บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการทำการศึกษาวิจัยผลกระทบเนื่องจากการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กต่อวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ โดยใช้วัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100, 250 และ 400 kPa โดยใช้ความหนาแน่น 17.0 kN/m^3 ยกเว้นตัวอย่าง TN7 ที่ใช้ความหนาแน่น 20.0 kN/m^3 ในการหาคุณสมบัติทางวิศวกรรมทั่วไปดังที่แสดงผลการทดสอบในหัวข้อ 4.1 จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติที่หาได้มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณเบนโทไนต์ที่ใช้ในการผสมไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามในการทดสอบหาความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างหรือการก่อเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กในวัสดุผสมแสดงให้เห็นว่า ที่ปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยนี้ให้ผลการทดสอบที่แตกต่างกันดังที่แสดงผลแล้วในหัวข้อที่ 4.6 ในการสรุปผลการวิจัยทั้งหมดแบ่งสรุปออกเป็นข้อ ๆ ตามการทดสอบดังนี้

1. ผลการทดสอบหาคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ ที่อัตราส่วนปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์

    1.1 โดยการทดสอบหาคุณสมบัติของทรายที่ใช้ในวัสดุผสม ทรายที่ใช้เป็น Well-graded medium to fine sand, SW มีค่า Cc = 6.0, และค่า Cu = 1.7 และมีค่า pmax = 19.9 kN/m^3, pmin = 14.8 kN/m^3และที่ความหนาแน่นแห้งที่ใช้ในการทดลอง 17.0 kN/m^3 ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความหนาแน่นสัมพัทธ์, Dr = 50 เปอร์เซ็นต์

    1.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 , 10, 12, และ 14 เปอร์เซนต์มีค่าใกล้เคียงกันคือ 2.64 ส่วนของทรายเปล่าและเบนโทไนต์มีค่า 2.64 และ 2.28 ตามลำดับ สรุปได้ว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์ดังกล่าวไม่มีผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเปลี่ยนแปลง

ค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ อยู่ในช่วงแคบ ๆ คือให้ค่าสูงที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 เปอร์เซ็นต์ และต่ำที่ปริมาณเบนโทไนต์ 12 เปอร์เซ็นต์ ค่าทั้งสองคือ 18.3 kN/m^3 และ 17.8 kN/m^3 ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันน้อยมากเพียง 0.5 และหาค่าความชื้นที่เหมาะสมได้ 12.52 เปอร์เซ็นต์

และ 14.26 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณต่ำและสูงที่ปริมาณเบนโทไนต์ทั้งสองเช่นกัน เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหมาะสมแตกต่างกัน 1.74 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น

2. ผลการตรวจสอบคุณภาพของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่ใช้ในแต่ละตัวอย่างในการทดสอบสามารถสรุปผลที่ได้ดังนี้

   2.1 ปริมาณเบนโทไนต์ที่หาได้ทั้งก่อนและหลังการทดสอบโดยวิธีล้างด้วยน้ำเพื่อหาความเป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างในการทดสอบเดียวกันให้ค่าแตกต่างกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์, และตามปริมาณเบนโทไนต์ที่ต้องการก็เช่นกันไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์ คือที่ปริมาณเบนโทไนต์ที่ต้องการ 8 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างมีโอกาสมีปริมาณเบนโทไนต์อยู่ในช่วง 7.2 ถึง 8.8เปอร์เซ็นต์

   2.2 ปริมาณความชื้นที่ตรวจสอบได้ขณะทำการบดอัดเป็นไปตามที่ออกแบบไว้คือมีค่าใกล้เคียง 14 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่าความหนาแน่นแห้งที่ต้องการตอนเริ่มบทอัดมีค่าใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้เช่นกัน และค่าความชื้นสุดท้ายที่ทำการวัดขณะเก็บตัวอย่างมีค่า ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น 4 เปอร์เซ็นต์

   2.3 ความหนาแน่นแห้งที่หาได้ ตอนบทอัดมีค่าต่ำกว่าที่ออกแบบไว้ประมาณ 1.2 เปอร์เซ็นต์ และค่าที่หาได้ขณะเก็บตัวอย่างมีค่าเท่ากันกับที่ออกแบบไว้ จึงมั่นใจได้ว่าค่าความหนาแน่นแห้งของทุกตัวอย่างเป็นไปตามที่ต้องการ

3. การทดสอบหาความสามารถในการไหลซึมผ่าน สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของทรายเปล่าที่ใช้ในวัสดุผสมได้ค่าอยู่ในช่วง 10^{-5} – 10^{-6} m/s และค่าที่หาได้ของวัสดุผสมที่ปริมาณเบนโทไนต์ต่าง ๆ กัน ในช่วงแรกที่ 8 – 12 เปอร์เซ็นต์ มีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 10^{-7} – 10^{-9} m/s และลดต่ำลงที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์คือให้ค่าอยู่ในช่วง 10^{-8} – 10^{-10} m/s ในแนวดิ่ง

4. การทดสอบการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กในวัสดุผสมระหว่างทรายกับเบนโทไนต์สามารถแยกสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

   4.1 ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวและค่าน้ำหนักกดทับที่น้ำหนักกดทับ 100, 250 และ 400 kPa ใกล้เคียงกันคือให้ค่าใกล้เคียง 1.0 และที่ปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าอัตราส่วนดังกล่าวใกล้เคียง 1.7 จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณเบนโทไนต์ที่

เพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 12 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์เพิ่มขึ้นด้วย

4.2 ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์ ค่าอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ทำให้เกิดรอยแตกร้าวและค่าน้ำหนักกดทับที่น้ำหนักกดทับ 100 และ 250 kPa ไม่ได้ให้ค่าใกล้เคียงกัน แต่กลับให้ค่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการก่อให้เกิดรอยแตกร้าวใกล้เคียงกันคือ 300 kPa จึงสรุปได้ว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์ 14 เปอร์เซ็นต์ นี้ ค่าน้ำหนักกดทับที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำ และที่น้ำหนักกดทับ 100 kPa เหมือนกันยังสรุปได้ว่าปริมาณเบนโทไนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างของวัสดุผสมตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย

4.3 ที่ความหนาแน่นแตกต่างกันภายใต้น้ำหนักกดทับและปริมาณเบนโทไนต์เท่า ๆ กัน ตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมากกว่าสามารถต้านทานแรงดันน้ำที่จะก่อให้เกิดรอยแตกร้าวได้มากกว่า คือที่ความหนาแน่นแห้ง 20.0 kN/m^3 ต้องใช้แรงดันน้ำ 400 kPa เพื่อก่อให้เกิดรอยร้าว ซึ่งมากกว่าที่ใช้ในตัวอย่างที่มีความหนาแน่นแห้ง 17.0 kN/m^3 ประมาณ 1.5 เท่า

4.4 หลังจากการเกิดรอยแตกร้าวในตัวอย่างแล้วความสามารถในการไหลซึมผ่านที่แรงดันน้ำต่ำ ๆ เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่อย่างไรก็ตามรอยแตกร้าวทำให้ความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำด้านข้างของวัสดุผสมลดลง เมื่อแรงดันน้ำเพิ่มมากขึ้นแม้จะยังไม่สูงเท่าแรงดันน้ำเดิมที่ก่อให้เกิดรอยแตกร้าว ก็สามารถทำให้ตัวอย่างวัสดุผสมแตกได้อีกครั้ง

5. ความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่หาได้จากการทดสอบแบบ Unconfined Compressive Strength Test ไม่สามารถระบุได้แน่ชัดว่ามีแนวโน้มที่จะสามารถต้านทานแรงเฉือนได้มากขึ้นเมื่อปริมาณเบนโทไนต์เพิ่มขึ้น, แต่เห็นได้ชัดว่าความสามารถดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามความลึก, ความหนาแน่น, และน้ำหนักกดทับ, โดยในบางตัวอย่างค่าความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนแทบไม่ต่างกันเลย ค่าของความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนของวัสดุผสมที่มีปริมาณเบนโทไนต์อยู่ในช่วง 8 – 12 เปอร์เซ็นต์ ความหนาแน่นแห้ง 17.0 kN/m^3 สรุปได้ว่าอยู่ในช่วง 25 ถึง 55 kPa และของ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นแห้ง 20.0 kN/m^3 อยู่ในช่วง 60 ถึง 90 kPa

6. ผลการทดสอบหาความสามารถในการยุบอัดตัวของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ โดยใช้เครื่องมือ Odeometer Test ในการทดสอบ สามารถหาค่าแรงดันสูงสุดที่เคยรับในอดีต และสรุปได้ว่าที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8 – 14 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้น้ำหนักกดทับ 100 kPa ค่าแรงดันสูงสุดที่เคยรับในอดีตที่หาได้โดยวิธีกราฟฟิคให้ค่าใกล้เคียงกันกับค่าน้ำหนักกดทับ และค่าความชันของตัวอย่างที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8-14 เปอร์เซ็นต์เช่นกันซึ่งหาจากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของตัวอย่างกับน้ำหนักกดทับในเสกลเซมิล็อก ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 0.100 – 0.200 สรุปได้ว่าลักษณะของอัตราการยุบอัดตัวของวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ที่ปริมาณเบนโทไนต์ 8, 10, 12, และ 14 เปอร์เซ็นต์ มีลักษณะใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาวิจัยต่อไป

การที่จะเกิด Horizontal Fracture และหรือ Clay detachment นั้น

1) ต้องมีการเคลื่อนตัวของเม็ดทรายออกจากกัน

$(P_w)_{min} = \sigma v$ ---------- 1st requirement

(independent to density)

2) ต้องสามารถชนะ Cohesion ภายในเม็ดดินเหนียว

2.1 detachment

$$(P_w)_{detach} = \tau = c + \sigma_v \tan\theta$$

เนื่องจากขณะเกิด detachment เม็ดทรายได้เคลื่อนออกจากกันแล้ว ดังนั้น Normal stress (σ_v) = 0 ดังนั้น

$(P_w)_{detach} = C_u$ = Undrained Shear Strength ของ Bentonite

โดยที่ Cu แปรผันตรงกันกับ bentonite content, และ thickness of layer

ดังนั้นแรงดันน้ำที่สามารถก่อให้เกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กและหรือเกิดการพัดพาเม็ดดินขนาดเล็กในวัสดุผสมตัวอย่างแสดงได้ในสมการของ

$$(P_w)_{total} = (P_w)_{min} + (P_w)_{detach}$$

โดยที่ : Small amount of bentonite

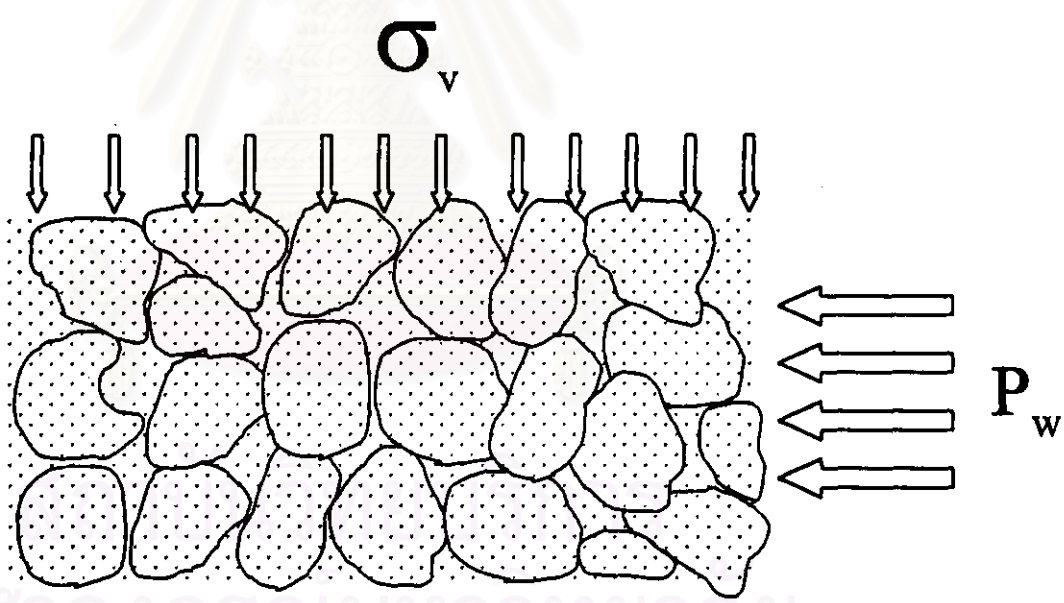
$(P_w)_{min}$ Controlled

Medium amount of bentonite

$(P_w)_{min}$ & $(P_w)_{detach}$ Controlled

Large amount of bentonite

$(P_w)_{detach}$ Controlled (sand particle already apart)



การศึกษาผลกระทบของการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กเนื่องจากแรงดันน้ำต่อวัสดุผสมทรายกับเบนโทไนต์ยังมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาวิจัยต่อไปอีก โดยเฉพาะในช่วงของสัดส่วนอื่น เช่นที่ปริมาณเบนโทไนต์ 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งการวิจัยนี้ยังไม่ได้ทำการศึกษาวิจัย นอกจากนั้นผลของความหนาแน่นที่จะมีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็กที่ความหนาแน่นอื่น หรือที่ความหนาแน่น ที่ปริมาณเบนโทไนต์อื่นนอกเหนือไปจากที่ศึกษาแล้ว เพื่อดูแนวโน้มที่จะเป็นไปของวัสดุผสมตัวอย่าง และการศึกษาถึงอิทธิพลอื่นเช่นน้ำหนักกดทับ ก็ยังสามารถศึกษาต่อไปได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อย่างไรก็ดี จุดประสงค์ของการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาครั้งต่อไปได้ คือเพื่อศึกษาหาความสามารถในการต้านทานแรงดันน้ำด้านข้าง และคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมที่จำเป็นในการใช้งานเพื่อออกแบบก่อสร้าง และออกกฎควบคุม อีกทั้งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะทำการวิจัยก็ยังเป็นแนวทางที่ดีในการทำการศึกษาครั้งต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย