

高波浪域における防波護岸の上部工形状による 越波流量と波力特性

WAVE OVERTOPPING QUANTITY AND WAVE FORCE CHARACTERISTICS OF SEAWALL WITH PARAPETS IN ROUGH SEAS

藤村公宜¹・下迫健一郎¹・小濱英司¹・本田和也²

Masaki FIJIMURA, Kenichirou SHIMOSAKO, Eiji KOHAMA, Kazuya HONDA,

¹正会員 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町 2-1-4)

² 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港調査事務所 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町 2-1-4)

Seawalls against open ocean are constructed in rough seas. Wave overtopping quantity and wave force characteristics on caisson-type seawall with various kinds of parapets are examined in some series of hydraulic model tests. For seawalls without dissipating blocks, the inventions of parapet shape decreased wave over topping quantity but increased that per a wave.

Key Words : seawall, wave overtopping quantity, wave force, parapet

1. はじめに

港湾区域内において、埠頭用地の不足等の空間的な制限から外洋に面した場所で埠頭建設を求められる場合があり、このような場所に建設される第一線防波護岸は、波浪条件の厳しい状況で建設されることになる。こうした場合には、消波ブロック被覆堤とすることにより越波量および波力を低減させるのが一般的であるが、消波ブロック天端が高いこと、また水深が深い場合には、消波ブロックの断面が大きくなり設置によるコスト増が大きくなることが問題点となる。消波ブロックを用いない場合に、越波量を低減させるには、上部工天端の嵩上げや波返し工の取り付けが有効であるが、一方で、このような特殊な上部工を有する場合の波力は通常の防波堤に作用する波力とは異なることが想定され、上部工だけでなくケーソン本体へも影響を与えることが考えられる。さらに、スリット構造¹⁾およびフレア型²⁾なども越波対策として有効であるが、既設の護岸を改良し越波流量の低減を図る場合などにおいては、その対応が大規模となり難しい。

本研究では、工費削減および工期短縮の観点から、ある程度の波力増大を許容することを前提に、上部工天端の嵩上げや波返し工の有無、2重パラペットの構造について越波流量と波力の関係を水理模型実験を行って整理した。この関係は、越波流量と波力をともに考慮したうえで最適な天端高と上部工形状を選定する場合に参考にできる。

2. 波返し工の検討

(1) 検討条件

水理模型実験は、二次元造波水路(長さ 38.0m, 高さ 1.5m, 幅 1.0m)を使用して、模型縮尺 1/50 で実施した。以下、本検討における波浪条件および構造条件等についてはすべて現地スケールで表記する。想定した現地の条件は、海底勾配 1/50, 護岸堤脚水深 $h=12.5\text{m}$, 設計潮位 H.W.L+1.5m である。護岸の構造形式は、比較的水深が大きく、波の作用を直接受ける防波護岸であることから高天端を有するケーソン式護岸とし、さらに波返し工がある上部工についても検討した。図-1 は、対象とした堤体断面の一例である。波返し工については、図-2 に示すように上部工の斜面部が直立壁に対して 45° または 60° で張り出し、張出幅と張出高を基本 1.0m とし、一部張出幅を 1.5m にしてその影響について確認した。なお、比較のため堤体前面に消波ブロックを設置した消波ブロック被覆堤についても水理模型実験を実施した。

水理模型実験は、設計潮位からの水面上天端高 h_c が、直立堤で波返し工のない構造について $h_c=8.5, 10.5, 12.5\text{m}$, 直立堤で波返し工のある構造では、 $h_c=8.5\sim 13.5\text{m}$ (1m ピッチ), 消波ブロック被覆堤では、 $h_c=6.5, 8.5, 10.5\text{m}$ として実施した。波浪条件については、修正 Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを有する不規則波を用い、有義波高 $H_{1/3}=8.1\text{m}$, 有義波周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ で 3 種類の波群を作成した。実験では、波作用開始後に実験水路内で反射波が安定するまでの 3 分間の待ち時間の後に、約 200 波分の

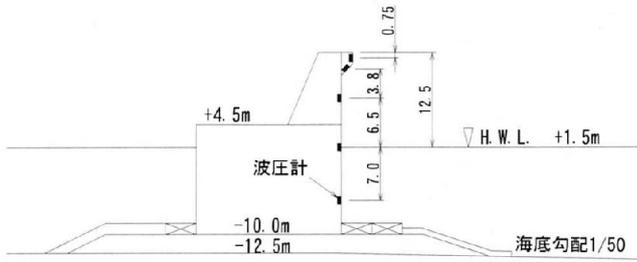


図-1 水理模型実験断面図 ($h_c=12.5\text{m}$)

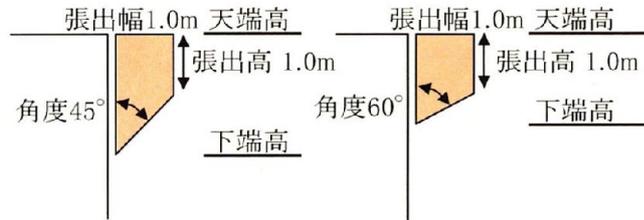


図-2 波返し工断面図

計測を行った。計測項目は、波高、波圧強度、越波流量であり、波高と波圧強度の計測はサンプリング周波数を 100Hz とした。また越波流量については、越波集水タンクに設置した容量式波高計による水位の時間変化から短時間越波流量についても求めた。

(2) 越波流量実験結果

越波状況については、波返し工なしの直立堤の場合は水塊が上方に打ちあがり、それが天端面に落下して背後へ越波する(写真-1)。一方、波返し工ありの場合は、波は基本的には波返し工によって港外側上方に飛び出すため、波返し工なしに比べて越波量は少なくなる(写真-2)。ただし、入射波と反射波の位相が合って堤体前面近くで重複波となり波の峰が高くなる場合は、波返し工の効果はほとんどなく上部工の上を直接越波する。

図-3 は、水面上天端高 h_c と単位幅、単位時間当たりの時間平均越波流量 q の関係を構造別に示したものである。許容越波流量を同じとした場合、天端高は、直立堤(波返し工なし) > 直立堤(波返し工あり) > 消波ブロック被覆堤となる。今回の場合、波返し工なしの直立堤は、許容越波流量を $0.05\text{m}^3/\text{m/s}$ とした場合でも、水面上天端高 h_c は 14.0m 以上と予想され、構造安定上現実的でないといえる。

波返し工斜面角度の違いについては、 60° のほうがより越波流量を低減できることがわかる。水面上天端高 $h_c=10.5\text{m}$ に着目してみると、波返し工斜面角度 45° の時間平均越波流量は $0.083\text{m}^3/\text{m/s}$ であるのに対して、 60° の時間平均越波流量は $0.062\text{m}^3/\text{m/s}$ であり、波返し工斜面角度 45° よりも 25% 越波流量を低減している。これは、写真-2 で示したように防波護岸に作用する波の多くは前壁で直上に打ち上げられるため、天端から張出す波返し工の角度が大きいくらい打ち上がりを抑制するものと考えられる。

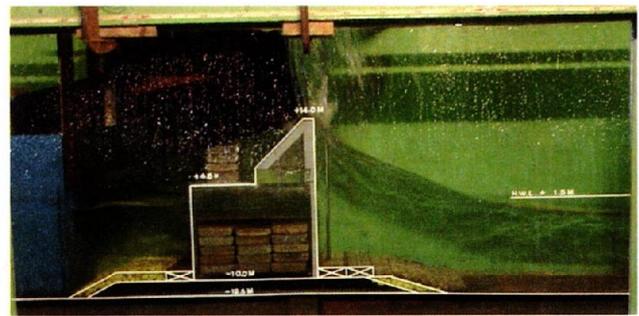


写真-1 波返し工なし ($h_c=12.5\text{m}$)



写真-2 波返し工角度 45° ($h_c=12.5\text{m}$)

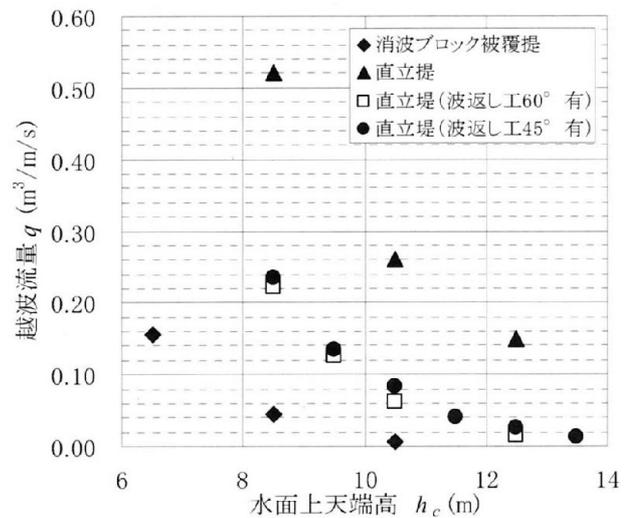


図-3 構造別水面上天端高 h_c と越波流量 q の関係

次に水面上天端高 $h_c=9.5\text{m}$ 、波返し工斜面角度 45° のケースにおいて、張出幅を 1.0m 、 1.5m とした場合の違いについて比較を行った結果を図-4 に示す。横軸を相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ 、縦軸を無次元越波流量 $q/(2gH_{1/3}^3)^{1/2}$ で整理している。張出幅 1m と 1.5m の結果はほとんど同じ結果となっており、波返し工の張出幅の違いはほとんどないと考えられる。

また、短時間越波流量の解析を行うため、越波集水タンクの中に容量式波高計を設置し、集水タンク内の水位の時間変化を計測し、越波量の時間変化を把握した。その結果の一例を同じ波群で、張出幅および張出高が 1.0m 、波返し工斜面角度 45° の水面上天端高 $h_c=9.5\text{m}$ の図-5 および水面上天端高 $h_c=11.5\text{m}$ の図-6 を比較して示す。両図の上段図は、越波量の時系列の観測累積値と 1 波ごとの越波量の分布を示した。ま

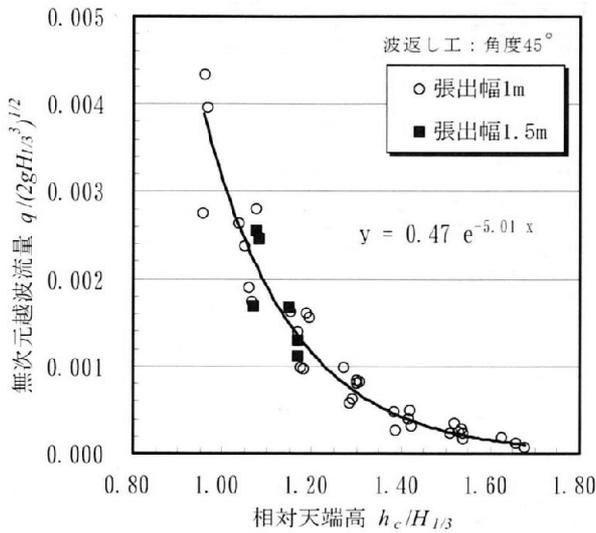


図-4 波返し工張出幅の違いによる越波流量

た、下段図には、上段図で示した 1 波あたりの越波量を前面水位が護岸天端高を越えている時間で除した 1 波あたりの短時間平均越波流量について示し、時間平均越波流量 q も併記した。

図-5 および図-6 より、水面上天端高 h_c が高くなり越波発生頻度が低下するに従い時間平均越波流量と短時間平均越波流量が乖離する傾向が確認される。これは、通常不規則波浪継続中には、越波量の多い波や少ない波および越波しない波があり、時間平均越波流量は、これらの平均値として表わされる。し

かし、図-6 のように波返し工ある構造で水面上天端高 h_c が高くなるにつれて越波量の少ない波は抑制され、越波量の多い波だけが越波する状態となる。このため、水面上天端高 h_c が高くなるに従い越波発生頻度が減少し、時間平均越波流量 q は減少するが、1 波ごとの短時間越波流量は、時間平均越波流量 q ほど大きく減少しないため、時間平均越波流量 q との乖離が大きくなり、その差が 10 倍以上となるものも多く確認された。また、1 波あたりの越波量は、いずれのケースにおいても、 10m^3 以上の大きなものが含まれていた。

(3) 波圧測定実験結果

波圧の計測においては、護岸前面の 5 箇所について行い (図-1 参照)、1 波ごとの波高と波圧のピーク値を整理し回帰分析することで設計波相当の波圧を評価した。なお、波圧の回帰分析には、波圧データの大きい側の影響と小さい側の影響を等価に取り込むことを考慮して近似式を 1 次式で表した。

波返し工の斜面部に作用する波圧は、合田式で計算されるケーソン前面の静水面での波圧を大きく上回る衝撃的な波圧となり、波返し工斜面角度 45° と 60° では、 45° における波圧強度が小さい (図-7)。水面上天端高 $h_c=10.5\text{m}$ にケースでは、波返し工斜面角度 45° の波圧が 330kN/m^2 であるのに対して、 60° の波圧は 440kN/m^2 で 45° の 1.3 倍の波圧が発生している。波返し工斜面部の波圧は波が防波護岸に衝突

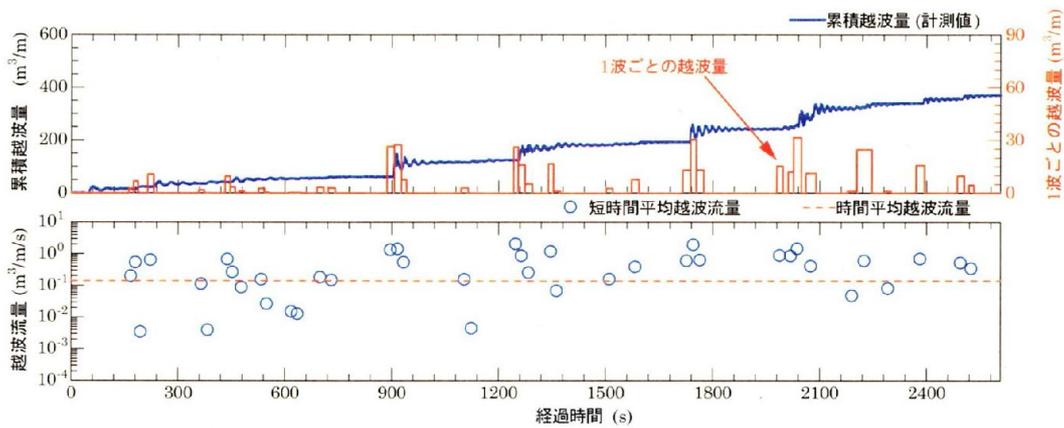


図-5 波返し工 $h_c=9.5\text{m}$ の短時間越波流量 (張出幅 1m, 張出高 1m, 角度 45° 波群 1)

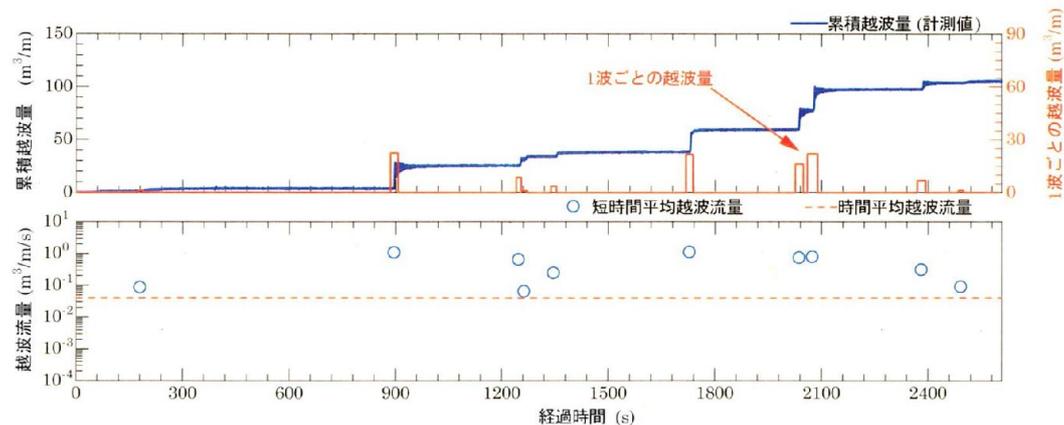


図-6 波返し工 $h_c=11.5\text{m}$ の短時間越波流量 (張出幅 1m, 張出高 1m, 角度 45° 波群 1)

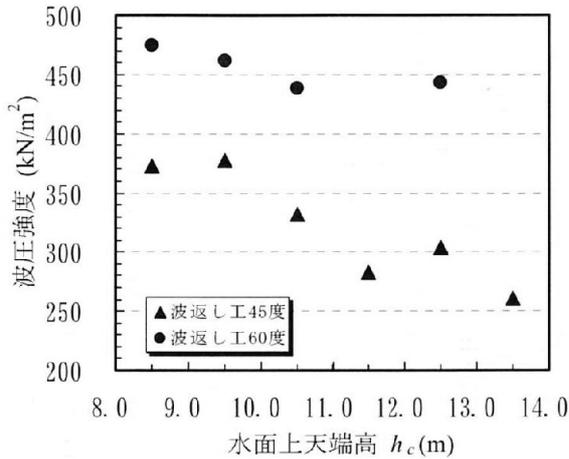


図-7 天端高の違いによる波返し工斜面部の波圧強度

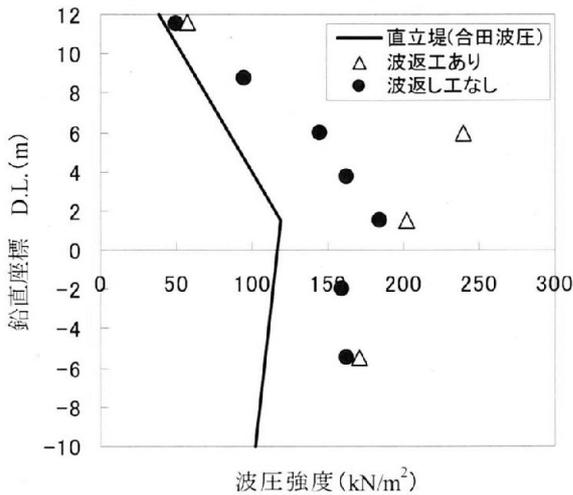


図-8 天端高 D.L.+12.0m の際の波圧鉛直分布

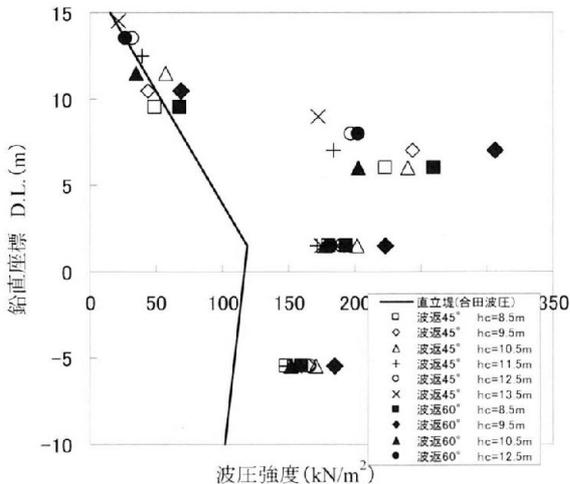


図-9 各天端高で作用する水平方向波圧強度の鉛直分布

すると、水塊が壁面に沿って上昇し、波返し工の斜面部に衝突する。波返し工斜面角度 45° と 60° では、 45° のほうが上昇してくる水塊に対して傾斜が緩く抵抗が小さいため 60° よりも波圧強度が小さくなったと考えられる。

また、高天端と波返し工の影響により、波返し工

を含む上部工だけでなく、護岸前面全体の波力も合田波圧に対して大きい値が確認された。合田波圧は水面上天端高 h_c が $0.6H_{1/3}$ 程度のもをを対象にして検討されたもので、本ケースの合田波圧の適用水面上天端高 h_c は、 $H_{1/3}=8.1\text{m}$ であることから $0.6H_{1/3}=6.4\text{m}$ 程度となる。それに対し今回の実験条件は $h_c=8.5\sim 13.5\text{m}$ と高いため、実験波圧と合田波圧に違いが現れたものと考えられる。実際に波返し工なしの直立堤の水面上天端高 $h_c=10.5\text{m}$ の静水面波圧は、合田式による静水面波圧の約 1.5 倍となり、水野ら³⁾が示している高天端防波堤の波力特性と同様の傾向を示した。また、波返し工ありの場合には、静水面より上の部分においてさらに波力が大きくなっている (図-8)。これは、防波護岸に衝突した波が前壁に沿って垂直に打ち上がってくるが、波返し工にぶつかり押さえられることによりそれが抵抗となり、直立護岸の場合と比べてエネルギーが逃げにくくなるためと考えられる。波返し工斜面角度 45° と 60° では、 60° のほうが、前壁に沿って垂直に打ち上がってくる波に対して抵抗が大きくなるため、 45° よりも 60° での波圧が大きくなる傾向にある (図-9)。本実験では斜面角度が異なる二種類の波返し項について検討したが、波返し工形状と波圧増大の一般的関係を求めるには、他の条件での検討も必要であろう。

3. 2重パラペットの検討

(1) 検討条件

水理模型実験の検討条件は、波返し工の検討条件と基本的には同じであるが、護岸堤脚水深 h を 13.0m 、有義波高 $H_{1/3}=7.48\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=12.3\text{s}$ に変更している。護岸パラペットの形状においては、前部パラペットおよび後部パラペットの水面上天端高 h_c を同一にしており、 $h_c=8.5, 10.5\text{m}$ とした。また、ケーソン幅は 19.0m であり、後部パラペット設置位置は、ケーソン後端から 4.5m 位置に設置した (図-10)。なお、比較のため直立堤の $h_c=8.5, 10.5\text{m}$ についても水理模型実験を実施した。

(2) 越波流量実験結果

越波状況については、前部パラペットにて水塊が上方に打ちあがり、前部パラペットを越波するが、多くのものは後部パラペット前面に落下してケーソン

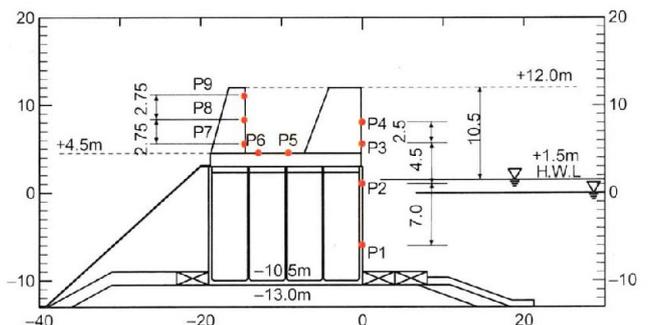


図-10 水理模型実験断面図 ($h_c=10.5\text{m}$)

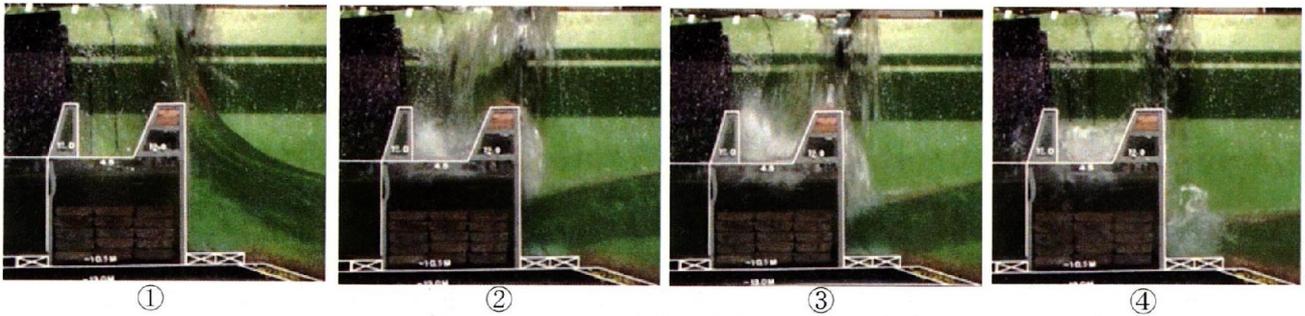


写真-3 2重パラペット越波状況($h_c=10.5\text{m}$)

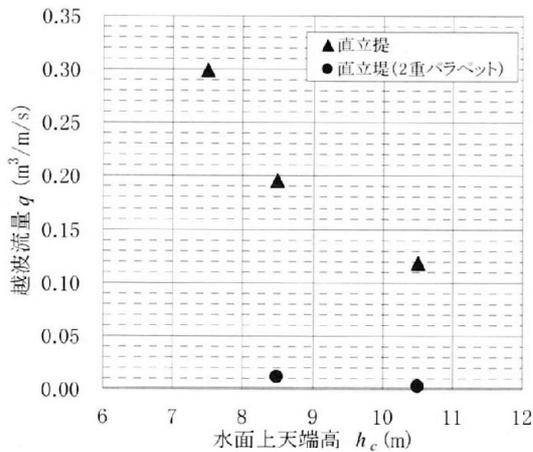


図-11 水面上天端高 h_c と越波流量 q の関係

ン背後への越波を防いでいる(写真-3)。ただし、波返し工の場合と同様に入射波と反射波の位相が合っ
て堤体前面近くで重複波となり波の峰が高くなる場合には、越波頻度は少ないが後部パラペットの上を直接越波するものがある。

図-11は、水面上天端高 h_c と単位幅、単位時間当たりの時間平均越波流量 q の関係を示したものである。2重パラペット水面上天端高 $h_c=8.5\text{m}$ の場合の時間平均越波流量は $0.011\text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ で直立堤の同じ天端高のケースの $1/20$ 程度、 $h_c=10.5\text{m}$ の場合は $0.003\text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ と直立堤の $1/40$ 程度になる。なおこれらの越波流量は、港湾埠頭用地で通常用いられる許容越波流量設計値 $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ を十分に満足している。

次に、2重パラペット $h_c=10.5\text{m}$ の短時間越波流量

について図-12に示す。1波あたりの最大越波量は 3m^3 程度で、1波あたりの短時間平均越波流量にすると $0.157\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ となり、前章の波返し工の検討と同様に、時間平均越波流量と短時間平均越波流量が乖離する傾向が確認される。

(3) 波圧測定実験結果

波圧の計測においては、護岸前面4箇所、ケーソン天端2箇所および後部パラペット3箇所の計9箇所について行い(図-10)、2重パラペットに対して、護岸前面、後部パラペット、全体の3種の合成波圧を作成した。そして、各合成波圧の波形より波圧のピーク時間を選定し、各測点の波圧(同時波圧)を抽出して回帰分析することで設計波相当の波圧を評価した。なお、波圧の回帰分析には、波返し工の場合と同様に波圧データの大きい側の影響と小さい側の影響を等価に取り込むことを考慮して近似式を1次式で表した。次に護岸前面、後部パラペットおよび全体波圧の各モードで得られた設計波相当の波圧に対して、構造安定照査を各々実施した。なお、護岸前面の波圧を合田波圧にした場合についても検討を行った。その結果、水面上天端高 $h_c=10.5\text{m}$ 例に挙げると護岸前面に合田波圧をあてたケースがもっとも安全側の照査結果となった。これは、護岸前面にあたる波圧のピーク時と後部パラペットにあたる波圧のピーク時の間に十分な位相差が得られているためだと考えられる。

ここで、2重パラペット水面上天端高 $h_c=10.5\text{m}$ の場合における後部パラペットに作用する波圧につい

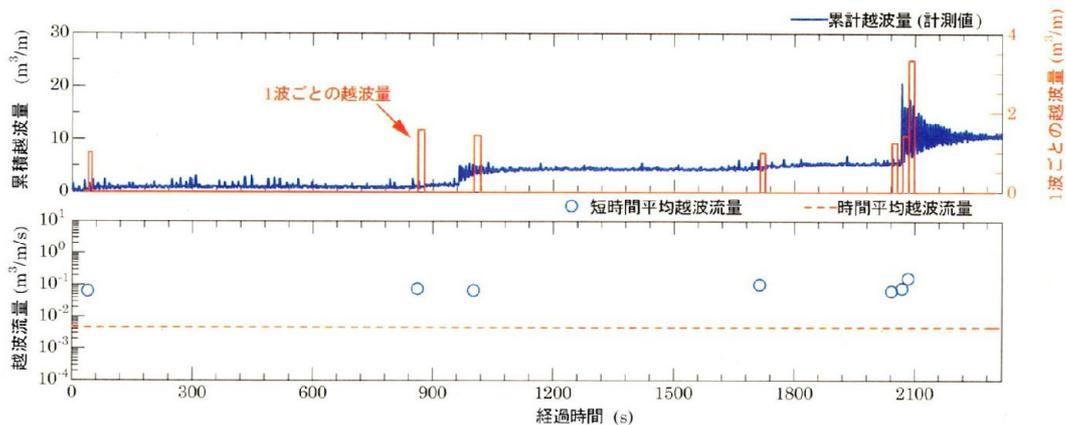


図-12 2重パラペット $h_c=10.5\text{m}$ における短時間越波流量 (波群 1)

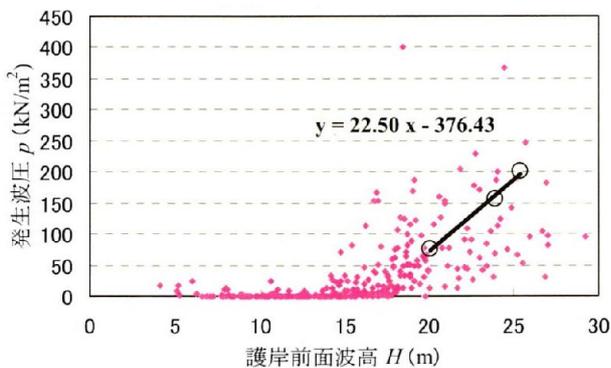


図-13 後部パラペット波圧 (測定位置 p7 : D.L.+5.5m)

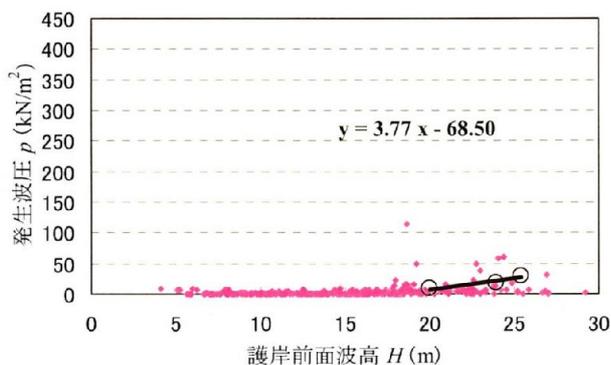


図-14 後部パラペット波圧 (測定位置 p8 : D.L.+8.3m)

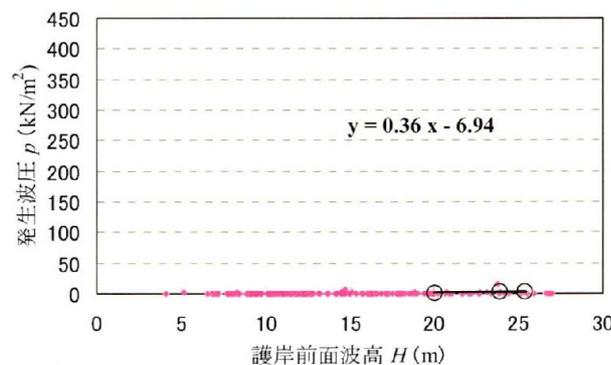


図-15 後部パラペット波圧 (測定位置 p9 : D.L.+11.0m)

て図-13～図 15 に示す。2重パラペットの構造で設計上留意しなければならないのは、後部パラペット下部において、衝撃的な波圧が発生しており、後部パラペットの安定性および部材の健全性に注意を払う必要があることがわかる。図中の近似式は、波圧を大きい方から全体の1/20抽出して平均した1/20最大波圧、1/10最大波圧、1/3最大波圧について整理し、1次式で表した。これは、水理模型実験で得られた波圧全体で回帰分析を行った場合には、波圧が平均的に評価されてしまうため、このような整理とすることで、衝撃的な波圧を考慮できるようにした。後部パラペットへの波圧は、波の条件やパラペット形状に左右されることから、一般的な波力特性を表現する評価式等を導くには、さらに検討が必要である。なお、図-13～図-15における設計波相当の護岸前面

波高 H は 26.1m である。

4. まとめ

外洋に面した場所に建設される第一線防波護岸は、波浪条件の厳しい状況で建設されることとなり、消波ブロック被覆堤にすることで越波量および波力を低減させるのが一般的である。しかしながら、消波工天端が高いまたは水深が深い場合には消波ブロックの断面が大きくなり、昨今の公共事業を取巻く環境も合間って、コスト増が大きな問題になる。

そこで、本検討では、波返し工および2重パラペットの可能性について、あるモデル断面をもとに模索した。

本検討による主要な結論は以下の通りである。

- ① 波返し工を設けることにより、時間平均越波流量 q は低減できるが、1波ごとの短時間越波流量は、時間平均越波流量 q ほど大きく減少しない。また、護岸前面の波圧について、特に静水面から上の部分で合田波圧をかなり上回る波圧増大を招く。
- ② 波返し工斜面角度 45° より 60° の方が越波流量を低減出来るが、斜面部にあたる波圧は 60° の方がきつい。また、張出幅 1.0m と 1.5m では有意な差は見受けられなかった。
- ③ 2重パラペット水面上天端高 $h_c=8.5m$ の場合の時間平均越波流量は $0.011 \text{ m}^3/\text{m/s}$ で直立堤の同じ天端高のケースの1/20程度、 $h_c=10.5m$ の場合は $0.003 \text{ m}^3/\text{m/s}$ と直立堤の1/40程度なり、大幅に越波流量を低減できる。
- ④ 2重パラペットの後部パラペット下部においては、衝撃的な波圧が発生しており、後部パラペット安定性および部材の健全性の検討にはこのような波圧を考慮する必要がある。

謝辞：本研究の水理模型実験においては、(株)エコー 長谷川巖氏、小畠大典氏、稲垣茂樹氏に協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木村克俊，早川哲也，高橋重雄，下迫健一郎，H.Oumeraci：消波型高基混成堤の越波特性に関する大型模型実験，海岸工学論文集，第46巻，pp.756-760，1999
- 2) 村上啓介，片岡保人，竹鼻直人，小長野宰，上久保祐志：フレア型護岸の大水深域への適用における護岸水理特性の検討，海洋開発論文集，第15巻，pp.1-6，1999
- 3) 水野雄三，杉本義昭，木村克俊，山中浩次，菊地聡一：高天端防波堤の波力特性に関する研究，海岸工学論文集，第40巻，pp.721-725，1993