



ANCHOR

離岸風電工程海象條件應用概述

中興公司 電力及能源工程部 吳芬華

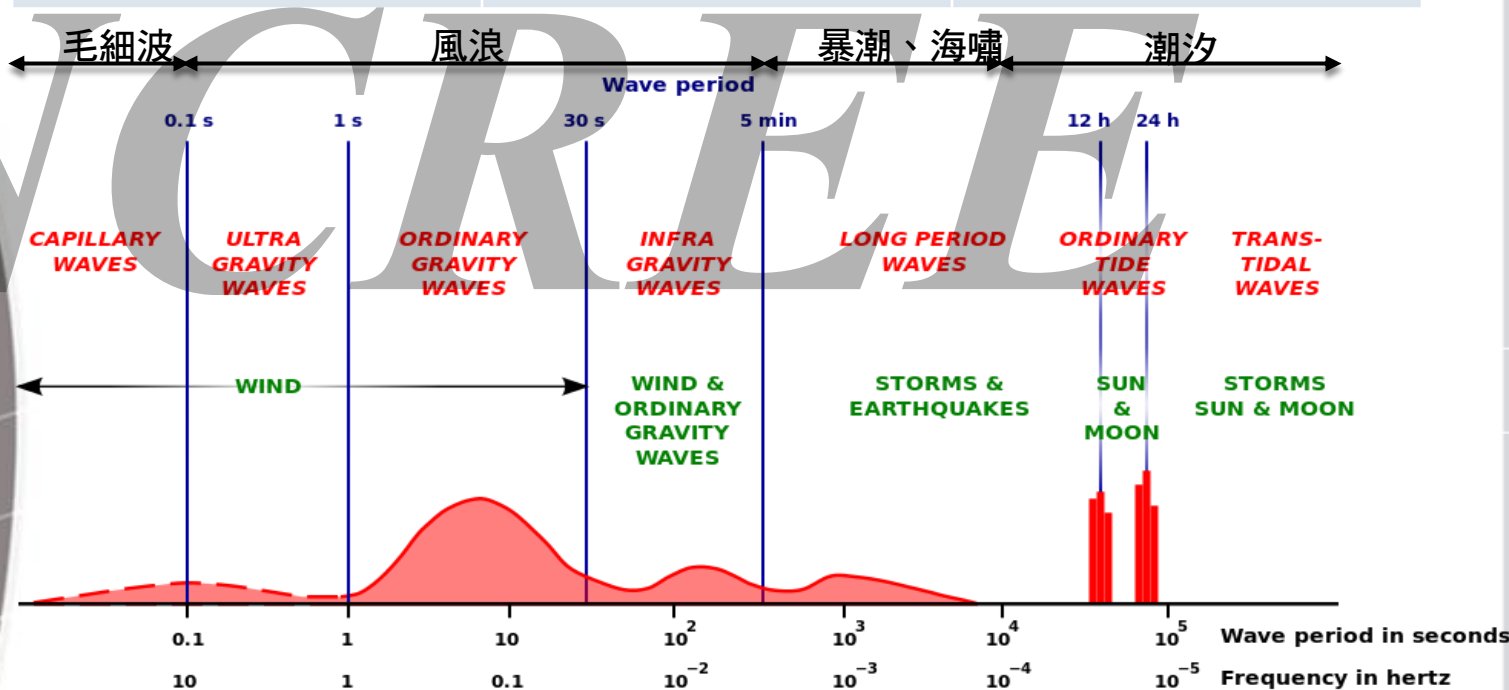


波浪起源



引起海洋波浪之外力分類

波浪	波長大小	外力因素
毛細波	<1.73cm	表面張力
風浪(wind wave)	60-120m	海面上的風
蕩漾(seiche)	與池的尺寸有關	壓力、暴潮、海嘯
海嘯(tsunami)	200km	海床滑動、火山暴發、板塊移動
潮汐(tide)	約地球周長之半	天體引力



蒲福風級及波高推算

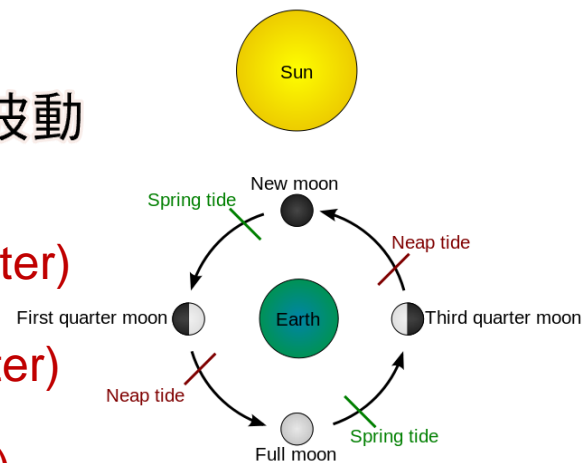
蒲福風級	風速		描述風力	浪高 (m)	海上情況	陸上情況
	節	公里/小時				
0	0~1	0~2	無風 calm	0~0.1	無浪	靜，煙直向上
1	1~3	2~6	軟風 light air	0.1~0.3	平靜 / 無浪 / 海平：波紋柔和，如鱗狀，波峰不起白沫。	煙能表示風向，風向標不轉動
2	4~6	7~12	輕風 light breeze	0.3~0.5	平靜 / 小浪 / 海平至有微波：小波相隔仍短，但波浪顯著；波峰似玻璃，光滑而不破碎。	人面感覺有風，樹葉有微響，風向標轉動
3	7~10	13~19	微風 gentle breeze	0.5~0.9	小浪 / 微波：小波較大，波峰開始破碎，波縫間中有白頭浪。	樹葉及小樹枝搖動不息，旗展開
4	11~16	20~30	和風 moderate breeze	0.9~1.25	小至中浪 / 微波至小浪：小波漸高，形狀開始拖長，白頭浪頗頻密。	吹起地面灰塵和紙張，小樹枝搖動。
5	17~21	31~40	清風 fresh breeze	1.25~2.5	中浪 / 小至中浪：中浪，形狀明顯拖長，白頭浪更多，間中有浪花飛濺。	有葉的小樹整棵搖擺；內陸水面有波紋。
6	22~27	41~51	強風 strong breeze	2.5~3	大浪 / 中浪：大浪出現，四周都是白頭浪，浪花頗大。	大樹枝搖擺，持傘有困難，電線有呼聲。
7	28~33	52~62	疾風 near gale	3~4	大浪至非常大浪：海浪突湧堆疊，碎浪之白沫隨風吹成條紋狀。	全樹搖動，人迎風前行有困難。
8	34~40	63~75	大風 gale	4~6	非常大浪至巨浪：接近高浪，浪峰碎成浪花，白沫被風吹成明顯條紋狀。	小樹枝折斷，人向前行阻力甚大。
9	41~47	76~87	烈風 strong gale	6~9	巨浪 / 狂浪 / 猛浪：高浪，泡沫濃密；浪峰捲曲倒懸，頗多白沫。	煙囪頂部移動，木屋受損。
10	48~55	88~103	狂風 storm	9~11	巨浪至非常巨浪 / 狂浪至狂濤：非常高浪。海面變成白茫茫，波濤衝擊，能見度下降。	大樹連根拔起，建築物損毀。
11	56~63	104~117	暴風 violent storm	11~14	非常巨浪至極巨浪 / 狂濤：波濤澎湃，浪高可以遮掩中型船隻；白沫被風吹成長片於空中擺動，遍及海面，能見度減低。	陸上少見，建築物普遍損毀。
12	≥64 64~71	≥118 118~132	颶風 hurricane	≥14	極巨浪 / 狂濤至非常巨浪：海面空氣中充滿浪花及白沫，全海皆白；巨浪如江傾河瀉，能見度大為降低。	陸上少見，建築物普遍嚴重損毀。
13以上	>71	>132	-	>14	極巨浪 / 狂濤 / 非常巨浪：海面巨浪滔天，不堪設想。	陸上難以出現，如有必成災禍。



潮汐成因

潮汐為海水受天體引力驅動之長週期波動

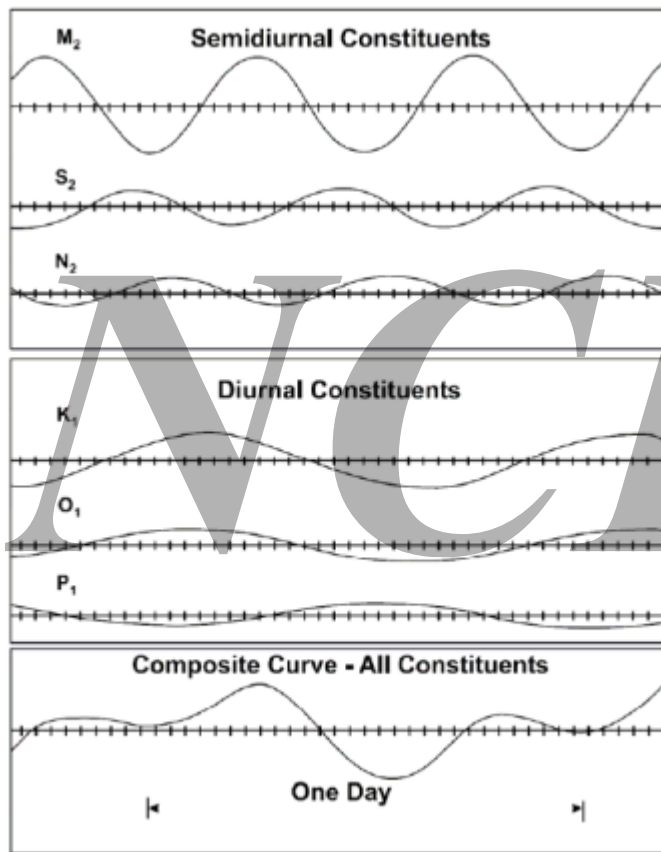
- 海面上升達最高時，稱為**滿潮(High water)**
- 海面下降至最低時，稱為**乾潮(Low water)**
- 由乾潮至滿潮的期間，稱為**漲潮(Flood)**
- 而由滿潮至乾潮的期間，則稱為**退潮(Ebb)**
- 自某一次滿潮至下一次滿潮，或由某一次乾潮至下一次乾潮的時間，稱為**潮汐的週期(Period of tide)**
- 滿潮與乾潮之海面高度差稱為**潮差(Tidal range)**
- 在新月和滿月後1至3日，因太陽、月球和地球的在一條線上，引潮汐力迭加，潮差較大，稱為**大潮(spring tide)**
- 上弦或下弦月時，因太陽和月球位置約略垂直，引力減低，潮差較小，稱為**小潮(neap tide)**



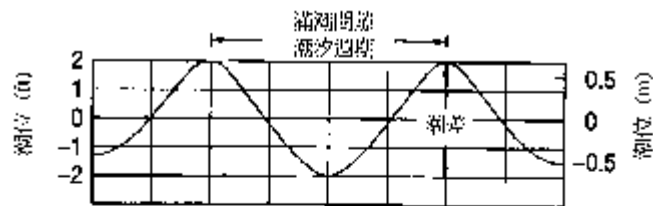
水位

▶ 潮汐

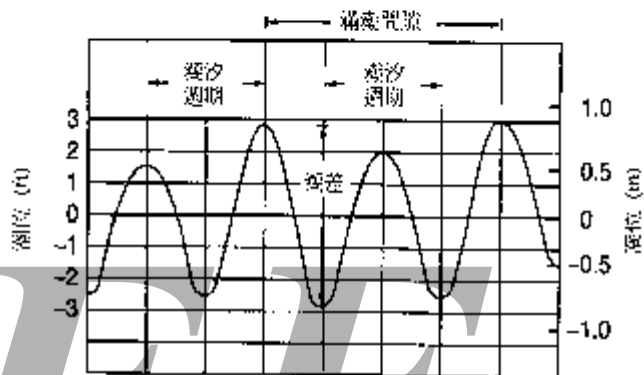
將潮汐視為周期函數，
潮位觀測資料調和分析
分解成無數個不同周期分潮**線性疊加**



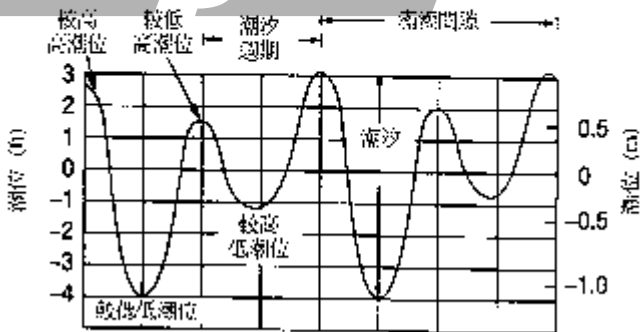
一日潮汐變化



全日潮



半日潮



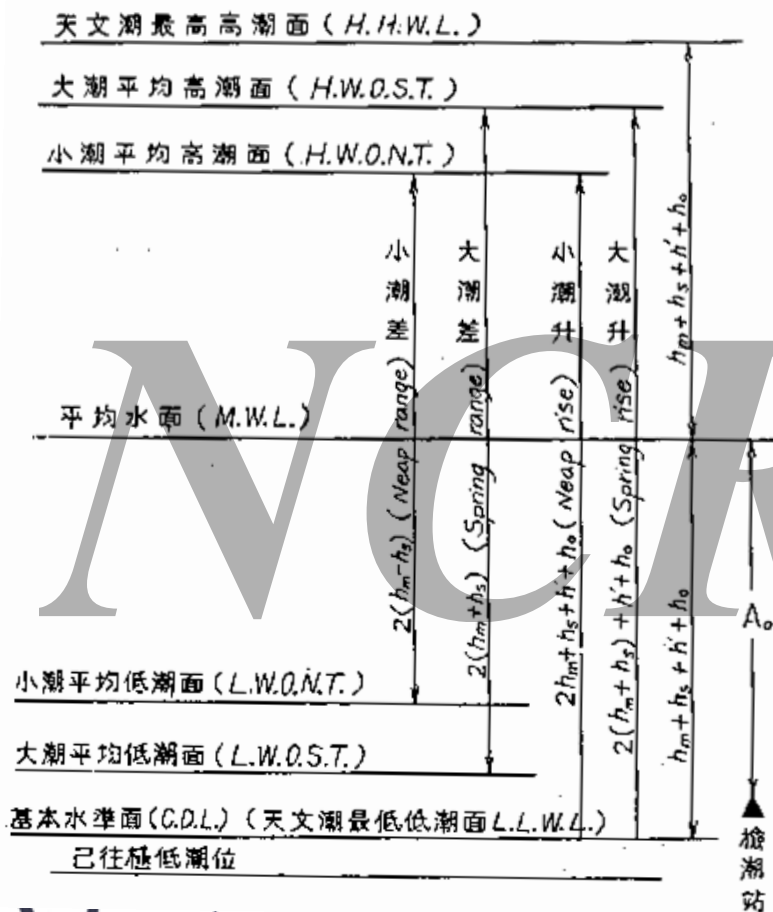
混和潮

水位

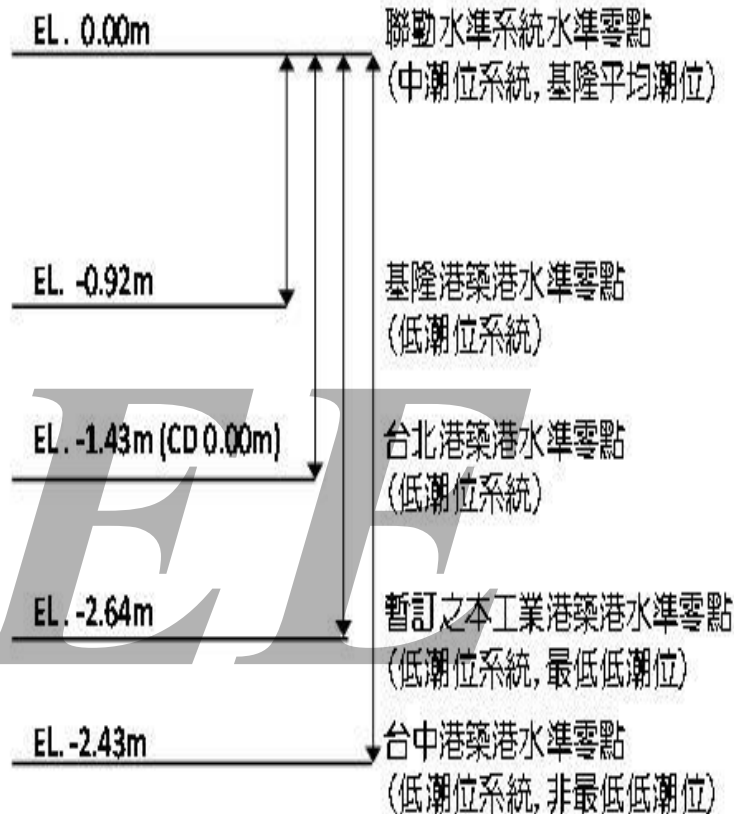
▶ 天文潮

以19年潮位觀測資料統計為佳

已往最高潮位 (氣象潮及其他因素)



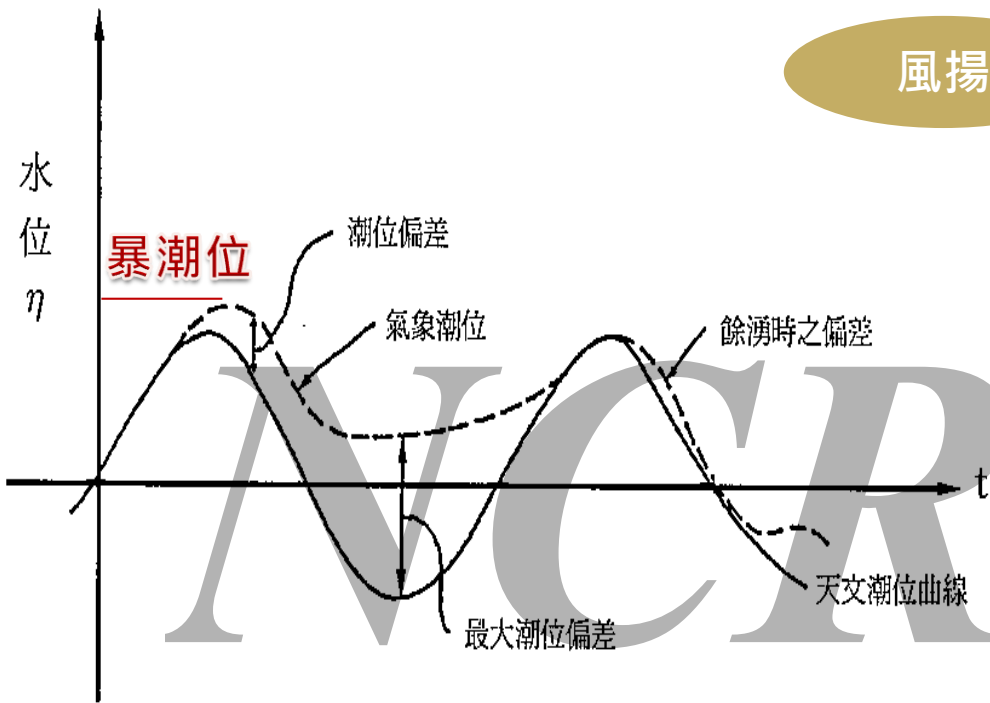
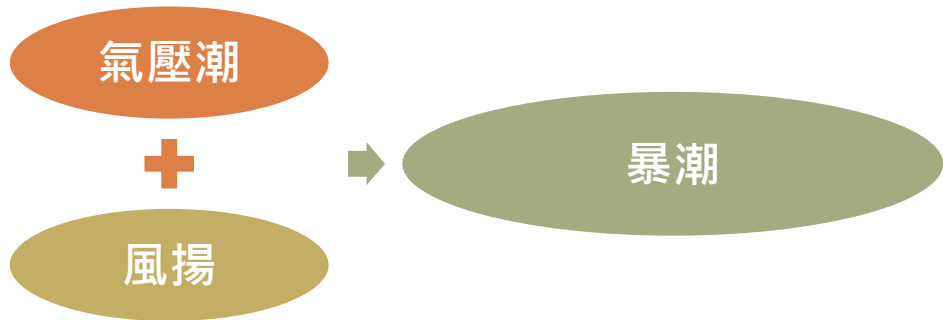
▶ 潮為基準



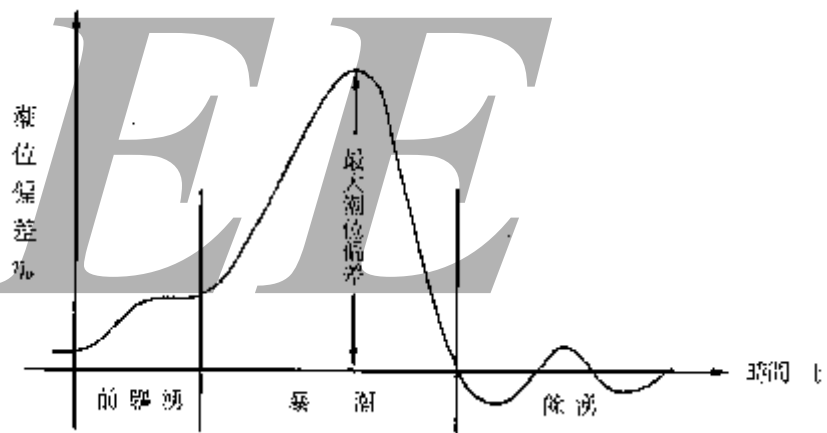
水位

► 氣象潮(暴潮)

暴潮定義



暴潮偏差歷線變化



水位

▶ 暴潮偏差重現期分析

頻率分析

常態分布

二參數對數常態分布

三參數對數常態分布

皮爾遜Ⅲ分布

對數皮爾遜Ⅲ分布

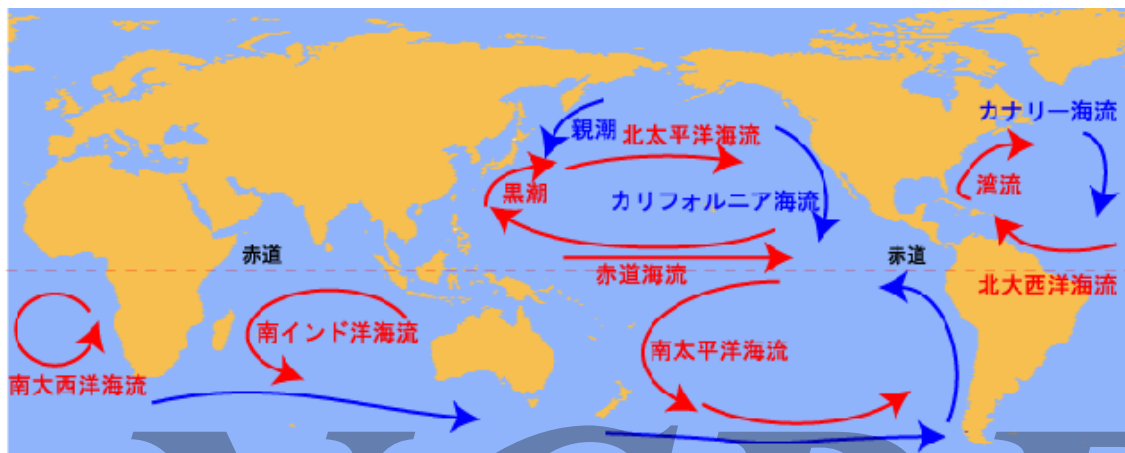
極端值I分布

重現期 (year)	暴潮偏差 (m)	大潮平均 高潮位 (EL.)	設計水位 (EL.)
5	0.292		+0.91
10	0.366		+0.99
20	0.438		+1.06
25	0.461	+0.62	+1.08
50	0.532		+1.15
100	0.604		+1.22

海流

組成成分

➤ **洋流**: 發生於大洋中的水流, 有一定的方向和流速



➤ **潮流**: 海水受日月引力產生潮波, 到了沿岸一帶, 產生伴隨漲落潮現象的水流。

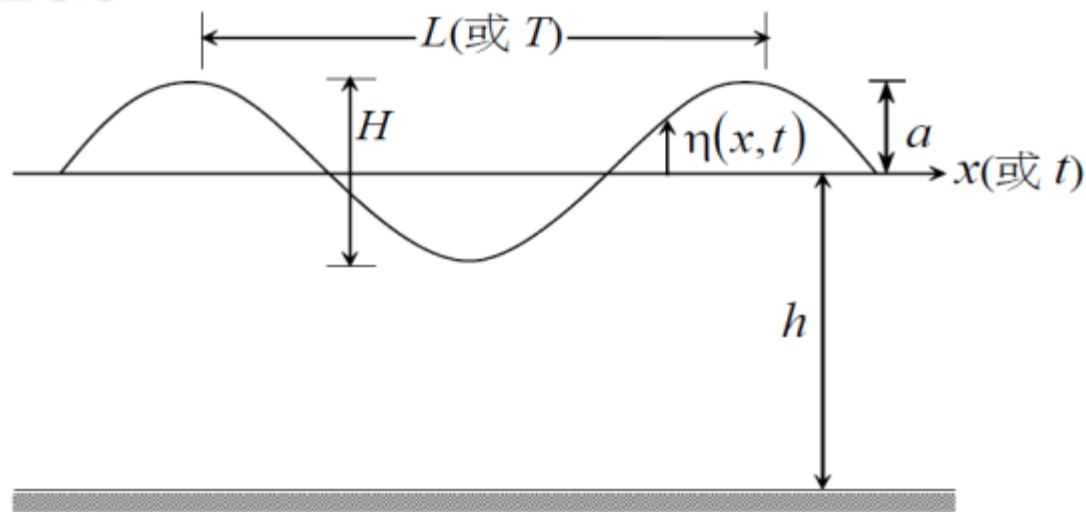
➤ **風趨流**: 沿岸之陸棚海域, 受季風影響, 因風剪力形成流向與流速不定的水流。



波浪定義



波形定義



水位(η)為水表面的高程；

波峰 為水位起伏區間的最高點；

波谷 為水位起伏區間的最低點；

波高(H)為波峰與波谷間的高程差 (垂直距離)；

振幅(a) 為原則上以波高一半， $a = H/2$ ；

波長(L) 為連續兩波峰 (或波谷)間的水平距離；

水深(h) 為平均水位與水底之距離，或通常稱為平均水深；

週期(T) 為在一定點處，連續兩波峰(或兩波谷)出現的時間差

波浪分類

► 依波動理論

□ 微小振幅波(線性波)

假設波高與波長，水深相比微小

□ 有限振幅波(非線性波)

假設波高及流速為有限量

✓ Stokes波理論

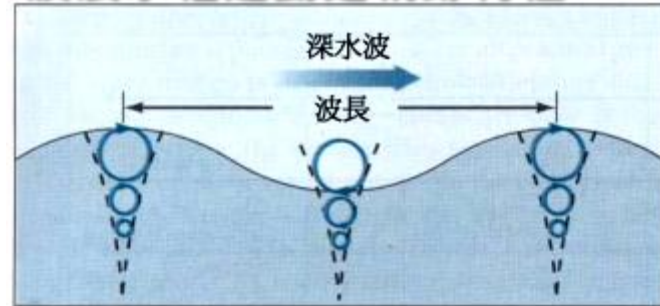
✓ Cn波理論

✓ 流函數波理論

✓ 孤立波理論

► 依波長水深關係

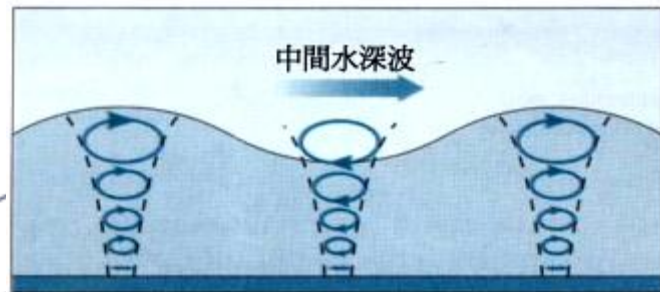
波浪水粒運動之軌跡特性



a Depth $\geq \frac{1}{2}$ wavelength



b Depth $\leq \frac{1}{20}$ wavelength



c Depth $\leq \frac{1}{2}$ to $\geq \frac{1}{20}$ wavelength

基本理論

假設非粘性非壓縮非旋性的流體運動中，具有速度勢 $\Phi(x, y, z; t)$

x、y 及 z 方向
流速 u 、 v 及 w 表示

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}, v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}, w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

連續方程式

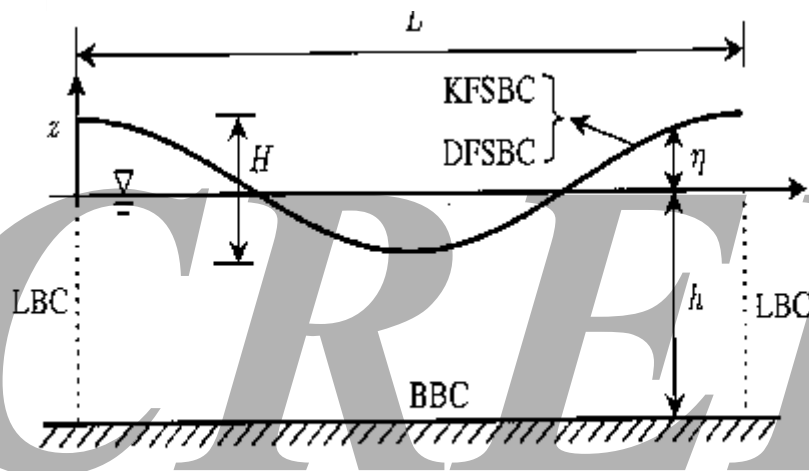
$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

Laplace 方程式

$$\nabla^2 \Phi = 0$$

$$F(x, y, z, t) = z - \eta(x, y, t) = 0$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + g\eta = Q(t); \text{ 在 } z = \eta(x, y, t)$$



$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi(x, y, z, t + nT)$$

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi(x + nL_x, y, z, t)$$

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi(x, y + nL_y, z, t)$$

$n=1,2,3$

波動方程式之邊界條件 (Dean 和 Dalrymple, 1984)

$$F(x, y, z, t) = z + h(x, y, t) = 0$$

微小振幅波

微小振幅波又稱Airy波，
依線形理論導出的波，在理論推導過程中作
三個假定以簡化計算公式

- (1) 水面變動量 η 非常小，可視 $\eta \doteq 0$
- (2) 波運動非常緩慢，可忽略速度的平方項。
- (3) 水面坡度 $\partial \eta / \partial x$ 亦非常小，而忽略其與速度的積

波形

$$\eta = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) = a \cos(kx - \sigma t)$$



分散關係式

$$kh \tanh kh = \sigma^2 h / g$$

h 水深，角頻率 $\sigma=2\pi/T$ ，
周波數 $k=\sigma=2\pi/L$

波長

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh kh$$

波速

$$C^2 = \frac{L^2}{T^2} = \frac{g}{k} \tanh kh$$

深海波長

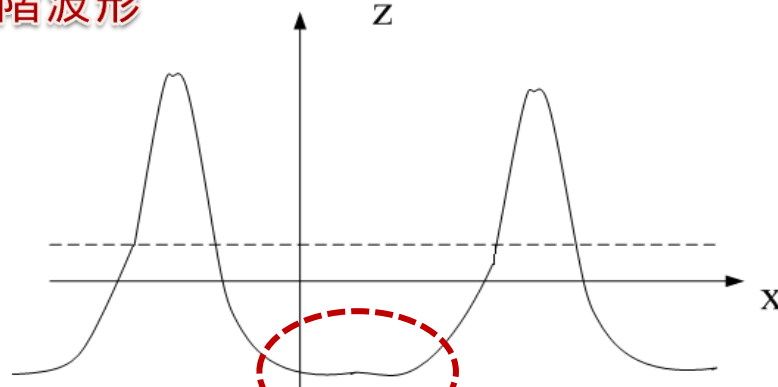
$$L = L_0 = \frac{g}{2\pi} T^2 = 1.56 T^2 \quad (\text{SI 制})$$



有限振幅波

Stokes波理論

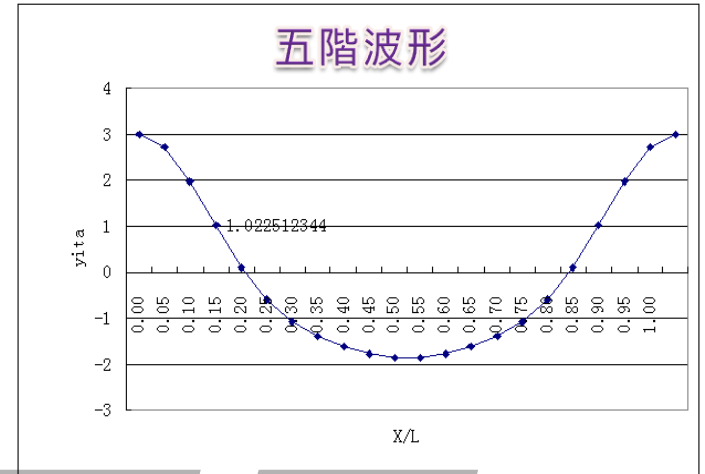
二階波形



水質點運動軌跡

wave phase : $t/T = 0.000$

五階波形



$$\frac{\pi H}{d} = \frac{1}{\left(\frac{d}{L}\right)} [\lambda + \lambda^3 B_{33} + \lambda^5 (B_{35} + B_{55})]$$

$$\frac{d}{L_0} = \frac{d}{L} thkd [1 + \lambda^2 C_1 + \lambda^4 C_2]$$



有限振幅波

➤ Cn 波理論

波形

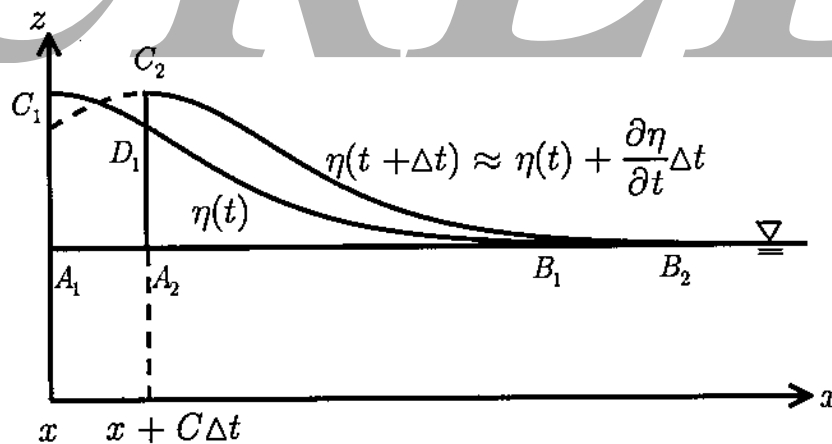
求解Jacobian橢圓函數



$$\frac{\zeta}{H} = \text{cn}^2(v, m) \left[1 - \frac{3H}{4h} (1 - \text{cn}^2(v, m)) \right] - \frac{\delta}{H}$$

波速

以靜水面以上體積不變，定義波速



有限振幅波

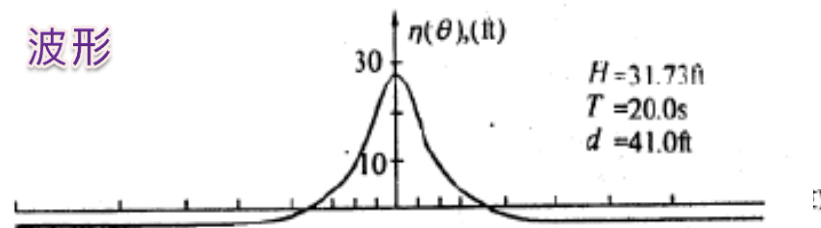
➤ 流函數波理論

與Stokes波理論有關的非線性波理論，最初是由Dean(1965)建立的。因為流動的描述採用了流函數，所以稱為流函數波理論。

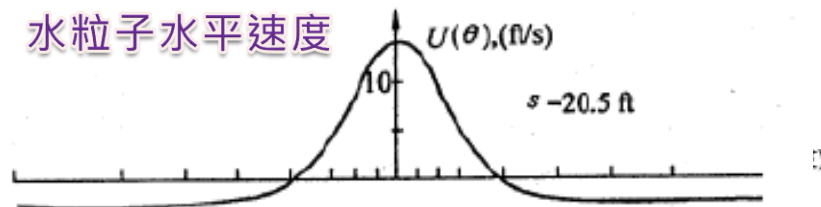
$$\psi(x, \theta) = -u(d+x) + \left(\frac{g}{k^3}\right)^{\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^N B_j \frac{\sinh jk(d+x)}{\cosh(jkd)} \cos(j\theta)$$

$$\eta(\theta) = \sum_{j=1}^{N-1} f_j \cos(j\theta) + 0.5 f_N \cos(N\theta)$$

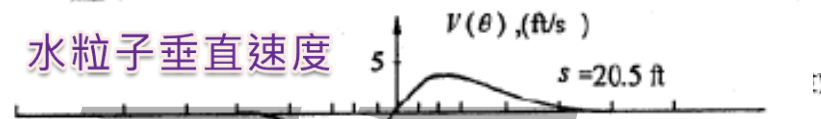
波形



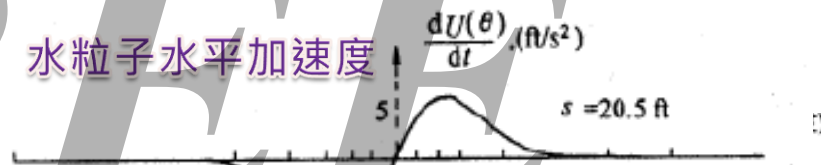
水粒子水平速度



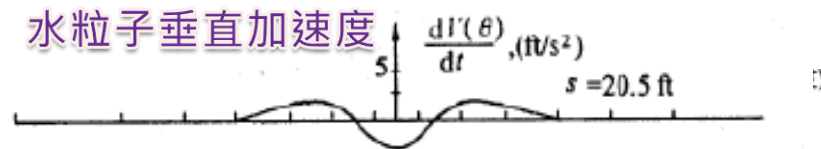
水粒子垂直速度



水粒子水平加速度



水粒子垂直加速度



有限振幅波

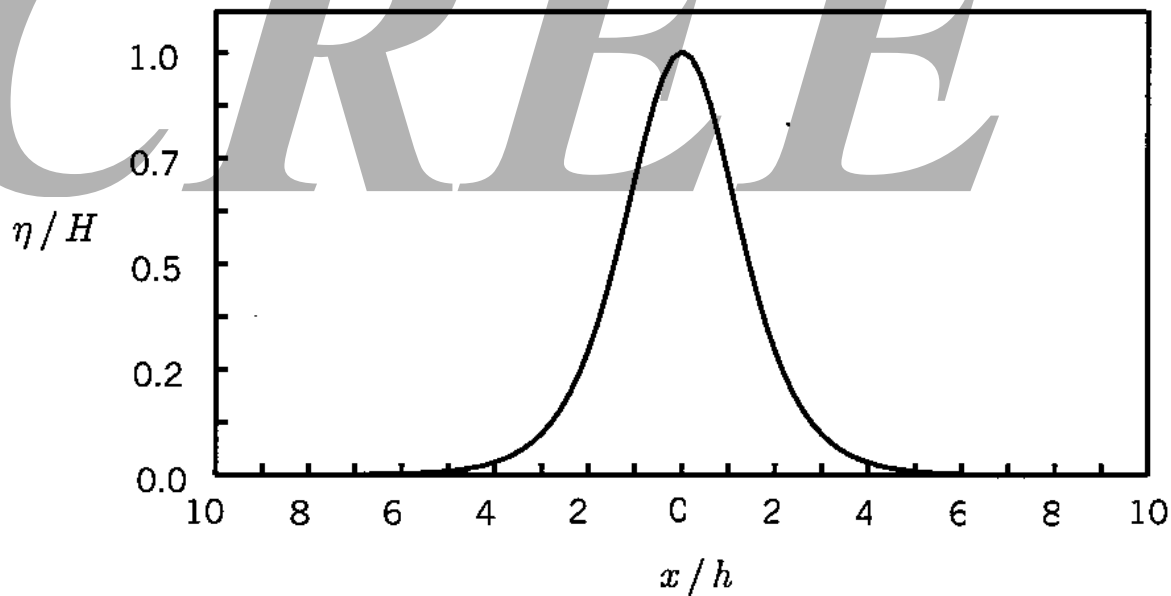
➤ 孤立波理論

波形

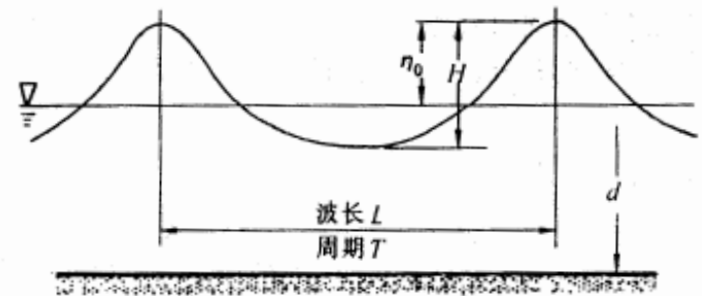
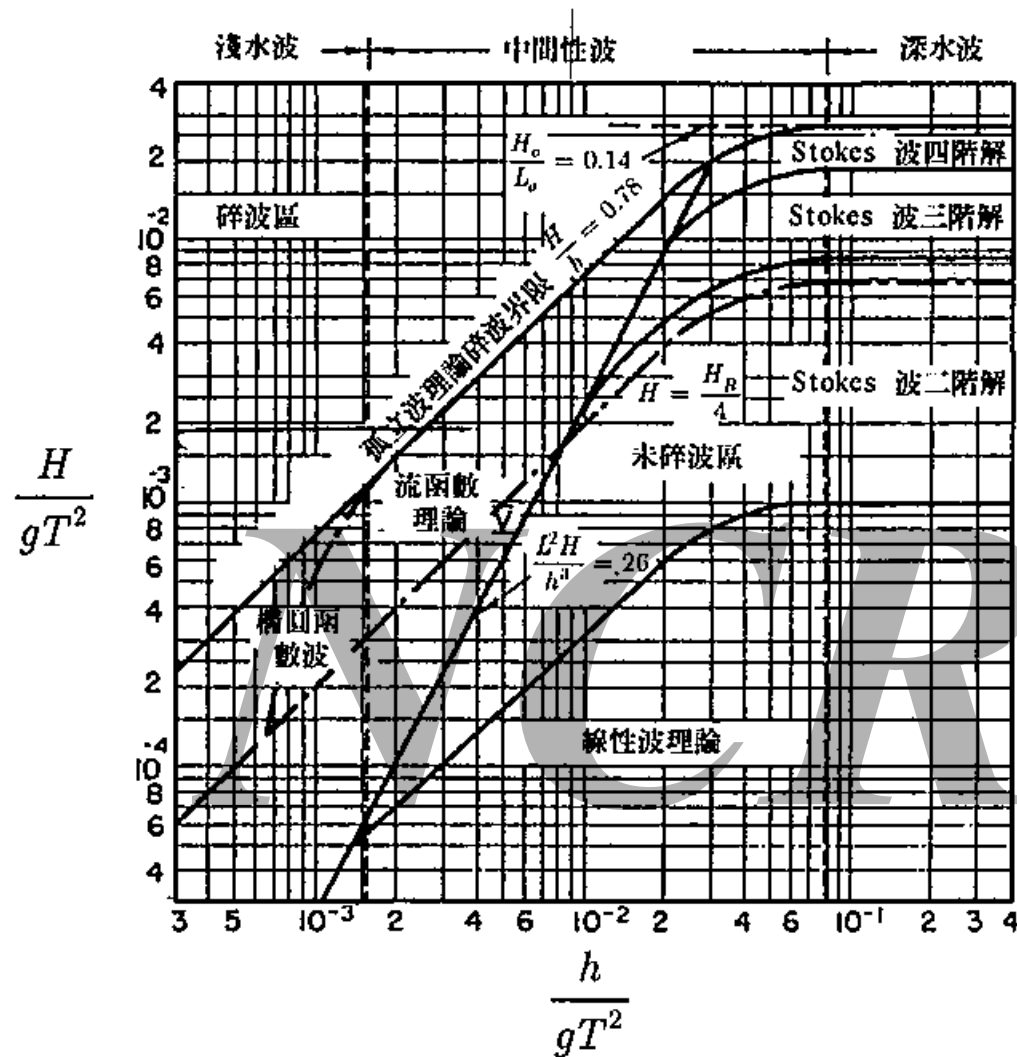
$$\eta = H \operatorname{sech}^2 [\alpha(x-ct)] - \frac{3}{4} \left(\frac{H}{h} \right)^2 \operatorname{sech}^2 \alpha(x-ct) [1 - \operatorname{sech}^2 \alpha(x-ct)]$$

波速

$$C = \sqrt{gh} \left[1 + \frac{H}{2h} - \frac{3}{20} \left(\frac{H}{h} \right)^3 \right]$$



各種波浪理論適用範圍



URSELL 尺度参数 $(n_0 L^2/d^3)$

AIRY 波 $n_0/H < 0.505; (n_0 L^2/d^3) < 1, c < \sqrt{gd}$

STOKES 波 $n_0/H < 0.635; (n_0 L^2/d^3) < 30, c < \sqrt{gd}$

椭圆波 $0.635 < n_0/H < 1; (n_0 L^2/d^3) > 10, c > \sqrt{gd}$

孤立波 $n_0/H = 1; (n_0 L^2/d^3) \rightarrow \infty, c = 1.33\sqrt{gd}$

波浪統計



長期波浪統計

▶ 聯合機率分佈

Period → Height ↓	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	Total	%	Tmed
0.0-0.5	95171	168779	50632	10991	2167	425	110	25	13	7	5	0	318326	17.27	3.31
0.5-1.0	11867	209032	229458	111698	40289	11935	2982	547	132	49	17	0	616786	33.70	5.38
1.0-1.5	322	47777	184356	145537	73169	27184	7458	1481	271	55	32	0	487642	25.53	8.91
1.5-2.0	6	6545	64094	85930	53460	23926	7570	1592	268	41	25	0	243454	13.30	7.77
2.0-2.5	0	742	19753	38224	27786	14938	5689	1263	190	37	13	2	109616	5.93	8.41
2.5-3.0	0	82	5311	14769	12522	8057	3290	798	149	11	3	0	44992	2.45	8.96
3.0-3.5	0	6	1277	5433	5522	4149	1907	510	90	10	3	0	18907	1.03	9.50
3.5-4.0	0	1	309	2006	2350	1963	987	265	51	3	0	0	7935	.43	9.90
4.0-4.5	0	0	69	733	1117	973	535	188	33	1	0	0	3829	.20	10.32
4.5-5.0	0	0	12	284	513	507	321	60	11	0	0	0	1668	.09	10.68
5.0-5.5	0	0	4	83	230	271	165	52	6	0	0	0	811	.04	11.31
5.5-6.0	0	0	1	30	115	123	86	23	1	0	0	0	379	.02	10.98
6.0-6.5	0	0	0	8	39	69	35	12	0	0	0	0	163	.00	12.14
6.5-7.0	0	0	0	3	21	26	16	2	0	0	0	0	68	.00	11.16
7.0-7.5	0	0	0	0	5	18	15	2	0	0	0	0	40	.00	11.93
7.5-8.0	0	0	0	2	3	3	7	0	0	0	0	0	15	.00	11.60
8.0-8.5	0	0	0	0	2	3	1	0	0	1	0	0	7	.00	10.34
8.5-9.0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	4	.00	12.00
9.0-9.5	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	4	.00	11.25
9.5-10.0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	4	.00	11.50
10.0-10.5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	.00	13.00
10.5-11.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00	-	-
11.0-11.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00	-	-
11.5-12.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	.00	12.00
Total	97388	429964	535276	415681	219311	84476	31041	6800	1213	215	98	2	1831442	100.00	
%	5.32	23.48	29.23	22.70	11.97	5.16	1.69	.37	.07	.01	.00	.00			
Mean Height	.31	.64	1.06	1.39	1.60	1.81	2.01	2.10	2.02	1.62	1.49	2.17			

隨機波譜

波浪是一種複雜的隨機過程。50年代初Pierson最先將瑞斯(Rice)關於無線電雜訊理論應用於海浪，從而以譜的形式用隨機過程來描述海浪成為主要的研究途徑。

依照Longuet - Higgins海浪模型

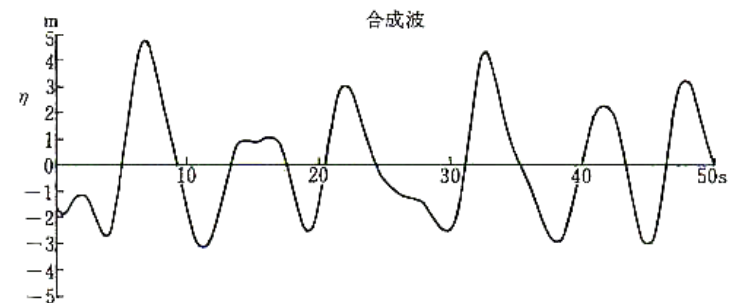
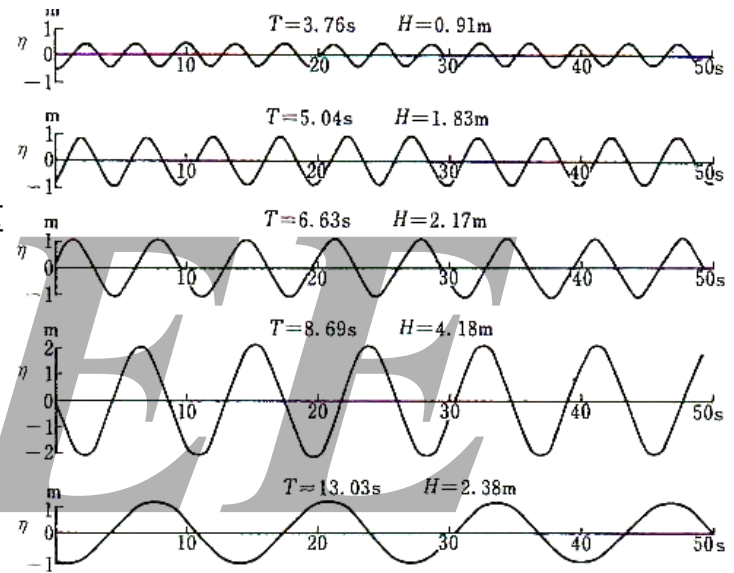
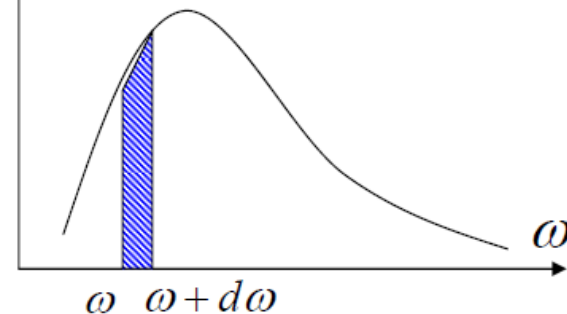
$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n)$$

a : 振幅 ; ω : 角頻率 ; ε : 相位

單一成份波之單位面積水柱能量

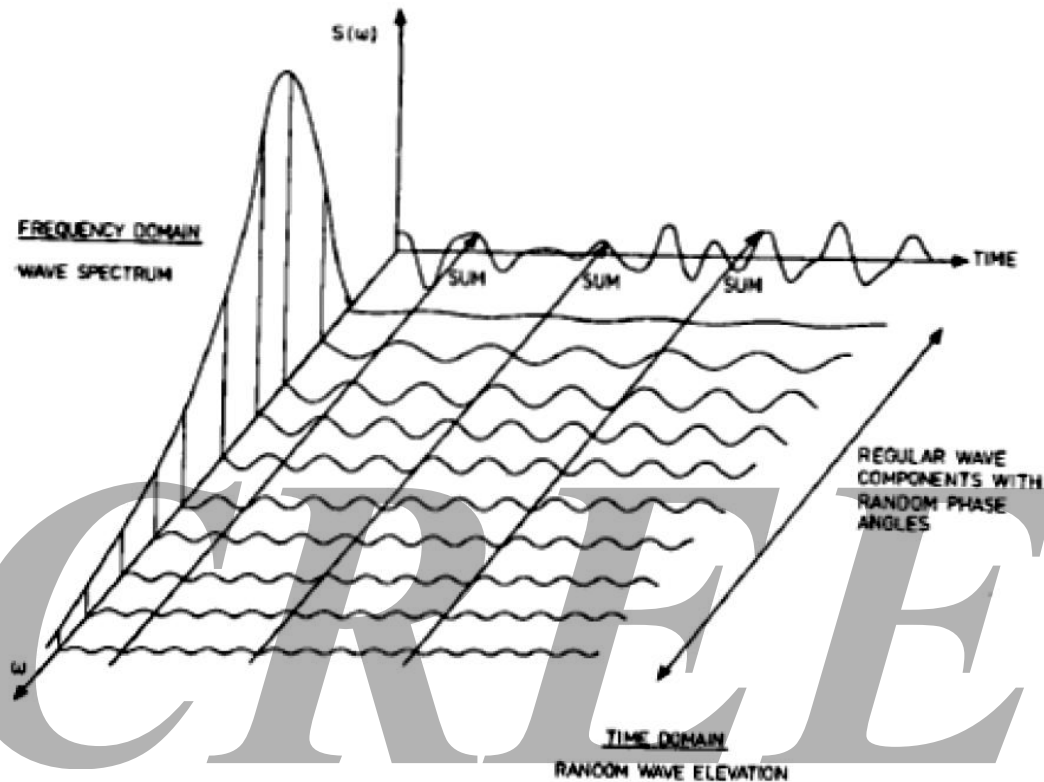
$$E = \sum_{\omega} \frac{\omega+d\omega}{2} \rho g a_n^2$$

$$S_{\eta}(\omega) S_{\eta}(\omega)d\omega = \sum_{\omega} \frac{\omega+d\omega}{2} a_n^2$$



隨機波譜

能量譜密度函數

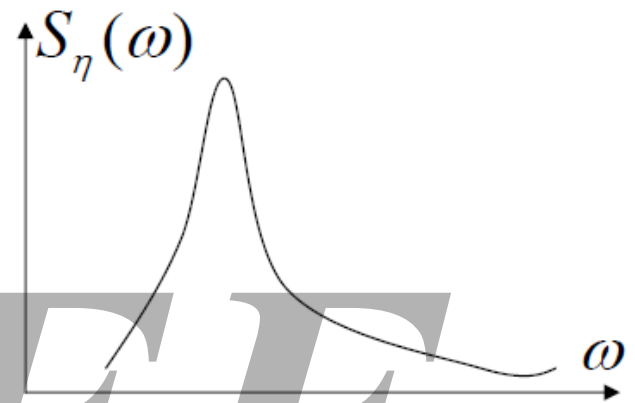
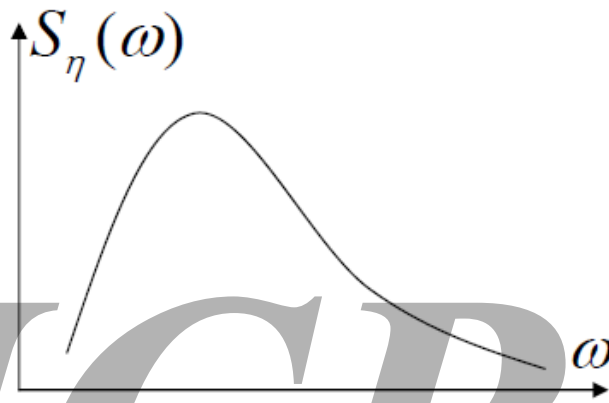


- (1) $\omega = 0$ 附近， $S(\omega)$ 很小
- (2) 隨 ω 增加， $S(\omega)$ 先急劇增加在減小
- (3) $\omega \rightarrow \infty$ ， $S(\omega) \rightarrow 0$

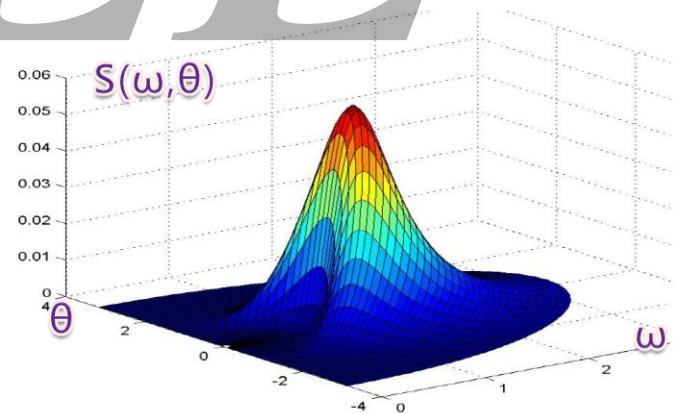
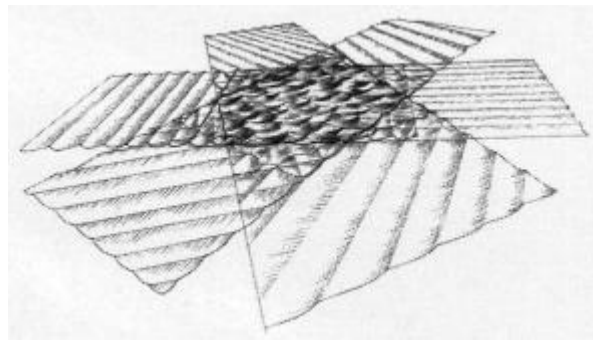
隨機波譜

➤ 風浪譜—寬帶譜

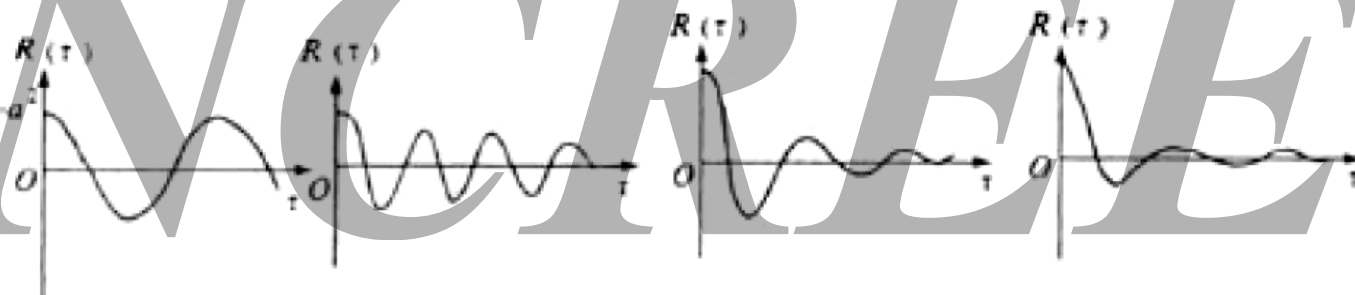
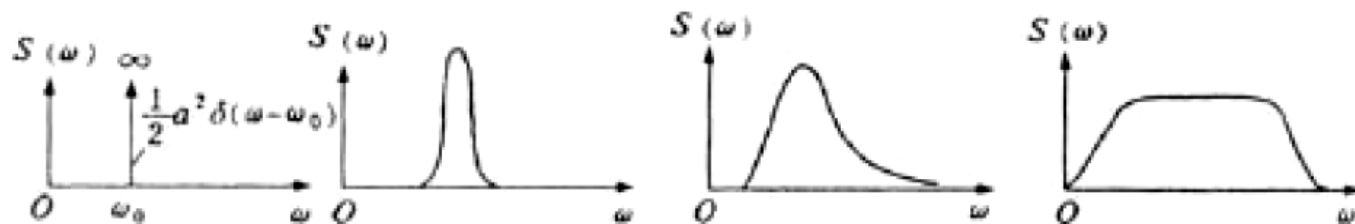
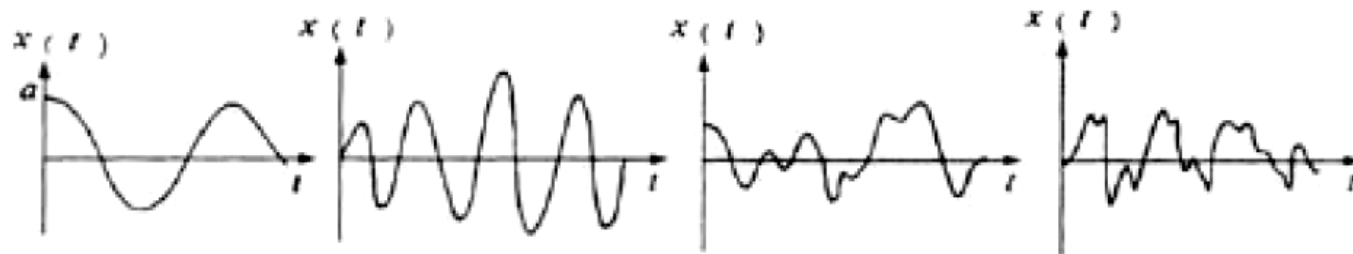
➤ 湧浪譜—窄帶譜



➤ 方向譜



隨機波譜



線性波

窄帶譜波

不規則波

寬帶譜波



隨機波譜種類

➤ Neuman譜

Neuman於1952年提出，為單參數譜

➤ 布氏(Bretschneider)譜

架構在Neuman譜，Bretschneider於1959年由無因次波高和無因次波長的聯合分佈函數匯出了兩參數譜，適用成長階段充分或充分成長的海浪

➤ P-M譜

1964年Pierson和Moskowitz依據北大西洋的實測資料P-M譜為經驗譜，由於所依據的資料比較充分，分析方法比較合理，使用也比較方便，因此在海洋工程和船舶工程中得到了廣泛的應用。

➤ JONSWAP譜

JONSWAP譜由Hasselmann等在“聯合北海波浪計畫”提出。JONSWAP譜的形式可由P-M經修改得到；主要是由中等風況和有限風距情況測得的，多數使用經驗表明，此譜和實測結果是符合的，適用不同成長階段的風浪，較為廣泛應用。

波浪推算



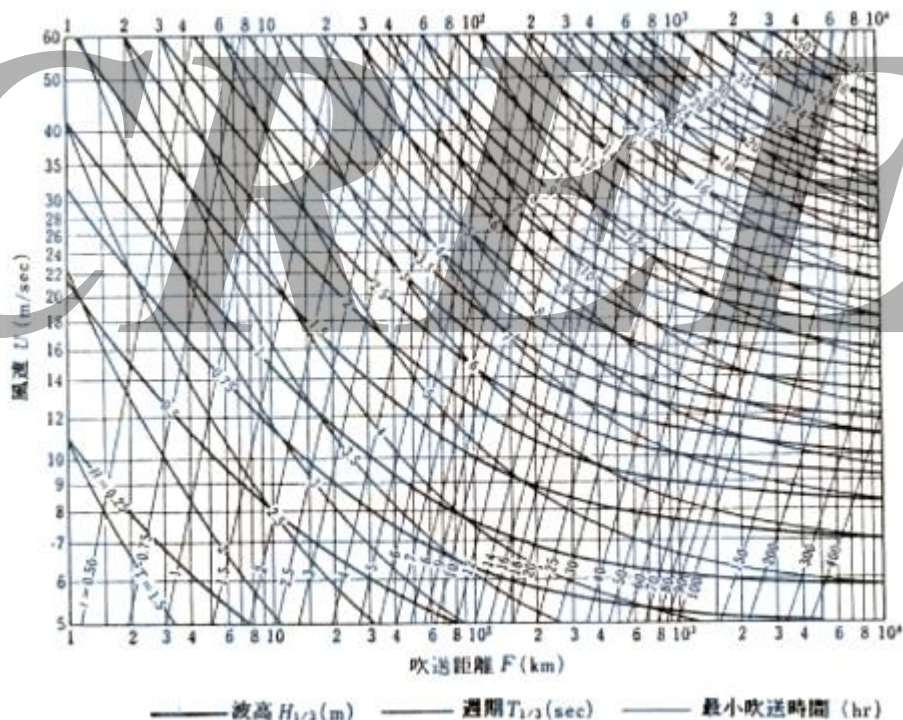
深海域風波推算

➤ SMB法

$$\frac{gH_{1/3}}{U_{10}^2} = 0.30 \left\{ 1 - \left[1 + 0.004 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \right]^{-2} \right\}$$

$$\frac{gT_{1/3}}{2\pi U_{10}^2} = 1.37 \left\{ 1 - \left[1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right]^{-5} \right\}$$

$H_{1/3}$ 及 $T_{1/3}$ 表示有義波高及週期，
 U_{10} 為海面上高10公尺處的風速，
 F 為吹送距離，
 g 為重力加速度



深海域風波推算

PNJ法

Pierson, Neumann 及 James 在1955年發表利用Neumann 波譜預報風波的方法

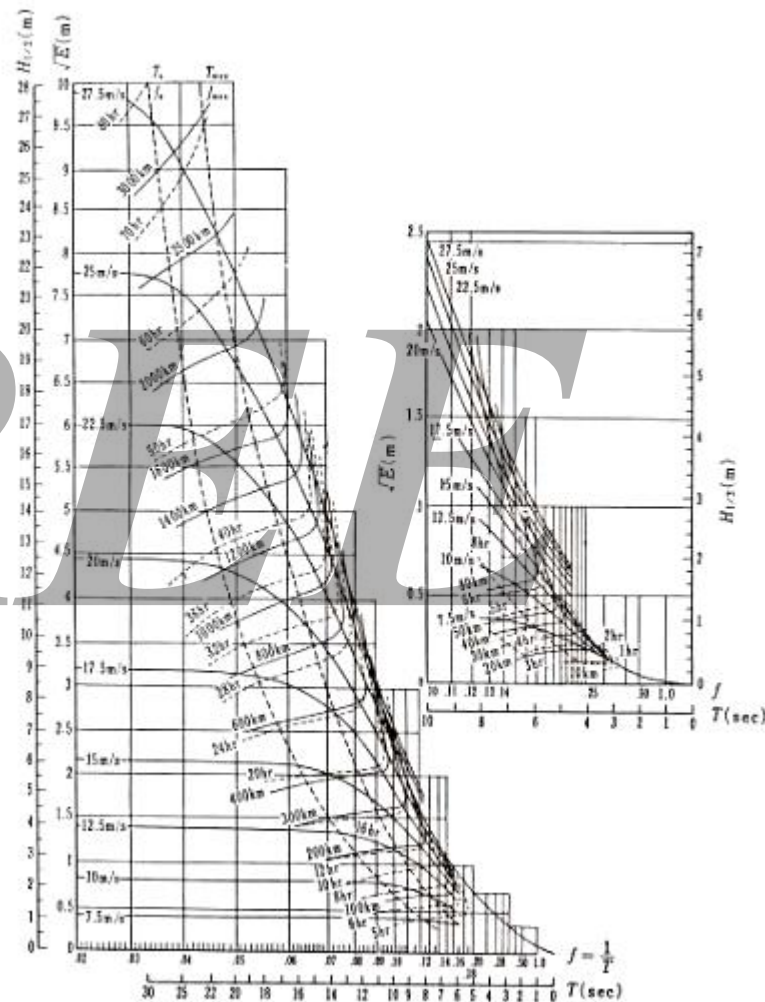
$$H_{1/3} = 2.83\sqrt{E}$$

$$H_{1/10} = 3.600\sqrt{E}$$

$H_{1/3}$ 表示有義波高

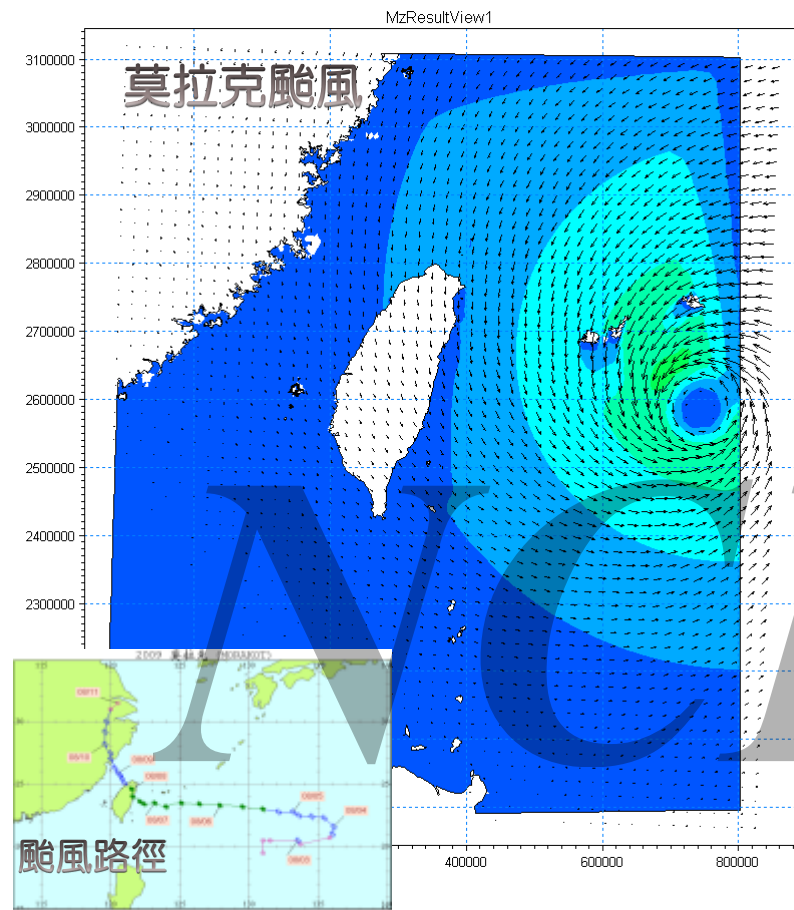
$H_{1/10}$ 表示1/10波高

E為波能



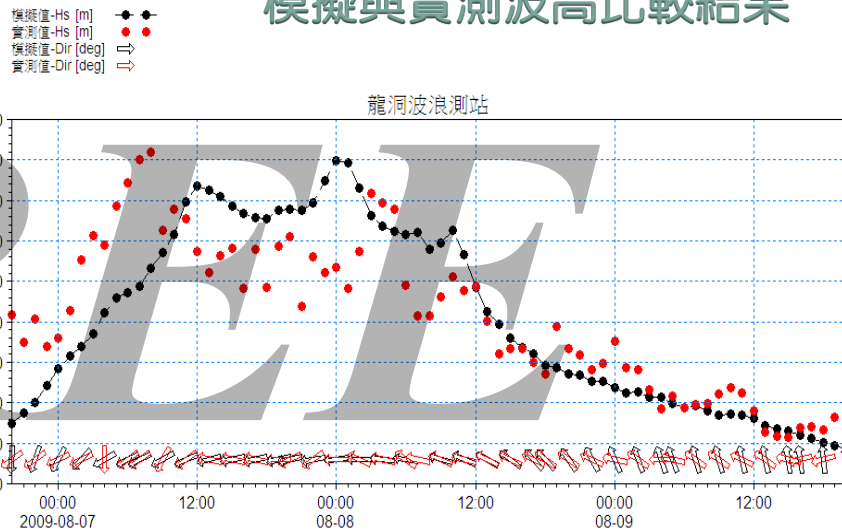
移動風域風波推算

► 颱風重現法



應用丹麥水工所Mike21 SW數值模式
推求颱風波浪(波高、週期、波向)
以作為後續設計波浪之分析。

模擬與實測波高比較結果



移動風域風波推算

▶ 波浪重現期分析

頻率分析

極值 I 型分布(**FT-I 型分布**)

Weibull 分布($k = 0.75$)

極值 II 型分布(**FT-II 型分布**)

Weibull 分布($k = 1.0$)

極值 III 型分布 (**FT-III 型分布**)

Weibull 分布($k = 1.4$)

Weibull 分布($k = 2.0$)

(重現及統計分析40~105年颱風波浪)

重現期 (年)	SE		SSE		S		SSW		SW	
	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)	H(m)	T(sec)
5	4.0	8.4	5.7	10.0	7.2	11.3	6.6	10.8	5.1	9.5
10	5.0	9.4	7.0	11.1	8.8	12.5	8.2	12.0	6.5	10.7
20	5.9	10.2	8.2	12.0	10.2	13.4	9.5	12.9	7.6	11.6
25	6.1	10.4	8.6	12.3	10.6	13.7	9.9	13.2	7.9	11.8
50	6.9	11.0	9.6	13.0	11.8	14.4	11.0	13.9	8.9	12.5
100	7.5	11.5	10.5	13.6	12.9	15.1	12.1	14.6	9.8	13.1



重現期

假設特徵波高（最大或有效波高）的年最大值不超過 H_R 的概率為 $P(H \leq H_R)$ ，則任一年超過 H_R 的遭遇機率為 $1 - P(H \leq H_R)$ ，於是重現期為

$$T_R = \frac{1}{1 - P(H \leq H_R)}$$

某海工結構物壽命 L_1 年，則 L_1 年內，設計波高年最大值超過 H_R 的機率（遭遇機率）：

$$E_1 = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^{L_1}$$

E_1 : 遭遇機率
 L_1 : 耐用年限
 T_R : 重現期

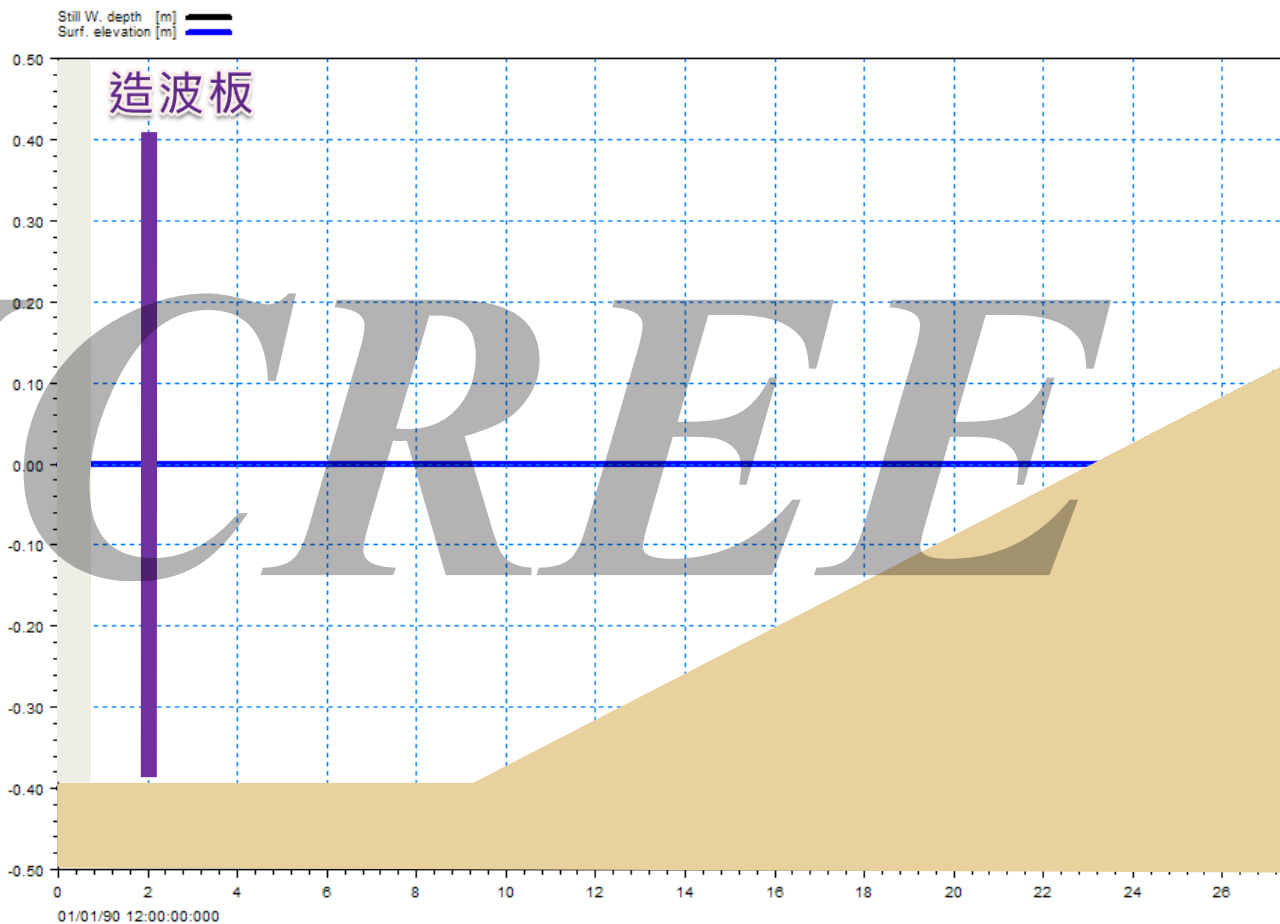


波浪變形



波高及波長的淺化變形

水深越來越淺，波高越來越大，水粒子的運動速度越來越快，快到水粒子離開原來的水體，就變成泡沫(白沫現象)



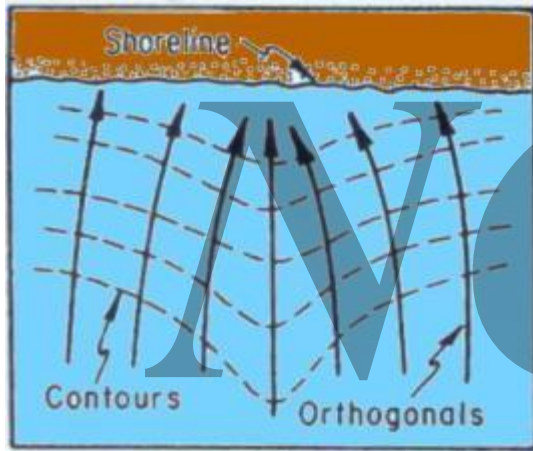
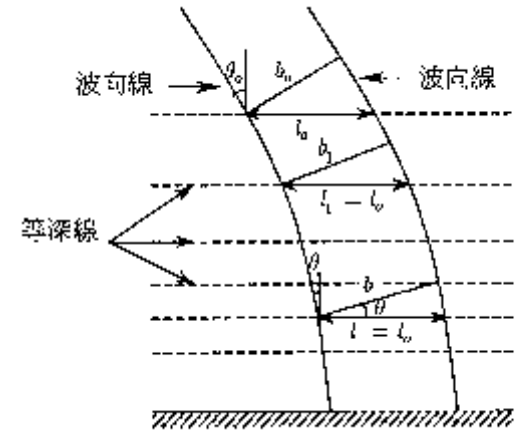
NO CRETE

折射

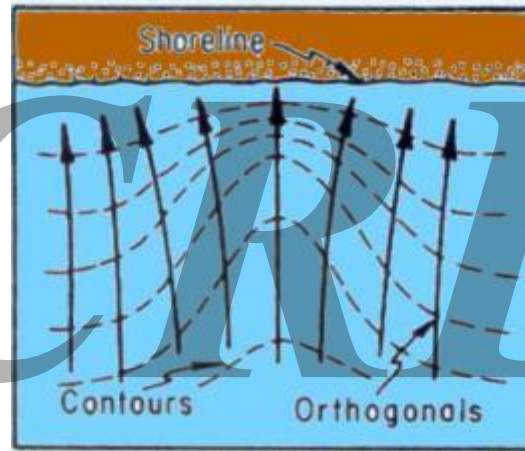
➤ Snell's Law

折射係數

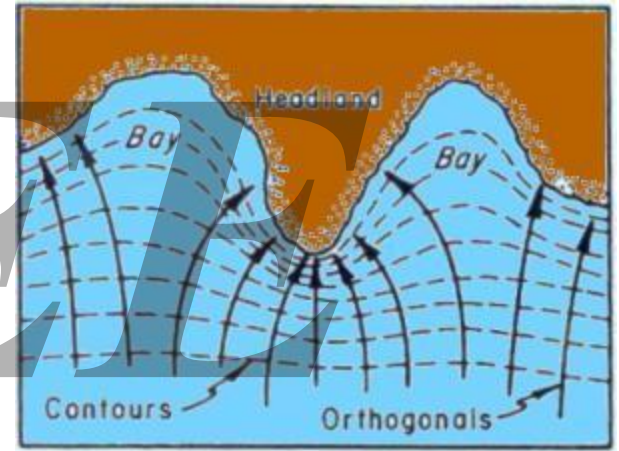
$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos\theta_0}{\cos\theta}}$$



(a) 波浪折射



(b) 突出地形波浪集中



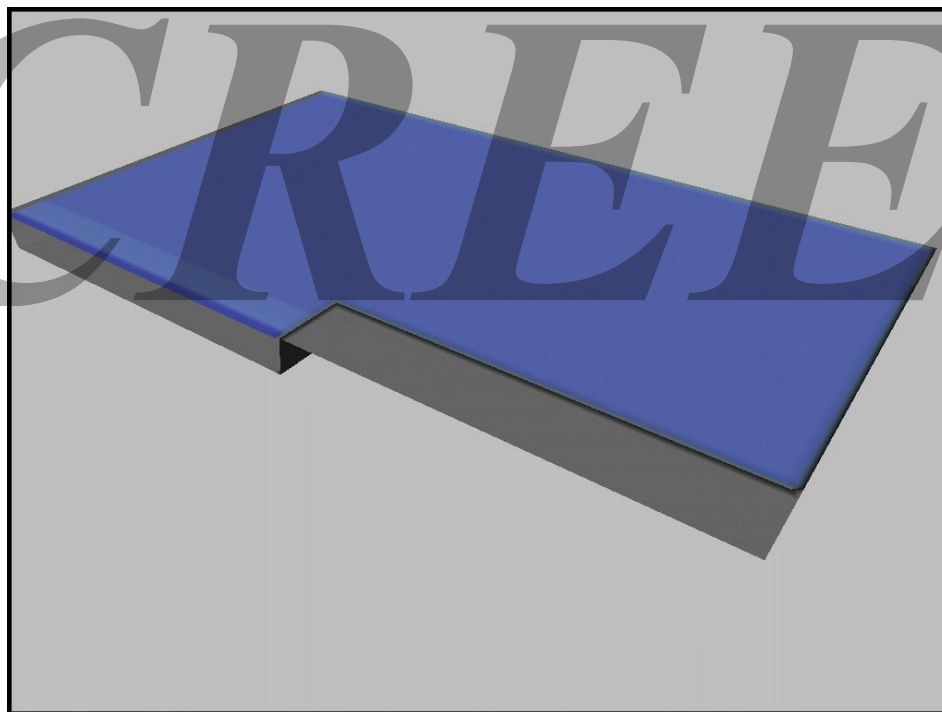
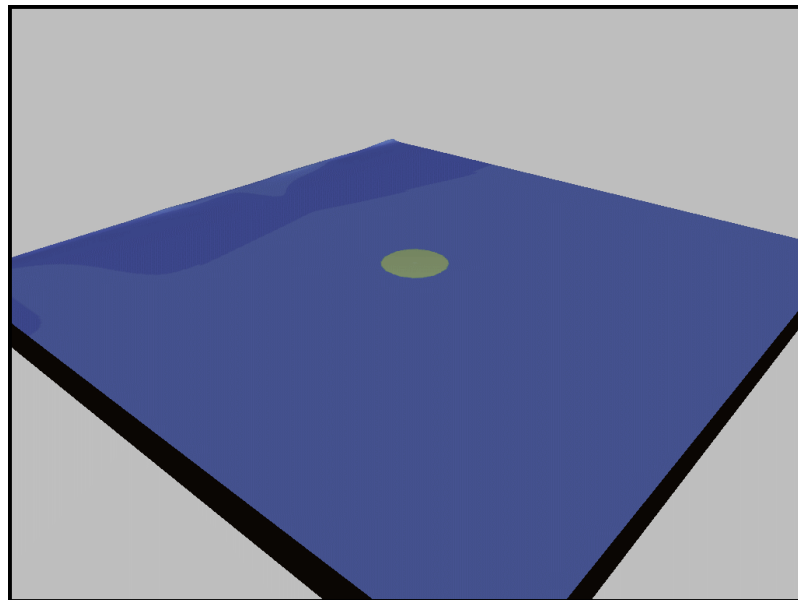
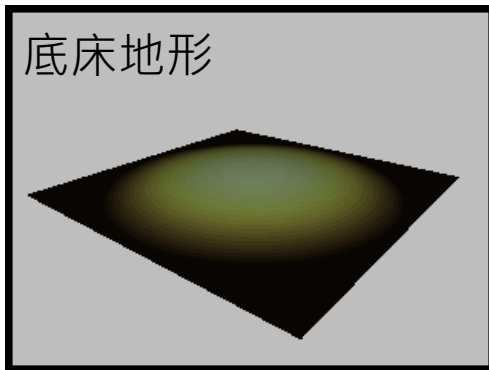
(c) 灣澳波浪發達



繞射

波高分布

底床地形

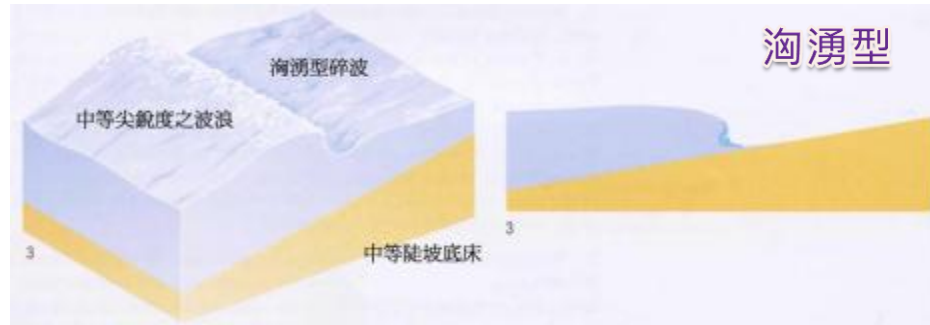


NO CRLE

碎波

碎波指標 $\gamma = \frac{H}{h} = 0.78$

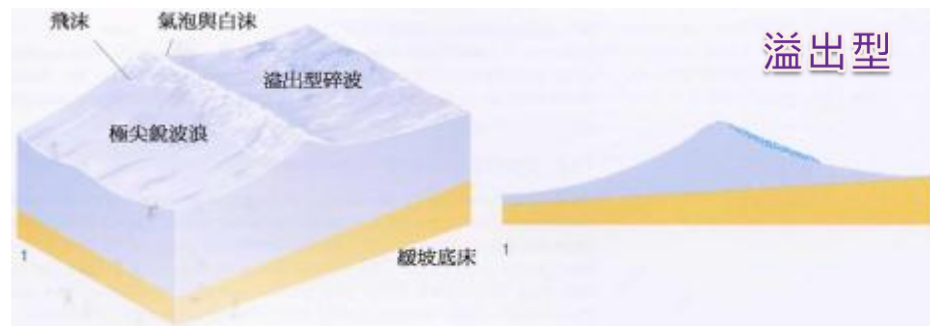
ξ_b 碎波相似參數



$\xi_b > 2.0$



$0.4 < \xi_b < 2.0$

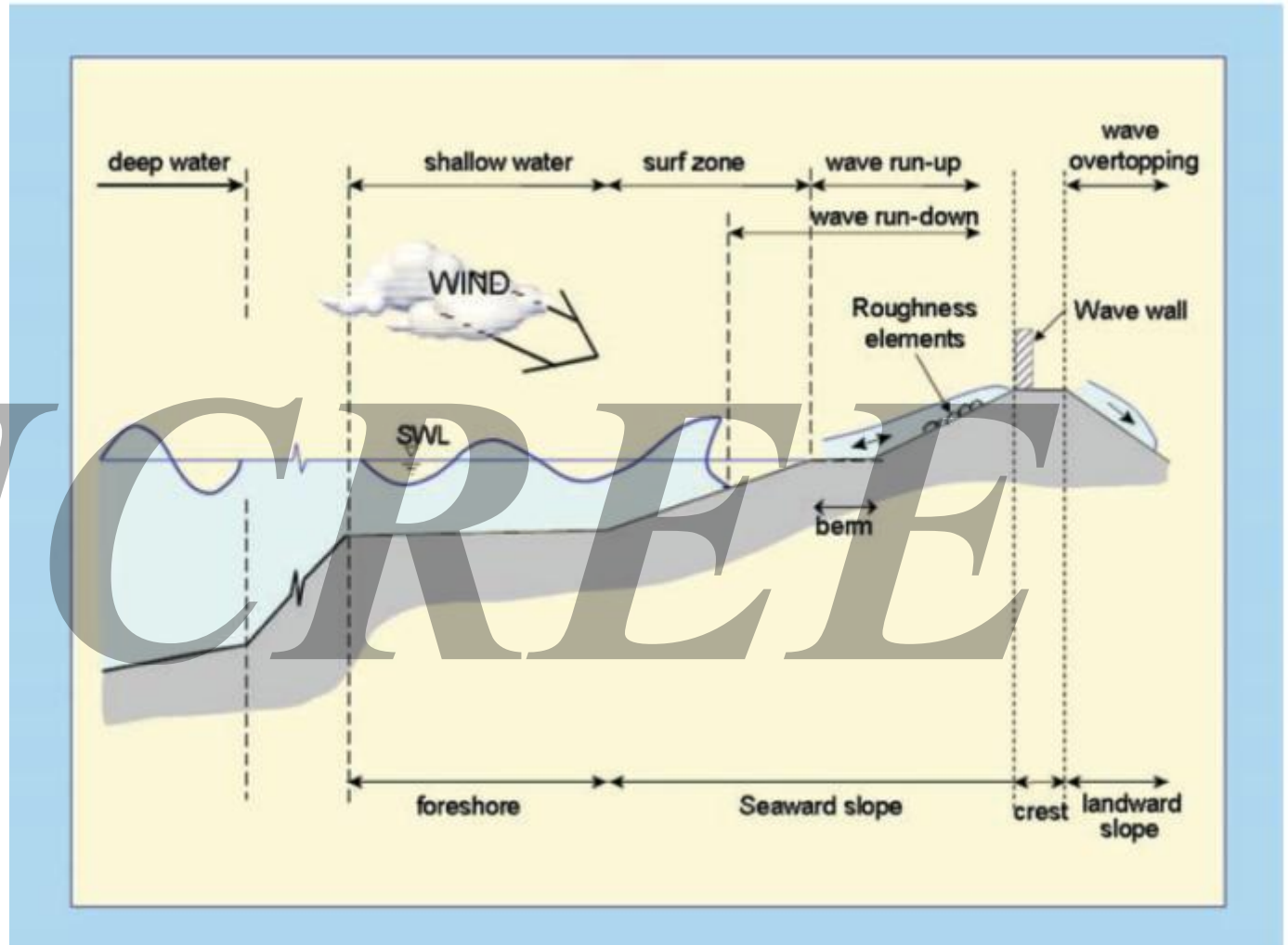


$\xi_b < 0.4$



NCR EE

波浪溯上



NOVEMBER

波浪溯上

▶ 災害限界之越波量

種類	保護工	越波量(m ³ /m.sec)
護岸	堤頂無保護工	0.05
	堤頂有保護工	0.2
堤防	堤頂及背後均無保護工	0.005以下
	堤頂保護・背後無保護工	0.02
	三面混凝土保護	0.05

資料來源：日本港灣協會「日本港灣の施設の技術上の基準、同解説」，1999

▶ 堤後土地利用狀況與其容許越波量

利用者	堤防距離	越波量(m ³ /m.sec)
行人	緊接堤後 (50%安全度)	2×10^{-4}
	緊接堤後 (90%安全度)	3×10^{-5}
汽車	緊接堤後 (50%安全度)	2×10^{-5}
	緊接堤後 (90%安全度)	1×10^{-6}
房屋	緊接堤後 (50%安全度)	7×10^{-5}
	緊接堤後 (90%安全度)	1×10^{-6}

資料來源：日本港灣協會「日本港灣の施設の技術上の基準、同解説」，1999

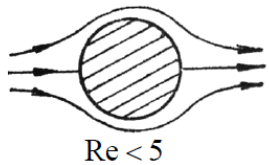
波力與構造物



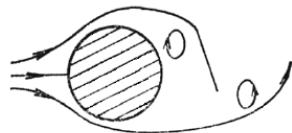
作用於小口徑圓柱體的波力

Kármán vortex street

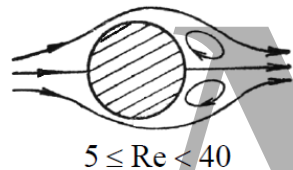
Strouhal number



$Re < 5$



$150 \leq Re < 300$
 $300 \leq Re < 3 \times 10^5$



$5 \leq Re < 40$



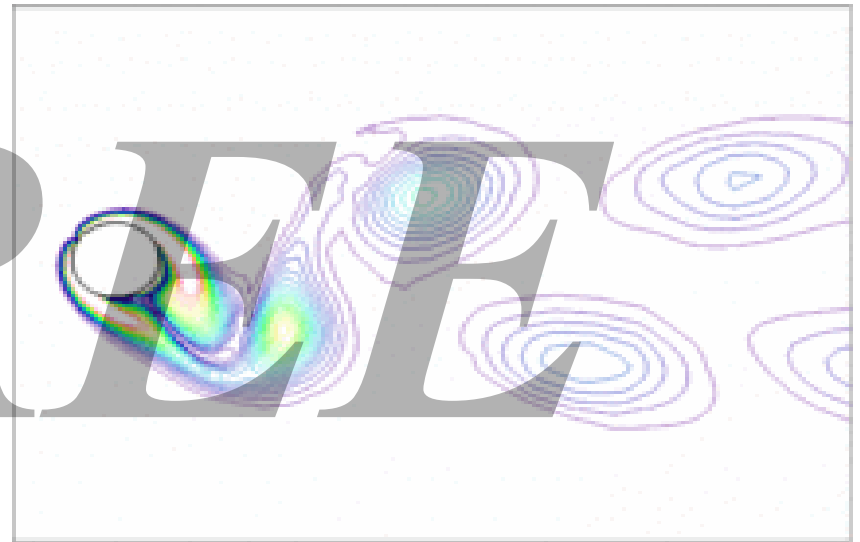
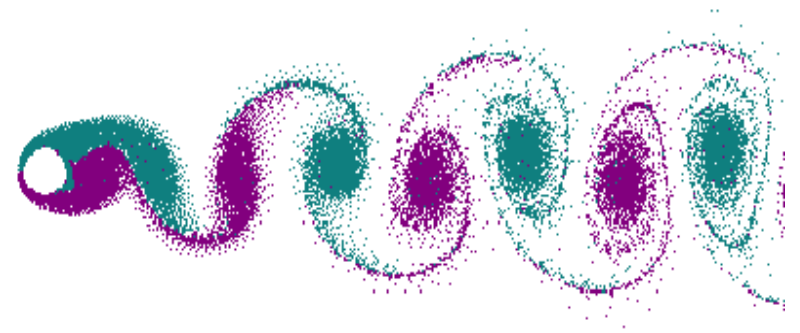
$3 \times 10^5 \leq Re < 3.5 \times 10^6$



$40 \leq Re < 150$



$3.5 \times 10^6 < Re$



Re: 雷諾數



作用於小口徑圓柱體的波力

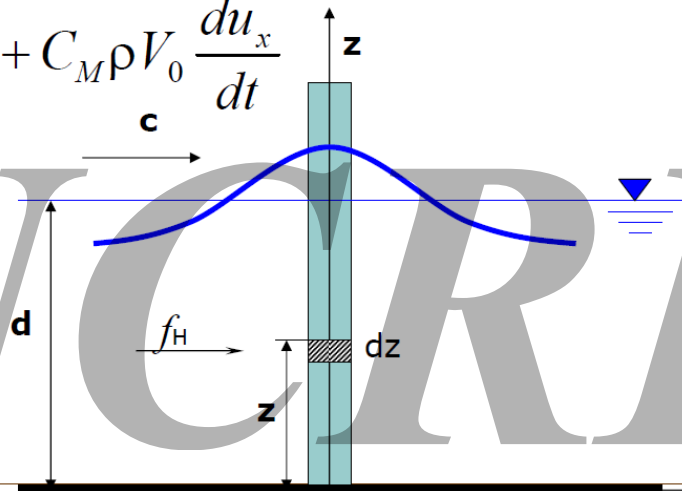
$D/L < 0.05$

➤ Morison方程式

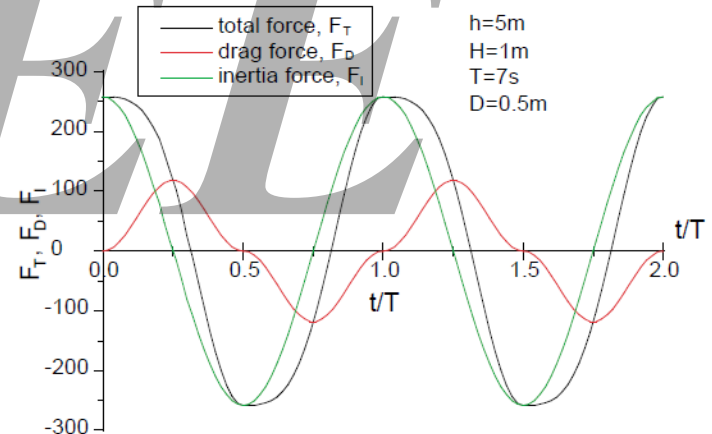
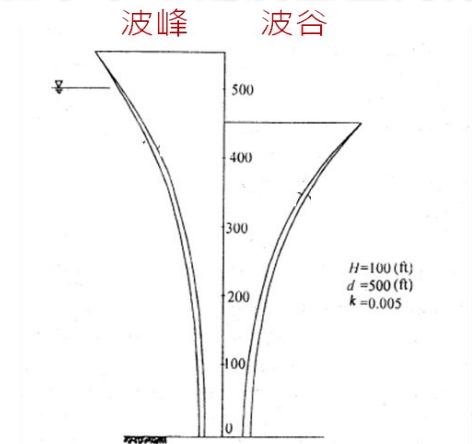
$$\begin{aligned}
 f_H &= f_D + f_I \\
 &= \frac{1}{2} C_D \rho A u_x |u_x| + \rho V_0 \frac{du_x}{dt} + C_m \rho V_0 \frac{du_x}{dt} \\
 &= \frac{1}{2} C_D \rho A u_x |u_x| + C_M \rho V_0 \frac{du_x}{dt}
 \end{aligned}$$

F_d 水平拖曳力

F_I 水平慣性力



水粒子水平速度垂直向分佈



一個週期圓柱力分佈



作用於大口徑圓柱體的波力

$D/L > 0.05$

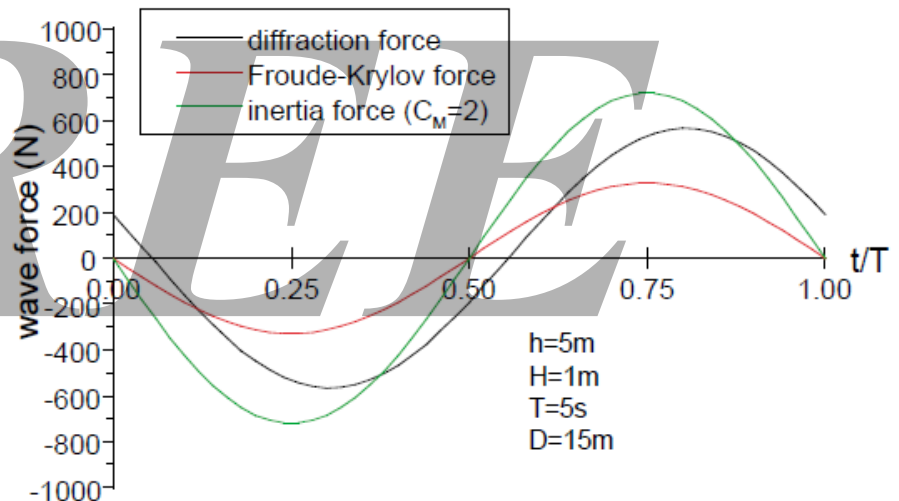
➤ MacCamy- Fuchs方程式

假定流體是不可壓縮的理想流體，結構物邊界作為波動著的流體邊界的一部分，先找出在結構物邊界上結構物對入射波的散射速度勢和未受結構物擾動的入射波的速度勢，兩者迭加後即為結構物邊界上擾動後的速度勢，應用線性化的貝努利方程取得了精確的解析解。

➤ Froude-krylov方程式

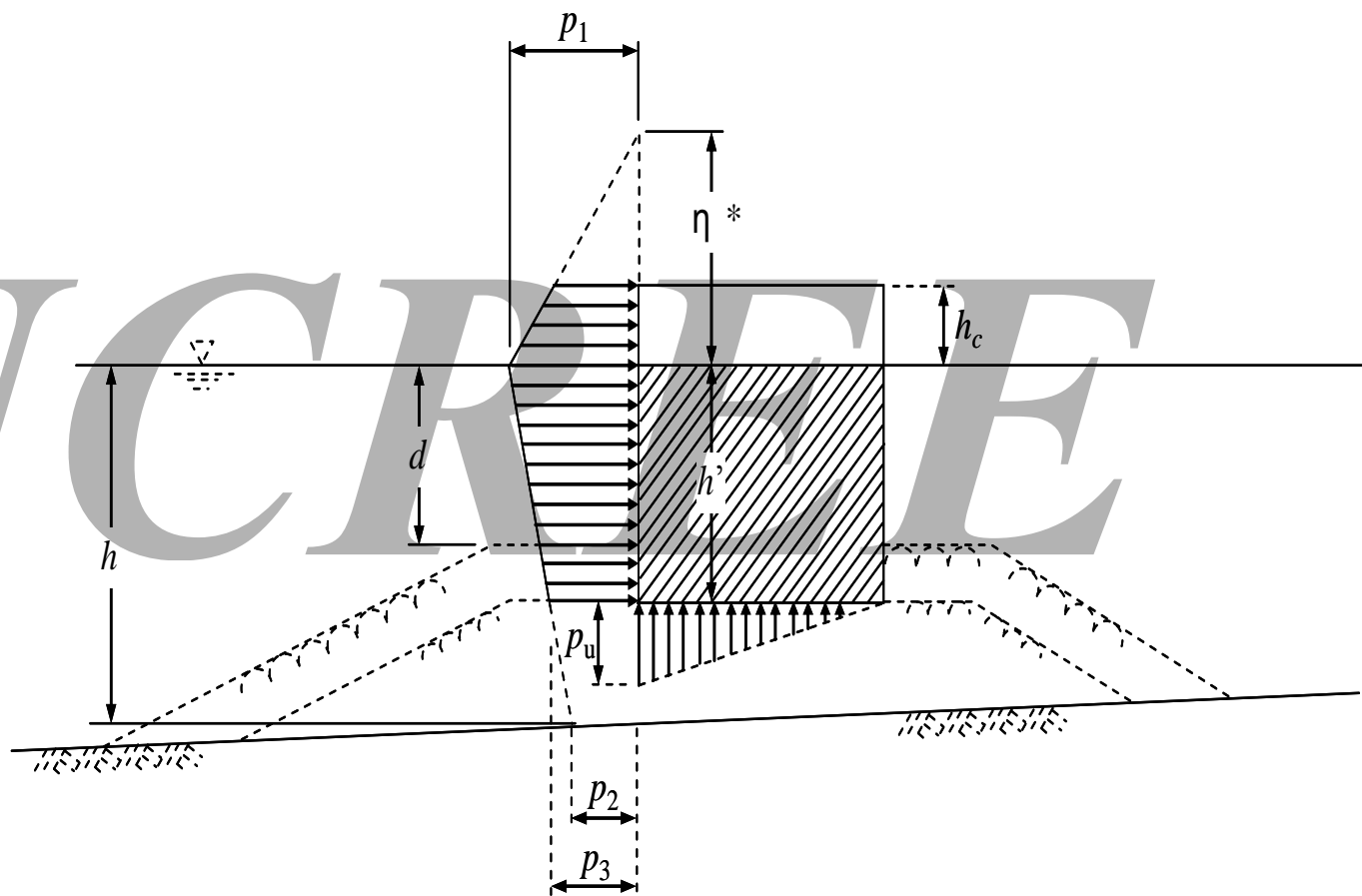
假定波浪原有的壓強分佈不因結構物的存在而改變，先算出由未擾動的入射波在結構物邊界上的作用力，稱為弗汝德—克洛夫力(簡稱弗—克力)，再乘以反映附加品質效應和繞射效應的一係數進行修正，此係數稱為繞射係數，需要通過模型試驗加以確定。

($h=5\text{m}$, $H=1\text{m}$, $T=5\text{s}$, $D=15\text{m}$)



作用於垂直壁的波壓

合田良實(Goda)根據波壓試驗結果及對現場防波堤之實測成果加以檢討，並修正波向效應所提出之公式



斜面上被覆工所需重量

► Hudson公式

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot \alpha}$$

- W: 塊石或混凝土塊之最小重量(t)
- γ_r : 塊石或混凝土塊之單位體積重(t/m³)
- S_r : 塊石或混凝土塊對海水之比重= γ_r/γ_w
- α : 坡面與水平面之角度
- γ_w : 海水之單位體積重(t/m³)
- H: 設計波高 · $H_{1/3}$ (m)
- K_d : 消波塊(塊石)之安定係數

HUDSON

1. 波高H= m

2. 塊石密度 ρ_r = t/m³

3. 海水密度 ρ_0 = t/m³

4. 坡面與水平夾角 α = 1: (V:H)

5. 塊石 K_d =

6. S_r =

7. 塊石重M= ton

DONE

版權所有:中興工程顧問公司 水利及海洋工程部 吳芬華

名稱	層堆數法	堤身		堤		坡度 cot θ
		碎波	未碎波	碎波	未碎波	
塊石						
圓滑塊石	2 亂拋	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5~3.0
圓滑塊石	3 亂拋	1.6	3.2	1.4	2.3	1.5~3.0
菱角塊石	2 亂拋			1.9	3.2	1.5
		2.0	4.0	1.6	2.8	2.0
菱角塊石	>3 亂拋			1.3	2.3	3.0
		2.2	4.5	2.1	4.2	1.5~3.0
菱形塊石 (Tetrapod)	2 亂拋	7.0	8.0	4.5	5.5	2.0
四角塊 Quadrupod				3.5	4.0	3.0
扇形塊 (Tribar)	2 亂拋	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
				7.8	8.5	2.0
				6.0	6.5	3.0
扇形塊	1 整砌	12.0	15.0	7.5	9.5	1.5~3.0
道拉斯塊 (Dolos)	2 亂拋	15.5	31.8	8.0	16.0	2.0
				7.0	14.0	3.0
修飾方塊 (Modified cube)	2 亂拋	6.5	7.5	-	5.0	1.5~3.0
六腳塊 (Hexapod)	2 亂拋	8.0	9.5	5.0	7.0	1.5~3.0



簡報完畢 敬請指教

