

消波ブロック積み幅広潜堤の変形および伝達波特性に関する検討

木村克俊* ・清水雄平** ・田谷年樹***
山本泰司**** ・土井善和***** ・半沢 稔*****

消波ブロック積み幅広潜堤の変形特性とそれによる伝達率の変化について検討を行った。現地においては港内側法肩のブロックが転落する事例が報告されており、こうした被災と構造および波浪条件の関係を調べた。水理模型実験では、分力計を用いた波力実験によりブロックに働く波力特性を明らかにするとともに、安定実験によって現地の被災パターンを再現した。これらの実験結果に基づいて、設計で用いる安定数を相対天端高さの関数として定式化し、作用波数と被災度の関係を示した。さらに、ブロックの転落によって生じた複断面形状の堤体に対して伝達波実験を行い、波高伝達率の変化特性を明らかにした。

1. はじめに

幅広潜堤は海岸侵食や越波災害の低減に優れた構造形式であるとともに、景観を阻害しないことや、環境要因が整えば良好な藻場を形成する可能性があることから、近年現地での施工実績が増加している。とくに耐波安定性や施工性を重視する場合には、消波ブロックを用いる工法が一般的である。

高山ら (1988) はこうした消波ブロック積み幅広潜堤の伝達波特性を検討し、波高低減効果を影響係数として定式化している。さらに半沢ら (1996) は、消波ブロックの耐波安定性を含めた検討を行い必要質量の算定法を提案している。しかしながら、これらは設計波 (30 年あるいは 50 年確率波) に対して変形を許さない従来の設計法に対応したものである。今後は、供用期間中の性能変化を評価する新しい設計法 (高橋ら, 2000) に適用可能な知見の蓄積が必要である。一方、現地においては、港の拡張や設計波の見直し等により、小質量の消波ブロックが不要材となることが少なくない。現行設計法では必要質量に満たないブロックは使用できないが、適切に変形量を評価できればこれらを幅広潜堤の材料として有効に活用できる可能性がある。本研究では、消波ブロック積み幅広潜堤を対象として、こうしたニーズに応えるため、変形特性とそれによる伝達波への影響を検討する。

2. 施工事例の分析

離岸堤のように比較的天端の低い消波ブロック積み傾斜堤の場合、港内側の消波ブロックが不安定になりやすい。曾我部ら (1982) は徳島県における台風による離岸堤の被災事例 (現地条件は表-1 の A 港参照) を水理模型実験で再現している。さらに波浪および構造条件を変化さ

表-1 現地施工事例

港名	h(m)	h _c (m)	HWL(m)	LWL(m)	B(m)	W(t)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (s)	被害
A	3.5	+4.0	+1.8	±0.0	7.6	12.0	3.0	7.9	有
B	7.6	+0.5	+1.5	±0.0	9.4	25.0	6.2	15.6	有
C	15.1	-0.3	+1.2	±0.0	11.1	40.0	6.7	11.3	無
D	7.5	-0.5	+0.3	±0.0	16.4	25.0	6.1	12.5	無
E	10.7	-0.5	+0.3	±0.0	19.2	40.0	7.2	12.5	無
F	18.0	-0.5	+0.3	±0.0	20.7	50.0	7.5	12.5	無

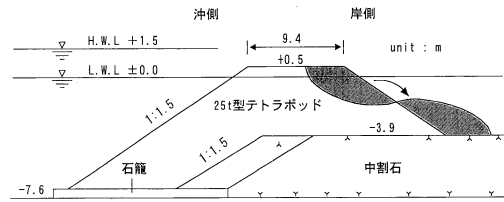


図-1 B港における施工事例

せた安定実験を行った結果、天端の低い消波ブロック積み傾斜堤に対しては、現行設計法では消波ブロックの必要質量が過小となることを明らかにしている。また宇多ら (1986) は離岸堤の異型ブロックの散乱状況を分析し、Hudson 式による計算質量を 1.5 倍とすることで大規模な散乱を防止できることを指摘している。

表-1 の B~F は、1990~2000 年に北海道内で施工された消波ブロック積み幅広潜堤の構造と施工後の来襲波の諸元である。B 港では 1998 年に設計波 ($H_{1/3}=5.8\text{ m}$, $T_{1/3}=14.8\text{ s}$) をわずかに上回る $H_{1/3}=6.2\text{ m}$, $T_{1/3}=15.6\text{ s}$ の波浪が来襲し、図-1 に示すように港内側の 25t 異型ブロックが転落し、背後に小段を有する断面となった。現地においては転落した消波ブロックに折損等は少なく、再設置することで復旧された。C~F の事例では、ほぼ設計波高条件に相当する波浪の来襲が確認されているけれども、特に被害は報告されていない。図-2 はこれらの施工事例についての設置水深と来襲波高の関係を示したものである。被害は波高水深比 $H_{1/3}/h$ が大きい条件で発生していることがわかる。また B と D では $H_{1/3}/h$ がほぼ等しいが、D のほうが天端高がやや低く、天端幅が

* 正会員 博(工) 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科

** 学生会員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻

*** 正会員 工 修 東亜建設工業(株) (前室蘭工業大学大学院)

**** 正会員 工 修 (独法)北海道開発土木研究所港湾研究室

***** 正会員 工 修 北日本港湾コンサルタンツ(株) 環境水理課

***** 正会員 工 修 (株)テトラ

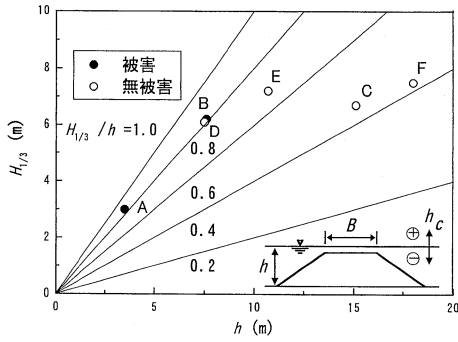


図-2 水深および波高条件

広いため被害が生じなかったものと考えられる。

3. 作用波力特性

(1) 実験の方法

消波ブロックに働く波力実験と後述する安定実験は、長さ 24 m、幅 0.6 m、高さ 1 m の 2 次元造波水路に 1/30 の海底勾配を設置して実施した。

図-3 に示すように、測定用ブロックを分力計の先端に固定し、現地で被害が生じた港内側の法肩において水平および鉛直波力を測定した。天端幅 B はブロック 3 ヶ並びに相当する 19.0 cm で一定であり、天端高さ h_c は天端面が水面上にある場合を正として、+6、0 および -6 cm の 3 種類とした。なお消波ブロックの質量は 235 g とした。実験波は規則波を用い、水深 h を 20~32 cm、波高 H を 11~19 cm、周期 T を 1.73~2.55 s に変化させた。波力データはサンプリング周波数 200 Hz で取得し、パソコンで解析した。

(2) 波力の時間変化

写真-1 は、 $H=19$ cm、 $T=2.55$ s に対する堤体への波の作用状況を、撮影間隔 0.1 s で連続的に示している。左側に示す天端が高い $h_c=6$ cm では、港内側法肩のブロックに越波水塊が直接作用している。図-4(a)には波力の時間変化を示しているが、押し波時に斜め上向きの波力が卓越し、ブロックの抜け出しが発生する可能性がある。これに対し写真-1 右側の $h_c=0$ cm の場合は、天端上を越流する傾向が顕著となるため、図-4(b)に示す

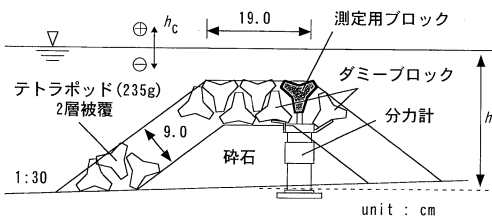


図-3 波力の測定方法

ように波力自体も小さい。

(3) 波浪条件の影響

図-5 は $T=2.55$ s の条件に対する無次元波力 F/W' と波高水深比 H/h の関係を示している。ここで F は水平波力 F_x と鉛直波力 F_z の合成波力で、 W' はブロックの

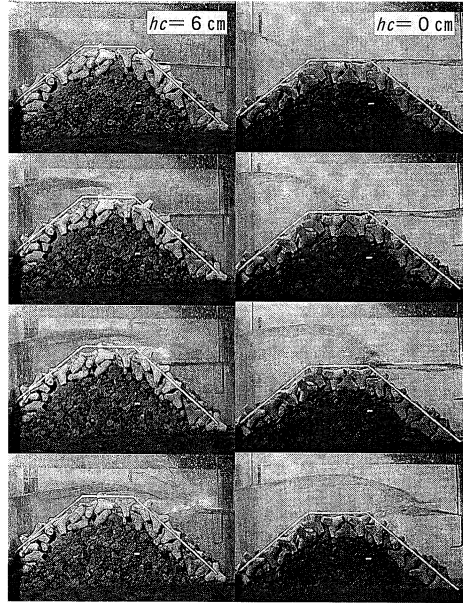


写真-1 波の作用状況

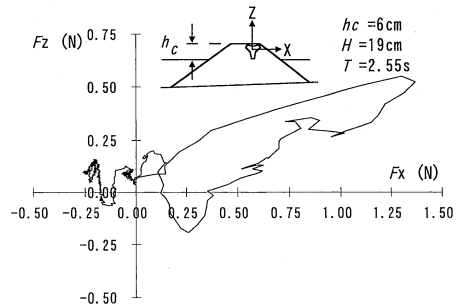


図-4(a) 波力の時間変化 ($h_c=6$ cm)

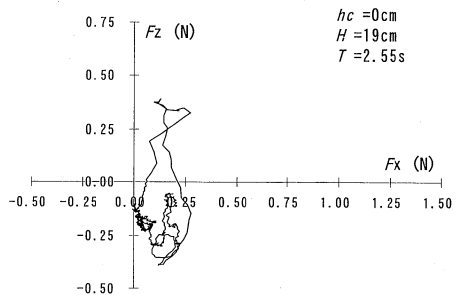


図-4(b) 波力の時間変化 ($h_c=0$ cm)

水中重量である。\$h_c=6\$ cm の場合は、\$F\$ は \$H/h\$ とともに増大する傾向があるが、潜堤条件 (\$h_c=0\$ および \$-6\$ cm) では \$H/h\$ の影響は小さく、その絶対値も小さい。

図-6 は、\$H=19\$ cm で一定としたときの、相対水深 \$h/L\$ と無次元波力 \$F/W'\$ の関係を示している。\$h_c=6\$ cm の場合は \$h/L\$ の影響が顕著であるが、潜堤条件 (\$h_c=0\$ および \$-6\$ cm) ではその影響が小さいことが分かる。

4. 消波ブロックの安定性

(1) 実験方法

安定実験では、基本的な堤体断面を波力実験と同様とした。実験水深 \$h\$ は \$16.7\$ cm で一定とし、天端高さ \$h_c\$ を \$-4.9\sim 9.9\$ cm の範囲で6種類に変化させた。消波ブロックの質量は \$120, 184\$ および \$368\$ g の3種類とした。実験波は不規則波とし、周期 \$T_{1/3}=2.12\$ s に対して、波高 \$H_{1/3}\$ を \$7.5\sim 13.3\$ cm に変化させた。

波の作用方法は、段階的に波高を大きくしていく場合と、同一波高を連続して作用させる場合の2種類とした。いずれの場合も1波群を500波とし、波作用後のブロックの移動状況を目視観測した後、積み替えを行わず次の波群を作用させ被害を累積した。なお、ブロック全高の1/2以上移動した場合を被害と定義し、その程度を被災度 \$N_0\$ で表わした。

(2) 安定数に対する相対天端高さの影響

一般に消波ブロックの必要質量 \$M\$ は、以下に示す Hudson 式で求められる。

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、\$\rho_r\$ は材料の密度、\$H\$ は設計有義波高、\$N_s\$ は安定数、\$S_r\$ は海水に対する材料の比重である。使用する消波ブロックごとに決まる \$K_D\$ 値に対応する安定数 \$N_{s0}\$ は以下のように表すことができる。

$$N_{s0} = (K_D \cot \theta)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、\$\theta\$ は消波法面が水平面と成す角度である。以下においては、安定実験で得られた安定数 \$N_s\$ を \$N_{s0}\$ で除して表示する。

図-7 は、作用波数 \$N=500\$、被災度 \$N_0=0.3\$ の条件に対して、相対天端高さ \$h_c/H_{1/3}\$ と \$N_s/N_{s0}\$ の関係を示している。潜堤条件に対しては \$N_s/N_{s0}\$ が1より大きく、従来の Hudson 式よりも必要質量が低減できることを意味している。これに対し天端が水面上となる場合には計算質量が過小となっており、離岸堤や突堤の設計に際してこれまで経験的に行われてきた質量割増の妥当性を示すものと考えられる。

(3) 波数と被災度の関係

高橋・半沢ら (1998) は、全断面乱積み消波ブロッ

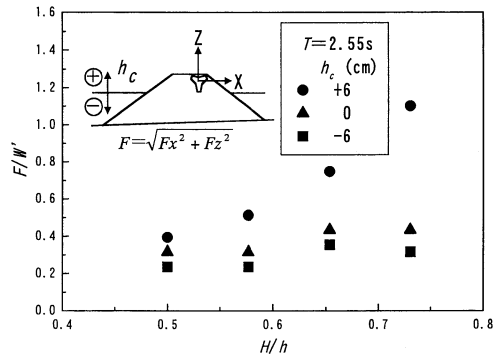


図-5 波高水深比の影響

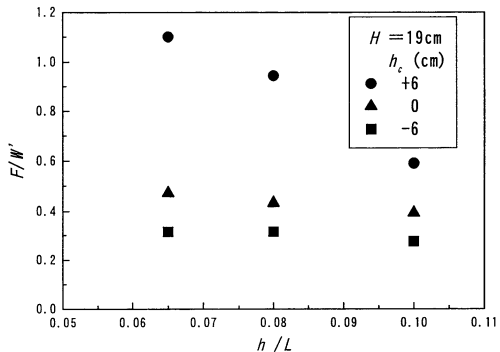


図-6 水深波長比の影響

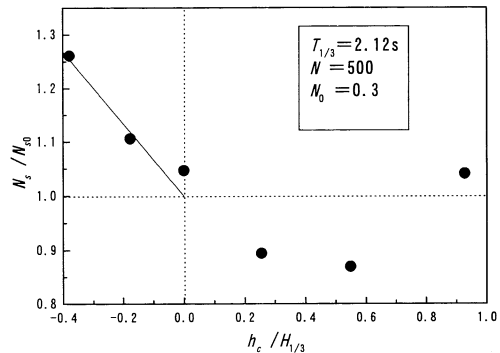


図-7 安定数と相対天端高さの関係

ク被覆堤を対象として、作用波数 \$N\$ に対する被災度 \$N_0\$ を用いて、安定数 \$N_s\$ を \$N_0/N^{0.5}\$ の関数で表わした。ここでは前出図-7 中の実線で示す傾向に着目して、\$N_s\$ を以下のように定式化した。

$$N_s = 2.32 \left(\frac{N_0}{N^{0.5}} \right)^{0.2} - 1.30 \left(\frac{h_c}{H_{1/3}} \right) + 1.33 \cdot \left(-0.40 \leq \frac{h_c}{H_{1/3}} \leq 0 \right) \dots\dots\dots (3)$$

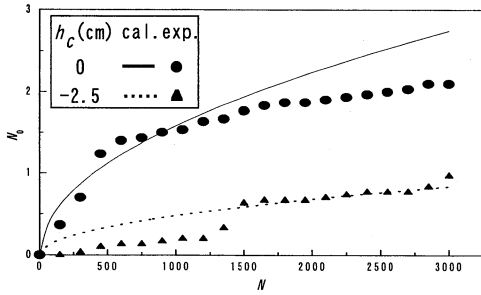


図-8 作用波数と被災度の関係

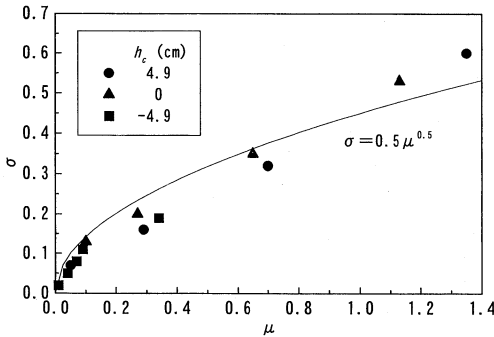


図-9 被災度の平均値と標準偏差の関係

なお $h_c/H_{1/3}$ が 0 以上の条件に対しては、波力実験結果で示したように、 h/L や H/h の影響が顕著となる。今回の安定実験では、天端が高い条件に対しては実験領域が限定されているため、算定式の適用範囲から外している。

図-8 は、 $H_{1/3}=12.0$ cm、 $T_{1/3}=2.12$ s の波を作用させた場合の作用波数 N と被災度 N_0 の関係を示している。天端高さ h_c を -2.5 および 0 cm の 2 種類に変化させているが、いずれの場合も、実験値は点線および実線で示した計算値とほぼ一致しており、式 (3) により被災度が推定できることが確認された。

(4) 被災度の変動性

図-9 は、特性の異なる波群を段階的に作用させて求めた被災度の変動性を示している。合計 20 回の試行の結果、被災度 N_0 の平均値 μ と標準偏差 σ の関係には天端高さの影響は小さく、図中の実線で示す以下の関係が得られた。

$$\sigma = 0.5\sqrt{\mu} \dots\dots\dots (4)$$

5. 伝達波特性

(1) 実験方法

伝達波実験は、長さ 26 m、幅 0.8 m、高さ 1 m の 2 次元造波水路に 1/30 の海底勾配を設置して実施した。堤体背後における水位上昇の影響を低減するため、水路は波

向き直角方向に分割されている。港内側の法肩のブロックが転落した状態を想定した図-10 の断面形状に対して伝達波特性を調べた。水深 h は 30 cm で一定とし、天端高さ h_c は -2.2 および -5.0 cm の 2 種類とした。消波ブロックは質量 360 g のものを用いた。被災による欠損後の天端幅 B_1 を 23.5 cm (3 ヶ並び) で一定とし、転落したブロックによって生ずる小段の幅 B_2 を 40~120 cm の 5 種類、その天端高さ h_c^* を 10, 15 および 20 cm に変化させた。なお比較のために被災前の標準的な断面形状に対する検討も行った。

実験波は不規則波を用い、有義波周期 $T_{1/3}$ を 1.63, 2.31 および 2.83 s の 3 種類、波高 $H_{1/3}$ を 10.0, 12.5 および 15.0 cm の 3 種類に変化させた。1 波群は約 150 波で構成される。なお、波高伝達率の変動性を考慮するため、特性の異なる波群 20 種類を用意した。

(2) 伝達波高の算定式

通常断面の幅広潜堤の伝達率を K_{H1} とし、その背後に小段部が追加された場合の効果を K_{H2} で評価し、両者を乗して所定の伝達率 K_T を求めることにした。まず K_{H1} の値については、沖波高 H_0 の関数で示された高山ら (1988) の算定式を、以下に示すような通過波高 $H_{1/3}$ の関数とする式に修正した。

$$K_{H1} = -0.775 \frac{B_1}{L_{1/3}} + 0.475 \frac{h_c}{H_{1/3}} + 2.055 \frac{H_{1/3}}{L_{1/3}} + 0.460 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 B_1 は天端幅、 h_c は天端水深、 $H_{1/3}$ は通過波高、

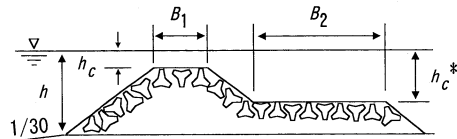


図-10 伝達波実験の断面形状

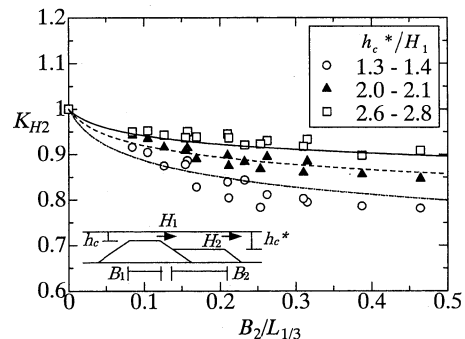


図-11 変形後の波高伝達率

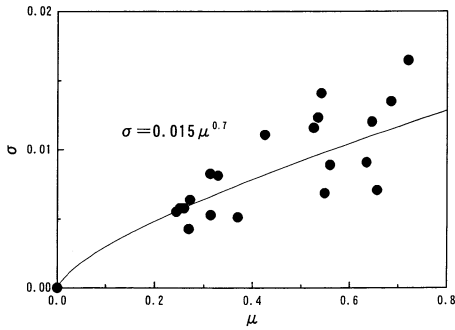


図-12 波高伝達率の変動性

$L_{1/3}$ は堤体設置水深における波長である。

図-11 は、 h_c^*/H_1 をパラメータとして、 $B_2/L_{1/3}$ と K_{H2} の関係を示している。いずれの場合も $B_2/L_{1/3}$ の増加とともに K_{H2} は減少傾向にある。これは小段上での碎波によっても波高が減衰するためと考えられる。すべての実験結果を最小2乗法で近似し、 K_{H2} を以下のように定式化した。

$$K_{H2} = 1 - a \log\left(56.68 \frac{B_2}{L_{1/3}} + 1.0\right) \dots\dots\dots (6)$$

$$a = 0.115 \exp\left(-0.489 \frac{h_c^*}{H_1}\right) \dots\dots\dots (7)$$

たとえば水深6mに設置された天端5ヶ並びの幅広潜堤の場合で、周期 $T_{1/3} = 7.3$ s、波高 $H_{1/3} = 2$ m の条件では、港内側法肩でブロック2ヶが転落することによって、伝達率 K_T は0.51から0.55に増加することになる。

(3) 波高伝達率の変動性

特性の異なる20種類の波群を用いて、波高伝達率 K_T の変動を調べた。図-12は K_T の平均値 μ と標準偏差 σ の関係を示しており、両者には図中の実線で示す以下の関係が得られた。

$$\sigma = 0.015 \mu^{0.7} \dots\dots\dots (8)$$

既に示した被災度の変動性とともに関係を用

いることにより、半沢・高橋ら(1996)と同様な性能変化の予測が可能となる。

6. まとめ

消波ブロック積み幅広潜堤の変形および伝達波特性に関して、以下の結論が得られた。

- ① 現地における施工事例を分析し、一般的な被害パターンを明らかにした。
- ② 消波ブロックに働く波力特性に及ぼす波浪及び構造条件の影響を示した。
- ③ 安定数を相対天端高さの関数として定式化し、作用波数と被災度の関係も再現できることを確認した。
- ④ 港内側へのブロックの転落によって生ずる小段が伝達率に及ぼす影響を定量的に示した。
- ⑤ 被災度および波高伝達率について繰り返し実験を行い、その変動性を示した。

参考文献

宇多高明・藪崎義之・村上由高・水野益宏 (1986): 離岸堤異型ブロック散乱の全国実態, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 417-421.
 曾我部隆久・伊東司郎・浅川 昭・西田芳浩 (1982): 離岸堤(消波ブロック堤)の被災原因に関する考察, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 423-427.
 高橋重雄・下迫健一郎・半沢 稔・杉浦 淳 (2000): 防波堤の安定性能照査と性能設計—海域施設の新しい耐波設計—, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp. 415-420.
 高橋重雄・半沢 稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利 (1998): 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第1報—, 港研報告, 第38巻, 第1号, pp. 3-28.
 高山知司・池田直太 (1988): 広天端潜堤による波浪変形と護岸越波流量の低減効果, 港研報告, 第27巻, 第4号, pp. 63-92.
 半沢 稔・周 遠強・杉浦 淳・佐藤弘和 (1996): 消波ブロックを用いた人工リーフの機能・安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 821-825.
 半沢 稔・高橋重雄・下迫健一郎 (1996): モンテカルロ法を用いた消波ブロックの期待被災度の計算, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 796-800.