

断面変形を伴う傾斜堤の越波量からみた性能評価

Performance Evaluation of Deforming Rubble Mound Breakwater in terms of Overtopping Quantity

太田隆夫¹・松見吉晴²・木村 晃²

Takao OTA, Yoshiharu MATSUMI and Akira KIMURA

In this study, laboratory experiments are conducted to investigate the variations of reflection coefficient and volume of overtopped water due to damage progression of a rubble mound breakwater. Furthermore, a time-averaged numerical wave model and semi-empirical overtopping model are applied to computation of wave energy dissipation, reflection coefficient and overtopping rate. The results of the experiments show that reflection coefficient does not change much with damage progression of the breakwater and the variations of overtopping rate have different tendency in each test. The computed reflection coefficient and overtopping rate agree with the measured values.

1. はじめに

現在, 海岸・港湾分野では, 耐波安定性能, 消波性能, 越波低減性能等を統合的に照査する性能設計法の導入が図られている。この性能設計では, 構造物の被災に伴う形状変化がもたらす各種性能の劣化の度合いと, 構造物の社会的重要度で性能レベルが評価されることになる。したがって, 性能設計法の確立に当たっては, 構造物の被災進行に伴う各性能の変化特性を明らかにしなければならない。また, 形状変化に伴う性能劣化を予測することができれば, 構造物の修復時期の的確な判定, ひいてはメンテナンス・ライフサイクルコストの評価に適用されることが考えられる。

本研究では, 傾斜堤体を対象に, その消波性能の評価指標として反射率と越波量を取り上げて, まず断面変形の進行に伴うそれらの変動特性を水理模型実験により検討する。また, 数値モデルにより堤体周辺の水位・流速変動およびエネルギー逸散を求め, これらにもとづいて反射率および越波流量を算定するとともに, 透過斜面上のエネルギー逸散特性より傾斜堤体の消波性能に及ぼす堤体断面変形の影響について検討する。

2. 模型実験

反射波制御機能をもつ不規則波造波水槽 (長さ 29 m, 幅 0.5 m, 高さ 0.75 m) において, 波の作用による傾斜堤体の断面変形と, それに伴う消波性能の変化を調べる実験を行った。模型堤体および計測機器の配置を図-1に示す。

堤体は, 碎石層およびコア部からなり, 初期断面は, 前面勾配 1:1.5, 後面勾配 1:1, 静水面からの天端高 15 cm, 天端幅 10 cm である。無作為抽出した 200 個の標本から求めた碎石の密度は 2.58 g/cm^3 , 代表粒径 (D_{n50}) は 2.52 cm であり, コア部に用いた砂利の中央質量は 3.75 g である。また, すべての碎石の質量は, 35 ~ 50 g の間にある。

不規則波の期待スペクトルとして JONSWAP スペクトル (集中度パラメータ $\gamma_c=3.3$, ピーク周期 $T_p=1.6 \text{ s}$) を用い, サンプリング間隔 0.05 s として 20 分間の造波信号 (744 波) を作成した。この信号データをもとに, 有義波高 $H_{1/3}=8.5, 10.5 \text{ cm}$ の不規則波を造波した。ただし, $H_{1/3}=8.5 \text{ cm}$ の波は, 初期断面における碎石層の締固めのために最初の 20 分間だけ作用させた。

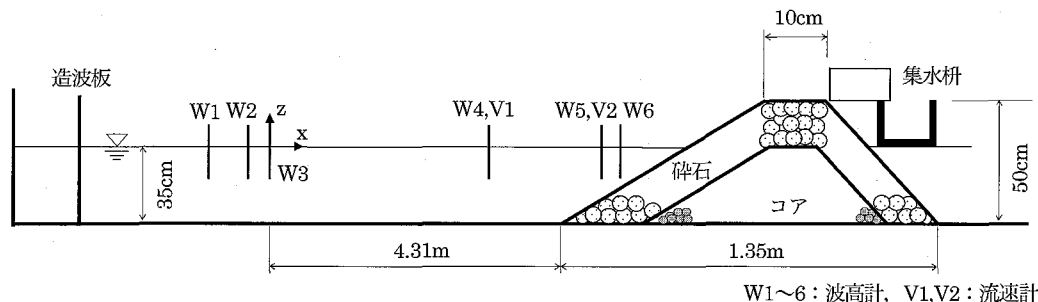


図-1 実験装置および数値計算の座標系

表-1 波高計および流速計の設置位置

	W1	W2	W3	W4, V1	W5, V2	W6
距離(m)	13.25	13.75	13.93	17.24	18.41	18.54

堤体の断面形（岸沖方向）の測定には、レーザー変位センサを用いた。波を20分間作用させるごとに3測線で堤体断面を測定し、その平均をとって断面形とした。初期断面を基準として、堤体の変形量を表すダメージパラメータ $S=A_e/D_{50}^2$ (A_e : 侵食面積) を求めた。また、図-1のように、堤体の天端背後に集水橋（幅37cm）を置き、20分間ごとの越波量を計測した。

一様水深部（水深35cm）に4本（W1～W4）、傾斜堤前法面上に2本（W5, W6）の波高計を設置して水位を計測し、W1～W3のデータより反射率を求めた。W4およびW5と同じ位置で電磁流速計により水平流速（岸沖方向）を計測した。流速計の設置水深は、V1が13cm, V2が15cm（何れも測定部中央の水深）である。表-1に、波高計および流速計の設置位置を造波板からの距離で表す。

実験においては、波の作用累積時間が3時間になるまで、同じ造波信号による波を繰り返し作用させ、これを2回行った（以後、1回目、2回目と表記）。

3. 数値計算モデル

最近、VOF法やブシネスク方程式にもとづく越波量算定モデル（佐貫ら, 2001; 中野ら 2001; 平山ら, 2006）が提案されているが、本研究ではKobayashi・de los Santos(2007)による、時間平均型波浪変形モデルと越波流量算定のための確率モデルを組み合わせたものを用いた。波浪変形モデルは、時間平均された連続式、運動量方程式およびエネルギー方程式に基づくもので、水位および透過性堤体内外の流速の平均値・標準偏差と、エネルギー逸散を計算することができる。運動量方程式およびエネルギー方程式は、式（1）のように表される。

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g \bar{h} \frac{d\bar{\eta}}{dx} - \tau_b; \quad \frac{dF}{dx} = -D_B - D_f - D_r \quad (1)$$

ここに、 S_{xx} : ラディエーション応力、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 $\bar{h}$: 平均水深、 $\bar{\eta}$: 平均水位、 τ_b : 底面でのせん断応力、 F : エネルギーフラックス、 D_B : 砕波によるエネルギー逸散率、 D_f : 底面摩擦によるエネルギー逸散率、 D_r : 透水層の抵抗によるエネルギー逸散率である。 S_{xx} と F は微小振幅波理論により与え、 τ_b とそれに関連する逸散率 D_f を次式のように表す。

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_u^2 G_2(u_*) ; \quad D_f = \frac{1}{2} \rho f_b \sigma_u^3 G_3(u_*) ; \quad u_* = \frac{\bar{u}}{\sigma_u} \quad (2)$$

ここに、 f_b : 底面摩擦係数、 $\bar{u}$: 水平流速の平均値、

σ_u : 水平流速の標準偏差であり、関数 G_2 、 G_3 は以下のよう表される。

$$G_2(r) = (1+r^2) \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} r \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (3)$$

$$G_3(r) = (3r+r^3) \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} r (r^2+2) \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (4)$$

σ_u は線形長波理論にもとづいて、水位の標準偏差 σ_η との関係により

$$\sigma_u = \sqrt{g\bar{h}} \sigma_* ; \quad \sigma_* = \frac{\sigma_\eta}{\bar{h}} \quad (5)$$

と与えられ、 $\bar{u}$ は時間平均および鉛直方向に積分された連続式より、次式で求められる。

$$\bar{u} = -\sqrt{g\bar{h}} \sigma_* + \frac{q_0 - \bar{v} h_p}{\bar{h}} \quad (6)$$

ここに、 q_0 : 平均越波流量、 $\bar{v}$: 透水層内の平均水平流速、 h_p : 透水層厚である。 $\bar{v}$ の算定法は、太田ら(2005)を参照されたい。

透水層の抵抗によるエネルギー逸散率 D_r は、

$$D_r = \rho h_p [\alpha \sigma_v^2 (1+v_*^2) + \beta \sigma_v^3 G_3(v_*)] ; \quad v_* = \frac{\bar{v}}{\sigma_v} \quad (7)$$

と与える。ここに、 σ_v : 透水層内の水平流速の標準偏差、 α : 層流抵抗係数、 β : 乱流抵抗係数である。

砕波によるエネルギー逸散率については、Battjes・Stive (1985)にもとづいて次式のように与える。

$$D_B = \frac{\rho g a Q H_B^2}{4 T_p} ; \quad \frac{Q-1}{\ln Q} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 ;$$

$$H_m = \frac{0.88}{k_p} \tanh\left(\frac{\gamma k_p \bar{h}}{0.88}\right) ; \quad a = \frac{T_p S_b \sqrt{g}}{b \sqrt{\bar{h}}} \geq 1 \quad (8)$$

ここに、 Q : 砕波した波の出現確率、 H_B : D_B を求めるための波高、 H_{rms} : rms波高 ($=\sqrt{8} \sigma_\eta$)、 H_m : 砕波限界波高、 γ : 砕波帯内での水深波高比（定数）、 S_b : 底面勾配、 b : 係数である。

この数値計算モデルでは、構造物による反射波は考慮されていないが、便宜的に静水時の汀線位置でのエネルギーフラックス F_{SWL} が反射されると仮定して、次式により反射波のrms波高 $(H_{rms})_r$ を求める。

$$(H_{rms})_r = \sqrt{8 F_{SWL} / (\rho g C_g)} \quad (9)$$

ここに、 C_g : 群速度であり、入射波と反射波で変わらないものとする。反射率は、 $(H_{rms})_r$ と $x=0$ における入射波のrms波高 $(H_{rms})_i$ との比で与える。

越波流量算定モデルでは、まず、堤体斜面上に仮想的に遡上計があるとして、波浪変形モデルで得られた水位変動の平均値 $\bar{\eta}$ と標準偏差 σ_η から、打ち上げ波の水位の平均値 $\bar{\eta}_r$ と標準偏差 σ_r を求める。図-2に示すように、 $(\bar{\eta} + \sigma_\eta)$ 、 $\bar{\eta}$ 、 $(\bar{\eta} - \sigma_\eta)$ と遡上計との交点 Z_1 、 Z_2 、

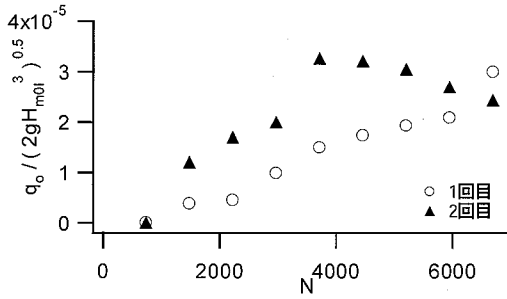


図-5 越波流量の変化

ほぼ一定とみなすことができる。

図-5は、無次元越波流量 $q_o / (2gH_{mol}^{3/2})^{0.5}$ と N との関係を表す。ここに、 H_{mol} ：入射波のエネルギー Spektrum から求めた有義波高である。1回目では、図-4(a)の S と同様に、ほぼ単調に増加している。2回目では、 $N=4000$ までは1回目よりも急な増加を示しているが、それ以降は減少傾向となっている。また、目視による越波の状態の変化については、断面変形が小さいうちは数波の大きな波による越流であったのが、変形の進行に伴って飛沫状の越波の発生が増加した。ただし、上述した断面変形の形状の違いなどにより、越波量は実験のケースごとに大きく異なる。

(2) 計算結果

3.に示した数値計算モデルを用いて、水位と流速の平均値・標準偏差、エネルギー逸散率、反射率および平均越波流量を求めた。計算においては、実験で得られた堤体断面形、 $x=0$ での平均水位およびrms波高を入力とした。また、式(2)の f_b を0.01、式(8)の γ と b をそれぞれ0.8、4、仮想的な遡上計の斜面からの高さ δ_r は1.5 cm、 x 方向の計算点間隔 Δx を約1 cmとした。 δ_r の値は、 $\bar{\eta}_r$ と σ_r の算出が可能な範囲での最小値を用いた。式(11)の A 、 B については、de los Santos・Kobayashi (2006)が1/2勾配の透過斜面に対して0.6と1.5を用いており、本研究でもそれに倣った。

図-6、7は、2回目の20分後および180分後の断面における、水位と流速の平均値・標準偏差の計算値と、実験値(●)を比較したものである。実験値は、 $t=20 \sim 40$ 、 $160 \sim 180$ 分に測定したものをを用いた。断面変形が生じた場合も含めて、計算値と実験値との対応はよい。1回目でも同様の結果が得られた。ただし、 u の計算値は、断面平均値であり、実験値との比較は厳密なものではない。

図-8に、2回目での20、80、180分後の断面における、エネルギーフラックスの空間変化を示す。 $F^* = F / (\rho g)$ であり、 F^* は $x=0$ での値で正規化した。 F^* の計算結果より、汀線位置までのエネルギー逸散量は、断面変形

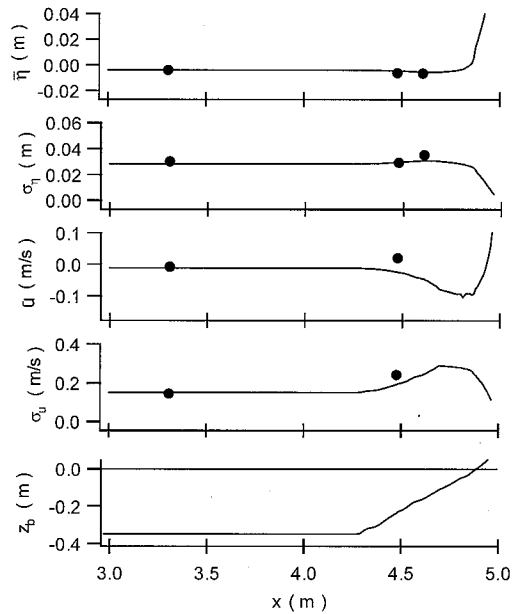


図-6 水位と流速の平均値・標準偏差の比較 (20分後)

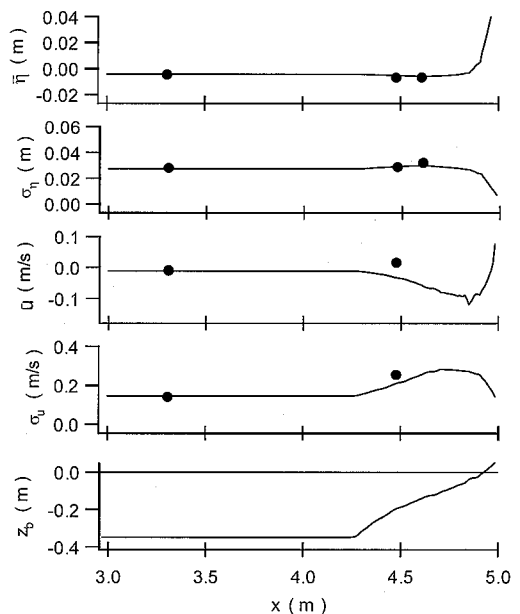


図-7 水位と流速の平均値・標準偏差の比較 (180分後)

に関係なく約85%であることがわかり、このことが反射率の変化が小さいことを説明するものと考えられる。なお、エネルギー逸散量のうち、碎波によるものが約90%を占めている。

表-2、3には、 K_R および q_o の実験値と計算値の比較を示す。 K_R の計算値は実験値とよく一致しており、上述の理由により、 K_R の計算値も変化が小さい。 q_o につ

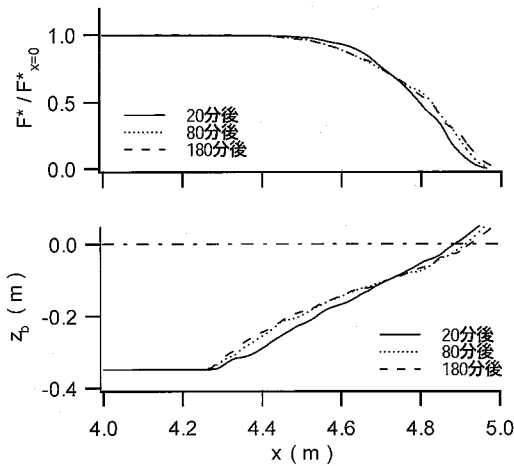


図-8 エネルギーフラックスの空間変化 (2回目)

表-2 反射率, 越波流量の比較(1回目)

t(min)	K_R		$q_o(\text{cm}^3/\text{cm}/\text{s})$	
	実験値	計算値	実験値	計算値
0	0.493	0.429	0.0	0.00029
20	0.502	0.428	0.00572	0.02785
40	0.495	0.417	0.00680	0.02903
60	0.483	0.417	0.01480	0.02496
80	0.472	0.418	0.02252	0.01676
100	0.469	0.417	0.02601	0.01741
120	0.471	0.418	0.02892	0.02575
140	0.460	0.418	0.03104	0.02413
160	0.435	0.415	0.04410	0.01350
180		0.417		0.02022

表-3 反射率, 越波流量の比較(2回目)

t(min)	K_R		$q_o(\text{cm}^3/\text{cm}/\text{s})$	
	実験値	計算値	実験値	計算値
0	0.472	0.434	0.0	0.00078
20	0.489	0.422	0.01809	0.04349
40	0.475	0.419	0.02536	0.04822
60	0.453	0.410	0.02980	0.02631
80	0.436	0.406	0.04833	0.02526
100	0.435	0.401	0.04748	0.02148
120	0.434	0.413	0.04482	0.03311
140	0.427	0.414	0.03946	0.02323
160	0.420	0.417	0.03529	0.02594
180		0.411		0.02450

いては, 計算結果と実験結果がオーダー的には合っていると見える。しかし, 上述のように, 実験においては断面変形の進行に伴って, 飛沫状の越波の発生が増加し, そのため計算結果との対応が低下することも考えられる。

この点については, 今後さらに検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では, 傾斜堤を対象にして, 断面変形に伴う消波性能の変化特性を, 水理模型実験により得られた反射率, 越波量を評価尺度として検討した。実験結果より, 反射率は断面変形の影響をあまり受けず, 変化が小さいこと, 越波流量では作用累積波数の増加につれて減少傾向となる場合もあることが示された。また, 時間平均型波浪変形モデルをベースとした数値モデルにより, 堤体周辺の水位・流速変動およびエネルギー逸散を求め, これらにもとづいて反射率および越波流量の算定を行った。傾斜堤斜面上のエネルギー逸散より, 汀線位置までの逸散量は断面変形に関係なく約 85 %であることがわかり, これにより反射率の変化が少ないことを説明することができた。さらに, 反射率では実験値と計算値はよい一致を示し, 越波流量でも両者はオーダー的に合っている結果が得られた。

謝辞: 越波流量算定モデルのソースコードをご提供いただいた de los Santos 博士 (グラナダ大学) に謝意を表します。

参考文献

- 太田隆夫・小林信久・木村晃(2005): 断面変形を伴う人工リーフ上での波浪変形計算について, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 51-55.
- 佐貫宏・藤田龍・関本恒浩・清水琢三(2001): 数値モデルによる越波量の評価に関する研究, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 736-740.
- 中野修・興野俊也・藤井直樹・榊山勉・大熊義夫(2001): 数値波動水路による護岸・防波堤の越波・伝達波の数値計算, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 731-735.
- 平山克也・長谷川準三・長谷川巖(2006): 越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算, 海工論文集, 第 53 巻, pp. 706-710.
- Battjes, J.A., and M.J.F. Stive (1985): Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, J. Geophys. Res., 90(C5), pp. 9159-9167.
- Benedicto, M.L., M.V. Ramos, M.A. Losada and I. Rodriguez (2004): Expected damage evolution of a mound-breakwater during its useful life, Proc. 29th ICCE, pp. 3605-3614.
- de los Santos, F.J. and N. Kobayashi (2006): Irregular wave seepage and overtopping of cobble beaches and revetment, Res. Rep. No. CACR-06-01, University of Delaware, 70p.
- Kobayashi, N and F.J. de los Santos (2007): Irregular wave seepage and overtopping of permeable slopes, J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng. 133(4), pp. 245-254.