

# 低反射性能をもつ 海水交換型ケーソンの開発

## DEVELOPMENT OF A NEW PERMEABLE BREAKWATER WITH LOW REFLECTION PERFORMANCE

藤田 孝<sup>1</sup>・永田修一<sup>2</sup>・岩田節雄<sup>2</sup>・新里英幸<sup>1</sup>・武田純男<sup>3</sup>

Takashi FUJITA, Shuichi NAGATA, Setsuo IWATA,  
Hideyuki NIIZATO and Sumio TAKEDA

<sup>1</sup>正会員 工修 日立造船(株) 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>2</sup>正会員 工博 日立造船(株) 技術研究所 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

<sup>3</sup>正会員 工修 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 (〒559-8559 大阪市住之江区南港北1-7-89)

New permeable type breakwater with low wave reflection performance is developed. This breakwater consists of a slit wall and reservoirs, in which L-type impermeable walls are set up, in front of a permeable vertical wall.

As the results of hydraulic model tests on the wave reflection, it is found that the breakwater has very low wave reflection performance for wide frequency range. Furthermore, the experiments on the water exchange performance are carried out, and it is found that the breakwater is effective in water quality improvement of an inner bay.

**Key Words :** Permeable breakwater, low wave reflection, wave energy dissipation, water exchange, wave tank test, water quality

### 1. はじめに

近年、複合型商業施設やテーマパークなどの建設が港湾地域で進められている。また、メガフロートなどによる大型海上空港や浮体式防災基地の研究も活発に行われている。これらの施設の建設や計画は、港湾地域を物流だけではなく、集客性を重視したアメニティーゾーンへ転換させ、より安全でより快適な水辺空間創造のニーズを作り出している。そのため現在の港湾開発では、海域環境や湾内の静穏度に配慮した整備計画が立案されるようになり、環境対応型や低反射型といった防波堤および護岸（以後、ケーソンと称する）の開発が進められている。

本研究では、図-1に示すようなL型不透過壁を用いて複数の遊水室を構成する消波構造を提案し、模型実験によってその消波型ケーソンが従来より広い周波数範囲で低反射性能をもつことを確認するとともに、L型不透過壁の設置位置などの構造パラメータを変化させて構造物の消波特性を明らかにした。

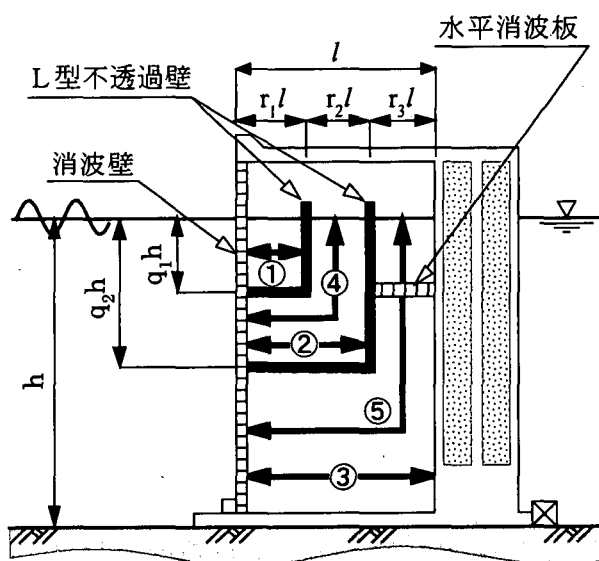


図-1 消波構造の概略

また、背面不透過壁の静水面より上の部分に開口部を設けた海水交換型構造の模型実験を行い、内湾などの水質改善に必要な海水交換性能について検討した。

2. 消波構造の特徴

鉛直不透過壁などの構造物に沖から進行してきた入射波がぶつかると、壁で波は反射し入射波とは逆方向に進行する。構造物でのエネルギー損失がない場合の反射波は、入射波と同振幅（反射率=1.0）で逆位相の波となる。したがって、構造物前面では入射波と反射波が重なった重複波となり、波高は入射波の2倍となる。この現象を回避するためには、構造物で波のエネルギーを散逸させて波高を減少させる方法が有効とされているが、その代表的なものにスリット式消波工がある<sup>1)</sup>。スリット式消波工は、図-2に示すように一定間隔をあけて配置された柱体列で構成されており、消波は主に波が柱体間を通過するときに発生する渦のエネルギー散逸によっておこる。散逸エネルギーは、スリット通過水平水粒子速度の2乗に比例<sup>2)</sup>するため、スリットでの通過流速を増大すれば、消波性能を向上させることができる。

新型構造では、消波壁、背面不透過壁の間に1つ以上のL型不透過壁を設置するため、複数の遊水室が存在する。図-1に示した例は、2つのL型不透過壁の設置により、異なる3つの遊水室幅（図中の①、②、③）に応じた水理特性が期待できる構造である。また、後部2つの遊水室はL型不透過壁に囲まれた水路となり、消波壁から自由表面までの海水はそれぞれ一つの水柱となって波の運動に伴って振動するため、その振動流が消波壁を通過する際に効果的な消波が起こる。一般に、消波壁を前面に設置したスリット式ケーソン堤では、遊水室幅に同調する波に対し最も低い反射率を与えることが知られているが、新型構造では遊水室幅（図中①、②、

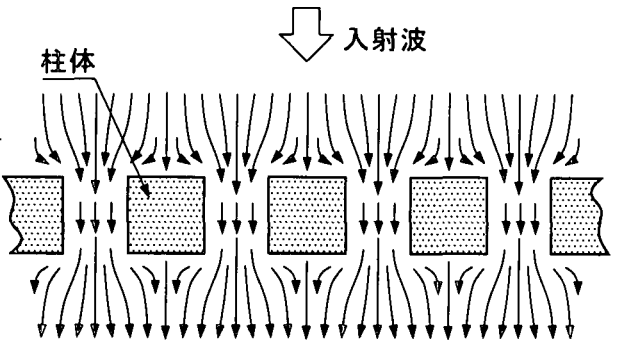


図-2 柱体間を通過する流れ

③)と振動水柱の固有周期に同調する波に有効であり、さらに振動水柱の固有周期は遊水室幅の固有周期より長くなるため、結果的に広い周波数範囲の波に対して低反射性能を与えることが期待できる。

3. 消波性能の確認

(1) 実験方法

実験は、図-3に示すように消波構造物模型と2本の容量式波高計を二次元造波水槽（長さ：60m，幅：1.0m，深さ：1.2m）に設置して行った。実験の縮尺は1/20とし、水深は0.75m（実機換算：15m）とした。実験では、沖側の反射吸収式造波装置より規則波を発生させ、波高計から得られる水位変動の時刻歴を収録した。入射波高および反射波高は、収録された時刻歴データに入・反射波分離推定法を適用して算出した。図-4に新型構造模型の設置状況を示す。

実験に用いた規則波は表-1に示すように、実機

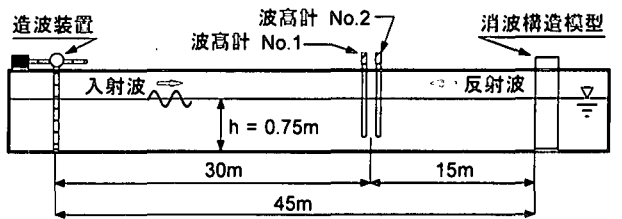


図-3 消波構造模型と波高計の設置位置



図-4 消波構造模型の設置状況

換算周期： $T=3.5s \sim 9.2s$  の範囲で波形勾配が  $H/L=0.02$  および  $H/L=0.04$  の異なる14ケースとし、構造条件としてはL型不透過壁の水平方向の設置位置 ( $r_1, r_2$ )、鉛直方向の設置位置 ( $q_1, q_2$ )、水平消波板の有無およびL型不透過壁の数 (1, 2枚) をそれぞれ変化させた十数ケースのモデルを用いた。

(2) 実験結果と考察

新型構造とL型不透過壁を設置しない場合（消波壁のみ）の実験値を図－5に示す。図中、縦軸は反射波高を入射波高で除した反射率 ( $K_R$ )、横軸は現地との対応を分かりやすくするため実機換算周期としている。ここで用いた消波構造は、2枚のL型不透過壁の設置位置を  $r_1=r_2=0.33$ ,  $q_1=0.25$ ,  $q_2=0.5$  とし水平消波板を取り付けたタイプである。比較のため、反射率の目標値を仮に  $K_R \leq 0.4$  とすると、消波壁のみでは目標値を満足する周期が  $5.1s \sim 7.2s$  であるのに対し、L型不透過壁を内蔵した新型構造では  $3.0s \sim 9.0s$  の範囲で目標値を満足していることが分かる。一般に、港湾で最も外洋に面している防波堤では季節や天候に応じてさまざまな周期の波

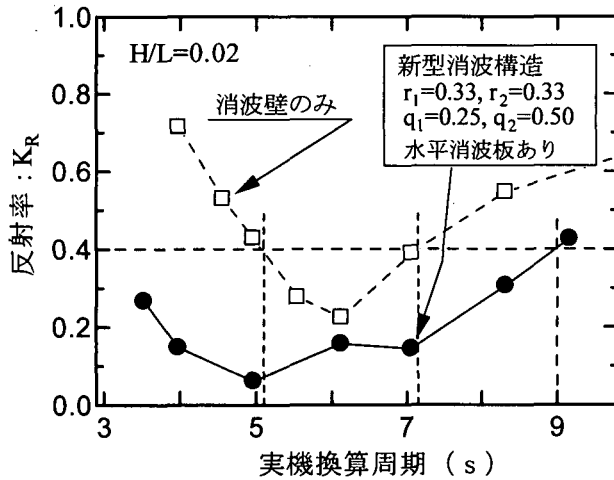
が作用するため、新型構造は非常に適した消波性能をもつといえる。また、周期変動の小さい内湾においても、その良好な周波数特性ゆえに、遊水室幅を卓越波の1/4波長以下に設定することが可能となり、コスト低減のため堤体幅を短くすることができる。

新型構造は遊水室内部にL型不透過壁を設置しただけの単純な構造であるが、L型壁の設置位置によっては消波性能が変化する。構造パラメーターと消波性能の関係は設計上重要であり、実験的に検討を行った。L型不透過壁の水平方向および鉛直方向の設置位置を変化させた反射率をそれぞれ図－6、図－7に示す。図の横軸は、遊水室の全幅を入射波の波長で除した無次元値 ( $l/L$ ) で入射波の周波数に対応する。実験結果より、いずれの構造ケースにおいても  $0.1 \leq l/L \leq 0.5$  の範囲で反射率は0.5以下となっている。なお、この  $l/L$  の範囲は、入射波の波長が遊水室全幅の2倍から10倍の範囲であることに等しい。

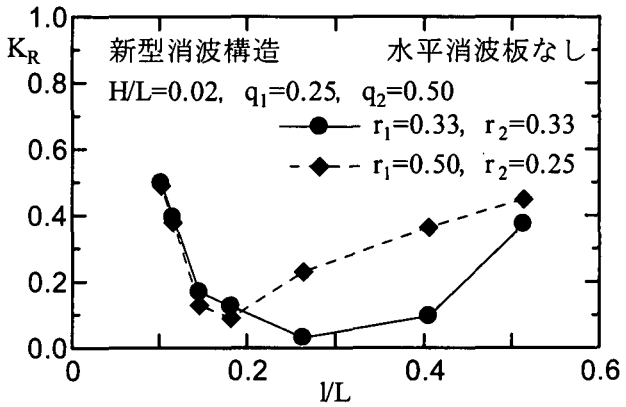
図－6よりL型不透過壁の水平方向の設置位置は、反射率の周波数特性に影響を及ぼし、特に形状が変化した遊水室幅（図－1の①、②）と同調する短波

表－1 波浪条件

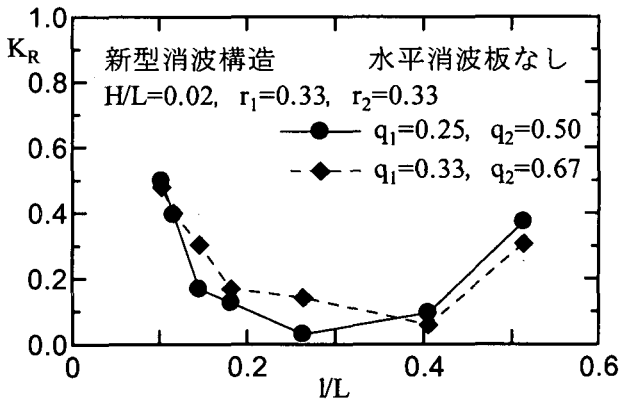
| 実験条件       |            |      | 実機換算値      |           |      |
|------------|------------|------|------------|-----------|------|
| 波周期<br>(s) | 波高<br>(cm) |      | 波周期<br>(s) | 波高<br>(m) |      |
| 0.79       | 1.9        | 3.9  | 3.53       | 0.39      | 0.78 |
| 0.89       | 2.5        | 4.9  | 3.98       | 0.49      | 0.99 |
| 1.11       | 3.8        | 7.6  | 4.96       | 0.76      | 1.52 |
| 1.37       | 5.5        | 11.0 | 6.13       | 1.10      | 2.20 |
| 1.58       | 6.9        | 13.7 | 7.07       | 1.37      | 2.74 |
| 1.86       | 8.6        | 17.2 | 8.32       | 1.72      | 3.45 |
| 2.05       | 9.8        | 19.6 | 9.17       | 1.96      | 3.91 |



図－5 新型構造とL型不透過壁を設置しない場合（消波壁のみ）の反射率



図－6 L型不透過壁の水平方向設置位置の影響



図－7 L型不透過壁の鉛直方向設置位置の影響

長側 ( $l/L > 0.2$ ) で顕著である。これは、遊水室が消波性能に影響するという当初の考察と一致している。なお、他にも実施した同様の実験結果を含めて検討したところ、2枚の不透過壁を等間隔に設置した場合 ( $r_1 = r_2 = r_3 = 1/3$ ) に、最も広い周波数範囲で低反射性能を与えることがわかった。一方、鉛直方向の設置位置を変えた図-7では、両者とも広い周波数範囲で低反射性能を示しているものの、周波数に対する傾向はほとんど変化していないことがわかる。鉛直方向の波の運動は水深と周期の関係によって変化するが、今回の実験水深と波周期の組み合わせでは、設置位置が極端に浅い場合と深い場合を除けば、不透過壁の鉛直位置による大きな変化は認められなかった。

背面不透過壁とL型不透過壁の間に取付けているスリット式水平消波板のあり、なしによる反射率の比較を図-8に示す。水平消波板を設置した場合の反射率は、長周期側 ( $l/L = 0.10, 0.12$ ) で設置しない場合よりも約0.1低減しており、このことからL型水路の水柱振動流が長周期側の消波に寄与していることがわかる。

L型不透過壁を1枚設置した場合と2枚設置した場合の反射率を図-9に示す。不透過壁の枚数の多い方が遊水室を多く確保できるため、反射率の周波数特性に有効と考えられるが、全体の堤体幅には制限があり、枚数を増やしても個々の遊水室で十分な容積が確保できず、効率的な消波は望めない。一般的な堤体幅の場合、建設コストも考えると2枚程度が妥当と考える。

#### 4. 海水交換性能の確認

海水の滞留による水質悪化を防止するために、背面不透過壁の静水面より上部に開口部を設け、L型不透過壁の上端部を切断した海水交換型構造の越波実験を行った。

##### (1) 実験方法

実験は、図-10に示すように、海水交換型模型の背後に流量測定箱を設け、その部分の水位上昇量を波高計で計測した。模型は、背面不透過壁の静水面より上を開口部とし、L型不透過壁先端と静水面との距離 ( $d$ ) によって、次の2種類のモデルを用いた。

- ・ Model-A :  $d/l = 0.00$
- ・ Model-B :  $d/l = 0.05$

単位幅、単位時間あたりの越波流量 ( $Q$ ) は、図-11に示すように水位上昇時刻歴の一定増加部分を抽出し、最小自乗法により求めた傾きに、測定箱の長さ ( $S$  : 図-10参照) を乗じることによって算出

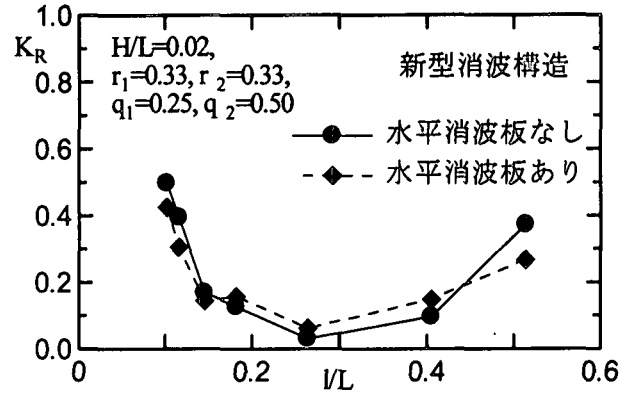


図-8 水平消波板が反射率に与える影響

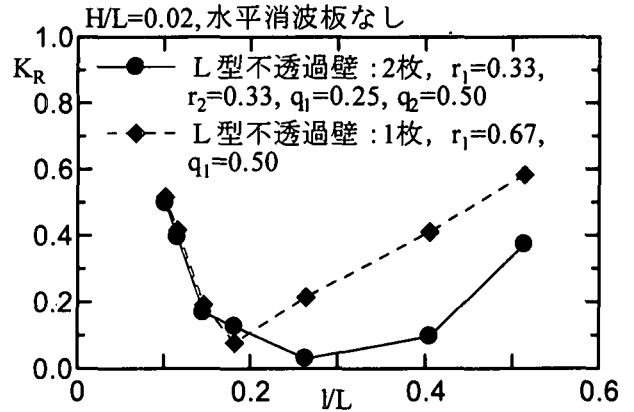


図-9 L型不透過壁の枚数の効果

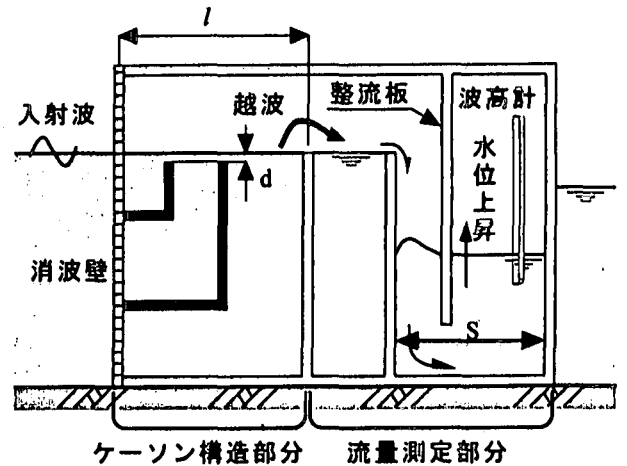


図-10 越波流量の測定方法 (概念図)

した。なお、入射波の条件については、波周期を消波性能実験と同じにし、波形勾配については測定箱の総容量と計測時間の関係から、 $H/L=0.04$ のケースを減らし、 $H/L=0.03$ のケースを追加した。

(2) 実験結果

越波流量の無次元化には、正弦波の静水面を越える単位幅あたりの水量を1周期間で平均化したつぎの値 (Q') を用いる。

$$Q' = \frac{HL}{2\pi T} \tag{1}$$

ここで、T は波周期である。この値を用いて無次元化した越波流量を入射波の周波数に対応する  $l/L$  を横軸にとって図-12に示す。Model-B の無次元越波流量は  $l/L$  の増加に対して単調に減少しているが、Model-A の場合は長周期側で Model-B と同量であるものの、短周期側での減少割合が大きい。

図-13は波形勾配を横軸にとり無次元越波流量を示したものである。無次元越波量は波形勾配に対して緩やかに増加し、その増加割合（傾き）はいずれの場合もほぼ同程度である。

越波実験では、L型不透過壁の先端を切断した際の消波性能確認のため、反射率の計測を行っている。不透過型（消波実験の結果）と Model-A、-B の反射率を図-14に示す。それぞれの反射率は、幾分の変動は認められるもののほぼ同等の値、傾向を示して

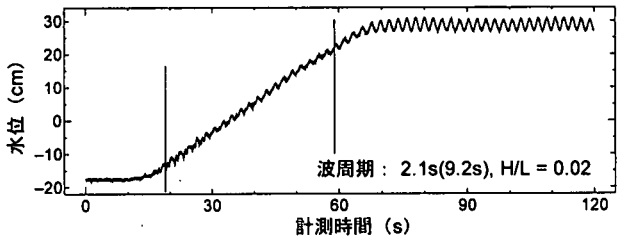


図-11 水位上昇時刻歴の例（実験値）

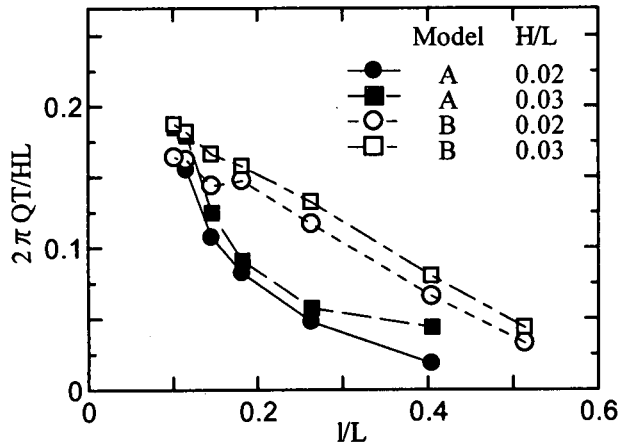


図-12 入射波の周波数と越波流量の関係  
( $r_1=0.33$ ,  $r_2=0.33$ ,  $q_1=0.33$ ,  $q_2=0.67$ )

おり、L型不透過壁を切断した影響は認められない。したがって、この海水交換型構造は、良好な消波性能を維持しつつ、先に示した海水交換性能を有していることが確認できた。

(3) 越波流量の推定

ケーソンの構造諸元を確定すれば、波浪条件に応じた越波流量を推定できることが望ましい。図-12、図-13に示した関係から、Model-B の越波流量の推定式を次のように求めた。

$$\frac{2\pi QT}{HL} = a \cdot \frac{l/L}{(H/L)^{1/4}} + b \tag{2}$$

ここで、a、b は定数でつぎのとおりである。

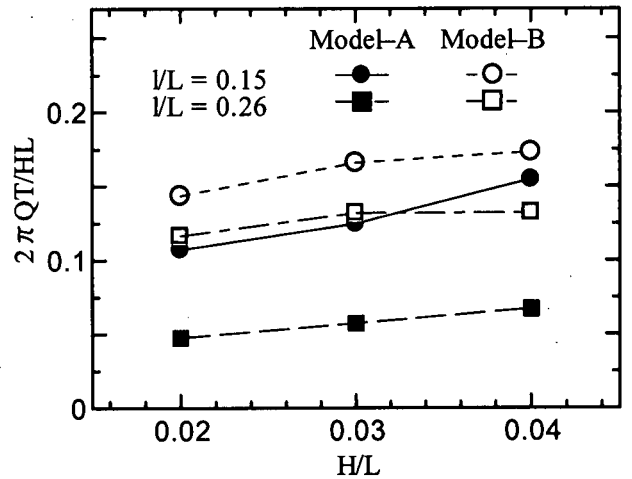


図-13 波形勾配と越波流量の関係  
( $r_1=0.33$ ,  $r_2=0.33$ ,  $q_1=0.33$ ,  $q_2=0.67$ )

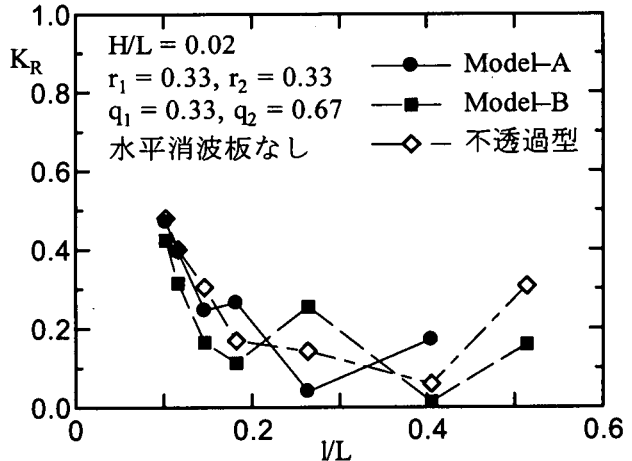


図-14 海水交換型構造と不透過型構造の反射率の比較

$$a = -0.14, \quad b = 0.21$$

式(2)から求めた推定値と実験値の比較を図-15に示す。多少のばらつきはあるものの、両者はよく一致しており、実機の性能評価に十分有効であることを確認した。

## 5. おわりに

遊水室内に複数のL型不透過壁をもつ消波構造物を提案し、その消波性能および海水交換性能について実験的な検討を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- ①波周期3.0s～9.0sの広い範囲で反射率0.4以下という優れた消波性能をもつ。
- ②消波性能は、L型不透過壁の設置位置に影響を受けるため、設置海域の波浪条件に応じた構造設計が必要である。
- ③背部不透過壁に開口部を設けた構造は、良好な消波性能を維持しつつ、内湾の水質悪化を防止するために必要な海水交換機能を有する。
- ④実験結果を用いて、実機の海水交換量を予測する推定式を導いた。

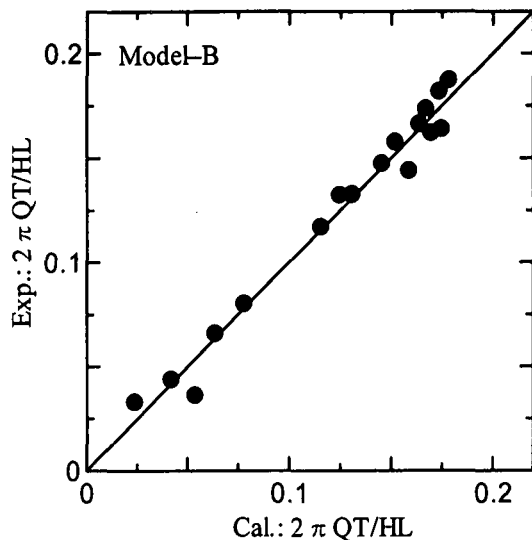


図-15 無次元越波流量の推定値と実験値の比較

## 参考文献

- 1) 近藤一郎, 竹田英章: 消波構造物, 森北出版株式会社, 1983.
- 2) 角野昇八, 小田一紀, 村本哲二, 芳田利春: 複素係数の blockage coef.を導入した漸近展開接合法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 407-411, 1986.