FUNWAVE 數值模式於港區波浪模擬應用之初探

蔡世璿[1]、林雅雯[2]

[1]交通部運輸研究所運輸技術研究中心副研究員
[2]交通部運輸研究所運輸技術研究中心科長

摘要

本研究旨在探討 FUNWAVE 數值模式在港灣波浪動力模擬之應用，透過研析其理論基礎與技術特性，建立完整的模擬架構。在初步測試階段，本研究以水工模型斷面水槽為試驗對象，設定規則波條件（H=4cm，T=0.8s），發現模擬過程中出現數值發散及非物理性波動現象，參考美國陸軍工程研究與發展中心（ERDC）數值模擬建議，針對波浪適用範圍、網格空間解析度及水深解析度進行調整，並將造波條件修正為 H=4cm，T=1.5s，成功消除數值發散現象，確保模擬結果的穩定性與物理合理性。本研究驗證了數值模擬過程中 Courant-Friedrichs-Lewy（CFL）設定條件的重要性，並提供有效的參數檢核經驗。未來將持續探討模擬技術，期望 FUNWAVE 模式模擬成果提供港灣營運管理與防災應用。

一、前言

臺灣四面環海，長期以來，藉其海洋資源與海運樞紐地位，在區域經濟中扮演舉足輕重的角色。港口做為海運體系的核心，其功能隨著經貿與文化發展逐漸多元化，涵蓋漁業、商業運輸及觀光休閒等用途。港灣設施的規劃與營運日益複雜，尤其在氣候變遷加劇、極端天氣頻繁發生的背景下，如何確保港區內設施的安全性、效能及適應性已成為重大挑戰。

港灣波浪模擬的準確性在港灣設施設計、營運管理與災害應變能力中扮演著至關重要的角色。現階段，全球海洋工程界普遍採用 WAM（WAve Model）與 SWAN（Simulating WAves Nearshore）等模式來進行波浪模擬與預測。這些模式在大尺度與中小尺度的波浪傳播與能量分布描述，展現了卓越的性能，為許多工程應用提供可靠基礎。然而，由於這些模式基於波譜理論（Wave Spectral Theory），其對港內小尺度環境中波浪的非線性行為（如折射、繞射、破碎）的模擬能力存在一定的限制。在臺灣，港灣地形特徵複雜且用途多元，包括商港、漁港及觀光碼頭等多功能港區。這樣的條件對波浪模擬的精度提出了更高的需求，但現有模式在處理近岸與港區內小尺度波浪動力時，難以全面反應非線性波浪與港區地形、設施相互作用的複雜過程。因此，傳統模擬工具較難滿足港區高精度模擬需求，應可引入更合適的數值模式來實現技術突破。

根據 Contardo 等人(2020)研究，現有近岸水動力數值模型可以根據解析波浪運動的能力與應用範圍，分為相位平均模型（Phase-Average Models）和相位解析模型（Phase-Resolving Models），進一步分類，相位解析模型又可細分為 Boussinesq 型模型（Boussinesq-Type Models）和非靜水壓波浪-流場模型（Nonhydrostatic(NH) Wave-Flow Models），分類如表 1 所示。

表 1 近岸水動力數值模型分類(整理與摘錄自 Contardo 等人(2020))

分類	相位平均模型	相位解析模型		靜水壓流動模型
		Boussinesq 型模型	非靜水壓型	
波浪處理方式	平均波浪能譜的相位	解析單個波浪的相位與非線性行為		描述水體的流動動力學
數學基礎	波譜理論	Boussinesq 方程式	Navier-Stokes 方程式	靜水壓假設的淺水波方程式
模擬範圍	深水到淺水的大範圍長期模擬	近岸波浪	風暴潮	長期、大範圍沿岸潮流
適用場合	全球、區域預測	折繞射、碎波	碎波與垂直流場	海洋環流
計算成本	較低	中 適合近岸應用	高 僅限高精度需求	較低
優勢	計算效率高 適用大範圍與長期模擬	計算需求適中 可解析非線性波浪	計算精度最高 可處理非線性波浪與垂直方向流場	可與波浪模型耦合使用 流場與波浪交互作用 適合長期模擬
代表模型	SWAN、WAM	FUNWAVE、COULWAVE、BOUSS-2D	SWASH、NHWAVE、XBeach-NH	ROMS、Delft3D
限制	無法模擬波浪瞬態行為	模擬範圍有限	計算需求高 範圍受限於小尺度場景	無法直接模擬波浪驅動的流場

相位平均模型基於波譜理論，著重於統計性描述波浪能量的分布與傳播特性，適用於大範圍的波浪模擬，如前段所述 WAM 與 SWAN。這些模型在大範圍波浪與流場交互作用的應用需求中，常與靜水壓流動模式系統（Hydrostatic Circulation Modeling Systems）進行耦合應用，以補充各自的侷限性。而相比之下，相位解析模型可以直接模擬單個波浪的相位資訊與動力學行為，適用於需要描述波浪細節的近岸與港區環境，在相位解析模型當中，Boussinesq 型模型基於 Boussinesq 方程式能解析波浪的非線性與弱頻散特性，特別適用於模擬淺水波浪傳播、折射與破碎等動力學過程；而非靜水壓波浪-流場模型則是基於 Navier-

Stokes 方程式，能夠模擬垂直方向的流場結構和強非線性波浪動力學，例如，湧浪、波浪破碎與波流交互作用。

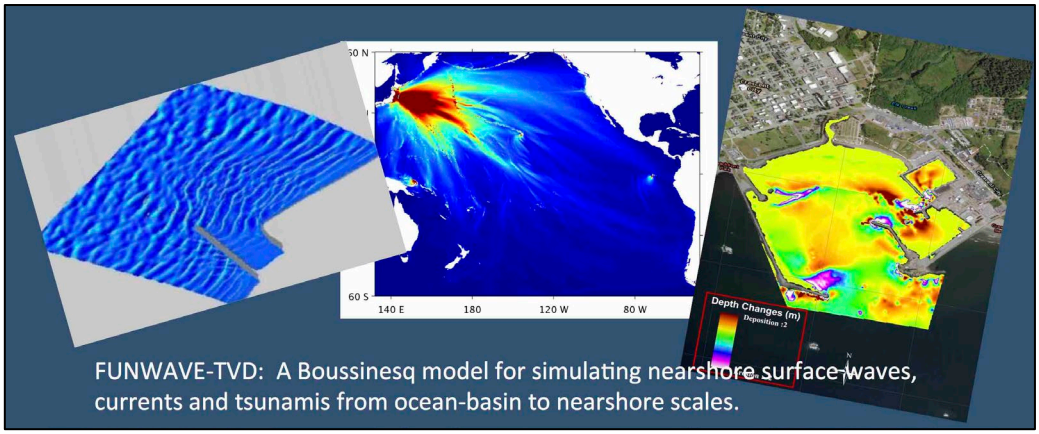


圖 1 FUNWAVE 數值模擬軟體(資料來源：FUNWAVE 網站)

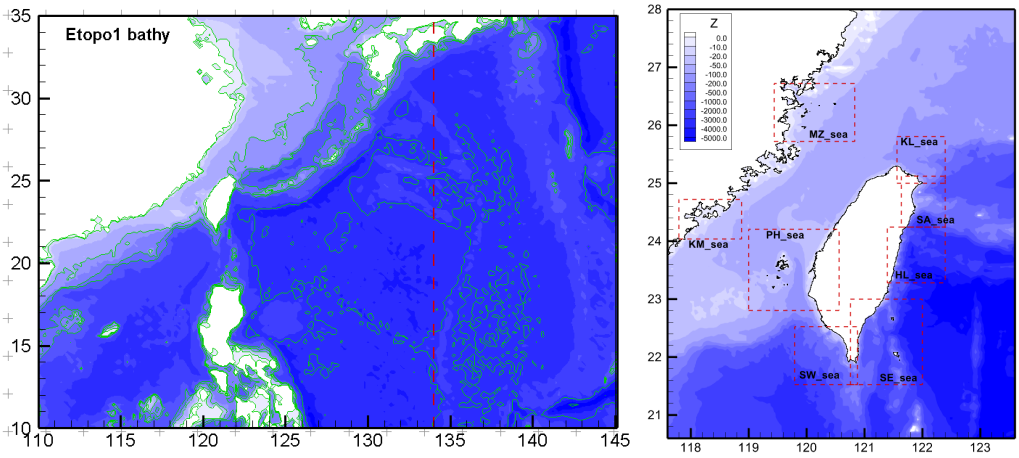


圖 2 TaiCOMS 風浪模組模擬範圍(資料來源：李等人，2024)

針對上述需求，本研究以 FUNWAVE 數值模式（如圖 1）為對象初步探討其應用於港區波浪模擬。FUNWAVE 基於非線性 Boussinesq 波浪模型（Nonlinear Bousssinesq Equations），特別適用於模擬波浪的非線性行為及複雜水動力過程，期望能為現有 TaiCOMS（Taiwan Coastal Operational Modeling System，臺灣近岸海象預測系統，如圖 2）提供技術參考，並進一步補充在小尺度波場模擬中的技術可能性，提供更精準的港內波浪模擬能力。FUNWAVE 模式不僅能處理波浪的非線性行為，還能模擬波浪與結構物之間的動態互動，對於港內設施的穩定性評估及設計最佳化具有重要價值，此外，現今氣候變遷帶來的挑戰不僅限於極端天氣事件的頻率增多，還包括港口環境中波浪動力條件的變化，港口做為交通樞紐及經濟活動核心，其安全性與穩定性直接影響區域發展。本研究希冀透過 FUNWAVE 模式應用於颱風引發波浪效應之模擬，提升港區波浪模擬技術，在極端事件發生時，提供港務管理單位與相關單位決策支援。

二、FUNWAVE 技術特性與文獻回顧

在數值模型的發展歷程中，相位解析 Boussinesq 模型已經成為模擬近岸波浪動力學的重要工具，廣泛應用於港灣設計、防災規劃及極端波浪事件模擬等領域。根據 Contardo 等人(2020)的研究結果顯示，FUNWAVE 除了與其他模型可以模擬非線性波浪傳播、折射、繞射、反射及波浪與結構物交互作用等動力學現象以外，亦能透過 GPU 加速技術的引入，顯著提升 FUNWAVE 計算效率，如表 2 所示。

表 2 相位解析 Boussinesq 模型之比較(整理與摘錄自 Contardo 等人(2020))

分類	FUNWAVE	COULWAVE	BOUSS-2D	MIKE21-BW
數學基礎	完全非線性 Boussinesq	非線性淺水方程& 弱頻散 Boussinesq	弱頻散與完全非線性方程	弱非線性 Boussinesq
非線性模擬能力	完全非線性	弱非線性	完全非線性	弱非線性
主要應用範圍	近岸波浪 海嘯模擬	海嘯生成 近岸演化與淹沒	近岸波浪動力學	港口波浪模擬 海嘯傳播
優勢	支援 GPU 加速	適合小範圍高精度模擬	適合小範圍高精度模擬	商用軟體，功能完善
風趨流 (Wind driven currents)	可	否	否	否
是否開源 (Open Source)	是	是	是	是

在應用上，該研究亦指出 FUNWAVE 適用於港內波浪動力模擬、颱風期間的防波堤安全性分析以及極端波浪事件（如：海嘯、風暴潮等）引發的複雜水動力現象模擬，相較於其他同類模型，FUNWAVE 在模擬港區共振現象、波浪與海岸結構物的動態交互作用及碎波後能量消散等方面呈現出更高的精度與操作性。整體而言，FUNWAVE 有較高的數值穩定性與計算效率上的顯著優勢，具有後續工程應用與技術開發價值。

2.1 技術特性

FUNWAVE 模式最初由 Kirby 等人(1998)基於 Wei 等人(1995)所發展的非線性 Boussinesq 方程進行設計，用於模擬淺水波浪在傳播與動力學行為上的數值模式。FUNWAVE 採用高階數值離散方法、有限差分框架以及渦黏性模型，可有效應用於波浪折射、繞射及碎波的模擬，然而，隨著研究需求的增加，原始版本在高頻噪點雜訊、碎波精度受侷限及乾濕邊界處理等方面，仍存在技術上的挑戰，其控制方程式如下：

$$\eta_t + \nabla \cdot M = 0 \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\boldsymbol{V}_t + \nabla\left[\frac{\boldsymbol{MM}}{H}\right] + \nabla\left[\frac{1}{2}g(\eta^2 + 2h\eta)\right] = \eta_t(V_1' - \overline{u_2}) + H(u_\alpha \cdot \overline{u_2} + \overline{u_2} \cdot \nabla u_\alpha - V_1'' - V_2 - V_3 - R) + g\eta\nabla h \cdots\cdots(2)$$

其中，式(1)為質量守恆方程式，M $= H\{u_\alpha + \bar{u}_2\}$為水平體積通量，$H = h + \eta$為總水深，而$\bar{u}_2 = \frac{1}{H}\int_{-h}^{\eta} u_2(z)dz = \left(\frac{z_\alpha^2}{2} - \frac{1}{6}(h^2 - h\eta + \eta^2)\right)\nabla B + \left(z_\alpha + \frac{1}{2}(h - \eta)\right)\nabla A$為深度平均水平速度；式(2)為動量守恆方程式，$\mathbf{V}$ = H$(u_\alpha + V_1')$，$\boldsymbol{\eta}$ 為水面變化、$\boldsymbol{h}$ 為靜水深，$\mathbf{u_\alpha}$ 為水深 $z_\alpha = -0.531$h 處的水平速度向量、$\bar{u}_2$ 為平均水平速度的消散項($O(\mu^2)$)沿著水深的貢獻、$\boldsymbol{V_1}$和$\boldsymbol{V_2}$為頻散項、$\boldsymbol{V_3}$為垂直渦度的次級效應、$\boldsymbol{R}$ 為擴散和消散項。

為了解決上述問題，Shi 等人(2012)開發了 FUNWAVE-TVD（Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model with Total Variation Diminishing）版本，該版本引入了混合有限體積和有限差分方法，結合總變量削減法（TVD），解決高頻噪點雜訊（數值震盪）的問題，顯著提升了波浪碎波的模擬精度，而乾溼邊界處理方面，FUNWAVE-TVD 利用自動追蹤波浪碎波位置結合動態乾溼邊界條件，使其能克服乾溼邊界問題的處理。

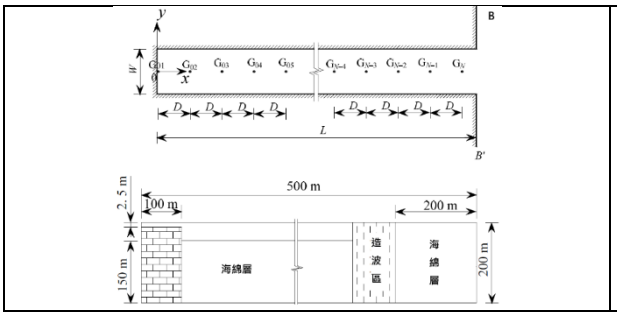
除了克服上述問題以外，FUNWAVE-TVD 進一步擴展非線性 Boussinesq 方程式的應用範圍，利用多種創新性的理論與數值技術來提升模擬效能。首先，完整的非線性 Boussinesq 方程式允許 FUNWAVE-TVD 同時描述波浪的非線性和頻散效應，使其在模擬淺水波浪傳播、折射、繞射和破碎等現象時，能夠提供更高的精度與可靠性，這種改進特別適用於港區內多變地形下的波浪行為分析，有效提升了模式在近岸應用中的適應性。為了進一步提高模擬的穩定性和準確性，FUNWAVE-TVD 引入了 MUSCL（Monotonic Upwind Scheme for Conservation Laws）-TVD 求解器，此技術結合 Runge-Kutta 法，有效解析碎波等動力過程，同時減少數值發散和頻散誤差，這種方法讓模式不僅在小尺度波浪模擬中表現出色，也能處理複雜動態環境中的波浪與流場交互運動；FUNWAVE-TVD 可以自動辨識波浪碎波的位置，並接續描述碎波後的能量消散與流場變化，此技術不僅增強近岸波浪動力學的模擬能力，亦可成為波浪碎波引發的近岸環流研究工具；乾溼邊界的處理則是結合 Harten-Lax-van Leer（HLL）構造方法，引進了動態乾溼邊界條件，引進這種方式使得模式動態追蹤水體邊界的變化，精確模擬水體淹沒和退潮過程，特別適用於模擬潮汐、暴潮或波浪侵襲的影響；模式中還有具備拉格朗日追蹤功能（Lagrangian tracking），使模式可以模擬漂浮物、污染物或浮標在波浪和流場中的運動軌跡，此方法讓模式亦可針對海洋環境進行評估和工程上的應用。

除了前述的核心技術以外，FUNWAVE-TVD 目前仍持續開發新功能藉此發展應用範圍，包括船舶艉波生成、氣象海嘯模擬以及泥沙運輸與地形變化的模擬等，進一步提升模式在港口設計、災害預測和海岸工程等領域的應用潛力。

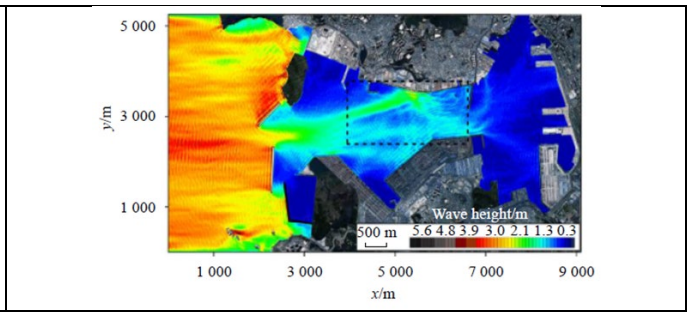
2.2 文獻回顧

以 Boussinesq 方程來設計的 FUNWAVE-TVD 模式為複雜近岸與港區環境提供的模擬工具，其研究的應用範圍也相當廣泛，包含非線性波與波、波與流的交互作用(Nonlinear wave-wave & wave-current interactions)、波浪引起的近岸環流(Wave-induced nearshore circulation)、溯升與越波的碎波現象(Wave breaking with runup & overtopping)、港池共振與亞重力波(Harbor resonance & Infragravity (IG) waves)、部分吸收與反射的內部邊界(Partially absorbing/reflecting inner boundaries)及船舶產生的波浪和泥沙運輸與地形變遷(Vessel-generated waves & related sediment trasport with morphology change)等。

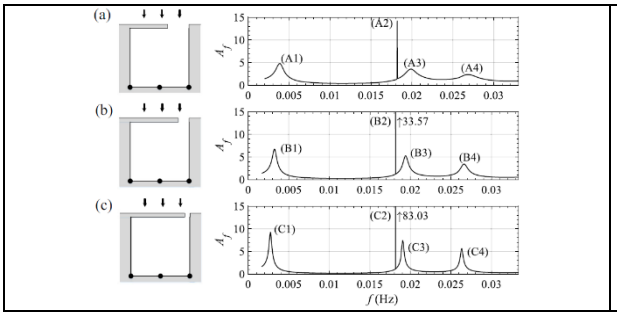
港灣靜穩與港灣震盪的部分，高等人(2016，如圖 3a)使用完全非線性 Boussinesq 模型模擬由雙頻群波引起的狹長矩形港池的非線性長波共振現象，分析束縛長波（Bound long waves）與自由長波（Free long waves）的振幅，及其振幅比如何受到入射短波的波長與振幅影響。Choi 等人(2019，如圖 3b)介紹一套結合 SWAN 與 FUNWAVE-TVD 模型的港口波浪預測系統，並用於韓國釜山港的波浪預測，透過 SWAN 負責大範圍的波浪預測，而 FUNWAVE-TVD 則專注於港內波浪繞射與反射等複雜現象，其方式可克服 SWAN 在地形變化大的侷限性，此系統整合了預先計算的 FUNWAVE-TVD 結果，透過線性插值提供即時的波浪預測，並使用實地觀測數據進行了超過 7 個月的模擬驗證，驗證 FUNWAVE-TVD 能顯著提高在遮蔽區域波浪高度的預測精度，並且 FUNWAVE-TVD 在模擬波浪的反射與繞射方面優於 SWAN。Ma 等人(2019，如圖 3c)利用 FUNWAVE-TVD 數值模型，分析港口特殊模式在非線性條件下的振幅放大特性與其影響因素，結果顯示，入口寬度對極端模式的振幅增強有顯著影響，入口越窄，波浪放大的效果越明顯，但也需要更長的時間才能達到穩定狀態，而非線性波浪則會把能量分散到其他波浪成分中，降低共振時的波高並縮短達到穩定的時間。蘇(2021，如圖 3e 與圖 3f)等人模擬颱風期間花蓮港與蘇澳港的長週期波浪，分析亞重力波與非常低頻波在港內的空間分布與波高變化，其結果為外海波浪透過非線性作用轉移能量至長週期波，進入港內後形成共振，並在特定區域如航道與防波堤附近的能量尤為集中，該研究驗證 FUNWAVE 模型在模擬複雜波浪行為上的準確性，可提供港口設計與防災規劃參考。Zheng 等人(2021，如圖 3d)透過擴展 FUNWAVE-TVD 模型，將時間相關的地震強迫項加入方程式中，用以模擬地震引發的港灣震盪行為，模擬斯里蘭卡 Hambantota 港因地震震動引發的長週期震盪，驗證了 FUNWAVE-TVD 在模擬地震引發港口震盪的準確性。



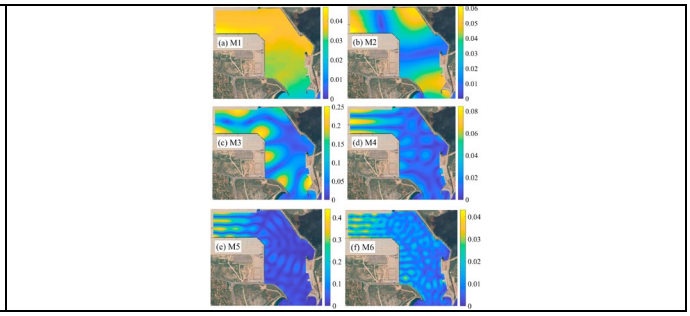
(a)狹長矩形港池模擬示意圖
(資料來源：高等人，2016)



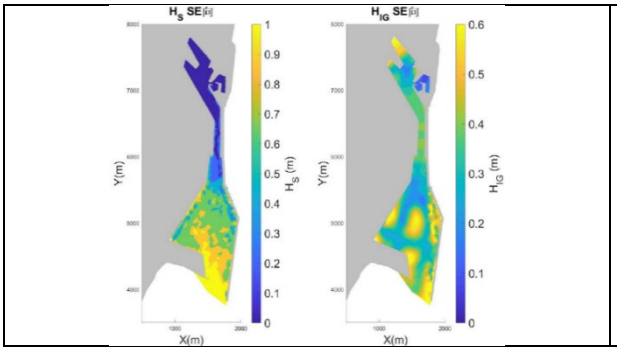
(b)透過 FUNWAVE 進行釜山港內波浪預測
(資料來源：Choi 等人，2019)



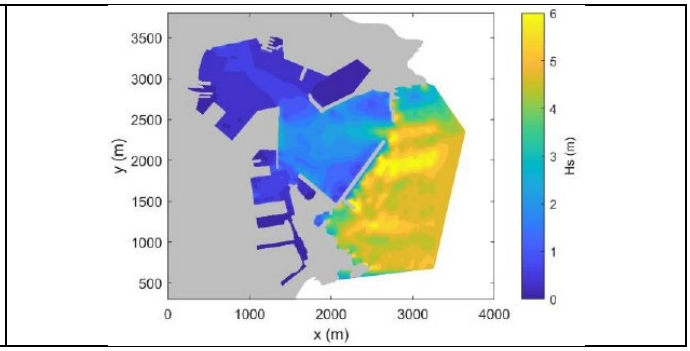
(c)入口寬度對極端模式之振幅增強
(資料來源：Ma 等人，2019)



(d)探討不同案例之波高分布示意圖
(資料來源：Zheng 等人，2021)



(e)花蓮港示性波高和亞重力波高空間分布
(資料來源：蘇等人，2021)

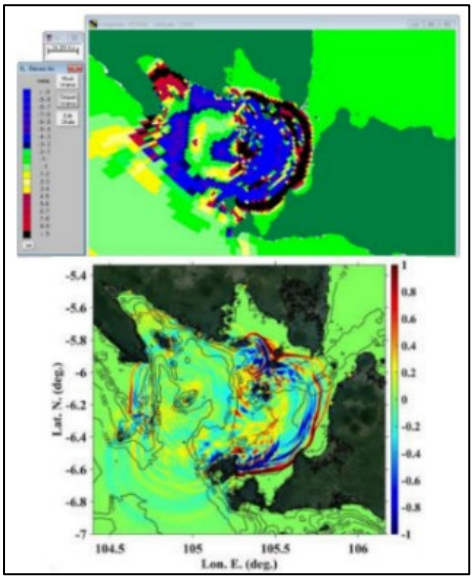


(f)蘇澳港示性波高空間分布圖
(資料來源：蘇等人，2021)

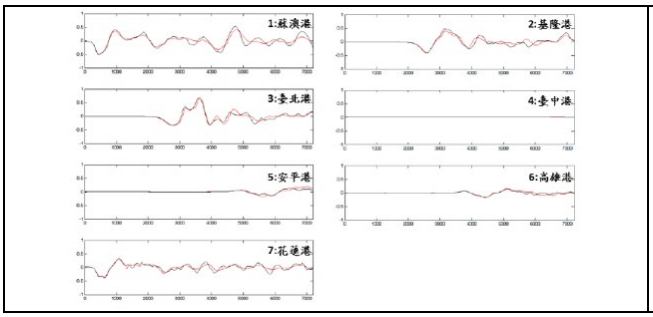
圖 3 港灣靜穩與港灣震盪相關文獻

海嘯方面的探討，蔡等人(2017，如圖 4b)模擬蘇澳港區在海嘯條件下的波浪傳播中，進行 FUNWAVE-TVD 模型與 COMCOT 模型的比較，其中 FUNWAVE-TVD 考慮頻散效應與非線性波浪行為，而 COMCOT 則基於淺水波方程式對遠洋海嘯的快速模擬，並忽略頻散效應，對比結果顯示，FUNWAVE-TVD 在模擬港內波浪反射、折射與局部放大時更為精確，特別波浪能量分布的分析上具顯著優勢，該研究驗證了 FUNWAVE-TVD 模型在極端波浪條件下模擬港灣和結構物互制的能力，並指出其對港灣設計與防災規劃的應用潛力。吳(2022，如圖 4a)模擬臺灣西南海域的山崩海嘯傳播行為，並探討其對沿岸地區的影響，研究中以 1998 年巴布亞紐幾內亞(Papua New Guinea)山崩海嘯案例驗證模型準確性，證實其在模擬頻散效應與非線性波浪行為上的可靠性，研究發現，海底地形對邊緣波的生成有顯著影響，邊緣波可延長沿岸地區受海嘯影響的時間，同時提出假設海底山崩參數的方法，並應用於模擬臺灣西南沿海地區的山崩情境，透過最大波高分布圖與測站時序圖，詳細分

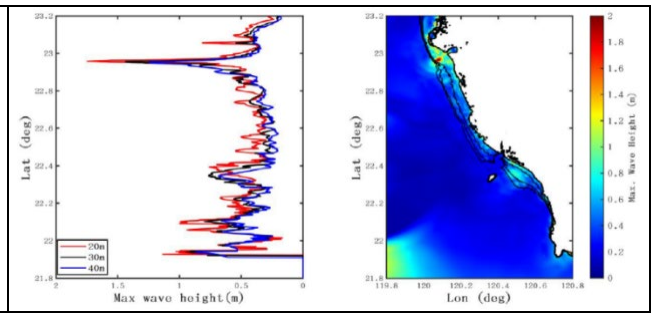
析海嘯波高的傳播特性。Muin & Muslim(2023，如圖 4c)比較了 MuTsunami 與 FUNWAVE-TVD 模型在模擬 Anak Krakatau 山崩引發的海嘯行為上的表現，兩者在海嘯傳遞過程中波高的時間演變與海嘯波高的模擬結果上呈現一致性，但 FUNWAVE-TVD 使用更細緻的網格，提供更高的空間解析度，因此，在波浪動力細節模擬上具有優勢，但 MuTsunami 因為運算時間短和快速生成可靠模擬結果的特性，更適合早期的預警系統，此外，研究結果顯示 FUNWAVE-TVD 模擬的海嘯抵達時間與觀測數據非常接近，驗證其模擬長波頻散效應和非線性波浪行為的高準確性。



(a) 模擬台灣西南沿海地區的山崩情境之海嘯波高傳播特性
(資料來源：吳，2022)

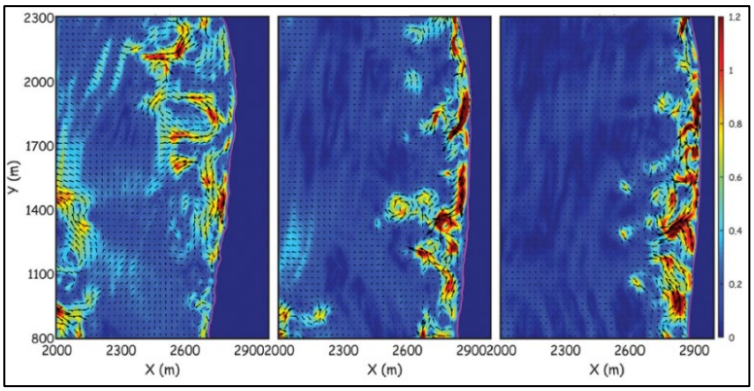


(b) FUNWAVE-TVD 與 COMCOT 的比較
(資料來源：蔡等人，2017)

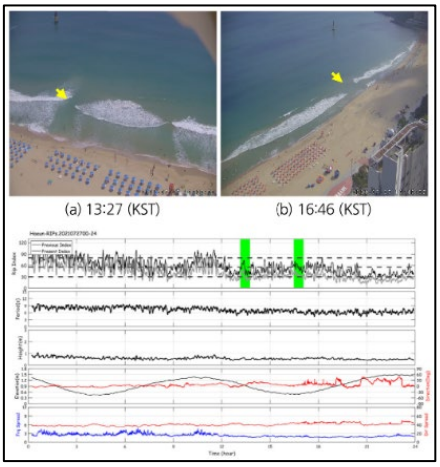


(c) MuTsunami 與 FUNWAVE 的比較
(資料來源：Muin & Muslim，2023)

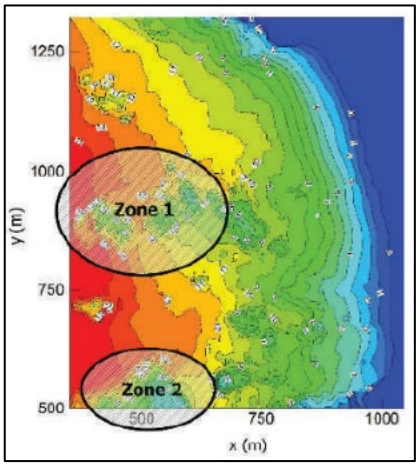
圖 4 海嘯相關文獻



(a) 探討不同潮位離岸流變化與影響
(資料來源：Choi，2022)



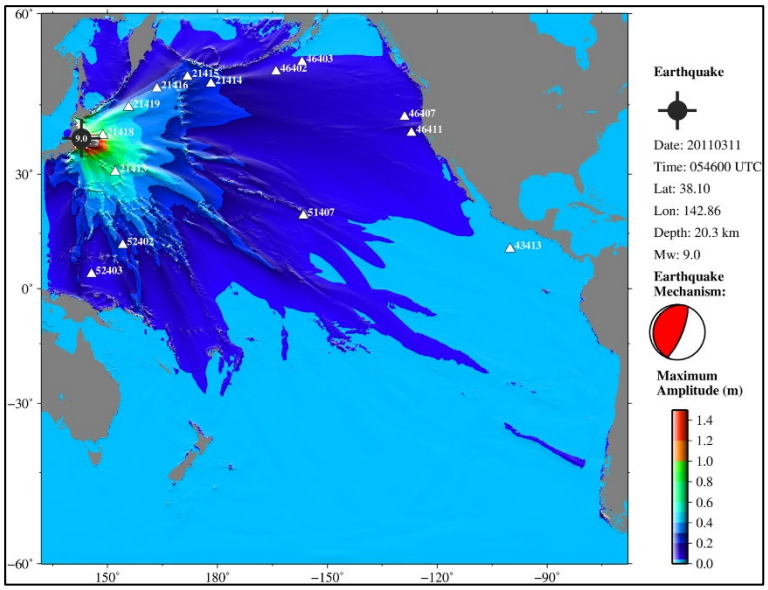
(b) CCTV 與模式比對 (資料來源：Choi，2022)



(c) 探討離岸流生成機制 (資料來源：Ha 等人，2022)

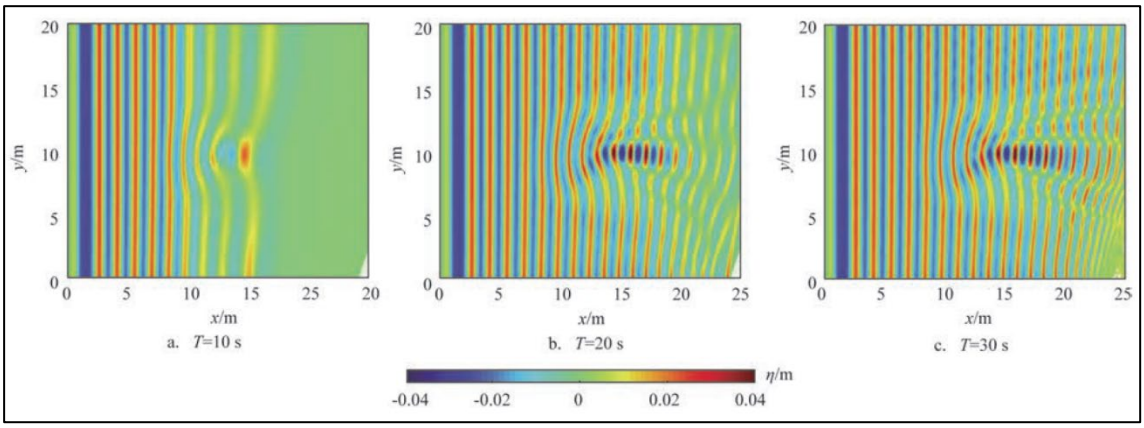
圖 5 離岸流相關文獻

在離岸流方面的研究，Ha 等人(2014，如圖 5c)使用 FUNWAVE-TVD 模型探討韓國海雲台海灘離岸流的生成機制，模擬不同波浪條件、海底地形與潮汐影響下的流場特性，發現離岸流的強度和分布受波浪方向、波高及地形結構顯著影響，FUNWAVE-TVD 可精確呈現出波浪碎波後的流場分布與能量傳遞，當波浪沿特定角度進入海灘時，能量集中區域形成強烈離岸流，對海灘的安全管理單位提供相關數據參考，後續 Choi(2022，如圖 5b)亦透過 FUWNAVE-TVD 模型針對海雲台海灘的離岸流預警系統進行改進，透過模型預先計算不同海況（波高、波向、潮位）下的離岸流發生機率並儲存於資料庫中，並透過這個資料庫快速生成即時預警指數，該研究並用實際觀測數據與 CCTV 記錄離岸流事件進行比對，結果顯示該方法更精確預測離岸流風險，並改進預警系統的效率與準確性，對於海灘安全管理及離岸流災害預防具有重要的應用價值。Choi(2022，如圖 5a)利用 FUNWAVE-TVD 模型，探討韓國西海岸大川海攤在潮汐水位變化下，離岸流的生成機制與特性，該區域的海床地形具有特殊的露出礁岩，而潮汐的變化使得這些礁岩成為水下障礙物，並對波浪傳播與能量分布造成影響，數值模擬結果顯示，礁岩在不同潮位時產生不同強度的離岸流，此外，該篇研究也發現，潮汐水位變化會改變離岸流的強度與分布，此研究驗證了 FUNWAVE 模型在模擬潮汐變化下的波浪變形與離岸流動力行為的準確性。



(a) 利用 GPU 版本的 FUNWAVE 進行日本東北海嘯事件模擬

(資料來源：Yuan 等人，2020)



(b) 潛堤地形的非線性傳播與變形現象

(資料來源：林與李，2023)

圖 6 透過 GPU 加強 FUNWAVE 模擬效能相關文獻

Yuan 等人(2020，如圖 6a)針對 FUNWAVE-TVD 模型進行多 GPU(Graphics Processing Unit)的加速最佳化，並用於提升大規模海浪與海嘯模擬的計算效率，透過測試 2011 年日本東北海嘯事件，顯示 GPU 版本的 FUNWAVE 模型能夠在保持精度的前提下，大幅提升模擬速度。與傳統的 36 個運算核心相比，單 GPU 模式的計算速度可提升達 4~7 倍，而雙 GPU 模式下更可超過 10 倍的加速效果，此研究證明 GPU 加速技術為 FUNWAVE-TVD 模型提升應用潛力，為大尺度海洋波浪動力學模擬與即時災害預警系統，提供更高效、成本更低的運算平台。林與李(2023，如圖 6b)透過 FUNWAVE-GPU 模型模擬近岸海浪在典型潛堤地形和緩坡地形下的非線性傳播與變形現象，分析海浪的反射、折射與繞射等特性，在 GPU 的多核心計算平台上進行測試，與 CPU 版本(FUNWAVE-TVD)相比運算時間縮短了約 22%。

三、FUNWAVE 基本模擬與初步測試

為了深入了解模式在後續研究中可提供的模擬應用潛力，掌握其模擬步驟與運作邏輯是有效應用模式的關鍵，因此，本章將首先介紹 FUNWAVE 的基本模擬步驟，說明從前期準備、數值模擬到後處理分析，建立清晰的模擬架構。此外，透過 FUNWAVE 提供的基本案例，呈現模式在不同物理機制下的數值模擬應用，進一步說明其在波浪傳播、折射、碎波及與結構物交互作用等方面的模擬效果。最後，參考 113 年度交通部運輸研究所運輸技術(以下簡稱運技中心)所執行的水工模型斷面試驗的試驗條件，進行數值模擬建模與初步測試，做為後續更深入的研究與應用之技術基礎。

3.1 模擬主要步驟

FUNWAVE 的模擬主要可以分為 3 個階段：準備階段、模擬階段及後處理階段。首先，準備階段在設定數值模型各項初始條件和參數，確保模擬運行的穩定性與準確性，需設定包括控制檔案（input.txt）、地形檔案（包含水深資料、結構物資料、吸收層資料）及波浪生成器（視需要或內建），其中控制檔案是 FUNWAVE 模擬的核心設定檔案(如圖 7)，包含前述地形檔、波浪生成器等外部檔案與數值模擬參數都需要透過控制檔案來設定，包含模擬時間（總時間和時間步長 Δt）、邊界條件（開放邊界、吸收邊界）及輸出頻率，而 FUNWAVE 模型的地形網格類型屬於規則矩形網格，因此也需要在控制檔案中設定其網格解析度（x 方向和 y 方向的網格數量），波浪生成器則可以使用其內建的多種造波方式，如：規則波、不規則波、孤立波或 JONSWAP 波譜等等，亦可透過從外部的波浪資料導入模式中進行造波。其次，模擬階段需要在 Linux 或 WSL（Windows Subsystem for Linux，本研究運行方式）環境下透過指令啟動模擬運算(如圖 8)，並在模擬過程中持續輸出日誌檔案，記錄模擬執行的各項細節，包括時間步長、數值穩定性及可能出現的錯誤訊息，此外，模擬過程中也會根據輸出頻率的設定，生成一系列結果檔案（如：eta_*.txt、u_*.txt、v_*.txt 等），此階段使用者可以由模擬過程或是檢查輸出日誌(如圖 9)，確認是否出現數值發散或異常狀態，若發生異常，可以根據日誌訊息，回溯至控制檔案或初始條件，進行修正後再次啟動模擬（熱啟動），模擬階段流程如圖 10。最後，後處理階段則可利用 MATLAB 或 Python 等程式進行後處理，將模擬階段所輸出的結果檔案進行數據分析與影像視覺化，驗證模擬的準確性及穩定性。

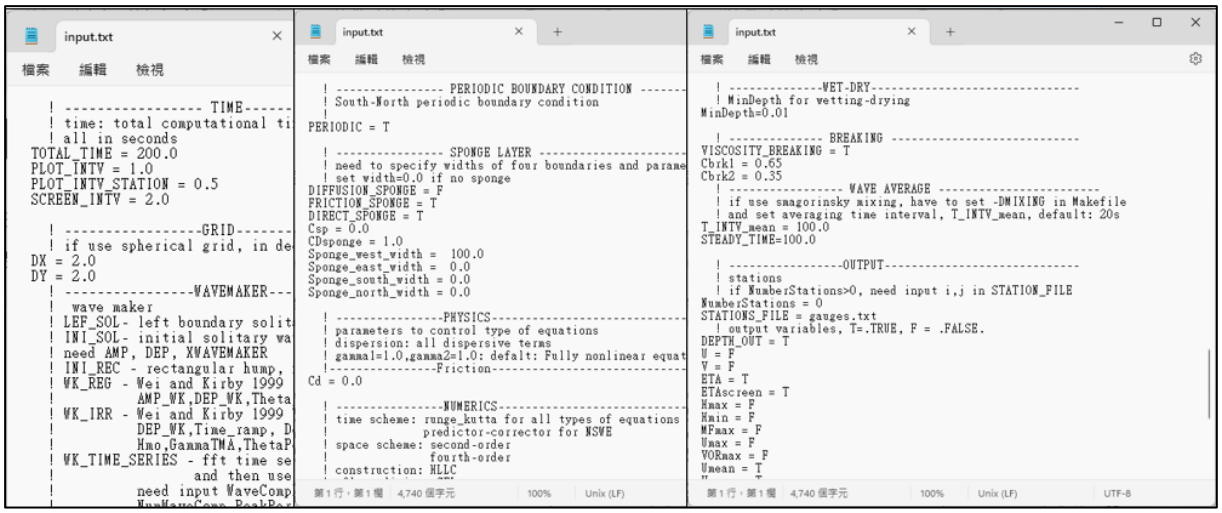


圖 7 FUNWAVE 輸入設定檔案

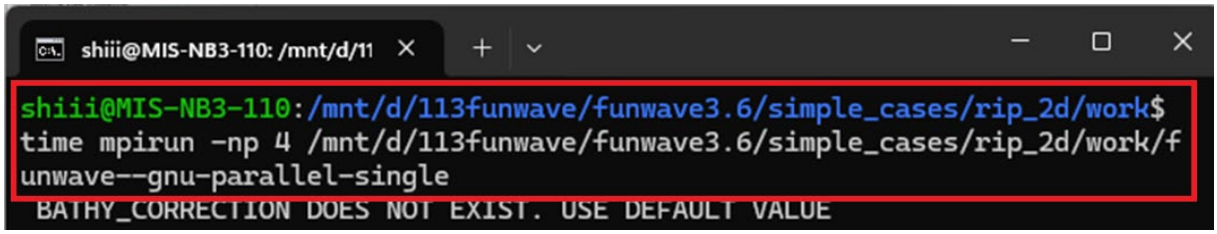


圖 8 模擬啟動指令

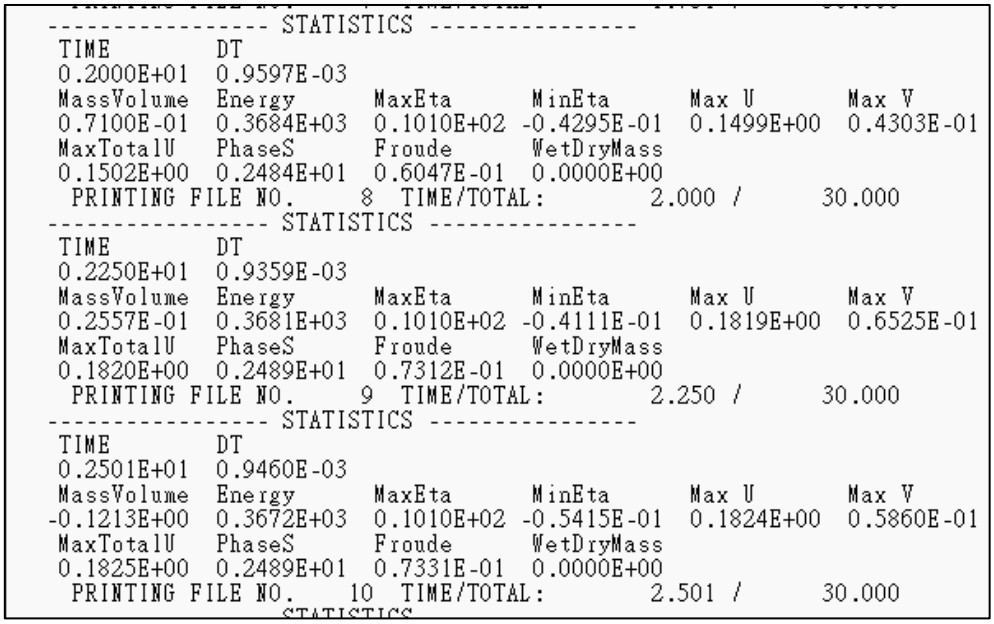


圖 9 模擬結果輸出日誌(Logs File)

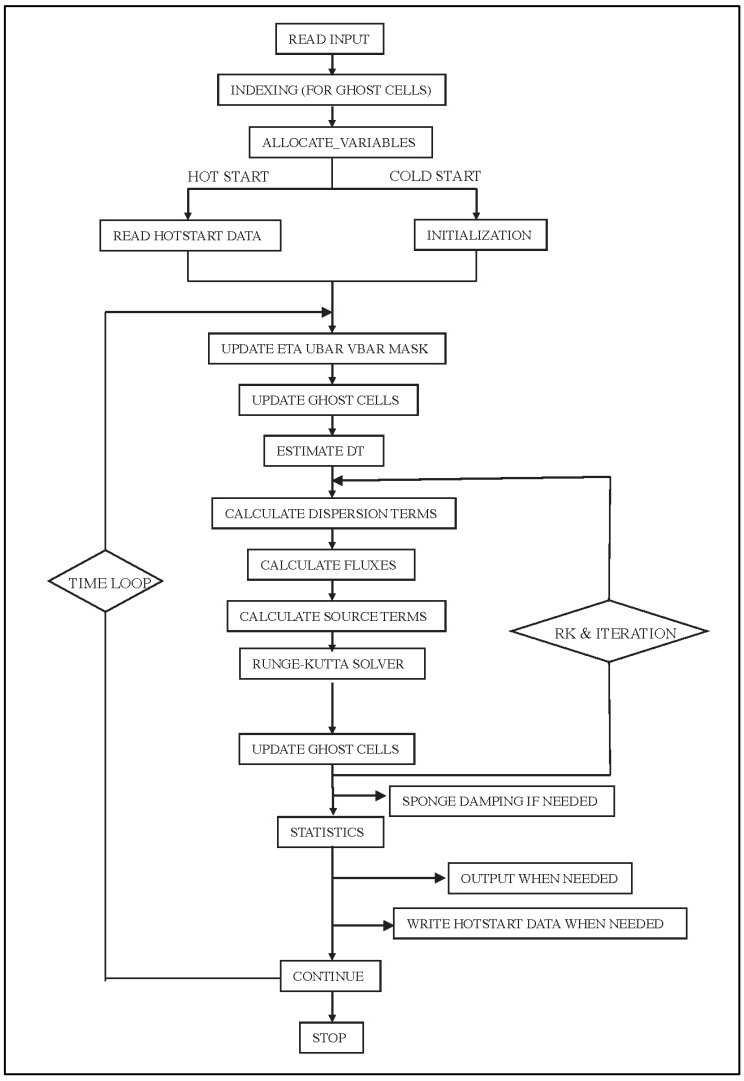


圖 10 FUNWAVE 模擬流程圖 (資料來源：FUNWAVE 操作手冊)

3.2 基礎案例模擬

本節以 FUNWAVE 官方提供的基礎案例進行說明與測試，案例涵蓋不同水動力機制（如波浪傳播、溯升、反射和共振），提供後續數值模型的執行流程的熟悉與應用，但本研究僅先初步就 FUNWAVE 模式進行熟悉與模式操作，故模擬測試之設備先以筆電（CPU: i7-1165G7，4 核心/8 執行緒；RAM: 16GB）與桌電（CPU: i7-8700，6 核心/12 執行緒；RAM: 8GB）進行測試。

在一維斜坡海灘（1D Sloped Beach）的案例是由一個水深 10 公尺的平坦區過渡到一個 1:20 的斜坡，模擬波浪於傾斜海灘上的傳播、變形、碎波與溯升現象，而波浪條件設定為規則波（波高 1m，週期 8s）與孤立波（波高 1m），並在左側設定吸收邊界，減少不必要的波浪反射效應，模擬結果分別如圖 11，可以觀察到波浪在斜坡上的變形、碎波及溯升現象，呈現出波浪能量耗散和水面變化的過程，模式的高解析度網格可以擷取破碎點的位置和溯升的最大高度，供後續分析應用。

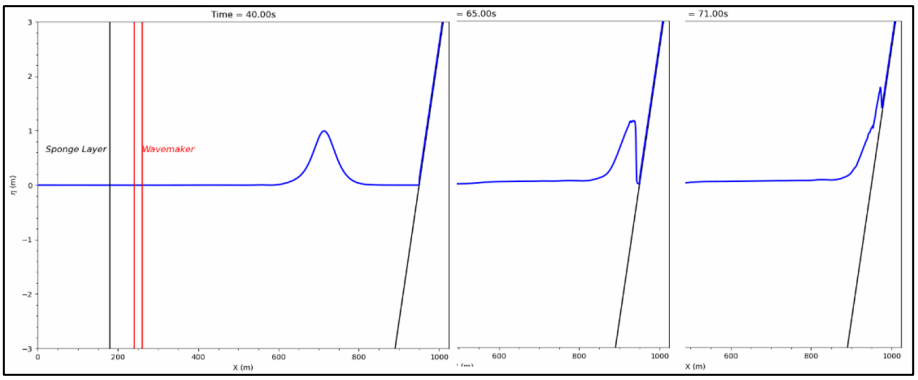


圖 11 一維斜坡海灘模擬結果

在港口設計與營運階段，港池共振（Harbor Resonance）是一個重要且經常困擾管理單位的議題，當入射波浪的頻率與港池的自然頻率相匹配時，將在港池內引發顯著的波浪能量放大效應，進而可能對港池內的設施（例如碼頭、船舶停泊區）產生不利影響，若未能妥善處理，嚴重時甚至可能造成結構物損壞，進一步威脅到港區的安全性與穩定性。因此，透過數值模擬來預測與分析港池共振現象，對於港池設計和營運管理具有極高的實務價值。

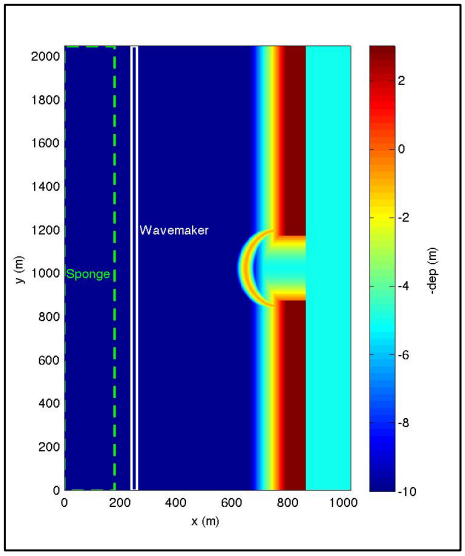


圖 12 港池共振模擬地形配置

FUNWAVE 案例中的港池共振模擬配置為一長方形港池（網格尺寸為 512*1024，網格間距為 Dx=2.0m，Dy=2.0m，如圖 12）並設定為週期性邊界條件，波浪條件為規則波（波高 2m，週期 12s），其模擬結果可觀察到在特定區域形成能量集中的高能量熱點區域(如圖 13)，儘管此案例為官方提供的基礎案例，但實際模擬過程中仍然消耗大量的計算資源（前述設備，NB：約 18hr，PC：約 13hr17m），因此，為因應日後更大規模與高解析的模擬需求，並提升研究效率，運技中心已規劃採購專業級工作站做為模擬設備，以提供更穩定與高效的運算環境。

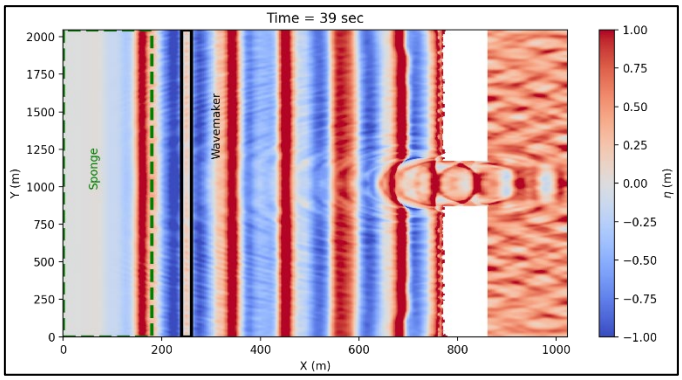
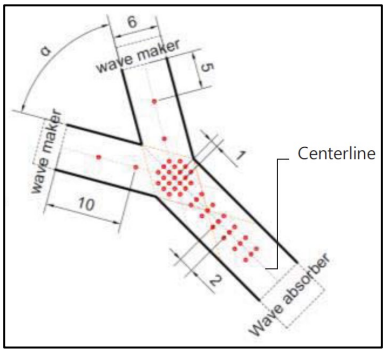


圖 13 港池共振模擬模擬結果

3.3 初步測試

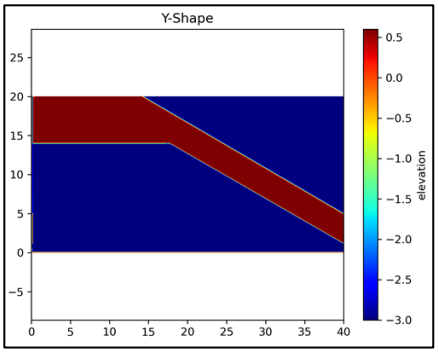
為了有效測試 FUNWAVE 在水槽環境下的模擬能力，並在現有設備效能限制下取得穩定且可靠的模擬結果，本節選擇以水工模型試驗斷面水槽作為主要模擬對象。本研究未直接選用實際港池的複雜地形進行模擬，主要考量斷面水槽模擬的設定相對單純，透過斷面水槽的模擬更能有效地進行物理機制的重現，此外，在有限的設備資源下，斷面水槽模擬較能減少運算資源的負擔，並縮短模擬時間，確保模擬的穩定性與重現性。

在模擬現象的觀察上，首先參考王等人(2024)水工模型試驗（Y 型水槽，如圖 14a）為觀察對象並製作數值模型，又因 Y 型水槽有其對稱性，故沿對稱軸取一半進行數值建模（如圖 14b），設計水深為 0.6m，網格解析度(Δx)為 0.05m。並依水工模型試驗條件規則波，波高 4cm、週期 0.8s 的造波條件。首先由圖 15 依序可觀察到，由第 5 秒到第 30 秒的造波過程，雖然波浪沿著造波方向向前傳遞，並沿著水槽壁出現反射與繞射的狀態，但可以明顯發現波浪在傳遞的過程中，出現了非物理性的波動現象，特徵類似波浪的波峰與波谷出現扭曲，水面高度分布不規則的頻散現象，尤其造波時間拉長以後更加明顯(第 15~30 秒)。



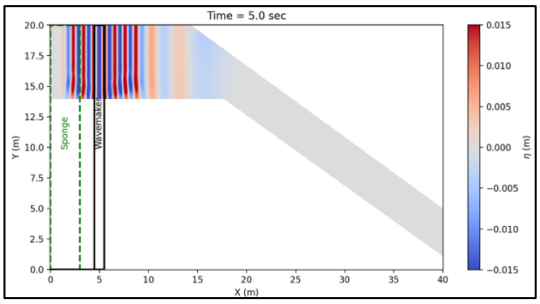
(a) 王等人(2024)試驗之 Y 型水槽

(資料來源：王等人，2024)

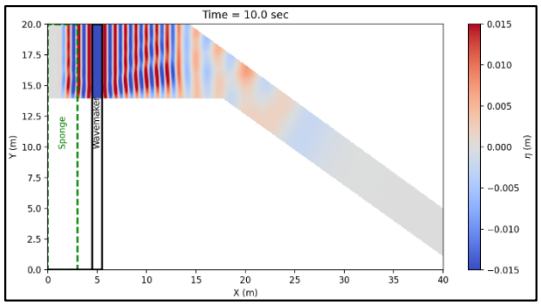


(b)數值水槽建模

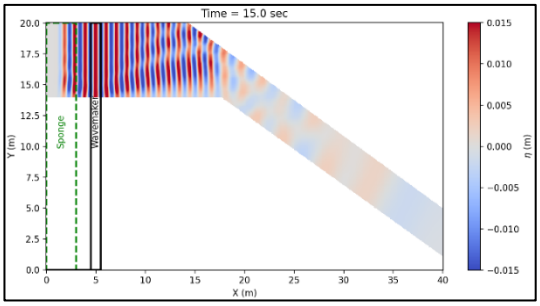
圖 14 王等人(2024)之 Y 形配置與本研究之數值水槽建模



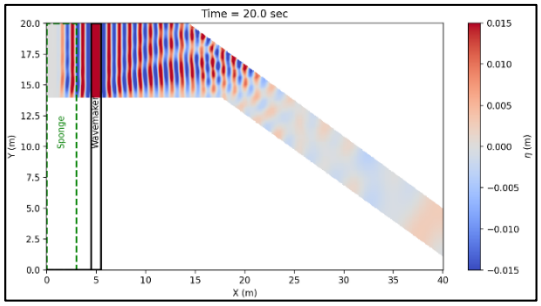
(a) t = 5s



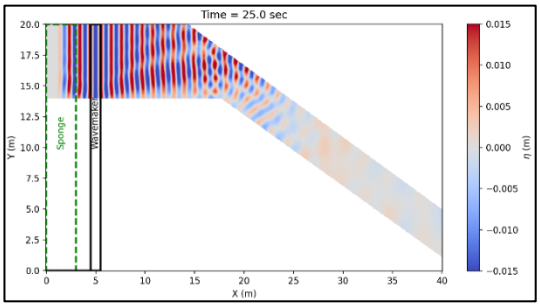
(b) t = 10s



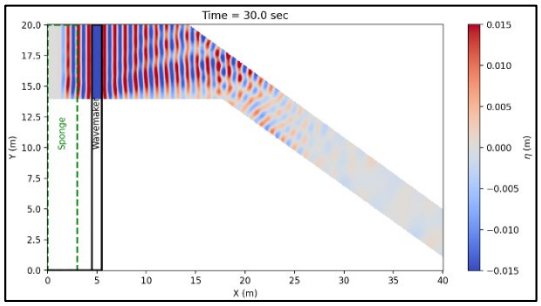
(c) t = 15s



(d) t = 20s



(e) t = 25s



(f) t = 30s

圖 15 造波條件 T=0.8s 模擬結果

為了解決這種現象的發生，參考美國陸軍工程研究與發展中心（ERDC）Marissa 等人(2022)針對模型的物理限制範圍以及合適的建模參數等事項之建議，主要包括：波浪的適用範圍、輸入波浪參數的空間解析度要求及水深的空間解析度要求等 3 項，說明如下：

①波浪的適用範圍（$\lambda > 2h$，即波長(λ)大於 2 倍水深）：此條件是基於 Boussinesq 理論，因為 FUNWAVE 模式屬於弱頻散模型，因此無法解析深水波浪（$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$），僅適用於淺水波（$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{20}$）至中間水深波（$\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$）的波浪環境（波浪受底床影響）；而對於不規則波的模擬建議，則是確保波浪組成的波長條件都能符合上述條件，方能解析所有波浪。

②輸入波浪參數的空間解析度要求（$\Delta x < \frac{\lambda}{60}$，$\Delta x$ 為網格大小）：當空間解析度過低，雖然模型的計算成本會較低，但數值解的準確度也會下降，而為了充分解析空間中的物理過程，一個波長至少要有 60 個網格點來描述，波浪的物理過程與能量傳遞才能滿足。

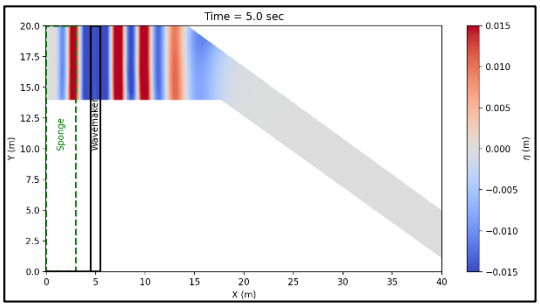
③水深的空間解析度要求（$\frac{\Delta X}{h} > \frac{1}{15}$）：此條件是 Marissa 等人(2022)透過 FUNWAVE-TVD 建模社群通過大量試驗與穩定模型的經驗所得的結果，其推測是與波浪特性或非線性 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL，如式 3)的條件有關。其中 Δt 為時間步長、 Δx 為網格間距、 g 為重力加速度、 h 為水深、 η 為水面變化以及 C 為 Courant 數，一般 C 取值在 0.5 以下，代表數值穩定性條件的上限。而 CFL 條件則是為了確保波浪傳播時不會「跨越」相鄰的網格單元，避免數值解發散或產生非物理性震盪。

$$\Delta t \leq \frac{C \cdot \Delta x}{\sqrt{g(h+\eta)}} \quad \cdots\cdots (3)$$

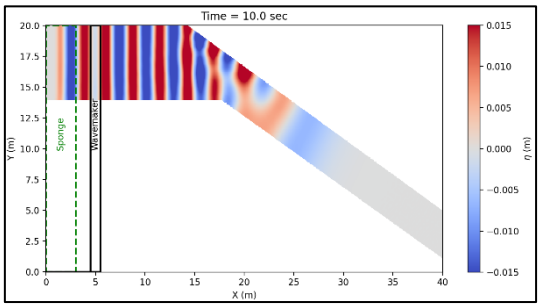
表 3 造波條件數值模擬適用性比較(水深為 60cm)

造波週期(T)	λ (m)	$\frac{h}{\lambda}(<0.5)$	$\Delta x < \frac{\lambda}{60}$	$\Delta x > \frac{h}{15}$	是否符合
0.8s	0.9984	0.6010	$\Delta x < 0.0166$	$\Delta x > 0.04$	NG
1.4s	3.0576	0.1962	$\Delta x < 0.0510$	$\Delta x > 0.04$	OK

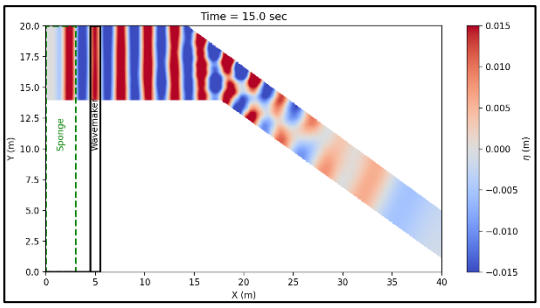
根據建議，在水深 60cm、網格解析度為 0.05m 的情況下，$\lambda > 0.05\text{m} \times 60 = 3\text{m}$，因此將造波調整為波高 4cm、週期 1.4s，調整前後的比較，如表 3 所示。重新選擇模擬條件的造波週期如圖 16 所示，異常波動的現象顯著消失，波浪傳播時的波峰與波谷呈穩定的規則排列，而為了讓比較更為明顯，分別再針對兩個條件進行直線段水槽的模擬比較(如圖 17 所示)，可以更清楚的看到，在符合淺水波、時間步長與網格解析度的條件中，波形更加穩定，而相對的短週期波浪模擬則明顯的不穩定，因為在短週期波浪運動時，波浪頻率高、波長短，則需要更小的時間步長(Δt)與更細的網格間距(Δx)，確保在每個時間步長內，波浪的前緣不會「跳過」網格單元；此外，Boussinesq 方程式在描述長週期、頻率較小波浪時準確性較高，但在短週期波浪的模擬中則可能存在誤差，即超出 Boussinesq 方程式的適用範圍。



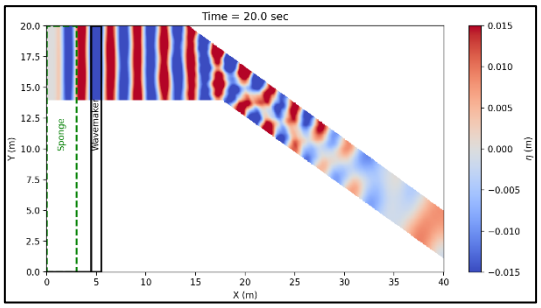
(a) t = 5s



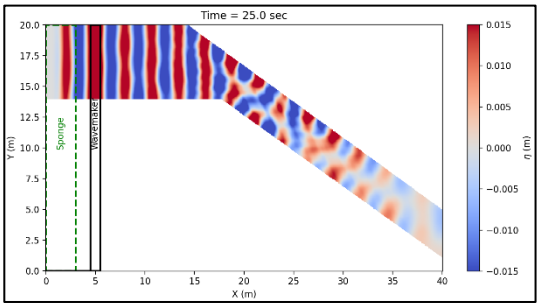
(b) t = 10s



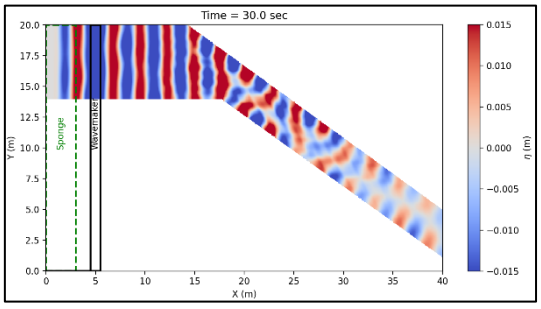
(c) t = 15s



(d) t = 20s

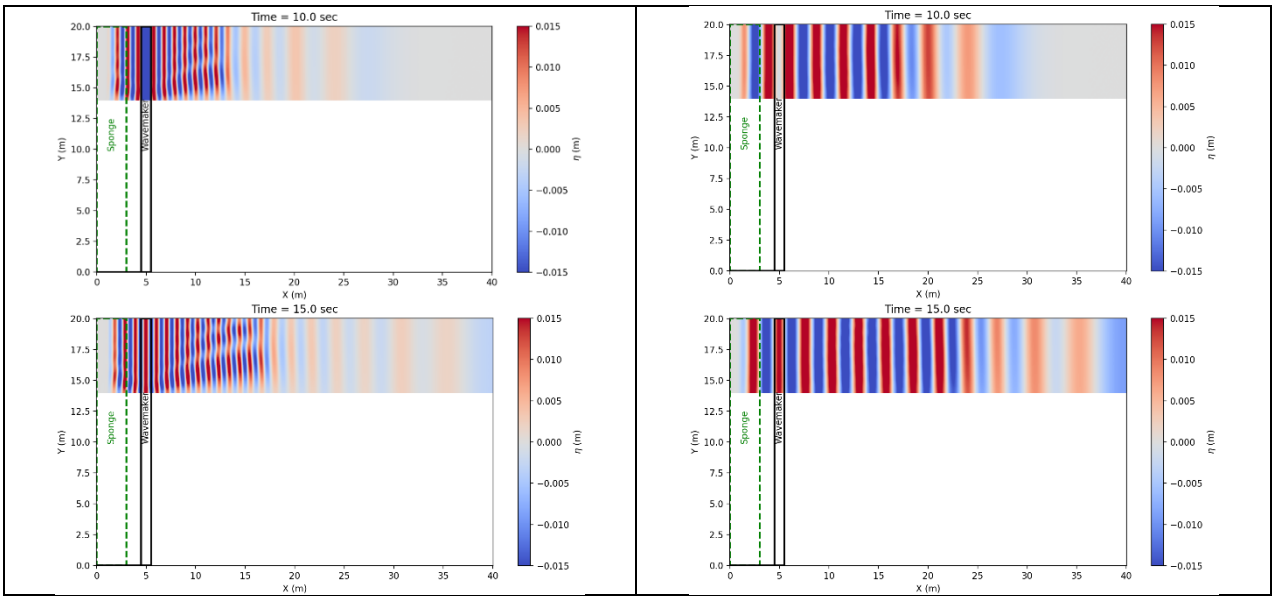


(e) t = 25s



(f) t = 30s

圖 16 造波條件 T=1.4s 模擬結果



(a)T=0.8s　　(b)T=1.4s

圖 17 不同週期條件的數值穩定性

四、結論

本研究透過對 FUNWAVE 模式的系統性探討，首先從基本原理與技術特性進行深入剖析，瞭解該模式在非線性波浪動力學模擬中的核心架構與數值處理技術。並透過文獻回顧，彙整國內外 FUNWAVE 模式在不同應用場景的成功案例，包括港池共振、海嘯模擬、近岸環流及離岸流生成機制等，提供豐富的參考依據，並展示該模式在不同應用環境下的

適用性與優勢。此外，透過官方提供的案例，本研究能快速掌握 FUNWAVE 的模擬架構與操作流程，有效縮短學習曲線，並透過基礎案例驗證不同情境下的數值模擬需求，為後續進行更複雜的數值建模與情境測試奠定基礎。整體而言，FUNWAVE 模式不僅具備高度的數值穩定性與物理合理性，更能應用於港灣工程、災害防治及水動力現象模擬中，具有極高的應用潛力與實務價值。

在初步測試階段，本研究以水工模型試驗為基礎設置水深為 60cm 的環境條件，設定規則波浪條件 H=4 cm，T =0.8s 進行模擬。然而，在模擬過程中觀察到顯著的非線性現象，包含波峰與波谷扭曲、水面高度不規則分布等數值發散現象，特別是在模擬時間拉長後更加明顯。為釐清問題成因，本研究參考了美國陸軍工程研究與發展中心（ERDC）的相關文獻，該文獻提供有關波浪適用範圍、網格空間解析度以及水深空間解析度的建議。經過參數調整，將造波條件修正為 H =4cm，T=1.4s，成功消除數值發散現象，波形表現趨於穩定且物理合理性獲得改善。這次的測試過程不僅呈現了數值模型在特定條件下可能出現的侷限性，更加深了對 FUNWAVE 模式特性的理解，並為未來在模擬設置與參數檢核，提供寶貴經驗與參考依據。

參考文獻

1. FUNWAVE-TVD (https://fengyanshi.github.io/build/html/index_non_usace.html).
2. Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., & Subramanya, R. (1995). A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part 1. Highly nonlinear unsteady waves. Journal of fluid mechanics, 294, 71-92.
3. Kirby, J. T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. B., & Dalrymple, R. A. (1998). FUNWAVE 1.0: fully nonlinear Boussinesq wave model-Documentation and user's manual. University of Delaware.
4. Shi, F., Kirby, J., Tehranirad, B., Harris, J. C., Grilli, S., & TVD, F. (2012). Fully nonlinear Boussinesq wave model with TVD solver: Documentation and user’s manual (version 2.0). Res. Rep. CACR-11-04, Cent. for Appl. Coastal Res., Univ. of Delaware, Newark.
5. Ha, T., Jun, K., Yoo, J., & Park, K. S. (2014). Numerical study of rip current generation mechanism at Haeundae Beach, Korea. Journal of Coastal Research, 72, 179-183.
6. GAO, J. L., MA, X. Z., DONG, G. H., & CHEN, H. Z. (2016). Numerical study on low-frequency waves inside the harbor during harbor oscillations. Engineering Mechanics, 33(7), 159-166.
7. 蔡立宏、洪維屏、許弘莒、李孟學、林敬樺、許城榕 (2017)，港灣結構物受異常波浪影響分析(3/3)，交通部運輸研究所。
8. Choi, Y. K., Seo, S. N., Choi, J. Y., Shi, F., & Park, K. S. (2019). Wave prediction in a port using a fully nonlinear Boussinesq wave model. Acta Oceanologica Sinica, 38, 36-47.
9. Contardo, S., Hoeke, R., Branson, P., Hernaman, V., & Pitman, T. (2020). Hydrodynamic modelling for nearshore predictions.

10. Ma, X., Zheng, Z., Zhang, X., & Dong, G. (2020). Numerical investigation on special modes with narrow amplification diagram in harbor oscillations. Ocean Dynamics, 70, 1-19.
11. Yuan, Y., Shi, F., Kirby, J. T., & Yu, F. (2020). FUNWAVE-GPU: Multiple-GPU acceleration of a Boussinesq-type wave model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 12(5), e2019MS001957.
12. Zheng, Z., Ma, X., Ma, Y., Perlin, M., & Dong, G. (2021). Numerical investigation of seismic-induced harbor oscillations. Coastal Engineering, 165, 103838.
13. 蘇仕峯、夏武成、周立翔、謝杰恩、吳瑋軒 (2021)，長週期亞重力波於港灣及河口海岸之數值模擬，科技部補助專題研究計畫報告，MOST-109-2221-E-032-020。
14. Choi, J. (2022). A modification of the rip current warning system utilizing real-time observations: a database function of likelihood distributions. Journal of Korea Water Resources Association, 55(10), 843-854.
15. Choi, J. (2022). A Numerical Study of Rip Current Generation Modulated with Tidal Elevations at the Daecheon Beach. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 34(6), 247-257.Torres, M. J., Lam, M. A. Y. H., & Malej, M. (2022). Practical guidance for numerical modeling in FUNWAVE-TVD.
16. 周立翔 (2022)，數值模擬花蓮港之颱風波浪，淡江大學水資源及環境工程學系碩士班學位論文。
17. 夏武成 (2022)，數值模擬蘇澳港受長週期波動影響，淡江大學水資源及環境工程學系碩士班學位論文。
18. 林華東、李本霞 (2023)，基於 FUNWAVE-GPU 模型的近岸海浪傳播變形的數值模擬研究，海洋預報，Vol.40，No.3。
19. Muin, M., & Muslim, A. B. (2024). Anak Krakatau Landslide Tsunami and Sediment Transport Simulation Using Non-Orthogonal Boundary Fitted Technique in Spherical Coordinate Model. Journal of Coastal Research, 116(SI), 146-150.
20. 王馨儀、蔡立宏、李俊穎、李政達、林受勳、許弘莒、李孟學 (2024)，短峰波之傳遞及演化，第 46 屆海洋工程研討會摘要集，台灣海洋工程學會，125-127 頁。