

各種多孔板式防波堤による波の反射・伝達特性

○室蘭工業大学 正会員 近藤 俣郎
 室蘭工業大学 学生会員 佐藤 隆一
 福島県庁 正会員 小椋 山茂※

1. ま え が き

近年、世界的に消波機能をもつ海岸堤防、防波堤や海洋構造物の開発が活発におこなわれている。我国では海岸堤防や防波堤を低反射、低打上げにするため、主として消波用異形ブロックを不透過壁体の海側におく工法が採られてきたが、水深が大きくなると占有面積と材料が急増し、工費的にも水面利用の立場からも不都合になる場合が多い。また一方では港内水質汚染を軽減するため海水交流の良い港湾を要望されるケースも増加している。こうした背景から、直立の透過性防波堤・岸壁の研究・開発が急速に進められ、実施に移されている段階にある。そのような構造物の型式として、多孔壁とかスリット壁をもつ透過堤および不透過堤が最近になって注目を集めている。

しかしながら、このような孔あるいはスリット壁を有する防波堤の消波機能や安定性に関しては、不確かな点が多く残されており、その説明は今後の研究に俟たなくてはならない。こうした現時点の状況から、昭和51年11月、福岡市で開催された第23回土木学会海岸工学講演会には、この種の防波堤・岸壁に関連した8編もの論文が発表された。筆者らの属する室蘭工大本土木工学科河海工学研究室では8年前から透過性防波構造物の水理的機能の研究を行なつてきて、主として粒状体などの透水性材料からなる防波堤による波の変形特性についての知見を得た¹⁾。また円柱を用いたスリット壁式の構造物に関しても48年度から研究している。^{2), 3)} 本論文は多孔壁として均一径の円孔をあけた板を用いた防波堤を対象として、その反射率・伝達率が入射波と堤体構造にどのように支配されるかを実験的に調べその特性を考察したものである。

2. 研究 方 法

1) 防波堤の種類 研究の対象とした多孔板防波堤はおよそ次の4種類である。

- (i) 1枚多孔板：多孔板1枚のみの防波構造物であり、類似のものとしてはスリット壁、鋼管防波堤などがあげられる。
 - (ii) 2枚多孔板透過堤：2枚の多孔板を側壁とするような堤体で、堤体を海水が通過できるがその反面、岸側水域に入射波のエネルギーの一部が伝達し、伝達波の発生をみる。50年度に着工した室蘭港の絵巻地区の防波堤(北海道開発局担当)はこの種のものである。なお、岸側の多孔板が不透過ならば(iv)になる。
 - (iii) 透水材料と多孔板からなる透過堤：石あるいは異形ブロックなどの粒状材料あるいはまたその他の透水性材料をその前後面あるいは内部に多孔板を設置したもの。多孔板は一般に鉛直に設置されるから、前後面に2枚ある場合には、多孔板間に中詰材料がある直立構造になるが、前、後のいずれか1枚のときはもう片方の面は斜面にできる。今回は直立堤のみを実験した。
 - (iv) 多孔板不透過堤：多孔板と不透過壁からなる防波堤で、多孔板が1枚ならばいわゆるJarlan型防波堤である。多孔板を2枚としたものも実験対象とした。
- 今回の実験は反射波・伝達波を対象とし、堤体に作用する波圧や安定性を対象外にしているので(ii), (iii), (iv)の堤体模型は、函型には作らず多孔板を間隔をあけて水槽内に設置しただけで構成した。

2) 多孔板および透水性材料の水理的諸元

実験に用いた多孔板は厚さ6mmの鋼板に円孔を水平鉛直方向に一樣に配列したもので(写真-1参照)、3種類が用いられ、その水理的特性は表-1のようである。

※ 昭和50年度室蘭工業大学土木工学科卒業生

表 - 1 多孔板の水利的諸元

空隙率, λ (%)	孔径, ϕ (mm)	損失係数 $C = \Delta h / \left(\frac{V^2}{2g} \right)$
34	20	8.8
20	20	36
19	12	44

上表において C は定常流について実験して得られた損失係数であつて、式中の Δh は損失水頭、 V は定常流の流量流速（円孔を通る流速は λV ）である。

透水材料としては立体格子（写真-2参照）と碎石であり、それらの諸元は表-2のようである。

表 - 2 透水材料の水利的諸元

名称	空隙率, λ (%)	代表径, D_m (mm)	乱流損失係数 C_3
立体格子	60.7	34	0.11
碎石	45	38	0.40

表-2の中の乱流損失係数 C_3 は、次式で定義されるものである。

$$\frac{\Delta h}{l} = \frac{V^2}{2g\lambda^5 D_m} \cdot \left[\frac{C_2}{(D_m V / \nu)} + C_3 \right] \quad (1)$$

こゝで $\Delta h/l$ は摩擦勾配、 ν は動粘性係数である。

3) 実験施設と手順

実験は長さ18.5m、幅0.4m、高さ1.0mの規則波水路において行なわれた。実験装置の配置はFig.1のようであつた。波高の測定には並行抵抗線式波高計を用いた。入射波と反射波の決定はHealyの方法によつて $L/4 \sim L/2$ の間を1~2台の波高計を移動させて行なわれた。

実験波は水深 $h = 50$ cm、入射波高 $H_I = 4$ cmとし、周期 T を0.7~2.0secの範囲で変化させたものが主である。実験波をこのようにした理由は、透過性の

防波堤の反射率・伝達率は主として周期あるいは波長 L によつて支配され、波高の大小による変化はそれに比べて小さいことが知られているからである。なお、この実験と実物との長さの縮尺比は $1/16 \sim 1/40$ の範囲にあるとして、実物に適用されう。

3 実験結果

1) 1枚多孔板 1枚板について波高を固定し、周期を変化させた場合の伝達率と反射率をFig.2に示す。

これによれば T の小さい領域で T の減少 ($1/T$ の増大) とともに伝達率はやゝ小となり、反射率はわずかながら大きくなる傾向をもつ。一方、入射波高の増加とともに、伝達率は減少して反射率は増大する。また空隙率

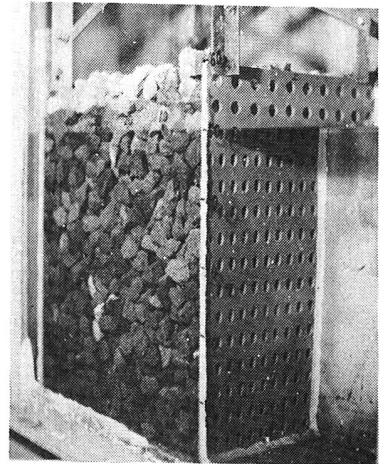


写真-1 2枚多孔板（中詰碎石）透過堤

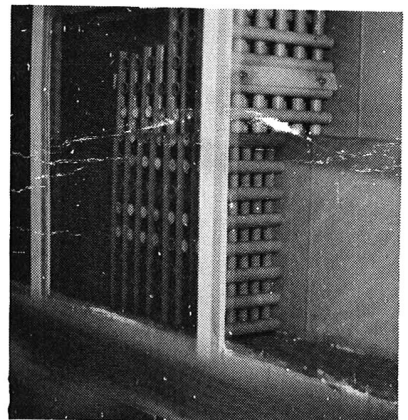


写真-2 立体格子構造物 ($D_m 34$)

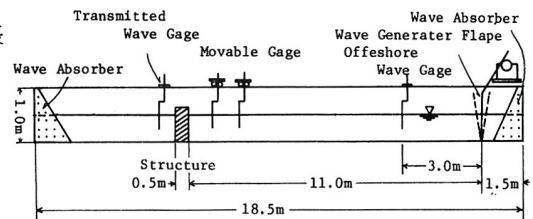


Fig.1 Arrangement of Experimental Equipment

λ が大きい多孔板ほど伝達率が大き、反射率が小さく、 λ がほぼ同じである場合は、孔径の小さいほど反射率が大きくなっている。以上の結果は次の理由による。

H_T が大きいと水粒子速度が大きくなるので、孔を通過する噴流の抵抗が大きくなって、伝達波エネルギーの割合が小さくなり、反射波エネルギーの割合が大きくなる。また T が小さくなると水粒子速度の水平成分に対する鉛直成分の割合が大きくなるので、岸側に伝達し難くなり、反射率は大きくなるものである。

λ が大きくなることは、孔を通過する実流速が減少するから、 H_T が小さくなるのと同様な効果を与える。また同程度の λ では表-1に示すように ϕ が大きいほど抵抗が小さいから K_R が小さくなる。

2) 2枚多孔板透過堤 2枚の多孔板を組合せた透過堤では板の間の堤体内では一種の定常波動があらわ

れるので板間距離あるいは堤体幅員 B を波長で除した相対幅員 B/L が反射率を支配する大きな要因となる。

Fig.3は $B=50\text{ cm}$ と 25 cm の場合について、多孔板の種類をかえた4種類の透過堤について反射率、伝達率を B/L を横軸にとつて示したものである。これによれば伝達率は $B/L < 0.2$ では B/L とともに急減するが $B/L > 0.3$ では減少の度合いがきわめて小さい。これに対して反射率は $B/L \approx 0.2$ で最小値をとり、極大値は 0.5 付近に出現している。このことは2枚板透過堤では $0.25 < B/L < 0.75$ では、堤体内に定常波の一つの節があつて、それにとまつて大部分のエネルギー損失が起つていゝもので、したがつてこの範囲では B/L の増によつて K_T はあまり減少しない、と考える。また K_R は両多孔板が定常波動の腹となるような $B/L \approx 1/2$ では極大値をとり、逆に全く条件に合わない $B/L \approx 1/4$ 付近で最小値をとつていゝと解釈できる。

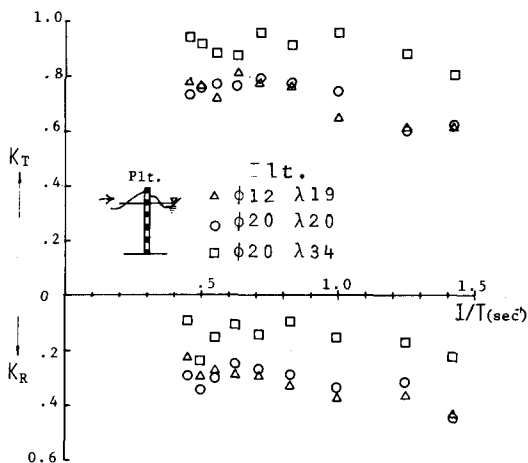
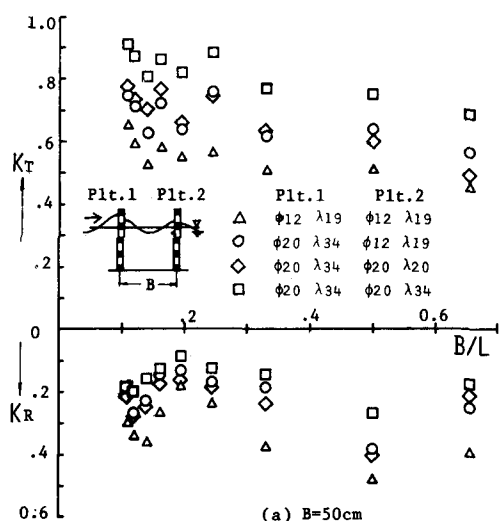
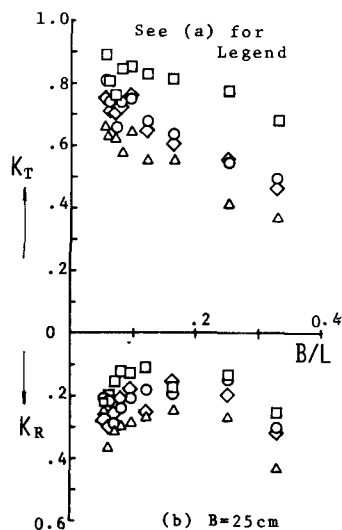


Fig.2 K_T and K_R of Single Perforated Plate



(a) $B=50\text{ cm}$



(b) $B=25\text{ cm}$

Fig.3 K_T and K_R of Double Perforated Plates

K_T を小さくするには、多孔板の空隙率を小さくする方法があるが、そうすると K_R が大きくなるので、前(海側)の板の λ を大きく、後(岸側)の板の λ を小さくするのが良い。しかしながら前板の λ が大き過ぎるとかえって K_R が大きくなってしまうことになる。

比波高 H_T/h の効果は、 K_T は H_T/h の増加とともに確実に増加するが、 K_R は $H_T/h < 0.2$ の範囲では H_T/h に無関係であつた。1枚板の場合と比べると K_T は小さくなるが、 K_R が大きくなっているとは言えず、 B/L の値によつて異なっている。これは反射波が位相が異なる二成分の合成波であつて、その位相差によつて海側に出現する反射波高が変動することを意味している。

3) 透水材料と多孔板からなる透過堤 2枚の多孔板の間に立体格子および碎石で中詰めした場合、および1枚の多孔板を材料の表面あるいは中においた場合である。

K_T, K_R の特質はFig. 4, 5に示すように多孔板を設けない単層の透過性防波堤とほぼ同様である。Fig. 4は透水材料として空隙率が大きくて抵抗の小さい立体格子を用いた透過堤に関するもので、 K_T は多孔板を1枚おくだけでも相当に小さくなる。しかしながら逆に K_R は増大を招くことが多い。 K_R の増大を避けるためには、1枚の多孔板を中央あるいは後面におくのが効果的である。材料として碎石を用いた場合は、立体格子に比べて透水性が小さくて抵抗が大きいため、多孔板をおくことによる効果は、主として長周期波の K_T を低くできることに限定されるようである。その場合も多孔板を前後の両面におくと B/L の大きい領域で K_R を大きくしてしまう。

こうしたことから、多孔板と材料の水理的特性を選択し、しかも堤体後面あるいは堤体内でなるべく後方に多孔板をおいた構造とすることで、反射率を増さず伝達率をかなりの長周期波でも低くおさえることが可能である。なお、透水材料でできている透過堤については、入射波高 H_T が大きいほど、周期 T が小さいほど K_T が小さくなり、ほぼ $\exp(-\frac{H_T}{T}B)$ に比例することは理論的にも導びかれる。また、 K_R の最大値を与える B/L 値が2)の場合よりも小さいのは堤体内の波長が抵抗を受けるために通常の水波よりも短くなることに、そしてもう一つの極大値が $B/L=0.12$ 付近にあることは二倍周波数波の出現に関連があると考えられる。

4) 多孔板不透過堤 今回対象としたものは、多孔板1枚と不透過壁からなる従来のJarlan型の防波堤の他に堤体の中央にもう1枚の多孔板を設けた二重多孔板不透過堤についても実験を行なつた。

K_R の特性はやはり $B/L=0.25$ のところで最小値をと

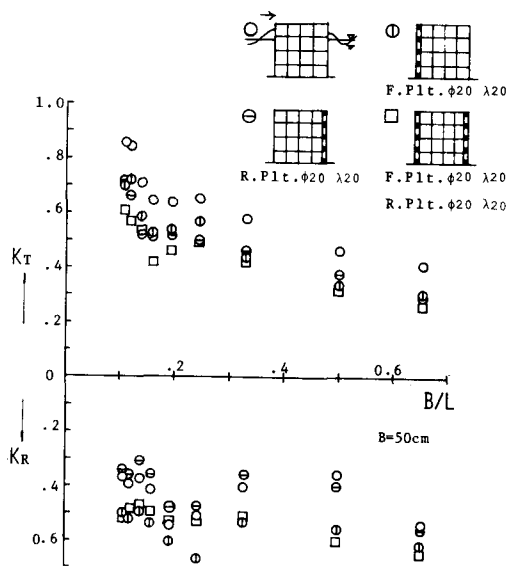


Fig. 4 K_T and K_R Lattice with Perforated Plates

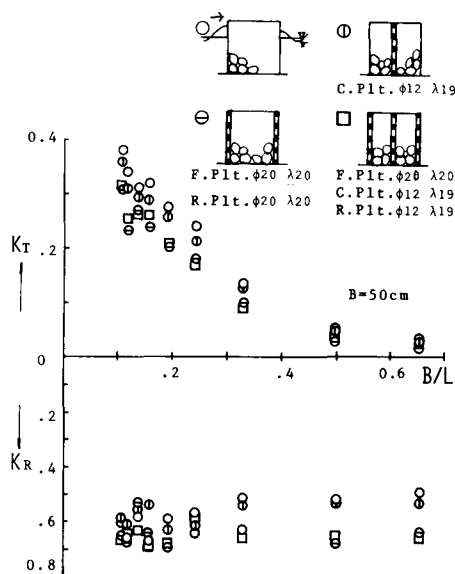


Fig. 5 K_T and K_R Rubble with Perforated Plates

り、0.5で最大値をとる。この傾向は2)の場合と類似である。しかし、この場合多孔板の空隙率が大きくなつても K_R は小さくならないことが明らかに示されている。反射率は多孔板の空隙率、孔径に対して敏感に変化することが認められる。Fig. 7は二重多孔板についての結果である。この場合 $B/L > 0.3$ では1枚多孔板の場合よりも K_R が小さくなっているが、 $B/L < 0.2$ ではその効果はほとんどない。

二枚多孔板の場合は中の多孔板の空隙率、位置などの効果をさらに詳しく検討する必要がある。

4. 各種防波堤によるエネルギー損失特性

以上、伝達率、反射率の特性を知ることができたが、これをもとにしてエネルギー損失の割合が防波堤の種類によつてどのように変化するかを調べてみる。入射波、反射波および伝達波の単位表面積当りの全エネルギーをそれぞれ

E_I , E_R および E_T とすると

$$E = \frac{w_0 H^2}{8} \quad (2)$$

であるから、損失エネルギーを E_L とすると

$$E_I = E_R + E_T + E_L \quad (3)$$

したがつて、

$$\frac{E_L}{E_I} = 1 - \frac{E_R}{E_I} - \frac{E_T}{E_I} \quad (4)$$

こゝで、 $E_R/E_I = K_R^2$ (5)
 $E_T/E_I = K_T$

である。(5)、(4)式で求めた E_R/E_I , E_T/E_I , E_L/E_I を数種の防波堤について B/L あるいは h/L で表現した(Fig. 8)。

(1)は一枚多孔板についてのものであり、 E_T/E_I および E_R/E_I

は h/L によつて変動しているが E_L/E_I は h/L の大きいほど大きくなっている。(2)の二枚板透過堤の場合は K_R が最小値をとる $B/L = 0.25$ で E_L/E_I が最大になる。この場合に限らず有限

幅員をもつ透過堤の場合は、(3)式で表現される E_L が摩擦などの損失のみをあらわすものではな

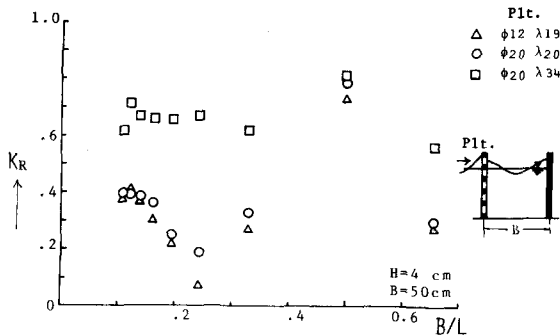


Fig. 6 K_R of Impervious Breakwater with Perforated Wall

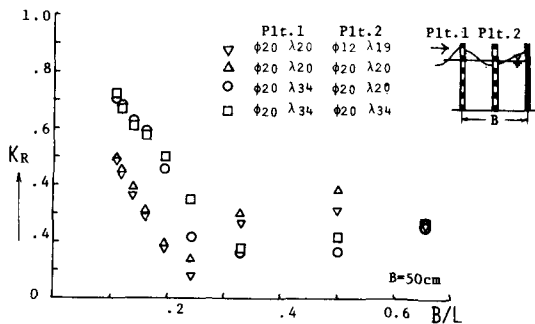


Fig. 7 K_R of Impervious Breakwater with Two Perforated Walls

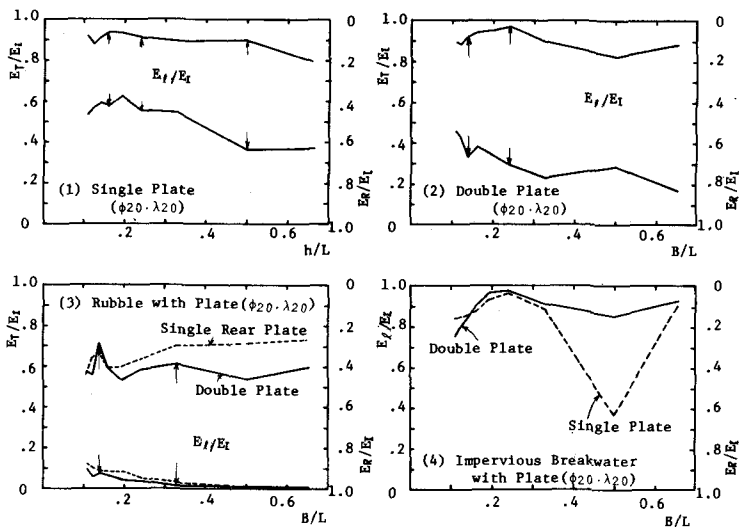


Fig. 8 Energy Ratio for Several Types of Pervious Breakwater

く、反射波が2成分波の合成波であるからその位相差によつて E_R が変り、それによつて E_L も変動する。(3)は砕石を2枚板の中詰とした場合と後面1枚板の場合を図示しているが、実線と与えている前者の場合は、3.3節で記した K_R の分布特性から、 $B/L=0.14$ と 0.33 に E_L/E_I の極大値が出現している。(4)の不透過堤の場合は $K_T=0$ であるから E_L/E_I の最大値は K_R の最小値の出現位置に一致する。こゝで注目すべき点はこの場合の E_L/E_I が全般的にきわめて大きいことであつて、 $B/L<0.3$ では(3)の砕石中詰堤よりも大きいことである。これは、(4)の場合の E_L/E_I は単に粘性に関する種々の損失だけではなく、二成分反射波間の位相差による K_R の低下によつて生じているからである。

5. 反射率・伝達率の理論的推定法の現況と問題点

透過性構造物による波の変形に関する理論的研究も活発に進められているが、こゝでは反射率・伝達率を具体的に推定できる理論を上出の各種の防波堤について概括し、推定上の問題を探ることとする。

1枚多孔板型式については、林ら⁴⁾が長波性の波を対象にしてスリット型式の鋼管防波堤についての理論を導き出しており、また服部は浅水波にも適用される多孔板についての K_T , K_R の推定式を示している。Mei⁵⁾ら⁶⁾はスリット型について、非線形抵抗項と慣性項をかなり厳密に取り入れた長波理論式を発表している。

2枚多孔板透過堤と1枚多孔板不透過堤は、長波理論に基づいて抵抗を線形化する方法で、その K_R , K_T を求めることができ、後者についてはTerrett⁷⁾らの解がかなり以前に発表されている。前者についてはこの手法では2枚の多孔板位置での水粒子速度を仮定しなければならないので、線形解は得られても具体的な計算法に致るまでには工夫を要する。また厳密な境界値問題としないで、境界面で反射・伝達する波を個々に扱つてその和として反射波、伝達波を求め、 K_R , K_T を計算する樫木・岩田^{8), 9)}の方法もある。この方法であれば、二重多孔板不透過堤など、多孔板の数が増加しても、境界値解のように複雑にならない。

多孔質透水性材料の単層直立堤による K_R , K_T を境界値問題として扱ひ、実際の問題について計算できる形で提案した理論としてはSollitt¹⁰⁾らのものがある。Madsen^{11), 12)}は K_T についてきわめて簡略な解を求め、さらに台形堤の推定式も与えている。筆者ら¹⁾は長波近似に従つて、非線形抵抗の線形化を行ない、内部抵抗に加えて堤体表面での損失も考慮した推定法を示しており、さらに2層以上の透水層をもつ直立堤の K_T , K_R の推定法をも提案している。¹³⁾多孔板と透水材料とを組合せた3)のような防波堤では、多孔板による変形作用をも合わせて考慮しなければならないから、筆者らの手法がきわめて有力であると考えられる。

以上のように、各種の多孔板の K_T , K_R は線形解や近似解法であればかなりの範囲で得られており、今後求められる。しかしながら、正確に K_T , K_R を得るためには、非線形抵抗をいかに計算に取り入れるかが問題であり、今後の研究の主要課題となる。

5. む す び

各種の多孔板式防波堤を、多孔板の数、透水性材料との組み合わせ、不透過壁の有無などの観点から分類し、それらの反射率、伝達率、エネルギー損失の特性を実験的に調べた。その結果、エネルギー損失の見地からして効果が大きいと思われるのは、透水材料の中で岸側か、後面に多孔板1枚を設置する型式と、多孔板をもつ不透過堤である、と認められた。今後はこれらの型式について、実験的、理論的に精しく調べるとともに、非線形抵抗に関する理解を深めたい。

本研究は文部省科学研究費、試験研究(1)、「消波構造物の特性とその改善に関する研究」の分担研究としてその一部が行なわれたことを付記し、協力された河海工学研究室の教職員、院生、学生に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 近藤・藤間ほか：第16～20, 22回海岸工学論文集ほか
- 2) 近藤・谷野：土木学会道支部論文集，50年度，1976.
- 3) 同・同：海岸工学論文集，23回，1976.
- 4) 林・服部・白井：海岸工学論文集，13回，1966.
- 5) 服部昌太郎：海岸工学論文集，18回，1971.
- 6) Mei, Liu, Ippen : Proc. ASCE, WW3, 1974.
- 7) Terrett, Osorio, Lean : Proc. Coastal Eng. Conf, 11th, 1968.
- 8) 樫木・岩田：土木学会論文報告集，220，1973.
- 9) 同・同：同，237，1975.
- 10) Sollitt, Cross : MIT. Parsons Lab. Rt. No. 147, 1972.
- 11) Madsen : Proc. ASCE, WW3, 1974.
- 12) Madsen・White : Proc. ASCE, WW1, 1976.
- 13) 近藤・藤間・葛西：室蘭工大研究報告，9巻1号，(印刷中)