

摘要

當海底發生地震，或海底山崩塌，海水便被抬升或崩塌，因此在短時間內獲得大量位能，轉成爲海水的動能向四面八方傳遞，這就是海嘯。我們以基隆港爲模型，海底坡度 1：10，藉由實驗發現水波在寬闊水域由較深區域進入較淺區域，波高(波峰與波谷的距離)並不會出現太大的不同，然而一旦水波進入狹窄的港區，能量在灣內累積，波高就大幅增加，比例可達 55%。當波谷先抵達岸邊時，會造成海水後退、水位大幅下降甚至露出海底的情形。在我們的實驗中，代表海底的斜板露出的距離最大約 14 公分(坡度 1：10)，佔小水槽長度的 28%。若改變斜板與水槽底部的角度，斜板露出的距離也會改變，當 $\theta = 10^\circ$ ，即坡度 175：1000 時斜板露出距離最長。

壹、研究動機

海嘯 — 令人怵目驚心的大自然力量。

2004 年 12 月 26 日於南亞發生了舉世震驚的大海嘯，死亡與失蹤人數逼近卅萬人(路透社)。爲什麼會發生海嘯呢？海嘯在南亞造成這麼大的生命財產損失，我們不禁想到台灣：台灣會不會發生海嘯呢？於是我們以我們的家鄉爲主，去查了「基隆」歷年海嘯的記載，發現基隆在 1876 年也曾經發生過一次大海嘯，海嘯來臨前港區內的海水好像瞬間被「吸乾」一樣，基隆港底部都露出來了，船隻也落到港底。我們感到很好奇：爲什麼海水會瞬間退走呢？基隆會不會再次發生海嘯呢？因此想做關於海嘯的科展。

貳、研究目的

我們查了資料，發現引發海嘯的因素有彗星或隕石撞擊地球、海底山崩塌、海底地震等等，因為台灣多地震，所以我們把研究鎖定在海底地震與海嘯之間的關係。我們想了解：

- 一、 怎樣的海底地震會引起海嘯？
- 二、 怎樣的海嘯會把沿岸海水吸到外海？
- 三、 海嘯波在較深水區和較淺水區的波浪高度有何不同？
- 四、 海底坡度對海底露出的距離有何影響？
- 五、 海嘯由寬闊水域進入港灣後的表現有何不同？

參、使用設備及器材

複合式水槽、大小斷層模型各一、水砂紙、皮尺、塑膠繩。

爲了要模擬海水運動的情況，我們設計了一個複合式水槽(圖一、圖二)，由一大一小兩個水槽組合而成，大水槽長二公尺，寬、高各一公尺，用來進行相同深度的水波實驗，和觀察水波由較深的區域進入較淺的區域時波高的改變。使用時以閘板跟小水槽分開。小水槽長一公尺，高半公尺，寬 25 公分，用來觀察海嘯波進入港灣和狹窄水域的表現。使用時另有兩片彎曲的木板作爲兩翼，模擬港灣的形狀。



圖一 複合式水槽外觀



圖二 複合式水槽

水槽製作的同時，我們也物色適合的材料當作我們的斷層。由於水槽相當大，斷層模型如果太小就做不出水波的效果，我們試過用磚頭，但是效果不好，也想過自己做模型然後灌水泥進去，或者用鋼材製作，這些都因為費用的問題而被我們淘汰。最後我們跟學校總務處借水溝蓋當作斷層模型(圖三)。



圖三 權充斷層模型的大小水溝蓋

大的水溝蓋(下稱大斷層模型)長 30 公分，寬 28 公分，厚 7 公分，重量 19.7 公斤；小的水溝蓋(下稱小斷層模型)長 30 公分，寬 25 公分，厚 8 公分，重量 11.7 公斤。在斷層模型上綁好塑膠繩，模擬斷層抬升時直接用手把模型往上拉，盡量保持各次實驗的上提速率相等。另外爲了模擬斷層沉降，我們將四張廢棄的書桌兩兩疊在一起，放在水槽兩側，在桌面上各釘兩根釘子，把鋁製伸縮棒放在桌面上兩根釘子中間當轉軸(圖四)。操作時把斷層模型上的繩子捲在伸縮棒上，直到斷層模型頂部與水面齊高，以手握住伸縮棒固定繩子，待水靜後使模型自由落下。



圖四 簡易懸吊系統

肆、研究過程與結果

一、 蒐集資料，學習相關知識：

我們從文獻中知道，海底地震造成的斷層垂直活動（正斷層或逆斷層）會改變斷層上方海水的重力位能，然後重力位能會轉成海水的動能，之後往四面八方傳播出去，形成海嘯。相關資料蒐集好，就開始學習相關知識，如正斷層、逆斷層、能量轉換等等，為我們的研究作準備。

二、 研究過程

我們進行的實驗說明如下：

（一） 模擬斷層斷層錯動引發海水垂直運動。

首先我們以大斷層作為起波器製造海水垂直運動，以大的水波槽從水深 15 公分做起。

1. 將大斷層模型往下墜當作板塊沉降(高度與水面齊，圖五)，量測水波傳到大水槽另一端時最高和最低的水位。重複做三次求平均值。
2. 將大斷層模型往上拉當作板塊抬升（圖六），量測水波傳到大水槽另一端時最高和最低水位。重複做三次求平均值。
3. 換成小的斷層模型，重複前面的操作方式，記錄最高和最低水位。
4. 增加水深，以大、小斷層模型重複實驗，並記錄高低水位(圖六)。
5. 水深分別為 20、30、40、50 公分（圖七）。



圖五 大斷層沉降，使用
簡易懸吊系統



圖六 大斷層模型模擬板塊抬升



圖七 大斷層抬升後讀取數據



圖八 水深 50 公分的大水槽

(二) 觀察水波由較深區域進入較淺區域時的波高改變，並觀察水波近岸時海底是否會露出。

做完第一個實驗，我們把水放掉，然後加裝斜板。坡度是按照基隆外海大約一百公里內的平均水深變化(圖九)設定的，水平距離 100 公里時深度大約 1 公里，因此我們將坡度設為 1：10。將斜板墊高 8 公分，板厚 2 公分，長 50 公分，斜板上加釘水砂紙和皮尺(圖十，皮尺最小刻度為公厘)，方便觀測。水深由恰好漫過斜板開始，操作方法與第一個實驗相同，各重複三次求取平均值。



圖九 基隆外海等深線圖



圖十 大水槽加斜板，釘上水砂紙和皮尺

(三) 觀察不同海底坡度對海底露出距離的影響

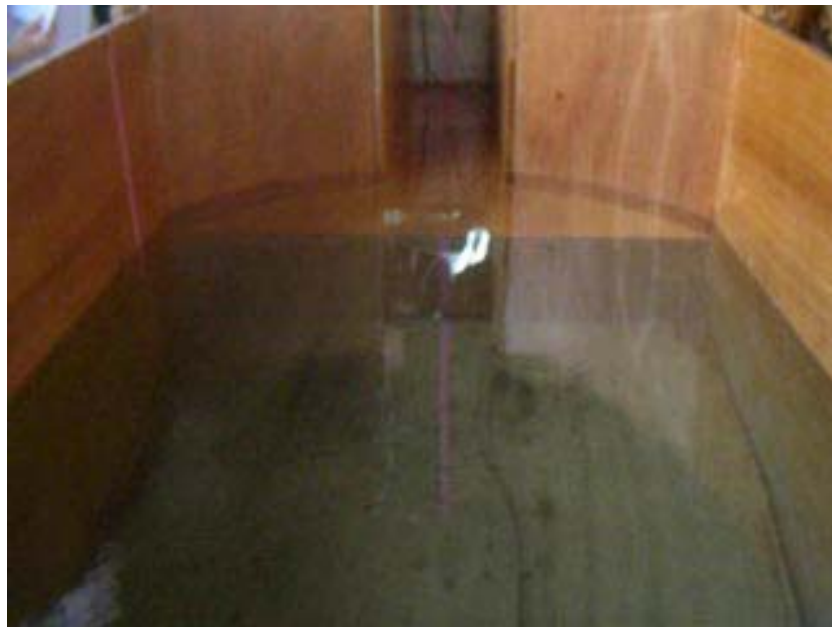
基隆港外海的海底坡度大約是 1：10，由 $\tan \theta \doteq 0.1$ ，求出 θ 大約為 6° 。若 θ 角度稍微增加一些，情況會如何呢？於是更改斜板

與底部的夾角來試試看。

我們在斜板與模型短邊接觸的一端下面墊磚塊，墊一個磚塊時 $\theta \doteq 10^\circ$ ，墊兩個磚塊時 $\theta \doteq 12^\circ$ ，墊三個磚塊時 $\theta \doteq 14^\circ$ ，我們用這三個角度重複實驗二的步驟，觀察海底露出距離的改變。

(四) 觀察水波由寬闊水域進入港灣內的表現。

前兩個實驗都只用大水槽，現在要把小水槽納入實驗。我們把閘板卸除，在小水槽也加裝斜板，並在斜板上釘好皮尺。小水槽的坡度也是 1 : 10，高度 5 公分，板厚 2 公分，長度 50 公分。水深由剛好漫過小水槽斜坡開始(圖十一)，操作方法與前面的實驗相同。



圖十一 複合式水槽，水深剛好漫過小水槽斜板

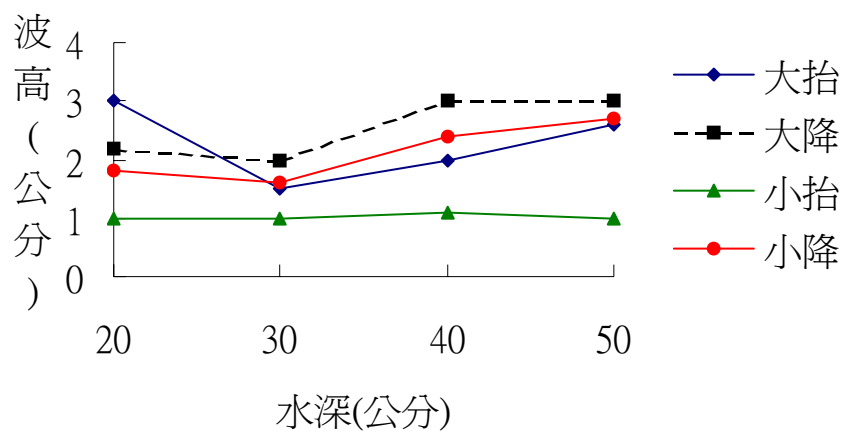
三、 研究結果與討論

1. 實驗一的數據如表 1-1 所示。

表 1-1 斷層運動造成的平均波高(單位：公分)

水深(公分)	20	30	40	50
大抬	3.0	1.5	2.0	2.6
大降	2.2	2.0	3.0	3.0
小抬	1.0	1.0	1.1	1.0
小降	1.8	1.6	2.4	2.7

圖1-1 斷層垂直運動造成的波高



圖中的「大抬」表示大斷層抬升，「大降」表示大斷層沉降，以此類推。

以下圖表中使用法相同。

我們進一步計算斷層垂直運動產生的位能，與獲得能量之水體的質量，並求出佔總水量的百分比，將結果作成表 1-2，以便進一步分析。

表 1-2 斷層產生之位能 (單位：J)、獲得動能量水質量及與總水量的比值

	水深(公分)	20	30	40	50
能量釋放	大斷層	25.1 J	44.4 J	63.7 J	83.0 J
	小斷層	13.8 J	25.2 J	36.7 J	48.2 J
	小/大	55%	56%	58%	58%
獲得能量之水體質量	大斷層	11.0 kg	19.0 kg	27.0kg	36.0Kg
	小斷層	9.0kg	17.0kg	24.0kg	32.0kg
	小/大	82%	90%	89%	88%

水深 30 公分時大小斷層垂直運動的波高非常接近。我們深入去探討原因，發現不管水深多少，小斷層垂直運動產生的位能約為大斷層的 55%~58%，這個比例相差不大，但是大小斷層所驅動的水體卻在 30 公分時最接近，達 90%，使得大小斷層水深在 30 公分時波高最接近。

我們發現不管是大斷層還是小斷層，沉降造成的波高都較大。小斷層抬升的波高不明顯，大約都只有 1 公分左右。斷層垂直運動所釋出的能量以 $E = mgh$ 求出， $h = (\text{水深} - \text{斷層厚度})$ ，由於抬升與沉降都以水面為基準，

因此兩種操作方式的 h 會相等。大斷層與小斷層質量相差近一倍(19.7kg 與 11.7kg)，但面積與厚度卻相差不多(大斷層 0.084m^2 ， 0.07m ，小斷層 0.075m^2 ， 0.08m)，因此大小斷層垂直運動時驅動的水量相差不多(小/大=82%~90%)，而大斷層移動產生的位能卻較大(小/大=55%~58%)，所以大斷層垂直運動造成的波高較高。

2. 實驗二的結果：

本實驗要測量水波在坡度 1：10 的海底($\theta = 6^\circ$)行進抵達岸邊時波高的變化，我們發現當水恰漫過斜板(水深 14 公分)，波谷到達岸邊時會將水捲離，以致斜板露出來。我們在斜板上釘了水砂紙和皮尺，測量斜板露出水面的距離，結果如表 2-1 所示。裝上斜板後大小斷層抬升與沉降造成的波高變化見表 2-2 到表 2-5。

表 2-1 坡度 1：10 斜板平均露出的距離

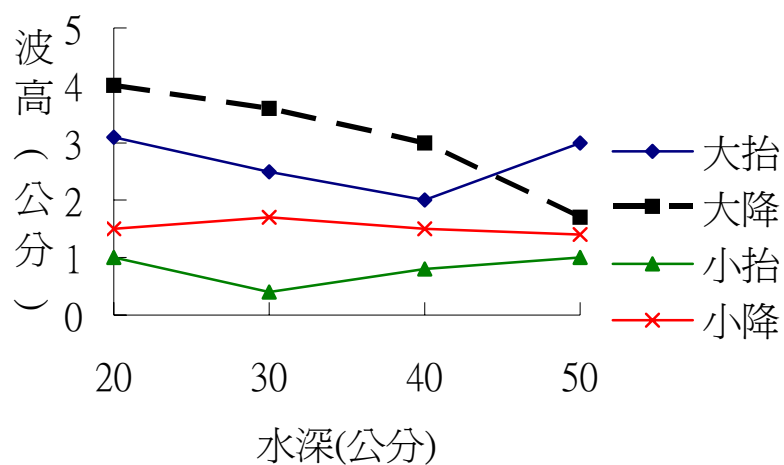
(單位：公分)

	抬升	沉降
大斷層	7.0	9.7
小斷層	3.7	4.7

表 2-2 坡度 1：10 斷層之平均波高(單位：公分)

水深(公分)	20	30	40	50
大抬	3.1	2.5	2.0	3.0
大降	4.0	3.6	3.0	1.7
小抬	1.0	0.4	0.8	1.0
小降	1.5	1.7	1.5	1.4

圖2-1 水波由較深水域進入較淺水域之波高變化



由圖 2-1 我們同樣發現不管斷層大小，沉降造成的波高都比較大。大斷層沉降所造成的波高有規律地隨水深增加而變淺，抬升部分也略有此趨勢，只在水深 50 公分時出現波高變高的情形。小斷層沉降的波高變化不大，抬升部分在 30 公分出現波高最小值。

做了以上的實驗之後，我們想知道裝斜板與不裝斜板對波高有何影響，所以將表 1-1 的結果拿來做比較，做成表 2-3、表 2-4、圖 2-2 與圖 2-3。

表 2-3 有無斜板對抬升時的波高影響(單位公分)

水深(公分)		20 公分	30 公分	40 公分	50 公分
大抬	無斜板	3.0	1.5	2.0	2.6
	有斜板	3.1	2.5	2.0	3.0
%(Δ 波高/水深)		0.5%	3%	0	0.8%
小抬	無斜板	1.0	1.0	1.1	1.0
	有斜板	2.8	2	1.6	1
%(Δ 波高/水深)		9%	3%	1.5%	0

圖2-2 有無斜板對抬升時的波高影響

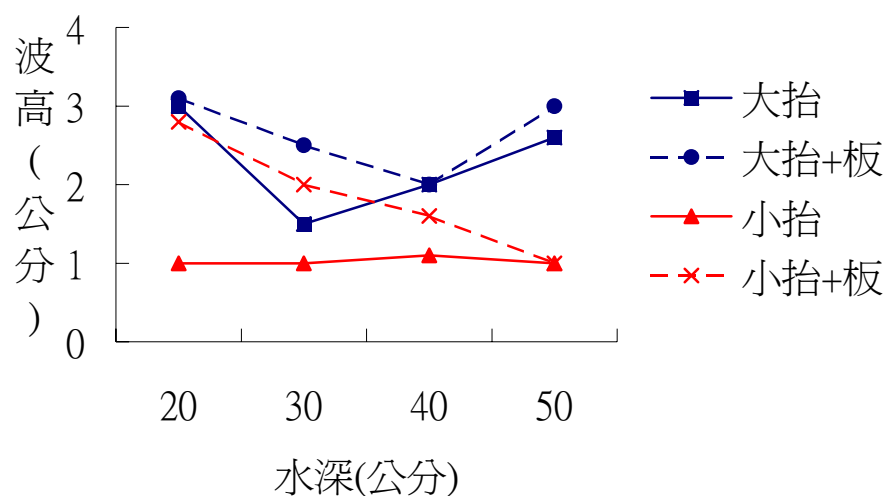
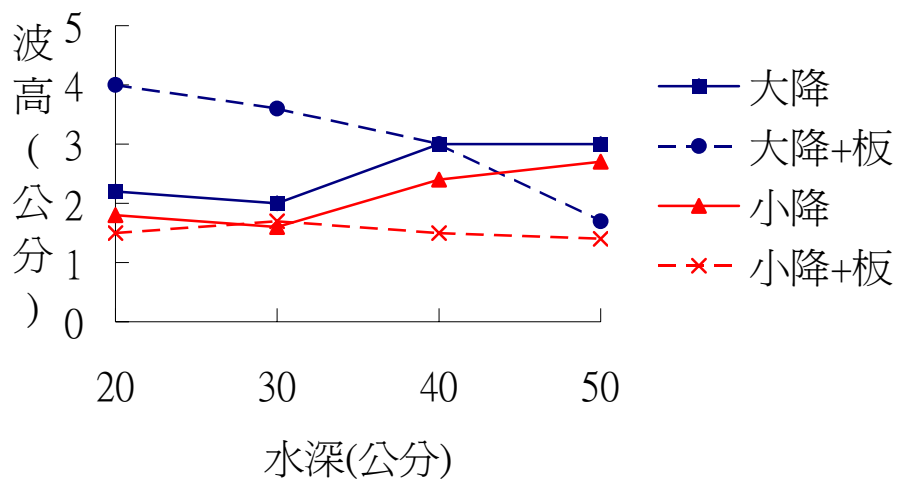


表 2-4 有無斜板對沉降時的波高影響(單位公分)

水深(公分)		20 公分	30 公分	40 公分	50 公分
大降	無斜板	2.2	2.0	3.0	3.0
	有斜板	4.0	3.6	3.0	1.7
%(Δ 波高/水深)		9%	5.3%	0	-2.6%
小降	無斜板	1.8	1.6	2.4	2.7
	有斜板	1.5	1.7	1.5	1.4
%(Δ 波高/水深)		-1.5%	0.3%	-2.3%	-2.6%

圖2-3 有無斜板對沉降時的波高影響



由圖 2-2 與圖 2-3 可以看到在大水槽中，不論大小斷層，抬升時有斜板的波高較大，但沉降時則與斷層模型大小及水深有關，大斷層模型在水深 40 公分以淺的水域有斜板的波高較高，到水深 40 公分時有無斜板無差別，水深 50 公分則有斜板反而波高較小。小斷層模型沉降時，有斜板的波高多

比無斜板時要小。這樣的結果顯示在寬闊水域坡度 1：10 的海底地形對波高的影響可能較不易歸納。

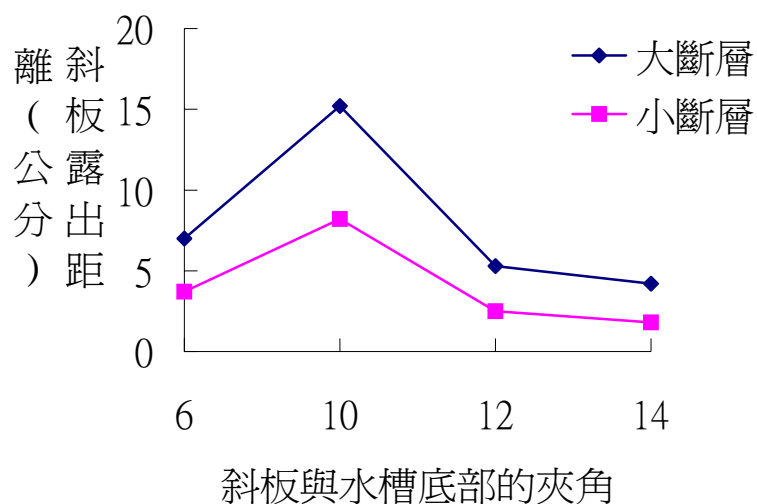
3. 實驗三的結果

我們想了解坡度對斜板露出距離的影響，因此在斜板下放磚塊把斜板墊高，使斜板與水槽底部的夾角 θ 分別為 10° 、 12° 與 14° 。

表 3-1 斷層抬升時不同坡度露出的平均斜板距離 (單位：公分)。

斜板與水槽底部夾角	$\theta = 6^\circ$	$\theta = 10^\circ$	$\theta = 12^\circ$	$\theta = 14^\circ$
大斷層	7	15.2	5.3	4.2
小斷層	3.7	8.2	2.5	1.8

圖3-1 大小斷層於不同坡度時斜板露出的距離



我們發現不論是大斷層或小斷層，在 $\theta = 10^\circ$ 時斜板露出的距離最大，也就是坡度大約 175：1000 時，會使得海底露出的距離最長。

4. 實驗四的結果

這個實驗要觀察水波由寬闊水域進入港灣的波高變化，需使用整個複合式水槽，所以我們把代表灣區的兩片木板架好，把水放到恰可漫過小水槽斜板的高度(在小水槽中大約為 6 公分)，如圖十一所示。因為水位高，我們將大小斷層模型合併使用製造抬升和沉降的效果，也繼續使用大斷層來進行實驗，但單獨使用小斷層模型水波起伏太小，不易觀測，所以在這個實驗中捨棄不用。

我們在小水槽較深的地方釘上水砂紙和皮呎，以便觀測水波在狹窄水道內較深水區的波峰和波谷，與水波進入較淺水區的波峰值做比較。

表 4-1 中的「水深」指的是小水槽的水位高度，「深峰」指在小水槽中較深水區的波峰，「深谷」指小水槽中較深水區的波谷，「岸峰」指水波到達小水槽岸邊時的波峰，「退」指小水槽斜板露出的距離。

表 4-1 不同斷層模型在小水槽中造成的平均水位變化(單位：公分)

水深(公分)		6			7			8		
		深峰	岸峰	退	深峰	岸峰	退	深峰	岸峰	退
抬升	大+小	1.2	5.0	14.3	1.3	3.8	11.5	1.2	2.7	×
	大	1.0	4.2	13.8	1.4	3.6	9.5	1.0	2.0	×
沉降	大+小	1.0	4.7	14.7	1.3	3.5	12.0	1.2	2.6	×
	大	1.3	4.5	12.0	1.3	3.0	9.7	1.0	2.0	×

由表 4-1 可以看出不論模型大小，水波進入小水槽波峰顯著增加。我們將增加比例分別計算，結果紀錄在表 4-2。表中的「平均」表示同一斷層模型抬升與沉降的平均值。

表 4-2 小水槽岸邊波峰高度比深水區波峰高度增加之比例

水深(公分)		6	7	8
抬升	大+小	316%	192%	125%
	大	246%	157%	100%
沉降	大+小	370%	169%	117%
	大	246%	131%	100%
平均	大+小	343%	181%	171%
	大	246%	116%	100%

在實驗二、實驗三與實驗四中，使水深恰好漫過斜坡，再以斷層模型進行操作，發現不管抬升或沉降，水都會大幅往後退，使原本沒在水面下的斜板露出來，這個現象與這次南亞大海嘯來臨前靠近岸邊的海水被「吸乾」、海底出露、海水在外海形成海牆的情形相似。基隆 1867 年發生的大海嘯也有這樣的情形。斜板露出的時候只量得到波峰，量不到波谷，所以我們覺得這種海底露出來的情形應該是波谷到達岸邊造成的。如果是波谷首次抵達，就會有海水被「吸到」外海而形成海牆的情形。

以實驗四水深 6 公分，大小斷層合併時來看，斜板露出的距離長達 14.3 與 14.7 公分，是水深的兩倍有餘，若換成水深 15 公尺的基隆港，水大約可以退到 35 到 36 公尺外。

水波由寬闊水域進入狹窄的港灣，波峰高度抵達岸邊時增加的比例非常驚人：大小斷層合併使用時最多可增加到 343%，而以單獨使用大斷層來看，最多也可增加到 246%！表 4-2 也可看出波峰高度與水深的關係非常密切，水深每增加 1 公分，波峰增加比例就大幅減少，尤其是從 6 公分增加到 7 公分時，波峰只比深水區波峰增加 181%與 116%。

我們再進一步計算水波抵達港灣岸邊時波峰高度與整個小水槽水深的比較，作成表 4-3。

表 4-3 水波由深水進入複合式水槽岸邊時波峰與水深的比較

小水槽深度(公分)	6	7	8
大+小，抬	5.0(83.3%)	3.8(54.3%)	2.7(33.8%)
大抬	4.2(70%)	3.6(51.4%)	2.0(25%)
大+小，降	4.7(78.3%)	3.5(50%)	2.6(32.5%)
大降	4.5(0.75)	3.0(43%)	2.0(25%)

表中的%是波峰與水深的比例。將三種水深求平均，則大小斷層合併使用時，波峰高度約為水深的 55%。若以水深 15 公尺的基隆港來說，可以造成波峰 8 公尺的巨浪，接近 3 層樓高，實在非常驚人。

再以能量觀點來看，小水槽水位 6 公分，大水槽水位 56 公分，以大斷層模型來說， $h \approx 50$ 公分，所排除下方水體的質量 M ，則

$$M=0.5m \quad 0.3m \quad 0.28m=0.042 \text{ m}^3$$

斷層垂直位移的位能為 E ，則

$$E=mgh=19.7 \quad 9.8 \quad 0.5=96.5 \text{ j}$$

這些能量成爲水的動能，近岸時可以產生平均 4.4 公分的波峰。

以同樣的方式推算，假設基隆外海某海底斷層發生錯動，沉降深度 10 公尺，斷層長度 100 公里，寬度為 10 公里，假設上盤抬升與下盤沉降發生在斷層兩側各一百公里（ 10^5 m）範圍內，則上盤抬升的海水質量 M 是（海水密度是 10^3 kg/m^3 ）

$$M = 10^5 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10^4 \text{ m} \times 10^3 \text{ kg/m}^3 = 10^{13} \text{ kg}$$

位能 U ，重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，海水平均抬升高度 $h = 10 \text{ m}$ ，則

$$U = m \times g \times h = 10^{13} \text{ kg} \times 10 \text{ m} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 9.8 \times 10^{14} \text{ 焦耳}$$

海水挾帶這些能量不斷往四面八方擴散，這樣的能量到底有多大呢？我們其實搞不太清楚，所以又去查了資料，發現在二次世界大戰的時候美國在日本長崎投下的原子彈能量大約是 8.4×10^{13} 焦耳！上面所假設的斷層錯動釋放的能量比原子彈的能量還要大！真是可怕！

到底海嘯會不會再發生在基隆呢？這個答案誰也不知道，只是以台灣附近海域發生地震的頻率來看，如果很容易就會發生，那麼應該常有海嘯才對，但是查得到的資料裡只有 1867 年那次的紀錄，到現在已經 2006 年，中間經過 139 年都沒有發生災難性的海嘯，因此應該發生的機率不大吧！我們希望海嘯若發生，不要長驅直入，只要呼嘯而過！

陸、結論

- 一、 本實驗中斷層沉降造成的波高均較大，抬升造成的波高較小。是否表示實際狀況也是如此，可能還要再進一步研究。
- 二、 在較寬闊的海域，海水由較深的水域往較淺的水域前進時，在較淺水域的波高不一定會比較高，但在狹窄的港灣內，海水能量會增強，造成波高大幅增加，最多可達 2 倍以上。
- 三、 海水重力波的波谷首次抵達岸邊，會出現海水被「吸」到外海形成海牆，而海底露出來的情況。我們的實驗顯示斜板露出的距離與坡度有關，當坡度為 175：1000 時斜板露出距離越長。
- 四、 我們做了以上的研究，認為基隆要再度發生具有破壞力的海嘯，機會並不是很大，但若斷層位在外海正對著基隆港，斷層錯動前後距離長，或抬升(沉降)距離大，又發生在海底淺層，釋放極大的能量，那麼將使海嘯波對著基隆長驅直入，可能會造成災難性海嘯。

柒、參考資料及其他

- 一、 國民中學自然與生活科技課本第五冊(2005 年 8 月修訂版)。臺南市:南一書局。
- 二、 孫鎮球(2005 年 2 月)。海嘯。科學發展月刊，386 期，P.72-77。
- 三、 The China Post staff (2004, December 28). Tsunami highly unlikely to hit Taiwan. *The China Post*.

031733

4