

国道231号石狩市浜益海岸道路における 防波フェンスの設計と施工

上久保勝美¹・酒井和彦²・木村克俊³・佐々木理人⁴
名越隆雄⁵・上北正一⁶・越智聖志⁷

¹正会員 (国研)土木研究所寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
E-mail: kamikubo-k22aa@ceri.go.jp

²正会員 (国研)土木研究所寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)
E-mail: sakai-k22ae@ceri.go.jp

³フェロー会員 室蘭工業大学大学院教授 暮らし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27番1号)
E-mail: kimura@mmm.muroran-it.ac.jp

⁴北海道開発局札幌開発建設部滝川道路事務所 (〒073-0033 滝川市新町2丁目1-31)
E-mail: sasaki-m22am@mlit.go.jp

⁵正会員 (一財)北海道道路管理技術センター (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目)
E-mail: nakoshi.takao@rmec.or.jp

⁶正会員 株式会社ドーコン 防災保全部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1)
E-mail: mu1115@docon.jp

⁷正会員 日本データサービス株式会社 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1番14号)
E-mail: m-ochi@ndsinc.co.jp

国道231号石狩市浜益地区の海岸道路では、高波による通行障害が多発していたことから、車両の安全通行を目的として、消波護岸の背後に防波フェンスを設置することが計画された。まず現地において越波飛沫の打ち上げ高さの観測を行い、10年確率波に対して1/20最大打ち上げ高さを用いて、防波フェンスの必要高さを決定した。さらに縮尺1/40で二次元水理模型実験を行って、設計波である50年確率波に対して、防波フェンスに働く波圧分布を求め、それをもとに各諸元を決定した。防波フェンスの設置後、2015年10月には設計波に相当する波浪が来襲した。その後の調査によって、防波フェンスには変状が生じていないことから、現地条件に対する設計手法の妥当性が明らかとなった。

Key Words : coastal road, wave splash barrier, block mound seawall, design, construction

1. はじめに

我が国においては海岸線に沿った限られた土地に道路を設置して必要な交通路を整備してきた。近年、汀線の後退が進むにつれて高波の影響を受ける箇所が増加しつつある。こうした場所においては、護岸天端の嵩上げや消波ブロックの設置が必要であるが、環境面や経済的な理由でその実施が困難な箇所が少なくない。このような場合に適した対策が防波フェンスであり、すでに各地で施工されている。これまで木村ら¹⁾²⁾³⁾⁴⁾、上久保ら⁵⁾⁶⁾、山本ら⁷⁾が現地事例を対象とした検討を行ってきたが、その一般的な設計法は未だ確立していない。

北海道の日本海に面した国道231号石狩市浜益海岸では、汀線に近接した2車線道路において越波による通行障害が多発していた。このため2013年11月に防波フェンスが設置され、現在に至っている。当該道路における越波対策の概要については上久保ら⁸⁾が報告している。

ここでは、当該道路における防波フェンスの施工の経緯と、その設置後に来襲した高波浪時における越波状況について分析する。

2. 越波に関する現地観測

当該道路は、図-1に示すように海岸線に沿っておよそ1.3kmの直線道路が設置されている。護岸前面水深は

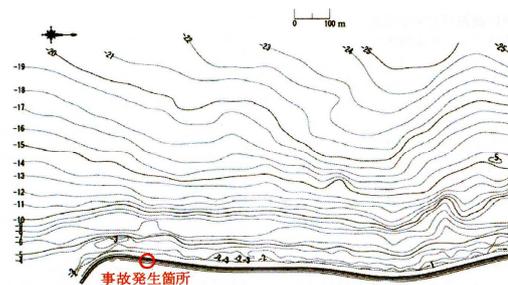


図-1 浜益海岸の海底地形

$h=+1.1\sim+3.1\text{m}$ で、図中の左側ほど水深が大きくなっている。消波ブロックは全断面で設置されているが、その天端幅は場所によって異なっている。

当該路線では、2005～2014年までの10年間に、合計28回の高波による通行止めが発生し、のべ通行止め時間は753時間となっていた。また2004年9月には、図中に○印を付した地点で越波による車両被害が発生しており、その要因について清水ら⁹⁾が分析している。

こうした状況を踏まえて、現地における具体的な対策案を検討するため2009～2011年の3年間にわたって、高波浪時の越波観測を実施した。波浪予測による沖波波高が4mを上回る場合に現地でのビデオ観測を実施した結果、写真-1に示すような越波画像を得た。画像の青色で示すように越波飛沫の外縁を特定し、その最大高さを一波ごとに読み取り、1/20最大打上げ高さ $R_{1/20}$ 求めた。ここで得られた $R_{1/20}$ を水面を基準とした値に換算し、近隣のナウファス観測点である留萌港の換算沖波波高 H_0' との関係を図-2のように整理した。以上の結果に基づいて、10年確率波である $H_0'=7.0\text{m}$ に対する防波フェンスの路面を基準とした必要高さを5.0mと設定した。

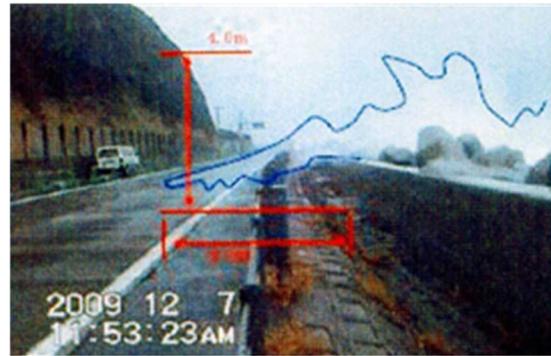


写真-1 現地における越波状況

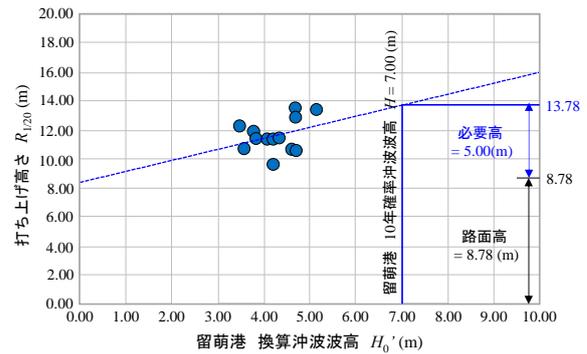


図-2 越波の打ち上げ高さ $R_{1/20}$ と換算沖波波高 H_0' の関係

3. 実験の方法

(1) 実験水路および堤体模型

現地の前面海底勾配は1/20であり、護岸前面には法面勾配1:1で消波ブロック(8t型)が設置されている。水理模型実験では、2次元造波水路(長さ28.0m、幅0.8m、深さ1.0m)内に、勾配1/20の水路床を設け、その上に堤体模型(図-3)を設置した。模型縮尺は1/40とし、当該護岸に関する越波実験と防波フェンスに作用する波圧の測定実験をすべて不規則波(1波群150波)を用いて実施した。なお、越波実験では3回、波圧実験では10回、同一条件のケースを繰り返し、平均値と標準偏差を求めた。

(2) 越波実験の方法

護岸背後に設置した越波升に越波水を導き、波群全体の時間平均越波流量 q ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$)および最高波における

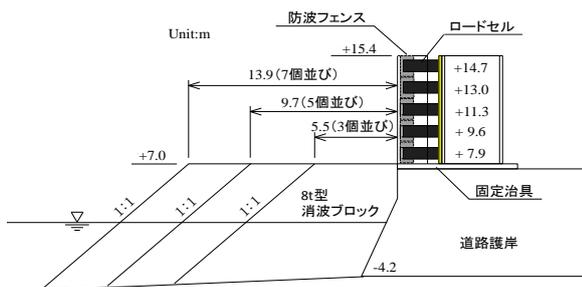


図-3 実験模型の断面形状

越波量 Q_{max} (m^3/m)を測定した。消波工の天端幅 B は3個並び(5.5m)、5個並び(9.7m)および7個並び(13.9m)の3種類に変化させ、実験波は周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ 、換算沖波波高 $H_0'=5.0, 6.0, 7.0$ および 8.0m の4種類とした。

(3) 防波フェンスへの作用波圧の測定方法

防波フェンスに作用する波圧については、写真-2に示す長さ40cm、幅4.6cmのパネルの両端を分力計(定格50N)で固定し、これを縦方向に5枚設置して測定を行い、1枚ごとに単位面積当たりの波圧を算出し鉛直分布を求めた。消波工の天端幅は、越波実験で用いたケースに、4個並び(7.6m)を加えた合計4種類に変化させた。さらに波圧測定装置自体を波向き方向に6か所移動させることにより、作用波圧の空間分布を求めた。実験波は、現地における50年確率波に相当する周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ 、換算沖波波高 $H_0'=8.0\text{m}$ の1種類とした。



写真-2 波圧測定用のパネル

4. 護岸における越波特性

(1) 越波流量

防波フェンスがない状態での護岸における越波特性を調べた。図-4は、換算沖波波高 H_0' と時間平均越波流量 q ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$) の関係を示している。波高条件に関わらず、消波工の天端幅による越波流量の低減効果が顕著となっている。図-5は、 $H_0'=8.0\text{m}$, $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の条件について、越波流量 q と消波工幅の関係を示している。越波流量 q は 10^2 ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$) のオーダーであり、消波工の並び幅を1.8倍にした場合に越波流量 q の低減率は40%程度となることが分かる。こうした消波工幅による時間平均越波流量の低減効果については、合田ら¹⁰の実験結果により明らかにされており、その結果は現行の技術基準に反映されている。

$H_0'=8.0\text{m}$, $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の条件に限定して不規則の波群中の最高波に対する越波量 Q_{max} (m^3/m) に及ぼす消波工幅の影響を検討した。図-6は、越波量 Q_{max} と消波工の並び幅の関係を示している。消波工の並び幅を1.8倍にした場合の越波量の低減効果は30%程度となっている。

(2) 防波フェンスへの波の作用状況

写真-3は、50年確率波である $H_0'=8.0\text{m}$, $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の条件の波群中の最高波に対して、越波パターンを消波工幅ごとに示している。画像解析の結果、防波フェンスへの越波水塊の衝突速度は、消波工幅に関わらずほぼ一定であった。消波工幅3個並びとした場合には、波面が激しく衝突し、越波水塊が打ち上げられていることがわかる。消波工幅を5個並びとした場合にも顕著な効果は見られず、消波工幅を7個並びとした場合には波面の衝突を抑えられていることがわかる。

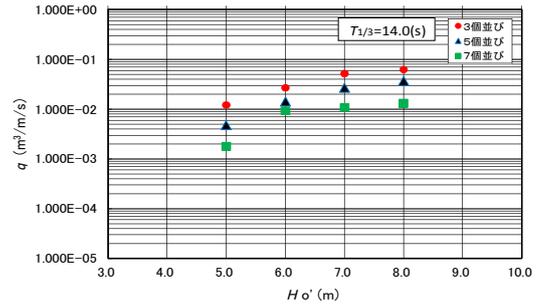


図-4 時間平均越波流量と波高の関係

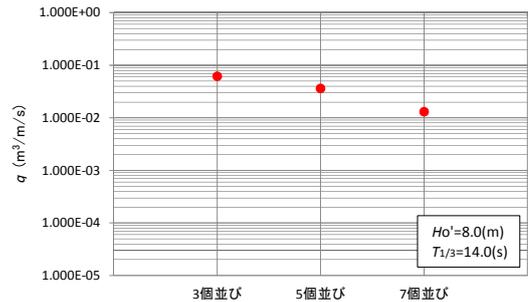


図-5 時間平均越波流量と消波工幅の関係

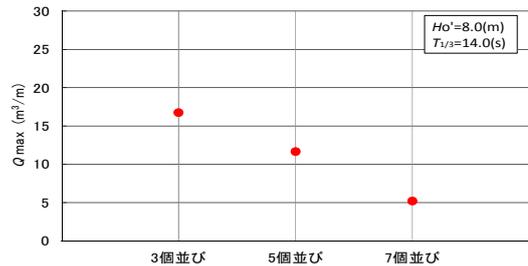


図-6 最高波の越波量と消波工幅の関係

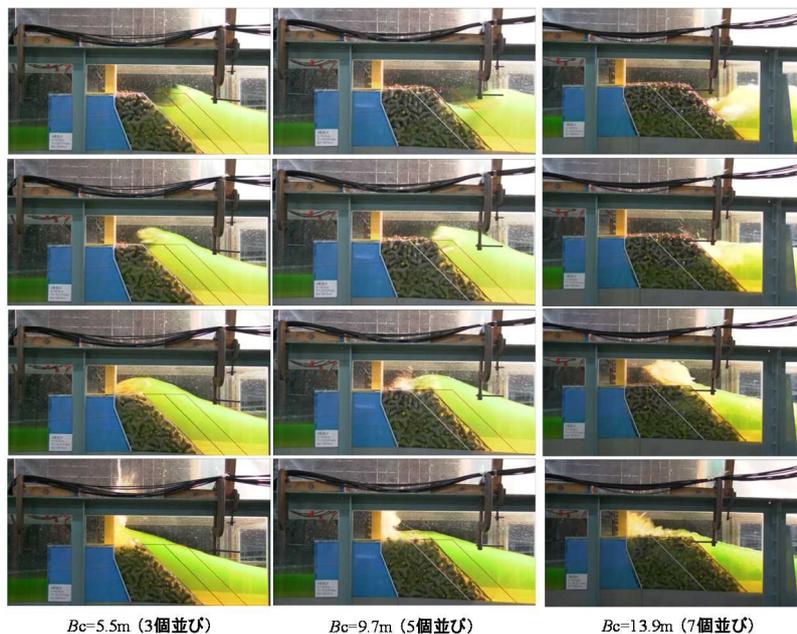


写真-3 越波のパターン

5. 防波フェンスに働く波圧

(1) 消波工幅の効果

図-7は、50年確率波である $H_0'=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の条件に対して、最高波圧 p_{max} の分布に及ぼす消波工幅の効果を示している。消波工の天端幅を3個並び ($B=5.5\text{m}$) とした場合には、最下段での波圧が局所的に増大し、その値は 100kN/m^2 に達しており、波圧を低減させるためには消波工の大幅な拡幅が必要であることが明らかになった。

一方、これより上部における波圧については、消波工の拡幅による波圧低減効果が顕著であり、上久保ら⁹⁾が提案した合田式の補正による波圧分布に近づく傾向があることが分かる。

(2) 全体波力の空間分布

防波フェンスの設置予定個所の消波工の状況を調査したところ、最も危険な部分の消波工は4個並びであることが判明した。このことから50年確率波である $H_0'=8.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ の波浪条件に対して、消波工を4個並びとして、防波フェンスの位置を変化させた場合の最高波圧 p_{max} の空間分布を求めた。図-8は、各位置での波圧分布に基づいて、代表的な波圧値のコンター図を示している。波圧が 50kN/m^2 に相当するコンターは、護岸中央部では波圧が極小値を有する分布形状となっている。また波圧がゼロとなる点は、図中の青線で示すように概ね放物線で近似することができ、木村ら³⁾、越智ら¹¹⁾の方法を用いて、以下のように定式化した。

$$v_s = \alpha_1 \cdot k_D \cdot k_B \sqrt{g \cdot H_{1/3}} \quad (1)$$

$$\beta = \alpha_2 \cdot 71.5 \cdot \exp(-0.07 \cdot \cot \theta) \quad (2)$$

ここで、 v_s は越波飛沫の初速度、 β は越波飛沫の打ち

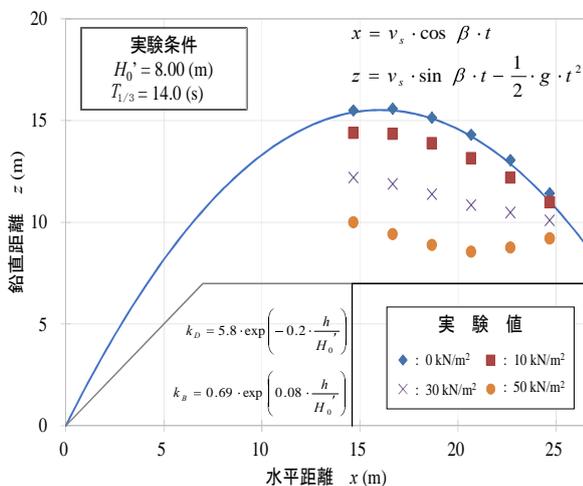


図-8 波圧の空間分布

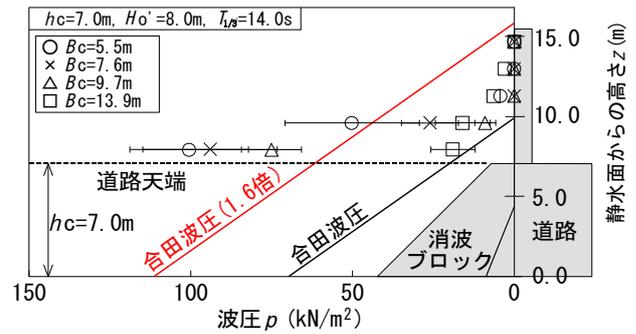


図-7 防波フェンスに作用する波圧分布

出し角度、 k_D は水深係数、 k_B は形状係数、 θ は壁面傾斜角で、補正係数は $\alpha_1=0.82$ 、 $\alpha_2=0.94$ とした。

(3) 現地における防波フェンスの形状

現地においては、発生する局所的な波圧の影響を避けるため、図-9に示すように既設の擁壁を1.4m嵩上げし、防波フェンスへの作用波圧を抑えることとした。さらに嵩上げ後の擁壁の天端まで消波ブロックで被覆することとした。防波フェンスは重力式基礎形式とし、雑割石によるマウンド上にコンクリート基礎部を設置し、その転倒に対する安全率1.2を確保した。

防波フェンスのパネル部分は、光透過性のあるポリカーボネード製の折板によるパネルを採用した。このパネル(高さ1.0m)を鉛直方向に5段設置するものとし、波圧分布は実験結果に基づいて、下端部で 42.9kN/m^2 、上端部で 3.76kN/m^2 となる台形分布を採用した。最下段におけるパネル部材の板厚は、当該製品のカタログに記載された荷重 $40\text{--}45\text{kN/m}^2$ に対応した基準板厚である8mmとした。また、2~4段目は6mm厚、最上段は5mm厚とした。防波フェンスの支柱にはH型鋼(340mm×250mm×9mm×14mm)を使用し、その設置間隔を2.0mとした。

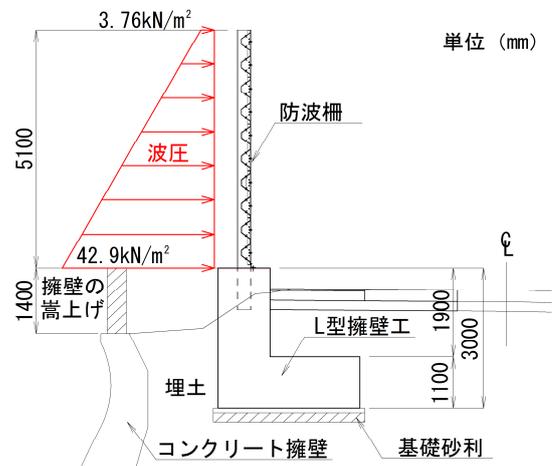


図-9 設計に用いた波圧分布

6. 高波浪作用時の越波状況の分析

(1) 作用波浪の概要

防波フェンスを設置した 2012 年以降、10 年確率波を上回る波浪が合計 3 回発生した。このうち 2014 年 10 月 2 日に発生した 50 年確率波に相当する波浪の時間変化を図-10 に示す。ピーク時における沖波波高 $H_{1/3}=8.3\text{m}$ で、周期は設計周期 $T_{1/3}=14.0\text{s}$ よりも短い 12.0s であった。当該道路においては、調査時に当該区間前後から全面規制を行っており、越波による車両被害等は発生していない。

(2) 越波状況の分析

写真-4 は、現地に設置された定点観測カメラ映像の静止画であり、波面が一度、防波フェンスに衝突した後、飛沫が路面に打ち込まれている状況を示している。この場合の水量は少なく、通行車両への影響は小さいと考えられる。

写真-5 は同じ時間帯に撮影された越波状況で、消波工で打ち上げられた水塊が道路面に落下した状況を示している。こうした水塊が高速で走行する車両に作用した際には、フロントガラスへの被害が想定されるため、道路供用時にこうした越波状況がモニターされた場合には、通行止め等の車線規制の補助的な対応が必要となる場合がある。

道路の安全管理の立場からは、越波の最大打ち上げ高さ R_{max} を用いた評価が重要となる。防波フェンス施工前も含めたすべての観測データを用いて、換算沖波波高 H_0' と最大越波高さ R_{max} （路面基準）の関係を図-11 に示す。周期レンジによって異なるプロットで示しているが、周期の影響は比較的小さく、全体として R_{max} は H_0' にほぼ比例していることが明らかになった。

(3) 今後の対応方針について

当該施設においては、50 年確率波に相当する波浪が作用したが、防波フェンスの支柱部、基礎部およびパネル部に全く変状は生じていなかった。ただし、一部のパネルの継ぎ目部において、目地材の脱落が発生した。このため継ぎ目となる部分でパネル部材をオーバーラップさせることで対処した。

近年、海岸道路における防波フェンスの被災例がいくつか報告されている（例えば山下¹²⁾）。このうち波圧の過小評価が原因と推察される場合には、本件で採用したような波圧割増しの必要性を含めて、耐波性を再検討する必要があると考えられる。なお、現地当該区間においては、高波時の通行止めをさらに抑える目的で、既設防波フェンスの嵩上げを検討している。

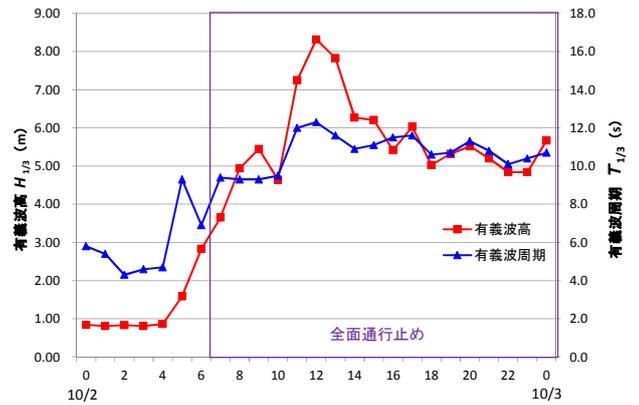


図-10 現地における波浪の時間変化



写真-4 防波フェンスに衝突後の越波状況



写真-5 防波フェンスを越えた水塊の打ち込み状況

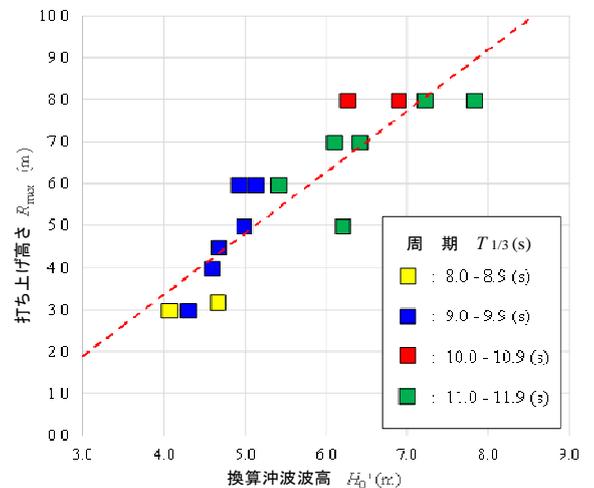


図-11 現地における越波の打ち上げ高さ

7. まとめ

現地に設置された防波フェンスに関する検討の結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 当該地点における高波による通行障害の履歴を取りまとめるとともに、現地観測を行って、換算沖波波高と 1/20 最大越波高さの関係を求め、防波フェンスの必要高さを路面上 5m と設定した。
- (2) 防波フェンスの設置箇所を対象として、50 年確率波を用いた越波実験を行い、越波流量に及ぼす消波工の天端幅の影響を示した。
- (3) 防波フェンスに作用する全体波力分布を示し、消波工の天端幅による波圧低減効果を明らかにした。さらに防波フェンスの設置場所を変化させて、全体波力の空間分布を示した。
- (4) 実験によって得られた全体波力を用いて転倒に対する安全率を考慮してコンクリート基礎部の形状を決定した。防波フェンスのパネル部分は、光透過性のあるポリカーボネード製の折板を採用し、波圧特性を考慮して部材厚と支柱間隔を決定した。
- (5) 50 年確率波に相当する波浪を含めた来襲波について越波の打ち上げ高さを観測し、換算沖波波高と最大越波打ち上げ高の関係を整理した。

謝辞：本研究の実施に際して、ポリカーボネード製防波フェンスの耐久性に関して、AGCマテックス(株)の山本圭亮氏から資料提供を頂いた。また、ナウファス留萌港の波浪データについては、北海道開発局留萌港湾事務所から速報値の提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木村克俊, 藤池貴史, 上久保勝美, 安部隆二, 石本敬志: 海岸道路における波の打ち上げ特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.676-680, 1998.
- 2) 木村克俊, 安田佳乃子, 山本泰司, 梅沢信敏, 清水敏晶, 佐藤隆: 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, 2001.
- 3) 木村克俊, 浜口正志, 岡田真衣子, 清水敏晶: 消波護岸における越波飛沫の飛散特性と背後道路への影響, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.796-800, 2003.
- 4) 木村克俊, 古川諭, 山本泰司, 吉野大仁: 海岸道路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, 2006.
- 5) 上久保勝美, 山本泰司, 菅原健司, 木村克俊, 清水敏明: 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. B2-65, pp.821-825, 2009.
- 6) 上久保勝美, 菅原健司, 山本泰司, 木村克俊, 今井浩平, 名越隆雄, 上北正一: 海岸道路用防波フェンスの必要高さ と作用波力に関する検討, 土木工学論文集 B3 (海洋開発), Vol. B3-67, No.4, pp.862-867, 2011.
- 7) 山本泰司, 木村克俊, 南部裕之, 高橋元樹, 今村晃, 熊木功治: 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, 2008.
- 8) 上久保勝美, 山本泰司, 河手雅行: 国道 231 号浜益海岸における防波フェンスの設計について, 平成 26 年度北海道技術研究発表会講演概要集, 技術-25, 2015.
(<http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/gijyutu/giken/index.html>)
- 9) 清水敏明, 木村克俊, 山本泰司, 上久保勝美, 吉野正明: 海岸道路を走行する車両の高波被害に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. B2-65, pp.821-825, 2012.
- 10) 合田良実, 岸良安治: 不規則波による低天端型護岸の越波特性実験, 港湾技研資料, No.242, 28p., 1976.
- 11) 越智聖志, 木村克俊, 山本泰司, 名越隆雄: 護岸上の車両の高波による滑動特性とその対策に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp. I_1003-I_1008, 2015.
- 12) 山下尚志: 紀南地域の越波多発箇所における対策と課題について, 国道交通省近畿地方整備局研究発表会, 調査・計画・設計部門, No.11, 2014.

(2017.3.15 受付)

DESIGN AND CONSTRUCTION OF WAVE SPLASH BARRIERS FOR A COASTAL ROAD OF ROUTE 231 AT HAMAMASU DISTRICT OF ISHIKARI CITY

Katsumi KAMIKUBO, Kazuhiko SAKAI, Katsutoshi KIMURA, Masato SASAKI
Takao NAKOSHI, Masakazu UEKITA and Masashi OCHI

Traffic hindrances were often caused by wave overtopping under storm wave conditions on a coastal road of Route 231 at Hamamasu District of Ishikari City. In order to keep the safety passage of vehicles on the site, the necessary height of the wave splash barrier was designed based on the field data of wave overtopping. Hydraulic model tests with irregular waves of 1/40 scale were also carried out to obtain the wave force distribution acting the wave splash barrier. After the construction of the wave splash barriers, extreme storm waves, equivalent to the design wave condition, attacked the site on October, 2015. Because no damage was identified on the wave splash barriers, the applicability of the design procedures was confirmed for the prototype conditions.