

消波物質消能效果之研究

周宗仁*

成俊欽**

摘 要

本文的目的在於求得消波物質受波浪作用時之消能效果，首先利用實驗，對各種不同空隙率及断面形狀的消波岸壁，測定作用於不透水岸壁的波壓力分佈及堤前之反射率。其次利用邊界元素法理論解析，求得對各種断面形狀及不同空隙率時，此等消波断面引起之反射率及作用於不透水岸壁之波壓力分佈。再利用由實驗所得之結果與理論結果比較，以求抗力係數 μ 及附加質量力係數 ϵ 值，兩者比較結果得抗力係數 μ 介於0.8~1.2間，對本研究之對象而言， μ 為1.0時與實驗值最吻合，附加質量力係數 ϵ ，則定為0較為適當。

一、前 言

由於世界經濟的發展，導致貿易的頻繁，進而加重了航運的重要性。由於航運在今日的經濟扮演了重要的角色，所以港灣工程相對的也受大眾的矚目。

為了加強港內水域之穩定性，必須有賴於消波設施，因此消波設施之消能效果對工程設計，為一相當重要之考慮因素。

消能效果雖可由數值上之計算求得，但仍須由實驗求得抗力係數與附加質量力係數，方能正確算出其消能效果。對於這問題的研究，曾有許多學者發表過相關的論文。例如：Sollitt and Cross⁽¹⁾，Madsen⁽²⁾，井島武士⁽³⁾等。

Sollitt and Cross在解析此問題時，假定孔隙性物質對流體之抵抗為Darcy type，經使用Lorentz principle後可得一簡單之解，而其解考慮項目包括防波堤形狀，構成防波堤物質之水力特性和入射波之特性。而Madsen係將Sollitt and Cross法中之流體抵抗作了線性轉換。Sollitt and Cross和Madsen法之缺點為須由經驗公式求得防波堤物質之水力特性。

井島之研究，乃假定 μ' 為與水粒子流速成比例之抗力項之抗力係數，而以 μ'/σ 表示之，又將與水粒子加速度成正比之質量力歸因於空隙率內，而以一假想的空隙率 V 表示之。對某特定模型，利用模型實驗求得其 μ'/σ 值及假空隙率，而當模型形狀或空隙率稍作改變時，此一 μ'/σ 值即不

* 國立臺灣海洋學院河海工程學系教授

** 國立臺灣海洋學院河海工程研究所畢業

再適用。

本文乃繼續採井島之理論分析法，而假定波浪作用於消波物質空隙內之運動為線性滲流運動。消波物質之消能效果一般可視為與防波堤之形狀、消能物質之粒徑、表面粗度、空隙率及均一性有關，同時亦和入射波之週期和波形尖銳度有關係。在井島之研究中，係將上述因素歸納入抗力係數及質量力係數兩項，而將抗力係數以 μ'/σ 表示。而本文認為與防波堤構成物質有關之 μ' 和入射波特性有關之 σ 應分開個別處理，而變為：

$$\frac{\mu'}{\sigma} = \frac{\mu'}{\sqrt{\sigma^2 h}} \times \sqrt{\frac{h}{g}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma^2 h}} \times \mu' \times \sqrt{\frac{h}{g}} = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma^2 h}}$$

$$\text{其中 } \mu = \mu' \times \sqrt{\frac{h}{g}}$$

此時之 μ 值與 σ 值將不再互相影響， σ 代表波浪之周波數， μ 代表流體阻尼之特性，對井島係將附加質量力所引起之影響併入空隙率內，而以一假想空隙率 V 取代之，但本研究之空隙率為真實之空隙率，因此本文之研究對象為抗力係數 μ 與附加質量力係數 ϵ 之選定方法。對任意之消波物質可利用模型實驗求得其 μ 與 ϵ 值，即能正確的求出其消能之效果。

二、有關理論之基本方程式

本文乃利用邊界元素法解析二次度透水性防波堤的問題，而本文之研究重點乃在以實驗的方法求得抗力係數與附加質量力係數，因此本章僅記述有關之基本條件及方程式，至於詳細之理論解析方法，請參照參考文獻 4。

如圖(一)所示，斜坡面與靜水面之交點為原點 0，水平向外海方向為 x 軸，垂直向上為 z 軸，在 $x = \ell$ 處，設一假想邊界面，則整個領域可分為三個部份。在第 (I) 及第 (II) 領域內為理想流體領域，第 (III) 領域為透水性物質領域。

在第 (I) 及第 (II) 領域內，其流體均為非壓縮性、非黏性且非旋轉性之理想流體所充滿，則其運動持速度勢 $\Phi(x, z, t)$ ，有一振幅為 ζ_0 ，周波數為 σ ($\sigma = 2\pi/T$) 之正弦波入射時，則第 (I) 及第 (II) 領域之速度勢可表示為：

$$\Phi(x, z, t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \phi(x, z) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (2-1)$$

且 ϕ 必須滿足 Laplace equ.

$$\nabla^2 \phi(x, z) = 0 \dots\dots\dots (2-2)$$

在第(I)領域中，若假想邊界面 ($x = \ell$) 離岸壁甚遠，則可假定第(I)領域之流體運動不受岸壁引起散射波 (Scattering wave) 之影響，而其速度勢可表示為：

$$\phi(x, z) = [e^{ik(x-\ell)} + \phi e^{-ik(x-\ell)}] \cosh k(z+h) / \cosh kh \dots\dots\dots (2-3)$$

其中 ϕ 為反射率， k 為 $\sigma^2 h/g = k \tanh kh$ 之根，第(II)領域內，任意一點之速度勢 $\phi(x, z)$ 則可用邊界元素法以下列方程式表之：

$$\phi(x, z) = \frac{1}{2\pi} \int_D [\phi(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} (-\ell_n \frac{1}{r}) - \frac{\partial \phi(\xi, \eta)}{\partial n} (-\ell_n \frac{1}{r})] ds \dots\dots\dots (2-4)$$

在第(II)領域其空隙內流體領域之局部空間之水平及垂直方向流速以 U_* 及 W_* 表示，流體壓力及密度以 P_* 及 ρ 表示，空隙率以 V 表示，抗力係數與附加質量力係數分別以 μ 及 ϵ 表示，則其連續方程式及運動方程式可以下式表示：

$$\frac{\partial U_*}{\partial x} + \frac{\partial W_*}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (2-5)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial U_*}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_*}{\partial x} - \frac{\mu'}{V} U_* - \frac{\epsilon(1-V)}{V} \frac{\partial U_*}{\partial t} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial W_*}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_*}{\partial z} - \frac{\mu'}{V} W_* - \frac{\epsilon(1-V)}{V} \frac{\partial W_*}{\partial t} - g$$

由(2-5)及(2-6)所示之流體運動具有速度勢：

$$\Phi_*(x, z, t) = \frac{g \zeta_0}{\sigma} \phi_*(x, z) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (2-7)$$

而 $\phi_*(x, z)$ 必須滿足下列之 Laplace 方程式：

$$\frac{\partial^2 \phi_*}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_*}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (2-8)$$

故其無因次壓力可以下式表之：

$$\frac{P_*}{\rho g \zeta_0} = -i \beta \phi_*(x, z) e^{i\sigma t} \dots\dots\dots (2-9)$$

其中： $\beta = \frac{\alpha}{V}$ ， $\alpha = 1 - \epsilon(1-V) - 1 \frac{\mu'}{\sigma}$

三、實驗設備、條件、步驟與方法

本實驗係於台灣海洋學院海港工程試驗館之斷面水槽進行，該水槽長30公尺，寬1.2公尺，高1公尺，造波機為拍拉式規則造波機。

實驗模型如圖(二)所示，實驗材料為：

- ①直徑 3.8 cm 之硬塑膠球，空隙率為 $V = 0.34$
- ②直徑 6.4 cm 之硬塑膠球，空隙率為 $V = 0.50$
- ③以上二種均勻混合後，空隙率為 $V = 0.435$

實驗步驟與方法：

本實驗水深取 40cm，應用 Healy 法測定反射率，波高計為容量式，波壓分佈之測定則利用波壓轉置器直接量測作用於不透水岸壁之波壓值，又造波條件如表(一)所示。

四、理論與結果分析

4.1 抗力係數及附加質量力係數之選定

4.1.1 與井島之比較

井島假定假想空隙率 V 為 0.5，而 μ'/σ 為一常數，與本文將 μ'/σ 分解成 $\mu/\sqrt{\sigma^2 h/g}$ 之方法的比較如圖(三)~圖(四)。由圖可知，利用井島之理論解析法，其反射率會有一極小值出現，而利用本文之方法，則求得一平滑之曲線，而在其他的模型形狀，由井島所求得的極小值會降到很低，與由實驗所得的結果不合，因此本研究對抗力係數之假設法，與由實驗所得結果較吻合。

4.1.2 附加質量力係數的選定

由於本實驗的空隙率為一真實值，因此須考慮附加質量力的影響，改變附加質量力係數，對反射率及無因次波壓力分佈之影響，可由圖(五)~圖(六)可知。當抗力係數取 1.0，附加質量力係數取 0 時之反射率值與實驗值較吻合，又改變附加質量力係數，發現無因次波壓力分佈之影響亦不大，因此選定附加質量力係數為零。

4.1.3 抗力係數之選定

當選定附加質量力係數 $\epsilon = 0$ 時，改變抗力係數，對反射率之影響，可由圖(七)~圖(八)知，以抗力係數 $\mu = 1.0$ 與實驗結果最吻合。

4.1.4 實驗與理論值之比較

本實驗的模型形狀有坡度 1:0, $B/H = 1.0, 1.5$ 及 2.0 三種及坡度 1:1, $B/H = 1.5$ 及 2.0 二種, 共五種模型形狀, 改變三種空隙率, 共有十五種模型條件, 由於篇幅關係, 僅附上圖以供參考。理論之曲線皆取 $\mu = 1.0, e = 0$ 。

4.2 實驗之結果分析

由圖(四)~(五)可知, 當消波體之坡度為 1:0 時, 而 $\sigma^2 h/g$ 在 0.25 ~ 0.75 時, 由實驗所得的結果較理論值小, 此乃因當 $\sigma^2 h/g$ 小時, 其週期大, 而入射波之波長較長, 在實驗室中易產生二次反射, 因此在此 $\sigma^2 h/g$ 之範圍內, 實驗值均較理論值為小。而在其他 $\sigma^2 h/g$ 時, 實驗值與理論值相當吻合。在圖(六)~(七)中, 消波體之坡度為 1:1 之斜坡堤, 由圖可知, 由實驗所得之反射率均較由理論解析之值較小, 此乃因當坡度為 1:1 時, 波浪會在斜坡面上產生碎波而減低一些能量, 因此由實驗所得之結果均較理論值為小。

圖(八)~(九)乃無因次波壓力分佈之圖, 由圖可知實測之值較理論值為小, 且對同一模型與空隙率而言, 當週期增大後, 其所受無因次波壓力值會隨之增大。

4.3 理論解析之結果分析

本文理論解析部分乃取抗力係數 $\mu = 1.0$, 而附加質量力係數 $e = 0$, 來探討當改變空隙率與模型形狀後, 反射率對 $\sigma^2 h/g$ 之關係圖其變化為何?

圖(四)表示, 當我們固定空隙率 $V = 0.5$, 與坡度 1:0, 而改變 B/H 值時, 由圖可知, 當 B/H 值變大後, 其平均之消能效果愈佳, 但當 B/H 大於某值時, 平均之消能效果反而變差。

圖(五)表示, 當固定模型形狀時, 改變空隙率對反射率之影響。模型形狀取坡度為 1:0, B/H 為 1.0, 由圖可知, 當空隙率增大時, 其消能效果愈佳, 但當空隙率大於某特定值時, 其消能效果反而變差。

上述之原因是波浪作用於消波物質後, 除了受到摩擦損失外, 主要原因乃是消波堤會改變入射波與反射波之相位差, 當改變 B/H 值或空隙率時, 其相位差亦會隨之改變, 當兩者間之差為 $\pi/2$ 時, 其消能效果愈佳, 因此會有一 B/H 值及空隙率值使其入射波及反射波之相位差接近 $\pi/2$, 而當 B/H 值或空隙率改變後, 其相位差又遠離 $\pi/2$, 此一結果由數值計算亦可得到同樣的答。

五、結 論

本文乃以實驗的方法求得波浪作用於消波岸壁堤前之反射率與作用於不透水岸壁之無因次波壓力分佈值, 然後利用數值計算改變抗力係數與附加質量力係數後與實驗求得之反射率與無因次波壓力分佈相吻合, 從而確定抗力係數與附加質量力係數值。因此在本文所研究的範圍內, 得到以下之結論:

(1) $\sigma^2 h/g$ 介於 0.25 與 2.5 之間時, 抗力係數介於 0.8~1.2, 其中以 1.0 為最佳, 而附加質量力係數為 0。

(2)對同一空隙率而言，當 B/H 值增大，其平均之消能效果愈佳，但當 B/H 值大於某特定值時，其消能效果反而變差。

(3)對同一模型形狀而言，空隙率增大時，其反射率變小，不透水岸壁所受之無因次波壓力亦變小，但當空隙率大於某特定值時，其反射率反而變大，岸壁所受之無因次波壓力亦變大。

(4)對同一模型形狀與空隙率而言，當 $\sigma^2 h/g$ 值愈小（即週期愈大），其反射率愈大，且不透水岸壁所受之無因次波壓力亦愈大。

(5)不論消波岸壁之斷面形狀或空隙率為何，當入射波之週期變小時，反射率會趨一定值。

參 考 文 獻

1. Charles K. Sollitt, Ralph H. Cross : "Wave Transmission Through Peameable Breakwaters" (1972) PROC. 13th. conf. coastal Eng. ASCE. pp.1827-1846.
2. Ole Secher Madsen : "Wave Transmission Through Porous Structure" (1974) Journal of Water Ways Harbors and Coastal Engineering Division. pp.169-187.
3. Takeshi IJIMA, Yasuhiko EGUCHI and Akira KDBAYASHI : "Theory and Experiment on Permeable Breakwater and Ouay Wall" 日本國立九州大學實驗報告。
4. 周宗仁： "波浪作用於透水及不透性防波堤群之研究" 河海工程第十期，民國67年7月。

| T (Sec) | L (cm) | HI (cm) | HI/L |
|---------|--------|---------|---------------|
| 2.53 | 482 | 3.5-4.8 | 0.0072-0.0083 |
| 1.79 | 325 | 6.9-7.6 | 0.021-0.023 |
| 1.46 | 253 | 4.9-7.0 | 0.019-0.027 |
| 1.26 | 209 | 5.5-6.0 | 0.026-0.028 |
| 1.13 | 178 | 6.2-7.1 | 0.034-0.040 |
| 1.03 | 155 | 6.5-7.8 | 0.042-0.050 |
| 0.97 | 136 | 7.0-8.2 | 0.051-0.060 |
| 0.89 | 121 | 7.5-8.6 | 0.062-0.071 |
| 0.84 | 109 | 7.5-8.5 | 0.068-0.077 |

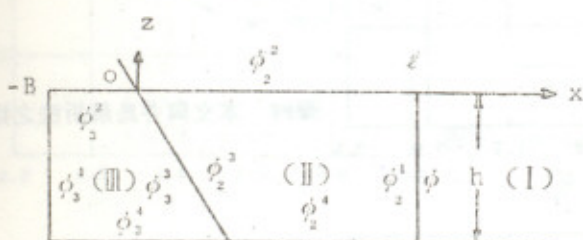
T: PERIOD

HI: INCIDENT WAVE HEIGHT

L: WAVE LENGTH

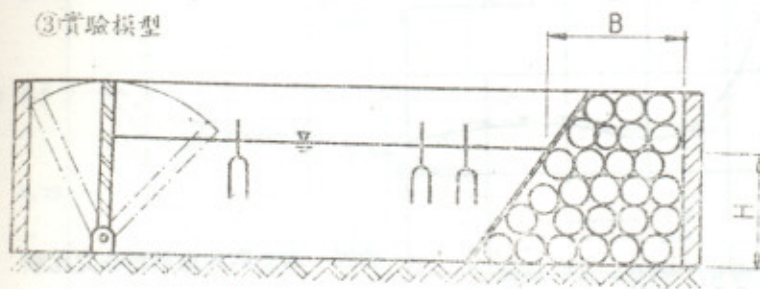
HI/L: WAVE STEEPNESS

表(一) 造波條件

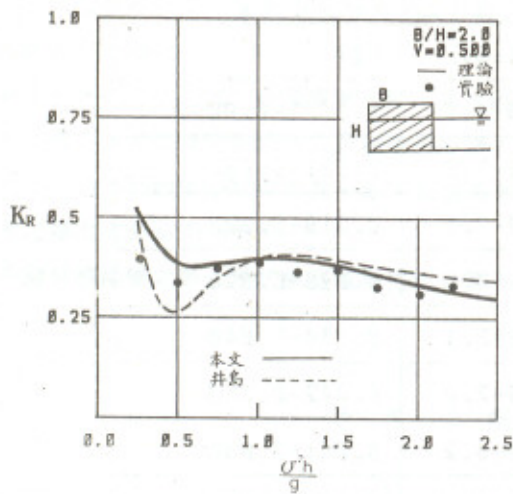


圖(一)

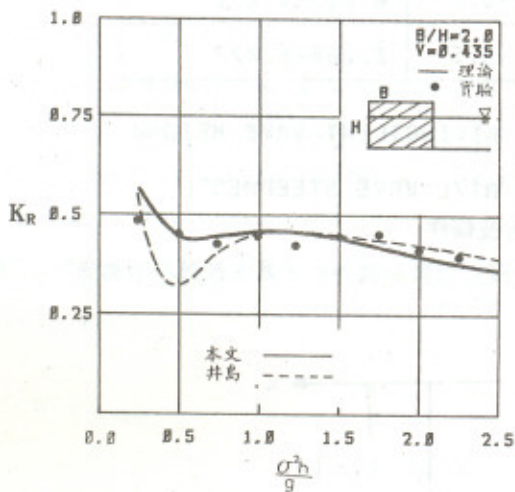
③ 實驗模型



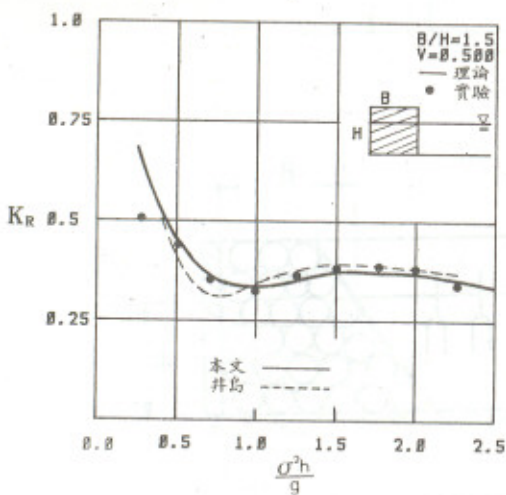
圖(二) 實驗模型圖



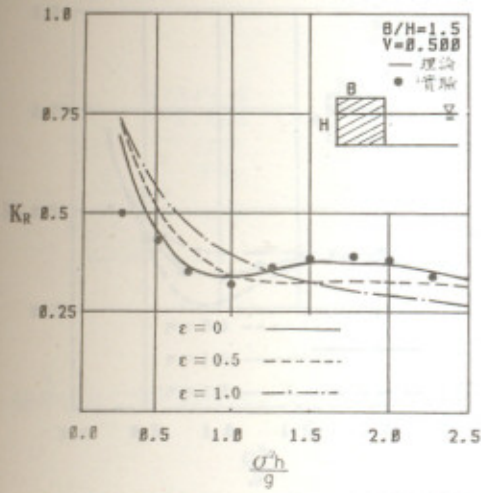
圖(三) 本文與井島解析法之比較



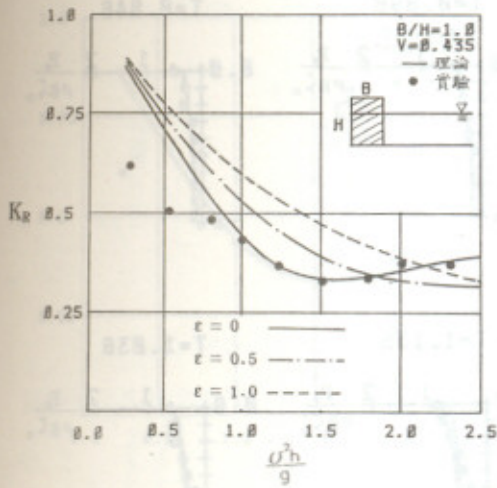
圖(四) 本文與井島解析法之比較



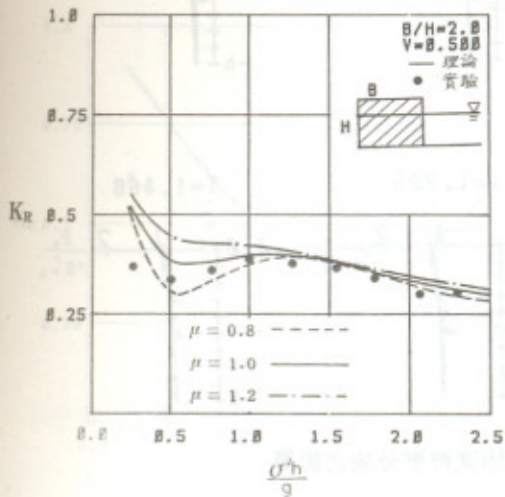
圖(五) 本文與井島解析法之比較



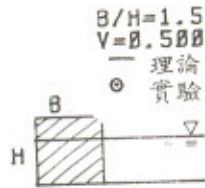
圖(a) $\mu = 1.0$ 時， ϵ 對反射率之影響



圖(b) $\mu = 1.0$ 時， ϵ 對反射率之影響

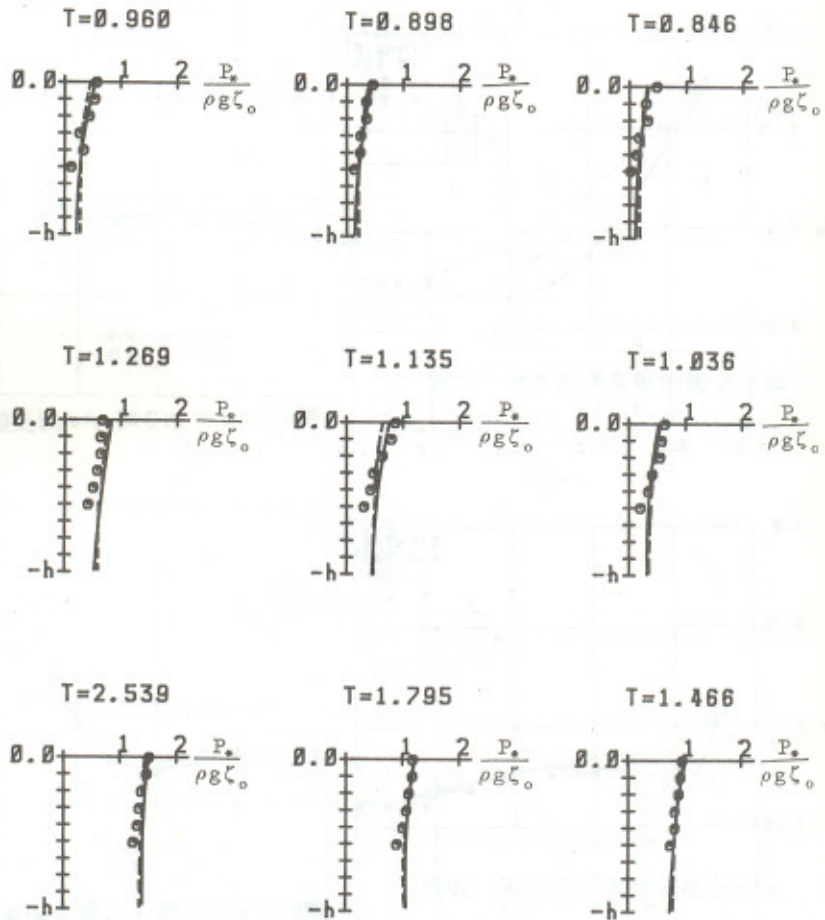


圖(c) $\epsilon = 0$ 時， μ 對反射率之影響

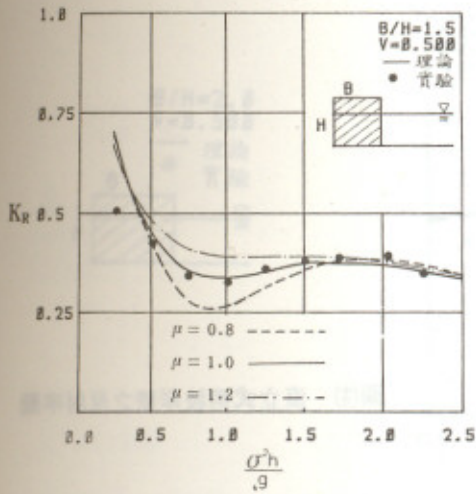


$\varepsilon = 0$ ————

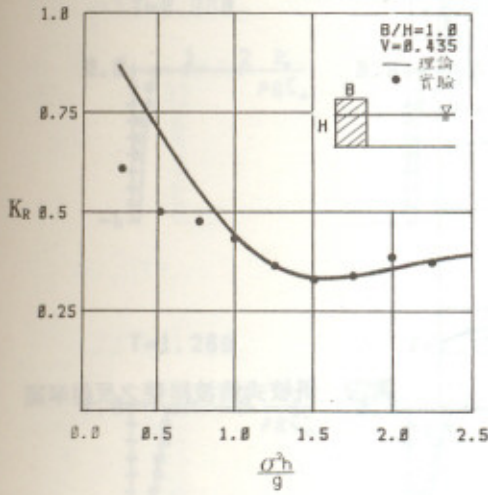
$\varepsilon = 0.5$ - - - - -



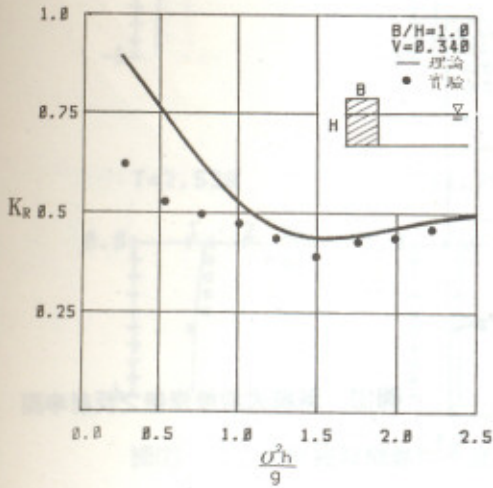
圖(八) $\mu = 1.0$ 時， ε 對無因次波壓分佈之影響



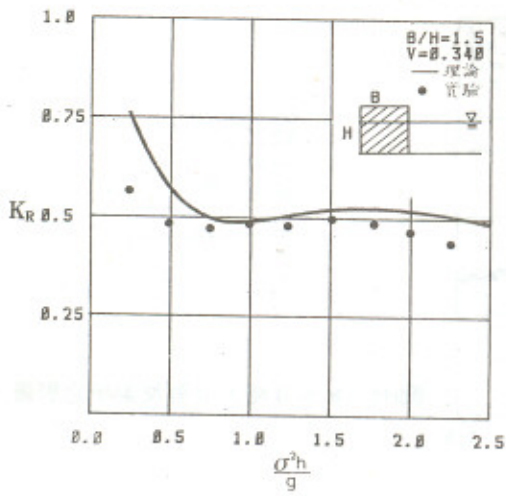
圖(a) $\epsilon = 0$ 時, μ 對反射率之影響



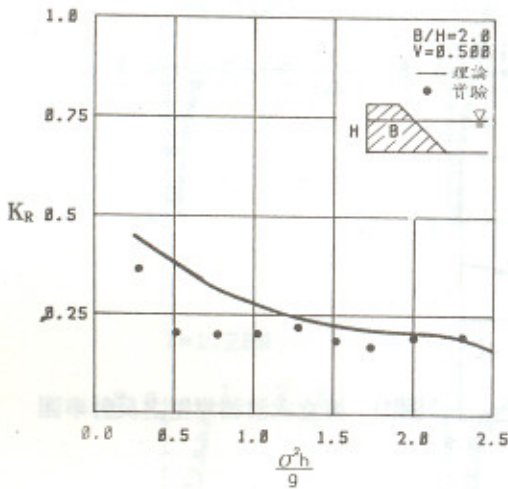
圖(b) 直立式消波岸壁之反射率圖



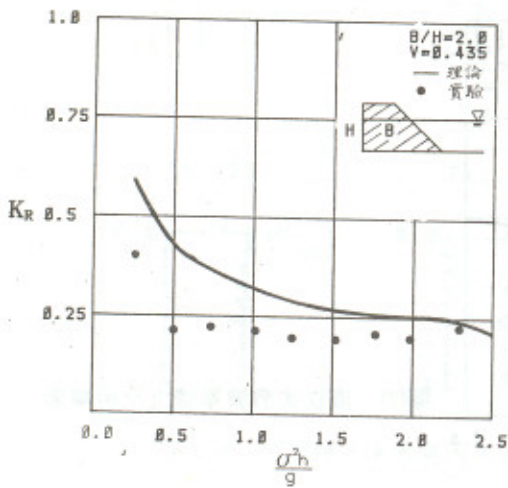
圖(c) 直立式消波岸壁之反射率圖



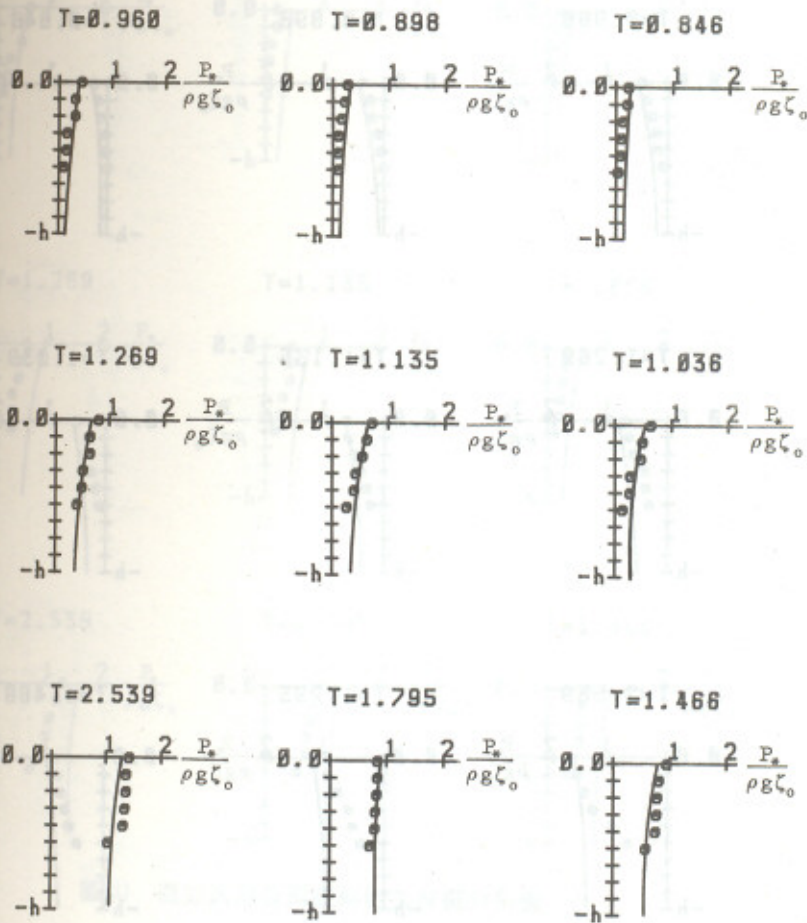
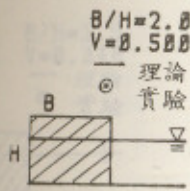
圖(甲) 直立式消波岸壁之反射率圖



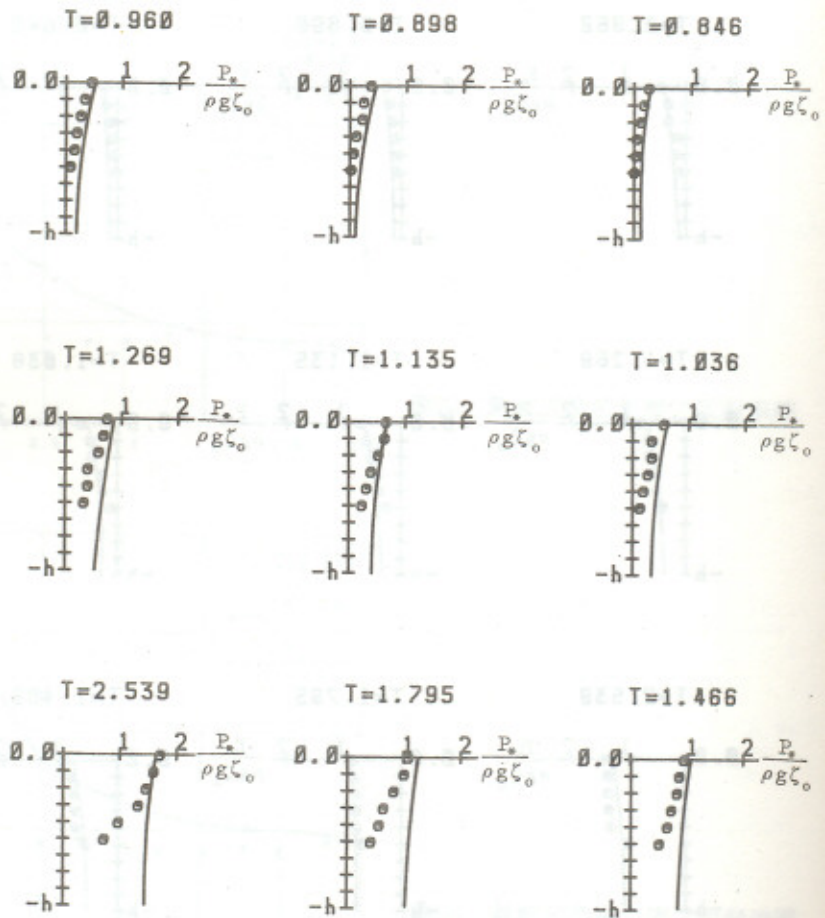
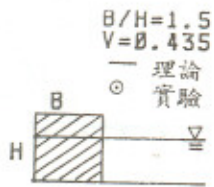
圖(乙) 斜坡式消波岸壁之反射率圖



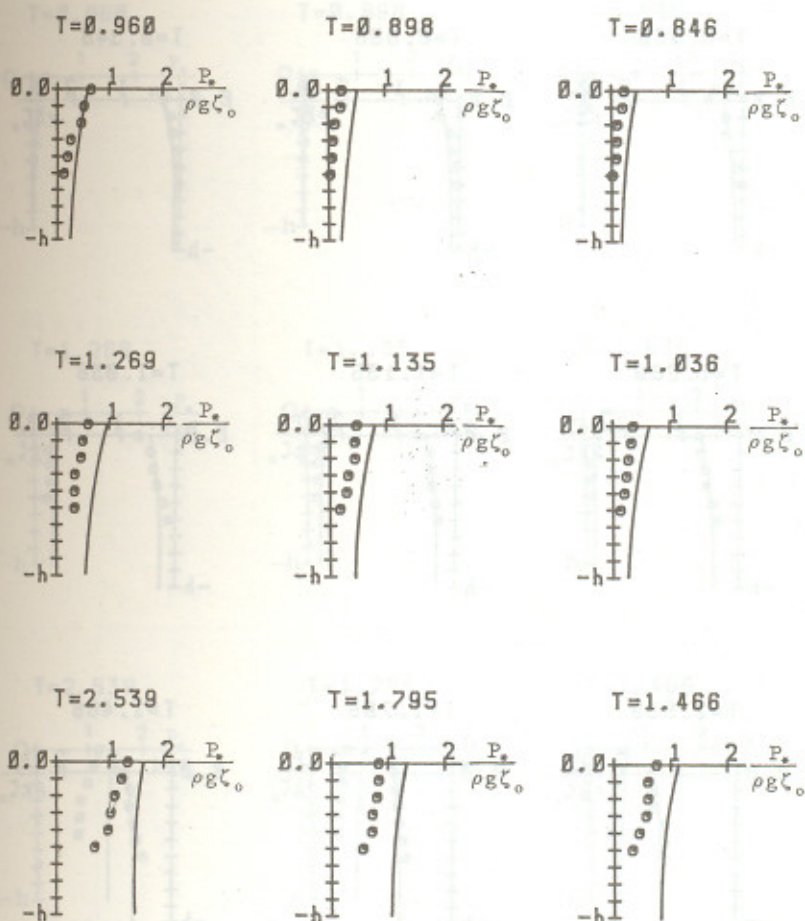
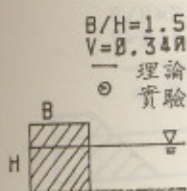
圖(丙) 斜坡式消波岸壁之反射率圖



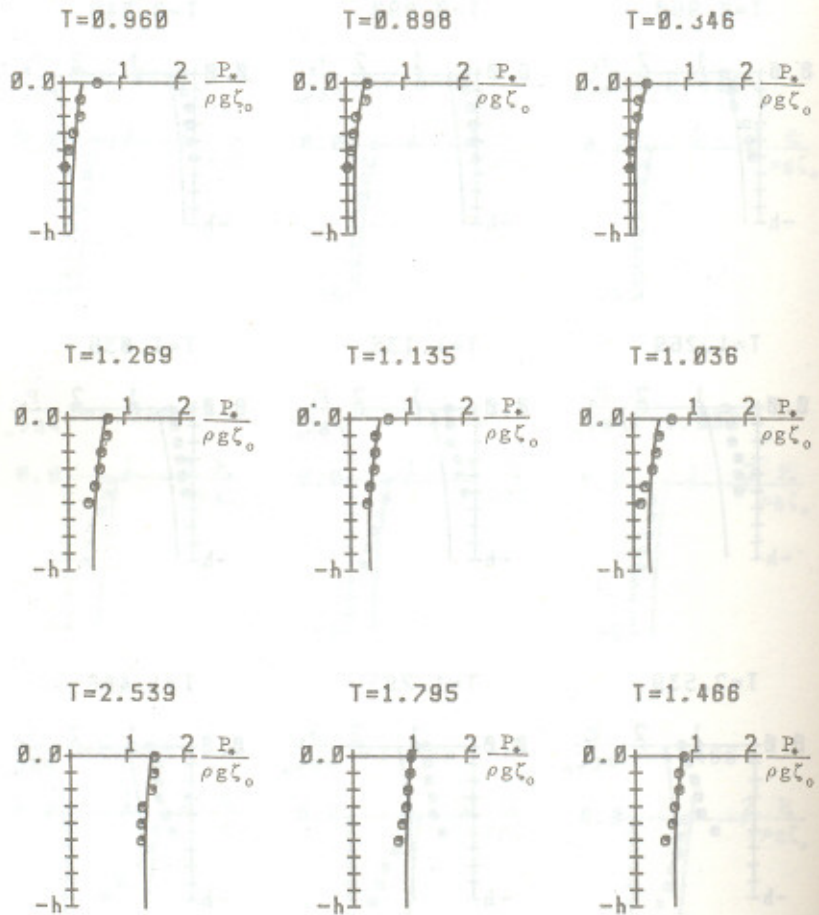
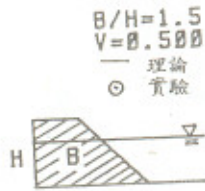
圖(七) 直立式消波岸壁無因次波壓分佈圖



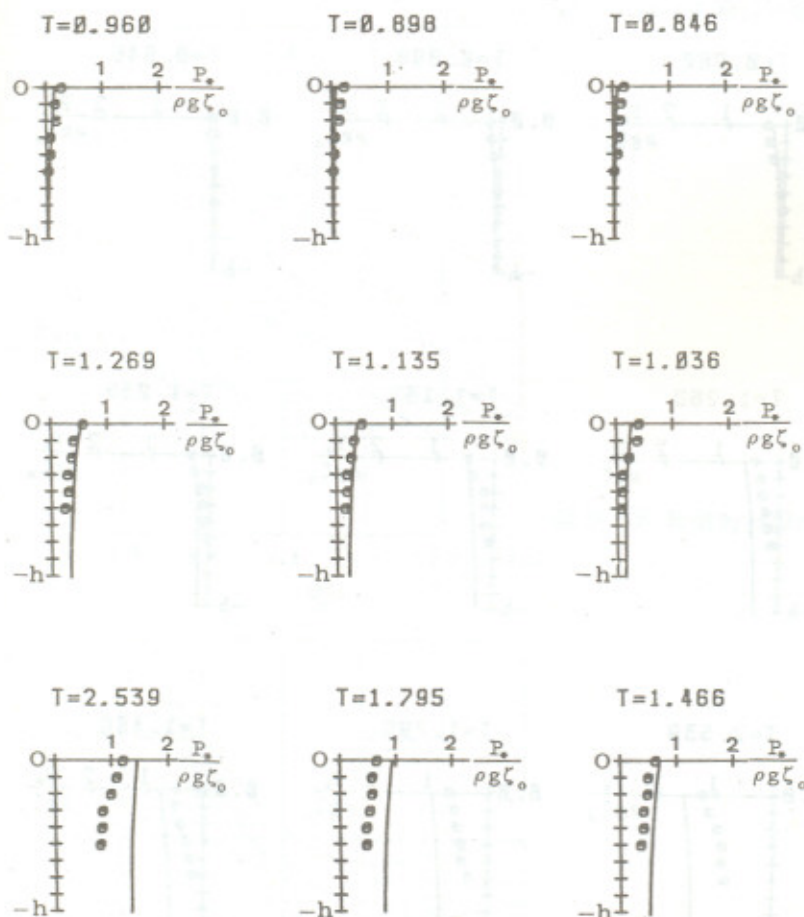
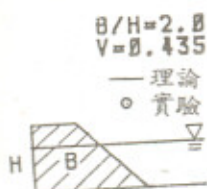
圖(六) 直立式消波岸壁無因次波壓分佈圖



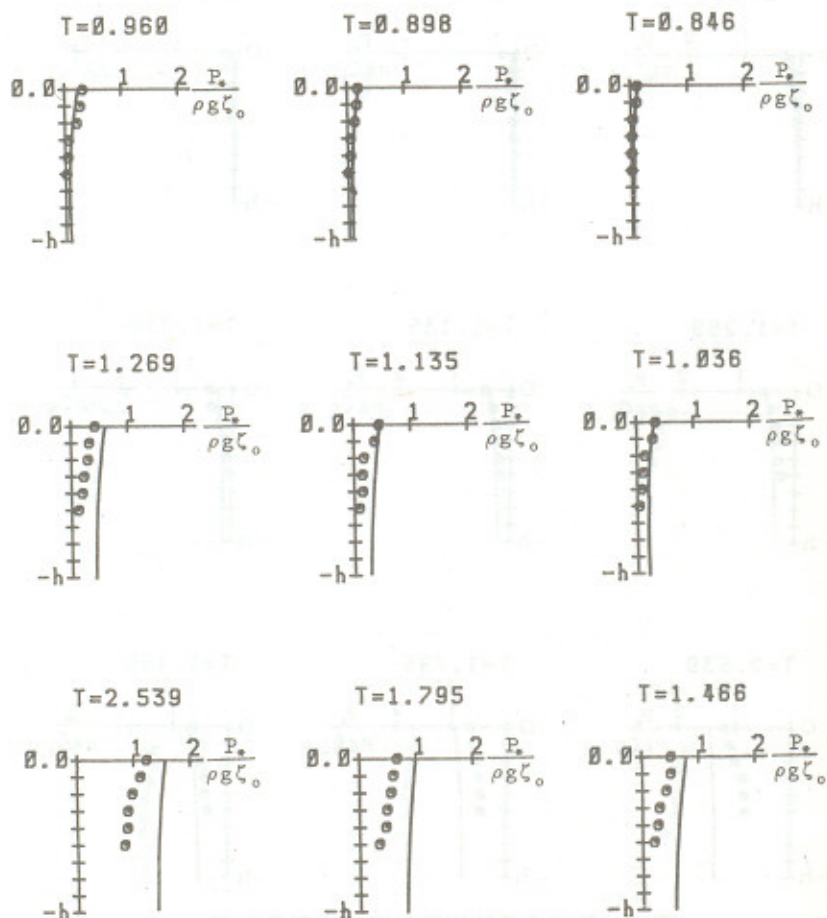
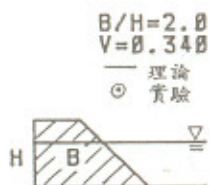
圖(六) 直立式消波岸壁無因次波壓分佈圖



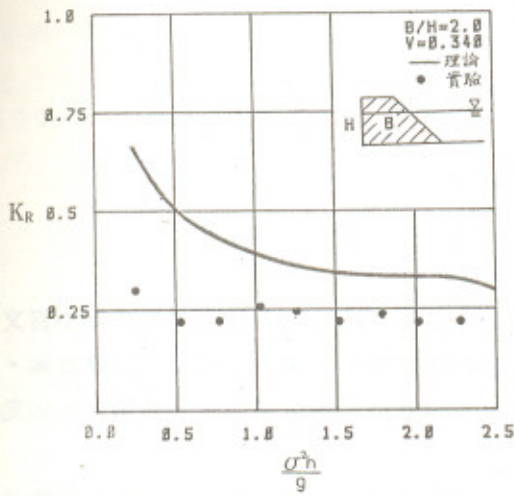
圖(7) 斜坡式消波岸壁無因次波壓力分佈圖



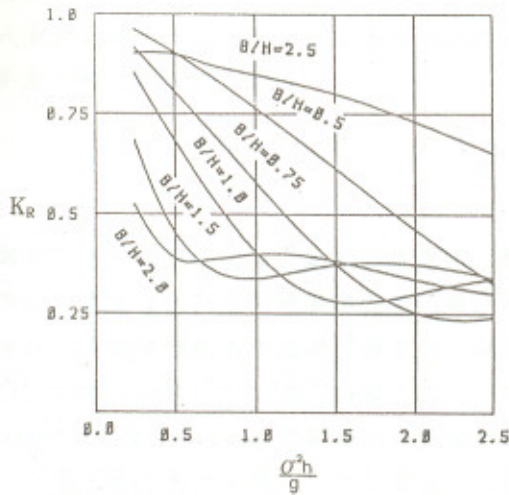
圖(三) 斜坡式消波岸壁無因次波壓分佈圖



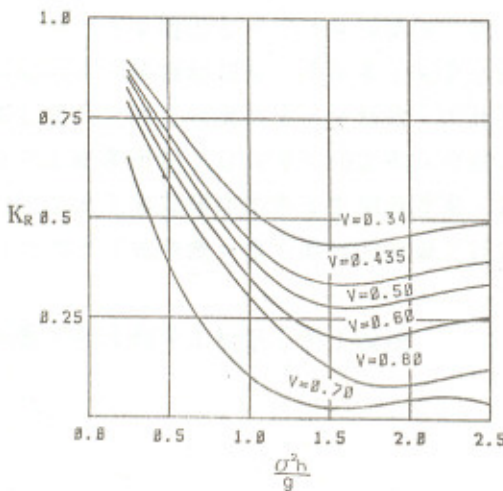
圖(三) 斜坡式消波岸壁無因次波壓分佈圖



圖(一) 斜坡式消波岸壁之反射率圖



圖(二) B/H 值對反射率之影響



圖(三) 空隙率對反射率之影響