

การออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทางของถนนคอนกรีต Portland Cement Concrete Pavement Design

ส่วนออกแบบและแนะนำโครงสร้างชั้นทาง
สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ

กุมภาพันธ์ 2546

สารบัญ

บทนำ	1
องค์ประกอบพื้นฐานของถนนคอนกรีต	1
ผิวทางคอนกรีต (Concrete Slab)	1
รองพื้นทาง (Subbase)	2
ชั้นดินเดิม (Subgrade)	2
ไหล่ทาง (Shoulder)	2
รอยต่อ (Joint)	2
ชนิดของถนนคอนกรีต	2
Joint Plain Concrete Pavement (JPCP)	3
Joint Reinforced Concrete Pavement (JRCP)	3
Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)	3
โครงสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทย	3
การออกแบบโครงสร้างถนนคอนกรีตตามวิธีการของ Portland Cement Association (PCA)	3
ความแข็งแรงของดินเดิม	4
ความแข็งแรงของคอนกรีต	6
ประมาณการจราจร	8
Axle Load Distribution	8
Load Safety Factor	9
อายุการออกแบบ	10
การออกแบบความหนาชั้นทางคอนกรีต	10
รอยต่อในถนนคอนกรีต	21
Contraction Joint	21
Expansion Joint	21
Construction Joint	21
Longitudinal Joint	21
เหล็กเดือย (Dowel)	22
เหล็กยึด (Tie Bar)	22
การออกแบบเหล็กเสริมในถนนคอนกรีต	23
ตัวอย่างการออกแบบความหนาถนนคอนกรีต	23

การออกแบบความหนาของถนนคอนกรีต ตามวิธีของ Portland Cement Association (1984)

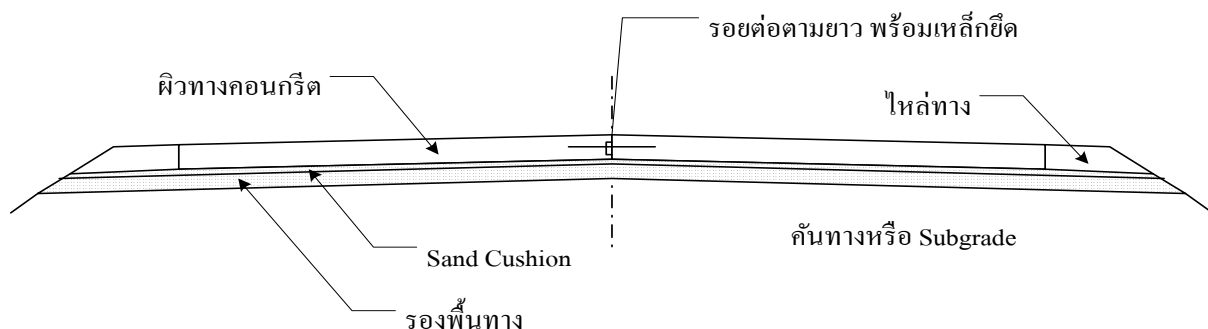
บทนำ

ถนนคอนกรีตถือเป็นถนนแบบ Rigid Pavement โดยปกติแล้วจะสามารถรองรับจำนวนที่ขยของน้ำหนักระทำจากล้อรถได้มากกว่าถนนลาดยาง (Flexible Pavement) หลายเท่า และยังมีคุณภาพการขับขี่มากกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตาม การก่อสร้างถนนคอนกรีตต้องใช้เงินลงทุนสูงกว่าและต้องมีการบำรุงรักษาเป็นอย่างดีตลอดอายุการใช้งาน

ถนนคอนกรีตในประเทศไทยนิยมก่อสร้างในบริเวณตัวเมืองหรือย่านชุมชน ถนนคอนกรีตสายแรกของกรมทางหลวงที่ได้รับการออกแบบก่อสร้างตามหลักวิศวกรรม คือ ถนนพหลโยธิน ช่วงอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ – ลาดพร้าว ระยะทางประมาณ 6 กิโลเมตร ซึ่งเปิดใช้งานประมาณปี 2507 และหลังจากนั้นกรมทางหลวงก็ได้ออกแบบก่อสร้างถนนคอนกรีตอีกหลายสาย เช่น สายกรุงเทพฯ – นครปฐม ตอนบางแค – นครปฐม, สายกรุงเทพฯ – สระบุรี ตอน ดินแดง – คอนเมือง ถนนจรัลสนิทวงศ์, ถนนลาดพร้าว เป็นต้น จนปัจจุบัน (พ.ศ. 2545) กรมทางหลวงมีถนนคอนกรีตภายใต้ความรับผิดชอบโดยประมาณ 4,000 กิโลเมตร

องค์ประกอบพื้นฐานของถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตโดยทั่วไปจะมีรูปตัดขวาง (Typical Cross Section) ดังแสดงในรูปที่ 1 องค์ประกอบต่าง ๆ ของถนนคอนกรีต ประกอบด้วย



รูปที่ 1 รูปตัดทั่วไปของถนนคอนกรีต

ผิวทางคอนกรีต (Concrete Slab)

ทำจากคอนกรีต บางที่เรียกว่า พื้นทางคอนกรีต (Concrete Base) เนื่องจากเป็นชั้นทางหลักที่ทำหน้าที่รับแรงกระทำจากยานพาหนะ และถ่ายแรงลงสู่ชั้นรองพื้นทางและชั้นดินเดิมต่อไป นอกจากนี้ ผิวทางคอนกรีต ยังทำหน้าที่ให้คุณภาพการขับขี่ และ Skid Resistance อีกด้วย

รองพื้นทาง (Subbase)

บางครั้งมีผู้เรียกสับสนว่าเป็นชั้นพื้นทาง (Base) เพราะเป็นชั้นที่สองจากด้านบน ซึ่งจากที่กล่าวมาแล้วว่า ในถนนคอนกรีตนั้นชั้นคอนกรีตจะทำหน้าที่หลักในการถ่ายน้ำหนักลงสู่ชั้นดินเดิม จึงทำหน้าที่เป็นชั้นพื้นทางไปในตัว ชั้นวัสดุที่อยู่ใต้ชั้นคอนกรีตจึงเป็นส่วนประกอบของถนนคอนกรีตส่วนหนึ่ง การเพิ่มความหนาของชั้นรองพื้นทางเพื่อเพิ่มกำลังของถนนคอนกรีตจะไม่ค่อยมีผลมากนัก อย่างไรก็ตาม ชั้นรองพื้นทางของถนนคอนกรีตมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- เป็น Working Platform สำหรับเครื่องจักรในการก่อสร้าง
- เพื่อให้การรองรับแผ่นคอนกรีตมีความเรียบ, สม่ำเสมอ
- ลดการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต
- เพื่อป้องกันการเกิด Pumping บริเวณรอยต่อ

ชั้นดินเดิม (Subgrade)

คือ ดินเดิมหรือดินคันทาง (Embankment) ปกติแล้วในการออกแบบถนนคอนกรีตความสามารถในการรับน้ำหนักของชั้นดินเดิมจะวัดในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction หรือค่า k ซึ่งได้จากการทดสอบ Plate Bearing Test (ASTM) แต่อาจจะเทียบค่า k กับค่า CBR ซึ่งเป็นที่คุ้นเคยกันมากกว่าก็ได้

ไหล่ทาง (Shoulder)

ทำหน้าที่ระบายน้ำออกจากผิวทาง (น้ำฝน) และเป็นที่จอดรถฉุกเฉินในกรณีรถเสียหรือเป็นช่องจราจรสำหรับจักรยานและจักรยานยนต์ ไหล่ทางอาจทำด้วยแอสฟัลท์หรือคอนกรีต ซึ่งจะมีผลต่อความหนาของโครงสร้างชั้นทางคอนกรีตด้วย

รอยต่อ (Joint)

ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตจะมีการทำรอยต่อบนผิวคอนกรีตเป็นช่วง ๆ ตามยาวและตามขวางของถนน แบ่งผิวคอนกรีตออกเป็นแผ่นๆ รอยต่อเหล่านี้จะทำหน้าที่ควบคุมการเกิดรอยแตก (Crack) เนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต, ป้องกันการโก่งตัวของแผ่นคอนกรีต เมื่อคอนกรีตขยายตัว และเป็นรอยต่อเนื่องจากการหยุดพักงานก่อสร้าง แรงกระทำจะถ่ายจากแผ่นคอนกรีตแผ่นหนึ่งไปสู่อีกแผ่นหนึ่งโดยเหล็กเดือย (Dowel Bar) และเหล็กยึด (Tie Bar) รายละเอียดเกี่ยวกับรอยต่อชนิดต่าง ๆ จะได้กล่าวต่อไป

ชนิดของถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตแบ่งตามการเสริมเหล็กและรอยต่อสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. Joint Plain Concrete Pavement (JPCP)

คือ ถนนคอนกรีตที่ไม่มีเหล็กเสริมกันร้าว การถ่ายแรงบริเวณรอยต่อเกิดจากการขัดกันของมวลรวมของรอยแตกได้รอยต่อ แต่เพื่อให้การถ่ายแรงมีประสิทธิภาพจึงมักจะติดตั้งเหล็กเดือย (Dowel) บริเวณรอยต่อด้วย ระยะระหว่างรอยต่อถึงรอยต่อจะมีระยะไม่มาก เนื่องจากไม่มีเหล็กเสริมกันร้าว โดยปกติจะมีระยะห่างประมาณ 4-6 เมตร

2. Joint Reinforced Concrete Pavement (JRCP)

คือ ถนนคอนกรีตที่มีการเสริมเหล็กเสริมกันร้าวบริเวณผิวส่วนบนของชั้นคอนกรีตและมีเหล็กเดือยเพื่อการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อด้วย ถนนคอนกรีตชนิดนี้สามารถสร้างให้มีระยะห่างระหว่างรอยต่อห่างกว่าชนิด JPCP ได้ เนื่องจากมีเหล็กเสริมกันร้าวป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตก โดยปกติถนนคอนกรีตชนิดนี้จะสร้างให้มีระยะห่างระหว่างรอยต่อไม่เกิน 12 เมตร

3. Continuously Reinforced Concrete Pavement (CRCP)

คือ ถนนคอนกรีตที่ก่อสร้างโดยไม่มีรอยต่อตามขวางเลย ทั้งนี้รอยแรกจะถูกป้องกันโดยเหล็กเสริมกันร้าวที่มีมากกว่าแบบ JRCP เหล็กเสริมกันร้าวนี้จะทำหน้าที่ยึดรอยแตกที่เกิดขึ้นเข้าด้วยกันและทำหน้าที่ถ่ายแรงบริเวณรอยแตก

นอกจากนี้ยังมีถนนคอนกรีตชนิดคอนกรีตอัดแรง (Prestress Concrete) ด้วย แต่เป็นผิวทางคอนกรีตชนิดพิเศษและยังไม่เคยมีการก่อสร้างในประเทศไทย

รูปแบบของถนนคอนกรีตทั้ง 3 ชนิดข้างต้น แสดงไว้ในรูปที่ 2

โครงสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทย

ถนนคอนกรีตในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตประเภท JRCP ขนาดของแผ่นคอนกรีตกว้าง 3.50 เมตร ยาว 10.00 เมตร มีชั้นคอนกรีตหนา 23 - 25 ซม. ไหล่ทางมีทั้งที่เป็นแอสฟัลท์คอนกรีตและที่เป็นคอนกรีต โดยปกติจะมีชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นลูกรังหนา 15 ซม. และมีชั้นทรายหนา 10 ซม. อยู่ระหว่างแผ่นคอนกรีตกับชั้นลูกรังเพื่อป้องกันการเกิด Pumping

การออกแบบโครงสร้างถนนคอนกรีตตามวิธีการของ Portland Cement Association (PCA)

Portland Cement Association (PCA) ได้พัฒนาและจัดทำคู่มือการออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตมาตั้งแต่ปี 1951 และล่าสุดเป็นฉบับปี 1984 ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบถนนคอนกรีตที่ยอมรับกันทั่วโลก การออกแบบตามวิธีของ PCA ฉบับปี 1984 นั้น มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีโครงสร้างชั้นทางพื้นฐาน, การทดลองพฤติกรรมของถนนคอนกรีต ตลอดจนข้อมูลต่าง ๆ จากหลาย ๆ แหล่ง

ตามวิธีการออกแบบของ PCA (1984) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหนาของคอนกรีต ประกอบด้วย

1. ความแข็งแรงของดินเดิม
2. ความแข็งแรงของคอนกรีต
3. ปริมาณการจราจร
4. ระยะเวลาการออกแบบ

นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของรอยต่อ, ไหล่ทาง และชนิดของชั้นรองพื้นทางอีกด้วย

ความแข็งแรงของดินเดิม

ความแข็งแรงของดินเดิมสำหรับการออกแบบความหนาของถนนคอนกรีตอยู่ในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction หรือค่า k ซึ่งสามารถวัดได้โดยการทดสอบ Plate Bearing Test ตามมาตรฐาน AASHTO T 235 โดยมีวิธีการโดยย่อคือการกระทำแรงแก่ดินผ่านแผ่นเหล็กรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 นิ้ว (762 มิลลิเมตร) ด้วยแรงกระทำคงที่ขนาดประมาณ 10 psi (69 kPa) แล้ววัดค่าการทรุดตัว (Deflection) ของดิน ค่า Modulus of Subgrade Reaction สามารถคำนวณได้จากสมการ

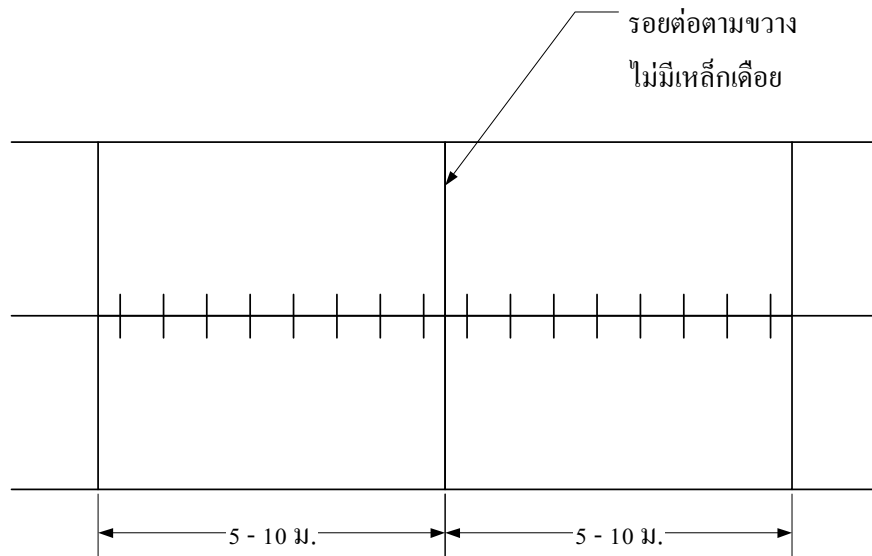
$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (1)$$

เมื่อ P = แรงกดที่กระทำต่อดิน (10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
 Δ = ค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้น (นิ้ว)

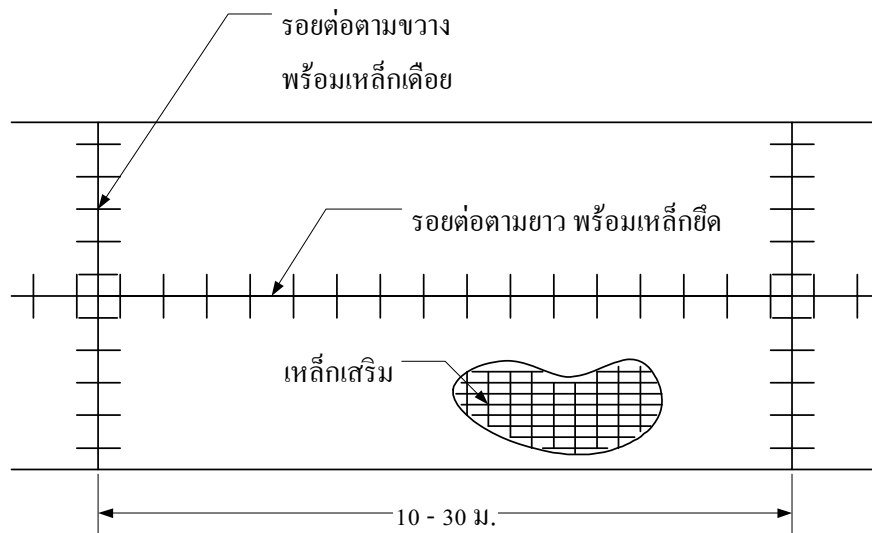
ค่า k มีหน่วยเป็น ปอนด์ต่อตารางนิ้วต่อนิ้ว (Pound per square inch per inch) หรือจะเรียกว่า ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว (pound per cubic inch, pci) ก็ได้ ค่า k นี้เปรียบได้กับค่าคงที่ของสปริง หรือค่าแรงดันที่จะทำให้ดินยุบลงไป 1 หน่วยความยาว ไม่ใช่ค่า Young's Modulus (E) ของดิน

การทดสอบ Plate Bearing Test อาจจะเสียเวลาและต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงอาจเทียบค่า k กับค่า CBR ซึ่งทดสอบได้ง่ายกว่า, เร็วกว่า และใช้ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าได้จาก chart ในรูปที่ 3

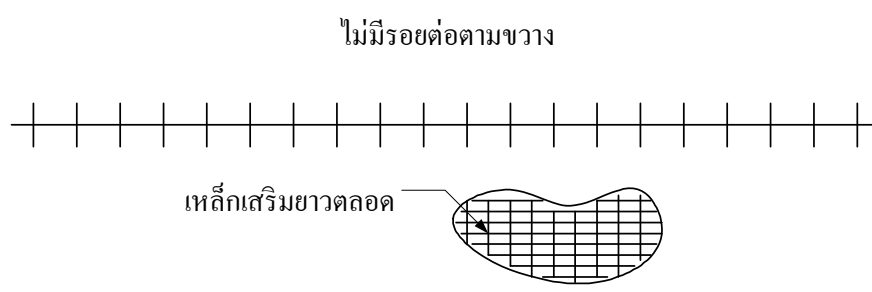
ในการก่อสร้างถนนคอนกรีตในประเทศไทยจะประกอบด้วยชั้นรองพื้นทางเหนือชั้น Subgrade ดังนั้นในการออกแบบจะต้องคำนึงถึงผลกระทบของชั้นรองพื้นทางที่เพิ่มขึ้นด้วย กล่าวคือ ค่า k ที่ใช้ออกแบบจะต้องเป็นค่ารวมของทั้งสองชั้น Portland Cement Association (1984) ได้แนะนำค่า k ที่เพิ่มขึ้นโดยประมาณเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของชั้นรองพื้นทาง โดยถ้าหากชั้นรองพื้นทางเป็นวัสดุที่ไม่มีความเชื่อมแน่น (Unbound) ค่า k สามารถหาได้จากตารางที่ 1 และถ้าหากชั้นรองพื้นทางเป็นชั้นวัสดุที่มีความเชื่อมแน่น (Bound) เช่น ดินซีเมนต์ ค่า k สามารถหาได้จากตารางที่ 2



(ก) JPCP



(ข) JRCP



(ค) CRCP

รูปที่ 2 ชนิดของถนนคอนกรีต

ตารางที่ 1. ค่า k ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีชั้นรองพื้นทางชนิด Unbound Material อยู่เหนือดิน subgrade

ค่า k ของ Subgrade, pci	ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทาง, pci			
	4 นิ้ว	6 นิ้ว	9 นิ้ว	12 นิ้ว
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

ตารางที่ 2. ค่า k ที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีชั้นรองพื้นทางชนิด Bound Material อยู่เหนือดิน subgrade

ค่า k ของ Subgrade, pci	ค่า k เมื่อมีชั้นรองพื้นทาง, pci			
	4 นิ้ว	6 นิ้ว	9 นิ้ว	12 นิ้ว
50	170	230	310	390
100	280	400	520	640
200	470	640	830	-

หมายเหตุ: 1 in. = 25.4 mm, 1 pci. = 271.3 kN/m³**ความแข็งแรงของคอนกรีต**

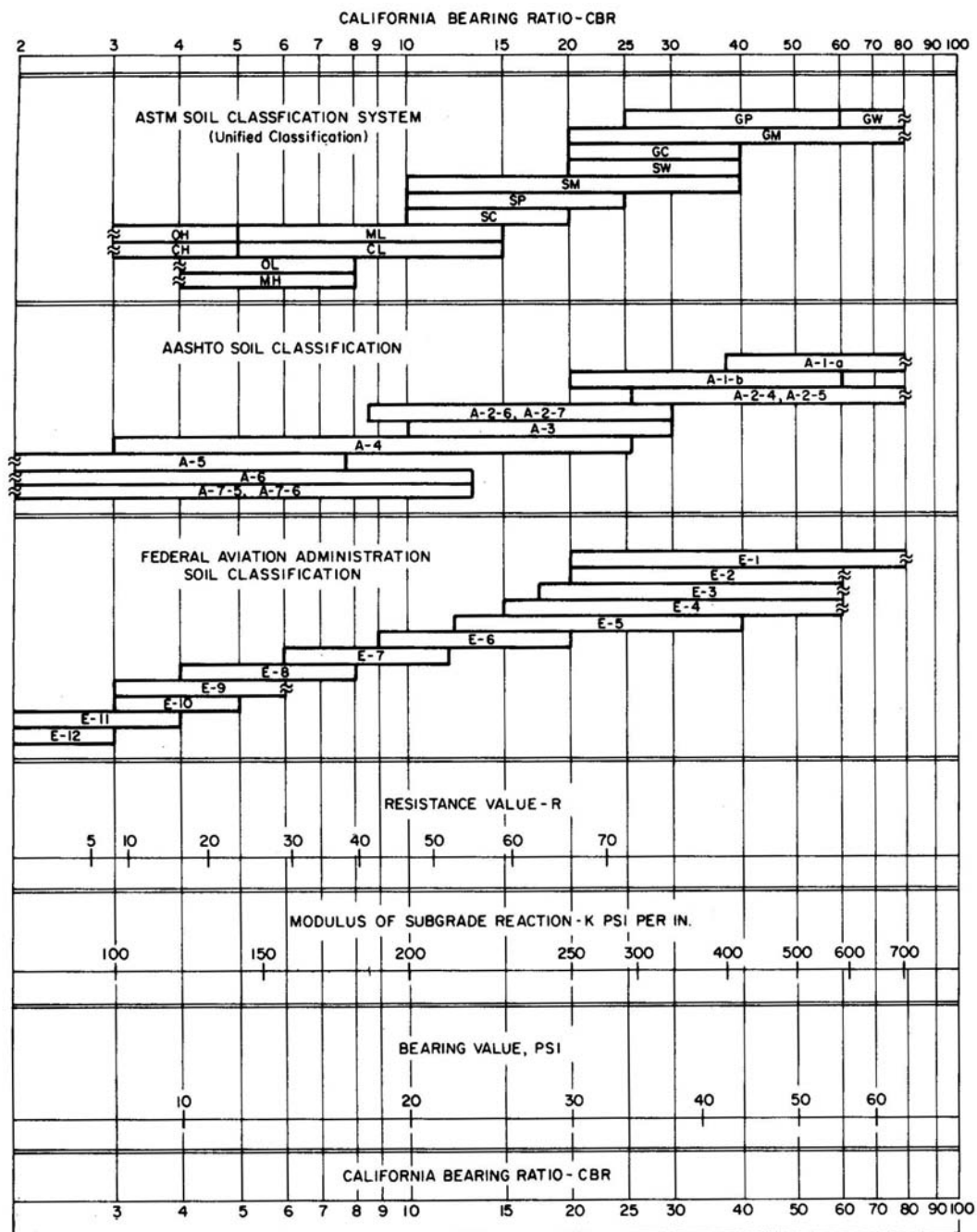
คุณสมบัติของคอนกรีตสำหรับการออกแบบคือ ค่า Flexural Strength ที่ 28 วัน โดยปกติค่าที่เหมาะสมสำหรับถนนคอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 3.0 – 5.0 MPa อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจะควบคุมคุณสมบัติคอนกรีตที่ค่า Compressive Strength ซึ่งทดสอบได้สะดวกกว่า ตามมาตรฐานกรมทางหลวง คอนกรีตที่จะนำมาสร้างถนนคอนกรีตจะต้องมี Compressive Strength ที่อายุ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 32.5 MPa

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Compressive Strength และค่า Flexural Strength เป็นไปตามสมการ

$$f_f = 0.75\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

เมื่อ f_f = Flexural Strength ของคอนกรีตที่ 28 วัน

f'_c = Compressive Strength ของคอนกรีตที่ 28 วัน



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR และค่าความแข็งแรงของดินชนิดอื่นๆ

ประมาณการจราจร

ใช้เฉพาะประมาณการจราจรของรถหนักที่มี 6 ล้อขึ้นไปเท่านั้น ได้แก่ รถบรรทุกขนาดกลาง (Medium Truck) รถโดยสารขนาดใหญ่ (Heavy Bus) และรถบรรทุกขนาดใหญ่ (Heavy Truck) จำนวนและน้ำหนักลงเพลาคิดว่าจะแล่นผ่านถนนในช่วงระยะเวลาการออกแบบประมาณจาก

- Average Daily Traffic (ADT) คือ ปริมาณการจราจรของพาหนะทุกชนิดเฉลี่ยต่อวันทั้งสองทิศทาง
- Average Daily Truck Traffic (ADTT) คือ ปริมาณของรถบรรทุกเฉลี่ยต่อวันทั้งสองทิศทาง
- การกระจายของน้ำหนักบรรทุกบนเพลารถบรรทุก

ข้อมูล ADT และ ADTT สามารถหาได้จากการสำรวจประมาณการจราจร และ ADTT อาจจะแสดงในรูปของ ร้อยละของ ADT ได้ ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกที่จะวิ่งผ่านช่องจราจรออกแบบ (Design Lane) ในช่วงระยะเวลาออกแบบสามารถคำนวณจาก

$$\text{จำนวนรถบรรทุกที่ผ่าน Design Lane} = \text{ADT} \times \frac{\% \text{ADTT}}{100} \times \text{Lane Factor} \times \text{GF} \quad (3)$$

เมื่อ	Lane Factor	=	อัตราส่วนของรถบรรทุกที่จะวิ่งผ่าน Design Lane ปริมาณได้จากตารางที่
	GF	=	Cumulative Growth Factor
		=	$\frac{(1+r)^n - 1}{r}$
	r	=	อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณรถบรรทุกต่อปี (%)
	n	=	อายุการออกแบบ (ปี)

Axle Load Distribution

ปริมาณการจราจรที่ใช้ในการออกแบบประกอบด้วยเพลาน้ำหนักแตกต่างกัน ข้อมูลที่ต้องใช้ในการออกแบบอีกอย่างหนึ่งก็คือ ปริมาณของเพลาน้ำหนักลงเพลาน้ำหนักต่าง ๆ ที่คาดว่าจะวิ่งผ่าน Design Lane ในช่วงเวลาที่ออกแบบ ข้อมูลนี้สามารถประมาณได้จากค่าน้ำหนักบรรทุกหรือจากการวัดน้ำหนักแบบ Weight – In-Motion ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างของข้อมูลน้ำหนักลงเพลาน้ำหนักต่าง ๆ ของถนนสายกรุงเทพฯ – สระบุรี

ตารางที่ 3 Axial Load Distribution ของรถหนักที่ผ่านถนนสายกรุงเทพ – สระบุรี ช่วง กรุงเทพฯ - รังสิต

Single – Axle, Dual Wheels (MT, HB)			Tandem Axles, Dual Wheels (HT)	
Axle Load Tons (kips)	%		Axle Load Tons (kips)	% HT
	MT	HB		
2.60 (5.73)	43.38		6.40 (14.11)	39.74
3.25 (7.16)	8.14		7.20 (15.87)	1.41
3.90 (8.60)	9.54		8.00 (17.63)	0.97
4.55 (10.03)	9.85		8.80 (19.40)	1.13
5.20 (11.46)	7.23	5.30	9.60 (21.16)	1.02
5.85 (12.89)	6.26	29.39	10.40 (22.92)	1.10
6.50 (14.33)	5.18	40.86	11.20 (24.68)	1.04
7.15 (15.76)	3.02	17.74	12.00 (26.45)	1.93
7.80 (17.19)	2.33	6.09	12.80 (28.21)	2.06
8.45 (18.62)	0.51	0.62	13.60 (29.97)	1.36
9.10 (20.06)	0.85		14.40 (31.74)	6.25
9.75 (21.49)	0.40		15.20 (33.50)	3.33
10.40 (22.92)	1.20		16.00 (35.26)	7.66
11.05 (24.35)	1.37		16.80 (37.03)	19.08
11.70 (25.79)	0.23		17.60 (38.79)	2.34
			18.40 (40.55)	0.84
			19.20 (42.32)	0.35
			20.00 (44.08)	0.45
			20.80 (45.84)	0.71
			21.60 (47.61)	0.45
			22.40 (49.37)	1.36
			23.20 (51.13)	3.29
			24.00 (52.90)	0.22
			24.80 (54.66)	0.32
			25.60 (56.42)	0.41
			26.40 (58.19)	0.76
			27.20 (59.95)	0.22
			28.00 (61.71)	0.04
Total	100 %	100 %	Total	100 %

Note: MT = Medium Truck, HB = Heavy Bus, HT = Heavy Truck

Load Safety Factor

คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่จะนำไปคูณกับน้ำหนักที่คาดว่าจะกระทำต่อถนนที่ประมาณได้ในขั้นตอนที่ผ่านมา ค่า Load Safety Factor ขึ้นอยู่กับความสำคัญของถนนที่จะออกแบบ PCA ได้แนะนำค่า Load Safety Factor ที่เหมาะสมกับถนนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่า Load Safety Factor

Load Safety Factor	ชนิดของถนน
1.2	ถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway) และทางหลวงหลายช่องจราจรที่ต้องรองรับการจราจรของรถหนักจำนวนมากโดยไม่มีการหยุดชะงัก และต้องการคุณภาพการบริการ (Serviceability) สูงตลอดอายุการใช้งานโดยเสียค่าบำรุงรักษาต่ำ
1.1	ถนนพิเศษระหว่างเมือง (Motorway), ทางหลวงสายหลักที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนปานกลาง
1.0	ถนนที่ต้องรองรับปริมาณการจราจรของรถหนักจำนวนน้อย

อายุการออกแบบ

ถนนคอนกรีตอาจมีอายุยืนยาวถึง 40 ปี ถ้ามีการบำรุงรักษาที่ดีสม่ำเสมอ หรืออาจจะมีอายุการใช้งานต่ำกว่า 20 ปี ก็ได้หากมีการบรรทุกเกินน้ำหนักที่ได้คาดการณ์ไว้มาก อย่างไรก็ตามอายุการออกแบบของถนนคอนกรีตโดยปกติจะกำหนดที่ 20 ปี

การออกแบบความหนาแน่นทางคอนกรีต

ถนนคอนกรีตมีสมมติฐานว่า มีรูปแบบความเสียหายใน 2 ลักษณะ คือ

- การเกิดความล้า (Fatigue) เนื่องจากการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต
- การเกิดการสึกหรอ (Erosion) ของชั้นดินเดิมหรือชั้นรองพื้นทาง เนื่องจากการเกิดการแอ่นตัวเข้าไปเข้ามาของคอนกรีตบริเวณรอยต่อหรือรอยแตก

โดยหลักการแล้ว ผู้ออกแบบจะสมมติความหนาของชั้นทางคอนกรีตขึ้นมาก่อน รวมทั้งตัดสินใจว่าจะใช้ชั้นรองพื้นทางหรือมีไหล่ทางคอนกรีตหรือไม่ จากนั้นตรวจสอบว่าโครงสร้างถนนที่ออกแบบนั้นสามารถทนทานต่อน้ำหนักเพลลาที่เกิดจากปริมาณการจราจรทั้งหมดที่คาดการณ์ไว้ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายในทั้งสองลักษณะข้างต้น ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่าโครงสร้างถนนเกิด Fatigue หรือ Erosion มากกว่า 100% ก็ทำการเพิ่มความหนาของคอนกรีตแล้วทำการตรวจสอบซ้ำ ความหนาคอนกรีตที่ยอมรับก็คือ ความหนาคอนกรีตที่ต่ำที่สุดที่เมื่อรับน้ำหนักกระทำจากปริมาณการจราจรที่คาดการณ์ไว้แล้ว จะเกิดความเสียหายในลักษณะ Fatigue และ Erosion ไม่เกิน 100%

การคำนวณสามารถกระทำได้โดยใช้ตารางคำนวณในรูปที่ 4 และ 5 โดยทำตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือกรูปแบบของถนนคอนกรีตที่ต้องการ เช่น มีรอยต่อไม่มีเหล็กเดือย (Joint Undoweled) หรือมีเหล็กเดือย (Joint Doweled) หรือไม่มีรอยต่อแต่เป็น CRCP เป็นต้น และตัดสินใจด้วยว่าจะใช้ไหล่ทางเป็นคอนกรีตด้วยหรือไม่

2. พิจารณาค่า Modulus of Subgrade (k) ของชั้นดินเดิมรวมกับชั้นรองพื้นทางค่านี้สามารถประมาณจากค่า CBR โดย Chart ในรูปที่ 3
3. ประมาณค่า Flexural strength ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน
4. เลือกค่า Load Safety Factor ที่เหมาะสมจากตารางที่ 4
5. เลือกความหนาของชั้นคอนกรีต
6. กรอกข้อมูลเกี่ยวกับขนาดน้ำหนักระทำลงเพลและอัตราส่วนของเพลที่รับน้ำหนักขนาดต่าง ๆ ลงใน 3 สดมภ์แรกของตารางคำนวณ “Calculation of Expected Repetitions” รวมทั้งกรอกค่าปริมาณการจราจรใน สดมภ์ที่ 4 จำนวนเที่ยวของเพลที่รับน้ำหนักขนาดต่าง ๆ คำนวณโดยการคูณค่าในสดมภ์ที่ 2,3 และ 4 เข้าด้วยกัน ผลลัพธ์ที่ได้กรอกลงในสดมภ์ที่ 5
7. นำผลลัพธ์จากสดมภ์ที่ 5 ของตารางคำนวณ “Calculation of Expected Repetitions” มากรอกในสดมภ์ที่ 1 ของตารางคำนวณ “Calculation of Pavement Thickness”
8. คูณน้ำหนักลงเพลด้วยค่า Load Safety Factor แล้วกรอกผลลัพธ์ลงในสดมภ์ที่ 2
9. วิเคราะห์ Fatigue ในแต่ละประเภทเพล
 - ถ้าไม่มีไหล่ทางคอนกรีต ใช้ตารางที่ 5 และรูปที่ 6
 - ถ้ามีไหล่ทางคอนกรีตใช้ตารางที่ 6 และรูปที่ 6
 การวิเคราะห์ Fatigue มีขั้นตอนดังนี้
 - 9.1 กรอกค่า Equivalent Stress ลงในช่องหมายเลข 8 และหมายเลข 11 ในตารางคำนวณ เลือกค่า Equivalent Stress ที่เหมาะสมจากตารางที่ 5 หรือ 6 ขึ้นอยู่กับว่ามีไหล่ทางคอนกรีตหรือไม่ ค่า Equivalent Stress ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นคอนกรีตที่กำหนด และค่า k ของดินเดิมรวมกับรองพื้นทาง
 - 9.2 นำค่า Modulus of Rupture ของคอนกรีตมาหารค่า Equivalent Stress แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้กรอกลงในช่องหมายเลข 9 และหมายเลข 12 ของตารางคำนวณ ค่าที่คำนวณได้นี้คือ ค่า Stress Ratio Factor
 - 9.3 นำค่า Stress Ratio Factor และน้ำหนักระทำลงเพลมาคำนวณหาจำนวนเที่ยวที่น้ำหนักลงเพลขนาดนี้จะวิ่งผ่านถนนได้ โดยไม่เกิดความเสียหายจากการล้า (Allowable Repetitions to Fatigue) โดยใช้ Nomograph รูปที่ 6
 - 9.4 คำนวณอัตราส่วนระหว่างจำนวนเที่ยวที่ออกแบบต่อจำนวนเที่ยวที่ยอมให้เกิดขึ้นได้โดยการหารค่าในสดมภ์ที่ 3 ด้วยค่าในสดมภ์ที่ 4 จากนั้นทำเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการคูณด้วย 100 กรอกผลลัพธ์ลงในสดมภ์ที่ 5
 - 9.5 รวมค่าในสดมภ์ที่ 5 ทั้งหมด ของแต่ละประเภทเพล
10. วิเคราะห์ Erosion ในแต่ละประเภทเพล
 - การวิเคราะห์ Erosion มีขั้นตอนดังนี้

10.1 เลือกค่า Erosion Factor จากตารางที่เหมาะสมแล้วกรอกลงในช่องหมายเลข 10 และ 13 ในตารางคำนวณ

ถ้าไม่มีไหล่ทางคอนกรีต

- ถ้ามีเหล็กเคียวที่รอยต่อหรือเป็นถนนคอนกรีตประเภท CRCP ใช้ตารางที่ 7 และ รูปที่ 7
- ถ้าไม่มีเหล็กเคียวที่รอยต่อใช้ตารางที่ 8 และรูปที่ 7

ถ้ามีไหล่ทางคอนกรีต

- มีเหล็กเคียวที่รอยต่อหรือเป็นถนนคอนกรีตประเภท CRCP ใช้ตารางที่ 9 และรูปที่ 8
- ไม่มีเหล็กเคียวที่รอยต่อใช้ตารางที่ 10 และรูปที่ 8

10.2 คำนวณค่าจำนวนเที่ยวที่ยอมให้ผ่านถนนได้โดยไม่เกิดความเสียหายจากการสึกหรอ (Allowable Repetitions for Erosion) โดยใช้ค่า Erosion Factor และน้ำหนักกระทำลงเพลาและ Nomograph ในรูปที่ 7 หรือ 8 กรอกผลลัพธ์ลงในสดมภ์ที่ 6

10.3 คำนวณอัตราส่วนระหว่างจำนวนเที่ยวที่ออกแบบต่อจำนวนเที่ยวที่ยอมให้เกิดขึ้นได้โดยการหารค่าในสดมภ์ที่ 3 ด้วยค่าในสดมภ์ที่ 6 จากนั้นทำเป็นเปอร์เซ็นต์โดยการคูณด้วย 100 กรอกผลลัพธ์ลงในสดมภ์ที่ 7

10.4 รวมค่าในสดมภ์ที่ 7 ทั้งหมดของแต่ละประเภทเพลา

11. ถ้าค่าผลรวมอัตราส่วนความเสียหายในลักษณะของ Fatigue (สดมภ์ที่ 5) และ Erosion (สดมภ์ที่ 7) เมื่อรวมทุกประเภทเพลา มีค่าไม่มากกว่า 100% แสดงว่าความหนาของโครงสร้างชั้นทางที่กำหนดสามารถรองรับปริมาณการจราจรที่กำหนดได้ ถ้าหากไม่เป็นไปตามนี้จะต้องเพิ่มความหนาของคอนกรีตอีกแล้วทำตามขั้นตอนที่ 6-10 อีกครั้ง จนกว่าค่าผลรวมของ Fatigue และ Erosion จะน้อยกว่า 100%

ตารางที่ 5 Equivalent Stress – ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต
(Single Axle/Tandem Axle)

ความหนาของ แผ่นคอนกรีต(นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	825/679	726/585	671/542	634/516	584/486	523/457	484/443
4.5	699/586	616/500	571/460	540/435	498/406	448/378	417/363
5	602/516	531/436	493/399	467/376	432/349	390/321	363/307
5.5	526/461	464/387	431/353	409/331	379/305	343/278	320/264
6	465/416	411/348	382/316	362/296	336/271	304/246	285/232
6.5	417/380	367/317	341/286	324/267	300/244	273/220	256/207
7	375/349	331/290	307/262	292/244	271/222	246/199	231/186
7.5	340/323	300/268	279/241	265/224	246/203	224/181	210/169
8	311/300	274/249	255/223	242/208	225/188	205/167	192/155
8.5	285/281	252/232	234/208	222/193	206/174	188/154	177/143
9	264/264	232/218	216/195	205/181	190/163	174/144	163/133
9.5	245/248	215/205	200/183	190/170	176/153	161/134	151/124
10	228/235	200/193	186/173	177/160	164/144	150/126	141/117
10.5	213/222	187/183	174/164	165/151	153/136	140/119	132/110
11	200/211	175/174	163/155	154/143	144/129	131/113	123/104
11.5	188/201	165/165	153/148	145/136	135/122	123/107	116/98
12	177/192	155/158	144/141	137/130	127/116	116/102	109/93
12.5	168/183	147/151	136/135	129/124	120/111	109/97	103/89
13	159/176	139/144	129/129	122/119	113/106	103/93	97/85
13.5	152/168	132/138	122/123	116/114	107/102	98/89	92/81
14	144/162	125/133	116/118	110/109	102/98	93/85	88/78

ตารางที่ 6 Equivalent Stress – มีไหล่ทางคอนกรีต
(Single Axle/Tandem Axle)

ความหนาของ แผ่นคอนกรีต(นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci						
	50	100	150	200	300	500	700
4	640/534	559/468	517/439	489/422	452/403	409/388	383/384
4.5	547/461	479/400	444/372	421/356	390/338	355/322	333/316
5	475/404	417/349	387/323	367/308	341/290	311/274	294/267
5.5	418/360	368/309	342/285	324/271	302/254	276/238	261/231
6	372/325	327/277	304/255	289/241	270/225	247/210	234/203
6.5	334/295	294/251	274/230	260/218	243/203	223/188	212/180
7	302/270	266/230	248/210	236/198	220/184	203/170	192/162
7.5	275/250	243/211	226/193	215/182	201/168	185/155	176/148
8	252/232	222/196	207/179	197/168	185/155	170/142	162/135
8.5	232/216	205/182	191/166	182/156	170/144	157/131	150/125
9	215/202	190/171	177/155	169/146	158/134	146/122	139/116
9.5	200/190	176/160	164/146	157/137	147/126	136/114	129/108
10	186/179	164/151	153/137	146/129	137/118	127/107	121/101
10.5	174/173	154/143	144/130	137/121	128/111	119/101	113/95
11	164/161	144/135	135/123	129/115	120/105	112/95	106/90
11.5	154/153	136/128	127/117	121/109	113/100	105/90	100/85
12	145/146	128/122	120/111	114/104	107/95	99/86	95/81
12.5	137/139	121/117	113/106	108/99	101/91	94/82	90/77
13	130/133	115/112	107/101	102/95	96/86	89/78	85/73
13.5	124/127	109/107	102/97	97/91	91/83	85/74	81/70
14	118/122	104/103	97/93	93/87	87/79	81/71	77/67

ตารางที่ 7 Erosion Factors – มีเหล็กเดียวที่รอยต่อ, ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต
(Single Axle/Tandem Axle)

ความหนาของ แผ่นคอนกรีต(นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.74/3.83	3.73/3.79	3.72/3.75	3.71/3.73	3.70/3.70	3.68/3.67
4.5	3.59/3.70	3.57/3.65	3.56/3.61	3.55/3.58	3.54/3.55	3.52/3.53
5	3.45/3.58	3.43/3.52	3.42/3.48	3.41/3.45	3.40/3.42	3.38/3.40
5.5	3.33/3.47	3.31/3.41	3.29/3.36	3.28/3.33	3.27/3.30	3.26/3.28
6	3.22/3.38	3.19/3.31	3.18/3.26	3.17/3.23	3.15/3.20	3.14/3.17
6.5	3.11/3.29	3.09/3.22	3.07/3.16	3.06/3.13	3.05/3.10	3.03/3.07
7	3.02/3.21	2.99/3.14	2.97/3.08	2.96/3.05	2.95/3.01	2.94/2.98
7.5	2.93/3.14	2.91/3.06	2.88/3.00	2.87/2.97	2.86/2.93	2.84/2.90
8	2.85/3.07	2.82/2.99	2.80/2.93	2.79/2.89	2.77/2.85	2.76/2.82
8.5	2.77/3.01	2.74/2.93	2.72/2.86	2.71/2.82	2.69/2.78	2.68/2.75
9	2.70/2.96	2.67/2.87	2.65/2.80	2.63/2.76	2.62/2.71	2.61/2.68
9.5	2.63/2.90	2.60/2.81	2.58/2.74	2.56/2.70	2.55/2.65	2.54/2.62
10	2.56/2.85	2.54/2.76	2.51/2.68	2.50/2.64	2.48/2.59	2.47/2.56
10.5	2.50/2.81	2.47/2.71	2.45/2.63	2.44/2.59	2.42/2.54	2.41/2.51
11	2.44/2.76	2.42/2.67	2.39/2.58	2.38/2.54	2.36/2.49	2.35/2.45
11.5	2.38/2.72	2.36/2.62	2.33/2.54	2.32/2.49	2.30/2.44	2.29/2.40
12	2.33/2.68	2.30/2.58	2.28/2.49	2.26/2.44	2.25/2.39	2.23/2.36
12.5	2.28/2.64	2.25/2.54	2.23/2.45	2.21/2.40	2.19/2.35	2.18/2.31
13	2.23/2.61	2.20/2.50	2.18/2.41	2.16/2.36	2.14/2.30	2.13/2.27
13.5	2.18/2.57	2.15/2.47	2.13/2.37	2.11/2.32	2.09/2.26	2.08/2.23
14	2.13/2.54	2.11/2.43	2.08/2.34	2.07/2.29	2.05/2.23	2.03/2.19

ตารางที่ 8 Erosion Factors – ไม่มีเหล็กเดียวที่รอยต่อ, ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต
(Single Axle/Tandem Axle)

ความหนาของ แผ่นคอนกรีต(นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.94/4.03	3.91/3.95	3.88/3.89	3.86/3.86	3.82/3.83	3.77/3.80
4.5	3.79/3.91	3.76/3.82	3.73/3.75	3.71/3.72	3.68/3.68	3.64/3.65
5	3.66/3.81	3.63/3.72	3.60/3.64	3.58/3.60	3.55/3.55	3.52/3.52
5.5	3.54/3.72	3.51/3.62	3.48/3.53	3.46/3.49	3.43/3.44	3.41/3.40
6	3.44/3.64	3.40/3.53	3.37/3.44	3.35/3.40	3.32/3.34	3.30/3.30
6.5	3.34/3.56	3.30/3.46	3.26/3.36	3.25/3.31	3.22/3.25	3.20/3.21
7	3.26/3.49	3.21/3.39	3.17/3.29	3.15/3.24	3.13/3.17	3.11/3.13
7.5	3.18/3.43	3.13/3.32	3.09/3.22	3.07/3.17	3.04/3.10	3.02/3.06
8	3.11/3.37	3.05/3.26	3.01/3.16	2.99/3.10	2.96/3.03	2.94/2.99
8.5	3.04/3.32	2.98/3.21	2.93/3.10	2.91/3.04	2.88/2.97	2.87/2.93
9	2.98/3.27	2.91/3.16	2.86/3.05	2.84/2.99	2.81/2.92	2.79/2.87
9.5	2.92/3.22	2.85/3.11	2.80/3.00	2.77/2.94	2.75/2.86	2.73/2.81
10	2.86/3.18	2.79/3.06	2.74/2.95	2.71/2.89	2.68/2.81	2.66/2.76
10.5	2.81/3.14	2.74/3.02	2.68/2.91	2.65/2.84	2.62/2.76	2.60/2.72
11	2.77/3.10	2.69/2.98	2.63/2.86	2.60/2.80	2.57/2.72	2.54/2.67
11.5	2.72/3.06	2.64/2.94	2.58/2.82	2.55/2.76	2.51/2.68	2.49/2.63
12	2.68/3.03	2.60/2.90	2.53/2.78	2.50/2.72	2.46/2.64	2.44/2.59
12.5	2.64/2.99	2.55/2.87	2.48/2.75	2.45/2.68	2.41/2.60	2.39/2.55
13	2.60/2.96	2.51/2.83	2.44/2.71	2.40/2.65	2.36/2.56	2.34/2.51
13.5	2.56/2.93	2.47/2.80	2.40/2.68	2.36/2.61	2.32/2.53	2.30/2.48
14	2.53/2.90	2.44/2.77	2.36/2.65	2.32/2.58	2.28/2.50	2.25/2.44

ตารางที่ 9 Erosion Factors – มีเหล็กเดียวที่รอยต่อ, มีไหล่ทางคอนกรีต
(Single Axle/Tandem Axle)

ความหนาของ แผ่นคอนกรีต(นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.28/3.30	3.24/3.20	3.21/3.13	3.19/3.10	3.15/3.09	3.12/3.08
4.5	3.13/3.19	3.09/3.08	3.06/3.00	3.04/2.96	3.01/2.93	2.98/2.91
5	3.01/3.09	2.97/2.98	2.93/2.89	2.90/2.84	2.87/2.79	2.85/2.77
5.5	2.90/3.01	2.85/2.89	2.81/2.79	2.79/2.74	2.76/2.68	2.73/2.65
6	2.79/2.93	2.75/2.82	2.70/2.71	2.68/2.65	2.65/2.58	2.62/2.54
6.5	2.70/2.86	2.65/2.75	2.61/2.63	2.58/2.57	2.55/2.50	2.52/2.45
7	2.61/2.79	2.56/2.68	2.52/2.56	2.49/2.50	2.46/2.42	2.43/2.38
7.5	2.53/2.73	2.48/2.62	2.44/2.50	2.41/2.44	2.38/2.36	2.35/2.31
8	2.46/2.68	2.41/2.56	2.36/2.44	2.33/2.38	2.30/2.30	2.27/2.24
8.5	2.39/2.62	2.34/2.51	2.29/2.39	2.26/2.32	2.22/2.24	2.20/2.18
9	2.32/2.57	2.27/2.46	2.22/2.34	2.19/2.27	2.16/2.19	2.13/2.13
9.5	2.26/2.52	2.21/2.41	2.16/2.29	2.13/2.22	2.09/2.14	2.07/2.08
10	2.20/2.47	2.15/2.36	2.10/2.25	2.07/2.18	2.03/2.09	2.01/2.03
10.5	2.15/2.43	2.09/2.32	2.04/2.20	2.01/2.14	1.97/2.05	1.95/1.99
11	2.10/2.39	2.04/2.28	1.99/2.16	1.95/2.09	1.92/2.01	1.89/1.95
11.5	2.05/2.35	1.99/2.24	1.93/2.12	1.90/2.05	1.87/1.97	1.84/1.91
12	2.00/2.31	1.94/2.20	1.88/2.09	1.85/2.02	1.82/1.93	1.79/1.87
12.5	1.95/2.27	1.89/2.16	1.84/2.05	1.81/1.98	1.77/1.89	1.74/1.84
13	1.91/2.23	1.85/2.13	1.79/2.01	1.76/1.95	1.72/1.86	1.70/1.80
13.5	1.86/2.20	1.81/2.09	1.75/1.98	1.72/1.91	1.68/1.83	1.65/1.77
14	1.82/2.17	1.76/2.06	1.71/1.95	1.67/1.88	1.64/1.80	1.61/1.74

ตารางที่ 10 Erosion Factors – ไม่มีเหล็กเดียวที่รอยต่อ, มีไหล่ทางคอนกรีต
(Single Axle/Tandem Axle)

ความหนาของ แผ่นคอนกรีต(นิ้ว)	ค่า k ของ Subbase - Subgrade, pci					
	50	100	200	300	500	700
4	3.46/3.49	3.42/3.39	3.38/3.32	3.36/3.29	3.32/3.26	3.28/3.24
4.5	3.32/3.39	3.28/3.28	3.24/3.19	3.22/3.16	3.19/3.12	3.15/3.09
5	3.20/3.30	3.16/3.18	3.12/3.09	3.10/3.05	3.07/3.00	3.04/2.97
5.5	3.10/3.22	3.05/3.10	3.01/3.00	2.99/2.95	2.96/2.90	2.93/2.86
6	3.00/3.15	2.95/3.02	2.90/2.92	2.88/2.87	2.86/2.81	2.83/2.77
6.5	2.91/3.08	2.86/2.96	2.81/2.85	2.79/2.79	2.76/2.73	2.74/2.68
7	2.83/3.02	2.77/2.90	2.73/2.78	2.70/2.72	2.68/2.66	2.65/2.61
7.5	2.76/2.97	2.70/2.84	2.65/2.72	2.62/2.66	2.60/2.59	2.57/2.54
8	2.69/2.92	2.63/2.79	2.57/2.67	2.55/2.61	2.52/2.53	2.50/2.48
8.5	2.63/2.88	2.56/2.74	2.51/2.62	2.48/2.55	2.45/2.48	2.43/2.43
9	2.57/2.83	2.50/2.70	2.44/2.57	2.42/2.51	2.39/2.43	2.36/2.38
9.5	2.51/2.79	2.44/2.65	2.38/2.53	2.36/2.46	2.33/2.38	2.30/2.33
10	2.46/2.75	2.39/2.61	2.33/2.49	2.30/2.42	2.27/2.34	2.24/2.28
10.5	2.41/2.72	2.33/2.58	2.27/2.45	2.24/2.38	2.21/2.30	2.19/2.24
11	2.36/2.68	2.28/2.54	2.22/2.41	2.19/2.34	2.16/2.26	2.14/2.20
11.5	2.32/2.65	2.24/2.51	2.17/2.38	2.14/2.31	2.11/2.22	2.09/2.16
12	2.28/2.62	2.19/2.48	2.13/2.34	2.10/2.27	2.06/2.19	2.04/2.13
12.5	2.24/2.59	2.15/2.45	2.09/2.31	2.05/2.24	2.02/2.15	1.99/2.10
13	2.20/2.56	2.11/2.42	2.04/2.28	2.01/2.21	1.98/2.12	1.95/2.06
13.5	2.16/2.53	2.08/2.39	2.00/2.25	1.97/2.18	1.93/2.09	1.91/2.03
14	2.13/2.51	2.04/2.36	1.97/2.23	1.93/2.15	1.89/2.06	1.87/2.00

Calculation of Expected Repetitions

Project _____

Axle Load, kips	Proportion of loads (%/100)	Proportion of Axle Group (%/100)	Design Traffic	Expected Repetitions
1	2	3	4	5

Single Axles

Tandem Axles

รูปที่ 4. ตารางคำนวณ *Calculation of Expected Repetitions*

Project _____	
Trial Thickness _____ in.	Doweled joints: yes _____ no _____
Subgrade-Subbase k _____ pci.	Concrete shoulder: yes _____ no _____
Modulus of Rupture, MR _____ psi.	Design Period _____ years
Load Safety Factor, LSF _____	

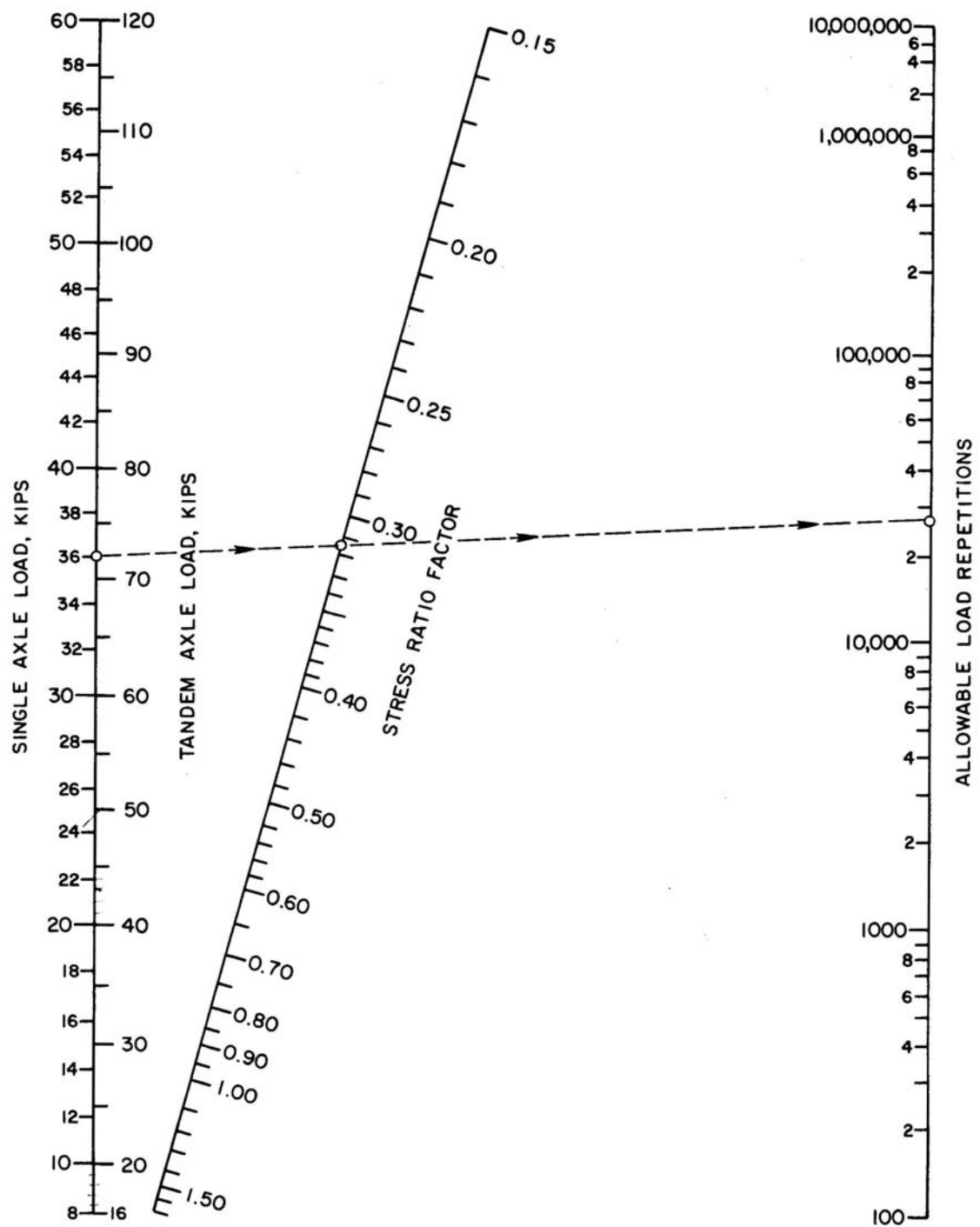
Axle load, kips	Multiplied by LSF	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Fatigue, %	Allowable repetitions	Damage, %
1	2	3	4	5	6	7

9. Stress Ratio Factor

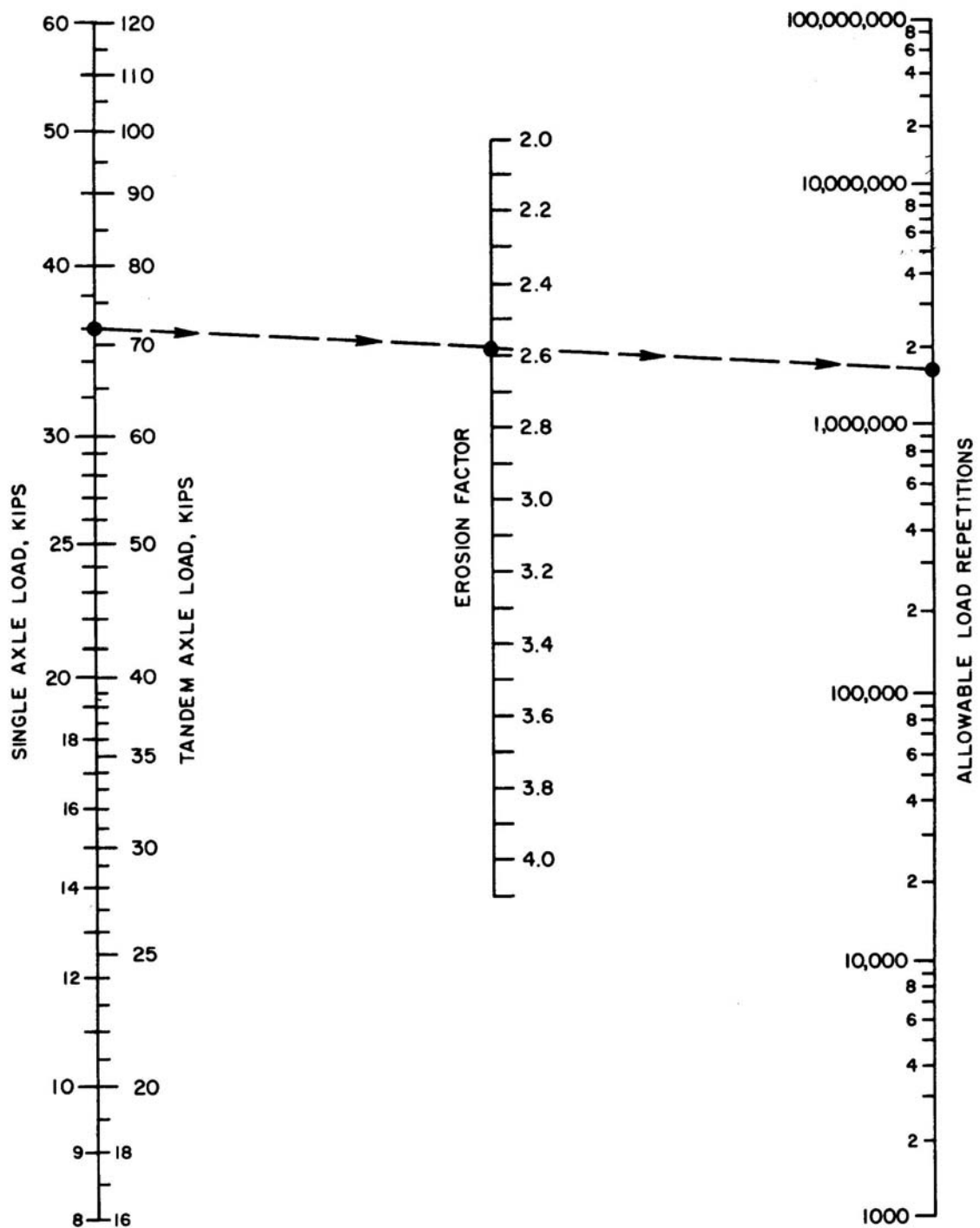
[illegible]

12. Stress Ratio Factor

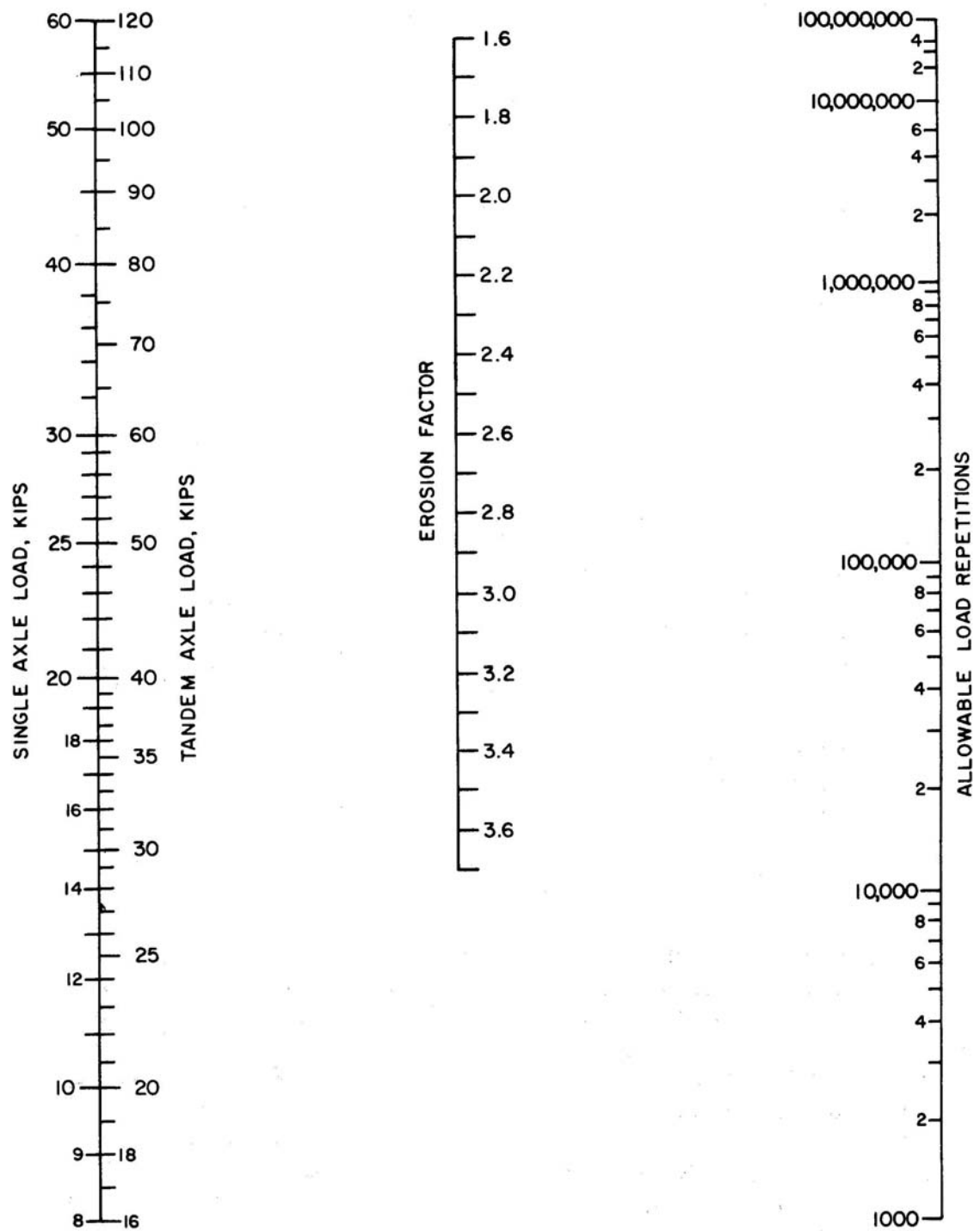
[illegible]รูปที่ 5 ตารางคำนวณ *Calculation of Pavement Thickness*



รูปที่ 6 Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ Fatigue (กรณีมี และ ไม่มีไหล่ทางคอนกรีต)



รูปที่ 7 Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ Erosion (กรณีไม่มีไหล่ทางคอนกรีต)



รูปที่ 8 Nomograph สำหรับการวิเคราะห์ Erosion (กรณีมีไหล่ทางคอนกรีต)

รอยต่อในถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตจำเป็นต้องมีรอยต่อ เพื่อป้องกันไม่ให้นถนนคอนกรีตเกิดความเสียหายจากการยืด-หดตัวของคอนกรีต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น รวมทั้งเป็นจุดต่อระหว่างการก่อสร้างคอนกรีตแผ่นต่อแผ่นด้วย รอยต่อในถนนคอนกรีตแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. Contraction Joint

เป็นรอยต่อตามขวาง (Transverse Joint) นั่นคือ รอยต่อมีทิศทางขวาง (ตั้งฉาก) กับทิศทางการจราจรรอยต่อนี้มีไว้เพื่อควบคุมรอยแตก (Crack) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage) ของคอนกรีต ทำให้ได้โดยการเลื่อยผิวคอนกรีตให้เป็นร่องก่อนที่คอนกรีตจะแข็งตัวเต็มที่ เมื่อคอนกรีตหดตัวแล้วเกิดรอยแตก รอยแตกจะถูกควบคุมให้เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ เนื่องจากที่รอยต่อผิวคอนกรีตมีความหนาต่ำกว่าที่อื่น เมื่อรอยต่อเกิดมีรอยแตกขึ้นมาแล้ว คอนกรีตจะสูญเสียการถ่ายแรงไป ดังนั้น จึงต้องมีเหล็กเดือย (Dowel Bar) เพื่อให้เกิดการถ่ายแรงจากแผ่นคอนกรีตไปสู่แผ่นคอนกรีตอีกแผ่นหนึ่งได้ โดยปกติรอยต่อชนิดนี้จะก่อสร้างให้มีระยะห่างกันประมาณ 10-15 เมตร ในถนนคอนกรีตแบบ JRC

2. Expansion Joint

เป็นรอยต่อตามขวาง มีหน้าที่ป้องกันความเสียหายของถนนคอนกรีต เนื่องจากการขยายตัว (Expansion) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ที่รอยต่อจะมีเหล็กเดือยเพื่อถ่ายแรง เหล็กเดือยต้องหล่อลื่นที่ปลายข้างหนึ่ง และต้องมีพื้นที่ให้เหล็กเดือยเคลื่อนที่ไปมาได้โดยการติดตั้งฝา (Cap) ไว้ที่ปลายเหล็กเดือย โดยปกติจะติดตั้ง Expansion Joint ทุก ๆ ระยะ 100 – 150 เมตร

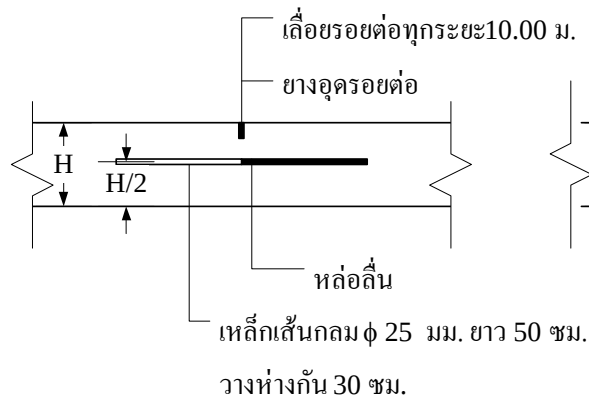
3. Construction Joint

เป็นรอยต่อตามขวาง เป็นรอยต่อที่เกิดขึ้นเมื่อมีการหยุดพักการก่อสร้าง แล้วกลับมาก่อสร้างต่อ รอยต่อชนิดนี้มีลักษณะคล้าย Contraction Joint

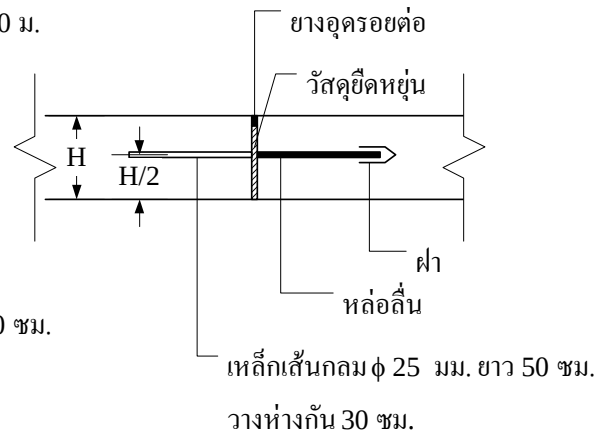
4. Longitudinal Joint

ในการก่อสร้างถนนคอนกรีต โดยทั่วไปจะไม่ทำการเทคอนกรีตทีเดียวเต็มความกว้างของถนน แต่จะเทคอนกรีตกว้างทีละ 1 ช่องจราจร ดังนั้นจึงทำให้เกิดรอยต่อระหว่างแผ่นคอนกรีตในทิศทางเดียวกับทิศทางการจราจร หรือตามยาว รอยต่อนี้ต้องถูกยึดติดกันเพื่อให้เกิดการถ่ายแรงที่สมบูรณ์โดยใช้เหล็กยึด (Tie Bar)

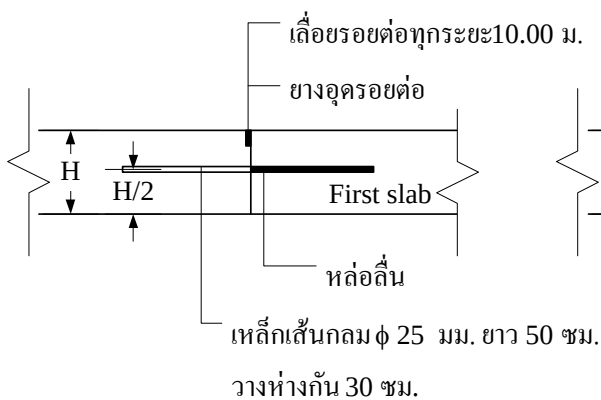
รายละเอียดตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวงของรอยต่อต่าง ๆ เหล่านี้แสดงในรูปที่ 9



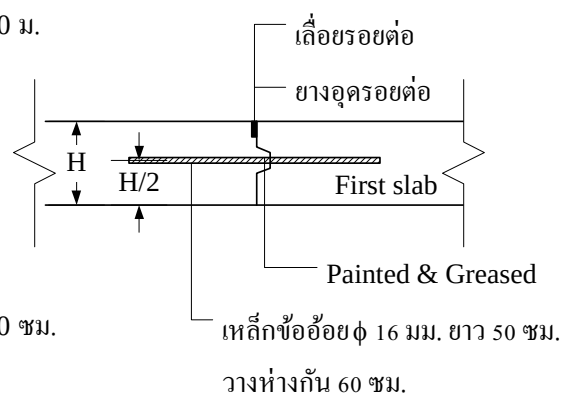
(a) Contraction Joint



(b) Expansion Joint



(c) Construction Joint



(d) Longitudinal Joint

รูปที่ 9 รายละเอียดรอยต่อของถนนคอนกรีตตามแบบมาตรฐานกรมทางหลวง

เหล็กเดือย (D o w e l)

ใช้สำหรับการถ่ายแรงบริเวณรอยต่อตามขวาง ตามมาตรฐานกรมทางหลวง เหล็กเดือย (Dowel) เป็นเหล็กเส้นกลม ขึ้นมาตรฐาน SR24 ยาว 50 เซนติเมตร และควรมีการหล่อลิ้นที่ปลายข้างหนึ่ง เส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเดือยที่เหมาะสมคือ 25 มิลลิเมตร สำหรับผิวคอนกรีตหนา 20-25 เซนติเมตร เหล็กเดือยจะถูกจัดวางห่างกัน 30 ซม. ที่รอยต่อตามขวาง และจะถูกจัดวางขนานกันกับแนวถนนและอยู่ในแนวระดับ

เหล็กยึด (T i e B a r)

ใช้เพื่อป้องกันการแยกตัวของแผ่นคอนกรีตบริเวณรอยต่อตามยาว ตามมาตรฐานกรมทางหลวง เหล็กยึดเป็นเหล็กข้ออ้อย ขึ้นมาตรฐาน SD40 เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 50 ซม. ไม่มีการหล่อลิ้น และวางห่างกัน 60 ซม. ที่กึ่งกลางความหนาของคอนกรีต บริเวณแนวรอยต่อตามยาว

การออกแบบเหล็กเสริมในถนนคอนกรีต

ถนนคอนกรีตในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นถนนคอนกรีตประเภท JRCP ซึ่งมีเหล็กเสริมหน้าท้องเหล็กเสริมในคอนกรีตไม่ได้ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดรอยแตก แต่ช่วยยึดรอยแตกให้อยู่ชิดติดกัน โดยที่ถนนคอนกรีตยังคงไม่เสียกำลังในการรับน้ำหนัก ในกรณีของถนนคอนกรีตแบบ JRCP ปริมาณเหล็กเสริมในถนนคอนกรีตสามารถคำนวณได้จาก

$$A_s = \frac{\mu LMgh}{2f_s}$$

เพื่อ	A_s	=	พื้นที่เหล็กเสริมที่ต้องการ (ต่อความกว้างของคอนกรีต)
	f_s	=	ค่ากำลังรับแรงดึงที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ในเหล็กเสริม
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก
	h	=	ความหนาของแผ่นคอนกรีต
	L	=	ระยะห่างระหว่างรอยต่อตามขวาง
	M	=	มวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของแผ่นคอนกรีต
	μ	=	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างแผ่นคอนกรีตกับวัสดุชั้นรองพื้นทาง ปกติมีค่าประมาณ 1.0-2.0

ตัวอย่างการออกแบบความหนาถนนคอนกรีต

ข้อกำหนด

ถนน 4 ช่องจราจร

ค่า CBR สำหรับการออกแบบ 2%

ค่า Flexural Strength ของคอนกรีตที่ 28 วัน = 600 psi (4.2 Mpa)

ถนนคอนกรีตเป็นแบบ JRCP โดยไม่มีไหล่ทางคอนกรีต

Load Safety Factor = 1.2

ออกแบบให้มีอายุการใช้งาน 20 ปี

ข้อมูลการจราจร

ปริมาณการจราจรทั้งหมด (ADT) = 1,893 คันต่อวัน

อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจร = 5% ต่อปี

ปริมาณรถบรรทุกหนัก = 30% ของปริมาณการจราจรทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย

- รถโดยสารขนาดใหญ่ (Heavy Bus) = 3.80 %

- รถบรรทุกขนาดกลาง (Medium Truck) = 6.61 %

- รถบรรทุกขนาดใหญ่ (Heavy Truck) = 19.59 %

ขนาดของน้ำหนักต่างๆ ที่ลงเพลาเป็นไปตามตารางที่ 3

การคำนวณ

คำนวณค่า Modulus of Subgrade Reaction (k)

CBR ของ Subgrade = 2%

จากรูปที่ 3 ค่า k ของ Subgrade = 50 pci

พิจารณาใช้ชั้นรองพื้นทางลูกรังหนา 30 ซม. (12 นิ้ว)

จากตารางที่ 1. ค่า Modulus of Subgrade – Subbase Reaction = 110 pci

คำนวณจำนวนเที่ยวของเพลขนาดต่าง ๆ

1) จำนวนเที่ยวสะสมของยานพาหนะตลอดระยะเวลาการออกแบบ

$$\begin{aligned}
 &= ADT \times \frac{(1+r)^n - 1}{r} \times 365 \\
 &= 1893 \times \frac{(1+0.05)^{20} - 1}{0.05} \times 365 \\
 &= 22846755 \quad \text{เที่ยว}
 \end{aligned}$$

จำนวนเที่ยวสะสมของยานพาหนะใน Design Lane

$$\begin{aligned}
 &= 22846755 \times 0.45 \\
 &= 10281040 \quad \text{เที่ยว}
 \end{aligned}$$

- 2) กรอกรายข้อมูลในตารางที่ 3 ลงใน 3 สดมภ์แรกของตารางคำนวณ “Calculation of Expected Repetition” พร้อมด้วยจำนวนเที่ยวสะสมของยานพาหนะใน Design Lane ลงในสดมภ์ที่ 4
- 3) คำนวณจำนวนเที่ยวของเพลที่รับน้ำหนักต่างๆ กัน โดยคูณค่าในสดมภ์ที่ 2, 3 และ 4 เข้าด้วยกัน นำผลลัพธ์กรอกลงในสดมภ์ที่ 5
- 4) นำค่าน้ำหนักกระทำลงเพลในสดมภ์ที่ 1 และ ค่าในสดมภ์ที่ 5 ของตารางคำนวณ “Calculation of Expected Repetition” ไปกรอกลงในสดมภ์ที่ 1 และ 3 ของตารางคำนวณ “Calculation of Pavement Thickness”

วิเคราะห์ Fatigue และ Erosion

ใช้ตารางคำนวณ “Calculation of Pavement Thickness”

- 1) เลือกค่า Equivalent Stress และ Erosion Factor ที่เหมาะสมสำหรับเพลแบบต่างๆ จากตารางที่ 5 และตารางที่ 7 ตามลำดับ จากนั้นคำนวณค่า Stress Ratio Factor โดยการหาค่า Equivalent Stress ด้วยค่า Flexural Strength ของคอนกรีต
- 2) คำนวณจำนวนเที่ยวของน้ำหนักรกระทำที่ยอมให้โดยไม่เกิดความเสียหายจาก Fatigue โดยใช้ Nomograph ในรูปที่ 6 ลากเส้นเชื่อมจุดค่าน้ำหนักลงเพล และค่า Stress Ratio Factor ไปสู่ค่าจำนวนเที่ยวที่ยอมให้ ถ้าหากเส้นที่เชื่อมต่อไม่ตัดแกนจำนวนเที่ยวที่ยอมให้น้ำหนักลงเพล

- ขนาดนั้น สามารถกระทำต่อโครงสร้างถนนได้ไม่จำกัดจำนวนที่ขั้วกรอกผลัฟ์ลงในสดมภ์ที่ 4
- 3) คำนวณอัตราส่วนการเกิด Fatigue เนื่องจากจำนวนที่ขั้วของเพลลาที่คาดว่าจะแล่นผ่านถนน โดยการหารค่าในสดมภ์ที่ 3 ด้วยค่าในสดมภ์ที่ 4 จากนั้นทำเป็นเปอร์เซนต์โดยการคูณด้วย 100 กรอกผลัฟ์ลงในสดมภ์ที่ 5
 - 4) คำนวณจำนวนที่ขั้วที่ยอมให้เกิดขึ้นได้โดยไม่เกิดความเสียหายจาก Erosion โดยวิธีในการทำ เดียวกันกับการวิเคราะห์ Fatigue แต่คำนวณโดยใช้ Nomograph ในรูปที่ 7 จากค่าน้ำหนัก กระทำและ Erosion Factor กรอกผลัฟ์ลงในสดมภ์ที่ 6
 - 5) คำนวณอัตราส่วนการเกิด Erosion โดยการหารค่าในสดมภ์ที่ 3 ด้วยค่าในสดมภ์ที่ 6 จากนั้นทำ เป็นเปอร์เซนต์โดยการคูณด้วย 100 แล้วกรอกผลัฟ์ลงในสดมภ์ที่ 7
 - 6) หลังจากวิเคราะห์ Fatigue และ Erosion จนครบทุกขนาดน้ำหนักและครบทุกรูปแบบเพลลา แล้ว รวมค่าในสดมภ์ที่ 5 ทั้งหมดเป็นผลรวมของอัตราส่วน Fatigue และรวมค่าในสดมภ์ที่ 7 ทั้งหมดเป็นผลรวมของอัตราส่วนการเกิด Erosion

การวิเคราะห์ผลการคำนวณ

จากตัวอย่างจะเห็นว่าผลรวมของอัตราส่วน Fatigue และ Erosion มีค่า 99.98% และ 21.42% ตามลำดับ ค่าอัตราส่วนของ Fatigue และ Erosion มีค่าต่ำกว่า 100% ดังนั้น ความหมายของคอนกรีต 25 ซม. สามารถรองรับปริมาณการจราจรในช่วงระยะเวลาที่ออกแบบได้

Calculation of Expected Repetitions

Project _____ ตัวอย่าง _____

Axle Load, kips	Proportion of loads (%/100)	Proportion of Axle Group (%/100)	Design Traffic	Expected Repetitions
1	2	3	4	5

Single Axles (MT)

5.73	0.4338	0.0661	10281040	294801
7.16	0.0814	0.0661	10281040	55318
8.60	0.0954	0.0661	10281040	64832
10.03	0.0985	0.0661	10281040	66938
11.46	0.0723	0.0661	10281040	49133
12.89	0.0626	0.0661	10281040	42542
14.33	0.0518	0.0661	10281040	35202
15.76	0.0302	0.0661	10281040	20523
17.19	0.0233	0.0661	10281040	15834
18.62	0.0051	0.0661	10281040	3466
20.06	0.0085	0.0661	10281040	5776
21.49	0.0040	0.0661	10281040	2718
22.92	0.0120	0.0661	10281040	8155
24.35	0.0137	0.0661	10281040	9310
25.79	0.0023	0.0661	10281040	1563

Single Axles (HB)

11.46	0.0530	0.0380	10281040	20706
12.89	0.2939	0.0380	10281040	114821
14.33	0.4086	0.0380	10281040	159632
15.76	0.1774	0.0380	10281040	69307
17.19	0.0609	0.0380	10281040	23792
18.62	0.0062	0.0380	10281040	2422

Calculation of Expected Repetitions

Project _____ ตัวอย่าง _____

Axle Load, kips	Proportion of loads (%/100)	Proportion of Axle Group (%/100)	Design Traffic	Expected Repetitions
1	2	3	4	5

Tandem Axles (HT)

14.11	0.3974	0.1959	10281040	800387
15.87	0.0141	0.1959	10281040	28398
17.63	0.0097	0.1959	10281040	19536
19.40	0.0113	0.1959	10281040	22759
21.16	0.0102	0.1959	10281040	20543
22.92	0.0110	0.1959	10281040	22155
24.68	0.0104	0.1959	10281040	20946
26.45	0.0193	0.1959	10281040	38871
28.21	0.0206	0.1959	10281040	41490
29.97	0.0136	0.1959	10281040	27391
31.74	0.0625	0.1959	10281040	125879
33.50	0.0333	0.1959	10281040	67068
35.26	0.0766	0.1959	10281040	154277
37.03	0.1908	0.1959	10281040	384282
38.79	0.0234	0.1959	10281040	47129
40.55	0.0084	0.1959	10281040	16918
42.32	0.0035	0.1959	10281040	7049
44.08	0.0045	0.1959	10281040	9063
45.84	0.0071	0.1959	10281040	14300
47.61	0.0045	0.1959	10281040	9063
49.37	0.0136	0.1959	10281040	27391
51.13	0.0329	0.1959	10281040	66263
52.90	0.0022	0.1959	10281040	4431
54.66	0.0032	0.1959	10281040	6445
56.42	0.0041	0.1959	10281040	8258
58.19	0.0076	0.1959	10281040	15307
59.95	0.0022	0.1959	10281040	4431
61.71	0.0004	0.1959	10281040	806

Calculation of Pavement Thickness

Project _____ ตัวอย่าง _____

Trial Thickness 10 นิ้ว (250 มม.)Doweled joints: yes /no Subgrade-Subbase k 110 pci.Concrete shoulder: yes /no Modulus of Rupture, MR 600 psi.Design Period 20 yearsLoad Safety Factor, LSF 1.2

Axle load, kips	Multiplied by LSF	Expected repetitions	Fatigue analysis		Erosion analysis	
			Allowable repetitions	Fatigue, %	Allowable repetitions	Damage, %
1	2	3	4	5	6	7

8. Equivalent stress 197.2 10 Erosion Factor 2.5379. Stress Ratio Factor 0.329**Single Axles (MT + HB)**

5.73	6.88	294801	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
7.16	13.20	55318	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
8.60	10.31	64832	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
10.03	12.03	66938	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
11.46	13.75	69840	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
12.89	15.47	157362	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
14.33	17.19	194834	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
15.76	18.91	89830	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
17.19	20.63	39627	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
18.62	22.35	5888	ไม่จำกัด	0	1000000000	0.01
20.06	24.07	5776	ไม่จำกัด	0	40000000	0.01
21.49	25.79	2718	ไม่จำกัด	0	22000000	0.01
22.92	27.51	8155	1600000	0.51	13000000	0.06
24.35	29.23	9310	330000	2.82	8000000	0.12
25.79	30.94	1563	125000	1.25	5400000	0.03

11. Equivalent stress 189.0 13. Erosion Factor 2.75212. Stress Ratio Factor 0.315**Tandem Axles**

14.11	16.93	800387	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
15.87	19.04	28398	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
17.63	21.16	19536	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
19.40	23.27	22759	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
21.16	25.39	20543	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
22.92	27.51	22155	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
24.68	29.62	20946	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
26.45	31.74	38871	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
28.21	33.85	41490	ไม่จำกัด	0	ไม่จำกัด	0
29.97	35.97	27391	ไม่จำกัด	0	70000000	0.04
31.74	38.09	125879	ไม่จำกัด	0	35000000	0.36

33.50	40.20	67068	ไม่จำกัด	0	20000000	0.34
35.26	42.32	154277	ไม่จำกัด	0	14000000	1.10
37.03	44.43	384282	ไม่จำกัด	0	9100000	4.22
38.79	46.55	47129	ไม่จำกัด	0	6600000	0.71
40.55	48.66	16918	ไม่จำกัด	0	5000000	0.34
42.32	50.78	7049	ไม่จำกัด	0	4000000	0.18
44.08	52.90	9063	ไม่จำกัด	0	3000000	0.30
45.84	55.01	14300	10000000	0.14	2400000	0.60
47.61	57.13	9063	1600000	0.57	1800000	0.50
49.37	59.24	27391	600000	4.57	1600000	1.71
51.13	61.36	66263	400000	16.57	1400000	4.73
52.90	63.48	4431	170000	2.61	1000000	0.44
54.66	65.59	6445	110000	5.86	820000	0.79
56.42	67.71	8258	70000	11.80	700000	1.18
58.19	69.82	15307	46000	33.28	600000	2.55
59.95	71.94	4431	29000	15.28	500000	0.89
61.71	74.05	806	17000	4.74	400000	0.20
รวม				99.98	รวม	21.42