

數值模擬亞重力波在珊瑚裙礁地形之空間分布

蘇仕峯¹ 馬鋼鋒²

¹淡江大學水資源及環境工程學系

²美國歐道明大學土木及環境工程學系

摘要

本文利用完全非線性 Boussinesq 波浪模式研究亞重力波在各種珊瑚裙礁地形之空間變化，以數值試驗模擬波浪通過一系列不同礁坡坡度與礁坪水深之理想裙礁地形。固定入射波浪與礁坪寬度，模式結果顯示淺水礁坪的情況下(約 1.0~2.0m)，近岸亞重力波總能通量對於礁坡坡度相當敏感，在較陡之礁坡(1/5~1/20)，其隨著坡度增加而增強，反之，在相對平緩之礁坡(1/20~1/60)，其隨坡度減緩而增加。在空間分布上，淺水時最大的亞重力波約在礁緣及沙灘趾，而最小則出現在礁坪中間。水深增加時，亞重力波朝岸向增加並伴隨較顯著的震盪。此外，模式結果顯示亞重力波駐波結構，隨著礁坪水深增加與礁坡減緩而更為明顯，其頻率隨礁坪水深增高而平移至較高頻域。本研究模擬亞重力波於裙礁之空間分布，提供一個珊瑚礁環境中漂沙與地貌之蘊含。

關鍵詞：珊瑚礁、波譜、亞重力波

Numerical Modeling to Investigate the Spatial Variations of Infragravity Waves on Fringing Reefs

Shih-Feng Su* Gangfeng Ma

* Assistant Professor, Department of Water Resources and Environmental Engineering, Tamkang University

ABSTRACT

Spatial variations of infragravity waves over various fringing reefs were investigated using a fully nonlinear Boussinesq model. Numerical experiments were conducted using a series of idealized fringing reef morphology with varying forereef slope and reef-flat water depth. With a given incident wave condition and a reef-flat width held constant, model results revealed that the nearshore infragravity energy fluxes were sensitive to the forereef slope in the relative shallow reef-flat water depth (1.0~2.0 m). On the steeper slope (1/5~1/20), the nearshore infragravity energy flux increased with increasing slope. Inversely, it increased with decreasing slope on the milder slope (1/20~1/60), which was also identified in the relatively deep water depths (2.0~3.0 m). The model results clearly exhibited nodal structure patterns of infragravity waves across the reef flat became significant with increasing reef-flat water depth and decreasing forereef slope. Largest infragravity energy fluxes occurred around the reef edge and nearby the beach toe while the minimal appeared on the middle of the reef flat in the low water depth. In the high water depth, the infragravity energy fluxes increased toward the beach toe with the strong fluctuation. Additionally, the nodal infragravity frequencies shifted to higher frequency with increasing reef-flat water depth. The presence of modeled infragravity motions on fringing reefs provided significant implications for sediment transport and geophysical processes on reef environments.

Keywords: Coral reef; Wave spectrum; Infragravity waves

一、前言

珊瑚礁是全世界公認重要的海洋資源，它提供生態棲息地，孕育多元的海洋生物，其寬敞且粗糙之淺水平台地形，削減大部分入射波浪能量，保護海岸沙灘免於侵蝕。在東亞區域中，台灣是少數擁有廣泛珊瑚礁分布的國家，東部、南部、北部以及離島等海岸都有豐富的珊瑚礁環境，除了是國人喜愛的水域遊憩景點外，也是世界各國珊瑚研究人員所屬意的研究熱點。然而，珊瑚生態系統逐漸受到威脅與破壞，例如鄰近河流排放汙染物、海岸工程設施改變流場及氣候變遷等影響，如果海岸工程師與海洋物理學家對珊瑚礁環境之水動力特性能予以掌握，雖然仍難以避免天然災害之影響，但至少可以減少人為因素所造成之破壞。

以往現場觀測發現，長週期(低頻)亞重力波之波動特性與近岸漂沙及海岸地貌有高度關連性(Holman and Bowen, 1984)，然而，亞重力波在珊瑚礁海岸的角色比其在沙灘海岸更為重要，因為湧浪及風浪等相對短週期之波浪通過水淺且粗糙之底床時會大量衰減，而亞重力波卻能持續成長至岸線(Hardy and Young, 1996)。基於此現象，海岸工程師近年開始關注到亞重力波造成珊瑚礁島嶼海岸溢淹及侵蝕等問題，此外，海洋科學研究人員也關心此長週期波浪水動力對於珊瑚生態系統之影響，例如漂沙傳輸、營養鹽攝取及水體交換等。

波浪在珊瑚礁之現場觀測研究有限，原因是珊瑚礁之波浪水動力是近期才成為研究重點，加上珊瑚礁地形空間變化性大，在有限儀器可以使用之情況下，決定放置地點難度很高，因此，許多數值模式被應用到珊瑚礁環境，這些模式雖然在平緩的沙灘海岸能夠合理地預測波浪，但是在地形陡峭且粗糙之珊瑚礁地形時，重新率定檢測模式能力是必要的(蘇、梁，2011)。

一般海岸常用之波浪模式 SWAN 被應用來預測波浪於珊瑚礁之過程(Filipot and Cheung, 2012)，在調整適當之碎波與底床摩擦參數下，此模式可以合理地預測波高及波揚，然而卻無法模擬亞重力波，主要在模式中三波交互作用之模組方法限制，無法估算低頻亞重力波。Sheremet et al. (2011) 修正非線性緩坡方程式，並加入與頻率有關之碎波消散項，此模式可以合理地估算波浪通過群礁海岸之湧

浪、風浪及亞重力波，雖然高頻風浪與主頻之湧浪能夠準確預測，然而亞重力波之變化反應卻相對緩慢，也出現低估之情況。Nwogu and Demirbilek (2010)利用 Boussinesq 方程式模擬裙礁之亞重力波與湧升，模式能夠有效模擬亞重力波之發展過程，但並未進一步探討其量化之精確性。Yao et al. (2012) 利用 Boussinesq 方程式討論不同礁坡坡度下示性波高與波揚之發展，發現結果十分接近，但沒有比較亞重力波之發展。Pomeroy et al. (2012) 利用 XBeach 模式探討造成亞重力波之能量消散機制，研究指出能量消散主要是由底床摩擦所引起，而不是非線性能量傳遞至主頻或高頻處後經碎波衰減，此外發現亞重力波之能量大小明顯受到水位高度影響，和 Péquignet et al. (2009)之現場觀測相符合。Ma et al. (2014)利用 non-hydraustatic 波浪模式模擬波譜於珊瑚礁地形之發展，推論亞重力波在珊瑚覆蓋率低(底床摩擦小)之珊瑚礁環境其能量會較為明顯。

珊瑚礁地形與沙灘差異性甚大，數公里之沙灘岸線，由於砂質粒徑相當接近，故斷面變化不大，但是珊瑚礁地形在不到 1 公里的長度範圍內可能就出現差異性很大的礁坡坡度與礁坪水深，主要原因是地貌的形成與珊瑚生長有關，亞重力波受此地形之影響會顯得十分複雜，在進一步研究亞重力波二維平面波場前，本文利用數值模擬波浪通過各種珊瑚群礁斷面地形，來了解亞重力波於一維空間分布之情形。

二、研究方法

本文應用美國 Delaware 大學應用海岸研究中心所發展之完全非線性 Boussinesq 波浪模式 FUNWAVE-TVD，此模式利用平行化運算，能夠模擬不規則波傳遞、衰減及非線性波與波能量交互傳遞，準確地應用在真實海岸之波浪與水流預測 (Shi et al., 2012)。此模式在本計畫另案(Su et al., 2014, 原稿投至 Ocean Engineering)已利用珊瑚礁地形之波浪實驗資料率定後可得到合理的預測，因此，本研究進一步將利用此模式用來模擬各種裙礁地形，其理想斷面詳圖 1 所示，本研究初步針對波浪受礁坡坡度(Sf)與礁坪水深(Df)之影響，因此礁坪寬度(Wf)固定為 200 m，沙灘坡度(Bs)設為 1/10，礁坡坡

度範圍從 1/5 至 1/60，所選取的範圍乃是根據珊瑚礁研究之相關文獻歸納出的一般範圍，礁坪水深選取 5 個水深：1.0 m、1.5 m、2.0 m、2.5 m 及 3.0 m，此範圍涵蓋低、中、高潮位之情況，此水深亦符合實際礁坪水深，各種數值試驗條件詳表 1。為了測試珊瑚礁地形之影響，數值模擬中底床摩擦所造成之能量損失不予以考慮，即設定底床摩擦係數為零。入射波浪條件在所有的數值試驗中也都予以固定，給定一個標準 JONSWAP 波譜，其示性波高(Hs)為 2.0 m，尖峰週期(Tp)為 8.0 sec，能量集中度參數(peak enhancement factor, γ) 為 3.3，頻率設在 0.05 至 0.3Hz 之間，頻率共區分為 50 個頻寬。模式執行 40 分鐘以上，取最後 1800 秒穩定狀態之結果進行後續波譜分析。

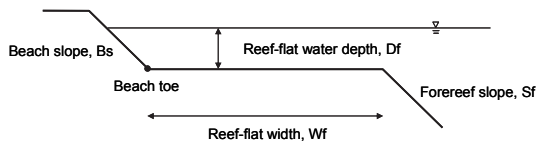


圖 1 珊瑚裙礁斷面示意圖

表 1 礁坡與礁坪地形之數值試驗條件

礁坡坡度	1/60, 1/50, 1/40, 1/30, 1/20, 1/10, 1/5
礁坪水深 (m)	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0

三、結果與討論

3.1 近岸亞重力波總能通量

數值結果為時序列水位變化，經過波譜分析得到能量頻譜密度(spectral energy density)，能量頻譜密度乘上群波波速為能通量頻譜密度(spectral energy flux density)，我們將頻譜分為兩個區塊，頻率介於 0.005~0.05Hz 之間為亞重力波，0.05~0.3Hz 之間為湧浪及風浪，頻譜區塊內能通量密度總和稱之總能通量(Bulk energy flux)。

本文考慮到亞重力波於珊瑚礁環境中對岸線地貌及海岸溢淹之影響，因此分析近岸沙灘趾(beach toe, $x=0$)處波譜總能通量。圖 2 顯示近岸亞重力波與湧浪/風浪總能通量於各種礁坡坡度與礁坪水深之關係。圖中可以看出兩種總能通量皆受其影響，在礁坪水深 1.0m、1.5m 和 2.0m，亞重力波總能通量與礁坡坡度呈現一個拋物線之關係，例如，水深

1.0m 之轉折點約在礁坡 1/20 (詳圖 2a)，水深 1.5m 和 2.0m 則在礁坡 1/10 (詳圖 2c 和 2e)。由於此趨勢之關係，近岸亞重力波在陡坡 1/5 之總能通量大小與在緩坡 1/50 相當接近。然而，當礁坪水深在 2.5m 和 3.0 m 時，近岸亞重力波總能通量隨著礁坡坡度減少而增強(詳圖 2g 和 2i)。這些特殊現象可能與亞重力波生成機制有關(例如：Longuet-Higgins 和 Stewart (1964); Symonds et al., (1982))。

近岸湧浪/風浪總能通量與礁坡坡度之關係在淺水時(1.0m)與其他水深之關係不同，其總能通量隨著坡度減緩稍減少(圖 2b)，然而，在水深增加的情況下，卻隨著坡度減緩呈現平穩增加的趨勢(圖 2d、f、h 和 j)。此外，近岸湧浪/風浪之總能通量隨礁坪水深增加而增強，主要是因為受水深限制之碎波造成能量衰減的緣故。

3.2 亞重力波總能通量空間分布

波浪在礁坡與礁坪之能量會影響漂沙傳輸及流場，因此，本文挑選出亞重力波與湧浪/風浪總能通量在三種不同礁坪水深下(1.0 m, 2.0 m 和 3.0 m)，於各種礁坡坡度之空間分布，分別呈現在圖 3、圖 4 和圖 5。

圖 3 上版顯示，湧浪/風浪總能通量與礁坡坡度可以看出其線性關係，坡度越緩，能量越早消散(例如紅色虛線，礁坡 1/60)，坡度越陡，能通量接近礁緣才衰減，由於礁坡水深較淺，能通量在礁坪海側已消散許多，到了礁坪中間與陸側，能通量相對微弱。圖 3 中版顯示，亞重力波能通量與礁坡坡度之關係無法直接用線性關係表示，例如，坡度 1/50 之數值結果顯示，相對其他坡度，亞重力波發展可達到最高值，而陡坡坡度 1/5 之數值結果更為特殊，接近礁緣的位置，亞重力波相對於其他坡度來的高，甚至在沙灘趾($x=0$)也相對最高。亞重力波在整個礁坪上的空間分布出現震盪現象，如同駐波結構，不同的礁坡產生不同的分布，這點是很特殊的情況，如果模式結果是合理的，在實驗室或是現場觀測時，儀器必須設置密集才能得到精確的空間分布。

圖 4 上版顯示，湧浪/風浪能通量隨著礁坪水深增高而減少消散，最高之亞重力波總能通量朝岸向平移。亞重力波在礁坪上之擺動現象與圖 3 類似，

總能通量從礁緣處朝岸向減少，約在 $x=50\text{m}$ 處達最低(節點)，而後又朝岸線增加。亞重力波總能通量在礁坪坡度 1/5 之礁緣處迅速發展後又稍微減少，此結果與圖 3 一致。

圖 5 顯示湧浪/風浪與亞重力波總能通量於數值試驗中最高礁坪水深 3.0 m 之空間分布，當上版顯示當湧浪/風浪總能通量朝岸向些微減少時，亞重力波確朝向岸逐漸增加，其發展有別於其他兩種較淺水深之特性。此外，其震盪幅度隨礁坡減緩而增強。除了礁坡 1/5 之最高能通量發生在 $x=90\text{m}$ 處，大部分出現在沙灘趾前($x=10\sim 20\text{m}$)，最低約出現在 $x=50\text{m}$ 處。在水深增加時亞重力波朝岸線增強之趨勢與現場觀測之結果符合(Péquignot et al., 2009)。

3.3 波譜能通量之空間分布

上述在礁坪水深 1.0 m 時，礁坡 1/5 和 1/50 之近岸亞重力波總能通量相近，我們將波譜能通量密度之空間發展於圖 6 相互比較，坡度 1/5 之結果呈現最高的能通量密度在尖峰頻率處 $f_p=0.125\text{Hz}$ ，受到水深限制在礁緣處開始明顯衰減(詳圖 6a)。礁坡 1/50 之坡度相對較緩，有較長的距離提供淺化發展，主頻能量經由非線性波與波交互作用從尖峰頻率傳到高频之風浪頻域與低頻之亞重力波頻域，因此波譜之間能通量分布較廣(詳圖 6c)。雖然，兩種坡度之近岸亞重力波總能通量相近，但是波譜密度在空間分布卻差異很大。沙灘趾於坡度 1/5，波譜能通量密度集中在頻率 0.01~0.005Hz 之間，而且在礁緣處也出現顯著之亞重力波能通量。沙灘趾在礁坡 1/50，亞重力波頻率小於 0.01Hz 之能通量較集中， $x=250\text{m}$ 處能通量分布整個亞重力波頻域。

礁坪水深 2.0 m 時，我們比較礁坡 1/5 和 1/50 之波譜能通量密度之空間發展(圖 7)。坡度 1/5 之結果(圖 7a)與圖 6a 相似，而礁坪上能量較強之亞重力波頻率往其較高頻處移動(圖 7c)。

圖 8 顯示礁坪水深 3.0 m 時，礁坡 1/5 和 1/50 之波譜能通量密度之空間發展。有一個和諧的亞重力波發生在頻率 0.028Hz。一個清楚的節點結構出現在 $x=90\text{m}$ 、 220m 和 360m 處，約 130 m 之波長。亞重力波在自然沙灘出現亞重力駐波之現象已被觀察到(Holman and Bowen, 1984)，但是在珊瑚礁之現場觀測研究尚未提出，然而，Beethan 和 Kench

(2011)在地形地貌類似珊瑚裙礁之岩石海岸發現此現象，並推論其導致漂沙移動，岩石海岸底床非常平滑，可以視為與本研究設定底床摩擦為零之情況，因此，利用模式所得到之結果是可信的，故可推論對於珊瑚礁地貌與漂沙有影響性。

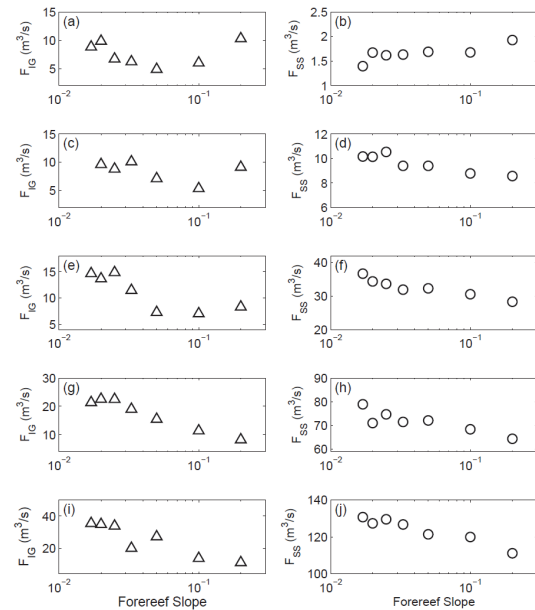


圖 2 近岸亞重力波與重力波總能通量於各種礁坡與礁坪水深。(a)和(b)代表 $Df=1.0\text{m}$; (c)和(d)代表 $Df=1.5\text{m}$; (e)和(f)代表 $Df=2.0\text{m}$; (g)和(h)代表 $Df=2.5\text{m}$; (i)和(j)代表 $Df=3.0\text{m}$ 。

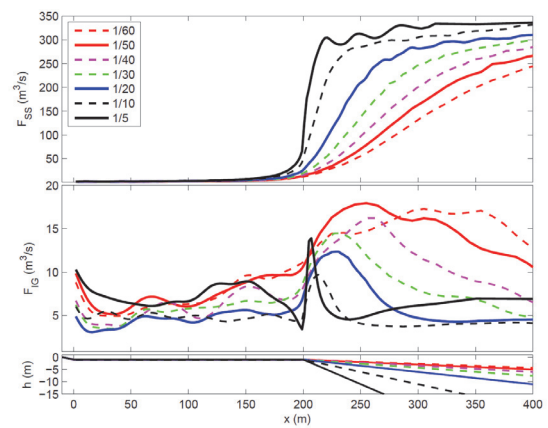


圖 3 湧浪-風浪及亞重力波能量通量於各種礁坡地形之空間發展 (礁坪水深 1.0m, 波浪條件 $H_s=2.0\text{m}$, $T_p=8.0\text{s}$)

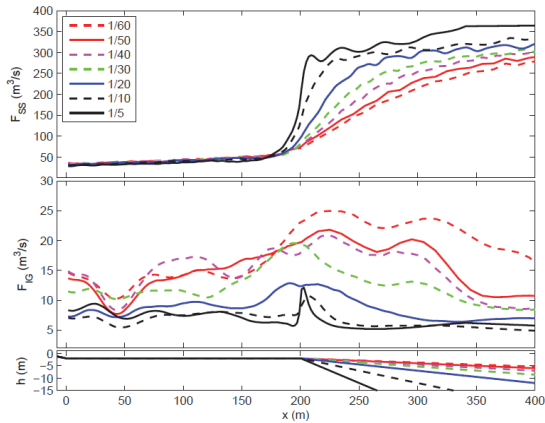


圖 4 湧浪-風浪及亞重力波能量通量於各種礁坡地形之空間發展 (礁坪水深 2.0m, 波浪條件 $H_s=2.0$ m, $T_p=8.0$ s)

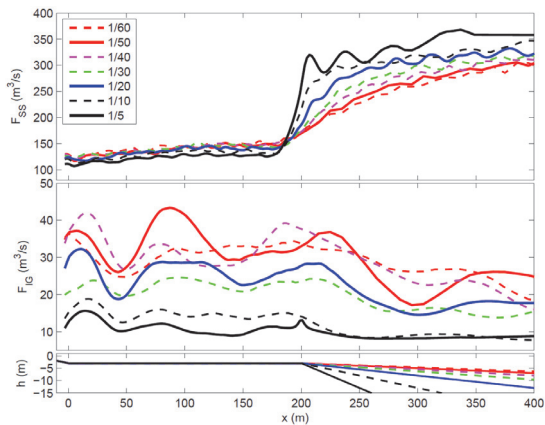


圖 5 湧浪-風浪及亞重力波能量通量於各種礁坡地形之空間發展 (礁坪水深 3.0m, 波浪條件 $H_s=2.0$ m, $T_p=8.0$ s)

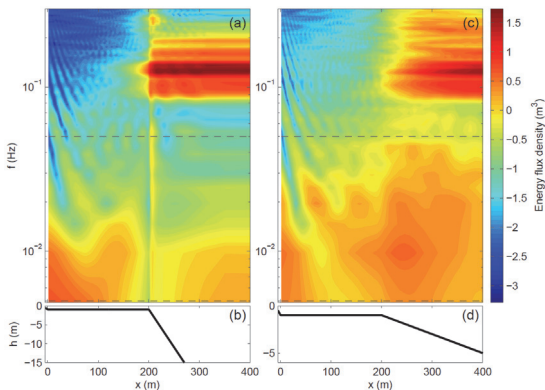


圖 6 波譜空間分布圖((a),(b)為礁坡 1/5; (c),(d)為礁坡 1/50;虛線區分亞重力波與重力波之頻帶,礁坪水深為 1.0m,能通量密度之色階利用對數尺度表示)。

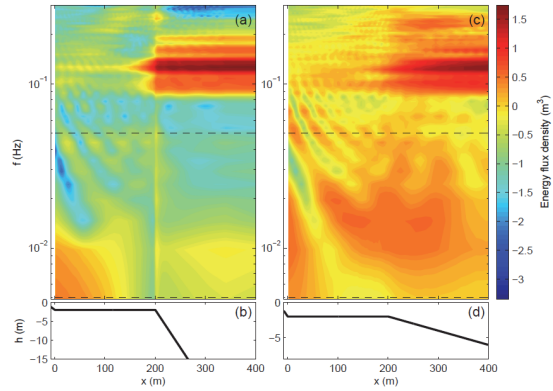


圖 7 波譜空間分布圖((a),(b)為礁坡 1/5; (c),(d)為礁坡 1/50;虛線區分亞重力波與重力波之頻帶,礁坪水深為 2.0m)。

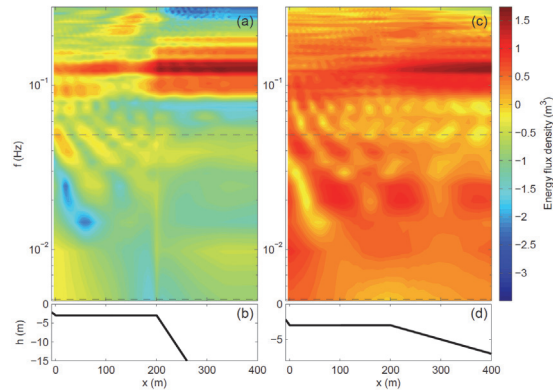


圖 8 波譜空間分布圖((a),(b)為礁坡 1/5; (c),(d)為礁坡 1/50;虛線區分亞重力波與重力波之頻帶,礁坪水深為 3.0m)。

四、結論

真實海洋中的珊瑚裙礁地形地貌分布相當不均勻, 礁坡坡度與礁坪水深在短短 1 公里內可能就有很大的差異, 因此導致波場與流場之複雜度相當高, 亞重力波在近岸之發展受地形影響非常重要, 因此, 本文利用完全非線性 Boussinesq 波浪模式, 以數值試驗模擬波浪通過一系列不同礁坡坡度與礁坪水深之一維理想裙礁地形, 欲了解亞重力波之空間發展特性。模式結果顯示淺水的情況下近岸亞重力波總能通量對於礁坡坡度相當敏感。在較陡之礁坡, 近岸亞重力波能通量隨著坡度增加而增加, 反之, 在相對平緩之礁坡, 其隨坡度減緩而增加。在空間分布上, 模式結果顯示亞重力波駐波結構隨著

礁坪水深增加與礁坡減緩而變得更為明顯。淺水時最大的亞重力波約出現在礁緣及沙灘趾，而最小則出現在礁坪中。水深增加時，亞重力波朝岸向增強並伴隨較明顯之震盪，此外，節點(或腹點)之頻率隨礁坪水深增高而移至較高頻。礁坪寬度也是一個重要因子，可進一步在後續研究中討論。數值試驗結果除了提供珊瑚礁漂沙與地貌特性一個蘊含，亦可應用於類似珊瑚裙礁地形之岩石海岸。

謝誌

本論文係科技部專題研究計畫「數值研究波浪於珊瑚裙礁之波譜變化」(編號 NSC 103-2218-E032-002)之部分研究成果，承蒙科技部經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. 蘇仕峯、梁茂昌(2011)「參數化碎波模式模擬颯風波浪通過珊瑚礁海岸之研究」，*第三十三屆海洋工程研討會論文集*，第 109-114 頁。
2. Bowen, A.J. and Huntley, D.A. (1984) Waves, long waves and nearshore morphology, *Marine Geology*, 60(1-4), 1-13.
3. Hardy, T.A. and Young, I.R. (1996) Field study of wave attenuation on an offshore coral reef, *J. Geophys. Res.*, 101(C6), 14311-14326.
4. Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.w. (1964) Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications, *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 11(4), 529-562.
5. Ma G., Su S.-F., Liu S. and Chu J.-C. (2014) Numerical simulation of infragravity waves in fringing reefs using a shock-capturing non-hydrostatic model, *Ocean Engineering*, 85, 54-64
6. Nwogu, O. and Demirbilek, Z. (2010) Infragravity wave motions and runup over shallow fringing reefs, *Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering*, 136(6), 295-305.
7. Péquignat, A.C.N., Becker, J.M., Merrifield, M.A. and Aucan, J. (2009) Forcing of resonant modes on a fringing reef during tropical storm man-yi, *Geophys. Res. Lett.*, 36(3), L03607.
8. Pomeroy, A., Lowe, R., Symonds, G., Van Dongeren, A. and Moore, C. (2012) The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C11), n/a-n/a.
9. Roeber, V. and Cheung, K.F. (2012) Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments, *Coastal Engineering*, 70(0), 1-20.
10. Sheremet, A., Kaihatu, J.M., Su, S.F., Smith, E.R. and Smith, J.M. (2011) Modeling of nonlinear wave propagation over fringing reefs, *Coastal Engineering*, 58(12), 1125-1137.
11. Shi, F., Kirby, J.T., Harris, J.C., Geiman, J.D. and Grilli, S.T. (2012) A high-order adaptive time-stepping tvd solver for boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation, *Ocean Modelling*, 43-44(0), 36-51.
12. Symonds, G., Huntley, D.A. and Bowen, A.J. (1982) Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint, *J. Geophys. Res.*, 87(C1), 492-498.
13. van Dongeren, A. et al. (2007) Shoaling and shoreline dissipation of low-frequency waves, *J. Geophys. Res.*, 112(C2), C02011.
14. Yao, Y., Huang, Z., Monismith, S.G. and Lo, E.Y.M. (2012) 1dh boussinesq modeling of wave transformation over fringing reefs, *Ocean Engineering*, 47(0), 30-42.