

導水板を用いた長周期波対策構造物の 平面波浪場における水理特性について

THREE DIMENSIONAL HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF LONG-WAVE ABSORBER WITH OBLIQUE WALLS

大島香織¹・森屋陽一²・水流正人³・杉田繁樹⁴・平石哲也⁵
Kaori OHSHIMA, Yoichi MORIYA Masahito TSURU, Shigeki SUGITA
and Tetsuya HIRAISHI

¹正会員 修(工) 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

²正会員 博(工) 沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16)

³正会員 五洋建設(株) 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

⁴正会員 修(工) 五洋建設(株) 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

⁵正会員 工博(独) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

In many ports in Japan, long-period waves cause disturbances of cargo handling and breaks of mooring ropes. We developed a new type of long-period wave absorption structure which involves two oblique walls and a vertical slit between them. The performance of various structural types of them has been examined by two dimensional hydraulic experiments.

In this paper, the performance when installing proposed structure in an actual port is examined. We study the effect of the proposed structure to reduce standing wave height in the harbor by three dimensional model test and numerical experiment using boussinesq equation.

Key Words : Long-period wave, long-wave absorber, reflection coefficient, bossinesq equation, sponge layer

1. はじめに

長周期波が原因とされる係留船舶の動揺による荷役稼働率の低下, 係留設備の破損などの安全性の低下が, 全国各地の港湾で問題となっている. これらの問題の対策として, 港内に設置する様々なタイプの消波構造物が検討されている. 代表的なものを示すと, ①通常波浪と同様にレキなどの消波層を設置する構造, ②レキによる消波層と遊水室を有する構造物(平石ら¹⁾, 池野ら²⁾)などが提案されている. ①は大きな消波層幅が必要となるため, 防波堤背後などの航路や泊地に影響のない水域への設置に限られる. ②の構造物も構造物幅が50m程度と大きく, 既存の港湾の対策に用いるには制約が大きい. 著者らは, 既存の対策構造物の問題を解決するために, 幅が25m程度の省スペースかつ構造物前面や天端を有効に利用できる渦消波タイプの構造物を開発した³⁾. 本構造は図-1に示すように, 斜めに配した1対の導水板とその背後の遊水室からなり, 渦を励起して長周期波のエネルギーを低減する. 2次元水理模型実験により, 幅広い周期帯において高い消波性能

を有することが確認されており, 3次元 Large Eddy Simulation や可視化実験により, スリット開口部に励起される渦の乱れエネルギーや遊水室内に形成される循環流の効果で長周期波を低減することが明らかとされている⁴⁾.

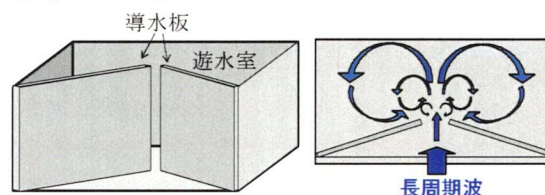


図-1 導水板を用いた長周期波対策構造物

本構造の消波効果は2次元実験で確認されているが, 斜め入射波に対する消波性能や平面波浪場に対する低減効果については検討されていない.

そこで本研究は, 渦消波タイプの対策構造物(以下, 対策構造物とする)の平面波浪場における消波性能を確認することを目的とし, 対策構造物を平面水槽に直線配置した場合, 矩形港湾を模擬した港内に設置した場合の2種類の模型実験を実施した. 矩

形港湾を模擬した実験に対しては、ブシネスク方程式を用いた数値解析を行い、本構造の数値解析による再現性を検討した。

2. 平面水理模型実験概要

(1) 実験概要

実験には、長さ 20m×幅 30m×高さ 1.5m の平面造波水槽を用いた。図-2 に示すように、造波板端部からの回折散乱波を低減するために、20m の造波板の両端に側壁を設置し実験を行った。

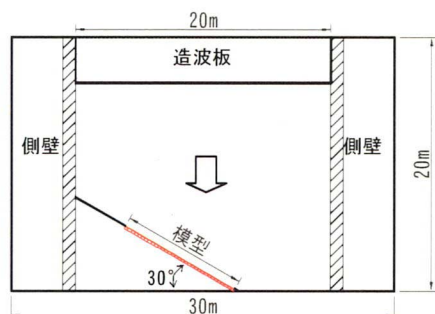


図-2 平面水槽概略図(直線配置, 波向30°)

a) 実験条件

水槽の長さとし長周期波の波長等を考慮して縮尺 1/100, 現地スケールで水深 10m, 表-1 に示す周期 10~90s の規則波を用いて実験を実施した(以下の数値は全て現地スケールとする)。周期 90s は水槽長に対し波長が長すぎるが、参考のため実験のケースに加えた。

入射波向は、直入射(0°)と斜め入射(30°)の2種類で、斜め入射波は図-2 に示すように模型を設置する角度を変えて対応し、造波波向は造波板より直角方向のみとした。

水位は容量式波高計を用い、サンプリング周波数 20Hz, 造波開始から 60s 間のデータを計測した。造波機には反射波吸収機能が付いているが、長周期波の吸収は難しいため吸収制御は行わず、有効なデータを適宜選択して解析に用いた。

表-1 入射波条件(現地スケール)

	波高	周期	水深
規則波	0.25m	10s	10m
		30s	
		60s	
		90s	

b) 実験模型

構造物模型は、過去の2次元水理模型実験³⁾で水深 10m, 周期 60s の条件における最適形状(構造物の幅 25m, 長さ 30m, 導水板角度 15°, スリット開口幅 0.75m, 反射率 0.7 程度)を採用した(図-3)。

1 対の導水板毎に遊水室を仕切る壁の有無による消波性能の違いを検討するため、図-4 に示す「仕切あり」と「仕切なし」の2種類の模型を用意した。

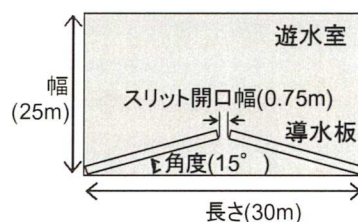
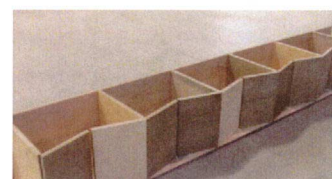
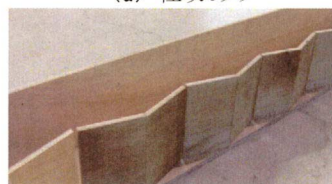


図-3 構造物模型寸法(現地スケール)



(a) 仕切あり



(b) 仕切なし

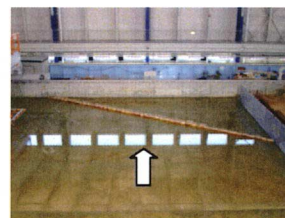
図-4 構造物模型

(2) 直線配置実験

過去に行った2次元実験では、導水板を用いた対策構造物1ユニットに対する消波性能の確認を行った。この構造物を平面的に設置した場合の、消波性能を確認するため、図-3 に示した模型を33個並べ(約1km相当)、構造物前面の波高分布、中央位置での反射率を算定した。その結果と2次元実験結果を比較し、2次元実験結果の平面波浪場への適応性を検証した。模型の設置状況を図-5 に、実験ケースを表-2 に示す。



(a) 角度0°



(b) 角度30°

図-5 模型設置状況

表-2 直線配置実験ケース

模型種類	入射角	周期
直立壁	0, 30°	10, 30, 60, 90s
対策構造物(仕切あり)	0, 30°	10, 30, 60, 90s
対策構造物(仕切なし)	0, 30°	10, 30, 60, 90s

水位計測は、造波板前面と図-6 に示す位置に設置した計 31 本の波高計を用いた。そのうち、構造

物模型延長方向に設置した 21 本の波高計の水位を用いて構造物前面の波高分布を、模型に対し直角方向に設置した 5 本の波高計の水位を用いて反射率を算定した。なお、解析には造波板からの再反射波が到達するまでのデータを用いている。

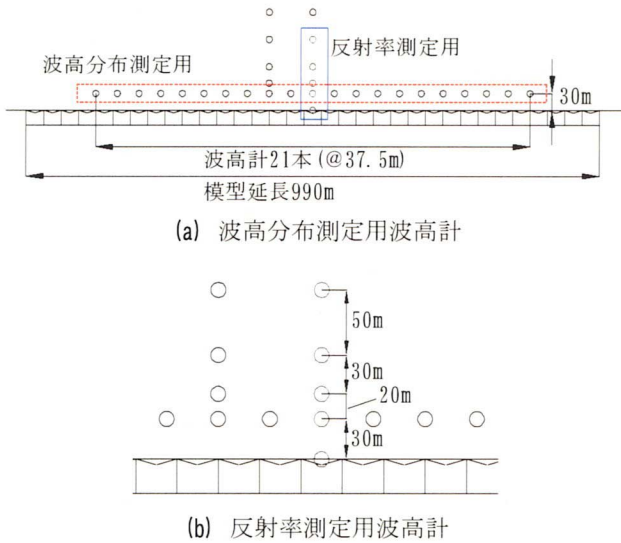


図-6 波高計配置図（現地スケール）

a) 波高分布の算定

波高分布は、水位の二乗平均値 η_{rms} より算定した。斜め入射波の水位には、模型と水槽の壁の接続部からの回折散乱波の影響が含まれるため、消波性能の評価は、直立壁の結果との比較により確認した。

b) 反射率の算定

本検討の反射率の算定には、合田ら⁵⁾の入・反射波分離手法を適応した。斜め入射波の場合、模型延長の直角方向に設置した波高計に対し、入射波と反射波の波向が鏡像関係にあると仮定した。よって、模型延長の直角方向の波峰線間隔を波長とみなし、見かけ上、対策構造物模型に長周期波が直入・反射しているものと仮定して反射率を算定した。波高計の距離と有効周波数帯を考慮し、周期ごとに使用する波高計を適宜選択し解析を行った⁶⁾。

(3) 矩形港湾実験

直線配置実験では、造波板からの再反射波が到達するまでのデータを用いて消波性能を確認した。一方、実際の港湾では、港内で重複波浪場が形成されている。そこで、重複波浪場における対策構造物の消波性能を確認し、実港湾への適応性を確認するため、図-7 に示す矩形港湾を水槽内に設置し、その港湾奥に設置した対策構造物による波浪場の低減効果を評価した。港湾模型の設置状況を図-8 に示す。斜め入射は、前述の実験同様、矩形港湾模型の設置角度を変化させた。

矩形港湾の長周期対策として、既存護岸（直立壁）前面に対策構造物を設置した（図-9），直立壁の場合と対策構造物設置した場合の港内波高分布を比較し、重複波浪場に対する対策構造物の波高低減効果を評価した。水位は、図-9 に示す 25m メッ

シュ、240 地点を計測し、その η_{rms} より波高分布を算出した。波高計の台数の関係より、計測は岸沖方向の 2 列ずつ 8 回に分けて実施した。直線配置実験と同条件（表-1）で周期 10s を除く、30～90s の実験を行った（表-3）。

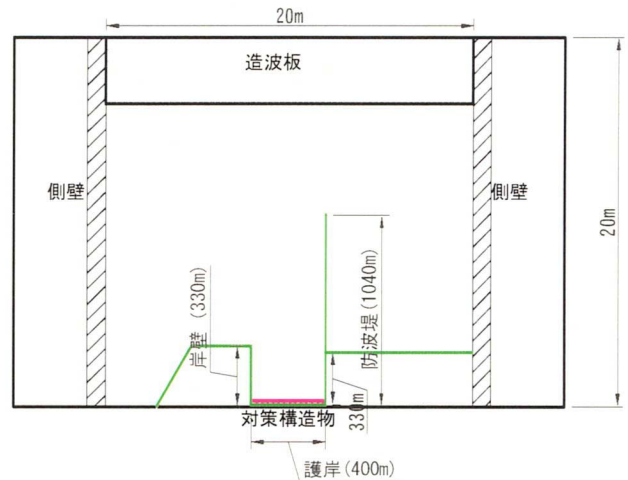


図-7 矩形港湾概略図（現地スケール）



(a) 角度 0° (b) 角度 30°

図-8 模型設置状況

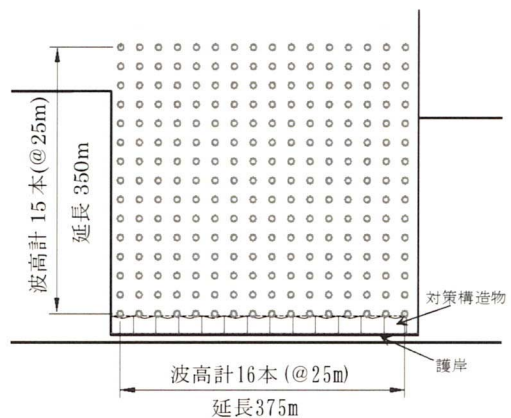


図-9 波高計設置位置（現地スケール）

表-3 矩形港湾実験ケース

模型種類	入射角	周期
直立壁	0, 30°	30, 60, 90s
対策構造物 (仕切あり)	0, 30°	30, 60, 90s
対策構造物 (仕切なし)	0, 30°	30, 60, 90s

3. 数値再現計算概要

長周期波の影響評価や対策構造物の効果を数値計

算により検証するには、ブシネスク方程式を用い平面波浪場の計算を行うのが一般的である。その際に、レキやブロック等の消波構造物は、スポンジ層で模擬される。著者らが開発した渦消波タイプの対策構造物に対し、同じ検討手法が適応可能であるかを確認するため、前章の矩形港湾実験の再現計算を行った。計算は現地スケールで行い、図-7 の水槽と港湾地形を再現した。斜め入射波（波向 30° ）も実験と同様に模型の設置角度を変えて実施した。計算条件を表-4 に示す。対策構造物は、周期 60s の条件で表-4 に示す反射率を満たすスポンジ層を用いて再現した。対策構造物の前面とスポンジ層の前面を同一位置とし、反射面を揃えるように設定した。

表-4 計算条件

水深	10m
波高	0.25m
周期	30, 60, 90s
波向	0° , 30°
時間間隔	0.1s
格子間隔	5m
計算ステップ	6000step
スポンジ層の反射率 (周期 60s, 水深 10m)	0.7, 0.8, 0.9

4. 実験結果

(1) 直線配置実験

a) 波高分布

直線状に配置した対策構造物前面の波高低減効果を波高低減率で比較した（図-10）。波高低減率は、直立壁を設置した時の波高に対する対策構造物を設置した時の波高の割合である。図-11 は構造物前面に設置した 21 本の波高計から求められた波高低減率の平均値を示している。

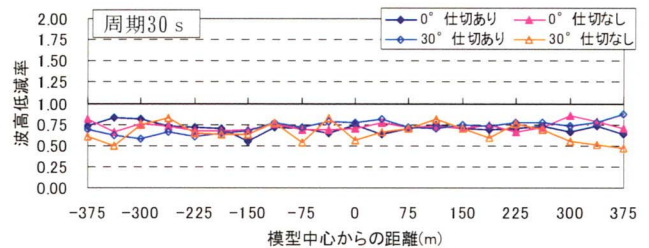
図-10 より、周期 30, 60s では、対策構造物設置方向全域にわたり波高低減効果が確認された。周期 30s では波向、模型形状によらず 7 割程度、周期 60s ではバラツキはあるが 8 割程度に波高が低減する効果が確認された。

「波向 30° 仕切なし」の条件で、波高低減率分布の変動が顕著である。斜め入射波は、模型の設置角度を変えて対応しているため、水槽壁や側壁と模型が接している隅角部より発生する回折散乱波の影響がその一因と考えられる。遊水室内に着目すると、直入射では遊水室内に対称な一對の渦が励起されるのに対し、斜め入射では、非対称な大きさの渦が生成することが確認された。さらに「仕切なし」の条件では、非対称の渦のほかに、連続した遊水室の延長方向に大きく水面が振動する現象が目視により確認された。これらが、波高低減率の分布に変動を与えている要因の可能性もある。

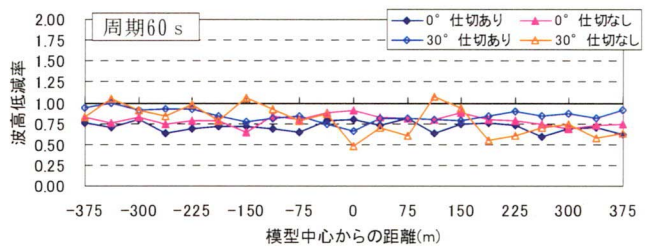
本実験の模型は、2 次元実験で周期 60s に対する最適形状（反射率 0.7 程度）とされた寸法を用いて

いる。図-11 に示した周期毎の消波性能の比較からも、周期 60s で低減率が 0.7~0.8 で、周期が長くなると波高低減性能が低くなり、過去の 2 次元実験と同様の特性が確認できた。

本研究の結果全体に共通するが、周期 90s では波長 (L) に対し構造物幅 (B) が短いため十分な消波性能が得られていない。これは既往の研究⁴⁾においても同様な結果が得られており、B/L が 0.03 程度の時、有効な消波効果が期待できることにも符号する。



(1) 周期 30s



(2) 周期 60s

図-10 構造物前面の波高低減率分布

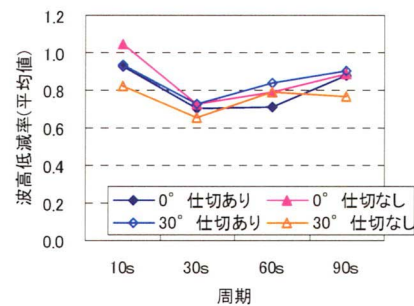


図-11 構造物前面の波高低減率

b) 反射率

構造物中央に設置した波高計を用いて反射率を算定した結果を図-12 に示す。斜め入射波には、回折散乱波の影響などが含まれている可能性があり、定性的に消波性能を明らかにするため、反射率低減率（対策構造物の反射率/直立壁の反射率）で比較を行った（図-13）。この結果、平面波浪場における長周期波の低減効果を、反射率からも確認できた。

さらに、「直入射、仕切あり」の条件の反射率を過去の 2 次元実験結果³⁾と比較した（図-14）。2 次元実験は縮尺 1/50、平面実験は縮尺 1/100 で実施されているが、両者の結果に有意な差は見られない。これにより、平面実験も断面実験と同等の精度で実施されたことが確認できた。

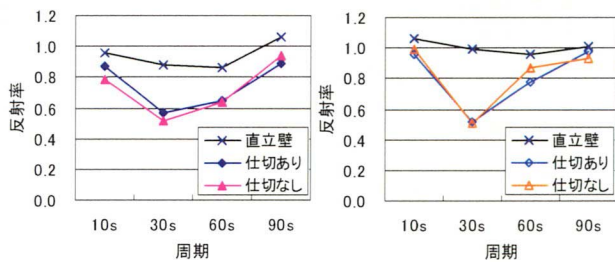


図-12 模型中央ラインの反射率
(左：波向0°，右：波向30°)

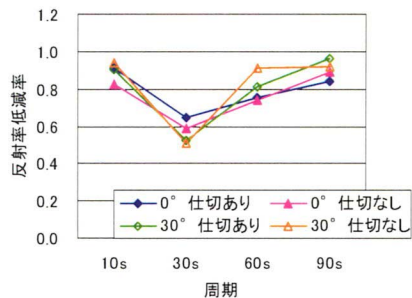


図-13 模型中央ラインの反射率低減率

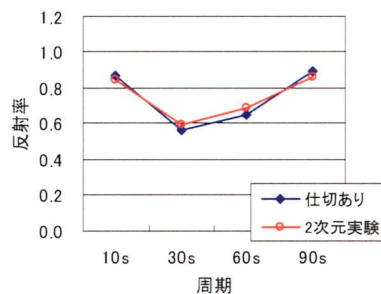


図-14 過去の2次元実験結果との比較

(2) 矩形港湾実験

矩形港湾内の波高分布の計測結果を図-15, 16に示す。長周期波が港内で多重反射し、重複波浪場が形成されている。直入射波の場合（図-15），周期30, 60sは(a)直立壁に比べ，(b)，(c)の対策構造物を設置したほうが，港内の重複波が低減しているが，仕切の有無による明確な低減効果の違いは確認されなかった。これは，直入射は遊水室内に対称な一對の渦が生成され，入射方向に対し対称な流況場が形成されるため，構造物間の仕切の影響が少ないことが要因と推測される。周期90sは，波長に対し構造物の奥行きが短いため，本実験では明確な消波効果は確認できなかった。斜め入射波（図-16）の場合も，直入射と同様に，周期30, 60sで対策構造物設置により重複波が低減している。重複波の腹の波高を比較すると，「(c)仕切なし」が多少ではあるが低減効果が大きい。直線配置実験でも述べたが，斜め入射は遊水室内に非対称な渦が形成される。仕切がないと，非対称な渦の形成に対して有効な遊水室幅が大きくなり，性能が向上すると考えられる。

構造物間の仕切のない構造で，消波性能の良さが確認されたことにより，導水板と背後壁のみのシンプルな構造で長周期波を低減でき，工期，施工コスト

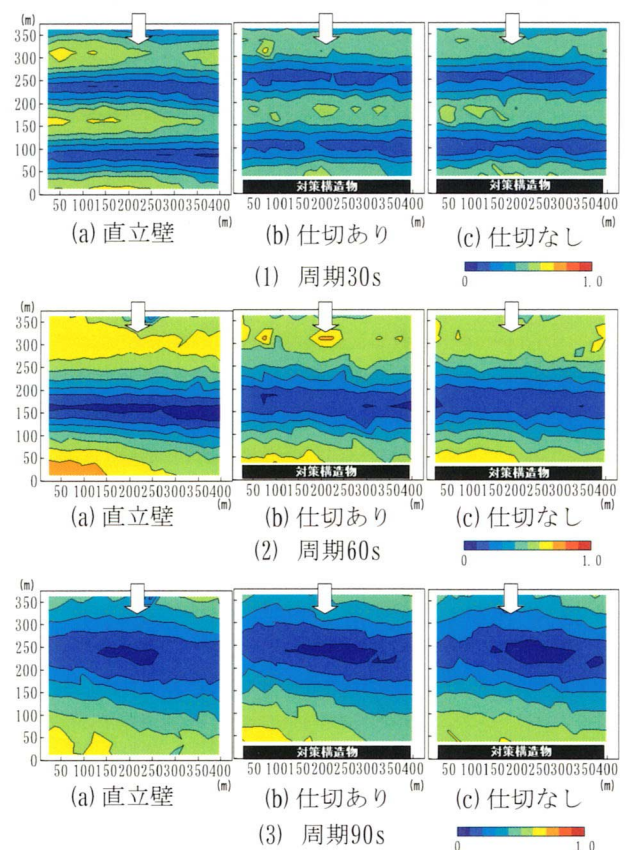


図-15 波高分布（直入射）

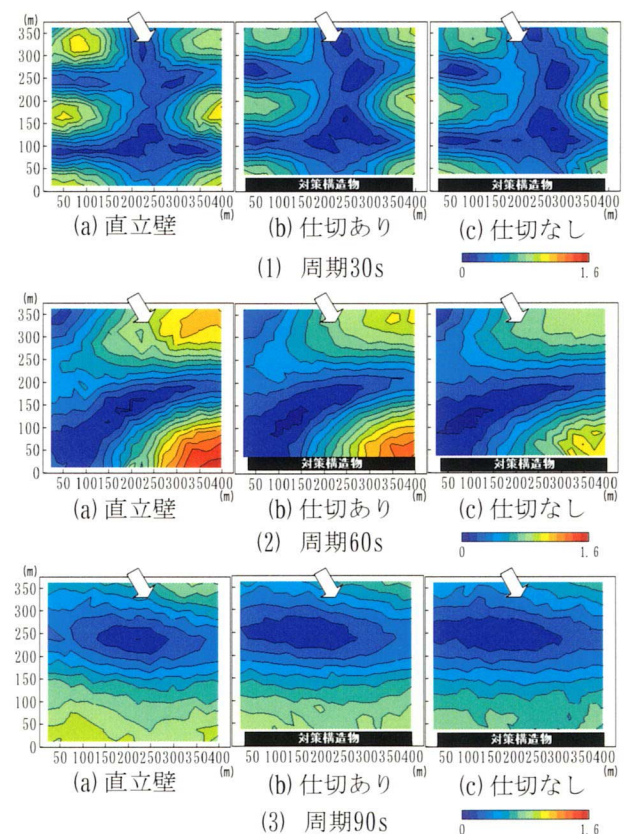


図-16 波高分布（斜め入射）

トの面からも有利な対策構造物の実現が可能となることを明らかとした。また、既存の港湾への対策として、護岸を背後壁として用いることも可能となる(図-17)

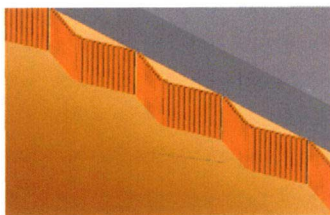


図-17 対策構造物設置イメージ図

5. 数値再現計算結果

ブシネクス方程式を用いた実験の再現計算より得られた矩形港湾内の波高分布の一例(反射率 0.7)を図-18に示す。図-15, 16と比較すると、実験の重複波浪場が良く再現されている。反射率 0.7~0.9の計算で、最も実験結果と一致していたのが図-18に示した反射率 0.7の結果である。

矩形港湾実験は、消波効果を波高低減率や反射率で評価できていないが、本計算結果より平面波浪場においても2次元実験と同等の性能(周期 60s で反射率 0.7程度)を発揮していたと考えられる。

また、導水板を用いた構造に対しても、入射角 30°程度までは、スポンジ層を用いた再現計算の手法で十分に再現できることも確認できた。これにより、本構造においても、現在一般的に行われている長周期波対策の評価手法を用いて、対策工の効果、平面レイアウトなどを検討することが可能となる。

入射角がさらに大きくなると本堤体における消波特性とスポンジ層による消波特性に差異が生ずる可能性があるため、入射角の大きな場合のスポンジ層の設定は今後の課題と考える。

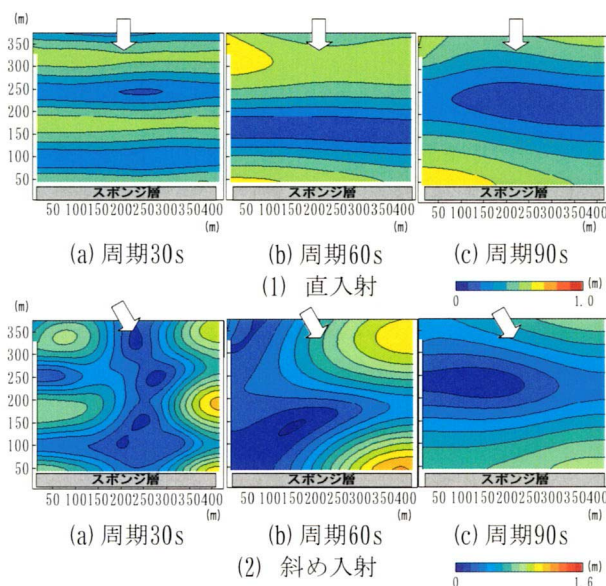


図-18 数値再現計算結果(反射率0.7)

6. まとめ

本研究は、渦消波タイプの対策構造物の平面波浪場における消波性能を確認するために、平面水理模型実験と数値解析による再現計算を行い、以下に示す結論を得た。

- ① 直線配置実験より、約 1km の延長で対策構造物を設置すると、直立壁の護岸前面の波高分布に比べ、周期 30s では 7 割程度、周期 60s では 8 割程度の低減効果を得た。また、反射率の算定結果からも、平面配置、斜め入射波に対し有効な長周期波低減効果が確認できた。
- ② 矩形港湾を模擬した実験より、直入射、斜め入射とも周期 30s, 60s で港内の重複波を低減する効果を確認した。斜め入射波では、構造物間の仕切がない構造形式では低減効果が高いことが明らかとなった。
- ③ ブシネクス方程式を用い、矩形港湾実験の再現計算を行い、導水板を用いた対策構造物の効果をスポンジ層を用いて評価することが可能であり、既存の評価手法が本構造にも適応可能であることを確認した。
- ④ 再現計算結果より、矩形港湾における本構造の消波効果は、過去の 2 次元実験や直線配置実験で得られた性能と同等(周期 60s で反射率 0.7程度)であることが確認された。

以上の結果より、導水板を用いた長周期波対策構造物が平面波浪場において、有効な消波性能を有することが確認できた。また、導水板と背後壁のみの構造で、高い消波性能を発揮することから、既存の護岸を背後壁として活用するなど過去の研究成果も含め、幅広い構造形式に対応できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 平石哲也, 永瀬恭一: 長周期波対策護岸の性能検証実験, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 801-805, 2003.
- 2) 池野勝哉, 熊谷隆宏, 森屋陽一, 大島香織, 関本恒浩: 長周期波を対象にした直立消波構造物の開発, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 731-735, 2004.
- 3) 大島香織, 森屋陽一, 水流正人, 杉田繁樹, 平石哲也: 渦による消波機能を活用した長周期波対策施設の特性, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp. 145-150, 2006.
- 4) 大島香織, 森屋陽一, 大塚淳一, 渡部靖憲: 導水板構造物のエネルギー低減機構について, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 796-800, 2007.
- 5) 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, 港湾技研資料, No. 248, pp. 24, 1976.
- 6) 大島香織, 森屋陽一, 土屋京助: 長周期波の平面波浪場における反射率算定法の検討, 第 61 回年次学術講演会, p. 157-158, 2000.