

沖合い防波堤用のスリットケーソンの開発

DEVELOPMENT OF SLIT CAISSONS FOR OFFSHORE BREAKWATER

坂本明¹・大友正悦¹・中野渡秀一¹・関信郎²・長谷川巖³・鈴木智浩⁴

Akira SAKAMOTO, Syouetsu OOTOMO, Syuuichi NAKANOWATARI, Nobuo SEKI,
Iwao HASEGAWA and Tomohiro SUZUKI

¹ 東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所 (〒983-0852 宮城県仙台市宮城野区榴岡 5-1-35)

² 正会員 工修 東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所 (〒983-0852 仙台市宮城野区榴岡 5-1-35)

³ 正会員 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 水理実験部 (〒221-0052 東京都台東区北上野 2-6-4)

⁴ 正会員 工修 株式会社エコー 沿岸デザイン本部 水理実験部 (〒221-0052 台東区北上野 2-6-4)

It is common to cover a vertical part of a composite breakwater with wave-dissipating blocks when the breakwater is constructed in deepwater areas. However in these areas, the construction cost becomes quite expensive due to its volume of the structure. Therefore, we attempt to develop a new type of breakwater without wave-dissipating blocks in order to reduce the cost. In this paper, two-dimensional hydraulic model experiments are carried out to clarify the hydraulic characteristics of the reflected waves and transmitted waves, using the new type of breakwater. Two types of the structure are applied: "Sloping top caisson breakwater with sloped slit wall" and "Sloping top caisson breakwater with vertical slit wall". The angle of the sloping caisson and slit wall is changed in several ways. The result of both experiments on reflected waves and transmitted waves is satisfied the chosen criteria.

Key Words : slit caisson breakwater, sloping top caisson breakwater, reflected waves, transmitted waves, hydraulic experiment

1. 研究概要

(1) 研究目的と構造選定

港湾の大型化に伴って、従来よりも沖合いの大水深海域に防波堤を建設するケースが増えている。沖合いの防波堤に一般的に用いられている消波ブロック被覆式混成堤は、大水深海域において防波堤断面が大きくなるため建設コストが高くなる。上部斜面堤としてケーソン幅を狭くするとともに、消波工の天端高を低くして経済性の向上が図られるようになっているが、十分にコストが縮減されているとは言い切れない。そこで、建設コストのさらなる縮減を目的に、大波浪海域に適用可能な消波ブロックなしの防波堤構造の開発を試みたものである。

消波ブロックなしで反射波高や伝達波高を抑制する方法として、スリット壁と遊水室を有する消波ケーソン堤の構造があり、防波堤の安定性を確保する方法として、上部斜面構造で波力の位相差や鉛直下向き波力を利用する方法がある(例えば、高橋¹⁾)。そこで消波ケーソンと上部斜面を組み合わせる構造を考えた。この様な構造の研究事例として関口・窪内²⁾や本田ら³⁾があり、反射波の抑制と波力特性向上の可能性が示されているけれども、

斜面角度や遊水幅、スリットの開口率などを変更した場合の水理特性については、細かく述べられていない。そこで二次元水理模型実験を実施して反射波特性と伝達波特性を調べた。

(2) 実験条件

対象とした構造様式は図-1に示す2種類である。(a)はスリット壁と遊水室後壁を同じ角度で傾斜させる構造で、(b)はスリット壁を直立とし遊水室後壁だけを傾斜させる構造である。両構造とも、傾斜角を45度、60度、75度、90度(直立)の4種類、斜面下端の遊水幅を5.0m、7.5m、10.0mの3種類、開口率を0.2、0.3、0.4の3種類について実施した。斜面下端高はD.L. -5.0mの1種類である。水理模型実験は、長さ38m、幅0.5m、高さ1.5mの造波水路で実施した。東北地方の太平洋側の港湾を想定し、防波堤設置位置の地盤高はD.L. -21.0m、マウンド天端高はD.L. -14.0m、設計波は防波堤設置位置において $H_{1/3}=8.3\text{m}$ で $T_{1/3}=13.0\text{s}$ 、消波対象波は $H_{1/3}=1.5\text{m}$ で $T_{1/3}$ は6.0s、8.0s、10.0sとした。実験は消波対象波を作用させる反射波実験と、設計波を作用させる伝達波実験の2種類を実施した。実験潮位は反射波実験でD.L. +0.8m、伝達波実験で

D.L. +1.5m である。スリット壁前後の水位差によりスリット部で発生する渦でエネルギーが消費される（高橋¹⁾）現象を再現するために、実験模型をできるだけ大きくする必要があるので、そこで反射波実験の模型縮尺は1/16とし、マウンドを作らずに D.L. -14.0m より浅い部分のみを実験水路に再現した。伝達波実験は設計波を作用させるので、海底勾配やマウンドによって波浪が大きく変形する。そこで伝達波実験は模型縮尺を1/50として1/50の海底勾配とマウンドも再現した。

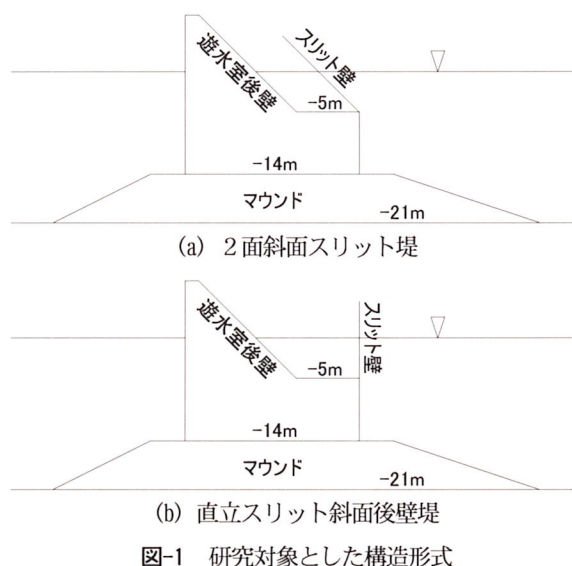


図-1 研究対象とした構造形式

(3) 実験方法及び解析方法

反射波実験、伝達波実験ともに不規則波を約250波作用させる実験を行った。反射波実験では防波堤法線の1波長沖側に設置した2本の容量式波高計のデータを使用して、合田ら⁴⁾の方法で反射率の計算を行うと共に、スリット壁の前後にもスリット壁に沿わせて容量式波高計を設置し、遡上高や水位差の解析を行った。伝達波実験では防波堤法線の背後50m、100m、150m 及び200m の位置に容量式波高計を設置して水位変動を測定し、4地点の波高の平均値を伝達波高とした。なお、防波堤法線の200m 背後位置には2本の容量式波高計を設置して水位変動の測定を行い、合田ら⁴⁾の方法で入・反射波の分離計算を行って水路終端の反射率を求め、反射波の影響を除去した伝達波高 H_t を求めた。この伝達波高を防波堤設置位置の進行波としての波高 H_i で割って、波高伝達率 K_T とした。

2. 反射波実験結果

(1) 既往研究との比較

今回の実験において実施した斜面起立角度90度（直立消波）の反射率は、図-2に示すとおりである。横軸に適用した B_{wl} は静止水面高さでの遊水幅、 L はマウンド天端水深（14.8m）における波長である。反射率算出方法は前述のとおりである。今回実験の結果は谷本ら⁵⁾の研究結果とほぼ一致しているけれども、反射率の極小値を生

じる相対遊水幅 B_{wl}/L が若干異なる。その理由は、今回実験がスリットケーソンであるのに対し、谷本ら⁵⁾は多孔壁式遊水堤であるという構造の違いが考えられる。

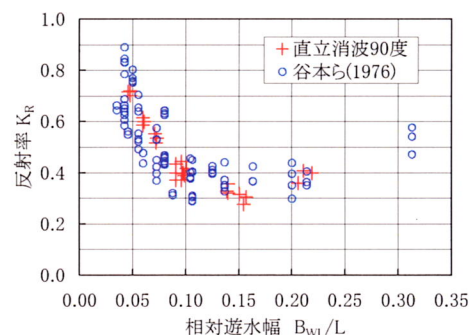
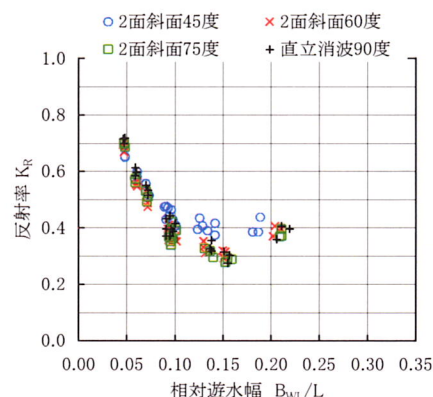


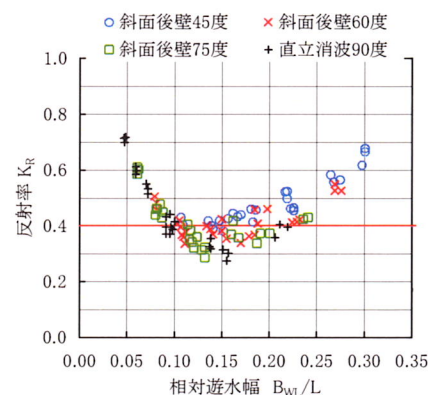
図-2 今回実験と既往研究の比較

(2) 反射率解析結果

開口率0.3の条件で遊水幅を3種類、入射波周期を3種類、斜面起立角度を4種類に変更した実験の反射率解析結果は図-3のとおりである。(a)の2面斜面は斜面起立角度45度の反射率極小値が大きく、60度から90度の結果はほぼ同じである。したがって開口率0.3ではスリット壁と遊水室後壁を傾斜させる効果はない。(b)の斜面後壁は起立角度が大きいほど、すなわち直立に近いほど反射率が小さい。ただし、75度と90度はほぼ同じである。このような結果になった要因は(3)で検討する。



(a) 2面斜面スリット堤



(b) 直立スリット斜面後壁堤

図-3 開口率0.3の反射波実験結果

2面斜面は遊水幅10m, 斜面後壁は遊水幅7.5m で, 開口率と斜面起立角度を変更した実験の反射率解析結果は図-4のとおりである. それぞれの遊水幅は, 消波対象としている6~10sの波長に対して反射率が小さくなる条件を選定した. 2面斜面は(a)のように斜面起立角度が小さいと開口率変更による反射率の違いが大きく, (b), (c)と斜面を直立に近づけると開口率変更の影響が小さくなる. (d)から(g)に示す斜面後壁では, 斜面起立角度に関係なく開口率変更が反射率に与える影響は小さい.

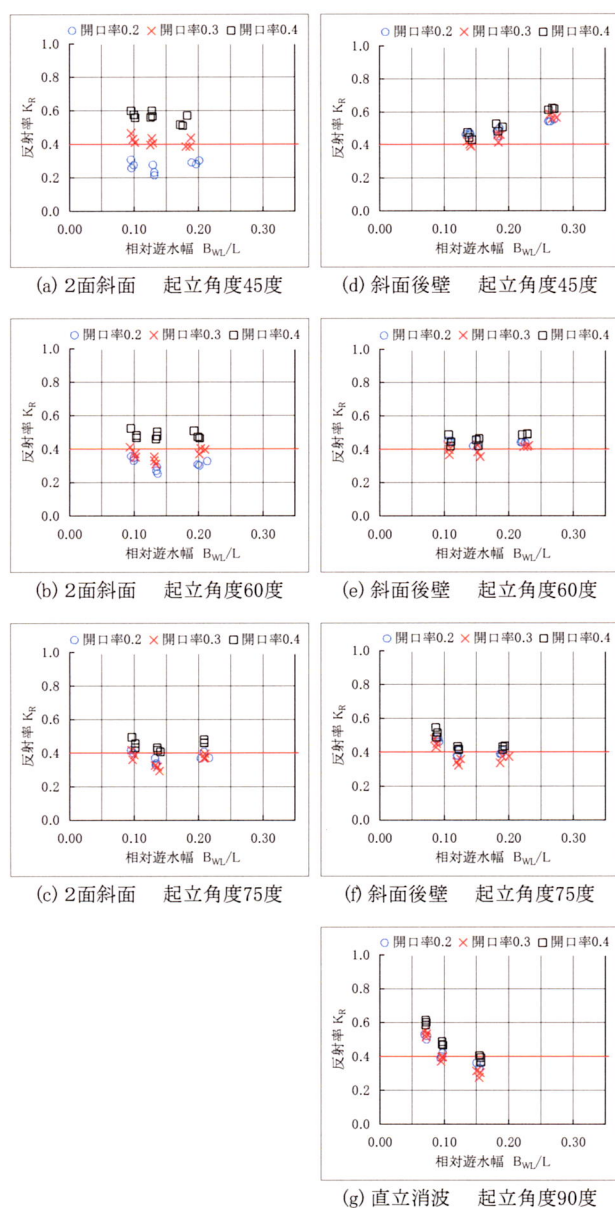


図-4 開口率を変更した反射波実験結果

(3) 反射率の違いの要因分析

2面斜面は斜面起立角度が小さいほどスリット壁の遡上高が高い現象が, 斜面後壁では斜面起立角度が小さいほど後壁の遡上高が高い現象が認められた. スリット壁の遡上高とスリット壁前後の水位差との関係は図-5のとおりである. 遡上高は静止水面よりも上側の片振幅の1波ごとの最大値を求めた後に, 上位1/3の平均値 (いわゆる

る有義値) を計算して鉛直高さに換算した. 水位差はスリット壁前面の水位から同時刻のスリット壁背面の水位を差し引いた時間波形をつくり, 1波ごとの両振幅を求めた後に上位1/3の平均値を計算して鉛直高さに換算した. 2面斜面は起立角度が小さいほど遡上高と水位差が大きい結果が, 観察どおりに得られている. 斜面後壁は起立角度が小さいほど遡上高と水位差が小さくなっている. 斜面後壁で起立角度を小さくすると, 後壁上の水位変化が大きくなるけれども, スリット壁の位置は腹の状態水位変化が小さくなったものである. その結果, 2面斜面の遡上高と水位差は直立消波より大きく, 斜面後壁では直立消波より小さくなった.

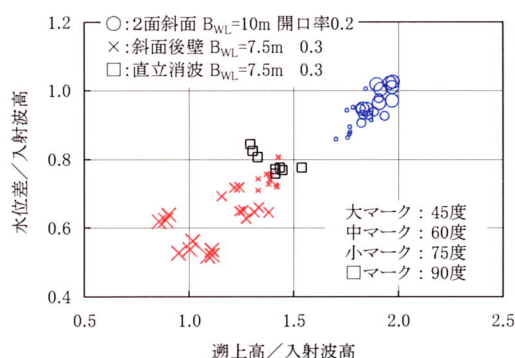


図-5 遡上高と水位差の解析結果 (角度変更)

開口率を変更した実験の遡上高と反射率は図-6のとおりである. 2面斜面の45度は開口率変更による遡上高と水位差の違いが大きい. 開口率を小さくすると遡上高がより高くなるとともに, 遊水室内に入る水量が減ってスリット壁背後の水位変化が小さくなるので, スリット壁前後の水位差が大きくなったものである. 水位差が大きくなるとスリットを通過する流速及び渦が大きくなるので, 渦によるエネルギー消費により反射波のエネルギーが小さくなって反射率が小さくなる. この結果は図-4に示した反射率の結果と一致している.

斜面後壁の75度のスリット壁前面遡上高は直立消波とほぼ同じであるけれども, 水位差は直立消波が大きい. これは, 斜面後壁ではスリット壁背面位置が腹となって水位変化が小さくなり, その影響はスリット壁背面ほど大きいのである.

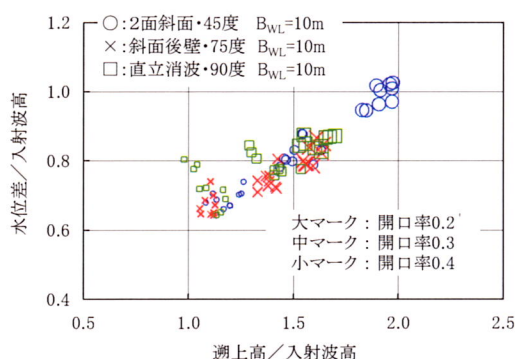


図-6 遡上高と水位差の解析結果 (開口率変更)

図-7はスリット壁前後の水位をデータ計測個数だけ描いたグラフである。横に分布が広いと斜面を遡上し易く、縦に分布が広いとスリット壁を波が透過し易いことになる。2面斜面では(a), (b), (c)と開口率を大きくするにしたがって、前面水位と背面水位の分布が1:1に近付き、スリット壁前後の水位差が小さくなる。図-3において2面斜面でスリット壁と遊水室後壁を傾斜させる効果が得られなかったのは、開口率0.3では図-7(b)のように水位差が小さいためである。図-7(d)から(f)の斜面後壁は2面斜面より遡上が小さい。斜面後壁で(d), (e), (f)と起立角度を大きくすると、横の分布幅は変わらず縦の分布幅が広がる。つまり起立角度が大きいほどスリット壁背面の水位変化が大きくなり、スリット壁前後の水位差が大きくなる。図-3において斜面後壁では起立角度が大きいほど反射率が小さかったのはこのためである。

2面斜面は、スリット壁前面の水位変化が大きく背面の水位変化が小さい条件でスリット壁前後の水位差が大きくなり、反射率が低下する。斜面後壁はスリット壁背面の水位変化の大きい条件でスリット壁前後の水位差が大きくなり、反射率が低下する。このような現象の違いがあるので、最適なケーソン条件も、2面斜面は起立角度と開口率が小さい条件、斜面後壁は起立角度と開口率が大きい条件と言う違いがある。

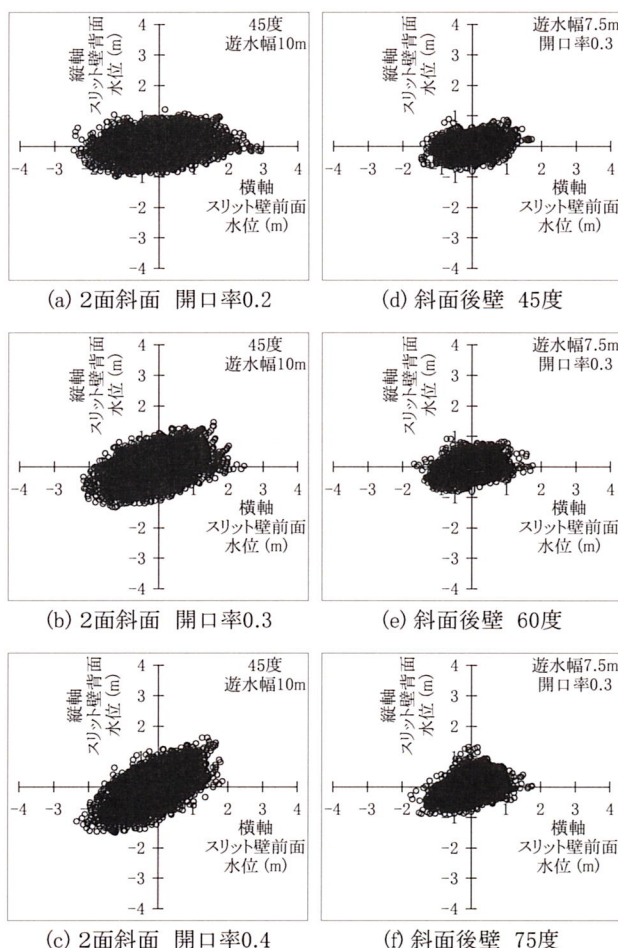
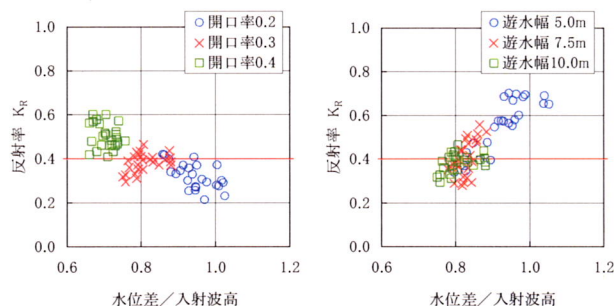


図-7 スリット壁前後の水位計測結果 ($T_{1/3}=8s$)

2面斜面の同一遊水幅で開口率を変更した場合の、スリット壁前後の水位差と反射率の関係は、図-8(a)のとおりである。この条件では、事前の予測どおりスリット壁前後の水位差が大きいと反射率が小さくなる結果が得られた。しかし同一開口率で遊水幅を変更した図-8(b)では、水位差が大きくなっても反射率が小さくならなかった。これは遊水室内における入・反射波の位相干渉のような現象も、反射率に影響するためであると考えられる。



(a) 2面斜面 遊水幅10m (b) 2面斜面 開口率0.3

図-8 スリット壁前後の水位差と反射率の関係

(4) 2面斜面と斜面後壁の反射率に対する効果

斜面起立角度、遊水幅、開口率を変更した実験により、2面斜面は斜面起立角度45度、遊水幅10m、開口率0.2が、斜面後壁は75度、7.5m、0.3が、反射率特性の良い条件であることがわかった。これらの条件の反射率と相対遊水幅の関係をグラフ化すると図-9のとおりである。2面斜面は直立消波と比べて反射率の極小値を小さくできるほかに、直立消波ケーソンよりも反射率を抑制できる波長の幅が広い特長がある。斜面後壁は遊水室後壁の角度を直角に近づけるほど反射率が小さくなったので、15度刻みの角度では75度が最適条件となった。斜面後壁75度の反射率は直立消波とほぼ同じである。

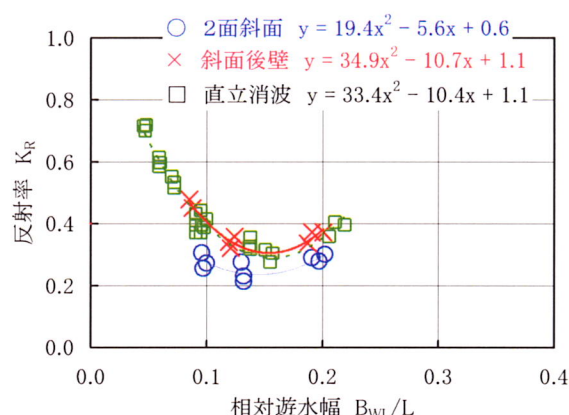


図-9 反射率の比較

反射率抑制効果が高い2面斜面の開口率0.2について、斜面起立角度と反射率の関係を整理すると図-10のとおりである。実験を行った45度から90度の範囲では、45度で反射率が最も小さくなる。75度の反射率は90度とほぼ同じである。

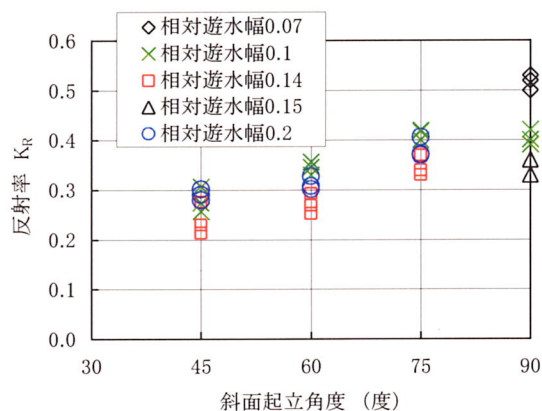
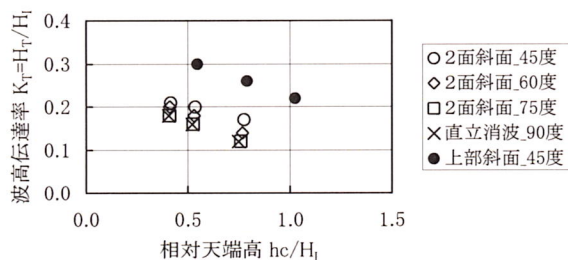


図-10 反射率の比較

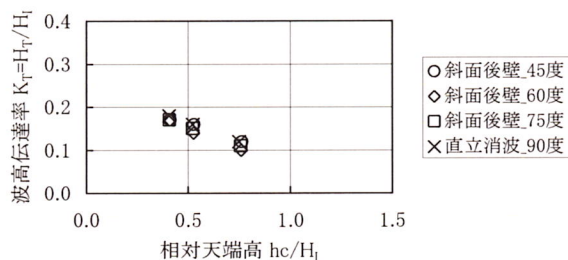
3. 伝達波実験結果

(1) 伝達率解析結果

反射波実験の結果から遊水幅と開口率を、2面斜面は10mと0.2、斜面後壁は7.5mと0.3に限定し、 $H_{1/3}=8.3$ mで $T_{1/3}=13.0$ sの設計波を作用させて波高伝達率を調べた結果は図-11のとおりである。波高伝達率算出方法は前述のとおりである。図の横軸に使用した hc は静止水面上の遊水室後壁（上部工を含む）の高さであり、 H_1 は防波堤設置位置の進行波としての波高である。なお、スリット壁の高さは静止水面上に3.0mとした。



(a) 2面斜面と直立消波および上部斜面堤



(b) 斜面後壁と直立消波および上部斜面堤

図-11 波高伝達率・相対天端高グラフ

図-11(a)の2面斜面は斜面起立角度が小さいほど波高伝達率が高い。ただし75度は直立消波とほぼ同じである。起立角度が小さいほど伝達率が大きくなったのは、角度が小さいとスリット壁及び遊水室後壁を遡上しやすくなるためである。上部斜面堤は hc/H_1 が1.0の条件で波

高伝達率が0.2程度になることが知られている（例えば、高橋¹⁾）。2面斜面の波高伝達率はそれと同等であると予測していたが、予測に反して波高伝達率が小さかった。確認のためにスリット壁と遊水室がない、通常の上部斜面堤の実験を実施したところ、図-11(a)に●印で示すように $hc/H_1=1$ で伝達率がほぼ0.2となる結果が得られた。したがって、波高伝達率が想定以上に小さかったことは、実験手法の間違いによるものではない。図-11(b)の斜面後壁は後壁の起立角度を変更しても、波高伝達率の差がほとんど現れなかった。斜面後壁の波高伝達率が2面斜面よりやや小さいのは、2面斜面のスリット壁の遡上の影響が現れたものである。

波高伝達率が0.2となる相対天端高は、2面斜面の45度は0.54、60度は0.41、75度と90度は0.3である。斜面後壁は45度から90度の結果がほぼ同じで、波高伝達率が0.2となる相対天端高は0.3である。開口率²⁾は2面斜面の60度で波高伝達率0.1を満足するために、相対天端高1.2を必要としているのに対し、今回実験の60度の結果では相対天端高1.0でよい。

(2) 伝達率が小さい要因の分析

波高伝達率が予想外に小さかったので、波作用状況を注意深く観察したところ、スリット壁を乗り越えた波が遊水室後壁に衝突することによって、波のエネルギーが弱まっている現象が見られた（写真-1）。消波対象波の6～10sというスリットケーソンとしては波長の長い波に対応するため、遊水幅を2面斜面で10m、斜面後壁で7.5mと大きくしたので、このような現象になったものと考えた。そこで、遊水幅を小さくした実験を実施したところ、遊水室後壁に衝突しないで波が遊水室後壁を乗り越える頻度が高まった。その結果、図-12に示すように遊水幅の小さい条件で波高伝達率が大きくなった。したがって、遊水幅を大きくすると堤体幅を広くしなければならないけれども、天端高は低くできることがわかった。ただしスリット壁を越波した波が遊水室後壁に衝突するので、遊水室後壁の設計に注意が必要である。

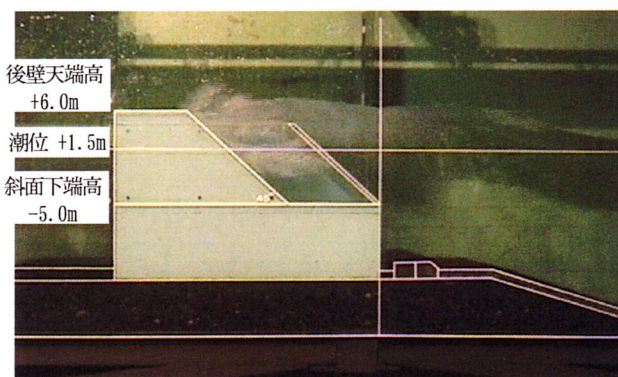


写真-1 遊水室後壁への波の衝突状況（2面斜面，45度）

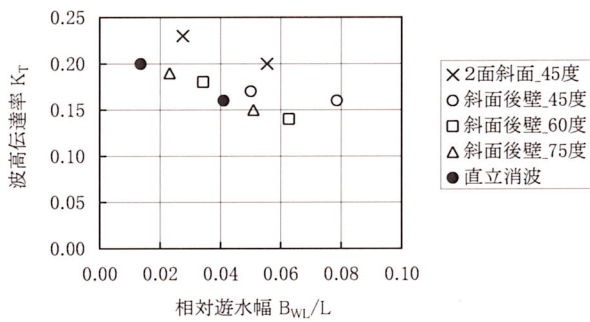


図-12 波高伝達率・相対遊水幅グラフ

4. まとめ

(1)研究成果

- ① 様々な条件で実験を行ったこと、反射率と伝達率の評価に限定したこと、によって既往の研究事例で報告されていない情報を得ることができた。
- ② 2面斜面スリット堤は、開口率変更による反射率の変化が大きく、その影響は斜面起立角度が小さいほど大きい。
- ③ 直立スリット斜面後壁堤は、斜面起立角度を小さくするほど反射率が大きくなるので、直立消波ケーソンより反射率を低下させる効果は得られない。(遊水室後壁の起立角度75度は、反射率が直立消波ケーソンと同じである。遊水室後壁を傾斜させることで、波力特性は直立消波ケーソンより良くなることが期待できる。)
- ④ 2面斜面スリット堤で起立角度や開口率の変更によって反射率が変化するの、スリット壁の遡上高やスリット壁前後の水位差が変わるためである。
- ⑤ 2面斜面スリット堤は、直立消波ケーソンと比較して反射率の極小値を小さくする効果と、反射率を抑制できる波長の幅を広くする効果がある。
- ⑥ 遊水幅を大きくすると、低い天端高で伝達波高を抑制できる効果が得られる。ただし遊水室後壁に波が衝突するので、設計において注意が必要である。

(2)今後の課題

今回は反射波と伝達波に限定した模型実験を実施して水理機能の評価を行ったけれども、この構造を沖合いの防波堤に適用するためには、波圧・波力と滑動安定性に対する検討が必要である。

2面斜面スリット堤は斜面起立角度と開口率を小さくすると、反射率が小さくなる効果が得られた。しかし起立角度を小さくすると、堤体幅を大きくしなければならずコストがかかる。反射率の極小値が小さく、幅広い波長に対して反射率を抑制できるので、目標の反射率を達成できる範囲で起立角度を大きくし、堤体幅を小さくすることも可能である。また、起立角度と堤体幅の設定では滑動安定性を考慮する必要もあり、水理機能と経済性を考慮した設計方法の確立が課題である。

二次元実験しか実施していないので、斜め入射波に対する反射波特性を把握できていない。斜め入射波に対する反射率が大きくなる場合には、付録に示すダイヤ型スリットケーソンと組み合わせたいと考えている。

付録 「ダイヤ型スリットケーソン」

ダイヤ型スリットケーソンとは、図-13に示すように縦スリットケーソンのスリット柱を45度回転させた構造である。著者らはこの構造について、二次元と三次元の水理模型実験を別途実施した。消波対象波は3~5sである。二次元実験によって開口率と遊水幅の検討を行い、ダイヤ型スリットケーソンの開口率は0.2、遊水幅は3.1mとした。比較のための縦スリットケーソンは、斜め入射波に対しても見かけ上の開口率を確保するために開口率を0.4とし、遊水幅は二次元実験によって3.6mとした。これらの模型実験において、縦スリットケーソンでは入射角45度の反射率が直角入射の1.18倍になったのに対し、ダイヤ型スリットケーソンは1.03倍であった。この様に、スリット柱を45度回転させると、斜め入射に対しても反射率を抑制できる効果が得られる。また、ダイヤ型スリットケーソンは、縦スリットケーソンよりも反射率の極小値を小さくする効果も得られた。このように通常の縦スリットケーソンよりダイヤ型スリットケーソンの反射率特性が良かったのは、スリットとスリットの隙間が面ではなく点であるので、断面の急縮・急拡により剥離渦が発生しやすいことによるものであると考えられる。

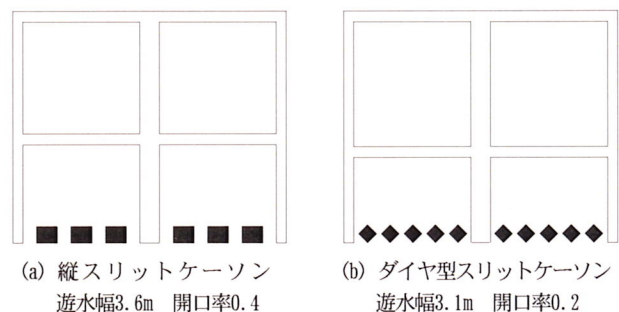


図-13 ダイヤ型スリットケーソンの平面図

参考文献

- 1) 高橋重雄：新構造防波堤とその設計，土木学会水工学に関する夏期研修会講義集，B-5，pp.1-20，1997。
- 2) 関口信一郎・窪内 篤：環境性・耐久性・経済性に優れた斜面スリットケーソン堤の開発，土木学会誌，vol.88，no.9，2003。
- 3) 本田秀樹・塩崎禎郎・堀内 博・辻岡和男：高波浪域向け消波型ケーソンの開発，海洋開発論文集，第16巻，pp.245-250，2000。
- 4) 合田良實・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，港湾技研資料，No.248，1976。
- 5) 谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟 正彦・大里睦男(1976)：各種消波ケーソン堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験，港湾技研資料，No.246，pp.3-38。