

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

Evaluation System for Reflection Coefficient of Seawall with Accumulative Damage of Armor Layers

平山隆幸¹・松見吉晴²・藤本啓伸³・河合直樹³・太田隆夫⁴・大野賢一⁵

Takayuki HIRAYAMA, Yoshiharu MATSUMI, Hironobu FUJIMOTO, Naoki KAWAI
Takao OHTA and Kenichi OHNO

This study aims to develop a performance evaluation system of seawall with the accumulative damage of armor layer. Firstly, numerical experiments are conducted to investigate the variations of reflection coefficient of the seawall under condition of the damage progression of an armor layer. The results of numerical experiments show that there are not the regressive prediction properties between the reflection coefficient and the damage parameter of armor layer. Secondly, a neural network system is applied to evaluate the causal relation of the reflection coefficient and the accumulative damage parameter. The neural network with a three-layer calibrated by the numerical experiments can predict the reflection coefficient of seawall under the damage progression of armor layer within about 5% error.

1. はじめに

社会基盤施設の計画，設計では，被災損傷に伴う性能劣化を構造物の社会的重要性と併せて診断し，補修・更新による性能回復と共に，ライフサイクルコストを考慮した維持管理の考え方が必要と言われている（多々納ら，2005）．この維持管理の考え方を護岸被覆工の補修・更新に関する意志決定問題へ導入するには，被覆工の累積損傷に伴う消波性能劣化に関する評価ツールが必要となる．

著者ら（2006，2007）は，護岸前面における消波被覆工の被災進行に伴う消波性能の変化に着目し，被覆工の被災断面における反射率や越波量の変化について実験的に検討を行ってきた．しかしながら，被覆工の断面変化と反射率および越波量変化との因果関係において，被災率という単一のパラメータだけでは明確な回帰式を見出せるまでに至っていない．

本研究は，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，被覆材の被災に伴う被覆層の断面変化における反射性能を客観的に判断できる支援ツールを提案するものである．具体的には，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，並びに設計条件等（例えば，堤体諸元や設計波浪条件等）のデータを入力値とし，被覆工の損傷に伴う反射率を出力値として評価する被覆層の断面変化における

反射性能に特化した消波性能評価システムを開発するものである．

2. 水理模型実験および数値波動水路実験

(1) 水理模型実験

本研究では，数値波動水路CADMAS-SURF（財団法人沿岸開発研究センター，2001）における抗力係数 C_D ，慣性力係数 C_M の各パラメータ値の設定に当たって，水理模型実験における護岸前面の水位変動とその計算値の比較より決定した．

本研究で対象とした模型護岸は，図-1に示す碎石を用いた被覆層とコアの構造形式（a護岸）と，消波工全体が消波ブロックの構造形式（b護岸）の2種類である．a護岸の断面は，斜面勾配2:3，天端高15cm，天端幅10cmである．碎石の寸法，質量等は，無作為抽出した200個の標本から碎石の密度が 2.58g/cm^3 ，代表粒径 d_{n50} が 2.52cm ，またコアに用いた砂利の中央質量は 3.75g であった．被覆層とコアの空隙率は，それぞれ 0.387 ， 0.368 であった．一方，b護岸の断面は，斜面勾配3:5，天端高13cm，天端幅をブロック2個並びとした．消波ブロックには，縮尺1/22.6のコンクリート製ブロック（質量： 247g ，体積： 112cm^3 ，高さ： 7.3cm ）を採用し，空隙率は 0.5 であった．これらの模型実験に用いた水槽は，反射波制御機能をもつ2種類の2次元造波水槽（A水槽：長さ 29.0m ×幅 0.5m ×高さ 0.75m ，B水槽：長さ 30.0m ×幅 0.8m ×高さ 1.2m ）である．CADMAS-SURFにおけるパラメータ調整のため，A水槽ではa護岸を，B水槽ではb護岸を対象にそれぞれ規則波実験を実施した．また，本研究で開発する反射率の評価システムの検証用データとして，b護岸を対象に不規則波による消波ブロックの被災実験も併せて行った．

1 正会員	工修	三省水工(株)九州支店設計課
2 正会員	工博	鳥取大学教授工学研究科社会基盤工学専攻
3 学生会員		鳥取大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻
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
5 正会員	博(工)	鳥取大学准教授総合メディア基盤センター

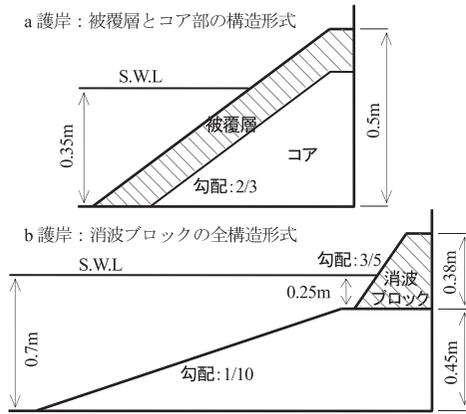


図-1 模型護岸の断面形状

規則波実験における実験条件については、水深0.35mと一定とし、入射波高には被覆層の碎石の重量からハドソン式とVan der Meerの設計公式（被災率 $s=2$ の場合）により算定した安定限界波高を設定し、周期には1sから2sまで0.2s間隔で変化させた6種類を採用した。なお、安定限界波高の算定に際して、被覆層の透水性パラメータ P 、高波浪時の波の数 N には、便宜的に $P=0.4$ 、 $N=2000$ （合田，1990）を採用した。一方、b護岸を対象とした不規則波実験では、沖側水平床部水深を0.7mおよび堤体前面部水深を0.25mと一定とし、波浪スペクトルにはJONSWAP型を適用し、ピーク周期には1.18s、1.71s、2.25sの3種類、有義波高には対象の消波ブロックの重量とハドソン公式より算定した安定限界波高とそれより5割増しの波高の2種類を採用した。

(2) CADMAS-SURFのパラメータ調整

計算格子間隔は、A水槽およびB水槽共に、水平方向に関して造波板から護岸法先までを2cm間隔、護岸法先から護岸部分までを1cm間隔、鉛直方向に関して1cm間隔に設定している。なお、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。

ポーラスセルの設定には、被覆層とコアからなる堤体の場合、①流体と被覆層が混在する場合、②流体と被覆層およびコアが混在する場合、③流体とコアの場合、以上の3パターンがある。特に、②のポーラスセルにおける空隙率は、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。その際、被覆層とコアの空隙率は模型実験と同じ値を適用した。差分スキームにはDONORスキームを用い、スキームパラメータは予備計算より0.5に設定した。なお、CADMAS-SURFに用意されている乱流モデルは適用していない。

被覆層とコアの抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M の値は、従来の研究事例（財団法人沿岸開発研究センター，2001）を参照に、水槽中央部の水平床における水位変動に関す

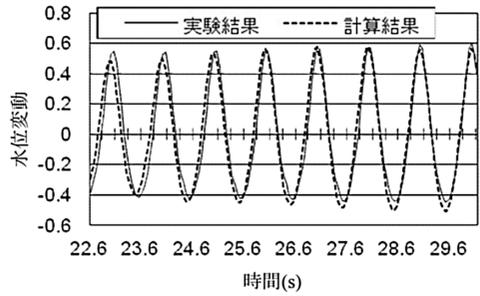


図-2 水位変動に関する実験結果と計算結果の比較

表-1 予備計算で用いた C_D と C_M の値

ケース	被覆層		コア	
	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

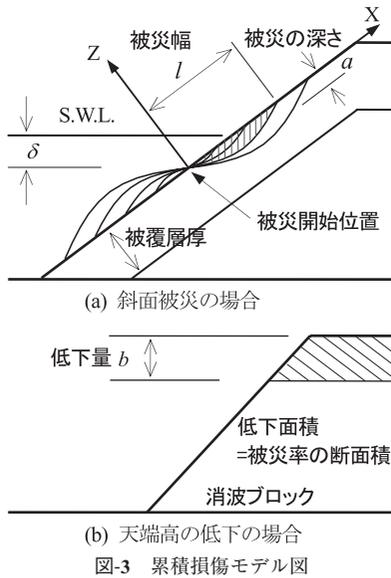
る計測結果と、表-1に示す5種類の予備計算結果の比較により設定した。図-2は、a護岸を対象に水槽中央部の水平床における水位変動（入射波高で無次元化した値）に関して、計測結果と計算結果が比較的良好に一致した結果の一例を示したもので、この場合の C_D と C_M の値はCASE1である。なお、周期は1.0sである。また、b護岸の場合についても、a護岸と同様にCASE1の C_D と C_M の値を適用することにより計測結果を再現できた。以上の予備計算から、本研究では被覆層および消波ブロックの C_D に0.9、 C_M に1.5、またコアの C_D に1.5、 C_M に2.0を設定した。なお、ポーラスセルの内、先の②流体と被覆層およびコアが混在する場合の C_D と C_M については、セルに占める被覆層の割合とコアの割合に基づいてそれぞれの値を設定した。

3. 被覆層の累積損傷と反射率の関係

(1) 数値実験における被覆層の累積損傷モデル

消波ブロック被覆堤の被災形態は、久保田ら（2009）の被災事例調査によると、消波工天端付近での被災、消波工斜面での被災、および消波工天端と斜面の両方での被災の3パターンに分類できる。本研究では、護岸被覆層の累積損傷として、被覆層の斜面における被災進行と天端低下の2種類を対象に以下のようなモデル化を行った。

まず、斜面における被災進行に伴う断面変化モデルに関しては、太田ら（2006，2007，2009）の護岸被覆層の被災実験結果より、図-3（a）に示すように被災が始まる位置（図中、被災開始位置と表記）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ことにした。



$$Z = -a \sin \{ (\pi/l) \cdot X \} \dots\dots\dots (1)$$

$$a = \frac{s \cdot (d_{n50})^2 \pi}{2l} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 a は被災の深さ、 l は被災幅、 X 軸は被覆層斜面に沿った上向き方向、 Z 軸は被災開始位置を基点に被覆層斜面に対して垂直方向としている。被災の深さ a は、式(2)に示すように、 $X=0$ (被災開始位置)から $X=l$ までの正弦曲線の面積と、被災率 $s=(Ae/(d_{n50})^2)$ に対応した侵食面積 Ae を一致させることにより求めている。

次に、累積損傷における被災幅の増長モデルについては、 $s=1$ の時に l は被覆材3個分とし、その後の被災率の増加に伴って l は被覆材1個分ずつ堤体斜面に沿って天端方向へ延長させた。ただし、侵食断面が堤体天端面に達した場合、または堆積断面が堤体法先に達した場合は、被災幅 l を固定し、設定された被災率に対応するように被災の深さ a を増加させた。なお、静水面から被災開始位置までの距離 δ については、3種類($\delta/h=0.33, 0.14, 0.0$ 、 h :水深)に変化させて数値計算を行った。

一方、図-3(b)に示す天端高の低下モデルに関しては、消波ブロックの沈下のみを対象とし、天端の低下量 b については与えられた被災率 s に該当する侵食面積 Ae と天端高の低下面積(図-3(b)の斜線部)が等しくなるように設定した。

(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実験では、波浪条件として規則波を対象とし、周期には1sから2sまで0.2s間隔で変化させた6種類を使用した。各周期における波高は、対象被覆材毎に算定した安定限界波高

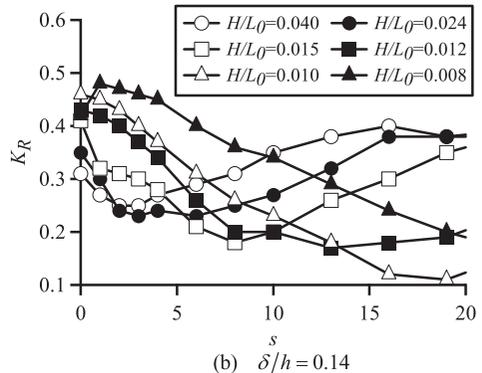
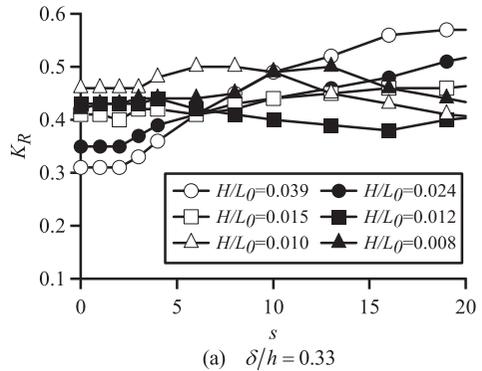
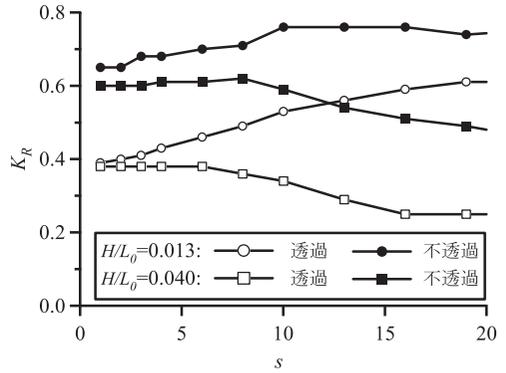


図-5 被覆層斜面の累積損傷と反射率の関係

を採用した。なお、反射率の解析に当たっては、造波した波が護岸で反射し、また戻った波が再度造波板で反射した波が計測位置に到達するまでの時間を対象に、水位変動の時系列データから入反射分離法を用いて行った。

まず本研究では、a護岸を対象に、被覆層斜面の被災進行に伴う被覆層およびコアの透過層内における流体運動に伴うエネルギーロスと、複合断面効果(樫木ら、1985)について確認した。図-4は、 $\delta/h=0.3$ の場合について、同一被災断面における被覆層およびコアの両方を不透透と透過にした場合の反射率 K_R の被災率変化を示したものである。被災率の増加に伴う反射率の変化傾向は、

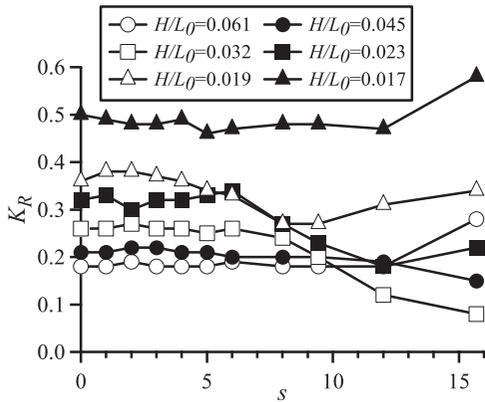


図-6 天端高の低下と反射率の関係

透過と不透過では波形勾配により大きく異なるが、各波形勾配における変化傾向は、透過の場合と不透過の場合で大差がない。この計算では、入射波として斜面上で碎波しない条件に設定していることから、透過と不透過の場合における反射率の差が被覆層とコアにおける流体運動に伴うエネルギーロスによるものと推察できる。また、波形勾配による反射率の変化傾向の違いは、図-3 (a) に示すように被覆層断面形状が被災進行に伴って複合断面へ変遷することから、反射波源が堆積域と侵食域の2つにあらわれ、波形勾配がそれらの反射波の位相差に影響を及ぼしたものと推察する。

図-5は、図-3 (a) に示すa護岸の斜面被災について、被災開始位置の違いにおける反射率と被災率の関係を示した一例である。図-5 (a) の被災開始位置が深い場合、反射率は被覆層の被災進行に伴って増加傾向にある。一方、図-5 (b) の被災開始位置が浅い場合、波形勾配によっては減少傾向、または減少後増加する不規則な変化傾向を示す。特に被災開始位置が浅い場合、被災進行に伴って侵食域の後退と堆積域の前面へのせり出しが重複することから斜面での水深が見かけ上浅くなる。その結果、碎波形式の変化と複合断面における反射波源の位相差、さらには被覆層の層厚の増減に伴う堤体透過層内におけるエネルギーロス等が影響し、反射率に対して波形勾配による変化があらわれたものと推測される。

図-6は、図-3 (b) に示すb護岸の天端低下を対象に、反射率と被災率の関係を示したものである。被災率6以下の場合、反射率には被災率による変化が認められないが、被災率6以上では、被災率の増大に伴って波形勾配毎に反射率が異なった変化を示す。そのため、被災率6以上について堤体上の水位変動を可視化して検討した結果、消波ブロック斜面上での碎波、非碎波に伴う遡上波の堤体背後直立壁での反射現象に対して波形勾配が影響していることがわかった。しかし、本研究ではその現象

表-2 計算ケース

(a) 斜面被災の場合

変数	ケース数 (条件)
被災位置 δ/h	3 (0.33, 0.14, 0.0)
被災率 s	11 (0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 13, 16, 19)
被覆層空隙率	1 (0.387)

(b) 天端高の低下の場合

変数	ケース数 (条件)
被災率 s	11 (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 12, 15)
ブロック空隙率	1 (0.5)

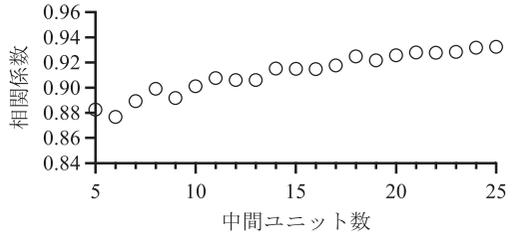


図-7 中間ユニット数と相関係数

が波形勾配によって区別化されるまでに至っていない。

以上のように、被覆層斜面における被災進行および消波ブロック堤の天端高の低下に伴う各反射率と被災率の間には明確な対応関係が認められず、被災率という観点から護岸被覆工の被災進行に伴う消波性能の劣化について直接的に評価することは難しいことがわかる。

4. 反射率の予測モデル

ここでは、ニューラルネットワークを用いて護岸前面の被覆層における被災進行に伴う反射率の変化予測に関する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 (被災率, 被災幅, 被災開始位置, 天端高の低下量), 護岸の堤体諸元 (法先水深, 被覆層の天端高, 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、被災現場で計測可能なパラメータを採用した。

ユニットの応答関数には、間瀬ら (1994, 1995) および齊藤ら (2008) の研究を参照に、中間層および出力層に対して値域が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、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法を採用した。また、ニューラルネットワークの調整用の教師データには、図-3に示し

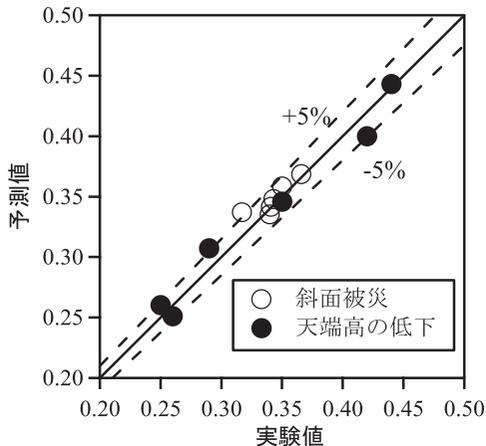


図-8 反射率に関する予測値と実験値の比較

た2種類の被災形式に対して、表-2に示す計算ケースより算定した反射率を用いた。なお、周期は1sから2sまで0.2s間隔で6種類変化させ、計算ケースは総数264である。

図-7は、中間層のユニット数を5から25まで変化させたときの相関係数を示したものである。相関係数についてはユニット数の増加に伴って高くなり、ユニット数24と25で同程度の値に達することから、ここでは中間ユニット数を24に固定した。なお、本研究で用いたニューラルネットワークのソフトウェアは、MATLABのNeural Network Toolboxである。

図-8は、上記のニューラルネットワークの妥当性を検証するため、太田ら(2006, 2007)による傾斜堤体被覆層の斜面被災変形に伴う反射率変化に関する不規則波実験で得られた反射率、並びに本研究で実施した不規則波による消波ブロック被覆護岸の天端高の低下時の反射率と、それらに対する予測値を比較したものである。図-9に示すように太田らの堤体模型は、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。ただし、太田らの実験における被覆層の勾配と層厚、被覆材の粒径、並びにコア材の粒径は、本研究で教師データとして用いた数値計算の条件と全て同じである。図-8より、本研究で構築された護岸被覆層における累積損傷に伴う反射率の評価システムは、実験値をほぼ±5%以内の誤差で予測できることがわかる。なお、斜面被災の結果については堤体の構造形式から外挿的予測になり、本研究において数値計算の対象とした構造形式の堤体に関する検証実験および評価システムの予測精度の向上も含めて、今後さらに検討する予定である。

5. あとがき

本研究では、被覆護岸の被災損傷に伴う補修・更新に関する意志決定問題を対象に、まず被覆工の累積損傷に

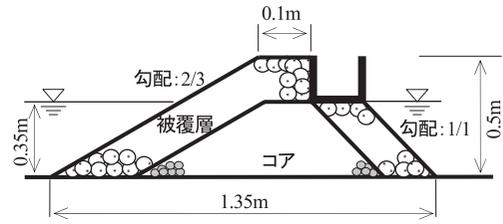


図-9 太田ら(2006)の実験における堤体

伴う反射率の変化特性を数値波動水路により検討した。その結果、累積被災断面における反射率がそのときの被災率のみで評価できないことがわかった。次に、被覆工の被災進行として被覆層斜面における被災と天端高の低下を対象に、被覆材の被災個数や被災領域、天端高の低下量、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。今後は、被覆層の斜面被災と天端高の低下の両方の被災パターンも含めて検討を進める必要がある。

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

- 太田隆夫・松見吉晴・木村 晃(2006): 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, 第53巻(2), pp. 711-715.
- 太田隆夫・松見吉晴・木村 晃(2007): 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, 第54巻(2), pp. 746-750.
- 太田隆夫・松見吉晴・平山隆幸・木村 晃(2009): 傾斜堤および傾斜護岸における断面変形のモデル化と性能評価, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 175-180.
- 久保田真一・山本方人・松本 朗・半沢 稔(2009): 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.
- 合田良實(1975): 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.
- 財団法人沿岸開発研究センター(2001): 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.
- 齊藤武久・砂原啓人・市川督人・福本 正・間瀬 肇・石田啓(2008): 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(2), pp. 971-975.
- 榎木 亨・柳 青魯・楠見正人(1985): 複合断面捨石堤の低反射効果について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 495-499.
- 多々納裕一・高木朗義編(2005): 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.
- 間瀬 肇(1994): 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, 第41巻(2), pp. 761-765.
- 間瀬 肇・酒井哲郎(1995): 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, 第42巻(2), pp. 891-895.