

消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの耐波安定性

木村克俊*・上久保勝美**・坂本洋一**
水野雄三***・竹田英章****・林倫史*****

1. ま え が き

消波ブロック被覆堤は反射・伝達波の低減とともに耐波安定性に優れ、我が国の代表的な防波堤の構造形式のひとつである。しかしながら近年、防波堤の設計波高の増大にともなう、消波ブロックの大型化が問題となってきた。とくに堤頭部ではブロックが不安定になりやすく、その重量を堤幹部よりも大きくすることが技術基準(運輸省港湾局監修;1989)でも推奨されている。しかしながら割増率や割増範囲は経験に基づいて決められたものであり、明確な根拠は得られていない。

消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関しては、鹿島ら(1986)が過去の被災事例を分析し、安定重量算定式としてのハドソン式の適用性を明らかにするとともに、堤頭部の被災事例について言及している。最近では五明ら(1996)が現地の被災例を分析し、堤幹部に比べて堤頭部が被災しやすいことを報告している。

本研究では、まず被災データに基づいて、消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロック被災状況を分析した。次に消波ブロック被覆堤の堤頭部を対象とした大規模な3次元実験を行って、消波ブロックに働く波力特性を明らかにするとともに、安定実験を行って作用波数と被害率の関係を検討した。以上の結果に基づいて、堤頭部を対象とした消波ブロックの安定重量算定法を提案する。

2. 現地における被災例

(1) 消波ブロックの被災事例

被災データは主に北島ら(1968)、武山ら(1975)、服部ら(1984)および宮井ら(1993)がまとめた被災防波堤集覧(その1~4)を参照した。防波堤の被災原因とし

ては消波工の散乱に起因するものが最も多く、1983~1991年の被災統計でも、全体の34.8%が消波工被害に起因している。

表一は、1965~1996年の被災統計から消波ブロック被覆堤の堤頭部のブロックに関する現地被災例12データをまとめたものである。ケーソンの滑動によるブロックの移動事例と、堤頭部だけでなく被害が堤幹部まで及んでいる事例は除外している。なおこれらのデータの定量的な解析は後述する。

(2) 被災パターンの分析

最近の被災事例に基づいて、波向きや平面配置が堤頭部の消波ブロックの被災パターンに及ぼす影響を検討する。

図一にK港(1995)における被災事例を示す。波向きはほぼ直角入射と推定され、設計波に相当する波浪によって、消波ブロック(40tf型)が転落した部分を斜線で示している。

図二にJ港(1990)の被災事例を示す。波向き β は $+45^\circ$ (β の定義は後出の図一9参照)と推定されており、設計波相当の波浪の作用によって、斜線で示した範囲の消波ブロック(40tf型)が転落し港内側に散乱している。斜め入射の場合には、波向きから見て突き出た側のケーソン角部周辺のブロックが移動しやすい傾向が認められる。

図三はL港(1996)における被災事例である。防波堤

表一 消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロック被災例

港名	公称重量 (tf)	作用波高 $H_{1/10}$ (m)	被災年月日	備考
A	8	5.4	1965.9.17~18	完成断面
B	50	6.5	1970.8.21	完成断面
C	40	6.2	1978.1.22	完成断面
D	50	7.2	1981.8.1~2	施工途中
E	32	5.9	1981.8.23~24	施工途中
F	50	7.0	1982.8.26	完成断面
G	16	5.8	1982.10.24~25	施工途中
H	25	7.7	1986.3.16~18	完成断面
I	40	7.7	1990.2.16~17	完成断面
J	40	8.1	1990.11.10	完成断面
K	40	6.9	1995.11.7~9	完成断面
L	50	7.3	1996.9.23	施工途中

* 正会員 博(工) 北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部 港湾研究室
** 正会員 同上
*** 正会員 博(工) 北海道工業大学教授 工学部 土木工学科 (前北海道開発局 開発土木研究所 環境水工部長)
**** 正会員 博(工) 北海道東海大学教授 工学部 海洋開発工学科 (社)寒地港湾技術研究センター 調査研究部
***** 正会員 (前北日本港湾コンサルタント(株)環境水理課)

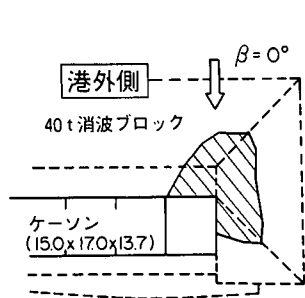


図-1 K港の被災例 (1995)

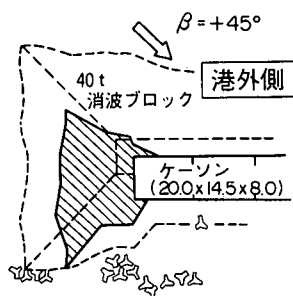


図-2 J港の被災例 (1990)

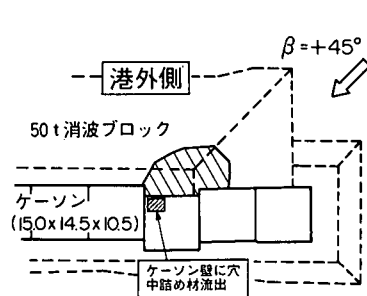


図-3 L港の被災例 (1996)

延伸中に設計波相当の波浪が来襲し、施工端部において消波ブロック (50 tf 型) が不安定になり、ケーソン壁に直径 1.5 m 程度の穴があき、中詰め砂が流失し滑動が生じた。

3. 実験の方法

実験はすべて平面水槽 (長さ 19.65 m, 幅 32.85 m, 深さ 3 m) において実施した。堤体模型は全長 6.0~8.4 m の島堤とした。

波向きは直角入射と斜め入射 45° の 2 種類とした。入射角 β は、防波堤法線直角方向と成す角度で定義し、斜め入射の場合は、堤頭部が波の進行方向に対して上手側となる場合を +45°, 下手となる場合を -45° とした。

模型の断面形状は図-4 に示すように、水平床上の実験水深 h を 46.8 cm とし、ケーソン基面水深 h_c を 28.8 cm, 天端高さ h_e を 11.2 cm とした。なお一部の波力実験では、現地を対象として海底勾配 1/30, $h=33.1$ cm としている。

消波工は天端 2 個並びとし、法勾配を 1:1.5 とした。同図は 589 g の消波ブロックを使用した場合の断面図を示しているが、ブロックの質量が異なる場合はブロックの天端幅が異なる。

4. ブロックに働く波力特性

(1) 測定方法

消波ブロックに作用する波力に関しては、榊山ら (1989) が断面実験において堤体上方に設置した分力計により直接計測を行っている。本研究では、図-4 に示した

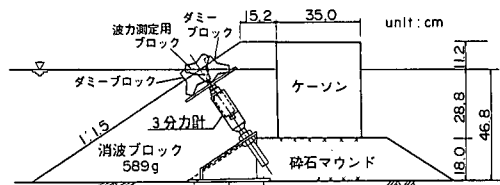


図-4 模型の断面形状と 3 分力計

ように小型の 3 分力計 (定格 50 N, 直径 4.5 cm) を堤体内に埋め込み、ブロック模型 (全高 9.7 cm, 589 g 相当) に働く 3 方向の波力を直接計測した。なお波力を測定するブロックが他のブロックと接触するのを防ぐため、周囲は 3 個のダミーブロックで保護されている。

断面水路において予備実験を行って、設置水深による波力の違いを調べたところ、静水面での波力が最大となることが明らかになった。このため平面実験においても静水面位置にブロックを固定し、堤頭部周辺の 5 箇所および堤体中央部 (堤幹部) において波力を測定した。さらに施工時を想定して、ケーソン部の先行長さを 3 種類に変化させて港外側の消波工端部での波力を測定した。

波力実験はすべて規則波で実施し、周期 T を 4 種類とし、波高 H を 5~20 cm に変化させた。

(2) 堤頭部周辺における波力分布

図-5 は代表的な 3 測点におけるブロックに働く平面 2 次元波力の時系列変化を示している。波浪条件は $T=1.98$ s, $H=15.0$ cm とした。堤頭部港内側 (St. C) では波の回り込みが顕著となるため、堤頭部港外側 (St. B) や堤幹部 (St. A) に比べて波力が大きい。こうした傾向は現地における被災位置とも一致している。

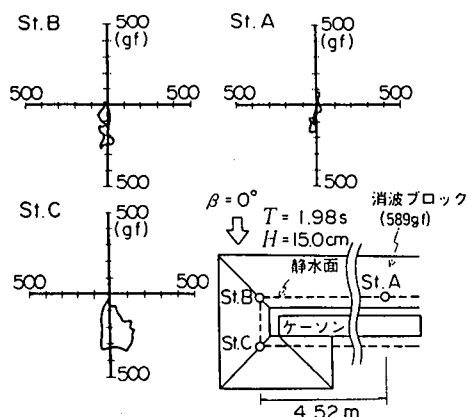


図-5 消波ブロックに働く波力の時間変化

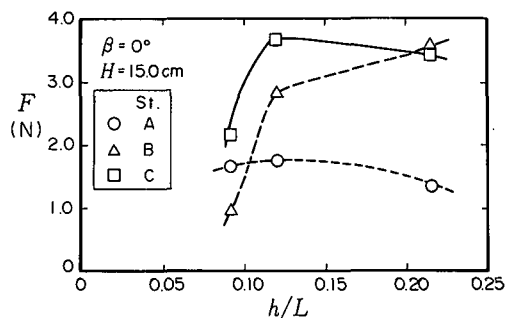


図-6 ブロックに働く波力と相対水深の関係

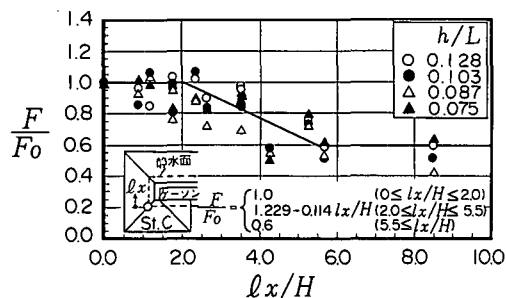


図-7 堤頭部におけるブロック波力分布

図-6は各測点における波力のピーク値と相対水深 h/L との関係を示している。St. Cでの波力は $h/L=0.12$ 付近で極大となり、周期が長い場合には波力が小さくなる傾向がある。

図-7はSt. Cからの距離 l_x による波力の変化を示している。横軸は l_x を波高 H で除して無次元化し、縦軸は各点の波力 F を、St. Cでの波力 F_0 で除して無次元化している。 l_x/H が2.0以上になると波力が減衰し、 l_x/H が5.5で F/F_0 は0.6程度となる。これらの傾向を図中の実線のように近似した。一般に堤頭部ではケーソン1函分をブロック等の重量割増の対象としているが、波力増大の範囲は比較的狭く、St. C周辺部に限られることが明らかになった。

(3) 施工時を対象とした検討

日本海側のように冬季風浪が厳しい海域では、延伸中の消波ブロック被覆堤の場合、堤頭部を消波ブロックで巻き込んで越冬するのが一般的である。翌年、新たにケーソンを設置する際には既設のブロックをいったん撤去する必要がある。こうした暫定的な堤頭部で消波ブロックを巻き込まなければ、危険なブロックの移設作業を省略できるとともに、工費の縮減につながる可能性がある。

図-8は直立部を先行して施工した場合のブロックに働く波力を比較している。消波工天端上の端部から直立部の端部までの距離 l_y を大きくするほど、ブロックに働く波力が大きくなり、 $l_y=2.0$ mでは通常の堤頭部にお

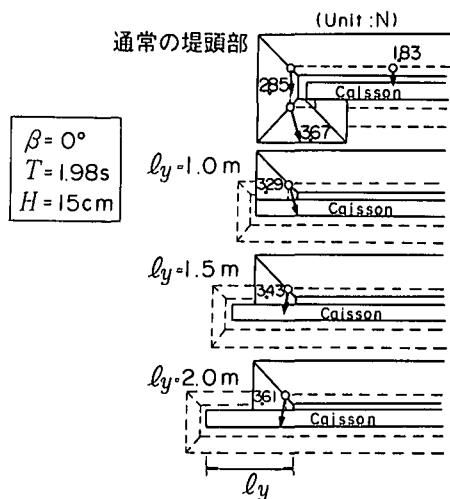


図-8 施工時に対する検討

ける波力と同程度となる。しかしながら l_y が1.0 m程度であれば F は3.29 Nであり、波力がやや小さくなる。さらに、堤頭部に近接した不連続消波部を対象としたケーソンに働く波力特性が明らかになれば、暫定的な堤頭部において消波ブロックを巻かず済ませることも可能と考えられる。

5. 消波ブロックの安定性

(1) 実験方法

安定実験はすべて一方方向不規則波を用い、堤体配置を変えることで波向きを変化させた。質量の異なる3種類のモルタル製ブロック模型(236 g, 368 g および 589 g)を用いて、①1波群1,000波として波高を徐々に大きくしていく方法 ②同一波高の波群を連続して4,000波作用する方法、の2種類の実験を行った。

消波ブロックの観察では、ブロックの全高の1/2以上の距離を移動した場合を「被害」と定義した。図-9は堤頭部の検査域を示している。検査域の下端水深およびケーソン端部から法線方向の検査域の幅は22.5 cmとした。この値は236 gのブロックの安定限界波高 $H_{1/3}$

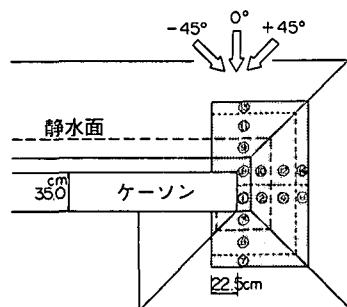


図-9 安定実験の検査域

(14.2 cm) の約 1.5 倍である。

各エリアにおける移動個数をそのエリアに属するブロックの総数で除して局所被害率を求めた。実験結果の整理に当っては検査域全体の平均被害率に着目した。さらに比較のために堤体中央部においてもブロックの移動を観察し、同様の整理を行った。

安定実験の実験周期は、前述した波力実験における波力の卓越条件に着目して、 $T_{1/3}=1.98$ s に限定した。また波高 $H_{1/3}$ は 6.0~24.0 cm の範囲で 7 種類に変化させた。

(2) 安定限界重量

消波ブロックの安定重量は、以下に示すハドソン式で求められる。

$$W = \frac{\gamma_a H_{1/3}^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 W は安定重量 (9.8 kN)、 $H_{1/3}$ は設計有義波高 (m)、 γ_a はブロックの空中単位体積重量 (9.8 kN/m³)、 θ は傾斜面が水平面となす角度、 K_D はブロックの形状および被害率によって決まる定数である。半沢ら (1996) は堤幹部を対象とした谷本ら (1985) の実験結果を再整理してブロックの変形特性を明らかにし、作用波数 $N_w=1,000$ 波で被害率 $D=1\%$ の条件に着目すると、従来からの K_D 値を用いて安定重量が算定できることを明らかにしている。

図-10 はこの被害基準に着目して、波高 $H_{1/3}$ と安定限界重量 W の関係をまとめたものである。堤幹部に比べて堤頭部では、同一重量のブロックに対する安定限界波高が小さく、波力増大の影響が現われている。図中の実線は式 (1) による計算結果で、堤頭部では破線で示すように計算重量の 5 割増とした。実験結果によると堤頭部では $\beta=0^\circ$ および $+45^\circ$ の場合は 5 割増がほぼ妥当である。これに対して $\beta=-45^\circ$ の場合はかなり安全側となる。

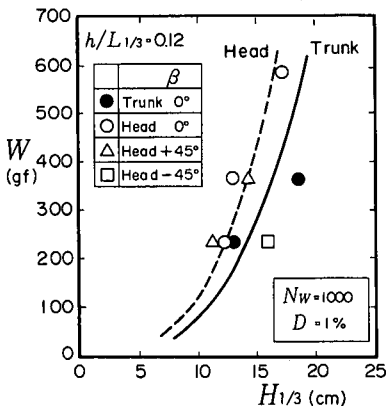


図-10 安定限界波高

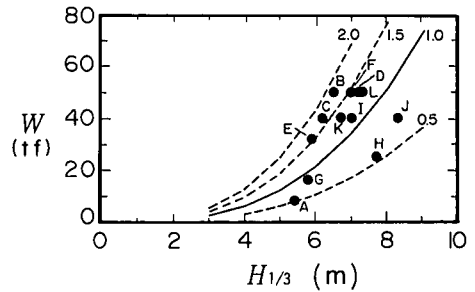


図-11 現地被災例の分析

図-11 は前述した表-1 の現地被災例を、実験結果と同様の形式にまとめたものである。実線は式 (1) による計算曲線で、破線はその 0.5 倍、1.5 倍および 2.0 倍に相当する曲線である。なお K_D 値は現地で使用したブロックの平均値である 8.1 を用いた。若干ばらつきが認められるが、1.5 倍の曲線は被災事例のほぼ上限に位置しており、5 割増の妥当性を示していると考えられる。また、実線よりも右側に位置する事例では、堤幹部において被災が生じていないことから、現地条件の堤幹部に対しては式 (1) がやや安全側の値を与える場合もあることがわかる。

(3) 安定限界を上回る条件に対する検討

堤頭部に対して、波向き条件を 3 種類 ($\beta=0^\circ, +45^\circ$ および -45°) に変化させて、安定限界を上回る波浪を 4,000

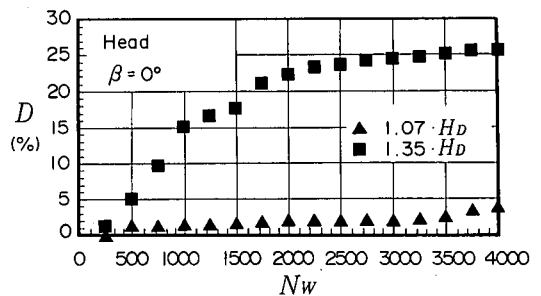


図-12 波数と被害率 ($\beta=0^\circ$)

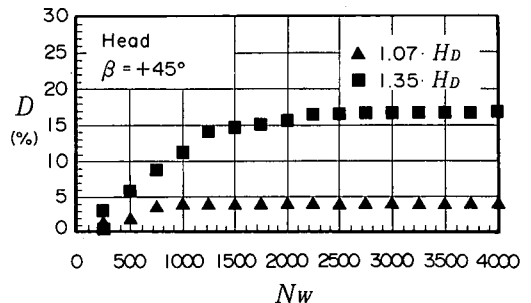
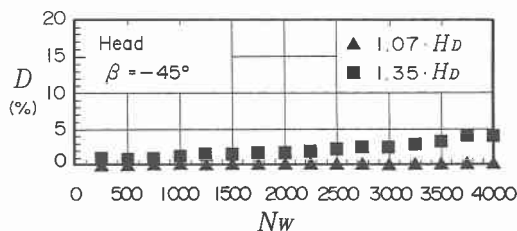


図-13 波数と被害率 ($\beta=+45^\circ$)

図-14 波数と被害率 ($\beta = -45^\circ$)

波 (250 波を 16 回) による被害特性を調べた。使用したブロックは 236 g とし、波高 $H_{1/3}$ は 13.1 および 16.6 cm の 2 種類とした。堤頭部に対して重量 5 割増を考慮して求めた安定限界波高を H_b とすると、それぞれの波高は $1.07H_b$ および $1.35H_b$ となる。

図-12 は $\beta = 0^\circ$ における被害率の変化を示している。 $1.07H_b$ の条件では、4,000 波で被害率 D がおよそ 4% 程度となっている。 $1.35H_b$ の条件に対しては、4,000 波作用後の $D = 25.7\%$ となっている。写真-1 は最終的な被害状況を示しているが、直角入射条件の被害と推定される前出の図-1 と傾向が似ている。

図-13 に示す $\beta = +45^\circ$ の場合は、4,000 波の作用後 $1.07H_b$ の条件で $D = 4\%$ 、 $1.35H_b$ の条件では $D = 16.6\%$ となった。写真-2 は最終的な被害状況を示しているが、同じ入射角と推定される前出の図-2 と同様に、港内側に転落するブロックが多い。

前述した実験結果 ($\beta = 0^\circ$ および 45°) に関しては安定限界を上回る波浪によっても、ケーソン前面では検査域内のブロック移動は少なかった。平面的に見てケーソン端部から設計有義波高 $H_{1/3}$ の 1.5 倍を被覆範囲とすれば、おおむね安全側であることが示された。

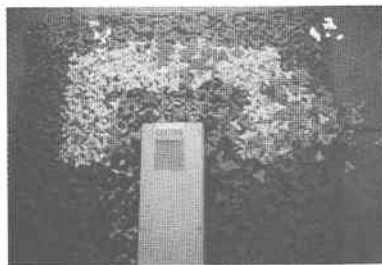
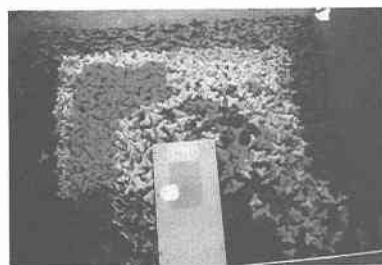
図-14 は $\beta = -45^\circ$ の結果を示している。 $\beta = 0^\circ$ および $+45^\circ$ に比べて被害が小さく、 $1.35H_b$ の条件に対して、4,000 波作用後で $D = 4\%$ で収束している。このことから堤尾部となる部分については、とくに堤頭処理を行わずに済むと考えられる。

6. 結 論

消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの安定性に関して検討し、以下の結論を得た。

① 消波ブロックに働く波力を直接計測し、堤頭部では堤幹部に比べて波力自体が大きくなることを示した。また波力増大の範囲を波高の関数として表した。

② 堤頭部に直角入射波が作用する条件に対しては、作用波数 1,000 波、被害率 1% に着目すると、ハドソン式の計算重量を 5 割増することで安定重量が求められる。斜め入射 45° では、波の進行方向に対して上手側の堤頭部

写真-1 ブロックの移動パターン ($\beta = 0^\circ$)写真-2 ブロックの移動パターン ($\beta = +45^\circ$)

では直角入射と同様であるが、下手側の堤頭部では安全側となる。

③ 安定限界を上回る波浪に対するブロックの移動パターンを実験により明らかにし、現地における被災パターンと一致することを確認した。

参 考 文 献

- 運輸省港湾局監修 (1989): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 日本港湾協会, 上巻, pp. 134.
- 鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和 (1986): 被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 626-630.
- 北島昭一・中野拓治・堀井修身・柿崎秀作・降旗健一・花木芳雄 (1968): 被災防波堤集覧, 港研資料, No. 58, 239 p.
- 五明美智男・堺和彦・高山知司・寺内 潔・高橋重雄 (1995): 消波ブロック被覆堤のブロックの安定性に関する現状調査, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 901-905.
- 楠山 勉・鹿島遼一 (1989): 消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果, 海岸工学論文集 第 36 巻, pp. 653-657.
- 武山秀夫・中山種清 (1975): 被災防波堤集覧 (その 2) 港研資料, No. 200, 255 p.
- 谷本勝利・原中祐人・山崎一雄 (1985): 不規則波による消波ブロックの安定性に関する実験的考察, 港研報告, 第 24 巻, 第 2 号, pp. 85-121.
- 服部千佳志・柴田鋼三・大堀晃一 (1984): 被災防波堤集覧 (その 3) 港研資料, No. 485, 281 p.
- 半沢 稔・佐藤弘和・高山知司・寺内 潔・高橋重雄・谷本勝利 (1995): 消波ブロックの安定性評価式に関する研究, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 901-905.
- 宮井真一郎・大平勝司・塩見雅樹 (1993): 被災防波堤集覧 (その 4) 港研資料, No. 765, 248 p.