

กำลังสถานะวิกฤตของทรายปนดินเหนียวปรับปรุงด้วยวัสดุรีไซเคิลและซีเมนต์ ภายใต้การทดสอบแรงอัดสามแกน

Critical State Strength of Clayey Sand Stabilized by Recycled Materials and Cement under Triaxial Compression

จิระยุทธ สืบสุข* อนิรุทธิ์ สุขแสน คมกร ไชยเดชาธร เชิดศักดิ์ สุขศิริพัฒน์พงษ์
ศูนย์วิจัยเพื่อความก้าวหน้าด้านวิศวกรรมโยธาและวัสดุก่อสร้าง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา 30000

Jirayut Suebsuk* Aniroot Suksan Komkorn Chaiyadachatom Cherdskak Suksiripattanpong
Research Center for Advances in Civil Engineering and Construction Materials, Department of Civil
Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan
Nakhon Ratchasima 30000

Tel : 08-3739-8434 E-mail: jirayut.su@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนออิทธิพลของผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล (Recycled Asphalt Pavement, RAP) และปริมาณซีเมนต์ต่อกำลังสถานะวิกฤตภายใต้แรงอัดสามแกนของทรายปนดินเหนียวปรับปรุงด้วย RAP และซีเมนต์ การศึกษาในห้องปฏิบัติการทำโดยทดสอบการเฉือนภายใต้แรงอัดสามแกนกับตัวอย่างดินผสม RAP และซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อปริมาณ RAP และซีเมนต์เพิ่มขึ้นกำลังและความแกร่งของวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เส้นทางการเค้นประสิทธิผลของวัสดุไม่ผสมซีเมนต์เพิ่มสูงขึ้นและเข้าสู่สถานะวิกฤตโดยไม่แสดงพฤติกรรมการอ่อนลงด้วยความเครียด ในขณะที่วัสดุผสมซีเมนต์ร้อยละ 3 แสดงพฤติกรรมการอ่อนลงหลังจากจุดที่กำลังสูงสุด ปริมาณ RAP และซีเมนต์ในวัสดุผสมมีบทบาทสำคัญต่อเส้นทางการเค้นและกำลังสูงสุดภายใต้ความเค้นโอบรัดต่างๆ สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยว (cohesion intercept, q_0) กับปริมาณซีเมนต์ เมื่อปริมาณซีเมนต์เพิ่มค่า q_0 เพิ่มขึ้นเนื่องจากกำลังเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคดิน RAP และวัสดุประสานซีเมนต์จากผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ความชันของเส้นสถานะวิกฤต (M) ขึ้นกับมุมเสียดทานภายในของวัสดุผสม การเพิ่มขึ้นของปริมาณ RAP และ

ปริมาณซีเมนต์ส่งผลต่อการเพิ่มความชันของเส้นสถานะวิกฤตอย่างมีนัยสำคัญ

คำหลัก กำลังสถานะวิกฤต ทรายปนดินเหนียว ผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล การปรับปรุงด้วยซีเมนต์

Abstract

This research presents the influence of recycled asphalt pavement (RAP) and cement contents on the critical state strength of RAP and cement stabilized clayey sand under triaxial compression shearing. The laboratory investigations were performed during triaxial compression shearing test on the soil-RAP-cement mixtures under different mix proportions. With an increase in RAP and cement contents (C), the strength and stiffness of mix material tend to increase. The effective stress path of uncemented mixture rise up to critical state line (CSL) without the strain softening behavior, while the mix mixture with $C = 3\%$ shows strain softening after peak strength. The RAP and cement contents in the mix materials play a significant role on the stress path and peak strength under different

confinements. For cohesion intercept (q_0) versus cement content, as the cement content increases, the q_0 increase due to an increasing bonding between the solid particles (soil and RAP) and cement binder, which is caused by the hydration reaction. The slope of critical state line (M) is depended on the internal friction angle of mix material. An increase in RAP and cement contents, the M increase significantly.

Keywords: critical state strength, clayey sand, recycled asphalt pavement, cement stabilization

1. บทนำ

การซ่อมหรือทำผิวทางใหม่เมื่อถนนชำรุดหรือหมดอายุการใช้งานต้องรื้อผิวทางเดิมจนถึงชั้นพื้นทางออก ก่อนทำชั้นพื้นทางและผิวทางใหม่ ผิวทางแอสฟัลต์ (asphalt pavement) เดิมมักถูกไปกองไว้ในที่ต่างๆ เป็นขยะที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ ในแต่ละปีตำรวจทางถนนลาดยางที่มีการซ่อมแซมโดยรื้อผิวทางแอสฟัลต์ทั้งมีระยะทางหลายพันกิโลเมตรจะมีปริมาณขยะผิวทางแอสฟัลต์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปีจำนวนมากถูกกองทิ้งข้างทางหลวงดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญด้านสิ่งแวดล้อมทั้งในรูปแบบของขยะของแข็งและการชะล้างโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ [1]

ผิวทางเดิมของถนนลาดยางประเภทนี้มักเป็นวัสดุจำพวกแอสฟัลต์คอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุผสมระหว่างยางแอสฟัลต์และมวลรวม (เช่น หินคลุก เป็นต้น) ในอดีตเมื่อรื้อผิวทางเก่าที่เสียหายเพื่อซ่อมแซมแอสฟัลต์คอนกรีตเดิมจะถูกรื้อทิ้งเป็นขยะของเสียนำไปกองทิ้งโดยไม่มีประโยชน์ การนำขยะผิวทางแอสฟัลต์เหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่นๆ มักเรียกว่า Recycled or Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) [2] คุณสมบัติของ RAP อาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเสื่อมสภาพตามอายุและการใช้งาน แต่การเสื่อมสภาพส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการเสียรูปของยางแอสฟัลต์และการจับยึดกันของมวลวัสดุแต่มวลรวมยังคงมีสภาพดีหรืออาจเสียหายเล็กน้อยจากการย่อยลดขนาด RAP สามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการนำมาบดอัดผสมกับดินชั้นพื้นทางเดิมหรือวัสดุคัดเลือกตามมาตรฐานเพื่อเป็นชั้นพื้นทางใหม่หรืออาจเพิ่มกำลังด้วยการปรับปรุงโดยซีเมนต์ [3 – 8] การใช้งาน RAP ใน



รูปที่ 1 ขยะผิวทางแอสฟัลต์ ถนนมิตรภาพ จังหวัดสระบุรี

ปัจจุบันของกรมทางหลวงคือวิธีการหมุนเวียนผิวทางแอสฟัลต์เก่ามาใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่ (pavement recycling) [9] แม้จะใช้การหมุนเวียน RAP นำกลับมาใช้เป็นชั้นพื้นทางใหม่แล้วยังคงมี RAP ส่วนที่เหลือจากการใช้งานโดยตรงเช่นกัน ซึ่งวัสดุ RAP นี้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุถม (fill material) หรืออาจใช้เป็นวัสดุทำชั้นทางสำหรับการก่อสร้างถนนใหม่ได้ โดยการผสมกับวัสดุคัดเลือกในสนามแล้วใช้เป็นชั้นรองพื้นทางใหม่ การนำวัสดุ RAP ผสมดินเดิมในสนามเป็นวัสดุถมอาจพบปัญหาเมื่อวัสดุคัดเลือกในสนามเป็นดินเม็ดละเอียด เช่น ทรายปนดินเหนียว ดินเม็ดละเอียดจะเกิดการอัดตัวคายน้ำเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกในช่วงใช้งานส่งผลต่อการเสีรูปของวัสดุเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกใช้งาน[10] อย่างไรก็ตามการพิจารณาของวัสดุผสมระหว่างดินเม็ดละเอียด RAP และซีเมนต์มีความแตกต่างกับการตามลักษณะการใช้งานการใช้งานเป็นชั้นพื้นทางปกติเน้นที่การรับกำลังที่เพียงพอต่อน้ำหนักบรรทุกใช้งานเท่านั้น แต่ถ้านำวัสดุผสมนี้ไปใช้เป็นวัสดุถมที่มีความเค้นกดทับมาก (ความลึกของการกดทับมาก) พฤติกรรมความเค้นและความเครียดและกำลังสถานะวิกฤตของวัสดุขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือความดันน้ำขณะเฉือนและการเสีรูปถาวรของวัสดุ อย่างไรก็ตามการนำวัสดุ RAP มาใช้งานผสมดินเดิมเพื่อใช้เป็นวัสดุชั้นทางหรือวัสดุถมในเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือมักต้องผสมวัสดุคัดเลือกในท้องถิ่นที่เป็นดินลูกรังหรือทรายปนดินเม็ดละเอียดซึ่งมักเกิดการอัดตัวคายน้ำเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก การนำวัสดุชนิดนี้มาใช้งานจึงต้องศึกษาพฤติกรรมภายใต้ความเค้นใช้งานของวัสดุผสมชนิดนี้ให้ชัดเจนก่อนจึงจะสามารถออกแบบใช้งานได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย

ด้วยปัญหาการใช้งานวัสดุ RAP ผสมดินเดิมในสนามซึ่งเป็นทรายปนดินเหนียวเพื่อใช้เป็นวัสดุถมข้างต้น บทความนี้ศึกษาผลของปริมาณ RAP และซีเมนต์ที่ใช้ปรับปรุงต่อเส้นทางความเค้นประสิทธิผล โดยทดสอบการเหนียวภายใต้แรงอัดสามแกนเพื่อให้เกิดความเข้าใจในพฤติกรรมในช่วงใช้งานของวัสดุผสมดังกล่าวข้างต้นสำหรับนำไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างและเป็นองค์ความรู้ในการใช้งานวัสดุนี้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด

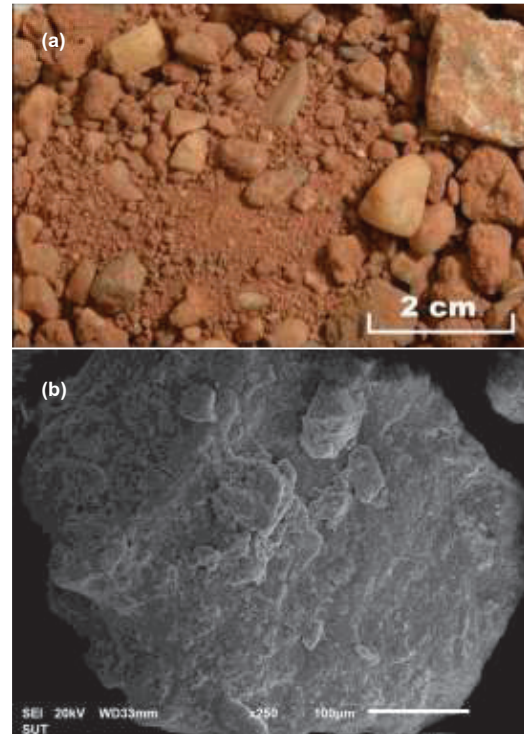
2. วิธีการทดสอบ

2.1) ดินตัวอย่างและผิวทางแอสฟัลต์รีไซเคิล

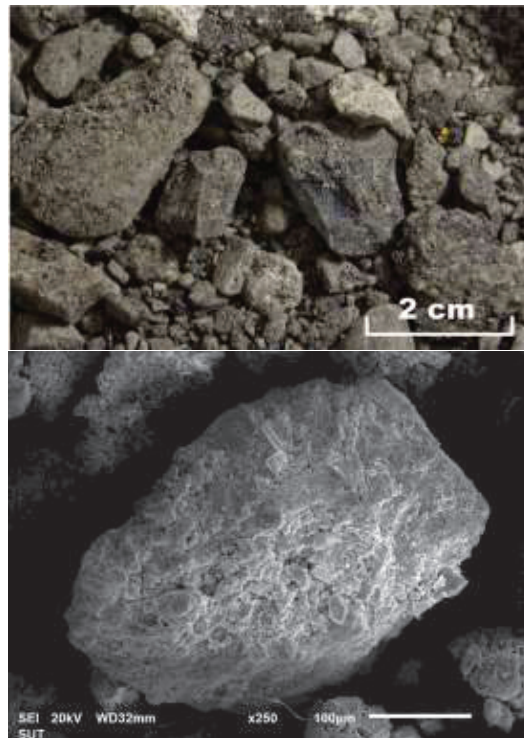
ดินตัวอย่างเป็นทรายปนดินเหนียวที่มีปริมาณทรายร้อยละ 80 ที่เหลือเป็นส่วนละเอียดร้อยละ 20 ดินส่วนละเอียดมีขีดจำกัดเหลวและขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 21.8 เปอร์เซ็นต์ และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [11] ความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.68 [12] ตัวอย่างดินจำแนกตามระบบ Unified Soil Classified System (USCS) [13] เป็นทรายปนดินเหนียว (SC) RAP มีความถ่วงจำเพาะ 2.60 [14] ปริมาณยาง (asphalt binder) ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ RAP ถูกจำแนกตามระบบ USCS [13] เป็นกรวดที่มีขนาดละเอียด (GP) ตัวอย่างดินและ RAP ถูกคัดขนาดโดยตะแกรงเบอร์ 3/8 เพื่อคัดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 มิลลิเมตรออก ก่อนนำมาใช้ทดสอบบดอัด การทดสอบการบดอัดตัวอย่างทรายปนดินเหนียวผสม RAP ต่างๆ โดยวิธีสูงกว่ามาตรฐาน (modified proctor test) [15] ภาพถ่ายขนาดปกติและภาพถ่ายขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์ SEM แสดงตามรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ทรายปนดินเหนียวมีพื้นผิวอนุภาคที่เรียบและมีลักษณะเป็นชั้นที่ต่อเนื่องกัน ส่วน RAP มีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ และมีอนุภาคเล็กๆ ลักษณะทรงเหลี่ยมอยู่ที่บริเวณพื้นผิวโดยรอบ ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นยางแอสฟัลต์ที่เป็นวัสดุประสานเดิม

2.2) การเตรียมตัวอย่าง การทดสอบอัดตัวคายน้ำ และการทดสอบการเหนียวภายใต้แรงอัดสามแกน

จากการบดอัดทำการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการรับแรงอัดโดยการอัดรูปด้วยแบบหล่อตัวอย่างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 ทรายปนดินเหนียว (a) Photograph (b) SEM Micrograph



รูปที่ 3 RAP (a) Photograph (b) SEM Micrograph

ความสูง 100 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบแรงอัดสามแกน และวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สูง 20 มิลลิเมตร ที่หน่วยน้ำหนักและปริมาณน้ำเหมาะสม (optimum moisture content) ของแต่ละอัตราส่วนปริมาณซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 0 1 และ 3 ของหน่วยน้ำหนักดินแห้ง จากนั้นห่อก้อนตัวอย่างด้วยพลาสติกเพื่อรักษาความชื้นและบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน การทดสอบการอัดตัวของตัวอย่างทำตามมาตรฐาน ASTM D2435 [16] โดยตัวอย่างทดสอบอิมตัวด้วยน้ำก่อนการทดสอบ ส่วนการทดสอบการเนียนภายใต้แรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำทำตามมาตรฐาน ASTM D4767 [17] เส้นสถานะความเค้นนำเสนอนในมิติของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบน (deviator stress, q) กับความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ย (mean effective stress, p')

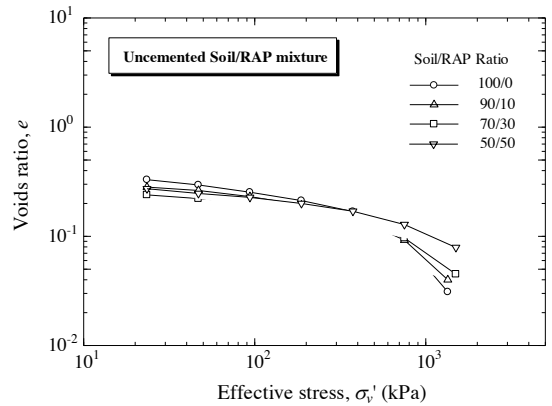
3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

3.1) พฤติกรรมการอัดตัวของวัสดุผสมที่มีน้ำ

ลักษณะพฤติกรรมของการอัดตัวของวัสดุผสมระหว่างทรายปนดินเหนียวและ RAP แสดงดังรูปที่ 4 จากการทดสอบการอัดตัวแบบหนึ่งมิติแสดงให้เห็นว่าทรายปนดินเหนียวไม่ผสม RAP เม็ดดินมีขนาดเล็กซึ่งสามารถอัดตัวจนเม็ดดินชิดกันมากขึ้น แรงดันน้ำภายในมวลดินระบายออกจากมวลดินเกิดการอัดตัวของน้ำ ส่งผลให้อัตราส่วนโพรงของดินลดลง อัตราส่วนโพรงของดินลดลงตามความเค้นประสิทธิผลที่เพิ่มขึ้น ความเค้นครากจากการอัดตัวของน้ำของทรายปนดินเหนียวมีค่าประมาณ 700 กิโลปาสคาล เมื่อวัสดุผสมมีส่วนผสมของ RAP มากขึ้นความเค้นครากของวัสดุมีแนวโน้มคงที่ไม่ขึ้นกับปริมาณ RAP แต่มีการเสีรูปลดลงหลังความเค้นเกินกว่าความเค้นคราก อัตราส่วนโพรงเริ่มต้นลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

3.2) กำลังสถานะวิกฤต

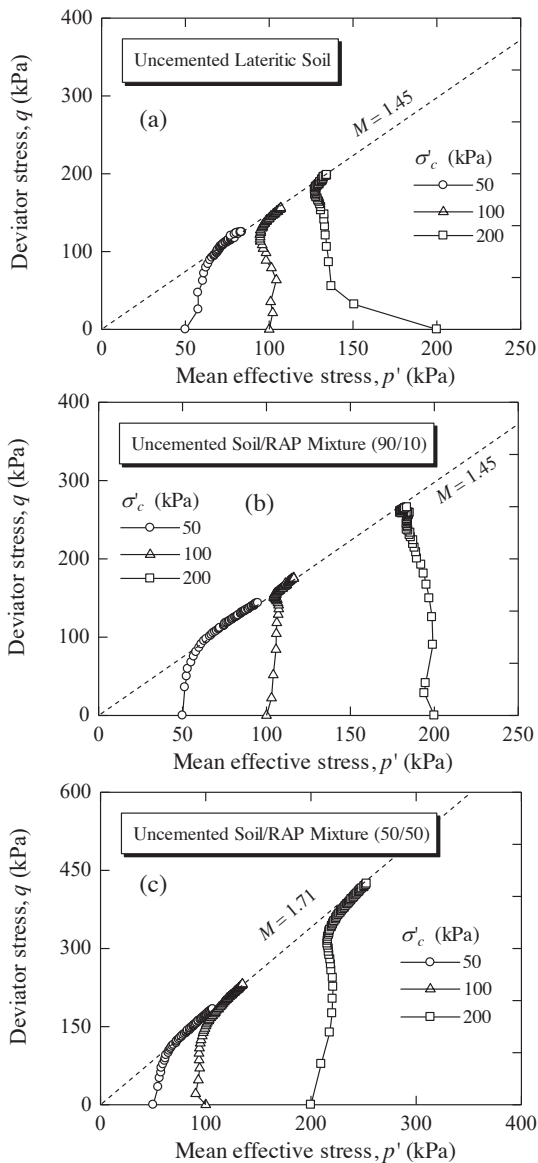
จากการทดสอบการเนียนภายใต้แรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ความเค้นเบี่ยงเบนกับความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยหรือเส้นทางความเค้น (stress path) ของทรายปนดินเหนียวที่ปริมาณ RAP ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5 พฤติกรรมเส้นทางความเค้นของทรายปนดินเหนียวที่แต่ละความเค้นโอบรัด (confining stress, σ'_c)



รูปที่ 4 การอัดตัวของน้ำหนึ่งมิติของวัสดุผสมที่สัดส่วนต่าง ๆ

มีลักษณะต่างกันตามความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยเริ่มต้น ที่ความเค้นโอบรัดต่ำเส้นทางความเค้นเคลื่อนไปด้านขวาอย่างชัดเจนก่อนเข้าสู่เส้นสถานะวิกฤต เมื่อความเค้นโอบรัดเพิ่มขึ้นเส้นทางความเค้นมีแนวโน้มเคลื่อนจากด้านขวามาซ้ายแล้วจึงวกกลับไปทางขวา ก่อนเคลื่อนเข้าสู่เส้นสถานะวิกฤต (Critical State Line, CSL) สำหรับทรายปนดินเหนียวไม่ผสมซีเมนต์ ความชันของเส้นสถานะวิกฤต (slope of critical state line, M) มีค่าเท่ากับ 1.45 และเพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณ RAP ในส่วนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อความเค้นโอบรัดเพิ่มขึ้นส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มขึ้นของความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุด อย่างไรก็ตามจุดวิบัติของตัวอย่างทดสอบที่แต่ละความเค้นโอบรัดอยู่บนเส้นสถานะวิกฤตเดียวกัน

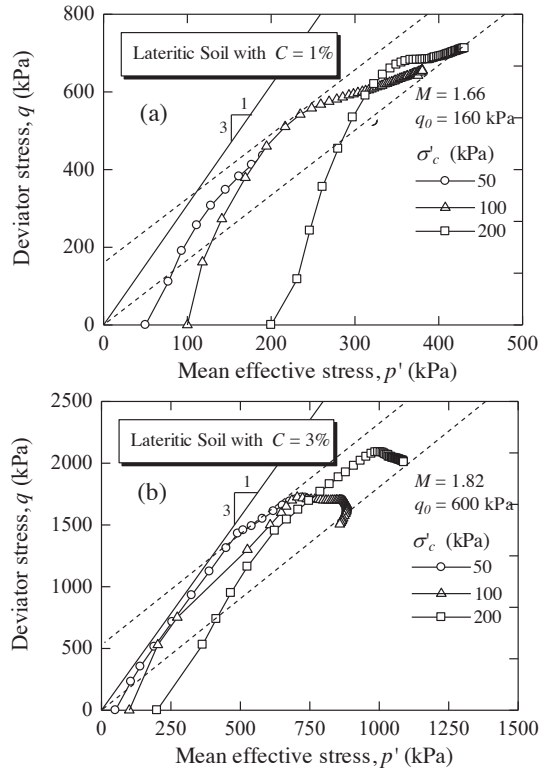
ผลจากการปรับปรุงทรายปนดินเหนียวด้วย RAP และซีเมนต์บดอัดต่อเส้นทางความเค้นแสดงดังรูปที่ 6 ถึง 8 สำหรับปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 0 1 และ 3 ตามลำดับความเค้นเบี่ยงเบนสูงสุดของเส้นทางความเค้นแต่ละความเค้นโอบรัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ ที่ปริมาณซีเมนต์ร้อยละ 3 พบพฤติกรรมการณ์อ่อนลงหลังจากจุดสูงสุด (peak strength) นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นสถานะวิกฤตมีความชันสูงขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณซีเมนต์ด้วย เมื่อใช้เส้นตรงที่มีความชันเดียวกับเส้นสถานะวิกฤตลากสัมผัสกับเส้นทางความเค้นทางด้านซ้ายจะปรากฏจุดตัดของเส้นความชันกับแกนความเค้นเบี่ยงเบนซึ่งเรียกว่า Cohesion intercept (q_0) ค่า q_0 จะปรากฏกับวัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ จากผลการทดสอบอัดตัวของน้ำจุดครากของทรายปนดินเหนียวบดอัดมี



รูปที่ 5 ความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยของทรายปนดินเหนียวผสม RAP (ไม่ผสมซีเมนต์) ที่ปริมาณ RAP ต่างๆ (a) ไม่ผสม (b) ร้อยละ 10 และ (c) ร้อยละ 50

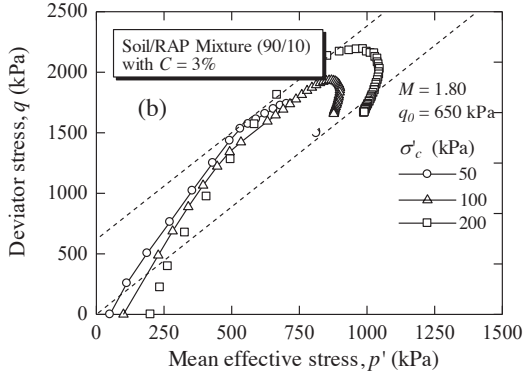
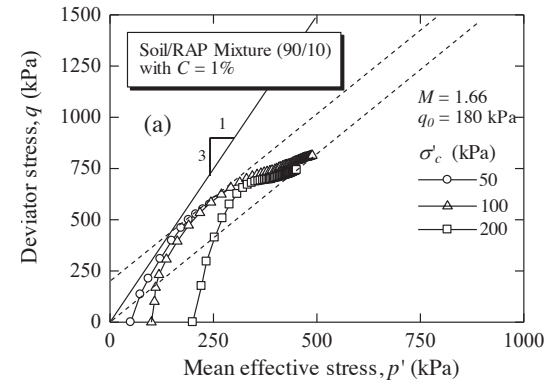
ค่าประมาณ 700 กิโลปาสกาล ดังนั้นทรายปนดินเหนียวบดอัดที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ เส้นทางการเค้นยังคงอยู่ในผิวครากและ Tension cut-off ($p'_i < p'_y$) ขนาดของผิวครากมีแนวโน้มใหญ่ขึ้นตามปริมาณซีเมนต์ [6] พฤติกรรมของตัวอย่างที่เงื่อนไขความเค้นโอบรัด 50 100 และ 200 กิโลปาสกาล มีลักษณะเหมือนตัวอย่างที่อยู่ด้านซ้ายของเส้นสถานะวิกฤต

ผลของปริมาณ RAP ในวัสดุผสมสามารถพิจารณา

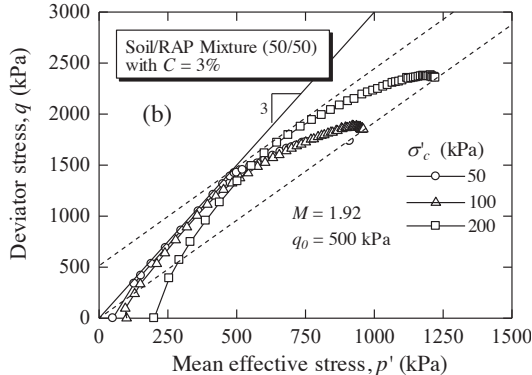
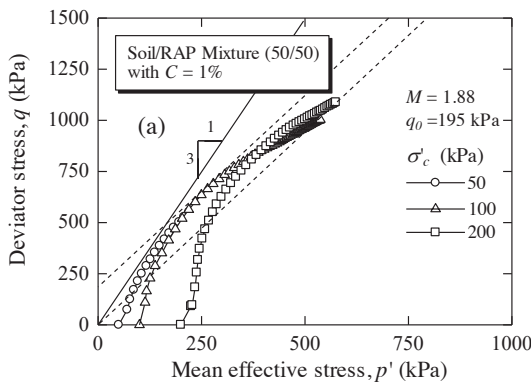


รูปที่ 6 ความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยของทรายปนดินเหนียวผสมซีเมนต์ (a) ร้อยละ 1 และ (b) ร้อยละ 3

ได้จากเส้นทางการเค้นจากการทดสอบการเฉือนภายใต้แรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับทรายปนดินเหนียวที่มี RAP ผสมที่ร้อยละ 0 10 และ 50 ตามลำดับ เส้นทางการเค้นของวัสดุไม่ผสมซีเมนต์ที่มีปริมาณ RAP ต่างๆ ที่ความเค้นโอบรัดต่ำ (50 กิโลปาสกาล) มีลักษณะคล้ายกับเส้นทางการเค้นของทรายปนดินเหนียว เส้นทางการเค้นเคลื่อนไปทางขวาตามความเค้นเบี่ยงเบนที่เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สถานะวิกฤตที่ความเค้นโอบรัด 100 และ 200 กิโลปาสกาล เส้นทางการเค้นเคลื่อนสูงขึ้นตามแนวตั้งแล้วจึงเคลื่อนเข้าสู่เส้นสถานะวิกฤต ความชันของเส้นสถานะวิกฤตเพิ่มขึ้นตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสม ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจาก RAP มีขนาดใหญ่กว่าทรายและมีมุมเสียดทานภายในสูงกว่าทรายปนดินเหนียวมากจึงส่งผลต่อความชันของเส้นสถานะวิกฤตที่เพิ่มขึ้นตาม เมื่อปรับปรุงวัสดุผสมที่ปริมาณซีเมนต์ต่างๆ อิทธิพลของกำลังเชื่อมประสานจากปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อเส้นทางการเค้นของวัสดุผสมที่สัดส่วนต่างๆ ปริมาณซีเมนต์เพิ่มขึ้น ค่า q_0



รูปที่ 7 ความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยของทรายปนดินเหนียวผสม RAP ร้อยละ 10 ผสมซีเมนต์ (a) ร้อยละ 1 และ (b) ร้อยละ 3



รูปที่ 8 ความเค้นเบี่ยงเบนและความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยของทรายปนดินเหนียวผสม RAP ร้อยละ 50 ผสมซีเมนต์ (a) ร้อยละ 1 และ (b) ร้อยละ 3

ตารางที่ 1 กำลังสถานะวิกฤตและจุดตัดแกนเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว

Mixtures	Slope of Critical State Line (M)	Peak strength interception (q_0 , kPa)
Uncemented Soil	1.45	-
Soil with $C = 1\%$	1.66	160
Soil with $C = 3\%$	1.82	600
Uncemented Soil/RAP (90/10)	1.45	-
Soil/RAP (90/10) with $C = 1\%$	1.66	180
Soil/RAP (90/10) with $C = 3\%$	1.80	650
Uncemented Soil/RAP (70/30)	1.55	-
Soil/RAP (70/30) with $C = 1\%$	1.70	190
Soil/RAP (70/30) with $C = 3\%$	1.85	700
Uncemented Soil/RAP (50/50)	1.71	-
Soil/RAP (50/50) with $C = 1\%$	1.88	195
Soil/RAP (50/50) with $C = 3\%$	1.92	500

มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับความชันของเส้นสถานะวิกฤต แต่อย่างไรก็ตามที่ปริมาณ RAP สูง (ร้อยละ 50) ค่า q_0 มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากที่ปริมาณ RAP สูงปริมาณแอสฟัลต์ในส่วนผสมมีสูงเช่นกันซึ่งปริมาณแอสฟัลต์นั้นส่งผลต่อความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยสำหรับทรายปนดินเหนียวผสม RAP (ผสมซีเมนต์) การยึดเหนี่ยวของกำลังเชื่อมประสานจากซีเมนต์กับเม็ดดินและ RAP ให้เกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ [6] ส่งผลต่อการพัฒนากำลังเชื่อมประสานในกรณีความเค้นโอบรัดต่ำ ความชันของเส้นสถานะวิกฤตและจุดตัดแกนเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวจากผลการทดสอบดังแสดงตามตารางที่ 1

5. สรุป

- 1) ปริมาณ RAP ในวัสดุผสมส่งผลต่อพฤติกรรมการอัดตัวของวัสดุผสมทรายปนดินเหนียวและ RAP อัตราส่วนโพรงของวัสดุผสมทรายปนดินเหนียวและ RAP ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเค้นประสิทธิผล ความเค้นครากจากการอัดตัวของวัสดุผสมที่มีส่วนผสมของ RAP มากขึ้น ความเค้นครากของวัสดุมีแนวโน้มคงที่สำหรับทุกปริมาณ RAP อัตราส่วนโพรงเริ่มต้นลดลงตามปริมาณ RAP ที่เพิ่มขึ้น
- 2) พฤติกรรมของความเค้นและความเครียดเบี่ยงเบนของผลการทดสอบที่ปริมาณ RAP ต่างๆ มีลักษณะเหมือนกัน คือ การแข็งขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความเครียด ปริมาณ RAP ส่งผลต่อความเค้นเบี่ยงเบนที่สูงขึ้นตามปริมาณ RAP สัดส่วนของ RAP ที่เพิ่มขึ้นใน

ส่วนผสมส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของมุมเสียดทานภายในและความชันของเส้นสถานะวิกฤต เมื่อปรับปรุงวัสดุผสมด้วยซีเมนต์ ปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของค่า q_0 ซึ่งเป็นผลจากการล้างเชื่อมประสาน

3) วัสดุผสมที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ ความเค้นเบี่ยงเบนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลงหลังจากผ่านจุดความเค้นสูงสุดตามการเพิ่มขึ้นของความเครียดเบี่ยงเบน แต่อย่างไรก็ตามความเค้นเบี่ยงเบนที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับความดันน้ำส่วนเกินที่เป็นลบซึ่งเป็นพฤติกรรมก่อนวิบัติ วัสดุที่ปรับปรุงด้วยซีเมนต์ตามหลักการสถานะวิกฤต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน และขอขอบคุณสำนักทางหลวงที่ 10 (นครราชสีมา) กรมทางหลวงสำหรับข้อมูลวัสดุและตัวอย่างวัสดุ RAP ที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Brantley, A.S., and Townsend, T.G. 1999. Leaching of pollutants from reclaimed asphalt pavement. *Environmental Engineering Science*; 16(2): 105-116.
- [2] Cosentino, P.J., Kalajian, E.H., Shieh, C.H., Mathurin, W.J.K., Gomez, F.A., Cleary, E.D., and Treeratrakoon, A. 2003. Developing specifications for using recycled asphalt pavement as base, subbase or general fill materials, Phase II, Rep. No. FL/DOT/RMC/06650-7754. Florida Institute of Technology.
- [3] Puppala, A.J., Hoyos, L.R., and Potturi, A.K., 2011. Resilient moduli response of moderately cement-treated reclaimed asphalt pavement aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*; 23(7): 990-998.
- [4] Puppala, A.J., Saride, S., and Williammee, R. 2012. Sustainable reuse of limestone quarry fines and RAP in pavement base/subbase layers. *Journal of Materials in Civil Engineering*; 24(4): 418-429.
- [5] Suebsuk, J., Horpibulsuk, S., and Liu, M.D. 2010. Modified Structured Cam Clay: a generalised critical state model for destructured, naturally structured and artificially structured clays. *Computers and Geotechnics*; 37(7-8): 956-968.
- [6] Suebsuk, J., Suksan, A. and Horpibulsuk, S. 2014. Strength assessment of cement treated soil reclaimed asphalt pavement (RAP) mixture. *Int. J. of GEOMATE*; 6(2): 878-884.
- [7] Taha, R., Ali, A., Basma, A., and Al-Turk, O. 1999. Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases. *Transportation Research Record 1652*, Washington, DC: 264-269.
- [8] Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K., and Al-Zubeidi, M. 2002. Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases. *Journal of Materials in Civil Engineering*; 14(3): 239-245.
- [9] Department of Highway. 2000. Standard No. DHS 213/2543. Pavement recycling.
- [10] Al-Badran, Y., Schanz, T. 2009. Soil-water characteristic curve and consolidation for fine-grained soils. 4th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, Newcastle, Australia, November 23–25 2009, pp: 243–249.
- [11] ASTM. 2010. Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. ASTM D4318-10e1. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [12] ASTM. 2014. Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM D854-14. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [13] ASTM. 2011. Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System). ASTM

- D2487-11. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.
- [14] ASTM. 2015. Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. ASTM C127-15. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [15] ASTM. 2012. Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m<sup>3

[16] ASTM. 2011. Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. ASTM D2435/D2435M-11. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.

[17] ASTM. 2011. Standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils, ASTM D4767-11. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA.</sup>