波および流れによる捨石堤および消波ブロック堤の安定性に関する実験的研究

松本和記¹・泉宮尊司²・石橋邦彦³

¹射水市役所 (〒939-0393 富山県射水市戸破1511番地)

E-mail:matsumoto@city.imizu.lg.jp

²正会員 新潟大学 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

E-mail:izm@eng.niigata-u.ac.jp

³正会員 新潟大学 工学部建設学科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐2の町8050)

E-mail:isibasik@eng.niigata-u.ac.jp

本研究では、水理模型実験により不規則波に対する消波ブロック堤の安定性、および津波を疑似した準定常流に対する捨石堤および消波ブロック堤の安定性について詳しく調べている。不規則波に対する消波ブロックの安定数 N_s は、被害率 D 、作用波数 N およびイリバレン数 ζ に依存することが見出された。

流れに対する捨石堤および消波ブロック堤の安定性については、新たな安定数 $N_s=u/\{(Sr-1)gD_r\}$ を提案し、相対水深や堤防に働く流体力との関係を明らかにした。その結果、消波ブロック堤および捨石堤の安定数は、共に下流側の相対水深が大きく、堤防高さが高いほど小さくなること、および、堤防の単位長さあたりに働く流体力 F/l が大きいほど安定数が小さくなることが明らかとなった。

Key Words : wave-dissipating block, armor stone, stability number, detached breakwater, tsunami

1. はじめに

地球温暖化に伴って生じる異常波浪や地震に伴う津波に対する離岸堤の消波ブロックおよび捨石の安定性を精度よく評価することは重要である。現在、海岸・港湾構造物のブロックおよび捨石の所要質量を算定するには、一般的にHudson式が用いられている。しかしながら、有義波高や法面勾配等のみが考慮されているものの、波の作用時間や被害率が考慮されていないなど精度の問題が挙げられる。

また、半沢ら(2011)、榊山ら(2011)等により、津波に対する消波ブロックの安定性について検討が行われている。しかしながら、波作用時間や被害率を考慮した離岸堤消波ブロックの安定性や、津波を対象とした離岸堤消波ブロックの安定性に関する研究は極めて数少ない。

そこで本研究では、波作用時間および被害率に着目して、水理模型実験を行うことにより不規則波に対する消波ブロック堤の安定性、および津波を模擬した準定常流に対する捨石堤および消波ブロック堤の安定性に関して、実験的に検討することを研究の目的とする。

2. 実験概要

不規則波および準定常流に対する離岸堤の安定性に関して検討を行うため、以下に示す想定縮尺1/40から1/100の2つの水理模型実験を行った。

(1) 不規則波を用いた安定性実験

実験には、長さ 8.0 m、幅 1.0 m、深さ 0.3 m の 2 次元造波水槽を用いた。造波水槽には、ピストンタイプの不規則波造波装置が設置されており、図-1 にその配置概要を示す。水槽には固定床の斜面(1/10 勾配)を設置し、離岸堤の中央位置における堤脚水深が 10 cm となるよう

図-1 不規則波造波水槽と波高計の設置位置

に離岸堤消波ブロック模型(質量 76g, 代表径 3.22cm)を設置した. 斜面勾配を 1/10 にしたのは, より安定性の低い条件を想定するためである. 離岸堤模型は堤脚幅 $\ell=0.48$ m, 比高 $d=0.12$ m, 法面勾配 1:4/3 とし, 消波ブロックの積み方は整積みとした. 一様水深を 18 cm とし, 波高計 3 台(水平床部, 水深 15.1cm および 12.5 cm の地点), 電磁流速計を波高計③と同位置に設置した.

表-1 に示すように入力波のスペクトル形状, 波高および周期を変えて計 10 ケース行い, 波作用 10 分後にブロックの被害個数を測定した. Case-5 および Case-6 に関しては, 上記に加えて波作用 20 分後, 40 分後, 80 分後においてもブロックの被害個数の測定を行った.

(2) 準定常流を用いた安定性実験

実験は, 長さ 7 m, 幅 0.3 m, 深さ 0.3 m の 2 次元開水路を用いて行った. 図-2 に示すように, 水路内に離岸堤模型, 電磁流速計(堤体の上流側下端より 0.75 m 離れた位置)を設置した. 離岸堤模型に作用させる準定常流の流量を変化させ, 堤防模型の被害の有無および被害の程度を観測した. 水路内に水位が無い状態から給水バルブを素早く開き, 定常流になるまでにかかる時間ができる限り短くなるように実験を行った. 堤体模型には消波ブロック堤(堤脚幅 $\ell=0.33$ m, 離岸堤高 $d=0.08$ m, 法面勾配 1:4/3)および捨石堤(堤脚幅 $\ell=0.60$ m, 天端高 $d=0.10$ m, 法面勾配 1:1/2)の 2 パターン行った(写真-1 および写真-2). 堤体の上流側に水面が到達した時刻を作用時間 $t=0$ s とし, 30 s 経過ごとに堤体の上流側において水位 h_1 と流速 u_1 を, 下流側において水位 h_2 を計測した. 下流側における流速 u_2 は, 連続式より算出している(図-3). 30 s の計測間隔の間において破壊が発生した場合には, 随時計測を行った. また, 堤体に作用する力 F は運動量保存則より, 下式によって算定される.

$$F = w/2 \cdot (h_1^2 - h_2^2) + w/g \cdot q^2 \cdot \frac{(h_2 - h_1)}{h_1 h_2} \quad (1)$$

ここに, w は単位体積重量, g は重力加速度, q は単位幅流量, h_1 , h_2 は上流; 下流の水深である.

写真-1 準定常流を作用させた消波ブロック堤模型

写真-2 準定常流を作用させた捨石堤模型

表-1 不規則波を用いた実験条件

	スペクトル形状	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)
Case-1	修正 Bretschneider- 光易型	5.65	1.10
Case-2		7.85	1.41
Case-3		7.50	1.10
Case-4		9.56	1.37
Case-5		5.63	1.10
Case-6		10.07	1.67
Case-7	JONSWAP 型	5.63	1.10
Case-8		7.88	1.41
Case-9		7.60	1.10
Case-10		9.51	1.35

図-2 開水路内配置の概要 (準定常流実験)

図-3 記号の定義および堤防越流時に働く力

表-2 消波ブロックおよび捨石の諸元

	質量 (g)	体積 (cm ³)	密度 (g/cm ³)	代表径 (cm)
消波ブロック	76.00	33.50	2.27	3.22
捨石	8.68	3.24	2.68	1.48

実験に用いた消波ブロック模型と捨石の諸元を、表-2に示す。代表径 D_r は、 $D_r = (W/\rho_r)^{1/3}$ によって定義される。ここに、 W は単位質量(g/個)、 ρ_r は密度(g/cm³)である。

3. 不規則波による実験結果および考察

(1) 被害率の定義および実験時の被災状況

離岸堤消波ブロック模型の被害の度合いを、被害率 D で表すこととした。被害率 (%) は、堤体全体の消波ブロック個数に対する移動したブロックの個数の百分率で定義される。なお、移動個数を数える際に、ブロックの大きさの約 1 個分以上動いたものを被災ブロックと判断した。消波ブロック模型の被災状況は、岸側法肩が大半を占めており、一部として側面の消波ブロック模型が移動したが沖側はほとんど無被害であった。また、全 10 ケースにおいてほぼ同様の被災状況であった。

波作用時において、ある大きさの波が堤体に作用すると、天端の消波ブロック模型が岸沖方向に揺れることがあり、その繰り返しによってブロック同士の噛み合いが緩み、移動する場合があることを確認した。

(2) 被害率と波作用時間との関係

被害率と波作用時間を考慮して離岸堤消波ブロックの安定性を評価するため、まず本実験での被害率 D と波作用波数 N との関係を検証した。図-4 に Case-6 での被害率 D と作用波数 N との関係を示す。高橋ら³⁾によれば、消波工の変形は波作用開始直後に大きく、時間経過とともに落ち着く傾向にあるとされており、消波工の変形は近似的には波の継続時間の 1/2 乗に比例することが示されている。そのことより、波作用時間 80 分後までのプロット点を $D = aN^{0.5}$ 型で近似した曲線を図中に示す。本実験においても、被害率 D は近似的に作用波数 N の 1/2 乗におおよそ比例することが確認された。

また、被害率が 7% 以上では作用波数 N の 1/2 乗による近似曲線よりも被害率が小さいことが分る。これは、消波ブロック同士のかみ合わせの効果により、ある程度波が作用すると被害率の上昇が捨石や被覆堤等よりも抑えられるものと考えられる。

(3) 安定数 N_s の算定式

被覆石および被覆消波ブロック、消波ブロックの所要質量 M の算定には、一般的に Hudson 式が用いられる。

$$M = \frac{\rho_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \quad (2)$$

ここに $H_{1/3}$ は有義波高、 S_r は被覆石あるいはブロックの水に対する比重、 N_s は安定数(被覆材の形状、勾配およ

び被害率 D 等によって決まる)である。

実験より得られた各ケースでの波作用 10 分後におけるデータに加え、Case-5 および Case-6 での波作用 80 分後のデータも用いて以下の検討を行った。

被害率 D と波数 N の平方根との比と安定数 $N_s = H_{1/3} / (S_r - 1) D_r$ との関係を図-5 に示す。実線はべき関数型による近似曲線、破線は安田ら⁴⁾による混成堤消波ブロックに対するべき乗関数、非碎波条件の実験式である。全体として破線よりも小さい値をとっており、混成堤よりも消波ブロックの所要質量が大きいことが分る。

(4) 所要質量 M の算定式

朝倉ら(1999)により、潜堤に消波ブロックを用いた場合における所要質量の算定式には、下式のような関係があることが示されている。

図-4 被害率 D と作用波数 N との関係

図-5 安定数 N_s と $D/N^{0.5}$ との関係

$$\frac{H_{1/3}^3}{M} \cdot \xi^{1.5} = \alpha \cdot f(S_r) \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{N}} \right)^\beta \quad (3)$$

$$f(S_r) = \frac{(S_r - 1)^3}{S_r} \quad (4)$$

ここに、 α は水の密度や被覆層の透水性パラメータ等によって定まる係数、 ξ は碎波相似性パラメータであり、次のように有義波高、沖波波長 L_0 、および法面傾斜角 θ で定義される。

$$\xi = \tan \theta / \sqrt{H_{1/3} / L_0} \quad (5)$$

ここで、 $DN^{0.5}$ と $H_{1/3}^3 \xi^{1.5} / \rho_r D_r^3$ の対数を取り、それらの関係を図-6 に示す。この図より、被害率 D と波数 N の平方根の比のべき乗によって、碎波の影響を考慮した離岸堤消波ブロックの所要質量 $M = \rho_r D_r^3$ を算出できることが分る。本実験においては、以下に示す算定式を得ることができた。

$$\frac{H_{1/3}^3}{M} \cdot \xi^{1.5} = 160.9 \cdot \left(\frac{D}{\sqrt{N}} \right)^{1.034} \quad (6)$$

図-6 $H_{1/3}^3 \xi^{1.5} / \rho_r D_r^3$ と $DN^{0.5}$ との関係

図-7 既往の所要質量算定法との比較

(5) 従来法による所要質量 M との比較・検討

前項で示したHudson式の安定数 N_s は、以下のように表される。

$$N_s^3 = K_D \cdot \cot \alpha \quad (7)$$

ここに、 K_D は被覆材および被害率等によって定まる定数、 α は法面勾配である。一般的にテトラポッドには $K_D=8.3$ が用いられる。図-5より実験から得られた曲線にほぼ重なっている4点のデータを用いて算出したブロックの所要質量と、 $K_D=8.3$ と式(7)の安定数を用いて算出した所要質量とを比較したものを図-7に示す。全体として本実験によって算出された所要質量が大きいことが確認できる。図中の一番下に位置する点は、Case-5の80分後のデータ(図-5では $D/N^{0.5}=0.08$ におけるデータ)を用いて所要質量を算出したものである。他の点と比べて $D/N^{0.5}$ が小さく、厳しい条件を想定して算出していることになるため、既往の算定式による所要質量より大きな値となったと考えられる。

4. 準定常流による実験結果および考察

(1) 被災の判断基準および実験時の被災状況

被害の判断基準に関して、消波ブロック堤はブロック模型が1個でもブロック模型の大きさの約1個分以上動いた場合を破壊(damage)とし、その後の測定時刻も計測を続行し判定は破壊とした。捨石堤の場合は、準定常流を6分間作用させた後、下流側の堤体底端よりも移動した捨石の体積を測定し、堤体全体の捨石の体積との比の百分率を被害率 $D(\%)$ として定義した。

消波ブロック堤の被災は、まず裏法面の消波ブロック模型が流出し、次にその下のブロック模型が上部からの荷重を失うことにより流出するといった過程を確認することができた。また捨石堤の被災は、徐々に堤体内の水位が上昇し、その水位が堤体を越流する程度まで達した際に、堤体裏法面の捨石が崩れるように流出した。

(2) 流れによるブロックの新しい安定数の提案

流れに対する消波ブロックの所要質量算定式は、ブロックに働く流体力 F_T と抵抗力 F_R との釣り合いより導出される。

$$F_T = \frac{1}{2} \rho_w C_D A u |u| + \rho_w C_M V \ddot{u} \quad (8)$$

$$F_R = \rho_w g (S_r - 1) V (\pm f \cos \theta - \sin \theta) \quad (9)$$

$$V = \frac{\frac{1}{2} C_D u |u| A}{g (S_r - 1) (\pm f \cos \theta - \sin \theta)} \quad (10)$$

ここに、 C_D は抗力係数、 A は投影面積、 C_M は慣性係数、

f は摩擦抵抗係数, V は体積である. 式(10)を変形して,

$$\frac{(S_r - 1)gV/A}{u|u|} = \frac{C_D}{2(\pm f \cos \theta - \sin \theta)} \quad (11)$$

と記述し, ここで, $D=V/A$ と置き, 式(11)の逆数をとると,

$$\frac{u|u|}{(S_r - 1)gD} = \frac{2(\pm f \cos \theta - \sin \theta)}{C_D} \quad (12)$$

となる. さらに, 上式の平方根をとり, その無次元数を N_s^* と置くと,

$$N_s^* = \frac{u}{\sqrt{(S_r - 1)gD}} = \frac{\sqrt{2(\pm f \cos \theta - \sin \theta)}}{\sqrt{C_D}} \quad (13)$$

と書くことができる. ここで, 安定数は一般に斜面勾配, Fr 数, $Reynolds$ 数および継続時間 t などの関数として表されることを考慮し, 代表径 D_r を用いると, 以下のようにな安定数 N_s を表すことができる.

$$N_s = \frac{u}{\sqrt{(S_r - 1)gD_r}} = f(\tan \theta, Fr, Re, T, D_r / D) \quad (14)$$

図-8 流れによる安定数 N_{s2} と h_2/d との関係 (消波ブロック)

図-9 流れによる安定数 N_{s2} と流体力 F/l との関係 (消波ブロック)

式(14)の関数 f を実験的に精度よく求められれば, 代表径 D_r が算定され質量 M を算定することができる.

(3) 安定数 N_s と各種パラメータとの関係

実験から得られた水位および流速等を用い, $Reynolds$ 数, Fr 数, および水位差等をパラメータとし, それらと安定数 N_s との関係を評価した. 上流側のデータを用いた場合には, パラメータおよび安定数に添え字の 1 を, 下流側のデータを用いた場合には添え字の 2 を付した.

流れに対する消波ブロック堤の安定数 N_{s2} と下流側の相対水深 h_2/d との関係を示したのが, 図-8 である. 相対水深 h_2/d が大きく, 堤防高さ d が相対的に低いほど, 安定性は低下し, より大きな質量の消波ブロックが必要であることを示している. 同様に流れに対する消波ブロック堤の安定数 N_{s2} と堤防の単位長さ当たり働く流体力 F/l との関係を示したものが, 図-9 である. 堤防の単位長さ当たり働く流体力が大きいほど, 安定性は低下し被害が発生することを示している.

図-10 流れによる安定数 N_{s2} と h_2/d との関係 (捨石)

図-11 流れによる安定数 N_{s2} と流体力 F/l との関係 (捨石)

図-10 は、流れに対する捨石堤の安定数 N_Q と相対水深 h_2/d との関係を示したものである。図中の記号は、被害率別に分けてプロットしている。被害率 1% および 2% の位置を一点鎖線で示している。この鎖線は、各点の被害率の値を基に、被害率 1% および 2% と推定される位置に記したものである。この図からも、相対水深 h_2/d が大きいほど、堤防高さ d が高いほど安定性は低下する傾向にあるが、相対水深 $h_2/d=0.15$ 以上ではそれらの依存性は小さくなっている。また、本研究で定義された安定数 $N_Q=u_2[(S_r-1)gD_s]^{1/2}$ が、消波ブロックおよび捨石の安定性を評価するのに十分有効であることを示している。同じく流れに対する捨石の安定数 N_Q と堤防の単位長さ当たり働く流体力 F/l との関係を示したものが、図-11 である。この図においても、流体力 F/l の値が大きいほど、安定性がやや低下する傾向にあり、安定数 N_Q とともに F/l の影響もあることが示された。

マウンドの被覆材の安定性の評価に用いられるイスバッシュ式により算出した捨石の所要質量と、図-10における被害率が1%の鎖線から得られる安定数 N_Q より算出した所要質量とを比較した。本実験結果から算出した所要質量が下回ることはなかった。

5. 結論

本研究では、離岸堤を対象として不規則波および津波を疑似した準定常流を用いた水理模型実験を行い、消波ブロック堤および捨石堤の安定性に関して、以下に示す事項が明らかになった。

- (1) 不規則波に対する離岸堤消波ブロックの安定性に関して、安定数 $N_s=H_{1/3}/(S_r-1)D_r$ と被害率 D および波数 N との関係を示した。消波ブロックの安定数 N_s は、被害率 D と波数 N の平方根の比のべき乗型で近似できることが分かった。
- (2) 消波ブロックの被害率 D は、作用波数 N の 1/2 乗にほぼ比例する関係があることが確認できた。
- (3) 潜堤の消波ブロックに用いられる砕波の影響を考慮

した所要質量算定式の比例係数およびべき乗係数を修正することにより、本実験における所要質量算定式を示した。

- (4) 本研究で定義された安定数 $N_Q=u_2[(S_r-1)gD_s]^{1/2}$ は、流れに対して消波ブロックおよび捨石の安定性を評価するのに十分有効であることが示された。
- (5) 流れに対する消波ブロック堤および捨石堤の安定数は、共に下流側の相対水深が大きく、堤防高さ d が高いほど小さくなる。また、堤防の単位長さ当たり働く流体力 F/l が大きいほど安定数が小さくなることが明らかになった。これらのことより、流れに対する消波ブロックおよび捨石の安定性評価に関するパラメータとして、相対水深および単位長さ当たり働く流体力も重要であることが示された。

参考文献

- 1) 半沢稔・松本朗・田中仁・山本方人：離岸堤消波ブロックの津波に対する安定性に関する実験的研究，土木学会論文集B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.1,796-1,800, 2011.
- 2) 榊山勉・松山昌史：津波に対する傾斜堤消波ブロックの安定性に関する実験的研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.1,791-1,795, 2011.
- 3) 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：期待被害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 37 巻，第 1 号，pp.3-32, 1998.
- 4) 安田誠宏・間瀬肇・高橋真弘・松下紘資・徳永誠之：波形勾配および砕波の影響を考慮した消波ブロック安定数算定式の提案，海洋開発論文集，第 25 巻，pp.575-580, 2009.
- 5) 朝倉良介・池谷毅・岩瀬浩二：潜堤被覆材の所要重量算定に関する実験的研究，海岸工学論文集，第 46 巻，pp.906-910, 1999.
- 6) Van der Meer, J.W. : Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack, Doctoral thesis approved by Delft University. 152p, 1988.

LABORATORY INVESTIGATION ON STABILITY OF WAVE-DISSIPATING BLOCKS OF DETACHED BREAKWATERS AGAINST WAVES AND TSUNAMIS

Kazuki MATSUMOTO, Takashi IZUMIYA, and Kunihiko ISHIBASHI

Laboratory experiments were carried out to investigate the stability of the wave-dissipating blocks of detached breakwaters against waves and tsunamis. The relationship between the stability number, relative damage level D and the number of waves N as well as the Iribarren number was proposed by modifying Van der Meer's formula. A stability number N_s is proposed that is suitable for the wave dissipating blocks and armor stones used in detached breakwaters. The required mass of the concrete blocks and armor stones was found to become large when the relative water depth and the height of the breakwaters increase.