

第四章 波浪的圖像

4.1 波浪的定義

為清楚瞭解波動現象，以最簡單的單一成份規則波為例，先定義出如圖 15 的基本名詞：

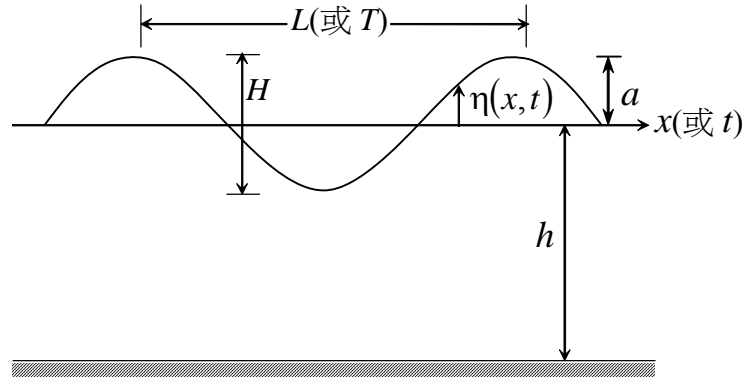


圖 15 規則波基本名詞意義

其中水位($\eta(x, t)$ ，water surface elevation)為水表面的高程；波峰 (wave crest) 為水位起伏區間的最高點；波谷 (wave trough) 為水位起伏區間的最低點；波高 (H ，wave height)為波峰與波谷間的高程差 (垂直距離)；振幅(a ，amplitude) 為原則上以波高一半來定義，即 $a = H/2$ ；波長(L ，wave length) 為連續兩波峰 (或波谷)間的水平距離；水深(h ，water depth) 為平均水位與水底之距離，或通常稱為平均水深(mean water depth)；週期(T ，wave period) 為在一定點處，水位起伏中連續兩波峰(或兩波谷) 出現的時間差。這些名詞會在往後會使用。

波浪形狀傳遞之快慢與週期及水深有關，波速大小估算為

$$c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (1)$$

一般稱深水是在水深與波長比大於 $1/2$ 時，而淺水是指水深與波長比小於 $1/20$ 情況。因為函數關係在深水及淺水可簡化成簡單之結果分別為 $c = \sqrt{gT/2\pi}$ 及 $c = \sqrt{gh}$ 。波浪在不同水深的傳遞如圖 16 所示

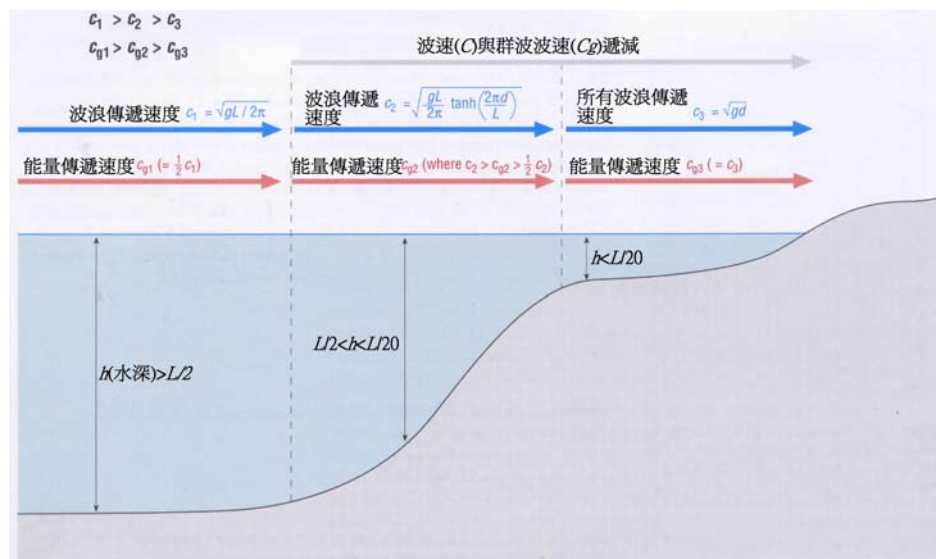


圖 16 波浪在不同水深的傳遞示意圖

4.2 波浪的滾動

如同觀測海鷗現象之結果(見圖 4)，由理論推導也發現，波浪在深海因為垂直空間較大，水粒子運動時前進後退與上下震盪大小都沒有什麼約束，所以水粒子的運動軌跡(trajecotory)像圓形，示如圖 17，水面的運動比水下的運動還大。當水深越來越淺，水粒子的垂直運動受底床影響不太容易，所以運動軌跡比較成現橢圓形(ellipse)，當波浪到達極淺時，水粒子的垂直運動受底床影響更大，運動軌跡變得更扁平，而且上下移動的大小相近。

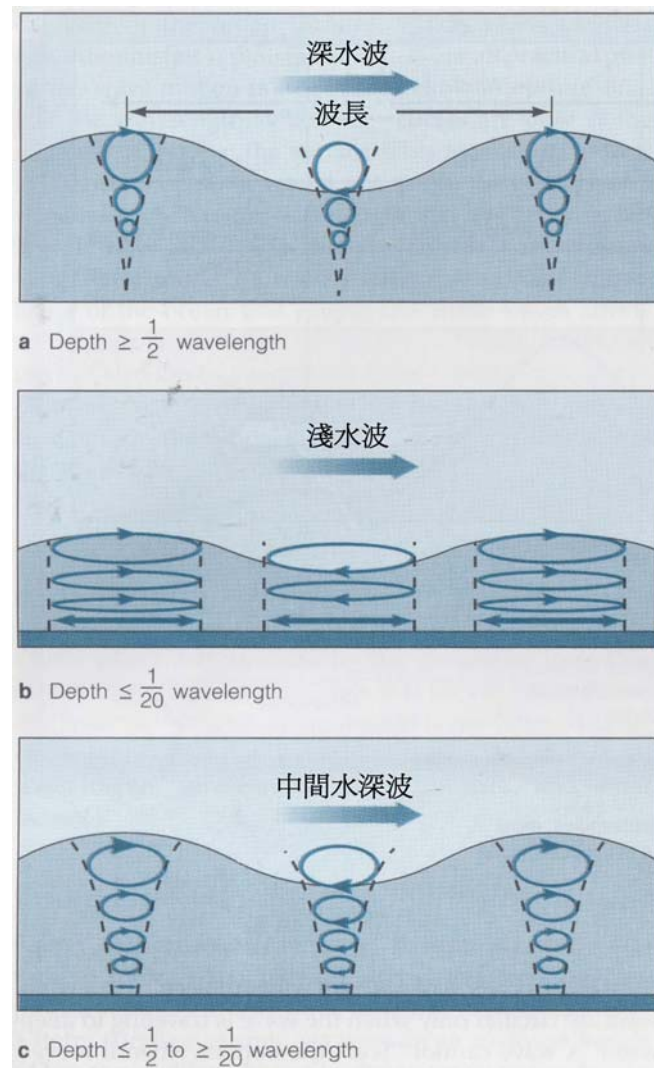


圖 17 深水至淺水下波浪水粒運動之軌跡特性(修改自 Wright et al., 2005)

從巨觀角度來看圖??顯示波浪波形傳遞時水粒子之運動呈現封閉結果，但從微觀來看，水粒子之運動其實有微量的前進，見如圖 18。這種微量的前進會造成一些在表面之物質隨著波浪之運動而持續的往前，這種由波浪驅動之現象叫做波驅流(wave drift)或者叫質量傳遞(mass transport)。這種波驅流之大小也如同波浪水粒子之運動軌跡一樣隨著水深增加而減小，也就是說在水表面的波驅流大比在水底的波驅流大。

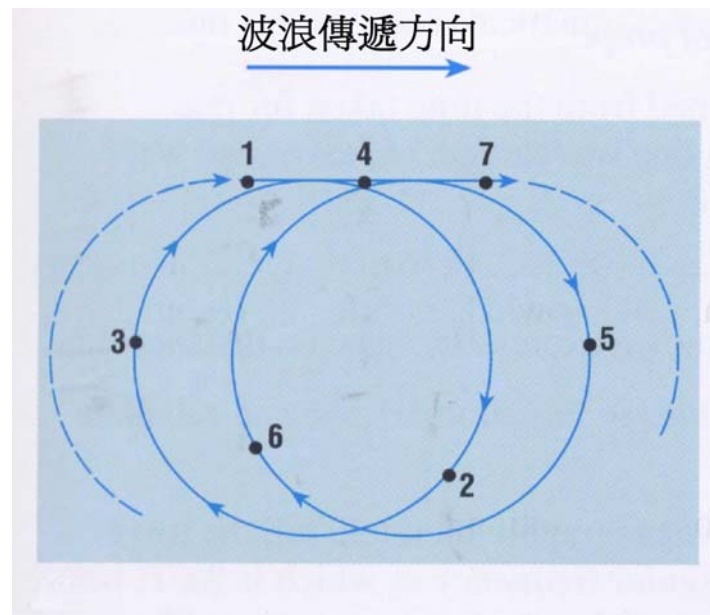


圖 18 微觀下波浪水粒運動之不封閉軌跡

4.3 一群波浪的圖像

波浪的表面做上下起伏所產生波形的傳遞是最能表現波浪的運動，波浪在傳遞過程當中波浪會依自己本身的傳遞快慢逐漸分開，這叫做波浪之分散 (dispersion)。當有兩個波浪相遇時(見圖 19(a))，所合成的最後水表面形狀如圖 19(b)，由圖 19(b)顯示有部份水位起伏的高度較高，而有些起伏比較低，這種有時高起伏有時低起伏所形成組合波浪的現象，叫做群波(group wave)。這種現象其實在海灘最容易感覺，當你站在海灘時湧來之波浪有時會很大，有時又變得很小，而且這種湧來波浪大小變化的時間間距又有些固定，就是群波的一個例子。

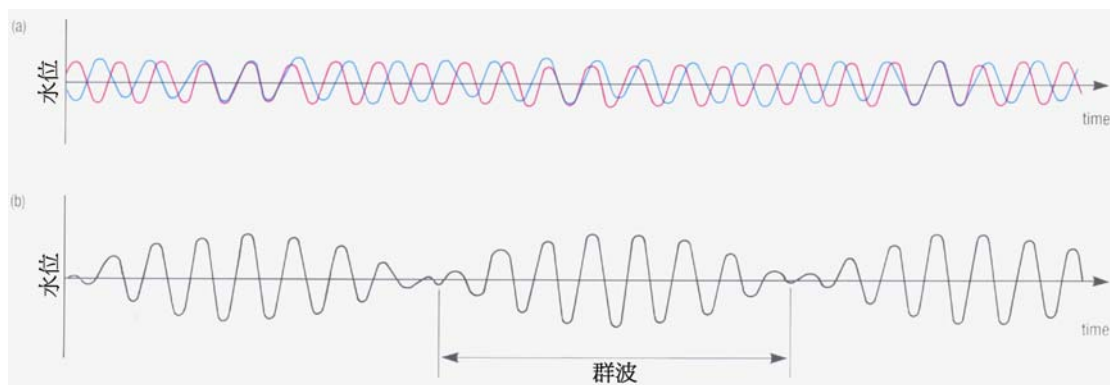


圖 19 波浪群波產生之示意圖(a)上圖：二個成份波；(b)下圖：組合波

群波的傳遞和個別波傳遞的快慢是否一樣，我們從圖 19b 截取一段當此段波浪傳遞一段距離後如圖 20，此圖 20 說明一個波絡包含五個波長的波，當這段群波前進距離如紅色所示，其中的五個波浪前進就如黑色之距離。在相同時間，黑

色的長度比紅色的長度長，此顯示群波的速度會小於個別波的波速。此種差異在深水會比淺水大。

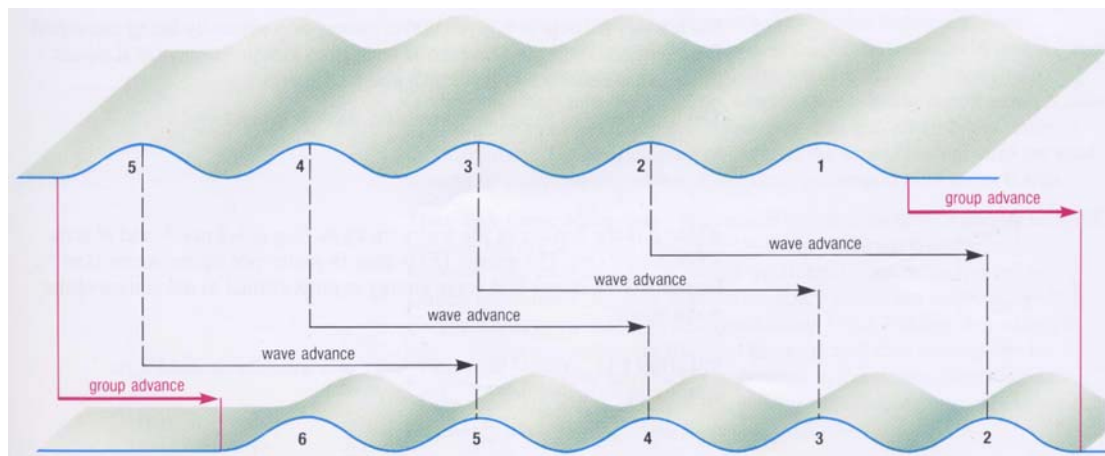


圖 20 波浪群波產生之示意圖

第五章 沿岸的波浪

5.1 波浪的折射

當波浪從深海逐見傳遞至近岸時之狀況如圖 16。我們知道波浪在表面水粒子運動比在底部者較大，在深海稍淺處的底床對波浪運動影響不大，但是波浪傳遞到水深淺到水粒可以感覺到底床時，水粒子不能穿透底床，就不會保持原本水平橢圓運動，因此波浪逐漸產生左右不對稱的現象，而且受底床擠壓的影響，水粒子運動能量會往上發展，在基本波浪能量通率守恒條件下，較小水深因傳遞速度較慢，所以要有較高的波浪(能量)才會滿足此定律。這種波浪因為水深變淺而使波高變高的現象叫做波浪淺化(wave shoaling)。

光波在存在不同介質因傳遞速度不同而產生前進方向的改變，此現象叫做折射 (diffraction)，最明顯的例子就是彩虹的形成。光波折射要滿足有名的 Snell 法則，即為

$$\frac{\sin \theta}{c} = \frac{\sin \theta_0}{c_0} = \text{constant} \quad (2)$$

上式中 θ 為波前近的入射角， c 為波速，而下標0代表初使條件。

如同前段所述波浪在前進至近岸時候，波浪速度也會因為水深的改變而不同，所以推論波浪在前進的過程也會發生類似光波的折射現象，而且理論推導出波浪折射也會滿足公式(2)的 Snell 法則。如圖 21 所示當波浪有一個角度由外海前進到海岸，因為水深一直變淺所以速度一直變慢，原本前進的角度就會一直的變小，直至海岸的時後，波浪速度幾乎為零，所以波浪前進的角度也會幾乎為零，因此，波浪到達海岸邊時都幾乎會垂直於海岸。

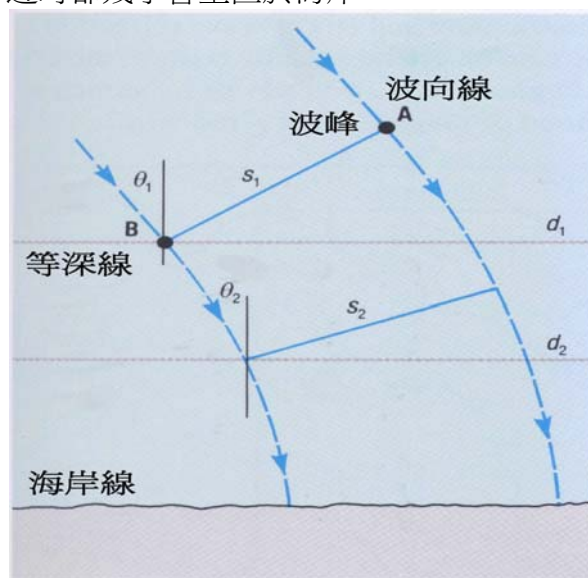


圖 21 波浪折射圖

如果有此概念，就可以瞭解如圖 22 之波浪折射的結果。當波浪進入一個有岬頭(headland)的海岸，即是突出海中的部份，因為波浪折射到達岸邊都會垂直於海岸，所在岬頭部分波浪會先要垂直於海岸，以至於在岬頭處波浪會集中，所以波浪較大。反過來講，如果波浪入射到一個灣澳的海岸，此灣澳海岸有較多的水體且海灘線呈現扇形狀，波浪為了在到達海岸需要滿足垂直之要求，所以波浪也會跟海灘線一樣展開成扇形，也因為如此在這種灣澳裡的波浪會比平直海岸較小。

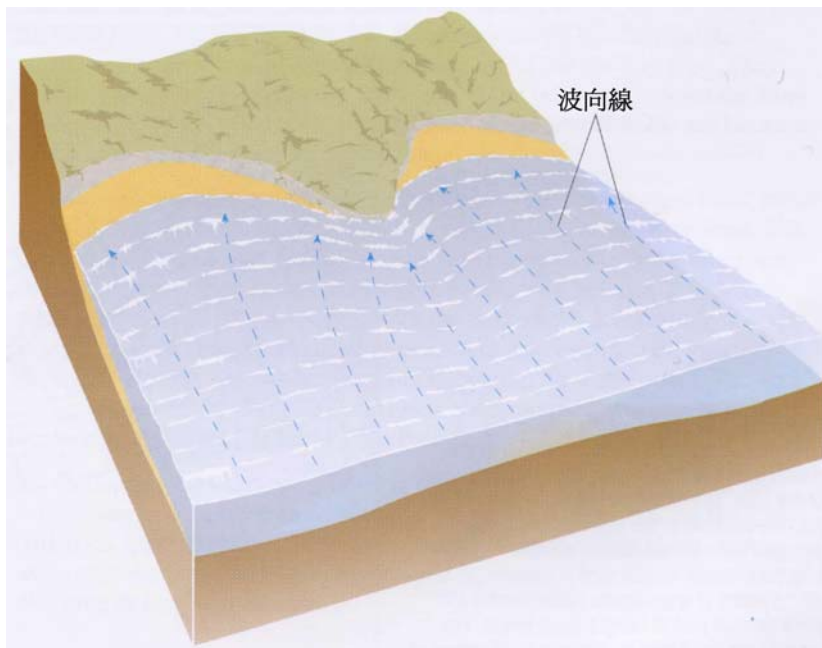


圖 22 波浪折射至一個岬頭海岸或凹內海岸之示意圖

5.2 波浪的繞射

光通過一個窄洞時，因為波浪具有波的特性會繞過遮避物，在後方有光亮，此光量因為光能從窄洞小範圍要分配到整個大範圍，所以在後方的亮度較窄洞時暗，這就是有名的光的繞射(Refraction)。波浪與光波有類似的的地方，如圖 23 所示當波浪前進到一個有防波堤阻礙的區域(圖中之左下角)，如果波浪不會繞射時，在防波堤後之水域因為防波堤之阻礙，不會有波浪進來，但是從圖 23 還是有波浪在此區域存在，這種現象就是波浪的繞射。



圖 23 波浪繞射至一個防波堤之狀況

從圖 23 可知在繞射區域的波浪與原來波浪前進方向不同，而且波浪高度降低。此種波浪繞射現象在港灣最為重視的因素，在港灣裡為了船隻航行、停泊及卸貨作業之安全，所以要求水位振盪高度在某規定範圍，若波浪繞射進來港灣的能量太多，水位就變化大而會影響船隻之安全。圖 24 為美國海岸工程手冊(Coastal engineering manual) 中波浪以 60° 入射於半無限長防波堤之繞射係數分佈圖其中繞射係數定義為某點波高與入射波高之比值。由圖 24 顯示遮蔽區中，繞射波之波峰線以堤端為原點，呈同心圓弧形前進，而波高迅速減低。

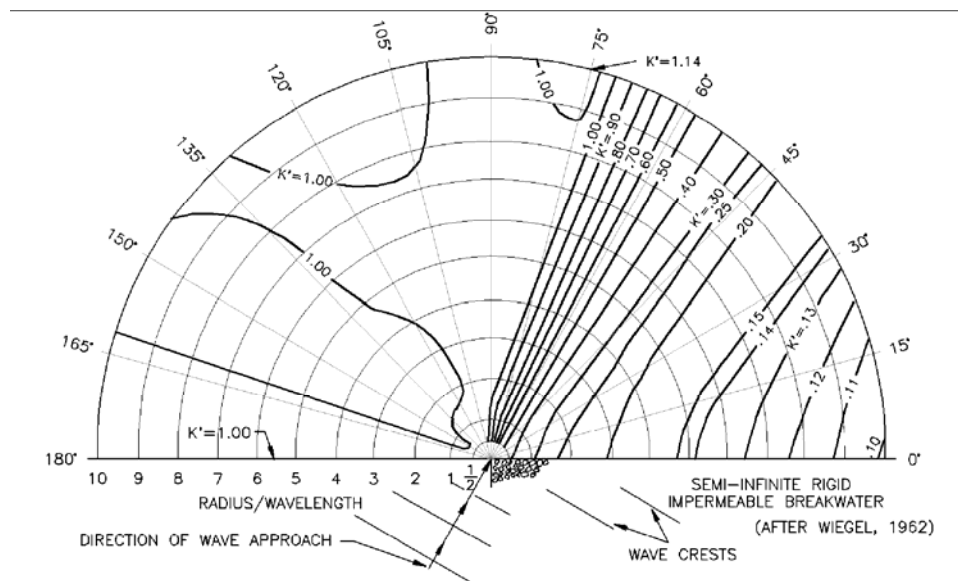
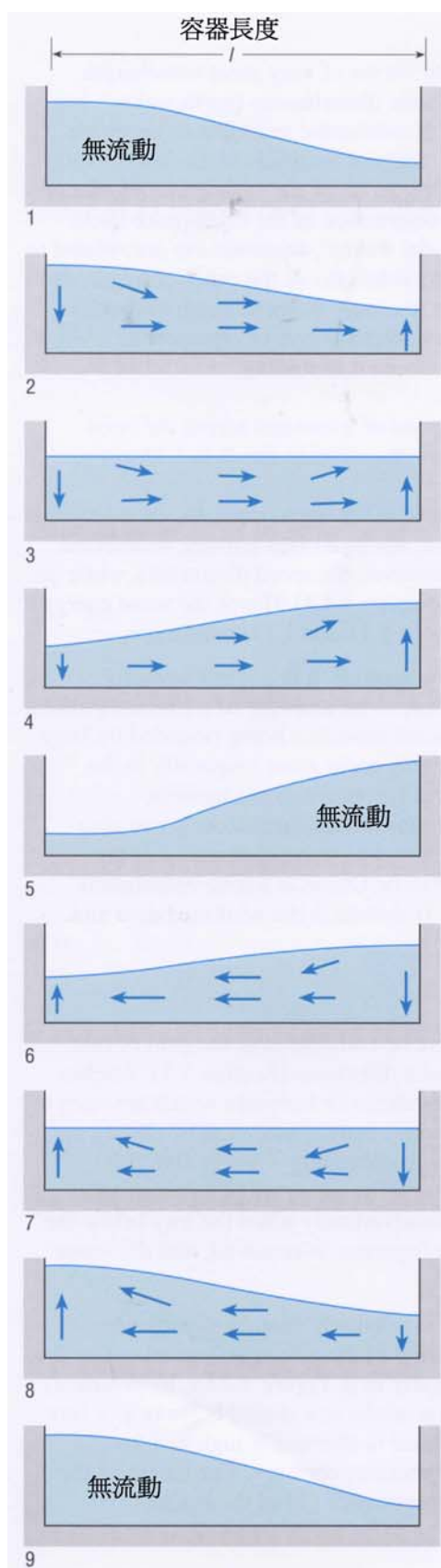


圖 24 波浪繞射無限長防波堤之繞射係數分佈(CEM，2002)

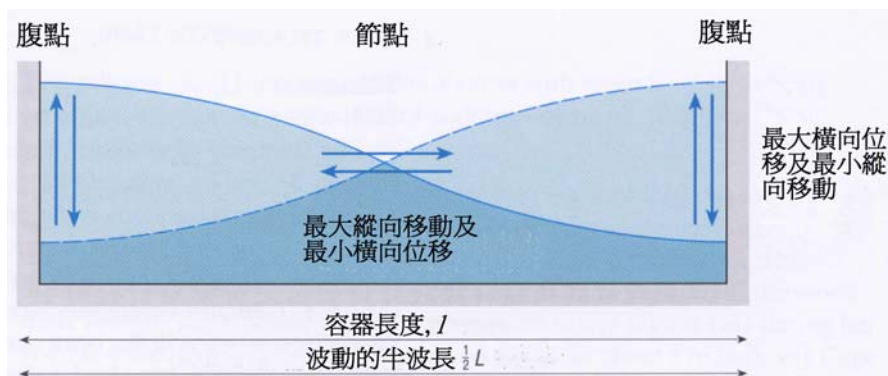
5.3 波浪的盪漾

波浪進入一個有限水域如港灣，如果港灣形狀類似於長方形時，又其長度為波浪波長之半的整數倍的關係時。若滿足條件之波浪在此特殊水域中形成後，此

波浪會持續振盪而不會消失，這種現象叫做港池盪漾(seiche)，此盪漾的現象如圖 25 說明極易明瞭。這種持續的盪漾造成停泊在碼頭的船隻產生上下晃動，繫纜繩伸縮如果沒有控制好的話，容易造成斷纜之機會。



(a)港池盪漾的過程



(b)港池盪漾的水位變化

圖 25 波浪在港內形成港池盪漾的過程(a)及水位變化(b)示意圖

5.4 沿岸跑的波浪——緣波

當波浪斜向進入近岸時，因為海底底床之反射將波浪部份能量傳回外海，若較為垂直於海岸者稱為洩漏波(leakage wave)，若返回角度較大，而返回波浪再繞射回岸上，則此波浪就無法反回至外海，圈陷(trap)在近岸而且沿著海岸方向傳遞，此稱為緣波(edge wave)，這兩種差異如圖 26 所示。

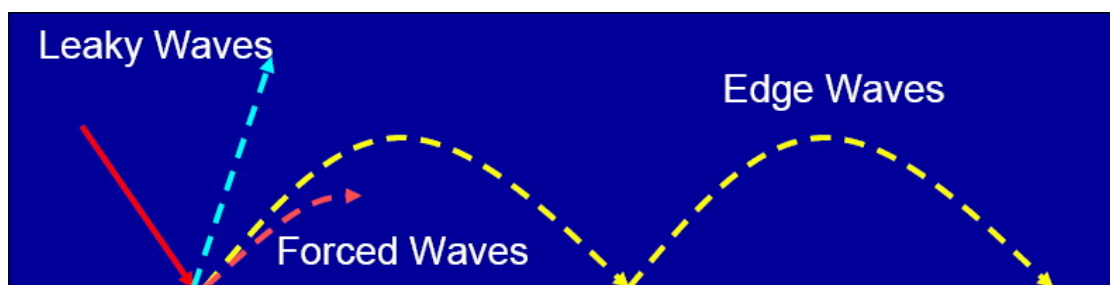


圖 26 波浪在近岸形成洩漏波或緣波之示意圖

緣波有不同的型態(mode)，不管那種型態，他的運動特性就是在近岸有較高的波浪振幅，而隨著離岸越遠振幅越小，緣波主要特性在沿岸方向做空間週期變化。一般緣波的三維運動形狀如圖 27 所示。

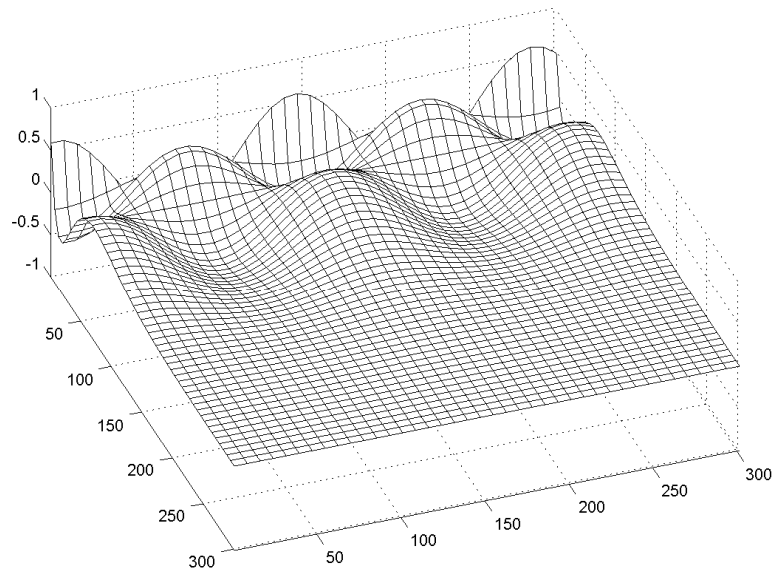


圖 27 緣波的三維運動形狀

因為緣波在沿岸的週期變化，所以在沿岸方向之波流特性就有週期變化。因此，岸邊之地形就容易形成半月形的海灘，照片 5 為在各國因為緣波所照造成的半月形的海灘的案例。



照片 5 為緣波所照造成的半月形的海灘的案例(引自 University of West Florida 之 Coastal Geomorphology 課程講義)

5.5 波浪產生的沿岸水流

當波浪斜向進入近岸波浪還是會碎波，碎波的波浪會造成沿岸方向的推力分量，而此沿岸推力就會引起沿岸方向的水流流動如圖 28 所示，此種水流稱為沿

岸流(longshore current)，若地形有些有外凸時，這種沿岸流會因地形導出向外的離岸水流，稱為裂流(rip current)。如果近岸地形如圖 29 為半月形就構成沿岸流及裂流同時存在之流況。

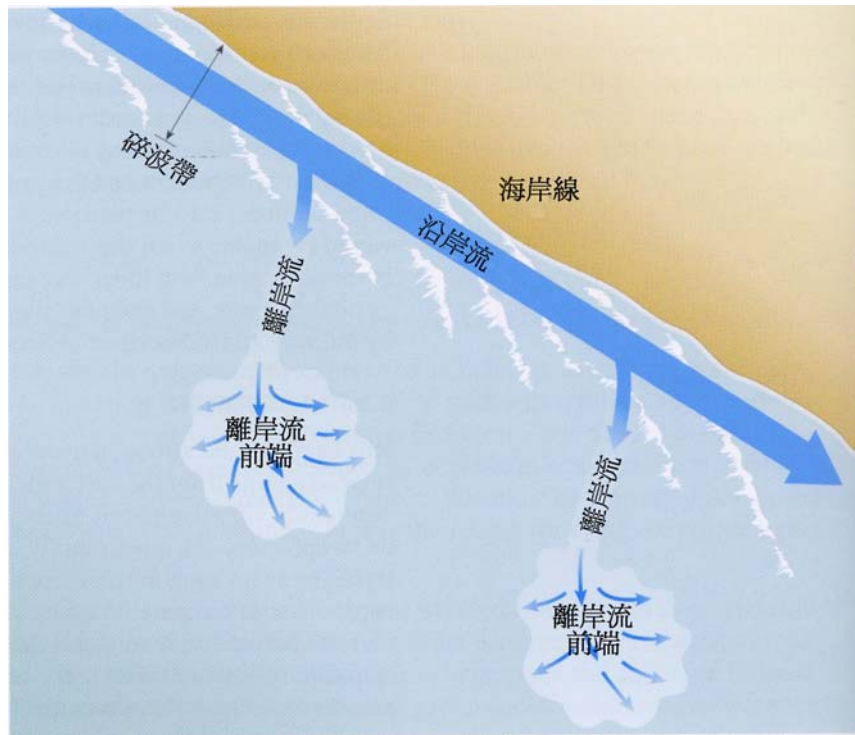


圖 28 波浪在近岸產生的沿岸流示意圖

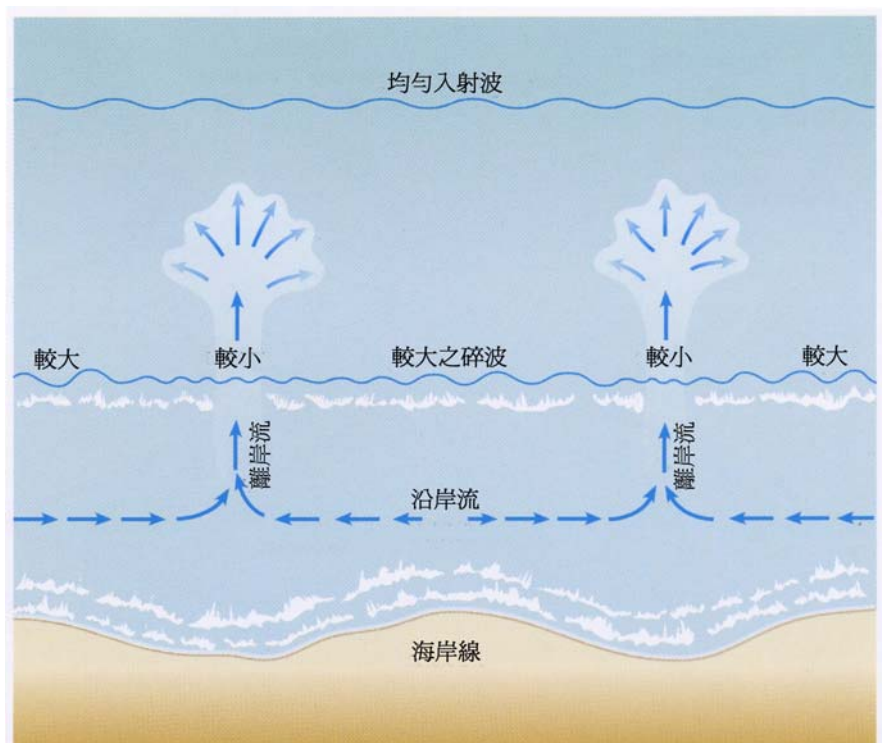


圖 29 在彎月形海岸波浪導致的沿岸流及裂流示意圖

第六章 波浪的能譜

6.1 波浪的組合

一般風浪使為不規則 (irregular) 的表面形狀。如照片 6 示波浪表面為縱橫各方向的波重重疊疊而成，且同樣的波形不可能再次發生，是屬於時間及空間上的一種紛紜 (random) 變動。風浪既是一種紛紜現象，用統計的方法來描述其特性頗為恰當。其中波別分析法 (individual wave analysis) 和波譜分析法 (spectral analysis) 是最普遍的方法。利用這兩種方法從不規則波中定義出波高和週期，使其能適用於規則波的波浪理論，以達到各種工程設計應用的目的。



照片 6 實際海面風浪的照片

6.2 從個別波觀點

單純來看，若視風浪的水面變位為一維的波形變化，利用水位與平均水位交點位置來區隔每一個別波之技術，一般常用的為零位上切 (zero up cross) 法，所謂上切零點是水位上昇曲線與平均水位線之交點，零位上切法之示意圖見圖 30。

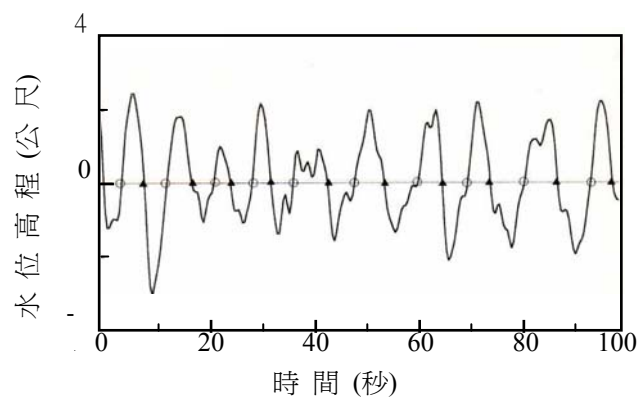


圖 30 零位上切法之示意圖

從一般波浪海洋觀測約 20 分鐘的水位變化信號約可獲得 100~200 個波。代

表波這些個別波常用指示波高(significant wave)，又稱為 1/3 最大波，其指波群中波高較大的 1/3 部份的個別波的波高平均值 H_s 。雖其並不具有特別的意義但接近人類以目視觀測對不規則波直覺上獲得的波高。另外在統計特性上發現其具有最大的安定性（不隨取樣不同而變化），較能反映波浪所含能量的大小，故是最常用的代表波。圖 31 為 2002 年 5 月在花蓮港外測得之水位訊號。

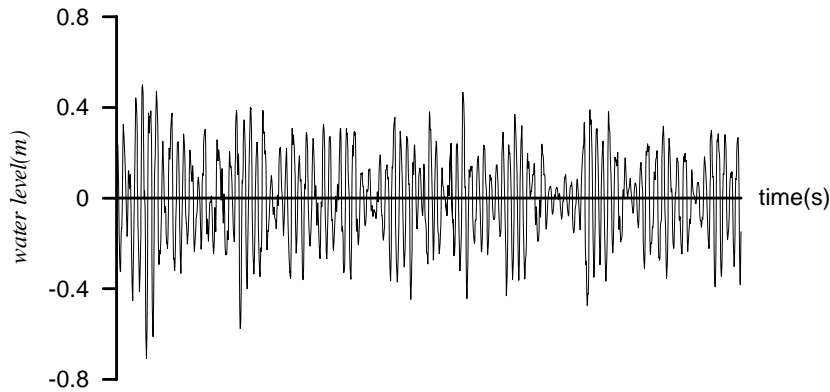


圖 31 於 2002 年 5 月 30 日 20 時花蓮港外測得之水位訊號

6.3 從整體波觀點

海面的波浪可視為是由無限個不同振幅、頻率、相位和方向的成份波所疊加而成，如圖 32 所示：

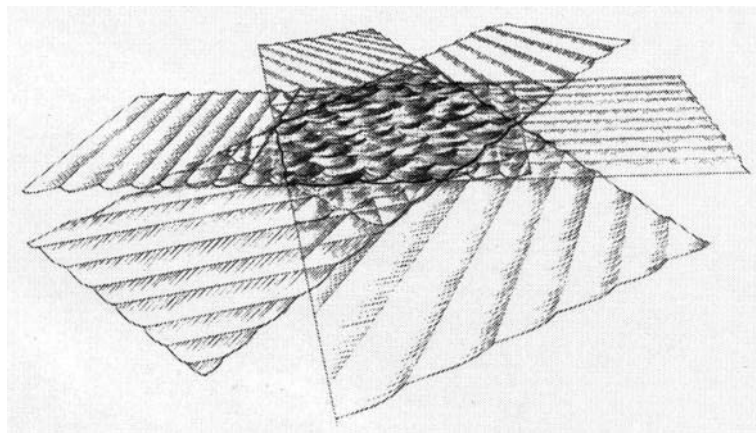


圖 32 波譜分析的概念 (Kampion, 1989)

經過數學的 Fourier 轉換操作可將這種空間紛紜的變量表示成波浪頻率(f)與入射角度(θ)之函數， $S(f, \theta)$ ，而稱為波浪的方向波譜 (directional spectrum)。工程設計上常以波浪的週期為主而忽視方向性此時方向頻譜可簡化成一維的波浪頻譜，稱為功率譜或能譜 (power spectrum) $S(f)$ 。

能譜的大小基本與波高的平方大小有關，而且能譜的形狀也會透露海面水位所代表組合成份波頻率的分散程度。圖 33 是將上述花蓮港實測的水位訊號所計

算出之能譜。從圖 33 可知在 $f=0.16$ 有比較高之波浪能量，此代表在 $T=1/f \approx 6$ 秒有比較大的波浪，其他週期的波浪比較小，或者說此水位訊號是由大約是週期 6 左右秒之大多數波浪組合而成的。由能譜可以看出組成份波之主要週期及能量大小及其分佈情況。

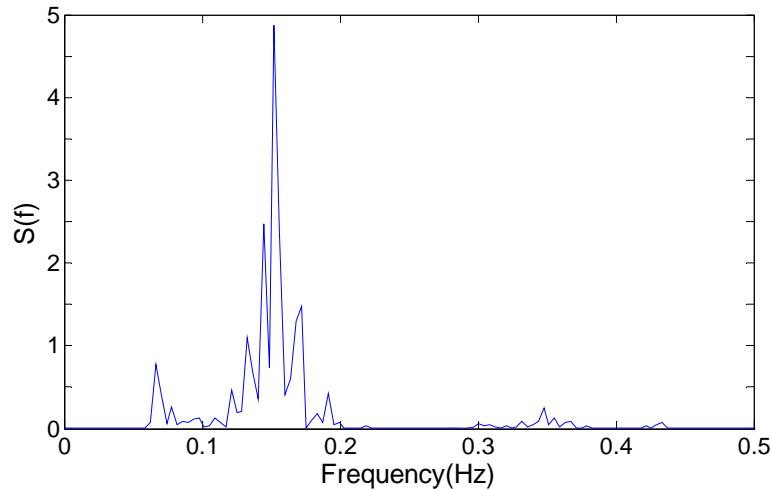


圖 33 在花蓮港外測得水位之能譜

6.4 水位出現的機率

理論上，假設海面上的風浪是由無限多的線性獨立成份波疊加而成，不論各成份波振幅變化的機率分佈為何，其疊加而成的最終波形之水面變位，依照統計學上定理認為其必成一個常態分佈 (normal distribution) 的機率分佈。此常態分佈以零為軸左右對稱，表示水面變位以平均水位為零正負出現的頻度是一樣。如果分佈特性不像常態分佈代表說這種波浪不是獨立的組合，所以水面變位的機率探討主要可瞭解波浪是不是獨立的，也就說波浪中的交互作用(interaction)強不強，強交互作用代表波浪間關係較強，獨立性就不高；反過來說，弱交互作用代表波浪間關係較弱，獨立性就高。

如同上述之資料所做成之水面，依其出現在某個高度分數個等區間，計算在每一個區間之數量，將此數量除以總個數稱為機率，而將每個分區的機率表示成圖稱為直方圖。水位機率分佈之直方圖與常態分佈的比較如圖 34 所示。由圖 34 可知此水位資料與常態分佈很接近，因為此波浪不大，獨立性不強的緣故。

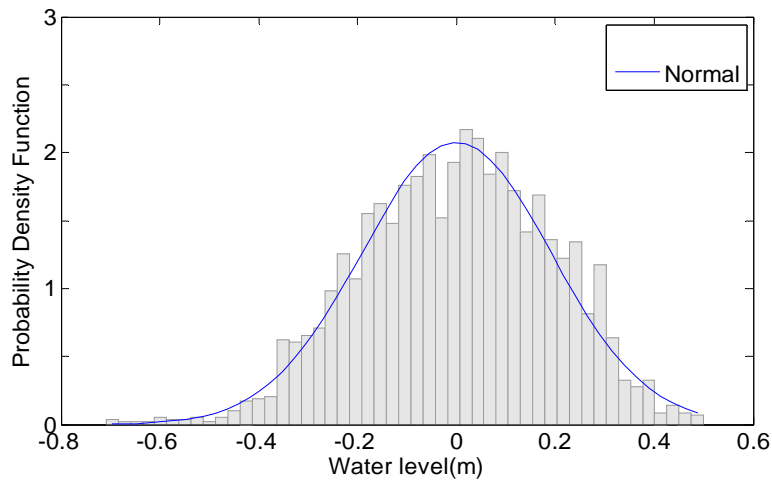


圖 34 風浪水位之直方圖以及與常態分佈的比較

6.5 波高出現的機率

如果將零上切之個別波依波高大小排列後，繪製成波高的機率直方圖，此形狀理論上可用 Rayleigh 分佈之機率密度函數來表示，如圖 35 為上述所用資料之高分佈，雖然波高分佈理論上為 Rayleigh 分佈，但是因為地形因素導致波浪之變形所以可能要做分佈上之修正或以別的分佈函數(如 Weibull 函數)來描數述。

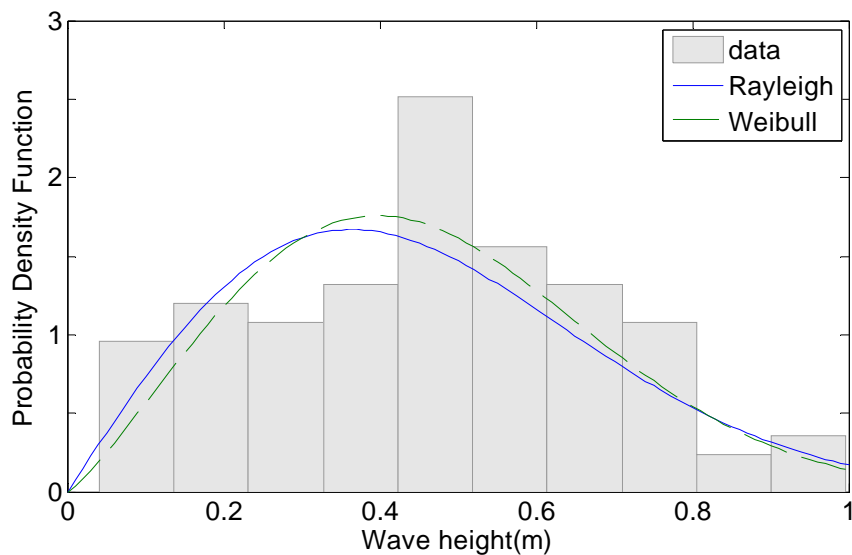


圖 35 風浪波高之直方圖以及與常態分佈的比較

6.6 週期出現的機率

在工程設計上有時候週期的影響非常重要。我們可以利用現場的波浪實測數據，經統計分析計算出波高週期的聯合分佈以及其相關性，以應用於當地的工程設計。此外更早 Bretschneider (1959) 亦曾提出週期的平方成 Rayleigh 分佈的建議，而後有人提出 Gamma 分佈是比較恰當。圖 36 為上述所用資料之週期分佈圖。此圖看出常用的 Gamma 及 Rayleigh 分佈均不太適合描述小波浪之週期分佈特性。

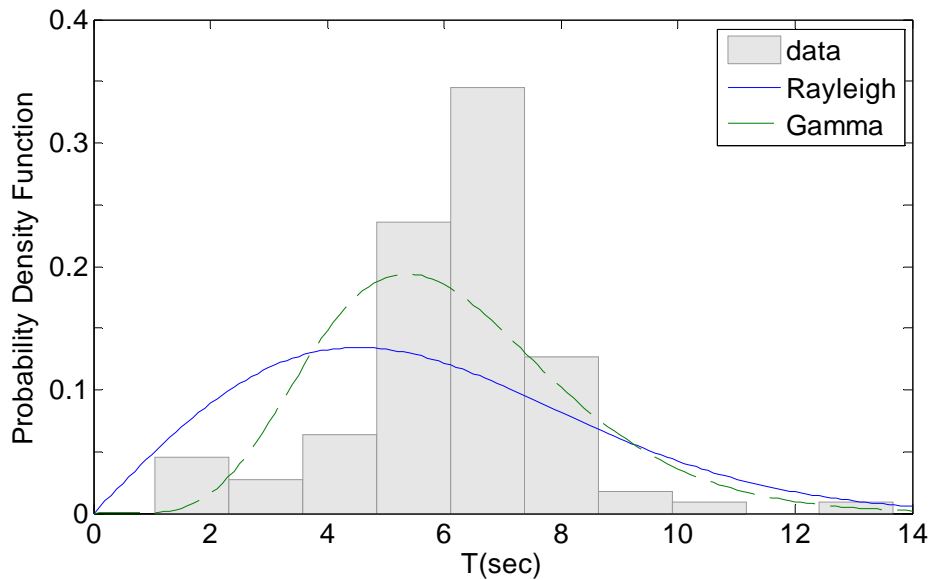


圖 36 週期之直方圖以及與個種分佈函數的比較

6.7 波高與頻譜的關係

基於波高為 Rayleigh 分佈的假設，指示波高與能頻譜面積的關係為 $H_s = 4\sqrt{m_0}$ ， m_0 是能譜的面積。由現場數據分析結果發現其中常數 4.0 並非固定，而大約在 3.8-4.0 之間。一般使用描述波浪能譜之形狀有 (1)P-M 波譜(Pierson 和 Moskowitz, 1964)，(2)Bretschneider-Mitsuyasu 波譜 (3)JONSWAP 波譜。圖 37 為不同參數之 JONSWAP 波譜形狀示意圖。使用此類波譜函數的原因，主要是當決定此波譜函數中之參數決定後，就可由此函數推導出其他之物理量如，平均週期，平均波高等。

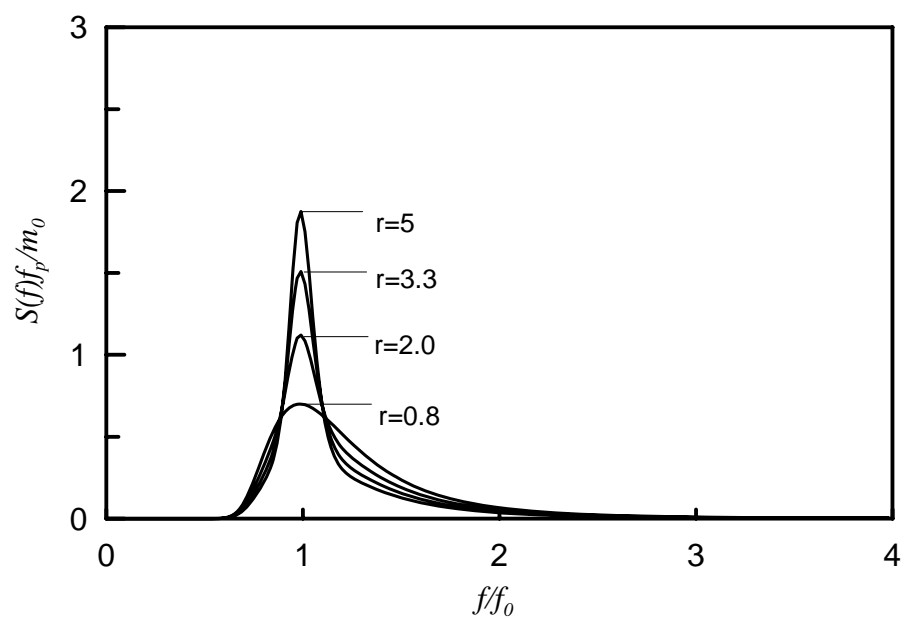


圖 37 各種不同值的 JONSWAP 波譜