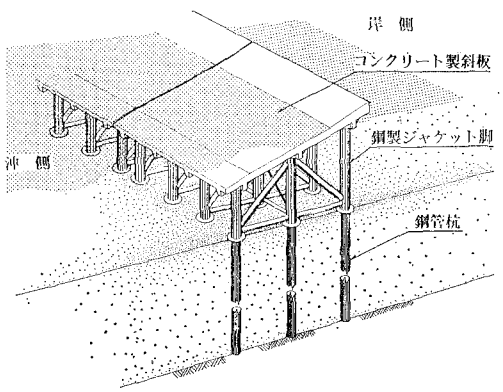
斜板堤の消波・波力特性の実用的算定法

山下誠也*・櫻井清一**・竹内浩一**
宇多高明***・小俣　篤****

1. まえがき

近年，筆者らは沿岸域の波浪制御構造物として，水面を貫通して斜板を配置した斜板堤（図—1 参照）の研究開発を進めている（建設省土木研究所，1989a, 1989b, 櫻井ら, 1990）．斜板堤の消波特性や波力特性に影響を及ぼす要素には，斜板の傾斜角，没水深および天端高と，設置海域の水深，波浪条件などがあるが，従来の研究ではこれらの要素を系統的に変えた水理実験を実施し，これにより消波・波力特性について検討している（高橋ら，1989，櫻井ら, 1990）．しかし，種々の海域条件を考えると，この方法に従う限り非常に多くの実験が必要になる．設置海域が与えられて斜板堤の構造諸元を選定する初期設計の段階では，たとえ概略算定法であっても消波特性と波力を簡単に推定する方法があれば，実験を行う必要がなく便利である．そこで本研究では，消波・波力特性を支配する第一義的な要素である斜板の没水深，波長および水深による消波・波力特性の変化を調べるため，透過率・反射率および波力の近似解析と水理実験を行う．解析法はポテンシャル接続法の考え方をもとにした簡便な方法である．また，計算と実験との比較を通じて，斜板堤を通過する波の透過率と，構造物に作用する波力の実用的算定法の適合性を確認する．



図—1　斜板堤の概念図

* 正会員　工博　石川島播磨重工業(株)技術研究所
** 正会員　石川島播磨重工業(株)土木建築プロジェクト部
*** 正会員　工博　建設省土木研究所海岸研究室長
**** 正会員　建設省土木研究所海岸研究室

2. 透過率・反射率および波力の簡易解析法

2.1 基本式

一定水深 h の海域に，傾斜角 θ の斜板が静水面から突出した状態で固定して設置されているとする．座標系を図—2 のようにとり，x 軸の正方向から角周波数 σ の微小振幅波が入射する場合を考える．流体は非粘性および非圧縮性であるとし，流体運動は非回転でかつ微小であると仮定して流体運動の速度ポテンシャルを $i\sigma Y\phi(x,z)e^{i\sigma t}$ と表す．ここに Y は複素振幅である．流体領域を図—2 に示すように4分割すると，各領域で速度ポテンシャル $\phi(x,y)$ が満足しなければならない条件は次のように表される．

領域Ⅰ（斜板の上方）：

$$x\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial\phi}{\partial x}+m\phi=0 \quad \cdots\cdots(1)$$

領域Ⅱ（斜板の下方）：

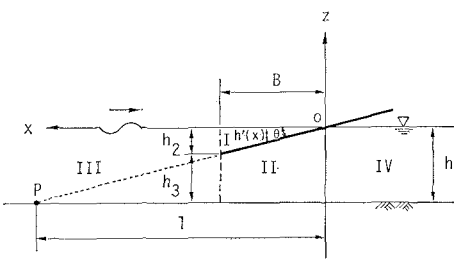
$$z=-h'(x) \text{ および } z=-h \text{ で } \frac{\partial\phi}{\partial n}=0 \quad \cdots\cdots(2)$$

領域ⅢおよびⅣ（斜板の前方および後方）：

$$z=0 \text{ で } K\phi-\frac{\partial\phi}{\partial z}=0 \quad \cdots\cdots(3)$$

$$z=-h \text{ で } \frac{\partial\phi}{\partial z}=0 \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，$h'(x)$：斜板の没水深，n：固定境界から流体領域へ向かって立てた法線であり，K および m は入射波の波数 k により次式で定義される．



図—2　記号と流体領域の定義

$$\frac{\sigma^2}{g}=K=m\tan\theta=k\tanh kh \quad \cdots\cdots(5)$$

ただし g は重力加速度である．領域Ⅰにおいては，$h'(x)$ は波長に比べて小さいとして長波の理論にもとづく条件を用いた．

各流体領域でそれぞれの条件を満足する速度ポテンシャルを検討すると，まず領域Ⅰでは，海底が傾斜した海域を進行する長波の速度ポテンシャルが考えられ

$$\phi_1(x)=C_0J_0(2\sqrt{mx}) \quad \cdots\cdots(6)$$

とおける．ここに，J_0: 0次の第1種 Bessel 関数，C_0: 未定係数である．領域Ⅱでは，斜板の延長線と海底面との交点 P（図—2 参照）に吹き出しがある場合の速度ポテンシャルを用いる．このような吹き出しがつくる流れは斜板の下面および海底に沿った流れとなるから，境界条件式 (2) が満足されるのは明らかである．速度ポテンシャルは次式となる．

$$\phi_2(x,z)=D_0+E_0\log\{(x-l)^2+(z+h)^2\} \quad \cdots\cdots(7)$$

ただし，l: 点 P から z 軸までの水平距離，D_0 および E_0: 未定係数である．領域Ⅲには入射波と反射波，領域Ⅳには透過波が存在するが，これらの領域の速度ポテンシャルを考えるにあたって局所かく乱にもとづく成分を無視する．波の反射率を C_R，透過率を C_T とすれば，領域Ⅲおよび Ⅳ の速度ポテンシャルは次式で与えられる．

$$\phi_3(x,z)=\frac{1}{K}(e^{ikx}+C_Re^{-ikx})\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad \cdots\cdots(8)$$

$$\phi_4(x,z)=\frac{C_T}{K}e^{ikx}\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad \cdots\cdots(9)$$

C_R, C_T は未定係数であり，一般に複素数である．

次に，ポテンシャル接続法の考え方を用いて未定係数を決定する．例えば領域Ⅰと Ⅲとの境界での速度ポテンシャルの連続条件は

$$\frac{1}{h_2}\int_{-h_2}^{0}\phi_1(B)\,dz=\frac{1}{h_2}\int_{-h_2}^{0}\phi_3(B,z)\,dz \quad \cdots\cdots(10)$$

と表される．ただし，B: 斜板の没水部の水平方向長さ，h_2: 斜板下端の没水深である．領域Ⅱと Ⅲとの境界および領域Ⅱと Ⅳとの境界でも同様な連続条件を考える．一方，速度の連続条件は領域（Ⅰ＋Ⅱ）と Ⅲとの境界では次式で与えられる．

$$\int_{-h_2}^{0}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}\bigg|_{x=B}dz+\int_{-h}^{-h_2}\frac{\partial\phi_2}{\partial x}\bigg|_{x=B}dz=\int_{-h}^{0}\frac{\partial\phi_3}{\partial x}\bigg|_{x=B}dz \quad \cdots\cdots(11)$$

領域Ⅱと Ⅳとの境界でも同様である．以上の5種類の条件を用いて演算を行い，未定係数 C_0, D_0, E_0, C_R および C_T を求めた．

2.2 透過率・反射率および波力

複素透過率 C_T，複素反射率 C_R は次式のように表される．

$$C_T=\frac{2}{1+f_Xf_Y}e^{ikB} \quad \cdots\cdots(12)$$

$$C_R=\left(\frac{2f_X}{1+f_Xf_Y}-1\right)e^{2ikB} \quad \cdots\cdots(13)$$

ここに

$$f_X=f_B+if_C \quad \cdots\cdots(14)$$

$$f_Y=1+if_A \quad \cdots\cdots(15)$$

$$f_A=\frac{J_1(2\sqrt{mB})}{J_0(2\sqrt{mB})}\sqrt{\frac{\tanh kh}{kh_2}}\left(1-\frac{\sinh kh_3}{\sinh kh}\right) \quad (16)$$

$$f_B=\frac{h_3}{h}\frac{\sinh kh}{\sinh kh_3} \quad \cdots\cdots(17)$$

$$f_C=-f_B\frac{kh}{\theta}\log\frac{h_3}{h} \quad \cdots\cdots(18)$$

であり，J_1: 1次の第1種 Bessel 関数，h_3: $h_3=h-h_2$ である．本研究で用いた簡易解析では，斜板に対する透過率および反射率を支配するパラメータは kh, h_2/h および θ の3個のみとなる．

特別な場合として斜板の傾斜角が $\theta\to0$ の場合を考えると，これは水面に水平板がある状態に相当する．$\theta\to0$ ($h_3\to h$) ならば $f_A\to0$, $f_B\to1$ であり，また，近似的に $h=h_3+B\theta$ であるから

$$f_C\to-\frac{kh}{\theta}\log\left(1-\frac{B\theta}{h}\right)\to kB \quad \cdots\cdots(19)$$

である．したがって式(12), (13)は次式となる．

$$C_T=\frac{1}{1+ik(B/2)}e^{ikB} \quad \cdots\cdots(20)$$

$$C_R=\frac{ik(B/2)}{1+ik(B/2)}e^{2ikB} \quad \cdots\cdots(21)$$

これらは水平板について Stoker (1957) が求めた解に等しい．

次に，斜板に作用する波力を斜板の上面および下面の圧力を積分することによって求める．鉛直波力 F_z の式を速度ポテンシャル ϕ_1 および ϕ_2 を用いて書くと

$$\frac{F_z}{\rho gH_I/2}=K\int_0^B(\phi_1-\phi_2)\,dx \quad \cdots\cdots(22)$$

である．ここに，ρ: 流体の密度，H_I: 入射波の波高とする．この式に式 (6), (7) を代入し，更に未定係数 C_0, D_0, E_0 には既に求めた関係を用いて演算を行うと次式を得る．

$$\frac{F_z}{\rho gH_Ih_2/2}=\frac{f_A}{kh_2}(e^{ikB}+C_Re^{-ikB})-\frac{\tanh kh}{kh\tan\theta}(1+if_D)C_T \quad \cdots\cdots(23)$$

なお，f_D は次式で与えられる．

$$f_D=\frac{kh}{\theta}\left\{\frac{\theta}{\tan\theta}+\left(\frac{h}{h_2}-1\right)\log\left(1-\frac{h_2}{h}\right)\right\} \quad \cdots(24)$$

この結果より，鉛直波力も3個のパラメータ kh, h_2/h

および θ により決まることが分かる．水平波力 F_x の式は

$$F_x=F_z\tan\theta \quad \cdots\cdots(25)$$

である．

特別な場合として波長が水深に比べて非常に大きい ($kh\to 0$) 場合を考えると，$f_A\to 0$, $f_D\to 0$, $C_T\to 1$ であるから

$$\frac{F_z}{\rho g H_I h_2/2}=-\frac{1}{\tan\theta} \quad \cdots\cdots(26)$$

となる．この場合，無次元波力は斜板の傾斜角のみに依存する．

3. 実験方法

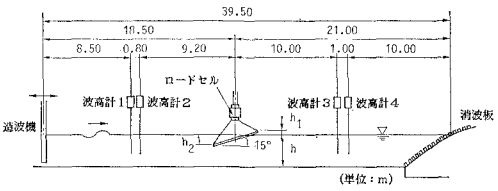
斜板に対する波の透過率および反射率と作用波力を測定する実験を造波水路（長さ 39.5 m, 幅 2.5 m, 高さ 1.8 m）で行った．水路内に高さ 1.1 m の仕切壁を水路の長さ方向に設置して幅 1 m の水路をつくり，この仮設水路内で実験した．斜板模型は 1/25 の縮尺模型であり，ロードセル（三分力計）を介して固定装置に取り付けた（**図—3** 参照）．波高計測には 4 台の容量式波高計を用い，**図—3** の波高計 1, 2 で入射波高 H_I および反射波高 H_R を，波高計 3, 4 で透過波高 H_T を測定し，反射率 K_R ($=|C_R|$)，透過率 K_T ($=|C_T|$) を算出した．また，三分力計により斜板模型に作用する下向きおよび上向きの鉛直波力 F_z と，岸向きおよび沖向きの水平波力 F_x を測定し，いずれも $w_0H_Ih_2c/2$ で除して無次元波力を求めた．ただし，$w_0=\rho g$, c は入射波の進行方向に直角方向の斜板の長さで，実験に用いた斜板模型では $c=0.99$ m である．

実験では斜板の傾斜角，天端高および入射波高は一定値とし，$\theta=15°$, $h_1=0.1$ m, $H_I=0.16$ m とした．斜板の没水深を一定 ($h_2=0.2$ m) として水深を $h=0.4$, 0.6, 0.8 m と変化させた場合（水深変化シリーズ）と，水深を一定 ($h=0.6$ m) として没水深を $h_2=0.24$, 0.2, 0.16 m と変えた場合（没水深変化シリーズ）について実験し，没水深と全水深との比 h_2/h の影響を調べた．

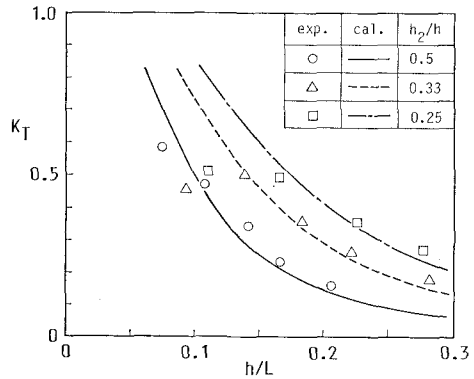
4. 計算と実験との比較

4.1 実験結果

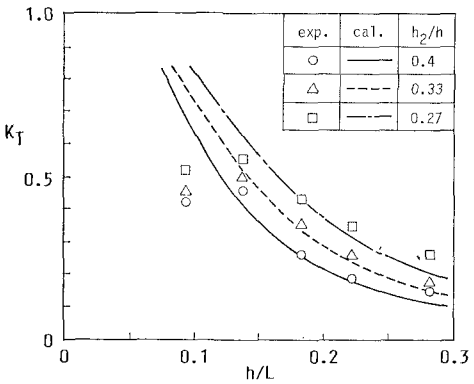
水深変化シリーズの透過率 K_T の実験値を**図—4** に示す．図の横軸は水深波長比 h/L である．h/L の小さい範囲を除いて，K_T は h_2/h が大きくなるにしたがって単調に小さくなることが明らかである．**図—5** には没水深変化シリーズの結果を示すが，実験を行った h/L の全範囲で，K_T は h_2/h が大きくなるにしたがって小さくなっている．これらの結果より，h/L が大きい範囲では（今回の場合約 0.15 以上），水深変化シリーズと没水深変化シリーズで K_T に及ぼす h_2/h の影響は同じであり，K_T を支配する主要なパラメータは h_2/h であることが分かる．



図—3 実験装置



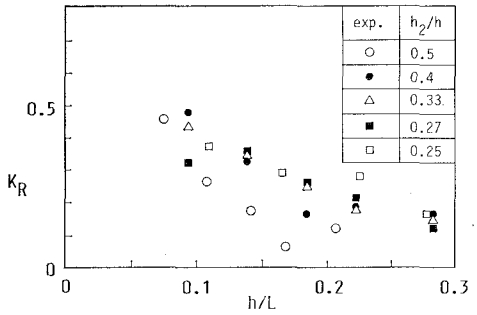
図—4 透過率 K_T と h/L の関係（水深変化）



図—5 透過率 K_T と h/L の関係（没水深変化）

図—6 には，反射率 K_R と h/L との関係を示す．水深変化シリーズと没水深変化シリーズの実験値を合わせて示した．ここに，図中の記号○，□は水深変化シリーズ，記号●，■は没水深変化シリーズ，記号△は両シリーズ共通の実験ケースの実験値を示す．$h_2/h=0.5$ の場合を除いて考えると，K_R の h_2/h による変化は大きくない．K_R がこのような傾向を示すのは，K_R に対しては斜板上での砕波や越波にもとづく波エネルギー逸散の影響が大きく現れ，そしてその影響は h_2/h が変化してもあまり変わらないためであると考えられる．

次に，斜板に作用する鉛直波力と h/L の関係を**図—**



図—6　反射率 K_R と h/L の関係

7 および図—8 に示す．下向き波力，上向き波力の両実験値とも，h/L の大きい範囲では h/L によってあまり変化せず，一方 h/L の小さいところで急増する傾向を示している．これは波長が長くなると衝撃的な波力が作用するようになるためである．鉛直波力に及ぼす h_2/h の影響については，明瞭な傾向はみられず，大略，h_2/h によって無次元鉛直波力は変わらないといえる．図—9 には，水深変化シリーズと没水深変化シリーズの水平波力の実験値を合わせて示す．図中の記号の定義は図—6 の場合と同じである．図から明らかなように無次元水平波力は h_2/h によってほとんど変化しない．

4.2　透過率の実用算定法

透過率の式(12)から K_T は次式となる．

$$K_T=|C_T|=\frac{2}{\sqrt{(1+f_B-f_Af_C)^2+(f_C+f_Af_B)^2}} \quad \cdots\cdots(27)$$

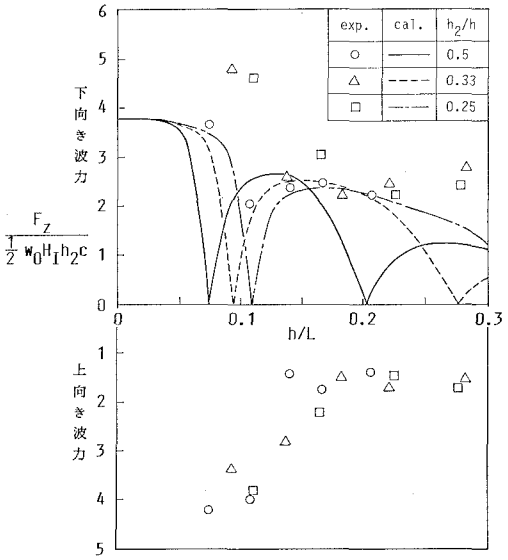
$\theta=15°$，$h_2/h=0.5$ としてこの式より計算した K_T の例を図—10 に破線で示す．この K_T の計算値は h/L に対して周期的に変動する傾向を示し，前述の実験値の傾向と異なる．そこで，実験結果を説明できる K_T の算定法を得るために，計算式の一部を簡略化するとともに，実験結果を考慮に入れて決める補正係数を計算式に取り入れることにした．すなわち f_A を式(16)の代わりに次式によって求めることにした．

$$f_A=\alpha\frac{\tanh kh}{\tan\theta}\left(1-\frac{\sinh kh_3}{\sinh kh}\right) \quad \cdots\cdots(28)$$

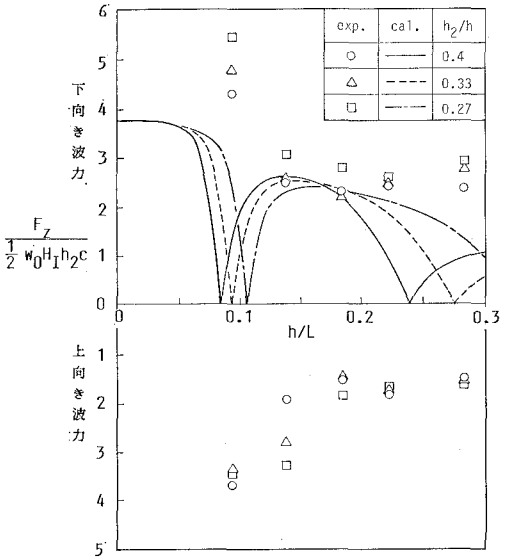
これは式(16)で J_1/J_0 を $J_1/J_0\to\sqrt{mB}$ と近似して得られる式に補正係数 α を乗じたものである．f_A は領域 I（斜板の上方）の流体運動に関係しているが，この領域では簡易解析法における仮定と実際の現象との差が比較的大きく，したがって f_A に対する補正が最も必要になる．図—10 の実線は式(28)で $\alpha=1.8$ としたときの補正計算値を示す．

図—4 および図—5 の K_T の計算値は，このような方法で求めた値である．補正係数 α は次式で与えた．

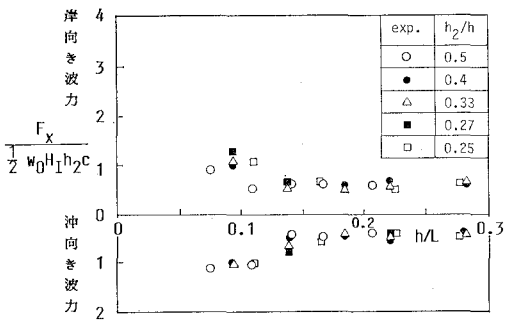
$$\alpha=1+0.4/(h_2/h) \quad \cdots\cdots(29)$$



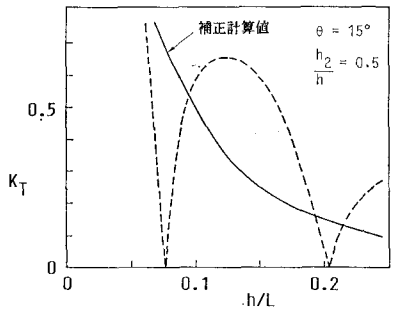
図—7　鉛直波力と h/L の関係（水深変化）



図—8　鉛直波力と h/L の関係（没水深変化）



図—9　水平波力と h/L の関係



図—10 K_T の計算値の例

この式は，水深変化シリーズの中の水深が最も小さい場合 ($h_2/h=0.5$) と最も大きい場合 ($h_2/h=0.25$) の両者について，K_T の計算値と実験値が対応するように定めたものである．したがって**図—4** の $h_2/h=0.5$ および 0.25 のときの計算値と実験値が一致するのは当然であるが，$h_2/h=0.33$ の場合も良く合っている．また，**図—5** の没水深変化シリーズでも計算値と実験値とはほぼ対応している．ただし，いずれの場合も K_T の計算値が 0.5 を越える範囲では計算値と実験値の傾向が異なる．

以上より，K_T の計算値が 0.5 以下の範囲に限ってみると，ここで示した方法は斜板堤の K_T の概略値を推定するための実用算定法として用いることができる．なお，天端高波高比 h_1/H_I が今回の値 ($h_1/H_I=0.625$) よりかなり小さくて越波が容易に起こるような状態に対しては，補正係数 α は式(29)による値より大きくする必要がある．

4.3 波力に関する検討

式(23)により計算した鉛直波力の絶対値を，**図—7** および**図—8** に下向き波力の実験値と対比させて示す．F_z の計算値は h/L に対して周期的に変動する傾向を示す．一方，実験値にはそのような傾向はないが，h/L に対して単調に減少する訳ではなく，h/L が大きい範囲ではほとんど変化しない．計算値が零に落ち込む場所では計算値と実験値との差は大きい．しかし，計算値が極大値をとる場所では両者はほぼ対応している．そこで，鉛直波力を推定する場合，計算で得られる波力曲線の包絡線に相当する値をとることにすれば，波力の概略推定値が得られる．次に，水平波力は式(25)により求められるが，ここでは h/L が小さい場合だけを検討してみる．$h/L\to 0$ の場合の計算値は式 (25), (26) から $|F_x|/(w_0H_Ih_2/2)\to 1$ であり，一方，**図—9** より実験値も同様の値である．水平波力の最大値としては無次元波力が1となる程度の波力を考えれば良いことが分かる．

5. まとめ

ポテンシャル接続法の考え方をもとにして，斜板堤に対する透過率・反射率および波力の簡易解析を行った．波の透過率に関しては，この解析法により求められる式を実験結果を考慮に入れて補正した実用算定法を得た．また斜板堤に作用する波力については，今回の解析法をもとに概略の波力を推定できることを示した．更に精度の良い推定法とするためには，斜板の上方領域の流体運動の取り扱いを改善する必要がある．

参考文献

建設省土木研究所海岸研究室 (1989a)：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (8)，土木研究所資料，第2701号，pp. 31～54.

建設省土木研究所海岸研究室 (1989b)：海域制御構造物の開発に関する共同研究報告書 (9)，土木研究所資料，第2788号，pp. 97～108.

高橋陽一・盛高裕生・礒部雅彦・渡辺 晃 (1989)：傾斜板を用いた波浪制御構造物に関する研究，海岸工学論文集，第36巻，pp. 519～523.

櫻井清一・竹内浩一・山下誠也・宇多高明・小俣 篤 (1990)：大水深域における斜板堤の消波特性および波力低減に関する実験的検討，海洋開発論文集，Vol. 6, pp. 125～130.

Stoker, J.J. (1957)：Water Waves, Interscience Publishers, Inc., New York, pp. 432～436.