

海水交換型防波堤の現地導水量計測

FIELD INVESTIGATION ON WATER INLET ABILITY OF WATER – EXCHANGE BREAKWATER

本田秀樹¹・塩崎禎郎¹・堀内 博²・森本悟司³

Hideki HONDA, Yoshio SHIOZAKI, Hiroshi HORIUCHI and Satoshi MORIMOTO

¹正会員 工修 JFE技研(株) 土木・建築研究部(〒210-0855 神奈川県川崎市南渡田町1番1号)

²正会員 工修 JFEエンジニアリング(株) 鋼構造事業部(〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

³正会員 JFEエンジニアリング(株) 鋼構造事業部(〒230-8611 神奈川県横浜市鶴見区末広町2-1)

Recently, it has been necessary the purification of basin water in port and harbor for utilizations, such as live fish preservation facilities and amenity space. Therefore, various types of water-exchange breakwater by wave energy, tidal current and sea level exchange have been developed. The authors developed a wave dissipating caisson breakwater having a function of seawater exchange. This caisson is a permeable slit caisson with a submerged vertical plate in a water chamber, and generates a one-way flow from offshore to harbor.

In this paper, through the field investigation, we proved the water inlet ability of this water-exchange breakwater that was constructed in MISAKI fishing port, and compared the result of the hydraulic model test with the result of the field investigation.

Key Words : Water-exchange breakwater, field investigation, water inlet ability

1. はじめに

近年, 港内水域を蓄用水面や親水水域として利用することが求められるようになってきている。ところが, 港内水域は静穏度の確保に重点を置いて整備されてきたため閉鎖性が強く, さらに生活排水や水産加工施設からの汚濁水流入により, 水質や底質の悪化が問題となることがある。この問題を解決するために, 波浪, 潮流, 潮位変動等の自然エネルギーを利用することで, 港内外の海水交換(循環)を行うことのできる様々な構造形式¹⁾の海水交換型防波堤が開発され, 各地で施工されている。

著者ら²⁾³⁾も, 直立消波堤の遊水室内に鉛直版を設けた簡単な工夫により効率的な海水導入が行える海水交換型防波堤を開発し, 水理実験により, 導水特性を明らかにしてきた。今回は, 本構造が実際に採用された神奈川県三崎漁港南防波堤において, 導水特性を実証するための現地計測を行う機会を得た。そこで, 本論文では, 現地での導水量計測結果, および, 現地計測結果と水理実験結果との比較について述べる。

2. 遊水室内に鉛直版を有する海水交換型防波堤の導水メカニズム

直立消波堤の遊水室内に鉛直版を有する海水交換型防波堤の導水メカニズムを図-1に示す。波の峰が作用する押し波時には, 遊水室内と港内側に水位差が生じるため港内方向に海水が導水される。波の谷が作用する引き波時には, 遊水室内の水位低下が鉛直版天端高さよりも低くならないため港外方向への戻り流れは生じにくい。これらのことから, 常に港内側への一方方向流れとなり, 効率的な海水導入が可能となる。

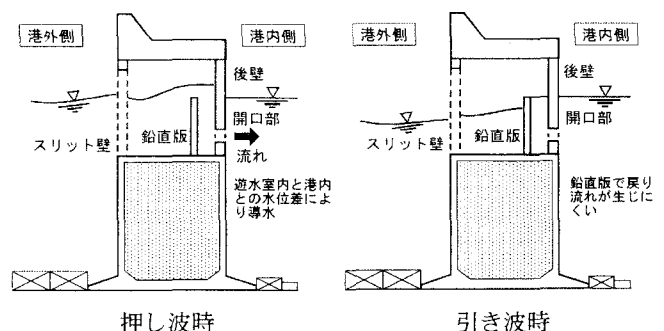


図-1 導水メカニズム

3. 現地計測概要

三崎漁港は、神奈川県三浦半島の先端に位置する特定第三種漁港であり、船舶の大型化や国際化に対応できる漁港を目指して、現在、二町谷地区において漁港整備事業が進められている。この南防波堤の第3工区から第7工区に海水交換型防波堤が設置されている。第3工区、第4工区は、遊水室内に鉛直版を設けた形式、第5工区から第7工区には防波堤の側壁（目地部）に切欠き（空隙部）を設けた形式となっている。ここでは、岸から約220m離れた第4工区の14号函で行った計測結果について述べる。現地計測地点を図-2、第4工区の計測函断面を図-3、防波堤外観を写真-1に示す。本防波堤は、広範囲の周期帯の波を消波させるために二重スリット壁（開口率は港外側40%、港内側20%）、潮位変動（H.W.L. +1.6m, M.W.L. +1.0m, L.W.L. ±0.0m）に対応するために鉛直版天端高さは2種類（+0.6m, +1.1m）、設計波高が11.9mと大きいために導水管は堤体本体内部（中詰砂部）を貫通させた構造となっている。また、導水管は直径1.2mであり、防波堤法線方向4.0m間隔に設置している。

現地計測は、平成15年10月3日から11月27日までの2ヶ月間行い、波浪データと導水流速データ（鉛直版天端高 +0.6m, +1.1mの2箇所）を計測した（以後、鉛直版天端高+0.6mをST-A, +1.1mをST-Bとする）。導水流速データは、導水管の港内側開口部中央に電磁流速計（アレック電子社製、COMPACT-EM, 写真-2）を設置して、流速（2方向、北方分速、東方分速）、方位、水温を毎時4分間、サンプリング間隔1.0sで計測した。この流速データの整理には、計測した2方向成分から主流方向（導水管方向）を求め、各流速ベクトルを主流方向に投影する補正を行った。また、波浪データ（波高、周期等）は、計測函の沖（約80m）の海底に波高計（DL-2）を設置し、毎時20分間（毎正時±10分間）、サンプリング間隔0.5sで計測を行い、ゼロアップクロス法で統計処理した。計測期間中の波浪データを図-4に示す。今回の計測期間内では台風等の異常波浪はなかったため、有義波高0.2m～1.5m、周期（有義波周期）4.0～8.0s程度となっている。

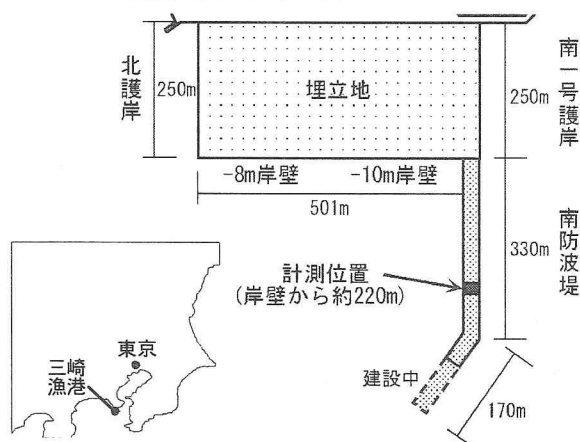


図-2 現地計測地点

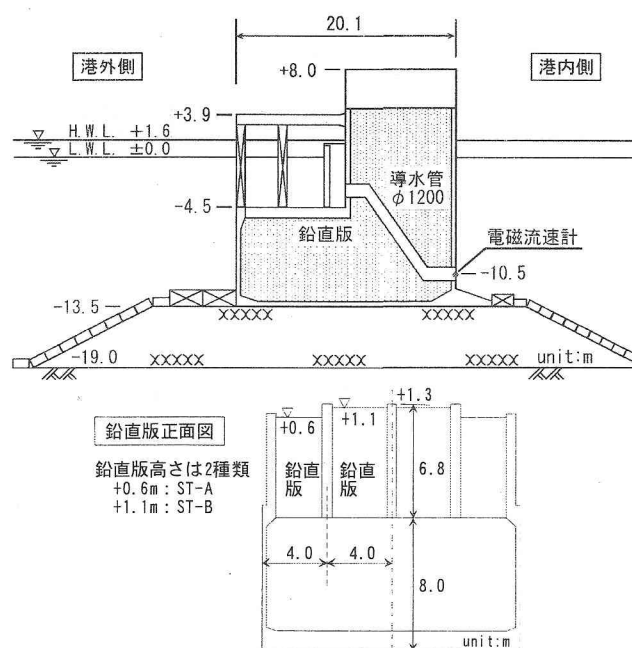


図-3 海水交換型防波堤（第4工区）

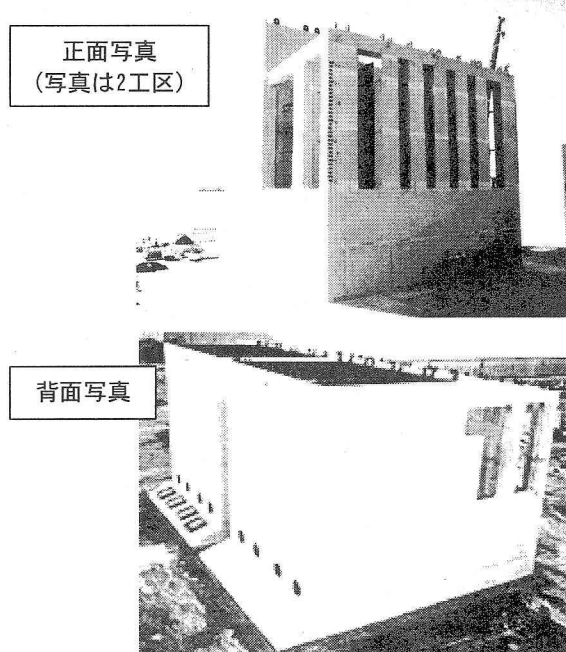


写真-1 防波堤外観



写真-2 電磁流速計（COMPACT-EM）

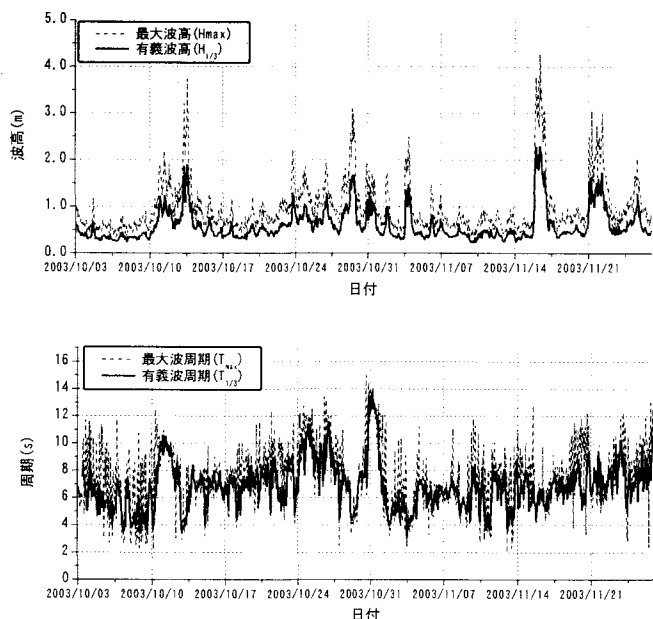


図-4 計測期間中の波浪（上段：波高，下段：周期）

4. 現地計測結果

(1) 有義波高と平均導水流速の関係

計測結果の一例として、10月20日14時～16時（潮位+1.45m，有義波高0.5m，周期7.5s）において，ST-Bで計測した導水流速時系列を図-5に示す。導水流速がプラスとなるのが，港内方向への流れである。その結果，計測4分間の平均流速値はプラスの値を示していることから，導水管内の流れは，港内方向に卓越した一方向流れとなっていることがわかる。

ST-Bで計測した全データに対する，有義波高と平均導水流速（毎時計測4分間の平均値）の関係を図-6に示す。これより，有義波高0.25m程度のような低波浪の状態においても最大で0.2m/s程度の流速が生じており，確実に港内方向に導水されているのがわかる。また，導水流速値は有義波高に比例して大きくなっているが，平均導水流速に若干ばらつきがみられる（例えば，有義波高1.0mでは平均導水流速0～0.4m/s）。これは，導水流速は潮位変動（潮位と鉛直版天端高の関係）の影響をうけるためである。

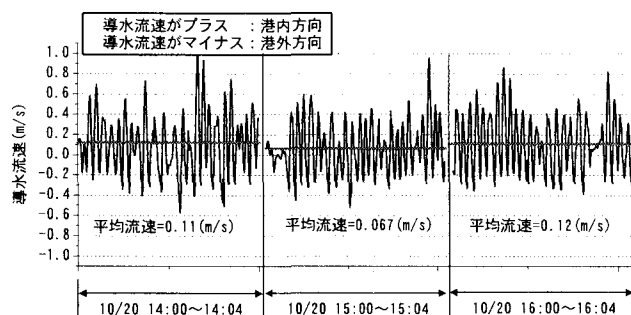


図-5 導水流速時系列（ST-B）

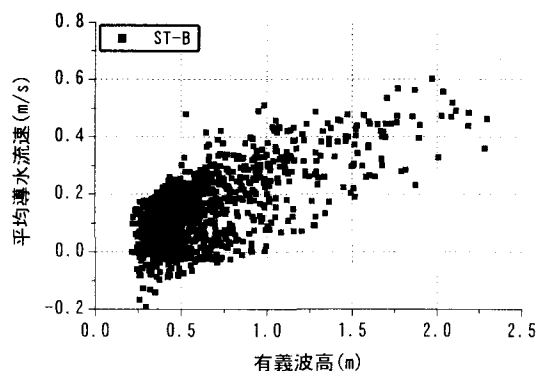


図-6 有義波高と平均導水流速の関係（ST-B）

(2) 周期と平均導水流速の関係

ST-Bにおける周期（有義周期）と平均導水流速の関係を図-7に示す。これより，導水流速は全体的にばらついており，周期との明確な相関はみられなかった。また，導水流速は潮位変動の影響をうけることから，ST-Bの計測データから有義波高0.2m～0.5m，潮位+1.0m～+1.2m（ST-Bの鉛直版天端高+1.1m）のデータを抽出した。抽出したデータの周期と平均導水流速の関係を図-8に示す。その結果，周期4.0s～9.0sにおける平均導水流速は同程度であり，周期による導水流速の影響はみられなかった。

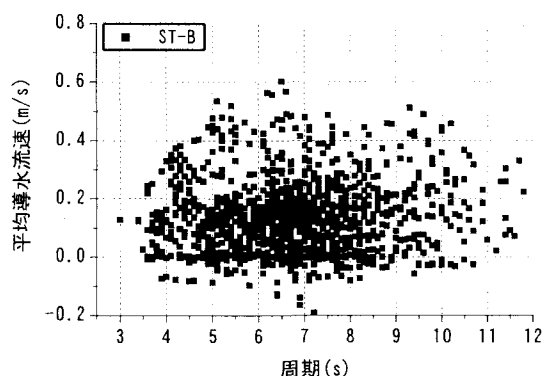


図-7 周期と平均導水流速の関係（ST-B）

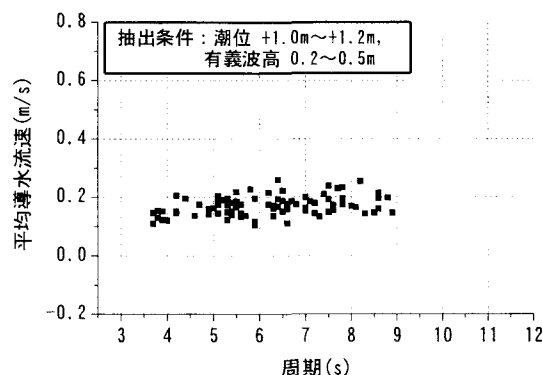


図-8 周期と平均導水流速の関係（ST-Bの抽出データ）

(3) 潮位変動（鉛直版天端高）と平均導水流速の関係

潮位変動と平均導水流速の関係を図-9に示す。導水流速は，有義波高に比例するため，ST-AとST-Bの

全計測データから有義波高の階級別（有義波高0.5m以下，0.5m～1.0m，1.0m以上）に整理した。横軸の鉛直版天端水深(hc)は，水面から鉛直版天端までの距離であり，これにより潮位変動の影響を考慮している。鉛直版天端水深(hc)の符号は，鉛直版天端が水面下に没水するときをプラスに定義した。

その結果，全ての波高条件において，導水流速は水面位置と鉛直版天端が等しい条件($hc/H_{1/3}=0$)で最大となり，それ以外で減少するような凸型の分布を示している。水面位置が鉛直版天端よりも下側($hc/H_{1/3}$ がマイナス)の場合， $hc/H_{1/3}=-1.0$ 程度で導水流速がゼロとなる。これは鉛直版が水面より有義波高の高さだけ突出すると，波が鉛直版を越波しないためである。水面位置が鉛直版天端よりも上側($hc/H_{1/3}$ がプラス)の場合，有義波高0.5m以下や有義波高0.5m～1.0mでは $hc/H_{1/3}=1.5$ 程度まで導水できているが，有義波高1.0m以上では計測値が少ないため明確ではないが $hc/H_{1/3}=1.0$ 程度になっており，導水範囲が狭くなる傾向を示している。これは，本防波

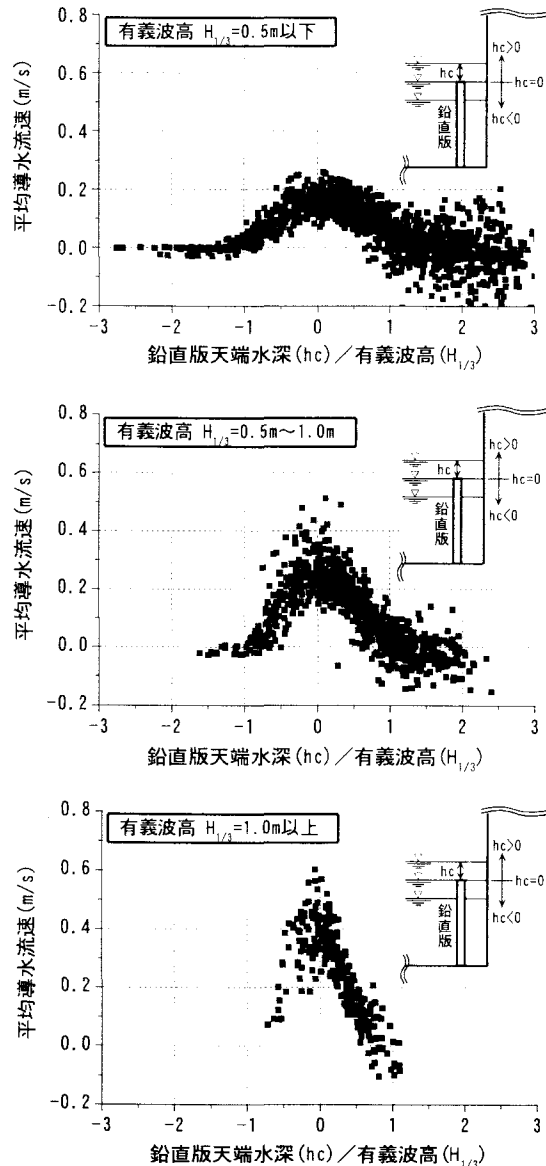


図-9 潮位変動と平均導水流速の関係

堤がスリット壁を有する構造であり，波高が大きくなるとスリット壁でのエネルギー損失の割合が大きくなるため，遊水室内の水位上昇の割合が少なくなり，導水流速が減少していると思われる。特に，今回は二重スリット壁であることから，その影響が大きいと考えられる。また，有義波高0.5m以下や有義波高0.5m～1.0mにおいて， $hc/H_{1/3}=1.5$ 以上で導水流速がマイナス値を示すことがある。これは，波の谷作用時（引き波時）において遊水室内の水位が港外側よりも低下してしまうことや回折波高との位相差が影響していると考えられる。

以上のことから，有義波高1.0m以上では明確ではないが，有義波高1.0m以下の条件においては，本構造の導水可能となる範囲は，水面位置が鉛直版天端高よりも有義波高程度下側から有義波高の1.5倍程度上側($-1.0 < hc/H_{1/3} < 1.5$)であると考えられる。

5. 水理実験結果と現地計測結果の比較

遊水室内に鉛直版を有する海水交換型防波堤について，これまで水理実験により効果を明らかにしてきた³⁾。そこで実験結果の有効性を検証するために現地計測結果との比較を行った。ここでは，有義波高1.0m以下の条件で実施した実験結果と比較した。

(1) 水理実験概要

水理実験は，吸収制御式の二次元造波水路を用いて行った。実験波は規則波とした。実験条件を表-1に示す。実験は，波高1.0m以下の低波浪で，鉛直版天端水深4種類の条件とした。また，実験時の縮尺率を1/10としたことから，防波堤断面の遊水室より上側部分をモデル化した部分断面実験とした。実験断面を図-10に示す。なお，実験模型のスリット壁開口率，スリット壁設置間隔，鉛直版設置位置，導水管長さは，現地の第4工区断面と同じである。

表-1 実験条件

波高 H	0.25m, 0.5m, 0.75m, 1.0m
周期 T	4.0s, 6.0s
鉛直版天端水深 $hc^*)$	-0.4m, 0.0m, +0.4m, +0.8m
導水管サイズ $^{**})$	0.3m, 0.5m, 1.0m, 1.5m

表中の値は全て現地換算値

*) 鉛直版天端からの高さ

**) 導水管は矩形，堤体法線方向4.5m間隔で設置

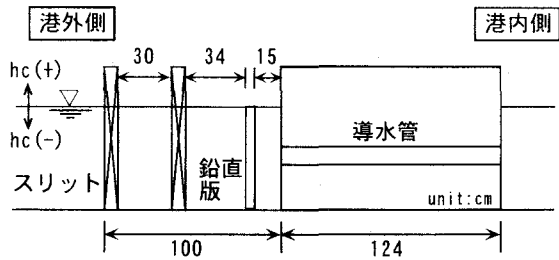


図-10 実験断面

(2) 導水特性の比較

現地での導水管断面積 $1.13\text{m}^2(=\pi/4\times 1.2^2\text{m})$ に近い導水管サイズ $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$ （矩形）の実験結果を図-11に示す。波高に比例して導水流速が大きくなるのは現地計測結果と同様であった。ところが、水理実験では周期が長い方が導水流速は大きくなっており、現地計測結果（図-8）と異なっていた。これは、規則波と不規則波の違いが影響している。不規則波の場合、1波ごとの波周期は異なり、有義波周期 $= (0.9\sim 1.4)\times$ 平均周期で表される⁴⁾ようにばらつきが大きい。このため、現地では規則波の場合のような周期による導水流速の違いが明確となりにくいと考えられる。

周期 6.0s での潮位変動と導水流速に関する実験結果を図-12に示す。導水流速は $hc/H=0$ で最大となる凸型であり、導水可能範囲も $-1.0 < hc/H < 2.0$ 程度と現地計測と同様の傾向を示している。これらのことから、水理実験は現地の現象とよく一致していることがわかった。

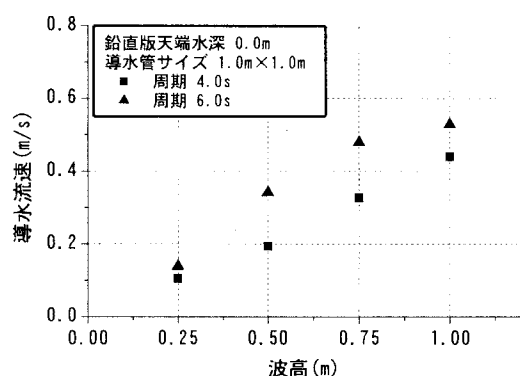


図-11 波高と導水流速の関係（実験結果）

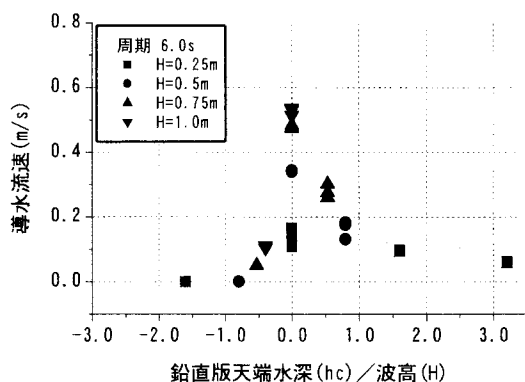


図-12 潮位変動と導水流速の関係（実験結果）

(3) 単位幅導水流量の比較

水理実験が現地の現象とよく一致していることから、ある波高に対する導水流速値の比較を行った。ここでは、導水流速が最大を示す鉛直版天端高と水面位置が等しい条件での比較を行う。ただし、現地では常に潮位が変動しているため、鉛直版天端水深 hc が $\pm 0.1\text{m}$ 以内となる計測データを抽出した。また、水理実験条件にあわせるために、有義波高 $0.2\text{m}\sim 1.0\text{m}$ の計測データを用いた。抽出した計測データの有義波高と平均導水流速の関係を図-13に示す。図

中の直線は最小二乗法による近似直線であり、相関係数 0.81 と比較的よく一致している。これより、今回の現地計測条件（導水管設置間隔： 4.0m ，導水管サイズ：直径 1.2m ，鉛直版と後壁の間隔： 1.5m ），有義波高 $0.2\text{m}\sim 1.0\text{m}$ において、鉛直版天端高と水面位置が等しいときの導水流速は、導水流速 $(\text{m/s}) = 0.047 + 0.288 \times$ 有義波高 (m) の近似式を用いて求めることができる。

そこで、この近似式から算定した現地での導水流量と水理実験結果との比較を表-2に示す。導水管サイズと導水管設置間隔が現地と水理実験で異なるため、防波堤法線方向に対する単位幅導水流量（＝導水管断面積 $\times$ 導水流速 $\div$ 導水管設置間隔）に換算して比較した。また、今回の計測期間では周期 $4.0\text{s}\sim 8.0\text{s}$ が多いため、水理実験結果は周期 6.0s のデータを用いている。その結果、現地計測結果は水理実験結果の $7\sim 8$ 割程度となることがわかった。これは、現地波浪が不規則波のためであり、構造形式は異なるが山本らの結果⁵⁾と同様の傾向であった。

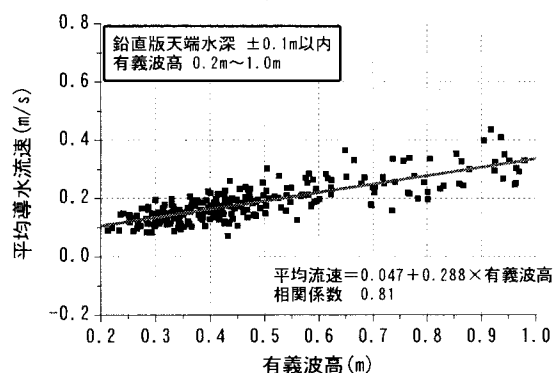


図-13 有義波高と平均導水流速の関係

表-2 単位幅導水流量の比較

有義波高	現地計測結果	水理実験結果***)
0.25m	$0.034 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.119m/s)	$0.031 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.138m/s)
0.5m	$0.054 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.191m/s)	$0.076 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.341m/s)
0.75m	$0.074 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.263m/s)	$0.106 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.479m/s)
1.0m	$0.095 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.335m/s)	$0.117 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (0.528m/s)

() は流速値

***) 鉛直版天端水深 $hc=0$ ，導水管サイズ $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$ ，有義波高相当の規則波での値。

6. 導水流量の算定方法

海水交換型防波堤を計画する場合、現地条件（波高，周期や潮位変動）を考慮した導水流量を求める必要がある。そこで、簡単な導水流量算定方法を提案する。現地条件は、波高，周期，潮位変動が考えられるが、今回の結果から周期の影響はみられな

かったので、波高と潮位変動を考慮した。ここで、導水流速は、 $hc/H_{1/3}=0$ で最大、 $hc/H_{1/3}=-1.0, 1.5$ でゼロとなる三角形分布として、有義波高 $H_{1/3}=0.5\text{m}$ 、潮位変動 $1.0\text{m}(\pm 0.0\text{m}\sim +1.0\text{m})$ で算定した。導水流量算定のフローチャートを図-14、導水流量算定モデルを図-15に示す。

①鉛直版天端高の決定

有義波高 $H_{1/3}=0.5\text{m}$ （設計条件）から、導水可能な潮位変動幅は $1.25\text{m}(-1.0<hc/H_{1/3}<1.5)$ より算定、図-15の三角形部分となる。これに対して、潮位変動 1.0m の方が小さいため、導水範囲は図-15の斜線部分となる。この斜線部面積は導水流量を表しているため、この面積が最大となるように鉛直版天端高を決定すればよい。ここでは、鉛直版天端高を $+0.4\text{m}$ と設定したときに斜線部面積は最大を示し、この時の導水範囲は $-0.8<hc/H_{1/3}<1.2$ になる。

②鉛直版天端と水面位置が等しい時($hc/H_{1/3}=0$)の流量（流速）の算定

表-2を用いて、単位幅導水流量を求める。有義波高 0.5m では、単位幅導水流量 $0.054\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ である。また、図-13の流速値からも算定できる。

③導水流量の算定

図-15の斜線部分が1回の潮位変動における導水流量となる。潮位変動時間を6時間とすると、6時間での単位幅導水流量は $699.8\text{m}^3/\text{m}$ 、単位時間単位幅導水流量は $116.6\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ と算定できる。

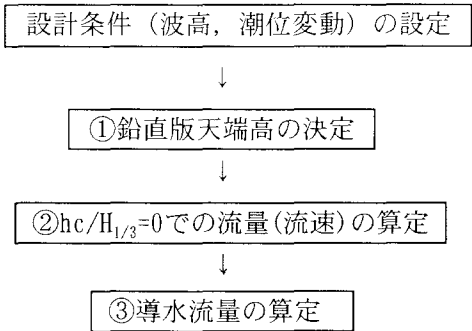


図-14 導水流量算定のフローチャート

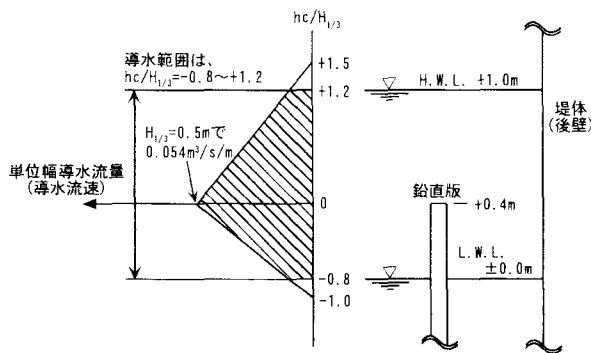


図-15 導水流量算定モデル

7. 結論

神奈川県三崎漁港南防波堤に採用された海水交換型防波堤において、現地導水量計測を実施し、導水特性の実証、水理実験結果との比較を行った。主要な結論を以下に示す。

1) 現地での導水流速平均値は港内方向を示していたことから、本構造は港内側への一方向流れを造り出し、効率的な海水交換を行えることが実証できた。

2) 現地計測の結果、波高と導水流速には相関がみられた。ところが、周期と導水流速には明確な相関はみられず、規則波での水理実験結果と異なっていた。これは、不規則波は1波ごとの波周期が異なるため、規則波のような周期による導水流速の違いが明確になりにくいと考えられる。

3) 導水流速は、潮位変動（水面位置と鉛直版天端の相対関係）に大きく影響され、水面位置と鉛直版天端が等しい条件で最大となり、それ以外ではゼロに近づくような凸型の分布を示す。これは、水理実験でも同様の傾向であった。このことから、水理実験は現地の現象とよく一致しているといえる。

4) 今回の計測結果における導水可能範囲は、水面位置が鉛直版天端高よりも有義波高だけ下側から有義波高の1.5倍程度上側($-1.0<hc/H_{1/3}<1.5$)であった。

5) 水面位置と鉛直版天端が等しい条件における現地での導水流速は、有義波高 $0.2\text{m}\sim 1.0\text{m}$ において、導水流速(m/s) $=0.047+0.288\times$ 有義波高(m)の関係を示していた。

6) 現地計測結果と水理実験結果の単位幅導水流量を比較（水面位置と鉛直版天端が等しい条件）したところ、現地計測結果は水理実験結果の7～8割程度であった。これは、構造形式は異なるが山本らの結果⁵⁾と同様の傾向を示している。

謝辞：現地計測を行うにあたり、神奈川県東部漁港事務所の皆様には、貴重なデータ（波浪、潮位）の提供や様々なご配慮をいただきました。ここに、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 高橋重雄：新構造防波堤とその設計，水工学に関する夏期研修会講義集Bコース，土木学会海岸工学委員会，pp.1-20，1997.
- 2) 塩崎禎郎・磯崎総一郎・中村滋・堀内 博：海水交換機能を有する直立消波ケーソンの開発，海洋開発論文集，Vol.12，pp.79-84，1996.
- 3) 塩崎禎郎・本田秀樹・堀内 博・中村 宏：海水交換機能を有する直立消波ケーソンの開発 ～高波浪域への適用に向けて～，海洋開発論文集，Vol.16，pp.481-486，2000.
- 4) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，鹿島出版会
- 5) 山本正昭・中泉昌光・間辺本文：海水導入を目的とした潜堤付防波堤の開発(Ⅰ)，水産工学研究所技法，第10号，pp.39-55，1988.