もたれ式護岸の安定性に関する一検討

A STUDY ON THE STABILITY OF THE NEW LEANING TYPE RETAINING WALL

松永康司[1]・野村直道[2]・鬼童孝[3]・水谷享二[4]・荒木達也[5]・西井康浩[6]
Yasushi MATSUNAGA, Naomichi NOMURA, Takashi KIDOU, Kyoji MIZUTANI
Tatsuya ARAKI, and Yasuhiro NISHII

[1]正会員　工修　国土交通省　中国地方整備局　広島港湾空港技術調査事務所
（〒730-0029広島市中区三川町2-10）
[2]国土交通省　中国地方整備局　広島港湾空港技術調査事務所（〒730-0029広島市中区三川町2-10）
[3]国土交通省　中国地方整備局　広島港湾空港技術調査事務所（〒730-0029広島市中区三川町2-10）
[4]正会員　国土交通省　中国地方整備局　広島港湾空港技術調査事務所
（〒730-0029広島市中区三川町2-10）
[5]国土交通省　中国地方整備局　広島港湾空港技術調査事務所（〒730-0029広島市中区三川町2-10）
[6]正会員　株式会社三洋コンサルタント　技術部（〒750-0067 山口県下関市大和町1-5-7）

In order to confirm the effects on stability of structure and external force acting on the leaning type retaining wall, this sensitivity analysis is conducted. As a result of the analysis, a backwash, which is traditionally not considered as an active element, actually has a considerable impact on the leaning type retaining wall. Therefore, we have been measuring the wave forces and we also have found out the mechanism of destruction acting on the new type retaining wall by the hydraulic model experiments. This new type retaining wall will bring better results on Hiroshima harbor development plan.

Key Words : *Backwash, wave forces, hydraulic model experiments, revetment, sensitivity analysis, the mechanism of destruction*

1．はじめに

広島港海岸は，南方向に開口部を持ち，また地盤高も低いことから，度々台風による被害を受けており，最近では，平成 3 年，11 年，16 年，に大規模な高潮被害を受けている．

広島港海岸の多くはもたれ式護岸で整備されており，平成 16 年の台風 18 号ではパラペット部の倒壊や護岸の変位などの大きな被害を受けた．

このような状況を踏まえ，もたれ式護岸の改良や，今後の護岸整備を行うにあたって，もたれ式護岸の破壊メカニズムを把握する必要があったため，感度分析及び水理模型実験を行った．まず，護岸に作用する主要な外力及びその影響の程度を確認するため感度分析を実施した．しかし，実際の外力の作用状況が不明であったためその評価を行うまでには至らなかった．そこで，水理模型実験を行うことによって実際の外力の作用状況を把握し，感度分析結果の整合性の評価，及び破壊メカニズムについて検討した．

本報告は，これらの検討結果の概要について述べるとともに，もたれ式護岸の安定性に大きく影響していると考えられる要因について整理を行ったものである．

写真-1 被災状況

2．感度分析

(1) モデル断面

図-1 に感度分析で用いたモデル断面及び設計条件を示す．これは，広島県が作成した「広島港高潮対策基本計画検討調査」より算定された所要天端高，及び同県で用いられている港湾設計マニュアルを参考に決定した．

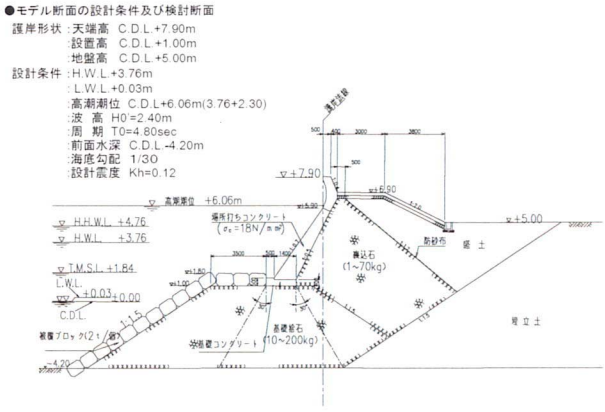


図-1 モデル断面（もたれ式護岸）

もたれ式護岸は，背後の地盤高まで土砂を盛って堤体とし，その表面を被覆したものであり，単位体積当たりの載荷重が小さく，基礎地盤が軟弱である場合に適用される．したがって，多量の盛土用の土砂の確保が可能で，護岸用地が容易に得られる場所に適している．

(2) 検討条件

図-2 に安定計算に用いる作用荷重一覧を示す．従来設計手法は，常時及び地震時における護岸の安定性を考慮しており，引き波時における護岸の安定性の検討は通常行っていない．広島港で発生した高波浪時の護岸被災状況を踏まえると，引き波が堤体に影響を与えていると推測された．そのため，引き波時において波高を変化させた場合，及び護岸の安定性に大きな影響を与える残留水位を変化させた場合について感度分析を行った．

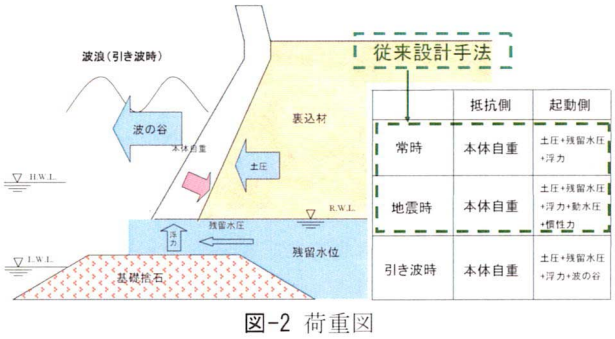


図-2 荷重図

引き波については，**図-3** に示す通り，静水面で 0，静水面下 $0.5H_D$ で P_n，以下底面まで一様な直線分布の波圧が作用するものとして算出した．P_n については，以下の通りである．

$$p_n = 0.5\rho_0 g H_D \quad (1)$$

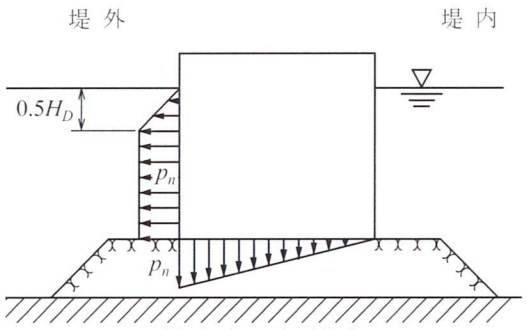


図-3 負の波圧分布

(3) 感度分析結果

図-4 に残留水位の感度分析結果を示す．残留水位の検討では，常時及び地震時において，潮位をそれぞれ H.W.L，L.W.L と設定し，残留水位を上昇させた時の安全率の変化について整理したものである．

残留水位の上昇は，すべての検討ケースにおいて感度が大きく，安全率が低下することからもたれ式護岸の安定に大きな影響を与えていることがわかる．

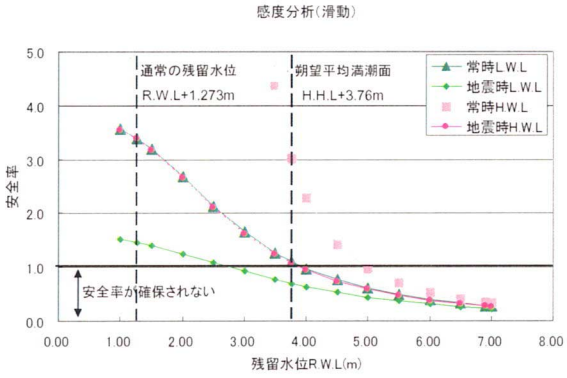


図-4 残留水位の感度分析結果

図-5 に波高の感度分析結果を示す．波高の検討については，潮位を H.W.L，L.W.L，高潮時と設定し，H.W.L 及び高潮時の残留水位については同水位，L.W.L については潮位差の 1/3 として，もたれ式護岸に引き波が作用した場合の安全率の変化について整理したものである．

引き波がもたれ式護岸に与える影響は，潮位が高いほど波高に対する感度が上がり，波高の増大に伴い安全率が減少する傾向が強くなることから，残留水位と同様にもたれ式護岸の安定に大きな影響を与えていることが分かる．しかし，ある程度まで波高が大きくなると感度が鈍くなり，安全率は変わらなくなる．

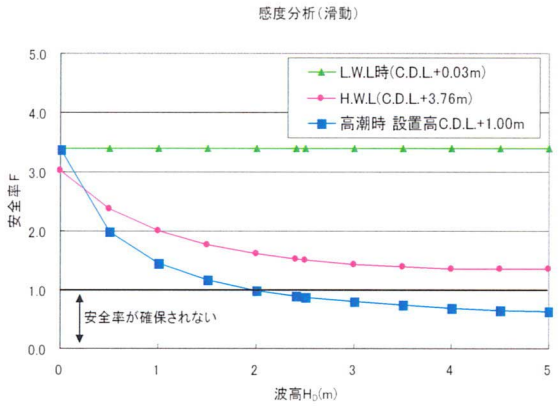


図-5 波高の感度分析結果

以上のことを踏まえ，従来設計手法による場合と，引き波を考慮した場合について安定計算の比較を行った．従来の設計手法では，地震時の潮位 H.W.L で断面が決定した．一方で，引き波を考慮した場合には，高潮時に安全率がさらに低下し，もたれ式護岸の安定は確保できないことが分かった．

表-1 安定計算の比較

内　容	従来設計手法	引き波を考慮した場合
設計条件	地震時（H.W.L）	引き波（高潮時 C.D.L.+6.06m）
滑　動	1.069 ≧ 1.00	0.893 ＜ 1.20
転　倒	2.435 ≧ 1.10	1.698 ≧ 1.20
支持力	1.842 ≧ 1.00	1.820 ≧ 1.00

3．水理模型実験

(1) 実験概要

本実験は 2 次元水路（長さ 41.0m，幅 0.8m，高さ 1.25～0.95m）において波力検証実験及び被災状況再現実験を行った．**表-2** に実験条件を示す．

波力検証実験において，対象としたもたれ式護岸は傾斜堤であるため，**図-6** に示すように波圧計に作用した力は水平・鉛直に成分分解して評価した．

表-2 波浪条件

検証内容	潮　位(m)	周期T(s)	波高H(m)	ケース数
波力検証実験（規則波）	H.W.L +3.76	4.8	1.5	1
			2.0	1
			2.5	1
			3.1	1
	H.H.W.L +4.76		1.5	1
			2.0	1
			2.5	1
			3.2	1
	高潮時 +6.06		1.5	1
			2.0	1
			2.5	1
			3.3	1
被災状況再現実験（不規則波）	高潮時 +6.06	T_0=4.8	H_0'=2.4	1

※ ■ は，水路内限界波高

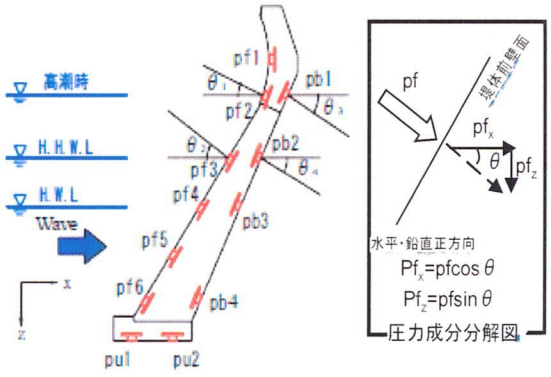


図-6 各波圧測定点

実験縮尺は，長さ縮尺λ=1/20 のフルード相似則を用いた．**表-3** に物理量と実験縮尺を示す．

堤体に使用する捨石については，基礎捨石は 1.25～25.00g，裏込石は 0.13～8.75g を用いた．石材は，積み込みながら最終断面形成時に厚板版で全体を 10～25 回程度打ちながら成形した．盛り土部に関しては，湿潤状態にして少しずつ盛りながら，空隙が生じないように詰め固めを行い，最終的に厚平版で打ち込み締め固めながら成形した．

表-3 物理量と実験縮尺

名　称	例	縮尺	模型	現地
模型寸法	l_r	1/20	100 cm	20.0 m
波高波長	$H_r=l_r$	1/20	25 cm	5.0 m
周期	$T_r=l_r^{1/2}$	1/4.472	1.07 s	4.8 s
質量	$M_r=l_r^3$	1/8,000	125 g	1,000 kg
力	$W_r=l_r^3$	1/8,000	1.23 N	9.8 kN
圧力強度	$P=l_r$	1/20	0.049 N/cm²	9.8 kN/m²

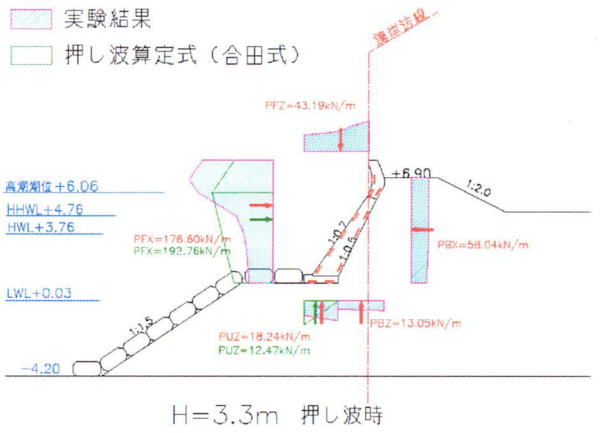
(2) 波力検証実験結果

図-7 に波浪条件のうち最も厳しい高潮時+6.06m，波高 H=3.3m の場合の実験結果と押し波の算定式（合田式）及び引き波の算定式より求めた波圧分布の比較を示す．

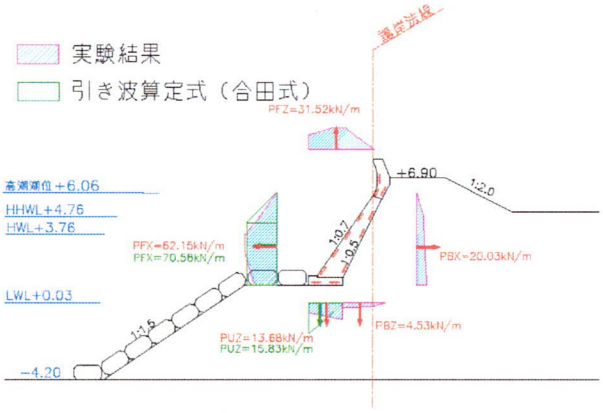
押し波（合田式）については，護岸が傾斜していることから，実験による水平方向の全波力は算定した波圧の 6 割程度であったが，静水面より上方については，算定した波圧以上の波力を受けることが分かった．

このように，静水面より上方においては衝撃砕波力が作用していることが分かり，このことは被災状況において見られたパラペット部分が欠落していた要因の一つであると考えられる．

引き波についても，実験による水平方向の全波力は算定式より求めた波圧分布の 7 割程度であったが，実験による鉛直方向の波力は堤体重量を軽くする方向に作用するため，感度分析結果と同程度の安全率になった．**図-8** に示す様に，感度分析と波力検証実験の安全率はほぼ同じであることから感度分析は妥当であったと言える．



H=3.3m　押し波時



H=3.3m　引き波時

図-7 波圧分布の比較

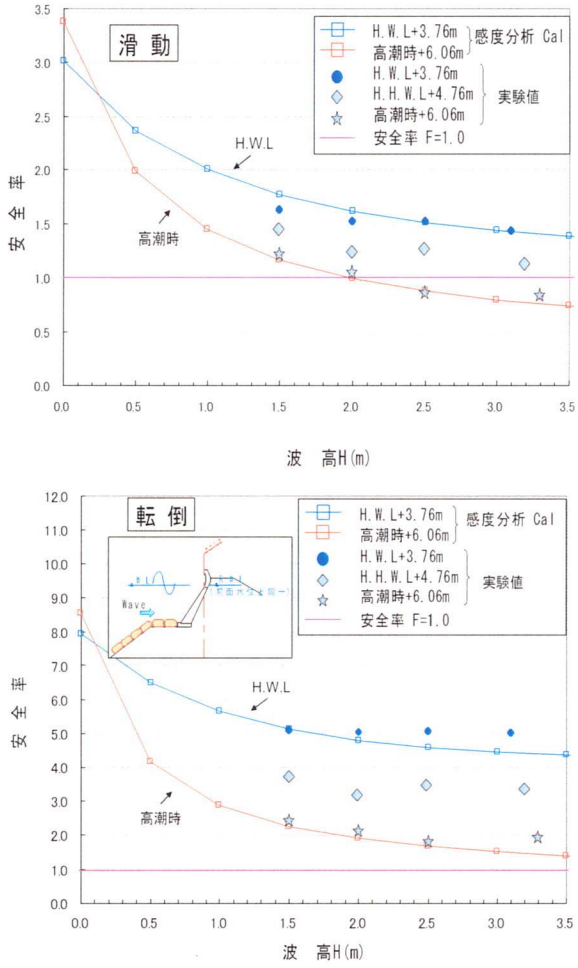


図-8 感度分析と実験結果の比較

(3) 被災状況再現実験結果

被災状況再現実験では，図-9 に示す通り最終的に堤体天端背後端が水平方向（陸側）に 30mm（実際のスケールに戻すと 60cm），鉛直方向に 38mm（実際のスケールに戻すと 76cm）変位し，15° 傾斜した．

実験での被災状況については，堤体の初期挙動により微少ながら滑動（水平変位）を生じ，さらに，押し波時に岸側へ押す波力に対して，堤体は背後土の弾性エネルギーにより沖側へ押し戻される．このとき同時に作用する引き波より沖側へと微動変位する．この動きは，あたかも波と同調するように微少な前後動を繰り返し生ずる．やがて，この動きの繰り返しにより背後地の裏込石が緩み，吸い出しを伴い，堤体が沖側に微動した隙間に崩落した．この結果，背後土の天端部が欠損することになる．

最終的に被災に至る過程は，この状況を繰り返すことにより，裏込石にもたれ，支えられていた「もたれ式護岸」堤体は自立できず，その後，大きな波浪を受けることで重心位置周辺を中心に基礎工沖側底面の端点が持ち上がるように転倒するように被災した．図-10 に被災に至る経過を示す．

ただし，実験における裏込石の弾性定数は現地より大きくなるため，現地の初期動揺が 1 回の台風のみで発生したとは考えにくい．つまり，経年の波作用の繰り返しにより微少ではあるが，同様の変位やメカニズムが働き，また蓄積されることにより，その後の高波浪により実験で見られた被災状況に至ったものと推察される．

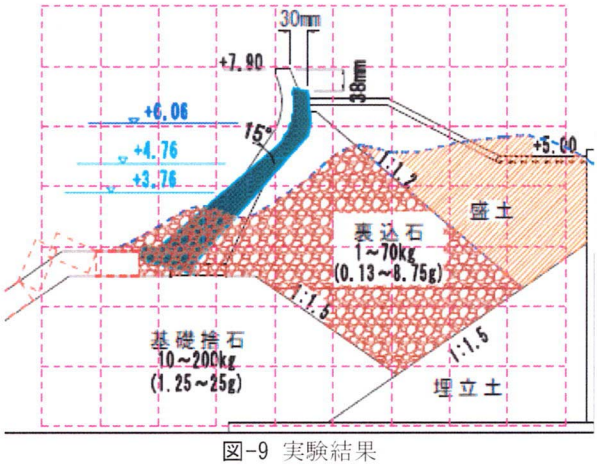


図-9 実験結果

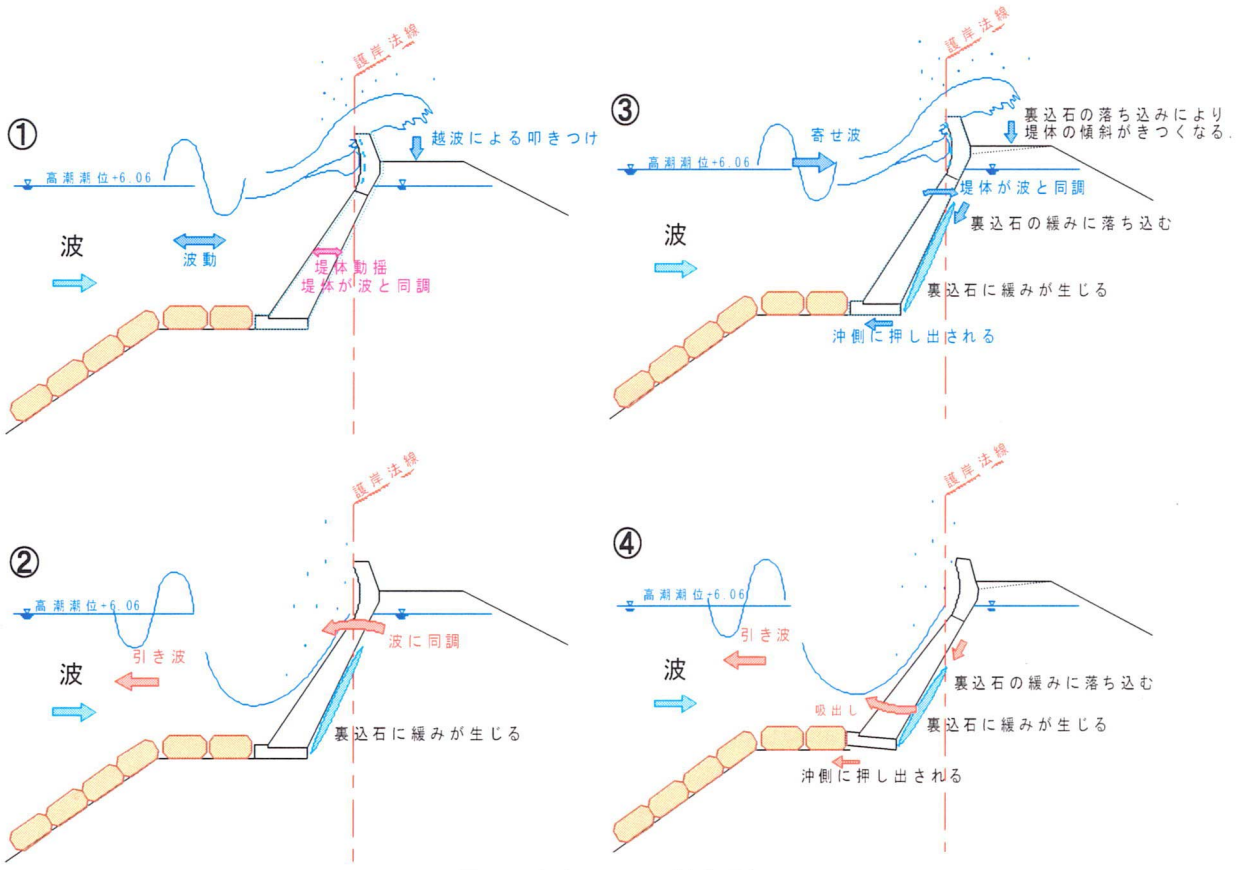


図-10 実験における被災過程

4．まとめ

本調査の結果，広島港におけるもたれ式護岸において，残留水位及び引き波の影響が護岸の安定に大きく関わっていることがわかった．引き波については，潮位及び波高が高いほどもたれ式護岸に与える影響が大きくなることが水理模型実験からも確認され，今後高潮による被害が想定される場合，引き波についての検討が重要になると考えられる．また，残留水位については，感度分析結果より重大なパラメーターであることが分かったが，水理模型実験による検証を行っていないため，今後検討を行う必要がある．

もたれ式護岸の破壊については，経年的に押し波及び引き波が繰り返し作用することで，背後地盤に生じる緩みが引き金となって起こると推察された．今後は，経年的な堤体の安定性についてどのように評価し，今後の設計に取り入れるかという点が課題として挙げられる．

参考文献

1) 高山知司，永井紀彦，西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，Vol.21, No.2, 1982.
2) 高橋重雄，下迫健一郎，佐々木均：直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法，港湾技術研究所報告，Vol.30, No.4, pp.3-34, 1991.
3) 合田良實，福森利夫：直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol.11, No.2, pp.3-35, 1972.
4) 谷本勝利，木村克俊，宮崎啓司：大水深混成堤の耐波安定性に関する研究（第 1 報），港湾技術研究所報告，Vol.27, No.1, pp.3-29, 1988.
5) 谷本勝利，滑川伸孝，石丸敬純，関本恒浩：半円形ケーソン堤の水理特性に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，Vol.28, No.2, pp.3-32, 1989.
6) 高橋重雄，下迫健一郎，佐々木均，谷本勝利：高波浪海域における直立消波ケーソンの耐波設計法，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.706-710, 1992.
7) 高橋重雄，大木泰憲，下迫健一郎，諫山貞雄，石貫国朗：台風 9918 号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験，港湾技術資料，No.973, pp.1-50, 2000.
8) 高橋重雄，谷本勝利，下迫健一郎，細山田得三：混成防波堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.676-680, 1992.
9) 高橋重雄，下迫健一郎，上部達生，谷本勝利：衝撃砕波圧に対する混成防波堤の動的応答計算，海岸工学論文集，第 40 巻，pp.766-770, 1993.