

การใช้วิธีโพโตอัสติคซิติในการประมาณค่า K_0 ของตัวอย่างเม็ดแก้วที่จัดเรียงแบบ 2 มิติ

Photoelasticity for estimation K_0 of 2-dimensional granular assembly

ทวีศักดิ์ จิระธนาถาวร (Thaweesak Jirathanathaworn)

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ (fengtwtj@ku.ac.th)

บทคัดย่อ : บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้วิธีโพโตอัสติคและเทคนิโณโลยีการประมวลผลภาพถ่าย (digital image processing) เพื่อประมาณค่าหน่วยแรงสำหรับงานวิศวกรรมปฐพี ชุดเครื่องมือโพโตอัสติค ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาแรงดันด้านข้างของตัวอย่างเม็ดแก้วที่มีการจัดเรียงแบบ 2 มิติ โดยชุดเครื่องมือ ประกอบด้วย กล้องไฟแสงขาวแบบโพลาไรซ์, ชุดเลนส์ polariscope, กล้องดิจิทัล Nikon D300, กล่องตัวอย่างสำหรับจัดเรียงเม็ดแก้ว โดยระบบเครื่องมือโพโตอัสติคซิตินี้ ถูกจัดวางอยู่บนคานเหล็กรูปตัวไอและเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมชุดเครื่องมือ เพื่อเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ผลการทดสอบ การศึกษาในห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ การสอบเทียบเซนเซอร์ (sensor calibration) และการใช้เซนเซอร์เพื่อวัดแรงดันด้านข้างของตัวอย่างเม็ดแก้วที่เรียงตัว 2 มิติ โดยทั่วไปแล้ว วิธีการประมวลผลภาพถ่ายแยกสีของภาพถ่ายดิจิทัล ออกเป็น 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ผลการทดสอบเบื้องต้น แสดงว่า แสงสีแดงบนเซนเซอร์ ควรถูกเลือกใช้เป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับศึกษาเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง (K_0) ของตัวอย่าง กราฟความสัมพันธ์ (calibration charts) ระหว่างความเข้มแสงสีแดงและหน่วยแรงมีความสัมพันธ์กันแบบ quadratic equation หลังจากการสอบเทียบ sensor แล้ว กราฟความสัมพันธ์ของเซนเซอร์ประดิษฐ์นี้ ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่า σ_h และ K_0 ของตัวอย่างเม็ดแก้วที่มีการจัดเรียงแบบ 2 มิติ ผลการศึกษา แสดงว่า ค่า K_0 ของตัวอย่าง ที่ได้จากการวัดโดยวิธีนี้ มีค่าระหว่าง 0.45 และ 0.35 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เดียวกับค่า K_0 ของดินทรายแบบแน่น (Dense sands)

ABSTRACT: This paper presents a newly application using photoelasticity with digital image processing for an estimation of lateral earth pressure for geotechnical engineering. This study installed a new test setup which includes white polarized light source, polariscope, digital camera (Nikon D300) and an invented specimen box. The test setup was connected to a desktop computer for controlling the camera and collecting/analyzing image results. The study includes 2 main procedures (1) sensor calibration and (2) estimation of lateral earth pressure coefficient at-rest (or K_0). In general, colors on the digital photos can be separated into 3 colors: red (R), green (G) and blue (B). Based on preliminary results, red was selected as a parameter to estimate the value of K_0 due to its most sensitivity to applied stress compared to change in the intensities of the two other colors (i.e., green and blue). Sensor calibration shows that quadratic equation fit very well for the relationship between $R_0 - R_G$ and σ/P_a . After the calibration, the sensors were placed at the left and right sides of the specimen for measuring lateral stress and estimating the value of K_0 . The result show that K_0 of the specimen is between 0.35 and 0.45. Range of the K_0 is in the range of K_0 for dense sand.

KEYWORDS : Photoelasticity, Digital image processing, Coefficient of lateral earth pressure at-rest

1.0 บทนำ

แรงดันดินด้านข้าง (lateral earth pressure, σ_h) เป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการศึกษาและงานวิจัยทางด้านปฐพีกลศาสตร์ แรงดันดินด้านข้างมีค่าหรือแรงดันดิน

โดยรอบ (confining pressure) ซึ่งใช้กำหนดสภาพความเค้น (state of stress) ของดิน กล่าวคือ โดยทั่วไปแล้ว กำลัง (strength) และความยืดหยุ่น (stiffness หรือ modulus) ของดินมีค่าสูงขึ้นเมื่อแรงดันดินโดยรอบหรือแรงดันดินด้านข้างสูงขึ้น

บทความนี้นำเสนอการใช้ทฤษฎีโฟโตออสติคซิติและวิธีการประมวลผลเชิงตัวเลขจากภาพถ่ายดิจิทัล เพื่อประยุกต์ใช้ประมาณค่าแรงดันด้านข้างของตัวอย่างที่มีการจัดเรียงของเม็ดแก้วแบบ 2 มิติ การวัดค่า lateral earth pressure ได้อย่างแม่นยำสามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานในการการวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างต่างๆ เช่น กำแพงกันดิน, การออกแบบเสาเข็มรับน้ำหนัก บทความนี้เสนอวิธีการทดสอบเพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะสมดุลหรือภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีการขยายตัวทางด้านข้าง (Coefficient of lateral earth pressure at rest, K_0) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดสถานะความเค้นของดินเริ่มต้น ซึ่งเป็นสถานะเดียวกับดินในสนามที่ยังไม่เคยมีการถูกรบกวน ค่า K_0 สามารถหาได้โดย อัตราส่วนระหว่างหน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ (Horizontal effective stress, σ'_h) ต่อ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง (Vertical effective stress, σ'_v) หรือตามสมการที่ (1)

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \dots\dots\dots (1)$$

เมื่อ K_0 คือ สัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะสมดุล

σ'_h คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวราบ

σ'_v คือ หน่วยแรงประสิทธิผลในแนวตั้ง

2.0 แรงดันด้านข้าง

การศึกษาแรงดันดินด้านข้างในห้องปฏิบัติการ พบได้ใน Terzaghi (1934); Dyvik (1985); Thomann and Hryciw (1990); Hryciw and Thomann (1993) เป็นต้น Clark et al. (1993) พบว่าแรงดันด้านข้างของดินทรายผสมซีเมนต์ (cemented sands) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีน้ำหนักข้างตั้งไว้บนตัวอย่างดิน ผลการทดสอบนี้ แสดงว่า ซีเมนต์ผสมกับทรายมีผลให้เม็ดทรายเคลื่อนที่ออกจากด้านข้างได้ลดลง ดังนั้น การจัดเรียงตัวของเม็ดทราย (rearrangement of sand particles) เป็นสาเหตุสำคัญในการเปลี่ยนแปลงของแรงดันดินด้านข้าง

Bowman and Soga (2003) เสนอว่าระหว่างการคืบ (creep) ในทราย โครงสร้างของทรายจะมีการก่อตัวเป็น arching โดยไซในแนวตั้งของกลุ่มเม็ดทราย จะมีการโค้งตัวออกทางแนวราบเพื่อปรับตัวให้เป็นโครงสร้างการเรียงตัวมีเสถียรภาพสูงสุด โดยเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวใหม่ในทราย โดยกระบวนการ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้างนี้อาจมีผลเนื่องต่อการเพิ่มขึ้นของแรงดันด้านข้างของทราย บทความอื่นๆ เช่น Chow et al. (1988), Bowman and Soga (2005) แสดงผลการทดสอบทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการซึ่งสนับสนุนแนวความคิดในการเพิ่มขึ้นของแรงดันด้านข้างในทรายเนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่ของเม็ดทรายทำให้เกิดเป็นโครงสร้างคล้ายสายโซ่ที่มีความแข็งแรงขึ้น รวมทั้งส่งผลให้แรงดันด้านข้างในทรายเพิ่มสูงขึ้น

3.0 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

3.1 เครื่องมือทดสอบและการแสดงผลความเข้มแสงสี

ภาพที่ 1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบสำหรับการศึกษาลวดเครื่องมือทดสอบ ประกอบด้วย กล้องไฟแสงขาวแบบโพลาไรซ์, ชุด polariscope, กล้องดิจิทัล Nikon D300, กล้องตัวอย่างสำหรับจัดเรียงเม็ดแก้ว ชุดเครื่องมือทดสอบถูกจัดวางบนคานเหล็กรูปตัวไอ เครื่องคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับชุดเครื่องมือเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงเลขจากภาพถ่ายดิจิทัลโฟโตออสติคซิติ การศึกษาครั้งนี้ใช้โปรแกรม Matlab 7.4 สำหรับวิเคราะห์ภาพถ่ายและแยกแถบสีออกเป็น 3 ชุด ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน

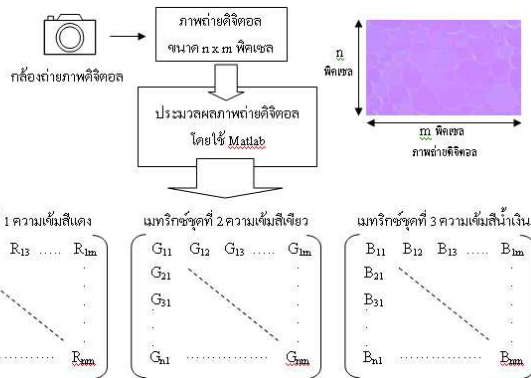


ภาพที่ 1 เครื่องมือทดสอบ

สีแต่ละสีที่อ่านได้จาก Matlab มีระดับความเข้มของสี ตั้งแต่ 0 ถึง 255 โดยค่าที่อ่านได้จากภาพถ่ายดิจิทัลแสดงในเมทริกซ์ 3 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 2 สมาชิกในแต่ละเมทริกซ์ คือ ค่าความเข้มแสงสีแดง ความเข้มแสงสีเขียว และความเข้มแสงสีน้ำเงิน (Frocht, 1946; Aben and Guillemet, 1993; McAndrew, 2004; พิเชษฐ์, 2551; พิเชษฐ์, 2552; Jirathanathaworn et al., 2010)

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ภาพที่ 3 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมวัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เลื่อยตัดใบเพชร (ภาพที่ 3a) สำหรับตัดแก้ว, เครื่องขัดแก้ว (ภาพที่ 3b) สำหรับขัดบริเวณหน้าตัดของเม็ดแก้ว ให้มีความเงา เพื่อให้เกิดความโปร่งใสและแสงขาวผ่านได้ ทั้งนี้ จะช่วยให้

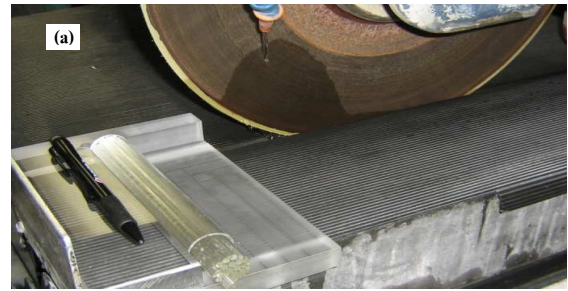


ภาพที่ 2 ขั้นตอนการประมวลผลความเข้มแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน

บนภาพถ่ายดิจิทัล

ภาพถ่ายโฟโตโพลีเมอริกที่มีความคมชัดมากยิ่งขึ้น และเครื่องอบอุณหภูมิสูง (ภาพที่ 3c) สำหรับอบเม็ดแก้วให้เกิดการขยายตัวก่อนการทดสอบ เพื่อลดหน่วยแรงตกค้าง (residual stress) ในเม็ดแก้ว หน่วยแรงตกค้างนี้มีผลให้โฟโตโพลีเมอริกแตกต่างกันก่อนการทดสอบ

ภาพที่ 4 แสดงวัสดุที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ เม็ดแก้วทรงกระบอก (ดูภาพที่ 4a) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม., 2 มม. และ 3 มม. ความสูง 3 มม. ภาพที่ 4b แสดงเซนเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการวัดแรงดันด้านข้างของตัวอย่างเม็ดแก้วถูกจัดเรียงแบบ 2 มิติ เซนเซอร์มีลักษณะเป็นแผ่นแก้วขนาด 1 มม. x 1 มม.หนา 3 มม. รูเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว ถูกทำขึ้นเพื่อเพิ่มระดับความเข้มของ Stress บนแผ่นแก้ว มีผลให้การเปลี่ยนแปลงความเข้มสีบริเวณรอบๆ รูเปิดนี้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น รายละเอียดผลการสอบเทียบเซนเซอร์ประดิษฐ์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดแรงดันด้านข้าง ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 4.0



ภาพที่ 3 อุปกรณ์สำหรับเตรียมวัสดุทดลอง: (a) เลื่อยใบเพชร สำหรับตัดแก้ว, (b) เครื่องขัดแก้ว, (c) เครื่องอบอุณหภูมิสูง สำหรับอบเม็ดแก้วแก้วก่อนการทดสอบ

3.3 การรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

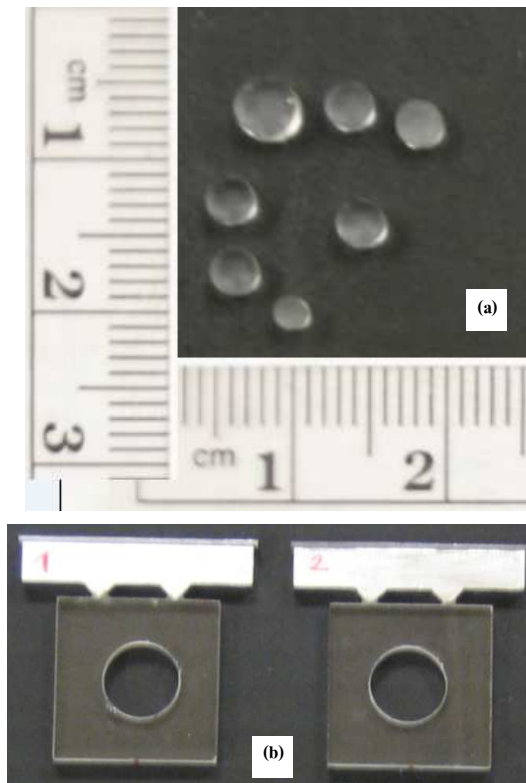
การศึกษาวิจัยครั้งนี้เก็บรวบรวมผลการทดสอบโดยใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัลรุ่น Nikon D300 โดยกล้องถูกเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการถ่ายภาพ โดยถ่ายภาพจะถูกจัดเก็บเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติในไดเรกทอรีที่กำหนดไว้เมื่อได้ชุดภาพถ่ายดิจิทัลโฟโตโพลีเมอริกแล้ว ภาพถ่ายทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์เพื่อหาความเข้มสีในแต่ละพิกเซล โดยใช้การวิเคราะห์ความเข้มสีจากโปรแกรม Matlab ดังแสดงขั้นตอนและรายละเอียดในภาพที่ 2 ข้างต้น

4.0 ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบเบื้องต้น (Preliminary study)

ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม

แสงสีแดง เขียว น้ำเงินกับแรงดันที่กระทำบนแผ่นแก้วขนาด 6 มม. x 6 มม.หนา 3 มม. ผลการทดลองแสดงว่าความเข้มแสงสีแดงลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีแรงดันกระทำบนแผ่นแก้วจนถึง 1000 kPa ช่วงแรงดันตั้งแต่ 1000 ถึง 2000 kPa ความเข้มแสงสีแดง ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ช่วงระดับแรงดันเดียวกันนี้ (0 -2000 kPa) ความเข้มแสงสีเขียวเพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (3) ที่ระดับแรงดันสูง (>5000 kPa) ความเข้มแสงสีแดงเพิ่มขึ้นส่วนความเข้มแสงสีน้ำเงินคงที่ ที่ระดับ 255 โดยไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่กระทำบนแผ่นแก้ว

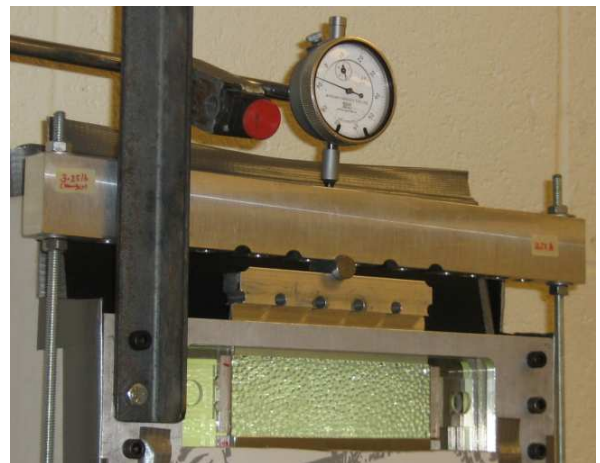


ภาพที่ 4 วัสดุทดลอง: (a) เม็ดแก้ว (b) เซนเซอร์สำหรับวัดแรงดันซ้ายและขวาของตัวอย่าง

ตารางที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสีแดงและแรงดันที่กระทำบนแผ่นแก้ว 6 มม. x 6 มม. ผลการทดสอบเบื้องต้นนี้แสดงอย่างชัดเจนว่าความเข้มแสงสีแดงเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่ระดับแรงดันไม่เกิน 1000 kPa ซึ่งเป็นช่วงแรงดันที่ใช้ในการศึกษาแรงดันด้านข้างในขั้นต่อไป ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงสีแดงจึงถูกนำมาใช้เป็นพารามิเตอร์ในการวัดค่าแรงดันด้านข้าง

4.2 การสอบเทียบเซนเซอร์ (Sensor calibration)

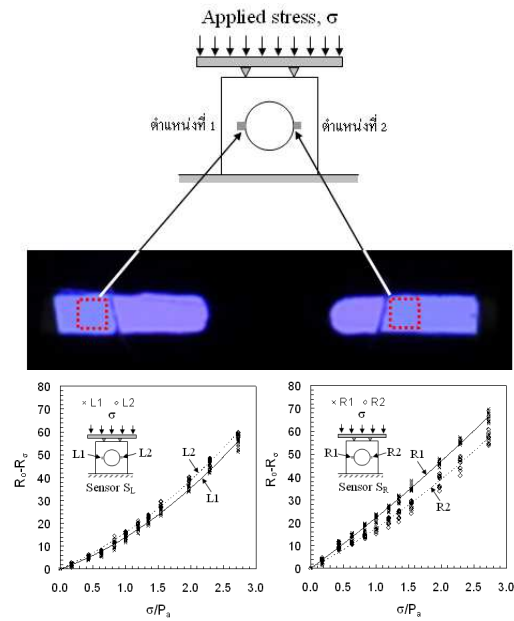
ภาพที่ 7 แสดงผลการสอบเทียบเซนเซอร์ซึ่งเขียนเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $R_0 - R_G$ และ σ/P_a โดยที่ $R_0 - R_G$ คือความเข้มแสงสีแดงบนแผ่นแก้ว ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 ที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับความเข้มแสงสีแดงบนแผ่นแก้วที่ไม่ถูกแรงกระทำ ณ ตำแหน่งเดียวกัน σ/P_a คือ แรงดันที่กระทำบนแผ่นแก้วต่อแรงดันบรรยากาศ การใช้ค่า P_a เป็นตัวหารค่า σ เพื่อให้กราฟการสอบเทียบเซนเซอร์นี้ใช้ได้โดยทั่วไปโดยไม่ขึ้นกับหน่วยของแรงดันที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการสอบเทียบเซนเซอร์ที่แสดงอยู่ในรูปของสมการ Quadratic (หรือสมการกำลังสอง) นี้ ความสัมพันธ์ที่ได้จากการสอบเทียบเซนเซอร์ครั้งนี้มีค่า r^2 มากกว่า 0.99 ซึ่งแสดงว่า กราฟการสอบเทียบเซนเซอร์นี้ใช้งานได้ดี สมการที่ (2) ถึง (5) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R_0 - R_G$ และ σ/P_a ที่ตำแหน่ง L1, L2, R1 และ R2 ตามลำดับ



ภาพที่ 5 ตัวอย่างสำหรับทดสอบ

ตารางที่ 1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสีและแรงดันบนแผ่นแก้วขนาด 6 มม. x 6 มม.

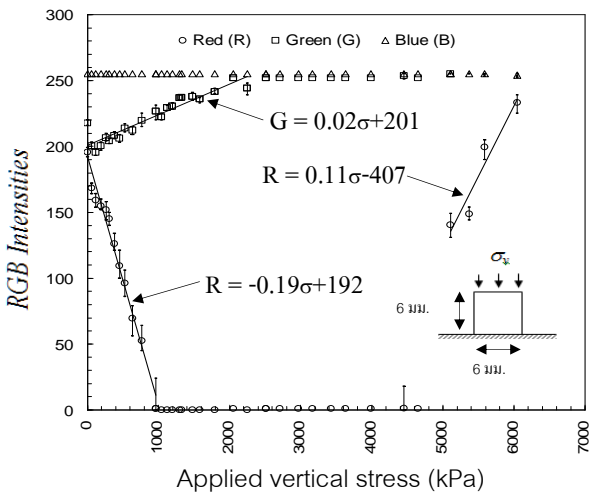
แรงดัน, □ (kPa)	ความเข้มแสง		
	สีแดง (R)	สีเขียว (G)	สีน้ำเงิน (B)
0 ถึง 1000	$-0.19\sigma + 192$	$0.02\sigma + 201$	255
1000 - 2000	0		
2000 - 5000		255	
> 5000	$0.11\sigma - 407$		



ภาพที่ 7 การสอบเทียบเซนเซอร์: (a) การทดสอบ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง $R_0 - R_\sigma$ กับ σ/P_a

4.3 การหาแรงดันด้านข้างโดยวิธีโฟโตออสติคซิติ

ผลการทดลองใช้เซนเซอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อวัดค่าแรงดันด้านข้างของตัวอย่างเม็ดแก้วที่มีการจัดเรียงแบบ 2 มิติ แสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงสีและแรงดันบนแผ่นแก้วขนาด 6 มม. x 6 มม.

ภาพที่ 8 แสดงผลการทดสอบวัดแรงดันด้านข้างของตัวอย่างขนาด 1.5 นิ้ว x 5.0 นิ้ว ผลการทดสอบแสดงว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงดันด้านข้าง (K_x) มีค่าเท่ากับ 0.45 และ 0.35 ที่ด้านซ้ายและด้านขวาของตัวอย่าง ตามลำดับ

$$L1: R_0 - R_\sigma = 3.85 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right)^2 + 10.02 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right) \dots (2)$$

$$L2: R_0 - R_\sigma = 3.45 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right)^2 + 12.35 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right) \dots (3)$$

$$R1: R_0 - R_\sigma = 1.29 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right)^2 + 20.86 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right) \dots (4)$$

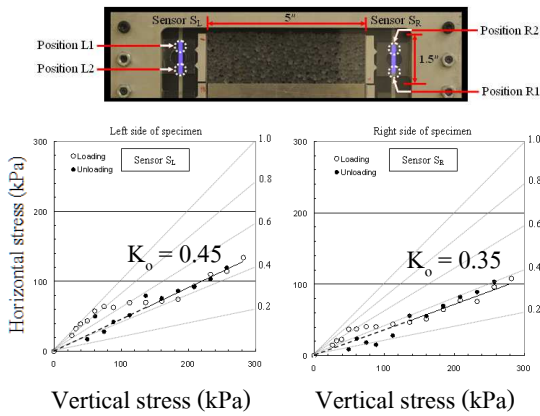
$$R1: R_0 - R_\sigma = 2.04 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right)^2 + 15.42 \left(\frac{\sigma}{P_a}\right) \dots (5)$$

เมื่อ R_0 = ความเข้มแสงสีแดงบนเซนเซอร์ที่ไม่มีแรงดันกระทำ

R_σ = ความเข้มแสงสีแดงบนเซนเซอร์ที่มีแรงดันกระทำเท่ากับ σ

σ = แรงดันกระทำบนเซนเซอร์

P_a = ความดันบรรยากาศ (หน่วยเดียวกับ σ)



ภาพที่ 8 แรงดันด้านข้างและค่า K_o ของตัวอย่าง

5.0 บทสรุป

การศึกษาครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้วิธีโฟโตอลาสติกซิตีและวิธีประมวลผลภาพถ่าย (digital image processing) เพื่อวัดแรงดันด้านข้างของตัวอย่างเม็ดแก้วที่เรียงตัว 2 มิติ (ใช้แทนตัวอย่างของดินทราย) เซนเซอร์แผ่นแก้วขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว ที่มีรูเปิดตรงกลางถูกประดิษฐ์ขึ้นเพื่อประยุกต์ใช้วัดแรงดันด้านข้างของตัวอย่าง

ผลการสอบเทียบเซนเซอร์ (sensor calibration) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $R_o - R_\sigma$ และ σ/P_a ในรูปแบบของสมการ Quadratic เซนเซอร์ทั้งสองตัวที่ทำการสอบเทียบแล้วถูกนำมาติดตั้งไว้ที่ด้านซ้ายและขวาของตัวอย่างเม็ดแก้วที่เรียงตัว 2 มิติ เพื่อใช้วัดแรงดันด้านข้างของตัวอย่าง ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่า K_o ด้านซ้ายและขวาของตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 0.45 และ 0.35 ตามลำดับ ค่า K_o ในช่วงนี้ใกล้เคียงกับค่า K_o ของทรายแน่น (Dense sands) การประยุกต์งานวิจัยนี้ทางด้านวิศวกรรมปฐพี อาจเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสีโฟโตออสติก ที่จุดสัมผัสระหว่างเม็ดแก้ว เพื่อทราบถึงพฤติกรรมและลักษณะการกระจายของแรงดันระหว่างเม็ด (contact pressure) เพื่อการศึกษาวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมเมื่อถูกรับแรงของวัสดุเม็ด (granular assemblies)

6.0 เอกสารอ้างอิง

พิเชษฐ์ พิณีจ. (2551). “โปรแกรมเพื่อการแสดงภาพสนามความเค้นสองมิติเพื่อการพัฒนาการเรียนรู้อะนาลิติกและการเรียนวิชาการศาสตร์วัสดุขั้นสูง,” เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมแห่งชาติครั้งที่ 3, วิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมแห่งชาติครั้งที่ 3, วิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม

กับการพัฒนาอาชีพศึกษายุคใหม่, 18-19 ธันวาคม, โรงแรมเอสดี อเวนิว, กรุงเทพฯ, ประเทศไทย, หน้า 233-241.

พิเชษฐ์ พิณีจ. (2552). “ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโฟโตออสติกซิตีและโฟโตออสติกซิตีเชิงเลข,” วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 36 ฉบับที่ 3, หน้า 195-203.

Aben, H. and Guillemet, C. (1993). “Photoelasticity of Glass,” Springer-Verlag, 255p.

Bowman, E.T. and Soga, K. (2003). “Creep, Aging, and Microstructural Change in Dense Granular Materials,” *Soil and Foundation*, Japanese Geotechnical Society, Vol. 43 (4), 107-117.

Clark, J.I., Zhu, F. and Paulin, M. (1993). Discussion on “Time Dependent Cone Penetration Resistance due to Blasting,” by Charlie, W.A., Rwebyogo, M.F.J. and Doehring, D.O., *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 119 (12), 2007-2008.

Dyvik, R., Lacasse, S. and Martic, R. (1985). “Coefficient of Lateral Stress from Oedometer Cell,” *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, August, 1003-1006.

Frocht, M.M. (1946). “Photoelasticity,” Wiley, London, 411p.

Hryciw, R.D. and Thomann, T.G. (1993). “Stress-history-Based Model for G^c of Cohesionless Soils,” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119(7), 1073-1093.

McAndrew, A. (2004). “Introduction to Digital Image Processing with Matlab,” Thomson Course Technology, 509 p.

Jirathanathaworn T., Hryciw, R.D. and Green R.A. (2010). “Photoelastic Sensors for Measurement of K_o ,” *GeoCongress- ASCE Special Publication*, West Palm Beach, Florida, February 21-24, 6p.

Terzaghi, K. (1934). “Large Retaining Wall Tests,” *Engineering News Record*, 112, Feb 1st, 136-140.

Thomann, T.G. and Hryciw, R.D. (1990). “Laboratory Measurement of Small Strain Shear Modulus under K_o Conditions,” *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 97-105.