



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์
ของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทย

โดย อ.ดร. อภินิติ โชติสังกาศ

กันยายน พ.ศ. 2551

สัญญาเลขที่ MRG4980086

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์
ของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทย

อ.ดร. อภินิติ โชติสังกาศ
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive summary

องค์ความรู้ด้านพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อุ้มน้ำในประเทศไทยนับว่ายังขาดแคลนอยู่มากในประเทศไทย เมื่อเทียบกับองค์ความรู้สำหรับพฤติกรรมของดินในสภาวะอุ้มน้ำด้วยน้ำ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเนื่องจากการขาดแคลนอุปกรณ์ทดสอบที่เหมาะสมสำหรับดินไม่อุ้มน้ำ อย่างไรก็ตาม ดินไม่อุ้มน้ำสามารถพบได้ในงานวิศวกรรมทั่วไปในประเทศไทย โดยเฉพาะหินผุหรือดินที่สลายจากหินผุ ณ ที่ตั้ง Residual soils อาทิในพื้นที่ลาดชันซึ่งมักจะประสบปัญหาการพังทลายของลาดดิน. นอกจากนี้ การทดสอบกำลังอัดแบบไม่มีการขอบเขตซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติยังเป็นการทดสอบตัวอย่างดินซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึงหรือ suction โดยที่วิศวกรมักไม่ทราบข้อเท็จจริงอันนี้. จึงเห็นได้ว่าการศึกษากฎการของดินไม่อุ้มน้ำหรือดินภายใต้สภาวะแรงดึง suction นี้จะช่วยสร้างองค์ความรู้อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในงานวิศวกรรมซึ่งเกี่ยวข้องกับดินในสภาวะไม่อุ้มน้ำหรือสภาวะภายใต้แรงดูด ในที่สุด

โครงการนี้เริ่มด้วยการพัฒนาเทนซิโอมิเตอร์เพิ่มเติมขึ้นจากที่ได้พัฒนาขึ้นแล้วที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดูดได้สูงถึง 100 kPa อุปกรณ์นี้เป็นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงดันขนาดเล็ก ชนิด Piezoresistive ซึ่งมีขายทั่วไปในราคาไม่แพงมาก. โดยเทนซิโอมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้นำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดแรงดูดในสนาม การหาเส้นอัตตลักษณ์ของดิน และรวมถึงการประยุกต์ใช้ตรวจวัดแรงดันน้ำด้านล่างหรือแรงดูดในช่องว่างดินระหว่างการทดสอบกำลังอัดแบบไร้ขอบเขตสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลทดสอบเป็นกำลังรับแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิภาพ

กระบวนการเติมน้ำลงใน KU-Tensiometer นับว่ามีความสำคัญมากเพื่อให้การใช้งานมีความถูกต้อง โดยในช่วงแรกของการศึกษานี้จะใช้ขั้นตอนซึ่งพัฒนาขึ้นที่ Imperial College London (Ridley & Burland, 1995) อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนดังกล่าวค่อนข้างจะยุ่งยากและใช้อุปกรณ์ค่อนข้างมาก คณะนักวิจัยจึงได้พัฒนาไปใช้วิธีการเติมน้ำในกะเปาะด้วยการดูดอากาศออกจากกะเปาะน้ำและตัว sensor ซึ่งอยู่แยกจากกัน ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อให้อากาศเหลือน้อยมากก่อนจะประกอบตัวกะเปาะน้ำและเซนเซอร์เข้าด้วยกันได้น้ำในภายหลัง วิธีนี้นับว่าเป็นวิธีการที่ดีที่สุดและใช้สำหรับการทดสอบทุกครั้งในภายหลัง การปรับเทียบ Tensiometer ก่อนการใช้งานจะใช้หลักการ Hanging Water Column หรือการห้อยน้ำจากปลายหัวเข็มของ Tensiometer ดังรูปที่ 3 โดยจะต้องระมัดระวังให้ไม่มีฟองอากาศในสายน้ำเพื่อความต่อเนื่องของน้ำในการส่งถ่ายแรง ค่าแรงดูดที่วัดได้จะแปรผันกับความสูงวัดจากน้ำขึ้นไปยัง Tensiometer

การทดสอบกำลังอัดแบบไร้ขอบเขตสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลทดสอบเป็นกำลังรับแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิภาพ ในเบื้องต้น ตัวอย่างดินเหนียว

อ่อนซึ่งทดสอบได้นำมาจากบริเวณโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ จ. สมุทรปราการ พบว่าได้ค่า ในช่วง Effective mean stress หรือ Suction เท่ากับ 0 ถึง 100 kPa. ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์จากผลการวิจัยในอดีตซึ่งใช้เครื่องมือทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Apparatus) จากการทดสอบพบว่าเมื่อค่าแรงดูด (หรือ Effective Stress) ของดิน แตกต่างกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแตกต่างกันด้วยคือ เมื่อค่าแรงดูด (Suction) ของดิน เพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นตาม โดยระหว่างการเฉือนนั้นค่าแรงดูดของดินตัวอย่าง มีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก (แรงดันน้ำเพิ่มขึ้น) แล้วจะเริ่มคงที่ ($\Delta u = 0$) เมื่อถึงจุด Critical state

ในการวิเคราะห์ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Path) และวิเคราะห์หาเส้นขอบเขตการวิบัติ นั้นตั้งอยู่บนเงื่อนไขว่าดินที่ทดสอบจะต้องอิ่มตัวด้วย น้ำหรือใกล้เคียง ($S_r > 95\%$) เพื่อให้หลักการของ Effective stress สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของดิน จากการทดสอบพบว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่า Degree of saturation ที่ใกล้เคียงอิ่มตัว ($> 95\%$) เทคโนโลยีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้จะเป็นทางเลือกที่สำคัญในการทดสอบหาลักษณะรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งมีราคาทดสอบถูกกว่าใช้เครื่องมือทดสอบสามแกนอย่างมาก

การทดสอบในส่วนที่สองเกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินที่สลายจากหินผุ ณ ที่ตั้ง (Residual soils) ในสภาวะไม่อิ่มน้ำ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของดินในสภาวะไม่อิ่มน้ำจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในระหว่างที่มีน้ำซึมลงในลาดช่วงฝนตก ในโครงการนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องทดสอบเฉือนตรงในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยมีการติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์เพื่อวัดแรงดูดระหว่างการเฉือน ของตัวอย่างผ่านฝาครอบด้านบน และได้ตรวจสอบเส้นอัตราลักษณะหรือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและแรงดูดของดินที่สภาวะไม่อิ่มน้ำหนักกดทับ รวมไปถึงกำลังรับแรงเฉือนที่แรงดูดต่างๆกันของดินตัวอย่างจากกระบอกเปลือกบางซึ่งเก็บจากพื้นที่ซึ่งเคยประสบดินถล่มมาก่อนในอดีตสี่พื้นที่ด้วยกันในประเทศไทย ได้แก่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์, อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่, อ.เขาคิชกูฏ จ.จันทบุรี และ เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก. ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณะ บ่งชี้ว่าค่า แรงดูดที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างดิน (Air-entry suction) มีค่าค่อนข้างต่ำ ประมาณ 0-1 kPa สำหรับตัวอย่างดินจากทุกสถานที่ ซึ่งมีลักษณะเป็นดินทรายแป้งปนดินเหนียว ดินเหนียวปนดินทราย และดินทรายแป้งปนดินทราย ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงขนาดและการเรียงตัวของช่องว่างขนาดใหญ่ในเม็ดดิน สำหรับกำลังรับแรงเฉือนพบว่าการแปรผันแบบไม่เชิงเส้นกับแรงดูด โดยดิน residual soil ซึ่งมีแรงดูดสูงกว่า (หรือความชื้นน้อยกว่า) จะมีแนวโน้มการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่ชัดเจนกว่าจึงทำให้มีพฤติกรรมเปราะ (Brittle) กว่า. และในระหว่างการเฉือนตัวอย่างที่มีสภาพเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนักคงที่ พบว่าแรงดูดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเฉือน โดยแรงดูดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการขยายปริมาตร

ของดิน และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาตรลดลง. นอกจากนั้น ยังพบว่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบชนิด multistage shearing จะมีค่าอยู่ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะ peak และ สภาวะ ultimate. ในการศึกษานี้ยังได้เสนอสมการอย่างง่ายซึ่งสามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนที่ ultimate ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับค่าแรงดัดที่ต่ำกว่า 33 kPa โดยสมการจะอาศัยตัวแปรสำคัญคือ ปริมาณความชื้นโดยปริมาตรที่ค่าแรงดัดเท่ากับศูนย์และ 33 kPa

อนึ่ง สำหรับปัญหาดินถล่มเนื่องจากฝนตกนั้น ผลการตรวจวัดในสนามโดยนักวิจัยหลายท่านบ่งชี้ว่าช่วงของแรงดัดซึ่งพบในสนามจะมีค่าค่อนข้างน้อย โดยอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าจุด field capacity หรือน้อยกว่า 33 kPa นอกจากนั้นพารามิเตอร์สำหรับการวิบัติที่สภาวะ ultimate มักจะเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเนื่องจาก การเคลื่อนตัวของลาดจะมีค่ามากและเกินกว่าความเค้นที่สภาวะ peak ด้วยสาเหตุนี้ สมการที่ได้เสนอไว้จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ประมาณความเชื่อมั่นที่เพิ่มขึ้นจากแรงดัดนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่สูงชันบริเวณกว้าง ซึ่งอาจไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์หากจะมีการทดสอบโดยละเอียดทั้งพื้นที่ สมการนี้ หากได้ประยุกต์ร่วมกับการตรวจวัดแรงดัดด้วยเทนซิโอมิเตอร์ จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยแบบทันทีทันใดได้ โดยใช้สมการเสถียรภาพของลาดอนันต์ และนำไปใช้ในระบบเตือนภัยดินถล่มในที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วรากร ไผ่เรียง และ ผศ.ดร.สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยครั้งนี้ รวมทั้ง ให้โอกาสผู้วิจัยร่วมทำงานในโครงการวิจัยด้านดินถล่ม อื่นหลายโครงการ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นการสนับสนุนการทดสอบดินในงานวิจัยครั้งนี้ด้วย

การพัฒนา Tensiometer ขึ้นที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์นี้ หัวหน้าโครงการวิจัยและนาย วิชาญพงศ์ พอลิละ ได้เริ่มต้นออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยอาศัยแหล่งทุนภายในศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก และ ทุนอุดหนุนการวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และในโครงการนี้ได้นำ Tensiometer ที่พัฒนาขึ้นประยุกต์ใช้ กับอุปกรณ์ทดสอบชนิด Direct shear test และ Unconfined compression tests ซึ่ง นาย วศัน สุทธินน และ นาย นรินทร์ หรรษชัยนันท์ เป็นผู้ปฏิบัติการทดสอบ นาย วุฒชาติ วิชาโชค เป็นผู้ช่วยด้านเทคนิคในการผลิต Tensiometer ผลการทดสอบ Unconfined compression tests ชนิดวัดแรงกดเป็นส่วนหนึ่งของงานวิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิตของนาย วศัน สุทธินน

บทคัดย่อ

Project Code : MRG4980086

Project Title : การศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทย

Investigator : ดร.อภินิติ โชติสังกาศ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail Address : fengatj@ku.ac.th

Project Period : 2 ปี 2 เดือน

องค์ความรู้ด้านพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทยนั้นว่ายังขาดแคลนอยู่มากในประเทศไทย เมื่อเทียบกับองค์ความรู้สำหรับพฤติกรรมของดินในสภาวะอิ่มตัวด้วยน้ำ ทั้งนี้ส่วนหนึ่งเนื่องจากการขาดแคลนอุปกรณ์ทดสอบที่เหมาะสมสำหรับดินไม่อิ่มน้ำ อย่างไรก็ตาม ดินไม่อิ่มน้ำสามารถพบได้ในงานวิศวกรรมทั่วไปในประเทศไทยโดยเฉพาะหินผุหรือดินที่สลายจากหินผุ ณ ที่ตั้ง Residual soils อาทิในพื้นที่ลาดชันซึ่งมักจะประสบปัญหาการพังทลายของลาดดิน. นอกจากนี้ การทดสอบกำลังอัดแบบไม่มีขอบเขตซึ่งเป็นที่ยอมรับใช้ในทางปฏิบัติยังเป็นการทดสอบตัวอย่างดินซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึงหรือ suction โดยที่วิศวกรมักไม่ทราบข้อเท็จจริงอันนี้. จึงเห็นได้ว่าการศึกษาพฤติกรรมของดินไม่อิ่มน้ำหรือดินภายใต้สภาวะแรงดึง suction นี้จะช่วยสร้างองค์ความรู้ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในงานวิศวกรรมซึ่งเกี่ยวข้องกับดินในสภาวะไม่อิ่มน้ำหรือสภาวะภายใต้แรงดูด ในที่สุด

โครงการนี้เริ่มด้วยการพัฒนาเซนเซอร์เพิ่มเติมขึ้นจากที่ได้พัฒนาขึ้นแล้วที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดูดได้สูงถึง 100 kPa อุปกรณ์นี้เป็นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงดันขนาดเล็ก ชนิด Piezoresistive ซึ่งมีขายทั่วไปในราคาไม่แพงมาก. โดยเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นได้นำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดแรงดูดในสนาม การหาเส้นอัตราลักษณะของดิน และรวมไปถึงการประยุกต์ใช้ตรวจวัดแรงดันน้ำด้านล่างหรือแรงดูดในช่องว่างดินระหว่างการทดสอบกำลังอัดแบบไร้ขอบเขตสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลทดสอบเป็นกำลังรับแรงเฉือนในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล ในเบื้องต้นตัวอย่างดินเหนียวอ่อนซึ่งทดสอบได้นำมาจากบริเวณโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ พบว่าได้ค่า $c' = 0, \phi' = 20 - 26^\circ$ ในช่วง Effective mean stress หรือ Suction เท่ากับ 0 ถึง 100 kPa. ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์จากผลการวิจัยในอดีตซึ่งใช้เครื่องมือทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Apparatus) เทคโนโลยีการทดสอบที่พัฒนาขึ้นนี้จะ เป็นทางเลือกที่สำคัญในการทดสอบหาลำดับรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงประสิทธิผลซึ่งมีราคาทดสอบถูกกว่าใช้เครื่องมือทดสอบสามแกนอย่างมาก

การทดสอบในส่วนที่สองเกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินที่สลายจากหินผุ ณ ที่ตั้ง (Residual soils) ในสภาวะไม่อิ่มน้ำ โดยทั่วไปความสัมพันธ์ของกำลังรับแรง

เงื่อนไขของดินในสภาวะไม่อิ่มน้ำจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในระหว่างที่มีน้ำซึมลงในลาดช่วงฝนตก ในโครงการนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องทดสอบเฉือนตรงในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยมีการติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์เพื่อวัดแรงดูดระหว่างการเฉือน ของตัวอย่างผ่านฝาครอบด้านบน และได้ตรวจสอบเส้นอัตราลักษณะหรือความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและแรงดูดของดินที่สภาวะไม่มีน้ำหนักกดทับ รวมไปถึงกำลังรับแรงเฉือนที่แรงดูดต่างกันของดินตัวอย่างจากกระบอกเปลือกบางซึ่งเก็บจากพื้นที่ซึ่งเคยประสบดินถล่มมาก่อนในอดีตสี่พื้นที่ด้วยกันในประเทศไทย ได้แก่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์, อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่, อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี และ เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก. ผลการทดสอบเส้นอัตราลักษณะ บ่งชี้ว่าค่า แรงดูดที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างดิน (Air-entry suction) มีค่าค่อนข้างต่ำ ประมาณ 0-1 kPa สำหรับตัวอย่างดินจากทุกสถานที่ ซึ่งมีลักษณะเป็นดินทรายแป้งปนดินเหนียว ดินเหนียวปนดินทราย และดินทรายแป้งปนดินทราย ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงขนาดและการเรียงตัวของช่องว่างขนาดใหญ่ในเม็ดดิน สำหรับกำลังรับแรงเฉือนพบว่ามีการแปรผันแบบไม่เชิงเส้นกับแรงดูด โดยดิน residual soil ซึ่งมีแรงดูดสูงกว่า (หรือความชื้นน้อยกว่า) จะมีแนวโน้มการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่ชัดเจนกว่าจึงทำให้มีพฤติกรรมเปราะ (Brittle) กว่า. และในระหว่างการเฉือนตัวอย่างที่มีสภาพเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยน้ำหนักคงที่พบว่าแรงดูดมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยระหว่างการเฉือน โดยแรงดูดจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการขยายปริมาตรของดิน และจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาตรลดลง. นอกจากนั้น ยังพบว่ากำลังรับแรงเฉือนจากการทดสอบชนิด multistage shearing จะมีค่าอยู่ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะ peak และ สภาวะ ultimate. ในการศึกษานี้ยังได้เสนอสมการอย่างง่ายซึ่งสามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนที่ ultimate ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับค่าแรงดูดที่ต่ำกว่า 33 kPa โดยสมการจะอาศัยตัวแปรสำคัญคือ ปริมาณความชื้นโดยปริมาตรที่ค่าแรงดูดเท่ากับศูนย์และ 33 kPa

Keywords : แรงดูด, เทนซิโอมิเตอร์, กำลังรับแรงเฉือน, residual soils, ดินเหนียวอ่อน

Abstract

Project Code : MRG4980086

Project Title : Investigation of behaviour of unsaturated soils in Thailand

Investigator : Dr. Apiniti Jotisankasa, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

E-mail Address : fengatj@ku.ac.th

Project Period : 2 years 2 months

The understanding of mechanical behaviour of unsaturated soils in Thailand still lagged very much behind those for fully saturated soils. This is partly due to inadequate testing technique available in the country. Unsaturated soils can be found in nature especially in hilly areas where problems of rainfall-induced slope instability are frequent. Moreover, the unconfined compression tests, which are commonly carried out in practice, are in fact often unknowingly performed on samples with negative pore water pressure or soil suction. This is thus a need for studies of unsaturated soil behaviour in order that engineering work related to those materials be carried out efficiently, safely and economically.

This project includes a further development of the miniature tensiometer at Kasetsart University, used for measuring suction up to 100 kPa. The device makes use of miniature commercial piezoresistive pressure sensor which is available at relatively low cost. Examples of applications of these devices are given for in-situ suction measurement, and soil-water retention curves determination. A particular attention is drawn to the determination of the effective strength parameter of soft Bangkok clay using the suction-monitored unconfined compression test. The tested soft soil was obtained from a construction site along the drainage canal of Suvarnabhumi airport. The value of the effective angle of shearing resistance, obtained from these tests is 20 to 26° with effective cohesion equal to zero. These values correspond to those obtained from previous research which used Triaxial apparatus. This innovative testing method is expected to be an attractive alternative for determination of effective strength parameters with its cost much lower than the triaxial tests and will also be value-adding to unconfined compression test which is commonly used in Thailand.

Another part of this project is related to mechanical behaviour of residual soils in landslide-prone areas of Thailand. The relationships of shear strength for unsaturated

soils are frequently used in stability analysis for slope subjected to rain infiltration. In this project, a modified direct shear box is also used to determine such relationships. The apparatus incorporates the developed miniature tensiometer for simpler, direct suction measurement during shearing. The soil-water retention curves and shearing behavior has been investigated for intact residual soils from four landslide-prone areas in Thailand. The air-entry suctions vary from zero to one kPa for the low-to-medium plasticity clayey silt, sandy clay, and silty sand, reflecting the presence of large pore within these materials. The shear strength increases non-linearly with suction, though linearization can be reasonably assumed. The residual soil samples with higher suction tend to have stronger bonds around particle contacts and thus the more brittle they are at higher suctions. During constant water content shearing, the soil suction appeared to change slightly according to change in soil volume. The strengths determined from multistage tests appear to be bounded within the envelopes of peak and ultimate strength. A simple equation can be used conservatively to predict the ultimate strength of unsaturated residual soils for suctions lower than about 33kPa, based on the volumetric water contents at 33kPa and zero suction.

Keywords :, suction, tensiometer, shear strength, residual soils, soft clay

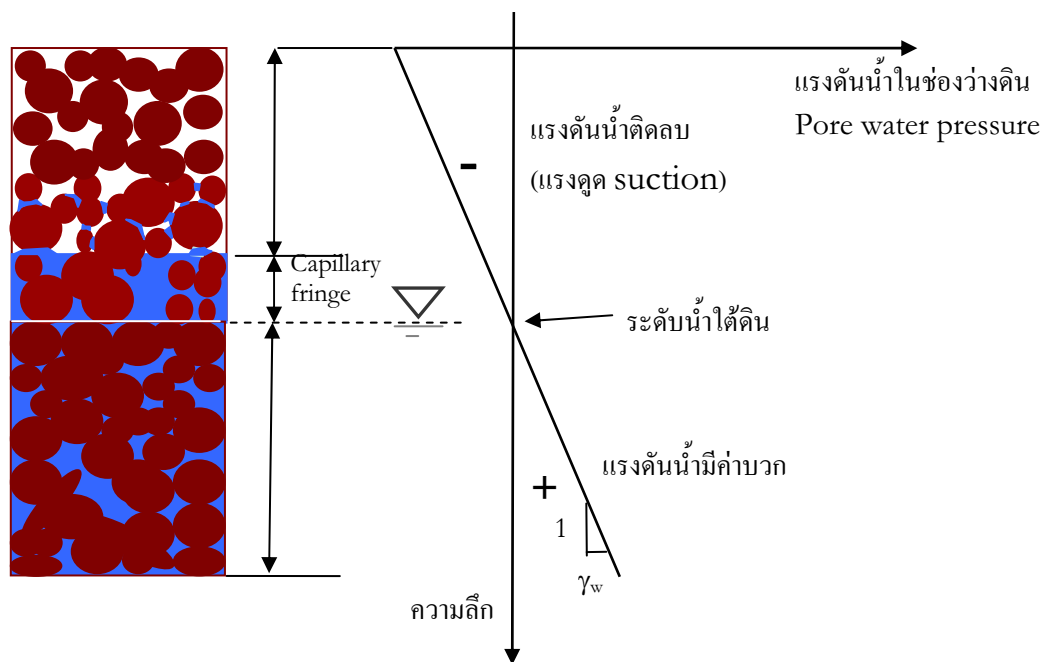
1. บทนำ

ประเทศไทยนับว่ายังขาดแคลนความรู้พื้นฐานทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (unsaturated soils) แม้ว่าองค์ความรู้ด้านนี้จะมีความสำคัญอย่างยิ่งในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมปฐพีและสิ่งแวดล้อม เช่น ปัญหาดินถล่มในพื้นที่ลาดชันเนื่องจากฝนตก ปัญหาการทรุดตัวของดินที่มีโครงสร้างหลวม เช่นดินลมหอบ (loess) ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ หรือการปนเปื้อนของดินในชั้นไม่อิ่มตัว หรือ vadose zone สำหรับงานวิจัยในระดับนานาชาตินั้น ยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวที่พบจริงในธรรมชาติมากนัก ดินในธรรมชาติโดยทั่วไปจะมีโครงสร้างที่แตกต่างจากดินเทียม (artificial soils) ที่นิยมใช้ทดสอบในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้อาจทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (constitutive model) ที่เสนอขึ้นมาไม่มีความแม่นยำนักเมื่อใช้อธิบายดินธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินในเขตร้อน เช่น ประเทศไทย

ค่าตัวแปรที่สำคัญซึ่งบ่งชี้ถึงสถานะของน้ำในดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำคือ แรงดูดของดิน (Soil suction). ถ้ายกตัวอย่างกรณีที่น้ำอยู่ในสถานะสถิตย์ (Hydrostatic) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) จะอยู่ภายใต้สถานะแรงดึง (Tension) จากน้ำหนักของน้ำด้านล่าง (รูปที่ 1). แรงดึงหรือแรงดูดนี้เรียกว่า แรงดูดเมทริก (Matric suction, s) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

โดย u_w เท่ากับแรงดันน้ำในช่องว่างดิน และ u_a เท่ากับแรงดันอากาศในช่องว่างดิน. เครื่องมือที่ใช้วัดแรงดูดเมทริกโดยตรงเรียกว่า Tensiometer ซึ่งจะใช้งานในสถานะที่ค่า u_a ของดินมีค่าเท่ากับ 0 และค่า suction ที่วัดได้ก็คือ ค่าที่ติดลบของแรงดันน้ำดังแสดงในรูปที่ 1 นั่นเอง. อย่างไรก็ตาม Tensiometer ทั่วไปจะไม่สามารถวัดค่าแรงดันน้ำที่ติดลบเกิน 100 kPa ได้ ซึ่งกรณีที่ค่าเกิน 100kPa จะต้องใช้หลักการ Axis-translation เพื่อวัดและควบคุมค่า matric suction ของดินด้วยเครื่องมือ pressure plate หรือหม้อแรงดัน โดยเป็นการเพิ่มแรงดันอากาศในช่องว่างดิน u_a เพื่อเพิ่ม suction ในขณะที่ค่า $u_w = 0$ นั่นเอง



รูปที่ 1 ลักษณะของแรงดันน้ำในสถานะสถิตย

ปรากฏการณ์หลักๆที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดูดเมทริกนี้มีอยู่สองปรากฏการณ์ด้วยกันคือ แรงตึงผิวคาปิลลารี และ Surface adsorption ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากประจุไฟฟ้าลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว. อย่างไรก็ตาม สักย์หรือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดิน ซึ่งเรียกว่า แรงดูดออสโมติก (Osmotic suction, π) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีสักย์ในการดูดน้ำหาตัวเองได้มากไปด้วย. โดยทั่วไปแล้วจะสามารถพิจารณา แรงดูดทั้งสองชนิดรวมกันเรียกว่า แรงดูดรวม (Total suction, ψ) (สมการ 1b)

$$\psi = \pi + s \quad (1b)$$

แรงดูดรวมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ในช่องว่างดินตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ดังสมการที่ (2)

$$\psi = - \left[\frac{RT}{V_{mol}} \right] \cdot \ln(R_h) \quad (2)$$

เมื่อ R_h = ความชื้นสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไอน้ำในสถานะปกติต่อแรงดันไอน้ำในสถานะอิ่มตัว (P/P_0)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant) = $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

V_{mol} = molecular volume ของไอน้ำ (0.01802 m^3),

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$) , และ Total suction, ψ , มีหน่วยเป็น kPa

แรงดูดในดิน หรือ พลังงานก่อกับก่อดิน เป็นตัวแปรที่สัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญหลายอย่างของดินไม่อิ่มตัว (Fredlund & Rahardjo, 1993). อาทิเช่น เปอร์เซ็นต์ของน้ำในดิน , สัมประสิทธิ์ของการไหลซึมของน้ำผ่านดิน, กำลังรับแรงเฉือนของดิน และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน ความสัมพันธ์ต่างๆ เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับดินหลายด้านด้วยกัน อาทิ การไหลซึมของน้ำผ่านผิวดิน การระเหยของน้ำจากดิน การพังทลายของดิน สมดุลของพลังงานระหว่างดินและอากาศ ฯลฯ

2. วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาพฤติกรรมของดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ที่พบในประเทศไทย การศึกษาจะเน้นการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบพฤติกรรมจริงของดินธรรมชาติกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พฤติกรรมทางกลศาสตร์ที่จะทดสอบประกอบไปด้วย พฤติกรรมการรับแรงเฉือน (shearing behaviour) อิทธิพลของแรงดูดต่อพฤติกรรมต่างๆ และ ความสามารถในการเก็บกักน้ำของดิน (soil-water retention behaviour) หรือความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงดูด โดยจะเน้นทดสอบดินชนิดที่เป็นตัวแทนของดินที่มักเป็นปัญหาในงานวิศวกรรมในประเทศไทย ได้แก่ ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ และดิน residual soils จากพื้นที่ซึ่งเสี่ยงต่อดินถล่มในประเทศไทย

3. วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการศึกษาในโครงการวิจัยแบ่งได้ดังนี้

3.1 การประยุกต์ Tensiometer เพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนชนิด เฉือนตรง (Direct shear test) และ การทดสอบกำลังอัดแบบไร้แรงด้านข้าง (Unconfined compression test)

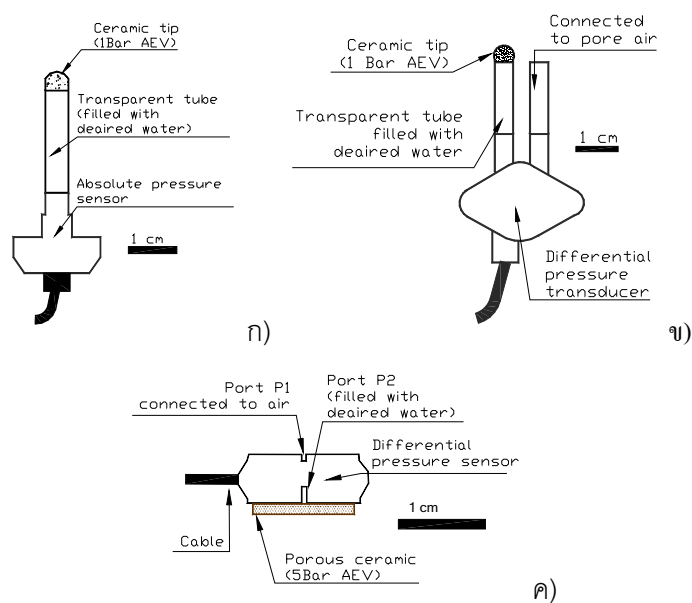
3.2 การทดสอบกำลังอัดแบบไร้แรงด้านข้าง ชนิดวัดแรงดูด (Unconfined compression test) เพื่อประเมินกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งเก็บจากความลึก 0-4 เมตร บริเวณโครงการคลองระบายน้ำ สนามบินสุวรรณภูมิ และเปรียบเทียบกับกำลังที่ทำนายได้จากหลักการ effective stress

3.3 การศึกษาพฤติกรรมกำลังรับแรงเฉือนและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นและแรงดูดของดิน residual soil จากพื้นที่ซึ่งเคยประสบดินถล่มมาก่อนในอดีตสี่พื้นที่ด้วยกันในประเทศไทย ได้แก่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์, อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่, อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี และ เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก.

โดยรายละเอียดของผลการศึกษาในแต่ละส่วนจะได้กล่าวต่อไปในรายงาน

4. การพัฒนา KU-Tensiometer และการประยุกต์ใช้

ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น Tensiometer เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เป็นอย่างมากในการวัดค่าแรงดูดเมทริกของดินในช่วงค่า 0-100 kPa. ในประเทศไทย อิทธิสุนทร (2532) ได้พัฒนา Tensiometer และใช้ในการวัดความชื้นของดินเพื่อการให้น้ำพืชอย่างมีประสิทธิภาพ. และในต่างประเทศ ได้มีการพัฒนา Tensiometer ด้วยเซ็นเซอร์วัดแรงดันแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสะดวกในการอ่านค่าอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง แต่มักจะมีราคาแพงทำให้การวัดแรงดูด suction ในลักษณะนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัดในประเทศไทย. ด้วยเหตุผลดังกล่าว คณะนักวิจัยจึงได้พัฒนา Tensiometer ขึ้นเองเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยเงินทุนเบื้องต้นจากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก และเงินทุนอุดหนุนคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้เริ่มใช้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายโครงการ (Jotisankasa et al., 2007)



รูปที่ 2 KU-Tensiometer, ก) ชนิดแรงดูดต่ำ-A (Low-suction-Absolute) ข) ชนิดแรงดูดต่ำ-D (Low-suction-Differential) ค) ชนิดแรงดูดสูง (High-suction-Differential)

ส่วนประกอบของเทนซิโอมิเตอร์ที่สำคัญคือ 1) ปลายดินเผา 2) กะเปาะน้ำ และ 3) อุปกรณ์วัดแรงดันหรือเกจสุญญากาศ. ดังตัวอย่างในรูปที่ 2 โดยในขณะที่ใช้งานทุกส่วนจะต้องมีน้ำอยู่เต็มช่องว่างเพื่อให้สามารถส่งถ่ายแรงดึงจากน้ำในดินสู่หน้าด้านหน้าเซ็นเซอร์วัดแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ. เซ็นเซอร์วัดแรงดันที่ใช้สำหรับ KU-Tensiometer นี้เป็นเซ็นเซอร์ชนิด Single

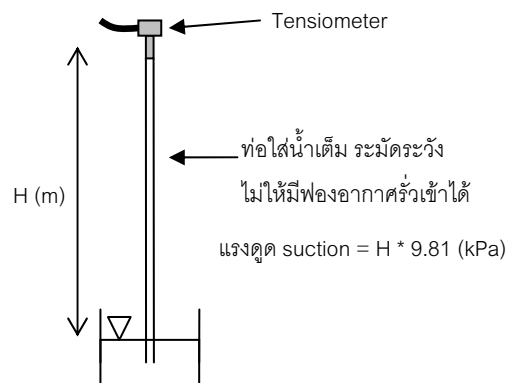
Silicon Piezoresistive ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เทคโนโลยีระดับจุลภาค (MEMs technology) ทำให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็กและมีสัญญาณที่เสถียรในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง. วิญญพงศ์และสุทธิศักดิ์ (2550) ได้ใช้เซ็นเซอร์ชนิดนี้พัฒนาเป็นเครื่องมือพิโซมิเตอร์เพื่อวัดแรงดันน้ำ(ด้านบวก) และใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมปฐพีหลายงานด้วยกัน อาทิ การก่อสร้างคันดินถม และการวิเคราะห์การทรุดตัวของดิน. สำหรับ KU-Tensiometer ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 3 แบบด้วยกัน. ชนิดแรงดูดต่ำ-A และ -D (รูป 2ก และ 2ข) สามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดถึงประมาณ 90 kPa และชนิดแรงดูดสูง (รูป 2ค) ซึ่งยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาและสามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดถึงประมาณ 350 kPa. (Jotisankasa et al., 2007) สำหรับข้อแตกต่างของรุ่นแรงดูดต่ำ-A และ -D คือ รุ่นแรงดูดต่ำ-A จะมีค่าศูนย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันบรรยากาศซึ่งต้องอาศัยการปรับแก้ ในขณะที่รุ่นแรงดูดต่ำ-D จะอ่านค่า differential pressure เทียบกับความดันบรรยากาศจึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับแก้เรื่องความดันบรรยากาศนี้

กระบวนการเติมน้ำลงใน KU-Tensiometer นับว่ามีความสำคัญมากเพื่อให้การใช้งานมีความถูกต้อง โดยในช่วงแรกของการศึกษานี้จะใช้ขั้นตอนซึ่งพัฒนาขึ้นที่ Imperial College London (Ridley & Burland, 1995) ดังนี้ (1) นำ Tensiometer ที่อยู่ในสภาพแห้งใส่ในภาชนะปิดผนึกภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ปรับสภาพ (2) ภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นเติมน้ำเข้าไปในช่องว่าง และยังคง Tensiometer ไว้ภายใต้สภาวะปั๊มสุญญากาศต่ออีกอย่างน้อย 1 ชั่วโมง (3) ค่อยๆ คลายสุญญากาศโดยปิดปั๊มอย่างช้าๆ เพื่อให้น้ำเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างให้หมด.

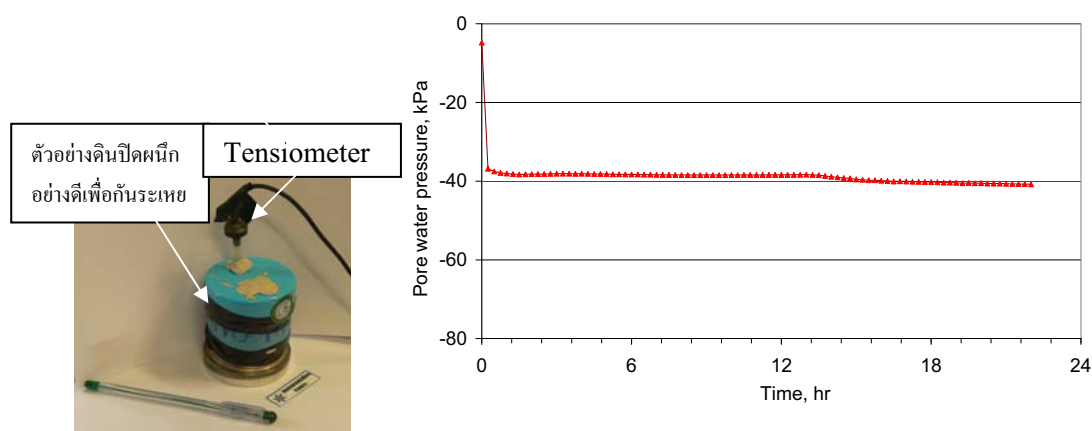
อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนดังกล่าวค่อนข้างจะยุ่งยากและใช้อุปกรณ์ค่อนข้างมาก คณะนักวิจัยจึงได้พัฒนาไปใช้วิธีเจาะรูขนาดเล็กที่กะเปาะน้ำเพื่อให้สามารถไล่ฟองอากาศที่ยังตกค้างอยู่ออกมาได้หมดระหว่างดูดอากาศด้วยปั๊มสุญญากาศ และจะต้องปิดผนึกรูที่เจาะนี้อย่างดีด้วยวัสดุจำพวกtac หรือยาง ก่อนจะใช้ฟลอปซีทนนํ้าทาทับบ่อนใช้งาน. และในปัจจุบันวิธีการที่ดีที่สุดในการเติมนํ้าในกะเปาะคือการดูดอากาศออกจากกะเปาะน้ำและตัว sensor ซึ่งอยู่แยกจากกัน ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เพื่อให้อากาศเหลือน้อยมากก่อนจะประกอบตัวกะเปาะน้ำและเซ็นเซอร์เข้าด้วยกันได้นํ้าในภายหลัง วิธีนี้นับว่าเป็นวิธีการที่ดีที่สุดและใช้สำหรับการทดสอบทุกครั้งในภายหลัง

การปรับเทียบ Tensiometer ก่อนการใช้งานจะใช้หลักการ Hanging Water Column หรือการห้อยน้ำจากปลายหัวเชรามิกของ Tensiometer ดังรูปที่ 3 โดยจะต้องระมัดระวังให้ไม่มีฟองอากาศในสายน้ำเพื่อความต่อเนื่องของน้ำในการส่งถ่ายแรง ค่าแรงดูดที่วัดได้จะแปรผันกับความสูงวัดจากน้ำขึ้นไปยัง Tensiometer (9.81 kPa/ 1 เมตรน้ำ). รูปที่ 4 แสดงลักษณะการติดตั้ง Tensiometer เพื่อวัดแรงดูดน้ำของตัวอย่างดินที่ปิดผนึกอย่างดีเพื่อป้องกันการระเหยของดินระหว่างการตรวจวัด. โดยทั่วไปการติดตั้ง Tensiometer เพื่อวัดแรงดูดจากตัวอย่างดินจะมีขั้นตอนดังนี้ (1) ปรับแต่งผิวที่จะทำการวัดให้เรียบ (2) เมื่อต้องวัดแรงดูดของดินที่มีผิวขรุขระและเนื้อ

หยาบเช่นพวก ดินทราย ลูกรังหรือ Residual soil ควรจะปาดดินเหนียวเม็ดละเอียด (อาจเป็นดินขาว คาโอลีน) ที่หัวเซรามิกของ Tensiometer เล็กน้อยเพื่อให้ น้ำในดินต่อเนื่องกับน้ำในเซรามิก (3) ปักหัว Tensiometer ลงในตำแหน่งให้แน่นพอสมควรและ ทำการอุดช่องว่างระหว่างหัว Tensiometer กับดินด้วยวัสดุพวก Tac เพื่อป้องกันการระเหยบันทึกค่าที่อ่านจาก Tensiometer ซึ่งจะถึงสมดุลกับแรงดูดภายในระยะเวลา 0.5-1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 การสอบเทียบ Tensiometer โดยวิธีการห้อยน้ำ Hanging Water Column



รูปที่ 4 ตัวอย่างการวัดแรงดูดของตัวอย่างดินโดย KU-Tensiometer ในห้องปฏิบัติการ

5. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ

Unconfined Compression Test ชนิดวัดแรงดูด suction

ในรายงานส่วนนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้ KU tensiometer สำหรับวัดแรงดูด suction เพื่อหาพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากการทดสอบ

Unconfined Compression Test ซึ่งส่วนหนึ่งนำมาจากบทความโดย วสัน และอภินิติ (2551). ในปัจจุบันการทดสอบเพื่อหาลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวอ่อนตัวด้วยน้ำในห้องปฏิบัติการมีด้วยกัน

หลายวิธี โดย 2 วิธีที่เป็นที่นิยม ได้แก่ การทดสอบกำลังอัดแบบไร้แรงดันข้าง (Unconfined Compression Test, UC) และการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ข้อแตกต่างที่สำคัญของทั้งสองวิธีคือ วิธีแรงอัดสามแกนจะสามารถควบคุมค่าแรงดันด้านข้าง (Confining Stress) แรงดันน้ำ และหน่วยแรงประสิทธิผลได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีราคาสูงโดยจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่นำเข้าจากต่างประเทศ สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขตซึ่งแรงดันด้านข้างเป็นศูนย์ เป็นการทดสอบที่ได้รับความนิยม เนื่องจากกระทำได้ง่าย รวดเร็ว และมีราคาที่ถูกกว่ามาก ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากการทดสอบดังกล่าวจะเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength, s_u , $c_u = \frac{q_u}{2}$) และสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในรูปแบบหน่วยแรงรวม (Total Stress Analysis) หรือการวิเคราะห์ด้วยหลักการ $\phi_u = 0$ สำหรับดินเหนียวอิ่มตัวด้วยน้ำนั่นเอง (รูปที่ 5) สมมุติฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์นี้ คือค่าหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress) ของดินเหนียวอ่อนขณะที่ทำการทดสอบ Unconfined compression test มีค่าเท่ากับค่า Effective stress ของดินในสนามจริง แต่อย่างไรก็ตาม การเก็บตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample) สำหรับดินเหนียวอ่อนนั้น เป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ การรบกวนดินจะทำให้ค่า Effective stress ในดินมีค่าลดลงได้มากสำหรับดินเหนียวอ่อน

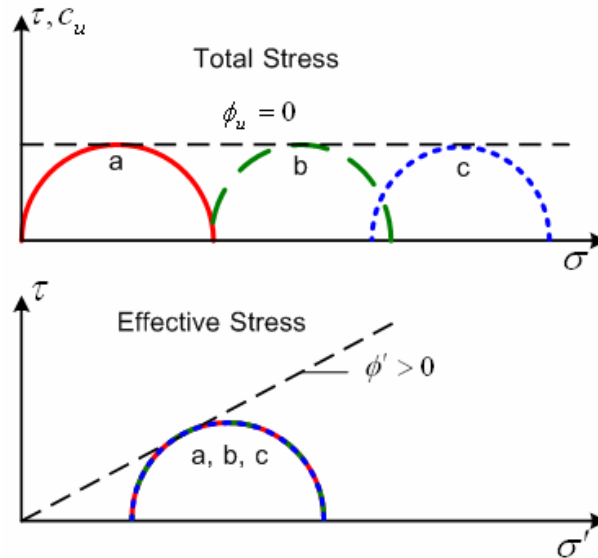
รูปที่ 6 แสดงถึงลักษณะของหน่วยแรงที่แปรเปลี่ยนในระหว่างการเก็บตัวอย่างแบบไม่รบกวน (Perfect Undisturbed Sampling) จะเห็นว่าถ้าการเก็บตัวอย่างไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินและบริเวณของตัวอย่างดินที่ถูกเฉือนถูกจำกัดอยู่ในพื้นที่บางๆ ดินตัวอย่างจะอยู่ในสภาวะ Undrained unloading และค่า Effective stress จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงทำให้ค่าแรงดันน้ำมีค่าติดลบ หรือมีลักษณะเป็นแรงดูด Suction ซึ่งมีค่าเท่ากับหน่วยแรงประสิทธิผลเฉลี่ย (Mean Effective Stress) นั่นเอง

ในประเทศไทย ยังไม่มีการศึกษาวิจัยด้านทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล ระหว่างการทดสอบ Unconfined compression test มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากในอดีตการวัดแรงดันน้ำด้านลบสามารถกระทำได้ยาก การศึกษาครั้งนี้จะก่อให้เกิดความเข้าใจเรื่องกำลังรับแรงเฉือนแบบหน่วยแรงประสิทธิผล (ϕ' และ c') จากการทดสอบ UC และเสนอเทคนิคการทดสอบชนิดใหม่ และหวังว่าจะเป็นประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ขั้นสูง เช่น การวิเคราะห์สภาวะระยะยาว (Long Term Condition) ซึ่งต้องใช้พารามิเตอร์ในรูปของหน่วยแรงประสิทธิผล

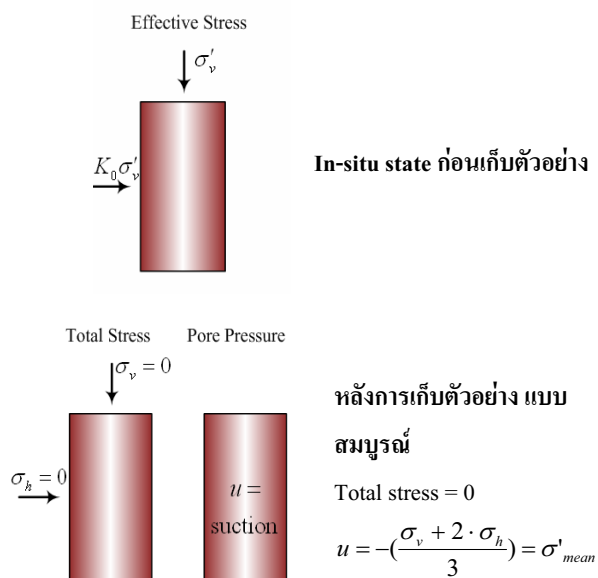
5.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ Unconfined Compression Test ชนิดวัดแรงดูด suction

พารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงรวม (ϕ_u, c_u) นั้นพิจารณาเฉพาะหน่วยแรงรวม $\sigma = \sigma' + u$ ซึ่งรวมเอาผลของการเกิดแรงดันน้ำส่วนเกินในดินที่จุดวัดไว้ด้วย การทดสอบจึงตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าแรงดันน้ำส่วนเกินระหว่างทดสอบมีค่าเทียบเท่ากับแรงดันน้ำในสภาวะจริงใน

สนาม ส่วนพารามิเตอร์ในรูปหน่วยแรงประสิทธิผลได้แก่ ค่ามุมแรงเฉือนประสิทธิผล ϕ' และ ความเชื่อมแน่นประสิทธิผล c' จะได้มาจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงเฉือน τ และหน่วยแรงประสิทธิผล $\sigma' = \sigma - u$ ซึ่งแยกค่าแรงดันน้ำ (Pore Pressure) ออกจากการพิจารณา ทำให้สามารถ ประเมินกำลังของดินที่สภาวะแรงดันน้ำต่างๆ กันได้



รูปที่ 5 เส้นแสดงขอบเขตการวิบัติของดินเหนียวในรูปของหน่วยแรงรวมและหน่วยแรงประสิทธิผล



รูปที่ 6 พฤติกรรมของดินในสภาวะก่อนและหลังจากเก็บตัวอย่างแบบคงสภาพอย่างสมบูรณ์ (Perfect Undisturbed Sampling) (วสัน และ อภินิติ, 2551)

ในระหว่างการทดสอบ Unconfined compression test นั้น โดยทั่วไปแรงดันน้ำในช่องว่างดินจะมีค่าเป็นลบ ดังได้อธิบายไว้ข้างต้น ค่าแรงดันน้ำที่เป็นลบนี้จะบ่งชี้ถึงแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน หรือที่เรียกว่า แรงดูดเมทริก (Matric Suction, s) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ $s = u_a - u_w = -u_w$ โดยค่า u_w เท่ากับค่าแรงดันน้ำในช่องว่างดิน และ u_a จะมีค่าเท่ากับแรงดันอากาศในช่องว่างดิน ซึ่งในการทดสอบ UC โดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับศูนย์หรือเท่ากับความดันบรรยากาศ เมื่อพิจารณาลักษณะทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Path) ระหว่างการทดสอบ Unconfined compression test โดยใช้สัญลักษณ์แบบ MIT, Lambe & Whitman (1969) จะได้สมการด้านล่างดังนี้

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma_v}{2} + s \quad (3)$$

$$q = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v}{2} \quad (4)$$

โดย s คือ ค่าแรงดูดเมทริก ซึ่งสามารถวัดโดยใช้เครื่องมือเทนซิโอมิเตอร์ Tensiometer, ค่า σ_v คือ หน่วยแรงกดในแนวตั้ง และ หน่วยแรงในแนวราบ σ_h มีค่าเท่ากับศูนย์

5.2 ขั้นตอนการทดสอบ Suction-monitored Unconfined Compression Test (S – UC)

ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่ทำการทดสอบเป็นตัวอย่างคงสภาพ (Undisturbed Sample) ทำการขุดเจาะโดยใช้กระบอกเปลือกบางจากคลองระบายน้ำสุวรรณภูมิ ความลึก 1 – 4 เมตร โดยตัวอย่างดินถูกห่อหุ้มด้วยพาราฟินจุดหลอมเหลวต่ำเพื่อเก็บรักษาความชื้นอย่างดีที่สุดก่อนการทดสอบ สำหรับขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาพารามิเตอร์ ϕ' และ c' นั้นเช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) ซึ่งมีการเหนี่ยวนำตัวอย่างดินที่หน่วยแรงประสิทธิผลแตกต่างกัน และกระทำโดยเปลี่ยนแปลงการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างที่ แรงดันด้านข้าง Effective consolidation stress, σ'_c แตกต่างกัน. สำหรับการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขต (Unconfined Compression Test) ที่เสนอขึ้นนี้ มีวิธีการเปลี่ยนแปลง Effective stress ของตัวอย่างดินโดยเพิ่มหรือลดแรงดึงดูดระหว่างเม็ดดิน (Suction) หรือแรงดันน้ำด้านลบ ด้วยการทำให้ตัวอย่างดินแห้งหรือเปียกอย่างช้าๆนั่นเอง

อนึ่ง ลักษณะการเปลี่ยนแปลง Effective stress ด้วยการเพิ่มแรงดูด Suction ในตัวอย่างดินที่เสนอขึ้นนั้น Cunningham et al. (2001) ได้ทำการวิจัยกับดินเหนียวปนทรายแป้งที่อิ่มตัวด้วยน้ำ พบว่ามีผลเช่นเดียวกับการเพิ่มหน่วยแรงประสิทธิผลโดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัดสามแกน ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Effective stress ที่ดัดแปลงเพิ่มเติมโดย Bishop (1959) ดังแสดงในสมการที่ 5

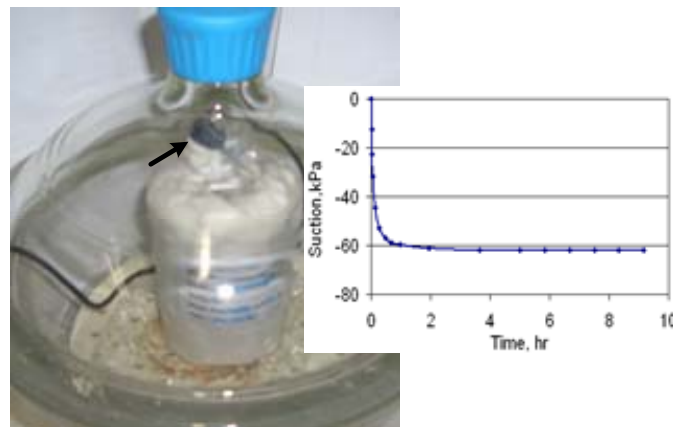
$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \chi(u_a - u_w) \quad (5)$$

โดยค่า χ factor จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อดินอยู่ในสถานะอิ่มตัวหรือใกล้อิ่มตัว ($S_r > 95\%$) และสมการที่ 5 จะมีค่าเท่ากับ $\sigma' = (\sigma - u_w)$ หรือสมการดั้งเดิมของ effective stress นั่นเอง

สำหรับขั้นตอนการทดสอบในงานวิจัยนี้มีดังนี้ (1) ติดตั้ง KU-Tensiometer ลึกลงไปในดินตัวอย่างประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้แน่ใจว่าผิวเซรามิกสัมผัสกับเนื้อดินอย่างดี และรอจนค่าแรงดูดของดินตัวอย่างคงที่ (รูปที่ 6) ในการทดสอบนี้จะเรียกค่าดังกล่าวว่าแรงดูดเริ่มต้น Initial suction

(2) สำหรับกรณีที่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดึงดูระหว่างเม็ดดิน ดังได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มความชื้นโดยการพรมไอน้ำบนตัวอย่างดิน หรือลดความชื้นโดยการตากตัวอย่างอย่างช้าๆ ซึ่งมีผลให้ค่าแรงดูดระหว่างเม็ดดินเปลี่ยนแปลง ข้อสำคัญคือขบวนการนี้ต้องทำอย่างช้าๆ และทำการบันทึกค่าแรงดูดไปด้วยในระหว่างกระบวนการ เนื่องจากดินเหนียวมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่ำ เพื่อให้ดินทั้งตัวอย่างมีแรงดูดน้ำที่สม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อการกระจายของแรงดันน้ำระหว่างทำการเฉือน

(3) เมื่อได้ตัวอย่างดินที่มีค่าแรงดูด (หรือ Effective stress) แตกต่างกัน จึงทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับการทดสอบแรงอัดแบบไร้ขอบเขต แตกต่างกันที่ระหว่างทำการเฉือนนั้นจะต้องมีการบันทึกค่าแรงดูดของดินตัวอย่าง โดยการติดตั้ง KU-Tensiometer ไว้ด้านบนของตัวอย่าง (รูปที่ 7) ในการทดสอบนี้ส่วนใหญ่ใช้อัตราการกดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อนาที และ 0.5, 2.0 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้กับตัวอย่างที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



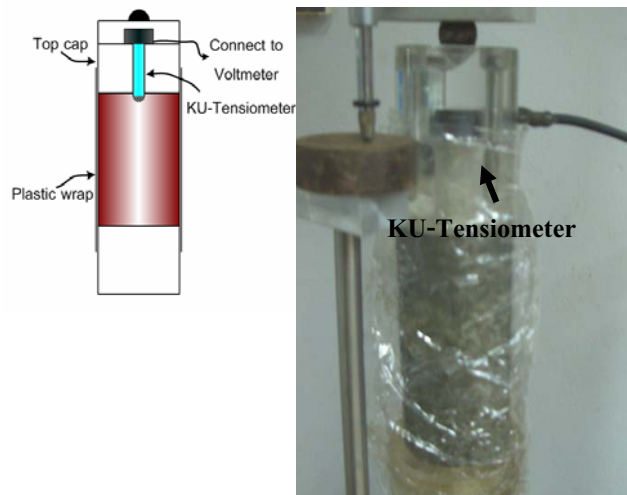
รูปที่ 6 การทดสอบวัดแรงดูดของตัวอย่างดินโดย KU-Tensiometer (วสัน และ อภินิติ, 2551)

5.3 ผลการทดสอบ Suction-monitored Unconfined Compression Test (S – UC)

การทดสอบ Unconfined compression test เป็นการทดสอบที่เรียกว่า Quick test ซึ่งมีสมมุติฐานที่ว่า ระหว่างการทดสอบค่าความชื้นของดินตัวอย่างไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อมีผล

ของหน่วยแรงกระทำจะทำให้ความดันน้ำ (Pore Water Pressure) และแรงดูดของดินตัวอย่างเปลี่ยนแปลงไป เช่นเดียวกับกรณีกดอัดแบบไม่ระบายน้ำ Undrained loading

สำหรับอัตราการกดที่เหมาะสมในการทดสอบครั้งนี้เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรต่อวินาที เนื่องจากระหว่างการเลื่อนตัวอย่างการกระจายตัวของแรงดันน้ำสม่ำเสมอทั้งตัวอย่าง (ตัวอย่างที่ 1 และ 2 ระหว่างการเลื่อนพบว่า การกระจายตัวของแรงดันน้ำอาจไม่สม่ำเสมอทั้งตัวอย่าง) ดังสรุปในตารางที่ 1



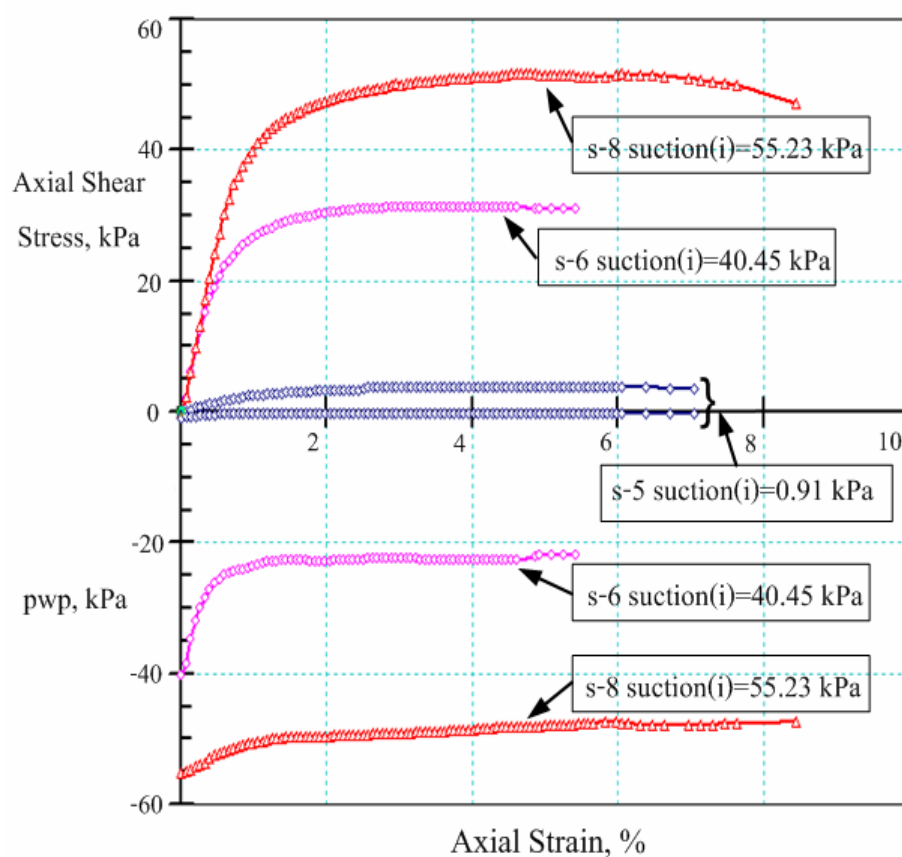
รูปที่ 7 การติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ S – UC – Test (วสัน และ อภินิติ, 2551)

จากการทดสอบนี้เห็นได้ว่าเมื่อค่าแรงดูด (หรือ Effective Stress) ของดินแตกต่างกัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนแตกต่างกันด้วยคือ เมื่อค่าแรงดูด (Suction) ของดินเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นตาม โดยระหว่างการเลื่อนนั้นค่าแรงดูดของดินตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรก (แรงดันน้ำเพิ่มขึ้น) แล้วจะเริ่มคงที่ ($\Delta u = 0$) เมื่อถึงจุด Critical state ดังแสดงในรูปที่ 8

ในการวิเคราะห์ทางเดินของหน่วยแรงประสิทธิผล (Effective Stress Path) และวิเคราะห์หาเส้นขอบเขตการวิบัติ นั้นตั้งอยู่บนเงื่อนไขว่าดินที่ทดสอบจะต้องอิ่มตัวด้วยน้ำหรือใกล้เคียง (Sr. >95%) เพื่อให้หลักการของ Effective stress สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงของดิน (Cunningham et al., 2003). จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่า Degree of saturation ที่ใกล้เคียงตัว (>95%) จากรูปที่ 9 สามารถบอกถึงลักษณะพฤติกรรมของดินได้คือ S – 4, S – 6, S – 7 เป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นปกติ (NC – Clay) และ S – 3, S – 8 เป็นดินเหนียวที่มีสภาพอัดแน่นเกินตัว (OC – Clay) ส่วนใน S – 1, S – 2, S – 5 ไม่สามารถบอกได้ชัดเจนเนื่องจากแรงดูดของดิน (Suction) ในการทดสอบมีค่าที่ต่ำ

ตารางที่ 1 ตารางสรุปผลการทดสอบ Suction-monitored Unconfined Compression Test

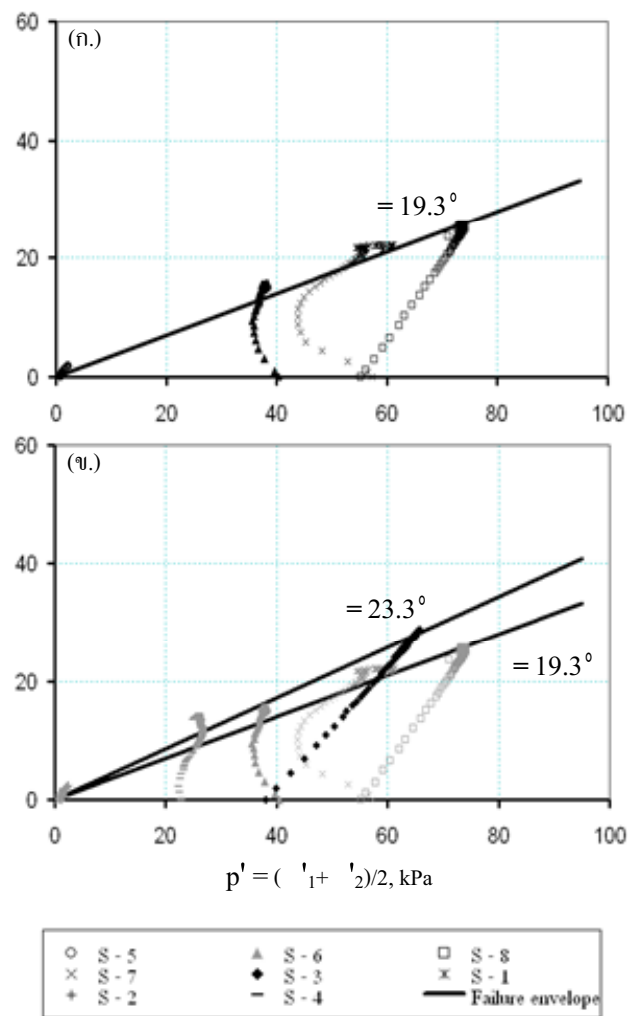
Sample	Depth (m.)	Rate mm/min	w (initial) (%)	Suction (initial) kPa.	w (final) (%)	Sr (%)
1	3.5-4.0	0.5	114.18	0.68	108.44	95.54
2	3.5-4.0	2	120.47	1.14	117.24	98.00
3	0.5-1.0	0.1	56.88	37.95	54.88	98.53
4	3.5-4.0	0.1	95.07	22.27	89.70	95.70
5	2.5-3.0	0.1	123.84	0.91	120.87	96.90
6	2.5-3.0	0.1	67.85	40.45	67.43	95.15
7	2.0-2.5	0.1	78.24	57.27	76.65	97.08
8	2.5-3.0	0.1	73.22	55.23	70.31	97.59



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแนวแกนและแรงดันน้ำกับ ความเครียดจากการทดสอบ S-UC-Test (ความลึก 2.5-3.0 เมตร) (วสัน และ อภินิติ. 2551)

จากงานวิจัยนี้ศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้เท่ากับ $c' = 0, \phi' = 20.5^\circ$ (ตารางที่ 2) ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องจากการทดสอบแรงอัดสามแกน (Manoon, 1969) กับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ที่ความลึกประมาณ 1 – 5 เมตร จากบริเวณรังสิต ปทุมธานี ซึ่งได้ค่า $c' = 0, \phi' = 17.2 - 21.9^\circ$

จากตัวอย่าง S – 3 (รูปที่ 9 (ข.)) เป็นดินเหนียวที่มีสภาพอันแน่นเกินตัว (OC – Clay) และมีค่ากำลังรับแรงเฉือนสูงเนื่องจากเป็นดินตัวอย่างบริเวณ Crust zone (1-2 เมตร) ได้ค่า $c' = 0, \phi' = 25.5^\circ$ สำหรับช่วงความลึก 3.5 – 4.0 เมตร (ตัวอย่าง S – 1, S – 2, S – 4) ค่า Initial suction ของตัวอย่างดินอยู่ในช่วง 0 – 22.27 kPa. เท่านั้น จึงอาจยังไม่ครอบคลุมเท่าที่ควรแต่พอที่จะสรุปค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 9 กราฟแสดงทางเดินและเส้นขอบเขตการวิบัติในรูปหน่วยแรง ประสิทธิภาพของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ จากการทดสอบ S-UC- Test (ก.) ความลึก 2.0 – 3.0 เมตร (ข.) ความลึก 0.5 – 4.0 เมตร (วสัน และ อภินิติ. 2551)

ตารางที่ 2 ตารางสรุปค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนในรูปหน่วยแรงประสิทธิภาพ จากการทดสอบ S -UC – Test

Depth m	At Ultimate State			
	Stress Path		Mohr – Coulomb	
	Parameter		Parameter	
	$a'^{(1)}$	$\alpha'^{(2)}$	$c'^{(1)}$	$\phi'^{(2)}$
2.0-3.0	0	19.3	0	20.5
3.5-4.0	0	23.3	0	25.5

¹ a' , c' : kPa

² α' , ϕ' : Degrees

จะเห็นได้ว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนประสิทธิภาพที่ได้จากการศึกษานั้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตซึ่งใช้วิธีการทดสอบแบบสามแกน Triaxial test และเนื่องจากการทดสอบ Unconfined Compression Test นับเป็นการทดสอบที่ง่าย และนิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย วิธีการนี้จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าอย่างมากให้กับการทดสอบ UC – Test สำหรับดินเหนียวอ่อนในช่วงค่า Effective stress เท่ากับ 0 ถึง 100 kPa.

6. การทดสอบเฉือนตรงชนิดวัดแรงดูด (Suction-monitored direct shear test)

ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินไม่อิ่มตัวนั้นได้เป็นที่สนใจของนักวิจัยหลายท่านเป็นระยะเวลานาน อาทิ Bishop et al., 1960, Fredlund, & Rahardjo, 1993 โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน หน่วยแรงตั้งฉาก และแรงดูด เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อไปใช้ในการวิเคราะห์ดินถล่มเนื่องจากฝนตก (อาทิ Cho & Lee, 2002, Collins & Znidarcic, 2004, and Rahardjo et al., 2007) ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดูดนี้ยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพสำหรับลาดดินในเขตร้อนซึ่งมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ค่อนข้างลึกทำให้ดินมักจะอยู่ในสภาวะไม่อิ่มตัวและแรงดันน้ำเป็นค่าติดลบ

โดยทั่วไปการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังรับแรงเฉือน หน่วยแรงตั้งฉาก และแรงดูด จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษซึ่งสามารถควบคุมหรือวัดแรงดูดของตัวอย่างระหว่างทดสอบได้ โดยอาจใช้เทคนิค axis-translation หรือ osmotic (อาทิ Gan & Fredlund, 1996 and Delage et al., 2008) และใช้เครื่องมือที่ค่อนข้างซับซ้อนซึ่งอาจจะหาได้ยากหรือราคาแพงในห้องปฏิบัติการทางปฐพีกลศาสตร์ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนาซึ่งมักประสบ

ปัญหาดินถล่มเนื่องจากฝนตก ด้วยเหตุผลดังกล่าว การศึกษาด้านดินไม่อุ้มน้ำในระดับนานาชาติจึงมักจะมีช่องว่างระหว่างงานวิจัยกับภาคปฏิบัติของงานวิศวกรรมอยู่มาก

ในงานวิจัยส่วนนี้ ได้มุ่งแก้ปัญหาดังกล่าวโดย การประยุกต์ KU-Tensiometer เพื่อใช้งานกับเครื่องมือทดสอบเฉือนตรง (Directshear box) ระบบการทดสอบใหม่ซึ่งพัฒนาขึ้นใหม่นี้ยังมีการจำลองสภาพของแรงดูดที่ใกล้เคียงกับสภาพในสนามได้มากกว่าระบบ axistranlation เนื่องจากไม่มีการเพิ่มค่าแรงดันของอากาศ u_a อันจะเป็นการทำให้สภาพไม่ตรงกับความเป็นจริงซึ่งมีค่าแรงดันอากาศเท่ากับศูนย์. และยังเป็นระบบการทดสอบที่สามารถพัฒนาขึ้นได้เองในประเทศไทย และสามารถเผยแพร่สู่ระดับนานาชาติได้อีกด้วย

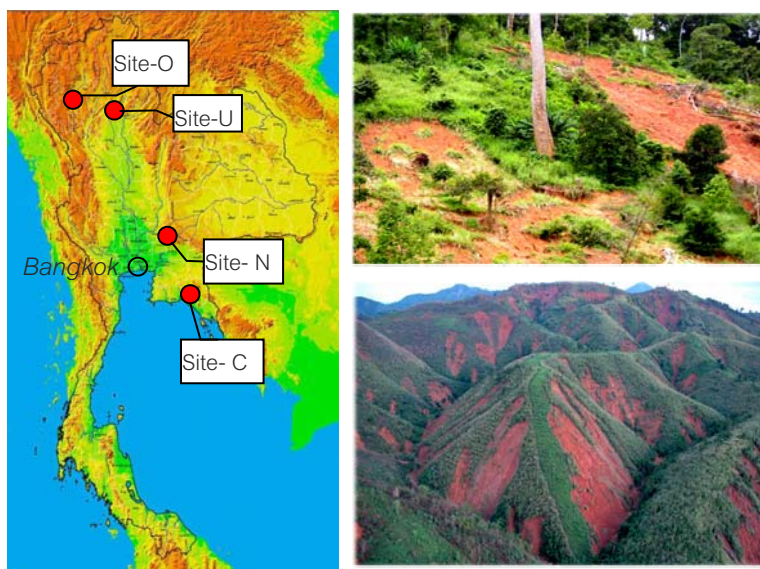
6.1 วัสดุซึ่งทำการทดสอบ

ตัวอย่างดินซึ่งทำการทดสอบในงานวิจัยนี้ได้นำมาจากการศึกษาในโครงการอื่นๆ ที่ทางมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และหัวหน้าโครงการวิจัยได้เข้าไปมีส่วนร่วม (อาทิ กรมทรัพยากรน้ำ, 2551, อภินิติ และวิญญพงศ์, 2551, Jotisankasa et al., 2008 and Jotisankasa & Vathananukij, 2008) และทั้งหมดเป็นโครงการซึ่งศึกษาปัญหาด้านดินถล่มในหลากหลายจังหวัดทั่วประเทศไทย โดยโครงการวิจัยนี้ได้คัดเลือกพื้นที่เก็บตัวอย่าง 4 พื้นที่ด้วยกัน (รูปที่ 10) ได้แก่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์ (U), อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่ (O), อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี (C) และ เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก (N). โดยตัวอักษรย่อภาษาอังกฤษในวงเล็บจะใช้เป็นเครื่องหมายอ้างอิงต่อไปเมื่อนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบกราฟ

ทั้งสี่พื้นที่ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างมานี้เคยประสบภัยน้ำป่าไหลหลากและดินถล่มมาในอดีต โดยเป็นลักษณะของการพังทลายระดับตื้น (1-2 เมตร) ซึ่งเกิดขึ้นบ่อยครั้งในประเทศไทยและมีระดับความเสียหายค่อนข้างรุนแรง ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่ จ.จันทบุรี (C) เป็นหินแกรนิตเนื้อหยาบในยุคไทรแอสซิก สำหรับหินในพื้นที่ อมก๋อย (O) เป็นหินแกรนิตเนื้อละเอียดจากยุคคาร์บอนิเฟอรัส พื้นที่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์ (U) เป็นหินตะกอนยุคคาร์บอนิเฟอรัส-เพอร์เมียน ประกอบไปด้วยหินทรายแป้ง หินโคลน และ shale ซึ่งแสดงลักษณะการคดโค้งเนื่องจากกระบวนการทาง tectonic อย่างชัดเจน. สำหรับดินในพื้นที่เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก (N) เป็นดินจากหินภูเขาไฟในยุคเพอร์โม-ไทรแอสซิก ได้แก่ หิน rhyolite, andesite, tuffs และ agglomerate โดยสภาพแวดล้อมทางภูเขาไฟได้ทำให้ลักษณะทางธรณีวิทยาในพื้นที่จำแนกได้ยากและมีความไม่สม่ำเสมอเป็นอย่างมาก

ดินตัวอย่าง”คงสภาพ”จากทั้งสี่พื้นที่ได้ถูกเก็บมาโดยการตอกกระบอกเปลือกบางซึ่งมีกระบอก PVC ภายใน (นงลักษณ์, 2547, วรากร และคณะ, 2550) ที่ความลึก 0.5 ถึง 1 เมตร รวมถึงดินตัวอย่างถูกรบกวนซึ่งเก็บไปเพื่อทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 ดินทั้งหมดจำแนกได้เป็นพวกดินทรายแป้งปนดินเหนียวมีค่าพลาสติกต่ำถึงปานกลาง ดิน

เหนียวในทราย และดินทรายปนทรายแป้ง ดินตัวอย่างทั้งหมดถูกเก็บจากลาดดินความชันปานกลาง (10° - 24°) ภายนอกบริเวณซึ่งเกิดการถล่ม ยกเว้นดินนครนายก (N) ซึ่งเก็บมาจากบริเวณลาดดินซึ่งเคยถล่มมาในอดีตเมื่อปี 2547 และถูกปรับความลาดชันให้น้อยลง ดินนครนายกจึงถือว่าเป็นดินบดอัดแบบหลวมๆ ซึ่งโครงสร้างเดิมของ residual soil ถูกรบกวน



รูปที่ 10 ตำแหน่งของพื้นที่ศึกษาซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่าง และภาพจากพื้นที่ซึ่งเคยเกิดดินถล่ม จังหวัดอุตรดิตถ์ (U), ภาพจาก Asian Disaster Preparedness Center (2006)

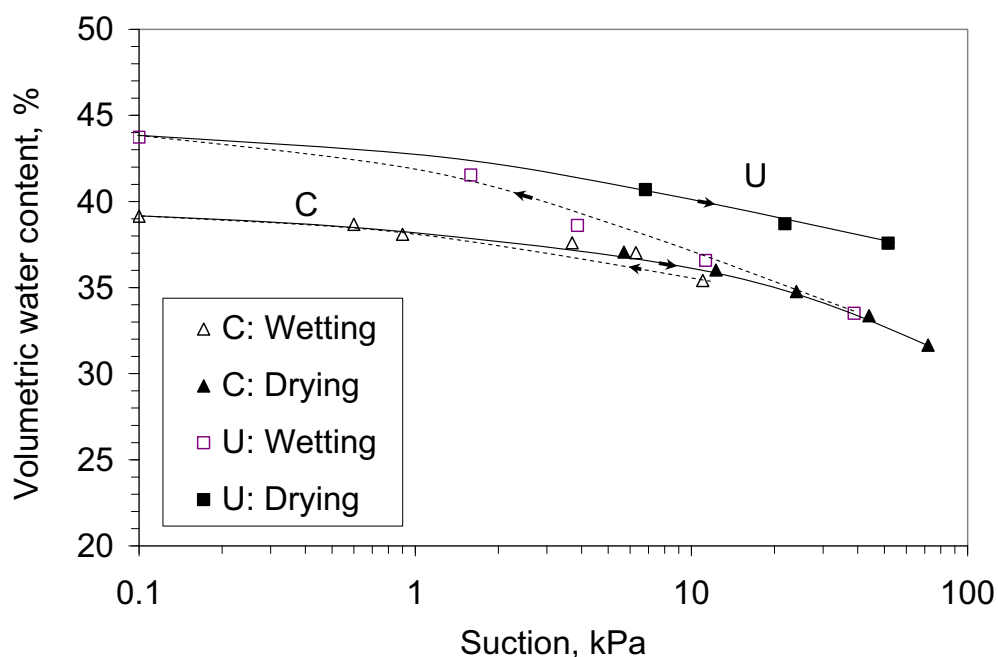
Site Location	Parent Rock	Liquid Limit	Plasticity Index	% gravel	% sand	% silt	% clay	Soil Type
C Chantaburi	Granite	41-48	5-12	2	53.2-55.4	22.9-26.5	16.0-22.7	Silty sand SM
N Nakornnayok	Volcanic	46-51	6-18	0.5-5.5	13.7-18.9	38.9-53.9	31.9-36.7	Silts MH/ ML
O Omko	Granite	47.3	15.4	1.0	45.1	16.1	37.8	Sandy clay CL
U Uttaradit	Siltstone/ mudstone	41.6	20.2	14.2	26.5	36.9	22.3	Sandy silt ML

ตารางที่ 3 คุณสมบัติพื้นฐานของดิน residual soils ที่ทดสอบ

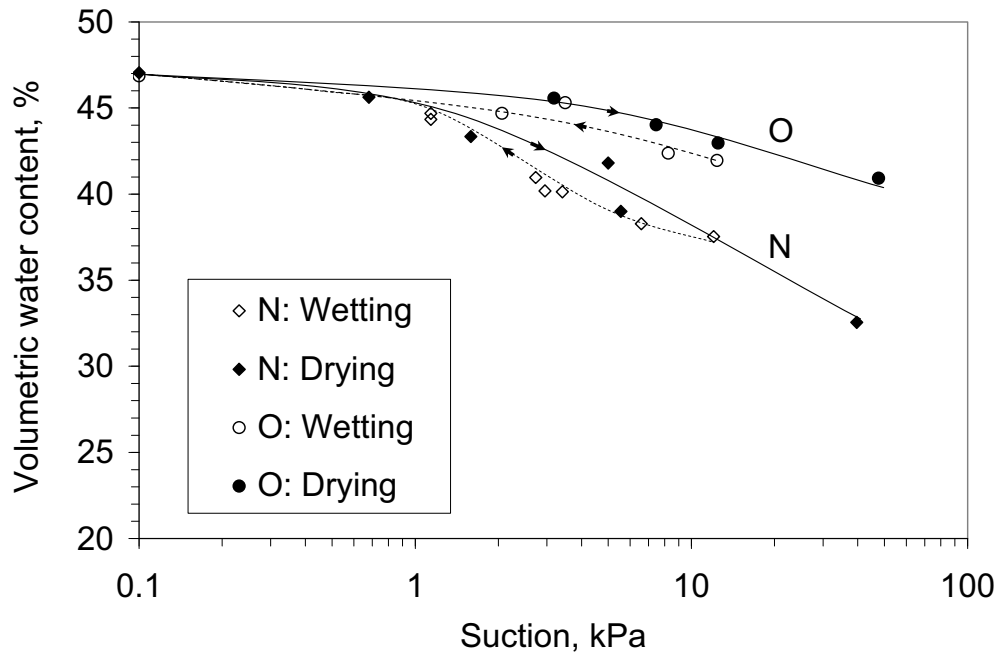
ลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นโดยปริมาตรและแรงคูดสำหรับดินที่ทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 11 การทดสอบเส้นอัตราคณณเป็นการตรวจวัดปริมาณความชื้นและแรงคูดของดิน

ขณะที่กำลังค่อยๆ แห้ง หรือกำลังค่อยๆเปียกโดยใช้ KU-tensiometer ดังได้กล่าวมาแล้ว ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากการวัดแรงดูดของตัวอย่างดินในสถานะที่ได้เก็บมาจากพื้นที่ หลังจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มน้ำกับตัวอย่างดิน โดยใช้สเปร์ย์ฝอยเล็กน้อยโดยตรงที่ผิวของตัวอย่างดินหรือนำตัวอย่างดินบรรจุไว้ในกล่องปิดใกล้เครื่องทำหมอกเพื่อให้ตัวอย่างดินมีความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อเพิ่มความชื้นได้ในแต่ละครั้งจะทำการวัดแรงดูดจนถึงสมดุลและชั่งน้ำหนักพร้อมวัดส่วนสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อไว้ใช้คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในภายหลัง. หลังจากตัวอย่างดินมีค่าแรงดูดต่ำกว่า 1 kPa จะนำตัวอย่างดินแช่น้ำโดยมีน้ำหนักกดทับโดยประมาณ 1 kPa ทิ้งอยู่เพื่อป้องกันการแตกตัวของตัวอย่าง ภายหลังแช่น้ำเป็นระยะเวลาประมาณ 5 วันจะนำตัวอย่างดินออกมาแล้วจึงชั่งน้ำหนักพร้อมวัดส่วนสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่สถานะแรงดูดเท่ากับ 0 (จะพล็อตเป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่แรงดูดเท่ากับ 0.1 kPa ในกราฟ log scale)

หลังจากนั้นจะเริ่มการทดสอบช่วงแห้ง (Drying) โดยจะนำตัวอย่างดินผึ่งอากาศทิ้งไว้เพื่อให้ปริมาณความชื้นลดลงประมาณ 1% แล้วจึงนำตัวอย่างดินปิดผนึกเพื่อให้ความชื้นกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งตัวอย่างประมาณ 1 คืน แล้วจึงวัดแรงดูด จนถึงสมดุลและชั่งน้ำหนักพร้อมวัดส่วนสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางเพื่อไว้ใช้คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นในภายหลัง. กระทำอย่างนี้ซ้ำไปจนมีค่าแรงดูดถึง 100 kPa จึงนำตัวอย่างเข้าเตาอบเพื่อหาน้ำหนักแห้งและหาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างดินในแต่ละทุกช่วงการทดสอบ. จากผลการทดสอบในรูปที่ 11 พบว่า ค่าแรงดูดที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างดิน (Air-entry suction) มีค่าค่อนข้างต่ำ ประมาณ 0-1 kPa ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงขนาดและการเรียงตัวของช่องว่างขนาดใหญ่ในเม็ดดิน



รูปที่ 11 ก)

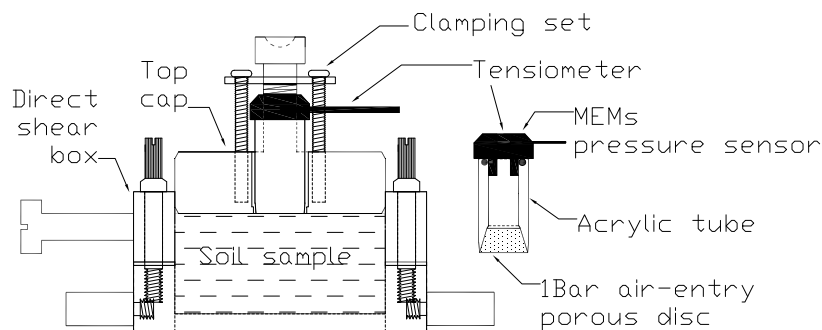


ข)

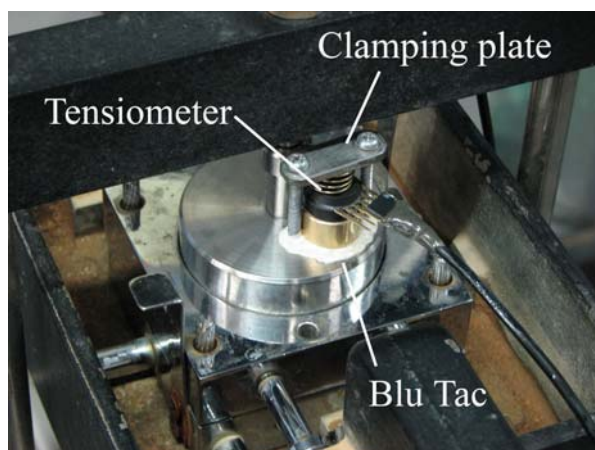
รูปที่ 11 เส้นออตคลักซ์สำหรับดินตัวอย่าง ก) จันทบุรี (C) และอุตรดิตถ์ (U) ข) นครนายก (N) และอมก๋อย เชียงใหม่ (O)

6.2 การทดสอบแรงเฉือนตรงชนิดวัดแรงดูด

รูปที่ 12 และ 13 แสดงลักษณะของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนตรงซึ่งดัดแปลงสำหรับวัดแรงดูดของตัวอย่าง ผ่านทางช่องเปิดของฝาครอบด้านบนด้วยเทนซิโอมิเตอร์ ทั้งนี้เทนซิโอมิเตอร์จะถูกยึดด้วยแผ่นเหล็กและสกรู อนึ่งวิธีการทดสอบนี้คล้ายคลึงกับวิธีที่เสนอขึ้นโดย Tarantino & Tombolato (2005) and Jotisankasa et al. (2007b) โดยมีความแตกต่างที่สำคัญคือ KU-Tensiometer ที่ใช้ในโครงการนี้มีความสามารถในการวัดแรงดูดตั้งแต่ 0 ถึง 80 kPa ซึ่งต่ำกว่าเทนซิโอมิเตอร์ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวไว้



รูปที่ 12 แบบแสดงการติดตั้ง Tensiometer บน direct shear box



รูปที่ 13 แสดงการติดตั้ง Tensiometer บน direct shear box

ตารางที่ 4 โปรแกรมการทดสอบสำหรับพื้นที่ อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่

Test no.	Initial suction kPa	Initial S_r , %	w % * during shearing	Initial void ratio	Vertical stress during shearing (kPa)
O-2	Soaked	~100%	-	0.700	31
O-14	Soaked	~100%	-	0.801	15.5/31/62 (multistage)
O-1	2	89.1	26.9	0.802	31
O-7	11	90.0	28.4	0.837	31
O-11	18	83.4	25.2	0.801	31
O-9	50	81.7	26.2	0.843	31
O-0	77	81.7	22.9	0.742	31
O-13	62	66.8	21.7	0.874	15.5/31/62 (multistage)
O-16	32	82.8	23.6	0.754	15.5/31/62 (multistage)

* w = gravimetric water content

นอกจากนั้นแล้วอุปกรณ์ทดสอบกำลังเงื่อนไขตรงที่ใช้ในโครงการนี้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานที่สามารถหาได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรมปฐพี และเพื่อให้สามารถรักษาปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักของตัวอย่างดินในระหว่างการทดสอบให้คงที่ จะต้องทำการคลุมตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกและผ้าชุบน้ำหมาดๆ เพื่อให้ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าสูงและดินไม่เกิดการระเหยระหว่างทดสอบ ด้วยวิธีการนี้ ปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักของดินก่อนและหลังทดสอบมีค่าที่ใกล้เคียงกันอย่างมาก (แตกต่างกันน้อยกว่า 0-0.25%) สำหรับช่วงการทดสอบประมาณ 8-10 ชั่วโมง. นอกจากนั้น

ยังต้องใช้ Blu Tac ปิดช่องว่างระหว่างเทนซิโอมิเตอร์และ ฝาปิด (Top cap) เพื่อป้องกันการระเหย เฉพาะจุดและป้องกันความคลาดเคลื่อนในค่าแรงดูดที่อ่านได้

6.3 โปรแกรมการทดสอบ

ตารางที่ 4 แสดงโปรแกรมการทดสอบสำหรับตัวอย่างดินจากพื้นที่ อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่ ทั้งนี้ การทดสอบสำหรับดินจากพื้นที่อื่นจะมีลักษณะคล้ายกับในตารางที่ 4 นี้ โดยการทดสอบกลุ่มแรกจะประกอบไปด้วยการเงื่อนไขแบบ Consolidated-Drained (Slow) กับตัวอย่างดินแซ่ (O-2, O-14) โดยจะทดสอบทั้งชนิดแบบ Single stage และ multi-stage ที่กำหนดแรงตั้งฉากสามค่าด้วยกัน ได้แก่ 15.5, 31, 62 kPa ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับน้ำหนักกดทับในสนาม และใช้วิธีการทดสอบเงื่อนไขแบบมาตรฐาน สำหรับการทดสอบที่เหลือสำหรับดินไม่อิ่มน้ำหรือดินที่มีค่าแรงดูดมากกว่า ศูนย์จะใช้อุปกรณ์เงื่อนไขแบบดัดแปลงดังได้กล่าวมาแล้ว โดยในแต่ละการทดสอบจะทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำของตัวอย่างดินโดยวิธีการตากอากาศหรือสเปรย์น้ำที่ผิวของตัวอย่างเพื่อเพิ่มหรือลดแรงดูดในดินจนได้ค่าที่ต้องการ (initial suction ในตารางที่ 4) หลังจากนั้นจึงทำการเงื่อนไขตัวอย่างโดยตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ซึ่งทำให้สามารถประมาณค่าระดับการอิ่มตัว

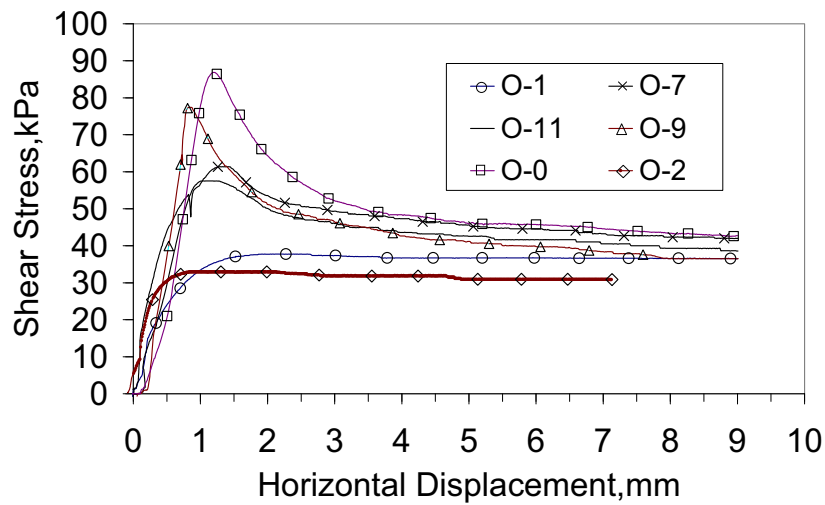
$$(S_r = \frac{V_w}{V_v}) \text{ ได้}$$

สำหรับการทดสอบดินไม่อิ่มตัวนั้น ได้ใช้วิธีทดสอบทั้งแบบ Single และ แบบ multi-stage ในระหว่างการเงื่อนไข เพื่อเป็นการประเมินความแตกต่างของพฤติกรรมกำลังรับแรงเงื่อนไขจากวิธีทดสอบทั้ง 2 วิธี โดยวิธีทดสอบแบบ Multistage เป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบดินไม่อิ่มน้ำ residual soil (อาทิ Ho & Fredlund, 1982) เพื่อให้ได้ข้อมูลมากที่สุดเท่าที่จะมากได้จากจำนวนตัวอย่างที่จำกัด และยังเป็นผลลดผลกระทบจากไม่สม่ำเสมอของดินในพื้นที่ด้วย อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้ได้รับการวิพากษ์วิจารณ์ว่าจะก่อให้เกิดการรบกวนโครงสร้างของดินในช่วงการเงื่อนไขใน stage 2-3 และจะให้ค่า กำลังที่จุด peak ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบแบบ single stage

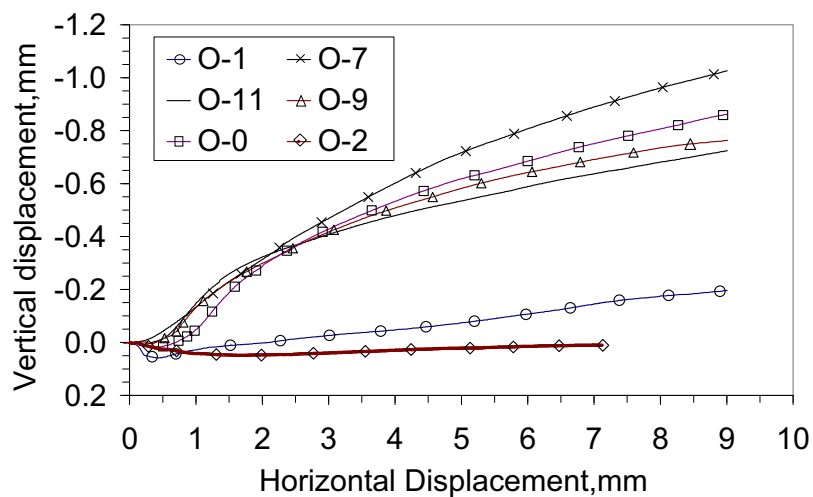
ในระหว่างการทดสอบ อัตราการเงื่อนไขตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 0.1 มม/นาท โดยในการทดสอบจะต้องช้าพอที่ค่าแรงดันน้ำหรือแรงดูดซึ่งวัดที่ด้านบนของตัวอย่าง (ดูรูปที่ 12, 13) มีค่าเท่ากับค่าแรงดูดเฉลี่ยของทั้งตัวอย่าง การประเมินความสมดุลของแรงดูดในตัวอย่างนี้ทำได้โดยที่ ระหว่างเงื่อนไขตัวอย่างให้หยุดการเงื่อนไขลงชั่วคราว (ประมาณ 30-45 นาที) แล้วคอยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงดูด ถ้ามีค่าไม่เปลี่ยนแปลงไปมากเกินไป 10% จะถือว่าแรงดูดที่วัดนั้นค่อนข้างจะเป็นค่าที่สม่ำเสมอทั้งตัวอย่าง.

ลักษณะของตัวอย่างที่ทดสอบเป็นรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 63 มม. ความสูง 31 มม. โดยมีขนาดของอนุภาคเม็ดดินที่ใหญ่ที่สุดของตัวอย่างดินจากพื้นที่ C, N และ O

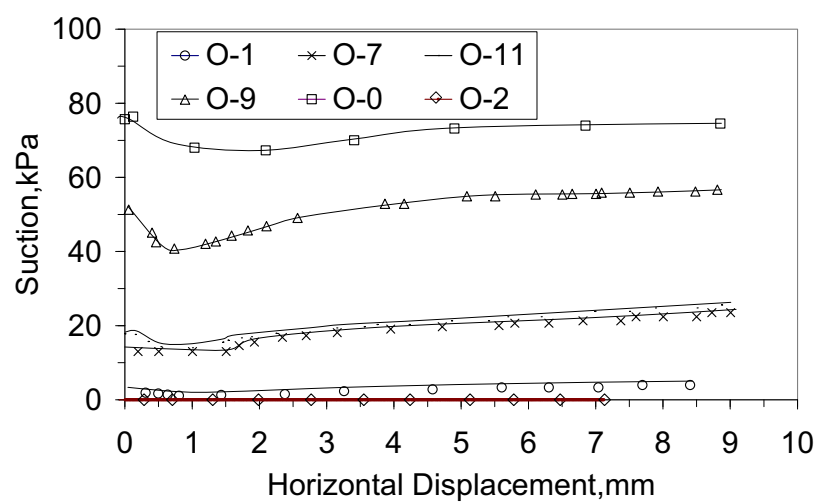
ประมาณเท่ากับ 1/6 เท่าของความหนาตัวอย่าง แต่ สำหรับพื้นที่อุตรดิตถ์ (U) จะมีขนาดประมาณ ¼ เท่า



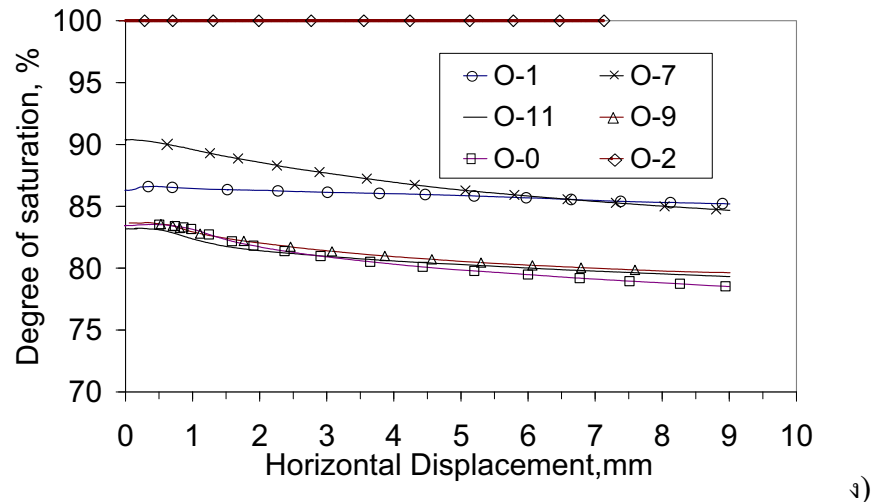
รูปที่ 14 ก)



ข)



ค)



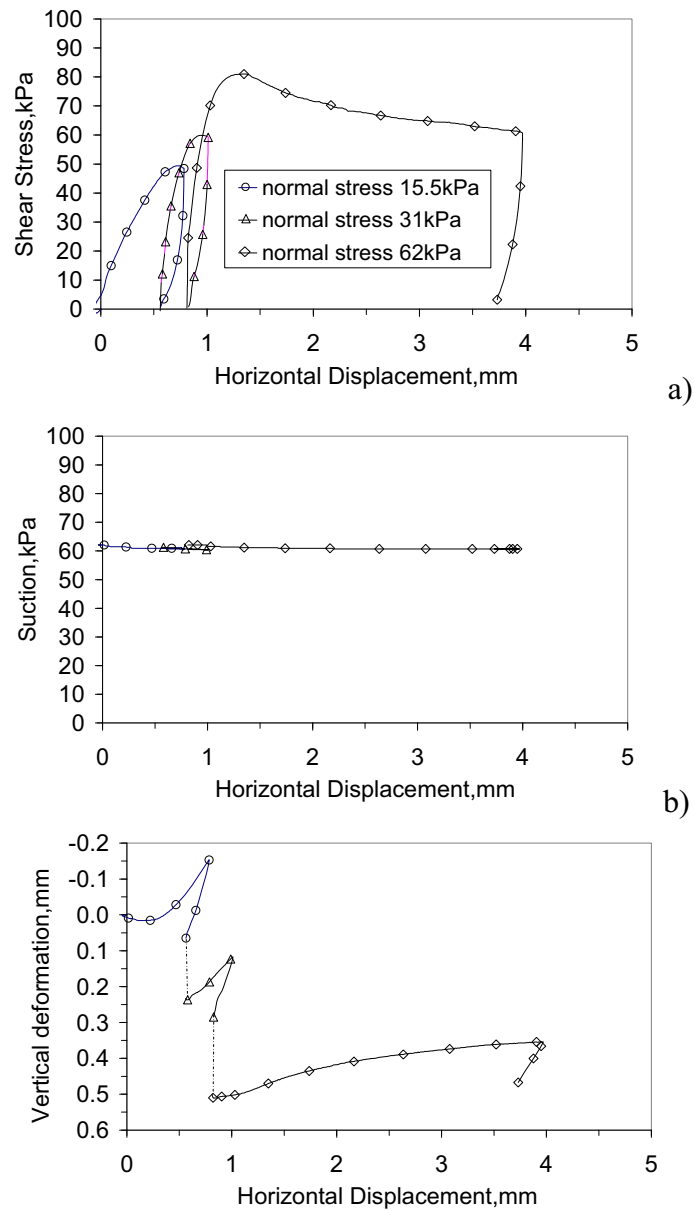
รูปที่ 14 ลักษณะของผลทดสอบสำหรับการเลื่อนแบบ single stage ของดินไม่อิ่มตัว (พื้นที่อิ่มตัว O)

6.4 พฤติกรรมการเลื่อนดินไม่อิ่มตัว

รูปที่ 14 แสดงผลการทดสอบการเลื่อนแบบ single stage สำหรับดินไม่อิ่มตัวจากพื้นที่อิ่มตัว ก้อย เชียงใหม่ ที่ค่าหน่วยน้ำหนักกดทับ 31 kPa ทุกตัวอย่างถูกเลื่อนที่ความชื้นโดยน้ำหนักและแรงกดต่างกัน โดยระหว่างเลื่อนแต่ละตัวอย่างจะไม่ยอมให้มีการระเหยจากตัวอย่างดิน (น้ำหนักคงที่) จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าตัวอย่างซึ่งมีค่าแรงกดที่สูงกว่า (O-0, O-9) แสดงพฤติกรรมเปราะหรือ strain-softening อย่างชัดเจน โดยกำลังรับแรงเลื่อนจะมีค่าลดลงหลังจากถึงจุดสูงสุด (peak) โดยมีค่าลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อถึงจุดสุดท้าย (ultimate) และเมื่อเริ่มต้นเลื่อนตัวอย่างปริมาตรของตัวอย่างและแรงกดมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อย ต่อเมื่อตัวอย่างเริ่มเกิดการขยายตัว (dilate) ในขณะที่หน่วยแรงเลื่อนเพิ่มขึ้นเข้าสู่จุด peak แรงกดจึงเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับความอิ่มน้ำ S_r พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย (~5%) เนื่องจากการพองตัวของตัวอย่างที่ค่า gravimetric water content, w เท่าเดิม สำหรับตัวอย่างซึ่งมีค่าแรงกดเท่ากับศูนย์ และ 2 kPa พบว่ามีลักษณะการเลื่อนแบบยุบตัว (Contractant) และไม่พบการลดลงของแรงเลื่อนหลังจากขึ้นถึงจุดสูงสุด (peak)

คำอธิบายสำหรับพฤติกรรมการเลื่อนเช่นนี้อาจพูดได้ว่าตัวอย่างดินซึ่งมีแรงกดมากกว่าจะมีการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดินเนื่องจากน้ำผิวโค้ง (water menisci) ได้มากกว่า การเชื่อมประสานนี้จะถูกเอาชนะด้วยการพองตัวของดิน (dilation) ในระหว่างเลื่อน และน่าสนใจว่าแรงกดจะไม่ถูกทำลายลงจากการพองตัวนี้ แต่กลับจะมีค่าที่เพิ่มขึ้น. อาจกล่าวได้ว่าผลกระทบจากแรงกดต่อพฤติกรรมการเลื่อนมีลักษณะคล้ายกับการอัดแน่นเกินตัว (overconsolidation) หรือการเชื่อมประสานด้วยสารที่มีความเชื่อมแน่น เช่นพวก carbonate silica พฤติกรรมดังกล่าวได้มีนักวิจัยอื่นๆ อาทิ Cunningham et al., 2003, Jotisankasa, 2005 สังเกตพบในดินไม่อิ่มตัวอื่นๆ มาแล้ว. สำหรับผลการทดสอบชนิด multistage ได้แสดงไว้ในรูปที่ 15 โดยระหว่างการเลื่อนใน stage 1-2 (ค่าหน่วย

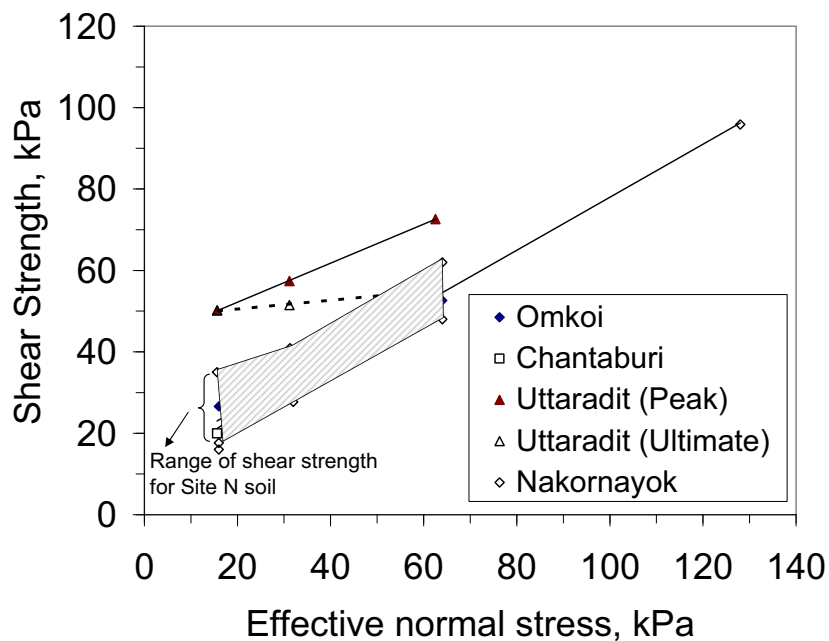
แรงตั้งฉาก 16 และ 31 kPa) ตัวอย่างดินจะไม่ถูกเฉือนมากจนเลยจุดสูงสุดและอาจยอมให้หน่วยแรงเฉือนลดลงหลังจากถึงจุด peak เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขั้นตอนการทดสอบดังกล่าวทำให้ตัวอย่างไม่มีการพองตัวได้มากและค่าแรงเฉือนจึงไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงเท่าใดนักในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 15 ผลการทดสอบการเฉือนชนิด multistage (O-13)

6.5 พฤติกรรมการเฉือนสำหรับดินอิมตัว

ผลการทดสอบเฉือนตรงชนิด consolidated drained ได้แสดงไว้ในรูปที่ 16 และแสดงพารามิเตอร์แรงเฉือนประสิทธิผลในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าขอบเขตการพิบัติสำหรับดินพื้นที่จันทบุรี (C) พื้นที่อมก๋อย (O) และพื้นที่นครนายก (N) มีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันมาก อนึ่งขอบเขตการพิบัติสำหรับดินนครนายกมีลักษณะที่กระจายค่อนข้างมาก ซึ่งบ่งชี้ถึงลักษณะความไม่สม่ำเสมอของดินในพื้นที่ธรณีวิทยาแบบหินภูเขาไฟ สำหรับลักษณะความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียด พบว่าดินจากพื้นที่ C, O, N มีลักษณะ strain-hardening หรือไม่มีการลดลงของกำลังหลังจากถึงจุดสูงสุด อย่างไรก็ตามสำหรับดินจากพื้นที่อุตรดิตถ์ (U) มีขอบเขตการพิบัติที่สูงกว่าดินในพื้นที่อื่นๆค่อนข้างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงการเชื่อมประสานในตัวอย่างดินที่มีมากกว่า ซึ่งเป็นลักษณะที่เห็นได้ชัดเจนว่าดินอุตรดิตถ์มีลักษณะของความเป็นหินผุอยู่มากกว่า นอกจากนั้นดินจากพื้นที่อุตรดิตถ์ยังมีการลดลงของค่ากำลังหลังจากถึงจุดสูงสุด (Strain-softening) ด้วย รูปที่ 16 จึงได้แสดงขอบเขตการพิบัติทั้งสภาวะ peak และ ultimate สำหรับดินจากพื้นที่อุตรดิตถ์



รูปที่ 16 ขอบเขตการวิบัติ (ทั้งสภาวะ peak และ ultimate) จากการทดสอบเฉือนตรง consolidated drained จากตัวอย่างน้ำทั้งสี่พื้นที่

ตารางที่ 5 สรุปค่าพารามิเตอร์กำลังรับแรงเฉือนประสิทธิภาพของตัวอย่างดิน residual soils

Site	Chantaburi	Nakornayok	Omko	Uttaradit	
				Peak	Ultimate
c' , kPa	8.7	12.8	17.6	42.8	48.4
ϕ' , degree	38.6	33.1	28.7	25.6	6.2

6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงเฉือน แรงดูด และหน่วยแรงตั้งฉาก

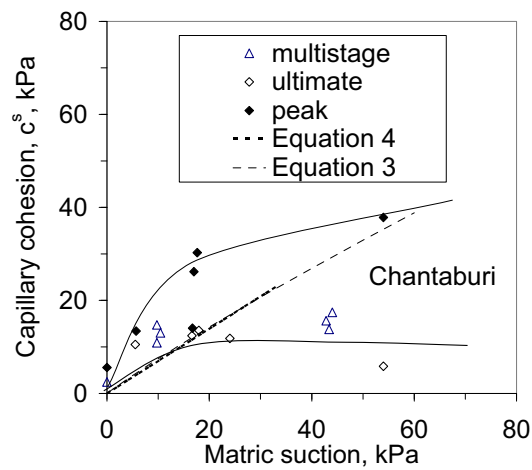
สมการความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของดินในสถานะไม่อิ่มน้ำ τ แสดงได้ดังสมการที่ 6 ด้านล่าง (Fredlund & Rahardjo, 1993)

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi^a + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (6)$$

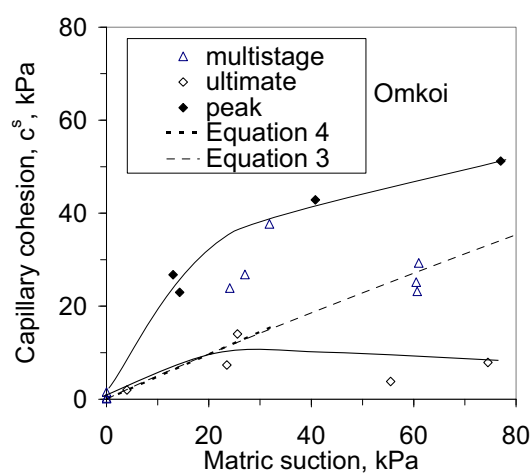
โดย c' = ความเชื่อมแน่นประสิทธิภาพ, σ = หน่วยแรงรวมตั้งฉาก, u_a = ความดันอากาศในช่องว่าง (สำหรับการทดสอบเฉือนตรงนี้ความดันอากาศเท่ากับสภาวะบรรยากาศ $u_a = 0$, u_w = แรงดันน้ำในช่องว่าง (ค่าติดลบ), ϕ^a คือมุมของกำลังเฉือนเนื่องจากหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิ $\sigma - u_a$ และ ϕ^b คือมุมของกำลังเฉือนเนื่องจากแรงดูด. โดยทั่วไปจะอนุมานว่า ϕ^a มีค่าเท่ากับมุมของกำลังเฉือนประสิทธิภาพ ϕ' ซึ่งทดสอบได้โดยวิธีมาตรฐานทั่วไปสำหรับดินอิ่มน้ำ. อนึ่ง นักวิจัยบางท่าน อาทิ Toll et al. (2008) ได้ทดสอบดินซึ่งมีการเชื่อมประสาน (cemented soil) พบว่ามุม ϕ^a อาจมีค่าแตกต่างจาก ϕ' ได้มากโดยในช่วงที่ค่าหน่วยแรงตั้งฉากสุทธิและความอิ่มน้ำมีค่ากว้าง อย่างไรก็ตามการแปรผลในการศึกษานี้จะตั้งสมมุติฐานว่ามุม ϕ^a มีค่าเท่ากับ ϕ' เพื่อความง่ายในการวิเคราะห์ ก่อนจะมีการทดสอบในรายละเอียดมากกว่านี้

สมการที่ 6 สามารถจัดรูปให้ง่ายขึ้นโดยกำหนดให้กำลังเฉือนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงดูดมีค่าเท่ากับ ความเชื่อมแน่นคาปิลลารี (Capillary cohesion) c^s แสดงในสมการที่ 7 ดังนั้น ค่า c^s จึงคำนวณได้โดยตรงจากค่าพารามิเตอร์หน่วยแรงประสิทธิภาพ, c', ϕ' (จากตารางที่ 5) และกำลังรับแรงเฉือนและหน่วยแรงตั้งฉากจากการทดสอบ, τ, σ โดยค่า c^s ที่คำนวณได้จากการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 17 ขอบเขตการวิบัตินี้ได้แสดงไว้โดยเส้นทึบทั้งในสภาวะ peak และ ultimate จากการทดสอบ single stage และ ผลจากการทดสอบแบบ multistage

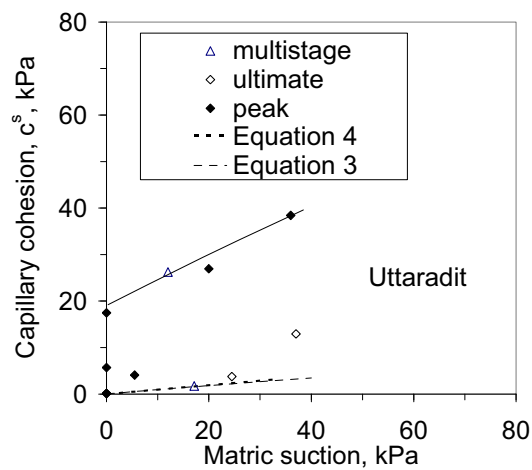
$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan \phi' + c^s \quad (7)$$



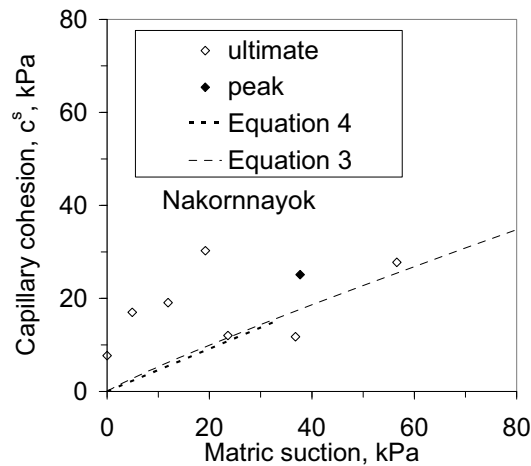
รูปที่ 17 ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 17 ความเชื่อมแน่นคาปิลลารี (Capillary cohesion) สำหรับดินจาก ก) จันทบุรี ข) อมก๋อย
ค) อุตรดิตถ์ และ ง) นครนายก

ความแตกต่างระหว่างขอบเขตการวิบัติในสภาวะ peak และ ultimate บ่งชี้ถึงความเปราะ (Brittleness) ของดินซึ่งจะเปราะมากขึ้นเมื่อดินมีค่าแรงดูดสูงขึ้นหรือดินแห้งมากขึ้น เพราะมีการเชื่อมแน่นจากแรงดูดและการพองตัว dilatancy มากขึ้นนั่นเอง สำหรับความเชื่อมแน่นคาปิลลารีจากการทดสอบ multistage พบว่ามีค่าระหว่างขอบเขตการวิบัติทั้งสอง (Peak และ Ultimate) อย่างไรก็ดีตามดินทรายแป้งจากนครนายก (รูปที่ 17ง) จะไม่แสดงความเปราะนี้มากนัก ผลทดสอบทั่วไปจะแสดงเฉพาะพฤติกรรมชนิด strain hardening และไม่มีการพองตัว dilatancy มากนัก ดินทรายแป้งนครนายกนี้เป็นดินซึ่งถูกทำลายโครงสร้างธรรมชาติแบบ residual ไปเมื่อเกิดการเลื่อนไถลของลาดในขณะที่ดินจากพื้นที่อื่นๆ เป็นดินจากบริเวณที่ไม่ได้มีการพังทลายมาก่อนในอดีต จึงสามารถให้เหตุผลได้ว่าดินนครนายกน่าจะมีลักษณะการเชื่อมประสานน้อยกว่าดินจากพื้นที่อื่นๆ

นักวิจัยหลายท่านในอดีต ได้เสนอสมการเอมพิริคัลสำหรับทำนายขอบเขตการพิบัติของดินไม่อิ่มน้ำไว้ (อาทิ Vanapilli et al., 1996, and Oberg & Salfors, 1997) ในที่นี้จะนำเสนอเฉพาะการทำนายจากสองสมการ ซึ่งมีพื้นฐานมาจากเส้นอัตราลักษณะของดิน (ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตรและแรงดูด) สมการที่ 8 แสดงสูตรคำนวณสำหรับค่าความเชื่อมแน่นคาปิลลารี, c^s , ซึ่งเป็นฟังก์ชันของผลคูณระหว่างแรงดูด ($s = -u_w$) เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตร, $\theta = V_w / V$ ที่ค่าแรงดูดนั้น และมุมของกำลังแรงเฉือน ϕ'

$$c^s = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right) \cdot s \cdot \tan \phi' \quad (8)$$

โดยค่า θ_s คือเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตรเมื่อค่าแรงดูดเท่ากับศูนย์ หรือเมื่อตัวอย่างถูกแช่น้ำจนความชื้นสมดุล ทั้งนี้จากการสังเกตในทดลองพบว่าค่า θ_s อาจไม่จำเป็นต้องเท่ากับค่าความพรุน,

porosity, $n = V_v / V$ เสมอไปเนื่องจากตัวอย่างดินอาจจะยังไม่อิ่มน้ำเต็มที่และอาจยังมีฟองอากาศ
 ถูกกักไว้ในช่องว่างภายในดิน สูตรคำนวณนี้อันที่จริงแล้วคล้ายคลึงกับสมการหน่วยแรง
 ประสิทธิผลของ Bishop ซึ่งมีการอนุมานให้ค่าแฟกเตอร์ χ เท่ากับระดับความอิ่มตัวประสิทธิผล,
 effective degree of saturation, $S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$, และกำหนดให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตร
 คงค้าง θ_r เท่ากับศูนย์ (ค่า $\theta_r = \theta$ เมื่อแรงดูดมีค่าสูงมากจน $\frac{d\theta}{ds}$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์)

สมการที่ 9 แสดงสูตรเอมพิริคัลซึ่งมีรูปแบบง่ายกว่า

$$c^s = \left(\frac{\theta_{33}}{\theta_s} \right) \cdot s \cdot \tan \phi' \quad (9)$$

โดยให้ค่า θ_{33} เท่ากับ เปอร์เซ็นต์ความชื้นโดยปริมาตรเมื่อค่าแรงดูดเท่ากับ 33 kPa หรือที่ความจุ
 สนาม (Field capacity) นั้นเอง จากสูตรนี้อาจจะนำไปอนุมานต่อได้ว่า ค่ามุมแรงเฉือนเนื่องจากแรง
 ดูด $\phi^b = \tan^{-1} \left(\frac{\theta_{33}}{\theta_s} \cdot \tan \phi' \right)$ นั้นเอง ลักษณะของมุมแรงเฉือน ϕ^b ที่มีค่าคงที่นี้สามารถนำไปใช้ในการ
 การคำนวณได้โดยสะดวกมากกว่าสมการที่ 8 โดยเฉพาะเมื่อขาดข้อมูลเส้นอัตตลักษณะของดินที่
 สมบูรณ์และมีเพียงข้อมูลความจุสนามของดินเท่านั้น

ทั้งสมการที่ 8 และ 9 ได้นำมาใช้ทำนายค่า ความเชื่อมแน่นคาปิลลารีในรูปที่ 17 โดยอ้างอิงจากเส้น
 อัตตลักษณะในรูปที่ 11 ค่าที่ทำนายได้แสดงไว้ในเส้นประหนาและเส้นประบางในรูป เป็นที่
 น่าสนใจว่าทั้งสมการที่ 8 และ 9 ให้ค่าทำนายที่ใกล้เคียงกันมาก โดยอาจเนื่องจากค่าแรงดูดที่เริ่มมี
 อากาศในช่องว่าง (Air-entry suction) ที่ต่ำมากสำหรับตัวอย่างดินทั้งสี่พื้นที่นั้นเอง. ทั้งนี้ค่าที่ทำนาย
 มีความสอดคล้องกับค่าความเชื่อมแน่นที่สภาวะ ultimate มากกว่าที่สภาวะ peak โดยจะสอดคล้อง
 กันในช่วงค่าแรงดูดที่ต่ำกว่า 20 kPa สำหรับช่วงที่ค่าแรงดูดมากขึ้น การทำนายจะเข้าใกล้ค่าความ
 เชื่อมแน่นที่สภาวะ peak มากกว่าสำหรับดินจากพื้นที่อมก๋อย และพื้นที่จันทบุรี (รูปที่ 17ก, 17ข)
 สำหรับดินซึ่งจากพื้นที่อุตรดิตถ์และนครนายกพบว่าการทำนายสอดคล้องกับสภาวะ ultimate ใน
 ทุกการทดสอบ

อนึ่ง สำหรับปัญหาดินถล่มเนื่องจากฝนตกนั้น ผลการตรวจวัดในสนามโดยนักวิจัยหลายท่าน อาทิ
 Johnson & Sitar, 1990, Springman et al., 2003, and Jotisanaksa et al., 2008 บ่งชี้ว่าช่วงของแรงดูด
 ซึ่งพบในสนามจะมีค่าค่อนข้างน้อย โดยอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าจุด field capacity หรือน้อยกว่า 33 kPa

นอกจากนั้นพารามิเตอร์สำหรับการวัดที่สถานะ ultimate มักจะเป็นค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดเนื่องจาก การเคลื่อนตัวของลาดจะมีค่ามากและเกินกว่าความเค้นที่สถานะ peak (Atkinson, 1993: หน้า 262) ด้วยสาเหตุนี้ สมการที่ 9 จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ประมาณความเชื่อมั่นที่เพิ่มขึ้นจากแรงดูดนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่สูงชันบริเวณกว้างดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งอาจไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์หากจะมีการทดสอบโดยละเอียดทั้งพื้นที่ สมการนี้หากได้ประยุกต์ร่วมกับการตรวจวัดแรงดูดด้วยเทนซิโอมิเตอร์ จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยแบบทันทีทันใดได้ (อภินิติ และวิญญพงศ์, 2551) โดยใช้สมการเสถียรภาพของลาดอนันต์ และนำไปใช้ในระบบเตือนภัยดินถล่มในที่สุด

7. สรุป และ บทวิจารณ์

โครงการนี้ได้มีการพัฒนาเทนซิโอมิเตอร์เพิ่มเติมขึ้นจากที่ได้พัฒนาขึ้นแล้วที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งสามารถวัดค่าแรงดูดได้สูงถึง 100 kPa โดยเป็นการประยุกต์ใช้เซนเซอร์วัดแรงดันขนาดเล็ก ชนิด Piezoresistive ซึ่งมีขายทั่วไปในราคาไม่แพงมากในการประดิษฐ์ เทนซิโอมิเตอร์ที่พัฒนาขึ้นได้นำไปประยุกต์ใช้สำหรับการตรวจวัดแรงดูดในสนาม การหาเส้นอัตราลัดลัดของดิน รวมไปถึงการวัดแรงดันน้ำด้านลบของดินขณะทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน

งานวิจัยได้ประยุกต์ใช้เครื่องมือ Tensiometer กับการทดสอบ Unconfined Compression (UC) test แบบวัดแรงดูดในเบื้องต้น โดยทดสอบตัวอย่างดินเหนียวอ่อนซึ่งนำมาจากบริเวณโครงการก่อสร้างคลองระบายน้ำสนามบินสุวรรณภูมิ จ.สมุทรปราการ พบว่าได้ค่า $c' = 0, \phi' = 20 - 26^\circ$ ในช่วง Effective mean stress หรือ Suction เท่ากับ 0 ถึง 100 kPa. ซึ่งสอดคล้องกับค่าพารามิเตอร์จากผลการวิจัยในอดีตซึ่งใช้เครื่องมือทดสอบแบบสามแกน (Triaxial Apparatus) เนื่องจากการทดสอบ Unconfined Compression Test เป็นการทดสอบที่ง่าย และใช้มากที่สุดในประเทศไทย วิธีการนี้จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าอย่างมากให้กับ การทดสอบ UC สำหรับดินเหนียวอ่อน

ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงเฉือนของดินในสถานะไม่อิ่มน้ำจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในระหว่างที่มีน้ำซึมลงในลาดช่วงฝนตก ในโครงการนี้ได้มีการปรับปรุงเครื่องทดสอบเนื่องตรงในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว โดยมีการติดตั้งเทนซิโอมิเตอร์เพื่อวัดแรงดูดระหว่าง การเฉือนของดินตัวอย่างจากกระบอกเปลือกบางซึ่งเก็บจากพื้นที่ซึ่งเคยประสบดินถล่มมาก่อนในอดีตสี่พื้นที่ด้วยกันในประเทศไทย ได้แก่ อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์, อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่, อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี และ เขื่อนขุนด่านปราการชล จ.นครนายก. ผลการทดสอบเส้นอัตราลัดลัด บ่งชี้ว่าค่า แรงดูดที่อากาศเริ่มเข้าไปในช่องว่างดิน (Air-entry suction) มีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 0-1 kPa สำหรับตัวอย่างดินจากทุกสถานที่ ซึ่งมีลักษณะเป็นดินทรายแป้งปนดินเหนียว

ดินเหนียวปนดินทราย และดินทรายแป้งปนดินทราย ลักษณะดังกล่าวสะท้อนถึงขนาดและการเรียงตัวของช่องว่างขนาดใหญ่ในเม็ดดิน สำหรับกำลังรับแรงเฉือนพบว่าการแปรผันแบบไม่เชิงเส้นกับแรงกด โดยดิน residual soil ซึ่งมีแรงกดสูงกว่า (หรือความชื้นน้อยกว่า) จะมีแนวโน้มการเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคเม็ดดินที่ชัดเจนกว่าจึงทำให้มีพฤติกรรมเปราะ (Brittle) กว่า. นอกจากนี้ยังพบว่าการรับแรงเฉือนจากการทดสอบชนิด multistage shearing จะมีค่าอยู่ระหว่างกำลังรับแรงเฉือนที่สภาวะ peak และ สภาวะ ultimate. ในการศึกษาครั้งนี้ได้เสนอสมการอย่างง่ายซึ่งสามารถทำนายกำลังรับแรงเฉือนที่ ultimate ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับค่าแรงกดที่ต่ำกว่า 33 kPa โดยสมการจะอาศัยตัวแปรสำคัญคือ ปริมาณความชื้น โดยปริมาตรที่ค่าแรงกดเท่ากับศูนย์และ 33 kPa

8. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ผลการวิจัยในโครงการนี้ยืนยันว่าการประยุกต์ใช้ Tensiometer ในการทดสอบพฤติกรรมของดินไม่อิ่มน้ำในประเทศไทยให้ผลเป็นที่น่าพอใจ สามารถนำไปประยุกต์นำไปใช้ในงานด้านพฤติกรรมดินถล่มและการทดสอบดินหลายประเภท ในอนาคต ควรจะมีการนำไปประยุกต์เพิ่มเติมในการทดสอบ triaxial test, oedometer และแบบจำลองชนิด column tests เพื่อศึกษาการไหลซึมในชั้น vadose zone

9. Output จากโครงการวิจัยที่ได้รับทุนจาก สกว.

9.1 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (ระบุชื่อผู้แต่ง ชื่อเรื่อง ชื่อวารสาร ปี เล่มที่ เลขที่ และหน้า) หรือผลงานตามที่คาดไว้ในสัญญาโครงการ

วารสารวิชาการนานาชาติ (manuscript ในภาคผนวก)

อยู่ในระหว่างการพิจารณาบทความเพื่อตีพิมพ์เรื่อง

Jotisankasa, A., and, Mairiang W. (200x). Suction-monitored direct shear tests on residual soils from landslide-prone areas of Thailand. Submitted to Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE

9.2 การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เชิงสาธารณะ (มีเครือข่ายความร่วมมือ/สร้างกระแสความสนใจในวงกว้าง)

หัวหน้าโครงการวิจัยได้รับเชิญเป็นวิทยากรบรรยายในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินถล่มดังนี้

วิทยากรรับเชิญรายการหนึ่งในพระราชดำริเรื่อง “ภัยดินถล่ม” ออกอากาศทางช่อง โมเดิร์นไนน์ วันที่ 22 เมษายน พ.ศ. 2549

วิทยากรรับเชิญรายการหนึ่งในพระราชดำริเรื่อง “ดินถล่ม...มหันตภัยฤดูฝน” ออกอากาศทางช่องโมเดิร์นไนน์ วันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2549

วิทยากรรับเชิญรายการหนึ่งในพระราชดำริเรื่อง “ดินถล่ม รู้ไว้ก่อนภัยเกิด” ออกอากาศทางช่องโมเดิร์นไนน์ วันที่ 28 กรกฎาคม 2550

วิทยากรรับเชิญรายการหนึ่งในพระราชดำริเรื่อง “เตือนภัยดินถล่ม” ออกอากาศทางช่องโมเดิร์นไนน์ วันที่ 3 พฤษภาคม 2551

เขียนบทความร่วมกับ รศ.ดร.วรากร ไผ่เรียง และ ผศ.ดร.สุทธสิริศร์ ศรีลัมพ์ เรื่อง “ดินถล่มภัยที่ป้องกันได้” เพื่อให้ความรู้กับประชาชนทั่วไป ในนามของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และมูลนิธิอานันทมหิดลแผนกเกษตรศาสตร์ เพื่อเฉลิมพระเกียรติในมหามงคลสมัยการครองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี และการเจริญพระชนมพรรษา 80 พรรษา

มีการพัฒนาต่อยอดเครื่องมือวัด Tensiometer และได้นำไปใช้ในโครงการวิจัยอื่นๆ ได้แก่

โครงการกำหนดค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เพื่อการเตือนภัยน้ำท่วมฉับพลัน-ดินถล่ม ดำเนินการโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ งบประมาณของ กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ปี 2549-2550

โครงการวิจัยกลุ่มย่อยเรื่อง “การศึกษาสภาวะความชุ่มชื้นดินวิกฤตที่เกิดน้ำท่วม-ดินถล่มสูง ด้วยลักษณะการซึมผ่านผิวดินของน้ำในบริเวณลุ่มน้ำเจ้าพระยาตอนบน” งบประมาณของ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้โครงการวิจัยและพัฒนาระบบบูรณาการเชิงพลวัตข้อมูลภูมิประเทศ อุทกวิทยาเพื่อการจัดการทรัพยากรน้ำแบบพอเพียงและยั่งยืนในลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา (2550-2551)

โครงการวิจัยเรื่อง “โครงการบูรณาการระบบช่วยตัดสินใจ (DSS) และถ่ายทอดแบบจำลองของโครงการวิจัย GAME-T และระบบเตือนภัยน้ำท่วมฉับพลันแผ่นดินถล่มและภัยแล้งไปสู่ชุมชนในพื้นที่ลุ่มน้ำเจ้าพระยาโดยกระบวนการมีส่วนร่วมและการให้บริการเพื่อการจัดการทรัพยากรในมิติของชุมชน เพื่อการจัดการทรัพยากรในลุ่มน้ำเจ้าพระยาอย่างยั่งยืน” โดย ศูนย์วิจัยป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ งบประมาณของ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

โครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาพฤติกรรมและการเกิดน้ำท่วม-ดินถล่ม ในพื้นที่ต้นแบบเพื่อสร้างแบบจำลอง สำหรับกำหนดเกณฑ์และวิธีการในการเตือนภัย” ร่วมกับ ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรม

ปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ งบประมาณของ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(2550-2551)

โครงการวิจัยเรื่อง “การศึกษาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มตัวที่มีผลต่อการรับแรงฐานรากอาคาร กรณีศึกษาอาคารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร” ร่วมกับ อ.ก้องรัฐ นกแก้ว งบประมาณของ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร (2550-2551)

- เชิงวิชาการ (มีการพัฒนาการเรียนการสอน/สร้างนักวิจัยใหม่)

เปิดสอนวิชาปัญหาพิเศษ และจัดทำเอกสารประกอบการสอน อภินิติ โชติสังกัส (2549) Unsaturated soil Mechanics (กลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำ) วิชา 203596 Selected Topics in Civil Engineering จำนวน 3 หน่วยกิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จำนวน 142 หน้า

งานวิจัยนี้ได้สนับสนุน นาย วสัน สุทธินนท์ นิสิตปริญญาโท ในการทำวิทยานิพนธ์หัวข้อ กำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ Unconfined Compression Test ชนิดวัดแรงดูด suction

9.3 อื่นๆ (เช่น ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการในประเทศ การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการ หนังสือ การจดสิทธิบัตร)
 ดังแสดงในภาคผนวกผลงานตีพิมพ์ซึ่งส่วนหนึ่งได้รับเงินสนับสนุนจากสกว.มีดังนี้

การประชุมวิชาการในประเทศ (บทความอยู่ในภาคผนวก)

อภินิติ โชติสังกัส และ วิชญพงศ์ พ่อลิละ, 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน, 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551, จำนวน 8 หน้า

วสัน สุทธินนท์ และ อภินิติ โชติสังกัส 2551. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ Unconfined Compression Test ชนิดวัดแรงดูด suction. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 14-16 พฤษภาคม 2551, พัทยา, จำนวน 6 หน้า

การประชุมวิชาการนานาชาติ (บทความอยู่ในภาคผนวก)

Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S., Mairiang W. (2007). Development of a low cost miniature tensiometer and its applications. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007), Organized by Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, China, April 21-23, pp 6

10. หนังสืออ้างอิง

กรมทรัพยากรน้ำ (2551) รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการกำหนดค่าดัชนีความชุ่มชื้นของดิน (Antecedent Precipitation Index: API) เพื่อการเตือนภัยน้ำท่วมฉับพลัน-ดินถล่ม ดำเนินการโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วรากร ไผ่เรียง, สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ และ อภินิติ โชติสังกาศ. 2550 ดินถล่ม ภัยที่ป้องกันได้. หนังสือเฉลิมพระเกียรติพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ ทรงเจริญพระชนมพรรษา ๘๐ พรรษา. จัดทำโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์และมูลนิธิธำมรงค์นิพนธ์. จำนวน 37 หน้า

วสัน สุทธินุ่น และ อภินิติ โชติสังกาศ 2551. การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนประสิทธิผลของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยการทดสอบ Unconfined Compression Test ชนิดวัดแรงดูด suction. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 14-16 พฤษภาคม 2551, พัทยา, จำนวน 6 หน้า

วิญญูพงศ์ พอลิละ และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. 2550. การศึกษาและพัฒนา KU Piezometer โดยการประยุกต์ใช้ MEMs Pressure sensor. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, ประเทศไทย, 2-4 พฤษภาคม 2550

นงลักษณ์ ไทยเจียมอารีย์ 2547. คุณสมบัติดินทางวิศวกรรมเพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ น้ำก้อ ต.น้ำก้อ อ.หล่มสัก จ.เพชรบูรณ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

อภินิติ โชติสังกาศ และ วิญญูพงศ์ พอลิละ, 2551. การพัฒนาระบบตรวจวัดพฤติกรรมดินถล่ม. การประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 28-29 มกราคม 2551, จำนวน 6 หน้า

อภินิติ โชติสังกาศ และ วิษณุพงศ์ พ่อลิละ, 2551. การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดันน้ำในดิน. การประชุมวิชาการครั้งที่ 46 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, จัดโดย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, บางเขน, 29 มกราคม-1 กุมภาพันธ์ 2551, จำนวน 8 หน้า

อภินิติ โชติสังกาศ และ อัครพัฒน์ สว่างสุริย์, 2551, การประยุกต์ใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของดินไม่อิ่มน้ำสำหรับงานเสถียรภาพของลาดดิน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 14-16 พฤษภาคม 2551, พัทยา, จำนวน 6 หน้า

อภินิติ โชติสังกาศ และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์, 2551, การตรวจวัดพฤติกรรมและการเคลื่อนตัวของลาดบริเวณโครงการพัฒนาออยตุง, การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13, จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ร่วมกับวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 14-16 พฤษภาคม 2551, พัทยาจำนวน 6 หน้า

อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2532. การใช้วัสดุดินเผาภายในประเทศเพื่อประกอบเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบ Tensiometer. รายงานผลการวิจัยสาขาพืช การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 28 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
<http://www.kmitl.ac.th/soilkmitl/SoilRes/Tensiometer.htm>

Asian Disaster Preparedness Center (2006). Rapid assessment, Flashflood and landslide disaster in the provinces of uttaradit and sukhothai, northern Thailand, May 2006. (www.adpc.net/enews/july/Uttaradit_rapidassessment.pdf)

Atkinson, J.H. (1993). The mechanics of soils and foundations, London: McGraw Hill.

Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E. & Donald, I. B. (1960). Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. *Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, 503-532.

Bishop A. W. (1959). The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad* 39, pp.859-863

Cunningham, M. R., Ridley, A. M., Dineen, K. & Burland, J. J. (2003). The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay. *Geotechnique* 53, No. 2, 183–194

Lambe, T.W. and R.B. Whitman (1979). Soil Mechanics, SI Version. John Wiley and Sons Inc., New York. 553 p.

Manoon Arayasiri, (1969). Shear strength characteristics of bangkok clay in the weathered zone. Master's Thesis, Asian Institute of Technology.

Terzaghi, K., R.B. Peck, G. Mesri (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons Inc., New York.

Cho, S. E. and Lee, S. R. (2002). Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE*. Vol. 128, No. 9, September 1, pp. 756-763

Collins, B. D, and Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall-induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE*. April 2004, Vol. 130, No. 4, pp. 362–372.

Cunningham, M. R., Ridley, A. M., Dineen, K. & Burland, J. J. (2003). The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay. *Geotechnique* **53**, No. 2, 183–194

Delage, P., Romero, E., and Tarantino, A. (2008). Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils. *Proceedings of the first European conference on unsaturated soils, E-UNSAT 2008, Durham, United Kingdom, July 2-4*

Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley.

Gan J. K. M. & Fredlund, D. G. (1996). Shear strength characteristics of two saprolitic soils. *Can. Geot. J.* **33**, 595-609.

Ho. D.Y.F. and Fredlund, D.G. (1982). A multistage triaxial tests for unsaturated soils. *ASTM, Geotechnical Testing Journal*, 5(1/2): 18-25

Johnson, K.A., and Sitar, N. (1990) Hydrological conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27: 789-801

Jotisankasa, A. (2005). Collapse behaviour of a compacted silty clay.. Ph.D. thesis, Imperial College London.

Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S., and Mairiang W. (2007a), Development of a low cost miniature tensiometer and its applications, *The 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007)*, Nanjing, China

Jotisankasa, A., Ridley, A., Coop, A. (2007b). Collapse behavior of a compacted silty clay in the suction-monitored oedometer apparatus, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, July

Jotisankasa, A., Sawangsuriya, A & Sukolrat, J. (2008) Innovative testing methods for unsaturated soil slopes, The 3rd Seminar on Highway Engineering, Organized by Department of Highways, 5-6 June, 2008, Bangkok, Thailand, pp 475-489

Jotisankasa, A., Kulsuwan, B., Toll, D., and Rahardjo, H. (2008) Studies of rainfall-induced landslide in Thailand and Singapore, The First European Conference on Unsaturated Soils (E-UNSAT) , Organized by Durham University and University of Glasglow, 2-4 July, 2008, Durham, UK, pp 901-907

Jotisankasa, A. and Vathananukij, H. (2008). Investigation of soil moisture characteristics of landslide-prone slopes in Thailand. *Proceedings of the International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region*. Sendai, Japan, November 11-15

Oberg, A.L. & Salfors, G. (1997). Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curves. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 20, No. 1, pp. 40-48.

Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., and Leong, E. C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE*. Vol. 133, No. 12, December 1, pp. 1532-1543.

Ridley, A. M. & Burland, J. B. 1993. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique* 43, No. 2, 321–324.

Springman, S.M., Jommi, C. & Teyssie, P. (2003). Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history. *Geotechnique* **53**, No. 1, 3-10

Tarantino, A. & Tombolato, S. (2005). Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Geotechnique* **55**, No. 4, 307-317

Toll, D.G., Ali Rahman, Z. & Gallipoli, D. (2008). Critical state conditions for an unsaturated artificially bonded soil. *Proceedings of the first European conference on unsaturated soils, E-UNSAT 2008, Durham, United Kingdom, July 2-4*

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufhal D.E. & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can. Geot. J.* 33, 379-392.

ภาคผนวก

การพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน

The Development of Soil Suction Measuring Devices

อภินิติ โชติสังกะส¹ และ วิษณุพงศ์ พอลิละ^{1,2}
Apiniti Jotisankasa¹ and Wissanupong Porlila^{1,2}

บทคัดย่อ

บทความนี้รายงานการพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดิน ซึ่งมีสองชนิดด้วยกันคือ 1) Tensiometer และ 2) Psychrometer. เครื่องมือ Tensiometer นี้พัฒนาขึ้นเพื่อวัดแรงดูดเมทริก (Matric suction) หรือแรงดึงของน้ำในดิน ซึ่งเป็นการประยุกต์เอาเซ็นเซอร์วัดแรงดันชนิดเทคโนโลยีระดับจุลภาค (MEMs) เข้ามาใช้ทำให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็กและประยุกต์ใช้ในการทดลองได้หลากหลาย. Tensiometer ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ในช่วงค่าแรงดูดตั้งแต่ 0- 90 kPa และอยู่ในระหว่างการพัฒนาเพื่อให้วัดแรงดูดเมทริกได้ในช่วงแรงดูด 100-300 kPa. สำหรับเครื่องมือ Psychrometer ที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ชนิดวัดความชื้นสัมพัทธ์และเทอร์มิสเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสองไปคำนวณเป็นค่าแรงดูดรวม (Total suction) ได้ โดยเหมาะสำหรับวัดค่า Total suction ตั้งแต่ 1,000 ถึง 1,000,000 kPa. การปรับเทียบเครื่องมือวัดทั้งชนิด Tensiometer และ Psychrometer สามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่ไม่ซับซ้อนในห้องปฏิบัติการ. บทความนี้ยังนำเสนอผลการประยุกต์ใช้เครื่องมือดังกล่าวในการหาเส้นโค้งความชุ่มน้ำ (Soil-Water Retention Curve) ของตัวอย่างดิน และการวัดแรงดูดในสนาม

Abstract

This paper reports on the development of two types of soil suction measuring devices, namely Tensiometer and Psychrometer. The tensiometer has been developed for measuring suction or tension of water within soil pore. It incorporates commercially available pressure sensors based on MEMs technology. The newly developed tensiometers work satisfactorily for suction range from 0 to 90 kPa. Another kind of tensiometer with higher capacity is being developed for measuring suction from 100-300 kPa. The psychrometer used for measuring total suction is also being developed, which is based on capacitive relative humidity sensor and thermistor. The range of total suction suitable for this psychrometer is from 1,000 to 1,000,000 kPa. Calibrations of these devices can be done with relatively simple equipments in laboratory. An example of applications of these devices is also shown for Soil-Water Retention Curve determination of soil sample in the laboratory.

Keyword: Soil suction, Matric suction, Total suction, Tensiometer, Psychrometer, Soil Water Retention Curve, Soil Physics

E-mail address: fengatj@ku.ac.th.

¹ ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมทางวิศวกรรมปฐพี ศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีและฐานราก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

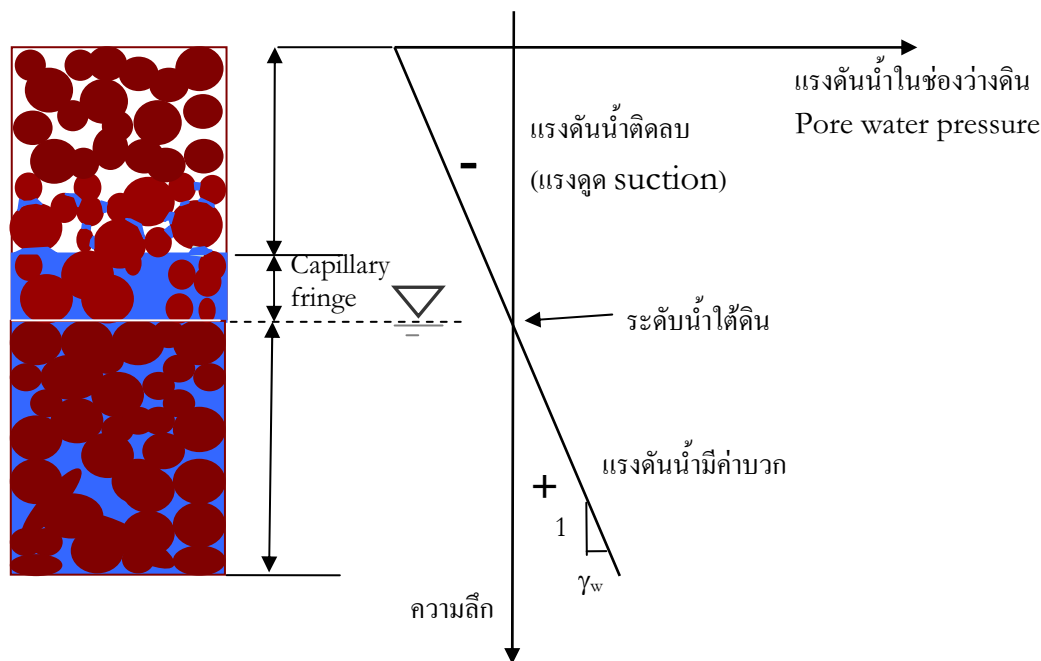
¹ Geotechnical Innovation Laboratory (GIL) Geotechnical Engineering Research and Development Center, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University Bangkok 10900, ² Asian Technology and Testing,

คำนำ

ความเข้าใจในพฤติกรรมของน้ำในดิน โดยเฉพาะด้านการไหลของน้ำใต้ดิน การอุ้มน้ำของดิน และคุณสมบัติด้านอื่นๆ ทั้งกลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์ นับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่งในหลากหลายสาขาวิชา ทั้งการเกษตร ธรณีวิทยา ป่าไม้ วิศวกรรมปฐพี ทรัพยากรน้ำ ชลประทาน และสิ่งแวดล้อม. ค่าตัวแปรที่สำคัญซึ่งบ่งชี้ถึงสถานะของน้ำในดินคือ แรงดูดของดิน (Soil suction). ถ้ายกตัวอย่างกรณีที่น้ำอยู่ในสภาวะสถิตย์ (Hydrostatic) น้ำในช่องว่างดินที่อยู่เหนือระดับน้ำใต้ดิน (Ground Water Table) จะอยู่ภายใต้สภาวะแรงดึง (Tension) จากน้ำหนักของน้ำด้านล่าง (รูปที่ 1). แรงดึงหรือแรงดูดนี้เรียกว่า แรงดูดเมทริก (Matric suction, s) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1

$$s = u_a - u_w \quad (1)$$

โดย u_w เท่ากับแรงดันน้ำในช่องว่างดิน และ u_a เท่ากับแรงดันอากาศในช่องว่างดิน. เครื่องมือที่ใช้วัดแรงดูดเมทริกโดยตรงเรียกว่า Tensiometer ซึ่งจะใช้งานในสภาวะที่ค่า u_a ของดินมีค่าเท่ากับ 0 และค่า suction ที่วัดได้ก็คือ ค่าที่ติดลบของแรงดันน้ำดังแสดงในรูปที่ 1 นั่นเอง. อย่างไรก็ตาม Tensiometer ทั่วไปจะไม่สามารถวัดค่าแรงดันน้ำที่ติดลบเกิน 100 kPa ได้ ซึ่งกรณีที่มีค่าเกิน 100kPa จะต้องใช้หลักการ Axis-translation เพื่อวัดและควบคุมค่า matric suction ของดินด้วยเครื่องมือ pressure plate หรือหม้อแรงดัน โดยเป็นการเพิ่มแรงดันอากาศในช่องว่างดิน u_a เพื่อเพิ่ม suction ในขณะที่ค่า $u_w = 0$ นั่นเอง



รูปที่ 1 ลักษณะของแรงดันน้ำในสภาวะสถิตย์

ปรากฏการณ์หลักๆที่ใช้อธิบายการเกิดแรงดูดเมทริกนี้มีอยู่สองปรากฏการณ์ด้วยกันคือ แรงตึงผิวคาปิลลารี และ Surface adsorption ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากประจุไฟฟ้าลบที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว. อย่างไรก็ตาม ศักย์หรือความสามารถในการดูดน้ำเข้าหาตัวของดินก็ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารละลายเกลือของน้ำในดิน

ซึ่งเรียกว่า แรงดูดออสโมติก (Osmotic suction, π) โดยดินที่มีสารละลายเกลือปนอยู่ในน้ำมากก็จะมีศักย์ในการดูดน้ำหาตัวเองได้มากไปด้วย. โดยทั่วไปแล้วจะสามารถพิจารณา แรงดูดทั้งสองชนิดรวมกันเรียกว่า แรงดูดรวม (Total suction, Ψ)

$$\Psi = \pi + s \quad (1)$$

แรงดูดรวมจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่อยู่ในช่องว่างดินตามหลักของเทอร์โมไดนามิกส์ดังสมการที่ (2)

$$\Psi = - \left[\frac{RT}{V_{mol}} \right] \cdot \ln(R_h) \quad (2)$$

เมื่อ R_h = ความชื้นสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ อัตราส่วนระหว่างแรงดันไอน้ำในสภาวะปกติต่อแรงดันไอน้ำในสภาวะอิ่มตัว (P/P_0)

R = ค่าคงที่ของก๊าซ (Universal gas constant) = $8.314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

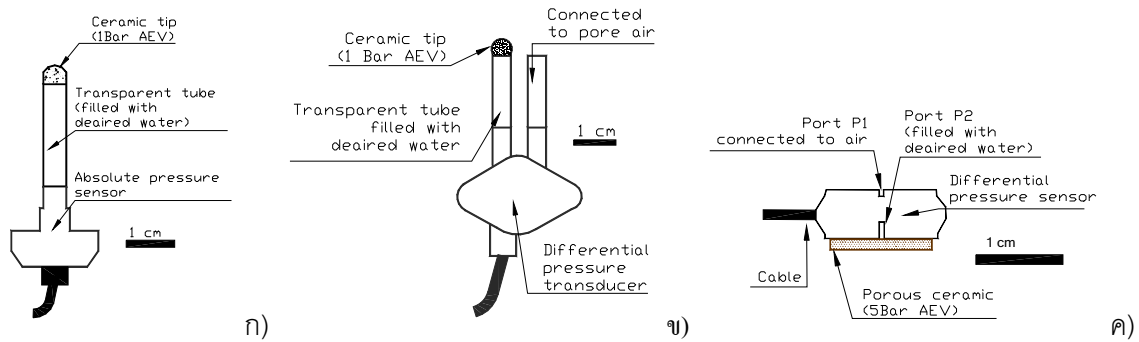
V_{mol} = molecular volume ของไอน้ำ (0.01802 m^3),

T = อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{K}$) , และ Total suction, Ψ , มีหน่วยเป็น kPa

แรงดูดในดิน หรือ พลังงานกักเก็บกอนดิน เป็นตัวแปรที่สัมพันธ์โดยตรงกับคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญหลายอย่างของดิน (Fredlund & Rahardjo, 1993). อาทิเช่น เปอร์เซ็นต์ของน้ำในดิน, สัมประสิทธิ์ของการไหลซึมของน้ำผ่านดิน, กำลังรับแรงเฉือนของดิน และ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของดิน ความสัมพันธ์ต่างๆ เหล่านี้เป็นพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับดินหลายด้านด้วยกัน อาทิ การไหลซึมของน้ำผ่านผิวดิน การระเหยของน้ำจากดิน การพังทลายของดิน สมดุลของพลังงานระหว่างดินและอากาศ ฯลฯ

การพัฒนา KU-Tensiometer

ดังได้กล่าวมาข้างต้น Tensiometer เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เป็นอย่างมากในการวัดค่าแรงดูดเมทริกของดินในช่วงค่า 0-100 kPa. อิทธิสุนทร (2532) ได้พัฒนา Tensiometer และใช้ในการวัดความชื้นของดินเพื่อการให้น้ำพืชอย่างมีประสิทธิภาพ. และในต่างประเทศ ได้มีการพัฒนา Tensiometer ด้วยเซ็นเซอร์วัดแรงดันแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสะดวกในการอ่านค่าอัตโนมัติแบบต่อเนื่อง แต่มักจะมีราคาแพงทำให้การวัดแรงดูด suction ในลักษณะนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัดในประเทศไทย. ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา Tensiometer ขึ้นเองที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ และได้เริ่มใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายโครงการ (Jotisankasa et al., 2007)



รูปที่ 4 KU-Tensiometer, ก) ชนิดแรงดูดต่ำ-A (Low-suction-Absolute) ข) ชนิดแรงดูดต่ำ-D (Low-suction-Differential) ค) ชนิดแรงดูดสูง (High-suction-Differential)

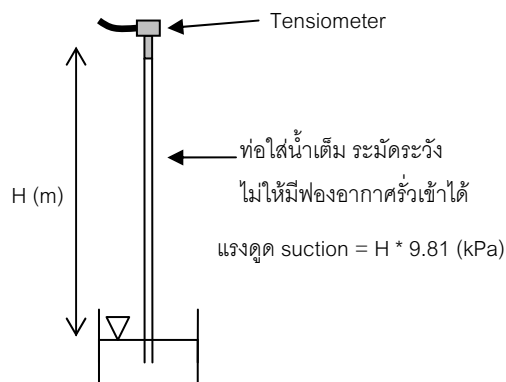
ส่วนประกอบของเทนซิโอมิเตอร์ที่สำคัญคือ 1) ปลายดินเผา 2) กระเปาะน้ำ และ 3) อุปกรณ์วัดแรงดันหรือเกจสุญญากาศ. ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 โดยในขณะที่ใช้งานทุกส่วนจะต้องมีน้ำอยู่เต็มช่องว่างเพื่อให้สามารถส่งถ่ายแรงดึงจากน้ำในดินสู่น้ำด้านหน้าเซ็นเซอร์วัดแรงดันได้อย่างมีประสิทธิภาพ. เซ็นเซอร์วัดแรงดันที่ใช้สำหรับ KU-Tensiometer นี้เป็นเซ็นเซอร์ชนิด Single Silicon Piezoresistive ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้เทคโนโลยีระดับจุลภาค (MEMs technology) ทำให้เซ็นเซอร์มีขนาดเล็กและมีสัญญาณที่เสถียรในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง. วิชาญพงศ์และสุทธิศักดิ์ (2550) ได้ใช้เซ็นเซอร์ชนิดนี้พัฒนาเป็นเครื่องมือพิซมิเตอร์เพื่อวัดแรงดันน้ำ(ด้านบวก) และใช้ในงานวิจัยทางวิศวกรรมปฐพีหลายงานด้วยกัน อาทิ การก่อสร้างคันดินถม และการวิเคราะห์การทรุดตัวของดิน. สำหรับ KU-Tensiometer ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมีทั้งหมด 3 แบบด้วยกัน. ชนิดแรงดูดต่ำ-A และ -D (รูป 4ก และ 4ข) สามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดถึงประมาณ 90 kPa และชนิดแรงดูดสูง (รูป 4ค) ซึ่งยังอยู่ในระหว่างการพัฒนาและสามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดถึงประมาณ 350 kPa. สำหรับข้อแตกต่างของรุ่นแรงดูดต่ำ-A และ -D คือ รุ่นแรงดูดต่ำ -A จะมีค่าศูนย์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันบรรยากาศ ซึ่งต้องอาศัยการปรับแก้ ในขณะที่รุ่นแรงดูดต่ำ-D จะอ่านค่า differential pressure เทียบกับความดันบรรยากาศ จึงไม่จำเป็นต้องมีการปรับแก้เรื่องความดันบรรยากาศนี้

กระบวนการเติมน้ำลงใน KU-Tensiometer นับว่ามีความสำคัญมากเพื่อให้การใช้งานมีความถูกต้อง โดยมีขั้นตอนดังนี้ (1) นำ Tensiometer ที่อยู่ในสภาพแห้งใส่ในภาชนะปิดผนึกภายใต้สภาวะสุญญากาศ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ปรับสภาพ (2) ภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้นเติมน้ำเข้าไปในช่องว่าง และยังคง Tensiometer ไว้ภายใต้สภาวะปั๊มสุญญากาศต่ออีกอย่างน้อย 1 ชั่วโมง (3) ค่อยๆ คลายสุญญากาศโดยปิดปั๊มอย่างช้าๆ เพื่อให้ น้ำเข้าไปแทนที่อากาศในช่องว่างให้หมด. ในบางกรณีอาจต้องเจาะรูขนาดเล็กที่กระเปาะน้ำเพื่อให้สามารถไล่ฟองอากาศที่ยังตกค้างอยู่ออกมาได้หมด ซึ่งจะต้องปิดผนึกรูที่เจาะนี้อย่างดีเมื่อใช้งาน

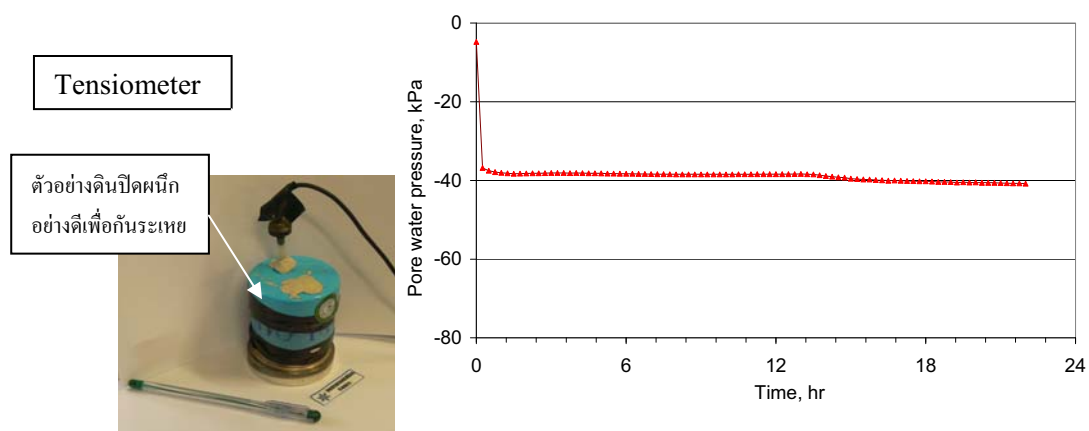
โดยทั่วไปแล้ว Tensiometer จะสามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดเพียง 100 kPa หรือ 1 bar เท่านั้น เนื่องจากเมื่อแรงดูดเกินค่านี้ จะเริ่มมีฟองอากาศก่อตัวขึ้นภายในกระเปาะน้ำ ทำให้น้ำใน Tensiometer ขาดความต่อเนื่อง จึงไม่สามารถส่งถ่ายแรงดึงจากน้ำในดินไปสู่เซ็นเซอร์วัดแรงดันได้. ทั้งนี้ Ridley & Burland (1993) ได้คิดค้นวิธีการแก้ไขสภาวะเกิดฟอง (Cavitation) ที่ Imperial College London โดยเสนอให้ Tensiometer มีลักษณะดังนี้ (1) ใช้ดินเผาที่มีความทึบน้ำมาก วัดเป็นค่า Air-Entry ที่ 15 Bar (2) ลดขนาดช่องว่างในกระเปาะน้ำและใช้

stainless steel หรือแก้ว เป็นวัสดุสำหรับทำกะเปาะ (3) ปรับสภาพ Tensiometer ก่อนใช้งานโดยมีการอัดแรงดันน้ำผ่านดินเผาเข้าไปในกะเปาะน้ำที่แรงดัน 20 bar เป็นระยะเวลา 2 วันก่อนใช้งาน. ด้วยวิธีการข้างต้น Ridley & Burland (1993) สามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดถึง 1,800 kPa ติดต่อกันกว่า 1 เดือน. จากหลักการดังกล่าว จึงได้ปรับมาใช้พัฒนาขึ้นเป็น KU-Tensiometer ชนิดแรงดูดสูง ซึ่งใช้ดินเผาชนิด Air-Entry ที่ 5 bar ดังแสดงในรูปที่ 4ค และอัดแรงดันน้ำที่ 8 bar และสามารถวัดแรงดูดได้สูงสุดถึง 350 kPa

การปรับเทียบ Tensiometer ก่อนการใช้งานจะใช้หลักการ Hanging Water Column หรือการห้อยน้ำ จากปลายหัวเซรามิกของ Tensiometer ดังรูปที่ 5 โดยจะต้องระมัดระวังให้ไม่มีฟองอากาศในสายน้ำเพื่อความต่อเนื่องของน้ำในการส่งถ่ายแรง ค่าแรงดูดที่วัดได้จะแปรผันกับความสูงวัดจากน้ำขึ้นไปยัง Tensiometer (9.81 kPa/ 1 เมตรน้ำ). รูปที่ 6 แสดงลักษณะการติดตั้ง Tensiometer เพื่อวัดแรงดูดน้ำของตัวอย่างดินที่ปิดผนึกอย่างดีเพื่อป้องกันการระเหยของดินระหว่างการตรวจวัด. โดยทั่วไปการติดตั้ง Tensiometer เพื่อวัดแรงดูดจากตัวอย่างดินจะมีขั้นตอนดังนี้ (1) ทำการขุดรูบนผิวตัวอย่างดินให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดของหัว Tensiometer เล็กน้อย (2) เมื่อต้องวัดแรงดูดของดินที่มีผิวขรุขระและเนื้อหยาบเช่นพวก ดินทราย ลูกรังหรือ Residual soil ควรจะป้ายดินเหนียวเม้ดละเอียด (อาจเป็นดินขาวคาโอลีน) ที่หัวเซรามิกของ Tensiometer เล็กน้อยเพื่อให้ น้ำในดินต่อเนื่องกับน้ำในเซรามิก (3) ปักหัว Tensiometer ลงในหลุมให้แน่นพอสมควรและบันทึกค่าที่อ่านจาก Tensiometer ซึ่งจะถึงสมดุลกับแรงดูดภายในระยะเวลา 0.5-1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 การสอบเทียบ Tensiometer โดยวิธีการห้อยน้ำ Hanging Water Column



รูปที่ 6 ตัวอย่างการทดสอบวัดแรงดูดของตัวอย่างดินโดย KU-Tensiometer ในห้องปฏิบัติการ

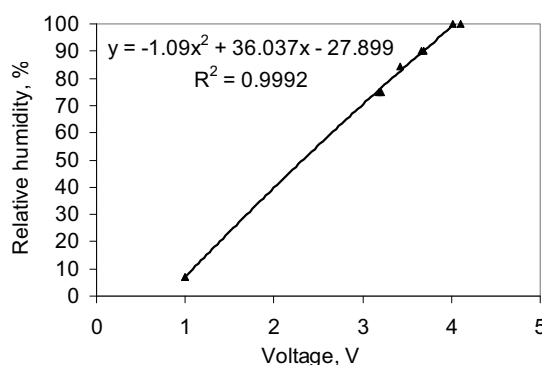
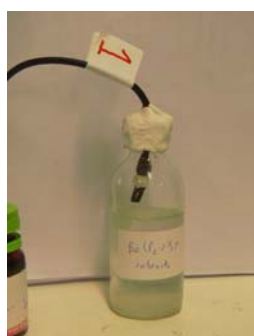
การพัฒนา KU-Total Suction Probe

จากสมการที่ (2) เห็นได้ว่า การวัดแรงดูดรวมหรือ Total suction ทำได้โดยการวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ R_h และอุณหภูมิ T ภายในตัวอย่างดิน ค่าพารามิเตอร์ทั้งสองสามารถตรวจวัดได้โดยใช้เซนเซอร์มาตรฐานซึ่งใช้ทั่วไปในงานอุตสาหกรรม โครงการวิจัยนี้ได้เลือกใช้เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์ชนิด Thermoset polymer capacitive sensing element ซึ่งมีระบบการปรับสัญญาณแบบ on-chip และสามารถอ่านสัญญาณโดยใช้แรงดันเลี้ยง 5 โวลต์ เช่นเดียวกับ Tensiometer ทำให้มีความสะดวกในการติดตั้งระบบอ่านค่า.

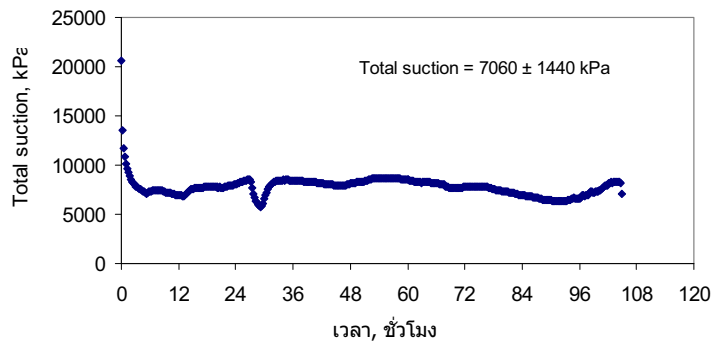
การปรับเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์สามารถจะกระทำโดยใช้วิธี Field Calibration (สุรราชบุรี, 2546) คือการใช้คุณสมบัติของเกลืออิ่มตัวแต่ละชนิดดังตารางที่ 1 โดยจะทำการแขวนเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์เหนือสารละลายเกลือซึ่งบรรจุภายในขวดปิดผนึกดังแสดงในรูปที่ 7 และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าจากเซนเซอร์ตามระยะเวลาจนถึงจุดสมดุลกับความชื้นภายในขวด ข้อควรระวังในการปรับเทียบด้วยวิธีนี้คือควรกระทำในห้องปรับอากาศที่มีการควบคุมอุณหภูมิหรือต้องมีการปรับแก้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างเหมาะสม.

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ใช้ในการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์
(Lu & Likos, 2004)

สารละลายเกลืออิ่มตัว	อุณหภูมิ (°C)	%ความชื้นสัมพัทธ์ %RH	แรงดูดรวม, kPa (Total suction)	d(RH)/dT (% ต่อ °C จาก 25 °C)
NaOH.H ₂ O	15-25	7	365,183	0
NaCl	5-60	75.1	39,323	-0.02
KCl	5-40	84.2	23,617	-0.16
BaCl ₂ .2H ₂ O	5-60	90.3	14,012	-0.08
H ₂ O (น้ำกลั่น)	-	0	0	-



รูปที่ 7 การสอบเทียบเซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวและตัวอย่างผลการสอบเทียบ

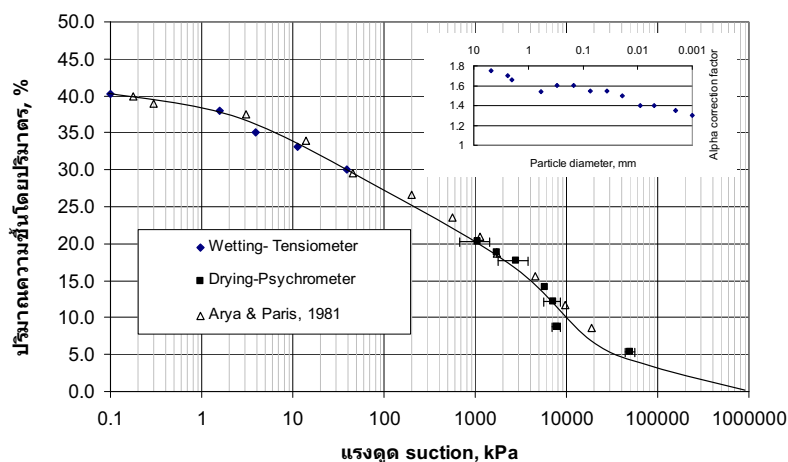


รูปที่ 8 ตัวอย่างผลการวัดแรงดูดรวม (Total suction)

สำหรับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิได้เลือกใช้ชนิด Thermistor เนื่องจากมีระบบไฟเลี้ยงและอ่านค่าเช่นเดียวกับ Tensiometer จึงมีความสะดวกในการติดตั้ง การปรับเทียบ Thermistor ทำง่ายโดยวัดอุณหภูมิของน้ำที่คงที่เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์. รูปแบบการใช้เครื่องมือวัดแรงดูดรวมในห้องปฏิบัติการมีลักษณะคล้ายกับ Tensiometer โดยทำการขุดหลุมขนาดเล็กที่ผิวบนของตัวอย่างดินเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 มม. ลึกประมาณ 3 มม. จากนั้นจึงหย่อนเซนเซอร์วัดความชื้น (Rh) ซึ่งหุ้มด้วยกระดาษทิชชูลงไปในหลุมและอุดรูด้านข้างด้วยวัสดุ seal ประเภท UHU tack เพื่อป้องกันการระเหย โดยทั่วไปจะใช้ระยะเวลาไม่เกิน 12 ชั่วโมงเพื่อคอยให้ค่าจากเซนเซอร์ Rh ถึงสมดุลกับสภาพความชื้นในตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 8

การประยุกต์ใช้ Suction probe เพื่อหาเส้นโค้งความอุ้มน้ำของดิน

เพื่อสาธิตประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องวัด จึงได้แสดงผลการใช้เครื่องมือทั้งสองชนิดในการทดสอบหาเส้นโค้งความอุ้มน้ำ (Soil Water Retention Curve, SWRC) ของตัวอย่างดินคงสภาพจาก อ.ลับแล จ.อุตรดิตถ์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยด้านพฤติกรรมดินถล่ม ของศูนย์วิจัยวิศวกรรมปฐพีฯ. ลักษณะของดินเป็นดินเหนียวปนทรายมีต้นกำเนิดจากหินดินดาน ดังแสดงในรูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นและแรงดูดที่ทดสอบได้มีความสอดคล้องกับลักษณะของ SWRC ที่สามารถประมาณได้จากขนาดคละของดินโดยวิธีของ Arya and Paris (1981) โดยใช้ alpha correction factor, α ในช่วง 1.7-1.3 ซึ่งอยู่ในช่วงที่แนะนำโดย Arya and Paris



รูปที่ 9 ลักษณะของเส้นโค้งความอุ้มน้ำของตัวอย่างดินจาก จ.อุตรดิตถ์

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาเครื่องมือวัดศักย์แรงดูดน้ำในดินที่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยประกอบไปด้วยเครื่องมือวัดสองชนิดด้วยกัน คือ 1) Tensiometer สำหรับวัดแรงดูดเมทริก (0-90kPa) และ 2) Total suction probe หรือ Psychrometer ซึ่งเหมาะสมสำหรับวัดแรงดูดรวมในช่วงค่า 1000-1,000,000 kPa. เครื่องมือทั้งสองพัฒนาขึ้นโดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์มาตรฐานสำหรับวัดแรงดันและสำหรับความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม และมีการปรับเทียบเองอีกครั้งในห้องปฏิบัติการเพื่อความมั่นใจในการใช้งาน. เนื่องจากเครื่องมือมีขนาดเล็กทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการทดสอบได้หลากหลาย อาทิ การทดลองหาเส้นโค้งอุ้มน้ำ (Soil-Water Retention Curve) ของตัวอย่างดิน การวัดแรงดูดเมทริกในสนาม รวมไปถึงการวัดแรงดันน้ำด้านลบของดินขณะทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน

คำนิยาม

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่
(MRG4980086) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และ
ทุนอุดหนุนการวิจัยวิศวกรรมศาสตร์ มก. ประจำปี 2549

เอกสารอ้างอิง

อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2532. การใช้วัสดุดินเผาภายในประเทศเพื่อประกอบเครื่องมือวัดความชื้นในดินแบบ Tensiometer. รายงานผลการวิจัยสาขาพืช การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 28 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ <http://www.kmitl.ac.th/soilkmitl/SoilRes/Tesiometer.htm>

สุราษฎร์ สุทธิเนตร. 2546. การสอบเทียบเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์. คู่มือการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

วิชญพงศ์ พอลิละ และ สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์. 2550. การศึกษาและพัฒนา KU Piezometer โดยการประยุกต์ใช้ MEMs Pressure sensor. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 12, พิษณุโลก, ประเทศไทย , 2-4 พฤษภาคม 2550

Arya, L. M., and J. F. Paris. 1981. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:1023-1030.

Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley.

Lu, N. & Likos, W.J. 2004. *Unsaturated soil mechanics*. Wiley.

Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S., Mairiang W. 2007. Development of a low cost miniature tensiometer and its applications. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007), Nanjing, China.

Ridley, A. M. & Burland, J. B. 1993. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Geotechnique* 43, No. 2, 321–324.

Editorial Manager(tm) for Journal of Geotechnical and Geoenvironmental
Engineering

Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Shear behavior of residual soils from landslide-prone areas in suction-monitored direct shear test

Article Type: Technical Note

Corresponding Author: Dr apiniti jotisankasa, Ph.D

Corresponding Author's Institution: Kasetsart University

First Author: Apiniti Jotisankasa, PhD, DIC

Order of Authors: Apiniti Jotisankasa, PhD, DIC; Warakorn Mairaing, PhD

Abstract: The relationships of shear strength for unsaturated soils are frequently used in stability analysis for slope subjected to rain infiltration. In this paper, a modified direct shear box is used to determine such relationships. The apparatus incorporates the relatively low-cost miniature tensiometer for simpler, direct suction measurement during shearing. The soil-water retention curves and shearing behavior has been investigated for intact residual soils from four landslide-prone areas in Thailand. The air-entry suctions vary from zero to one kPa for the low-to-medium plasticity clayey silt, sandy clay, and silty sand, reflecting the presence of large pore within these materials. The shear strength increases non-linearly with suction, though linearization can be reasonably assumed. The residual soil samples with higher suction tend to have stronger bonds around particle contacts and thus the more brittle they are at higher suctions. During constant water content shearing, the soil suction appeared to change slightly according to change in soil volume. The strengths determined from multistage tests appear to be bounded within the envelopes of peak and ultimate strength. A simple equation can be used conservatively to predict the ultimate strength of unsaturated residual soils for suctions lower than about 33kPa, based on the volumetric water contents at 33kPa and zero suction.

Suggested Reviewers: Sarah Springman PhD

Professor, Institute of Geotechnical Engineering, Swiss Federal Institute of Technology

springman@igt.baug.ethz.ch

The paper has referred to and was built upon one of her papers "Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history" published in Geotechnique 2003

David G Toll PhD

Senior lecturer, School of Engineering , Durham University

d.g.toll@durham.ac.uk

His research interests lie in experimental research into the behaviour of tropical and other weakly bonded soils, including their behaviour in unsaturated conditions.

Opposed Reviewers:

Cover Letter

Click here to download Cover Letter: [cover_letter.doc](#)

Dr. Apiniti Jotisankasa
Kasetsart University
Dept. of Civil Engineering
50 Phaholyothin Rd., Jatujak
Bangkok 10900
THAILAND

August 19, 2008

ASCE
Journals Department
1801 Alexander Bell Dr.
Reston, VA 20191-4400

Manuscript:
Shear behavior of residual soils from landslide-prone areas in suction-monitored direct shear test

Dear Sir or Madam,

Please find enclosed the manuscript of “**Shear behavior of residual soils from landslide-prone areas in suction-monitored direct shear test**” by Apiniti Jotisankasa, and Warakorn Mairaing.

Should you need to contact me, please use the above address or call me at (66)81 904-3060. You may also contact me by fax at (66)2 579-2265 or via e-mail at fengatj@ku.ac.th.

Sincerely yours,

Apiniti Jotisankasa

Shear behavior of residual soils from landslide-prone areas in suction-monitored direct shear test

A. Jotisankasa and W. Mairaing

Abstract

The relationships of shear strength for unsaturated soils are frequently used in stability analysis for slope subjected to rain infiltration. In this paper, a modified direct shear box is used to determine such relationships. The apparatus incorporates the relatively low-cost miniature tensiometer for simpler, direct suction measurement during shearing. The soil-water retention curves and shearing behavior has been investigated for intact residual soils from four landslide-prone areas in Thailand. The air-entry suctions vary from zero to one kPa for the low-to-medium plasticity clayey silt, sandy clay, and silty sand, reflecting the presence of large pore within these materials. The shear strength increases non-linearly with suction, though linearization can be reasonably assumed. The residual soil samples with higher suction tend to have stronger bonds around particle contacts and thus the more brittle they are at higher suctions. During constant water content shearing, the soil suction appeared to change slightly according to change in soil volume. The strengths determined from multistage tests appear to be bounded within the envelopes of peak and ultimate strength. A simple equation can be used conservatively to predict the ultimate strength of unsaturated residual soils for suctions lower than about 33kPa, based on the volumetric water contents at 33kPa and zero suction.

Introduction

Shear strength behavior of unsaturated soils has long been investigated by a number of researchers (e.g. Bishop et al., 1960 and Fredlund, & Rahardjo, 1993). The relationships between shear strength, suction and net stress are frequently used in the analysis of rainfall-induced landslides (e.g. Cho & Lee, 2002, Collins & Znidarcic, 2004, and Rahardjo et al., 2007). The additional shear strength provided by suction is important in maintaining stability of steep slopes with deep ground water table where pore water pressure is negative.

In order to obtain the shear strength-suction-net stress relationships of an unsaturated soil, some special equipment is usually needed to control and monitor suction, such as triaxial apparatus or direct shear box with axis-translation or osmotic system (see for example, Gan & Fredlund, 1996 and Delage et al., 2008). These equipments are not always available in commercial laboratories and are considered relatively expensive in many developing countries where rainfall-induced landslides are serious problems. In addition, the majority of shearing behavior of unsaturated soils reported in the literature is that of compacted materials and rarely reported are behavior of intact natural soils. These problems consequently result in a large gap between practice and research in unsaturated soil mechanics.

This paper will address these problems by first introducing an alternative testing technique for determination of the relationship of shear strength for unsaturated soils. A low-cost miniature tensiometer (Jotisankasa et al., 2007a) has been incorporated into a standard direct shear box for simpler direct suction measurement at atmospheric air pressure during shearing. The shearing behavior in the developed shear box of

some intact residual soils from four landslide-prone areas in Thailand will then be presented. A simple mathematical expression is finally proposed which can be used to predict shear strength of unsaturated soil for slope stability application.

Materials and background

This study is part of a research project on rainfall-induced landslides in Thailand (Jotisankasa et al., 2008 and Jotisankasa & Vathananukij, 2008), which aimed at characterizing mechanical properties of soils from landslide-prone areas. “Undisturbed” samples of residual and colluvial soils were taken at the depths of about 0.5 to 1 meter from four landslide-prone areas of Thailand, namely, Site C (Chantaburi), Site N (Nakornnayok), Site O (Omkoi) and Site U (Uttaradit) as indicated in Figure 1. These areas have experienced shallow landslides in the past, which are typical of destructive debris flow in Thailand. The geology of Site C is that of coarse-grained Triassic granite while that of Site O is mainly medium-grained granite from the lower Carboniferous. The geology of Site U is that of Carboniferous/Permian sedimentary rocks including siltstone, mudstone, and shale, which shows distinct fold structure due to tectonic activities. In the vicinity of Site N, the geology consists of undifferentiated Permo-triassic volcanics rocks, including rhyolite, andesite, tuffs, and agglomerate. The volcanic activities resulted in highly heterogeneous materials in the area.

The studied materials are typically low-to-medium plasticity clayey silt, sandy clay, and silty sand. Their basic properties are summarized in Table 1. All specimens were obtained using a thin-walled tube sampler with PVC liner having a diameter of 63 mm and length of about 60 mm. Samples were taken in test pits in the vicinity of the debris flow (outside the failed mass). Only the Site-N samples were taken from the slope of failed soil mass that had been re-graded in 2004.

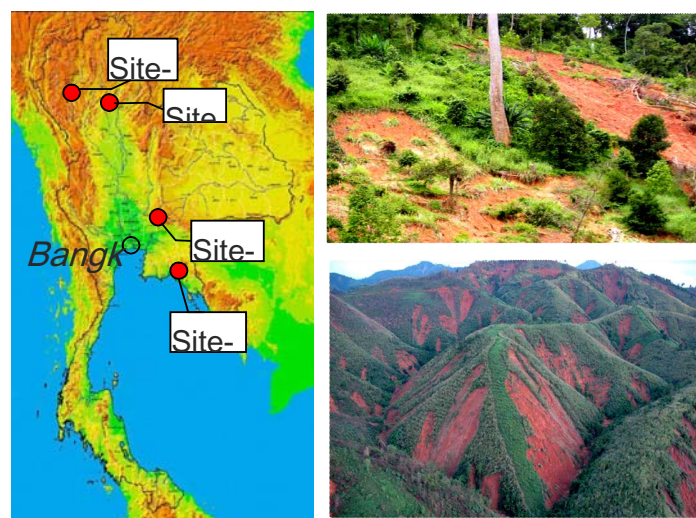


Figure 1 Locations of the four studied sites and photos of landslides in Uttaradit (Site-U), from Asian Disaster Preparedness Center (2006)

Site Location	Parent Rock	Liquid Limit	Plasticity Index	% gravel	% sand	% silt	% clay	Soil Type
C Chantaburi	Granite	41-48	5-12	2	53.2- 55.4	22.9- 26.5	16.0- 22.7	Silty sand SM
N Nakornnayok	Volcanic	46-51	6-18	0.5-5.5	13.7- 18.9	38.9- 53.9	31.9- 36.7	Silts MH/ ML
O Omkoï	Granite	47.3	15.4	1.0	45.1	16.1	37.8	Sandy clay CL
U Uttaradit	Siltstone/ mudstone	41.6	20.2	14.2	26.5	36.9	22.3	Sandy silt ML

Table 1 Basic properties of the studied materials

The volumetric water content-suction relationships have also been determined for the samples of four studied sites, as shown in Figure 2. Suction measurements were made using the miniature tensiometers (Jotisankasas et al., 2007a). The test procedure involved initial suction measurement of the soil samples in the condition as-collected from the site, and then gradually wetting the sample by means of fog generator with the samples' suction, weight and dimensions being measured at each stage of wetting. After the soil suction fall below 1kPa, the specimen was then submerged under water with a nominal vertical overburden stress of 1 kPa on top of soil specimen (in order to prevent soil dispersion) for a period of at least 5 days. The values of water content at suction of 0.1kPa, shown in Figure 2, was in fact arbitrarily chosen to indicate the water content of soaked samples in the logarithmic suction plot. After soaking, the samples were gradually air-dried and their suctions, weight, and dimensions during each stage were monitored incrementally. The air-entry suctions for all soils are relatively low, being from zero to one kPa, which reflect the presence of large pore within all specimens.

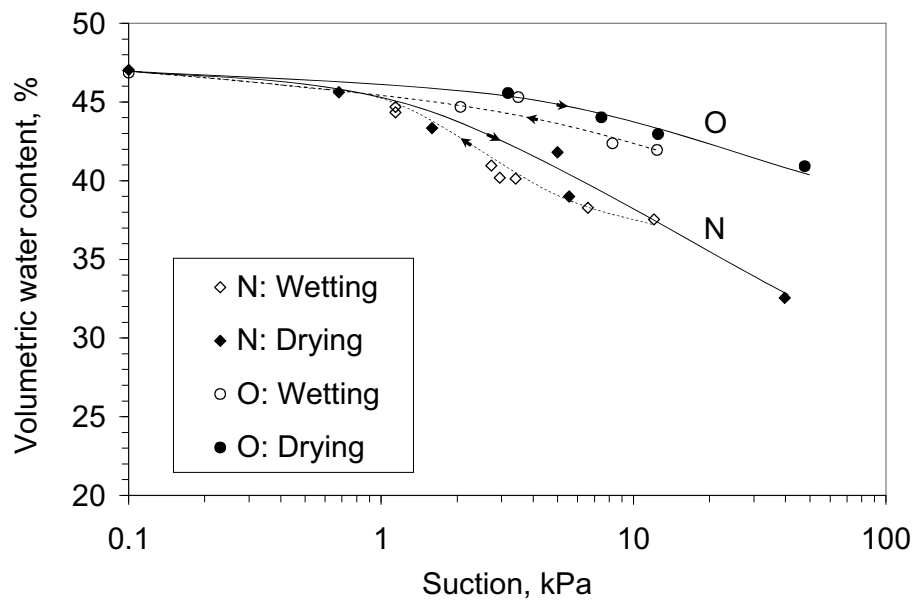
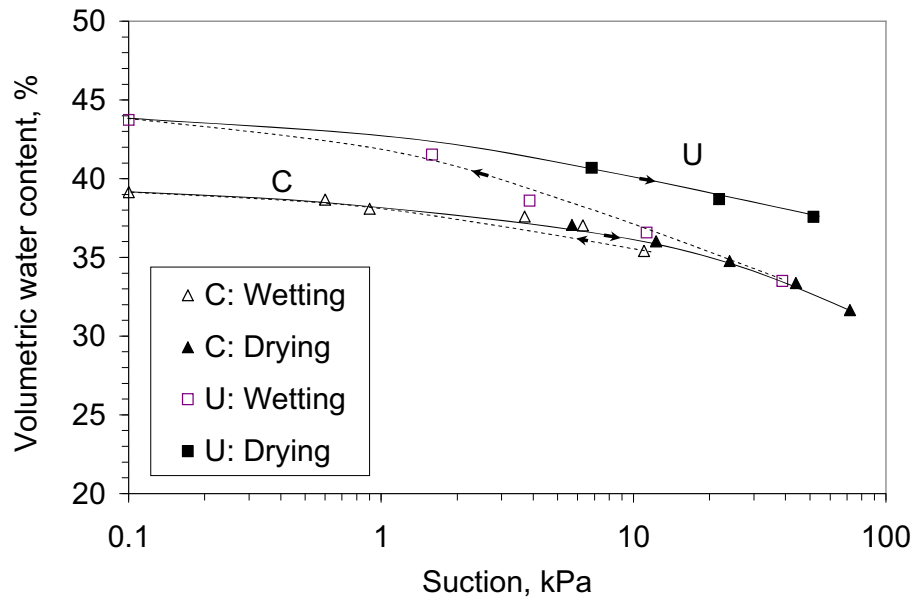


Figure 2 Soil-Water Retention curves for samples from a) Chantaburi and Uttaradit and b) Nakornayok and Omkoi

Suction-monitored direct shear box

Figures 3 and 4 show the suction-monitored direct shear apparatus. Only minor modification was made to the top cap whereby the tensiometer is inserted through a hole and a clamping set was used to secure the tensiometer in place during shearing. This testing technique was in fact similar to those presented by Tarantino & Tombolato (2005) and Jotisankasa et al. (2007b). The main difference is that the miniature tensiometer used in this study was of a lower capacity, capable of

measuring suction from value of zero to 80 kPa. The tensiometer consists of a commercially available MEMs pressure sensor, a transparent acrylic tube and a mini one-bar air-entry-value porous ceramic disc at the front. The device was assembled in the Geotechnical laboratory of Kasetsart University and calibrated using hanging water column. Careful de-airing of water inside the reservoir of each tensiometer was carried out inside a vacuum chamber.

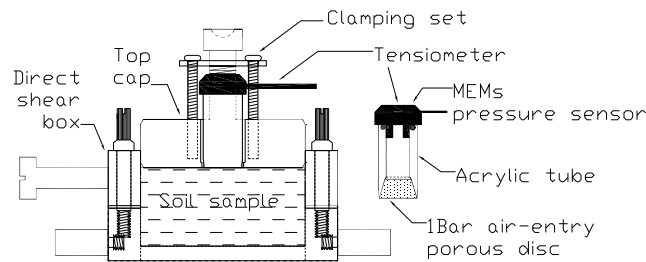


Figure 3 Experimental set up of suction-monitored direct shear tests and the tensiometer

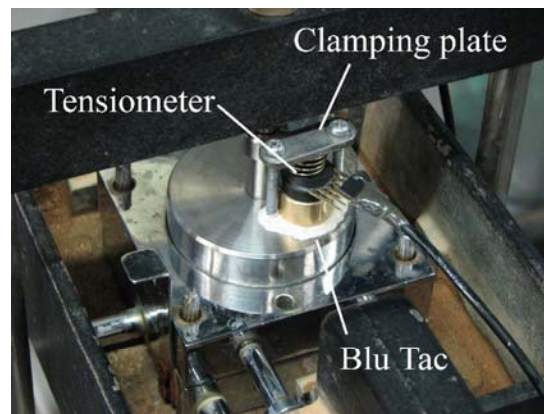


Figure 4 Photo showing the experimental setup

The direct shear box used in this study is otherwise a standard version available in most practicing geotechnical laboratories. In order to maintain a constant water content condition of the soil specimen during testing, plastic wrap and pieces of wet clothes were used to cover the whole shear box. With this technique, the water contents before and after testing were found to differ only by 0-0.25% for a test period of about 8-10 hours. Blu Tac was also applied around the gap between the tensiometer and the top cap to prevent local evaporation, thus avoiding erroneous suction readings.

Table 2. Testing program for Site O

Test no.	Initial suction kPa	Initial S_r , %	w % * during shearing	Initial void ratio	Vertical stress during shearing (kPa)
O-2	Soaked	~100%	-	0.700	31
O-14	Soaked	~100%	-	0.801	15.5/31/62 (multistage)
O-1	2	89.1	26.9	0.802	31
O-7	11	90.0	28.4	0.837	31
O-11	18	83.4	25.2	0.801	31
O-9	50	81.7	26.2	0.843	31
O-0	77	81.7	22.9	0.742	31
O-13	62	66.8	21.7	0.874	15.5/31/62 (multistage)
O-16	32	82.8	23.6	0.754	15.5/31/62 (multistage)

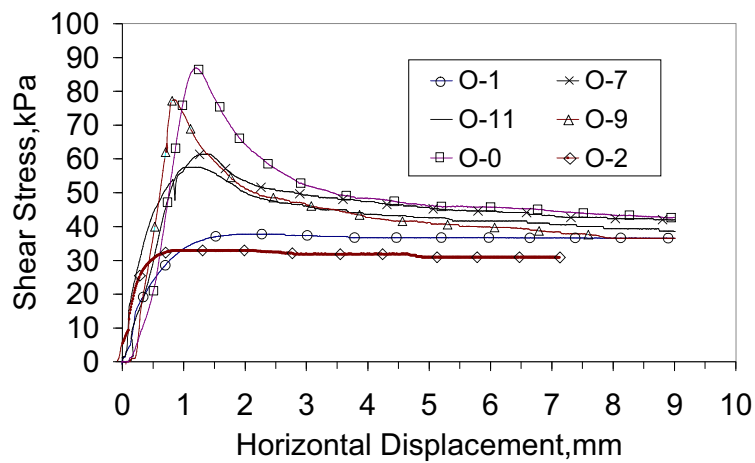
* w = gravimetric water content

Testing program

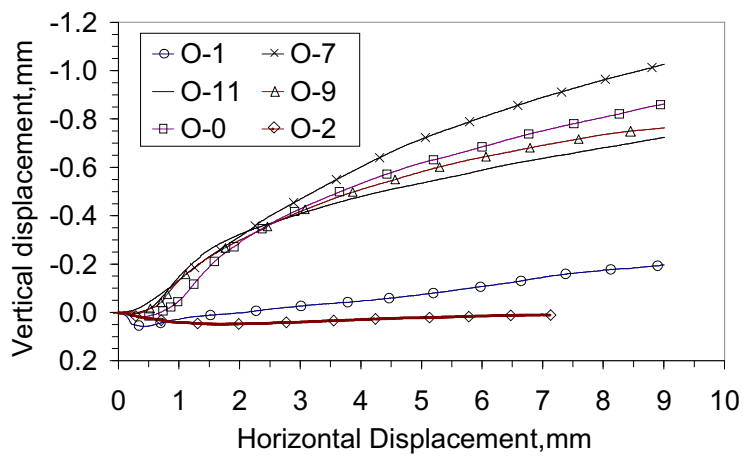
Table 2 shows the testing program for samples from Site O. A similar testing program was followed for samples from other sites. The first group consists of slow (Consolidated-Drained) shearing tests on saturated samples (O-2, O-14), carried out in single-stage and multi-stages at three vertical stresses. Standard direct shear device was used for this first group. All shearing tests on unsaturated samples were carried out using the modified apparatus in a constant water content condition with direct suction measurement as previously shown. The samples' moisture content were modified to the required values prior to testing by either gradual water spraying or air-drying. Since the vertical displacement is monitored, the void ratios and the degree of saturation during shearing can also be estimated.

For unsaturated soil testing, both single and multistage shearing stages were also followed in the program. This was done in an attempt to determine the difference in soil behavior between the two testing approaches. Multistage shearing technique has been used frequently in testing residual soil (e.g. Ho & Fredlund, 1982) so as to obtain maximum information from a limited number of tests and so that the effect of soil variability is eliminated. The technique may nevertheless cause structural disturbance, resulting in lower peak strength than if obtained using a single stage test.

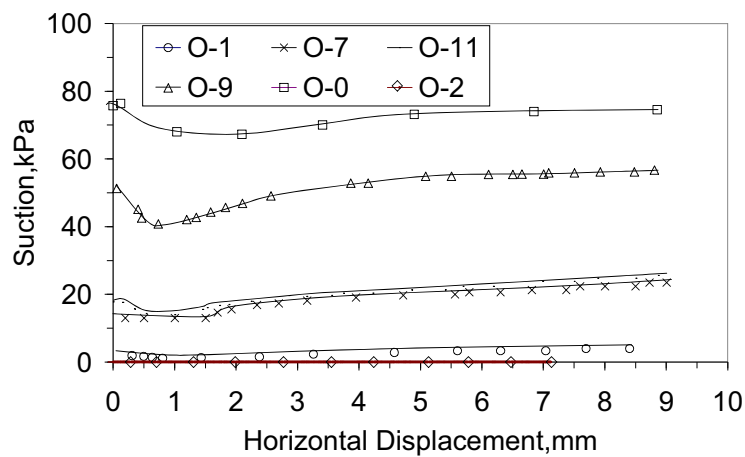
The shearing rate of the unsaturated samples was 0.1 mm/min and it was made sure that the pore water pressure measured at the top of sample represents the average suction of the sample. To verify the appropriateness of this rate, the shearing process in several tests was periodically stopped for about 30-45 minutes and no significant change (less than 10%) was observed in pore water pressure, which was considered a practical equilibration of suction throughout the sample. The cylindrical samples tested were of a diameter of 63 mm and a height of about 31 mm. The maximum grain size of the samples from Sites C, N and O are about one-sixth of the sample thickness, while those for Site U samples are about one-fourth.



a)



b)



c)

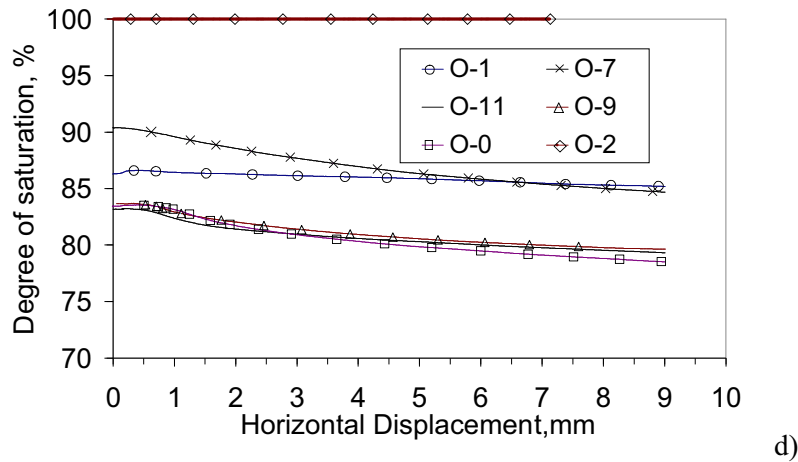


Figure 5 Typical results of single stage shearing tests (samples from Site O)

Shearing behavior

In order to demonstrate the typical shearing behavior of the unsaturated residual soils, results of single stage tests for Site O samples will be described as shown in Figure 5. All the samples were sheared at a constant vertical stress of about 31kPa. It can be seen that the samples with higher suctions (O-0, O-9) exhibit very clearly the strain-softening behavior, whereby after the peak, the shear stress dropped by about a half towards the ultimate state. Before reaching the peak strength, the volume of these samples only slightly decreased, and the suction tended to decrease correspondingly. As the samples started to dilate and reaching the peak strength, the suction also appeared to increase slightly. The degrees of saturation in general tend to decrease slightly by 5% due to sample's dilation. The samples with suction of zero and two kPa (O-1, O-2) appear to be more contractant, without drop in shear stress after the peak.

A possible explanation for this behavior is that samples with higher suction tend to have stronger bonds around soil particles due to water menisci. These suction-induced bonds were overcome by sample's dilation during shearing. Interestingly, the suction was not destroyed, but slightly increased by this dilation process. The influence of suction on shearing behavior thus appears similar to over-consolidation and cementation. This pattern of behavior has also been observed by several researchers (e.g. Cunningham et al., 2003, Jotisankasa, 2005). Typical result of a multistage test is shown in Figure 6 for samples O-13. During the first and second shearing stages (i.e. normal stresses of 16 and 31kPa), the samples were not allowed to shear much further after reaching the peak and only a slight drop in shear stress was allowed. This practice appeared to prohibit the sample from further dilation during shearing and the suction and degree of saturation remained relatively constant during test.

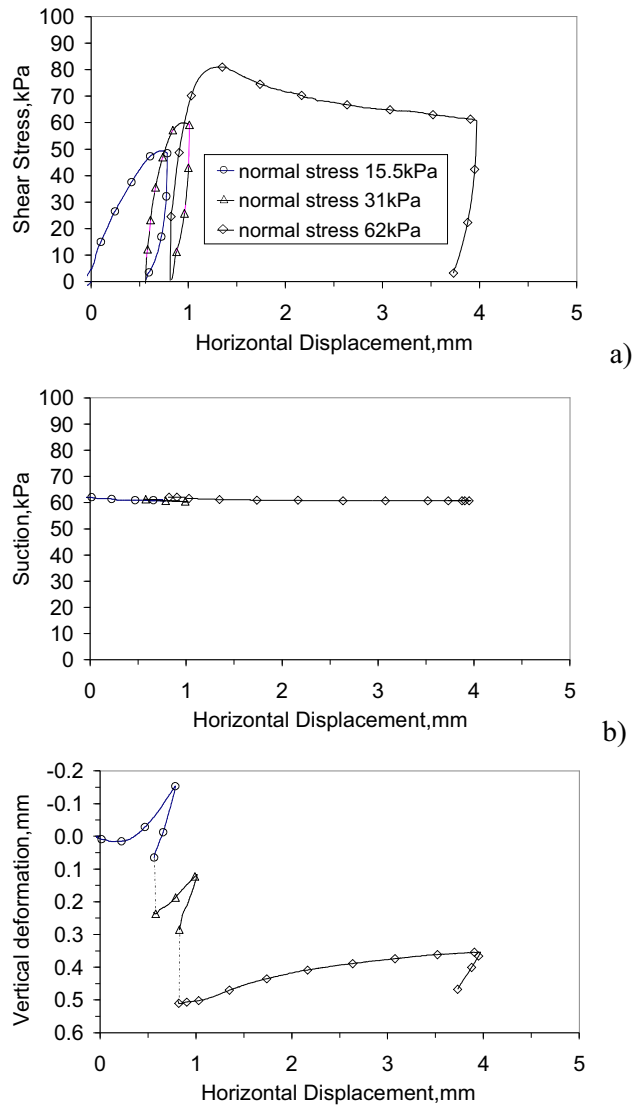


Figure 6 Results of multistage shearing test O-13

Direct shear tests on saturated samples

A series of consolidated drained direct shear tests on saturated samples were also performed for all four sites. The failure envelopes of four soils are shown in Figure 8 in a plot of shear stress versus normal effective stress. Table 3 summarizes the effective shear strength parameters of the soils. The failure envelopes for Groups C, O, and N appear to be within the same range. The results of Site N samples in particular appear to be quite scattered, indicating heterogeneity of the volcanic soil slope at Nakornayok. The stress-strain relationships for Sites C, O, and N appeared to be strain-hardening. However, the failure envelope for Site U samples lies evidently above the others, indicating the material's greater degree of cementation. The stress-strain behavior of Site U samples also showed slight drop after the peak, and thus both envelopes for peak and ultimate states are shown in Figure 7.

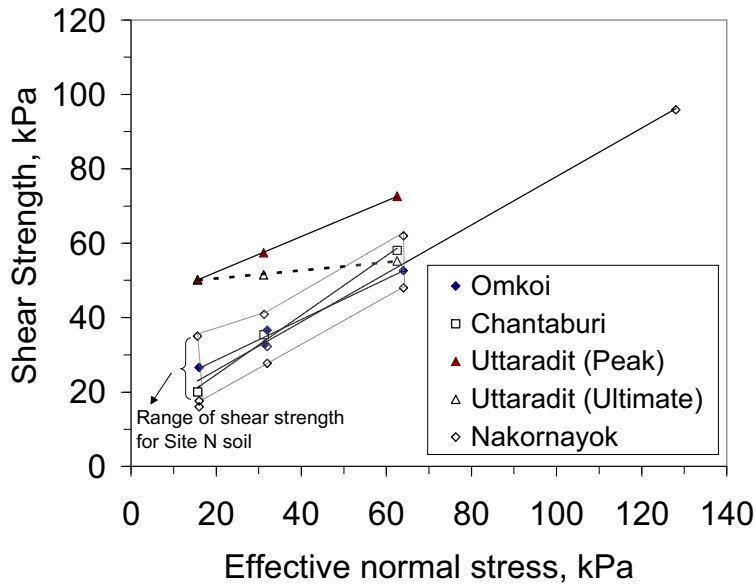


Figure 7 Failure envelopes from consolidated drained direct shear tests for the fully saturated soils of four sites

Table 3. Summary of effective shear strength parameters of the studied materials

Site	Chantaburi	Nakornayok	Omkoi	Uttaradit	
				Peak	Ultimate
c' , kPa	8.7	12.8	17.6	42.8	48.4
ϕ' , degree	38.6	33.1	28.7	25.6	6.2

Shear strength-suction-normal stress relationship

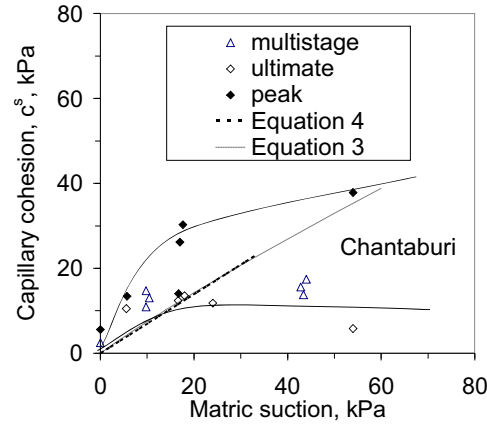
A general formulation of shear strength for unsaturated soils, τ , can be expressed by Equation 1 (Fredlund & Rahardjo, 1993)

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi^a + (u_a - u_w) \cdot \tan \phi^b \quad (1)$$

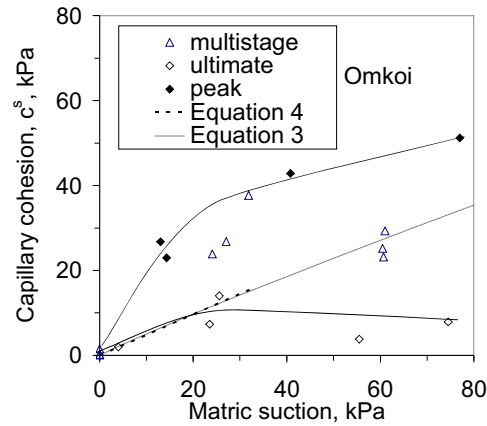
where c' = effective cohesion intercept, σ = normal total stress, u_a = pore air pressure (for the direct shear tests carried out at atmospheric pressure, u_a equals zero), u_w = pore water pressure, ϕ^a is the angle of shearing resistance with respect to net normal stress, and ϕ^b the angle of shearing resistance with respect to suction. In general, the value of ϕ^a is assumed to be equal to the effective angle of shearing resistance, ϕ' , determined by conventional saturated soil testing. Despite some evidence that the value of ϕ^a for cemented soils may in fact differ significantly from the effective angle of shearing resistance, ϕ' (Toll et al., 2008), the interpretation in this study will assume a constant value of ϕ^a equal to ϕ' for simplicity before any more concrete evidence is available.

The shear strength of unsaturated soils can be alternatively expressed by Equation 2. The additional shear strength due to suction is called here as “capillary cohesion”, c^s . Figure 8 shows the values of c^s , calculated for peak and ultimate strength at different suctions. Also indicated are the values from the multistage shearing tests. The values of c' and ϕ' used are the ultimate values as summarized in Table 3.

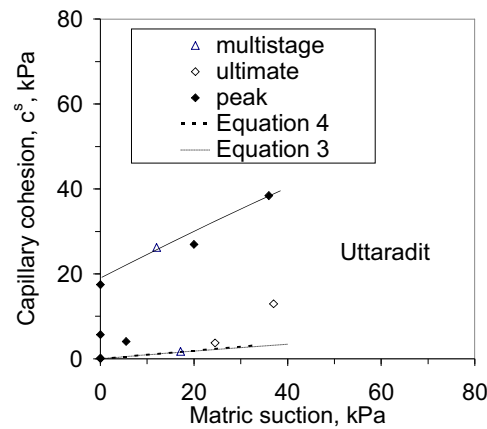
$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan \phi' + c^s \quad (2)$$



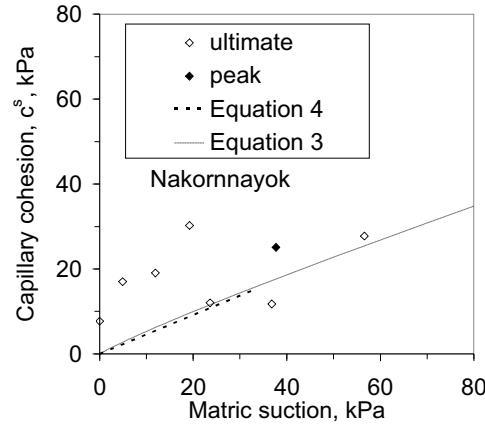
a)



b)



c)



d)

Figure 8 Capillary cohesions of soils from a) Chantaburi b) Omkoi, c)Uttaradit and d) Nakornnayok

The two solid curves in Figure 8 for Site O, U and C are the envelopes for capillary cohesion in the peak and ultimate states. The differences between the peak and ultimate strength (i.e. the material's brittleness) appear to be greater at higher suction, due to greater bonding effects of suction and to greater dilatancy. The cohesions from the multistage tests fall within these two boundaries. Nevertheless, the silt from Site N (Figure 8d) does not exhibit as much brittleness and most tests show only strain-hardening behavior with lesser dilatancy. It is reminded that the silty soil from Site N is actually remolded material from a failed slope that had been re-graded while other soils were from unfailed slopes. Thus a lesser degree of cementation is expected for the Nakornayok soil.

Various mathematical expressions have been proposed in the literature for the failure envelopes of unsaturated soils (see for example, Vanapilli et al., 1996, and Oberg & Salfors, 1997). Only predictions from two simple empirical equations based on the soil-water retention curve are shown here. Equation 3 shows the expression of capillary cohesion, c^s , based on the product of suction, degree of saturation, and effective angle of shearing resistance.

$$c^s = \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right) \cdot s \cdot \tan \phi' \quad (3)$$

where s is the matric suction ($s = -u_w$), and θ_s is the volumetric water content when suction is zero or the sample is soaked. It is noted that the value of θ_s is not necessarily the same as the porosity, n , since usually there are still some occluded air within a soaked soil sample. This approach in fact assumes the Bishop effective stress's χ factor equal to effective degree of saturation, $S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)$, and that the volumetric water content at residual state, θ_r , is zero.

Equation 4 shows a simpler form of the relationship:

$$c^s = \left(\frac{\theta_{33}}{\theta_s} \right) \cdot s \cdot \tan \phi' \quad (4)$$

where θ_{33} is the volumetric water content at 33 kPa suction or at the field capacity. It can also be inferred from this equation that $\phi^b = \tan^{-1} \left(\frac{\theta_{33}}{\theta_s} \cdot \tan \phi' \right)$. This linearized

ϕ^b is particularly useful when only available information of the water content-suction relationship is the field capacity. Both equation 3 and 4 are used to predict the capillary cohesions based on the SWRC from Figure 2. The predictions are shown in Figure 9 as thin and thick dashed lines. Interestingly, the predicted failure envelopes from Equation 3 and 4 are practically the same for this range of suction, perhaps as a result of the low value of air entry suction for all soils. A good agreement between the prediction and the ultimate strength is observed for all sites for suctions below about 20 kPa. At higher suctions, the prediction tends towards the peak strength for the sandy clay and silty sand from Site O and C (Figures 8a and 8b). For the more cemented silt from Site U and the colluvial silt from Site N, the prediction agrees with the measured ultimate strength (Figures 8c and 8d) for most tests.

For rainfall-induced landslide problems, field monitoring experience (e.g. Johnson & Sitar, 1990, Springman et al., 2003, and Jotisanaksa et al., 2008) suggests that the suction range of interest is relatively small, perhaps within the range of a nominal field capacity or about 33kPa. The ultimate strength parameters are also generally used for the stability analyses of slopes since ground movements involved are relatively large and exceed the strains required for mobilizing peak state (e.g. Atkinson, 1993: p. 262). For these reasons, it should be very convenient to use Equation 4 to estimate the contribution of suction to shear strength in a large hilly terrain such as shown in Figure 1, especially when conducting detailed laboratory tests for the whole area is not always possible. Coupled with field tensiometer measurement, this approach is being used to calculate real-time factor of safety, based on an infinite slope stability calculation, for a landslide early warning system in Thailand.

Conclusions

The suction-monitored direct shear box, which incorporates the relatively low-cost miniature tensiometer, would be an alternative testing technique for characterizing the shear strength of unsaturated soils. Even though the device is only capable of measuring suction lower than 80 kPa, this low suction range is more critical than the higher, especially in such engineering applications as rainfall-induced landslide.

The residual soil with higher suction tend to have stronger bonding around soil particle contacts and thus the difference between the peak and ultimate shear strength appear to be greater for higher suction. Upon constant-water content shearing, the unsaturated soil tended first to slightly contract and then dilate. The soil suction appeared to vary slightly in accordance with the volume change, which is decreasing followed by increasing. The bonding effect of suction appears to be similar to over-consolidation and cementation. The strengths determined from multistage tests appear to be bounded within the envelopes of peak and ultimate strength.

Despite the material's heterogeneity, a simple equation can be used satisfactorily to predict the ultimate strength of unsaturated residual soils, based on the volumetric

water contents at 33kPa and zero suction. The prediction is on the safe-side for lower values of suction.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledges the research grant no. MRG4980086 of the Thailand Research Fund and Commissions of Higher Education, Thailand, and Mr. Narin Hansachainun for his assistance in performing the direct shear tests in this research project.

References

- Asian Disaster Preparedness Center (2006). Rapid assessment, Flashflood and landslide disaster in the provinces of uttaradit and sukhothai, northern Thailand, May 2006. (www.adpc.net/enews/july/Uttaradit_rapidassessment.pdf)
- Atkinson, J.H. (1993). The mechanics of soils and foundations, London: McGraw Hill.
- Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E. & Donald, I. B. (1960). Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. *Res. Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils*, Boulder, 503-532.
- Cho, S. E. and Lee, S. R. (2002). Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE*. Vol. 128, No. 9, September 1, pp. 756-763
- Collins, B. D, and Znidarcic, D. (2004). Stability analyses of rainfall-induced landslides. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE*. April 2004, Vol. 130, No. 4, pp. 362–372.
- Cunningham, M. R., Ridley, A. M., Dineen, K. & Burland, J. J. (2003). The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay. *Geotechnique* **53**, No. 2, 183–194
- Delage, P., Romero, E., and Tarantino, A. (2008). Recent developments in the techniques of controlling and measuring suction in unsaturated soils. *Proceedings of the first European conference on unsaturated soils, E-UNSAT 2008, Durham, United Kingdom, July 2-4*
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. New York: Wiley.
- Gan J. K. M. & Fredlund, D. G. (1996). Shear strength characteristics of two saprolitic soils. *Can. Geot. J.* **33**, 595-609.
- Ho. D.Y.F. and Fredlund, D.G. (1982). A multistage triaxial tests for unsaturated soils. *ASTM, Geotechnical Testing Journal*, 5(1/2): 18-25
- Johnson, K.A., and Sitar, N. (1990) Hydrological conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27: 789-801

Jotisankasa, A. (2005). Collapse behaviour of a compacted silty clay.. Ph.D. thesis, Imperial College London.

Jotisankasa, A., Porlila, W., Soralump, S., and Mairiang W. (2007a), Development of a low cost miniature tensiometer and its applications, *The 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia 2007)*, Nanjing, China

Jotisankasa, A., Ridley, A., Coop, A. (2007b). Collapse behavior of a compacted silty clay in the suction-monitored oedometer apparatus, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, July

Jotisankasa, A., Kulsuwan, B., Toll, D. G. and Rahardjo, H. (2008). Studies of Rainfall-induced Landslides in Thailand and Singapore. *Proceedings of the first European conference on unsaturated soils, E-UNSAT 2008, Durham, United Kingdom, July 2-4*

Jotisankasa, A. and Vathananukij, H. (2008). Investigation of soil moisture characteristics of landslide-prone slopes in Thailand. *Proceedings of the International Conference on Management of Landslide Hazard in the Asia-Pacific Region*. Sendai, Japan, November 11-15

Oberg, A.L. & Salfors, G. (1997). Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curves. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 20, No. 1, pp. 40-48.

Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., and Leong, E. C. (2007). Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*. Vol. 133, No. 12, December 1, pp. 1532-1543.

Springman, S.M., Jommi, C. & Teyssere, P. (2003). Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history. *Geotechnique* **53**, No. 1, 3-10

Tarantino, A. & Tombolato, S. (2005). Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Geotechnique* **55**, No. 4, 307-317

Toll, D.G., Ali Rahman, Z. & Gallipoli, D. (2008). Critical state conditions for an unsaturated artificially bonded soil. *Proceedings of the first European conference on unsaturated soils, E-UNSAT 2008, Durham, United Kingdom, July 2-4*

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufhal D.E. & Clifton, A. W. (1996). Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can. Geot. J.* 33, 379-392.

DEVELOPMENT OF A LOW-COST MINIATURE TENSIO METER AND ITS APPLICATIONS

Apiniti Jotisankasa, Wissanupong Porlila, Suttisak Soralump & Warakorn Mairiang
Geotechnical Engineering Research and Development Center (GERD)
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering
Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Abstract: The paper presents a development of the new miniature tensiometers. Two types of tensiometers are being developed, one of which is designed to measure matrix suction upto 80 kPa, another for suctions in excess of 100 kPa. The device makes use of miniature commercial piezoresistive pressure sensor which are available at relatively low cost. Examples of applications of these devices are given for in-situ suction measurement, and soil-water retention curves determination. A particular attention is drawn to the determination of the effective strength parameter of soft Bangkok clay using the suction-monitored unconfined compression test.

1. INTRODUCTION

Tensiometers have been used extensively to measure the matrix suction of unsaturated soils. Their geotechnical applications include assessing the stability of unsaturated soil slope, the volume change behaviour, and the flow phenomena in vadose zone. The device directly measures the tensile stress or negative pressure of the water within soil pores ($-u_w$), which is equivalent to the matrix suction ($s = u_a - u_w$) of the soil when the pore air pressure equals atmospheric value ($u_a = 0$). The device essentially consists of a high air-entry porous ceramic filter, a reservoir of de-aired water, and a pressure-measuring device of some types, which can be either a vacuum gauge, a manometer or an electronic pressure sensor. Conventional forms of tensiometers constantly suffer from air-bubble formation within the water reservoir when the tensile stress of water exceeds about 90kPa.

A breakthrough in the development of tensiometer started with Ridley & Burland (1993) who first developed the high-capacity tensiometers. These tensiometers are capable of measuring negative pore water pressure up to about 1500kPa for relatively long periods (e.g. > 1 months) without problems of bubble formation. Special saturation and preconditioning procedures for the tensiometers however have to be strictly followed if the devices are to function appropriately. Similar developments of the high-capacity tensiometers have since been made by various subsequent researchers (e.g. Fredlund et al., 1997, and Lourenço et al., 2006). This paper presents another development of the tensiometers which make use of a silicon pressure sensor, manufactured commercially using the micromachined-fabrication

technology. Some examples of the geotechnical applications of the developed tensiometers are presented.

2. THE LOW-COST MINIATURE TENSIO METERS

As discussed earlier, the three main components of tensiometers are: ceramic filter, reservoir of de-aired water, and a pressure measuring device. Normally, the size of water reservoir is designed to be relatively small so that the response time of the tensiometer is reasonably fast. A smaller size of the reservoir also reduces the likelihood of bubble formation within the device (Ridley & Burland, 1993). The pressure sensor is to be placed as close as possible to the porous ceramic tip in order to avoid head loss between different elevations of the tip and the sensor. The proximity of the sensor to the porous tip increases the working range of the tensiometer (a distance of 1m ~ 9.81 kPa).

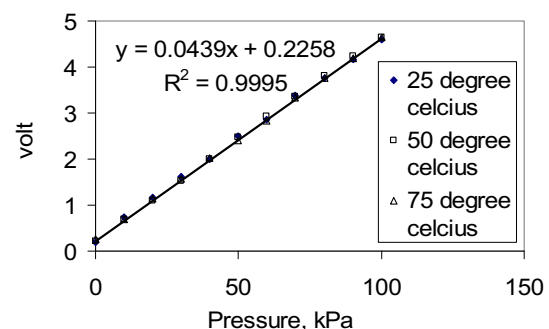


Figure 1. Example of calibration relationship of the pressure sensor for different temperatures.

The advent of the Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMs) technology has brought about commercially available single-silicon piezoresistive pressure sensor with high reliability and accuracy at competitively low cost. The pressure sensors of this type are normally available in temperature compensated, calibrated, and signal conditioned (or amplified) configurations. Hence the thermal stability of this type of sensor is excellent without any complicated external signal conditioning system. Figure 1 demonstrates the repeatability of the calibration relationships of the sensor used with the tensiometer carried out at different temperatures in the laboratory at Kasetsart University. This type of pressure sensor also has high output sensitivity (in the range of 6-40mV/kPa for different types of sensor), and thus ideally suited for using with the proposed miniature tensiometer. Two types of tensiometers, used for measuring different ranges of suction, are being developed as explained in the following.

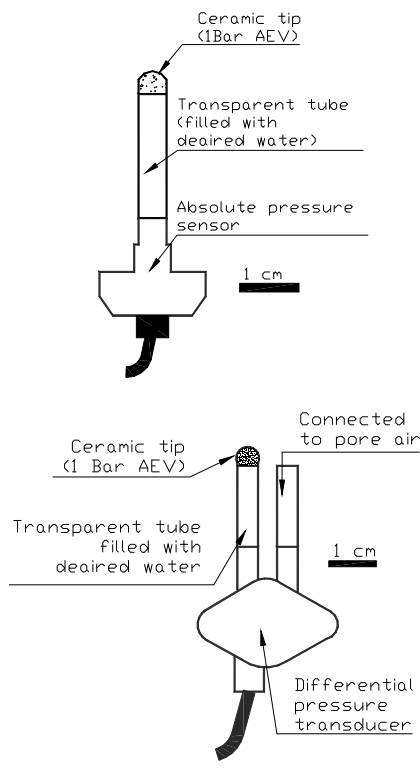


Figure 2. Configuration of the low-suction KU tensiometers, a) with absolute pressure sensor, b) with differential pressure sensor.

2.1 Low-suction KU tensiometer

This type of Kasetsart University (KU) tensiometer employs porous ceramic of 1Bar air entry value, and its maximum working range is limited to a suction of about 0.8Bar. There are 2 configurations of the low-suction tensiometer, depending on the type of pressure sensor used. Figure 2a show the tensiometer which uses the absolute pressure sensor, sensing the pressure referenced to vacuumed chamber within the sensor. The tensiometer in Figure 2b uses the differential pressure, whose one of the two ports is connected to porous tip contacted with soil pore water, and another port to either atmosphere or the air within soil pore. When connecting this port to soil pore air, the tensiometer automatically measures the difference between pore air pressure and pore water pressure, ($s = u_a - u_w$), thus the matrix suction. This will be of advantage when using this type of tensiometer to measure matric suction in compacted clay fill where air pressure can be greater than atmospheric value.

The tensiometer is calibrated using hanging water column, where the ratio between the distance of the water column open end below the sensor is about 1m per 9.8kPa of suction. The method used to saturate the low-suction tensiometer with de-air water is similar to the approach suggested by Ridley & Burland (1993), however, without pressurisation the tensiometer at high pressure. The low-suction KU tensiometers have been used in various research works at Kasetsart University and examples of their application are given in Sections 3, 4 and 5.

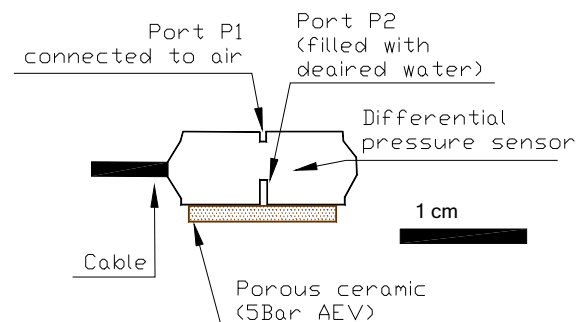


Figure 3. Configuration of the high-suction KU tensiometers.

2.2 High-suction KU tensiometer

Shown in Figure 3 is another form of tensiometer designed to measure suction higher than 1Bar. The size of water reservoir of the tensiometer (in port P2) is designed to be relatively small ($\sim 0.06\text{cm}^3$) and the device needs to be preconditioned before use. The method used to saturate the tensiometer with de-air water is similar to the approach by Ridley & Burland (1993). The tensiometer is first evacuated under dry condition before submerging the device with de-aired water under vacuum. Afterwards, the tensiometer is pressurised under water at 1500 kPa. A preliminary testing of the high-suction tensiometer shows that suction upto 350 kPa can be measured with this device. Figure 4 shows result of suction measurement on a gradually drying clay sample over a period of 12 days, before bubble forming in the tensiometer. However, the success rate of manufacturing the well-performing high-suction tensiometer is still unsatisfactory and need further research. It is believed that the Epoxy-based material used to manufacture the pressure sensor body might have some imperfections on the surface which provides nuclei of air bubble formation when under high tensile stress. More research needs to be carried out to improve further the performance of the high-suction KU tensiometer. The high-suction KU tensiometer also employs differential pressure sensor, thus automatically measuring the difference between pore air pressure and pore water pressure, ($s = u_a - u_w$), i.e. the matrix suction.

3. IN-SITU SUCTION MEASUREMENTS

Figure 5 shows schematically the method used for installing the KU tensiometer in-situ. Firstly, a borehole is formed, and a plastic casing is inserted (stage 1). A guide rod with a drill bit is then used to drill a small hole, where the tensiometer tip is gently pushed in afterwards with the guide rod (stages 2-3-4). Some results of the suction measurement during rain infiltration simulation on a landslide prone area of weathered granite, are shown in Figure 6. The weathered granitic soils are of silty and loamy type. Movement of the wetting front can be seen in the figure. The data of suction variation with depth and time from the simulation can also be used to back calculate the permeability variation with suction of the ground profile in the tested area, provided that the soil-water retention curves of the soils are known.

4. DETERMINATION OF SOIL-WATER RETENTION CURVE

In general the soil-water retention curve (SWRC) is determined using the pressure plate apparatus. Recently, some researchers make use of the tensiometer to determine the retention curves continuously (Cunningham, 2000, Toker et al., 2004). This novel use of the tensiometer simplifies the process and apparatus used to determine the soil-water retention curve.

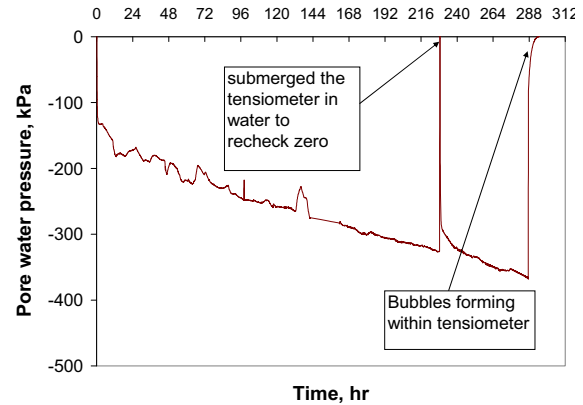


Figure 4. Results of suction measurement of a gradually drying clay sample.

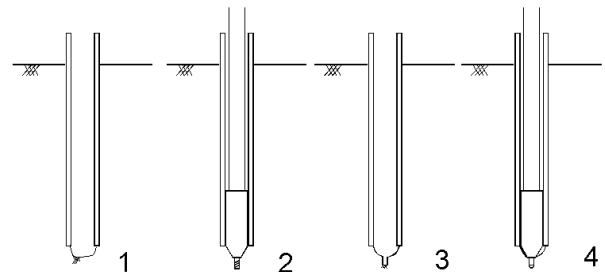


Figure 5. Installation of the tensiometer for in-situ suction measurement.

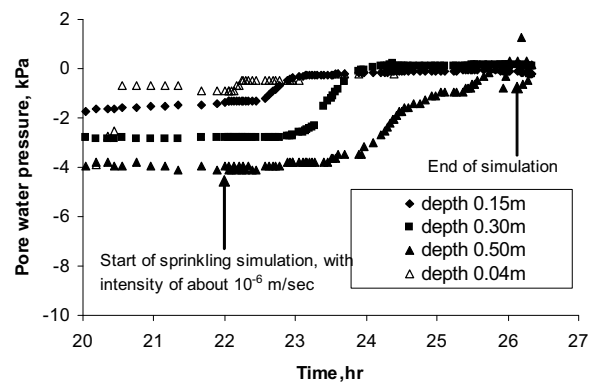


Figure 6. Suction variation with time from various depths during a rainfall simulation.



Figure 7. Experimental set-up for determining the soil-water retention curve using the tensiometer.

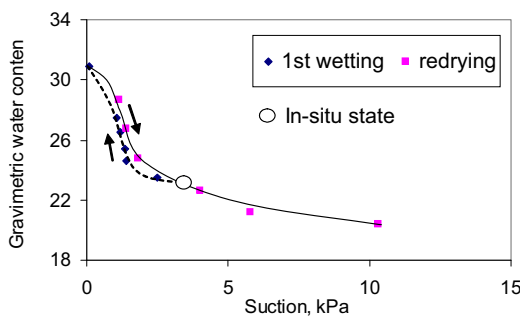


Figure 8. Soil-water retention curves of a granitic residual soil determined using the tensiometer.

The KU tensiometers have been used to investigate the SWRC of the same granitic soil from the landslide area. Suction measurement is made on a carefully wrapped sample, inside a sealed container. Figure 7 shows the experimental set up used for the measurement. In this preliminary study, after each suction measurement, the sample is either dried or wetted by about 1% water content in order to obtain the soil-water retention curve. Drying is realised by exposing the sample in the air, while wetting is achieved by directly adding water into the sample using syringe and/or fog generator. Some results of these preliminary tests are shown in Figure 8. This method has the advantage in that the equipment used is much simpler than the conventional pressure plate or suction plate.

5. SUCTION-MONITORED UNCONFINED COMPRESSION TESTS

In Asian countries, the unconfined compression tests are normally carried out to determine the design parameters for structures founded on both fully saturated soils and unsaturated soil. Thus the total stress analysis, and undrained shear strength,

($s_u = q_u/2$) are normally employed in the routine designs.

Cunningham et al. (2003) demonstrate that the effective stress failure envelope of a silty clay determined using unconfined compression tests with suction measurement coincides with that from conventional effective-stress triaxial testing, when the samples are close to full saturation. Similarly, in this study, three preliminary unconfined compression tests were carried out on the Bangkok clay from various depths of 1-4 m. The soil samples were obtained from a test site at Asian Institute of Technology, AIT, and were fully saturated. Figure 9 shows the experimental set up. Note that the tensiometer was inserted 7-8mm into the wrapped soil samples with diameter of 65mm. It is believed that the insertion of the tensiometer into the soil did not cause excessive interference with the shearing process and the measured soil strength, although more research needs to be carried out to verify this assumption. The effective stress paths of the samples during unconfined shearing are shown in Figure 10, using the MIT notations, where

$$q = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v}{2} \quad (1)$$

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} = \frac{\sigma_v}{2} + s \quad (2)$$

and s is the matrix suction monitored during the tests, using the tensiometer. This soft clay has value of air entry suction greater than the suction values shown in the figure and thus fully saturated throughout the tests. The value of the effective angle of shearing resistance, ϕ' , obtained from these tests is 29° , with effective cohesion equal to zero. This parameter is close to the previously reported angle of shearing resistance, ϕ' , of about 30° of the Bangkok clay (e.g. Balasubramaniam et al., 1992, and Shibuya & Tamrakar, 2003;). In addition, the sample from a shallower depth of crust zone (1-2m) tends to behave like a more overly-consolidated clay with dilatant behaviour and higher suction. It thus can be seen that very useful additional information can be obtained from the routinely performed unconfined compression tests, when the tensiometers are incorporated.



Figure 9. Experimental set up of the suction-monitored unconfined compression tests on soft Bangkok clay.

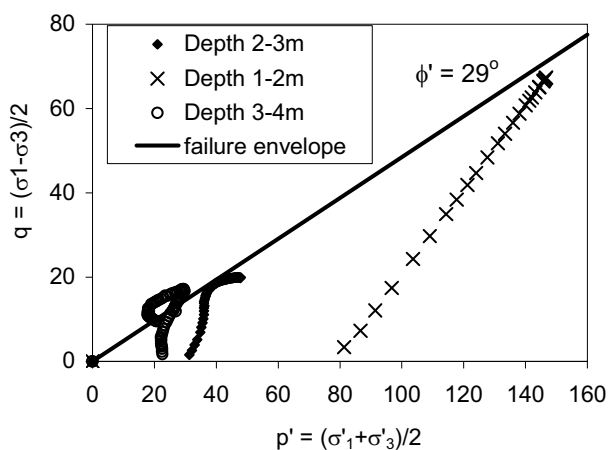


Figure 10. Effective stress paths of the Bangkok clay during suction-monitored unconfined compression tests.

6. OTHER POSSIBLE APPLICATIONS

With the relatively low cost of the tensiometers, it is very feasible that the devices are incorporated into other standard apparatus, such as the oedometer, direct shear box, and triaxial apparatus. Collapse-on-wetting behaviour of a silty clay have been thoroughly investigated by Jotisankasa (2005) using the suction-monitored oedometer. Tarantino, & Tombolato (2005) incorporate the Imperial College type tensiometer into their direct shear apparatus, obtaining coupling hydraulic and mechanical constitutive equations of a compacted kaolin. Many useful informations thus can be obtained when incorporating the miniature tensiometers into conventional apparatus.

7. CONCLUSIONS

An ongoing development of the miniature tensiometers at Kasetsart University is reported. Two types of the tensiometers are being developed, those measuring suction below 1Bar and those measuring suction up to 3 Bar. The devices have been used for in-situ suction measurement, and soil-water retention curve determination. In particular, the suction-monitored unconfined compression tests were carried out, enabling determination of the effective strength parameters of the soft Bangkok clay. The miniature tensiometer appears a promising tool for investigating the behaviour of both fully saturated and unsaturated soils.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge the research grant no. MRG4980086 of the Thailand research fund, as well as the Faculty of Engineering, Kasetsart University and the Department of Water resource of Thailand who partly funded this project. They are also thankful to the students of the class on “partly saturated soil behaviour” at Kasetsart University, who helped setting up the equipments and performing the tests.

REFERENCES

- Balasubramaniam, A.S., Handali, S. and Wood, D. M. 1992. *Pore pressure: stress ratio relationship for soft Bangkok clay*. Soils and Foundations 32(1): pp. 117-131.
- Cunningham, M.R. 2000. *The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated soil*. Ph.D. thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
- Fredlund, D.G., Gan, J.K.M., Guan, Y. and Richardson, N. 1997. *Suction measurements on a Saskatchewan soil using a direct measurement, high suction sensor*. In Transportation Research Board 76th Annual Meeting, Washington, DC.
- Jotisankasa, A. 2005. *Collapse behaviour of a compacted silty clay*. PhD. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London
- Lourenço, S.D.N., Gallipoli, D., Toll, D.G. and Evans, F.D. 2006. *Development of a Commercial Tensiometer for Triaxial Testing of Unsaturated Soils*. In 4th International Conference on Unsaturated Soils, Carefree,

Arizona, USA, American Society of Civil Engineers.

Ridley, A.M. and Burland, J.B. 1993. *A new instrument for the measurement of soil moisture suction*. Géotechnique 43(2): pp. 321-324.

Shibuya, S. and Tamrakar, S.B. 2003. *Engineering properties of Bangkok clay*. In Tan et al. (eds.), Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils: pp. 645-692.

Tarantino, A. and Tombolato, S. 2005. *Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay*. Géotechnique 55(4): pp. 307-317

Toker, N.K., Germaine, J.T., Sjoblom, K.J. and Culligan, P.J. 2004. *A new technique for rapid measurement of continuous soil moisture characteristic curves*. Géotechnique 54(3): pp. 179-186