

傾斜堤体の被災変形に伴う消波性能変化について

太田隆夫¹・松見吉晴²・木村 晃³

本研究では、傾斜堤を対象として、堤体断面の形状変化と消波性能の変化について水理模型実験により検討した。実験より得られた反射率、越波量および打ち上げ高を消波性能の評価尺度とした。また、時間平均型波浪変形計算モデルを用いて、透過斜面上のエネルギー逸散を求め、消波性能に及ぼす堤体断面変形の影響について検討した。実験結果より、反射率は断面変化の影響をほとんど受けないこと、断面変形の進行に伴って、越波量は増加、打ち上げ高は減少する傾向を示すことがわかった。また、数値計算により求められたエネルギー逸散量に対する断面変化の影響は小さく、実験において反射率がほぼ一定となることを理論的に裏付ける結果が得られた。

1. はじめに

現在、海岸・港湾分野では、海域施設の設計時に要求される機能に対して、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注目されてきている。この性能設計では、構造物の被災に伴う形状変化の絶対値が損傷の基準となるのではなく、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。また、要求される性能を損なわない範囲での形状変化は許容され得るものであり、現行の基準で被災したと判断される状況（たとえば被覆層の移動）が必ずしも性能低下を意味するものではない。したがって、性能設計法の確立に当たっては、構造物の形状変化の進行に伴う各性能の変化特性を明らかにしておく必要があろう。

本研究は、代表的な堤体として傾斜堤を対象に、まず断面変形の進行に伴う反射率、越波量、打ち上げ高の各変動特性を模型実験により検討するとともに、堤体上および堤体内部でのエネルギー逸散を数値計算により求めて、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評価するものである。

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化と、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、天端高 50 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 2.6 g/cm^3 、代表粒径 (D_{n50}) は 2.5 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 $\gamma_c = 3.3$ 、 $T_p = 1.6 \text{ s}$ ）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（波数：約 740 波）を作成した。この信号データをもとに、

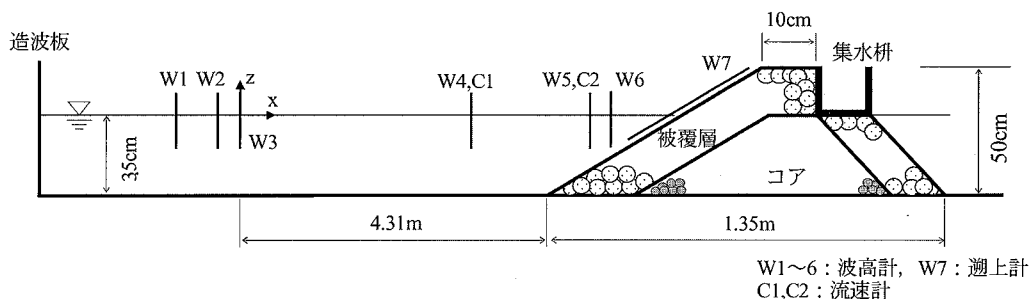


図-1 実験装置

1 正会員 博(工) 鳥取大学助工学部社会開発システム工学科
2 正会員 工博 鳥取大学助教授工学部社会開発システム工学科
3 正会員 工博 鳥取大学教授工学部社会開発システム工学科

表-1 波高計および流速計の設置位置

	W1	W2	W3	W4, C1	W5, C2	W6
距離(m)	13.25	13.75	13.93	17.24	18.41	18.54

有義波高 $H_{1/3} \approx 8.5, 10.5$ cm の不規則波を造波した。ただし, $H_{1/3} \approx 8.5$ cm の波は, 初期断面における砕石層の締固めのために最初の 20 分間だけ作用させた。

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 $S = A_e / D_{n50}^2$ (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枡 (幅 40.8 cm) を置き, 20 分間ごとの越波量を計測した。

Case 1 の実験では, 一様水深部 (水深 35 cm) 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 のデータより合田ら (1976) の入反射波分離法にもとづいて反射率を求めた。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, C1 が 13 cm, C2 が 17 cm (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。Case 2 の実験では, さらに初期断面の前法面上約 2.5 cm の位置に遡上計 (W7) を設置し, 打ち上げ波の水位を計測した。

実験は Case 1, 2 とも 2 回ずつ行い, 堤体断面がほぼ平衡となるまで, または砕石層の浸食が進行し第 2 層が被災する部分が生じるまで, 同じ造波信号による波を繰り返し作用させた。

3. 数値計算モデル

堤体上および堤体内部でのエネルギー逸散を求めるために, 本研究では Kobayashi ら (2006) によって提案された断面 2 次元の数値計算モデルを用いた。このモデルは, 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・標準偏差などを算出できる。運動量方程式およびエネルギー方程式は, それぞれ式 (1), (2) のように表される。

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g \bar{h} \frac{d\bar{\eta}}{dx} - \tau_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dF}{dx} = -D_B - D_f - D_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

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 (Kobayashi ら, 1998)。

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

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

$$G_2(r) = (1+r^2) \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} r \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (4)$$

$$G_3(r) = (3r+r^3) \operatorname{erf}\left(\frac{r}{\sqrt{2}}\right) + \sqrt{\frac{2}{\pi}} (r^2+2) \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

透水層の抵抗によるエネルギー逸散率 D_r は,

$$D_r = \rho h_p [\alpha \sigma_v^2 (1+v_*^2) + \beta \sigma_v^2 G_3(v_*)] ; v_* = \frac{\bar{v}}{\sigma_v} \quad \dots\dots\dots (6)$$

と与える。ここに, h_p : 透水層厚, $\bar{v}$: 透水層内の平均水平流速, 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) の式を用いて与える。

$$D_B = \frac{\rho g a Q H_B^2}{4 T_p} ; \frac{Q-1}{\ln Q} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m} \right)^2 ; \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$H_m = \frac{0.88}{k_p} \tanh\left(\frac{\gamma k_p \bar{h}}{0.88} \right)$$

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) である。また, 係数 a は次式のように与える。

$$a = \frac{T_p S_b \sqrt{g}}{b \sqrt{h}} \geq 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに, S_b : 底面勾配, b : 係数である。

4. 実験および計算結果

(1) 実験結果

図-2 に Case 1 での堤体断面変化を示す。図の横軸は, W3 を原点に岸向きを正とした x 座標, 縦軸は静水面から上向きを正とした z 座標である (図-1 参照)。波の作用時間が増すにつれて, 静水面付近が浸食され, 転落した石が前法面下部に堆積することがわかる。図-3 (a), (b) は, ダメージパラメータ S , 反射率 K_R と作用累積波数 N との関係を示したものである。浸食は, 累積波数の増加に伴って, Case 1 ではほぼ単調に増大し, Case 2 では一旦収束する傾向を示した後, 再び増大し

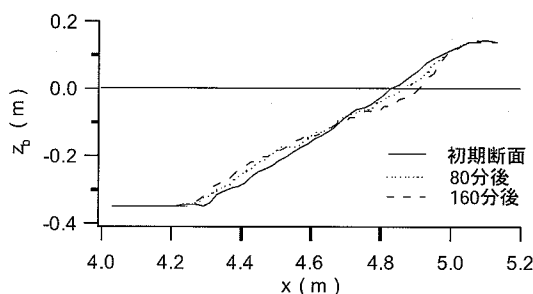
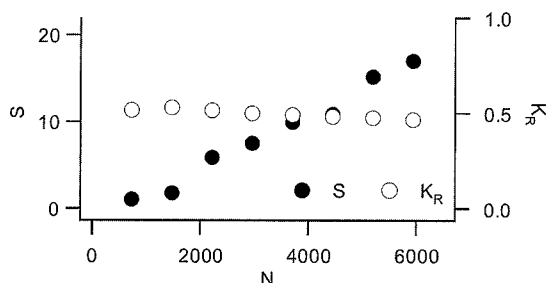
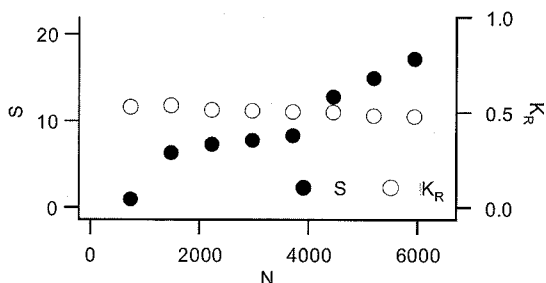


図-2 堤体断面の変化 (Case1)



(a) Case1

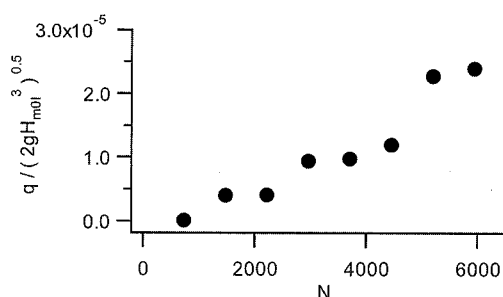


(b) Case2

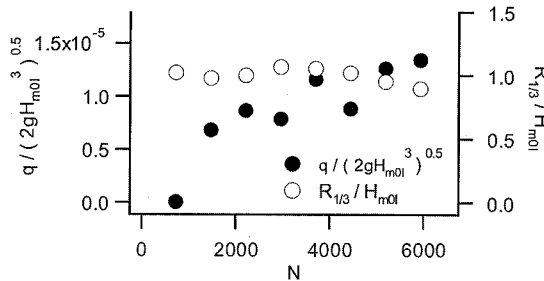
図-3 ダメージパラメータ、反射率の変化

ている。これらは、碎石層の2層目までの被災が生じた場合の結果である。一方、反射率は徐々に低下しているものの、その変化量は約0.06と小さく、ほぼ一定とみなすことができる。

図-4(a), (b)は無次元越波量 $q/(2gH_{mol}^3)^{0.5}$ 、相対打ち上げ高 $R_{1/3}/H_{mol}$ と累積波数との関係を表す。ここに、 q : 単位時間、単位幅あたりの越波量、 H_{mol} : 入射波のエネルギースペクトルから求めた有義波高、 $R_{1/3}$: 1/3最大打ち上げ高である。累積波数の増加、すなわち浸食の増大とともに、無次元越波量が増加する傾向が見られる。ただし、越波量は断面変化の形状等の影響により実験ごとに大きく異なる。相対打ち上げ高は、越波量とは逆に、浸食が大きくなるにつれ減少していく傾向を示している。



(a) Case1



(b) Case2

図-4 越波量と打ち上げ高の変化

(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、エネルギーフラックスおよびエネルギー逸散率を求めた。実験で得られた堤体断面形を多角形で近似して形状を与え、数値計算を行った。計算においては、さらに透水層厚、 $x=0$ での平均水位およびrms波高を入力し、 $\gamma=0.7$ 、 $f_b=0.01$ 、 $b=3$ 、 x 方向の計算点間隔を $\Delta x \div 1$ cm とした。

図-5~7は、Case 1の20分後、80分後および160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、 $t=20\sim40$ 、 $60\sim80$ 、 $140\sim160$ 分に測定したものをを用いた。これらの図より、斜面上の平均水平流速で差異が見られるものの、断面変化が生じた場合も含めて計算値と実験値はよく合っていることがわかる。また、Case 2でも同様の結果が得られた。計算結果には、碎波、底面摩擦および透水層の抵抗によるエネルギー逸散率も含まれおり、それらの比較により、碎波によるエネルギー逸散が全体の約90%を占めることがわかった。

図-8(a), (b)に、Case 1での20、80、160分後の断面における、エネルギーフラックスと碎波によるエネルギー逸散率の空間変化を示す。 $F^*=F/(\rho g)$ 、 $D_B^*=D_B/(\rho g)$ であり、 F^* は $x=0$ での値、 D_B^* は計算領域での総和で無次元化した。碎波によるエネルギー逸散率は、特に水深が浅いところで堤体断面の凹凸(勾配の変化)により局所的に大きく変動している。実験で計測した堤

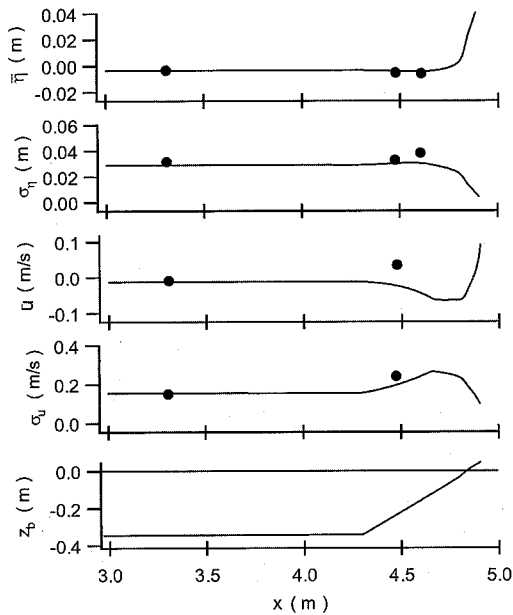


図-5 水位と流速の平均値・標準偏差の比較 (20分後)

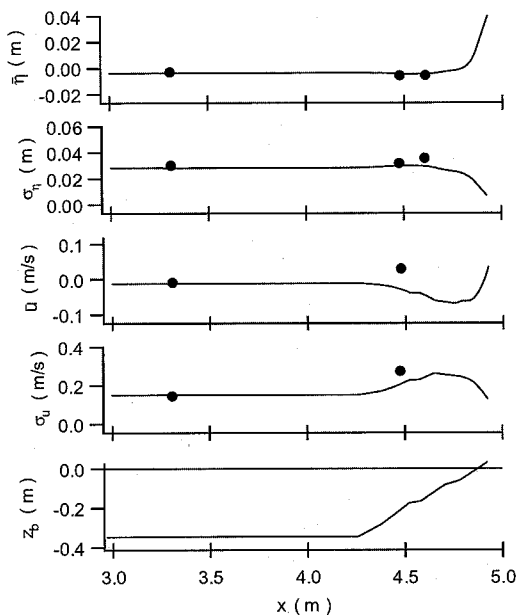


図-6 水位と流速の平均値・標準偏差の比較 (80分後)

体断面形と計算結果から、汀線 ($z_b=0$) までのエネルギー逸散量 (F^* の変化量) を求め、 $x=0$ での F^* に対する割合を調べたところ、その時間的な変化はわずかであった。すなわち、トータルのエネルギー逸散量は、断面変化によってもあまり変わらず、このことが反射率がほぼ一定値となることを説明するものと考えられる。

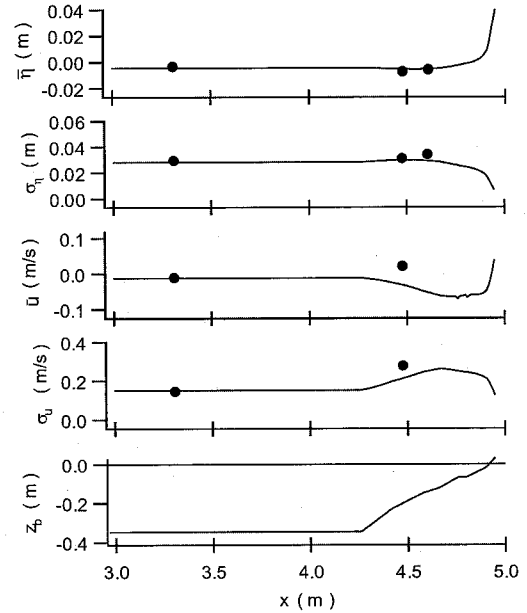
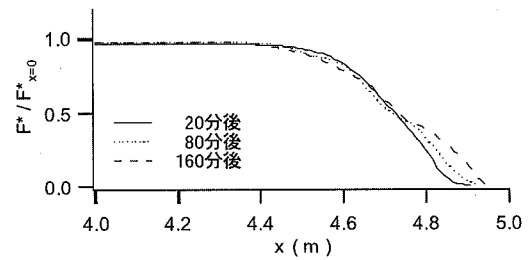
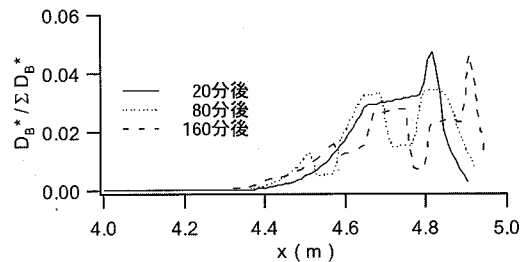


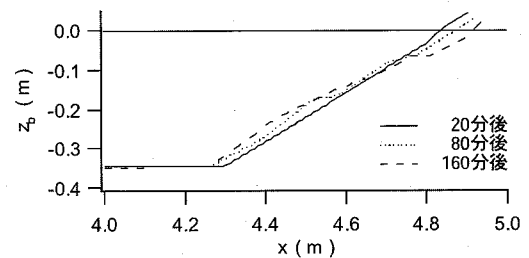
図-7 水位と流速の平均値・標準偏差の比較 (160分後)



(a) エネルギーフラックス



(b) 碎波によるエネルギー逸散率



(c) 堤体断面

図-8 エネルギーフラックス, 碎波によるエネルギー逸散率の空間変化 (Case1)

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、打ち上げ高を評価尺度として検討した。実験結果より、反射率は断面変化の影響をほとんど受けないこと、断面変形の進行に伴って、越波量は増加、打ち上げ高は減少する傾向を示すことがわかった。また、時間平均型波浪変形計算モデルにより、傾斜堤斜面上のエネルギー逸散を求め、消波性能に及ぼす断面変形の影響を評価した。計算結果より、碎波によるエネルギー逸散が全体の約90%を占めること、断面変形によるトータルのエネルギー逸散量の差は小さいことがわかった。エネルギー逸散量の差異の小さいことが、反射率の変化が少ないことを説明するものである。

題番号 17560460, 研究代表者: 松見吉晴) の助成を受けて実施されたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治(1976): 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.
- 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.
- Kobayashi, N., M.N. Herrman, B.D. Johnson and M.D. Orzech (1998): Probability distribution of surface elevation in surf and swash zones, *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, 124(3), pp. 99-107.
- Kobayashi, N., L.E. Meigs, T. Ota and J.A. Melby (2006): Irregular breaking wave transmission over submerged porous breakwater, *J. Waterw., Port, Coastal, Ocean Eng.*, in press

謝辞: 本研究は、科学研究費補助金基盤研究 (C) (課
