

# 直立消波岸壁に関する反射特性について

嶋田長彦\*・岡田哲一\*・浅田透\*\*

## 1. はじめに

自然環境の保全が叫ばれている今日、今後港湾の拡充は、今までのような物理的面積の広がる方法では許されない現状にあり、港湾の拡張に代表される港湾の量ではなく、港湾の質的向上が強く要請されている。このため、限られたスペースを最も有効に活用するところみが行われて来ている。

その具体的な一つの解決策として、港湾泊地内の静穏度を高め、港湾機能施設の能率向上をはかることがあげられる。すでに最近、数種の直積消波ブロックが企業化されているのもその一つの現れといえよう。

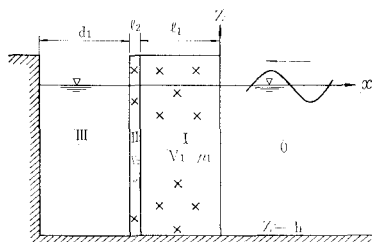
現在企業化されているこれら数種の直積消波ブロックは、比較的水深も浅く、規模の小さい、低反射構造物として実用化されて来ている。水理特性面では、一般的に波長50m以下程度の波には効果的に作用するが、さらに波長の長い波には、その効果は期待できないのが現状である。

著者らは、ここで具体的に手近かな -7.5m 岸壁を例にとり、すでに実用化されている直積消波ブロックを活用して、対応度の高い低反射構造物の実験的研究を行った。

## 2. 構造的特性と理論仮定条件

### (1) 構造的な特性

本報告による低反射構造体の基本的な構成要素を 図一の略図に示す。前面の透過堤体は、二つの構成領域



図一 略 図

よりなっていて、領域 I は一種のタービュレンス領域で空隙率は 50%、領域 II は一種の有孔壁体で、空隙率では 8% のものを実験に使用した。実施面では、領域 I と II は一つの透過堤体として、一体に製作し、背後に領域 III なる遊水部を確保した構造体となっている。これらの低反射構造体の機構は、きわめて複雑であって、理論的な解明も困難な点が多い。水路模型実験は海の現象を正確に再現できないにしても、いくつかの仮定条件のもとに組立てられた理論式に頼るよりは、信頼がおけると考えられる。したがって本報告は、実験的な経験値を主体とするもので、比較の意味で理論的な考察を行った。

### (2) 理論仮定条件

理論的な構成については、井島ら<sup>1)</sup>の長波近似理論による解析法に従った。図一のように堤体前面、静水面上に原点をとり、水平面内堤体前方に  $x$  軸、鉛直上方に  $z$  軸をとる。一定水深  $h$  の海域に、一定周波数  $\sigma$  ( $=2\pi/T$ ,  $T$  は周期) の波長の長い波が  $x$  の正の方向から入射するとする。

領域をおのおの 0, I, II, III に分け透過堤体内では Darcy の法則に従うものとし、I, II 内ではおのおの空隙率  $V_1, V_2$ 、抵抗係数  $\mu_1, \mu_2$  とし各領域では異なる流体運動がおこる。

各領域の値を添字 0, 1, ... で表わすとする。水位変動  $\xi_j$ 、水平流速  $u_j$ 、各領域の入射波高  $a_j$ 、反射波高  $b_j$  で表わす。

境界条件として、

$$x=0 \text{ で } \xi_1=\xi_0, \quad u_1=u_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$x=-l_1 \text{ で } \xi_2=\xi_1, \quad u_2=u_1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$x=-(l_1+l_2) \text{ で } \xi_3=\xi_2, \quad u_3=u_2 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$x=-(l_1+l_2+d_1) \text{ で } u_3=0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。

最終的に得られた結果は

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{2} \{ (1+\alpha_1)a_1 e^{i\alpha_1} + (1-\alpha_1)b_1 e^{-i\alpha_1} \} \\ \dots\dots\dots(5) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 = \frac{1}{2} \{ (1-\alpha_1)a_1 e^{i\alpha_1} + (1+\alpha_1)b_1 e^{-i\alpha_1} \} \\ \dots\dots\dots(6) \end{array} \right.$$

\* 正会員 東亜土木(株)工事部

\*\* 正会員 東亜建設工業(株)設計部

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{2\alpha_1} \{(\alpha_1 + \alpha_2)a_2 e^{i\lambda_2} + (\alpha_1 - \alpha_2)b_2 e^{-i\lambda_2}\} \\ \dots\dots\dots (7) \\ b_1 = \frac{1}{2\alpha_1} \{(\alpha_1 - \alpha_2)a_2 e^{i\lambda_2} + (\alpha_1 + \alpha_2)b_2 e^{-i\lambda_2}\} \\ \dots\dots\dots (8) \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{2\alpha_2} \{(\alpha_2 + 1)a_3 e^{i\lambda_0} + (\alpha_2 - 1)b_3 e^{-i\lambda_0}\} \\ \dots\dots\dots (9) \\ b_2 = \frac{1}{2\alpha_2} \{(\alpha_2 - 1)a_3 e^{i\lambda_0} + (\alpha_2 + 1)b_3 e^{-i\lambda_0}\} \\ \dots\dots\dots (10) \end{cases}$$

$$a_3 = b_3 \dots\dots\dots (11)$$

式 (5)~(11) の連立方程式を解くと各領域の波高が求められる。ここに、

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= k_1 \beta_1 / k_0, & \alpha_2 &= k_2 \beta_2 / k_0 \\ \beta_1 &= V_1 / (1 - i V_1), & \beta_2 &= V_2 / (1 - i V_2) \\ \nu_1 &= \mu_1 / \sigma, & \nu_2 &= \mu_2 / \sigma \\ \lambda_0 &= k_0 d_1, & \lambda_1 &= k_1 l_1, & \lambda_2 &= k_2 l_2 \end{aligned}$$

また

$$\begin{aligned} (k_0 h)^2 &= \frac{\sigma^2 h}{g} \\ (k_1 h)^2 &= (1 - i \nu_1) \frac{\sigma^2 h}{g} \\ (k_2 h)^2 &= (1 - i \nu_2) \frac{\sigma^2 h}{g} \end{aligned}$$

である。

$$\begin{aligned} \text{反射率 } K_r &= \left| \frac{b_0}{a_0} \right| \\ \text{堤体前面の水位変動 } \zeta(0) &= \left| \frac{a_0 + b_0}{a_0} \right| \\ \text{遊水部の水位変動} \\ \zeta(-l_1 - l_2 - d_1/2) &= \frac{1}{2} \left( \left| \frac{a_3 + b_3}{a_0} \right| + \left| \frac{a_2 + b_2}{a_0} \right| \right) \end{aligned}$$

実験値と比較するため、各諸元を下のようにして計算した。

$$\begin{aligned} h &= 7.5 \text{ m}, \\ l_1 &= 3.86 \text{ m}, & l_2 &= 0.44 \text{ m}, & d_1 &= 4.3 \text{ m} \\ V_1 &= 50\%, & V_2 &= 8\% \end{aligned}$$

なお抵抗係数は一定として

$$\nu_1 = 1.8, \quad \nu_2 = 0.1$$

とした。

### 3. 水理実験

#### (1) 透過性構造体の形状

透過堤を構成する一単塊は 図-2 に示すようなコンク

リート内部にクロスした孔を有する東亜土木(株)のクロスホロー方塊 14t 型の背後土留版に半円形の孔をあけ透過性方塊にしたものである。このブロックの土留版前部の空隙率は 50% で、半円形の孔を有する土留版の空隙率は 8% である。実験に使用した模型は、この実物 14t 型の縮尺 1/15 のものである。

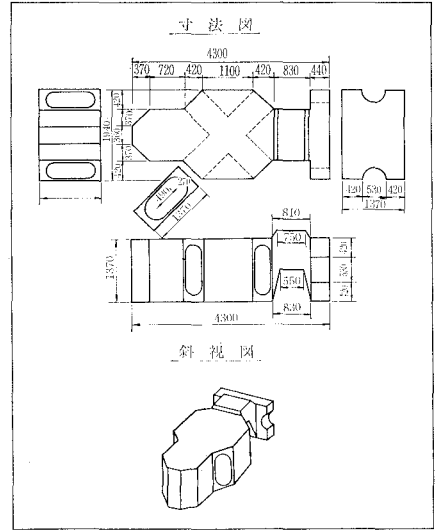


図-2 形状図

#### (2) 実験装置および実験方法

実験は 図-3 に示すようなフラップ式造波装置を有する長さ 35m、幅 1m、高さ 1m の二次元水路で行い、電気抵抗線式波高計で波高を測定し、水位計増幅器 (6 チャンネル) およびペン書きオシログラフ (6 チャンネル) により出力した。

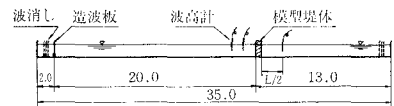


図-3 実験水路

水位は、 図-4 に示すように孔の中心にある場合 ( $h = 7.50 \text{ m}$ ) と孔と孔の間にある場合 ( $h = 8.25 \text{ m}$ ) の 2 種類に変化させ、消波効果の違いの有無を検討した。また

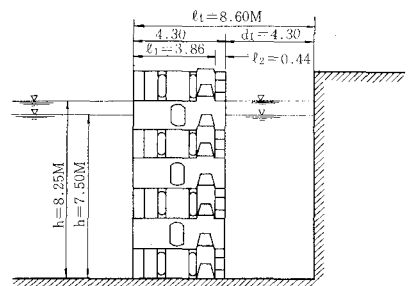


図-4 実験断面

表-1 実験波

周期 T(秒)	水深 h=7.50M					水深 h=8.25M				
	Hi(m)	L(m)	Hi/L	h/L	εt/L	Hi(m)	L(m)	Hi/L	h/L	εt/L
3.5	1.04	18.99	0.055	0.39	0.45	0.98	19.18	0.051	0.43	0.45
4.0	0.93	23.97	0.039	0.31	0.36	0.99	24.26	0.041	0.34	0.35
5.0	0.95	34.27	0.028	0.22	0.25	0.90	35.10	0.026	0.24	0.25
6.0	0.99	44.19	0.022	0.17	0.19	0.99	45.62	0.022	0.18	0.19
8.0	0.98	63.12	0.015	0.12	0.14	0.98	65.65	0.015	0.13	0.13
10.0	0.95	81.35	0.012	0.09	0.11	1.04	84.88	0.012	0.10	0.10
12.0	0.90	99.20	0.009	0.08	0.09	0.90	103.73	0.009	0.09	0.08

それぞれの水位に対して 表-1 に示す周期 3.5 秒~12 秒の波を入射させて測定を行った。ここで入射波高としては一般的な避泊船舶の安全性を確保できる限界の波高である 1m 前後のものを対象とした。なお、入射波高は模型堤体を設置する前に造波板から 20m 離れた地点に波高計をセットし、水路末端からの反射波がはいるまでの波を対象として、波高が安定してからの 3~5 波の平均値をとった。また、縮尺は 1/15 で、フルードの相似則に従った。反射率の測定方法は、現在確立された方法はないが、ここでは、従来の実験値と比較する意味で Healey の方法により見掛けの反射率を測定した。

(3) 透過堤の特性

図-3 の実験水路に示す位置に透過堤体 図-2 に示す(直積消波ブロック 7 段積)を設置し、その反射率および透過率の測定を 図-4 に示す 2 種の水深に対して行った。反射率は、図-3 に示すように 2 本の波高計を模型

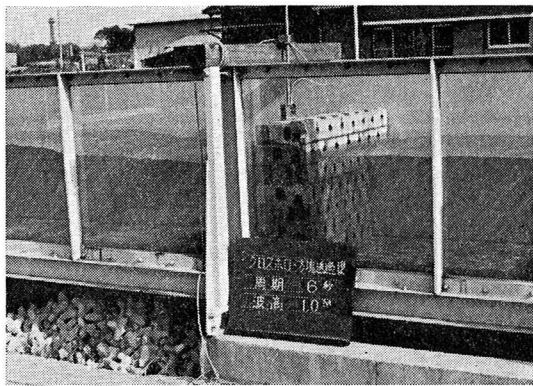


写真-1 透過堤部の実験

堤体前方約 L/4, L/2 の地点に設置し、その前後に波高計を L/50 ずつ移動させて固定し、毎回の測定を行い、部分重複波の最大振幅および最小振幅の発生する点を見つけ、造波板からの反射波の影響のはいらない最初の波の平均をとった。なお、周期 8, 10, 12 秒の波の反射率に対しては、合田らの方法<sup>3)</sup>により補正を行った。また、透過波は 図-3 に示すように透過堤体の後方 L/2 の地点に波高計を設置し、水路末端からの反射波がはいるまでの波を対象として測定を行った。

図-5 に反射率  $K_r$  と透過率  $K_t$  を示す。▲は△と▲

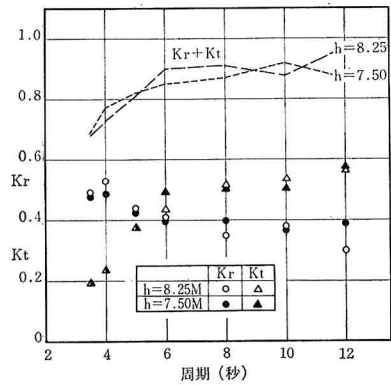


図-5 透過堤部の反射率と透過率

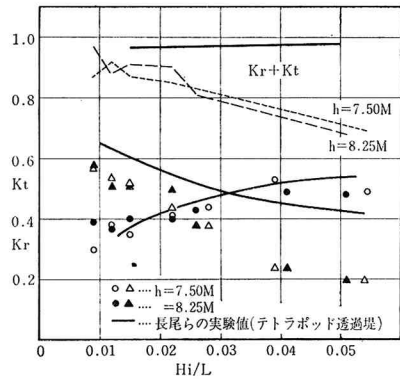


図-6 透過堤部の反射率と透過率

の合致点である。図より明らかなように水深による  $K_r$  と  $K_t$  の変化は認められなかった。図中の折線は  $K_r + K_t$  の値をそれぞれの水深に対して示したものである。長尾<sup>3)</sup>らによって、 $K_r + K_t = 1$  となることが報告されているが、このような直積ブロックでは周期が短くなるほど、この値が 1 より小さくなることを示している。図-6 は波形勾配を横軸にとり、これらのデータをまとめおしたものである。図中の実線はテトラポット堤(重量 64g, 堤幅  $B=10$ cm,  $B/h=0.5$ )に対する長尾らの実験値を示している。ここで、長尾らの実験とは反射率の測定方法が異なるので、多少問題はあるが、実験結果が比較的良好に一致しているため引用することにした。図-6 より、このような直積ブロック透過堤の場合、一様透過性堤体(実線)と比べて、反射率は同程度の値を示しており、透過率は、全体的に小さな値を示し、波形勾配が大きくなると 20% 程度小さくなり、その結果  $K_r + K_t$  が、1 より小さくなるのがわかる。透過率が小さいのは直積ブロック背後の土留板(空隙率 8%)による遮へい効果によるものと考えられ、それに対して反射率が大きな値を示さないのは、波形勾配が大きくなるほど、波形がぐずれやすく、エネルギーを消滅しやすいこと、および背後土留板からの反射波が前部のクロスした孔を

通過して減衰するためと考えられる。また、波形勾配の大きな波（短周期の波）に対しては、反射波に位相差を生じることによる影響もあると思われる。

(4) 直積ブロックのみの反射率

図-7 は直積ブロックのみの場合の反射率を示す（水深は図-4 に示す2種に対して行い、表-1 の波を入射させた）。この場合、堤体幅が小さいために、周期が長くなるにしたがって反射率は上昇する。また、水深による反射率の変化は定量的には認められなかった。

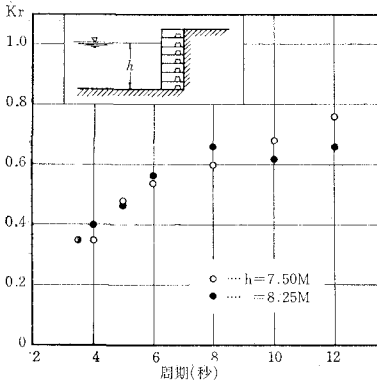


図-7 直積ブロックの反射率

(5) 遊水部を設けた場合の特性

図-4 の実験断面を造波板から 26m の位置に設置し、その反射率  $K_r$ 、透過堤前面の水位変動 ( $\pm$ )  $\zeta$  および遊水部の水位変動 ( $\pm$ )  $\delta$  を電気抵抗線式波高計で測定した。水深および入射波は前項と同じである。

測定結果を図-8~図-10 に示す。図中の実線は前述の仮定に基づき計算した理論値である。

図-8 の反射率より遊水部を設けた場合には、周期 3.5 秒~12 秒の波に対して最小反射率は約 25%，最大反射率は約 60% である。水深による変化は  $h=8.25$  m（孔と孔の間水位）の方が多少大きめにでている。また、図中理論値との傾向としてはよく一致している。

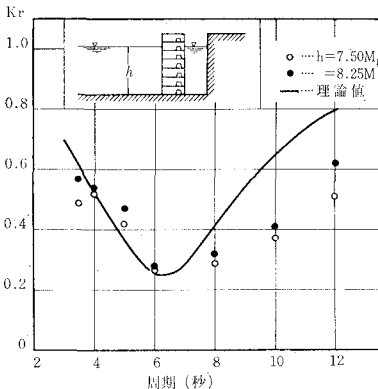


図-8 遊水部を有する場合

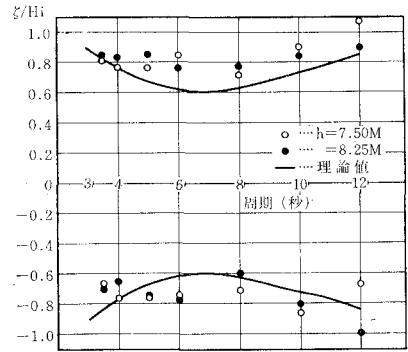


図-9 堤体前面の水位変動

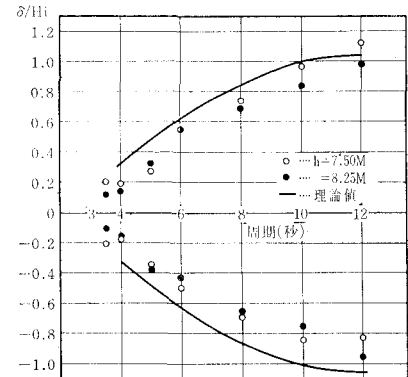


図-10 遊水部の水位変動

周期が 8 秒より長いところでは、理論値と実験値で 20% 程度異なっているが、これは理論値が二層の一樣透過堤と仮定したこと、抵抗係数が流速、周期等によらず一定としたことによるものと思われる。

図-9 は堤体前面の水位変動  $\zeta$  を静水面を 0 点にとり、その上昇量および下降量を入射波高  $H_i$  で除した値を縦軸にとったものである。

また図-10 は、遊水部の水位変動量  $\delta$  を図-9 の  $\zeta$  と同様の表わし方をしたものである。

(6) 反射率  $K_r$  に対する検討

技術的な見地からは岸壁前面の部分重複波の最大振幅が、どれだけになるかということが重要な問題となる。著者らは前回の報告<sup>5)</sup>でこのような考えにたち、この最大振幅  $H_s$  を入射波高  $H_i$  で除した値  $H_s/H_i$  を重複率と称し（正確には部分重複率であるが簡略化のため、このように呼んだ）これをパラメーターとして消波岸壁の特性を論じた。図-11は、前項の  $K_r$  の測定時に得られる最大振幅  $H_s(=H_{max})$  を用いて  $(H_s/H_i - 1)$  を計算し、その結果を  $K_r$  とともにプロットしたものである。

短周期の波では重複率も反射率も差はないが、周期が長い波では反射率の方が小さくなる。このように重複率で表わした場合、たとえば、水深 8.25m の場合、周期 12 秒においては  $K_r=0.62$  であっても、前面の最大振幅が

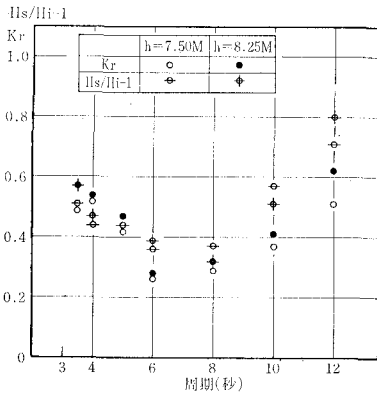


図-11 反射率と重複率の関係

入射波高の1.8倍の値を示すことがわかる。

以上のことから、今後このような消波構造体を岸壁構造として研究開発するにあたっては、測定方法の確立が必要であると思われる。

#### 4. 応用面での諸特性

##### (1) 水理特性面

図-12は、実験上の特性を実施面に結びつけようとするノモグラフである。横軸は、堤体幅  $l_t$  と波長  $L$  の比、 $l_t/L$  をとり、原点より縦軸の上方には反射率  $K_R$  をとっている。同下方には波長  $L$  をとって、 $l_t, L, K_R$  の関係を図化したものである。たとえば波長 60m の波で、堤体幅  $l_t=8.6m$  をとれば、反射率は 30% 程度であることを示したものである。

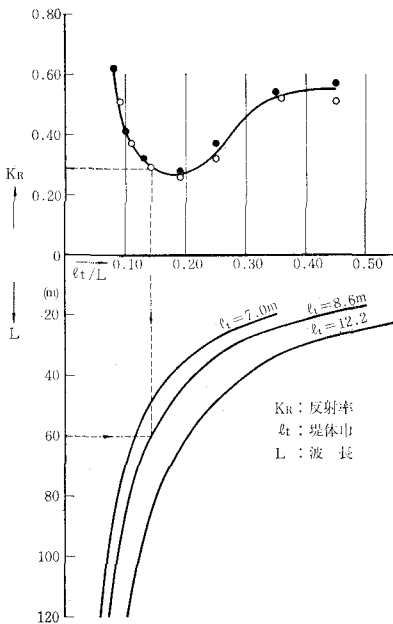


図-12 反射率と堤体幅・波長比の関係

これらは規則波に対するもので、自然界の不規則波に対する効果については、今後の研究に待つことにしたい。

##### (2) 実施構造体への手法

近年作業船舶の進歩は一種のクレーン革命ともいえるべきもので、大型フローティングクレーンは 3000t 吊におよぶものも建造されている。しかし全国的視野で施工条件を想定する場合、大型起重機船の回航は、経費的に高くつき、また大型プレキャスト部材の製作ヤード等の問題でも多くの制約条件を伴っている。したがって、一般的な低反射岸壁では、できるだけ小規模の作業船で処理できる組立方式が望まれるわけで、この実施例として、図-13のごとく、L型構造体と直積消波ブロックを結合して、遊水部を確保させ、原理的には図-1に示す特性を持たせたものが想定される。

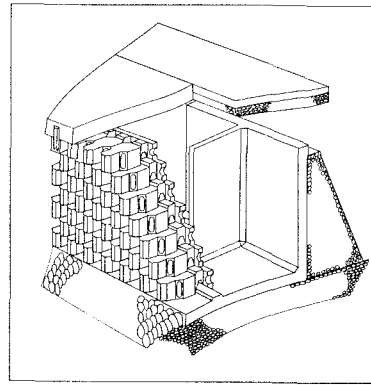


図-13 岸壁俯瞰図

#### 5. むすび

—7.5m 岸壁を対象とした研究結果をまとめると以下のようなになる。

(1) 直積消波ブロック(クロスホー堤)において、波の周期を3.5秒から12秒まで変化させた場合、それに対応して反射率は35~76%と、周期が長くなるほど反射率は大きくなる傾向にある。

現在各種開発されている直積消波ブロックは、一つのタービュレンス領域を構成させたもので、一般的には周期6.0秒以下程度の比較的短波長の波にはその効果を期待できるものと考えられる。

(2) 直積消波ブロックの背後に遊水部を確保させた形式の構造体は、周期10秒以下の波に対して、25%~50%の反射率を示す。

以上の報告が、今後の低反射岸壁の研究に、少しでも参考になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 井島武士・奥蘭英明・坂井 雄：2層透過性また

- は遊水部を持つ直立消波護岸の理論と実験, 第20回海岸工学講演会論文集(1973)
- 2) 合田良実・阿部淑輝: 有限振幅波の部分反射に伴う見掛けの反射率について, 港湾技術研究所報告第7巻, 第3号(1968)
  - 3) 長尾義三・加藤久徳: 直立消波岸壁に関する二, 三の実験的研究, 第17回海岸工学講演会論文集(1970)
  - 4) 時川和夫: 直立消波岸壁の反射率に関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集(1974)
  - 5) 嶋田長彦・岡田哲一: 一種のパーフォレイトケーンに関する実験的研究, 第21回海岸工学講演会論文集(1974)
-