บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทดสอบแบบไม่ทำลาย

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

1. Surface Loading Test เป็นการทดสอบที่ทำโดยการให้น้ำหนักกระทำที่ผิวของถนนแล้วทำการวัดค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น การวัดค่าการทรุดตัวอาจวัดที่ตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำหรือวัดที่ตำแหน่งที่ห่างจากน้ำหนักกระทำก็ได้

2. Wave Propagation Techniques เป็นการทดสอบที่ใช้หลักของการส่งสัญญาณคลื่นผ่านตัวกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าคุณสมบัติของวัสดุ

อย่างไรก็ตาม การทดสอบในประเภท Wave Propagation Techniques กำลังอยู่ในช่วงพัฒนา ดังนั้น เครื่องทดสอบ NDT ที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปจะเป็นชนิด Surface Loading Test โดยเครื่องทดสอบ ชนิดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Static Deflection ได้แก่ Benkleman Beam

2. Steady-State Deflection ได้แก่ Dynaflect และ Road Rater และ

3. Impulse Load Deflection ได้แก่ Falling Weight Deflectometer (FWD)

เครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลายที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน 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 สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณย้อนกลับ

โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปได้ถูกพัฒนาขึ้นมามากมาย เพื่อใช้ในการคำนวณย้อนกลับโดย Ulliditz และ Coetzee (1995) ได้รวบรวมรายชื่อของโปรแกรมที่ได้รับความนิยมใช้ทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของบางโปรแกรมได้ถูกนำเสนอโดย Chou และ Lytton (1991) โปรแกรมที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจะทำการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะสถิต โดยใช้เพียงค่าสูงสุดทั้งของน้ำหนักที่มากระทำและค่าการทรุดตัวที่วัดได้มาทำการคำนวณย้อนกลับ ทั้งนี้จะไม่ตรงกับสภาพที่เกิดขึ้นจากเครื่องทดสอบ FWD ซึ่งข้อมูลทั้งสองที่บันทึกได้จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามเวลา

2.3 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลวัตกับพฤติกรรมเชิงสถิต

Davies และ Mamlouk (1985) และ Roesset และ Shao (1985) ได้ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมของชั้นถนนในลักษณะพลวัต โดยยังไม่ได้ทำการคำนวณย้อนกลับ พบว่าโดยการพิจารณาผลของ ความเฉื่อย (Inertia) จะได้คำตอบที่มีความแตกต่างจากการวิเคราะห์แบบสถิตอยู่มาก Sebaaly et al. (1986) สรุปว่า การวิเคราะห์แบบสถิตจะให้ค่าการทรุดตัวสูงกว่าค่าที่บันทึกได้จริงจากเครื่อง FWD ประมาณ 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ทำให้ความแข็งแรงของชั้นถนนที่ได้จากการคำนวณย้อนกลับมีค่ามากเกินไป ในขณะที่ Chang et al. (1992) พบว่า การวิเคราะห์แบบสถิตจะให้ค่าคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง โดยจะมีค่าน้อยเกินไปในชั้น Subgrade และมีค่ามากเกินไปในชั้น Base และชั้นบนสุด ดังนั้นในการคำนวณย้อนกลับจาก FWD เพื่อประเมินความแข็งแรงของถนนจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์แบบพลวัต เพื่อให้ได้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่ถูกต้อง การจำลองในลักษณะนี้จะใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากที่สุด และข้อมูลที่บันทึกได้ทั้งหมดสามารถนำไปใช้ในการคำนวณ ไม่ใช่เพียงแต่ค่าสูงสุดอย่างเช่นในกรณีของวิเคราะห์แบบสถิต นอกจากนั้นแล้ว เรายังสามารถจำลองคุณสมบัติบางประการของชั้นถนนที่ไม่สามารถกระทำได้โดยวิเคราะห์แบบสถิต เช่น การพิจารณาคุณสมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic properties) ของผิวทางลาดยางรวมไปถึงผลของการมีชั้นหินข้างใต้ถนน (Rigid bedrock) ได้อีกด้วย (Magnuson, Lytton and Briggs, 1991)

เนื่องจากการวิเคราะห์ในลักษณะพลวัตจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการคำนวณมากกว่าการวิเคราะห์แบบสถิต ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงได้มีการเสนอแนวทางในการคำนวณออกมาหลายวิธี เช่น 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) ได้นำเอาวิธีไฟไนท์เอลิเมนท์มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างถนน อย่างไรก็ตาม แบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนท์ 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 จะอยู่ในโดเมนของความถี่ (Frequency domain) และเป็นจำนวนเชิงซ้อน (Complex numbers) ทำให้การคำนวณค่อนข้างจะยุ่งยากและซับซ้อนโดยจำเป็นต้องใช้ Fast Fourier Transform (FFT) มาช่วย เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทรุดตัวที่บันทึกได้จากในสนาม ซึ่งอยู่ในโดเมนของเวลา (Time domain) การวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างถนนเนื่องมาจากน้ำหนักจาก FWD ที่เหมาะสมได้ถูกเสนอโดย Rajapakse และ Wang (1995) โดยการสร้างโกลบัลสติฟเนสเมทริกซ์ (Global stiffness matrix) สำหรับวัสดุยืดหยุ่นหลายชั้น ให้อยู่ในโดเมนของลาปลาซ (Laplace domain) และจากนั้นจึงคำนวณหาค่าการทรุดตัวในโดเมนของเวลา โดยวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามในการศึกษาดังกล่าว ยังไม่ได้มีการกล่าวถึงวิธีการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาโมดูลัสยืดหยุ่น แต่อย่างใด

2.4 <u>การคำนวณย้อนกลับ</u>

วิธีการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่น โดยการเปรียบเทียบค่าการทรุดตัวที่วัดได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง FWD และจากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองนั้น ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่

(1) วิธีการคำนวณซ้ำ (Iteration 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 ในการคำนวณย้อนกลับ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เช่นเดียวกับ Sivanneswaran et al. แต่วิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณมากไม่เหมาะกับการใช้งานจริง

(2) การใช้ฐานข้อมูล (Data base) ในวิธีนี้ชุดข้อมูลของน้ำหนักกระทำและค่าการทรุดตัวจะถูกสร้างขึ้นโดยการกำหนดค่าคุณสมบัติ ซึ่งได้แก่ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ให้อยู่ในช่วงที่เป็นไปได้

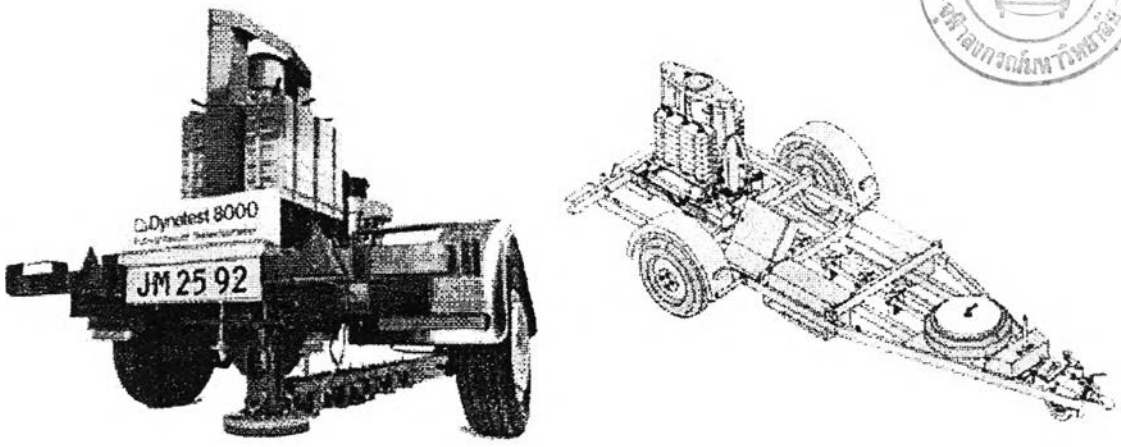
ของชั้นถนนในแบบจำลอง ชุดของค่าคุณสมบัติเหล่านี้จะเป็นชุดคำตอบที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อน้ำหนักกระทำและการทรุดตัวหนึ่งๆ ที่บันทึกได้จากการทดสอบนั้นสอดคล้องกับค่าในฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น วิธีนี้ต้องใช้ความรู้เรื่อง Search technique เช่น ในโปรแกรม MODULUS จะใช้ Hook-Jeeves Pattern Search Algorithm และ Three-Point Lagrangian Interpolation ในการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม การใช้ฐานข้อมูลนั้นต้องใช้เวลาค่อนข้างมากในการสร้างฐานข้อมูล และหากจำเป็นต้องเปลี่ยนสถานที่ทดสอบ ก็ต้องสร้างฐานข้อมูลขึ้นใหม่ทุกครั้งจึงไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นจะพบว่ายังไม่มีการใช้วิธีนี้กับการวิเคราะห์แบบพลวัตแต่อย่างใด

2.5 การทดสอบด้วยเครื่อง FWD ในประเทศไทย

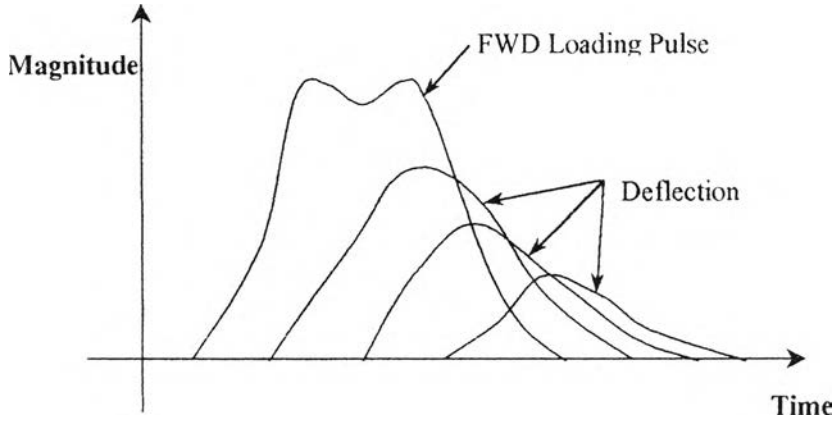
สำหรับในประเทศไทย หน่วยงานที่รับผิดชอบด้านการทาง คือ กรมทางหลวงได้เริ่มนำเทคโนโลยีการตรวจสอบสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนด้วยวิธี NDT เข้ามาศึกษาตามโครงการนำร่องการประเมินสภาพความแข็งแรงของถนนโดยใช้เครื่อง FWD กับประเทศเดนมาร์ก (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2544) โดยในปี พ.ศ. 2537 ทางศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางของกรมทางหลวงได้รับความช่วยเหลือจาก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

ตารางที่ 2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของชั้นถนน (บางส่วน)

Program Name	Developed By	Forward Calculation Method	Forward Calculation Subroutine	Backcalculation Method	Non-Linear Analysis	Maximum Number of Layer	Seed Moduli	Range of Accentable Modulus	Convergence Routine
BOUSDEF	ZHOU,et.al. OREGON STATE UNIV	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.ULLIDT. 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