

國立臺灣大學工學院工程科學及海洋工程學系

碩士論文

Department of Engineering Science and Ocean Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

以 NHWAVE 模擬 N 型波之溯升

Numerical simulation of N-wave runup using NHWAVE

柯秉辰

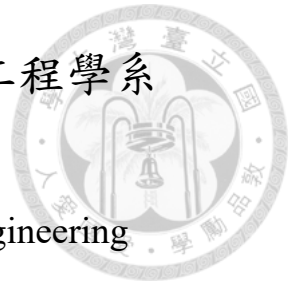
Pin-Chen Ko

指導教授：羅弘岳 博士

Advisor: Hong-Yueh Lo, Ph.D.

中華民國 112 年 7 月

July, 2023



國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

以 NHWAVE 模擬 N 型波之溯升

Numerical simulation of N-wave runup using
NHWAVE

本論文係柯秉辰君（學號 R10525001）在國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系完成之碩士學位論文，於民國 112 年 7 月 12 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department of Engineering Science and Ocean Engineering on July, 12, 2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by Pin-Chen Ko (R10525001) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

畢弘岳

戴聖恆

吳明達

(指導教授 Advisor)

吳偉良

系主任 Director:

丁建隆



謝誌



能在兩年完成碩士學位，最先要感謝的是指導老師羅弘岳教授，在論文研究期間，當遇到問題時，給予適當建議，激發學生的思考與想像力，培養自行解決問題的能力。此外，老師也傳授大量的知識與經驗，讓我在研究中有明確的方向與目標並有充分的相關資料能夠研讀，讓我能將所學，應用在自身的數值模擬研究以及數據處理與分析中，在此致上十二萬分的感謝。

感謝實驗室的大家。碩一期間，感謝澤廷、文育、崧瑋、俊瑞，他們是一群能夠一起玩鬧也能夠一起向前的優質學長們，在生活與研究上，都讓我受益良多，畢業後也時常關心我的近況，給予我建議與鼓勵。感謝同屆的同學們，一起度過碩士兩年的時光，大家都辛苦了！常與濬瑋一起解決程式上遇到的問題，與婉青分享生活瑣事，與玟諭共同解決許多在課程期間中遇到的難題，互相討論彼此的論文研究，使他的水槽實驗與我的數值模擬能夠相輔相成。感謝碩二期間加入的學弟妹們，感謝信瀚、欣怡，在我分析數據、跑模擬時，一起待到半夜再去吃宵夜，感謝芝宇傳授網路購物上的小撇步，感謝子喻讓我體驗 VR 的樂趣。即將邁入碩二的學弟妹們也逐漸進入狀況，展現了對研究的熱忱，相信他們能成為優秀的學長姐們，指導新加入的學弟妹們，維持良好的研究風氣。

最後要感謝我的家人們，感謝爸爸聽我吐苦水並在我處於低潮時給予鼓勵，感謝媽媽對我的呵護以及照顧，感謝哥哥、弟弟在我最忙碌的時候，幫忙分擔家事，感謝阿公、阿嬤的關心與問候。謝謝我的女朋友，在我身心俱疲時仍舊陪伴在我身邊，並給我大大的鼓勵，幫我的身心充電。很開心能夠加入波浪與環境流體力學實驗室，讓我結識一群優秀的朋友。這兩年要感謝的人太多，有約我吃飯、聊天的，也有教我程式的，謝謝你們，讓我的碩士生活多采多姿又快樂。



摘要



溯升即海浪抵達陸地後可達之最大高程，是海嘯和波浪在海岸工程中的重要指標之一。海嘯由多個波浪疊加而成，當真實海嘯接近沿岸時，海水面經常被觀察到會先出現退縮的現象。早期，孤立波常作為海嘯替代模型，卻無法表現海水的退縮現象。因此許多學者陸續提出不同的替代波型，其中之一則為 N 型波。然而，以波浪數值模擬軟體模擬 N 型波的溯升，至今並無人制定其方法與流程。本篇文章則透過兩種波浪數值模擬軟體，分別模擬造波及溯升，完成一套有效率的 N 型波溯升模擬方法。完成驗證後並在後續模擬中發現，破碎 N 型波會比相對應之破碎孤立波的溯升值低，原因為損失能量與紊流耗散能量大於孤立波，擁有更強烈的破碎現象，越強烈的破碎現象會對沿岸造成越嚴重的破壞。因此，使用孤立波作為替代波型，可能會低估真實海嘯對沿岸的侵蝕與破壞。

關鍵字： NHWAVE、OpenFOAM、N 型波、孤立波、溯升、波破碎



Abstract



Wave runup, the maximum elevation water can reach on land, is an important parameter in coastal engineering for both tsunamis and water waves. A tsunami is formed by the superposition of multiple waves. When a real tsunami approaches the coast, sea level is often observed to recede first before rising. In the past, solitary waves were often used as a substitute model for tsunamis, but they could not capture the phenomenon of sea water receding. Therefore, many scholars have proposed different alternative wave-forms of tsunamis, one of which is the N-wave. However, no one has yet established a method and procedure for simulating the runup of N-waves using numerical wave simulation software. This article presents an efficient N-wave runup simulation method, which uses two simulation software: one for wave generation and the other for wave propagation and runup simulation. After validation and subsequent simulations, it was found that the broken N-wave has a lower runup value compared to the corresponding broken solitary wave. This is because the energy loss and turbulent dissipation in the broken wave are greater than in the solitary wave, resulting in a more intense breaking phenomenon. The stronger the breaking phenomenon, the more severe the coastal damage. Therefore, using solitary waves as a substitute wave type may underestimate the erosion and destruction

caused by real tsunamis on the coast.

Keywords: NHWAVE, OpenFOAM, N-wave, solitary wave, runup, wave breaking



目錄



	Page
口試委員審定書	i
謝誌	iii
摘要	v
Abstract	vii
目錄	ix
圖目錄	xiii
表目錄	xix
符號列表	xxi
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與意義	1
1.2 相關文獻回顧	2
1.3 研究動機與目的	4
1.4 研究方法與主要內容	5
1.5 本研究架構	6
第二章 孤立波與 N 型波理論	7
2.1 孤立波定義	7
2.2 N 型波定義	8
2.3 N 型波造波理論	9
第三章 NHWAVE 數值模型	13
3.1 σ 座標系統	13

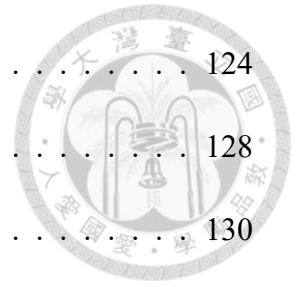


3.2	水動力模型控制方程	14
3.3	紊流模型控制方程	15
3.4	紊流耗散能量與損失能量	17
第四章	數值模擬驗證	19
4.1	初始條件與邊界條件	19
4.1.1	OpenFOAM 之初始條件與邊界條件	19
4.1.2	NHWAVE 之初始條件與邊界條件	20
4.1.3	N 型波初始波型資料轉換方式	21
4.2	收斂性測試	23
4.2.1	OpenFOAM 之收斂性測試	23
4.2.2	NHWAVE 之收斂性測試	25
4.3	溯升值驗證	28
4.3.1	孤立波溯升值驗證	28
4.3.2	N 型波溯升值驗證	29
4.4	速度場驗證	32
4.5	改變斜板位置之數值水槽架設與驗證	39
4.6	改變斜板斜率之數值水槽架設與驗證	42
4.7	紊流耗散能量與損失能量的驗證	44
第五章	結果與討論	47
5.1	分析孤立波與 N 型波溯升值之差異	47
5.1.1	普通 N 型波 (general N-wave)	48
5.1.2	段波狀 N 型波 (bore-like N-wave)	53
5.1.3	陡峭型 N 型波 (steep N-wave)	58



5.1.4	強烈破碎 N 型波 (strong-breaking N-wave)	63
5.2	斜板前移的影響	69
5.2.1	斜板前移對孤立波的影響	70
5.2.2	斜板前移對 N 型波的影響	72
5.3	斜率改變的影響	76
5.3.1	改變斜板斜率對孤立波的影響	76
5.3.2	改變斜板斜率對 N 型波的影響	79
第六章	結論與未來展望	89
6.1	結論	89
6.2	未來展望	90
	參考文獻	91
	附錄 A — 驗證用之實驗與模擬數據	97
A.1	孤立波之造波參數	97
A.2	N 型波之造波參數	98
A.3	孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板)	102
A.4	N 型波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板)	103
A.5	孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板前移)	107
A.6	N 型波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板前移)	109
A.7	孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:20 斜板)	113
A.8	孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:40 斜板)	117
A.9	孤立波能量驗證數據	119
	附錄 B — 案例之模擬結果	123
B.1	孤立波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)	123

B.2	N 型波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)	124
B.3	孤立波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 7.0 公尺處)	128
B.4	N 型波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 7.0 公尺處)	130
B.5	孤立波於斜率 1:20 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)	134
B.6	N 型波於斜率 1:20 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)	135
B.7	孤立波於斜率 1:40 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)	139
B.8	N 型波於斜率 1:40 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)	141



圖目錄



圖 2.1	孤立波與 N 型波波型示意圖 (紅線為孤立波; 藍線為 N 型波)	8
圖 2.2	前導下沉 N 型波之初始波型 (藍線) 與造波板移動軌跡 (黑線) 示意圖	12
圖 3.1	左邊為原始物理區域, 右邊為座標轉化後的計算區域	14
圖 4.1	OpenFOAM 數值模型邊界條件名稱示意圖 (未依真實比例)	20
圖 4.2	NHWAVE 數值模型邊界條件名稱示意圖 (未依真實比例)	21
圖 4.3	NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)	23
圖 4.4	OpenFOAM 初始波型收斂性測試 (取模擬時間結束之波型) (上圖為 N-EXP25; 下圖為 N-EXP44)	24
圖 4.5	NHWAVE 之測站水位歷時圖, 測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m。 (a) N-EXP25 水平方向收斂性測試; (b) N-EXP25 垂直方向收斂性測試; (c) N-EXP44 水平方向收斂性測試; (d) N-EXP44 垂直方向收斂性測試。	27
圖 4.6	孤立波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板, 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	29
圖 4.7	OpenFOAM 初始輸出資料 (N-EXP10)	30
圖 4.8	初始資料求出之初始波型 (N-EXP10)	30
圖 4.9	N 型波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板, 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)	31
圖 4.10	N 型波水面退位值比較圖 (斜率 1:10 斜板, 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)	32
圖 4.11	N 型波案例 C13 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$, 測站位於 $x = 9.5$ m)	34
圖 4.12	N 型波案例 C14 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$, 測站位於 $x = 9.5$ m)	34
圖 4.13	N 型波案例 C17 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$, 測站位於 $x = 9.5$ m)	34

圖 4.14	N 型波案例 C18 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)	35
圖 4.15	N 型波案例 C13 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)	35
圖 4.16	N 型波案例 C14 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)	35
圖 4.17	N 型波案例 C17 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)	36
圖 4.18	N 型波案例 C18 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)	36
圖 4.19	N 型波案例 C13 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	36
圖 4.20	N 型波案例 C13 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	37
圖 4.21	N 型波案例 C14 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	37
圖 4.22	N 型波案例 C14 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	37
圖 4.23	N 型波案例 C17 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	38
圖 4.24	N 型波案例 C17 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	38
圖 4.25	N 型波案例 C18 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	38
圖 4.26	N 型波案例 C18 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)	39
圖 4.27	斜板前移後之 NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)	39
圖 4.28	孤立波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)	40

圖 4.29	N 型波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)	41
圖 4.30	N 型波水面退位值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)	41
圖 4.31	斜率 1:20 斜板之 NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)	42
圖 4.32	斜率 1:40 斜板之 NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)	42
圖 4.33	斜率 1:20 斜板之孤立波最大溯升值驗證圖	43
圖 4.34	針對碎波參數的孤立波最大溯升值驗證圖	44
圖 5.1	孤立波與 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	48
圖 5.2	孤立波與普通 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(紅框為用來比較的兩個案例)	50
圖 5.3	測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP17 與 N-EXP25)	50
圖 5.4	波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP17，綠色箭頭為其速度向量; 藍色實線為 N-EXP25，紅色箭頭為其速度向量)	51
圖 5.5	海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP17 與 N-EXP25)	52
圖 5.6	波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP17; 下圖為 N-EXP25)	53
圖 5.7	孤立波與段波狀 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(紅框為用來比較的兩個案例)	55
圖 5.8	測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP21 與 N-EXP43)	55

圖 5.9	波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP21，藍色箭頭為其速度向量;綠色實線為 N-EXP43，紅色箭頭為其速度向量)	56
圖 5.10	海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP21 與 N-EXP43)	57
圖 5.11	波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP21; 下圖為 N-EXP43)	58
圖 5.12	孤立波與陡峭型 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(藍框為用來比較的兩個案例)	60
圖 5.13	測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP01 與 N-EXP85)	60
圖 5.14	波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP01，藍色箭頭為其速度向量;桃紅色實線為 N-EXP85，綠色箭頭為其速度向量)	61
圖 5.15	海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP01 與 N-EXP85)	62
圖 5.16	波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP01; 下圖為 N-EXP85)	63
圖 5.17	孤立波與 N 型波單位寬度之紊流耗散能量圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	65
圖 5.18	孤立波與強烈破碎 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(藍框為用來比較的兩個案例)	65
圖 5.19	測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP07 與 N-EXP32)	66

圖 5.20	波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP07，藍色箭頭為其速度向量;紅色實線為 N-EXP32，綠色箭頭為其速度向量)	67
圖 5.21	海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP07 與 N-EXP32)	68
圖 5.22	波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP07; 下圖為 N-EXP32)	69
圖 5.23	斜板改變位置前後孤立波之溯升比較圖	70
圖 5.24	斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (S-EXP04)	71
圖 5.25	斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (S-EXP24)	71
圖 5.26	斜板改變位置前後孤立波之損失能量比比較圖	72
圖 5.27	斜率 1:10 斜板，改變位置前後之孤立波與 N 型波溯升比較圖 (空心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m; 實心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(紅框為波型類別改變的兩個案例)	73
圖 5.28	斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (N-EXP40)	74
圖 5.29	斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (N-EXP41)	74
圖 5.30	段波狀 N 型波之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)	75
圖 5.31	斜率 1:10 斜板，孤立波、普通 N 型波與段波狀 N 型波的損失能量比比較圖 (空心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m; 實心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)	75
圖 5.32	不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$) (S-EXP04) 77	
圖 5.33	不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$) (S-EXP24) 77	

圖 5.34	不同斜率斜板之孤立波溯升結果與波破碎判定 (空心圖示: 非破碎; 實心圖示: 破碎)(虛線: 1:10 非破碎線; 點劃線: 1:20 非破碎線; 點線: 1:40 非破碎線)	78
圖 5.35	孤立波於不同斜率斜板之損失能量比	78
圖 5.36	不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP25)	80
圖 5.37	不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP34)	81
圖 5.38	不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP43)	81
圖 5.39	不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP85)	82
圖 5.40	不同斜率斜板之孤立波、普通 N 型波與段波狀 N 型波溯升結果比較, 測站與斜板起點位於 $x = 13.5 \text{ m}$ 。(a) 斜率 1:10 斜板之溯升模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之溯升模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之溯升模擬結果。	83
圖 5.41	不同斜率斜板之孤立波、陡峭型 N 型波、強烈破碎 N 型波與陡峭型破碎 N 型波溯升結果比較, 測站與斜板起點位於 $x = 13.5 \text{ m}$ 。(a) 斜率 1:10 斜板之溯升模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之溯升模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之溯升模擬結果。	84
圖 5.42	不同斜率斜板之孤立波與普通 N 型波溯升結果與波破碎比較 (空心圖示: 非破碎; 實心圖示: 破碎), 測站與斜板起點位於 $x = 13.5 \text{ m}$ 。(a) 斜率 1:10 斜板之溯升模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之溯升模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之溯升模擬結果。	85
圖 5.43	不同斜率斜板之孤立波與 N 型波之損失能量比, 測站與斜板起點位於 $x = 13.5 \text{ m}$ 。(a) 斜率 1:10 斜板之模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之模擬結果。	87

表目錄



表 4.1	選用波型之造波參數與選用原因	23
表 4.2	OpenFOAM 模擬資料	24
表 4.3	NHWAVE 模擬資料	26
表 4.4	施文育 (2022) 之 N 型波造波參數與本研究模擬資料	33
表 5.1	孤立波 (S-EXP17) 與普通 N 型波 (N-EXP25) 資料 (斜率 1:10 斜板， 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	49
表 5.2	孤立波 (S-EXP21) 與段波狀 N 型波 (N-EXP43) 資料 (斜率 1:10 斜板， 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	54
表 5.3	孤立波 (S-EXP01) 與陡峭型 N 型波 (N-EXP85) 資料 (斜率 1:10 斜板， 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	59
表 5.4	孤立波 (S-EXP07) 與強烈破碎 N 型波 (N-EXP32) 資料 (斜率 1:10 斜 板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	64
表 A.1	孤立波之造波參數	97
表 A.2	N 型波之造波參數	98
表 A.3	孤立波之陳玟諭 (2023) 實驗結果與本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜 板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	102
表 A.4	N 型波之陳玟諭 (2023) 實驗結果及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板， 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(*: 無法模擬)	103
表 A.5	孤立波之陳玟諭 (2023) 實驗結果及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜 板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)	107
表 A.6	N 型波之陳玟諭 (2023) 實驗結果及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板， 測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(*: 無法模擬)	109
表 A.7	Synolakis (1987) 論文中之實驗結果 (斜率 1:19.85 斜板)	113
表 A.8	不同底部粗糙度的模擬結果 (斜率 1:20 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	115
表 A.9	不同底部粗糙度的模擬結果 (斜率 1:40 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	117

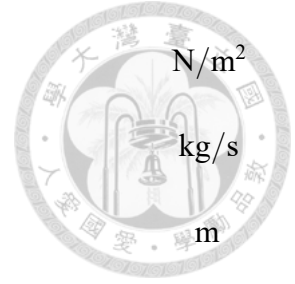
表 A.10	陳玟諭 (2023) 實驗數據及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站 與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	119
表 A.11	陳玟諭 (2023) 實驗數據及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與 斜板起點位於 $x = 7.0$ m)	120
表 B.1	孤立波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	123
表 B.2	N 型波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x =$ 13.5 m) (*: 無法模擬)	124
表 B.3	孤立波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)	128
表 B.4	N 型波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m) (*: 無法模擬)	130
表 B.5	孤立波於斜率 1:20 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	134
表 B.6	N 型波於斜率 1:20 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x =$ 13.5 m) (*: 無法模擬)	135
表 B.7	孤立波於斜率 1:40 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)	139
表 B.8	N 型波於斜率 1:40 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x =$ 13.5 m) (*: 無法模擬)	141

符號列表

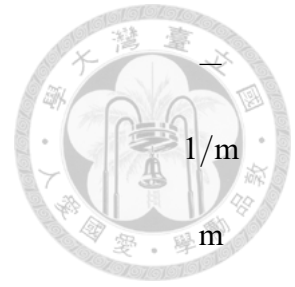


符號	符號意義	單位
a^+	波峰正振幅	m
a^-	波谷負振幅	m
a_{wg}^+	斜板前測站所量測之正振幅	m
c	波速	m/s
D	總水深	m
DY	數值水槽 y 方向網格間距	m
E_{diss}	單位寬度紊流耗散能量	J/m
E_k	單位寬度動能	J/m
E_{loss}	單位寬度損失能量	J/m
E_p	單位寬度位能	J/m
E_{p0}	單位寬度靜水位位能	J/m
E_{wave}	單位寬度總能量	J/m
F	整合方程式	—
g	重力加速度 ($g = 9.81$)	m/s ²
H	波高	m
h	靜止水深	m
k	紊流動能	J/kg
$mass$	流體質量	kg
N	網格總數量	—

p	壓力	N/m^2
Q_s	週期平均質量流率	kg/s
R	最大溯升值	m
R_d	水面線退位值	m
s	斜率	—
T	有效週期	s
t	時間	s
U_c	現時速度	m/s
u	x 方向流速	m/s
$\bar{u}$	深度平均水平流速	m/s
v	y 方向流速	m/s
w	z 方向流速	m/s
x	水平方向座標	m
y	垂直於 xz 平面之方向座標	m
z	垂直方向座標	m
α	體積分函數	—
β	斜板與平面所夾之弧度	rad
δ	偏心率參數	—
ϵ	紊流耗散率	$\text{J/kg} \cdot \text{s}$
ϵ'	非線性參數	—
ε	比例因數	—
η	自由液面高程	m



θ	引數	
κ	有效波數	1/m
λ	有效波長	m
ν_t	紊流運動粘度	m ² /s
ξ	造波板位移	m
$\dot{\xi}$	造波板速度	m/s
$\ddot{\xi}$	造波板加速度	m/s ²
ξ_s	碎波參數	—
ρ	水的密度	kg/m ³
σ	σ 座標系統垂直方向座標	—
σ'	頻散參數	—
τ	造波板移動時間	s
τ_{ij}	紊流應力	N/m ²
ω	σ 座標系統垂直方向速度	m/s





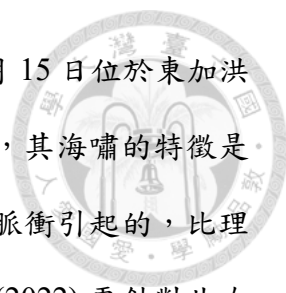
第一章 緒論



1.1 研究背景與意義

台灣位於太平洋板塊與歐亞板塊的交界處，是一個地震頻繁的區域，因此也容易受到海嘯的影響。海嘯是由於海底地震、海底火山爆發、海崖崩塌、落石等因素引起海水的劇烈震盪所形成的。當這些事件發生時，海水會產生巨大的波浪，形成海嘯。由於台灣的地理位置鄰近太平洋海域，當太平洋海域發生地震或其他類似事件時，會產生海嘯波浪，這些波浪會沿著海洋傳播，最終抵達台灣的海岸。如果海嘯波浪足夠強大，就可能造成嚴重的災害。所幸台灣在過去並沒有因海嘯而造成嚴重傷亡的紀錄。

近年來發生許多重大海嘯災害，同樣位在環太平洋地震帶的亞洲國家，日本，2011 年 3 月 11 日於日本東北太平洋沿岸發生了地震矩規模 9.0 的強烈地震，甚至引發了巨大的海嘯，超過 15000 人不幸罹難，其中海嘯也成為了罹難者們的主要死因(可參考 Mori et al., 2011)。2004 年 12 月 26 日發生印度洋大地震，引起了 15 到 30 公尺的巨大海嘯，海嘯襲擊了 12 個國家，但印度尼西亞、斯里蘭卡、印度和泰國受到的打擊最為嚴重，不僅造成嚴重的人命傷亡(超過十萬人罹難)以及經濟損失(數十億美元)(可參考 Wachtendorf et al., 2006)。2018 年 9 月 28 日於印度尼西亞蘇拉威西島，帕盧灣發生規模 7.5 的強烈地震，地震後的主要現象是土壤液化和海嘯。海嘯襲擊了海岸，夷平了房屋，沖走了各種物品，並摧毀了中蘇拉威西省帕盧灣的沿海地區，多達 2000 多人遇難(可參考 Widiyanto et al., 2019)。2018 年 12 月 22 日於印度尼西亞巽他海峽的喀拉喀托火山，在噴發期間發生重大的側向倒塌，使得蘇門答臘島和爪哇島的相鄰海岸引發海嘯，漲幅高達 13 公尺。



海嘯造成至少 437 人死亡 (可參考 Grilli et al., 2019)。2022 年 1 月 15 日位於東加洪阿東加—洪阿哈阿帕伊島的海底火山發生噴發，進而引發海嘯，其海嘯的特徵是一個均勻的小前導波，前導波由火山爆炸產生的快速大氣壓力脈衝引起的，比理論上預期的海嘯波從火山自由傳播的時間要早，Imamura et al. (2022) 更針對此次海嘯對日本的影響作研究，海嘯抵達的時間比日本海嘯監測預警系統所預期的提前了數小時，雖說沒有人員傷亡，但在當時正值冬天以及 COVID-19 大流行使得疏散困難與交通堵塞，在沿海地區，由於海嘯的流動，漁船和水產養殖設施遭到破壞，對經濟具有影響 (可參考 Carvajal et al., 2022; Imamura et al., 2022)。由此可見海嘯對人們造成的影響有多麼嚴重。

海嘯與颱風、地震都一樣屬於自然災害，大自然的力量往往不能忽視，若能更瞭解海嘯的相關特性，就能防患於未然，有助於改進海嘯預警系統、海嘯防護措施以及海洋工程的建設。在過去有關海嘯的研究經常以孤立波作為一種簡化的海嘯模型，已有諸多學者進行了相關的研究，不管是水槽實驗或是數值模擬 (可參考 Synolakis, 1987; Jensen et al., 2003; Synolakis et al., 2009; Lo et al., 2013)，另一種海嘯替代模型則為 N 型波，與孤立波最不同的是，它能夠捕捉海嘯抵達淺灘前的海水退位現象，而本研究主要則使用 N 型波最為海嘯替代模型並利用波浪數值模擬，探討不同條件下的溯升情形與孤立波溯升之差異。

1.2 相關文獻回顧

孤立波最早是由一名蘇格蘭土木工程師、造船工程師 John Scott Russell 於 1834 年發現，這是觀察到孤立波的首次記錄，當時為了決定最佳的運河船隻的設計，於蘇格蘭的聯合運河進行了實驗。在實驗過程中他發現了水面上一種特殊的水波，他將其稱之為「wave of translation」。在如今的流體動力學以及數學物理中，具有此類特性的波被稱為羅素的孤波 (可參考 Russell, 1845)。接著 Boussinesq



(1872) 推導出了可以描述水波在長方形水槽中傳播的數學方程式，即現在所稱的 Boussinesq 方程式。這個方程式可以用來解釋水波的傳播速度、振幅、頻率等物理特性。此外，也探討了水波在淺水區的行為，進一步擴展了人們對於水波行為的認識。然而，十分重要的開創性論文是 Korteweg and De Vries (1895)，提出了一個新的偏微分方程，現在稱為 Korteweg-de Vries 方程。這個方程描述了一種類似於孤立波的解，被稱為孤子 (soliton)，可以在非線性介質中傳播而不失真。這個發現對於非線性物理學有著深遠的影響，因為它表明即使在非線性系統中，也存在一些特殊的波解，可以像線性系統中的波解一樣被解析求解。這種發現在現代物理學、應用數學和工程學等領域中都有著廣泛的應用。

幾年後，海洋學家 Goring (1978)，研究海嘯長波在沿岸潮間帶的行為，將理論與實驗結果進行比較。他使用實驗室水槽來模擬長波在不同海底坡度下傳播的情況，並測量波的速度、高度和頻率。結果顯示，當長波進入沿岸潮間帶後，波的速度和高度均會發生改變。Synolakis (1987) 則為孤立波從恆定深度的近海區域傳播到具有恆定坡度的海灘的問題提供了一個解決方案，推導了不間斷孤立波最大溯升的公式，人們可以針對孤立波的最大溯升值進行簡單的估算。然而孤立波在描述實際海嘯事件卻有些問題，其一，孤立波模型無法描述複雜的海嘯波型，例如在海嘯傳播過程中，波峰和波谷之間的相對位置和交互作用可能會發生變化，而孤立波模型只能描述固定形狀的波型。其二，孤立波模型不能代表典型海嘯重要的地球物理時間和長度尺度，因此這種模型可能無法準確地描述實際的海嘯波動情況 (可參考 Madsen et al., 2008)。

關於海嘯抵達海岸線的軼事報導經常描述在海嘯波浪湧上海灘之前海岸線明顯後退，然而，以單一孤立波作為海嘯模型卻無法表現其特徵，Tadepalli and Synolakis (1994) 認為之前在氣體動力學 (Whitham, 1974) 中討論過的 N 型波更適合描述主海嘯波，便以此提出了另一種海嘯替代模型用來取代孤立波，其波型具

有波峰與波谷，類似於字母「N」，故稱為 N 型波。文中考慮了三種類型的 N 型波，分別為廣義 N 型波 (generalized N-wave)、等腰 N 型波 (isosceles N-wave) 與雙重 N 型波 (double N-wave)，每種波又可以分為波峰領先波型抑或是波谷領先波型，分別稱為前導上升 N 型波 (leading elevation N-wave, LEN) 與前導下沉 N 型波 (leading depression N-wave, LDN)。

Madsen and Schaeffer (2010) 將一個正的類孤立波和一個負的類孤立波結合作為 N 型波，並將波長設置為更適合海嘯波的資料。Chan and Liu (2012) 則基於上述的想法，提議將海嘯波建模為三個孤立波的組合。Liang et al. (2013) 開發出震波捕捉 Boussinesq 型模型來模擬並探討 N 型波之溯升。還有其他學者們提出了不同的 N 型波 (可參考 Rossetto et al., 2011; Klettner et al., 2012; Charvet et al., 2013; Goseberg et al., 2013; Schimmels et al., 2014)，可以看見早期的 N 型波有著各種定義，各個文獻中所使用的 N 型波皆不盡相同，並沒有統一的規範，原因之一是有沒有完整描述的技術用於實驗水槽中生成 N 型波 (可參考 Lima et al., 2019)，一直到 Lima et al. (2019) 提出以 Tadepalli and Synolakis (1994) 中定義的廣義 N 型波 (generalized N-wave) 之波型剖面為基礎，才推導出一個統一的 N 型波定義與造波方法。本實驗室在建立出一套具活塞式造波機之二維斷面水槽，並證實 Lima et al. (2019) 的 N 型波造波理論，數值計算與真實情況的結果具有一致性 (可參考林立剛, 2021)。黃俊瑞 (2022) 則延續林立剛 (2021) 之研究，探討前導下沉 N 型波在斜率 1:10 之斜板上的溯升現象並與孤立波進行比較，發現非破碎波時兩者的溯升值相當，而破碎波時前導下沉 N 型波之溯升值則小於孤立波。

1.3 研究動機與目的

有系統的 N 型波造波方法，一直到 Lima et al. (2019) 才被提出，且傳統計算流體力學軟體 (CFD) 在計算上非常耗時，因此本研究將使用非靜水壓波模型



(NHWAVE) 模擬 N 型波之傳遞及溯升現象，過去並沒有前人做過這項研究，利用數值模擬研究實驗中不易達成的情況，例如，改變斜板斜率、改變斜板位置以及計算流體中的能量。期盼驗證 NHWAVE 能準確模擬 N 型波之溯升情形，統整不同條件下的溯升差異，並將使用方式供給後續參考，提供後人更有效率模擬波浪溯升的方法。

1.4 研究方法與主要內容

本研究主要使用由 Ma et al. (2012) 開發的三維衝擊捕捉非靜水壓波模型 (three-dimensional shock-capturing Non-Hydrostatic WAVE model, NHWAVE) 進行數值模擬，其中，在 N 型波的數值模擬上需借助開源流體力學模擬軟體 OpenFOAM (version 8) (可參考 Greenshields, 2020) 以及 olaFlow (可參考 Higuera, 2017)，應用於 OpenFOAM 中的邊界條件與造波。

為了確保 NHWAVE 能夠用於模擬長波行進與溯升之情形，必須與已擁有的實驗結果相互驗證。本文以黃俊瑞 (2022) 的實驗設備為基礎，設置二維數值波浪水槽，取陳玟諭 (2023) 的實驗結果驗證波浪於斜率 1:10 的斜板上之溯升情形，速度場則以施文育 (2022) 使用 PIV 所量測到的速度場資料驗證 N 型波之速度場的數值模擬。斜率 1:10 的斜板前移之模擬結果再以陳玟諭 (2023) 的實驗結果驗證斜板前移的溯升情形，而改變斜板斜率則取斜率 1:20 之斜板模擬數據，以 Synolakis (1987) 於斜率 1:19.85 之斜板實驗結果驗證不同斜率的溯升模擬結果，斜率 1:40 之斜板則以 Wu et al. (2018) 提出的經驗公式作驗證，最後以陳玟諭 (2023) 的實驗所觀察的波浪溯升破碎情形，驗證由模擬資料所求得之能量相關數據。

驗證完以上的數值模型，確認以 NHWAVE 模擬波浪傳遞及溯升情形的準確性後，接著探討於斜率 1:10 的斜板前量測到相近波型之 N 型波與孤立波，並藉由 NHWAVE 之紊流模型求出紊流耗散能量以及波浪的位能與動能變化，觀察兩者在

波破碎時的能量變化以及溯升值之關係，加以證明黃俊瑞 (2022) 所提到的論點，當 N 型波破碎時，溯升值會比相對應的破碎孤立波之溯升值低。再探討以相同的造波參數造波時，於相同斜率改變斜板位置時的溯升情形和相同位置改變斜板斜率時的溯升情形，討論其傳遞與溯升之物理現象。

1.5 本研究架構

本研究總共分為六章，第一章為本研究的背景和動機，第二章介紹本研究使用的波型定義、特性以及造波理論，第三章介紹本研究主要所使用的浪數值模擬軟體之座標系統、水動力控制方程與紊流模型控制方程，第四章前段介紹兩種數值模型的初始條件與邊界條件，兩種數值模型之間的資料轉換方式以及網格的收斂性測試，第四章後段藉由前人提供之實驗數據，驗證數值模型在傳遞以及溯升的準確性，並為能量做驗證與設定波浪是否破碎的門檻值，第五章根據模擬結果將 N 型波分類加以分析其特色，並討論 N 型波在不同水槽條件下的變化，第六章統整數值模擬結果的重要發現與本研究的未來展望。

第二章 孤立波與 N 型波理論



2.1 孤立波定義

孤立波的特點是波非線性與波頻散同時存在且達到平衡，是一種於固定水深中傳播不會變形且依固定速度平移的波型，定義明確、好描述且好產生，因此也廣泛被用作水槽實驗中之海嘯模型。孤立波的一階解析解(有因次)為：

$$\eta(x, t) = H \cdot \text{sech}^2\theta, \quad (2.1)$$

其中 η 為自由液面高程、 H 為波高、

$$\theta = \kappa \cdot (x - c \cdot t), \quad (2.2)$$

為引數(argument)、 x 為水平方向座標、 t 為時間、

$$c = \sqrt{g \cdot (h + H)}, \quad (2.3)$$

為波速、 h 為靜水水深、 g 為重力加速度、

$$\kappa = \sqrt{\frac{3H}{4h^3}}, \quad (2.4)$$

為有效波數，其可定義有效波長 λ 與有效週期 T ：

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\kappa}, \quad T = \frac{\lambda}{c}. \quad (2.5)$$

Grimshaw (1971) 則提出三階解析解，詳盡推導及參數之定義亦可參考 Liu et al. (2007)。孤立波之波型只依單一非線性參數 $\epsilon' = H/h$ 改變，相對單純，因此本研究會先使用孤立波測試 NHWAVE。



2.2 N 型波定義

N 型海嘯波波型最早是由 Tadepalli and Synolakis (1994) 提出，文中提及的廣義 N 型波 (generalized N-wave) 之波型剖面，被 Lima et al. (2019) 沿用並改寫，其數學定義式如下：

$$\eta(x, t) = \varepsilon \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot H \cdot \text{sech}^2\theta, \quad (2.6)$$

其中 ε 為比例因數 (scale factor)、 δ 為偏心率參數 (eccentricity parameter)。

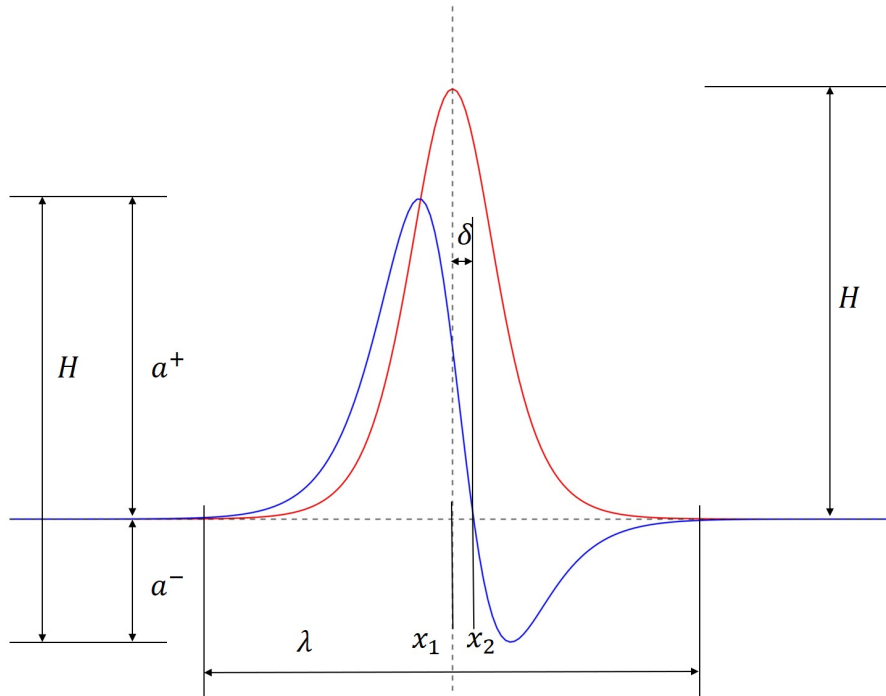


圖 2.1: 孤立波與 N 型波波型示意圖
(紅線為孤立波; 藍線為 N 型波)

N 型波波型與各參數之物理意義可參考圖 2.1，波高 H 定義為波峰正振幅 a^+ 與波谷負振幅 a^- 值之和，比例因數 ε 是將 N 型波波高定義為 H 所必需之值，另外也會決定 N 型波波型的形式，當 $\varepsilon > 0$ 時，會得到前導上升 N 型波 (leading elevation N-wave, LEN); 當 $\varepsilon < 0$ 時，會得到前導下沉 N 型波 (leading depression N-wave, LDN)。偏心率參數之定義為 $\delta = x_2 - x_1$ ， x_2 為靜止水面與 N 型波之交會位置， x_1 為 N 型波之波高波長相對應孤立波的中心位置，是決定波峰與波谷之間

傾斜程度的變數， δ 之值越大，則波峰與波谷之間的傾斜程度越大，當 $\delta = 0$ 且 $a^-/a^+ = 1$ 時，則為等腰 N 型波 (isosceles N-wave)。

Lima et al. (2019) 所提出之 N 型波造波方法共有三大統御參數：非線性參數 (ϵ')、頻散參數 (σ')、偏心率 (δ/λ)，其中 $\sigma' = 2\pi h/\lambda$ ，透過改變三種參數來得到不同的 N 型波，有關三種參數對 N 型波傳遞的影響可參考黃俊瑞 (2022)。比例因數設置則比照 Lima et al. (2019)，將比例因數 (ϵ) 設為 -1.079，僅討論前導下沉 N 型波，故不討論比例因數 ϵ 對波型的影響

2.3 N 型波造波理論

由 Lima et al. (2019) 所提出的一階活塞推板式造波理論，首先，假設 N 型波之波速 c 保持不變，對於恆定波速且無限長度的波 (可參考 Svendsen and Justesen, 1984 與 Grilli and Svendsen, 1990):

$$\int_{-h}^{\eta} u dz = c \cdot \eta + Q_s + U_c \cdot h \approx c \cdot \eta, \quad (2.7)$$

其中 u 為造波板前方的水粒子速度， Q_s 為非線性質量流率之週期平均， U_c 為當前的速度，定義為波谷下的平均粒子速度，對於無限長之長波，單位長度體積流率可用 $c \cdot \eta$ 近似之，如上式。由於活塞運動產生深度均勻的水平速度，表示水粒子在垂直方向的水平速度為均勻的 $u = \bar{u}(t)$ ，可將式 (2.7) 簡化如下：

$$\bar{u} \cdot (\eta + h) = c \cdot \eta, \quad (2.8)$$

粒子速度 $\bar{u}$ 與造波板速度 $\dot{\xi}$ 如下：

$$\dot{\xi} = \bar{u} = \frac{c \cdot \eta}{(\eta + h)}, \quad (2.9)$$

其中 $\dot{\xi} = d\xi/dt$ ， ξ 為造波板位移，可由式 (2.9) 積分得到。

假設 N 型波具有以下型式：

$$\eta(\xi, t) = \epsilon \cdot H \cdot F(\theta), \quad (2.10)$$



其中 F 為整合方程式， $\theta = \kappa \cdot (\xi - c \cdot t - x_1)$ ，將 θ 微分後可得

$$\frac{d\theta}{dt} = \kappa \cdot (\dot{\xi} - c), \quad (2.11)$$

則

$$\dot{\xi} = \frac{d\xi}{dt} = \frac{d\xi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\xi}{d\theta} \cdot \kappa \cdot (\dot{\xi} - c), \quad (2.12)$$

將式 (2.9) 代入式 (2.12) 可得

$$\frac{d\xi}{d\theta} = \frac{\dot{\xi}}{\kappa \cdot (\dot{\xi} - c)} = -\frac{\eta}{\kappa \cdot h}, \quad (2.13)$$

將式 (2.10) 代入式 (2.13) 後，變為

$$\frac{d\xi}{d\theta} = -\frac{\varepsilon \cdot H}{\kappa \cdot h} \cdot F(\theta), \quad (2.14)$$

當 $t \rightarrow -\infty$ 時， $\theta \rightarrow +\infty$ ，積分式為

$$\xi(t) = \lim_{t \rightarrow -\infty} \xi(t) + \frac{\varepsilon \cdot H}{\kappa \cdot h} \cdot \int_{\theta(t)}^{+\infty} F(\varphi) d\varphi. \quad (2.15)$$

現在，對於 N 型波型式，由式 (2.6) 與式 (2.10) 可知

$$F(\theta) = (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \text{sech}^2 \theta, \quad (2.16)$$

將式 (2.16) 代入 (2.15)，其中

$$\int_{\theta(t)}^{+\infty} F(\varphi) d\varphi = \int_{\theta(t)}^{+\infty} \varphi \cdot \text{sech}^2 \varphi d\varphi - \kappa \cdot \delta \cdot \int_{\theta(t)}^{+\infty} \text{sech}^2 \varphi d\varphi, \quad (2.17)$$

先對式 (2.17) 等號右方的第一個積分作分部積分，得

$$\begin{aligned} \int_{\theta(t)}^{+\infty} \varphi \cdot \text{sech}^2 \varphi d\varphi &= \int_{\theta(t)}^{+\infty} \frac{d}{d\varphi} (\varphi \cdot \tanh \varphi) d\varphi - \int_{\theta(t)}^{+\infty} \tanh \varphi d\varphi \\ &= [\varphi \cdot \tanh \varphi - \ln(\cosh \varphi)]_{\theta(t)}^{+\infty}, \end{aligned} \quad (2.18)$$

第二個積分為

$$\int_{\theta(t)}^{+\infty} \text{sech}^2 \varphi d\varphi = [\tanh \varphi]_{\theta(t)}^{+\infty}, \quad (2.19)$$

將積分完的式 (2.18) 與式 (2.19) 代回 (2.17)，可得

$$\int_{\theta(t)}^{+\infty} F(\varphi) d\varphi = \ln(\cosh \theta) - (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \tanh \theta + \ln 2 - \kappa \cdot \delta. \quad (2.20)$$

最後假設 $\lim_{t \rightarrow -\infty} \xi = 0$ ，得到生成 N 型波的造波板軌跡為

$$\xi(t) = -\frac{\varepsilon \cdot H}{\kappa \cdot h} \cdot [(\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \tanh\theta - \ln(2 \cdot \cosh\theta) + \kappa \cdot \delta], \quad (2.21)$$

其中 θ 為 ξ 的函數， $\theta = \theta(\xi, t)$ 以隱函數出現在式 (2.21) 之等號右方，由於等號的左右兩邊都有 ξ ，因此需要數值方法迭代求之。另外，由於自由液面高程 η 與造波板軌跡 ξ 都已推導出，因此造波板速度可由式 (2.9) 求得

$$\dot{\xi} = \frac{\varepsilon \cdot H \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot c}{\varepsilon \cdot H \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) + h \cdot \cosh^2\theta}, \quad (2.22)$$

而造波板加速度 $\ddot{\xi}$ 為

$$\ddot{\xi} = c^2 \cdot \kappa \cdot h \cdot \varepsilon \cdot H \cdot \operatorname{sech}^2\theta \cdot \frac{1 - 2 \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \tanh\theta}{[h + \varepsilon \cdot H \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \operatorname{sech}^2\theta]^2} \cdot \left[\frac{\varepsilon \cdot H \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \operatorname{sech}^2\theta}{h + \varepsilon \cdot H \cdot (\theta - \kappa \cdot \delta) \cdot \operatorname{sech}^2\theta} - 1 \right]. \quad (2.23)$$

對於孤立波而言，N 型波的前緣和後緣出現在 $t = -\infty$ 和 $t = +\infty$ 處。然而，出於實際目的，假設它們相隔兩個波週期，並且波的中心位於具有相同高度和長度的相關孤立波的波峰對齊。造波板移動時間 (τ)，即造波板運動開始至結束之經歷時間，如下所示：

$$\tau = \frac{4 \cdot \pi}{\kappa \cdot c} \cdot \left(1 - \varepsilon \cdot \frac{H}{h} \cdot \frac{\delta}{\lambda}\right) \quad (2.24)$$

圖 2.2 為節 2.2 所提到的前導下沉 N 型波之初始波型與其本節所介紹的造波板移動軌跡的示意圖。

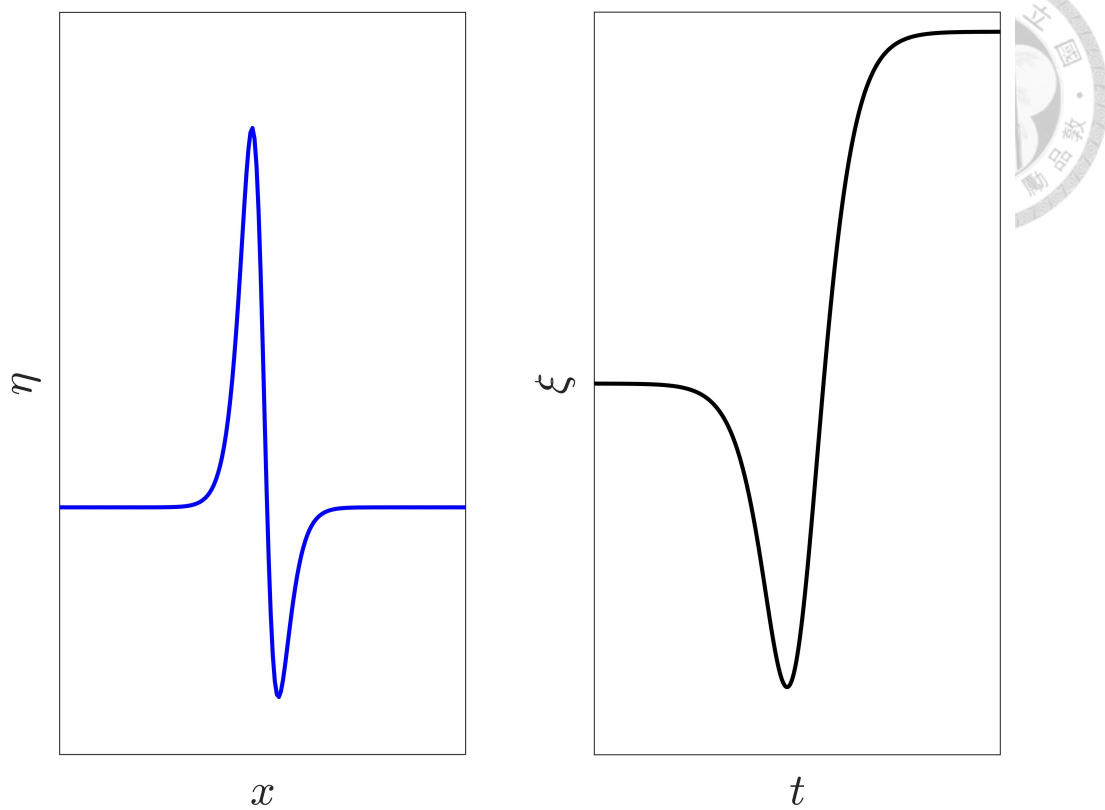


圖 2.2: 前導下沉 N 型波之初始波型 (藍線) 與造波板移動軌跡 (黑線) 示意圖

第三章 NHWAVE 數值模型



NHWAVE 是由 Ma et al. (2012) 開發的三維衝擊捕捉非靜水壓波模型 (three-dimensional shock-capturing Non-Hydrostatic WAVE model)。求解地形和自由表面跟隨 σ 坐標中不可壓縮的 Navier-Stokes 方程式。

相較於傳統計算流體力學軟體 (CFD，例如: OpenFOAM)(可參考 Greenshields, 2020)，NHWAVE 能夠更有效率地模擬波浪傳播與溯升的問題且能更精準地捕捉水面位置。這是因為 NHWAVE 通過假設自由液面高程是 (x, y) 的單個函數，直接從連續方程式求解自由表面高程。OpenFOAM 或其他 CFD 軟體使用流體體積法 (VOF) 或水平集方法 (LSM) 來捕獲自由表面，這需要大量迭代來定位自由表面並且非常耗時。

3.1 σ 座標系統

在非靜水壓波模型 NHWAVE 中，自由液面高程 η 被定義為水平方向的單個函數 $\eta = \eta(x, y, t)$ ，為了使模型系統適應上述的處理方式，以及網格適應複雜的水底地形與自由液面高程的變化，NHWAVE 模型採用了 Phillips (1957) 提出的坐標變換方法

$$t = t^* \quad x = x^* \quad y = y^* \quad \sigma = \frac{z^* + h}{D}. \quad (3.1)$$

其中 (x^*, y^*, z^*, t^*) 為笛卡兒座標系統參數，而 $D(x, y, t) = h(x, y, t) + \eta(x, y, t)$ 。這種座標變換基本上將物理域中變化的垂直座標映射到一個從 0 到 1 的均勻變換空間，即 σ 從 0 到 1(可參考 Lin and Li, 2002)，如圖3.1。

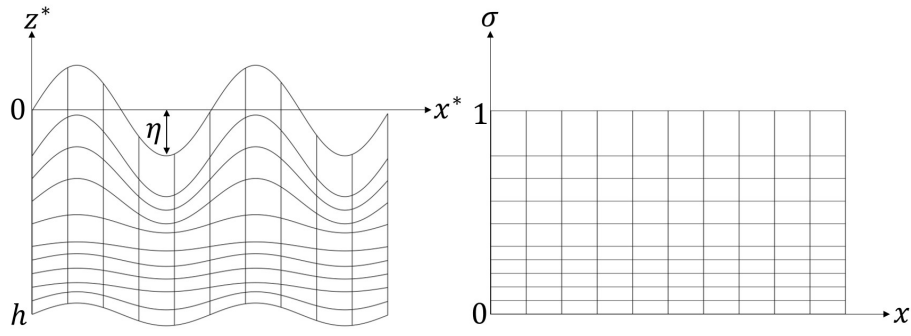


圖 3.1: 左邊為原始物理區域，右邊為座標轉化後的計算區域

3.2 水動力模型控制方程

水動力模型的控制方程是 Navier-Stokes 方程式與連續方程式。笛卡爾坐標 (x_1^*, x_2^*, x_3^*) 中的不可壓縮 Navier-Stokes 方程式，其中 $x_1^* = x^*$ ， $x_2^* = y^*$ 和 $x_3^* = z^*$ 以及時間 t^* 已給出：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i^*} = 0, \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t^*} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i^*} + g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j^*}. \quad (3.3)$$

其中 $(i, j) = 1, 2, 3$ ， u_i 為 x_i^* 方向的速度分量， p 為總壓力， ρ 為水的密度， $g_i = -g\delta_{i3}$ 為重力， $\tau_{ij} = \nu_t(\partial u_i/\partial x_j^* + \partial u_j/\partial x_i^*)$ 是紊流應力， ν_t 是紊流運動粘度。

在經過上一節提到的座標軸轉換後，利用微分連鎖律，物理域中變量 $f = f(x^*, y^*, z^*, t^*)$ 的偏微分變換如下：

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t^*} &= \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial t^*} \\ \frac{\partial f}{\partial x^*} &= \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} \\ \frac{\partial f}{\partial y^*} &= \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} \\ \frac{\partial f}{\partial z^*} &= \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} \end{aligned} \quad (3.4)$$



即

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma}{\partial t^*} &= \frac{1}{D} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} &= \frac{1}{D} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} &= \frac{1}{D} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial z^*} &= \frac{1}{D}\end{aligned}\quad (3.5)$$

將方程式 (3.5) 代入 (3.2) 和 (3.3)，我們得到新坐標 (x, y, σ) 和時間 t 下的連續方程式。

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = 0, \quad (3.6)$$

其中 ω 為 σ -坐標系下的垂直速度， ω 與垂直速度 w 的關係如下式：

$$\omega = D\left(\frac{\partial \sigma}{\partial t^*} + u \frac{\partial \sigma}{\partial x^*} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y^*} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z^*}\right), \quad (3.7)$$

接著將式 (3.6) 連續方程式沿著垂直方向 $\sigma = 0 \sim 1$ 積分，即可得到自由表面運動的控制方程式：

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(D \int_0^1 u d\sigma\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D \int_0^1 v d\sigma\right) = 0. \quad (3.8)$$

求得總水深 D ，即可算出自由表面位置。

3.3 紊流模型控制方程

在 NHWAVE 中，使用一個非線性 $k - \epsilon$ 模型 (可參考 Lin and Liu, 1998; Ma et al., 2011) 來模擬紊流， k 為紊流動能，單位為 (J/kg)，紊流動能 (turbulence kinetic energy, 又稱 TKE)，表示與紊流中渦流相關之每單位質量的平均動能， ϵ 為紊流耗散率，單位為 (J/(kg * s))，其紊流動能的產生、運輸以及耗散過程可以表示為：

$$\frac{\partial Dk}{\partial t} + \nabla \cdot (D\mathbf{u}k) = \nabla \cdot \left[D \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + D(P_s + P_b - \epsilon), \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial D\epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (D\mathbf{u}\epsilon) = \nabla \cdot \left[D \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} D(C_{1\epsilon}(P_s + C_{3\epsilon}P_b) - C_{2\epsilon}\epsilon), \quad (3.10)$$



其中 ν_t 為紊流渦流黏度

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3.11)$$

而 σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ 為經驗係數

$$\sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3, \quad C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad (3.12)$$

P_s 和 P_b 是產生的剪切力和浮力，描述為

$$P_s = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j^*}, \quad (3.13)$$

和

$$P_b = \frac{g}{\rho_0} \frac{\nu_t}{D} \frac{\partial \rho_m}{\partial \sigma}, \quad (3.14)$$

其中雷諾應力 $\overline{u'_i u'_j}$ 由 Lin and Liu (1998) 提出的非線性模型計算得出，該模型由下

式給出

$$\begin{aligned} \overline{u'_i u'_j} &= -C_d \frac{k^2}{\epsilon} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i^*} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \\ &= -C_1 \frac{k^3}{\epsilon^2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_l^*} \frac{\partial u_l}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j}{\partial x_l^*} \frac{\partial u_l}{\partial x_i^*} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_k^*} \frac{\partial u_k}{\partial x_l^*} \delta_{ij} \right) \\ &= -C_2 \frac{k^3}{\epsilon^2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k^*} \frac{\partial u_j}{\partial x_k^*} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_k^*} \frac{\partial u_l}{\partial x_k^*} \delta_{ij} \right) \\ &= -C_3 \frac{k^3}{\epsilon^2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_i^*} \frac{\partial u_k}{\partial x_j^*} - \frac{1}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_k^*} \frac{\partial u_l}{\partial x_k^*} \delta_{ij} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

其中 C_d , C_1 , C_2 和 C_3 是 Lin and Liu (1998) 給出的經驗係數

$$\begin{aligned} C_d &= \frac{2}{3} \left(\frac{1}{7.4 + 2S_{max}} \right), \quad C_1 = \frac{1}{185.2 + 3D_{max}^2} \\ C_2 &= \frac{1}{58.5 + 2D_{max}^2}, \quad C_3 = \frac{1}{370.4 + 3D_{max}^2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

其中

$$\begin{aligned} S_{max} &= \frac{k}{\epsilon} \max \left\{ \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_i^*} \right| \right\} \quad (\text{indices not summed}) \\ D_{max} &= \frac{k}{\epsilon} \max \left\{ \left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j^*} \right| \right\} \end{aligned} \quad (3.17)$$

詳細的推導與解釋可參考 Ma et al. (2012, 2014)。



3.4 紊流耗散能量與損失能量

波浪的紊流耗散能量，使用節 3.3 中，NHWAWE 紊流模型計算出的紊流耗散率 (ϵ) 來求得波浪傳遞至溯升最大值時，總共的紊流耗散能量，計算方式如下：

$$E_{turbulent} = \int \sum_{i=1}^N (mass_i \cdot \epsilon_i) dt / DY, \quad (3.18)$$

時間積分從波峰經過斜板前之測站積分至波浪溯升達最大溯升值時。其中 $E_{turbulent}$ 為單位寬度之紊流耗散能量，單位為 (J/m)， N 為模擬中的網格總數量， i 為模擬中第 i 個網格， $mass_i$ 為單位網格流體質質量， ϵ_i 為單位網格紊流耗散率， DY 為數值水槽 y 方向網格間距。

損失能量定義為波峰經過斜板前之測站時求出的總能量減掉波浪溯升達最大溯升值時的總能量，其差值即為波浪溯升過程所損失的能量，總能量公式如下：

$$E_{wave} = E_p + E_k, \quad (3.19)$$

其中 E_{wave} 為波浪的單位寬度之總能量， E_p 為波浪的單位寬度之位能， E_k 為波浪的單位寬度之動能，單位皆為 (J/m)：

$$E_p = \sum_{i=1}^N (mass_i \cdot g \cdot z_i) / DY - E_{p0}, \quad (3.20)$$

和

$$E_k = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} mass_i \cdot (u_i^2 + w_i^2) \right) / DY, \quad (3.21)$$

其中 E_{p0} 為靜水位時之位能， u_i 為單位網格水平方向流速， w_i 為單位網格垂直方向流速。最後將波峰抵達測站時與波浪達到最大溯升時的單位寬度之總能量相減，即可求得單位寬度之損失能量 E_{loss} 。有關波浪能量的討論可參考 Li (2000)、Dutykh and Dias (2009)。



第四章 數值模擬驗證



本研究希望能藉由數值模擬軟體，將造出波浪、波浪傳遞以及波浪溯升，所有波浪運動全由模擬完成，總共會使用兩種數值模型，一是 OpenFOAM，程式架構以及使用方式之教程可參考 Greenshields (2020)、二是 NHWAVE，程式架構以及使用方式之教程可參考 Ma et al. (2014)。OpenFOAM 用途為執行 N 型波的造波，由於 NHWAVE 無邊界移動造波功能，需借助 OpenFOAM 與 olaFlow 之移動邊界造波功能實現 N 型波之造波，以得到 N 型波的初始波型。NHWAVE 的用途則為模擬波浪傳遞至溯升，其最大溯升值定義為 R ，N 型波因前導下沉波谷造成的水面線退位值則以 R_d 表示。

4.1 初始條件與邊界條件

兩種波浪數值模擬軟體皆須建立適當的數值模擬水槽，並輸入合適的初始條件與邊界條件，才能使數值模擬正常運作，得到所需的數值結果並加以討論。以下會分兩個部份分別介紹兩種數值模擬軟體的設置為何。

4.1.1 OpenFOAM 之初始條件與邊界條件

使用 OpenFOAM 的目的為，利用移動邊界造波功能，以取得 N 型波的初始波型之自由液面高程 η 與液體速度 u, v, w 資料。數值造波採用 olaFlow 教程中的「WAVEMAKERFLUME」，建立一個二維造波水槽，只需輸入造波軌跡即可在數值水槽中完成造波(可參考 Higuera et al., 2015)，其二維水槽中六個邊界的設定則沿用林立剛 (2021)，名稱分別為入口 Inlet、出口 Outlet、水槽底部 Bottom、水槽頂部 Atmosphere、水槽前面 Front、水槽後面 Back。初始條件設定為水深 0.23 公尺的靜止水面，計算域尺度設定為長 20 公尺、寬 0.01 公尺、高 0.5 公尺，如圖

4.1。由於我們只需要造波板移動時間結束時的資料，因此不需要設置斜板，這樣才能得到最原始的 N 型波初始波型資料，不受到反射波抑或是水深改變的影響。

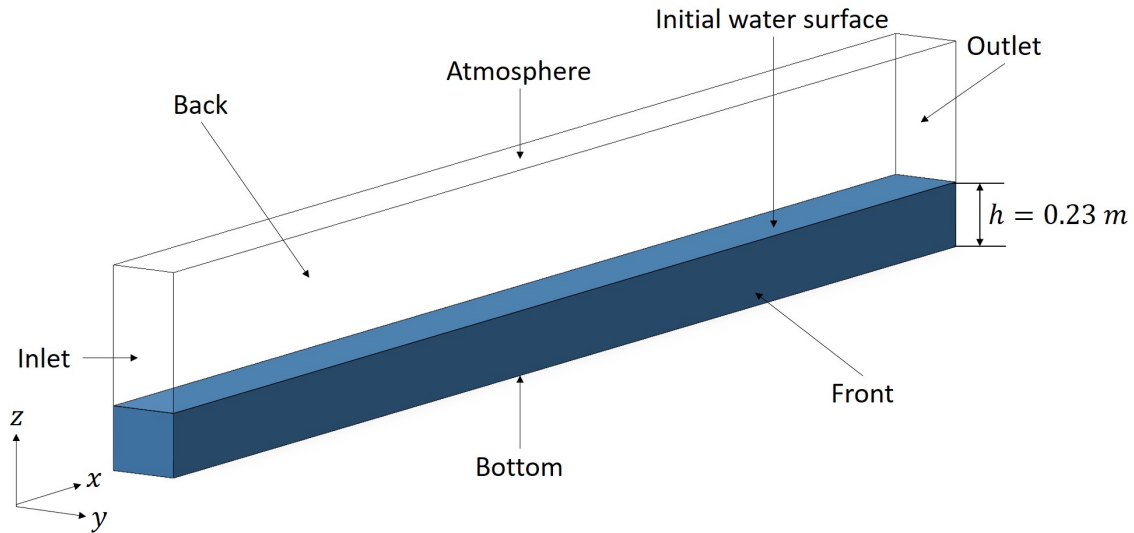


圖 4.1: OpenFOAM 數值模型邊界條件名稱示意圖 (未依真實比例)

當造波時間結束時，即可得到 N 型波的初始波型，接著開啟 NHWAVE 中的「INITIAL EUVW」功能，開啟此功能後，將得到的初始波型資料 η 存入 eta0.txt，並將 u, v, w 存入 uvw0.txt 後，NHWAVE 則能讀取初始條件，繼續模擬波的傳遞及溯升。

4.1.2 NHWAVE 之初始條件與邊界條件

使用 NHWAVE 的目的為，模擬波浪的傳遞和波抵達斜板後的溯升情形。首先是計算域尺度設定為長 20 公尺、寬 0.02 公尺，並在長 13.5 公尺處設置一斜率 1:10 之斜板，高不需要設置，因為 NHWAVE 所使用的 σ 座標系統會自動適應複雜的水底地形與自由液面高程的變化，如同節 3.1 所述。六個邊界的設定可在 input.txt 之「BOUNDARY_TYPE」調整，如圖 4.2，右邊界、前邊界、後邊界、上邊界為「free-slip」，下邊界為「bottom or wall friction」，而左邊界則會視當時要模擬的波型為孤立波或 N 型波而改變，若要模擬的是孤立波，左邊界則為「influx」，並在「WAVEMAKER」設定中填入，「WAVEMAKER = LEF_SOL」，並填入波高

與水深，即可由左邊界造出符合設定的孤立波；若要模擬的是 N 型波，左邊界則為「free-slip」，在「WAVEMAKER」設定中填入，「WAVEMAKER = NONE」，並在「INITIAL CONDITION」填入，「INITIAL_EUVW = T」，如同前一小節最後提到的，讓 NHWAVE 讀取 OpenFOAM 模擬出的 N 型波初始波型，繼續模擬波浪的傳遞及溯升。此外，在左邊界開啟海綿層功能，在「SPONGE LAYER」填入，「SPONGE_ON = T」、「Sponge_west_Width = 0.5」，使左邊生成一個 0.5 公尺長的海綿層。在「VISCOSITY」設定中填入，「VISCOUS_FLOW = T」，即可開啟紊流模型，使模擬考慮剪力與渦流黏度。

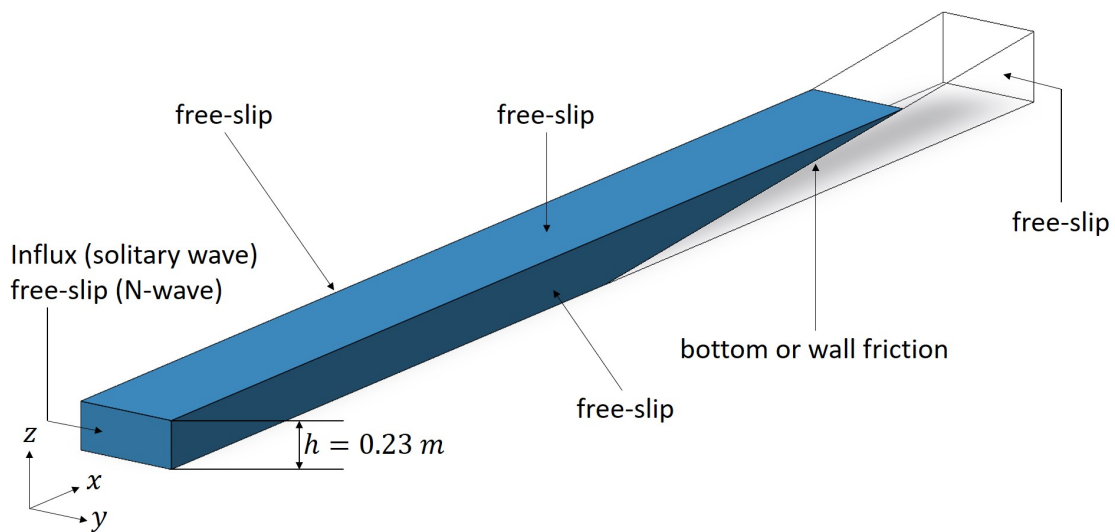


圖 4.2: NHWAVE 數值模型邊界條件名稱示意圖 (未依真實比例)

4.1.3 N 型波初始波型資料轉換方式

由於 OpenFOAM 與 NHWAVE 對自由液面的捕捉方式不同，本研究中，OpenFOAM 對自由液面所採用的捕捉方法為流體體積法 (VOF, volume of fluid)，在資料輸出時，會輸出參數 α ，其參數 α 表示單位體積內流體體積的佔比，而本

研究中只存在空氣與水兩種流體，參數 α 的詳細定義如式 (4.1)。

$$\alpha(x,t) = \begin{cases} 0, & \text{控制體積內只有空氣} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{控制體積內含水與空氣} \\ 1, & \text{控制體積內只有水} \end{cases} \quad (4.1)$$



而 $\alpha = 0.5$ 則為自由液面的位置，不過輸出資料中，通常不會剛好有 $\alpha = 0.5$ 的值，因此需要在後處理使用內插法求出 $\alpha = 0.5$ ，並找出相對應的位置。在找出 OpenFOAM 的自由液面後，再對 NHWAVE 的 x 軸數值做線性內插，即可得到 NHWAVE 所需 N 型波初始波型的自由液面高程資料 η 。

速度資料則需要使用前一章中所提到的式 (3.1)，將 OpenFOAM 中的 z^* 座標轉換為 NHWAVE 中的 σ 座標，其中 z^* 座標在轉換時，在節 3.1 中有提到，NHWAVE 的垂直網格會隨著水底地形與自由液面而變化， σ 的值為 0 到 1，因此轉換過後的值在大於 1 的部份都是需要被忽略掉的，因為 NHWAVE 並不會模擬自由液面上方的部分。

$$\begin{cases} \sigma = \frac{z^* + h}{D} \\ D = h + \eta \end{cases} \quad (4.2)$$

以 σ 軸的網格數等於 5 為例， σ 從 0 到 1 的值會被分為五等份，分別為 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9， z^* 在式 (4.2) 的轉換後，必須找出上述提到 σ 軸五個值的位置，對應到的速度資料即為 NHWAVE 所需 N 型波初始波型的速度資料，若垂直網格數設定為其他數值則以此類推。

本文章之後還會探討改變斜板位置與改變斜板斜率的問題，為此需要再改變數值水槽的計算域以及斜板的設置，但只需要更改 NHWAVE 的數值水槽就好，因為 N 型波的造波參數皆是相同的，因此 OpenFOAM 的造波模擬只需要做一次，再透過上述的資料轉換方式即可將初始波型套用到其他問題的數值水槽中。雖然多一個轉換的步驟，卻能夠大幅縮減傳統使用 CFD 模擬所需的時間。



4.2 收斂性測試

當數值模型完成架設後，接著必須針對數值網格進行收斂性測試，目的為找出合適的網格，當網格過粗時，雖說計算時間會比較短，但會導致計算不夠精細，無法準確捕捉自由液面；當網格過細時，雖說能捕捉更為精確的自由液面，但會導致計算時間過長，甚至會花上數倍的時間。收斂性測試分為兩個部分，一為 OpenFOAM 取造波結束時之波型，二為 NHWAVE 取波傳遞至斜板開始位置之測站 (13.5 公尺處) 時的波高資料，如圖 4.3。



圖 4.3: NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)

波從水槽最左端 (0 公尺處) 傳遞至水槽最右端 (20 公尺處)，電腦處理器為 Intel® Core™ i5-11400 CPU @ 2.6GHz × 6，記憶體 (RAM) 為 8GB。表 4.1 為選用的波型。

表 4.1: 選用波型之造波參數與選用原因

Case	ϵ'	σ'	δ/λ	選用原因
N-EXP25	0.27	0.16	0.04254	波長最短
N-EXP44	0.27	0.28	0.17016	波高最高

4.2.1 OpenFOAM 之收斂性測試

首先是 OpenFOAM 的收斂性測試，使用 6 核心平行計算，將模擬時間設置為造波板移動時間 (τ)，如圖 4.4 所示兩種極端波型都具有收斂，由表 4.2 所顯示的

各資料，最終 OpenFOAM 選擇以 800*600 作為 OpenFOAM 模擬網格數 (水平網格數 800、垂直網格數 600；水平網格間距 0.025 公尺、垂直網格間距 0.0008 公尺)。

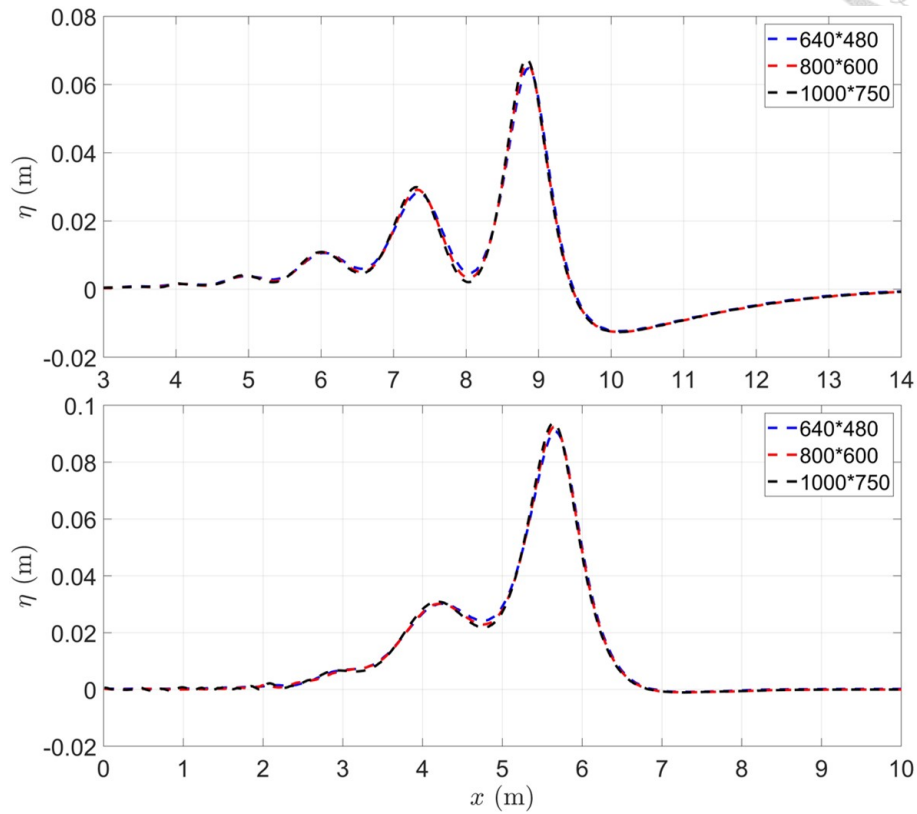


圖 4.4: OpenFOAM 初始波型收斂性測試 (取模擬時間結束之波型)
(上圖為 N-EXP25; 下圖為 N-EXP44)

表 4.2: OpenFOAM 模擬資料

Case	網格數	模擬時間 (s)	計算時間 (s)
N-EXP25	640*480	12.18	8831.98
	800*600	12.18	18957.90
	1000*750	12.18	41142.40
N-EXP44	640*480	7.22	6360.60
	800*600	7.22	13610.30
	1000*750	7.22	29211.20

4.2.2 NHWAVE 之收斂性測試



接著為 NHWAVE 收斂性測試，使用 5 核心平行計算。由於 NHWAVE 對我們來說並不熟悉，且垂直方向所使用的 σ 座標系統並不常見，須將兩個方向的網格數拆開分別做測試，才能清楚了解水平方向網格數與垂直方向網格數對波型的收斂性影響。收斂性結果如圖 4.5 所示，雖說圖 4.5-(a) 與圖 4.5-(c)，線段在後方相差有點大，所幸我們並不會使用到後方的資料，只需觀察最前方的波峰與波谷仍然具有收斂，並可由表 4.3 中無因次溯升值判斷網格有收斂，最後決定選擇 800*10 作為 NHWAVE 模擬網格數 (水平網格數 800、垂直網格數 10；水平網格間距 0.025 公尺)。

表 4.3: NHWAVE 模擬資料

Case	網格數	模擬時間 (s)	計算時間 (s)	R/h
N-EXP25	400*10	20	446.06	0.708
	800*10	20	903.53	0.803
	1600*10	20	2846.54	0.856
	網格數	模擬時間 (s)	計算時間 (s)	R/h
	800*5	20	306.73	0.803
	800*10	20	903.53	0.803
	800*20	20	3119.49	0.802
Case	網格數	模擬時間 (s)	計算時間 (s)	R/h
N-EXP44	400*10	20	598.21	1.029
	800*10	20	824.79	1.144
	1600*10	20	2632.94	1.194
	網格數	模擬時間 (s)	計算時間 (s)	R/h
	800*5	20	277.63	1.136
	800*10	20	824.79	1.144
	800*20	20	2837.64	1.147

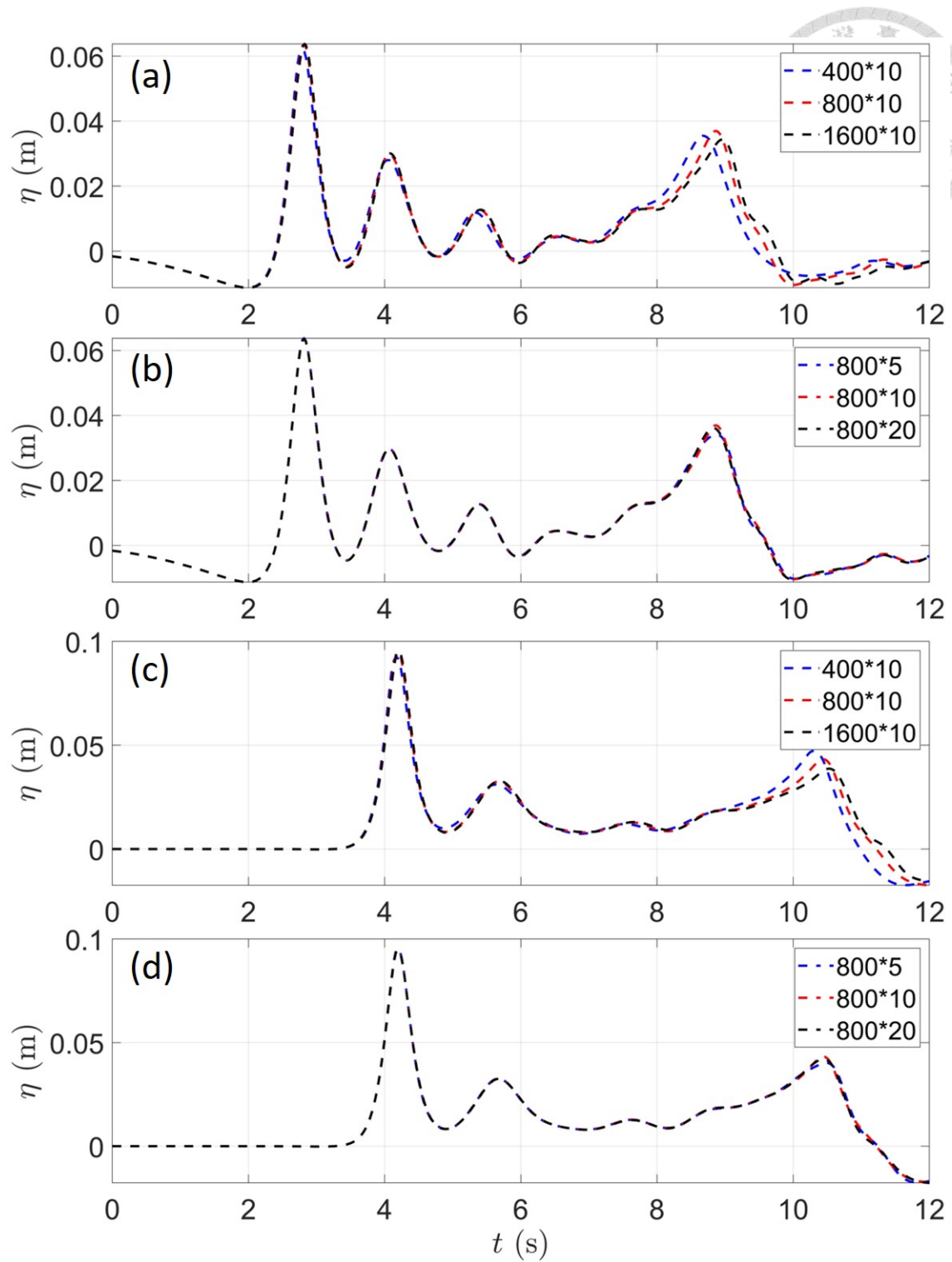


圖 4.5: NHWAVE 之測站水位歷時圖，測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m。 (a) N-EXP25 水平方向收斂性測試; (b) N-EXP25 垂直方向收斂性測試; (c) N-EXP44 水平方向收斂性測試; (d) N-EXP44 垂直方向收斂性測試。



4.3 溯升值驗證

在建立好數值水槽模型的邊界條件與初始條件，以及進行網格收斂性測試確認網格數之後，本節將開始進行溯升值的驗證，模擬皆在斜率 1:10 斜板，設置在水槽 13.5 公尺之斜板進行溯升模擬，並與陳玟諭 (2023) 的水槽實驗數據進行驗證，以確保 NHWAVE 在模擬長波傳遞與溯升的可信度，分別以孤立波以及 N 型波進行溯升模擬。由於數值水槽模型設置為二維水槽，在模擬中只取最大溯升值，而實驗水槽為三維的，數據中存在最大溯升值、最小溯升值與平均溯升值，本研究取實驗數據中的最大溯升值數據來驗證模擬的溯升值。

4.3.1 孤立波溯升值驗證

在 NHWAVE 中，孤立波造波只需填入水深 (h) 與波高 (H)，靜止水深固定為 0.23 公尺，波高則利用造波非線性參數 (ϵ') 乘上靜止水深得出，其中造波非線性參數設定範圍在 0.02~0.44，相關資料可參考附錄 A 中的表 A.1，表 A.3 為實驗結果與模擬結果，實驗 H/h 與模擬 H/h 皆為斜板開始位置之測站 (水槽 13.5 公尺處) 所測得之數據。由圖 4.6 可以發現 NHWAVE 在孤立波溯升的模擬表現不錯，NHWAVE 在模擬孤立波溯升具有可信度。

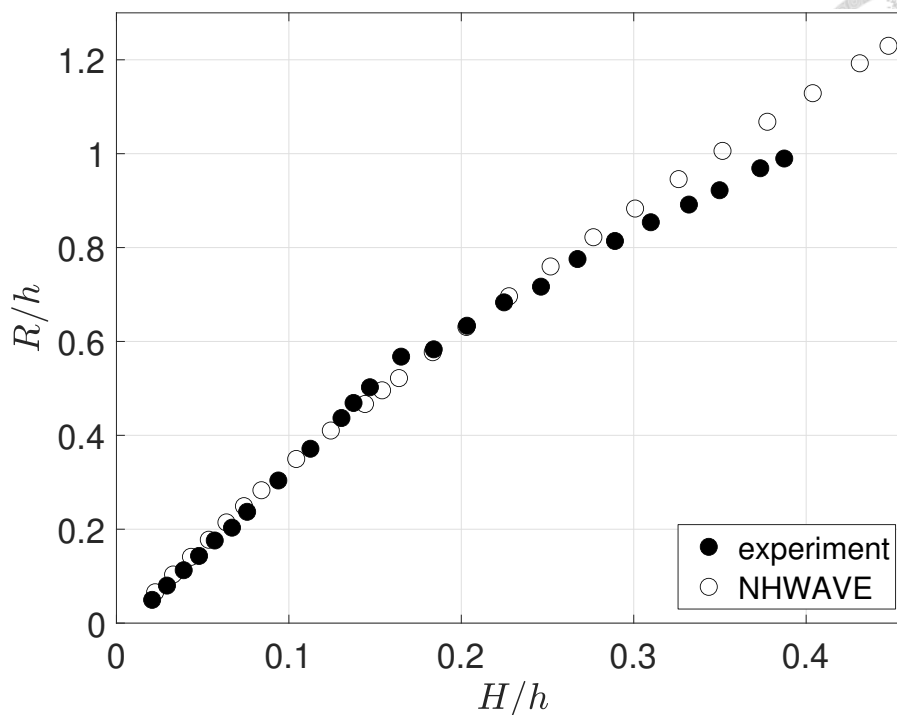


圖 4.6: 孤立波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

4.3.2 N 型波溯升值驗證

在小節 4.1.3 中已說明 N 型波初始波型資料轉換方式，將資料由 OpenFOAM 轉換至 NHWAVE 的方法。造波的三大統御參數為非線性參數 (ϵ')、頻散參數 (σ')、偏心率 (δ/λ)，透過改變三種參數來得到不同的 N 型波，其中非線性參數設定範圍在 0.1~0.4、頻散參數設定範圍在 0.16~1.64、偏心率設定範圍在 -0.17016~0.17016，各 N 型波的詳細參數設定可參考附錄 A 中的表 A.2。附錄 A 中的表 A.4 中，有部分 N 型波無法透過 NHWAVE 模擬 (在案例前加上 * 表示)，主要有兩種因素：(1) 在 N-EXP10~N-EXP13 中，由於非線性太大，波型也跟著變大，使得在使用 OpenFOAM 模擬造波就已經出現波浪破碎的情形，初始波型破碎，導致在資料轉換時會出錯，因此無法使用 NHWAVE 繼續模擬波浪的傳遞及溯升，可參考圖 4.7、4.8，當初始波型凹凸不平且存在明顯的上下震盪數值時，則視為初始造波破碎。(2) 在 N-EXP26~N-EXP29 與 N-EXP45~N-EXP60 中，由於這幾個波型的造波時間較長，造波板的移動時間需要耗時較久，導致當 OpenFOAM 模擬造波

結束，將得到的初始波型轉換至 NHWAVE 時，波峰位置已經超過測站抵達斜板上。

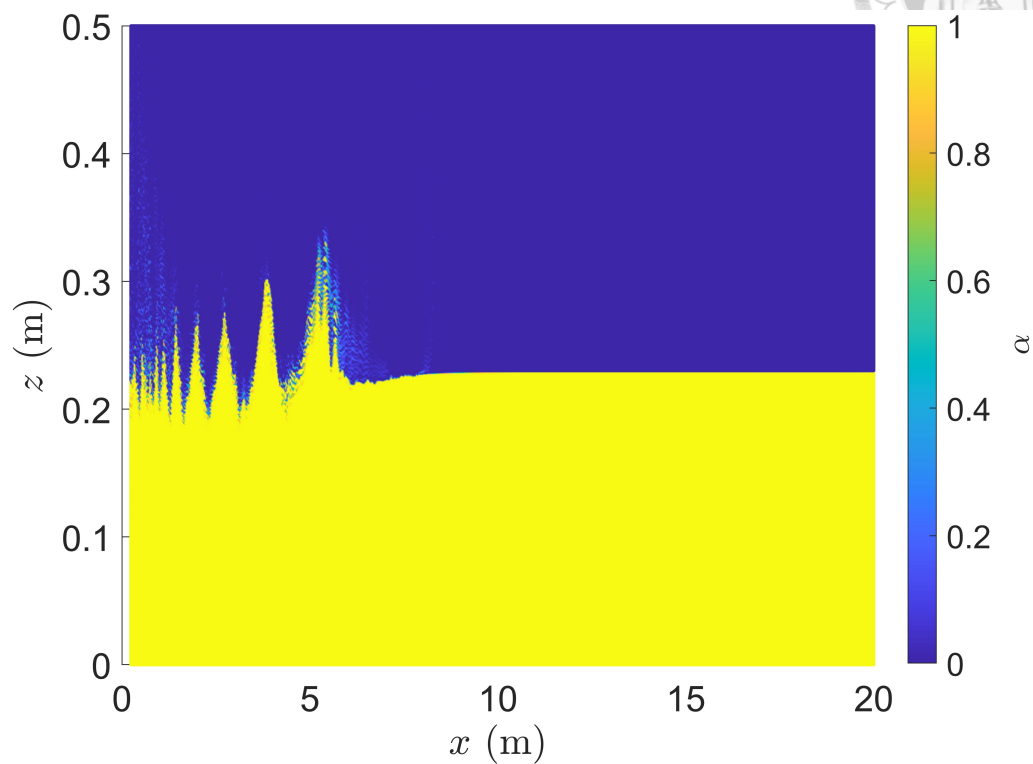


圖 4.7: OpenFOAM 初始輸出資料 (N-EXP10)

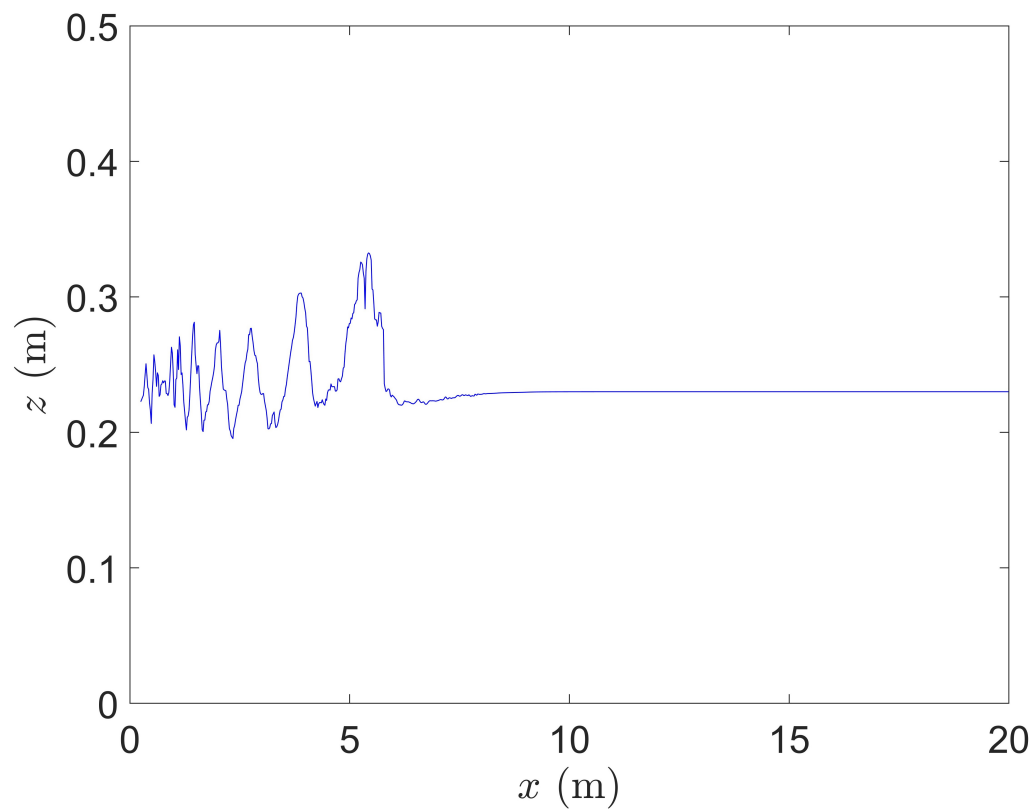


圖 4.8: 初始資料求出之初始波型 (N-EXP10)

由圖 4.9 可以發現 NHWAVE 在 N 型波溯升的模擬表現也非常好，NHWAVE 在模擬 N 型波溯升具有可信度。其中圖 4.9 中，有關 N 型波的分類會在下一章進一步說明。此外，由於 N 型波具有前導下沉波谷，在前導波峰抵達斜板，溯升現象發生前，海水位會受到前導下沉波谷的影響出現水面線退位現象，而我們將實驗的水面線退位值與使用 NHWAVE 模擬的水面線退位值找出並作圖，如圖 4.10，部分案例在實驗中不存在水面退位值，是因為這些 N 型波在測站沒有量測到前導下沉波谷，因此水面退位值沒有紀錄，而這些案例在模擬中捕捉到的水面退位值也近乎為 0。可見 NHWAVE 不僅在模擬溯升表現上不錯外，水面線退位的表現也相當不錯，使用 NHWAVE 模擬 N 型波是具有可信度的。

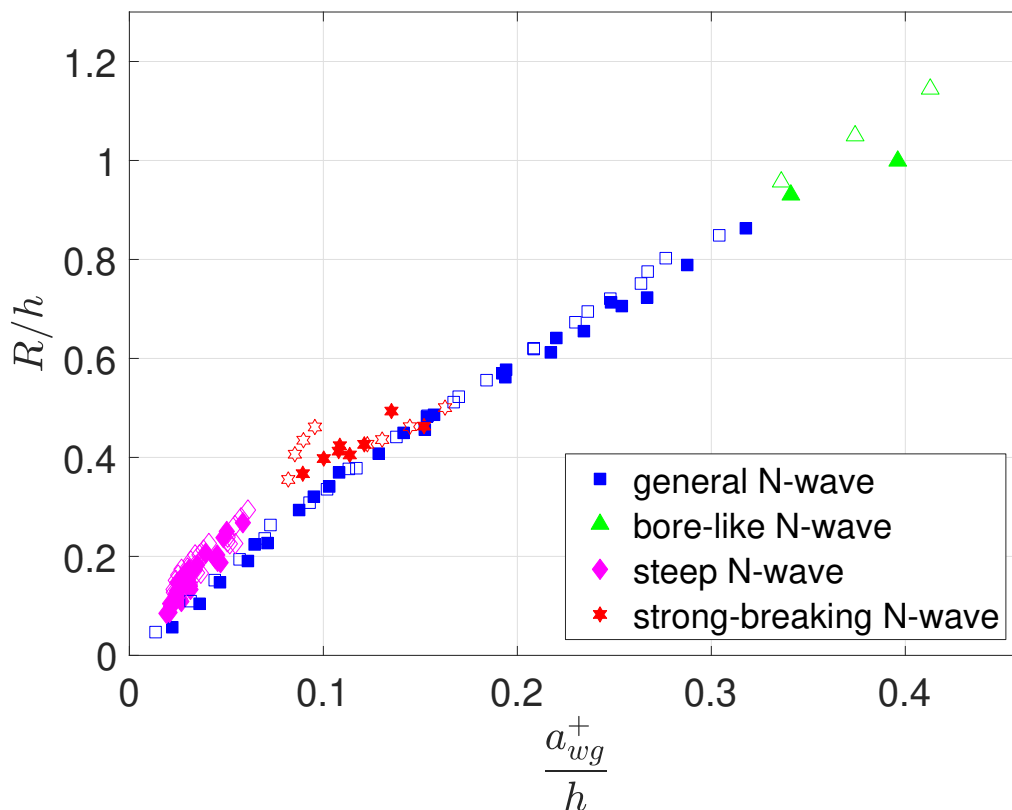


圖 4.9: N 型波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)

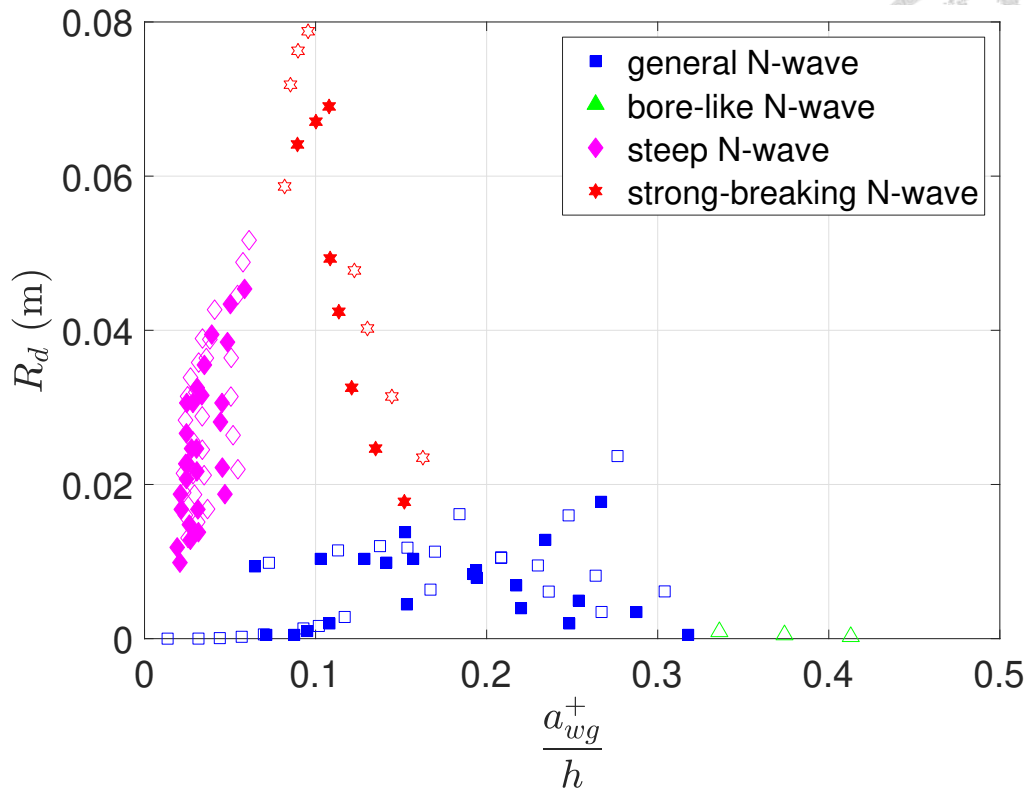


圖 4.10: N 型波水面退位值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)

4.4 速度場驗證

速度場驗證採用的 N 型波波型為施文育 (2022) 中提到的四種 N 型波波型，可參考表 4.4，並與施文育 (2022) 的實驗數據與模擬數據進行驗證。數值水槽模型為了配合實驗設置也隨之調整，有更動的部分為水深改 0.15 公尺、無設置斜板以及測站位置改為水槽 9.5 公尺處。

由於施文育 (2022) 中模擬數據所使用的模擬軟體為節 1.4 中所提到的 OpenFOAM 與 olaFlow，能夠直接模擬 N 型波的造波與傳遞，在後面的自由液面高程與水平速度的比較圖中以紅色表示，而實驗數據則以藍色表示。本研究所使用的 NHWAVE，如同本章最一開始所描述的，需借助 OpenFOAM 與 olaFlow 來完成 N 型波的造波，接著以小節 4.1.3 初始波型轉換方式，轉換為 NHWAVE 的資料形式，使 NHWAVE 繼續模擬波浪的傳遞，模擬時間設置為 10 秒，以黑色線條

表示。四組 N 型波的造波結束時間 (τ)、造波結束時前導波峰的所在位置與後續使用 NHWAVE 模擬的波浪傳播距離可參考表 4.4。



表 4.4: 施文育 (2022) 之 N 型波造波參數與本研究模擬資料

Case	h (m)	ϵ'	σ'	δ/λ	τ (s)	前導波峰位置 (m)	傳播距離 (m)
C13	0.15	0.33	0.17	0.04254	9.28	5.6375	14.3625
C14	0.15	0.25	0.13	0.04254	12.10	7.3375	12.6625
C17	0.15	0.27	0.28	0.04254	5.62	3.1625	12.7000
C18	0.15	0.19	0.38	0.04254	4.12	2.0875	12.2750

施文育 (2022) 中的實驗數據與 OpenFOAM 模擬數據以及本研究 NHWAVE 的模擬數據各自擁有的時間資料皆不同，因此我們將前導波峰通過測站 (水槽 9.5 公尺處) 時定為 $t = 0$ ，使三組數據的時間資料對齊。先進行波型驗證，透過比對測站量測到的自由液面資料，驗證數值模擬中的 N 型波傳遞是否與真實物理世界傳遞情形相同，如圖 4.11、4.12、4.13、4.14，四個案例中，發現 NHWAVE 在自由液面高程的捕捉中，前導波的波峰以及波谷表現不錯，後面的尾波則不太完美。接著驗證中間水深的水平速度資料，找出各波型在水槽 9.5 公尺、水深 0.075 公尺處的水平速度，如圖 4.15、4.16、4.17、4.18，前導波的波峰與波谷經過時，所量測到的中間水深之水平速度十分貼近，尾波的表現尚可。最後看到整個垂直方向的速度場，如圖 4.19、4.20、4.21、4.22、4.23、4.24、4.25、4.26。雖然 NHWAVE 沒有完整貼合所有數據，不過最前方的前導下沉波谷以及第一個波峰驗證結果，NHWAVE 的表現不錯，至於尾波的部分不完美但還算合理。

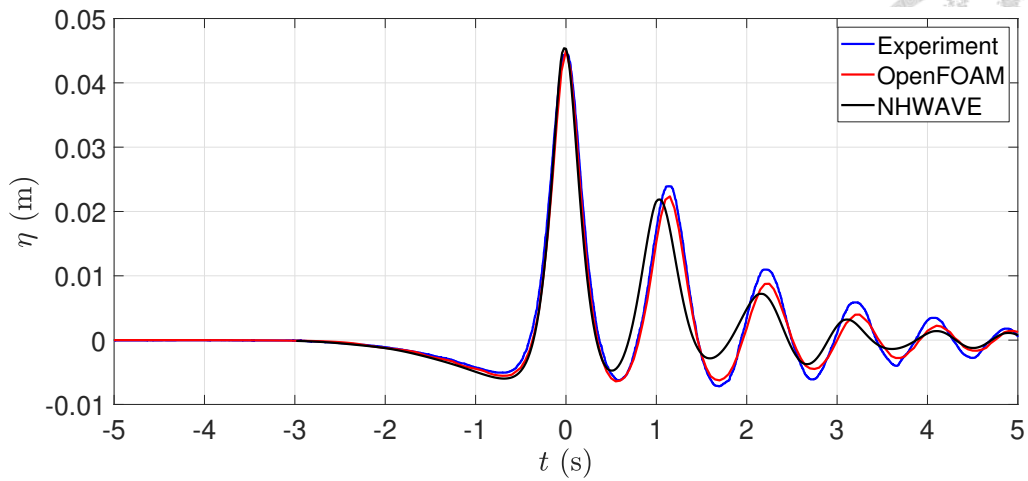


圖 4.11: N 型波案例 C13 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

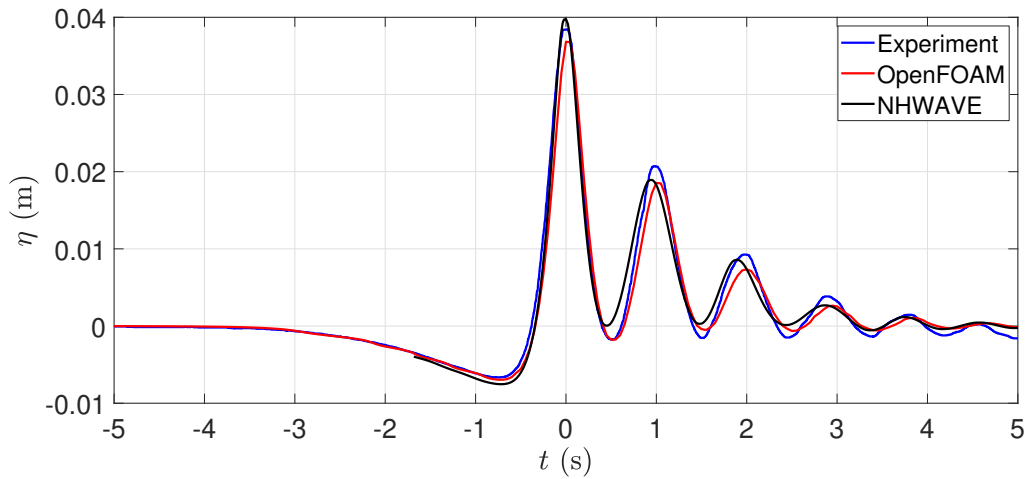


圖 4.12: N 型波案例 C14 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

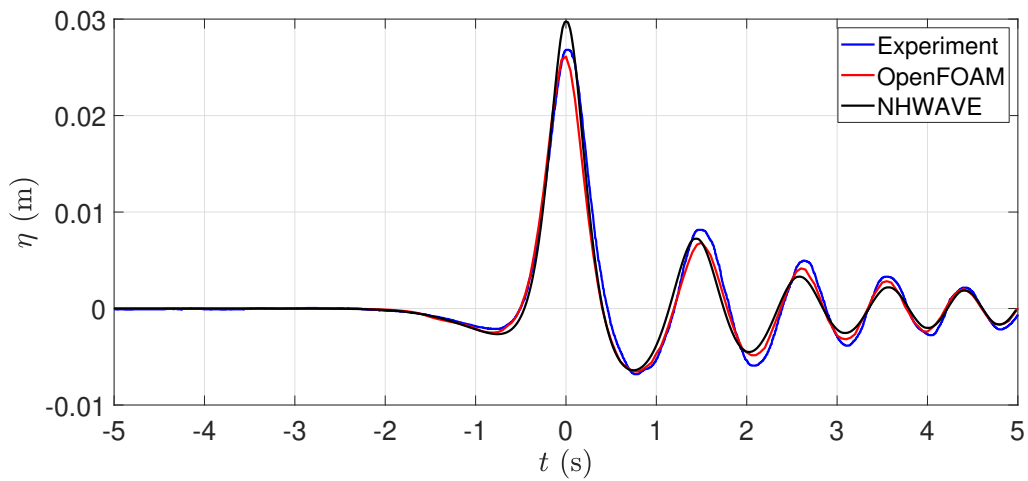


圖 4.13: N 型波案例 C17 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

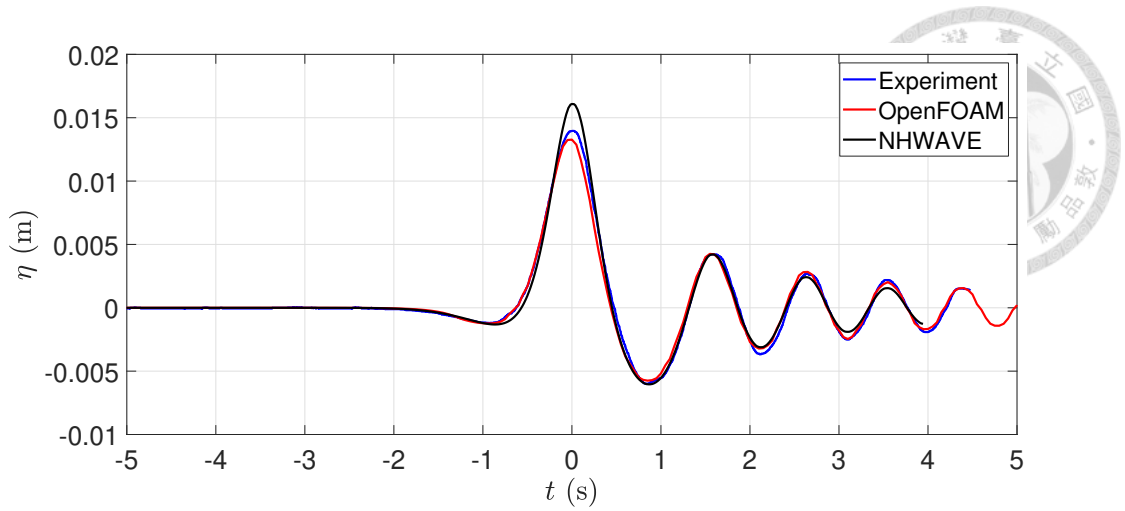


圖 4.14: N 型波案例 C18 的自由液面高程 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

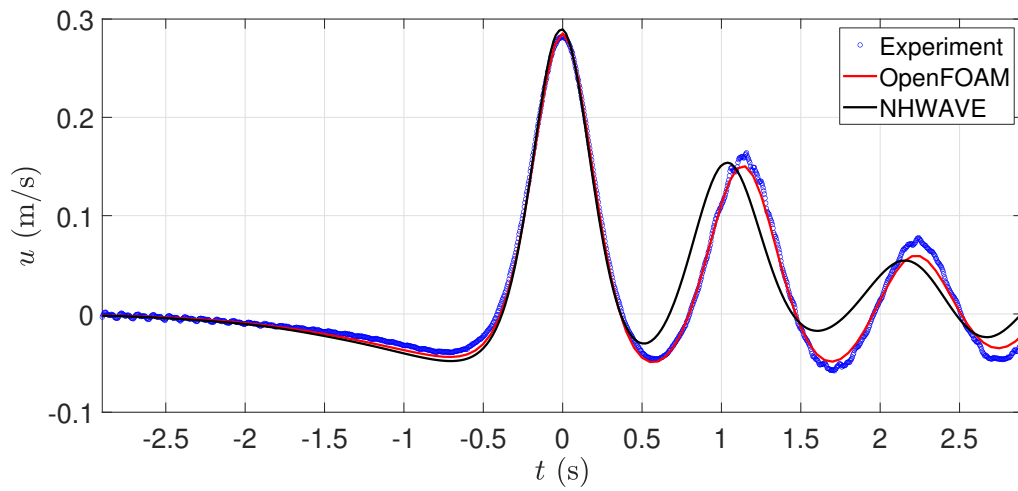


圖 4.15: N 型波案例 C13 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

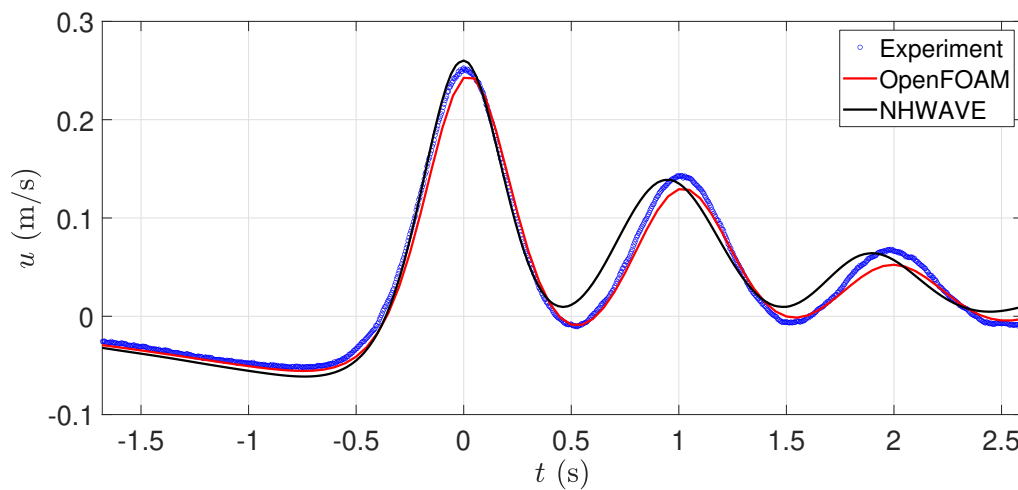


圖 4.16: N 型波案例 C14 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

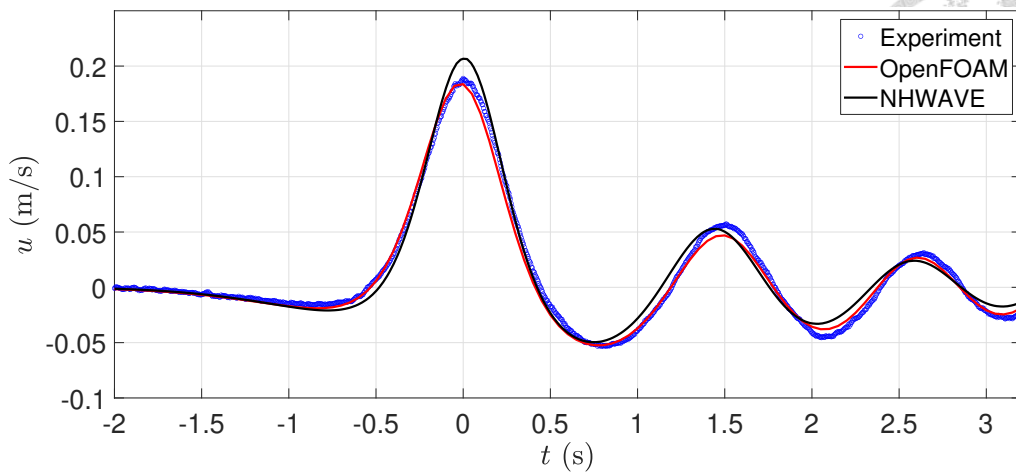


圖 4.17: N 型波案例 C17 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

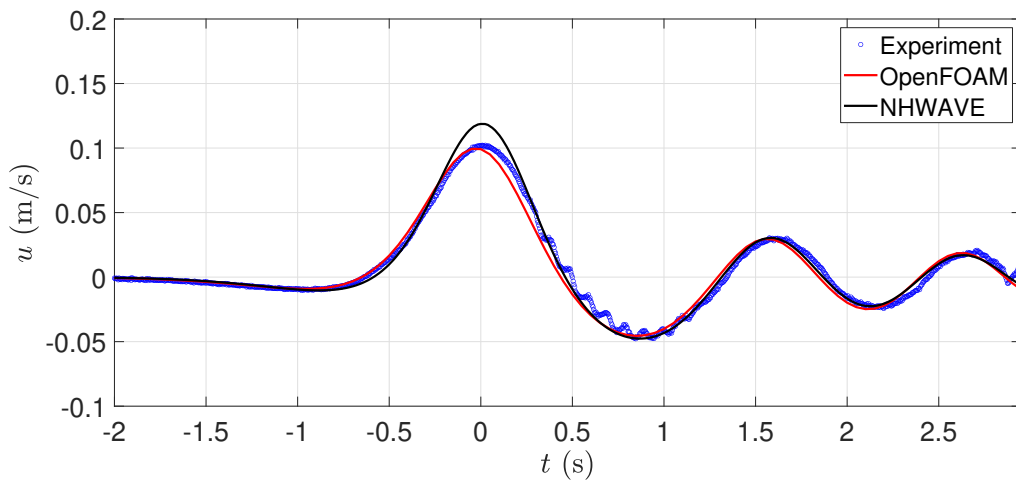


圖 4.18: N 型波案例 C18 的中間水深之水平速度 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)

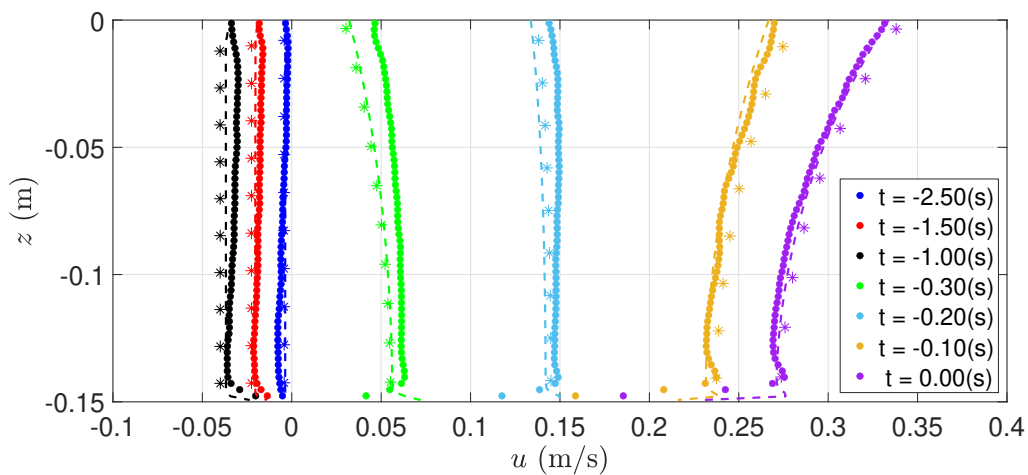


圖 4.19: N 型波案例 C13 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●: 實驗; --: OpenFOAM; *: NHWAVE)

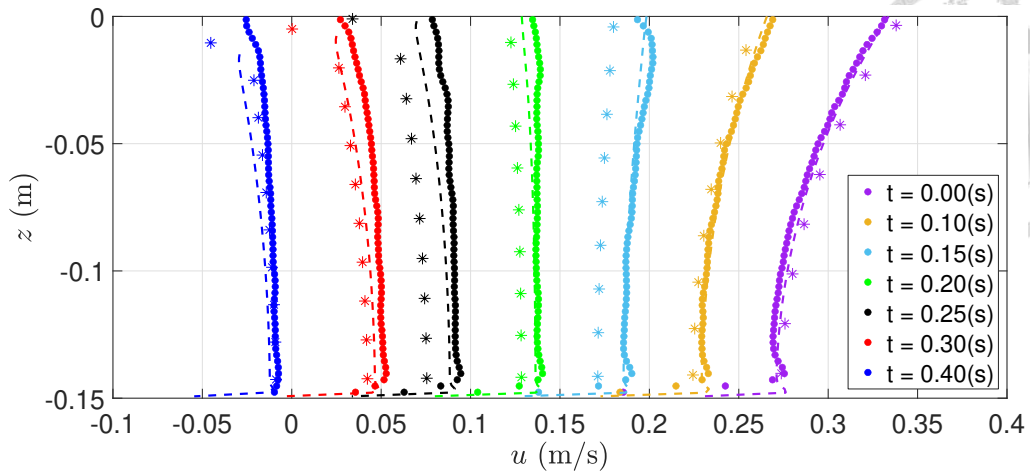


圖 4.20: N 型波案例 C13 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWave)

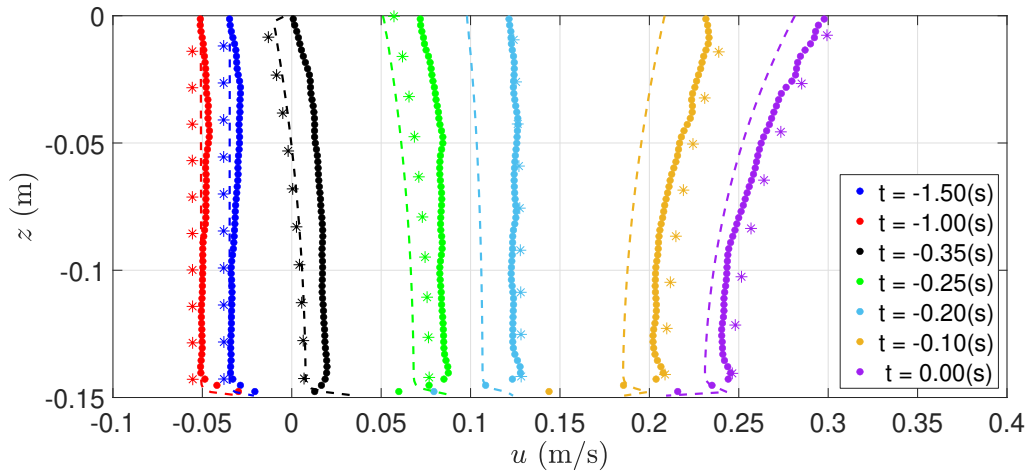


圖 4.21: N 型波案例 C14 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWave)

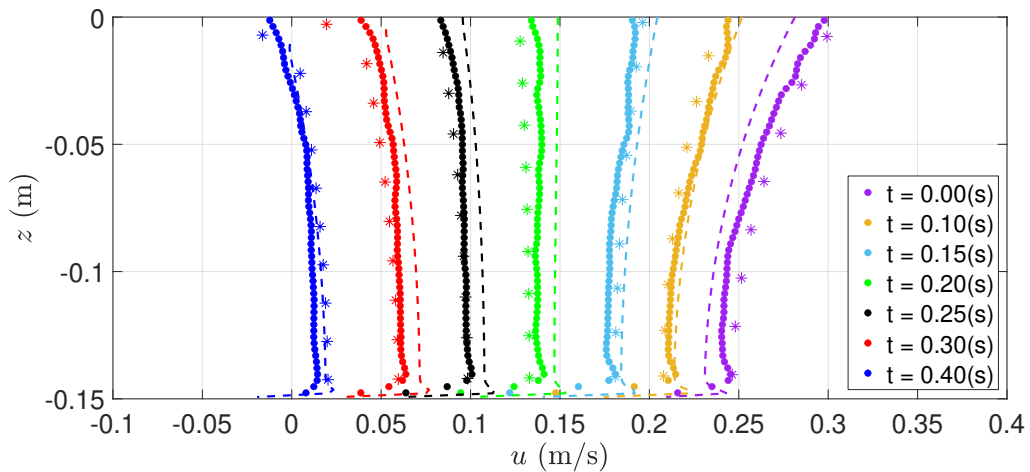


圖 4.22: N 型波案例 C14 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWave)

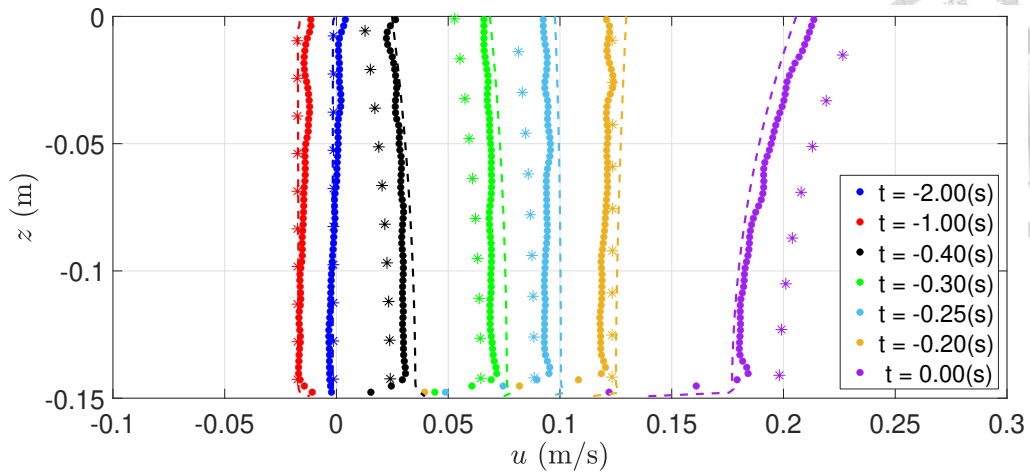


圖 4.23: N 型波案例 C17 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●: 實驗; --: OpenFOAM; *: NHWAVE)

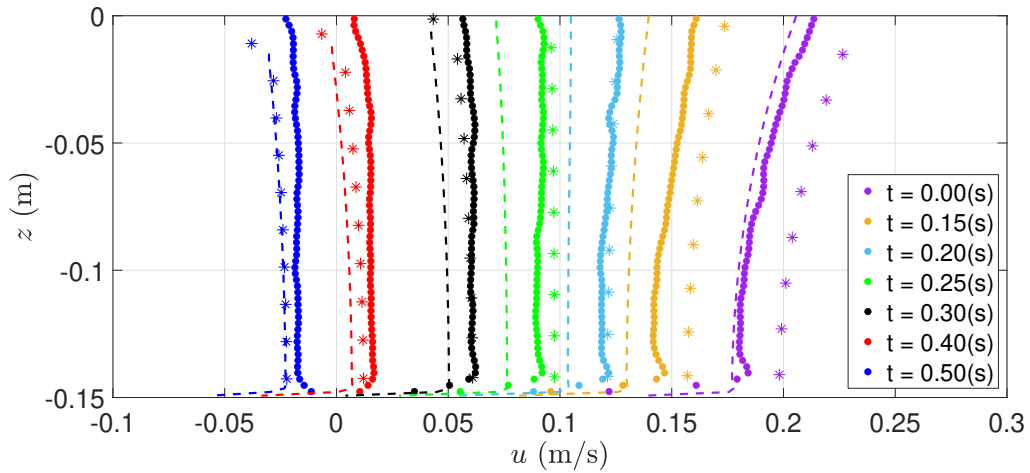


圖 4.24: N 型波案例 C17 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●: 實驗; --: OpenFOAM; *: NHWAVE)

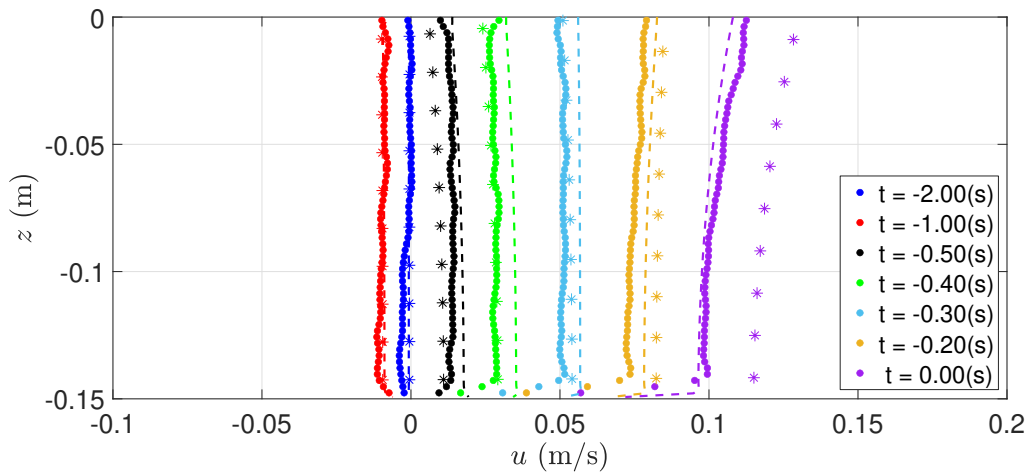


圖 4.25: N 型波案例 C18 的速度場資料 (波峰抵達測站前，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●: 實驗; --: OpenFOAM; *: NHWAVE)

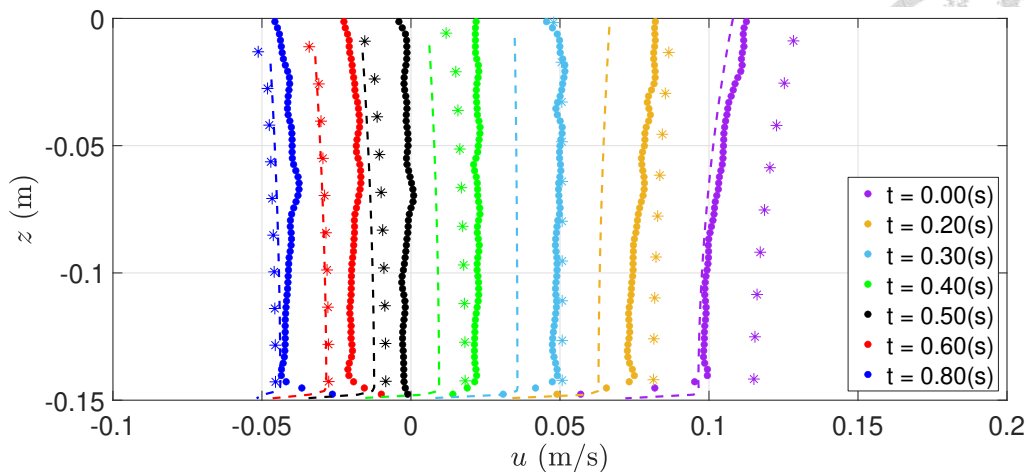


圖 4.26: N 型波案例 C18 的速度場資料 (波峰抵達測站後，波峰通過測站時 $t = 0$ ，測站位於 $x = 9.5$ m)(●：實驗；--：OpenFOAM；*：NHWAVE)

4.5 改變斜板位置之數值水槽架設與驗證

由於 N 型波會受到頻散的影響，波型會隨著傳播距離而有所改變，我們透過將斜板前移，調整波浪傳播距離，來得到不同的 N 型波波型，觀察 N 型波的改變。為此必須將 NHWAVE 數值水槽重新架設，邊界條件、水深與造波相關之設定皆相同，有更動的地方為計算域尺度，長縮短為 15 公尺，水平方向網格數減少至 600(網格間距維持 0.025 公尺)，並將斜率 1:10 之斜板改至水槽 7 公尺處，如圖 4.27。以陳玟諭 (2023) 的實驗數據作驗證。

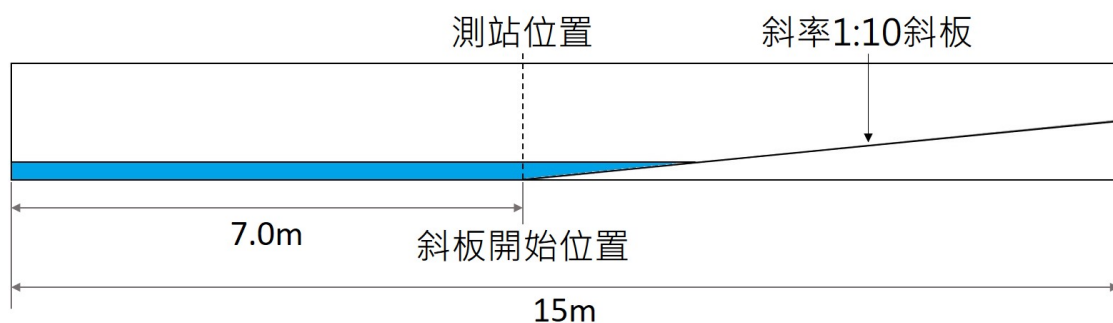


圖 4.27: 斜板前移後之 NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)

孤立波與 N 型波的造波參數與原先相同，詳細的造波參數設定可參考附錄 A 中的表 A.1、A.2，斜板前移後，孤立波的實驗與模擬結果可參考附錄 A 中的表

A.5，由圖 4.28 觀察斜板前移後實驗與模擬的比較，發現孤立波的溯升模擬也依然具有可信度。而 N 型波則因為斜板前移，導致 N-EXP24、N-EXP25 在造波時間結束時，初始波型轉換至 NHWAVE，波峰已經傳遞超過斜板開始的位置，因此無法套用至 NHWAVE 使其繼續模擬波的傳遞與溯升，實驗與模擬的結果如附錄 A 中的表 A.6 所示。由圖 4.29 可見，斜板前移後，NHWAVE 在模擬 N 型波的溯升依然是具有可信度的，其中有關 N 型波的分類會在下一章進一步說明。圖 4.30 中，水面退位值差異較大的為波型陡峭的 N 型波，而部分案例在實驗中不存在水面退位值，是因為這些 N 型波在測站沒有量測到前導下沉波谷，因此水面退位值沒有紀錄，而這些案例在模擬中捕捉到的水面退位值也近乎為 0。

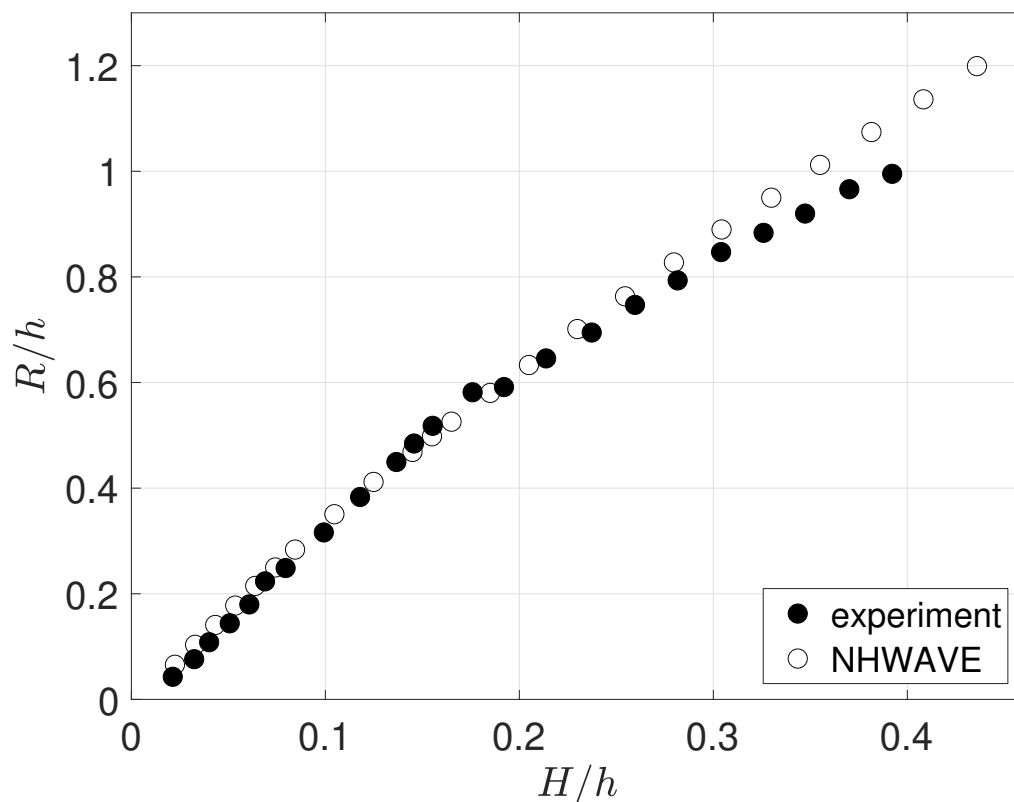


圖 4.28: 孤立波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)

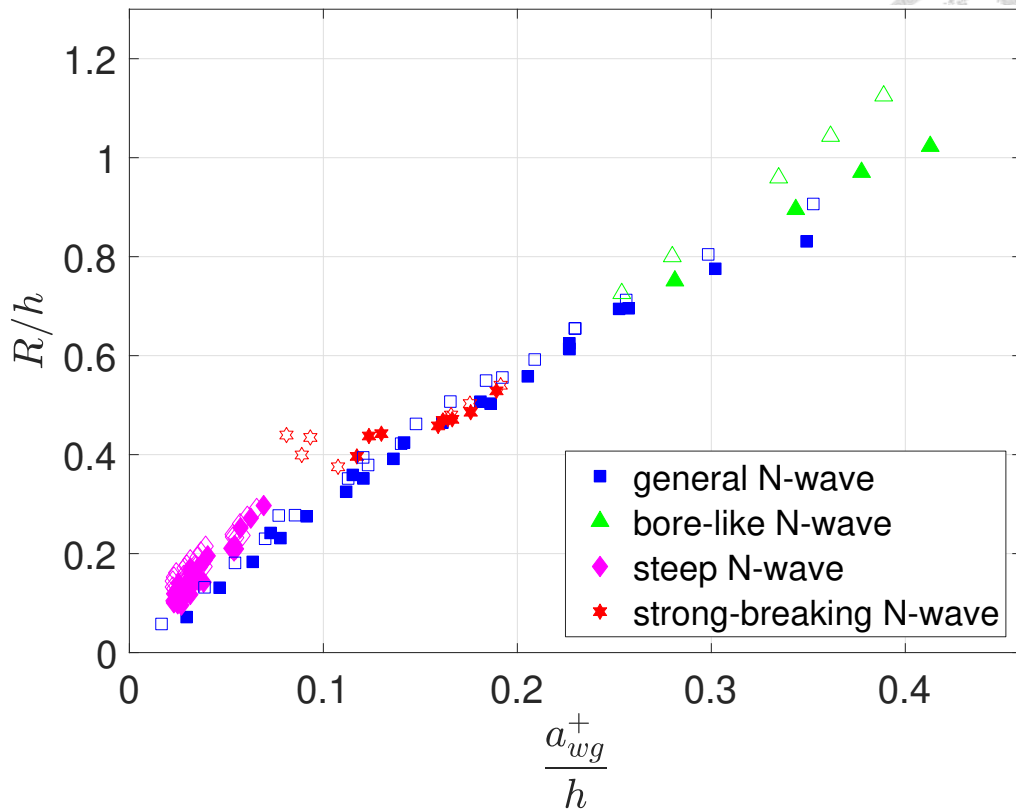


圖 4.29: N 型波最大溯升值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)

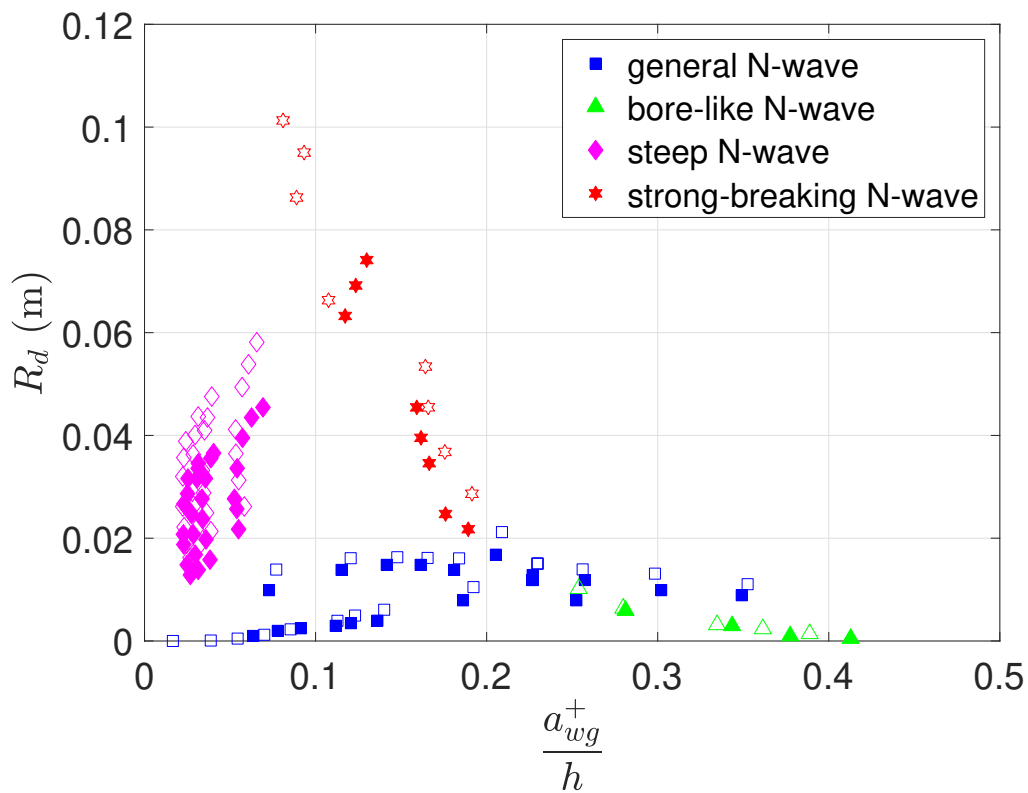


圖 4.30: N 型波水面退位值比較圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(實心圖示: 實驗; 空心圖示: NHWAVE)

4.6 改變斜板斜率之數值水槽架設與驗證

本研究會將置於水槽 13.5 公尺處的斜板更改斜率，將原先斜率 1:10 改為 1:20 與 1:40，由於斜率變小，水槽則需加長，數值水槽設置如圖 4.31、4.32，為了確保更改斜率後能夠準確的模擬溯升，必須與前人的實驗數據做比較，加以驗證。

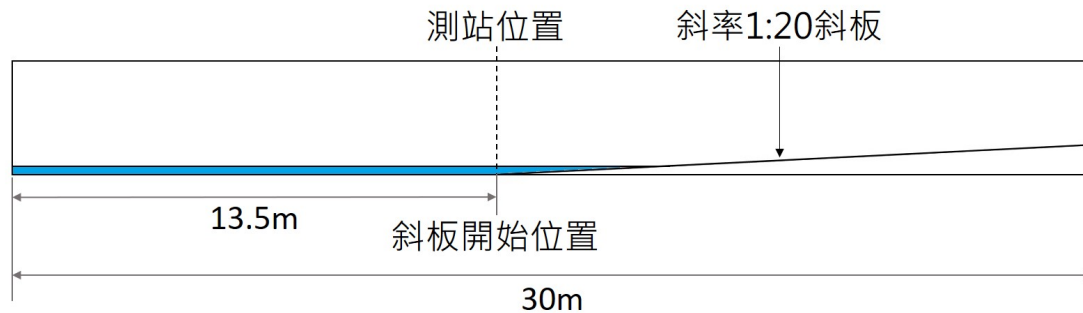


圖 4.31: 斜率 1:20 斜板之 NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)

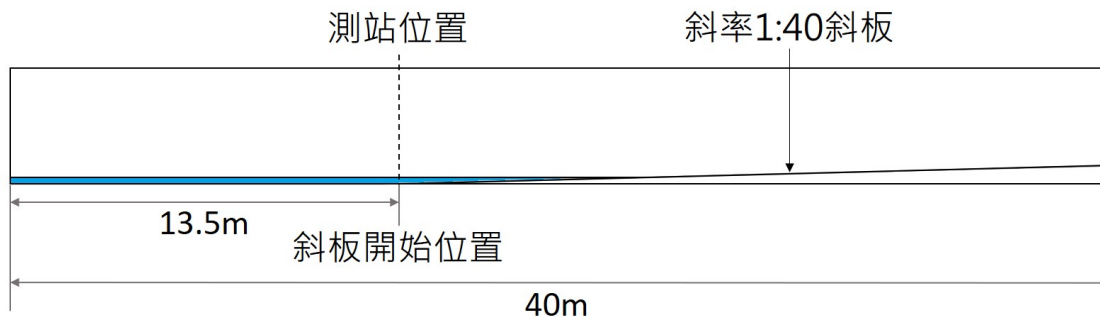


圖 4.32: 斜率 1:40 斜板之 NHWAVE 數值水槽示意圖 (依真實比例)

前人的實驗數據採用 Synolakis (1987) 在水槽長 14.86 公尺處設置斜率 1:19.85 之斜板並做孤立波溯升的水槽實驗數據，與本研究在水槽 13.5 公尺處設置斜率 1:20 斜板的孤立波溯升模擬數據進行驗證，實驗數據可參考附錄 A 中的表 A.7。NHWAVE 中能夠選擇指定阻力係數 (C_{d0} , drag coefficient) 或底部粗糙度 (Z_{ob} , bottom roughness) 來調整數值水槽中底部的摩擦力。原先，我們採用與斜率 1:10 斜板相同的底部粗糙度，設定為 0，發現模擬結果與前人的實驗數據在非線性較大時有落差，於是我們將底部粗糙度作為不同斜率斜板的模擬調校參數，透過調整底部粗糙度，使 NHWAVE 模擬的溯升值能夠貼近前人的實驗數據，如圖 4.33，

不同底部粗糙度的模擬結果可參考附錄 A 中的表 A.8。圖 4.33 中，當底部粗糙度逐漸增大，模擬的溯升值會越小，底部粗糙度為 0.0001 時，模擬結果與前人的實驗結果最貼近，因此，我們將斜率 1:20 的底部粗糙度設定為 0.0001，下一章會再以這個設定進行 N 型波的模擬。

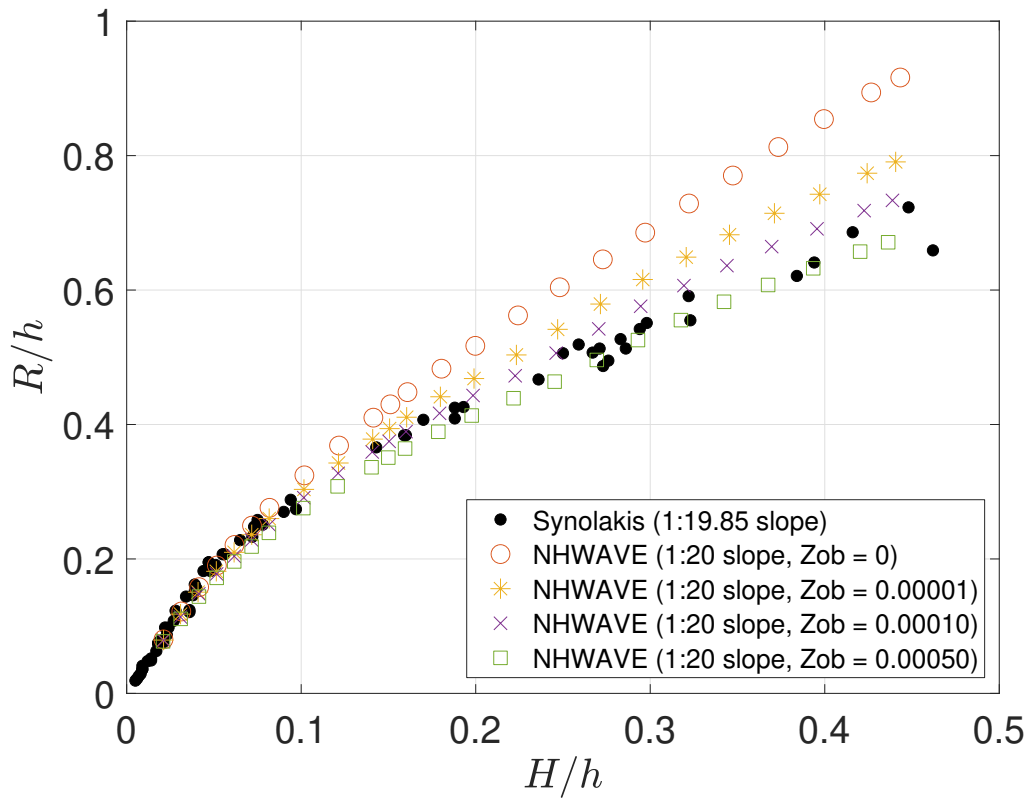


圖 4.33: 斜率 1:20 斜板之孤立波最大溯升值驗證圖

模擬孤立波於斜率 1:40 斜板的溯升也是以底部粗糙度進行模擬的調校，使用 Wu et al. (2018) 提出的經驗公式進行驗證，文中提到使用最小二乘法進行最佳擬和，推導出具有四個係數的新經驗公式，如下：

$$\frac{R}{H} = \frac{4.50(\xi_s)^{1.52}}{0.04 + (\xi_s)^{1.19}}, \quad (4.3)$$

其中 ξ_s 為碎波參數 (surf parameter)，由 Lo et al. (2013) 提出：

$$\xi_s = s \left(\frac{H}{h} \right)^{-\frac{9}{10}}, \quad (4.4)$$

其中 s 為斜板斜率，將本研究驗證用的實驗數據與模擬數據一同繪製在圖中，圖 4.34 中，斜率 1:40 斜板的模擬結果中，當底部粗糙度為 0.0001 時，與經驗公式較

貼合，因此，我們將斜率 1:40 的底部粗糙度設定為 0.0001，下一章會再以這個設定進行 N 型波的模擬，不同底部粗糙度的模擬結果可參考附錄 A 中的表 A.9。另外，斜率 1:10 斜板與斜率 1:20 斜板各自的實驗與模擬數據也標示於圖中，能再次從圖中得到驗證。

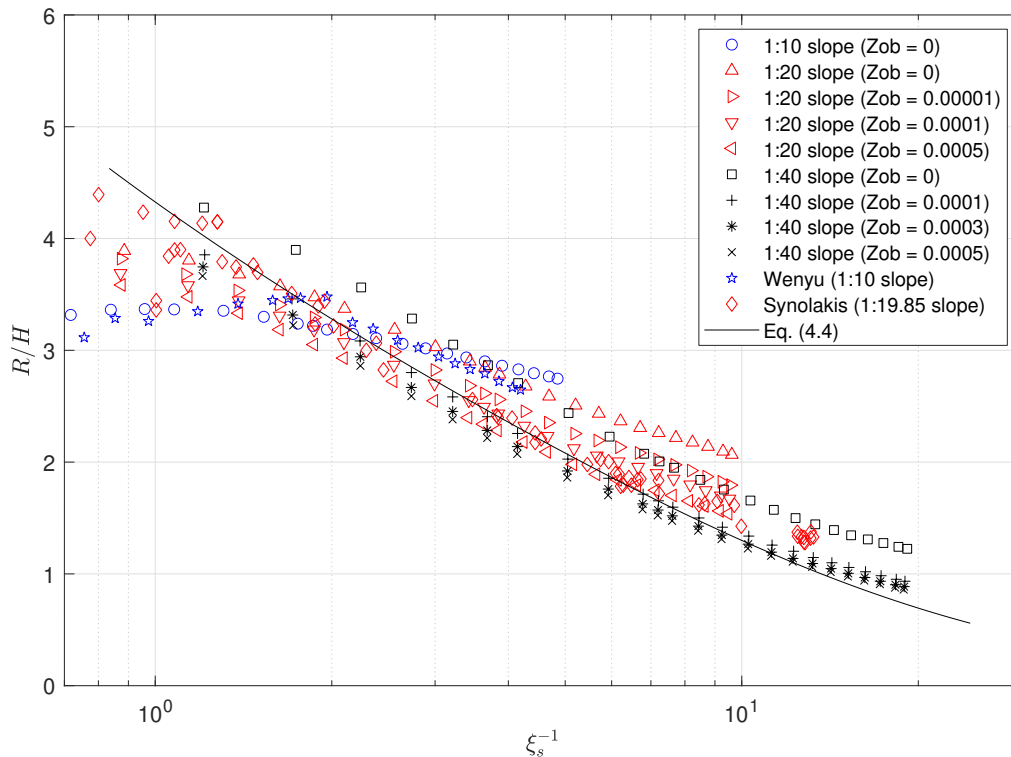


圖 4.34: 針對碎波參數的孤立波最大溯升值驗證圖

4.7 紊流耗散能量與損失能量的驗證

在節 3.4 中提到單位寬度之紊流耗散能量 ($E_{turbulent}$) 與損失能量 (E_{loss})，為了找出這些能量與波浪之間的關係，與陳玟諭 (2023) 的實驗數據相比對。實驗中有利用實驗影像判斷波浪溯升時的碎波結果並記錄下來，其中波浪破碎型態的種類主要分為以下四種：(1) 如果波峰變得不穩定並順著波浪的正面流下，產生泡沫狀的水面，就會發生溢出型碎波 (spilling breaker)。(2) 如果波峰在波浪的前方捲曲並落入波浪底部，則發生捲浪型碎波 (plunging breaker)，導致水花飛濺。(3) 如果波峰保持完整，同時波浪的前方下部變得更陡然後崩落，會發生崩潰型碎波

(collapsing breaker)，產生不規則的紊流水面。(4) 如果波峰保持完整，且波浪的前方表面在海灘上前進並有輕微的破碎，則會出現洶湧型碎波 (surging breaker)。可參考 Galvin (1968, 1972)

陳玟諭 (2023) 實驗中則以洶湧型碎波與捲浪型碎波為主，將實驗數據與本研究的模擬結果相比後發現 (可參考附錄 A 中的表 A.10 和 A.11，測站量測之非線性值及溯升值可參考附錄 A 中的表 A.3 和 A.5)，損失能量比與實驗中觀察溯升是否破碎具有一定的關係，損失能量比 (E_{loss}/E_{wave}) 即單位寬度損失能量與單位寬度總能量的比值，當損失能量比超過 5% 時，實驗中能夠明確觀察到洶湧型碎波的產生，因此本研究將損失能量比小於 5%，視為非破碎波；大於 5%，則視為破碎波。隨著孤立波的波高增加，實驗中的波浪破碎情形也更加劇烈，從原先溯升沒有破碎，轉為波浪前方有輕微破碎的洶湧型碎波，最後則變為會造成水花飛濺的捲浪型碎波，而模擬中波浪部份能量轉為紊流動能而造成紊流，並發生耗散，其中單位寬度之紊流耗散能量 ($E_{turbulent}$) 也隨著破碎逐漸劇烈而變大，本研究將單位寬度之紊流耗散能量視為波浪破碎的劇烈程度。



第五章 結果與討論



透過調整非線性參數 (ϵ')，改變孤立波的波型；透過調整三種不同的造波參數，非線性參數 (ϵ')、頻散參數 (σ')、偏心率 (δ/λ)，以模擬出不同波型的 N 型波。使用相同造波參數的孤立波與 N 型波，可參考附錄 A 中的表 A.1、A.2，在各個條件下 (斜率 1:10 斜板、斜板前移、斜率 1:20 斜板、斜率 1:40 斜板) 的模擬相關資料，可參考附錄 B。後續在能量的討論中，部份能量由以下參數無因次化表示：

$$E^* = \frac{E}{\rho g h^3} \quad (5.1)$$

其中 ρ 為水的密度。

5.1 分析孤立波與 N 型波溯升值之差異

當斜板為斜率 1:10 且斜板位置設置在 13.5 公尺處時，孤立波與 N 型波之溯升結果如圖 5.1，根據斜板前測站 (水槽 13.5 公尺處) 測得之波型特徵、溯升結果、能量表現，本研究將 N 型波分為四種不同的群組，將會在後面的各小節中逐一說明。孤立波與 N 型波模擬結果可參考附錄 B 中的表 B.1 與 B.2，其中 N-EXP10～N-EXP13 因為造波時初始波型破碎，在資料轉換時會出錯，因此無法模擬，而 N-EXP26～N-EXP29、N-EXP45～N-EXP60 則因造波時間太長，而無法模擬。

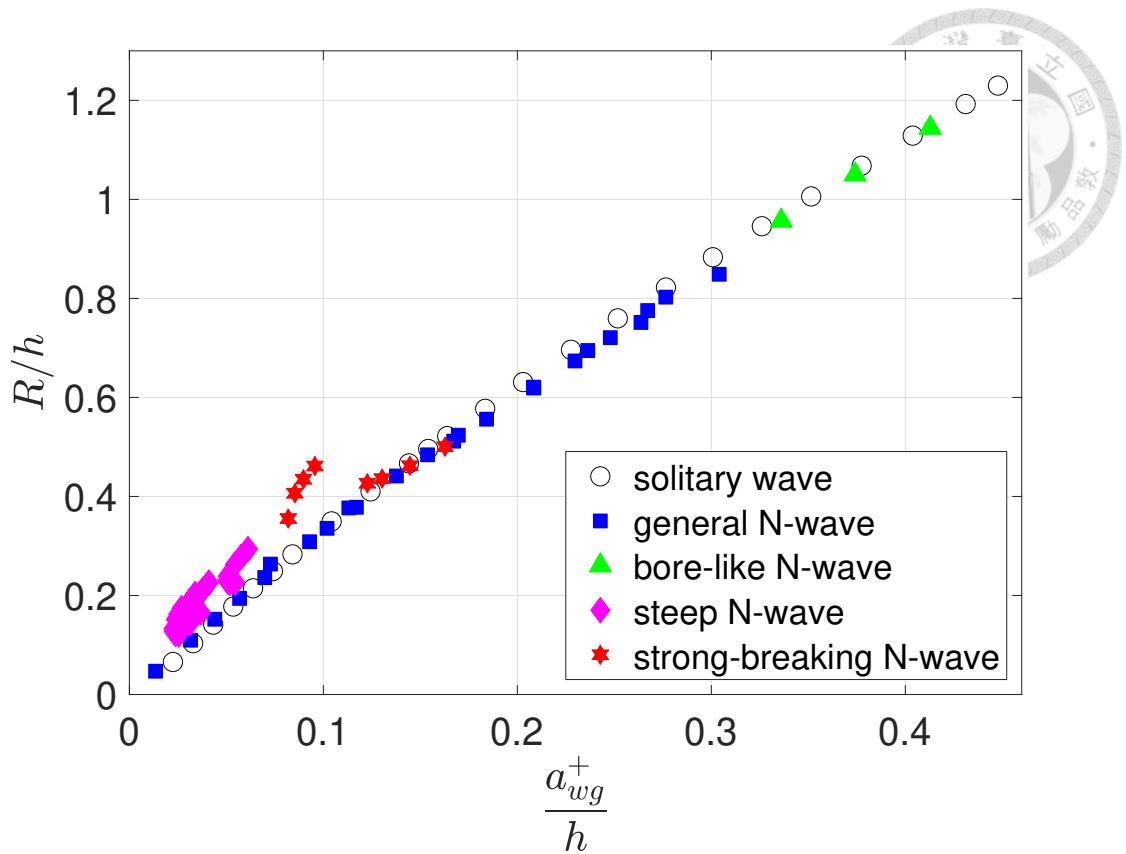


圖 5.1: 孤立波與 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5 \text{ m}$)

5.1.1 普通 N 型波 (general N-wave)

N-EXP01~N-EXP09、N-EXP14~N-EXP26、N-EXP38~N-EXP41 為普通 N 型波 (general N-wave)。當前導波波型具有前導下沉波谷，前導波峰與相對應孤立波波型貼近，溯升值趨勢類似於孤立波時，將其定義為普通 N 型波。利用節 3.4 提到的單位寬度損失能量 (E_{loss}) 將波浪再更進一步分類，如節 4.7 所述，若單位寬度損失能量比 (E_{loss}/E_{wave}) 小於 5%，視為非破碎波；大於 5%，視為破碎波。依循上述規則將溯升結果再更進一步分類，如圖 5.2 所示。

整體而言，普通 N 型波的溯升值會小於等於孤立波，進一步分析發現，在相同的非線性下，普通 N 型波會找到相對應的孤立波，在非破碎波時，普通 N 型波的溯升值與孤立波的溯升值相近，而破碎波時，普通 N 型波的溯升值則略低於孤立波的溯升值。為了找出破碎波時普通 N 型波的溯升值會低於孤立波的溯升值的

原因，找出相近的非線性下，相似的孤立波與普通 N 型波，如圖 5.3，取用案例為 S-EXP17 和 N-EXP25，兩者在波型上最大的差異就是普通 N 型波具有明顯的前導下沉波谷。在表 5.1 發現兩者在測站的非線性值近乎相同，普通 N 型波的溯升值較孤立波低，而損失能量與紊流耗散能量則比孤立波大，由此可知普通 N 型波溯升時，不僅損失的能量比較多，且波破碎的情形也比較劇烈。

在波浪溯升過程中，普通 N 型波前導波峰與孤立波在抵達斜板開始位置 (水槽 13.5 公尺處) 時，兩者速度向量相近，而前導下沉波谷抵達斜板後的速度則與緊接而來的前導波峰方向相反，導致普通 N 型波波浪前方比孤立波更為捲曲，使得波浪破碎更加劇烈，如圖 5.4。當普通 N 型波抵達斜板時，會因前導下沉波谷的到來，海水位出現明顯的倒退現象，如圖 5.5，以能量的角度來看，當波達到最大溯升值時，並不會剛好是位能最大，動能最小的時候，以單一個流體質點來看，達到最大溯升值時，波浪最前端的確是位於垂直高度最高，位能最大，然而，這邊的能量是整個模擬範圍水體的能量，因此最大溯升發生時，位能不一定是最大值，如圖 5.6，其中總能量逐漸下降的過程便是溯升時的破碎現象所造成的能量損失，可以看到普通 N 型波總能量下降的起伏比孤立波明顯許多，因破碎劇烈而損失更多的能量，可能會導致沿岸的沖刷更加嚴重，增加對淺灘的破壞。圖 5.6 中，孤立波總能量在最後會些微上升的原因，認為是模擬中網格為矩形，但抵達斜板時的水深非常的淺，水體質量可能受到高估，才會導致這樣的現象。

表 5.1: 孤立波 (S-EXP17) 與普通 N 型波 (N-EXP25) 資料 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	測站非 線性值	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP17	0.2766	0.1891	28.1157	0.2092	2.0056	7.13
N-EXP25	0.2765	0.1846	27.2856	0.2851	5.7285	20.99

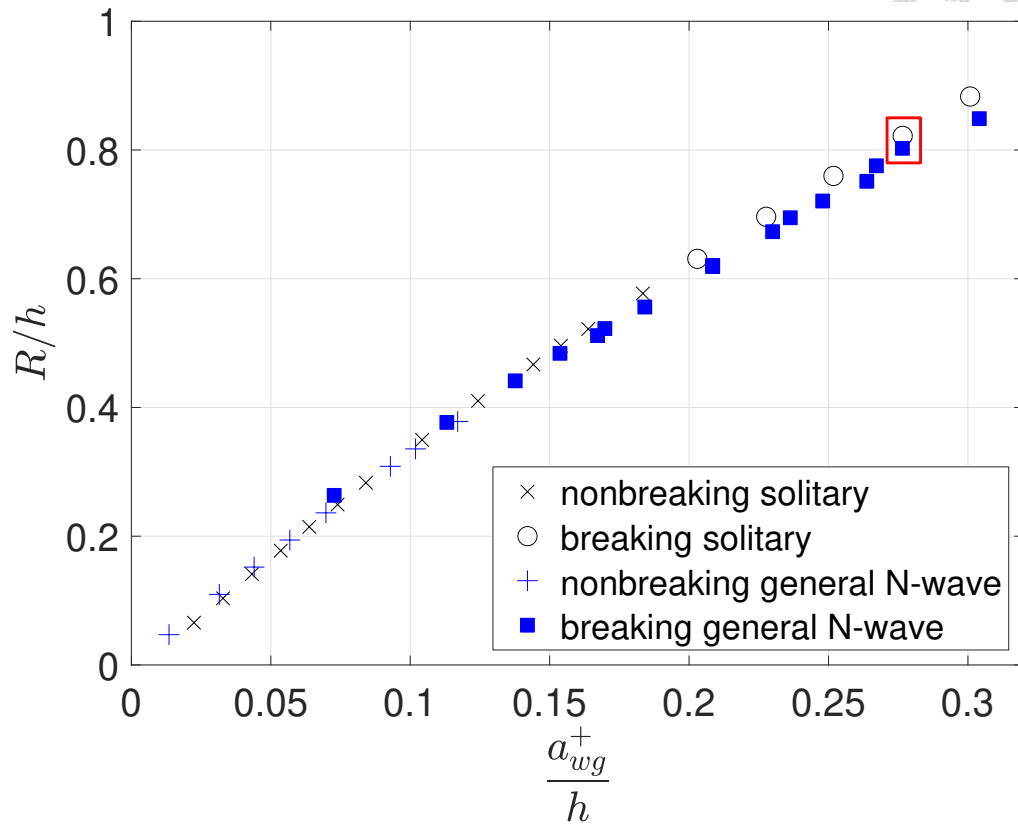


圖 5.2: 孤立波與普通 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(紅框為用來比較的兩個案例)

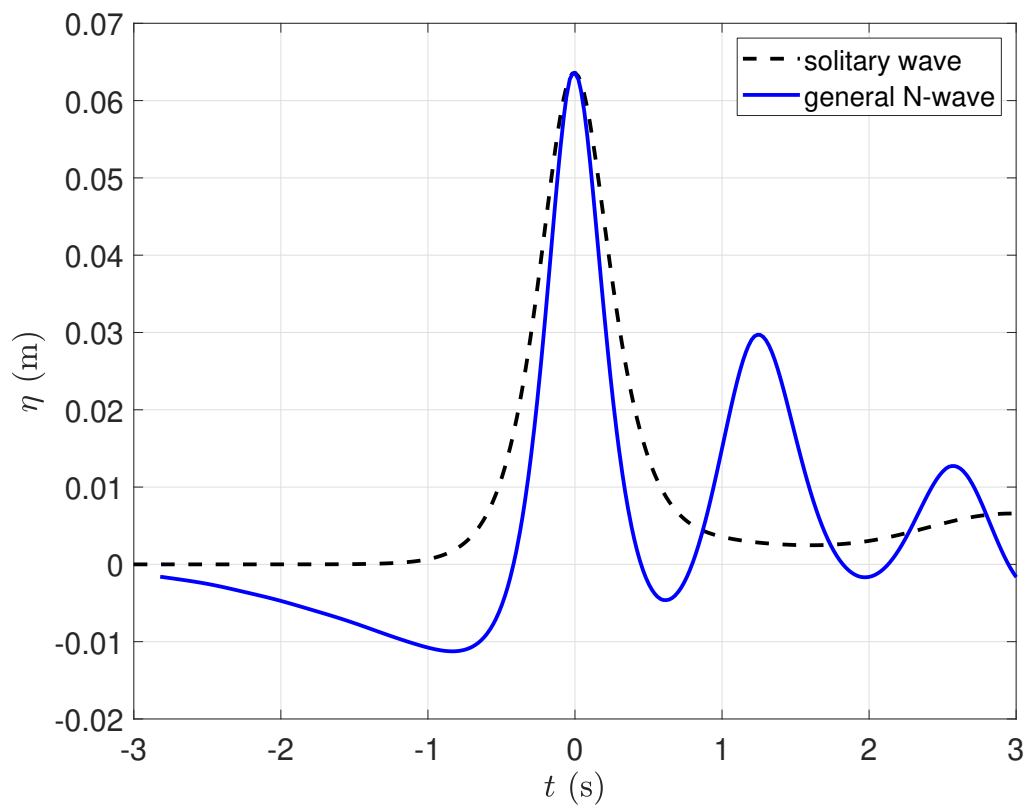


圖 5.3: 測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP17 與 N-EXP25)

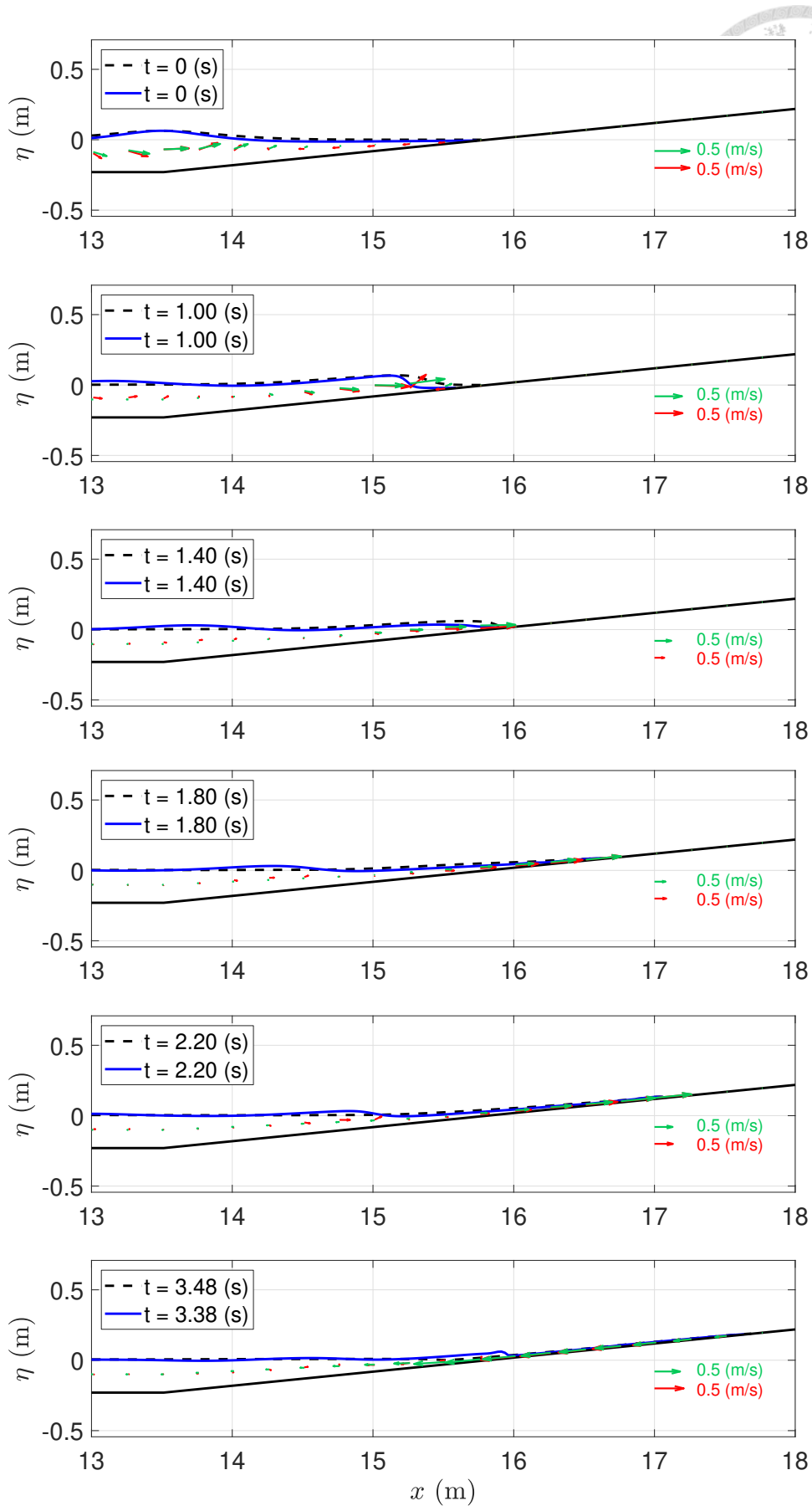


圖 5.4: 波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP17，綠色箭頭為其速度向量；藍色實線為 N-EXP25，紅色箭頭為其速度向量)

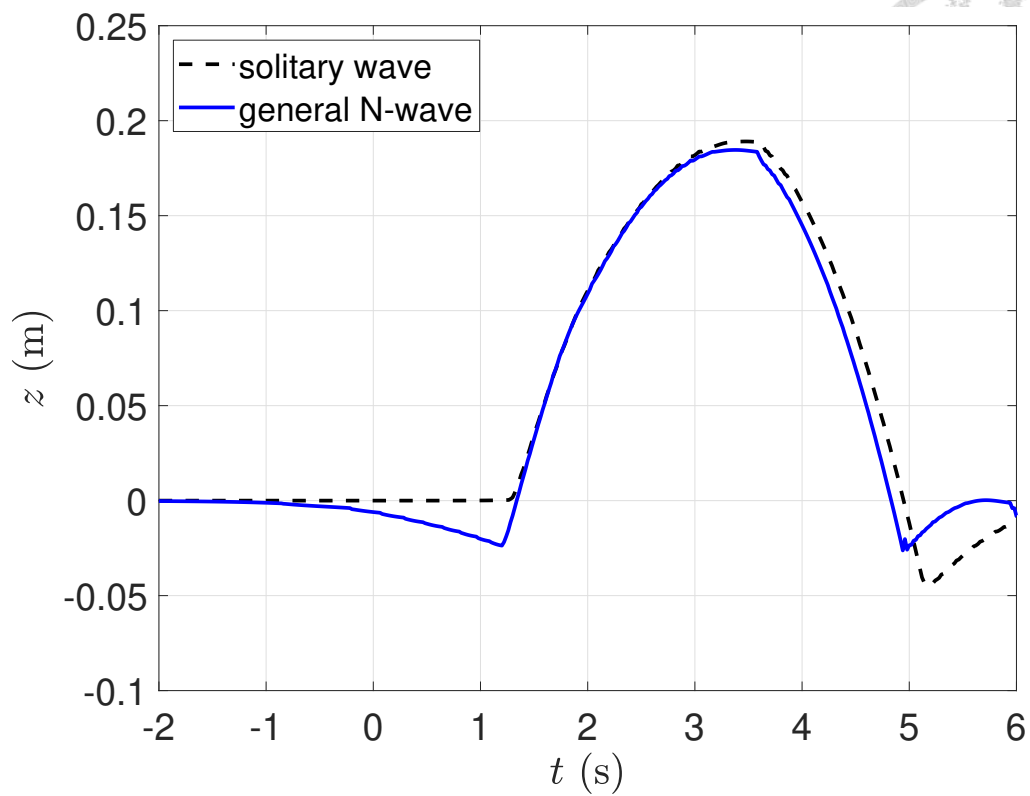


圖 5.5: 海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP17 與 N-EXP25)

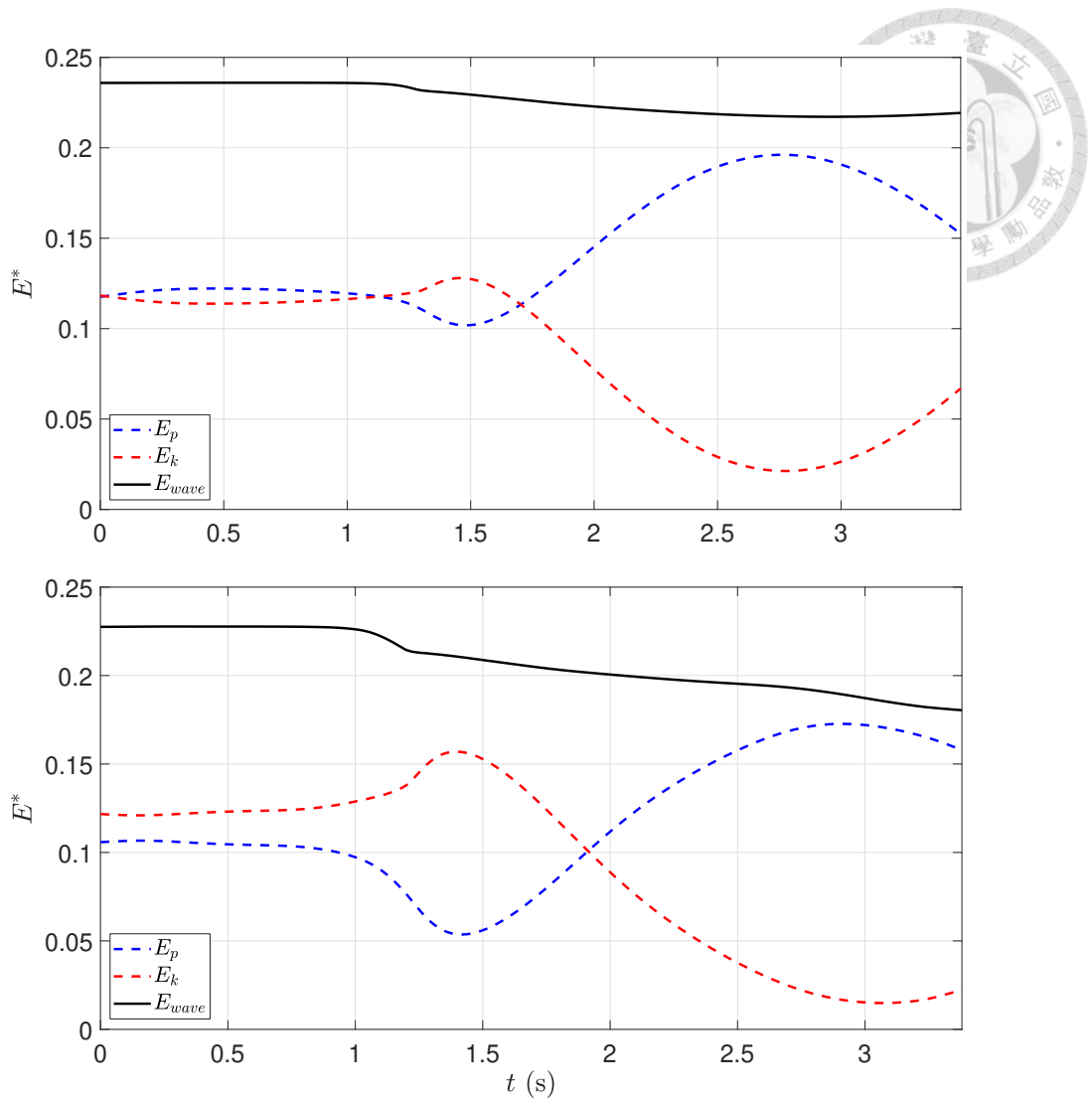


圖 5.6: 波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP17; 下圖為 N-EXP25)

5.1.2 段波狀 N 型波 (bore-like N-wave)

N-EXP42~N-EXP44 為段波狀 N 型波 (bore-like N-wave)。當前導波後的第一個波谷高於水平面時，則稱其為段波狀 N 型波，由圖 5.7 觀察到段波狀 N 型波的溯升值則與孤立波相近。要產生此種波型，造波板的移動時間需要耗時較久，導致當 OpenFOAM 模擬造波結束時，將得到的初始波型轉換至 NHWAVE 時，波峰位置已經超過測站抵達斜板上，因此模擬中能夠執行這種波型的案例只有三個，可參考附錄 A 中的表 A.2 中的造波板移動時間。找出相近的非線性下，相似的孤立波與段波狀 N 型波，如圖 5.8，取用案例為 S-EXP21 和 N-EXP43，段波狀 N 型

波的特色為前導波後的波谷會高於水平面，且前導下沉波谷幾乎無法被觀察到。跟據 Barranco and Liu (2021) 的結果，段波溯升值會大於等於孤立波，符合本研究段波狀 N 型波溯升值與孤立波相近的模擬結果。圖 5.8 中可以發現段波的形狀並不明顯，波型像是分散的兩個孤立波，因此前導波峰造成的溯升值才會大約等於相對應孤立波的溯升值，且其餘數值也與孤立波相近，如表 5.2。

在波浪溯升過程中，段波狀 N 型波整體的波型變化以及速度向量變化與孤立波相似，如圖 5.9，原因如前面所提，案例中的段波狀 N 型波波型像是分散的兩個孤立波，且前導波谷並不明顯，前導波峰在抵達斜板時，並不像普通 N 型波會受到前導波谷影響使波浪前方變得更捲曲，段波狀 N 型波波浪前方的捲曲程度與孤立波相貼合，單位寬度紊流耗散能量也相近，意味著波浪破碎的劇烈程度相當。在海水位隨著時間的變化中，段波狀 N 型波與孤立波皆不存在波峰抵達海岸前，海水位下降的情況，如圖 5.10，而能量在溯升過程的變化中，整體上，兩者的趨勢也十分相似， $t = 1.1$ (s) 左右時，總能量下降，即發生波浪破碎現象，接著動能增加，位能下降，在 $t = 3$ (s) 左右時，位能達到最高，動能達到最低，如圖 5.11。

表 5.2: 孤立波 (S-EXP21) 與段波狀 N 型波 (N-EXP43) 資料 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	測站非 線性值	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP21	0.3775	0.2456	46.3032	0.5049	4.4028	9.51
N-EXP43	0.3741	0.2415	48.2288	0.5013	5.4851	11.37

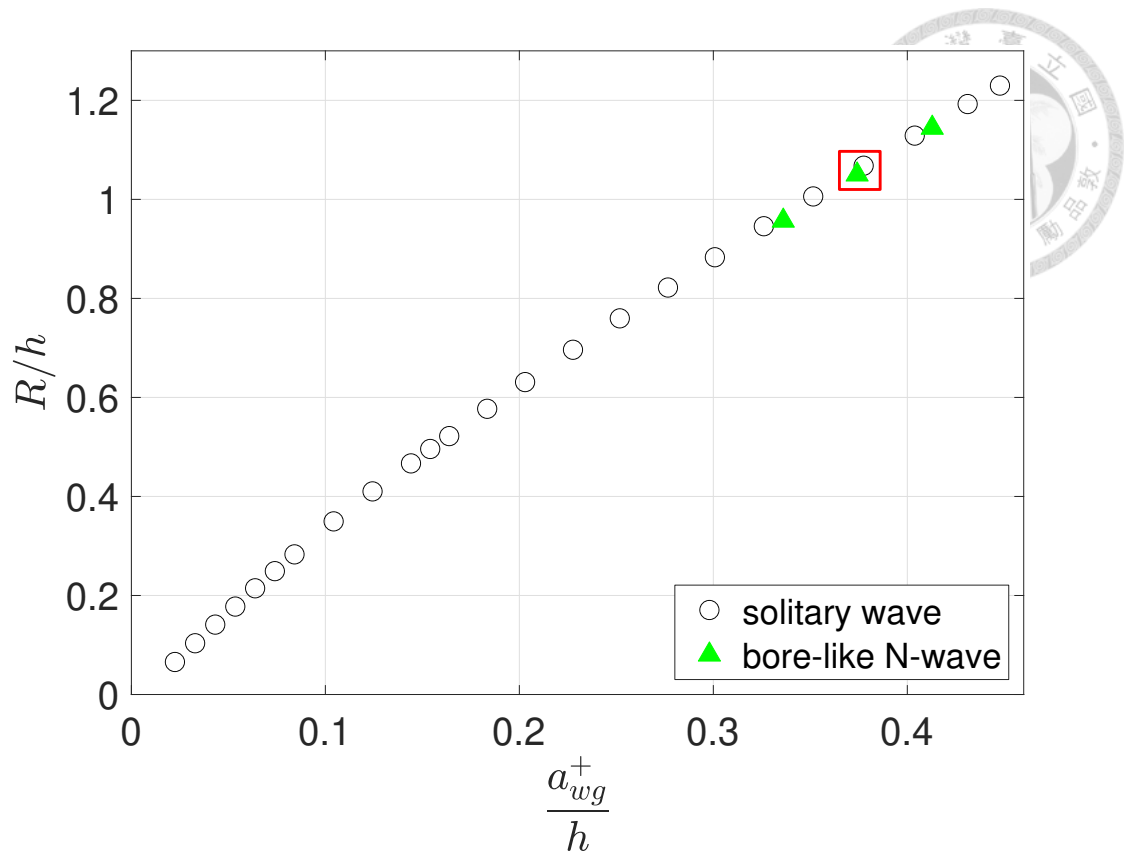


圖 5.7: 孤立波與段波狀 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(紅框為用來比較的两个案例)

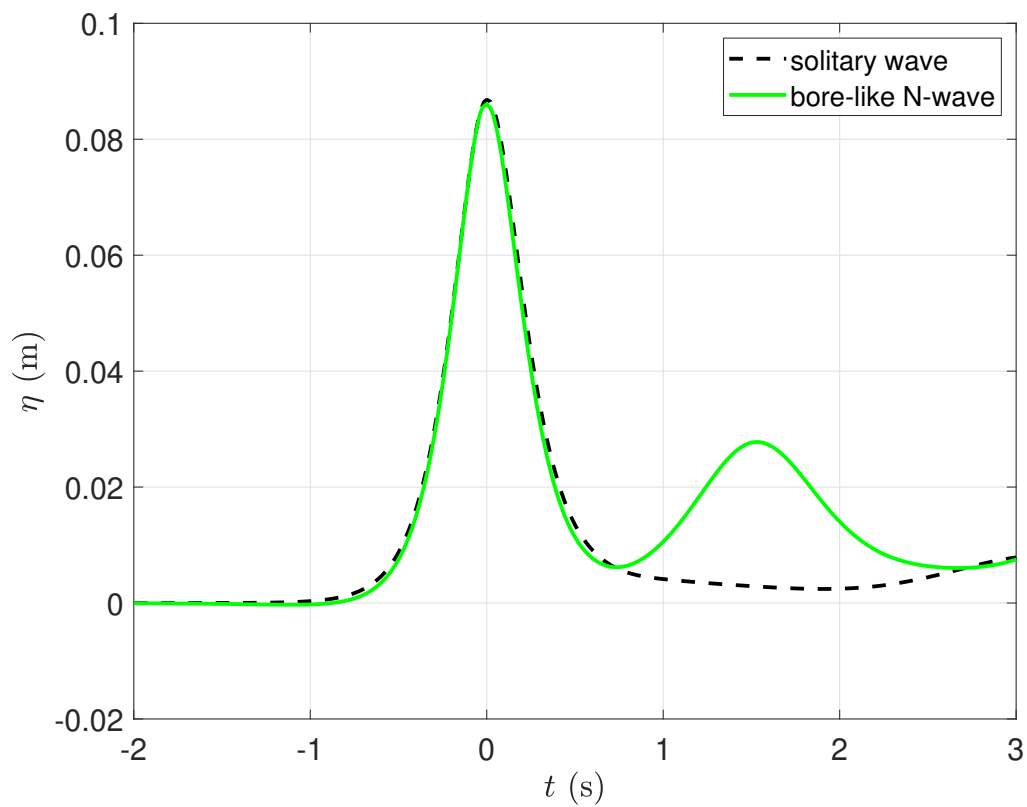


圖 5.8: 測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP21 與 N-EXP43)

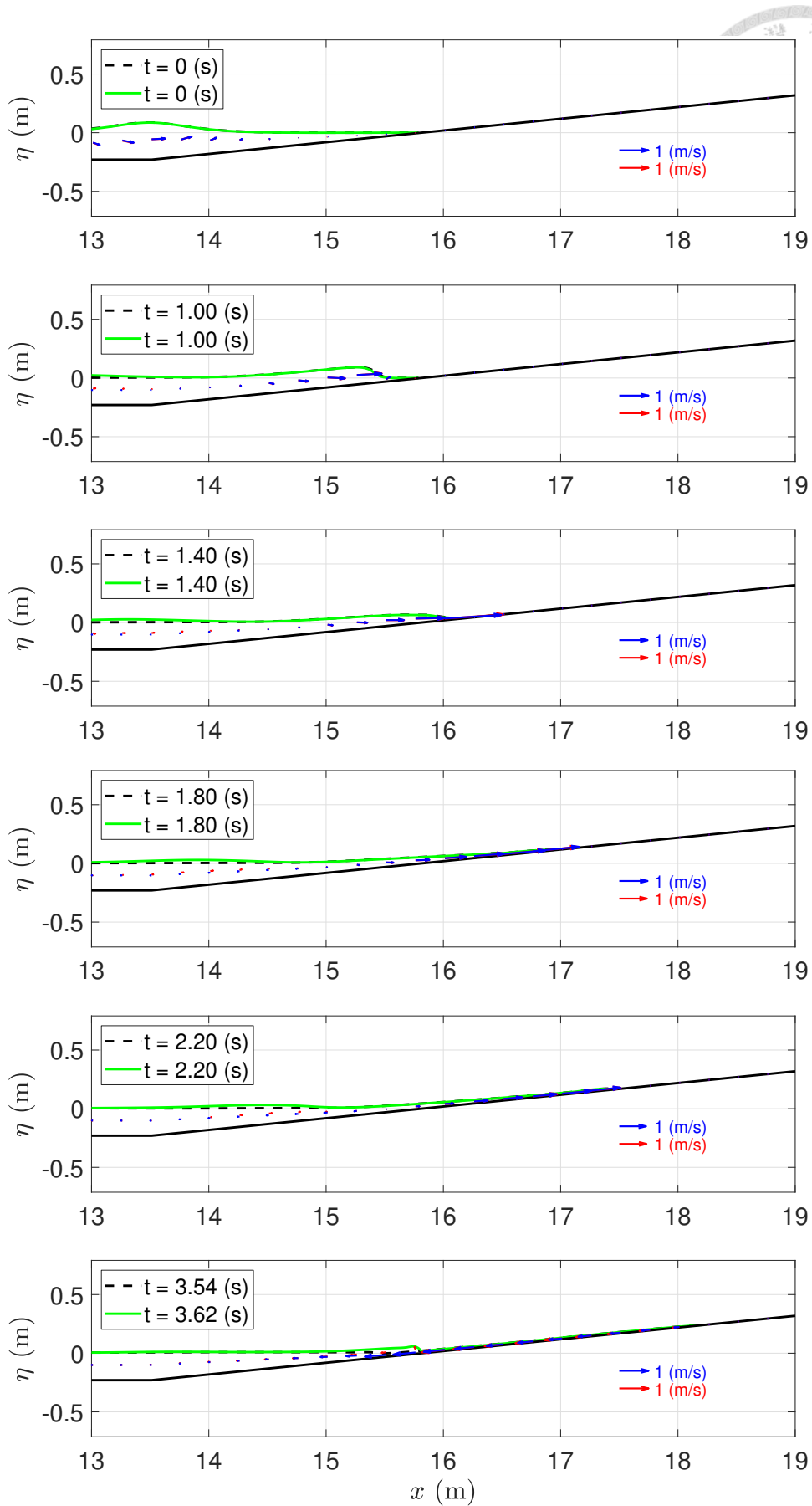


圖 5.9: 波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP21，藍色箭頭為其速度向量；綠色實線為 N-EXP43，紅色箭頭為其速度向量)

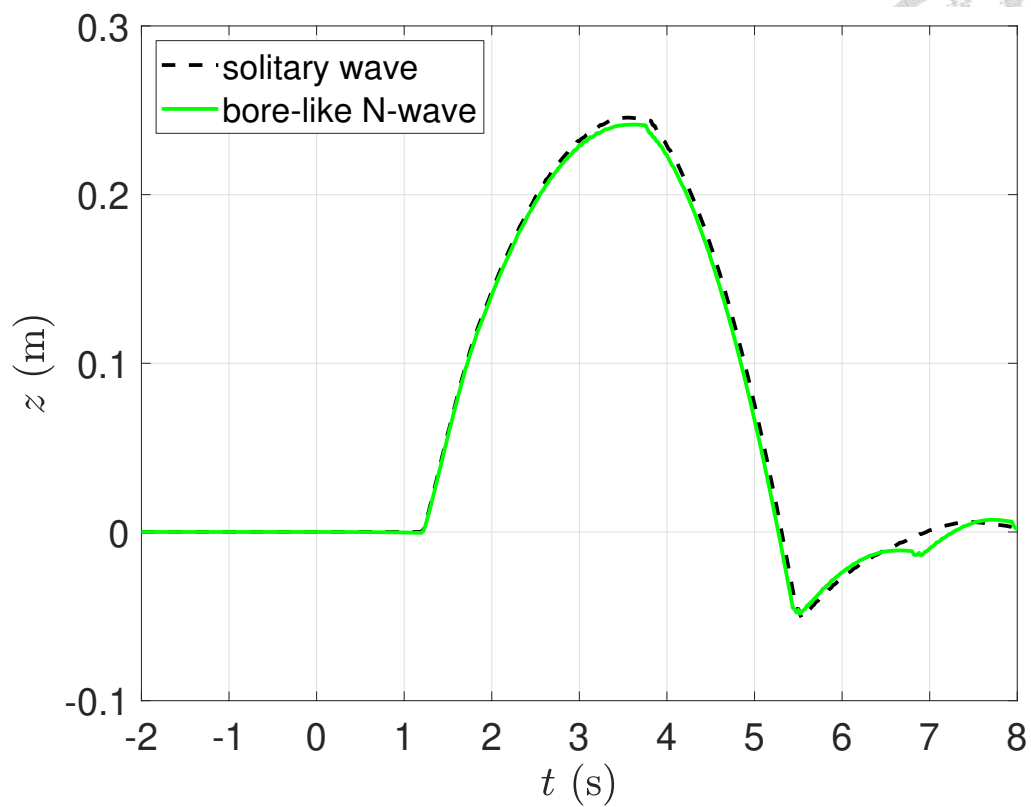


圖 5.10: 海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP21 與 N-EXP43)

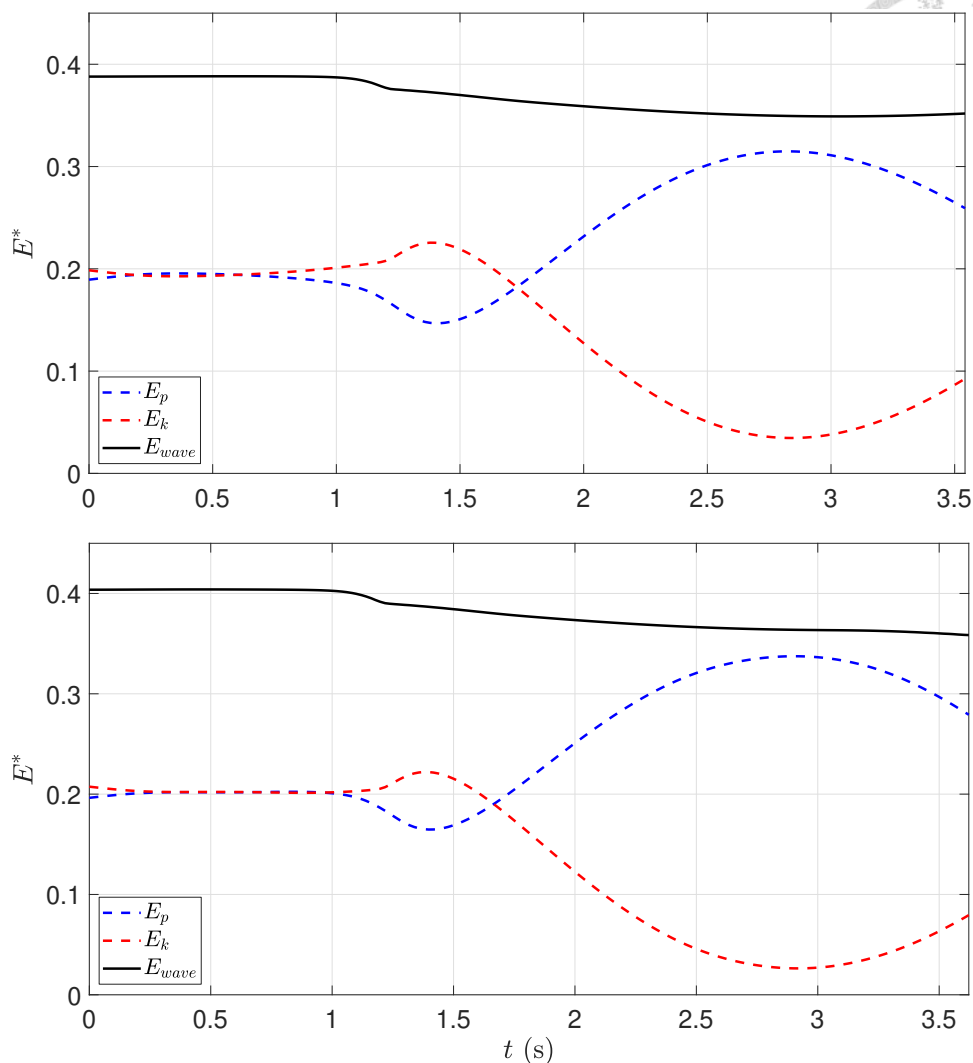


圖 5.11: 波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP21; 下圖為 N-EXP43)

5.1.3 陡峭型 N 型波 (steep N-wave)

N-EXP61~N-EXP88 為陡峭型 N 型波 (steep N-wave)。根據模擬結果，陡峭型 N 型波的溯升值會大於等於孤立波，如圖 5.12。找出相近的非線性下，相似的孤立波與陡峭型 N 型波，如圖 5.13，取用案例為 S-EXP01 和 N-EXP85，雖然兩者的非線性值相近，但陡峭型 N 型波波型卻比孤立波更為陡峭，波高雖然不大，但前導下沉波谷卻十分顯眼，前導下沉波谷的負振幅甚至比前導波峰的正振幅還大。圖 5.14 中，當兩者波峰抵達測站時，速度向量皆不大，陡峭型 N 型波的前導下沉波谷產生與波峰反方向的速度向量，陡峭型 N 型波波峰抵達斜板上時，速度

向量比孤立波大，造成較大的溯升值，圖 5.15 中可以明顯地看到陡峭型 N 型波不僅造成了較大的溯升值，還有明顯的海水位退縮。

雖然兩者非線性值相近，但陡峭型 N 型波的總能量約為孤立波的兩倍，孤立波的總能量維持平衡，位能與動能的變化趨於平緩，而陡峭型 N 型波則損失了些微能量，動能與位能不斷轉換，如圖 5.16，有趣的是表 5.3 中，陡峭型 N 型波的損失能量比大於 5%，達到節 4.7 所訂定的波浪破碎條件，但表示波浪破碎劇烈程度的紊流耗散能量卻為 0，且測站測得的非線性值也很小，代表陡峭型 N 型波的破碎現象非常輕微，可能為洶湧型碎波，真實世界中，波高很小的波浪發生洶湧型碎波，肉眼可能也觀察不太到，若將前導波峰視為非破碎波，則會符合 Chan and Liu (2012) 的結果，非破碎長波中，越陡峭的波會造成越大的溯升。

表 5.3: 孤立波 (S-EXP01) 與陡峭型 N 型波 (N-EXP85) 資料 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	測站非 線性值	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	0.0224	0.0151	0.5203	0.0000	0.0005	0.09
N-EXP85	0.0228	0.0306	0.9427	0.0000	0.0679	7.21

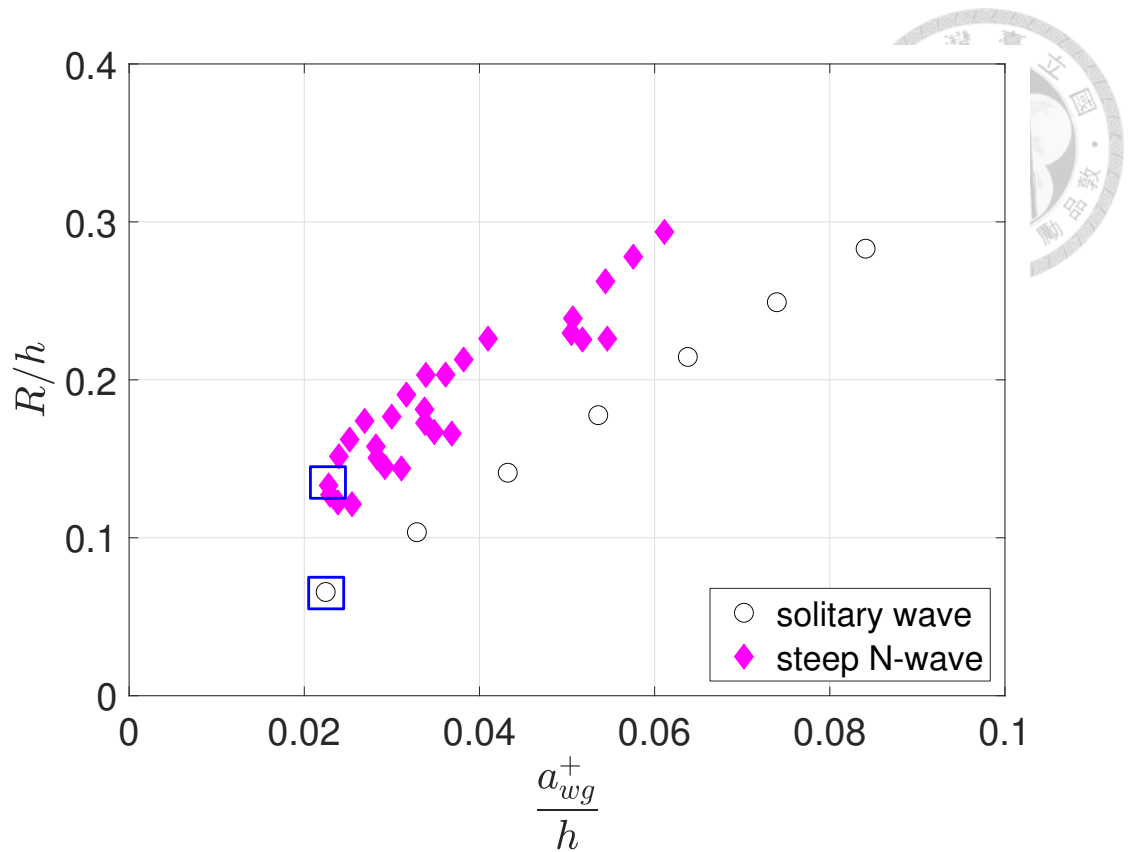


圖 5.12: 孤立波與陡峭型 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(藍框為用來比較的两个案例)

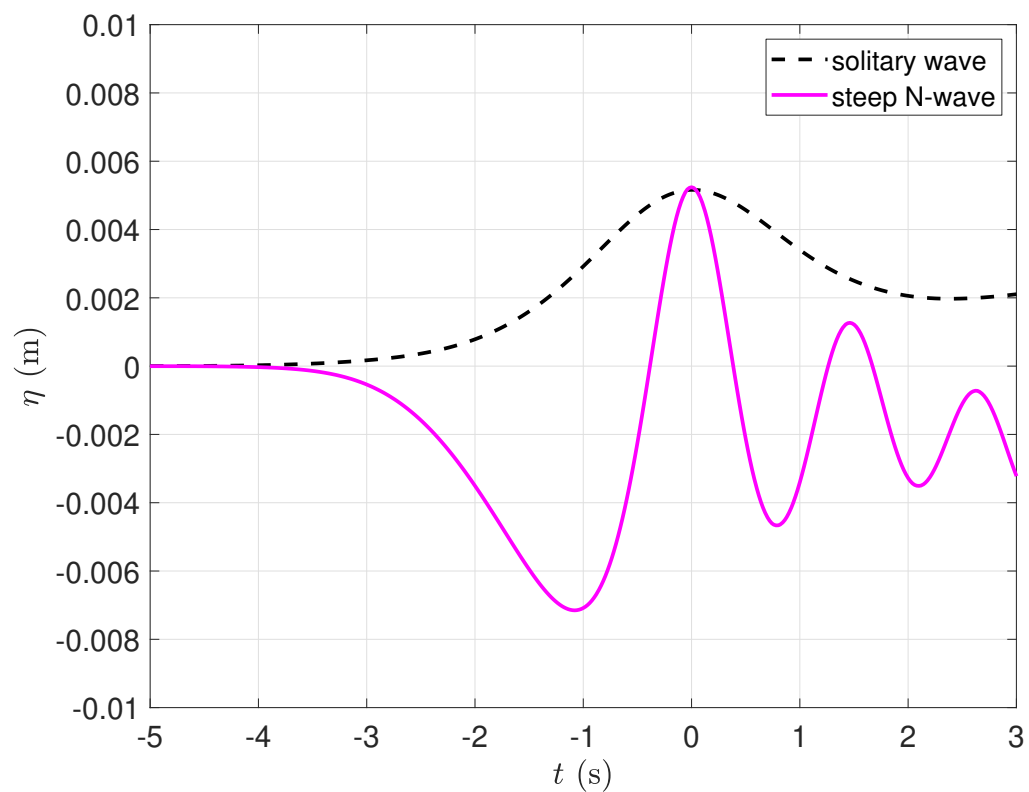


圖 5.13: 測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP01 與 N-EXP85)

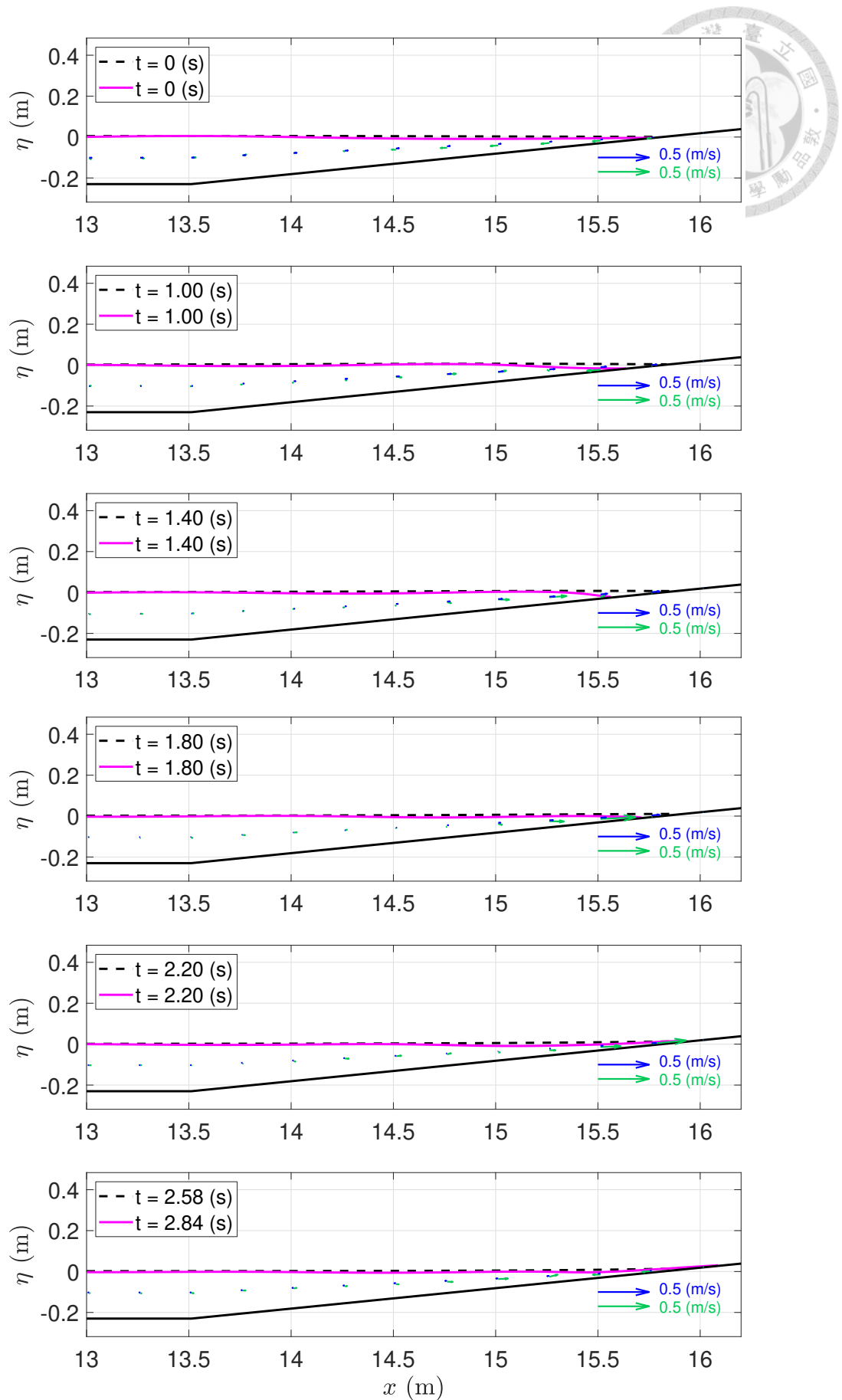


圖 5.14: 波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP01，藍色箭頭為其速度向量；桃紅色實線為 N-EXP85，綠色箭頭為其速度向量)

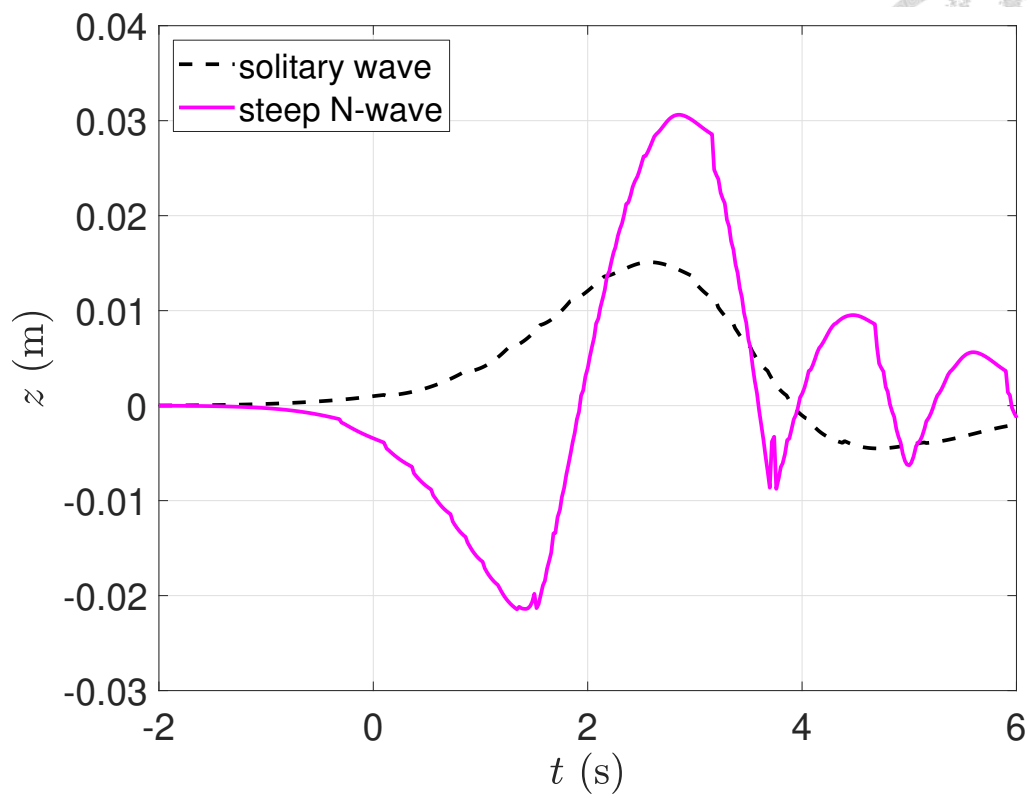


圖 5.15: 海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP01 與 N-EXP85)

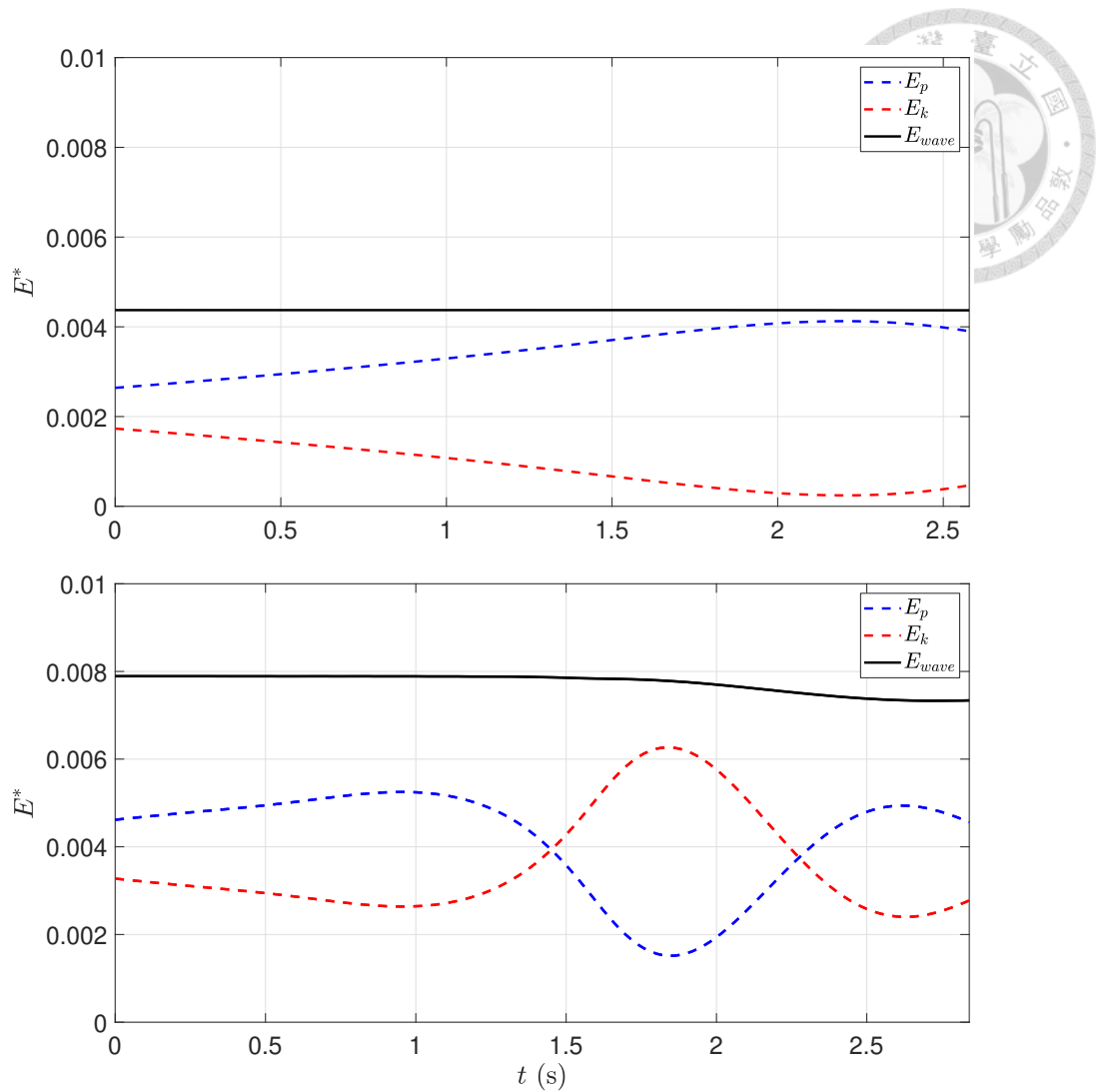


圖 5.16: 波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP01; 下圖為 N-EXP85)

5.1.4 強烈破碎 N 型波 (strong-breaking N-wave)

N-EXP30~N-EXP37 為強烈破碎 N 型波 (strong-breaking N-wave)。在圖 5.17 中發現，本研究用來表示波破碎劇烈程度的紊流耗散能量中，在相同非線性下，有一部份 N 型波的紊流耗散能量會比相對應的孤立波大上許多，其餘 N 型波的紊流耗散能量則是與相對應的孤立波相近，將這一部份的 N 型波找出後，定義為強烈破碎 N 型波。發現這些 N 型波在溯升值的表現上並不像前面其他類型的 N 型波具有能夠被簡易預測的規律性，如圖 5.18。我們進一步將這類 N 型波與相對應的孤立波比較，可參考表 5.4，雖然兩者在測站所測得的非線性值相近，但波型卻

如同陡峭型 N 型波，如圖 5.19，強烈破碎 N 型波波型明顯比孤立波還要更陡峭，且波高比陡峭型 N 型波大。

在波峰抵達測站時，強烈破碎 N 型波的前導下沉波谷在斜板上產生與波峰反方向的速度向量，與陡峭型 N 型波相同，但值比較大，且前導波峰受到前導下沉波谷影響，抵達斜板上時，波浪前方十分陡峭，波峰向上爬升時，速度向量比孤立波大上許多，如圖 5.20。海水位高度下降十分明顯，且溯升達最大值時，海水位高度比孤立波高，如圖 5.21。波浪所擁有的總能量中，強烈破碎 N 型波比相對應的孤立波大上許多，孤立波總能量趨於平衡，位能逐漸變大，動能逐漸變小，在 $t = 2.6$ (s) 左右時，位能達到最大值，動能達到最小值，強烈破碎 N 型波在 $t = 1$ (s) 左右時，總能量逐漸下降，即波破碎現象，在 $t = 2.9$ (s) 左右時，波達最大溯升值，總能量也達到最小值，如圖 5.22。

表 5.4: 孤立波 (S-EXP07) 與強烈破碎 N 型波 (N-EXP32) 資料 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	測站非 線性值	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP07	0.0841	0.0651	4.2120	0.0000	0.0686	1.63
N-EXP32	0.0853	0.0935	25.0047	0.1252	3.4747	13.90

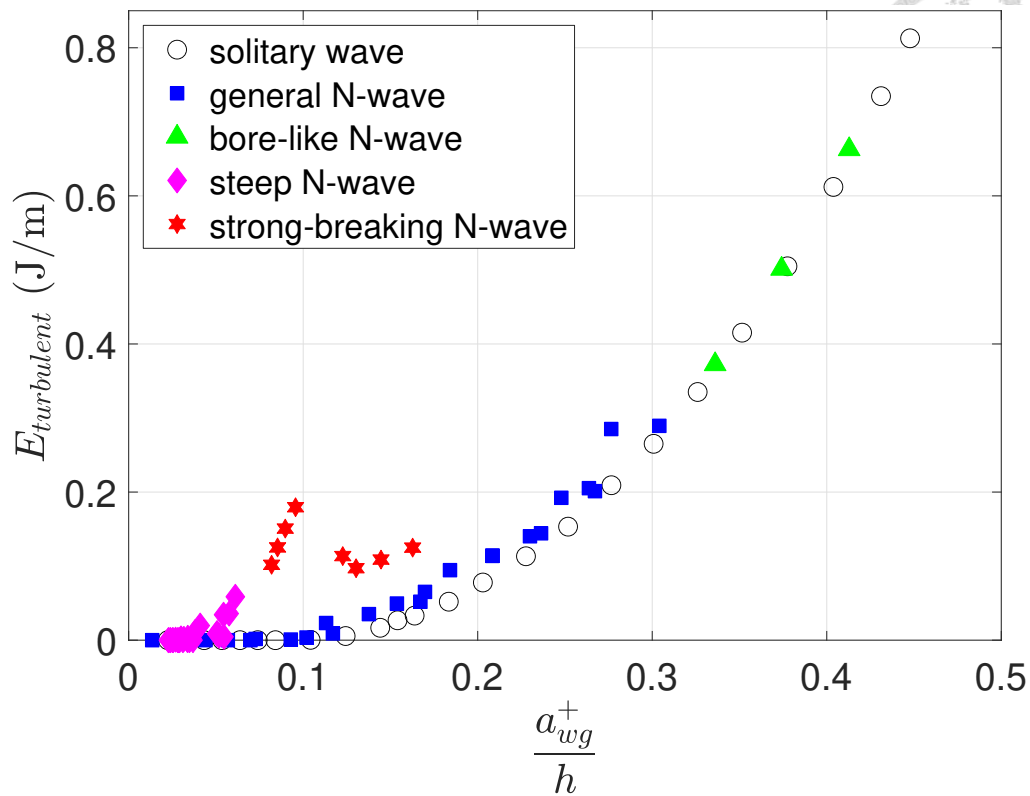


圖 5.17: 孤立波與 N 型波單位寬度之紊流耗散能量圖 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

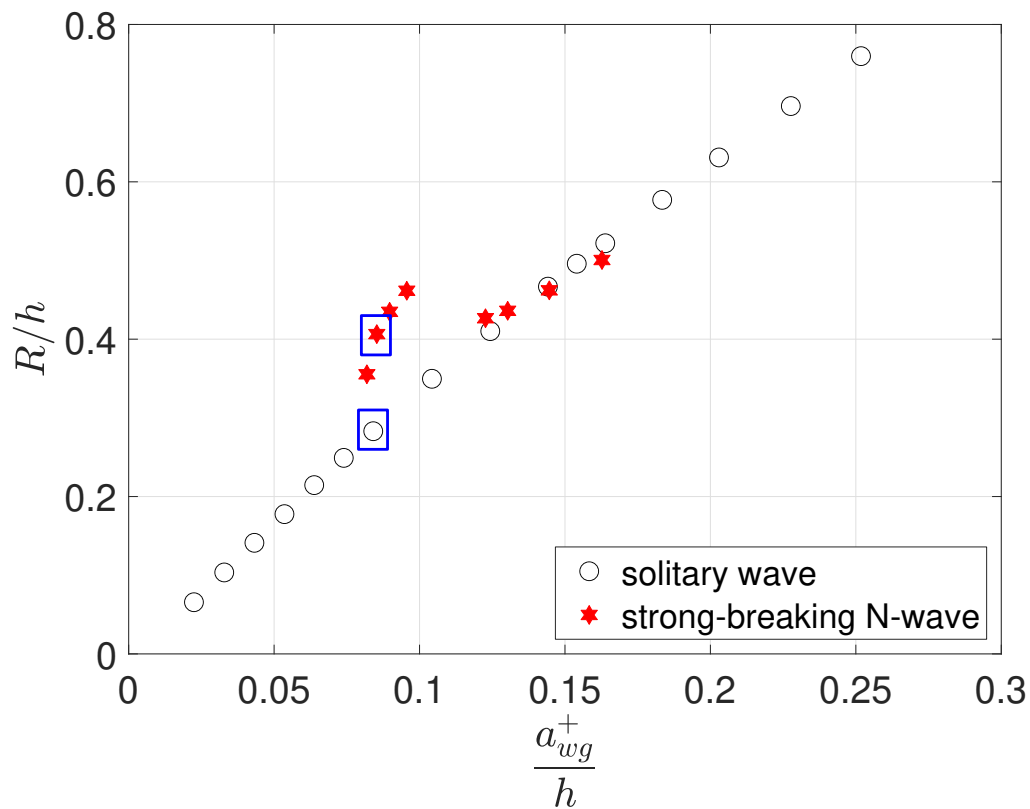


圖 5.18: 孤立波與強烈破碎 N 型波溯升結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(藍框為用來比較的兩個案例)

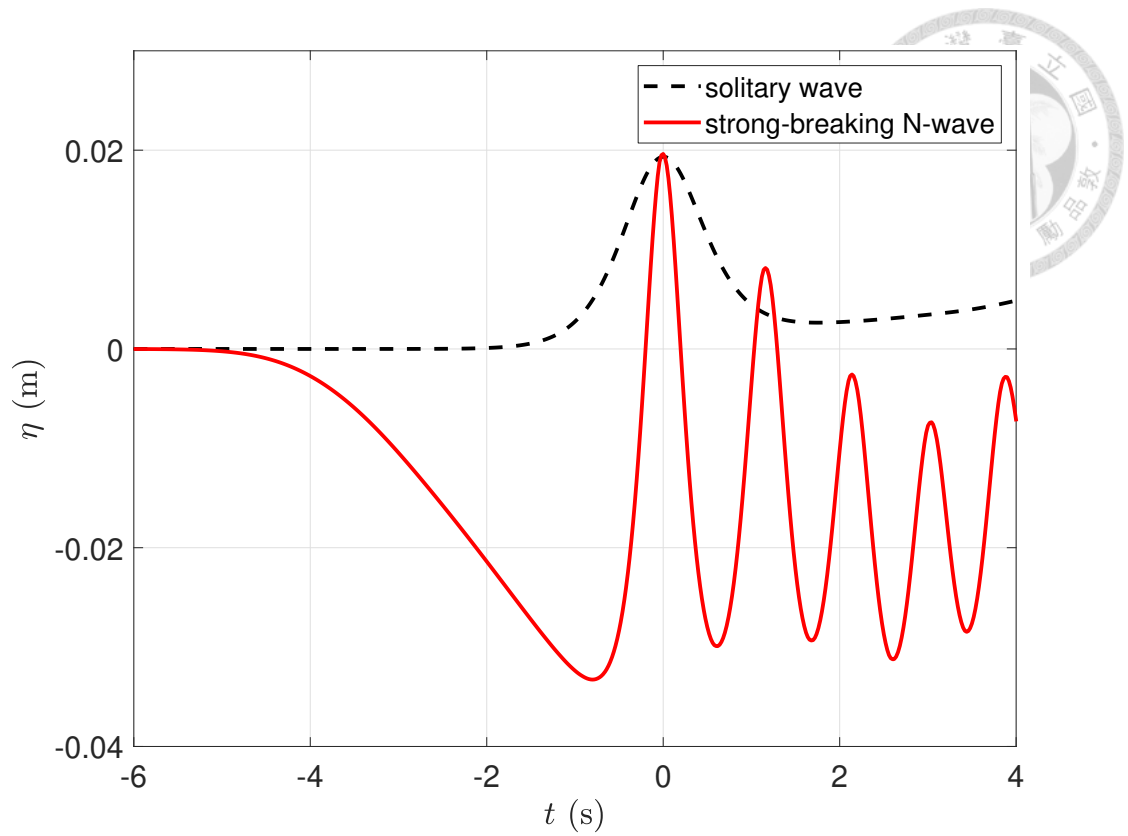


圖 5.19: 測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP07 與 N-EXP32)

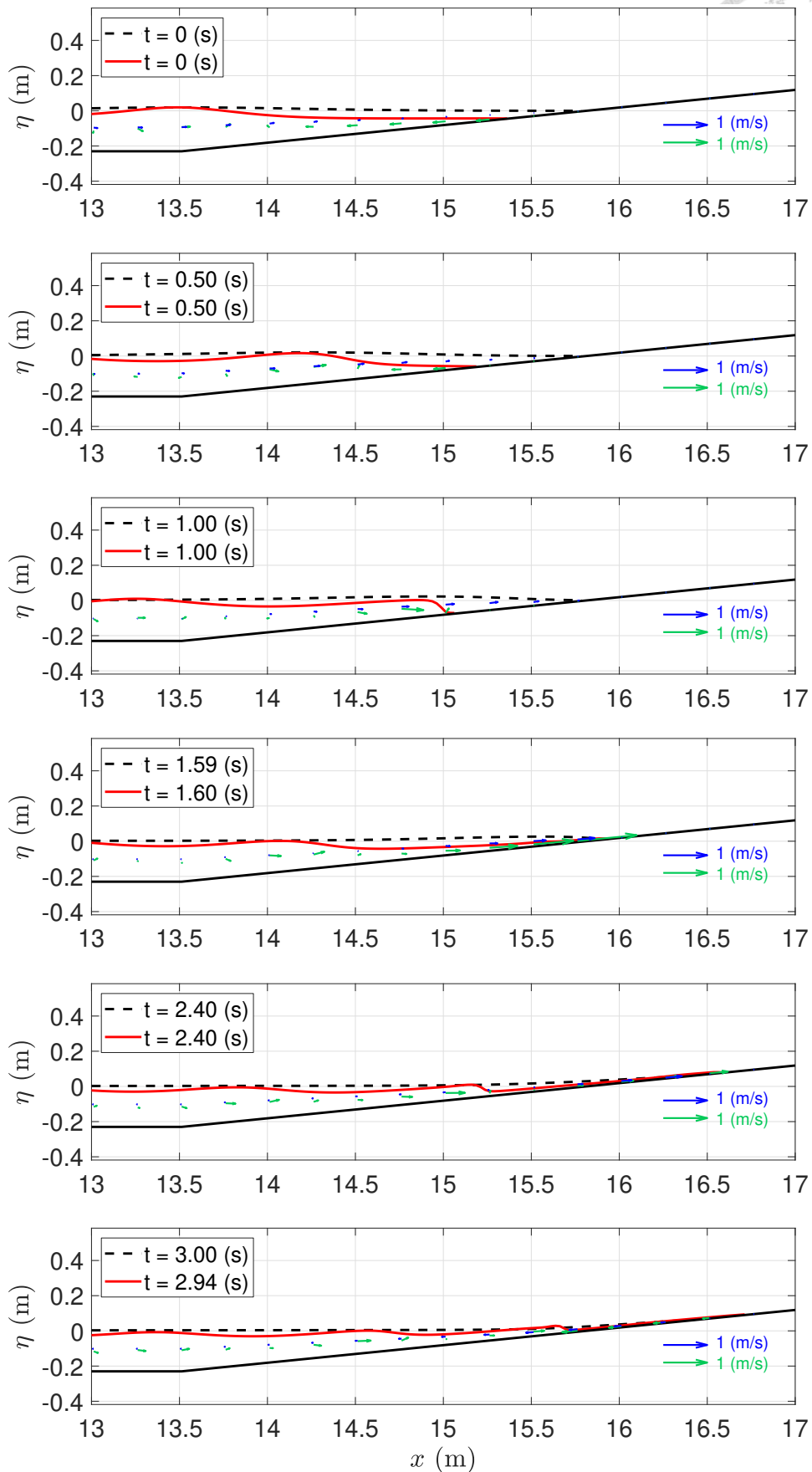


圖 5.20: 波浪中間水深速度向量與傳遞演變圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(斜率 1:10 斜板，測站位於 $x = 13.5$ m)(黑色虛線為 S-EXP07，藍色箭頭為其速度向量；紅色實線為 N-EXP32，綠色箭頭為其速度向量)

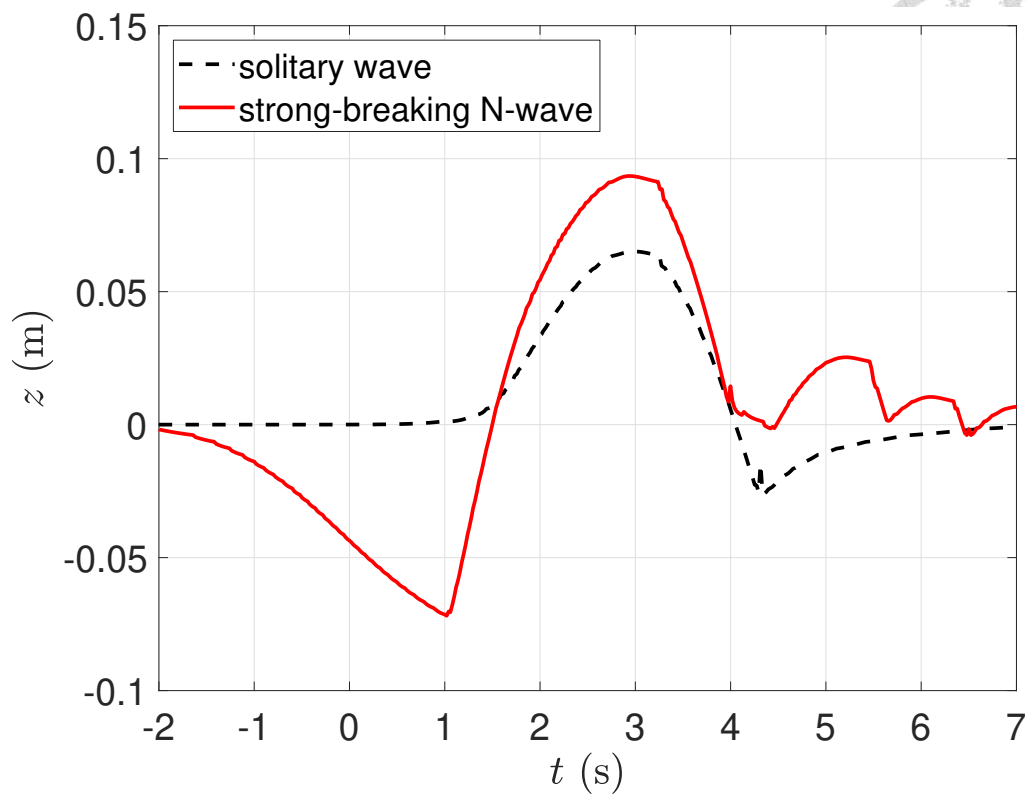


圖 5.21: 海水位高度歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(S-EXP07 與 N-EXP32)

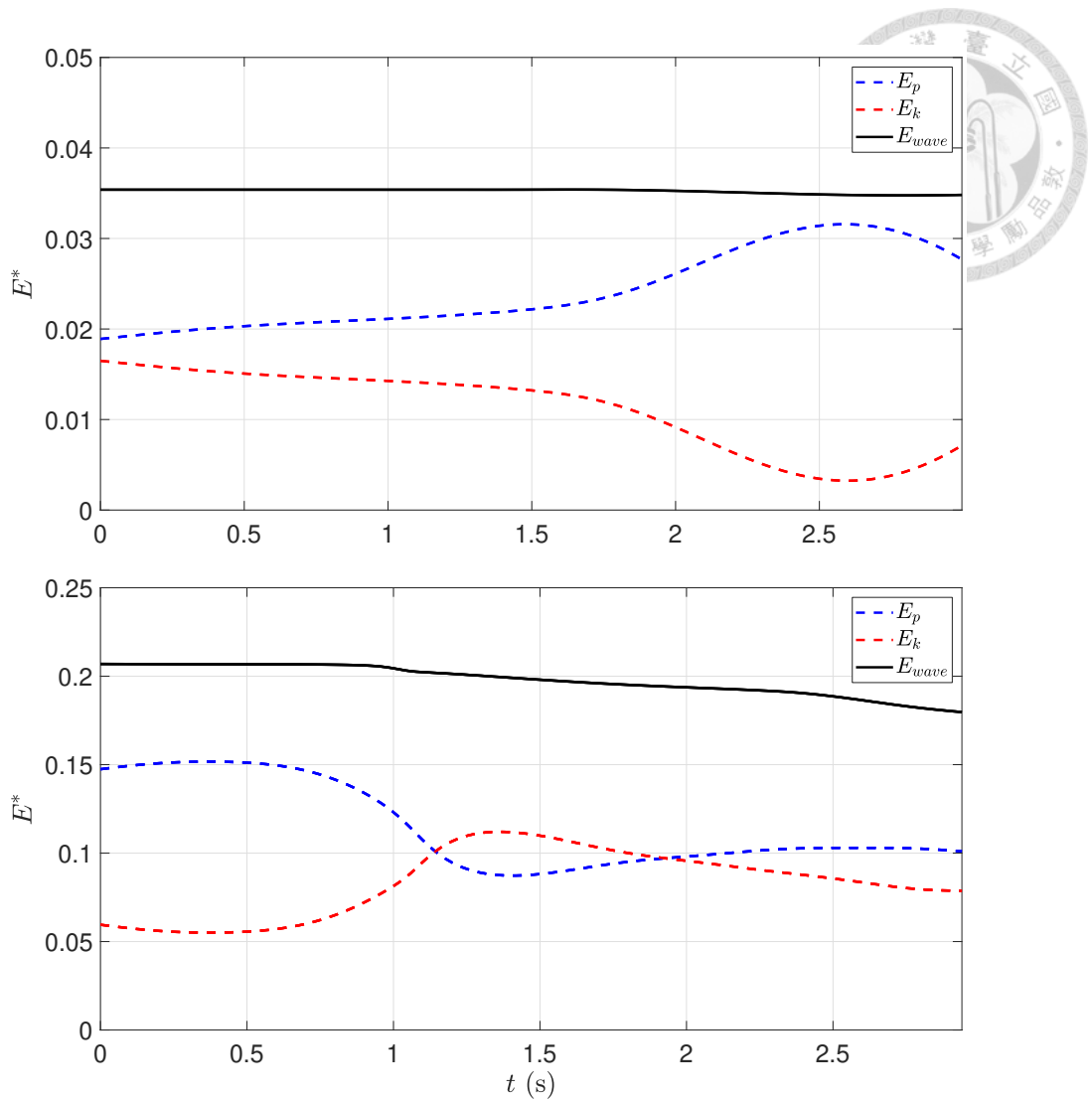


圖 5.22: 波浪能量演變歷時圖，時間為波峰通過測站時到波浪達最大溯升值時。(測站與斜率 1:10 斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(上圖為 S-EXP07; 下圖為 N-EXP32)

5.2 斜板前移的影響

將原先位在水槽 13.5 公尺處之 1:10 斜板往前移至水槽 7.0 公尺處，並以相同的造波參數造波，觀察波型、溯升值和能量的變化。孤立波與 N 型波模擬結果可參考附錄 B 中的表 B.3 與 B.4，其中 N-EXP10~N-EXP13 因為造波時初始波型破碎，在資料轉換時會出錯，因此無法模擬，而 N-EXP24~N-EXP29、N-EXP45~N-EXP60 則因造波時間太長，而無法模擬。



5.2.1 斜板前移對孤立波的影響

對於孤立波而言，溯升值整體並沒有太大的改變，斜板前移的溯升值趨勢與原先的趨勢相近，波破碎情形也相似，如圖 5.23。圖 5.23 中發現，模擬結果中，在造波參數之非線性參數較小的案例中，在斜板前所量測到的非線性值與溯升值幾乎沒有改變，如圖 5.24，斜板前所量測到的波型看不太出變化，但造波參數之非線性參數較大的孤立波中，在斜板前所量測到的非線性值與溯升值皆略為增加，如圖 5.25，這是因為波傳遞至斜板的時間變短，波受到能量耗損的影響也跟著變小。而相同斜率的斜板改變位置後損失能量比的影響並不大，整體趨勢與改變斜板位置前相似，如圖 5.26。

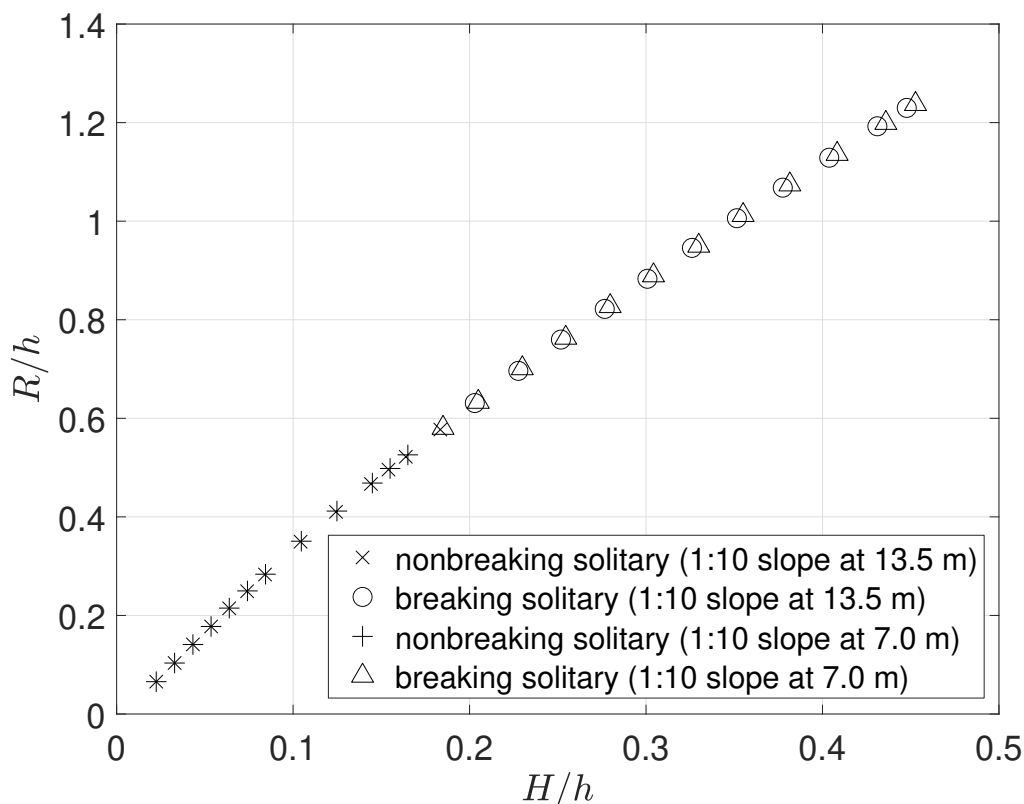


圖 5.23: 斜板改變位置前後孤立波之溯升比較圖

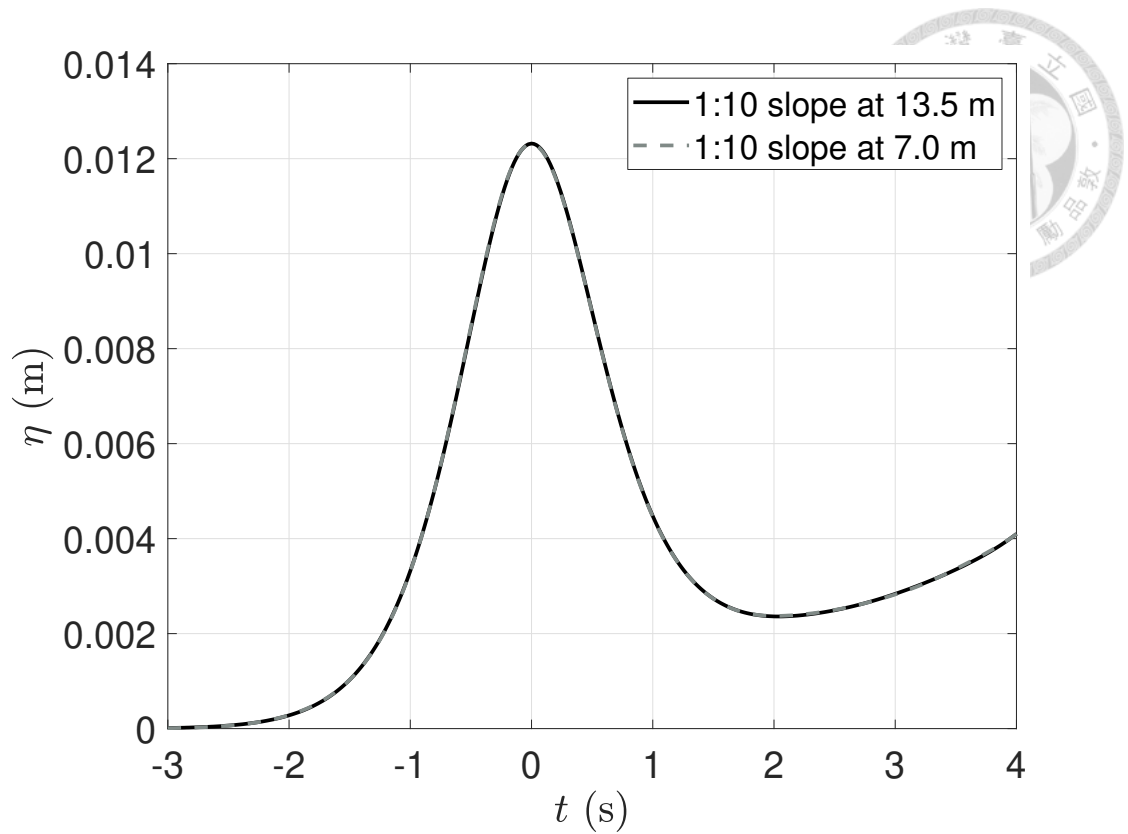


圖 5.24: 斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (S-EXP04)

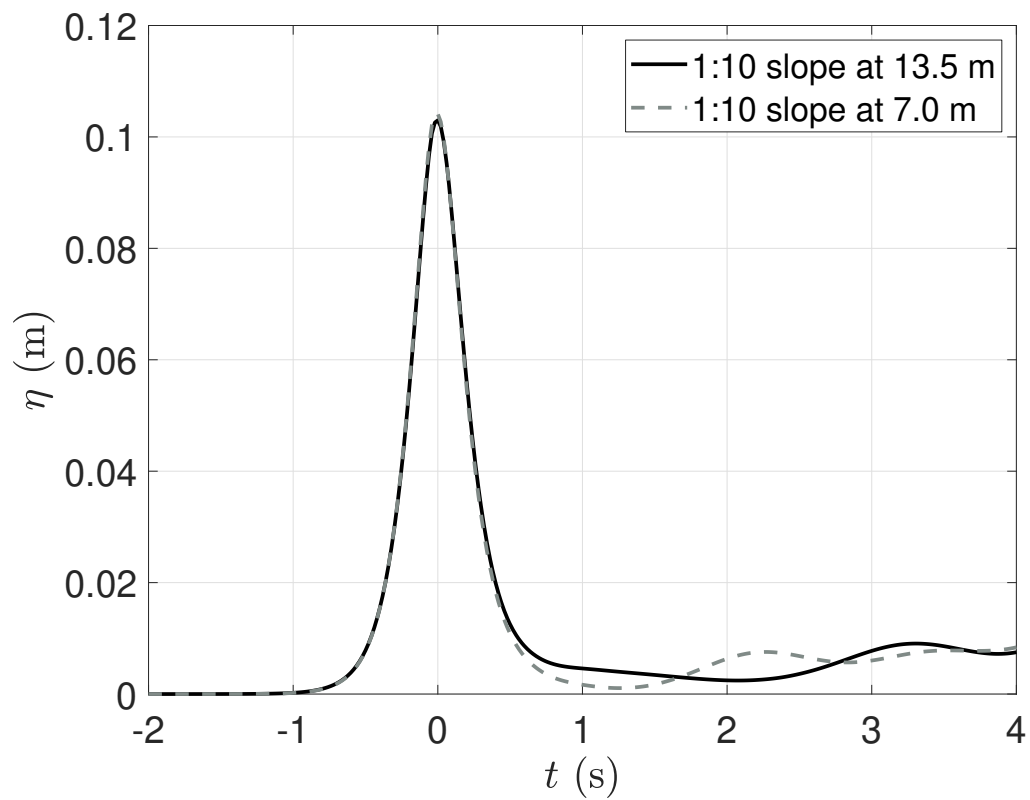


圖 5.25: 斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (S-EXP24)

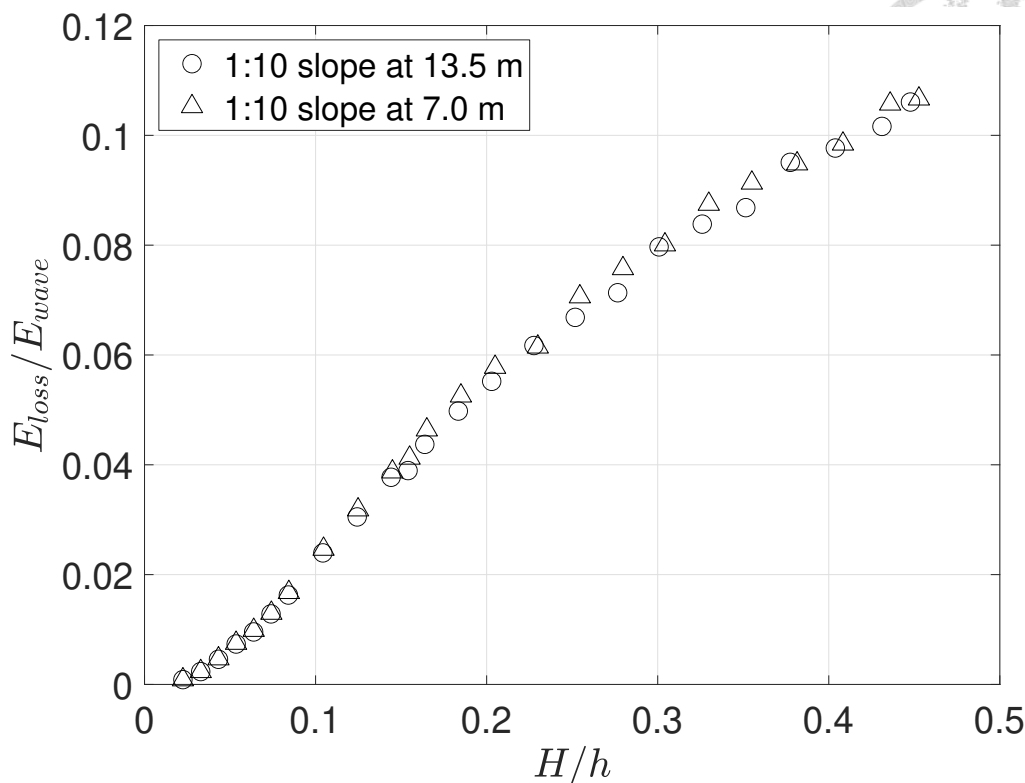


圖 5.26: 斜板改變位置前後孤立波之損失能量比比較圖

5.2.2 斜板前移對 N 型波的影響

由於 N 型波會受頻散的影響，將斜板前移會使斜板前的測站 (由原先 13.5 公尺改至 7 公尺處) 所量測到的波型會有所改變，本研究藉由調整波浪傳播距離，得到不同的 N 型波波型。斜板前移影響較大的就是波型，而溯升值整體而言則沒有太大的變化，如圖 5.27，可以發現各類型的 N 型波還是與原先的溯升值預測相同，其中較為特別的是綠色的段波狀 N 型波增加了兩個案例。此兩個案例分別為 N-EXP40 和 N-EXP41，原先斜板在 13.5 公尺處時，被分類為普通 N 型波，斜板前移後則轉變為段波狀 N 型波，如圖 5.28、5.29，可以發現斜板前移後 (實線)，前導波之後的第一個波谷高於水平面，明顯與原本的波型有所差異。其中，這兩個案例的溯升值會略小於孤立波，推測原因為它們的段波型式還不夠明顯，與其他段波狀 N 型波的波型相比，前導波後的第一個波谷抬升高度較低，且這兩個案例的前導波谷也比較明顯，如圖 5.30。由於 N-EXP40 和 N-EXP41，受到前導波谷

的影響，波破碎所造成的能量損失較大，導致溯升值下降，如圖 5.31，可以發現有兩個實心綠色三角形在圖中的分佈位置是比較接近於普通 N 型波的，這兩個案例即是 N-EXP40 和 N-EXP41，因此這兩個案例不僅受段波型式不明顯影響，還受前導下沉波谷影響，使得損失能量比類似普通 N 型波，溯升值在破碎波時，會略低於相對應之孤立波。然而，隨著段波狀 N 型波之段波型式越來越明顯，其最大溯升值也逐漸大於相對應之孤立波，符合 Barranco and Liu (2021) 的結果，段波之溯升值會大於等於孤立波，這是在斜板前移前看不出來的現象。

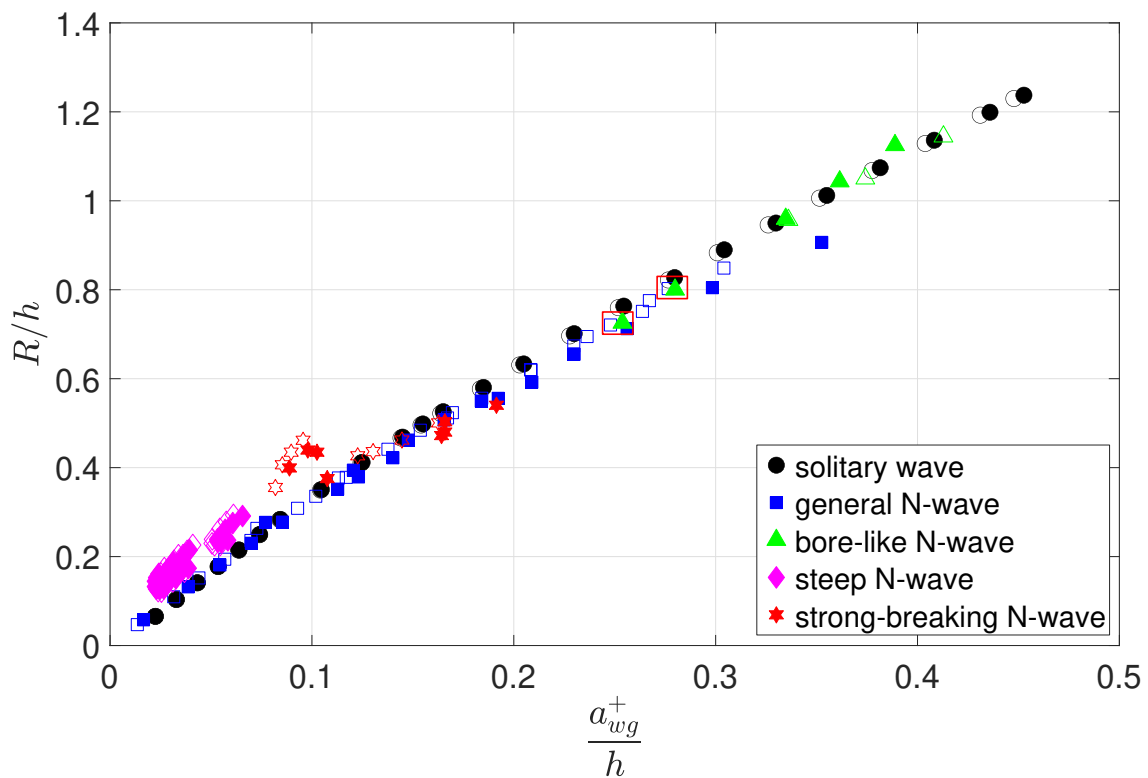


圖 5.27: 斜率 1:10 斜板，改變位置前後之孤立波與 N 型波溯升比較圖 (空心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m; 實心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(紅框為波型類別改變的兩個案例)

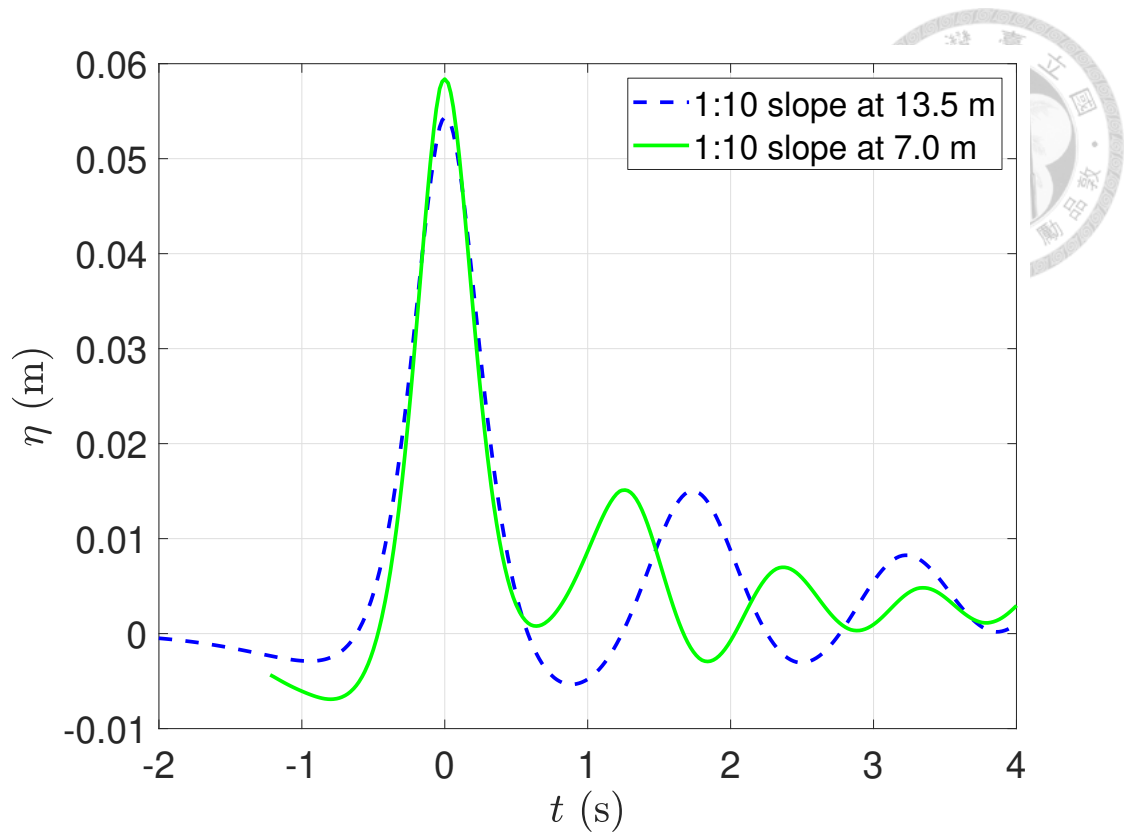


圖 5.28: 斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (N-EXP40)

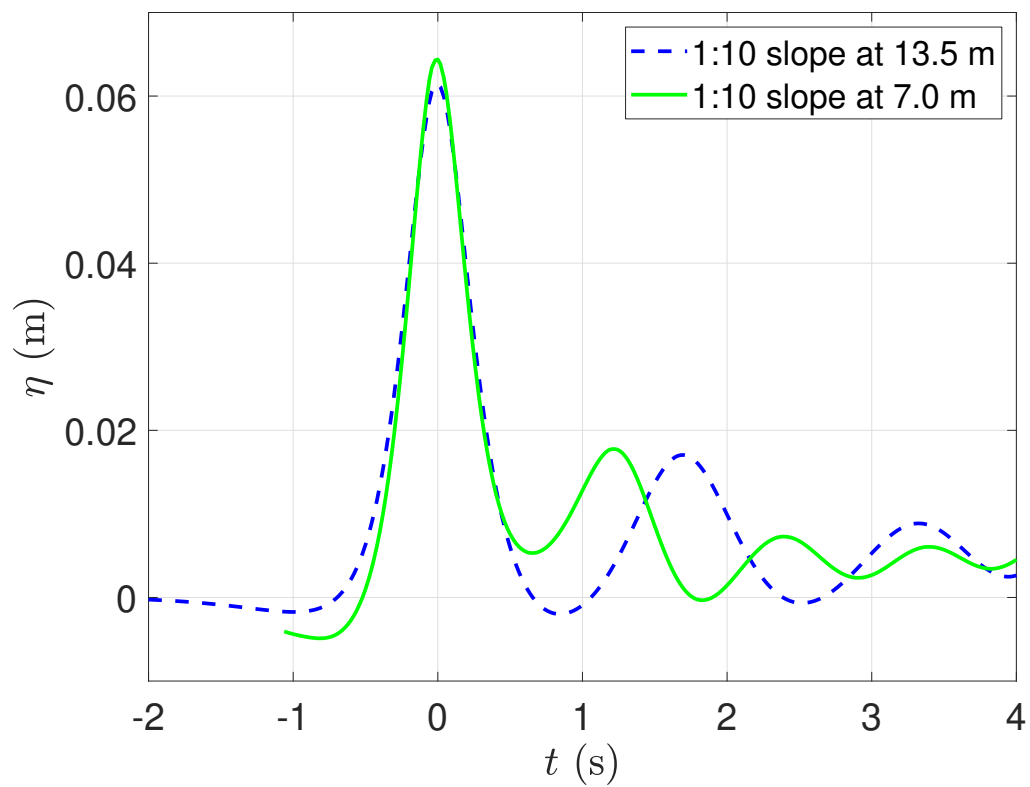


圖 5.29: 斜板改變位置前後之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$) (N-EXP41)

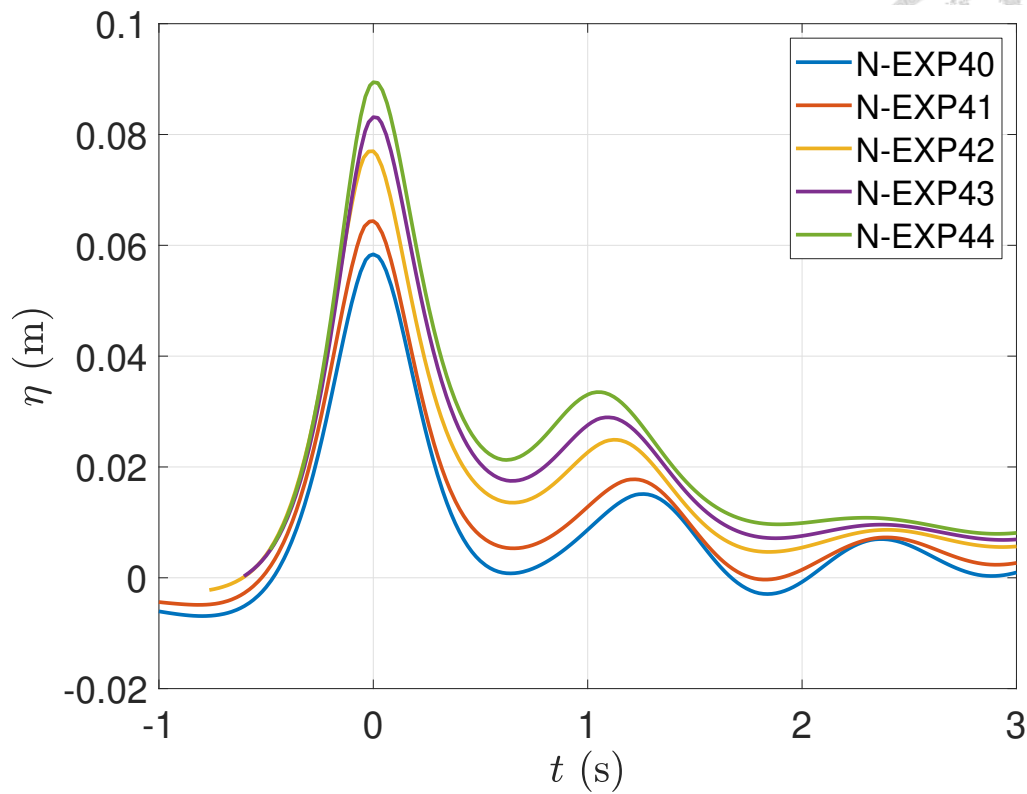


圖 5.30: 段波狀 N 型波之水位歷時圖比較 (波峰通過測站時 $t = 0$ ，斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)

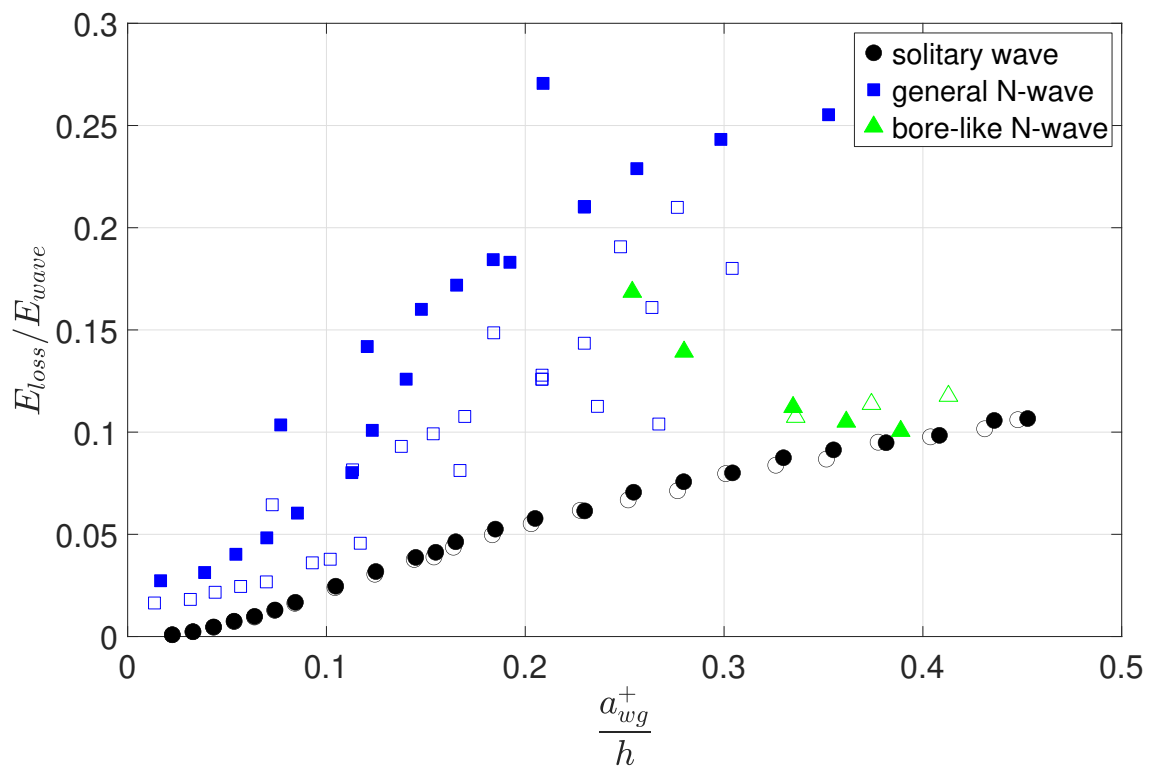


圖 5.31: 斜率 1:10 斜板，孤立波、普通 N 型波與段波狀 N 型波的損失能量比比較圖 (空心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m; 實心圖示: 測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)



5.3 斜率改變的影響

將原先位在水槽 13.5 公尺處之 1:10 斜板更改斜率為 1:20 與 1:40 之斜板，並以相同的造波參數造波，觀察波型、溯升值和能量的變化，測站維持在斜板開始位置，水槽 13.5 公尺處。孤立波與 N 型波在斜率 1:10 斜板之模擬結果可參考附錄 B 中的表 B.1、B.2，在斜率 1:20 斜板之模擬結果可參考附錄 B 中的表 B.5、B.6，在斜率 1:40 斜板之模擬結果可參考附錄 B 中的表 B.7、B.8，其中無法模擬的案例與在斜率 1:10 之斜板原因相同。

5.3.1 改變斜板斜率對孤立波的影響

改變斜板斜率對斜板前之測站所量測到的波型並沒有太大的影響，如圖 5.32、5.33，由於斜板開始位置相同，測站位置也不變，因此孤立波波峰在傳遞至測站時的高度相近，僅在波峰後方測得的水面變化有所不同，主要是因斜率不同，受到波浪回流與反射波影響時間不同，才會導致這種現象。而斜板斜率改變在最大溯升值產生明顯的變化，如圖 5.34，隨著坡度變緩，孤立波之最大溯升值則越來越小，與 Li and Raichlen (2003) 的結果相符合，且波浪破碎的案例也隨著坡度變緩而變多。圖 5.34 中線段為依模擬結果判定的非破碎波之最大非線性值，可以發現線段會隨著斜板斜率變小而向左移動，非線性值也越來越小。而損失能量也因斜率的改變發生變化，與 Li (2000) 的結果相符合，隨著斜板變緩，損失能量比越來越大，如圖 5.35。

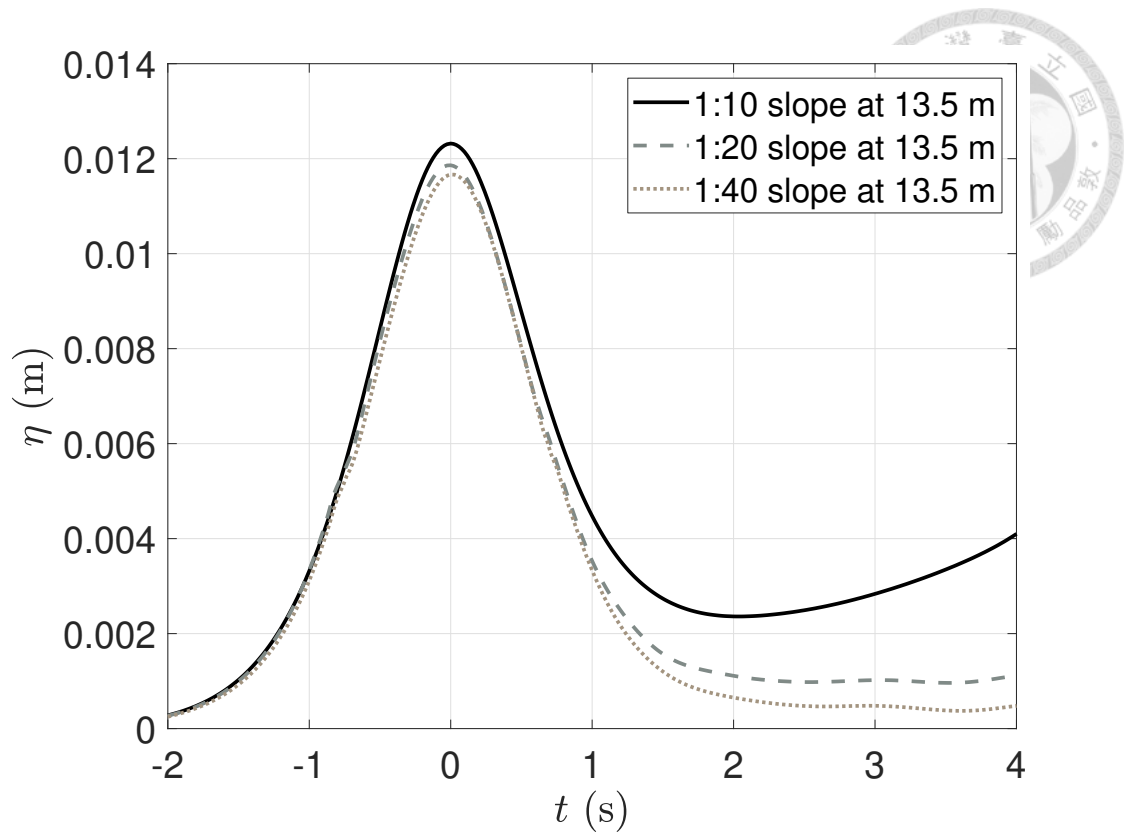


圖 5.32: 不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$)
(S-EXP04)

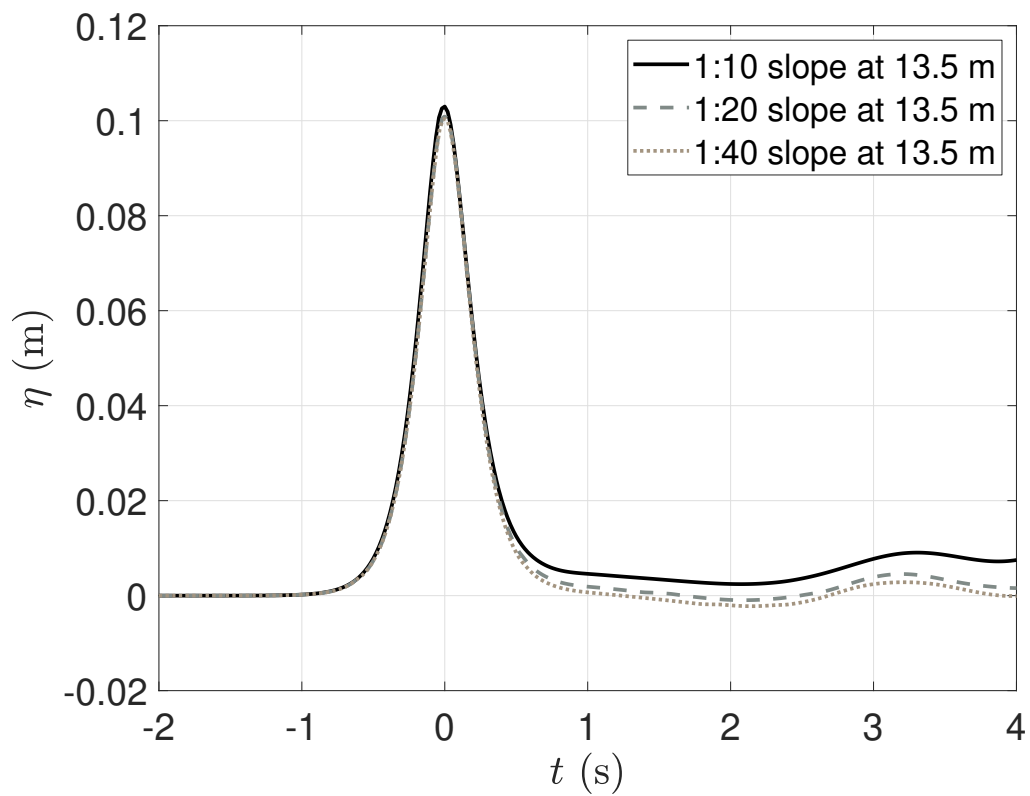


圖 5.33: 不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (波峰通過測站時 $t = 0$)
(S-EXP24)

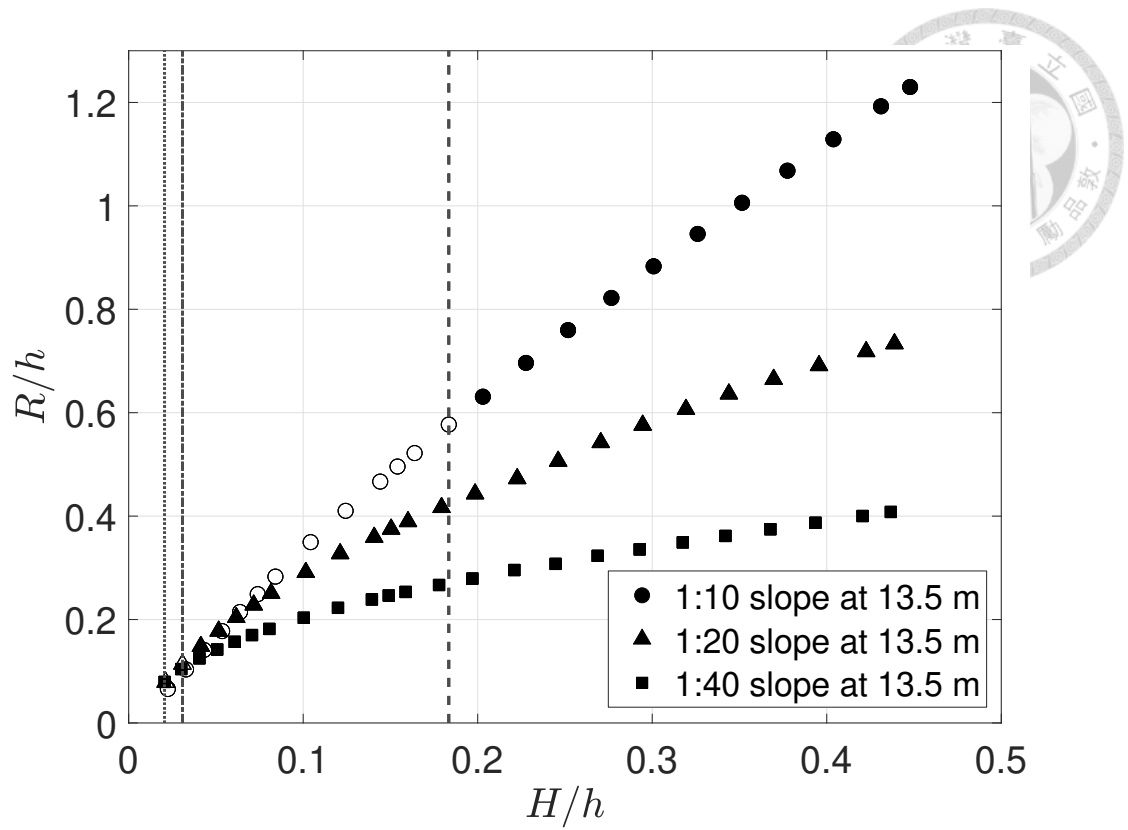


圖 5.34: 不同斜率斜板之孤立波溯升結果與波破碎判定 (空心圖示: 非破碎; 實心圖示: 破碎)(虛線: 1:10 非破碎線; 點劃線: 1:20 非破碎線; 點線: 1:40 非破碎線)

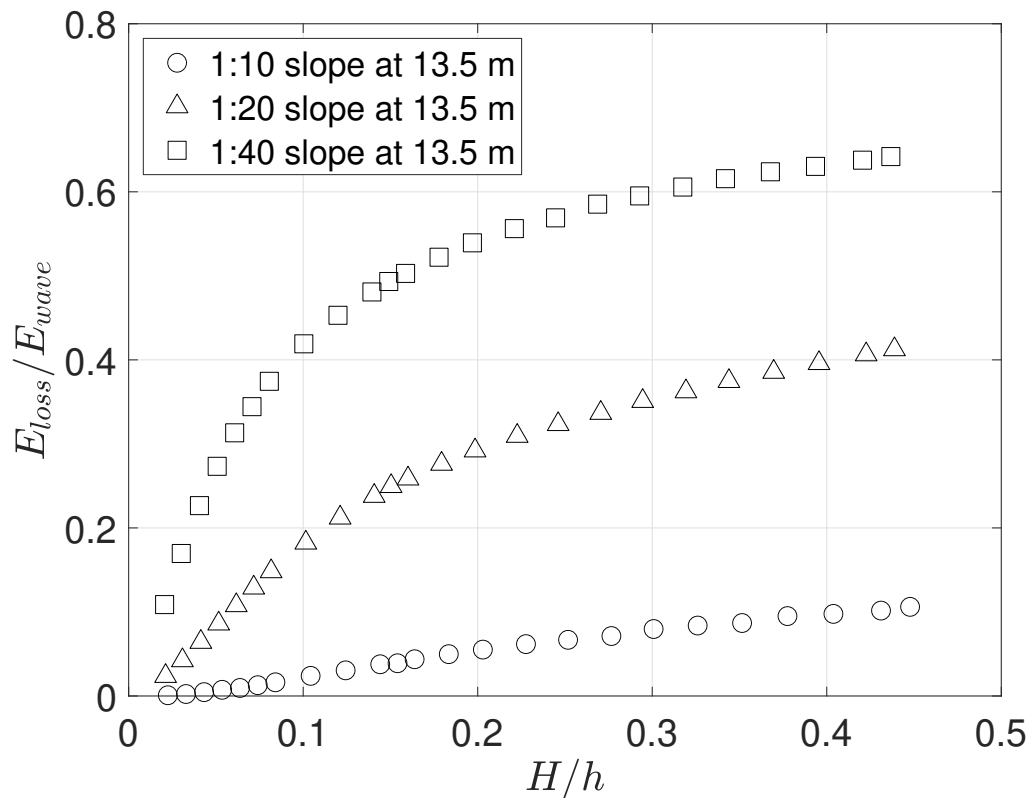


圖 5.35: 孤立波於不同斜率斜板之損失能量比



5.3.2 改變斜板斜率對 N 型波的影響

將四種不同類型之 N 型波各取一案例，針對斜板前之測站所量測到之波型進行比較，如圖 5.36、5.37、5.38、5.39，取用案例分別為：N-EXP25 (普通 N 型波)、N-EXP34 (強烈破碎 N 型波)、N-EXP43 (段波狀 N 型波)、N-EXP85 (陡峭型 N 型波)，發現斜板斜率對斜板前之測站所量測到的前導波波型沒有太大的影響，而跟隨在前導波後的尾波則有些許差異，是因為斜板斜率不同，造成反射波傳遞至測站的時間也有所不同，然而最大溯升值的觀測主要是受 N 型波的前導波影響，因此尾波不影響觀測。在溯升值方面則有明顯的影響，N 型波之溯升值整體而言會如同孤立波之結果，在相同的非線性下，隨著斜板變為平緩，溯升值逐漸下降，如圖 5.40、5.41。

圖 5.40 中，普通 N 型波與段波狀 N 型波之溯升值仍符合原先的趨勢，普通 N 型波在非破碎波時，溯升值會與相對應之孤立波之溯升值相近，破碎波時，則會小於相對應之孤立波之溯升值，由於斜率變小，坡度變緩，使得非破碎波減少，如圖 5.42，損失能量比則隨著斜板變緩，逐漸增大，如圖 5.43。段波狀 N 型波中，由於同樣是段波不明顯的案例，因此只能觀察到其溯升值與相對應之孤立波之溯升值相近，而損失能量比在不同斜率的斜板中，皆與孤立波相近，如圖 5.43。

圖 5.41 中，陡峭型 N 型波在改變斜板斜率後，其溯升值則不再是大於等於孤立波之溯升值，隨著斜板變緩，陡峭型 N 型波逐漸小於相對應孤立波之溯升值，會造成這種現象的原因為，原先其溯升值會大於等於相對應孤立波之溯升值，是在非破碎或微小破碎的條件下，損失能量比約等於 5% 且紊流耗散能量趨近於 0，斜板變緩後，陡峭型 N 型波將不再是非破碎波，損失能量比遠超過節 4.7 定義的破碎條件 5%，如圖 5.43，陡峭型 N 型波與強烈破碎 N 型波相同，損失能量比不僅比相同非線性下的孤立波大，還比普通 N 型波大，甚至在斜率 1:40 的斜板時，

兩者的損失能量比接近 80、90%，因此將改變斜板斜率後的陡峭型 N 型波重新定義為陡峭型破碎 N 型波 (steep breaking N-wave)。它們受到破碎現象與陡峭波型兩種力量的影響，當溯升值大於孤立波時，代表陡峭波型對 N 型波的影響力大於破碎現象，如陡峭型 N 型波與強烈破碎 N 型波，當溯升值小於孤立波時，則反之，如斜率 1:20 與 1:40 的結果，波破碎的影響力已大於陡峭波型，如陡峭型破碎 N 型波與強烈破碎 N 型波。

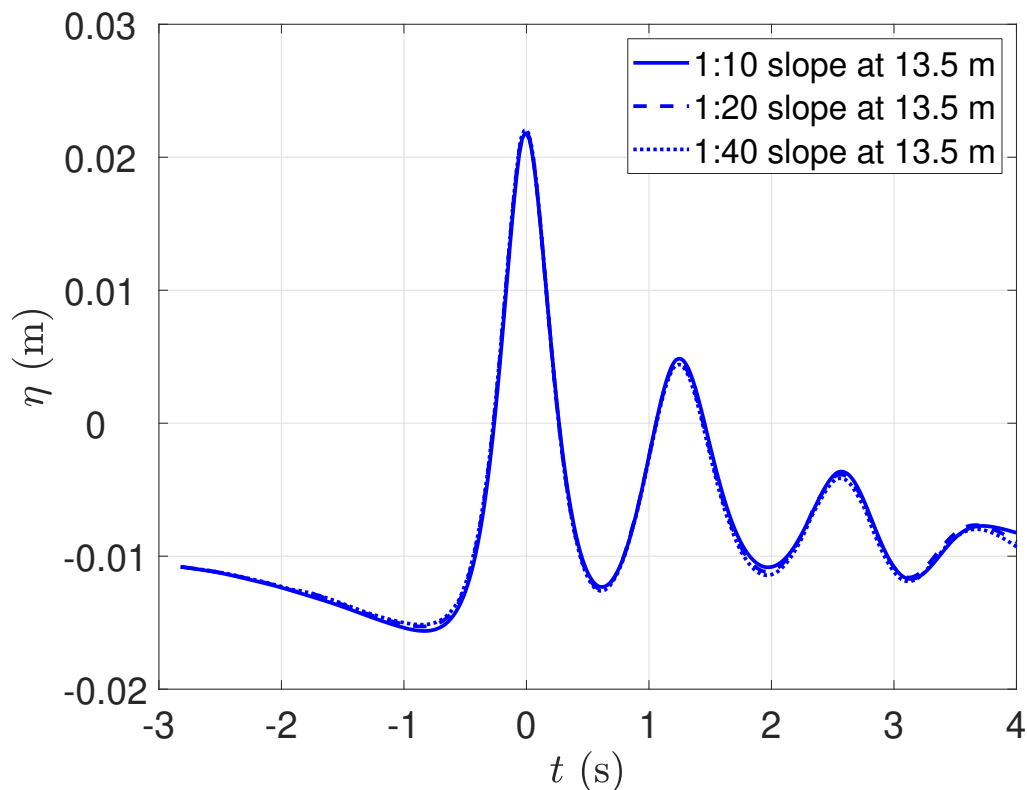


圖 5.36: 不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP25)

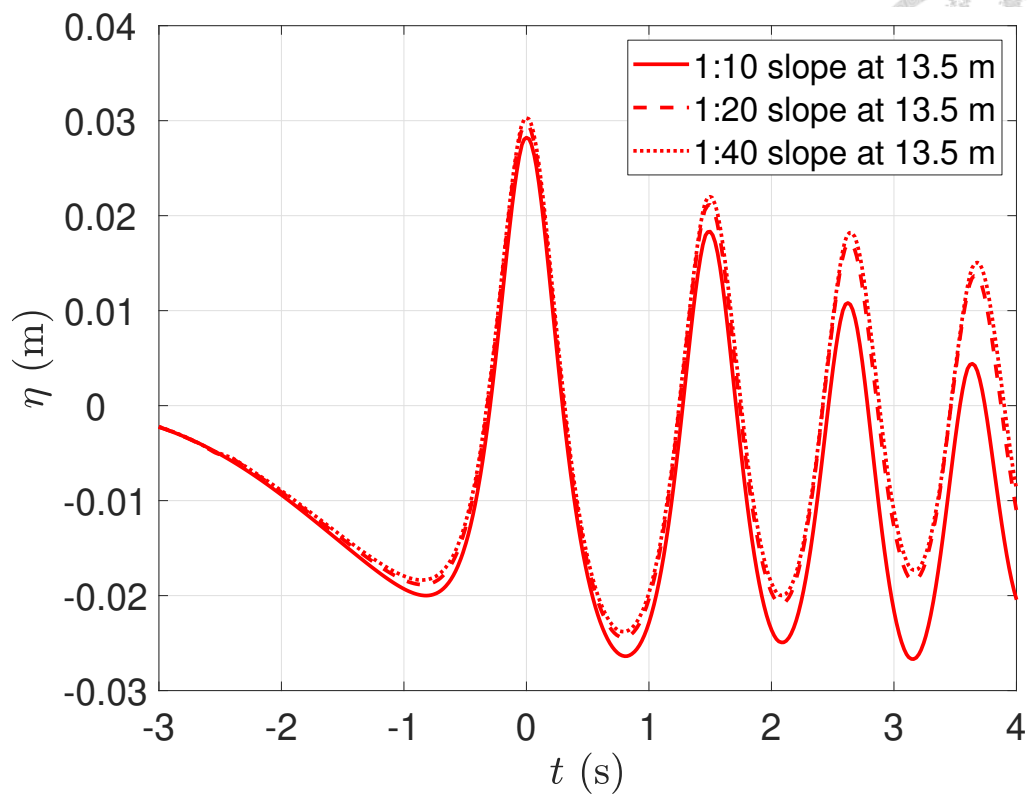


圖 5.37: 不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP34)

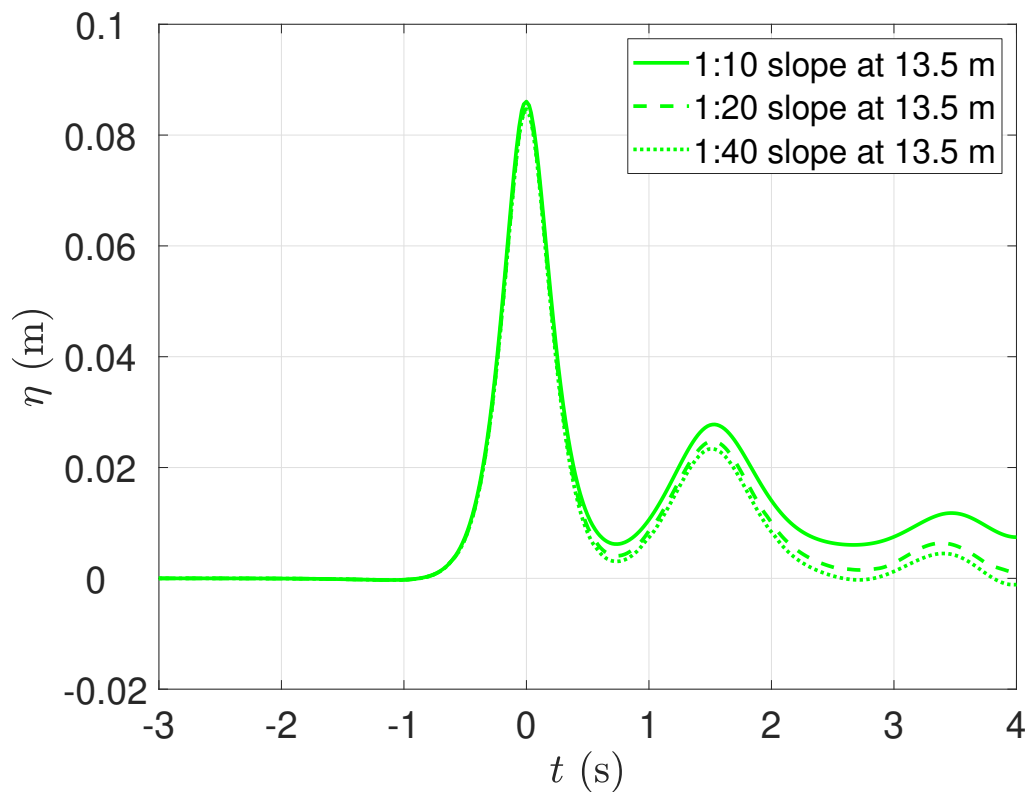


圖 5.38: 不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP43)

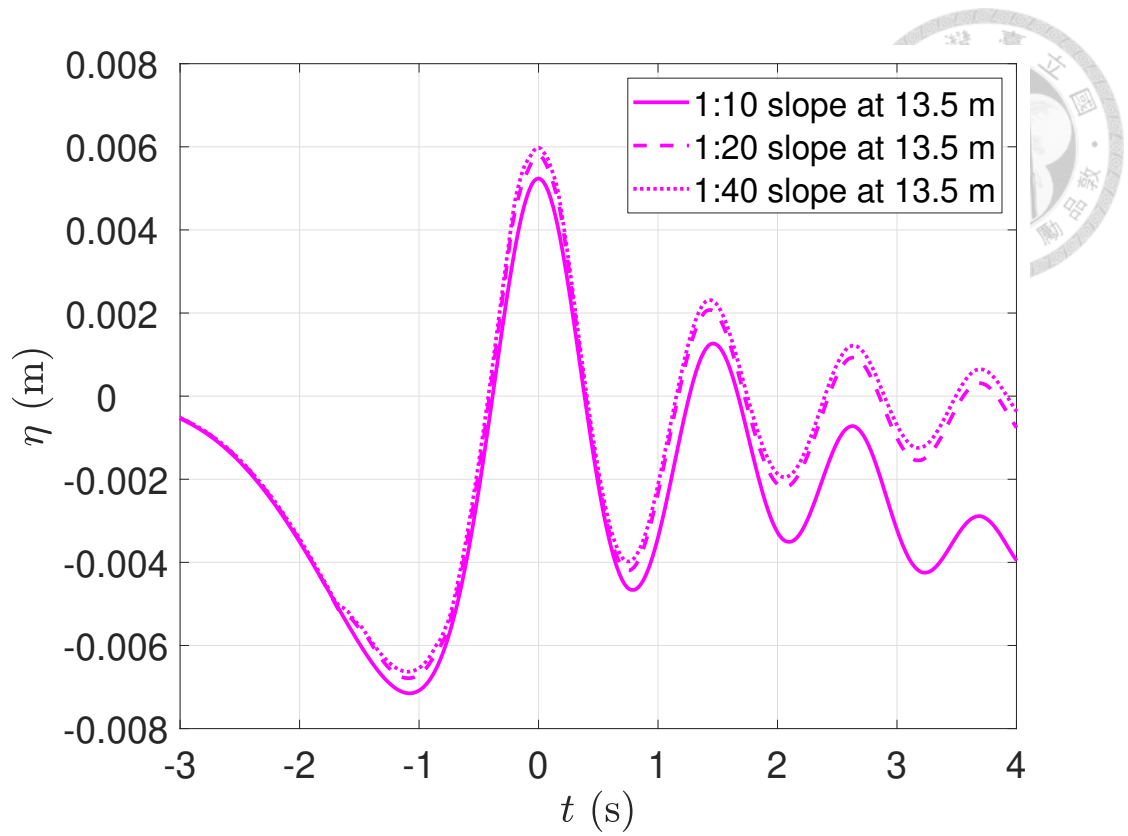


圖 5.39: 不同斜率斜板前之測站水位歷時圖 (N-EXP85)

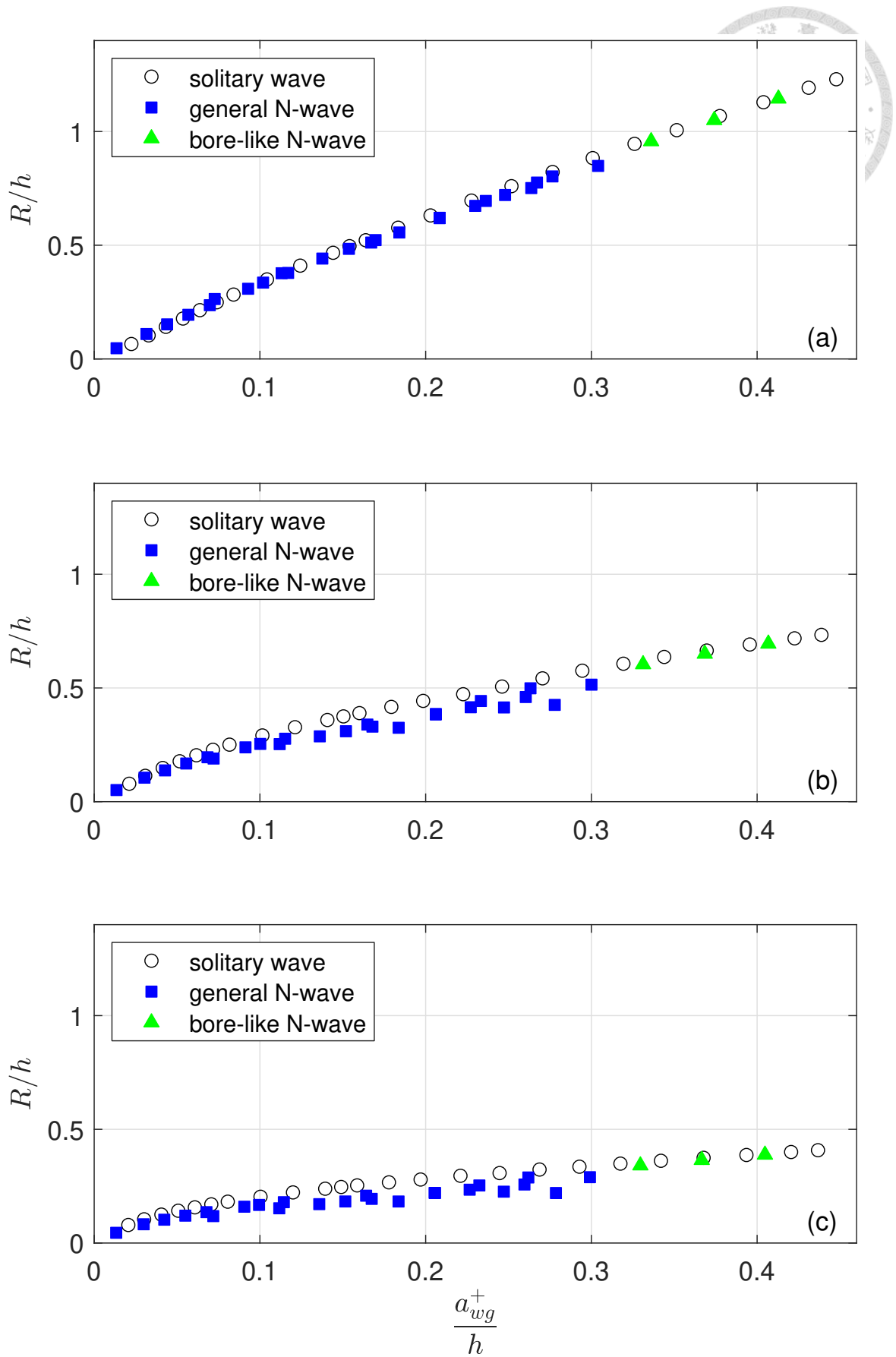


圖 5.40: 不同斜率斜板之孤立波、普通 N 型波與段波狀 N 型波溯升結果比較，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m。(a) 斜率 1:10 斜板之溯升模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之溯升模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之溯升模擬結果。

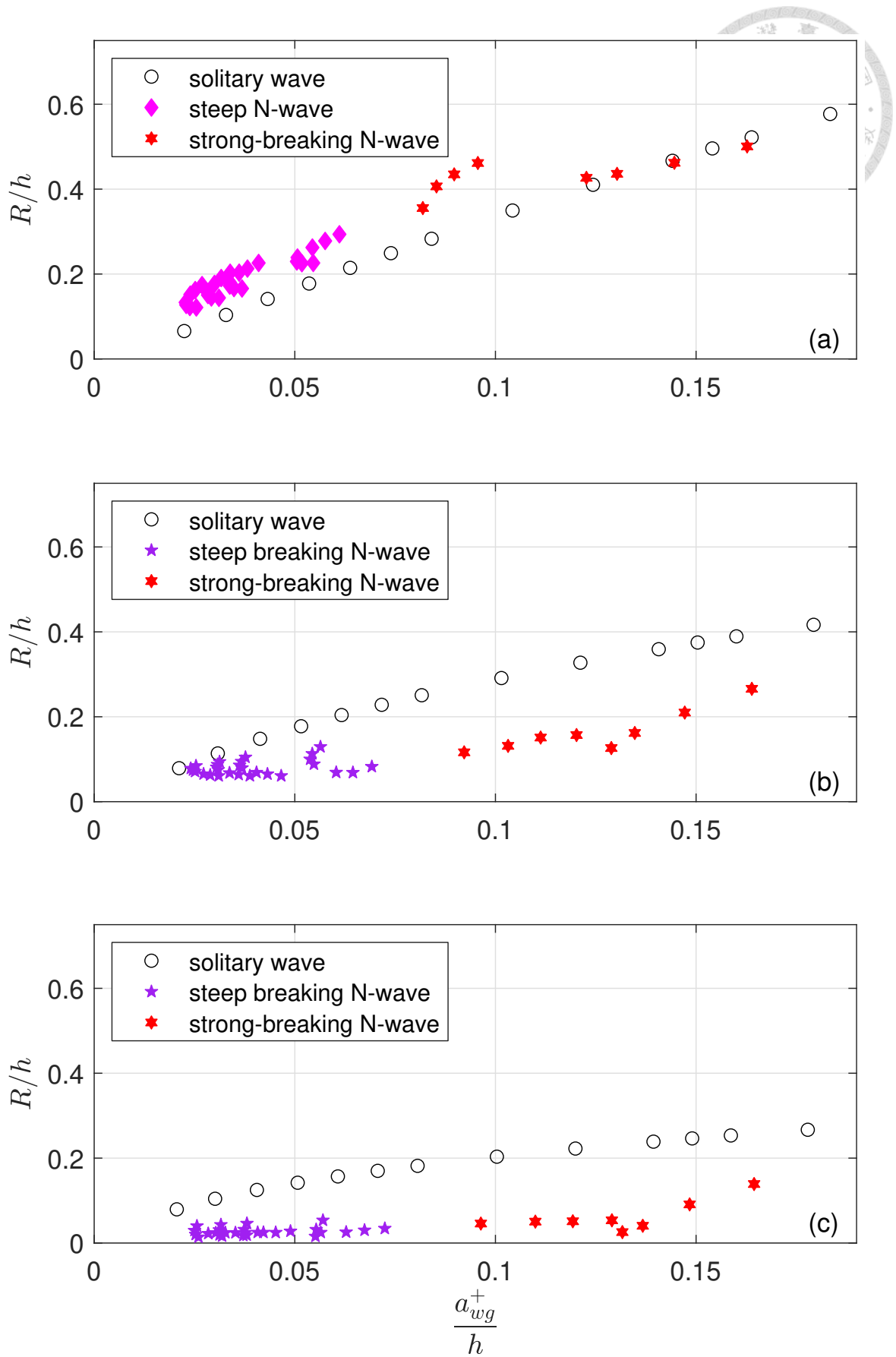


圖 5.41: 不同斜率斜板之孤立波、陡峭型 N 型波、強烈破碎 N 型波與陡峭型破碎 N 型波溯升結果比較，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m。(a) 斜率 1:10 斜板之溯升模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之溯升模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之溯升模擬結果。

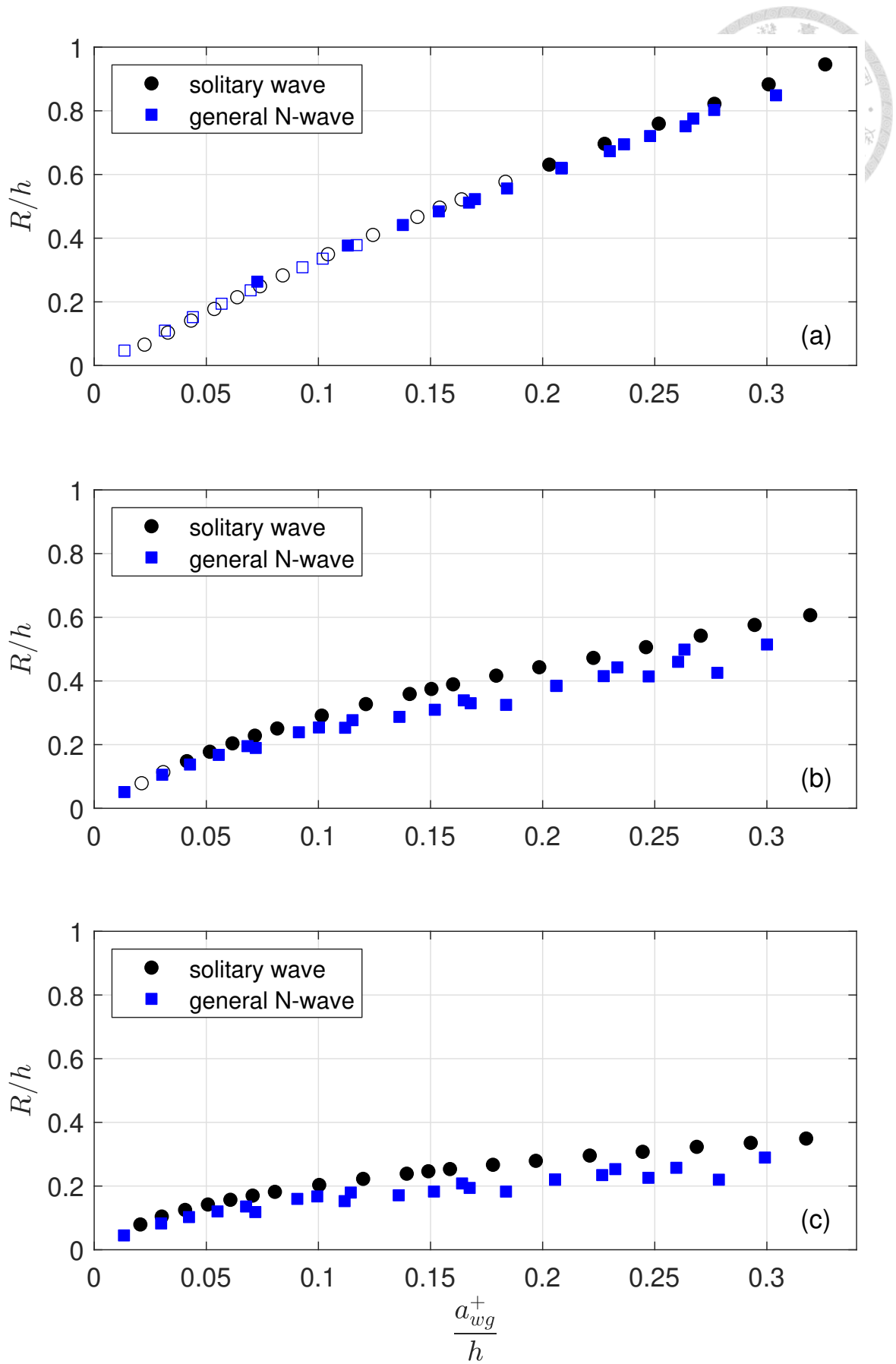
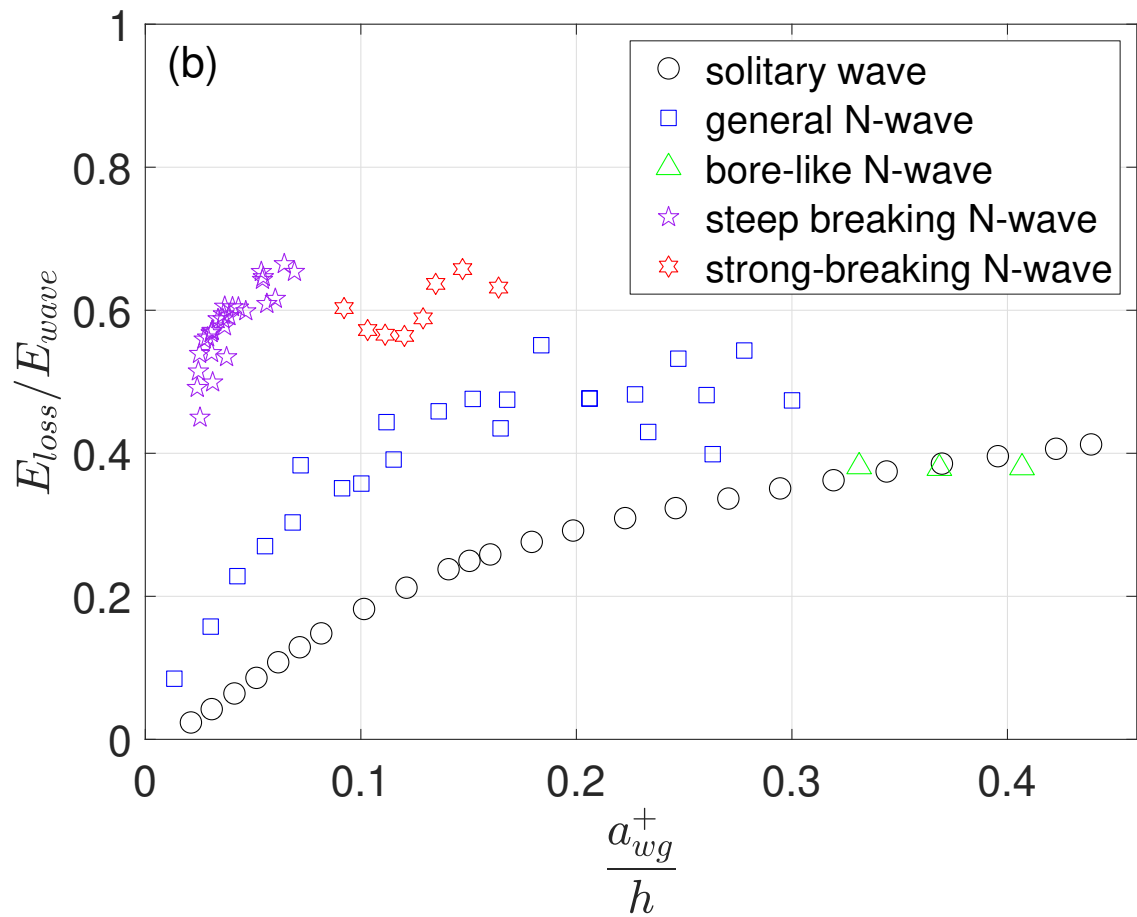
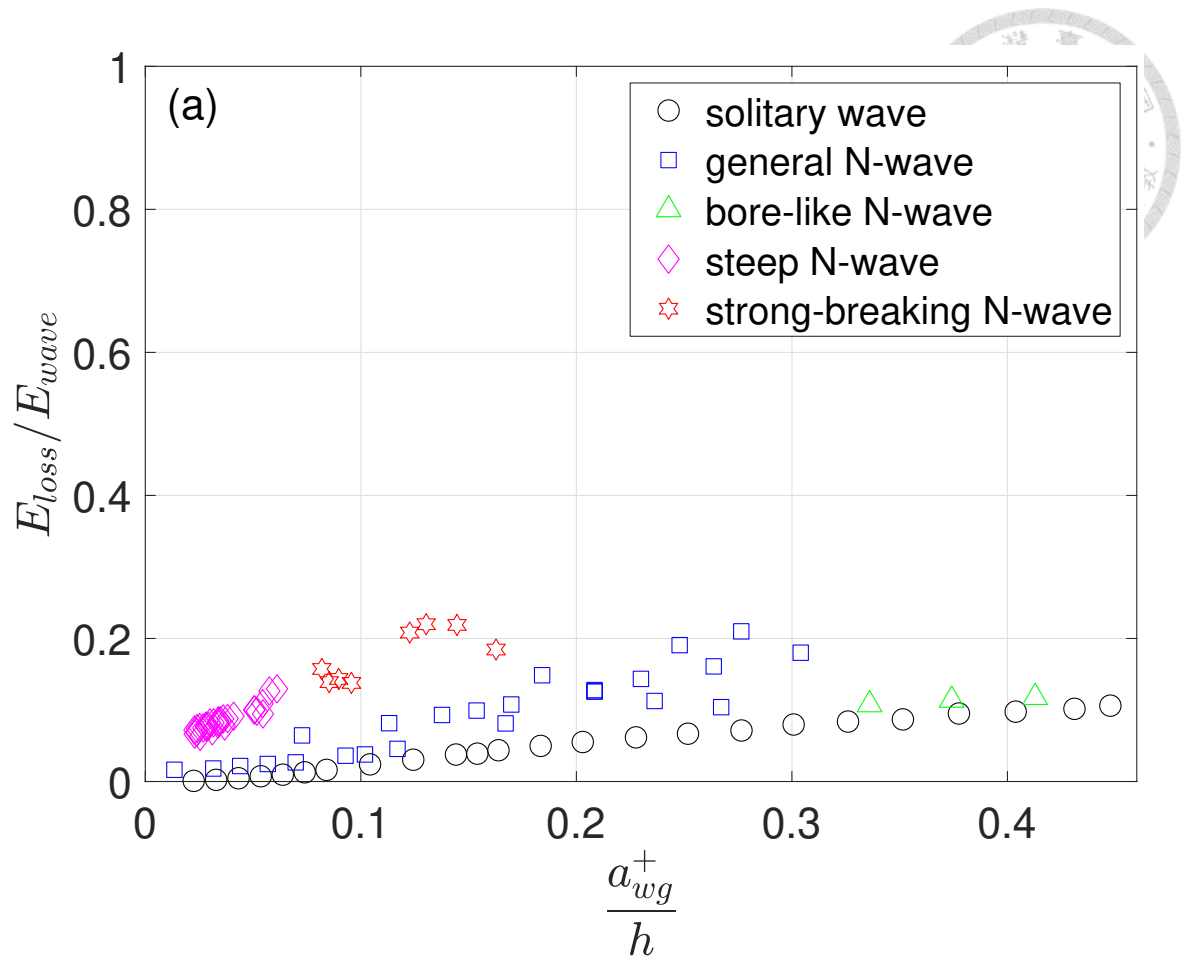


圖 5.42: 不同斜率斜板之孤立波與普通 N 型波溯升結果與波破碎比較 (空心圖示: 非破碎; 實心圖示: 破碎), 測站與斜板起點位於 $x = 13.5 \text{ m}$ 。(a) 斜率 1:10 斜板之溯升模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之溯升模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之溯升模擬結果。



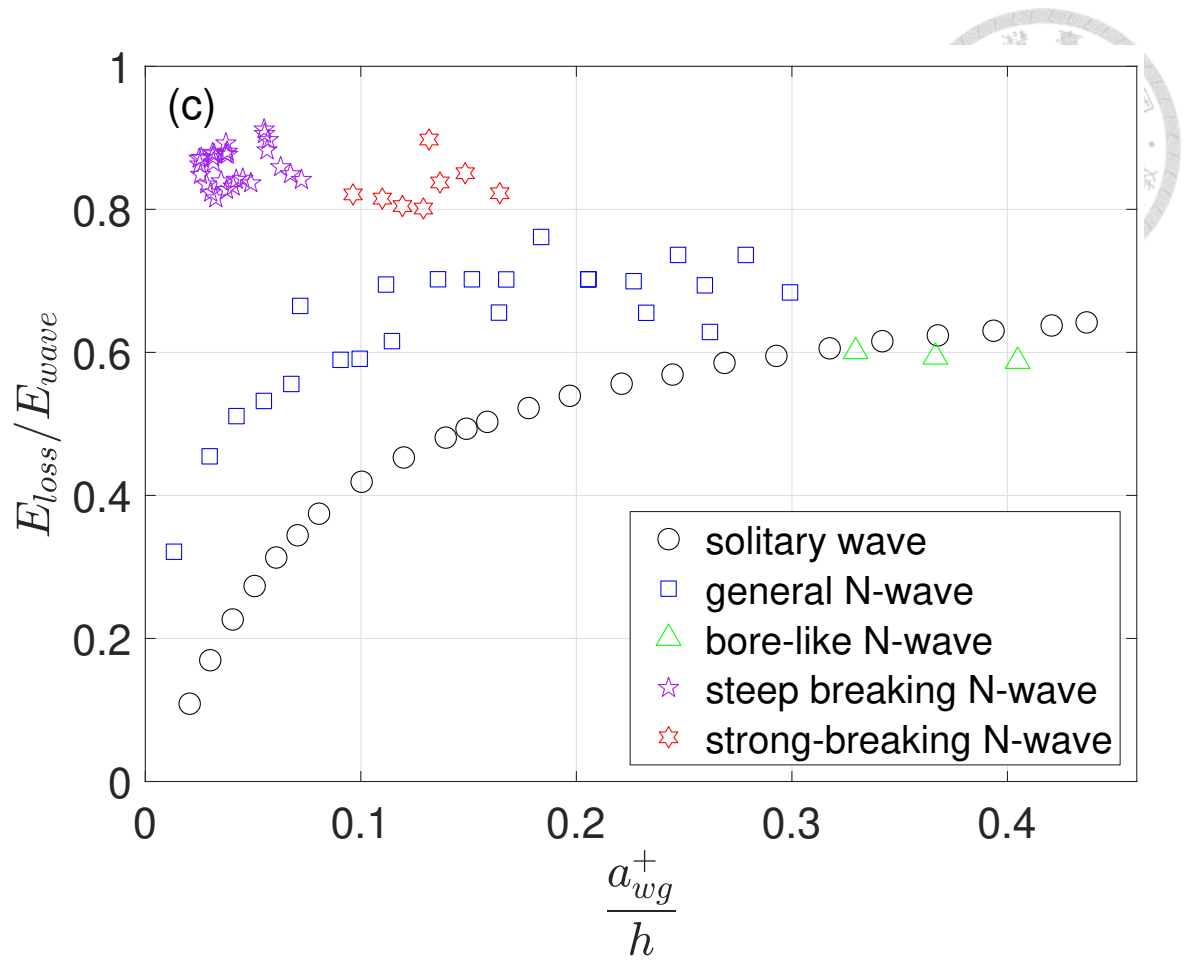


圖 5.43: 不同斜率斜板之孤立波與 N 型波之損失能量比，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m。(a) 斜率 1:10 斜板之模擬結果; (b) 斜率 1:20 斜板之模擬結果; (c) 斜率 1:40 斜板之模擬結果。



第六章 結論與未來展望



6.1 結論

基於過去的文獻，發現真實海嘯接近沿岸時，海水面經常被觀察到會出現退縮的現象，因此，本研究使用前導下沉 N 型波作為海嘯替代模型，利用三種造波參數非線性參數 (ϵ')、頻散參數 (σ')、偏心率 (δ/λ) 造出有規範的特定 N 型波波型。完成驗證更有效率的非靜水壓波模型 NHWAVE，並用其來模擬 N 型波在不同條件下的傳遞現象以及溯升運動情形。

將 N 型波依測站測得之波型特徵、溯升結果以及能量表現進行分類並分析，在改變斜板位置以及改變斜板斜率後發現以下幾點：(1) 普通 N 型波破碎時會比相對應的孤立波之溯升值來得低，但波浪破碎較為劇烈，可能會增加對淺灘的破壞。(2) 陡峭型 N 型波中發現，越陡峭的非破碎(微小破碎)長波會造成較大的溯升。(3) 當 N 型波陡峭、波高又高時，會造成強烈的破碎，紊流耗散能量會比相對應孤立波高出許多。(4) 段波狀 N 型波中，當前導波峰後之波谷距離水平面之距離越大且前導下沉波谷越不明顯時，將會產生較高之溯升值。(5) 斜板前移會改變斜板前測站所量測到的 N 型波波型，使得部份波型分類會有所改變，但波型對溯升的影響仍能用相同的方法加以解釋。(6) 改變斜率對斜板前所量測到的波型沒有影響，隨著坡度變緩，整體的 N 型波與孤立波之溯升值變小，損失能量比變大。



6.2 未來展望

- (1) 本研究在使用 NHWAVE 模擬 N 型波時，仍需借助 OpenFOAM 執行造波以得到 N 型波之初始波型，日後若能更改 NHWAVE 內的原始碼，並在其中添加自製的造波程式碼，便能夠直接使用 NHWAVE 實現 N 型波造波。本研究中因造波時間太長而無法進行模擬的 N 型波，便能透過其造波程式碼模擬波浪的傳遞以及溯升，觀察並分析此類 N 型波。
- (2) 本研究所使用的 NHWAVE 無法模擬波浪破碎的表現，無法由波浪在斜板上的溯升過程觀察波浪破碎型式，僅能由波浪前端是否垂直與能量相關的模擬結果來判斷波浪是否破碎，未來可使用更複雜的模擬軟體來捕捉波浪破碎情形。
- (3) 本研究數值水槽模型尺寸是以實驗水槽的尺寸為基礎，日後可套用真實海岸的資料進行模擬，觀察不同類別的 N 型波與真實海嘯的差異，比較兩者在海岸的海水退縮現象與溯升運動情形。

參考文獻



林立剛 (2021). N 型波傳遞之數值模擬與實驗驗證. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程研究所碩士論文，台北.

施文育 (2022). 前導下沉 N 型波下速度場之探討. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程研究所碩士論文，台北.

陳玟諭 (2023). 前導下沉 N 型海嘯波於不同傳遞距離之溯升. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程研究所碩士論文初稿，台北.

黃俊瑞 (2022). 前導下沉 N 型海嘯波之傳遞與溯升. 國立臺灣大學工程科學及海洋工程研究所碩士論文，台北.

Barranco, I. and Liu, P. L.-F. (2021). Run-up and inundation generated by non-decaying dam-break bores on a planar beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 915, A81.

Boussinesq, J. (1872). Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 17, 55–108.

Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A., and Garreaud, R. (2022). Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*, 49(6), e2022GL098153.

Chan, I.-C. and Liu, P. L.-F. (2012). On the runup of long waves on a plane beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C8).

Charvet, I., Eames, I., and Rossetto, T. (2013). New tsunami runup relationships based on long wave experiments. *Ocean Modelling*, 69, 79–92.

Dutykh, D. and Dias, F. (2009). Energy of tsunami waves generated by bottom motion. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 465(2103), 725–744.

Galvin, C. (1968). Breaker type classification on three laboratory beaches. *Journal of Geophysical Research*, 73(12), 3651–3659.

Galvin, C. (1972). Wave breaking in shallow water. *Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport*, pages 413–456.

Goring, D. G. (1978). *Tsunamis—the propagation of long waves onto a shelf*. PhD thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.

Goseberg, N., Wurpts, A., and Schlurmann, T. (2013). Laboratory-scale generation of tsunami and long waves. *Coastal Engineering*, 79, 57–74.

Greenshields, C. (2020). *OpenFOAM v8 User Guide*. The OpenFOAM Foundation, London, UK.

Grilli, S. and Svendsen, I. (1990). Computation of nonlinear wave kinematics during propagation and runup on a slope. *Water Wave Kinematics*, pages 387–412.

Grilli, S. T., Tappin, D. R., Carey, S., Watt, S. F., Ward, S. N., Grilli, A. R., Engwell, S. L., Zhang, C., Kirby, J. T., Schambach, L., and Muin, M. (2019). Modelling of the tsunami from the December 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits, Indonesia. *Scientific Reports*, 9(1), 11946.

Grimshaw, R. (1971). The solitary wave in water of variable depth. Part 2. *Journal of Fluid Mechanics*, 46(3), 611–622.

Higuera, P. (2017). olaFlow: CFD for waves. URL: <https://zenodo.org/record/1297013>.

Higuera, P., Losada, I. J., and Lara, J. L. (2015). Three-dimensional numerical wave generation with moving boundaries. *Coastal Engineering*, 101, 35–47.

Imamura, F., Suppasri, A., Arikawa, T., Koshimura, S., Satake, K., and Tanioka, Y. (2022). Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Applied Geophysics*, 179(5), 1549–1560.

Jensen, A., Pedersen, G. K., and Wood, D. J. (2003). An experimental study of wave run-up at a steep beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 486, 161–188.

Klettner, C., Balasubramanian, S., Hunt, J., Fernando, H., Voropayev, S., and Eames, I. (2012). Draw-down and run-up of tsunami waves on sloping beaches. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 165(2), 119–129.

Korteweg, D. J. and De Vries, G. (1895). XLI. On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 39(240), 422–443.

Li, Y. (2000). *Tsunamis: Non-breaking and breaking solitary wave run-up*. California Institute of Technology.

Li, Y. and Raichlen, F. (2003). Energy balance model for breaking solitary wave runup. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(2), 47–59.

Liang, D., Gotoh, H., Khayyer, A., and Chen, J. M. (2013). Boussinesq modelling of solitary wave and N-wave runup on coast. *Applied Ocean Research*, 42, 144–154.

Lima, V. V., Avilez-Valente, P., Baptista, M. A. V., and Miranda, J. M. (2019). Generation of N-waves in laboratory. *Coastal Engineering*, 148, 1–18.

Lin, P. and Li, C. W. (2002). A σ -coordinate three-dimensional numerical model for surface wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 38(11), 1045–1068.

Lin, P. and Liu, P. L.-F. (1998). A numerical study of breaking waves in the surf zone. *Journal of Fluid Mechanics*, 359, 239–264.

Liu, P. L.-F., Park, Y. S., and Cowen, E. A. (2007). Boundary layer flow and bed shear stress under a solitary wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 574, 449–463.

Lo, H.-Y., Park, Y. S., and Liu, P. L.-F. (2013). On the run-up and back-wash processes of single and double solitary waves—An experimental study. *Coastal Engineering*, 80, 1–14.

Ma, G., Kirby, J., and Shi, F. (2014). Non-hydrostatic wave model NHWAVE: Documentation and user's manual (version 2.0). *Department of Civil and Environmental Engineering, Old Dominion University*.

Ma, G., Shi, F., and Kirby, J. T. (2011). A polydisperse two-fluid model for surf zone bubble simulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C5).

Ma, G., Shi, F., and Kirby, J. T. (2012). Shock-capturing non-hydrostatic model for fully dispersive surface wave processes. *Ocean Modelling*, 43, 22–35.

Madsen, P. A., Fuhrman, D. R., and Schäffer, H. A. (2008). On the solitary wave paradigm for tsunamis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C12).

Madsen, P. A. and Schaeffer, H. A. (2010). Analytical solutions for tsunami runup on a plane beach: single waves, N-waves and transient waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 645, 27–57.

Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T., and Yanagisawa, H. (2011). Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. *Geophysical Research Letters*, 38(7).

Phillips, N. A. (1957). A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *Journal of Meteorological Research*, 14, 184–185.

Rossetto, T., Allsop, W., Charvet, I., and Robinson, D. I. (2011). Physical modelling of tsunami using a new pneumatic wave generator. *Coastal Engineering*, 58(6), 517–527.

Russell, J. S. (1845). *Report on Waves: Made to the Meetings of the British Association in 1842-43*.

Schimmels, S., Sriram, V., Didenkulova, I., and Fernández, H. (2014). On the generation of tsunami in a large scale wave flume. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 14.

Svendsen, I. and Justesen, P. (1984). Forces on slender cylinders from very high and spilling breakers. In *Symposium on Description and Modelling of Directional Seas*, pages 18–20.

Synolakis, C. E. (1987). The runup of solitary waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 185, 523–545.

Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kânoğlu, U., and Gonzalez, F. I. (2009). Validation and verification of tsunami numerical models. *Tsunami Science Four Years after the 2004 Indian Ocean Tsunami: Part I: Modelling and Hazard Assessment*, pages 2197–2228.

Tadepalli, S. and Synolakis, C. E. (1994). The run-up of N-waves on sloping beaches. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 445(1923), 99–112.

Wachtendorf, T., Kendra, J. M., Rodriguez, H., and Trainor, J. (2006). The social impacts and consequences of the December 2004 Indian ocean tsunami: observations from India and Sri Lanka. *Earthquake Spectra*, 22(S3), 693–714.

Whitham, G. B. (1974). Linear and nonlinear waves. *John Wiley & Sons*.

Widiyanto, W., Santoso, P. B., Hsiao, S.-C., and Imananta, R. T. (2019). Post-event field survey of 28 September 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12), 2781–2794.

Wu, Y.-T., Liu, P. L.-F., Hwang, K.-S., and Hwung, H.-H. (2018). Runup of laboratory-generated breaking solitary and periodic waves on a uniform slope. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 144(6), 04018023.

附錄 A — 驗證用之實驗與模擬數據



A.1 孤立波之造波參數

表 A.1: 孤立波之造波參數

Case	h (m)	ϵ'	H (m)
S-EXP01	0.23	0.020	0.0046
S-EXP02	0.23	0.030	0.0069
S-EXP03	0.23	0.040	0.0092
S-EXP04	0.23	0.050	0.0115
S-EXP05	0.23	0.060	0.0138
S-EXP06	0.23	0.070	0.0161
S-EXP07	0.23	0.080	0.0184
S-EXP08	0.23	0.100	0.0230
S-EXP09	0.23	0.120	0.0276
S-EXP10	0.23	0.140	0.0322
S-EXP11	0.23	0.150	0.0345
S-EXP12	0.23	0.160	0.0368
S-EXP13	0.23	0.180	0.0414
S-EXP14	0.23	0.200	0.0460
S-EXP15	0.23	0.225	0.0518
S-EXP16	0.23	0.250	0.0575
S-EXP17	0.23	0.275	0.0633

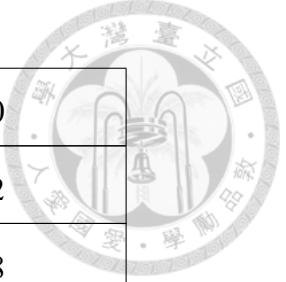


S-EXP18	0.23	0.300	0.0690
S-EXP19	0.23	0.325	0.0748
S-EXP20	0.23	0.350	0.0805
S-EXP21	0.23	0.375	0.0863
S-EXP22	0.23	0.400	0.0920
S-EXP23	0.23	0.425	0.0978
S-EXP24	0.23	0.440	0.1012

A.2 N 型波之造波參數

表 A.2: N 型波之造波參數

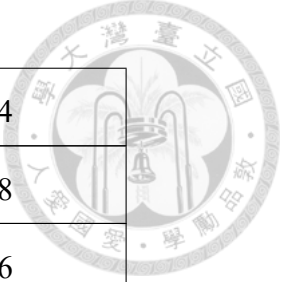
Case	h (m)	ϵ'	σ'	δ/λ	造波板移動時間 (s)
N-EXP01	0.23	0.10	0.28	0.04254	6.90
N-EXP02	0.23	0.15	0.28	0.04254	6.92
N-EXP03	0.23	0.18	0.28	0.04254	6.92
N-EXP04	0.23	0.20	0.28	0.04254	6.94
N-EXP05	0.23	0.22	0.28	0.04254	6.94
N-EXP06	0.23	0.27	0.28	0.04254	6.96
N-EXP07	0.23	0.30	0.28	0.04254	6.96
N-EXP08	0.23	0.35	0.28	0.04254	6.98
N-EXP09	0.23	0.40	0.28	0.04254	7.00
N-EXP10	0.23	0.50	0.28	0.04254	7.02
N-EXP11	0.23	0.60	0.28	0.04254	7.06



N-EXP12	0.23	0.70	0.28	0.04254	7.10
N-EXP13	0.23	0.80	0.28	0.04254	7.12
N-EXP14	0.23	0.27	1.64	0.04254	1.18
N-EXP15	0.23	0.27	1.16	0.04254	1.68
N-EXP16	0.23	0.27	0.95	0.04254	2.06
N-EXP17	0.23	0.27	0.82	0.04254	2.38
N-EXP18	0.23	0.27	0.73	0.04254	2.66
N-EXP19	0.23	0.27	0.62	0.04254	3.14
N-EXP20	0.23	0.27	0.58	0.04254	3.36
N-EXP21	0.23	0.27	0.52	0.04254	3.74
N-EXP22	0.23	0.27	0.37	0.04254	5.26
N-EXP23	0.23	0.27	0.28	0.04254	6.96
N-EXP24	0.23	0.27	0.21	0.04254	9.28
N-EXP25	0.23	0.27	0.16	0.04254	12.18
N-EXP26	0.23	0.27	0.12	0.04254	16.24
N-EXP27	0.23	0.27	0.09	0.04254	21.64
N-EXP28	0.23	0.27	0.08	0.04254	24.34
N-EXP29	0.23	0.27	0.07	0.04254	27.82
N-EXP30	0.23	0.27	0.28	-0.17016	6.54
N-EXP31	0.23	0.27	0.28	-0.14889	6.58
N-EXP32	0.23	0.27	0.28	-0.12762	6.62
N-EXP33	0.23	0.27	0.28	-0.08508	6.70
N-EXP34	0.23	0.27	0.28	-0.06381	6.74



N-EXP35	0.23	0.27	0.28	-0.04254	6.78
N-EXP36	0.23	0.27	0.28	-0.02127	6.82
N-EXP37	0.23	0.27	0.28	0	6.88
N-EXP38	0.23	0.27	0.28	0.02127	6.92
N-EXP39	0.23	0.27	0.28	0.04254	6.96
N-EXP40	0.23	0.27	0.28	0.06381	7.00
N-EXP41	0.23	0.27	0.28	0.08508	7.04
N-EXP42	0.23	0.27	0.28	0.12762	7.12
N-EXP43	0.23	0.27	0.28	0.14889	7.18
N-EXP44	0.23	0.27	0.28	0.17016	7.22
N-EXP45	0.23	0.27	0.110	0.04254	17.70
N-EXP46	0.23	0.27	0.100	0.04254	19.48
N-EXP47	0.23	0.27	0.085	0.04254	22.92
N-EXP48	0.23	0.27	0.075	0.04254	25.98
N-EXP49	0.23	0.15	0.090	0.04254	21.52
N-EXP50	0.23	0.15	0.080	0.04254	24.22
N-EXP51	0.23	0.15	0.070	0.04254	27.68
N-EXP52	0.23	0.15	0.065	0.04254	29.80
N-EXP53	0.23	0.15	0.060	0.04254	32.28
N-EXP54	0.23	0.20	0.100	0.04254	19.42
N-EXP55	0.23	0.20	0.090	0.04254	21.58
N-EXP56	0.23	0.20	0.080	0.04254	24.28
N-EXP57	0.23	0.20	0.075	0.04254	25.90



N-EXP58	0.23	0.20	0.070	0.04254	27.74
N-EXP59	0.23	0.20	0.065	0.04254	29.88
N-EXP60	0.23	0.20	0.060	0.04254	32.36
N-EXP61	0.23	0.10	0.28	-0.17016	6.74
N-EXP62	0.23	0.10	0.28	-0.14889	6.76
N-EXP63	0.23	0.10	0.28	-0.12762	6.78
N-EXP64	0.23	0.10	0.28	-0.08508	6.80
N-EXP65	0.23	0.10	0.28	-0.06381	6.82
N-EXP66	0.23	0.10	0.28	-0.04254	6.84
N-EXP67	0.23	0.10	0.28	-0.02127	6.86
N-EXP68	0.23	0.07	0.28	-0.17016	6.78
N-EXP69	0.23	0.07	0.28	-0.14889	6.80
N-EXP70	0.23	0.07	0.28	-0.12762	6.80
N-EXP71	0.23	0.07	0.28	-0.08508	6.82
N-EXP72	0.23	0.07	0.28	-0.06381	6.84
N-EXP73	0.23	0.07	0.28	-0.04254	6.84
N-EXP74	0.23	0.07	0.28	-0.02127	6.86
N-EXP75	0.23	0.06	0.28	-0.17016	6.80
N-EXP76	0.23	0.06	0.28	-0.14889	6.80
N-EXP77	0.23	0.06	0.28	-0.12762	6.82
N-EXP78	0.23	0.06	0.28	-0.08508	6.84
N-EXP79	0.23	0.06	0.28	-0.06381	6.84
N-EXP80	0.23	0.06	0.28	-0.04254	6.86



N-EXP81	0.23	0.06	0.28	-0.02127	6.86
N-EXP82	0.23	0.05	0.28	-0.17016	6.80
N-EXP83	0.23	0.05	0.28	-0.14889	6.82
N-EXP84	0.23	0.05	0.28	-0.12762	6.82
N-EXP85	0.23	0.05	0.28	-0.08508	6.84
N-EXP86	0.23	0.05	0.28	-0.06381	6.84
N-EXP87	0.23	0.05	0.28	-0.04254	6.86
N-EXP88	0.23	0.05	0.28	-0.02127	6.86

A.3 孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板)

表 A.3: 孤立波之陳玟諭 (2023) 實驗結果與本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	實驗 H/h	實驗 R (m)	模擬 H/h	模擬 R (m)
S-EXP01	0.0207	0.0114	0.0224	0.0151
S-EXP02	0.0293	0.0184	0.0329	0.0238
S-EXP03	0.0390	0.0259	0.0432	0.0325
S-EXP04	0.0479	0.0329	0.0536	0.0409
S-EXP05	0.0570	0.0405	0.0638	0.0493
S-EXP06	0.0670	0.0468	0.0740	0.0573
S-EXP07	0.0758	0.0545	0.0841	0.0651
S-EXP08	0.0939	0.0699	0.1043	0.0804
S-EXP09	0.1125	0.0854	0.1243	0.0944
S-EXP10	0.1305	0.1005	0.1441	0.1074



S-EXP11	0.1375	0.1079	0.1541	0.1141
S-EXP12	0.1470	0.1156	0.1638	0.1200
S-EXP13	0.1651	0.1306	0.1834	0.1327
S-EXP14	0.1840	0.1341	0.2030	0.1451
S-EXP15	0.2033	0.1457	0.2276	0.1601
S-EXP16	0.2248	0.1572	0.2518	0.1747
S-EXP17	0.2462	0.1648	0.2766	0.1891
S-EXP18	0.2674	0.1784	0.3008	0.2031
S-EXP19	0.2891	0.1872	0.3260	0.2175
S-EXP20	0.3099	0.1964	0.3515	0.2314
S-EXP21	0.3320	0.2051	0.3775	0.2456
S-EXP22	0.3498	0.2121	0.4038	0.2596
S-EXP23	0.3734	0.2229	0.4311	0.2743
S-EXP24	0.3873	0.2276	0.4478	0.2829

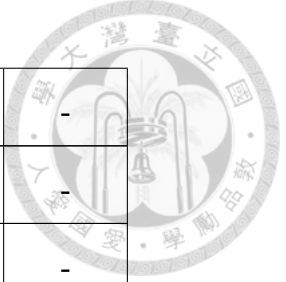
A.4 N 型波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板)

表 A.4: N 型波之陳玟諭 (2023) 實驗結果及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)(*：無法模擬)

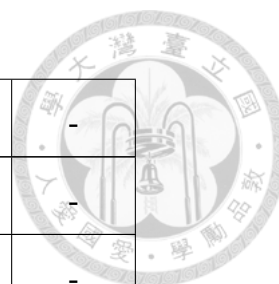
Case	實驗 a_{wg}^+/h	實驗 R (m)	實驗 R_d (m)	模擬 a_{wg}^+/h	模擬 R (m)	模擬 R_d (m)
N-EXP01	0.0646	0.0515	0.0094	0.0727	0.0606	0.0098
N-EXP02	0.1030	0.0785	0.0104	0.1131	0.0867	0.0114
N-EXP03	0.1285	0.0938	0.0104	0.1377	0.1015	0.0120



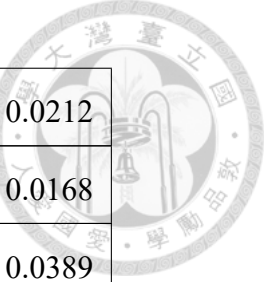
N-EXP04	0.1413	0.1034	0.0099	0.1537	0.1113	0.0118
N-EXP05	0.1571	0.1118	0.0104	0.1698	0.1202	0.0113
N-EXP06	0.1938	0.1293	0.0089	0.2084	0.1427	0.0105
N-EXP07	0.2173	0.1408	0.0069	0.2299	0.1548	0.0095
N-EXP08	0.2539	0.1623	0.0049	0.2637	0.1728	0.0082
N-EXP09	0.2876	0.1814	0.0035	0.3041	0.1952	0.0061
*N-EXP10	0.2899	0.1865	0.0030	-	-	-
*N-EXP11	0.3111	0.2045	0.0030	-	-	-
*N-EXP12	0.3481	0.2202	0.0020	-	-	-
*N-EXP13	0.3771	0.2364	0.0010	-	-	-
N-EXP14	0.0221	0.0131	-	0.0135	0.0108	0.0000
N-EXP15	0.0362	0.0240	-	0.0315	0.0252	0.0000
N-EXP16	0.0467	0.0340	-	0.0440	0.0350	0.0001
N-EXP17	0.0611	0.0439	-	0.0568	0.0446	0.0002
N-EXP18	0.0712	0.0522	0.0005	0.0698	0.0543	0.0006
N-EXP19	0.0875	0.0675	0.0005	0.0929	0.0710	0.0013
N-EXP20	0.0951	0.0738	0.0010	0.1019	0.0772	0.0016
N-EXP21	0.1081	0.0850	0.0020	0.1170	0.0870	0.0028
N-EXP22	0.1534	0.1110	0.0044	0.1672	0.1177	0.0064
N-EXP23	0.1923	0.1311	0.0084	0.2084	0.1427	0.0105
N-EXP24	0.2343	0.1507	0.0128	0.2479	0.1658	0.0160
N-EXP25	0.2669	0.1663	0.0178	0.2765	0.1846	0.0237
*N-EXP26	0.2884	0.1807	0.0276	-	-	-



*N-EXP27	0.2816	0.1820	0.0365	-	-	-
*N-EXP28	0.2628	0.1815	0.0385	-	-	-
*N-EXP29	0.2345	0.1810	0.0404	-	-	-
N-EXP30	0.1079	0.0949	0.0690	0.0956	0.1062	0.0788
N-EXP31	0.1002	0.0915	0.0671	0.0897	0.1000	0.0763
N-EXP32	0.0894	0.0844	0.0641	0.0853	0.0935	0.0719
N-EXP33	0.1085	0.0974	0.0493	0.0819	0.0817	0.0587
N-EXP34	0.1136	0.0931	0.0424	0.1227	0.0981	0.0478
N-EXP35	0.1211	0.0981	0.0325	0.1303	0.1003	0.0402
N-EXP36	0.1351	0.1135	0.0247	0.1446	0.1063	0.0314
N-EXP37	0.1519	0.1065	0.0178	0.1627	0.1151	0.0235
N-EXP38	0.1523	0.1049	0.0138	0.1841	0.1279	0.0162
N-EXP39	0.1942	0.1328	0.0079	0.2084	0.1424	0.0105
N-EXP40	0.2201	0.1475	0.0039	0.2363	0.1598	0.0061
N-EXP41	0.2483	0.1641	0.0020	0.2672	0.1784	0.0035
N-EXP42	0.3178	0.1985	0.0005	0.3360	0.2201	0.0009
N-EXP43	0.3410	0.2140	-	0.3741	0.2415	0.0005
N-EXP44	0.3961	0.2298	-	0.4128	0.2632	0.0003
*N-EXP45	0.2902	0.1801	0.0306	-	-	-
*N-EXP46	0.2884	0.1817	0.0325	-	-	-
*N-EXP47	0.2713	0.1850	0.0365	-	-	-
*N-EXP48	0.2490	0.1806	0.0375	-	-	-
*N-EXP49	0.1142	0.1113	0.0247	-	-	-



*N-EXP50	0.0998	0.1099	0.0237	-	-	-
*N-EXP51	0.0836	0.1002	0.0247	-	-	-
*N-EXP52	0.0750	0.0933	0.0242	-	-	-
*N-EXP53	0.0686	0.0877	0.0242	-	-	-
*N-EXP54	0.1881	0.1438	0.0296	-	-	-
*N-EXP55	0.1758	0.1436	0.0316	-	-	-
*N-EXP56	0.1594	0.1412	0.0325	-	-	-
*N-EXP57	0.1498	0.1384	0.0321	-	-	-
*N-EXP58	0.1357	0.1346	0.0316	-	-	-
*N-EXP59	0.1182	0.1319	0.0316	-	-	-
*N-EXP60	0.1031	0.1250	0.0296	-	-	-
N-EXP61	0.0585	0.0616	0.0454	0.0611	0.0675	0.0517
N-EXP62	0.0502	0.0576	0.0434	0.0576	0.0639	0.0488
N-EXP63	0.0485	0.0547	0.0385	0.0544	0.0604	0.0446
N-EXP64	0.0453	0.0467	0.0306	0.0507	0.0549	0.0364
N-EXP65	0.0444	0.0450	0.0281	0.0505	0.0528	0.0314
N-EXP66	0.0455	0.0437	0.0222	0.0518	0.0519	0.0264
N-EXP67	0.0470	0.0431	0.0187	0.0546	0.0520	0.0220
N-EXP68	0.0393	0.0474	0.0395	0.0410	0.0520	0.0427
N-EXP69	0.0350	0.0421	0.0355	0.0382	0.0490	0.0388
N-EXP70	0.0335	0.0400	0.0316	0.0361	0.0468	0.0364
N-EXP71	0.0304	0.0341	0.0247	0.0337	0.0417	0.0288
N-EXP72	0.0306	0.0327	0.0217	0.0338	0.0397	0.0245



N-EXP73	0.0312	0.0322	0.0168	0.0348	0.0384	0.0212
N-EXP74	0.0315	0.0306	0.0138	0.0368	0.0382	0.0168
N-EXP75	0.0308	0.0401	0.0325	0.0339	0.0467	0.0389
N-EXP76	0.0283	0.0377	0.0306	0.0317	0.0438	0.0358
N-EXP77	0.0275	0.0346	0.0247	0.0300	0.0406	0.0320
N-EXP78	0.0251	0.0302	0.0227	0.0282	0.0363	0.0256
N-EXP79	0.0245	0.0284	0.0207	0.0283	0.0346	0.0214
N-EXP80	0.0262	0.0262	0.0148	0.0292	0.0333	0.0187
N-EXP81	0.0268	0.0250	0.0128	0.0311	0.0331	0.0151
N-EXP82	0.0247	0.0338	0.0306	0.0269	0.0400	0.0339
N-EXP83	0.0245	0.0300	0.0266	0.0252	0.0373	0.0314
N-EXP84	0.0241	0.0275	0.0227	0.0240	0.0349	0.0283
N-EXP85	0.0210	0.0240	0.0187	0.0228	0.0306	0.0214
N-EXP86	0.0215	0.0227	0.0168	0.0229	0.0293	0.0189
N-EXP87	0.0191	0.0195	0.0118	0.0238	0.0281	0.0160
N-EXP88	0.0207	0.0199	0.0099	0.0255	0.0279	0.0131

A.5 孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板前移)

表 A.5: 孤立波之陳玟諭 (2023) 實驗結果及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)

Case	實驗 H/h	實驗 R (m)	模擬 H/h	模擬 R (m)
S-EXP01	0.0213	0.0099	0.0224	0.0151
S-EXP02	0.0324	0.0175	0.0329	0.0238

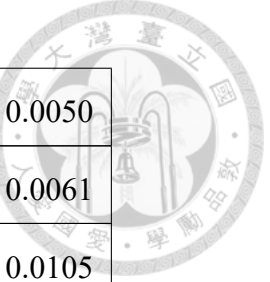


S-EXP03	0.0401	0.0249	0.0432	0.0324
S-EXP04	0.0507	0.0331	0.0535	0.0409
S-EXP05	0.0608	0.0414	0.0638	0.0494
S-EXP06	0.0689	0.0514	0.0741	0.0574
S-EXP07	0.0795	0.0572	0.0844	0.0653
S-EXP08	0.0992	0.0727	0.1047	0.0806
S-EXP09	0.1179	0.0882	0.1248	0.0947
S-EXP10	0.1366	0.1034	0.1449	0.1078
S-EXP11	0.1457	0.1114	0.1550	0.1146
S-EXP12	0.1553	0.1192	0.1650	0.1209
S-EXP13	0.1759	0.1338	0.1850	0.1335
S-EXP14	0.1921	0.1360	0.2049	0.1456
S-EXP15	0.2138	0.1485	0.2299	0.1613
S-EXP16	0.2373	0.1598	0.2545	0.1755
S-EXP17	0.2596	0.1718	0.2797	0.1903
S-EXP18	0.2816	0.1825	0.3042	0.2047
S-EXP19	0.3040	0.1948	0.3299	0.2185
S-EXP20	0.3259	0.2032	0.3550	0.2328
S-EXP21	0.3473	0.2116	0.3815	0.2471
S-EXP22	0.3701	0.2222	0.4083	0.2613
S-EXP23	0.3922	0.2289	0.4359	0.2758
S-EXP24	0.4062	0.2359	0.4527	0.2846

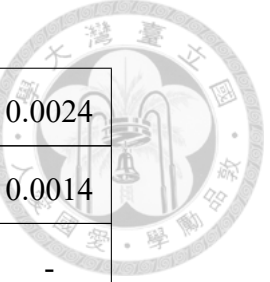
A.6 N 型波溯升值驗證數據 (斜率 1:10 斜板前移)

表 A.6: N 型波之陳玟諭 (2023) 實驗結果及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)(*: 無法模擬)

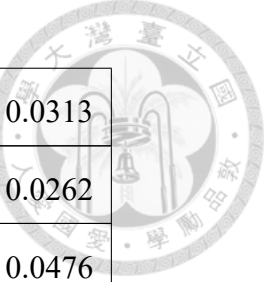
Case	實驗 a_{wg}^+/h	實驗 R (m)	實驗 R_d (m)	模擬 a_{wg}^+/h	模擬 R (m)	模擬 R_d (m)
N-EXP01	0.0728	0.0556	0.0099	0.0770	0.0637	0.0139
N-EXP02	0.1152	0.0826	0.0138	0.1205	0.0907	0.0161
N-EXP03	0.1416	0.0976	0.0148	0.1478	0.1063	0.0163
N-EXP04	0.1614	0.1069	0.0148	0.1655	0.1167	0.0162
N-EXP05	0.1810	0.1166	0.0138	0.1839	0.1264	0.0161
N-EXP06	0.2268	0.1437	0.0119	0.2297	0.1506	0.0151
N-EXP07	0.2574	0.1600	0.0119	0.2561	0.1639	0.0139
N-EXP08	0.3020	0.1784	0.0099	0.2984	0.1851	0.0131
N-EXP09	0.3491	0.1911	0.0089	0.3526	0.2085	0.0111
*N-EXP10	-	-	-	-	-	-
*N-EXP11	-	-	-	-	-	-
*N-EXP12	-	-	-	-	-	-
*N-EXP13	-	-	-	-	-	-
N-EXP14	0.0295	0.0165	-	0.0166	0.0133	0.0000
N-EXP15	0.0465	0.0301	-	0.0387	0.0303	0.0001
N-EXP16	0.0636	0.0422	0.0010	0.0544	0.0417	0.0005
N-EXP17	0.0779	0.0532	0.0020	0.0700	0.0529	0.0012
N-EXP18	0.0914	0.0633	0.0025	0.0854	0.0639	0.0023
N-EXP19	0.1118	0.0747	0.0030	0.1128	0.0809	0.0039



N-EXP20	0.1207	0.0809	0.0035	0.1231	0.0872	0.0050
N-EXP21	0.1361	0.0901	0.0040	0.1401	0.0971	0.0061
N-EXP22	0.1862	0.1157	0.0079	0.1923	0.1279	0.0105
N-EXP23	0.2269	0.1410	0.0128	0.2297	0.1506	0.0151
*N-EXP24	0.2582	0.1584	0.0168	-	-	-
*N-EXP25	0.2711	0.1747	0.0296	-	-	-
*N-EXP26	0.2480	0.1680	0.0395	-	-	-
*N-EXP27	0.1915	0.1621	0.0455	-	-	-
*N-EXP28	0.1606	0.1535	0.0464	-	-	-
*N-EXP29	-	-	-	-	-	-
N-EXP30	0.1299	0.1017	0.0741	0.0810	0.1011	0.1013
N-EXP31	0.1235	0.1007	0.0692	0.0933	0.1000	0.0950
N-EXP32	0.1173	0.0912	0.0632	0.0889	0.0918	0.0863
N-EXP33	0.1592	0.1053	0.0455	0.1076	0.0864	0.0663
N-EXP34	0.1616	0.1079	0.0395	0.1642	0.1086	0.0534
N-EXP35	0.1664	0.1084	0.0346	0.1658	0.1104	0.0455
N-EXP36	0.1760	0.1117	0.0247	0.1756	0.1157	0.0368
N-EXP37	0.1892	0.1216	0.0217	0.1914	0.1243	0.0287
N-EXP38	0.2054	0.1284	0.0168	0.2090	0.1362	0.0212
N-EXP39	0.2267	0.1413	0.0119	0.2297	0.1507	0.0151
N-EXP40	0.2525	0.1597	0.0079	0.2538	0.1669	0.0102
N-EXP41	0.2812	0.1728	0.0059	0.2799	0.1840	0.0064
N-EXP42	0.3435	0.2060	0.0030	0.3347	0.2207	0.0032



N-EXP43	0.3774	0.2232	0.0010	0.3615	0.2400	0.0024
N-EXP44	0.4128	0.2353	0.0005	0.3888	0.2587	0.0014
*N-EXP45	0.2350	0.1689	0.0405	-	-	-
*N-EXP46	0.2161	0.1657	0.0455	-	-	-
*N-EXP47	0.1757	0.1591	0.0474	-	-	-
*N-EXP48	0.1420	0.1481	0.0464	-	-	-
*N-EXP49	0.0819	0.0910	0.0267	-	-	-
*N-EXP50	0.0731	0.0845	0.0277	-	-	-
*N-EXP51	0.0692	0.0765	0.0267	-	-	-
*N-EXP52	0.0709	0.0733	0.0262	-	-	-
*N-EXP53	0.0702	0.0696	0.0247	-	-	-
*N-EXP54	0.1340	0.1259	0.0376	-	-	-
*N-EXP55	0.1167	0.1197	0.0366	-	-	-
*N-EXP56	0.0997	0.1136	0.0356	-	-	-
*N-EXP57	0.0930	0.1098	0.0346	-	-	-
*N-EXP58	0.1036	0.1073	0.0356	-	-	-
*N-EXP59	0.0901	0.1014	0.0326	-	-	-
*N-EXP60	0.0890	0.0945	0.0316	-	-	-
N-EXP61	0.0692	0.0683	0.0455	0.0656	0.0670	0.0581
N-EXP62	0.0626	0.0625	0.0435	0.0608	0.0633	0.0538
N-EXP63	0.0573	0.0579	0.0395	0.0570	0.0599	0.0494
N-EXP64	0.0541	0.0498	0.0336	0.0533	0.0549	0.0412
N-EXP65	0.0526	0.0484	0.0277	0.0534	0.0537	0.0364

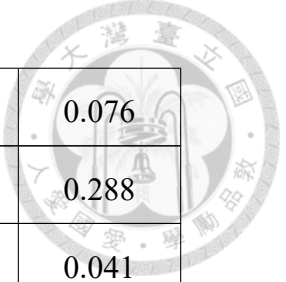


N-EXP66	0.0539	0.0472	0.0257	0.0550	0.0534	0.0313
N-EXP67	0.0550	0.0482	0.0217	0.0583	0.0544	0.0262
N-EXP68	0.0404	0.0450	0.0366	0.0393	0.0494	0.0476
N-EXP69	0.0388	0.0429	0.0356	0.0368	0.0468	0.0435
N-EXP70	0.0356	0.0396	0.0316	0.0351	0.0443	0.0410
N-EXP71	0.0336	0.0345	0.0277	0.0338	0.0406	0.0332
N-EXP72	0.0340	0.0333	0.0237	0.0345	0.0402	0.0288
N-EXP73	0.0359	0.0331	0.0198	0.0362	0.0396	0.0249
N-EXP74	0.0383	0.0327	0.0158	0.0388	0.0400	0.0213
N-EXP75	0.0314	0.0393	0.0346	0.0314	0.0431	0.0437
N-EXP76	0.0313	0.0369	0.0336	0.0296	0.0407	0.0401
N-EXP77	0.0307	0.0337	0.0316	0.0285	0.0393	0.0363
N-EXP78	0.0275	0.0293	0.0247	0.0279	0.0358	0.0290
N-EXP79	0.0285	0.0284	0.0208	0.0287	0.0350	0.0263
N-EXP80	0.0296	0.0278	0.0168	0.0303	0.0346	0.0217
N-EXP81	0.0314	0.0270	0.0138	0.0326	0.0347	0.0189
N-EXP82	0.0254	0.0323	0.0316	0.0241	0.0371	0.0389
N-EXP83	0.0251	0.0293	0.0287	0.0230	0.0351	0.0357
N-EXP84	0.0230	0.0273	0.0267	0.0224	0.0332	0.0320
N-EXP85	0.0227	0.0240	0.0208	0.0224	0.0305	0.0262
N-EXP86	0.0229	0.0231	0.0188	0.0231	0.0297	0.0222
N-EXP87	0.0249	0.0227	0.0148	0.0246	0.0293	0.0189
N-EXP88	0.0268	0.0221	0.0128	0.0266	0.0294	0.0162

A.7 孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:20 斜板)

表 A.7: Synolakis (1987) 論文中之實驗結果 (斜率 1:19.85 斜板)

實驗 h (m)	實驗 H/h	實驗 R/h	實驗 h (m)	實驗 H/h	實驗 R/h
0.0625	0.250	0.506	0.2843	0.039	0.152
0.0625	0.072	0.233	0.2855	0.040	0.156
0.0801	0.448	0.723	0.2914	0.021	0.076
0.0979	0.078	0.251	0.2934	0.014	0.049
0.0979	0.384	0.621	0.2935	0.051	0.191
0.0981	0.097	0.274	0.2940	0.075	0.258
0.0984	0.462	0.659	0.2954	0.073	0.248
0.0989	0.236	0.467	0.2962	0.065	0.228
0.1317	0.294	0.542	0.2963	0.055	0.207
0.1454	0.610	0.780	0.2972	0.056	0.207
0.1454	0.591	0.790	0.2973	0.034	0.144
0.1454	0.607	0.805	0.2975	0.018	0.074
0.1454	0.607	0.780	0.2977	0.009	0.036
0.1550	0.601	0.801	0.2980	0.018	0.075
0.1567	0.090	0.270	0.2983	0.027	0.108
0.1572	0.259	0.519	0.2986	0.038	0.146
0.1576	0.590	0.810	0.3000	0.047	0.195
0.1562	0.298	0.551	0.3048	0.047	0.195
0.1565	0.322	0.591	0.3093	0.188	0.425
0.1569	0.170	0.407	0.3097	0.019	0.078



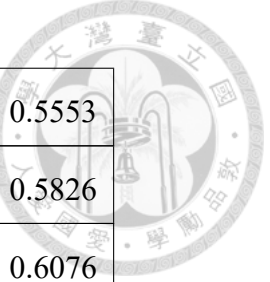
0.1670	0.273	0.487	0.3106	0.019	0.076
0.1753	0.276	0.495	0.3138	0.094	0.288
0.1942	0.633	0.842	0.3331	0.009	0.041
0.1942	0.625	0.825	0.3352	0.005	0.019
0.1947	0.626	0.862	0.3355	0.006	0.022
0.1956	0.283	0.527	0.3361	0.007	0.026
0.1962	0.286	0.513	0.3365	0.028	0.123
0.2080	0.323	0.555	0.3365	0.008	0.029
0.2085	0.036	0.124	0.3376	0.023	0.087
0.2092	0.188	0.409	0.3384	0.017	0.063
0.2092	0.271	0.513	0.3404	0.024	0.098
0.2092	0.416	0.686	0.3424	0.012	0.048
0.2101	0.159	0.384	0.3429	0.014	0.052
0.2144	0.160	0.384	0.3439	0.009	0.036
0.2147	0.143	0.366	0.3535	0.193	0.426
0.2208	0.036	0.121	0.3797	0.044	0.182
0.2349	0.394	0.641	0.3799	0.022	0.098
0.2400	0.048	0.182	0.3832	0.039	0.162
0.2638	0.267	0.507			

表 A.8: 不同底部粗糙度的模擬結果 (斜率 1:20 斜板，測站與斜板起點位於
 $x = 13.5 \text{ m}$)

Case	Zob	H/h	R/h	Zob	H/h	R/h
S-EXP01	0	0.0211	0.0803	0.00001	0.0211	0.0793
S-EXP02	0	0.0313	0.1218	0.00001	0.0309	0.1179
S-EXP03	0	0.0415	0.1580	0.00001	0.0409	0.1506
S-EXP04	0	0.0517	0.1902	0.00001	0.0514	0.1816
S-EXP05	0	0.0618	0.2208	0.00001	0.0616	0.2099
S-EXP06	0	0.0718	0.2496	0.00001	0.0717	0.2360
S-EXP07	0	0.0818	0.2761	0.00001	0.0817	0.2601
S-EXP08	0	0.1018	0.3244	0.00001	0.1016	0.3035
S-EXP09	0	0.1217	0.3687	0.00001	0.1214	0.3427
S-EXP10	0	0.1414	0.4102	0.00001	0.1410	0.3782
S-EXP11	0	0.1511	0.4300	0.00001	0.1507	0.3939
S-EXP12	0	0.1609	0.4481	0.00001	0.1604	0.4108
S-EXP13	0	0.1804	0.4830	0.00001	0.1798	0.4413
S-EXP14	0	0.1998	0.5170	0.00001	0.1990	0.4684
S-EXP15	0	0.2242	0.5623	0.00001	0.2233	0.5035
S-EXP16	0	0.2482	0.6041	0.00001	0.2469	0.5416
S-EXP17	0	0.2728	0.6456	0.00001	0.2715	0.5792
S-EXP18	0	0.2971	0.6854	0.00001	0.2957	0.6157
S-EXP19	0	0.3222	0.7287	0.00001	0.3206	0.6490
S-EXP20	0	0.3473	0.7704	0.00001	0.3454	0.6822



S-EXP21	0	0.3734	0.8127	0.00001	0.3712	0.7142
S-EXP22	0	0.3995	0.8543	0.00001	0.3972	0.7425
S-EXP23	0	0.4266	0.8939	0.00001	0.4243	0.7738
S-EXP24	0	0.4433	0.9162	0.00001	0.4406	0.7907
Case	Zob	H/h	R/h	Zob	H/h	R/h
S-EXP01	0.00010	0.0212	0.0788	0.00050	0.0208	0.0773
S-EXP02	0.00010	0.0308	0.1137	0.00050	0.0309	0.1109
S-EXP03	0.00010	0.0414	0.1481	0.00050	0.0414	0.1440
S-EXP04	0.00010	0.0516	0.1777	0.00050	0.0516	0.1719
S-EXP05	0.00010	0.0617	0.2040	0.00050	0.0616	0.1963
S-EXP06	0.00010	0.0717	0.2282	0.00050	0.0716	0.2184
S-EXP07	0.00010	0.0816	0.2507	0.00050	0.0815	0.2388
S-EXP08	0.00010	0.1015	0.2912	0.00050	0.1012	0.2756
S-EXP09	0.00010	0.1212	0.3274	0.00050	0.1209	0.3080
S-EXP10	0.00010	0.1407	0.3591	0.00050	0.1403	0.3364
S-EXP11	0.00010	0.1504	0.3749	0.00050	0.1499	0.3508
S-EXP12	0.00010	0.1601	0.3894	0.00050	0.1595	0.3643
S-EXP13	0.00010	0.1793	0.4166	0.00050	0.1786	0.3892
S-EXP14	0.00010	0.1985	0.4431	0.00050	0.1977	0.4133
S-EXP15	0.00010	0.2226	0.4725	0.00050	0.2217	0.4391
S-EXP16	0.00010	0.2461	0.5062	0.00050	0.2452	0.4638
S-EXP17	0.00010	0.2705	0.5422	0.00050	0.2694	0.4960
S-EXP18	0.00010	0.2945	0.5759	0.00050	0.2930	0.5256



S-EXP19	0.00010	0.3193	0.6066	0.00050	0.3176	0.5553
S-EXP20	0.00010	0.3439	0.6363	0.00050	0.3423	0.5826
S-EXP21	0.00010	0.3696	0.6646	0.00050	0.3676	0.6076
S-EXP22	0.00010	0.3956	0.6911	0.00050	0.3934	0.6324
S-EXP23	0.00010	0.4226	0.7182	0.00050	0.4203	0.6572
S-EXP24	0.00010	0.4388	0.7334	0.00050	0.4363	0.6711

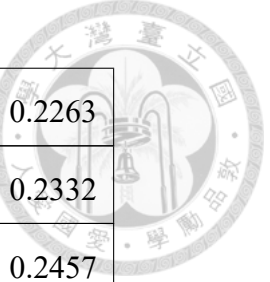
A.8 孤立波溯升值驗證數據 (斜率 1:40 斜板)

表 A.9: 不同底部粗糙度的模擬結果 (斜率 1:40 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	Zob	H/h	R/h	Zob	H/h	R/h
S-EXP01	0	0.0205	0.0878	0.00010	0.0206	0.0794
S-EXP02	0	0.0306	0.1194	0.00001	0.0301	0.1043
S-EXP03	0	0.0407	0.1452	0.00001	0.0405	0.1250
S-EXP04	0	0.0508	0.1670	0.00001	0.0507	0.1421
S-EXP05	0	0.0609	0.1857	0.00001	0.0607	0.1569
S-EXP06	0	0.0708	0.2030	0.00001	0.0707	0.1700
S-EXP07	0	0.0808	0.2187	0.00001	0.0806	0.1818
S-EXP08	0	0.1007	0.2455	0.00001	0.1004	0.2034
S-EXP09	0	0.1204	0.2683	0.00001	0.1199	0.2226
S-EXP10	0	0.1400	0.2905	0.00001	0.1394	0.2388
S-EXP11	0	0.1497	0.3003	0.00001	0.1490	0.2464
S-EXP12	0	0.1595	0.3109	0.00001	0.1587	0.2534



S-EXP13	0	0.1789	0.3293	0.00001	0.1778	0.2668
S-EXP14	0	0.1982	0.3477	0.00001	0.1970	0.2792
S-EXP15	0	0.2226	0.3687	0.00001	0.2210	0.2958
S-EXP16	0	0.2465	0.3878	0.00001	0.2446	0.3076
S-EXP17	0	0.2710	0.4063	0.00001	0.2687	0.3232
S-EXP18	0	0.2954	0.4264	0.00001	0.2928	0.3356
S-EXP19	0	0.3204	0.4461	0.00001	0.3175	0.3492
S-EXP20	0	0.3453	0.4645	0.00001	0.3420	0.3617
S-EXP21	0	0.3714	0.4860	0.00001	0.3677	0.3746
S-EXP22	0	0.3975	0.5072	0.00001	0.3935	0.3871
S-EXP23	0	0.4245	0.5272	0.00001	0.4205	0.4002
S-EXP24	0	0.4411	0.5401	0.00001	0.4367	0.4081
Case	Zob	H/h	R/h	Zob	H/h	R/h
S-EXP01	0.00030	0.0204	0.0766	0.00050	0.0204	0.0748
S-EXP02	0.00030	0.0302	0.1002	0.00050	0.0303	0.0976
S-EXP03	0.00030	0.0406	0.1194	0.00050	0.0406	0.1162
S-EXP04	0.00030	0.0507	0.1353	0.00050	0.0507	0.1314
S-EXP05	0.00030	0.0607	0.1490	0.00050	0.0607	0.1446
S-EXP06	0.00030	0.0706	0.1612	0.00050	0.0706	0.1564
S-EXP07	0.00030	0.0805	0.1722	0.00050	0.0805	0.1668
S-EXP08	0.00030	0.1002	0.1925	0.00050	0.1001	0.1864
S-EXP09	0.00030	0.1197	0.2106	0.00050	0.1196	0.2038
S-EXP10	0.00030	0.1391	0.2263	0.00050	0.1390	0.2192

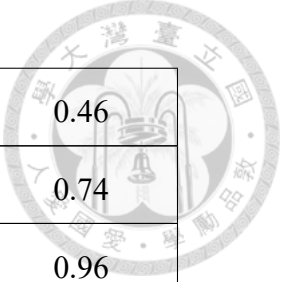


S-EXP11	0.00030	0.1487	0.2337	0.00050	0.1486	0.2263
S-EXP12	0.00030	0.1583	0.2405	0.00050	0.1581	0.2332
S-EXP13	0.00030	0.1774	0.2532	0.00050	0.1772	0.2457
S-EXP14	0.00030	0.1965	0.2647	0.00050	0.1962	0.2573
S-EXP15	0.00030	0.2204	0.2791	0.00050	0.2201	0.2701
S-EXP16	0.00030	0.2439	0.2914	0.00050	0.2435	0.2831
S-EXP17	0.00030	0.2680	0.3050	0.00050	0.2676	0.2969
S-EXP18	0.00030	0.2918	0.3189	0.00050	0.2913	0.3095
S-EXP19	0.00030	0.3164	0.3314	0.00050	0.3159	0.3211
S-EXP20	0.00030	0.3410	0.3428	0.00050	0.3403	0.3324
S-EXP21	0.00030	0.3666	0.3547	0.00050	0.3657	0.3439
S-EXP22	0.00030	0.3922	0.3663	0.00050	0.3914	0.3556
S-EXP23	0.00030	0.4190	0.3785	0.00050	0.4182	0.3668
S-EXP24	0.00030	0.4352	0.3856	0.00050	0.4343	0.3734

A.9 孤立波能量驗證數據

表 A.10: 陳玟諭 (2023) 實驗數據及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	水槽實驗中 以肉眼觀察 溯升是否破碎	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	否	0.5203	0.0000	0.0005	0.09
S-EXP02	否	0.9578	0.0000	0.0022	0.23

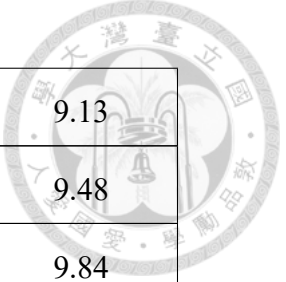


S-EXP03	否	1.4775	0.0000	0.0068	0.46
S-EXP04	否	2.0689	0.0000	0.0152	0.74
S-EXP05	否	2.7250	0.0000	0.0260	0.96
S-EXP06	否	3.4407	0.0000	0.0442	1.28
S-EXP07	否	4.2120	0.0000	0.0686	1.63
S-EXP08	否	5.9101	0.0004	0.1416	2.40
S-EXP09	否	7.8005	0.0056	0.2380	3.05
S-EXP10	否	9.8703	0.0167	0.3724	3.77
S-EXP11	否	10.9695	0.0268	0.4272	3.89
S-EXP12	否	12.1107	0.0332	0.5295	4.37
S-EXP13	否/surging	14.5157	0.0520	0.7227	4.98
S-EXP14	surging	17.0796	0.0779	0.9428	5.52
S-EXP15	surging	20.5356	0.1133	1.2675	6.17
S-EXP16	surging/plunging	24.1716	0.1533	1.6159	6.69
S-EXP17	plunging	28.1157	0.2092	2.0056	7.13
S-EXP18	plunging	32.2381	0.2652	2.5690	7.97
S-EXP19	plunging	36.6872	0.3351	3.0755	8.38
S-EXP20	plunging	41.3183	0.4153	3.5877	8.68
S-EXP21	plunging	46.3032	0.5049	4.4028	9.51
S-EXP22	plunging	51.4925	0.6121	5.0303	9.77
S-EXP23	plunging	57.1005	0.7346	5.8030	10.16
S-EXP24	plunging	60.5469	0.8128	6.4220	10.61

表 A.11: 陳玟諭 (2023) 實驗數據及本研究模擬結果 (斜率 1:10 斜板，測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)



Case	水槽實驗中 以肉眼觀察 溯升是否破碎	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	否	0.5203	0.0000	0.0004	0.09
S-EXP02	否	0.9578	0.0000	0.0023	0.24
S-EXP03	否	1.4775	0.0000	0.0069	0.47
S-EXP04	否	2.0690	0.0000	0.0155	0.75
S-EXP05	否	2.7252	0.0000	0.0269	0.99
S-EXP06	否	3.4411	0.0000	0.0447	1.30
S-EXP07	否	4.2127	0.0000	0.0706	1.68
S-EXP08	否	5.9114	0.0004	0.1456	2.46
S-EXP09	否	7.8030	0.0058	0.2482	3.18
S-EXP10	否	9.8746	0.0187	0.3823	3.87
S-EXP11	否	10.9748	0.0273	0.4525	4.12
S-EXP12	否/surging	12.1173	0.0338	0.5619	4.64
S-EXP13	surging	14.5254	0.0550	0.7633	5.26
S-EXP14	surging	17.0936	0.0869	0.9876	5.78
S-EXP15	surging/plunging	20.5566	0.1173	1.2636	6.15
S-EXP16	plunging	24.2022	0.1597	1.7089	7.06
S-EXP17	plunging	28.1589	0.2138	2.1328	7.57
S-EXP18	plunging	32.2970	0.2745	2.5861	8.01
S-EXP19	plunging	36.7683	0.3459	3.2162	8.75



S-EXP20	plunging	41.4279	0.4276	3.7834	9.13
S-EXP21	plunging	46.4478	0.5187	4.4043	9.48
S-EXP22	plunging	51.6847	0.6278	5.0875	9.84
S-EXP23	plunging	57.3544	0.7507	6.0635	10.57
S-EXP24	plunging	60.8456	0.8390	6.4887	10.66

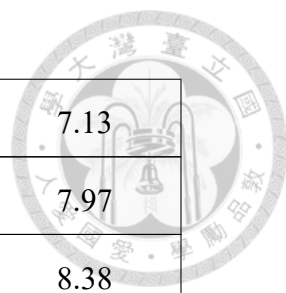
附錄 B — 案例之模擬結果



B.1 孤立波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)

表 B.1: 孤立波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	H/h	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	0.0224	0.0151	0.5203	0.0000	0.0005	0.09
S-EXP02	0.0329	0.0238	0.9578	0.0000	0.0022	0.23
S-EXP03	0.0432	0.0325	1.4775	0.0000	0.0068	0.46
S-EXP04	0.0536	0.0409	2.0689	0.0000	0.0152	0.74
S-EXP05	0.0638	0.0493	2.7250	0.0000	0.0260	0.96
S-EXP06	0.0740	0.0573	3.4407	0.0000	0.0442	1.28
S-EXP07	0.0841	0.0651	4.2120	0.0000	0.0686	1.63
S-EXP08	0.1043	0.0804	5.9101	0.0004	0.1416	2.40
S-EXP09	0.1243	0.0944	7.8005	0.0056	0.2380	3.05
S-EXP10	0.1441	0.1074	9.8703	0.0167	0.3724	3.77
S-EXP11	0.1541	0.1141	10.9695	0.0268	0.4272	3.89
S-EXP12	0.1638	0.1200	12.1107	0.0332	0.5295	4.37
S-EXP13	0.1834	0.1327	14.5157	0.0520	0.7227	4.98
S-EXP14	0.2030	0.1451	17.0796	0.0779	0.9428	5.52
S-EXP15	0.2276	0.1601	20.5356	0.1133	1.2675	6.17
S-EXP16	0.2518	0.1747	24.1716	0.1533	1.6159	6.69

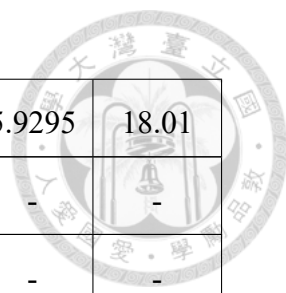


S-EXP17	0.2766	0.1891	28.1157	0.2092	2.0056	7.13
S-EXP18	0.3008	0.2031	32.2381	0.2652	2.5690	7.97
S-EXP19	0.3260	0.2175	36.6872	0.3351	3.0755	8.38
S-EXP20	0.3515	0.2314	41.3183	0.4153	3.5877	8.68
S-EXP21	0.3775	0.2456	46.3032	0.5049	4.4028	9.51
S-EXP22	0.4038	0.2596	51.4925	0.6121	5.0303	9.77
S-EXP23	0.4311	0.2743	57.1005	0.7346	5.8030	10.16
S-EXP24	0.4478	0.2829	60.5469	0.8128	6.4220	10.61

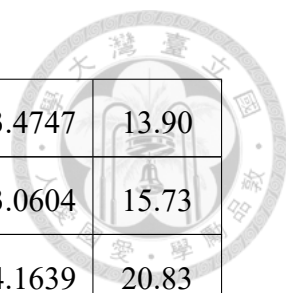
B.2 N 型波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)

表 B.2: N 型波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)
(*: 無法模擬)

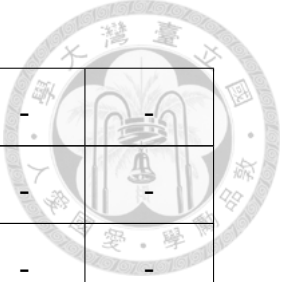
Case	a_{wg}^+/h	R (m)	R_d (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失 能量比 (%)
N-EXP01	0.0727	0.0606	0.0098	2.3371	0.0017	0.1507	6.45
N-EXP02	0.1131	0.0867	0.0114	5.1174	0.0232	0.4173	8.15
N-EXP03	0.1377	0.1015	0.0120	7.2645	0.0352	0.6758	9.30
N-EXP04	0.1537	0.1113	0.0118	8.8508	0.0495	0.8779	9.92
N-EXP05	0.1698	0.1202	0.0113	10.6102	0.0652	1.1424	10.77
N-EXP06	0.2084	0.1427	0.0105	15.5202	0.1139	1.9538	12.59
N-EXP07	0.2299	0.1548	0.0095	18.5995	0.1403	2.6688	14.35
N-EXP08	0.2637	0.1728	0.0082	24.2032	0.2053	3.8961	16.10



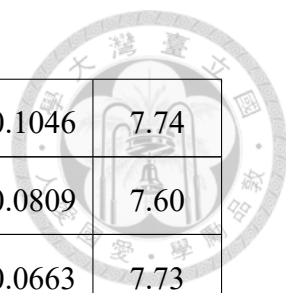
N-EXP09	0.3041	0.1952	0.0061	32.9230	0.2894	5.9295	18.01
*N-EXP10	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP11	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP12	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP13	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP14	0.0135	0.0108	0.0000	0.1886	0.0000	0.0031	1.64
N-EXP15	0.0315	0.0252	0.0000	0.9448	0.0000	0.0172	1.82
N-EXP16	0.0440	0.0350	0.0001	1.8795	0.0000	0.0407	2.17
N-EXP17	0.0568	0.0446	0.0002	2.8725	0.0000	0.0704	2.45
N-EXP18	0.0698	0.0543	0.0006	3.8894	0.0000	0.1040	2.67
N-EXP19	0.0929	0.0710	0.0013	5.8665	0.0008	0.2116	3.61
N-EXP20	0.1019	0.0772	0.0016	6.5176	0.0036	0.2465	3.78
N-EXP21	0.1170	0.0870	0.0028	7.5435	0.0091	0.3443	4.56
N-EXP22	0.1672	0.1177	0.0064	11.4277	0.0519	0.9283	8.12
N-EXP23	0.2084	0.1427	0.0105	15.5202	0.1139	1.9538	12.59
N-EXP24	0.2479	0.1658	0.0160	20.8754	0.1923	3.9803	19.07
N-EXP25	0.2765	0.1846	0.0237	27.2856	0.2851	5.7285	20.99
*N-EXP26	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP27	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP28	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP29	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP30	0.0956	0.1062	0.0788	32.3514	0.1795	4.4586	13.78
N-EXP31	0.0897	0.1000	0.0763	29.5809	0.1507	4.2424	14.34



N-EXP32	0.0853	0.0935	0.0719	25.0047	0.1252	3.4747	13.90
N-EXP33	0.0819	0.0817	0.0587	19.4505	0.1018	3.0604	15.73
N-EXP34	0.1227	0.0981	0.0478	19.9939	0.1136	4.1639	20.83
N-EXP35	0.1303	0.1003	0.0402	15.0598	0.0972	3.3126	22.00
N-EXP36	0.1446	0.1063	0.0314	12.7904	0.1088	2.8003	21.89
N-EXP37	0.1627	0.1151	0.0235	12.3060	0.1250	2.2710	18.45
N-EXP38	0.1841	0.1279	0.0162	13.2079	0.0945	1.9626	14.86
N-EXP39	0.2084	0.1424	0.0105	15.5202	0.1140	1.9844	12.79
N-EXP40	0.2363	0.1598	0.0061	19.3164	0.1443	2.1751	11.26
N-EXP41	0.2672	0.1784	0.0035	24.5128	0.2012	2.5484	10.40
N-EXP42	0.3360	0.2201	0.0009	39.0409	0.3724	4.1936	10.74
N-EXP43	0.3741	0.2415	0.0005	48.2288	0.5013	5.4851	11.37
N-EXP44	0.4128	0.2632	0.0003	58.6674	0.6628	6.9054	11.77
*N-EXP45	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP46	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP47	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP48	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP49	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP50	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP51	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP52	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP53	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP54	-	-	-	-	-	-	-



*N-EXP55	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP56	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP57	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP58	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP59	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP60	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP61	0.0611	0.0675	0.0517	9.0449	0.0586	1.1719	12.96
N-EXP62	0.0576	0.0639	0.0488	7.3782	0.0359	0.9341	12.66
N-EXP63	0.0544	0.0604	0.0446	5.9293	0.0344	0.6454	10.88
N-EXP64	0.0507	0.0549	0.0364	3.6926	0.0096	0.3699	10.02
N-EXP65	0.0505	0.0528	0.0314	2.9047	0.0085	0.2906	10.01
N-EXP66	0.0518	0.0519	0.0264	2.3443	0.0060	0.2302	9.82
N-EXP67	0.0546	0.0520	0.0220	2.0056	0.0045	0.1894	9.44
N-EXP68	0.0410	0.0520	0.0427	4.4897	0.0197	0.4097	9.13
N-EXP69	0.0382	0.0490	0.0388	3.6601	0.0114	0.3222	8.80
N-EXP70	0.0361	0.0468	0.0364	2.9414	0.0025	0.2574	8.75
N-EXP71	0.0337	0.0417	0.0288	1.8319	0.0003	0.1470	8.02
N-EXP72	0.0338	0.0397	0.0245	1.4441	0.0003	0.1202	8.32
N-EXP73	0.0348	0.0384	0.0212	1.1676	0.0000	0.0992	8.50
N-EXP74	0.0368	0.0382	0.0168	0.9989	0.0000	0.0775	7.76
N-EXP75	0.0339	0.0467	0.0389	3.3115	0.0032	0.2812	8.49
N-EXP76	0.0317	0.0438	0.0358	2.7003	0.0017	0.2217	8.21
N-EXP77	0.0300	0.0406	0.0320	2.1687	0.0024	0.1775	8.18

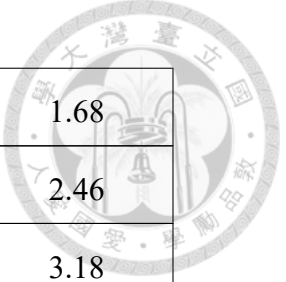


N-EXP78	0.0282	0.0363	0.0256	1.3520	0.0000	0.1046	7.74
N-EXP79	0.0283	0.0346	0.0214	1.0652	0.0000	0.0809	7.60
N-EXP80	0.0292	0.0333	0.0187	0.8587	0.0000	0.0663	7.73
N-EXP81	0.0311	0.0331	0.0151	0.7374	0.0000	0.0523	7.09
N-EXP82	0.0269	0.0400	0.0339	2.3088	0.0007	0.1730	7.49
N-EXP83	0.0252	0.0373	0.0314	1.8803	0.0001	0.1419	7.55
N-EXP84	0.0240	0.0349	0.0283	1.5131	0.0000	0.1119	7.39
N-EXP85	0.0228	0.0306	0.0214	0.9427	0.0000	0.0679	7.21
N-EXP86	0.0229	0.0293	0.0189	0.7410	0.0000	0.0490	6.62
N-EXP87	0.0238	0.0281	0.0160	0.5988	0.0000	0.0410	6.85
N-EXP88	0.0255	0.0279	0.0131	0.5142	0.0000	0.0325	6.32

B.3 孤立波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 7.0 公尺處)

表 B.3: 孤立波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)

Case	H/h	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	0.0224	0.0151	0.5203	0.0000	0.0004	0.09
S-EXP02	0.0329	0.0238	0.9578	0.0000	0.0023	0.24
S-EXP03	0.0432	0.0324	1.4775	0.0000	0.0069	0.47
S-EXP04	0.0535	0.0409	2.0690	0.0000	0.0155	0.75
S-EXP05	0.0638	0.0494	2.7252	0.0000	0.0269	0.99
S-EXP06	0.0741	0.0574	3.4411	0.0000	0.0447	1.30

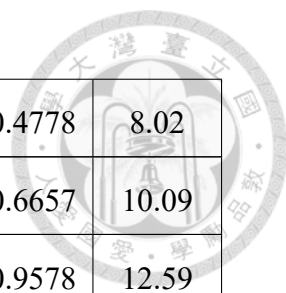


S-EXP07	0.0844	0.0653	4.2127	0.0000	0.0706	1.68
S-EXP08	0.1047	0.0806	5.9114	0.0004	0.1456	2.46
S-EXP09	0.1248	0.0947	7.8030	0.0058	0.2482	3.18
S-EXP10	0.1449	0.1078	9.8746	0.0187	0.3823	3.87
S-EXP11	0.1550	0.1146	10.9748	0.0273	0.4525	4.12
S-EXP12	0.1650	0.1209	12.1173	0.0338	0.5619	4.64
S-EXP13	0.1850	0.1335	14.5254	0.0550	0.7633	5.26
S-EXP14	0.2049	0.1456	17.0936	0.0869	0.9876	5.78
S-EXP15	0.2299	0.1613	20.5566	0.1173	1.2636	6.15
S-EXP16	0.2545	0.1755	24.2022	0.1597	1.7089	7.06
S-EXP17	0.2797	0.1903	28.1589	0.2138	2.1328	7.57
S-EXP18	0.3042	0.2047	32.2970	0.2745	2.5861	8.01
S-EXP19	0.3299	0.2185	36.7683	0.3459	3.2162	8.75
S-EXP20	0.3550	0.2328	41.4279	0.4276	3.7834	9.13
S-EXP21	0.3815	0.2471	46.4478	0.5187	4.4043	9.48
S-EXP22	0.4083	0.2613	51.6847	0.6278	5.0875	9.84
S-EXP23	0.4359	0.2758	57.3544	0.7507	6.0635	10.57
S-EXP24	0.4527	0.2846	60.8456	0.8390	6.4887	10.66

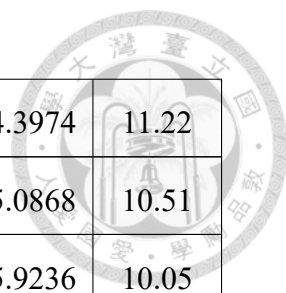
B.4 N 型波於斜率 1:10 斜板 (置於水槽 7.0 公尺處)

表 B.4: N 型波於斜率 1:10 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 7.0$ m)
(*: 無法模擬)

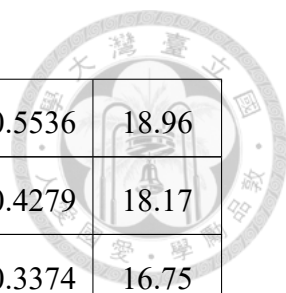
Case	a_{wg}^+/h	R (m)	R_d (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失 能量比 (%)
N-EXP01	0.0770	0.0637	0.0139	2.3417	0.0044	0.2424	10.35
N-EXP02	0.1205	0.0907	0.0161	5.1335	0.0482	0.7283	14.19
N-EXP03	0.1478	0.1063	0.0163	7.2940	0.0726	1.1675	16.01
N-EXP04	0.1655	0.1167	0.0162	8.8928	0.0873	1.5286	17.19
N-EXP05	0.1839	0.1264	0.0161	10.6686	0.1127	1.9672	18.44
N-EXP06	0.2297	0.1506	0.0151	15.6427	0.1682	3.2880	21.02
N-EXP07	0.2561	0.1639	0.0139	18.7678	0.2333	4.2960	22.89
N-EXP08	0.2984	0.1851	0.0131	24.4804	0.2751	5.9536	24.32
N-EXP09	0.3526	0.2085	0.0111	33.5252	0.4246	8.5583	25.53
*N-EXP10	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP11	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP12	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP13	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP14	0.0166	0.0133	0.0000	0.1942	0.0000	0.0053	2.73
N-EXP15	0.0387	0.0303	0.0001	0.9662	0.0000	0.0303	3.13
N-EXP16	0.0544	0.0417	0.0005	1.9277	0.0000	0.0776	4.02
N-EXP17	0.0700	0.0529	0.0012	2.9362	0.0000	0.1418	4.83
N-EXP18	0.0854	0.0639	0.0023	3.9648	0.0006	0.2394	6.04



N-EXP19	0.1128	0.0809	0.0039	5.9576	0.0095	0.4778	8.02
N-EXP20	0.1231	0.0872	0.0050	6.6000	0.0146	0.6657	10.09
N-EXP21	0.1401	0.0971	0.0061	7.6072	0.0285	0.9578	12.59
N-EXP22	0.1923	0.1279	0.0105	11.5303	0.0903	2.1111	18.31
N-EXP23	0.2297	0.1506	0.0151	15.6427	0.1682	3.2880	21.02
*N-EXP24	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP25	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP26	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP27	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP28	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP29	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP30	0.0810	0.1011	0.1013	32.8977	0.2246	3.7397	11.37
N-EXP31	0.0933	0.1000	0.0950	30.1631	0.2401	4.3238	14.33
N-EXP32	0.0889	0.0918	0.0863	25.7647	0.1949	4.2768	16.60
N-EXP33	0.1076	0.0864	0.0663	20.6244	0.1309	5.5754	27.03
N-EXP34	0.1642	0.1086	0.0534	20.9489	0.1798	7.5281	35.94
N-EXP35	0.1658	0.1104	0.0455	15.5048	0.1515	5.8461	37.71
N-EXP36	0.1756	0.1157	0.0368	13.0501	0.1606	4.7669	36.53
N-EXP37	0.1914	0.1243	0.0287	12.4931	0.1938	4.1853	33.50
N-EXP38	0.2090	0.1362	0.0212	13.3536	0.1790	3.6135	27.06
N-EXP39	0.2297	0.1507	0.0151	15.6427	0.1708	3.2908	21.04
N-EXP40	0.2538	0.1669	0.0102	19.4286	0.1927	3.2754	16.86
N-EXP41	0.2799	0.1840	0.0064	24.6277	0.2569	3.4307	13.93



N-EXP42	0.3347	0.2207	0.0032	39.1883	0.4161	4.3974	11.22
N-EXP43	0.3615	0.2400	0.0024	48.4224	0.5191	5.0868	10.51
N-EXP44	0.3888	0.2587	0.0014	58.9227	0.6462	5.9236	10.05
*N-EXP45	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP46	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP47	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP48	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP49	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP50	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP51	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP52	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP53	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP54	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP55	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP56	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP57	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP58	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP59	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP60	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP61	0.0656	0.0670	0.0581	9.1384	0.0702	1.9596	21.44
N-EXP62	0.0608	0.0633	0.0538	7.4430	0.0509	1.5041	20.21
N-EXP63	0.0570	0.0599	0.0494	5.9747	0.0465	1.1884	19.89
N-EXP64	0.0533	0.0549	0.0412	3.7145	0.0238	0.7128	19.19



N-EXP65	0.0534	0.0537	0.0364	2.9199	0.0140	0.5536	18.96
N-EXP66	0.0550	0.0534	0.0313	2.3552	0.0096	0.4279	18.17
N-EXP67	0.0583	0.0544	0.0262	2.0137	0.0063	0.3374	16.75
N-EXP68	0.0393	0.0494	0.0476	4.5126	0.0299	0.7259	16.09
N-EXP69	0.0368	0.0468	0.0435	3.6768	0.0198	0.5677	15.44
N-EXP70	0.0351	0.0443	0.0410	2.9535	0.0152	0.4472	15.14
N-EXP71	0.0338	0.0406	0.0332	1.8383	0.0061	0.2697	14.67
N-EXP72	0.0345	0.0402	0.0288	1.4489	0.0004	0.2045	14.12
N-EXP73	0.0362	0.0396	0.0249	1.1711	0.0014	0.1609	13.74
N-EXP74	0.0388	0.0400	0.0213	1.0016	0.0000	0.1309	13.07
N-EXP75	0.0314	0.0431	0.0437	3.3244	0.0144	0.4803	14.45
N-EXP76	0.0296	0.0407	0.0401	2.7100	0.0111	0.3763	13.89
N-EXP77	0.0285	0.0393	0.0363	2.1758	0.0035	0.2907	13.36
N-EXP78	0.0279	0.0358	0.0290	1.3558	0.0004	0.1778	13.11
N-EXP79	0.0287	0.0350	0.0263	1.0681	0.0000	0.1356	12.70
N-EXP80	0.0303	0.0346	0.0217	0.8609	0.0001	0.1045	12.14
N-EXP81	0.0326	0.0347	0.0189	0.7391	0.0000	0.0867	11.73
N-EXP82	0.0241	0.0371	0.0389	2.3156	0.0049	0.2903	12.54
N-EXP83	0.0230	0.0351	0.0357	1.8855	0.0024	0.2293	12.16
N-EXP84	0.0224	0.0332	0.0320	1.5170	0.0015	0.1790	11.80
N-EXP85	0.0224	0.0305	0.0262	0.9449	0.0000	0.1081	11.44
N-EXP86	0.0231	0.0297	0.0222	0.7427	0.0000	0.0819	11.03
N-EXP87	0.0246	0.0293	0.0189	0.6001	0.0000	0.0628	10.47

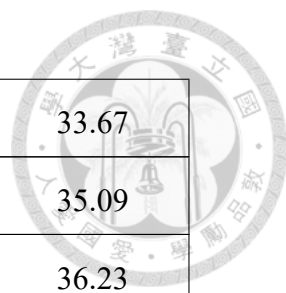
N-EXP88	0.0266	0.0294	0.0162	0.5153	0.0000	0.0524	10.16
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------



B.5 孤立波於斜率 1:20 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)

表 B.5: 孤立波於斜率 1:20 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	H/h	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	0.0212	0.0181	0.5192	0.0036	0.0123	2.36
S-EXP02	0.0308	0.0261	0.9546	0.0116	0.0404	4.23
S-EXP03	0.0414	0.0341	1.4713	0.0272	0.0944	6.42
S-EXP04	0.0516	0.0409	2.0585	0.0507	0.1770	8.60
S-EXP05	0.0617	0.0469	2.7092	0.0840	0.2921	10.78
S-EXP06	0.0717	0.0525	3.4179	0.1257	0.4402	12.88
S-EXP07	0.0816	0.0577	4.1809	0.1731	0.6197	14.82
S-EXP08	0.1015	0.0670	5.8577	0.2880	1.0679	18.23
S-EXP09	0.1212	0.0753	7.7205	0.4362	1.6373	21.21
S-EXP10	0.1407	0.0826	9.7570	0.5815	2.3213	23.79
S-EXP11	0.1504	0.0862	10.8369	0.6711	2.7047	24.96
S-EXP12	0.1601	0.0896	11.9576	0.7578	3.0919	25.86
S-EXP13	0.1793	0.0958	14.3162	0.9752	3.9530	27.61
S-EXP14	0.1985	0.1019	16.8284	1.1107	4.9135	29.20
S-EXP15	0.2226	0.1087	20.2107	1.3887	6.2523	30.94
S-EXP16	0.2461	0.1164	23.7643	1.6706	7.6837	32.33

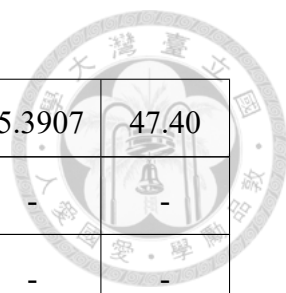


S-EXP17	0.2705	0.1247	27.6180	2.0033	9.2987	33.67
S-EXP18	0.2945	0.1325	31.6439	2.5253	11.1033	35.09
S-EXP19	0.3193	0.1395	35.9863	2.9853	13.0393	36.23
S-EXP20	0.3439	0.1464	40.5016	3.5008	15.1711	37.46
S-EXP21	0.3696	0.1529	45.3669	4.0138	17.4911	38.55
S-EXP22	0.3956	0.1590	50.4446	4.5618	19.9738	39.60
S-EXP23	0.4226	0.1652	55.9202	5.1864	22.7220	40.63
S-EXP24	0.4388	0.1687	59.2796	5.5680	24.4468	41.24

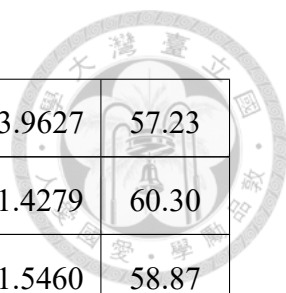
B.6 N 型波於斜率 1:20 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)

表 B.6: N 型波於斜率 1:20 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)
(*: 無法模擬)

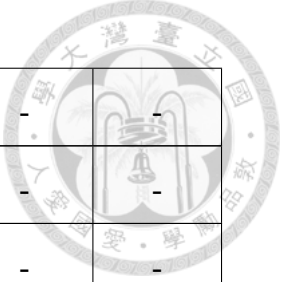
Case	a_{wg}^+/h	R (m)	R_d (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失 能量比 (%)
N-EXP01	0.0721	0.0436	0.0049	2.3221	0.1138	0.8899	38.33
N-EXP02	0.1119	0.0582	0.0034	5.0775	0.2584	2.2521	44.35
N-EXP03	0.1361	0.0661	0.0025	7.2038	0.3888	3.3045	45.87
N-EXP04	0.1519	0.0712	0.0022	8.7714	0.4982	4.1754	47.60
N-EXP05	0.1679	0.0759	0.0015	10.5088	0.6054	4.9913	47.50
N-EXP06	0.2061	0.0884	0.0011	15.3521	0.8542	7.3173	47.66
N-EXP07	0.2272	0.0955	0.0009	18.3864	1.0594	8.8687	48.23
N-EXP08	0.2604	0.1058	0.0005	23.9068	1.4295	11.5079	48.14



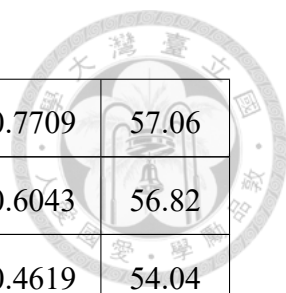
N-EXP09	0.3001	0.1183	0.0002	32.4723	1.9736	15.3907	47.40
*N-EXP10	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP11	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP12	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP13	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP14	0.0135	0.0118	0.0000	0.1823	0.0017	0.0155	8.48
N-EXP15	0.0303	0.0243	0.0000	0.9461	0.0156	0.1492	15.77
N-EXP16	0.0427	0.0316	0.0001	1.8742	0.0373	0.4277	22.82
N-EXP17	0.0555	0.0386	0.0002	2.8555	0.0689	0.7714	27.02
N-EXP18	0.0684	0.0449	0.0004	3.8610	0.1095	1.1711	30.33
N-EXP19	0.0913	0.0549	0.0005	5.8149	0.2029	2.0417	35.11
N-EXP20	0.1002	0.0584	0.0005	6.4589	0.2413	2.3101	35.77
N-EXP21	0.1152	0.0637	0.0005	7.4727	0.3289	2.9240	39.13
N-EXP22	0.1648	0.0780	0.0006	11.3020	0.6493	4.9151	43.49
N-EXP23	0.2061	0.0884	0.0011	15.3521	0.8542	7.3173	47.66
N-EXP24	0.2473	0.0953	0.0029	20.6905	1.1122	11.0132	53.23
N-EXP25	0.2779	0.0979	0.0064	27.1105	1.3607	14.7401	54.37
*N-EXP26	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP27	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP28	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP29	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP30	0.1202	0.0361	0.0514	31.6011	0.9944	17.8268	56.41
N-EXP31	0.1113	0.0347	0.0489	28.9023	0.8367	16.3530	56.58



N-EXP32	0.1032	0.0302	0.0446	24.3960	0.6225	13.9627	57.23
N-EXP33	0.0922	0.0267	0.0324	18.9505	0.3472	11.4279	60.30
N-EXP34	0.1289	0.0290	0.0213	19.6134	0.2483	11.5460	58.87
N-EXP35	0.1347	0.0372	0.0163	14.8513	0.2343	9.4586	63.69
N-EXP36	0.1472	0.0483	0.0108	12.6445	0.2732	8.3144	65.76
N-EXP37	0.1639	0.0611	0.0060	12.1764	0.3878	7.6919	63.17
N-EXP38	0.1837	0.0747	0.0026	13.0680	0.6333	7.2019	55.11
N-EXP39	0.2061	0.0884	0.0011	15.3521	0.8540	7.3171	47.66
N-EXP40	0.2333	0.1018	0.0004	19.1025	1.1847	8.2102	42.98
N-EXP41	0.2632	0.1147	0.0001	24.2346	1.6784	9.6639	39.88
N-EXP42	0.3312	0.1389	0.0000	38.6031	2.9585	14.7206	38.13
N-EXP43	0.3684	0.1495	0.0000	47.6868	3.6448	18.0721	37.90
N-EXP44	0.4068	0.1597	0.0000	58.0033	4.5238	22.0349	37.99
*N-EXP45	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP46	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP47	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP48	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP49	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP50	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP51	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP52	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP53	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP54	-	-	-	-	-	-	-



*N-EXP55	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP56	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP57	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP58	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP59	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP60	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP61	0.0692	0.0190	0.0289	8.9521	0.2065	5.8536	65.39
N-EXP62	0.0645	0.0158	0.0273	7.3166	0.1724	4.8634	66.47
N-EXP63	0.0603	0.0159	0.0251	5.8905	0.1319	3.6296	61.62
N-EXP64	0.0548	0.0203	0.0202	3.6830	0.0999	2.3811	64.65
N-EXP65	0.0538	0.0230	0.0176	2.8996	0.0887	1.8957	65.38
N-EXP66	0.0544	0.0260	0.0151	2.3403	0.0801	1.5042	64.27
N-EXP67	0.0564	0.0297	0.0124	2.0008	0.0779	1.2186	60.90
N-EXP68	0.0466	0.0140	0.0251	4.4733	0.1167	2.6783	59.87
N-EXP69	0.0432	0.0150	0.0239	3.6503	0.1042	2.2051	60.41
N-EXP70	0.0405	0.0158	0.0220	2.9360	0.0951	1.7747	60.44
N-EXP71	0.0368	0.0183	0.0184	1.8292	0.0739	1.1071	60.52
N-EXP72	0.0362	0.0197	0.0164	1.4412	0.0634	0.8569	59.46
N-EXP73	0.0367	0.0218	0.0139	1.1638	0.0551	0.6722	57.76
N-EXP74	0.0377	0.0241	0.0116	0.9919	0.0473	0.5302	53.46
N-EXP75	0.0388	0.0141	0.0239	3.3042	0.1059	1.9555	59.18
N-EXP76	0.0360	0.0147	0.0226	2.6960	0.0959	1.5842	58.76
N-EXP77	0.0337	0.0156	0.0209	2.1662	0.0854	1.2731	58.77

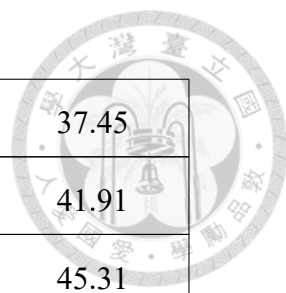


N-EXP78	0.0309	0.0173	0.0175	1.3511	0.0631	0.7709	57.06
N-EXP79	0.0305	0.0187	0.0154	1.0636	0.0544	0.6043	56.82
N-EXP80	0.0307	0.0201	0.0136	0.8546	0.0460	0.4619	54.04
N-EXP81	0.0312	0.0216	0.0114	0.7304	0.0386	0.3646	49.92
N-EXP82	0.0310	0.0140	0.0224	2.3068	0.0923	1.3182	57.15
N-EXP83	0.0289	0.0144	0.0211	1.8801	0.0812	1.0569	56.21
N-EXP84	0.0273	0.0150	0.0195	1.5139	0.0708	0.8467	55.93
N-EXP85	0.0251	0.0163	0.0163	0.9433	0.0509	0.5086	53.92
N-EXP86	0.0246	0.0171	0.0145	0.7394	0.0416	0.3805	51.46
N-EXP87	0.0241	0.0180	0.0126	0.5934	0.0337	0.2917	49.16
N-EXP88	0.0254	0.0194	0.0108	0.5091	0.0284	0.2291	45.00

B.7 孤立波於斜率 1:40 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)

表 B.7: 孤立波於斜率 1:40 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)

Case	H/h	R (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失能量比 (%)
S-EXP01	0.0206	0.0183	0.5191	0.0182	0.0565	10.88
S-EXP02	0.0301	0.0240	0.9545	0.0483	0.1619	16.96
S-EXP03	0.0405	0.0288	1.4711	0.0915	0.3333	22.65
S-EXP04	0.0507	0.0327	2.0583	0.1418	0.5626	27.33
S-EXP05	0.0607	0.0361	2.7089	0.1932	0.8484	31.32
S-EXP06	0.0707	0.0391	3.4176	0.2537	1.1767	34.43

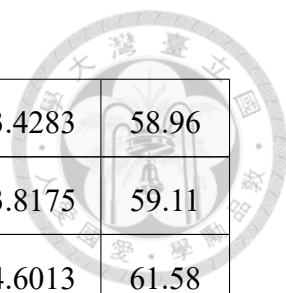


S-EXP07	0.0806	0.0418	4.1806	0.3002	1.5656	37.45
S-EXP08	0.1004	0.0468	5.8573	0.4201	2.4548	41.91
S-EXP09	0.1199	0.0512	7.7200	0.5307	3.4977	45.31
S-EXP10	0.1394	0.0549	9.7564	0.6660	4.6912	48.08
S-EXP11	0.1490	0.0567	10.8363	0.7435	5.3452	49.33
S-EXP12	0.1587	0.0583	11.9568	0.8211	6.0131	50.29
S-EXP13	0.1778	0.0614	14.3154	0.9767	7.4751	52.22
S-EXP14	0.1970	0.0642	16.8274	1.1583	9.0750	53.93
S-EXP15	0.2210	0.0680	20.2096	1.3236	11.2406	55.62
S-EXP16	0.2446	0.0708	23.7636	1.5981	13.5217	56.90
S-EXP17	0.2687	0.0743	27.6167	2.0861	16.1646	58.53
S-EXP18	0.2928	0.0772	31.6421	2.3668	18.8312	59.51
S-EXP19	0.3175	0.0803	35.9843	2.6735	21.7952	60.57
S-EXP20	0.3420	0.0832	40.4997	3.0351	24.9332	61.56
S-EXP21	0.3677	0.0862	45.3643	3.3291	28.3002	62.38
S-EXP22	0.3935	0.0890	50.4418	3.6972	31.7921	63.03
S-EXP23	0.4205	0.0921	55.9171	4.0614	35.6558	63.77
S-EXP24	0.4367	0.0939	59.2763	4.2549	38.0517	64.19

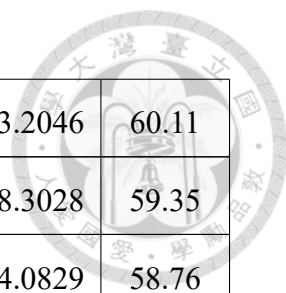
B.8 N 型波於斜率 1:40 斜板 (置於水槽 13.5 公尺處)

表 B.8: N 型波於斜率 1:40 斜板之模擬結果 (測站與斜板起點位於 $x = 13.5$ m)
(*: 無法模擬)

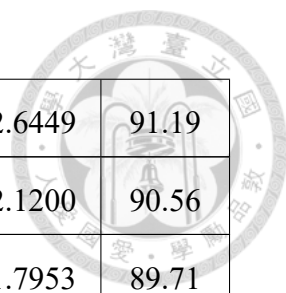
Case	a_{wg}^+/h	R (m)	R_d (m)	E_{wave} (J/m)	$E_{turbulent}$ (J/m)	E_{loss} (J/m)	損失 能量比 (%)
N-EXP01	0.0719	0.0272	0.0004	2.3221	0.0996	1.5442	66.50
N-EXP02	0.1117	0.0351	0.0001	5.0776	0.2090	3.5284	69.49
N-EXP03	0.1358	0.0393	0.0000	7.2040	0.3063	5.0590	70.22
N-EXP04	0.1515	0.0420	0.0000	8.7716	0.3709	6.1594	70.22
N-EXP05	0.1674	0.0447	0.0000	10.5089	0.4368	7.3774	70.20
N-EXP06	0.2055	0.0507	0.0000	15.3522	0.6550	10.7807	70.22
N-EXP07	0.2266	0.0539	0.0000	18.3867	0.7898	12.8628	69.96
N-EXP08	0.2596	0.0592	0.0000	23.9069	1.0594	16.5869	69.38
N-EXP09	0.2991	0.0666	0.0000	32.4719	1.4333	22.2071	68.39
*N-EXP10	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP11	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP12	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP13	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP14	0.0133	0.0103	0.0000	0.1823	0.0053	0.0586	32.13
N-EXP15	0.0299	0.0190	0.0000	0.9460	0.0332	0.4302	45.47
N-EXP16	0.0423	0.0236	0.0000	1.8740	0.0672	0.9575	51.09
N-EXP17	0.0550	0.0277	0.0000	2.8552	0.1077	1.5193	53.21
N-EXP18	0.0677	0.0312	0.0000	3.8607	0.1579	2.1460	55.59



N-EXP19	0.0906	0.0367	0.0000	5.8145	0.2544	3.4283	58.96
N-EXP20	0.0995	0.0385	0.0000	6.4585	0.2796	3.8175	59.11
N-EXP21	0.1144	0.0413	0.0000	7.4723	0.3540	4.6013	61.58
N-EXP22	0.1641	0.0479	0.0000	11.3018	0.5286	7.4100	65.56
N-EXP23	0.2055	0.0507	0.0000	15.3522	0.6550	10.7807	70.22
N-EXP24	0.2472	0.0519	0.0000	20.6911	0.6978	15.2349	73.63
N-EXP25	0.2786	0.0506	0.0004	27.1124	0.7121	19.9616	73.63
*N-EXP26	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP27	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP28	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP29	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP30	0.1290	0.0123	0.0287	31.6216	1.3661	25.3346	80.12
N-EXP31	0.1193	0.0118	0.0275	28.9156	1.1659	23.2659	80.46
N-EXP32	0.1099	0.0116	0.0254	24.4074	0.9310	19.8934	81.51
N-EXP33	0.0964	0.0106	0.0189	18.9552	0.4306	15.5605	82.09
N-EXP34	0.1316	0.0059	0.0095	19.6163	0.2344	17.6090	89.77
N-EXP35	0.1367	0.0093	0.0052	14.8532	0.1364	12.4409	83.76
N-EXP36	0.1484	0.0209	0.0015	12.6459	0.1454	10.7556	85.05
N-EXP37	0.1645	0.0320	0.0002	12.1772	0.2432	10.0163	82.25
N-EXP38	0.1836	0.0420	0.0000	13.0683	0.4212	9.9502	76.14
N-EXP39	0.2055	0.0507	0.0000	15.3522	0.6551	10.7808	70.22
N-EXP40	0.2324	0.0582	0.0000	19.1020	0.9537	12.5194	65.54
N-EXP41	0.2620	0.0663	0.0000	24.2338	1.2751	15.2327	62.86



N-EXP42	0.3296	0.0784	0.0000	38.6013	2.4134	23.2046	60.11
N-EXP43	0.3666	0.0839	0.0000	47.6846	2.9841	28.3028	59.35
N-EXP44	0.4047	0.0893	0.0000	58.0009	3.5772	34.0829	58.76
*N-EXP45	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP46	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP47	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP48	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP49	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP50	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP51	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP52	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP53	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP54	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP55	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP56	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP57	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP58	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP59	-	-	-	-	-	-	-
*N-EXP60	-	-	-	-	-	-	-
N-EXP61	0.0724	0.0079	0.0183	8.9552	0.2759	7.5351	84.14
N-EXP62	0.0674	0.0069	0.0177	7.3190	0.2169	6.2167	84.94
N-EXP63	0.0628	0.0059	0.0152	5.8924	0.1593	5.0625	85.92
N-EXP64	0.0565	0.0057	0.0108	3.6842	0.0708	3.2522	88.27



N-EXP65	0.0551	0.0036	0.0084	2.9004	0.0486	2.6449	91.19
N-EXP66	0.0553	0.0073	0.0059	2.3409	0.0380	2.1200	90.56
N-EXP67	0.0570	0.0123	0.0039	2.0012	0.0388	1.7953	89.71
N-EXP68	0.0489	0.0064	0.0159	4.4752	0.1590	3.7443	83.67
N-EXP69	0.0452	0.0057	0.0145	3.6516	0.1221	3.0786	84.31
N-EXP70	0.0422	0.0057	0.0127	2.9371	0.0877	2.4719	84.16
N-EXP71	0.0380	0.0043	0.0095	1.8299	0.0458	1.6119	88.09
N-EXP72	0.0372	0.0041	0.0077	1.4419	0.0334	1.2658	87.79
N-EXP73	0.0374	0.0073	0.0058	1.1642	0.0284	1.0389	89.24
N-EXP74	0.0381	0.0106	0.0045	0.9919	0.0272	0.8695	87.66
N-EXP75	0.0407	0.0058	0.0145	3.3055	0.1226	2.7507	83.21
N-EXP76	0.0377	0.0057	0.0133	2.6970	0.0921	2.2315	82.74
N-EXP77	0.0352	0.0056	0.0119	2.1672	0.0692	1.8190	83.94
N-EXP78	0.0319	0.0037	0.0089	1.3517	0.0385	1.1859	87.73
N-EXP79	0.0312	0.0044	0.0073	1.0641	0.0290	0.9293	87.33
N-EXP80	0.0312	0.0071	0.0058	0.8549	0.0244	0.7517	87.93
N-EXP81	0.0316	0.0099	0.0045	0.7304	0.0231	0.6322	86.55
N-EXP82	0.0327	0.0056	0.0132	2.3079	0.0876	1.8825	81.57
N-EXP83	0.0303	0.0055	0.0120	1.8811	0.0686	1.5492	82.36
N-EXP84	0.0284	0.0051	0.0108	1.5147	0.0528	1.2648	83.50
N-EXP85	0.0260	0.0032	0.0083	0.9438	0.0313	0.8231	87.21
N-EXP86	0.0253	0.0046	0.0069	0.7399	0.0240	0.6384	86.29
N-EXP87	0.0250	0.0068	0.0058	0.5935	0.0200	0.5170	87.11

N-EXP88	0.0256	0.0092	0.0045	0.5094	0.0190	0.4323	84.85
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------

