# 補修時の重量増加による低天端護岸消波ブロックの安定性の変化

Change in Stability of Wave-Dissipating Blocks of Low-Crested Seawall due to the Repair by Using Larger Blocks

# 有光 刷<sup>1</sup>•尾西宙郎<sup>2</sup>

# Tsuyoshi ARIMITSU and Hiroo ONISHI

In the repair of damaged wave-dissipation works, the stability of wave dissipation blocks is expected to be improved by the use of blocks larger mass than the required mass in the initial design. However, although the wave-dissipation blocks used for the repair are heavier than the weight calculated by the Hudson equation, the damage of the blocks has occasionally occurred near the crest of wave-dissipating works. This paper aims to elucidate the damage mechanism of wavedissipation blocks used for the repair at the crest of wave-dissipating blocks of a low-crested seawall by conducting hydraulic model experiments. It is found from the experimental results that the wave pressure in the vicinity of the discontinuity of the mass of blocks causes the block damage near the water surface.

# 1. はじめに

近年、コスト削減の観点から、海岸構造物のライフサ イクルコストの算定や、それを最小にする設計手法に関 する研究が行われてきている. 一般的に海岸構造物のラ イフサイクルコストは、初期建設費用と被災後の原形復 旧に要する補修費用の合計で求められる(荒木ら,2005; 高山ら,2006).一方で,荒木・出口(2007)は,捨石構 造物の被災後の補修時に原設計と比べて大きな重量の被 覆材を用いた場合、安定性が向上し、総補修費用が低減 する可能性を示している.ただし,これは補修時の重量 割増により安定性が向上するという条件に基づいたもの であり、原設計を上回る基準で補修したにもかかわらず 安定性が期待通りに向上しない場合は,その後も被災と 補修を繰り返し、総費用が増大する可能性もある、この ように、ライフサイクルコストを算定する上で、補修後 の安定性の変化はその後の被災頻度や補修費用に大きく 影響を及ぼすことから,その評価には高い精度が求めら れる.また、補修後には期待通りの安定性が得られなけ ればならない.

実際に,埋立地隅角部付近の低天端護岸において,ハ ドソン式による所要重量を満足する消波ブロックが被災 し,安定性向上のために原設計より大きな重量のブロッ クを用いて補修している事例がある.補修には所要重量 の2倍程度にまで重量を割増したブロックが用いられた にも関わらず,隅角部を中心に数年確率波程度の波によっ てブロックの移動が生じ,多額の補修費が必要となって いる.特に顕著な移動がみられた隅角部については,目 見田・三谷(2005)に基づき,さらにブロック重量を増加 させている.一方,隅角部に隣接する直線部については 目見田・三谷(2005)の実験の対象外であるため、今後の

1	Æ	会	員	博(工)関西電力(株)電力技術研究所
2	Æ	会	員	関西電力(株)原子力事業本部

被災範囲の拡大の可能性については検証されていない. また,所要重量の2倍の重量のブロックが被災した原因 についても明らかにされていない.

本研究では、低天端、隅角部、補修時の重量増加の影響を考慮した詳細な水理実験に基づき、ハドソン式を十分に満たす重量の消波ブロックが被災するメカニズムを 解明し、期待通りに安定性を向上させるために有効な対 策を検討することを目的としている.

## 2. 検討対象護岸の被災事例の概要

# (1) 検討対象護岸の概要

検討対象は、目見田・三谷(2005)と同じ隅角部を有す る埋立地護岸である. 護岸の標準断面を図-1に示す. ケー ソンの天端は低く,その前面および護岸上部に消波ブロッ クが設置されている.ケーソン前面の消波ブロックは天 端3個並びの全面被覆形式で,法勾配は1:4/3である. 護岸上部の消波ブロックは水平2層積である.原設計で は,設計波高H<sub>1/2</sub>=5.3mに対してハドソン式から算定さ れる所要重量16.6tを上回る20t型の消波ブロックが用い られている.



## 図-1 護岸標準断面

#### (2) 被災状況と補修履歴

図-1に示した護岸の実構造物では,数年確率波程度の 波が作用したときに,ケーソン前面部の天端付近の消波 ブロックが沖側へ転落している.補修工事では,天端下 の消波ブロック2層分程度の範囲に残った不安定な20t型 ブロックを撤去し,新たに32t型ブロックが据え付けら れている.しかしながら,補修後も隅角部や隣接する直 線部で,天端ブロックの移動が生じ,その都度32t型の ブロックによる補修工事が繰り返されている.なお,特 にブロックの移動が顕著である隅角部については,目見 田・三谷(2005)の検討結果に基づき,32t型よりさらに 重量を増加させた40t型,50t型の消波ブロックを用いた 補修が行われている.

# 3. 消波ブロック安定性に関する平面実験

### (1) 実験装置と模型

多方向不規則波造波装置を備えた平面水槽を用いて水 理模型実験を実施した.図-2に,水槽内に再現した地形 と構造物の平面図を示す.隅角部および隣接する北護岸 の直線部を有効造波領域内に配置すること,模型縮尺を 可能な限り大きくすることを考慮し,模型縮尺は1/65と した.沖波条件が波向Nの時の地形開始部における波向 が造波装置と直角になるように模型を配置した.

## (2) 波浪条件

現地では、対象護岸の約1km沖の水深28mの地点において波浪観測が行われている.波浪観測地点における波 浪条件が表-1を満たす沖波条件を用いて、エネルギー平 衡方程式(間瀬ら、1999)によって地形開始部の波浪条件 (波高、周期,波向)を算定し、造波条件とした. Casel は実構造物でブロック移動が生じた時の条件、Case2~6 は波向毎の既往最大波高を記録した際の条件、Case7は N方向の100年確率波である.実際の波浪観測データは、 N方向の波の出現確率が最も高く、高波浪の来襲方向も Nが多い.周波数スペクトルはBretscheider-光易型、方 向関数は光易型とする.継続時間は目見田・三谷(2005) と同様に、現地換算で50時間以上とした.潮位について も目見田・三谷(2005)を参考に、HWL(DL+0.5m)とし た.



図-2 地形と構造物の概要

表-1 波浪条件

Case	H <sub>1/3</sub>	T <sub>1/3</sub>	波向	Smax	確率年
1	5.9m	9.6s	N	œ	約10年(被災時)
2				8	
3	6.5m	11.7s	N	75	約20年 (既往最大波高)
4				25	
5	4.8m	9.6s	NNE	8	
6	5.7m	10.9s	NNW	8	
7	7.0m	12.2s	N	8	100 年確率波



図-3 消波ブロックの検査領域の配置

## (3) 消波ブロックの被害率の算定

図-3に, 護岸に沿う方向に設けた消波ブロックの検査 領域の配置を示す. 隅角部付近については護岸外郭形状 に基づいて4分割し, 直線部についてはケーソン1函の幅 15m毎に領域を分割した. 検査域の下端は, 原設計の20t 型消波ブロックに対してハドソン式から波高H<sub>10</sub>を逆算 し, 静水面下1.5H<sub>10</sub>までの深さである水深h=6.75mとし た. なお,実験では, ブロック1個分の長さ以上移動し たブロックを被害とした.

## 4. 補修前後の消波ブロック安定性の変化に関する実験

#### (1) 実験条件

補修時の重量割増の効果を確認するために、補修前後 の消波ブロックの安定性を比較した.図-4に、原設計 (Type1)と補修工事後(Type2)の消波ブロックの配置を 示す.図には、検査領域毎の水深方向のブロック重量の 配置を示しており、重量を増加させた範囲を灰色で示し ている.原設計では全領域で20t型ブロックを用い、補 修工事後の隅角部には40t型、50t型を、隣接する直線部 のうち領域⑤~⑬の135mの区間の天端から2層には32t



型を用いた. 領域⑭以降は,実構造物においてブロック が移動していないため,原設計のとおり20t型ブロック を用いている. Type1には表-1に示したCase1~6を, Type2にはCase1~7を作用させた.

(2) 補修前後の消波ブロックの安定性

図-5に、Case2(既往最大波高・N・ $S_{max} = \infty$ )に対する Type1とType2の被害率の時系列を示す.なお、Case2の 波浪条件に対して、エネルギー平衡方程式から算定され る護岸前面の波高 $H_{L3} = 4.6m$ を用いると、ハドソン式か ら求められる消波ブロックの所要重量は10.9t、隅角部 を考慮して5割増としても16.3tであり、Type1,Type2とも に十分安定な重量の消波ブロックを用いている.



(b) Type2(補修後)

図-5 消波ブロック被害率の時系列(Type 1・Type 2)

原設計のType1の隅角部(領域①~④)では,波の作用 開始直後から20t型消波ブロックの移動が多数移動し, 14時間後には被害率が40%に達する.直線部においても, 隅角部に隣接する領域⑤~⑦の被害率は50時間後には20 %近くまで上昇する.なお,直線部では,隅角部から離 れるほど被害率が小さくなる.この理由としては,堤幹 部が堤頭部に比べて構造的に安定であること,水深の減 少による波高の低減,防波堤による遮蔽などが考えられ る. 実構造物において, 消波ブロックが移動したために 補修工事が行われている範囲は領域①~⑬であり, 本実 験は実構造物の被災をよく再現できている.

補修後のType2の隅角部では、40t, 50tの消波ブロッ クを用いて補修している効果が現れ、被害率がType1の 1/3程度に低下する.一方で32t型ブロックを用いて補修 した領域⑤~⑦の被害率はType1とほぼ同程度である. なお、領域⑧以降では、Type1と比べて被害率が低下し ており、32t型ブロックへの重量割増の効果が現れてい る.

図-6に、Type1、Type2に対して各波浪条件を54時間 造波した後の被害率の分布を示す.両Typeとも、方向 集中度Smaxが小さいほど被害率は小さく、目見田・三谷 (2005)と同様の傾向がみられる.また斜め入射時(NNW, NNE)は沖波条件の波高が小さく、護岸に作用する波も 小さいために、N方向波に比べると被害率が小さい.





Type1で用いている20t型の消波ブロックは、全波浪条 件に対して所要重量を満たしているにもかかわらず、隅 角部を中心に被害が生じている。特に、領域①の被害率 が大きいのは、斜め入射波がケーソン前面に作用する際 の激しい水粒子運動や循環流(目見田・三谷、2005)に加 え、消波ブロックの端部であり背後からの支持が無いこ とが原因であると考えられる. 隅角部のうち領域③の被 害率が隣接する他の領域に比べて小さいのは, 領域③に 対して波が正面から直角に作用するためだと考えられる. ただし, 隅角部において最も安定な領域③においても, ハドソン式から求められる所要重量の1.5倍以上の重量 のブロックが移動する. 以上のことから, ハドソン式で は考慮されていない波の入射角や天端の低さなど対象護 岸固有の条件がブロックの安定性に影響をおよぼしてい ると考えられる

Type2の隅角部では,40tと50tの消波ブロックを用いて いるために,Type1と比べると安定性が向上する.特に 領域③では100年確率波が作用した場合にもブロックの 移動はみられない.一方,直線部のうち隅角部に隣接す る領域⑤ではType1と同程度の被害が発生し,32t型消波 ブロックへの重量割増の効果はみられず,重量が大きな ブロックほど安定性が増すハドソン式の考え方と一致し ない結果となる.

#### 5. 安定性に影響をおよぼす要因に関する実験

#### (1) 実験条件

前節で述べたとおり、隅角部では重量割増による消波 ブロックの安定性向上効果がみられるものの、直線部で は32t型の消波ブロックでも補修工事前と同程度の被害 が発生し、安定性が向上していないことが確認された. ここでは、ブロックの安定性に影響をおよぼす要因を抽 出するために、図-7に示すブロックの配置に対して Case7 (100年確率波)を作用させ、Type2の安定性との比 較を行った.なお、Case7の波浪条件に対する護岸前面 の波高H<sub>IB</sub>=5.0mを用いてハドソン式から求められる消 波ブロックの所要重量は14t,隅角部を考慮して5割増と しても21tであり、Type2で補修に用いられた32t型は十 分な重量を有しているブロックである. Type3~Type7 に対する実験については、Type1およびType2で顕著な 被災が生じた隅角部付近のみをブロック移動の検査範囲 とし、Type3~Type6は領域⑦以降に、Type7は領域⑩以 降に飛散防止用のネットを展張した.なお、図-7中の薄 い灰色は原設計からブロック重量を増加させた範囲を示 し、濃い灰色はネットによる飛散防止を図った範囲を示 している.

#### (2) 天端高およびブロック重量による安定性の変化

**図-8**に, Type2~Type6に対して100年確率波を54時間 作用させた後の被害率を示す.

Type3は、Type2の天端上に5層のブロックを上乗せし、 天端高を約10m高くした条件である. これにより,他の Typeでは、ケーソン前面のブロック天端上に波が作用 するのに対して、Type3では非越波となる. この時,領 域②~④ではブロックは移動がみられないことから、 Type2では天端高の低さが消波ブロックの安定性を低下



させていると考えられる.ただし、領域⑤,⑥において は、天端高を高くすることでType2と比べると安定性は 向上するものの、ハドソン式を満足する32t型ブロック の移動がみられ、期待通りの安定性は得られていない. 低天端のType1,2では天端付近のブロックが移動する のに対して、非越波となるType3では天端付近のブロッ クは安定であるが静水面付近で移動が生じる.このこと から、被災の原因は天端の低さだけではないことが分か る. 一方,領域①~④を50t型ブロックで補修したType4 では,領域②と④で50t型ブロックが移動することから, 重量を40t(Type2)から50t(Type4)に割増する効果と比べ ると,天端高を高くする(Type3)ことによる安定性向上 効果の方が大きいといえる.

Type5は、領域②~④をType2と同様の40t型ブロック で補修し、さらに領域⑤まで40t型ブロックの範囲を拡 大している.この条件に対しては、領域④、⑤において Type4と比べて安定性の向上がみられる.これは領域⑤ の重量を40tに割増した効果であり、Type4の被害率が大 きいのは、領域⑤で生じた被災が隣接する領域④へ拡大 したためだと考えられる.領域⑤、⑥を40t型ブロック で補修したType6では、領域③~⑥でブロックの移動が みられないことからも、隅角部で所要重量以上のブロッ クが移動する原因の1つとして、直線部の被災による支 持の低下が挙げられる.

(3) ブロック重量不連続部の水深による安定性の変化

前節で述べた高天端のType3の領域⑤, ⑥においてブ ロックの移動が生じた静水面付近には、ブロック重量の 不連続部がある.このことから、対象護岸では、重量の 異なるブロックの境界が、大きな力が作用する静水面付 近に位置するために不安定となっていると考えられる. そこで、Type7では、領域⑤~⑦にType2と同じ32t型ブ ロックを用い、その設置範囲を天端下2層からブロック 移動検査範囲下限まで拡大した.

図-9に、Type2とType7に対して100年確率波を54時間 作用させた後の被害率を示す.ブロック重量の不連続部 の水深を1.5H<sub>13</sub>とすることで、十分な安定性が得られて いる.この水深は、傾斜堤の設計時に質量の小さい捨石 およびブロックを使うことができる水深(日本港湾協会、 2007)と一致している.このことから、補修時の重量割 増は、設計時と同様に波の作用が強い範囲全体を対象と するべきであり、原設計のブロックとの重量不連続部は 波の作用の弱い水深とするべきであると考えられる.



図-9 造波開始より 54 時間後の被害率(Type 2~Type 7)

#### 6. まとめ

本研究では、実際に被災後に重量の割増により安定性 向上を図っている埋立地隅角部付近の消波ブロックに対 して、水理実験により重量割増の効果を評価するととも に、補修前後の安定性の変化に影響をおよぼす影響を検 討した.結果をまとめると以下のとおりである.

- ①水理実験では、現地と同様に、隅角部および隣接する 直線部において原設計の20tブロックに移動が生じた. 天端下2層に対して重量を32tに割増したブロックを用 いて補修をしても、十分な安定性は得られなかった.
- ②32tに重量割増をした消波ブロックを用いて、天端高を高くした場合には若干の安定性の向上はみられることから、低天端護岸は通常の形状と比べると消波ブロックの安定性が低いことが確認できた.ただし、天端が高い条件においても、ハドソン式で算定される所要重量以上の消波ブロックが移動する領域がみられることから、天端高だけが対象護岸の被災原因ではない。
- ③32はり重量を増加させて40t型のブロックを用いて補 修を行った場合にも、十分な安定性は得られなかった. しかしながら、補修時の重量割増の範囲を静水面下 1.5H<sub>i</sub>sまでとすると32t型でも十分安定であった.この ことから、対象地点では、ブロック重量の不連続部が 静水面付近に位置することが被災の原因と考えられる.
- ④以上より、補修時に重量を割増したブロックを用いて 安定性向上を図る場合には、波浪の影響が小さくなる 領域までを一様な重量のブロックに置換することが望 ましいと考えられる。

謝辞:本研究の実験データの取りまとめに当たっては, 財団法人電力中央研究所榊山勉上席研究員より貴重なご 助言を,また水理実験にあたっては,㈱日本工業試験所・ 内西博氏の協力を得たことを記して,謝意を表する.

#### 参考文献

- 荒木進歩・田中隆太・浦井 剛・出口一郎(2005):透過波高を性 能指標とした捨石防波堤の最適な補修計画の検討,海岸工学 論文集,第52巻,pp.856-860.
- 荒木進歩・出口一郎(2007):期待総補修費の算定に基づく質量を 割増した被覆石による堤体補修の検討,海洋開発論文集,第 23巻, pp.351-356.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏(2006):ライフサイクルコストを 考慮した護岸被覆材の最適設計,海岸工学論文集,第53巻, pp.856-860.
- 日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同解説(下), 1485p.
- 間瀬 肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋(1999):波の回折を考 慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究、土木 学会論文集,第628号, II-48, pp.177-187.
- 目見田哲・三谷敏博(2005):構造物隅角部における消波ブロック の被災メカニズム,海岸工学論文集,第52巻,pp.776-780