หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีและทบทวนผลงานในอดีต

จากการศึกษาผลงานของ Flaherty (8) กล่าวว่า การทำ cement - stabilization เป็นที่นิยมมาก และเป็นวิธีการที่ดีอันดับสอง รองจากการใช้เครื่องจักรกลบดอัด (mechanical stabilization) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก

(1) ซีเมนต์เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในทุกประเทศ

(2) มีการผลิตซีเมนต์เป็นจำนวนมากในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์แต่ละแห่ง ซึ่งทำให้ราคาผลิตและราคาจำหน่ายต่อหน่วยลดลง

(3) สามารถทำการปฏิบัติได้ง่าย เพราะมีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก

(4) มีข้อมูลที่จะศึกษาค้นคว้าเป็นจำนวนมาก

(5) soil เกือบทุกชนิดสามารถนำมาทำ cement - stabilization ได้

3.1 <u>ชนิดของวัสดุที่เหมาะสมในการทำ cement - stabilization</u>

ชนิดของวัสดุตัวอย่างที่เหมาะสมในการทำ cement - stabilization นั้น สามารถพิจารณาจากคุณสมบัติต่าง ๆ ดังที่จะกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

3.1.1 <u>คุณสมบัติโดยทั่วไป</u> Lambe, Michaels และ Moh (7) ได้กล่าวว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นสาร stabilizer ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและได้ผลดีมาก เหมาะสมที่จะใช้กับวัสดุพวก inorganic มาก ทั้งนี้โดยจะใช้ปริมาณซีเมนต์ที่แตกต่างกันไป ตามคุณสมบัติของวัสดุและการใช้งานต่าง ๆ สาเหตุที่ไม่นิยมใช้กับวัสดุที่มีสาร organic ปะปนอยู่มากนั้น เพราะเหตุว่าสาร organic ที่มีอยู่นี้ สามารถไปรบกวนการทำปฏิกริยา

cement hydrationได้ ซึ่งทำให้วัสดุผสมที่ได้มีกำลังต่ำ และไม่สามารถนำไปใช้งานได้ดี

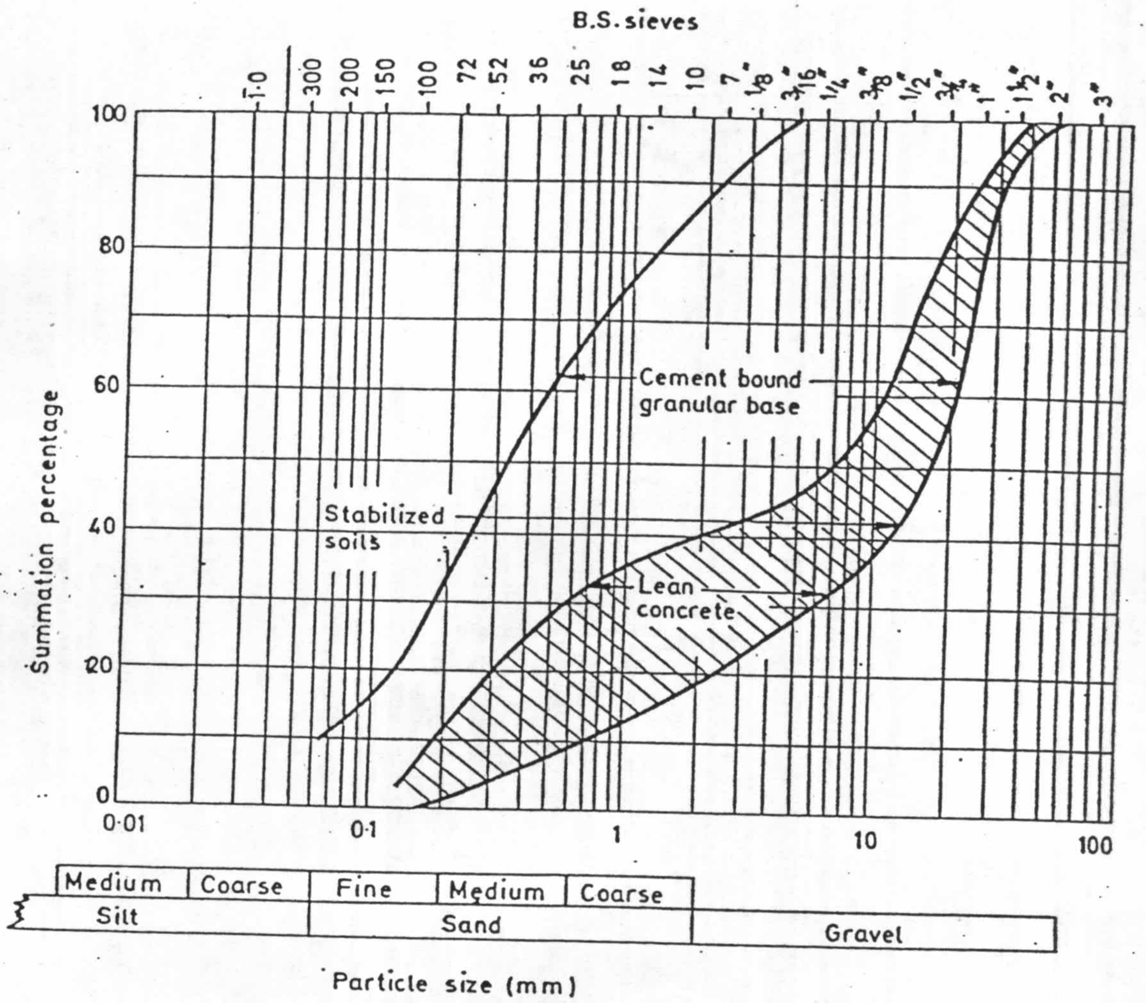
Sherwood (4) ได้อธิบายว่า วัสดุทุกชนิดที่มีขนาดคละของส่วนละเอียดมากกว่าขนาดคละของส่วนหยาบ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 นั้น จะสามารถนำมาใช้ทำ cement - stabilization ได้ ทั้งนี้โดยที่วัสดุนั้นต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เหมาะสมด้วย สำหรับวัสดุที่มีขนาดโตกว่า 2 นิ้ว (5 เซนติเมตร) นั้น ไม่เหมาะที่จะนำมาทำ cement - stabilization เพราะจะก่อให้เกิดปัญหาทั้งในด้านการผสม (mixing) และการก่อสร้าง (construction)

3.1.2 <u>คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุ</u> สามารถพิจารณาได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

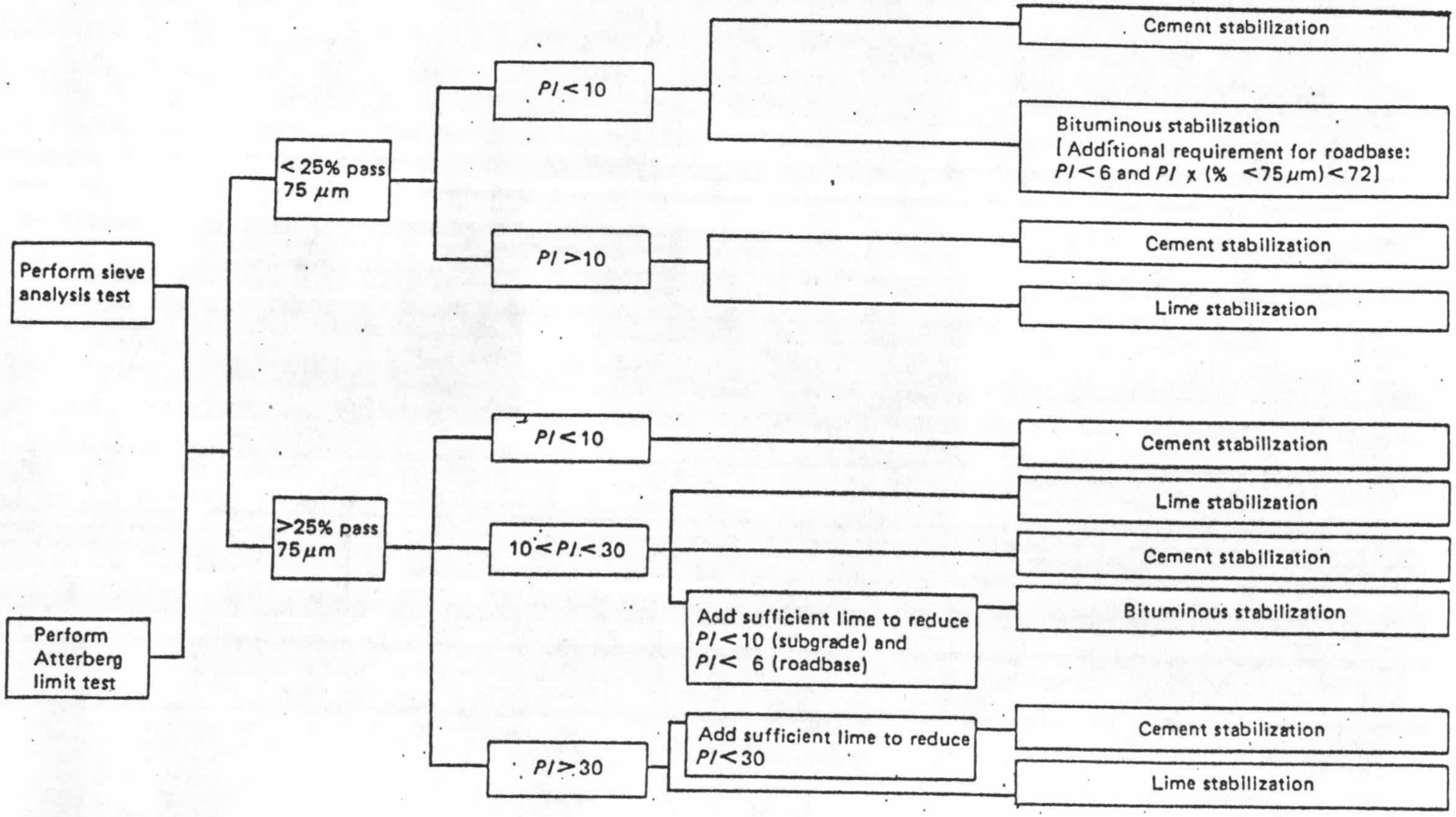
3.1.2.1 <u>ขนาดของวัสดุ</u> Flaherty (8) ได้กล่าวว่า cement - stabilization สามารถใช้ได้อย่างกว้างขวางในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุต่าง ๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการแนะนำตามวิธีของ USA Air Force นอกจากนี้ยังได้มีการแนะนำขนาด และปริมาณของวัสดุที่จะใช้ทำ cement - stabilization ไว้ดังนี้

ขนาดของวัสดุ	ปริมาณน้อยสุดที่ต้องมี (%)
เล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร	55
เล็กกว่า 2.00 มิลลิเมตร	35
ขนาดระหว่าง 0.075 - 2.00 มิลลิเมตร	25

Lambe, Michaels และ Moh (7) ได้กล่าวว่า จากประสบการณ์ที่ผ่านมา พบว่า ดิน ชนิดต่าง ๆ ต้องการปริมาณซีเมนต์ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงขนาดคละของวัสดุที่เหมาะสมกับการทำ cement - stabilization



รูปที่ 3.2 เกณฑ์กำหนดในการคัดเลือกสาร stabilizer ที่เหมาะสม
กับ soil ชนิดต่าง ๆ ของ USA Air Force

หมายเลข	ชนิดของ soil	ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ (% โดยน้ำหนัก)
1.	gravel	5 - 10
2.	sand	7 - 12
3.	silt	12 - 15
4.	clay	12 - 20

Portland Cement Association (9) ได้จำแนกความต้องการปริมาณซีเมนต์ของ soil กลุ่มต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับระบบ AASHTO ไว้ในตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 สำหรับความต้องการใช้ปริมาณซีเมนต์ของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลักต่าง ๆ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 3.4 แล้ว

ทางด้าน Winterkorn (2) ได้สรุปการใช้ปริมาณซีเมนต์สำหรับ soil ชนิดต่าง ๆ ไว้ดังนี้

หมายเลข	ชนิดของ soil	ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนัก)
1.	Well - graded soil with or without small amounts of silt or clay	5
2.	Poorly - graded one - size a minimal amount of silt	9
3.	Sandy soil	7
4.	Nonplastic or moderately plastic silty soil	10
5.	Plastic clay soil	13

ตารางที่ 3.1 ปริมาณซีเมนต์สำหรับ ดินชนิดต่าง ๆ ตามระบบ AASHTO (PCA, 1959)

AASHO Soil Group	Usual Range in Cement Requirement (% by vol.)	Usual Range in Cement Requirement (% by wt.)	Estimated Cement Content and That Used in the Moisture - Density Test (% by wt.)	Cement Content for Wet-Dry and Freeze-Thaw Tests (% by wt.)
A-1-a	5 - 7	3 - 5	5	3 - 5 - 7
A-1-b	7 - 9	5 - 8	6	4 - 6 - 8
A-2	7 - 10	5 - 9	7	5 - 7 - 9
A-3	8 - 12	7 - 11	9	7 - 9 - 11
A-4	8 - 12	7 - 12	10	8 - 10 - 12
A-5	8 - 12	8 - 13	10	8 - 10 - 12
A-6	10 - 14	9 - 15	12	10 - 12 - 14
A-7	10 - 14	10 - 16	13	10 - 13 - 15

For dark gray to gray A-horizon soils, increase the above cement contents four percentage points, for black A-horizon soils six points.

ตารางที่ 3.2 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการโดยเฉลี่ยของ sandy soil (PCA, 1959)

Material Retained on No. 4 Sieve Percent	*Material Smaller than 0.05 mm. Percent*	*Cement Content, Percent by Wt.*					
		Maximum Density, lb/ft^3					
		105–109	*110–114*	*115–119*	*120–124*	*125–129*	*130 or More*
0–14	0–19	10	9	8	7	6	5
	20–39	9	8	7	7	5	5
	40–50	11	10	9	8	6	5
15–29	0–19	10	9	8	6	5	5
	20–39	9	8	7	6	6	5
	40–50	12	10	9	8	7	6
30–45	0–19	10	8	7	6	5	5
	20–39	11	9	8	7	6	5
	40–50	12	11	10	9	8	6

ตารางที่ 3.3 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการโดยเฉลี่ยของ silty soil และ clayey soil (PCA, 1959)

AASHO Group Index	*Material Between 0.05 mm. and 0.005 mm. Percent*	*Cement Content, Percent by Wt.*						
		Maximum Density, lb/ft^3						
		90–94	*95–99*	*100–104*	*105–109*	*110–114*	*115–119*	*120 or More*
0– 3	0–19	12	11	10	8	8	7	7
	20–39	12	11	10	9	8	8	7
	40–59	13	12	11	9	9	8	8
	60 or more	—	—	—	—	—	—	—
4– 7	0–19	13	12	11	9	8	7	7
	20–39	13	12	11	10	9	8	8
	40–59	14	13	12	10	10	9	8
	60 or more	15	14	12	11	10	9	9
8–11	0–19	14	13	11	10	9	8	8
	20–39	15	14	11	10	9	9	9
	40–59	16	14	12	11	10	10	9
	60 or more	17	15	13	11	10	10	10
12–15	0–19	15	14	13	12	11	9	9
	20–39	16	15	13	12	11	10	10
	40–59	17	16	14	12	12	11	10
	60 or more	18	16	14	13	12	11	11
16–20	0–19	17	16	14	13	12	11	10
	20–39	18	17	15	14	13	11	11
	40–59	19	18	15	14	14	12	12
	60 or more	20	19	16	15	14	13	12

ตารางที่ 3.4 ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการโดยเฉลี่ยของวัสดุต่าง ๆ (PCA, 1959)

Type of Miscellaneous Material	Estimated Cement Content and That Used in Moisture-Density Test		Cement Content for Wet-Dry and Freeze-Thaw Tests
	(% by vol)	(% by wt)	(% by wt)
Shell soils	8	7	5-7-9
Limestone screenings	7	5	3-5-7
Red-dog	9	8	6-8-10
Shale or disintegrated shale	11	10	8-10-12
Caliche	8	7	5-7-9
Cinders	8	8	6-8-10
Chert	9	8	6-8-10
Chat	8	7	5-7-9
Marl	11	11	9-11-13
Scoria (containing + No. 4 material)	12	11	9-11-13
Scoria (Minus No. 4 material only)	8	7	5-7-9
Air-cooled slag	9	7	5-7-9
Water-cooled slag	10	12	10-12-14

Lee, White และ Igles (10) ได้แนะนำปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่ควรใช้กับ soil ชนิดต่าง ๆ ไว้เช่นกัน ดังนี้

หมายเลข	ชนิดของ soil	ปริมาณซีเมนต์ (% โดยน้ำหนัก)
1	Fine crushed rock	0.5 - 1
2	Well graded sandy clay gravel	2 - 4
3	Well graded sand	2 - 4
4	Poorly graded sand	4 - 6
5	Sandy clay	4 - 6
6	Silty clay	6 - 8
7	Heavy clay	8 - 12
8	Organic soil	10 - 15

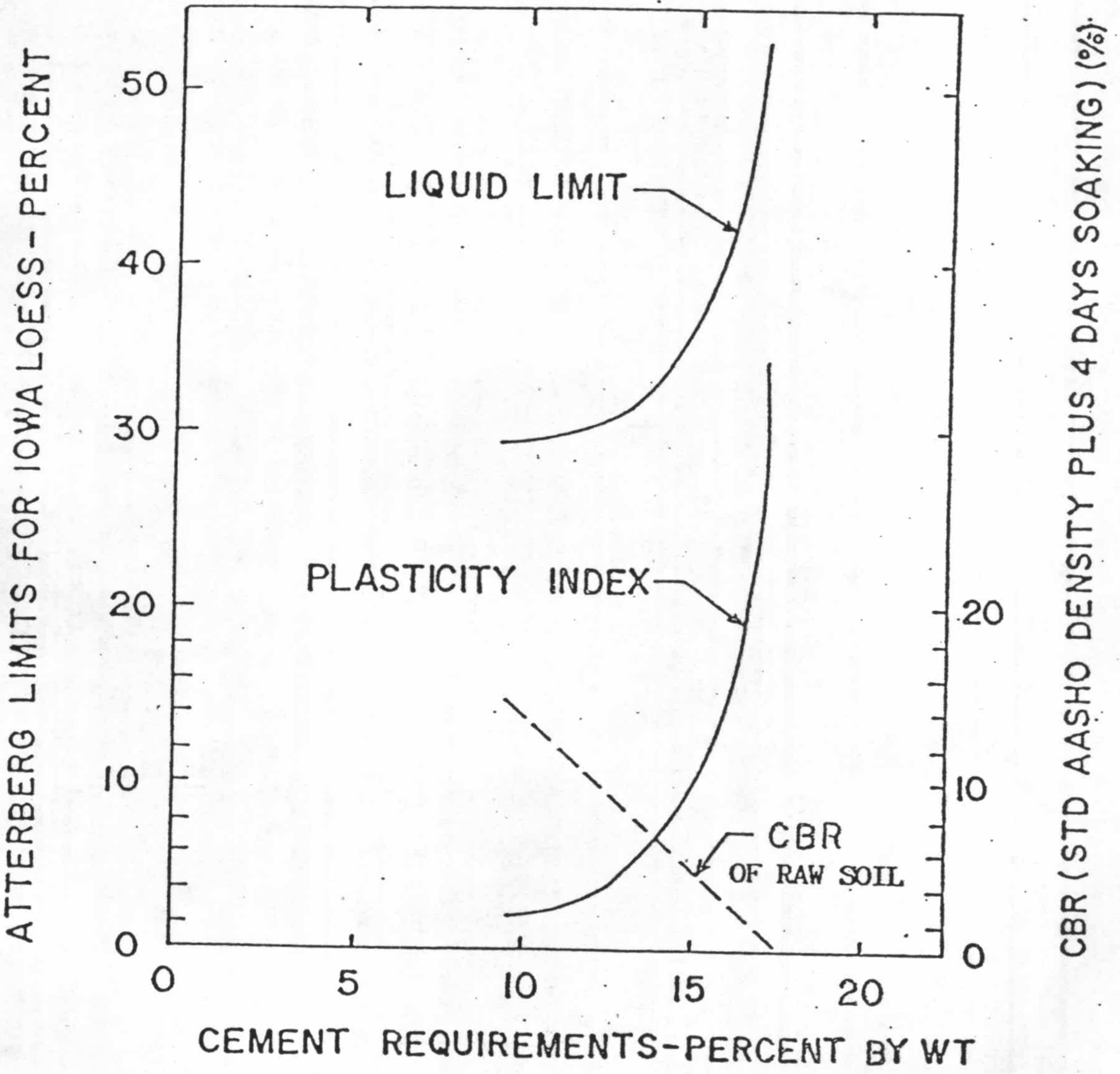
3.1.2.2 <u>Atterberg limit</u> Highway Research Board (11) ได้แสดงผลการทดสอบ Loess soil ของ Southwestern Iowa ไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อ Liquid Limit และ Plastic Index สูงขึ้น ปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการก็จะสูงขึ้นด้วย

Flaherty (8) ได้แนะนำว่า ค่าของ Plastic Index ของวัสดุที่จะทำ cement - stabilization ควรเป็นไปดังนี้

$$PI \leqslant 20 + (50 - \%\ \text{fine content})/4$$

3.2 <u>กลไกที่เกิดขึ้นในการทำ cement - stabilization</u>

ในการทำ cement - stabilization สามารถพิจารณาจากสารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้คือ



รูปที่ 3.3 แสดงค่าของ plasticity ซึ่งมีผลต่อปริมาณซีเมนต์ที่ต้องการ

3.2.1 สารประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ Flaherty (8) ได้อธิบายว่า สารประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีดังนี้คือ

สารประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	% โดยน้ำหนัก
CaO	59 - 66
SiO_2	18 - 23
Al_2O_3	4.5 - 8.0
Fe_2O_3	2.5 - 4.5

ตามปกติแล้วสารประกอบทางเคมีเหล่านี้ จะอยู่ในรูปสารประกอบของแร่ ซึ่งเกิดจากปฏิกริยาในเตาเผา ระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนี้

สารประกอบของแร่	สูตรเต็ม	สูตรย่อ
Tricalcium silicate	$3Cao.SiO_2$	C_3S
Dicalcium silicate	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Tricalcium aluminate	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Tetracalcium alumino ferrite	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

3.2.2 ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น Flaherty (8) ได้อธิบายไว้ว่า เมื่อใส่น้ำเข้าไปผสมกับซีเมนต์ จะทำให้เกิดปฏิกริยา cement hydration ขึ้น ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกริยาที่สำคัญนี้ ออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงแรก เป็นช่วงที่เกิดปฏิกริยาสูง หลังจากผสมในวันแรกคือ

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O$$

(CAH)

ช่วงที่สอง เป็นช่วงที่เกิดปฏิกริยาสูง ในระหว่างวันที่ 2 ถึงวันที่ 7 หลังจากการผสมคือ

$$2\,[3CaO.SiO_2] + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.SiO_2.3H_2O + 3Ca(OH)_2$$

(CSH)

ช่วงที่สาม เป็นช่วงที่เกิดปฏิกริยาสูง ภายหลัง 7 วัน ของการผสมคือ

$$2\,[2CaO.SiO_2] + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2SiO_2.3H_2O + Ca(OH)_2$$

(CSH)

Moh (12) ได้อธิบายว่า เมื่อเกิดปฏิกริยา cement hydration ได้สารประกอบ calcium silicate hydrate (CSH), calcium aluminate hydrate (CAH) และ released hydrated lime [$Ca(OH)_2$] ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าว จะทำให้เกิดการแข็งตัวของ CSH และ CAH ซึ่งเป็นวัสดุยึดเชื่อมขึ้นมา

Atkins (13) ได้สรุปผลที่เกิดขึ้นต่าง ๆ เมื่อทำการผสมวัสดุด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนี้คือ

ผลที่เกิดขึ้น	สารประกอบของแร่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
- อัตราการเกิด cement hydration	ปานกลาง	ช้า	เร็ว	ช้า
- กำลังในช่วงแรก	สูง	ต่ำ	ปานกลาง	ต่ำ
- กำลังช่วงในหลัง	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
- จำนวนความร้อนที่ที่ซับออกมา	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ต่ำ
- ความทนทานต่อสารเคมี	ดี	ดี	ไม่ดี	ดี

Lee, White และ Ingles (10) ได้กล่าวว่า การทำ cement - stabilization ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงดึง (tensile strength) กำลังรับแรงอัด (compressive strength) ความทนทาน (durability) และอื่น ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.5

3.3 องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อกำลังของ cement - stabilized material

Sherwood (4) ได้กล่าวว่า องค์ประกอบสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกำลังของ cement - stabilized material นั้น สามารถแบ่งได้ดังนี้

ตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของ cement - stabilized soil

Property	*Granular Soils*	*Fine-Grained Soils*	*Notes*
Density (t/m³)	(1.6-2.2) t/m³	(1.4-2.0) t/m³	May be higher or lower than untreated soil. Delay between mixing and compaction causes density and strength reductions.
Unconfined compressive strength (kPa)	q_u = (500 to 1000) C	q_u = (300 to 600) C	C = cement content
	$(q_u)_d = (q_u)_{d_0} + K \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$		$(q_u)_{d_0}$ = UC strength at age of d_0 days
	K = 500 C	K = 70 C	d = age (days) ($d > d_0$)
Cohesion (kPa)	To a few thousand kN/m²	To a few thousand kN/m²	Depends on C, d
	$C = 60 + 0.225\,(q_u)$		
Friction angle (deg)	40-45	30-40	May decrease at high confining pressures.
Flexural and tensile strength	Flexural Strength = $\left(\frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{3}\right)$ compressive strength		Need 1-3% cement to develop.
	$CBR = 0.0038\,(q_u)^{1.45}$		q_u in kPa
Modulus compression (kPa)	7×10^3-35×10^3	7×10^2-7×10^3	Depends on stress level
	$E_t = 1 - \frac{0.74(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2c\cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} E_i$		E_i = initial tangent modulus E_t = tangent modulus σ_3 = confining pressure
	$E_i = Kp_a\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n$		p_a = atmospheric pressure n = 0.3-0.7 K = 1000-20,000
Modulus-tension and flexure	Same order of magnitude as in compression.		$E_c \neq E_t$ (usually)
Poisson's ratio	0.1-0.2	0.15-0.35	
Shrinkage	A few tenths of one percent	Up to 1%	Shrinkage cracks generally inevitable in thin slab construction.
Permeability	$k < 1 \times 10^{-6}$ cm/sec	$k < 1 \times 10^{-6}$	k parallel to compaction planes may be up to 20 times greater than normal to them.
Erosion resistance	C = standard + 2% for severe exposure C = standard for normal exposure C = standard − 2% for mild exposure Standard = C for usual soil-cement C = cement content % by wt. Need extra 2% cement and gravel content of 20% for streams containing sand, gravel, debris.		
Fatigue resistance			Slabs are subject to fatigue failure if there are a very large number of flexural stress applications greater than 50% of the flexural strength.

- ส่วนประกอบทางเคมี

- ส่วนประกอบทางกายภาพ

- การ curing

- ซีเมนต์

ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

3.3.1 อิทธิพลเนื่องจากส่วนประกอบทางเคมี Sherwood (4) ได้อธิบายไว้ว่า ในการเกิดปฏิกริยา cement hydration ในการทำ cement - stabilization นั้น มีขั้นตอนซับซ้อนและความไวตัวต่อสภาพแวดล้อมมาก การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุตัวอย่าง ก็สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงใน cement - stabilization ในวัสดุนั้น ๆ ได้มาก สำหรับในดินนั้น เราสามารถแยกส่วนประกอบที่มีผลต่อปฏิกริยาทางเคมีได้ดังนี้คือ

ผลต่อปฏิกริยาทางเคมี	ประเภทของส่วนประกอบของ soil
เฉื่อยชา (inert)	Gravel, sand, and silt fraction
ทำให้เกิดผลเสีย (deleterious)	Organic matter, sulphate
ทำให้กำลังสูงขึ้น (benificial)	Calcium carbonate, clay mineral, iron and aluminium oxide

3.3.1.1 <u>สารอินทรีย์</u> Sower (14) ได้อธิบายไว้ว่า สารอินทรีย์บางชนิดนั้น ถึงแม้จะประกอบอยู่ใน soil เป็นจำนวนเล็กน้อย ก็อาจทำให้เกิดการแข็งตัวของ soil - cement เป็นไปได้ยาก ซึ่งในบางครั้งต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใส่เข้าไปช่วยแก้ปัญหานี้ ก่อนที่จะเริ่มทำ cement - stabilization

Sherwood (4) กล่าวว่า สารอินทรีย์นี้ จะทำปฏิกริยากับ calcium ion ทำให้ค่า pH ใน cement - stabilization ลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังของ cement - stabilized material ลดลงไปด้วย ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 สำหรับดินนั้น โดยทั่วไปที่ความลึก 1 เมตร (3 ฟุต) จะมีสารอินทรีย์มากและส่วนที่ลึกลงไปอีกก็จะมีสารอินทรีย์น้อยลงตามลำดับ ซึ่งสารอินทรีย์จะมีความสัมพันธ์กับกำลังและระยะเวลา ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.5 ส่วนในรูปที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ calcium chloride เติมลงไป จะทำให้กำลังเปลี่ยนแปลงไปด้วย

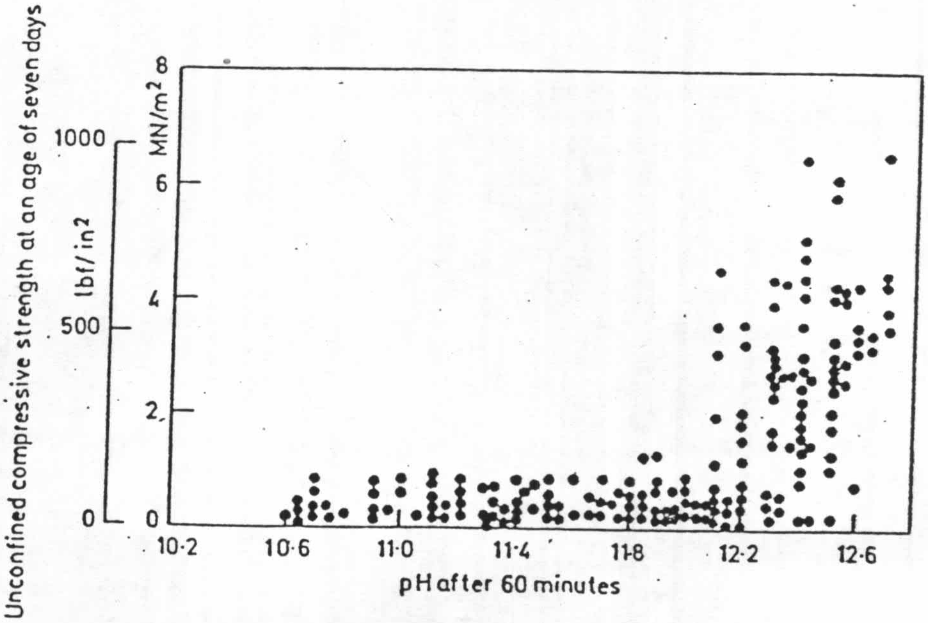
3.3.1.2 <u>สาร sulphate</u> Sower (14) ได้กล่าวว่า soil บางชนิดนั้น ถ้ามีสาร sulphate สูง ก็จะทำให้กำลังของ stabilized material ไม่ดี ถึงแม้ว่าจะใช้ซีเมนต์ประเภท sulphate resistance ใส่แทนลงไป ก็ไม่มีประโยชน์

Sherwood (4) อธิบายว่า calcium sulphate จะรวมตัวกับ tricalcium aluminate และน้ำ เป็น calcium sulpho - aluminate (ettringite) ซึ่งทำให้เกิดการบวมตัวขึ้น และถ้าหากเป็น magnesium sulphate แล้ว ก็จะมีอันตรายมากกว่า เพราะสามารถรวมตัวกับ calcium silicate และ tricalcium aluminate ได้อีกด้วย

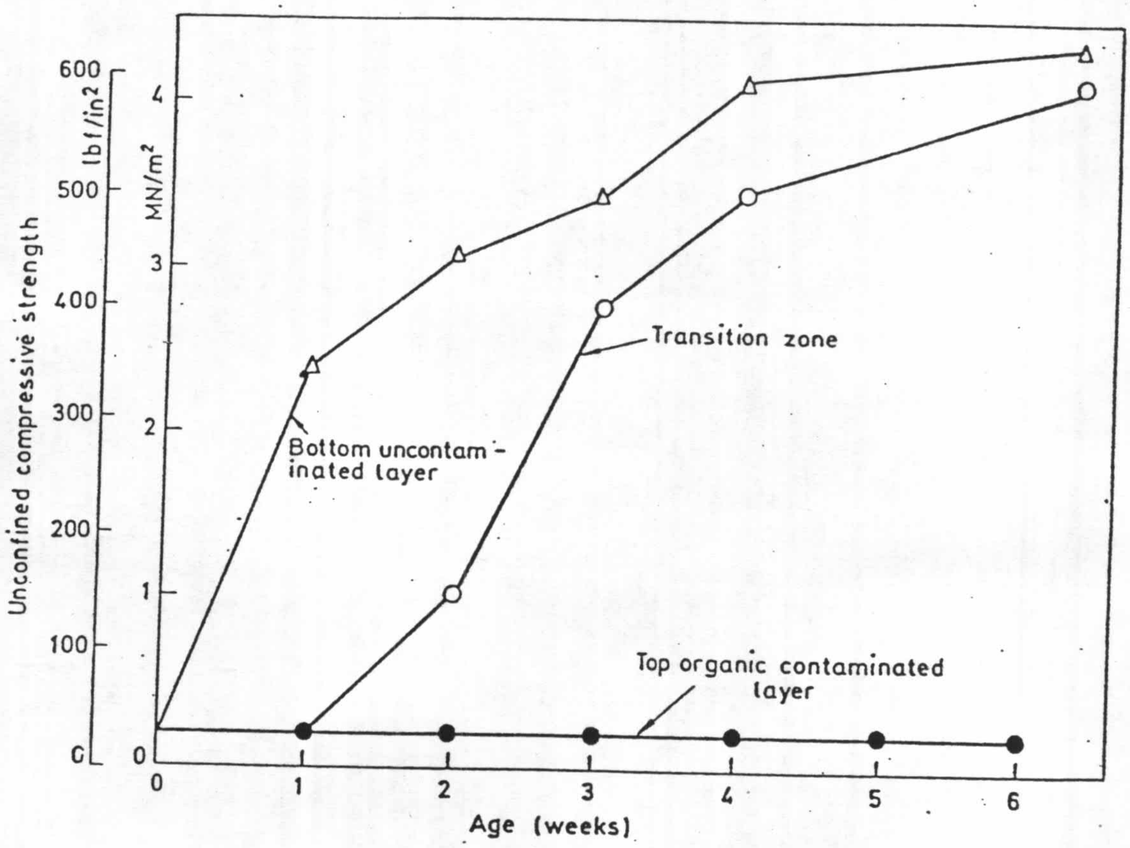
สำหรับปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจาก sulphate นั้น จะมีผลต่อกำลังของ cement - stabilized material ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.7

3.3.1.3 <u>สาร calcium carbonate</u> Sherwood (4) กล่าวว่า สาร calcium carbonate ช่วยเพิ่มค่า pH ให้สูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้กำลังของ cement - stabilized material สูงขึ้นด้วยเช่นกัน

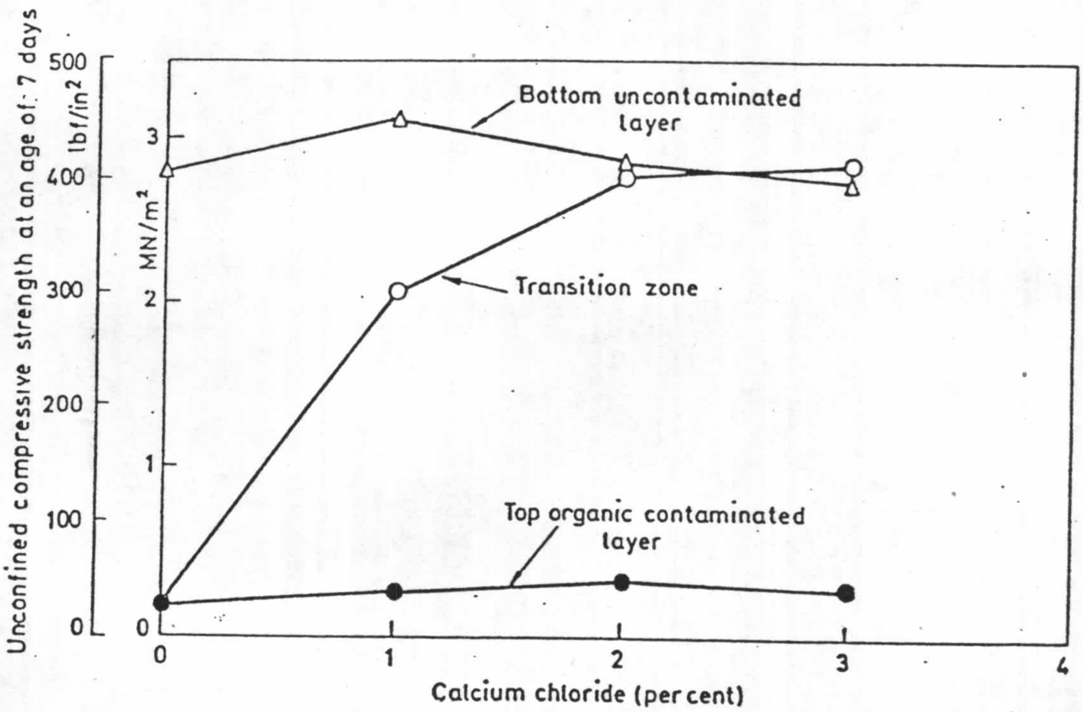
I10309706.



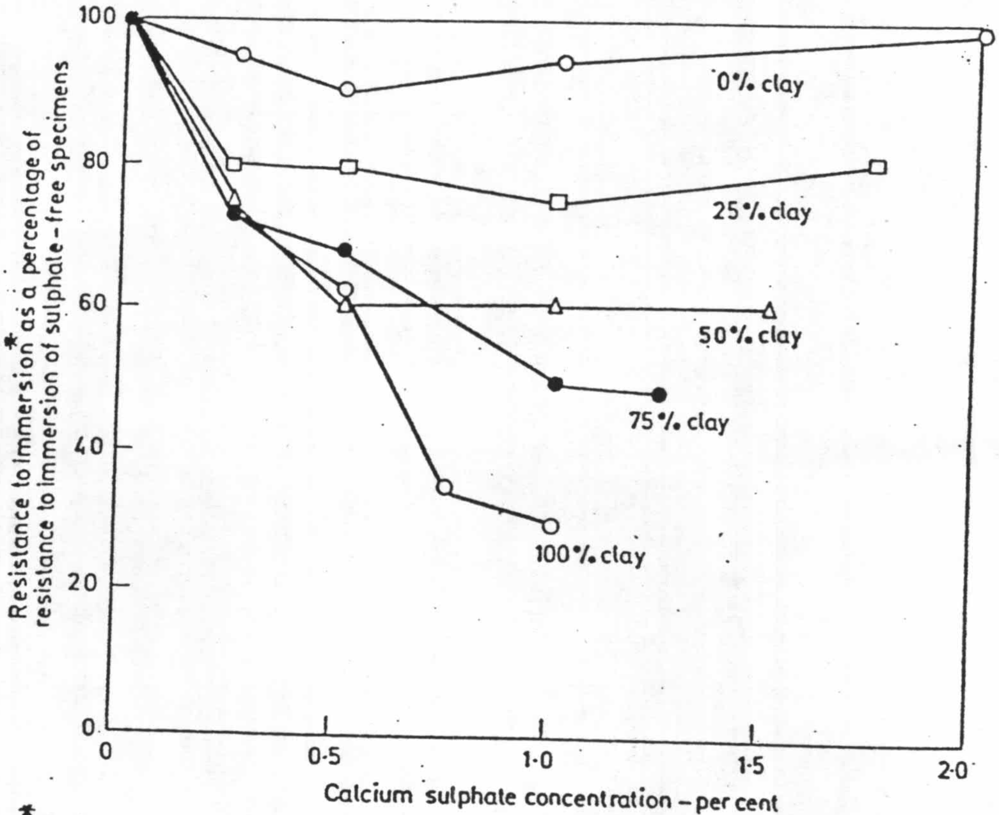
รูปที่ 3.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength กับ pH ของ soil ซึ่งผสมซีเมนต์ 10 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของ soil ที่ระดับต่าง ๆ จากผิวบน กับเวลา ภายหลังจากทำการ stabilization ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 %



รูปที่ 3.6 แสดงผลของ calcium chloride ที่มีต่อ cement - stabilized clay - sand mixture



*(Resistance to immersion = $\frac{\text{Strength of specimens cured for 7days, soaked for 7days} \times 100\text{percent}}{\text{Strength of specimens cured for 14 days}}$)

รูปที่ 3.7 แสดงผลของ calcium sulphate ที่มีต่อ cement - stabilized clay - sand mixture

3.3.1.4 สาร iron oxide และ aluminium oxide

Sherwood (4) กล่าวว่า iron oxide และ aluminium oxide จะมีผลทำให้กำลังของ cement - stabilized material สูงขึ้นด้วย สำหรับตัวอย่างที่สนับสนุนพฤติกรรมนี้คือ การผสม lateritic soil กับซีเมนต์ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.8 ซึ่งจากผลที่เกิดขึ้น สมมุติฐานได้ว่า iron oxide กับ aluminium oxide ใน lateritic soil จะทำปฏิกริยากับ lime ที่ขับออกมาจากปฏิกริยา cement hydration คล้ายกับปฏิกริยา pozzolanic นั่นเอง แต่เกิดขึ้นรวดเร็วกว่า และมีกำลังสูงในระยะแรก สำหรับเหตุผลที่สนับสนุนข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้นคือ ในการที่นำ lateritic soil มาผสมกับซีเมนต์นั้น จะต้องใช้น้ำมากกว่าใน soil ชนิดอื่น ๆ ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้ในปฏิกริยาที่คล้าย pozzolanic ที่เกิดขึ้นระหว่าง Fe_2O_3 และ Al_2O_3 กับ $Ca(OH)_2$ ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 แต่สำหรับในดินชนิดอื่น ๆ เช่น sand จะมีการเกิด degree of hydration ในลักษณะที่คล้ายกับ cement paste โดยทั่วไป

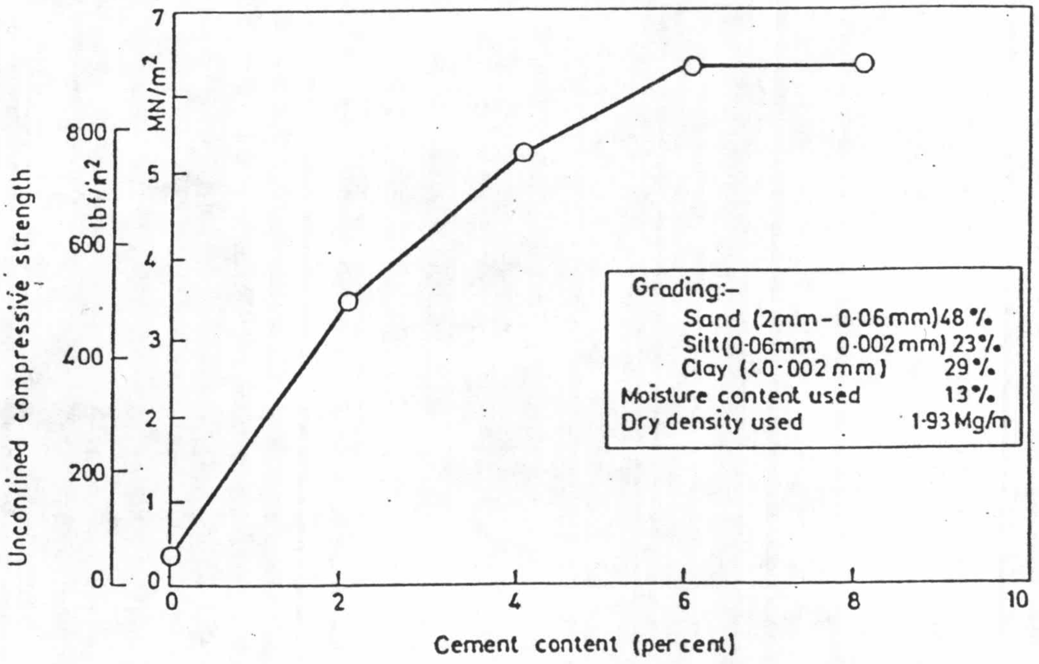
Lea (15) ได้แสดงให้เห็นว่า ในดินที่มี Al_2O_3 สูง เมื่อนำไปผสมด้วยซีเมนต์แล้ว กำลังจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่อ free lime [$Ca(OH)_2$] ถูกขับออกจากปฏิกริยา cement hydration แล้วจะทำปฏิกริยากับ Al_2O_3 ในดิน เกิดเป็นสารประกอบ $CaO.Al_2O_3.10H_2O$ และ $CaO.Al_2O_3.8H_2O$ และในที่สุดสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ จะเปลี่ยนเป็น $3CaO.Al_2O_3.6H_2O$ หมด ซึ่งสารประกอบตัวสุดท้ายนี้ มีคุณสมบัติด้านการยึดเชื่อมลดลง จึงทำให้กำลังของวัสดุผสมในระยะยาวลดลงไปด้วย

3.3.2 อิทธิพลเนื่องจากส่วนจากส่วนประกอบทางกายภาพ Sherwood (4) กล่าวโดยสรุปไว้ว่า กำลังของ cement - stabilized material จะมีผลเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้คือ

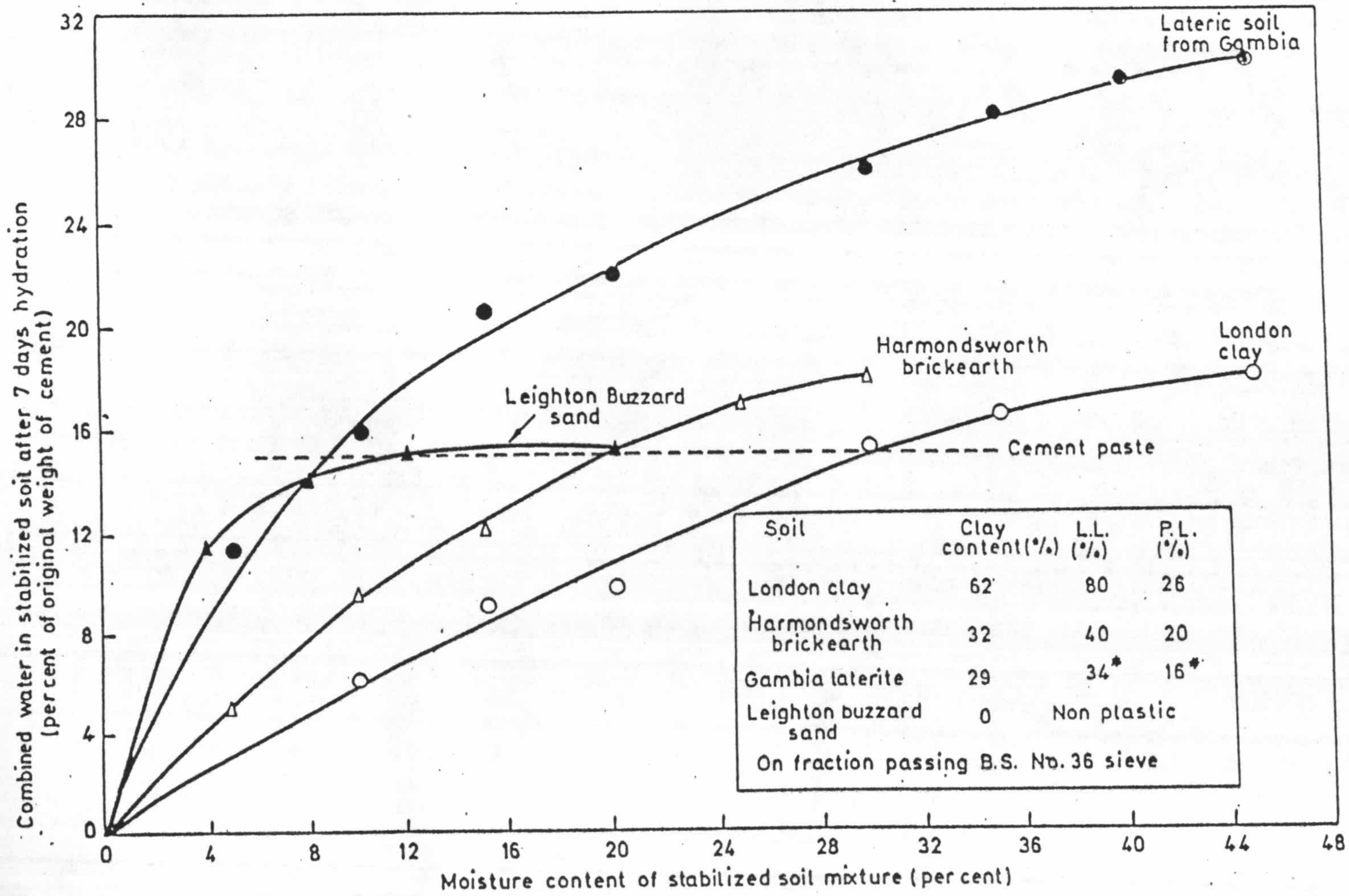
- maximum dry density ซึ่งได้จากการบดอัด

- optimum moisture content ที่ให้ค่า maximum compacted density

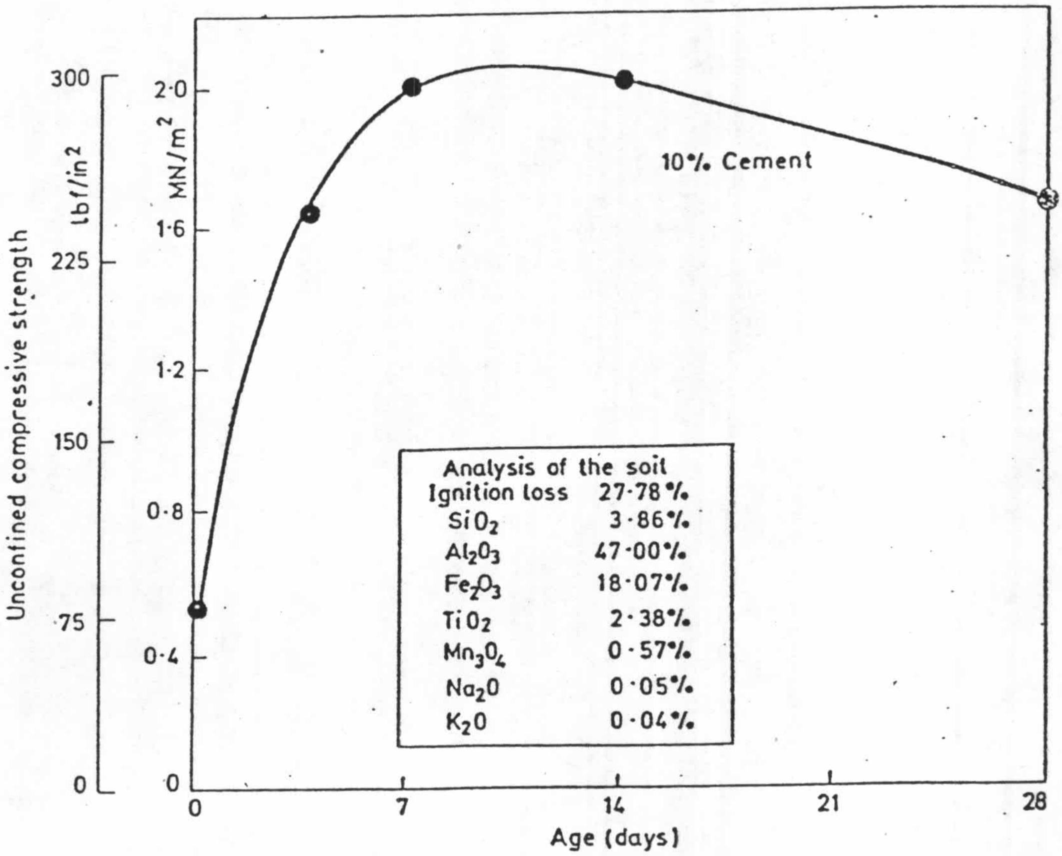
- ความสามารถในการรวมตัวกันระหว่างซีเมนต์กับวัสดุตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของ cement - stabilized lateritic soil ซึ่งมี Fe_2O_3 และ Al_2O_3 ประกอบอยู่



รูปที่ 3.9 แสดง degree of hydration ของ soil ชนิดต่าง ๆ
เมื่อผสมด้วยซีเมนต์ 10 %



รูปที่ 3.10 แสดงให้เห็นพฤติกรรมของ Al_2O_3 ใน soil ซึ่งมีผลต่อกำลังของ cement - stabilized soil ที่เวลาต่าง ๆ

ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

3.3.2.1 <u>Dry density</u> Grimer (16) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ dry density กับกำลังของ cement - stabilized material ของ soil ชนิดต่าง ๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 และเมื่อนำค่าของ unconfined compressive strength มา plot กับค่าของ dry density จะได้ curve ความสัมพันธ์ดังในรูปที่ 3.11 (a) ซึ่งจะพบว่าค่าของ unconfined compressive strength และ dry density จะแปรผันตามกัน ในรูปนี้เป็นตัวอย่างของ silty clay และ fine gravel และถ้าหากนำเฉพาะค่าของ unconfined compressive strength ดังกล่าวมา plot ใหม่ ใน logarithmic scale ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.11 (b) ก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength และ dry density เป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\log S = \log K + n \log D$$

หรือ

$$S = KD^n$$

ซึ่ง S = strength

D = density

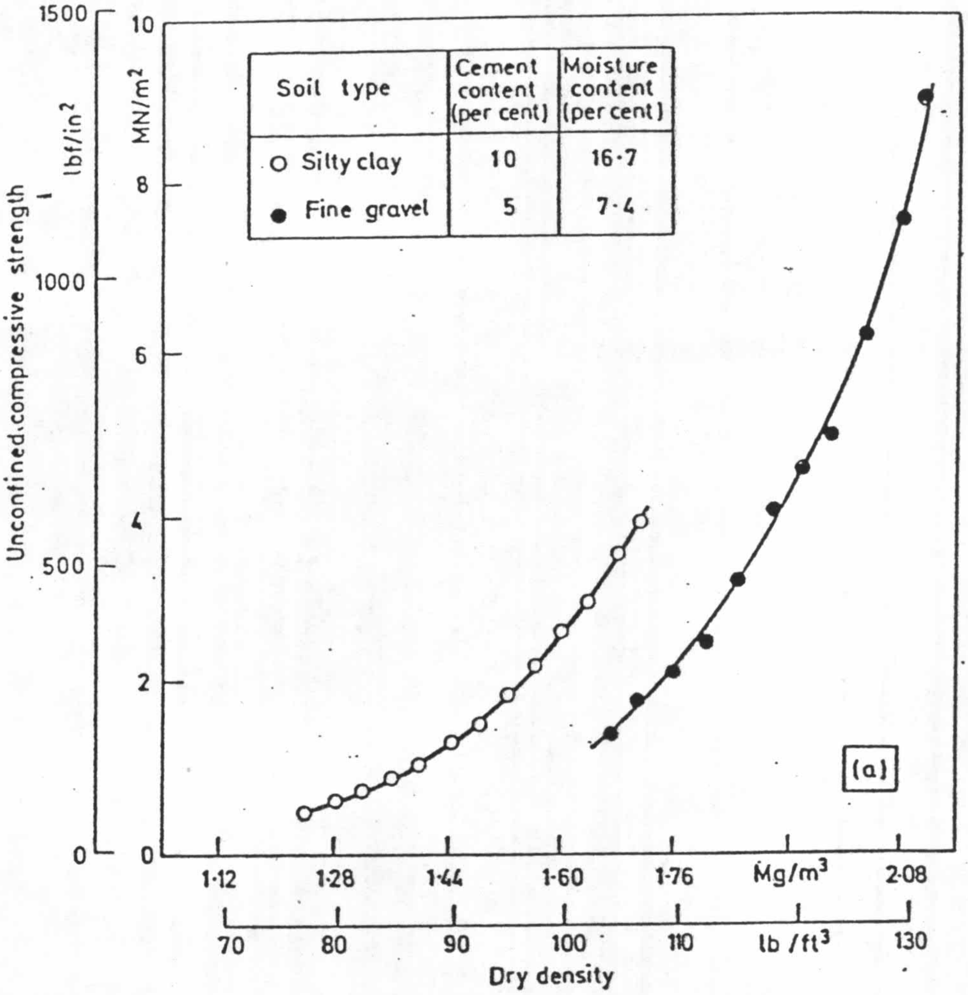
K = a constant

n = a dimensionless constant (slope)

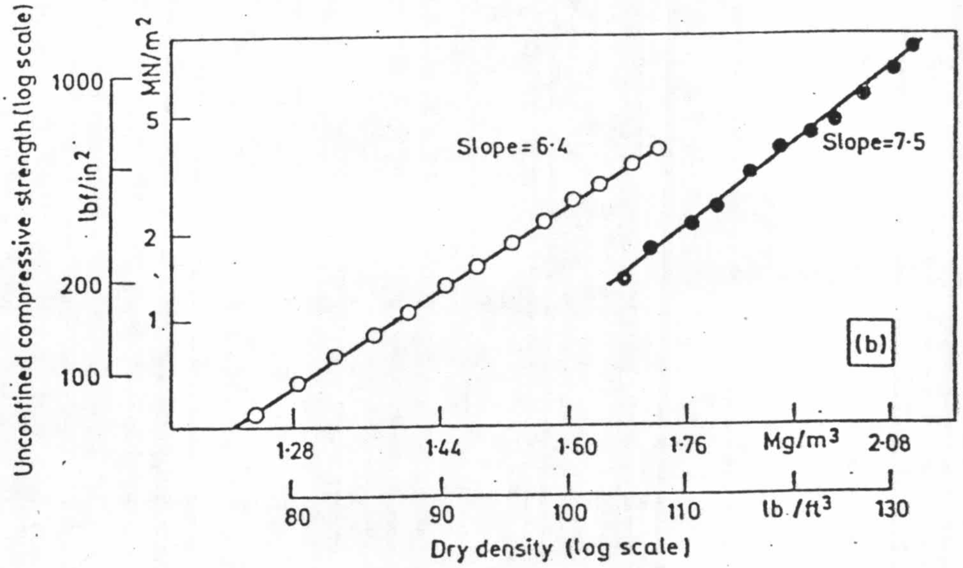
จากการทดลองพบว่าค่า n ในสมการนี้ จะขึ้นอยู่กับ moisture content ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.12 ค่า n นี้ จะมีค่าน้อย (เท่ากับ 5) สำหรับ limestone ที่ moisture content สูง และ n จะมีค่ามาก (เท่ากับ 22) สำหรับ as - dug gravel ที่ moisture content ต่ำ

ตารางที่ 3.6 แสดงขนาดคละของวัสดุที่จะทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง กับ dry density

Fraction (%) \ Material	Silty Clay	Well Graded Sand	Porphyry	As-dug Gravel	Fine Gravel	Blast furnace Slag	White Lime-stone	Blue Lime-stone
Coarse Gravel (60mm-20mm)	0	0	0	35	6	20	0	28
Medium Gravel (20mm-6mm)	0	0	0	30	34	34	0	40
Fine Gravel (6mm-2mm)	0	14	25	7	16	28	23	18
Coarse Sand (2mm-0.6mm)	0	16	40	4	10	10	40	6
Medium Sand (0.6mm-0.2mm)	0	40	15	17	25	4	15	3
Fine Sand (0.2mm-0.006mm)	5	18	10	5	9	4	12	5
Silt (0.06mm-0.002mm) Clay (<0.002mm)	65 30	12	10	2	0	0	10	0
Liquid Limit (%) Plastic Limit (%)	45 19	Non-Plastic						



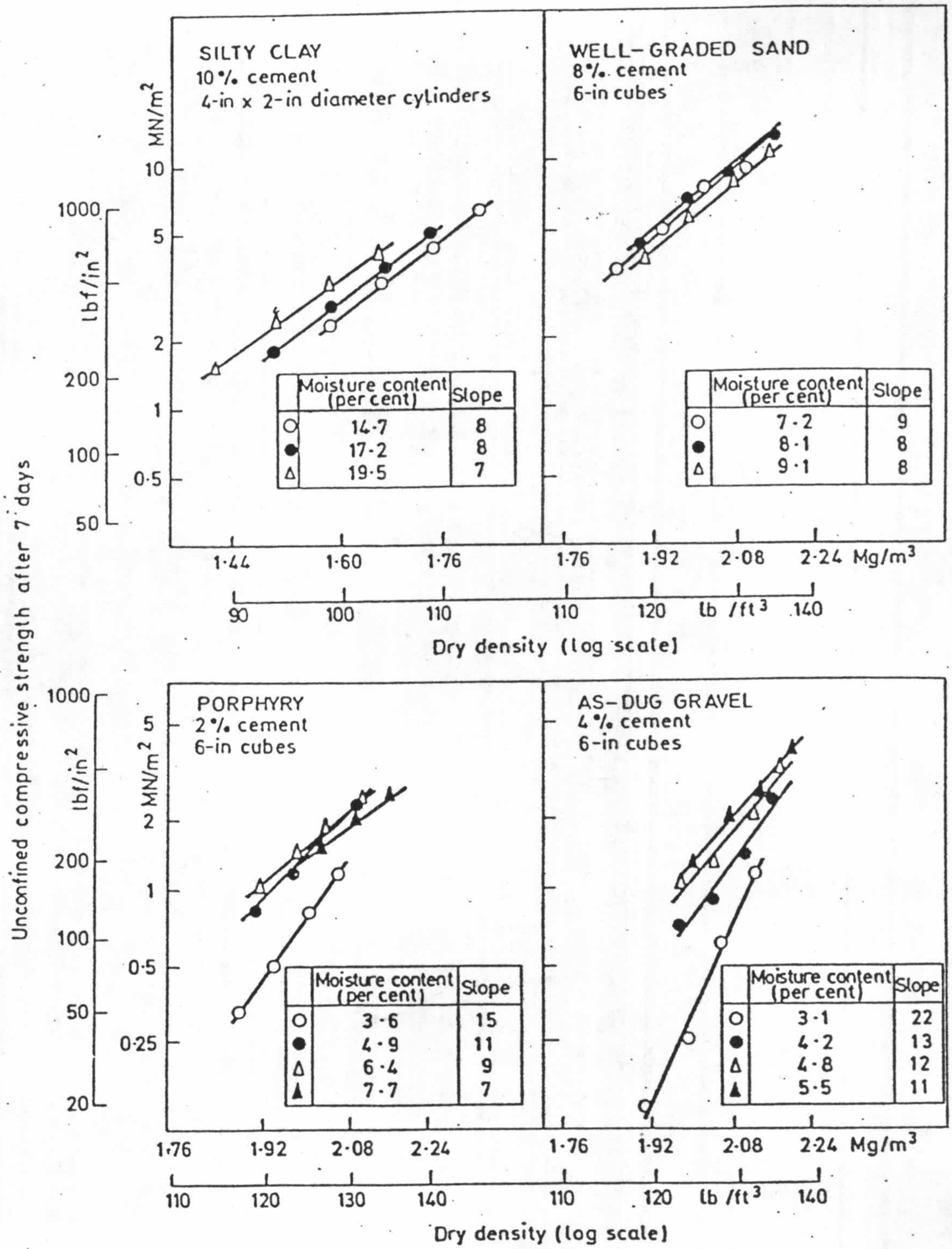
รูปที่ 3.11 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength กับ dry density ของ silty clay และ fine gravel ที่ได้จากขนาดคละในตารางที่ 3.6 เมื่อนำมาทำการ stabilized ด้วยซีเมนต์ โดย plot บน normal scale



รูปที่ 3.11 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength กับ dry density ของ silty clay และ fine gravel ที่ได้จากขนาดคละในตารางที่ 3.6 เมื่อนำมาทำการ stabilized ด้วยซีเมนต์ โดย plot บน log scale

ตารางที่ 3.7 แสดงค่าของ n ในสมการ $S = KD^n$ สำหรับ granular material 3 ชนิด ที่สภาพต่าง ๆ กัน

MATERIAL	Cement Content (%)	Moisture Content (%)	Value of n in $S = KD^n$
Crushed Gravel	4	3.7 5.4 7.2 8.7	13 12 11 10
Blast furnace Slag	2	4.1 5.3 5.7 6.4	16 12 11 8
Blue Limestone	2	3.3 4.0 4.9 5.5	12 9 6 5
White Limestone	2	4.3 5.8 7.0	11 7 5



รูปที่ 3.12 แสดงค่า n ที่ได้จาก slope ของ cement - stabilized material ต่าง ๆ

3.3.2.2 Moisture content Sherwood (4) ได้กล่าวว่า ในการทำ cement - stabilization จะต้องใช้ปริมาณน้ำให้เพียงพอต่อการบดอัด และการเกิดปฏิกริยา cement hydration การเปลี่ยนแปลงความชื้นใน cement - stabilized material จะทำให้มีผลเกิดขึ้น 2 ประการคือ

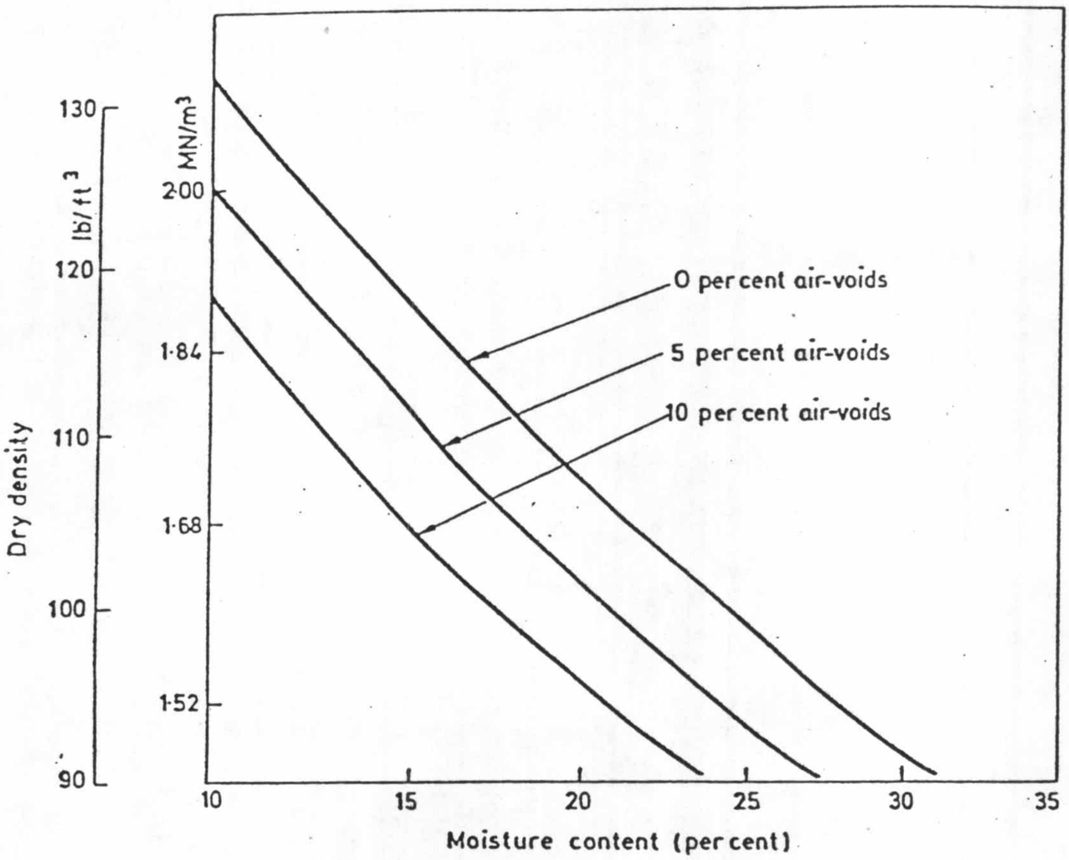
- ที่ air - void คงที่ การลด moisture content ลงจะทำให้ dry density เพิ่มขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ใช้ก็จะลดลงด้วย

- ที่ค่า moisture content ต่ำแล้ว ถ้าหากทำการลด moisture ลงไปอีก จะทำให้ปฏิกริยา cement hydration ลดลงไปด้วยเช่นกัน

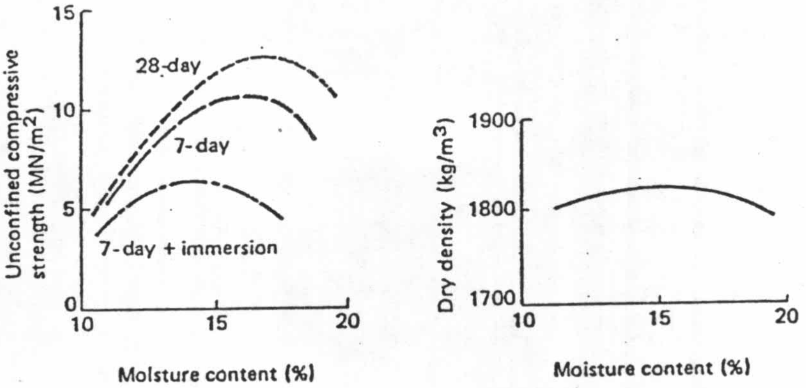
ในปฏิกริยา cement hydration ที่สมบูรณ์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะมีค่าประมาณ 0.2 โดยทั้งนี้ต้องระวังความเป็นสารดูดความชื้นของวัสดุตัวอย่างด้วย เพราะจะมีผลทำให้ปฏิกริยา cement hydration ไม่สามารถเกิดขึ้นได้เต็มที่ แต่ในบางครั้งถ้า moisture content สูงมาก ก็จะทำให้ dry density ของ cement - stabilized material ลดลง ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13

Ruenkrairergsa (17) ได้อธิบายว่า จากความสัมพันธ์ระหว่าง moisture content กับ dry density ของ soil - cement นั้น ไม่ได้ให้ค่า maximum dry density เพียงอย่างเดียว แต่ moisture content ยังก่อให้เกิดปฏิกริยา cement hydration ด้วย และจากผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการมา ได้แสดงให้เห็นว่าใน soil - cement ที่ค่า optimum moisture content ซึ่งให้ค่า maximum dry density นั้น ไม่จำเป็นต้องให้ค่า maximum strength ด้วยเสมอไป

Flaherty (8) ได้อธิบายว่า เหตุที่ optimum moisture content ของ soil - cement ไม่จำเป็นต้องให้ค่า maximum strength เสมอไปนั้น เป็นผลมาจากพฤติกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการ stabilization รวมทั้งการ curing ก่อนที่จะทำการทดสอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสำหรับ moisture content ที่ให้ค่า maximum strength ของ sandy soil จะอยู่ข้าง dry side และ clayey soil จะอยู่ข้าง wet side ของ optimum moisture content ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง moisture content และ dry density ของ cement - stabilized soil



รูปที่ 3.14 แสดงให้เห็นอิทธิพลของ moisture content ที่มีผลต่อ dry density และกำลังของ soil - cement mixture ซึ่งประกอบด้วยซีเมนต์ 20 % และ dune clay ผสม montmorillonite clay ในอัตราส่วน 1 : 1

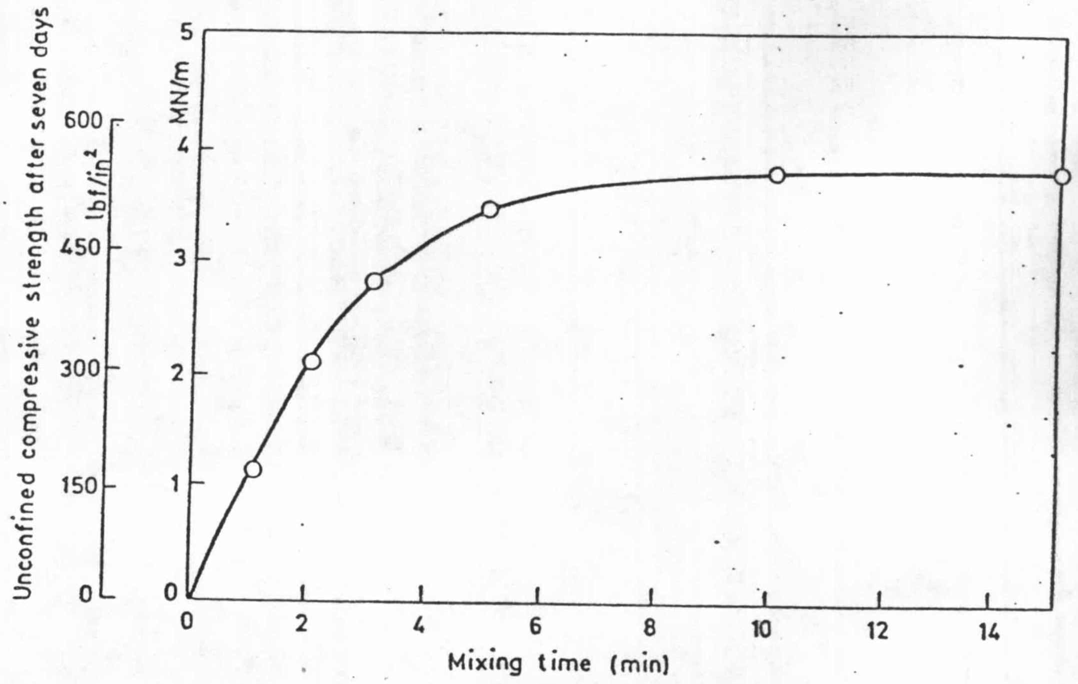
ในการพิจารณา moisture content นั้น Flaherty (8) ได้กล่าวว่า น้ำที่ใช้ใน soil - cement มีความจำเป็นต่อการทำ cement - stabilization ด้วยเหตุผล 3 ประการคือ ประการแรกทำให้เกิดปฏิกริยา cement hydration ประการต่อมาช่วยให้ workability ดี และประการสุดท้ายช่วยให้การ compaction ง่ายขึ้น น้ำที่ใช้นี้จะต้องสะอาด ปราศจากความเป็นด่างและกรด และต้องไม่มีสาร organic ปะปนอยู่ สำหรับ moisture content นั้น จะพิจารณาจากการทดลอง compaction test ซึ่งจะทำให้ทราบค่า optimum moisture content ที่ค่าของ maximum dry density ได้

3.3.2.3 <u>การผสม (mixing)</u> Sherwood (4) ได้กล่าวว่าในการทำ cement - stabilization จะเกิดผลดีเมื่อเราใส่ซีเมนต์ลงไปใน material อย่างสม่ำเสมอและกระจายไปทั่ว ในการผสมสารพวก granular material ด้วยซีเมนต์นั้นจะกระทำได้สะดวก เพราะสามารถทำให้ซีเมนต์กระจายไปทั่วได้ แต่สำหรับพวก cohesive material แล้วจะกระทำได้ยากกว่า เพราะวัสดุพวกนี้รวมตัวกันอยู่ ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการผสมซีเมนต์ลงไป

ถ้าหากนำ stabilized material ที่ผสมซีเมนต์แล้ว ไปทำการบดอัดเพื่อทดสอบ unconfined compressive strength จะพบว่ากำลังจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการผสมนานขึ้น ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.15 จนกระทั่งถึงจุดที่จำกัดกำลัง (limiting strength) ซึ่งจากจุดนี้สามารถอธิบายได้ว่า อนุภาคซีเมนต์ (cement grain) ได้กระจายไปจนทั่ววัสดุตัวอย่างแล้ว นั่นคือการเกิดสภาวะของการกระจายสูงสุด (maximum degree of dispersion)

Flaherty (8) ได้อธิบายว่า โดยทั่วไปแล้ว ถ้าซีเมนต์ น้ำ และ soil ผสมกันอย่างดีแล้ว จะได้ cement - stabilized soil ที่มีเสถียรภาพ (stability) และความคงทน (durability) หรือถ้าหากการผสม (mixing) มีประสิทธิภาพสูงแล้ว ก็จะทำให้มีการใช้ซีเมนต์น้อยลง ในการที่จะทำให้ cement - stabilized soil นั้น ๆ มีกำลังตามต้องการ

3.3.2.4 <u>ผลที่เกิดจากความล่าช้าระหว่างการผสมและการบดอัด</u> Sherwood (4) กล่าวว่า ทันทีที่ผสมน้ำลงไปใน cement - stabilized material ก็จะเกิดปฏิกริยา cement hydration โดยทันทีเช่นกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการบดอัด



รูปที่ 3.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ unconfined compressive strength เมื่อ mixing time เพิ่มขึ้น

ให้เร็วที่สุด หลังจากที่การผสม (mixing) เสร็จเรียบร้อยแล้ว เพราะมิฉะนั้นจะสูญเสียทั้งกระบวนการแข็งตัว และการที่ต้องใช้พลังงานในการบดอัดที่สูงขึ้น สาเหตุเป็นเพราะวัสดุผสมบางส่วน ได้แข็งตัวเป็นก้อนไปแล้ว ซึ่งทั้งสองกรณีที่เกิดขึ้นดังกล่าว จะทำให้กำลังลดลง ความล่าช้านี้จะเกี่ยวข้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา cement hydration และส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุตัวอย่าง ซึ่งมีความผันแปรค่อนข้างสูง และคาดหมายได้ยาก ดังนั้นเพื่อความแน่นอนในการปฏิบัติการ จึงควรทำการบดอัดให้เสร็จสิ้นภายในเวลา 2 ชั่วโมง นับตั้งแต่เริ่มทำการผสม (mixing)

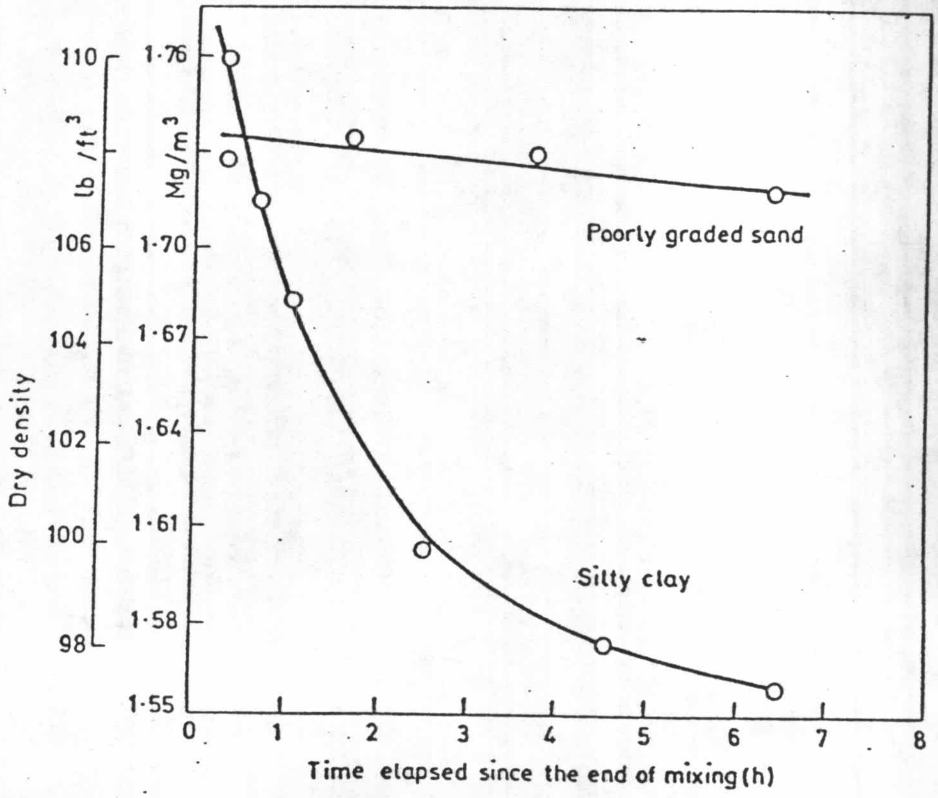
ในกรณีที่จะใช้สารจำพวก retarding agent ช่วยเพื่อขยายระยะเวลาในการแข็งตัวออกไปนั้น อาจจะทำให้เกิดผลเสียหายได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของสาร retarding agent ที่จะเติมลงไปนั้น ประมาณการได้ค่อนข้างยาก ซึ่งอาจทำให้การแข็งตัวต้องล่าช้าออกไปอีก เพราะในปฏิกิริยา cement hydration นั้น มีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง

ความล่าช้าในการบดอัด จะมีผลต่อค่าของ dry density ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.16

3.3.3 <u>Curing</u> Sherwood (4) อธิบายว่า ในการศึกษาคุณสมบัติของ cement - stabilized material นั้น ขั้นตอนในการ curing จะต้องควบคุมอย่างระมัดระวัง ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้เป็น 4 ลักษณะด้วยกันคือ

- curing time (age)
- curing temperature
- shrinkage
- soaking

ดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง dry density และเวลาที่ล่าช้าในการบดอัด ภายหลัง mixing แล้ว ของวัสดุ 2 ชนิด ซึ่งผสมด้วยซีเมนต์ 10 %

3.3.3.1 <u>Curing time (age)</u> Sherwood (4) กล่าวว่า กำลังของ cement - stabilized material จะเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ทำการ curing ซึ่งตามปกติแล้วความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength (plot ใน arithemetic scale) กับอายุของ specimen (plot ใน logarithmic scale) จะเป็นเส้นตรงในช่วงระยะเวลาแรก ถึง 1 หรือ 2 เดือน สำหรับระยะเวลาในการบ่ม ที่นิยมใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบมากคือ 7 วัน

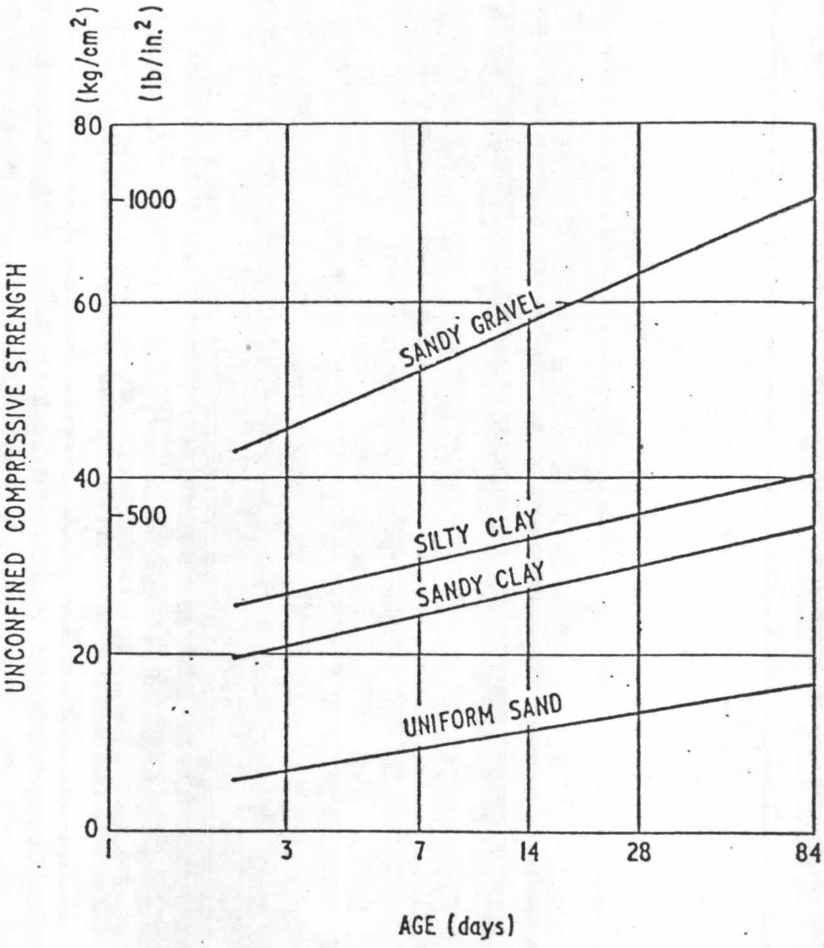
Ingles และ Metcalf (18) ได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของ unconfined compressive strength กับ curing time ไว้ในรูปที่ 3.17

3.3.3.2 <u>Curing temperature</u> Ingles และ Metcalf (18) กล่าวว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้กำลังของ cement - stabilized material สูงขึ้นเช่นกัน แต่ในทางปฏิบัติแล้วต้องคำนึงถึงการแห้งมากเกินไปของ cement - stabilized material ด้วย เพราะอาจจะทำให้เกิดการ cracking ได้

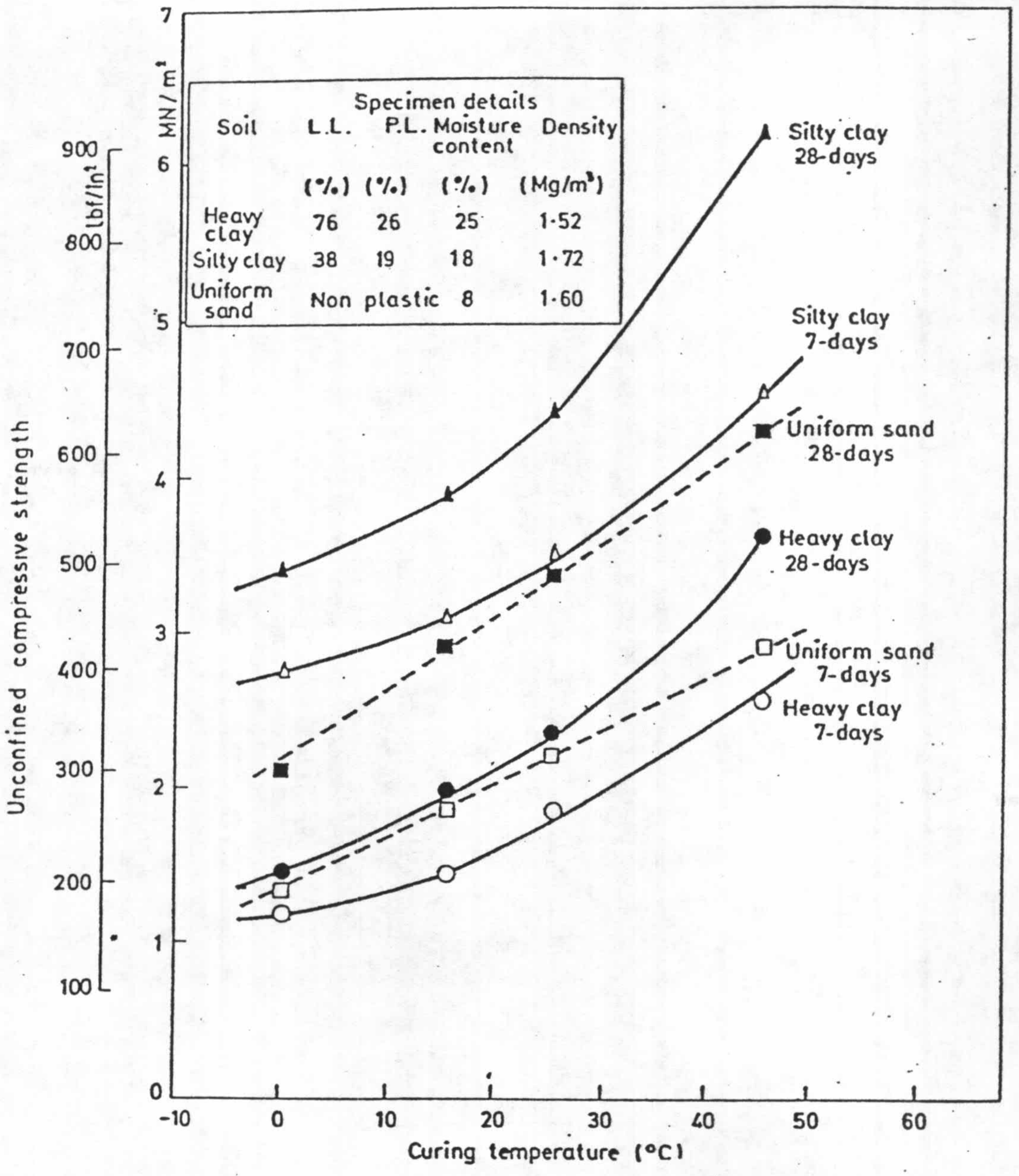
Clarke และ Pollard (19) และ Dumbleton (20) ได้แสดงให้เห็นการ curing ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งจะมีผลต่อกำลังของ cement - stabilized material ไว้ในรูปที่ 3.18

3.3.3.3 <u>Shrinkage</u> Flaherty (8) ได้กล่าวว่า องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อ shrinkage คือ

- การสูญเสียความชื้นไปในระหว่างการเกิดปฏิกริยา cement hydration
- การหดตัวของวัสดุผสม เนื่องจากอุณหภูมิลดลง
- การขยายตัวของโครงสร้างชั้นที่อยู่ถัดลงไปจากชั้นของ soil - cement
- คุณสมบัติด้านการรับแรงดึงของ soil - cement มีน้อย



รูปที่ 3.17 ผลที่เกิดขึ้นเมื่อ age of curing เพิ่มขึ้น ของ cement - stabilized soil โดยใช้ปริมาณซีเมนต์ 5 %



รูปที่ 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง curing temperature และ unconfined compressive strength ของ soil 3 ชนิด ที่ stabilized ด้วยซีเมนต์ 10 %

Shrinkage นี้ จะเกิดขึ้นมากในชั้นที่มีการบดอัดไม่ดี โดยเฉพาะในช่วงที่ cement - stabilized soil มีอายุน้อยอยู่ หรือมีส่วนผสมของซีเมนต์น้อยไป

เงื่อนไขที่จะทำให้การ curing แล้วเกิด shrinkage น้อยที่สุดคือ การที่ไม่ให้ความชื้นสูญเสียไปโดยใช้ impermeable membrane ปิดคลุม soil - cement ซึ่งในกรณีนี้จะเกิด shrinkage ในลักษณะ "autogenous shrinkage" เท่านั้น แต่ถ้าหากเป็นกรณีที่เราปล่อยให้ความชื้นสูญเสียไปโดยอิสระ ก็จะมีโอกาสเกิด cracking ขึ้นได้มาก

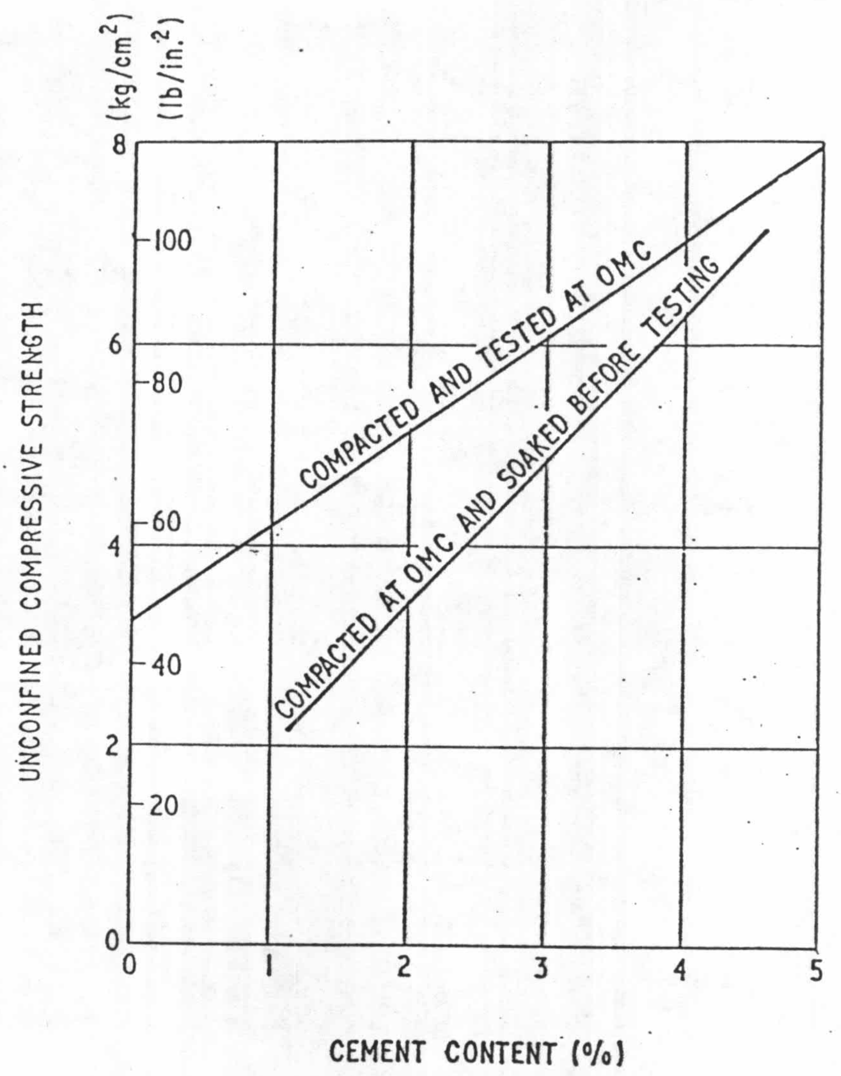
3.3.3.4 Soaking Ingles และ Metcalf (18) ได้แสดงให้เห็นว่า ถ้าหากเราทำการ soaking ตัวอย่างของ cement - stabilized material แล้วจะทำให้กำลังของ cement - stabilized material นั้น ๆ ลดลงไป เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ cement - stabilized material ที่ไม่ได้ทำการ soaking ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.19

3.3.4 อิทธิพลเนื่องจากซีเมนต์ ในการพิจารณาอิทธิพลของซีเมนต์ในการทำ cement - stabilized material สามารถแยกพิจารณาได้ดังนี้คือ

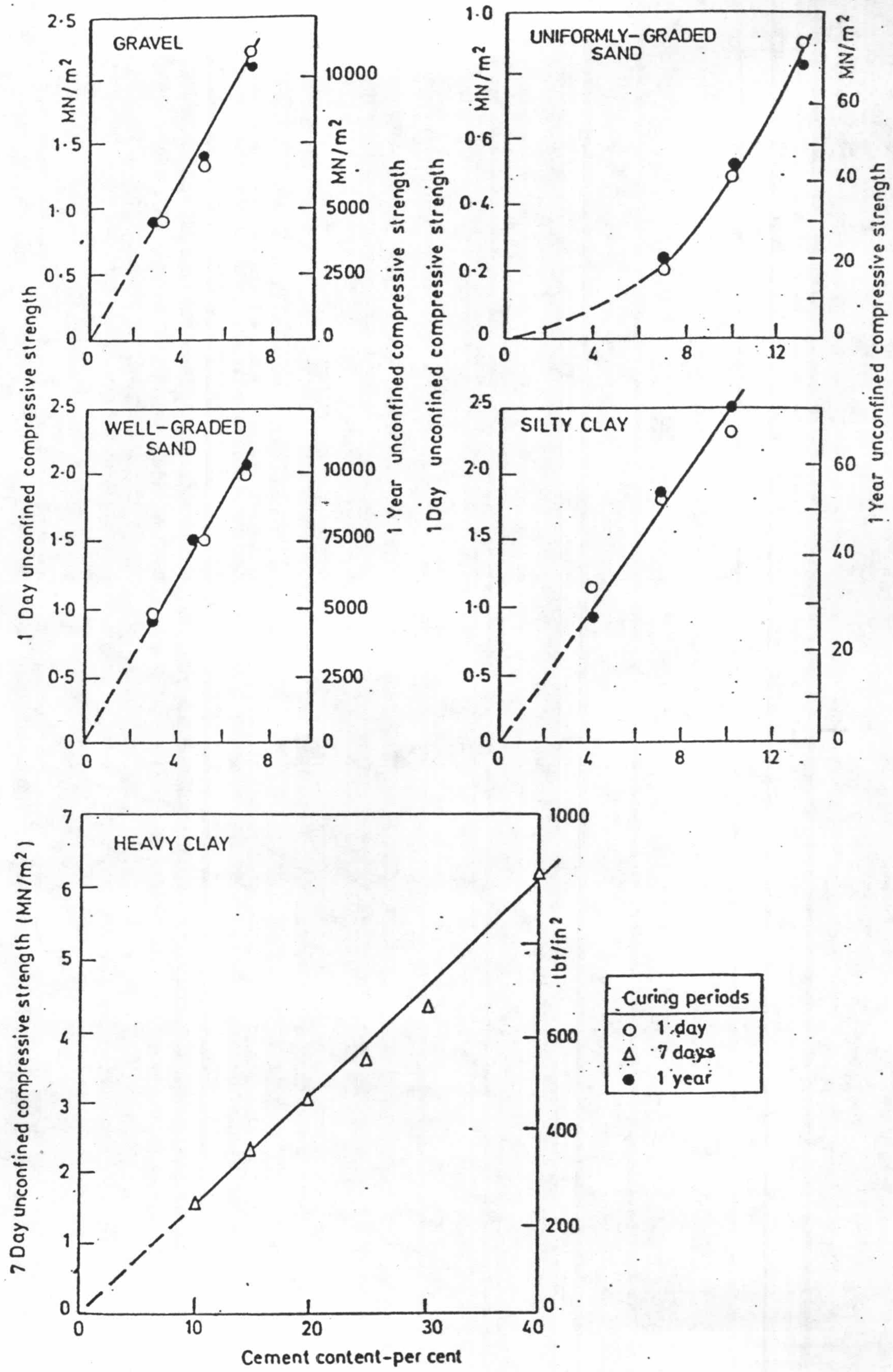
3.3.4.1 ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ Sherwood (4) ได้กล่าวว่า เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้กำลังของ cement - stabilized material เพิ่มขึ้นด้วย ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.20 และในรูปที่ 3.21 แต่ถ้าปริมาณซีเมนต์มากเกินไปก็จะทำให้การเกิดปฏิกิริยา cement hydration ไม่สมบูรณ์ ในทางตรงกันข้ามถ้าหากปริมาณซีเมนต์น้อยเกินไป ผลที่ได้ก็จะไม่ดี เนื่องจากซีเมนต์ที่ใส่ลงไปจะมีพฤติกรรมคล้ายกับเป็น filler ไปอุดช่องว่าง (void) ของวัสดุตัวอย่างเท่านั้น

สำหรับปริมาณที่เหมาะสมกับดินชนิดต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.1

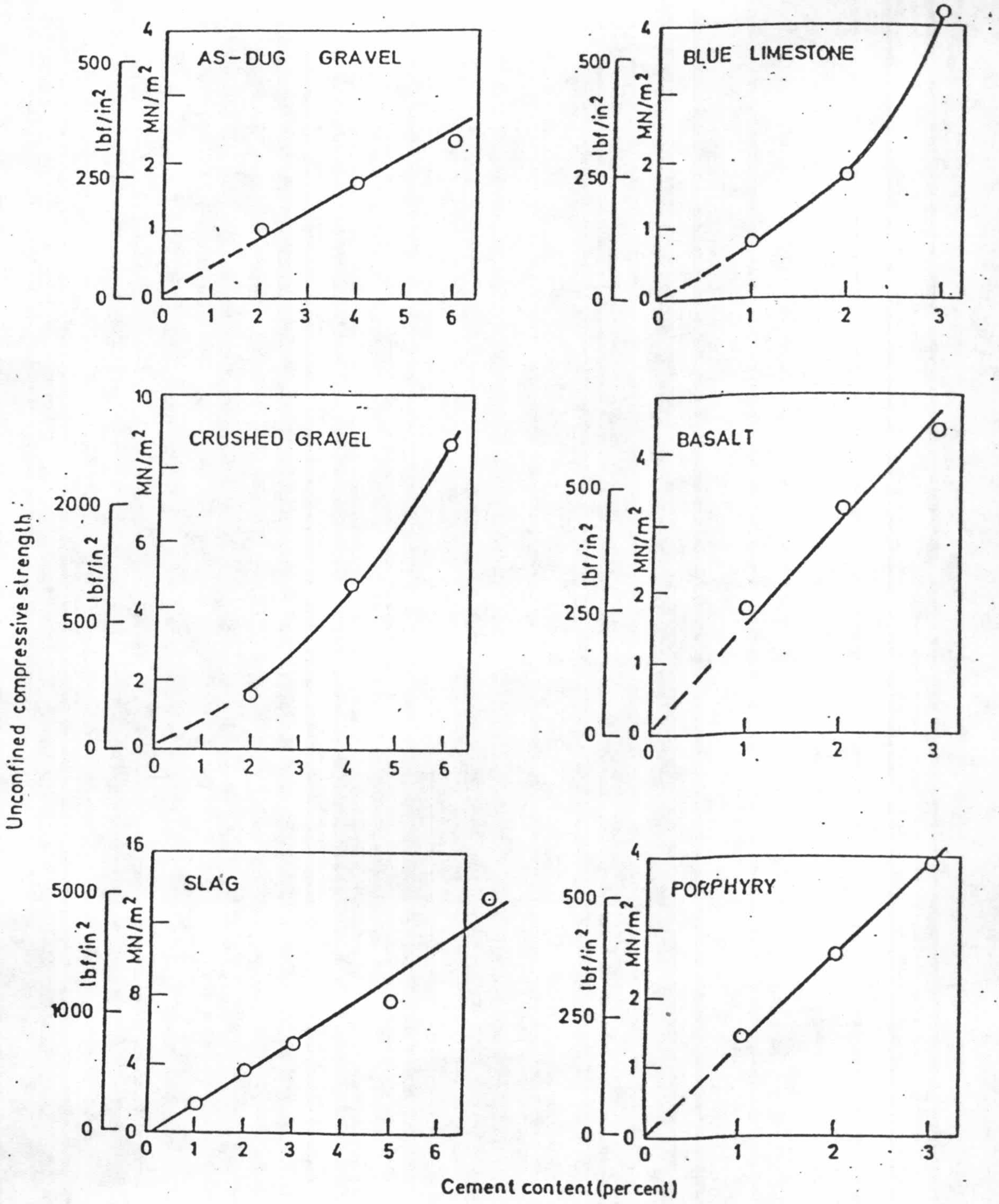
3.3.4.2 ประเภทของซีเมนต์ Flaherty (8) กล่าวว่า ตามปกติแล้วจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ประเภทหนึ่ง ในการทำ cement - stabilized material สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท high early strength จะใช้เมื่อ



รูปที่ 3.19 ผลที่เกิดขึ้นกับ unconfined compressive strength เมื่อทำการ soaking



รูปที่ 3.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength และปริมาณซีเมนต์ของ soil 5 ชนิด ซึ่งทำการ stabilized ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 3.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง unconfined compressive strength ที่ 7 วัน และปริมาณซีเมนต์ ของ stone 6 ชนิด ซึ่งทำการ stabilized ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ต้องการกำลังในระยะเวลาสั้น หรือในดินที่มีสารอินทรีย์ปะปนอยู่เท่านั้น

และสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท sulphate - resistant สามารถใช้ในดินที่มีสาร sulphate ปะปนอยู่ และในการใช้ต้องระมัดระวัง เพราะถ้ามีพวก clay ปะปนอยู่ จะก่อให้เกิดปฏิกริยาระหว่าง sulphate, clay mineral และ lime ขึ้น ซึ่งจะทำให้กำลังของ cement - stabilized material ลดลงไป

3.3.4.3 <u>การพิจารณาคุณภาพของซีเมนต์</u> Sherwood (4) กล่าวว่า ในการพิจารณาซีเมนต์ที่จะใช้นั้น ต้องพิจารณาทั้งคุณสมบัติทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ สำหรับคุณสมบัติในทางเคมีนั้น จะพิจารณาจากปริมาณ calcium oxide (CaO) เป็นสำคัญ ส่วนคุณสมบัติในทางกายภาพ จะพิจารณาจากความสดใหม่ และไม่รวมตัวกันเป็นก้อนแข็งของซีเมนต์ด้วย