

急勾配海底条件に対する越波防止柵の必要高さと作用波圧に関する検討

西谷 尚峻¹・木村 克俊²・上久保 勝美³・山本 泰司⁴
名越 隆雄⁵・阿部 翔太⁶

¹学生会員 室蘭工業大学大学院環境創生工学系専攻 (〒050-0071 室蘭市水元町 27-1)
E-mail : 21041061@mmm.muroran-it.ac.jp

²フェロー会員 室蘭工業大学大学院工学研究科 (〒050-0071 室蘭市水元町 27-1)
E-mail : kimura@mmm.muroran-it.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

⁴正会員 北海道科学大学工学部都市環境学科 (〒006-8585 札幌市手稲区前田 7-15-4-1)

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 20)

⁶正会員 八千代エンジニアリング(株) 河川部技術第四課 (〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8)

太平洋に面した海岸道路において、台風に伴う高波により通行車両の被害が発生した。当該区間は海底勾配が 1/7 の急峻な地形であるため、路面上へ顕著な越波が生じた。本研究では、現地の海底地形と護岸を縮尺 1/50 で再現した水理模型実験を行い、越波状況を明らかにするとともに、越波防止柵の必要高さと作用波圧について検討した。車両被害は満潮時に高潮による水位上昇が加わり発生し、越波流量は $2 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ と推定された。こうした越波に対して通行車両の安全を確保するためには越波防止柵の高さを 6.6m とする必要がある。越波防止柵の支柱部に働く波圧については、最下部の波圧および作用高さを、最高波高 H_{max} の関数として定式化するとともに、消波ブロックの拡幅効果を明らかにした。さらに提案した算定式は 1/30 勾配における作用波圧にも適用できることを示した。

Key Words : wave splash barrier, block mound seawall, steep foreshore condition, wave force, hydraulic model test

1. はじめに

海岸道路では高波による通行被害の防止を目的として、道路管理者により越波対策が講じられてきた。こうした施設の必要諸元や作用波圧については、海底勾配が 1/10 よりも緩やかな条件に対して、上久保ら¹⁾が水理模型実験と現地観測結果に基づいて基本的な設計法を提案している。しかしながら、海底勾配が 1/10 よりも急な条件に対しては適用可能な算定法がないため、越波防止効果が不十分となることや、施設自体が被災する例も少なくない(例えば、木村ら²⁾)。

太平洋に面した E 海岸は、図-1 に示すような海底勾配 1/7~1/10 の急斜面に続くリーフ上に海岸道路が設置されている。本研究では、当該道路で発生した高波による車両事故について分析するとともに、現地において越波防止柵を設計するために必要な柵高や作用波圧に関する基礎資料を得ることを目的に水理模型実験を行ったので、その概要を報告する。

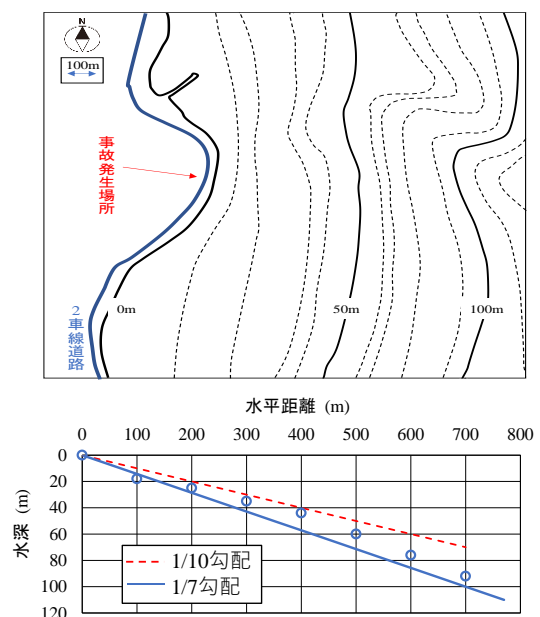


図-1 E 海岸の海底地形

2. 現地における通行障害

2018年7月28日19時頃、E海岸の汀線に近接した2車線道路において、パトカーを含む合計15台の車両が高波を受け押し流され、そのうち4台が車体の半分程度まで水につかった状態で停止し道路を塞いだ。押し流された車内にいた警察官を含む4人が負傷した。また路肩に設置されていた防護柵が倒壊し、ガードレールも破損する被害が発生した。

図-2に近隣のナウファス観測点で得られた波浪データを示す。事故発生時の波浪条件は、 $H_{1/3}=5.03\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=11.3\text{s}$ であった。近隣の港湾の設計波と比較すると、この波高は10年確率波に相当する。当日は18時に満潮となっていたが、その後、潮位は急激に上昇し、19時には天文潮位を1.5m上回っていたことが確認されている。

これらの擾乱は台風によってもたらされたものであるが、当該台風が通常とは異なるルートで来襲し、急激に発達したことによる。道路管理者は19時30分に通行止めの措置を講じたが、事故の発生時には間に合わなかった。

図-1に示した深浅図で水深20m付近の海底勾配が1/7であることから、以下においては勾配1/7の海底地形を再現した実験を行うこととした。

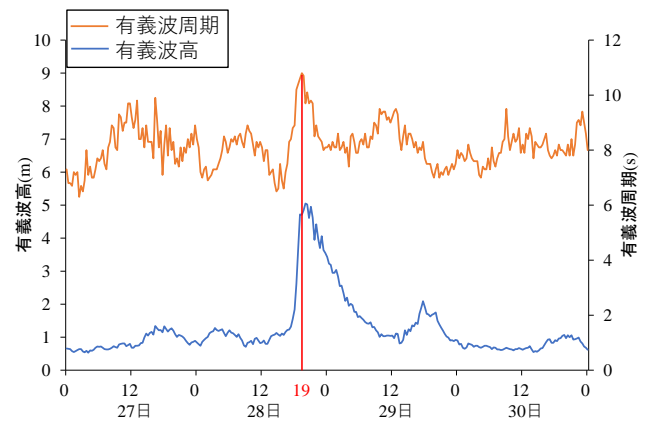


図-2 事故発生時の波浪データ

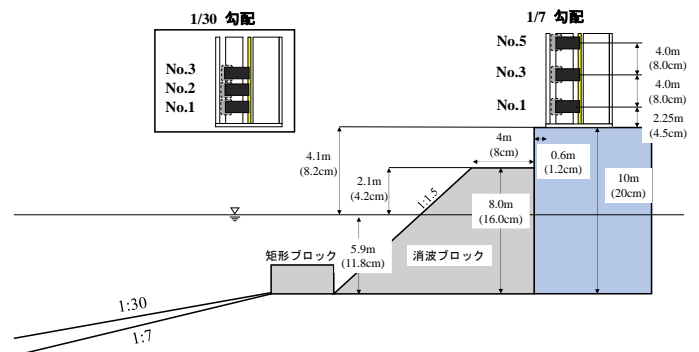


図-3 実験模型

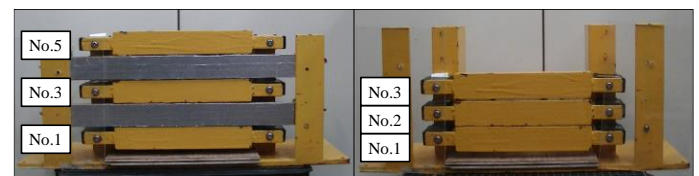


写真-1 受圧板の配置 (左: 勾配1/7、右: 勾配1/30)

3. 実験方法

(1) 実験模型および実験波

2次元造波水路(長さ24m、幅0.6m、高さ1.0m)内に、勾配1/7および1/30の海底地形を作製し、その上に図-3のような縮尺1/50の消波護岸模型を設置した。以下すべて現地量で示す。

実験においては事故発生時の潮位を再現し、護岸前面の水深は5.9m、護岸の天端高さ h_c は4.1mで一定とした。消波工として27.5tのテトラポッドを使用し、その天端高さ h_{cb} は2.1mとした。消波工の天端は2個を標準とし、勾配1/7の実験では天端を1~6個に変化させた。なお、消波ブロックの沖側への流失を防ぐため、法先に矩形ブロック(50t型)を設置した。

実験はすべて不規則波を使用し、1波群150波を作用させた。作用波の周期は事故発生時に近い $T_0=12\text{s}$ とし、換算沖波波高 H_0 は1~10mの10パターンに変化させた。

(2) 越波流量の測定方法

越波実験は勾配1/7のみを対象とし、護岸天端上に直立壁を設置して、その高さを3.8m、7.5m、11.3mの3種類に変化させ、柵なしの場合を含めて合計4パターンと

した。造波開始1分後から150波分の越波水量を計測し、単位時間当たりの越波流量を算出した。なお、同一条件について3回繰り返し計測し、その平均値を求めた。

(3) 波圧の測定方法

波圧実験は勾配1/7および1/30を対象とした。波圧計測のための受圧板は3枚使用し、各受圧板の両端部に取り付けた合計6台のロードセル(定格:50N)により測定した。写真-1に示すように、取り付け位置はNo.1~5の5箇所とし、1/7勾配についてはNo.1, 3, 5に、1/30勾配についてはNo.1, 2, 3の位置に受圧板を配置した。

現地で施工される越波防止柵は、およそ2m程度の間隔で支柱を立て、その間に平板を取り付ける形式が一般的である。本実験では支柱部の作用外力を得ることを目的としているため、波圧分布については3枚の受圧板に働く合力が最大となるタイミングでの波圧を用いて整理した。波圧の測定は同一条件について10回繰り返し、その平均値および標準偏差を求めた。波圧のサンプリングタイムを1msとし、測定系全体の固有振動数はおよそ

140Hz となった。

消波工の天端 2 個の条件に対して、海底勾配による違いを調べた。さらに勾配 1/7 に対しては、消波工の天端を 1~6 個に変化させての作用波圧に及ぼす影響を調べた。

4. 越波特性

(1) 越波流量

図-4 に換算沖波波高 H_0' と越波流量 q の関係を示す。図中の実線は合田ら³⁾による海底勾配 1/10 の越波算定図から読み取った計算値である。 $H_0'=7\text{m}$ 以上において柵なしの実験値がこの計算値を上回っており、これは海底勾配の影響と考えられる。

現地に設置されていた防護柵やガードレールは透過性が高い構造であることから、事故発生時については、 $H_0'=5\text{m}$ の柵なしの場合の実験結果より、越波流量は $2 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ となる。越智ら⁴⁾は海岸道路で越波により大型バスが転倒した事例の再現実験を行っているが、事故当時の越波流量は $2 \times 10^{-2} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ と推定されており、今回の実験によって得られた越波流量と良く一致している。

(2) 越波防止柵の必要高さ

堤前で実測された有義波高 $H_{1/3}$ を用いて、無次元越波流量 q^* と無次元天端高さ h_c^* を以下のように定義した。

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} \quad (1)$$

$$h_c^* = \frac{h_c}{H_{1/3}} \quad (2)$$

図-5 は、すべての実験結果をプロットしたもので、 q^* と h_c^* は概ね直線的な関係にあり、次式の近似曲線で表わすことができる。

$$q^* = 0.030 \cdot \exp(-2.75 \cdot h_c^*) \quad (3)$$

清水ら⁵⁾は海岸道路における高波による車両被害の発生には走行速度が影響することを明らかにしている。ここでは比較的低速で走行することを制約条件として、現地で車両事故が発生した波浪条件である $H_0'=5\text{m}$ に対して、通行安全を確保するための許容越波流量を $1 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ とした。その結果、式(1)~(3)より越波防止柵の天端高 h_c は 10.7m と算出できる。護岸の天端高 4.1m を引くと、越波防止柵の必要高さは 6.6m となった。

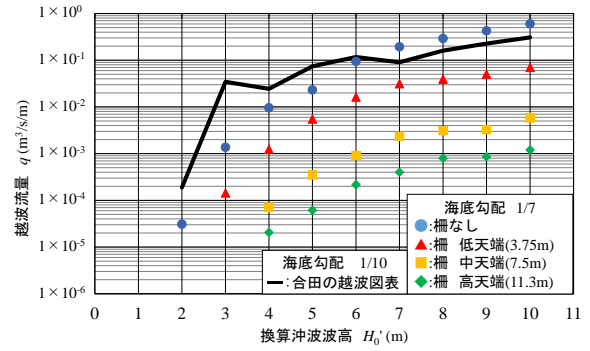


図-4 越波流量

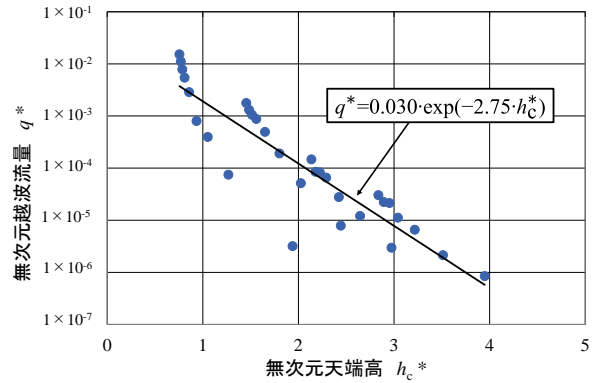


図-5 無次元越波流量

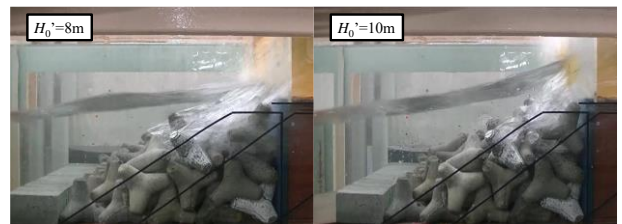


写真-2 波の作用状況 (勾配 1/7: 天端 2 個)

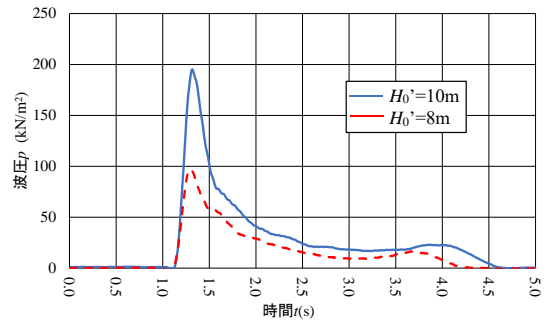


図-6 波圧の時間変化 (勾配 1/7: 天端 2 個)

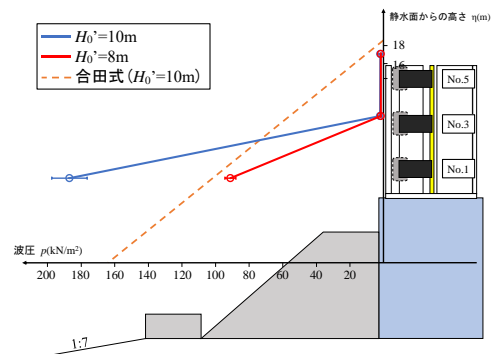


図-7 同時波圧分布 (勾配 1/7: 天端 2 個)

5. 波圧特性

(1) 波の作用状況

写真-2に、消波ブロックの天端を2個とした場合について、波高 $H_0^*=8\text{m}$ と 10m の最高波が作用したタイミングにおける波の作用状況を示す。 $H_0^*=8\text{m}$ では消波ブロックの法面に衝突した後の水塊が受圧板に作用するのに対し、 $H_0^*=10\text{m}$ では強い巻き波により生じた切り立った波面が受圧板に直接衝突していることが分かる。

図-6は、下段部(No.1)の波圧について、 $H_0^*=8\text{m}$ (赤の破線)と 10m (青の実線)の波圧の時間波形を示している。いずれの波高においても、双峰型の波形を示しており、とくに $H_0^*=10\text{m}$ でやや衝撃的な波圧が発生している。

(2) 波圧分布

本研究では、越波防止柵の支柱部の設計に用いる波圧の算定を目的としていることから、波圧合力が最大となるタイミングの同時波圧で評価する必要がある。図-7に、波高 $H_0^*=8\text{m}$ および 10m における同時波圧分布を示す。いずれの波高条件においても、波圧合力が最大となるタイミングではNo.1のみに波圧は発生しており、No.3およびNo.5では波圧は発生しないことが分かる。

図中の破線は、波高 $H_0^*=10\text{m}$ に対して、合田式により求めた消波ブロック被覆堤の波圧分布を示す。作用波圧は合田式に比べて、下部に集中する傾向がある。こうした衝撃的な波圧は水塊の衝突によって発生するものであり、砕波に伴う水塊の質量と移動速度が、波高とともに増大することが影響していると考えられる。

(3) 波高と波圧の関係

図-8にNo.1, 3, 5の受圧板に働く最大波圧と換算沖波波高の関係を示す。下段部(No.1)には $H_0^*=5\text{m}$ から波圧が作用し始め、 $H_0^*=9\text{m}$ で急激に増大する。図中には平均値とともに標準偏差を示しているが、波高とともに標準偏差が増大する傾向がある。

図中の破線は合田式による計算曲線を示しているが、 $H_0^*=9\text{m}$ 以上になると計算値が過小となっている。これは合田式が相対天端高さ $h_0/H_{1/3}$ が $0.6\sim 1.0$ 程度の防波堤に対して定式化されたものであり、道路護岸のような高天端条件は想定されていなかったことが理由と考えられる。

(4) 消波ブロックの天端幅の影響

消波護岸の設計においては、消波ブロックの天端を2個とすることが標準とされているが、拡幅による越波流量の低減効果は、港湾の技術基準⁹⁾にも明記されている。

また消波ブロックが被災した場合には天端が1個にな

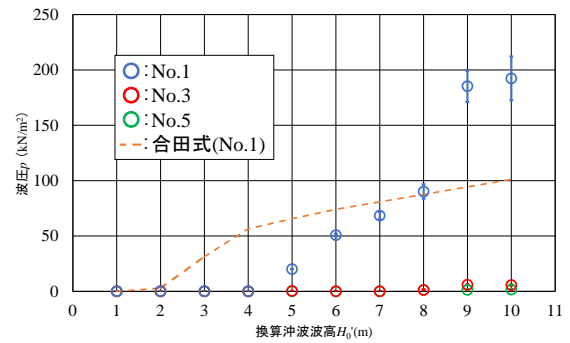


図-8 波高と最大波圧の関係(勾配 1/7:天端 2 個)



写真-3 波の作用状況 ($H_0^*=10\text{m}$)

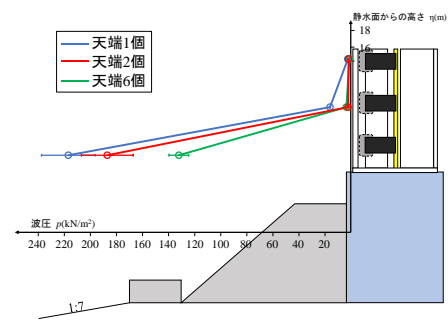


図-9 同時波圧分布 ($H_0^*=10\text{m}$)

る場合も想定される。写真-3は、波高 $H_0^*=10\text{m}$ の最高波が作用したタイミングについて、消波ブロックの天端を1個と6個とした場合の波の作用状況を示している。天端1個の場合は波面が直接受圧板に衝突しているのに対し、天端6個の場合は消波ブロックにより減衰した波が作用していることがわかる。

図-9は、換算沖波波高 $H_0^*=10\text{m}$ に対して、消波工の天端を1個、2個および6個に変化させた場合の同時波圧分布を示している。天端を1個とした場合には、No.1だけでなくNo.3にも波圧が作用するようになった。また天端を2個から広げることによって、徐々に作用波圧が低減していくことが分かる。

図-10は、消波工の天端を1~6個に変化させた場合について、下段部(No.1)の受圧板に働く最大波圧と換算沖波波高の関係を示している。天端を1個とした場合は、 $H_0^*=4\text{m}$ から波圧が作用し始め、 $H_0^*=7\text{m}$ で急激に増大し、作用波圧は天端を2個とした場合の1.1~1.4倍に増大する。

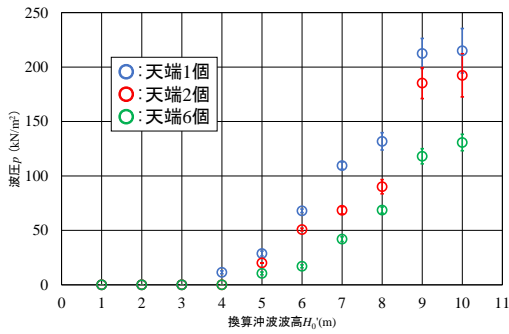


図-10 波高と最大波圧の関係 ($H_0'=10\text{m}$)

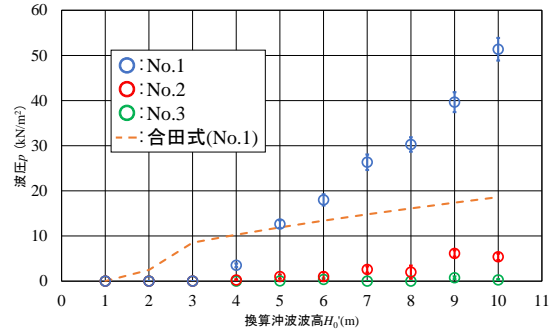


図-12 波高と最大波圧の関係 (1/30 勾配)

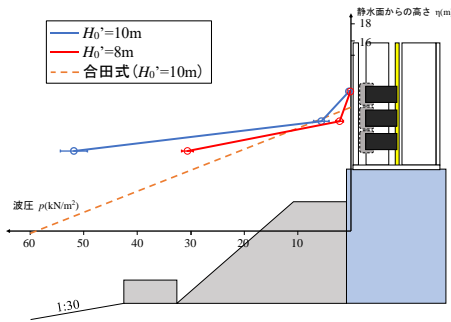


図-11 同時波圧分布 (1/30 勾配)

(5) 海底勾配の影響

図-11 に、1/30 勾配における波高 $H_0'=8\text{m}$ および 10m の同時波圧分布を示す。いずれの波高条件においても、No.1 および No.2 で波圧は発生しており、No.3 では発生しない。1/30 勾配における砕波の形態は崩れ波であり、1/7 勾配で見られた強い巻き波の作用は見られない。 $H_0'=10\text{m}$ では消波ブロックの法面付近で砕波するため、水塊が受圧板に直接衝突する。これに対して $H_0'=8\text{m}$ ではやや前方で砕波し、消波ブロックの法面を遡上した後の水塊が受圧板に衝突したものと考えられる。図中の破線は、波高 $H_0'=10\text{m}$ に対しての消波ブロック被覆堤の合田式による波圧分布を示す。作用波圧は合田式に比べて、下部に集中する傾向がある。

図-12 に各段の受圧板に働く最大波圧と換算沖波波高の関係を示す。下段部 (No.1) には $H_0'=4\text{m}$ から波圧が作用し始め、換算沖波波高に比例して増大する。図中には平均値とともに標準偏差を示しているが、波高とともに標準偏差が増大する傾向がある。1/30 勾配では、前出の図-8 に示した 1/7 勾配に比べて、同一の波高に対する波圧が 1/4~1/3 程度の値となっている。これは急勾配海底条件では堤体の直前で砕波するため、 H_{max} の値が大きくなるのが理由と考えられる。図中の破線は合田式による計算曲線を示しているが、 $H_0'=6\text{m}$ 以上になると計算値が過小となっている。

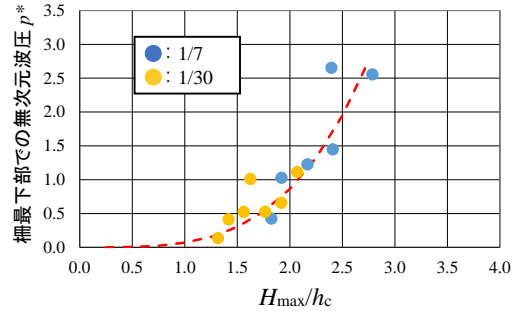


図-13 無次元波圧

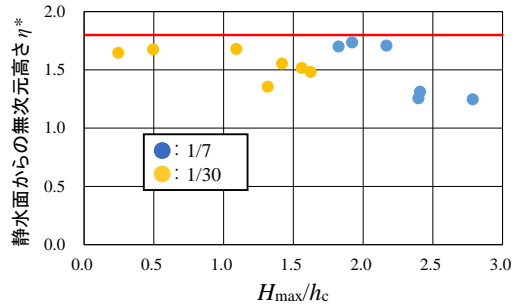


図-14 無次元作用高さ

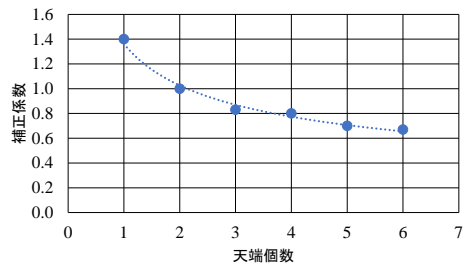


図-15 消波ブロックの天端個数による
無次元波圧の補正係数

6. 作用波圧の算定法

現地において越波防止柵の支柱部の設計の際に用いる波圧は、以下の手順で求めることができる。

最下部に作用する波圧を p_b 、波圧の作用高さを η と定

義し、それぞれ H_{\max} を用いて $p^* = p_b / \rho g H_{\max}$, $\eta^* = \eta / H_{\max}$ と無次元化した。図-13 および図-14 に、消波工の天端を2個とした場合の H_{\max} / h_c に対する p^* および η^* の関係を示す。 p^* と H_{\max} / h_c の関係には海底勾配の影響は見られず、図中の点線で示すように以下の近似式が適用可能である。

$$p^* = 0.069 \left(\frac{H_{\max}}{h_c} \right)^{3.65} \quad (4)$$

また η^* については、安全側の値として 1.8 を用いることとした。

一方、海底勾配 1/7 条件に対して消波工の拡幅が可能な場合は、前出の図-10 に示した実験結果を用いて作成した図-15 により補正係数を求め、これを式(4)に乗することにより波圧を求めることができる。

越波防止柵のパネル部については、ポリカーボネード製の折板が使用されることが多いが、急勾配海底条件に設置された場合に損傷することが少なくない。上久保ら⁷⁾は、海底勾配 1/20 の条件下における損傷事例について報告している。

今回提案した波圧算定法では、越波防止柵の支柱部の設計の際に使用するため同時最大波圧を用いている。パネル部の設計においては局所的に大きな波圧が作用する可能性があるため、別途検討が必要になる。

7. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 急勾配海底条件下の海岸道路で発生した高波被害を分析し、事故発生時の越波流量は $2.0 \times 10^2 \text{ m}^3/\text{s/m}$ であったことが明らかとなった。
- (2) 越波防止柵の高さを3種類に変化させて越波流量 q を求め、無次元波高 $h_c/H_{1/3}$ と無次元越波流量の関係を示した。その結果、車両事故が発生した波浪条件に対して通行安全を確保するための柵高は 6.6m となった。
- (3) 越波防止柵の支柱部に作用する波圧分布を求め、波圧強度と作用高さを最高波高 H_{\max} の関数として定式化した。さらに消波工の拡幅による波圧の低減効果を明らかにした。
- (4) 新たに提案した波圧算定式が海底勾配 1/30 においても適用できることを示した。

本研究では、越波防止柵の支柱部に働く波圧の算定法を示した。今後はパネル部材の作用波圧について検討を行う予定である。

謝辞：本研究の一部はJSPS科研費 課題番号20K04697による助成を受けて実施された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 上久保勝美, 菅原健司, 山本泰司, 木村克俊, 今井浩平, 小原康信, 名越隆雄, 上北正一: 海岸道路用防波フェンスの必要高さ与作用波力に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.B3-67, No.2, I.862-I.867, 2011. [Kamikubo, K., Sugawara, K., Yamamoto, Y., Kimura, K., Imai, K., Obara, Y., Nakoshi, T. and Uekita, M.: Wave Force and Necessary Height of Wave Splash Barrier on Block Mound Seawall for a Coastal Road, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.B3-67, No.2, I.862-I.867, 2011.]
- 2) 木村克俊, 古川諭, 山本泰司, 吉野大仁: 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, 2006. [Kimura, K., HURUKAWA, S., Yamamoto, Y. and Yoshino, D.: Damage Pattern of Wave Splash Barrier for Coastal Highways, *Proceedings of Coastal Engineering*, Vol.53, pp.871-875, 2006.]
- 3) 合田良実, 岸良安治, 神山豊: 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, 港湾技術研究報告 第14巻, 第4号, pp.3-44, 1976. [Gouda, Y., Kishira, Y. and Kamiyama, Y.: Laboratory Investigation on the Overtopping Rate of Seawalls by Irregular Waves, *Report of Port and Harbour Technical Research Institute*, Vol.14, No.4, pp.3-44, 1976.]
- 4) 越智聖志, 木村克俊, 山本泰司, 上久保勝美, 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.B2-71, No.2, pp. I_1003~I_1008, 2015. [Ochi, M., Kimura, K., Yamamoto Y., Kamikubo K. and Nakoshi T.: Hydraulic Model Tests on Vehicle Sliding due to Wave Overtopping and Countermeasures on a Coastal Road, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.B2-71, No.2, pp. I_1003~I_1008, 2015.]
- 5) 清水敏明, 木村克俊, 高橋翼, 山本泰司, 上久保勝美, 名越隆雄, 吉野真史: 海岸道路を走行する車両の高波によるフロントガラス被害の分析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.B2-66, No.1, pp.746-750, 2010. [Shimizu, T., Kimura K., Takahashi T., Yamamoto Y., Kamikubo K., Nakoshi T. and Yoshino M.: Analysis on a Windshield Damage of a Vehicle by Wave Action on a Coastal Road, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.B2-66, No.1, pp.746-750, 2010.]
- 6) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (平成30年改訂版) 上巻, 日本港湾協会, p.169, 2018. [THE PORTS & HARBOURS ASSOCIATION OF JAPAN: Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan (Revised in 2018) Vol.1, p.169, 2018.]
- 7) 上久保勝美, 酒井和彦, 木村克俊, 佐々木理人, 名越隆雄, 上北正一, 越智聖志: 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, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, I.859-I.864, 2017. [Kamikubo, K., Sakai K., Kimura K., Sasaki M., Nakoshi T., Uekita M. and Ochi M.: Design and Construction of Wave Splash Barriers for a Coastal Road of Route 231 at HAMAMASU District of ISHIKARI City, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol.B2-73, No.2, pp. I_859~I_864, 2017.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

NECESSARY HEIGHT AND WAVE FORCE ON WAVE SPLASH BARRIER FOR COASTAL ROAD ON STEEP FORESHORE CONDITIONS

Naotaka NISHIYA, Katsutoshi KIMURA, Katsumi KAMIKUBO,
Yasuji YAMAMOTO, Takao NAKOSHI and Shota ABE

On July 28 in 2018, fifteen vehicles slid due to wave overtopping at a coastal road on the steep foreshore conditions. In this research, hydraulic model tests with irregular waves were conducted on a scale of 1/50 to reproduce the wave overtopping on the block mound seawall with 1/7 seabed slope for the wave and tidal condition when the accident occurred. The wave overtopping rate at the accident was 2.0×10^{-2} m³/s/m, and the necessary height of wave splash barrier was found to be 6.6m for the wave height condition of the accident. The characteristics of wave force on the wave splash barrier was measured by six load cells for wave height $H_o' = 1 \sim 10$ m. Based on the test results, the design wave pressure distribution was formulated as the function of the highest wave height H_{max} , and the wave force reduction effect was disclosed for different block width conditions. The applicability of the formula was also confirmed for 1/30 seabed slope conditions.