

斜面スリットケーソンの水理特性に関する研究

島谷 学* 関本 恒浩*

要 旨

斜面スリットケーソンは、遊水室後壁が斜面によって構成されるスリットケーソンであり、直立スリットケーソンに比べ優位性を持つと考えられる。本研究は、直立スリットケーソンおよび斜面スリットケーソンの両方について、反射率および波高伝達率に関する水理模型実験を実施するとともに、境界積分方程式を用いた数値解析を実施し、斜面スリットケーソンの基本的な消波性能について検討した。その結果、斜面スリットケーソンは、同等の消波性能を有する直立スリットケーソンに比べ、静水面における遊水室幅を狭くできることがわかった。

1. はじめに

直立スリットケーソンは堤体前部にスリット柱の並んだ透過壁と遊水室を有し、これによって消波効果を発揮するケーソンで、近年、岸壁、防波堤、護岸等に用いられることが多くなってきた。直立スリットケーソンは消波ブロックを必要としないため、消波ブロック被覆式ケーソン堤に比べ、消波ブロックの設置に付随するコスト・時間の節約が可能である。しかしながら、要求される消波性能によっては遊水室の幅を広げる必要があり、波浪条件が厳しい海域では堤体幅を大きくせざるを得ない。このため、堤体幅の増加に伴ってマウンドや地盤改良の必要幅も増大し、コストや工程に影響を及ぼすことは想像に容易い。そこで本研究では、図-1に示す斜面スリットケーソンを提案する。そして、斜面スリットケーソンが有すると期待される優位的な機能（消波性能、耐波安定性等）のうち、消波特性について数値計算および水理実験により検証する。

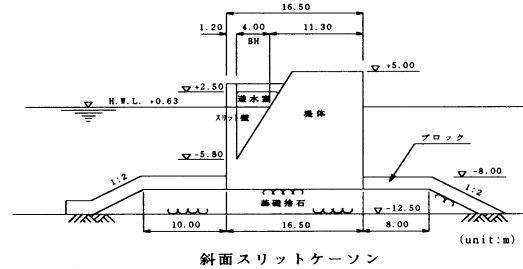
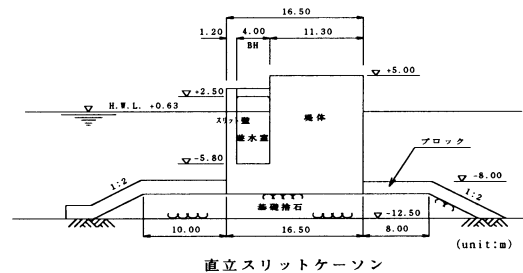


図 - 1 断面図

2. 斜面スリットケーソンの概要

2.1 構造特性

図-1に従来の直立スリットケーソンと斜面スリットケーソンの標準的な断面を示す。斜面スリットケーソンの遊水室は三角形で形成されており、これが構造上の大きな特徴となっている。

2.2 期待される機能

斜面スリットケーソンが直立スリットケーソンに対して有意になると期待される機能を以下にまとめる。

- 1) 堤体斜面部によって遊水室内の波長が短くなるため消波性能が向上し、遊水室幅の縮小が可能となる。
- 2) 斜面に作用する鉛直下向きの波力の効果より、滑動抵抗が増加する。
- 3) 遊水室の広さが減少した分を中詰材に置き換えることができ、堤体重量が増す。

これらの効果によりケーソンの滑動・転倒安定性が向上

するため、堤体幅の縮小が可能となる。このうち本研究では1)の項目に着目し、斜面スリットケーソンおよび直立スリットケーソンの消波特性を水理実験および数値計算によって評価し、比較検討することで斜面スリットケーソンの持つ消波特性の優位性を検証する。

3. 水理実験

3.1 実験水槽

実験水槽は図-2に示すような、長さ50m、幅0.6m、高さ1.2mのステンレス製一部両面ガラス張り不規則波造波水路を用いた。水槽の一端にはピストン式造波装置が、もう一端には消波材が設置されている。

* 技術研究所

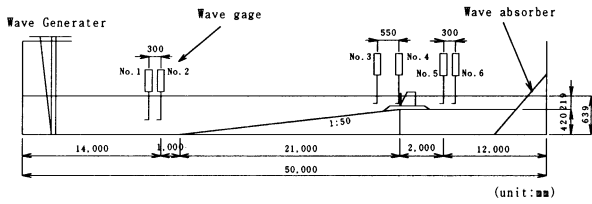


図 - 2 実験装置

3.2 実験項目と内容

本研究においては、水理特性として反射率および伝達率の計測を行った。計測には容量式波高計を用いた。波高計の設置位置は図 - 2 に示した通りである。なお、データ取得サンプリング周波数は200Hzとし、計測時間は規則波については造波開始と同時に120s、不規則波については造波開始後1分後より300sとした。実験ケースを表 - 1 に示す。

表 - 1 実験ケース一覧

実験項目		波浪の種類	波高(m)	周期(s)	
波浪条件	反射率測定実験	常時波浪	2.0	6.0	
			2.0	8.0	
			2.0	10.0	
			2.0	12.0	
	伝達率測定実験	設計波	4.0	12.0	
			6.6	12.0	
ケース名	堤体形状	開口率	スリット厚(m)	遊水室幅(m)	
構造条件	Case1	斜面堤	0.2	1.2	4.0
	Case2	斜面堤	0.3	1.2	4.0
	Case3	斜面堤	0.2	1.5	4.0
	Case4	斜面堤	0.2	1.2	3.0
	Case5	斜面堤	0.2	1.2	5.0
	Case6	直立堤	0.3	1.2	4.0
	Case7	直立堤	0.2	1.2	4.0

反射率の測定においては、入射波は規則波及び不規則波を用いた。図 - 2 に示す波高計No.1, 2を用いて模型堤体設置後における一様水深部の水位変動を測定し、合田ら¹⁾による入射波分離推定法を用いて水槽内の合成波を入射波成分と反射波成分に分離することで反射率を算定した。そして、規則波実験で得られた結果と数値計算による結果を比較することにより数値計算法の検証を行った。同時に、不規則波実験結果と数値計算結果を比較することで、現地波浪を対象とした場合でも反射率の算定が可能であるか検討を行った。

構造物背後への波の伝達率は、波の持つ不規則性に大きく影響されるためここでは不規則波を用いた。伝達率の測定は図 - 2 に示す波高計No.5, 6を用いた。伝達率は模型堤体設置前における入射波分離後の入射波高と模型堤体設置後における有義波高との比をとることで算出した。模型堤体設置後の有義波高の代表値は波高計No.5、

6で得たデータの平均値とした。また、計測は同一条件の実験を3回づつ繰り返して行い、その平均値を伝達率の代表値とした。

4. 数値解析による検討

4.1 数値解析法の概要

スリットケーソンの水理特性の数値計算は、境界積分方程式法によって行った。以下に、境界積分方程式法の波動場への適用とスリットのモデル化について説明する。まず、Laplaceの方程式に対する積分方程式は次式のように表される。

$$\frac{C}{2\pi} \phi(x, z) = \int_{\Gamma} \left[\phi^* \frac{\partial \phi}{\partial n} - \phi \frac{\partial \phi^*}{\partial n} \right] ds \quad (1)$$

ただし、 Γ は領域の境界、 C は (x, z) における内部角、 $\frac{\partial}{\partial n}$ は境界外向き法線方向微分である。波の入射角を考慮した場合の Γ は、 y 軸を堤体法線方向にとり、 ϕ を速度ポテンシャルとして次式で定義される。

$$\Phi(x, y, z; t) = \phi(x, z) \exp[i(ky \sin \alpha - \omega t)] \quad (2)$$

ここで、 k は波数、 ω は角周波数、 α は入射角である。また、 ϕ^* はHelmholtz方程式のGreen関数で以下のようになる。

$$\phi^* = \frac{1}{2\pi} K_0(kr \sin \alpha) \quad (3)$$

ここで、 K_0 は第2種0次変形Bessel関数である。

したがって、式(1)の積分方程式を以下に示す境界条件のもとで解くことにより、ケーソン周辺の波の変形や作用波圧が計算できる。

まず、自由表面における境界条件は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \phi, \quad z=0 \quad (4)$$

であり、水深を h とすると水底における境界条件は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0, \quad z=-h \quad (5)$$

となる。また、ケーソン表面の境界条件は以下のようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (6)$$

沖側無限遠点では、入射波と反射波のみ存在するいわ

ゆる Sommerfeld の放射条件を満足する必要があり、

$$\lim_{kx \rightarrow \infty} \left(\pm \frac{\partial}{\partial x} ik \right) \left(\phi - \phi_I \right) = 0 \quad (7)$$

$$\phi_I = -\frac{igA \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} e^{ikx} \quad (8)$$

である。また、入波境界では、

$$\phi_- = A_- \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-ikx} + \phi_I \quad (9)$$

である。ただし、 g は重力の加速度、 c は入射波の速度ポテンシャル、 A は入射波の振幅、 A_- は反射波の振幅を表す。

スリット周辺の波浪場解析を行うために、ここでは領域分割法を用い、領域の接合条件として角野ら²⁾の漸近展開接合法を用いてモデル化を行っている。“Blockage Coefficient”を C とすると、圧力と流速の連続条件よりスリット部の境界条件は次のように表される。

$$\phi_1 - \phi_2 = 2C \frac{\partial \phi_1}{\partial n} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_2}{\partial n} \quad (11)$$

なお、

$$C = 0 \quad (12)$$

とすれば、スリットのない状態を考慮できる。

角野ら²⁾は“Blockage Coefficient”を複素数として扱うことにより、損失を考慮できるようにしている。すなわち、

$$C = C_1 + iC_2 \quad (13)$$

係数 C_1 によってスリットは加速度に比例する力、すなわち慣性力を受けることになり、流れの場においては慣性抵抗として作用する。したがって、 C_1 は慣性力係数に相当するものとなる。角野ら³⁾によれば矩形のスリットに対しては、

$$\frac{C_1}{h} = \frac{b}{2h} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right) + \frac{1}{\pi h} \left[1 + \log 4\varepsilon + \frac{1}{3}\varepsilon^2 + \frac{281}{180}\varepsilon^4 \right] \quad (14)$$

によって C_1 を算出することができる。ここで、 h は水深、 D はスリット間隔、 $2a$ はスリット幅であり、 ε はスリットによる空隙率を表す。

また、 C_2 は流速に比例する抵抗係数を表し、これによってスリットに対して抗力を生じ、エネルギー損失についても考慮が可能となる。ただし、抗力は本来流速の 2 乗に

比例するものであるのに対し、ここで流速に比例する線形化された抵抗となっており、その意味で C_2 は線形抵抗係数と呼ばれる。

スリットの損失を精度良く求めるためには、係数 C_2 を適切に評価することが必要となる。係数 C_2 は流速に比例する損失を表す係数であるため、流速の 2 乗に比例するエネルギーの損失を表す損失係数 f (通常の損失係数) と関連づけることが望ましい。そこで、ローレンツの等価仕事の原理に基づいて決定する。等価仕事の原理は波一周期当たりの線形抵抗による仕事と実際の抵抗による損失が等しいとして導かれるものであり、次式によって表される。

$$\frac{C_2}{h} = \frac{8\pi}{3} \frac{f}{\omega \varepsilon^2} \int_{-d}^0 (\partial \phi / \partial n)^3 dx / \int_{-d}^0 (\partial \phi / \partial n)^2 dx \quad (15)$$

ただし、 ε はスリットの空隙率である。ここで、線形抵抗係数 C_2 と損失係数 f の関係は流速場が変化すれば、それに伴って変化することが式(15)より理解できる。なお、実際に線形抵抗係数の見積の際にはスリット部の流速は、計算値より求めることとした。ここで、先に述べたようにスリット部の流速は損失係数 f によって変化するため、与えられた f に対して、初期値として $C_2=0$ を与え、式(13)によって所定の誤差になるまで逐次繰り返し計算を行って C_2 を確定した。

図 - 3 に計算に用いた領域と境界条件を示す。

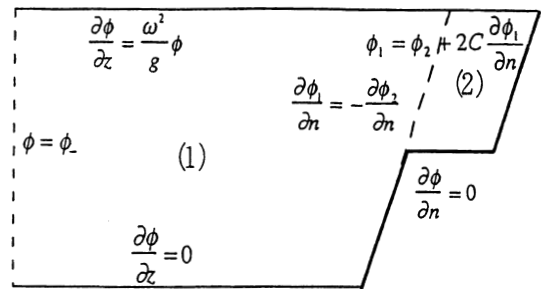


図 - 3 領域と境界条件

4. 2 既往の研究成果との比較

4.1 の理論を基に導き出される解と、既往の研究成果とを比較することにより、境界積分方程式法による解析 (ここでは反射率の算定) の妥当性を検証した。検証に用いた実験データは谷本・吉本⁴⁾によるものである。検証に用いた構造物の断面を図 - 4 に示す。

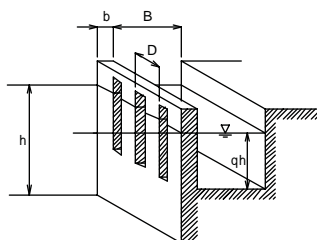


図 - 4 検証に用いた構造物

また、実験データと境界積分方程式法による数値計算結果を比較したものを図 - 5 に示す。横軸は水深波長比 h/L 、縦軸は反射率 K_r を表しており、構造条件も図 - 5 に示している。構造物形状の各諸元は波形勾配 H/L を変化させた3ケースを比較したが、どのケースにおいても比較的良好に合致しており、境界積分方程式法による解析が妥当であることが確認できた。

また、ここで用いた損失係数 f の値を今後の計算でも用いるものとする。

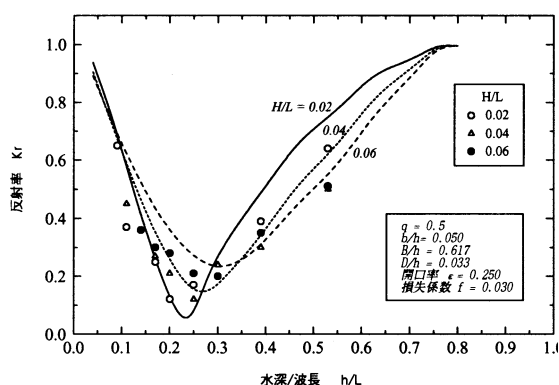


図 - 5 実験データと計算結果の比較

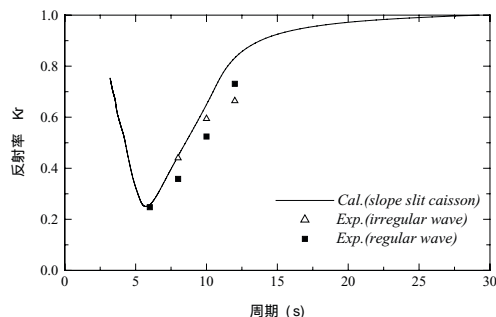
5. 水理実験結果

5.1 反射率実験結果

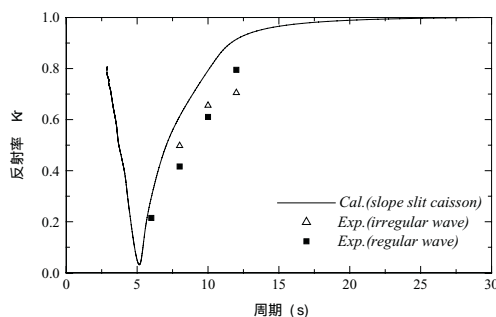
斜面スリットケーソン及び直立スリットケーソンの消波特性を表したものを図 - 6 (1) (2) に示す。数値計算結果も併せて示す。スリットケーソンの消波特性は周期依存性が強いので、横軸を入射波の周期で設定した。また、今回の実験では反射率が極小値となる周期より短い周期帯での実験データが取得できなかった。本実験では、実験条件において最小周期を6.0sと設定しているが、これより周期が短くなると、造波板前面において波の非線形性により変調不安定となり、安定した波形が得られなかったためである。したがって、反射率測定実験の波浪条件は周期6.0 ~ 12.0sで与えており、ケースによっては極

小値を捉えていないものもある。

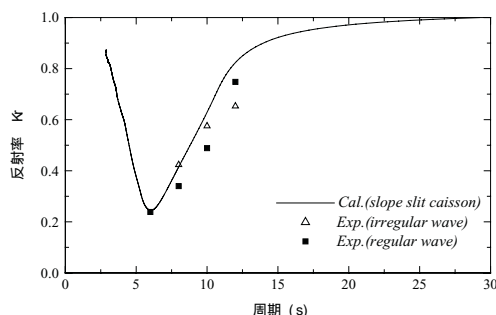
実験結果と数値計算結果を比較すると、どのケースにおいても比較的良好に一致しているのが確認できる。



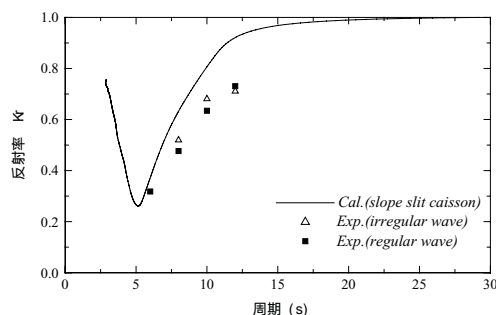
(1) Case1 (斜面堤, 基準)



(2) Case2 (斜面堤, 開口率=0.3)

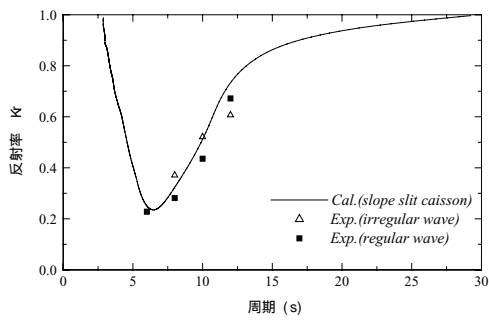


(3) Case3 (斜面堤, スリット厚=1.5m)

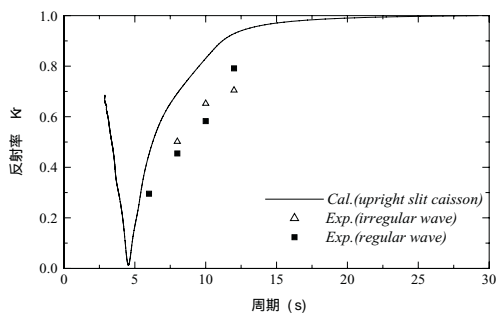


(4) Case4 (斜面堤, 遊水室幅=3.0m)

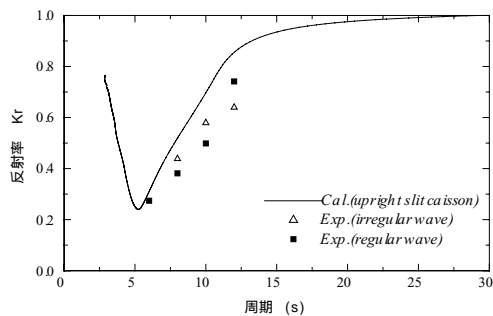
図 - 6 (1) 消波特性 1



(5) Case5 (斜面堤, 遊水室幅=5.0m)



(6) Case6 (直立堤, 開口率Y=0.3)



(7) Case7 (斜面堤, 開口率=0.2)

図 - 6 (2) 消波特性 2

ただし、実験結果の方がやや小さくなる傾向が見られる。これは反射率を算定するための波高計が反射境界である堤体位置より22mも離れており、実験水路の側壁摩擦の影響が無視できなくなっていることと、数値計算ではマウンド部の境界を反射境界として扱っているのに対し、実験では入射波のエネルギーの一部が越波および堤体下部のマウンド層から透過によって、堤体背後に伝達しているためと考えられる。

また、数値計算は規則波を対象としたものであるが、不規則波であっても規則波と同条件で有義値として諸元を与えてやれば、反射率の算定が可能であることが実験結果から確認できる。

構造条件に着目すると、開口率が0.3のケースと開口率が0.2のケースでは消波特性の様相が若干異なる。開口率が0.3のケースでは極小値が小さくなるかわりに、消波可能周期の幅が著しく狭くなる。

また、遊水室幅を変化させたCase4、5に着目すると、遊水室幅が狭いCase4 (BH=3.0m) よりも遊水室幅が広いCase5 (BH=5.0m) の方が消波可能周期はやや長周期寄りになり、消波周期帯の幅も広くなる。これは、周期依存性の強いスリットケーソンの消波機能の特徴で、遊水室幅を広く設定することが消波機能の向上に繋がることを示唆している。しかしながら、斜面スリットケーソンは遊水室幅を広く設定すると、遊水室後壁斜面が波の進行方向に対して開くような形になり、越波量が増加する危険があるのと同時に、堤体重量を確保するために堤体幅を広げなければならない。したがって、実際には経済性も含め適切な遊水室幅を設定しなければならない。

また、斜面スリットケーソンが持つ消波機能の優位性を検証するため、Case1、Case7及びCase1において遊水室幅BHを4.0mから3.5mに0.5m縮小させたもの計3ケースについて、数値計算によって消波特性の比較を行った。それぞれの消波特性を図-7に示す。

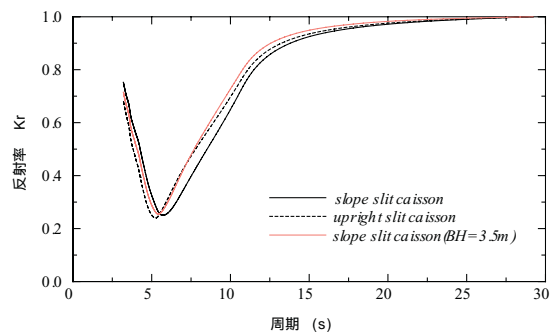


図 - 7 消波特性比較

斜面スリットケーソンは斜面部において入射波の波長が短くなるため、同じ遊水室幅を持つ直立スリットケーソンに比べ消波機能が優れている。これは図からも明らかで、遊水室幅を減少させても直立スリットケーソンと同等の消波効果を発揮することが確認できた。

5.2 伝達率実験結果

斜面スリットケーソン及び直立スリットケーソンの伝達率実験結果を図-8に示す。横軸は相対天端高(天端高/入射波高)としている。実線はd/h=0.7(d:マウンド水深、h:防波堤前面水深)の時の混成防波堤の波高伝達率を表している。

斜面スリットケーソンの伝達率は、その構造特性から推測できるように直立スリットケーソンよりやや大きく

なる傾向が見られる。ただし、スリット壁及び遊水室による消波効果により、斜面スリットケーソンの伝達率は直立スリットケーソンに対して平均で約1.2倍と、斜面堤としては堤体背後への波の伝達が抑えられており、堤体直立壁を斜面壁にすることによって伝達率が著しく増大することはない。

ちなみに、谷本・木村⁵⁾によると、台形ケーソンの波高伝達率について実験した結果、垂線からの斜面角度が20度、相対天端高が0.5～0.7の実験ケースにおいて、直立堤の波高伝達率との比で1.31倍である。この実験ケースに最も近い本実験ケースでは、斜面角度が32度、相対天端高が0.726のケースにおいて、直立堤の波高伝達率との比で1.06～1.14倍であった。

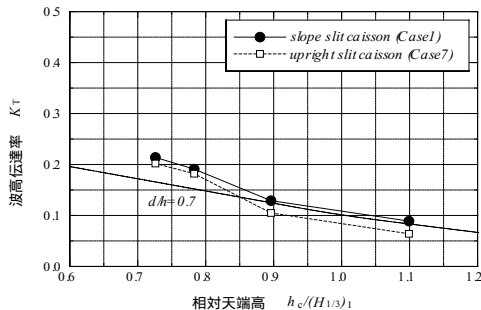


図 - 8 波高伝達率

6. あとがき

通常のスリットケーソンに比べ、消波性能及び耐波安定性等で優位性を持つと考えられる斜面スリットケーソンについて、水理模型実験および数値解析により水理的特性を検討した。その結果、斜面スリットケーソンは、同等の消波性能を有する直立スリットケーソンに比べ、静水面における遊水室幅を狭くできることが認められた。また、境界積分方程式を用いる方法でスリットケーソンの反射特性を精度良く推定できることが確認できた。

今後は、波力特性について詳細に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 合田良実、鈴木康正、岸良安治、菊池 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法、港湾技術研究所資料、No.248、1976
- 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 - スリットにおけるエネルギー損失量の評価 -、第33回海岸工学講演会論文集、pp.407-411、1986
- 3) 角野昇八、小田一紀：任意断面柱体列による波の反射率および透過率の境界値問題解析、土木学会論文集、第369号 /II-5、pp.213-222、1986
- 4) 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、pp.43-77、1982
- 5) 谷本勝利、木村克俊：台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究、港湾技術研究所資料、No.528、1985