

消波用スクリーンを有する栈橋に作用する 揚圧力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY FOR WAVE UP LIFT ACT ON THE PIER WITH WAVE CONTROL SCREEN

大中 晋¹・古賀省二郎²・志村豊彦³・五明美智男⁴
Susumu ONAKA, Shojiro KOGA, Toyohiko SHIMURA and Michio GOMYO

¹正会員 工修 日本工営(株)コンサルタント海外カンパニー (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-2)

²正会員 同上 (同上)

³正会員 工修 (株)ドラムエンジニアリング (〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5-21)

⁴正会員 工博 同上 (同上)

The piled pier with the wave control screen has been newly proposed in order to be able to suppress the wave up-lift which affects the slab. The physical model test with two-dimensional wave flume has been conducted to find the optimum layout condition of screen and to obtain the external design condition for this type of pier. Further, CADMAS-SURF (Super roller flume for computer aided design of maritime structure) has been applied prior to the physical model test in order to know the outline for characteristics of horizontal and up-lift force. As result, it has been presented that the wave control screen was greatly effective to suppress the wave up-lift, and that the mathematical wave flume model was useful the qualitative analysis such as pre-study of physical model test.

Key Words : Wave uplift force, wave force, pier, wave control, wave dissipation screen

1. はじめに

国内における栈橋は、通常比較的静穏性が確保された海域に建設されるのが一般的である。しかし海外においては、それぞれの国における自然条件や経済性、使用ニーズ、また援助の形態等、多くの制約条件により、国内と同様の設計思想を用いて進めていくことができないケースも少なくない。本論で示す対象国においては、急峻な海底勾配をもつために、経済的な面から防波堤等の遮蔽構造物なしでの杭式物揚栈橋が求められた。当海域は半島に囲まれた湾奥に位置し設計波高は外海に比べて小さいものの、設計波相当の襲来波に対して通常構造では対処できない過大な揚圧力が作用する。このため、越波や岸壁前面反射特性といった機能面に関する水理特性を低下させることなしに、揚圧力の低減を図る必要があった。また計画する栈橋は、栈橋長が110m程度(11スパン)と、想定される波長の3倍程度と長いものである。栈橋に作用する揚圧力に関する研究はいくつかあるが^{1), 2)}、比較的長い栈橋長に対する研究例は限られる³⁾。さらに揚圧力低減を目的とした

波浪制御施設を有した栈橋の検討事例は見られない。

そこで本研究は、長い栈橋長を有する杭構造の栈橋前面部に、揚圧力低減を目的とした消波用スクリーンを設けた場合の栈橋に作用する揚圧力特性について、2次元水路を用いた水理実験により明らかにすることを目的とする。

2. 栈橋断面の検討経緯

(1) 当海域の自然条件

本検討の対象地点はアドリア海の湾奥に位置する。図-1は、栈橋計画地点周辺の平面図を示したものである。図中に示すように延長約250m、幅約110mの物揚栈橋を建設するというのが本プロジェクトの目的である。当地点では過去の波浪観測データが存在しないため詳細な波浪特性については不明であるが、長期間の風観測データより卓越波向としてS~SE方向と推定される。また当地点で実施した約3ヶ月間にわたる波浪観測結果より、観測期間中の約98%が波高0.2m以下であり、周期は3~4秒程度と短い。観測期間中得られた最大波としては $H_{1/3}$ =

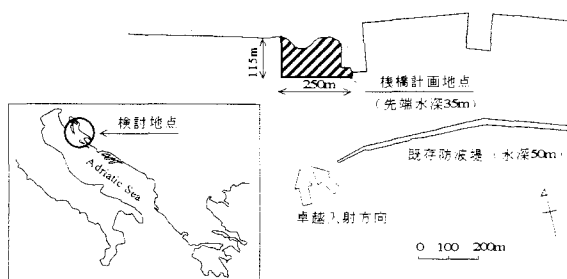


図-1 検討位置図

0.63m ($T_{1/3}=4.2s$), $H_{max}=1.14m$ で波向SSWである。なお栈橋に対する設計波条件としては $H_{1/3}=3.4m$, $T_{1/3}=6.5s$, 波向SWである。対象海域は1/3~1/5の海底勾配を持ち、計画する栈橋の先端付近での水深は約35m, また既設防波堤位置での水深は約50mである。

(2) 断面決定までの経緯

当地点の特異性として海底地形が急峻で防波堤延長には多大な建設費がかかること、および設計波高としては比較的小さいことから、防波堤なしでの栈橋構造とすることが前提条件となった。これにより、構造面、機能面において、栈橋上部工に作用する揚圧力および越波を低減することが課題となった。これら2点を解決する方策として第一に考えられるのは、天端高の嵩上げである。しかしながら背後地の地盤高が+3.2mであり、鉄道線路の引き込み線が栈橋上まで延びることや、運搬車輛の背後地から栈橋上への連続的な動線確保のため、少なくとも栈橋上の勾配を1%以内に抑える必要があった。これより上部工天端高として、これらの制限の中で考えられる最大高さとして+4.0mと設定した。しかしながら当海域の設計潮位は+0.95mであり、この場合に床版下面と水面との距離(D)は2.5m程度となり、設計波浪条件を考えた場合、通常の栈橋構造では対処できない揚圧力が作用することが予想された。このため、揚圧力低減のための波浪制御機能を有した栈橋構造とする必要があった。栈橋に波浪制御機能を付加する案としては、図-2に示すように、①先端スパン部に透水層を設け、ここでのエネルギー逸散効果により栈橋背後での揚圧力低減効果を期待する方法、②先端杭にPC遮水板(カーテン壁)を設ける

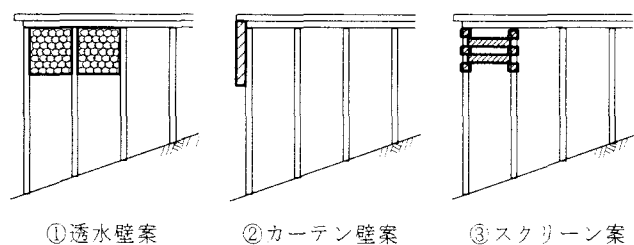


図-2 考えられる揚圧力低減案

ことにより通過波を低減する方法、③先端杭にPC桁(スクリーン)を串刺し状に配置することにより波浪低減効果を期待する方法、などが挙げられた。これらの中から、構造面、機能性、施工性、現地の材料調達事情などを踏まえ、③の案を基本とする工法を採用した。

3. 実験概要

(1) 実験目的および計測項目

本実験の目的は、以下の2点にある。

- ・栈橋に作用する揚圧力、越波および反射特性を踏まえ、構造上および機能上最適なスクリーン配置形状を見出すこと
- ・得られた最適スクリーン形状を有する栈橋構造およびスクリーンに作用する設計外力条件を得ること

以上の目的より、①上部工に作用する揚圧力およびスクリーンに作用する水平波圧の計測、②反射率及び伝達率の計測、③越波状況、の3つの項目に対する計測を実施した。なお、揚圧力による上部工への被災状況を確認するため、上記の実験とは別に、スパン毎に分割し重量調整を施した上部工模型による上部工被災実験も合わせて実施した。

(2) 実験方法

水理実験は厳しい工程上の制約より、効率的に進める必要があった。そこで事前に数値波動水路(CADMAS-SURF)を用いた感度分析を行い、実験ケースの絞り込み、計測器配置、計測モード、模型形状の設定を行った。

実験は、長さ50m、幅1m、高さ1.2mの2次元水路に、図-3に示すような縮尺1/40の栈橋模型を用いて実施した。ここで栈橋模型は、現地スケールで岸沖方向に115m(11@10m)、水槽奥行方向には仕切版を用いて3スパン分(水槽幅75cm分)のみ再現した。岸沖方向の各スパンの床版下面に揚圧力計を計11個配置し揚圧力の計測を行うとともに、中央スパン部のスクリーン模型に波圧計を最大6個取り付け、水

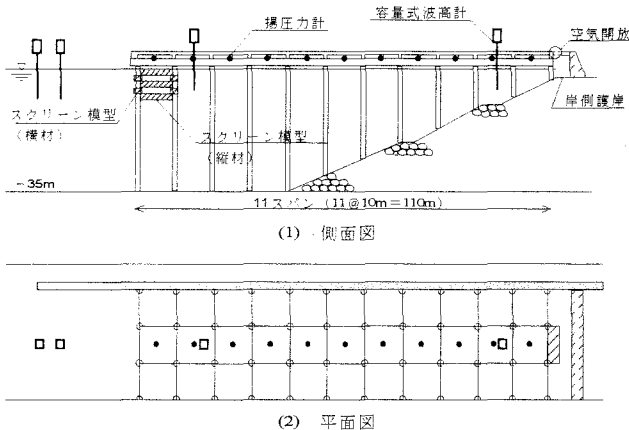


図-3 実験概要

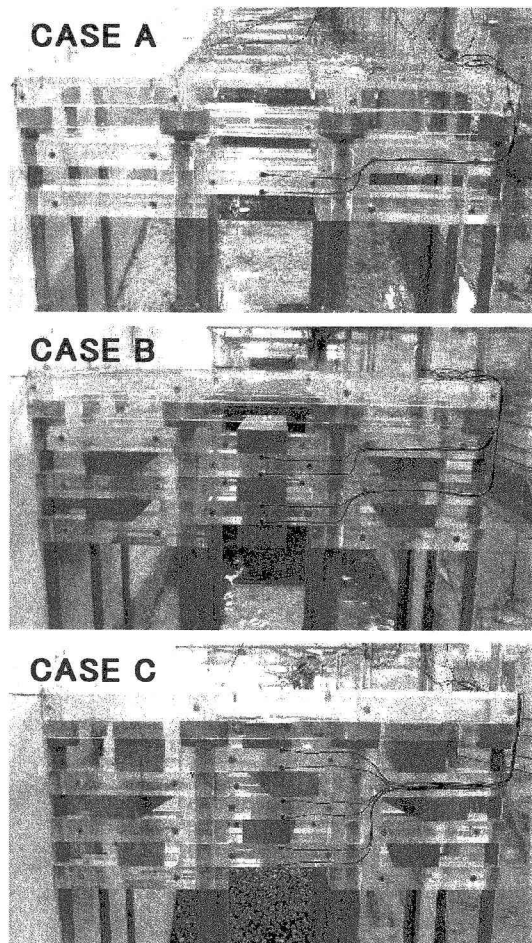


写真-1 用いたスクリーン配置

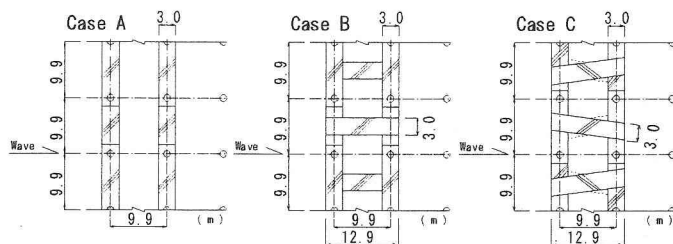


図-4 用いたスクリーンの平面配置

平波圧の計測を行った（写真-1）。なお、揚圧力、水平波圧の計測とも、サンプリング周波数は1000Hzで行った。また、栈橋前面に2台、栈橋内の先端より2スパン目および10スパン目に容量式波高計を計4台配置し、栈橋前面反射率および伝達率の計測を行った。越波状況についてはビデオ撮影による画像解析により評価した。

(3) 検討ケース

比較に用いた消波用スクリーン配置、形状を写真-1および図-4、その諸元を表-1に示す。ここでスクリーン材単体は、高さ1.5m、幅1.0m、長さ10mのPC材で構成され、その形状はほぼ直方体をなす。本検討ではこれを横材（法線方向スパン間への配置

表-1 スクリーン配置諸元

実験ケース		スクリーン下端高	横材の段数	縦材
スクリーンなし		-	-	-
あり	CASE A	-4.5m	2	なし
	CASE B	-7.0m	3	あり
	CASE C	-8.5m	4	あり（斜め配置）

表-2 実験ケース

揚圧力実験	規則波	H=4.2m, T=6.5s (1年確率波の H_{max} に相当)
		H=5.5m, T=6.5s (20年確率波の H_{max} に相当)
		H=6.8m, T=6.5s (100年確率波の H_{max} に相当)
	不規則波	$H_{1/3}=3.4m, T_{1/3}=6.5s$ (設計波条件) $H_{1/3}=4.0m, T_{1/3}=7.6s$
反射率、伝達率実験	規則波	H=1m, 2m, 3m, T=6.5s
	不規則波	$H_{1/3}=3.4m, T_{1/3}=6.5s$
越波実験	規則波	H=1m~6.8m (1m刻み), T=6.5s
(水面と床版下面間距離)		D=2.15m (HHWL), 3.45m (MWL), 4.30m (LLWL)

スクリーン材）として段数を変えるとともに、縦材（岸沖方向スパン間への配置スクリーン材）の有無による3ケースで比較した。なおCASE Cについては、縦材を波の進行方向に対して斜めに配置した。実験は規則波および不規則波を用いて行い、表-2に示すように入射波および水位条件を変えて実験を行った。なお規則波の設定波高は、不規則波の各確率波の最大波高に相当する。計測時間は、規則波については波が栈橋模型地点に到達してから岸側からの反射の影響が生じないまでの20秒間、不規則波については540秒間とした。

4. 実験結果および考察

(1) 揚圧力

a) 空気開放の有無による違い

本検討に用いた栈橋模型は、床版下面にリブが存在するため、実験ケースによっては各ブロック間で

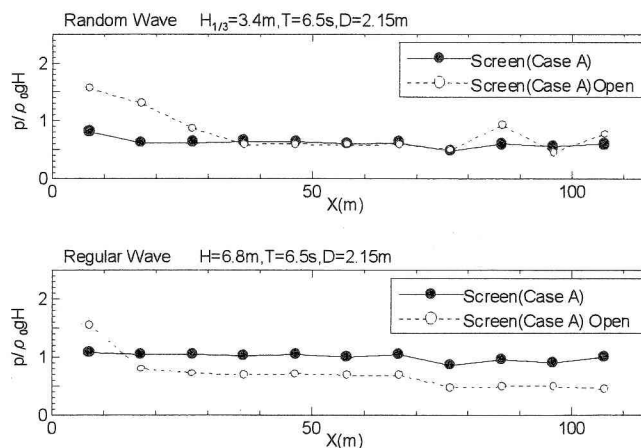
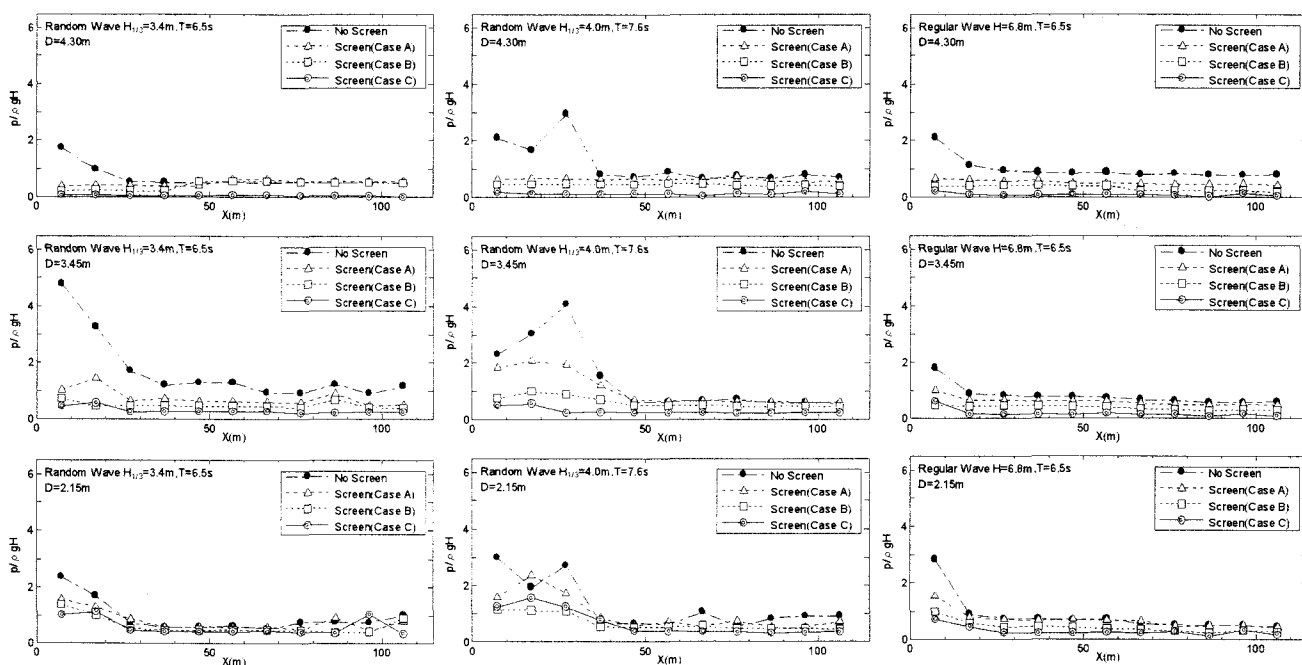


図-5 空気開放の違いによる揚圧力分布の違い



(1) 不規則波 ($H_{1/3}=3.4\text{m}$)

(2) 不規則波 ($H_{1/3}=4.0\text{m}$)

(3) 規則波 ($H=6.8\text{m}$)

図-6 揚圧力分布

閉じこめられた空気存在により、波が直接床版に作用しない状況が見られた。図-5は、同一波浪条件で空気を閉じ込めた場合と、岸側の床版の一部を取り外して空気を逃がした場合について、不規則波および規則波の結果を示したものである。空気を開放しない場合には、岸沖方向にほぼ一定であったものが、開放することにより前面スパン部で顕著な揚圧力の増大が見られる。また規則波の結果は、前面スパン以外では空気を開放することにより揚圧力の低下が見られる。現地における斜め入射の可能性や多方向不規則性の影響を考えると、少なくとも2次元実験で得られるほどの空気の密閉状況は起こりにくいと想定される。その場合、顕著な揚圧力が生じる先端スパン付近での設計揚圧力を過小評価してしまう可能性がある。そこで本実験では、図-3に示すように護岸側の床版の一部を取り外すことにより空気を開放し、その後の実験を行った。

b) スクリーン形状による比較

図-6は、 $H_{1/3}=3.4\text{m}$ および 4.0m の不規則波、および $H=6.8\text{m}$ の規則波に対する揚圧力の岸沖分布を示したものである。縦軸は無次元揚圧力を表すが、不規則波の場合は $H=2 \times H_{1/3}$ を用いた。これより、スクリーンなしの場合には、どのケースも先端より3スパン目付近まで顕著な揚圧力の増加が生じているものが、スクリーンを設けることにより、CASE A→CASE B→CASE Cの順に揚圧力の低減効果が見られる。4スパン目以降はスクリーンの有無や、波浪、水位条件に関わらず、ほぼ一定値となっている。ここで、先端数スパン付近で顕著な揚圧力が生じるスクリー

ンなしのケースに着目すると、(1)では1スパン目で最大値を示すのに対し、(2)では3スパン目で最大値を示している。(2)中段に見られるような5スパン目以降の急激な揚圧力の低下なども考え合わせると、このような分布形状の違いには、入反射波の位相干渉、入射波高、波長と水位の相違、リブの存在などに起因しているものと推察される。またいずれの波浪条件の結果も、 $D=3.45\text{m}$ の場合に最大揚圧力が発生している。これは、この水位の場合に、水面の衝突する速度が最も大きくなるためと考えられる。

スクリーンの効果を明らかにするために、 $H_{1/3}=3.4\text{m}$ およびその最大波高に相当する規則波実験($H=6.8\text{m}$)において、顕著な揚圧力が作用する1, 2スパン目における揚圧力を比較したものが図-7である。これよりCASE Aの場合には、スクリーンなしの場合に比べて50%程度、CASE B, Cの場合では30~20%程度の揚圧力に低減している。これよりスクリーンの設置は、揚圧力低減に有効であること、また横材とともに縦材を配置することにより、さらなる揚圧力の低減効果が得られることがわかった(CASE B, C)。

(2) スクリーンに作用する水平波圧

スクリーンに対する水平波圧分布は、各ケースの条件に係わらず、各スクリーンの設置高さ水面との相対関係で規定されることが明らかとなった。そこでここでは最もスクリーン段数の多いCASE Cについての結果を示す。図-8は、各水位条件に対するCASE Cのスクリーンに作用する水平波圧分布を示し

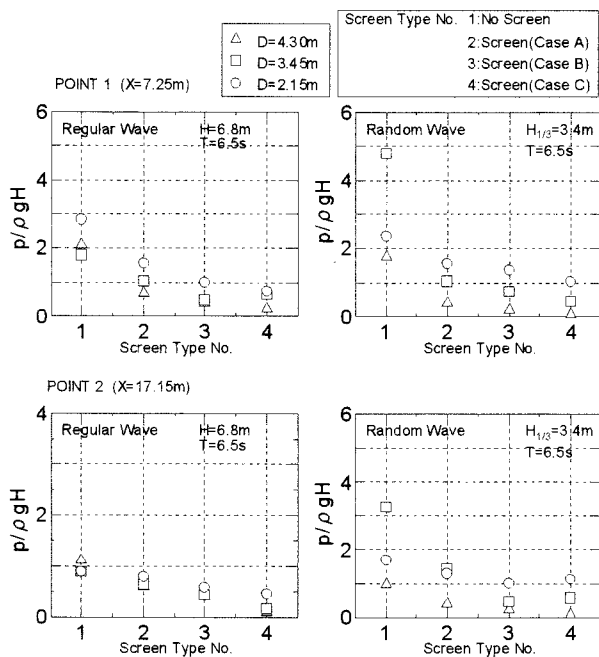


図-7 1, 2 スパン目の揚圧力の比較

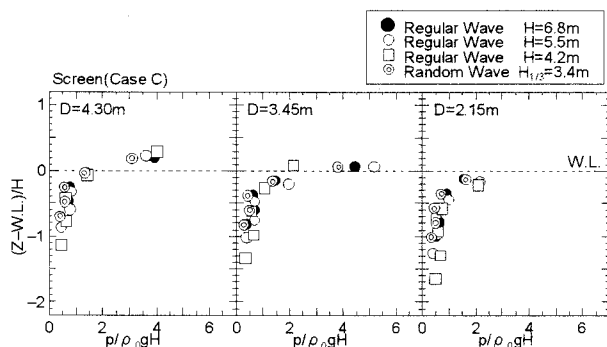


図-8 スクリーンに作用する水平波圧分布

たものである。ここで縦軸は静水面からの無次元相対水深を示す。これよりスクリーンに作用する水平波圧分布は、水位条件によらず静水面からの相対位置のみでほぼ規定されていることがわかる。また静水面近傍より上側で、衝撃波圧による増加が見られる。

(3) 数値計算結果との比較

本報告における数値波動水路の適用に際し、必ずしも各設定条件に対する十分な検討や、スクリーン開口部を再現できるほどの十分な計算格子間隔、リブの存在を考慮した計算とはなっていない。しかしながら、実験の効率化や実験条件、方法を見極めるための感度分析を目的としていることから、数値計算結果の適用性を確認しておくことは、実務レベルで有益な情報を与えるものと考えられる。

図-9は、スクリーンなし、あり (CASE A) における両者の比較を示したものである。これより、先端スパン付近での顕著な揚圧力が生じる傾向、それよ

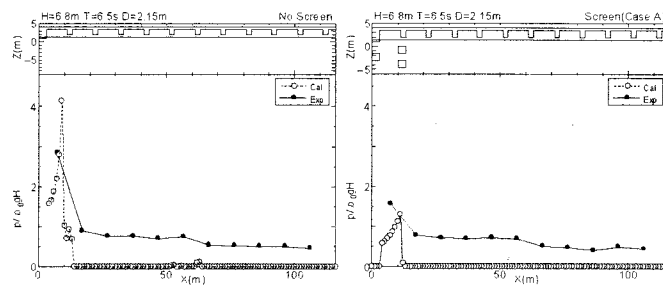


図-9 揚圧力の実験値と計算値の比較

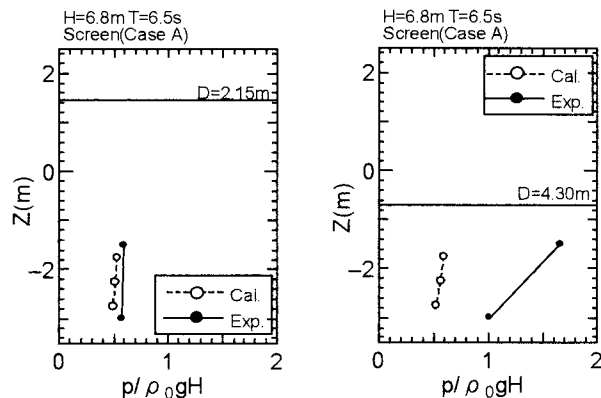


図-10 スクリーンに作用する水平波圧の実験値と計算値の比較

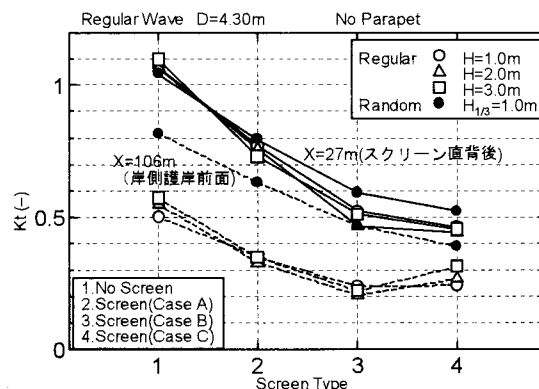


図-11 棧橋前面位置における反射率

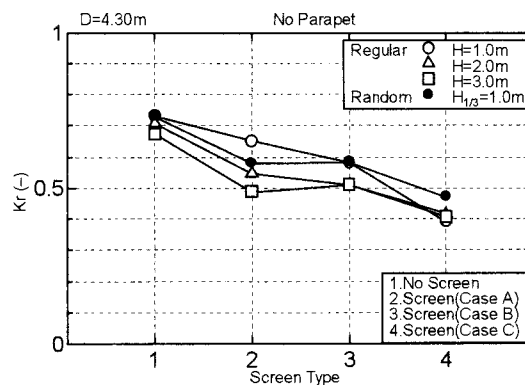


図-12 スクリーン通過後および岸側の伝達率

り岸側ではほぼ一定となるような傾向については、ほぼ実験結果と同様である。しかし、計算結果に見られる各スパン間での急激な変化は、実験結果では生じていない。また計算結果は先端付近を除けばほぼ0であるのに対し、実験結果はある一定値を示している。このような両者の違いは、計算では空気圧縮の効果が考慮されず、波高変動に応じた揚圧力分布を示すために、このような傾向になったものと考えられる。つぎにスクリーンに作用する水平波圧について、CASE Aにおける数値計算結果と実験結果を比較したものを図-10に示す。これよりD=2.15mの結果は、両者は好な一致を示すものの、D=4.30mの結果は実験結果が計算値に比べて極端に大きくなっている。

(3) 反射率および伝達率

栈橋前面での反射率を図-11に、また栈橋内のスクリーン通過後の位置 (X=27m) , およびさらに岸側に進んだ護岸前面付近 (X=106m) における伝達率を図-12に示す。横軸はそれぞれのスクリーンタイプを示し、図中には規則波および不規則波の両者の結果を示す。これより、スクリーンなし→CASE A→CASE B→CASE Cの順に反射率および伝達率とも小さくなっていく。これは、計測された反射率はスクリーンに対する反射率のみではなく、それ以上に岸側護岸の反射率の影響が大きいことを示す。すなわち、スクリーンによる波浪制御効果が高いほど栈橋内への伝達波高が小さくなり、岸側護岸からの反射波成分が低減するため、全体としての反射率が低下する。図-13は、スクリーンなしに対する各ケースの伝達率の低減率を自乗したものと、各揚圧力の低減率とを比較したものである。これより、各スクリーンによる揚圧力低減効果は、ほぼ伝達率の低減率の自乗に比例する。

(4) 越波特性

図-14は、D=2.15mおよび4.30mの各水位条件に対する、ビデオ観察より判読される越波高を示したものである。ここで越波高とは、計測時間内での栈橋天端面を基準とした場合の波の最大到達位置と定義する。D=2.15mの場合は入射波高が3mを越えるあたりから、またD=4.30mの場合は入射波高が4mを越えるあたりから越波が生じるようになる。なお、スクリーンありなしの違いやスクリーンタイプの違いによる顕著な差はほとんど見られなかった。

4. 結論

本研究で得られた主要な結論を以下にまとめる。

- ・ 栈橋床版に生ずる揚圧力低減に対し、消波スクリーンが有効であることがわかった。
- ・ 消波スクリーン配置として、法線方向スパン間における鉛直方向の段数を増すとともに、岸沖方向スパン間での縦材を使用することにより、さらな

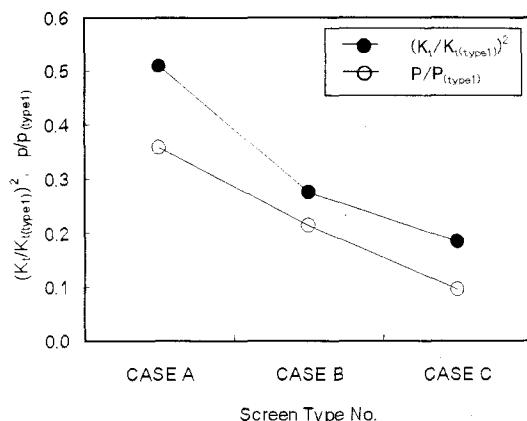


図-13 伝達率低減と揚圧力低減の関係

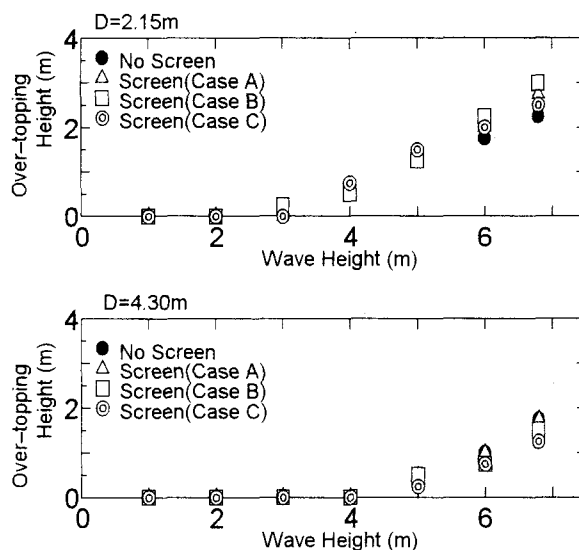


図-14 越波高と波高の関係

る揚圧力低減効果が得られる。

- ・ 栈橋内に閉じ込められた空気取り扱いにより、揚圧力分布に大きな違いが生ずる。
- ・ 数値波動水路 (CADMAS-SURF) を、栈橋揚圧力の検討に用いる場合、空気圧縮の影響やリブの存在を含めた複雑な形状を十分に再現しきれないため、現段階では定量評価には問題がある。しかし揚圧力発生位置や大凡の揚圧力を推定するといった定性的な感度分析には有用であることが示された。

参考文献

- 1) 堀川清司, 中尾忠彦, 矢島昭弘: 栈橋に働く揚圧力についての実験的研究, 第14回海岸工学講演会講演集, pp. 148-153, 1967.
- 2) 谷本勝利, 高橋重雄, 和泉田芳和: 水平床版に働く揚圧力に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第17巻2号, pp. 3-47, 1978.
- 3) 榎木 亨, 後野正雄: 栈橋床版に作用する揚圧力特性に及ぼす空気層の効果に関する研究, 土木学会論文集, No. 381/II-7, pp. 141-149, 1987.