

# 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

## An Experimental Study of Wave Force and Overtopping at a Vertical Seawall with a Porous Barrier

楳田真也<sup>1</sup>・齋藤武久<sup>2</sup>・古路裕子<sup>3</sup>・中口彰人<sup>4</sup>・石田 啓<sup>5</sup>

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

This paper examined the reduction effects of wave force and overtopping of a porous barrier installed on a vertical seawall. The laboratory experiments of green water overtopping at a low crest seawall with a barrier were carried out under a range of test conditions; the barrier parameter ranging from 0% to 100%, the relative seawall freeboard ranging from 0.35 to 1.45, the wave steepness ranging from 0.014 to 0.03, the relative water depth ranging from 2.9 to 6.5. The test results show that the reductions of the wave force and overtopping discharge due to the porous barrier are mainly governed by the barrier parameter and the relative freeboard. The reduction effects are influenced by a variation in the wave runup induced by porous barrier installation.

### 1. はじめに

防波柵は多数の孔が開いた金属板で構成される透過性の構造物で、既存の海岸護岸等に併設して、来襲波の打ち上がり、水塊や飛沫の堤内地への浸入を低減するために主に利用される。特に波消工や護岸の増設及び高上げ等が困難な状況下における越波対策として有効で、護岸背後に道路、家屋及び重要施設等がある場合に適用事例が多い。また、2011年東北地方太平洋沖地震津波の際、漂流した船舶、コンテナ及び木材等を柵が捕捉し、堤内地の被害軽減に少なからず寄与したと推測される幾つかの事例が主に東北4県で確認されている(日本パーツセンター, 2012)。このように防波柵は地域状況や設計外力等に応じて適切に活用することで波浪と津波の両方に対して効果的に機能するため、今後の海岸防災対策の重要な手段の一つとして期待される。

防波柵の耐波性能に関する研究は、木村ら(2001, 2006)、山本ら(2008)及び上久保ら(2009)による成果にほぼ限られるようである。これらの研究では、主に北海道における道路護岸上の防波柵の被災事例の調査及び再現実験等による波の打ち上げ高、飛沫の運動、波圧、越波流量等に関する多面的な検討が進められてきた。ただし、柵の遮蔽率の違いに対する波力及び越波の基本特性については未解明な点が多く、現状では防波柵の標準的な設計法は確立されていない。そのため、性能設計に不可欠となる防波柵の波力と越波流量との対応関係を明らかにすることが重要な課題である。

そこで本研究は、直立護岸上に設置された遮蔽率の異なる防波柵について、構造及び波浪条件の変化に対する柵に作用する波力の変動特性、護岸を越波して柵を透過した水塊の流量の変動特性、及び両者の基本的な対応関係を明らかにすることを目的とする。本論文では柵の遮蔽率、護岸の相対天端高及び来襲波の条件の変化が波力や越波流量に及ぼす影響を考察した。

### 2. 実験方法及び条件

実験は図-1に示すように縮尺約1/10の直立護岸・防波柵の模型を、反射波の吸収制御機能を備えたピストン型造波装置を持つ長さ22m、幅1m、深さ1.6mの断面二次元造波水槽に設置して、水深 $h=50\sim 60\text{cm}$ 、周期 $T=2\sim 3$ 秒、入射波高 $H=9\sim 18\text{cm}$ の範囲で規則波による実験を行った。護岸の天端高は4.5~14.5cmである。護岸上の防波柵に波が作用する場合を計測対象とし、実験条件の範囲は波形勾配 $H/L=0.014\sim 0.033$ 、相対水深 $h/H=2.9\sim 6.5$ 、水深波長比 $h/L=0.036\sim 0.096$ 、護岸の相対天端高 $h_c/H=0.35\sim 1.45$ で、すべて重複的な波であった。

防波柵模型の鉛直断面は図-2(a)に示すような台形波状で、一般的な折板型の有孔柵の断面形状を忠実に再現し、遮蔽率 $\sigma=49\sim 77\%$ の異なる5種類の透過性柵を対象とした。有孔板の遮蔽率 $\sigma$ は面積比で定義し、柵板に全く孔の開いていない完全不透過の状態を遮蔽率 $\sigma=100\%$ とした。なお、柵孔は直径2mmの円形であり、柵孔での水の表面張力(20℃)は水深約15mmの静水圧と同程度であると推測される。柵孔の直径を2倍にした模型を用いて越波流量を比較した結果、本実験条件の範囲では柵孔の大きさは越波流量にほとんど影響しないことが確認されたため、孔径2mmで遮蔽率の異なる模型を用いて実験した。また、防波柵の有無や有孔板の効果を把握するため、護岸のみで柵の無い場合( $\sigma=0\%$ )及び

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次長  
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

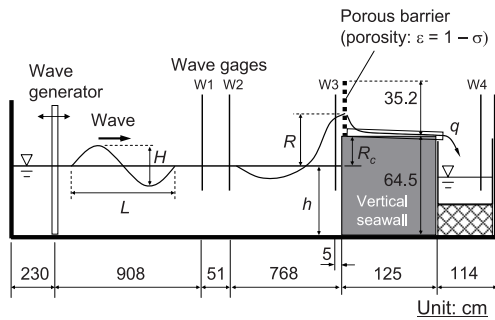


図-1 断面二次元造波水槽・模型の設定

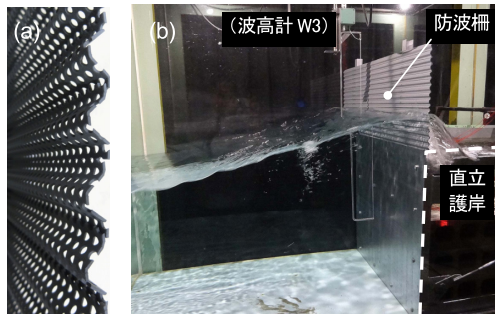


図-2 防波柵模型の断面及び護岸・防波柵の越波状況

不透過柵を護岸上に設置した場合 ( $\sigma = 100\%$ ) の実験も行った。

図-2 (b) のように波が護岸天端を超え、防波柵に作用した時の波力、柵孔を通過して背後域へ運ばれる時間平均の水量 (以下では越波流量と呼ぶ) 及び波高等を同時に計測した。防波柵に作用する波力  $F$  は、剛性の高い柵の支柱と護岸上部を厚さ 6mm の板バネで接続し、板バネの歪を上下表裏 4 点で測定した値を用いて求めた。越波流量  $q$  は、越波した水を導水路によって護岸背後の容器に集めて、容器内の水位の時間変化から求めた。なお、入射波高  $H$ 、打ち上げ高  $R$  及び越波流量  $q$  の測定には図-1 に示す容量式波高計 W1~W4 を利用した。

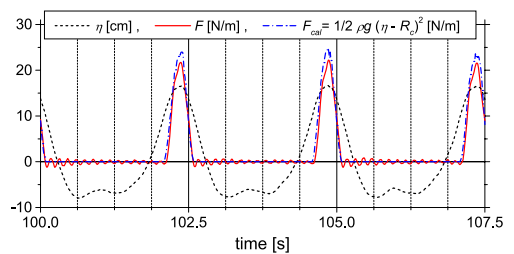
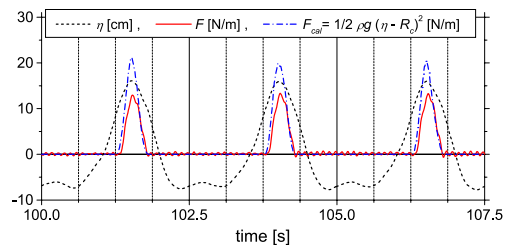
### 3. 防波柵の波力及び越波流量に関する実験結果及び考察

#### (1) 防波柵に作用する波力の基本特性

本研究では、護岸前面を一樣水深とし、入射波が護岸前面においては、その水面が護岸天端を上回り、防波柵へ到達するように砕波限界を超えない範囲で規則波を作用させている。このため、水槽内では重複的な波が形成された。本実験条件の範囲では、護岸・防波柵前面での水面形は、図-2 (b) に示すように入射波は比較的滑らかな水面形を保って防波柵へ作用するが、入射波と反射波の重複によって水塊が衝撃的に防波柵へ作用することはなかった。このときの防波柵前面の水位  $\eta$  と波力の時

間変化を図-3 に例示する。なお、(a) 完全遮蔽された不透過柵 (遮蔽率  $\sigma = 100\%$ ) および (b) 遮蔽率 60% の防波柵の場合ともに、入射波条件はほぼ同一 ( $T = 2.5$  s,  $H = 11$  cm) で、護岸天端高  $R_c = 9.5$  cm であり、重複的な波の発生が確認されている。このときの波の反射率  $r$  はそれぞれ 0.86 および 0.84 であり、遮蔽率が小さく柵からの越波を許容する (b) の場合の反射率がやや小さな値となる。まず (a) の場合を見ると、柵前面水位は、波谷の位相で平坦化し、波峰の位相で先鋭化を伴う有限振幅的な特徴を示している。このとき、波力  $F$  は柵前面水位が護岸天端を上回る時刻から発生し、柵前面水位がピークとなる時刻に同時に波力がピークを迎える周期的な変化となっていることが確認できる。両者のピークが同時刻に発生することは、波形勾配が大きき有限振幅重複波の場合に特徴的な双峯型の波圧の発生までには至っていないことを意味している。次に、柵前面水位を基準とした静水圧分布に基づく全圧力  $F_{cal} (= 1/2 \rho g (\eta - R_c)^2)$  を同時に図示するが、柵への作用波力  $F$  は、水位が比較的低位相では全圧力にほぼ一致し、ピーク水位付近の位相では  $F_{cal}$  を下回る値となっていることが確認できる。一方、遮蔽率が 60% の (b) の場合、波力の発生位相等は (a) の場合と同様となるものの、ほぼ同一の入射波条件に対して、防波柵への作用波力  $F$  のピーク値は遮蔽率程度に低減している。

続いて、遮蔽率の変化に伴う防波柵への作用波力の变化特性を把握するため、図-4 に、遮蔽率  $\sigma$  の防波柵に作用する波力  $F_\sigma$  と対応する入射波条件のもとで完全遮蔽された不透過柵に作用する波力  $F_{100}$  との関係を示す。図中

(a) 遮蔽率  $\sigma = 100\%$  ( $H = 10.9$  cm,  $r = 0.86$ )(b) 遮蔽率  $\sigma = 60\%$  ( $H = 11.1$  cm,  $r = 0.84$ )図-3 護岸・防波柵前面の水面変動  $\eta$  と波力  $F$  の時間変化 ( $T = 2.5$  s,  $h = 55$  cm,  $R_c = 9.5$  cm)

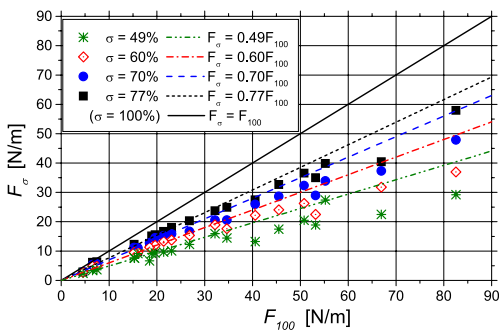
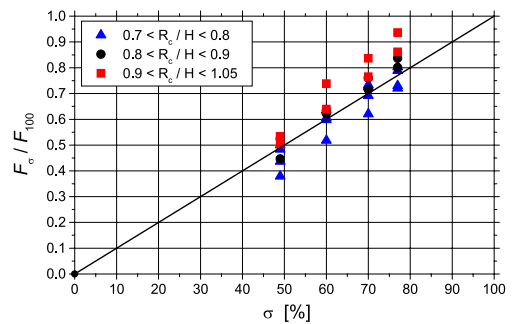


図-4 不透過柵の波力に対する透過性柵の波力

図-5 波力比  $F_{\sigma}/F_{100}$  と遮蔽率・相対天端高  $R_c/H$  との関係

の波力には、図-3に見られるように周期的に発生する個々の波力ピーク値の平均値を採用している。なお、それぞれの実験条件で、波力の最大値、1/10および1/3有義値を算出しているが、平均値と最大値および1/3有義値のばらつきは、それぞれ20%および10%程度の範囲であった。同図より、完全遮蔽された不透過柵の場合に比べ、防波柵に作用する波力は全ての実験条件のもとで実線  $F_{\sigma} = F_{100}$  を下回る値となっており、波力の低減が確認できる。なお、作用波力が比較的小さい場合、波力は遮蔽率程度までに低減される一方、作用波力が大きな範囲では、遮蔽率以下に作用波力は低減され、その傾向は遮蔽率が小さい場合に顕著となっている。

さらに、防波柵に作用する波力の低減効果に与える遮蔽率および波浪・護岸条件の影響を検討するため、図-5に不透過柵に作用する波力  $F_{100}$  に対する遮蔽率  $\sigma$  の防波柵に作用する波力  $F_{\sigma}$  の比  $F_{\sigma}/F_{100}$  (以下では波力比と呼ぶ) と遮蔽率や護岸の相対天端高  $R_c/H$  との関係を示す。ただし、相対天端高が大きく、作用波力が極端に小さな場合の計測データは、計測精度の観点から除外している。同図より、波力比は、遮蔽率でおおよそ全体的な変化傾向をある程度表現可能とするものの、遮蔽率  $\sigma \pm 10 \sim 20\%$  程度の範囲で変動していることが分かる。この変動に寄与する無次元量として、入射波諸元に基づく種々の変数を用いて整理を試みたが、本実験の条件の範囲では、相対天端高を用いることで波力比の特性がある程度系統的に整理された。図-5より相対天端高が高い場合、波力比は  $\sigma$  に比べて大きく、相対天端高が低くなるに従って、波力比は小さくなり、透過性柵による波力の低減効果は増加傾向にあることが確認できる。なお、防波柵に作用する波力は、外力となる柵前面での水位に強く影響されることになるが、後述するように、相対天端高が低く柵の遮蔽率が小さいほど、越波量は増加して、反射波は低減されるため、防波柵前面での打ち上げ高は不透過柵に比べて低下傾向にある。その結果、防波柵の波力は不透過柵の場合に比べて遮蔽率以下にまで低減したと考えら

れる。

## (2) 防波柵を透過する越波流量の基本特性

本実験で計測された越波流量と豊富な研究成果のある直立護岸に対する越波流量を比較するために、図-6に越波流量  $q$  と護岸天端高  $R_c$  の関係を示す。越波流量と天端高は吉川ら (1967) に従って測定地点の波高  $H_0$  (=入射波高+反射波高) を用いてそれぞれ無次元化した値で比較している。護岸の相対天端高  $R_c/H_0$  が増加するにつれて越波流量は減少し、 $R_c/H_0$  が1.0を超えると、無次元越波流量  $q/(gH_0^3)^{1/2}$  は  $O(10^{-2})$  以下まで減少する。護岸上に柵が無い場合の本実験結果にはデータのばらつきがあるものの、吉川ら (1967) の規則波実験の結果を代表する彼らの算定式と良好に一致することが確認できる。また、柵が併設された場合の越波流量は護岸のみの場合より越波流量が減少し、その低減量は柵の遮蔽率によって大きく異なることが分かる。

そこで防波柵による越波流量の低減効果を把握するために、遮蔽率  $\sigma$  の柵を透過する越波流量  $q_{\sigma}$  と同じ波浪条件における直立護岸のみの場合 ( $\sigma = 0\%$ ) の越波流量  $q_0$  との比較を図-7に示す。それぞれの越波流量は合田 (1970) に従って換算沖波波高  $H_0'$  を用いて無次元化した値である。本実験結果は全て図中の実斜線より下側に位置しており、防波柵によって越波流量は着実に減少することが分かる。本実験結果は遮蔽率別に鎖線や破線等に表示した補助線にはほぼ沿っていることから、柵による越波流量の低減量は遮蔽率  $\sigma$  に比例し、越波流量の平均的な低減効果は遮蔽率でほぼ評価可能であることが分かる。ただし、個々の越波流量の低減比率は遮蔽率が同じでも多少ばらついており、波力の場合と同様に波浪条件にある程度左右されると考えられる。

防波柵による越波流量の低減効果に与える遮蔽率及び波浪・護岸条件の影響を検討するため、図-8に同一波浪条件における護岸のみの場合の越波流量  $q_0$  に対する防波柵の越波流量  $q_{\sigma}$  の比 (以下では流量低減比と呼ぶ) と遮蔽率や護岸の相対天端高  $R_c/H$  との関係を示す。防波柵に

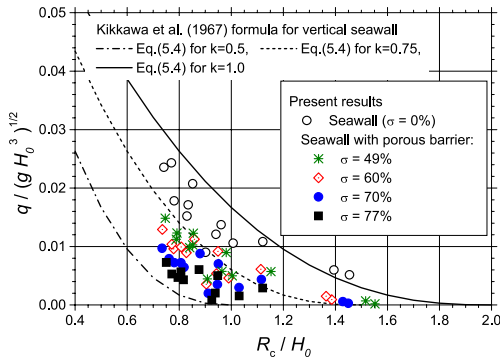


図-6 無次元越波流量と相対天端高・遮蔽率の関係

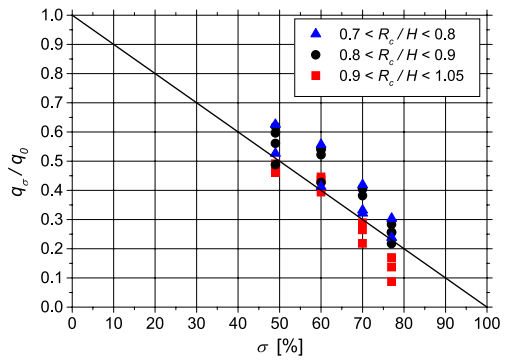


図-8 越波流量の低減比  $q_\sigma/q_0$  と遮蔽率・相対天端高との関係

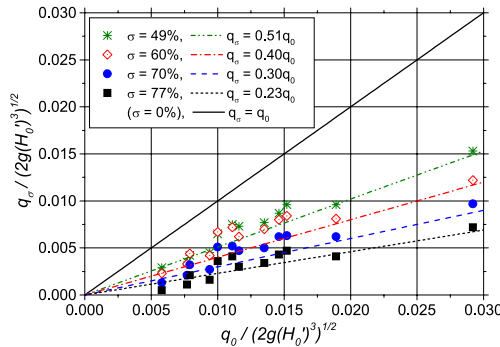


図-7 遮蔽率の異なる柵の有無による越波流量の変化

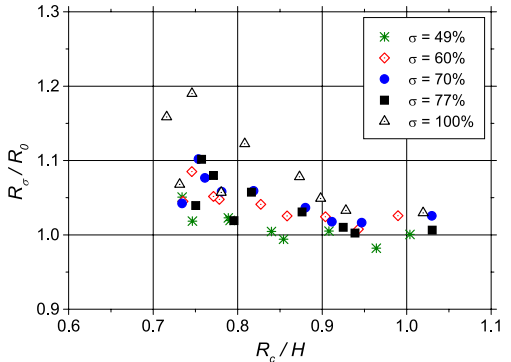


図-9 防波柵による護岸・防波柵前面の打ち上げ高の変化と相対天端高・遮蔽率との関係

よる越波流量の低減比は遮蔽率の関数  $1-\sigma$  (柵の透過率に対応) で全体的な変化傾向をある程度表現可能であるものの、同一遮蔽率でも最大  $\pm 0.2$  程度の範囲で流量低減比は変動している。その変動に関係する無次元量として、直立護岸の越波流量の変化に影響を与える波形勾配、相対水深及び相対天端高等が従来研究の結果 (例えば、合田ら、1975) から予想されるが、防波柵による越波流量の低減比に対しては相対天端高の影響が本実験条件の範囲では卓越することが分かった。相対天端高が高い場合、流量低減比  $q_\sigma/q_0$  は小さく、防波柵による越波流量の低減効果が高く、相対天端高が低くなるにつれて低減効果は減少傾向にあることが図-8 より確認できる。

越波流量の変化は波の打ち上げ高と密接に関係すると考えられるので、直立護岸・防波柵の前面における波の打ち上げ高  $R$  の変動特性を調べた。図-9 は防波柵前面の打ち上げ高  $R_\sigma$  と同一波浪条件における護岸のみの場合の打ち上げ高  $R_0$  の比  $R_\sigma/R_0$  と相対天端高及び遮蔽率との関係を示す。護岸の天端高を超える波に対しては防波柵の存在によって波の打ち上げ高が多少増加する場合がある。護岸の相対天端高が低く、柵の遮蔽率が大きいほど、打ち上げ高の増加は顕著になるものの、本実験条件の範囲では遮蔽率 77% の防波柵で最大 1 割程度、遮蔽率 100% の完全不透過柵で最大 2 割程度である。相対天端高

が低い護岸の場合、防波柵の設置によって波の打ち上げ高が増加し、越波時の柵前面の水位が上昇するため、越波流量は遮蔽率で予想される値  $(1-\sigma) q_0$  より多くなる傾向にある (図-8 参照)。一方、相対天端高が高い護岸の場合、柵による波の打ち上げ高の上昇はほとんど無いこと、及び柵孔からの流出水に縮脈現象が生じている可能性があること等から、防波柵による越波流量の低減効果が高まったと推察される。

(3) 防波柵の波力と越波流量との関係

最後に防波柵による越波流量の低減効果と柵の作用波力の基本的な対応関係を把握するため、図-10 に遮蔽率の異なる防波柵による越波流量の低減比  $q_\sigma/q_0$  に対する波力比  $F_\sigma/F_{100}$  の変化を示す。両者の低減比はほぼ逆相関を示し、防波柵によって越波流量を減少させるにつれて、波力は増大する。防波柵の遮蔽率を変化させることによって波力及び越波の低減比のバランスをある程度の範囲内で制御可能であることが分かる。ただし、遮蔽率が同じであっても、両者の低減比のバランスは波浪・護岸条件によってある程度変化する。本実験条件の範囲では相対天端高の影響が卓越し、相対天端高が高い場合、波力の低減効果は低いものの、越波流量の低減効果は高くな

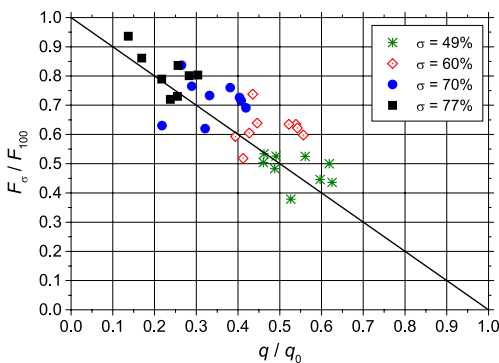


図-10 波力と越波流量の低減比の対応関係

り、相対天端高が低い場合はその反対になる傾向があることが分かった。

#### 4. おわりに

本研究は、直立護岸上に設置される透過性柵による波力及び越波の基本的な低減特性を明らかにするために、構造・波浪条件を変化させた水理模型実験を行い、柵に作用する波力と越波流量の変化及び両者の対応関係を調べた。ここで主な結果をまとめて結論とする。

- (1) 防波柵前面の打ち上げ高は不透過柵に比べて低下傾向を示し、相対天端高が低い場合には防波柵への作用波力が遮蔽率以下に低減、相対天端高が高くなると波力の低減効果は小さくなる傾向がある。
- (2) 護岸天端高を超える波の打ち上げ高は相対天端高の低い護岸に遮蔽率の高い防波柵を設置すると増加し、柵による越波流量の低減効果は遮蔽率の値より少し低下、相対天端高が高くなると越波流量の低減効果が上昇する傾向がある。
- (3) 防波柵の透過性による波力の低下と防波柵の設置による越波流量の低減効果はほぼ逆相関の関係にあり、柵の遮蔽率によって両者の低減比のバランスをある範囲内で制御できる。ただし、波浪・構造条件によって

も波力・越波の低減効果は変化し、本実験条件の範囲では相対天端高の影響が大きい。

なお、本研究では複雑な越波現象を比較的捉えやすくするために、直立護岸上の防波柵に重複的な波が作用する場合を中心に規則波実験を行っている。今後は、現地波浪の越波状況を忠実に再現するために、波の不規則性や海底勾配を考慮して、碎波的な波に対する柵の波力および越波流量の変動特性を検討する必要がある。

謝辞：水理模型実験の実施に当たっては、当時金沢大学水工学研究室大学院生の山本浩史君、学部生の渋谷伊純さん、小児尚之君の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 上久保勝美・山本泰司・菅原健司・木村克俊・清水敏明 (2009)：海岸道路を対象とした防波フェンスの被災事例とその再現実験，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. 65, No. 1, pp.821-825.
- 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫 (1967)：海岸堤防の越波に関する基礎的研究 (1)，海岸工学講演会講演集，第14巻，pp.118-122.
- 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 (1970)：防波護岸の越波流量に関する研究，港湾技術研究所報告，第9巻，第4号，pp.3-41.
- 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.
- (株)日本パーツセンター：有孔折板の津波漂流物の捕捉状況報告 (オンライン)，<http://www.n-parts.jp/>，参照2012-05-14.
- 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.