

บทที่ 5 ผลการทดสอบ triaxial test

5.1 บทนำ

บทนี้จะแสดงพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยการศึกษากฎพฤติกรรมที่ความเครียดกว้างและศึกษาเกี่ยวกับ non-linearity และ anisotropy โดยจะทำการทดสอบ triaxial compression ทั้งแบบระบายน้ำและไม่ระบายน้ำ ผลการทดลองนี้จะทำให้สามารถเข้าใจพฤติกรรมของดินเหนียวกรุงเทพฯ มากขึ้นและเป็นข้อมูลที่สำคัญในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯต่อไป

การทดสอบจะทำ isotropically consolidated undrained compression (CIUC) และ isotropically consolidated drained compression (CIDC) กับทั้งตัวอย่างที่ตัดในแนวตั้งและแนวนอนเพื่อศึกษาพฤติกรรม anisotropy ของความเค้น-ความเครียด โดยเครื่องมือ triaxial จะมีการเพิ่มระบบ local strain measurement (LVDT และ proximity transducer) และระบบ bender element โดยรายละเอียดของเครื่องมือได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 ตัวอย่างคงสภาพของดินเหนียวกรุงเทพฯที่ใช้นำมาจากพื้นที่ลาดพร้าวที่ความลึก 10.5-14.5 เมตร ซึ่งเป็นดินเหนียวแข็งปานกลางถึงแข็ง คุณสมบัติของตัวอย่างดินได้แสดงในตารางที่ 5-1

5.2 การทดสอบ isotropic consolidation

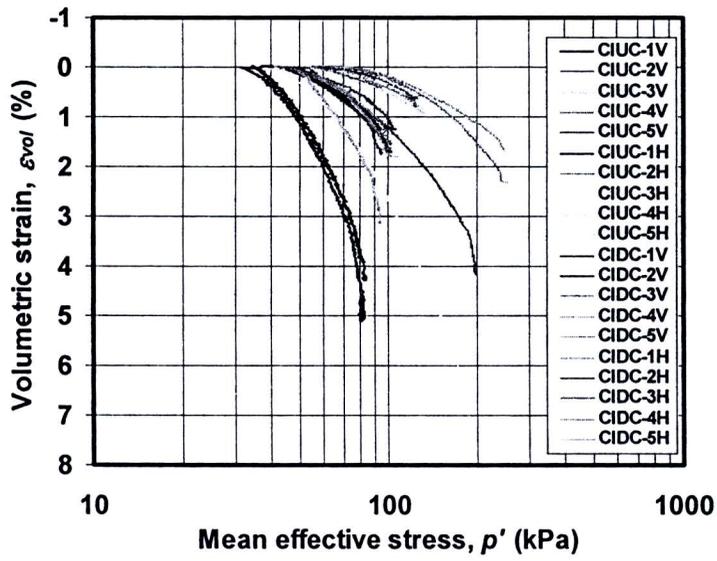
5.2.1 คุณสมบัติด้าน consolidation

ตัวอย่างคงสภาพของดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้ถูกทำการทดสอบ isotropic consolidation ไปที่ความเค้นเฉลี่ยประสิทธิผลในสนาม ผลของ isotropic consolidation curve ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้แสดงในรูปที่ 5-1 โดยที่รูปที่ 5-1(a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง volumetric strain (ϵ_v) ซึ่งคำนวณมาจากระบบ local strain measurement (LVDT และ proximity transducer) และ logarithm of mean effective stress (p') จากรูปที่ 5-1(a) แสดงว่าค่าเฉลี่ยของ recompression ratio RR (คำนวณจาก $RR = \Delta \epsilon_v / \Delta \log p'$) มีค่าประมาณ 2.7% ซึ่งมีค่าตรงกับค่า recompression index C_r เท่ากับ 0.072 ซึ่งคำนวณจาก $C_r = \Delta e / \Delta \log p'$ ดังแสดงในรูปที่ 5-1(b) ซึ่งค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าทั่วไปของดินเหนียวกรุงเทพฯ คือ $RR = 2.77$ และ $C_r = 0.07$ ซึ่งทดสอบโดย oedometer test (Shibuya and Tamrakar, 1999)

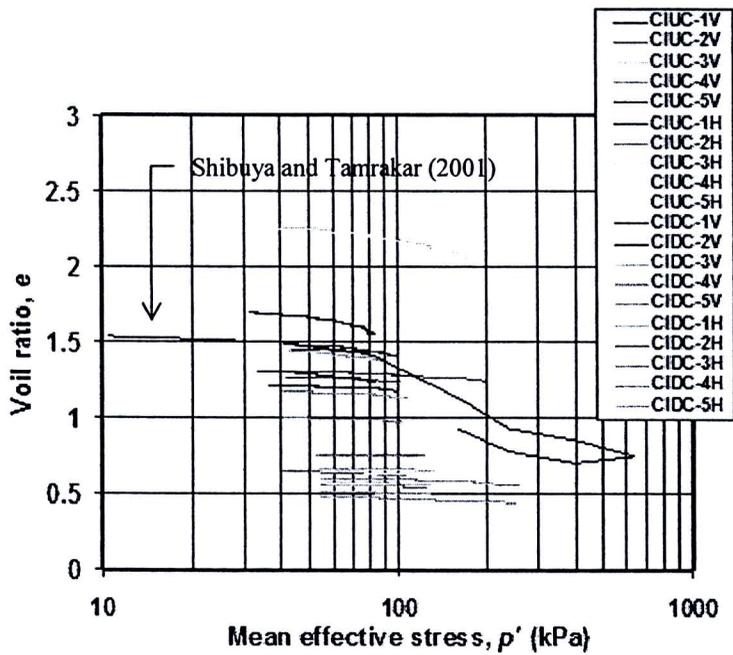
ตารางที่ 5-1 คุณสมบัติของตัวอย่างดิน

Test No.	Depth (m)	p'_0 (kPa)	Void ratio e_0	Water content, w_n (%)	LL (%)	PL (%)	Specimen direction
CIUC-1V	10.9	80	1.69	59.62	-	-	Vertical
CIUC-1H	11.7	90	1.30	48.40	73.5	27.29	Horizontal
CIUC-2V	13.1	100	1.27	44.72	-	-	Vertical
CIUC-2H	12.9	100	0.64	23.25	42.25	15.63	Horizontal
CIUC-3V	14.5	130	0.66	27.67	-	-	Vertical
CIUC-3H	13.7	120	0.57	23.49	51.00	17.60	Horizontal
CIUC-4V	13.7	120	0.76	29.33	-	-	Vertical
CIUC-4H	13.7	120	0.64	24.99	51.00	17.60	Horizontal
CIUC-5V	13.1	200 [*]	1.30	48.33	-	-	Vertical
CIUC-5H	12.3	180 [*]	2.25	81.56	53.30	17.91	Horizontal
CIDC-1V	11.7	90	1.48	51.92	61.10	32.26	Vertical
CIDC-1H	11.7	90	1.43	55.99	73.50	27.92	Horizontal
CIDC-2V	13.1	100	1.21	45.80	51.75	25.00	Vertical
CIDC-2H	12.3	90	1.45	43.75	53.30	17.91	Horizontal
CIDC-3V	13.9	120	0.51	17.77	39.10	15.66	Vertical
CIDC-3H	13.9	120	0.55	19.27	50.35	18.38	Horizontal
CIDC-4V	12.9	100	1.17	41.62	-	-	Vertical
CIDC-4H	12.9	100	1.00	32.96	42.25	15.63	Horizontal
CIDC-5V	13.7	240 [*]	0.60	21.02	-	-	Vertical
CIDC-5H	13.9	240 [*]	0.47	18.09	50.35	18.38	Horizontal

หมายเหตุ: ^{*} isotropically consolidated to $p'_0 = 2p'_{in-situ}$ where p'_0 = isotropic consolidation pressure and $p'_{in-situ}$ = in-situ mean effective stress.



(a) $\epsilon_{vol} - \log p'$



(b) $e - \log p'$

รูปที่ 5-1 Isotropic consolidation curve

5.2.2 การเคลื่อนตัวแบบ anisotropic ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation

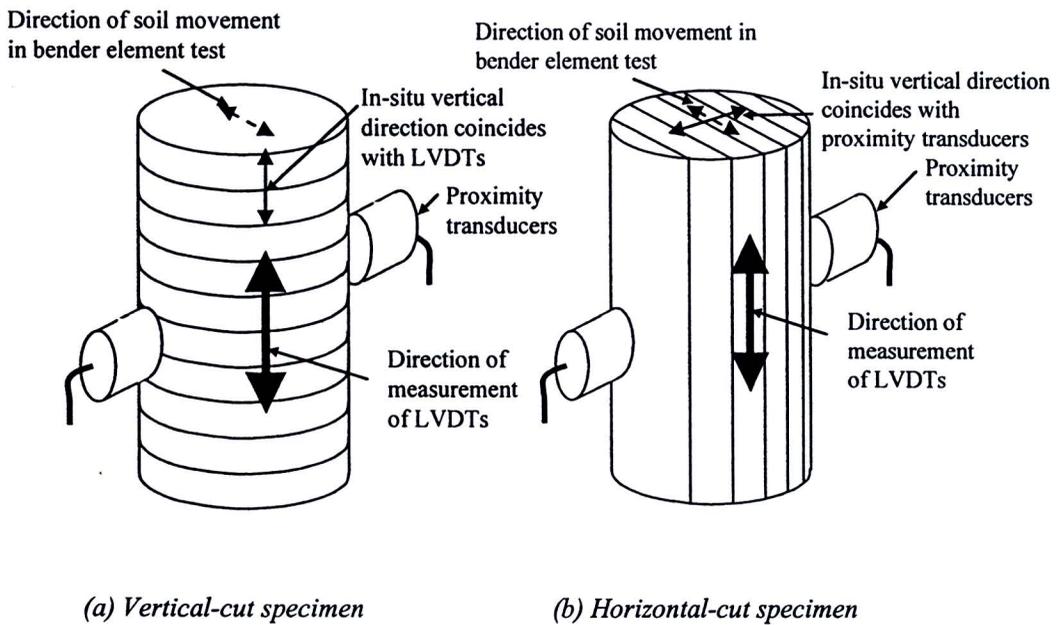
ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation สามารถศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนตัวของแบบ anisotropy ของตัวอย่างดินได้เนื่องจากการวัด local axial และ radial strain แยกต่างหากจากกัน โดยที่ทั้ง submersible LVDT และ proximity transducer ได้ติดตั้งไว้ที่กึ่งกลางความสูงและตรงกันข้ามกัน การติดตั้งระบบ local strain measurement สำหรับ vertical- และ horizontal-cut specimen ได้แสดงในรูปที่ 5-2 สำหรับ vertical-cut specimen นั้นความเค้นในแนวตั้ง (ϵ_v) ที่วัดโดย LVDT จะตรงกับแนวตั้งในสนามด้วย (ตั้งฉากกับ bedding plane) ในขณะที่ความเค้นในแนวนอน (ϵ_h) ที่วัดโดย proximity transducer จะตรงกับค่าความเค้นในแนวนอนในสนามและขนานกับ bedding plane ดังแสดงในรูปที่ 5-2(a) สำหรับ horizontal-cut specimen นั้นค่าความเค้นในแนวตั้ง (ϵ_v) ที่วัดโดย LVDT จะตรงกับแนวนอนในสนามและขนานกับ bedding plane ในขณะที่ค่าความเค้นในแนวนอน (ϵ_h) ที่วัดโดย proximity transducer จะตรงกับค่าความเค้นในแนวตั้งในสนามและตั้งฉากกับ bedding plane ดังแสดงในรูปที่ 5-2(b)

ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง axial และ radial strain ได้แสดงในรูปที่ 5-3 ซึ่งแสดงว่าการเคลื่อนตัวภายใต้สภาวะ isotropic consolidation นั้นมีสภาพ anisotropic โดยพบว่าสำหรับ vertical-cut specimen นั้น $\Delta\epsilon_v > \Delta\epsilon_h$ และสำหรับ horizontal-cut specimen นั้น $\Delta\epsilon_v < \Delta\epsilon_h$ ตารางที่ 5-2 ได้สรุปค่าอัตราส่วน $\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_h$ ที่ได้จาก vertical-cut specimen และค่าอัตราส่วน $\Delta\epsilon_h/\Delta\epsilon_v$ ที่ได้จาก horizontal-cut specimen ค่าอัตราส่วน $\epsilon_v/\Delta\epsilon_h$ จาก vertical-cut specimen และส่วนกลับของ horizontal-cut specimen ของทุกตัวอย่างได้พล็อตในรูปที่ 5-4 ผลการทดสอบแสดงว่าตัวอย่างนั้น stiff มากกว่าในแนวนอน โดยมีอัตราส่วน $\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_h$ ระหว่าง 1 และ 4.5 และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 2.14 ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ตรงกับผลการทดลองที่รายงานโดย Kuwano and Bhattarai (1989) ที่รายงานว่าดินเหนียวกรุงเทพฯอ่อนกว่าในแนวตั้งจากการทดสอบแบบระบายน้ำโดยใช้ true triaxial apparatus

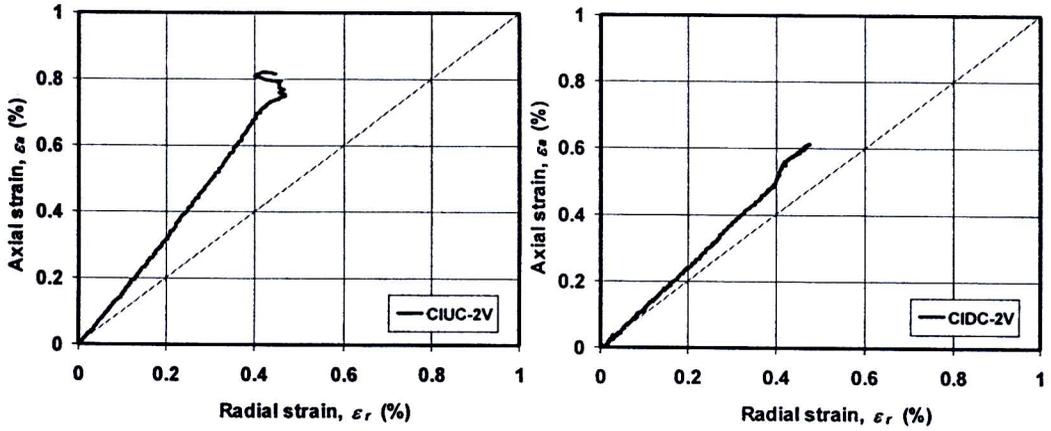
ตารางที่ 5-2 อัตราส่วนของ $\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_h$ ระหว่างการ isotropic consolidation

Test No.	Specimen orientation	Isotropic consolidation	
		Stress range (kPa)	Average $\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_h$
CIUC-1V	Vertical	230→280	1.03
CIUC-1H	Horizontal	240→290	3.65*
CIUC-2V	Vertical	240→300	1.73
CIUC-2H	Horizontal	240→300	2.04*
CIUC-3V	Vertical	250→330	1.20
CIUC-3H	Horizontal	250→320	0.96*
CIUC-4V	Vertical	250→320	0.80
CIUC-4H	Horizontal	250→320	3.60*
CIUC-5V	Vertical	240→400	1.21
CIUC-5H	Horizontal	240→380	2.17*
CIDC-1V	Vertical	240→290	0.94
CIDC-1H	Horizontal	240→290	2.41*
CIDC-2V	Vertical	240→300	1.30
CIDC-2H	Horizontal	240→290	3.14*
CIDC-3V	Vertical	250→320	1.50
CIDC-3H	Horizontal	250→320	1.95*
CIDC-4V	Vertical	240→300	1.69
CIDC-4H	Horizontal	240→300	4.54*
CIDC-5V	Vertical	250→440	1.00
CIDC-5H	Horizontal	250→440	1.02*

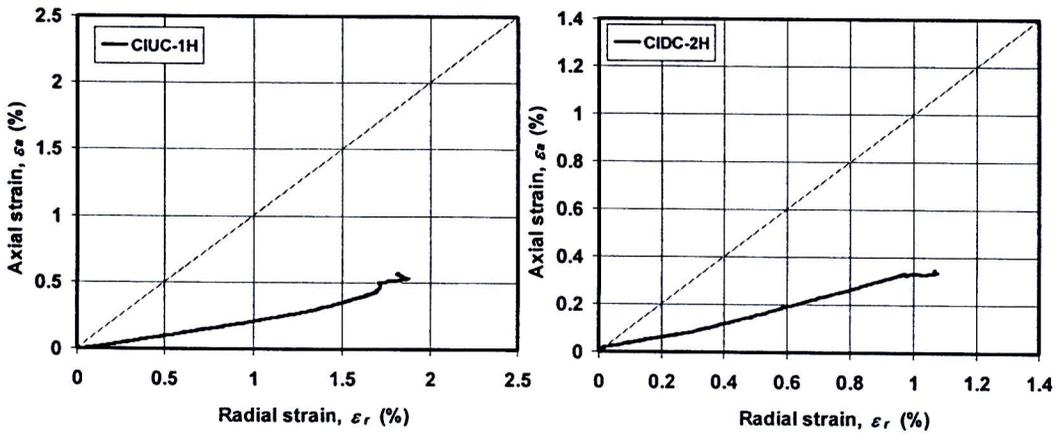
หมายเหตุ: * $\Delta\varepsilon_v/\Delta\varepsilon_h$ สำหรับ horizontal specimen



รูปที่ 5-2 การติดตั้งระบบ local strain measurement และ bender element

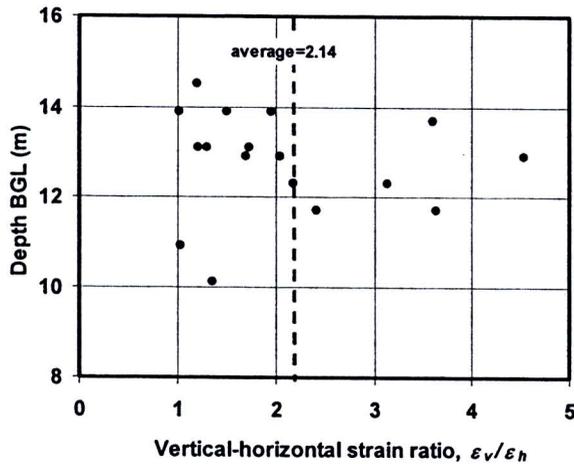


(a) Vertical-cut specimen (Test CIUC-2V and CIDC-2V)



(b) Horizontal-cut specimen (Test CIUC-1H and CIDC-2H)

รูปที่ 5-3 การเสีรูแบบ anisotropic ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation



รูปที่ 5-4 อัตราส่วน $\Delta\epsilon_v/\Delta\epsilon_h$ ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation

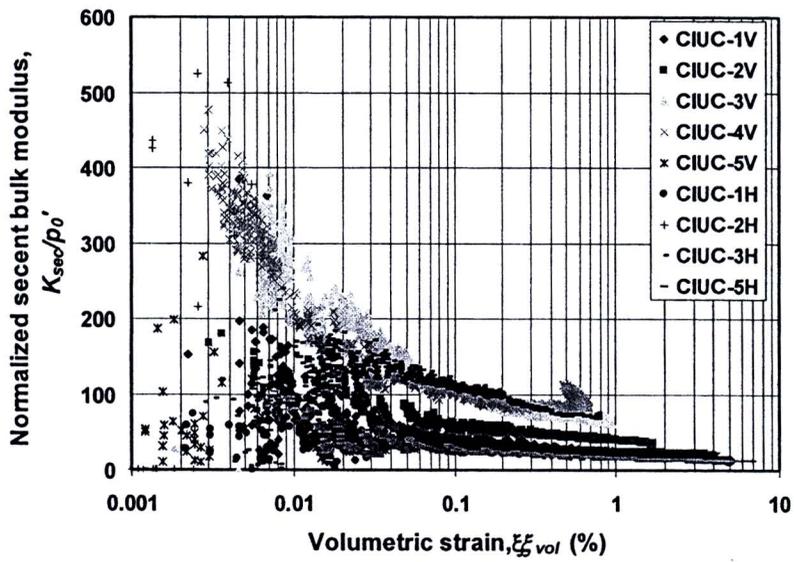
5.2.3 ค่า bulk modulus ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation

ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation สามารถหาค่า secant bulk modulus และการเปลี่ยนแปลงค่ากับ volumetric strain ได้เนื่องจากการทดสอบ constant-rate-of-stress consolidation โดยที่ค่า secant bulk modulus สามารถคำนวณจากสมการที่ (5-1)

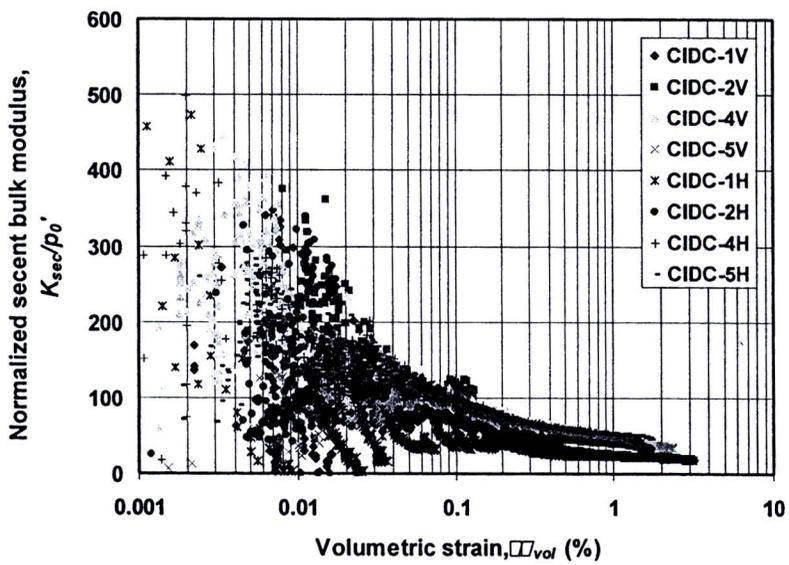
$$K_{sec} = \frac{\Delta p'}{\Delta \epsilon_{vol}} \quad (5-1)$$

โดยที่ K_{sec} คือ secant bulk modulus, $\Delta p'$ คือการเปลี่ยนแปลงของ mean effective confining pressure และ $\Delta \epsilon_{vol}$ คือการเปลี่ยนแปลงของ volumetric strain

รูปที่ 5-5 แสดง normalized secant bulk modulus degradation curve ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ซึ่งแสดงว่าค่า secant bulk modulus สามารถวัดได้ถึงความเค้นเล็กเท่ากับ 0.002% ของ volumetric strain อย่างไรก็ตามผลการทดสอบของบางตัวอย่างดินจะค่อนข้างกระจายและมีความน่าเชื่อถือน้อยลงเมื่อ volumetric strain มีค่าน้อยกว่า 0.01% ตารางที่ 5-3 สรุปค่า small-strain bulk modulus ที่ ϵ_{vol} เท่ากับ 0.001%



(a) CIUC test



(b) CIDC test

รูปที่ 5-5 Secant bulk modulus degradation curve

ตารางที่ 5-3 Small-strain bulk modulus ระหว่างการทดสอบ isotropic consolidation

Test No.	Isotropic consolidation		
	Initial mean effective stress p'_0 (kPa)	Small-strain bulk modulus K_{max} (kPa)	K_{max} / p'_0
CIUC-1V	80	7000	88
CIUC-1H	80	6000	75
CIUC-2V	100	9700	97
CIUC-2H	100	13500	135
CIUC-3V	130	40000	307
CIUC-3H	120	14300	119
CIUC-4V	120	45500	379
CIUC-4H	120	50000	417
CIUC-5V	200*	10000	50
CIUC-5H	180*	16750	93
CIDC-1V	90	10000	111
CIDC-1H	90	6000	67
CIDC-2V	100	15000	150
CIDC-2H	90	16000	183
CIDC-3V	120	-	-
CIDC-3H	120	17300	144
CIDC-4V	100	15800	158
CIDC-4H	100	16000	160
CIDC-5V	240*	25000	104
CIDC-5H	240*	36000	150



5.3 ลักษณะของ small-strain stiffness

ค่า small-strain stiffness ของดินเหนียวกรุงเทพฯ ได้ศึกษาโดยทั้งการทดสอบแบบ static และ dynamic โดยแบบ static นั้นใช้ triaxial test ที่มีระบบ local strain measurement และแบบ dynamic ใช้ bender element test ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบหา small-strain stiffness และพฤติกรรม anisotropy

5.3.1 Small-strain shear modulus จาก bender element test

ระหว่างหารทดสอบ isotropic consolidation จะวัดค่า small-strain shear modulus ด้วย bender element โดยมีรายละเอียดการดำเนินการอธิบายในบทที่ 3 ค่า shear wave velocity วิเคราะห์จากการพิจารณา arrival time ของคลื่นเฉือนที่วิ่งผ่านตัวอย่างดิน ค่า small-strain shear modulus สามารถคำนวณได้จากสมการ (5-2)

$$G_{max} = \rho V_s^2 = \rho \frac{L^2}{t_s^2} \tag{5-2}$$

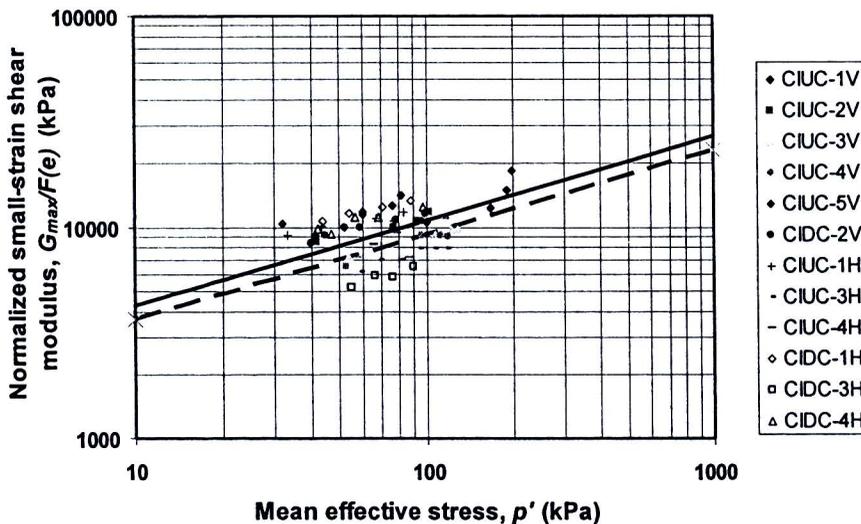
โดยที่ ρ คือ total density ของดิน และ V_s คือ shear wave velocity โดยคำนวณมาจากค่า effective length L ที่คลื่นเฉือนใช้ในการเดินทางและ travel time t_s

ระหว่าง isotropic consolidation จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง small-strain shear modulus และ isotropic confining stress ในงานวิจัยนี้ค่า G_{max} ที่ได้จาก vertical- และ horizontal-cut specimen จะเป็น G_{vh} และ G_{hh} ตามลำดับ รูปที่ 5-6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า normalized $G_{max}/F(e)$ และ p' ของดินเหนียวกรุงเทพฯ สมการ empirical equation ในรูปแบบที่แนะนำโดย Hardin and Black (1968) ได้ใช้ในการประมาณผลการทดสอบ โดยจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง G_{max} และ p' ดังนี้

$$G_{vh} = 1700 F(e) p'^{0.4} \tag{5-3}$$

$$G_{hh} = 1450 F(e) p'^{0.4} \tag{5-4}$$

โดยที่ G_{max} และ p' มีหน่วยเป็น kPa และ $F(e) = (2.937 - e)^2 / (1 + e)$ (Hardin and Black, 1968)



รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง small-strain shear modulus และ isotropic confining stress

5.3.2 Small-strain Young's modulus จาก triaxial test

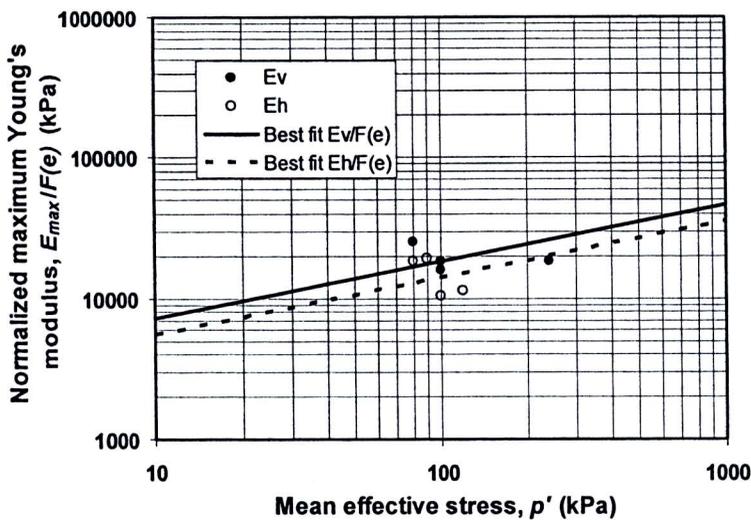
การทดสอบ drained triaxial compression ที่ทำกับ vertical- และ horizontal-cut specimen จะให้ค่า small-strain Young's modulus E_v และ E_h ภายใต้สภาพ isotropic confining stress รูปที่ 5-7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง small-strain Young's modulus $E_{max}/F(e)$ และ p' ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

เนื่องจากมีข้อมูลของ E ก่อนข้างจำกัดดังนั้นจึงไม่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของ $E_{max}/F(e)$ กับ p' ได้อย่างแม่นยำดังนั้นจึงสมมุติให้ความสัมพันธ์ระหว่าง $E_{max}/F(e) \sim p'$ มีค่ายกกำลังของ p' เหมือนกับความสัมพันธ์ของ $G_{max}/F(e) \sim p'$ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง E_v และ E_h กับ p' จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (5-5) และ (5-6) และแสดงในรูปที่ 5-7

$$E_v = 2850F(e)p'^{0.4} \tag{5-5}$$

$$E_h = 2250F(e)p'^{0.4} \tag{5-6}$$

โดยที่ E_v, E_h และ p' มีหน่วยเป็น kPa และ $F(e) = (2.937 - e)^2 / (1 + e)$ (Hardin and Black, 1968)



รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง small-strain Young's modulus และ isotropic confining stress

ตารางที่ 5-4 Small-strain Young's modulus

Test No.	Isotropic consolidation		
	Initial mean effective stress p'_0 (kPa)	Small-strain Young's modulus E_{max} (kPa)	E_{max}/p'_0
CIUC-1V	80	27900	349
CIUC-1H	80	15500	194
CIUC-2V	100	36800	368
CIUC-2H	100	55000	550
CIUC-3V	130	91000	700
CIUC-3H	120	80000	667
CIUC-4V	120	120000	1000
CIUC-4H	120	42000	350
CIUC-5V	200	50000	250
CIUC-5H	180	65000	361
CIDC-1V	90	23100	257
CIDC-1H	90	18000	200
CIDC-2V	100	25550	256
CIDC-2H	90	18000	200
CIDC-3V	120	32900	274
CIDC-3H	120	43000	358
CIDC-4V	100	23500	235
CIDC-4H	100	20028	200
CIDC-5V	240	65000	271
CIDC-5H	240	30000	125

5.3.3 พฤติกรรม anisotropy ของ small-strain stiffness

สมการที่ได้จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่แล้วจะใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรม anisotropy ของ small-strain stiffness ผลแสดงว่าดินเหนียวกรุงเทพฯ stiff กว่าในแนวตั้งภายใต้สภาพ isotropic confining stress โดยมีอัตราส่วน G_{hh}/G_{vh} และ E_h/E_v ดังข้างล่าง

$$G_{hh}/G_{vh} = 0.85$$

$$E_h/E_v = 0.80$$

5.3.4 การวิเคราะห์หาค่า cross-anisotropic elastic parameters

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่า cross-anisotropic elastic parameters ภายใต้สภาพ isotropic confining stress ของดินเหนียวกรุงเทพฯ โดยมีสมมุติฐานที่ว่าค่า shear modulus และ Young's modulus ขึ้นอยู่กับสภาพความเค้น ส่วนค่า Poisson's ratio มีค่าคงที่

5.3.4.1 Small-strain modulus

ค่า small-strain shear modulus และ Young's modulus ได้วิเคราะห์ไปก่อนหน้านี้แล้วและได้แสดงคั้งข้างล่างนี้

$$G_{vh} = 1700F(e)p^{0.4} \tag{5-3b}$$

$$G_{hh} = 1450F(e)p^{0.4} \tag{5-4b}$$

$$E_v = 2850F(e)p^{0.4} \tag{5-5b}$$

$$E_h = 2250F(e)p^{0.4} \tag{5-6b}$$

5.3.4.2 Small-strain Poisson's ratio

ค่า small-strain Poisson's ratios V_{vh} และ V_{hv} สามารถได้โดยตรงจากการทดสอบ drained triaxial compression กับ vertical- และ horizontal-cut specimen ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดวางของระบบ local strain measurement ทั้งในแนวตั้งและในแนวนอน ตารางที่ 5-5 แสดงผลการทดสอบ small-strain Poisson's ratio สำหรับค่า Poisson's ratio V_{hh} สามารถคำนวณจากสภาพ isotropic ในระนาบแนวนอนคั้งแสดงในสมการที่ (5-7)

$$G_{hh} = \frac{E_h}{2(1 + \nu_{hh})} \tag{5-7}$$

ค่าเฉลี่ยของ V_{vh} และ V_{hv} ที่ได้จากการทดสอบจะใช้เป็นตัวแทนของคุณสมบัติของดินเหนียวกรุงเทพฯคั้งนี้

$$V_{vh} = 0.088$$

$$(hv = 0.084$$

$$(hh = -0.224$$

□□□□□□□□ 5-5 Small-strain Poisson's ratio

Test No.	Mean effective confining stress (kPa)	Poisson's ratio ν_{vh}	Poisson's ratio ν_{hv}

CIDC-1V	80	0.115	-
CIDC-2V	100	0.038	-
CIDC-3V	120	0.100	-
CIDC-4V	100	0.058	-
CIDC-5V	120	0.127	-
CIDC-1H	80	-	0.309
CIDC-2H	90	-	0
CIDC-3H	120	-	0
CIDC-4H	100	-	0.057
CIDC-5H	120	-	0.055
Average		0.088	0.084

5.3.4.3 Original elastic compliance matrix

ค่า original elastic compliance matrix ที่ได้จากการทดสอบเป็นดังสมการที่ (5-8) ค่าที่ได้นี้ยังมีปัญหา 2 ประการคือ (i) ความไม่สมมาตรของ compliance matrix และ (ii) ผล $E/V_{vh} \neq E_h/V_{hv}$ นอกจากนั้นค่า V_{hh} ยังเป็นค่าติดลบ

$$\begin{aligned}
 G_{vh} &= 1700F(e)p^{0.4} \\
 G_{hh} &= 1450F(e)p^{0.4} \\
 E_v &= 2850F(e)p^{0.4} \\
 E_h &= 2250F(e)p^{0.4} \\
 V_{vh} &= 0.088 \\
 V_{hv} &= 0.084 \\
 V_{hh} &= -0.224
 \end{aligned}
 \tag{5-8}$$

5.3.4.4 Modified elastic compliance matrix

ในการปรับแก้ค่า cross-anisotropic elastic parameter ได้พิจารณาที่จะปรับค่า V_{hv} เพื่อให้ได้ความสมมาตรของ compliance matrix ($E/V_{vh} = E_h/V_{hv}$) เนื่องจากพิจารณาว่าค่านี้ น่าจะมีความผิดพลาดมากกว่าค่า V_{vh} ค่า V_{hv} ที่ได้ทำการปรับแก้แล้วจะเท่ากับ 0.073 เทียบกับค่าเดิมที่เท่ากับ 0.081 นอกจากนี้ Hardin (1978) แนะนำว่าค่า Poisson's ratio ของดินน่าจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 0.2 และค่าใดที่อยู่ระหว่างนี้ น่าจะแม่นยำเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ทั่วไป ดังนั้นจึงพิจารณาปรับค่า V_{hh} ให้เป็น 0.15 จากค่าแนะนำดังกล่าว ฉะนั้นค่า modified elastic compliance matrix จะได้ดังสมการที่ (5-9)

$$G_{vh}=1700F(e)p^{0.4}$$

$$G_{hh}=1450F(e)p^{0.4}$$

$$E_v=2850F(e)p^{0.4}$$

$$E_h=2250F(e)p^{0.4}$$

$$V_{vh} = 0.088$$

$$V_{hv} = 0.070$$

$$V_{hh} = 0.15$$



(5-9)

ถึงแม้ว่า cross-anisotropic elastic parameters ที่ได้จากการปรับแก้จะไม่มีคุณสมบัติ isotropic ใน horizontal plane แต่พิจารณาว่ายอมรับได้ในที่นี้เนื่องจากค่าที่วิเคราะห์ได้จะนำไปคำนวณพฤติกรรมภายใต้การทดสอบในสภาพ triaxial stress เท่านั้น

5.3.5 การประยุกต์ใช้ cross-anisotropic elastic parameter

ในหัวข้อนี้จะแสดงการประยุกต์ใช้ค่า cross-anisotropic compliance matrix ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบ drained triaxial test ในการทำนายค่า undrained shear stress path direction และ undrained small-strain Young's modulus ที่ได้จากการทดสอบ undrained triaxial compression

5.3.5.1 การทำนายค่า undrained stress path direction และ undrained small-strain Young's modulus

ของ vertical-cut specimen

สำหรับ vertical-cut specimen นั้นสามารถเขียน cross-anisotropic elastic constitutive equation ได้ดังสมการที่ (5-10)

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_a \\ \delta\varepsilon_r \\ \delta\varepsilon_r \\ \delta\gamma_{ar} \\ \delta\gamma_{ra} \\ \delta\gamma_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_v} & -\frac{V_{hv}}{E_h} & -\frac{V_{hv}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{V_{vh}}{E_v} & \frac{1}{E_h} & -\frac{V_{hh}}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{V_{vh}}{E_v} & -\frac{V_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma'_a \\ \delta\sigma'_r \\ \delta\sigma'_r \\ \delta\tau_{ar} \\ \delta\tau_{ra} \\ \delta\tau_{rr} \end{bmatrix} \quad (5-10)$$

โดยที่ a และ r คือแกนตั้งและนอนของตัวอย่างดิน ส่วน v และ h คือแกนตั้งและนอนของสภาพดินในสนาม

จากสมการ (5-10);

$$\delta\varepsilon_a = \frac{\delta\sigma'_a}{E_v} - 2\nu_{hv} \frac{\delta\sigma'_r}{E_h}$$

$$\delta\varepsilon_r = -\nu_{vh} \frac{\delta\sigma'_a}{E_v} + \frac{\delta\sigma'_r}{E_h} - \nu_{hh} \frac{\delta\sigma'_r}{E_h}$$

จากสภาพไม่ระบายน้ำ; $\delta\varepsilon_{vol} = \delta\varepsilon_a + 2\delta\varepsilon_r = 0$

$$0 = \frac{\delta\sigma'_a}{E_v} - 2\nu_{hv} \frac{\delta\sigma'_r}{E_h} + 2 \left[-\nu_{vh} \frac{\delta\sigma'_a}{E_v} + \frac{\delta\sigma'_r}{E_h} - \nu_{hh} \frac{\delta\sigma'_r}{E_h} \right]$$

$$\frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a} = \frac{E_v}{E_h} \left[\frac{-1 + 2\nu_{vh}}{2(1 - \nu_{hv} - \nu_{hh})} \right] \quad (5-11)$$

ดังนั้น stress path direction;

$$\frac{\delta q}{\delta p'} = \frac{3(\delta\sigma'_a - \delta\sigma'_r)}{\delta\sigma'_a + 2\delta\sigma'_r} = \frac{3 \left(1 - \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a} \right)}{1 + 2 \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a}} \quad (5-12)$$

เมื่อแทนค่าของ cross-anisotropic elastic แบบ original และ modified จากสมการ (5-8) และ (5-9) ลงในสมการ (5-11) และ (5-12) จะสมารถได้ undrained stress path direction ซึ่งค่าที่คำนวณได้สรุปในตารางที่ 5-6

Undrained small-strain Young's modulus;

$$(E_a)_u = \frac{\delta q}{\delta\varepsilon_a} = \frac{\delta\sigma'_a - \delta\sigma'_r}{\delta\varepsilon_a}$$

$$= \frac{\delta\sigma'_a - \delta\sigma'_r}{\frac{\delta\sigma'_a}{E_v} - 2\nu_{hh} \frac{\delta\sigma'_r}{E_h}} = \frac{1 - \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a}}{\frac{1}{E_v} - \frac{2\nu_{hh}}{E_h} \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a}} \quad (5-13)$$

เมื่อแทนค่า cross-anisotropic elastic parameter ทั้งแบบ original และ modified ที่ได้จากสมการ (5-8) และ (5-9) ลงในสมการ (5-13) จะสมารถคำนวณค่า undrained small-strain Young's modulus ได้ดังสมการ (5-14) และ (5-15)

Original: $(E_a)_u = 3459F(e)p^{0.6} \quad (5-14)$

Modified: $(E_a)_u = 3762F(e)p^{0.6} \quad (5-15)$

โดยที่ $(E_a)_u$ และ p' มีหน่วยเป็น kPa และ $F(e) = (2.973 - e)^2 / (1 + e)$

5.3.5.2 การทำนายค่า undrained stress path direction และ undrained small-strain Young's modulus ของ horizontal-cut specimen

สำหรับ horizontal-cut specimen จะสามารถเขียนสมการ cross-anisotropic elastic constitutive equation ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \delta\varepsilon_{r_1} \\ \delta\varepsilon_{r_2} \\ \delta\varepsilon_a \\ \delta\gamma_{rr} \\ \delta\gamma_{ar} \\ \delta\gamma_{ra} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_v} & -\frac{\nu_{hv}}{E_h} & -\frac{\nu_{hv}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & \frac{1}{E_h} & -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{vh}}{E_v} & -\frac{\nu_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{vh}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{hh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\sigma'_r \\ \delta\sigma'_r \\ \delta\sigma'_a \\ \delta\tau_{rr} \\ \delta\tau_{ar} \\ \delta\tau_{ra} \end{bmatrix} \quad (5-16)$$

โดยที่ a คือแกนตั้งของตัวอย่างดิน, r , คือแกนนอนของตัวอย่างดินที่ตั้งฉากกับ bedding plane, r_2 คือแกนนอนของตัวอย่างดินที่ขนานกับ bedding plane และ ν และ h คือแกนนอนและแกตั้งของดินในสนาม

จากสมการ (5-16);
$$\delta\varepsilon_a = -\frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_r - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_r + \frac{\delta\sigma'_a}{E_h}$$

$$\delta\varepsilon_{r_1} = \frac{\delta\sigma'_r}{E_v} - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_r - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_a$$

$$\delta\varepsilon_{r_2} = -\frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_r + \frac{\delta\sigma'_r}{E_h} - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_a$$

สำหรับสภาพไม่ระบายน้ำ;
$$\delta\varepsilon_{vol} = \delta\varepsilon_a + \delta\varepsilon_{r_1} + \delta\varepsilon_{r_2} = 0$$

$$0 = -\frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_r - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_r + \frac{\delta\sigma'_a}{E_h} + \frac{\delta\sigma'_r}{E_v} - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_r - \frac{\nu_{hv}}{E_h} \delta\sigma'_a - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_r + \frac{\delta\sigma'_r}{E_h} - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_a$$

$$\frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a} = \frac{E_v}{E_h} \left[\frac{-(1 - \nu_{hv} - \nu_{hh})}{(1 - \frac{E_v}{E_h} \nu_{hv} - \nu_{vh} + \frac{E_v}{E_h} - \nu_{vh} - \frac{E_v}{E_h} \nu_{hh})} \right] \quad (5-17)$$

เมื่อแทนค่า parameter ในกรณีของ original และ modified elastic compliance matrix ที่ได้ในสมการ (5-8) และ (5-9) ลงในสมการ (5-17) และ (5-12) จะสามารถคำนวณค่า undrained stress path direction โดยผลลัพธ์ได้สรุปในตารางที่ 5-6

Undrained small-strain Young's modulus;

$$(E_a)_u = \frac{\delta q}{\delta\varepsilon_a} = \frac{\delta\sigma'_a - \delta\sigma'_r}{\frac{\delta\sigma'_a}{E_h} - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \delta\sigma'_r - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \delta\sigma'_r}$$

$$= \frac{1 - \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a}}{\frac{1}{E_h} - \frac{\nu_{vh}}{E_v} \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a} - \frac{\nu_{hh}}{E_h} \frac{\delta\sigma'_r}{\delta\sigma'_a}} \quad (5-18)$$

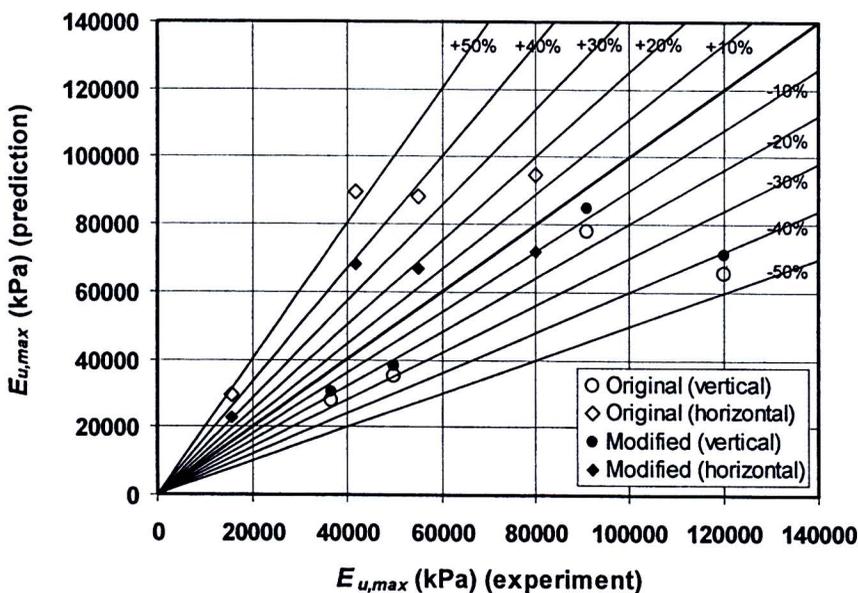
เมื่อแทนค่า parameter ของทั้งกรณี original และ modified elastic compliance matrix ที่ได้ในสมการ (5-8) และ (5-9) ลงในสมการ (5-18) จะสามารถคำนวณค่า undrained small-strain Young's modulus ได้ดังนี้

Original: $(E_a)_u = 4087F(e)p^{0.6}$ (5-19)

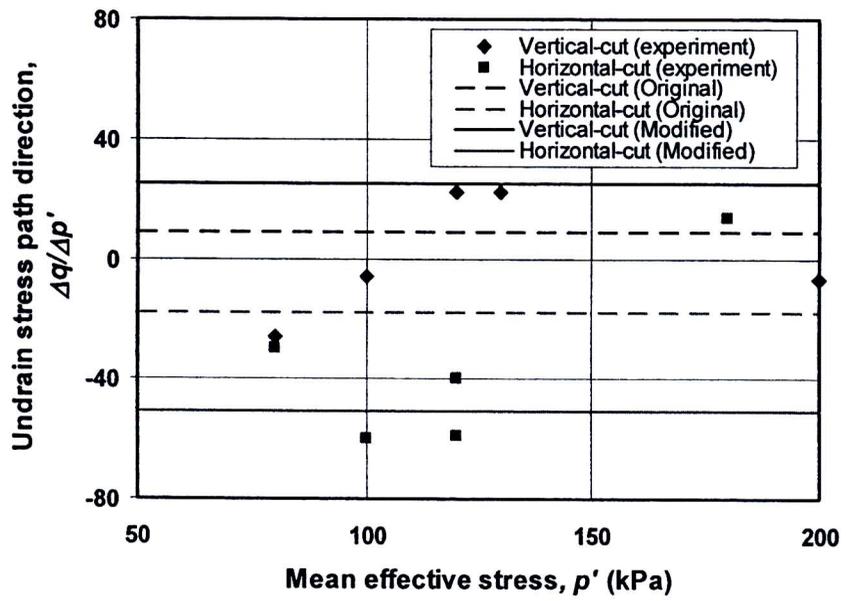
Modified: $(E_a)_u = 3106F(e)p^{0.6}$ (5-20)

โดยที่ $(E_a)_u$ และ p' มีหน่วยเป็น kPa และ $F(e) = (2.973 - e)^2 / (1 + e)$

ค่า undrained small-strain Young's modulus ที่คำนวณจากสมการ (5-14), (5-15), (5-19) และ (5-20) ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากผลการทดสอบ undrained experiment ในรูปที่ 5-8 และ 5-9 และในตารางที่ 5-6 ผลการเปรียบเทียบแสดงว่าค่าที่ทำนายจาก original และ modified elastic compliance matrix จะมีค่าคลาดเคลื่อนประมาณ $\pm 60\%$ และ $\pm 40\%$ จากผลการทดสอบ หมายความว่าค่า % ที่เป็นบวกแสดงว่าค่าที่ทำนายมากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ในขณะที่ % ที่เป็นลบแสดงว่าค่าที่ทำนายน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 5-8 การทำนายค่า undrained small-strain Young's modulus



รูปที่ 5-9 การทำนายค่า undrain stress path direction

ตารางที่ 5-6 ผลการทำนายค่า undrained small-strain Young's modulus

Test No.	Specimen orientation	Effective mean confining pressure p' (kPa)	Void ratio e	Undrained stress path direction ($\Delta q/\Delta p$) (experiment)	Undrained stress path direction ($\Delta q/\Delta p$) (prediction)		Undrained small-strain Young's modulus E_u (experiment) (kPa)	Undrained small-strain Young's modulus E_u (prediction) (kPa)	
					Original	Modified		Original	Modified
CIUC-1V	Vertical	80	1.69	-26.1	9	25	27900	12215	13284
CIUC-2V	Vertical	100	1.27	-6	9	25	36800	27884	30325
CIUC-3V	Vertical	130	0.66	22.2	9	25	91000	78121	84959
CIUC-4V	Vertical	120	0.76	22.2	9	25	120000	65323	71042
CIUC-5V	Vertical	200	1.3	-6.7	9	25	50000	35045	38112
CIUC-1H	Horizontal	80	1.28	-30	-18	-51	15500	29648	22529
CIUC-2H	Horizontal	100	0.62	-60	-18	-51	55000	88128	66966
CIUC-3H	Horizontal	120	0.62	-40	-18	-51	80000	94795	72032
CIUC-4H	Horizontal	120	0.66	-59	-18	-51	42000	89392	67927
CIUC-5H	Horizontal	180	2.16	13.4	-18	-51	65000	6823	5185



5.4 พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดที่ความเครียดกว้าง

ในหัวข้อนี้จะศึกษาพฤติกรรม non-linearity ในสภาพไม่ระบายน้ำและระบายน้ำ โดยที่จะแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดสำหรับสภาพไม่ระบายน้ำและระบายน้ำจะไม่เป็นเส้นตรงโดยที่ค่า stiffness จะลดลงกับระดับของความเครียด ในการพิจารณาพฤติกรรมไม่เป็นเส้นตรงนี้จะแสดงโดย normalized stiffness degradation curve

5.4.1 Non-linearity ในสภาวะไม่ระบายน้ำและระบายน้ำ

ค่า undrained และ drained secant Young's modulus, $E_{u,sec}$ และ E'_{sec} สามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ deviatoric stress-axial strain กราฟ normalized stiffness degradation curve $E_{u,sec}/p_0'$ จาก undrained และ drained triaxial compression test ได้แสดงในรูปที่ 5-10 และ 5-11 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่ากราฟ normalized stiffness degradation curve จากการทดสอบ drained test จะมีการกระจายตัวมากกว่าที่ได้จากการทดสอบ undrained test อย่างไรก็ตามไม่สังเกตเห็นความแตกต่างใดๆระหว่างกราฟ normalized stiffness degradation curve จากตัวอย่างในแนวตั้งและแนวนอนในทั้งสองการทดสอบ นอกจากนี้ผลการทดสอบยังแสดงความแตกต่างของพฤติกรรม non-linearity ในสภาวะไม่ระบายน้ำและระบายน้ำ โดยที่ค่า average normalized stiffness degradation ของการทดสอบ drained test ที่ระดับ small-strain มีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการทดสอบ undrained test

5.4.2 พฤติกรรม anisotropy ของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด

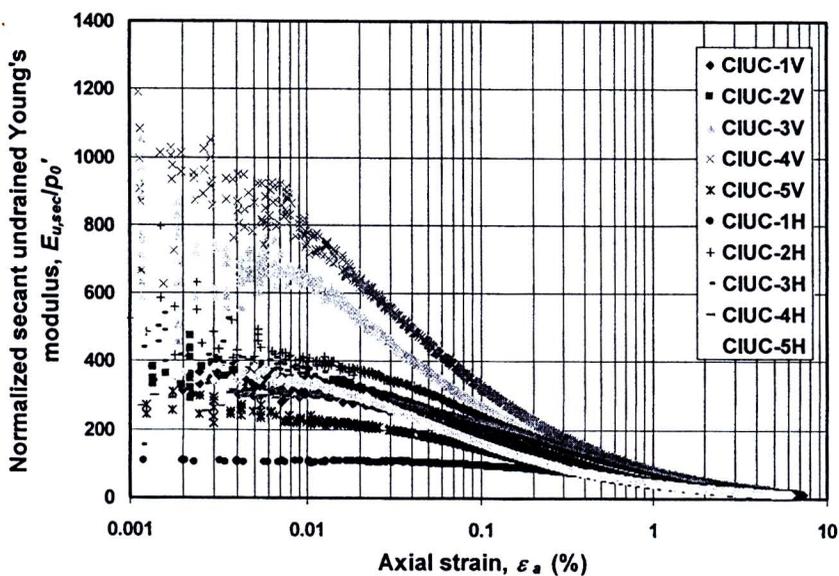
ในหัวข้อนี้จะแสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของตัวอย่างในแนวตั้งและแนวนอนที่มีความลึกเดียวกันจะถูกทดสอบในสภาพเดียวกันเพื่อศึกษาพฤติกรรม anisotropy ของพฤติกรรมความเค้น-ความเครียด โดยจะพิจารณาพฤติกรรมในสภาวะไม่ระบายน้ำและระบายน้ำแยกกัน

5.4.2.1 พฤติกรรม anisotropy ในสภาวะไม่ระบายน้ำ

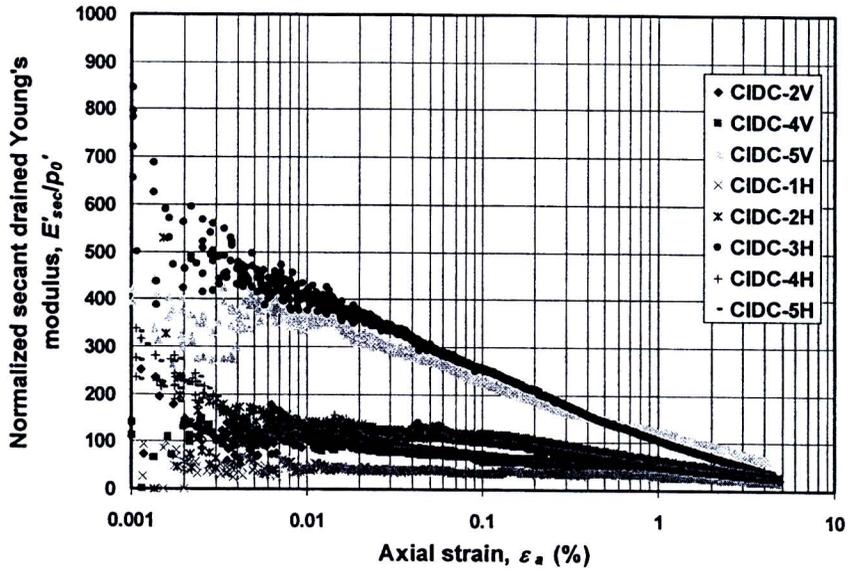
หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ undrained ของการทดสอบที่ CIUC-1V และ CIUC-1H พฤติกรรมเคลื่อนตัวของตัวอย่างในแนวตั้งและแนวนอนได้แสดงในรูปที่ 5-12 โดยแสดงว่า undrained effective stress path ของตัวอย่างในแนวตั้งจะอยู่ทางซ้ายเล็กน้อยของตัวอย่างในแนวนอนเนื่องจากตัวอย่างในแนวตั้งมี excess pore pressure ที่มากกว่าเล็กน้อย ผลของกราฟความเค้น-ความเครียดในรูปของ deviatoric stress-axial strain และ normalized secant undrained Young's modulus degradation curve ก็แสดงว่าตัวอย่างในแนวตั้ง stiff กว่าตัวอย่างในแนวนอน

5.4.2.2 พฤติกรรม anisotropy ในสภาพระบายน้ำ

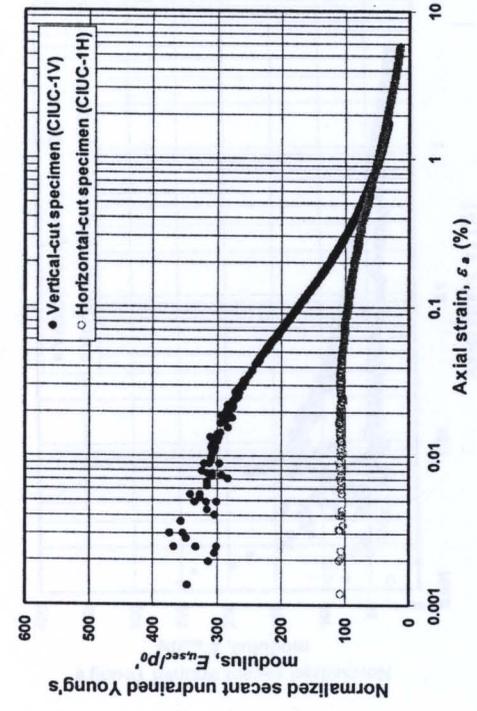
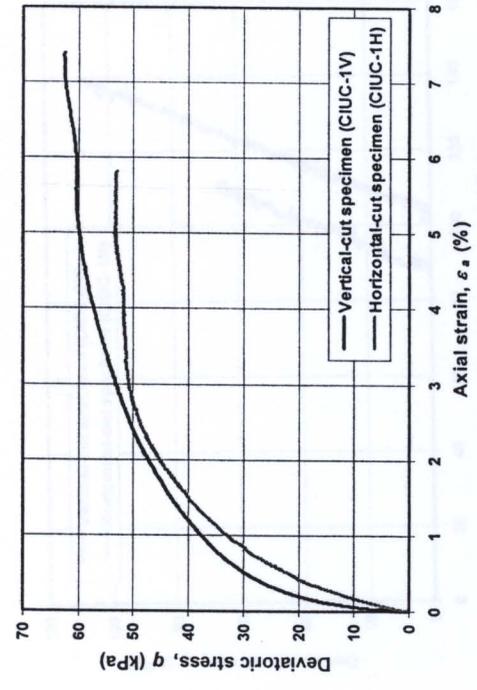
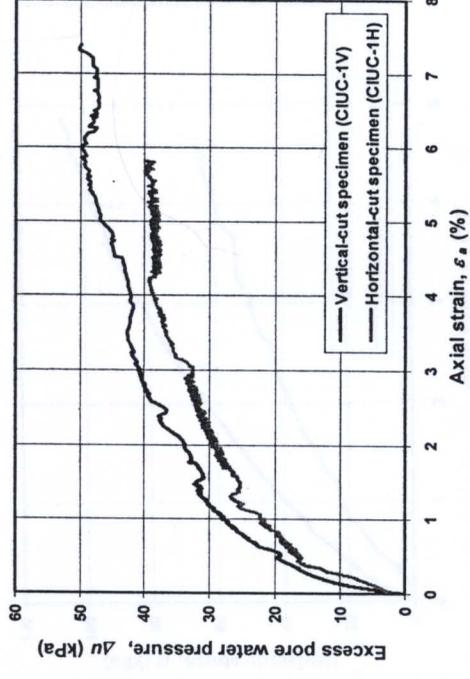
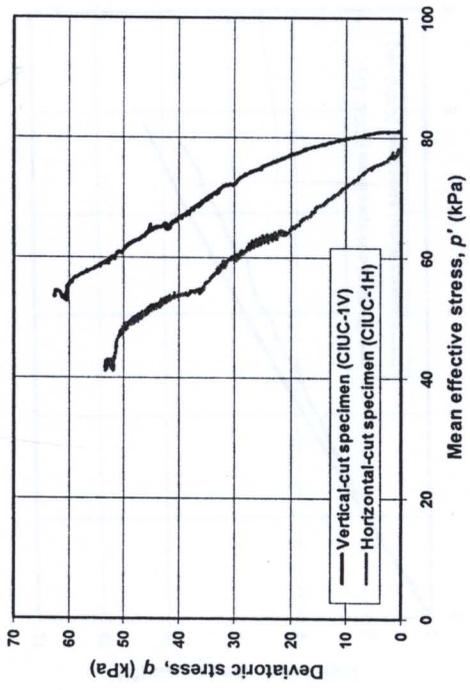
หัวข้อนี้จะเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบ drained ของการทดสอบที่ CIDC-2V และ CIDC-2H พฤติกรรมการเคลื่อนตัวของตัวอย่างในแนวตั้งและแนวนอนได้แสดงในรูปที่ 5-13 ผลของกราฟความเค้น-ความเครียดในรูปของ deviatoric stress-axial strain และ normalized secant undrained Young's modulus degradation curve แสดงว่าตัวอย่างในแนวตั้ง stiff กว่าตัวอย่างในแนวนอน กราฟ volumetric strain curve ของทั้งสภาพไม่ระบายน้ำและระบายน้ำจะค่อนข้างเหมือนกันจนกระทั่ง $\epsilon_a = 1\%$ หลังจากนั้นตัวอย่างในแนวตั้งจะให้ค่า volumetric strain มากกว่าเล็กน้อย



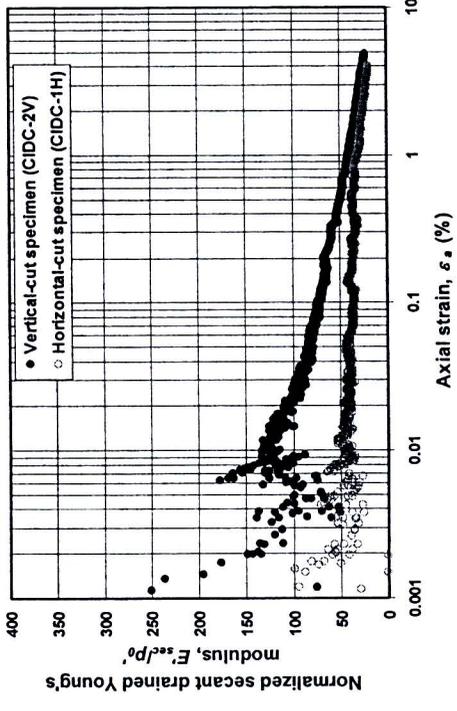
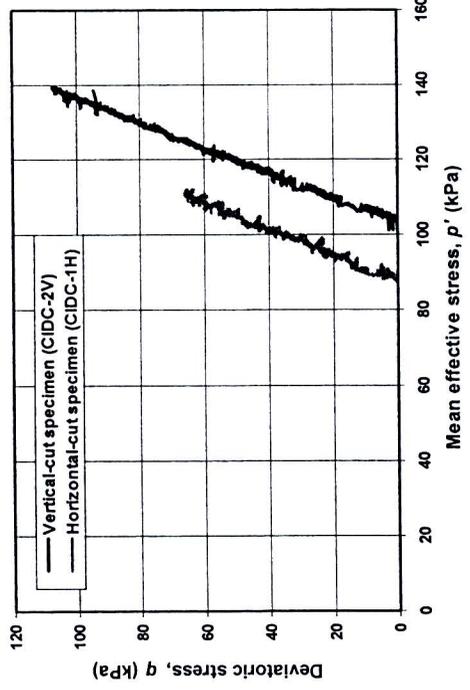
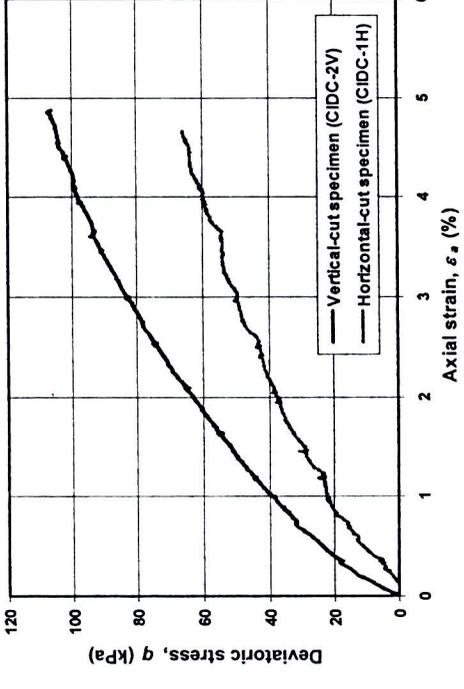
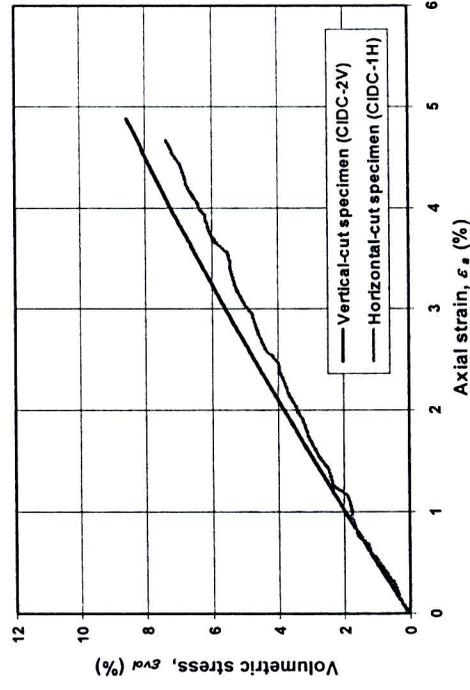
รูปที่ 5-10 Normalized stiffness degradation curve จากการทดสอบ undrained triaxial compression



รูปที่ 5-11 Normalized stiffness degradation curve จากการทดสอบ drained triaxial compression



รูปที่ 5-12 พฤติกรรม anisotropy ในสภาพไม่ระบายน้ำ



รูปที่ 5-13 พฤติกรรม anisotropy ในสภาพระยะยาว