

護岸被覆工の被災劣化に伴う反射率変化 に関する予測診断システムの開発

EVALUATION SYSTEM FOR REFLECTION COEFFICIENT OF SEAWALL
WITH ACCUMULATIVE DAMAGE OF ARMOUR LAYER

松見吉晴¹・河合直樹²・平山隆幸³・太田隆夫⁴・大野賢一⁵
Yoshiharu MATSUMI, Naoki KAWAI, Takayuki HIRAYAMA,
Takao OHTA and Kenichi OHNO

¹正会員 工博 鳥取大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

²学生会員 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³正会員 工修 三省水工(株) 九州支店 設計課 (〒812-0011 福岡市博多区博多駅東3-3-3)

⁴正会員 博(工) 鳥取大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁵正会員 博(工) 鳥取大学准教授 鳥取大学メディア総合センター (同上)

This study aims to develop a performance evaluation system of seawall with the accumulative damage of armour layer. Firstly, by using the super roller flume for computer aided design of maritime structure, numerical experiments are conducted to investigate the variations of reflection coefficient of the seawall under condition of the damage progression of an armour layer. The results of the numerical experiments show that there are not the regressive prediction properties between the reflection coefficient and the damage parameter of armour layer. Secondly, to evaluate the causal relation of the reflection coefficient and the accumulative damage parameter, a neural network system is applied. The neural network with a three-layer calibrated by the numerical experiments can predict the reflection coefficient of seawall under the damage progression of armour layer with 5% errors.

Key Words : Performance design, Reflection coefficient, Damage of armour layer, Neural network

1. はじめに

これからの社会基盤施設の計画, 設計に当たっては, 災害のリスクコントロールから破損も視野に入れた維持管理型設計法の確立が必要と考えられている¹⁾. この維持管理型設計法とは, 外力の作用履歴に伴って施設が劣化あるいは破損した場合, その損傷に伴う機能低下を構造物の社会的性能レベルと併せて適切に診断し, 補修することで機能, 防災力を回復させて構造物の寿命を延ばし, さらに LCC (ライフサイクルコスト) を低減することを目指すものである.

この維持管理型設計法の考え方を護岸構造物の被覆工の補修・更新の意志決定問題へ導入するためには, 被覆工の被災進行に伴う消波性能の劣化特性を明らかにしておく必要がある. すなわち, 被覆材の累積被災の増加に伴って消波性能が劣化し, その被覆材のダメージパラメータと消波性能の劣化との関係が回帰式のようなもので評価できれば, 補修・更新の意志決定問題にダメージパラメータを指標として適用できることになる.

そこで, 著者らは, これまで傾斜護岸を対象に, 被覆捨石の被災進行に伴う反射性能や越波低減性能の劣化度合に関して実験的に検討してきた結果^{2), 3)}, 被覆材の損傷に伴う消波性能の劣化特性として, 被覆材のダメージパラメータと反射率および越波量の関係には被覆材の形状やかみ合わせ効果に伴う不確実性が強く, ダメージパラメータと消波性能との間に明確な因果関係の存在について明らかになっていない. このような研究成果から, 被覆護岸の補修・更新の意志決定問題にダメージパラメータのみを指標とする回帰式を確立することは難しいと考え, 例えば, パラメータ間の因果関係の分析に有効なニューラルネットワークを利用して, 被覆材の被災個数と設計波浪条件等を入力データとしたときに, 被覆層の損傷に伴う消波性能に関する評価が得られるような予測診断システムが開発されれば, 現場サイドで修復に関する意志決定の支援となるのではと着想した.

本研究は, 護岸被覆層の被災に伴う各種性能の劣化度合を判断できるツールとして, まず現場サイドで容易に目視計測できる被覆材の被災個数や被災領

域，設計条件（例えば，堤体諸元や設計波浪条件等）を入力データとするニューラルネットワークを用いて被覆層の被災進行に伴う反射率変化に関する予測診断システムを開発するものである。

2. CADMAS-SURF のパラメータ調整

(1) 水理模型実験

本研究では，数値波動水路 CADMAS-SURF における抵抗係数 C_D ，慣性力係数 C_M の各パラメータを水理模型実験での水位変動とその計算値の比較より設定することにした。水理模型実験は，反射波制御機能をもつ2次元波造波水槽（長さ 29.0m，幅 0.5m，高さ 0.75m）を使用した。模型堤体および計測機器の配置を図-1 に示す。

本研究で対象とした模型護岸は，図-1 に示すように被覆層（碎石）とコア部（砂利）からなる構造形式である。断面寸法は，被覆層の勾配 2:3，静水面からの天端高 15cm，天端幅 10cm である。碎石の特性としては，無作為抽出した 200 個の標本から求めた碎石の密度が 2.58g/cm^3 ，代表粒径（ dn_{50} ）が 2.52cm であり，コア部に用いた砂利の中央質量は 3.75g である。また，被覆層とコア部の空隙率に関しては，ジッキング法を採用して，それぞれ 0.387，0.368 であった。

この実験で用いている被覆層の碎石の安定限界波高（ H_D ）に関しては，以下のように碎石の重量からハドソン式と Van der Meer の設計公式（ダメージパラメータ $s=2$ の場合）を適用して以下のように算定した。

$$H_D = \left[\frac{WK_D(S_r - 1)^3 \cot \theta}{\gamma_r} \right]^{1/3} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} K_D &= 238.3P^{0.54} (s/\sqrt{N})^{0.6} \xi^{-1.5} / \cot \theta & \xi < \xi_c \\ K_D &= P^{-0.39} (s/\sqrt{N})^{0.6} \xi^{-1.5} (\cot \theta)^{1.5} \xi^P & \xi \geq \xi_c \end{aligned} \quad (2)$$

ここに， W は被覆材の重量， S_r は被覆材の流体に対する比重， $\cot \theta$ は斜面勾配（=1.5）， γ_r は被覆材の単位体積重量， N は高波浪時の波の数， P は被覆層の透水性パラメータ， ξ は surf similarity パラメータである。式(2)の ξ_c は両式の K_D 値が等しくなる値であり，式(2)の両式より次式として与えられる。

$$\xi_c = \left[\frac{238.3P^{0.93}}{(\cot \theta)^{2.5}} \right]^{1/(1.5+P)} \quad (3)$$

なお，本研究では，安定限界波高の算定に際して，便宜的に $P=0.4$ ， $N=2000$ ⁴⁾を採用した。

入射波浪条件は，規則波を対象として，水深 0.35m と一定，周期を 1s から 0.2s 間隔で 2s まで 6 種類変化させた。また，波高は先に算定した安定限界波高以下に設定している。実験の際，捨石の移動を妨げるように被覆層表面を金網で覆っている。

(2) ポーラスセル， C_D および C_M 値の設定

本研究で対象としている被覆層とコア部からなる堤体の場合，CADMAS-SURF におけるポーラスセルとして，①セル内に流体と被覆層が混在する場合，②セル内に流体と被覆層およびコア部が混在する場合，③セル内に流体とコア部の場合，以上の 3 パターンがある。特に，②のポーラスセルの設定に当たっては，被覆層内の流体の割合とコア部の流体の割合より，空隙率を与えている。

被覆護岸のポーラス値として抗力係数 C_D ，慣性力係数 C_M の値の設定に当たっては，従来の研究事例⁵⁾を参照して，図-1 に示す 3ヶ所に設置された波高計により計測された水位変動に関する実験結果と，表-1 に示す 5 種類の計算結果の比較より設定することにした。

CADMAS-SURF における計算格子間隔は，水平方向に関して造波板から護岸法先までを 2cm 間隔，護岸部分を 1cm 間隔，また鉛直方向に関して 1cm 間隔に設定している。差分スキームに関しては，CADMAS-SURF に用意されている DONOR スキームを用い，ス

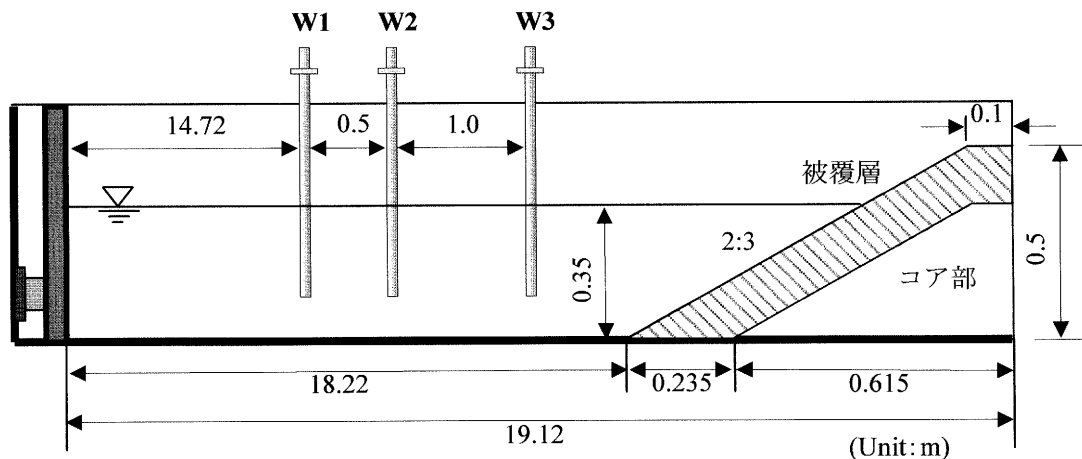


図-1 数値波動水路の説明図

表-1 被覆護岸のポーラス値

	被覆層		コア部	
	C_D	C_M	C_D	C_M
CASE1	0.9	1.5	1.5	2.0
CASE2	0.7	1.3	1.3	1.8
CASE3	0.8	1.2	1.3	2.0
CASE4	0.8	1.4	1.3	1.8
CASE5	1.0	1.4	1.5	1.8

キームパラメータを0.5に設定している。また、造波モデルには、実験水槽と同じピストンタイプを選択している。

図-1 に示す波高計 W1～W3 の位置における水位変動の時間波形について、実験結果と5種類の計算結果を比較した結果、CASE1 のポーラス値で比較的良好に一致した。その結果の1例として、周期1.0sの入射波条件を図-2 に示す。以上より、本研究ではCADMAS-SURF に用いる被覆護岸のポーラス値として、被覆層の C_D を0.9、 C_M を1.5、またコア部の C_D を1.5、 C_M を2.0 に設定した。なお、ポーラスセルの内、先の②セル内に被覆層およびコア部が混在する場合のポーラス値については、セルに占める被覆層の割合とコア部の割合に基づいて、それぞれの抵抗係数および慣性力係数を設定している。

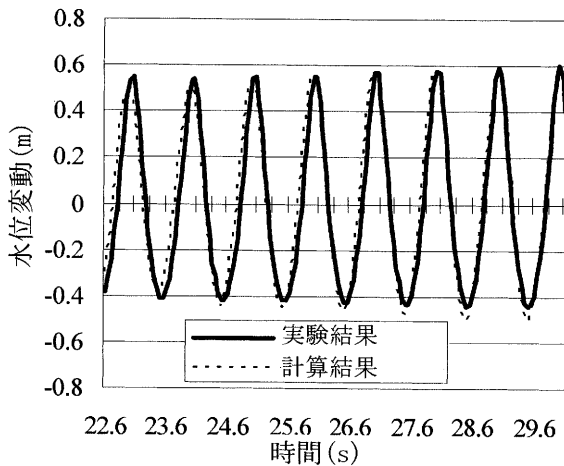


図-2 水位変動に関する実験結果と計算結果の比較

3. 累積被災と反射率の関係

(1) 被覆層の累積被災断面の定義

数値計算における被覆層の被災進行に伴う断面変化のモデル化に当たっては、従来の護岸被覆層の被災実験結果^{2), 3)}を参照して、以下のように簡易なモデル化を行った。すなわち、図-3 に示すように被災が始まる位置(図中、被災位置と表記)を固定し、侵食断面および堆積断面を次式のように正弦曲線で表す。

$$Z = -a \sin \{ (\pi/l) \cdot X \} \quad (4)$$

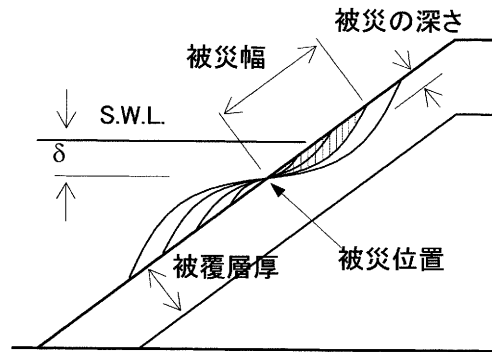


図-3 被災断面の説明図

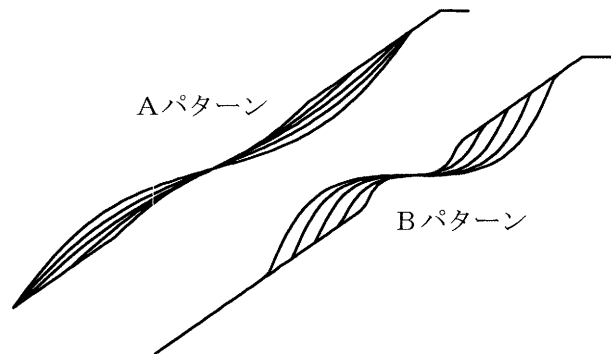


図-4 被災断面モデル図

$$a = \frac{s \cdot (dn_{50})^2 \pi}{2l} \quad (5)$$

ここに、 $s = Ae / (dn_{50})^2$ 、 a は被災深さ、 l は被災幅、 X 軸が堤体断面、その鉛直方向が Z 軸である。被災深さ a は、式(5)に示すように、 $X=0$ (被災位置)から $X=l$ までの面積を求め、ダメージパラメータ値(s)に対応した侵食面積(Ae)と一致させることにより求めている。

次に、被災進行に伴う被災幅の増長モデルとしては、図-4 に示すように、ダメージパラメータ $s=1$ の時に被覆材の6個分とした場合(Aパターン)と3個分とした場合(Bパターン)の2種類、その後の被災率の増加進行($s=2, 3, 4, \dots$)に伴ってAパターンでは被覆材2個分ずつ、Bパターンでは1個分ずつそれぞれ堤体斜面に沿って天端方向へ延長するように設定している。ただし、侵食断面が堤体天端面に達したとき、また堆積断面が堤体法先に達した時点で、被災幅を固定し、設定されたダメージパラメータに対応するように被災の深さを増加させている。

AとBパターンの断面形状の違いは、図-4 に示すように浅く広く被災する場合と、深く狭くなる場合をモデル化したものである。なお、被災位置を示す静水面から距離(δ)を数値計算では、3種類($\delta/h=0.33, 0.14, 0.0$, h :水深)変化させている。

(2) 被覆層の被災進行に伴う反射率の変化

被覆層の累積被災断面に対する反射率の数値計算

では、波浪条件として規則波を対象に、周期を 1s から 0.2s 間隔で 2.0s までの 6 種類、各周期における波高を式(1)より得られた安定限界波高に固定している。

数値計算における反射率の解析には、ヒーリーの方法により、造波板から 15m から 16.6m の間を 2cm 間隔で計算された 81 ヶ所の水位変動データを用いて行った。なお、この反射率の解析対象の水位変動データには、波が被覆護岸で反射して各計測位置を通過し、また造波板で再反射した波が計測位置に到達するまでの時間内に、各計測位置で計算された時系列波形データを用いている。

まず図-5 は、被覆層およびコア部の透過層内の流体運動に伴うエネルギーロスによる反射低減効果を確認するため、被災断面形状として B パターンおよび $\delta/h=0.33$ の場合について、透過層を不透過と透過にした場合のダメージパラメータによる反射率 (K_R) の変化を示したものである。この図より、ダメージパラメータの増加に伴う反射率の変化傾向は消波工の透過と不透過にかかわらず波形勾配の大きさによって異なるが、透過の場合と不透過の場合で反射率のダメージパラメータの増加に伴う変化傾向は同じである。また、透過と不透過の場合における反射率の差が透過層内の流体運動に伴うエネルギーロスに依存するものと推察できる。

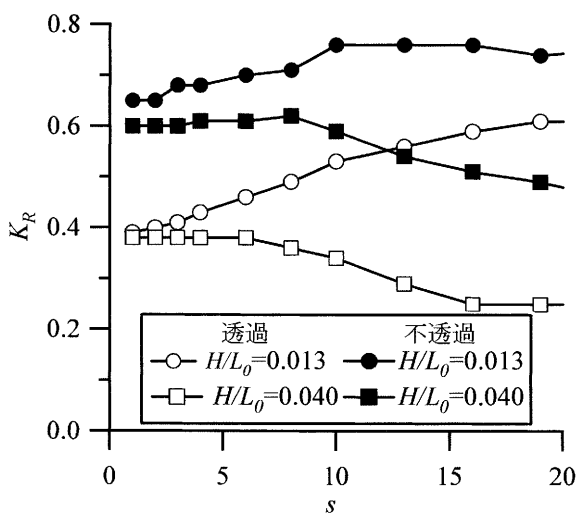


図-5 透過と不透過の場合の反射率

次に、図-6 は 3 種類の被災位置における、ダメージパラメータの増加に伴う反射率の変化を示した一例である。この場合の被災断面は、B パターンである。これらの図より、被災位置が深い(a)の場合には被覆層の被災進行に伴う反射率の増加傾向にあり、一方、被災位置が浅い(b), (c)の場合には波形勾配によって減少傾向または減少後増加する変化傾向を示す。(b)と(c)の場合は、被災進行に伴う被覆層の前面へのせりだし部により、堤体上の水深が浅くなることから、碎波形式の変化に伴う碎波によるエネルギーロスの変動と、さらに被覆層の層厚の増加に伴う透過層内でのエネルギーロスの影響も含

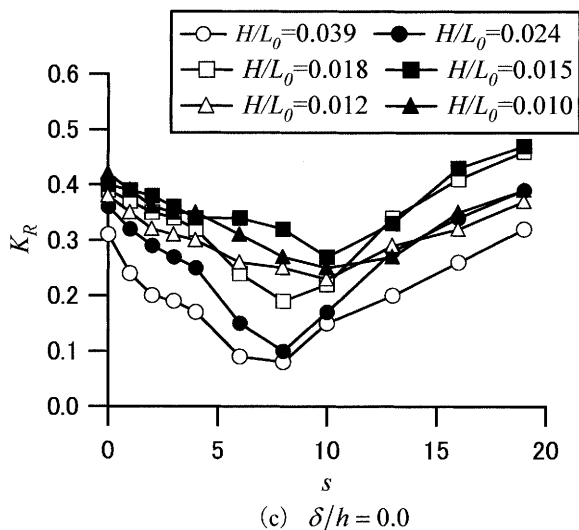
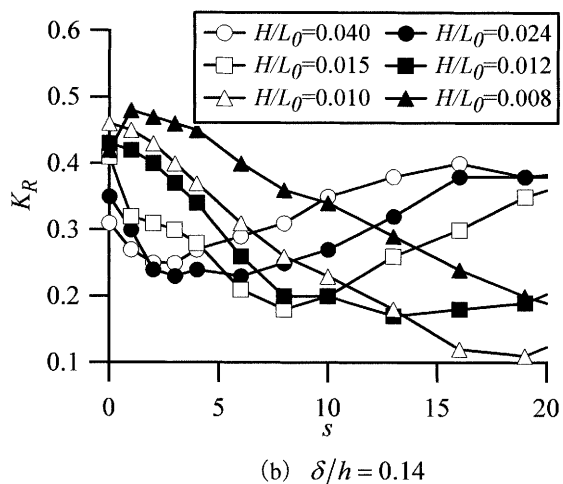
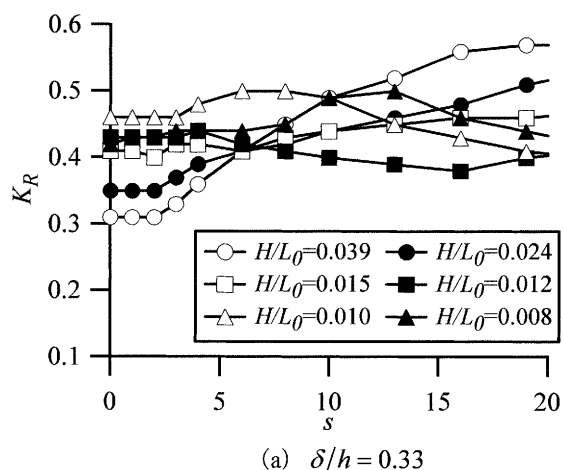


図-6 被災進行に伴う反射率の変化

まれるものと推測される。

以上のように、被覆層の被災進行に伴う反射率の変化特性には、波形勾配によってはダメージパラメータの増加に伴って反射率が增加するケースもあるが、全体的に各累積被災断面における反射率とダメージパラメータの間に明確な対応関係が認められ

ない。すなわち、ダメージパラメータ値がわかれば、それによって被災を受けた被覆護岸の消波性能の劣化を直接に評価することが難しいことがわかる。

4. 反射率の予測診断モデル

ここでは、先に示したようにダメージパラメータと反射率の間に明確な回帰性が認められなかったことから、データ間の因果関係の分析に有効なニューラルネットワークを用いて、被覆層の被災進行に伴う反射率の変化予測に関する診断モデルを構築するものである。

本研究で採用したニューラルネットワークは、入力層、中間層、出力層からなる階層型モデルである。入力層ユニットには、被災に関する諸量（ダメージパラメータ、被災幅、被災位置；図-3を参照）、護岸の堤体諸元（法先水深、被覆工の天端高、斜面勾配、被覆材の代表径、被覆層の厚さと空隙率、コア部の空隙率）、設計波浪条件（波高、周期）としている。中間層は1層とし、出力ユニットは反射率の1項目とした。なお、入力層ユニットの被災に関する諸量については、ここで開発しようとしている反射率の予測診断システムが被災現場で利用できることを目的としているため、現場で直接に計測可能なパラメータを採用している。

ユニットの応答関数には、間瀬ら^{6), 7)}および斉藤ら⁸⁾の研究を参照に、中間層および出力層には値域が0から1となるlog型シグモイド関数を採用した。学習法には、間瀬らの解析結果を参考にして、数値最適化手法に基づく高速訓練アルゴリズムである共役勾配法のBayesian正規化法を付加したLevenberg-Marquardt法を採用している。また、ニューラルネットワークの調整には、教師データとしてCADMAS-SURFによる被覆層の種々のダメージパラメータと反射率に関する計算結果を用いている。その計算ケース数の総計は、表-2に示すように594ケースである。

表-2 計算ケース

被災断面：Aパターン	
変数	ケース数(条件)
δ/h	3 (0.33, 0.14, 0.0)
s	10 (1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 19)
被覆層空隙率	2 (0.387, 0.4)
ケース数：360	
被災断面：Bパターン	
変数	ケース数(条件)
δ/h	3 (0.33, 0.14, 0.0)
s	13 (1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 19, 22, 26, 30)
被覆層空隙率	1 (0.387)
ケース数：234	

中間層のユニット数については、予備計算で5, 10, 12 および 24 と4種類変化させて検討した結果、それぞれのユニット数における予測値とテストデータ（反射率の計算結果の1/3のデータ数）との相関係数がユニット数24で最も高くなったことから、ここではユニット数を24に固定している。なお、本研究で用いたニューラルネットワーク・ソフトウェアは、MATLABのNeural Network Toolboxである。

図-7は、各被災断面に関する全ての数値計算結果を教師データとして調整したニューラルネットワークを用いて、太田ら^{2), 3)}の傾斜堤体被覆層の被災変形に伴う反射率変化に関する模型実験より得られた反射率と予測値を比較したものである。実験値の反射率の解析には、実験が不規則波で行われていることから、入反射分離法が用いられている。また、太田らの実験における被覆材の代表径(dn_{50})は、本研究で教師データとして採用した被覆層の砕石と同じである。なお、本研究との違いは、太田らの堤体模型の場合、図-8に示すように堤体背後が鉛直不透過壁で仕切られておらず、透過性を有する構造形式である。図-7より、本研究で構築された、護岸被覆工の被災劣化に伴う反射率変化に関する予測診断システムは、実験値を±5%以内の誤差でほぼ予測できることがわかる。

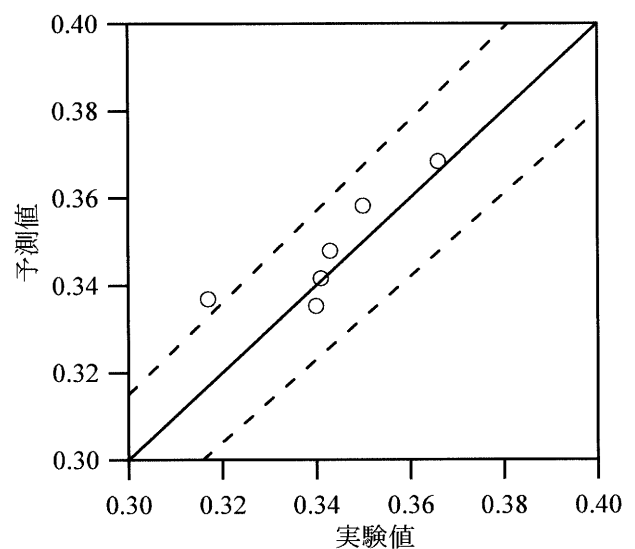


図-7 反射率に関する実験値と予測値の比較

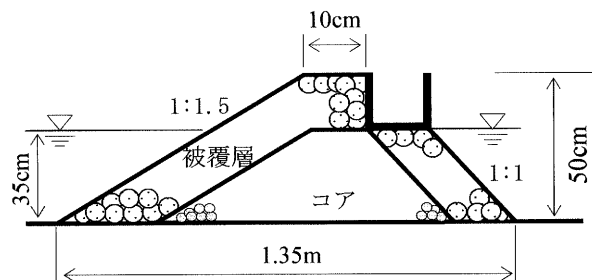


図-8 太田ら²⁾の実験における堤体

5. あとがき

本研究では、被覆護岸を対象にして、被覆層の被災進行に伴う反射率の変化特性を数値波動水路CADMAS-SURFにより検討した。その結果、ダメージパラメータと反射率変化の間に明確な回帰性が認められなかった。ついで、被覆層の被災進行に伴う反射率変化に関する予測診断システムの開発を目的に、被覆材の被災個数や被災領域、堤体諸元、設計波浪条件を入力データとするニューラルネットワークの構築を行った結果、その有効性が認められた。

本研究では、被覆層の累積被災断面モデルに対して便宜的に正弦曲線近似を採用したが、今後は、実用化を目的として被覆層の被災断面の変形特性に関してより現実的なモデルの検討を進めると共に、被災進行と越波量の低減性能変化も含めた、護岸被覆層の累積損傷に伴う消波性能変化に関する予測診断モデルの構築を目指す計画である。また、被覆層の被災進行に伴う波浪場の非線形性を考えると、ニューラルネットワークの学習データに用いるための数値波動水路実験における反射率の解析方法として、ヒーリーの方法の適用性に関しても検討する必要がある。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号 20560479, 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

- 1) 多々納裕一，高木朗義編：防災の経済分析－リスクマネジメントの施策と評価－，勁草書房，pp. 3-21，2005.
- 2) 太田隆夫，松見吉晴，木村晃：傾斜堤体の被災変形に伴う消波性能変化について，海岸工学論文集，53 巻(2)，pp. 711-715，2006.
- 3) 太田隆夫，松見吉晴，木村晃：断面変形に伴う傾斜堤の越波量からみた性能評価，海岸工学論文集，54 巻(2)，pp. 746-750，2007.
- 4) 合田良實：港湾構造物の耐波設計－波浪工学への序説－増補改訂，鹿島出版会，pp. 111-114，1990.
- 5) 財団法人沿岸開発研究センター：CADMAS-SURF 数値波動水路の研究・開発，数値波動水路の耐波設計への適用性に関する研究報告書，296p.，2001.
- 6) 間瀬肇：ニューラルネットワークを用いた捨石防波堤の安定性評価，海岸工学論文集，41 巻(2)，pp. 761-765，1994.
- 7) 間瀬肇，酒井哲郎：ニューラルネットワークを用いた消波ブロック被覆工の変形量評価，海岸工学論文集，42 巻(2)，pp. 891-895，1995.
- 8) 斉藤武久，砂原啓人，市川督人，福本正，間瀬肇，石田啓：ニューラルネットワークを用いた人工リーフ周辺の水理特性評価－トラップ式ダブルリーフを対象として－，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 971-975，2008.