

消波工と本体工の天端高さが異なる消波ブロック 被覆堤の水理特性

上久保勝美* ・山本泰司**・梅沢信敏***
木村克俊****・土井善和*****

1. ま え が き

消波ブロック被覆堤は反射・伝達波や波力の低減効果に優れ、浅海域における我が国の代表的な防波堤の構造形式のひとつであり、その断面形状は図-1の右側に示すように消波工と本体工の天端高さを等しくするのが一般的である。近年、公共事業に対する高付加価値化、低コスト化が強く求められる中、防波堤においても本来の防波機能に加えて、多岐にわたる付加機能が求められている。そのひとつが親水機能であり、利用者の安全を確保する目的で同図の左上段に示すような親水デッキを設ける場合、一般に消波工よりも本体工の天端が高い構造となる。また、中小規模の漁港では防波堤の直背後が係留施設や泊地となることがあり、越波伝達波を極力抑えるため、設計有義波高の1.0倍の比較的高い天端高が採用されることが多い。こうした場合、同図の左下段に示すように本体工よりも消波工の天端を所期の機能を有する範囲で低くすることができれば建設コストの縮減が可能となる。本報告では、これまで十分な検討が行われていない上述のような消波工と本体工の天端高さが異なる場合の水理特性と耐波安定性について水理模型実験により明らかにし、消波ブロック被覆堤の設計法の高度化を目指すものである。

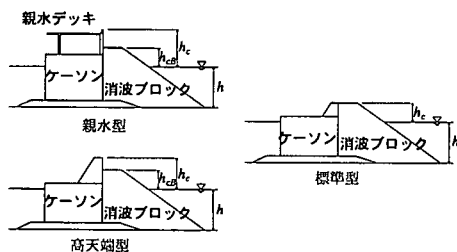


図-1 消波ブロック被覆堤の断面形状

2. 実験の方法

実験は不規則波発生装置を備えた二次元造波水路(長さ27.0m, 幅0.6m, 深さ1.2m)に勾配 i が1/100のモルタル製の水路床を製作して行った。堤体設置水深 h は35.0cmと一定とし、図-2に示す防波堤模型を設置した。直立部の天端高さ h_c を6.0~22.5cm, 消波ブロックの天端高さ h_{cb} を1.5~22.5cm, 消波工の天端幅 b_c を13.2~65.4cmに変化させた。また、波力の測定については分力計および波圧計を用いた。

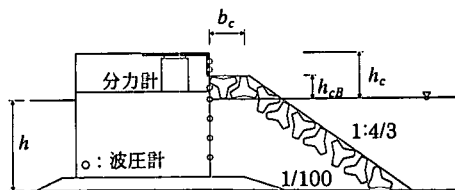


図-2 模型の標準断面

実験波はBretschneider・光易型のスペクトルを目標とする不規則波を用いた。波浪条件は有義波周期を $T_{1/3}=1.58$ および1.90sの2種類、有義波高を $H_{1/3}=15.0$ cmとした。1波群の作用波数は200波を標準とした。実施した実験は伝達波実験、反射波実験および波力実験の3種類であり、波力については滑動実験も併せて行った。いずれの実験においても直立部の天端高さと消波工の天端高さの比 h_{cb}/h_c (以下、「天端高比」と表記する)による特性を検討した。

3. 水 理 特 性

(1) 伝達波特性

港湾や漁港においては、越波による港内への伝達波は港内擾乱の主要な因子であり、天端高さの合理的決定を行うには天端高さと越波による伝達波の関係を知らなくてはならない。消波工の高さが越波による伝達率に及ぼす影響については、これまで十分な検討が行われていない。特に消波ブロック被覆堤の波高伝達率を扱ったものとしては、近藤ら(1963)が入射波に対する相対天端高さによる定式化を行い、また、消波工の天端幅を変化さ

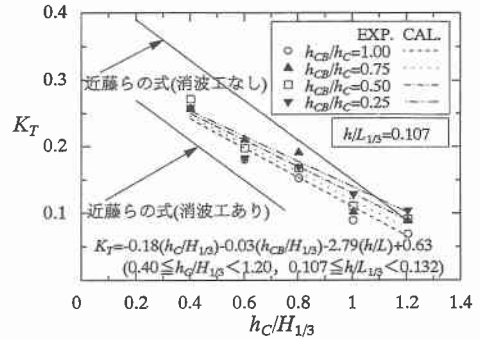
* 正会員 (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室
** 正会員 工 修 (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室 副室長
*** 正会員 (独)北海道開発土木研究所 港湾研究室長
**** 正会員 博(工) 室蘭工業大学助教授 建設システム工学科
***** 北日本港湾コンサルタント(株) 環境水理課

せることによる港内伝達波高に与える影響について森下ら(1981)の報告があるが、検討事例は少ない。

伝達波実験については、堤体背後に $L_{1/3}/4$ の間隔で波高計を3本設置し、各波高の平均値を伝達波高とした。波高伝達率 K_T は、入射波数に対する有義伝達波高 $H_{t1/3}$ と入射波高 $H_{1/3}$ の比 $H_{t1/3}/H_{1/3}$ として整理した。

写真—1は直立部の相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ が1.2, 0.8および0.4のそれぞれの条件について、天端高比 h_{CB}/h_c を1.00, 0.75, 0.50および0.25に変化させた場合の波の作用状況を0.1秒間隔で示したものである。波浪条件は $H_{1/3}=15.0$ cm, $T_{1/3}=1.90$ sである。消波工の天端高さの違いにより直立部を越波する波形が変化していることがわかる。 $h_c/H_{1/3}=0.8$ の条件で $h_{CB}/h_c=1.0$ の場合、消波工斜面を遡上した水塊は直立部天端上を港外側から港内側に流れる状況となる。 $h_{CB}/h_c=0.25$ の場合、越波水は突出した直立部に衝突して打ち上がり、天端面に落下するような越波形態が確認される。しかしながら、 $h_c/H_{1/3}=0.4$ の条件では、 $h_{CB}/h_c=0.25$ と消波工の天端高さが低い条件においても越波水は打ち上がることなく天端上を越流する。一方、 $h_c/H_{1/3}=1.2$ の条件では、越波水は $h_c/H_{1/3}=0.8$ の条件に比べて打ち上がりも高く、打ち上がる水脈が薄いのが特徴である。高く打ち上がった水塊は飛散しているのが確認できる。

図—3は相対水深を $h/L_{1/3}=0.107$ の条件において、天端高比 h_{CB}/h_c をパラメータとして、相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$ と波高伝達率 K_T の関係を示したものである。図中には、(1)式で表される近藤ら(1963)の実験式および今回提案する(3)式の拡張式を合わせて示している。



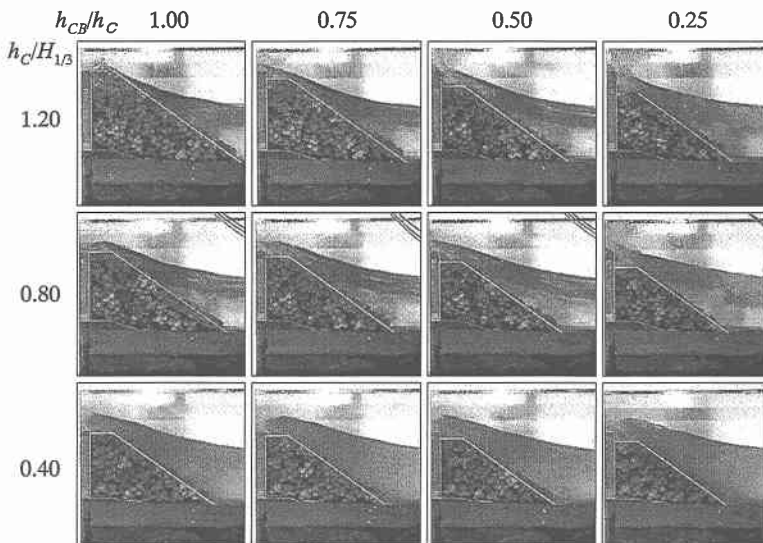
図—3 伝達波特性

$$\left. \begin{aligned} K_T &= 0.3(1.5 - h_c/H_1) : 0 \leq h_c/H_1 \leq 1.25 (\text{消波工あり}) \\ K_T &= 0.3(1.1 - h_c/H_1) : 0 \leq h_c/H_1 < 0.75 (\text{消波工なし}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

(1)式で示す近藤ら(1963)の実験式は規則波実験によるものであり、直接的な比較はできないが、今回の実験値は消波工がある場合と無い場合の中間的な値をとっている。天端高比 h_{CB}/h_c が異なる場合の波高伝達率 K_T について、 $h/L_{1/3}=0.132$ および $h/L_{1/3}=0.107$ の条件における全データを比較した結果、 $h/L_{1/3}$ および $h_c/H_{1/3}$ が同じ場合 $h_{CB}/H_{1/3}$ が小さくなる程、 K_T が増加することから、(1)式を拡張し、 $h_c/H_{1/3}$ と $h_{CB}/H_{1/3}$ が線形関係にあるとして最小自乗法を用いて関係式を求めると次のようになった。

$$K_T = -0.17(h_c/H_{1/3}) - 0.03(h_{CB}/H_{1/3}) + 0.29 \dots (2)$$

この時の相関係数は $R=0.830$ である。次に、 $h/L_{1/3}$ の違いを考慮すると $h_c/H_{1/3}$ および $h_{CB}/H_{1/3}$ が同じで、ほとん



写真—1 波の作用状況(消波工天端高さの影響)

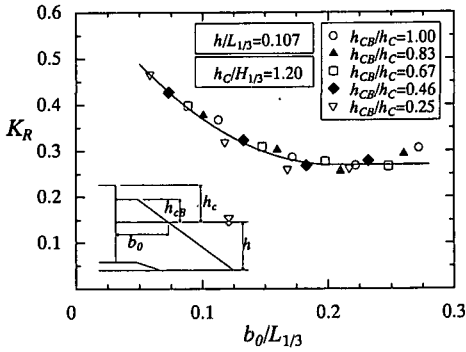


図-4 反射特性

どの場合 $h/L_{1/3}$ が小さい方が K_T が大きくなることから、さらに $h/L_{1/3}$ も線形関係にあるとして、同様に最小自乗法で関係式を求めると、

$$K_T = -0.18(h_C/H_{1/3}) - 0.03(h_{CB}/H_{1/3}) - 2.79(h/L_{1/3}) + 0.63$$

$$(0.4 \leq h_C/H_{1/3} \leq 1.2, 0.107 \leq h/L_{1/3} \leq 0.132) \cdots (3)$$

となった。この時の相関係数は $R=0.979$ となり、本実験の範囲では (3) 式を用いることにより、 K_T を比較的良好に推定できることがわかった。

(2) 反射特性

反射率は堤体前面に設置した2本の波高計による水位データから、入反射の分離計算を行って求めた。図-4は堤体の相対天端高さを $h_C/H_{1/3}=1.2$ で一定としたときの相対ブロック被覆幅 $b_0/L_{1/3}$ (b_0 は静水面におけるブロック被覆幅) と反射率 K_R の関係を、天端高比 h_{CB}/h_C をパラメータとして示したもので、実線は全体の傾向を表している。

実験においては、ブロックの天端高さ h_{CB} と天端幅 b_0 を双方変化させているが、反射率 K_R は相対ブロック被覆幅 $b_0/L_{1/3}$ のみの関数として表すことができ、ブロックで被覆されていない直立部が K_R におよぼす影響はほとんどないことが分かる。

4. 突出部に作用する波力補正法の提案

防波堤の改良などにより直立部のみを嵩上げする場合は、突出した直立部には、消波ブロックを完全に被覆した場合に比べて大きな波圧が作用することが知られている。ここでは消波工の天端高さが直立部に及ぼす影響を明らかにするとともに突出部に作用する波力算定法を提案する。

波力の測定は、直立部前面に天端条件に合わせて水深方向に6～8個の波圧計を取り付け測定を行った。また、消波ブロックが被覆されない突出部については、分力計を設置し併せて測定を行った。なお、波圧計の定格容量は 0.01 N/mm^2 、サンプリング周波数は 200 Hz である。

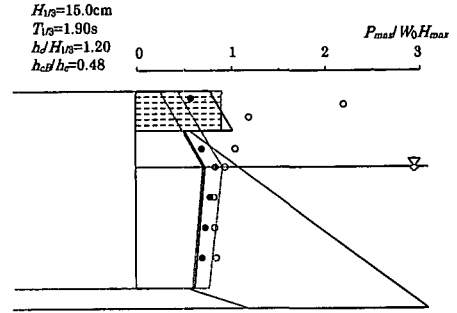


図-5 波圧分布

また、分力計の定格容量は 4.9 N/mm^2 、サンプリング周波数は同じく 200 Hz である。

図-5は $h_C/H_{1/3}=1.2$ 、 $h_{CB}/h_C=0.48$ の構造条件において、 $H_{1/3}=15.0 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3}=1.90 \text{ s}$ の波浪が作用した時の最大同時波圧分布を示したものである。図中の一点鎖線の値は合田式による波圧分布を示し、2点鎖線は合田式の波圧に $\lambda=0.8$ を乗じた計算値を示している。●は消波ブロックを完全に被覆した場合の波圧の値を示している。一方、○は天端高比を $h_{CB}/h_C=0.48$ の条件とした場合の波圧分布を示している。消波ブロックが完全に被覆されていない条件では、突出部に衝撃的な波圧が作用するとともに、消波ブロックによって被覆されている直立部にも完全被覆の場合と比べて、全体に大きめの波圧が作用していることがわかる。これは両者の波圧作用時の時刻歴変化を比較した結果、不完全被覆の場合には、突出部の衝撃波圧の影響が消波工被覆部にも現れる傾向が出ていることがわかった。ただし力積値で見ると両者はほぼ同程度であった。以上から消波ブロックが被覆されていない突出部に作用する波圧は、合田の波圧分布を仮定して、新たに波圧補正係数として後述する λ^* を用い、また、消波ブロックが被覆されている直立部については従来の $\lambda=0.8$ を用いることとし、図中の実線に示す波圧分布を仮定した。

図-6は、天端高比 h_{CB}/h_C と消波ブロックが被覆されていない突出部に作用する波圧との関係を波圧補正係数 λ^* を用いて示したものである。ここで λ^* は合田式の波圧分布形を仮定して算定した突出部に作用する波圧合力と、消波ブロックがない場合の当該直立部に作用する合田式による波圧合力との比として定義したものである。

これより突出部に作用する波圧補正係数 λ^* は安全側を考え、以下のとおり定式化した。

$$\left. \begin{aligned} \lambda^* &= 2.250 \quad (0.2 \leq h_{CB}/h_C \leq 0.6) \\ \lambda^* &= -3.625(h_{CB}/h_C) + 4.425 \quad (0.6 < h_{CB}/h_C \leq 1.0) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (4)$$

突出部の波力算定には上式の λ^* を用い、消波ブロック被覆部は現行の $\lambda=0.8$ を用いることで、消波工と本体工の

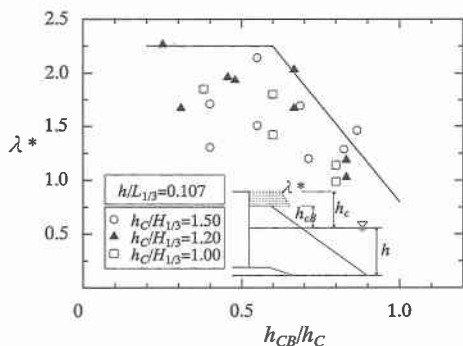


図-6 突出部に作用する波圧特性 (天端高さの影響)

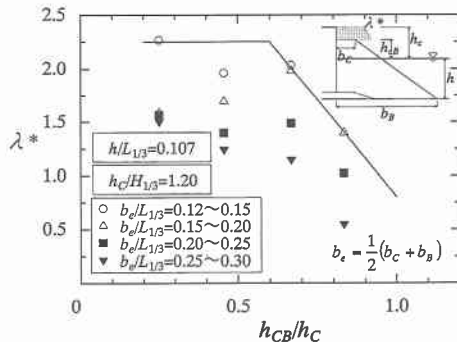


図-7 突出部に作用する波圧特性 (天端幅の影響)

天端高さが異なる消波ブロック被覆堤に作用する波力を求めることが可能となった。

写真-2は $h_C/H_{1/3}=1.2$ の条件について $h_{CB}/H_{1/3}=1.00, 0.80, 0.55$ および 0.30 に変化させた場合、各々の条件について消波工天端幅を $b_C/L_{1/3}=0.04\sim0.20$ に変化させて、マウンド形状の違いによる波の作用状況を示したものである。 $h_{CB}/H_{1/3}=0.80$ の条件では $b_C/L_{1/3}$ が短い場合に消波ブロックの前肩付近で水面が盛り上がり直立部に衝突するが、 $b_C/L_{1/3}=0.2$ と前肩幅が長い場合は、消波工の天端上で速い流れが生じ直立部に衝撃的に衝突する。 $h_{CB}/H_{1/3}=0.55$ の条件になると、 $h_{CB}/H_{1/3}=0.80$ の条件に比べて、より消波ブロック面を遡上しやすく波面

が直立壁に衝突しているのが確認される。特に $b_C/L_{1/3}=0.2$ の条件では、 $h_{CB}/H_{1/3}=0.80$ の場合に比べて、波面はより衝撃的に直立部に衝突しているのが確認される。こうした現象は、 $h_{CB}/H_{1/3}=0.30$ になるとより顕著となる。一方、 $h_{CB}/H_{1/3}=1.00$ の条件では、消波ブロック面を遡上する水脈も薄くなることが特徴である。

ここで、 $b_C/L_{1/3}$ が λ^* に与える影響を明らかにするため、消波工天端幅を変化させた場合の λ^* の検討を行った。図-7は、 h_{CB}/h_C と λ^* との関係が消波工の相対天端幅 $b_C/L_{1/3}$ をパラメータにして関係を示したものである。消波ブロック天端高さが比較的高い $h_{CB}/h_C=0.67$ の条件においても $\lambda^*=2.03$ と波圧増大が生じている。写真一

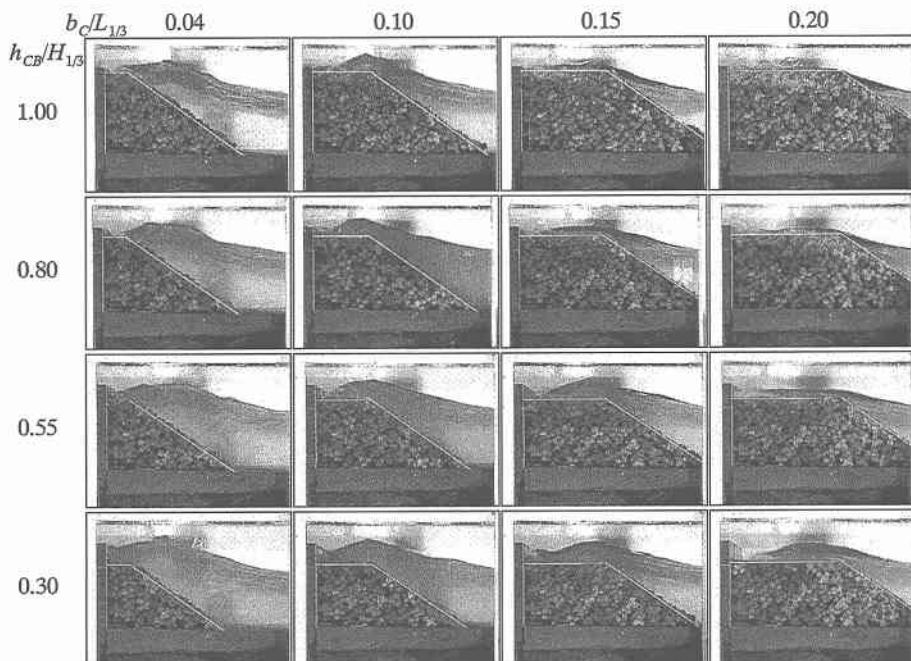


写真-2 波の作用状況 (消波工天端幅の影響)

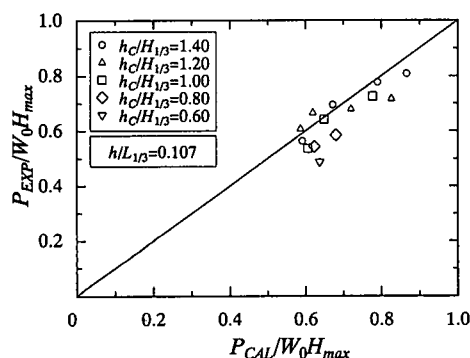


図-8 水平波力の計算値と実験値の比較

2に示したように消波ブロック天端高さがある程度高い条件においても消波ブロックの天端上で速い流れが生じ波圧が大きくなるが、 $be/L_{1/3}$ が大きくなるほど波圧は減少する傾向にある。

図-8は、直立部の天端高さ $h_c/H_{1/3}=0.6\sim1.4$ の条件において、各々の条件について h_{CB} を変化させ、 λ^* を用いて計算した水平波力 P_{CAL} と滑動実験より得られた値 P_{EXP} とを比較したものである。直立部の天端高さが比較的高い $h_c/H_{1/3}=1.2$ および 1.4 の条件でやや計算値を上回っているケースもあるが、全般的に計算値と実験値はよく一致している。

5. まとめ

消波工と本体工の天端高さが異なる消波ブロック被覆堤について $H_{1/3}/h=0.43$, $h/L_{1/3}=0.132\sim0.107$ の条件において水理特性および波力特性を検討した。主要な結論は以下の通りである。

①天端高比 h_{CB}/h_c および周期の影響を考慮した波高伝達率 K_T の算定式を提案した。

②天端高比 h_{CB}/h_c および相対天端幅 $b_0/L_{1/3}$ の反射波特性におよぼす影響を明らかにした。

③天端高比 h_{CB}/h_c と突出部の波圧補正係数 λ^* との関係を明らかにし、消波工の天端高さと本体工の天端高さが異なる条件での波力算定法を提案した。

④滑動実験結果にもとづいて、提案した算定法による計算値と実験値との比較を行い、算定法の妥当性を確認した。

本研究では、比較的水深が深い条件における防波堤を対象として検討を行った。今後は、防波護岸などの比較的水深が浅い波浪条件における検討も必要である。

参考文献

- 近藤俊郎・佐藤 功 (1963): 防波堤天端高に関する研究, 北海道開発局土木試験所月報, 第117号, pp. 1-15.
- 森下敏夫・綿貫 啓 (1981): 消波ブロック被覆堤成堤の波高伝達率に関する実験的研究, 第28回海岸工学講演会論文集, pp. 348-351.