海岸工程

原主編者：郭金棟
審訂者：張劭曾
修訂者：郭金棟

中國土木水利工程學會

海 岸 工 程

原主編者：郭金棟
審 訂 者：張劭曾
修 訂 者：郭金棟

中國土木水利工程學會

海　岸　工　程

修訂者：郭　金　棟

出版者：中 國 土 木 水 利 工 程 學 會
總經銷：科 技 圖 書 股 份 有 限 公 司
台北市重慶南路一段49號四樓之一
電　話：3118308・3118794
郵 政 劃 撥 帳 號 0015697-3

七十七年五月初版　　　特價新台幣 200 元

第十篇
海岸工程
目　　錄

第一章　波動理論

1.1　概　述……10－1
1.2　波浪要素、分類與符號……10－2
1.3　微小振幅波……10－8
1.4　有限振幅波……10－38

第二章　波浪之發生、發達與減衰

2.1　引　言……10－73
2.2　有義波……10－74
2.3　波浪之統計特性……10－77
2.4　波浪能譜……10－90
2.5　深海風浪預報……10－97
2.6　颱風波浪推算……10－114
2.7　淺海風浪推算……10－135
2.8　深海餘波推算……10－147
2.9　風速、風向及風域之決定……10－151
2.10　風向變動及風域形狀對風浪之影響……10－161

第三章　波浪之變形

3.1　淺海中波浪之變形……10－163
3.2　碎　波……10－172
3.3　波浪之折射……10－191
3.4　波浪之繞射……10－204

第四章 結構物對波浪之影響

4.1 波浪之反射及透射……………………………… 10－218
4.2 遡升（Run-up） ……………………………… 10－229
4.3 溢流（Overtopping） …………………………… 10－240

第五章 波力

5.1 引 言……………………………………………… 10－252
5.2 波壓之時間變化及分析………………………… 10－252
5.3 影響波壓之主要因素…………………………… 10－254
5.4 重複波波壓公式………………………………… 10－258
5.5 碎波波壓公式…………………………………… 10－265
5.6 伊藤（Ito）期待滑動量方式 ………………… 10－268
5.7 合田（Goda）公式……………………………… 10－272
5.8 防波堤之安定性………………………………… 10－275
5.9 四種波壓公式之比較…………………………… 10－276
5.10 防波堤直立沈箱寬度…………………………… 10－284
5.11 消波塊被覆時之波壓…………………………… 10－286
5.12 碎波後之波壓力………………………………… 10－287
5.13 拋石堤被覆塊石之安定………………………… 10－293
5.14 作用於直立圓柱之波力………………………… 10－300

第六章 潮位與水流

6.1 引 言……………………………………………… 10－329
6.2 潮 汐……………………………………………… 10－329
6.3 氣象潮（暴潮）………………………………… 10－335
6.4 海 嘯……………………………………………… 10－342
6.5 海 流……………………………………………… 10－349
6.6 潮 流……………………………………………… 10－351
6.7 內灣潟湖之潮流………………………………… 10－352
6.8 近岸流…………………………………………… 10－354

第七章　海灘與漂砂

7.1　緒　言 …… 10－359
7.2　海岸地形名詞 …… 10－361
7.3　海岸之分類 …… 10－361
7.4　海灘分類 …… 10－364
7.5　海灘底質之特性 …… 10－364
7.6　採　樣 …… 10－365
7.7　粒徑分佈 …… 10－366
7.8　礦物分析 …… 10－370
7.9　波浪之篩分作用 …… 10－371
7.10　影響海灘斷面之因素 …… 10－372
7.11　平衡斷面之分類 …… 10－375
7.12　縱向漂砂移動方向之判別 …… 10－378
7.13　縱向漂砂量之分佈 …… 10－379
7.14　海岸漂砂與移動形態 …… 10－380
7.15　臨界移動條件 …… 10－380
7.16　懸移質分佈 …… 10－384
7.17　沈降速度 …… 10－387
7.18　漂砂量之推算 …… 10－388
7.19　漂砂來源與損失 …… 10－393
7.20　漂砂之收支 …… 10－394
7.21　海岸變化之預測 …… 10－396
7.22　飛　沙 …… 10－400
7.23　風速分佈及摩擦速度 …… 10－400
7.24　臨界摩擦速度 …… 10－401
7.25　飛沙量之估計 …… 10－402

第八章　防止漂砂之方法

A　引　言 …… 10－405
B　人工養灘 …… 10－405
C　防沙堤 …… 10－406
8.1　防沙堤高度 …… 10－407

8.2　防沙堤長度……………………………………………………… 10－408
8.3　防沙堤間隔……………………………………………………… 10－409
8.4　防沙堤方向……………………………………………………… 10－410
8.5　防沙堤構造……………………………………………………… 10－411
D　導流堤…………………………………………………………… 10－411
E　離岸堤…………………………………………………………… 10－413
F　護岸、駁岸與海岸堤防………………………………………… 10－414
附　　錄 ………………………………………………………… 10－417

第十篇

海岸工程

編撰人：郭金棟
審查人：段品莊

第一章　波動理論

1-1　概　述

水受某種外力之作用，使水分子發生攪亂，水面發生高低之運動，如攪動之外形向他處傳播，當外力除去後，仍因重力及表面張力之作用繼續保持運動。此種以水爲媒介將其形狀傳播之現象稱爲水波 (water wave)。本書所謂波動或波浪除另有註明外即指水波。波動理論不僅爲流體力學研究之一部份，同時亦爲海岸工程主要研究對象之一。凡海岸構造物、漂砂及水流莫不以波動理論爲討論之依據，爲學習海岸工程所必需充份瞭解之物理現象。

實際之海面爲一極不規則之變化，幾乎無法以函數式表示其波動狀態，但如加以剖析，則可認爲由不同週期、波高及位相之波浪重疊而成，可由統計處理找出一特性波代表之。此處所謂規則波 (regular wave)係指由古典流體動力學導出，可由解析函數表示，波高及週期固定之單一或週期性之波動現象。理論上假定水爲無粘性、非壓縮體之均質理想流體，波峯無限小或有限而水底水平之二次元運動。水面上之壓力甚小可以忽視，波形在進行中不發生變形之保存波。因假定運動爲自靜止狀態開始之無渦運動，故可以流速勢 (velocity potential)ϕ 表示之。此種波動理論之研究遠在十八世紀即由Laplace 展開，十九世紀中葉已有相當完整之理論解。二次大戰後除理論研究外，在實驗室及實地海岸觀測波浪相互比較始知理論之適用性。Airy 波動理論雖在計算上較簡單，但 Stokes波理論較與自然現象脗合。一般情況下表面張力可以忽視，如此由重力發生之波動稱爲

重力波（gravity wave）。表面張力之影響較大時稱爲表面張力波或毛細管波。本章僅介紹微小振幅波理論演算過程及有限振幅波主要公式，其他理論詳細演算過程請讀者參考原論文或流體力學有關書籍。

1.2 波浪要素、分類與符號

1.2.1 波浪要素

設有一水面做週期性之升降，其波形以C之速度向x正方向傳播時，稱爲傳播速度 (wave celerity) 或波速（phase or propagation velocity）。二相隣波峯間之距離（參照圖1.1）稱爲波長L（wave length），波峯與波谷之高差稱爲波高H（wave height），波高之一半稱爲振幅a（wave amplitude），一固定點反覆出現同一水面變化所需之時間爲週期T（wave period）。x點之水面變化η或其他變量可以式(1.1)表示如下時

$$\eta = f(x - Ct) \tag{1.1}$$

稱爲進行波，反之$\eta = f(x + Ct)$表示向x負方向進行之波形稱爲後退波。波高H之正弦進行波一般以下式

$$\eta = \frac{H}{2}\sin(kx - \sigma t + \varepsilon) = \frac{H}{2}\sin k(x - Ct + \frac{\varepsilon}{k}) \tag{1.2a}$$

表示，但k爲波數（wave number）$k = \frac{2\pi}{L}$，σ爲角頻率(angular frequency) $\sigma = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$，$\varepsilon$爲位相角

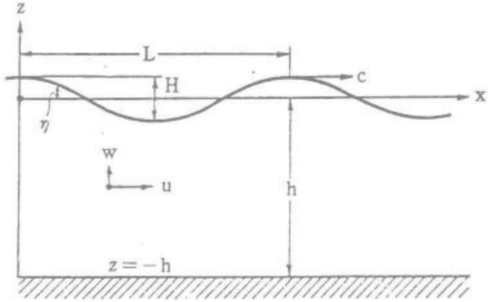

圖1.1 座標軸

波速　$$C=\frac{\sigma}{k}=\frac{L}{T} \tag{1.3a}$$

波長　$$L=\frac{2\pi}{k} \tag{1.3b}$$

週期　$$T=\frac{2\pi}{\sigma} \tag{1.3c}$$

將式 (1.3) 代入式 (1.2a)，則當 $\varepsilon=0$ 時波形又可表示如下：

$$\eta=\frac{H}{2}\sin\frac{2\pi}{L}(x-Ct)=a\sin 2\pi\left(\frac{x}{L}-\frac{t}{T}\right) \tag{1.2b}$$

1.2.2　波浪分類

波浪可從各種不同立場觀察分類之。例如：自其發生之原因、水深、波長、週期、外觀或理論關係等，就其所需要稱呼之。玆就常用之分類介紹如下：

a. 依週期(頻率)分類：

如將海水面上下運動現象予以長期記錄分析之，即可發現海面變動係由各種不同波高及週期運動所組成。

<圖 1.2 >爲以週期爲橫軸，能譜(spectrum)爲縱軸，表示海面發生之波譜模型。最上方表示該週期範圍之波動名稱。第二行表示其能量來源，即發生原因。第三行表示其復元力。最下方表示其能量密度。

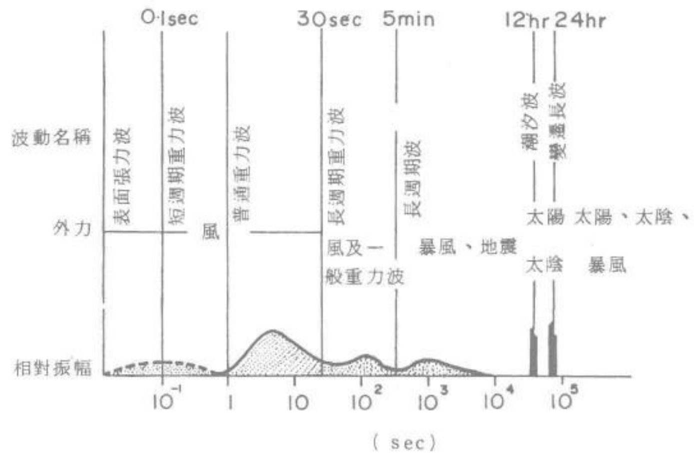

圖 1.2　海洋波浪依週期之分類

1. 表面張力波（surface tension waves）：表面產生之小漣漪，週期短於 0.1 sec 者。

2. 短週期重力波（ultra-gravity waves）：風吹小水域（池塘）或以機械造波產生之波動，其週期介於 0.1～1.0 sec 者。

3. 普通重力波（ordinary gravity waves）：因風吹水面或機械鼓波，週期介於 1～30 sec 者。一般海面常見之波浪，如風浪（wind wave）、或風停後餘波（swell）等。

4. 長週期重力波（infra-gravity waves）：因風與普通重力波所產生，週期介於 30 sec～5 min 者，如靜振（seiche）、副振盪等。

5. 長週期波（long period waves）：因氣壓變動等氣象變化或地震所產生，週期介於 5 min～12 hr，如海嘯、暴潮等。

6. 潮汐波（ordinary tide waves）：因太陽及太陰等起潮力產生，週期介於 12 hr～24 hr 者。

7. 變遷長波（transtidal waves）：因暴風、太陽及太陰所引起，週期大於 12 hr 以上。

b. 依波長與水深關係分類：

波動理論在水深（h）與波長（L）比，即相對水深 h／L 甚大或甚小時，波動公式可予以簡化，其水分子運動軌跡如＜圖 1.3＞所示有所不同。

1. 深水波（deep water waves）：$\infty > h/L > \frac{1}{2}$，波動在表面附近很大，向下急速減衰，底面附近幾乎靜止。海洋波浪屬此。

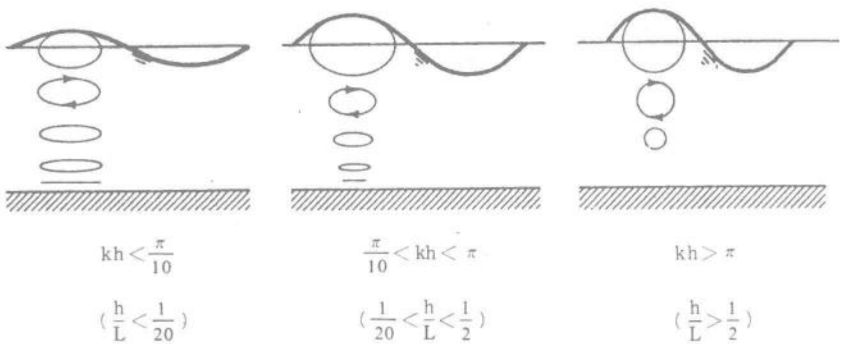

圖 1.3 進行波在不同水深之運動軌跡

2. 中間性波（intermediate depth water waves）：$\frac{1}{2} \geq h/L > \frac{1}{20}$，介於深水與淺水波之間，又稱爲表面淺水波（surface shallow water waves）。

3. 淺水波（shallow water waves）：$0 < h/L \leq \frac{1}{20}$，又稱長波（long waves），波動自表面到底面近乎相等，海岸附近之波浪或潮汐屬此。

c. 依波動理論分類：

波動現象一般由運動方程式、連續方程式及邊界條件解之，因其考慮之運動條件不同，其理論亦異。波浪依其理論假定可分爲：

1. 微小振幅波（small ampulitude waves）：假定波高與波長、水深相比甚爲微小，可以省略（$\eta \to 0$），流速之二次方極微小，亦可以省略，故波動運動方程式可簡化爲線型微分方程式。

2. 有限振幅波（finite amplítude waves）：此理論假定波高及流速爲有限量，$\frac{H}{h}$，$\frac{H}{L}$及二次微小量不可忽視，因此運動方程式爲非線型，故又稱爲非線型波動理論。有限振幅波理論展開方法有兩種：一爲Gerstner，Gaillard 導出之渦動餘擺波（trochoidal waves）理論，一爲 stokes，struik 導出之無渦動波，通常稱爲 stokes 波，此外尙有橢圓波（cnoidal waves）及孤立波(solitary wave）等。

d. 其他

以波浪進行方向分類則有：進行波（progressive wave）、重複波或駐波（standing wave，clapotis or stationary wave）、反射波（reflection wave）、變形波（translation wave)。以規則性分類則有：規則波（regular waves）及不規則波（Irregular waves，Random waves)。規則波爲可以週期性數學函數表示之理想波動形式。不規則波（irregular waves）爲實際海洋上之波浪週期、波高極不規則之亂動現象可以能譜（power spectrum）表示。

1.2.3 水波之描述

當一正弦波以<圖 1.4>之座標系表示其波形時，經 Δt 時間 $t' = t + \Delta t$，波形自 x 移至 $x' = x + C\Delta t$ 點，則波形

$$\eta = a\sin k\{(x + C\Delta t) - C(t + \Delta t)\}$$
$$= a\sin k(x - Ct) \qquad (1.4)$$

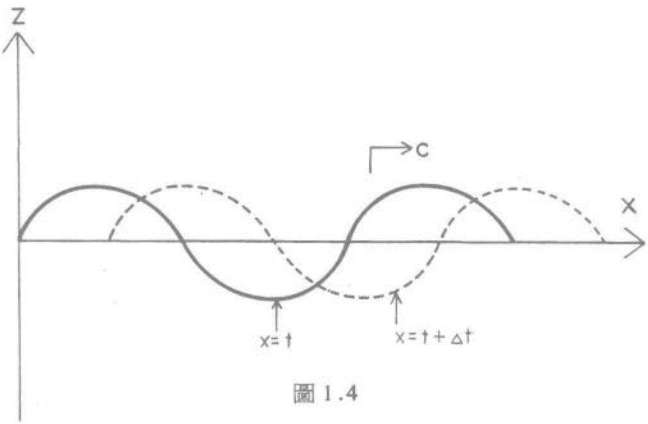

圖 1.4

即波形不變由實線的位置移到虛線的位置，向 x 正方向移動。此即表示如 η 爲 $(x-Ct)$ 之函數時，當 $x-Ct=\text{const}$ 時，波形保持不變之運動。故如自速度 C 之移動座標系觀察波形，則波形 η 保持不變成定常化。當波形移動方向與座標系方向一致時，即向 x 正方向移動之波浪稱爲進行波 (progressive wave) 或正波 (positive wave)。反之，如向 x 之負方向移動之波浪稱爲負波(negative wave) 或後退波。此時波形以下式表示：

$$\eta = a\sin(kx+\sigma t) = a\sin k(x+Ct) \tag{1.5}$$

蓋因 $x+Ct=\text{const}$ 時，$\dfrac{dx}{dt}=-C$，波形向 x 負方向以波速 C 進行。

如<圖 1.4 >所示，垂直向上爲 z 軸，水面之波動、壓力變化等量以函數 f 及 F 表示：$z=f(x-Ct)$；$z=F(x+Ct)$，前者爲進行波，後者爲後退波，如以微分方程式表之，則

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \tag{1.6}$$

此式稱爲波動方程式，其一般解爲

$$z = f(x-Ct) + F(x+Ct) \tag{1.7}$$

f 及 F 爲任意滿足波動方程式之函數。

1.2.4　符　號

玆將本篇所使用之符號提示於下：

x：水平軸與靜水面一致，波浪進行方向爲正，反之爲負。

z：垂直軸，靜水面 $z=0$，向上爲正，向下爲負，海底面 $z=-h$

h：水深，靜水面至海底之距離

$\eta(x, t)$：任意時刻之水面與靜水位之高差

H：波高，波頂至波谷之垂直距離，微小振幅波時 $H=2a$

L：波長，波列中相隣對應點之長度，如波峯至波峯之間距

T：週期，一定點同一現象重現所需之時間

C：波速，波形移動速度，$C=\dfrac{L}{T}=\dfrac{\sigma}{k}$

k：波數 $=\dfrac{2\pi}{L}$

σ：角頻率 $=\dfrac{2\pi}{T}$

u：水平水分子流速

u_{max}：水平水分子最大流速，水平水分子流速振幅

w：垂直水分子流速

w_{max}：垂直水分子最大流速，垂直水分子流速振幅

a_c：波峯至靜水面高差

a_t：波谷至靜水面高差

h：水深

t：時間

ρ：流體密度

γ：流體單位體積重量

ξ：水分子水平位移

ζ：水分子垂直位移

U：質量輸送速度（mass transport velocity）

p：單位面積壓力强度或波壓力

Δp：動壓力强度（dynamic pressure）

$\overline{P}$：單位寬度之平均功率（power）

E：單位面積之平均波浪總能量（energy）

E_k：單位面積之平均動能（kinetic energy）

E_p：單位面積之平均位能（potential energy）

C_G：群波傳播速度（group velocity）

δ：水分子軌跡平均面上升高

Δh：波高中分面與靜水面之高差

腳註"o"：表示深水波有關之值

腳註"b"：表示碎波有關之值

1-3　微小振幅波

1.3.1　微小振幅進行波之理論基本方程式

微小振幅波爲波動理論中最簡單之一種，因假定波高與波長比，即波形尖銳度（wave steepness）甚小，二次微小量可以省略爲線型運動。雖與實際波動現象並不嚴密相似，但在 $\frac{H}{L}$ 小，同時 $\frac{L^2H}{2h^3} \leq 50$ 時尙能與實際現象脗合。在精度要求不高之實用計算，數種波形之重疊、折射、繞射、反射、海洋不規則波波譜理論等都可引用之。

微小振幅波理論係由Airy 於 1845 年發表，爲水面波動各種理論之基礎。有關波浪問題都先以此理論簡化，然後再逐次深入研究。

a. 基本方程式：

假定波動之媒體爲一理想流體，即爲非壓縮性無粘性之非旋轉均質流體，且僅受重力作用，則二維之運動方程式爲：

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{1.8}$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} \tag{1.9}$$

上式中 g 爲重力加速度，p 爲壓力，ρ 爲流體之密度。u，w 分別爲 x 及 z 方向之分流速。連續方程式爲

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1.10}$$

導入流速勢（velocity potential）ϕ，並定義如下：

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad , \quad w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{1.11}$$

而非旋流應滿足：

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} \tag{1.12}$$

因此由非旋流條件及流速勢之關係代入無粘性非壓縮性流體之運動方程式，可得

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t}+\frac{1}{2}(u^2+w^2)+gz+\frac{p}{\rho}=0 \tag{1.13}$$

同時二維連續方程式可由式(1.10)寫成

$$\nabla^2\phi=\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}=0 \tag{1.14}$$

即具有流速勢之非旋流滿足Laplace 方程式時，自然滿足連續條件。

自由水面上爲大氣壓力，即 $z=\eta$ 處，$p=p_a=0$，故由式(1.13)得

$$-(\frac{\partial\phi}{\partial t})_{z=\eta}+\frac{1}{2}\{(\frac{\partial\phi}{\partial x})^2+(\frac{\partial\phi}{\partial z})^2\}_{z=\eta}+g\eta=0 \tag{1.15}$$

假定微小振幅波之波形銳度十分微小，則 $z=\eta$ 之物理量可以靜水面 $z=0$ 附近Taylor 展開之，取其一次近似值，忽略其高次項，即

$$(\frac{\partial\phi}{\partial t})_{z=\eta}=(\frac{\partial\phi}{\partial t})_{z=0}+\{\frac{\partial}{\partial z}(\frac{\partial\phi}{\partial t})\}_{z=0}\eta$$

$$+\cdots\cdots\doteqdot(\frac{\partial\phi}{\partial t})_{z=0}$$

式(1.15)第二項亦屬於二次微小量可以略去，則式(1.15)簡化爲

$$(\frac{\partial\phi}{\partial t})_{z=0}=g\eta \tag{1.16}$$

此即波形之水面條件。

固定邊界即水底之水分子垂直分速應爲零，故

$$(w)_{z=-h}=-(\frac{\partial\phi}{\partial z})_{z=-h}=0 \tag{1.17}$$

水面形狀　　$F(x, z, t)=-z+\eta(x, t)=0$

故

$$(\frac{dF}{dt})_{z=\eta}=(-\frac{dz}{dt}+\frac{\partial\eta}{\partial t}+\frac{\partial\eta}{\partial x}\cdot\frac{\partial x}{\partial t})_{z=\eta}$$

$$=(-w+\frac{\partial\eta}{\partial t}+u\frac{\partial\eta}{\partial x})_{z=\eta}=0 \tag{1.18}$$

類比式(1.16)，以 Taylor展開並將上式左邊第三項之二次微小量省略，則

$$(\frac{\partial\eta}{\partial t})_{z=0}=-(\frac{\partial\phi}{\partial z})_{z=0} \tag{1.19}$$

合并式(1.16)與式(1.19)，消去 η，則得

$$\left(\frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}\right)_{z=0}+g\left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_{z=0}=0 \tag{1.20}$$

故僅需解出滿足式(1.17)及式(1.20)二條件之Laplace式之解即可。

設流速勢ϕ爲獨立變數x，z，t之函數X(x)，Z(z)，T(t)之積

$$\phi(x,z,t)=X(x)Z(z)T(t) \tag{1.21}$$

代入式(1.14)得

$$\frac{X''}{x}=-\frac{Z''}{z}=-k^2=\text{const} \tag{1.22}$$

X''及Z''分別爲X及Z之二次微分，或

$$\begin{aligned}X''+k^2X=0\\ Z''-k^2Z=0\end{aligned} \tag{1.23}$$

(1)　k爲正實數之一般解爲

$$X(x)=\begin{bmatrix}\sin kx\\ \cos kx\end{bmatrix}$$

$$Z(z)=\begin{bmatrix}e^{-kz}\\ e^{kz}\end{bmatrix} \tag{1.24}$$

$$T(t)=\begin{bmatrix}\sin\sigma t\\ \cos\sigma t\end{bmatrix}$$

因式(1.14)爲線性方程式，故將其解相加仍爲其解。

例如將　$\cos kx\cos\sigma t+\sin kx\sin\sigma t=\cos(kx-\sigma t)$

乃表示波形向x正方向進行之解。故

$$\phi=[Ae^{kz}+Be^{-kz}]\cos(kx-\sigma t) \tag{1.25}$$

由滿足水底條件式(1.17)

$$\frac{\partial}{\partial z}[Ae^{kz}+Be^{-kz}]\cos(kx-\sigma t)|_{z=-h}$$

$$=k[Ae^{-kh}-Be^{kh}]\cos(kx-\sigma t)=0$$

可得　$$A=Be^{2kh} \tag{1.26}$$

故　$$\begin{aligned}\phi&=Be^{kh}[e^{k(z+h)}+e^{-k(z+h)}]\cos(kx-\sigma t)\\ &=C'\cosh k(z+h)\cos(kx-\sigma t)\end{aligned} \tag{1.27}$$

但$C'=2Be^{kh}$爲待定常數。

待定常數C'可由水面波形之關係決定。設波形爲振幅a之正弦波

$$\eta=a\sin(kx-\sigma t) \tag{1.28}$$

由式(1.16)