



บทที่ 4

การคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลองของโครงสร้างถนน ภายใต้น้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองของโครงสร้างถนนภายใต้น้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD รวมทั้งการทดลองใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในการประเมินโครงสร้างถนนตัวอย่างไม่ว่าจะเป็นการคำนวณค่าการทรุดตัวที่ผิวบนของถนนขณะรับน้ำหนักกระทำแบบแรงดล หรือการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าคุณสมบัติอันได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ความหนา ของวัสดุในแต่ละชั้น และทำการวิเคราะห์ผลที่ได้ รวมไปถึงการเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับวิธีการที่ได้มีผู้เสนอไว้ในบทความทางวิชาการต่างๆ และสุดท้ายจะนำข้อมูลการทดสอบจริงที่บันทึกได้จากเครื่อง FWD มาทำการคำนวณย้อนกลับและวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้น

4.1 วิธีการแก้ปัญหาและการคำนวณเชิงตัวเลข

เนื่องจากกระบวนการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ตามวิธีการคำนวณและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 บางส่วนไม่สามารถกระทำได้โดยตรง เช่น การหาปริพันธ์ การหาส่วนผกผันของการแปลงฟูรีเยร์ และการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขเข้ามาช่วย หรือแม้แต่การแก้ปัญหาที่ทำได้โดยตรงเช่น การหาส่วนผกผันของสติเฟนสเมทริกซ์ แต่อาจพบกับปัญหาเนื่องจากความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลขในการคำนวณโดยการโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สำหรับหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีการแก้ปัญหาต่างๆ ที่กล่าวไว้ข้างต้นซึ่งใช้ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

4.1.1 การหาปริพันธ์เชิงตัวเลข

ค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะอยู่ในโดเมนของลาปลาซและฮันเกล เนื่องจากการแปลงฮันเกลตามสมการที่ 3.11 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการหาปริพันธ์ฟังก์ชันค่าการทรุดตัวเพื่อให้กลับไปสู่โดเมนของระยะทาง (r) ดังสมการที่ 4.1

$$\bar{y}(r, z, \omega) = \int_0^{\infty} \xi y^*(\xi, z, \omega) J_m(\xi r) d\xi \quad (4.1)$$

เมื่อ $\bar{y}(r, z, \omega)$ และ $y^*(\xi, z, \omega)$ เป็นค่าเดียวกันกับที่พบในสมการที่ 3.12

ในการหาปริพันธ์เพื่อหาค่าการทรุดตัวให้อยู่ในโดเมนของระยะทางดังสมการที่ 4.1 นั้นต้องทำการหาปริพันธ์ค่าพารามิเตอร์ของฮันเกลตั้งแต่ศูนย์จนถึงอนันต์ ซึ่งในการโปรแกรมคอมพิวเตอร์เชิงตัวเลขไม่อาจจะทำได้ จึงจำเป็นต้องจำกัดขอบเขตบนในการหาปริพันธ์ โดยทำการพิจารณาค่าการ

ทรุดตัวที่อยู่ในโดเมนของฮันเกล จะพบว่าค่าการทรุดตัวในโดเมนของฮันเกลจะมีค่าลดลงเมื่อพารามิเตอร์ของฮันเกลมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้การหาปริพันธ์ไม่จำเป็นต้องทำจนถึงค่าอนันต์ ในการหาปริพันธ์จะทำได้โดยการแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของค่าการทรุดตัวให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูโดยแต่ละรูปจะมีความสูงเท่ากับ 0.1 ดังในรูปที่ 4.1 และทำการหาปริพันธ์ตั้งแต่พารามิเตอร์ของฮันเกลเป็นศูนย์จนถึงค่า 20 30 40 50 60 70 และ 80 โดยค่าการทรุดตัวในโดเมนของเวลาที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของฮันเกลที่เป็นขอบเขตบนในการหาปริพันธ์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ถ้าทำการหาปริพันธ์โดยให้ค่าพารามิเตอร์ของฮันเกลสูงสุดมากกว่า 60 แล้วค่าการทรุดตัวที่คำนวณได้ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของฮันเกลสูงสุดในการหาปริพันธ์เท่ากับ 60

4.1.3 การหาส่วนผกผันของการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์

ค่าการทรุดตัวในโดเมนของความถี่จะถูกแปลงให้อยู่ในโดเมนของเวลาโดยใช้วิธีการหาส่วนผกผันของการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีการดังกล่าว จึงทำการทดลองแปลงสมการของน้ำหนักกระทำที่เป็นแบบ half-sinusoidal load ดังในรูปที่ 4.4 และสมการที่ 4.2 ซึ่งอยู่ในโดเมนของเวลา จากนั้นก็ทำการแปลงสมการที่ 4.2 โดยใช้การแปลงฟูเรียร์ให้อยู่ในโดเมนของความถี่ดังสมการที่ 4.3

$$f(t) = \begin{cases} P_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}t\right) & ; 0 \leq t \leq a \\ 0 & ; t > a \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\bar{f}(\omega) = \frac{P_0 \pi a}{\pi^2 - \omega^2 a^2} (e^{-i\omega a} + 1) \quad (4.3)$$

โดย P_0 คือ น้ำหนักกระทำสูงที่สุด t คือ เวลา a คือ ช่วงเวลาที่ให้น้ำหนักกระทำ และ ω คือ พารามิเตอร์ในโดเมนของความถี่

จากนั้นทำการหาส่วนผกผันของการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์กับสมการที่ 4.3 โดยได้ทำการหาส่วนผกผันของการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ในช่วงความถี่ต่างๆและเปรียบเทียบกับค่าน้ำหนักกระทำจริงในโดเมนของเวลาโดยแสดงผลการคำนวณไว้ในรูปที่ 4.2 พบว่าการหาส่วนผกผันในช่วงความถี่ 8-11 เฮิร์ตซ (Hz) จะให้ค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักกระทำแบบ half-sinusoidal load ต่อมาเมื่อพิจารณาช่วงเวลาของข้อมูลในโดเมนของเวลาซึ่งควรจะมีค่าประมาณ 1-2 มิลลิวินาที และจำนวนข้อมูลที่ไม่ควรมีมากเกินไปเพื่อที่จะใช้เวลาในการคำนวณให้น้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกช่วงความถี่ 9 เฮิร์ตซ (Hz) และใช้จำนวนข้อมูล 64 จำนวน

4.2 การหาค่าการทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนนโดยใช้แบบจำลองในลักษณะพลวัต

เพื่อประเมินผลการคำนวณหาค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองในลักษณะพลวัต จึงได้กำหนดโครงสร้างถนนมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณขึ้น โดยทำการพิจารณาผลของค่าคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของถนนที่มีผลต่อค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นด้วย

4.2.1 โครงสร้างถนนและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ

4.2.1.1 โครงสร้างถนน

ในการวิจัยจะจำลองให้ถนนมีลักษณะเป็นตัวกลางยืดหยุ่นหลายชั้น ที่ประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุจำนวนหลายชั้นวางตัวอยู่บนชั้นหินแข็งหรือบนชั้นดินยืดหยุ่นก็ได้ โดยวัสดุในแต่ละชั้นมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Homogeneous and Isotropic) โดยที่ผิวชั้นบนสุดมีความเค้นเฉือนเท่ากับศูนย์ ความเค้นในแนวตั้ง (Normal Stress) มีค่าเท่ากับหน่วยแรงเนื่องจากน้ำหนักกระทำที่ผิว บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นจะมีค่าความเค้นเฉือน ความเค้นในแนวตั้ง การเคลื่อนที่แนวตั้งและแนวราบที่เท่ากัน และสมมุติเกิดแรงเสียดทานระหว่างชั้นเต็มที่ โดยในการวิเคราะห์จะไม่คิดผลของแรงดันน้ำอุณหภูมิต่ำ และความชื้น

เพื่อประเมินผลการคำนวณหาค่าการทรุดตัวจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น จึงได้กำหนดโครงสร้างถนนมาตรฐาน 3 ชั้นที่รวมชั้นดินยืดหยุ่นที่มีความลึกอนันต์ไว้แล้วดังรูปที่ 4.4 ก ส่วนคุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ในการศึกษาถึงผลของลักษณะและคุณสมบัติของวัสดุที่มีผลต่อการทรุดตัวที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าลักษณะหรือคุณสมบัติในแต่ละชั้นของถนนให้แตกต่างไปจากค่าที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 โดยลักษณะและคุณสมบัติที่จะทำการศึกษาได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่น ทั้งนี้ค่า อัตราส่วนปัวซอง และความหนาแน่นของวัสดุ ไม่ได้นำมาพิจารณาผลด้วยเพราะในงานออกแบบสมบัตินี้ดังกล่าวจะมีความสำคัญรองลงไปจากค่าโมดูลัสและความหนาแน่นที่กล่าวไว้ข้างต้น และจากการศึกษาของ Nazarian (1984) พบว่าผลของพารามิเตอร์ทั้งสองนี้จะกระทบต่อการวิเคราะห์หาค่าโมดูลัสของชั้นถนนน้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

4.2.1.2 น้ำหนักกระทำ

น้ำหนักกระทำต่อโครงสร้างถนนจะเกิดขึ้นที่ผิวบนโดยมีค่าสม่ำเสมอซึ่งถูกถ่ายผ่านแผ่นวงกลมแข็งไปยังถนน ผลของแรงกระทำร่วมระหว่างแผ่นโลหะวงกลมและผิวถนนจะไม่ถูกนำมาคิด ลักษณะของน้ำหนักกระทำจะสมมุติให้เป็นแบบ half-sinusoidal load กระทำในช่วงเวลา 25 มิลลิวินาที ดังรูปที่ 4.4 ข โดยมีค่าสูงสุดเป็น 700 กิโลปาสคาลเกิดขึ้นที่เวลา 12.5 มิลลิวินาที

4.2.2 ผลตอบสนองทางพลวัตของโครงสร้างถนนภายใต้น้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD

การศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างถนนภายใต้น้ำหนักกระทำที่คล้ายกับสภาพการทดสอบด้วยเครื่อง FWD สามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองและวิธีการคำนวณที่พัฒนาขึ้นในบทที่ 3 เพื่อพิจารณาค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างถนนมาตรฐาน 3 ชั้นดังรูปที่ 4.6 แล้วทำการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและลักษณะของชั้นถนนอันได้แก่ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น .

4.2.2.1 การทรุดตัวของโครงสร้างถนนมาตรฐาน

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงค่าการทรุดตัวของโครงสร้างถนนมาตรฐานโดยทำการคำนวณค่าการทรุดตัวทั้งสิ้น 7 ตำแหน่งด้วยกัน ซึ่งได้แก่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของน้ำหนักกระทำที่ระยะ 30 60 90 120 150 และ 180 เซนติเมตรจากจุดศูนย์กลาง

4.2.2.2 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของโครงสร้างถนนระหว่างการแปลงลาปลาซและการแปลงฟูเรียร์

ผลการคำนวณแสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ซึ่งจะพบว่า ค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีมีความคล้ายคลึงกัน โดยค่าการทรุดตัวสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณารูปของค่าการทรุดตัวทั้งสองแบบพบว่า กราฟค่าการทรุดตัวจะมีลักษณะคล้ายกับกราฟของน้ำหนักกระทำ โดยกราฟของค่าการทรุดตัวที่เกิดจากน้ำหนักกระทำจากการหาส่วนผกผันลาปลาซที่ได้มีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ ส่วนกราฟของค่าการทรุดตัวที่เกิดจากน้ำหนักกระทำจากการหาส่วนผกผัน FFT จะมีลักษณะคล้ายกับกราฟ half-sinusoidal load โดยช่วงปลายของกราฟจะมีลักษณะแกว่งกวัดคล้ายกับลูกคลื่น ในขณะที่ช่วงปลายของกราฟที่เกิดจากน้ำหนักกระทำจากการหาส่วนผกผันลาปลาซจะมีลักษณะเรียบซึ่งก็จะคล้ายกับช่วงปลายของกราฟของน้ำหนักกระทำ

4.2.2.3 การเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวของโครงสร้างถนนระหว่างการวางตัวบนชั้นดินยืดหยุ่นและการวางตัวบนชั้นหินแข็ง

ผลการคำนวณแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 ซึ่งจะพบว่า ค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองกรณีจะมีความคล้ายคลึงกันตั้งแต่เริ่มเกิดการทรุดตัวจนกระทั่งค่าการทรุดตัวมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ในครั้งแรกจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปค่าการทรุดตัวทั้งสองกรณีจะเริ่มเกิดความแตกต่างกันโดยพบว่า ในกรณีที่โครงสร้างถนนวางตัวอยู่บนชั้นหินแข็งกราฟค่าการทรุดตัวจะมีลักษณะแกว่งคล้ายกับลูกคลื่นซึ่งเกิดจากผลของการสะท้อนกลับของคลื่นเมื่อกระทบกับชั้นหินแข็ง ส่วนกรณีที่โครงสร้างถนนวางตัวอยู่บนชั้นดินยืดหยุ่นกราฟค่าการทรุดตัวเกิดการแกว่งที่น้อยกว่าในกรณีที่มีชั้นหินแข็ง

4.3 การคำนวณย้อนกลับ

ในการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของโปรแกรมการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าคุณสมบัติของโครงสร้างถนนหลายชั้นที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ จะกระทำโดยการจำลอง สภาพการทดสอบด้วยเครื่อง FWD ด้วยแบบจำลองและวิธีการคำนวณที่เสนอไว้ในบทที่แล้ว ในขั้นแรก จะพิจารณาโครงสร้างถนน 1 ชั้นที่ประกอบด้วยชั้นดินเดิม โดยมีลักษณะและคุณสมบัติดังตารางที่ 4.3 โดยมีน้ำหนักกระทำชนิดแรงดลกระจายตัวสม่ำเสมอภายใต้แผ่นโลหะถ่วงน้ำหนักรูปวงกลมรัศมี 15 เซนติเมตร การหาค่าการทรุดตัวที่ผิวของถนนดังกล่าวโดยการวิเคราะห์แบบพลวัต จะสมมติให้แรงกระทำเป็นแบบ half-sinusoidal load ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับน้ำหนักกระทำจากเครื่อง FWD ดังรูปที่ 4.4 ข กระทำในช่วงเวลา 25 มิลลิวินาที มีค่าหน่วยแรงสูงสุดเท่ากับ 700 กิโลปาสคาล ที่เวลา 12.5 มิลลิวินาที

ในการคำนวณย้อนกลับ จะนำข้อมูลของน้ำหนักกระทำและค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นไป วิเคราะห์หาค่าคุณสมบัติของโครงสร้างถนนตามหลักการของ Nonlinear Least Square Optimization โดยใช้วิธี Modified Levenberg-Marquardt Algorithm ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมา โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นแล้วทำการค้นหาค่าคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุด โดยกระบวนการดังกล่าวจะมีการทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าที่ดีที่สุด

4.3.1 การจัดเตรียมข้อมูล

ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนนหลายชั้นนั้นนอกจากจะต้องทราบค่าคุณสมบัติอื่นๆ อันได้แก่ ค่าความหนา อัตราส่วนของผิวของ และค่าความหนาแน่นของวัสดุแต่ละชั้นแล้วยังจำเป็นต้องทราบค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นพร้อมกับค่าน้ำหนักที่กระทำที่เวลาต่างๆ อีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้นจะสามารถจำลองขึ้นได้เองจากวิธีการคำนวณและแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ทำให้ข้อมูลดังกล่าวปราศจากความคลาดเคลื่อน แต่เนื่องจากปริมาณของข้อมูลมีเป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องเลือกข้อมูลที่เหมาะสมและเพียงพอ เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับ สำหรับวิธีเลือกข้อมูลจะทำโดยการสุ่มเลือกข้อมูลซึ่งประกอบด้วย

(1) เลือกค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ณ เวลา 7.02 15.80 และ 24.58 มิลลิวินาที และเลือกมาจากตำแหน่งน้ำหนักกระทำและระยะ 300 600 900 1200 1500 และ 1800 มิลลิเมตรจากน้ำหนักกระทำ โดยแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

(2) เลือกค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ณ เวลา 5.27 10.53 15.80 21.07 และ 26.33 มิลลิวินาที และเลือกมาจากตำแหน่งเช่นเดียวกับข้อ (1) โดยแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

(3) เลือกค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น ณ เวลา 7.02 10.53 15.80 21.07 24.58 28.09 และ 31.60 มิลลิวินาที และเลือกมาจากตำแหน่งเช่นเดียวกับข้อ (1) โดยแสดงไว้ในตารางที่ 4.7

ข้อมูลที่ถูกเลือกมาทั้ง 3 ข้างต้น จะเพียงพอต่อการคำนวณในโปรแกรมซึ่งต้องการจำนวนสมการหรือจำนวนข้อมูลอย่างน้อยเท่ากับจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า โดยในที่นี้มีตัวแปรที่ไม่ทราบอยู่ 1 ค่า คือค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นดินเดิม แต่ผลการวิเคราะห์จะถูกต้องเพียงใดก็ยังขึ้นกับความเหมาะสมของข้อมูลด้วย ในการพิจารณาความเหมาะสมของข้อมูลนั้นทำโดยการเลือกใช้จำนวน Geophone (ชุดข้อมูลค่าการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่วัดจากศูนย์กลาง) ตั้งแต่ 1 ตัวไปจนถึง 7 ตัว แล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณย้อนกลับ โดยพิจารณาค่าเริ่มต้นของโมดูลัสยืดหยุ่นในแต่ละชั้นเป็น 2 แบบด้วยกันคือ ให้มีค่าเป็น 110 และ 120 เปอร์เซนต์ สำหรับค่าเริ่มต้นที่แตกต่างกันนั้นกำหนดขึ้นเพื่อพิจารณาว่ามีผลกระทบต่อการคำนวณอย่างไร

ผลการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลในตารางที่ 4.5 ถึงตารางที่ 4.7 แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ถึงตารางที่ 4.10 พบว่าการเลือกใช้ข้อมูลไม่มากนักในการคำนวณย้อนกลับยังคงให้ผลการคำนวณที่ถูกต้องทั้งนี้เพราะข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับเป็นค่าจริงปราศจากความคลาดเคลื่อนแต่สาเหตุที่มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในส่วนของทศนิยมก็เนื่องมาจากการเก็บข้อมูลที่นำไปใช้คำนวณย้อนกลับโดยคอมพิวเตอร์ไม่สามารถเก็บได้ทุกตำแหน่งของทศนิยม นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้จำนวนข้อมูลมากยิ่งขึ้นก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นด้วยแต่ความถูกต้องมิได้แตกต่างกันนัก และในจำนวนข้อมูลที่มากเกินไปจนความจำเป็นก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดเชิงตัวเลขในกระบวนการคำนวณของคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นที่ต้องใช้ข้อมูลในการคำนวณย้อนกลับมากนัก แต่ก็ไม่ควรน้อยเกินไปเพราะอาจพบกับปัญหาที่มีคำตอบหลายค่าได้ ดังนั้นในการคำนวณย้อนกลับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ Geophone 4 ตัวและใช้เวลา 5 ค่า ส่วนค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณในงานวิจัยนี้ควรมีค่าประมาณ 70 ถึง 130 เปอร์เซนต์ของค่าจริง

4.3.2 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น

กรณีนี้จะพิจารณาโครงสร้างถนน 2 ชั้นที่ประกอบด้วยชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและชั้นดินเดิม โดยที่จะทราบข้อมูลของโครงสร้างถนน เช่น ความหนา และคุณสมบัติอื่นๆในแต่ละชั้นยกเว้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่านั้น ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 โดยจะทำการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา รวมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นให้มีค่ามากที่สุดน้อยแตกต่างกัน เพื่อพิจารณาผลของค่าเริ่มต้นต่อการคำนวณย้อนกลับ และตรวจสอบประสิทธิภาพของการคำนวณ สำหรับผลที่ได้ในตารางที่ 4.11 นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่าโมดูลัสที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่

เกิน 0.05 เปอร์เซนต์ ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าวิธีการคำนวณย้อนกลับที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในกรณีที่ข้อมูลไม่มีความคลาดเคลื่อน

4.3.3 การคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น กรณีที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง

กรณีนี้จะพิจารณาโครงสร้างถนน 2 ชั้นที่ประกอบด้วยชั้นแอสฟัลต์คอนกรีตและชั้นดินเดิม โดยที่จะทราบข้อมูลของโครงสร้างถนน เช่น ความหนา และคุณสมบัติอื่นๆ ในแต่ละชั้นยกเว้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่านั้น ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 และมีชั้นหินแข็งอยู่ใต้ชั้นดินเดิม โดยจะทำการคำนวณย้อนกลับด้วยวิธีการเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา รวมทั้งกำหนดค่าเริ่มต้นให้มีความมากน้อยแตกต่างกัน เพื่อพิจารณาผลของค่าเริ่มต้นต่อการคำนวณย้อนกลับ และตรวจสอบประสิทธิภาพของการคำนวณ สำหรับผลที่ได้ในตารางที่ 4.13 นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่าโมดูลัสที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 3 เปอร์เซนต์ ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่าวิธีการคำนวณย้อนกลับในงานวิจัยยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง

จากผลการทดสอบข้างต้นที่ได้นำเสนอ สามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ค่าโมดูลัสที่ทำนายจากการคำนวณย้อนกลับในแต่ละชุดของการคำนวณ มีค่าที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ค่าที่ทำนายได้จะอยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ทั้งสิ้น โดยที่ค่าเริ่มต้นควรมีค่าอยู่ระหว่าง 70 ถึง 130 เปอร์เซนต์ของค่าจริง
- (2) ค่าการทรุดตัวที่วิเคราะห์ได้จากผลการคำนวณย้อนกลับเมื่อเลือกใช้ Geophone ตั้งแต่ 4 ตัวขึ้นไป จะมีความสอดคล้องกับค่าที่บันทึกได้จากเครื่อง FWD มากขึ้นในทุกตำแหน่ง
- (3) ในการเลือกคำตอบที่เหมาะสมที่สุดนั้น จำเป็นต้องทราบข้อมูลจากในสนาม อันได้แก่ ชนิดของถนน ความหนาของวัสดุแต่ละชั้น ก็จะเป็นการดีต่อการประเมินสภาพความแข็งแรงของชั้นถนน
- (4) การทำนายค่าโมดูลัสในงานวิจัยนี้อาจยังไม่แม่นยำมากนัก ในกรณีที่โครงสร้างถนนมีจำนวนชั้นมาก

ตารางที่ 4.1 ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าสูงสุดของพารามิเตอร์ของอันเกล (ξ) ในการหาปริพันธ์

เวลา (มิลลิวินาที)	การทรุดตัวในโดเมนของเวลา						
	$\xi = 20$	30	40	50	60	70	80
16	665.327	669.810	654.615	651.402	658.687	661.360	657.327
24	233.551	234.233	231.923	231.421	232.564	232.997	223.543

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนนมาตรฐาน 3 ชั้นที่ใช้ในการวิจัย

ชั้นวัสดุ	ความหนา (cm)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	อัตราส่วน ปัวซอง	ความหนาแน่น (Kg/m ³)
ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต	15	1000	0.35	2300
ชั้นพื้นทาง	25	200	0.35	2000
ชั้นดินเดิม	∞	100	0.35	1500

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน 1 ชั้น ที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ

ชั้นวัสดุ	ความหนา (cm)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	อัตราส่วน ปัวซอง	ความหนาแน่น (Kg/m ³)
ชั้นดินเดิม	∞	100	0.35	1500

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ

ชั้นวัสดุ	ความหนา (cm)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	อัตราส่วน ปัวซอง	ความหนาแน่น (Kg/m ³)
ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต	15	1000	0.35	2300
ชั้นดินเดิม	∞	100	0.35	1500

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 3 ค่า

เวลา (มิลลิวินาที)	การหลุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆจากน้ำหนักระทำ (ไมโครเมตร)						
	0 มม.	300 มม.	600 มม.	900 มม.	1200 มม.	1500 มม.	1800 มม.
7.02	1348.494	266.454	67.349	-4.476	-16.046	-16.357	-16.193
15.80	1753.141	473.313	234.634	143.977	88.094	46.177	12.408
24.58	188.189	129.088	115.162	106.188	95.850	83.795	70.589

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 5 ค่า

เวลา (มิลลิวินาที)	การหลุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆจากน้ำหนักระทำ (ไมโครเมตร)						
	0 มม.	300 มม.	600 มม.	900 มม.	1200 มม.	1500 มม.	1800 มม.
5.27	1019.014	163.426	4.523	-21.790	-19.509	-18.051	-14.774
10.53	1773.977	418.509	167.690	73.757	18.784	-13.730	-15.394
15.80	1753.141	473.313	234.634	143.977	88.094	46.177	12.408
21.07	977.974	319.263	190.836	138.907	106.179	79.778	56.452
26.33	-31.863	28.446	71.268	81.924	83.403	79.708	72.244

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับกรณีเลือกใช้เวลาในการพิจารณา 7 ค่า

เวลา (มิลลิวินาที)	การหลุดตัวที่ตำแหน่งต่างๆจากน้ำหนักระทำ (ไมโครเมตร)						
	0 มม.	300 มม.	600 มม.	900 มม.	1200 มม.	1500 มม.	1800 มม.
7.02	462.414	101.751	38.008	17.335	6.571	-0.705	-2.400
10.53	593.949	143.646	63.995	37.524	23.682	14.970	9.350
15.80	574.222	155.253	81.358	56.983	44.332	36.094	29.792
21.07	317.233	110.556	72.598	57.827	48.825	42.179	36.672
24.58	54.257	44.375	43.865	41.926	39.535	36.468	32.855
28.09	-12.847	-18.853	21.815	54.238	67.346	71.624	70.575
31.60	-8.897	-11.991	-9.848	-4.575	27.068	46.292	57.294

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 1 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวในกรณีใช้
เวลาในการพิจารณา 3 ค่าในแต่ละ Geophone

จำนวน Geophone	ค่าโมดูลัสจากการคำนวณย้อนกลับ			
	ค่าเริ่มต้น (80 %)	time (s)	ค่าเริ่มต้น (110 %)	time (s)
	240		330	
	Subgrade		Subgrade	
1	99.82	2.61	99.78	5.88
2	99.91	6.03	99.94	5.17
3	99.87	2.56	99.89	2.67
4	99.97	2.44	99.86	2.39
5	100.03	2.64	99.96	4.75
6	99.98	5.92	100.07	5.94
7	99.99	7.37	99.94	6.11

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 1 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวในกรณีใช้
เวลาในการพิจารณา 5 ค่าในแต่ละ Geophone

จำนวน Geophone	ค่าโมดูลัสจากการคำนวณย้อนกลับ			
	ค่าเริ่มต้น (110 %)	time (s)	ค่าเริ่มต้น (120 %)	time (s)
	110		120	
	Subgrade		Subgrade	
1	99.95	2.50	99.97	7.08
2	99.98	2.55	100.03	6.36
3	100.03	2.39	100.02	6.19
4	100.00	2.47	99.99	4.70
5	100.00	2.58	100.00	3.73
6	100.00	6.19	100.00	8.11
7	100.00	4.64	100.00	4.28

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 1 ชั้นเมื่อใช้ข้อมูลค่าทรุดตัวในกรณีใช้
เวลาในการพิจารณา 7 ค่าในแต่ละ Geophone

จำนวน Geophone	ค่าโมดูลัสจากการคำนวณย้อนกลับ			
	ค่าเริ่มต้น (110 %)	time (s)	ค่าเริ่มต้น (120 %)	time (s)
	110		120	
	Subgrade		Subgrade	
1	100.08	4.56	100.06	2.78
2	100.03	3.70	99.92	3.02
3	99.99	2.52	99.97	4.03
4	99.98	2.56	100.03	4.61
5	100.01	4.47	100.05	4.83
6	100.00	6.98	100.00	3.86
7	100.00	4.55	100.00	5.59

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 2 ชั้น

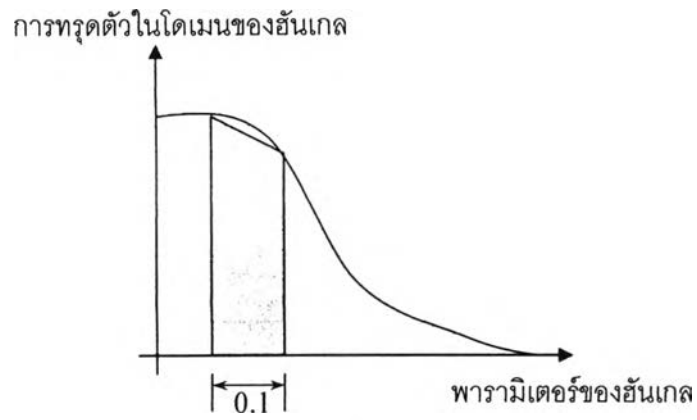
ค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Mpa)		ค่าโมดูลัสที่คำนวณได้ (Mpa)		เวลา (s)
AC	Subgrade	AC	Subgrade	
1200	120	999.72	100.02	14.31
1200	80	1000.23	99.97	21.70
800	80	1000.15	99.99	19.48
800	120	999.87	100.01	24.09

ตารางที่ 4.12 คุณสมบัติของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับ
ในกรณีทีวางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง (Rigid Base)

ชั้นวัสดุ	ความหนา (cm)	โมดูลัสยืดหยุ่น (Mpa)	อัตราส่วน ปัวซอง	ความหนาแน่น (Kg/m ³)
ชั้นแอสฟัลต์คอนกรีต	15	600	0.35	2300
ชั้นดินเดิม	200	300	0.35	1500

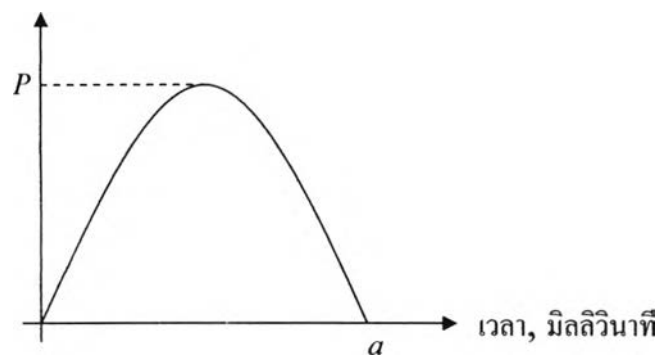
ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณย้อนกลับของโครงสร้างถนน 2 ชั้น ในกรณีทีวางตัวอยู่บนชั้นหินแข็ง

ค่าโมดูลัสเริ่มต้น (Mpa)		ค่าโมดูลัสที่คำนวณได้ (Mpa)		เวลา (s)
AC	Subgrade	AC	Subgrade	
720	360	615.28	295.81	7.84
540	270	617.38	295.33	27.55
540	300	598.70	300.29	38.92
630	300	603.75	298.92	51.20

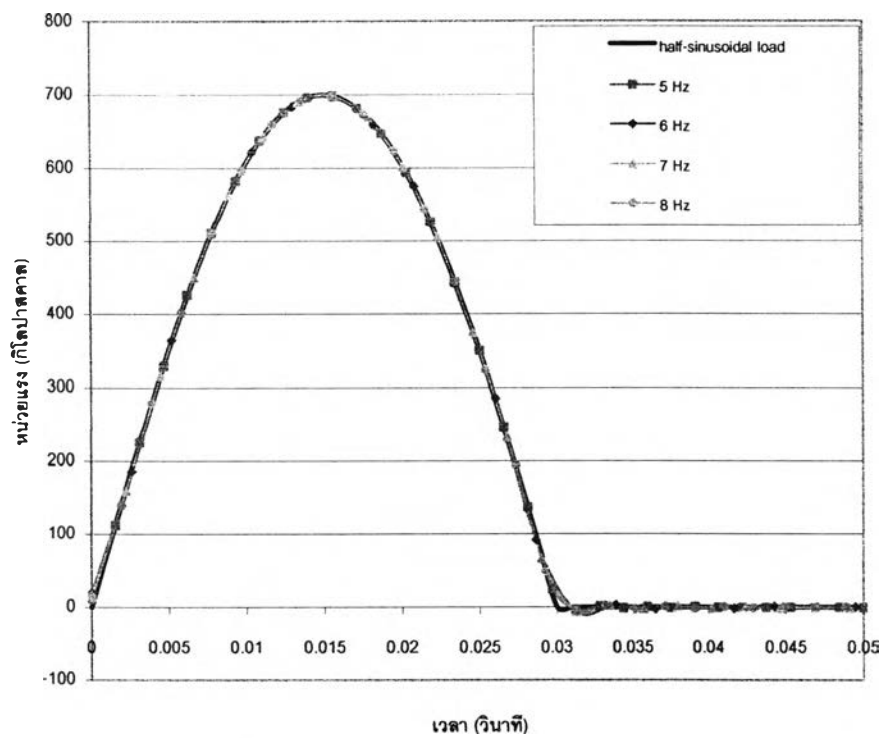


รูปที่ 4.1 การหาปริพันธ์โดยใช้ทฤษฎีสี่เหลี่ยมคางหมู

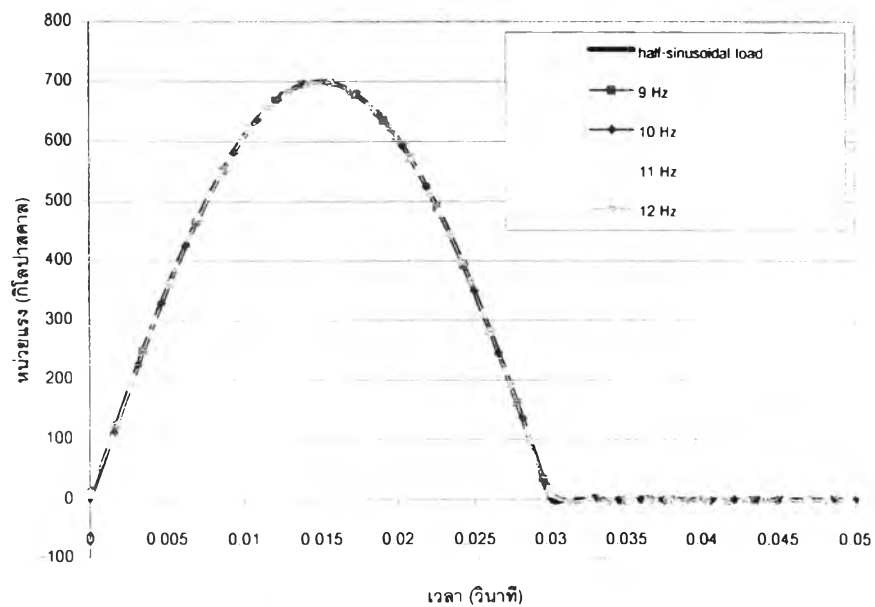
หน่วยแรง, $f(t)$ (kPa)



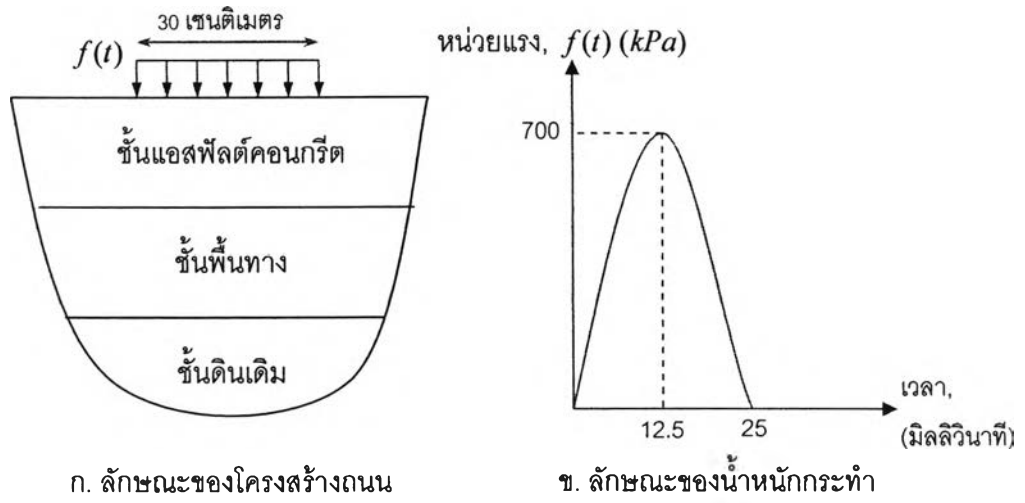
รูปที่ 4.2 น้ำหนักกระทำชนิด Half-Sinusoidal Load



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบช่วงของความถี่ที่ใช้ในการหาส่วนผกผันฟาสต์ฟูเรียร์



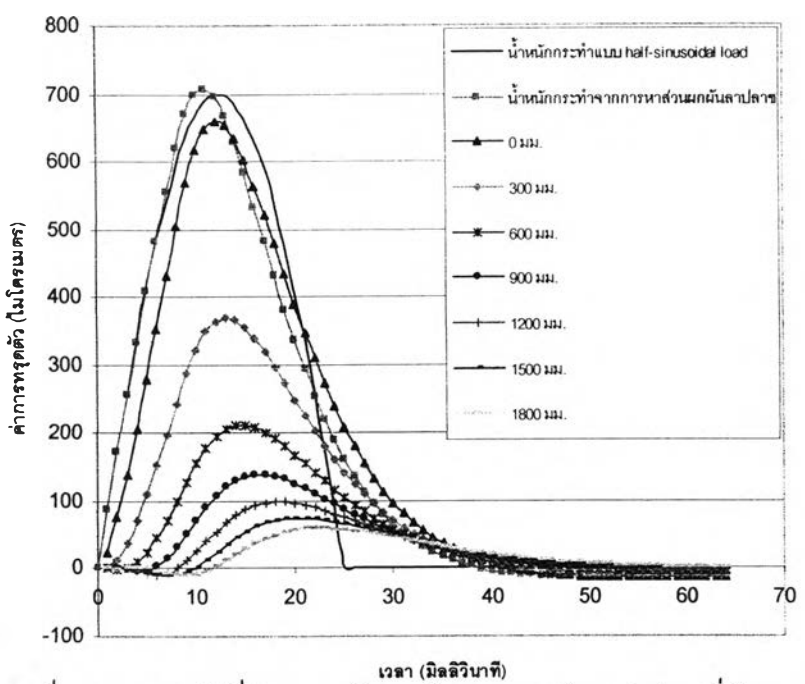
รูปที่ 4.3 (ต่อ) การเปรียบเทียบช่วงของความถี่ที่ใช้ในการหาส่วนผกผันฟาสต์ฟูเรียร์



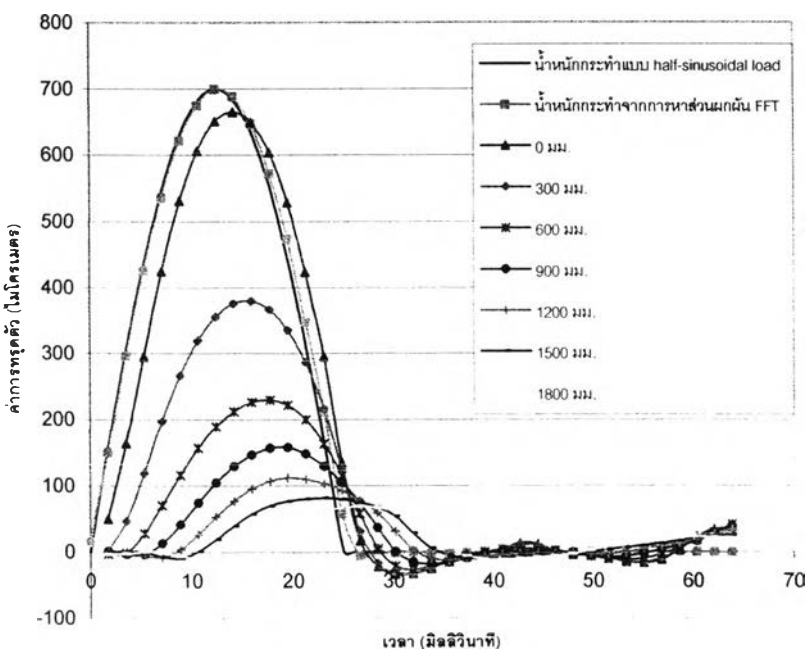
ก. ลักษณะของโครงสร้างถนน

ข. ลักษณะของน้ำหนักกระทำ

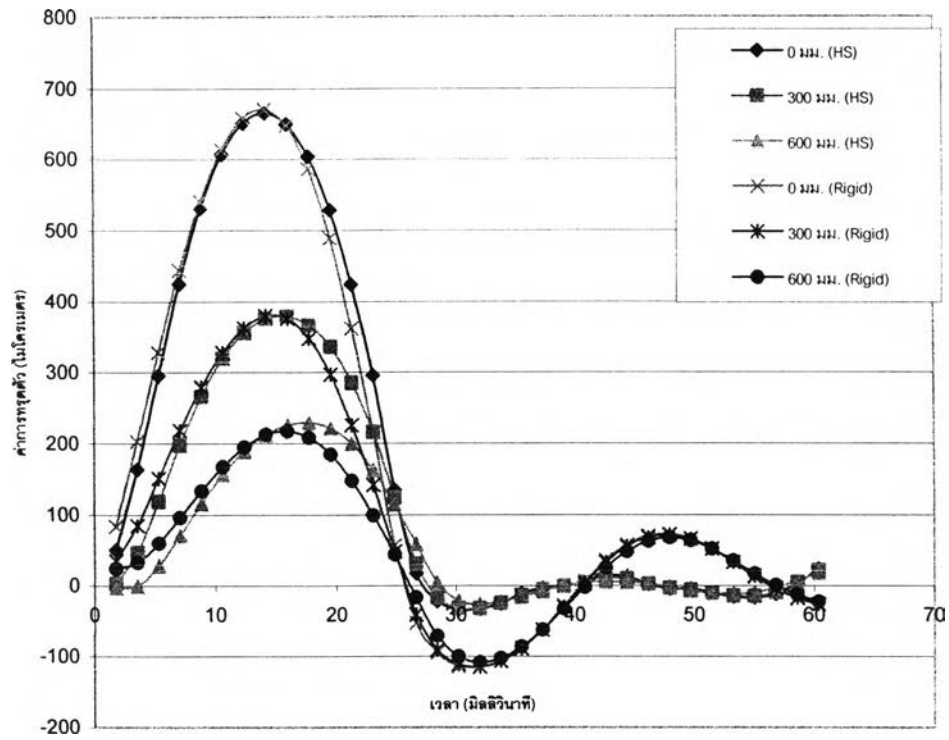
รูปที่ 4.4 ลักษณะของโครงสร้างถนนและน้ำหนักกระทำที่ใช้ในการคำนวณ



รูปที่ 4.5 การทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนน ณ ตำแหน่งต่างๆที่วัดจากศูนย์กลาง เมื่อให้น้ำหนักกระทำจากการหาส่วนผกผันลาปลาซ



รูปที่ 4.5 (ต่อ) การทรุดตัวที่ผิวบนของโครงสร้างถนน ณ ตำแหน่งต่างๆที่วัดจากศูนย์กลาง เมื่อให้น้ำหนักกระทำจากการหาส่วนผกผัน FFT



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่าการทุดตัวระหว่างโครงสร้างถนนที่วางตัวอยู่บนชั้นหินแข็งและโครงสร้างถนนที่วางตัวอยู่บนชั้นดินยืดหยุ่น