

การวิเคราะห์ลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวพันธะเชื่อม ประสานธรรมชาติ

สุขสันต์ หอพิบูลสุข^{1*} และรุ่งดาววัลย์ ราชัน²

Horpibulsuk, S.^{1} and Rachan, R.² (2003). Analysis of Engineering Behavior of Naturally Cemented Clays. Suranaree J. Sci. Technol. 10:31-39.*

Abstract

Natural clays are generally cemented. Engineering properties and behavior of the naturally cemented clays are mainly governed by the natural cementation bond. In this paper, the engineering behavior of the naturally cemented clays is critically analyzed. From the test results of the Bangkok and Ariake clays, it is found that the both clays are naturally cemented clays. They are stable at high natural water content and possess high shear strength compared to their intrinsic state. Consolidation and shear strength characteristics are dependent upon the effective stress, which is influenced by the fabric and the natural cementation bond.

Key words: consolidation, fabric, intrinsic state, natural clay, naturally cementation bond, shear strength

บทคัดย่อ

ดินเหนียวธรรมชาติส่วนมากเป็นดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานคุณสมบัติและลักษณะทางวิศวกรรมของดินประเภทนี้ถูกควบคุมโดยพันธะเชื่อมประสานการวิเคราะห์ผลของพันธะเชื่อมประสานถูกอธิบายอย่างละเอียดในบทความนี้ จากการทดสอบของดินเหนียวกรุงเทพ และดินเหนียวอะริเอเค พบว่าดินเหนียวทั้งสองแหล่งเป็นดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน ดินทั้งสองแหล่งนี้เสถียรอยู่ที่ปริมาณความชื้นที่สูงและมีกำลังต้านทานแรงเฉือนที่มากเมื่อเทียบกับสถานะเนื้อแท้ของมัน ลักษณะการอัดตัวคายน้ำและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวขึ้นอยู่กับความเค้นประสิทธิผลซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความเค้นประสิทธิผลคือการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดินและพันธะเชื่อมประสาน

¹ Ph.D. in Geotechnical Engineering อาจารย์, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² M.Eng. in Soil Engineering อาจารย์และหัวหน้าหมวดวิชาวิศวกรรมปฐพี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

* ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ

บทนำ

ดินเหนียวธรรมชาติโดยส่วนใหญ่จะถูกเชื่อมประสานด้วยพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) พันธะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากว่าดินเหนียวประกอบด้วยสารเคมีที่ก่อให้เกิดพันธะเชื่อมประสาน ซึ่งได้แก่ ซิลิกา (Si) แคลเซียม (Ca^{2+}) น้ำ (H_2O) และอื่น ๆ สารประกอบเหล่านี้เป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้เกิดการพันธะเชื่อมประสาน ซึ่งพันธะนี้เองมีความแข็งแรงขึ้นตามระยะเวลาที่ดินถูกทับถม (aging) ความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับพันธะเชื่อมประสานสามารถอ้างอิงได้จาก Nagaraj and Miura (2001) และ Mitchell (1994) พันธะเชื่อมประสานนี้มีบทบาทอย่างมากต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานจะแสดงพฤติกรรมระหว่างหินและดินเหนียวที่ไร้พันธะเชื่อมประสาน (ดินเหนียวปั้นใหม่) พฤติกรรมของดินเหนียวปั้นใหม่นี้ได้ถูกศึกษาและเผยแพร่อย่างยาวนานกว่า 30 ปี (Roscos and Poorooshasb, 1963; Henkel and Sowa, 1963; Wroth and Loudon, 1967; Roscos and Burland, 1968; Balasubramaniam, 1973 and 1975; Parry and Nadarajah, 1973; Yudhbir and Nadarajah, 1974; Pender, 1977; Mitchell and Kitago, 1979; Mayne and Swanson, 1981; Atkinson *et al.*, 1990, etc.) ผลการทดสอบจากนักวิจัยเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากสำหรับความเข้าใจทางด้านพฤติกรรมพื้นฐานของดินเหนียว ดินเหนียวปั้นใหม่ถูกจำแนกออกเป็นดินเหนียวใหม่อัดตัวปกติและดินเหนียวใหม่อัดตัวมากกว่าปกติ (Normally and over consolidated young clays) ซึ่งขึ้นอยู่กับประวัติการรับน้ำหนัก (Stress history) แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติยังขึ้นอยู่กับสภาพการกำเนิดของดิน ได้แก่ สิ่งแวดล้อมที่ดินก่อกำเนิด และเวลา ซึ่งก่อให้เกิดพันธะเชื่อมประสานและเมื่อเวลาผ่านไป พันธะเชื่อมประสานจะมีความแข็งแรงมากขึ้น เนื่องจากผลของพันธะเชื่อมประสานนี้ ดินเหนียวธรรมชาติสามารถเสถียรอยู่ได้ที่อัตราส่วนโพรง (Void ratio) ที่สูง และมีค่าความเค้นที่จุดคราก (Yield stress) สูงกว่าความเค้นกดทับในปัจจุบัน ดังนั้น ดินเหนียว

จึงถูกจำแนกออกเป็นดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานที่อัดตัวปกติ ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานที่อัดตัวมากกว่าปกติ และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ (Nagaraj *et al.* 1997) ผลของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวยังไม่ได้ถูกแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนดังที่นบความนี้ จะแสดงพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำและกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ นอกจากนี้กลไกควบคุมพฤติกรรมทางวิศวกรรมนี้จะถูกอธิบายในตอนท้ายของบทความ

ดินตัวอย่างและการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เพื่อให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานอย่างชัดเจน ดินเหนียวที่ใช้ในการศึกษาเป็นดินเหนียวที่ได้มาจากสองแหล่งคือดินเหนียวกรุงเทพ (Bangkok clay) และดินเหนียวอะริเอเคะ (Ariake clay) ดินเหนียวกรุงเทพถูกเก็บตัวอย่างจากพื้นที่รอบกรุงเทพมหานครตั้งที่ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) สนามบินสุวรรณภูมิ (SBIA) บางนาตราด สุขุมวิท ศรีนครินทร์-เทพารักษ์ เจริญกรุง 51 และพระประแดง ส่วนดินเหนียวอะริเอเคะได้จากหลุมเจาะรอบจังหวัดซากะ (Saga City) ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งคือ Nanri, Chiyoda-west, Hokumei, Ashikari, Kawasoe และ Ariake-east ดินเหล่านี้จะถูกนำขึ้นมาเพื่อทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน การอัดตัวคายน้ำ และกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่มีการระบายน้ำโดยใบพัด (Vane shear test) มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบเป็นมาตรฐานของอเมริกา (ASTM)

กรอบความคิดพื้นฐานสำหรับการจำแนกสถานะของดินเหนียว

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวตามธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับความเค้น อายุ และพันธะเชื่อมประสาน ดังนั้น เพื่อที่จะจำแนกสถานะของดินเหนียวออกเป็น

ดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน และดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน จำเป็นต้องมีสมการทั่วไปที่พิจารณาเพียงแค่ผลของความเค้น และอายุเพื่อเป็นตัวเปรียบเทียบ (Reference) Nagaraj and Srinivasa Murthy (1986) ได้สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง (Void ratio) และลึ้อคกาลิทึมของความเค้นในแนวตั้งของดินเหนียวปั้นใหม่ในเทอมของพิคคเหลว ความสัมพันธ์ทั่วไปนี้สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{e}{e_L} = 1.23 - 0.276 \log \sigma'_v \quad (1)$$

เมื่อ e คืออัตราส่วนโพรง e_L คืออัตราส่วนโพรงที่พิคคเหลว σ'_v คือความเค้นในแนวตั้งสมการทั่วไปนี้ถูกเรียกว่าเส้นสถานะเนื้อแท้ (Intrinsic State Line, ISL) การที่อัตราส่วนโพรงที่พิคคเหลวสามารถใช้สร้างความสัมพันธ์ทั่วไปนี้ได้เนื่องจากว่าพิคคเหลวสามารถสะท้อนผลเนื่องจากปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมี (Physico-chemical) ที่มีอยู่ในดินสมการนี้เป็นสมการสากลที่ได้รับการยอมรับทั่วโลก และถูกอ้างอิงอย่างแพร่หลาย สมการนี้ถูกสร้างขึ้นโดยอาศัยทฤษฎี Diffusion Double Layers และถูกเผยแพร่ครั้งแรกในวารสาร Geotechnique ซึ่งเป็นวารสารชั้นนำระดับโลก ในปี ค.ศ. 1986

การจำแนกสถานะของดินเหนียวโดยอาศัยเส้นสถานะเนื้อแท้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ โดยพิจารณาพิคคของ $(e/e_L, \sigma'_{v0})$ เทียบกับเส้นสถานะเนื้อแท้ เมื่อ σ'_{v0} คือความเค้นกดทับประสิทธิผลในปัจจุบัน

ถ้าพิคค $(e/e_L, \sigma'_{v0})$ อยู่บนเส้นสถานะเนื้อแท้ และดินเหนียวเป็นดินเหนียวอ่อนมาก (มีค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนประมาณ 5-10 กิโลปาสกาล) ดินเหนียวนี้จัดว่าเป็นดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานที่อัดตัวปกติ (Normally consolidated uncemented clay) ไม่มีผลของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรม ถ้าพิคค $(e/e_L, \sigma'_{v0})$ อยู่ด้านล่างของเส้นสถานะเนื้อแท้ สถานะของดินเหนียวนี้อาจเป็นไปได้ทั้งดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานที่อัดตัวมากกว่าปกติหรือดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ สถานะทั้งสองนี้ถูกจำแนกได้โดยอาศัยเส้นการอัดตัวคายน้ำ กล่าวคือถ้าทำการวาดเส้นการอัดตัวคายน้ำ

$(e, \log \sigma'_v)$ ของดินเหนียวคงสภาพแล้วพบว่าความเค้นช่วงหลังจุดครากเป็นเส้นเดียวกันกับของดินเหนียวปั้นใหม่ (Remoulded clay) ดินชนิดนี้ถูกเรียกว่าดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานที่อัดตัวมากกว่าปกติ (Overconsolidated uncemented clay) ดังแสดงในรูปที่ 1

ถ้าพิคค $(e/e_L, \sigma'_{v0})$ อยู่ทางขวามือของเส้นสถานะเนื้อแท้ ดินชนิดนี้จัดเป็นดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมคือพันธะเชื่อมประสาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลมากกว่าผลเนื่องจากประวัติการรับน้ำหนัก และเวลา

ผลการทดสอบ

สถานะของดินเหนียว

รูปที่ 2 และ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโพรง (Void ratio) และความเค้นกดทับประสิทธิผลในปัจจุบัน (σ'_{v0}) ของดินเหนียวกรุงเทพฯ และดินเหนียวอะริเอเค ตามลำดับ จากรูปทั้งสองพบว่าดินเหนียวกรุงเทพฯ และดินเหนียวอะริเอเคสามารถเสถียรอยู่ได้ที่ปริมาณความชื้นที่สูง และอยู่เหนือเส้นสถานะเนื้อแท้แสดงให้เห็นว่าดินเหนียวทั้งสองได้รับผลกระทบเนื่องจากพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ ดังนั้นดินเหนียวทั้งสองเหล่านี้จัดเป็นดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ

การอัดตัวคายน้ำ

รูปที่ 4, 5 และ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนช่องว่างและลึ้อคกาลิทึมของความเค้นในแนวตั้งของดินเหนียวกรุงเทพฯ ดินเหนียวอะริเอเค และดินเหนียวอิโรซิมา ตามลำดับ ข้อมูลพื้นฐาน (Basic properties) ของดินแต่ละชนิดถูกแสดงในตารางที่ 1 ดินเหนียวทั้งสามนี้ได้มาจากดินที่ความลึกประมาณ 2 เมตร ดังนั้นความเค้นกดทับในปัจจุบัน (σ'_{v0}) มีค่าประมาณ 10 กิโลนิวตัน โดยสมมติให้หน่วยน้ำหนักประสิทธิผล (Submerged unit weight, γ') มีค่าเท่ากับ 5 กิโลนิวตันต่อลูกบาศก์เมตร จากรูปทั้งสาม จะเห็นได้ว่าความเค้นที่จุด

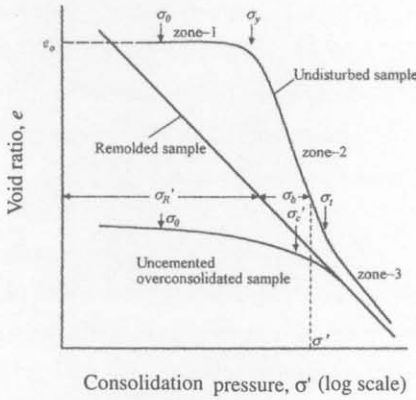


Figure 1. Typical compression path of soft cemented soil.

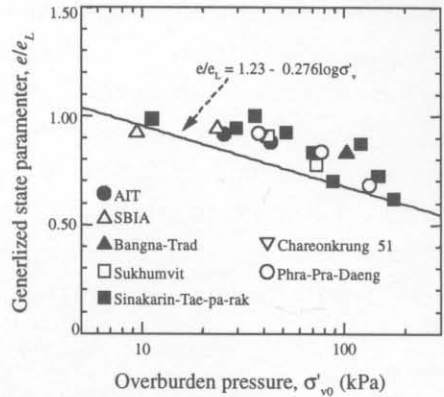


Figure 2. Classification of insitu of Bangkok clay.

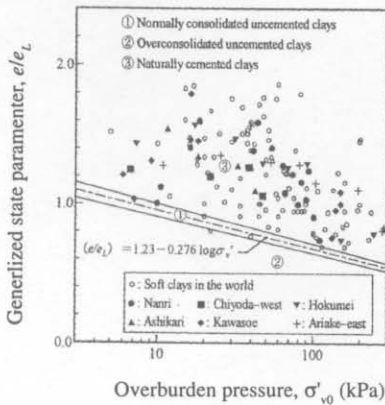


Figure 3. Classification of insitu of Ariake clay.

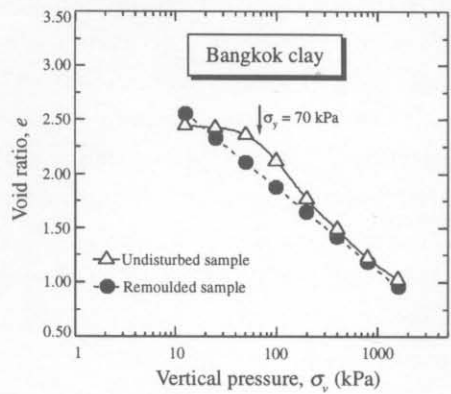


Figure 4. Consolidation path of uncemented and cemented Bangkok clay.

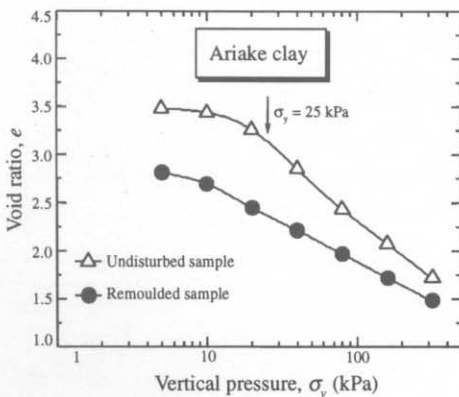


Figure 5. Consolidation path of uncemented and cemented Ariake clay.

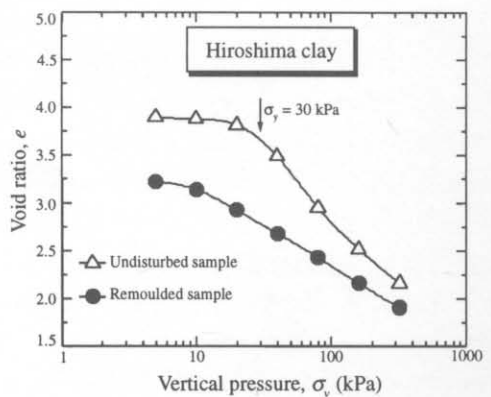


Figure 6. Consolidation path of uncemented and cemented Hiroshiro clay.

ครากของดินเหนียวทั้งสามมีค่ามากกว่าความเค้นกดทับในปัจจุบันและเส้นการอัดตัวของดินเหนียวบั้นใหม่มีลักษณะเป็นเส้นตรงในสเกลเซมิ ล็อกของอัตราส่วนช่องว่างกับความเค้นในแนวตั้ง ส่วนเส้นการอัดตัวของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติมีลักษณะเป็นตัว S กลับหัว ดังนั้นเราสามารถวางแผนภาพทั่วไปแสดงเส้นการอัดตัวของดินเหนียวได้ในรูปที่ 1 และแบ่งโซนการอัดตัวของดินเหนียวออกเป็น 3 โซนด้วยกัน ดังนี้

โซน 1: เป็นโซนที่มีค่าการอัดตัวต่ำเนื่องจากความต้านทานของพันธะเชื่อมประสาน

โซน 2: เริ่มจากความเค้นที่จุดคราก (Yield stress, γ) จนถึงความเค้นที่จุดเปลี่ยนผัน (Transitional stress, σ) ที่โซนนี้จะเกิดการอัดตัวที่มากเนื่องจากการแตกตัวของพันธะเชื่อมประสาน

โซน 3: เริ่มต้นตั้งแต่ความเค้นที่มากกว่าความเค้นที่จุดเปลี่ยนผัน เส้นการอัดตัวของดินเหนียวคงสภาพมีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นการอัดตัวของดินเหนียวบั้นใหม่ แต่จะไม่เป็นเส้นเดียวกันเนื่องจากแรงต้านทานของพันธะเชื่อมประสานกำลังต้านทานแรงเฉือน

รูปที่ 7 และ 8 แสดงผลทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบ ไบพัตของดินเหนียวบั้นใหม่ โดยทำการทดสอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ กันหลังจากถูกบั้นใหม่ ดินเหนียวบั้นใหม่นี้ถูกสร้างขึ้นจากดินเหนียวคงสภาพ โดยทำการบีบดินเหนียวด้วยไม้พาย แล้วนำดินนี้ใส่ภาชนะทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบ ไบพัตจากนั้นดินตัวอย่างพร้อมทั้งภาชนะนี้จะถูกคลุมด้วยพลาสติกบางและควบคุมการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นอย่างดี และเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตามเวลาที่กำหนดสำหรับการทดสอบ

รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงเฉือนกับมุมหมุนของไบพัตที่เวลาต่าง ๆ กัน จะเห็นได้ว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดยอดเพิ่มขึ้นกับมุมหมุน และมีค่าลดลงหลังจากค่าที่จุดยอดจนกระทั่งถึงค่าสุดท้ายในที่สุด กำลังต้านทานแรงเฉือนสุดท้ายในแต่ละช่วงเวลามีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่าเวลามีผลอย่างมากต่อกำลังต้านทานที่จุดยอด เวลายิ่งมาก ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดยอดก็มากขึ้น ในขณะที่กำลังต้านทานแรงเฉือนสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกัน (ไม่ขึ้นกับเวลา)

รูปที่ 8 แสดงการเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวบั้นใหม่กับเวลา กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และอัตราการเพิ่มขึ้นมีค่าลดลง ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่เพิ่มมากที่สุด (Ultimate recovered strength) สามารถคำนวณได้โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงไฮเปอร์โบล่า และมีค่าประมาณ 0.66 กิโลปาสคาล ขณะที่กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวคงสภาพมีค่าประมาณ 9.7 กิโลปาสคาล ดังนั้นจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนนี้เป็นผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างดิน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ปริมาตรปรากฏการณ์นี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อที่ว่า Thixotropic ถึงแม้ว่าดินจะมีการเพิ่มกำลังต้านทานแรงเฉือนกับเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกำลังที่เพิ่มมากที่สุดก็ยังมีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะคงสภาพ

ดังนั้นเราสามารถอนุมานได้ว่า กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ (τ) ประกอบด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากอนุภาคของดินที่สภาวะถูกบั้นใหม่ (ถูกรบกวนอย่างรุนแรง), การจัดเรียง

Table 1. Basic properties of Bangkok, Ariake and Hiroshima clays.

	Bangkok clay	Ariake clay	Hiroshima clay
Moisture content (%)	76-84	138-152	126-137
Liquid limit (%)	103	112	122
Plastic limit (%)	43	70	76
Specific gravity	2.76	2.67	2.60
Yield stress, σ_y (kPa)	70	25	30

ตัวของโครงสร้างดินกับเวลา (Thixotropic) และพันธะเชื่อมประสานดังแสดงได้โดยสมการดังนี้

$$\tau = \tau_{Ri} + \tau_{Ri} + \tau_b \quad (2)$$

เมื่อ τ คือกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน τ_{Ri} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาวะไร้พันธะเชื่อมประสาน τ_{Ri} คือกำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากการจัดเรียงตัวของดินกับเวลา τ_b คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน รูปที่ 9 แสดงแผนภาพแสดงส่วนประกอบของกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน

การวิเคราะห์โครงสร้างของดิน

การศึกษาลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวแนวใหม่เป็นการพิจารณา Microstructure ของดิน Mitchell (1993) กล่าวว่าลักษณะทางวิศวกรรมของดินเหนียวขึ้นอยู่กับโครงสร้างของดินซึ่งก็คือแรงกระทำระหว่างเม็ดดิน (Interparticle force) และการจัดเรียงตัวของดิน (Fabric) ซึ่งก็คือเม็ดดิน (Particle) กลุ่มของเม็ดดิน (Aggregate or Cluster) และช่องว่างระหว่างเม็ดดิน และกลุ่มของเม็ดดิน (Pore space among particles/clusters) Nagaraj *et al.* (1990) และ Nagaraj and Miura (2001) ได้แสดงแบบจำลองโครงสร้างของดินเหนียวโดยอาศัยทฤษฎีกลุ่มก้อนของดิน (Cluster theory) และผลการทดสอบการกระจายขนาดของช่องว่างระหว่างเม็ดดิน (Pore size distribution) ดังแสดงในรูปที่ 10 ขนาดของช่องว่างมีด้วยกัน 3 ระดับ

- 1) ช่องว่างระหว่างอนุภาคดินเหนียวในก้อนดิน (Cluster) ที่มีขนาดน้อยกว่า 20 Å
- 2) ช่องว่างระหว่างก้อนดินสองก้อน มีขนาดอยู่ระหว่าง 20 Å ถึง 200 Å
- 3) ช่องว่างขนาดใหญ่ภายในกลุ่มของก้อนดิน มีขนาดใหญ่กว่า 200 Å

จากแบบจำลองโครงสร้างดินที่ถูกเสนอโดย Nagaraj *et al.* (1990) และผลการทดสอบในบทความนี้แบบจำลองโครงสร้างของดินไร้พันธะเชื่อมประสานและดินที่มีพันธะเชื่อมประสานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 11

พิจารณาผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (รูปที่ 4 ถึง 6) บทบาทของพันธะเชื่อมประสานต่อคุณสมบัติทางวิศวกรรมคือพันธะซีเมนต์ทำหน้าที่ในการเชื่อมโครงสร้างของดินส่งผลให้ดินมีค่าความเค้นที่จุดครากมากกว่าความเค้นที่กดทับในปัจจุบัน และที่ความเค้นเท่ากันดินเหนียวของสภาพสามารถเสถียรอยู่ได้ที่ย่อตราส่วนโพรงที่สูงกว่าค่าของดินเหนียวปั้นใหม่ ด้วยเหตุนี้เส้นการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานจะไม่ทับหรือตัดกับเส้นการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั้นใหม่แม้ว่าที่ความเค้นในแนวตั้งสูง ๆ จากผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบใบพัด (รูปที่ 7 และ 8) เราพบว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวปั้นใหม่มีค่าน้อยกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานอย่างมากที่ความเค้นรวมเท่ากันที่เท่ากับศูนย์แต่อย่างไรก็ตามความเค้นประสิทธิผลไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้นเราสามารถอนุมานได้ว่า ความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานต้องมากกว่าของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสาน ทั้งนี้เนื่องจากการกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับความเค้นประสิทธิผลดังที่ทราบกันดีจากหลักการของความเค้นประสิทธิผลที่ถูกเสนอโดย Terzaghi (1936) ความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานเป็นผลเนื่องมาจาก matric suction ซึ่งคือผลต่างระหว่างความดันบรรยากาศและความดันโพรง ($u_a - u_w$) ขณะที่ความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติจะขึ้นอยู่กับ matric suction และพันธะเชื่อมประสาน ดังนั้นความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติจึงแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (รูปที่ 11)

$$\sigma'' = (\sigma' - u) + \sigma_b \quad (3)$$

$$\sigma'' = \sigma' + \sigma_b \quad (4)$$

เมื่อ σ'' คือความเค้นประสิทธิผลของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน σ' คือความเค้นประสิทธิผลที่เป็นผลเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของโครงสร้างดิน (Fabric) และ σ_b คือความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) ถ้าดินเหนียวธรรมชาติปราศจากพันธะเชื่อมประสานความเค้นประสิทธิผลจะขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของ

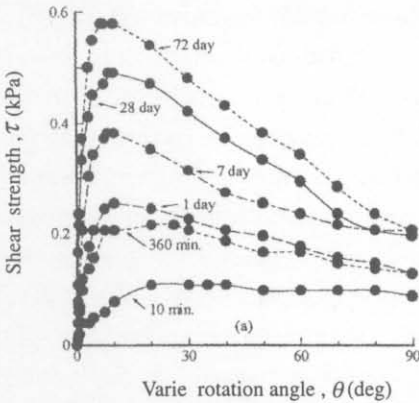


Figure 7. Time effect on the shear characteristics of remoulded Ariake clay.

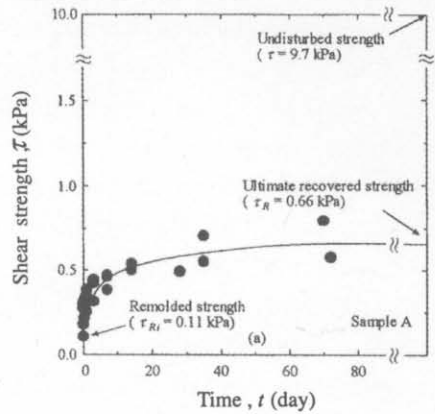


Figure 8. Strength recovering with time in Ariake clay.

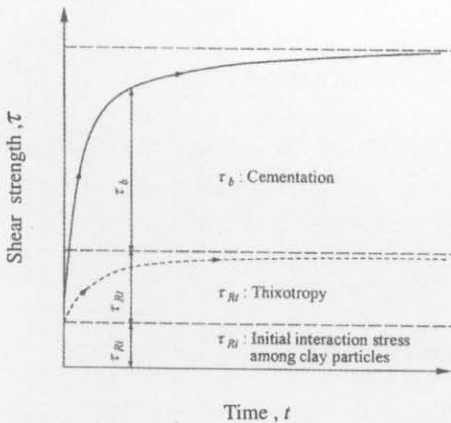
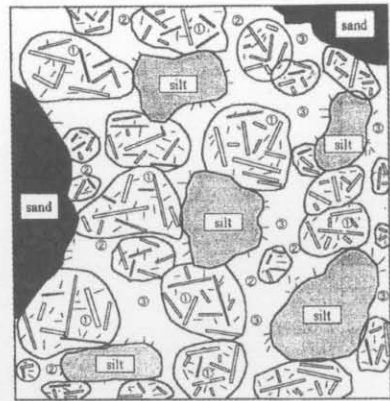


Figure 9. Illustration of shear strength component in Ariake clay.



(1) Intra-aggregate pores (2) Inter-aggregate pores (3) Large enclosed pores within group of aggregates

Figure 10. Microstructure of fine grained soil (Nagaraj et al., 1990).

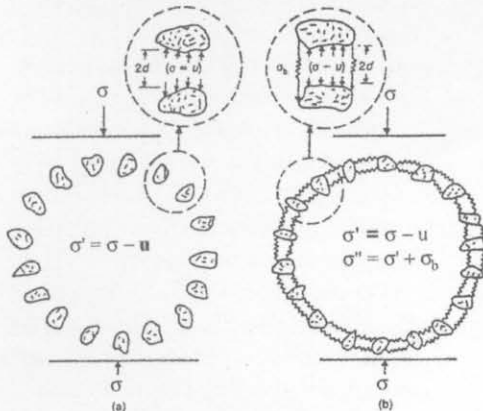


Figure 11. Soil structure (a) Uncemented state (b) Cemented state.

โครงสร้างดินเพียงอย่างเดียว

เนื่องจากพันธะเชื่อมประสานนี้เองตัวอย่างดินเหนียวธรรมชาติที่เก็บขึ้นมาจากหลุมทดสอบ (Bore hole) จึงสามารถตั้งอยู่ได้ทั้งที่ปราศจากความเค้นรอบข้าง แต่ถ้าดินนี้ถูกรบกวนอย่างรุนแรง กำลังต้านทานแรงเฉือนจะลดลงและมีค่าเท่ากับกำลังต้านทานแรงเฉือนที่สถานะไร้พันธะเชื่อมประสานดังนั้นดินเหนียวที่มีการเชื่อมแน่นด้วยพันธะเชื่อมประสาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินเหนียวสมุทร (Marine clay) จะมีค่าความไวตัว (Sensitivity) สูง

จากผลการทดสอบในรูปที่ 7 ความเป็นไปได้ของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของดินต่อการเพิ่ม

ขึ้นของกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินสามารถอธิบายได้ดังนี้ ดินเหนียวตามธรรมชาติจะมีการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนดินที่ใหญ่ (Cluster) และถูกเชื่อมกันด้วยพันธะเชื่อมประสาน หลังจากดินเหนียวถูกรบกวน (ถูกปั่นใหม่) พันธะเชื่อมประสานจะถูกทำลาย นอกจากนั้นแล้วกลุ่มของก้อนดินที่เคยใหญ่อยู่เดิมก็จะถูกทำให้แตกออกเป็นกลุ่มเล็ก ๆ ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนจึงมีค่าน้อย เมื่อทิ้งดินเหนียวปั่นใหม่เป็นระยะเวลา (aging) ดินเหนียวจะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่มก้อนขึ้นมาใหม่ ทำให้ดินแสดงค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนที่จุดยอดมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามที่ระยะเวลาหนึ่ง ๆ หลังจากการปั่นใหม่ ถ้าทำการเฉือนต่อไปเรื่อย ๆ กำลังต้านทานแรงเฉือนจะมีค่าลดลงหลังจุดยอด ทั้งนี้เนื่องจากว่ากลุ่มก้อนดิน (Cluster) เริ่มที่จะแตกสลาย และการแตกสลายจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่ค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสุดท้าย ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าค่ากำลังต้านทานแรงเฉือนสุดท้ายของดินเหนียวปั่นใหม่มีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่าจะทำการทดสอบที่เวลาใดก็ตาม

บทสรุป

บทความนี้นำเสนอพฤติกรรมการอัดตัวคายน้ำ และกำลังต้านทานแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ รวมถึงการวิเคราะห์หลักไคที่ควบคุมพฤติกรรมทางวิศวกรรมของดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานและดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานธรรมชาติ ประเด็นสำคัญสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ดินเหนียวธรรมชาติส่วนใหญ่จัดเป็นดินเหนียวพันธะเชื่อมประสาน ดังนั้นดินเหนียวธรรมชาติสามารถเสถียรอยู่ที่ปริมาณความชื้นที่สูงและมีค่าความเค้นที่จุดครากสูงกว่าความเค้นกดทับในปัจจุบัน
2. การอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานแบ่งออกเป็น 3 โซนดังนี้ โซน 1 เป็นโซนที่การอัดตัวคายน้ำมีค่าน้อยเนื่องจากความต้านทานของพันธะเชื่อมประสาน โซน 2 เป็นโซนที่เกิดการแตกร้าวของพันธะเชื่อมประสาน ทำให้เกิดการอัดตัวที่มากและ โซนสุดท้ายเป็นโซนที่เส้นการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานมีลักษณะ

ขนานกับเส้นการอัดตัวคายน้ำของดินเหนียวปั่นใหม่

3. กำลังต้านทานแรงเฉือนของดินขึ้นอยู่กับความเค้นประสิทธิผล ความเค้นประสิทธิผลยิ่งมาก กำลังต้านทานแรงเฉือนก็จะสูงตาม สำหรับดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานความเค้นประสิทธิผลมีค่าเท่ากับผลรวมของความเค้นประสิทธิผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเม็ดดิน (Fabric) และเนื่องจากพันธะเชื่อมประสาน (Cementation bond) ดังนั้นกำลังต้านทานแรงเฉือนของดินเหนียวพันธะเชื่อมประสานจึงมีค่ามากกว่ากำลังต้านทานแรงเฉือนของดินไร้พันธะเชื่อมประสานที่อัตราส่วนช่องว่างเดียวกันและถ้าดินเหนียวธรรมชาติถูกเชื่อมแน่นด้วยพันธะเชื่อมประสานที่แข็งแรงมาก ดินเหนียวนี้จะมีค่าความไวตัว (Sensitivity) สูง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ดร. Akira Yamadera, วิศวกร บริษัท Nippon Koei, Co Ltd., ประเทศญี่ปุ่นสำหรับความอนุเคราะห์จัดหาข้อมูลดินเหนียวอะริเอเคะที่ใช้ในการวิเคราะห์ในบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. (1995). Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia.
- Atkinson, J.H., Richardson, D., and Stallebrass, S.E. (1990). "Effect of recent history on the stiffness of overconsolidated soil", *Geotechnique*, 40(4): 531-540.
- Balasubramaniam, A.S. (1973). "Stress history effect on the stress-strain behaviour of a saturated clay", *Geotechnical Engineering Journal*, 4: 91-111.
- Balasubramaniam, A.S. (1975). "Stress-strain behavior of a saturated clay for states below the state boundary surface", *Soils and Foundations*, 15(3): 13-25.
- Henkel, D.J., and Sowa, V.A. (1963). "The influence of stress history on stress path in undrained triaxial tests on clay", *Laboratory Shear Testing of Soils*, ASTM, STP361: 280-291.
- Mayne, P.W., and Swanson, P.G. (1981). "The

- critical state pore pressure parameter for consolidated undrained shear tests", *Laboratory Shear Strength of the Soil*, ASTM, STP 740: 410-430.
- Mitachi, T., and Kitago, S. (1979). "The influence of stress history and stress system on the stress-strain-strength properties of saturated clay", *Soils and Foundations*, 19(2): 45-61.
- Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Nagaraj, T.S. and Miura, N. (2001). *Soft Clay Behaviour : Analysis and Assessment*, A.A. Balkema, 315p.
- Nagaraj, T.S. and Srinivasa Murthy, B.R. (1986). "A critical reappraisal of compression index equations", *Geotechnique* 36(1), 27-32.
- Nagaraj T.S., Miura, N., and Yamadera, A. (1997). "Re-examination of classification of soft clay deposits - Needs and methodology" *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Vododara, India*, 1: 431-434.
- Nagaraj, T.S., Srinivasa Murthy, B.R. and Vatsala, A. (1990). "Discussion on change in pore size distribution due to consolidation of clays by Griffiths and Joshi", *Geotechnique*, 40(2): 303-305.
- Parry, R.H.G., and Nadarajah, V. (1973). "Observations on laboratory prepared lightly overconsolidated specimens of Kaolin", *Geotechnique*, 24(3): 345-358.
- Pender, M.J. (1977). "A model for behavior of overconsolidated soil", *Geotechnique*, 28(1): 1-25.
- Roscoe, K.H., and Burland, J.B. (1968). "On the generalized stress-strain behaviour of wet clay", *Engineering Plastic*, Cambridge University Press, Cambridge, 535-609.
- Roscoe, K.H., and Poorooshasb, H.B. (1963). "A theoretical and experimental study of strains in triaxial tests on normally consolidated clays" *Geotechnique*, 13(1): 12-38.
- Terzaghi, K. (1936). "The shearing resistance of saturated soil and the angle between the planes of shear", *Proceeding of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1: 54-56.
- Wroth, C.P., and Loudon, P.A. (1967). "The correlation of strains within a family of triaxial tests on overconsolidated samples of Kaolin", *Proceedings of Geotechnical Conference, Oslo*, 1:159-163.
- Yudhbir, and Nadarajah, N. (1974). "Undrained Behavior of overconsolidated saturated clays during shear, *Soils and Foundations*, 14(4): 1-12.