

直立浮上式防波堤による港内静穏度向上効果とその運用法に関する考察

Evaluation of Harbor Tranquility with Bouyancy-Driven Vertical Piling Breakwater

平山克也¹・春尾和人²・田中和広³

Katsuya HIRAYAMA, Kazuto HARUO and Kazuhiro TANAKA

Recently, the Bouyancy-driven vertical piling breakwater, which is proposed as a barrier for tsunami in original, is expected to apply as a drastic measure for harbor tranquility. In this case it is very important to consider its permeability for wind waves because it has a narrow gap between individual piles. In this paper, a sponge layer model and a porous layer model, those are often applied to partial wave reflection boundaries, are used as a permeable boundary in a Boussinesq wave model, and harbor tranquility is evaluated in an actual harbor. The porous layer model can reproduce both transmission and reflection rate with a standard gap but not with more wide or narrow gap. A numerically installed such breakwater can increase harbor tranquility in a whole year, but it is not enough in more severe seasons because its transmissivity is not so small.

1. はじめに

直立浮上式防波堤（以下、浮上堤と称する）は上部・下部鋼管からなり、船舶航行の障害とならないよう静穏時にはこれらの鋼管を海底面に埋没させ、津波や高波の来襲時など必要に応じ、上部鋼管を海面上まで浮上させて港内波浪を低下させる全く新しい形式の可動式防波堤である。そのため、この波浪低減効果や耐波安定性は未だ研究段階にあり、特に、港内静穏度向上のための対策工としての効果を検討した事例は見当たらない。

そこで本研究では、実港湾の港内静穏度解析において現在広く適用されているブシネスクモデルを用いて、浮上堤による静穏度向上効果を定量的に把握するとともに、月別の波浪出現頻度に対する各岸壁の荷役稼働率に着目し、その運用法を考察した。

2. ブシネスクモデルにおける浮上堤のモデル化

浮上堤は、実用的には直径2～3mの複数の鋼管杭から構成され、これらの間には可動とするための隙間が設けられているため、水理特性上は透過堤に分類されると思われる。これをスリット式透過防波堤とみなせば、この透過率について多くの研究事例がみられるが、本研究では、この透過率を再現するためのモデル化には、消波工による反射率の再現などに多用されるスポンジ層モデル及び透水層モデルを適用することとした。

(1) スポンジ層によるモデル化

風波に対して通常5～10m程度の計算格子を設定するブシネスクモデルを用いた港内波浪変形計算において

は、浮上堤周辺の波浪場を詳細に再現することはできない。そこで、鋼管群としての浮上堤全体を僅かに1格子分の幅を有するスポンジ層（エネルギー吸収層）としてモデル化し、風波の透過・反射特性の再現を試みた。ここで、これらの再現目標には、縮尺1/5の浮上堤模型を用いて得られた有川ら（2007a）の実験結果を用いた。

a) 有川らによる浮上堤模型実験

彼らは、（独）港湾空港技術研究所所有の大規模波動地盤総合水路内に、直径約40cmの鋼管（杭）を水路幅方向に7本並べ（開口率：0.05, 0.10, 0.15）、風波及び津波を想定した規則波を作用させて、背後の透過率や前面の反射率、鋼管への作用波圧を計測した。このうち、堤前水深2m、波高0.8mとした風波の実験ケースを表-1に示す。

b) スポンジ層パラメータの検定計算

スポンジ層を用いて波の透過率を再現する際には、反射率の検定などと同様に、断面1次元の数値水路を用いて、スポンジ層の幅 F や強度（エネルギー吸収係数 ε の値とその分布）を調整するための試行計算を必要とする。ここで、本研究で用いた平山・平石（2002）による高次スポンジ層内の波浪抵抗は、運動方程式に付加された次項で算定される。

表-1 有川ら（2007a）による風波の実験ケース（縮尺1/5）

堤前水深[m]	波高[m]	周期[s]	杭径[m]	開口率	開口幅[m]
2.0	0.8	3.6	0.4064	0.05	0.021
		5.4			
		3.6		0.10	0.045
		5.4			
		3.6		0.15	0.072
		5.4			

1 正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 国土交通省九州地方整備局
3 (株) 日本港湾コンサルタント関西支社

$$\varepsilon(x) \left[P - \left\{ \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{h}{3} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} \right\} \right] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 h は静水深、 P は線流量Flux、 B は分散関係の修正係数である。ただし、計算格子幅よりも幅狭な浮上堤に対しては、スポンジ層の幅は1格子に固定し、エネルギー吸収係数のみを変化させることとした。ここで、直径約40cmの鋼管模型に対し、計算格子幅は $\Delta x = 1.0\text{m}$ とした。これは、実機スケールで直径約2mの鋼管径に対し、5mの計算格子幅を設定したことに相当する。

試行計算は、有川らが用いた実験条件をほぼ忠実に再現し、水路沖側及び浮上堤前面の斜面地形や水位変動データの抽出位置も同様に設定した。ただし、数値水路の岸側端は実際の実験水路よりも長く設定し、反射波の影響を除外している。この結果、入射波検定時に浮上堤法線の1.45m沖で算定された水面波形は、波の非線形化も含めて実験波形をほぼ再現することを確認した(図-1)。

次に、浮上堤による透過率と反射率を実験と同様な方法により算定した。すなわち、前者は、検定時に浮上堤法線沖で出力した入射波形と再現計算時に浮上堤背後で出力した透過波形について、それぞれ最初の有効5波の平均波高の比として算出した。一方、後者は、浮上堤沖の隣接する2地点で出力した20波以上の重複波形について、合田らによる入・反射波分離解析法により算出した。

有川らの実験によると、標準的な開口率0.10の場合、実海域の周期8s、12s(模型量で3.6s、5.4s)に対する浮上堤の透過率はそれぞれ $K_t = 0.56$ 、 0.63 、反射率はそれぞれ $K_r = 0.51$ 、 0.48 であり、これらの結果は両者が相反関係にあることに矛盾しない。一方、このうち透過率を再現するために実施した試行計算の結果、スポンジ層のエネルギー吸収係数は、実海域の周期8s、12sに対しそれぞれ、 $\varepsilon = 3.8$ 、 4.0 と設定すればよいことがわかった。しかしながら、このとき算定された反射率は $K_r = 0.37$ 、 0.35 であり、相反関係こそ矛盾しないものの、当然ながら、浮上堤とは異なる波浪減衰過程によって透過率のみを合わせ込んだスポンジ層を用いて、浮上堤による反射率を同時に再現することはできなかった。

(2) 透水層によるモデル化

有川ら(2007b)は、高潮・津波シミュレータ(STOC, 富田ら, 2005)のうち、鉛直方向の運動方程式を静水圧近似し広範囲の津波伝播計算の効率を高めたSTOC-ML

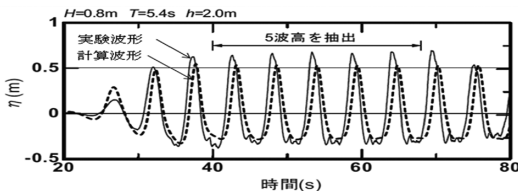


図-1 浮上堤法線前面の水面波形の比較(入射検定波)

を用いて、津波のような長周期の波に対する管の隙間による水理特性を再現するために、空隙率と乱流モデル(SGSモデル)を用いたモデル化を行っている。

一方、透水層モデル(平山, 2001)と一方程式乱流モデルに基づく碎波モデル(平山・平石, 2004)を組み込んだブシネスクモデルでは、風波に対して、これらと同様なモデル化が可能である。そこで、近藤・竹田(1983)による直立スリットの損失水頭とDupuit-Forchheimer則の関係を利用して、鋼管群としての浮上堤全体を僅かに1格子分の幅を有する透水層としてモデル化し、さらに浮上堤背後で生じる乱れによる波浪減衰を考慮し、スポンジ層と同様に、風波の透過・反射特性の再現を試みた。

a) 鋼管群の開口部による波浪抵抗のモデル化

近藤・竹田によると、直立スリット平板による損失水頭係数 C_l は次式で表わされる。

$$C_l = \left(\frac{S}{C_c S_0} - 1 \right)^2, \quad C_c = 0.6 + 0.4 \left(\frac{S_0}{S} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 S はスリット全面積、 S_0 はスリット開口部の面積、 C_c は流量係数である。また、スリット平板を薄い透水層とみなすと、スリット平板の開口率 S_0/S は、透水層の空隙率に相当するものと考えられる。

ところが、鋼管群で形成される浮上堤の波あたり面は平板のようなフラットではないため、薄い透水層においてこれらの凸凹を考慮すると、浮上式防波堤の空隙率 λ は、図-2を参考に、次式のように定義できる。

$$\lambda = \frac{4(d/2)^2(1-\pi/4)+w_0 d}{(d+w_0)d} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 d は鋼管の直径(=薄い透水層を構成する透水層材の代表径)、 w_0 は鋼管群の開口幅である。

すると、式(2)は、それぞれ次のように書き換えられる。

$$C_l = \left(\frac{1}{C_c \lambda} - 1 \right)^2, \quad C_c = 0.6 + 0.4 \lambda^2 \dots\dots\dots (4)$$

一方、損失水頭係数 C_l と透水層の抵抗係数 α 、 β との間には次のような関係がある。

$$\frac{C_l |u|}{2d_w} = \alpha + \beta |u| \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 d_w は直立スリットの壁厚、 u は代表流速である。

ここで、薄い直立スリットでは、層流抵抗による波エネルギー損失は乱流抵抗によるものに比べて十分小さいと仮定し、層流抵抗に作用するパラメータ α を無視すると、

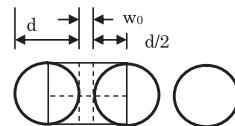


図-2 浮上堤に対する空隙率の設定

浮上堤に対する透水層パラメータ定数 λ_0 , α_0 , β_0 はそれぞれ次式で与えられる。なお、浮上堤を表現する薄い透水層では、透水層の代表径 d は鋼管径であり、これは、直立スリットの壁厚に等しい。これに対し、 d_w は数値モデル上与えることができる鋼管径 (= 薄い透水層の幅) の近似値であり、等間隔格子による差分計算を行う場合には、計算格子幅の整数倍で与えられる。

$$\lambda_0 = \lambda, \quad \alpha_0 = 0, \quad \beta_0 = \frac{d}{2d_w} C_l \frac{\lambda^2}{1-\lambda} \quad \dots\dots\dots (6)$$

b) 鋼管群背後の乱れの逸散過程のモデル化

波が浮上堤を透過する際に生成された乱れは直ちに消滅せず、碎波による乱れと同様、拡散しながら波浪減衰を生じさせると考えられる。そこで、1方程式乱流モデルにおける浮上堤による乱れの生成項 P^* を定式化し、乱れの逸散に対応した渦動粘性係数の定量化を試みる。

まず、薄い透水壁による損失水頭は次式で与えられる。

$$\Delta E = C_l \frac{u|u|}{2g} = \frac{C_l}{2g} \left| \frac{P}{D} \right| \frac{P}{D} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $u = P/D$ (D は全水深) である。

ここで、ブシネスクモデルで対象とする差分計算における計算格子幅 Δx は、通常、実際のスリット壁厚に比べ大きいので、数値計算上の近似スリット壁厚は $d_w \approx \Delta x$ とせざるを得ない。すると、単位時間・単位長さあたりのエネルギー逸散率は、式(7)を用いて次式で与えられる。

$$P_g \frac{\partial E}{\partial x} \approx \frac{C_l}{2g} \left| \frac{P}{D} \right| \frac{P^2}{D} \quad \dots\dots\dots (8)$$

さらに、碎波の場合と同様な乱れスケール $l^* = 1.5H_0$ (H_0 は沖波波高) が適用できると仮定すると、直立スリットによる乱れの生成項は次式で与えられる。

$$P^* = P_g \frac{\partial E}{\partial x} l^* = \frac{\beta_0}{d} \frac{1-\lambda}{\lambda} \left| \frac{P}{D} \right| \frac{P^2}{D} l^* \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)は、透水層パラメータと波浪物理量を用いて、浮上堤による乱れの生成項が定量的に得られることを示している。実際の計算では、前項で述べた透水層モデルで浮上堤による波浪減衰量を算定するとともに、式(9)

で生成される乱れエネルギーの逸散過程から渦動粘性係数の時空間分布を算定して、浮上堤周辺での運動量拡散による波浪減衰量を合わせて算定する。ただし、代表流速の絶対値は、波の分散特性を考慮して次式で算定した。

$$\left| \frac{P}{D} \right| = \sqrt{\left(\frac{P}{D} \right)^2 + h^2 \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D} \right) \right)^2 - \frac{2}{3} \frac{P}{D} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{P}{D} \right) \right\}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

c) 透水層による浮上堤の水理特性に関する再現性

開口率0.05, 0.10, 0.15とした浮上堤を透水層によりモデル化し、スポンジ層パラメータの検定計算と同様に、風波の透過・反射特性の再現を試みた。これらの結果を、前述したスポンジ層による結果と合わせて図-3に示す。

標準的な開口率0.10の場合、透水層によりモデル化した浮上堤の透過率は、周期8s (3.6s) のとき実験で得られた透過率をやや過小評価するものの、実験結果を比較的良好に再現している。また、反射率は、周期8s, 12s (3.6s, 5.4s) とともに、実験結果を概ねよく再現している。このことから、浮上堤による波浪変形を透水層モデルと乱流モデルで表現したブシネスクモデルでは、少なくとも風波のような短周期の波に対し、これらのパラメータのチューニングを行うことなく、浮上堤の透過率及び反射率を客観的に再現できることがわかった。

一方、標準よりも狭い開口率0.05や広い開口率0.15の場合には、これらを反映した透水層による浮上堤の透過率は過大または過小に算定され、反射率は逆に過小または過大に算定された。この原因には、式(3)において、開口率による鋼管群の開口幅と波あたり面の凹凸の比率の違いが考慮されていないことなどが挙げられる。すなわち、透水層によるモデル化では、開口率に対する透過率及び反射率の変化の応答性を高めるなどの改良が必要であると考えられる。

3. 実港湾を対象とした港内静穏度解析

N港の内防波堤に囲まれた水域に面する各岸壁 (1~8号、ただし8号岸壁は未整備) では、これらの静穏度をさらに高めるための1つのアイデアとして、高波浪時に航路幅の北側半分を浮上堤で遮蔽することが考えられる

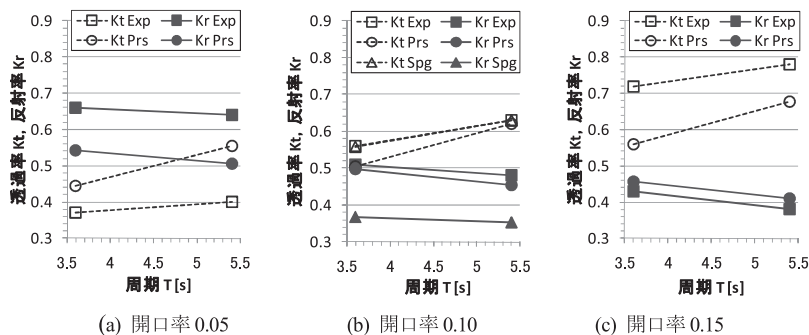


図-3 スポンジ層及び透水層による浮上堤の透過率・反射率

(図-4)．そこで、これらの岸壁を対象とした静穏度解析を実施する．ただし図より、対象水域における静穏度向上効果を定量把握する際には、浮上堤からの反射波は対象岸壁（1～7号）に直接及ばないため、浮上堤による反射率の再現精度は無視できると考えられる．したがって、本計算においては、浮上堤による波の透過率のみに着目することとした．このとき、透水層モデルによって算定される透過率は、周期が短い場合、実験値に比べ若干過小となるため、本解析では、代表周期に対して透過率が再現できるよう、それぞれエネルギー吸収係数を調整したスポンジ層モデルによって再現することとした．

(1) 計算条件

N港沖で観測された沖波波浪出現頻度分布をもとに、N港に入射する代表波浪諸元として、波高1m、周期6, 8, 10, 12s（4種類）、波向N～SW（7方位）を設定した．

浮上堤の鋼管径は2m、開口率0.10とし、設置水深は約20mである．これらは有川らの実験で想定された施工例に近いが（表-1参照）、波高が小さく水深が浅いため、図-1に比べ、作用波の非線形性はそれほど顕著ではないと考えられる．なお、計算格子幅は5mとした．

さらに、これらの透過率は、以下の考察に従い、作用波の波向きにより変化しないものと仮定した．すなわち、小島ら（1987）の研究によると、波向きが30°くらいまでは、透過率、反射率ともに直入射（0°）のものからほとんど変化しない．また、浮上堤の設置位置では、すぐ沖にある天端高水深2m程度の浅瀬による屈折効果により、北寄りの入射波であっても浮上堤の法線に対する入射角は直入射に近くなる傾向にあると想定された．

一方、浮上堤は可動式であるため、これを対象とした静穏度解析においては、波浪条件による浮上の有無を考慮することで何通りもの荷役稼働率を算定できる．本研究では、浮上堤の構造上の耐波安定限界とされる作用波高4mをしきい値として、法線前面の波高がこれより小さい場合には、航行船舶の有無にかかわらず、少なくとも波浪変形計算上は常に浮上しているとして各岸壁の荷役稼働率を算定し、浮上しない場合（暫定港形）と比較することにより、その静穏度向上効果を考察した．

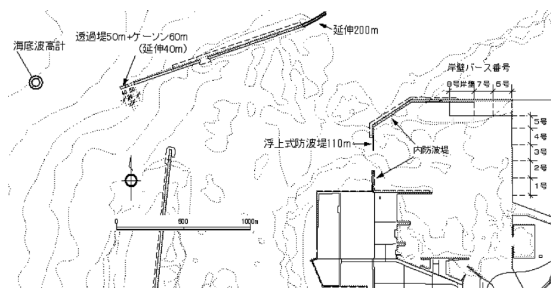


図-4 N港内防波堤の内水域に面する岸壁及び浮上堤の位置

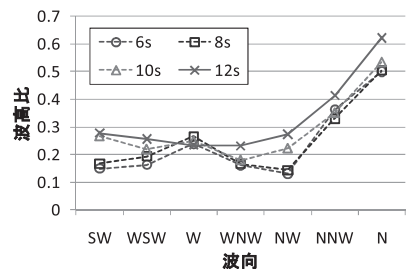
(2) 荷役稼働率の算定結果

暫定港形において浮上堤位置（案）での沖波に対する波高比及び波浪出現頻度を算出した結果を図-5に示す．

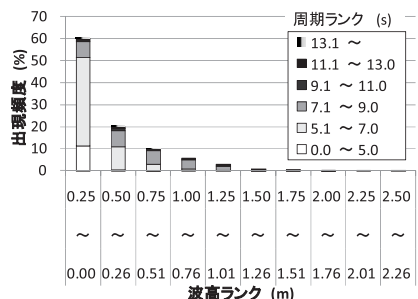
まず、N港への入射波向による波高比の変化をみると、波向W及び波向N、NNWの場合に、浮上堤法線位置で波高比が高くなるのがわかる．このうち前者は、N港西側の開口部から浮上堤法線位置へ、沖波が直接入射するためと考えられる．一方、後者は、内防波堤のすぐ沖にある浅瀬により、北寄りの波が屈折・浅水変形して内防波堤開口部へ来襲するためと考えられる．また、波向Wを除き、周期が長くなるほど波高比が増加する傾向は、これらの波浪変形に加え、沖防波堤開口部からの回折波の伝播特性によって説明することができる．

次に、浮上堤法線位置における波浪出現頻度をみると、波高0.25m以下で周期9s以下の波浪が年間の60%程度を占め、波高1.75mを超えるような波はほとんど来襲しないことが推定された．したがって、浮上堤は年間を通じて浮上可能であることが判明した．

さらに、N港1～7号岸壁を利用する3,000DWTクラスの一般貨物船を対象として、標準解析法に従い、暫定港形及び浮上堤を常に浮上させた場合に、各岸壁で期待される荷役稼働率（通年）の算定結果を図-6に示す．1～3号及び6号岸壁では、浮上堤を浮上させない暫定港形においても目標稼働率である97.5%をすでに満足しているが、浮上させることで、ほぼ99%以上の荷役稼働率を実現できることが推定される．一方、暫定港形において目標稼働率を僅かに下回る7号岸壁に加え、現地でのヒア



(a) 沖波に対する波高比



(b) 波浪出現頻度分布

図-5 浮上堤法線位置での波高比及び波浪出現頻度（暫定港形）

リング結果でも実際に静穏度が低い4号岸壁 (92.5%) 及び5号岸壁 (91.2%) でも、浮上させることで目標稼働率を満足し、荷役稼働率はそれぞれ99.1%, 98.6%にまで改善されることが推定された。特に4号, 5号岸壁は隅角部に位置し、入射波が多重反射されることが問題であったが、浮上堤によりこの水域への入射波自体が低減されたことがその要因であろうと推測される。

(3) 浮上堤の運用法に関する考察

以上のように、浮上堤による静穏度向上効果は確認できたものの、実際の運用にあたっては、当然、これらの岸壁を利用する船舶の航行を妨げないことが前提である。

一方、このような問題を解決するために、船舶の航行に合わせて浮上堤の浮上と沈降を頻繁に行うことは、オペレーションの手間と費用の面でも効率が悪い。そこで、暫定港形において静穏度が最も低い5号岸壁を対象として月別の荷役稼働率を算定し、浮上の有無による各月の稼働率の違いを考察した。結果を図-7に示す。

この岸壁では、暫定港形における通年の荷役稼働率は目標稼働率を大きく下回っていたが、月別にみると、5月と6月には少なくとも99%以上の荷役稼働率が確保できていることがわかる。しかし、7月から4月にかけての台風来襲時と冬季風浪時に静穏度が悪化し、特に北寄りの波が卓越する11月から2月にかけての荷役稼働率は85%を下回ることが明らかとなった。一方、これらの期間に最善のオペレーションを行い、浮上堤を頻繁に浮上させた場合には、概ね目標稼働率97.5%を満足すること

ができるものの、9月と2月の稼働率は、浮上堤によっても97.5%を僅かに下回ることが明らかとなった。

したがって、浮上堤によってN港5号岸壁の荷役稼働率を通年にわたり改善するためには、台風来襲時及び冬季風浪時に集中的なオペレーションを実施するとともに、合わせて沖防波堤の延伸や波除堤の設置などを行い浮上堤法線位置における波浪出現頻度をさらに改善するなど、ソフト的な対応とハード的な対応のバランスを図ることが有効と考えられる。

5. おわりに

本研究では、浮上時には透過堤となる浮上堤をスポンジ層あるいは透水層を用いてモデル化し、その妥当性を検証するとともに、N港内防波堤の開口部に設置した浮上堤による港内静穏度の向上効果やその運用法について検討した。この結果、浮上堤の運用法を検討する際には月別の荷役稼働率を算定することが有効であることなどが明らかとなった。ただし、透過率を再現したスポンジ層では反射率が再現されないことに留意するとともに、透水層による波の透過率や反射率について、異なる開口率に対する再現性をさらに向上させる必要がある。

参 考 文 献

- 有川太郎・中野史丈・野村逸人・下迫健一郎・宮島正悟・小林 真・虎石龍彦・荒井 清・木原一禎 (2007a): 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性, 港空研資料, No. 1156, 21p.
- 有川太郎・野村逸人・富田孝史・小林 真・虎石龍彦・荒井清・木原一禎 (2007b): 直立浮上式防波堤による現地津波防護効果に関する検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 936-940.
- 小島治幸・吉田明德・井島武士 (1987): 斜め入射波に対する透過性防波堤の消波特性, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 452-456.
- 近藤俊郎・竹田英章 (1983): 消波構造物, 森北出版, 275p.
- 富田孝史・柿沼太郎 (2005): 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波数値シミュレーションSTOCの開発と津波解析への適用, 港空研報告, 第44巻, 第2号, pp. 83-98.
- 平山克也 (2001): プシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 26-30.
- 平山克也・平石哲也 (2002): プシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 676-680.
- 平山克也・平石哲也 (2004): プシネスクモデルによる碎波・遡上計算法とその適用性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 11-15.

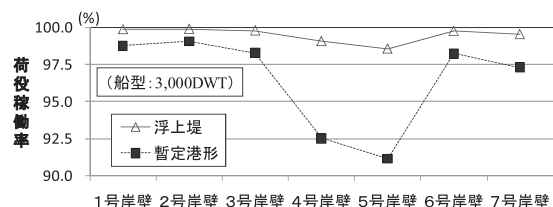


図-6 N港内防波堤内水域の各岸壁における荷役稼働率 (通年)

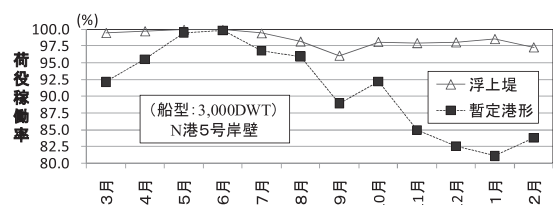


図-7 N港5号岸壁における荷役稼働率 (月別)