

消波工の断面変形とうねり性波浪が堤体への作用波力に及ぼす影響

鳥取大学大学院 学生会員 ○中原 修一郎

加古川市役所 高砂 伸平

国土交通省中国地方整備局 池永 直人

鳥取大学 正会員 太田 隆夫

1. はじめに

防波堤などの前面に設置される消波工においては、波浪による消波材の移動・破損による断面変形が生じることで、消波性能等が低下するとともに、堤体に作用する波力が増大し、堤体の安定性の低下を招く。また近年、防波堤の設計条件を超えるうねり性波浪あるいは偶発波浪と呼ばれる波の作用による被災事例が報告されている。本研究では、消波ブロック被覆堤を対象に、消波工の断面変形とうねり性波浪が作用波圧に及ぼす影響について検討を行う。水理模型実験により、消波工の断面変形が生じた状態でうねり性波浪が作用した場合の波圧を計測して、断面変形の程度と性能変化の関係を評価する。また、ニューラルネットワークを利用して、消波工の断面形状とうねり性波浪を含む波浪に関する情報を入力とし、波力を予測するためのモデルを構築し、その適用可能性を検討する。

2. 水理模型実験

実験に使用した水路は、長さ 29.0m、幅 0.5m、高さ 0.8m の 2 次元造波水路である。この水路内に勾配 1/30 の斜面と高さ 0.24m の水平面を置き、水平面上に防波堤の模型（1cm 厚の亚克力板による鉛直面）を設置した。日本海沿岸の 2 港湾（A 港、B 港と表記）における消波ブロックによる消波工を対象とし、模型縮尺を 1/70 としている。消波工初期断面の法面勾配は 1:4/3 である。使用した消波ブロック模型は、質量 37.6g、代表径 2.56cm の四脚型のものである。マウンドの高さは両港とも 4cm とし、砂利を敷き詰めで飛散防止用の金網で表面を覆った。実験装置の概要を図-1 に示す。また、河村ら（2016, 2017）による断面変化のモデルにもとづき、天端の沈下量、静水面における消波工厚さの減少量、法先位置の移動量を求め、図-2, 3 に示すような断面変形量を表すパラメータ $S=10, 15, 20, 25$ に対応するモデル断面を設定した（ $S=0$ は初期断面）。水路底面からの水深は 0.518m（A 港）、0.469m（B 港）、フルードの相似則により設定した設計波周期は 1.53s（A 港）、1.67s（B 港）である。この周期のほかに、設計波高に対してうねり性波浪の条件である波形勾配 0.025 未満を満たす周期として 2.03s（A 港、B 港）、上記 2 つの中間の周期として 1.80s を設定している。設計波高相当のものも含めて 7 または 8 種類の波高の規則波を造波した。実験においては、図-1 のように W1 から W6 の計 6 本の波高計により水位変動を計測し、鉛直面に 7 個（A 港）または 5 個（B 港）の圧力計を、亚克力板に開けた穴にねじ込む形で取り付け、圧力変動を計測した。図-2, 3 の P1 から P7 は、波圧計の設置位置を

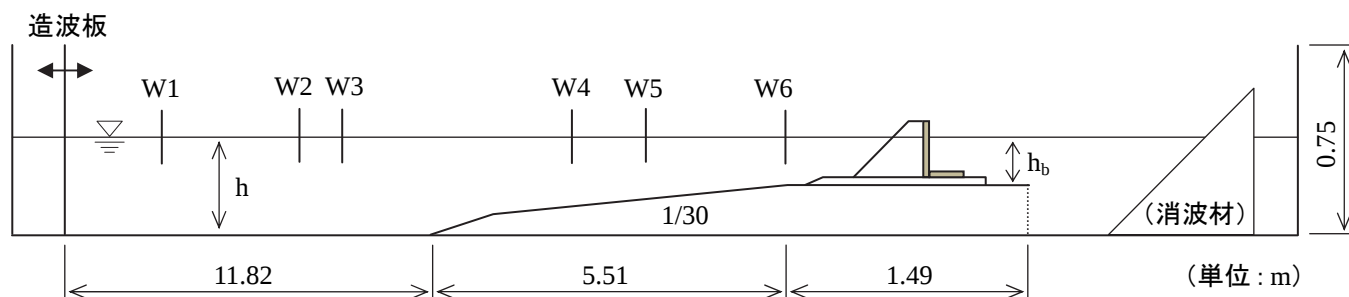


図-1 実験装置の概要

キーワード うねり性波浪, 断面変形, 波力, ニューラルネットワーク

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 TEL 0857-31-5309

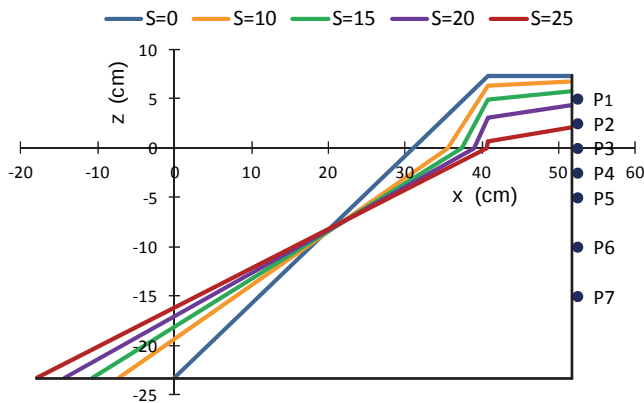


図-2 消波工の断面形状 (A 港)

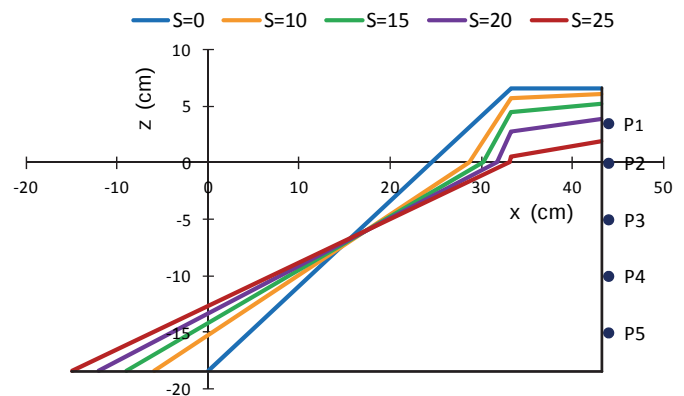


図-3 消波工の断面形状 (B 港)

表している．計測時間は造波開始から 40s 間，サンプリング周波数は 500Hz である．

3. 実験結果

図-4, 5 に，A 港における設計波周期とうねり性波浪の場合の鉛直面単位幅あたりに作用する水平波力を示す．単位幅あたりの水平波力は，鉛直面の上下端と圧力計間の midpoint から各圧力計に対する領域の長さを決め，これと波圧の積を合計することにより時々刻々の値を求めている．さらに，鉛直面に波が作用し始めた後，波形が比較的安定している 5 波におけるピーク値を平均して水平波力としている．また，図の横軸は，入射波高 H と図-1 に示した水平面上の水深 h_b との比である．これらの図より，鉛直面上部の圧力計が露出する程度まで変形が進むと，波力が大きく増加することがわかる．また，波力の最大値は，うねり性波浪のほうが若干小さいがほぼ同程度であり，波力のピークは，周期の増加に伴って H/h_b の小さいほうに移動している．図には示していないが，B 港での波力の最大値はうねり性波浪のほうが大きく，A 港と同様に周期の増加に伴って波力のピークが H/h_b の小さいほうに移動する．以上のことから，うねり性波浪程度に周期が長くなると，設計波周期の場合よりも小さな入射波高で同程度の水平波力を生じる可能性があると言える．

図-6, 7 は，A 港の結果で大きな波力を計測した条件における，波圧の鉛直分布を示したものである．図の横軸は，鉛直面の z 座標を鉛直面の高さ h_w で除した値である．波圧の値は，波力を求める際と同じ 5 波における波圧のピーク値の平均としている． $S=0$ と 15 との差異は大きくないが，さらに断面変形が進行し鉛直面上部の圧力計が露出するようになると，波圧が大きく増加している．これは，鉛直面の露出した部分に衝撃波圧が作用したためと考えられる．また， S の値が大きくなると，消波ブロックに被覆されている鉛直面下部においても波圧が比較的大きく増加している．露出した鉛直面に作用した衝撃波圧が鉛直面下部まで影響を及ぼしていると考えられる．なお，B 港の結果も同様の傾向を示している．

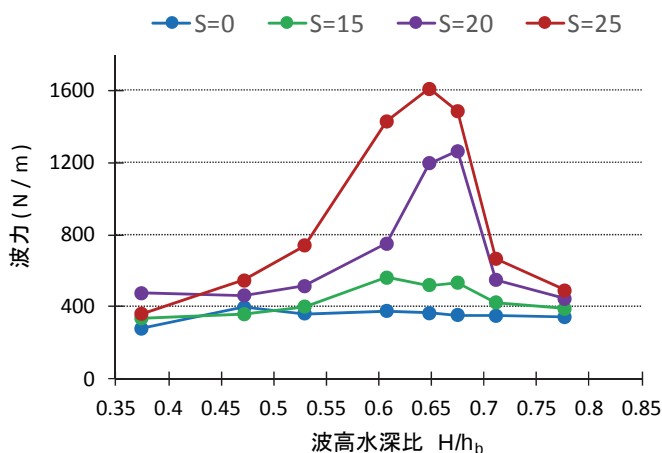


図-4 水平波力 (A 港，設計波周期)

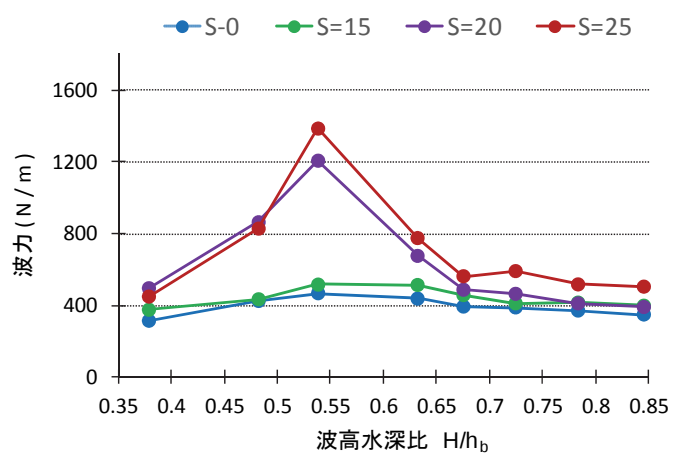


図-5 水平波力 (A 港，うねり性波浪)

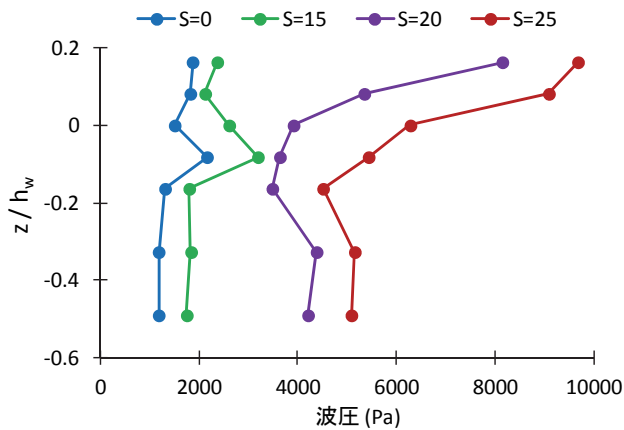


図-6 波圧の鉛直分布（A 港，設計波周期）

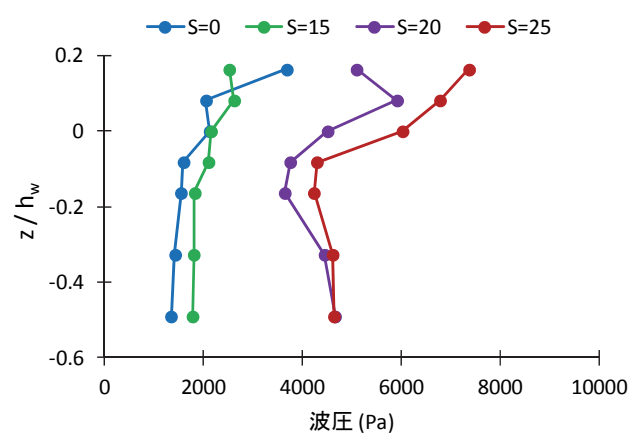


図-7 波圧の鉛直分布（A 港，うねり性波浪）

4. 波力の予測モデル

3. に述べた水理模型実験の結果にもとづいて，ニューラルネットワークを用いた波力の予測モデルを構築し，その適用性を検討する．ニューラルネットワーク構造は入力層，中間層，出力層からなる階層型モデルで，中間層は1層である．中間層ユニットの伝達関数には値域が-1 から 1 となる **tangent** 型シグモイド関数を，出力層ユニットには線形関数を使用する．間瀬ら（2005）と同様に，学習法には高速アルゴリズムである共役勾配法の **Levenberg-Marquardt** 法を用い，ネットワークの構築過程における過学習を防ぐために，**Bayesian** 正則化法と早期停止法を付加した 2 種類の学習法を採用している．

性能予測モデルの構築では，中間層ユニット数を変化させて計算を行い，ニューラルネットワークによる予測値と水理模型実験の結果（以下，実験値と表記）との相関や誤差を検討する．中間層ユニット数は 10, 15, 20, 25, 30 の 5 種類とする．入力データには，消波工の断面変形に関する諸量，消波工諸元，波浪条件から 10 項目を用いる．出力データは波力のみとし，3. に示した水平波力を〔入射波高分の静水圧×鉛直面の高さ〕で除した無次元水平波力の値を用いる．断面変形と波浪条件の組み合わせにより，水理模型実験では A 港，B 港ともに合計 92 組の実験値が得られている．上述の 10 項目の入力データと，無次元水平波力を出力データとしてデータセットを作成し，そのうちから出力データの値に偏りがないように，各港で 10 組の入出力データを抽出して予測精度検証用とし，残りの入出力データをニューラルネットワーク構築用の学習データとする．また，早期停止法では学習データをトレーニングデータ，バリデーションデータおよびテストデータに分割するが，それらの割合を 80%，15%，5%として学習データをランダムに分割する方法を用いる．

表-1, 2 に上述の 2 種類の学習法と 5 種類の中間層ユニット数に対する無次元水平波力の予測結果を示す．表中の **CC** は実験値と予測値との相関係数，**RMSE** は実験値と予測値との二乗平均平方根誤差である．これらの値は上述の予測精度検証用のデータ（10 組の入出力データ）から得られたものである．各表で **CC** が大きく **RMSE** が小さい結果（表中の緑色の欄）を与えているのは，早期停止法を付加した場合で，中間層ユニット数は両港とも 30 である．

表-1 実験値と予測値の相関係数など（A 港）

学習法		中間層ユニット数				
		10	15	20	25	30
Bayesian	CC	0.842	0.842	0.841	0.841	0.841
	RMSE	0.441	0.441	0.498	0.498	0.498
	学習回数	500	500	500	500	500
早期停止	CC	0.732	0.819	0.621	0.789	0.889
	RMSE	0.512	0.536	0.739	0.453	0.334
	学習回数	8	8	8	10	8

表-2 実験値と予測値の相関係数など（B 港）

学習法		中間層ユニット数				
		10	15	20	25	30
Bayesian	CC	0.760	0.765	0.747	0.747	0.747
	RMSE	0.350	0.355	0.340	0.341	0.341
	学習回数	363	285	208	247	349
早期停止	CC	0.700	0.788	0.775	0.808	0.833
	RMSE	0.230	0.200	0.213	0.387	0.187
	学習回数	9	9	9	8	7

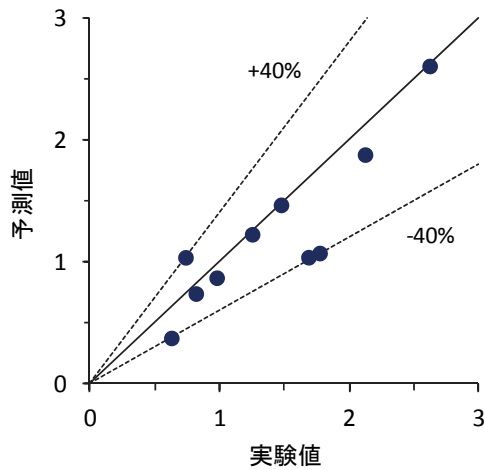


図-8 無次元水平波力の予測結果 (A 港)

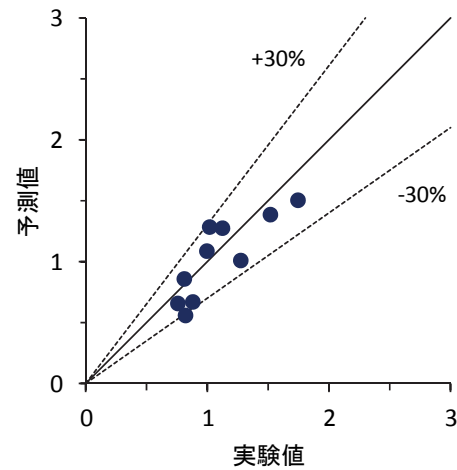


図-8 無次元水平波力の予測結果 (B 港)

図-8, 9 は, 無次元水平波力の実験値と予測値を比較したものであり, 表-1, 2 で予測精度が高いもの (表中の緑色の欄) を示している. A 港の結果では, うねり性波浪の 1 個を含む 4 個の予測値が $\pm 40\%$ 程度の誤差を生じているが, その他のデータの誤差は小さい. B 港の結果では, うねり性波浪も含めて $\pm 30\%$ の誤差範囲に収まっている. これらの結果より, うねり性波浪の場合も含めて適用可能な予測モデルであると考えられる.

5. おわりに

本研究では, 消波ブロック被覆堤の消波工を対象とし, まず消波工の断面変形にともなう波力の変化について, 水理模型実験により評価を行った. つぎに, 実験の結果にもとづいて, 階層型ニューラルネットワークを利用し, 消波工の断面変形に関する諸量, 消波工諸元および波浪諸元を入力データとして水平波力を予測するモデルを構築し, その適用性を検討した. 主な結果を以下に示す.

- ・鉛直面上部の圧力計が露出する程度まで消波工の変形が進むと, 鉛直面に作用する水平波力は大きく増加する. 露出部分での波圧の増加が著しいが, 消波ブロックに被覆されている鉛直面下部においても波圧が比較的大きく増加する場合がある.
- ・うねり性波浪程度に周期が長くなると, 設計波周期の場合よりも小さな入射波高で同程度の水平波力を生じる可能性がある.
- ・ニューラルネットワークモデルによる水平波力の予測結果は, $\pm 40\%$ の誤差範囲内に収まっており, うねり性波浪の場合も含めて適用可能性が示された.

【参考文献】

- 河村裕之, 太田隆夫, 松見吉晴, 平山隆幸: 消波ブロック被覆堤における消波工の被災・補修過程のモデル化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, I_1123-I_1128, 2016.
- 河村裕之, 太田隆夫, 松見吉晴, 権守真也: 消波工の断面変形に伴う性能変化と性能予測モデルについて, 土木学会論文集, B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, I_937-I_942, 2017.
- 間瀬 肇, 永橋俊二, T., Hedges: 緩傾斜護岸の越波流量算定におけるニューラルネットワークの適用性に関する研究, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.593-598, 2005.