ซึ่งคล้ายกับเป็นการนำค่าการเคลื่อนที่ในแกน x ที่ได้จากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของข้อกำหนดมาทำการปรับค่าด้วยค่า $R(T_x,T_y)$ และ $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ เพื่อพิจารณาผลของแผ่นดินไหวในทุกทิศทางและคาบของโครงสร้างในแต่ละแกนที่ไม่เท่ากัน

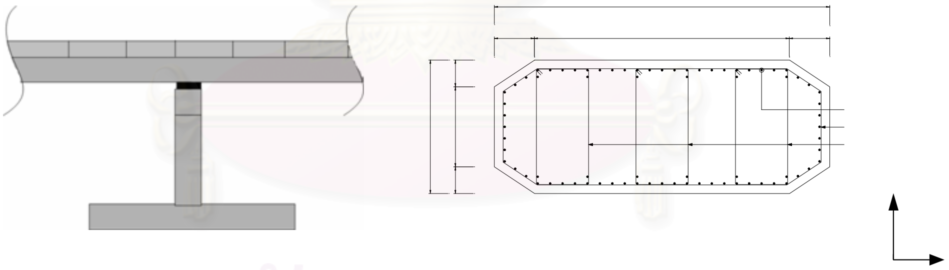
$$\begin{aligned} D_x^{RSBD} &= R(T_x,T_y)\times S_d(T_x)\times\cos\tilde{\alpha}(T_x,T_y) \\ D_y^{RSBD} &= R(T_x,T_y)\times S_d(T_x)\times\sin\tilde{\alpha}(T_x,T_y) \end{aligned} \tag{5.13}$$

โดยที่ $R(T_x,T_y)$ ได้จากสมการอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ สมการที่ (5.3)-(5.5)

$\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ ได้จากสมการทิศทางการเคลื่อนที่ สมการที่ (5.7)-(5.10)

$S_d(T_x)$ คือสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่

5.3.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ในการออกแบบเสาสะพานภายใต้แผ่นดินไหวกระทำ 2 ทิศทาง



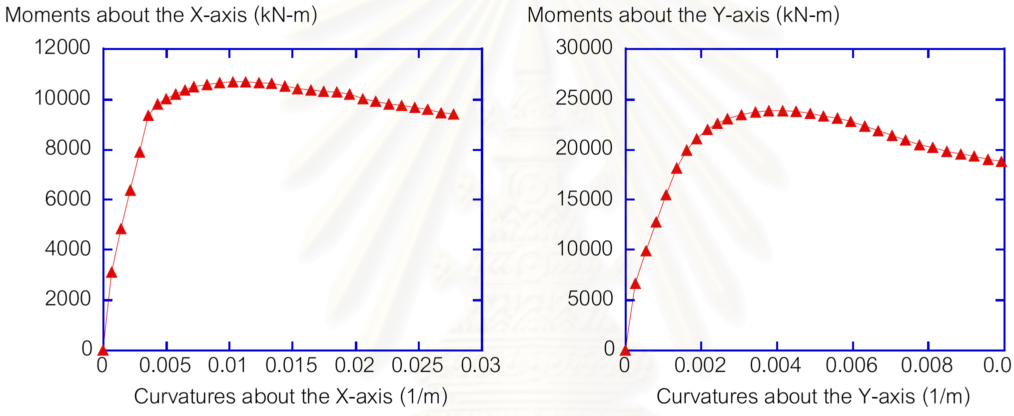
(ก) รูปตามยาวของสะพาน (ข) หน้าตัดของเสาสะพาน

รูปที่ 5.17 สะพานตัวอย่างในการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว

รูปที่ 5.17 แสดงภาพตัดขวางของสะพานต่อเนื่องหลายช่วง โดยมีความสูงเท่ากับ 12 เมตร และสมมติว่าฐานรากเป็นจุดยึดแน่นโดยเสาได้รับการออกแบบมาแล้วจากสภาวะการรับแรงประเภทต่าง ๆ ที่ไม่รวมแผ่นดินไหว โดยเสามีขนาดหน้าตัดและเหล็กเสริมดังแสดงในรูปที่ 5.17(ข) และโครงสร้างตั้งอยู่ในลักษณะของดินประเภทดินอ่อน จากนั้นได้ทำการออกแบบต้านทานแผ่นดินไหวของสะพานโดยขั้นตอนดังนี้

1. มวลของโครงสร้างที่จำลองเท่ากับมวลของคานบวกกับมวลของเสา 8456 kN

2. การหาค่าสติฟเนสประสิทธิผลของหน้าตัด, EI หาได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งของหน้าตัดที่โคนเสาภายใต้แรงอัดในแนวแกนเท่ากับน้ำหนักบรรทุกของสะพาน ในการวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม XTRACT วิเคราะห์หน้าตัดของโครงสร้างเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับการเปลี่ยนแปลงความโค้ง (Moment-Curvature) โดยจำลองพฤติกรรมของวัสดุออกเป็น 3 ส่วนคือ คอนกรีตที่มีการโอบรัด คอนกรีตที่ไม่มีการโอบรัด เหล็ก โดยพฤติกรรมของวัสดุอธิบายด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดัดกับความเครียดทางวัสดุของคอนกรีตและเหล็กเสริม จากนั้นนำค่าโมเมนต์และค่าการเปลี่ยนแปลงความโค้งของหน้าตัด มาคำนวนหาสติฟเนสประสิทธิผลดังแสดงในรูปที่ 5.18 (ก) และ (ข) จะได้ค่า EI แกน x เท่ากับ 2593568 kN-m^2 และ EI แกน y เท่ากับ 15730286 kN-m^2



(ก) แกน x (ข) แกน y

รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับการเปลี่ยนแปลงความโค้งจากโปรแกรม XTRACT

ดังนั้นจะสามารถหาค่าสติฟเนสของเสาในแกน x และ y ได้ดังนี้

$$K_x = \frac{12EI}{h^3} = \frac{12 \times 2593568}{12^3} = 18011 \text{ kN-m}$$

$$K_y = \frac{3EI}{h^3} = \frac{3 \times 15730286}{12^3} = 27310 \text{ kN-m}$$

3. คำนวณหาคาบของโครงสร้างในแกน x และ y

$$T_x = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_x}} = 1.37 \text{ s}$$

$$T_y = 2\pi\sqrt{\frac{M}{K_y}} = 1.11 \text{ s}$$

4. คำนวณค่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจากสเปกตรัมผลตอบอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ที่เสนอ (สมการที่ 5.3) และสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่จากข้อกำหนด (AASHTO article 3.6, 1996)

$$R(T_x, T_y) = 1.20 + 0.02 \times T_x = 1.20 + 0.02 \times 1.37 = 1.23$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$S_d^{code}(T_x)=\frac{1.2AS}{T^{2/3}}\left(\frac{1}{\omega^2}\right)g=\frac{1.2\times0.15\times2.0}{1.37^{2/3}}\times\frac{1}{\left(\frac{2\pi}{1.37}\right)^2}\times9.81=0.14\text{ m}$$

เพราะฉะนั้นจะได้การเคลื่อนที่ในแนวรัศมี $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)=1.23\times0.14=0.17$ m

5. คำนวณหาทิศทางของค่าการเคลื่อนที่ในแนวรัศมี $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ จากสมการทิศทางการเคลื่อนที่ที่เสนอ (สมการที่ 5.5 และ 5.8)

แทนค่า T_x,T_y ในสมการที่ 5.8 จะได้ดังนี้

$$C_1=\frac{60\left(\frac{T_x}{T_y}-1\right)}{2.43+5.81\left(\frac{T_x}{T_y}-1\right)^{2.53}}=5.45\ ;\ C_2=\frac{1}{0.022\left(\frac{T_x}{T_y}\right)^{4.98}}=15.93$$

$\tilde{\alpha}(T_x,T_y)=C_1T_x+C_2=23.40$ องศา

6. คำนวณการเคลื่อนที่ในการ x และ y โดยการแตกค่าการเคลื่อนที่มากที่สุดในแนวรัศมีลงบนแกน x และ y

การเคลื่อนที่ในแกน x = $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)\cos\tilde{\alpha}(T_x,T_y)=0.16$ m

การเคลื่อนที่ในแกน y = $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)\sin\tilde{\alpha}(T_x,T_y)=0.07$ m

7. คำนวณแรงด้านข้างจากการเคลื่อนที่ในแกน X และ Y และคำนวณโมเมนต์ดัดในแต่ละแกนและลดแรงเนื่องจากพฤติกรรมไม่เชิงเส้น R=3 สำหรับการออกแบบเสาเดี่ยว

$V_x=\frac{18011\times0.16}{3}=961$ kN

$V_y=\frac{27310\times0.07}{3}=637$ kN

$M_x=961\times12=11532$ kN-m

$M_y=637\times12=7644$ kN-m

8. คำนวณแรงด้านข้างจากข้อกำหนด จะได้ $S_d^{code}(T_x)=0.14$ m $S_d^{code}(T_y)=0.10$ m และพิจารณาผลของโมเมนต์ในอีกแกนเท่ากับ 30 % จะได้การเคลื่อนที่แกน x และ y ดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาแรงในแกน x 100% และแรงในแกน y 30%

$V_x=\frac{18011\times0.14}{3}=841$ kN

$$V_y = \frac{27310 \times 0.3(0.10)}{3} = 273 \text{ kN}$$

$$M_x = 841 \times 12 = 10092 \qquad \text{kN-m}$$

$$M_y = 273 \times 12 = 3276 \qquad \text{kN-m}$$

กรณีที่ 2 พิจารณาแรงในแกน x 30% และแรงในแกน y 100%

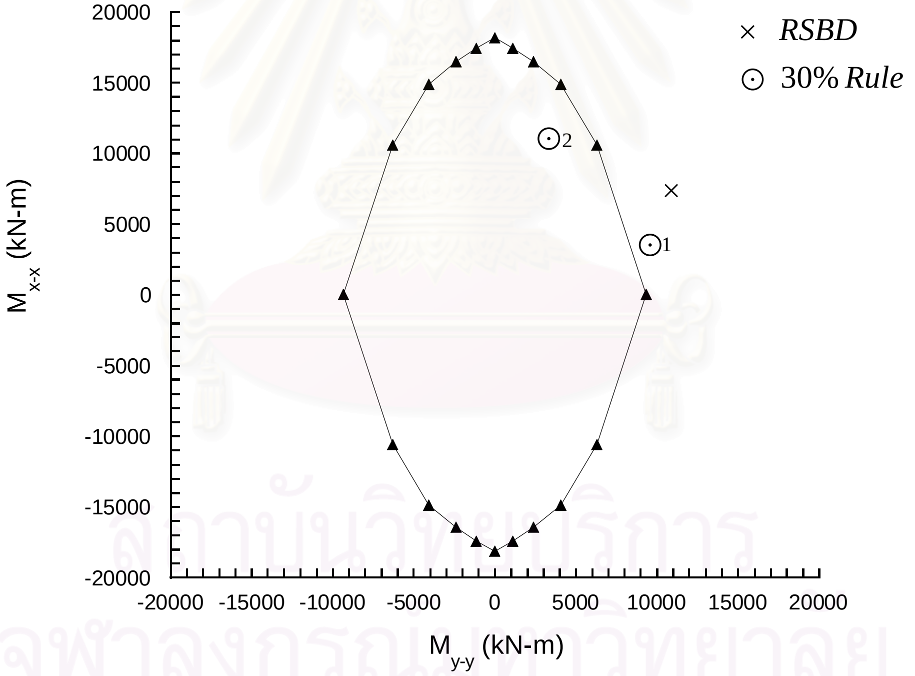
$$V_x = \frac{18011 \times 0.3(0.14)}{3} = 252 \text{ kN}$$

$$V_y = \frac{27310 \times 0.10}{3} = 910 \qquad \text{kN}$$

$$M_x = 252 \times 12 = 3024 \qquad \text{kN-m}$$

$$M_y = 910 \times 12 = 10920 \qquad \text{kN-m}$$

9. ตรวจสอบโมเมนต์ดัดด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดในทั้งสองแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Interaction diagram)



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดและโมเมนต์ดัดในทั้งสองแกนของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก (Interaction diagram) โดยที่ $M_{x\text{-}x}$ คือ โมเมนต์รอบแกน x

จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอมีค่ามากกว่าการพิจารณาโดยสเปกตรัมผลตอบสนองที่ได้จากข้อกำหนด โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากข้อกำหนดในแกน x ค่าโมเมนต์ที่ได้ (11532 kN-m) มีค่ามากกว่าค่าโมเมนต์ทั้งจากกรณีที่ 1 (10092 kN-m) และกรณีที่ 2

(3024 kN-m) ขณะที่ในแกน y ค่าโมเมนต์ที่ได้ (7644 kN-m) มีค่ามากกว่าในกรณีที่ 1 (3276 kN-m) แต่น้อยกว่าในกรณีที่ 2 (10920 kN-m) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าในแกน x หรือแกนที่มีคาบธรรมชาติมากกว่าควรที่จะพิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนในแกน y ค่าโมเมนต์ที่ได้มีทั้งมากกว่าและน้อยกว่า ซึ่งยังไม่ชัดเจนแต่ถ้าพิจารณาด้วยเส้นกำลังของหน้าตัดจะเห็นได้ว่าสเปกตรัมที่เสนอค่าโมเมนต์ที่ได้จะอยู่นอกเส้นกำลังของหน้าตัดมากกว่าค่าโมเมนต์ที่วิเคราะห์ตามข้อกำหนด อย่างไรก็ตามสะพานที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างเป็นเสาสะพานที่ไม่ได้ออกแบบต้านทานแผ่นดินไหว จึงจะเห็นได้ว่าโมเมนต์ที่โคนเสามีค่ามากกว่ากำลังของหน้าตัด ทั้งในกรณีของค่าที่ได้จากสเปกตรัมที่เสนอและจากข้อกำหนดในกรณีที่ 1

5.4 การเปรียบเทียบผลกับข้อกำหนด

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดโดยทำการเปรียบเทียบด้วยการเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y ที่ได้จากข้อกำหนดกับที่ได้จากสเปกตรัมที่เสนอ โดยมีวิธีการดังนี้

- ข้อกำหนด

$$D_x = S_d(T_x)$$
$$D_y = S_d(T_y)$$

โดยสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในการเปรียบเทียบนี้ได้ใช้สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของ Bommer(1999) เพราะได้มีการพัฒนาโดยคำนึงถึงแผ่นดินไหวระยะใกล้ด้วย

- สเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอ

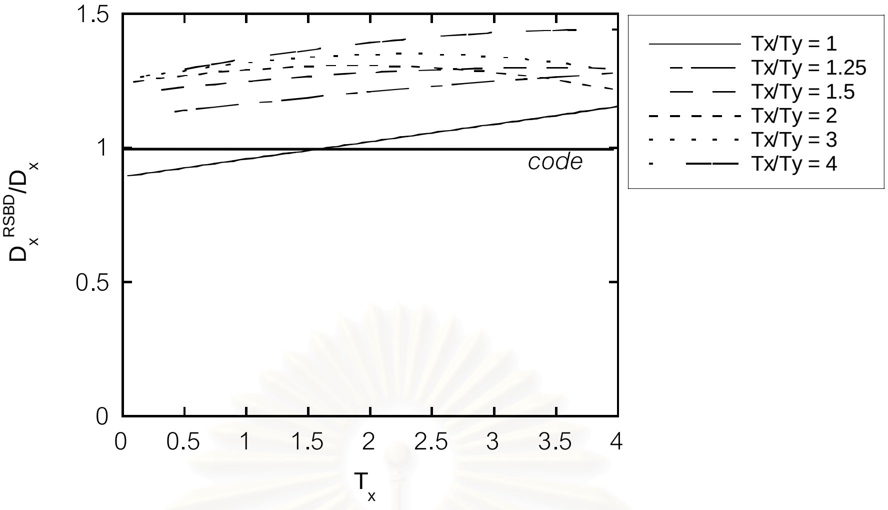
$$D_x^{RSBD} = R(T_x,T_y) \times S_d(T_x) \times \cos\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$$
$$D_y^{RSBD} = R(T_x,T_y) \times S_d(T_x) \times \sin\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$$

โดยที่ $R(T_x,T_y)$ ได้จากสมการอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ สมการที่ (5.3)-(5.5)

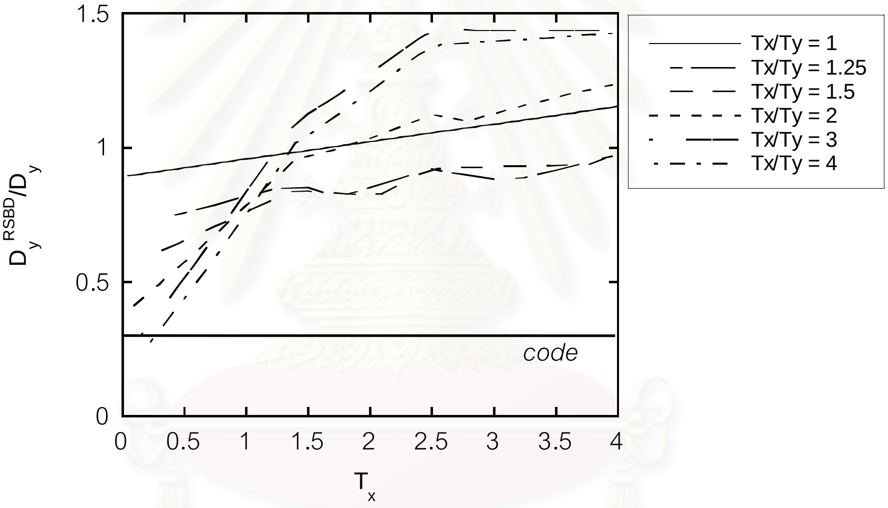
$\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$ ได้จากสมการทิศทางการเคลื่อนที่ สมการที่ (5.7)-(5.10)

$S_d(T_x)$ คือสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของ Bommer(1999)

จะเห็นได้ว่าเมื่อทราบค่าคาบของโครงสร้างในแต่ละแกน (T_x,T_y) และสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกนเดียวก็จะสามารถคำนวณการเคลื่อนที่ในแกน x และ y ได้ โดยในการเปรียบเทียบได้ทำการเปรียบเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าการเคลื่อนที่จากสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอกับการเคลื่อนที่จากข้อกำหนด ($\frac{D_x^{RSBD}}{D_x}$ และ $\frac{D_y^{RSBD}}{D_y}$) ที่คาบของโครงสร้างมีค่าต่าง ๆ กัน โดยแปรผัน ตั้งแต่ 0-4 วินาที แสดงดังรูปที่ 5.20-5.22

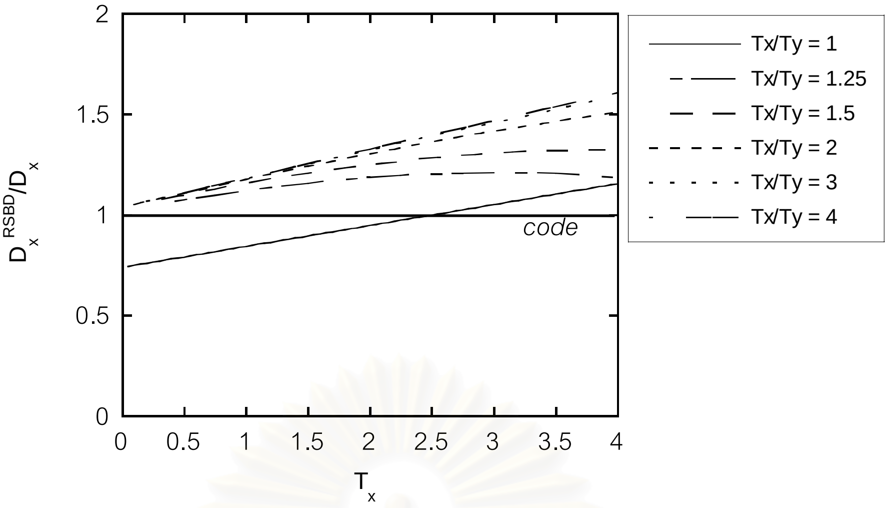


(ก) การเคลื่อนที่ในแกน x

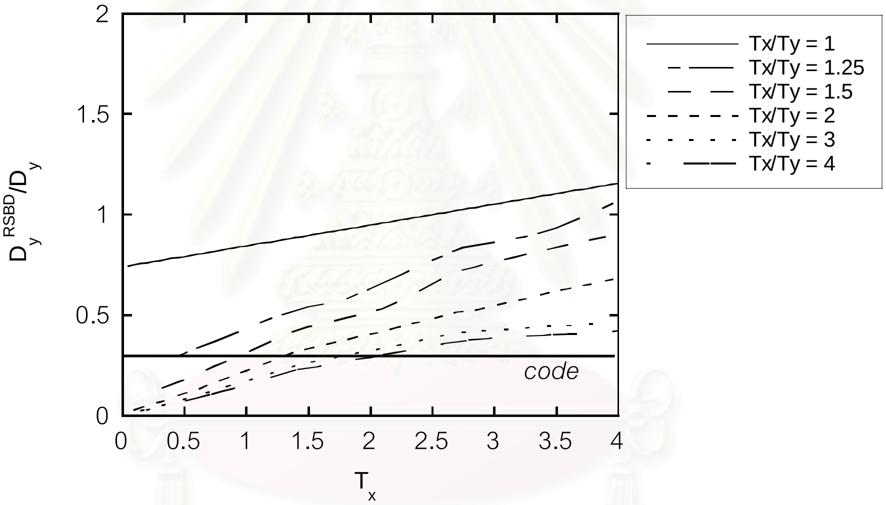


(ข) การเคลื่อนที่ในแกน y

รูปที่ 5.20 เปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จากข้อกำหนด (หิน)

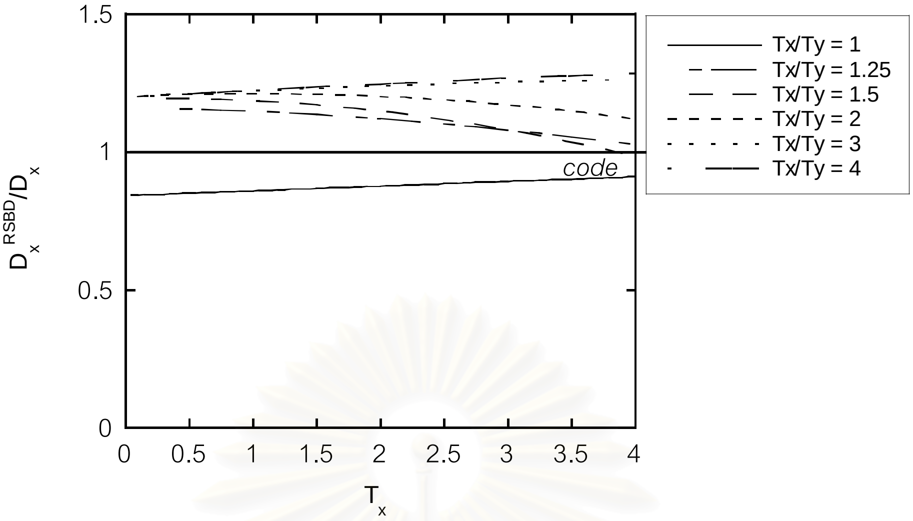


(ก) การเคลื่อนที่ในแกน x

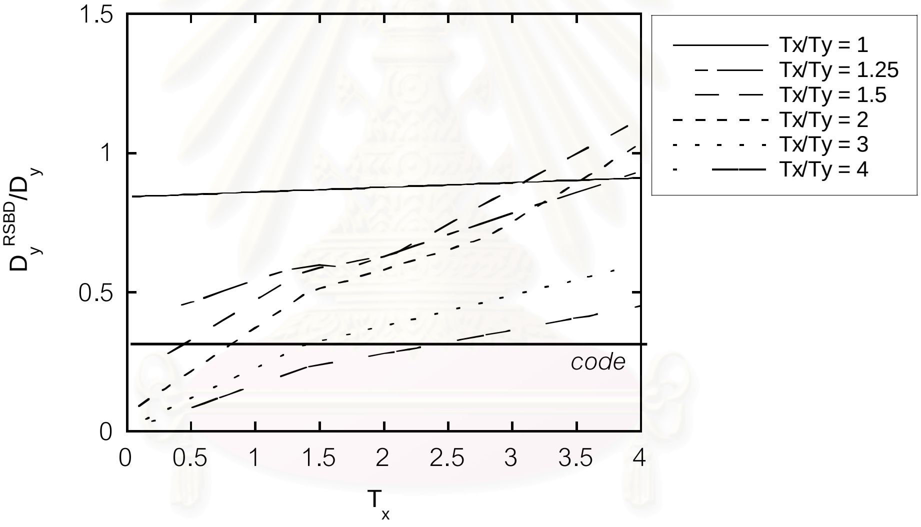


(ข) การเคลื่อนที่ในแกน y

รูปที่ 5.21 เปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จากข้อกำหนด (ดินแข็ง)



(ก) การเคลื่อนที่ในแกน x



(ข) การเคลื่อนที่ในแกน y

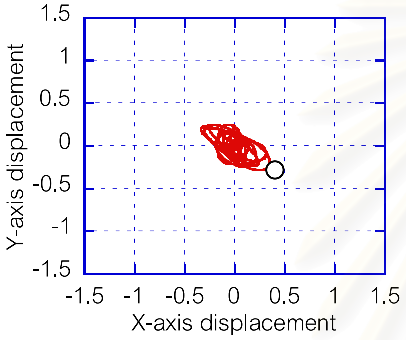
รูปที่ 5.22 เปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จากข้อกำหนด (ดินอ่อน)

รูปที่ 5.20-5.22 แสดงการเปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จากข้อกำหนด จะเห็นได้ว่าในแกน x การพิจารณาด้วยสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอจะให้ผลมากกว่าข้อกำหนด(100%) ในทุกอัตราส่วนของคาบของโครงสร้าง (T_x/T_y) เนื่องจากพิจารณาผลของทิศทางของแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างในทุกทิศทาง ค่า $\dfrac{D_x^{RSBD}}{D_x}$ จึงมีค่ามากกว่า 1 โดยจะมีค่ามากขึ้นเมื่อ T_x/T_y มีค่ามากขึ้น เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่จะเข้าใกล้แกน x มากขึ้น ในทางกลับกันในแกน y การพิจารณาด้วยสเปกตรัมผลตอบสนองจะให้ค่าทั้งมากกว่าและน้อยกว่าข้อกำหนด(30%) โดยค่า $\dfrac{D_y^{RSBD}}{D_y}$ มีค่าลดลงเมื่อค่า T_x/T_y ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่เข้าใกล้แกน x มากขึ้น การเคลื่อนที่ในแกน y จึงน้อยลง (โดยได้แสดงตัวอย่างในหัวข้อที่ 5.4.1) และ $\dfrac{D_y^{RSBD}}{D_y}$ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ T_x เพิ่มขึ้นเนื่องจาก $\tilde{\alpha}$ เพิ่มขึ้นตามค่า T_x ซึ่งสาเหตุที่ $\tilde{\alpha}$ เพิ่มขึ้นตามค่า T_x ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 5.2 จากทุกประเภทของดินจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ในแกน x, y เมื่อพิจารณาด้วยสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอให้ค่ามากกว่าการพิจารณาแบบแกนเดียวอิสระต่อกัน เนื่องจากสเปกตรัมที่เสนอได้พิจารณาผลของแผ่นดินไหวกระทำในทุกทิศทางด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าในดินประเภทหินจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมากในการเคลื่อนที่ในแกน y ในรูปที่ 5.20ข เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในลักษณะดินประเภทหิน เมื่อพิจารณาที่สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่แล้วมีความแตกต่างกับของ Bommer เป็นอย่างมากในด้านของรูปร่างของสเปกตรัม กล่าวคือคลื่นที่ใช้มีคาบเด่นของสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่อยู่ในช่วงคาบประมาณ 1-2 วินาที ในขณะที่สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของ Bommer ค่าการเคลื่อนที่จะสูงขึ้นเมื่อคาบสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่า R และ $\tilde{\alpha}$ ทำให้เกิดความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก (โดยได้แสดงตัวอย่างประกอบในหัวข้อที่ 5.4.2)

5.4.1 ตัวอย่างการเคลื่อนที่ในแกน x กับการเคลื่อนที่ในแกน y ของคลื่นแผ่นดินไหว Takatori ในเหตุการณ์แผ่นดินไหว Kobe ปี ค.ศ. 1995

ในตัวอย่างนี้ได้ทำการพิจารณาการเคลื่อนที่ในแกน x กับ แกน y ภายใต้คลื่นแผ่นดินไหว Takatori, Kobe , 1995 โดยพิจารณาที่คาบธรรมชาติของโครงสร้างในแกน x และแกน y แบ่งเป็น 3 กรณีดังนี้ 1) $T_x = 1s, T_y = 1s$ 2) $T_x = 2s, T_y = 1s$ และ 3) $T_x = 3s, T_y = 1s$ โดยทำการศึกษาค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแกน x และ y และค่าการเคลื่อนที่ในแกน x และแกน y ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี เพื่ออธิบายการเพิ่มขึ้นของ $\dfrac{D_x^{RSBD}}{D_x}$ และการลดลงของ $\dfrac{D_y^{RSBD}}{D_y}$ เมื่ออัตราส่วนคาบ T_x/T_y เพิ่มขึ้น ในรูปที่ 5.20(ก)-5.22(ก)

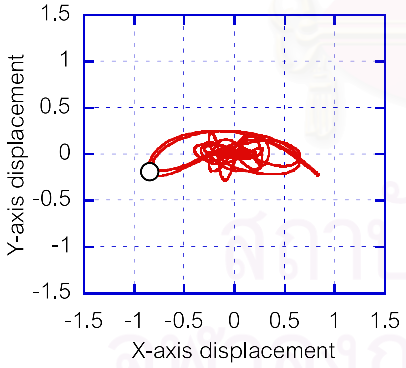
จากรูปที่ 5.23 (ก)-(ค) และตารางที่ 5.1(ก) -(ค) จะเห็นได้ว่าค่า %การเคลื่อนที่ในแกน x ซึ่งเปรียบได้กับค่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{D_x^{RSBD}}{D_x}$ มีค่าประมาณ 100 % ในทั้ง 3 กรณีซึ่งแสดงให้เห็นว่าแกนที่มีคาบธรรมชาติสูงกว่าจะเป็นตัวทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี ในทางกลับกัน %การเคลื่อนที่ในแกน y ซึ่งเปรียบได้กับค่าอัตราส่วนระหว่าง $\frac{D_y^{RSBD}}{D_y}$ มีค่าลดลงตามอัตราส่วนคาบที่สูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแกนที่คาบธรรมชาติน้อยกว่าโอกาสที่จะเกิดค่าสูงสุด (หรือ%การเคลื่อนที่เท่ากับ 100) นั้นจะน้อยลงเมื่อคาบธรรมชาติในแกน x และ y ต่างกันมากขึ้น



(ก) $T_x = 1s, T_y = 1s$

ตารางที่ 5.1(ก) การเคลื่อนที่ในแกน x และ y

การเคลื่อนที่ (เมตร)	ค่าสูงสุด	ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุด	% การเคลื่อนที่
แกน x	0.351	0.333	95
แกน y	0.280	-0.246	88



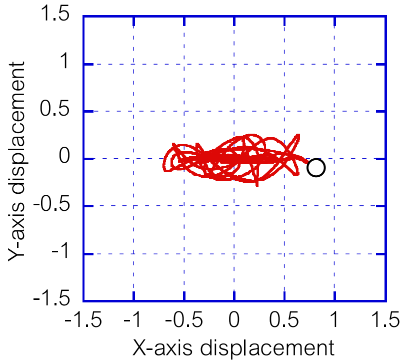
(ข) $T_x = 2s, T_y = 1s$

ตารางที่ 5.1(ข) การเคลื่อนที่ในแกน x และ y

การเคลื่อนที่ (เมตร)	ค่าสูงสุด	ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุด	% การเคลื่อนที่
แกน x	0.855	-0.854	100
แกน y	0.280	-0.171	61

รูปที่ 5.23 การเคลื่อนที่ในแกน x กับ y

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ค) $T_x = 3, T_y = 1$

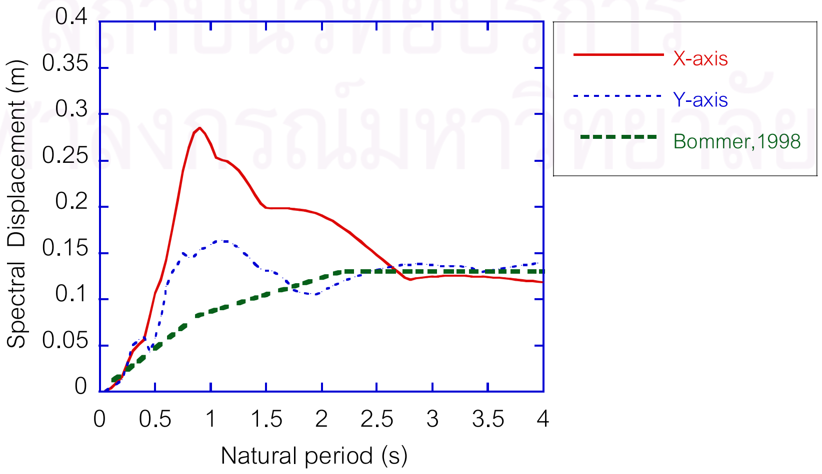
รูปที่ 5.23(ต่อ) การเคลื่อนที่ในแกน x กับ y

ตารางที่ 5.1(ค) การเคลื่อนที่ในแกน x และ y

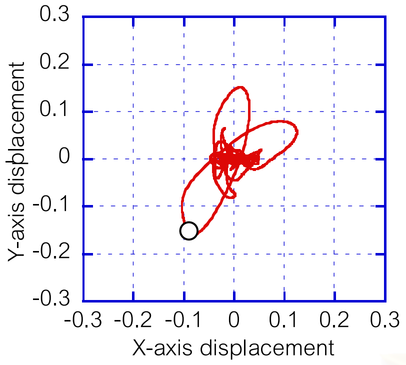
การเคลื่อนที่ (เมตร)	ค่าสูงสุด	ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุด	% การเคลื่อนที่
แกน x	0.770	0.770	100
แกน y	0.280	-0.068	24

5.4.2 ตัวอย่างการเปรียบเทียบกับข้อกำหนดโดยใช้คลื่นแผ่นดินไหว Coyote lake dam ในเหตุการณ์แผ่นดินไหว Morgan hill ปี ค.ศ. 1984

ในตัวอย่างนี้จะทำการหาค่าการเคลื่อนที่ในแกน x และ y โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอกับวิธีที่ได้จากข้อกำหนด เพื่อตรวจสอบสาเหตุที่ทำให้ค่าการเคลื่อนที่ในแกน y ในรูปที่ 5.20ข เมื่อพิจารณาด้วยสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอมีค่ามากกว่าการเคลื่อนที่ที่ได้จากข้อกำหนดเป็นอย่างมาก โดยกำหนดให้โครงสร้างมีคาบธรรมชาติในแกน x และ y เท่ากับ 3 และ 1 วินาทีตามลำดับและใช้คลื่นแผ่นดินไหว Morgan hill, Coyote lake dam,1984 โดยมีขนาดของแผ่นดินไหวเท่ากับ 6.2 (M_w) ระยะห่างจากแหล่งกำเนิด 100 เมตร และเป็นดินประเภทหิน โดยเมื่อทราบค่าขนาดของแผ่นดินไหว ระยะห่างจากแหล่งกำเนิดและลักษณะดิน จะสามารถสร้างสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ได้จากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ที่เสนอโดย Bommer,1998 (รูปที่ 1.14 และตารางที่ 1.2-1.5) โดยจะได้ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของคลื่นแผ่นดินไหว Morgan hill,Coyote lake dam, 1984



$T_x = 3, T_y = 1$

รูปที่ 5.25 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y

ตารางที่ 5.2 การเคลื่อนที่ในแกน x และ y

การเคลื่อนที่ (เมตร)	ค่าสูงสุด	ณ เวลาที่เกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีสูงสุด	% การเคลื่อนที่
แกน x	0.124	-0.086	69
แกน y	0.159	-0.159	100
แกนรัศมี	0.180	0.180	100

ค่า $R = \dfrac{0.180}{0.124} = 1.45\ ; \alpha = \tan^{-1}(\dfrac{0.159}{0.086}) = 61.59^{\circ}$

การเคลื่อนที่แกน x และ y จากสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของ Bommer,1999

$$D_x = S_d(T_x = 3) = 0.13 \text{ m}$$

$$D_y = S_d(T_y = 1) = 0.09 \text{ m}$$

การเคลื่อนที่แกน x และ y จากค่า R และ α

$$D_x^{RSBD} = R \times S_d(T_x = 3) \times \cos\tilde{\alpha} = 1.45 \times 0.13 \times \cos(61.6^{\circ}) = 0.09 \text{ m}$$

$$D_y^{RSBD} = R \times S_d(T_x = 3) \times \sin\tilde{\alpha} = 1.45 \times 0.13 \times \sin(61.6^{\circ}) = 0.17 \text{ m}$$

เปรียบเทียบการเคลื่อนที่จากสเปกตรัมที่เสนอกับข้อกำหนด

$$\frac{D_x^{RSBD}}{D_x} = \frac{0.09}{0.13} = 0.69 \text{ เท่า}$$

$$\frac{D_y^{RSBD}}{0.3D_y} = \frac{0.17}{0.3(0.09)} = 6.27 \text{ เท่า}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ในแกน y เมื่อพิจารณาด้วยวิธีการที่เสนอมีโอกาสเกิดได้มากกว่าค่าที่ได้จากสเปกตรัมของ Bommer ถึง 6.27 เท่า เนื่องจากคลื่นแผ่นดินไหวที่ใช้มีคาบเด่นของสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 0.9 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 5.24 ในขณะที่สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ของ Bommer ค่าการเคลื่อนที่จะสูงขึ้นเมื่อคาบสูงขึ้น ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อค่า R และ $\tilde{\alpha}$ ที่ใช้ในการคำนวณค่า D_x^{RSBD} และ D_y^{RSBD} ทำให้เกิดความแตกต่างกันเป็นอย่างมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งสามารถอธิบายรูปที่ 5.20ข ถึงสาเหตุที่ $\dfrac{D_y^{RSBD}}{D_y}$ มีค่าสูงกว่า 0.3 เป็นอย่างมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5 ข้อจำกัดของสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอ

เนื่องจากสเปกตรัมผลตอบสนองพิจารณาในทิศทางที่เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี โดยให้เป็นตัวแทนของการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากแผ่นดินไหวสองทิศทางพร้อมกัน ซึ่งในความเป็นจริงการเคลื่อนที่ในแกน y จะอาจจะเกิดได้ตั้งแต่ 0-100 % ขึ้นกับคลื่นแผ่นดินไหว แต่การเคลื่อนที่ในแกน y ที่ได้จากสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอนั้นเป็นการหาค่าทางสถิติของเปอร์เซนต์การเคลื่อนที่ในแกน y เมื่อเกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี โดยมีความสัมพันธ์ขึ้นกับอัตราส่วนคาบของโครงสร้าง กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนคาบมากขึ้น โครงสร้างมีโอกาสเคลื่อนที่ไปในทางแกนอ่อนมากกว่าแกนแข็ง อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาออกแบบทีละแกนด้วยค่า 100% ของแรงในแต่ละแกนด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถสรุปผลที่ได้จากการวิจัยดังต่อไปนี้

1. สำหรับคลื่นแผ่นดินไหวระยะใกล้ สเปกตรัมผลตอบสนองในแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุด (แกนหลัก) ซึ่งนิยามแกนที่เกิดความรุนแรงสูงสุดด้วยค่าพื้นที่ใต้กราฟของสเปกตรัมมากที่สุด มีความแตกต่างจากสเปกตรัมในแกนที่ตั้งฉากกัน (แกนรอง) อย่างมาก ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวจะแปรตามกับคาบธรรมชาติและลักษณะของดิน โดยในหินมีค่าอัตราส่วนสเปกตรัมระหว่างแกนหลักกับแกนรอง $(SR(T))$ เพิ่มขึ้นตามคาบที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.54 ที่คาบเท่ากับ 2.2 วินาที ในดินแข็งค่า $SR(T)$ เพิ่มขึ้นตามคาบที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.45 ที่คาบเท่ากับ 2.2 วินาที ในดินอ่อนมีค่า $SR(T)$ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามคาบที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 1.68 ที่คาบเท่ากับ 2.5 วินาที จะเห็นได้ว่าในลักษณะของดินประเภทดินอ่อน ความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมผลตอบสนองในสองแกนที่ตั้งฉากกันมีค่าน้อยกว่าในหิน และดินแข็ง

2. งานวิจัยนี้ได้นำสเนอสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีและทิศทางการเคลื่อนที่คือคาบของโครงสร้างในแกน x และ y และมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้าง โดยในกรณีที่คาบในแกน x มากกว่า y มาก การเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจะเข้าใกล้การเคลื่อนที่ในแกน x และทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะเข้าใกล้ 0 องศาเทียบกับแกน x ในกรณีที่คาบของโครงสร้างในแกน x น้อยกว่าแกน y มาก การเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจะเข้าใกล้การเคลื่อนที่ในแกน y และทิศทางการเคลื่อนที่ของโครงสร้างจะเข้าใกล้ 90 องศาเทียบกับแกน x สำหรับผลของมุมของคลื่นแผ่นดินไหวพบว่ามุมที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมีส่วนใหญ่จะเกิดในมุมของคลื่นแผ่นดินไหวที่ให้ความรุนแรงของแผ่นดินไหวสูงสุดกระทำในแกนที่มีคาบธรรมชาติมากกว่า

3. สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีที่พิจารณาแผ่นดินไหวทุกทิศทางหารด้วยค่าสเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ในแกน x ที่มุมของคลื่นแผ่นดินไหวเท่ากับ 0 องศา เรียกว่าสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่ โดยสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่จะมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในทุกๆ ค่าของคาบ

ธรรมชาติในแต่ละแกน โดยมีค่าขึ้นกับแกนที่มีคาบมากกว่าเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.1-1.7 สำหรับหิน 1.1-1.6 สำหรับดินแข็งและ 1.1-1.4 สำหรับดินอ่อน

4. สเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่มีค่าขึ้นกับอัตราส่วนคาบในแต่ละแกน โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะเอียงไปทางแกนที่มีคาบมากกว่าเป็นหลัก โดยในกรณีที่คาบแกน x มากกว่า y ที่อัตราส่วนคาบเดียวกัน ในลักษณะดินประเภทหินจะให้ค่าทิศทางการเคลื่อนที่สูงกว่าในดินแข็งและดินอ่อน

5. ผลของขนาดของแผ่นดินไหวและระยะทางจากแหล่งกำเนิดไม่มีนัยสำคัญกับสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่ จึงได้ทำการเฉลี่ยแล้วทำการวิเคราะห์การถดถอย โดยสเปกตรัมอัตราส่วนระยะเคลื่อนที่และสเปกตรัมทิศทางการเคลื่อนที่มีค่าขึ้นกับคาบในแกน x และ y

6. งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบและตัวอย่างการออกแบบจากการเปรียบเทียบผลจากสเปกตรัมที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวสองทิศทางกับผลที่ได้จากข้อกำหนดคือพิจารณาผลของคลื่นแผ่นดินไหวอีกแกน 30% จะเห็นได้ว่าในกรณีที่กำหนดให้แกน x มีคาบธรรมชาติมากกว่าแกน y การพิจารณาด้วยสเปกตรัมผลตอบสนองที่เสนอ ในแกน x ให้ผลมากกว่า 1.2 -1.5 เท่าในทุกอัตราส่วนของคาบของโครงสร้าง (T_x/T_y) เนื่องจากพิจารณาผลของทิศทางของแผ่นดินไหวที่กระทำกับโครงสร้างในทุกทิศทาง โดยมีผลที่มากกว่านั้นจะมากขึ้นเมื่อ T_x/T_y มีค่ามากขึ้น และทิศทางการเคลื่อนที่จะเข้าใกล้แกน x มากขึ้น ซึ่งการออกแบบโดยพิจารณาแผ่นดินไหวสองทิศทางด้วยวิธีรวมผลของแรงในอีกแกนเข้าไป 30% ได้ค่าที่ต่ำกว่าซึ่งอาจไม่ปลอดภัยได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากในการพัฒนาสเปกตรัมผลตอบสนองที่พิจารณาผลของแผ่นดินไหวกระทำในสองทิศทางพร้อมกัน กำหนดให้ใช้ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี ซึ่งจะให้ค่าที่ได้ขึ้นกับแกนอ่อนหรือคาบธรรมชาติมากเป็นส่วนใหญ่ ในอนาคตจึงควรวิเคราะห์โดยพิจารณาการเคลื่อนที่สูงสุดในแกน x และพิจารณาการเคลื่อนที่ในแกน y ว่าเป็นกี่เปอร์เซนต์ ในทำนองเดียวกันก็พิจารณาการเคลื่อนที่สูงสุดในแกน y และหาการเคลื่อนที่ในแกน x ว่าเป็นกี่เปอร์เซนต์ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับการใช้ค่าการเคลื่อนที่สูงสุดในแนวรัศมี

2. ควรทำการเพิ่มคลื่นแผ่นดินไหวในการวิเคราะห์เพื่อให้ได้สมการที่ครอบคลุมในหลาย ๆ ลักษณะของคลื่นแผ่นดินไหว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาอังกฤษ

Michael G. Olivia and Ray W. Clough. (1987). ”Biaxial Seismic Response of R/C Frames.”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 113,6:1264-1281.

Yuk-Lung Wong, T. Paulay, and M. J. Nigel Priestley. (1993).”Response of Circular Reinforced Concrete Columns to Multi-Directional Seismic Attack.”, ACI Structural Journal , 90,2 : 180-191.

Hisada, T., M. Miyamura, S. Kan and Y. Hirao. (1988). ”Studies on the Orthogonal Effects in Seismic Analysis.”, Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, V : 191-196.

F. Y. Cheng and J. F. Ger. (1990). ”The Effect of Multicomponent Seismic Excitation and Direction on Response Behavior of 3-D Structures.”, Proceeding of Fourth U.S. National Conference Earthquake Engineering, 2: 5-14.

Anil K. Chopra and Chatpan Chintanapakdee. (2001). ”Comparing Response of SDF Systems to Near-Fault and Far-Fault Earthquake Motions in the Context of Spectra Region.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics., 30:1769-1789.

Christos A. Zeris and Stephen A. Mahin. (1991). ”Behavior of Reinforced Concrete Structures Subjected to Biaxial Excitation.” Journal of Structural Engineering, ASCE, 117,9:   2657-2673.

Haruo Takizawa and Hiroyuki Aoyama. (1976). ”Biaxial Effects in Modelling Earthquake Response of R/C Structures.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 4: 523-552.

Oscar A. Lopez And Ronald Torres. (1997). "The Critical Angle of Seismic Incidence and The Maximum Structural Response." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26: 881-894.

Julian J. Bommer and Amr S. Elnashai. (1998). "Displacement Spectra for Seismic Design." Journal of Structural Engineering, Imperial college Press, 3,1: 1-32.

Malhotra. (1999). "Response of Buildings to Near-field Pulse-Like Ground motions." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 28: 1309-1326.

UBC(1997),Uniform Building Code, International Conference of Building Officials, California.

R. Park and T. Paulay . "Reinforced Concrete structures." A Wiley-Interscience,1975

Chopra AK. "Dynamics of Structures." Theory and Applications to Earthquake Engineering , Prentice hall,2001.

George P. Mavroeidis and Apostolos S. Papageorgiou.(2003) ."A Mathematical Representation of Near-fault Ground Motions." Bulletin of Seismological Society of America, 93,3: 1099-1131.

Penzien, J. and Watabe, M.(1975)."Charaterisics of 3-dimensional earthquake ground motion". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3: 365-373.

Smerby, W. and DerJiureghian, A.(1985),"Modal Combination rules for multicomponent earthquake excitation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics,13:1-12.

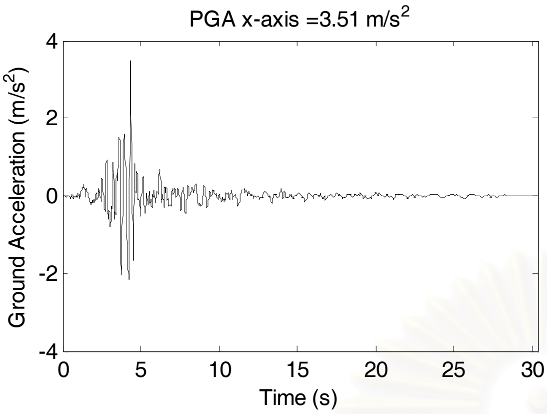
Julio J. Hernandez and Oscar A. Lopez. (2003)."Evaluation of combination rules of peak response calculation in-three-component seismic analysis." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32: 1585-1602.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

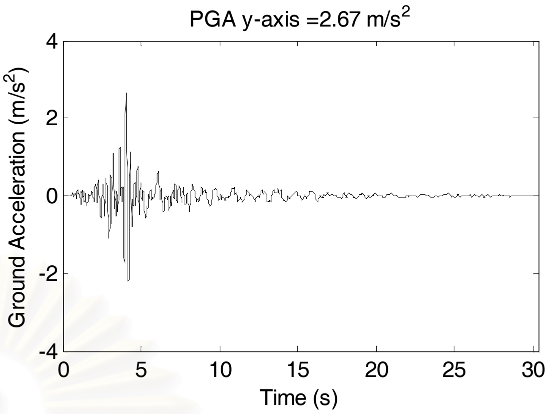
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

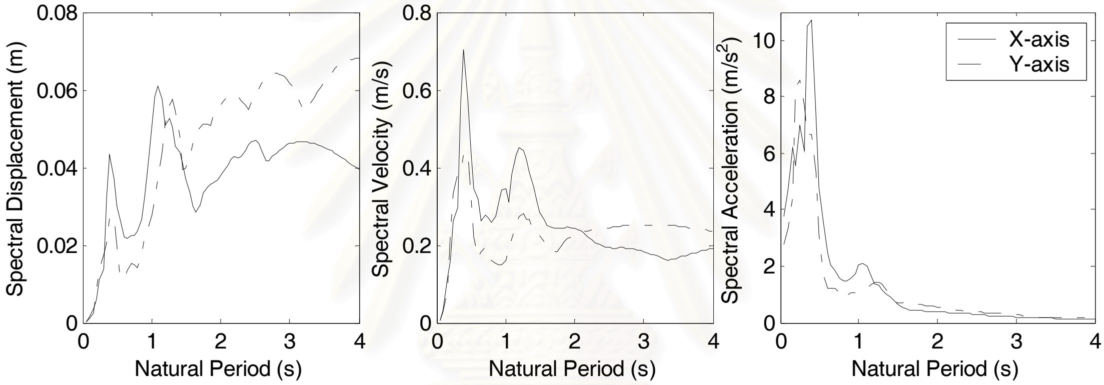
ภาคผนวก ก



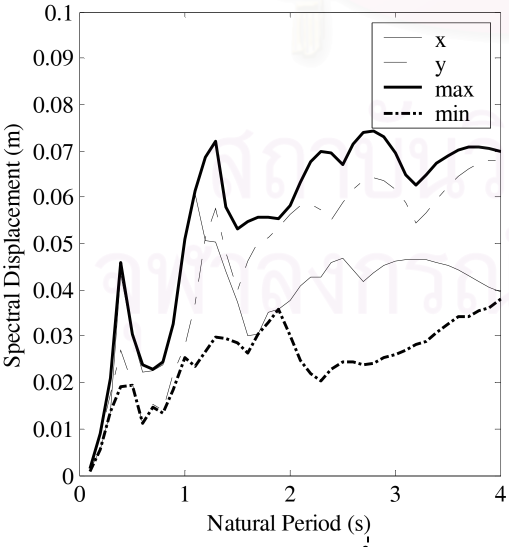
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



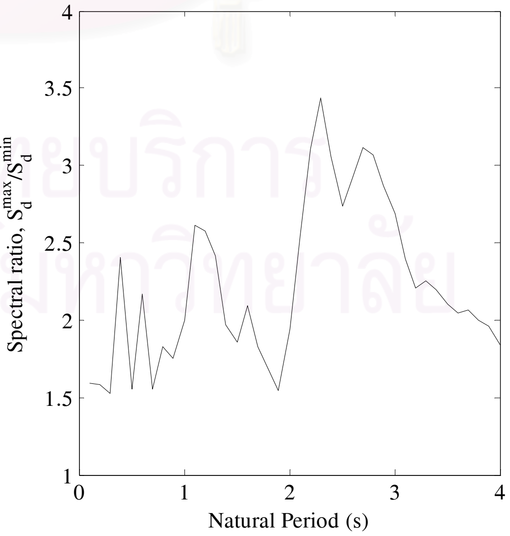
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



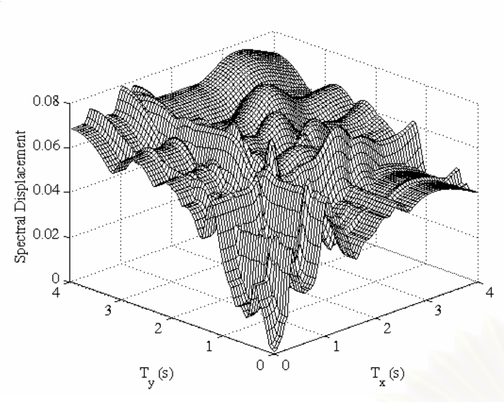
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



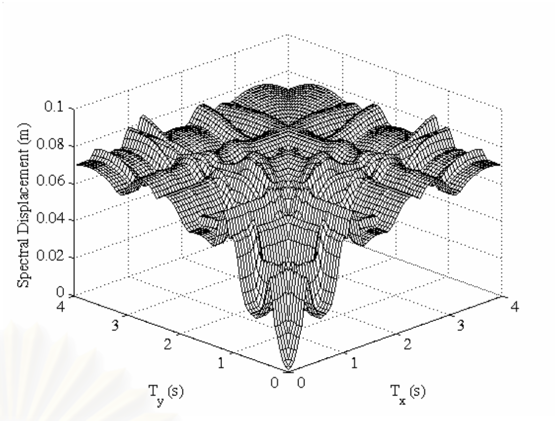
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.1 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Temblor,Parkfiled, 1966

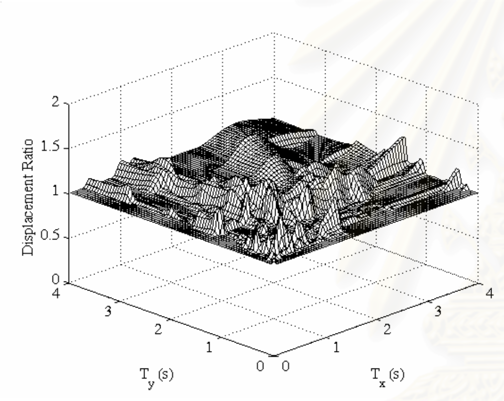
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



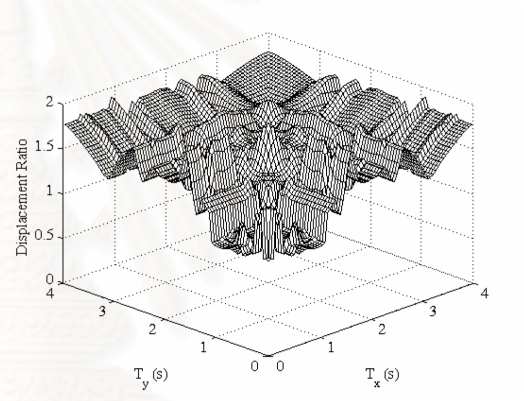
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



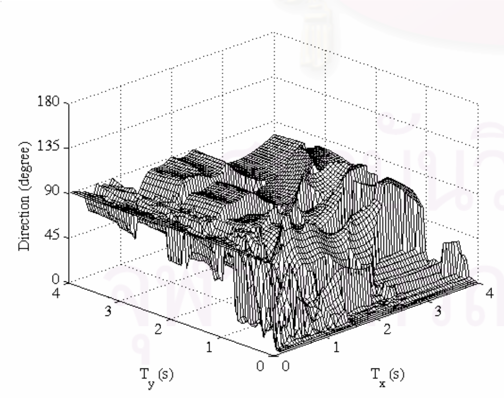
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



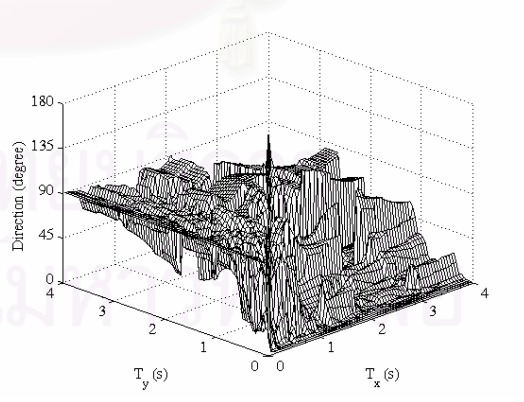
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

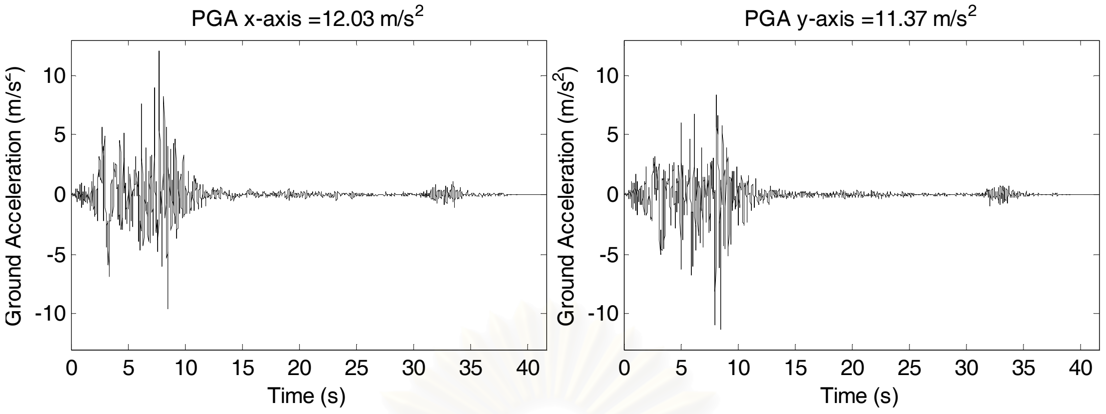


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

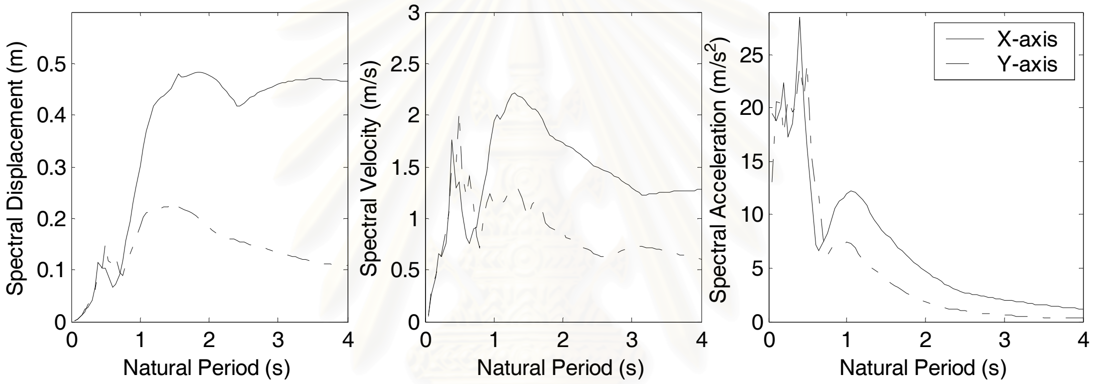


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

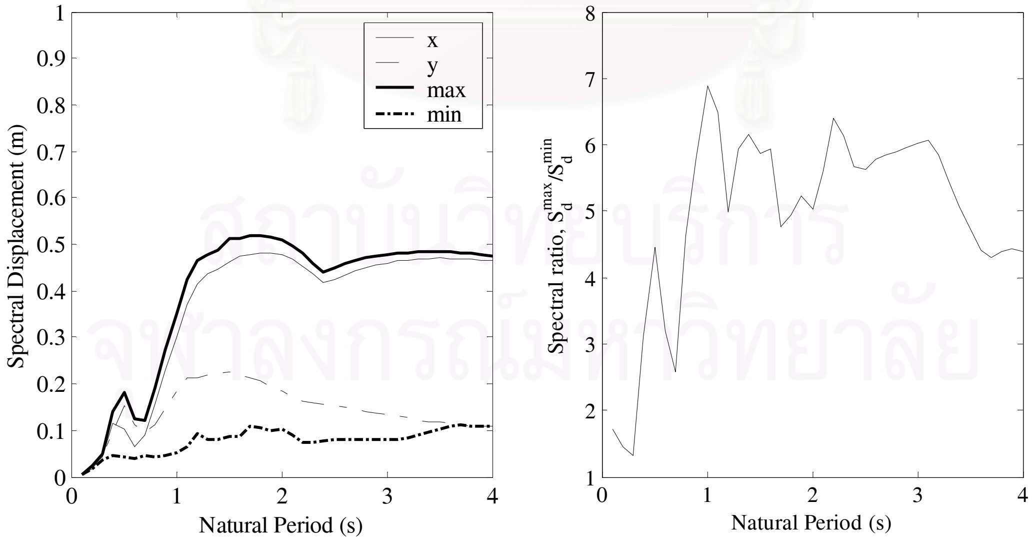
รูปที่ ก1.2 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Temblor, Parkfiled, 1966



(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x (ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



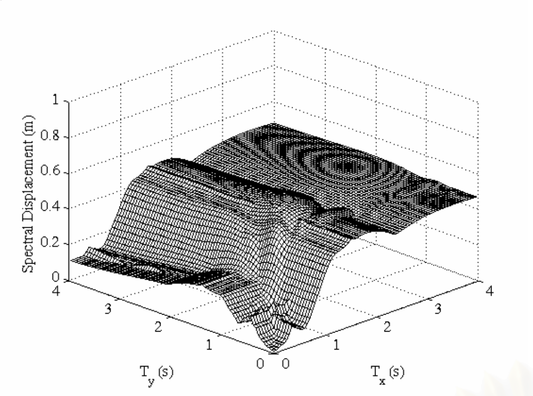
(ค) สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



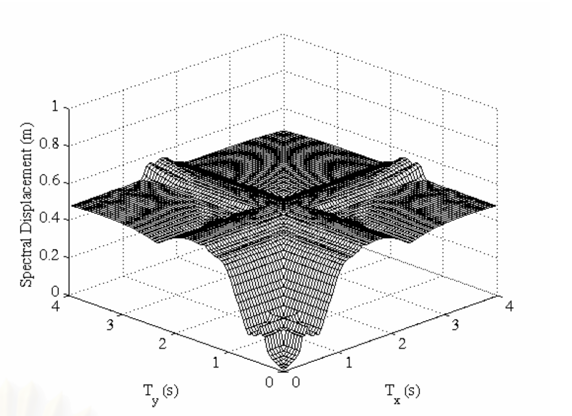
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด (จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.3 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Pacoima Dam, San Fernando, 1971

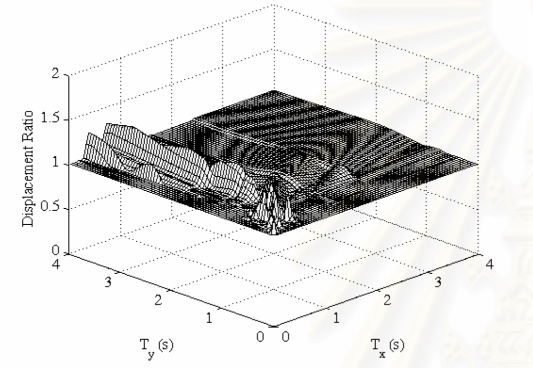
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



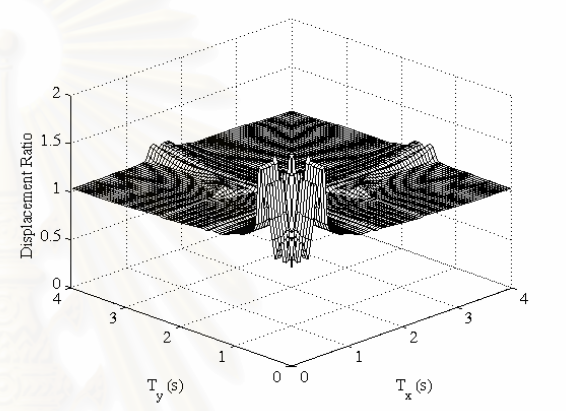
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$



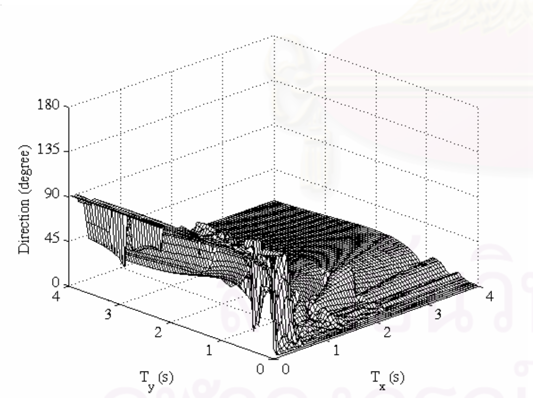
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$



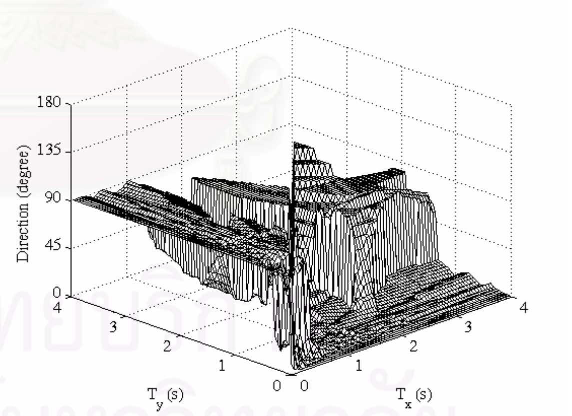
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$



(ง) $R(T_x,T_y)$

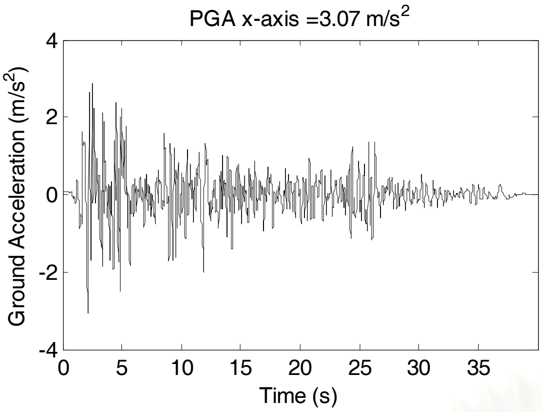


(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$

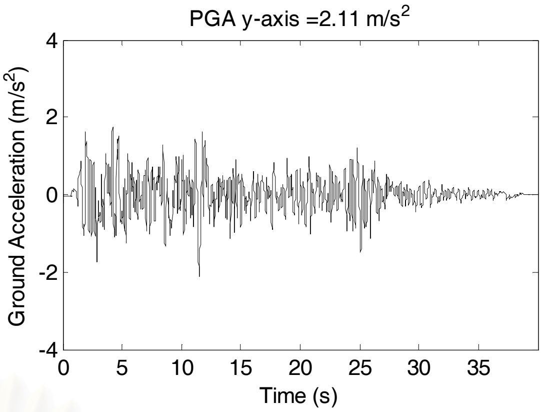


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

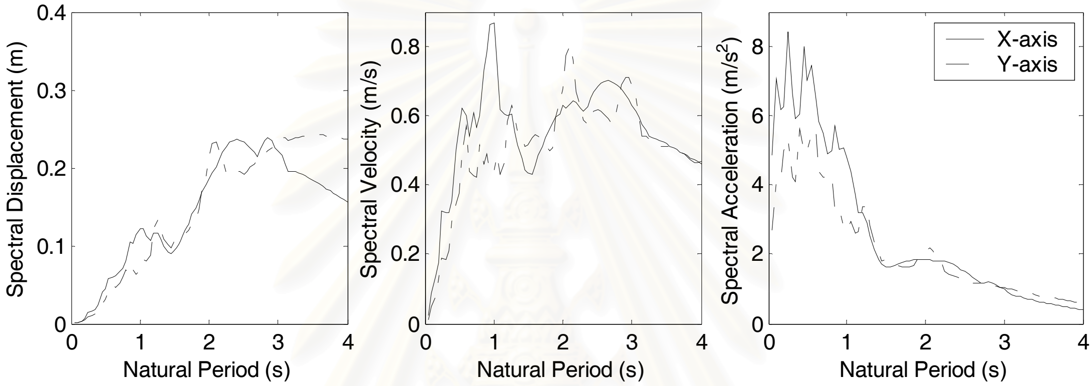
รูปที่ ก1.4 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Pacoima Dam, San Fernando,1971



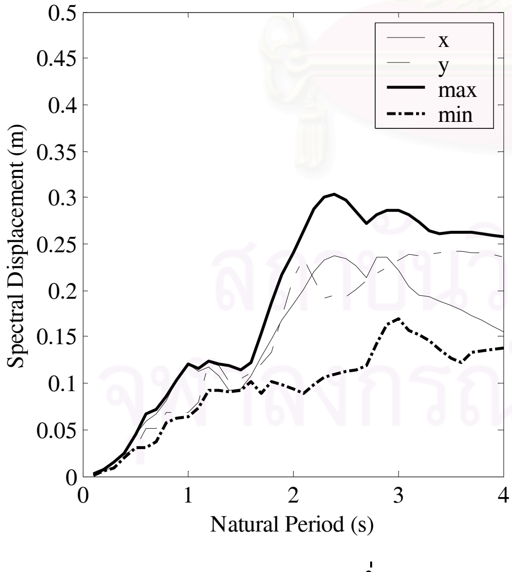
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



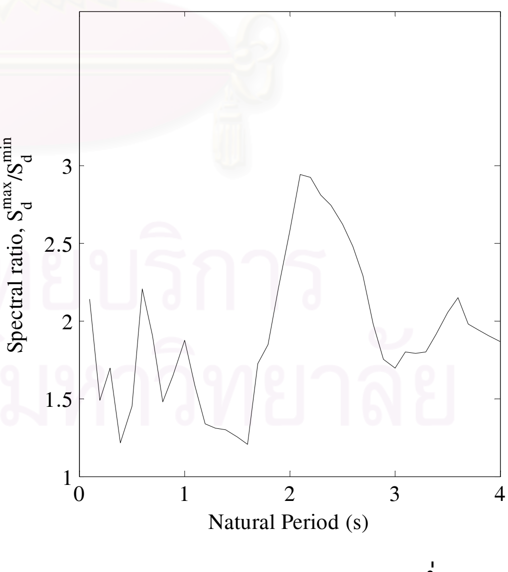
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง

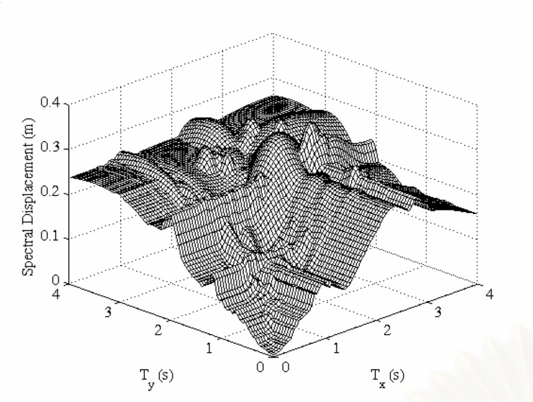


(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

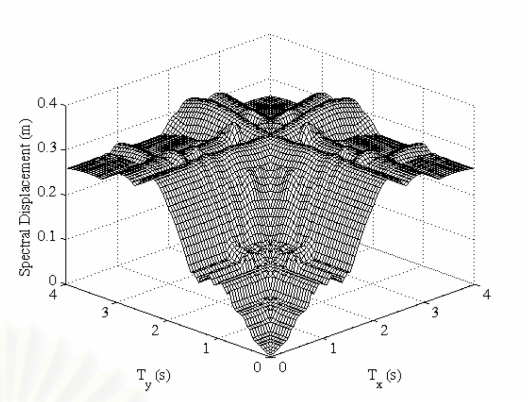


(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

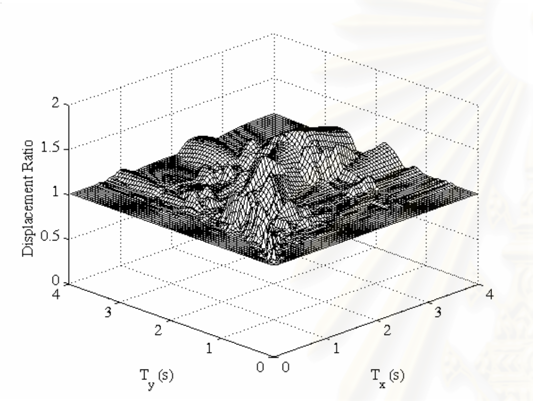
รูปที่ ก1.5 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว El Centro Array #9, Imperial valley, 1940



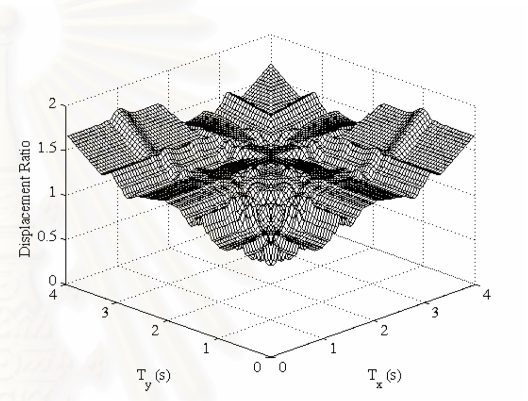
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$



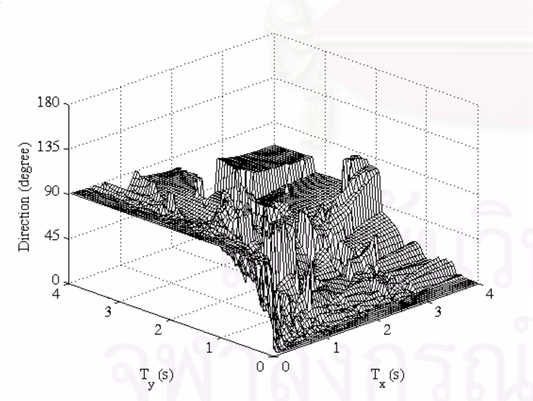
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$



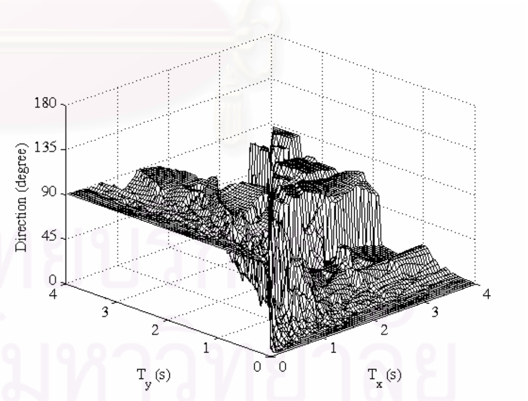
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$



(ง) $R(T_x,T_y)$

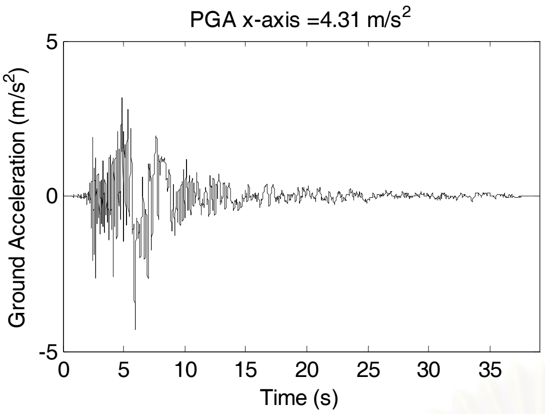


(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$

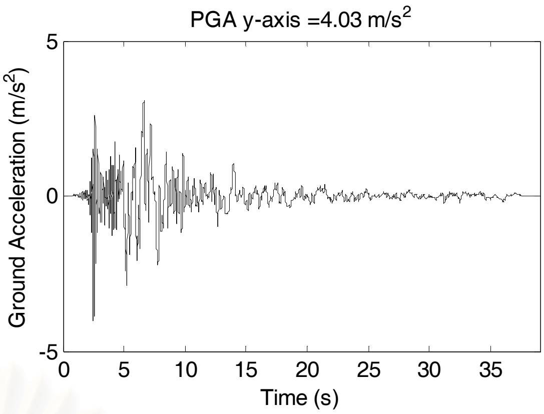


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

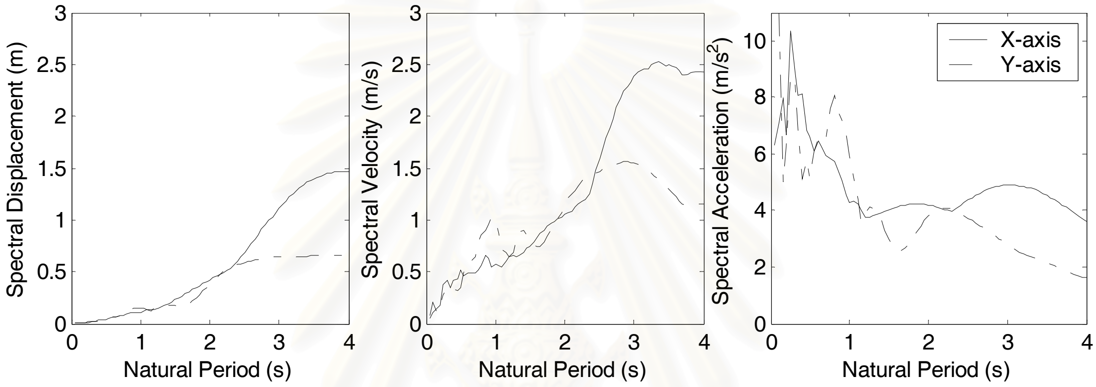
รูปที่ ก1.6 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว El Centro Array #6, Imperial valley, 1979



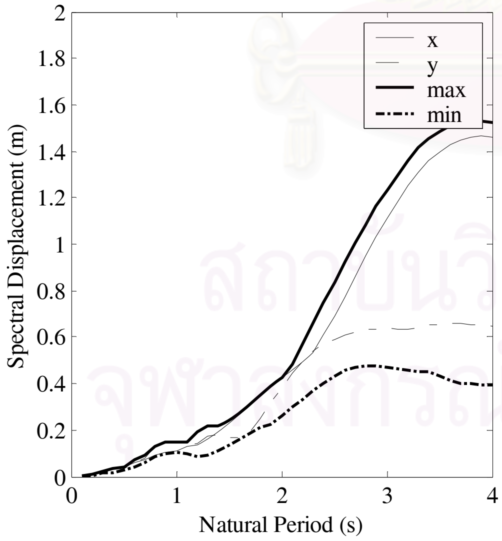
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



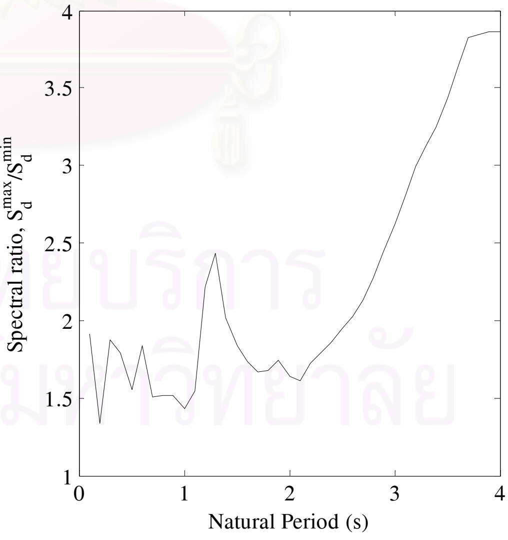
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



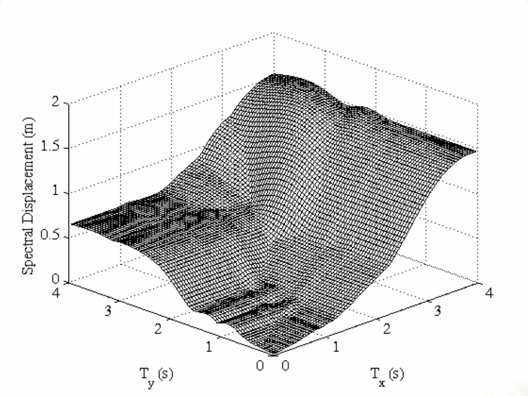
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



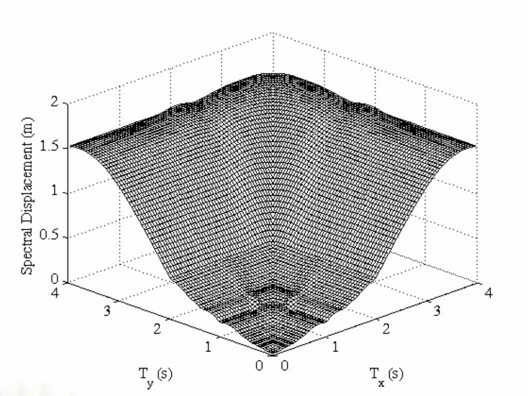
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.7 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว El Centro Array #6, Imperial valley, 1979

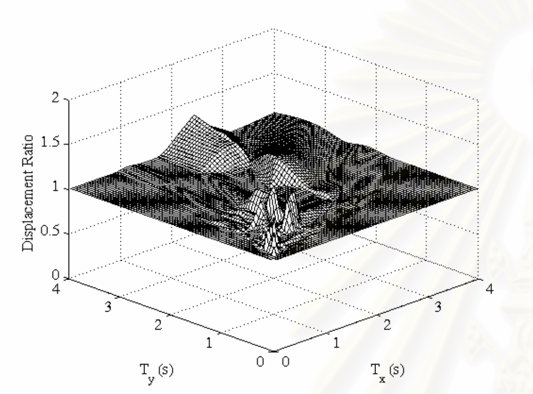
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



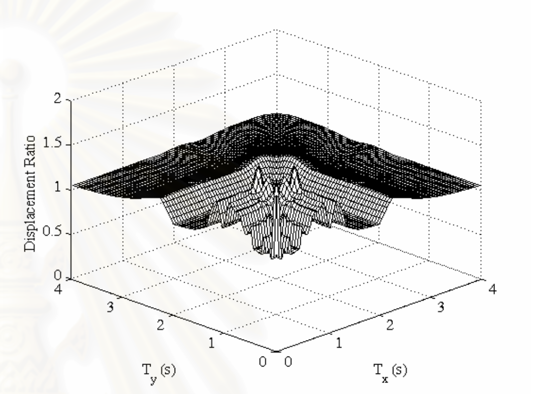
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^{\circ})$



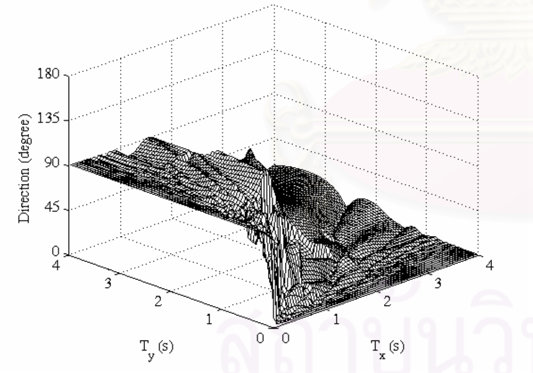
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



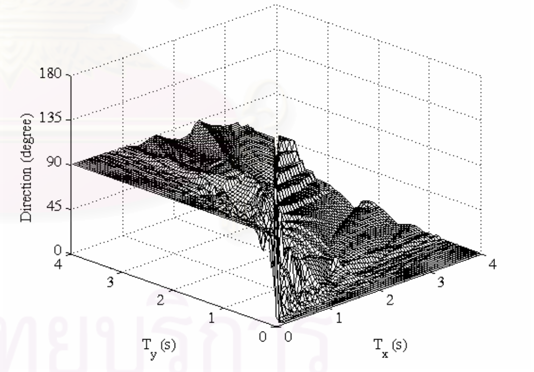
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



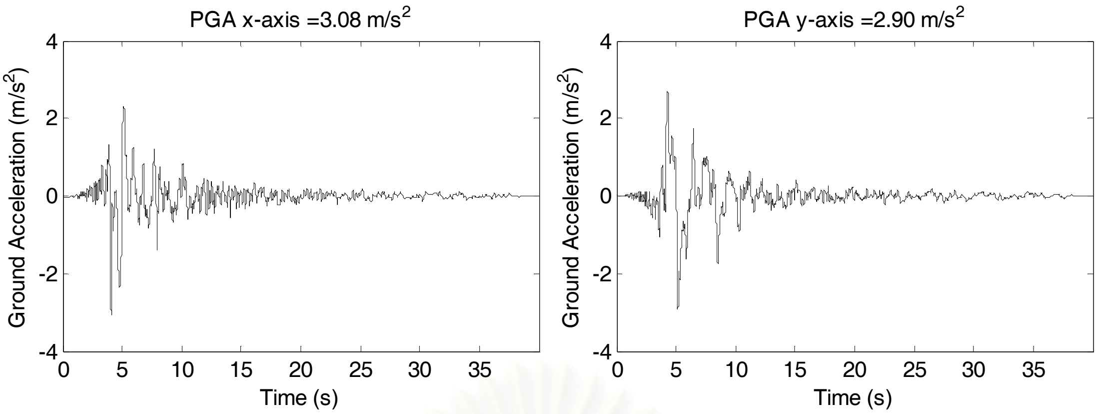
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^{\circ})$



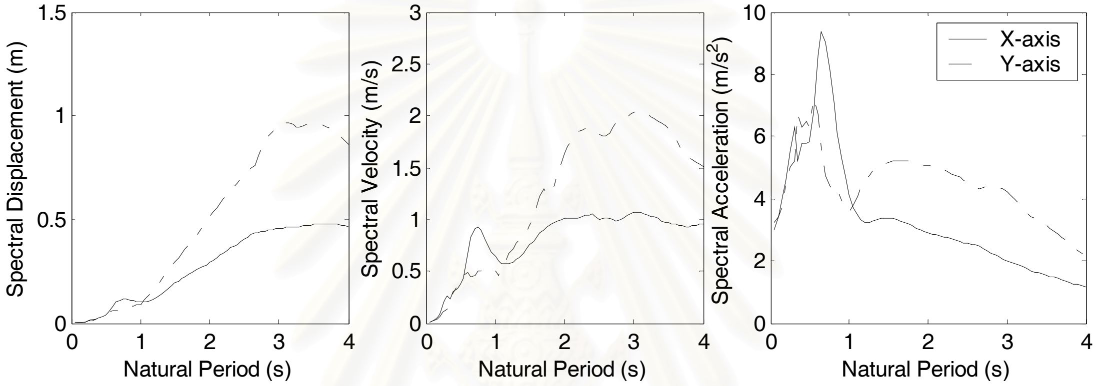
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

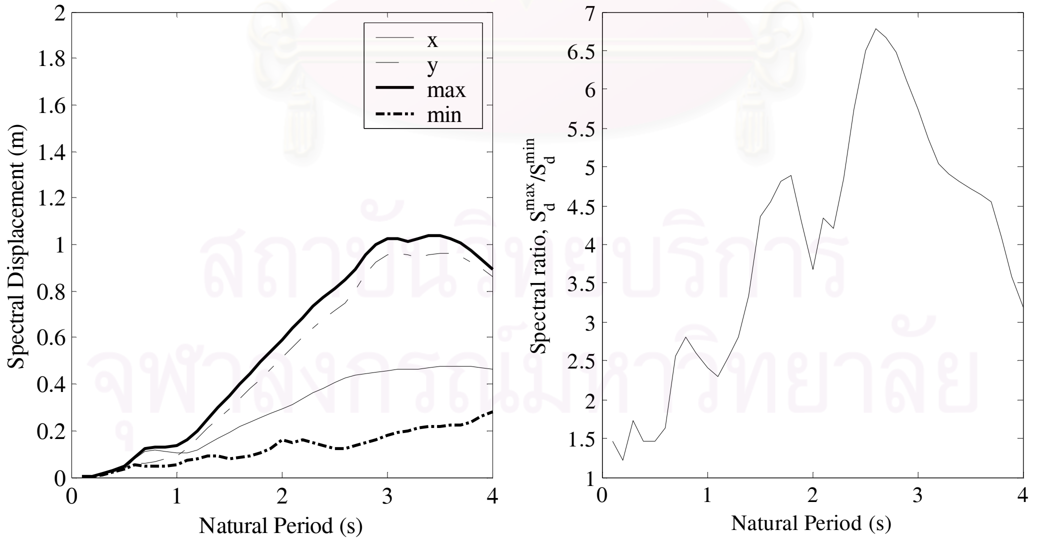
รูปที่ ก1.8 สเปกตรัมผลตอบสนองสองทิศทางสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว El Centro Array #6, Imperial valley, 1979



(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x (ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



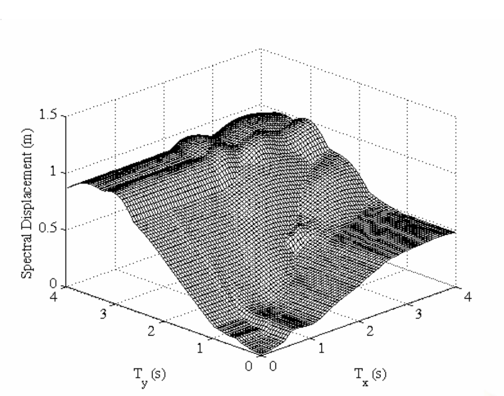
(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



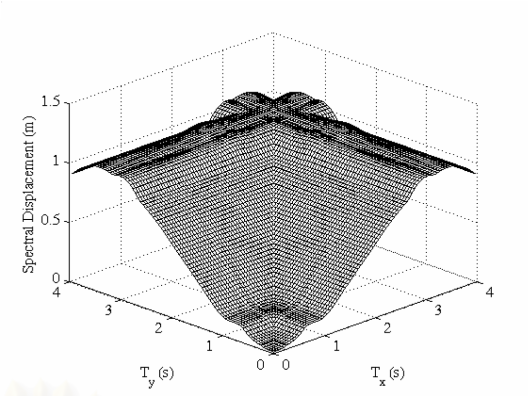
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด (จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.9 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Meloland, Imperial valley, 1979

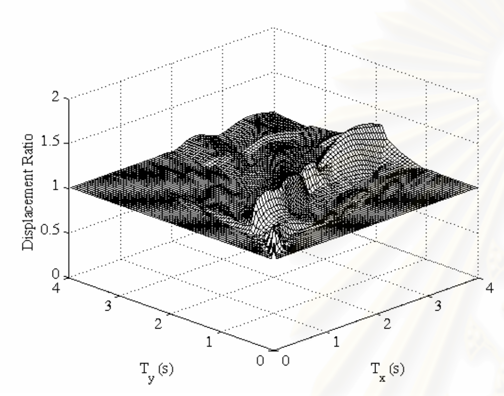
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



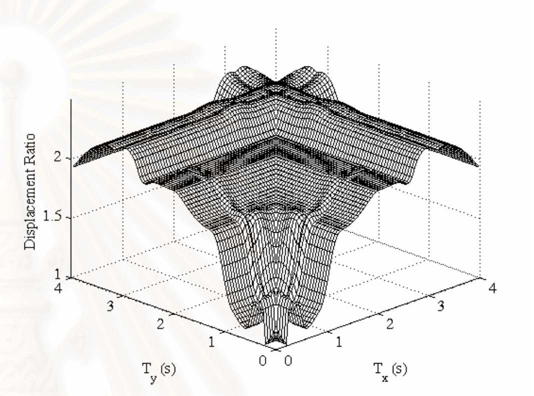
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



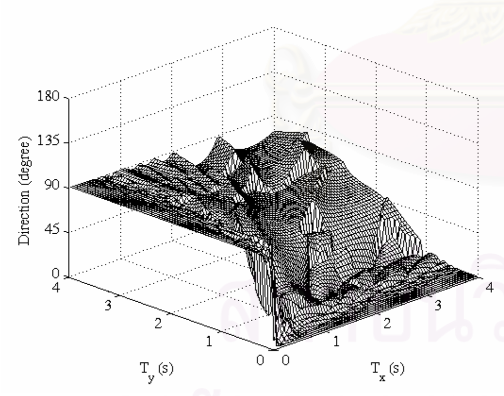
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



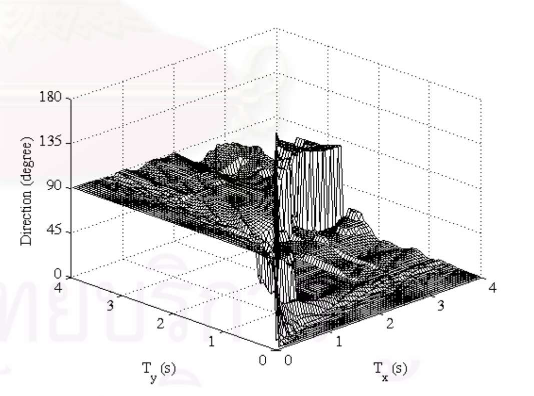
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

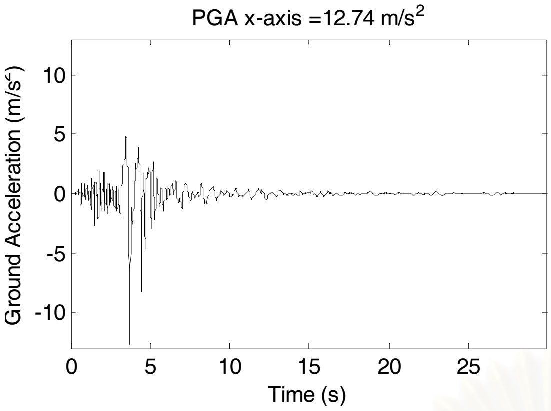


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

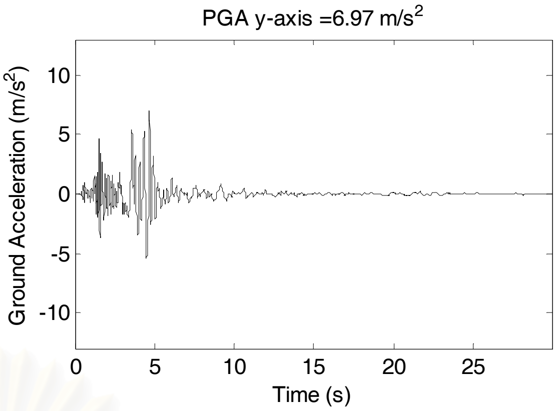


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

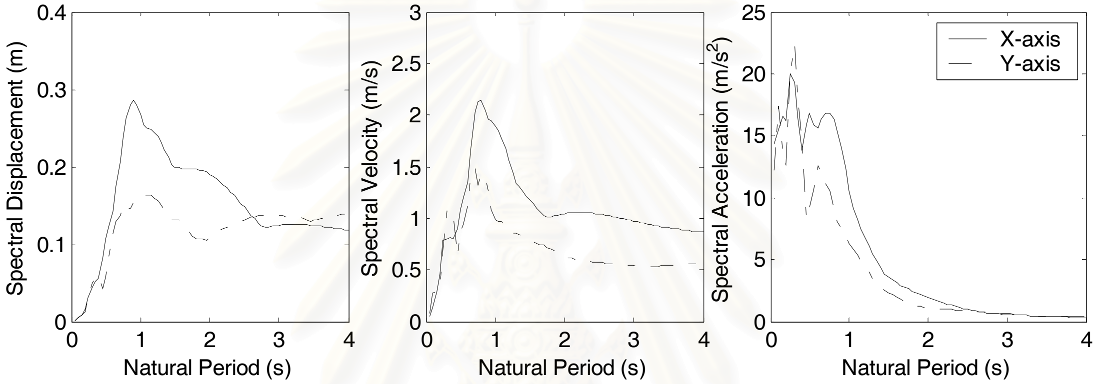
รูปที่ ก1.10 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Meloland, Imperial valley, 1979



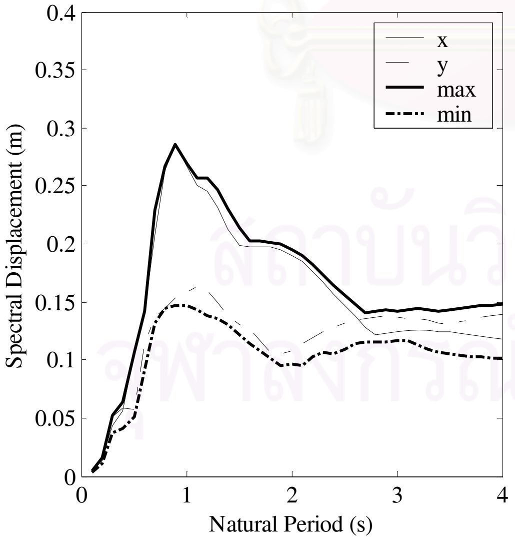
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



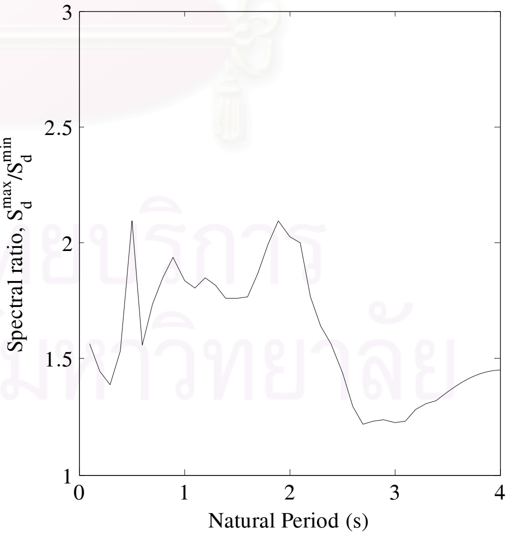
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



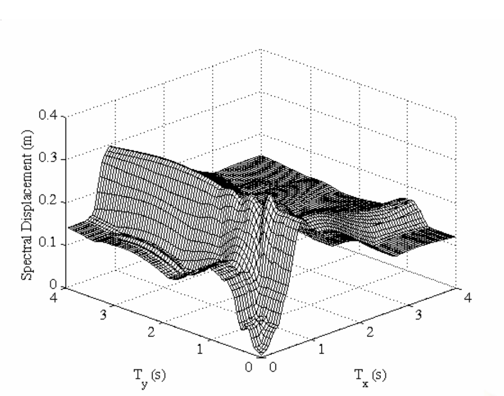
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



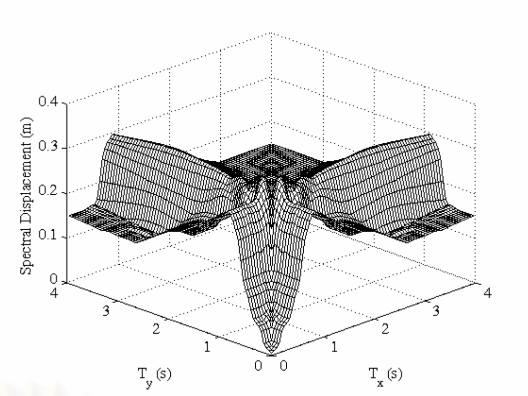
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.11 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Coyote lake land, Morgan hill, 1984

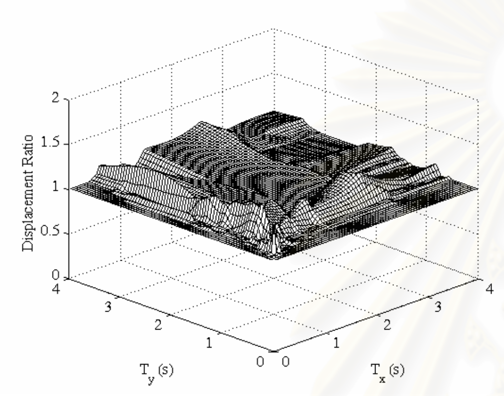
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



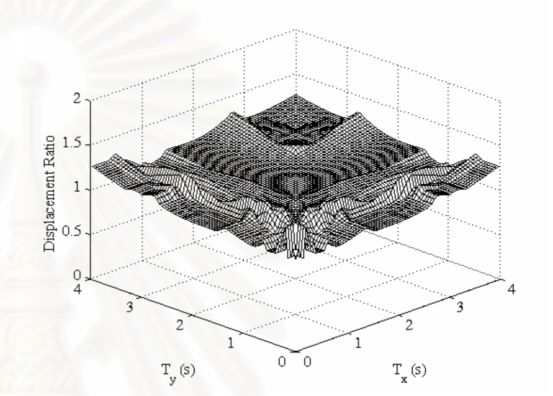
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$



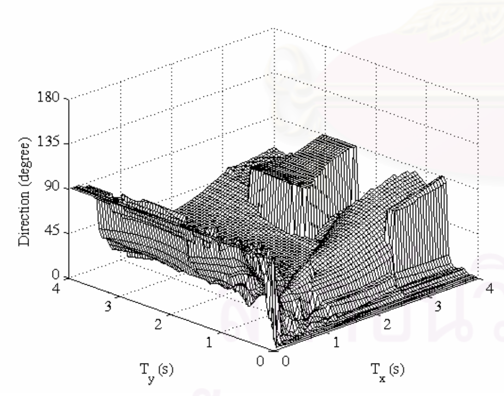
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$



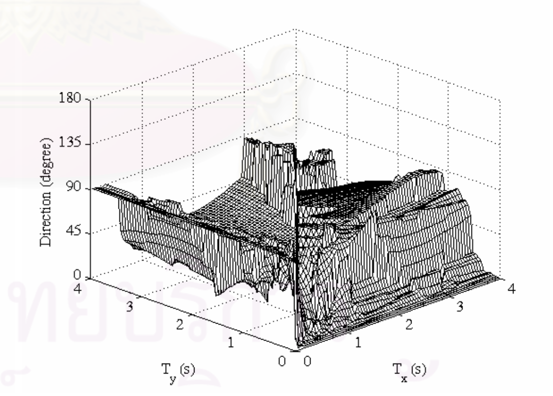
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$



(ง) $R(T_x,T_y)$

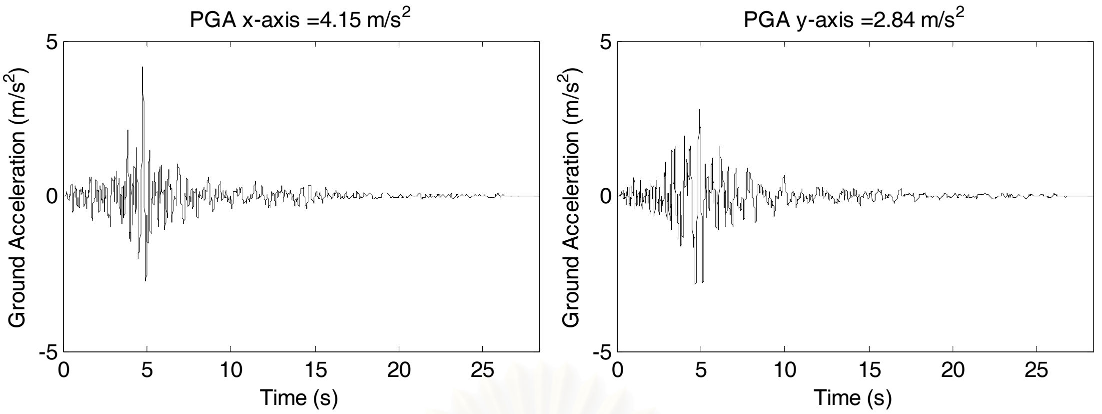


(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$

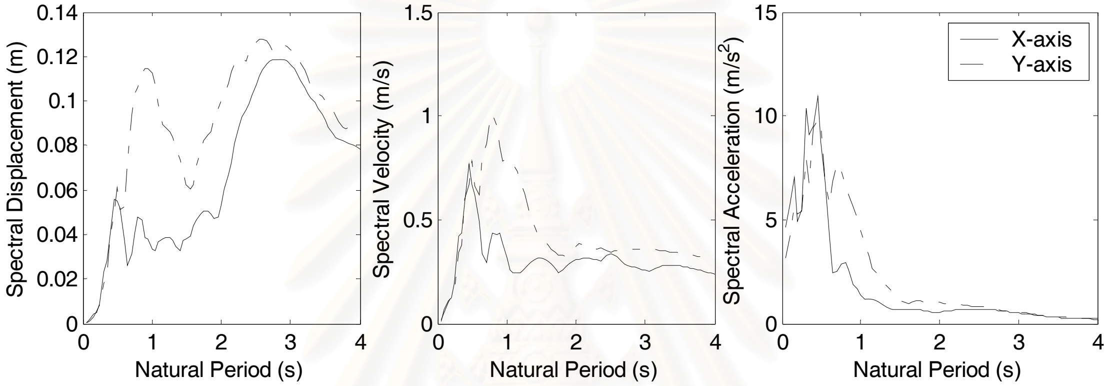


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

รูปที่ ก1.12 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Coyote lake land, Morgan hill, 1984

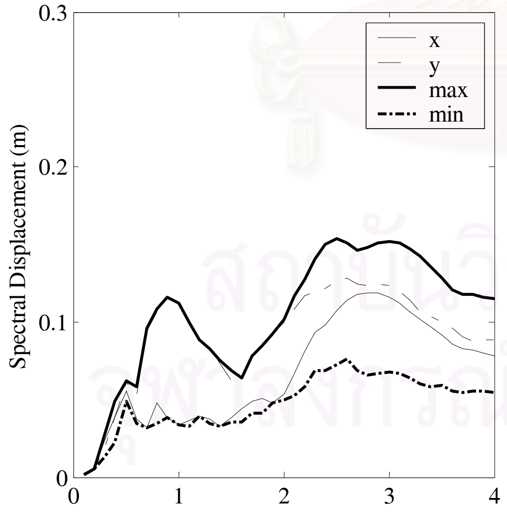


(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x (ข) ความเร่งผิวดินในแกน y

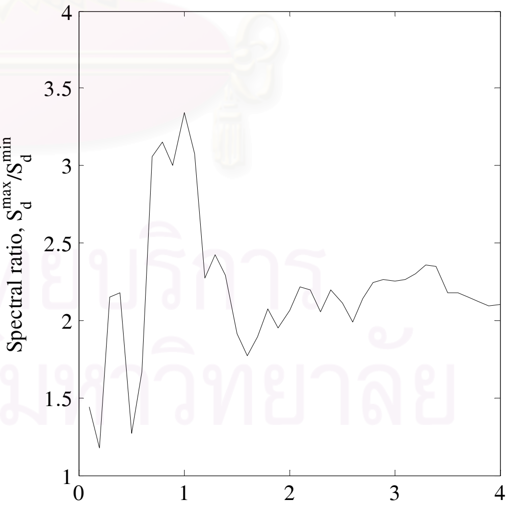


(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

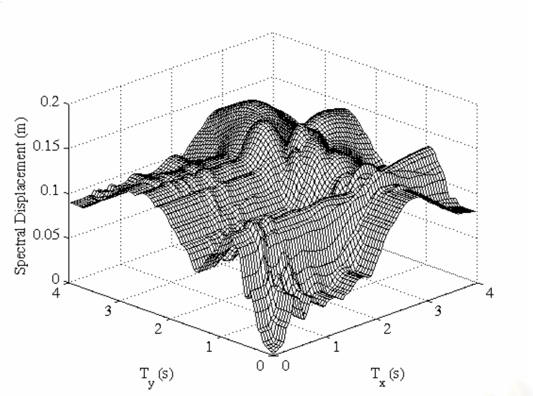


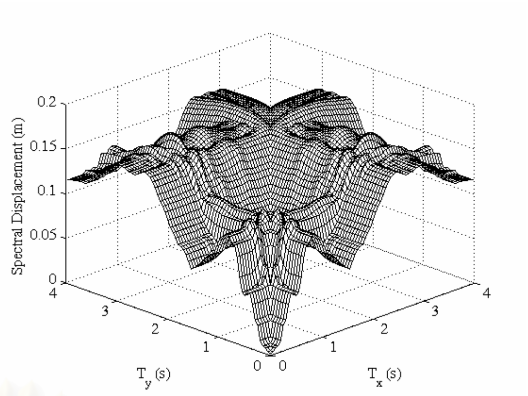
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

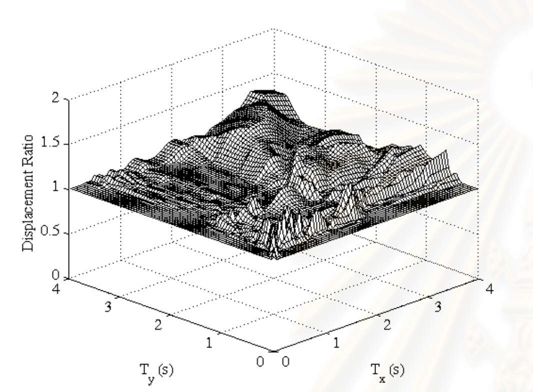
รูปที่ ก1.13 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Anderson Dam, Morgan hill, 1984

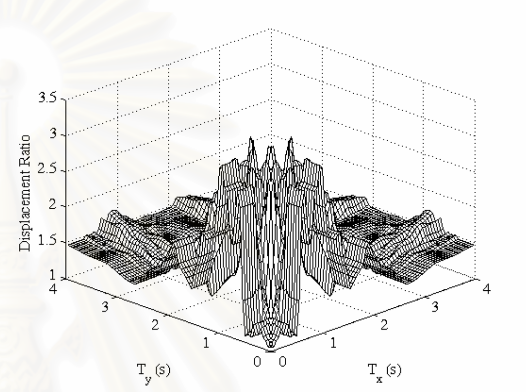




(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$

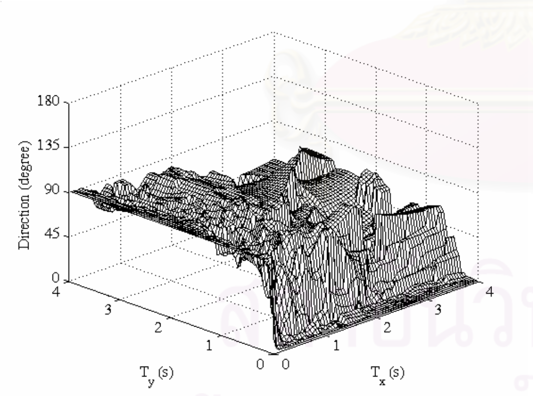
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$

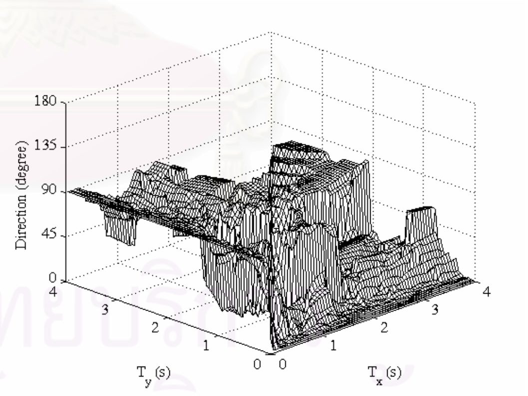




(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$

(ง) $R(T_x,T_y)$



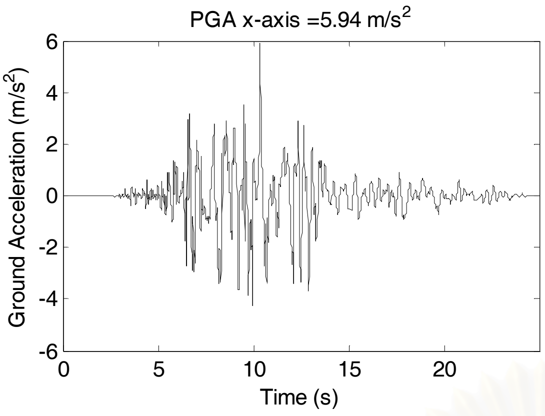


(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$

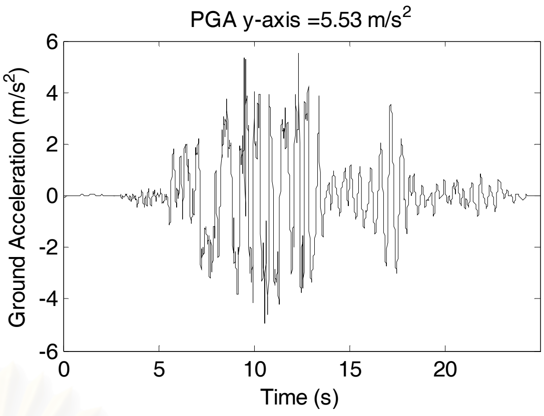
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

รูปที่ ก1.14 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Anderson Dam, Morgan hill, 1984

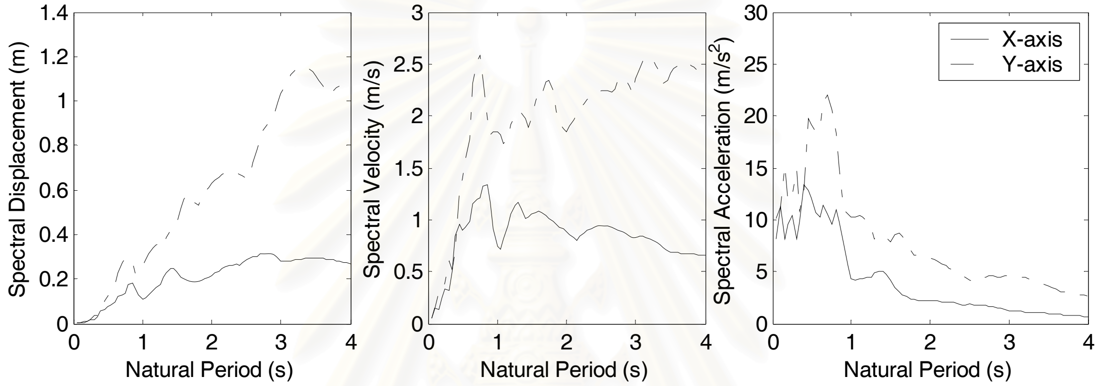
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



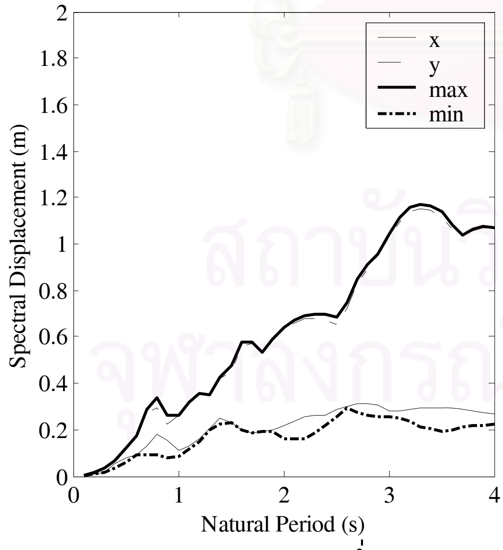
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



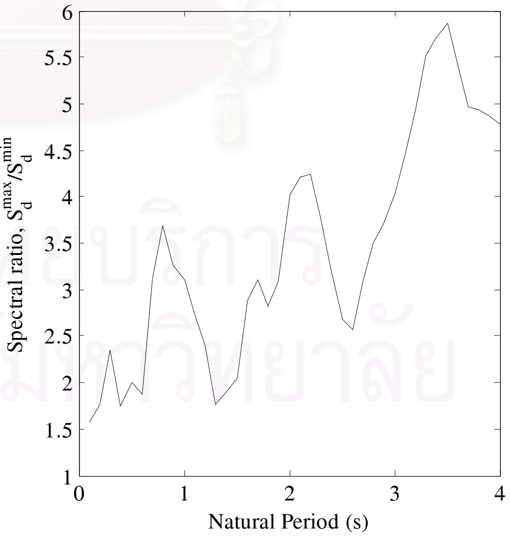
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



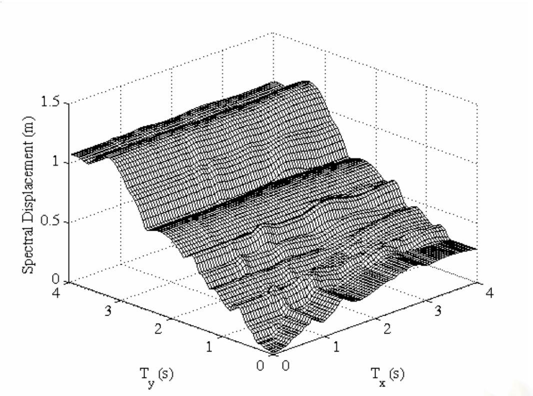
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



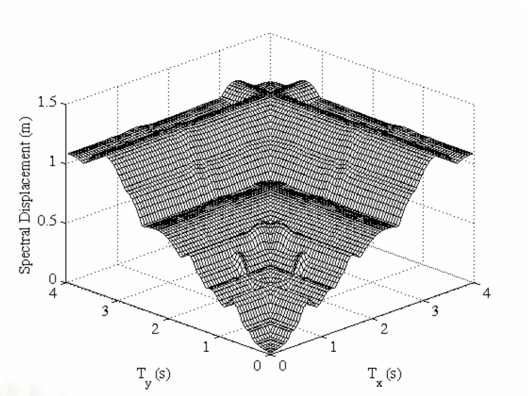
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.15 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว LGPC, Lomaprieta, 1989

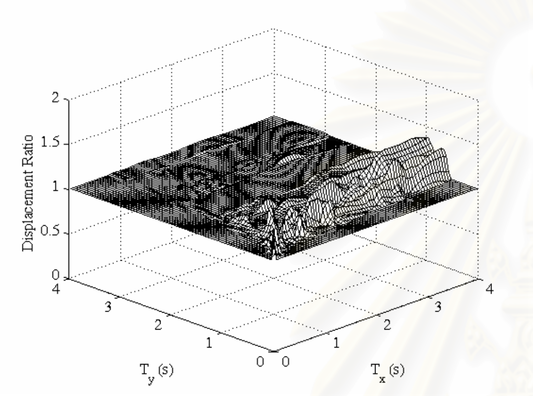
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



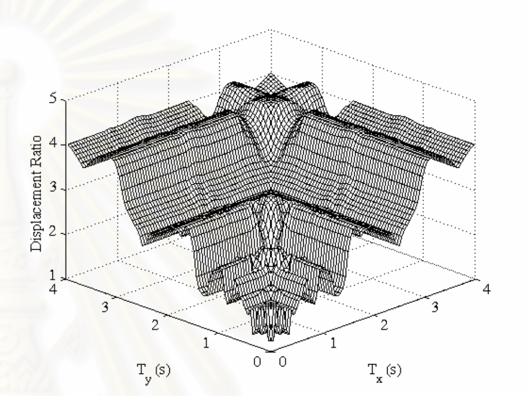
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



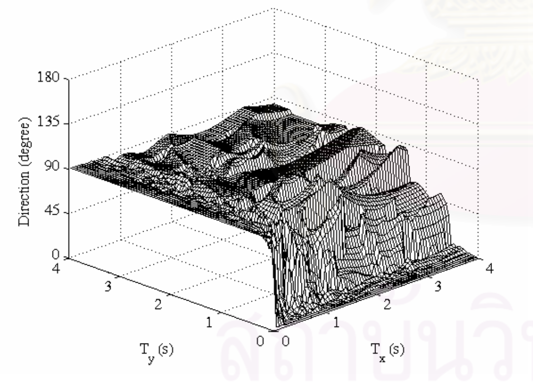
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$

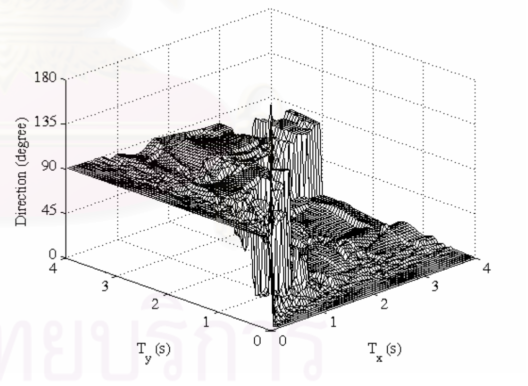


(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



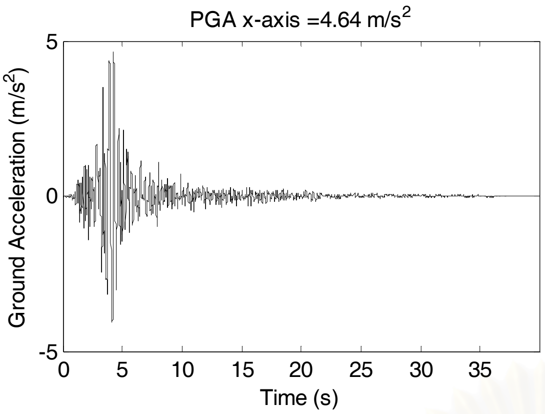


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

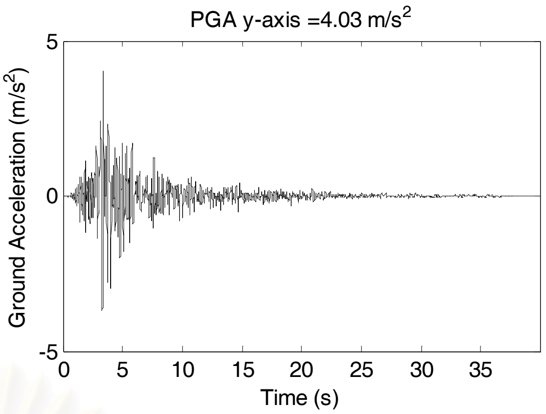
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

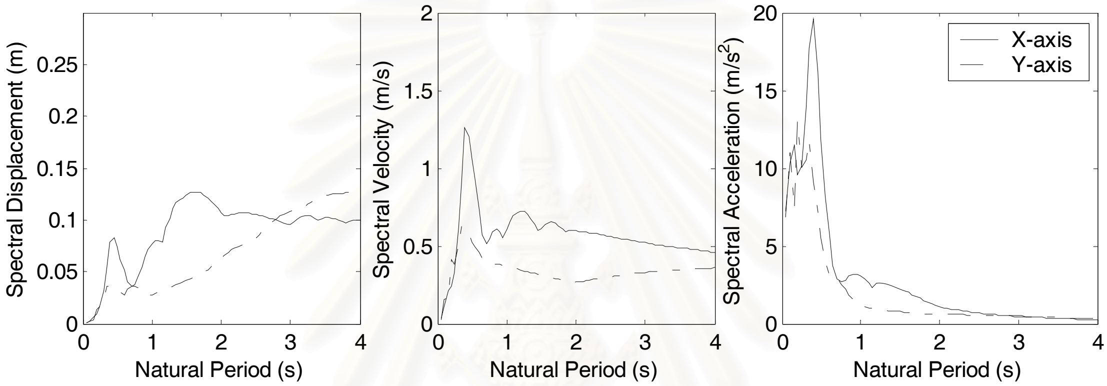
รูปที่ ก1.16 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว LGPC, Lomaprieta, 1989



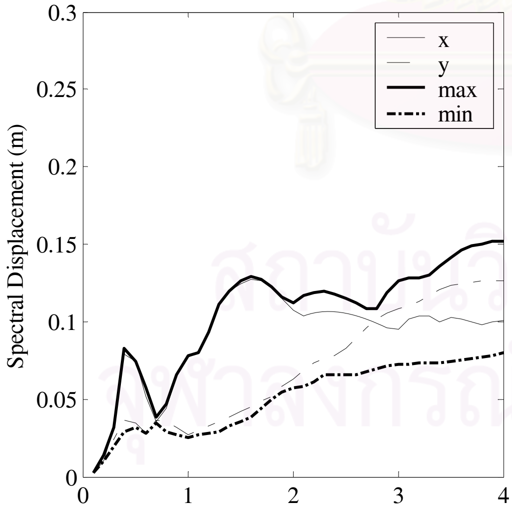
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



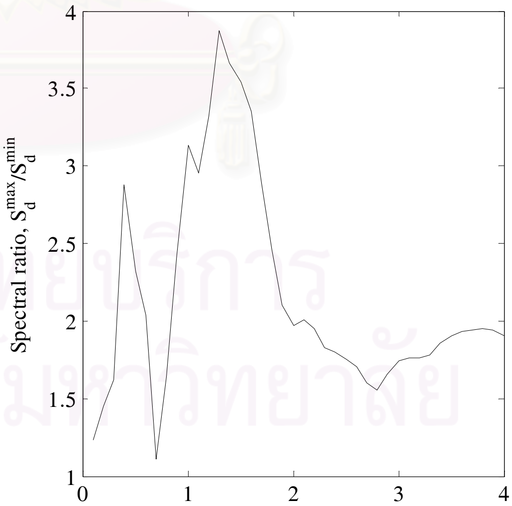
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



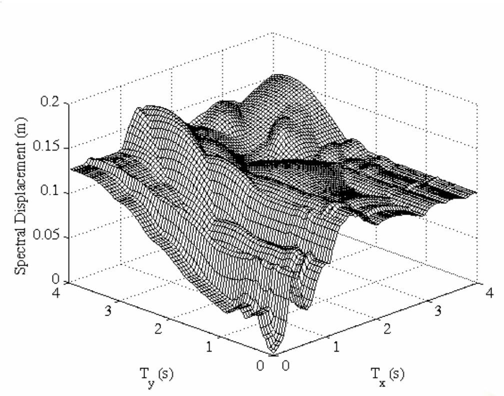
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



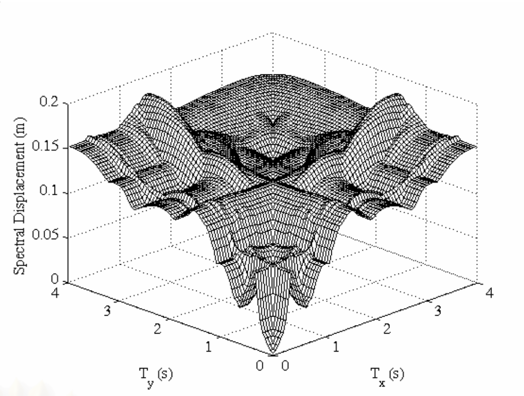
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.17 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Gilroy array 1, Lomaprieta, 1989

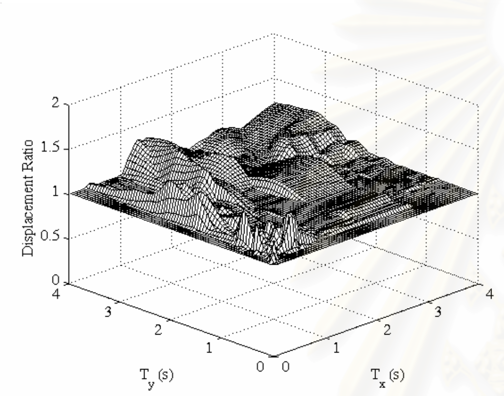
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



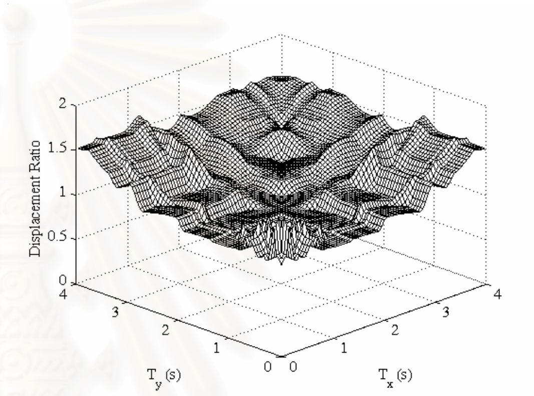
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$



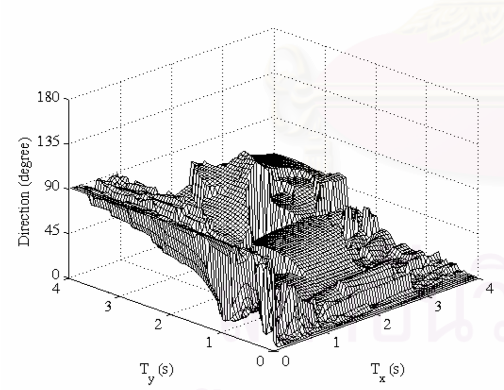
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$



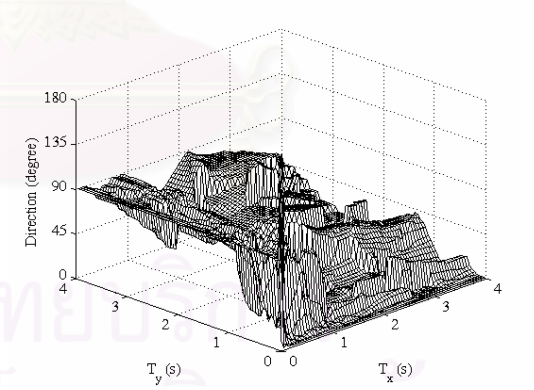
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$



(ง) $R(T_x,T_y)$

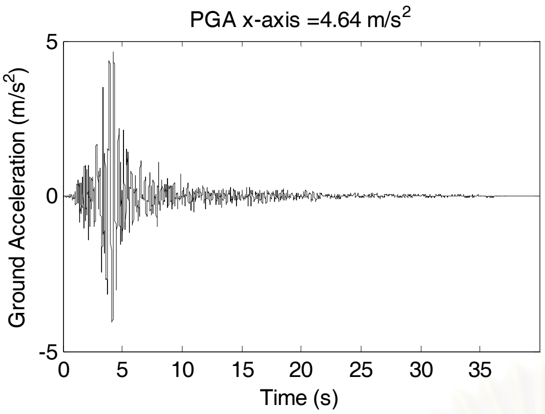


(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$

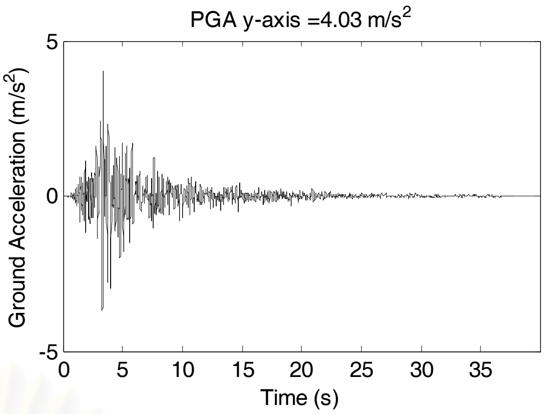


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

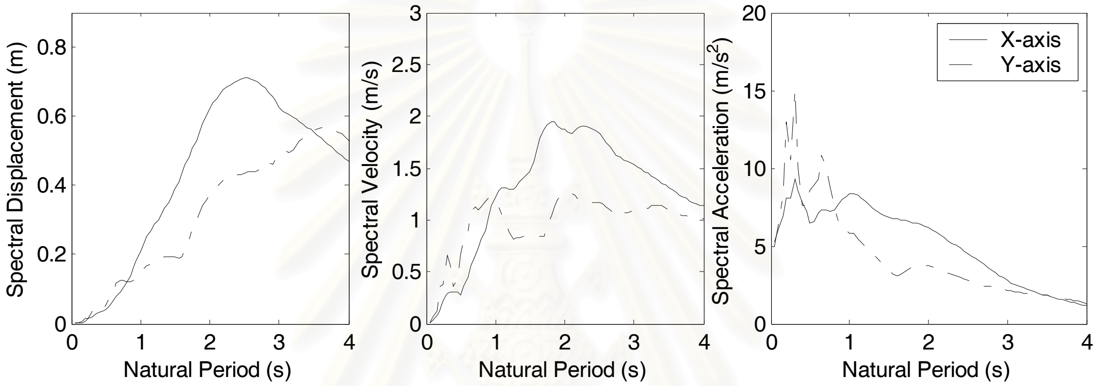
รูปที่ ก1.18 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Gilroy array 1, Lomaprieta, 1989



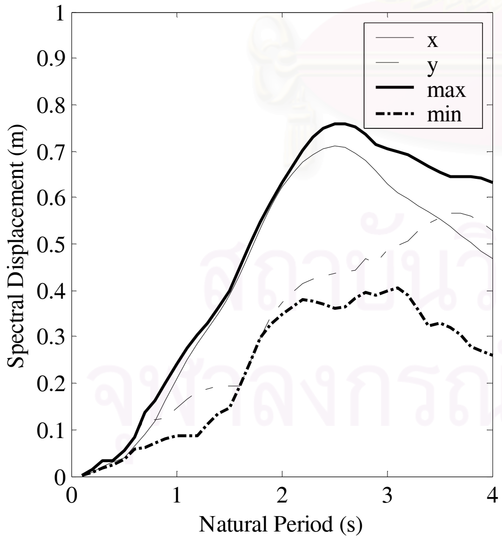
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



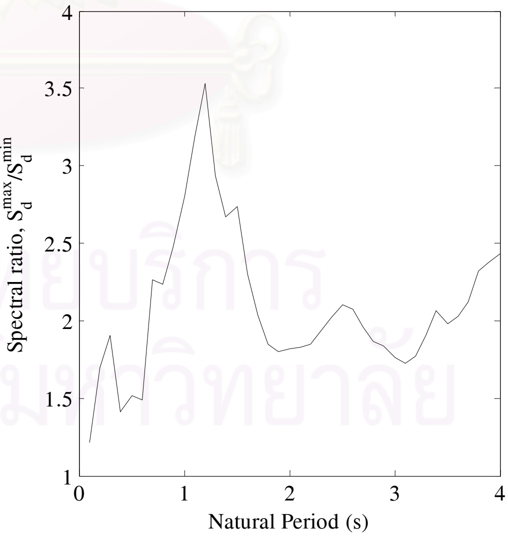
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



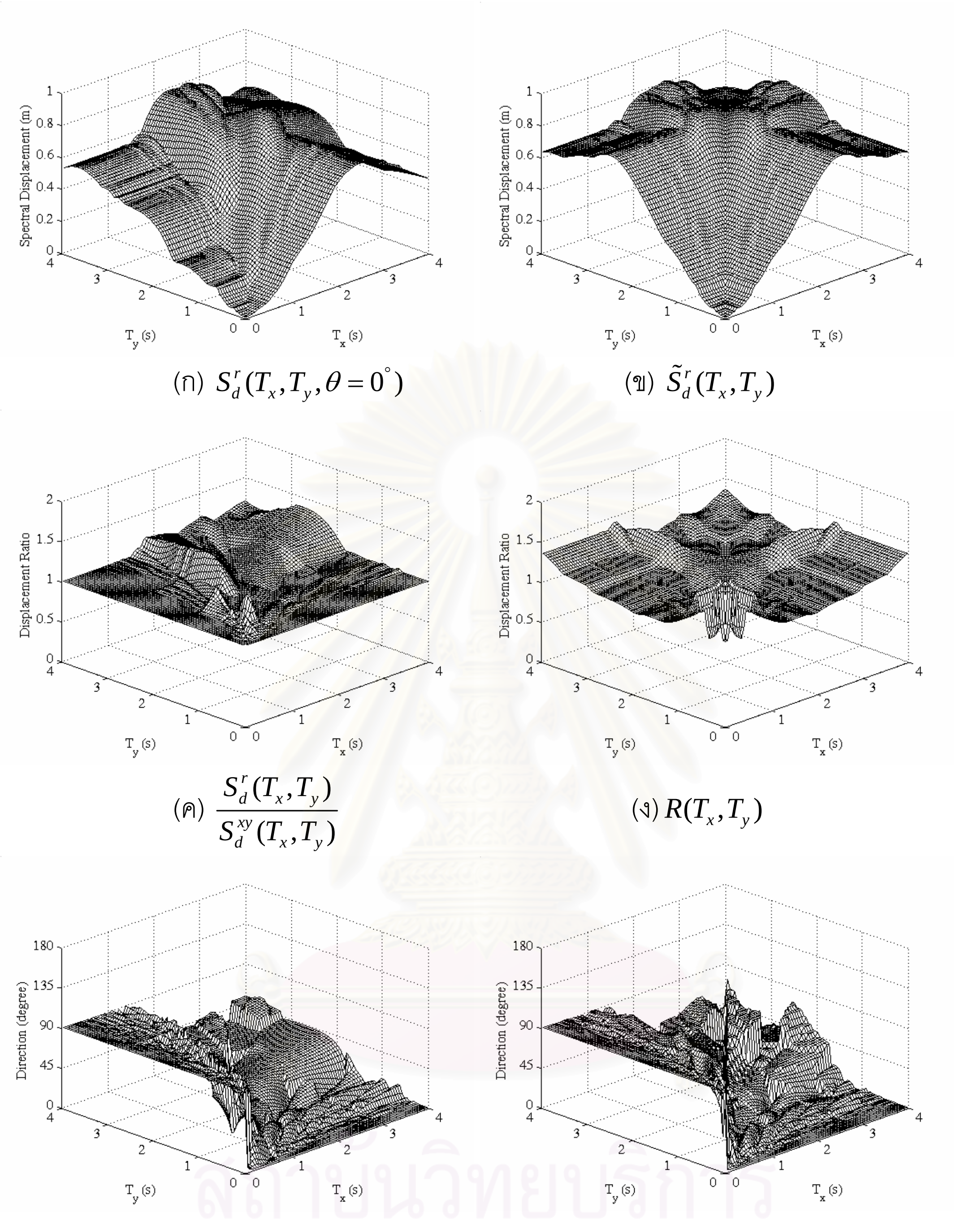
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.19 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Erzican, 1992

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



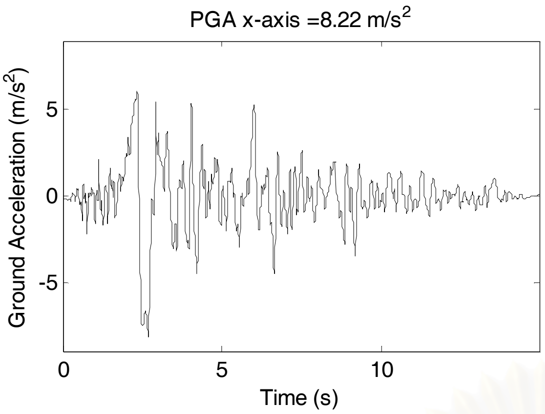
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$ (ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$

(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$ (ง) $R(T_x,T_y)$

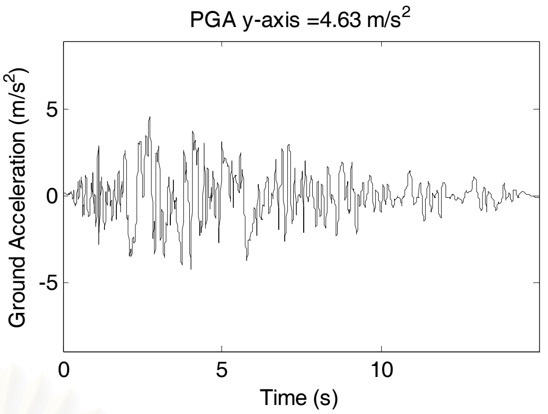
(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$ (ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

รูปที่ ก1.20 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Erzican, 1992

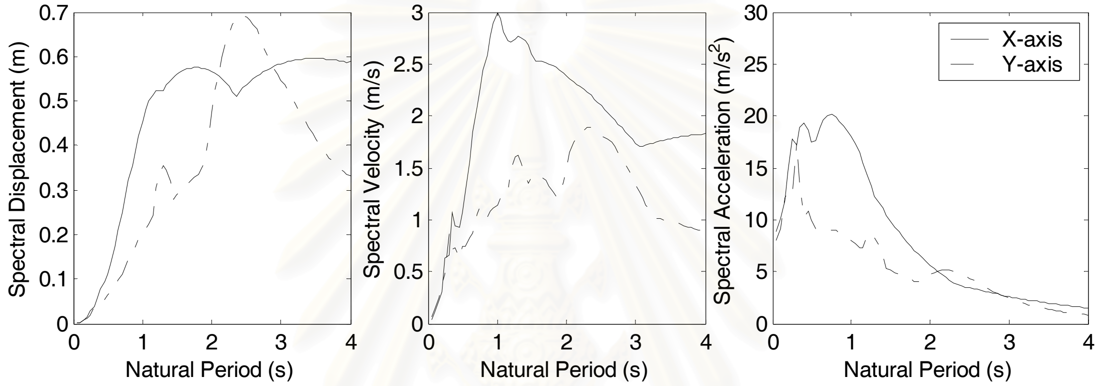
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



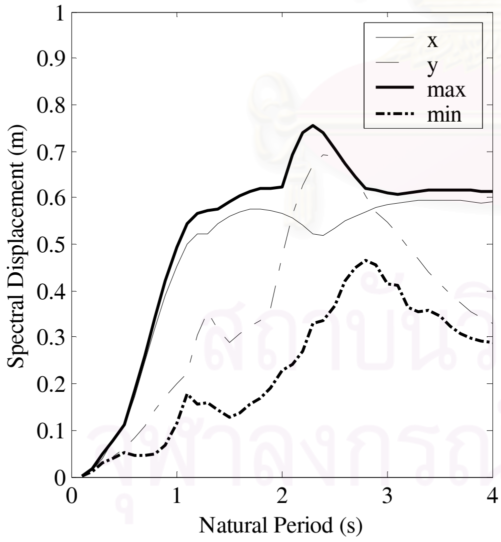
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



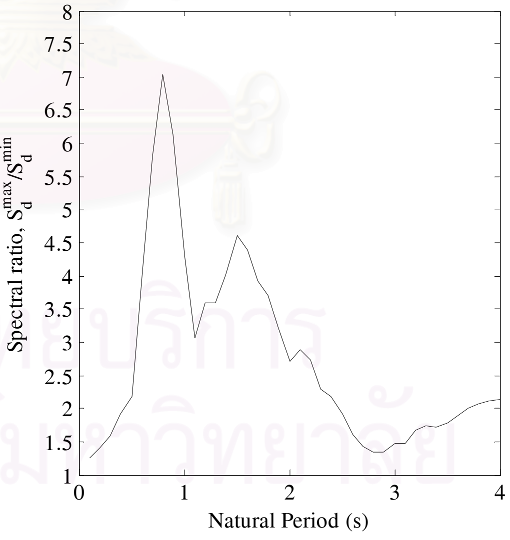
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



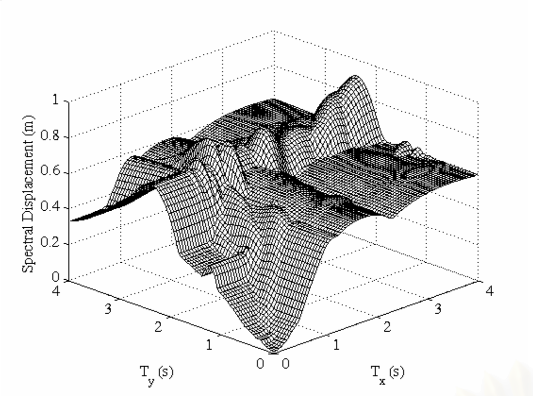
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



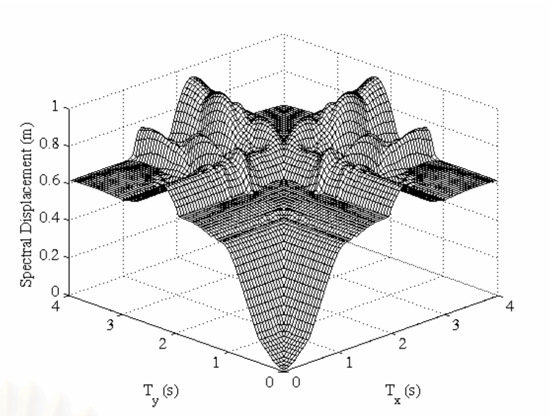
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.21 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Rinaldi receiving station, Northridge, 1994

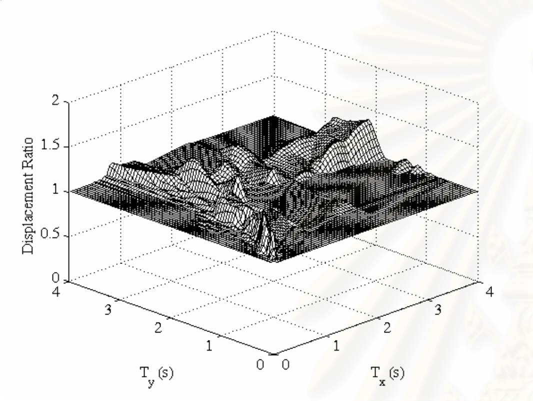
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



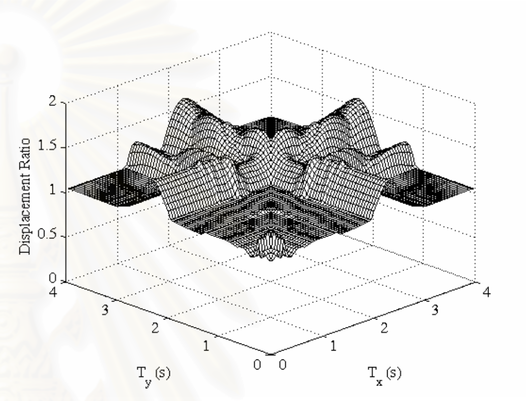
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



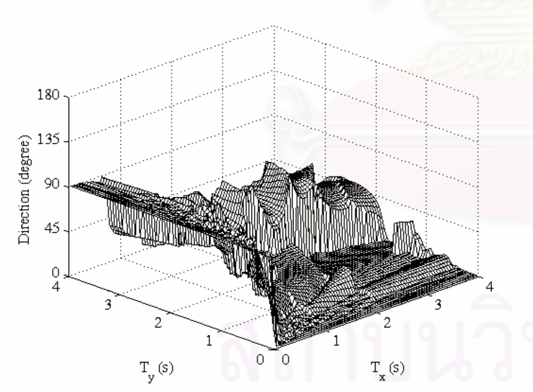
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



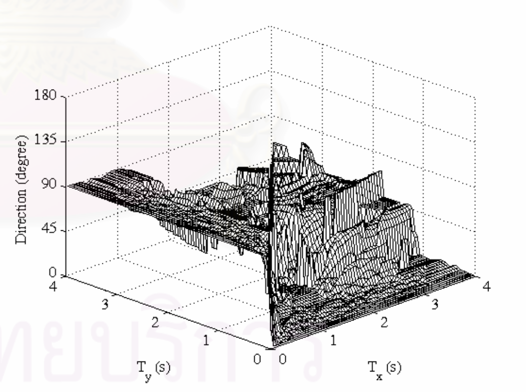
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



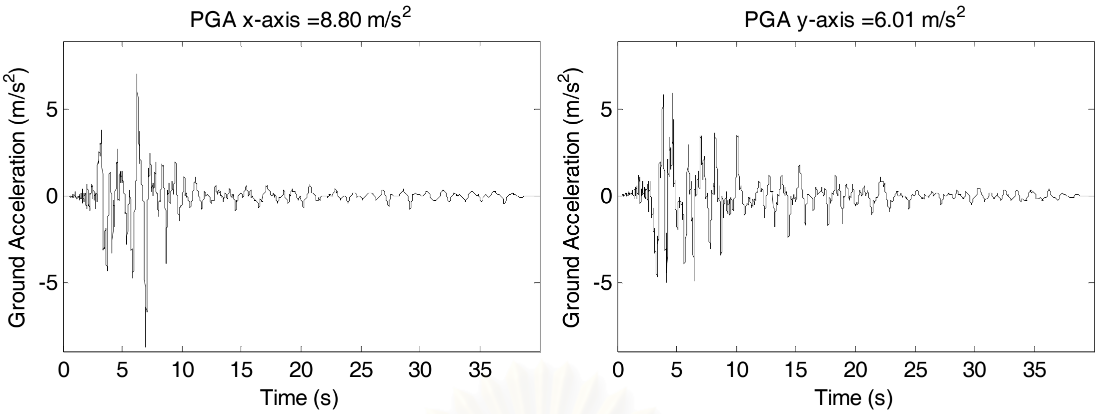
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



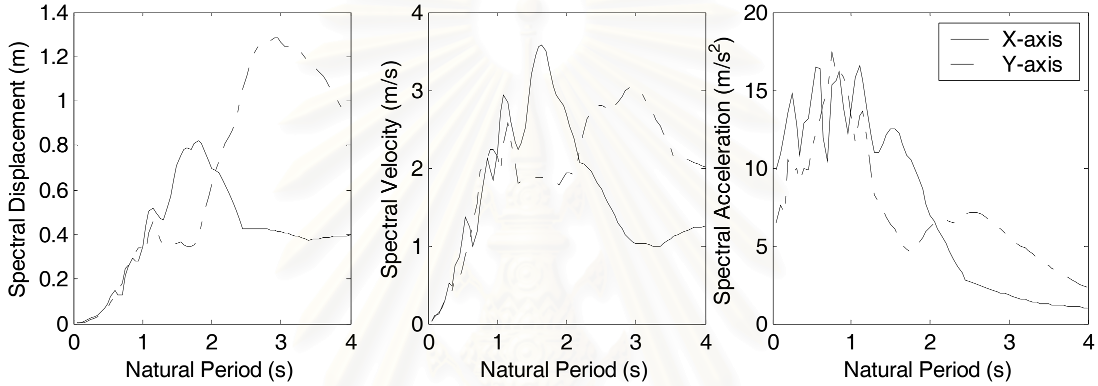
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

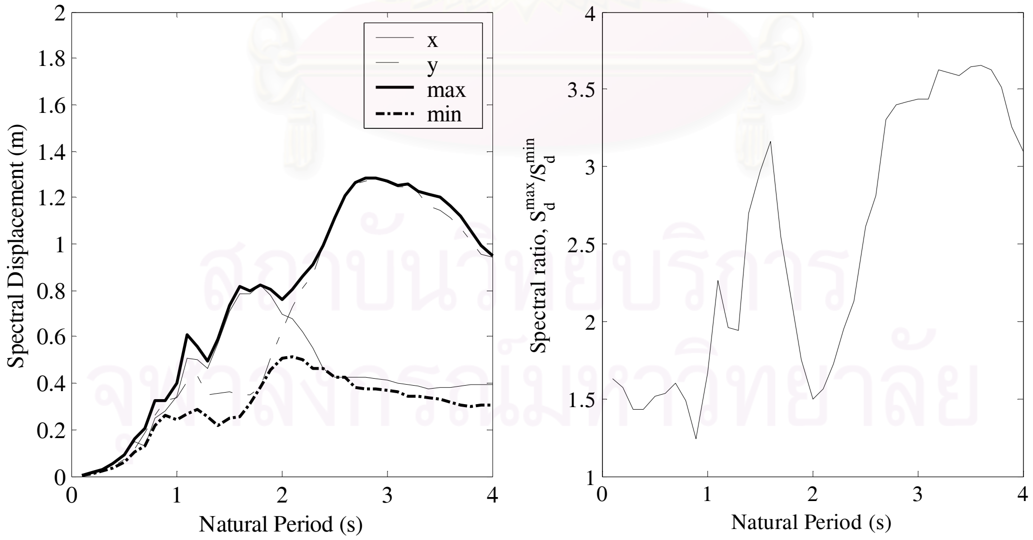
รูปที่ ก1.22 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Rinaldi receiving station, Northridge, 1994



(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x (ข) ความเร่งผิวดินในแกน y

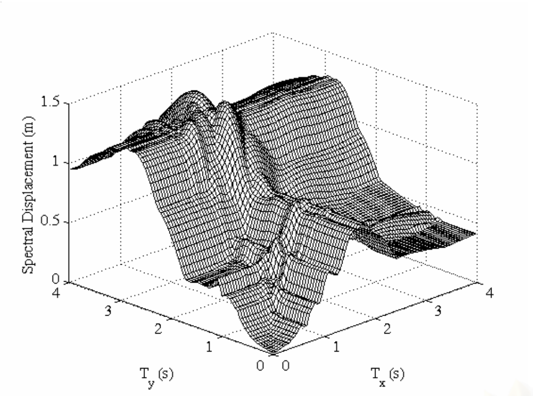


(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง

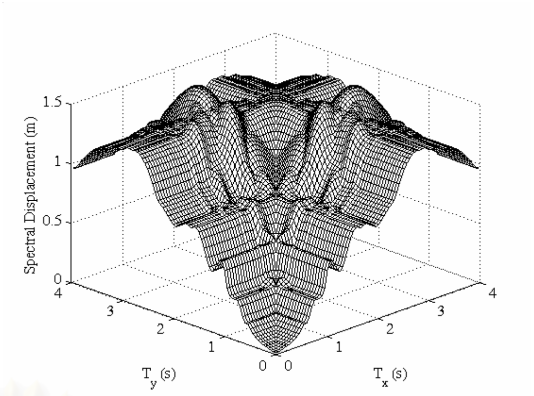


(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด (จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

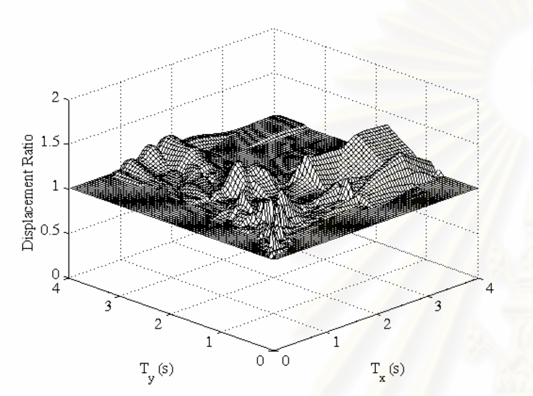
รูปที่ ก1.23 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Sylmar converter station, Northridge, 1994



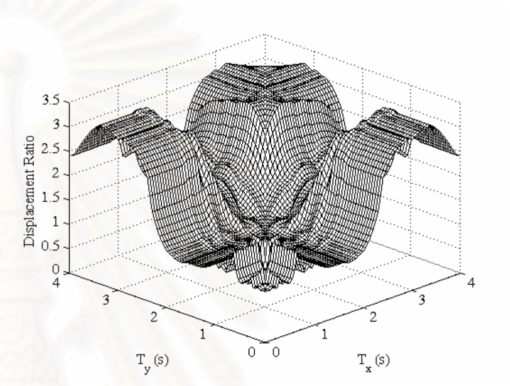
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



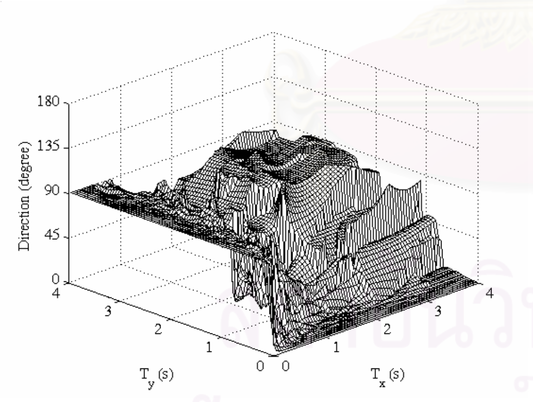
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



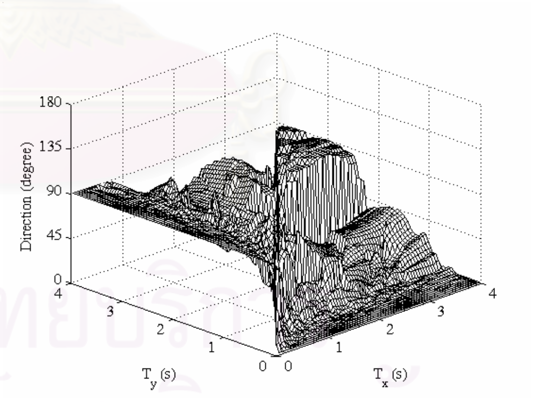
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

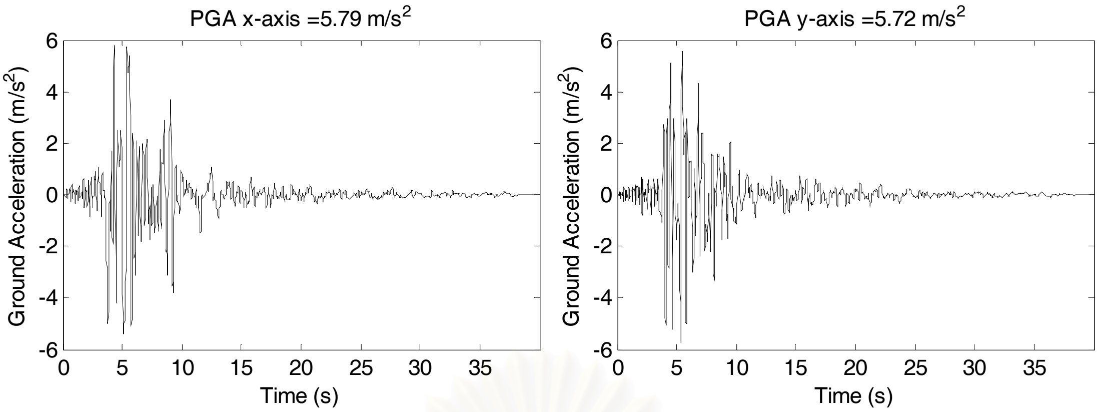


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

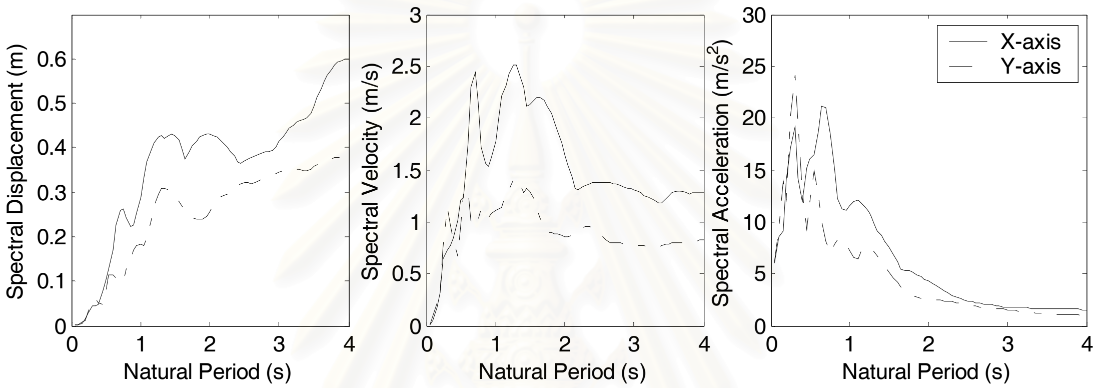


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

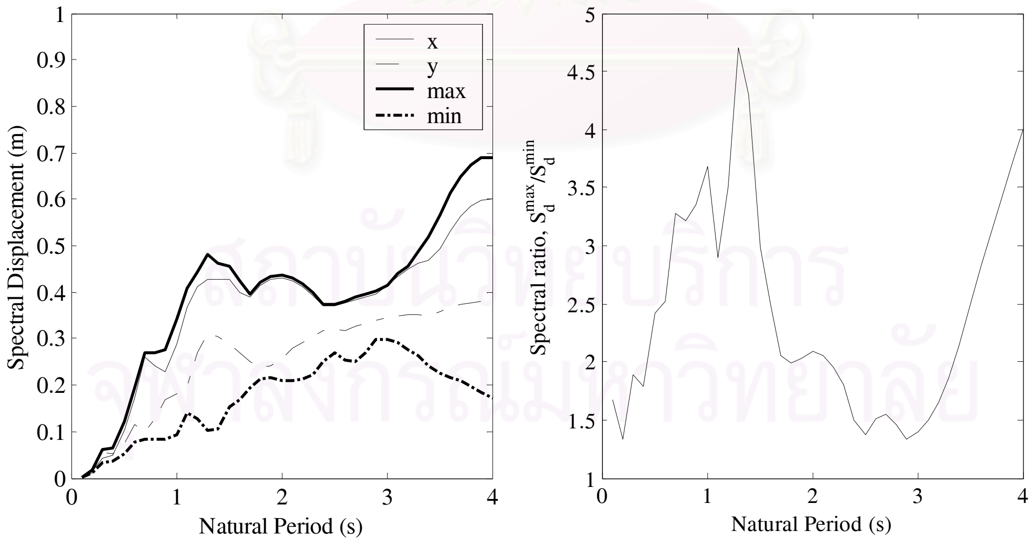
รูปที่ ก1.24 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Sylmar converter station, Northridge, 1994



(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x (ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



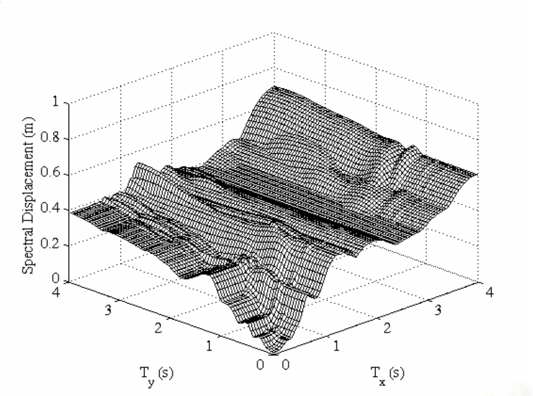
(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



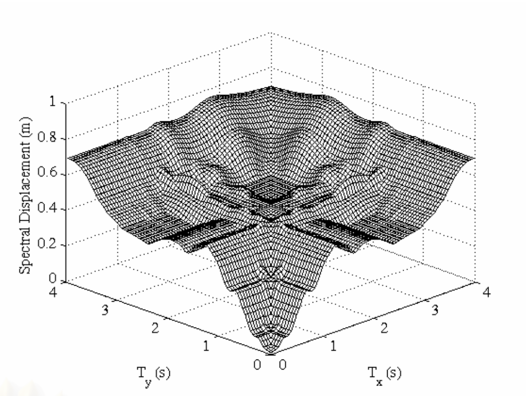
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด (จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.25 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Newhall fire station, Northridge, 1994

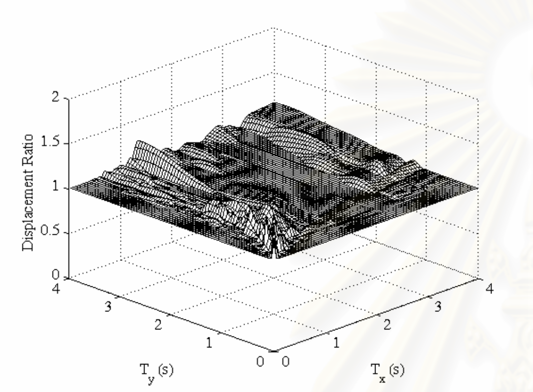
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



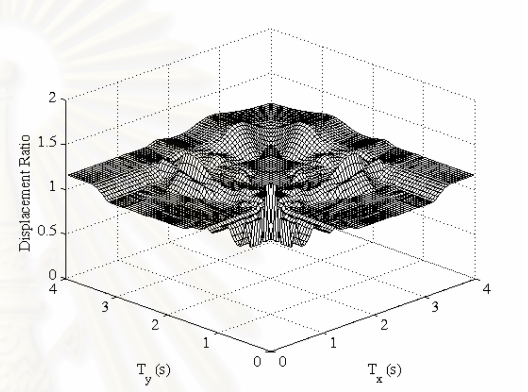
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



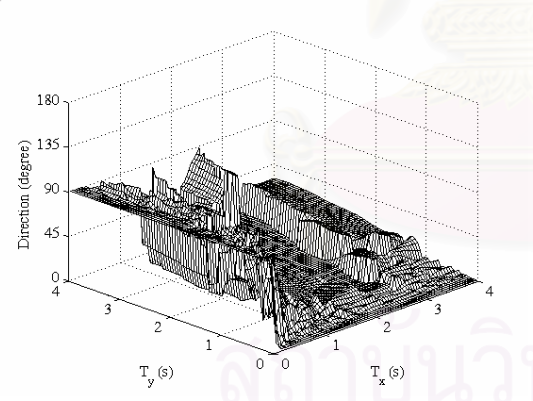
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



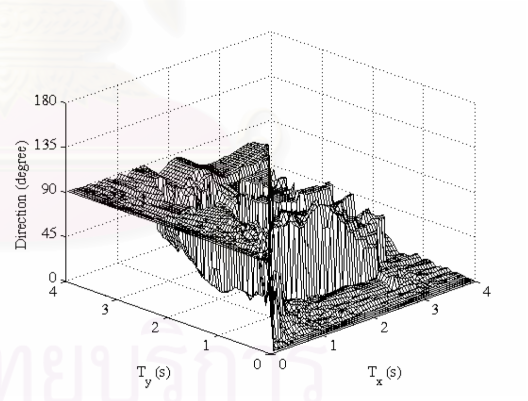
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



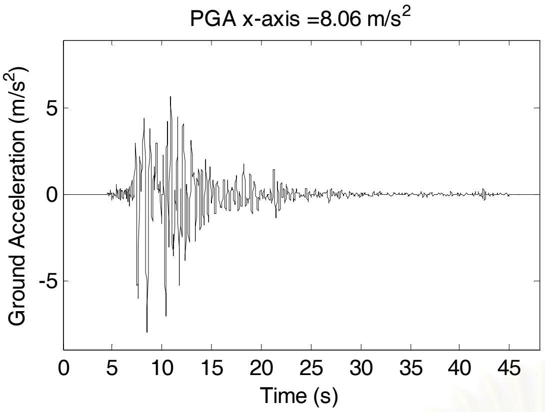
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



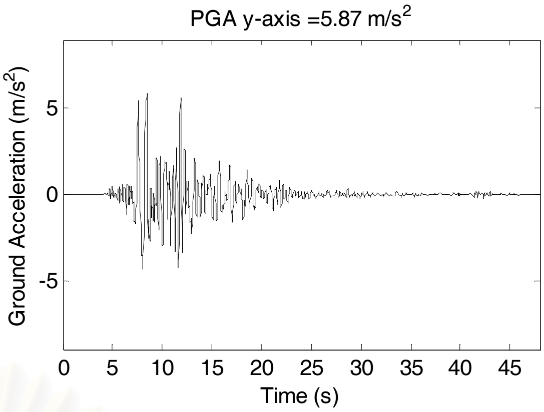
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

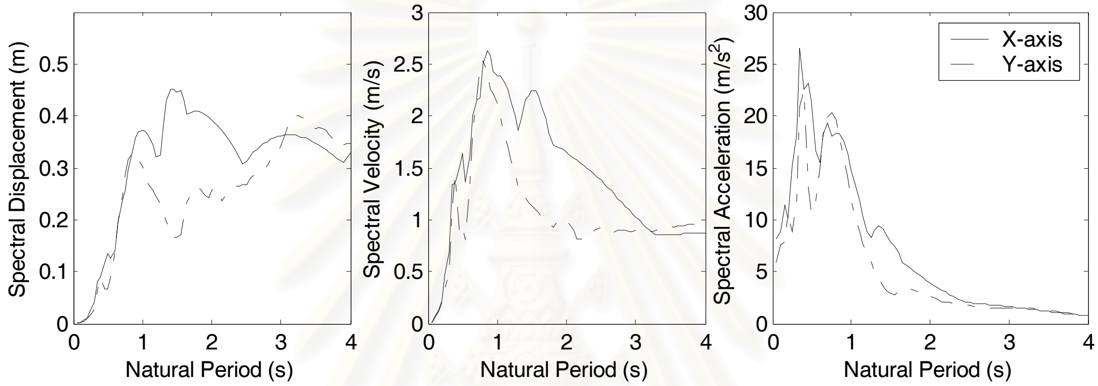
รูปที่ ก1.26 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Newhall fire station, Northridge, 1994



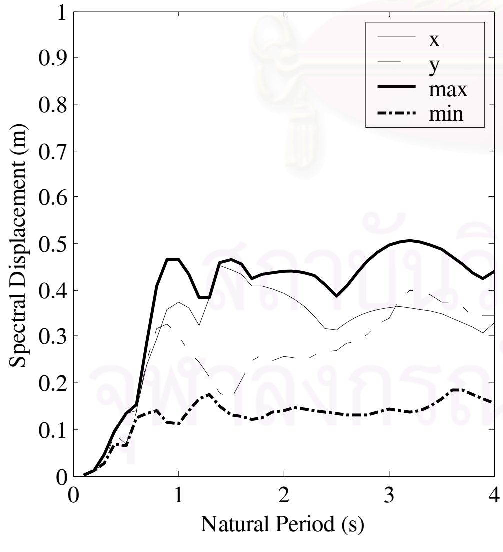
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



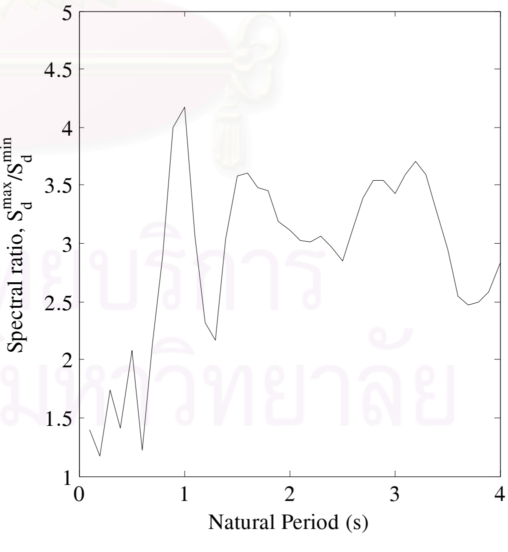
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



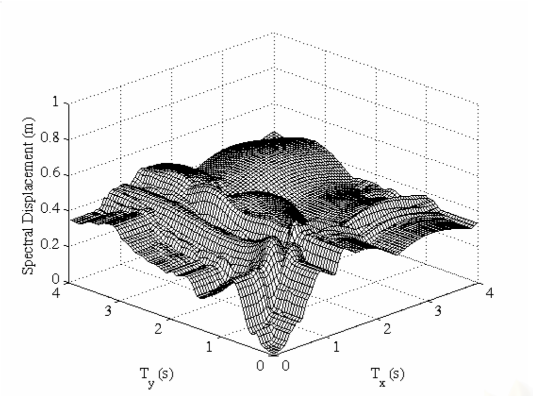
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



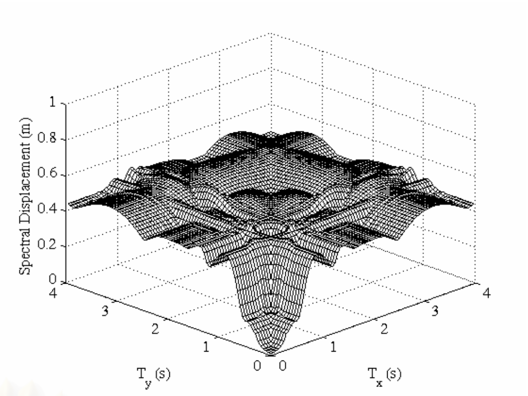
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.27 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA,Kobe, 1995

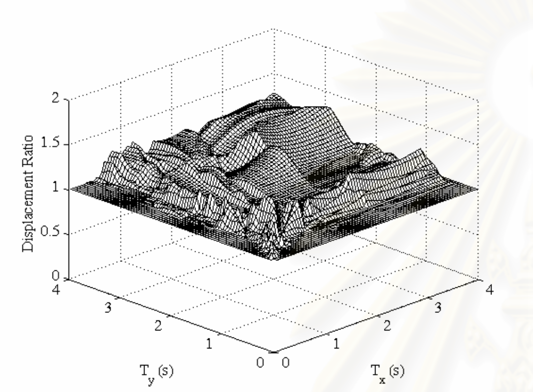
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



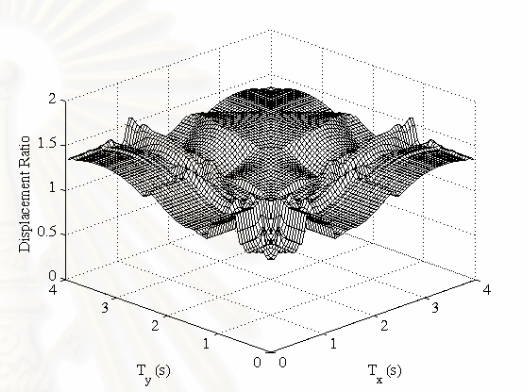
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



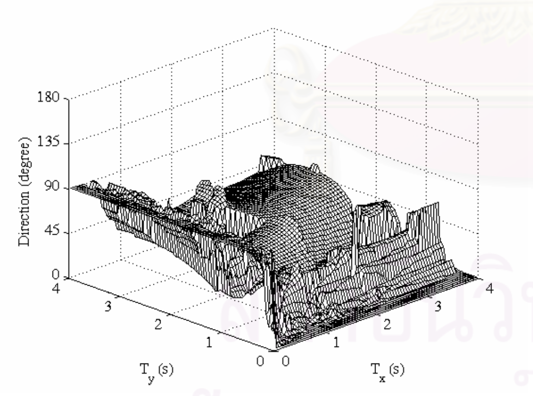
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



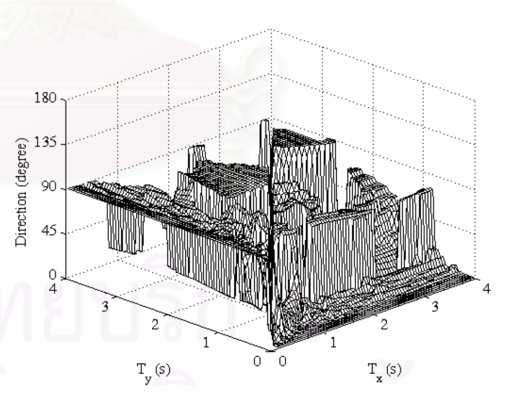
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



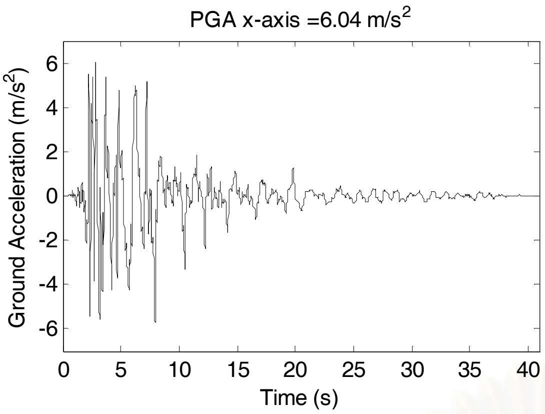
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



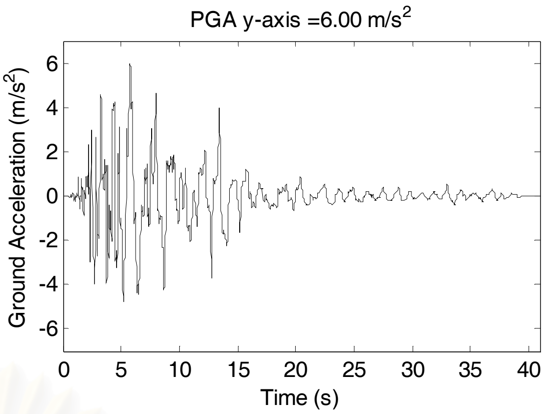
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

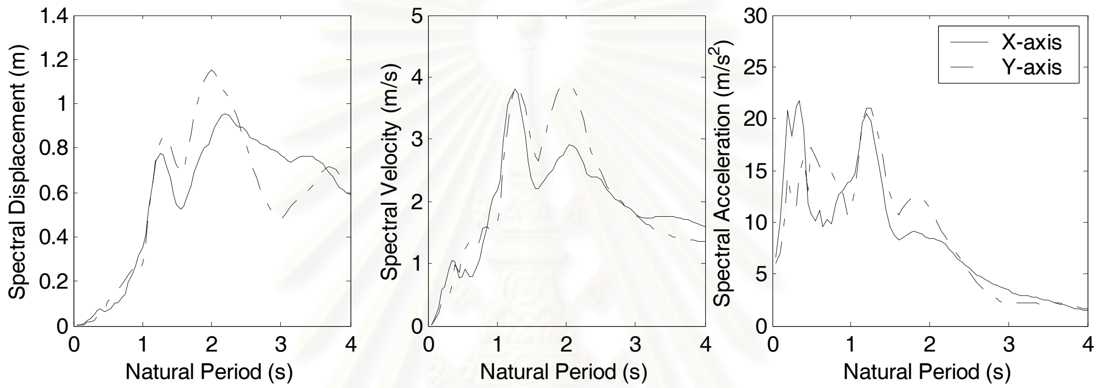
รูปที่ ก1.28 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว JMA,Kobe, 1995



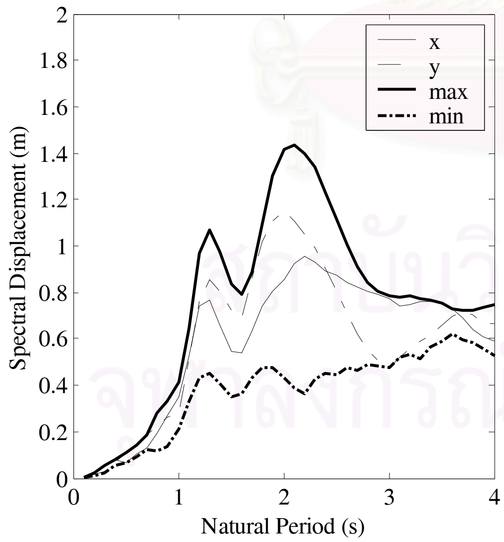
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



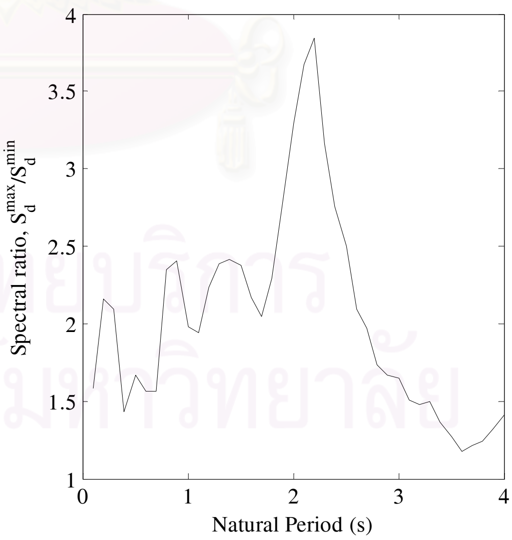
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



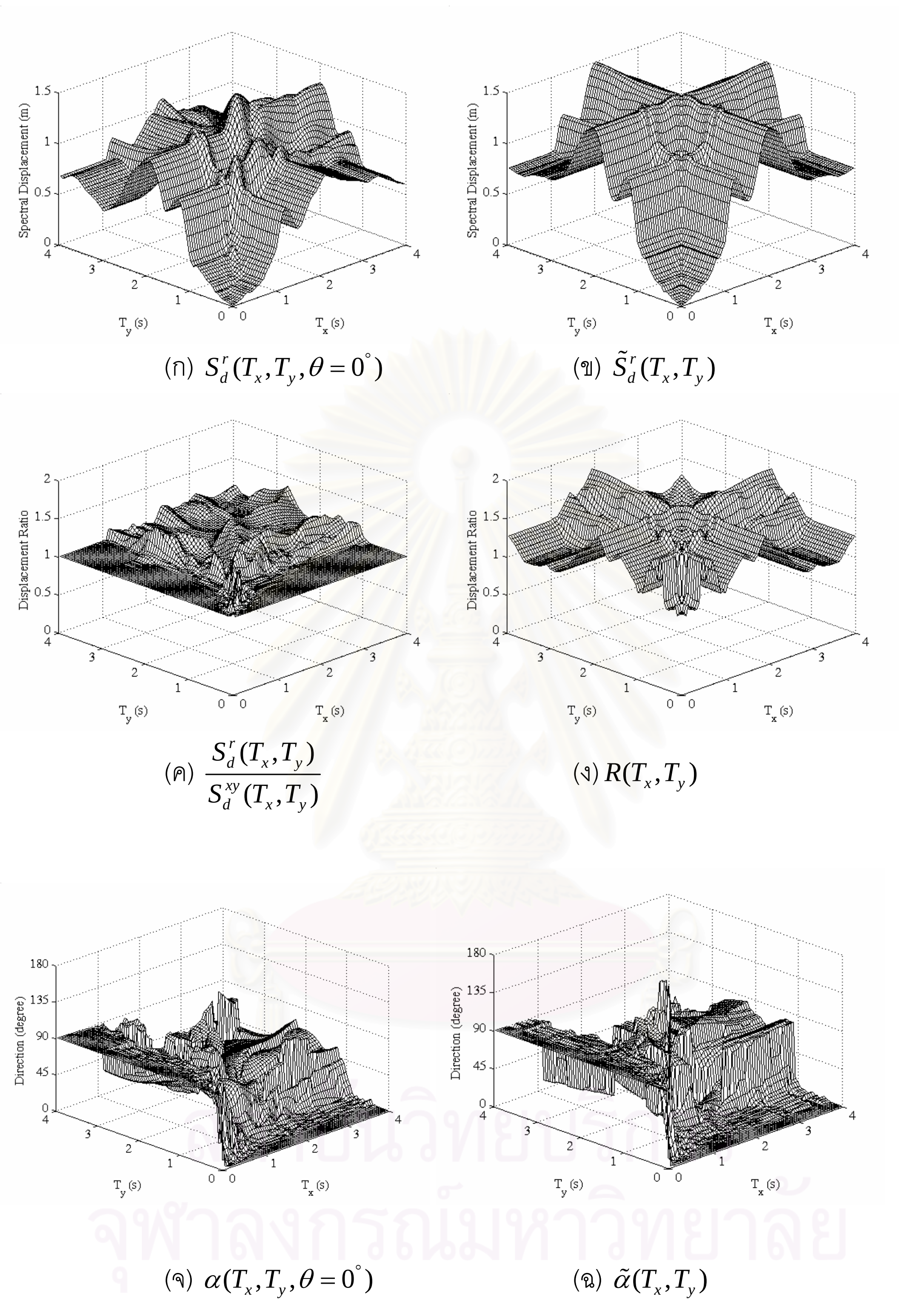
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.29 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Takatori, Kobe, 1995

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

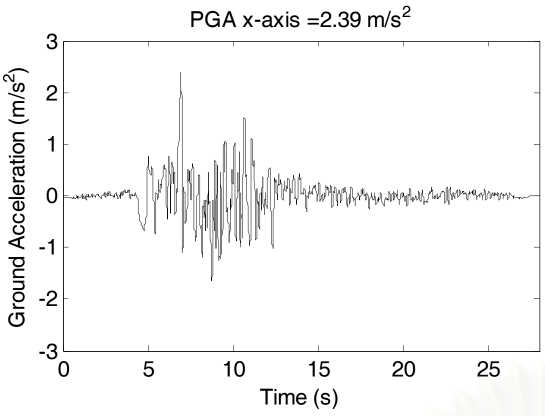


(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$ (ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$

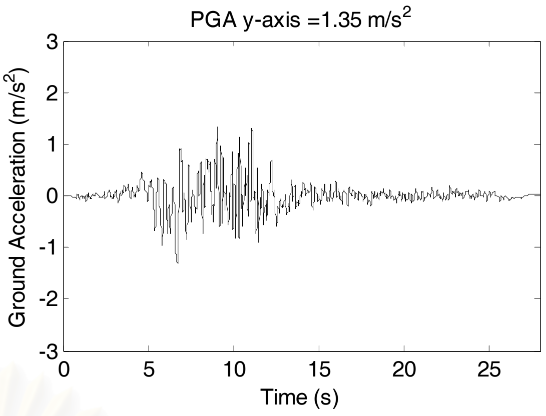
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$ (ง) $R(T_x, T_y)$

(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$ (ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

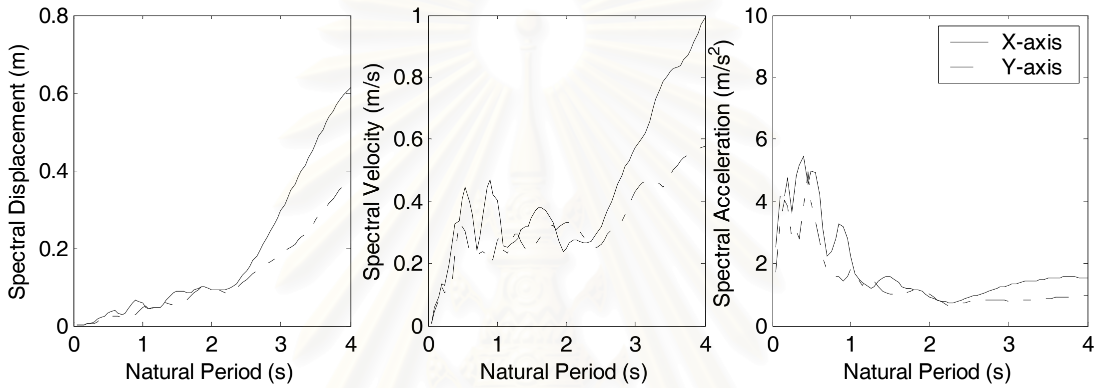
รูปที่ ก1.30 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Takatori, Kobe, 1995



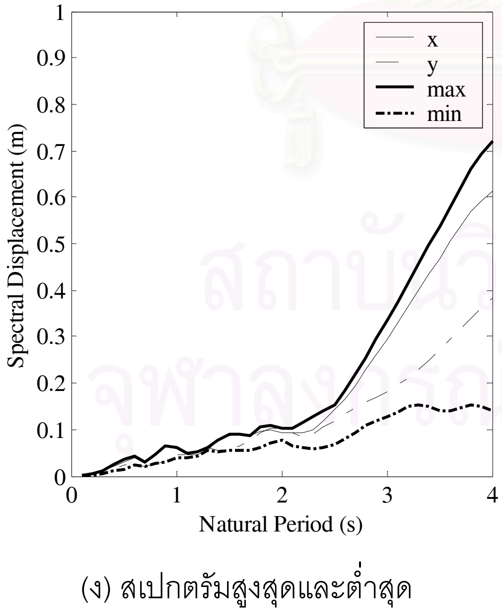
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



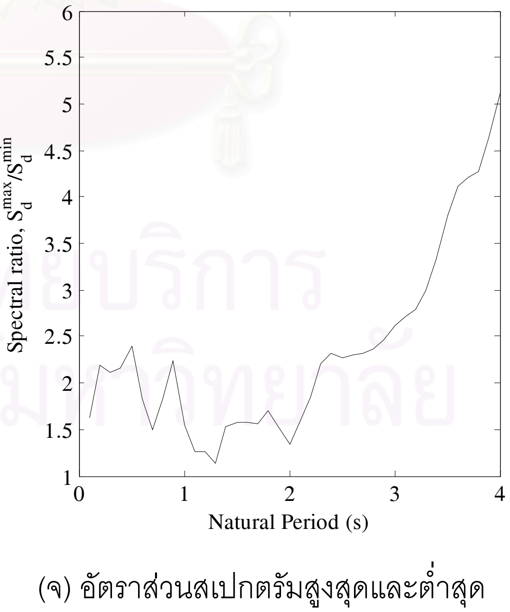
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง

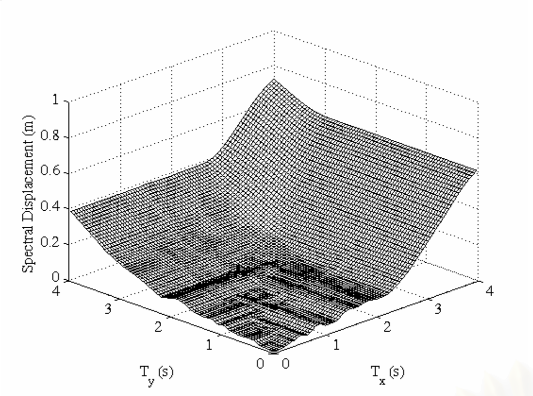


(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

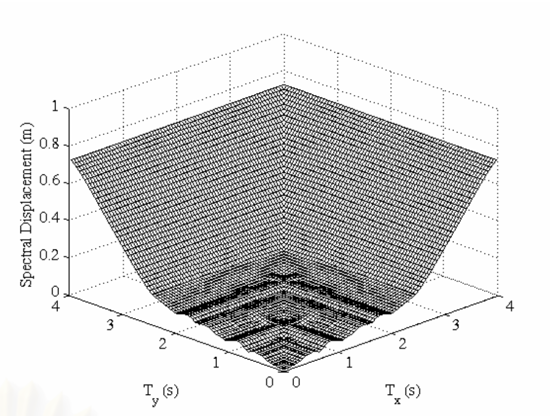


(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

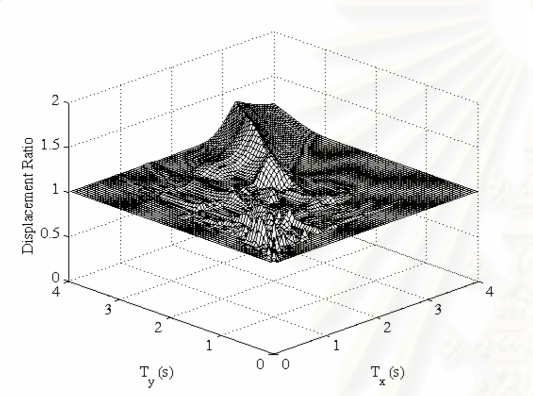
รูปที่ ก1.31 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Gebze, Kocaeli, 1999



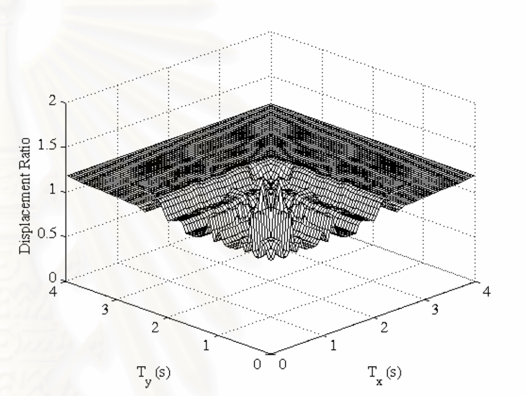
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^{\circ})$



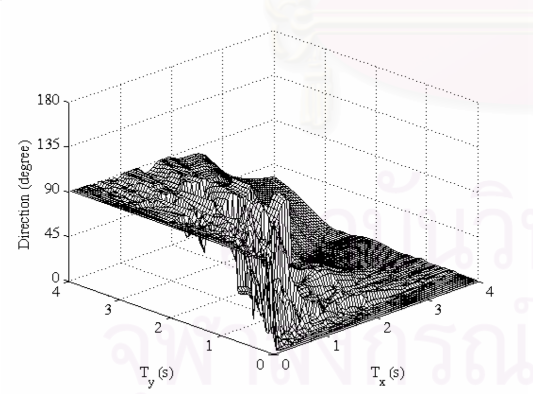
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



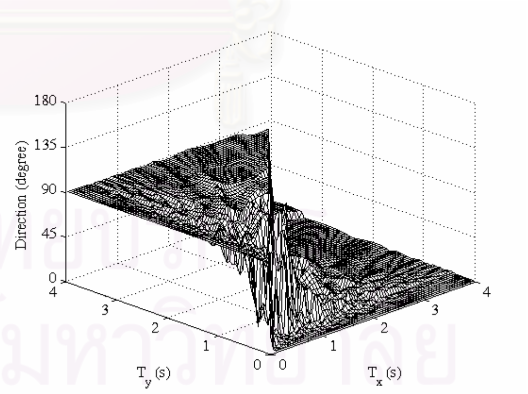
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

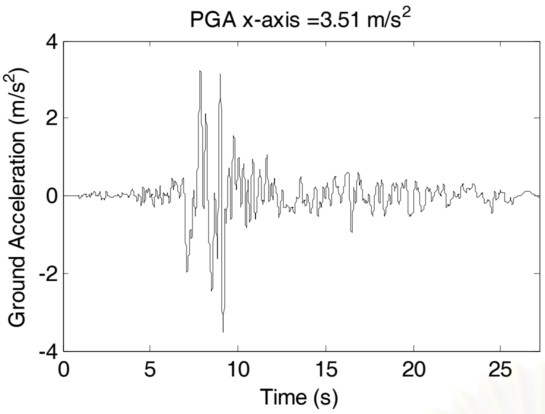


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^{\circ})$

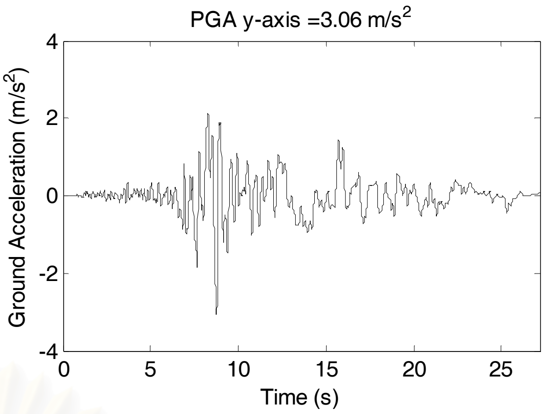


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

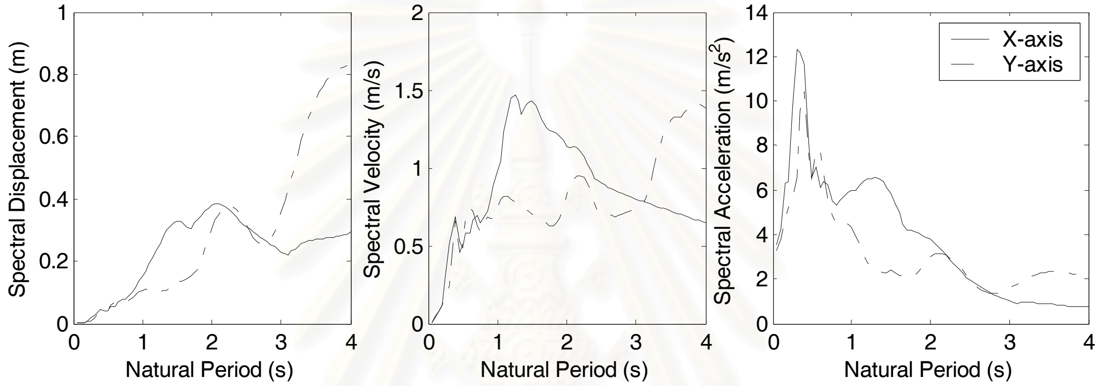
รูปที่ ก1.32 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Gebze, Kocaeli, 1999



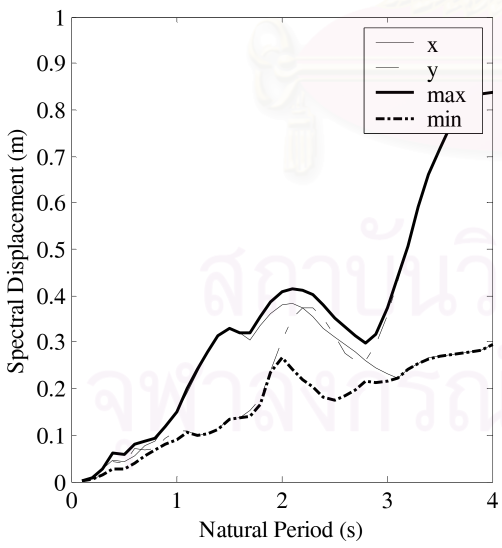
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



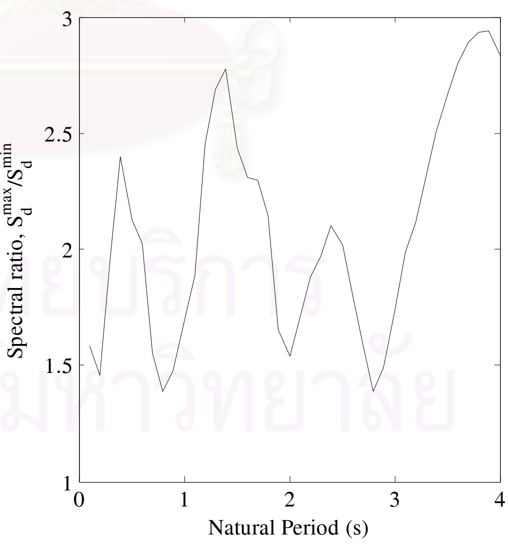
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



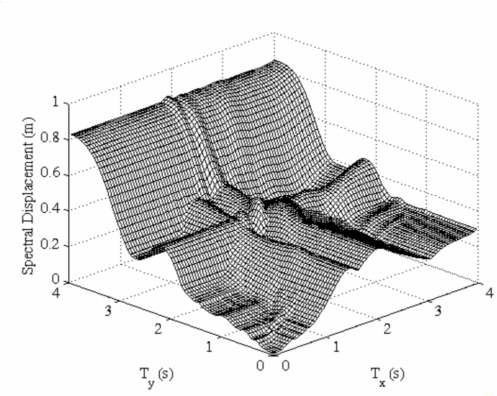
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



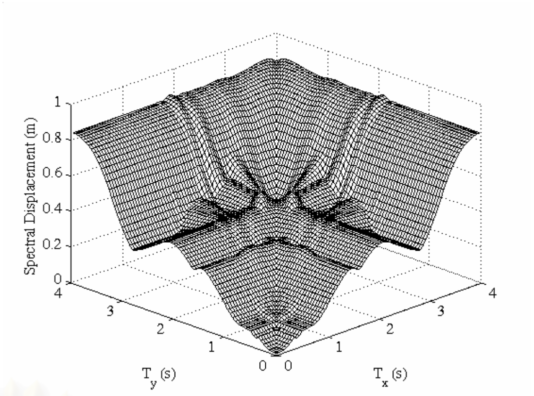
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.33 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Duzce, Kocaeli, 1999

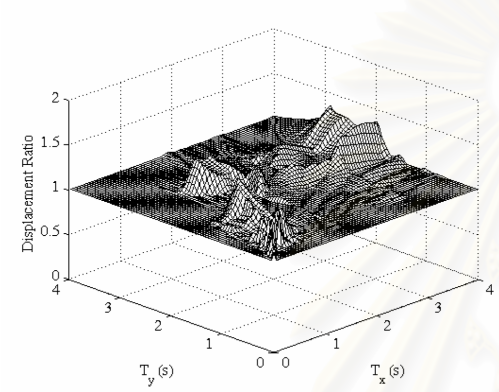
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



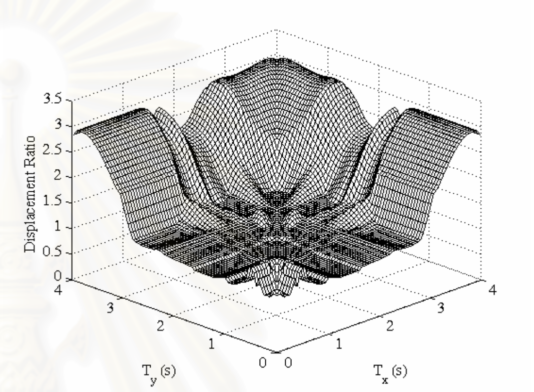
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



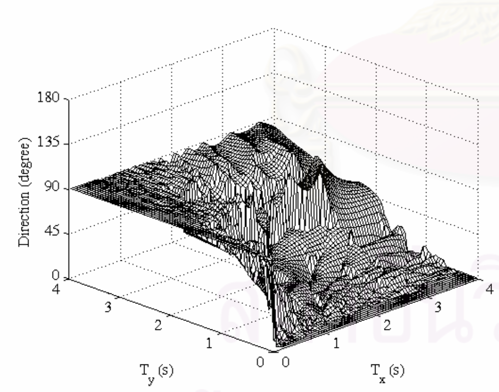
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



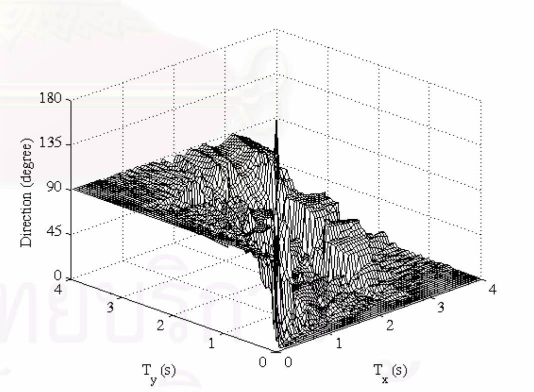
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

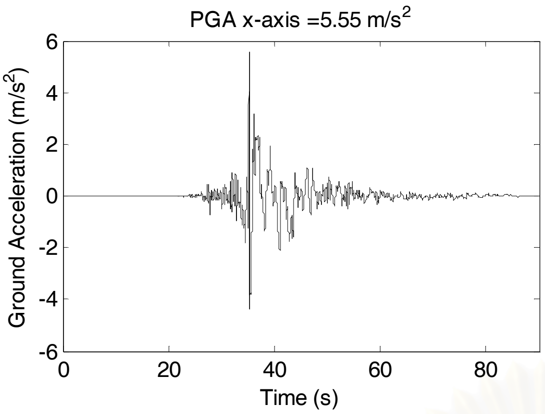


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

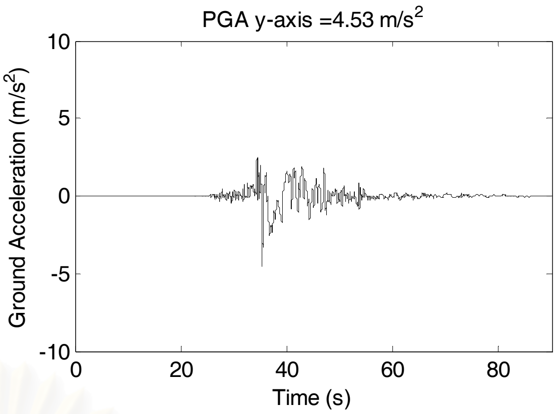


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

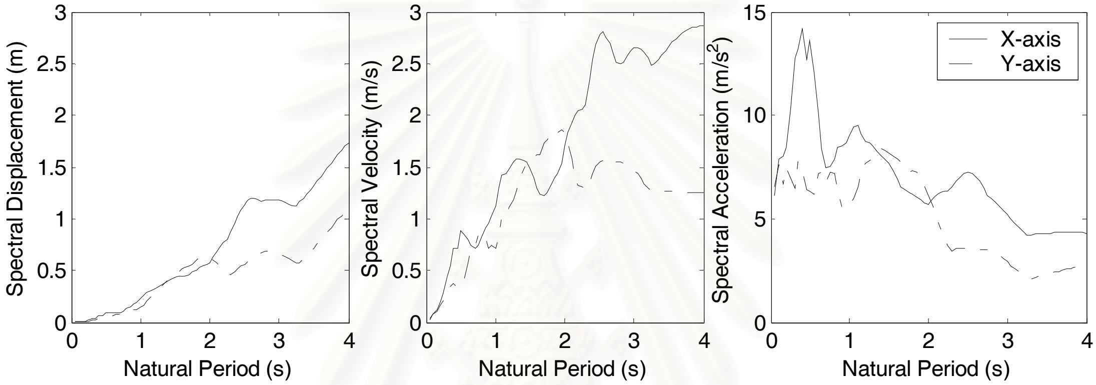
รูปที่ ก1.34 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Duzce, Kocaeli, 1999



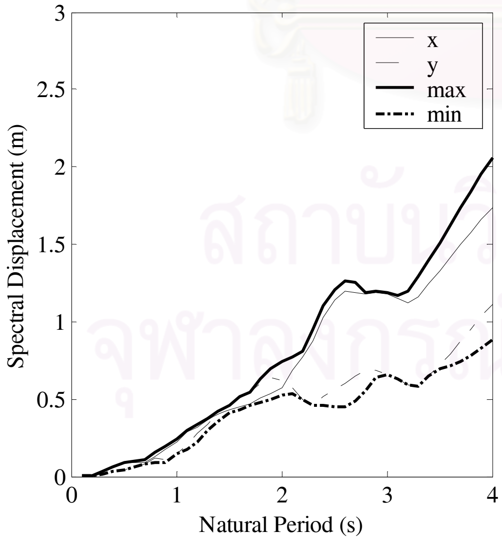
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



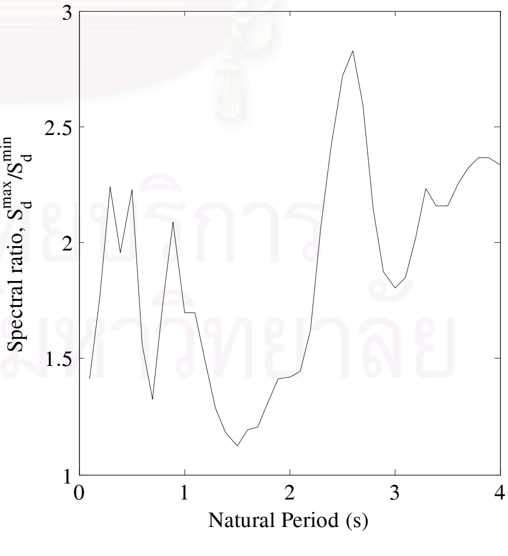
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



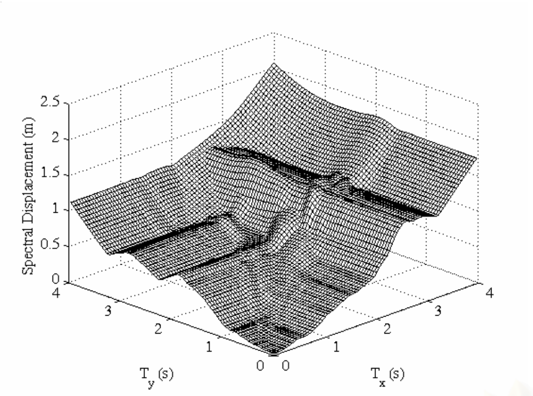
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



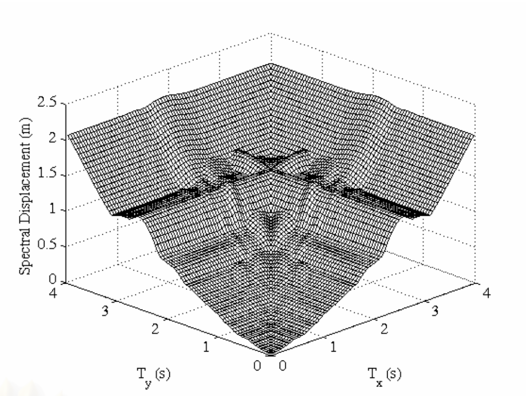
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.35 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว TCU068, Chi-Chi, 1999

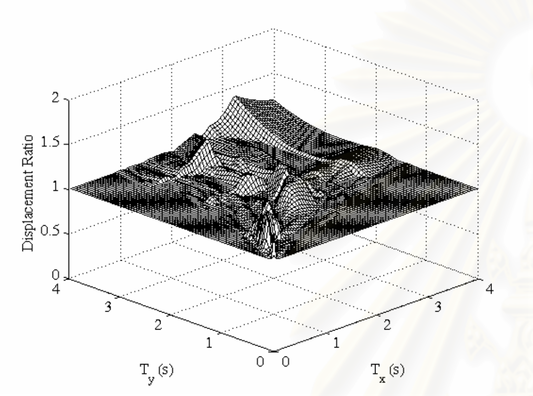
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



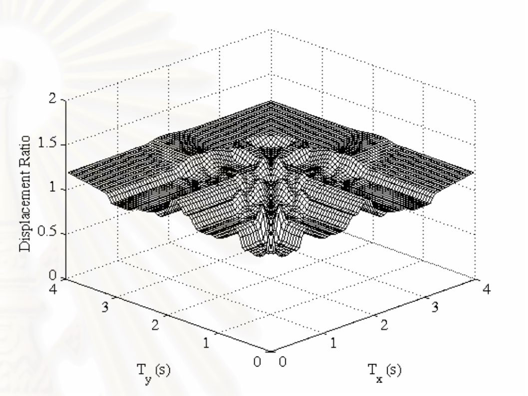
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$



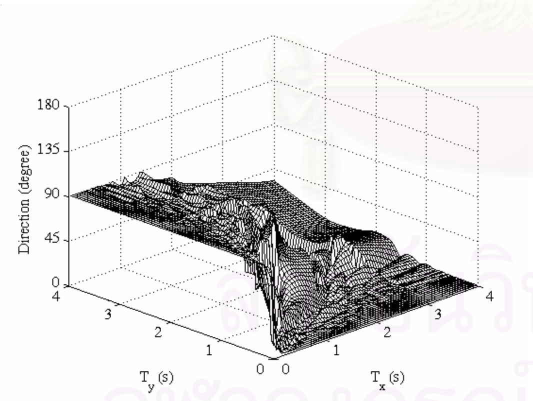
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$



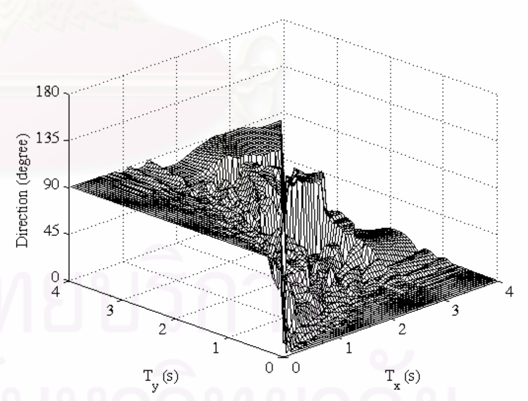
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$



(ง) $R(T_x,T_y)$



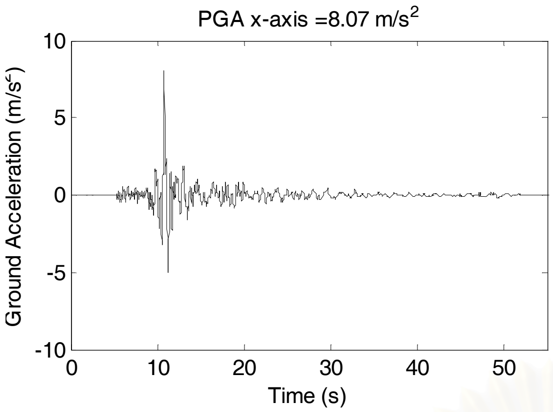
(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^\circ)$



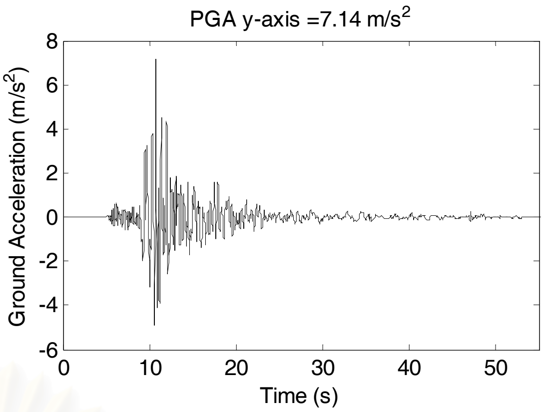
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

รูปที่ ก1.36 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว TCU068, Chi-Chi, 1999

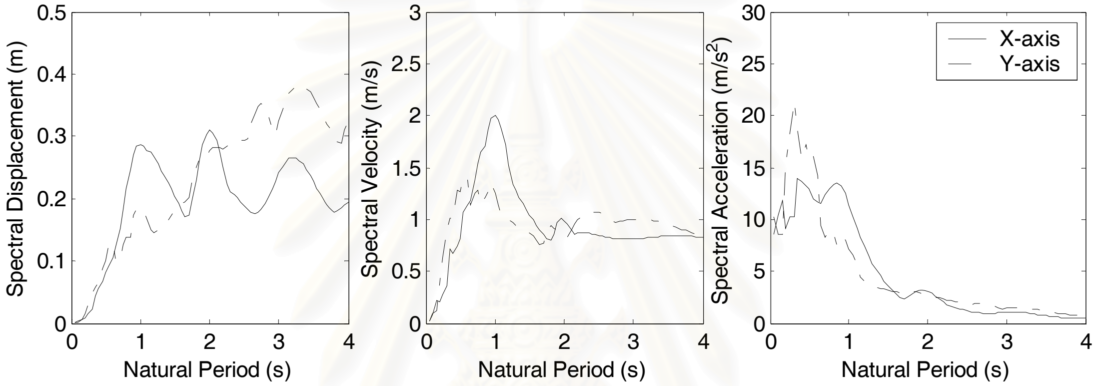
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



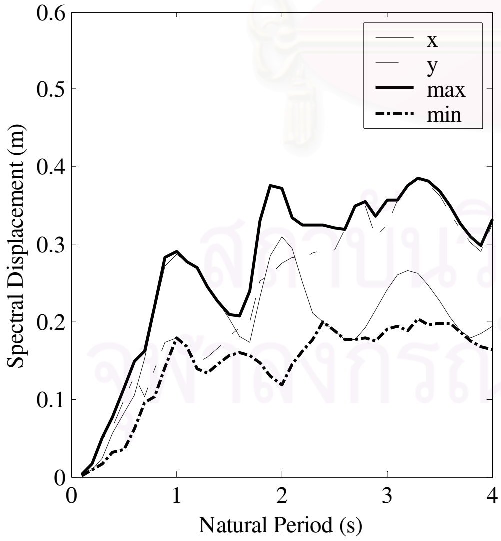
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



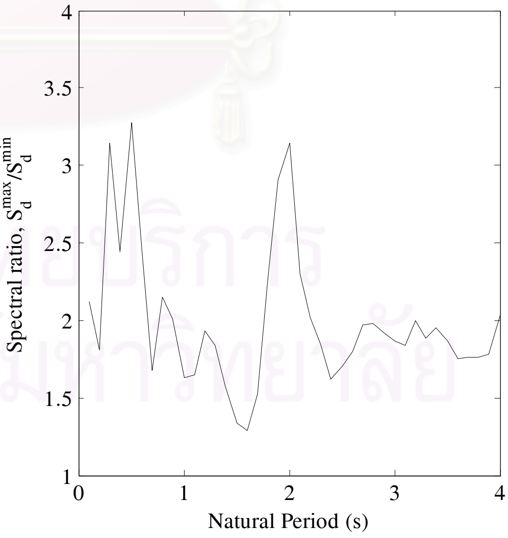
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



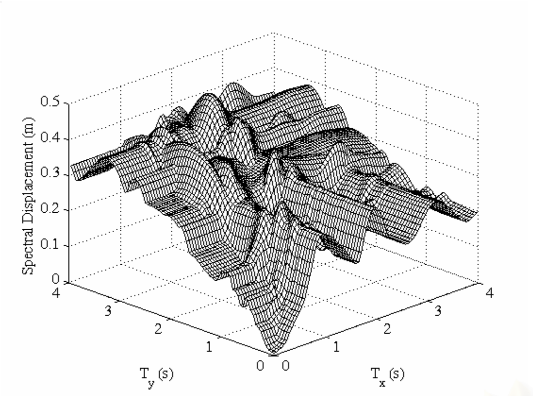
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



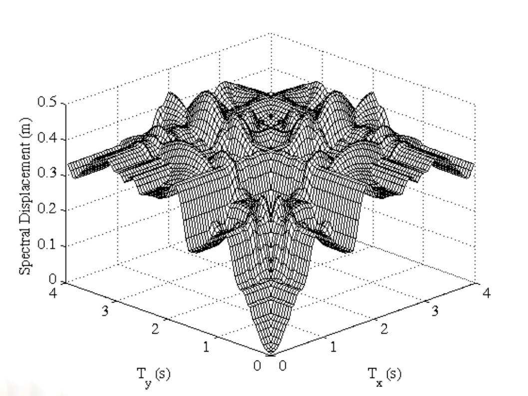
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.37 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Bolu, Duzce, 1999

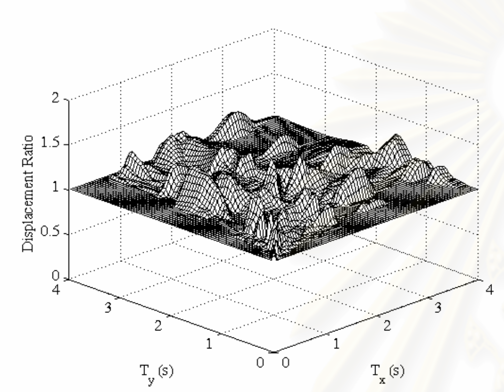
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



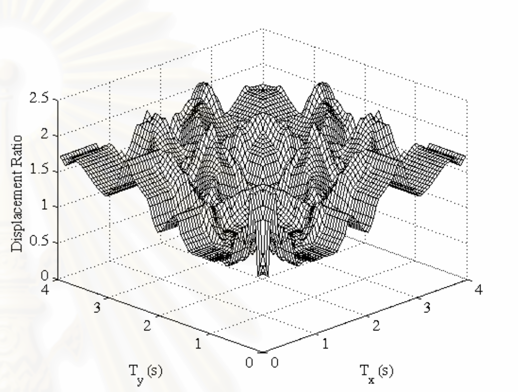
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



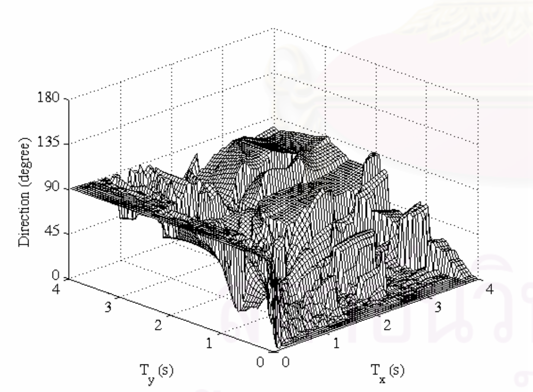
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



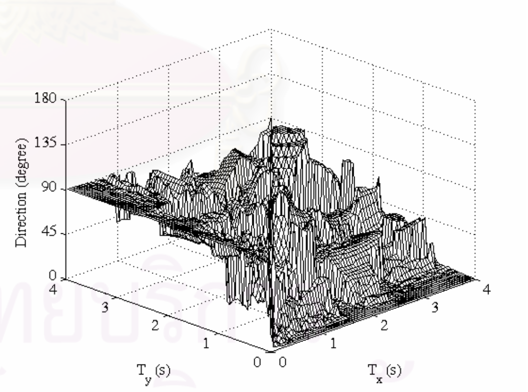
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

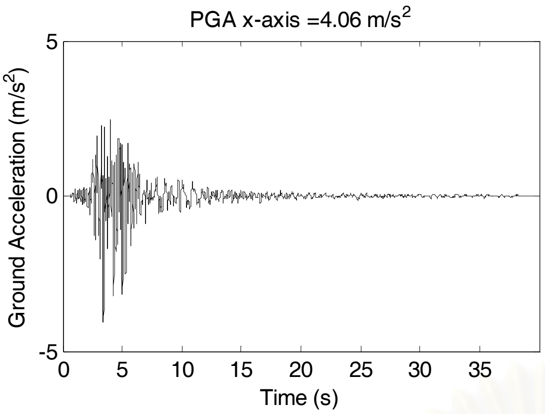


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

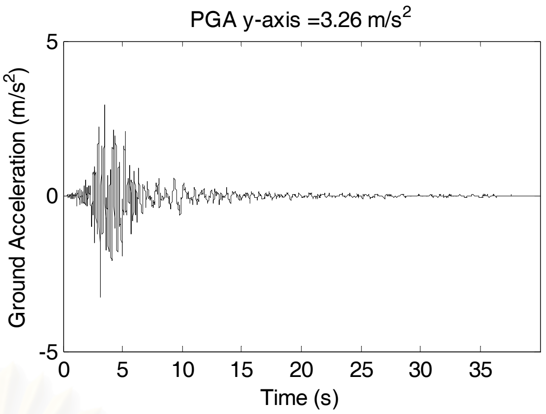


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

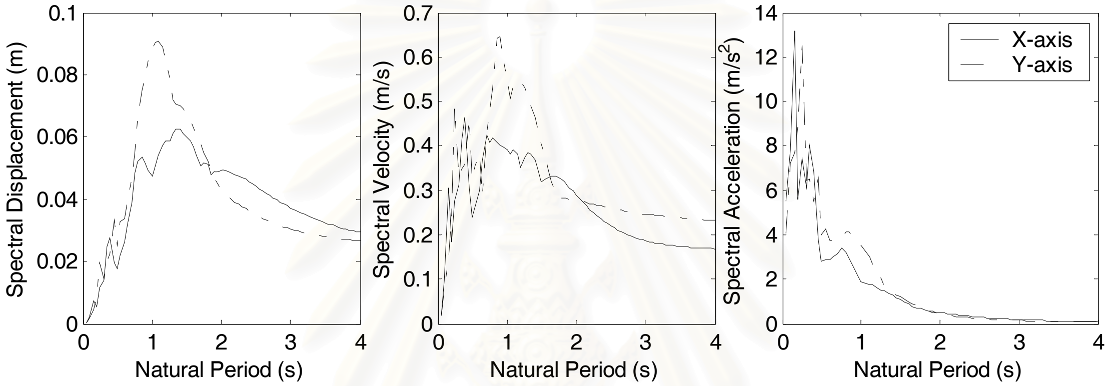
รูปที่ ก1.38 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Bolu, Duzce, 1999



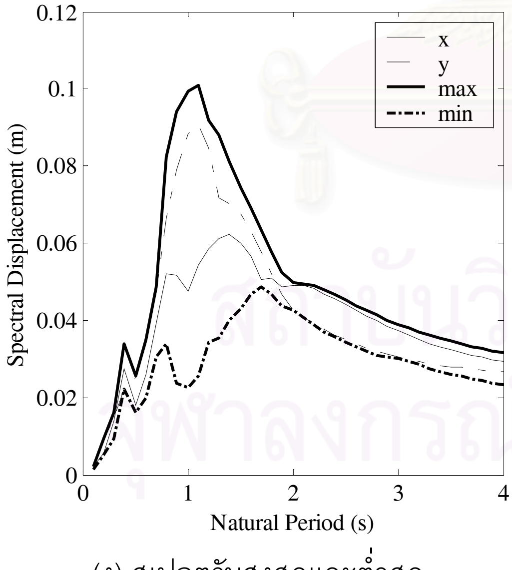
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



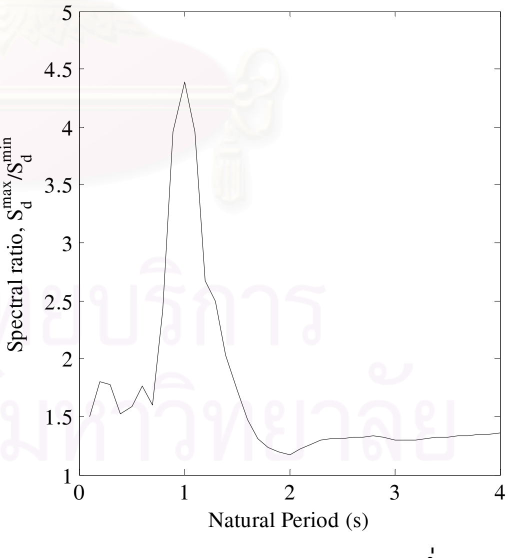
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



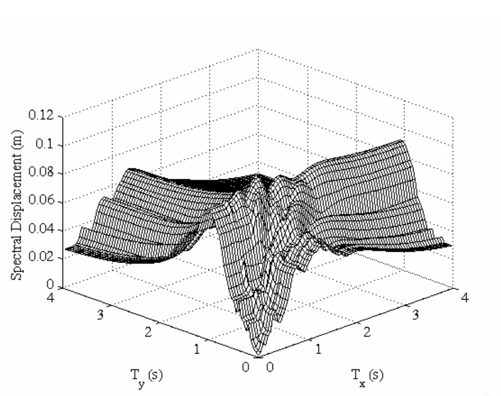
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



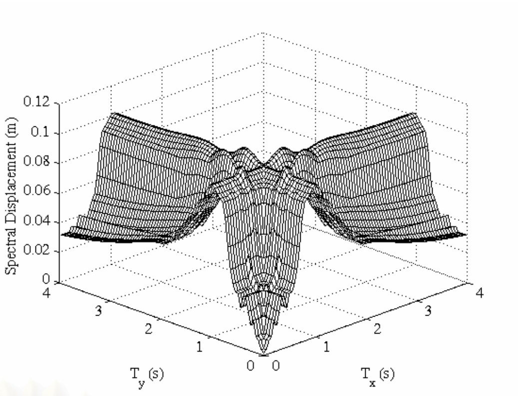
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.39 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Alhamabra, Whittier Narrows, 1987

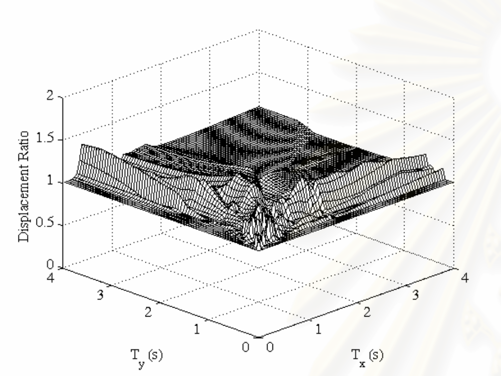
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



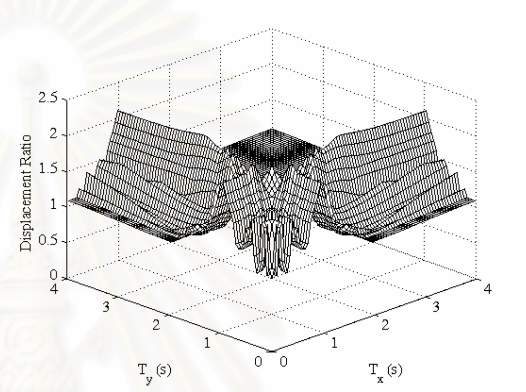
(ก) $S_d^r(T_x,T_y,\theta=0^{\circ})$



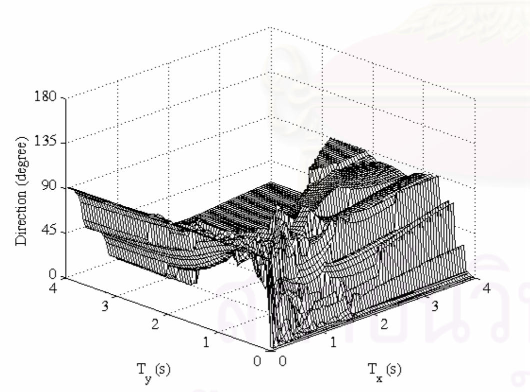
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x,T_y)$



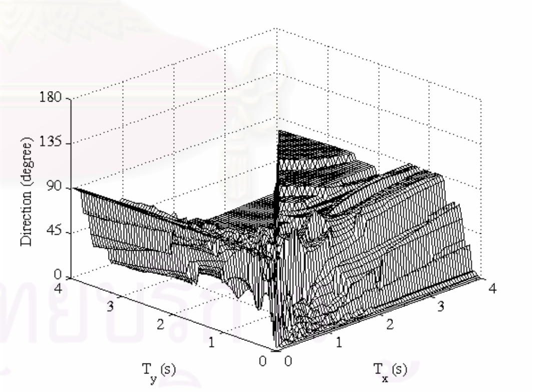
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x,T_y)}{S_d^{xy}(T_x,T_y)}$



(ง) $R(T_x,T_y)$

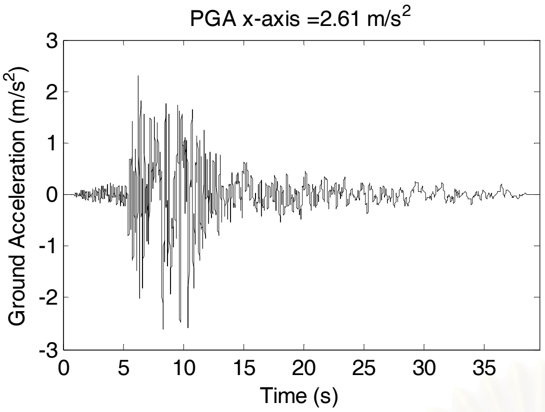


(จ) $\alpha(T_x,T_y,\theta=0^{\circ})$

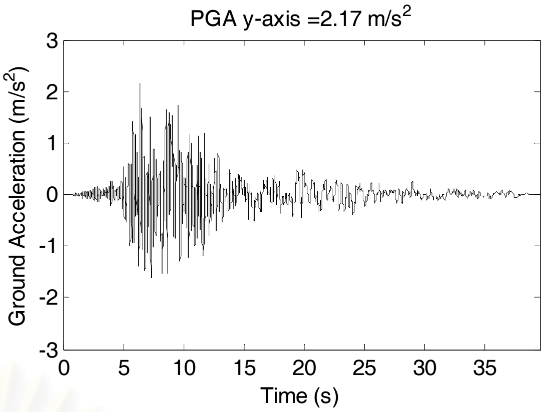


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x,T_y)$

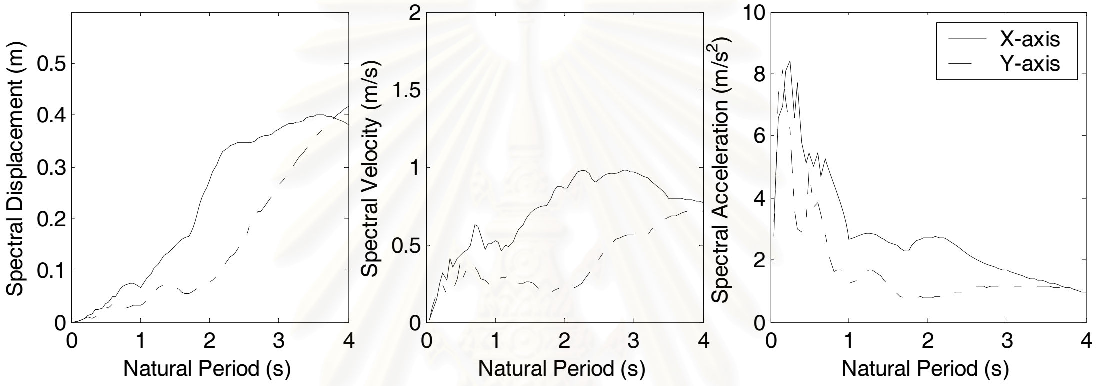
รูปที่ ก1.40 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Alhamabra, Whittier Narrows, 1987



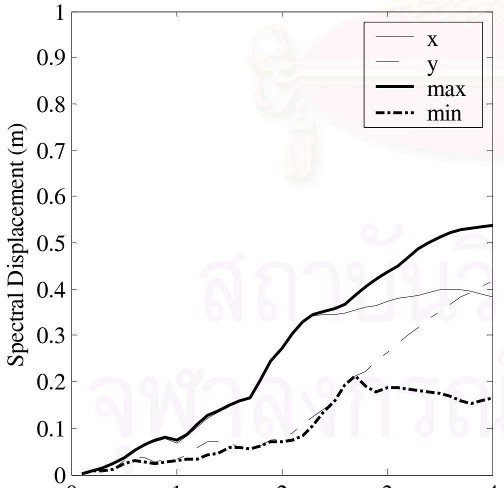
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



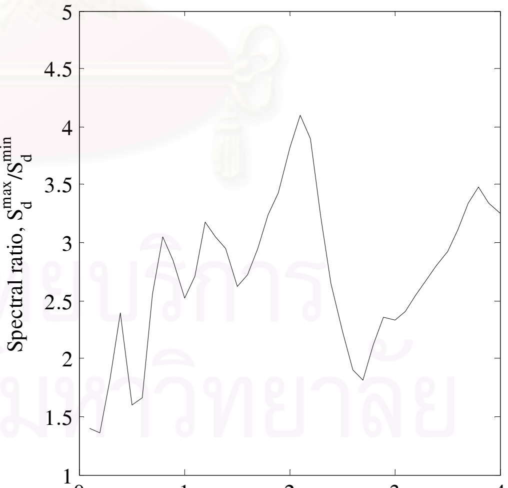
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



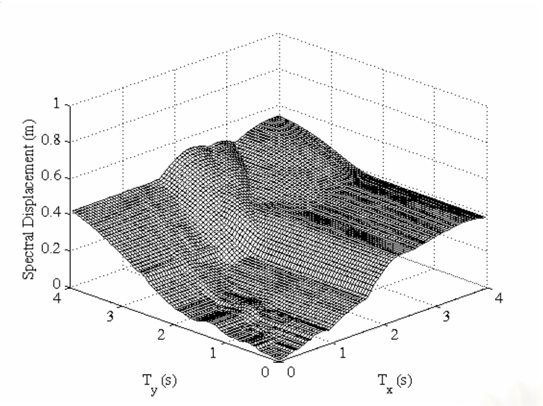
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



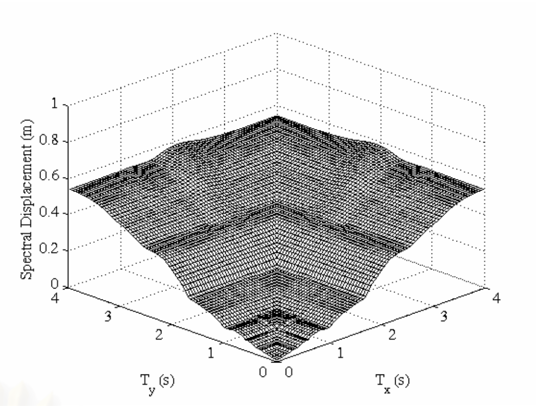
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.41 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว El centro array 3, Imperial valley, 1979

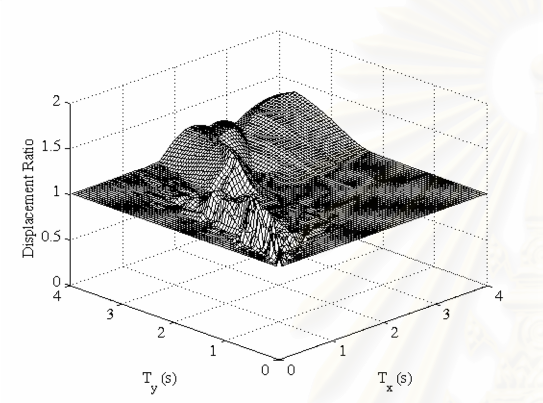
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



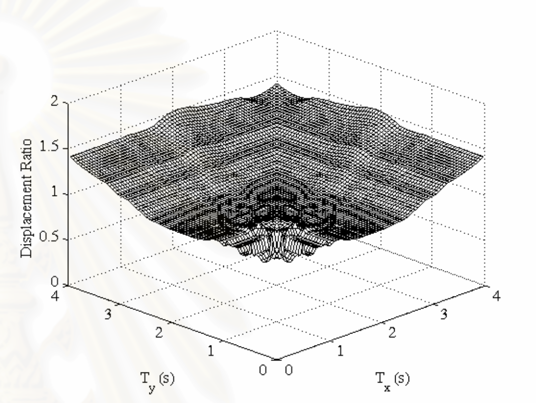
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



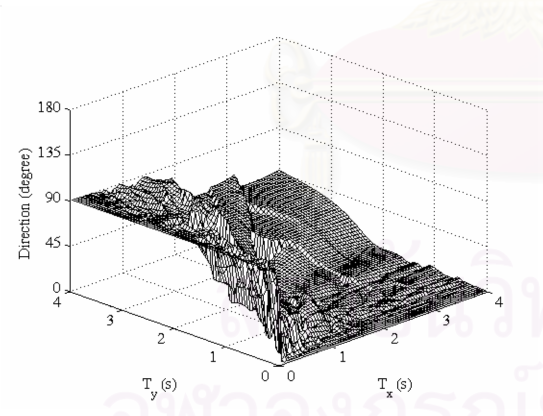
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



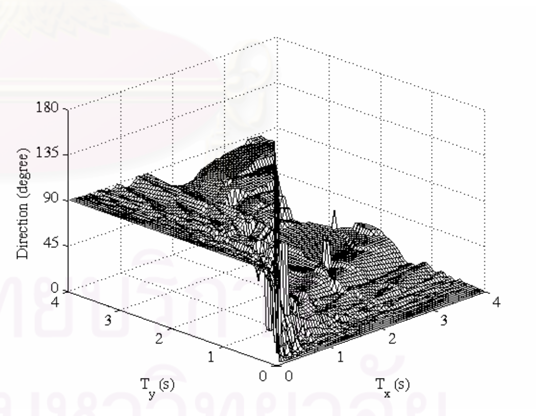
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



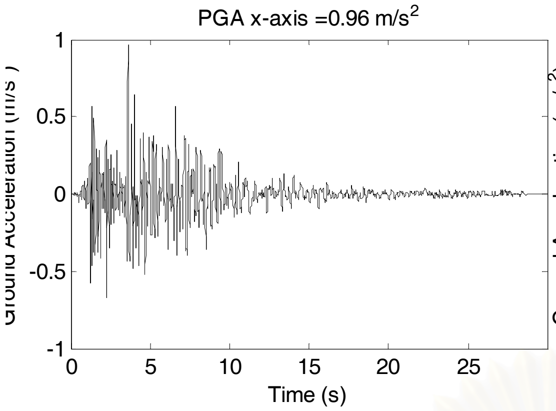
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



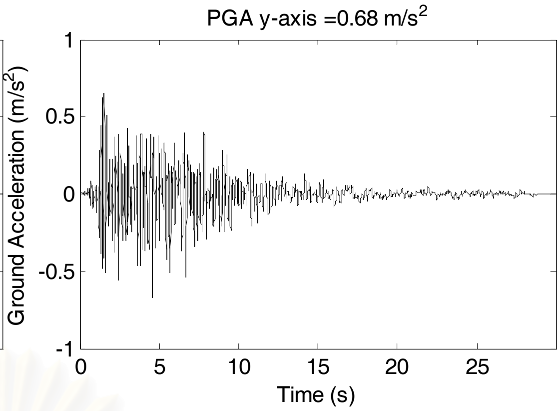
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

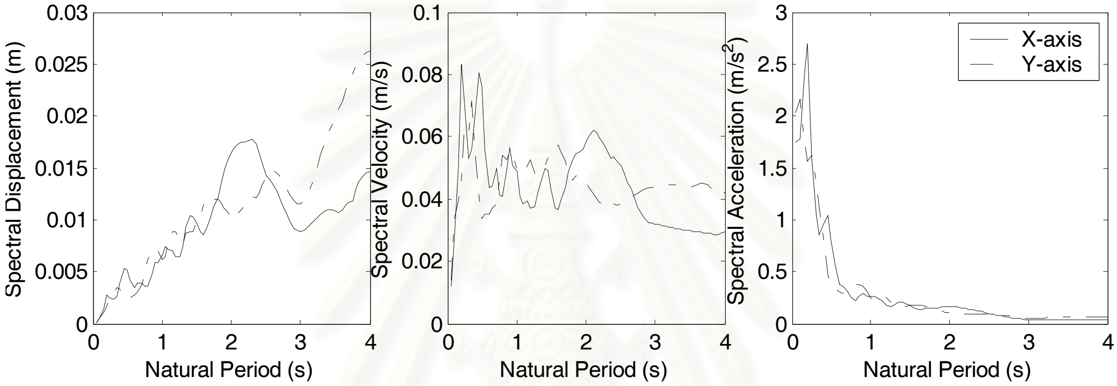
รูปที่ ก1.42 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว El centro array 3, Imperial valley, 1979



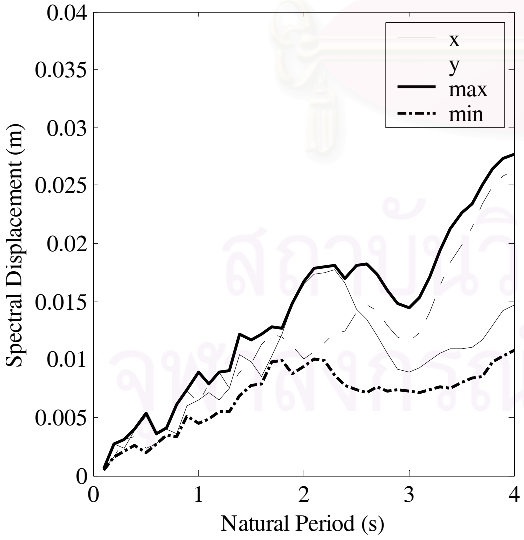
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



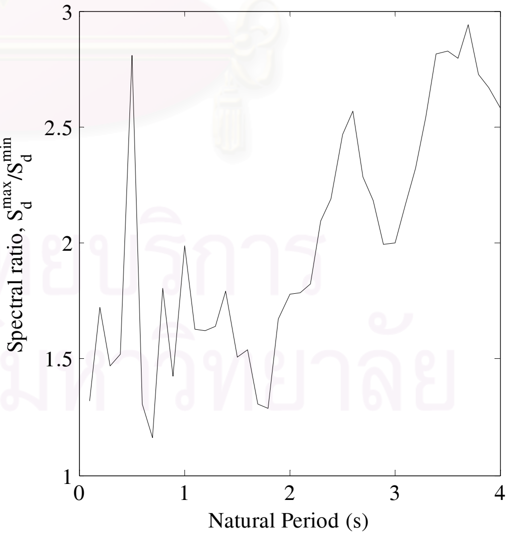
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



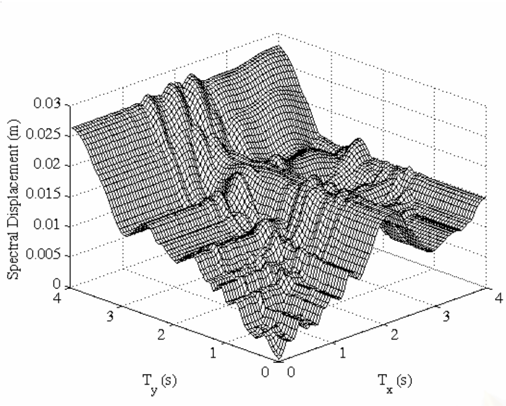
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



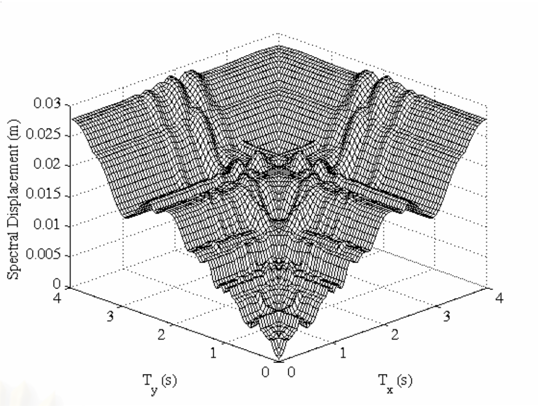
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.43 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Gilroy array 1, Loma prieta, 1984

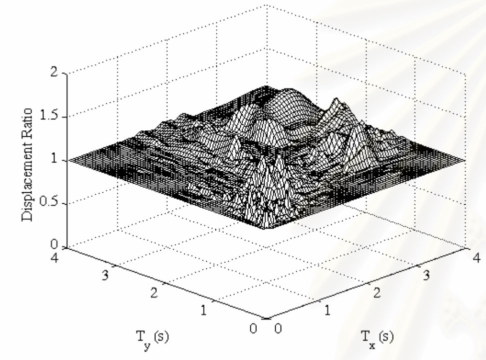
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



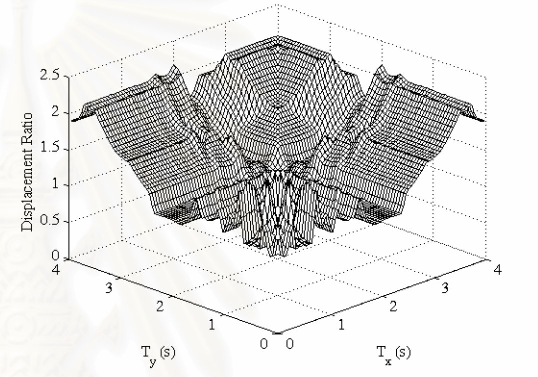
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



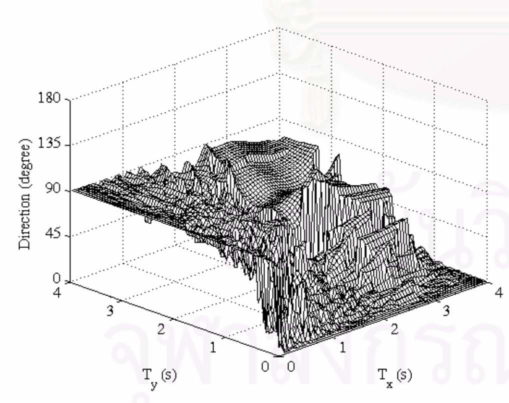
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



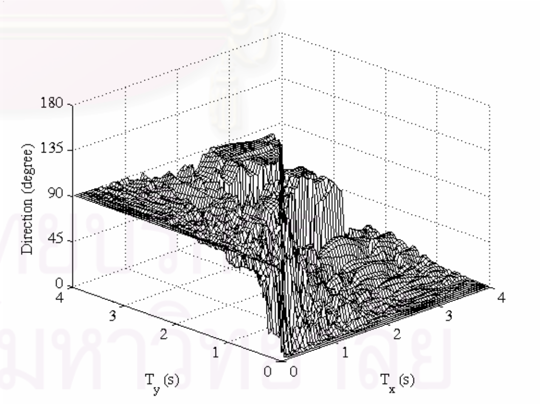
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

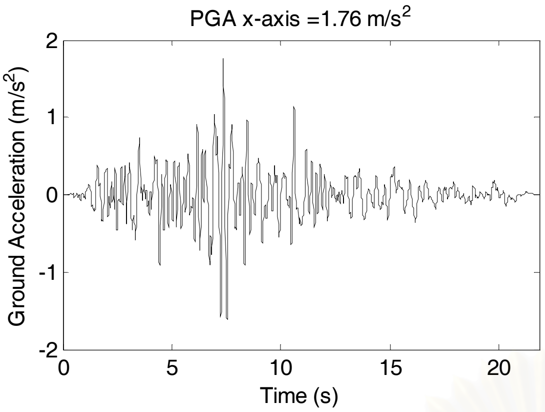


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

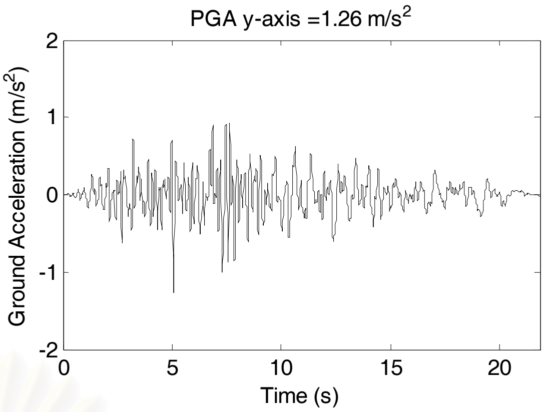


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

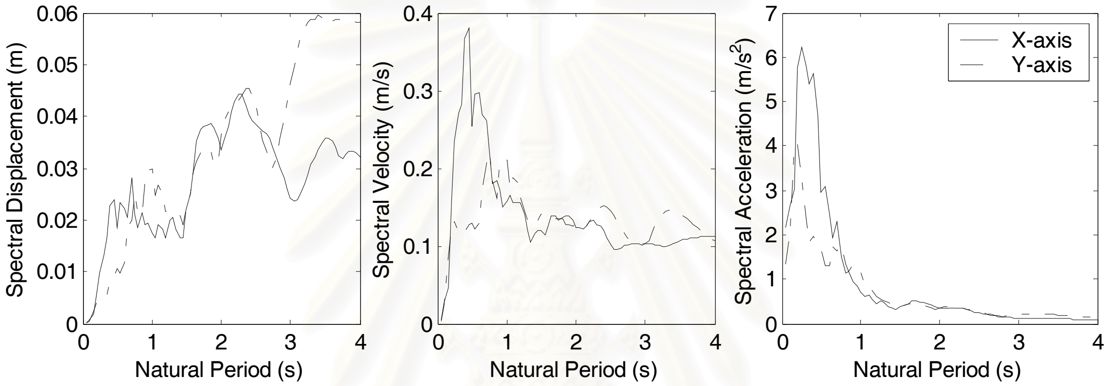
รูปที่ ก1.44 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Gilroy array 1, Loma prieta, 1984



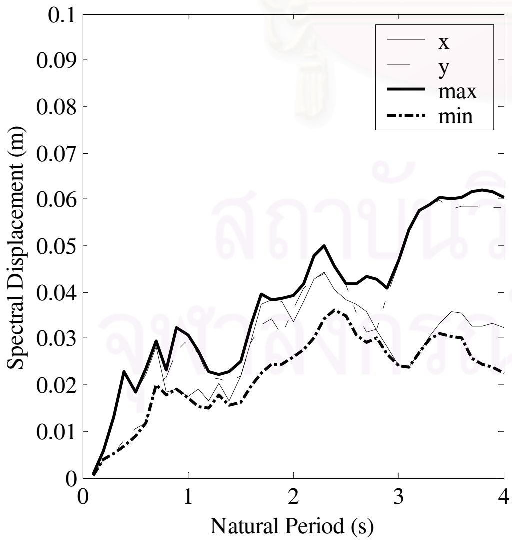
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



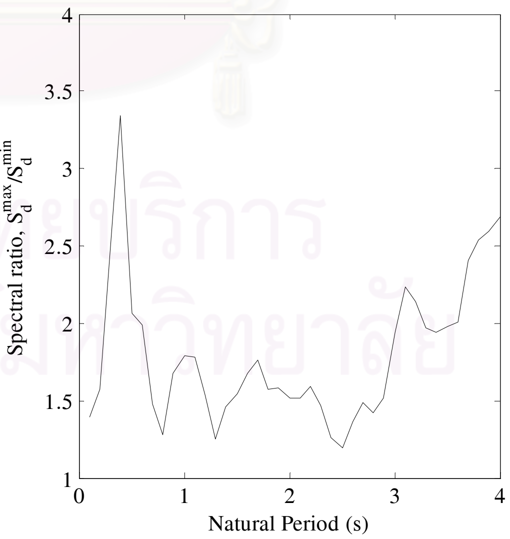
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



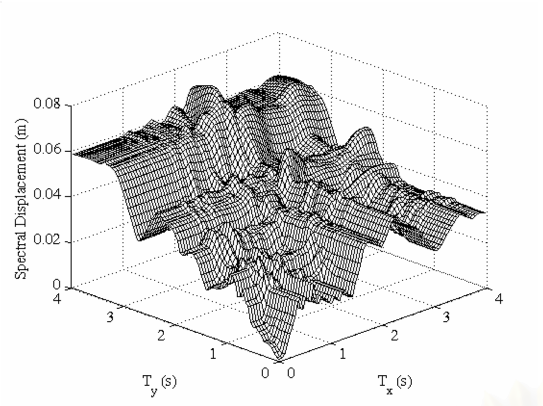
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



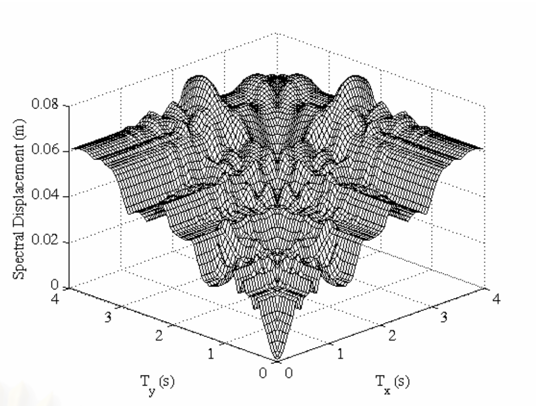
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.45 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Montebello, Northridge, 1994

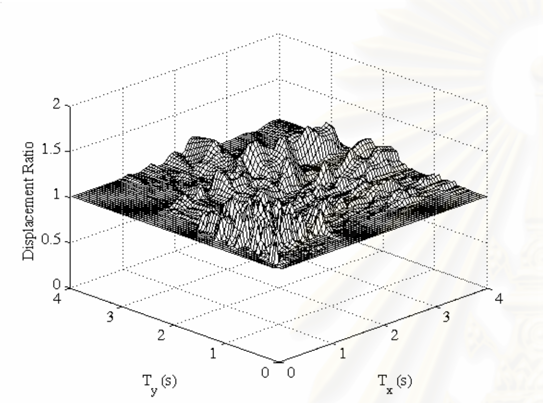
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



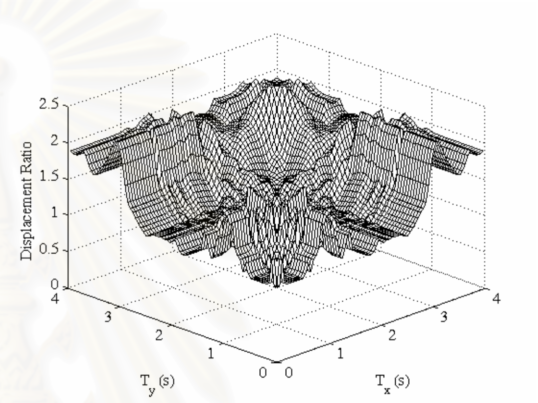
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



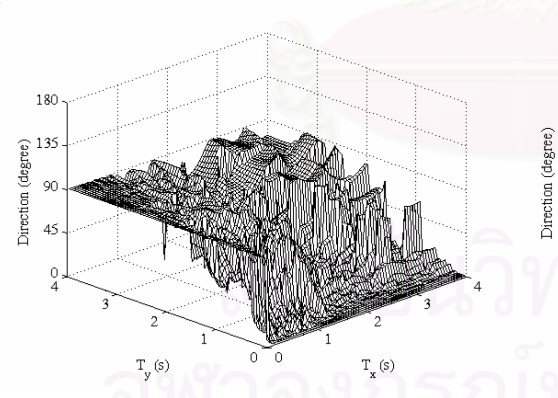
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



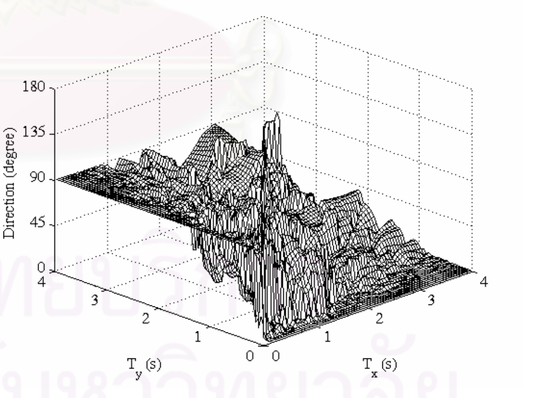
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



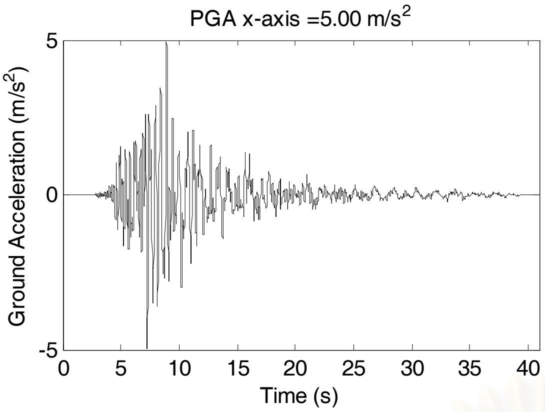
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



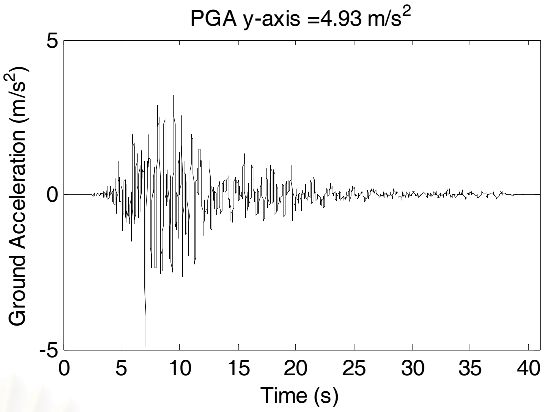
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

รูปที่ ก1.46 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Montebello, Northridge, 1994

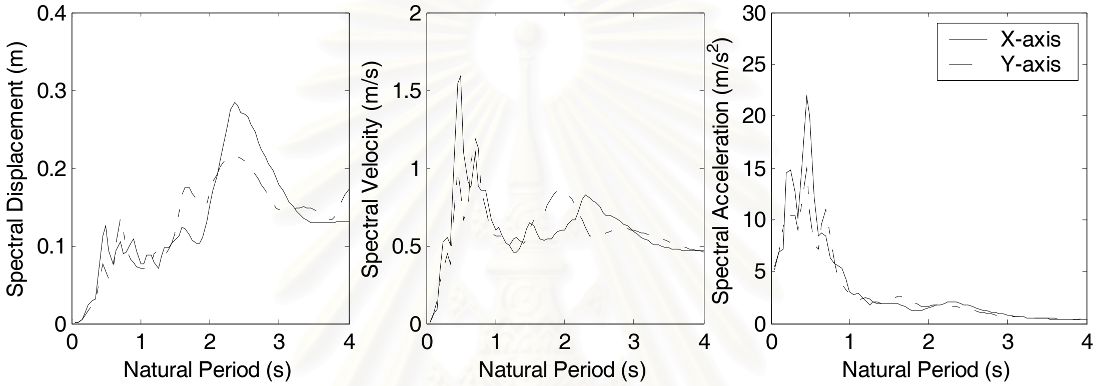
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



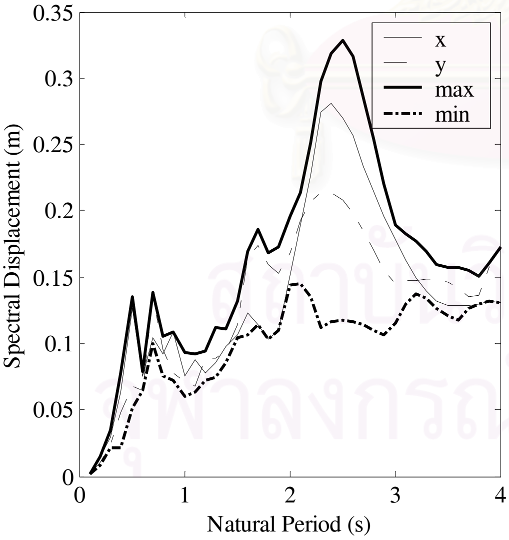
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



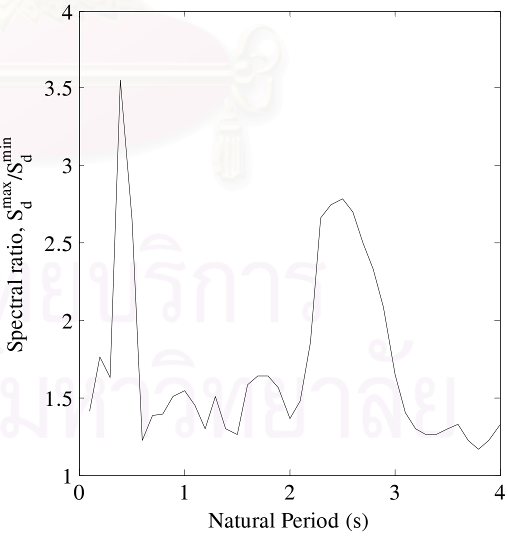
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



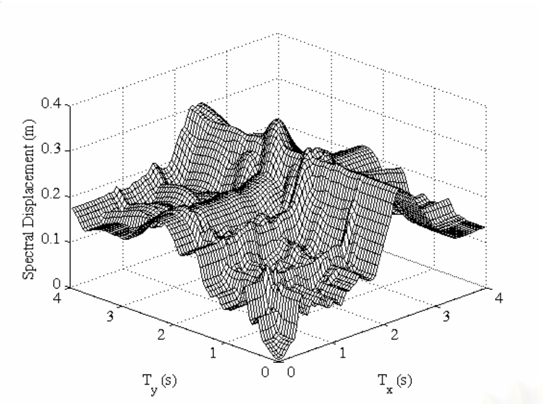
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



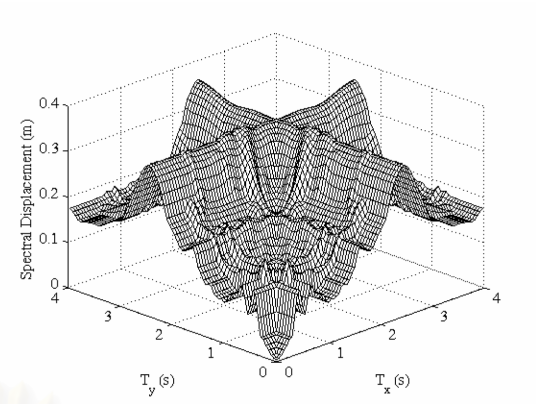
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.47 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Nishi-Akashi, Kobe, 1995

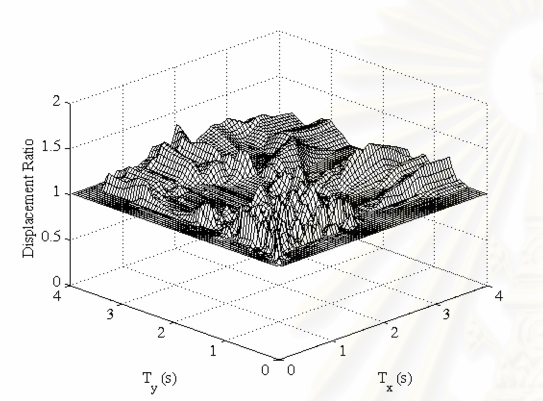
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

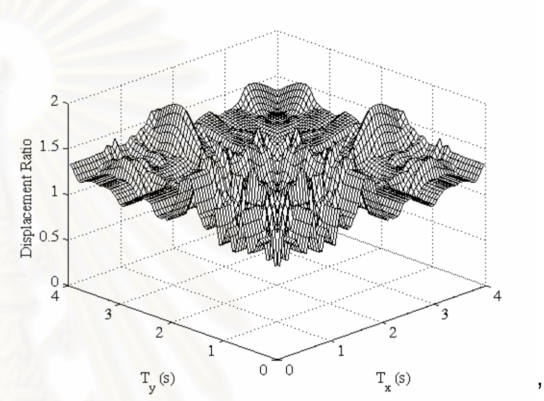


(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$

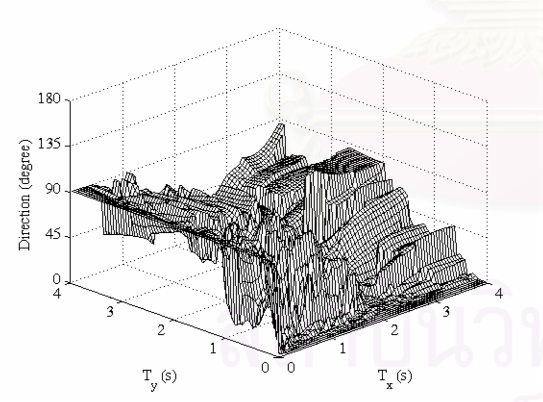




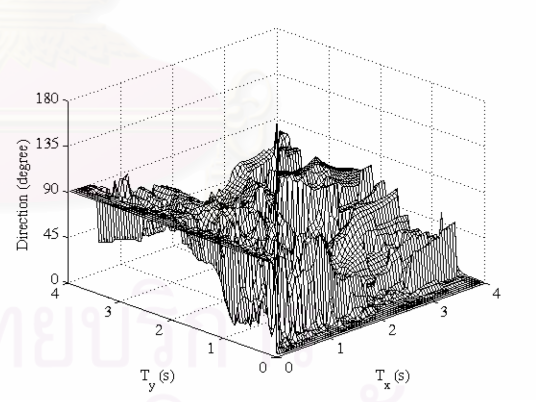
,

(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$

(ง) $R(T_x, T_y)$



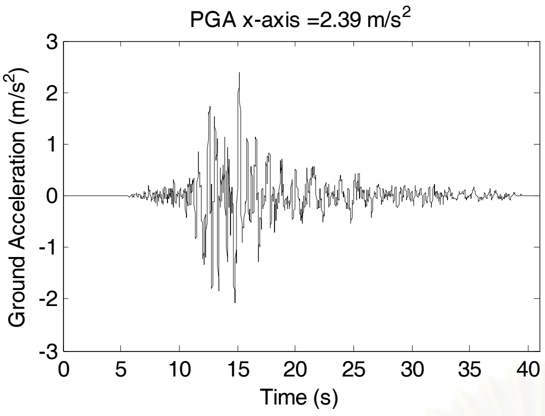
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



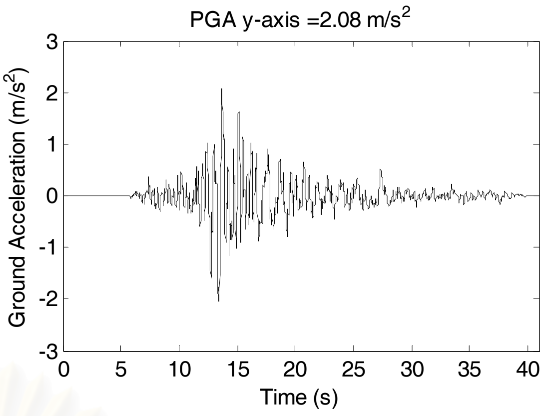
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

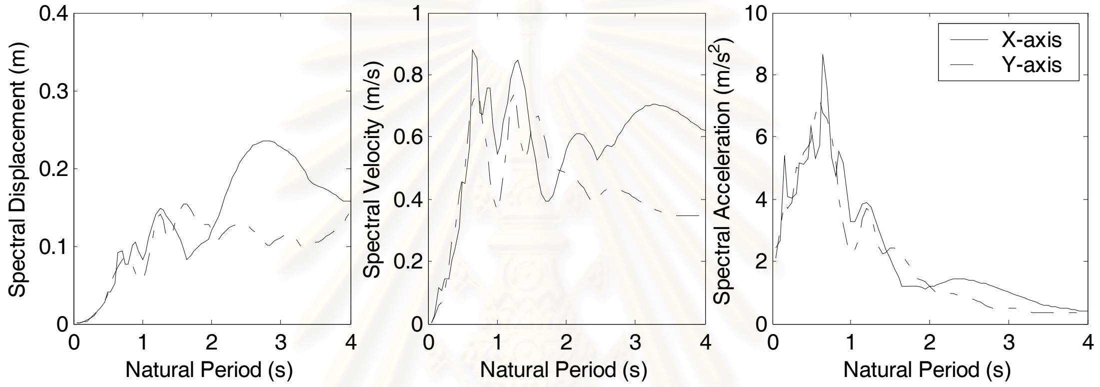
รูปที่ ก1.48 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Nishi-Akashi, Kobe, 1995



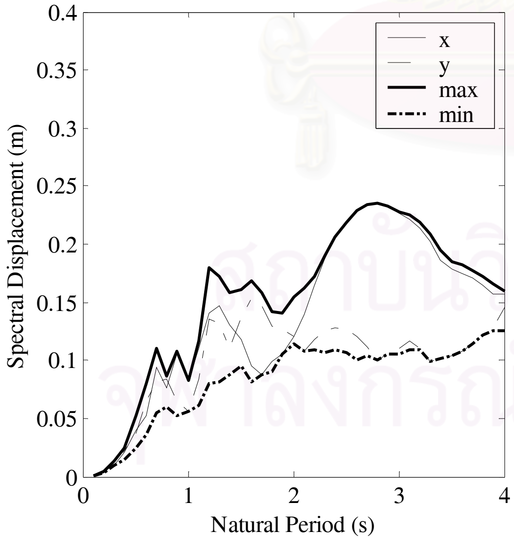
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



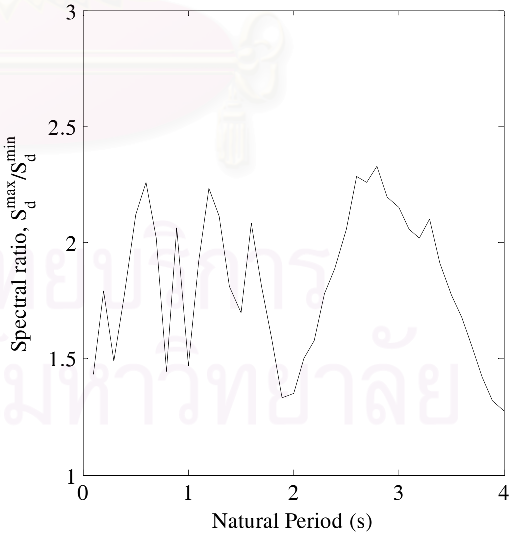
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



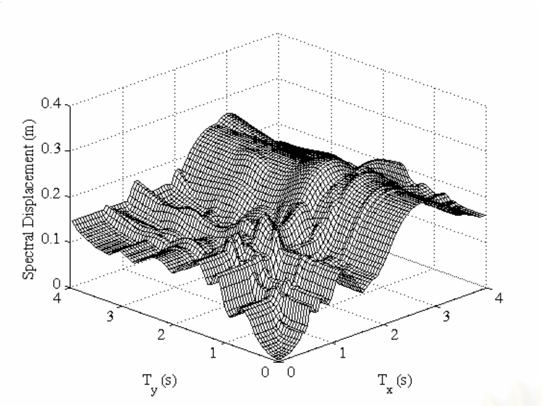
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



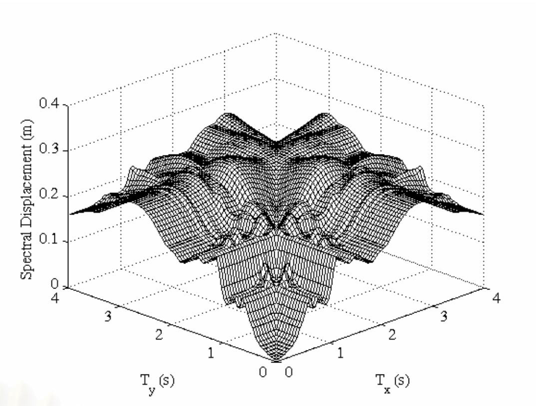
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.49 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Shin-Osaka, Kobe, 1995

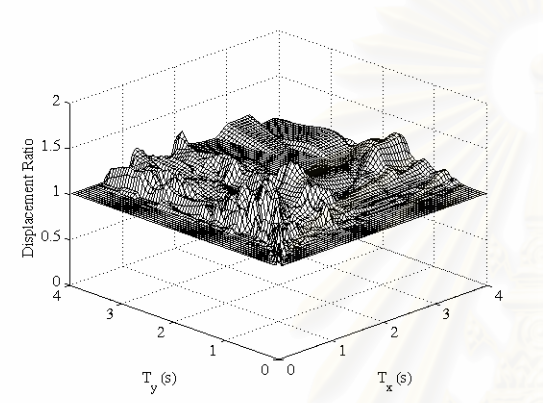
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



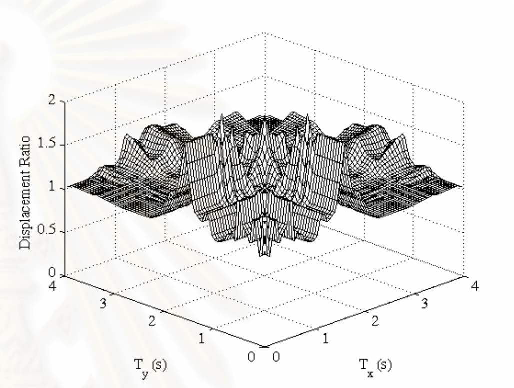
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



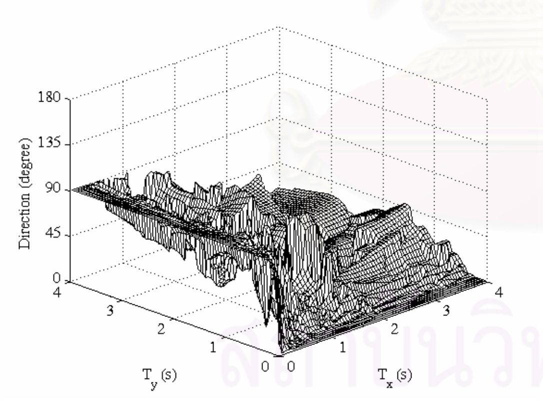
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



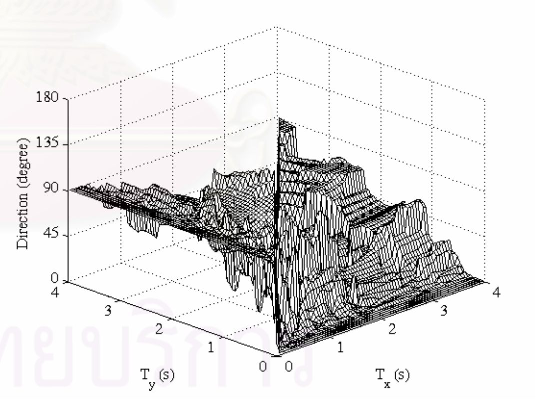
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



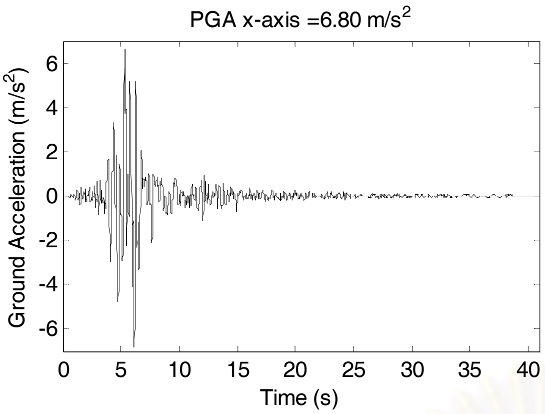
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



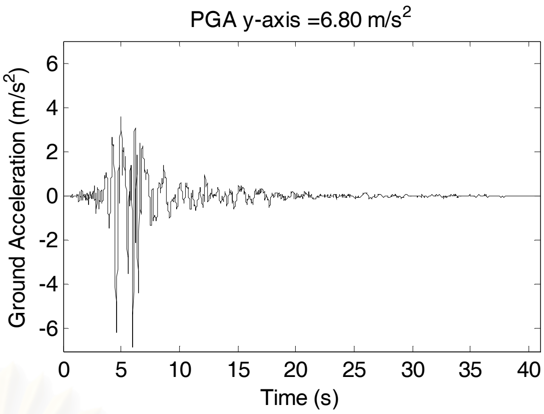
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

รูปที่ ก1.50 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Shin-Osaka, Kobe, 1995

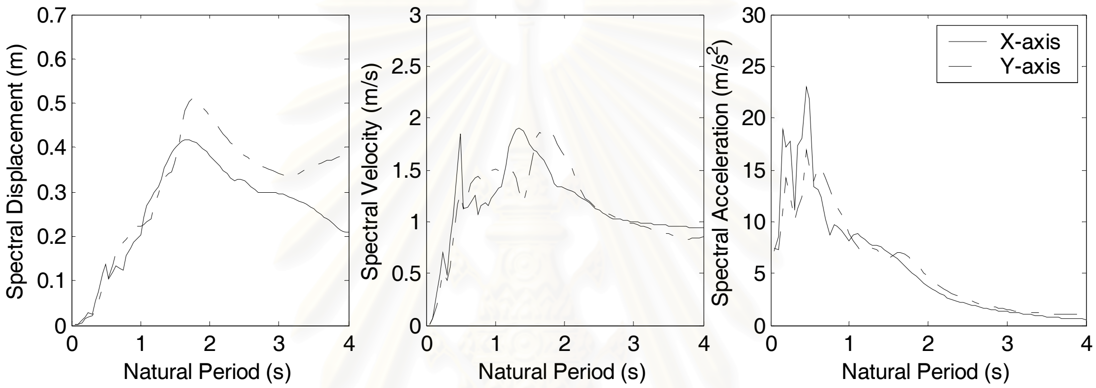
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



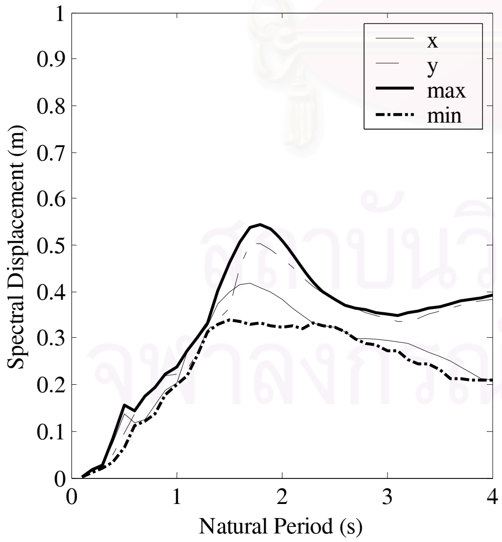
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



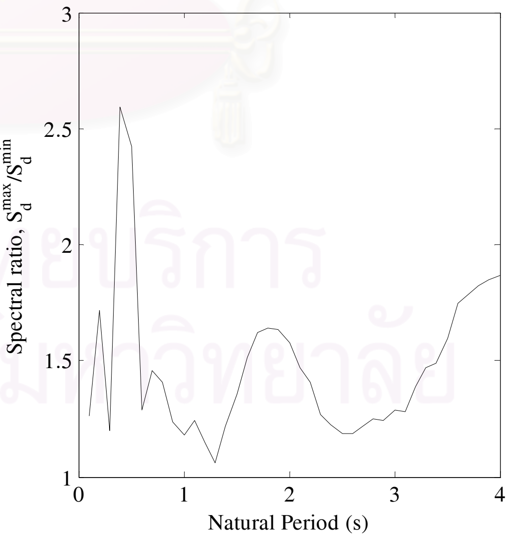
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง

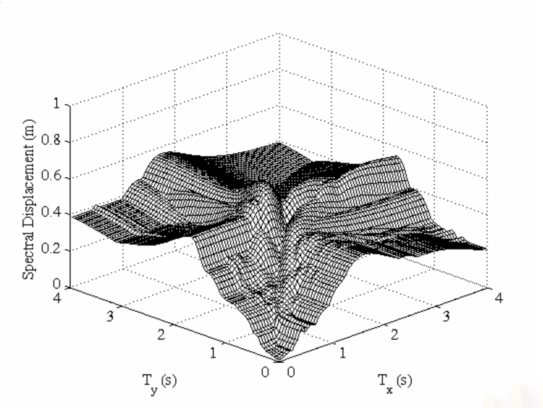


(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

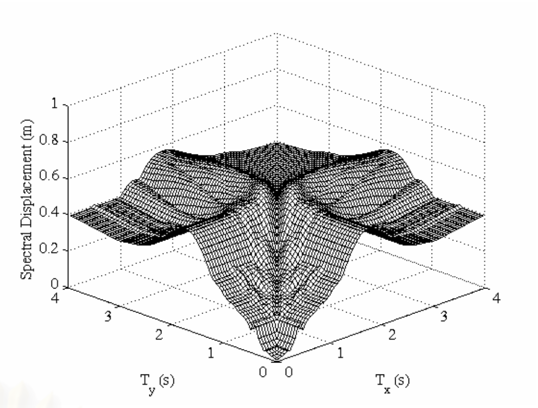


(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

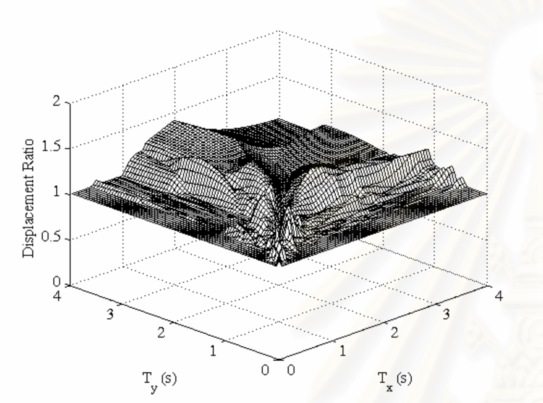
รูปที่ ก1.51 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Takarazuka, Kobe, 1995



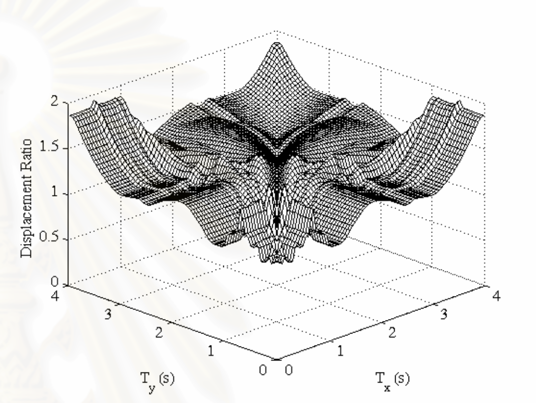
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



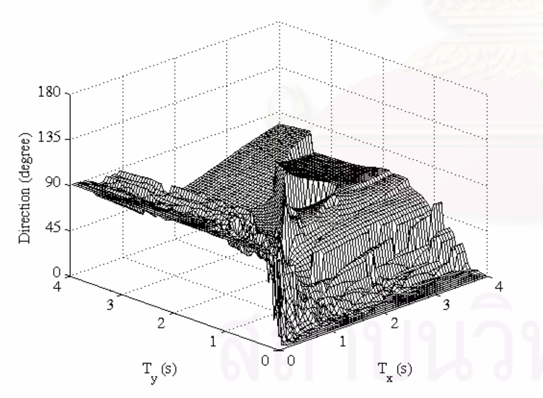
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



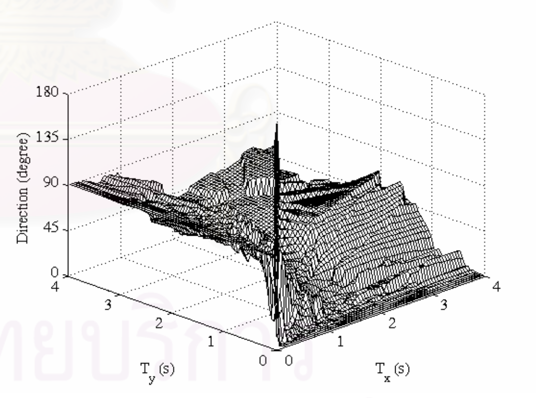
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



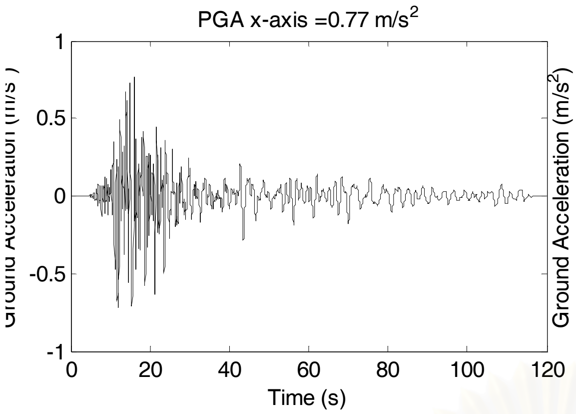
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



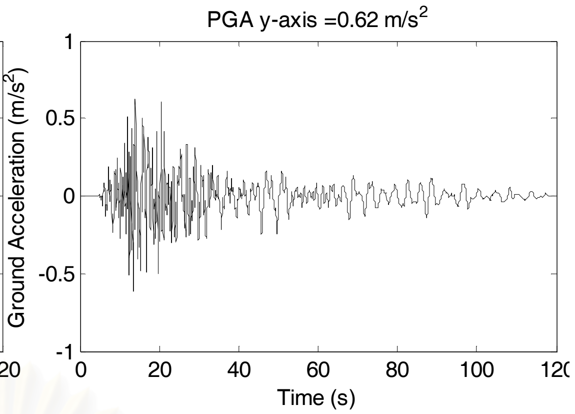
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

รูปที่ ก1.52 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว Takarazuka, Kobe, 1995

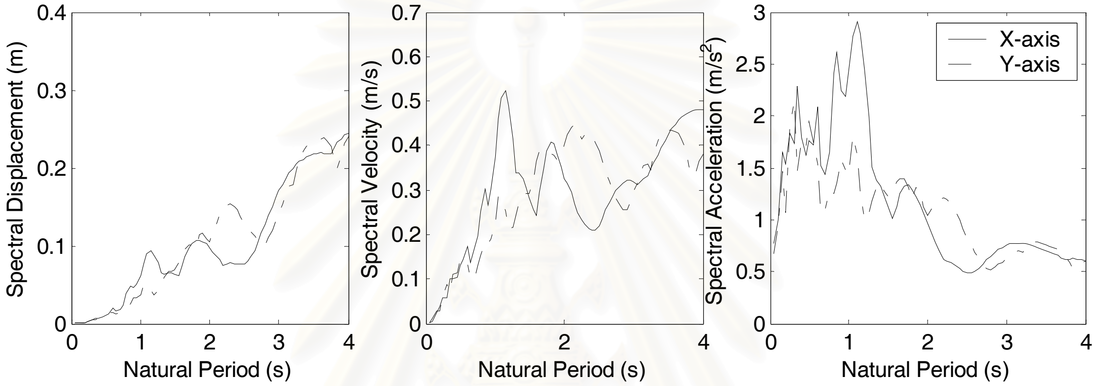
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



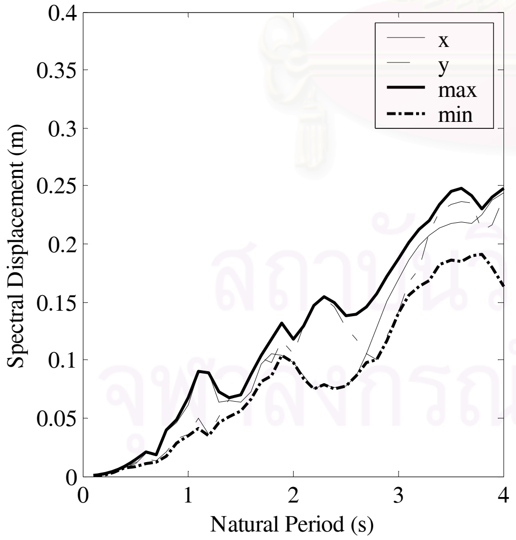
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



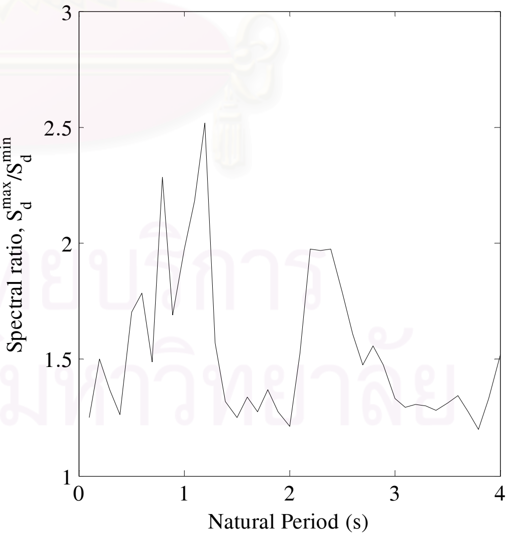
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



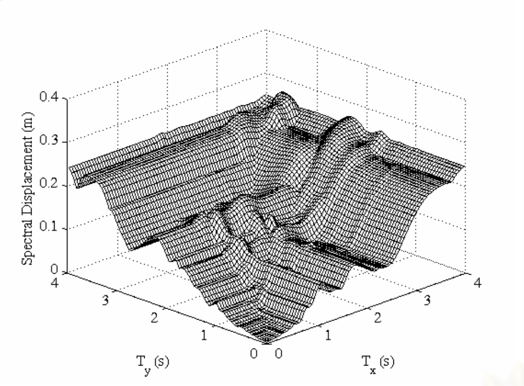
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



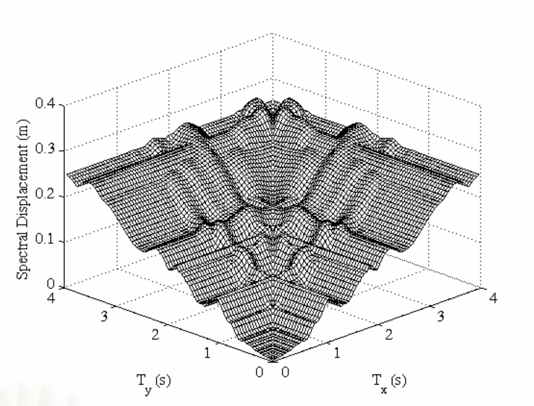
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.53 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว OSAJ, Kobe, 1995

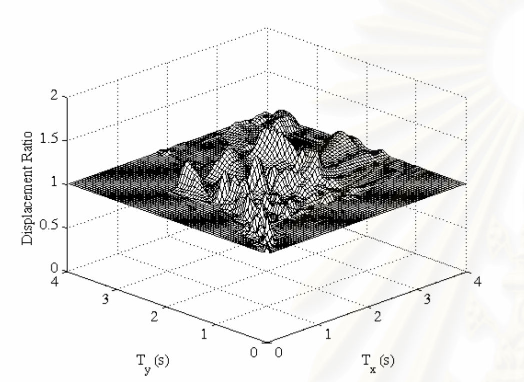
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



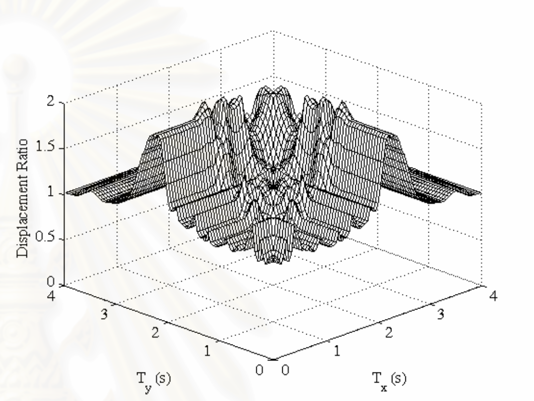
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



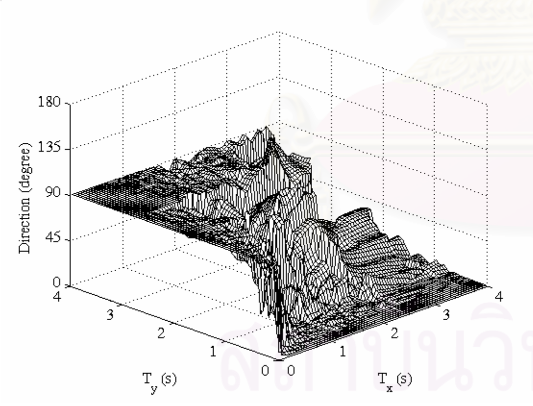
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



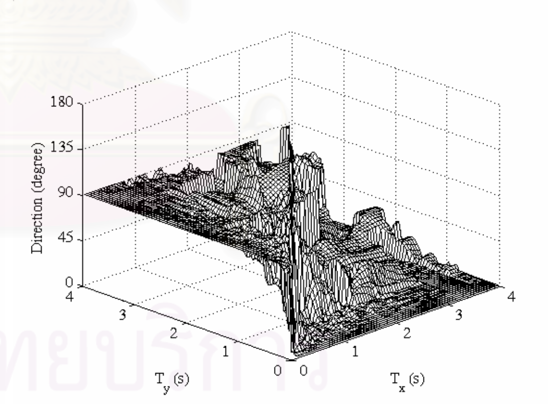
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



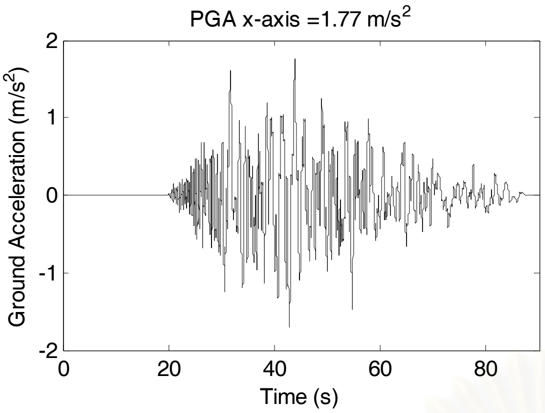
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



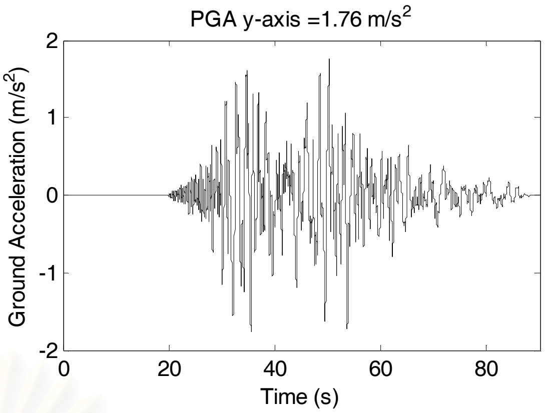
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

รูปที่ ก1.54 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว OSAJ, Kobe, 1995

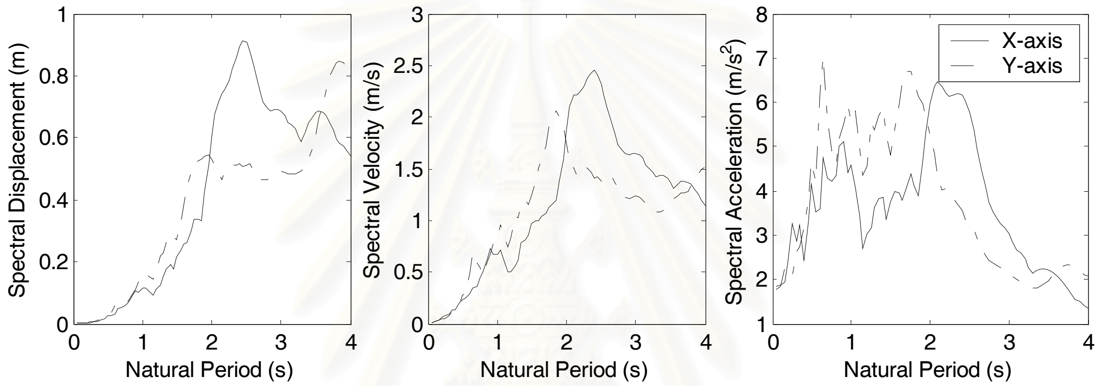
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



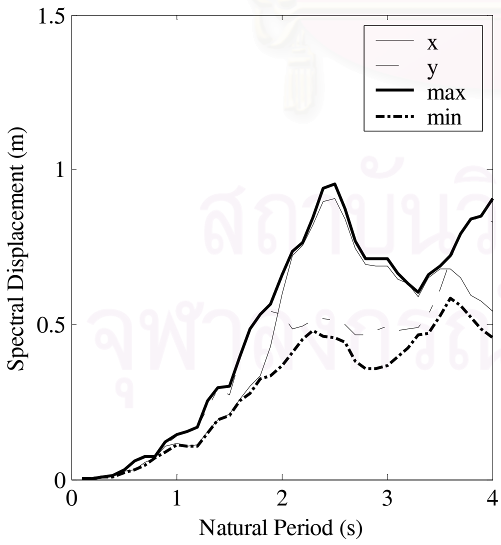
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



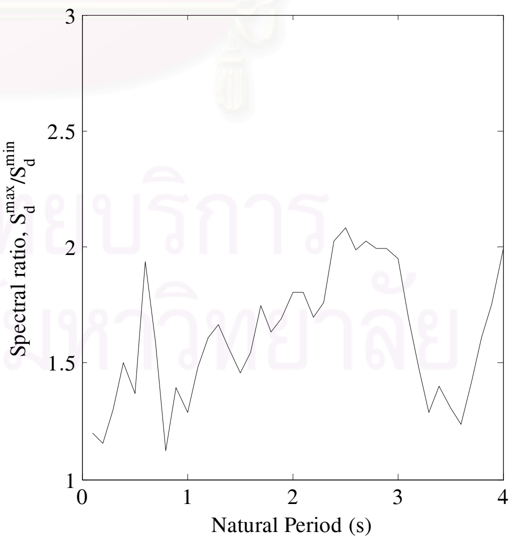
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง

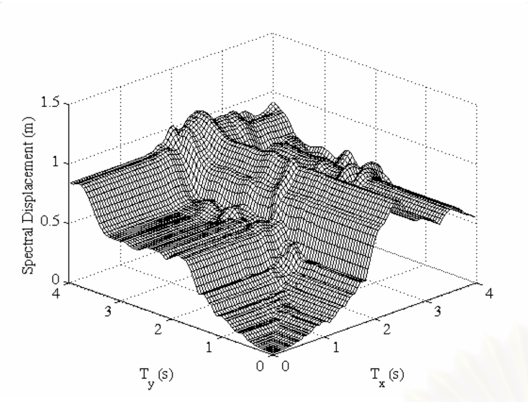


(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

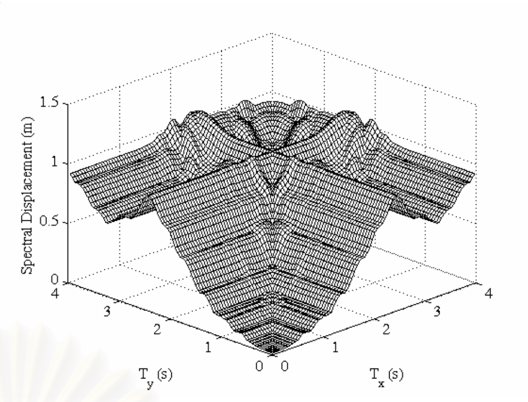


(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

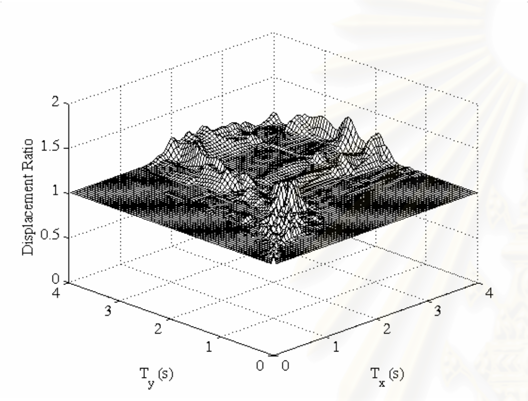
รูปที่ ก1.55 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว TCU110,Chi-Chi, 1999



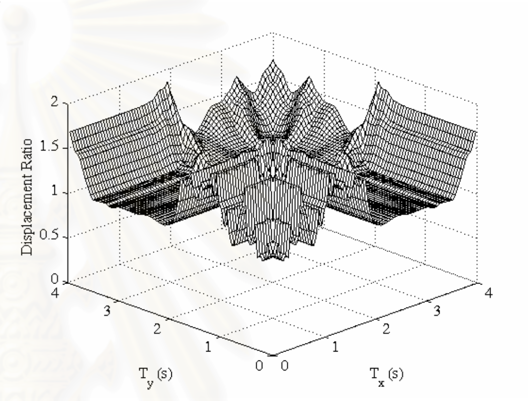
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



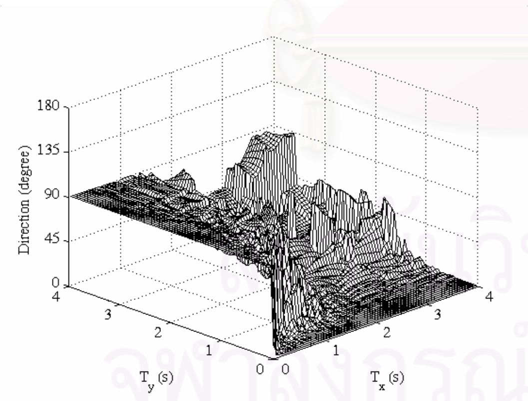
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



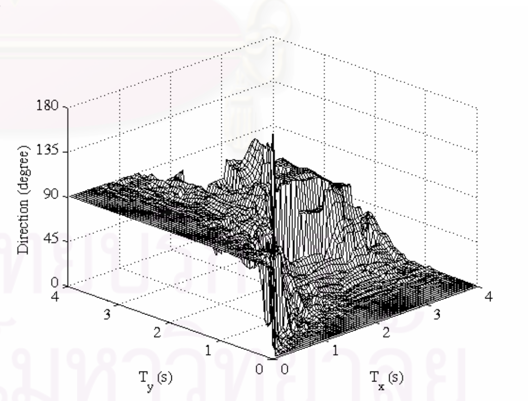
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



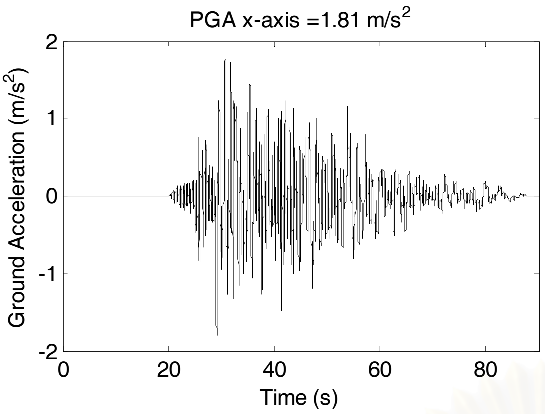
(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



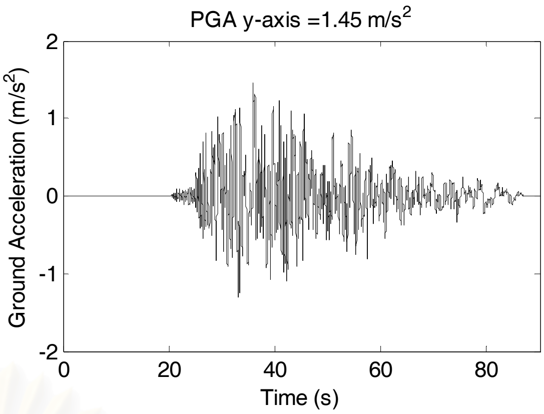
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

รูปที่ ก1.56 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว TCU110,Chi-Chi, 1999

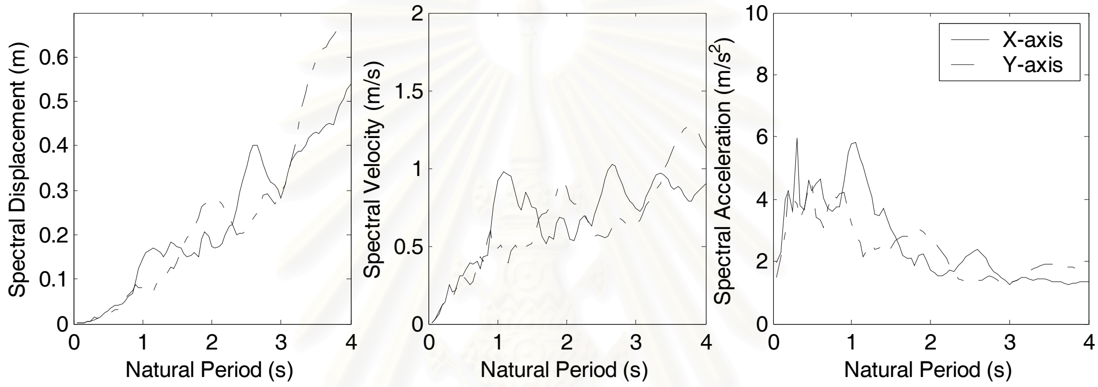
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



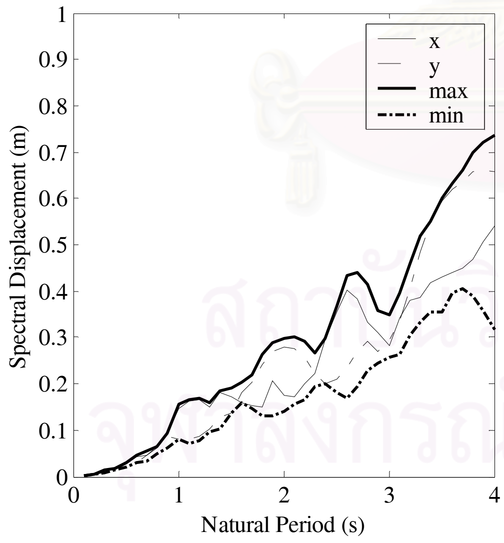
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



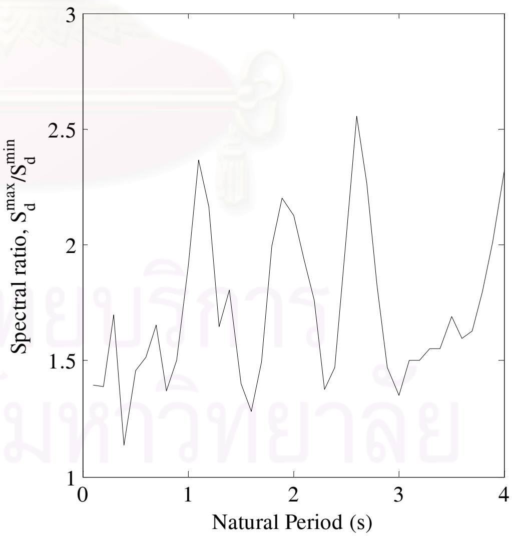
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ ความเร็วและความเร่ง



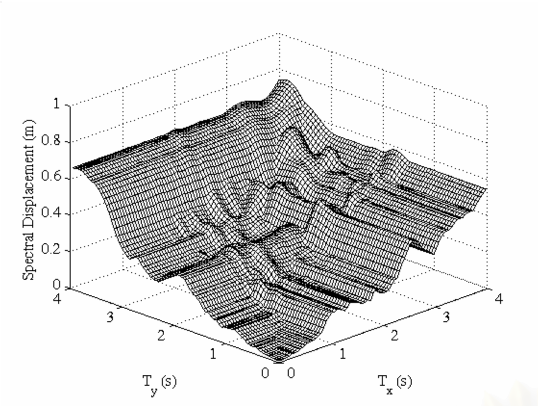
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



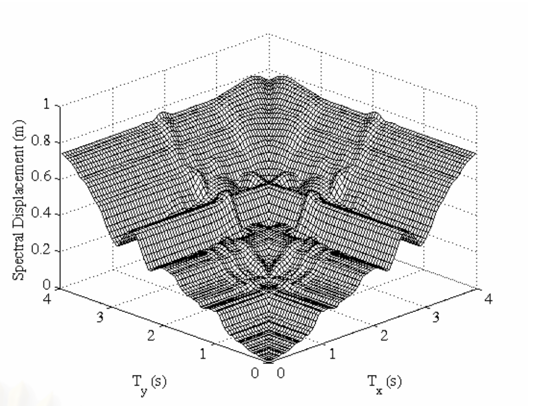
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.57 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว TCU116, Chi-Chi, 1999

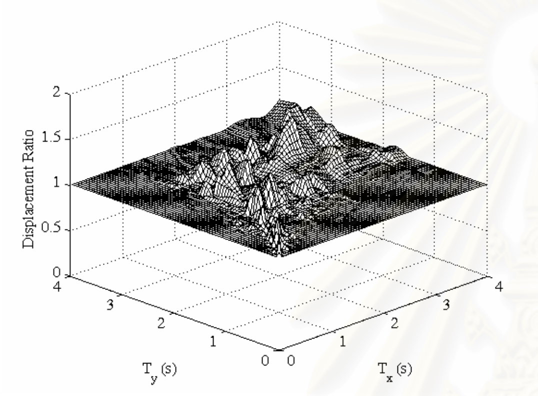
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



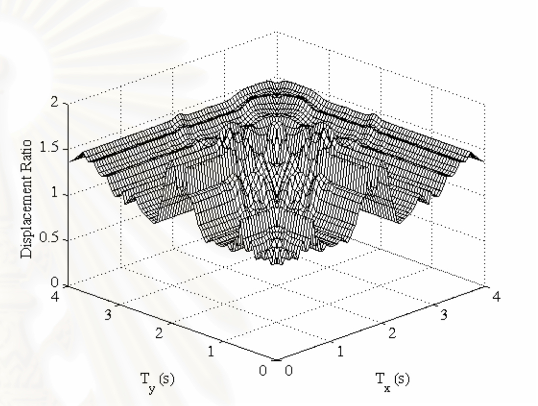
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



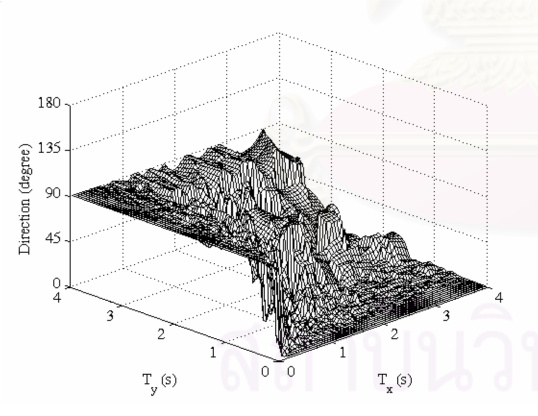
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



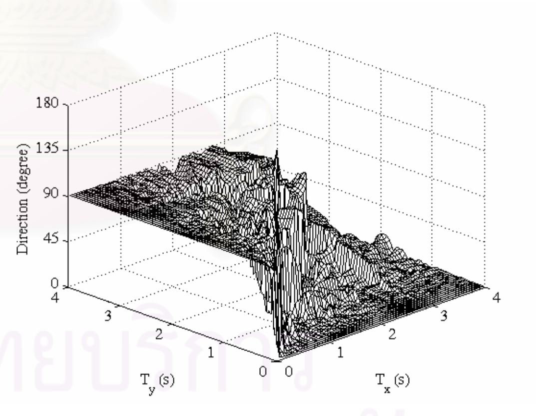
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$

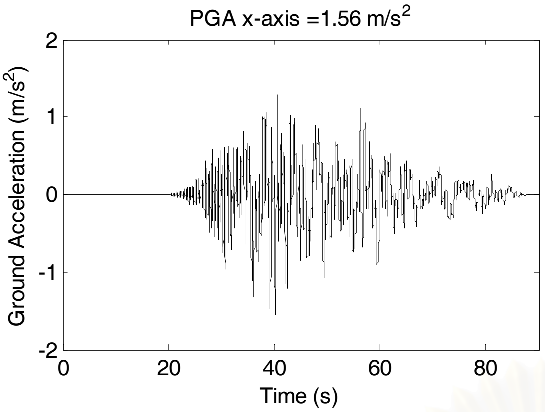


(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$

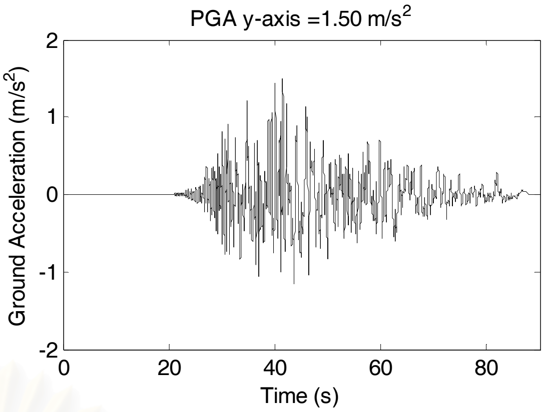


(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

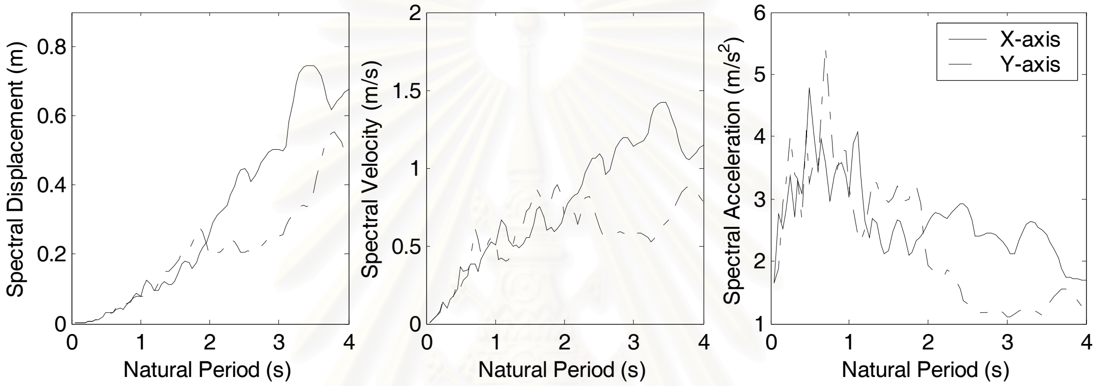
รูปที่ ก1.58 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว TCU116, Chi-Chi, 1999



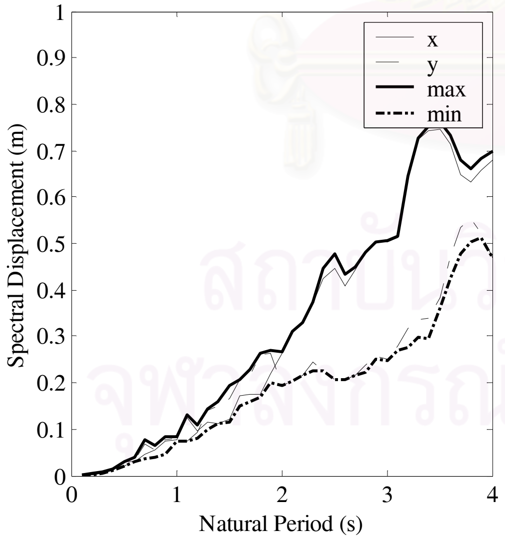
(ก) ความเร่งผิวดินในแกน x



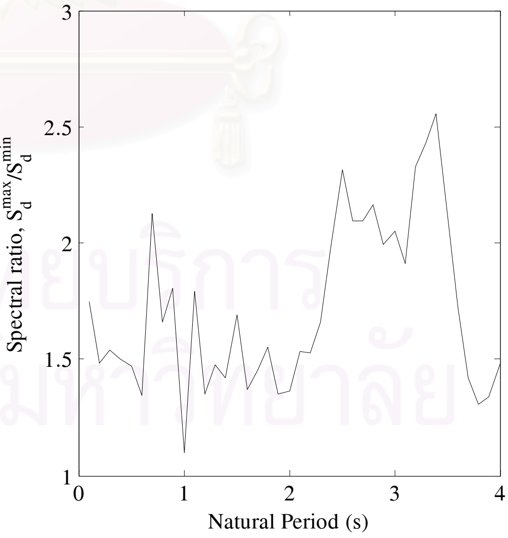
(ข) ความเร่งผิวดินในแกน y



(ค)สเปกตรัมระยะเคลื่อนที่ความเร็วและความเร่ง



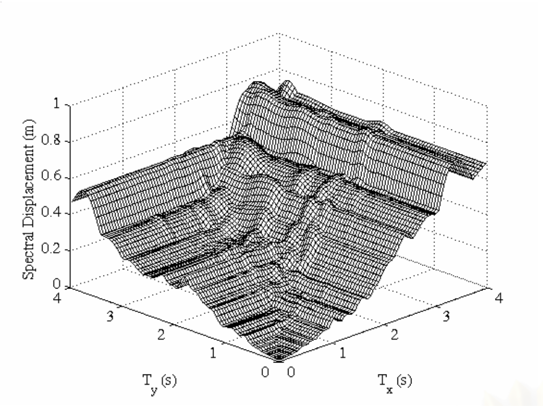
(ง) สเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด



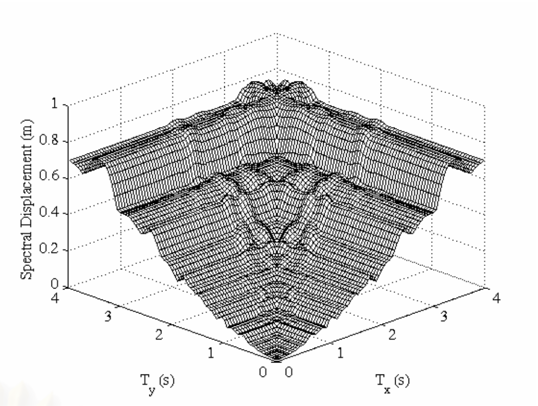
(จ) อัตราส่วนสเปกตรัมสูงสุดและต่ำสุด

รูปที่ ก1.59 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว CHY025, Chi-Chi, 1999

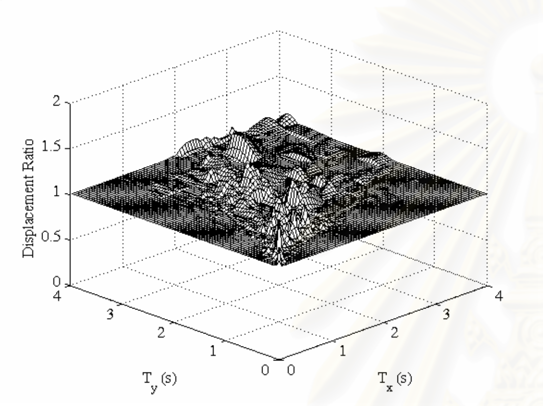
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



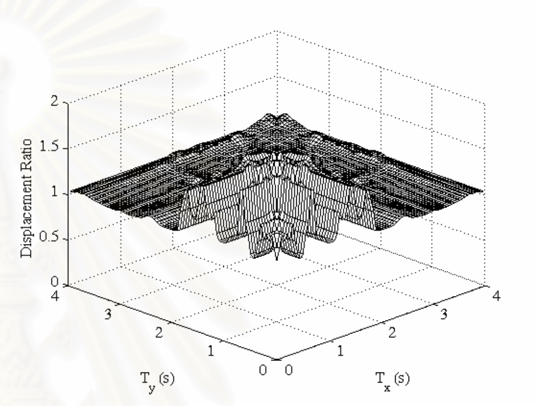
(ก) $S_d^r(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



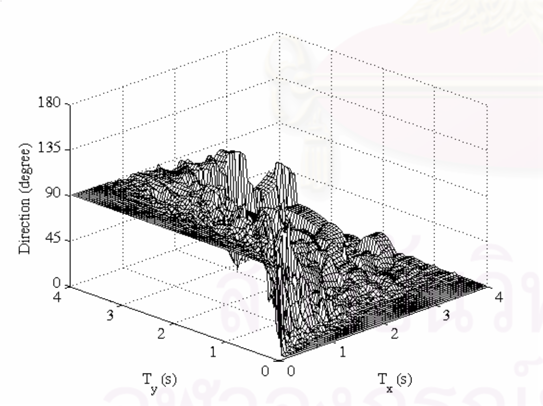
(ข) $\tilde{S}_d^r(T_x, T_y)$



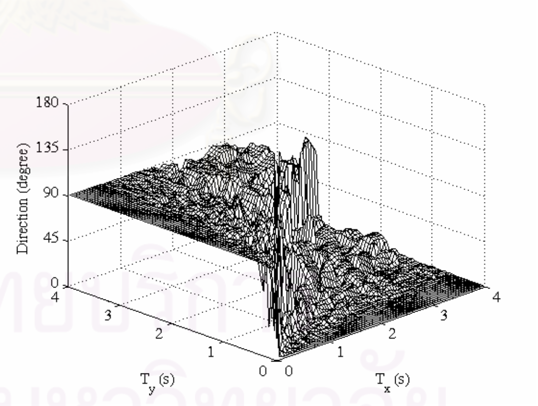
(ค) $\dfrac{S_d^r(T_x, T_y)}{S_d^{xy}(T_x, T_y)}$



(ง) $R(T_x, T_y)$



(จ) $\alpha(T_x, T_y, \theta = 0^\circ)$



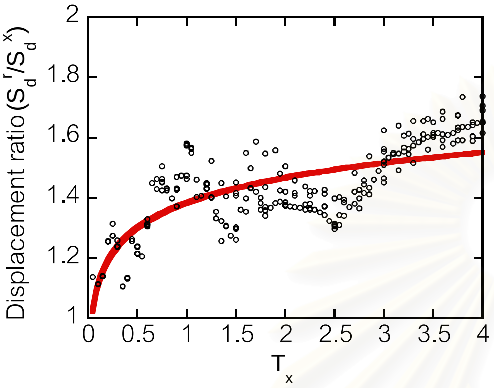
(ฉ) $\tilde{\alpha}(T_x, T_y)$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก1.60 สเปกตรัมผลตอบสนองสำหรับคลื่นแผ่นดินไหว CHY025, Chi-Chi, 1999

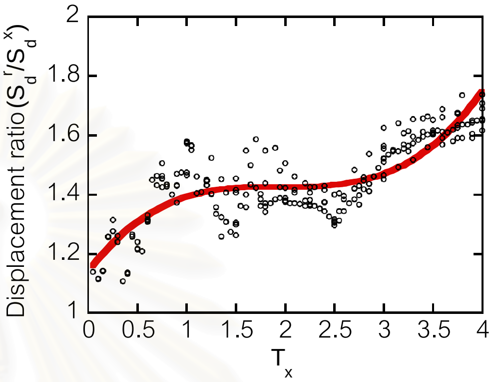
ภาคผนวก ข

การคำนวณเส้นแนวโน้มของสเปกตรัมอัตราส่วนการเคลื่อนที่ในรูปแบบของฟังก์ชันโพลิโนเมียลและลอกการิทึม



$$\frac{S_d^r}{S_d^x} = 1.38 + 0.28\log(T_x)$$
$$R^2 = 0.54$$

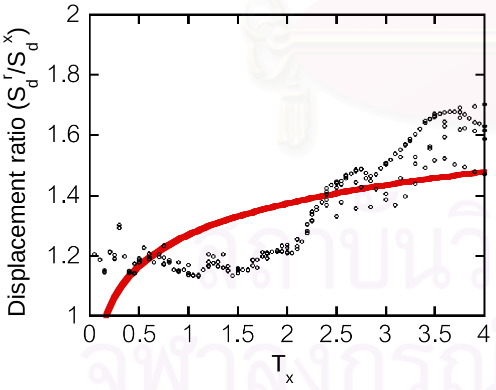
(ก) ลอกการิทึม



$$\frac{S_d^r}{S_d^x} = 1.13 + 0.44T_x - 0.23(T_x)^2 + 0.04(T_x)^3$$
$$R^2 = 0.69$$

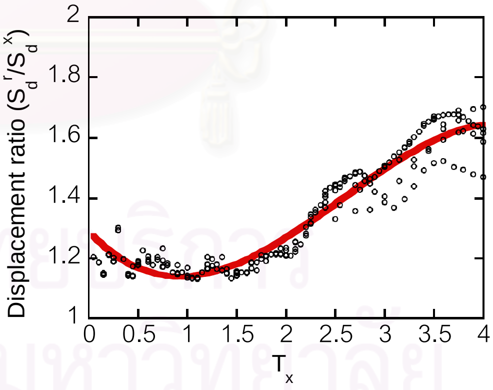
(ข) โพลิโนเมียล

รูปที่ ข1.1 สเปกตรัมอัตราส่วนการเคลื่อนที่ในดินประเภทหิน



$$\frac{S_d^r}{S_d^x} = 1.27 + 0.35\log(T_x)$$
$$R^2 = 0.49$$

(ก) ลอกการิทึม

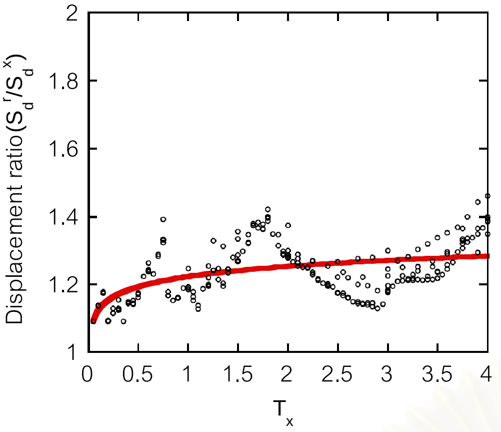


$$\frac{S_d^r}{S_d^x} = 1.29 - 0.35T_x + 0.23(T_x)^2 - 0.03(T_x)^3$$
$$R^2 = 0.93$$

(ข) โพลิโนเมียล

รูปที่ ข1.2 สเปกตรัมอัตราส่วนการเคลื่อนที่ในดินประเภทดินแข็ง

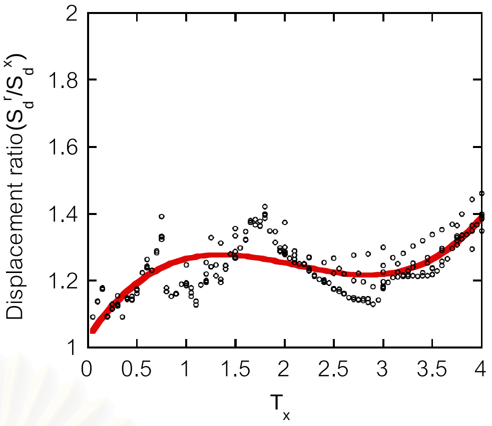
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



$$\frac{S_d^r}{S_d^x} = 1.22 + 0.10\log(T_x)$$

$$R^2 = 0.21$$

(ก) ลอกการิทึม



$$\frac{S_d^r}{S_d^x} = 1.03 + 0.44T_x - 0.24(T_x)^2 + 0.04(T_x)^3$$

$$R^2 = 0.48$$

(ข) โพลิโนเมียล

รูปที่ ข1.3 สเปกตรัมอัตราส่วนการเคลื่อนที่ในดินประเภทดินอ่อน

จะเห็นได้ว่า เมื่อใช้ฟังก์ชันลอกการิทึมหรือโพลิโนเมียลให้ค่า R^2 มากกว่าเมื่อใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น แสดงว่าสามารถอธิบายข้อมูลได้ดีกว่ารูปแบบเชิงเส้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศิริพล ศิริพละ เกิดวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อ พ.ศ. 2545

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย