

直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性 に関する実験的研究

松本 輝寿*・永井 康平**・武智 雅敏***

1. ま え が き

防波堤は港外からの波浪を遮蔽することによって、航路や泊地を静穏にする反面、堤体からの反射波により周辺海面のじょう乱を増幅したり、堤内外の海水交換を阻害する等の逆効果を生むおそれがある。特に近年では海域の水質保全上の配慮が重要となるなどの新しい要請に対応する防波堤のあり方が問われてきた。

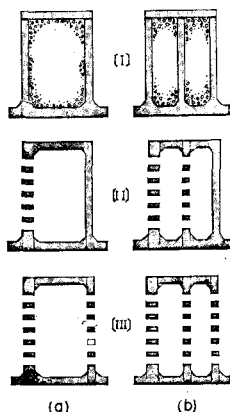
そこで反射波の低減と堤内外の通水性の向上を図る一方、越波および透過による港内伝達波を許容最小限に抑えるような防波堤の存在の可能性を模型実験により検討した。すなわち前後壁に穴のあいたケーソン堤の反射および透過波の特性と波による海水の通水性を調べた。

2. 直立消波および透過防波堤

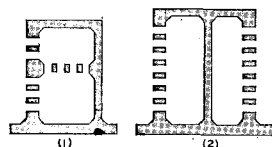
近年いわゆる直立消波あるいは透過式の構造物の研究が数多くなされている。それらは堤体断面に遊水部を設けるのが特徴であり、外国ではいわゆる Jarlan 型¹⁾、日本ではスリット型²⁾の係船岸がその走りであり、理論的、実験的にその反射波低減効果が考察されている³⁾。

しかしながら、これらはあくまで波の反射率の低減を目的としたものであり、越波以外の海水交換を許容するものではない。かといって、もしも海水交換を許す防波堤の構造形式を考えるならば、それは必然的に波の伝達を伴うことが不可避であり、防波堤本来の目的からいって、自家撞着に陥ることが危惧される。カーテン式防波堤等はそうした例といえよう⁴⁾。

そこで各種のケーソン断面で伝達波を許容最小限に抑える方法を考えてみる。図-1 図-1 各種のケーソン断面



は各種の典型的なケーソン断面であり、(I) 反射型、(II) 消波型、(III) 透過型に大別されよう。またそれぞれ隔壁の数により、(a)



1 室式、(b) 2 室式等に分 図-2 基本型の応用例
類される。例えば (II) (a) の型は「1 室式直立消波堤」(III) (b) は「2 室式直立透過堤」と呼ぶことができる(以下これらをⅡ_a型、Ⅲ_b型のように略称する)。Ⅱ型の応用例としては、図-2 のような、(1) 1 室 2 段型、(2) 2 室両面消波型等、消波効果を上げる数多くのアイデアが考えられる。しかし、海水交換の面からみると、Ⅰ、Ⅱ型は越波による海水の移入だけであり、ここで興味をもたれるのはⅢ型である。このような防波堤の海水交換効果については、流れによる実験的研究⁵⁾があるが、波によるものは第三港湾建設局の一連の実験^{6),7)}以外見当らない。我々はⅢ型の各種の断面について、効果(反射波、透過波特性)、経済性、施工性等に関して予め検討した結果、次に述べるような断面を選定した。

3. 実験概要

(1) 実験断面とケース

本実験では、図-3 に示す断面(変形Ⅲ型; Ⅲ_a'型、Ⅲ_b'型と呼称)について、波の反射、伝達特性(越波は無視)および海水交換特性を規則波により調べた。

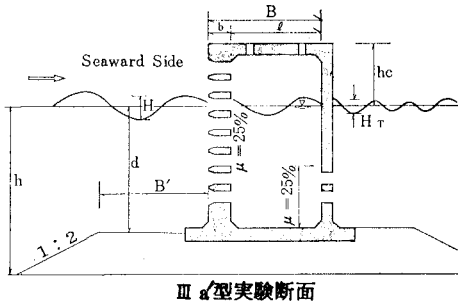
模型は前壁をモルタル造り、隔壁および後壁は木製とし、壁面の穴は円形とした。実験結果の解析には特に縮尺の規定は必要ないが、考えられる現地の波とケーソンの大きさから、1/30 の縮尺模型とみなすこととした。すなわち、現地に想定した堤体断面が、図-3 の記号で、前壁および後壁空隙率 $\mu=25\%$ 、隔壁空隙率 $\mu=25\%$ (下 2 段のみ)、 $b=3\text{ m}$ 、 $B'=12\text{ m}$ 、 $h=24\text{ m}$ 、 $d=19\text{ m}$ となるように諸量を固定した。ただし、 h_c は越波が生じない程度に高く、現象は Froude の相似則に従うとした。

実験ケースは、波の反射、伝達特性についてはⅢ_b'型において、遊水幅 l_1 、 l_2 の効果をみるために $H=4.5\text{ m}$

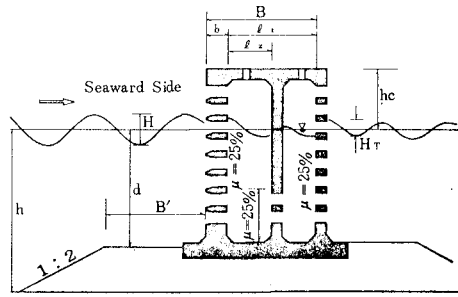
* 正会員 運輸省第三港湾建設局次長

** 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所次長

*** 運輸省第三港湾建設局山港工事事務所工事専門官



Ⅲ a'型実験断面



Ⅲ b'型実験断面

図—3 実験に用いた断面

と固定し、 $l_1/L=0.1\sim0.45$ 、 $l_2/L=0.02\sim0.25$ と変化させ、 $l_1/l_2=1$ すなわち Ⅲa' 型 ($l=l_2$) まで、また波形勾配 H/L の効果をみるために、 $l_2/L=0.12$ を固定し、 $H/L=0.01\sim0.03$ 、 $l_1/L=0.12\sim0.45$ 等と変化させた。一方海水交換特性実験では、Ⅲa' 型についてのみ、 $H=1, 2, 4.5$ m、 $l/L=0.075\sim0.225$ ($H/L=0.006\sim0.044$) で行った。

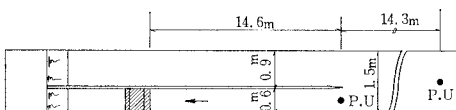
(2) 実験装置

実験は神戸調査設計事務所の二次元造波水路において行った。水路は $1.5\text{m}\times1.5\text{m}\times64.5\text{m}$ の大きさであるが、図—4 のように区切って用いた。波高は容量式 (計測技研製 CA-503)、色素水の濃度は分光光度計 (島津製作所製スペクトロニクス 88) で計測した。

(3) 反射波、透過波、通水量の測定法

波の反射率 K_R は Healy の方法で求めた。その場合、波高の極大値、極小値はそれぞれ 2 個の測定値の平均値を用いた。波の透過率 (港内への透過による伝達率) K_T は堤体背後の波高と Healy の方法で決めた入射波高との比とした。なお、測定は同条件で 3 回繰返し、それらの平均値を結果とした。また波の透過に関しては周期の変化を考慮していない。

波により堤体前後で海水交換がなされるが、ここではその通水量として、「波による水の粒子運動および堤体



図—4 水路平面および模型配置図

の影響 (乱れ等) により、堤体後壁を境とし、堤体前面から背後へ水が移動する量 (逆方向への移動量も一致するはず)」とした。すなわち 図—5 に示すように、まず堤体後壁前面に一定の均一な濃度をもった多量の水 (色素含有量 $\delta=a$ 、単位は gr/l) と、背面には別の均一な濃度 (同じ色素で含有量 $\delta=b$) の水を同一水位まで満たしておく。次に実験開始時 (波が整った時点) に後壁をふさいでいた防水遮断板 (ゲート) を瞬間的に開放し、適当な波数だけ波を当てて海水交換を行わせ、終了時再びゲートを閉じる。そして実験前後の堤背後の水の濃度変化量 $\Delta b=b-b'$ を知って、通水量 $\Delta v(l)$ は、色素量の関係

$$v \times b' = (v - \Delta v) \times b + \Delta v \times a \quad \dots\dots\dots (1)$$

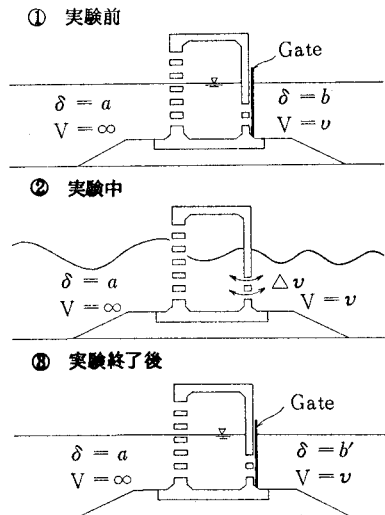
から

$$\Delta v = \frac{b'-b}{a-b} v = \frac{\Delta b}{a-b} v \quad \dots\dots\dots (2)$$

で求めた。もし初期状態で堤体背後の水の色素濃度 $b=0$ すなわち 真水を使うならば、 $\Delta v = (b'/a)v$ で簡単に通水量が求められる。ただし、以上の場合水粒子と色素粒子の運動は同じであると仮定した。この点については、静水中の色素 (エニオン) の拡散係数は $10^{-2}\sim10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 、完全重複波中ですら (移流および渦動拡散が) $10^{-2}\sim10^{-1} \text{cm}^2/\text{sec}$ のオーダーであり⁸⁾、本実験での波に乗った色素の拡散 (移流および乱流拡散) 以外の拡散による誤差は無視できる範囲と考えられる。

実際の測定は、図—6 に示される A、B、C のゲートを同時に操作し、中間の色素水は実験前後において十分攪拌し、図中の B 点で採水した試料水の吸光度を分光光度計で測定した。なお実験は各ケース 5~10 波を作用させ、それを 3 回以上繰返した。

本実験に使用した色素は、食用色素赤 106 号である。



図—5 海水交換の実験法

この色素の吸光度は水道水中に含まれる塩素等には左右されない安定した性質をっており、その濃度と吸光度の関係は図-7に示されるとおり線型になる。したがって式(2)の $\Delta b/(a-b)$ は、實際上、濃度ではなく吸光度の比を使って求められる訳である。

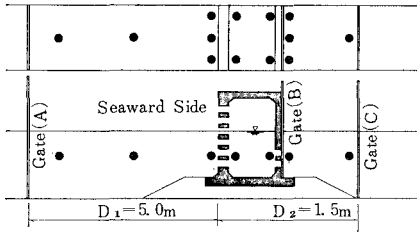


図-6 ゲート配置および採水位置図

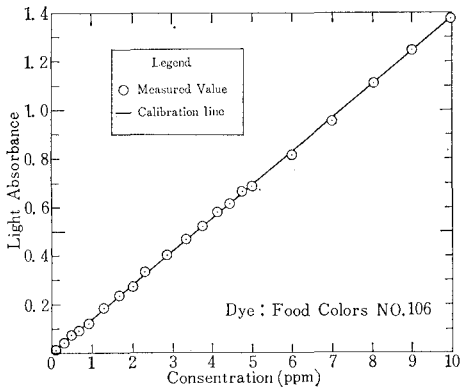


図-7 色素濃度と吸光度の関係

4. 実験結果と考察

(1) 波の反射特性

図-3に示したⅢ_a'およびⅢ_b'型断面の波の反射特性は図-8のとおりである。昨年度本講演会で発表したⅡ_a型の場合⁹⁾と同様、反射率 K_R が最小値を示す l_2/L 、換言すれば波長 L によって最適遊水幅 l_2 が存在することがわかる。すなわち、Ⅲ_a'型 ($l_1/l_2=1$) の場合、 $l/L=0.12$ で最低反射率約 0.2 まで落ち、Ⅲ_b'型では l_1/l_2 が小さい程 K_R も小さく、その値は $l_1/l_2=1.25\sim 2.0$, $l_2/L=0.12$ では $K_R=0.2\sim 0.3$ まで下っている。

ここで最も注目されることは、Ⅲ_b'型の極限 ($l_1-l_2\rightarrow 0$) であるⅢ_a'型の方が K_R が低いことである。これは複室型の方が一室型よりも反射率が落ちるであろうという我々の当初の予想に反するものであった。その原因としては隔壁が増えれば反射量も多くなるからと判断される。これはケーソン断面の経済性からいって望ましいことといえよう。次に注意しなくてはならないのは、昨年度のⅡ_a型の結果では最適遊水幅が $l/L=0.08$ ($B/L=0.125$) であった⁹⁾ものが、Ⅲ_a'型では 0.12 と 5 割増になることである。すなわち後壁に穴をあけると最適遊水幅が長くなり、ケーソン断面が増すことになる。た

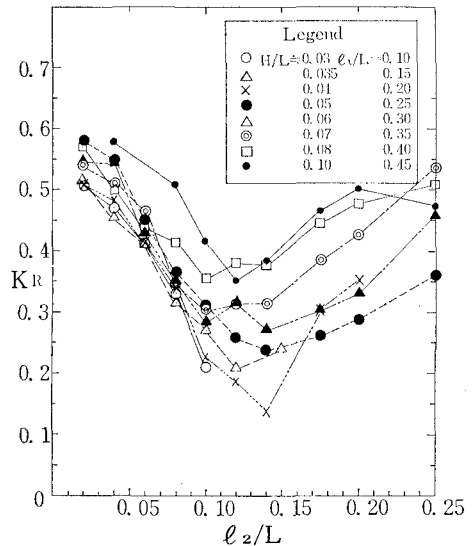
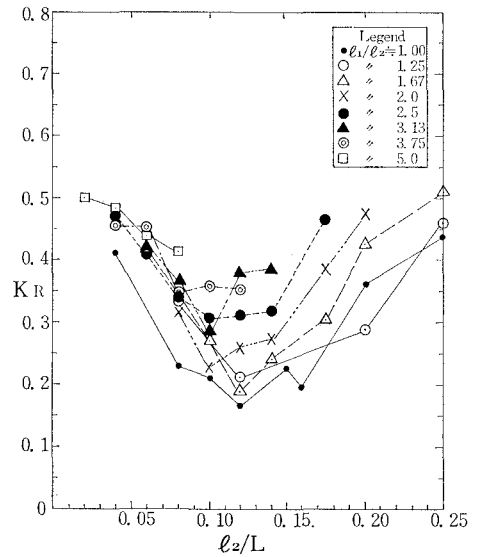


図-8 Ⅲ_a'およびⅢ_b'型での波の反射率

だし透過堤にするメリットとして、 K_R の落ちこむトラフの幅がⅡ_a型の場合より広くなることが挙げられる。このことは現地波の不規則性に対応する上で好ましいことであるといえよう。

ここで反射率 K_R に対する入射波の波形勾配 H/L の影響を $l_2/L=0.12$ の場合に見たのが図-9である。図よりⅢ_a'型 ($l_1/L=0.12$) の方がⅢ_b'型より K_R が小さいこと、 l_1/L が大きくなるほど、 H/L が小さいほど、 K_R が大きくなる傾向にあることが明瞭にわかる。また、Ⅲ_a'型では K_R が H/L に無関係になることは極めて特徴的である。このことはⅡ_a型の結果⁹⁾にも一致しており、一室式構造の K_R に関する優位性を意味している。

(2) 波の伝達特性

Ⅲ_a' および Ⅲ_b' 型断面での波の透過による伝達率 K_T を 図-10 に示す。図から、まず K_T に対する l_2/L の効果をみると、各種の l_1/l_2 で共通に l_2/L が小さいと K_T が大きく、ある程度 l_2/L が大きくなると $K_T \approx 0.2$ と一定になる領域があり、さらに大きくなると $K_T \approx 0.1$ まで落ちるという性質が読取れる。さらに Ⅲ_a' 型 ($l_1/l_2 = 1$) と Ⅲ_b' 型を比較すると、Ⅲ_a' 型の方が K_T が大きくなっている。これは K_R の逆の結果であり、後壁がないために波のエネルギーが伝達しやすいからである。

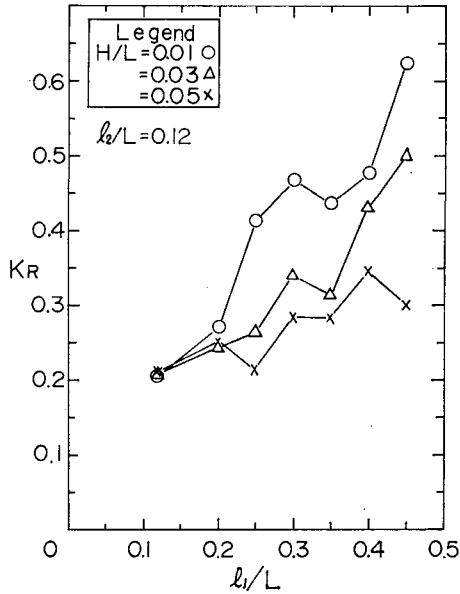


図-9 反射率と遊水長、波形勾配の関係

次に H/L および l_1/L をパラメーターにとってみると、 l_2/L にかかわらず K_T が一定するという著しい特徴がある。

次に反射波からみた最適遊水幅 $l_2/L = 0.12$ において H/L および l_1/L の影響を調べたのが 図-11 である。 K_T はおおむね H/L と l_1/L に反比例することが明白である。ここで最も注目されることは、 $l_1/L = 0.12$ (Ⅲ_a' 型) では H/L の影響が極めて大きく、逆に l_1/L が大きくなると H/L の影響が無くなることである。これは K_R の場合と全く逆である。そこで Ⅲ_a' 型の場合の H/L の K_T への働き方を示したのが 図-12 である。 H/L の効果は大きく、 $H/L < 0.035$ では K_T を 0.2 程度に抑えることはできない。ただし伝達波高 H_T の絶対値は必ずしも高いとはいえないことに注意されたい。なぜなら 図-13 のとおり、伝達波高 H_T は入射波高 H_I の変化ほど大きく変わらないこと、周期が変わってもそう影響されないことなどがいえるからである。これは逆に外海波が小さくともある程度の伝達波は常にあることを意味している。

(3) 海水交換特性

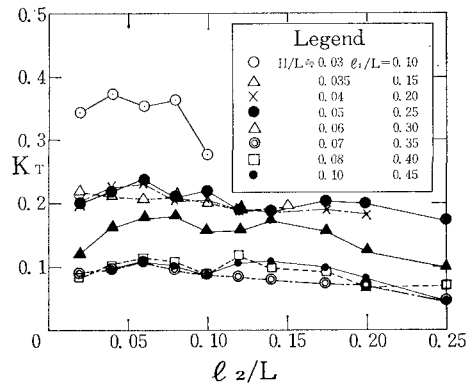
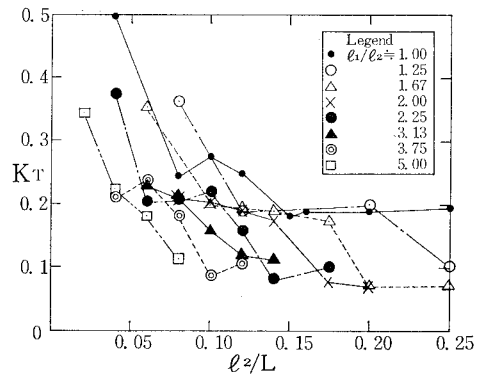


図-10 Ⅲ_a' および Ⅲ_b' 型での波の伝達率

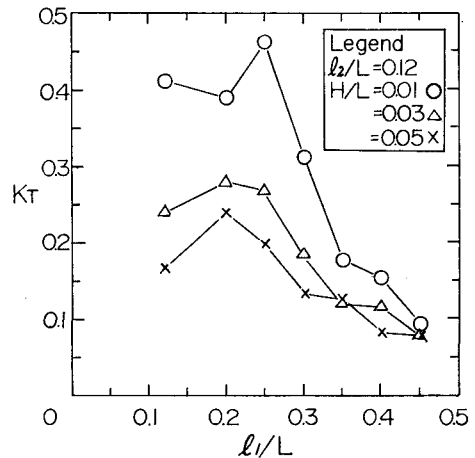


図-11 伝達率と遊水長、波形勾配の関係

最後に、Ⅲ_a' 型の断面についてのみ波による海水交換特性を調べてみた。まず遊水幅波長比 l/L を指標として通水流量 q ($\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{m}$) を示したのが 図-14 である。波高水深比 (水深 h は一定としているので実質的には波高 H) が大きくなるほど、 q の絶対量が増えている。 l/L に関しては、 q は相対的に $l/L = 0.15$ でやや大きくなっているが、海水交換からみた波長 L に対する最適遊水幅とまでは言えそうにない。

次に、波形勾配 H/L の影響をみるために、通水流量

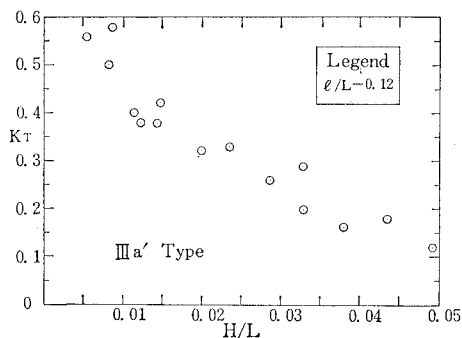


図-12 III a' 型での波の伝達率

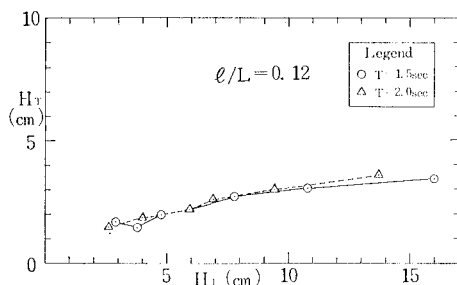


図-13 III a' 型での波高伝達特性

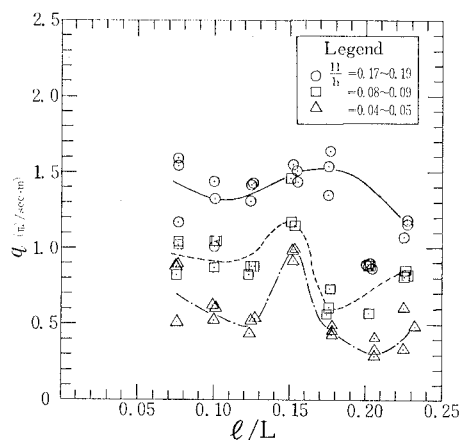


図-14 III a' 型での海水の通水流量

を $q/\sqrt{2gH^3}$ と無次元化して片対数グラフに整理したものが図-15である。 $q/H^{3/2}$ は明らかに H/L に反比例していること、 l/L は余り効かないことがわかる。

5. あとがき

本実験結果により、波の反射が少なく、かつ堤内への

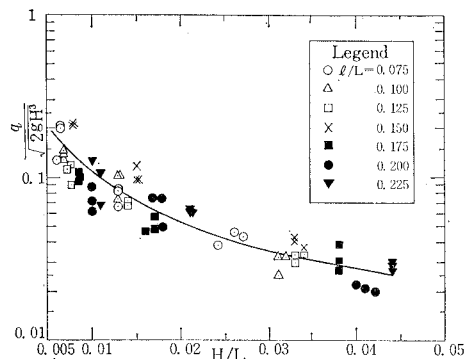


図-15 III a' 型での海水交換特性

波の伝達（越波は除く）が許容限度内に抑えうる透過式ケーソン防波堤が存在しうることがわかった。さらにそのような防波堤内外の波による海水交換の通水流量の大略の算定図が与えられた。たとえば、水深 $h=15\text{m}$ 地点の（1室式透過防波堤 III a' 型）で $l=8\text{m}$ の断面では、波高 $H=3\text{m}$ 、周期 $T=7\text{sec}$ の正弦波が入射した場合には、反射波高 $H_R=0.6\text{m}$ 、伝達波高 $H_T=0.5\text{m}$ 、通水流量 $q=0.6\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{m}$ 程度になる。

参考文献

- 1) U.S. Army Coastal Engineering Research Center: Shore protection, planning and design (3rd ed.), Tech. Rep. No.4, p. 348, 1966.
- 2) 第三港湾建設局: 神戸港-4m 物揚場模型実験報告(反射率の測定), 神調査 No.100, p. 21, 1969.
- 3) 井島武士他: 遊水部をもつ直立消波防波堤と護岸, 第19回海講論文集, pp. 185~192, 1972.
- 4) 森平倫生他: カーテン防波堤とその特性について, 港湾技術研究所報告, Vol. 3, No. 1, 1964.
- 5) 第四港湾建設局: 透過堤模型実験報告書, pp. 98~119, 1975.
- 6) 三木 享: 直立消波防波堤水理模型実験について, 調設広報, 第三港湾建設局, Vol.1, No.2, pp. 64~70, 1975.
- 7) 武智雅敏: 直立消波透過型防波堤の波浪および海水交換特性に関する実験的研究, 第7回管内工事施工技術研究会資料別冊, 第三港湾建設局, p. 16, 1976.
- 8) 岩垣雄一他: 重複波による染料の拡散に関する研究, 第22回海講論文集, pp. 349~354, 1975.
- 9) 松本輝寿他: 各種の防波堤隅角部の波浪特性に関する研究, 第22回海講論文集, pp. 115~119, 1975.