

杭式スリット消波構造物の反射率に関する模型実験

Model Test for Reflection Coefficient of Wave Dissipating Pile Support Structures

島田潤一*・塩田啓介*・今塩宏之**

Junichi Shimada, Keisuke Shiota and Hiroyuki Imashio

A wave dissipating pile support structure with a permeable pile wall and wave chamber has the advantage of low wave reflection. Experiments were conducted to investigate characteristics of the reflection coefficients for structures. The results of the experiments indicate that the reflection coefficients are influenced by pile section type. A practical calculation method is derived for the prediction of reflection coefficients of the structure on the basis of Tanimoto's theory for the wave dissipating caisson.

Keywords : reflection coefficient, wave dissipating pile structure

1. はじめに

杭式スリット消波構造物は前壁に鋼管杭、H形鋼杭などを間隔をあけてスリット状に打設し、後壁を鋼管矢板壁として、これらの2列の壁体頭部を鉄筋コンクリートや鋼材にて結合したラーメン構造の防波堤や護岸構造である（図-1）。波力や土圧などの外力に対して杭の支持力によって抵抗するため、軟弱地盤の場合は直立消波ケーソンやブロック式消波堤などの重力式構造物に比べて地盤改良工を削減することが可能である。また、直立消波ケーソンの場合は遊水室と中詰部を有するが、杭式スリット消波構造物の場合は2列の杭壁間が遊水室となり中詰部を必要としないため壁体幅が少なく済み、港内水域や航路の確保の面で有利であり、特に、マリーナや漁港の防波堤や消波護岸に適している（図-2）。

杭式スリット消波構造物は、縦スリットケーソンと同様に前面にスリット壁、後面に不透透壁を有し両壁間の遊水室に波を出入りさせて反射率を低減させる消波構造であるが、スリット部材の断面形状が円筒形やH形であるため一般的な矩形断面スリットと異なる反射率特性を有している。

本研究では模型実験によって杭式スリット消波構造物の反射率を測定し、開口比や波浪条件と反射率の関係を総括的に調べるとともに、スリット部材断面形状の違いが反射率に及ぼす影響を考察した。また、従来の直立消波ケーソンの理論計算式を基にスリット部材断面形状の違いを考慮した反射率計算方法を提案し、実験値と比較検討した。

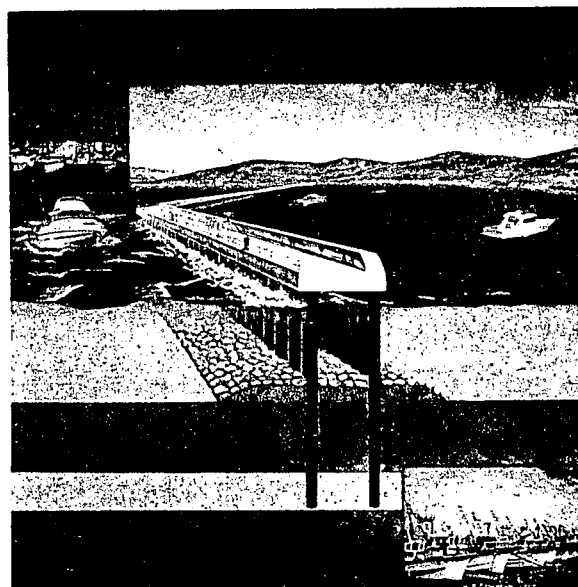


図-1 杭式スリット消波堤のイメージ

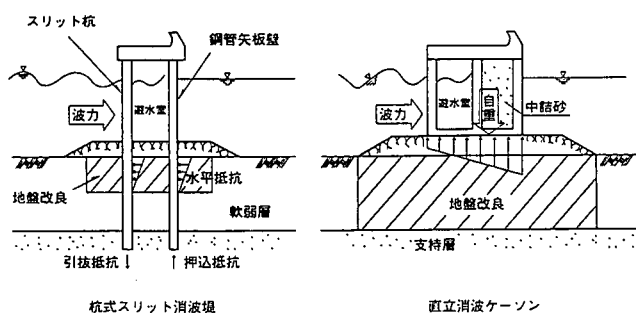


図-2 杭式スリット消波堤と直立消波ケーソンの比較

* 正会員 川崎製鉄株式会社エンジニアリング事業部土木技術部 (100 東京都千代田区幸町2-2-3)

** 正会員 財団法人 沿岸開発技術研究センター

2. スリット部材断面形状の違いを考慮した反射率の計算方法

ここでは、谷本および吉本が導いた縦スリットケーソンの反射率計算理論¹⁾を基にスリット部材断面形状の違いを考慮した計算方法を提案する。

谷本・吉本の理論によれば、反射率 K_r は式 (1) によって示される。

$$K_r = f(h, T, H, q, B, d_1, d_2, \epsilon) \dots\dots (1)$$

ここに、 h : ケーソン前面部水深、 T : 入射波の周期、 H : 入射波高、 q : ケーソン前面部水深に対する遊水室内部水深の比、 B : 遊水室幅、 d_1 : スリット部材幅、 d_2 : スリット部材厚および ϵ : スリット壁開口比 $(1 - d_1) / l$ である (図-3)。

この理論では反射率に影響を与えるスリット部材による損失に関する計算式としてスリット開口部での流速に関する損失係数 f およびスリット開口部での流速に対する有効慣性長 δ をそれぞれ式 (2) および (3) で与えている。

$$f = \epsilon^2 (1 - \epsilon) \{2.0 + 39.0 (1 - \epsilon)^2\} \dots\dots (2)$$

$$\delta = 12.4 (0.5 - B/L_1)^2 d_2 \quad (0 \leq B/L_1 < 0.5) \dots\dots (3)$$

ここに、 L_1 は遊水室内水深に対する波長である。

f および δ はもともと、抗力係数および慣性力係数の関数として与えられるものであるが、矩形断面スリットに関する実験データを基にして計算に便利ように式 (2) および (3) で表されている。したがって、スリット部材断面形状の違いが反射率に与える影響を考慮するためには、部材断面形状ごとの抗力係数および慣性力係数を用いて式 (2) および (3) の補正を行えばよいと考えられる。ここでは、式 (4) および (5) を補正式として用いることとした。

$$f' = a f \quad a = C_D / 2.0 \dots\dots (4)$$

$$\delta' = b \delta \quad b = C_M A / 2.0 d_1 d_2 \dots\dots (5)$$

ここに、 a : 抗力に関する補正係数、 b : 慣性力に関する補正係数、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性力係数および A : 慣性力計算のための基準断面積である。

表-1 は従来の提案値を参考にして反射率計算に使用するスリット部材断面形状ごとの C_D 、 C_M および A を示したものである。これらの値を用いて式 (4) および (5) を計算し谷本・吉本の理論式に代入することにより杭式スリット消波構造物の反射率が算定できる。

なお、2種類以上の断面形状の部材が組み合わされている場合は、 C_D については部材幅、 C_M については基準断面積による重みづけを行って計算を行うこととする。

3. 実験方法

実験に用いた水槽は全長163m 幅1mのもので、造波機より約100m離れた水槽側面が一部ガラス張りとなっている地点に模型を設置した。造波機は低慣性直流電動機駆動ピストン形式のものである。

図-4 に模型の形状を示す。模型の縮尺は1/11.8 とした。実験の対象とした杭式スリット消波堤は現地量で水深9.15mの地点に設置され、前壁の杭と後壁の鋼管矢板の中心間隔は6mとし、遊水室幅を5.1mとした。底部は高さ3mの根固め石にて被覆されている。前壁のスリット杭には主部材として外径900mmの鋼管杭、外径900mmの鋼管に外径200mmの継手パイプを装着した鋼管矢板杭および高さ900mm フランジ幅900mmのH形鋼杭を用い、これらの間隙に挿入する補

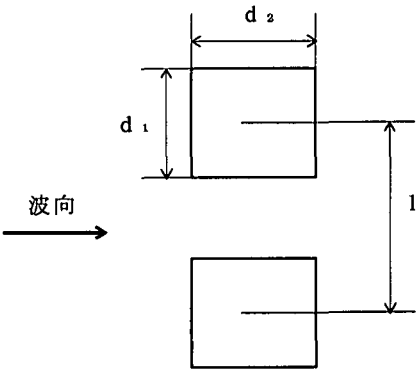


図-3 矩形スリットの断面

表-1 スリット杭の種類と計算に用いる係数

スリット杭の種類	断面形状	計算に用いる係数値	
		C_D	C_M
矩形杭		2.0	2.0
鋼管杭		0.8	2.0
鋼管矢板杭		0.8	2.0
H形鋼杭		1.6	1.0

(斜線部は慣性力計算のための基準断面積Aの範囲を示す)

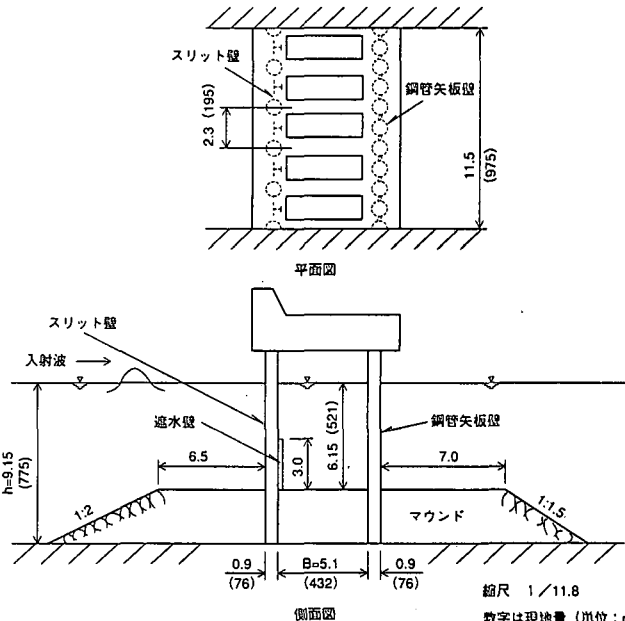


図-4 模型の形状

表-2 実験の構造タイプ

タイプ	スリット壁の種類 ↓波向	開口比 $\varepsilon = \frac{2-d_1}{d}$	遮水壁
1	鋼管矢板杭 + H-700	0.13	
2	鋼管杭 + H-700	0.30	
3	鋼管杭 + H-400	0.43	
4	鋼管杭	0.61	
5	鋼管杭 + H-700	0.30	○
6	鋼管杭	0.61	○
7	H形鋼杭	0.61	○

表-3 波浪条件

水深 h (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)		
9.15 (0.775)	3.5 (1.02)	0.3 (0.025)	0.5 (0.042)	0.75 (0.064)
	4.5 (1.31)	0.5 (0.042)	1.0 (0.085)	1.5 (0.127)
	6.0 (1.75)	0.5 (0.042)	1.0 (0.085)	1.5 (0.127)

上段は現地量

下段()内数字は模型量

助部材として高さ400mm フランジ幅400mmおよび高さ450mm 上フランジ幅700mm 下フランジ幅300mmのH形鋼杭を適宜使用した。後壁は外径900mmの鋼管矢板を用いた不透過壁とした。また、スリット壁にマウンド表面からの高さが3mある遮水壁を装着した場合についても実験を行った。

表-2に実験によって検討した模型の構造タイプを示す。タイプ1～4は開口比の影響をみたもの、タイプ5～7は遮水壁やスリット部材断面形状の影響に着目したものである。

波浪はBretschneider-光易型スペクトルの不規則波を使用した。表-3に波浪条件を示す。反射率の測定は合田・鈴木らの入反射波の分離推定法²⁾に従った。

4. 実験結果

(1) 開口比の影響

図-5(a)～(d)にそれぞれ開口比 ε が異なるタイプ1～4についての反射率実験結果を示す。図の横軸は遊水室幅・有義波長比 $B/L_{1/3}$ で縦軸は反射率 K_r である。実験値は有義波高 $H_{1/3}$ ごとに記号をかえてプロットしてある。また、図中の曲線は2.に述べたスリット部材断面形状を考慮した反射率の計算値であり $H_{1/3}=0.5\text{m}$ 、 1.0m および 1.5m の場合について示している。

タイプ1から4へと開口比 ε が大きくなるほど反射率 K_r が増加する傾向がみられる。また、 $B/L_{1/3}=0.1\sim 0.2$ 付近で K_r は最小小さくなり、波高 $H_{1/3}$ が大きくなるほど K_r

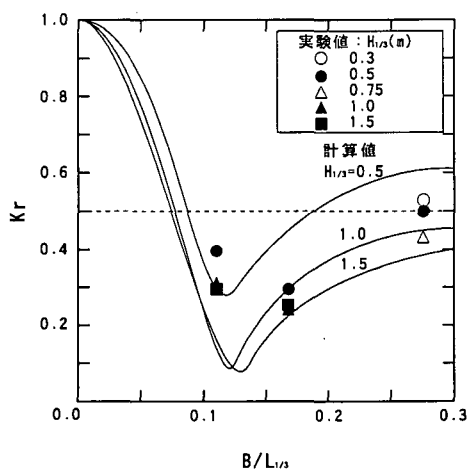
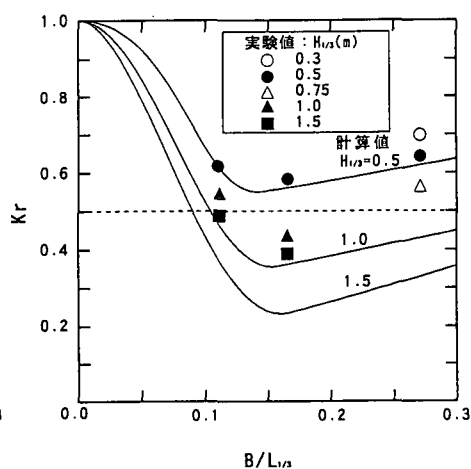
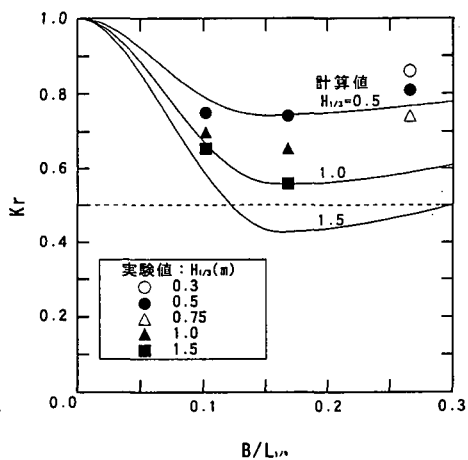
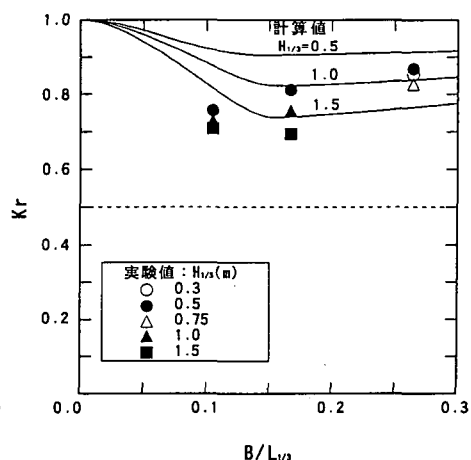
(a) タイプ1 ($\varepsilon = 0.13$)(b) タイプ2 ($\varepsilon = 0.30$)(c) タイプ3 ($\varepsilon = 0.43$)(d) タイプ4 ($\varepsilon = 0.61$)

図-5 開口比の違いによる反射率の変化

が小さくなっているが、このような傾向は従来の直立消波ケーソンの実験結果¹⁾と同様なものである。タイプ1および2のように鋼管杭や鋼管矢板杭の間にH形鋼杭を挿入し開口比 ε を0.1~0.3程度に設定すれば $Kr=0.3\sim 0.6$ を確保することができ、直立消波堤として有効なことがわかる。計算値は実験値の傾向をよく表していることがわかるが、波高の増加に伴う反射率の減少の割合は計算値の方が実験値より大きいようである。

(2) 遮水壁およびスリット部

材断面形状の影響

図-6 (a)~(c)はいずれもスリット壁に遮水壁を装着した場合の結果である。図-6 (a) のタイプ5および(b) のタイプ6はそれぞれ図-5 (b) のタイプ2および(d) のタイプ4に遮水壁を装着したものであるが前者を後者と比較すると、 $B/L_{1/3}=0.11$ および0.17の場合は遮水壁の効果により Kr が0.1~0.2程度減少しており、遮水壁を設けること

によって開口比を小さくすると同様に反射率を低減することができる¹⁾。ただし、 $B/L_{1/3}=0.27$ の場合については Kr の減少はみられない。これは、周期の短い波の場合には水深が深い位置での水粒子の運動が小さいため、底面近くの遮水壁の影響が現れにくくなるためと考えられる。なお、遮水壁の代わりにマウンドを盛り上げて遊水室内水深を遮水壁上端水深と同じにした場合についても実験を行ったが、遮水壁とマウンド盛り上げの効果は同一であった。

図-6 (c) はスリット部材にH形鋼杭を用いたタイプ7の場合であるが、スリット部材に鋼管杭を用いた(b)に示したタイプ6の場合と比較すると、 Kr が約0.1小さくなっている。これは、2.において考察したようにH形鋼杭の場合が鋼管杭よりも抗力係数が大きく、スリット部材による損失が大きいためと考えられる。計算値をみるとH形鋼杭の方が鋼管杭よりも Kr が小さくなる傾向をよく表しているといえる。

(3) スリット部材断面形状を考慮した計算方法の実験値による検討

図-7 は図-5 (a) に示したタイプ1の実験結果と従来の直立消波ケーソンの理論¹⁾による計算値を比較したものである。実験値では遊水室幅・有義波長比 $B/L_{1/3}=0.17$ のとき Kr が最小となっているのに対し、計算値では $B/L=0.08$ で最小となっておりピークの位置が周期の長い波の方へずれており、両者の差が大きいことがわかる。これは、直立消波ケーソンの理論が矩形断面のスリット部材を前提にして導かれているため、鋼管杭やH形鋼杭のような円形やH形断面のスリット部材の場合には誤差が大きくなるためと考えられる。図-5 (a)には2.に述べたスリット部材断面形状の違いを考慮した計算値を示したが、この場合はピークの位置のずれが修正され実験値とよく合っていることがわかる。

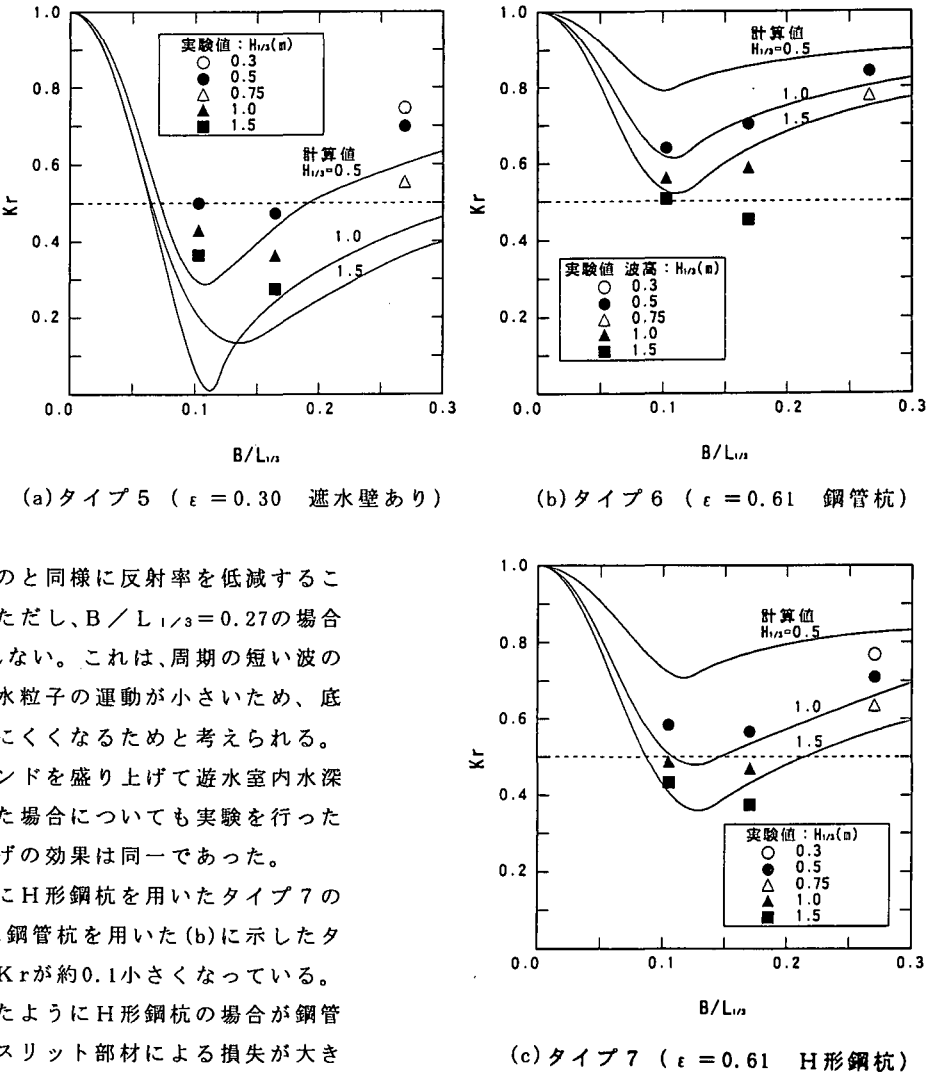


図-6 遮水壁およびスリット部材断面形状の違いによる反射率の比較

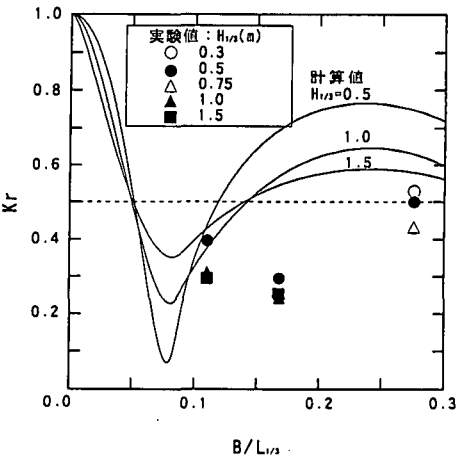


図-7 直立消波ケーソンの理論計算値と実験値の比較 (タイプ1)

図-8 (a)および(b)は全ケースについて反射率 K_r の計算値と実験値の相関を示したものであり、(a)は従来の直立消波ケーソンの理論によるもの、(b)は2. に述べたスリット部材断面形状の違いについて補正した計算方法によるものである。(a)の場合はばらつきが非常に大きい、(b)の場合にはかなり改善され、 K_r の計算値 ± 0.1 の範囲内に全実験値の約70%が納まっている。

このように、スリット部材断面形状の違いが反射率に及ぼす影響は大きく、鋼管杭やH形鋼杭などの矩形と異なる断面形状の場合には式(4)および(5)に示したように、従来の直立消波ケーソンの理論を基にスリット部材の抗力係数や慣性力係数の違いを考慮した補正を行うことによって反射率の算定を行う必要があることがわかる。

5. まとめ

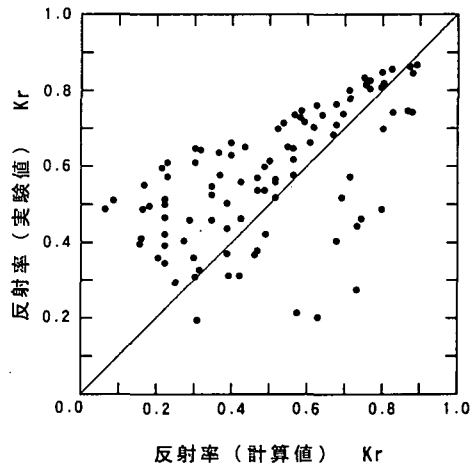
鋼管杭やH形鋼杭などをスリット部材に用いた杭式スリット消波構造物の反射率について模型実験を行うとともに、スリット部材断面形状の違いを考慮した反射率計算方法について検討したが、結果をまとめると次の通りとなる。

- ①鋼管杭やH形鋼杭などをスリット壁とした場合も従来の直立消波ケーソンと同様に遊水室幅・波長比を0.1~0.2にとった場合に反射率が最も小さくなる。
- ②鋼管杭や鋼管矢板杭の間にH形鋼杭を挿入するなどして開口比を0.1~0.3程度に設定することにより反射率を0.3~0.6に低減することが可能である。
- ③遮水壁をスリット壁に装着することによって開口比を小さくした場合と同様な反射率低減効果が得られる。ただし、周期の短い波に対しては遮水壁の効果は小さくなる。
- ④スリット部材がH形鋼杭の場合は鋼管杭の場合より反射率が0.1程度小さくなる傾向があり、部材断面形状の違いが反射率に影響を及ぼすことが明かになった。
- ⑤鋼管杭やH形鋼杭をスリット部材に用いた場合には、従来の直立消波ケーソンの理論式を用いて反射率を計算すると誤差が大きい。直立消波ケーソンの理論にスリット部材の抗力や慣性力についての補正を行うことによって反射率の算定精度を向上させることができる。

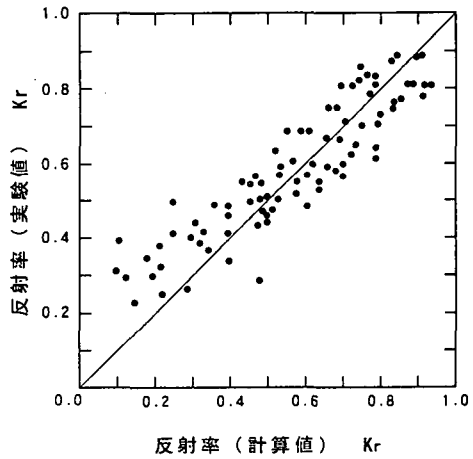
最後に、本研究を実施するにあたり貴重なご助言を頂いた運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室 高橋重雄室長および下迫健一郎研究官に深謝いたします。

参考文献

- 1) 谷本勝利・吉本靖俊：直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究、港湾技術研究所報告、第21巻、第3号、1982、pp.43~77.
- 2) 合田良實 他：不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港湾技研資料、No.248、1976.



(a) 直立消波ケーソンの理論計算値の場合



(b) スリット部材断面形状の違いを考慮した計算値の場合

図-8 反射率の計算値と実験値の相関