สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 2

# เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

ปัจจุบันการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Test; NDT) จัดว่าเป็นวิธีการประเมินสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนและสนามบินที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง (Guide, 1986; Lytton, Roberts and Stoffels, 1986) การทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Lytton et al., 1990; Huang, 1993) ด้วยกันคือ

1. Surface Loading Test เป็นการทดสอบที่ทำโดยการให้น้ำหนักกระทำที่ผิวของถนนแล้วทำการวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น โดยวัดที่ตำแหน่งน้ำหนักกระทำหรืออาจวัดที่ตำแหน่งที่ห่างจากน้ำหนักกระทำก็ได้

2. Wave Propagation Techniques เป็นการทดสอบที่ใช้หลักของการส่งสัญญาณคลื่นผ่านตัวกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของวัสดุ

อย่างไรก็ตาม การทดสอบในประเภท Wave Propagation Techniques กำลังอยู่ในช่วงพัฒนา ดังนั้นการทดสอบแบบไม่ทำลายที่ใช้กันอยู่ทั่วไปนั้นจะเป็นประเภท Surface Loading Test ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆตามลักษณะของเครื่องทดสอบ คือ

1. Static Deflection ได้แก่ Benkleman Beam
2. Steady-State Deflection ได้แก่ Dynaflect และ Road Rater
3. Impulse Load Deflection ได้แก่ Falling Weight Deflectometer (FWD)

เครื่องทดสอบแบบไม่ทำลายที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน ได้แก่ FWD (รูปที่ 2.1) เนื่องจากลักษณะการให้น้ำหนักจะใกล้เคียงกับน้ำหนักที่เกิดจากการจราจรมากที่สุด (Hoffman and Thompson, 1982; Sebaaly Mamlouk and Davies, 1986; Tholen, Shama and Terrel, 1982; Uddin et al., 1985; Ulliditz, 1987) โดยค่าน้ำหนักที่มากระทำจะมีลักษณะเป็นแรงดล และค่าการทรุดตัว ที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนไปตามเวลา โดยมีค่าสูงสุด (Peak Value) อยู่หนึ่งค่า (รูปที่ 2.2) โดยที่ค่าน้ำหนักที่มากระทำและค่าการทรุดตัวที่วัดได้จากการทดสอบทั้งสองค่านี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุในแต่ละชั้นต่อไป

หอสมุดกลาง สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



2.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณย้อนกลับ

Ulliditz และ Coetzee (1995) ได้รวบรวมรายชื่อของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเพื่อใช้ในการคำนวณย้อนกลับที่ได้รับความนิยมใช้ทั่วไปดังแสดงในตารางที่ 2.1

Chou และ Lytton (1991) ได้ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

โปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะทำการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะสถิต (Static Analysis) โดยใช้เพียงค่าสูงสุดทั้งของน้ำหนักที่มากระทำและค่าการทรุดตัวที่วัดได้มาทำการคำนวณย้อนกลับ ทั้งนี้จะไม่ตรงกับสภาพที่เกิดขึ้นจากเครื่องทดสอบ FWD ซึ่งข้อมูลทั้งสองที่บันทึกได้จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามเวลา

2.3 การศึกษาพฤติกรรมโครงสร้างถนน

Davies และ Mamlouk (1985) และ Roesset และ Shao (1985) ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนนในลักษณะพลวัต โดยยังไม่ได้ทำการคำนวณย้อนกลับ พบว่าโดยการพิจารณาผลของความเฉื่อย (Inertia) จะได้คำตอบที่มีความแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบสถิตอยู่มาก

Sebaaly et al. (1986) ได้สรุปว่า การวิเคราะห์แบบสถิตจะให้ค่าการทรุดตัวสูงกว่าค่าที่บันทึกได้จริงจากเครื่อง FWD ประมาณ 20 ถึง 40 เปอร์เซนต์ ทำให้ความแข็งแรงของชั้นถนนที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับมีค่ามากเกินความเป็นจริง ดังนั้นในการคำนวณย้อนกลับเพื่อประเมินค่าความแข็งแรงของชั้นถนนจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์แบบพลวัต

Stolle และ Peiravian (1996) จำลองโครงสร้างถนนโดยใช้แบบจำลองอย่างง่าย (Simplified model) แล้วหา Dynamic impedance เพื่อคำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น Ong, Newcomb and Siddharthan, (1991); Nazarian and Boddapati (1995) และ Lee, Kim and Ranjithan (1998) ได้นำเอาวิธีไฟไนท์เอลิเมนท์ (FEM) มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างถนน อย่างไรก็ตามแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนท์ แม้จะมีข้อดีในการจำลองพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของวัสดุ แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องจำนวนเอลิเมนท์ที่ใช้ซึ่งจะมีจำนวนมาก รวมไปถึงการจำลองสภาพขอบเขตซึ่งจะต้องทำการพิจารณาเป็นพิเศษ ในเรื่องที่เกี่ยวกับการสะท้อนของคลื่นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างชั้นถนน

แบบจำลองในลักษณะ Multi-Layered Viscoelastic Media ของ Kausel และ Roesset (1981) ได้ถูกใช้โดย Al-Khoury, Scarpas and Kasbergen (2001); Kang (1998) และ Uzan

(1994) ในการคำนวณย้อนกลับ อย่างไรก็ตามค่าการทรุดตัวที่ได้จากแบบจำลองนี้ จะอยู่ในโดเมนความถี่ (Frequency domain) และเป็นจำนวนเชิงซ้อน (Complex numbers) ทำให้การคำนวณค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อนโดยจำเป็นต้องใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) มาช่วย เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่บันทึกได้จากในสนาม ซึ่งอยู่ในโดเมนเวลา (Time domain)

Rajapakse และ Wang (1995) ได้เสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนนเนื่องมาจากน้ำหนักกระทำจาก FWD ที่เหมาะสม โดยการสร้างโกลบัลสติฟเนสเมทริกซ์ (Global stiffness matrix) สำหรับวัสดุยืดหยุ่นหลายชั้น ให้อยู่ในโดเมนลาปลาซ (Laplace domain) จากนั้นจึงคำนวณหาค่าการทรุดตัวในโดเมนของเวลา โดยวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในการศึกษาดังกล่าว ยังไม่ได้มีการกล่าวถึงวิธีการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาโมดูลัสยืดหยุ่น แต่อย่างใด

วิเชียร พัวรุ่งโรจน์ (2001) ได้ทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างถนนยืดหยุ่นหลายชั้นโดยใช้วิธีการหาส่วนผกผันของลาปลาซเชิงตัวเลข (Numerical Laplace Inversion) ในการแก้ปัญหาค่าการทรุดตัว จากนั้นคำนวณหาค่าการทรุดตัวของโครงสร้างถนนโดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะและคุณสมบัติของชั้นถนน เช่น ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นหรือความหนาของชั้นถนน พบว่าการเพิ่มค่าโมดูลัสหรือการเพิ่มความหนาของชั้นถนนในแต่ละชั้นจะทำให้ค่าการทรุดตัวลดลง นอกจากนี้ยังได้ทำการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและความหนาของชั้นถนนโดยใช้หลักการของ nonlinear least square optimization โดยใช้วิธี Modified Levenberg-Marquardt Algorithm

2.4 <u>การคำนวณย้อนกลับ</u>

วิธีการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่วัดได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD และจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองนั้น ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่

(1) วิธีการคำนวณซ้ำ (Iterative procedures) มีโปรแกรมคอมพิวเตอร์หลายโปรแกรมที่ใช้วิธีนี้ เช่น BISDEF, CHEVDEF, EVERCALC เป็นต้น สำหรับการนำเอาหลักการของ Least Square Optimization เข้ามาช่วยในการคำนวณนั้น ได้ถูกนำเสนออยู่ในหลายบทความ เช่น Harichandran et al. (1993); Kang (1998); Sivanneswaran, Kramer and Mahoney (1991) และ Uzan (1994) ส่วน Fwa, Tan and Chan (1997) ได้เสนอให้ใช้ Genetic Algorithm ในการ

คำนวณย้อนกลับ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เช่นเดียวกับ Sivanneswaran et al. แต่วิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณมากไม่เหมาะกับการใช้งานจริง

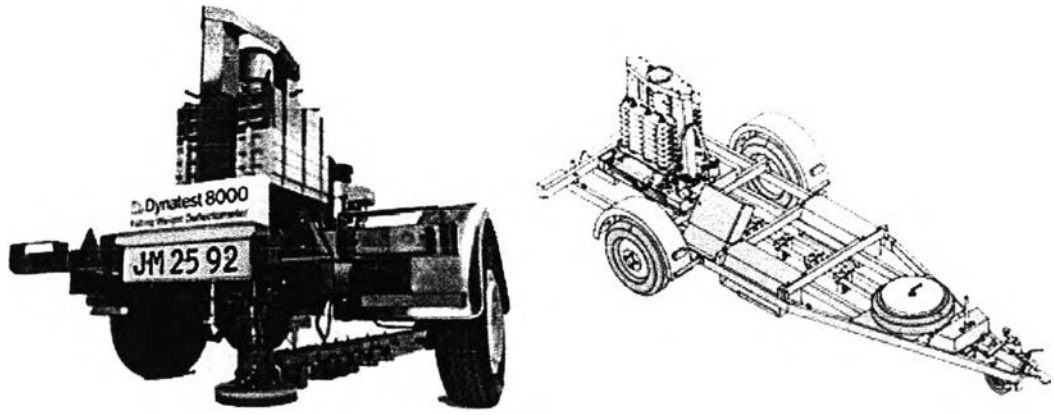
(2) การใช้ฐานข้อมูล (Data base) ในวิธีนี้ชุดข้อมูลของน้ำหนักกระทำและค่าการทรุดตัวจะถูกสร้างขึ้นโดยการกำหนดค่าคุณสมบัติ ซึ่งได้แก่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ให้อยู่ในช่วงที่เป็นไปได้ของชั้นถนนในแบบจำลอง ชุดของค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นชุดคำตอบที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อน้ำหนักกระทำและการทรุดตัวหนึ่งๆ ที่บันทึกได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับค่าในฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น วิธีนี้ต้องใช้ความรู้เรื่อง Search technique เช่น โปรแกรม MODULUS จะใช้ Hook-Jeeves Pattern Search Algorithm และ Three-Point Lagrangian Interpolation ในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การใช้ฐานข้อมูลนั้นต้องใช้เวลาค่อนข้างมากในการสร้างฐานข้อมูล และหากจำเป็นต้องเปลี่ยนสถานที่ทดสอบ ก็ต้องสร้างฐานข้อมูลขึ้นใหม่ทุกครั้งจึงไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นจะพบว่ายังไม่มีการใช้วิธีนี้กับการวิเคราะห์แบบพลวัตแต่อย่างใด

2.5 <u>การทดสอบด้วยเครื่อง FWD ในประเทศไทย</u>

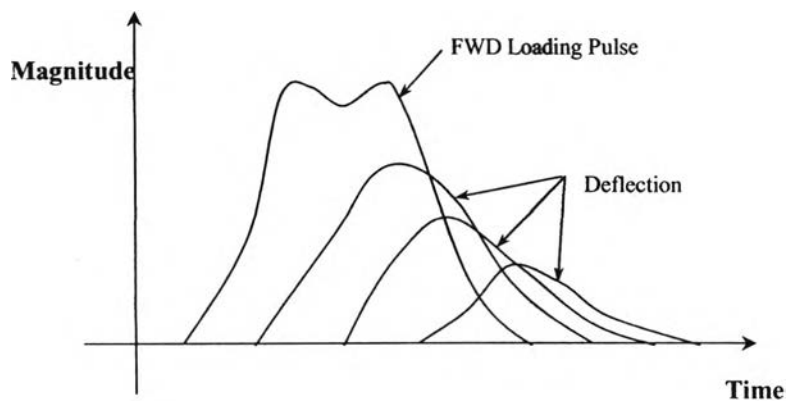
สำหรับในประเทศไทย หน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการทาง คือ กรมทางหลวงได้เริ่มนำเทคโนโลยีการตรวจสอบสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายเข้ามาศึกษาตามโครงการนำร่องการประเมินสภาพความแข็งแรงของถนนโดยใช้เครื่อง FWD กับประเทศเดนมาร์ก(ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2544) โดยในปี พ.ศ. 2537 ทางศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางของกรมทางหลวงได้รับความช่วยเหลือจาก Danish Road Directorate (DRD) โดยนำเครื่อง FWD รุ่น Dynatest 8000 (รูปที่ 2.1) มาทดลองใช้ในการตรวจสอบประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนซึ่งต่อมากรมทางหลวงได้รับความร่วมมือกับ DRD ในโครงการออกแบบโครงสร้างถนนและประมาณความแข็งแรงของโครงสร้างถนนโดยใช้เครื่อง FWD (Implementation of Falling Weight Deflectometer Technology and Development of Analytical Pavement Design Project) โดยใช้เงินกู้ Danish soft loans 84 ล้านบาท ระยะเวลาของโครงการได้สิ้นสุดลงในปี พ.ศ. 2544 ซึ่งได้มีการสุ่มทดสอบและเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง FWD ของถนนทั่วประเทศแล้ว (Macdonald, 2001) อย่างไรก็ตาม การทดสอบด้วยเครื่อง FWD กับถนนในประเทศไทยที่จัดเก็บโดยกรมทางหลวงได้ถูกออกแบบให้บันทึกข้อมูลได้เพียงค่าการทรุดตัวสูงสุดเนื่องจากน้ำหนักกระทำเท่านั้นซึ่งข้อมูลดังกล่าวยังไม่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัต

ตารางที่ 2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนน(บางส่วน)

| **Program Name** | Developed By | **Forward Calculation Method** | **Calculation Subroutin** | **Backcalculation Method** | **Non-Linear Analysis** | Maximum Number of Layer | **Seed Moduli** | **Range of Accepta** | **Convergence Routine** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BOUSDEF | ZHOU,et.al. OREGON | Odemark-Boussinesq | Odemark-Boussinesq | Iterative | Yes | 5, Works Best for 3 Unknown | Required | Required | Sum of Percent Error |
| CHEVDEF | USACE-WES | Multi-Layer Elastic Theory | CHEVRON | Iterative | No | Cannot Exceed No. of Deflec.,Works Best For 3 Unknowns | Required | Required | Sum of Squares of Absolute Error |
| ELMOD/ ELCON | P.ULLIDTZ DYNATEST | Odemark-Boussinesq | Odemark-Boussinesq | Iterative | Yes (Subgrade) | Up to 4, Exclusive of Rigid Layer | None | No | Relative Error on 5 Sensors |
| EVERCALC | J.MAHONEY, et.al. | Multi-Layer Elastic Theory | CHEVRON | Iterative | Yes | 3 Exclusive of Rigid Layer | Required | Required | Sum of Absolute Error |
| FPEDDI | W.UDDIN | Multi-Layer Elastic Theory | BASINPT | Iterative | Yes | Unknown | Program Generated | Unknown | Unknown |
| ISSEM4 | R.STUBSTAD | Multi-Layer Elastic Theory | ELSYM5 | Iterative | Yes (Finite Cylinder Concept) | 4 | Required | Required | Relative Deflect. Error |
| MODCOMP3 | L.IRWIN SZEBENYI | Multi-Layer Elastic Theory | CHEVRON | Iterative | Yes | 2 to 15 layers, Max 5 Unknown Layers | Required | Required | Relative Deflct. Error at Sensors |
| MODULUS | TEXAS TRANS. INSTITUTE | Multi-Layer Elastic Theory | WESLEA | Data Base | No | Up to 4 Unknown plus Stiff Layers | Required | Required | Sum of Relative Squared Error |
| MICHBACK | MICHIGAN STATE | Multi-Layer Elastic Theory | CHEVRON | Iterative | No | Up to 4 Unknown plus Stiff Layers | Required | Optional | Sum of Relative Squared Error |




รูปที่ 2.1 เครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) รุ่น dynatest 8000




รูปที่ 2.2 ลักษณะของน้ำหนักและค่าการทรุดตัวจากเครื่อง FWD