

消波ブロック被覆堤の波力低減に関する理論的考察

稲垣 圭二* ・ 常井 公一**・ 服部昌太郎***
野口 雄二****・ 遠藤 泰司*****

1. ま え が き

消波ブロック被覆工の波力低減効果に関して、今日まで数多くの実験的研究がなされて来た。著者ら¹⁾も入射波条件、被覆工の形状と規模、ブロック特性を取込んだ低減波力評価指標を提案し、これによって非越波時の被覆堤作用波力と波力低減率に対する実験式を提案している。しかし、ブロック被覆工の波力低減機構には多くの要因と複雑な現象とが関係していることから、その理論的検討はこれまで殆どなされていない。

本研究の目的は、線形長波理論によってブロック被覆工の波力低減に関する理論解析を行い、その妥当性を検討することである。

2. 理論的考察

図-1に示す一様水深 h に設置された幅 l の鉛直被覆工を備える直立堤に波が直に入射する場合に対して、以下の仮定の下に解析を行う。すなわち、(1) 波動場は線形長波理論により記述できる。(2) 被覆工の透過構造は一様である。(3) 被覆工内の抵抗則は、乱流抵抗まで考慮した抵抗則を線形化して使用する。

(1) 基礎方程式

被覆工外の領域 I ($x \leq 0$) の波動場の基礎方程式は、式 (1) と (2) で与えられる。

$$\partial \eta / \partial t + h \partial u / \partial x = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

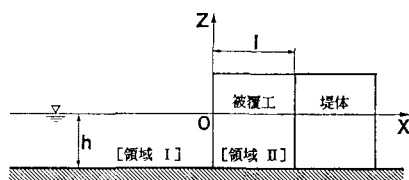


図-1 座標系と記号

$$\partial \eta / \partial t + g \partial \eta / \partial x = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで、 η ：静水面より波面までの鉛直距離、 u ：水平流速、 g ：重力の加速度、 t ：時間。

被覆工内の領域 II ($0 \leq x \leq l$) の流体運動に対しては、近藤²⁾と Madsen・White³⁾ にならって線形化した基礎方程式 (3) と (4) を用いる。

$$\partial \eta / \partial t + (h/\varepsilon) \cdot \partial u / \partial t = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$(s/\varepsilon) \partial u / \partial t + g \partial \eta / \partial x + f \omega u / \varepsilon = 0 \quad \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで、 u ：被覆工内の浸透流速の水平成分、 ε ：被覆工空隙率、 ω ：入射波の角周波数、 S は非定常流場でのブロックの付加質量を考慮する係数で、式 (5) で与えられる。

$$S = 1 + C_m(1 - \varepsilon) \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

C_m ：付加質量係数。また、 f は被覆工の無次元抵抗係数で、式 (6) のように表す。

$$f \omega / \varepsilon = \alpha + \beta |u| \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

α と β ：ブロック層の水理特性に関係する係数。

(2) 基礎式の解

いま、式 (1)～(4) を満足する η と u の周期解として

$$\eta = \text{Re}[\zeta(x) \cdot e^{i\omega t}] \quad \cdots \cdots \cdots (7)$$

および

$$u = \text{Re}[U(x) \cdot e^{i\omega t}] \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

を仮定する。ここで、 $i = \sqrt{-1}$ 。

領域 I では、入射波と被覆工よりの反射波とが存在することから式 (7) の $\zeta(x)$ は

$$\zeta = a_i e^{-ik_0 x} + a_r e^{ik_0 x} \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

と書け、また式 (8) の $U(x)$ は式 (1) と (2) より

$$U = \sqrt{g/h} (a_i e^{-ik_0 x} - a_r e^{ik_0 x}) \quad \cdots \cdots \cdots (10)$$

となる。ここで、 a_i と a_r ：入射波と反射波の振幅、 $k_0 = \omega / \sqrt{gh}$ ：入射波の波数。

領域 II では、被覆工前面よりの進行波と直立堤よりの反射波とが存在することから、式 (7) の $\zeta(x)$ は、

$$\zeta = a_+ e^{-ikx} + a_- e^{ik(x-l)} \quad \cdots \cdots \cdots (11)$$

となる。ここで、 a_+ と a_- はそれぞれ被覆工内の進行波の $x=0$ 、反射波の $x=l$ での振幅、 k は式 (12) で与えられる被覆工内の複素波数である。

* 工修 四日市市役所

** 中央大学大学院 土木工学専攻科

*** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

**** 正会員 日本テトラポッド 応用水理研究所

***** 正会員 理博 日本テトラポッド 応用水理研究所所長

$$k=(\omega/\sqrt{gh})\sqrt{S-if}=k_0\sqrt{S-if} \quad \dots\dots(12)$$

被覆工内の水平流速振幅 $U(x)$ は、式 (3) と (4) とより

$$U=\tau\sqrt{g/h}\cdot[a_+e^{-ikx}-a_-e^{ik(x-l)}] \quad \dots\dots(13)$$

となる。ここで、

$$\tau=\epsilon/\sqrt{S-if}$$

(3) 各領域間の結合条件

入射波振幅 a_i を既知量とすると未知量である複素振幅 a_r , a_+ , a_- 間の関係は、領域 I と II 間 ($x=0$) の結合条件と、直立堤前面 ($x=l$) での境界条件とから導かれる。 $x=0$ での結合条件として、圧力と質量流束の連続条件を用いると、式 (14) と (15) を得る。

$$a_i+a_r=a_++a_-e^{-ikl} \quad \dots\dots(14)$$

$$a_i-a_r=\tau(a_+-a_-e^{ikl}) \quad \dots\dots(15)$$

また、 $x=l$ での境界条件としては、直立堤体前面での水平流速がゼロであることから、

$$a_+=a_-e^{ikl} \quad \dots\dots(16)$$

(4) 被覆工の反射率

被覆工の反射率 K_R は、式 (14)~(16) より式 (17) とかける。

$$K_R=\frac{a_r}{a_i}=\frac{e^{ikl}(1-\tau)+e^{-ikl}(1+\tau)}{e^{ikl}(1+\tau)+e^{-ikl}(1-\tau)} \quad \dots\dots(17)$$

(5) 被覆工内の波動場

被覆工内の反射波振幅 a_- は、式 (14)~(16) より

$$a_-=2a_i/[e^{ikl}(1+\tau)+e^{-ikl}(1-\tau)] \quad \dots\dots(18)$$

また進行波の振幅 a_+ は、式 (16) と (18) とより

$$a_+=2a_ie^{ikl}/[e^{ikl}(1+\tau)+e^{-ikl}(1-\tau)] \quad \dots\dots(19)$$

となる。従って、被覆工内に形成される重複波の振幅は式 (11), (18) および (19) から、

$$\zeta=\frac{2a_i[e^{-ik(x-l)}+e^{ik(x-l)}]}{e^{ikl}(1+\tau)+e^{-ikl}(1-\tau)} \quad \dots\dots(20)$$

同様に、水平流速振幅は式 (13) から次式を得る。

$$U=2a_i\tau\sqrt{\frac{g}{h}}\frac{[e^{-ik(x-l)}-e^{ik(x-l)}]}{e^{ikl}(1+\tau)+e^{-ikl}(1-\tau)} \quad \dots\dots(21)$$

(6) 直立堤体の作用波力

線形長波の仮定より、直立堤単位幅当たりの水平波力 F_H は、静水圧則を適用して式 (22) と表す。

$$F_H=(\rho g/2)\cdot[2h\eta+\eta^2]_{x=l} \quad \dots\dots(22)$$

ここで、 ρ は水の密度、 $\eta_{x=l}$ は直立堤前面での水面変動で、式 (7) と (20) から

$$\eta_{x=l}=Re\left[\frac{4a_i\cdot e^{i\omega t}}{e^{ikl}(1+\tau)+e^{-ikl}(1-\tau)}\right] \quad \dots\dots(23)$$

3. 理論結果に対する検討

図-2 は、直立堤前面での最大打ち上げ高さ η_{lm} と入射波高 H_i との比で定義される無次元最大打ち上げ高さ C_T と相対被覆工幅 l/L [$L=Re(T\sqrt{(gh/s-if)})$: 被覆

工内の波長] との関係を示す。空隙率 $\epsilon=0.5$ の条件で抵抗係数 f をパラメータとして計算した結果である。被覆工を設置しない場合は $C_T=1.0$ である。図-2 より、被覆工の設置によって無次元最大打ち上げ高が、直立堤の場合より増大する条件が、 $f<2$ に存在することが認められる。この事は、非越波条件下であっても、被覆工の設置により直立堤の作用波力が増大する場合があることを意味し¹⁾、これは被覆工内水面の共振現象と流路断面の減少とによるものである。

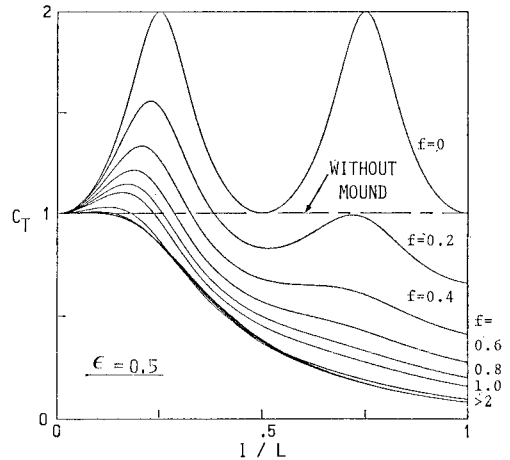


図-2 無次元最大打ち上げ高さと相対被覆工幅

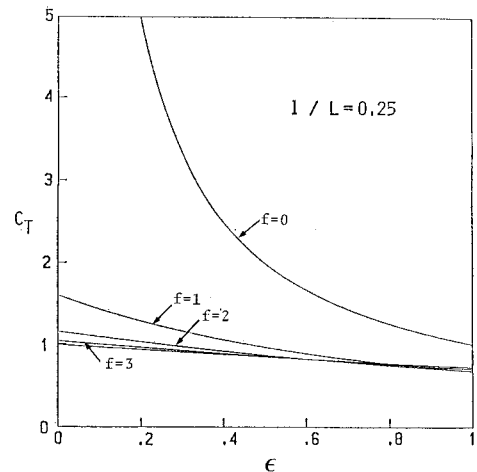


図-3 無次元最大打ち上げ高さと被覆工空隙率

図-3 は、無次元打ち上げ高に及ぼす被覆工の空隙率の効果を検討するため、 $l/L=0.25$ の場合に対して行った計算結果で、被覆工の抵抗係数の増加と共に C_T は減少するが、 $f\geq 1$ でブロック被覆工の空隙率 $\epsilon=0.4\sim 0.6$ の範囲では空隙率の効果はきわめて小さい。

4. 理論の実験による検討

式(6)の被覆工の抵抗則の妥当性の検証, 実験結果による抵抗係数の決定, 被覆堤波力の理論と実験との比較, および本理論の台形断面被覆堤への適用の検討を目的として模型実験を行った. 鉛直被覆堤は, 長さ 50 m, 幅 1 m, 高さ 1 m の波動水槽を隔壁で二分割した波力測定用水槽内の, 厚さ 5 cm の捨石マウンド上に設置した. 鉛直被覆工は代表長さ $B=5.0, 8.2, 11.3$ cm のテトラポッドを使用し, 幅 l を 22.5, 30, 45 cm の 3 種類に変化させた. 実験波の周期は $T=1.5$ s と 2.0 s, 入射波高は $H_i=1\sim 17$ cm [ブロック・レイノルズ数 $Re=(1\sim 70)\times 10^3$] である. 実験装置, 測定方法, データ処理法等の詳細は前報¹⁾を参照されたい.

(1) 抵抗係数の決定

被覆堤波力の算定には, 被覆工ブロックの付加質量係数 C_m と抵抗係数 f を予め決定して置く必要がある. しかし, ブロック層の C_m を推定することは極めて難しく, 本研究でもこれまでと同様に $C_m=0$ とした³⁾. Sollitt・Cross⁴⁾と近藤⁵⁾は透水試験によって被覆工の捨石・ブロックの抵抗係数を決定しているが, 本研究では被覆堤体前面での水面変動振幅の測定値と式(23)による計算値とが一致するように, 抵抗係数を決定した.

被覆堤前面の波高 H_t と被覆工前面の入射波高 H_i の実験結果より, $S=1$ とし式(23)より計算された $f\omega/\varepsilon$ と式(24)で定義される被覆工内の平均水平流速 U_m との関係を図-4に示す. f と U_m との間には良好な直線関係が認められ, 本研究で採用した抵抗係数の決定法の妥当性が確認される. ここで, U_m は

$$U_m = \frac{2}{lT} \int_0^{l+T/2} |u| dx dt \quad \dots\dots\dots (24)$$

被覆工の抵抗係数 f は, 式(6)に見られるように被覆工内の水平流速が関係するが, 理論では f は一定としている. したがって, 図-4の $f\sim U_m$ の関係が得られたとしても, 波力計算を行う場合には計算条件ごとに f の計算を行う必要がある. 本研究では被覆工前面での入射波による水平流速振幅 U_i と U_m との間には式(21)より関係づけられるから, 図-5の $f\omega/\varepsilon$ と $U_i h / Bl$ との関係によって f を決定する方法を採用した. ここで, h/Bl は被覆工の特性を表すために導入したパラメータである.

(2) 鉛直被覆堤の作用波力

鉛直被覆堤波力の実験値と, 図-5の近似曲線によって決められる被覆工の抵抗係数 f を用いて式(23)と(24)より計算される理論値との比較を, 無次元最大波力 $\phi_m (=F_{Hm}/\rho g H_i^2)$ と低減波力指標¹⁾ $K[(H_i l / h B) \cdot \tanh ko h]$ との関係で示したものが図-6で, 理論と実

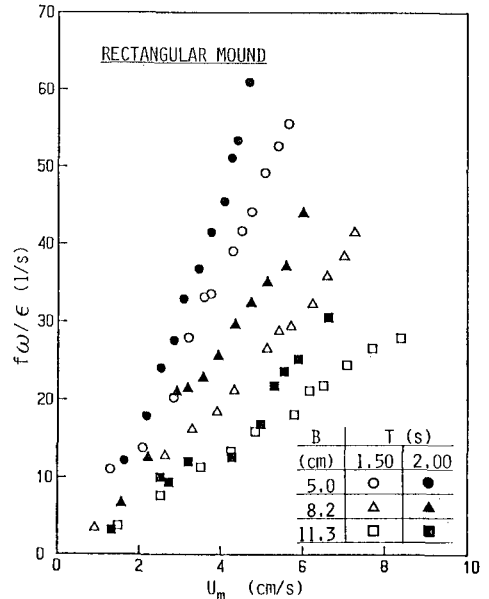


図-4 $f\omega/\varepsilon$ と U_m との関係の実験結果例 ($l=30$ cm)

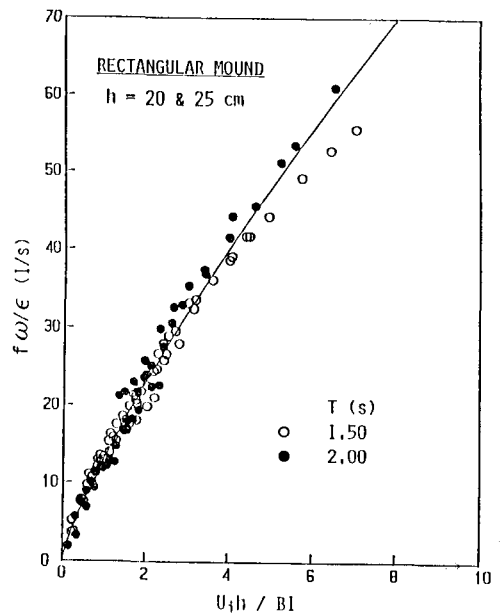


図-5 $f\omega/\varepsilon$ と $U_i h / Bl$

験との一致は非常に良好であると認められる.

図-7は全最大水平波力 F_{Hm} , 図-8は波力低減率 λ の理論と実験との比較をそれぞれ示したもので, これらの結果より本理論の妥当性が認められる. 波力低減率の理論値は $f=0, \varepsilon=1$ とした直立堤に対する理論値, また実験値は合田式⁹⁾による計算波力との比によってそれぞれ定義した. 図-8に見られるように, 理論結果にも

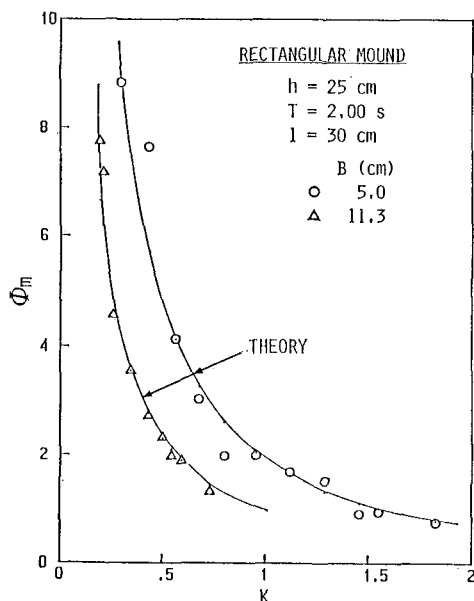


図-6 鉛直被覆堤波力の理論と実験との比較

波力低減率が $\lambda > 1$ となる場合があることが確認された。

5. 台形被覆堤への理論の適用

台形断面被覆工の波力低減機構には、理論で考慮されていないのり面上でのエネルギー損失や被覆工幅の非一様性の効果が関係する。Sollitt・Cross⁴⁾とMadsen・White³⁾は、鉛直透過堤の反射・透過率の理論結果を台形透過堤に適用する場合、水面下の堤体体積を等しくする堤体幅の鉛直堤と堤体のり面上でのエネルギー損失を考慮した抵抗係数を用いる事を提案している。

Sollitt・Crossの計算法を適用して台形被覆堤の作用波力を算定したところ、入射波高の増加と共に計算波力は実験結果を大幅に下回った。この事は、被覆工のり面でのエネルギー損失の効果よりも、台形断面を等価な鉛直断面に置き換える場合の被覆工幅 l_E の決定法が、重要であることを意味している。

被覆工のり面への波の打ち上げによって、入射波の残存エネルギーの主要部分は、静水位付近より上方の被覆堤幅の狭い部分を透過する。この効果を波力計算に入れるため、本研究では被覆工内外での wave setup を考慮した被覆堤の設置水深に、入射波の波高中分面までの鉛直距離を加えた水深、すなわち $h_E = h + \eta_s + (\eta_e - 0.5 H_i)$ [η_s : wave setup による水位上昇量, η_e : 波頂高] での台形被覆工幅を l_E とした。

図-9は、被覆工幅 l_E の等価鉛直被覆堤に対する計算波力と台形被覆堤の実験結果¹⁾との比較を、 ϕ_m と K との関係によって示したものである。入射波の平均水面

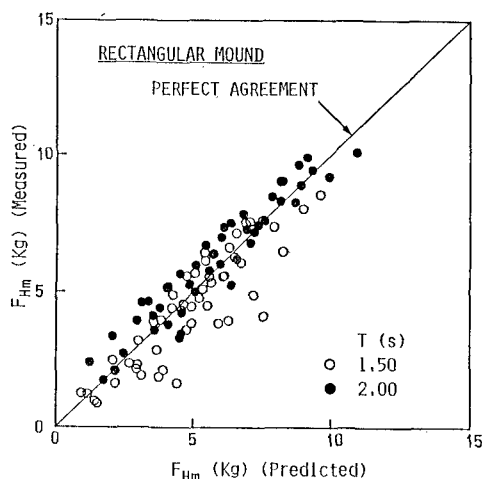


図-7 全最大波力の理論と実験との比較

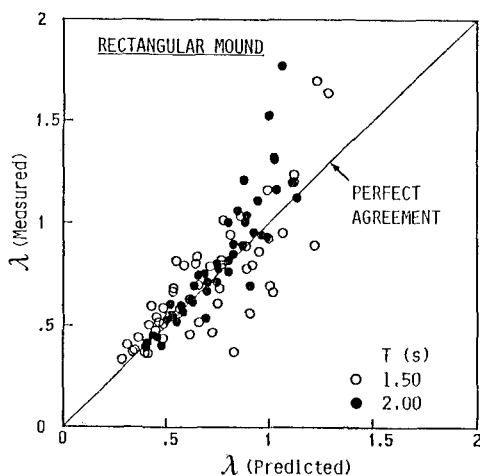


図-8 波力低減率の理論と実験との比較

に対する波高中分面高はクノイド波の第一近似解により、また wave setup 量は $0.1 H_i$ として計算した。図-10に、台形被覆工波力の理論と実験との比較を示す。両者の一致は極めて良好で、波力算定に対する等価鉛直被覆工幅の決定方法が妥当であることが認められる。

6. 結 論

本研究では、消波ブロック鉛直被覆工の波力低減機構を線形長波理論によって理論解析を行い、実験結果との比較によりその妥当性を確認した。また、本理論の台形被覆堤への適用手法を提案した。本研究で得られた主たる事柄を以下に記す。

(1) 被覆堤前面の相対打ち上げ高と相対被覆工幅との関係より、被覆工の抵抗係数が $f < 2$ の場合には、被覆工内水面の共振現象と流路の減少とにより、堤体前面

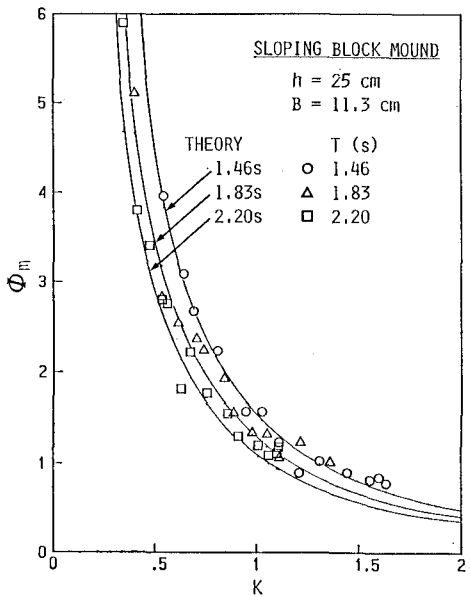


図-9 台形被覆堤波力の理論と実験との比較例

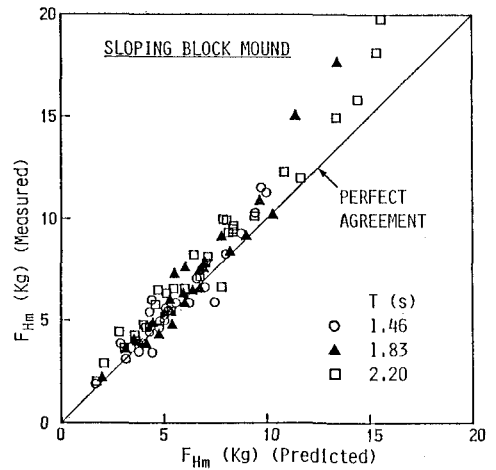


図-10 計算波力と実験との比較(台形被覆工)

での水面変動が直立堤のみの場合よりも増大し、これが波力増大の原因となることが明かとなった。

(2) 被覆工の抵抗係数が $f > 1$ では、作用波力に対する被覆工の空隙率の効果はきわめて小さい。

(3) 線形化した被覆工の抵抗係数は、進行波としての入射波による水平流速振幅と被覆工の構造特性とによって算定される。

(4) 台形被覆堤の作用波力は、被覆堤設置水深に入射波の波高中分面高さと wave setup による水位増加を考慮した水位位置での、台形被覆工幅をもつ等価鉛直被覆堤に置き換えることによって計算される。

本研究では、被覆工の抵抗係数 f を実験結果によって決定している。 f の決定法の妥当性は確認されたもの

の、ブロック・レイノルズ数が $Re = (1 \sim 70) \times 10^3$ の範囲の実験結果であることから、本研究の理論を被覆工の設計に適用する場合には、被覆ブロックの抵抗係数をどの様に推定するかが問題となり、これは今後の研究に残された課題である。

引用文献

- 1) 稲垣圭二・野口雄二・服部昌太郎：消波ブロック被覆工の波力低減率とその評価指標，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 362～366，1986。
- 2) 近藤淑郎：透過性防波堤の伝達波，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 321～327，1969。
- 3) Madsen, O. S. and S. M. White: Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwaters, Rept. No. 207, Ralph R. Parsons Lab., MIT, 138 p., 1985。
- 4) Sollitt, C. K. and R. H. Cross: Wave reflection and transmission at permeable breakwaters, Rept. No. 147, Ralph M. Parsons Lab., MIT, 235 p., 1972。
- 5) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技研報告，Vol. 12, No. 3, pp. 31～69，1973。