

消波ブロック被覆直立堤の反射特性の理論と実験

服部昌太郎*・片野明良**・山本方人***
野口雄二****・遠藤泰司****

1. 研究の目的

捨石・ブロックを使用した捨石式透過性構造物の反射・透過特性（例えば Madsen・White, 1976; 近藤・竹田, 1983）および被覆構造物の波力減殺機能に対して、これまで多くの理論的・実験的研究が行われているが、著者らも、線形長波理論による理論と実験とによりこれらの問題の検討をしてきた。その結果、捨石式構造物の反射特性の理論と実験結果の一致度は透過特性に較べて著しく不十分であり、一般に理論は実験に比較して反射率が過大に評価する傾向があることが指摘される。

このような理論の不十分さを改善するには、捨石構造物内のエネルギー逸散と同時に、表のり面での摩擦と碎波とによるエネルギー損失を、適切に評価する必要がある。そこで本研究では、直立堤体前面に鉛直断面の透過性被覆構造物を設置した消波ブロック被覆直立堤（図-1）を取り上げ、その反射特性を線形長波理論に基づく解析により検討する。そして、理論の適用を台形断面透過構造物に拡張するため、構造物のり面上の表層粗度による摩擦と碎波とによるエネルギー損失効果を、反射低減係数として理論に組み込み、その妥当性と問題点を実験との比較により検討する。

2. 鉛直断面透過工・直立堤構造系の反射特性

2.1 線形長波理論解

一様水深 h に設置される不透過直立堤の前面 l_0 の地点に、幅 l の鉛直断面透過工が付設される場合を取り扱う。入射波は直立堤に直に入射し、その進行方向に x 軸、静水面より上向きに z 軸を、そして透過工前面の静水位置に原点を取る（図-1）。この座標系で、透過工前面水域を領域 I ($x \leq 0$)、透過工部を領域 II ($0 \leq x \leq l$)、また直立堤前面の遊水部を領域 III ($l \leq x \leq l+l_0$) とすると、これら各領域での水面変動 η と水平流速変動 u は、線形長波理論より以下のように与えられる（稲垣ら, 1987）。

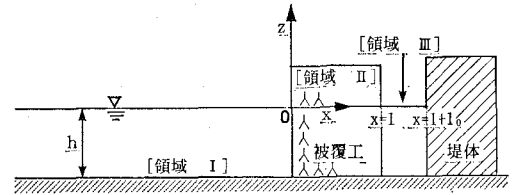


図-1 座標系と記号説明図

すなわち、

〔領域 I ($x \leq 0$)〕

$$\eta_1 = (a_i e^{-ik_0 x} + a_r e^{ik_0 x}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$u_1 = (g/h)^{1/2} (a_i e^{-ik_0 x} - a_r e^{ik_0 x}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 a_i と a_r ：入・反射波振幅、 $\omega (=2\pi/T)$ ：角周波数、 T ：入射波周期、 t ：時間、 $k_0 (= \omega/(gh)^{1/2})$ ：入射波波数、 g ：重力の加速度、 $i = (-1)^{1/2}$ 。

〔領域 II ($0 \leq x \leq l$)〕

$$\eta_2 = (a_{+2} e^{-ikx} + a_{-2} e^{ik(x-l)}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$u_2 = (g/h)^{1/2} \cdot \varepsilon (S - if)^{-1/2} \cdot (a_{+1} e^{-ikx} - a_{-1} e^{ik(x-l)}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 a_j ： j 領域での入(+)・反射(-)波の複素振幅、 $k = k_0 (S - if)^{1/2}$ ：透過工内の複素波数、 S ：ブロックの付加質量係数、 ε と f ：透過工の空隙率と線形化抵抗係数。

〔領域 III ($l \leq x \leq l+l_0$)〕

$$\eta_3 = (a_{+3} e^{-ik_0(x-l)} + a_{-3} e^{ik_0(x-(l+l_0))}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$u_3 = (g/h)^{1/2} (a_{+3} e^{-ik_0(x-l)} - a_{-3} e^{ik_0(x-(l+l_0))}) e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (6)$$

各領域間での境界条件として、境界面での圧力と流速の連続条件を使用する。

$x=0$ では、

$$a_i + a_r = a_{+2} + a_{-2} \cdot e^{-ikl}$$

$$a_i - a_r = (a_{+2} - a_{-2} e^{-ikl}) \varepsilon (S - if)^{-1/2}$$

$x=l$ では、

$$a_{+2} \cdot e^{-ikl} + a_{-2} = a_{+3} + a_{-3} \cdot e^{-ik_0 l_0}$$

$$\varepsilon (S - if)^{-1/2} (a_{+2} e^{-ikl} - a_{-2}) = (a_{+3} - a_{-3} e^{-ik_0 l_0})$$

また $x=l+l_0$ では、

$$a_{+3} e^{-ik_0 l_0} = a_{-3} \quad \text{と} \quad a_{+3} = a_{-3} e^{ik_0 l_0}$$

以上の関係から、領域 I での入・反射波の振幅比とし

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木学科

** 中央大学助手 理工学部土木学科

*** 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

て定義される反射率 K_R を計算すると、

$$K_R = \kappa |a_r/a_i| \\ = \kappa \{ [\alpha(1-\tau)\exp(2ikl) + (1+\tau)] / [\alpha(1+\tau)\exp(2ikl) + (1-\tau)] \} \quad \cdots \cdots (7)$$

をうる。ここで、

$$\alpha = -\{ (1+\tau)\exp(2ik_0l) - (1-\tau) \} / \{ (1-\tau)\exp(2ik_0l) - (1+\tau) \} \quad \cdots \cdots (8)$$

また、 κ は透過工表面でのエネルギー逸散を考慮するための反射低減係数 (次節以降で定義される)、 $\tau = \varepsilon(S - if)^{-1/2}$ 、および $\lambda = l_0/l$ である。式 (8) で $\lambda = 0$ とすると $\alpha = 1$ となり、式 (7) は稲垣ら(1987)の結果と一致する。以上の理論計算は、数基の透過工を直立堤前面に設置した場合にも容易に拡張できる。

2.2 理論結果

図-2 と 3 は、 $\lambda = 0$ と 1 に対する反射率 K_R と入射

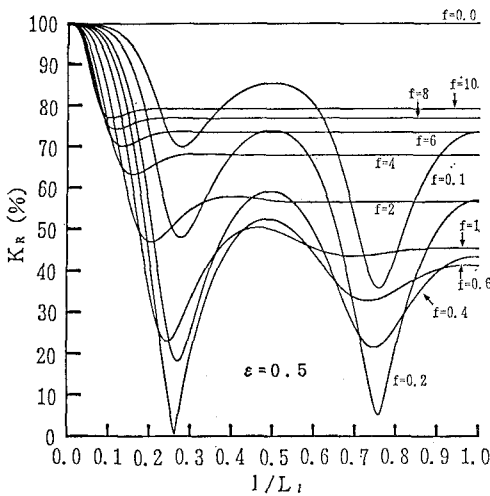


図-2 K_R と l/L_i との関係 (鉛直被覆工の場合、 $\lambda=0$)

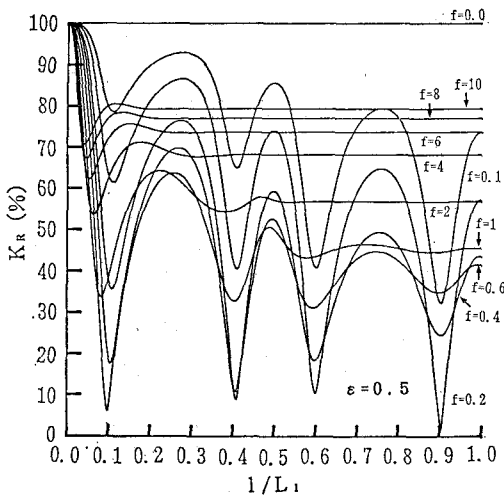


図-3 K_R と l/L_i との関係 ($\lambda=1.0$)

波長に対する相対透過工幅 l/L_i との関係を、透過工空隙率 $\varepsilon=0.5$ に対して、抵抗係数 f をパラメータとして示した理論計算結果 ($\kappa=1$) である。理論計算結果より、以下の興味ある事柄が明らかにされた。透過工の抵抗係数が小さい $f < 1$ の場合には、入射波エネルギーが比較的容易に透過工内を通過しうするため、直立堤での反射効果が顕著となる。したがって、透過工内と遊水部の入・反射波間の共振効果により、反射率が l/L_i によって変動する。しかし、消波効果を期待する高波浪条件に対応して f が増大すると ($f > 2$) と、透過工前面の反射が支配的なものとなり、反射率は λ と l/L_i にほとんど関係せず、 f の増加と共に $K_R=0.8$ 程度にまで増大することが認められる。以上のことを確認するため、図-4 に特徴的な条件に対する透過工内の水面変動振幅の理論計算結果 ($\varepsilon=0.5$, $\lambda=0$, $l/L_i=0.25$) を、抵抗係数 f をパラメータとして $\hat{\eta}_2/a_i$ と x/l_i との関係により示す。

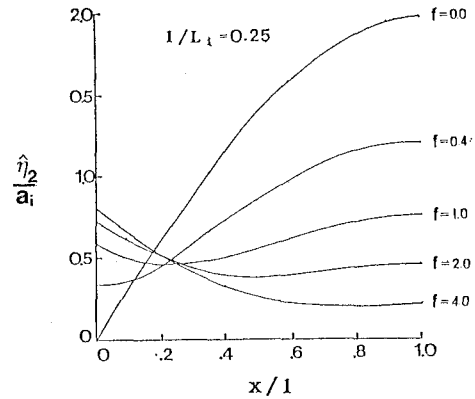


図-4 透過工内水面変動振幅の理論計算結果例 ($\varepsilon=0.5$, $\lambda=0$, $l/L_i=0.25$)

2.3 透過工表面でのエネルギー損失効果

前節での理論解析には透過工内部でのエネルギー損失のみを考慮し、透過工表面(のり面)上での摩擦と碎波によるエネルギー逸散の反射特性に対する効果は、式 (7) の反射低減係数 κ で表現されている。

(a) 鉛直工表面摩擦の効果

鉛直工表面 ($x=0$) での水面変動による一周期間平均の摩擦によるエネルギー損失率 $\dot{E}_f$ は、鉛直流速変動と摩擦損失係数 f_w を用いると、式 (9) で与えられる。

$$\dot{E}_f/E_i C_g = (f_w/3\pi)(a_i/h)[\omega(1+K_R)(h/g)^{1/2}]^3 \quad \cdots \cdots (9)$$

ここで、 $E_i = \rho g a_i^2/2$: 入射波エネルギー、 $C_g = (gh)^{1/2}$, K_R : 反射率(式(7)), ρ : 水の密度。透過工前面で式(9)で評価されるエネルギーを損失した入射波エネルギーの残存部分が、透過工に伝達されると考える。理論解析は線形長波仮定によっていることから、透過工と直立堤間

($0 < x < l + l_0$) の波動場に有効な入射エネルギー評価の第一近似として、 $\kappa=1.0$ として計算される反射率 K_R を用いる式(10)を提案する。

$$\kappa = (1 - \dot{E}_f / E_i C_g) \\ = [1 - (f_w / 3\pi)(a_i/h)[\omega(1 + K_{R,i})(h/g)^{1/2}]^3 \dots (10)$$

同様なエネルギー損失は、透過工背面と直立堤面にも生ずるが、これらの損失は無視する。式(10)を使用するには、摩擦係数 f_w の決定が問題となる。透過工表面を構成する巨大粗度の摩擦係数に関するデータは、著者らの知る限りでは極めて少ない。そこで本研究では、粗面乱流域での Jonsson (1966) の摩擦損失係数 f_w を、 $A_b < B < 10$ の範囲に対する近似式(11)で算定する。

$$f_w = 0.5(B/A_b) \dots (11)$$

ここで、 $A_b = k_0(a_i/h)$ ：入射波による透過工前面での鉛直方向水粒子軌道振幅、 B ：ブロックの代表寸法。

(b) 台形断面工のり面上の表面摩擦と砕波によるエネルギー損失効果

台形断面捨石構造物の反射・透過特性の解析にとって重要でしかも取り扱いが困難な問題は、構造物のり面上での摩擦と砕波によるエネルギー損失の算定である。Madsen・White (1985) は、斜面上の波動場に長波理論を適用し、摩擦損失は Jonsson の摩擦係数 (1963) を用い、また砕波による反射率低減は Miche (1951) の方法を適用して評価している。しかし、このような取り扱いでは急勾配のり面上のエネルギー損失効果を適切には評価できない。一方、粗面透過性斜面の反射率に対する実験結果は、これまで Straub・Herbich (1956)、Moraes (1970) および Per Braun (1985) などにより報告されているが、のり面上でのエネルギー損失の反射率に及ぼす効果を定式化するまでに到っていない。

Seeling・Ahrens (1981) は数多くの実験データに基づき、Battjes (1974) の不透過斜面に対する反射率算定式を修正し、のり面上での摩擦と砕波効果を反射率低減係数として実験式(12)を提案している。すなわち、

$$\kappa = \exp[-1.7(B/L_i)^{1/2} \cot \theta - (H_i/H_b)^{1.3}] \dots (12)$$

ここで、 L_i と T ：傾斜構造物のり先での入射波の波長と周期、 H_b ：合田の式 (1975) で算定される最大砕波波高、 $\cot \theta$ ：のり面勾配。式(12)で、 $(B/L_i)^{1/2} \cot \theta$ は表面粗度、また (H_i/H_b) は砕波の効果を表している。

3. 実験装置と測定方法

実験は、二次元波動水槽 (1 m × 1 m × 50 m) 内の 1/50 勾配斜面上に直立堤とブロック透過工を、波動水槽を隔壁で二分割したガラス側壁部に設置して行った (堤体設置水深： $h=0.20$ m と 0.25 m) (図-5)。鉛直・台形断面透過工は、重量 210 gr (代表寸法 $B=8.2$ cm、体積 85.0 cm³) の模型ブロックを使用して形成し、その空隙率は

透過工体積と使用ブロック数より算定した。反射率は、直立堤体前方 12 m 地点に設置した 3 台の容量式波高計で検出される水位変動記録より、合田の入・反射波分離法 (1987) により算定した。分離入射波高に非線形性を考慮した浅水変形計算 (首藤, 1975) により、透過工前面波高を算定した。また、模型ブロック工の抵抗係数は、

$$f_w/\varepsilon = 2.0 + 13.4(U_i h/B) \dots (13)$$

で算定した (Hattori et al., 1988)。ここで、 $U_i = a_i(g/h)^{1/2}$ ：入射波の水平方向水粒子速度振幅。実験装置、測定方法、データ処理法の詳細は、前報 (稲垣ら, 1987) に記載されている。

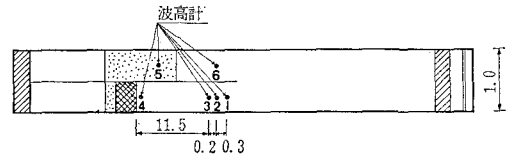


図-5 実験装置の配置概略図 (単位: m)

4. 実験結果による検討

4.1 鉛直ブロック透過工の場合

図-6 は鉛直ブロック被覆工 ($\lambda=0$)、また図-7 は直立堤前面に $\lambda=0.47$ の遊水部を持つ場合の実験結果と計算との比較で、 K_R と相対入射波高 H_i/h との関係を示したものである。いずれの場合も、入射波高の増大と共に反射率も増大するが、鉛直ブロック工前面での重複波の砕波が認められる $H_i/h < 0.5$ では、砕波によるエネルギー損失のため反射率が低減している。図中の実曲線は、式(6)、(7)と(10)とによる計算結果である。ブロック工前面で砕波が発生しない $H_i/h < 0.5$ では、 K_R の実験と理論は類似の変動傾向を示すものの、両者の一致

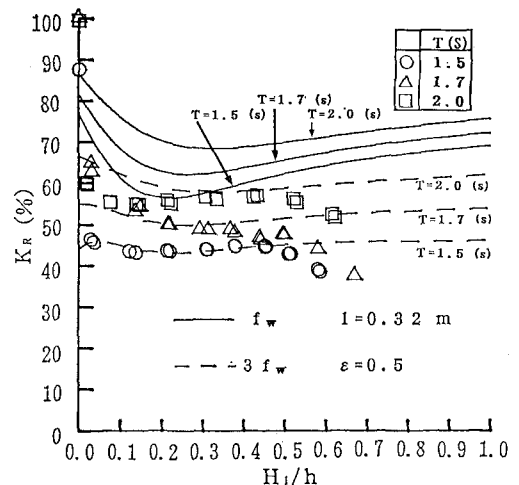
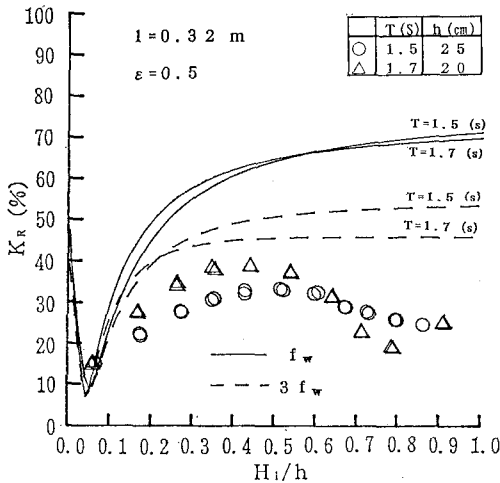


図-6 鉛直ブロック被覆工の実験と理論 ($h=0.25$ m)

図-7 鉛直ブロック工の実験と理論 ($\lambda=0.47$)

の程度は不十分である。この原因として、ブロックのような大粗度からなる透過工表層上を往復する、粗度高さに比較して流動厚が薄い流体運動に対する表面摩擦係数の評価が、式(11)では過小であると考えられる。式(11)の計算値の三倍の摩擦係数を使用した破線で示す計算結果と実験値との一致度は非常に良好であることから、本研究の方法は一応妥当であると認められる。なお今後の課題として、大粗度面上往復流の摩擦係数に関する検討が必要と認められる。

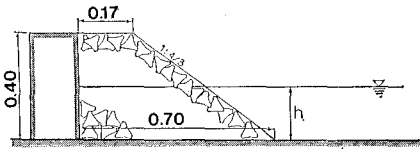
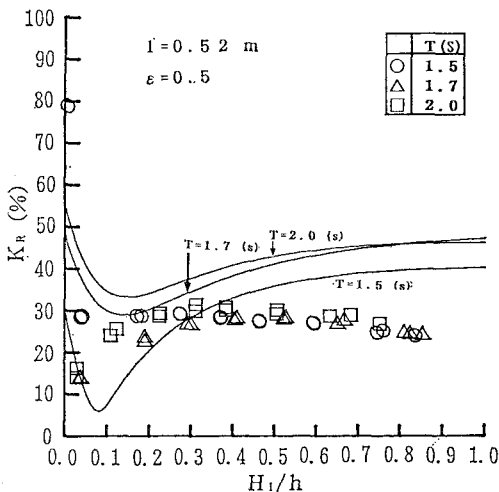
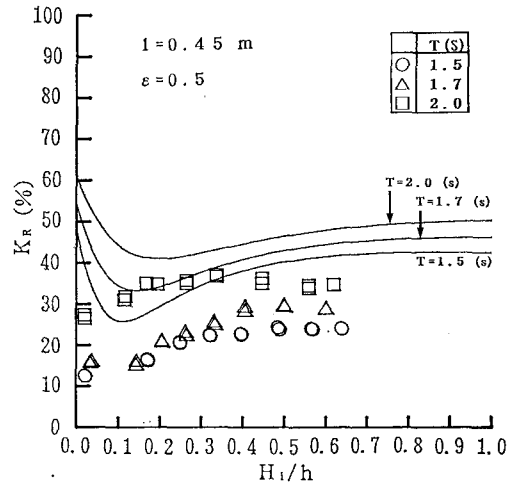


図-8 台形断面被覆工形状

図-9 台形断面被覆工の実験と計算 ($h=0.20$ m)

4.2 台形断面ブロック被覆工の場合 ($\lambda=0$)

台形断面被覆工に対して鉛直工の理論を適用する場合には、台形断面を水理的に等価な透過鉛直断面に置き換える必要がある (Sollitt・Cross, 1972)。本研究では、等価断面算定に稲垣ら(1987)の方法を適用した。図-8に示す表のり面勾配 1:4/3 の台形断面被覆工の実験結果と計算結果との比較を、図-9 と 10 に示す。図中の実線は、式(12)で与えられる反射低減係数を使用した反射率の計算結果である。入射波条件が長波域に近い設置水深 $h=0.20$ m (図-9) の場合は、実験と計算は良好な一致を示す。しかし、入射波が長波条件から外れると、 $K_R \sim H_1/h$ の両者間の傾向は非常に類似しているが、図-10に見られるように計算結果は若干過大な反射率を与える。このことは、台形断面被覆堤のり面上での摩擦と碎波に起因する反射率低下特性は、式(12)により一応満足すべき程度に評価されていると考えられる。しかし、式(12)の理論的裏付けを、Madsen・White (1976) が提案した不透過粗面の反射率計算法やこれまでの実験結果などとの比較検討によって行うことが必要である。

図-10 台形断面被覆工の実験と計算 ($h=0.25$ m)

5. 縮尺効果に対する検討

透過性構造物に期待する水理機能の主たる発生要因は、構造物の表層と内部でのエネルギー逸散機構である。この機構の模型と実物との違いは、流体運動にもたらす透過構造体の抵抗、すなわち層流抵抗と乱流抵抗の影響度の違いによる。Shuto・Hashimoto (1970) は、模型実験に使用すべき消波ブロックの最小重量が 300 gr であることを指摘している。捨石式透過性構造物の反射率と透過率に対する縮尺効果の検討は、Delmonte (1972)、Wilson・Cross (1972)、柿山・斉藤 (1988) らにより行われ、模型縮尺が小さくなると層流抵抗が卓越し、反射率

透過率とも小さくなることが指摘されている。台形断面構造物では、構造物のり面での碎波によるエネルギー逸散が重要となる。高橋・首藤(1989)と筒井・磯部・渡辺(1989)が実験を行っているが、構造物のり面上での碎波と波の打ち上げに関する縮尺効果の検討も必要である。

6. 結 論

本研究の結果明らかにされた主要な事柄を以下に記す。

- (1) 線型長波理論により、直立堤前面に遊水部を持つように設置された鉛直透過工の反射特性を検討した。透過工の抵抗係数が小さい場合($f < 1$)には、直立堤の反射効果が卓越することにより、透過工の反射特性は相対透過幅と相対遊水幅とにより変動する。しかし、抵抗係数が大きくなる高波浪条件下では、透過工前面での反射が支配的となることが明らかにされた。
- (2) 透過工のり面での摩擦と碎波によるエネルギー損失を考慮していないことから、理論は実験結果とはほぼ類似な反射特性を与えるものの、反射率を若干過大に評価する。
- (3) 反射特性に及ぼすエネルギー損失効果を反射低減係数として考慮した修正理論は、実験結果と良好な一致を示しその妥当性が確認された。理論の現地への適用を行うには、ブロックなどの巨大粗度の摩擦係数の決定、また実験式(12)の理論的意味付けの強化の強化など、実験の縮尺効果を含めた検討が必要である。

参 考 文 献

- 稲垣圭二・床井公一・服部昌太郎・野口雄二・遠藤泰司(1987): 消波ブロック被覆堤の波力低減に関する理論的考察, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 536~540.
- 合田良実(1987): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, pp. 221~225.
- 近藤俊郎・竹田英章(1983): 消波構造物, 森北出版, 275 p.
- 榊山 勉・斎藤昭三(1988): 消波ブロック被覆堤の反射率と遡上波特性, 電研報告 U88023, 40 p.
- 首藤伸夫(1974): 非線形長波の変形—水路幅, 水深の変化する場合, 第44回海岸工学講演会講演集, pp. 57~63.
- 高橋敏彦・首藤伸夫(1989): 波の打ち上げ高, 反射率に及ぼす粗度透水性の効果に関する一検討, 第44回年講概要集II, pp. 648~649.
- 筒井純一・磯部雅彦・渡辺 晃(1989): 急勾配斜面上における碎波条件に関する実験的研究, 第44回年講概要集II, pp. 610~611.
- Battjes, J.A. (1974): A computation of step-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, Delft Univ. of Technology, Rept. 74-2.
- Delmonte, R. C. (1972): Scale effects of wave transmission through permeable structures, Proc. 13th ICCE, pp. 1867~1873.
- Hattori, M., K. Inagaki, Y. Noguchi, and T. Endo (1988): Wave force on breakwaters with concrete block mound, Proc. 21st ICCE, pp. 2144~2158.
- Jonsson, I. G. (1966): Wave boundary layer friction factors, Proc. 10th ICCE, pp. 127~148.
- Madsen, O. S. and S. M. White (1976): Reflection and transmission characteristics of porous rubble-mound-breakwaters, Misc. Rept. No. 76-5, CERC.
- Miche, H. (1951): Pouvoir reflexissant des ouvrages maritimes exposes a l'action de houle, Annales des Pont et Chaussées, pp. 295~319.
- Moraes, Carlos de Campos (1970): Experiments on impermeable slopes, Proc. 12th ICCE, pp. 503~521.
- Per Bruun (1985): Design and Construction of Mound for Breakwaters and Coastal Protection, Elsevier, pp. 28~42.
- Seeling, W. N. and J. P. Ahren (1981): Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters, Tech. Paper No. 81-1, CERC.
- Shuto, N. and H. Hashimoto (1970): Hydraulic resistance of artificial concrete blocks, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 13, pp. 43~54.
- Sollitt, C. K. and R. H. Cross (1976): Wave reflection and transmission at permeable breakwaters, Tech. Paper 76-8, CERC.
- Straub, L. G. and J. B. Herbich (1956): Experimental studies of wave filters and absorbers, Project Rept. No. 44, St. Anthony Hydraulic Lab., Univ. of Minnesota.
- Wilson, K. W. and R. H. Cross (1922): Scale effects in rubble-mound breakwaters, Proc. 13th ICCE, pp. 1873~1885.