บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการศึกษาของงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองกับแท่งตัวอย่างทั้งสิ้น 8 ตัวอย่าง โดยใช้กระบวนการเตรียมตัวอย่าง และ วิธีการทดสอบเหมือนกัน ยกเว้นความถี่ที่ใช้ในการทดลองเท่านั้นที่แตกต่างกัน เนื่องจากรายละเอียดของการทดลองมีมาก จึงได้นำวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองเพียงแค่หนึ่งตัวอย่างมาแสดงเท่านั้น สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่างอื่น ๆ ได้ทำการสรุปรวมกันไว้ท้ายบท

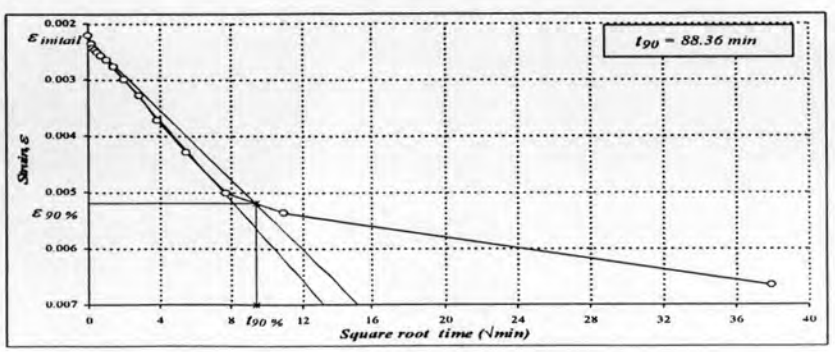
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

ตัวอย่างดินทุกตัวอย่างที่นำมาทำการทดลองได้ผ่านการทดสอบหาคุณสมบัติทากายภาพและทางวิศวกรรมเบื้องต้น ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ ลักษณะของเนื้อดินเหนียวละเอียดไม่มีส่วนผสมจำพวกเปลือกหอย และมีคุณสมบัติต่างดังนี้

ปริมาณความชื้นของตัวอย่างดินตามธรรมชาติ	W =	87.10	%
หน่วยน้ำหนัก	γ =	1.497	(t/m^2)
ขีดเหลว	LL =	116.5	%
ขีดพลาสติก	PL =	42.64	%

4.2 การอัดคายน้ำของตัวอย่างก่อนการทดลอง

ผลที่ได้จากการทดลอง การอัดตัวคายน้ำก่อนการทดลองหาความเร็วคลื่น นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระว่าง strain กับ square root time ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระว่าง strain กับ square root time

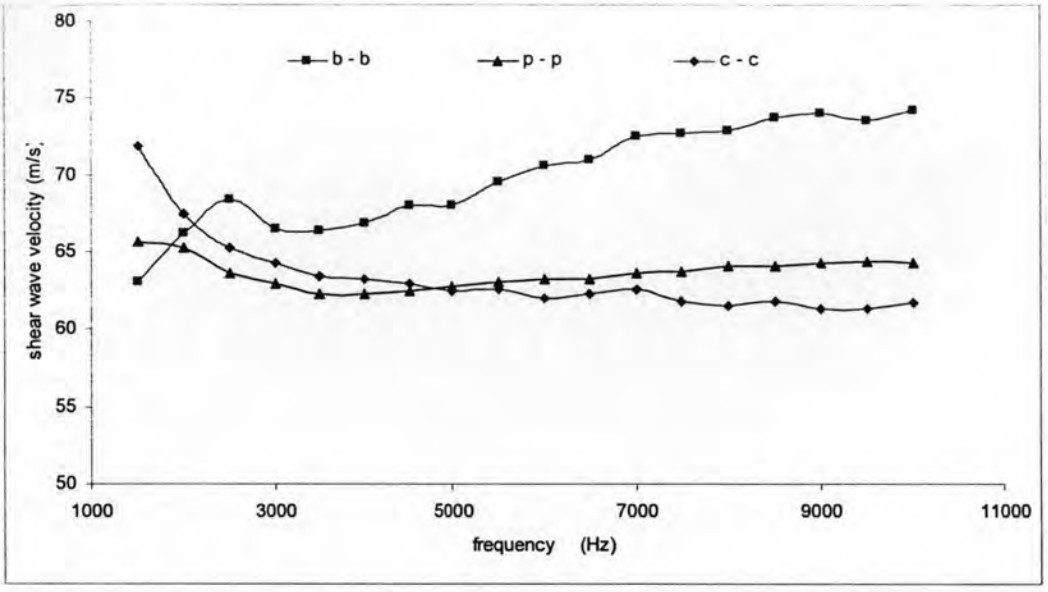
4.3 ผลการส่งคลื่นเฉือนผ่านตัวอย่างการทดลองโดยใช้คลื่นรูปแบบต่าง ๆ

4.3.1 คลื่นดลรูปไซน์

จากการทดลองโดยการส่งคลื่นดลรูปไซน์ ผ่านตัวอย่างดินภายหลังจากการบีบอัดตัวคายน้ำที่แรงดันประสิทธิผลเท่ากับ 56.2 kPa โดยใช้ความถี่ตั้งแต่ 1,500 – 10,000 Hz จากการใช้ตำแหน่งในการวัดหาเวลาการเดินทางของคลื่นที่แตกต่างกัน คือ ตำแหน่งจากจุดเริ่มต้นของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับ (beginning to beginning), ตำแหน่งจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์ลูกแรกของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับ (peak to peak) และ ตำแหน่งสิ้นสุดของคลื่นไซน์ลูกแรกบนคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับ (crossing to crossing) ได้ค่าความเร็วคลื่น ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ของคลื่นดลรูปไซน์

Frequency Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	shear wave velocity (m/s)		
			beginning to beginning	peak to peak	crossing to crossing
1500	10	32.63	63.137	65.676	71.839
2000	10	32.63	66.208	65.325	67.485
2500	10	32.63	68.427	63.629	65.325
3000	10	32.63	66.568	62.974	64.297
3500	10	32.63	66.477	62.333	63.464
4000	10	32.63	66.932	62.333	63.300
4500	10	32.63	68.047	62.492	62.974
5000	10	32.63	68.047	62.813	62.492
5500	10	32.63	69.594	63.137	62.652
6000	10	32.63	70.597	63.300	62.018
6500	10	32.63	71.006	63.300	62.333
7000	10	32.63	72.541	63.629	62.652
7500	10	32.63	72.691	63.794	61.861
8000	10	32.63	72.908	64.128	61.550
8500	10	32.63	73.786	64.128	61.861
9000	10	32.63	74.100	64.297	61.396
9500	10	32.63	73.565	64.466	61.396
10000	10	32.63	74.233	64.297	61.705



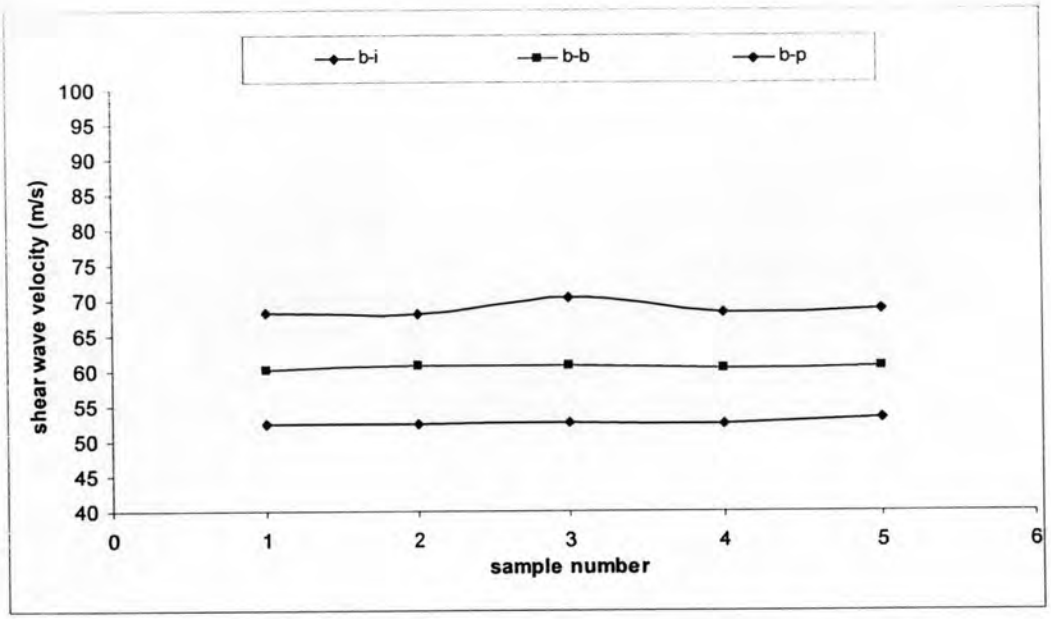
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ค่าความถี่ต่าง ๆ ของคลื่นดลรูปไซน์

4.3.2 คลื่นรูปขั้นบันได

จากการทดลองส่งคลื่นรูปขั้นบันได ผ่านตัวอย่างดินภายหลังจากการบีบอัดตัวคายน้ำที่แรงดันประสิทธิผลเท่ากับ 56.2 kPa จำนวน 5 ครั้ง จากการใช้ตำแหน่งบนคลื่นตัวรับที่แตกต่างกันในการวัดหาเวลาการเดินทางของคลื่น คือ ตำแหน่ง I, b และ p ดังที่ได้อธิบายไว้ในรูปที่ 3.6 พบว่าความเร็วคลื่นเฉือนที่วัดได้มีค่าแตกต่างกัน ดังแสดง ตามตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนของคลื่นรูปขั้นบันได

sample number	Voltage volt	Distance between T&R mm	shear wave velocity (m/s)		
			beginning to initial	beginning to peak	beginning to crossing
1	10	32.6	68.427	60.145	52.569
2	10	32.6	68.047	60.765	52.569
3	10	32.6	70.394	60.739	52.795
4	10	32.6	68.427	60.358	52.569
5	10	32.6	68.812	60.652	53.254



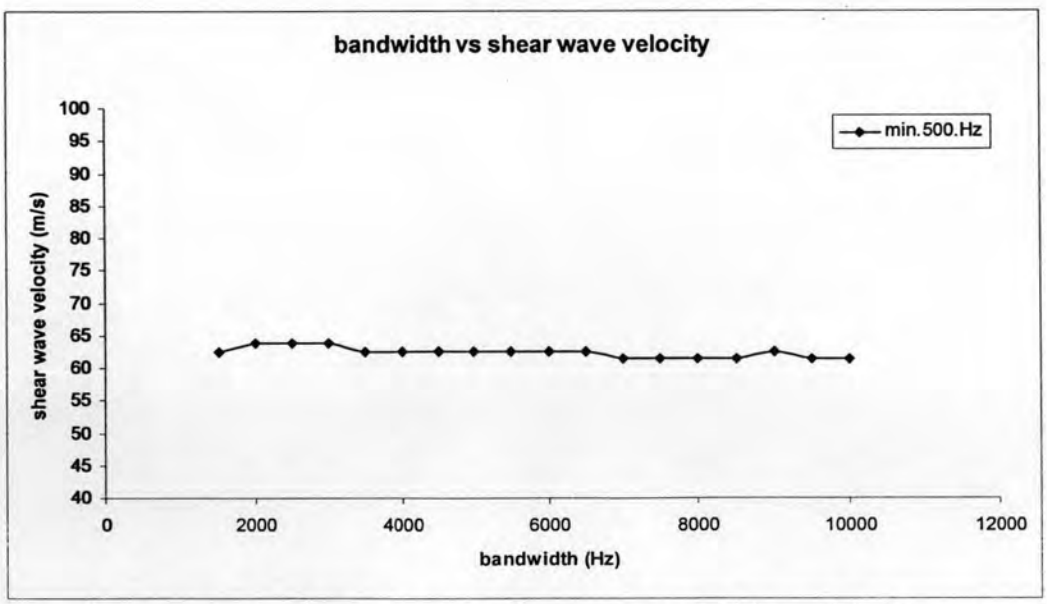
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนของคลื่นรูปขั้นบันได

4.3.3 ขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่

จากการทดลองโดยการส่งขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ ผ่านตัวอย่างดินภายหลังจากการบีบอัดตัวคายน้ำที่แรงดันประสิทธิผลเท่ากับ 56.2 kPa โดยใช้ความกว้างแถบความถี่ ๆ ตั้งแต่ 15,00 – 10,000 Hz และใช้ความถี่เริ่มต้นที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 500 – 4,500 Hz สัญญาณคลื่นที่ได้จากการส่งคลื่นชนิดนี้ ต้องใช้เทคนิค correlation ในการหาตำแหน่งของเวลาบนสัญญาณคลื่นของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับ จากการใช้เทคนิค correlation ในการหาตำแหน่งเวลาทำให้ได้รูปของสัญญาณใหม่หลังจากผ่านกระบวนการ correlation ตามที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก ซึ่งจะได้ตำแหน่งของเวลาที่ชัดเจนและแน่นอนมาก ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จะมีค่าแตกต่างกันตามความกว้างแถบความถี่ ที่ได้ใช้ในการทดลอง ซึ่งค่าความเร็วคลื่นเฉือน จะมีค่าสูงในช่วงที่มีความกว้างแถบความถี่ต่ำ ๆ และจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามความกว้างแถบความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเฉือนก็น้อยมาก ดังแสดงในตาราง และรูปดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 500 Hz

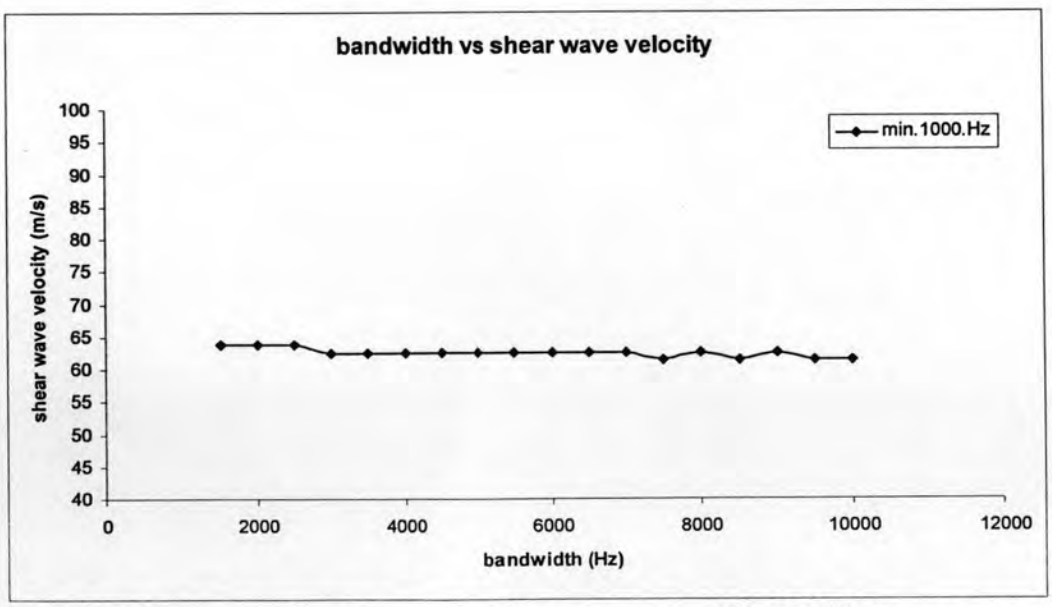
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	186	235	522	62.492
2000	10	32.6	186	234	511	63.794
2500	10	32.6	186	234	511	63.794
3000	10	32.6	186	234	511	63.794
3500	10	32.6	186	235	522	62.492
4000	10	32.6	186	235	522	62.492
4500	10	32.6	185	234	522	62.492
5000	10	32.6	185	234	522	62.492
5500	10	32.6	186	235	522	62.492
6000	10	32.6	186	235	522	62.492
6500	10	32.6	186	235	522	62.492
7000	10	32.6	186	236	533	61.242
7500	10	32.6	186	236	533	61.242
8000	10	32.6	186	236	533	61.242
8500	10	32.6	186	236	533	61.242
9000	10	32.6	186	235	522	62.492
9500	10	32.6	186	236	533	61.242
10000	10	32.6	185	235	533	61.242



รูปที่ 4.4 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 500 Hz

ตารางที่ 4.4 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 1000 Hz

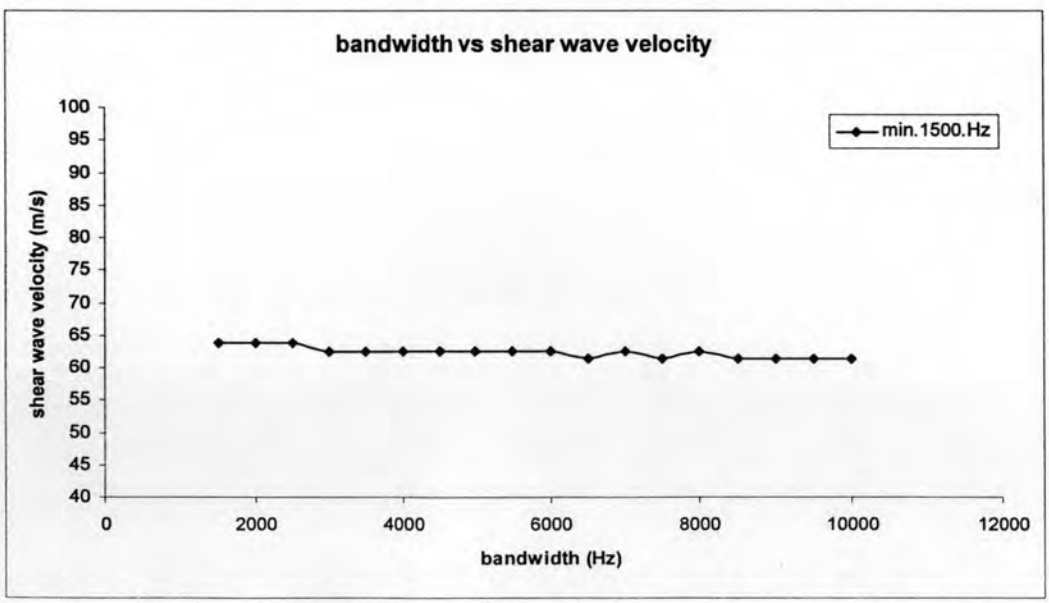
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	235	511	63.794
2000	10	32.6	186	234	511	63.794
2500	10	32.6	186	234	511	63.794
3000	10	32.6	186	235	522	62.492
3500	10	32.6	186	235	522	62.492
4000	10	32.6	186	235	522	62.492
4500	10	32.6	186	235	522	62.492
5000	10	32.6	187	236	522	62.492
5500	10	32.6	187	236	522	62.492
6000	10	32.6	186	235	522	62.492
6500	10	32.6	187	236	522	62.492
7000	10	32.6	187	236	522	62.492
7500	10	32.6	186	236	533	61.242
8000	10	32.6	187	236	522	62.492
8500	10	32.6	186	236	533	61.242
9000	10	32.6	187	236	522	62.492
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	186	236	533	61.242



รูปที่ 4.5 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 1000 Hz

ตารางที่ 4.5 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 1500 Hz

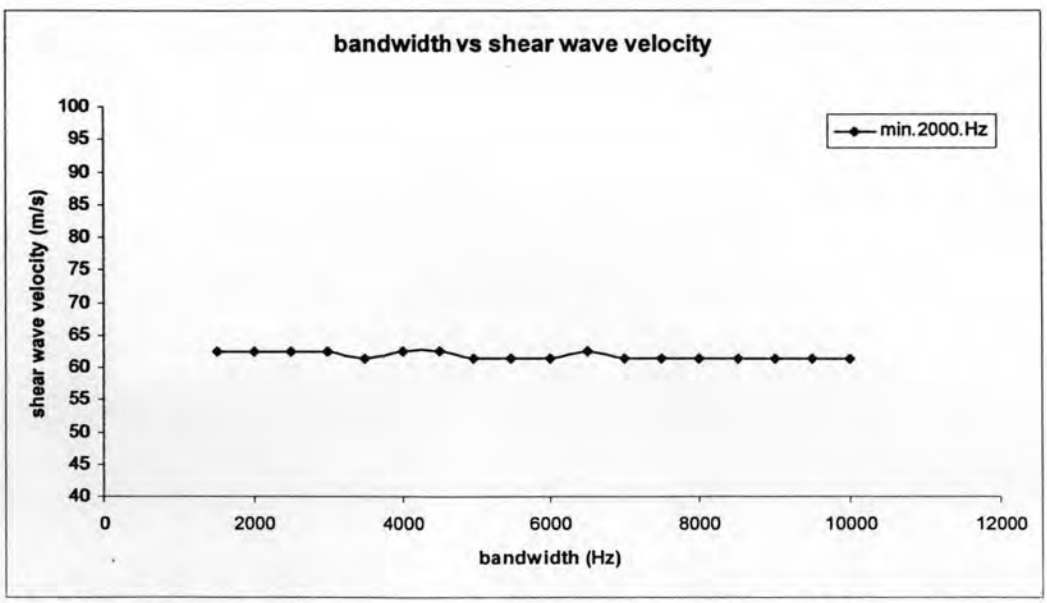
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	235	511	63.794
2000	10	32.6	187	235	511	63.794
2500	10	32.6	187	235	511	63.794
3000	10	32.6	187	236	522	62.492
3500	10	32.6	187	236	522	62.492
4000	10	32.6	187	236	522	62.492
4500	10	32.6	187	236	522	62.492
5000	10	32.6	186	235	522	62.492
5500	10	32.6	187	236	522	62.492
6000	10	32.6	187	236	522	62.492
6500	10	32.6	186	236	533	61.242
7000	10	32.6	187	236	522	62.492
7500	10	32.6	186	236	533	61.242
8000	10	32.6	187	236	522	62.492
8500	10	32.6	186	236	533	61.242
9000	10	32.6	186	236	533	61.242
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	187	237	533	61.242



รูปที่ 4.6 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 1500 Hz

ตารางที่ 4.6 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 2000 Hz

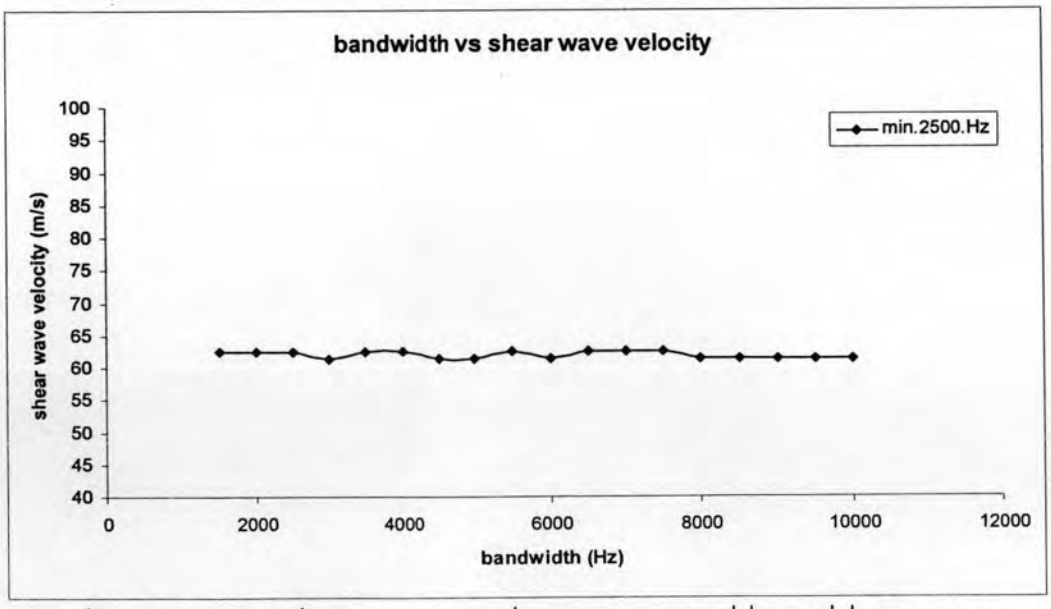
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
2000	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
2500	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
3000	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
3500	10.000	32.630	186.000	236.000	532.800	61.242
4000	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
4500	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
5000	10.000	32.630	186.000	236.000	532.800	61.242
5500	10.000	32.630	186.000	236.000	532.800	61.242
6000	10.000	32.630	187.000	237.000	532.800	61.242
6500	10.000	32.630	187.000	236.000	522.144	62.492
7000	10.000	32.630	186.000	236.000	532.800	61.242
7500	10.000	32.630	186.000	236.000	532.800	61.242
8000	10.000	32.630	187.000	237.000	532.800	61.242
8500	10.000	32.630	187.000	237.000	532.800	61.242
9000	10.000	32.630	186.000	236.000	532.800	61.242
9500	10.000	32.630	187.000	237.000	532.800	61.242
10000	10.000	32.630	187.000	237.000	532.800	61.242



รูปที่ 4.7 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 2000 Hz

ตารางที่ 4.7 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 2500 Hz

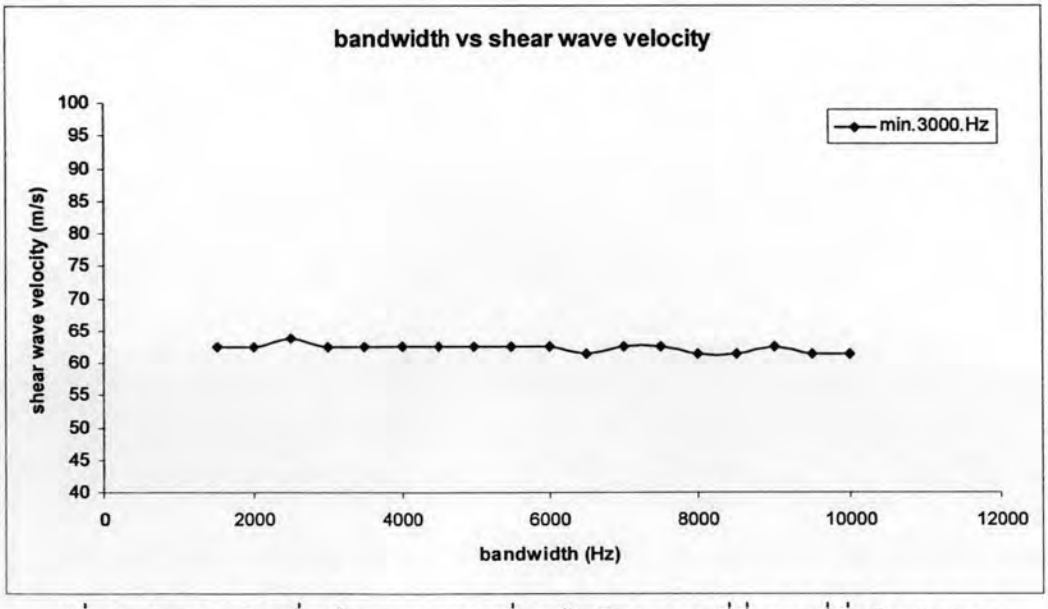
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	236	522	62.492
2000	10	32.6	187	236	522	62.492
2500	10	32.6	187	236	522	62.492
3000	10	32.6	186	236	533	61.242
3500	10	32.6	187	236	522	62.492
4000	10	32.6	187	236	522	62.492
4500	10	32.6	186	236	533	61.242
5000	10	32.6	186	236	533	61.242
5500	10	32.6	187	236	522	62.492
6000	10	32.6	187	237	533	61.242
6500	10	32.6	187	236	522	62.492
7000	10	32.6	187	236	522	62.492
7500	10	32.6	187	236	522	62.492
8000	10	32.6	187	237	533	61.242
8500	10	32.6	186	236	533	61.242
9000	10	32.6	187	237	533	61.242
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	186	236	533	61.242



รูปที่ 4.8 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 2500 Hz

ตารางที่ 4.8 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 3000 Hz

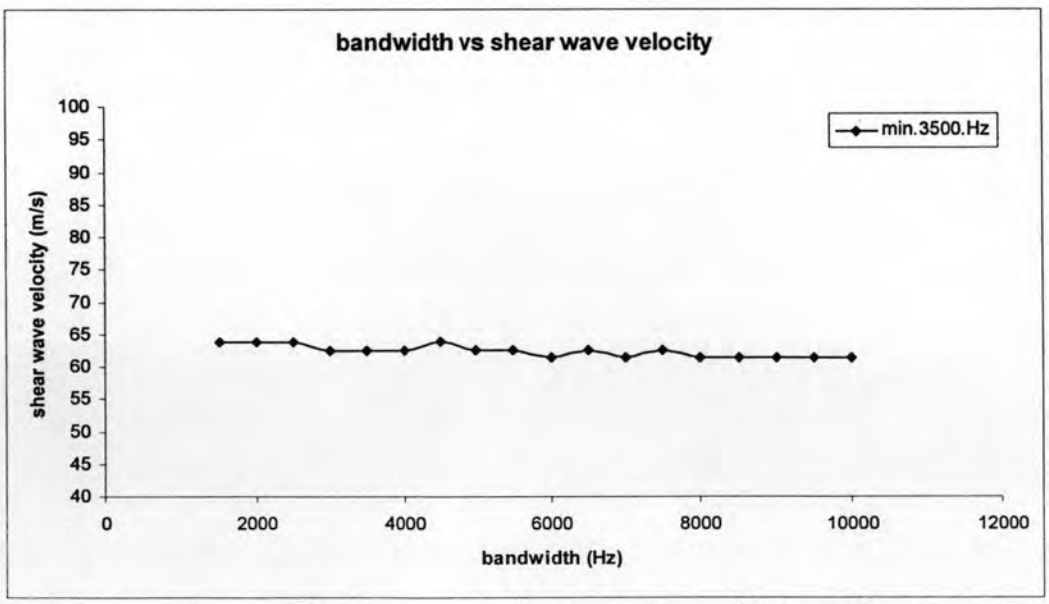
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	236	522	62.492
2000	10	32.6	187	236	522	62.492
2500	10	32.6	187	235	511	63.794
3000	10	32.6	187	236	522	62.492
3500	10	32.6	187	236	522	62.492
4000	10	32.6	187	236	522	62.492
4500	10	32.6	186	235	522	62.492
5000	10	32.6	187	236	522	62.492
5500	10	32.6	187	236	522	62.492
6000	10	32.6	187	236	522	62.492
6500	10	32.6	186	236	533	61.242
7000	10	32.6	187	236	522	62.492
7500	10	32.6	187	236	522	62.492
8000	10	32.6	187	237	533	61.242
8500	10	32.6	186	236	533	61.242
9000	10	32.6	187	236	522	62.492
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	186	236	533	61.242



รูปที่ 4.9 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 3000 Hz

ตารางที่ 4.9 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 3500 Hz

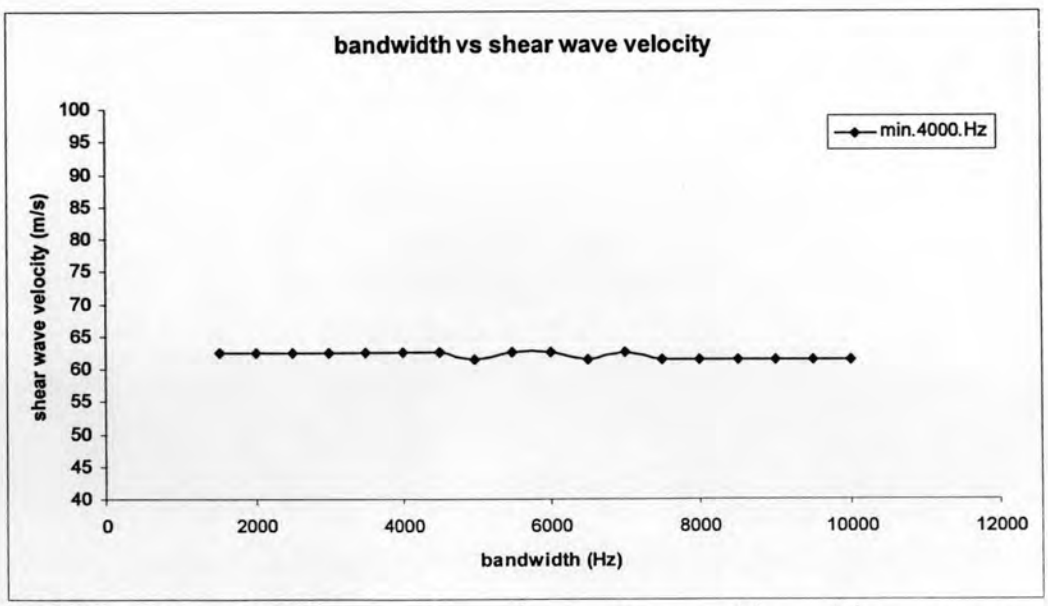
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	235	511	63.794
2000	10	32.6	187	235	511	63.794
2500	10	32.6	187	235	511	63.794
3000	10	32.6	187	236	522	62.492
3500	10	32.6	187	236	522	62.492
4000	10	32.6	187	236	522	62.492
4500	10	32.6	187	235	511	63.794
5000	10	32.6	187	236	522	62.492
5500	10	32.6	187	236	522	62.492
6000	10	32.6	187	237	533	61.242
6500	10	32.6	187	236	522	62.492
7000	10	32.6	187	237	533	61.242
7500	10	32.6	186	235	522	62.492
8000	10	32.6	187	237	533	61.242
8500	10	32.6	187	237	533	61.242
9000	10	32.6	187	237	533	61.242
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	187	237	533	61.242



รูปที่ 4.10 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 3500 Hz

ตารางที่4.10 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 4000 Hz

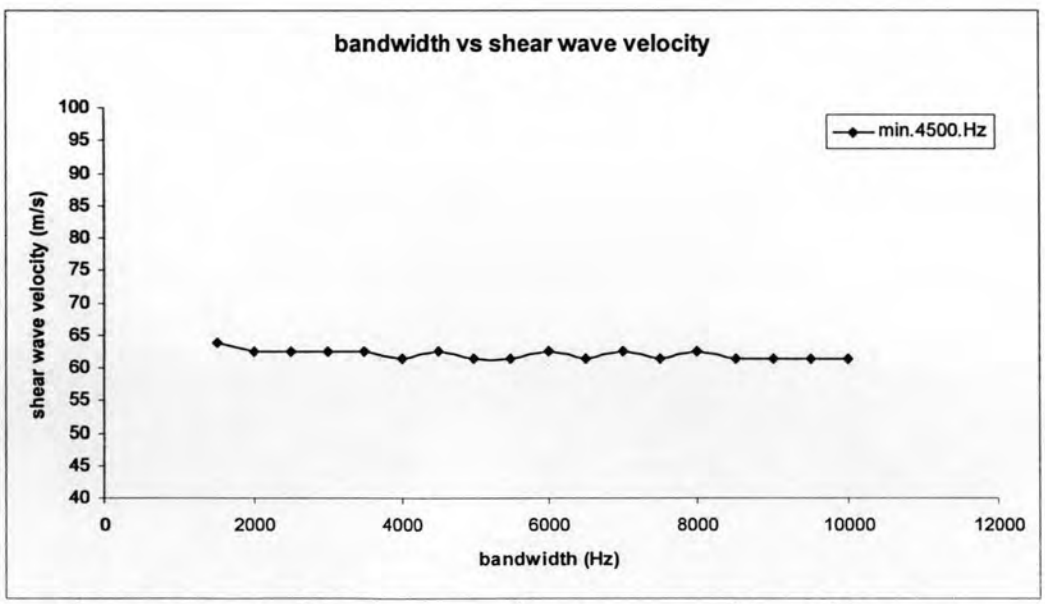
bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	236	522	62.492
2000	10	32.6	186	235	522	62.492
2500	10	32.6	186	235	522	62.492
3000	10	32.6	187	236	522	62.492
3500	10	32.6	186	235	522	62.492
4000	10	32.6	187	236	522	62.492
4500	10	32.6	187	236	522	62.492
5000	10	32.6	186	236	533	61.242
5500	10	32.6	187	236	522	62.492
6000	10	32.6	187	236	522	62.492
6500	10	32.6	187	237	533	61.242
7000	10	32.6	187	236	522	62.492
7500	10	32.6	186	236	533	61.242
8000	10	32.6	187	237	533	61.242
8500	10	32.6	186	236	533	61.242
9000	10	32.6	187	237	533	61.242
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	186	236	533	61.242



รูปที่ 4.11 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 4000 Hz

ตารางที่ 4.11 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 4500 Hz

bandwidth Hz	Voltage volt	Distance between T&R mm	Departure time x10.6^{-6} (s)	Arrival time x10.6^{-6} (s)	Traveling time x10^{-3} (ms)	Shear wave velocity (m/s)
1500	10	32.6	187	235	511	63.794
2000	10	32.6	187	236	522	62.492
2500	10	32.6	187	236	522	62.492
3000	10	32.6	187	236	522	62.492
3500	10	32.6	187	236	522	62.492
4000	10	32.6	186	236	533	61.242
4500	10	32.6	187	236	522	62.492
5000	10	32.6	187	237	533	61.242
5500	10	32.6	187	237	533	61.242
6000	10	32.6	187	236	522	62.492
6500	10	32.6	187	237	533	61.242
7000	10	32.6	187	236	522	62.492
7500	10	32.6	187	237	533	61.242
8000	10	32.6	187	236	522	62.492
8500	10	32.6	187	237	533	61.242
9000	10	32.6	187	237	533	61.242
9500	10	32.6	187	237	533	61.242
10000	10	32.6	187	237	533	61.242

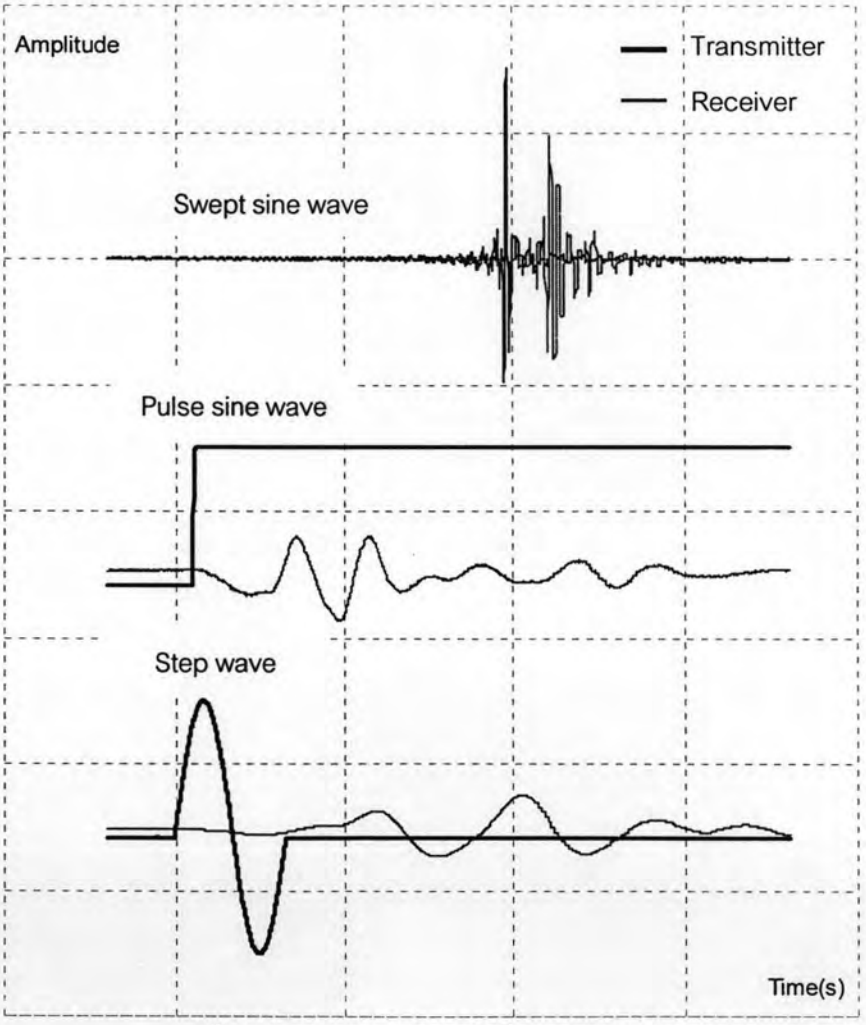


รูปที่ 4.12 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ที่ความถี่เริ่มต้น 4500 Hz

4.4 รูปแบบและลักษณะของสัญญาณคลื่นแบบต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

4.4.1 สัญญาณคลื่นของตัวส่งและตัวรับที่ใช้ในการหาความเร็วคลื่นเฉือน

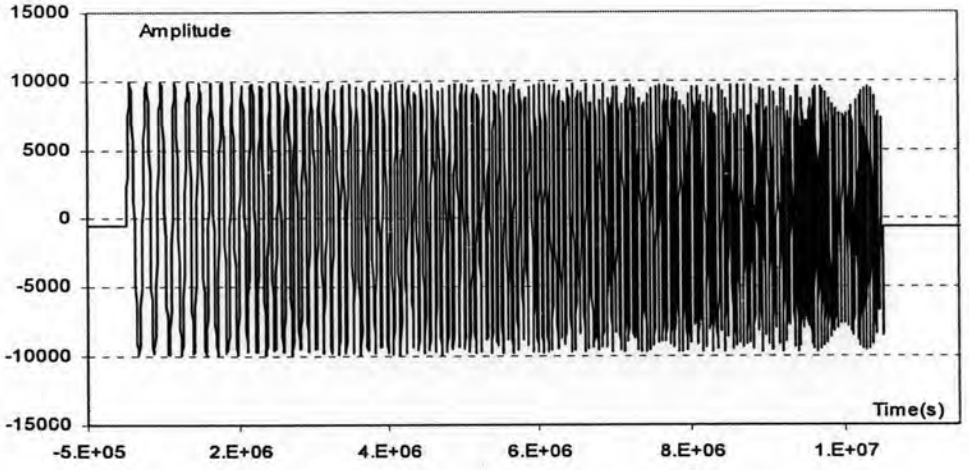
ผลของสัญญาณคลื่นที่ได้จากการทดลองในการส่งคลื่นแบบต่าง ประกอบด้วย ขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ คลื่นดลรูปไซน์และ คลื่นรูปขั้นบันได ดังแสดงตามรูปที่ 4.13 รูปสัญญาณของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรในช่วงความถี่ จะเป็นสัญญาณที่ผ่านกระบวนการ correlation เรียบร้อยแล้ว ซึ่งรูปสัญญาณจากการทดลองทั้งหมดได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก



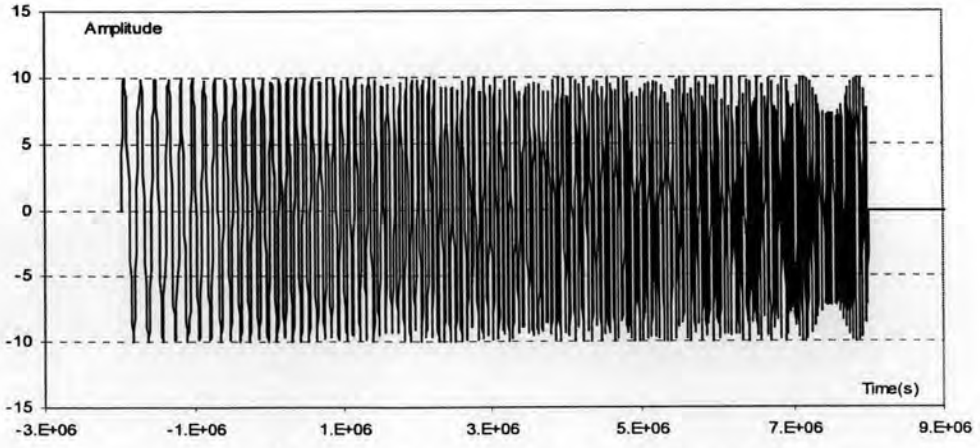
รูปที่ 4.13 แสดงรูปสัญญาณคลื่นของแบบต่าง ๆ

4.4.2 ลักษณะสัญญาณของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่

จากการทดลอง ในช่วงที่ต้องใช้ความถี่เริ่มต้นและความกว้างแถบความถี่ ที่มีค่าสูง ได้ทำการตรวจสอบสัญญาณ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมการตอบสนองของ เบนเดอร์อิลิเมนต์ ว่ามีการตอบสนองได้ตามปกติเหมือนกับการใช้ความถี่เริ่มต้นและความกว้างแถบความถี่ที่มีค่าต่ำ หรือไม่ ผลของสัญญาณ ที่วัดได้แถบจากกลางของเบนเดอร์อิลิเมนต์ที่ไม่มีการเชื่อมต่อกับสัญญาณเข้า และสัญญาณจากเครื่องกำเนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นสัญญาณที่ความถี่เริ่มต้น 4.5 kHz และความกว้างแถบความถี่ 10 kHz จะเห็นว่ามีลักษณะของรูปสัญญาณเหมือนกัน แสดงได้ว่าเบนเดอร์อิลิเมนต์มีพฤติกรรมตามตอบสนอง ได้ตามความถี่เริ่มต้นและความกว้างแถบความถี่ ที่ได้ส่งไป



รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ



รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณจากเบนเดอร์อิลิเมนต์

4.5 ผลการเปรียบเทียบความแตกต่างของสัญญาณคลื่นแต่ละชนิด

4.5.1 ความแตกต่างของค่าความเร็วคลื่นเฉือน

ผลจากการทดลองในการส่งคลื่นทั้งสามแบบ เมื่อเปรียบเทียบ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ ๆ กับค่าที่ได้จากคลื่นดลรูปไซน์ และ คลื่นรูปขั้นบันไดที่ใช้ตำแหน่งในการวัดเวลาแบบต่าง ๆ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากคลื่นทั้งสามแบบ พอสรุปได้ดังนี้

- คลื่นดลรูปไซน์

จากการใช้ ตำแหน่งจากจุดเริ่มต้นของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับดังรูปที่ 4.16 คือเส้น b-b ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าวิธีอื่นมาก ๆ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 63.1- 74.2 m/s

จากการใช้ ตำแหน่งจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์ลูกแรกของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับ ดังรูปที่ 4.16 คือเส้น p-p ได้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนสูงกว่าการใช้คลื่นชนิดอื่นอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะมีค่าความเร็วคลื่นเฉือนสูงในช่วงความถี่ต่ำ ๆ และค่าจะลดลงไปเรื่อย ๆ จนถึงความถี่ 3,500 Hz จากนั้นค่าความเร็วคลื่นเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 65.8- 62.3 m/s

จากการใช้ ตำแหน่งสิ้นสุดของคลื่นไซน์ลูกแรกบนคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับดังรูปที่ 4.16 คือเส้น c-c ได้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนสูงกว่าการใช้คลื่นชนิดอื่นอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะมีค่าความเร็วคลื่นจะมีค่าสูงมากในช่วงความถี่ต่ำ ๆ และจะลดลงอย่างรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ในช่วงความถี่ต่ำ ๆ จนถึงความถี่ 3,500 Hz ความเร็วคลื่นเฉือน จะมีความสม่ำเสมอขึ้น และลดลงเรื่อย ๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น โดยในช่วงความถี่ 0 - 3,500 Hz จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 71.4- 63.8 m/s และ ในช่วงความถี่ 3,500 - 10,000Hz จะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 63.4 - 61.2 m/s

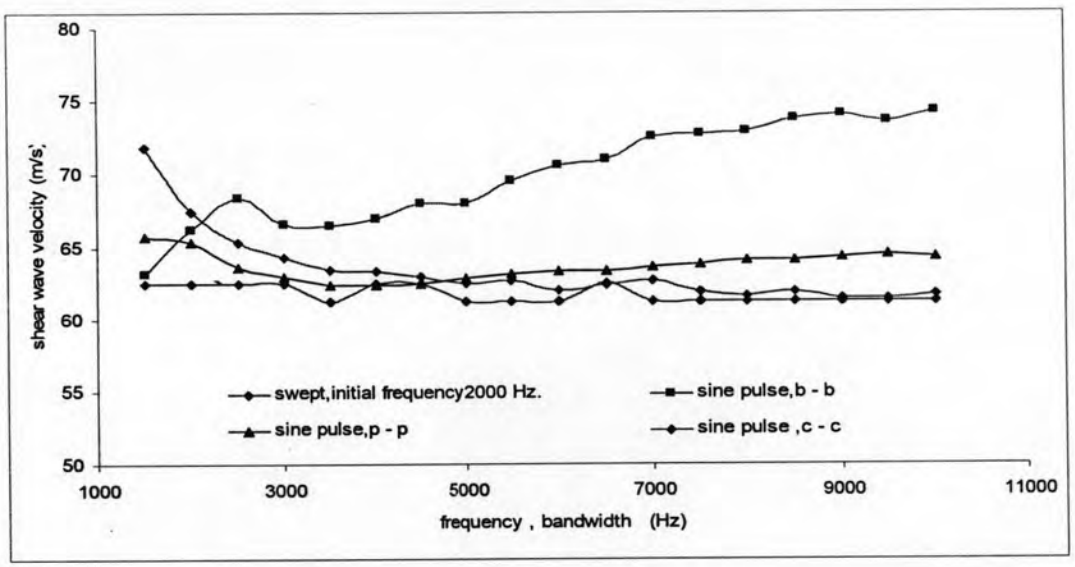
- ขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่

ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจะมีค่าน้อยกว่า การใช้คลื่นดลรูปไซน์เสมอ ซึ่งความเร็วคลื่นเฉือนจะมีค่ามากในช่วงความถี่ต่ำ ๆ เหมือนกัน และ ค่าจะลดลงตามความกว้างแถบความถี่ที่เพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นเฉือนจะน้อยกว่าการใช้คลื่นดลรูปไซน์ และ

ค่าความถี่เริ่มต้นก็ไม่มีผลต่อค่าความเร็วคลื่นโดยจะมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 63.8-61.2 Hz

- **คลื่นรูปขั้นบันได**

จากตาราที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า ค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการใช้ตำแหน่งบนสัญญาณรับที่แตกต่างกัน จะมีความแตกต่างกันดังนี้ คือค่าที่ได้จากตำแหน่ง beginning to initial > beginning to beginning > beginning to peak



รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างค่าความเร็วคลื่นเฉือนแบบต่าง ๆ

4.5.2 ค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่

จากการทดลองโดยใช้ความถี่เริ่มต้นตั้งแต่ 500 – 4,500 Hz และความกว้างแถบความถี่ 1,500-10,000 Hz จากตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ดังนี้

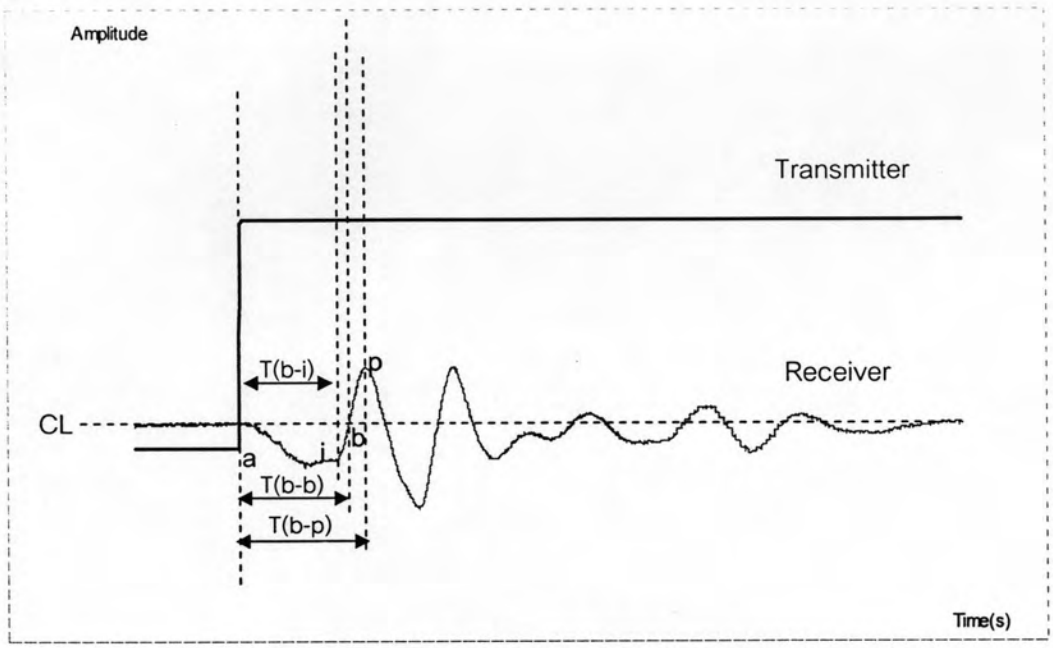
การเปลี่ยนค่าความถี่เริ่มต้น นั้นไม่มีกระทบผลต่อค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่เริ่มต้นทั้ง 9 ครั้ง จะได้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนในลักษณะเดียวกัน คือจะมีค่าประมาณ 63.8-62.5 m/s ในการใช้ความกว้างแถบความถี่ 1,500 Hz และ มีค่าเท่ากับ 61.2 m/s เท่ากัน ในการใช้ความกว้างแถบความถี่ตั้งแต่ 9,000 Hz

เมื่อพิจารณาผลจากการเปลี่ยนความกว้างแถบความถี่ ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามค่าความกว้างแถบความถี่ ที่เพิ่มขึ้น จนความกว้างแถบความถี่ 8,000 – 10,000 Hz ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจะมีความสม่ำเสมอ โดยเฉพาะที่ความกว้างแถบความถี่ 10,000 Hz ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจะมีความค่าเท่ากันทุกครั้ง ของใช้การความถี่เริ่มต้นที่แตกต่างกัน

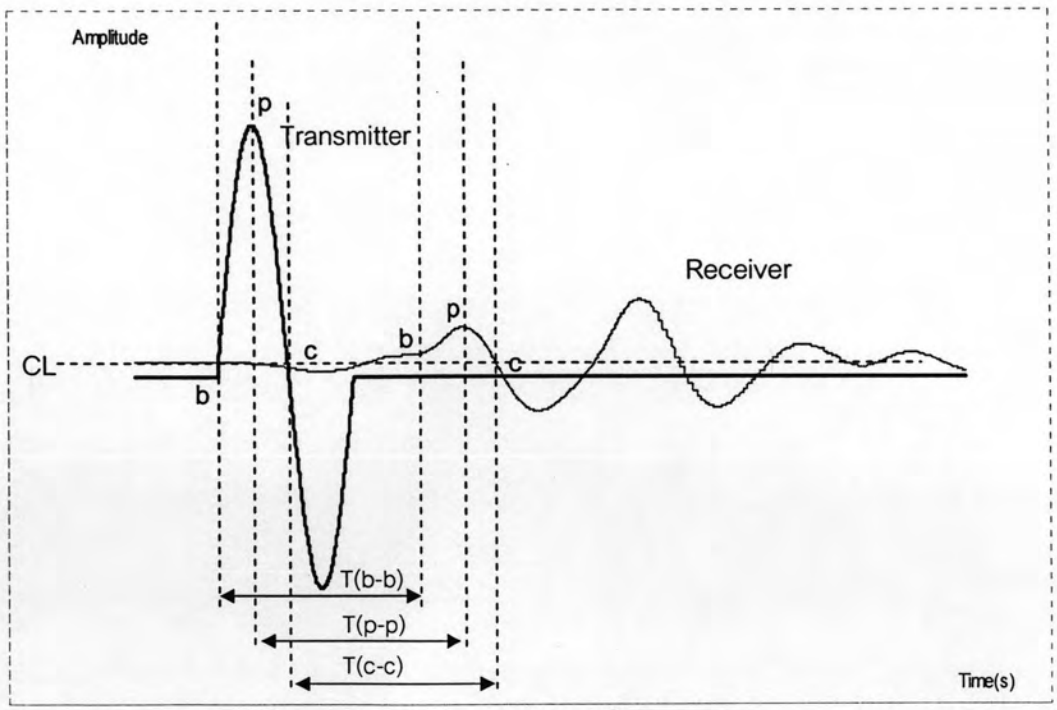
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความเร็วคลื่นเฉือนของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่

bandwidth	shear wave velocity (m/s) minimum frequency (Hz)								
Hz	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500
1500	62.492	63.794	63.794	62.492	62.492	63.794	63.794	62.492	63.794
2000	63.794	63.794	63.794	62.492	62.492	62.492	63.794	62.492	62.492
2500	63.794	63.794	63.794	62.492	62.492	63.794	63.794	62.492	62.492
3000	63.794	62.492	62.492	62.492	61.242	62.492	62.492	62.492	62.492
3500	62.492	62.492	62.492	61.242	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492
4000	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	61.242
4500	62.492	62.492	62.492	62.492	61.242	62.492	63.794	62.492	62.492
5000	62.492	62.492	62.492	61.242	61.242	62.492	62.492	61.242	61.242
5500	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	62.492	61.242
6000	62.492	62.492	62.492	61.242	61.242	62.492	61.242	62.492	62.492
6500	62.492	62.492	61.242	62.492	62.492	61.242	62.492	61.242	61.242
7000	61.242	62.492	62.492	61.242	62.492	62.492	61.242	62.492	62.492
7500	61.242	61.242	61.242	61.242	62.492	62.492	62.492	61.242	61.242
8000	61.242	62.492	62.492	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	62.492
8500	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242
9000	62.492	62.492	61.242	61.242	61.242	62.492	61.242	61.242	61.242
9500	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242
10000	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242	61.242

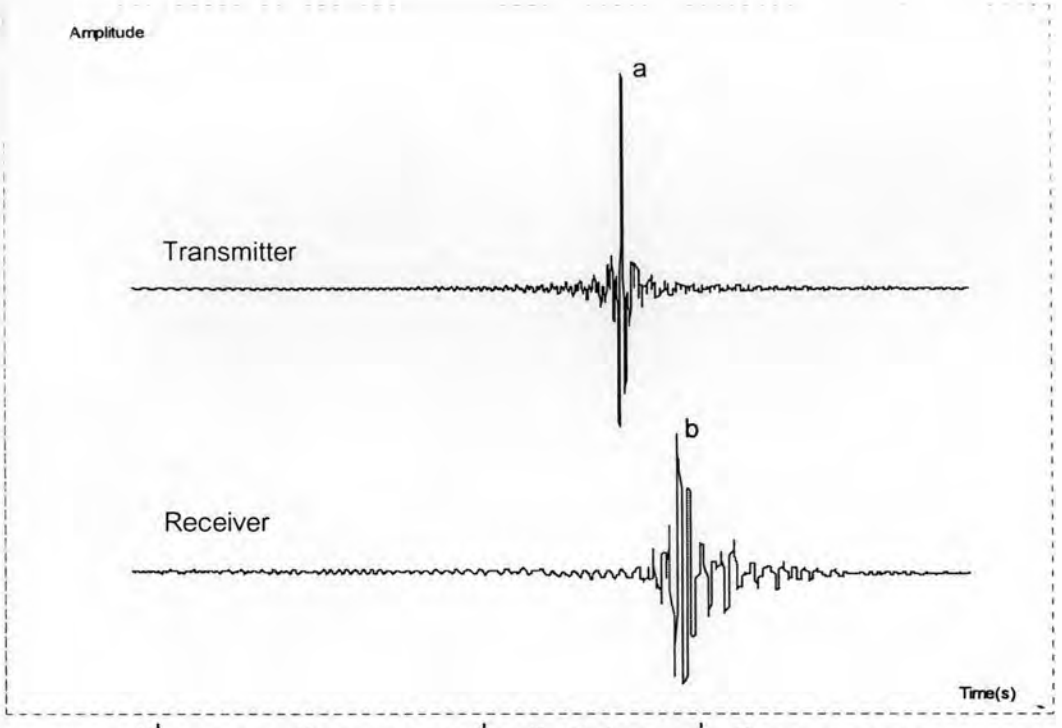
4.5.3 ความแตกต่างของการเลือกตำแหน่งเวลาบนสัญญาณคลื่นแบบต่าง ๆ



รูปที่ 4.17 แสดงสัญญาณคลื่นรูปขั้นบันได



รูปที่ 4.18 แสดงสัญญาณคลื่นดลรูปไซน์



รูปที่ 4.19 แสดงสัญญาณขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ หลังการ correlation

ในงานวิจัยนี้จะหาค่าความเร็วคลื่นเฉือน ซึ่งใช้ค่าความเร็วคลื่นเฉือนจากการใช้ขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ เป็นบรรทัดฐานในการหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนของคลื่นดลรูปไซน์และคลื่นรูปขั้นบันได โดยจะพิจารณาหาเวลาในการเดินทางของคลื่นดลรูปไซน์และคลื่นรูปขั้นบันได ว่าจะต้องใช้ตำแหน่งไดถึงจะมีค่าความเร็วคลื่นเฉือน ใกล้เคียงกับขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่มากที่สุด

จากรูปที่ 4.19 เป็นสัญญาณของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ ที่ผ่านกระบวนการ correlation แล้ว ซึ่งจะใช้ตำแหน่งที่มีค่าความสูงของคลื่นมากที่สุดบนคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับหาเวลาในการเดินทางของคลื่น จากรูปคือตำแหน่ง a และ b ซึ่งตำแหน่ง a และ b คือตำแหน่งที่เป็นศูนย์กลางของขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่หลังจากผ่านกระบวนการ correlation แล้ว โดยตำแหน่งที่มีค่าความสูงของคลื่นสูงสุดในสัญญาณคลื่นตัวส่งจะเห็นได้ชัดเจนตาม รูปคือจุด a ส่วนตำแหน่งเวลาบนสัญญาณคลื่นตัวรับ จะมีค่าความสูงของคลื่นเด่นขึ้นมาหลายค่า แต่ค่าที่ถูกต้องจริงจะมีเพียงค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งตำแหน่งที่มีค่าความสูงคลื่นสูงสุดจะเห็นได้ชัดเจนเช่นกัน ตามรูปคือจุด b จะเห็นได้ว่าการหาตำแหน่งเวลาจากคลื่นรูปแบบนี้ มีความแม่นยำมาก ความผิดเพี้ยนก็เกิดขึ้นยากเพราะตำแหน่งเวลาที่ถูกต้องจริงจะมีเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น

จากรูปที่ 4.17 เป็นสัญญาณคลื่นรูปขั้นบันได ซึ่งจะทำการพิจารณาหาเวลาในการเดินทางของคลื่นเฉือนทั้งหมด 3 ช่วงเวลา โดยตำแหน่งบนคลื่นตัวส่งจะใช้จุดเริ่มต้นของสัญญาณ คือจุด a และตำแหน่งบนคลื่นตัวรับจะพิจารณาที่จุด i , b และ c ได้เวลาของการเดินทางในการพิจารณาแต่ละตำแหน่งเป็น T(b-i) , T(b-b) และ T(b-p) ตามลำดับ ซึ่งเวลาในการเดินทางที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือนใกล้เคียงกับการใช้ขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่มากที่สุด คือ T(b -b) โดยการหาตำแหน่งเวลาของจุด b ต้องทำการสร้างเส้นตามแนวศูนย์กลางตามความยาวของคลื่นก่อนจะเห็นได้ดังรูปคือ เส้น CL ซึ่งตำแหน่งที่เส้นตามแนวศูนย์กลางคลื่นตัดกับคลื่นตัวรับเป็นตำแหน่งแรกบนคลื่นลูกแรก ได้เป็นตำแหน่งเวลาที่จุด b จะเห็นได้ว่าการหาความเร็วคลื่นของคลื่นรูปแบบนี้มีความยุ่งยากและมีความผิดเพี้ยนได้ง่าย และตำแหน่งก็ขึ้นอยู่กับผู้ทดลองว่าจะพิจารณาตำแหน่งอย่างไร

จากรูปที่ 4.18 เป็นสัญญาณคลื่นดลรูปไซน์ ซึ่งจะทำการพิจารณาหาเวลาในการเดินทางของคลื่นเฉือนทั้งหมด 3 ช่วงเวลา คือ เวลาจากตำแหน่งเริ่มต้นของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับคือจุด b และ b ตามลำดับ ได้เวลา T(b-b) , เวลาจากตำแหน่งสูงสุดของคลื่นไซน์ลูกแรกของคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับคือจุด p และ p ตามลำดับได้เวลา T(p-p) และ เวลาจากตำแหน่งสิ้นสุดของคลื่นไซน์ลูกแรกบนคลื่นตัวส่งและคลื่นตัวรับคือจุด c และ c ตามลำดับได้เวลาเป็น T(c-c) ซึ่งเวลาในการเดินทางที่มีค่าความเร็วคลื่นเฉือน ใกล้เคียงกับการใช้ขบวนคลื่นรูปไซน์แปรความถี่ คือเวลา T(c-c) ในช่วงความถี่ 4,500 -10,000 Hz จะเห็นว่าการเลือกตำแหน่งก็ต้องพยามยาหาตำแหน่งที่รูปคลื่นมีค่าสูงสุดทั้งคลื่นตัวส่งและตัวรับโดยการลากเส้นเวลาตามแนวดิ่งขึ้นมา ความผิดเพี้ยนของตำแหน่งเวลาก็มีมากเพราะโอกาสผิดเพี้ยนได้ทั้งสัญญาณตัวรับและตัวส่ง และตำแหน่งของสัญญาณก็ขึ้นอยู่กับดุลพินิจของผู้ทดลอง