

การประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและปริมาณน้ำที่เหมาะสมของทรายบดอัด

Estimation of maximum dry density and optimum water content of compacted sands

ธนิต เถลิงยานนท์ อดิสร จงสุพรรณพงศ์ ปณิธาน เสาร์ชัชวาลย์ และ พิพัฒน์ ทองฉิม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทร. 074-217-015, โทรสาร. 074-212-891

E-mail: tanit.c@psu.ac.th

บทคัดย่อ

คุณสมบัติของทรายและคุณสมบัติของดินเม็ดละเอียดที่ผสมอยู่ในทรายมีผลต่อความสามารถในการบดอัดให้แน่นของทราย วัตถุประสงค์ของโครงการนี้คือการศึกษาว่า ปริมาณดินเม็ดละเอียดและดัชนีความเหนียวที่ผสมอยู่ในทราย มีผลต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ได้จากการบดอัดอย่างไร โดยมีการนำทรายที่มีขนาดละเอียดดี (Well graded sand) และทรายที่มีขนาดละเอียดไม่ดี (Poorly graded sand) มาผสมกับดินเม็ดละเอียดที่มีค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity index, PI) แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ ดินขาวระนอง (PI = 17.84%), ดินเหนียวเกาะยอ (PI = 24.90%) และ ดินลูกรังคลองสรี (PI = 28.71%) โดยปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ใช้ผสมคือ ร้อยละ 5, 10, 15 และ 30 ของมวลดินผสม แล้วบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor) ผลการศึกษาพบว่า ช่วงปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ร้อยละ 5-15 ของมวลดินผสม ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้นและตามค่าดัชนีความเหนียวที่ลดลง ส่วนค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้นและตามค่าดัชนีความเหนียวของดินเม็ดละเอียดที่ลดลง เมื่อนำผลการทดสอบไปหาสมการคณิตศาสตร์แบบหลายตัวแปรที่ใช้ประมาณค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด กับ ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าดัชนีความเหนียวและปริมาณของดินเม็ดละเอียด, ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) และค่าสัมประสิทธิ์เส้นความโค้ง (C_c) ของทราย พบว่าสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นให้ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดและค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม ที่มีความแม่นยำที่ยอมรับได้

Abstract

Fine content in sands and its plasticity have significant effect on compaction of sands. The objective of this study was to determine how the fine contents and their plasticity affect the maximum dry density and optimum water content of compacted sands. Well-graded and poorly-graded sands were mixed with 3 fines which were Ranong Kaolin (PI=17.84%), Kho Yo marine clay

(PI=24.90%), and Khor Hong Lateritic soil (PI=28.71%). The fine contents used were 5%, 10%, 15% and 30% by weight of sand-fine mixtures. Sands and fine contents were mixed and compacted following Standard Proctor compaction method. For fine content of 5 to 15%, experimental results show that the maximum dry density of sand-fine mixtures increases with increasing fine content and decreasing its plasticity. The optimum water content decreases with increasing fine content and decreasing its plasticity. Multiple variable mathematical equations were developed based on experimental results and can be used to predict maximum dry density and optimum water content of sands. Verification of the equations was conducted and it was found that maximum dry density and optimum water content can be fairly predicted by these equations.

1. บทนำ

ทรายที่มีส่วนละเอียดไม่ดี (Poorly-graded sand) เมื่อนำมาบดอัดเพื่อให้มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นสำหรับการก่อสร้าง จะมีปัญหาว่าไม่สามารถที่จะให้ความหนาแน่นแห้งเพิ่มขึ้นได้มากนัก เนื่องจากไม่มีดินเม็ดเล็กมาเติมเต็มในช่องว่างระหว่างเม็ดทราย ทรายที่มีส่วนละเอียดดี (Well-graded sand) โดยมีดินเม็ดละเอียด (ดินที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200) ผสมอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถบดอัดให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นได้ โดยประสิทธิภาพของการบดอัดจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและปริมาณของทรายและดินเม็ดละเอียด คุณสมบัติความเป็นพลาสติก (Plasticity) ของดินเม็ดละเอียด เมื่อได้รับความชื้นที่ได้จากการเติมน้ำในการบดอัดจะทำให้หน้าดินที่เสมือนสารหล่อลื่น ทำให้การบดอัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการศึกษาของ Korfiatis และ Manikopoulos [1] พบว่าค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (Maximum dry density, ρ_{dmax}) ของทรายจะขึ้นอยู่กับขนาดของทราย (Grain size distribution) ผลการทดลองของ Masih [2] แสดงให้เห็นว่าค่า ρ_{dmax} ของทรายขึ้นอยู่กับขนาดเฉลี่ยของทราย (Mean of grain size), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ

ขนาดทราย (Standard deviation of grain size), ค่าความถ่วงจำเพาะของทราย, และ ปริมาณดินเม็ดละเอียด

การศึกษานี้ทำการศึกษากว่า ปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ผสมอยู่ในทรายมีผลต่อค่า ρ_{dmax} และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum moisture content, w_{opt}) อย่างไร และสำหรับดินเม็ดละเอียดที่ผสมอยู่ในทรายในปริมาณที่เท่ากันแต่มีค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index, PI) ต่างกัน จะมีผลต่อค่า ρ_{dmax} และค่า w_{opt} เพียงใด ผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า ρ_{dmax} และค่า w_{opt} ของทราย เมื่อมีปริมาณดินเม็ดละเอียดที่แตกต่างกัน มีค่า PI ไม่เท่ากัน และ ส่วนคละของทรายที่ไม่เท่ากันในรูปของ ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) และ ค่าสัมประสิทธิ์เส้นความโค้ง (C_c) ผลการทดสอบถูกนำไปหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรทุกตัวที่เกี่ยวข้องกับค่า ρ_{dmax} และค่า w_{opt} โดยใช้ Multiple variable regression technique สมการที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่า ρ_{dmax} และค่า w_{opt} ได้

2. ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงานได้แสดงเป็น Flow chart (รูปที่ 1) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

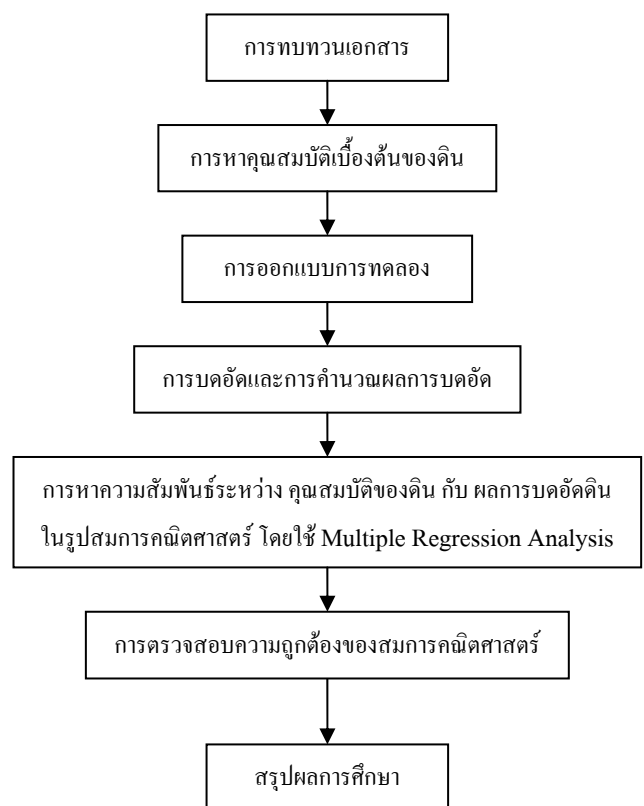
- 1) ทบทวนเอกสารเกี่ยวกับคุณสมบัติของทรายเป็นดินเม็ดละเอียดและการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Compaction Test) รวมไปถึงงานวิจัยต่างๆ
- 2) หาคุณสมบัติพื้นฐานของทรายและดินเม็ดละเอียดชนิดต่างๆ เช่น การกระจายขนาดของเม็ดดิน, ค่าดัชนีความเหนียว (Plasticity Index, P.I.) และ ความถ่วงจำเพาะ เป็นต้น
- 3) ออกแบบวิธีการทดสอบ ในส่วนของอัตราส่วนการผสมทรายและดินเม็ดละเอียด
- 4) ทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐานแล้วคำนวณหาค่า ρ_{dmax} และ w_{opt}
- 5) ประเมินผลของดินเม็ดละเอียดต่อการบดอัดของทรายแล้วนำค่าที่ได้ไปหาความสัมพันธ์ในรูปของสมการคณิตศาสตร์ระหว่าง ρ_{dmax} และ w_{opt} กับคุณสมบัติพื้นฐานของดินเม็ดละเอียดและทราย
- 6) ตรวจสอบความถูกต้องของสมการคณิตศาสตร์ที่ได้โดยใช้ข้อมูลชุดใหม่ที่ได้จากการทดลอง
- 7) สรุปผลการศึกษา

3. วัสดุและวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ได้มีการนำวัสดุ 2 ชนิดมาผสมกันคือ ดินเม็ดละเอียดและทราย ซึ่งดินเม็ดละเอียดที่ใช้ในการทดสอบนี้มีอยู่ 3 ชนิดคือ ดินขาว ดินเหนียว และ ดินลูกรัง (ค่า Atterberg Limits แสดงไว้ในตารางที่ 1) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินลูกรังสีน้ำตาลแดงจากบริเวณสวนสาธารณะนครหาดใหญ่ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
2. ดินเหนียวที่ใช้ในการทดสอบ เป็นดินเหนียวทะเล (Marine Clay) สีเทาเข้มบริเวณวัดแหลมพ้อ ได้สะพานดินสุสานที่ อ.เมือง จ.สงขลา
3. ดินขาวที่ใช้ในการทดสอบเป็นดินขาวจากจังหวัดระนองโดย บริษัท มินเนอรัล รีซอร์สเซส ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด

ทรายที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นทรายแม่น้ำที่ใช้ในการก่อสร้างทั่วไปใน อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา โดยแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ทรายที่มีการกระจายขนาดละเอียด (Well-graded sand, SW) และทรายที่มีการกระจายขนาดละเอียดไม่ดี (Poorly-graded sand, SP) ซึ่งมีคุณสมบัติแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1 ค่าพิคคอดเทอร์เบิร์ก (Atterberg's Limits) ของดินเม็ดละเอียดที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	ดินลูกรัง	ดินเหนียว	ดินขาว
Liquid Limit (%)	50.60	47.60	52.80
Plastic Limit (%)	21.89	22.70	34.96
Plasticity Index (%)	28.71	24.90	17.84

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของทรายที่ใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติ	SW	SP
Diameter with 10% Finer, D_{10} (cm)	0.18	0.16
Diameter with 30% Finer, D_{30} (cm)	0.52	0.42
Diameter with 50% Finer, D_{50} (cm)	0.92	0.92
Diameter with 60% Finer, D_{60} (cm)	1.25	1.30
Uniformity Coefficient, C_u	6.94	8.13
Coefficient of Gradation, C_c	1.20	0.85
Specific Gravity, G_s	2.62	2.62
Max. Dry Density, ρ_{dmax} (g/cm^3)	1.85	1.81
Optimum Moisture Content, w_{opt} (%)	12.1	12.9

ตารางที่ 3 ค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} จากการทดลอง

ชนิดของดินเม็ดละเอียด	ปริมาณดินเม็ดละเอียด (%)	SW		SP	
		ρ_{dmax} (g/cm^3)	w_{opt} (%)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	w_{opt} (%)
ดินลูกรังคอกหงส์	5	1.866	11.90	1.884	12.25
	10	1.927	10.50	1.945	10.00
	15	1.968	11.30	1.973	10.60
	30	2.107	10.00	2.020	11.60
ดินเหนียวเกาะขอม	5	1.910	11.40	1.907	11.50
	10	2.026	9.80	2.025	9.90
	15	2.055	9.60	2.051	9.65
	30	1.975	11.40	1.968	11.40
ดินขาวระนอง	5	1.931	12.30	1.928	10.90
	10	2.030	9.75	2.027	9.15
	15	2.070	9.40	2.060	9.10
	30	1.954	11.40	1.952	10.75

การเตรียมดินที่ใช้ในการทดสอบทำได้โดยการนำทรายที่อบแห้งแล้วไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ต่างๆ หลังจากนั้นนำทรายที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาผสมกันในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ทราย

ที่มีขนาดละเอียดกันทุกตัวอย่าง ไม่ว่าจะเป็น SW หรือ SP ส่วนการเตรียมดินเม็ดละเอียด ทำโดยนำดินเม็ดละเอียดที่เป็นก้อนไปอบแห้งแล้วไปกรึงด้วยดรัมน้ำหนักให้มีขนาดเล็กลงหลังจากนั้นนำดินนั้นไปเข้าเครื่องย่อยดิน เพื่อย่อยดินให้มีขนาดเล็ก แล้วนำดินเม็ดละเอียดที่ผ่านการย่อยดินแล้วไปอบให้แห้งก่อนนำไปทำการผสมกับทราย

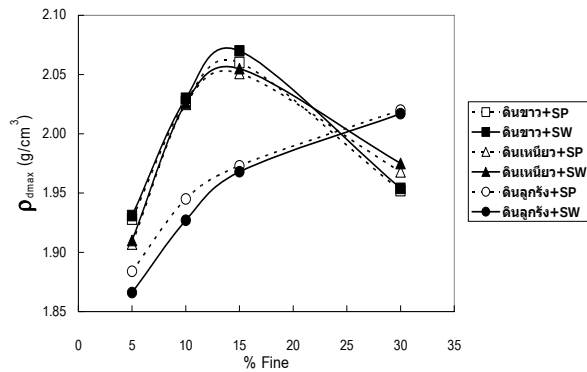
การทดสอบทำได้โดยการนำทรายและดินเม็ดละเอียดที่ได้เตรียมไว้มาผสมกัน โดยปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ใช้ผสมคือร้อยละ 5, 10, 15 และ 30 ของมวลดินผสม แล้วลูกคล้ามวลดินผสมกับน้ำแล้วบ่มในถุงพลาสติกเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงเพื่อให้มีการกระจายความชื้นอย่างทั่วถึง หลังจากนั้นนำดินที่ผสมแล้วไปทำการทดสอบการบดอัดแบบมาตรฐาน (Standard Proctor Compaction, ASTM D-698) โดยทำการทดสอบซ้ำในทุกตัวอย่างเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

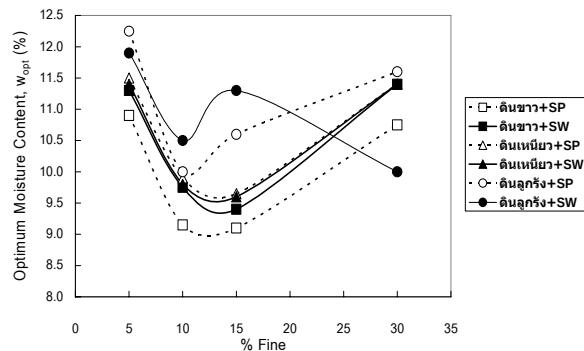
4.1 ผลของปริมาณดินเม็ดละเอียด ต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และ ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม

ผลของปริมาณดินเม็ดละเอียด ต่อค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด และ ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 3 เมื่อนำผลการทดสอบมาแสดงในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเม็ดละเอียด กับ ค่า ρ_{dmax} (รูปที่ 2) พบว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกราฟการบดอัดนั้นคือ ในช่วงปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ 5 -15% ค่า ρ_{dmax} จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเม็ดละเอียดทุกชนิดที่ผสมอยู่ในทราย โดยดินเม็ดละเอียดที่ผสมเข้าไปจะทำให้การบดอัดของทรายมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ามีดินเม็ดละเอียดผสมอยู่มากเกินไปจะทำให้ ค่า ρ_{dmax} ลดลง โดยค่า ρ_{dmax} จะลดลงเมื่อดินเม็ดละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 30% ยกเว้นทรายผสมดินลูกรังคอกหงส์ที่ค่า ρ_{dmax} ยังคงเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเม็ดละเอียด นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของทราย (SW หรือ SP) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ρ_{dmax} อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า C_c และ C_u ที่เลือกใช้ไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากทรายแบบ SP ที่เลือกใช้ไม่มีความเป็น "Uniform sand" เพียงพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่าง

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเม็ดละเอียด กับ ค่า w_{opt} (รูปที่ 3) แสดงให้เห็นว่า ค่า w_{opt} ของทรายจะลดลงตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้น กล่าวคือ ในช่วงที่ปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ 5%-15% สำหรับดินขาวระนอง ดินเหนียวเกาะขอม และ ช่วงที่ปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ 5%-10% สำหรับดินลูกรังคอกหงส์ ค่า w_{opt} จะลดลงตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณดินเม็ดละเอียดเพิ่มจาก 15 ถึง-30% ค่า w_{opt} จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเม็ดละเอียดกับความหนาแน่นแห้งสูงสุด

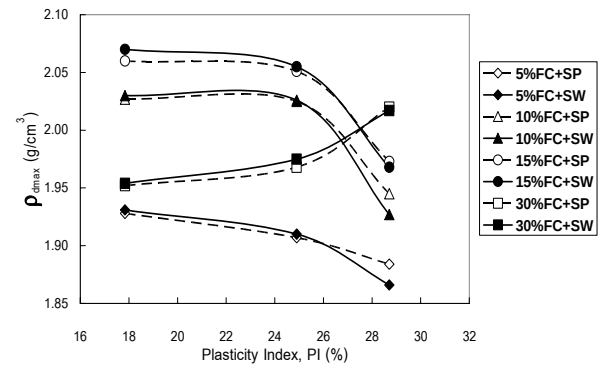


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณดินเม็ดละเอียด กับปริมาณน้ำที่เหมาะสม (w_{opt})

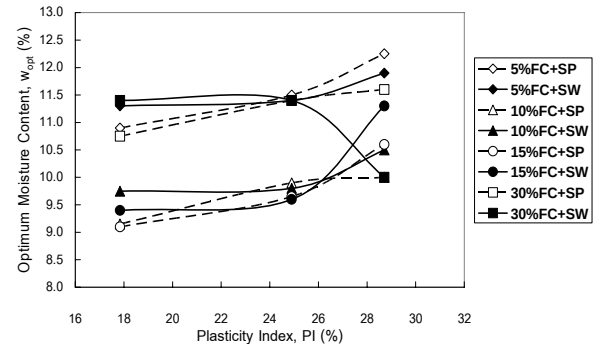
4.2 ผลของค่าดัชนีความเหนียวของดินเม็ดละเอียด ต่อค่า

ความหนาแน่นแห้งสูงสุด และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI ของดินเม็ดละเอียด กับค่า ρ_{dmax} ของทรายที่มีการกระจายขนาดคละกันดีและไม่ดีผสมกับดินเม็ดละเอียดในปริมาณที่แตกต่างกันและมี PI ที่ไม่เท่ากัน (รูปที่ 4) แสดงให้เห็นว่า สำหรับปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ 5-15% ค่า ρ_{dmax} มีค่าลดลงเมื่อดินเม็ดละเอียดมีค่า PI เพิ่มขึ้น ทรายที่ผสมกับดินขาวระนองซึ่งมีค่า PI ต่ำที่สุด (PI=17.84) ให้ค่า ρ_{dmax} สูงที่สุด ในขณะที่ทรายที่ผสมกับดินลูกรังคอหงส์ซึ่งมีค่า PI สูงที่สุด (PI=28.71) ในจำนวนดินที่ทำทดสอบให้ค่า ρ_{dmax} ต่ำที่สุด สำหรับในช่วงปริมาณดินเม็ดละเอียด ที่มากกว่า 15% จนถึง 30% ผลการทดสอบที่ได้มีความหลากหลายไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน นอกจากนั้นผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าชนิดของทราย (SW หรือ SP) ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า ρ_{dmax} มากนักเนื่องจากค่า C_c และ C_u ที่เลือกใช้ไม่ต่างกันมากนัก และเมื่อพิจารณาเฉพาะช่วงปริมาณดินเม็ดละเอียดเท่ากับ 5-15% จะเห็นว่าที่ทุกค่า PI หรือที่ทุกชนิดของดินเม็ดละเอียด ค่า ρ_{dmax} จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่ผสมอยู่ในทราย



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_{dmax} ของทรายบดอัด กับ PI ของดินเม็ดละเอียด



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง w_{opt} ของทรายบดอัด กับ PI ของทรายดินเม็ดละเอียด

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า PI ของดินเม็ดละเอียด กับค่า w_{opt} ของทรายบดอัด (รูปที่ 5) แสดงให้เห็นว่า ค่า w_{opt} ของทรายบดอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อดินเม็ดละเอียดที่ผสมอยู่มีค่า PI เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่าดินเม็ดละเอียดที่มี PI สูงต้องการปริมาณน้ำที่มากกว่าดินเม็ดละเอียดที่มีค่า PI ต่ำกว่าในการที่ทำให้ดินเม็ดละเอียดเหล่านั้นมีปริมาณน้ำที่เหมาะสมกับการบดอัด

4.3 Multiple Variable Regression Analysis

พารามิเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติของดินเม็ดละเอียด ปริมาณดินเม็ดละเอียด และ คุณสมบัติแสดงส่วนคละของทราย อันได้แก่ ปริมาณดินเม็ดละเอียด (FC) ค่าพิทักความเหลว (LL) ค่าพิทักพลาสติก (PL) และค่าดัชนีความเหนียว (PI) ของดินเม็ดละเอียด และ ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (C_u) และ ค่าสัมประสิทธิ์เส้นความโค้ง (C_c) ของทราย พารามิเตอร์เหล่านี้ได้ถูกนำมาหาความสัมพันธ์ (Correlation) กับค่า ρ_{dmax} และค่า w_{opt} โดยใช้ Multiple variable regression analysis ตามวิธีการที่สอดคล้องกับวิธีที่เสนอโดย Puppala et al. [3] โดยความสัมพันธ์ระหว่าง ρ_{dmax} และค่า w_{opt} และคุณสมบัติ

ของดินเม็ดละเอียดและทราย สามารถแสดงได้ในรูปสมการดังต่อไปนี้

$$\rho_{dmax} = C_{0(\rho)} + C_{1(\rho)}X_{1(\rho)} + C_{2(\rho)}X_{2(\rho)} + \dots + C_{n(\rho)}X_{n(\rho)} \quad (1)$$

$$w_{opt} = C_{0(w)} + C_{1(w)}X_{1(w)} + C_{2(w)}X_{2(w)} + \dots + C_{n(w)}X_{n(w)} \quad (2)$$

โดย $C_{0(\rho)}, C_{1(\rho)}, C_{2(\rho)}, \dots, C_{n(\rho)}$ และ $C_{0(w)}, C_{1(w)}, C_{2(w)}, \dots, C_{n(w)}$ คือ "Regression Coefficient" ที่ได้จาก Multiple variable regression analysis, $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$ เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงคุณสมบัติของดิน และ n คือจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ โดยจำนวน n และ X ได้เลือกใช้โดยวิธีลองผิดลองถูก (Trial & Error) จนได้สมการที่ให้ค่าประมาณของ ρ_{dmax} และ w_{opt} ที่ดีที่สุดซึ่งประเมินได้จากค่า Coefficient of Correlation (R^2)

ผลของ Multiple variable regression analysis ของทรายบดอัดที่มี $FC < 15\%$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 โดยเลือกใช้ค่า n ตั้งแต่ 2 ถึง 5 และพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ (X) อาจถูกยกกำลังสอง หรือ อยู่ในรูปของ exponential เพื่อให้ได้ค่าความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด ผลการวิเคราะห์พบว่าสมการที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการประมาณค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ได้แสดงไว้ในสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยทั้งสองสมการนี้มีค่า C_c และ C_u เป็นพารามิเตอร์หลัก ส่วน PI และ FC เป็นพารามิเตอร์รอง

$$\rho_{dmax} \text{ (g/cm}^3\text{)} = 0.171C_u + 0.576C_c - 2.567 \times 10^{-14} e^{PI} + 0.013 FC \quad (3)$$

$$w_{opt} \text{ (%) } = C_u + 4.319 C_c + 3.062 \times 10^{-13} e^{PI} - 0.177 FC \quad (4)$$

ตารางที่ 4 ค่า R^2 และ MSE ที่ได้จาก Multiple variable regression analysis

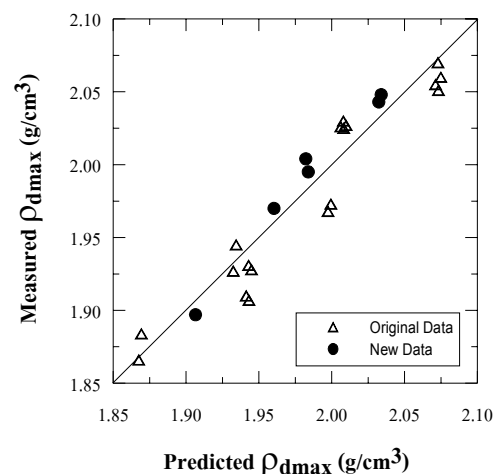
n	Parameters	R^2		MSE	
		ρ_{dmax}	w_{opt}	ρ_{dmax}	w_{opt}
2	FC, PI	0.816	0.574	0.0007	0.398
	FC, e^{PI}	0.906	0.612	0.0004	0.363
	FC, PI^2	0.834	0.584	0.0007	0.396
3	FC, PL, LL	0.904	0.591	0.0012	0.357
	FC, e^{PL}, e^{LL}	0.904	0.591	0.0004	0.357
4	FC, PI, C_u, C_c	0.999	0.996	0.0007	0.372
	FC, e^{PI}, C_u, C_c	0.999	0.996	0.0004	0.337
5	FC, PL, LL, C_u, C_c	0.999	0.996	0.0012	0.332
	FC, e^{PL}, e^{LL}, C_u, C_c	0.999	0.996	0.0004	0.331

4.4 การตรวจสอบความถูกต้อง

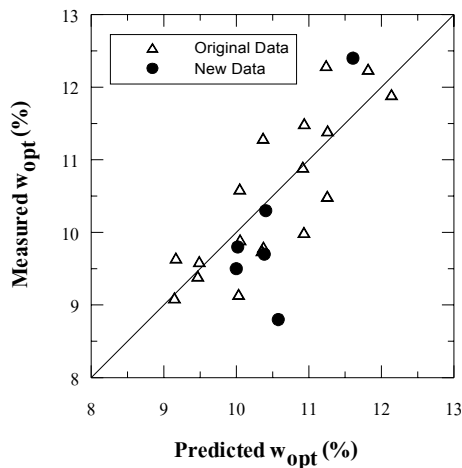
การตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ได้จาก Multiple variable regression analysis ในการประมาณค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ทำโดยนำค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ที่ได้จากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้พารามิเตอร์ 2 ถึง 5 ตัว (รวมถึงสมการที่ 3 และ 4 ด้วย) โดยแสดงค่าความถูกต้องในรูปของ Mean square error (MSE) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสมการที่ 3 และ 4 ให้ค่าประมาณของ ρ_{dmax} และ w_{opt} ตามลำดับ ดีที่สุดเนื่องจากมีค่า MSE ที่น้อยที่สุด

การเปรียบเทียบ ค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ที่ได้จากการทดลอง (Measured values) กับค่าที่คำนวณได้จากสมการ (Predicted values) โดยใช้สมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยใช้ข้อมูลชุดเดิม (Original data) ที่ใช้ใน Multiple variable regression analysis ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่า ค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 มีค่าสอดคล้องกับค่าที่หาได้จากการทดลองโดยสมการที่ใช้ในการประมาณค่า ρ_{dmax} มีความแม่นยำมากกว่าสมการที่ใช้ประมาณค่า w_{opt}

เพื่อเพิ่มความมั่นใจในการตรวจสอบสมการที่ได้จึงมีการใช้ข้อมูลจากการทดลองชุดใหม่ (New data) มาตรวจสอบว่าสมการที่หามาได้นั้นมีความน่าเชื่อถือ ข้อมูลการบดอัดในห้องปฏิบัติการชุดใหม่ได้จากการนำทรายทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดลองมาผสมกับดินเม็ดละเอียดทั้ง 3 ชนิด แต่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณดินเม็ดละเอียด (Fine content) เป็น 8% และ 12% แล้วนำค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ที่คำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 กับ ค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ที่ได้จากการทดลอง มาเปรียบเทียบกับ พบว่าสมการที่ 3 และ 4 สามารถประมาณค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ได้เป็นอย่างดี ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ตามลำดับ โดยการทำนายค่า ρ_{dmax} มีความผิดพลาดอยู่ในช่วง 0.30 ถึง 1.75 % ในขณะที่การทำนายค่า w_{opt} มีความผิดพลาดในช่วง 0.15 ถึง 9.63 %



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่า ρ_{dmax} ที่ประมาณได้จากสมการที่ 3 กับ ค่าที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบค่า w_{opt} ที่ประมาณได้จากสมการที่ 4 กับ ค่าที่ได้จากการทดลอง

5. สรุป

การหาค่า ความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ρ_{dmax}) และปริมาณน้ำที่เหมาะสม (w_{opt}) โดยการบดอัดทรายตามมาตรฐาน Standard Proctor สามารถทำได้โดยง่ายในห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ทั่วไป อย่างไรก็ตาม เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการบดอัดทรายจะมีประสิทธิภาพที่ดีถ้าทรายนั้นมีส่วนคละที่ดีและมีดินเม็ดละเอียดปนอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นถ้ารู้คุณสมบัติของทรายและดินเม็ดละเอียดที่ผสมอยู่ก็ควรจะประมาณค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ได้ การศึกษาถึงผลของปริมาณและความเหนียวของดินเม็ดละเอียดรวมถึงส่วนคละของทรายต่อค่าการบดอัดของทรายในรูปของ ρ_{dmax} และ w_{opt} และผลการหาสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ประมาณค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} สามารถสรุปผลการศึกษา ได้ดังนี้

1. สำหรับทรายที่มีดินเม็ดละเอียดผสมอยู่ในปริมาณ ร้อยละ 5 ถึง 15 พบว่าค่า ρ_{dmax} จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้น และตามดัชนีความเหนียวที่ลดลง ในขณะที่ค่า w_{opt} มีค่าลดลงตามปริมาณดินเม็ดละเอียดที่เพิ่มขึ้นและตามดัชนีความเหนียวของดินเม็ดละเอียดที่ลดลง

2. ชนิดของทราย (Well-graded หรือ Poorly-graded) ไม่ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุด (ρ_{dmax}) และค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (w_{opt}) มากนัก โดยอาจมีสาเหตุจากทรายแบบ

SP ที่เลือกใช้ไม่มีความเป็น “Uniform sand” เพียงพอที่จะทำให้เกิดความแตกต่างกัน

3. ผลจาก Multiple variable regression analysis ได้ถูกเสนอในรูปของสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ประมาณค่า ρ_{dmax} กับ w_{opt} จากค่าคุณสมบัติพื้นฐานของทรายที่มีดินเม็ดละเอียดไม่มากกว่า 15% ซึ่งสมการที่เหมาะสมจะนำไปใช้งานและให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบมากที่สุดคือ สมการที่ 3 และ 4 โดยค่าคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องมาใช้ในการประมาณค่าคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ และ ค่าสัมประสิทธิ์เส้นความโค้งของทรายซึ่งเป็นพารามิเตอร์หลัก และ ค่าดัชนีความเหนียวและปริมาณของดินเม็ดละเอียดซึ่งเป็นพารามิเตอร์รอง

4. การตรวจสอบความถูกต้องของสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ข้อมูลเดิมที่ใช้ในการหาสมการดังกล่าวทั้ง 2 และ ข้อมูลชุดใหม่ พบว่าสมการคณิตศาสตร์นี้สามารถประมาณค่า ρ_{dmax} และ w_{opt} ที่มีความแม่นยำที่ยอมรับได้

5. สมการคณิตศาสตร์นี้พัฒนาขึ้นจากทรายที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.62 ในกรณีที่ทรายมีความถ่วงจำเพาะต่างจากนี้ สมการดังกล่าวอาจให้ค่าประมาณของ ρ_{dmax} ที่มีความแม่นยำน้อยลง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Korfiatis, G.P., and Manikopoulos, C.N. (1982). “Correlation of Maximum dry density and Grain Size,” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 108, No. 9, 1171-1176.
- [2] Masih, R., (2000). “Formula to get Desired Soil Density,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 12, 1145-1150.
- [3] Puppala, A.J., Punthutaechea, K., and Vanapalli, S.K. (2006). “Soil-Water Characteristic Curves of Stabilized Expansive Soils,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 16, 736-751.