หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การอภิปรายผลการทดลอง

การอภิปรายผลการทดลองต่อไปนี้แยกหัวข้อตามคุณสมบัติสำคัญที่มีผลต่อความแข็งแรงของก้อนกากหินน้ำมันผสมซิเมนต์

5.1 คุณสมบัติของกากหินน้ำมันที่นำมาทดลอง

การเผาหินน้ำมันที่อุณหภูมิสูงถึง 1,100 องศาเซนติเกรด ทำให้น้ำและน้ำมันที่มีอยู่ระเหยกลายเป็นไอ กากที่ได้จึงมีลักษณะเบา พรุน เมื่อทุบจะกลายเป็นผง กากที่ได้นี้อาจมีลักษณะไม่เหมือนกากที่ได้จากการเผาในเตาชนิดอื่นและวิธีอื่นก็ได้ เช่นอาจจะมีขนาดป่นกว่า มีน้ำมันเหลืออยู่น้อยกว่า กากที่ได้เมื่อร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 10 แล้วจะมีลักษณะคล้ายกับทราย เม็ดมีเหลี่ยมคม ซิเมนต์ยึดเกาะได้ดี เป็นพวกที่ไม่มีความเหนียว (Plasticity) เช่นเดียวกับทราย ส่วนประกอบที่สำคัญ นอกจากพวก ซิลิก้า อลูมิน่าแล้ว ยังมีออกไซด์ของเหล็ก แคลเซี่ยมออกไซด์ โปแตสเซี่ยมออกไซด์ ซึ่งทำให้กากหินน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นด่างอย่างอ่อน เหมาะสมกับการผสมกับซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพราะปฏิกริยาเคมีของซิเมนต์เกิดได้ดีในสภาพด่างอย่างอ่อน ทำให้วัสดุผสมซิเมนต์ที่ได้มีความแข็งแรงสูง

5.2 ผลของปริมาณซิเมนต์

จากผลการจำแนกเนื้อดินทางวิศวกรรม กากหินน้ำมันมีความปนคละตาม Public Road Classification เป็น A-2-5-(0) ซึ่งสถาบัน Portland Cement Association ระบุว่าความปนคละลักษณะนี้ต้องผสมซิเมนต์ระหว่าง 5 – 9 เปอร์เซนต์ จึงสามารถใช้ในงานก่อสร้างได้ดี และจากการทดลองเพื่อที่จะให้ก้อนวัสดุมีค่าความเค้นแรงอัดสูงสุด 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตามที่ Highway Research Board (1961) ระบุจะต้องผสมซิเมนต์ 7 เปอร์เซนต์(ผลการทดลองหัวข้อที่ 4.4)ซึ่งเป็นค่าที่ยังไม่ครอบคลุมผลของการกัดกร่อนจากการเปียกและแห้ง

ผลการทดลองที่แสดงในกราฟรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณซิเมนต์เพิ่มขึ้น ค่าความเค้นแรงอัดสูงสุดจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณซิเมนต์ที่ใส่ และถึงแม้ว่าการเพิ่มค่ากวามเค้นแรงอัดสูงสุดจะขึ้นอยู่กับเวลาที่บ่มด้วย แต่จากกราฟได้แสดงให้เห็นว่า ค่าความเค้นแรงอัดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณซิเมนต์เป็นหลักสำคัญ ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการยึดเกาะหรือหุ้มอนุภาคกากหินน้ำมันเข้าด้วยกันของแคลเซี่ยมอลูมิเนตและแคลเซี่ยมซิลิเกตที่เกิดจากปฏิกริยาของซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เมื่อปริมาณซิเมนต์เพิ่มขึ้น การยึดเกาะของสารเหล่านี้ก็เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงจึงเพิ่มตามปริมาณซิเมนต์ นอกจากปฏิกริยา Hydration ของซิเมนต์จะทำให้เกิด CAH และ CSH แล้วยังมีแคลเซี่ยมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดขึ้นซึ่งจะมีปฏิกริยากับซิลิก้าและอลูมิน่าของกากหินน้ำมัน (Pozzolanic Reaction) ทำให้เกิด CAH และ CSH อีกทีหนึ่ง แต่ปฏิกริยานี้เกิดน้อยและใช้เวลานาน

เมื่อก้อนวัสดุถูกทดสอบความคงทนโดยการแช่น้ำและอบแห้งหลาย ๆ ครั้ง แรงบวมตัวเมื่อแช่น้ำ Swell และแรงดึงที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้ง จะทำให้ก้อนวัสดุที่ไม่ผสมซิเมนต์แตกหลายลง แต่สำหรับก้อนกากหินน้ำมันผสมซิเมนต์ ทั้งขนาดและปริมาตร ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่ความแข็งแรงลดลงเป็นเพราะปริมาณของ CAH และ CSH เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อกากหินน้ำมันยังน้อยอยู่ และบางส่วนถูกทำลายโดยแรงภายนอกที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ค่าพิกัด 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากตารางที่ 10 แสดงให้เห็นว่าต้องผสมซิเมนต์ปอร์ตแลนด์ 8 เปอร์เซนต์

5.3 ผลของปริมาณความชื้นในขณะบดอัด

5.3.1 ผลของปริมาณความชื้นขณะบดอัดที่มีต่อความหนาแน่นดินแห้ง

กราฟรูปที่ 10 และตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นดินแห้งของก้อนกากหินน้ำมันเพิ่มตามปริมาณน้ำจนถึงค่าหนึ่งจึงลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะน้ำที่ใส่จะไปหล่อลื่นอนุภาคต่าง ๆ ให้จัดเรียงตัวบดอัดได้ความหนาแน่นสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด เมื่อปริมาณน้ำมากกว่าจุดนี้จะเกิดน้ำส่วนเกินไปแย่งที่อยู่ของอนุภาควัสดุ เมื่ออบแห้งก้อนวัสดุจึงมีความ

ความหนาแน่นต่ำ พบว่าค่าความชื้นที่ความหนาแน่นสูงสุดมีค่าสูงมาก คือระหว่าง 35 ถึง 45 เปอร์เซนต์ ในขณะที่ดินหรือหินคลุกส่วนมากมีค่าต่ำกว่า 20 เปอร์เซนต์ทั้งนั้น การที่จะบดอัดกากหินน้ำมันให้มีความหนาแน่นดินแห้งใกล้เคียงกับดินทั่วไปโดยใช้ความชื้นเท่ากันต้องใช้พลังงานสูงมาก ทั้งนี้เป็นผลจากพลังความร้อนได้ทำให้น้ำผลึกหนีหายไปจากแร่ดิน ทำให้คุณสมบัติของแร่ดินเปลี่ยนเป็นแข็งแกร่ง มีเหลี่ยมคม ไม่มีน้ำระหว่างชั้นของแร่ดินซึ่งทำให้การหล่อลื่นขณะบดอัดมีน้อยยากแก่การบดอัดโดยการผสมน้ำปริมาณน้อย

วิธีการบดอัดมีผลต่อความหนาแน่นของก้อนวัสดุด้วย การบดอัดด้วยเครื่องมือ Havard Miniature Compactor มีผลภายหลังบดอัดใกล้เคียงกับการบดอัดด้วยรถบดตีนแกะ ซึ่งเป็นวิธีการบดอัดในสนามที่เหมาะสมกับกากหินน้ำมัน เพราะคุณสมบัติของกากหินน้ำมันแม้ว่าจะผ่านตะแกรงเบอร์ 10 และมีคุณสมบัติคล้ายทรายก็ตาม เมื่อโดนทุบกระแทกต่อไปจะแตกยุ่ยต่อไปอีก การใช้รถบดตีนแกะจะทำให้วัสดุเม็ดใหญ่แตกย่อยลงไปแทรกตัวอยู่ในช่องว่างที่มีอยู่ ความหนาแน่นจะสูงขึ้นมากกว่าการบดอัดด้วยแรงสถิตธรรมดา

5.3.2 <u>ผลของปริมาณความชื้นที่มีต่อค่าความเค้นแรงอัดสูงสุด</u>

จากกราฟรูปที่ 11 และ 12 ถึง 15 แสดงว่าการบดอัดกากหินน้ำมันล้วน ๆ ให้ได้ความเค้นแรงอัดสูงสุดต้องการน้ำน้อยกว่าการบดอัดให้ได้ความหนาแน่นดินแห้งสูงสุด เฉลี่ย 2.3 เปอร์เซนต์ เพราะการบดอัดกากหินน้ำมันล้วน ๆ ทางด้านแห้ง (Dry Side) การจัดตัวแบบเกาะเกี่ยว (Interlock) ของกากหินน้ำมันเมื่อมีปริมาณน้ำอยู่น้อย จะทำให้โครงสร้างทนแรงเค้นได้สูงกว่าการบดอัดด้านเปียก (Wet Side) สำหรับกากหินน้ำมันผสมซิเมนต์การบดอัดทางด้านเปียก (Wet Side) บวก 2 เปอร์เซนต์จากค่าความชื้นที่ให้ความหนาแน่นสูงสุด จะทำให้ได้ค่าความเค้นแรงอัดสูงสุด เพราะซิเมนต์ต้องการน้ำเป็นพิเศษจำนวนหนึ่งในการทำปฏิกริยา Hydration

5.4 ผลของความหนาแน่น

ความแข็งแรงของก้อนกากหินน้ำมันเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของก้อนวัสดุตามที่ได้แสดงในตารางที่ 8 ทั้งนี้เพราะแต่ละอนุภาคของเม็ดกากหินน้ำมันเมื่อถูกบังคับให้มาเบียดอยู่ชิดกันก้อนต่อก้อน จะเพิ่มพื้นที่สัมผัสของเม็ดดิน ซึ่งเป็นผลให้สามารถรับแรงที่เกิดขึ้นได้มากโดยไม่ทำให้โครงสร้างแตกหลายเหมือนการเกาะกันอย่างโปร่ง ๆ เมื่อมีความหนาแน่นต่ำ

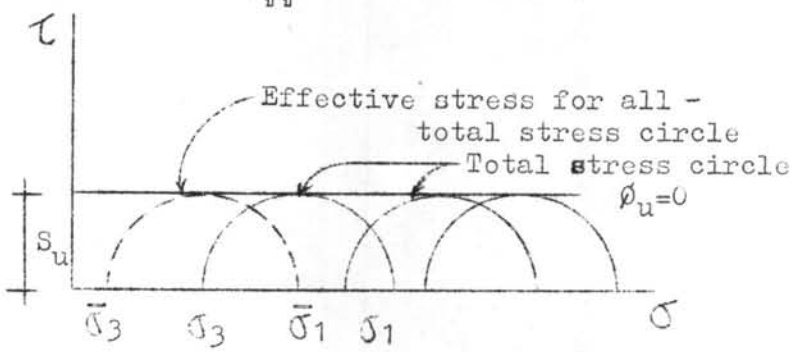
ค่าความหนาแน่นดินแห้งสูงสุดของก้อนกากหินน้ำมัน และกากหินน้ำมันผสมซิเมนต์ต่ำมาก คืออยู่ระหว่าง 1.1 ถึง 1.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่ดินทั่วไป เช่น ดินเหนียวกรุงเทพ ประมาณ 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดินลูกรัง 2.0 ทรายขี้เป็ด 1.7 หินคลุก 2.2 ขณะเดียวกันกากหินน้ำมันมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.69 ซึ่งใกล้เคียงกับดินหรือหินคลุก แสดงว่ากากหินน้ำมันมีช่องว่างระหว่างเม็ดดินอยู่มากกว่า คือมีค่าระหว่าง 1.25 ถึง 1.45 อันเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของกากหินน้ำมัน เมื่อเพิ่มความแข็งแรงของกากหินน้ำมันให้สูงขึ้นถึงขั้นโดยการผสมกับซิเมนต์ จึงสามารถใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการวัสดุน้ำหนักเบาได้เป็นอย่างดี เช่นงานถมคอสะพาน ทำถนนบนชั้นดินอ่อนและทำวัสดุก่อสร้าง

5.5 ผลของการบ่ม

วัสดุผสมซิเมนต์ทุกชนิดจะต้องบ่มทิ้งไว้เพื่อให้ปฏิกริยาของซิเมนต์เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ในขณะบ่มจนกว่าปฏิกริยาของซิเมนต์กับน้ำจะหมดไป กราฟรูปที่ 16 แสดงให้เห็นว่ากากหินน้ำมันที่บดอัดโดยไม่ผสมกับซิเมนต์ เมื่อเวลาผ่านไปค่าความเค้นแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อผสมกับซิเมนต์ ค่าความเค้นแรงอัดจะเพิ่มขึ้นทันทีตามเวลาที่บ่ม สำหรับกากหินน้ำมันผสมซิเมนต์น้อยกว่า 3 เปอร์เซนต์ อัตราการเพิ่มค่าความเค้นแรงอัดจะสูงมากในช่วง 14 วันแรก แต่หลังจากนั้นจะไม่เพิ่มขึ้นอีก แสดงว่าปฏิกริยาของซิเมนต์กับน้ำได้หมดลงใน 14 วัน และเมื่อเพิ่มปริมาณซิเมนต์ เช่นที่ 6 % อัตราการเพิ่มค่าความเค้นแรงอัดจะเพิ่มตลอดเวลา 28 วัน ความแข็งแรงของก้อนวัสดุนอกจากขึ้นอยู่กับเวลาที่บ่มแล้วยังขึ้นอยู่กับลักษณะและวิธีการบ่มด้วย

5.6 ผลการทดลอง Unconsolidated Undrained Test ก้อนกากหินน้ำมันอิ่มตัวด้วยน้ำ

การทดลอง Unconsolidated Undrained Test สำหรับตัวอย่างที่มี Initial Effective Stress เท่ากันได้ค่ามุมเสียดทานภายใน $\phi = 0$ สามารถอธิบายในรูปของ Effective Stress ได้คือ เมื่อก้อนวัสดุตัวอย่างอิ่มตัวด้วยน้ำ (ตรวจสอบโดยทดสอบค่า Parameter B = 1.0) ทำให้ค่า Initial Effective Stress ของตัวอย่างทุกก้อนคงที่เสมอ เมื่อถูกทดสอบแบบ Unconsolidated Undrained Test ค่า Su ที่ failure จึงเท่ากันทุกก้อนตัวอย่าง ถ้าเขียนกราฟ Total Stress Mohr Circle จะให้รัศมีของ Mohr Circle เท่ากันทุกวง และมี Effective Stress Circle เพียงวงเดียว (ดูรูปข้างล่าง) ซึ่งทำให้ ϕ ที่วัดได้มีค่าเท่ากับศูนย์



Mohr stress circle for undrained test on saturated sample

การทดลองพบว่าค่า Su ที่ได้จาก Unconsolidated Undrain Test มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จาก Unconfined Compression Test อาจเป็นเพราะเหตุผลดังต่อไปนี้

1. ค่า Effective Stress ($\bar{\sigma}$) ในก้อนตัวอย่างที่ทดลอง Unconsolidated Undrained Test มีค่าสูงกว่าตัวอย่างที่ทดลอง Unconfined Compression Test

2. Hydration Effect เกิดมากในตัวอย่างที่นำไป Back Pressure

เหตุผลในข้อที่ 1 มีความสำคัญในขณะที่ไม่มีซิเมนต์ผสม แต่เมื่อเปอร์เซนต์มากขึ้น เหตุผลในข้อที่ 2 จะมีผลมากกว่าข้อแรก

ปกติก้อนวัสดุตัวอย่างที่ผสมซิเมนต์เท่ากัน บดอัดด้วยแรงและค่าความชื้นเท่ากัน บ่มในสภาพเดียวกันและเวลาเท่ากัน ควรมีความแข็งแรงเท่ากัน การนำก้อนวัสดุตัวอย่างไป Back Pressure ในช่วง 48 ชม. สุดท้ายก่อนครบกำหนดการบ่ม ทำให้ปฏิกริยา Hydration เกิดได้อย่างเต็มที่เพราะมีน้ำอย่างพอเพียง เป็นผลให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงกว่าการบ่มตามปกติ แต่ถ้าก้อนวัสดุนั้นถูกบ่มเป็นเวลานาน ปฏิกริยา Hydration เกิดเกือบสมบูรณ์แล้วจึงนำไป Back Pressure ผลของ Back Pressure ที่มีต่อ Hydration จะมีน้อย รวมทั้งการที่ Back Pressure อาจจะทำลาย Cohesion บางส่วน ค่า Su ที่ได้จาก Unconsolidated Undrained Test และ Unconfined Compression Test ที่ long term จึงเกือบเท่ากัน

5.7 <u>ผลการทดลองความคงทน เปียก–แห้ง</u>

เมื่อผสมซิเมนต์ในกากหินน้ำมันพบว่ามีความคงทนสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อปริมาณซิเมนต์มากกว่า 6 % ขึ้นไปไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและความหนาแน่น (ทดลองโดยไม่ขูดก้อนวัสดุ) น้ำหนักที่หายไปเล็กน้อยในการทดลองรอบที่ 1 และ 2 เชื่อว่าเป็นการหลุดไปของอนุภาคกากหินน้ำมันบริเวณผิวที่ไม่ถูกยึดเกาะโดยซิเมนต์ เมื่อทดลองต่อไป ทั้งน้ำหนักและปริมาตรคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อทดลองครบ 10 รอบแล้ว ปรากฏว่าความเค้นแรงอัดสูงสุดลดลงเล็กน้อย เป็นเพราะการยึดเกาะบางส่วนของซิเมนต์ถูกทำลายในขณะทดลอง