直立壁前面における捨石堤の

不規則波による変形特性に関する水理模型実験*

五洋建設株式会社 高橋 研也

東北大学大学院工学研究科 田中 仁

1. はじめに

海岸施設・構造物施工時において,作用波浪が低減された所望の作業空間を確保するととも に、当該作業空間に供する重機等の足場を海上に確保したい場合がある。一般的には、等脚台 形マウンド(捨石堤)を築造することが多いが,法面を有するために重機足場が当該作業空間 から離れた位置となり作業半径が大きくなってしまう。例えば、外洋に面した海上工事を計画 する際には、施工ヤードの被災リスクの低減および施工性の向上をおこなうことが課題として 挙げられることがほとんどである。

このような背景に鑑み,著者ら¹)は写真-1 および図-1 に示すバットレス型消波構造物を開発 している。すなわち,L型壁構造であるバットレスを築堤内に埋設し,石材の重量および摩擦 力により滑動・転倒に対して安定させた土留め構造とすることで,築堤側面が鉛直に切り立ち 重機足場を作業空間に近接した位置に築造することができるものである。なお,バットレス底 版は揚圧力低減および石材との噛み合わせ効果促進のために隙間を設けた梁構造としている。 また,バットレスは防波壁としても機能するとともに,消波ブロックによって築堤の消波性能 の増強および石材の吸出しリスクの低減が図られている。このバットレス型消波構造物の設計 に資するため,著者ら¹1は既に水理模型実験を実施して設計波圧分布や水平波力の低減率,越 波流量などの基本的な水理性能を確認している。しかし,破壊モードに関しては被災形態の目 視確認を定性的におこなったにすぎず,破壊の進行とともに水理性能がどのように変化してい くかについても触れられていない。これは維持管理計画を作成する上で有用な情報となり得る。

そこで、本研究においては、このバットレス型消波構造物の不規則波による変形に着目した 水理模型実験を実施して、破壊モードおよび水理性能の変化傾向を把握することを目的とする。



*Hydraulic model experiment on deformation characteristics due to irregular waves of rubble mound breakwater at the front of upright seawall by Kenya Takahashi and Hitoshi Tanaka

2. 実験方法

図-2 に実験断面図を示す。一般的な急勾配海岸を想定して 2 次元造波水路内に沖側で 1/50, 岸側で 1/10 の海底勾配模型を設置し,造波水深を 78 cm とした。表-1 に実験条件を示す。沖波 波形勾配 $H_0'/L_0 = 0.021 \sim 0.041$ の範囲で,換算沖波波高 $H_0' = 6.9 \sim 17.7$ cm および沖波周期 $T_0 =$ 1.43 ~ 1.66 s の 5 ケースを設定した。各ケースで不規則波群I ~ III と 3 組用意し,造波信号の乱 数値を各組毎に固定して波高レベルを変えても同じ波形となるようにした。ケース 3,5 におい ては消波ブロックの効果を確認するため,消波ブロック模型を設置しない状態でも実験した。

まず,海底勾配模型のみの状態で造波をおこない,後述の検討で使用する進行波諸元を計測 した。サンプリング周波数 20 Hz にて水位を計測し,波高計 w2 および w3 における計測水位か ら合田ほか²⁾による入・反射波分離をおこなって通過波検定を実施した。

次に、図-1 に示すバットレス型消波構造物模型を波高計 w9 の位置に設置して造波をおこなった。バットレス模型はアクリル製,捨石模型は4号砕石(単粒度砕石 30-20 mm)とし,消波 ブロックは平均質量 320.9 gのモルタル製シェークブロック模型とした。図-3 にバットレス模 型正面図を圧力計の配置とともに示す。バットレス模型海側壁面の水路中央付近高さ方向に, 圧力計を静水面下に1個,砕石層内(完全被覆部)に3 個および突出部(不完全被覆部)に2 個の合計6個を設置した。圧力はサンプリング周波数 200 Hz にて計測した。さらに,構造物背 後の空間を越波升に見立て越波量を計測した。写真-2 にケース3 における実験状況を示す。



図-2 実験断面図(縦横比=2:1,単位:mm)

ケース	H_0'	T_0	$H_{0}'\!/L_{0}$	造波	消波
	(cm)	(8)		仮剱	7 499
1	6.9	1.43	0.021	900	有
2	9.8	1.45	0.030	900	有
3	12.2	1.51	0.034	1800	有, 無
4	13.7	1.58	0.035	1800	有
5	17.7	1.66	0.041	1800	有. 無

表-1 実験条件



写真-2 実験状況(ケース3,波群I)



図-3 バットレス模型正面図および圧力計配置図(単位:mm)

加えて、Hudson 式による消波ブロックの所要質量を満足しないケース 3~5 においては、バットレス型消波構造物の破壊モードをより詳細に把握するために、波群I、II、III、II、II、IIを順に 300 波ずつ繰り返して合計 1800 波作用させた。各波群造波終了後の 300 波毎に計測データの収録および水路側壁ガラス面からの画像解析による堤体形状の記録をおこなった。



図-4 捨石および消波ブロックの断面変化(N:作用させた波の数)

3. 実験結果

(1) 破壊モード

図-4 に全ケースにおける捨石および消波ブロックの 300 波毎の断面変化を, 写真-3 にケース 5 (消波ブロック有) における 1800 波作用後の被災状況を示す。ここに, N は作用させた波の 数であり, 横軸は造波前のバットレス模型海側壁面を原点としている。なお, Hudson 式による 消波ブロックの所要質量を満足するケース 1, 2 (消波ブロック有) においてはほとんど断面変 化が生じていなかったため, 造波を 900 波までで中止している。また, ケース 3 (消波ブロッ ク有)における 1500~1800 波間のデータに関しては有効なデータと認められなかったために欠 測扱いとしている。今回の実験条件の範囲内においてはバットレス模型にほとんど変位が生じ なかったため, ここでは捨石および消波ブロックにより構成される築堤部の変形特性にのみ着 目する。

図-4 を見ると, Hudson 式による消波ブロックの所要質量を満足するケース 1,2 (消波ブロッ ク有)のみならず,満足しないケース 3,4 (消波ブロック有)においてもほとんど断面変化が 生じなかったことが分かる。消波ブロックがある場合において顕著な断面変化が生じたのはケ ース 5 (消波ブロック有)のみであり,静水面付近に位置する法肩が侵食されて消波ブロック と捨石が沖側に崩れる,いわゆる S 字型断面に変形する破壊モードとなった。消波ブロックが ない場合における破壊モードもある場合とほぼ同様であり,ケース 3,5 ともに破壊が進行した が,特に図-4(g)に示すケース 5 (消波ブロック無)において,岸側へ打ち上げられた捨石がバ ットレス模型突出部に捕捉されて被災の進行が抑えられている様子が確認された。

(2) 変形レベルの変化

図-4 において顕著な断面変化が認められたケース 3,5(消波ブロック有,無)の変形レベル を算出し,作用波数による変化を確認した。変形レベルの算出には Van der Meer³⁾による式(1), (2)を用い,捨石および消波ブロックそれぞれに対しての値を算出した。

$$S = A / D_{n50}^{2} \tag{1}$$

$$D_{n50} = \left(M_{50}/\rho_r\right)^{1/3} \tag{2}$$



図-5 捨石および消波ブロックの変形レベルの作用波数による変化

ここに、*D*_{n50}は捨石の 50%質量に相当する粒径または消波ブロックの代表径、*M*₅₀は捨石また は消波ブロックの 50%質量、*p*_rは捨石または消波ブロックの密度、*S*は変形レベル、*A*は侵食 部の面積である。図-5 に捨石および消波ブロックの変形レベルの作用波数による変化を示す。 ケース 3 (消波ブロック有)においては波浪条件が低いために作用波数が増加しても変形レベ ルがほとんど変化していないが、ケース 5 (消波ブロック有)においては捨石および消波ブロ ックとも造波直後に大きく変形し、作用波数の増加とともに変形レベルが一定値に漸近してい く傾向が読み取れる。一方、消波ブロックがない場合においては 1800 波作用後も捨石の変形レ ベルが上昇傾向であり、上述の通りバットレス模型にほとんど変位が生じなかったとは言え、 築堤部の維持管理に配慮すれば、消波ブロックにより捨石を被覆する必要性は高いと言える。 なお、捨石と消波ブロックの変形レベルの値が異なるのは、波浪の作用による締固まりや噛み 合わせ、消波ブロックの捨石への食い込みなどによりそれぞれの変形過程が異なることに起因 するものと考えられ、変形レベルの値の評価に当たっては注意が必要である。

(3) 反射率および越波流量の変化

バットレス型消波構造物の消波性能の指標を反射率および越波流量と考え⁴⁾,図-5の変形レベルと同様に作用波数による変化をそれぞれ確認した。反射率 K_rは通過波検定と同様に波高計 w2 および w3 における計測水位から合田ほか²⁾による入・反射波分離をおこなって算出した。 越波流量は実験計測値 q を換算沖波波高 H₀'および重力加速度 g により無次元化して整理した。

図-6 にバットレス型消波構造物からの反射率の作用波数による変化を示す。変形レベルが小 さかったケース 3 (消波ブロック有)においては作用波数が増加しても反射率に大きな変化は 見られないが,それ以外の変形レベルが大きかったケースにおいては作用波数の増加とともに 反射率が減少している。これは,捨石および消波ブロックの被災が進行して構造物法面が徐々 に緩勾配化していることと,それに伴い越波流量が増大していることなどによると考えられる。

図-7 にバットレス型消波構造物からの無次元越波流量の作用波数による変化を示す。波群特性の異なる不規則波群I,II,IIIを順に300波ずつ繰り返して造波しているために変形レベルおよび反射率と比較してバラツキが大きいが,作用波数の増加とともに無次元越波流量が増加傾向であることが読み取れる。バットレス自体にほとんど変位が生じていなくても,築堤部の変形レベルが大きくなった場合には消波性能が低下する可能性があることに注意する必要がある。



図-6 バットレス型消波構造物からの 反射率の作用波数による変化



図-7 バットレス型消波構造物からの 無次元越波流量の作用波数による変化

(4) 水平波力の変化

最後に、バットレス模型海側壁面における水平波力の作用波数による変化を確認した。水平 波力は図-3 に示す圧力計 p5~p10 における圧力計測値を台形公式により積分して最大同時波圧 合力として算出した。図-8 に結果を示す。消波ブロックがある場合においては作用波数の増加 とともに水平波力も上昇しているが、消波ブロックがない場合においては逆に減少に転じてい る。これは、図-4(g)および写真-4 に示すように岸側へ打ち上げられた捨石がバットレス模型突 出部に捕捉されたことにより、砕波して捨石部に突っ込んで来た水塊が突出部に直接作用して 衝撃砕波圧を生じるのを防いだ結果であると考えられる。



図-8 バットレス模型海側壁面における 最大同時波圧合力の作用波数による変化



写真-4 ケース5(消波ブロック無)

4. おわりに

本研究においては,海岸工事を想定した新しいバットレス型消波構造物を提案し,水理模型 実験を実施して破壊モードや消波性能などの基本的な水理性能を確認した。今後は本研究で得 られた基礎資料から合理的な設計手法に体系化し,現場施工への適用を図っていく所存である。

謝辞

本研究において使用したモルタル製シェークブロック模型は本間コンクリート工業株式会 社の池田雅俊氏から貸与いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 塩畑英俊,宇山友理,高橋研也,西畑 剛,山下 徹,三好俊康,林 規夫,大久保泰宏: バットレス型消波構造物の開発,土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.74, No.2, pp.I_49-I_54, 2018.
- 合田良実,鈴木康正,岸良安治,菊地治:不規則波実験における入・反射波の分離推定法,港湾技研資料,No.248, 24p, 1976.
- J. W. Van der Meer: Stability of breakwater armor layers Design formulae, Coastal Engineering, 11, pp. 219-239, 1987.
- 4) 太田隆夫,松見吉晴,吉木弘軌,平山隆幸,大野賢一:傾斜護岸の複合被災に伴う消波性 能変化の予測モデル,土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_761-I_765, 2013.