

ผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักต่อการวิเคราะห์  
หน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีต

THE EFFECT OF LOAD TRANSFER EFFICIENCY MODELS  
ON THE STRESS ANALYSIS IN CONCRETE PAVEMENT

วรุฒิ สุวรรณมงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหน้าต่อการวิเคราะห์  
หน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2558  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักต่อการวิเคราะห์  
หน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีต

The Effect of Load Transfer Efficiency Models on Stress Analysis in  
Concrete Pavement

ชื่อ - นามสกุล

นายวรวิทย์ สุวรรณมงคล

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



ประธานกรรมการ

(อาจารย์จตุพล ตั้งปกาศิต, ปร.ด.)



กรรมการ

(อาจารย์รัฐพล สมณา, ปร.ด.)



กรรมการ

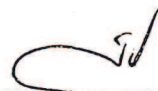
(อาจารย์บุญชัย ผึ้งไผ่งาม, ปร.ด.)



กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 28 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีต
ชื่อ - นามสกุล	นายวรุฒิ สุวรรณมงคล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พุทธพล ทองอินทร์ดำ, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2558

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (LTE) ที่แตกต่างกันของแต่ละหน่วยงานในระดับสากล อาทิ AASHTO, FHWA, ACPA, FAA และ Dynatest ต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นดัดในผิวทางคอนกรีตซึ่งสามารถ แบ่งแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ได้เป็น 4 กลุ่มหลักหน่วยแรงเค้นดัดที่คำนวณได้จากแต่ละแบบจำลอง LTE นี้ อาจส่งผลกระทบต่อรูปแบบ ซ่อมแซม และเกณฑ์การประเมินความแข็งแรงที่เกิดขึ้นในผิวทางคอนกรีตได้

ทำการจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกสิบล้อ 25 ตัน กระทำที่รอยต่อถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย นำเข้าความหนาแน่นทางของถนนคอนกรีตจากการเจาะสำรวจด้วยเครื่องมือ Bore Scope วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาวของแผ่นพื้นที่รับน้ำหนัก ร่วมกับแต่ละแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS ซึ่งพัฒนาขึ้นตามหลักทฤษฎีพื้นฐานของ Westergaard

ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  กลุ่มที่ 1 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมมากที่สุดโดยใช้อัตราส่วนการแอนตัวระหว่างแผ่นพื้นที่ไม่ได้รับน้ำหนักต่อแผ่นพื้นที่รับน้ำหนักคำนวณค่าหน่วยแรงเค้นดัดได้มากที่สุดและผลกระทบของแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ทุกกลุ่มต่อการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดจะมีค่ามากขึ้นเมื่อชั้นทางคอนกรีตมีกำลังรับแรงดัดน้อยและมีความหนาน้อยลง ขณะที่แบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  กลุ่มที่ 3 และ 4 ซึ่งนำผลทดสอบการแอนตัวที่กลางแผ่นมาปรับแก้ส่งผลกระทบต่อวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นดัดและ  $LTE_{\sigma}$  อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ทฤษฎีพื้นฐานของ Westergaard ยังไม่เหมาะสมในการหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$

**คำสำคัญ:** ผิวทางแบบแกร่ง ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก แรงเค้นดัด



**Thesis Title** The Effect of Load Transfer Efficiency Models on Stress Analysis in Concrete Pavement

**Name - Surname** Mr. Worawoot Suwanmongkon

**Program** Civil Engineering

**Thesis Advisor** Assistant Professor Puttapon Thongindam, Dr.-Ing.

**Academic Year** 2015

## ABSTRACT

This study investigated the effect of different Load Transfer Efficiency (LTE) models from international units such as AASHTO, FHWA, ACPA, FAA and Dynatest, on flexural stress analysis in rigid pavement. The  $LTE_{\Delta}$  models were divided into 4 main types. The flexural stress calculated from each LTE model affected the design, maintenance, and strength assessment on concrete pavement.

A jointed concrete pavement loaded by a Thai 10-wheel-truck (25 tons) was simulated. The thickness value of in-service concrete roads was determined by Bore scope equipment. The flexural stress at a transverse joint of the loaded slab with different  $LTE_{\Delta}$  models was analyzed using the computer program PAVERS, which was based on Westergaard's theory.

The results showed that the highest flexural stress was obtained from type 1 of the  $LTE_{\Delta}$  model, as calculated by the deflection ratio between unloaded to loaded slabs. The impact of all  $LTE_{\Delta}$  models on the flexural stress was inversely proportional to the thickness of the concrete slab and low flexural strength of the concrete slab. In addition, the  $LTE_{\Delta}$  models of type 3 and 4, which was corrected by mid slab deflection testing, could also have significant effects on the flexural stress analysis and  $LTE_{\sigma}$ . Furthermore, Westergaard's theory was not suitable for investigating the correlation between  $LTE_{\Delta}$  and  $LTE_{\sigma}$ .

**Keywords:** rigid pavement, load transfer efficiency, flexural stress

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือและการให้คำปรึกษาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พุทธพล ทองอินทร์คำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ของขอขอบคุณ ดร.จตุพล ตั้งปกาศิต ประธานกรรมการสอบ ดร.บุญชัย ผึ้งไผ่งามกรรมการสอบ และดร.รัฐพล สมณา ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำในข้อบกพร่องต่างๆ มีผลให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และมีคุณค่าในองค์ความรู้ทางวิศวกรรม

ขอขอบคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและความรู้ทางวิศวกรรมจนผู้วิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท เอเชีย เทสติ้ง อีควิปเมนต์ จำกัด ที่เอื้อเพื่อข้อมูลผลการเจาะสำรวจภาคสนามด้วยเครื่องมือ Bore Scope หาชั้นความหนาโครงสร้างถนนคอนกรีตและหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTRE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่เอื้อเพื่อลิขสิทธิ์โปรแกรม PAVERS รวมทั้งข้อมูลที่จำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ตลอดจนสิ่งอำนวยความสะดวกและสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคลากร สำนักงานบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษาแก่ข้าพเจ้าในทุกเรื่องตลอดช่วงเวลาที่ศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณครอบครัวสุวรรณมงคลและครอบครัววรรณรัตน์ ที่ให้ทั้งกำลังใจและเป็นทั้งกำลังใจตลอดระยะเวลาการศึกษาวิจัยด้วยดีเสมอมา สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอมอบความดีและความสำเร็จทั้งหมดนี้ให้แก่ คุณแม่และคุณพ่อที่ล่วงลับ เพื่อน รุ่นพี่และรุ่นน้องที่ให้การสนับสนุนจนทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

วรวุฒิ สุวรรณมงคล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	11
1.2 วัตถุประสงค์.....	13
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	13
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	13
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.1 โครงสร้างผิวทางถนนคอนกรีต.....	15
2.2 รอยต่อของผิวทางคอนกรีต.....	18
2.3 ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหน้าของผิวทางคอนกรีต.....	19
2.4 หน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อแผ่นพื้นคอนกรีต.....	28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.6 โปรแกรมออกแบบและประเมินผิวทาง PAVERS.....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	37
3.1 เจาะสำรวจความหนาชั้นทางด้วยเครื่องมือ Bore Scope.....	39
3.2 จำลองการทดสอบ FWD ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80.....	39
3.3 คำนวณค่า LTE ทั้ง 4 แบบจำลอง.....	41
3.4 จำลองน้ำหนักบรรทุกรถ 10 ล้อ บนรอยต่อถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80.....	41

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 จำนวนหน่วยแรงเค้นตัดจากรอบรทุก 10 ล้อ หน้า 25 ตัน ร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80 .....	43
3.6 วิเคราะห์และสรุปผลกระทบของหน่วยแรงเค้นตัดและ $LTE_{\sigma}$ จากแต่ละแบบจำลอง LTE .....	44
บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ .....	45
4.1 เจาะสำรวจความหนาชั้นทางด้วยเครื่องมือ Bore Scope .....	45
4.2 ผลจำลองการทดสอบ FWD ด้วยคอมพิวเตอร์ PAVERS .....	46
4.3 ผลการคำนวณค่า LTE .....	47
4.4 ผลการคำนวณค่าหน่วยแรงเค้นตัดจากรอบรทุก 10 ล้อกับ LTE .....	49
4.5 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นและวิเคราะห์ $LTE_{\sigma}$ .....	52
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ .....	59
5.1 สรุปผลการศึกษา .....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	60
บรรณานุกรม .....	61
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PAVERS 2.80.....	66
ภาคผนวก ข. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	141

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แบบจำลอง LTE ตามข้อเสนอแนะหรือมาตรฐานของหน่วยงานในระดับสากล .....	28
ตารางที่ 3.1 ค่าอีลาสติกโมดูลัส (E) โดยทั่วไปของวัสดุชั้นทางตามข้อเสนอแนะของ AASHTO .....	40
ตารางที่ 3.2 ตารางกำหนดค่า $d_u$ และ $d_r$ เพื่อแบ่งเกณฑ์และคำนวณค่า LTE .....	41
ตารางที่ 3.3 พิกัดกลุ่มล้อหลังรถสิบล้อที่นำเข้าไปรแกรม PAVERS .....	43
ตารางที่ 4.1 ผลเจาะสำรวจชั้นความหนาสายทางสระบุรี-หนองแค (SN) และปทุมธานี-ชนบุรี (PT) 46	
ตารางที่ 4.2 แสดงผลจำลองการทดสอบ FWD และคำนวณค่า B .....	46
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณ LTE ของสายทาง SN และ PT .....	47
ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ $LTE_{\sigma}$ สายทาง SN (Transverse Joint) ....	52
ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ $LTE_{\sigma}$ สายทาง SN (Longitudinal Joint) .	53
ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ $LTE_{\sigma}$ สายทาง PT (Transverse Joint) .....	53
ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ $LTE_{\sigma}$ สายทาง PT (Longitudinal Joint) .	53



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงการทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ HWD แบบหนักของผิวทางสนามบิน .....	12
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของผิวทาง JRCP .....	16
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของผิวทาง JRCP .....	17
รูปที่ 2.3 รายละเอียดรอยต่อประเภทต่างๆ ของผิวทางคอนกรีต .....	18
รูปที่ 2.4 การถ่ายน้ำหนักบริเวณรอยต่อเมื่อน้ำหนักกระทำ .....	20
รูปที่ 2.5 ความเสียหายจากการแตกหักที่มุมแผ่น (ซ้าย) การแตกหลุดร่อนที่รอยต่อตามขวาง (ขวา) ..	21
รูปที่ 2.6 ความเสียหายจากการค้ำหรือโค้งตัว (ซ้าย) การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของรอยต่อ (ขวา) ..	21
รูปที่ 2.7 การทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ NDT ที่รอยต่อแผ่น .....	22
รูปที่ 2.8 การทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ NDT ที่กลางแผ่น .....	23
รูปที่ 2.9 เกณฑ์การประเมินผลทดสอบ LTE ของ FAA .....	24
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LTE_I$ และ $LTE_C$ ของ FAA .....	27
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำบนแผ่นพื้นตามทฤษฎี Westergaard .....	28
รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบแบบจำลอง $LTE_I$ และ $LTE_C$ ของ Dattrler และ Teller .....	31
รูปที่ 2.13 ผลกระทบ LTE ต่อการคำนวณหน่วยแรงเส้นตัดของทางผิวคอนกรีตสนามบิน .....	32
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการใช้งาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS .....	36
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนปฏิบัติงานวิจัย .....	38
รูปที่ 3.2 เครื่องมือเจาะและสำรวจ Bore Scope .....	39
รูปที่ 3.3 จำลองการทดสอบ MID Slab ด้วยเครื่องมือ FWD โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS .....	40
รูปที่ 3.4 มิติและความยาวของรถบรรทุก 10 ล้อหนัก 25 ตัน .....	42
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งพิกัดกลุ่มล้อรถบรรทุก 10 ล้อ ที่ป้อนเข้าในโปรแกรม PAVERS .....	42
รูปที่ 3.6 แบบจำลองคำนวณหน่วยแรงเส้นตัดที่รอยต่อตามขวางร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS .....	43
รูปที่ 3.7 แบบจำลองคำนวณหน่วยแรงเส้นตัดที่รอยต่อตามยาวร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS .....	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 เจาะสำรวจหาความหนาชั้นทางถนนคอนกรีตสายทางสระบุรี – หนองแค (SN).....	45
รูปที่ 4.2 เจาะสำรวจหาความหนาชั้นทางถนนคอนกรีตสายทางปทุมธานี – ชนบุรี (PT).....	45
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการคำนวณของ LTE ทั้ง 4 แบบจำลองในสายทาง SN .....	48
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการคำนวณของ LTE ทั้ง 4 แบบจำลองในสายทาง PT.....	48
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามขวางกับแบบจำลอง LTE ของสายทาง SN.....	50
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามยาวกับแบบจำลอง LTE ของ สายทาง SN.....	50
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามขวางกับแบบจำลอง LTE ของสายทาง PT.....	51
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามยาวกับแบบจำลอง LTE ของ สายทาง PT.....	51
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LTE_{\Delta}$ กับ $LTE_{\sigma}$ รอยต่อตามขวางของสายทาง SN .....	54
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LTE_{\Delta}$ กับ $LTE_{\sigma}$ รอยต่อตามยาวของสายทาง SN .....	55
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LTE_{\Delta}$ กับ $LTE_{\sigma}$ รอยต่อตามขวางของสายทาง PT .....	55
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $LTE_{\Delta}$ กับ $LTE_{\sigma}$ รอยต่อตามยาวของสายทาง PT.....	56
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ $LTE_{\sigma}$ ที่รอยต่อตามขวางของสายทาง SN .....	57
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ $LTE_{\sigma}$ ที่รอยต่อตามยาวของสายทาง SN.....	57
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ $LTE_{\sigma}$ ที่รอยต่อตามขวางของสายทาง PT.....	58
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ $LTE_{\sigma}$ ที่รอยต่อตามยาวของสายทาง PT .....	58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ผิวทางแบบแกร่ง (Rigid Pavement) หรือเรียกสั้นๆว่า “ผิวทางคอนกรีต (Concrete Pavement)” เป็นโครงสร้างผิวทางที่มีความแข็งแรงสูง ถูกออกแบบให้รองรับน้ำหนักบรรทุกได้มากและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการซ่อมบำรุงและดูแลรักษาอย่างถูกต้อง จะยิ่งทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานหลายสิบปีในปัจจุบันผิวทางคอนกรีตถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น ถนน ทางหลวง ลานจอดรถ ลานจอดเครื่องบิน ลานส่งสินค้าในท่าเรือ หรือลานกองเก็บสินค้าในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น ทั้งนี้ผิวทางคอนกรีตมักถูกออกแบบให้มีรอยต่อเพื่อควบคุมการแตกร้าว ลดหน่วยแรงเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ซึ่งรอยต่อนี้ต้องถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นได้ (Load Transfer Efficiency, LTE) โดยใช้หลักทางกลศาสตร์ในการถ่ายเทน้ำหนักไปสู่แผ่นข้างเคียง เช่น การขัดเหลี่ยมของวัสดุ (Grain Interlock) การใช้เหล็กเดือยยึดรั้ง (Dowel Bar) และการใช้ฐานรองรับที่เสริมความแข็งแรง (Stabilized Subbase) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามรอยต่อของผิวทางคอนกรีตนี้ก็กลับกลายเป็นจุดอ่อนและเป็นตำแหน่งที่เกิดความเสียหายมากที่สุด [1, 2] เช่น รอยแตกร้าว (Cracking) รอยแตกหัก (Breaking) โพรงใต้แผ่นพื้น (Void) การทรุดตัวที่ต่างกันของรอยต่อแผ่น (Faulting) เป็นต้น ซึ่งความเสียหายเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อเนื่องลุกลามจนทำให้ผิวทางคอนกรีตมีอายุการใช้งานสั้นลงได้

ในการประเมินสภาพความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต LTE เป็นหนึ่งในหัวข้อหลักที่ต้องประเมินร่วมกับการทดสอบกำลังรับน้ำหนัก (Bearing Capacity) และการตรวจสอบสภาพโพรงใต้แผ่นพื้น (Void Detection) [1] เนื่องจาก LTE ที่ไม่ดีจะเหนี่ยวนำให้เกิดความเสียหายที่รอยต่อมากยิ่งขึ้น เร่งการเกิดรอยแตกหัก การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันให้มากยิ่งขึ้น [3] ซึ่งความเสียหายเหล่านี้นอกจากจะส่งผลกระทบต่อในส่วนของโครงสร้างโดยตรงแล้วยังส่งผลให้คุณภาพในการขับขี่ลดลง เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุได้อีกด้วย ดังนั้นหลายหน่วยงานด้านงานทางถนน อากาศยานและหน่วยงานเอกชนที่เกี่ยวข้องด้านงานผิวทางในระดับสากล อาทิ American Association of State Highway Officials (AASHTO), Federal Highway Administration (FHWA), American Concrete Pavement Association (ACPA), Federal Aviation Administration (FAA) และ Dynatest เป็นต้น จึงได้จัดตั้งข้อกำหนดหรือข้อเสนอแนะในการทดสอบและแบบจำลองการวิเคราะห์ LTE เพื่อใช้ในการประเมิน ความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต ซึ่งแต่ละหน่วยงานดังกล่าว ต่างก็มีรายละเอียดของ LTE ที่แตกต่างกันและอาจส่งผล



ให้การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นหรือการนำไปประยุกต์ใช้ต่อเนื่องถึงการประเมินความแข็งแรงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มีความแตกต่างกันไปด้วย

ในปัจจุบันหน่วยงานด้านงานทางข้างต้นนิยมทดสอบและประเมิน LTE ด้วยค่าการแอ่นตัว (Deflection LTE,  $LTE_{\Delta}$ ) [3] ด้วยเครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Device) เช่น เครื่องมือทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยลูกตุ้มกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) เครื่องมือทดสอบค่าการแอ่นตัวด้วยลูกตุ้มกระแทกแบบหนัก (Heavy Falling Weight Deflectometer, HWD) เครื่อง Dynaflect เป็นต้น รูปที่ 1.1 แสดงการทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ HWD วัดค่าการแอ่นตัวที่รอยต่อของสนามบิน ทั้งนี้ค่าการแอ่นตัวจะถูกนำไปใช้ไปใช้ในการวิเคราะห์ LTE เพื่อประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต แต่เนื่องจากมีหลายหน่วยงานและหลายแบบจำลอง LTE ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษา วิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงเค้นดัด (Flexural Stress) ที่เกิดขึ้นในผิวทางคอนกรีตจากแต่ละแบบจำลอง LTE



รูปที่ 1.1 แสดงการทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ HWD แบบหนักของผิวทางสนามบิน

โดยในงานวิจัยนี้ทำการจำลองน้ำหนักรถสิบล้อ 25 ตันกระทำที่รอยต่อของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทยด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ ประเมินและออกแบบผิวทาง [4] นำเข้าค่าความหนาของชั้นทางจากการเจาะสำรวจจริงด้วยเครื่องมือเจาะสำรวจ (Bore Scope) วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อหรือขอบแผ่นพื้นตามหลัก

ทฤษฎีพื้นฐานของ Westergaard ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้งานแบบจำลอง LTE ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางให้มากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักของรอยต่อผิวทางคอนกรีต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหน่วยแรงเค้นดัดที่เกิดขึ้นที่รอยต่อในผิวทางคอนกรีต
- 1.2.3 เพื่อศึกษามาตรฐาน ข้อเสนอแนะในการทดสอบและแบบจำลองในการวิเคราะห์ LTE ของแต่ละหน่วยงานด้านงานทางในระดับสากล
- 1.2.4 เพื่อศึกษาผลกระทบของแบบจำลอง LTE ต่อหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นในผิวทางคอนกรีต

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ใช้ทฤษฎีพื้นฐานของ Westergaard ในการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดที่เกิดขึ้นในรอยต่อผิวทางคอนกรีต
- 1.3.2 ใช้แบบจำลอง LTE (Deflection) ของหน่วยงาน AASHTO, FHWA, ACPA, FAA และ Dynatest ในการวิเคราะห์
- 1.3.3 กำหนดให้ใช้รถสิบล้อหนัก 25 ตันกระทำที่รอยต่อบนของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย
- 1.3.4 ไม่คำนึงถึงผลกระทบที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ในผิวทางคอนกรีต
- 1.3.5 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS รุ่น 2.80 จำลองการทดสอบการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษารวบรวมเอกสารทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดกลุ่มแบบจำลอง LTE จากแต่ละหน่วยงาน
- 1.4.3 เจาะสำรวจความหนาชั้นทางของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทยด้วยเครื่องมือเจาะสำรวจ (Bore Scope)

- 1.4.4 จำลองการทดสอบการแอ่นตัวด้วยเครื่องมือ FWD โดยใช้โปรแกรม PAVERS รุ่น 2.80
- 1.4.5 นำค่าการแอ่นตัวที่ได้มาคำนวณและวิเคราะห์ LTE (Deflection) ของแต่ละหน่วยงาน
- 1.4.6 วิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงก้นค้ำที่เกิดขึ้นจากแต่ละแบบจำลอง LTE
- 1.4.7 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา
- 1.4.8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และตีพิมพ์งานวิจัยเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบถึงพฤติกรรมการถ่ายน้ำหนักและการวิเคราะห์หน่วยแรงก้นค้ำที่รอยต่อในผิวทางคอนกรีต
- 1.5.2 ทราบถึงมาตรฐาน ข้อเสนอแนะในการทดสอบและแบบจำลองในการวิเคราะห์ LTE ของแต่ละหน่วยงานด้านงานทางในระดับสากล
- 1.5.3 ทราบถึงผลกระทบ LTE ต่อหน่วยแรงก้นค้ำที่รอยต่อในผิวทางคอนกรีต
- 1.5.4 สามารถเลือกใช้งานแบบจำลอง LTE ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางให้มากยิ่งขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 โครงสร้างผิวทางถนนคอนกรีต

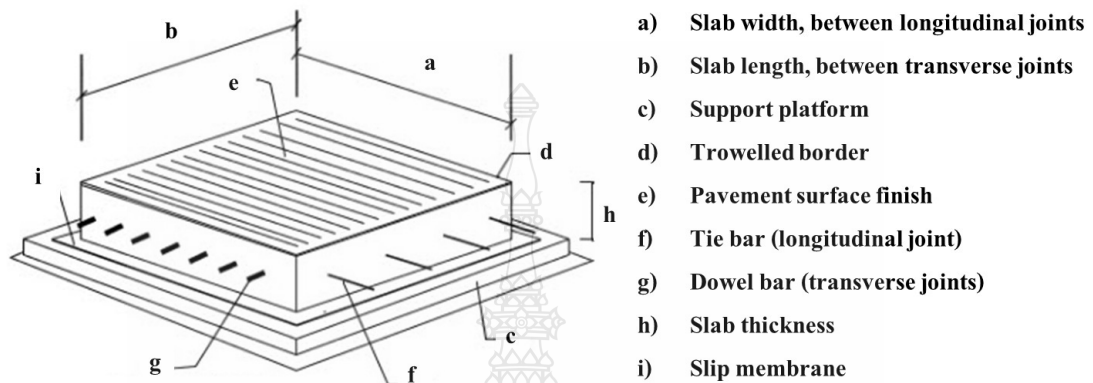
โครงสร้างผิวทางคอนกรีตถูกใช้งานเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1893 ที่รัฐโอไฮโอ ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยมีแนวความคิดจากความต้องการพัฒนาผิวทางให้ดียิ่งขึ้น [4] จากนั้นผิวทางคอนกรีตเริ่มมีการใช้งานอย่างแพร่หลายและใช้งานมากขึ้นช่วงยุคสงครามโลก มีการสร้างเส้นทางถนนขึ้นมากมายเพื่อใช้สำหรับการขนส่งเสบียง อาวุธและกำลังพล โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีการพัฒนาผิวทางคอนกรีตสำหรับงานสนามบิน [5] จากจุดเริ่มต้นดังกล่าวส่งผลให้ความรู้และประสบการณ์ด้านงานวิศวกรรมผิวทางคอนกรีตถูกพัฒนาเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน สำหรับในประเทศไทยได้ก่อสร้างถนนคอนกรีตสายแรกเมื่อปี พ.ศ. 2507 คือถนนพหลโยธิน ช่วงอนุสาวรีย์ชัยถึงลาดพร้าวมีระยะทาง 6 กม. และปัจจุบันนี้ เฉพาะกรมทางหลวงมีถนนคอนกรีตในการดูแลเป็นระยะทางกว่า 4,000 กม. ซึ่งส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีรอยต่อ [6]

โดยส่วนใหญ่แล้วผิวทางคอนกรีตมักถูกใช้ในถนน ทางหลวง แต่ผิวทางคอนกรีตก็ยังคงนำไปใช้ในงานประเภทอื่นอีก อย่างเช่น ลานจอดรถ ลานจอดเครื่องบิน ลานส่งสินค้าในท่าเรือหรือลานกองเก็บสินค้าในงานอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากผิวทางประเภทนี้สามารถรองรับปริมาณงานจราจรและน้ำหนักบรรทุกได้ดี รับน้ำหนักกระทำได้มากกว่าผิวทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากมีการบำรุงรักษาที่ดีจะยังมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน [6] ทั้งนี้ระบบโครงสร้างของผิวทางคอนกรีตโดยทั่วไปจะปูผิวคอนกรีตบนฐานดินรองรับ ซึ่งจะมีชั้นพื้นทาง (Base Course) หรือไม่มีก็ได้และเมื่อน้ำหนักจากยานพาหนะมากระทำ ผิวคอนกรีตจะเป็นโครงสร้างหลักที่รับกำลังจากยานพาหนะโดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งผิวทางคอนกรีตได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ ผิวทางคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก (Jointed Plain (Unreinforced) Concrete Pavement, JPCP) ผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีรอยต่อ (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP) และผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่มีรอยต่อ (Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP) [7, 9] มีรายละเอียดดังนี้

##### 2.1.1 ผิวทางคอนกรีตไม่เสริมเหล็ก (Joint Plain (Unreinforced) Concrete Pavement, JPCP)

เป็นโครงสร้างผิวทางคอนกรีตอย่างง่ายวางผิวคอนกรีตอยู่บนฐานรองรับโดยไม่ต้องมีการใส่เหล็กเสริมเพื่อป้องกันการแตกร้าวจากอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.1 นิยมใช้เหล็กเค็ยและการ

จัดเหลี่ยมประสานในการถ่ายน้ำหนัก [3, 8] โดยทั่วไปโครงสร้างผิวทาง JPCP มีขนาดแผ่นคอนกรีต กว้าง-ยาวไม่เกิน 5 ถึง 6 ม. ความเสียหายที่เกิดขึ้นในผิวทางประเภทนี้ที่พบเห็นได้บ่อยคือ การหักที่มุม (Corner Break) [9]



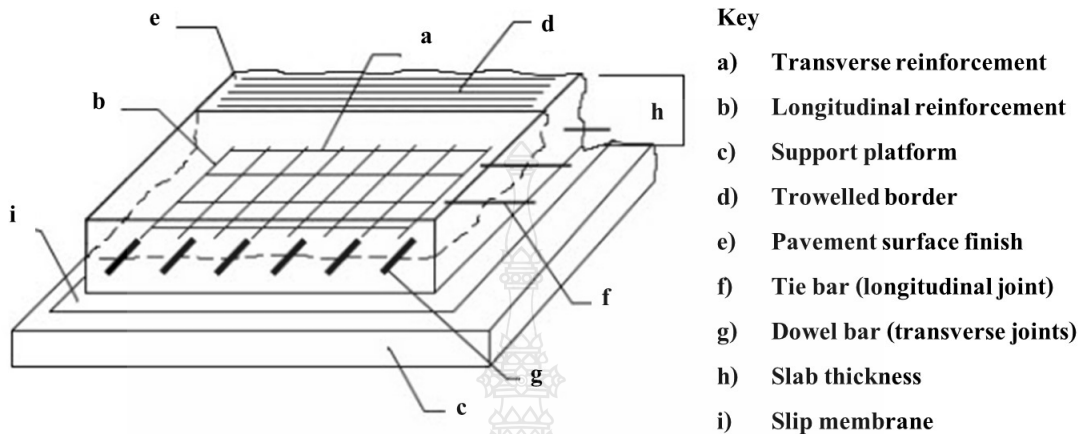
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของผิวทาง JRCP [9]

### 2.1.2 ผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบมีรอยต่อ (Jointed Reinforced Concrete Pavement, JRCP)

ผิวทางประเภทนี้นิยมใช้งานมากที่สุดในประเทศไทย [1] มีลักษณะเหมือนผิวทาง JPCP เพียงแต่มีการใส่เหล็กเสริมดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเหล็กเสริมนี้ทำหน้าที่รับหน่วยแรงเค้นจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature Stress) การเสริมเหล็กทำให้รอยต่อมีระยะห่างมากกว่าผิวทางคอนกรีตแบบ JPCP มีความยาวแผ่นประมาณ 10 ถึง 12 ม. ข้อเสียเปรียบของผิวทางประเภทนี้คือ แผ่นคอนกรีตมีความยาว จึงต้องมีการออกแบบรอยต่อให้เพียงพอ รองรับหน่วยแรงเค้นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อีกทั้งการเคลื่อนที่ (Movement) ของแผ่นคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิยังส่งผลให้ช่องว่างที่รอยต่อ (Joint Opening) มีความกว้างมากขึ้นอีกด้วย ส่งผลให้ต้องออกแบบเหล็กเดือยให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อถ่ายน้ำหนักจากยานพาหนะได้เพียงพอและต้องมีวัสดุอุดรอยต่อ (Joint Sealant) ที่ดีเพื่อป้องกันเศษวัสดุเข้าไปขัดภายในช่องว่างนี้ได้

ปัญหาของผิวทาง JRCP จะมีลักษณะใกล้เคียงกับผิวทาง JPCP คือ รอยแตกหรือหัก ทั้งนี้ผิวทาง JRCP มักจะเกิดรอยแตกที่กลางแผ่น (Mid-Panel Crack) ยิ่งระยะห่างของรอยต่อตามขวางมีมากเท่าไร ยิ่งส่งผลให้เกิดรอยแตกที่กลางแผ่นได้ง่ายขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้หากวัสดุอุดรอยต่อหลุดร่อน

ออกไปจนกระทั่งมีเศษวัสดุเข้าไปอุดหรือขัดภายในช่องว่างนี้ได้ อาจส่งผลให้รอยต่อหรือชั้นรองรับเสียหายได้ เนื่องจากแผ่นพื้นไม่สามารถหดหรือขยายตัวได้เต็มที่ [9]



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของผิวทาง JRCP [9]

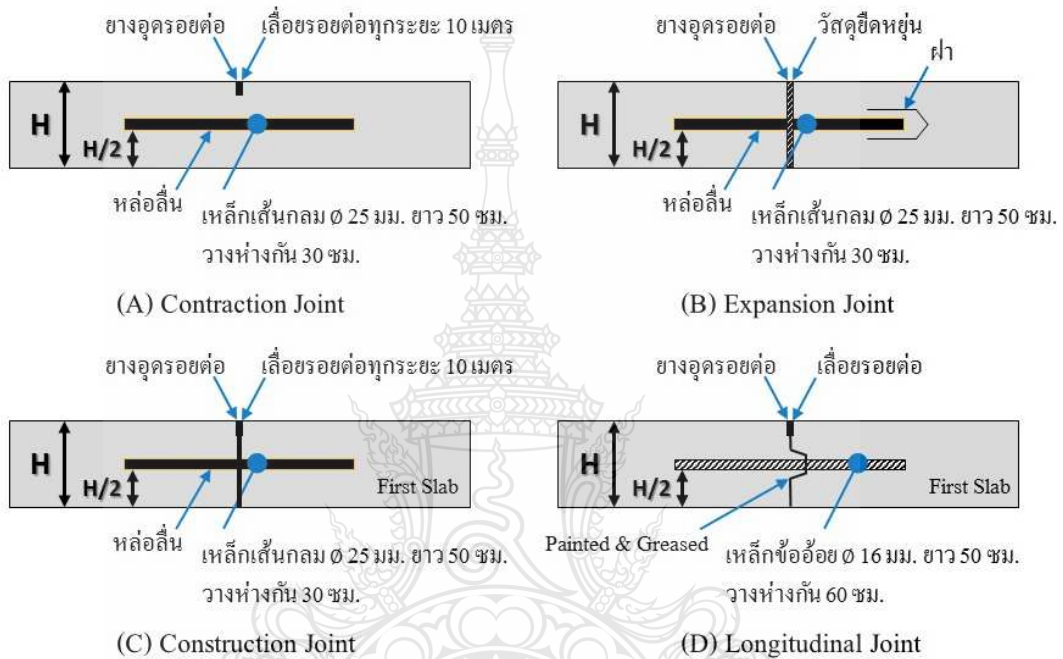
### 2.1.3 ผิวทางคอนกรีตเสริมเหล็กแบบไม่มีรอยต่อ (Continuously Reinforced Concrete Pavement, CRCP)

ผิวทางประเภทนี้นิยมใช้อย่างแพร่หลายในต่างประเทศโดยเฉพาะงานในระดับโครงการ (Project) เช่น ทางหลวงในยุโรปตะวันตกหรือทางวิ่ง (Runway) ของสนามบินจอห์น เคนนอน เมืองลิเวอร์พูล ประเทศอังกฤษ ข้อดีของผิวทางคอนกรีตประเภทนี้คือก่อสร้างง่ายและประหยัดหากเปรียบเทียบกับผิวทาง JPCP และ JRCP เพราะไม่ต้องมีค่าใช้จ่ายในการทำรอยต่อ แต่ข้อสำคัญของผิวทางประเภทนี้คือต้องมีการออกแบบและเลือกใช้วัสดุที่มีประสิทธิภาพ รวมไปถึงต้องมีขั้นตอนการดูแลรักษาที่ดีอยู่เสมอ ความเสียหายที่เกิดขึ้นของผิวทางประเภทนี้คือ การแตกทะลุ (Punch Out) การหลุดร่อน (Spalling) และความเสียหายของเหล็กเสริมซึ่งทำให้อายุการใช้งานสั้นลง [9]

นอกจากนี้ยังมีผิวทางคอนกรีตประเภทอื่นอีกที่เป็นทางเลือก เช่น การใส่เส้นใยเหล็ก (Steel Fiber) หรือผิวทางที่มีการใส่ลวดอัดแรงในคอนกรีตหรือที่เรียกว่า ผิวทางคอนกรีตอัดแรง (Pre-Stress Concrete Pavement) ซึ่งผิวทางประเภทนี้ยังไม่มีการใช้งานในประเทศไทย [6]

## 2.2 รอยต่อของผิวทางคอนกรีต

รอยต่อของผิวทางคอนกรีตทำหน้าที่การควบคุมการแตกร้าวตามธรรมชาติ ซึ่งรอยต่อยังช่วยลดหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นในผิวทางคอนกรีต โดยทั่วไปแบ่งรอยต่อตามประเภทการใช้งานได้ 4 ประเภทหลักดังนี้ [7, 8] และแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 รายละเอียดรอยต่อประเภทต่างๆ ของผิวทางคอนกรีต [8]

### 2.2.1 รอยต่อตามขวางเพื่อการหดตัว (Transverse Contraction Joint)

ทำหน้าที่ควบคุมการแตกร้าวของแผ่นคอนกรีตเนื่องจากการหดตัว ใช้เหล็กเดือยหรือการขัดเหลี่ยมประสานในการถ่าน้ำหนัก มีการตัดเซาะร่องเพื่อกำหนดแนวแตกของแผ่นให้เป็นระเบียบและใช้วัสดุอุดร่องรอยต่อเพื่อป้องกันน้ำหรือเศษวัสดุเข้าไปในรอยต่อ

### 2.2.2 รอยต่อตามขวางเพื่อการขยายตัว (Transverse Expansion Joint)

ทำหน้าที่รองรับการขยายตัวของแผ่นคอนกรีต มีระยะห่างระหว่างรอยต่อประมาณ 100 – 150 ม. ช่องว่างระหว่างรอยต่อจะมีมากกว่ารอยต่อเพื่อการหดตัว ในกรณีที่ใช้เหล็กเดือยในการถ่าน้ำหนักด้านหนึ่งจำเป็นต้องมีหมวกครอบ (Dowel Cap) เพื่อให้เหล็กเดือยเคลื่อนตัวในแนวระนาบได้อย่างอิสระ รอยต่อประเภทนี้หากการก่อสร้างไม่ดีจะส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมาก

เช่น การหลุดร่อน การอัดทะลัก (Pumping) ของมวลละเอียดได้รอยต่อ การทรุดตัวที่ต่างกันที่รอยต่อ และที่สำคัญคือเกิดการคู้หรือ โกงตัว (Blow up) เนื่องจากการขยายตัวของแผ่นคอนกรีต [8] ในบางรัฐของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ยกเลิกรอยต่อประเภทนี้ไปแล้วเนื่องจากความเสียหายข้างต้น [9]

### 2.2.3 รอยต่อตามยาว (Longitudinal Joint)

เป็นรอยต่อที่ขนานไปตามความยาวของผิวทาง ทำหน้าที่แบ่งความกว้างของแผ่น โดยทั่วไปจะใช้เหล็กยึด (Tie bar) เพื่อรั้งไม่ให้แผ่นคอนกรีตแยกออกจากกัน

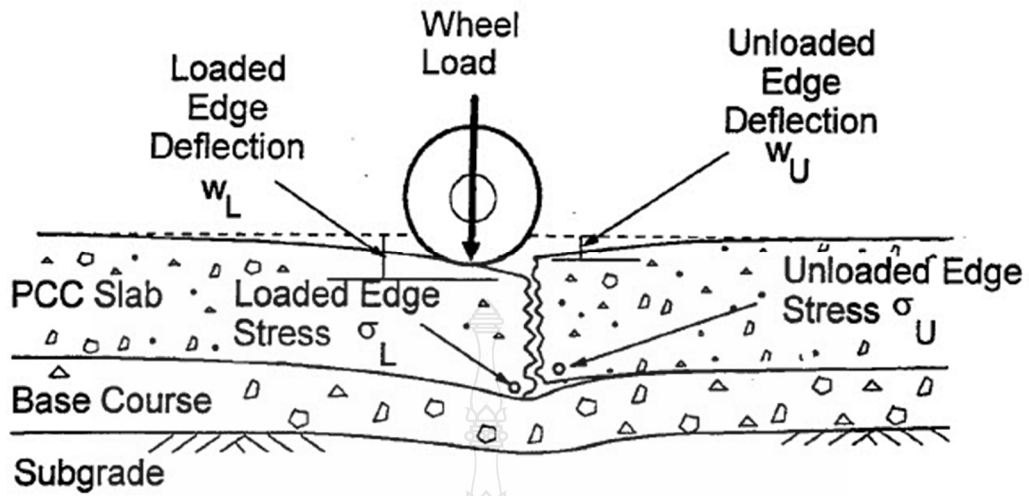
### 2.2.4 รอยต่อเพื่อการก่อสร้าง (Construction Joint)

เป็นรอยต่อสำหรับการก่อสร้าง เช่น รอยต่อเพื่อหยุดการทำงาน หยุดเทคอนกรีต หรือรอยต่อที่เกิดจากทางโค้ง ทางแยก เป็นต้น ปกติแล้วในการก่อสร้างมักจะกำหนดให้เป็นตำแหน่งเดียวกับรอยต่อตามขวาง

## 2.3 ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักของผิวทางคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วรอยต่อของผิวทางคอนกรีตจะใช้วัสดุหรืออุปกรณ์ทางกล 3 ชนิดคือ การขัด เหลี่ยมประสาน เหล็กเดือย และชั้นฐานรองรับที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งจะใช้นิดใดชนิดหนึ่ง หรือใช้ร่วมกันก็ได้ในการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่น ทั้งนี้เมื่อน้ำหนักจากยานพาหนะกระทำบนผิวทางคอนกรีตแบบมีรอยต่อ แผ่นที่ได้รับน้ำหนัก (Loaded Slab) จะถ่ายเทหน่วยแรงและเกิดการแอ่นตัวข้ามไปสู่แผ่นที่ไม่ได้รับน้ำหนัก (Unloaded Slab) ซึ่งอยู่ติดกัน แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งรอยต่อนี้เป็นจุดอ่อนที่มีโอกาสพัฒนาไปสู่ความเสียหายแบบต่างๆ ในผิวทางคอนกรีตได้ [3, 10, 12] ความสามารถทั้งระบบในการถ่ายน้ำหนักไปสู่แผ่นข้างเคียง เรียก ประสิทธิภาพในการถ่ายน้ำหนัก (Load Transfer Efficiency, LTE) ซึ่งหากรอยต่อมี LTE ที่ไม่ดีเมื่อน้ำหนักมากระทำที่ Loaded Slab การแอ่นตัวจะสูงขึ้นส่งผลให้หน่วยแรง ความเครียด (Strain) ของคอนกรีตที่บริเวณรอยต่อมีค่าสูง





รูปที่ 2.4 การถ่ายน้ำหนักบริเวณรอยต่อเมื่อมีน้ำหนักกระทำ [10]

### 2.3.1 ความเสียหายของรอยต่อผิวทางคอนกรีต

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นหากรอยต่อมีการถ่ายน้ำหนักที่ไม่ดีหรือมีการเสื่อมของ LTE ในทางกลับกันความเสียหายที่เกิดขึ้นที่รอยต่ออาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมของ LTE ได้เช่นกัน ความเสียหายนี้เกิดจากหลายปัจจัย เช่น การควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง วัสดุครอยต่อหลุดร่อนจนอาจทำให้มีน้ำขังในรอยต่อส่งผลให้เหล็กเดือยเกิดสนิม ไม่มีการซ่อมแซมบำรุงรักษาอย่างถูกต้องต่อเนื่อง เป็นต้น ความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งในส่วนของโครงสร้างและการใช้งาน (Structural and Functional Failure)

ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดจาก LTE หรือส่งผลต่อการเสื่อมของ LTE เช่น การแตกหักที่มุมแผ่น (Corner Break) การแตก หลุดร่อนที่รอยต่อ (Joint Crack and Spalling) การอัดทะลักของมวลละเอียดในฐานรองรับใต้ผิวทางคอนกรีต (Pumping) การคู้งหรือการโก่งตัว (Blow Up) และการทรุดตัวที่ไม่เท่ากัน (Faulting) [5] แสดงดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ความเสียหายจากการแตกหักที่มุมแผ่น (ซ้าย) การแตกหลุดร่อนที่รอยต่อตามขวาง (ขวา) [5]



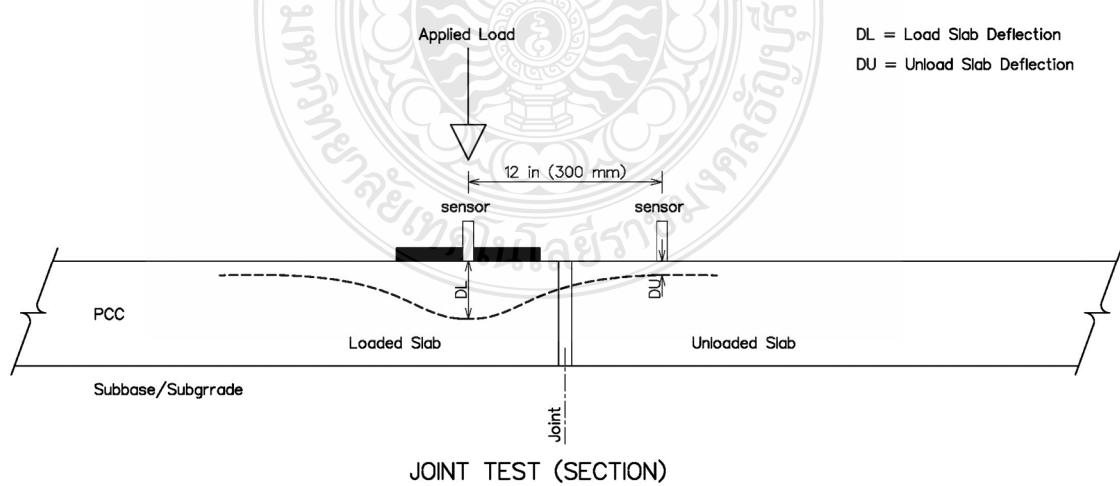
รูปที่ 2.6 ความเสียหายจากการคั้งหรือโก่งตัว (ซ้าย) การทรุดตัวที่ไม่เท่ากันของรอยต่อ (ขวา) [5]

### 2.3.2 การทดสอบ LTE ของหน่วยงานต่างๆ ในระดับสากล

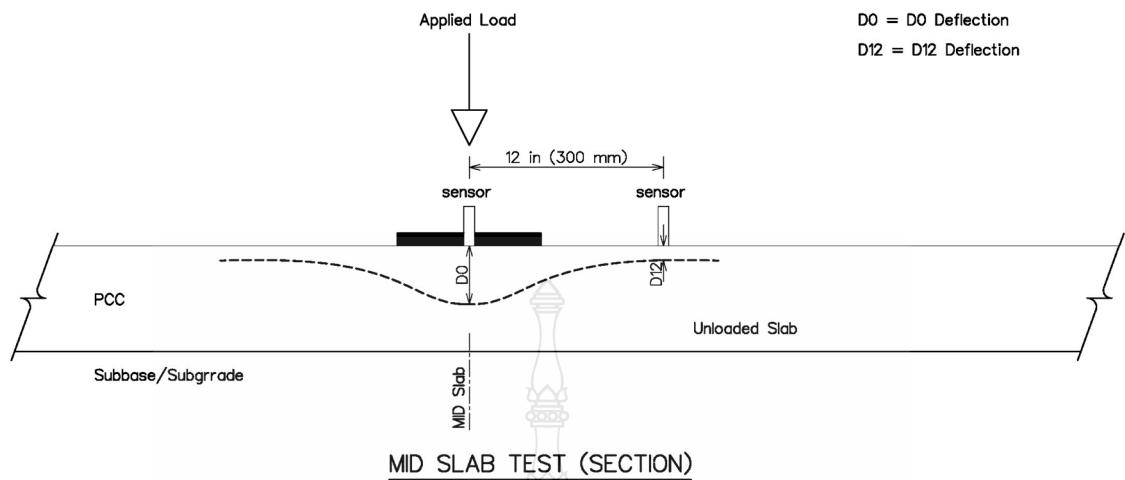
โครงสร้างผิวทางคอนกรีตเมื่อก่อสร้างแล้วเสร็จและเปิดใช้งานไปสักระยะหนึ่งอาจทำให้ค่า LTE มีค่าต่ำลงได้ การทดสอบผิวทางแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Test, NDT) โดยการวัดค่าการแอ่นตัว เป็นตัวเลือกอันดับแรกๆ สำหรับการทดสอบ LTE เนื่องจากเป็นวิธีการทดสอบที่ไม่ทำให้โครงสร้างชำรุดเสียหาย [13] การทดสอบ LTE จึงเป็นหนึ่งในหัวข้อหลักในการทดสอบความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีตร่วมกับการทดสอบการรับกำลังและการทดสอบโพรงใต้รอยต่อ ดังนั้นหลายหน่วยงานด้านงานทาง ถนน อากาศยานและหน่วยงานเอกชนที่เกี่ยวข้องทางด้านงานผิวทางในระดับสากล อาทิ American Association of State Highway Officials (AASHTO), Federal Highway Administration (FHWA), American Concrete Pavement Association (ACPA), Federal Aviation Administration (FAA) และ Dynatest เป็นต้น จึงได้จัดตั้งข้อกำหนดหรือข้อเสนอแนะในการทดสอบ

และแบบจำลองการวิเคราะห์ LTE เพื่อใช้ในการประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต ซึ่งแต่ละหน่วยงานดังกล่าว ต่างก็มีรายละเอียดของ LTE ที่แตกต่างกันและอาจส่งผลให้การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นหรือการนำไปประยุกต์ใช้ต่อเนื่องถึงการประเมินความแข็งแรงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มีความแตกต่างกันไปด้วย ซึ่งผลการทดสอบ LTE นิยมแสดงผลจากร้อยละ 0 ถึง 100 (จากแย่ถึงดี) มีรายละเอียดการทดสอบ LTE ของหน่วยงานในระดับสากลข้างต้นดังต่อไปนี้

AASHTO เริ่มต้นก่อตั้งในปี 1914 จากการเป็นสมาคมงานทางของรัฐโคลัมเบีย ประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อมาในปี 1973 ได้ขยายขอบเขตดูแลด้านงานขนส่งด้วย ปัจจุบันเป็นองค์กรหลักของประเทศสหรัฐอเมริกาซึ่งทำหน้าที่กำหนดมาตรฐานการทดสอบวัสดุ กำหนดมาตรฐานการออกแบบและศึกษาวิจัยในเรื่องงานทางและการขนส่ง [8, 9] สำหรับหัวข้อการทดสอบ LTE AASHTO แนะนำให้ทดสอบโดยเครื่องมือทดสอบ NDT ที่ให้ค่าการแอ่นตัว โดยวางเซ็นเซอร์ที่บริเวณรอยต่อทั้งของ Loaded และ Unloaded Slab ใช้น้ำหนักล้อรถ 1 ล้อซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับ 9,000 ปอนด์ (40 กิโลนิวตัน) ในการทดสอบ ซึ่งได้มาจากครึ่งหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกทูลงเพลามาตรฐาน 18,000 ปอนด์ วัดค่าการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น นำไปคำนวณ LTE แสดงดังรูปที่ 2.7 แต่ในหัวข้อการซ่อมแซมและเทพทับหน้า (Rehabilitation and Overlay) AASHTO แนะนำให้ใช้การทดสอบความการแอ่นตัวที่กลางแผ่น (MID Slab) แสดงดังรูปที่ 2.8 มาวิเคราะห์ร่วมกับการทดสอบที่รอยต่อแผ่นด้วยแสดงผลในรูปแบบของ J Factor แบ่งเป็น 3 เกณฑ์ คือ LTE น้อยกว่าร้อยละ 50, LTE ร้อยละ 50 ถึง 70 และ LTE มากกว่าร้อยละ 70 ซึ่ง AASHTO นำค่า J Factor นี้ไปใช้ในการคำนวณหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ [13]



รูปที่ 2.7 การทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ NDT ที่รอยต่อแผ่น [13]

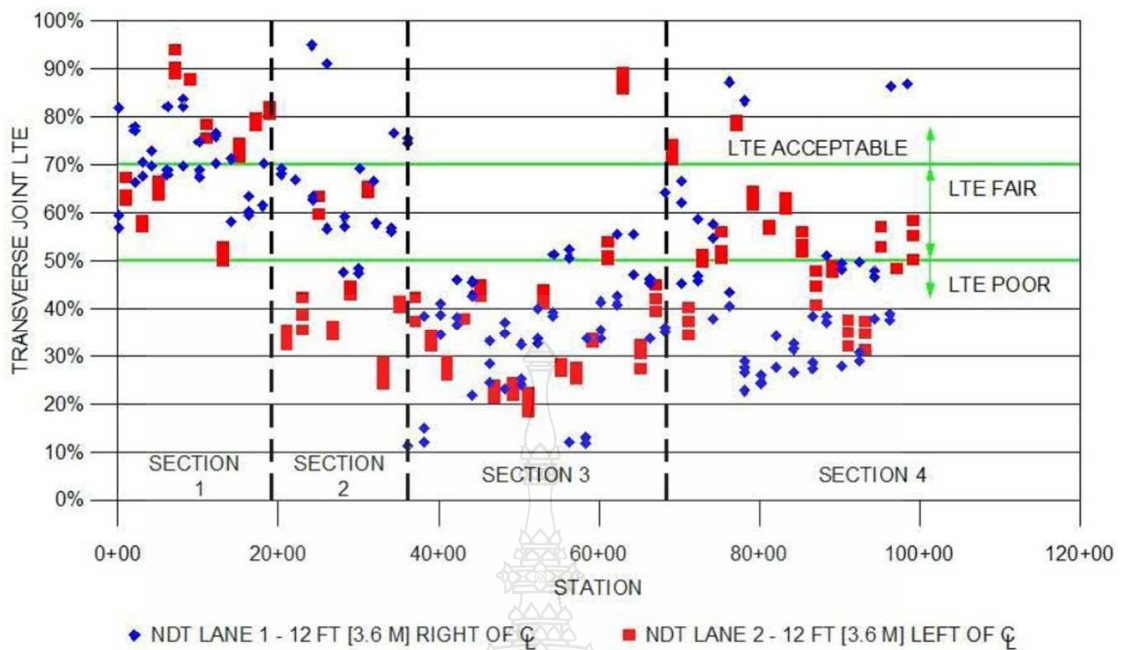


รูปที่ 2.8 การทดสอบ LTE ด้วยเครื่องมือ NDT ที่กลางแผ่น [13]

FHWA เป็นหน่วยงานด้านงานทางจากกรมการขนส่งประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งทำหน้าที่ก่อสร้าง คูแฉก ซ่อมแซม วางนโยบายด้าน ทางหลวงและการขนส่งในประเทศสหรัฐอเมริกาและในระดับนานาชาติ [14] ได้แนะนำให้ทดสอบ LTE โดยใช้เครื่องมือ FWD เช่นเดียวกันกับของ AASHTO ดังรูปที่ 2.7 [3] แต่มีแบบจำลองในการคำนวณ LTE ที่แตกต่างกันเล็กน้อย

หน่วยงานถัดไปคือ ACPA เป็นสมาคมวิศวกรของสหรัฐอเมริกาเป็นสมาคมที่ทำงานร่วมกับหน่วยงานอื่นๆ เช่น FHWA, FAA เป็นต้น มีฐานข้อมูล ความรู้ด้านเทคโนโลยีของวิศวกรถนนคอนกรีต สนามบินและงานวิศวกรรมในอุตสาหกรรม [15] แนะนำให้ทดสอบ LTE สำหรับการซ่อมแซมผิวทางด้วยเครื่อง FWD หรือเครื่องมือ NDT อื่นๆที่ให้ผลทดสอบคล้ายกัน จำลองน้ำหนักในการทดสอบงานถนนโดยใช้น้ำหนักจากเพลามาตรฐาน (18,000 ปอนด์) วัดค่าการแอ่นตัวที่รอยต่อและยอมรับค่า LTE มากกว่าร้อยละ 60 [16]

FAA เป็นหน่วยงานระดับสากลด้านอากาศยานและการบินรวมไปถึงการก่อสร้างและการประเมินสภาพความแข็งแรงของผิวทางสนามบินด้วยในส่วนของการทดสอบ LTE ทำการทดสอบด้วยน้ำหนักบรรทุกทุกเทียบเท่าน้ำหนักเครื่องบินที่ส่งผลกระทบต่อผิวทาง วัดค่าการแอ่นตัวจากเครื่องมือ NDT ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบจำเป็นจะต้องจำลองน้ำหนักเครื่องบินได้ เช่น เครื่องมือ HWD จากการทดสอบนำการแอ่นตัวของ Loaded และ Unloaded Slab ที่รอยต่อมาวิเคราะห์ LTE ซึ่ง FAA แบ่งออกเป็น 3 เกณฑ์ คือ Poor (LTE น้อยกว่าร้อยละ 50), Fair (LTE ร้อยละ 50 ถึง 70) และ Acceptable (LTE มากกว่าร้อยละ 70) แสดงดังรูปที่ 2.9 [17]



รูปที่ 2.9 เกณฑ์การประเมินผลทดสอบ LTE ของ FAA [17]

Dynatest เป็นหน่วยงานที่ปรึกษา ทดสอบและประเมินด้านงานทางถนนและสนามบินในระดับสากล [18] ในปี 1970 Dynatest เป็นผู้พัฒนาเครื่องมือ FWD ที่ใช้ในการทดสอบผิวทางในเชิงพาณิชย์ ให้มีความก้าวหน้ามากขึ้นทั้งในส่วนของอุปกรณ์เช่นเซอร์อย่าง Geophone ที่ใช้ในการวัดการแอ่นตัวและ โปรแกรมวิเคราะห์ผลทดสอบ [1] สำหรับหัวข้อ LTE นั้น Dynatest แนะนำให้ทดสอบการแอ่นตัวที่รอยต่อและการแอ่นตัวที่กลางแผ่น นำผลทั้ง 2 ส่วนมาวิเคราะห์ LTE ร่วมกัน [19] ซึ่งส่งผลให้จำนวนจุดทดสอบมีมากขึ้นแต่ก็ยังสอดคล้องกับหัวข้อ LTE การซ่อมแซมและเทบหน้าของ AASHTO

จะเห็นได้ว่าหลายหน่วยงานในระดับสากลข้างต้น ต่างมีการทดสอบที่คล้ายกันคือใช้เครื่องมือ NDT ทดสอบการแอ่นตัวของรอยต่อที่ Loaded และ Unloaded Slab รวมไปถึงบางหน่วยงานยังทดสอบ MID Slab ร่วมด้วย ผลทดสอบดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์ LTE โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อถัดไปซึ่งแสดงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

### 2.3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LTE

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด [3, 10, 11, 20] คือแบบจำลอง  $LTE_1$  แสดงดังสมการที่ 2.1 ซึ่งเป็นแบบจำลองที่หลายหน่วยงานเลือกใช้คือ AASHTO, FHWA, ACPA และ FAA โดยใช้อัตราส่วนร้อยละการแอ่นตัวของ Unloaded Slab ต่อ Loaded Slab

แบบจำลอง LTE ที่ได้รับความนิยมรองลงมาคือ LTE<sub>2</sub> คิดค้น โดย Teller และ Sutherland เมื่อปี 1936 [21] แสดงดังสมการที่ 2.2 ใช้อัตราส่วนร้อยละของ Unloaded Slab ต่อค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวที่รอยต่อ เป็นแบบจำลองทางเลือกของหน่วยงาน FHWA แบบจำลอง LTE<sub>3</sub> และ LTE<sub>4</sub> แสดงในสมการที่ 2.3 และ 2.4 เป็นแบบจำลองที่ AASHTO หัวข้อการซ่อมแซมและเทพื้นหน้าและหน่วยงาน Dynatest เลือกใช้ โดยมีการนำค่าทดสอบ MID Slab ซึ่งใช้เป็นตัวแทนปรับแก้การดัดของแผ่นพื้น (Bending Correction Factor, B) แสดงดังสมการที่ 2.5 โดย AASHTO ระบุว่าควรมีค่าอยู่ที่ 1.05 ถึง 1.15 [13] ซึ่งความโค้งงอเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น ความไม่เป็นระนาบหรือความโค้งงอของแผ่นพื้นจากการก่อสร้าง ความชื้นและอุณหภูมิ ความแตกต่างของความหนาหรือความแกร่งของแผ่นพื้นที่อยู่ติดกันทำให้ตัดตัวต่างกันเมื่อน้ำหนักกระทำ เป็นต้น ซึ่งความโค้งงอนี้เป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อ LTE [20]

$$LTE_1 = 100 \times \left( \frac{d_u}{d_l} \right) \quad (2.1)$$

$$LTE_2 = 100 \times \left( \frac{2d_u}{d_u + d_l} \right) = 2 \times \left( 1 + \frac{1}{1 + \left( \frac{LTE_1}{100} \right)} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

$$LTE_3 = 100 \times \left( \frac{d_u}{d_l} \right) \times B = LTE_1 \times B \quad (2.3)$$

$$LTE_4 = 100 \times \left( \frac{2d_u}{d_u + d_l} \right) \times B = LTE_2 \times B \quad (2.4)$$

$$B = \left( \frac{d_0}{d_{12}} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ LTE<sub>1</sub> ถึง LTE<sub>4</sub> คือ แบบจำลอง LTE รูปแบบที่ 1 ถึง 4 จากการทดสอบการแอ่นตัว

$d_u$  คือ การแอ่นตัวของ Unloaded Slab

$d_l$  คือ การแอ่นตัวของ Loaded Slab

$E$  คือ ค่าปรับแก้การดัดของแผ่นพื้นจากการทดสอบกลางแผ่น

$d_0$  คือ การแอ่นตัวได้จุดที่น้ำหนักกระทำตรงกลางแผ่นพื้น

$d_{12}$  คือ การแอ่นตัวถัดจากจุดที่น้ำหนักกระทำตรงกลางแผ่นพื้น 12 นิ้ว (300 มม.)

ยังมีแบบจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ LTE คือ  $LTE_{\sigma}$  แสดงดังสมการที่ 2.6 เทียบอัตราส่วนร้อยละของหน่วยแรงเค้น Unloaded ต่อ Loaded Slab ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการวัดขนาดหน่วยแรงเค้นโดยตรงทำได้ยาก แบบจำลอง  $LTE_{\sigma}$  นี้จึงคำนวณได้จากการวัดทางอ้อมด้วยค่าความเค้น (Strain) เมื่อมีน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะวิ่งผ่าน ส่วนใหญ่นิยมทำในแปลงทดสอบหรือติดตั้งในระหว่างการก่อสร้าง [22] โดยทำการติดตั้ง Strain Gauge ในตำแหน่งที่ต้องการ ทั้งนี้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $LTE_{\sigma}$  กับ  $LTE_1$  แต่ยังไม่แม่นยำนักเพราะความสัมพันธ์ของทั้ง 2 แบบจำลองขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่น ขนาดและชั้นความหนาของผิวทางกลไกในการถ่ายน้ำหนัก ชั้นฐานรองรับและอุณหภูมิ เป็นต้น [3]

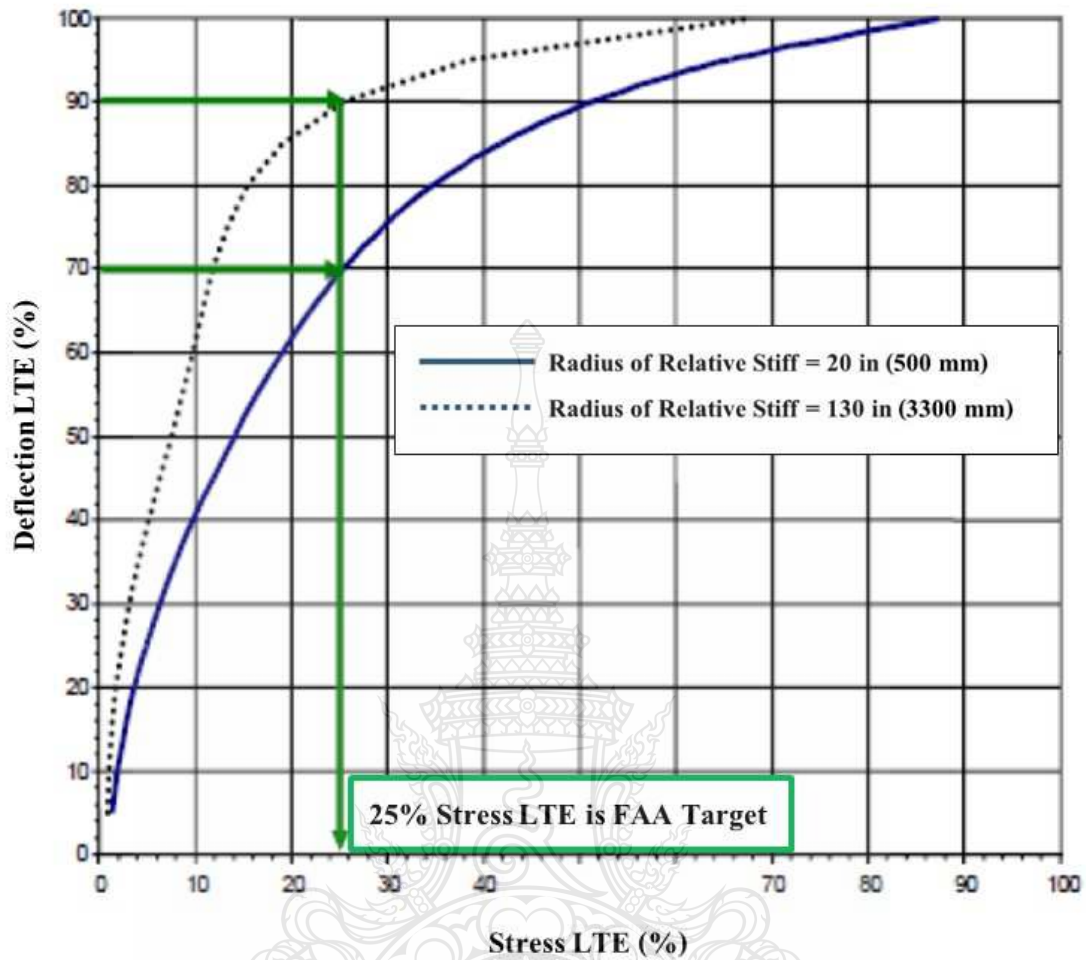
$$LTE_{\sigma} = 100 \times \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_l} \right) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $LTE_{\sigma}$  คือ แบบจำลอง LTE จากหน่วยแรงเค้น

$\sigma_u$  คือ หน่วยแรงเค้นของ Unloaded Slab

$\sigma_l$  คือ หน่วยแรงเค้นของ Loaded Slab

ในหัวข้อการวิเคราะห์ผลทดสอบการแอ่นตัวของผิวทางสนามบิน FAA มีตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_1$  และ  $LTE_{\sigma}$  ของผิวทางสนามบินซึ่งความสัมพันธ์นี้มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ มีลักษณะเฉพาะตัวขึ้นกับรัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (I) โดยที่ FAA แนะนำารอยต่อของแผ่นพื้นถ่ายแรงเค้นได้ร้อยละ 25 ตัวอย่างเช่น หากมีแรงเค้นเกิดขึ้นที่ Loaded Slab 4 เมกะปาสคาล แรงเค้นจะถูกถ่ายไปยัง Unloaded Slab 1 เมกะปาสคาล ดังนั้น FAA จึงให้เกณฑ์แนะนำของ  $LTE_{\sigma}$  ที่ร้อยละ 25 ในรูปที่ 2.10 พิจารณาที่เป้าหมาย  $LTE_{\sigma}$  ร้อยละ 25 พบว่าสายทางซึ่งมีค่า  $I$  มากกว่า คือ 130 นิ้ว (3,300 มม.) มีค่า  $LTE_1$  สูงถึงร้อยละ 90 และสายทางที่มีค่า  $I$  น้อยกว่าคือ 20 นิ้ว (500 มม.)  $LTE_1$  มีค่าเพียงร้อยละ 70



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_d$  และ  $LTE_\sigma$  ของ FAA [17]

ในงานวิจัยนี้รวบรวมแบบจำลอง LTE จากหลากหลายหน่วยงานในระดับสากล แสดงตารางที่ 2.1 โดยสรุปแบบจำลอง LTE ที่ได้จากการทดสอบการแอ่นตัวแบ่งได้เป็น 4 รูปแบบ ตามข้อกำหนดหรือมาตรฐานตามหน่วยงานในระดับสากลข้างต้น ซึ่งผลจากการทดสอบแบบเดียวกัน แต่มีแบบจำลอง LTE ที่แตกต่างกันและความแตกต่างนี้ อาจส่งผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเกินได้แตกต่างกันไปด้วย



ตารางที่ 2.1 แบบจำลอง LTE ตามข้อเสนอแนะหรือมาตรฐานของหน่วยงานในระดับสากล

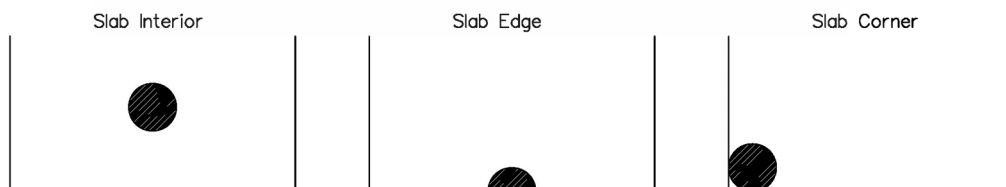
แบบจำลอง	ข้อเสนอแนะหรือมาตรฐาน
LTE <sub>1</sub>	AASHTO, FHWA, ACPA, FAA
LTE <sub>2</sub>	FHWA, ACPA
LTE <sub>3</sub>	AASHTO*, Dynatest
LTE <sub>4</sub>	Dynatest

AASHTO\* คือ LTE ของ AASHTO ในหัวข้อการซ่อมแซมและเทบพื้นน้ำ

2.4 หน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อแผ่นพื้นคอนกรีต

ผิวทางคอนกรีตทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกจากยานพาหนะเป็นหลัก ในปี 1923 Westergaard ได้เสนอหลักการในการแก้ปัญหาหน่วยแรงเค้นและการแอ่นตัวของผิวทางแบบแครง เรียก Westergaard Solution เป็นการแก้ปัญหาเชิงวิเคราะห์-เชิงประจักษ์ (Mechanistic-Empirical) ซึ่งหลักการดังกล่าวถูกยกให้หลักการพื้นฐาน ถึงแม้ว่าในปัจจุบันจะมีความแม่นยำน้อยกว่าวิธี Finite Element Method (FEM) แต่ความรวดเร็วในการคำนวณ ส่งผลให้หลักการของ Westergaard ยังคงได้รับความนิยม ถูกใช้งานและมีการพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาในงานด้านผิวทางแบบแครง

Westergaard ได้แบ่งการคำนวณหน่วยแรงเค้นและการแอ่นตัวภายใต้น้ำหนักบรรทุกกระทำออกเป็น 3 กรณี คือ น้ำหนักกระทำที่กลางแผ่น (Interior) น้ำหนักกระทำที่ขอบแผ่น (Edge) และน้ำหนักกระทำที่มุมแผ่น (Corner) แสดงดังรูปที่ 2.11 กำหนดให้มีน้ำหนักบรรทุกจากล้อเดี่ยว (Single Wheel Load) แผ่นพื้นวางเต็มบนระนาบของชั้นรองรับแบบยืดหยุ่น (Elastic Foundation) รูปแบบของ Modulus of Subgrade (k) ในกรณีกลางแผ่นและขอบแผ่น หน่วยแรงเค้นดึง (Tensile Stress) และการแอ่นตัวเกิดขึ้นที่ผิวล่างของแผ่นได้จุดที่น้ำหนักกระทำ แต่ในกรณีที่มุมแผ่นเกิดขึ้นที่ผิวบน [21, 24]



รูปที่ 2.11 ตำแหน่งที่น้ำหนักกระทำบนแผ่นพื้นตามทฤษฎี Westergaard [21]

การแก้ปัญหาที่แผ่นพื้นที่ขอบแผ่นตามสมการดั้งเดิมของ Westergaard แสดงดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นและการแอ่นตัวที่ขอบแผ่น จากหลักการดั้งเดิมยังแก้ปัญหาไม่ถูกต้องสมบูรณ์ เช่น ไม่มีการถ่ายแรงไปยังแผ่นข้างเคียง ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนา แก้ไขหลักการ Westergaard ให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยตรวจสอบผลเปรียบเทียบกับวิธี FEM ดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.13 ทั้งนี้จากการตรวจสอบเปรียบเทียบ ความแตกต่างระหว่างพื้นที่น้ำหนักกระทำเป็นวงกลม (Circular Loading Area) และครึ่งวงกลม (Semi-Circular Loading Area) ให้ผลต่างกันน้อยมาก [21]

กรณีน้ำหนักกระทำที่ขอบ (ทฤษฎีดั้งเดิม, พื้นที่น้ำหนักกระทำครึ่งวงกลม)

$$\sigma = \frac{0.529P}{h^2}(1+0.54\nu) \left\{ \log \left( \frac{Eh^3}{ka_2^4} \right) - 0.71 \right\} \quad (2.7)$$

$$w = \frac{P}{\sqrt{6kl^2}}(1+0.4\nu) \quad (2.8)$$

กรณีน้ำหนักกระทำที่ขอบ (ทฤษฎีแก้ไข, พื้นที่น้ำหนักกระทำวงกลม)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{(1-\nu)}{2} + 1.18(1+2\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.9)$$

$$w = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.76+0.4\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.10)$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k}} \quad (2.11)$$

กรณีน้ำหนักกระทำที่ขอบ (ทฤษฎีแก้ไข, พื้นที่น้ำหนักกระทำครึ่งวงกลม)

$$\sigma = \frac{3P(1+\nu)}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka_2^4} \right) + 3.84 - \frac{4}{3}\nu + \frac{(1-2\nu)}{2} \frac{a_2}{l} \right\} \quad (2.12)$$

$$w = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left\{ 1 - (0.76+0.4\nu) \frac{a}{l} \right\} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือ หน่วยแรงดึงจากน้ำหนักบรรทุกจร (นิวตัน/มม.<sup>2</sup>)

$w$  คือ การแอ่นตัว (มม.)

$P$  คือ น้ำหนักล้อเดี่ยว (นิวตัน)

$p$  คือ แรงดันลมยาง (นิวตัน/มม.<sup>2</sup>)

$h$  คือ ความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต (มม.)

$v$  คือ อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต

$l$  คือ รัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (มม.)

$k$  คือ ค่าโมดูลัสต้านทานของชั้นฐานรองรับ (นิวตัน/มม.<sup>3</sup>)

$E$  คือ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (นิวตัน/มม.<sup>2</sup>)

$a$  คือ รัศมีของพื้นที่สัมผัสอย่างแบบวงกลม เท่ากับ  $\sqrt{\frac{P}{\pi p}}$  (มม.)

$a_2$  คือ รัศมีของพื้นที่สัมผัสอย่างแบบครึ่งวงกลมเท่ากับ  $\sqrt{\frac{2P}{\pi p}}$  (มม.)

Van Cauwelaert [25] ได้เสนอการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีตโดยใช้สมการปรับแก้ของ Westergaard คำนวณหน่วยแรงเค้นคัตที่ขอบแผ่นอิสระ (Free Edge Stress) หน่วยแรงเค้นคัต Loaded Slab และหน่วยแรงเค้นคัต Unloaded Slab ได้ดังสมการ 2.14 ถึง 2.17 โดยมีตัวแปรการถ่ายแรงเฉือน (Transferred Shear,  $\gamma$ ) แสดงดังสมการ 2.16 ซึ่งเป็นตัวแปรได้มาจากการทดสอบ LTE ร่วมในการคำนวณหน่วยแรงเค้นของ Loaded Slab ด้วย

จากสมการปรับแก้ดังกล่าว ทำให้หาค่าตอบของหน่วยแรงเค้นคัตร่วมกับ LTE ได้ โดย Van Cauwelaert ตรวจสอบผลกับการคำนวณอัตราส่วนการแอ่นของ Loaded และ Unloaded ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกัน จากความไม่ซับซ้อนและด้วยความเรียบง่ายของหลักการ Westergaard ทำให้สามารถหาค่าตอบได้รวดเร็วและสามารถนำไปใช้วิเคราะห์โครงข่ายทางที่มีจุดทดสอบปริมาณมากๆ ได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะเมื่อนำไปพัฒนาในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำให้สามารถประเมินผลทดสอบผิวทางคอนกรีตได้รวดเร็วกว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่แก้ปัญหาด้วยวิธี FEM อย่างมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ จึงศึกษาความแตกต่างของแบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบดังที่กล่าวไปข้างต้น รวมทั้งอิทธิพลที่มีต่อหน่วยแรงเค้นคัตที่เกิดขึ้นที่รอยต่อผิวทางคอนกรีต [25]

$$\sigma_f = \sigma_u + \sigma_l \quad (2.14)$$

$$\sigma_f = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4}{3}\nu \right\} \quad (2.15)$$

$$\sigma_l = \frac{1}{1+LTE} \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left\{ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4}{3}\nu \right\} \quad (2.16)$$

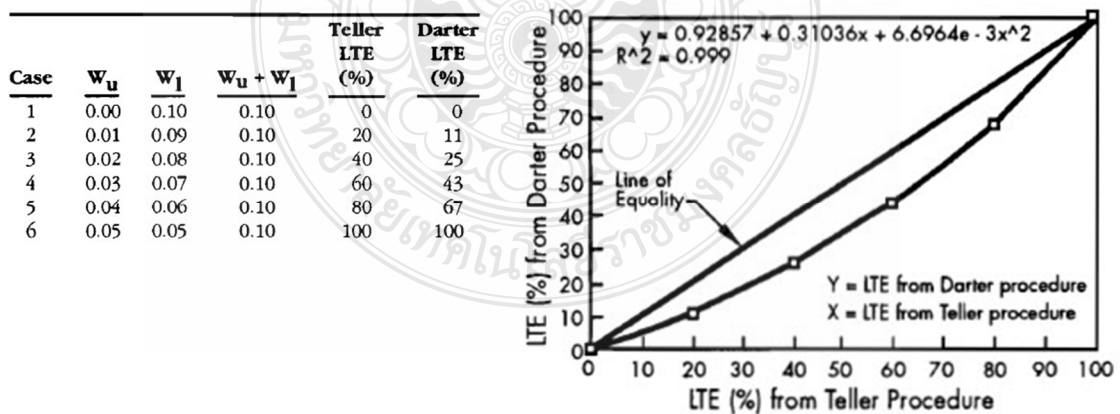
$$\gamma = \frac{2LTE}{1+LTE} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\sigma_f$  คือ หน่วยแรงเค้นคัตที่ขอบแผ่นอิสระ

$\gamma$  คือ Transferred Shear Factor

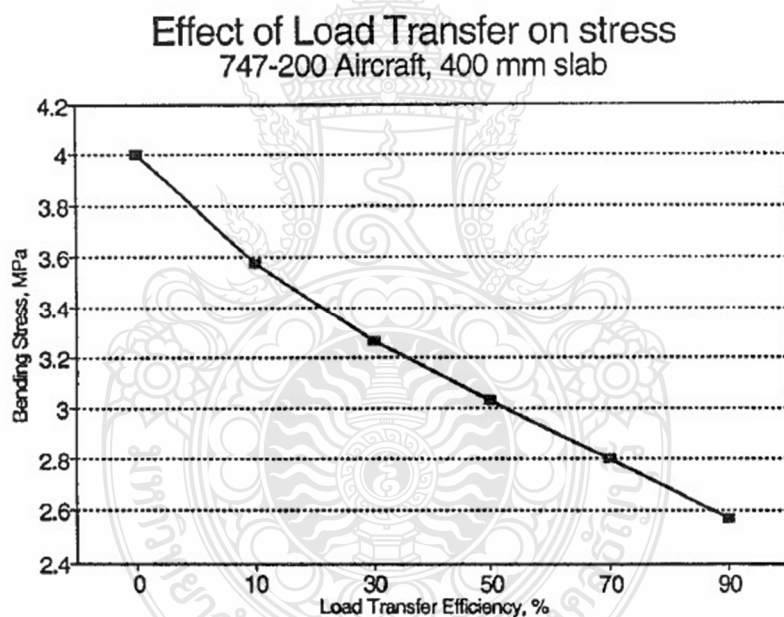
## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเรื่อง LTE เริ่มต้นขึ้นเมื่อมีการพัฒนาถนนคอนกรีตเพื่อการใช้งาน ในปี 1936 Teller และ Sutherland [21] ทดสอบการแอ่นตัวของ Loaded และ Unloaded Slab ของถนนคอนกรีตแบบมีรอยต่อ วัดค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่งต่างๆบริเวณรอยต่อ ทั้งรอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาว นำค่าการยุบตัวที่ตำแหน่งต่างๆ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลากหลายรูปแบบเพื่อหาค่า LTE ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง  $LTE_2$  เป็นแบบจำลองที่น่าเชื่อถือมากที่สุด แสดงผลของประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักจากร้อยละ 0 ถึง 100 และเป็นแบบจำลองที่ถูกใช้งานมายาวนานจนถึงปัจจุบัน [25] จากนั้นในปี 1947 Westergaard [24] เสนอการทฤษฎีการแก้ปัญหาหน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีตแบบใหม่ซึ่งพัฒนามาจากหลักการดั้งเดิมแก้ไขจุดอ่อนในเรื่องการถ่ายน้ำหนักข้ามแผ่นโดย Westergaard นำเสนอตัวแปร Load Transfer Efficiency Factor ( $j$ ) เป็นตัวแปรในการถ่ายแรงไปสู่แผ่นคอนกรีตที่อยู่ติดกัน ตัวแปรนี้นำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหน่วยแรงเค้นที่รอยต่อของแผ่นพื้นงานวิจัยของ AASHTO ในปี 1986 โดย Dartler [26] เป็นผู้เริ่มต้นใช้แบบจำลอง  $LTE_1$  คำนวณ LTE จากทดสอบการแอ่นตัวของถนนด้วยเครื่องมือ FWD จากนั้นในปี 1992 Chao Wei และคณะ [26] เปรียบเทียบแบบจำลอง LTE ของ Dartler และ Teller พบว่าแบบจำลอง  $LTE_1$  ให้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงแตกต่างจากแบบจำลอง  $LTE_2$  ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นสมการพหุนามกำลังสองและทั้งสองแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งต่อมาในปี 1993 [13] AASHTO ก็เลือกใช้  $LTE_1$  เป็นแบบจำลองแนะนำในการทดสอบรอยต่อของถนนคอนกรีต



รูปที่ 2.12 เปรียบเทียบแบบจำลอง  $LTE_1$  และ  $LTE_2$  ของ Darter และ Teller [26]

LTE ถูกใช้ในงานออกแบบ ประเมิน ซ่อมแซมและเททับหน้า ส่วนใหญ่มักใช้ผลจากการทดสอบ FWD ในงานถนนและใช้ HWD ในงานผิวทางสนามบิน ในปี 1992 E.J. Barenberg และ G.R. Woodman [27] นำค่า LTE<sub>1</sub> มาใช้ในการออกแบบและปรับปรุงผิวทางคอนกรีตของสนามบิน ฮีทโทรว์ ประเทศอังกฤษ เพื่อใช้รองรับการจราจรทางอากาศที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น ทดสอบรอยต่อตามขวาง , ตามยาวและรอยแตกด้วยเครื่องมือ HWD จำลองน้ำหนักจากเครื่องบินโบอิง 747-200, 747-400, 747-400E และ MD-11 จำนวนหน่วยแรงเค้นดัดร่วมกับ LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ILLI-SLAB พบว่าที่ LTE ที่มากขึ้นส่งผลให้จำนวนหน่วยแรงเค้นดัดที่ผิวล่างของคอนกรีตบริเวณรอยต่อได้ลดลง (LTE ร้อยละ 0 และ LTE ร้อยละ 100 จำนวนหน่วยแรงเค้นดัดแตกต่างกันเกือบ 2 เท่า) รูปที่ 2.13 กราฟแสดงตัวอย่างหน่วยแรงเค้นดัดของผิวทางคอนกรีตความหนา 400 มม. กับ LTE โดยใช้น้ำหนักเครื่องบินโบอิง 747-200 กระทำที่รอยต่อ



รูปที่ 2.13 ผลกระทบ LTE ต่อการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดของทางผิวคอนกรีตสนามบิน [27]

LTE ในปี 2001 Y.C. Sue และ K.K. Yun [28] ใช้เครื่องมือ FWD และแบบจำลอง LTE<sub>3</sub> ตามมาตรฐานของ AASHTO 1993 เรื่องการซ่อมแซมและเททับหน้าในการทดสอบเปรียบเทียบ Bonded Concrete Overlay (BOC) และ Un-bonded Concrete Overlay (UBCO) ของถนนทางพิเศษในประเทศเกาหลี พบว่าเหล็กเดือยช่วยให้ UBOD มี LTE ที่ดีขึ้นและอุณหภูมิในคอนกรีตส่งผลกระทบ

ต่อ LTE มากกว่าอุณหภูมิอากาศ ในการศึกษาผิวทางในระยะยาวหัวข้อ Long-Term Pavement Performance (LTPP) ปี 2003 Khazanovich และ Gotlif [3] ทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD วิเคราะห์ผลทดสอบด้วยแบบจำลอง  $LTE_1$  และ  $LTE_2$  พบว่า  $LTE$  มีส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของผิวทางคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นตัวแปรที่มีความซับซ้อนจากหลากหลายองค์ประกอบ และยังต้องการข้อมูลอีกมากเพื่อจะช่วยปรับปรุงกระบวนการออกแบบและการซ่อมแซมผิวทางให้ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยเรื่องค่าปรับแก้การคดของแผ่นพื้น (Bending Correction Factor, B) ปี 2003 Khazanovich และ Gotlif [3] ทดสอบถนนด้วยเครื่องมือ FWD และวิเคราะห์  $LTE_{\sigma}$  ด้วยโปรแกรม ISLAB2000 ซึ่งเป็นโปรแกรมวิเคราะห์ผิวทาง FEM เสนอว่าควรมีการปรับแก้การทดสอบการแอ่นตัวของแผ่นพื้นในกรณีที่ผลทดสอบการแอ่นตัวมีความแปรปรวนสูงและคำนวณค่า  $LTE$  ได้มากเกินไป ค่า B ดังกล่าวแสดงดังสมการ 2.18 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับรัศมีความโค้งสัมพัทธ์เป็นหลัก มีค่าไม่เกิน 1.00 และค่าปรับแก้ดังกล่าวแตกต่างจากค่า B ของ AASHTO 1993 และ Dynatest ที่ให้ผลมากกว่า 1.00

$$B^* = 1 - \frac{6.285}{l} + \frac{3661}{l^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $B^*$  คือ Bending Correction Factor ของ Khazanovich และ Gotlif [3]

ในปี 1996 Van Cauwelaert [25] พัฒนาทฤษฎีในการแก้ปัญหาการหาคำนวณหน่วยแรงเค้นและการแอ่นตัวที่รอยต่อแผ่น ซึ่งพัฒนาตามแนวความคิดทฤษฎีที่ปรับแก้ของ Westergaard โดยใช้  $LTE_1$  กำหนดสมการขอบเขตความสัมพันธ์ของ  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$  เป็นแบบเชิงเส้นตามสมมติฐานดั้งเดิมของ Westergaard ส่งผลให้คำนวณหน่วยแรงเค้นคดและการแอ่นตัวที่รอยต่อโดยใช้แบบจำลองแผ่นเดี่ยว (Single Slab) หาผลเฉลยด้วยรูปแบบปิด (Closed form formular) ซึ่งง่ายและหาคำตอบได้รวดเร็วกว่า FEM ให้ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นและการแอ่นตัวใกล้เคียงกับการทดลองและศึกษาทั้งในสนามและ FEM ของ Skarlatos หากเปรียบเทียบผลการคำนวณดังกล่าวด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma$  และ  $LTE_{\sigma}$  ให้ผลในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสาม ทั้งนี้จากการรวบรวมแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ข้างต้น ยังมีแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  อีก 3 แบบที่อาจส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\gamma$  และ  $LTE_{\sigma}$  ซึ่งในปีถัดมา Hammons และ Ioannides [29] นำเสนอผลงานวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองในการวิเคราะห์ผิวทางคอนกรีตแบบมีรอยต่อ โดยนำผลทดสอบจริงของ Corp

Model แบบ full scale ในช่วงปี 1950-1960 และแบบจำลอง FEM พบว่าให้ผลการคำนวณแรงเค้นต่ำกว่าทฤษฎีพื้นฐาน ของ Westergaard และให้ผลความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$  ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสามซึ่งขัดแย้งกับสมมติฐานของ Westergaard

สำหรับงานวิจัยด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ปี 2005 Lui และ Fwa [30] ศึกษาผลกระทบของ LTE กับการตอบสนองของผิวทางคอนกรีต (Concrete Pavement Response) ด้วยโปรแกรม NUS (National University of Singapore) ซึ่งเป็น โปรแกรมที่หาคำตอบด้วยผลเฉลยรูปแบบปิด (Close Form Solution) เช่นเดียวกับ โปรแกรม PAVERS แตกต่างกันที่ NUS ใช้แบบจำลอง 3 แผ่นพื้น (3-slab model) นำหนักบรรทุกกระทำที่กลางแผ่น, ขอบแผ่นและมุมแผ่นบนฐานราก Pasternak พิจารณา  $LTE_1$  ร่วมกับการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นตัดพบว่าค่า  $LTE$  มาใช้ในการวิเคราะห์ส่งผลให้คำนวณหน่วยแรงเค้นตัดที่รอยต่อแผ่นคอนกรีตสูงมากเกินไป  $LTE$  จำเป็นต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบและประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีตเนื่องจากส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งาน

งานวิจัยด้านถนนในประเทศไทยปี 2546 ชยธวัชและคณะ [1] ศึกษาถึงการประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิวปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตด้วยเครื่องมือ FWD ในช่วงเดือน พ.ค. ถึง ส.ค. พบว่าควรทดสอบสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนคอนกรีตในช่วงเวลาเช้าถึงก่อนเที่ยงเพราะเป็นช่วงเวลาที่แผ่นคอนกรีตไม่มีการโค้งงอจนส่งผลต่อการทดสอบ ค่า  $LTE$  ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงบ่ายและลดลงในช่วงเวลากลางคืนจนถึงเช้า ดังนั้นในการทดสอบและวิเคราะห์  $LTE$  หากไม่พิจารณาถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิ ควรจะทดสอบขณะแผ่นพื้นไม่มีการโค้งงอเนื่องจากอุณหภูมิ

งานวิจัยและศึกษาถนนคอนกรีตของ กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม [31] โดยเริ่มก่อสร้างถนนคอนกรีตแบบไม่เสริมเหล็กในปี พ.ศ. 2549 จำนวน 2 สายทางในจังหวัดศรีสะเกษ และ 1 สายทางในจังหวัดชลบุรี มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้าง ใช้วัสดุมวลรวมที่มีในท้องถิ่นมาประยุกต์ใช้ หลังจากก่อสร้างและเปิดใช้งาน ทดสอบรอยต่อของถนนด้วยรถ 10 ล้อเพลามาตรฐาน (น้ำหนักบรรทุกทุกกลุ่มล้อหลัง ล้อละ 2.5 ตัน) แรงดันลมยาง 100 และ 120 ปอนด์/นิ้ว<sup>2</sup> ตรวจวัดค่าการแอ่นตัวด้วย Transducer และ Strain Gauge พบว่าหลังจากก่อสร้างเสร็จใหม่ๆและมีการเปิดใช้ผิวทางได้ 83 วัน  $LTE_1$  รอยต่อแบบขัดเหลี่ยมประสานมีค่ามากกว่า 80 % สามารถใช้ทดแทนเหล็กเคียวได้เป็นอย่างดี

ในปี พ.ศ. 2555 จตุพล [32] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_1$  กับโพรงใต้ผิวทางคอนกรีต (Void) ทดสอบตามมาตรฐานของ FAA ด้วยเครื่องมือ HWD โดยใช้น้ำหนักทดสอบที่ 160, 190 และ 220 กิโลนิวตัน ที่ผิวทางสนามบินที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทยพบว่าทั้งสองปัจจัยมีความสัมพันธ์กันในแบบเชิงเส้นและเด่นชัดขึ้นเมื่อ  $LTE_1$  มากกว่าร้อยละ 70 และได้รอยต่อมีโพรงเกิดขึ้นและในปี

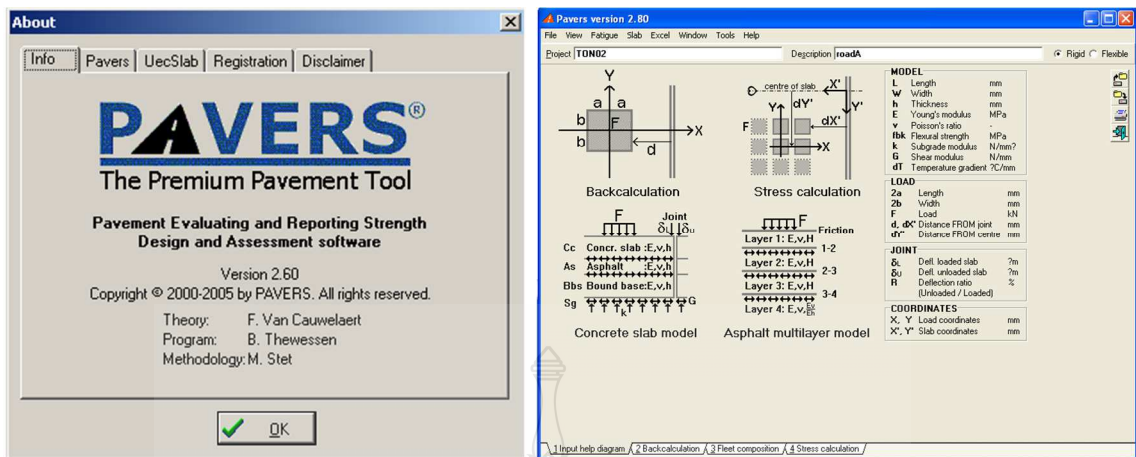
2557 พุทธพล [33] ได้พัฒนาเครื่องมือต้นแบบที่สามารถวัดค่า LTE ได้จากรถยนต์หรือยานพาหนะทั่วไป ทำการทดสอบทั้งในห้องปฏิบัติการและสนาม โดยใช้น้ำหนักจากรถบรรทุก 6 ล้อและ 10 ล้อ ซึ่งเป็นเครื่องมือต้นแบบที่ต้นทุนต่ำกว่า 400,000 บาท ให้ผลทดสอบที่สอดคล้องกับทฤษฎีเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำกว่า 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและยังต้องมีการพัฒนาเครื่องมือนี้ต่อไปให้ดียิ่งขึ้น

## 2.6 โปรแกรมออกแบบและประเมินผิวทาง PAVERS

งานวิจัยศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80 แสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำหรับงานโครงสร้างผิวทาง ใช้สำหรับออกแบบโครงสร้างผิวทางถนน, ผิวทางสนามบิน และผิวทางในงานอุตสาหกรรมหนัก สามารถจำลองการทดสอบด้วยเครื่อง FWD หรือ HWD เพื่อหาค่าแอมการยุบตัว อีกทั้งยังมีศักยภาพในการคำนวณย้อนกลับ (Back Calculation) หาค่าโมดูลัสของโครงสร้างชั้นทาง และประเมินค่า PCN ของโครงสร้างผิวทางสนามบินตามเกณฑ์ของ ICAO [34] โปรแกรมนี้ถูกพัฒนาในเชิงพาณิชย์โดย Van Cauwelaert และคณะ โดยพัฒนามาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ UEC - SLAB ซึ่งใช้ในองค์การดำเนินงานทางของประเทศเนเธอร์แลนด์และองค์การ North Atlantic Treaty Organization (NATO) [35]

ทฤษฎีที่ใช้ในการแก้ปัญหาและคำนวณผิวทางคอนกรีตในโปรแกรม PAVERS 2.80 นี้ ใช้สมการปรับแก้ของ Westergaard ที่พัฒนาโดย Van Cauwelaert และคณะ ใช้ระบบพิกัดระบุตำแหน่งของน้ำหนักยานพาหนะที่กระทำและระบุตำแหน่งหน่วยแรงและการยุบตัวของจุดที่ต้องการคำนวณในการคำนวณผิวทางคอนกรีตสามารถกำหนด LTE ได้ลดข้อจำกัดของการคำนวณแบบแผ่นพื้นแผ่นเดียว (Single Slab) ทำให้ผลการคำนวณที่มีความละเอียดแม้จะไม่เทียบเท่าวิธี FE แต่รวดเร็วมากจึงเหมาะกับการวิเคราะห์งานทางที่มีข้อมูลหรือมีจุดทดสอบจำนวนมาก





รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการใช้งาน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS

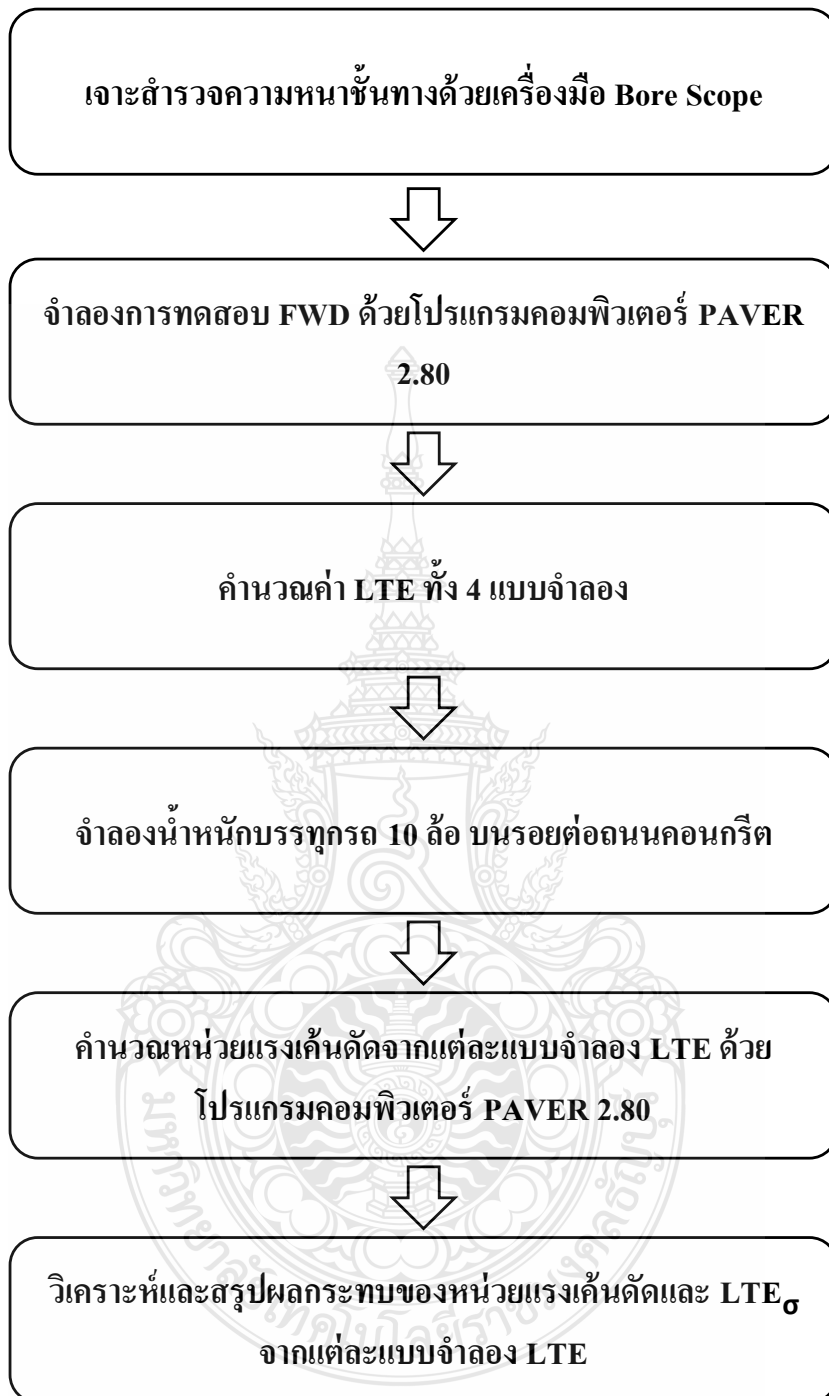


### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

หน่วยงานด้านถนนและผิวทางสนามบินในระดับสากลต่างก็มีรายละเอียดของ LTE ที่แตกต่างกันงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่การศึกษา วิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงเค้นดัด (Flexural Stress) ที่เกิดขึ้นในผิวทางคอนกรีตจากแต่ละแบบจำลอง LTE โดยเลือกใช้โปรแกรม PAVERS 2.80 ซึ่งเป็นโปรแกรมลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและท่าอากาศยาน (RAPTRE) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จำลองการทดสอบ FWD และน้ำหนักรถสิบล้อ 25 ตัน กระทำที่รอยต่อของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย ดังรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษารวบรวมเอกสารทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดกลุ่มแบบจำลอง LTE จากแต่ละหน่วยงาน
3. เจาะสำรวจความหนาแน่นของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทยด้วยเครื่องมือเจาะสำรวจ (Bore Scope)
4. จำลองการทดสอบการแอ่นตัว MID Slab ด้วยเครื่องมือ FWD โดยใช้โปรแกรม PAVERS รุ่น 2.80
5. นำค่าการแอ่นตัวที่ได้มาคำนวณและวิเคราะห์ LTE ของแต่ละหน่วยงาน
6. วิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงเค้นดัดที่เกิดขึ้นจากแต่ละแบบจำลอง LTE
7. สรุปผลที่ได้จากการศึกษา
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ และตีพิมพ์งานวิจัยเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการ



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนปฏิบัติงานวิจัย

### 3.1 เจาะสำรวจความหนาชั้นทางด้วยเครื่องมือ Bore Scope

ใช้ส่วนเจาะถนนคอนกรีตจากนั้นใช้เครื่องมือ Bore Scope ส่องเข้าไปในรูเจาะเพื่อสำรวจความหนาและวัสดุของผิวทางคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยในงานวิจัยนี้เจาะสำรวจถนนที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย 2 สายทางคือ สระบุรี-หนองแค (SN) และปทุมธานี-ชนบุรี (PT)



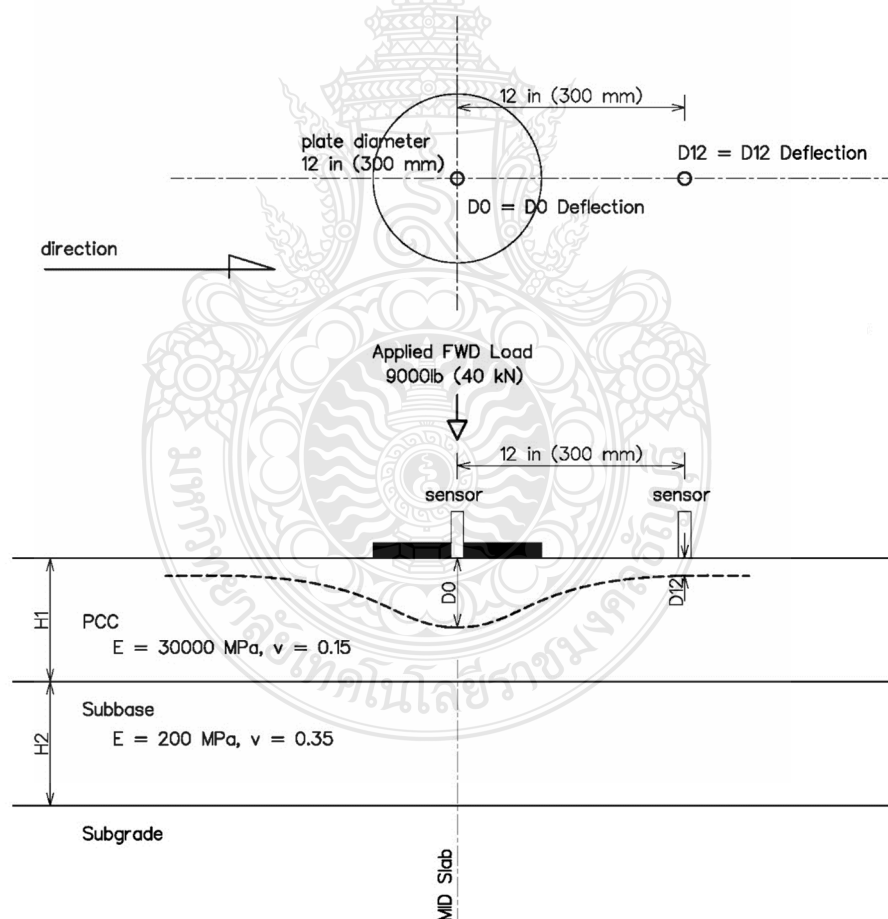
รูปที่ 3.2 เครื่องมือเจาะและสำรวจ Bore Scope

### 3.2 จำลองการทดสอบ FWD ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80

หลังจากได้ข้อมูลความหนาของชั้นผิวทางคอนกรีตแล้ว จำลองการทดสอบการแอ่นตัว MID Slab ด้วยเครื่องมือ FWD โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS แสดงดังรูปที่ 3.3 กำหนดให้ถนนคอนกรีตมีความกว้าง 3.5 ม. ยาว 1.0 ม. นำเข้าตัวแปรความหนาจากการเจาะสำรวจด้วยเครื่องมือ Bore Scope คุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าอีลาสติก โมดูลัสและค่าอัตราส่วนปัวซองเลือกใช้ตามข้อเสนอแนะของ AASHTO แสดงดังตารางที่ 3.1 [13] ค่า  $d_0$  และ  $d_{12}$  ที่ได้จากโปรแกรม PAVERS นำมาคำนวณค่า B ตามสมการที่ 2.5 เพื่อใช้ในการหาค่า  $LTE_3$  และ  $LTE_4$  ต่อไป

ตารางที่ 3.1 ค่าอีลาสติก โมดูลัส (E) โดยทั่วไปของวัสดุชั้นทางตามคำแนะนำของ AASHTO [13]

Pavement Material	Range (MPa)	Typical Value (MPa)
Hot Mixed Asphalt	1,500 – 3,500	3,000
Portland Cement Concrete	20,000 – 50,000	30,000
Asphalt Treated Base	500 - 3,000	1,000
Cement Treated Base	3,500 - 7,000	5,000
Lean Cement	7,000 - 20,000	10,000
Granular Base	100 – 300	200
Granular Subgrade Soils	50 - 150	100
Fine – Grained Subgrade Soli	20 -50	50



รูปที่ 3.3 จำลองการทดสอบ MID Slab ด้วยเครื่องมือ FWD โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS

### 3.3 คำนวณค่า LTE ทั้ง 4 แบบจำลอง

กำหนด  $d_u$  และ  $d_l$  ดังตารางที่ 3.2 เพื่อใช้เป็นตัวแทนค่านวณค่า  $LTE_1$  และค่านวณ  $LTE_2$  ถึง  $LTE_4$  ตามสมการที่ 2.1 – 2.4 และนำค่า LTE ทั้ง 4 แบบ แบ่งเกณฑ์ LTE ออกเป็น 5 กรณีและนำผลไปวิเคราะห์เพื่อหาผลกระทบต่อหน่วยแรงเค้นคัตที่รอยต่อ

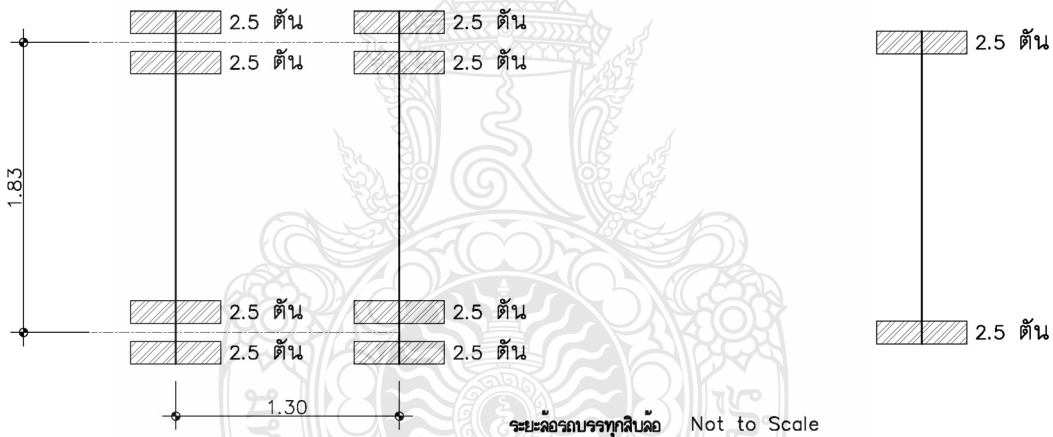
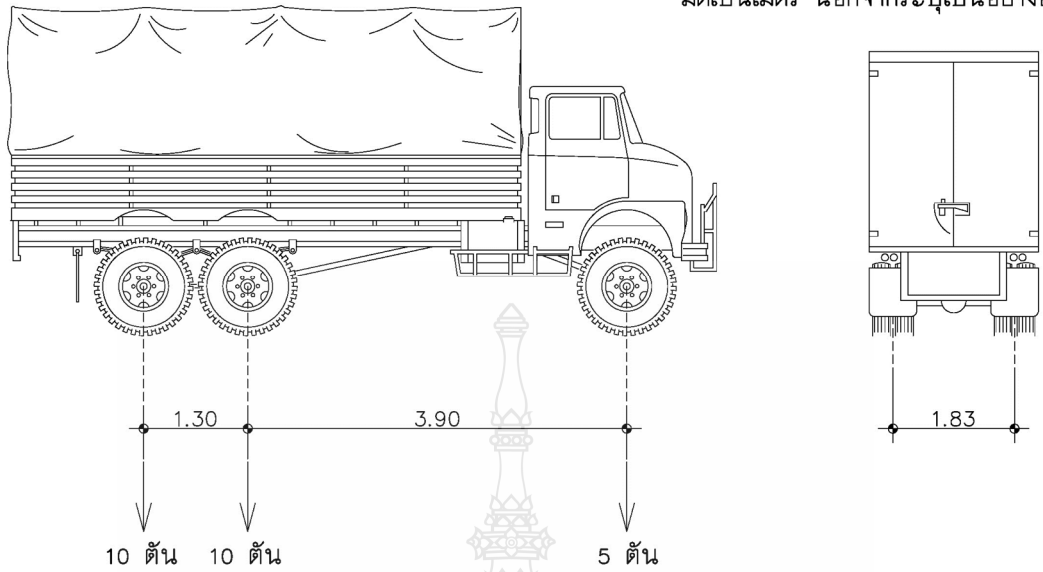
ตารางที่ 3.2 ตารางกำหนดค่า  $d_u$  และ  $d_l$  เพื่อแบ่งเกณฑ์และค่านวณค่า LTE

กรณี	1	2	3	4	5
$d_u$	0.000	0.025	0.05	0.075	0.100
$d_l$	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100

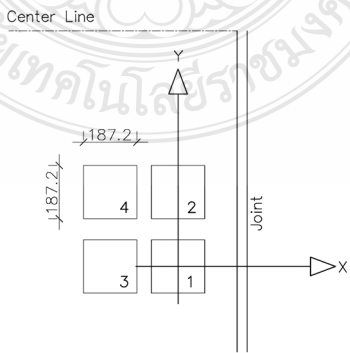
### 3.4 จำลองน้ำหนักบรรทุก 10 ล้อ บนรอยต่อถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80

จำลองน้ำหนักบรรทุก 10 ล้อ 25 ตัน ในประเทศไทยซึ่งมีมิติและความยาวแสดงดังรูปที่ 3.4 โดยกำหนดให้น้ำหนักจากเพลาล้อลงล้อ 2.5 ตัน (24.5 กิโลนิวตัน) เท่ากันทุกล้อ ใช้แรงดันลมยาง 100 ปอนด์/นิ้ว<sup>2</sup> (0.70 เมกะปาสกาล) คำนวณพื้นที่ผิวล้อรถสัมผัสถนนเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม 187.2 มม. กำหนดให้ถนนคอนกรีตมีกำลังรับแรงคัต 3 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่าต่ำที่สุดที่กรมทางหลวงยอมให้ [6] นำพิกัดของกลุ่มล้อหลังแสดงดังรูปที่ 3.5 และตารางที่ 3.3 เข้าในโปรแกรม PAVERS เพื่อคำนวณหน่วยแรงเค้นคัตร่วมกับ LTE แต่ละแบบ โดยหลักการทำงานของโปรแกรมนี้ ป้อนค่าพิกัดกลุ่มล้อครึ่งแผ่นล่างเท่านั้น

มิติเป็นเมตร นอกจากระบุเป็นอย่างอื่น



รูปที่ 3.4 มิติและความยาวของรถบรรทุก 10 ล้อหนัก 25 ตัน



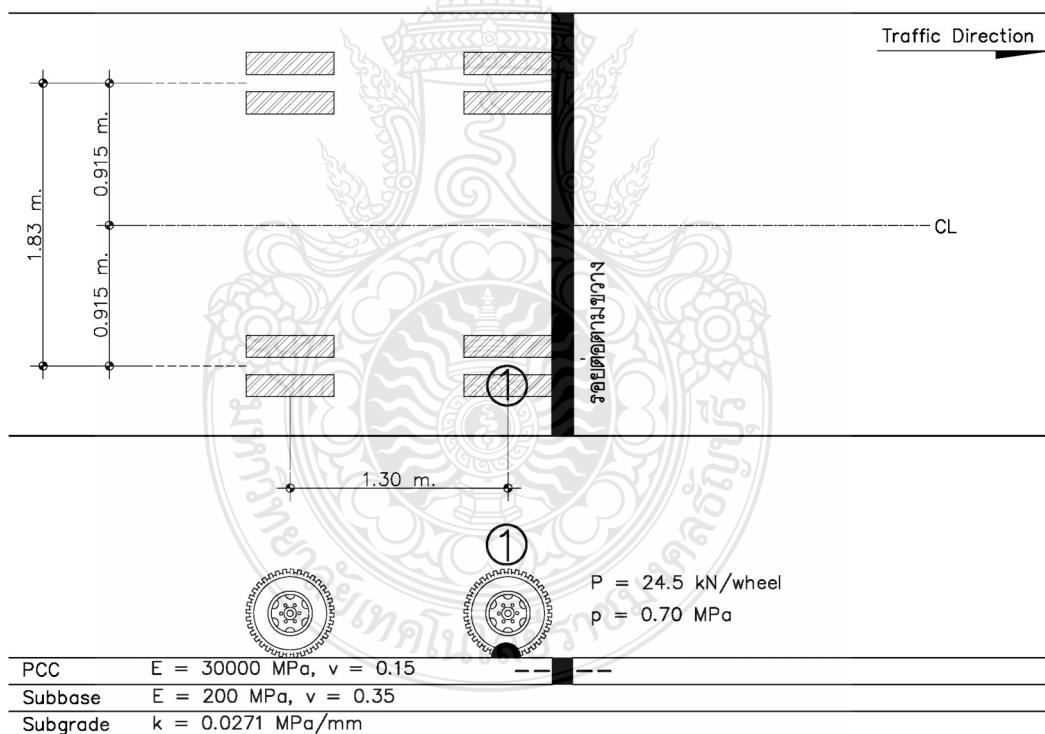
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งพิกัดกลุ่มล้อรถบรรทุก 10 ล้อ ที่ป้อนเข้าในโปรแกรม PAVERS

ตารางที่ 3.3 พิกัดกลุ่มล้อยหลังรถสิบล้อที่นำเข้าไปในโปรแกรม PAVERS

พิกัดล้อ (X, Y) มม.	1	2	3	4
Transverse Joint	(000 ,000)	(000 ,350)	(-1300 ,000)	(+1300 ,350)
Longitudinal Joint	(000 ,000)	(000 ,1300)	(-350,000)	(-350 ,1300)

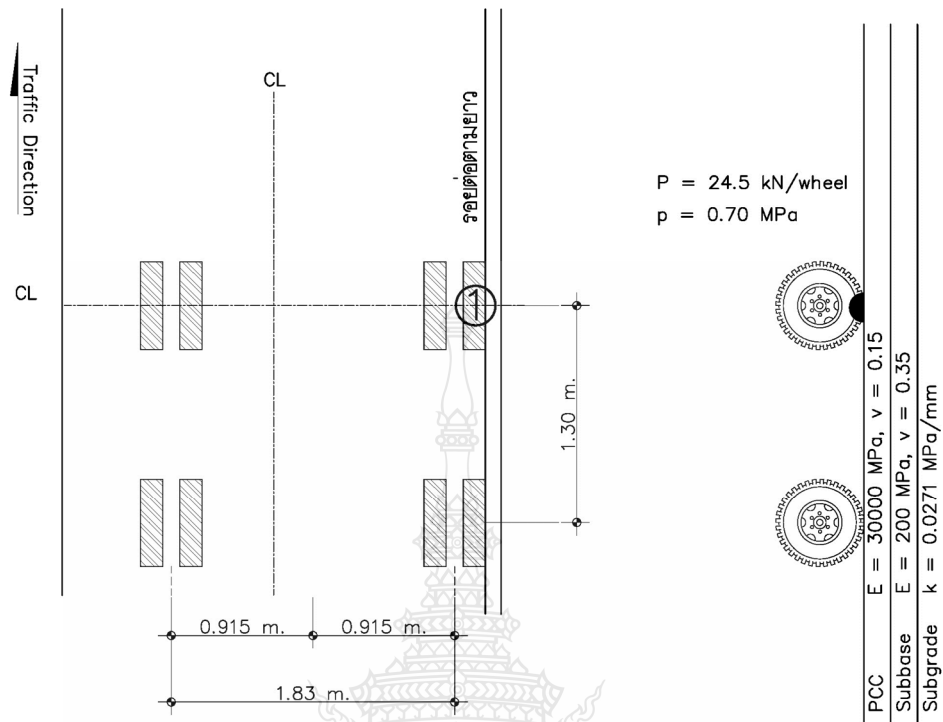
### 3.5 คำนวณหน่วยแรงเค้นดัดจากรถบรรทุก 10 ล้อหนัก 25 ตัน ร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS 2.80

คำนวณหน่วยแรงเค้นดัดได้ล้อที่ 1 ทั้งรอยต่อตามขวาง (Transverse Joint) และรอยต่อตามยาว (Longitudinal Joint) ของถนนคอนกรีต 2 สายทาง (PT และ SN) โดยตำแหน่งได้ล้อที่ 1 เป็นตำแหน่งวิกฤตที่ทำให้เกิดหน่วยแรงเค้นดัดที่ผิวล่างสูงที่สุด [36] แสดงดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 แบบจำลองคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามขวางร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS





รูปที่ 3.7 แบบจำลองคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามยาวร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS

### 3.6 วิเคราะห์และสรุปผลกระทบของหน่วยแรงเค้นดัดและ $LTE_{\sigma}$ จากแต่ละแบบจำลอง LTE

วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาที่ได้ โดยเปรียบเทียบผลกระทบของแต่ละแบบจำลอง LTE ที่ส่งผลกระทบต่อค่าคำนวณหาหน่วยแรงเค้นและ  $LTE_{\sigma}$  ตามทฤษฎีของ Westergaard เปรียบเทียบผลดังกล่าวทั้งรอยต่อตามขวาง (Transverse Joint) และรอยต่อตามยาว (Longitudinal Joint) โดยงานวิจัยนี้ไม่คำนึงถึงปัจจัยของความกว้างของรอยต่อ (Joint Opening) อุณหภูมิในคอนกรีต อุณหภูมิอากาศและความชื้น ผลการศึกษาที่ใช้เป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้งานแบบจำลอง LTE ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## บทที่ 4

### ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

#### 4.1 เจาะสำรวจความหนาชั้นทางด้วยเครื่องมือ Bore Scope

รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงการเจาะสำรวจความหนาถนนคอนกรีต 2 สายทางด้วยเครื่องมือ Bore Scope ณ ตำแหน่งที่สามารถเปิดการจราจรได้และมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติการ แสดงข้อมูลความหนาชั้นทางดังตารางที่ 4.1 โดยคอนกรีตสายทางหนองแค – สระบุรี (SN) มีชั้นคอนกรีตหนากว่าสายทางปทุมธานี – ชนบุรี (PT) 2 เท่า (ความหนาคอนกรีต 0.26 ม. และ 0.13 ม. ตามลำดับ) โดยที่สายทาง PT มีความหนาดังมาตรฐานการออกแบบของกรมทางหลวงมาก ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความหนาคอนกรีตที่ 0.23 ถึง 0.25 ม. [6]



รูปที่ 4.1 เจาะสำรวจหาความหนาชั้นทางถนนคอนกรีตสายทางสระบุรี – หนองแค (SN)



รูปที่ 4.2 เจาะสำรวจหาความหนาชั้นทางถนนคอนกรีตสายทางปทุมธานี – ชนบุรี (PT)

**ตารางที่ 4.1** ผลเจาะสำรวจชั้นความหนาสายทางสระบุรี-หนองแค (SN) และปทุมธานี-ชนบุรี (PT)

สายทาง	SN (m)	PT (m)
PCC	0.260	0.130
Subbase	0.101	0.125
Subgrade	-	-

#### 4.2 ผลจำลองการทดสอบ FWD ด้วยคอมพิวเตอร์ PAVERS

นำเข้าค่าความหนาทั้ง 2 สายทาง กำหนดตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการจำลองการทดสอบ MID Slab ดังรูปที่ 4.3 กำหนดค่าอีลาสติคโมดูลัสและค่าอัตราส่วนปัวซองตามข้อเสนอแนะของ AASHTO [13] กำหนดค่าการแอ่นตัวที่ตำแหน่ง  $d_0$  และ  $d_{12}$  ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS แสดงผล ดังตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณพบว่าสายทาง SN ซึ่งชั้นคอนกรีตมีความหนา 0.26 ม. กำหนดค่าการแอ่นตัวและค่า B ได้น้อยกว่าถนน PT ซึ่งชั้นคอนกรีตมีความหนา 0.13 ม. ทั้งนี้ค่า B ที่ได้ยังมีความสอดคล้องกับค่าแนะนำของ AASHTO (1.05 – 1.15) [3]

**ตารางที่ 4.2** แสดงผลจำลองการทดสอบ FWD และคำนวณค่า B

สายทาง	SN	PT
$d_0$ (mm)	0.142	0.394
$d_{12}$ (mm)	0.135	0.352
<b>B</b>	<b>1.052</b>	<b>1.119</b>

Slab Length = 10,000 mm, Slab Width = 3,500 mm

Plate Radius = 300 mm, FWD Load = 40 kN

E (PCC) = 30,000 MPa,  $\mu = 0.15$

E (Subbase) = 200 MPa,  $\mu = 0.35$

k (Subgrade) = 0.0271 MPa/mm

flexural Strength = 3 MPa

### 4.3 ผลการคำนวณค่า LTE

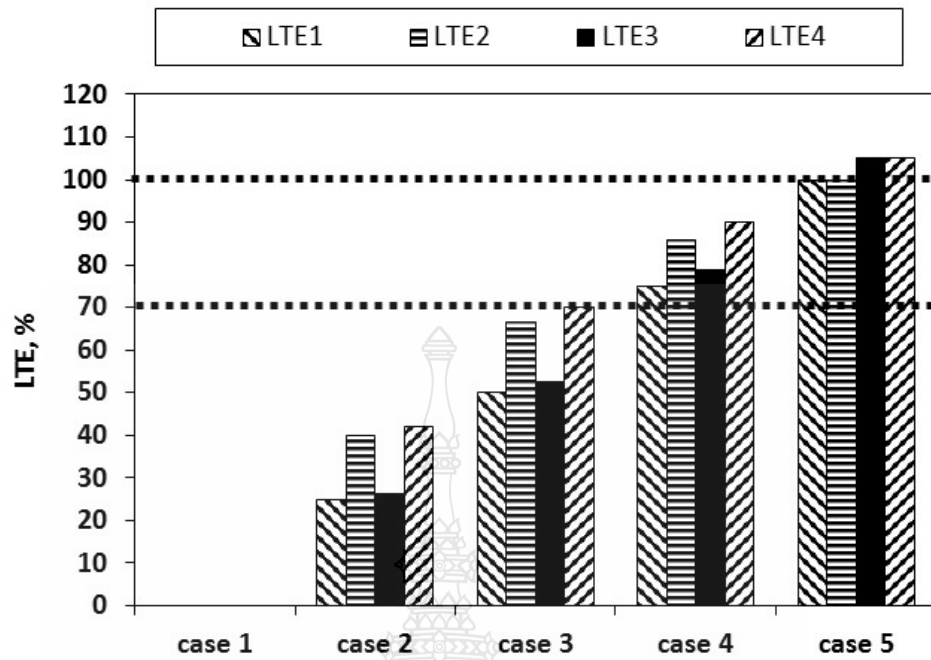
คำนวณค่า LTE<sub>1</sub> ถึง LTE<sub>4</sub> แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 หากพิจารณาเฉพาะแบบจำลอง LTE<sub>1</sub> และ LTE<sub>2</sub> ซึ่งเป็น 2 แบบจำลองที่นิยมใช้มากที่สุดและไม่มีผลปรับแก้จากค่าการตัดของแผ่นพื้น (B) ได้ผลเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Chao Wei และคณะ [26] ค่า B ส่งผลให้คำนวณ LTE<sub>3</sub> และ LTE<sub>4</sub> ได้มากยิ่งขึ้นในทุกกรณี และค่า B ส่งผลให้คำนวณค่า LTE มากเกินจริงในกรณีที่ 5 ทั้ง 2 สายทางซึ่งค่า LTE ที่มากเกินไปกว่าร้อยละ 100 หากนำมาวิเคราะห์ต่อเนื่องอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดหรือข้ามเกณฑ์ในการทดสอบได้

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณ LTE ของสายทาง SN และ PT

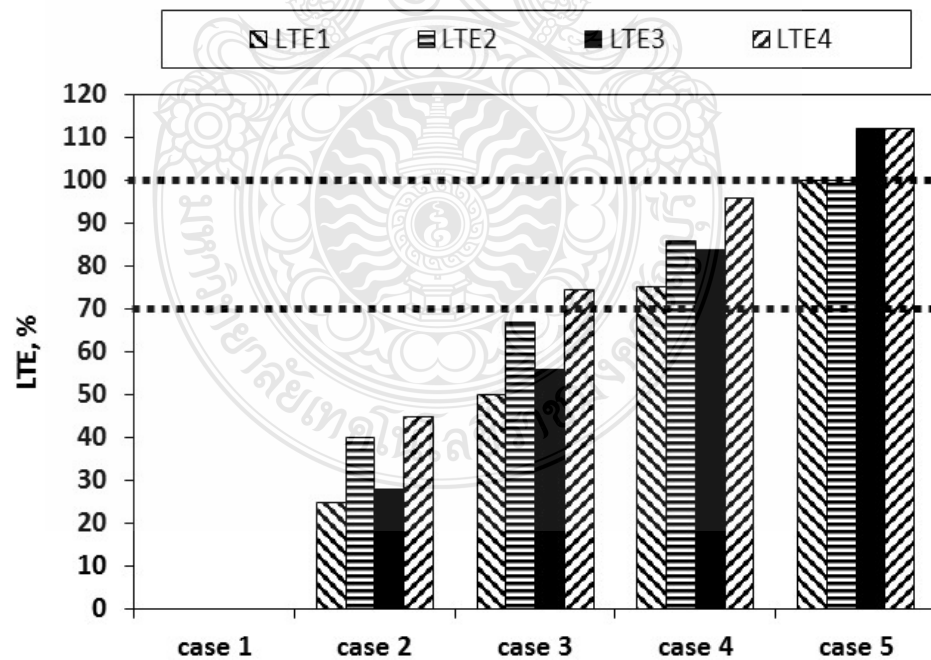
กรณี		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
SN	LTE <sub>1</sub>	0.00	25.0	50.0	75.0	100.0
	LTE <sub>2</sub>	0.00	26.3	52.6	78.9	100.0
	LTE <sub>3</sub>	0.00	40.0	66.7	85.7	<b>105.2*</b>
	LTE <sub>4</sub>	0.00	42.1	70.1	90.2	<b>105.2*</b>
PT	LTE <sub>1</sub>	0.00	25.0	50.0	75.0	100.0
	LTE <sub>2</sub>	0.00	28.0	56.0	83.9	100.0
	LTE <sub>3</sub>	0.00	40.0	66.7	85.7	<b>111.9*</b>
	LTE <sub>4</sub>	0.00	44.8	74.6	95.9	<b>111.9*</b>

\* คือ LTE มากกว่าร้อยละ 100

ในกรณีที่นำ LTE แต่ละแบบจำลองมาวิเคราะห์ โดยแบ่งผลทดสอบ LTE ตามเกณฑ์ของ FAA แสดงในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 พบว่าที่เกณฑ์ Fair LTE<sub>1</sub> มีค่าร้อยละ 50 แต่เมื่อนำผลทดสอบเดียวกันมาคำนวณด้วยแบบจำลอง LTE<sub>4</sub> ในสายทาง SN คำนวณได้สูงถึงร้อยละ 70.6 และสายทาง PT คำนวณ LTE<sub>4</sub> ได้สูงถึงร้อยละ 74.6 ซึ่งสูงจนข้ามไปอยู่ในเกณฑ์ Acceptable ได้ซึ่งอาจส่งผลให้ประเมินความแข็งแรงที่รอยต่อถนนคอนกรีตผิดพลาดได้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการคำนวณของ LTE ทั้ง 4 แบบจำลองในสายทาง SN

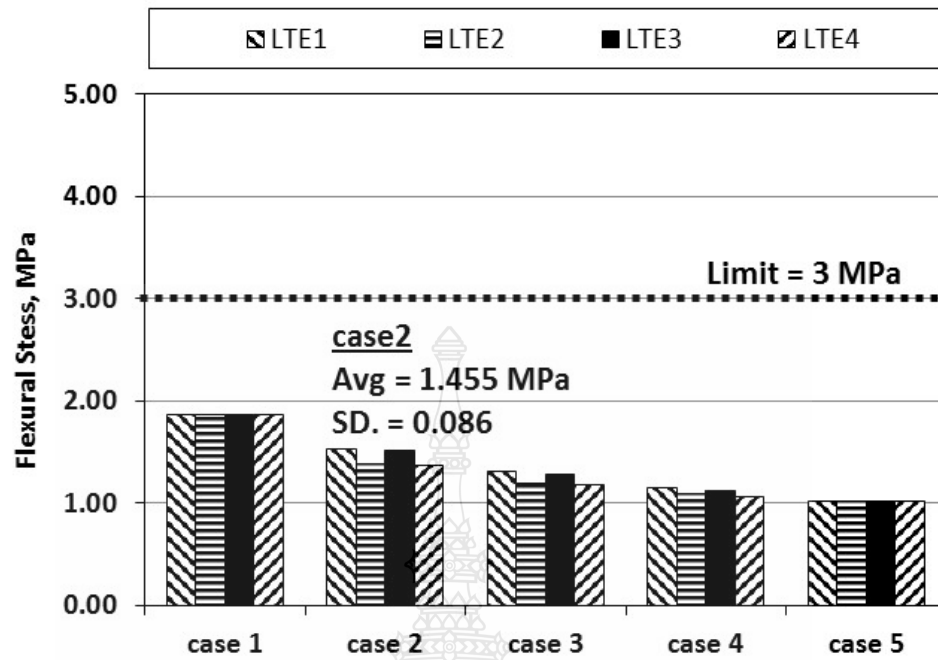


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการคำนวณของ LTE ทั้ง 4 แบบจำลองในสายทาง PT

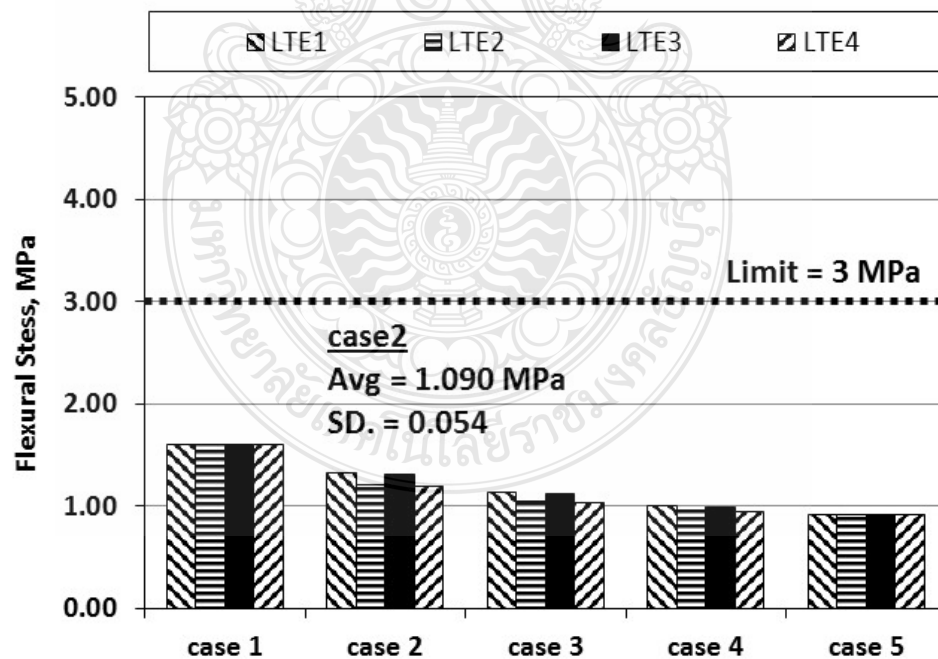
#### 4.4 ผลการคำนวณค่าหน่วยแรงเค้นดัดจากรถบรรทุก 10 ล้อกับ LTE

รูปที่ 4.5 – รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาวกับในสายทาง SN และ PT จากแต่ละแบบจำลอง LTE ทั้ง 5 กรณี (เป็นตัวแทน LTE จากแย่งดี) ผลการคำนวณพบว่าแบบจำลอง LTE ที่ให้ค่าสูงจะส่งผลให้คำนวณหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อผิวทางคอนกรีตได้น้อยลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ E.J. Barenberg และ G.R. Woodman [27] ในรูปที่ 2.13 โดยแบบจำลอง LTE ในทุกกรณีส่งผลกระทบต่อการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดของรอยต่อตามขวางมากกว่ารอยต่อตามยาวทั้ง 2 สายทางซึ่งรอยต่อตามขวางทั้ง 2 สายทางมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่ารอยต่อตามยาว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายทาง PT ซึ่งแผ่นคอนกรีตมีความหนาเพียง 0.13 ม. ในส่วนของ LTE กรณีที่ 2 ได้รับผลกระทบมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยของการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดเท่ากับ 3.681 เมกะปาสกาล ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.215

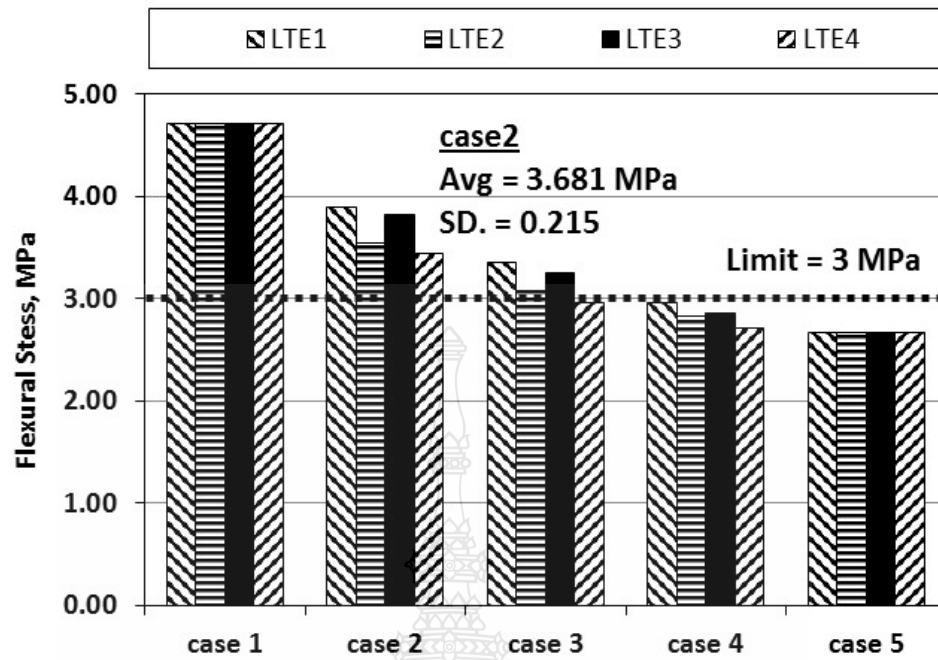
เมื่อพิจารณากำลังรับแรงเค้นดัด (Flexural Strength) ของถนนคอนกรีตที่ 3 เมกะปาสกาล ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ยอมให้ตามข้อกำหนดของกรมทางหลวง [6] พบว่าในสายทาง SN แบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบไม่ส่งผลกระทบต่อข้อจำกัดดังกล่าว แต่ในสายทาง PT แบบจำลอง LTE ส่งผลกระทบต่อ การคำนวณหน่วยแรงเค้นดัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ LTE มีค่าน้อยถึงปานกลาง ตัวอย่างเช่นในรูปที่ 4.7 LTE กรณีที่ 3 ผลของการคำนวณแรงเค้นดัดจากแบบจำลอง LTE<sub>1</sub> ให้ค่าสูงกว่า 3 เมกะปาสกาล แต่ผลการคำนวณดังกล่าวของ LTE<sub>4</sub> ให้ค่าต่ำกว่าข้อจำกัดซึ่งส่งผลต่อการประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีตโดยตรงและอาจทำให้ประเมินการซ่อมแซมถนนผิดพลาดได้



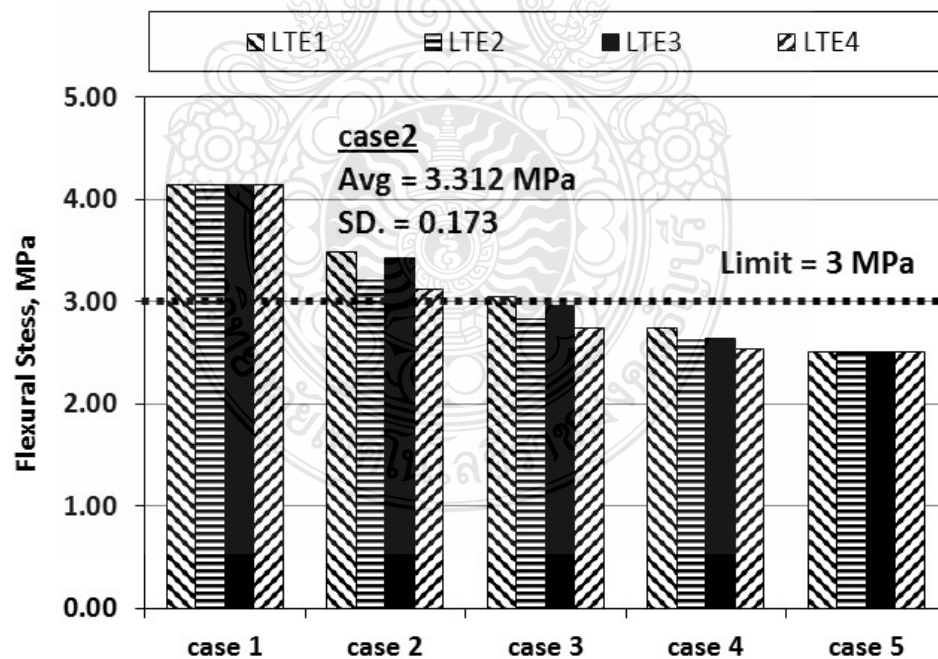
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามขวางกับแบบจำลอง LTE ของสายทาง SN



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นดัดที่รอยต่อตามยาวกับแบบจำลอง LTE ของสายทาง SN



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นคดที่รอยต่อตามขวางกับแบบจำลอง LTE ของสายทาง PT



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเค้นคดที่รอยต่อตามยาวกับแบบจำลอง LTE ของสายทาง PT



#### 4.5 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นและวิเคราะห์ LTE $\sigma$

หน่วยแรงเค้นคัตที่ได้คำนวณได้จากแต่ละแบบจำลอง LTE ทั้ง 5 กรณี ถือว่าเป็นหน่วยแรงเค้นคัตของ Unloaded Slab ในกรณีที่คำนวณหน่วยแรงเค้นคัตที่ขอบแผ่นอิสระ (Free Edge) ใช้ความสัมพันธ์ของสมการ 2.14 คำนวณหน่วยแรงเค้นคัตของ Unloaded Slab และผลการคำนวณ LTE $\sigma$  จากแต่ละแบบจำลอง LTE ได้ในทุกกรณีแสดงดังตารางที่ 4.4 - ตารางที่ 4.7

แต่ละแบบจำลอง LTE ส่งผลให้คำนวณหน่วยแรงเค้นได้แตกต่างกันและหากนำมาคำนวณต่อเนื่องเพื่อหา LTE $\sigma$  พบว่า LTE $\sigma$  ของรอยต่อตามขวางมีค่ามากกว่า LTE $\sigma$  ของรอยต่อตามยาวทั้ง 2 สายทาง ซึ่ง LTE $\sigma$  ในกรณีที่ 3 มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมากที่สุดที่สายทาง PT (ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 8.179 ที่ค่าเฉลี่ยร้อยละ 49.280) สำหรับผลการคำนวณ LTE $\sigma$  ที่รอยต่อตามยาวของสายทาง PT พบว่ามีค่า LTE $\sigma$  ต่ำที่สุด จากตารางที่ 4.4 - ตารางที่ 4.7 ข้างต้นพบว่าแต่ละแบบจำลอง LTE ส่งผลต่อหน่วยแรงเค้นและหากนำไปคำนวณ LTE $\sigma$  จะส่งผลต่อหน่วยแรงเค้นที่รอยต่อตามขวางในสายทาง SN มากกว่า

**ตารางที่ 4.4** ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นคัตและวิเคราะห์ LTE $\sigma$  สายทาง SN (Transverse Joint)

สายทาง SN (Transverse Joint)			$\sigma_t$ 1.873														
case 1			case 2			case 3			case 4			case 5					
$\sigma_t$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_t$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$			
1.873	0.000	0.0	1.535	0.338	22.0	1.309	0.564	43.1	1.147	0.726	63.3	1.026	0.847	82.6			
1.873	0.000	0.0	1.389	0.484	34.8	1.194	0.679	56.9	1.09	0.783	71.8	1.026	0.847	82.6			
1.873	0.000	0.0	1.524	0.349	22.9	1.287	0.586	45.5	1.126	0.747	66.3	1.026	0.847	82.6			
1.873	0.000	0.0	1.372	0.501	36.5	1.176	0.697	59.3	1.071	0.802	74.9	1.026	0.847	82.6			
Mean		0.0			29.1			51.2			69.1			82.6			
SD.		0.0			7.7			8.1			5.2			0.0			

กำหนดให้  $\sigma_t, \sigma_u, \sigma_u = \text{MPa}$ , LTE $\sigma$  (%), Mean = ค่าเฉลี่ย และ S.D. = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

**ตารางที่ 4.5** ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ LTE $\sigma$  สายทาง SN (Longitudinal Joint)

สายทาง SN (Longitudinal Joint):			$\sigma_r$ 1.605														
case 1			case 2			case 3			case 4			case 5					
$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$			
1.605	0.000	0.0	1.329	0.276	20.8	1.145	0.46	40.2	1.014	0.591	58.3	0.915	0.69	75.4			
1.605	0.000	0.0	1.211	0.394	32.5	1.051	0.554	52.7	0.967	0.638	66.0	0.915	0.69	75.4			
1.605	0.000	0.0	1.32	0.285	21.6	1.127	0.478	42.4	0.996	0.609	61.1	0.915	0.69	75.4			
1.605	0.000	0.0	1.197	0.408	34.1	1.037	0.568	54.8	0.951	0.654	68.8	0.915	0.69	75.4			
Mean		0.0			27.2			47.5			63.5			75.4			
S.D.		0.0			7.0			7.3			4.7			0.0			

กำหนดให้  $\sigma_r, \sigma_u, \sigma_u = \text{MPa}, \text{LTE}\sigma (\%), \text{Mean} = \text{ค่าเฉลี่ย}$  และ  $\text{S.D.} = \text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}$

**ตารางที่ 4.6** ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ LTE $\sigma$  สายทาง PT (Transverse Joint)

สายทาง PT (Transverse Joint)			$\sigma_r$ 4.713														
case 1			case 2			case 3			case 4			case 5					
$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$			
4.713	0.000	0.0	3.899	0.814	20.9	3.356	1.357	40.4	2.969	1.744	58.7	2.678	2.035	76.0			
4.713	0.000	0.0	3.55	1.163	32.8	3.08	1.633	53.0	2.831	1.882	66.5	2.678	2.035	76.0			
4.713	0.000	0.0	3.823	0.89	23.3	3.252	1.461	44.9	2.855	1.858	65.1	2.678	2.035	76.0			
4.713	0.000	0.0	3.45	1.263	36.6	2.969	1.744	58.7	2.72	1.993	73.3	2.678	2.035	76.0			
Mean		0.0			28.4			49.3			65.9			76.0			
S.D.		0.0			7.5			8.2			6.0			0.0			

กำหนดให้  $\sigma_r, \sigma_u, \sigma_u = \text{MPa}, \text{LTE}\sigma (\%), \text{Mean} = \text{ค่าเฉลี่ย}$  และ  $\text{S.D.} = \text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}$

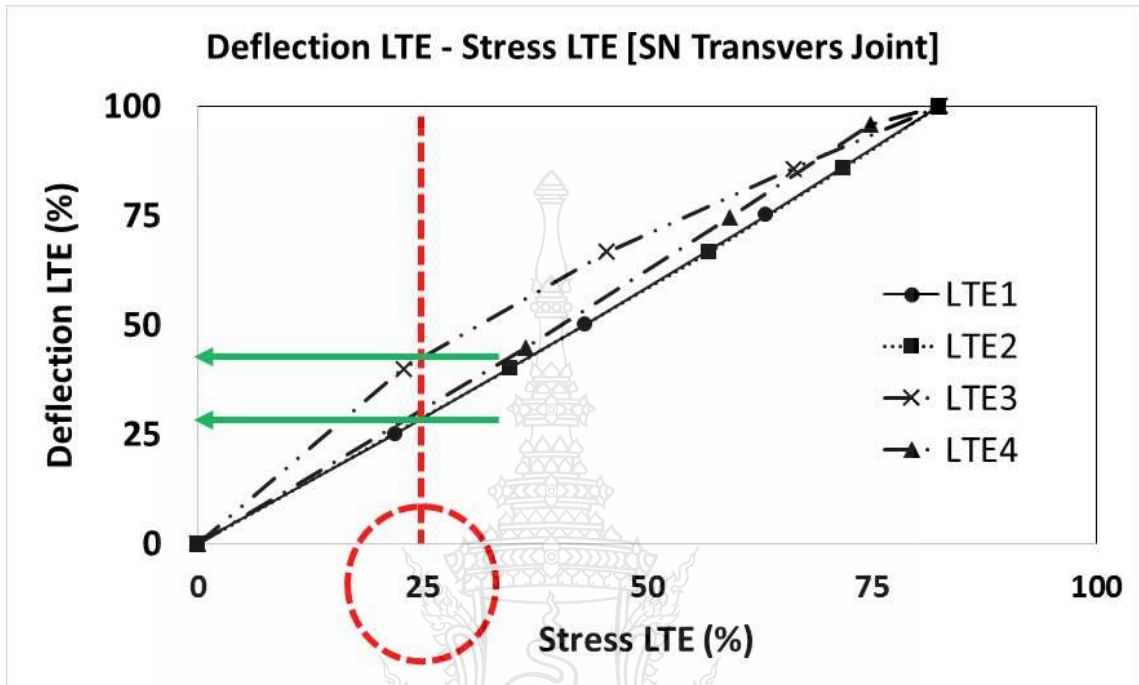
**ตารางที่ 4.7** ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นดัดและวิเคราะห์ LTE $\sigma$  สายทาง PT (Longitudinal Joint)

สายทาง PT (Longitudinal Joint)			$\sigma_r$ 4.144														
case 1			case 2			case 3			case 4			case 5					
$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$	$\sigma_l$	$\sigma_u$	LTE $\sigma$			
4.144	0.000	0.0	3.488	0.656	18.8	3.051	1.093	35.8	2.739	1.405	51.3	2.505	1.639	65.4			
4.144	0.000	0.0	3.207	0.937	29.2	2.829	1.315	46.5	2.628	1.516	57.7	2.505	1.639	65.4			
4.144	0.000	0.0	3.427	0.717	20.9	2.967	1.177	39.7	2.647	1.497	56.6	2.505	1.639	65.4			
4.144	0.000	0.0	3.127	1.017	32.5	2.739	1.405	51.3	2.538	1.606	63.3	2.505	1.639	65.4			
Mean		0.0			25.4			43.3			57.2			65.4			
S.D.		0.0			6.6			6.9			4.9			0.0			

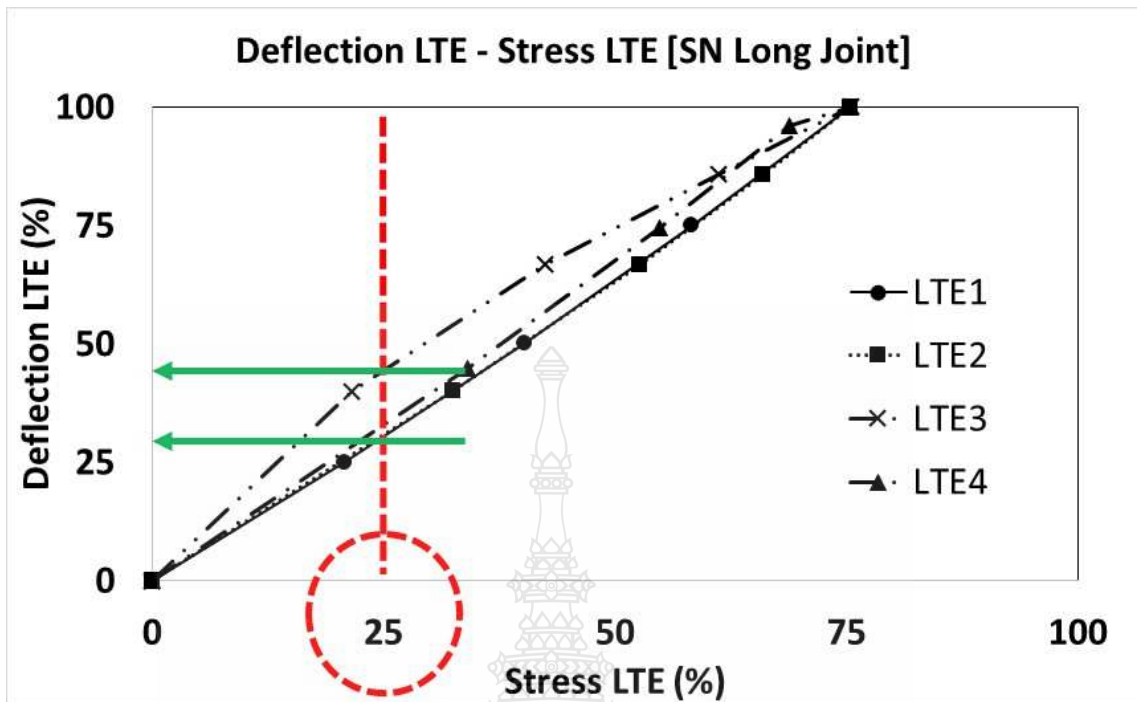
กำหนดให้  $\sigma_r, \sigma_u, \sigma_u = \text{MPa}, \text{LTE}\sigma (\%), \text{Mean} = \text{ค่าเฉลี่ย}$  และ  $\text{S.D.} = \text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}$

ทั้งนี้หากนำความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{LTE}\Delta$  จากแต่ละแบบจำลองและ  $\text{LTE}\sigma$  แสดงดังรูปที่ 4.9 ถึงรูปที่ 4.12 พบว่าแบบจำลอง  $\text{LTE}_1, \text{LTE}_2$  และ  $\text{LTE}_4$  มีความสัมพันธ์กับ  $\text{LTE}\sigma$  แบบเชิงเส้นซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยของ Hammons และ Ioannides ซึ่งระบุความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็นสมการพหุนามกำลัง 3 ยกเว้นแบบจำลอง  $\text{LTE}_3$  ที่ได้ผลเป็นสมการพหุนามกำลัง 3 เช่นเดียวกัน ทุกแบบจำลองหาก

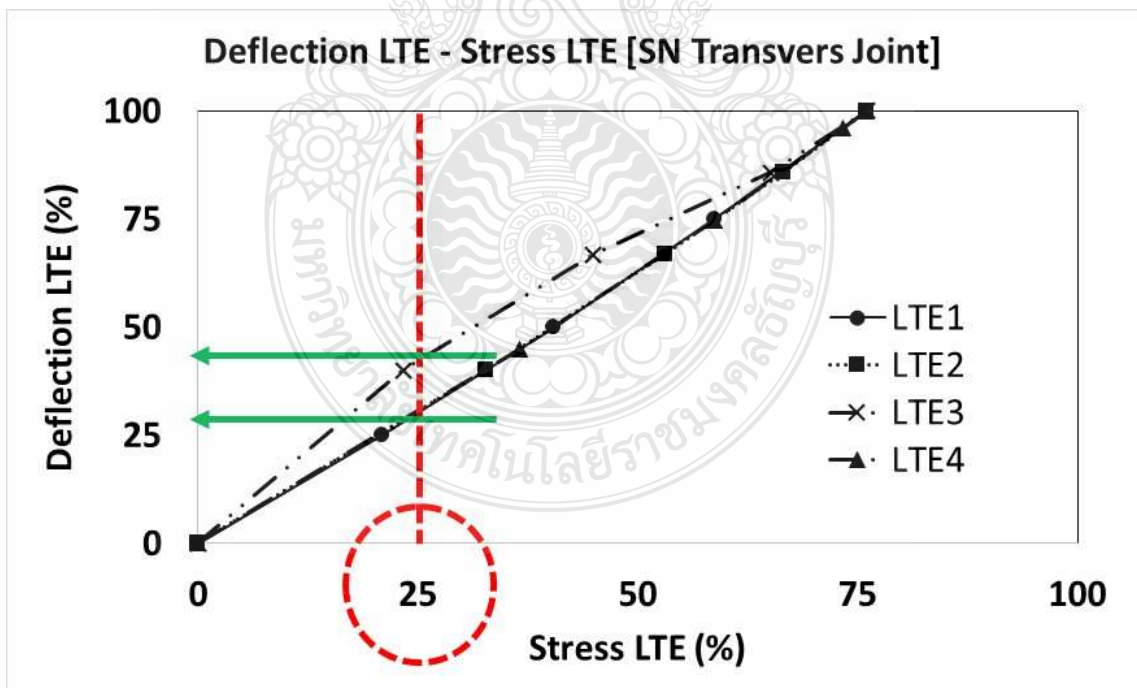
พิจารณาที่  $LTE_{\sigma}$  ที่ร้อยละ 25 ตามเกณฑ์ของ FAA พบว่าได้ค่า  $LTE_{\Delta}$  น้อยมาก มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 50 ในทุกสายทางและมีค่าต่ำกว่าความสัมพันธ์ที่ FAA แนะนำมาก



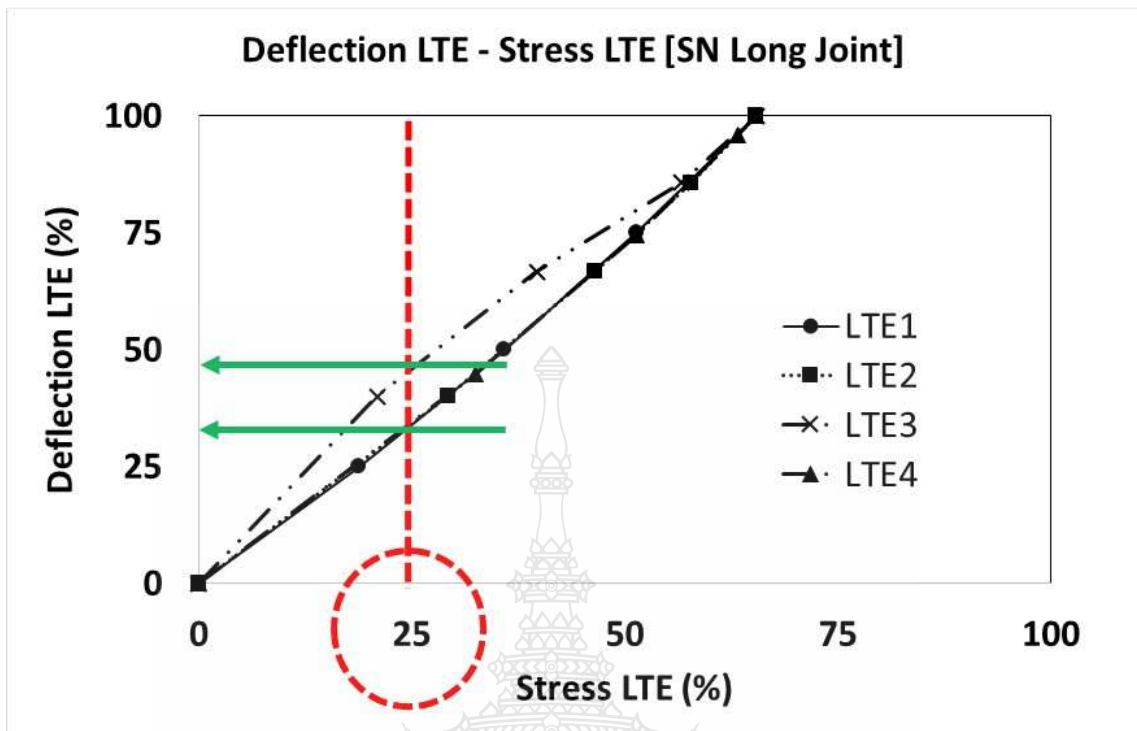
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$  ร้อยต่อตามขวางของสายทาง SN



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$  รอยต่อตามยาวของสายทาง SN

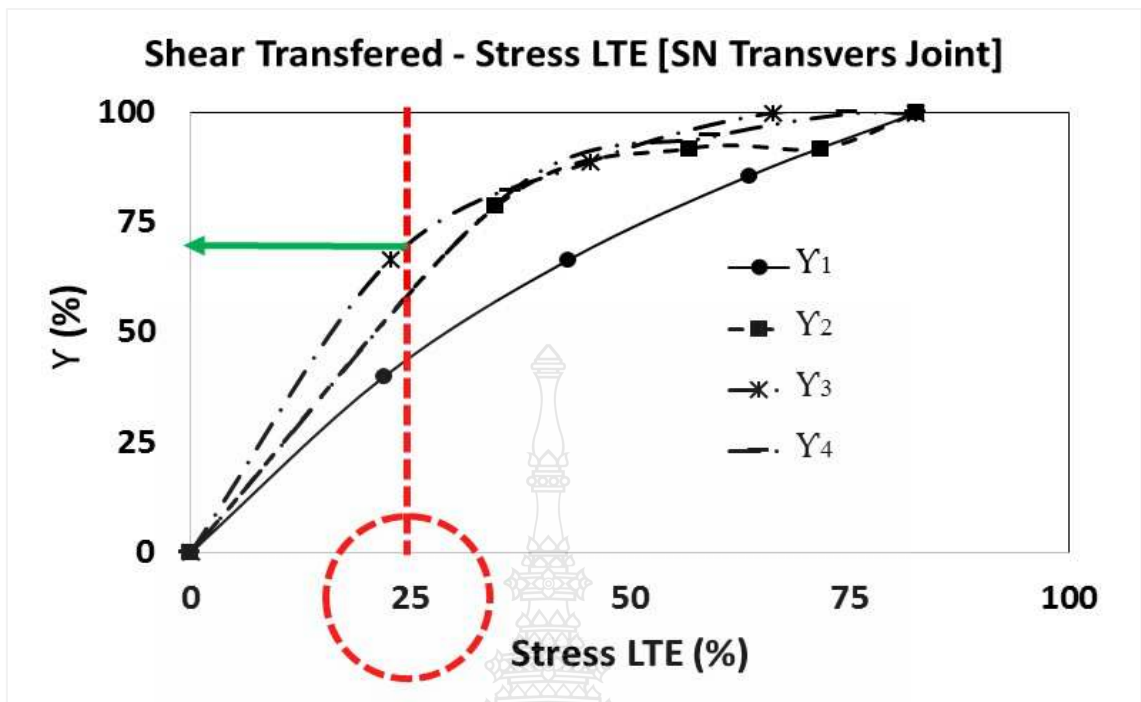


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$  รอยต่อตามขวางของสายทาง PT

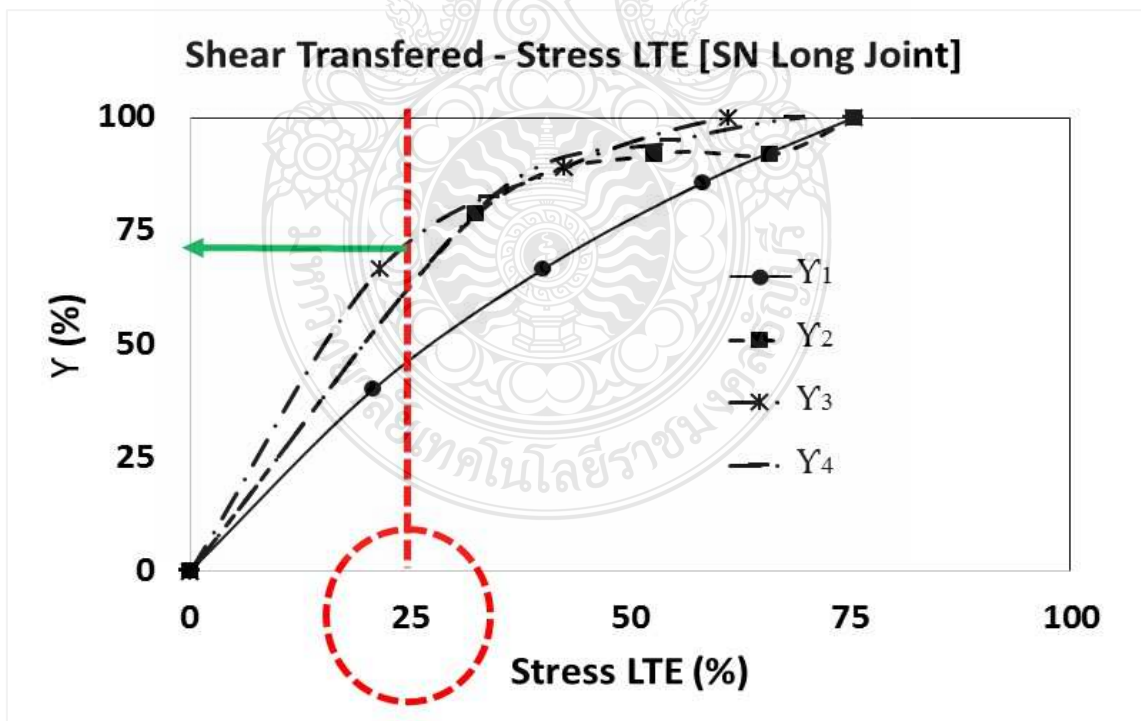


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $LTE_{\Delta}$  กับ  $LTE_{\sigma}$  รอยต่อตามยาวของสายทาง PT

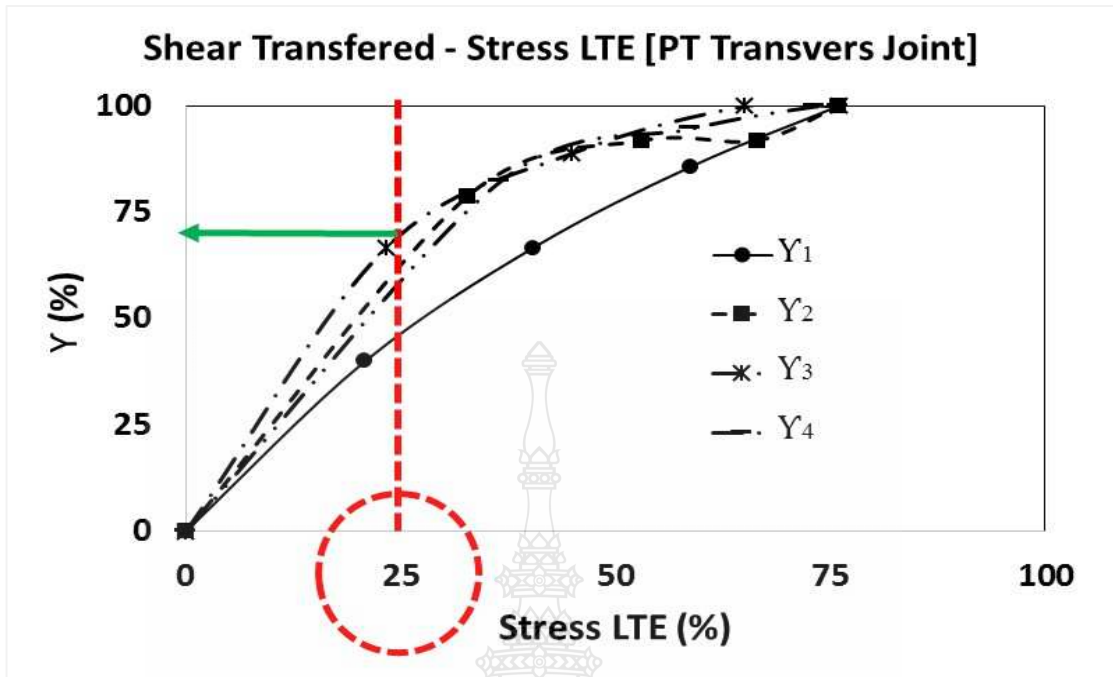
แบบจำลอง LTE ให้ผลความสัมพันธ์ระหว่าง  $Y$  กับ  $LTE_{\sigma}$  ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสามเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Van Cauwelaert [25] โดยที่ทุกแบบจำลอง LTE มีค่า  $R^2$  สูงมากกว่า 0.90 ในทุกแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 4.13 – รูปที่ 4.16 หากพิจารณาที่  $LTE_{\sigma}$  ที่ร้อยละ 25 ตามเกณฑ์ของ FAA พบว่าได้ค่า  $Y$  ที่แตกต่างกัน โดยที่  $Y_3$  ให้ค่าสูงที่สุดในทุกสายทาง แต่เมื่อนำ  $Y$  แปลงกลับไปหาค่า LTE พบว่าได้ค่าต่ำกว่าความสัมพันธ์ที่ FAA แนะนำมากเช่นเดียวกัน



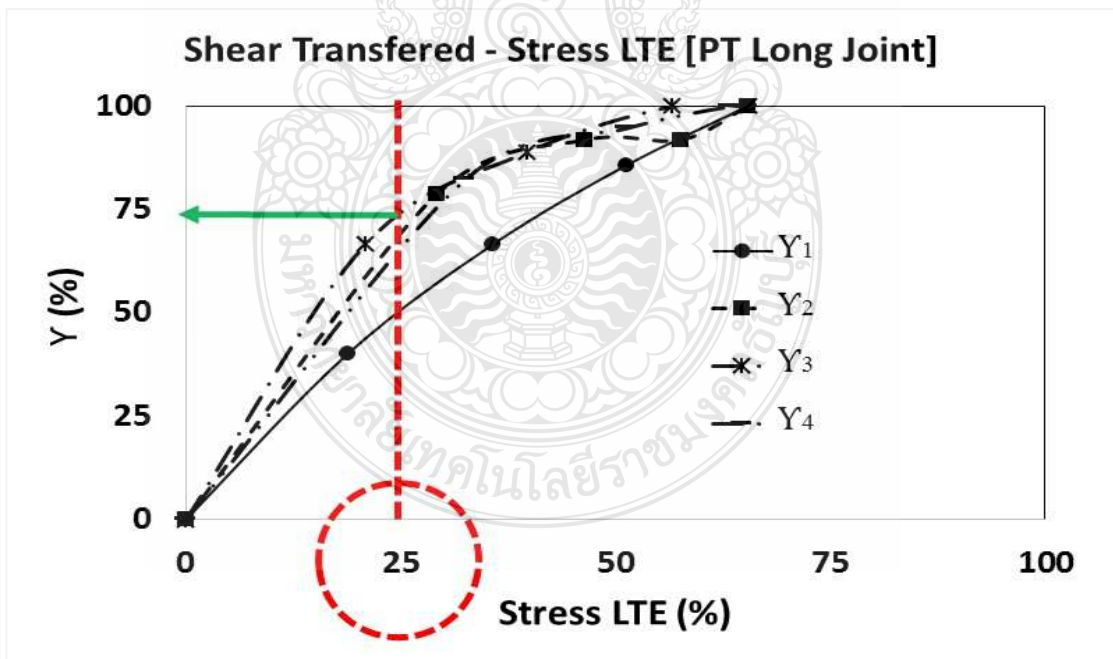
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ  $LTE_{\sigma}$  ที่รอยต่อตามขวางของสายทาง SN



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ  $LTE_{\sigma}$  ที่รอยต่อตามยาวของสายทาง SN



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ  $LTE_{\sigma}$  ที่รอยต่อตามขวางของสายทาง PT



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Y กับ  $LTE_{\sigma}$  ที่รอยต่อตามยาวของสายทาง PT



## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการเจาะสำรวจชั้นความหนาของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย 2 สายทางด้วยเครื่องมือ Bore scope คือ สายทาง PT คอนกรีตมีความหนาเพียง 0.13 ม. ต่ำกว่ามาตรฐานของกรมทางหลวงมากและสายทาง SN คอนกรีตมีความหนาปกติที่ 0.26 ม. นำความหนาที่ได้คำนวณ  $LTE_{\Delta}$  ซึ่งแบ่งได้ 4 กลุ่มหลักตามมาตรฐานหรือข้อเสนอแนะหน่วยงานด้านงานทางในระดับสากล แบ่งเกณฑ์  $LTE_{\Delta}$  ออกเป็น 5 กรณี (จากแย่ถึงดี) จากนั้นจำลองน้ำหนักบรรทุกทุก 10 ล้อหนัก 25 ตันกระทำที่รอยต่อถนน ทั้งรอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาวร่วมกับแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ดังกล่าวคำนวณหน่วยแรงเค้นบนทฤษฎีพื้นฐานของ Westergaard ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS ในตำแหน่งที่มีหน่วยแรงเค้นสูงสุด พบว่าแบบจำลอง  $LTE_1$  ซึ่งเป็นแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ที่ได้รับความนิยมให้ค่า  $LTE_{\Delta}$  ต่ำสุดและส่งผลกระทบต่อคำนวณหน่วยแรงเค้นได้สูงสุดทั้งรอยต่อตามขวางและรอยต่อตามยาวทั้ง 2 สายทาง ในส่วนของค่าปรับแก้การแอ่นตัวของแผ่นพื้น (B) ส่งผลให้แบบจำลอง  $LTE_3$  และ  $LTE_4$  มีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบจำลอง  $LTE_4$  มีค่าสูงมากจนอาจจะทำให้การคำนวณหน่วยแรงเค้นตัดต่ำกว่าความเป็นจริงได้ ขณะที่แบบจำลอง  $LTE_2$  และ  $LTE_3$  ส่งผลกระทบต่อคำนวณหน่วยแรงเค้นตัดมากที่สุดในช่วงเกณฑ์  $LTE_{\Delta}$  กรณีที่ 3 และ 4 ( $LTE$  มีค่าปานกลางร้อยละ 50 ถึง 70) และทุกแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ส่งผลกระทบต่อหน่วยแรงเค้นที่รอยต่อความขวางมากกว่ารอยต่อตามยาว

หากนำแต่ละแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  มาหาความสัมพันธ์กับ  $LTE_{\sigma}$  พบว่า  $LTE_1$ ,  $LTE_2$  และ  $LTE_4$  มีความสัมพันธ์กับ  $LTE_{\sigma}$  ในรูปแบบสมการเชิงเส้น มีเพียง  $LTE_3$  เท่านั้นที่ให้ความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ FAA ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสาม และทุกแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  ไม่เหมาะสมในการหาความสัมพันธ์กับ  $LTE_{\sigma}$  เนื่องจากให้ค่า  $LTE_{\Delta}$  ต่ำมากหากเทียบกับ  $LTE_{\sigma}$  ที่ร้อยละ 25 ตามที่ FAA แนะนำ ทั้งนี้หากนำค่า  $LTE_{\Delta}$  คำนวณหา Shear Transferred Factor (Y) เพื่อสร้างความสัมพันธ์กับ  $LTE_{\sigma}$  พบว่าในทุกแบบจำลอง  $LTE_{\Delta}$  มีความสัมพันธ์ระหว่าง Y และ  $LTE_{\sigma}$  ที่ดี ( $R^2$  มากกว่า 0.98) ในรูปแบบสมการพหุนามกำลังสาม และหากเทียบกับ  $LTE_{\sigma}$  ที่ร้อยละ 25 ตามที่ FAA แนะนำกลับพบว่าทุกแบบจำลองให้ค่า  $LTE_{\Delta}$  ที่ต่ำเช่นเดียวกัน

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าค่า  $LTE$  ส่งผลต่อหน่วยแรงเค้นที่รอยต่อแผ่นพื้น หาก  $LTE_{\Delta}$  เสื่อมสภาพหรือมีค่าต่ำลง ย่อมส่งผลให้คอนกรีตเกิดความเสียหายได้ง่ายเนื่องจากหน่วยแรงเค้นตัดมี



ค่าสูงขึ้น ในส่วนของแบบจำลอง LTE $\Delta$  ส่งผลกระทบต่ออย่างสูงต่อถนนคอนกรีตที่มีความหนาผิวทางคอนกรีตน้อยและมีกำลังรับแรงค้ำต่ำ เช่นในสายทาง PT ที่คอนกรีตมีความหนาเพียง 0.13 ม. ทั้งนี้ การศึกษาค่าปรับแก้การค้ำของแผ่นพื้น (B) เพิ่มเติม ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นในการเลือกใช้แบบจำลอง LTE $\Delta$  สำหรับงานประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีตหรือออกแบบซ่อมแซมได้มากยิ่งขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม เช่น การทดสอบในสนามหรือแปลงทดสอบด้วยเครื่องมือ NDT โดยเฉพาะในส่วนของปัจจัยเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้น และนำผลที่ได้วิเคราะห์โดยใช้ทฤษฎีหรือโปรแกรมคอมพิวเตอร์อื่น เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของแต่ละแบบจำลอง LTE ต่อหน่วยแรงเค้นที่รอยต่อผิวทางคอนกรีต



## บรรณานุกรม

- [1] ชยธันว์ พรหมศร, ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก, เลิศ พัดฉวี และ พรชัย ศีลารมย์, “การประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิวชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ในประเทศไทย”, รายงานฉบับที่ วพ. 206 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, เมษายน 2546.
- [2] Wadkar, A., Mehta, Y., Cheary, D., Guo, E., Musumeci, L., Zapata, A. and Kettlesonm W. “Load-Transfer Efficiencies of Rigid Airfield Pavement Joints Based on Stresses and Deflections”, in Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.23, No.8, 2011, pp. 1171-1180.
- [3] Khazanovich, L. and Gotlif, A. “Evaluation of Joint and Crack Load Transfer Final Report”, FHWA-RD-02-088, Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation, 2003.
- [4] American Society of Civil Engineers (ASCE), *First Concrete Pavement (online)*, Available: [www.asce.org/project/first-concrete-pavement](http://www.asce.org/project/first-concrete-pavement) (18 May 2016).
- [5] Norbert Delatte, Concrete Pavement Design Construction and Performance, Taylor & Francis Group, 2007.
- [6] ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ. การออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต (Portland Cement Concrete Pavement Design), ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง, กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม, 2546
- [7] นิรชร นกแก้ว. วิศวกรรมการทาง (Highway Engineering). พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ โยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2554
- [8] ณรงค์ กุหลาบ, วิศวกรรมการทาง (Highway Engineering), พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์วรรณกิจ. มิถุนายน 2556
- [9] Geoffrey Griffiths and Nick Thom. Concrete Pavement Design Guidance Notes, Taylor & Francis Group, 2007.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] Emmanuel B., Owusu-Antwi, Alvin H. Mayer and W. Ronal Hadson. Assessing Load Transfer across Joints and Crack in Rigid Pavement Using the Falling Weight Deflectometer, FHWA/TX-91+460-2, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, Austin Texas.1990
- [11] Michael I. Hammons, David W. Pitman, Dan d. Mathew, Effectiveness of Load Transfer Device. DOT/FAA/AR-95/80, U.S. Army Engineer Waterway Experiment Station1995
- [12] American Concrete Pavement Association (ACPA), Design and Construction of Joints for Concrete Streets, Concrete Information, American Concrete Pavement Association (ACPA) .Illinois. 1992
- [13] AASHTO, 1993. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials. 1993
- [14] Federal Highway Administration, *FHWA History (online)*, Available: [www.fhwa.dot.gov](http://www.fhwa.dot.gov) (1 May 2016).
- [15] American Concrete Pavement Association (*online*), Available: [www.acpa.org](http://www.acpa.org) (1 May 2016).
- [16] American Concrete Pavement Association (ACPA), Concrete Pavement Rehabilitation Guide for Load Transfer Restoration, ACPA JP001P, 1997
- [17] Federal Aviation Administration, Use of Nondestructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements, Advisory Circular No. 150/5370-11B , U.S. Department of Transportation, 2011.
- [18] Dynatest, *Welcome to Dynatest (online)*, Available: [www.dynatest.com](http://www.dynatest.com) (1 May 2016).
- [19] เอกสารติดต่อระหว่างบุคคล, 2555. เอกสารการอบรมเครื่องมือทดสอบ Dynatest. “Joint Efficiency Measurements”.บริษัทชอยล์เทสดีงสยามจำกัด (เอสทีเอส).
- [20] Christopher R. Byrum, Starr D. Kohn, Chuck A. Gemayel, Shiraz Tayabji. Joint Load Transfer in Concrete Airfield Pavements: Summary Report. Innovative Pavement Research Foundation, Airport Concrete Pavement Technology Program, Programs Management Office 9450 Bryn Mawr Road Rosemont, IL 60018.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [21] Houben L. J. M., "Structural Design of Pavements: Part IV Design of Concrete Pavements," Delft University of Technology, Netherland. 2009.
- [22] In-Soo Eom, I.D. Parsons and Keith Hjlmsad. Nonlinear Analysis of the Load Transfer Mechanism in Rigid Pavement Systems Considering Various Interface Conditions, FAA. 2000
- [23] Yoder E.J. and Witzak M.W., Principles of Pavement Design, 2th edition. John Wiley and Sons, INC. New York. 1975
- [24] Per Ullidtz. Pavement Analysis. Elsevier. 1987
- [25] Teller W. and Sutherland C., The structural Design of Concrete Pavement, Part4. A Study of the Structural Action of Several Types of Transverse and Longitudinal Joint Design
- [26] Chao Wei, B. Frank McCullough, W. Ronald Hudson and Kenneth Hankins. Development of Load Transfer Coefficients for Use with the AASHTO Guide for Design on Rigid Pavements Based on Field Measurements, Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, Austin Texas. 1992
- [27] Barenberg E.J. and Woodman G.R., Airfield Pavement Design for Heavy Aircraft Loading. Heavy Vehicles and Road: Technology, Safety and Policy. Thomas Teldord, London. 1992
- [28] SUH and YUN. Joint Movement and Load Transfer Characteristics of Concrete Overlay. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Vol.3, No.1, October, 2001
- [29] Michael I. Hammons and Anastasios M. Ioannides, 1997. Advanced Pavement Design: Finite Element Modeling for Rigid Pavement Joints Report I: Background Investigation, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station 3909 Halls Ferry Road Vicksburg, MS 39180-6199.
- [30] Lui W. and Fwa T.F., 2005. Effects of Joint Transfer on Concrete Pavement Response. Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1258-1273.

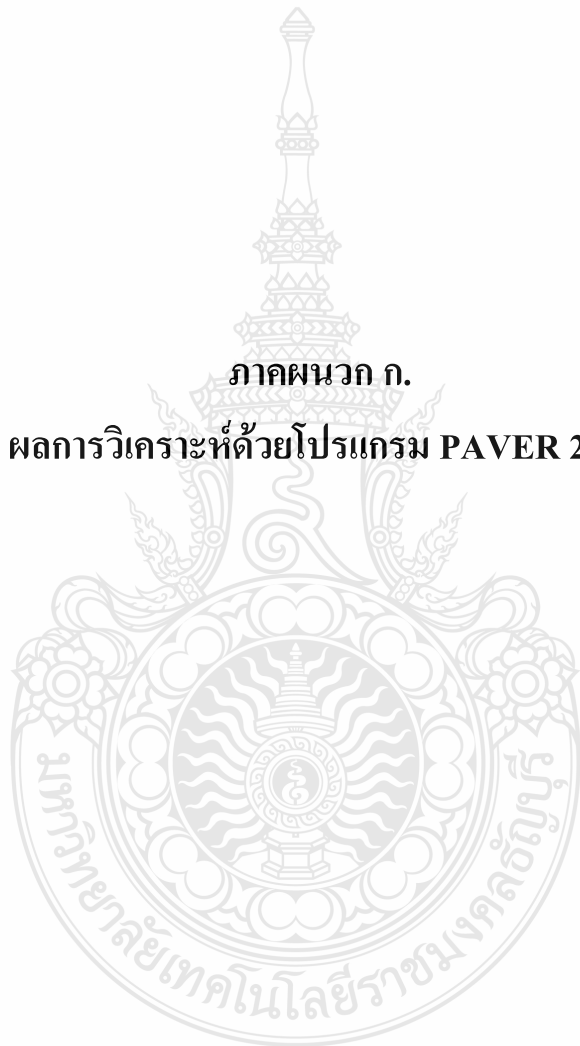
## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] สำนักวิเคราะห์ วิจัยและพัฒนา กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม. ศึกษาการก่อสร้างถนนคอนกรีตไร้เหล็กเสริมโดยใช้วัสดุมวลรวมหายาบจากท้องถิ่นในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. กรมทางหลวงชนบท กระทรวงคมนาคม.2552
- [32] จตุพล สายฉันทวัฒน์. “ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักกับโพรงใต้ผิวทางแผ่นพื้นคอนกรีตของท่าอากาศยาน,” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี, 2555.
- [33] พุทธิพล ทองอินทร์คำ, เครื่องมือต้นแบบทดสอบประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นพื้นของถนนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีต, ปทุมธานี: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 2557.
- [34] PAVERS, *Advanced Tool for Pavement Design & H/FWD Assessment (online)*, Available: [www.pavers.nl](http://www.pavers.nl) (24 May 2016).
- [35] Marc Stet, Bert Thewessen and Van Cauwelaert. The PAVERS system a Tool for the (Re-) Design of Flexible Pavement and Rigid Pavement, 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference. Atlantic City New Jersey, USA. 2004
- [36] Huang, Y.H., *Pavement Analysis and Design*. Second Edition, United States of America: Pearson Prentice Hall, 2004.

ภาคผนวก



**ภาคผนวก ก.**  
**ผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PAVER 2.80**



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Projec **TON02** Descriptic **PT**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: jo 5000 mm; centre 0 mm

Load ..... 40.0 kN

Radius ..... 150.0 mm

Length/ Width ..... 132.9 mm

Pressure ..... 0.566 MPa

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal) ..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos mm	Lr	Pos	Depth mm	Sx MPa	Sy MPa	Sz MPa	ex mm/m	ey mm/m	w mm	St,max MPa	Nf Repetitions	Damage Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.854	-0.854	0.004	-24	-24	142				
				Bt	260	0.854	0.854		24	24		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.002	-0.002		-8	-8				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.854	-0.854	0.004	-24	-24	142				
				Bt	260	0.854	0.854		24	24		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.002	-0.002		-8	-8				
				Bt	361	0.002	0.002		8	8				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.1 ผลการจำลองการทดสอบ FWD คำนวณค่าการแอ่นตัว  $d_0$  สายทาง SN ด้วยโปรแกรม

PAVERS



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Projec: **TON02** Descriptic: **PT** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: jo 5000 mm; centre 0 mm

Load ..... 40.0 kN

Radius ..... 150.0 mm

Length/ Width ..... 132.9 mm

Pressure..... 0.566 MPa

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 300.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos mm	Lr	Pos	Depth mm	Sx MPa	Sy MPa	Sz MPa	ex mm/m	ey mm/m	w mm	St,max MPa	Nr Repetitions	Damage Factor
Transversal	300.0	Cc	Tp	0	-0.372	-0.576	0.004	-10	-17	135	0.000	>>	0
		Bt	260	0.372	0.576		10	17			0.000	>>	0
		Bbs	Tp	260	-0.001	-0.002		-2	-6				
		Bt	361	0.001	0.002		2	6					
Longitudinal	300.0	Cc	Tp	0	-0.372	-0.576	0.004	-10	-17	135	0.000	>>	0
		Bt	260	0.372	0.576		10	17			0.000	>>	0
		Bbs	Tp	260	-0.001	-0.002		-2	-6				
		Bt	361	0.001	0.002		2	6					

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.2 ผลการจำลองการทดสอบ FWD คำนวณค่าการแอ่นตัว  $d_{12}$  สายทาง SN ด้วยโปรแกรม

PAVERS



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project: TON02      Descriptio: PT      Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: jo 5000 mm; centre 0 mm

Load ..... 40.0 kN

Radius ..... 150.0 mm

Length/ Width ..... 132.9 mm

Pressure ..... 0.566 MPa

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal) ..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa]      v [-]      H [mm]      Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy    Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos mm	Lr	Pos	Depth mm	Sx MPa	Sy MPa	Sz MPa	ex mm/m	ey mm/m	w mm	St,max MPa	Nf Repetitions	Damage Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-2.731	-2.731	0.011	-77	-77	394	0.000	3030	3.30E-4
			Bt	130	2.731	2.731		77	77		0.000	3030	3.30E-4
			Bbs	130	-0.020	-0.020		-63	-63				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.731	-2.731	0.011	-77	-77	394	0.000	3030	3.30E-4
			Bt	130	2.731	2.731		77	77		0.000	3030	3.30E-4
			Bbs	130	-0.020	-0.020		-63	-63				
			Bt	255	0.020	0.020		63	63				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.3 ผลการจำลองการทดสอบ FWD คำนวณค่าการแอ่นตัว  $d_0$  สายทาง PT ด้วยโปรแกรม

PAVERS



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Projec: TON02      Descriptic: PT      Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: jo 5000 mm; centre 0 mm

Load ..... 40.0 kN

Radius ..... 150.0 mm

Length/Width ..... 132.9 mm

Pressure ..... 0.566 MPa

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal) ..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab      R 100.0 %

E [Mpa]      v [-]      H [mm]      Fr [%]

Cc 30000      0.15      130      PCA

Bbs 200      0.35      125      None

Sg      k 0.0271      N/mm?

Copy      Input

**COMP. COORD.**

Slab      Load

X 300.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos mm	Lr	Pos	Depth mm	Sx MPa	Sy MPa	Sz MPa	ex mm/m	ey mm/m	w mm	St,max MPa	Nf Repetitions	Damage Factor
Transversal	300.0	Cc	Tp	0	-0.855	-1.643	0.010	-20	-50	352			
			Bt	130	0.855	1.643		20	50		0.000	>>	0
			Bbs	130	-0.006	-0.012		-10	-48				
Longitudinal	300.0	Cc	Tp	0	-0.855	-1.643	0.010	-20	-50	352			
			Bt	130	0.855	1.643		20	50		0.000	>>	0
			Bbs	130	-0.006	-0.012		-10	-48				
			Bt	255	0.006	0.012		10	48				

1 Input help diagram    2 Backcalculation    3 Fleet composition    4 Stress calculation

รูปที่ ก.4 ผลการจำลองการทดสอบ FWD คำนวณค่าการแอ่นตัว  $d_{12}$  สายทาง PT ด้วยโปรแกรม

PAVERS



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 0.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.465	-4.144	0.042	5	-136	1550				
				Bt	130	0.465	4.144		-5	136		0.000	< 1	> 1
				Bt	255	-0.003	-0.030		35	-142				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.717	-2.592	0.017	-44	-78	615				
				Bt	130	1.717	2.592		44	78		0.000	7973	1.25E-4
				Bt	255	-0.012	-0.019		-29	-71				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.5 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 0) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 25.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.651	-3.488	0.034	-4	-113	1250	0.000	15.6	0.0641
			Bt	130	0.651	3.488		4	113		0.000		
			Bbs	130	-0.005	-0.025		20	-116				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.966	-2.558	0.016	-53	-75	591	0.000	10098	9.90E-5
			Bt	130	1.966	2.558		53	75		0.000		
			Bbs	130	-0.014	-0.018		-38	-67				
			Bt	255	0.014	0.018		38	67				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.6 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 25) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 40.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.731	-3.207	0.030	-8	-103	1121				
				Bt	130	0.731	3.207		8	103		0.000	110.2	9.07E-3
				Bt	255	0.005	0.023		14	-105				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.073	-2.543	0.016	-56	-74	580				
				Bt	130	2.073	2.543		56	74		0.000	11175	8.95E-5
				Bt	255	-0.015	-0.018		-42	-65				
				Bt	255	0.015	0.018		42	65				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.7 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 40) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project: TON02 Description: roadA Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Down Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal): 3500 x 10000 mm?

Flexural strength: 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT): 0 ?C/mm

Model: Double Slab R: 28.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc: 30000 0.15 130 PCA

Bbs: 200 0.35 125 None

Sg k: 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X: 0.0 mm Y: 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.669	-3.427	0.033	-5	-111	1222				
				Bt	130	0.669	3.427		5	111		0.000	23.9	0.0418
				Bbs	255	-0.005	-0.024		19	-114				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.989	-2.555	0.016	-54	-75	588				
				Bt	130	1.989	2.555		54	75		0.000	10325	9.69E-5
				Bbs	255	-0.014	-0.018		-39	-66				
				Bt	255	0.014	0.018		39	66				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.8 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 28) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Down Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 44.8 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.754	-3.127	0.029	-10	-100	1084				
				Bt	130	0.754	3.127		10	100		0.000	193.3	5.17E-3
				Bbs	255	-0.005	-0.022		12	-102				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.103	-2.539	0.016	-57	-74	577				
				Bt	130	2.103	2.539		57	74		0.000	11505	8.69E-5
				Bbs	255	-0.015	-0.018		-43	-64				
				Bt	255	0.015	0.018		43	64				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.9 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 44) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 50.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.775	-3.051	0.028	-11	-98	1050				
				Bt	130	0.775	3.051		11	98		0.000	326.5	3.06E-3
				Bbs	130	-0.006	-0.022		10	-99				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.132	-2.535	0.016	-58	-74	574				
				Bt	130	2.132	2.535		58	74		0.000	11821	8.46E-5
				Bbs	130	-0.015	-0.018		-44	-64				
				Bt	255	0.015	0.018		44	64				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.10 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 50) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint  mm; centre  mm

Number of loads.....

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal).....  x  mm?

Flexural strength .....  MPa;

Max. temp. gradient (dT) .....  °C/mm

Model **Double Slab** R  %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc

Bbs

Sg k  N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

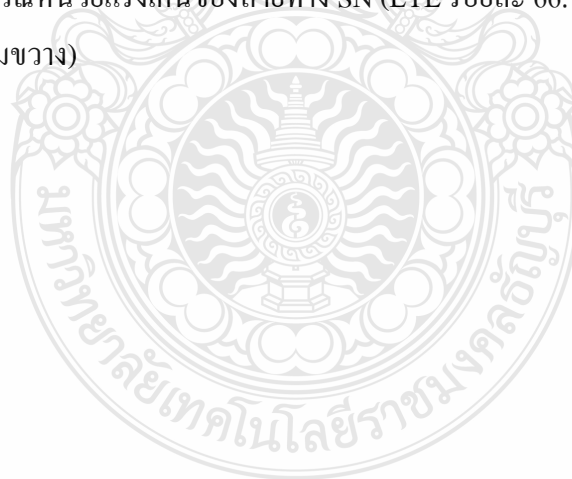
X  mm

Y  mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.839	-2.829	0.026	-14	-90	948				
				Bt	130	0.839	2.829		14	90		0.000	1535	6.52E-4
				Bbs	130	-0.006	-0.020		5	-91				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.217	-2.524	0.015	-61	-73	566				
				Bt	130	2.217	2.524		61	73		0.000	12808	7.81E-5
				Bbs	130	-0.016	-0.018		-48	-62				
				Bt	255	0.016	0.018		48	62				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.11 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 66.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (เรียงต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 56.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.799	-2.967	0.027	-12	-95	1011				
				Bt	130	0.799	2.967		12	95		0.000	586.0	1.71E-3
				Bt	255	0.006	0.021		9	-96				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.164	-2.531	0.015	-59	-74	571				
				Bt	130	2.164	2.531		59	74		0.000	12185	8.21E-5
				Bt	255	0.015	0.018		46	-63				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.12 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 56) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint  mm; centre  mm

Number of loads.....

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal).....  x  mm?

Flexural strength.....  MPa;

Max. temp. gradient (dT).....  °C/mm

Model **Double Slab** R  %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc

Bbs

Sg k  N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X  mm

Y  mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.864	-2.739	0.025	-15	-87	907				
				Bt	130	0.864	2.739		15	87		0.000	2865	3.49E-4
				Bbs	255	-0.006	-0.020		3	-87				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.251	-2.519	0.015	-62	-73	563				
				Bt	130	2.251	2.519		62	73		0.000	13230	7.56E-5
				Bbs	255	-0.016	-0.018		-49	-62				
				Bt	255	0.016	0.018		49	62				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.13 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 74.6) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint  mm; centre  mm

Number of loads:

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal):  x  mm?

Flexural strength:  MPa;

Max. temp. gradient (dT):  °C/mm

Model **Double Slab** R  %

E [Mpa]  v [-]  H [mm]  Fr [%]

Bbs    None

Sg k  N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X  mm

Y  mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.864	-2.739	0.025	-15	-87	907				
				Bt	130	0.864	2.739		15	87		0.000	2865	3.49E-4
				Bbs	255	-0.006	-0.020		3	-87				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.251	-2.519	0.015	-62	-73	563				
				Bt	130	2.251	2.519		62	73		0.000	13230	7.56E-5
				Bbs	255	-0.016	-0.018		-49	-62				
				Bt	255	0.016	0.018		49	62				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.14 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 75) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 85.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.896	-2.628	0.023	-17	-83	856				
				Bt	130	0.896	2.628		17	83		0.000	6193	1.61E-4
				Bbs	130	-0.006	-0.019		1	-83				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.293	-2.513	0.015	-64	-72	558				
				Bt	130	2.293	2.513		64	72		0.000	13769	7.26E-5
				Bbs	130	-0.016	-0.018		-50	-61				
				Bt	255	0.016	0.018		50	61				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.15 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 85.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 83.9 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.890	-2.647	0.023	-16	-84	865				
				Bt	130	0.890	2.647		16	84		0.000	5420	1.84E-4
				Bbs	130	-0.006	-0.019		1	-83				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.285	-2.514	0.015	-64	-72	559				
				Bt	130	2.285	2.514		64	72		0.000	13674	7.31E-5
				Bbs	130	-0.016	-0.018		-50	-61				
				Bt	255	0.016	0.018		50	61				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.16 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 83.9) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 95.9 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.921	-2.538	0.022	-18	-80	815				
				Bt	130	0.921	2.538		18	80		0.000	11577	8.64E-5
				Bt	255	-0.007	-0.018		-1	-79				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.327	-2.509	0.015	-65	-72	555				
				Bt	130	2.327	2.509		65	72		0.000	14222	7.03E-5
				Bt	255	-0.017	-0.018		-52	-60				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.17 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 95.9) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Dwn Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.931	-2.505	0.022	-18	-79	800				
				Bt	130	0.931	2.505		18	79		0.000	14610	6.84E-5
				Bbs	255	-0.007	-0.018		-2	-78				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-2.340	-2.507	0.015	-65	-72	554				
				Bt	130	2.340	2.507		65	72		0.000	14395	6.95E-5
				Bbs	255	-0.017	-0.018		-52	-60				
				Bt	255	0.017	0.018		52	60				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.18 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 100) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 0.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.455	-4.713	0.039	8	-155	1452			
			Bt	130	0.455	4.713		-8	155		0.000	< 1	> 1
			Bbs	130	-0.003	-0.034		43	-163				
			Bt	255	0.003	0.034		-43	163				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.481	-2.968	0.031	-1	-97	1130			
			Bt	130	0.481	2.968		1	97		0.000	584.1	1.71E-3
			Bbs	130	-0.003	-0.021		20	-100				
			Bt	255	0.003	0.021		-20	100				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.19 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 0) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 25.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.618	-3.899	0.032	-1	-127	1172			
		Bt	130		0.618	3.899		1	127		0.000	< 1	> 1
		Bbs	Tp	130	-0.004	-0.028		27	-131				
			Bt	255	0.004	0.028		-27	131				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.890	-2.740	0.025	-16	-87	940			
		Bt	130		0.890	2.740		16	87		0.000	2849	3.51E-4
		Bbs	Tp	130	-0.006	-0.020		2	-87				
			Bt	255	0.006	0.020		-2	87				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.20 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 25) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 40.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.688	-3.550	0.029	-5	-115	1053				
				Bt	130	0.688	3.550		5	115		0.000	10.2	0.0984
				Bbs	130	-0.005	-0.025		20	-118				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.066	-2.642	0.023	-22	-83	859				
				Bt	130	1.066	2.642		22	83		0.000	5617	1.78E-4
				Bbs	130	-0.008	-0.019		-5	-81				
				Bt	255	0.008	0.019		5	81				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.21 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 40) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 28.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.634	-3.823	0.031	-2	-124	1146				
				Bt	130	0.634	3.823		2	124		0.000	1.5	0.6546
				Bbs	130	-0.005	-0.027		25	-129				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.929	-2.718	0.025	-17	-86	923				
				Bt	130	0.929	2.718		17	86		0.000	3305	3.03E-4
				Bbs	130	-0.007	-0.019		1	-85				
				Bt	255	0.007	0.019		-1	85				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.22 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 28) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 44.8 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.708	-3.450	0.028	-6	-111	1018			
				130	0.708	3.450		6	111		0.000	20.4	0.0490
				Bbs	130	-0.005	-0.025		18	-114			
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.116	-2.614	0.023	-24	-82	836			
				130	1.116	2.614		24	82		0.000	6828	1.46E-4
				Bbs	130	-0.008	-0.019		-7	-79			
				Bt	255	0.008	0.019		7	79			

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.23 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 44.8) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 50.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.727	-3.356	0.027	-7	-108	986			
				130	0.727	3.356		7	108		0.000	39.1	0.0256
				Bbs	Tp	130	-0.005	-0.024		16	-111		
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.163	-2.588	0.022	-26	-80	814			
				130	1.163	2.588		26	80		0.000	8192	1.22E-4
				Bbs	Tp	130	-0.008	-0.018		-9	-78		
				Bt	255	0.008	0.018		9	78			

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.24 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 50) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 66.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.783	-3.080	0.024	-11	-99	891			
				130	0.783	3.080		11	99		0.000	266.7	3.75E-3
				Bbs	130	-0.006	-0.022		11	-100			
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.302	-2.511	0.020	-31	-77	750			
				130	1.302	2.511		31	77		0.000	14024	7.13E-5
				Bbs	130	-0.009	-0.018		-15	-73			
				Bt	255	0.009	0.018		15	73			

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.25 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 66.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 56.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.748	-3.252	0.026	-9	-105	950				
				Bt	130	0.748	3.252		9	105		0.000	80.8	0.0124
				Bbs	130	-0.005	-0.023		14	-107				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.216	-2.559	0.021	-28	-79	790				
				Bt	130	1.216	2.559		28	79		0.000	10037	9.96E-5
				Bbs	130	-0.009	-0.018		-11	-76				
				Bt	255	0.009	0.018		11	76				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.26 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 56) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 74.6 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.805	-2.969	0.023	-12	-95	853			
				130	0.805	2.969		12	95		0.000	578.7	1.73E-3
				Bbs	130	-0.006	-0.021		8	-96			
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.358	-2.479	0.020	-33	-76	724			
				130	1.358	2.479		33	76		0.000	17420	5.74E-5
				Bbs	130	-0.010	-0.018		-18	-72			
				Bt	255	0.010	0.018		18	72			

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.27 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 74.6) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 75.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.805	-2.969	0.023	-12	-95	853				
				Bt	130	0.805	2.969		12	95		0.000	578.7	1.73E-3
				Bbs	130	-0.006	-0.021		8	-96				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.358	-2.479	0.020	-33	-76	724				
				Bt	130	1.358	2.479		33	76		0.000	17420	5.74E-5
				Bbs	130	-0.010	-0.018		-18	-72				
				Bt	255	0.010	0.018		18	72				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.28 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 75) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 85.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.832	-2.831	0.022	-14	-90	806			
				130	0.832	2.831		14	90		0.000	1506	6.64E-4
				Bbs	Tp	130	-0.006	-0.020		6	-91		
			Bt	255	0.006	0.020		-6	91				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.427	-2.441	0.019	-35	-74	692			
				130	1.427	2.441		35	74		0.000	22768	4.39E-5
				Bbs	Tp	130	-0.010	-0.017		-20	-69		
			Bt	255	0.010	0.017		20	69				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.29 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 85.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 83.9 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.828	-2.855	0.022	-13	-91	814				
				Bt	130	0.828	2.855		13	91		0.000	1276	7.84E-4
				Bt	255	-0.006	-0.020		6	-92				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.415	-2.448	0.019	-35	-75	698				
				Bt	130	1.415	2.448		35	75		0.000	21738	4.60E-5
				Bt	255	-0.010	-0.017		-20	-70				
					0.010	0.017		20	70					

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.30 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 83.9) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Dwn Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 95.9 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.855	-2.720	0.021	-15	-86	768				
				Bt	130	0.855	2.720		15	86		0.000	3272	3.06E-4
				Bbs	130	-0.006	-0.019		3	-86				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.484	-2.410	0.018	-37	-73	666				
				Bt	130	1.484	2.410		37	73		0.000	28294	3.53E-5
				Bbs	130	-0.011	-0.017		-23	-67				
				Bt	255	0.011	0.017		23	67				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.31 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 95.9) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 130 PCA

Bbs 200 0.35 125 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.863	-2.678	0.020	-15	-85	754				
				Bt	130	0.863	2.678		15	85		0.000	4367	2.29E-4
				Bbs	130	-0.006	-0.019		3	-85				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-1.504	-2.398	0.018	-38	-72	657				
				Bt	130	1.504	2.398		38	72		0.000	30676	3.26E-5
				Bbs	130	-0.011	-0.017		-24	-67				
				Bt	255	0.011	0.017		24	67				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.32 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 100) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามขวาง)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint  mm; centre  mm

Number of loads.....

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal).....  x  mm?

Flexural strength.....  MPa;

Max. temp. gradient (dT).....  °C/mm

Model **Double Slab** R  %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc

Bbs

Sg k  N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X  mm

Y  mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.146	-1.605	0.021	3	-53	775				
				Bt	260	0.146	1.605		-3	53		0.000	>>	0
				Bbs	260	0.000	-0.005		6	-22				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.406	-1.072	0.010	-8	-34	369				
				Bt	260	0.406	1.072		8	34		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		0	-13				
				Bt	361	0.001	0.003		0	13				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.33 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 0) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Dwn Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 25.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.191	-1.329	0.017	0	-43	622				
				Bt	260	0.191	1.329		0	43		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.004		4	-18				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.531	-1.016	0.009	-13	-31	326				
				Bt	260	0.531	1.016		13	31		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.002	-0.003		-3	-12				
				Bt	361	0.002	0.003		3	12				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.34 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 25) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project: TON02 Description: roadA Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Dwn Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal): 3500 x 10000 mm?

Flexural strength: 4.00 MPa

Max. temp. gradient (dT): 0 °C/mm

Model: Double Slab R: 40.0 %

E (Mpa) v [-] H (mm) Fr [%]

Cc: 30000 0.15 260 PCA

Bbs: 200 0.35 101 None

Sg k: 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X: 0.0 mm Y: 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.210	-1.211	0.015	-1	-39	556				
				Bt	260	0.210	1.211		1	39		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		3	-16				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.585	-0.992	0.008	-15	-30	308				
				Bt	260	0.585	0.992		15	30		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-3	-11				
				Bt	361	0.002	0.003		3	11				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.35 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 40) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT) ..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 26.3 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage		
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor		
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.193	-1.320	0.017	0	-43	617					
				Bt	260	0.193	1.320		0	43		0.000	>>	0	
				Bbs	260	-0.001	-0.004		4	-18					
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	0.001	0.004		-4	18						
				Bt	260	-0.535	-1.015	0.009	-13	-31	325				
				Bbs	260	0.535	1.015		13	31		0.000	>>	0	
		Bbs	Tp	260	-0.002	-0.003		-3	-12						
				Bt	361	0.002	0.003		3	12					

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.36 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 26.3) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 42.1 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.213	-1.197	0.015	-1	-39	549				
				Bt	260	0.213	1.197		1	39		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		3	-16				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.591	-0.990	0.008	-15	-30	306				
				Bt	260	0.591	0.990		15	30		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-4	-11				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.37 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 42.1) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal): 3500 x 10000 mm?

Flexural strength: 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT): 0 °C/mm

Model: Double Slab R 50.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc: 30000 0.15 260 PCA

Bbs: 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.221	-1.145	0.014	-2	-37	520				
				Bt	260	0.221	1.145		2	37		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		3	-15				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.615	-0.979	0.008	-16	-30	298				
				Bt	260	0.615	0.979		16	30		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-4	-11				

1 Input help diagram / 2 Back calculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.38 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 50) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Down Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 66.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.236	-1.051	0.013	-3	-34	468				
				Bt	260	0.236	1.051		3	34		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-14				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.657	-0.960	0.008	-17	-29	283				
				Bt	260	0.657	0.960		17	29		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.002	-0.003		-5	-11				
				Bt	361	0.002	0.003		5	11				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.39 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 66.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 52.6 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.224	-1.127	0.014	-2	-36	510				
				Bt	260	0.224	1.127		2	36		0.000	>>	0
				Bbs	361	0.001	0.003		2	-15				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.623	-0.975	0.008	-16	-29	295				
				Bt	260	0.623	0.975		16	29		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-4	-11				
				Bt	361	0.002	0.003		4	11				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.40 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 52.6) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 70.1 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.239	-1.037	0.012	-3	-33	460				
				Bt	260	0.239	1.037		3	33		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		2	-14				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.664	-0.957	0.008	-17	-29	281				
				Bt	260	0.664	0.957		17	29		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-5	-10				
				Bt	361	0.002	0.003		5	10				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.41 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 70.1) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Dwn Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 75.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.243	-1.014	0.012	-3	-33	447				
				Bt	260	0.243	1.014		3	33		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-13				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.674	-0.952	0.008	-18	-28	277				
				Bt	260	0.674	0.952		18	28		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.002	-0.003		-5	-10				
				Bt	361	0.002	0.003		5	10				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.42 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 75) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 85.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.250	-0.967	0.011	-4	-31	421				
				Bt	260	0.250	0.967		4	31		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		1	-13				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.695	-0.943	0.007	-18	-28	270				
				Bt	260	0.695	0.943		18	28		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-5	-10				
				Bt	361	0.002	0.003		5	10				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.43 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 85.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 78.9 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.245	-0.996	0.012	-3	-32	437				
				Bt	260	0.245	0.996		3	32		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		1	-13				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.682	-0.949	0.007	-18	-28	275				
				Bt	260	0.682	0.949		18	28		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-5	-10				
				Bt	361	0.002	0.003		5	10				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.44 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 78.9) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 90.2 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.253	-0.951	0.011	-4	-30	413				
				Bt	260	0.253	0.951		4	30		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		1	-12				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.702	-0.940	0.007	-19	-28	268				
				Bt	260	0.702	0.940		19	28		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-5	-10				
				Bt	361	0.002	0.003		5	10				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.45 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 90.2) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 0 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	1300	0.70	187.2	187.2
3	-350	0	0.70	187.2	187.2
4	-350	1300	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 3500 x 10000 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.259	-0.915	0.011	-4	-29	392				
				Bt	260	0.259	0.915		4	29		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		1	-12				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.719	-0.932	0.007	-19	-27	262				
				Bt	260	0.719	0.932		19	27		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.002	-0.003		-6	-10				
				Bt	361	0.002	0.003		6	10				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.46 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง SN (LTE ร้อยละ 100) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal): 10000 x 3500 mm?

Flexural strength: 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT): 0 ?C/mm

Model: Double Slab R: 0.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc: 30000 0.15 260 PCA

Bbs: 200 0.35 101 None

Sg k: 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X: 0.0 mm

Y: 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.145	-1.873	0.019	5	-62	693			
			Bt	260	0.145	1.873		-5	62		0.000	>>	0
			Bbs	260	0.000	-0.005		7	-26				
			Bt	361	0.000	0.005		-7	26				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.162	-1.237	0.017	1	-40	635			
			Bt	260	0.162	1.237		-1	40		0.000	>>	0
			Bbs	260	0.000	-0.004		4	-17				
			Bt	361	0.000	0.004		-4	17				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.47 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 0) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project: TON02 Description: roadA Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads: 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal): 10000 x 3500 mm?

Flexural strength: 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT): 0 °C/mm

Model: Double Slab R: 25.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc: 30000 0.15 260 PCA

Bbs: 200 0.35 101 None

Sg k: 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X: 0.0 mm Y: 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.186	-1.535	0.015	1	-50	558			
			Bt	260	0.186	1.535		-1	50		0.000	>>	0
			Bbs	260	-0.001	-0.004		5	-21				
			Bt	361	0.001	0.004		-5	21				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.274	-1.088	0.014	-4	-35	516			
			Bt	260	0.274	1.088		4	35		0.000	>>	0
			Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-14				
			Bt	361	0.001	0.003		-2	14				

1 Input help diagram / 2 Back calculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.48 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 25) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 40.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.204	-1.389	0.014	0	-45	500				
				Bt	260	0.204	1.389		0	45		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.004		4	-19				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.322	-1.024	0.013	-6	-33	465				
				Bt	260	0.322	1.024		6	33		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		1	-13				
				Bt	361	0.001	0.003		-1	13				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.49 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 40) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA**  Rigid  Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint  mm; centre  mm

Number of loads.....

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal).....  x  mm?

Flexural strength.....  MPa;

Max. temp. gradient (dI).....  °C/mm

Model **Double Slab** R  %

E [Mpa]  v [-]  H [mm]  PCA

Bbs    None

Sg k  N/mm?

Copy  Input

**COMP. COORD.**

Slab  Load

X  mm

Y  mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.187	-1.524	0.015	1	-50	553				
				Bt	260	0.187	1.524		-1	50		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.004		5	-21				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.277	-1.083	0.014	-4	-35	512				
				Bt	260	0.277	1.083		4	35		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		1	-14				
				Bt	361	0.001	0.003		-1	14				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.50 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 26.3) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 42.1 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.206	-1.372	0.013	0	-45	493				
				Bt	260	0.206	1.372		0	45		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.004		4	-19				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.327	-1.017	0.012	-6	-32	459				
				Bt	260	0.327	1.017		6	32		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		0	-13				
				Bt	361	0.001	0.003		0	13				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.51 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 42.1) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 50.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.213	-1.309	0.013	-1	-43	467				
				Bt	260	0.213	1.309		1	43		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.004		4	-18				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.348	-0.989	0.012	-7	-31	436				
				Bt	260	0.348	0.989		7	31		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		0	-13				
				Bt	361	0.001	0.003		0	13				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.52 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 50) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**A Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads ..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 66.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.227	-1.194	0.011	-2	-39	421	0.000	>>	0
			Bt	260	0.227	1.194		2	39				
			Bbs	260	-0.001	-0.003		3	-16				
			Bt	361	0.001	0.003		-3	16				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.386	-0.938	0.011	-8	-29	396	0.000	>>	0
			Bt	260	0.386	0.938		8	29				
			Bbs	260	-0.001	-0.003		-1	-12				
			Bt	361	0.001	0.003		1	12				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.53 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 66.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 52.6 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.216	-1.287	0.012	-1	-42	458				
				Bt	260	0.216	1.287		1	42		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.004		3	-17				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.356	-0.979	0.012	-7	-31	429				
				Bt	260	0.356	0.979		7	31		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		0	-12				
				Bt	361	0.001	0.003		0	12				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.54 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 52.6) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 70.1 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.230	-1.176	0.011	-2	-38	414				
				Bt	260	0.230	1.176		2	38		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		3	-16				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.392	-0.930	0.011	-8	-29	390				
				Bt	260	0.392	0.930		8	29		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		-1	-11				
				Bt	361	0.001	0.003		1	11				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.55 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 70.1) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 75.0 %

E (Mpa) v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.233	-1.147	0.011	-2	-37	403			
			Bt	260	0.233	1.147		2	37		0.000	>>	0
			Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-15				
			Bt	361	0.001	0.003		-2	15				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.401	-0.918	0.010	-9	-29	380			
			Bt	260	0.401	0.918		9	29		0.000	>>	0
			Bbs	260	-0.001	-0.003		-1	-11				
			Bt	361	0.001	0.003		1	11				

1 Input help diagram 2 Backcalculation 3 Fleet composition 4 Stress calculation

รูปที่ ก.56 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 75) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength ..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dI) ..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 85.7 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.240	-1.090	0.010	-3	-35	380				
				Bt	260	0.240	1.090		3	35		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-15				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.420	-0.893	0.010	-10	-28	360				
				Bt	260	0.420	0.893		10	28		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		-2	-11				
				Bt	361	0.001	0.003		2	11				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.57 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 85.7) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)



**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 78.9 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.236	-1.126	0.011	-2	-36	394				
				Bt	260	0.236	1.126		2	36		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-15				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.409	-0.908	0.010	-9	-28	372				
				Bt	260	0.409	0.908		9	28		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		-1	-11				
				Bt	361	0.001	0.003		1	11				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.58 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 78.9) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane Own Airplane Lcn Fwd Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 °C/mm

Model Double Slab R 90.2 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nf	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.242	-1.071	0.010	-3	-34	372				
				Bt	260	0.242	1.071		3	34		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		2	-14				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.427	-0.884	0.010	-10	-27	353				
				Bt	260	0.427	0.884		10	27		0.000	>>	0
				Bbs	260	-0.001	-0.003		-2	-11				
				Bt	361	0.001	0.003		2	11				

1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.59 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 90.2) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

**Pavers version 2.80**

File View Fatigue Slab Excel Window Tools Help

Project **TON02** Description **roadA** Rigid Flexible

**OPTIONS**

Airplane | Own Airplane | Lcn | Fwd | Own Load

Distances FROM: joint 0 mm; centre 1090 mm

Number of loads..... 4

No	X	Y	p	2a	2b
	mm	mm	MPa	mm	mm
1	0	0	0.70	187.2	187.2
2	0	350	0.70	187.2	187.2
3	-1300	0	0.70	187.2	187.2
4	-1300	350	0.70	187.2	187.2

**SLAB**

Length (longitudinal) \* Width (transversal)..... 10000 x 3500 mm?

Flexural strength..... 4.00 MPa;

Max. temp. gradient (dT)..... 0 ?C/mm

Model Double Slab R 100.0 %

E [Mpa] v [-] H [mm] Fr [%]

Cc 30000 0.15 260 PCA

Bbs 200 0.35 101 None

Sg k 0.0271 N/mm?

Copy Input

**COMP. COORD.**

Slab Load

X 0.0 mm

Y 0.0 mm

Joint	Xpos	Lr	Pos	Depth	Sx	Sy	Sz	ex	ey	w	St,max	Nr	Damage	
	mm			mm	MPa	MPa	MPa	mm/m	mm/m	mm	MPa	Repetitions	Factor	
Transversal	0.0	Cc	Tp	0	-0.248	-1.026	0.010	-3	-33	354				
				Bt	260	0.248	1.026		3	33		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.003		2	-14				
Longitudinal	0.0	Cc	Tp	0	-0.441	-0.864	0.009	-10	-27	337				
				Bt	260	0.441	0.864		10	27		0.000	>>	0
				Bbs	361	-0.001	-0.002		-2	-10				
				Bt	361	0.001	0.002		2	10				

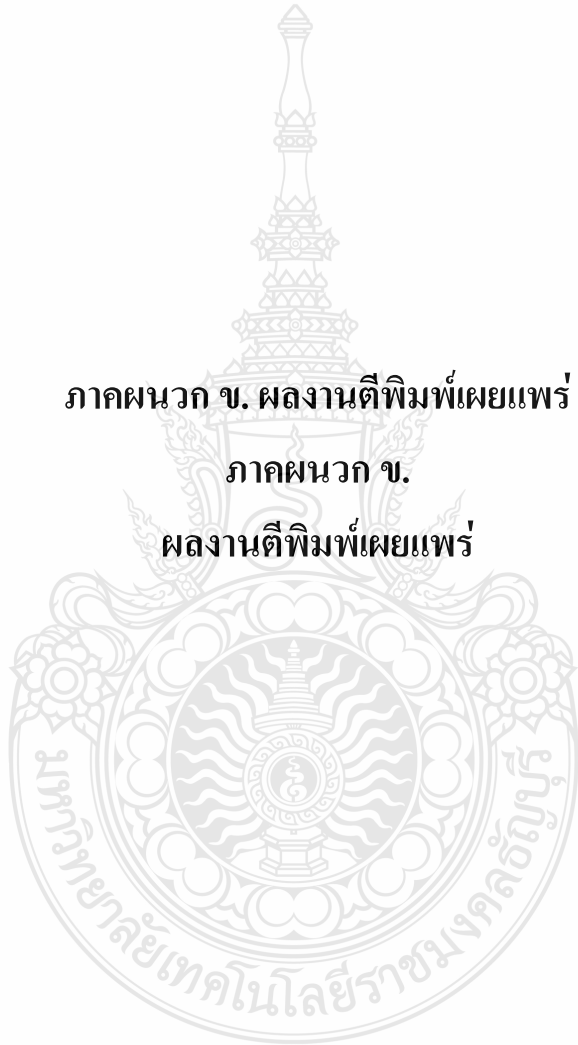
1 Input help diagram / 2 Backcalculation / 3 Fleet composition / 4 Stress calculation

รูปที่ ก.60 ผลการคำนวณหน่วยแรงเค้นของสายทาง PT (LTE ร้อยละ 100) ด้วยโปรแกรม PAVERS (รอยต่อตามยาว)

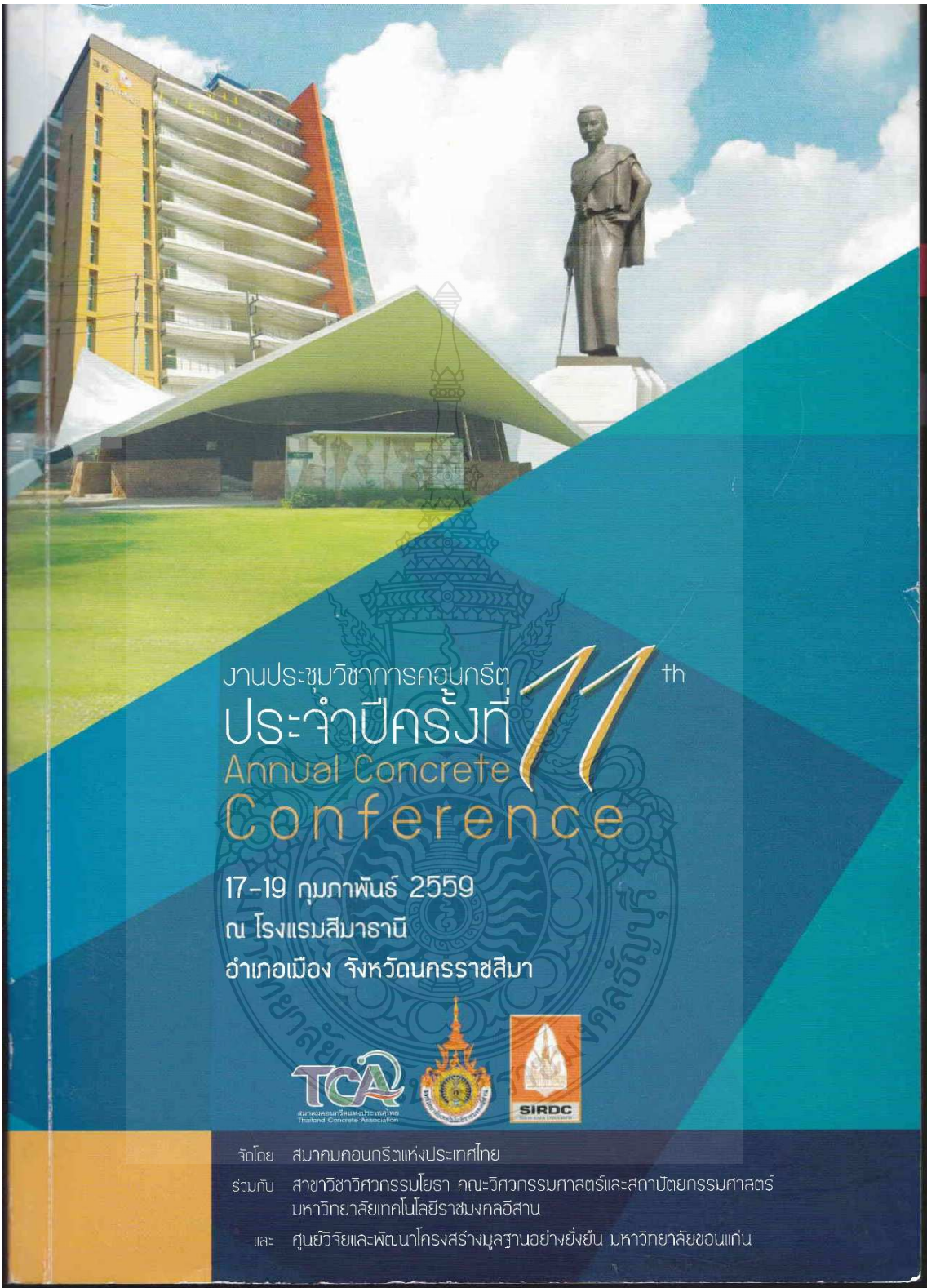
ภาคผนวก ข. ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ภาคผนวก ข.

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่







งานประชุมวิชาการคอนกรีต  
ประจำปีครั้งที่ 11<sup>th</sup>  
Annual Concrete  
Conference

17-19 กุมภาพันธ์ 2559  
ณ โรงแรมสีมารानी  
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา



จัดโดย สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย  
ร่วมกับ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
และ ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11 (ต่อ)

ผศ.ดร.รักติพงษ์	สหมิตรมงคล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.พุทธพล	ทองอินทร์ดำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ปิตุสานต์	กร้ามาตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ประวีณ	ชมปรีดา	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ปณัสชัย	เชษฐโชติศักดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์	สินสิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผศ.ดร.ธัชวีร์	ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.ทวีชัย	สำราญวานิช	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ณัฐพงศ์	มกระธัช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ชูชัย	สุจิรวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์	แก้วกุลชัย	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.กิตติภูมิ	รอดสิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
น.รศ.ดร.ธนากร	พีระพันธ์ุ	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
ดร.อุบลลักษณ์	รัตนศักดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
ดร.อภิชาติ	คำภาหล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.สนธยา	ทองอรุณศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา(ตาก)
ดร.สกลวรรณ	ห่านจิตสุวรรณ	มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง
ดร.วีระศักดิ์	ละอองจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วันโชค	เครือหงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตอุเทนถวาย
ดร.วรางคณา	แสงสร้อย	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.รัฐภูมิ	ปรีชาตปรีชา	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.รัฐพล	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

คณะกรรมการผู้พิจารณาบทความ การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11 (ต่อ)

ดร.ยูวดี	แช่ตั้ง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติจังหวัดสกลนคร
ดร.มงคล	นามลักษณ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ดร.ภาณุวัฒน์	จ้อยกลัด	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ดร.ภักดิ์วัฒน์	แสนเจริญ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.พัชรพล	โพธิ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.พงศกร	พวงชมพู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ปานเทพ	จุนิพิฐวงษ์	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.นันทวัฒน์	ชมหวาน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ดร.นันทชัย	ชูศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.ธนากร	ภูเงินขำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.ณัฐวัฒน์	จุกวาร์ตน์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ดร.เชิดศักดิ์	สุขศิริพัฒน์พงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เฉลิมชัย	วาณิชย์ล้ำเลิศ	ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษา (CONTEC)
ดร.เจริญชัย	ฤทธิรุทธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.จิระยุทธ	สืบสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ดร.จักษดา	ธำรงวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.จักรพันธ์ุ์	วงษ์พา	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.จตุพล	ตั้งปกาศิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.คำภี	จิตชัยภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
ดร.เกียรติสุตา	สมนา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน



วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2559	
16.40-17.55 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 1)
ประธานภาค : ผศ.ดร.ณัฐพงศ์ มกระธัช	
รองประธานภาค : ดร.ธนากร ภูเงินขำ	
16.40-16.55 น.	ENV-002 โฟมจีโอโพลีเมอร์จากเถ้าลอย ประสิทธิ์ ศรีภริรมย์, คำภี จิตชัยภูมิ
16.55-17.10 น.	MAT-031 ผลของการบ่มต่อกำลังของจีโอโพลีเมอร์มวลเบา คำภี จิตชัยภูมิ
17.10-17.25 น.	MAT-012 กำลังรับแรงอัดและโมดูลัสยืดหยุ่นของจีโอโพลีเมอร์คอนกรีตที่แข็งตัวเร็ว ธนากร ภูเงินขำ, ดารกร อินทรบุตร, ราชศักดิ์ จิรัมย์, ปรีชญไชย ญาตนิยม, ณัฐพงศ์ คำรัง วิริยะนุภาพ
17.25-17.40 น.	MAT-030 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ผสมเศษแก้ว สังสรรค์ วงศ์ไชยรัตน์, จักรพันธ์ ภาวิละ, ณัฐพงศ์ คำรังวิริยะนุภาพ, ธนากร ภูเงินขำ, สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ์, ปรีชญญา จินดาประเสริฐ
17.40-17.55 น.	MAT-047 Properties of concrete using bottom ash as a partial fine aggregate replacement material Pakawat Sancharoen, Auttapon Promsaeng, Noulanh Lathsoulin, Pitisan Krammart, Sontaya Tongaroonsri, Somnuk Tangtermsirikul

16.40-17.55 น.	การนำเสนอบทความวิจัย (ห้อง SIMA 2)
ประธานภาค : ผศ.ดร.ทวิชัย สี่ราญวานิช	
รองประธานภาค : ดร.จักษดา อ่างรุ่งวุฒิ	
16.40-16.55 น.	STR-001 การหาค่าสัมประสิทธิ์โมเมนต์สำหรับพื้นไร้คานชนิดมีแป้นหัวเสา พงศธร บุพลับ, อาทิตย์ เพชรศศิธร
16.55-17.10 น.	STR-003 การศึกษาโดยการทดสอบเสาต่อเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสรอกคอนกรีต กำลังสูง ธนพล สว่างงาม, จักษดา อ่างรุ่งวุฒิ
17.10-17.25 น.	STR-004 การจำลองพฤติกรรมการรับแรงอัดในแนวแกนของเสาคอนกรีตที่ถูกโอบรัด บางส่วนด้วยแถบเมทัลลิก ศิระพล ทัศนิจการวัฒน์กุล, เมธี บุญพิเชษฐวงศ์, อัญญา พรพรรณชัย
17.25-17.40 น.	STR-005 การทดสอบเสาต่อเหล็กหน้าตัดกลมรอกคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์คู่ ภายใต้แรงกดอัดในแนวแกน สิทธิศักดิ์ หวังรักกลาง, จักษดา อ่างรุ่งวุฒิ
17.40-17.55 น.	STR-006 การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นจากความลาดชันอุณหภูมิในถนนประเภท JRCP ในประเทศไทยด้วยวิธี Eisenmann กฤษฎี เมื่อนันท, พุทธิพล ทองอินทร์ดา



บทความวิจัย

REP

สาขานำรุงรักษา  
ซ่อมแซม  
และเสริมกำลังคอนกรีต



งานประชุมวิชาการคอนกรีต  
ประจำปีครั้งที่ 11<sup>th</sup>  
Annual Concrete  
Conference

ผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นในผิวทางคอนกรีต  
Effect of the Load Transfer Efficiency Models on the Stresses Analysis in Concrete Pavement

วรุฒิ สุวรรณมงคล (Worawoot Suwanmpngkon)<sup>1</sup>

พุทพอล ทองอินทร์คำ (Puttapon Thongindam)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษานิเทศศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[suwanmongkon.w@gmail.com](mailto:suwanmongkon.w@gmail.com)

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[puttapon.t@en.rmutt.ac.th](mailto:puttapon.t@en.rmutt.ac.th)

**บทคัดย่อ:**งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของแบบจำลองประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (LTE) ที่แตกต่างกันของแต่ละหน่วยงานในระดับสากล อาทิ AASHTO, FHWA, ACPA, FAA และ Dynatest ต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นคดในผิวทางคอนกรีต ทำการแบ่งแบบจำลอง LTE ออกเป็น 4 กลุ่มหลักจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกสปีด 25 ตันกระทำที่รอยต่อถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย นำเข้าความหนาแน่นทางของถนนคอนกรีตจากการเจาะสำรวจด้วยเครื่องมือ Bore Scope วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นคดที่รอยต่อตามขวางของแผ่นพื้นที่รับน้ำหนักร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ PAVERS ซึ่งพัฒนาขึ้นตามหลักทฤษฎีพื้นฐานของเวสเตอร์การ์ด ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลอง LTE กลุ่มที่ 1 ซึ่งใช้อัตราส่วนการแอ่นตัวระหว่างแผ่นพื้นที่ไม่ได้รับน้ำหนักต่อแผ่นพื้นที่รับน้ำหนัก คำนวณค่าหน่วยแรงเค้นคดได้มากที่สุด ขณะที่แบบจำลอง LTE กลุ่มที่ 3 และ 4 ซึ่งนำผลทดสอบการแอ่นตัวที่กลางแผ่นมาปรับแก้ส่งผลต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นคดอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ผลกระทบของแบบจำลอง LTE ทุกกลุ่มต่อการคำนวณหน่วยแรงเค้นคดจะมีค่ามากขึ้นเมื่อชั้นทางคอนกรีตมีความหนาน้อยลง

**คำสำคัญ:**ผิวทางแบบแกร่ง, ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก, แรงเค้นคด

**ABSTRACT:** This paper investigates the effect of several international standards of the Load Transfer Efficiency (LTE) model such as AASHTO, FHWA, ACPA, FAA and Dynatest, on the flexural stress analysis in rigid pavement. The LTE models are divided into 4 types. A jointed concrete pavement loaded by a Thai 10-wheel-truck (25 tons) was simulated. The thickness values of in-service concrete roads was determined by Bore scope equipment. The flexural stress at a transverse joint of the loaded slab with different LTE models were analyzed using computer program PAVERS, which is based on Westergaard's theory. The results show that the highest flexural stress is obtained from LTE model type 1 which is calculated by the deflection ratio between unloaded to loaded slabs. It has been found that the type 3 and 4, which was corrected by mid slab deflection testing, could have a significant effect on the flexural stress analysis. Furthermore, the impact of all LTE models on the flexural stress is inversely proportional to the thickness of the concrete slab.

**KEYWORDS:** rigid pavement, Load Transfer Efficiency, flexural stress

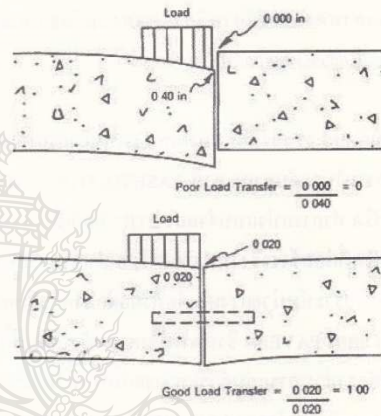


## 1. บทนำ

ถนนคอนกรีตหรือผิวทางคอนกรีต (Portland Cement Concrete pavement, PCC pavement) เป็นโครงสร้างทางที่มีความแข็งแรงสูงมักถูกออกแบบให้รองรับน้ำหนักบรรทุกได้มากและมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยทั่วไปประเทศไทยจะออกแบบให้ผิวทางคอนกรีตมีรอยต่อเพื่อลดหน่วยแรงและความเสียหายอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างไรก็ตามจากความไม่ต่อเนื่องทำให้รอยต่อเหล่านี้เป็นจุดอ่อนและเป็นตำแหน่งที่เกิดความเสียหายมากที่สุด [1, 2] เช่น รอยร้าว (cracking) รอยแตก (breaking) การเกิดโพรงใต้แผ่นพื้น (void) รวมไปถึงความเสียหายที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าอย่างเช่น การสูญเสียประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักที่รอยต่อ (Load Transfer Efficiency, LTE) ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อเนื่องจนกระทั่งทำให้ผิวทางคอนกรีตมีอายุการใช้งานที่สั้นลง ดังนั้นการทดสอบ LTE จึงเป็นหนึ่งในหัวข้อสำคัญในการประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต [1] ร่วมกับการตรวจสอบกำลังรับน้ำหนัก (capacity) และการตรวจสอบโพรงใต้แผ่นพื้น (void detection)

ในปัจจุบันมีหลายหน่วยงานด้านงานถนนและอากาศยานในระดับสากล อาทิ American Association of State Highway Officials (AASHTO), Federal Highway Administration (FHWA), American Concrete Pavement Association (ACPA), Federal Aviation Administration (FAA) และ Dynates เป็นต้น ได้จัดตั้งข้อกำหนดข้อแนะนำ การทดสอบและแบบจำลองในการวิเคราะห์ LTE เพื่อใช้ในการประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต ซึ่งแต่ละหน่วยงานดังกล่าวต่างก็มีรายละเอียดของ LTE ที่แตกต่างกันซึ่งอาจส่งผลให้การวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นหรือการนำไปประยุกต์ใช้ต่อเนื่องถึงการประเมินความแข็งแรงอายุการใช้งานที่เหลืออยู่มีความแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึง

มุ่งเน้นที่การศึกษา วิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงเค้นดัด (flexural stress) ที่อาจเกิดขึ้นในผิวทางคอนกรีตจากแต่ละแบบจำลอง LTE โดยจำลองน้ำหนักรถลิบล้อ 25 ตัน กระทำที่รอยต่อของถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทยผลการศึกษาที่ได้จะเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกใช้งานแบบจำลอง LTE ให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 1 ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนักที่ไม่ดีและดี [3]

## 2. วัตถุประสงค์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

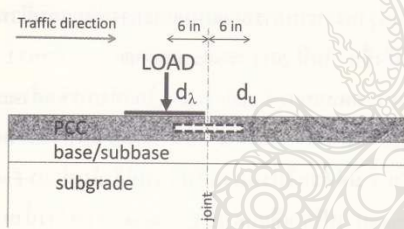
### 2.1 ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (LTE)

สำหรับรอยต่อของผิวทางคอนกรีตต้องออกแบบให้มีกลไกในการถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นคอนกรีต เช่น ใช้อุปกรณ์ทางกลอย่างเหล็กเดือย (dowel) การขัดเหลี่ยมประสานของวัสดุมวลรวม (interlocking) และการถ่ายน้ำหนักผ่านฐานรองรับที่เป็นพื้นทางเสริมความแข็งแรง [1] โดยหลักการแล้วหากรอยต่อมี LTE ที่ดี จะส่งผลให้หน่วยแรงเค้นและการแอ่นตัว (deflection) ที่เกิดขึ้นในแผ่นคอนกรีตลดลงเมื่อน้ำหนักกระทำที่รอยต่อ ค่าการแอ่นตัวของสองแผ่นที่อยู่ติดกันควรจะมีค่าการแอ่นตัวที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน ไปด้วยในทางกลับกันหากแผ่นมี LTE ที่ไม่ดี แผ่นที่ถูกน้ำหนักกระทำ (loaded slab) จะมีค่าการแอ่นตัวมากกว่าแผ่นพื้นที่ไม่ได้รับน้ำหนักกระทำ

(unloaded slab) [3] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งในการทดสอบ LTE นิยมใช้เครื่องมือทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT) ที่สามารถจำลองน้ำหนักของยานพาหนะและวัดค่าการแอ่นตัวได้ เช่น เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) [3, 4]

2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์ LTE

จากการทดสอบด้วยเครื่องมือ NDT ดังรูปที่ 2 นำค่าการแอ่นตัวที่ได้มาใช้ในการวิเคราะห์ LTE ซึ่งมีแบบจำลอง LTE 2 รูปแบบที่นิยมใช้มากที่สุด [5] รูปแบบที่ 1 ใช้อัตราส่วนระหว่างแผ่นที่ไม่ได้รับน้ำหนักต่อแผ่นที่รับน้ำหนักแสดงคังสมการที่ (1) และรูปแบบที่ 2 ใช้อัตราส่วนของแผ่นที่ไม่ได้รับน้ำหนักต่อค่าเฉลี่ยการแอ่นตัวระหว่างรอยต่อทั้งสองแผ่นซึ่งทั้ง 2 รูปแบบมีความสัมพันธ์แสดงคังสมการที่ (2) [5]

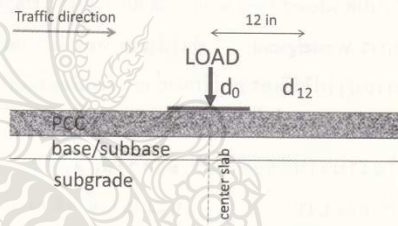


รูปที่ 2 การทดสอบ LTE ที่รอยต่อแผ่น

แต่ละหน่วยงานด้านงานผิวทางในระดับสากลต่างเลือกใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ LTE ตามความเหมาะสม หน่วยงานด้านถนน AASHTO และหน่วยงานด้านผิวทางอากาศยาน FAA เลือกใช้ LTE<sub>1</sub> [3], [4] ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางคอนกรีต ทั้งนี้หน่วยงานด้านถนนเช่นเดียวกันอย่าง FHWA และหน่วยงานเฉพาะทางด้านผิวทางคอนกรีต ACPA ให้เลือกใช้ LTE ได้ทั้ง 2 แบบจำลอง [5], [6]

การวิเคราะห์ค่า LTE เพื่อใช้ในการซ่อมแซมถนนคอนกรีตของ AASHTO แนะนำให้ใช้แบบจำลอง LTE<sub>3</sub> ซึ่งต้องนำผลทดสอบการแอ่นตัวที่กลางแผ่นดังรูปที่ 3

มาวิเคราะห์ร่วมด้วย [3] ทั้งนี้แผ่นคอนกรีตที่มีรัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (radius of relative stiffness, I) แสดงคังสมการที่ (10) สูงจะต้านทานการคัคได้ดี มีการแอ่นตัวน้อย และมีค่าปรับแก้ที่น้อยกว่าแผ่นคอนกรีตที่มีค่า I ต่ำ [5] ยังมีอีกหลายปัจจัยที่ทำให้แผ่นคอนกรีตเกิดการคัคและส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ LTE เช่น ความโค้งหรือโค้งงอขึ้นเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้นและค่าความคลาดเคลื่อนของความหนาชั้นทาง เป็นต้น จากพฤติกรรมดังกล่าว Dynatest หน่วยงานเอกชนด้านงานทางซึ่งเป็นผู้พัฒนา จำหน่ายเครื่องมือ และแนะนำหลักการทดสอบผิวทาง [7] จึงได้แนะนำให้ใช้แบบจำลอง LTE<sub>3</sub> และ LTE<sub>4</sub> ซึ่งต้องนำการทดสอบที่กลางแผ่นมาร่วมในการประเมินความแข็งแรงของผิวทางคอนกรีต [8]



รูปที่ 3 การทดสอบการแอ่นตัวที่กลางแผ่น

$$LTE_1 = 100 \times \left( \frac{d_u}{d_l} \right) \tag{1}$$

$$LTE_2 = 100 \times \left[ \frac{2d_u}{d_u + d_l} \right] = 200 \times \left[ 1 - \frac{1}{1 + (LTE_1/100)} \right] \tag{2}$$

$$LTE_3 = 100 \times \left( \frac{d_u}{d_l} \right) \times B \tag{3}$$

$$LTE_4 = 100 \times \left[ \frac{2d_u}{d_u + d_l} \right] \times B \tag{4}$$

$$B = \left( \frac{d_0}{d_{12}} \right) \tag{5}$$

LTE = ประสิทธิภาพการถ่ายน้ำหนัก (%)

d<sub>u</sub> = การแอ่นตัวของแผ่นที่ไม่ได้รับน้ำหนัก



- $d_f$  = การแอนตัวของแผ่นที่รับน้ำหนัก
- $B$  = ค่าปรับแก้การคดของแผ่นพื้น
- $d_0$  = การแอนตัวที่กลางแผ่น
- $d_{12}$  = การแอนตัวถัดจากกลางแผ่น 12 นิ้ว

2.3 หน่วยแรงเส้นคดที่รอยต่อแผ่นคอนกรีต

ในปี 1923 Westergaard ได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว ซึ่งสมการนี้แม้จะยังไม่สมบูรณ์แต่ก็ถูกยกให้เป็นสมการพื้นฐานของการวิเคราะห์ผิวทางคอนกรีต และมีนักวิจัยอีกหลายท่านพัฒนาสมการนี้ให้มีความแม่นยำมากขึ้นตั้งแต่อดีตเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน [9], [10] Van Cauwelaert [11] กำหนดให้รอยต่อถ่ายแรงด้วยแรงเฉือนเท่านั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ที่ร่วมกับหลักการของ Westergaard แสดงดังสมการที่ (6)–(10) หาคำตอบของหน่วยแรงเส้นคดร่วมกับ LTE ด้วยผลเฉลยรูปแบบปิด (closed form solution) ด้วยความเรียบง่ายของหลักการ Westergaard ทำให้หาคำตอบได้รวดเร็วสามารถนำไปใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางที่มีจุดทดสอบปริมาณมากได้ดียิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาความแตกต่างของแบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบดังกล่าวข้างต้นต่อและอิทธิพลที่มีต่อหน่วยแรงเส้นคดที่เกิดขึ้นที่รอยต่อผิวทางคอนกรีต

$$\sigma_f = \sigma_u + \sigma_l \tag{6}$$

$$\sigma_f = \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4\mu}{3} \right] \tag{7}$$

$$\sigma_l = \frac{1}{1+LTE} \cdot \frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4\mu}{3} \right] \tag{8}$$

$$\gamma = \frac{2LTE}{1+LTE} \tag{9}$$

$$l = \left[ \frac{Eh^3}{12(1-\mu)k} \right]^{1/4} \tag{10}$$

- $l$  = ค่ารัศมีความแกร่งสัมพัทธ์ (in)
- $E$  = โมดูลัสดิกโมดูลัสคอนกรีต (psi)
- $h$  = ความหนาชั้นทางคอนกรีต (in)

- $k$  = โมดูลัสปฏิกิริยาของดิน (pci)
- $\mu$  = อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีต
- $\sigma_f$  = หน่วยแรงเส้นคดที่ขอบแผ่นพื้นปลายอิสระ
- $\sigma_u$  = หน่วยแรงเส้นคดที่รอยต่อฝั่งไม่ได้รับน้ำหนัก
- $\sigma_l$  = หน่วยแรงเส้นคดที่รอยต่อฝั่งรับน้ำหนัก
- $\gamma$  = transferred shear factor

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 2003 Khazanovich และ Gotlif [5] ศึกษา LTE ในโปรแกรม Long-Term Pavement Performance (LTPP) ทดสอบด้วยเครื่องมือ FWD วิเคราะห์ผลทดสอบด้วยแบบจำลอง LTE และ LTE<sub>2</sub> พบว่า LTE มีส่วนสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของผิวทางคอนกรีต อีกทั้งยังเป็นตัวแปรที่มีความซับซ้อนจากหลากหลายองค์ประกอบและยังต้องการข้อมูลอีกมากที่จะช่วยปรับปรุงกระบวนการออกแบบและการซ่อมแซมผิวทางให้ดียิ่งขึ้น ในปี 2011 Wadkar และคณะ [2] ศึกษา LTE จากการทำทดสอบแบบ full-scale โดยทำการติดตั้ง strain gauge ในทางขับของสนามบิน วิเคราะห์หน่วยแรงเส้นคดแบบ 2 มิติด้วยโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์ (2D-Finite Element) เปรียบเทียบค่า LTE (stress) ระหว่างน้ำหนักเครื่องบินแบบสถิตย์กับน้ำหนักเครื่องบินขณะเคลื่อนที่ พบว่า LTE (stress) แบบสถิตย์มีค่าเฉลี่ยน้อยกว่าถึง 38% สำหรับงานวิจัยด้านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ปี 2005 Lui และ Fwa [12] ศึกษาผลกระทบของ LTE กับการตอบสนองของผิวทางคอนกรีต (concrete pavement response) ด้วยโปรแกรม NUS ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ทำคำตอบด้วยผลเฉลยรูปแบบปิด ใช้แบบจำลอง 3 แผ่นพื้น (3-slab model) วางบนฐานราก Pasternak พิจารณา LTE ร่วมกับการวิเคราะห์หน่วยแรงเส้นคด พบว่าการไม่นำ LTE มาใช้ในการวิเคราะห์ส่งผลให้ได้หน่วยแรงเส้นคดที่รอยต่อแผ่นคอนกรีตมากขึ้น

ในประเทศไทยปี 2546 ชยธวัชและคณะ [1] ศึกษาถึงการประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิวบอร์คเลนส์ซีเมนต์

คอนกรีตด้วยเครื่องมือ FWD ในช่วงเดือน พ.ค. - ส.ค. พบว่าควรทดสอบสภาพความแข็งแรงของโครงสร้างถนนคอนกรีตในช่วงเวลาเช้าถึงก่อนเที่ยงเพราะเป็นช่วงเวลาที่แผ่นคอนกรีตไม่มีการโค้งงอจนส่งผลต่อการทดสอบ ค่า LTE ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นในช่วงบ่ายและลดลงในช่วงเวลากลางคืนจนถึงเช้า

2.5 โปรแกรมออกแบบและประเมินผิวทาง PAVERS

งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม PAVERS ซึ่งเป็นโปรแกรมด้านโครงสร้างผิวทางที่พัฒนาโดย Van Cauwelaert และคณะ [13] โปรแกรมดังกล่าวนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อใช้ในการออกแบบโครงสร้างถนนสนามบิน ผิวทางในงานอุตสาหกรรมหนักและใช้ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างผิวทางและเป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับจากองค์กร North Atlantic Treaty Organization (NATO) และมาตรฐานการออกแบบผิวทางของประเทศเนเธอร์แลนด์

3.วิธีการดำเนินงาน

ทำการเจาะสำรวจความหนาชั้นทางถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงและนำความหนาของชั้นทางมาวิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงเส้นค้ำที่เกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของ LTE ทั้ง 4 แบบโดยโปรแกรม PAVERS ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

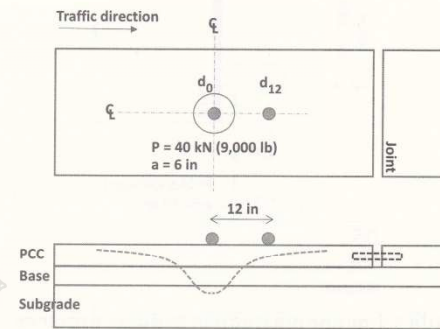
3.1 เจาะสำรวจความหนาของผิวทางคอนกรีต

ใช้เครื่องมือ Bore Scope เจาะสำรวจความหนาชั้นทางผิวทางคอนกรีตที่ก่อสร้างจริงในประเทศไทย 2 สายทาง คือ สระบุรี-หนองแค (SN) และ ปทุมธานี-ธนบุรี (PT)

3.2 จำลองการทดสอบ FWD ด้วยโปรแกรม PAVERS

งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โปรแกรม PAVERS จำลองการทดสอบ FWD ที่กลางแผ่นพื้นของถนนคอนกรีตตัวอย่าง ทั้ง 2 สายทาง โดยใช้น้ำหนัก 9,000 lb หรือ 40 kN (ครึ่งหนึ่งของน้ำหนักบรรทุกลงเพลามาตรฐาน) กระทำบนแผ่นเหล็ก (รัศมี 150 มิลลิเมตร) ตามข้อแนะนำของ AASHTO [3] แสดงดังรูปที่ 4 วัดค่าการแอ่นตัวที่

ตำแหน่ง  $d_0$  และ  $d_{12}$  เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่า  $B$  ตามสมการที่ (5)



รูปที่ 4 จำลองการทดสอบ FWD ที่กลางแผ่นพื้น

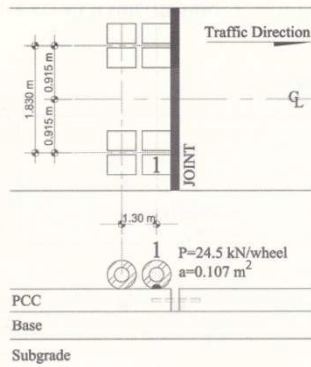
3.3 วิเคราะห์ค่า LTE ทั้ง 4 แบบจำลอง

กำหนดให้ค่า LTE เป็นแบบจำลองตั้งต้นและใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ (2) - (5) คำนวณค่า  $LTE_1$ ,  $LTE_2$  และ  $LTE_3$  วิเคราะห์ความแตกต่างของแบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบ

3.4 วิเคราะห์ผลกระทบของหน่วยแรงเส้นค้ำจาก

แบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบ

จำลองน้ำหนักบรรทุกรถ 10 ล้อ 25 ตันกระทำที่รอยต่อถนนคอนกรีต 2 สายทางตัวอย่างด้วยโปรแกรม PAVERS แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะอิทธิพลของแบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบต่อหน่วยแรงเส้นค้ำ โดยไม่พิจารณาอิทธิพลของหน่วยแรงเส้นค้ำที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้น



รูปที่ 5 จำลองเพลาลังรถสิบล้อ 25 ตันกระทำที่รอยต่อถนนคอนกรีต

#### 4. ผลการทดลอง

##### 4.1 ผลการเจาะสำรวจถนนคอนกรีต 2 สายทาง

เจาะสำรวจความหนาถนนคอนกรีต 2 สายทางแสดงดังรูปที่ 6 มีข้อมูลความหนาชั้นทางแสดงดังตารางที่ 1 โดยคอนกรีตสายทาง SN มีความหนามากกว่าสายทาง PT 1 เท่าและข้อมูลความหนาเหล่านี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ LTE และหน่วยแรงเค้นคัตต่อไป



รูปที่ 6 การเจาะสำรวจหาความหนาชั้นทางถนนคอนกรีตสายทาง SN ด้วยเครื่องมือ Bore Scope

##### 4.2 ผลจำลองการทดสอบ FWD

ใช้โปรแกรม PAVERS นำเข้าค่าความหนาของสายทางจากตารางที่ 1 กำหนดค่าอีลาสติค โมดูลัสและอัตราส่วนพัชของตามข้อเสนอแนะของ AASHTO [3] คำนวณค่าการแอ่นตัว  $d_0$  และ  $d_{12}$  แสดงผลดังตารางที่ 2 พบว่าถนน SN ซึ่งคอนกรีตมีความหนา 0.260 m คำนวณค่าการแอ่นตัวและค่า  $B$  ได้น้อยกว่าถนน PT ซึ่งคอนกรีตมีความหนา 0.130 m และค่า  $B$  ที่ได้สอดคล้องกับค่า

แนะนำของ AASHTO ซึ่งแนะนำว่าควรมีค่า ประมาณ 1.05 – 1.15 [3]

ตารางที่ 1 ตารางแสดงความหนาถนนคอนกรีตสายทาง SN และ PT

ชั้นทาง	สายทาง SN(m)	สายทาง PT(m)
Concrete	0.260	0.130
Base	0.101	0.125
Subbase	0.110	0.260

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าการแอ่นตัวที่กลางแผ่นสายทาง SN และ PT

Pavement Configuration	Pavement Configuration		
	E (MPa)	k (N/mm <sup>3</sup> )	poison ratio
concrete	30000	-	0.15
base	200	-	0.35
subbase	-	0.0271	0.40
width	3.50		m
length	10.00		m
flexural strength	4.00		MPa
load	40		kN
plate (radius)	150		mm
	$d_0$ (mm)	$d_{12}$ (mm)	$B$
SN	0.142	0.135	1.052
PT	0.394	0.352	1.119

##### 4.3 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นคัตร่วมกับแต่ละแบบจำลอง LTE

ให้ LTE เป็นแบบจำลองตั้งต้นและกำหนดให้ LTE มีค่าเท่ากับ 25%, 50% และ 75% ใช้ข้อมูลจากตารางที่ 1 และ 2 คำนวณค่า  $LTE_3$ ,  $LTE_5$  และ  $LTE_7$  วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นคัตที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรม PAVERS แสดงผลดังตารางที่ 3 และ 4



ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นค้ดจากแต่ละแบบจำลอง LTE ของถนน SN

SN	*LTE <sub>1</sub> = 25 %		*LTE <sub>1</sub> = 50 %		*LTE <sub>1</sub> = 75 %	
	LTE (%)	Flexural Stress	LTE (%)	Flexural Stress	LTE (%)	Flexural Stress
LTE <sub>1</sub>	25.0	1.535	50.0	1.309	50.0	1.147
LTE <sub>2</sub>	40.0	1.389	66.7	1.194	66.7	1.090
LTE <sub>3</sub>	26.3	1.524	52.6	1.287	52.6	1.126
LTE <sub>4</sub>	42.1	1.372	70.1	1.176	70.1	1.071
mean		1.455		1.242		1.109
Std. Dev.		0.075		0.057		0.030

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นค้ดจากแต่ละแบบจำลอง LTE ของถนน PT

PT	*LTE <sub>1</sub> = 25 %		*LTE <sub>1</sub> = 50 %		*LTE <sub>1</sub> = 75 %	
	LTE (%)	Flexural Stress	LTE (%)	Flexural Stress	LTE (%)	Flexural Stress
LTE <sub>1</sub>	25.0	3.899	50.0	3.356	75.0	2.969
LTE <sub>2</sub>	40.0	3.550	66.7	3.080	85.7	2.831
LTE <sub>3</sub>	28.0	3.823	56.0	3.252	83.9	2.855
LTE <sub>4</sub>	44.8	3.450	74.6	2.969	95.9	2.720
mean		3.681		3.164		2.844
Std. Dev.		0.186		0.150		0.088

ผลการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นค้ดในถนนทั้ง 2 สายพบว่าแบบจำลอง LTE ที่ให้ค่าสูงจะส่งผลให้วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นค้ดได้น้อยลง โดยที่แบบจำลอง LTE<sub>1</sub> ให้ค่าน้อยที่สุดและแบบจำลอง LTE<sub>4</sub> ให้ค่ามากที่สุด แบบจำลอง LTE ทั้ง 4 แบบส่งผลกระทบบต่อหน่วยแรงเค้นค้ดที่เกิดขึ้นในถนน SN บ้างเล็กน้อย โดย

ส่งผลกระทบบมากขึ้นเมื่อ LTE มีค่าต่ำสังเกตได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเมื่อกำหนดให้ LTE<sub>1</sub> เท่ากับ 25% มีค่ามากที่สุด แต่เมื่อความหนาของชั้นคอนกรีตลดลงอย่างถนน PT แบบจำลอง LTE ส่งผลกระทบบต่อการวิเคราะห์หน่วยแรงเค้นค้ดมากขึ้นและยิ่งส่งผลมากขึ้นเมื่อ LTE มีค่าน้อย โดยหน่วยแรงเค้นค้ดที่เกิดขึ้นเมื่อกำหนด LTE<sub>1</sub> เท่ากับ 25% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.186 ทั้งนี้หากพิจารณาในภาพรวมแต่ละแบบจำลอง LTE จะส่งผลกระทบบมากขึ้นเมื่อถนนคอนกรีตมีความหนาคอนกรีตลดลง

### 5.สรุปผลการทดลอง

แบบจำลอง LTE จากแต่ละหน่วยงานในระดับสากลข้างต้น ส่งผลกระทบบต่อการคำนวณหน่วยแรงเค้นค้ดที่เกิดขึ้นในถนนคอนกรีต ซึ่งแบบจำลองที่ให้ผล LTE มากจะส่งผลให้วิเคราะห์หน่วยแรงเค้นค้ดลดลง ทั้งนี้ค่า LTE ที่มากขึ้นจากการทดสอบการแอ่นตัวที่กลางแผ่นหรือค่า B โดยแบบจำลอง LTE จะส่งผลกระทบบมากขึ้นเมื่อชั้นทางคอนกรีตมีความหนาน้อยลง ดังนั้นในการเลือกใช้แบบจำลอง LTE วิเคราะห์หรือประเมินความแข็งแรงของถนนคอนกรีตที่มีความหนาของชั้นคอนกรีตน้อย จึงควรนำผลการทดสอบอื่นๆ เช่น การประเมินความเสียหายของรอยต่อด้วยสายตา การทดสอบโพรงใต้แผ่นพื้น หรือข้อมูลเกี่ยวกับการซ่อมแซมถนนคอนกรีตประกอบการพิจารณาหน่วยแรงเค้นค้ด งานวิจัยนี้ใช้การจำลองการทดสอบ FWD ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์หาค่าการแอ่นตัวที่กลางแผ่นแทนการทดสอบจริง จึงควรมีการศึกษาต่อเพื่อนำค่าหน่วยแรงเค้นค้ดไปใช้ในการคำนวณความล้าที่เกิดขึ้นหรืออายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของถนนคอนกรีตเพื่อให้ได้แนวทางในการเลือกใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์ LTE ได้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

### 6.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท เอเชีย เทคตั้ง อีคิวบีเม้นท์ จำกัด ที่เอื้อเพื่อข้อมูลผลการเจาะสำรวจภาคสนามด้วย เครื่องมือ Bore Scope หาชั้นความหนาโครงสร้างถนน คอนกรีตและศูนย์วิจัยเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและทำ อากาศยาน (RAPTRe) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล รัตนบุรี ที่เอื้อเพื่อลิขสิทธิ์โปรแกรม PAVERS สำหรับ งานวิจัยฉบับนี้

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] ชยธรรพ์ พรหมสร, ธนศักดิ์ ไฝกระโทก, เลิศ พัดฉวีและ พรชัย ศิลา, 2546. การประเมินสภาพผิวทางถนนที่มีผิว ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์คอนกรีตโดยใช้เครื่องมือ Falling Weight Deflectometer ในประเทศไทย. รายงาน ฉบับที่ ๖. 206 สำนักวิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- [2] Ashish Wadkar, et. al, 2011. Load-Transfer Efficiencies of Rigid Airfield Pavement Joints Based on Stresses and Deflections. Journal of Material in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE).
- [3] AASHTO, 1993. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [4] Federal Aviation Administration, 2009. Airport Pavement Design and Evaluation. Advisory Circular No. 150/5320-6E. Federal Aviation Administration (FAA), U.S. Department of Transportation.
- [5] Lev Khazanovich and Alex Gotlif, 2003. Evaluation of Joint and Crack Load Transfer Final Report. FHWA-RD-02-088. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation.
- [6] Vijay P.V., Hota V.S. GangaRoa and Li H., 2009. Design and Evaluation of Joint Plain Concrete Pavement with Fiber Reinforced Polymer Dowels. FHWA-HRT-06-106. Federal Highway Administration (FHWA), U.S. Department of Transportation.
- [7] Dynatest, 23 October 2015. Dynatest - Pavement Engineering Specialists & equipment. <URL: [www.dynatest.com](http://www.dynatest.com)>
- [8] เอกสารติดต่อระหว่างบุคคล, 2555. เอกสารการอบรมเครื่องมือทดสอบ Dynatest. "Joint Efficiency Measurements". บริษัทชอยล์เทคตั้งสยามจำกัด (เอสทีเอส).
- [9] Yoder E.L. and Witzczak M.W., 1975. Principle of Pavement Design, 2nd edition. A Wiler-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- [10] Per Ullidtz, 1987. Pavement Analysis. Institute of Road, Transport and Town Planning, the Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. Elsevier Science Publishers.
- [11] Van Cauwelaert F. and Stet M. 23 October 2015. Shear Transfer and Deflection Ratio's at a Joint of a Concrete Slab. <URL: [www.pavers.nl](http://www.pavers.nl)>
- [12] Lui W. and Fwa T.F., 2005. Effects of Joint Transfer on Concrete Pavement Response. Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 1258-1273.
- [13] Stet M., Thewessen B. and Van Cauwelaert F., 23 October 2015. The PAVERS system; a novel approach to the design and assessment of road, airfield and industrial pavement. <URL: [www.pavers.nl](http://www.pavers.nl)>

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวรวิทย์ สุวรรณมงคล
วัน เดือน ปีเกิด	7 กันยายน พ.ศ. 2523
ที่อยู่	หมู่บ้านโมดิ วิลล่า เลขที่ 198/9 ม.13 ถ.กาญจนาภิเษก ต.บางบัวทอง อ. บางบัวทอง จ. นนทบุรี 11110
การศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัยและวิศวกรประจำหน่วยวิจัยเทคโนโลยีผิวทางถนนและ ท่าอากาศยาน (Road & Airfield Pavement Technology Research Unit) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ตั้งแต่ พ.ศ. 2554 ถึง พ.ศ. 2555 วิศวกรโยธา บริษัทแอ็ดวานซ์โพลีเมอร์ เจ ที จำกัด ตั้งแต่ พ.ศ. 2555 ถึง พ.ศ. 2556 วิศวกรโครงสร้าง บริษัทรอสเทลเฮาส์ จำกัด พ.ศ. 2556 ถึงปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-7920-8162
อีเมล	suwanmongkon.w@gmail.com