

防波護岸上に設置された防波柵による越波および波力の低減効果に関する研究

Reduction of Wave Overtopping and Wave Force by a Porous Barrier Mounted on a Vertical Seawall

榎田真也¹・斎藤武久²・古路裕子³・中口彰人⁴・石田 啓⁵

Shinya UMEDA, Takehisa SAITOH, Hiroko FURUMICHI, Akito NAKAGUCHI and Hajime ISHIDA

The reduction of wave overtopping and wave force by a porous wave barrier was investigated to clarify hydraulic performance of such a coastal structure. Two-dimensional model tests for a wave barrier mounted on a seawall were carried out to examine variations in regime of wave overtopping, mean overtopping rate and maximum wave force acting on the barrier with changing barrier parameter and incident wave intensity. The test results show that the porous wave barrier can reduce the overtopping rate and wave force in different overtopping regimes effectively. These reduction effects of the barrier are mainly governed by the porosity of barrier and several wave parameters. Their reduction ratios between the presence and absence of the barrier are influenced by variations in the wave run-up height induced by barrier installation.

1. はじめに

荒天時における海岸護岸の越波対策は、護岸の高上げや消波工の新設・増設等が一般的に行われている。しかし、地形、海岸施設の構造や地域の海岸利用状況等によっては、これらの対策が必ずしも効果的でなく、適用困難な場合も多い。特に、背後域に道路、公共施設や人家などが密集する場合、越波低減機能を高めるために既存護岸へコンパクトに併設できる対策方法が必要になる(例えば、山本ら, 2008; 川崎・笹田, 2009)。

防波柵は多数の孔が開いた金属板でできた透過性構造物で、主に護岸上に設置して、越波や飛沫拡散を低減するために利用されている。防波柵の耐波設計に関する研究は、道路護岸上の防波柵の被災事例の調査や再現実験等によって、波の打上げ高さ、飛沫の運動及び構造物の波圧分布と被災状況との関係等の多面的な研究成果が蓄積されている(例えば、木村ら, 2001, 2006)。著者らも重複的な越波を対象に防波柵の作用波力と越波流量の低減比の関係について基礎的な検討を行ったが(榎田ら, 2012)、護岸が砕波帯内にある場合の詳細な波力特性や越波低減効果については未解明な点が多い。

そこで本研究では、直立護岸上に設置された防波柵の越波流量の低減効果や作用波力の基本的な変動特性を明らかにすることを目的として、護岸や柵の構造的条件や波浪条件を変化させた水理模型実験を行い、越波の形式、波力の時系列及び越波流量の低減比率について考察した。

2. 実験方法及び条件

直立護岸・防波柵の模型及び勾配1/20の海底地形を断面二次元造波水槽(22m長×1m幅×1.6m深)に図-1のように設置して実験を行った。防波柵の模型は直径4.0mmの円形の孔が一様に多数開いた金属板と支柱から構成される。波が護岸の天端高を超える場合を対象に、護岸上の柵に作用する波力、柵の孔を通過して背後域に運ばれる時間平均の水量(以下では越波流量と呼ぶ)及び波高等を計測した。計測方法の詳細は榎田ら(2012)と同様である。防波柵の有無や透過性の効果を明らかにするため、波浪・護岸の条件が同じ設定で、透過性の異なる3種類の防波柵(遮蔽率 $\sigma=50, 60, 70\%$)、不透過壁($\sigma=100\%$)、及び護岸上に構造物が無い場合($\sigma=0\%$)の越波流量や作用波力を比較した。なお、柵の遮蔽率 σ は面材部分の不透過な面積の割合で定義した。

波浪・護岸条件の範囲は相対水深 $h/H_0'=0.5\sim 4.0$ 、波形勾配 $H_0'/L_0=0.012\sim 0.036$ 、護岸の相対天端高 $h_c/H_0'=0.5\sim 1.5$ とした。ここで h は護岸根元の水深、 H_0' は換算沖波高、 L_0 は沖波波長、 h_c は護岸の天端高である。図-1に示したW1とW2地点の波高計測結果から求めた入射波高は $H=6.0\sim 15.8\text{cm}$ 、波の周期は $T=1.1\sim 2.8\text{s}$ 、護岸根元水深は $h=4\sim 30\text{cm}$ 、天端高は $h_c=4.5\sim 20.5\text{cm}$ である。なお、仮に護岸が無く、1/20一様勾配斜面のみの場合には、崩れ波砕波が発生する条件に本実験条件は概ね入る。砕波・越波の形式及び水面・波力時系列の基本的な変動特性を把握するために規則波を、ピーク波力、越波流量及び防波柵の低減効果を評価するために不規則波(修正 Bretschneider・光易型)を用いて実験した結果に基づいて考察を行った。

1 正会員 博(工) 金沢大学准教授環境デザイン学系
2 正会員 博(工) 金沢大学教授環境デザイン学系
3 (株)日本パーツセンター設計部部長
4 (株)日本パーツセンター設計部課長代理
5 フェロー 工博 金沢大学名誉教授

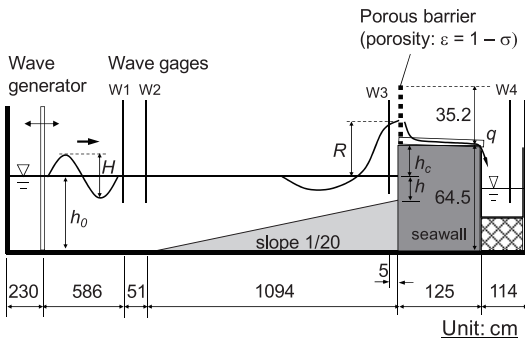


図-1 実験模型の設定と計測機器の配置

3. 防波柵による波力・越波の低減効果と越波形式に関する実験結果及び考察

(1) 来襲波の浅水・碎波変形と越波形式

護岸・防波柵に作用する波力や越波量及び柵によるこれらの低減効果は、前浜での浅水・碎波変形の状況によって変化する越波形式の違いによる影響を受けると考えられるので、まず、本研究で確認できた代表的な越波形式を図-2に示す。越波形式は大きく3つに分けられる。

相対水深が比較的大きい ($h/H_0' \approx 4.0$ や 2.0) 場合には、入射波は非碎波状態で護岸に到達して、護岸前面を腹とする重複波が形成される。相対水深が同一でも波形勾配の違いによって護岸付近の水面形が多少異なる。波形勾配が大きい ($H_0'/L_0 = 0.036$) と上に凸の滑らかな水面形(図-2 (I-a) 右側)で越波するが、波形勾配が小さい ($H_0'/L_0 = 0.012$) と護岸に近づくにつれて水面が急上昇して、下に凸の水面形(図-2 (I-b) 右側)で越波する。この場合、護岸前面での波の打ち上がりが顕著で、水面が不安定になり多少乱れるものの碎波はしない。

相対水深が中程度 ($h/H_0' \approx 1.0$) の場合には、来襲波は護岸近傍で波峰先端部が切り立ち(図-2 (II) 左側)、前のめりになると同時に護岸に衝突して、碎波する。その際は衝撃的に水しぶきが高く上がると伴って越波が生じる。さらに相対水深が小さく ($h/H_0' = 0.5$) になると、前浜で碎波し、水面が激しく乱れた状態で護岸に衝突して、激しく水しぶきを上げながら越波する。波先端部が前のめりになる地点(以下碎波点と呼ぶ)が護岸付近にあると、水しぶきが上方高く跳ね上がり(図-2 (III-a) 左側)、前述の越波形式 (II) と似る。碎波点が護岸から離れていると、碎波時に気泡を多量に含んだ波が打ち寄せて、護岸に乗り上げる(図-2 (III-b) 左側)。以上の越波形式の発生条件は表-1に示すように概ね相対水深及び波形勾配に依存し、相対天端高や柵の遮蔽率の影響は本実験条件の範囲ではあまり明確でなかった。

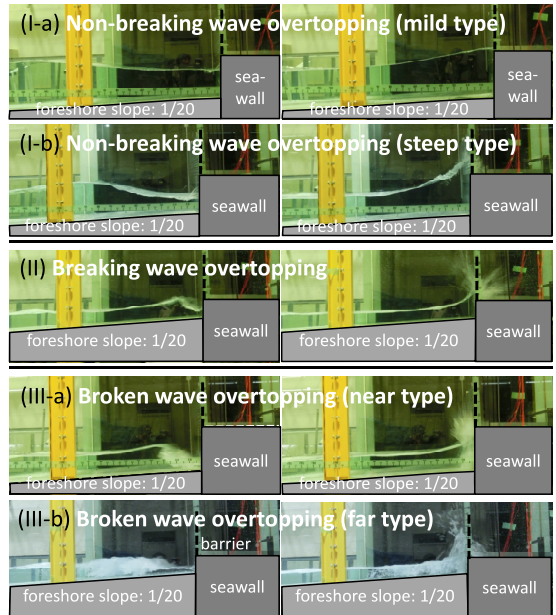


図-2 代表的な越波形式 (左側：護岸到達前、右側：到達時)

表-1 越波形式と波浪条件 ($1/20$ 勾配, $h_c/H_0' \approx 0.5-2.0$)

h/H_0'	H_0'/L_0		
	0.012	0.024	0.036
0.5	III-b	III-b	III-b or III-a
1	II	II	II or III-a
2	I-b	I-a	I-a
4	I-a	I-a	I-a

(2) 作用波力の時間変化とピーク波力の低減

柵に働く波力の変動特性や透過性に伴う波力低減効果と越波形式との関係を把握するため、図-3に各越波形式における護岸・柵前面(図-1のW3地点)の水面変動及び護岸上の柵に働く波力の時間変化を示す。横軸は時間 t を波の周期 T で基準化した値で、左側の縦軸は波力 F を、右側の縦軸は水面変動 η を表す。越波形式毎に水面と波力の時間変動パターンが大きく異なることが分かる。

非碎波状態で越波する形式 (I-a) の場合、典型的な重複波が形成される。反射率は不透過壁では0.75、透過性柵の場合は少し下がって0.70で、構造物前面のピーク水位が少し低下する。波峰・波谷位相ともに滑らかな水面を維持し、水面が護岸天端を超える時に、防波柵に波が作用し、波力が発生する。波力は発生初期に急増し、波峰ピーク時付近で変化は小さくなって、急激に減少する。図中には水面変動から静水圧を仮定して計算した全圧力 $F_{cal} (=1/2\rho g(\eta-h_c)^2)$ を点線で示しているが、測定波力と良く一致し、重複波的な越波による波力は構造物前面の水面変動から容易に推定できる。不透過壁に比べ

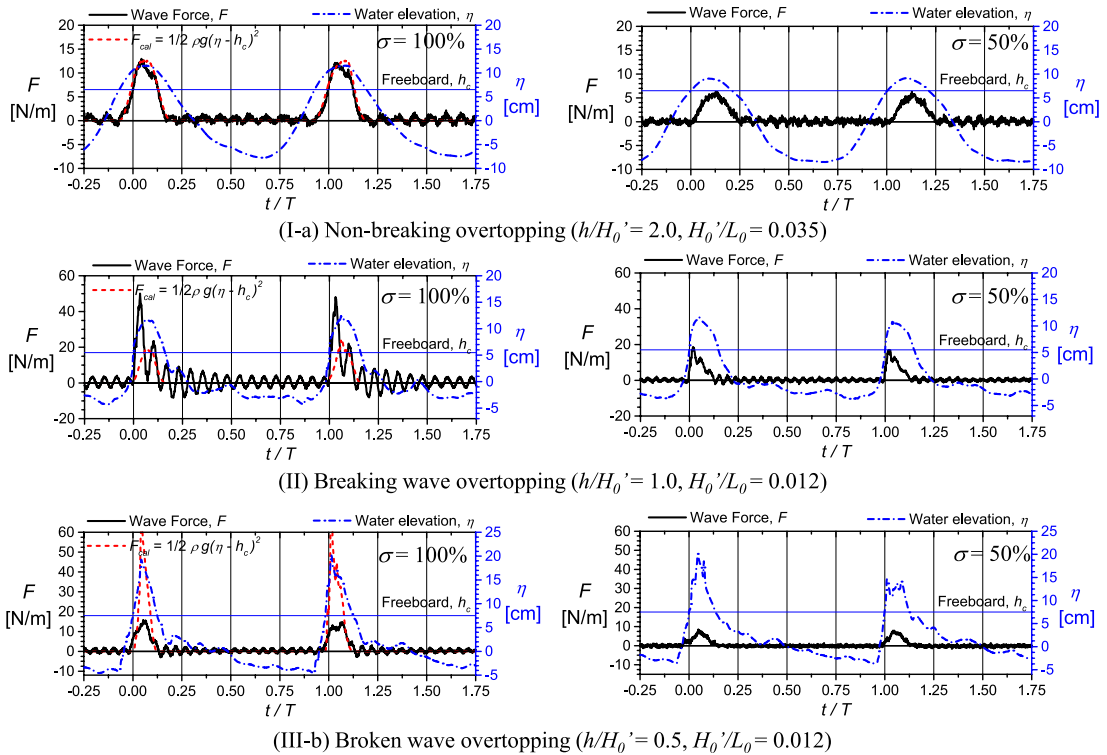


図-3 護岸・防波柵前面の水面変動と波力の時間変化 (左図：不透過壁，右図： $\sigma=50\%$ 柵， $h_c/H_0'=0.5$)

て $\sigma = 50\%$ の防波柵では、各周期のピーク水位は1割ほど低く、ピーク波力はほぼ半減する。

護岸直前で碎波する越波形式 (II) の場合、前傾した波先端部が不透過壁に勢いよく当たって間もなく大きな波力が衝撃的に発生する。各周期のピーク波力は静水圧近似して水面変動から求めた全圧力 F_{cal} の2倍以上あり、測定した波力は計算した全圧力とは変動波形がかなり異なる。波力の波形はピーク波力発生時間を基準に前後の非対称性が強く、ピークが比較的鋭い。 $\sigma = 50\%$ の防波柵の波力は不透過壁と同様に前後非対称な変動波形を示すものの、ピーク波力は不透過壁の波力の半分に満たない。

護岸から沖に離れた所で碎波した波による越波形式 (III-b) の場合、大量の気泡を含んだ波が構造物に衝突して、水面が激しく乱れるものの、水位の割に波力は意外に小さい。水面変動から計算した全圧力に比べて測定された波力はかなり小さいものの、波形は似ており、前述の越波形式 (II) のようなピークの鋭い波力は発生しない。 $\sigma = 50\%$ の防波柵の波力は不透過壁の波力に比べてピーク値は半分以下になる。

次に、同じ入射波条件において防波柵のピーク波力 F_{σ}^p と不透過壁のピーク波力 F_{100}^p を比較したものを図-4 に示す。防波柵の波力は不透過壁の波力の遮蔽率 σ 程度かそれ以下になる場合が多いことが分かる。防波柵は

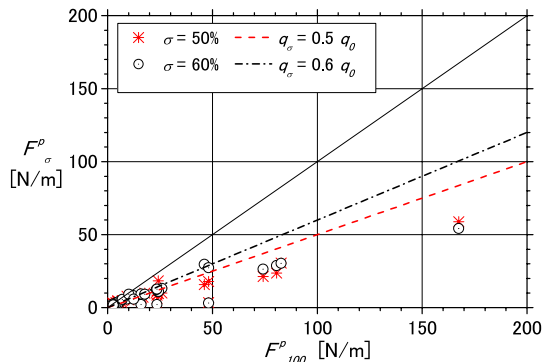


図-4 不透過壁と防波柵のピーク波力の比較

透過性によって水流を遮蔽する面積を減らすと共に、前述のように波の打ち上がり時の柵前面水位を下げる効果がある。越流時の柵前面水位の低下は越波形式が主に (I-a) や (III-b) の場合に確認されるが、(II) の場合はあまり無い。しかし、前述のように (II) の波力の低減効果はかなり高いことから、柵の孔が衝撃的な波力の発生を効果的に抑えているのではないかと推測される。

(3) 越波流量の低減比と波浪・護岸条件との関係

まず、豊富な研究成果が蓄積されている直立護岸のみの場合 ($\sigma = 0\%$) の越波流量について、本実験結果と従来研究の結果を比較するために、図-5に越波流量と相対

天端高の関係を示す。図に示すように越波流量及び天端高は護岸前面の有義波高 H_{toe} を用いて無次元化した値であり、 H_{toe} は合田 (1975) の碎波帯内の波高の略算式を用いて求めた。図中にはCLASHデータベースの実験値の上下限5%の範囲、EurOtop越波マニュアルの越波流量推定式及び合田 (2008) の推定式を示している。本実験で得られた越波流量はこれら従来研究の結果と同程度の値を示し、相対天端高の増加に従って無次元越波流量が減少する全体的な傾向が一致する。

越波流量に及ぼす相対水深の影響を把握するため、合田ら (1975) に従って換算沖波波高 H_0' を用いて無次元化した越波流量と相対水深の関係を図-6に示す。図中には合田ら (1975) によって提案された海底勾配1/10と1/30の直立護岸の越波流量推定図の結果を示しているが、 $\sigma=0\%$ の本実験結果は合田ら (1975) の結果と整合する。波形勾配と相対天端高が一定の場合には、無次元越波流量は相対水深 $h/H_0' = 2$ 付近で最大になり、それから離れるにつれて無次元越波流量は減少する。同様の傾向は $\sigma = 50, 60, 70\%$ の防波柵を設置した直立護岸の場合にも見られる。

次に、越波流量の低減効果に及ぼす防波柵の遮蔽率の影響を検討するため、図-7に遮蔽率 σ の柵の越波流量 q_σ と同じ波浪・護岸条件の直立護岸のみの場合の越波流量 q_0 の比較を示す。本実験条件の範囲では、防波柵の設置された直立護岸の越波流量は柵の無い場合の流量より小さく、柵によって越波流量を確実に低減しうることが分かる。ただし、その低減割合にはある程度ばらつきが見られる。遮蔽率 σ の柵の越波流量 q_σ は柵無しの場合の越波流量 q_0 の $(1 - \sigma)$ 倍程度になる(図-7の破線や鎖線に沿う)場合が多いものの、越波流量の低減割合がだいぶ異なる条件もある。

そこで、波浪・護岸条件の違いによる越波流量低減効果の変化を明らかにするため、護岸上に構造物が無い場合の越波流量 q_0 に対する遮蔽率 σ の防波柵の越波流量 q_σ の比(以下、流量低減比と呼ぶ)と相対水深 h/H_0' 、波形勾配 H_0'/L_0 及び相対天端高 h_c/H_0' との関係を図-8に示す。 $h/H_0' \approx 0.5$ の場合を除くと、流量低減比は図中破線で示した柵の空隙率に相当する $(1-\sigma)$ 前後の値を中心とにばらついていることが分かる。越波形式(III)になる $h/H_0' \approx 0.5$ の場合、波形勾配が小さくなるにつれて流量低減比は増加傾向を示す。一方、越波形式(1)になる $h/H_0' \approx 2$ 以上の場合、流量低減比の変化には波形勾配よりも相対天端高の影響が卓越する。

図-9に越波形式が概ね(II)になる $h/H_0'=1.0$ における遮蔽率 σ の異なる防波柵の流量低減比を示すが、相対天端高や波形勾配に対する流量低減比の変化傾向は異なる遮蔽率の柵でも同様であることが確認できる。 $h_c/H_0' \approx 1$

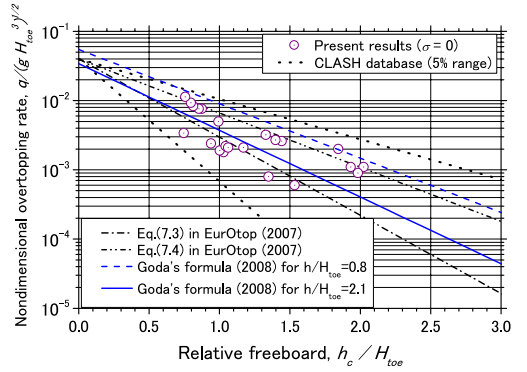


図-5 護岸のみの場合の無次元越波流量と相対天端高の関係

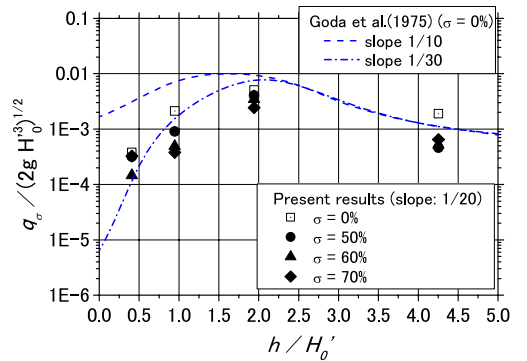


図-6 越波流量と相対水深の関係 ($H_0'/L_0=0.012, h_c/H_0'=1.0$)

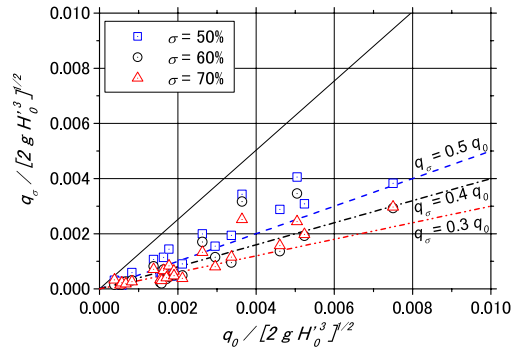


図-7 遮蔽率の異なる柵の有無による越波流量の変化

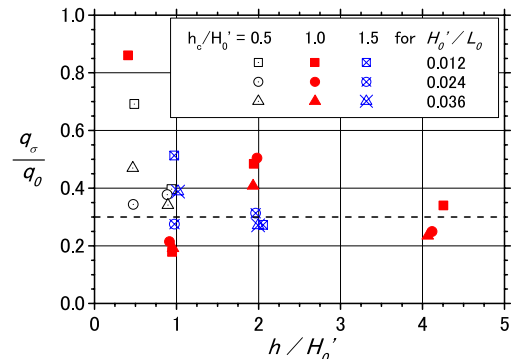


図-8 越波流量の低減比と相対水深との関係 ($\sigma=70\%$)

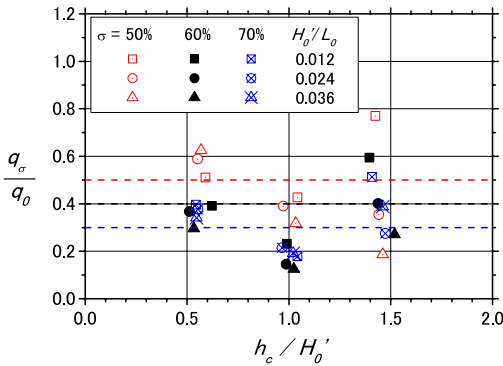


図-9 越波流量の低減比と相対天端高との関係 ($h/H_0'=1.0$)

以下の場合、波形勾配の影響は小さく、前述の越波形式 (III) における流量低減比と同様の傾向を示す。一方、 $h_c/H_0' \approx 1.5$ の場合、流量低減比は波形勾配の影響を受けて変化し、越波形式 (I) における流量低減比の変化傾向と似ている。また、 $h_c/H_0' \approx 1$ の場合に流量低減比は遮蔽率の値より小さくなり、柵による越波流量の低減効果が相対的にかなり高まるのが分かる。

4. おわりに

本研究は、護岸が碎波帯の内及び外にあるような広範囲の波浪・護岸条件における透過性柵による越波及び波力の低減効果を明らかにするために、相対水深、波形勾配及び相対天端高を系統的に変化させた実験を行い、柵による越波流量や波力の低減特性と越波形式との関係を調べた。ここで主な結果をまとめて結論とする。

護岸上の不透過壁に作用する波力と同様に、透過性柵の波力は越波形式に応じて異なった時間変動波形を示す。透過性柵のピーク波力は不透過壁の波力の遮蔽率倍程度かそれ以下になる場合が大半である。防波柵は柵孔からの水や空気の通過をある程度許容するため、不透過壁に比べて波の打上げ高さを減らす作用があると共に、碎波が直接柵に作用する時の衝撃的な波力を効果的に低減できる可能性が示唆された。

防波柵の設置による越波流量の低減比 q_σ/q_0 は柵の遮蔽率と同程度になる場合が多いものの、波浪・護岸条件によっては流量低減割合が大きく変化する。本実験条件の範囲では、前浜で碎波した波の打上げによる越波形式 (III) においては波形勾配の違いによる流量低減比の変化が大きいこと、重複波的な越波形式 (I) における流量低減比の変化には相対天端高の影響が卓越すること、護岸前面でちょうど碎波する越波形式 (II) における流量低減比は相対天端高に依存して前述の2つの特徴を示すことなどが分かった。

謝辞：水理模型実験の実施に当たっては、(株)日本パーテセンターの松本光徳さん、当時金沢大学水工学研究室の大学院生の山本浩史さん、学部生の濱平雄治さん、吉田有希さんの協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 榎田真也・齋藤武久・古路裕子・中口彰人・石田 啓 (2012)：直立護岸上に設置された防波柵に作用する波力及び越波の基本特性，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 68 (2)，pp. 786-790.
- 川崎浩司・笹田泰雄 (2009)：直立護岸に設置した越波対策工の越波低減効果と作用波圧特性，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 65 (1)，pp. 766-770.
- 木村克俊・安田佳乃子・山本泰司・梅沢信敏・清水敏晶・佐藤 隆 (2001)：道路護岸における越波による通行障害とその対策について，海岸工学論文集，第48巻，pp. 756-760.
- 木村克俊・古川 諭・山本泰司・吉野大仁 (2006)：海岸覆道用防波板の高波による被災特性とその再現実験，海岸工学論文集，第53巻，pp. 871-875.
- 合田良実 (2008)：CLASHデータベースに基づく統一的越波流量推定式の提案，海洋開発論文集，24巻，pp. 939-944.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975)：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，pp. 3-44.
- 山本泰司・木村克俊・南部裕之・高橋元樹・今村晃久・熊木功治 (2008)：国道231号湯泊地区の海岸道路における越波の観測と対策工の検討，海岸工学論文集，第55巻，pp. 956-960.
- EA(UK)・ENW(NL)・KFKI(DE)：EurOtop Wave Overtopping of Sea Defenses and Related Structures - Assessment Manual, June 2007.