

# 別府湾におけるフレア型護岸の越波制御特性

## CHARACTERISTICS OF WAVE OVERTOPPING GENERATED ABOVE FLARING SHAPED SEAWALL IN BEPPU BAY

上久保祐志<sup>1</sup>・村上啓介<sup>2</sup>・磨井剛史<sup>3</sup>・富永家教<sup>4</sup>・片岡保人<sup>5</sup>・竹鼻直人<sup>6</sup>

Yuji KAMIKUBO, Keisuke MURAKAMI, Takefumi USUI, Ienori TOMINAGA,

Yasuto KATAOKA and Naoto TAKEHANA

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 八代高専助手 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

<sup>2</sup>正会員 博士 (工学) 宮崎大学助教授 土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>3</sup>学生会員 八代高専 専攻科環境建設工学専攻 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

<sup>4</sup>学生会員 熊本大学 工学部社会環境工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

<sup>5</sup>正会員 博士 (工学) (株) 神戸製鋼所 機械研究所 構造強度研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5)

<sup>6</sup>正会員 工修 (株) 神戸製鋼所 機械エンジニアリングカンパニー 構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町4-4-8)

The authors have been developing a non-wave overtopping type seawall with a deep circular cross section (referred to a flaring shaped seawall (FSS)). The seawall effectively controls waves by reversing incoming wave's motion on its curved face. This seawall creates a safe and useable space on top with a lower crest height compared to a conventional upright seawall. The basic characteristics of the FSS, such as wave overtopping, wave force and wave reflection, have been investigated through a series of experiments.

Practical construction of the FSS has been scheduled in Beppu bay. However, because in practical situations wind is blowing, it is necessary to investigate the effect of wind on an FSS. In this study, the hydraulic model used in the experiments is scaled down from an actual site and we predict the wind effect on water spray and wave overtopping when the planned FSS is constructed on site.

**Key Words :** *Flaring shaped seawall , wave overtopping, Beppu bay, wave overtopping quantity*

### 1. まえがき

海域施設の中でも、陸と海の境界を形づくる護岸は、背後の人命財産を防護する重要な構造物となっている。一般にどのような護岸断面であっても、護岸前面で立ち上がった波は、岸向きの運動量を持っているので水塊となって護岸天端背後にたたきつけられ、これが人命財産に危害をもたらすことになる。このような問題に対して、護岸前面の形状を工夫することにより、越波により立ち上がった水塊の岸向きの運動ベクトルをゼロにして越波を制御する方法が考えられる。そこで提案されたのが、図-1に示すように、断面形状として凹ませた曲面を有する護岸形状 (フレア型護岸) である。従来の直立消波護岸では、図-2に示す様に、護岸に作用した水塊の運動ベクトルは岸向きを向いているために越波を生じ易くなる

が、このフレア型護岸は、前傾した曲断面によって護岸に作用した水塊の運動ベクトルを強制的に沖向きに変えさせるため、越波が生じにくくなる特徴がある。これに



図-1 フレア型護岸

より、護岸直背後に、道路や鉄道はもちろん、空港や発電所等の高整備水準施設をも建設可能となる。著者らは、このフレア型護岸に関する研究をこれまでに進めてきた結果、フレア型護岸は従来の直立消波護岸に比べて格段に越波しにくい護岸形式であることがわかっている(1), 2), 3), 4)。

現在、図-3に示す大分県別府湾に面する国道10号線沿いにおいて、道路護岸としてフレア型護岸の施工が開始されている。この沿岸域では、台風などの暴風浪時には越波によって道路が通行規制となる場合が多いため、フレア型護岸を設置する効果が期待できる。一方で、施工区域においてフレア型護岸を用いる優位性を確認するために、従来の直立消波護岸を設置した場合との比較検証も必要となる。特に、風浪下における越波の発生状況を確認することは、現地での道路護岸としての機能を確認する上で重要となる。

本研究では、別府湾での施工区域を対象に、フレア型護岸および直立消波護岸、さらにフレア型護岸の性能向上のため上部に直立壁(現地換算で0.5mの高さ)を設置した護岸について、越波流量の空間分布を計測し、それぞれの護岸を施工する場合の比較実験を行なった。

## 2. 施工区域におけるフレア型護岸の越波特性

### (1) 実験条件および実験方法

別府湾における施工区域に対して、フレア型護岸と直立消波護岸を設置した際の越波制御特性を水理模型実験により確認する。実験は、図-4に示す二次元造波風洞水槽(長さ20.0m、高さ1.0m、奥行き0.5m)を用い、模型縮尺を1/45として行なった。水槽の一端には、図-5に示すようにフレア型護岸および直立消波護岸の護岸模型を設置した。これらの護岸模型に関しては、実際に現地において施工される際の設計寸法をそれぞれ求め、それを縮尺した寸法となっている。そのため、設置水深は両者とも5.3cmと同じであるが、天端高さについてはフレア型護岸が12.2cm、直立消波護岸が13.7cmと異なっている。

本実験の入射波は、有義波高7.3cm、有義波周期0.92s、有義波長133cmの不規則波をBretschneider-光易型スペクトルをもとに作成した。これは、別府湾における30年確率波の有義波高・有義波周期を元に模型縮尺に合わせて換算した値である。また、風速に関する縮尺を考慮する場合は、これまでに多くの研究が行なわれてきているが、今回は山城ら<sup>5)</sup>による研究結果を用いることでその縮尺を決定することとした。これは、現地で観測した越

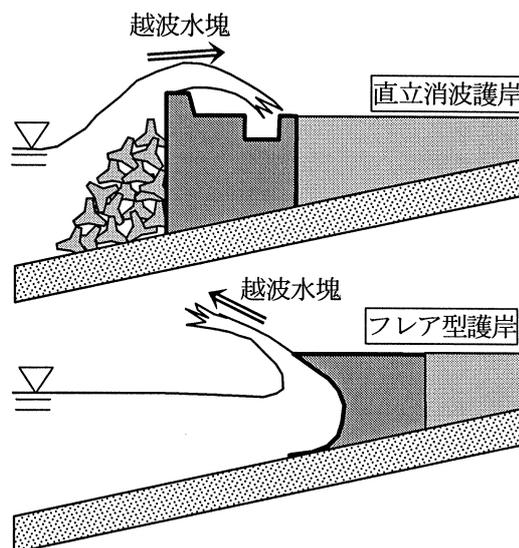


図-2 フレア型護岸の概念図

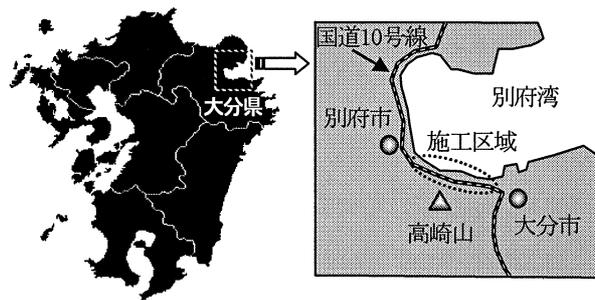


図-3 フレア型護岸の施工区域

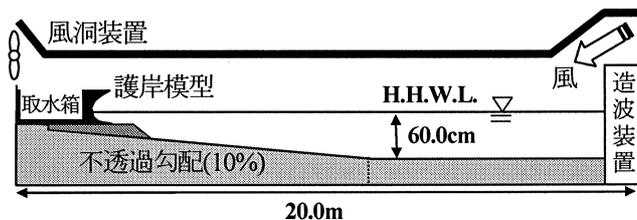


図-4 二次元造波風洞水槽

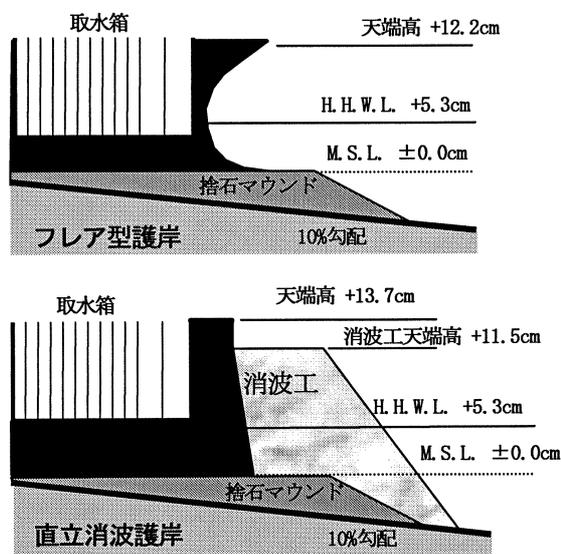


図-5 護岸模型

波流量と模型実験用に換算した越波流量とを一致する様に実験風速を設定し、現地風速と実験風速との比を求めることで実験において使用する風速値を決定したものである。この研究結果によると、模型縮尺が1/45である場合には、実験風速は現地風速のおよそ1/3程度となることが分かっている。

本実験においては、台風における強風域の風速である15.0m/s以下の現地風速を対象として、 $U=0.0\text{m/s}$ ,  $9.2\text{m/s}$ ,  $15.3\text{m/s}$  (実験風速 $0.0\text{m/s}$ ,  $3.0\text{m/s}$ ,  $5.0\text{m/s}$ ) の3種類の風速に対して実験を行った。

越波流量の測定に際しては、護岸前面からの距離による越波量の違いを検討する為に、護岸背後に12個の取水箱を並べて設置した。造波装置により不規則波を、風洞装置により風を12分間同時に発生させ、造波を開始した1分後に越波量の測定を開始し、その後の11分間での越波量の測定を行った。

## (2) 実験結果

図-6は、今回の実験によって測定された単位面積・1時間あたりの越波流量と、取水箱の護岸前面からの距離との関係を、ともに現地スケールで示したものである。横軸は護岸前面からの距離、縦軸は越波流量を示しており、各プロットは護岸形状の違いおよび風速の違い ( $U=0.0\text{m/s}$ ,  $15.3\text{m/s}$ ) を示している。図より、どのケースにおいても、護岸先端から岸方向にいくほど、越波流量が少なくなる傾向がある。また、二つの護岸を比較すると、風速が $0.0\text{m/s}$ の場合であれば、直立消波護岸と比較して、フレア型護岸の越波流量は少なく、効果的に越波を制御していることがわかる。しかし、風速が強い場合には、フレア型護岸の方が直立消波護岸よりも越波流量が大きくなる傾向がみられる。

図-7は、越波流量の水平分布を積分して求めた単位幅当たりの越波流量と風速の関係を示している。図より、各護岸は、風速が大きくなるとともに越波流量は増加する傾向にある。また、風速が小さい場合には、フレア型護岸の越波制御機能の有用性が確認できるものの、現地風速が $15.3\text{m/s}$ の場合では直立消波護岸よりも越波流量が大きくなっている。

以上のように、風速の増大とともにフレア型護岸の越波制御機能が損なわれているが、これは水塊の打ち上げ形態に大きな違いがあるためである。つまり、フレア型護岸においては、無風時では波が沖側上方に打ち上げられるため越波量は少ないものの、強風時には打ちあがった水塊は図-8に示すように容易に風により細粒化され、

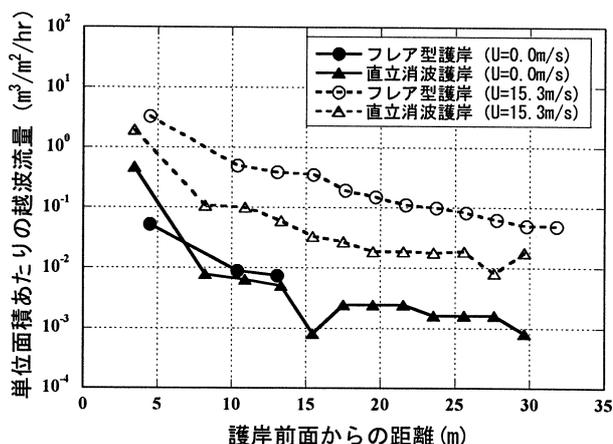


図-6 越波流量の水平分布

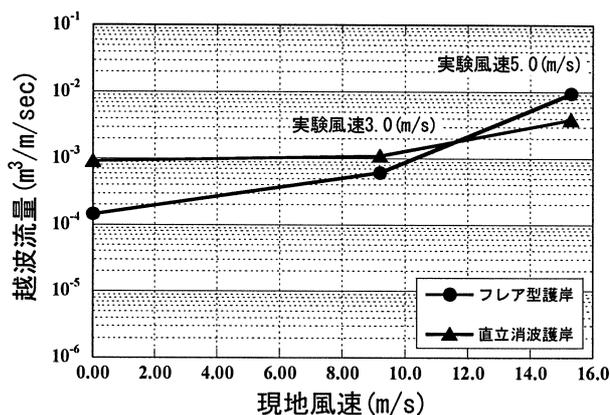


図-7 風速と越波流量の関係

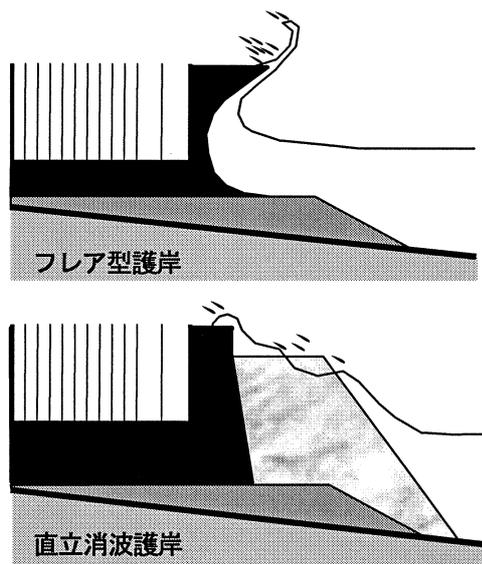


図-8 越波発生状況の相違

岸方向に輸送され易くなる。特に、護岸上部先端における水塊の細粒化が顕著となっている。このような実験スケールでの現象が現地にて適用されるためには、細粒化された飛沫の粒径の定量化についての現地観測が必要となるが、今回は定量化の検討はなされていない。

### 3. フレア型護岸の改良による越波特性

フレア型護岸は風速が大きくなると、水塊の打ち上げ形態により越波流量が増加するということがわかった。この対策として、フレア型護岸上部に直立壁を設置する方法があり、この直立壁により、効率良く越波量を低減することが可能となることが既往の研究<sup>6)</sup>により明らかにされている。

そこで、施工区域での越波制御機能の向上を目的として、低天端の直立壁をフレア型護岸の上部先端に設置し、その越波特性を検討する。以降、この形式の護岸を「直立壁付フレア型護岸」と呼ぶこととする。

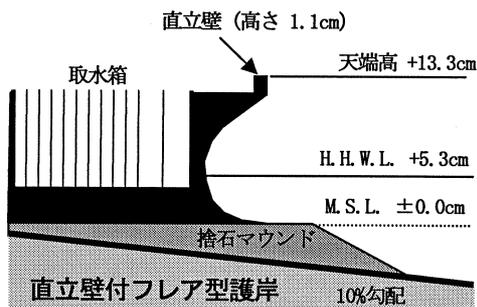


図-9 護岸模型

#### (1) 実験条件および実験方法

実験は、先述と同様に図-4に示す二次元造波風洞水槽（長さ20.0m、高さ1.0m、奥行き0.5m）を用い、模型縮尺を1/45として行なった。水槽の一端には、図-9に示すように高さ1.1cm（現地換算で0.5m）の直立壁を付けたフレア型護岸を設置した。これにより、護岸天端高さについては13.3cmとなっている。

入射波および風の実験条件については、先述の実験と同様の条件に設定し、有義波高7.3cm、有義波周期0.92s、有義波長133cmの不規則波および0.0m/s、3.0m/s、5.0 m/s（現地風速  $U=0.0\text{m/s}$ ,  $9.2\text{ m/s}$ ,  $15.3\text{ m/s}$ ）の3種類の風速に対して実験を行った。また、越波流量の測定に際しても、護岸背後に設けた取水箱により同様の条件で測定した。

#### (2) 実験結果

図-10は、単位面積・1時間あたりの越波流量と、取水箱の距離との関係を、ともに現地スケールで示したものである。横軸は護岸前面からの距離、縦軸は越波流量を示しており、各プロットは護岸形状の違いおよび風速の違い ( $U=0.0\text{m/s}$ ,  $15.3\text{m/s}$ ) を示している。図より、無風時においては、直立壁付フレア型護岸は、直立消波護岸と比較して、どの場所においても越波流量は小さくなっている。また、強風時においても、直立壁付フレア型護岸については、直立消波護岸と同等かそれよりも小さい越波流量となっている。

図-11は、越波流量の水平分布を積分して求めた単位幅当たりの越波流量と風速の関係を示している。図より、各護岸ともに、風速が大きくなると越波流量は増加する傾向にあるが、どの風速の場合においても、直立壁付フレア型護岸の方が、直立消波護岸よりも越波流量が小さ

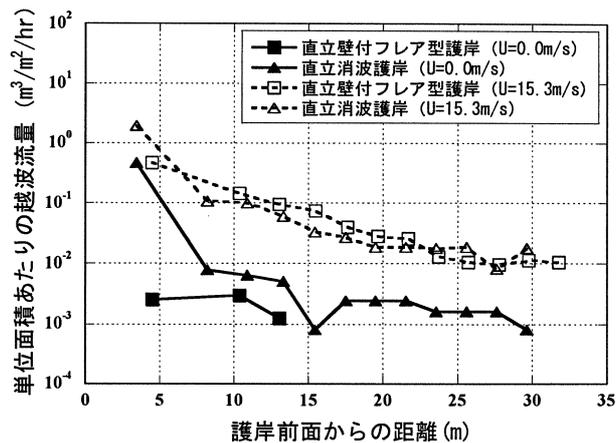


図-10 越波流量の水平分布

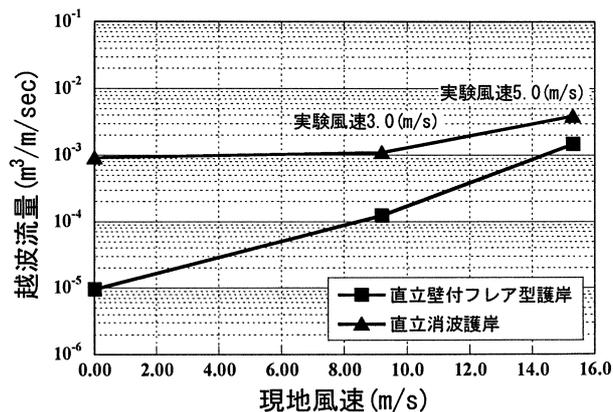


図-11 風速と越波流量の関係

くなっている。ただし、風速の増大とともに、両者の越波流量の差は小さくなっていくことがわかる。

以上より、フレア型護岸の上部に直立壁を設けることで、フレア型護岸の問題点となっていた強風時における越波水塊の細粒化を防止することができ、結果として風による越波および飛沫の発生を有効的に制御できることがわかった。

#### 4. 護岸背後の道路における越波流量の比較

護岸背後の国道10号線への越波に対する影響を詳細に検討するために、今回の実験結果をまとめ、護岸背後の歩道および車道への越波特性について確認する。護岸背後の道路に関しては、現在、図-12に示すような設計条件で施工が予定されている。この図に示す歩道、車道1、車道2について、それぞれの箇所における越波流量の風速による変化について、比較検討を行なう。ただし、比較を行なう護岸としては、フレア型護岸の上部に低天端の直立壁を設置した直立壁付フレア型護岸（図-9参照）と直立消波護岸（図-5参照）の2種類を対象とした。

図-13に、歩道部における越波流量の風速による変化を示す。風速の増大に伴って越波流量が増加する様子がみられるが、直立壁付フレア型護岸の方が越波流量は小さくなっている。特に、無風時においては、越波流量は約 $5.7 \times 10^{-6}$  ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{sec}$ )と格段に小さく、歩行者が安全に歩道を通行できるレベルにまであると考えられる。

図-14には車道1における越波流量を示す。車道の使用性についての許容越波流量を $2.0 \times 10^{-5}$  ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{sec}$ )とすれば、直立消波護岸は約3.0 (m/s)以上、直立壁付フレア型護岸は約8.0 (m/s)以上の現地風速で許容越波流量を上回ることが予想される。また、この車道部においては、風速が15.3 (m/s)になると、直立壁付フレア型護岸の越波流量は直立消波護岸よりも大きくなっている。このように、護岸形式の違いと護岸からの距離によって、越波流量が変化する場合もある。

図-15には車道2における越波流量を示す。無風時には、直立壁付フレア型護岸の越波流量はゼロであり、越波による影響を全く受けていないことがわかる。また、車道の使用性についての許容越波流量を $2.0 \times 10^{-5}$  ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{sec}$ )とした場合、直立消波護岸は約7.0 (m/s)以上、直立壁付フレア型護岸は約13.0 (m/s)以上の現地風速で許容越波流量を上回ることになる。

#### 5. 結論

本研究では、別府湾における施工区域を対象にフレア型護岸の越波制御特性についての実験的研究を行った。主な結論を以下に記す。

(1) フレア型護岸は、無風時には直立消波護岸よりも越波制御機能は優れているものの、風速が大きくなるにつれてその越波制御機能は低下する。

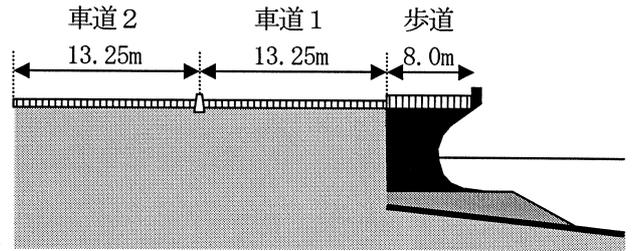


図-12 護岸背後の道路横断面

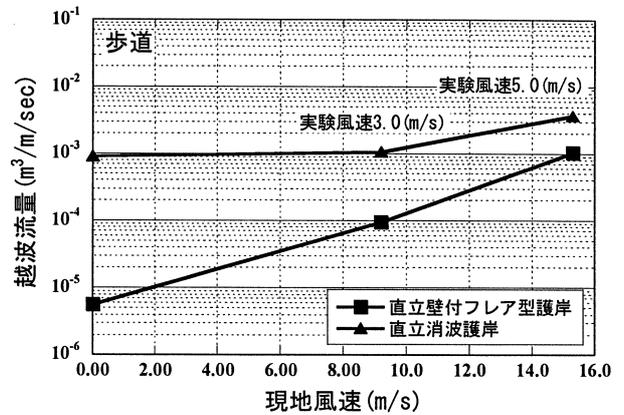


図-13 越波流量 (歩道)

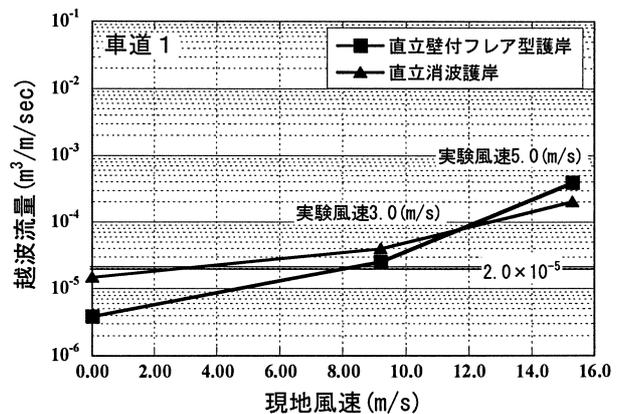


図-14 越波流量 (車道1)

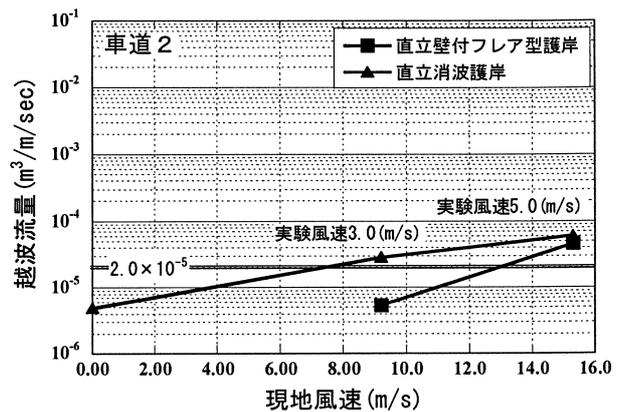


図-15 越波流量 (車道2)

(2) 低天端（現地寸法で50cm）の直立壁をフレア型護岸上部に設置することで、効率的に越波を低減できる。

(3) 無風時には、上部直立壁を設置したフレア型護岸は直立消波護岸と比較して格段に高い越波制御機能を有するが、強風時には、両者の性能の差は小さくなる。

(4) 護岸背後の車道の使用性についての許容越波流量を $2.0 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{m}/\text{sec})$ としたとき、直立壁付フレア型護岸においては、海側の車道では風速8.0m/s以下、山側の車道では風速13.0m/s以下であれば、十分に許容越波流量を満足する。

今後は、台風の強風域（風速15.0m/s）以内だけでなく、暴風域といったより大きな風速での検討を行なう。また、現地観測を通して、フレア型護岸から細粒化されて発生する飛沫の粒径のスケール効果を確認する必要がある。

謝辞：風洞実験における風速の縮尺に関して、九州大学の山城賢先生には多くのご指導とご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 村上啓介, 入江 功, 上久保祐志：非越波型防波護岸の護岸天端高さと作用波圧について, 海岸工学論文集, 第43巻, (1996), pp. 776-780
- 2) 上久保祐志, 入江 功, 村上啓介, 神田一紀, 片岡保人, 濱崎義弘：浅海域を対象とした非越波防波護岸断面の基礎的特性について, 海洋開発論文集 第15巻 (1999) pp. 25-30
- 3) 上久保祐志, 村上啓介, 入江 功：非越波型護岸の防災特性に関する研究, 土木学会海岸工学論文集第47巻(2) (2000) pp. 796-800
- 4) 上久保祐志, 村上啓介, 入江功, 吉田明德, 山城賢, 竹鼻直人：非越波型護岸の飛沫輸送特性とその制御方法の開発, 海岸工学論文集 第50巻 (2003) pp. 646-650
- 5) 山城賢, 吉田明德, 橋本裕樹, 久留島暢之, 入江功：越波実験における風洞水槽内風速の現地風速への換算, 海洋開発論文集 第20巻 (2004) pp. 653-658
- 6) 上久保祐志, 村上啓介, 入江功, 竹鼻直人, 早坂健誠, 溝上浩平：上部直立壁を設置した非越波型護岸の飛沫および越波の制御特性, 海洋開発論文集 第19巻 (2003) pp. 243-248
- 7) 合田良実：港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 1990