การออกแบบทางคอนกรีตของสนามบิน
Design of Rigid Airport Pavment

Weerayuth Suanpaga
(D.ENG-Candidate)

Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering , Kasetsart University
Bangkok, Thailand

http://203.159.10.20/~weerayuth/GIS

การออกแบบทางคอนกรีตของสนามบิน

เป็นการประยุกต์ใช้ระหว่างทฤษฎีคำนวณแรงที่เกิดในแผ่นคอนกรีต ประกอบกับประสบการณ์ที่ได้จากการทำงานในสนามบินที่มีอยู่แล้ว มาช่วยในการพิจารณา

จากการวิเคราะห์ตามทฤษฎีแรงเค้น ขึ้นอยู่กับ K, E และ μ ของคอนกรีต ซึ่งแรงดังกล่าว มีสาเหตุมาจาก

1. น้ำหนักล้อ
2. อุณหภูมิเนื่องจากแสงแดด
3. ความชื้น
4. ความฝืดระหว่างผิวคอนกรีตกับดินที่รอบรับ

การวิเคราะห์แรงที่เกิดจากน้ำหนักล้อใช้ทฤษฎีของ
Westergaard

มีสมมติฐานดังนี้

1. ผิวทางคอนกรีตมีลักษณะเหมือนวัสดุแผ่นบางวางอยู่บนดินคันทาง ซึ่งมี ความยืดหยุ่นตามแนวดิ่ง
2. แผ่นคอนกรีต มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกันโดยตลอด (Isotropic) และเป็น Elastic solid
3. น้ำหนักล้อของเครื่องบินจะแผ่กระจายลงบนผิวทางในลักษณะเป็นรูปวงรี

แรงที่เกิดในแผ่นคอนกรีต

แรงที่เกิดในแผ่นคอนกรีต วิเคราะห์ได้สมการ ดังนี้

Interior Stress $\sigma_i = \frac{P}{d^2}\{0.275(1+\mu)\log_{10}\frac{Ed^3}{K\left[\frac{a+b}{2}\right]^4} \pm 0.239(1-\mu)+0.239(1-\mu)\frac{a-b}{a+b}\}$

Edge Stress $\sigma_e =$

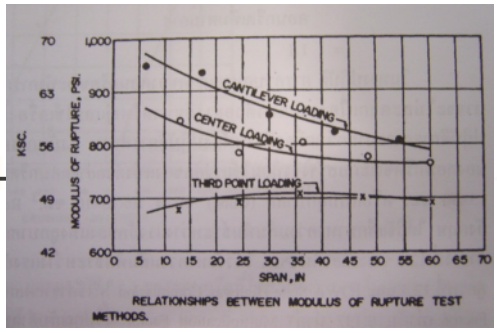
$$\frac{2.2(1-\mu)P}{(3+\mu)d^2}\log_{10}\frac{Ed^2}{100K\left[\frac{a+b}{2}\right]^4}+\frac{3(1+\mu)P}{\pi(3+\mu)d^2}\{1.84-\frac{4}{3}+(1+\mu)\frac{a-b}{a+b}+2(1-\mu)\frac{ab}{(a+b)^2}+1.18(1+2\mu)\frac{b}{l}\}$$

กำหนดให้ P = น้ำหนักล้อ (ปอนด์)
a, b = ความยาวของรูปวงรี
x, y = ระยะตามแนวราบและแนวตั้ง
d = ความหนาของพื้นทาง

โมดูลัสการแตกหักของคอนกรีต
(Modulus of Rupture)

คือ Stress ตรงบริเวณผิวนอกของคานคอนกรีต เมื่อรับแรงกระทำจนกระทั่งถึงจุดแตกหัก หาได้ 3 วิธี

1. การทดสอบแบบคานยื่น (Cantilever Loading)
2. การทดสอบแบบออกแรงกดกลางคานเพียงจุดเดียว (Midspan Loading)
3. การทดสอบแบบออกแรงกดสองจุด โดยแบ่งช่วงคานเท่าๆกันสามช่วง (Third Point Loadind)



ภาพที่ 12.1 โมดูลัสการแตกหักจากการทดลองแบบต่างๆ

โมดูลัสการแตกหักของคอนกรีตที่ใช้ออกแบบ

Packard, R.G. แนะนำให้ใช้ค่า MR ในการออกแบบตามสมการนี้

$$DMR = MR_{90}\left[1-\frac{CV}{100}\right]M$$

กำหนดให้ DMR = โมดูลัสออกแบบ (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

MR_{90} = โมดูลัสแตกหักเฉลี่ยที่ 90 วัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)

CV = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสการแตกหัก (%)

= < 10% คอนกรีตมีคุณภาพดี

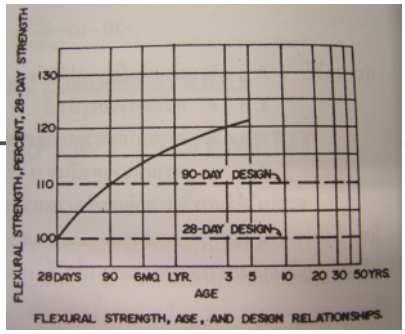
= 15 – 20% คอนกรีตมีคุณภาพใช้ได้

= > 20% คอนกรีตคุณภาพไม่ดี

M = แฟกเตอร์เฉลี่ยของโมดูลัสแตกหัก = 1.1

7

โมดูลัสการแตกหักของคอนกรีตที่ใช้ออกแบบ



ภาพที่ 12.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุและ Flexural Strength ของคอนกรีต

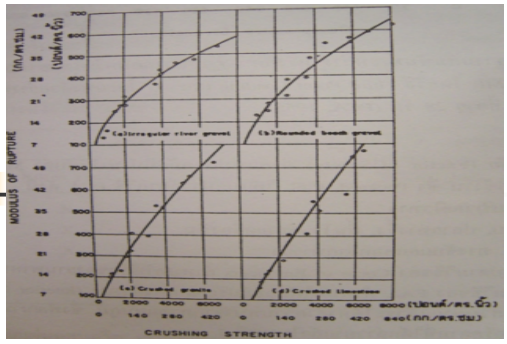
8

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดแท่งลูกบาศก์คอนกรีตและ MR

ตารางที่ 12.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดแท่งลูกบาศก์คอนกรีตและ MR ของ Road Research Laboratory

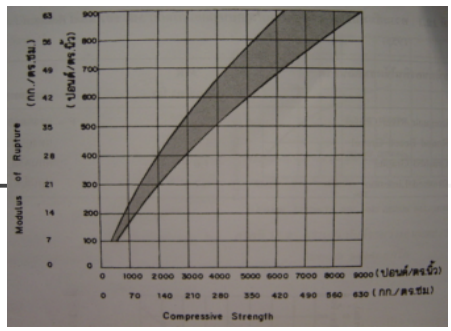
ชนิดของหินที่ใช้ผสมคอนกรีต	MR (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)
Irregular River Gravel	$6.5F^{0.5}$
Round Beach Gravel	$4.6F^{0.55}$
Crushed Granite	$1.6F^{0.7}$
Crashed Lime Stone	$0.7F^{0.8}$

9



ภาพที่ 12.3 ความสัมพันธ์ระหว่างMR และแรงอัดแท่งคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมชนิดต่างๆ (Road Research Laboratory)

10



ภาพที่ 12.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง MR และแรงอัดแท่งคอนกรีตที่ใช้ส่วนผสมชนิดต่างๆ (PCA)

11

ส่วนปลอดภัย (Factor of Safety) ของค่า MR

Packard, R.G. แนะนำให้ใช้ค่าส่วนปลอดภัยในการใช้ค่า MR ขึ้นกับลักษณะหรือบริเวณผิวของทางที่จะใช้งาน ตามวิธีของ PCA ดังนี้

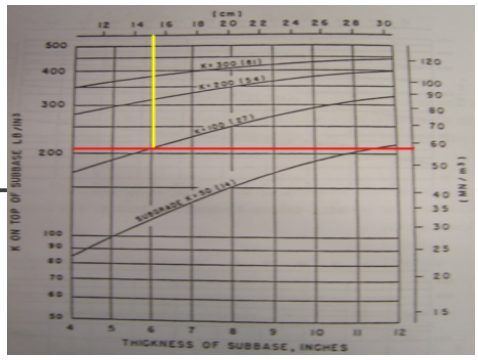
บริเวณผิวทาง	ส่วนปลอดภัย
ลานจอด, ทางขับ, ปลายทางวิ่ง, พื้นโรงซ่อม, เครื่องบิน	1.7 – 2.0
ช่วงกลางทางวิ่ง, ทางขับแยกออกจากทางวิ่ง	1.4 – 1.7

12

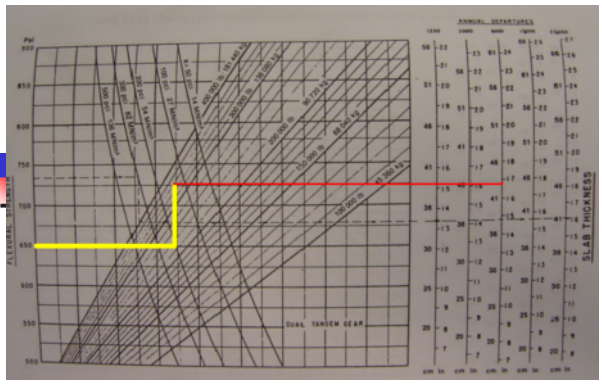
การออกแบบด้วยวิธี Federal Aviation Administration (FAA)

ประกอบด้วยการพิจารณาค่าต่างๆ ดังนี้

1. Flexural Strength ได้จากการทดลองค่าโมดูลัสการแตกหักของคอนกรีต แบบ Third Point Loading
2. น้ำหนักของเครื่องบินออกแบบ
3. จำนวนครั้งของเครื่องบินขึ้นต่อปี (Annual Departure)
4. ลักษณะของรองพื้นทาง ซึ่งจะช่วยเพิ่มค่า K ในดินคันทาง



ภาพที่ 12.5ผลของรองพื้นทางที่ปรับปรุงคุณภาพต่อค่า K ในดินคันทาง



ภาพที่ 12.6 แผนภูมิใช้ออกแบบทางคอนกรีต, Dual Tandem Gear (FAA)

ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธี FAA

ตัวอย่างที่ 1 ออกแบบสนามบินรับเครื่องหนัก 350,000 ปอนด์ (160,000 kg) เพลาแบบ Dual Tendem มีอัตราการบินขึ้น 6,000 ครั้งต่อปี ดินคันทาง K = 100 ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว (25 MN/m^3) จัดอยู่ในประเภท CL การระบายน้ำไม่ดีและเกิด Frost ลึก 17 นิ้ว (45 cm.) ค่าแรงอัดของคอนกรีตกำหนดให้ 650 ปอนด์/ตร.นิ้ว (4.5 MN/m^2)

วิธีทำ ทำการปรับปรุงดินโดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์หนา 15 cm.

จากภาพ 12.5 จะมีค่า K เพิ่มจาก 100 เป็น 210 ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว

จากภาพ 12.6 จะได้ความหนาของแผ่นคอนกรีต = 43 cm.

ดังนั้น ความหนาของผิวทาง + รองผิวทาง = 43 + 15 = 58 cm.

จากที่เกิด Frost ลึก 45 cm. ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องยกระดับป้องกับ Frost อีก

การออกแบบด้วยวิธี Portland Cement Association Method (PCA)

เป็นการคำนวณออกแบบความหนาของผิวทางคอนกรีตในสนามบิน โดยพิจารณาในกรณีที่น้ำหนักล้อกระทำบริเวณกลางแผ่นคอนกรีต โดยกำหนดให้

$E = 4 \times 10^6$ ปอนด์/ตร.นิ้ว

$\mu = 0.15$

MR เป็นค่าที่ได้จากการทดลองกดคานโดยวิธี Third Point Loading และหารด้วยส่วนปลอดภัย

การออกแบบด้วยวิธี Portland Cement Association Method (PCA)

แผนภูมิออกแบบที่ PCA กำหนดให้แต่ละภาพใช้กับเครื่องบินแบบต่างๆกัน แต่ถ้ามีเครื่องบินประเภทอื่นมาร่วมใช้สนามบิน (Mixed Air Traffic) จำเป็นต้องพิจารณาถึงการล้าของผิวทาง (Fatigue) โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ จำนวนครั้งที่เครื่องบินกดทับไปบนผิวทางและน้ำหนักของล้อที่บดทับ

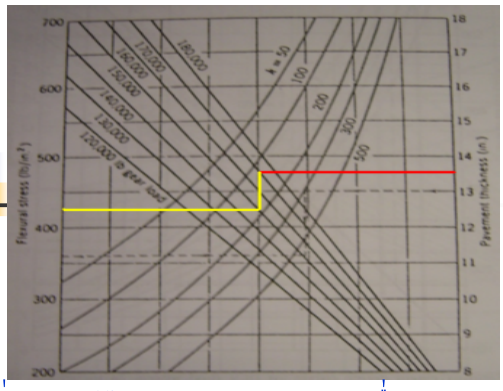
PCA กำหนด Stress Ratio = Actual Stress/Allowable Stress

ถ้า Stress Ratio มีค่าน้อยกว่า 0.51 ผิวทางคอนกรีตสามารถรับน้ำหนักการบดทับได้ไม่จำกัด แต่ถ้า Stress Ration มีค่าสูงมาก จำนวนครั้งการบดทับจะได้น้อยลง

การออกแบบด้วยวิธี Portland Cement Association Method (PCA)

Stress Ratio	จำนวนครั้งบดทับที่ยอมให้	Stress Ratio	จำนวนครั้งบดทับที่ยอมให้
0.51	400,000	0.63	14,000
0.52	300,000	0.64	11,000
0.53	240,000	0.65	8,000
0.54	180,000	0.66	6,000
0.55	130,000	0.67	4,500
0.56	100,000	0.68	3,500
0.57	75,000	0.69	2,500
0.58	57,000	0.70	2,000
0.59	42,000	0.71	1,500
0.60	32,000	0.72	1,100
0.61	24,000	0.73	850
0.62	18,000	0.74	650

19



ภาพที่ 12.7 แผนภูมิใช้ออกแบบความหนาผิวทางคอนกรีตรับเครื่องบิน Boeing 707 (PCA)

20

ตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธี (PCA)

ตัวอย่างที่ 12.2 กำหนดความหนาผิวทางคอนกรีตเพื่อรับเครื่อง Boeing 707 มีน้ำหนักเพลา 170,000 ปอนด์, K = 200 ปอนด์/ลบ.นิ้ว, MR = 600 ปอนด์/ตร.นิ้ว, FS = 1.5

วิธีทำ Allowable Working Stress = 650/1.5

= 433 ปอนด์/ตร.นิ้ว

จากภาพที่ 12.7 จะได้ความหนาของผิวทางคอนกรีต = 13.5 นิ้ว

21

การออกแบบด้วยวิธี Corps of Engineers

การออกแบบวิธีนี้ ค่า K จะได้จากการทดสอบในสนาม ส่วนค่า Flexural Stress ให้ใช้ค่าที่ได้จากการทดลองโดยไม่ต้องหารด้วย FS เพราะว่าค่าที่คำนวณได้จากแผนภูมิได้เผื่อค่าส่วนปลอดภัยไว้แล้ว

การบดอัด Corps of Engineers แสดงดังตาราง

ชนิดของดิน			Cohesive Soil	Cohesionless Soil
ดินถันทาง	ดินตัด (Cut)	15 ซม. จากผิวดิน	90% Mod. AASHTO	100% Mod. AASHTO
		45 ซม. จากผิวดิน	-	95% Mod. AASHTO
	ดินถม (Fill)	15 ซม. จากผิวดิน	-	100% Mod. AASHTO
		< 15 ซม. จากผิวดิน	-	95% Mod. AASHTO
พื้นทาง		15 ซม. จากผิวดิน	-	100% Mod. AASHTO
		< 15 ซม. จากผิวดิน	-	95% Mod. AASHTO

22

การหาขนาดแผ่นคอนกรีตในวิธีต่างๆ

หน่วยงาน	ความหนาของคอนกรีต	ไม่เสริมเหล็ก		เสริมเหล็ก	
		ตามยาว (ft)	ตามขวาง(ft)	ตามยาว (ft)	ตามขวาง(ft)
FAA	≤ 9	12.5	15		
	9 – 12	20	20		
	> 12	25	25		
PCA	≤ 12	12.5 (Max)	15 – 20	12.5 (Max)	30 – 40
	12 – 15 (ล้อบดทับซ้ำแนวเดียวกัน)	12.5 (Max)		12.5 (Max)	
	≥ 15	Varies	25 – 30	Varies	50
	12 – 15 (ล้อบดทับไม่ซ้ำแนวเดียวกัน)	Varies	25 – 30	Varies	50
CE	≤ 9	12.5	15 (Max)		
	9 – 12	20 (Max)	20 (Max)		
	> 12	25 (Max)	25 (Max)		

23

การเสริมเหล็กในงานสนามบิน

จุดประสงค์

1. ป้องกันการแตกร้าวในแผ่นคอนกรีต เนื่องจากอุณหภูมิ
2. ลดการแอ่นตัวของแผ่นคอนกรีต
3. ลดรอยต่อของแผ่นคอนกรีต
4. ยืดอายุการใช้งานของผิวทาง

การเสริมเหล็กมี 3 ประเภท

1. การเสริมเหล็กในแผ่นคอนกรีต
2. การเริมเหล็กยึดแผ่นคอนกรีต (Tie Bar)
3. การเสริมเหล็กเดือย (Dowel Bar)

24

การเสริมเหล็กในแผ่นคอนกรีต

เป็นการเสริมเพื่อป้องกันการแตกร้าว มีสูตรดังนี้

$$A_s = \frac{WLf}{2f_s}$$

กำหนดให้ A_s = พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (ตร.ซม./เมตร)

W = น้ำหนักแผ่นคอนกรีต (กก./ตร.เมตร)

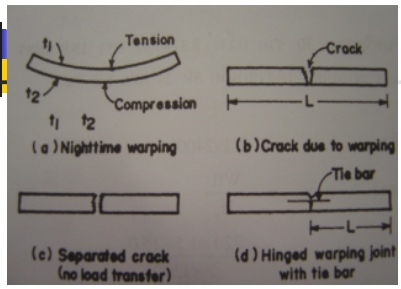
f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวทางและพื้นทาง = 1.5

L = ความยาวของแผ่นคอนกรีต (เมตร)

f_s = Allowable Steel Stress (กก./ตร.ซม.)

การเสริมเหล็กยึดแผ่นคอนกรีต (Tie Bar)

เป็นการเสริมเพื่อยึดรอยต่อตามยาวเหล็กยึดจะต้องเป็นเหล็กข้ออ้อย มีสูตรดังนี้



$$A_s = \frac{WLf}{f_s}$$

ภาพที่ 12.8 การเกิดรอยแตกตามความยาวในแผ่นคอนกรีต

การเสริมเหล็กยึดแผ่นคอนกรีต (Tie Bar)

ความยาวของเหล็กยึดแผ่นคอนกรีตคำนวณได้จาก : $\mu = \frac{WLf}{\Sigma_0 (t/2)}$

แต่โดยปกติจะเพิ่มความยาวของเหล็กยึดอีก 7.5 ซม.

จาก $WLf = A_s f_s$

ดังนั้น $t = \frac{1 f_s d}{2\mu}$

กำหนดให้ μ = แรงยึดเกาะระหว่างเหล็กกับคอนกรีต (กก./ซม.^{2})

Σ_0 = เส้นรอบวงของเหล็กยึด (ซม.)

t = ความยาวของเหล็กยึด (ซม.)

W = น้ำหนักของแผ่นคอนกรีต (กก./ม.^{2})

L = ความยาวของแผ่นคอนกรีต (ม.)

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน = 1.5

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็ก (ซม.)

การเสริมเหล็กในงานสนามบิน

ตัวอย่างที่ 12.3 แผ่นคอนกรีตหนา 32 ซม. กว้าง 3.8 เมตร ยาว 15.0 เมตร จงคำนวณเหล็กเสริมกันร้าวและเหล็กยึด โดยใช้เหล็ก SR 24 และ SD 30

วิธีทำ น้ำหนักคอนกรีต = 0.3 x 2400 = 720 กก./ม^2.

เหล็กเสริมตามยาว $A_s = \frac{WLf}{2f_s} = \frac{720 \times 1.5 \times 15}{2 \times 1200} = 6.75$ ซม.^{2}/ม.

ดังนั้น ใช้ Ø 9 @ 9.0 ซม.

เหล็กเสริมตามขวาง $A_s = \frac{720 \times 1.5 \times 3.8}{2 \times 1200} = 1.71$ ซม.^{2}/ม.

ดังนั้น ใช้ Ø 9 @ 35.0 ซม.

เหล็กยึด $A_s = \frac{720 \times 1.5 \times 3.8}{1500} = 2.74$ ซม.^{2}/ม.

ดังนั้น ใช้เหล็กข้ออ้อย Ø 12 มม. @ 40.0 ซม.

ความยาวของเหล็กยึด $t = \frac{1 f_s d}{2\mu} + 7.5 = \frac{1 \times 1500 \times 1.2}{2 \times 22.0} + 7.5 = 45$ ซม.

การเสริมเหล็กเดือย (Dowel Bar)

ทำหน้าที่ถ่ายน้ำหนักระหว่างแผ่นคอนกรีต ใช้กับรอยต่อตามขวาง เช่น รอยต่อก่อสร้าง รอยต่อเพื่อการหดตัวและขยายตัว แสดงขนาดและความยาวของเหล็กเดือย ดังตาราง

หน่วยงาน	ความหนาของคอนกรีต (นิ้ว)	ขนาด ø (นิ้ว)	ความยาว (นิ้ว)	ระยะห่าง (นิ้ว)
FAA	6 – 7	¾	18	12
	8 – 12	1	18	12
	13 – 16	1 ¼	20	12
	17 – 20	1 ½	20	18
	21 – 24	2	24	18

การเสริมเหล็กเดือย (Dowel Bar)

หน่วยงาน	ความหนาของคอนกรีต (นิ้ว)	ขนาด ø (นิ้ว)	ความยาว (นิ้ว)	ระยะห่าง (นิ้ว)
PCA	5 – 6	¾	16	12
	7 – 8	1	18	12
	9 – 11	1 ¼	18	12
	12 – 16	1 ½	20	15
	17 – 20	1 ¾	22	18
	21 – 25	2	24	18
CE	< 8	¾	16	12
	8 – 11	1	16	12
	12 – 15	1 - ¼	20	15
	16 – 20	1 – 1 ½	20	18
	21 – 25	2	24	18
	> 25	3	30	18

รอยต่อในแผ่นคอนกรีต

แบ่งลักษณะรอยต่อตามจุดประสงค์การใช้งานได้ดังนี้

1. รอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint)
2. รอยต่อการก่อสร้าง (Construction Joint)
3. รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint)
4. รอยต่อตามยาว (Hing or Warping Joint)

รอยต่อในแผ่นคอนกรีต

ความยาวของร่องรอยต่อตามขวาง คำนวณได้ตากสูตร

$$Z = L(12)[\varepsilon\Delta t+\delta]$$

กำหนดให้

L = ความยาวของแผ่นคอนกรีต (ฟุต)

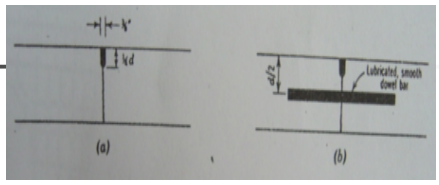
Z = ความกว้างของร่องรอยต่อ (นิ้ว)

ε = สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ (5×10^{-6} นิ้ว/นิ้ว/°ฟ)

δ = สัมประสิทธิ์การหดตัวคอนกรีต (5×10^{-5} นิ้ว/นิ้ว)

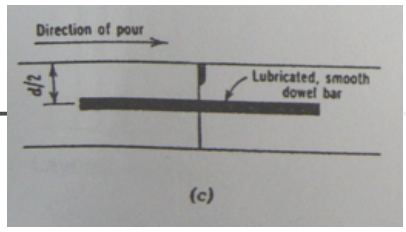
Δt = ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (°ฟ)

รอยต่อในแผ่นคอนกรีต



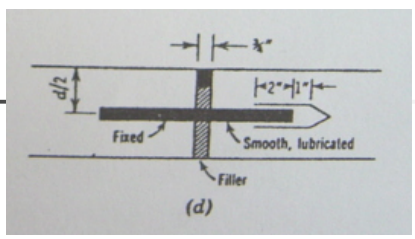
ภาพที่ 12.9 รอยต่อเพื่อการหดตัว (Contraction Joint)

รอยต่อในแผ่นคอนกรีต



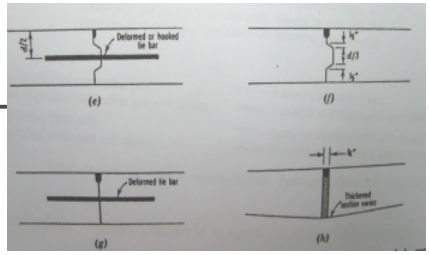
ภาพที่ 12.10 รอยต่อการก่อสร้าง (Construction Joint)

รอยต่อในแผ่นคอนกรีต



ภาพที่ 12.11 รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint)

รอยต่อในแผ่นคอนกรีต



ภาพที่ 12.11 รอยต่อเพื่อการขยายตัว (Expansion Joint)