

บทที่ 2

การประเมินความเร็วคลื่นเฉือนของดิน

2.1 การเจาะทดสอบคุณสมบัติของดิน

ปกติการเจาะสำรวจดินจะได้ค่าการดักทดสอบมาตรฐาน (standard penetration test - N value) หรือค่ากำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (undrained shear strength) แต่สำหรับดินในประเทศไทยยังไม่มี การศึกษาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (shear wave velocity) มากเพียงพอ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนมีความสำคัญมาก ในการจำแนกชั้นดินเพื่อการวิเคราะห์หรือออกแบบโครงสร้างรับแรงด้านข้างจากแผ่นดินไหว หรือแรง ด้านข้างอื่นๆ ฉะนั้นในการศึกษานี้จะทำการสำรวจดินและทดสอบให้ได้ค่าการดักทดสอบมาตรฐานหรือค่า กำลังเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ พร้อมกันนี้ก็จะทดสอบในสนามเพื่อหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยใช้ การทดสอบที่เรียกว่า การทดสอบควาน์โฮล (seismic down hole test) ซึ่งใช้หลักการของการแพร่กระจาย คลื่น (wave propagation) ในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนและค่าโมดูลัสเฉือนของดินแต่ละชั้น โดยเลือก บริเวณที่สำรวจดินจำนวน 6 หลุม ให้มีคุณสมบัติของดินมีความหลากหลายเพื่อที่จะได้ครอบคลุมช่วงการใ้ งานได้มากที่สุด พื้นที่ที่เลือกไว้มี 6 จุดดังนี้

1) ภาคกลาง

- สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย
- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

โดยมีข้อมูลการทดสอบบางส่วนในบริเวณใกล้สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียและจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย การทดสอบที่บริเวณนี้จะเป็นการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบในเบื้องต้นอีกด้วย

2) ภาคเหนือ

- มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
- วัดเจดีย์หลวง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
- สำนักงานทางหลวงชนบท จังหวัดเชียงราย หรือบริเวณใกล้เคียง

จังหวัดเชียงใหม่ โดยเฉพาะบริเวณอำเภอเมือง อยู่ในแอ่งเขาทำให้มีการขยายคลื่นแผ่นดินไหวได้ จึง ทำการทดสอบบริเวณดังกล่าวให้ละเอียด

2.2 การทดสอบวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนเพื่อการประมาณความแรงของชั้นดินในการออกแบบ

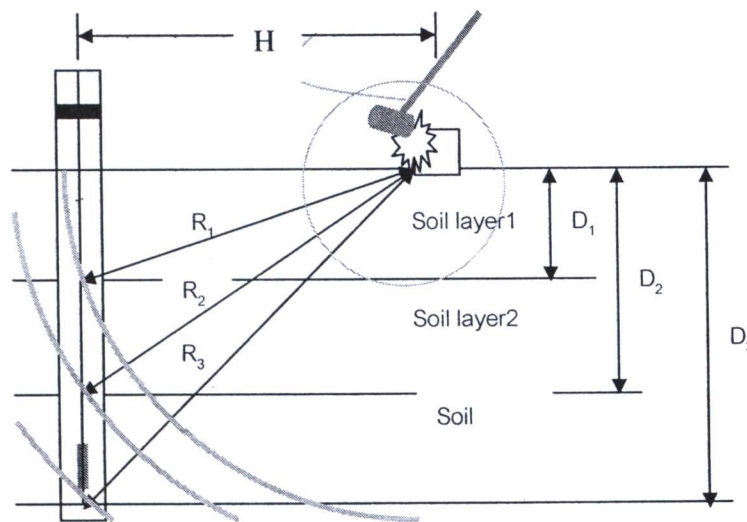
การวัดค่าของความเร็วคลื่นเฉือนจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาที่ระดับความเครียดน้อยซึ่งจำเป็นต่อการจำแนกชั้นดินตามมาตรฐาน การวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนในภาคสนามสามารถกระทำได้หลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้ดังนี้

1) หลักการทดสอบแบบครอสโฮล (crosshole test)

หลักการคือทำให้เกิด คลื่นความเค้น (stress wave) ในหลุมเจาะหนึ่งและทำการตรวจจับอีกหลุมเจาะหนึ่งที่ระดับเดียวกัน เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ถึงครั้งแรกเป็นของคลื่นเฉือนและสามารถหา ค่าของความเร็วคลื่นเฉือนได้

2) หลักการทดสอบแบบอัพโฮลและดาวน์โฮล (uphole and downhole test)

ทั้งหลักการทดสอบแบบอัพโฮล และ ดาวน์โฮล มีหลักการที่คล้ายคลึงกันต่างเพียงการจัดวางตำแหน่งของตัวรับคลื่นและตัวกำเนิดคลื่นอยู่สลับกัน โดยหลักการทดสอบดาวน์โฮลจะทำการติดตั้งแหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ที่ผิวดิน และให้คลื่นความเค้นวิ่งผ่านชั้นดินโดยมีตัวรับสัญญาณติดกับดินที่ระดับความลึกต่างๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการคำนวณค่าความเร็วการเดินทางของคลื่น

จากรูปที่ 2.1 คลื่นจะถูกส่งกระจายออกไปเป็นลักษณะวงกลม ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) จาก $V_s = \Delta R / \Delta T$ โดยที่ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนจากแหล่งกำเนิดถึงตัวรับสัญญาณ (R) สามารถหาได้จากหลักของพีทาโกรัส ($R_i = \sqrt{H^2 + D_i^2}$) และค่าของเวลาในการเดินทาง (T) หาได้จากข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ

2.2.1 ชุดอุปกรณ์ทดสอบความไว

อุปกรณ์ทั้งหมดประกอบด้วย

- คอมพิวเตอร์

- 1) ชุดคอมพิวเตอร์ทดสอบ
- 2) ถังเก็บสายสัญญาณ + สายสัญญาณ + ท่อลม
- 3) ตัวรับสัญญาณการตอก (trigger)
- 4) ตัวรับสัญญาณคลื่นสั่นสะเทือน (geophone)

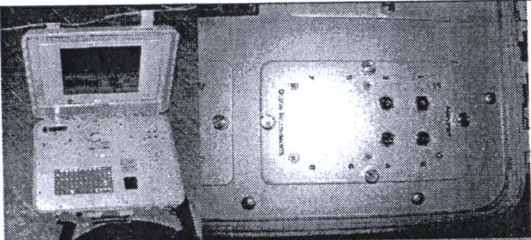
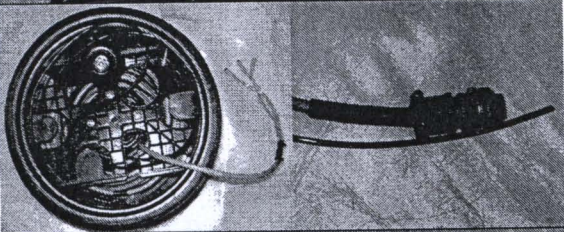
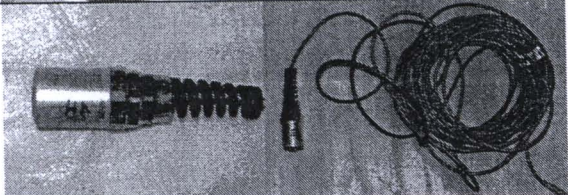
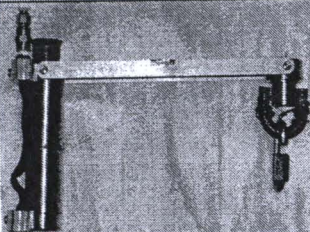
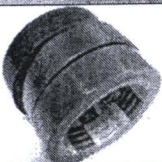
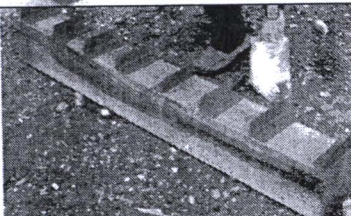
- ชุดแหล่งกำเนิดสัญญาณ

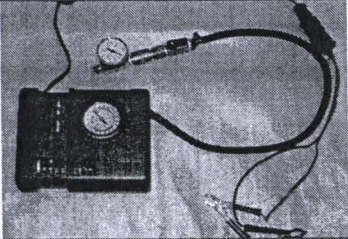
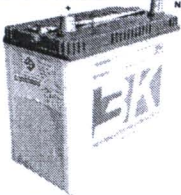
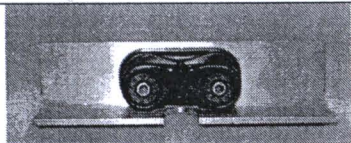
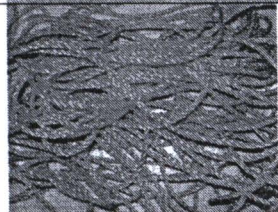
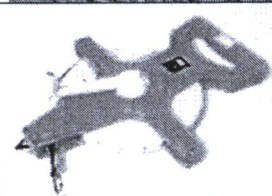
- 5) ค้อนขนาด 12 ปอนด์
- 6) เทปผ้า
- 7) ท่อนไม้ขนาด 15x15x120 ซม. + เหล็กฉาก
- 8) กระสอบทราย

- ชุดตัวรับสัญญาณ

- 9) เครื่องสูบลมใช้ไฟ 12 โวลต์
- 10) แบตเตอรี่ 12 โวลต์
- 11) ตัวล็อกเชือก ขนมห่อหุ้ม
- 12) เชือกยัด
- 13) เทปวัดระยะ 30 เมตร
- 14) สายชาร์จคอมพิวเตอร์
- 15) เครื่องชาร์จแบตเตอรี่

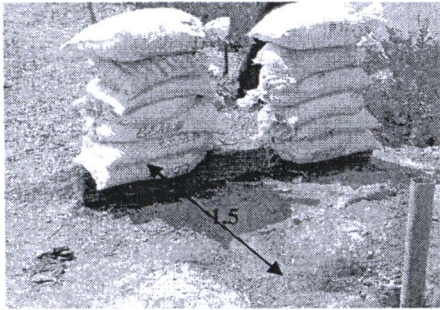
ตารางที่ 2.1 อุปกรณ์การทดสอบ

ลำดับ	อุปกรณ์	ภาพ
1	ชุดคอมพิวเตอร์ทดสอบ	
2	ถังเก็บสายสัญญาณ + สายสัญญาณ + ท่อลม	
3	ทริกเกอร์ (trigger)	
4	จีโอโฟน (geophone)	
5	ค้อนขนาด 12 ปอนด์	
6	เทปผ้า	
7	ท่อนไม้ขนาด 15x15x120 ซม. + เหล็กฉาก	
8	กระสอบทราย	

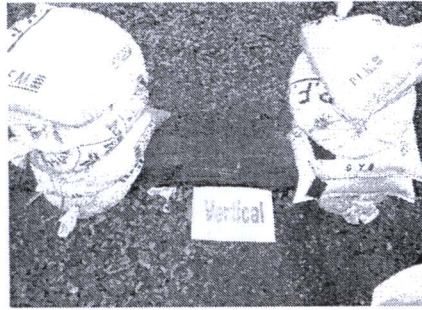
รูปที่	อุปกรณ์	ภาพ
9	เครื่องสูบลมใช้ไฟ 12 โวลต์	
10	แบตเตอรี่ 12 โวลต์	
11	ตัวล็อกเชือก	
12	เชือกยัด	
13	เทปวัดระยะ	

2.2.2 ขั้นตอนการทดสอบควาน้ำโฮล

1) นำท่อนไม้ขนาด $15 \times 15 \times 120$ เซนติเมตร มาวางบนพื้นดินให้ห่างจากปากหลุมทดลองเป็นระยะ 1.5 - 3 เมตร (ขึ้นอยู่กับสภาพของสถานที่ทดสอบ) โดยมีด้านที่เป็นเหล็กฉากฝังลงไปในดิน ดังรูปที่ 2.2 และทำการเพิ่มน้ำหนักที่กระทำบนท่อนไม้ โดยการนำกระสอบทรายทับลงบนท่อนไม้เพื่อทำให้การถ่ายแรงจากท่อนไม้ไปสู่ดินได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3

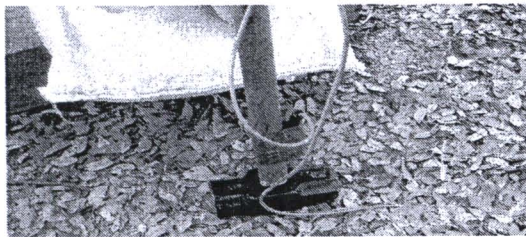


รูปที่ 2.2 การจัดตำแหน่งการวางท่อนไม้



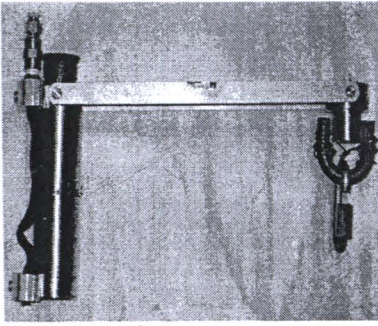
รูปที่ 2.3 กระสอบทรายทับบนท่อนไม้

2) ติดตั้งทรินเกอร์กับค้อน โดยทำการมัดที่บริเวณห่างจากตัวหัวค้อนประมาณ 10 ซม. และใช้เทปผ้ามัดติดไว้เพื่อป้องกันการหลุดของทรินเกอร์ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การติดตั้งตำแหน่งทรินเกอร์ที่บริเวณค้ำค้อน

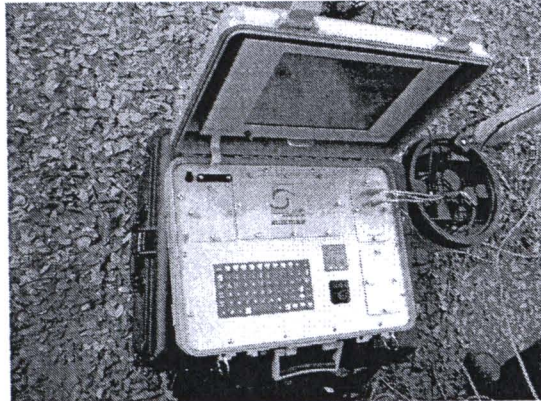
3) นำสายสัญญาณและท่อลมจากถังเก็บสายสัญญาณมาต่อกับจีไอโฟน (รูปที่ 2.5) แล้วนำไปไว้ที่ปากหลุมทดลองเพื่อเตรียมหย่อนลงไปวัดผลการทดสอบ โดยนำสายสัญญาณอีกด้านมาต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และนำท่อลมต่อเข้ากับเครื่องสูบลม (รูปที่ 2.6) โดยช่องรับสัญญาณในการต่อสายสัญญาณนั้นจะประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ช่องรับสัญญาณในแนวตั้ง แนวขวาง และแนวรัศมี ต่อเข้ากับสายรับสัญญาณในแนวตั้ง แนวขวาง และแนวรัศมีตามลำดับ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 จีโอโฟน



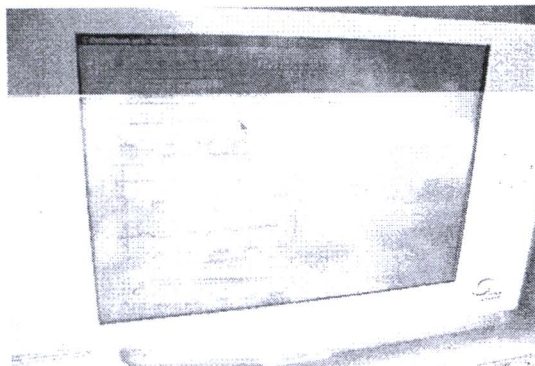
รูปที่ 2.6 การต่อแบตเตอรี่กับเครื่องสวบม



รูปที่ 2.7 การต่อช่องรับสัญญาณ

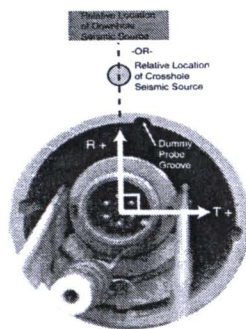
4) ตรวจสอบปั๊มลม โดยต่อปั๊มลมเข้ากับแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ แล้วสวบมเข้าไปในลูกยางเล็กน้อยเพื่อตรวจสอบการรั่วซึมของยางที่ติดอยู่กับเครื่องวัดสัญญาณเมื่อตรวจสอบสภาพของลูกยางแล้วจึงทำตามขั้นตอนต่อไป

5) ทำการเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ ตรวจสอบโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองทำการตั้งค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการทดลองให้กับโปรแกรม เพื่อบันทึกข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หน้าจอคอมพิวเตอร์เมื่อทำการตั้งค่าข้อมูล

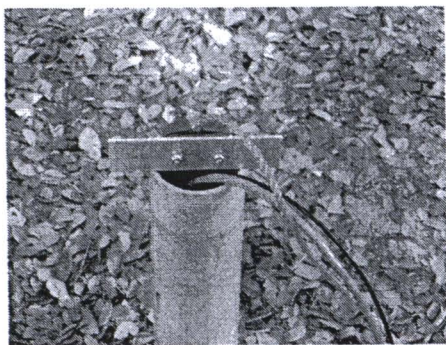
6) นำเครื่องรับสัญญาณหย่อนลงไปในหลุม ดังแสดงในรูปที่ 2.9



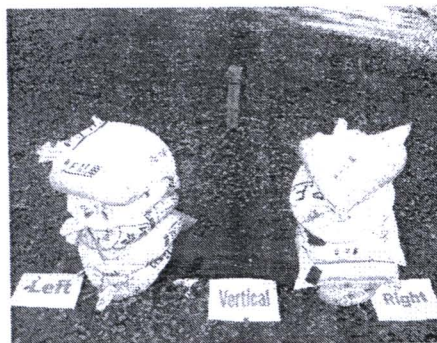
รูปที่ 2.9 การวางตำแหน่งของเครื่องจีโอโฟน

7) เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ทุกชิ้นเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการทดลองวัดค่าที่ต้องการ โดยการเติมลมให้ยางโป่งออกจนจีโอโฟนติดกับขอบหลุม ชีคเชือกไว้กับตัวล็อกเชือกดังรูปที่ 2.10 เพื่อป้องกันจีโอโฟนตกลงไปในหลุมทดสอบ แล้วตอกท่อนไม้ด้วยค้อน โดยการตอกครั้งแรกให้ตอกที่ด้านบนของท่อนไม้เป็นการตอกในแนวตั้ง (vertical) แล้วตรวจสอบค่าที่เครื่องรับสัญญาณสามารถรับได้ว่าผลที่ได้จะยอมรับได้หรือไม่ เมื่อได้ผลการทดลองที่ยอมรับได้แล้วจึงทำการตอกด้านต่อไป คือ ด้านซ้าย (left) และด้านขวา (right) ตามลำดับดังรูปที่ 2.11

ผลการทดลองแต่ละด้านนั้นจะถูกบันทึกไว้โดยคอมพิวเตอร์ และเพื่อป้องกันการดำเนินงานที่ผิดพลาดของคอมพิวเตอร์จึงทำการจดข้อมูลลงในใบบันทึกข้อมูลด้วย แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 2.10 การยึดจับเชือกด้วยตัวยึดบริเวณปากหลุม

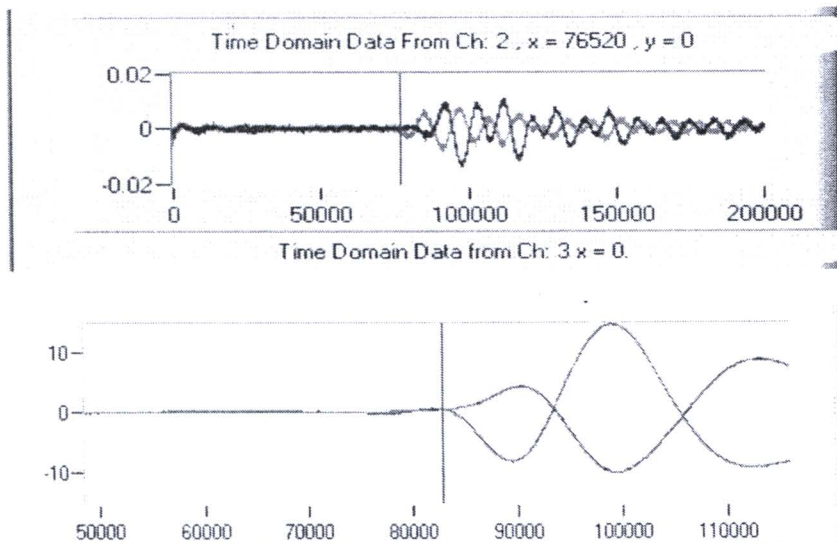


รูปที่ 2.11 ทิศทางการตอกไม้

2.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ

1) เรียกข้อมูลจากการบันทึกที่สนาม

2) จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะได้เป็นกราฟของเวลาที่เครื่องรับสัญญาณสามารถรับสัญญาณได้หลังจากที่มีการตอก ดังนั้นเวลาที่เครื่องคอมพิวเตอร์แสดงออกมาจึงเป็นเวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นถึงเครื่องรับสัญญาณ การเลือกค่าเวลานั้นจะเลือกที่ตำแหน่งจุดที่คลื่นเริ่มแยกออกจากกัน ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเลือกตำแหน่งของเวลาที่คลื่นใช้ในการเดินทาง

3) นำเวลาที่ได้มาหาค่าความเร็วคลื่น ซึ่งหาได้จากความสัมพันธ์

$$V = \frac{S}{t} \quad (2.1)$$

โดยที่ V คือ ความเร็ว

S คือ ระยะทางการเคลื่อนที่

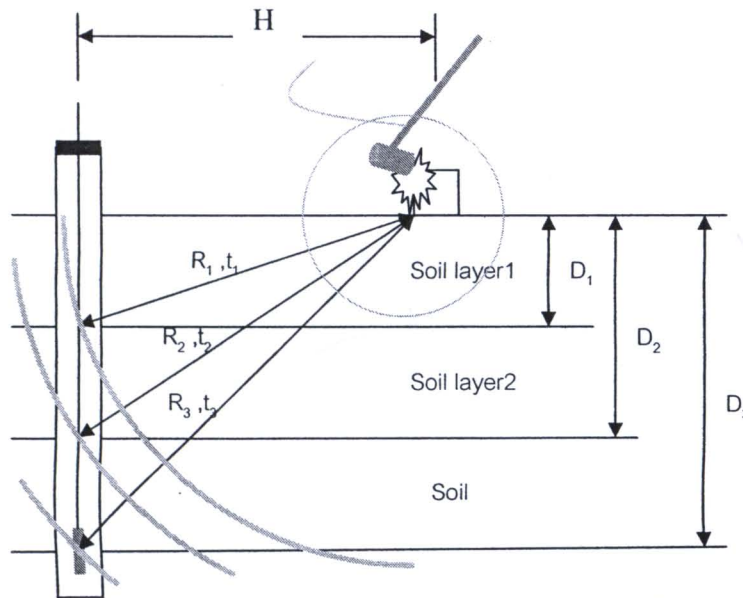
t คือ เวลาที่คลื่นเดินทาง

โดยระยะทางนั้นหาได้จากสูตร

$$R_i = \sqrt{D_i^2 + H^2} \quad (2.2)$$

โดยที่ D_i คือ ระยะทางจากปากหลุมถึงจีไอโฟน

H คือ ระยะทางจากหลุมทดสอบถึงไม้



รูปที่ 2.13 ระยะทางและเวลาที่คลื่นเดินทางจากตัวแหล่งกำเนิดถึงเครื่องรับสัญญาณ

หาความเร็วคลื่นในแต่ละชั้นจากสูตร

$$V = (R_2 - R_1) / (t_2 - t_1) \quad (2.3)$$

โดยที่ R_2, R_1 คือระยะที่คลื่นใช้เดินทาง

t_2, t_1 คือระยะเวลาที่คลื่นใช้เดินทาง

นำค่าความเร็วคลื่นเฉือน มาหาค่าโมดูลัสของแรงเฉือน โดยค่าโมดูลัสของแรงเฉือนความสัมพันธ์กับค่าความเร็วดังนี้

$$G = \rho V_s^2 \quad (2.4)$$

โดยที่ G คือค่าโมดูลัสของแรงเฉือน (MPa)

V_s คือความเร็วคลื่นเฉือน (m/s)

ρ คือความหนาแน่นของดิน (kg/m^3)

2.3 ผลการทดสอบคาน้ำโอสของหลุมทดสอบต่างๆ

ผลการทดสอบทั้ง 6 หลุมสามารถสรุปได้ดังนี้

2.3.1 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

ที่พิกัดละติจูดที่ 13.738 องศาเหนือ, ลองจิจูดที่ 100.532 องศาตะวันออก



รูปที่ 2.14 การทดสอบคาน้ำโอสบริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Layer No.	Type of Sample	Depth, m	Thickness, m	Classification	Natural Water Content (%)	Su, t/m ²	SPT, N (Blow/ft)	Plastic Index (%)	Wet Unit Weight (t/m ³)	(Downhole) Vs (m/s)	(Downhole) Shear Modulus (MPa)
1	ST	0.3	1.05	CH	117.6				1.70	121	25
2	ST	1.8	1.50	CH	109.8	1.25			1.70	69	8
3	ST	3.3	1.50	CH	68.1	1.50			1.70	86	13
4	ST	4.8	1.50	CH	81.9	2.50			1.70	104	18
5	ST	6.3	1.50	CH	63.5	2.00			1.70	101	17
6	ST	7.8	1.50	CH	53.3	2.00			1.70	104	18
7	ST	9.3	1.50	CH	36	3.00			1.70	105	19
8	ST	10.8	1.50	CH	25.2	3.75			1.70	141	34
9	SS	12.3	1.00	CL	20	12.5			1.70	203	70
10	SS	12.8	0.75	CL	19.2		12		1.70	200	68
11	SS	13.8	1.25	CL	16.9		13		1.70	172	50
12	SS	15.3	1.50	CL	16.6		15		1.70	209	74
13	SS	16.8	1.50	CL	16.9		18		1.70	182	57
14	SS	18.3	1.50	CL	17.2		19		1.70	264	118
15	ST	19.8	1.50	CL	22.6		20		1.70	241	99
16	SS	21.3	1.50	CL	28.1		34		1.70	278	132
17	SS	22.8	1.50	CL	17.1		30		1.70	217	80
18	SS	24.3	1.50	CL	19.5		34		1.70	288	141
19	SS	25.8	1.50	CL	12.1		30		1.70	259	114
20	SS	27.3	1.50	SM	17.3		55		1.75	227	90
21	SS	28.8	1.50	SM	20.2		51		1.75	373	244
22	ST	30.3	1.50	SM	16		24		1.75	268	126
23	SS	31.8	1.50	SM	17.4		40		1.75		
24	SS	33.3	1.50	SM	19		60		1.75		
25	SS	34.8	1.50	SM	20.5		43		1.75		
26	SS	36.3	1.50	CH	18.4		42		1.80		
27	SS	37.8	1.50	CH	19		30		1.80		
28	SS	39.3	1.50	CH	14.8		36		1.80		
29	SS	40.8	1.50	CH	18		45		1.80		
30	SS	42.3	1.50	CH	15.6		37		1.80		
31	SS	43.8	1.50	CH	14		31		1.80		
32	SS	45.3	1.50	CH	17.2		37		1.80		
33	SS	46.8	1.50	CH	18.8		38		1.80		
34	SS	48.3	1.50	CH	16.3		49		1.80		
35	SS	49.8	1.50	SM	18.7		46		1.80		
36	SS	51.3	1.50	SM	20.7		75		1.80		
37	SS	52.8	1.50	CL	19.6		45		1.80		
38	SS	54.3	3.75	CL	21.4		56		1.80		
39	SS	60.3	3.00	SM	24.3		67		1.80		

บริเวณหลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งเป็นหลุมแรกในการทดสอบความชื้นได้ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง เพื่อเป็นตรวจสอบว่าได้ผลซ้ำกันไหม (repeatability) โดยมีระยะของท่อนไม้ (wooden plank) ห่างจากปากหลุม 3 เมตร และกำหนดให้เครื่องมือเริ่มบันทึกข้อมูลก่อนการตอกไม้ (time delay) 2000 μ s

(10^{-6} วินาที) สามารถอ่านค่าเวลาที่คลื่นเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกดังตารางที่ 2.3 ถึง 2.6 จากการทดสอบพบว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกันในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 2.3 ค่าเวลาที่คลื่นเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกในการทดสอบครั้งที่ 1 ของ หลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)
	T ²	R ³	T	R	T	R	T	R	
1	27540	26820	27180	26470	26830	26970	27180	26650	26955
2	36980	37210	35330	37440	35570	37910	35330	37210	36623
3	42940	42980	42850	42980	42740	43460	42630	43220	42975
4	53930	53450	53930	53450	53450	53270	53690	53350	53565
5	61160	62700	60710	61220	60120	61210	60260	60640	61003
6	67930	68200	68530	68200	68230	67690	68230	67670	68085
7	75550		76910	75880	77340	75880	77010	75340	76273
8	87790	87790	87950	87160	87860	87590	87460	87780	87673
9	94460	94490	94480	94460	94520	94690	94460	94460	94503
10	105560	104180	105620	105310	105760	105040	105560	104790	105228
11	110140	109790	110140	110380	109750	110330	110340	110320	110149
12	118060	118780	119250	118400	119450	119170	119050	118590	118844
13		125510		125510		125510		125860	125598
14		130550		130510		131090		130130	130570
15	133520	130460	136160	134300	135620	135400	135940	135020	134553
16	127630	126690	127540	125790	126690	127060	127100	125890	126799
17	133220	132520	133930	131170	134640	131180	133930	131820	132801
18		137420		137490		137410		137420	137435
19	142310	142530	141760	142230	143010	142990	142310	143710	142606
20	151790	151340	151170	151400	150370	150740	150370	149090	150784
21	155570	154950	156000	155710	156410	156800	156300	156370	156014
22	159100	158930	158290	159770	158400	159120	159050	159650	159039
23	164090	164170	164070	164440	164170	164460	164140	164500	164255
24		168890		168900		168910		168890	168898
25	173090	173120	173780	173260	173780	172390	174480	172380	173285
26	177940	178850	178190	178060	178470	178010	178520	178010	178256
27		182170		181500		182170		181790	181908
28	188720	188000	187860	188040	188280	187970	188850	188030	188219
29		191670		192090		192580		191910	192063
30	197780		197640		197770		197560	197440	197638

¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการตอกไม้ 3 ครั้งที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ

² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวนอน (Transverse)

³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)

ตารางที่ 2.4 ค่าเวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกในการทดสอบครั้งที่ 2 ของ หลุมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)
	T ²	R ³	T	R	T	R	T	R	
1	26730	26890	26780	27100	26980	26860	27100	26980	26928
2	33220	32790	33220	33050	33920	33470	33920	33210	33350
3	42010	42810	43050	44170	43430	43550	43270	43700	43249
4		50590	53360	52010	52410	52010		52010	52065
5	59050	60310	60580		60270		59940		60030
6		68280		69080		69340		68970	68918
7	78610	78790	78780	79280	78180	79600	78780	79600	78953
8	88040	87600	87690	87240	87690	87320	87810	87280	87584
9	95230	95500	95830	95850	96170	96220	95810	95850	95808
10	104160	104920	103470	105690	104090	105450	103660	105610	104631
11	113890	114680	113070	113460	113060	114160	113180	113110	113576
12		119420		119390		119390		119240	119360
13	122260	122980	122440	122630	122040	122970			122553
14	131610	131830	131600	131820	131850	132170	131430	131710	131753
15	137210		135790	137520	136890	138220	136490	137970	137156
16	141800	142230	142360	142290	142230	142290	142140	142290	142204
17	147830	147940	147910	147920	148040	147910	147920	147980	147931
18	152800	152830	152820	152850	152970	152800	152800	152820	152836
19		155600		155920		155600		155780	155725
20	158930	159060	158400	158990	159100	159100	157700	158400	158710
21		162610		161900		162630		162590	162433
22		166100		165360		165950		165500	165728
23	170360	170620	169650	170360	169980	170300	169770	170500	170193
24	174650		174030		174650		174650		174495
25	177560	177510	177510	177280	177740	177280	176960	177750	177449
26	180410	180600	180360	180410	180020	181090	180070	181430	180549
27		186580		186080		186080		186080	186205
28		189700		190000		190180		190180	190015
29	191980	191790	191400	191800	191970	191790	191260	191790	191723
30	193380	193180	194150	194690	194620	194780	194390	194920	194264

¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการตอกไม้ 3 ครั้งที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ

² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวขวาง (Transverse)

³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)

ตารางที่ 2.5 ค่าเวลาที่คลื่นเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณในแต่ละความลึกในการทดสอบครั้งที่ 3 ของ หลุมจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)
	T ²	R ³	T	R	T	R	T	R	
1	31120	31020	31000	30230	31840	30450	31360	31120	30934
2	36990	35400	37690	36760	37110	36870	36990	36990	36849
3	45850	42560	45680	42350	46020	44440	45680	45850	44376
4	51640	50870	51470	51740	51310	52250	51470	51640	51650
5	60860	60380		60860		61040		60860	60752
6	69850	68040	69930	70000	70300	69190	69930	69850	69583
7									
8		89060		89020		88580			88800
9	96520	95470	97250	96080	97260	96360	97340	96520	96588
10	105630	105970	106210	105390	106210	106030	106230	105630	105908
11	113030	114200	113940	113150	113940	112990	113490	113030	113428
12	121470	120450	121700	120790	121930	120470	121930	121470	121176
13	125820	125350	125580	126000	126030	126290	126030	125820	125804
14	131960	131800	131760	131460	132420	131180	131940	131960	131708
15	136750	136870	136550	136720	136530	136610	136530	136750	136645
16	141080	140860	140580	140990	141180	141480	140510	141080	141024
17	146560	145910	147020	145920	147260	146180	147120	146560	146446
18	151120	150340	152040	150250	152270	150310	152950	151120	151301
19		154610		154730		154350			154565
20	158800	158390	157990	158380	157990	158190	158530	158800	158333
21	161900		162300		161460		161460	161900	161760
22	165730		166030		165740		165990	165730	166060
23	170930	170950	170350	170720	170380	170540	170380	170930	170543
24		174890		174560		174520			174553
25	177400	177140		177570	177400	177790	177590	177400	177436
26	180310	180190	181480	181420	180410	180540	179960	180310	180804
27	184430	187750	183630	185440	184010	185720	184140	184430	184961
28	188930	189190	188920	188100	188720	189070	188320	188930	188754
29	191290	191300	190610	190690	190630	191790	191500	191290	191151
30	195170		195540		195540		195340	195170	195418

¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการดักไม้ 3 ครั้งที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ

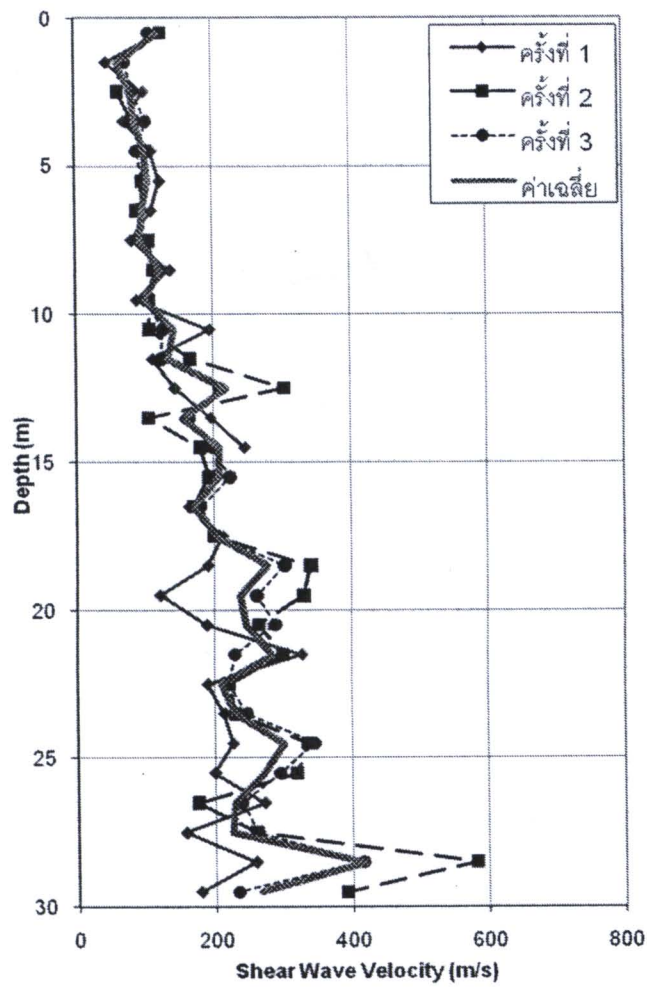
² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวนอน (Transverse)

³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)

ตารางที่ 2.6 การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) บริเวณหลุมจุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Depth (m)	Distance (m)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			ครั้งที่ 3			Average V_s (m/s)
		Time (μ s)	Δ Time (μ s)	V_s (m/s)	Time (μ s)	Δ Time (μ s)	V_s (m/s)	Time (μ s)	Δ Time (μ s)	V_s (m/s)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
0.5	3.162	26955	24955	127	26928	24928	127	30934	28934	109	121
1.5	3.606	36623	9668	46	33350	6423	69	36849	5915	75	63
2.5	4.243	42975	6353	100	43249	9899	64	44376	7528	85	83
3.5	5.000	53565	10590	72	52065	8816	86	51650	7274	104	87
4.5	5.831	61003	7438	112	60030	7965	104	60752	9102	91	102
5.5	6.708	68085	7083	124	68918	8888	99	69583	8831	99	107
6.5	7.616	76273	8188	111	78953	10035	90			96	99
7.5	8.544	87673	11400	81	87584	8631	108	88800	19218	96	95
8.5	9.487	94503	6830	138	95808	8224	115	96588	7788	121	125
9.5	10.440	105228	10725	89	104631	8824	108	105908	9320	102	100
10.5	11.402	110149	4921	195	113576	8945	107	113428	7520	128	144
11.5	12.369	118844	8695	111	119360	5784	167	121176	7749	125	134
12.5	13.342	125598	6754	144	122553	3193	304	125804	4628	210	220
13.5	14.318	130570	4973	196	131753	9199	106	131708	5904	165	156
14.5	15.297	134553	3983	246	137156	5403	181	136645	4938	198	208
15.5	16.279	126799			142204	5048	194	141024	4379	224	209
16.5	17.263	132801	6003	164	147931	5728	172	146446	5423	181	172
17.5	18.248	137435	4634	213	152836	4905	201	151301	4855	203	206
18.5	19.235	142606	5171	191	155725	2889	342	154565	3264	302	278
19.5	20.224	150784	8178	121	158710	2985	331	158333	3768	262	238
20.5	21.213	156014	5230	189	162433	3723	266	161760	3428	289	248
21.5	22.204	159039	3025	327	165728	3295	301	166060	4300	230	286
22.5	23.195	164255	5216	190	170193	4465	222	170543	4483	221	211
23.5	24.187	168898	4643	214	174495	4303	231	174553	4010	247	231
24.5	25.179	173285	4388	226	177449	2954	336	177436	2883	344	302
25.5	26.173	178256	4971	200	180549	3100	320	180804	3368	295	272
26.5	27.166	181908	3651	272	186205	5656	176	184961	4158	239	229
27.5	28.160	188219	6311	158	190015	3810	261	188754	3793	262	227
28.5	29.155	192063	3844	259	191723	1708	582	191151	2398	415	419
29.5	30.150	197638	5576	178	194264	2541	391	195418	4267	233	268
(1) คือความลึก ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างชั้นดินแต่ละชั้น (กึ่งกลางระหว่างตำแหน่งของตัวรับสัญญาณแต่ละชั้น)											
(2) $= [(1) + 0.5]^2 + 3.0^2]^{1/2}$											
(4) _i = (3) _i - 2000, (4) _{i+1} = (3) _{i+1} - (3) _i , (5) _i = (2) _i / (4) _i * 10 ⁶ , (5) _{i+1} = [(2) _{i+1} - (2) _i] / (4) _{i+1} * 10 ⁶											
(7) _i = (6) _i - 2000, (7) _{i+1} = (6) _{i+1} - (6) _i , (8) _i = (2) _i / (7) _i * 10 ⁶ , (8) _{i+1} = [(2) _{i+1} - (2) _i] / (7) _{i+1} * 10 ⁶											
(10) _i = (9) _i - 2000, (10) _{i+1} = (9) _{i+1} - (9) _i , (11) _i = (2) _i / (10) _i * 10 ⁶ , (11) _{i+1} = [(2) _{i+1} - (2) _i] / (10) _{i+1} * 10 ⁶											
(12) = Average[(5), (8), (11)]											

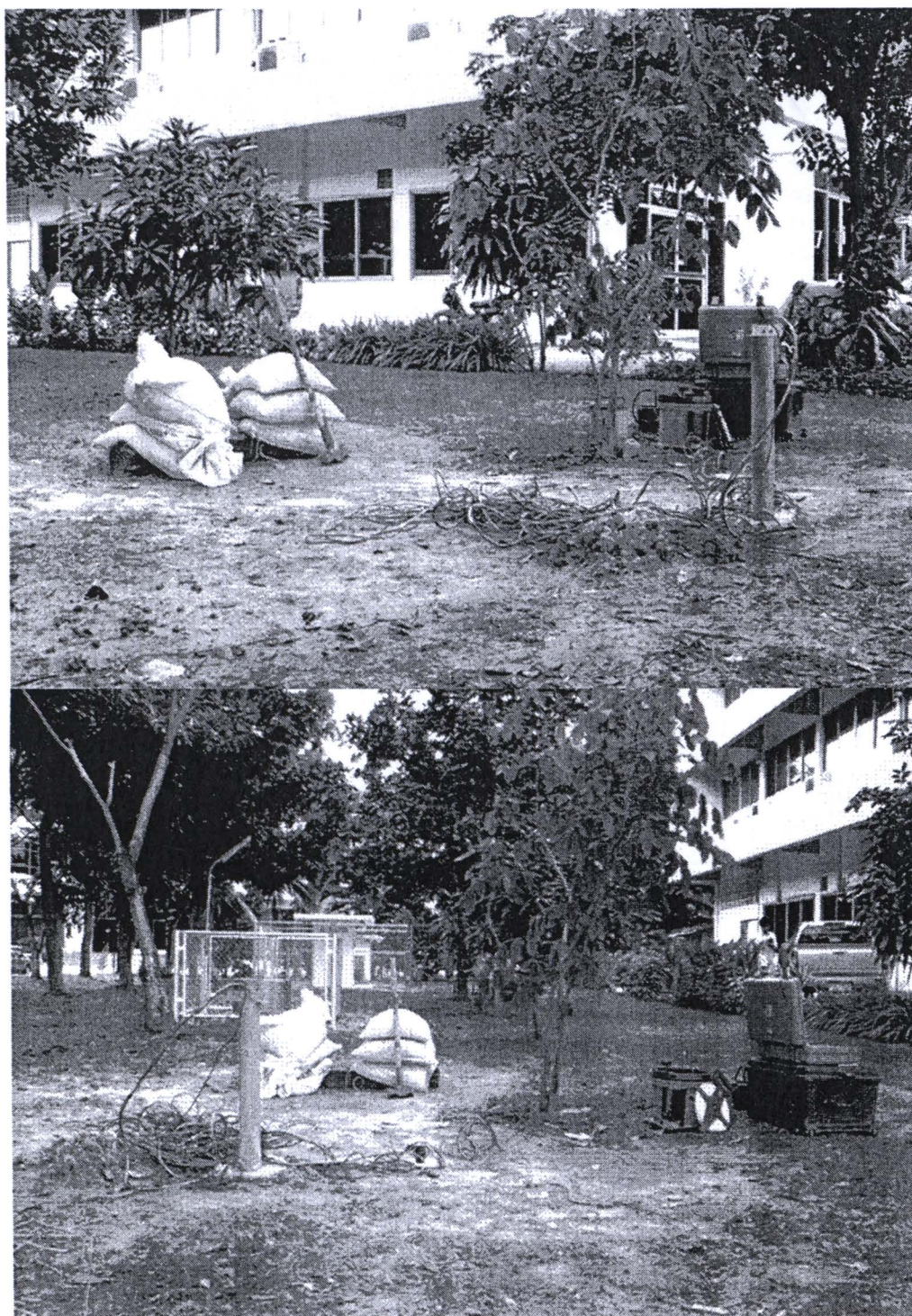
เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 2.6 มาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนและความลึกได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึกจากการทดสอบดาวน์โฮลทั้ง 3 ครั้ง บริเวณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 กรมอุตุนิยมวิทยา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร

ที่พิกัดละติจูดที่ 13.669 องศาเหนือ, ลองจิจูดที่ 100.607 องศาตะวันออก



รูปที่ 2.16 การทดสอบควาน์โซลบริเวณกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา

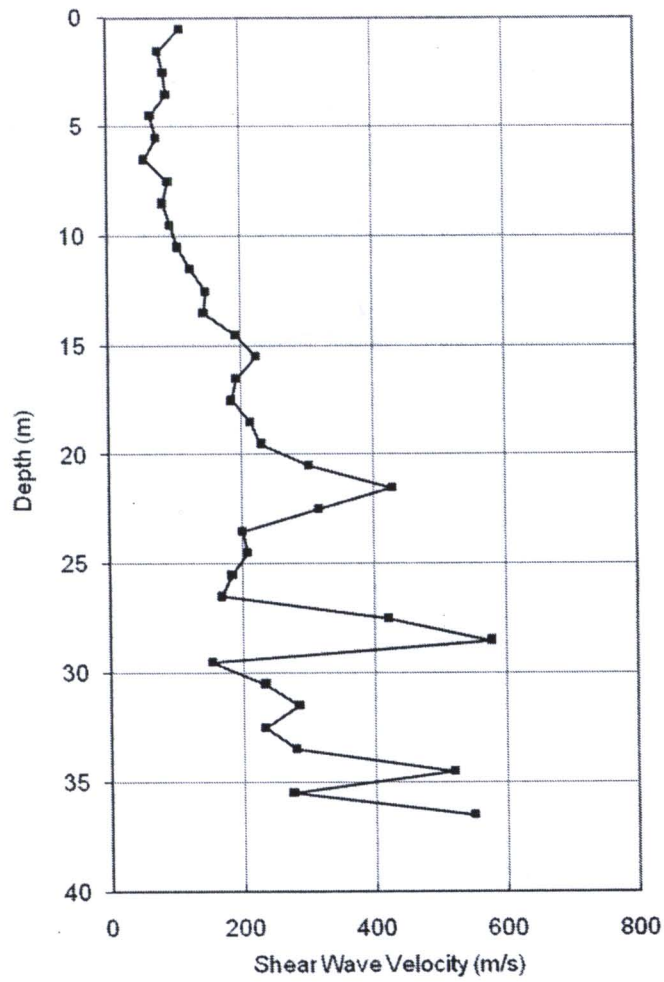
ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบกรมอุตุณิยมหาวิทยาลัย บางนา

Layer No.	Type of Sample	Depth, m	Thicknes s, m	Classification	Natural Water Content (%)	Su, t/m ²	SPT, N (Blow/ft)	Plastic Index (%)	Wet Unit Weight (t/m ³)	(Downhole) Vs (m/s)	(Downhole) Shear Modulus (MPa)
1	ST	1.8	2.55	CH	37.0	3.44		32.00	1.86	81	12
2	ST	3.3	1.50	CH	65.0	2.90			1.67	90	14
3	ST	4.8	1.50	CH	54.0	1.63			1.72	69	8
4	ST	6.3	1.50	CH	71.0	1.17		39.00	1.64	60	6
5	ST	7.8	1.50	CH	88.0	1.75			1.56	90	13
6	ST	9.3	1.65	CH	84.0	2.56			1.56	93	14
7	ST	11.1	1.50	CH	69.0	4.01		62.00	1.63	118	23
8	ST	12.3	1.35	CH	67.0	4.27			1.61	144	33
9	ST	13.8	1.50	CH	37.0	3.24			1.86	159	47
10	ST	15.3	1.00	CH	36.0	5.07		36.00	1.75	217	83
11	SS	15.8	0.75	CH	31.0		19		1.88	214	86
12	SS	16.8	1.25	CH	33.0		21		2.00	191	73
13	SS	18.3	1.50	CH	37.0		14	30.00	2.00	208	87
14	SS	19.8	1.50	ML/SM	22.0		22		2.02	252	128
15	SS	21.3	1.50	CL	22.0		35	12.00	2.00	403	324
16	SS	22.8	1.50	SM	23.0		75		1.97	282	156
17	SS	24.3	1.50	SM	22.0		53		1.98	207	85
18	SS	25.8	1.50	SM	17.0		39		1.98	180	64
19	SS	27.3	1.50	SM	22.0		34		2.00	370	274
20	SS	28.8	1.50	CH	29.0		17	34.00	2.10	451	426
21	SS	30.3	1.50	CH	25.0		14		2.06	217	97
22	SS	31.8	1.50	CH	26.0		30		2.12	268	152
23	SS	33.3	1.50	CH	33.0		24	40.00	1.88	270	137
24	SS	34.8	1.50	CH	19.0		46		2.03	446	404
25	SS	36.3	1.50	CH	21.0		37		2.06	495	504
26	SS	37.8	1.50	SM/ML	18.0		65		2.01	550	608
27	SS	39.3	1.25	SM/ML	21.0		71		2.06		
28	SS	40.3	0.50	SM/ML	23.0		88		2.05		



ตารางที่ 2.8 เวลาที่คลื่นเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นในตะกอนของ
หลุมกรมนุญนิยมวิทยา บางนา

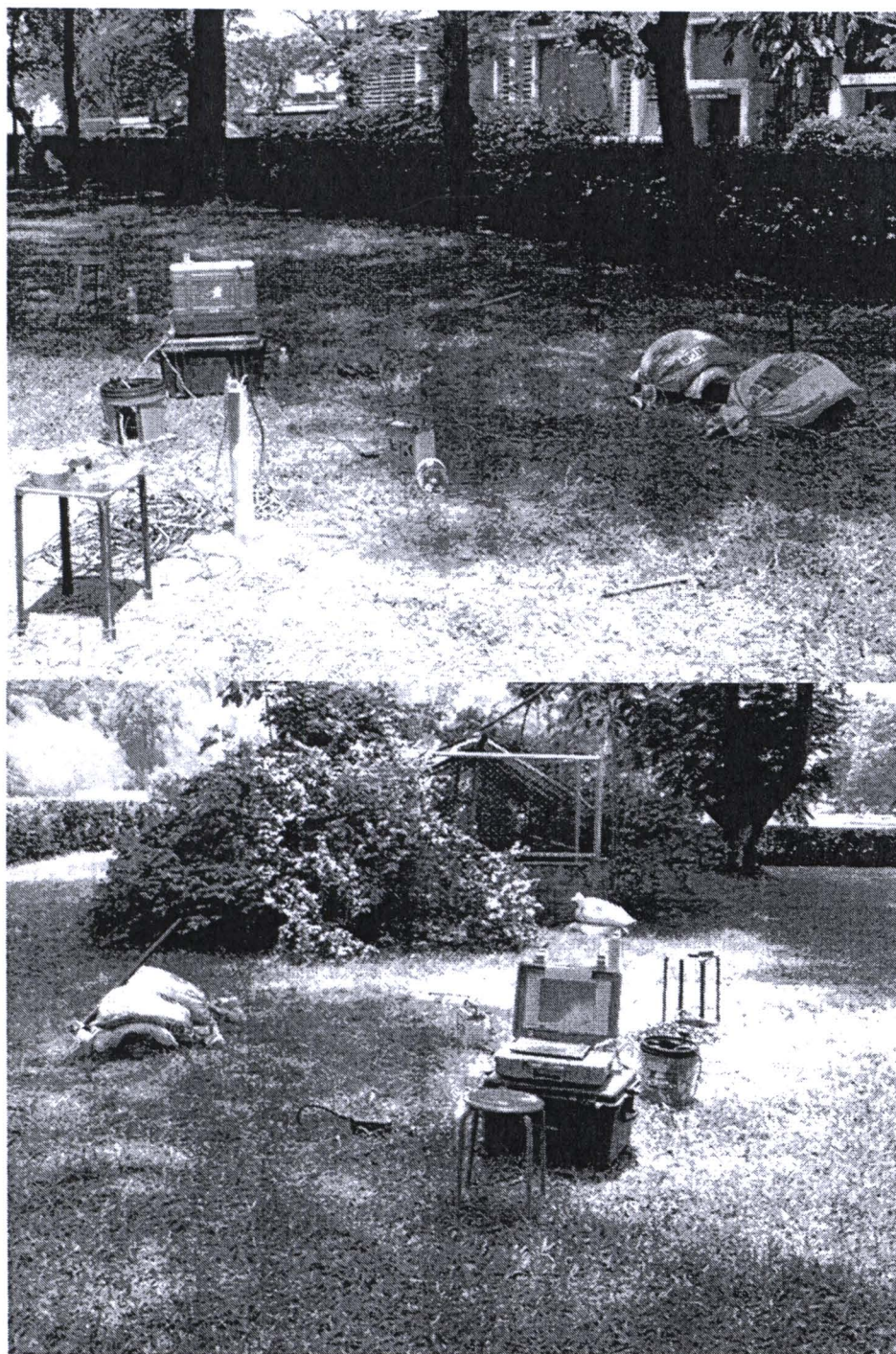
TMD	Horizontal Distance from Wooden Plank to Hole = 3 m										
Depth (m)	Sensor Depth (m)	Time 1 (μ s)		Time 2 (μ s)		Time 3 (μ s)		Average ¹		Average Time (μ s)	V_s (m/s)
		T ²	R ³	T	R	T	R	T	R		
0.5	1.04	31590	28920	31690	29390	31980	28970	31550	29050	30393	112
1.5	2.00	36110	35380	36390	35500	36110	35650	36110	35650	35863	79
2.5	3.00	42290	42690	43140	43810	42720	43980	42290	44230	43144	87
3.5	4.04	51160	52360	52740	51380	51710	51690	51920	51680	51830	91
4.5	5.00	63970	63660	64140	63930	63990	63070	63750	63640	63769	67
5.5	6.00	75420	76170	75110	75970	74700	76040	74550	75460	75428	75
6.5	7.00	90910	91960	90630	92090	90490	92940	90200	92370	91449	57
7.5	8.00	101460	101530	100950	101810	100780	102090	100920	101810	101419	93
8.5	9.00	112070	113200	112070	113270	112070	112850	112210	113560	112663	84
9.5	10.00	122650	122700	122500	122550	122500	122980	122500	122700	122635	96
10.5	11.00	131810	131210	131810	131930	131950	131490	131840	131210	131656	107
11.5	11.91	138870	138460	138860	138140	138860	138510	139000	138500	138650	126
12.5	13.07	146060	146770	145770	146600	145920	146100	145770	146950	146243	149
13.5	13.93	152730	152150	152780	151230	152830	150900	152830	150730	152023	145
14.5	14.95	157230	157100	157210	157240	157060	157380	157310	157110	157205	193
15.5	16.00	162420	161480	162590	160350	163110	160890	162780	160920	161818	223
16.5	17.00	167070	166590	167540	166610	166940	166720	167210	166580	166908	193
17.5	17.93	172090	172890	171420	172870	171080	171740	170800	171800	171836	186
18.5	18.95	175170	176960	176030	176890	176890	177030	176740	176600	176539	214
19.5	19.96	180390	181070	179120	181110	181340	182260	180340	181380	180876	230
20.5	21.00	184240	184070	184240	184170	184720	184380	184360	184110	184286	302
21.5	21.94	186520	186000	186710	186590	186940	186270	186320	186340	186461	428
22.5	22.95	189980	189570	190650	189110	189390	189250	189970	189110	189629	316
23.5	24.00	194720	194890	194860	195000	194570	194710	194860	194860	194809	201
24.5	25.00	199020	199600	199280	199900	199320	200090	199540	199890	199580	208
25.5	26.00	204490	205340	203980	205160	204280	206200	204340	205880	204959	185
26.5	26.90	210100	210210	210390	210360	210250	210530	209690	210500	210254	169
27.5	27.90	212320	212270	213060	212530	212670	212390	213040	212660	212618	421
28.5	29.00	214630	214560	214530	214280	214700	214250	214690	214440	214510	578
29.5	29.90	220120	220390	220150	220370	220510	220550	220220	220570	220360	153
30.5	30.95	225160	224590	224930	224150	225340	224580	225350	224660	224845	233
31.5	31.90	228200	227610	228190	227620	228770	228520	228480	228060	228181	283
32.5	33.00	233430	233360	233130	232540	232830	232690	232830	232400	232901	232
33.5	33.95	235470	236790	236310	236170	236630	236610	235880	236460	236290	279
34.5	34.90	238010	238090	237640	238660	237470	238930	237450	238640	238111	520
35.5	36.00	242590	241400	242880	241550	242620	241410	242850	241530	242104	275
36.5	36.90	243670	243990	243390	244300	243600	244160	243280	243490	243735	550



รูปที่ 2.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณกรม
อุตุวิทยวิทยา บางนา

2.3.3 สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

ที่พิกัดละติจูดที่ 14.081 องศาเหนือ, ลองจิจูดที่ 100.611 องศาตะวันออก



รูปที่ 2.18 การทดสอบดาวนโหลดบริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

ตารางที่ 2.9 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

Layer No.	Type of Sample	Depth, m	Thickness, m	Classification	Natural Water Content (%)	Su, t/m ²	SPT, N (Blow/ft)	Plastic Index (%)	Wet Unit Weight (t/m ³)	(Downhole) Vs (m/s)	(Downhole) Shear Modulus (MPa)
1	ST	1.8	2.55	CH	54.0	2.33		51.00	1.72	165	47
2	ST	3.3	1.50	CH	50.0	3.79			1.71	92	14
3	ST	4.8	1.50	CH	91.0	2.02		65.00	1.55	67	7
4	ST	6.3	1.50	CH	87.0	1.50			1.58	59	6
5	ST	7.8	1.50	CH/SC	58.0	0.65			1.63	123	25
6	ST	9.3	1.50	CH	30.0	3.82		29.00	1.88	192	69
7	ST	10.8	1.00	CL	25.0	6.70			2.01	263	139
8	SS	11.3	0.75	CL	21.0		18	32.00	2.09	196	81
9	SS	12.3	1.25	CL	27.0		17		1.97	179	63
10	SS	13.8	1.50	CL	28.0		18		1.96	195	74
11	SS	15.3	1.50	CL	27.0		13	17.00	2.18	292	186
12	SS	16.8	1.50	CL	27.0		25		2.00	463	429
13	SS	18.3	1.50	SM	15.0		44		2.13	385	316
14	SS	19.8	1.50	SM	9.0		83		2.11	329	229
15	SS	21.3	1.50	SP-SM	16.0		58		2.08	296	
16	SS	22.8	1.50	SP-SM	16.0		51		2.15	306	
17	SS	24.3	1.50	CL	30.0		24	43.00	1.99	313	
18	SS	25.8	1.50	CL	29.0		22		1.99	227	103
19	SS	27.3	1.50	CL/SC	32.0		25	24.00	2.17	481	502
20	SS	28.8	1.50	CL/SC	46.0		9		1.97	140	39
21	SS	30.3	0.75	SC/CL	41.0		17	15.00	1.95	163	52

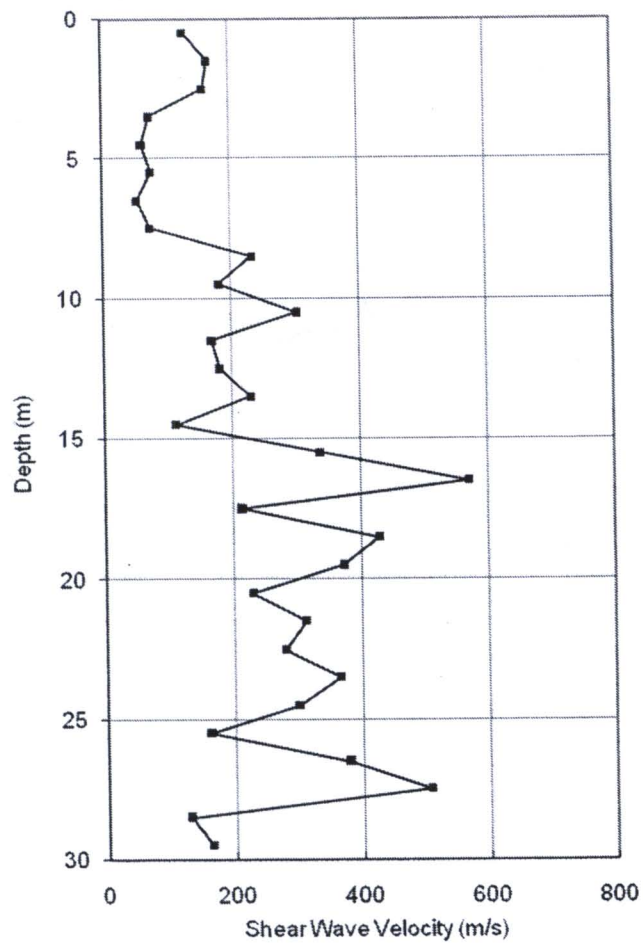
ตารางที่ 2.10 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละความลึกของหลุมสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

AIT	Horizontal Distance from Wooden Plank to Hole = 3 m										
Depth (m)	Sensor Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)	V _s (m/s)
		T ²	R ³	T	R	T	R	T	R		
0.5	1.03	26680	26690	26690	26680	26400	26400	26120	26540	26525	129
1.5	2.04	29390	29250	28970	29400	28110	30550	28970	29400	29255	167
2.5	3.03	33140	33170	33590	33450	33190	33170	33170	33170	33256	159
3.5	4.05	43820	44200	43360	43690	43640	43220	43640	43220	43599	75
4.5	5.04	57670	57040	56770	56000	57200	55830	57010	55870	56674	63
5.5	6.05	68050	68200	68210	68310	68360	68240	68350	68100	68228	77
6.5	7.04	85190	84960	84480	84370	84810	83840	84330	84660	84580	55
7.5	8.05	97400	95550	97690	96370	97690	96690	97540	96490	96928	76
8.5	9.00	100800	100180	101220	100580	101220	100290	101360	100460	100764	234
9.5	10.00	106030	106080	106030	106210	105900	106100	105750	106120	106028	181
10.5	11.04	109890	109920	109600	109340	108590	109070	109030	109200	109330	303
11.5	12.05	116260	115870	115000	114520	114520	114380	115530	114660	115093	170
12.5	13.04	121920	119370	120850	120380	120760	119340	120900	119620	120393	182
13.5	14.05	124530	125610	125970	124290	124940	124180	123640	124270	124679	230
14.5	15.00	132640	132420	132750	133210	133180	133130	132930	133130	132924	113
15.5	16.00	135580	135900	135700	136450	135110	135980	135590	136360	135834	337
16.5	17.00		137590		137530		137630		137490	137560	570
17.5	18.04		142380		142240		142520		142240	142345	214
18.5	19.00	144710	144580	144580	144320	144710	144450	144720	144410	144560	428
19.5	20.00		147190		147320		147190		147170	147218	372
20.5	21.00		151740		151420		151540		151380	151520	230
21.5	22.00		154420		154880		155020		154420	154685	313
22.5	23.00	159870	159090	158140	157550	157430	157370	158570	157760	158223	280
23.5	24.00		161050		160900		160910		160900	160940	365
24.5	25.00	164180	164110	164280	164150	164320	164420	164410	164110	164248	300
25.5	26.00	171030	170740	170480	170180	170070	169770	170600	170050	170365	162
26.5	27.00	172880		173170		172880		173030		172990	379
27.5	28.00	175290	175150		174990	175740	174270		174270	174952	507
28.5	29.00		183150		182160		182620		182450	182595	130
29.5	30.04	189890	188280	188210	188010	189880	188850	190170	188130	188928	163

¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการตอกไม้ 3 ครั้งที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ

² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวนอน (Transverse)

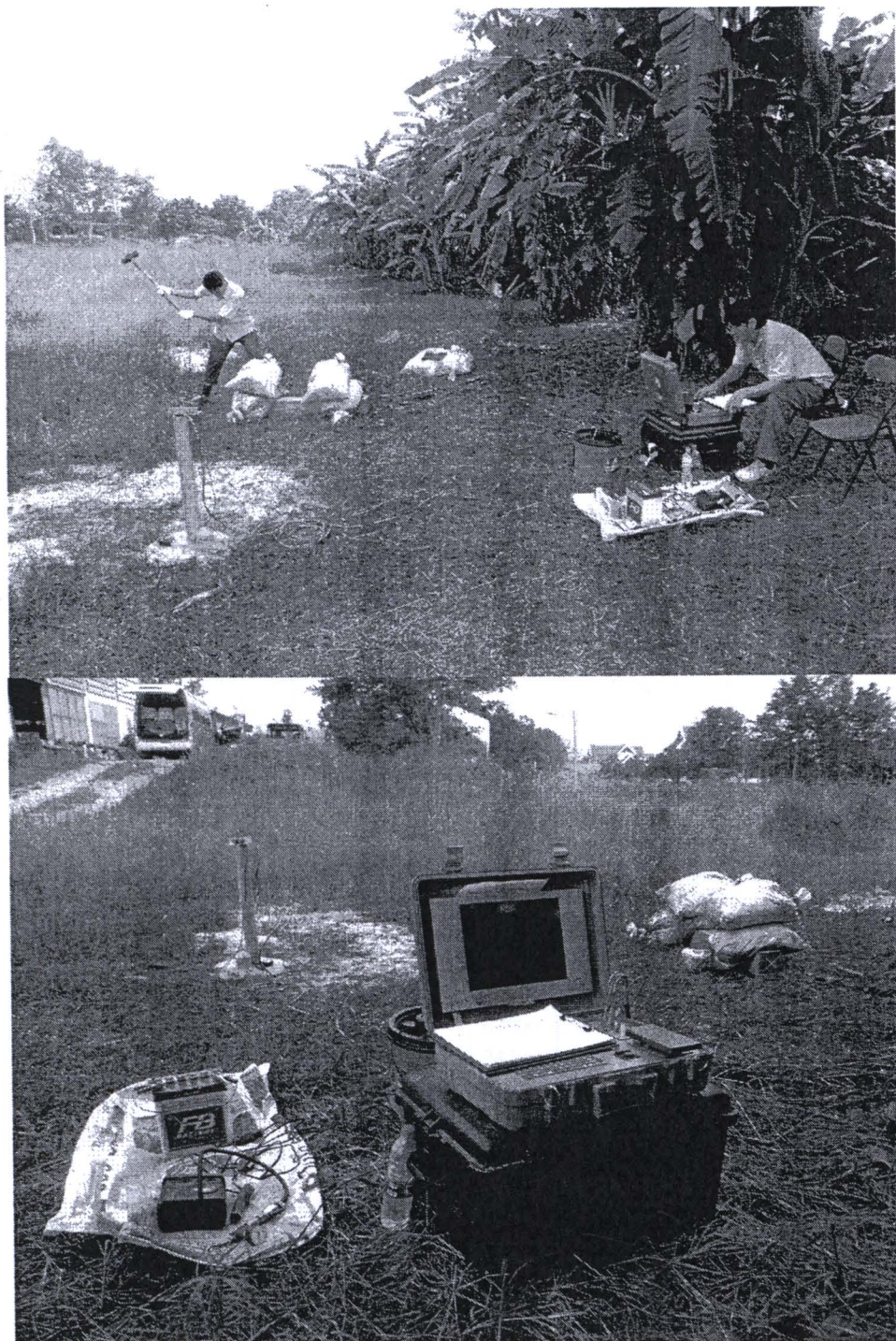
³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

2.3.4 สำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย

ที่พิกัดละติจูดที่ 19.928 องศาเหนือ, ลองจิจูดที่ 99.872 องศาตะวันออก



รูปที่ 2.20 การทดสอบดาวนัโสลบริเวณสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย

ตารางที่ 2.11 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย

Layer No.	Type of Sample	Depth, m	Thickness, m	Classification	Natural Water Content (%)	Su, t/m ²	SPT, N (Blow/ft)	Plastic Index (%)	Wet Unit Weight (t/m ³)	(Downhole) Vs (m/s)	(Downhole) Shear Modulus (MPa)
1	SS	0.8	1.05	SM	12.0		14		1.94	111	24
2	SS	1.3	0.50	SM	16.0		13		2.04	88	16
3	SS	1.8	0.50	SP-SM	25.0		8		1.98	100	20
4	SS	2.3	0.50	SP-SM	20.0		11		1.84	134	33
5	SS	2.8	0.50	SP-SM	20.0		11		2.11	153	49
6	SS	3.3	1.00	SP-SM	21.0		7		2.01	160	52
7	SS	4.8	1.50	SP-SM	17.0		9		2.14	196	82
8	SS	6.3	1.50	CH	17.0		5	31.00	1.97	129	33
9	SS	7.8	1.50	SP-SM	18.0		21		2.07	279	161
10	SS	9.3	1.50	SP-SM	19.0		24		2.13	349	260
11	SS	10.8	1.50	SP-SM	10.0		29		1.96	224	99
12	SS	12.3	1.50	SP-SM	8.0		46		2.06	396	324
13	SS	13.8	1.50	GM			51				
14	SS	15.3	0.75	GM			52				

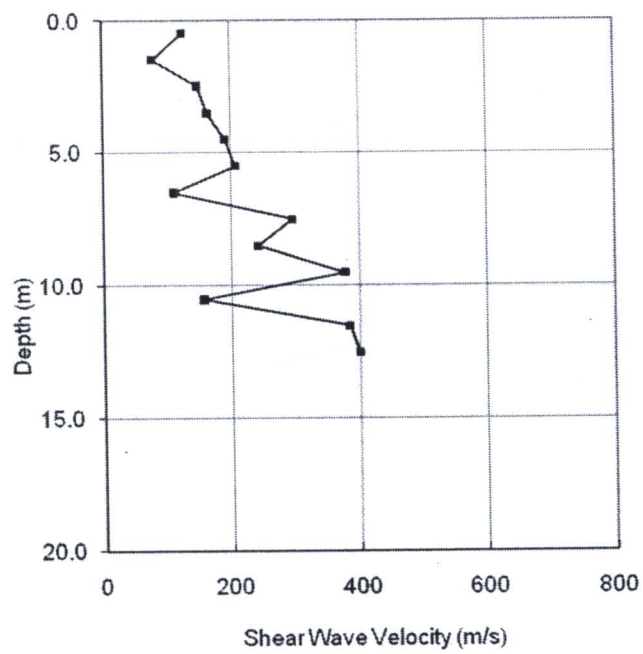
ตารางที่ 2.12 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละความลึกของหลุมสำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย

CHR	Horizontal Distance from Wooden Plank to Hole = 3 m										
Depth (m)	Sensor Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)	V _s (m/s)
		T ²	R ³	T	R	T	R	T	R		
0.5	0.99	27030	27480	27260	27000	27660	27550	27170	27540	27336	125
1.5	1.99	33160	32800	33030	32520	33080	32970	33170	32740	32934	79
2.5	2.99	37390	37530	37360	37210	36800	36930	37220	37330	37221	148
3.5	3.99	42600	40930	42110	40810	42560	41770	42550	41480	41851	163
4.5	4.99	46700	46350	46270	45830	46270	46280	45990	45970	46208	191
5.5	5.99	50510		50370		50510		50370		50440	207
6.5	6.99	58910	58440	58150	58480	58960	58940	58990	58840	58714	110
7.5	7.98	61810		61810		61810		61550	62130	61822	296
8.5	8.98	67650		65270		65310		65970	64440	65728	241
9.5	9.99	68570		68090		67900		68210	68660	68286	376
10.5	10.97	75120		74100		74290		74340	73790	74328	156
11.5	11.97	76600	76680	76470	77010	77290	76670	77060	77020	76850	384
12.5	13.05	79320	79510	79220	79310	79600	79550	79600	79720	79479	399

¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการตอกไม้ 3 ครั้งที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ

² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวขวาง (Transverse)

³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณ
สำนักงานทางหลวงชนบทเชียงราย

2.3.5 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ที่พิกัดละติจูดที่ 18.794 องศาเหนือ, ลองจิจูดที่ 98.952 องศาตะวันออก



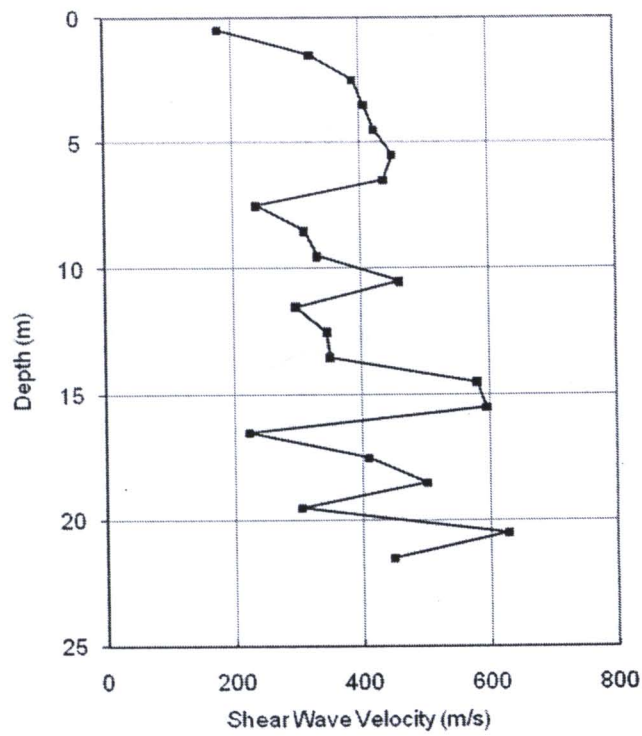
รูปที่ 2.22 การทดสอบดาวนโซลบริเวณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Layer No.	Type of Sample	Depth, m	Thickness, m	Classification	Natural Water Content (%)	Su, t/m ²	SPT, N (Blow/ft)	Plastic Index (%)	Wet Unit Weight (t/m ³)	(Downhole) Vs (m/s)	(Downhole) Shear Modulus (MPa)
1	SS	0.8	1.05	CL-ML	7.0		37	5.00	1.97	223	98
2	SS	1.3	0.50	SC/CL	7.0		16	13.00	2.00	294	173
3	SS	1.8	0.50	SC/CL	15.0		15	15.00	2.13	343	251
4	SS	2.3	0.50	CL	16.0		18		2.19	376	310
5	SS	2.8	0.50	CL	17.0		28	19.00	2.19	395	342
6	SS	3.3	1.00	CL	18.0		19		2.24	404	365
7	SS	4.8	1.50	SC/CL	14.0		12	11.00	2.24	432	418
8	SS	6.3	1.50	SC/CL	15.0		13		2.25	440	436
9	SS	7.8	1.50	CL	17.0		15	20.00	2.23	259	150
10	SS	9.3	1.50	CL	15.0		18	18.00	2.25	328	242
11	SS	10.8	1.50	CL	20.0		20		2.25	412	381
12	SS	12.3	1.50	CL	21.0		18	15.00	2.26	336	255
13	SS	13.8	1.50	SC/CL	19.0		12	15.00	2.06	420	363
14	SS	15.3	1.50	SC/CL	22.0		13		2.19	593	771
15	SS	16.8	1.50	SC	17.0		31	8.00	2.04	279	159
16	SS	18.3	1.50	SC	16.0		28		2.05	483	479
17	SS	19.8	1.50	SC	11.0		45	20.00	2.07	401	334
18	SS	21.3	1.50	GM						485	
19	SS	22.8	0.75	GM							

ตารางที่ 2.14 เวลาที่คลื่นเฉือนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเฉือนในแต่ละความลึกของหลุมมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

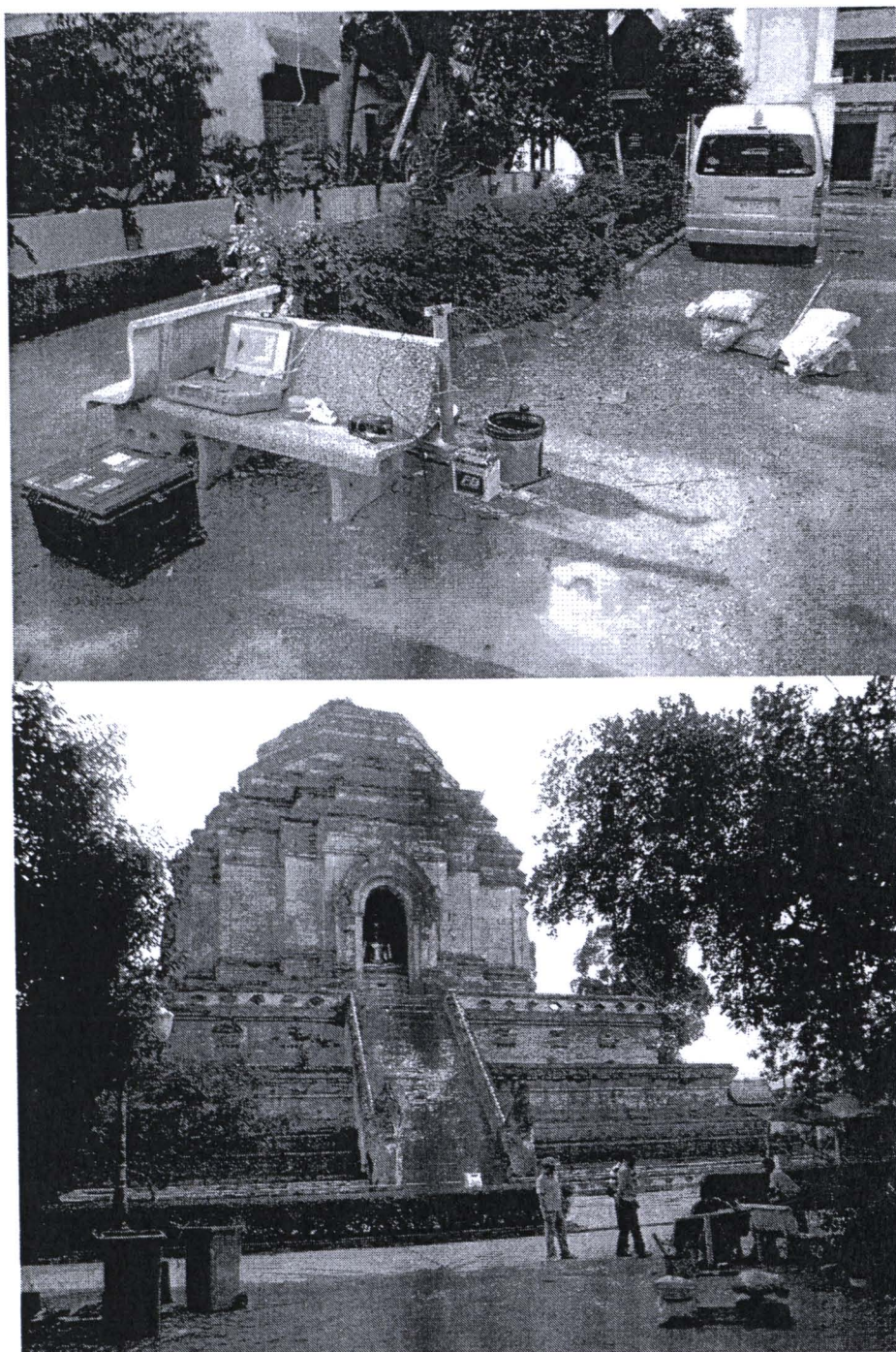
CMU	Horizontal Distance from Wooden Plank to Hole = 3 m															
Depth (m)	Sensor Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)	V _s (m/s)					
		T ²	R ³	T	R	T	R	T	R							
0.5	0.97	20720	19290	20600	19570	21010	19430	19570	19540	19480	180					
1.5	1.98														20848	323
2.5	2.99		22420							23130	22000	22420	22493	390		
3.5	3.99		24420							24130	24410	24440	24350	407		
4.5	5.00		26540							26400	26120	26260	26330	424		
5.5	5.99		28680							28110	27970	28250	28253	452		
6.5	6.99		30690							31010	29660	29950	30328	437		
7.5	7.98		34050							34050	34370	34370	34210	237		
8.5	8.96		37460							36990	37280	36980	37178	311		
9.5	9.98	45440	40070	40100	40200	40200	40060	40108	40108	332						
10.5	10.99		42550								42250	42250	41810	42215	461	
11.5	11.98													45440	297	
12.5	12.98		48760								48500	47870	47870	48250	346	
13.5	13.97		50210								51650	51510	50660	51008	350	
14.5	14.98		52600								52600	52740	52900	52710	581	
15.5	15.97		53630								54530	55260	53940	54340	596	
16.5	16.99		59410								59080	58120	58790	58850	223	
17.5	17.94		61290								61590	60590	61050	61130	411	
18.5	18.98		63310								63230	63250	62920	63178	501	
19.5	19.98		66460								66460	66480	66310	66428	304	
20.5	20.99		68400								67930	68080	67660	68018	629	
21.5	21.66	70630	69110	69280	68960	69495	449									
¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการตอกไม้ 3 ครั้งที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ																
² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวขวาง (Transverse)																
³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)																



รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึก บริเวณมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2.3.6 วัดเจดีย์หลวงวรวิหาร อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ที่พิกัดละติจูดที่ 18.787 องศาเหนือ, ลองจิจูดที่ 98.987 องศาตะวันออก



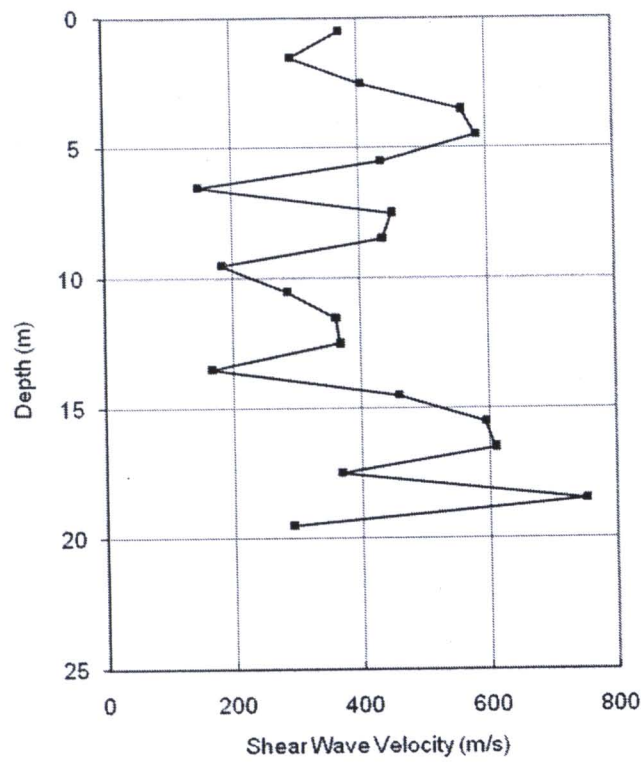
รูปที่ 2.24 การทดสอบดาวนัโซลบริเวณวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 2.15 คุณสมบัติของดินชั้นต่าง ๆ ณ บริเวณหลุมทดสอบวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร

Layer No.	Type of Sample	Depth, m	Thickness, m	Classification	Natural Water Content (%)	Su, t/m ²	SPT, N (Blow/ft)	Plastic Index (%)	Wet Unit Weight (t/m ³)	(Downhole) Vs (m/s)	(Downhole) Shear Modulus (MPa)
1	SS	0.8	1.05	SC-SM	12.0		28	6.00	2.04	349	249
2	SS	1.3	0.50	CL	18.0		24	10.00	2.06	311	199
3	SS	1.8	0.50	CL	14.0		10	8.00	2.12	328	229
4	SS	2.3	0.50	CL	18.0		5		2.06	383	302
5	SS	2.8	0.50	SC	14.0		21	14.00	2.13	452	436
6	SS	3.3	1.00	SC	12.0		22		2.10	531	592
7	SS	4.8	1.50	SC	12.0		31	17.00	2.00	541	584
8	SS	6.3	1.50	CL	20.0		20		2.00	205	84
9	SS	7.8	1.50	CL	21.0		22		1.97	448	395
10	SS	9.3	1.50	CL	25.0		33	24.00	1.87	233	102
11	SS	10.8	1.50	CL	20.0		22		1.98	309	189
12	SS	12.3	1.50	CL	24.0		30		1.96	367	264
13	SS	13.8	1.50	SM	20.0		47		1.97	255	127
14	SS	15.3	1.50	SM	16.0		79		1.97	568	637
15	SS	16.8	1.50	SM	14.0		60		1.98	537	571
16	SS	18.3	1.50	SM	13.0		63		2.16	675	983
17	SS	19.8	1.50	SM	13.0		47		2.06	292	176
18	SS	21.3	0.95	SM			75		2.06		
19	SS	21.7	0.20	SM							

ตารางที่ 2.16 เวลาที่คลื่นเนื่อนเดินทางไปถึงตัวรับสัญญาณและค่าความเร็วคลื่นเนื่อนในแต่ละความลึกของหลุมวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร

CMJD	Horizontal Distance from Wooden Plank to Hole = 3 m									m	
Depth (m)	Sensor Depth (m)	Time 1 (μs)		Time 2 (μs)		Time 3 (μs)		Average ¹		Average Time (μs)	V _s (m/s)
		T ²	R ³	T	R	T	R	T	R		
0.5	0.99	8530	6570	5800	6080	8090	5590	8340	5630	6829	372
1.5	1.98		9040	9030	8200	8900	9680	9040	10180	9153	296
2.5	2.98		11910		12060		10040		11020	11258	405
3.5	3.98		14220		12200		12200		12930	12888	563
4.5	4.99		14880		14590		14310		14310	14523	586
5.5	6.00		16580		16580		17010		16860	16758	436
6.5	6.99		23440		22970		23450		23270	23283	148
7.5	7.99		25700		25400		25150		25550	25450	452
8.5	8.99		27820		27640		27680		27680	27705	437
9.5	10.00		33510		33000		33150		33010	33168	183
10.5	10.99		36670		36360		36930		36400	36590	286
11.5	12.00		39520		39790		39060		39060	39358	362
12.5	12.98		42940		41200		41620		42250	42003	368
13.5	13.98		47600		48330		47900		48030	47965	167
14.5	14.97		50030		50190		50160		50050	50108	460
15.5	15.97		51850		51710		51850		51710	51780	595
16.5	16.98		53500				53360			53430	610
17.5	17.96		55810		56530		55790		56210	56085	368
18.5	18.97		57570		57430		57420		57280	57425	751
19.5	19.95		61040		59910		61080		61050	60770	292
¹ AVERAGE เป็นเวลาเฉลี่ยจากการตอกไม้ 3 ครั้ง ที่อ่านได้จากเครื่องมือทดสอบ											
² T คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวนอน (Transverse)											
³ R คือทิศทางของตัวรับสัญญาณแนวรัศมี (Radial)											



รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน (Shear wave velocity) กับความลึกบริเวณวัดเจดีย์หลวงวรวิหาร

2.4 การจำแนกประเภทของดิน

ในการจำแนกประเภทของดินแต่ละบริเวณ จะสามารถทำได้โดยเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และค่าการดักทอลงมาตรฐาน (ค่า N) และนำค่าเฉลี่ยดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับตาม National Earthquake Hazards Reduction Program NEHRP (BSSC, 1997) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 การจำแนกประเภทของดินตาม NEHRP (BSSC, 1997)

Soil class	Soil Type	Velocity of shear wave (V_s), m/s	Undrained shear strength (S_u), kN/m ²	Uncorrected Standard penetration resistance (N)
A	Hard rock	$V_s > 1500$	---	--
B	Rock	$760 < V_s \leq 1500$	---	--
C	Very dense soil and soft rock	$360 < V_s \leq 760$	$S_u \geq 98$	$N > 50$
D	Dense/ Stiff soil	$180 < V_s \leq 360$	$49 \leq S_u \leq 98$	$15 \leq N \leq 50$
E	Loose/ Soft soil	$V_s < 180$	$S_u < 49$	$N < 15$
	Soft soil with $PI^* > 10$ and Natural Moisture Content $\geq 40\%$	---	$S_p < 24$	--
F	Soil vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading (i.e. liquefiable soil, quick and highly sensitive soil, collapsible weakly cemented soil) Peat or highly organic clays ($H > 3m$, where H = thickness of soil) Very high plasticity clays ($H > 7.5m$ with plasticity index > 75) Very thick medium or soft stiff clays ($H > 35m$)	---	--	--

วิธีการเฉลี่ยค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และค่าการดักทอลงมาตรฐาน (ค่า N) ตามมาตรฐานดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการ

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (2.5)$$

$$\bar{S}_u = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{ui}}} \quad (2.6)$$

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \quad (2.7)$$

- โดยที่ $\bar{V}_s$ คือค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก
 $\bar{S}_{ui}$ คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก
 $\bar{N}$ คือจำนวนครั้งในการตอกทดลองมาตรฐานเฉลี่ยสำหรับ 30 เมตรแรก
 n คือจำนวนชั้นดินใน 30 เมตรแรก
 d_i คือความหนาของชั้นดินชั้นที่ i
 V_{si} คือความเร็วคลื่นเฉือนของดินชั้นที่ i
 S_{ui} คือค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินชั้นที่ i
 N_i คือจำนวนครั้งในการตอกทดลองมาตรฐานในชั้นที่ i
 และได้ผลดังตารางที่ 2.18 ถึง 2.23

ตารางที่ 2.18 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยทุกๆ 5 เมตร (V_{si})

ความลึก (m)	ความเร็วคลื่นเฉือน V_{si} (m/s)					
	จุฬาฯ	กรมอุตุฯ บางนา	A.I.T.	เชียงใหม่ ราชภัฏ	ม. เชียงใหม่	วัดเจดีย์ หลวง
0-5	93	86	100	150	355	406
5-10	106	79	115	206	347	259
10-15	164	143	190	261	384	280
15-20	218	211	301		377	488
20-25	249	270	287			
25-30	265	253	240			

ตารางที่ 2.19 ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยทุกๆ 5 เมตร (S_{ui})

ความลึก (m)	ค่ากำลังเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ, S_{ui} (t/m ²)		
	จุฬาฯ	กรมอุตุฯ บางนา	A.I.T.
0-5	1.75	2.77	2.77
5-10	2.40	1.91	2.23
10-15	4.84	3.87	

ตารางที่ 2.20 จำนวนครั้งในการตอกทดสอบมาตรฐานทุกๆ 5 เมตร (N_i)

ความลึก (m)	จำนวนครั้งในการตอกทดสอบมาตรฐาน, N_i (blow/ft)					
	จุฬาฯ	กรมอุตุฯ บางนา	A.I.T.	เชียงใหม่	ม. เชียงใหม่	วัดเจดีย์ หลวง
0-5				10	19	21
5-10				16	15	25
10-15	13		17	40	16	39
15-20	18	19	39		29	62
20-25	31	49	49			
25-30	43	30	19			

ตารางที่ 2.21 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก ($\bar{V}_s$)

ความลึก (m)	$\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}$					
	จุฬาฯ	กรมอุตุฯ บางนา	A.I.T.	เชียงใหม่	ม. เชียงใหม่	วัดเจดีย์ หลวง
0-5	0.043	0.046	0.040	0.027	0.011	0.010
5-10	0.047	0.063	0.043	0.024	0.014	0.019
10-15	0.030	0.035	0.026	0.008	0.013	0.018
15-20	0.023	0.024	0.017		0.013	0.008
20-25	0.020	0.019	0.017		0.002	
25-30	0.015	0.020	0.017			
$\sum_{i=1}^n d_i$	28	29	28	11	20	18
$\bar{V}_s$	157	141	174	188	368	326
Class	E	E	E	D	C	D

ตารางที่ 2.22 ค่ากำลังเงื่อนไขแบบไม่ระบายน้ำเฉลี่ยสำหรับชั้นดิน 30 เมตรแรก ($\bar{S}_u$)

ความลึก (m)	$\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{S_{ui}}$		
	จุฬาฯ	กรมอุตุฯ บางนา	A.I.T.
0-5	1.714	1.443	1.445
5-10	2.081	2.612	2.241
10-15	0.206	1.292	
$\sum_{i=1}^n d_i$	9	14	9
$\bar{S}_u$	2.25	2.62	2.44
Class	E	E	E

ตารางที่ 2.23 จำนวนครั้งในการตอกทดลองมาตรฐานเฉลี่ย 30 เมตรแรก ($\bar{N}$)

ความลึก (m)	$\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}$					
	จุฬาฯ	กรมอุตุฯ บางนา	A.I.T.	เชียงใหม่ ราชภัฏ	ม. เชียงใหม่	วัดเจดีย์ หลวง
0-5				0.417	0.211	0.190
5-10				0.310	0.330	0.200
10-15	0.149		0.178	0.099	0.305	0.128
15-20	0.272	0.211	0.128		0.173	0.081
20-25	0.163	0.102	0.103			
25-30	0.117	0.167	0.262			
$\sum_{i=1}^n d_i$	17	14	18	13	19	19
$\bar{N}$	24	29	27	16	19	32
Class	D	D	D	D	C	D

จากตารางที่ 2.21 ถึง 2.23 สามารถสรุปชนิดของดินในแต่ละสถานีได้ดังตารางที่ 2.24

ตารางที่ 2.24 สรุปประเภทของดินแต่ละสถานี

สถานี	ประเภทของดิน		
	ตาม $\bar{V}_s$	ตาม $\bar{S}_u$	ตาม $\bar{N}$
จุฬาฯ	E	E	D
กรมอุตุฯ บางนา	E	E	D
A.I.T.	E	E	D
เชียงราย	D	-	D
ม.เชียงใหม่	C	-	D
วัดเจดีย์หลวง	D	-	D

2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นเฉือน ค่าการตอกทดสอบมาตรฐาน และ S_u

ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) จากผลการทดสอบดาวน์โฮลในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล สามารถนำมาหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) และค่าการตอกทดสอบมาตรฐาน (N) ดังรูปที่ 2.26 และ 2.27 ตามลำดับ และแสดงได้ดังสมการ

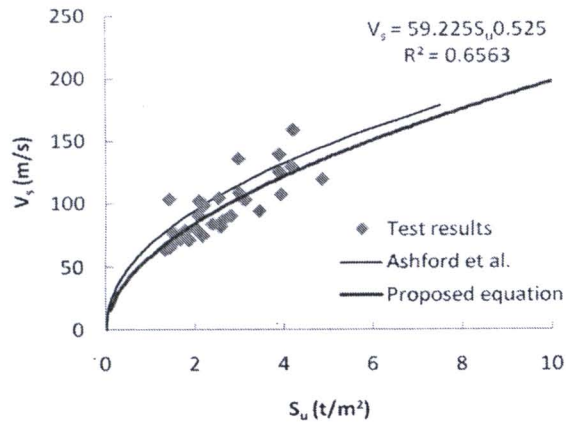
$$V_s = 59.225 S_u^{0.525} \tag{2.8}$$

$$V_s = 53.216 N^{0.481} \tag{2.9}$$

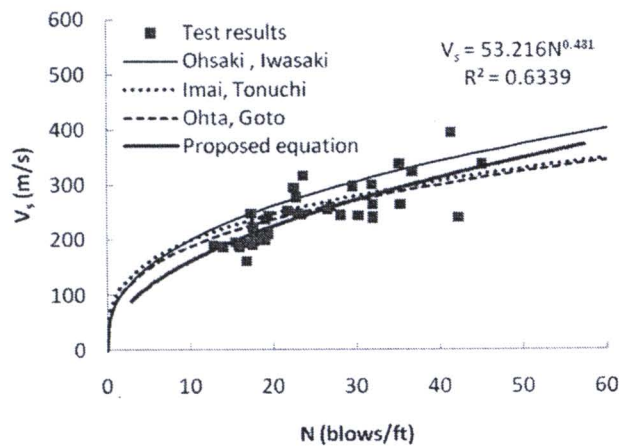
โดยที่ V_s คือความเร็วคลื่นเฉือนในหน่วย m/s

S_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำในหน่วย t/m^2

N คือจำนวนครั้งในการตอกทดสอบมาตรฐานให้จมลงไปในดิน 1 ฟุต



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s กับ S_u ของดินเหนียวบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล

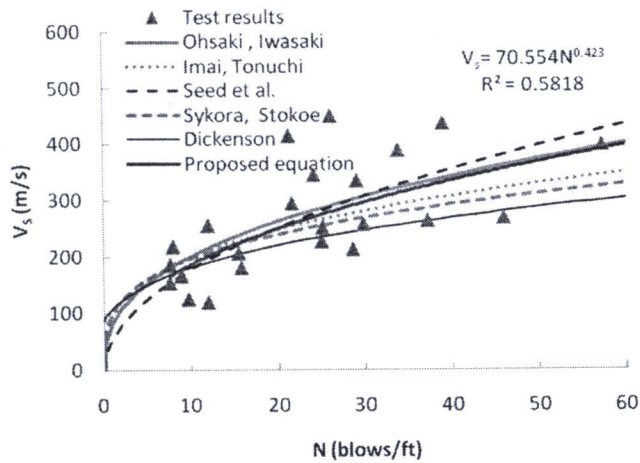


รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s กับ N ของดินเหนียวบริเวณกรุงเทพฯ และปริมณฑล

จากรูปที่ 2.26 พบว่า ความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการทดสอบดาวน์โฮล มีค่าน้อยกว่าความเร็วคลื่นเฉือนจากสมการของ Ashford และคณะ (2000) ประมาณ 10 % และจากรูปที่ 2.27 พบว่า ความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบดาวน์โฮลในช่วงค่า N ไม่เกิน 30 ครั้งต่อฟุต มีค่าน้อยกว่าความเร็วคลื่นเฉือนจากสมการของ Ohsaki และ Iwasaki (1973) Imai และ Tonouchi (1982) และ Ohta และ Goto (1978) ประมาณ 25 % และความเร็วคลื่นเฉือนจากการทดสอบดาวน์โฮลในช่วงค่า N มากกว่า 30 ครั้งต่อฟุต มีค่าน้อยกว่าความเร็วคลื่นเฉือนจากสมการของ Ohsaki และ Iwasaki (1973) ประมาณ 10 % แต่มากกว่าความเร็วคลื่นเฉือนจากสมการของ Imai และ Tonouchi (1982) และสมการของ Ohta และ Goto (1978) ประมาณ 5%

ค่าความเร็วคลื่นเฉือน (V_s) จากผลการทดสอบดาวน์โฮลใน บริเวณภาคเหนือ สามารถนำมาหาความสัมพันธ์กับค่าการตอกทดสอบมาตรฐาน (N) ดังรูปที่ 2.28 และแสดงได้ดังสมการ

$$V_s = 70.554 N^{0.423} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s กับ N ของดินทรายบริเวณภาคเหนือ

ส่วนความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือนกับค่า N ของดินทรายบริเวณภาคเหนือดังรูปที่ 2.28 มีค่าต่ำกว่าความเร็วคลื่นเฉือนจากสมการของ Sykora และ Stokoe (1983) Dickenson (1994) Ohsaki และ Iwasaki (1973) และ Imai และ Tonouchi (1982) ประมาณ 13 % ในช่วงค่า N ต่ำกว่า 14 ครั้ง/ฟุต แต่มากกว่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากสมการของ Sykora และ Stokoe (1983) Dickenson (1994) และ Imai และ Tonouchi (1982) ประมาณ 6 % ในช่วงค่า N เกินกว่า 14 ครั้ง/ฟุต

