

II-1 マウンド上の消波構造物に関する長波理論

室蘭工業大学 正会員 近藤 倣郎

1. ま え が き

波浪に対する環境保全ならびに水域の効率的利用を図る目的で、近年、直立消波型の防波堤、海岸堤防、護岸および岸壁が普及しつつある。このような直立消波構造物の出現は、防波施設の発達の歴史の中でも特筆されるべきものであり、今後も研究し開発されてゆくに違いない。

透水性の消波構造物による波の反射率や伝達率の理論は、非線型項を線型化することで境界値問題として解かれるが、対象とする波によつて(a)浅波理論、(b)長波理論に大別される¹⁾。(a)の方が一般性があるはずだが、エネルギー損失の見積りが不十分なこともあつて、計算が複雑な割には(b)の理論に比べて特段精度が上つていない²⁾。(b)の長波理論についても多くの人が発表しているが、単一透水層の防波堤に関しては Madson と近藤の討論で^{3), 4), 5)} 得られた式が簡潔さと変数の明確さにおいて、現段階では最も実用性があると考えられる。しかしながら、従来の消波構造物を対象にした理論はすべて構造物の内外の水深が一定の場合を対象としている。直立消波構造物の場合は水深が大きくなると安定性や施工性からの理由でマウンド上に設置したり、消波構造が堤体の一部となるような型式が多く見受けられる。

そこで本論文では、内外の水深が異なる場合の反射率や伝達率を求める長波理論を示すことにする。対象とする構造物の種類としては

(i) 後方水域が広くて陸側からの反射がない透過性防波堤型式 (透過堤)

(ii) 後方に不透壁をもつような消波防波堤、あるいは消波護岸・岸壁のような型式 (不透過堤)

の二型式である。

2. 基 本 式

長波の連続、運動の方程式は、堤体の内部を除く前後の水域では次のようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots (2.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \dots (2.2)$$

ここで h は水深、 g は重力加速度である。

この解は波の周期を $T (= 2\pi/\omega)$ として、 x の正負に進む波の合成波を考えると、静水面からの水位 η は

$$\eta = a e^{i(\omega t - kx)} + b e^{i(\omega t + kx)} \dots (2.3)$$

ここで a 、 b は進行波ならびに後退波の位相を含む複素振幅であり、 k は波数で、 $k = \frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{T\sqrt{gh}}$ 。また水粒子速度 u の解は

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} \left[a e^{i(\omega t - kx)} - b e^{i(\omega t + kx)} \right] \dots (2.4)$$

堤体の内部では、堤体の空隙率を λ 、抵抗係数を f 、慣性係数を σ とすると

$$\lambda \frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \dots (2.5)$$

$$\frac{\sigma}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + f \frac{\sigma}{\lambda} u = 0 \dots (2.6)$$

この式の解は

$$\eta = a e^{i(\omega t - \bar{k}x)} + b e^{i(\omega t + \bar{k}x)} \dots (2.7)$$

$$u = \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - i f}} \cdot \left[a e^{i(\omega t - \bar{k}x)} - b e^{i(\omega t + \bar{k}x)} \right] \dots (2.8)$$

以上の η , u の解は複素振幅 a , b が原点 $x=0$ で定義されている形となつてゐるが、境界で発生すると考えられる波の場合はその位置, ($x=x_1$), で定義する方が便利である。そのような場合は上の解において x に代つて $(x-x_1)$ とおく。次節からはそのような表現になつてゐる。

$\bar{k}$ は次式で与えられる波数(複素)である。

$$\bar{k} = k \cdot \sqrt{\tau - i f} = m - i n \dots (2.9)$$

$$m = \sigma \sqrt{\frac{\tau}{gh} \left[\frac{1}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + (f/\tau)^2} \right\} \right]}, \quad n = \sigma \sqrt{\frac{\tau}{gh} \left[\frac{1}{2} \left\{ -1 + \sqrt{1 + (f/\tau)^2} \right\} \right]} \dots (2.10) \dots (2.11)$$

f の値は $(f \propto \lambda)$ が抵抗項であることを考慮すると, $\lambda g / \omega f$ が透水係数にあたる。乱流抵抗も加えた Dupuit-Forchheimer 則型式の抵抗を対象とし、一周期間の平均の近似値をとることになると⁶⁾, 下式のようなになる。

$$f \cdot \frac{\sigma}{\lambda} = \alpha + \beta \frac{8}{3\pi} \cdot |\hat{u}| \dots (2.12)$$

こゝで $\hat{u}$ は堤体全体を代表する水平水粒子速度 $\hat{u}$ (通常、堤体中央での u が用いられる)の振幅で、 $\hat{u} = \hat{u} e^{i\omega t}$ である。

粒状体については動粘性係数を ν , 材料の代表径を d とすると

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \cdot \frac{\nu}{d^2} \dots (2.13) \quad \beta = \beta_0 \cdot \frac{1-\lambda}{\lambda^3} \cdot \frac{1}{d} \dots (2.14)$$

とおけることが知られており, Madsen⁷⁾によれば石の場合は $\alpha_0=1100 \sim 2700$, $\beta_0=2.7$ が妥当な値である。

τ は本来的に流路の曲りくねりに基づく、慣性力の増加を示す係数であり多孔質の堤体では

$$\tau = 1 + \kappa (1 - \lambda) \dots (2.15)$$

で与えられる。 κ は付加質量係数であるが不明なので、 τ の値も良くわからないが、およそ $1 \leq \tau \leq 1 + \lambda$ になると考えられる⁸⁾。

τ の効果に関してはMadsenは石積堤のような場合は1としても良いと述べているが、抵抗の小さい構造物については反射率を支配する大切な要素である⁹⁾。

なお、堤体外の抵抗が無い水域では、 $f=0$, $\tau=1$, $\lambda=1$ である。

堤体表面など、異なる水域の境界における境界条件は、境界面の前後での質量ならびに運動量の保存から次式が成立する。

$$(\eta u)_j = (\eta u)_{j+1} \dots (2.16) \quad \eta_j = \eta_{j+1} \dots (2.17)$$

こゝで下付 j は水域の番号を意味している。

3. 透過堤

(i)の透過堤については下図のようにマウンド部分を不透水として、モデル化したものについて解く。領域

I と II, II と III の水深変化にともなう損失は無視する。

この場合、領域 III では進行波しか存在しないことに留意し、境界条件の式 (2.16), (2.17) を $x=0$, および $x=l$ について適用すると次式が得られる。

$$a_1 + b_1 = a_2 + b_2 e^{-i\bar{k}_2 l} \dots (3.1)$$

$$\sqrt{gh_1}(a_1 - b_1) = \sqrt{gh_2} \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - if}} (a_2 - b_2 e^{-i\bar{k}_2 l}) \quad (3.2)$$

$$\sqrt{gh_2} \frac{\lambda}{\sqrt{\tau - if}} (a_2 e^{-i\bar{k}_2 l} - b_2) = \sqrt{gh_3} a_3 \dots (3.3)$$

$$a_2 e^{-i\bar{k}_2 l} + b_2 = a_3 \dots (3.4)$$

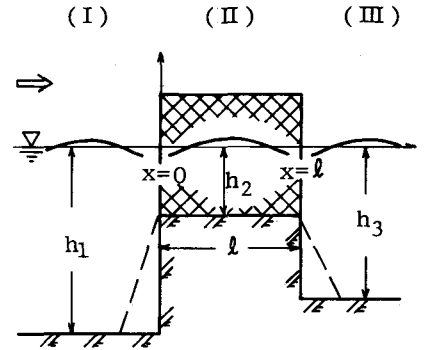


図-1 透過堤の断面略図

ここで入射波振幅 a_1 に対する比を,

$$R_j = b_j/a_1, \quad T_j = a_j/a_1, \quad (j = 1, 2, 3) \quad \text{のように定義する。}$$

また,

$$\alpha_{j \pm 1, j} = \left[\sqrt{\frac{h}{\tau - if}} \cdot \lambda \right] / \left[\sqrt{\frac{h}{\tau - if}} \cdot \lambda \right]_{j \pm 1}$$

とする。ここで扱っているのは $j=2$ の場合である。

(3.1) ~ (3.4) 式を代表的に解いて、 R_1, R_2, T_2, T_3 は次のように求まる。

$$R_1 = \frac{(1 - \alpha_{1,2})(1 + \alpha_{3,2})e^{i\bar{k}_2 l} - (1 + \alpha_{1,2})(1 - \alpha_{3,2})e^{-i\bar{k}_2 l}}{(1 + \alpha_{1,2})(1 + \alpha_{3,2})e^{i\bar{k}_2 l} - (1 - \alpha_{1,2})(1 - \alpha_{3,2})e^{-i\bar{k}_2 l}} \dots (3.5)$$

$$R_2 = -2(1 - \alpha_{3,2})/B \dots (3.6) \quad T_2 = (2 + \alpha_{3,2})e^{i\bar{k}_2 l}/B \dots (3.7)$$

$$T_3 = 4\alpha_{3,2}/B \dots (3.8)$$

ただし、 B は R_1 の分母の項である。

堤体内の水粒子速度の振幅 U_2 は次のように求まる。

$$U_2 = \frac{2a_1}{h_2} \sqrt{gh_1} \cdot \alpha_{1,2} \cdot \left[(1 + \alpha_{3,2})e^{i\bar{k}_2(l-x)} + (1 - \alpha_{3,2})e^{-i\bar{k}_2(l-x)} \right] / B \dots (3.9)$$

反射率 K_R , 伝達率 K_T は下式で与えられる。

$$K_R = |R_1|, \quad K_T = |T_3| \dots (3.10)$$

K_R, K_T は本解法では、 $\lambda/\sqrt{\tau}, f/\tau, \lambda k_2 l, h_2/h_1, h_2/h_3$ の関数となる。ここでは堤体水深 h_2 の効果を知る目的で、 $f/\tau = 1.0, \lambda/\sqrt{\tau} = 0.45, h_1 = h_3$ の場合についての K_R, K_T の計算例を図-2, 3 に示す。

K_R は h_2/h_1 の値が小さい程大きく、 $\lambda k_2 l$ が小さいところでその効果が大きい。また K_T は逆に、 h_2/h_1 が大きいほど大きくなり、 $\lambda k_2 l$ が大きいところで効果が大きい。 f/τ が 1.0 のみについて比較したが、 f/τ の値が大きくなると h_2/h_1 の影響は小さくなる。なお図の中の破線と一点鎖線は $h_1 = h_2 = h_3$ の場合につき Madson が計算したものを引用した。

実際の波について計算するには、 f は (2.12) 式のように非線形抵抗係数で U の関数であるから (3.9)

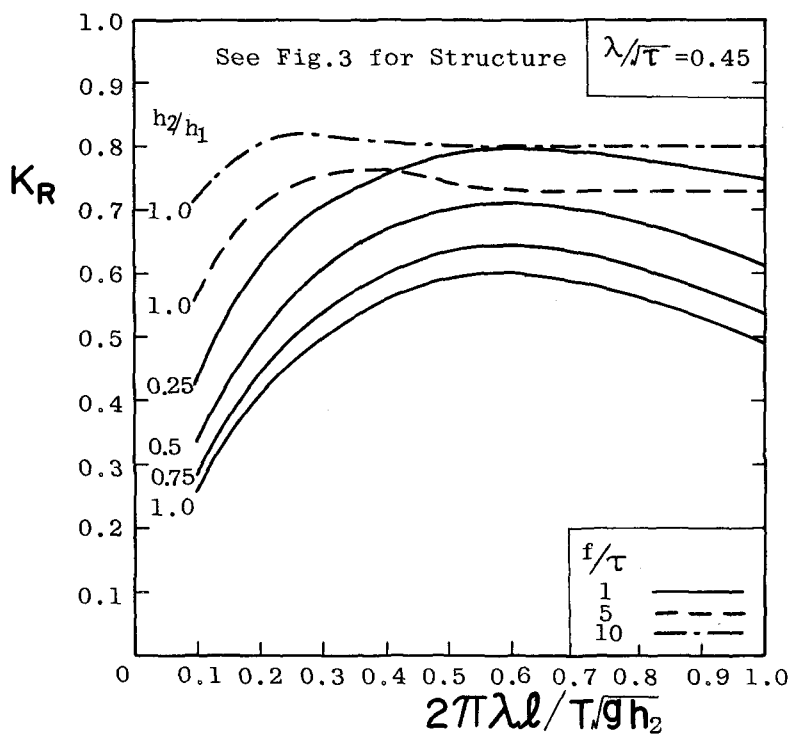


図-2 透過堤の反射率に及ぼすマウンド水深の影響

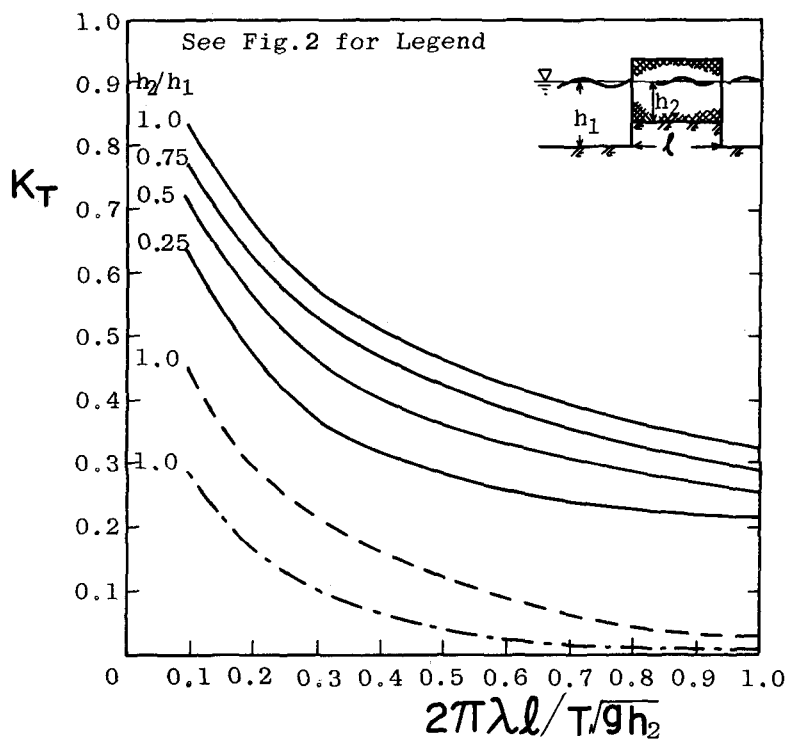


図-3 透過堤の伝達率に及ぼすマウンド水深の影響

式を有理化して $|U_2|$ を求め繰返し計算によつて f を定め、 K_R, K_T を計算することになる。

4. 不透過堤

この場合はるの透過堤と異なる点は、領域 III では後退波が出現することと、 $x=l_1+l_2$ で $u=0$ という境界条件が加わることである。

$$a_1 + b_1 = a_2 + b_2 e^{-i\bar{k}_2 l_1} \dots (4.1)$$

$$\sqrt{g h_1} \cdot (a_1 - b_1) = \sqrt{g h_2} \cdot \frac{\lambda}{\tau - i f} \cdot \left\{ a_2 - b_2 e^{-i\bar{k}_2 l_1} \right\} \dots (4.2)$$

$$a_2 e^{-i\bar{k}_2 l_1} + b_2 = a_3 + b_3 e^{-i k_3 l_2} \dots (4.3)$$

$$\sqrt{g h_2} \cdot \frac{\lambda}{\tau - i f} \cdot \left\{ a_2 e^{-i\bar{k}_2 l_1} - b_2 \right\} = g h_3 \left\{ a_3 - b_3 e^{-i k_3 l_2} \right\} \dots (4.4)$$

$$a_3 e^{-i k_3 l_2} = b_3 \dots (4.5)$$

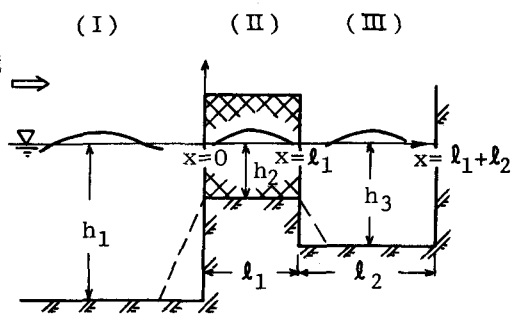


図 - 4 不透過堤の断面略図

こゝで

$$F_+ = 1 + e^{-2i k_3 l_2} \dots (4.6) \quad F_- = 1 - e^{-2i k_3 l_2} \dots (4.7)$$

を定義して、 $R_1 \sim R_3$ を解くと以下のようになる。

$$R_1 = \frac{(1 - \alpha_{12})(F_- + \alpha_{32} F_+) e^{i\bar{k}_2 l_1} - (1 + \alpha_{12})(F_- - \alpha_{32} F_+) e^{-i\bar{k}_2 l_1}}{(1 + \alpha_{12})(F_- + \alpha_{32} F_+) e^{i\bar{k}_2 l_1} - (1 - \alpha_{12})(F_- - \alpha_{32} F_+) e^{-i\bar{k}_2 l_1}} \dots (4.8)$$

$$T_2 = 2(F_- + \alpha_{32} F_+) e^{i\bar{k}_2 l_1} / W \dots (4.9) \quad R_2 = -2(F_- - \alpha_{32} F_+) / W \dots (4.10)$$

$$T_3 = \left[(1 + \alpha_{32})(F_- + \alpha_{32} F_+) - (1 - \alpha_{32})(F_- - \alpha_{32} F_+) \right] / W \dots (4.11)$$

$$R_3 = T_3 e^{-i k_3 l_2} \dots (4.12)$$

反射率は $K_R = |R_1|$ で求まる。

また堤体内の水平水粒子速度は

$$U_2 = \frac{2a_1}{h_2} \sqrt{g h_1} \cdot \alpha_{12} \left[(F_- + \alpha_{32} F_+) e^{i\bar{k}_2 (l_1 - x)} + (F_- - \alpha_{32} F_+) e^{-i\bar{k}_2 (l_1 - x)} \right] / W \dots (4.13)$$

である。ただし、式 (4.10), (4.11), (4.13) 中の W は、(4.8) 式中の分母の項である。

不透過堤の反射率などの計算図表は本文では省略したが、水深比 h_2/h_1 の効果は透過堤の場合とほぼ同じとして良い。 $k_2 l_1$ が極めて小さいときは K_R は堤体水深 h_2 の増加とともに減少し、また $k_3 l_2$ が小さいと背後水域の水深 h_3 の影響はなくなる。

む す び

マウシド上におかれた消波構造物あるいは堤体の下部が不透過となつてゐるような消波構造物について、堤体内外の水深が反射率や伝達率にどのような効果があるのかを知るために、水深の変化を考えた長波の場

合の理論式を、透過堤と不透過堤について誘導した。

その結果、水深の効果はかなり明瞭であり、一様水深に比べて堤体水深が浅いほど反射率が高く、伝達率が低くなっており、その効果は堤体の抵抗係数が小さいほど大きいことなどが知れた。

今回は主として理論式の提示に終つたが別の機会にもっと精しい検討結果を報告する所存である。

本研究の一部は昭和54年度文部省科学研究費試験研究(2)によつてなされたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 近藤 俊郎：消波の機構，海と港，*№1*，pp. 31~37，1978.
- 2) Madsen, O. S.: Wave transmission through porous structures, *Jr. of Watys., Harbors and Coastal Eng. Div., Proc. of ASCE, WW3*, pp. 169-188, 1974.
- 3) Kondo, H.: Discussion on 2), *Jr. of Watys., Harbors and Coastal Eng. Div., Proc. of ASCE, WW3*, pp. 300-302, 1975.
- 4) Madsen, O. S.: Discussion on 2) (Closure), *Jr. of Watys., and Harbors and Coastal Eng. Div., Proc. of ASCE*, pp. 94-97, 1976.
- 5) Madsen, O. S. and S. M. White: Reflection and transmission characteristics of Porous rubble mound breakwaters, *Rt. No. 207, Ralph M. Parsons Lab., Dept. of Civil Eng., School of Eng., MIT*, 183 p., 1975.
- 6) 前出 1)
- 7) 前出 5)
- 8) 前出 3)
- 9) 前出 3)