

天端被覆ブロック護岸の設計法に関する研究

岩瀬浩二*・池谷 毅**・安部鐘一***
 白川部秀基***・天野 英樹****

1. 緒 論

人工島護岸や港湾構造物は、建設コストが水深のほぼ二乗で増大するため、大水深海域での築造に当たっては、コストを如何に削減するかが重要課題となる。このため高橋ら (1995) にみられるように低天端護岸の研究も活発となってきている。そこで著者らは、この要求に対応するため、施工性も考慮した天端被覆ブロック護岸を提案した(岩瀬ら, 1999)。本報では、この新護岸を標準化するために行った越波流量推定法と設計法に関する実験的研究を述べるとともに、越波流量推定法を補完するために行った越波の数値計算について報告する。

2. 天端被覆ブロック護岸

新護岸の形状を図-1 に示す。基本思想は、従来の消波護岸の波エネルギー減勢への寄与が小さいブロック部分にケーソンを埋め込むことである。波エネルギーの集中する静水面上に2層のブロックを配置し、効率的に消波するものであり、後退パラペット護岸に見られるパラペットへの衝撃的な波圧と著しい跳波を抑止することが可能となる。

また、ハドソン式から得られるケーソン天端の所要ブロック(テトラポッド)4個分の幅と、森平ら(1967)から求めた滑动限界ケーソン幅とは、図-2 に示すように波高によらず良く一致しており、ケーソン天端のブ

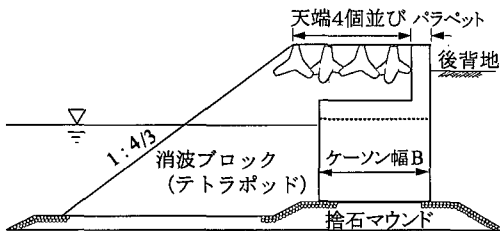


図-1 天端被覆ブロック護岸

- * 正会員 鹿島技術研究所 主任研究員
- ** 正会員 工博 鹿島技術研究所 グループ長
- *** 正会員 北海道電力(株)
- **** 正会員 北電興業(株)副長

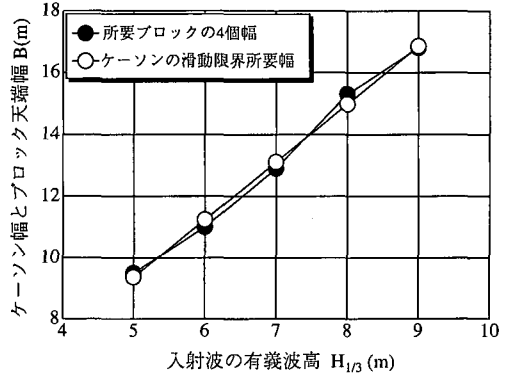


図-2 ケーソン幅とブロック幅

ロックは上下2層積みで水平4個並びが必要十分と考えられる。

3. 越波流量の推定法と波力特性

3.1 越波流量の推定法

越波流量の推定法を作成するために水理実験を行った。図-3 に示すように、長さ60m、高さ1.5m、幅0.7mの造波水路に1/100勾配の斜面を設置し、この上に護岸模型を入れて不規則波を約300波作用させた。

波浪条件は、護岸前面の相対水深 h/H_0 を1.0, 1.67, 2.33の3つにおいて、沖波の波形勾配 H_0/L_0 を0.0154, 0.024, 0.0333の3種類に変化させて、合計9種類の不規則波を作成し、相対天端高さ h_c/H_0 を0.75, 1.0, 1.25, 1.5とした4種類の護岸模型にそれぞれ作用させた。

越波流量は、図-4 に示すように、護岸を越波した水流

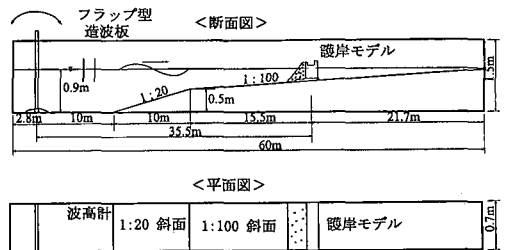


図-3 実験水路

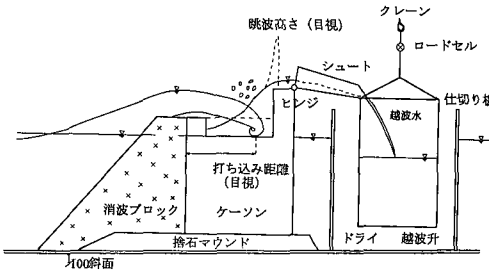


図-4 越波流量計測状況

をシュートにより越波升に流し込み、ロードセルにて時系列的に重量を計測し、波浪作用時間全体の平均越波流量を算出した。

越波流量の推定法は合田 (1975) の不規則波の碎波変形法を取り入れた合田ら (1975) の越波計算モデルに基いた。このモデルでは、波頂高比 $K (= \eta_c/H)$ を規定する項の内、 H/h に比例して重複的に K を増大させる項の比例定数 a を実験結果から 0.5 としている。今回の場合、実験結果から、重複的な効果が従来の消波護岸より小さくなることを考慮して a を 0.3 とした。実験の入射波条件から碎波変形計算を行い、 $a=0.3$ として越波計算を行った結果と、実測した越波流量を比較した。図-5 に越波流量の推定値と実験値を示す。これより、推定値は実質的に越波流量を検討する範囲 ($10^{-5} \sim 10^{-2}$) で実験値と良好な一致を示しており、実用上十分な精度を有していると考えられる。図-6 に今回の越波流量推定法を適用して、海底勾配 1/100 で沖波波形勾配 0.036 の場合の消波護岸と天端被覆ブロック護岸の越波流量を推定した結果を示す。これより、消波護岸に比べて、今回の護岸は越波流量を大きく低減できることが分かる。その結果、天端高さを小さく設定でき、コストの低減が図れるものと思われる。

3.2 波力特性

次に、護岸を設計するために必要な波力特性について

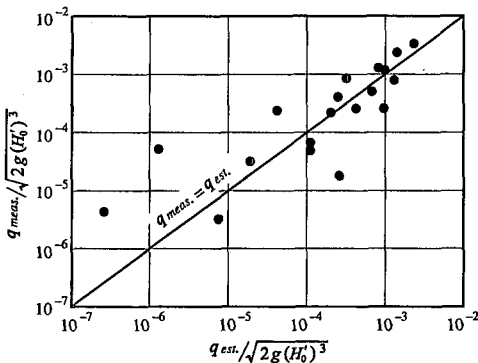


図-5 無次元越波流量の計算値と実験値

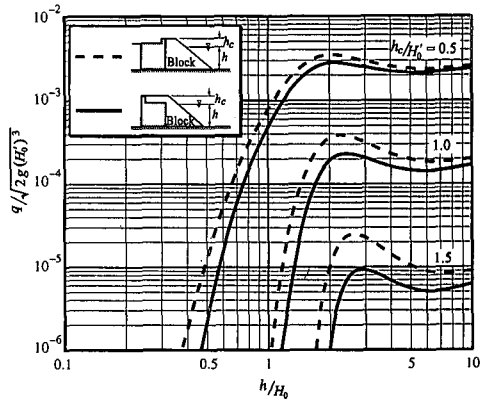


図-6 消波護岸と天端被覆ブロック護岸の越波流量

述べる。実験は越波実験と同じ造波水路を用いた。護岸模型に小型波圧計を 20 点貼り付けた状態で、模型を砕石で作成したマウンド模型上に設置し、消波ブロックを積み上げた。この模型に $T_h=1.84$ s, $H_0=16.6$ cm の不規則波を約 300 波作用させて波圧の時系列を計測した。なお、衝撃的な波圧も計測できるように、サンプリング周波数は 1000 Hz とした。実験結果を図-7 に示す。図-7 には最大波 ($H_{max}=20$ cm) が作用した際の最大波圧分布を示している。

ケーソン前面波圧と揚圧力の実験値 (●印) は、合田式から得られる値と良く一致している。一方、パラペットに作用する波圧 (□印) は、最大で $1.0 \sim 1.5 \omega H_{max}$ (ω : 海水の単位体積重量) である。従来の後退パラペット護岸では、パラペットに最大で $3.0 \sim 4.0 \omega H_{max}$ に達する衝撃的な波圧が観測されているが、今回の護岸は、ケーソン天端の 2 層積みの消波ブロックによって波エネルギー

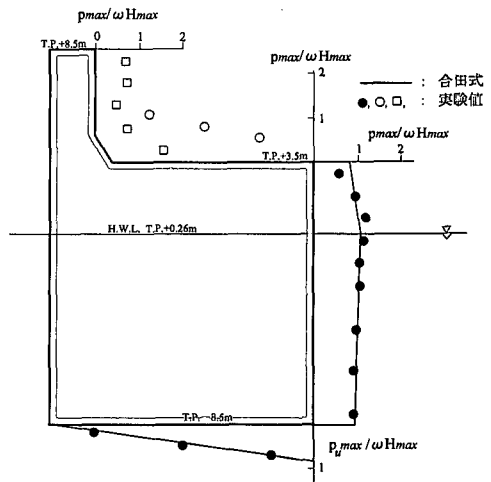


図-7 天端被覆ブロック護岸に作用する波圧

の減勢が十分に行われているため、パラペットに衝撃的な波圧が生じることを抑止できたものと考えられる。また、後退パラペット護岸では、パラペットに衝突する水塊により、著しい跳波がみられたが、今回の護岸では跳波の発生はみられず、安定した越波現象が観察された。さらに、ケーソン天端を鉛直下向きに押え込む波圧（○印）も計測したが、パラペットに作用する波圧と同程度であり、ケーソンの安定上問題にはならなかった。位相的には、ケーソン前面圧力と揚圧力がほぼ同位相で出現し、これに遅れてパラペットの圧力と鉛直下向きの圧力がほぼ同位相でピークを示す。

設計的には、パラペットに作用する波力は位相が遅れる上、大きさが小さいことから、ケーソン前面波圧と揚圧力のみを全体の安定計算時に合田式で評価すれば十分である。鉛直下向きの波圧は位相の遅れがあるため、安定計算上は無視した方が良くと考える。パラペットに作用する波圧は $(1.0\sim 1.5)\omega H_{max}$ で鉛直方向一様としてパラペット部材の設計に用いれば良いと考えられる。

4. 越波に関する数値計算

天端被覆ブロック護岸の消波のメカニズムを観察し、越波現象の理解を深めるとともに、越波流量推定法を補完することを目的として、Navier-Stokes 方程式を有限差分で直接解く手法により、2次元の越波に関する計算を行った。ここでは、従来の消波護岸と比較しながら計算を行った。榊山ら(1996)が消波護岸を対象として越波に関する数値シミュレーションを実施している。ここでは、消波ブロック部分の取り扱いには、榊山ら(1990)のポーラスモデルを適用し、VOF法により自由表面を規定し、造波境界では、微小振幅波理論に基づいて造波した。

4.1 計算条件

計算領域を図-8に示す。水平方向811m、高さ30mとし、水深を15mとした。水平方向の4波長分は320等分割とし、護岸前面の1波長分は130等分割とした。鉛直方向の30mは60等分割とした。時間間隔は $\Delta t/T=1/300$ とした。護岸モデルを造波境界から5波長分離れた位置に設置し、護岸の後方にも水位を設定した。入射波は、周期 $T=13$ s、波高 $H=5$ mの規則波であり、微小振幅波理論に基づいて造波したものの、進行するに従って、波高7m程度のStokes 波的な波形となった。

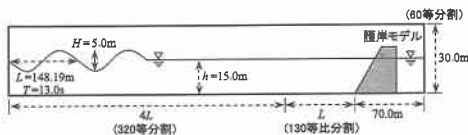


図-8 計算領域

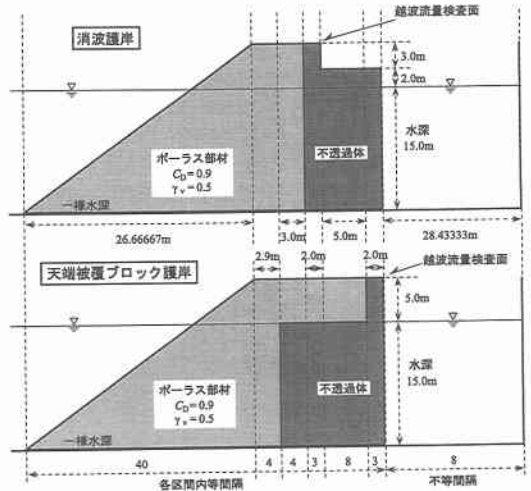


図-9 護岸計算モデル

次に、計算に用いた護岸モデルを図-9に示す。消波護岸と天端被覆ブロック護岸とも天端高さは5mとした。ポーラス部材の抗力係数 C_D は0.9とし、空隙率は0.5とした。消波護岸のポーラス部材の断面積は 385 m^2 であり、天端被覆ブロック護岸のそれは 375 m^2 と消波ブロック護岸より若干小さくなっている。ケーソンは不透過体とし、パラペットの天端に越波流量検査面を設け、ここで越波する水の質量速度を計算し、1波ごとの越波量を求めた。初期状態から計算を始め、周期 T の10倍(130s)で計算を打ち切った。

4.2 越波時の流速ベクトル

前述した方法で計算した消波護岸と天端被覆ブロック護岸に関して、越波に至る流速ベクトルの代表的な時間変化をそれぞれ図-10及び11に示す。

消波護岸では、波浪が来襲した際、ポーラス材の斜面上を遡上する流れとポーラス材内部を上昇する流れがパラペットの天端付近で一体となり、パラペットの天端から斜め前方へ跳ぶようにして越波している状況が観察された。また、ポーラス材の底辺部分は流速がほとんど無く波エネルギーの減勢にはあまり寄与していないことが明らかになった。

一方、天端被覆ブロック護岸の場合は、ポーラス材の斜面上を遡上する流れは、ポーラス材天端前方で最も強くなるが、その後ケーソン上のポーラス材内部に落ち込みながら進行する。また、ポーラス材内部を上昇する流れはケーソン天端で水平方向に進行し始める。この2つの流れはある時点で一体となってケーソン上の長いポーラス材で減勢されながらパラペットに近づき、水位がパラペットより高くなって越波に至る。これより、ケーソン上の水平方向に長いポーラス材が波エネルギーの減勢

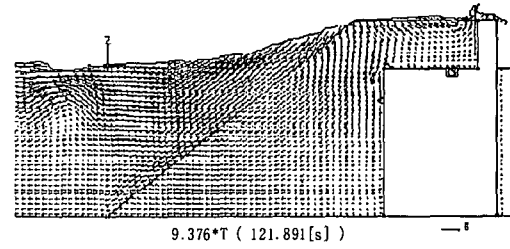
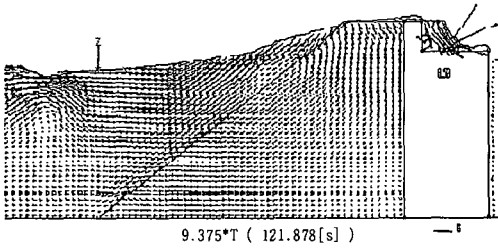
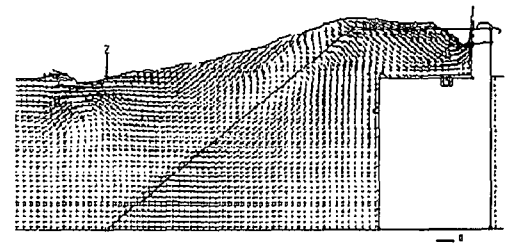
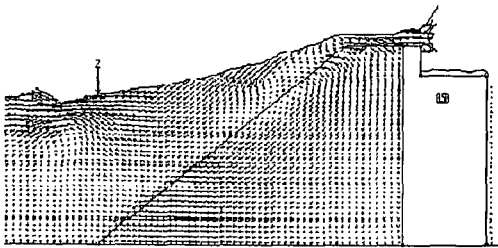
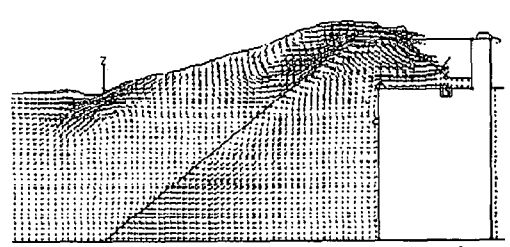
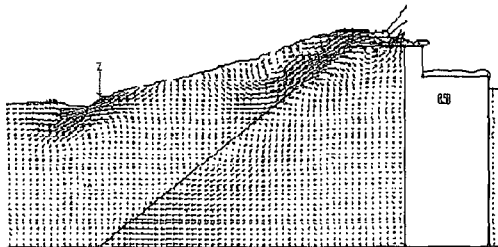
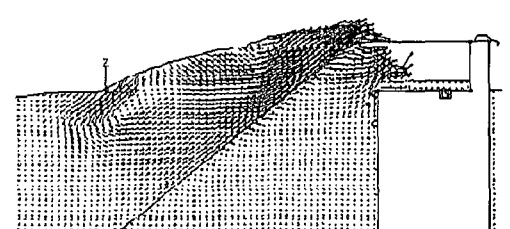
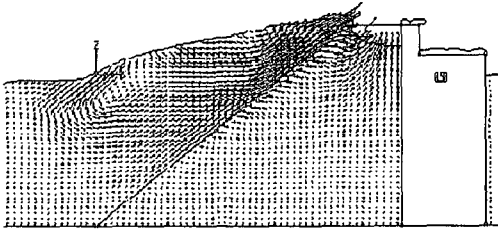
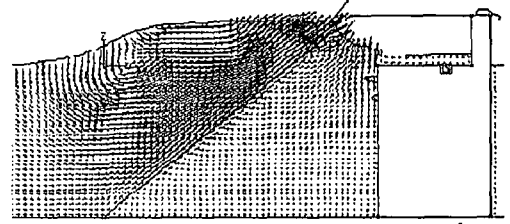
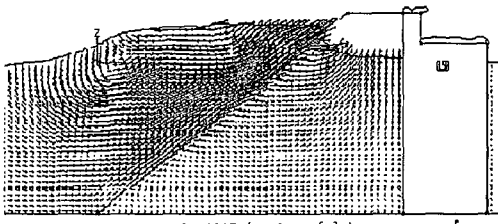


図-10 消波護岸の流速ベクトル

図-11 天端被覆ブロック護岸の流速ベクトル

に大きく寄与していることが明らかになった。
 前述した2つの護岸に関する越波時の流速ベクトルの計算結果から考察した越波現象のメカニズムの比較を図-12に示す。消波護岸は消波材斜面を遡上する流れと

消波材内部を上昇する流れが1点で衝突し、斜め上方に跳び上がって越波する。天端被覆ブロック護岸では、ケーソン上の消波材が有効に働いて、波エネルギーを効率的に減勢する。

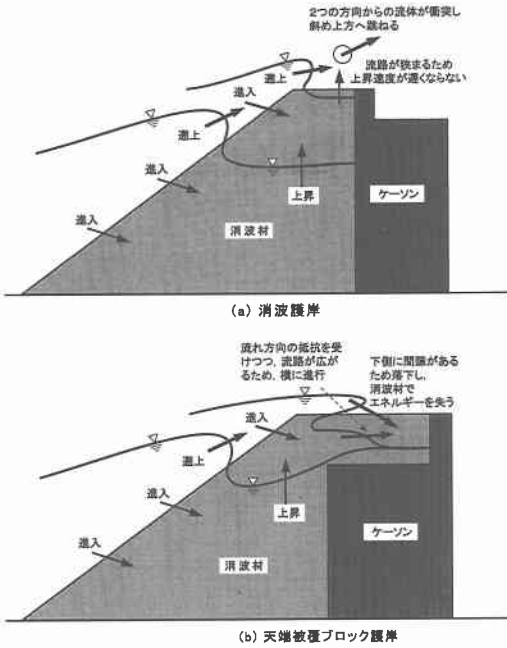


図-12 越波のメカニズムの比較

4.3 越波流量の計算結果

消波護岸と天端被覆ブロック護岸の越波量の計算結果を図-13に示す。消波護岸の1波当たりの越波量は約7,500 kg/波であるのに対し、天端被覆ブロック護岸のそれは約1,700 kg/波となっており、この条件では越波流量が約1/4と大きく低減している。消波護岸の越波流量を合田ら(1975)より推定すると5,300 kg/波となる。一方、天端被覆ブロック護岸の越波量を前述した推定法により評価すると3,500 kg/波となり、推定法による低減率は1/1.5である。数値計算結果では、天端被覆護岸の消波護岸に対する越波流量の低減が大きく出ているようであるが、推定法と数値計算で得られた越波流量は実用上十分な精度を有していると考えられる。今回の数値計算により、越波流量の推定法が補完された。

5. 結 論

今回、コストダウンを主眼として開発し、施工性の面でも優れている天端被覆ブロック護岸に関して、基本的な設計法を構築するために、水理実験と数値計算を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- ①ケーソン上に載せる消波ブロックは2層積みで水平4個並びにすれば必要十分である。
- ②越波流量の推定は、合田ら(1975)の越波モデルの内、

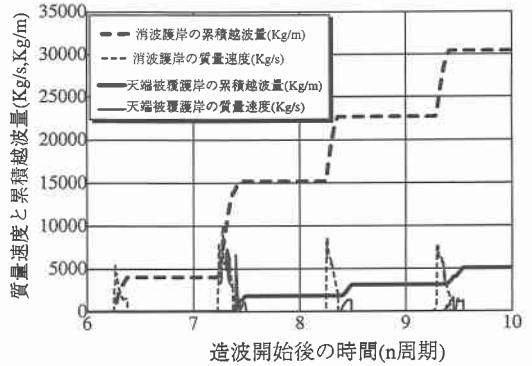


図-13 越波量の比較

波頂高比 K を規定するパラメータ a を0.3とすることによって精度良く評価することができる。

- ③消波護岸と比較して、越波流量を低減することができ、天端を低下させ、コストを低減することが期待できる。
- ④ケーソン前面波圧と揚圧力は、合田式と良く一致する。
- ⑤パラペットに作用する波圧は、 $(1.0 \sim 1.5) \omega H_{max}$ である。設計上安定計算を行う場合は、ケーソン前面波圧と揚圧力のみを合田式で評価すれば十分である。
- ⑥規則波による越波の数値計算の結果、消波護岸に比べて越波流量は大きく低減されることが明らかになった。
- ⑦数値計算で得られた越波流量と今回の推定法に基く越波流量は実用上十分な精度で合い、今回の越波流量推定法を補完することができた。

参 考 文 献

岩瀬浩二・池谷 毅・安部鐘一・能登谷勇人 (1999): ケーソン式低天端護岸の水理特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 19-24.

合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.

合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.

神山 勉・阿部直行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.

神山 勉・今井澄雄 (1996): 消波護岸の越波に関する数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 696-700.

高橋重雄・鈴木高二郎・三浦裕信・斉藤祐一 (1995): 低天端型防波護岸の越波に関する一実験, 海洋開発論文集, 第11巻, pp. 193-197.

森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹 (1967): 異形ブロックの波力減殺効果に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第6巻, 第4号, pp. 3-31.