อิทธิพลของแรงกระทำด้านข้างแบบวัฏจักรต่อค่าสติฟเนสของดินโดยรอบเสาเข็มเดี่ยวจำลอง

พงศ์ภัค สืบถวิลกุล วรัช ก้องกิจกุล และ พงศธร กระจ่างผล

[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จ.กรุงเทพฯ
**Corresponding author; E-mail address: Seang_12345@hotmail.com*

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์อิทธิพลของเสาเข็มเดี่ยวจำลองที่ฝังตัวในทรายภายใต้แรงกระทำซ้ำด้านข้างแบบวัฏจักรโดยควบคุมแอมพลิจูดจากระยะกระทำซ้ำที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสติฟเนสของดินโดยรอบ แบบจำลองนี้ได้ทำการจำลองลักษณะของเสาเข็มรองรับสะพานแบบอินทิกรัลซึ่งมีการรับแรงกระทำซ้ำด้านข้างแบบวัฏจักรจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของตัวสะพาน จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสะพานส่งผลให้การขยายตัวและหดตัวมีแอพลิจูดจากระยะทางการเคลื่อนที่คงที่ ซึ่งแปรเปลี่ยนตามเวลาและฤดูกาลจึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ โดยศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวประกอบด้วย โมเมนต์ดัด การเสียรูป แรงเฉือน และแรงปฏิกิริยาของดินตามแนวแกนของเสาเข็ม เพื่อหาค่าสติฟเนสของดินด้วยการเขียนรหัสในโปรแกรม MATLAB® ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และศึกษาลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสติฟเนสของดินจากจำนวนรอบการให้แรงกับเสาเข็มภายใต้แรงกระทำซ้ำแบบวัฏจักร โดยการเปรียบเทียบที่ระดับความลึกและค่าระยะทางสูงสุดที่กระทำต่อเสาเข็มเดี่ยวที่แตกต่างกัน จากการศึกษาค่าสติฟเนสของดินเริ่มต้นของดิน (Nc=1) จะเพิ่มตามระดับความลึกของชั้นดินซึ่งเกิดจากผลของระดับความเครียดของดิน หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากสมบัติพลาสติกของดิน นอกจากนี้ค่าสติฟเนสจะคงที่อันเกิดจากสมบัติยืดหยุ่นของดิน แล้วในระดับความลึกที่ไม่มากค่าสติฟเนสของดินจะเพิ่มขึ้นกับจำนวนรอบ ซึ่งสาเหตุเกิดจากอิทธิพลของการสะสมทิศทางเดียว นั้นคือเมื่อดินทรายเกิดการเสียรูปแบบเชิงรุกไปแล้วการคืนกลับไปที่เดิมจำเป็นจะต้องใช้แรงดันดินด้านข้างมากขึ้น เมื่อแรงดันดินด้านข้างมากขึ้นทำให้ระดับความเค้นในมวลดินมากขึ้น ดังนั้นค่าโมดูลัสและค่าสติฟเนสของดินก็จะมากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการพัฒนาค่าสติฟเนสของดินยังมีความสัมพันธ์กับ ระดับความลึกของดินและค่าระยะสูงสุดที่กระทำต่อเสาเข็มอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การให้แรงกระทำซ้ำด้านข้างแบบวัฏจักร, เสาเข็ม, เสาเข็มเดี่ยวจำลอง, ทราย, ค่าสติฟเนส

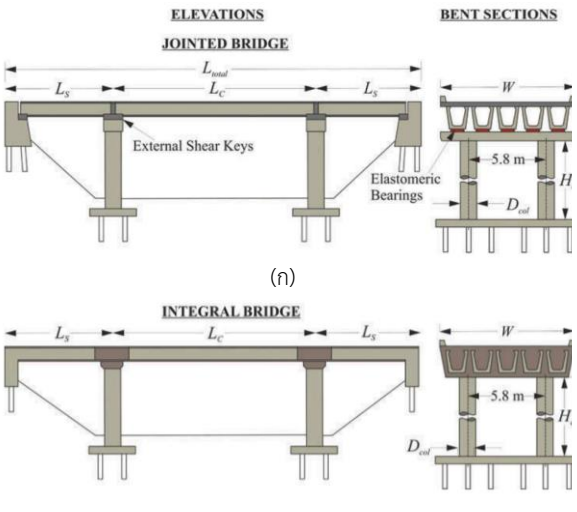
This study focuses on the effects of lateral cyclic loading by Displacement-controlled amplitude on the surrounding soil stiffness of a modelled single pile in sandy soil. This model demonstrates the behaviour of a single pile within Integral bridge which receives the cyclic loading from the displacement amplitude change from temperature. Because of the change of temperature, the bridges expand and shrink themselves in term of distance and time. Then, this study occurs. By the behaviours of the piles is evaluated through the bending moment distribution, lateral displacement, shear force and soil resistance (subgrade reaction) along with the pile. For determining the soil stiffness, the code is written in MATLAB® in term of the numerical analysis method. The change of soil stiffness from the number of cyclic loading is the main study in different soil levels and the peak applied loads. According to this study, the initial soil stiffness (Nc=1) increases on the deep of soil level because of strain-level effect. After that, the soil stiffness rapidly increases in term of plastic material, then, it keeps constant in term of elastic material, On the other hands, at soil-level around soil surface, the soil stiffness increases with the number of cyclic loading. This effect could be called “Ratcheting Effect”, i.e. when the sandy soil active fails, the increasing lateral pressure is needed to move back itself. When the lateral pressure increases, the soil stress increases, therefore, the soil modulus and stiffness also increase. However, the soil stiffness has a significant relationship with the soil level and the displacement amplitude.

Keywords**:** Lateral cyclic loading test, Pile, A modelled single pile, Sandy soil, Soil stiffness

คำนำ

ในทุกวันนี้สะพานแบบอินทิกรัล (Integral bridges) ได้มีการนำมาใช้แพร่หลายมากยิ่งขึ้น เมื่อเทียบกับแบบมีข้อต่อ (Jointed bridges) ที่มีใช้โดยทั่วไปเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วสะพานแบบอินทิกรัลใช้งบประมาณการก่อสร้างและค่าซ่อมบำรุงที่ถูกกว่า มีใช้งานที่ยาวนานกว่ารวมถึงคุณภาพการขับเคลื่อนของพาหนะที่ไหลลื่นกว่า [1-3] เพราะสะพานแบบอินทิกรัลต่างจากสะพานแบบมีข้อต่อ (รูปที่ 1(ก)) ในส่วนที่ไร้ข้อต่อและแบริ่ง (Expansion joints and bearing) [4]

อย่างไรก็ตามสะพานแบบอินทิกรัล (รูปที่ 1(ข)) ยังมีข้อเสียอยู่ นั้นก็คือสะพานแบบอินทิกรัลไม่เหมาะสมในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่สูง เมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้ตัวคาน (Beam) หรือตัวสะพานมีการขยายและหดตัวลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาและฤดูกาล เปรียบเสมือนมีแรงกระทำซ้ำแบบวัฏจักรไปยังเสา (Column) ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงไปยังเสาเข็ม ดังนั้นการเสียรูปจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงส่งผลทางตรงต่อเสาเข็ม และเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดการขยายตัวและหดตัว ดังนั้นแรงด้านข้างที่เกิดจะถูกควบคุมโดยระยะการขยายตัวและหดตัว จากสาเหตุข้างต้นแสดงปัญหาที่มีแรงด้านข้างกระทำซ้ำต่อเสาเข็มในระยะทางที่เท่าเดิมตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป [5-6] ดังนั้นในการศึกษานี้เป็นการจำลองแรงกระทำซ้ำด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็ม โดยควบคุมแอมพลิจูดของแรงกระทำซ้ำจากระยะกระทำซ้ำ (Displacement-controlled amplitude)



(ก)

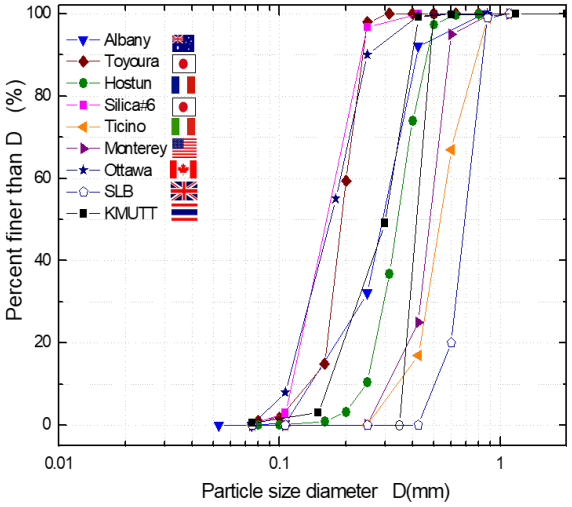
(ข)

รูปที่ 1 โครงสร้างสะพาน[7] (ก) สะพานแบบมีข้อต่อ (ข) สะพานแบบอินทิกรัล

วิธีดำเนินการจำลอง

2.1 วัสดุอุปกรณ์

2.1.1 ทราย

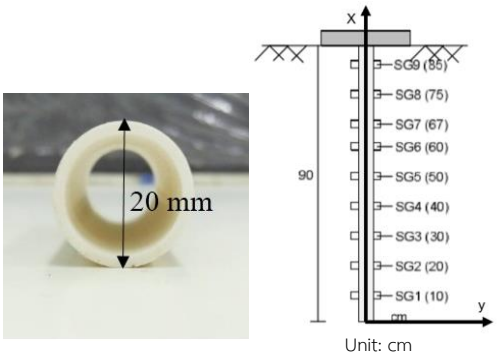


รูปที่ การกระจายตัวของทราย KMUTT sand เปรียบเทียบกับทรายมาตรฐานอื่นทั่วโลก

ดินถูกจำลองโดยการใช้ทราย KMUTT sand ทรายชนิดนี้มาจากทรายแม่น้ำในจังหวัดราชบุรี ประเทศไทย ที่ใช้วิธีร่อนผ่านตะแกรงโดยผ่านตะแกรงเบอร์ 40 (0.425 มิลลิเมตร) และค้างที่ตะแกรงเบอร์ 100 (0.150 มิลลิเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 2 และเพื่อที่นำวัสดุที่ไม่จำเป็นจำพวกฝุ่นและพวกสารอินทรีย์ออก ทรายจะผ่านการล้างน้ำและอบที่อุณหภูมิ 110 ^{o}C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทรายชนิดนี้มีค่าความถ่วงจำเพาะ (Gs) เท่ากับ 2.64 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดดินเฉลี่ย (D50) เท่ากับ 0.285 มิลลิเมตร ค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Coefficient of Uniformity, Cu) เท่ากับ 1.879 ค่าสัมประสิทธิ์ความโค้ง (Coefficient of Curvature, Cc) เท่ากับ 0.946 ค่าอัตราส่วนช่องว่างสูงสุดและต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.06 และ 0.67 ตามลำดับ

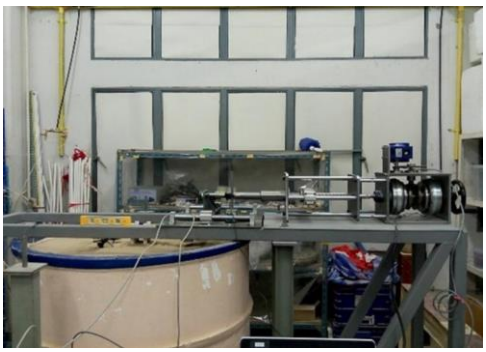
2.1.2 เสาเข็มจำลอง

ท่อพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) ได้ถูกนำมาใช้ในการจำลองเสาเข็มย่อขนาดดังแสดงในรูปที่ 3 วัสดุนี้คือเรซินสังเคราะห์ (Synthetic resin) ที่มีสมบัติบางประการคล้ายยางเมื่อมีปฏิกิริยาต่อสารเคมี สมบัติของที่พอลิไวนิลคลอไรด์แสดงในตารางที่ 1 ในการศึกษาครั้งนี้เสาเข็มจำลองได้ถูกจัดในรูปแบบเสาเข็มเดี่ยว โดยกำหนดให้ระยะ x เท่ากับ 0 ที่จุดล่างสุดของเสาเข็มและเพิ่มขึ้นเรื่อย จนถึงปลายเสาเข็มที่ x เท่ากับ 90 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในเท่ากับ 20 และ 18.4 มิลลิเมตรตามลำดับ ความหนาของผนังเสาเข็มจำลองเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) เท่ากับ $3.94\times10^{-9}\text{m}^4$



Unit: cm

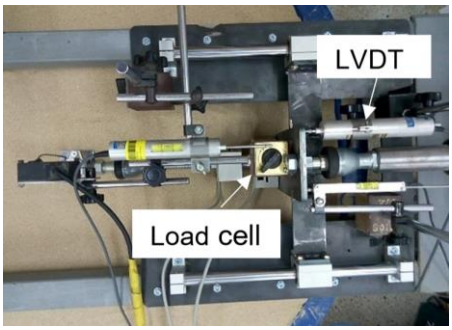
รูปที่ เสาเข็มจำลอง



รูปที่ โครงเหล็กและถังคอนกรีต

ตารางที่ 1 สมบัติของท่อพอลิไวนิลคลอไรด์

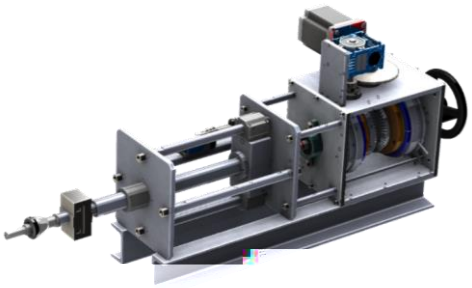
	ASTM D638 ASTM D638 ASTM D792	51.40 4.10 1.40 0.41	MPa GPa



รูปที่ เซลล์วัดแรงและเซ็นเซอร์วัดระยะ

2.2 การเตรียมการทดสอบ

ถังคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร สูง 98 เซนติเมตร ถูกใช้เป็นภาชนะในการจำลองเสาเข็มที่ให้แรงกระทำด้านข้างในห้องทดลอง โครงสร้างเหล็กใช้ในการรองรับถังคอนกรีตและรองรับแรง ในการทดลองนี้ชั้นทรายได้ถูกเตรียมการอย่างเป็นระเบียบและมีการควบคุมความหนาแน่นของทรายผ่านทางการโปรยทราย[8] โดยที่จะมีความหนาแน่นประมาณ 1.55 g/cm^3 โดยมีการแรงกระทำด้านข้างจากเครื่องมือให้แรงที่ถูกติดตั้งบนกรอบโครงสร้างเหล็ก เครื่องมือให้แรงสามารถให้แรงได้สูงสุด 20 กิโลนิวตัน ระยะทางสูงสุด 30 เซนติเมตร และความเร็วที่ 0.1-1 มิลลิเมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 เซลล์วัดแรง (Load cell) ได้ถูกใช้ในการวัดแรงกระทำด้านข้างที่กระทำต่อเสาเข็มจำลอง เซ็นเซอร์วัดระยะ (Linear variable displacement transducer, LVDT) ได้ถูกใช้สำหรับการวัดการเสียรูปด้านข้าง ดังแสดงในรูปที่ 6

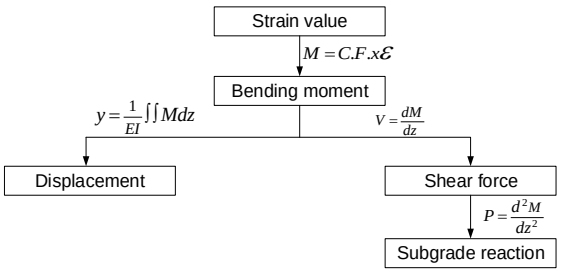


รูปที่ เครื่องมือให้แรงกระทำด้านข้าง

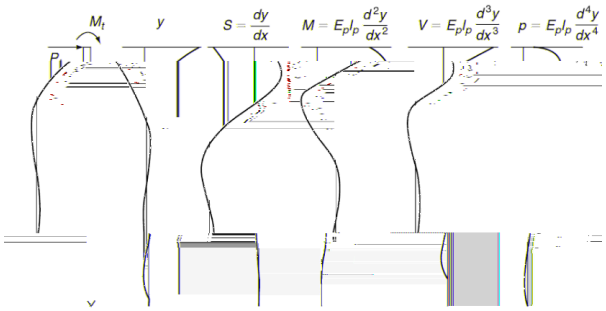
2.3 วิธีการวิเคราะห์ผล

2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและค่าสติฟเนส

จากการศึกษาที่ผ่านมา Pathak et al.[9] ได้รวบรวมการพัฒนาการคำนวณค่าสติฟเนสจากตัวแปรต่าง ๆมากมาย หนึ่งในนั้นคือวิธี Strain Wedge method [10] โดยวิธีนี้เป็นการนำความสัมพันธ์ของโมเมนต์ดัดคำนวณหาแรงเฉือน ความต้านทานของดิน (Soil resistance) และการเสียรูปในแนวด้านข้าง เพื่อไปคำนวณหาค่าสติฟเนสของดิน (Soil Stiffness) ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8



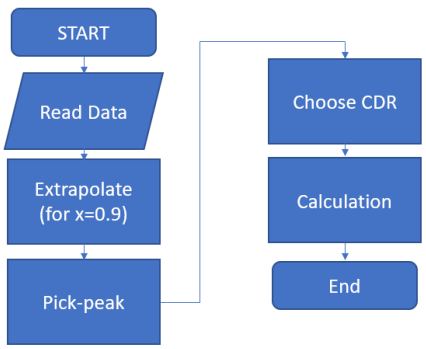
รูปที่ Strain Wedge method



รูปที่ Deflection (y), slope (dy/dx), bending moment (M), shearing force (V), and soil reaction (p) for elastic conditions[11]

2.3.2 การวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม

ในการศึกษานี้ใช้โปรแกรม MATLAB® ในการวิเคราะห์หาค่าสติฟเนสของดิน โดยเริ่มจากการใส่ข้อมูลโมเมนต์ดัดที่มาจากค่าสเตรนจากสเตรนเกจ (Strain gauges) เข้าไป เนื่องจากทำการวัดค่าโมเมนต์ดัด (M) จำนวน 9 ตำแหน่งตามความยาวของเสาเข็ม (รูปที่ 3) ลักษณะการผันแปรของโมเมนต์จึงกระจายตัว (Scattered) ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ค่า การเสียรูป ค่าความชัน แรงเฉือน และแรงปฏิกิริยาของดิน (รูปที่ 8) มีความต่อเนื่องตลอดเสาเข็มจึงต้องมีการใช้คำสั่ง spline เพื่อฟิตข้อมูล โดย spline interpolation คือหนึ่งในวิธีการประมาณค่าข้อมูลภายในช่วงที่กำหนดที่ใช้ piecewise polynomial นั้นคือพหุนามที่ประกอบด้วยฟังก์ชั่นย่อย (Sub-function) หลายชนิดประกอบกัน หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลมาคำนวณหาค่าแรงเฉือน และค่าแรงปฏิกิริยาของดิน ด้วยวิธีการหาอนุพันธ์ (Differentiation) หนึ่งครั้งและสองครั้งตามลำดับ หลังจากนั้นเพื่อหาค่าการเสียรูปด้วยการนำโมเมนต์ดัดมาหาค่าปฏิยานุพันธ์สองครั้ง (Double Integration) ในส่วนของการให้แรงแบบวัฏจักร เนื่องจากมีการบันทึกค่าจำนวนมากและหลายวัฏจักร จึงต้องมีการแยกหรือเลือกทีละวัฏจักรมาผ่านกระบวนการ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มคำสั่งในส่วนพิคพีค (Pick-peak) มาเลือกจุดต่ำสุดและสูงสุดจากค่าระยะทางสูงสุด รวมถึงการเลือกค่าระยะทางและแรงสูงสุดที่แตกต่างกัน ตามที่การทดลองกำหนด ดังแสดงในรูปที่ 9



Remark: CDR = Cyclic Displacement Ratio

รูปที่ การเขียนรหัสโปรแกรมโดยย่อ

2.4 ผลกระทบจากขนาดของแบบจำลอง

จากกฎการย่อขนาด (Scaling Law) ตารางที่ 2 แสดงตัวคูณขนาดแบบจำลอง (Scaling factor) โดยคอลัมน์ “General” แสดงค่าตัวคูณขนาด (Factor) ที่ต้องการใช้ คอลัมน์“1_g (laboratory)” และ “n_g (centrifuge)” แสดงตัวขนาดเฉพาะ ซึ่งก็คือผลลัพธ์ของการออกแบบ

ตารางที่ 2 ตัวคูณขนาดแบบจำลอง (Scaling Factor) [12]

Quantity	General	1_g (laboratory)	n_g (centrifuge)
Length	n_t	$1/n$	$1/n$
Mass density	n	1	1
Acceleration	n_g	1	N
Stiffness	n_G	$1/n^{\alpha}$	1
Stress	$n\ n_g\ n_t$	$1/n$	1
Force	$n\ n_g\ n_t^3$	$1/n^3$	$1/n^2$
Force/unit length	$n\ n_g\ n_t^2$	$1/n^2$	$1/n$
Strain	$n\ n_g\ n_t/n_G$	$1/n^{1-\alpha}$	1
Displacement	$n\ n_g\ n_t^2/n_G$	$1/n^{2-\alpha}$	$1/n$
Pore fluid viscosity	n	1 or $*n^{1-\alpha/2}$	1 or $*n$
Pore fluid density	n_f	1	1
Permeability	$n_f n_g/n$	1 or $*1/n^{1-\alpha/2}$	n or *1
Hydraulic gradient	n/n_f	1	1
Time (diffusion)	$n\ n_t^2/n_G$	$1/n^{2-\alpha}$ or $*1/n^{1-\alpha/2}$	$1/n^2$ or $*1/n$
Time (creep)	1	1	1
Time (dynamic)	$n_t(n/n_G)^{1/2}$	$1/n^{1-\alpha/2}$	$1/n$
Velocity	$n_g\ n_t(n/n_G)^{1/2}$	$1/n^{1-\alpha/2}$	1
Frequency	$(n/n_G)^{1/2}/n_t$	$n^{1-\alpha/2}$	n
Shear wave velocity	$(n/n_G)^{1/2}$	$1/n^{\alpha/2}$	1

เนื่องจากกฎการย่อขนาดท่อพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride, PVC) จึงได้นำมาใช้เป็นเสาเข็มจำลองดังแสดงในตารางที่ 3

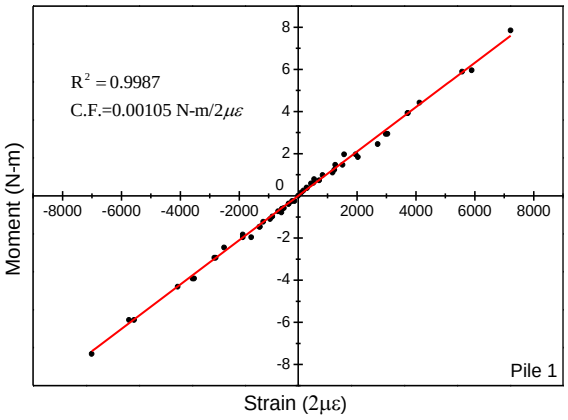
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติและขนาดของเสาเข็มต้นแบบ เสาเข็มย่อขนาด 1g และสาเข็มพีวีซี (PVC) ที่ใช้ในแบบจำลอง

	Prototype	1g	PVC	
	18	0.9	0.9	m
	0.4	$2x10^{-2}$	$2x10^{-2}$	m
	-	-	$1.84x10^{-2}$	m
	-	-	$1.60\ x10^{-3}$	m
	$1.25\ x10^{-3}$	-	$3.94x10^{-9}$	m^4
	$1.95\ x10^{4}$	50	65	N/m

ผลทดลองและอภิปรายผล

3.1 การสอบเทียบเสาเข็มจำลอง

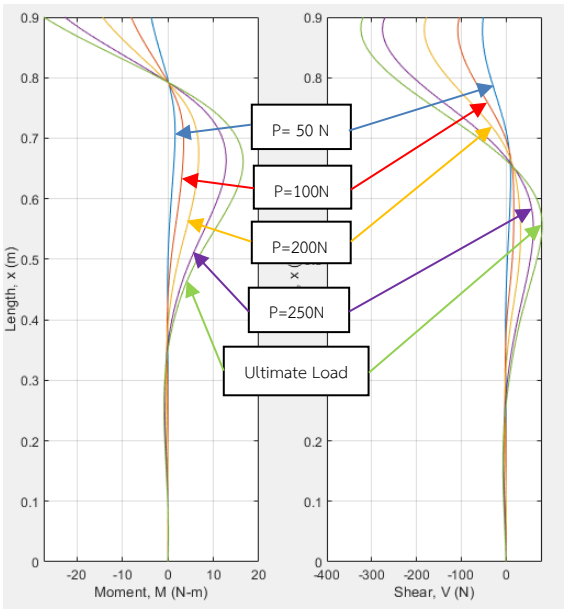
ในการเปลี่ยนค่าสเตรนจากสเตรนเกจที่ติดตั้งบนเสาเข็มเป็นค่าโมเมนต์ดัดเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอื่นที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.3 มีความจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าแฟคเตอร์การเปรียบเทียบ (Calibrate factor) เป็นอันดับแรกโดยวิธีการหาค่าได้แสดงในรูปที่ 10 โดยจุดล่างสุดของเสาเข็มจะมีข้อต่อแบบยึดแน่น (Fixed Joint) เพื่อยึดให้เสาเข็มอยู่กับที่และสะดวกต่อการเตรียมการทดลอง โดยกำหนดให้เสาเข็มเปรียบเสมือบคานยื่น (Cantilever Beam) แล้วให้แรงที่ระยะ 90 เซนติเมตรจากจุดล่างสุดของเสาเข็ม เพื่อเปรียบเทียบค่าสเตรนที่ได้กับโมเมนต์ดัด



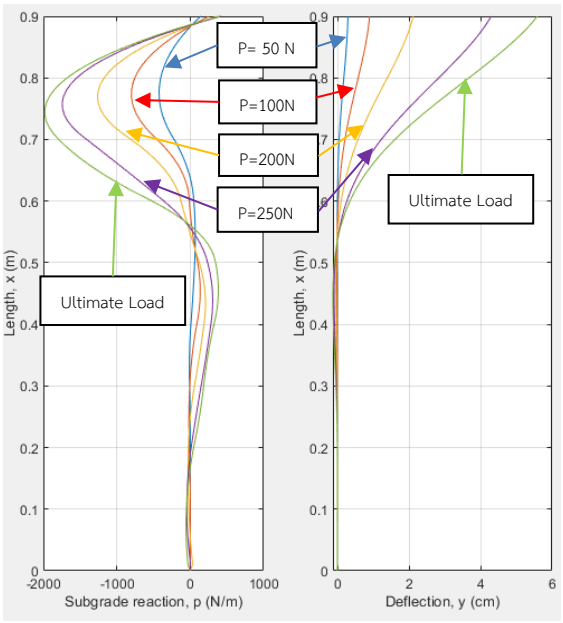
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์โมเมนต์ดัดกับค่าสเตรน เพื่อหาค่าแฟกเตอร์การปรับเทียบ

3.2 การให้แรงต่อเนื่องทิศทางเดียว (Monotonic Loading)

ในกรณีนี้จะเป็นการให้แรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งระยะที่หัวเสาเข็มเท่ากับ 55 มิลลิเมตร จากนั้นจะคำนวณค่าโมเมนต์ดัด แรงเฉือน ค่าแรงปฏิกิริยาของดิน และค่าเสียรูปด้านข้างของดินจากการเรียกใช้รหัสผ่านโปรแกรม MATLAB® ดังแสดงในรูปที่ 11 รูปที่ 11(ก) แสดงค่าโมเมนต์ดัดตามแนวเสาเข็ม รูปที่ 11(ข) เป็นแรงเฉือนซึ่งใช้ข้อมูลของโมเมนต์ดัด (รูปที่ 11(ก)) มาทำการหาอนุพันธ์หนึ่งครั้ง รูปที่ 11(ค) แรงปฏิกิริยาในดินเกิดจากการหาอนุพันธ์ของแรงเฉือนอีกหนึ่งครั้ง ในส่วนของรูปที่ 11(ง) ค่าการเสียรูปเกิดจากการนำข้อมูลโมเมนต์ดัดมาทำการหาปฏิยานุพันธ์สองครั้ง (Double integration) แล้วจึงทำการหารด้วยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าโมดูลัสของเสาเข็มจำลอง



(ก) (ข)



(ค) (ง)

รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการพัฒนา:
(ก) โมเมนต์ดัด (ข) แรงเฉือน (ค) แรงปฏิกิริยาในดิน และ(ง) ค่าเสียรูป เมื่อให้แรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มอย่างต่อเนื่องจน y_0=55mm

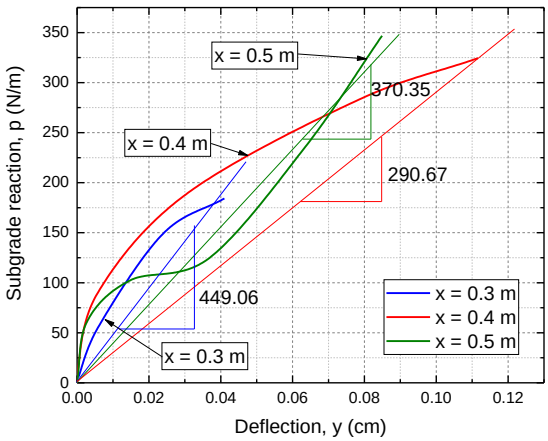
จากรูปที่ 11(ง) แสดงค่าเสียรูปด้านข้างที่ได้จากการคำนวณโดยการเรียกใช้โปรแกรม MATLAB® เมื่อระยะสูงสุดที่ให้เท่ากับ 55 มิลลิเมตร

แรงสูงสุดที่วัดผ่านเซลล์วัดแรงเท่ากับ 323 นิวตัน ลักษณะของโมเมนต์ดัดแรงเฉือน แรงปฏิกิริยาในดิน และค่าเสียรูปตามแนวแกนเสาเข็ม (x) เมื่อแรงกระทำด้านข้างต่อเสาเข็มเท่ากับ 50, 100, 200, 250 และ 323 นิวตัน แสดงดังรูปที่ 11 เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าระยะการเสียรูปที่ได้จากรหัสในโปรแกรม MATLAB® ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าระยะการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งปลายเสาเข็ม (y at $x=0.9m$) ที่คำนวณจากโมเมนต์ดัดที่วัดได้จากสเตรนเกจกับเซ็นเซอร์วัดระยะ (y_0)

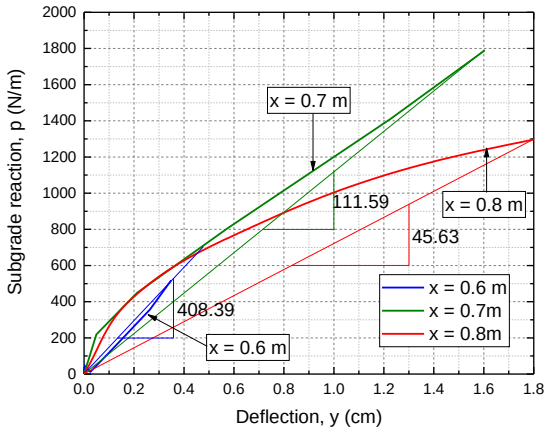
ตารางที่ 4 ตารางเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ (y_0) ที่ตำแหน่งหัวเสาเข็ม

Applied Force (N) (P_0)	Deflection (cm)	
	Strain gauge (y at $x=0.9$ m)	LVDT (y_0)
50	0.2945	0.2555
100	0.8994	0.8404
200	2.1183	2.0796
250	4.2995	4.1833
Unlimited Load	5.5914	5.5097

เพื่อการหาค่าสติฟเนสของดินเส้นโค้งพีวาย (p-y curves) จำเป็นจะต้องถูกพล็อต โดยการนำค่าแรงปฏิกิริยาในดินและค่าการเสียรูปของดินมาทำการพล็อตและหาความชัน ในกรณีนี้ใช้ค่าปฏิกิริยาสูงสุดและค่าเสียรูปสูงสุดมาหาความชันและใช้เป็นค่าสติฟเนส โดยเส้นโค้งพีวายและค่าสติฟเนสของดินแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ

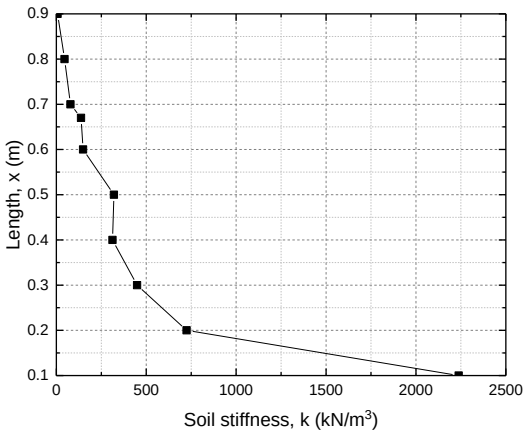


(ก)



(ข)

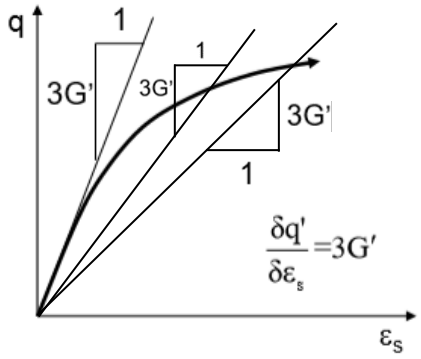
รูปที่ 1 เส้นโค้ง พี-วาย (ก) สำหรับ x=0.3, 0.4 และ 0.5 เมตร (ข) สำหรับ x=0.6, 0.7 และ 0.8 เมตร



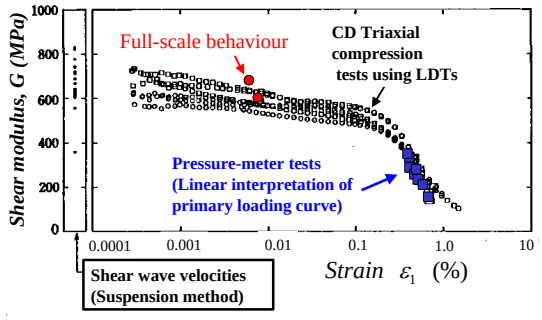
รูปที่ 1 ค่าสติฟเนสของดินเสาเข็มเดี่ยว

รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปฏิกิริยาของดินกับค่าความเสียรูปด้านข้างของดินแต่ละตำแหน่งเมื่อค่าเสียรูปเพิ่มค่าปฏิกิริยาก็เพิ่มตาม แต่มีความชันที่น้อยลงแสดงว่าค่าปฏิกิริยาเพิ่มตามค่าเสียรูปด้วยอัตราที่ลดลง เมื่อสังเกตจากระดับความลึกช่วงล่างของเสาเข็มคือ x=0.3 ถึง 0.5 เส้นโค้งพีวายจะมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อสูงมากขึ้นยิ่งใกล้พื้นดินความชันของกราฟจะต่ำลงมาก จากรูปที่ 13 จะเห็นได้ว่าค่าสติฟเนสเริ่มต้นของดินจะเพิ่มขึ้นตามความลึกของดิน ซึ่งเกิดจากผลของระดับความเครียด (Strain-level effect) ที่มีการกล่าวถึงในผลการทดลองแรงอัดสามทิศทางที่ระดับความเครียดต่ำของดิน [13] นั้นคือเมื่อความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสเฉือน (Shear Modulus) มีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 14 และรูปที่ 15 ดังนั้นเมื่อความลึกมากขึ้น ค่าโมดูลัสเฉือนก็จะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าสติฟเนสเพิ่มขึ้น จะสามารถเห็นได้ว่าที่ระดับความลึกสูง (x มีค่าต่ำ) ค่าการเสียรูป (รูปที่ 13(ง)) ก็จะต่ำไปด้วย

Displacement, y_0 (mm)



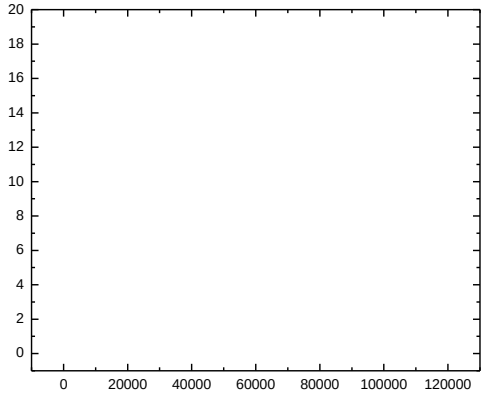
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นรวมและความเครียดเฉือน



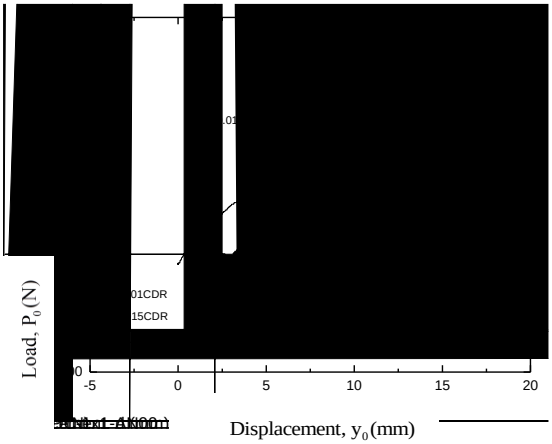
รูปที่ 15 การเปรียบเทียบระหว่างค่าสติฟเนสในรูปแบบความเครียดจากการทดสอบแรงอัดสามแกน [13]

3.3 การให้แรงกระทำซ้ำแบบเป็นวัฏจักร (Cyclic Loading)

การศึกษานี้เป็นการให้แรงกระทำซ้ำแบบวัฏจักรโดยควบคุมแรงจากระยะสูงสุด เมื่อสังเกตุการเคลื่อนไหวโดยรวมของระยะการเคลื่อนที่ต่อแรงที่ให้จะเห็นได้ว่ากำหนดระยะทางที่ 0.005, 0.010, 0.015 และ 0.020 ของอัตราส่วนระยะความยาวเสาเข็ม (เสาเข็มยาว 9 เมตร) ที่นั้นคือมีค่าระยะทางเท่ากับ 4.5, 9, 13.5 และ 18 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 16 และ 17

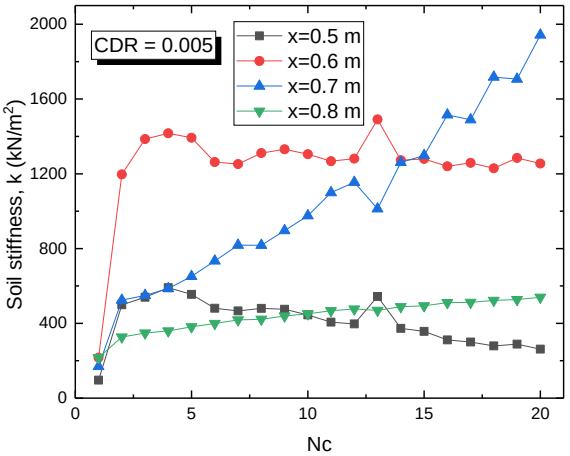


รูปที่ 16 ประวัติเวลาการให้แรงโดยควบคุมจากระยะการเคลื่อนที่

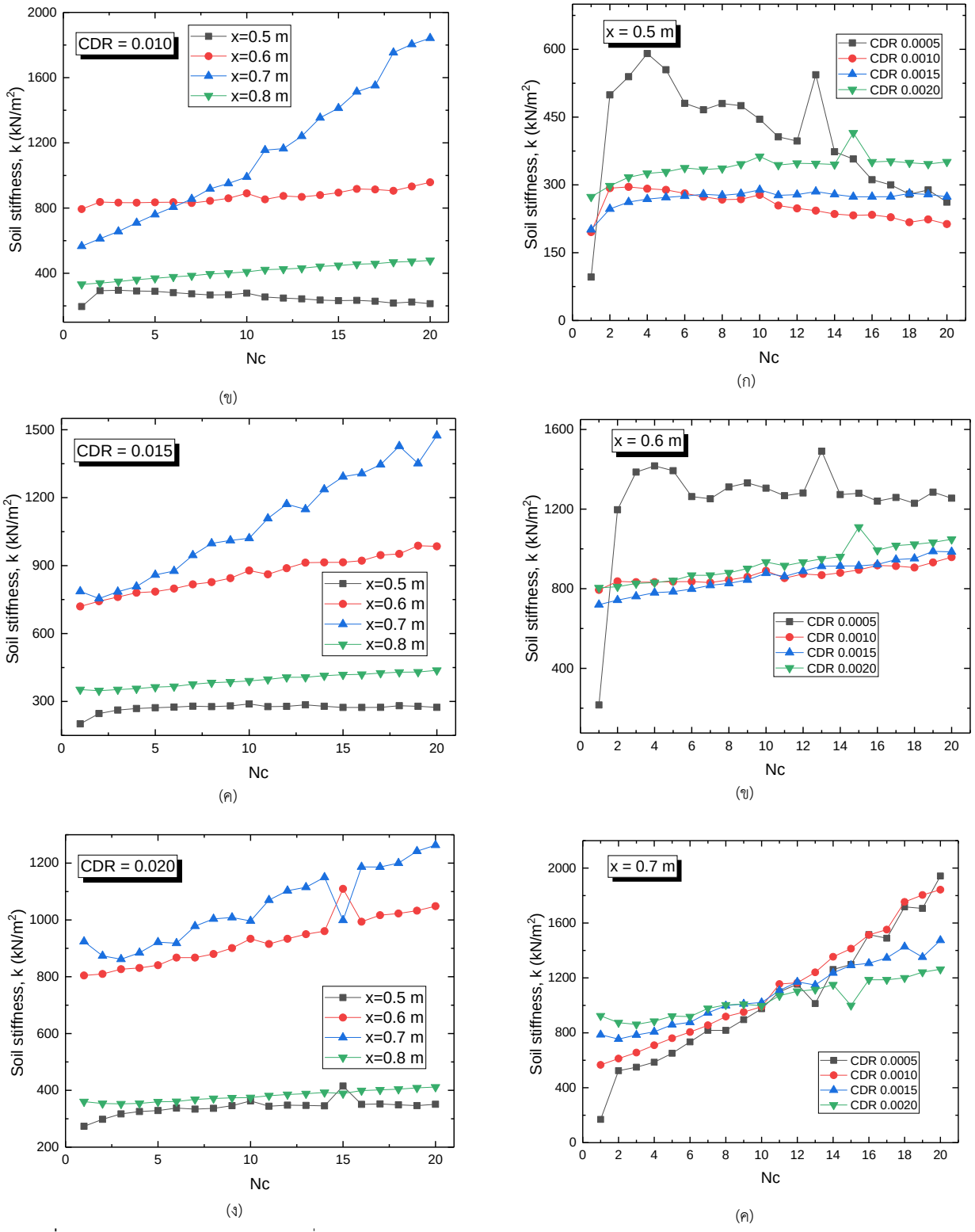


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่และแรงที่ให้

เมื่อผ่านการเรียกใช้รหัสผ่านโปรแกรม MATLAB® โดยการแบ่งข้อมูลตามชนิดของการทดลองซึ่งแตกต่างกันในส่วนการควบคุมแรงจากระยะสูงสุด เริ่มจากให้โปรแกรมเลือกชนิดของค่าระยะสูงสุดที่ต้องการหา โดยการทดลองนี้ได้แบ่งเป็น 4 ระยะสูงสุดและแต่ละระยะสูงสุดมีทั้งหมด 20 รอบแล้วจึงทำการเลือกที่ข้อมูลทีละรอบหลังจากนั้นเข้าสู่การคำนวณซึ่งวิธีการโดยสังเขปได้มีการอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 3.2 หลังจากนั้นนำค่าสติ-ฟเนสของดินมาเปรียบเทียบกัน ณ อัตราส่วนระยะสูงสุดที่กำหนดให้เดียวกันในแต่ละวัฏจักรที่มีระดับความลึกแตกต่างกัน และเปรียบเทียบ ณ อัตราส่วนระยะสูงสุดที่แตกต่างกัน แต่ความลึกเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 18 และ 19 ตามลำดับ

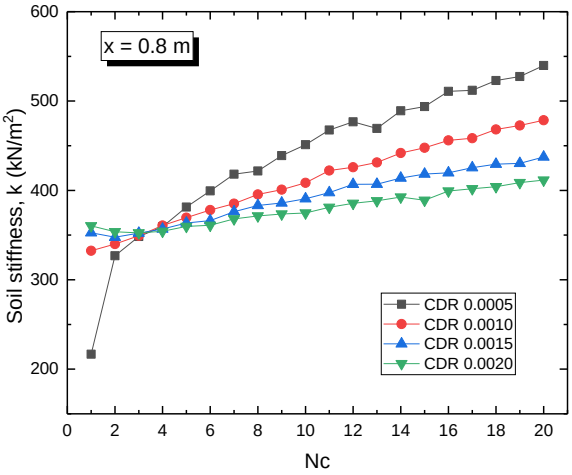


(ก)



รูปที่ 1 การพัฒนาค่าสติฟเนสกับจำนวนรอบที่ความลึกต่างกัน ณ อัตราส่วนระยะสูงสุดที่ (ก) 0.005 (ข) 0.010 (ค) 0.015 (ง) 0.020

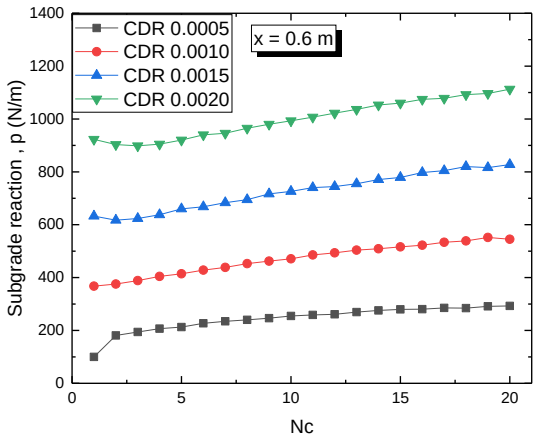
จากการศึกษาพบว่าเมื่อให้แรงและถอนกลับไปเรื่อย ๆอย่างเป็นวัฏจักรแล้ว จะมีค่าสติฟเนสที่แตกต่างกันสองลักษณะที่เห็นได้ชัด นั้นก็คือ มีการคงที่ของค่าสติฟเนสที่ไม่เพิ่มขึ้น กับมีการเพิ่มขึ้นของค่าสติฟเนสตามจำนวนรอบการให้แรงกระทำซ้ำ ด้วยอัตราที่แตกต่างกันไป



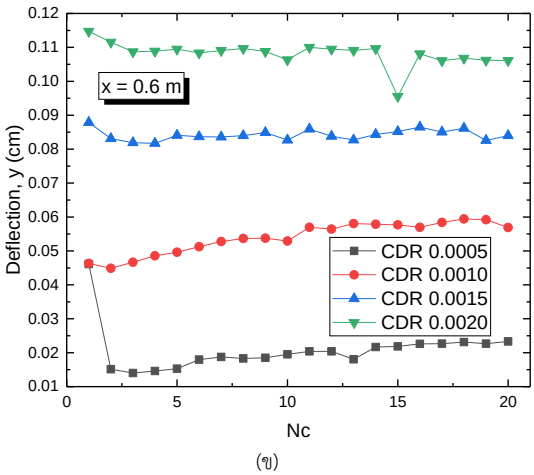
(ง)

รูปที่ 19 การพัฒนาค่าสติฟเนสต่อจำนวนรอบที่ความอัตราส่วนระยะสูงสุดต่างกัน ณ ความลึกที่ (ก)0.5 (ข)0.6 (ค)0.7 (ง)0.8

เมื่อเปรียบเทียบผลจากศึกษาเมื่อกำหนดที่ความลึกเท่ากัน ค่าในรอบแรกสุดที่จำนวนครั้งเท่ากับ 1 (Nc=1) ค่าสติฟเนสจะเรียงลำดับจากน้อยไปมากที่อัตราส่วน 0.005, 0.010, 0.015 และ 0.020 ตามลำดับ และจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกันไป เพราะว่าดินทรายมีสมบัติทั้งพลาสติก (Plastic material) และยืดหยุ่น (Elastic material) ส่งผลให้ค่าสติฟเนสครั้งที่สองมีค่าสูงขึ้นและหลังจากนั้นจะคงตัวต่อไป เห็นได้ชัดจากรูป 19(ก) และ 19(ข) นั่นคือ x เท่ากับ 0.5 และ 0.6 เมตร แต่จากรูปที่ 19(ค) และ 19(ง) หรือเมื่อ x เท่ากับ 0.7 และ 0.8 ที่ความชันของกราฟยังคงสูงอยู่ซึ่งหมายความว่าการพัฒนาค่าสติฟเนสของตำแหน่ง x ที่ 0.7 และ 0.8 ยังมีการพัฒนาต่อ โดยสาเหตุเกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสติฟเนสเกิดจากอิทธิพลการของสะสมทิศทางเดียว (Ratcheting Effect) นั้นคือเมื่อดินเกิดการพังทลายแบบเชิงรุกไปแล้ว มีการคืนกลับไปที่เดิมจำเป็นจะต้องใช้แรงด้านข้างมากขึ้น เมื่อแรงด้านข้างเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความเค้นรวมเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าสติฟเนสของดินก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อความชัดเจนมากยิ่งขึ้น รูปที่ 20 และ 21 ค่าแรงปฏิกิริยาและค่าการเสียรูปต่อจำนวนรอบการให้แรงที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.6 และ 0.7 เมตรตามลำดับ



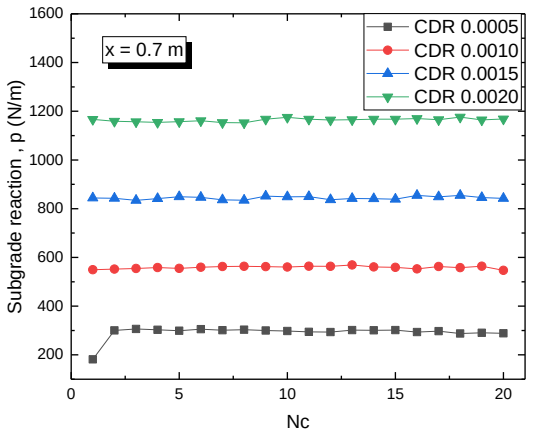
(ก)



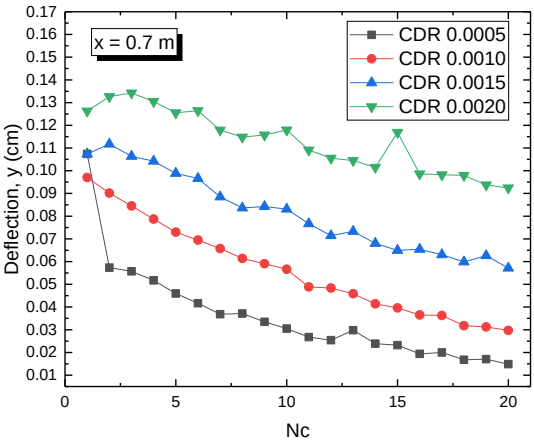
(ข)

รูปที่ 0 ค่าแรงปฏิกิริยาและค่าการเสียรูปต่อจำนวนรอบการให้แรงที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.6 เมตร

จากรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าค่าแรงปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นในขณะที่ค่าการเสียรูปคงที่ไปแล้ว แสดงถึงการหยุดการพัฒนาของค่าสติฟเนสของตำแหน่ง x ที่ 0.6 เมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 ค่าแรงปฏิกิริยาและค่าการเสียรูปต่อจำนวนรอบการให้แรงที่ตำแหน่ง x เท่ากับ 0.7 เมตร

จากรูปที่ 21 จะเห็นได้ว่าค่าแรงปฏิกิริยาคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ค่าการเสียรูปลดลงเรื่อย ๆ แสดงถึงการพัฒนาของค่าสติฟเนสของตำแหน่ง x ที่ 0.7 เมตร ที่ยังคงพัฒนาต่อไป

บทสรุป

การศึกษานี้นำเสนอผลของการจำลองการให้แรงด้านข้างในเสาเข็มเดี่ยวในทรายแห้ง โดยการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวภายใต้การให้แรงด้านข้างต่อเนื่องเพื่อศึกษาพฤติกรรมเริ่มต้นของค่าสติฟเนสในดิน ส่วนที่สองคือการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวภายใต้แรงด้านข้างกระทำซ้ำแบบวัฏจักรเพื่อศึกษาพฤติกรรมหลังจากมีการให้แรงกระทำซ้ำในดิน กล่าวคือ

1. ค่าสติฟเนสเริ่มต้นของดินจะเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของดิน นั้นคือ เมื่อดินลึกมากขึ้น ค่าสติฟเนสเริ่มต้นของดินก็จะมากขึ้น

2. ค่าสติฟเนสของดินจะเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นในรอบแรกเพราะสมบัติที่เป็นพลาสติก (Plastic) หลังจากนั้นจะคงที่ตามสมบัติยืดหยุ่น (Elastic) ของดิน แต่ในระดับความลึกที่น้อยค่าสติฟเนสจะพัฒนาเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบอันเกิดจากอิทธิพลของการสะสมทิศทางเดียว เอกสารอ้างอิง

[1] Wallbank, E. (1989). The performance of concrete in bridges. A survey of 200 highway bridges.

[2] Pritchard, B. (1994). *Continuous and integral bridges*: CRC Press, pp.35-48.

[3] Wolde-Tinsae, A., Greimann, L., & Yang, P. (1982). *Nonlinear Pile Behavior in Integral Abutment Bridges: Final Report: February, 1982*: Department of Civil Engineering, Engineering Research Institute, Iowa State

[4] Burke Jr, M. P. (1993). Integral bridges: attributes and limitations. *Transportation research record* (1393).

[5] Horvath, J. S. (2000). Integral-abutment bridges: problems and innovative solutions using EPS geofoam and other geosynthetics. *Res. Rpt. No. CE/GE-00, 2*.

[6] Card, G., & Carder, D. (1993). A literature review of the geotechnical aspects of the design of integral bridge abutments. *TRL Project Report* (PR 52).

[7] Dicleli, M., & Albhaisi, S. M. (2004). Effect of cyclic thermal loading on the performance of steel H-piles in integral bridges with stub-abutments. *Journal of Constructional Steel Research, 60*(2), 161-182.

[8] Miura, S., & Toki, S. (1982). A sample preparation method and its effect on static and cyclic deformation-strength properties of sand. *Soils and Foundations, 22*(1), 61-77.

[9] Pathak, B. (2011). Analysis of static lateral load test of battered pile group at I-10 Twin Span Bridge.

[10] Norris, G. (1986). *Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis.* Paper presented at the Proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling.

[11] Reese, L., & Van Impe, W. (2001). Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading Taylor&Francis. *London, United Kingdom, 8*.

[12] Wood, D. M. (2004). Geotechnical modelling (applied geotechnics). In: Spon Press, London and New York.

[13] TATSUOKA, F. (2001). Impacts on geotechnical engineering of several recent findings from laboratory stress-strain tests on geomaterials. Paper presented at the Geotechnics for roads, rail tracks and earth structures.