

台灣二〇〇五年國際科學展覽會

科 別：地球與太空科學

作品名稱：在浪碎之前

得獎獎項：大會獎佳作

學 校：高雄市立左營高級中學

作 者：簡伶縈、蔡淑君

評語與建議事項：

本作品利用簡單的水槽，配合攝影及影像分析，研究海邊常見的岸邊浪碎之前的變化，初步解釋及與理論公式的比較頗為有趣，作品十分適合作者的程度。

作者簡介

我叫蔡淑君，高雄縣人，住在幸福的小窩裡，目前就讀左營高中，平常沒事喜歡打打球、看漫畫（最喜歡的是一部叫「天生妙手」的醫科漫畫，超好看的！）還有上網唱歌或聽歌、看韓劇、煮飯……。在高中課程中獨愛數學，喜歡思考問題，尤其在解出謎題時，非常開心。雖然長相平平，也不太會打扮，但是生活依舊精采多姿。以後想學釣魚、煮家常菜、夜市裡的 BB 彈打氣球，未來的路還很長，我會繼續努力的。

我是個活潑外向的女生，我的名字叫作簡伶縈，極附正義感，是個路見不平拔刀相助的女孩，住在甜美幸福的窩裡，目前就讀高雄市立左營高中，家中有親愛的爸爸、媽媽以及疼我的姊姊，雖然不是很富有，但天天都過的很快樂、充實。本身興趣也很廣泛，例：繪畫、唱歌、電影欣賞、聽音樂、作手工藝品...，喜愛追求一些新事物，不想只是停留在前人的腳步，更喜歡獨立思考及探索一些問題，未來的路還很長，我會朝著標竿邁進的。



左簡伶縈右蔡淑君

在浪碎之前

摘要

本研究以模擬實驗探討波浪在斜坡海灘上的行爲。實驗在長1.8公尺、寬0.75公尺的透明水波槽中進行，以長0.90公尺、寬0.60公尺的木板在深水區產生單峰波向淺水區前進，同時以數位錄影機錄影後進行分析。結果發現單峰波由深水進入淺水，波速會變慢，但當波高對水深的比值增加到一定值時，波速隨水深變淺而變快，波高也變高。當比值繼續增加，波前方的水面形成垂直的水牆，接著波就碎了。如果坡度較緩，碎波點會離水岸線較遠，水牆維持的時間也較長。有趣的是，水波槽中的單峰波移動時，有蠕動現象，波寬會伸縮，波高會起伏，波速也會些微地忽快忽慢。

Before Wave Breaking

Abstract

This study simulates the behavior of the wave on a sloping beach. Experiments are performed in a sloping wave tank. A paddle wave maker at the deeper end generates single crest waves. To analyze the wave height, speed and breaking point, a digital camera is used. The results show that when the wave moves toward the coast, the shallower the water is, the slower the wave moves. But when the ratio (wave-height/water-depth) exceeds a critical value, it turns out that when the water is shallower, the wave speed becomes faster and the wave height, higher. As the ratio keeps on increasing, the front part of wave becomes a vertical water-wall, and then breaks. If the slope is gentler, the breaking point will be farther from the coast and the water-wall will keep for a longer time. An interesting phenomenon is also found that a single crest wave squirms with slightly undulated changing of width, height, and speed while it propagates in the sloping wave tank.

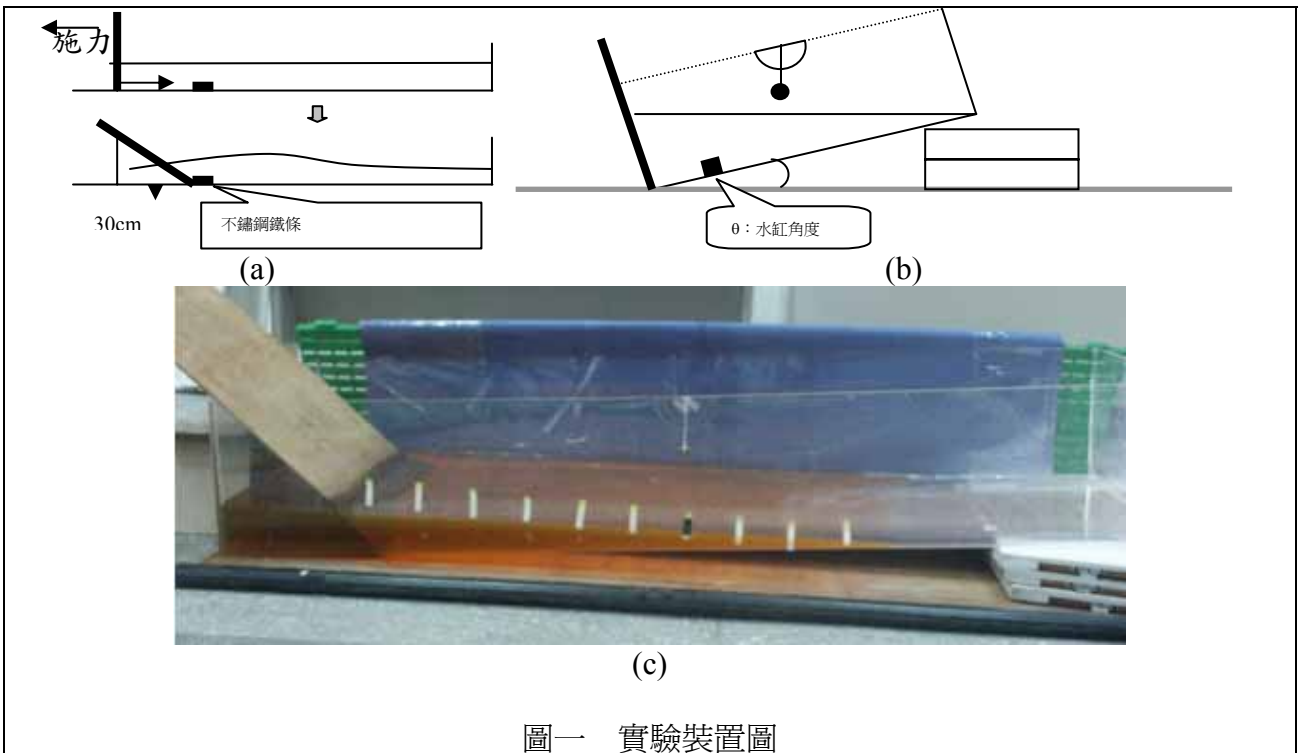
壹、前言

波浪的行爲變化莫測，令人著迷，對人類的影響也很深遠。小如海邊一波波的海浪，沖刷著沙灘，撞擊著岩石，激起陣陣浪花，也帶來或但走積砂，進行侵蝕或沉積作用。大如海嘯，平靜的海面，突然湧起高大的水牆，衝向陸地，釀成巨大的災害。然而大海浪有時可以溫柔得適合衝浪，有時卻凶狠地奪走釣客的性命如瘋狗浪。是什麼樣的機制影響著波浪的行爲？

本研究以模擬實驗來探索斜坡海灘上，向岸邊運動的波浪，由深水進入淺水區時，波速、波高、及波形的變化，找出其與水深的關係。並探討影響浪碎位置與水牆產生的因素。

貳、研究方法與過程

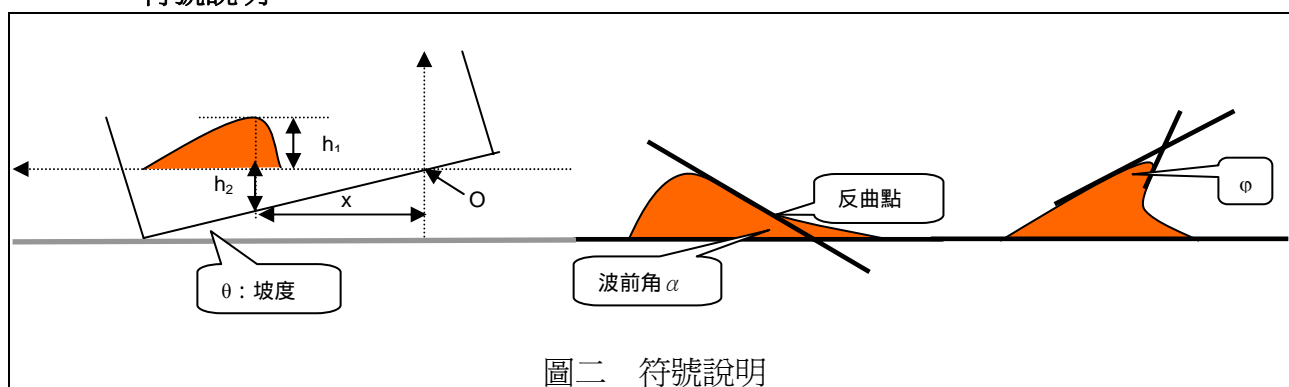
實驗在長180cm、寬75cm、高30cm 的透明壓克力水波槽進行，水深4cm。水波槽一端以木塊墊高形成斜坡，斜度可由木塊數調整。在深水區的一端以長90cm，寬60cm的木板推水作為產生波浪的工具，並在距離側面30cm處的槽底黏上不鏽鋼條限制推水板的運動。為了方便觀察，把水染成紅色。水槽外貼上量角器，以綁著小鐵塊的棉線顯示斜坡角度。另沿著水平水面貼上刻度尺，方便做比例換算。波浪的運動過程，以數位攝影機(DVC)記錄，為了避免視差，DVC正對水波槽，架在水平面上。錄下的波浪運動影片利用軟體「會聲會影6」，每1/30秒擷取一張畫面。每一組影片開頭均有一張靜止的水面，作為基準。畫面以單槍投影機投射在貼有方格紙的牆壁上進行分析，本研究的實驗均以木板推水產生單峰波，並以波的最高點來計算波速與波高。實驗裝置如圖一。



圖一 實驗裝置圖

參、研究結果與討論

一、符號說明



本研究使用的符號說明如圖二。

1. 波高 h_1 ：波的最高點到靜止水平面的垂直距離。
2. 水深 h_2 ：波的最高點對應水平面到水缸的垂直距離。
3. 大波浪： $h_1 \geq h_2$ 的波。
4. 小波浪： $h_1 < h_2$ 的波。
5. 波前角 α ：反曲點之後的曲線延伸與水平面的夾角。
6. 水牆：波前角 α 為 90° 時。
7. 碎浪：波前角 α 大於 90° 時的波浪。
8. O點：水平面與陸地的交界點，也是座標的參考點。
9. 波浪位置(x)：最高點到O點的水平距離。
10. 坡度(θ)：水波槽底部與地面的夾角。
11. 波尖銳度： ϕ 越小，波尖銳度越大。

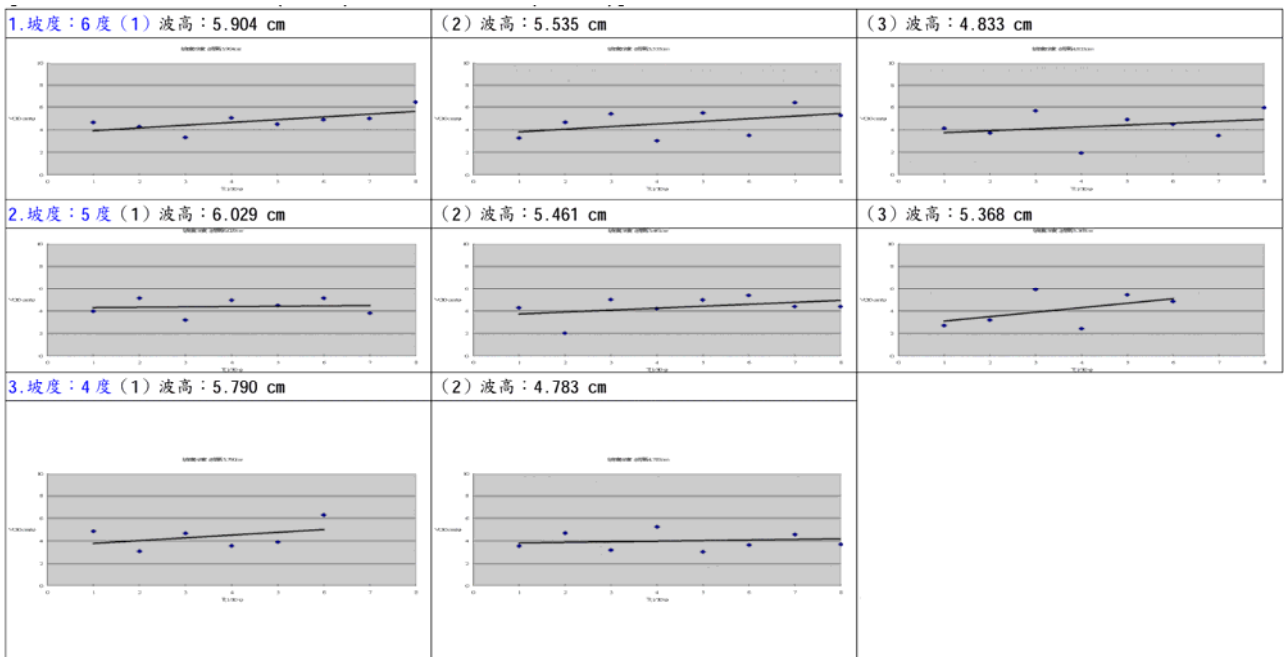
二、浪從深水區進入淺水區的波速變化

圖三為大波浪從深水區進入淺水區的波速 V 對時間 T 的關係圖，結果顯示無論施予能量的多寡，以及坡度的緩與陡，波浪由深水進入淺水區時，速度皆有增快的趨勢。這與由教科書學得的「淺水區波速較慢」的認知不合。為了找出變快的因素，把本實驗的波與以往物理實驗的波做比較，結果發現本實驗波與以往物理實驗的波，最大的不同處在後者的波高遠小於水深，而前者的波高大部分都超過水深。所以繼續做了波高小於水深的實驗，結果如圖四。

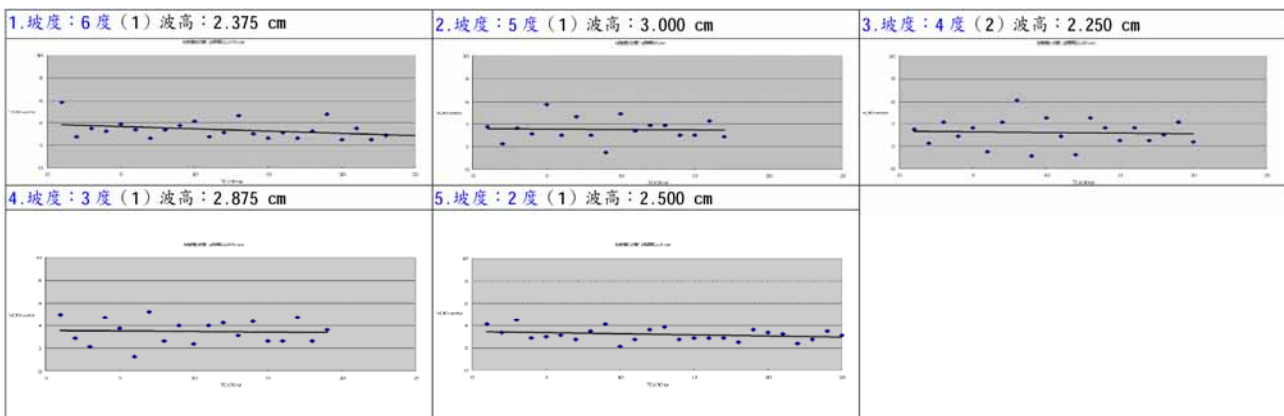
三、浪從深水區進入淺水區的波速變化

圖四顯示波高在還未超過水深時，波速有漸慢的趨勢，而且波高越小這個趨勢越明顯。因此推測當波高比水深小時，單峰波的波速隨水深減少而變慢；當波高比水深大時，波速反而隨水深的變淺而增加。

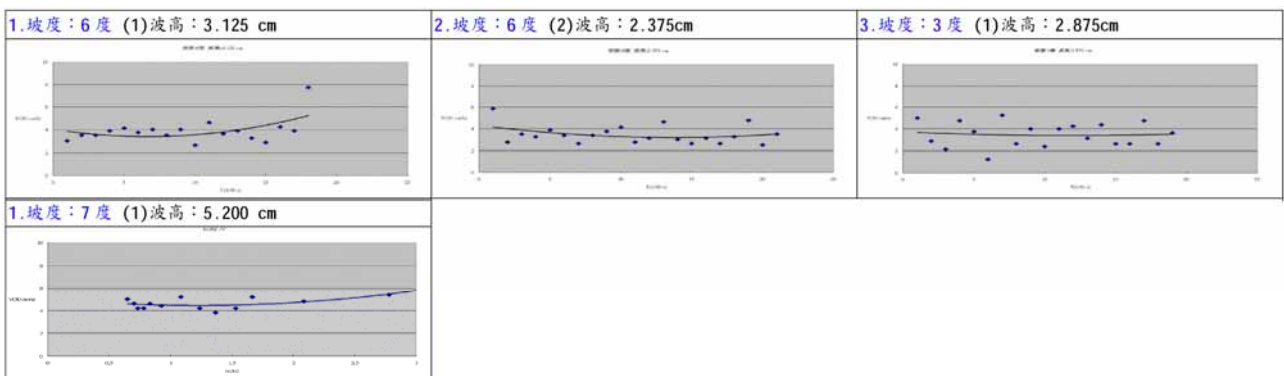
圖五可以用來佐證這個觀點，加上 $h_1 > h_2$ 時的數據點來作圖，波速的變化趨勢反而是漸慢再漸快。分析連續波形圖(如圖九)，以及圖五中波速開始變快的點，結果發現這些點 h_1/h_2 的值都介於0.8到1.5之間。



圖三 大波浪從深水區進入淺水區的波速 V 隨時間 T 漸增



圖四 小波浪從深水區進入淺水區時波速 V 隨時間 T 漸減

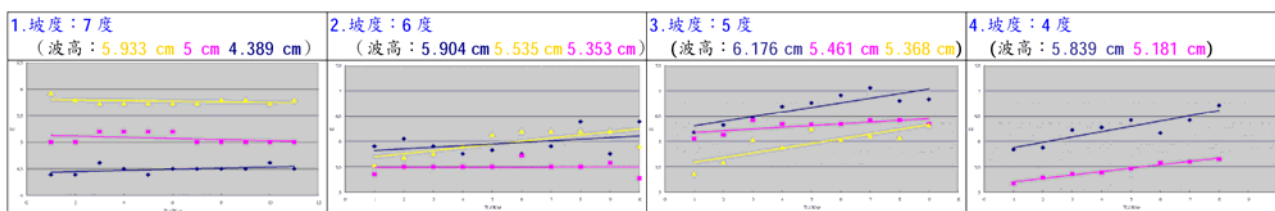


圖五 波浪從深水區進入淺水區時波速先減後增

由這以上的探討得知，一個單峰波由深水進入淺水，當 h_1 未超過 h_2 時，波速有漸慢的趨勢，這符合一般的認知、以及教科書的記載，但是後來，波速有漸快的趨勢，直到波碎。波速受 h_1/h_2 影響。

四、波浪從深水區進入淺水區的波高變化

圖六顯示大波浪從深水區進入淺水區時，波高呈線性增加，而且坡度越小越明顯。不過仔細觀察，可以發現波高有上下起伏的現象。

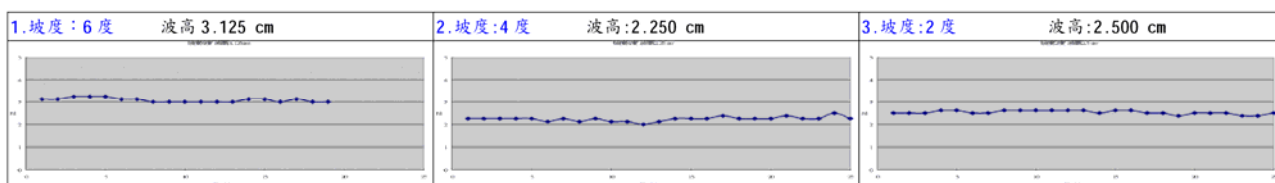


圖六 大波浪由深水進入淺水區波高 h_1 隨時間 T 漸增

五、波浪從深水區進入淺水區的波高變化

圖七顯示小波浪的波高有微小的周期性起伏，我們懷疑它與波速的跳動現象有關。

綜合上述，波浪由深水進入淺水，一開始波高沒有明顯變化，後來則越來越高。當 $h_1/h_2 \geq 1.5$ 後，坡度越緩，波高變化率越大。

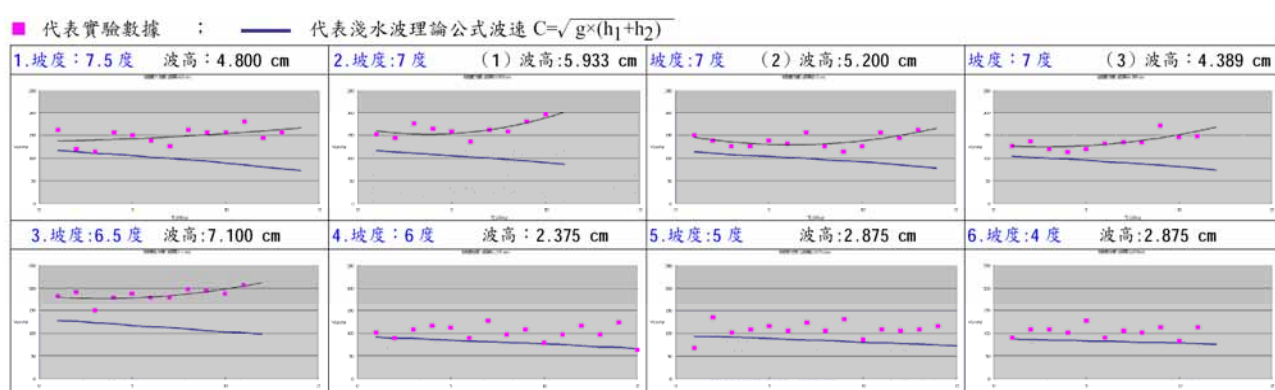


圖七 小波浪由深水進入淺水區波高 h_1 隨時間 T 漸增

六、淺水波理論公式比較

將實驗結果與淺水波理論公式比較(如圖八)發現：

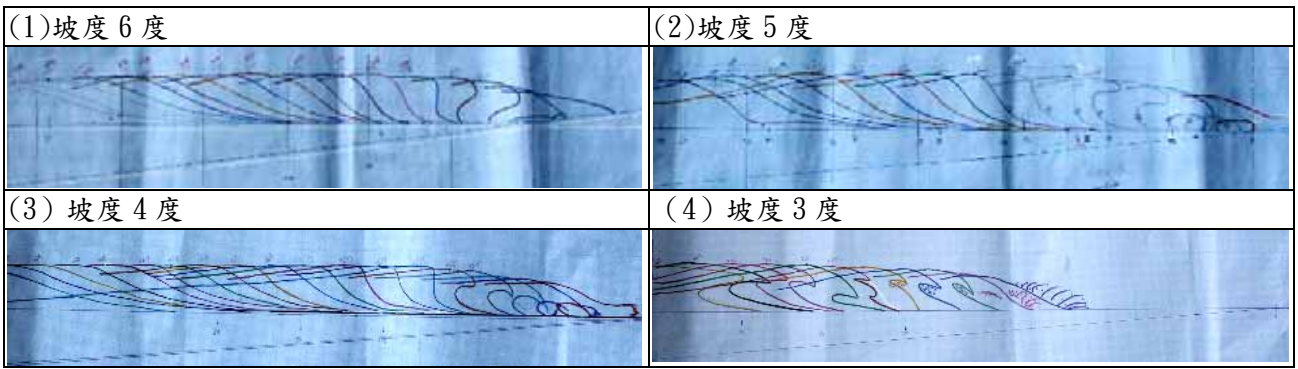
- 1.波高越小， h_1/h_2 值越小，越吻合淺水波波速公式 $C=\sqrt{g \times (h_1+h_2)}$ 。
- 2.淺水波波速公式預測波速隨水深減小而變慢，與實際觀察到的波速越來越快，並不吻合。
- 3.實際的觀測值高於理論值， h_1/h_2 越大，差距越大。



圖八 波浪由深水進入淺水區時，實測波速與淺水波理論公式的比較

七、大波浪從深水進入淺水區時的波形變化

圖九是每格 1/30 s 擷取一張圖片，疊畫在方格紙上，結果發現碎波依 Galvin 的分類，當坡度在 6 度時，形成湧波，5 度時為潰波，4 度時為捲波，3 度時則接近溢波。同時可看出前面的波很密集，後面很疏鬆，表示波速變快。而且坡度越緩，波變形後的尖銳度越大，水牆維持較久，且形成水牆的位置距離岸邊越遠(圖十)。

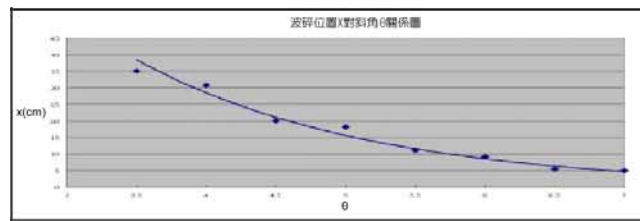


圖九 波浪從深水進入淺水區時的波形變化

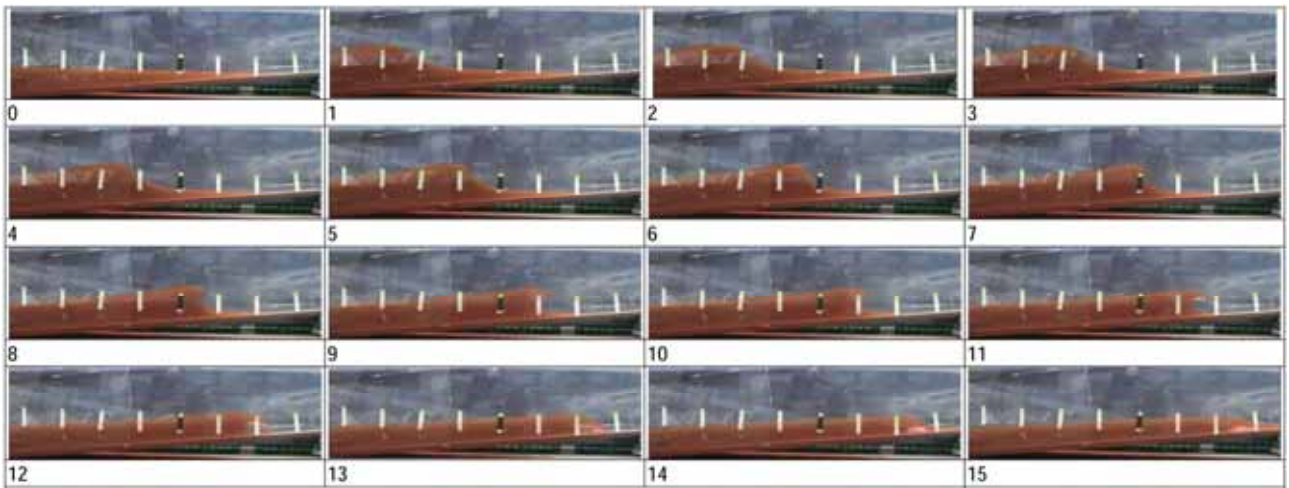
圖十一為大波浪在坡度 5 度的斜坡上運動的連續影像。圖十二為波前角 α 的變化情形，由趨勢圖可以發現，坡度較陡時，波前角會慢慢變成 90° ，而坡度較緩，波前角會突然變成 90° ，也就是突然就形成了水牆。

綜合上述，可以知道坡度較緩時，波浪進入淺水區，會在離岸邊較遠就碎掉，但是會突然就變成水牆，而且維持很久。

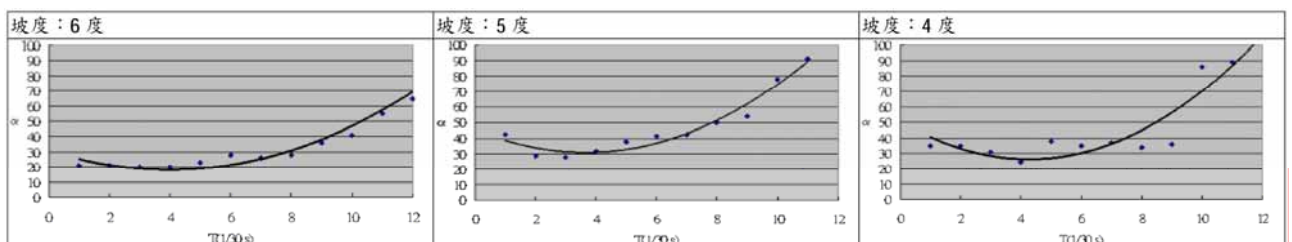
不過仔細觀察，我們發現波前角 α 也有上下起伏的現象。



圖十 坡度越緩波碎位置離岸越遠



圖十一 大波浪由深水進入淺水區的波形變化(坡度五度)



圖十二 波浪由深水進入淺水區時波前角的變化

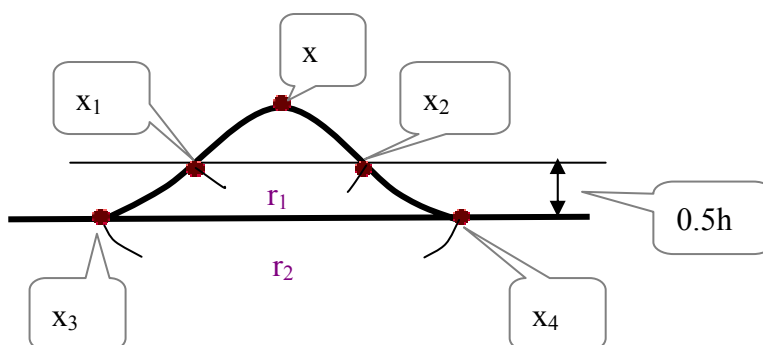
八、產生水牆的位置與波高水深比(波高 h_1 /水深 h_2)的關係

表一 水牆產生位置 x 與波高水深比(h_1/h_2)

水牆	3.5°	3.5°	3.5°	4°	4°	4°	4.5°	4.5°	5°	5°	5°	5.5°	5.5°	6°	6°	6°	水牆	3.5°	4°	4.5°	5°	5.5°	6°	6.5°
X(cm)	38.00	33.75	33.50	31.50	31.50	29.69	19.75	20.44	16.75	19.00	18.81	11.75	10.50	8.50	7.94	10.86	X(cm)	35.08	30.90	20.09	18.19	11.13	9.10	5.38
h_1	3.44	3.38	3.13	3.50	3.25	3.25	3.25	3.13	3.13	3.13	2.945	2.63	2.56	2.75	2.50	3.43	h_1	3.31	3.33	3.19	3.06	2.59	2.89	2.63
h_2	2.44	2.38	2.38	2.38	2.31	2.25	1.88	2.00	1.88	2.00	1.94	1.63	1.56	1.38	1.38	1.43	h_2	2.40	2.31	1.92	1.94	1.59	1.39	1.13
h_1/h_2	1.41	1.42	1.32	1.47	1.41	1.44	1.73	1.56	1.67	1.56	1.52	1.62	1.64	2.00	1.82	2.40	h_1/h_2	1.38	1.44	1.65	1.58	1.63	2.07	2.33

由表一得知，坡度相同時，波高越高，形成水牆的位置距離水陸交界點越遠，且無論波高如何，形成水牆時的 h_1/h_2 值會很相近。坡度不同時，坡度越緩，形成水牆的位置距離岸邊越遠。形成水牆時，坡度越陡， h_1/h_2 的值越大。

九、單峰波運動的蠕動現象



圖十三 向左運動的單峰波符號說明

為了比較一個單峰波在波峰和其他位置的速度有什麼不同，就在波上取幾個代表性的位置(如圖十三)：

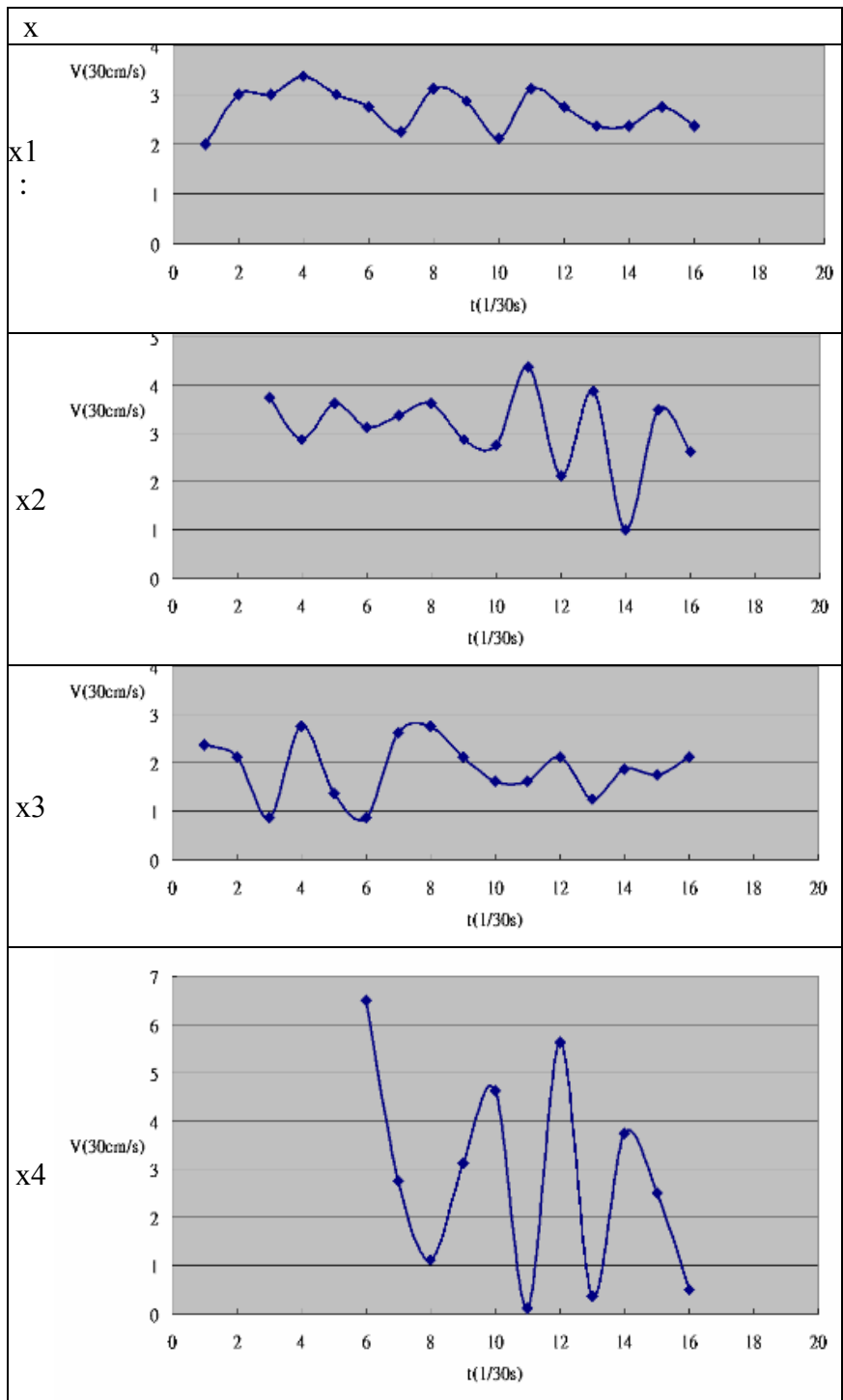
1. 波峰與水平面垂直距離的一半取點 x_1 (波前方)及 x_2 (波後方)；
2. 取水平面上剛隆起的點 x_3 (波前方)與 x_4 (波後方)；
3. x_1 到 x_2 的距離定為 r_1 ， x_3 到 x_4 的距離定為 r_2 。

圖十四為在 6 度斜坡上運動的單峰坡五個特定點的速度對時間關係。比較 x 、 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 發現：

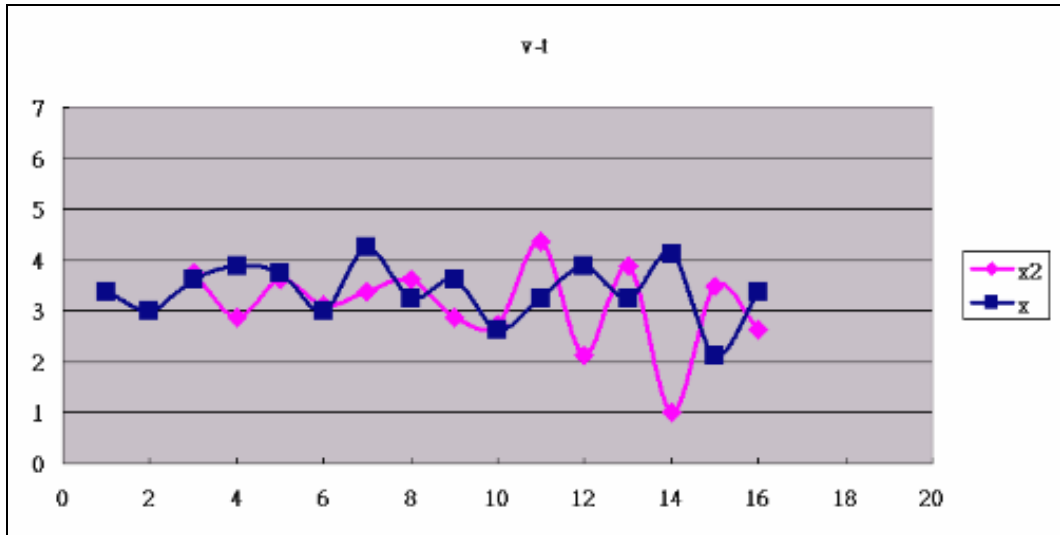
1. x_2 的速度隨水深變淺，上下起伏就越厲害；而 x_3 的速度隨水深變淺，上下跳動由劇烈轉為平穩。
2. x 的速度變化則較穩，以跳動起伏來看是 $x_4 > x_3 > x_2 > x_1$ 。
3. x_2 的速度變化與 x 交錯，一快一慢(如圖十五)。
4. x_3 的速度大部分都小於 x 的速度(如圖十六)。
5. 越接近岸邊， r_1 、 r_2 皆會縮短(如圖十七)。

綜合以上幾點：

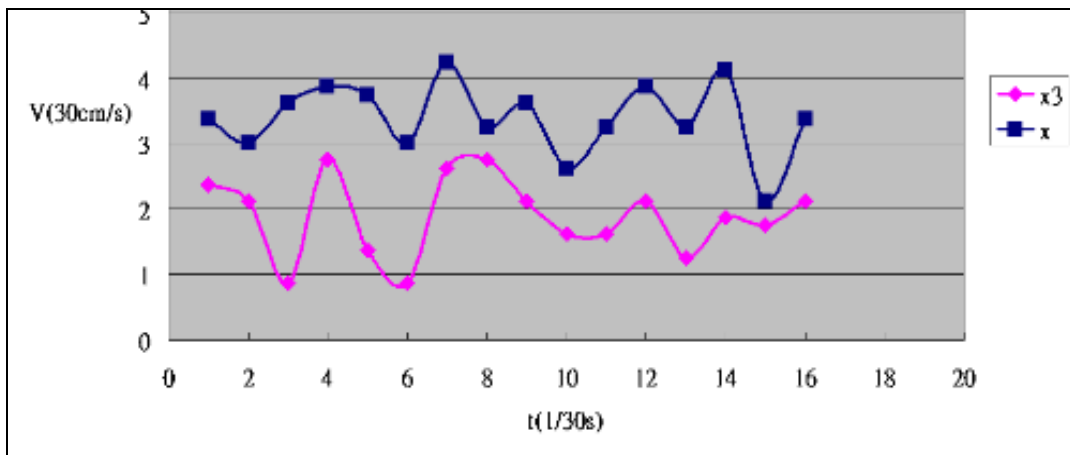
一個單峰波由深水進入淺水區，它的波速不是平滑的增加或減低，而是略有上下起伏的現象，尤以當波峰與 x_2 的速度交錯時，一快一慢，伸縮更明顯，更能具體證實本研究中單峰波前進時的蠕動現象。



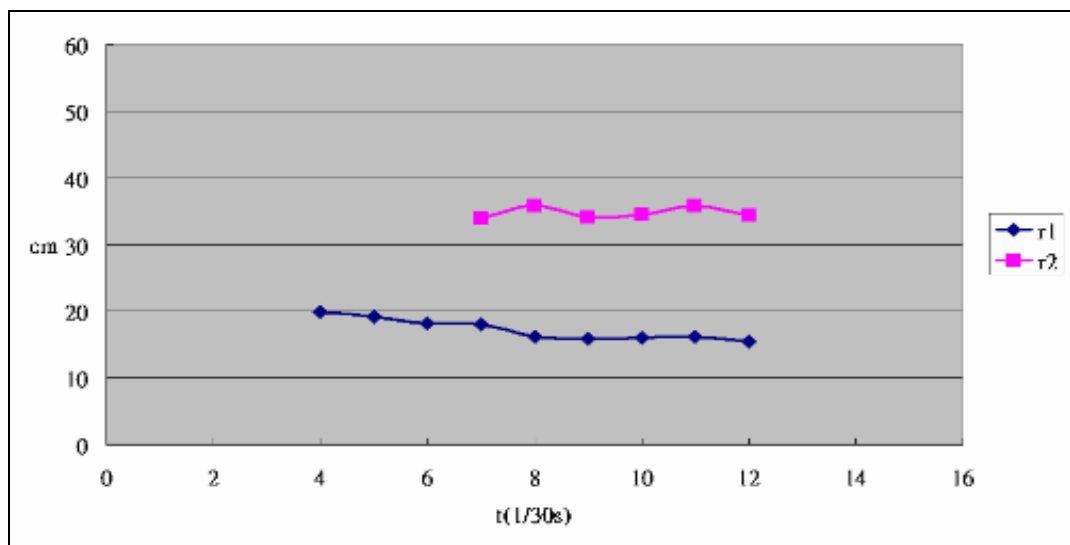
圖十四 單峰波五個特定點的速度對時間關係(坡度 6 度)



圖十五 單峰波波峰x與波前方半高點x₂的速度對時間關係(坡度 6 度)



圖十六 單峰波波峰x與波後方半高點x₃的速度對時間關係(坡度 6 度)



圖十七 單峰波波寬 r1 與半高寬 r2 對時間關係(坡度 6 度)

肆、討論

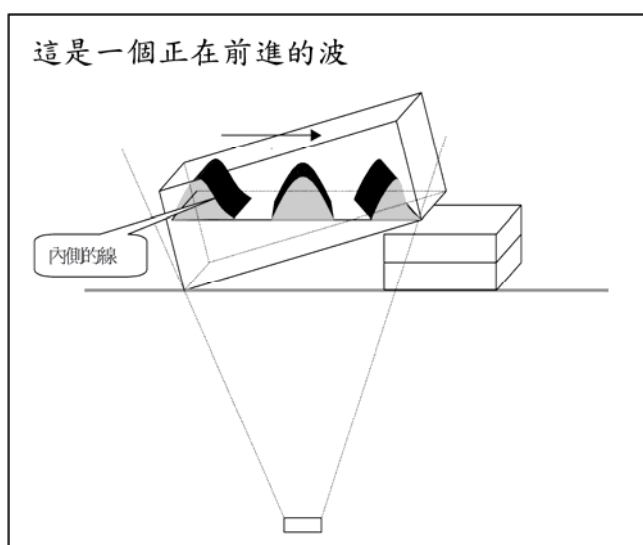
波前進的蠕動現象可以說明何以本研究的實驗數據圖的點看似雜亂的分佈。如圖十八，

從擷取的畫面中，可以看見波底較短的波由深水進入淺水，並不是很平滑的移動，而波底會有內縮及外擴的現象忽快忽慢的變化，波高也會上下起伏。波底分布較廣者變化較不明顯。我們懷疑可能是受液體粘滯係數、表面張力及慣性的緣故。



圖十八 一個小單峰波傳播時的蠕動現象(波由右向左)

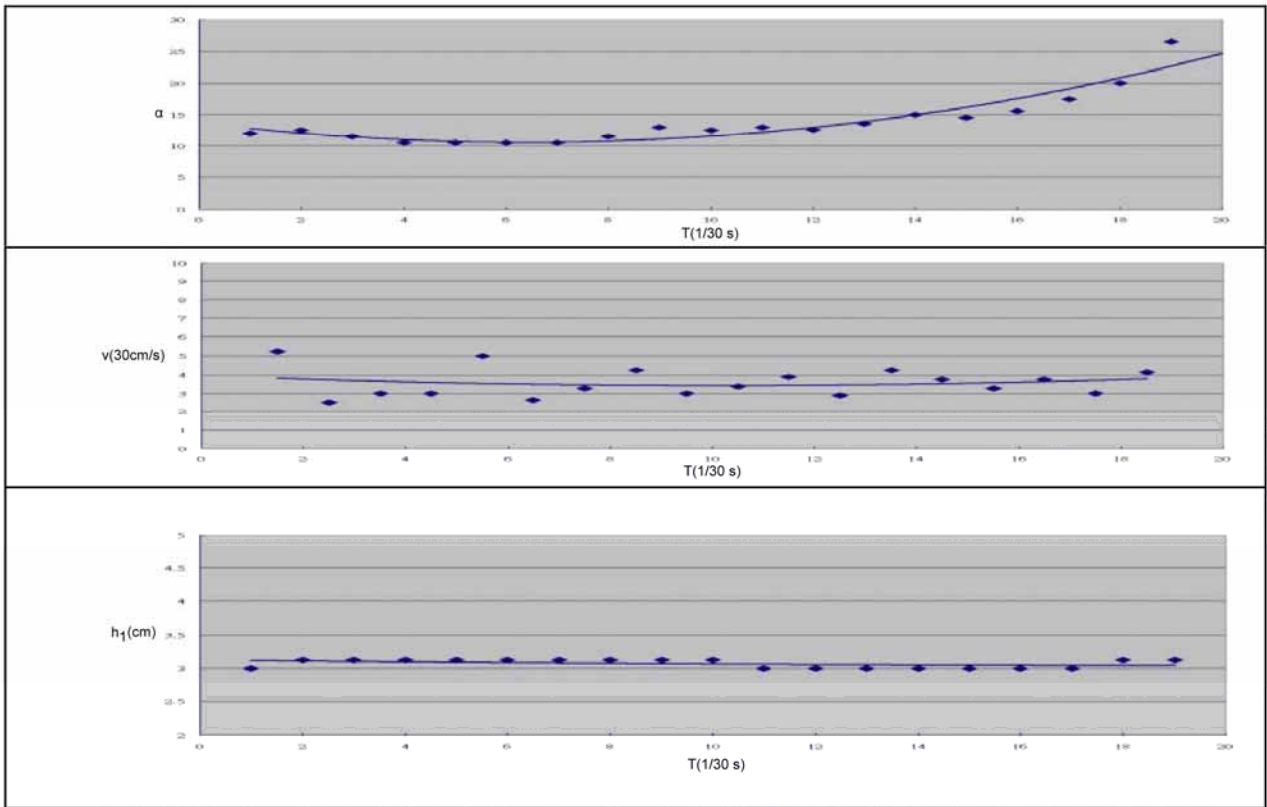
本實驗中波浪運動並非錄全程的影像，而只錄後半部分或前半部分。原來一開始我們是將 DVC 擺在遠一點的地方錄，這樣就可以錄到全部，但是畫面越遠就越小，在電腦上放大，整個畫面就顯得模糊不清，最重要的是，有角度上的問題(如圖十九)，這樣擷取的畫面不易辨識內側的線，波看起來就不切實際，所以沒辦法錄全程。



圖十九 錄影時視野太大會有視差問題

伍、結論與應用

在本研究中，我們可得知，一個單峰波在斜坡海灘上由深水進入淺水區，其波速受 h_1/h_2 影響，一開始 $h_1 < h_2$ 時，波速有漸慢的趨勢；當 h_1/h_2 在 0.8 至 1.5 時，波速開始轉為漸快的趨勢，直到形成碎浪。波高在尚未大於水深之前，幾乎沒有什麼明顯的變化，後來會漸漸增高。坡度越緩，波高變化率越大，且波變形後的尖銳度越大。坡度越陡，波前角會慢慢變成 90 度，而坡度較緩，波前角會突然變成 90 度，也就是突然就形成了水牆。坡度相同時，波高越高，形成水牆的位置距離水陸交界點越遠。坡度越緩，水牆維持較久，且形成水牆的位置距離岸邊越遠。實驗中曾經觀察到大波浪在還未變成水牆之前，就已在岸邊產生退潮現象。實驗結果顯示波浪的移動有蠕動現象，波寬會伸縮，浪高也會起伏，波速也會些微地忽快忽慢。圖二十顯示波前角、波速及波高的變化。



圖二十 斜坡上的波傳播時波前角 α 、波速 v 及波高 h_1 對時間 T 的關係

本研究結果，可以作為適合衝浪地點選擇的參考，適合衝浪的地點海灘必須斜坡平緩，如果稍陡碎浪持續的時間太短；也不能太緩，如此無法形成適合衝浪的捲浪。本研究結果也可作為預測可能受瘋狗浪或海嘯危害的地形條件的參考，如果是陡峭的海岸，則不會形成水牆，如果比適合衝浪的海灘稍陡，則就有可能在浪碎後形成潰浪或湧浪，而且浪碎的位置距離海岸較近，波高短時間增高，能量瞬間釋放而造成災害。

柒、參考文獻

- 許明光（1996）：台灣及其鄰近地區之海嘯研究，台灣海洋學刊，35(1)，1-16
 許明光、曾俊超、高家俊（1993）：台灣地區「瘋狗浪」之調查及成因初探，中華民國第十五屆海洋工程研討會論文集(<http://sun4.coe.ntou.edu.tw/research/lgswell/papero3/>)
 許泰文（2003）：近岸水動力學，台北市:科技圖書
 郭金棟（2004）：海岸保護，台北市:科技圖書
 莊姿君（1997）：「瘋狗浪」，科學月刊，326
 蔡政翰（1996）：什麼是瘋狗浪及如何避其害，台灣釣魚，126，33-35
 Goumilevksi, A., Cheng, J. Y. & Chahine, G. L., “Wave Breaking on a Sloping Beach: Comparism Between Experiments and Simulations”, 2004 取自 <http://www.dynaflow-inc.com/>