傾斜被覆堤の複合被災に伴う越波量変化 に関する評価システムの開発

平山 隆幸¹・藤本 啓伸²・松見 吉晴³・太田 隆夫⁴・大野 賢一⁵

¹正会員 工修 三省水工(株) 九州支店設計課 (〒812-0013 福岡市博多区博多駅東3-3-3)

E-mail:t-hirayama@sanshousuiko.co.jp

²正会員 株式会社ウエスコ 神戸支店 (〒651-0092神戸市中央区生田町2-2-2)

³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)

E-mail:matsumi@sse.tottori-u.ac.jp

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

E-mail:ohta@sse.tottori-u.ac.jp

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 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail:ohno@tottori-u.ac.jp

社会基盤施設の設計に対して性能設計法の導入が図られている現状においては、消波工の累積損傷に伴う性能劣化特性を明らかにする必要がある。既往の研究では、被覆層の被災断面に対する消波性能の変化に着目し、反射率や越波流量の変化について検討されているが、明確な因果関係を見出せるまでに至っていない。本研究では、傾斜被覆堤を対象に、性能指標を反射率と越波流量として、数値波動水路による不規則波実験より、被覆層の法面被災および天端低下が同時に生じる複合被災の場合の被災進行に伴う消波性能の変化特性を不規則波の波群性より検討する。次に、データ間の因果関係が不明確な情報処理に有効であるニューラルネットワークを用い、被覆層損傷に伴う断面変化における消波性能および越波低減性能に関する評価システムの開発を目指すものである。

Key Words : Seawall, Neural network, Performance design, Accumulative damage of armor

1. はじめに

海岸施設の維持管理としての被覆工の補修・更新の意志決定問題において、その被覆工のダメージパラメータと消波性能の劣化との関係が評価できれば、消波性能評価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。著者ら^{1,2)}は、これまで消波被覆工の被災進行に伴う消波性能の変化に着目し、ニューラルネットワーク(NN)を利用した被覆工の累積損傷に伴う反射性能の評価モデルを提案してきた。

本研究は、消波性能指標として反射率、越波流量を取り上げ、特に被覆工法肩付近から被災進行に伴う天端低下と法面被災の複合被災パターン³⁾を対象に、被災進行に伴う各性能の変動特性について、不規則波による数値波動実験より検討すると共に、被覆材の被災個数や設計条件等を入力データとするNNによる被覆工断面変化に対応した消波性能に関する評価システムの開発を構築するものである。不規則波浪場における越波現象には、不規則波の特徴である前後の波の組合せも重要なパラメー

タとなりうることから、本研究では波群特性として不規則波の構成波の組合せを変化させて、不規則波浪場における越波流量の変動性についても検討を行った。

2. 数値波動実験の概要

NNを利用した消波性能の評価モデルの構築に当たっては、入力データとそれに対応した出力データ(教師データと呼ぶ)を与え、出力値が教師データの出力値に近い値が出るまでネットワークを調整するために、多数の教師データが必要となる。本研究では、教師データを数値波動水路を用いて作成することにした。

(1) 不規則波の造波方法

本研究では、CADMAS-SURF⁴⁾で用意されている計算モジュールmtbmkGを使用して不規則波信号を作成している。周波数スペクトルは、修正Bretschneider・光易モデルで、不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ は9.5cm、有義周期 $T_{1/3}$ は

1.75s, 水深35cm一定とした。

造波信号長は、約600波の造波ができるように計算時間を960sに設定している。また、時刻暦の点数については、周波数スペクトルで考慮する最も周期の短い成分波に対し、少なくともその山と谷を表現するために、有義周期の1/15程度のデータ間隔になるように設定している。各周波数成分波の設定方法には、周波数帯を等間隔に分割し、各区分で1つの周波数を乱数により決定し、振幅をスペクトルに応じて決定する周波数等分割を適用した。

mtbnkGのオプションタブでは、乱数発生初期値(idum1, idum2, idum3)の変更が可能である。これら3つのパラメータの中でもidum3は、各成分波の位相を設定するもので、波群を変える場合にはidum3の値を変更することによりできる。また、idum1は上記のように周波数等分割を設定した際、各区分の周波数を設定する乱数を変化させることができる。本研究では、オプションパラメータidum1とidum3に対して表-1の値を設定し、15種類の不規則波を対象とした。

(2) 造波不規則波の特性

本研究では、目標スペクトルに対する造波不規則波の検定を図-1に示すような水路両端にエネルギー減衰帯を配置し、境界条件を放射境界とする無反射水路で行っている。水深は35cm, 水路高さは70cmである。

数値波動水路の格子間隔は、水平方向 $\Delta X=0.03\text{m}$, 鉛直方向 $\Delta Z=0.01\text{m}$ に設定した。差分スキームにはVP-DONORスキームを用い、スキームパラメータは推奨値の0.2に設定した。なお、CADMAS-SURFの乱流モデルは適用していない。

図-2は、傾斜堤法先の予定設置位置でのスペクトルの合わせ込み結果の一例を示したものである。本研究では、対象不規則波15種類について、全て図-2に示すようにスペクトルの合わせ込みより不規則波の造波検定を行っている。15種類の不規則波の波浪特性は、傾斜堤体法先の予定位置で観測された水位変動より表-2に示す結果となった。平均連長は、設定波高を有義波高にしたときの全ての連長の平均値を示す。また越波に関しては、波高の大きな波が関係すると考え、造波不規則波連における有義波高を超える波の数として $H_{1/3}$ 超過波数も併せて表-2に示している。15種類の不規則波は、目標設定有

表-1 不規則波15パターンのidum1, idum3の組合せ

Case No.	idum1	idum3
WAVE1	-69897	-84509
WAVE2	-39897	-44509
WAVE3	-30000	-44509
WAVE4	-19897	-24509
WAVE5	-1000	-84509
WAVE6	-39897	-84509
WAVE7	-90000	-84509
WAVE8	-69897	-1000
WAVE9	-69897	-100000
WAVE10	-69897	-44509
WAVE11	-69897	-24509
WAVE12	-69897	-64509
WAVE13	-19897	-84509
WAVE14	-59897	-84509
WAVE15	-59897	-64509

図-2 スペクトルの合わせ込み結果

義波高および周期に対して多少の誤差はあるものの、有義波高9.5cm, 有義周期1.75s, 平均連長1.1, $H_{1/3}$ 超過波数31程度である。図-3は、各造波不規則波のスペクトル解析の結果を示したもので、総エネルギーは同等の不規則波となっていることが確認できる。

以上の本研究で対象とする造波不規則波特性に関する検討より、15種類の不規則波における波群特性には大きな差がない。ただし、CADMAS-SURFのmtbnkGのオプション・パラメータのidum3を変化させているために、15種類の不規則波における時系列波列を構成する個々の波の組合せは異なっている。したがって、越波現象に関わる波列における前後の波の組合せの影響は、これら15種類の造波不規則波により検討できる。

図-1 検定用数値波動実験概要図

表-2 造波不規則波の波浪特性

Case No.	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	平均連長	$H_{1/3}$ 超過波数
WAVE1	9.38	1.73	1.11	30
WAVE2	9.39	1.81	1.08	28
WAVE3	9.55	1.75	1.13	27
WAVE4	9.61	1.75	1.11	30
WAVE5	9.53	1.73	1.03	31
WAVE6	9.62	1.76	1.13	34
WAVE7	9.40	1.75	1.15	31
WAVE8	9.72	1.75	1.21	35
WAVE9	9.41	1.75	1.13	34
WAVE10	9.64	1.72	1.14	33
WAVE11	9.31	1.73	1.08	28
WAVE12	9.47	1.72	1.27	33
WAVE13	9.60	1.71	1.15	39
WAVE14	9.50	1.74	1.07	32
WAVE15	9.49	1.72	1.15	30

3. 反射率・越波に関する数値波動実験

(1) 数値波動実験の概要

数値波動水路の設定に当たっては、検証用データとして用いた水理模型実験と一致させるために、図-4に示すように造波板から19.2mの位置に傾斜堤の法先を設置し、堤体背後に越波量計測用の集水升3mを設けている。また、造波板背後1mの位置から幅5mのエネルギー減衰帯を配置し、解析領域端の影響を抑えている。水路高は堤体に当たった波が水路の上端を越えないように0.8mに設定している。波高計5本のW1～W5は、それぞれ造波板から13.2m、13.5m、13.7m、17m、17.9mの位置にした。

(2) 模型堤体とポーラスセルのパラメータ値

模型堤体は被覆層とコアからなる形式で、水理模型実験ではそれぞれ砕石で構成されている。堤体の法面勾配は2:3で、天端幅は10cmである。水理実験での被覆層およびコアの捨石の平均質量と空隙率は、それぞれ41g、0.387および3.75g、0.368であった。数値波動実験における堤体モデルのポーラスセルの空隙率には、これらの値を設定すると共に、被覆層とコアの抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M の値には先の研究結果²⁾を参考に、被覆層セルに $C_D=1.0$ 、 $C_M=1.2$ 、コアセルに $C_D=1.5$ 、 $C_M=2.0$ を設定

図-3 15種類の不規則波の周波数スペクトル

図-5 複合被災モデル

している。ポーラスセルのパラメータ設定に当たって、流体と被覆層およびコアが混在するポーラスセルにおける空隙率と C_D および C_M の値には、被覆層内の流体の割合とコアの流体の割合より与えている。

(3) 堤体の複合被災モデル

本研究では、被覆層の被災進行に伴う累積型の被災断面モデルとして、天端低下と法面被災の複合被災を対象にしている。その複合被災のモデル化は、図-5に示すように、まず堤体初期断面（被災レベル $DL=0$ ）として天端幅 $b=10$ cm、天端高 $B=15$ cmとする。次に、被災レベルが1段階（ $DL=1$ ）進行すると、天端高を被覆材1個分（ $\Delta B=2.5$ cm）低下させると共に、天端幅を天端高の低下率（ $\Delta B/B$ ）と同じ割合で減少させ、さらに堤体法先位置

図-4 数値波動水路の概要図

を侵食面積と堆積面積が等しくなるように水平方向へ前進させている。被災レベルが進行する毎に、天端高を ΔB ずつ低下させると共に、天端幅を天端高の低下率で減少させ、その被災断面面積だけ法面の勾配が緩くなっていく被災モデルである。本研究では、 $B=15\text{cm}$ から 5cm まで $DL=0$ を含めて $DL=4$ まで計5種類の被災レベルにおける堤体断面を対象にした。

4. 被災進行に伴う消波性能の変化特性

(1) 被覆層の被災進行に伴う反射率の変化特性

反射率の解析は、図-4に示す造波水路内の一様水深部に設置した波高計W1, W2によって得られた水位データから、合田らの入反射波分離推定法に基づいて算定している。その際の水位データには、所定の波高に達した波が堤体法面で反射してW1の波高計に到達してからのデータを対象とするため、計測水位データの初めの約20波を除いたものを用いている。

図-6は、15種類の不規則波を対象に被災レベルの増加に伴う反射率 K_R の変化をそれぞれ示したものである。本研究において対象としている不規則波15種類は、まず同一の周波数スペクトルであり、表-2に示すように有義波高、有義周期、平均連長等に大きな差がないものである。ただし、CADMAS-SURFのオプション・パラメータのidum3による各周波数成分波の初期位相を変化させているために、不規則波を構成する波列が異なる。図-6より反射率の被災進行に伴う変動傾向は、ほぼ同じ結果となっている。このことについては、まず反射率が入射波エネルギーと反射波エネルギーによって求められるものであり、入射不規則波のエネルギーが図-3に示すように各不規則波共にほぼ同じであることから、不規則波の構成波列に関わらず反射率がほぼ同じ値を示す結果になったものと考察できよう。

図-6 被災レベルの増加に伴う反射率 K_R の変化

図-7 被災レベルの増加に伴う越波流量 q の変化

複合被災の被災進行に伴う反射率の変化傾向としては、 $DL=2$ まで減少傾向を示すものの、 $DL=3, 4$ では増加し、その増加の割合が $DL=2$ までの減少割合より大きくなり、 $DL=4$ では初期断面の反射率以上の値となっている。反射率は一般的に法面勾配が緩やかになると減少傾向を示すことより、 $DL=2$ までの変化特性はこの法面勾配の緩勾配化による影響によるものと推察できる。一方、 $DL=3$ 以上の場合、天端高と天端幅の減少に伴って斜面堤背後の止水板での反射が強くなったことにより、反射率が増加傾向を示したものと考えられる。

(2) 被覆層の被災進行に伴う越波流量の変化特性

越波流量は、数値波動水路の堤体背後に設けた集水升内のVOF関数 F 値の面積積分より越波量を算定し、それを計測時間で割ったものである。越波流量の計算結果は、各造波不規則波ともに平均連長、 $H_{1/3}$ 超過波数、周波数スペクトルがほぼ同じにもかかわらず、図-7に示すように造波ケース間に大きなバラツキが認められる。その被災進行に伴う越波流量の変化は、被災率が大きくなると初期断面の場合より増加する傾向にある。

この越波流量のバラツキについて、越波に影響を及ぼす不規則波列の前後の波の関係より考察を行う。図-8と図-9は平均連長、 $H_{1/3}$ 超過波数が同値のWAVE6とWAVE9の堤体法先位置での水位と、越波量の時間変化を示したものである。図-8において時間487sで発生する越波を引き起こす波とその直前の波（図中①と①'）と、図-9の473sでの越波を引き起こす波とその直前の波（図中②と②'）の関係を比較すると、水位変動量は前後の波共に①、①'の方が小さいにもかかわらず、両者の越波量はほぼ同等である。すなわち、越波を引き起こす波の直前の波の組み合わせの影響が総越波量のバラツキに現れたものと考えられる。これらの結果から、越波を不規則波実験により検討する場合、構成波列の不規則性に

図-8 WAVE6の水面波形と越波量の時間変化

図-9 WAVE9の水面波形と越波量の時間変化

配慮した確率統計的な考察が必要であり、この点に関しては今後検討を行っていく予定である。

5. 消波性能の評価システム

本研究で採用したNN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、被災に関する諸元（天端幅、天端高低下量/代表粒径、被災後の法面勾配、天端の低下率）、堤体諸元（法先水深、天端高、コア高、法面勾配、被覆材の代表粒径と空隙

率）と設計波浪条件に関する項目を設定している。なお、設計波浪条件には、上記の越波量に関する考察より不規則波の波列構成を考慮する必要があるが、それを的確に表現できるパラメータがないことから、ここでは波の組み合わせを考慮するために図-4に示す波高計W1で計測された平均連長を取り入れ、設計有義波高と有義周期を併せた3項目としている。また、NNの中間層は1層とし、出力ユニットは対象事象（反射率、または越波流量）の1項目とした。

NNのチューニングには教師データによる学習法を採用し、NNからの出力値が教師データに近い値が出るようにユニットにかかる結合荷重と閾値を調整しながら、出力値と教師データとの誤差をフィードバックする方法である。この学習方法に対しては、パフォーマンス関数が最も早く減少する勾配の負の方向に結合荷重と閾値を更新する勾配降下法や数値最適化手法に基づく共役勾配法のLevenberg-Marquardt法（LM法）を採用している。また、NNのチューニング中の過学習への対策には、自動的に最適正則化パラメータを決定するBayesian法を用いている。中間層と出力層ユニットの応答関数には、出力が0~1のlog型シグモイド関数を採用した。

中間層ユニット数に関しては、ユニット数を変化させた試行計算を行い、予測値と実験値との相関や誤差から検討した。また、この試行計算の結果、誤差、精度の観点から反射率と越波流量を1つのシステムで構築することが困難と判明したため、複合型被災の反射率予測、越波流量予測と分けてシステムを構築した。なお、中間層ユニット数は、反射率と越波流量においてそれぞれ16、25を試行計算より設定した。

本予測システムの検証用データとして、表-3に示す複合被災を対象とした不規則波実験を用いた。実験で使った堤体模型は、数値波動実験で対象としたものと同じである。ただし、表-3に示すように有義周期が1.6sと数値波動実験の場合より短くなっている。

図-10は反射率に関する実験値と予測値の比較を示したもので、被覆工の累積損傷に伴う反射率は±10%程度の誤差で評価できる。一方、越波流量に関す

表-3 検証用に用いる実験データ

項目	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
有義周期(s)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
有義波高(m)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
平均連長(W1)	1.51	1.49	1.46	1.46	1.49	1.50	1.46	1.49	1.51
法先水深(m)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
天端高さ(m)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
法面勾配	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
空隙率	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
粒径(m)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
コア高(m)	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
天端幅(m)	0.10	0.10	0.08	0.07	0.07	0.05	0.05	0.03	0.03
天端高低下量/粒径	0	0	1	2	2	3	3	4	4
被災後の法面勾配	1.50	1.50	1.72	1.98	1.98	2.28	2.28	2.64	2.64
天端低下率	0.00	0.00	0.17	0.33	0.33	0.50	0.50	0.67	0.67
反射率	0.44	0.43	0.38	0.33	0.33	0.30	0.30	0.31	0.31
越波流量(cm³/cm/s)	0.022	0.020	0.083	0.151	0.151	0.133	0.125	0.170	0.174

表-4 越波流量に関する数値実験と模型実験の統計量

DL	越波流量(cm³/cm/s)			
	数値実験			模型実験の平均値
	平均値μ	標準偏差σ	σ/μ	
0	0.035	0.023	0.656	0.021
1	0.076	0.033	0.439	0.083
2	0.074	0.050	0.682	0.151
3	0.083	0.043	0.515	0.129
4	0.105	0.044	0.420	0.172

図-10 反射率に関する予測値と実験値の比較

図-11 越波流量に関する予測値と実験値の比較

る実験値と予測値を示す図-11においては、 $\pm 40\%$ の誤差範囲で予測されており、表-4に示す15種類の数値波動実験より与えた学習データの標準偏差と平均値の比が0.5前後の値であることから妥当な結果が認められる。

6. まとめ

本研究では、傾斜被覆堤を対象に被覆工の複合被災進行に伴う反射率、越波流量の変動特性について、特に不規則波の構成波列より検討すると共に、NNを用いた消波性能の評価システムの開発を行った。以下に、本研究で明らかになったことを記述する。

反射率の被災レベルによる変化特性に関しては、入射不規則波の構成波列に関わらず同様の変化特性を示したが、越波流量の場合、不規則波の波列の組合せにより、同じ被災レベルにおいて大きなバラツキが認められた。

複合被災に伴う消波性能の評価システムとしてのニューラルネットワークの適用性は、反射率に対して10%程度の誤差で予測可能となったが、越波流量についてはさらに多くの不規則波による教師データを用いる必要性が判明した。

参考文献

- 1) 平山隆幸, 松見吉晴, 藤本啓伸, 河合直樹, 太田隆夫, 大野賢一: 護岸被覆工の累積損傷に伴う反射率の評価システムについて, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol66, No.1, pp.826-830, 2010.
- 2) 平山隆幸, 松見吉晴, 河合直樹, 藤本啓伸, 太田隆夫, 大野賢一: 護岸被覆工の天端と法面の複合被災における消波性能の予測モデル, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol67, No.2, pp. I_124-I_129, 2011.
- 3) 久保田真一, 山本方人, 松本朗, 半沢稔: 消波ブロック被覆堤における消波工の変形過程に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第 56 巻(2), pp.906-910, 2009.
- 4) 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, 306p., 2001.

EVALUATION SYSTEM FOR CHANGE OF WAVE OVERTOPPING UNDER DAMAGED ARMOUR LAYERS AROUND TOP OF SLOPE-TYPE REVETMENT

Takayuki HIRAYAMA, Hironobu FUJIMOTO, Yoshiharu MATSUMI, Takao OHTA and Ken-ichi OHNO

To introduce the performance design into design of the armoured breakwaters, it is necessary to clarify the degradation of wave absorption performance with cumulative damage of armour units. From the viewpoint of change of wave absorption performance for the damaged cross section of armour layers, the change of reflectivity and wave overtopping flow rate have been examined in the conventional researches, the clear causal relationship between the wave absorption performance and damage parameters cannot be found. In this study, focusing on the reflection coefficient and wave overtopping rate as the performance measures for the slope-type revetment covered with armour units, the change characteristics of these performances under the deformation progress in which the slope damaging and levee crown lowering of armour layer are simultaneously generated, are investigated from wave groupness factors of random wave using numerical wave flume. Secondly, a neural network system is applied to evaluate the causal relation of the reflection coefficient, wave overtopping rate and the accumulative damage of armour layer. It is found that the neural network with a three-layer calibrated by the numerical experiments can be applied to evaluation of reflection coefficient and overtopping rate under the damage progression of armor layer.