

緩傾斜護岸背後の道路上の車両に働く越波による波力に関する検討

越智 聖志¹・木村 克俊²・中村 彰吾³
宮武 誠⁴・上久保 勝美⁵・袖野 宏樹⁶

¹正会員 日本データサービス(株) 水工部 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)
E-mail: m-ochi@ndsinc.co.jp

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

³非会員 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: 11021080@mmm.muroran-it.ac.jp

⁴正会員 函館工業高等専門学校 准教授 (〒042-8501 函館市戸倉町14-1)
E-mail: miyatake@hakodate-ct.ac.jp

⁵正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
E-mail: kamikubo-k22aa@ceri.go.jp

⁶正会員 日本データサービス(株) 水工部主任技師 (〒065-0016 札幌市東区北16条東19丁目1-14)
E-mail: sode@ndsinc.co.jp

緩傾斜護岸では、高波浪時において護岸背後の道路で通行障害が発生することがある。本研究では、まず現地調査を行って、越波による車両の危険性を明らかにした。水理模型実験では、3種類の周期条件に対して波高を変化させて、①海側車線部における最大越波水脈厚、②越波流量、③車両に働く水平波力、の特性を明らかにした。また、最も周期の長い条件に対して、最大越波水脈厚の空間分布を示した。さらに、最大越波水脈厚を指標として、車両に働く波圧分布を定式化するとともに、車両滑動実験によりその妥当性を確認した。

Key Words : gently sloping seawall, coastal road, wave overtopping, horizontal wave force

1. はじめに

近年、我が国においては、親水性が高く、環境共生にも適した護岸形式である緩傾斜護岸が各地で施工されている。この護岸形式では、斜面部を波が遡上しやすいことから、その設計においては、越波特性の把握が重要である。玉田¹⁾は、様々な傾斜角の緩傾斜護岸に対する越波流量算定図を作成し、法先水深および波高比の増大や、相対護岸天端高の減少とともに越波流量が増加することを示し、合田²⁾による直立護岸の越波流量算定図と比較して、緩傾斜護岸の越波低減効果を明らかにしている。また、鈴木³⁾は、緩傾斜護岸背後の天端上における越波流速・水深および越波量を水理模型実験により把握するとともに、護岸前面における砕波後の3次元性渦を評価した3次元LES(Large Eddy Simulation)数値モデルの適合性を検証している。

これらの既往研究により、緩傾斜護岸の一般的な越波特性は明らかにされてきたが、背後地に存在する道路の安全性については十分に検討されていない。こうした緩

傾斜護岸背後の道路において、越波による車両被害を防止するためには、車両の危険性を定量的に評価した上で、明確な通行規制基準を設定する必要がある。

本研究では、太平洋側に面するA海岸に設置された緩傾斜護岸を対象として、高波浪時の緩傾斜護岸背後道路での危険性について、現地調査および水理模型実験により明らかにするとともに、越波水脈厚を評価指標とし、車両に作用する波力の定式化を行うことによって、海岸道路における車両通行の安全性を向上させることを目的としている。

2. 現地の状況

(1) 越波状況

本研究で対象とした緩傾斜護岸の断面形状を図-1に示す。護岸法先部には、越波低減を目的とした3.2 t型の消波ブロックが設置されており、その背後に1:4勾配の緩傾斜部(40.0 m)および1:2勾配の道路路面(3.0 m)が存在する。また、現地の海岸道路は、海拔5.0 mの地盤高

さである。

写真-1に、当該緩傾斜護岸での常時波浪作用時の状況を示す。写真撮影時の波浪および潮位条件は、近隣港のナウファスデータおよび気象庁による観測データにより、有義波波高 $H_{1/3} = 0.54$ m, 有義波周期 $T_{1/3} = 3.40$ s およ

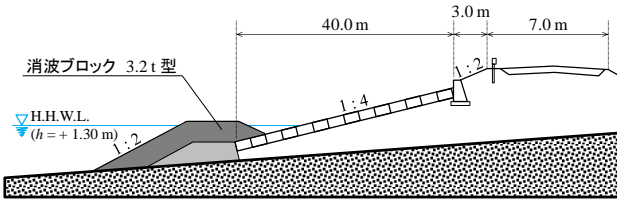


図-1 A 海岸の緩傾斜護岸の断面形状



写真-1 常時波浪の作用状況



写真-2 高波浪時における道路上への越波状況

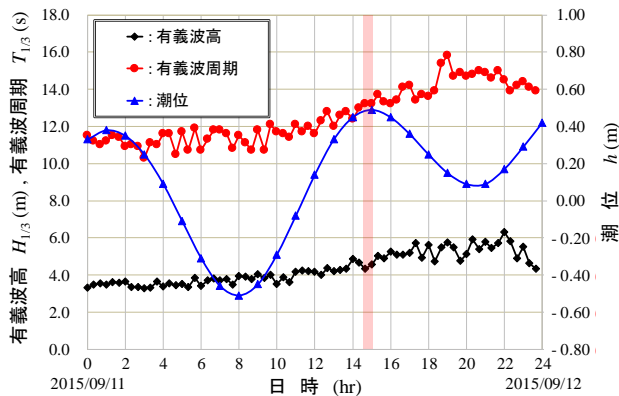


図-2 越波発生時の波浪および潮位

び潮位 $h = +1.10$ mであり、潮位がやや高いものの穏やかな海象状況であることがわかる。

一方、高波浪時には、写真-2に示すように緩傾斜護岸背後地の海岸道路上にまで激しい越波が生じはじめる。越波水は、陸側車線の路側帯にまで達していることがわかる。この写真の撮影時は、海岸道路が全面通行止めとなっていた。図-2に写真撮影日の波浪および潮位の時系列を示す。写真撮影時刻が14時半頃であることから、有義波高 $H_{1/3} = 4.32$ m, 有義波周期 $T_{1/3} = 13.2$ s および潮位 $h = +0.45$ m という厳しい海象状況であったことがわかる。

(2) 砂の堆積状況

A海岸においては、過去数年にわたり高波浪時における道路部への砂の堆積状況について調査が行われている。表-1は、経年調査より、道路上への砂の堆積が確認された代表的な5ケース (Case.A~E) の有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$, 潮位 h , 波向および砂の堆積距離 B の状況である。ここで、同表中の B は、図-3に示すように道路法面部と道路路側帯の境界を原点とし、砂が連続して堆積している区間内の最大到達地点までの距離としている。図-4に各周期帯における有義波高 $H_{1/3}$ と砂の堆積距離 B の関係を示す。 B は、波高および周期の増大に伴い、その距

表-1 道路部への砂の堆積距離および海象条件

ケース名	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	潮位 h (m)	波向	砂の堆積距離 B (m)
Case.A	3.03	11.6	+0.53	E	0.53
Case.B	3.85	10.6	+0.55	SE	0.80
Case.C	6.55	12.8	+0.54	SSE	4.70
Case.D	4.15	14.6	+0.05	ESE	3.60
Case.E	3.68	17.4	-0.11	SSE	4.00

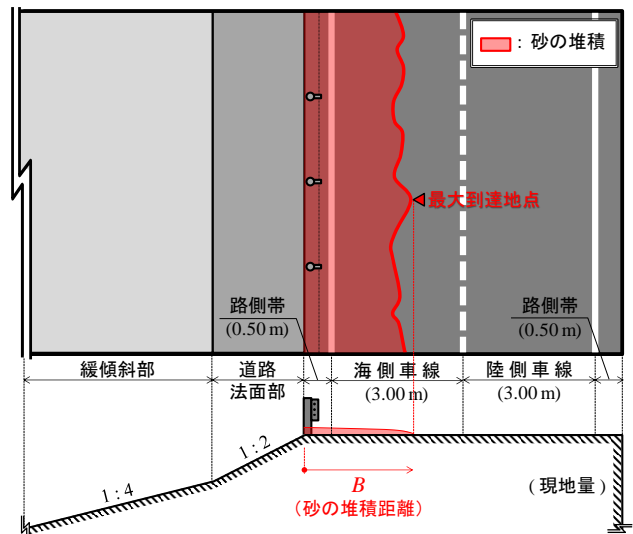


図-3 砂の堆積距離の推定方法

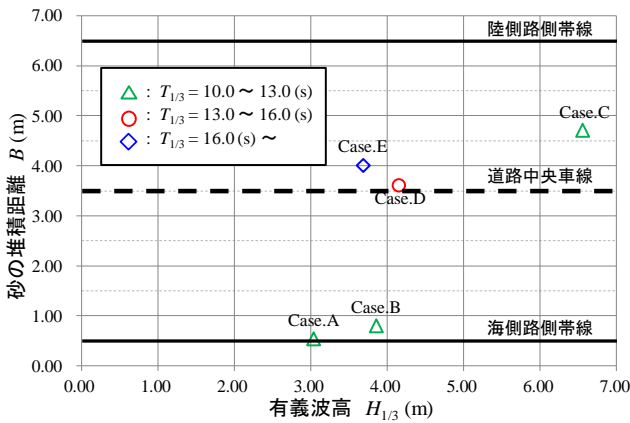


図-4 有義波高と砂の堆積距離の関係

離を増加させている。また、緩傾斜護岸では、周期の影響が大きく、Case.B, DおよびEを比較すると、同程度の波高4.00 mに対する条件下においても、周期の長い波浪条件の方がBを増大させていることがわかる。

さらに、当該路線における上記の5ケースを含む過去の道路部への砂の全堆積履歴から、砂の堆積が中央線を越えない海象条件は、有義波高 $H_{1/3} = 2.33 \sim 3.85$ m, 有義波周期 $T_{1/3} = 6.7 \sim 11.6$ sおよび潮位 $h = +0.16 \sim +0.67$ mの範囲であることが明らかとなっている。また、中央線 ($B = 3.50$ m) を越えて砂の堆積が生じる海象条件は、全体として $H_{1/3} = 4.00$ m以上であるが、Case.Eのように周期が非常に長い場合においては、 $H_{1/3} = 4.00$ m以下においても道路中央線付近まで砂の堆積が発生する傾向がある。

3. 海岸道路部への越波特性

(1) 実験方法

越波実験は、2次元造波水路（長さ24.0m、幅0.6m、深さ1.0m）内に海底勾配1/30の地形を設置し、図-5に示すように縮尺1/40でA海岸における緩傾斜護岸および法先部の消波ブロック（現地3.20 t型）を再現した。波浪および潮位条件は、表-2に示す1潮位3周期6波高の計18実験波高とした。ここで、潮位は、護岸背後道路部への越波が生じやすいように、現地におけるH.H.W.L.に相当する $h = +1.30$ mを採用した。また、実験波は、すべて150波1波群の不規則波を用いた。

越波に対する海岸道路の危険性の評価は、おもに道路部海側車線の路側帯線であるI断面において行った。計測項目は、越波流量 q および最大越波水脈厚 η_{max} とした。 q は、I断面において道路部の縦断方向中央部に幅10.0 cmの樋を設置して越波量を計測したのち、単位時間および単位幅あたりに換算し計測した。また、 η_{max} は、道路基面高さを基準とした越波水脈厚 η のうち、I断面に設置した容量式波高計を用いて計測した不規則波群中の最大波作用時の水脈厚を採用した。さらに、最も越波外力が大きいと推測される周期 $T_0 = 15.0$ sに関しては、道

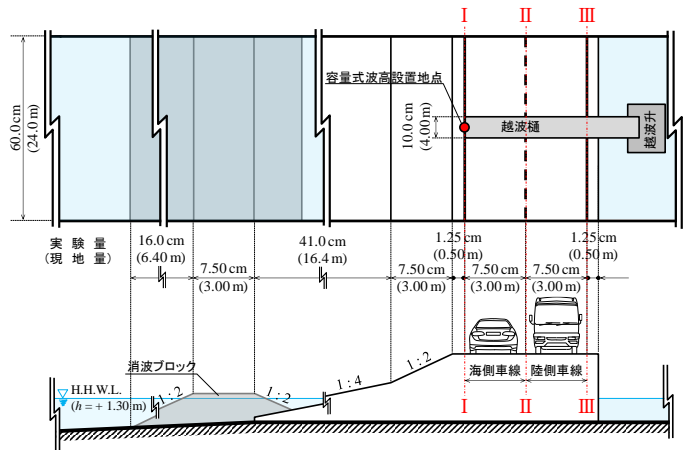


図-5 実験に用いた緩傾斜護岸の断面図および平面図

表-2 実験時の波浪および潮位条件

	潮位 h	周期 T_0	換算沖波波高 H_0'
現地量	+1.30 m	11.0, 13.0, 15.0 s	2.00, 3.00, 4.00 5.00, 6.00, 7.00 m
実験量	+3.25 cm	1.74, 2.06, 2.37 s	5.00, 7.50, 10.0 12.5, 15.0, 17.5 cm

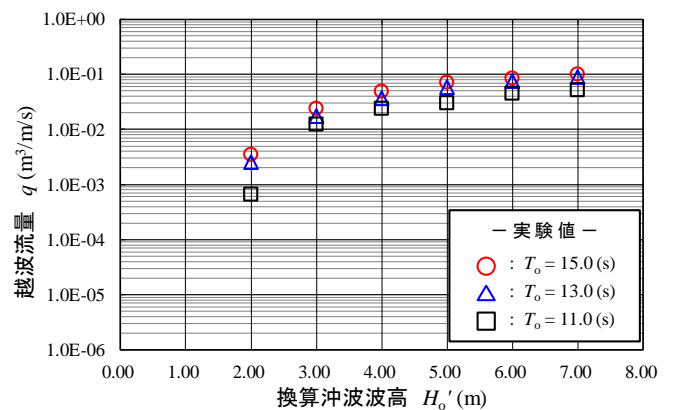


図-6 換算沖波波高と越波流量の関係

路上における越波水脈厚の空間分布を明らかにするため、同図-5中に示すIIおよびIII断面において水位の時間変化を計測した。

以上の越波流量 q , 最大越波水脈厚 η_{max} および越波の空間分布については、同一の実験波条件に対し、それぞれ3回ずつ繰り返して計測を行い、その平均値を用いて実験結果を整理した。

(2) 越波流量

図-6に各周期 T_0 における換算沖波波高 H_0' と越波流量 q の関係を示す。周期が長いほど q の値が増大することがわかる。また、すべての実験波条件において、海岸道路を走行する車両に対する越波流量の許容値である 1.0×10^4 m³/m/sを大きく上回っており、現地におけるH.H.W.L.時の条件では、換算沖波波高 $H_0' = 2.00$ m程度であっても海岸道路の走行が危険であることがわかる。

(3) 最大越波水脈厚

図-7に各周期 T_0 におけるI断面での換算沖波波高 H_o' と最大越波水脈厚 η_{max} の関係を示す. 同図中の実線および破線は, 実験値の回帰曲線を示す. 越波流量 q と同様に, 周期が長いほど η_{max} の値が増大している. これは, 周期が長いほど, 最大波1波あたりの越波水量が増大するためと考えられる. さらに, 全周期において η_{max} は, 対数関数的な増加傾向を示していることがわかる.

図-8に周期 $T_0 = 15.0$ sにおける, 各断面における越波水脈の道路横断方向距離 L に対する空間分布を示す. ここで, I断面とII断面の水脈厚 η の減衰率が大きいのにに対し, II断面とIII断面に大きな差異がみられないことがわかる.

以上のことから, 次章で行う緩傾斜護岸背後道路における車両に対する波力計測実験は, 最も越波外力の大きな海側車線のI断面のみで評価を行う.

4. 車両に働く波力特性

(1) 実験方法

緩傾斜護岸背後における波圧の基本的な特性を明らかに

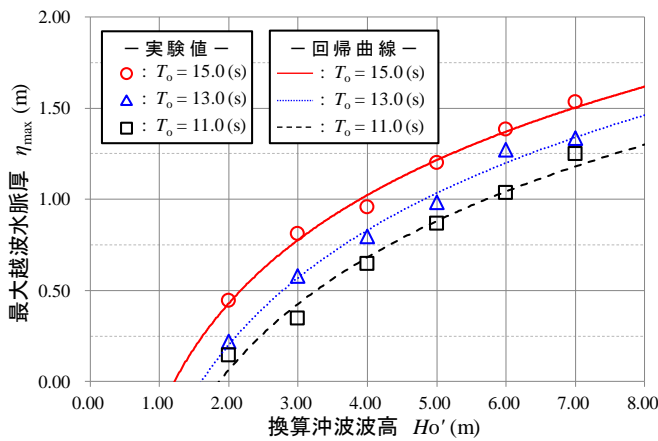


図-7 換算沖波波高と最大越波水脈厚の関係

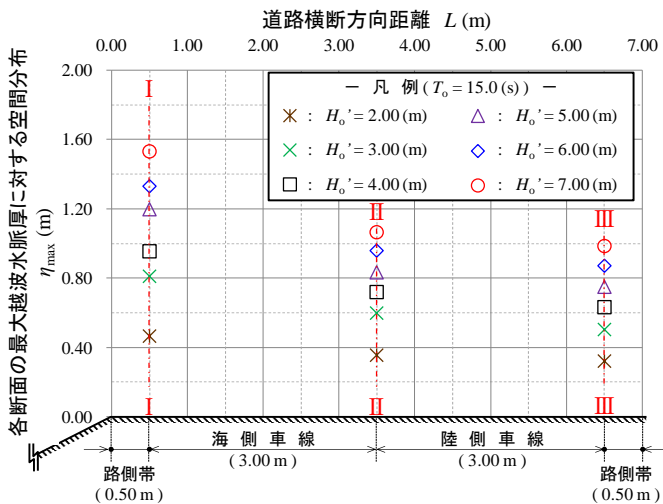


図-8 周期 15.0s における越波水脈厚の空間分布

かにするために, 図-9に示すように海側車線のI断面横断方向を遮蔽する直立壁(高さ 4.20 m (現地量))を設置して, これに高さ方向等間隔に3つの波圧計を配置した.

車両に作用する波力の計測方法を図-10 (a)および(b)に示す. 車両模型(高さ 39.0mm, 幅 50.0mm, 長さ 190.0mm)を1分力計(定格 10N)に吊りし, 海側車線における水平波力 F_H を計測した. 車両と路面間のクリアランス s は, 一般的な車両の $s = 0.24$ mを用いた.

波圧分布および波力計測の両実験は, 計測時のサンプリング周波数を 100 Hz とし, 1 実験波につき 3 回計測を行い, その平均値を実験値とした.

さらに, 計測した水平波力の妥当性を確認するため, 波力計測実験で用いた車両模型と同寸法の滑動車両を用いて車両滑動限界質量 M_L の計測を行った. 車両質量は, 車両模型中空部に重さが均一になるように鉛玉を詰めて変化させた. また, 車両模型のゴムタイヤと路面の摩擦係数は, 予め行った車両の静的な引張り試験より $\mu = 0.40$ であることを確認した. この μ は, 一般的なコンクリート路面の湿潤状態におけるタイヤと路面の値とほぼ同程度である. 以上の車両滑動実験についても, 1 つの実験波につき 3 回計測を行い, その平均値を実験値とした.

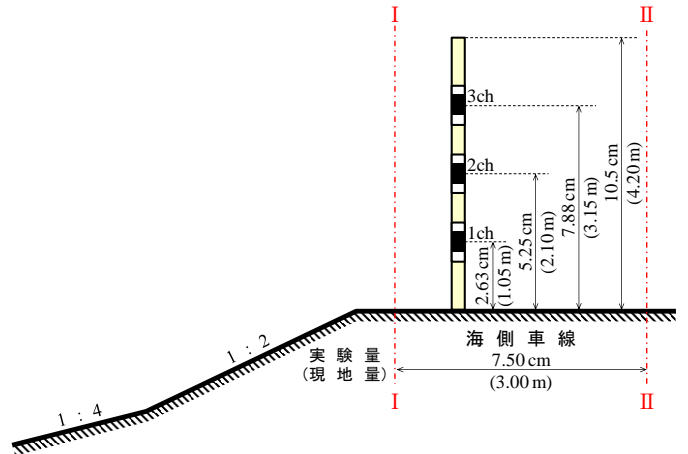
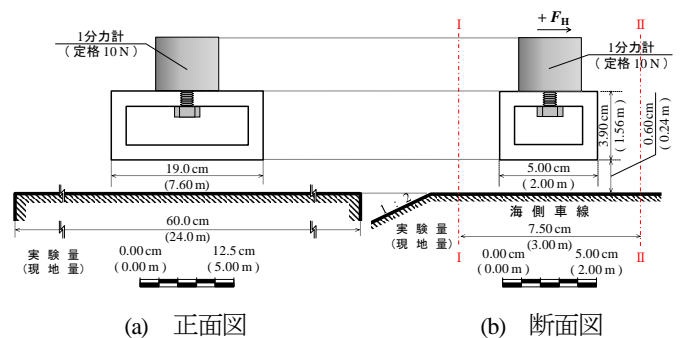


図-9 直立壁に働く波圧分布の計測実験



(a) 正面図

(b) 断面図

図-10 車両に働く波力の計測実験

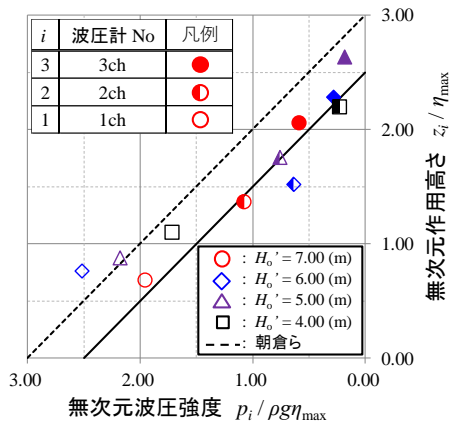


図-11 緩傾斜護岸背後地における無次元波圧分布

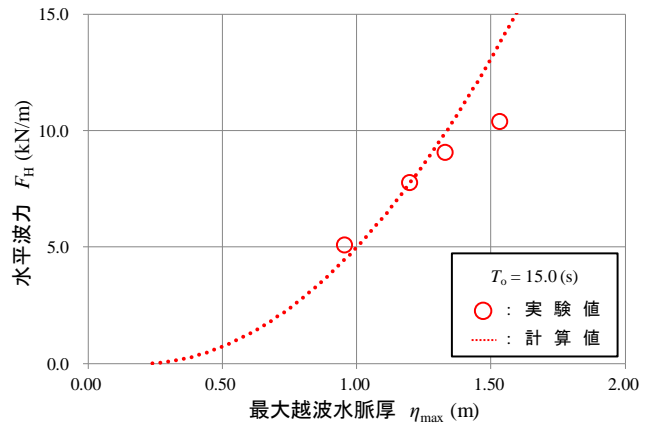


図-13 最大越波水脈厚と水平波力の関係

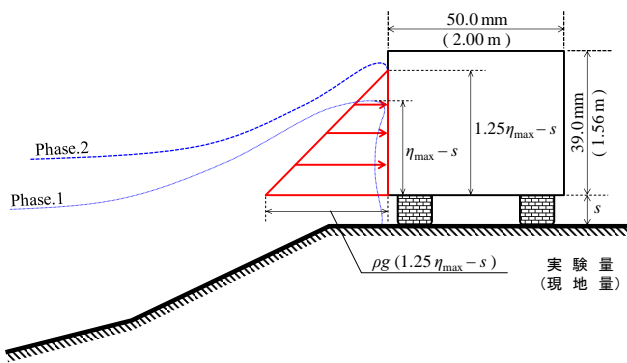


図-12 車両に作用する水平波圧の分布形状

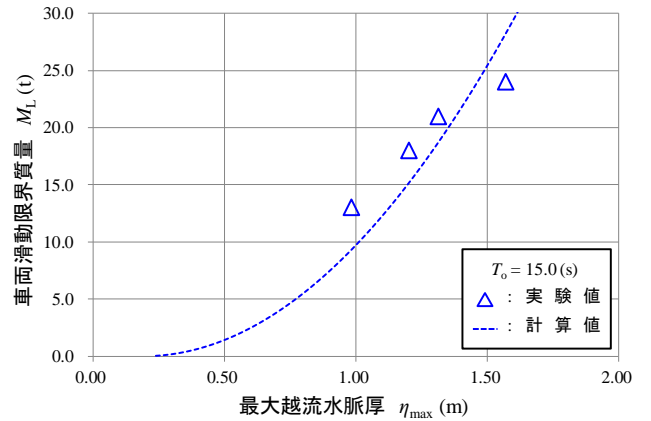


図-14 最大越波水脈厚と車両滑動限界質量の関係

(2) 波圧分布および波力特性

図-11に換算沖波波高 $H_0' = 4.00, 5.00, 6.00$ および 7.00 m時の緩傾斜護岸 I 断面背後における直立壁への無次元波圧分布を示す。ここで、 $H_0' = 3.00$ m (最大越波水脈厚 $\eta_{max} = 0.81$ m) 以下の計測に関しては、後述する車両滑動実験において、車両模型(マイクロバス)の最小質量 10.0 t (現地量)において滑動が生じなかったため、計測を省略している。同図中に示す実線の無次元波圧分布は、無次元波圧強度 $p_i / \rho g \eta_{max}$ および無次元作用高さ z_i / η_{max} ($i = 1, 2$ および 3 は、それぞれ波圧計 1ch, 2ch および 3ch) をそれぞれ 2.50 倍した静水圧分布となることがわかる。これは護岸背後地に大きな水量を有する越波が動的に作用するため生じたものと考えられる。また、これらの値は、同図中の破線で示す朝倉ら⁴⁾の津波に対する無次元波圧分布よりもやや小さいことがわかる。

車両は3次元的な構造を有するとともに、車両と路面間にクリアランス s が存在するため、直立壁に作用する断面2次元的な波圧分布をそのまま用いることはできない。本研究では、最大越波水脈厚 η_{max} が車両側面に作用した際の波圧分布を図-12に示すようにモデル化した。後述する車両滑動実験より、車両の滑動は、単に車両へ η_{max} が作用した瞬間の Phase.1 では生じず、越波が車両側面に衝突し、その水塊が η_{max} の 1.25 倍上部へ打ち上がった Phase.2 の事象で生じる。この $1.25\eta_{max}$ に関しては、各

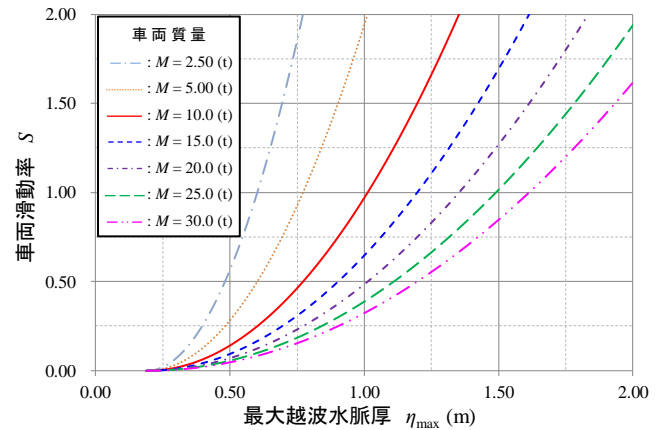


図-15 最大越波水脈厚と車両滑動率の関係

波高条件に対する車両滑動動画のビデオ解析より明らかとした実験定数である。以上より、車両へ作用する水平波力 F_H は、車両クリアランス s を考慮すると(1)式のように推定できる。

$$F_H = 0.50 \rho g (1.25 \eta_{max} - s)^2 \quad (1)$$

ここに、 ρ は水の密度、 g は重力加速度を示す。

図-13に最大越波水脈厚 η_{max} と水平波力 F_H の関係を示す。 η_{max} の増大に伴い F_H は増加していることがわかる。

また、同図中の破線は、(1)式による F_H の計算値であり、実験値を概ね良好な精度で再現している。ここで $\eta_{\max} = 1.50 \text{ m}$ 以上の場合は車両全体を覆う越波が生じたため、(1)式による F_H の再現性が低下したものと考えられる。

(3) 車両滑動限界質量

図-14 に最大越波水脈厚 η_{\max} と車両滑動限界質量 M_L の関係を示す。また、同図中の破線は、(1)式の水平波力 F_H の算定式を用いて以下に示す(2)式から算出した M_L の計算値である。

$$M_L = \frac{0.50\rho B(1.25\eta_{\max} - s)^2}{\mu} \quad (2)$$

ここに、 B は車両長さ、 μ はタイヤと路面間の摩擦係数(= 0.40)を示す。計算値は、概ね良好な精度で実験値を再現している。以上のことから、(1)式で示した緩傾斜護岸背後地における車両に対する水平波力の算定式の妥当性が確認できた。

車両滑動率 S は、越波による滑動力と車両の自重による滑動抵抗力の比として以下に示す(3)式で評価することができる。

$$S = \frac{F_H \cdot B}{\mu(M \cdot g)} \quad (3)$$

図-15 に、車両質量 M をパラメータとして、最大越波水脈厚 η_{\max} と車両滑動率 S の関係を示す。これにより、 M が車両の滑動安定性に及ぼす影響を評価することができる。

5. まとめ

本研究で得られた結論を要約すると、以下に示すとおりである。

- (1) A 海岸における緩傾斜護岸の現地調査により、高波浪時における護岸背後地の道路に対する越波状況および砂の堆積状況を示した。
- (2) 高波浪時における緩傾斜護岸直背後の道路に対する越波特性を水理模型実験により明らかにした。
- (3) 道路部への最大越波水脈厚を評価指標として、越波により車両へ作用する水平波力の算定法を提案した。
- (4) 車両滑動限界質量より、提案した水平波力式の妥当性を確認した。

参考文献

- 1) 玉田崇, 井上雅夫, 手塚崇雄: 緩傾斜護岸の越波流量算定図とその越波低減効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.641-645, 2002.
- 2) 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, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 4 号, pp.3-44, 1976.
- 3) 鈴木崇之, 岡安章夫, 田中真史: 緩傾斜護岸の越波水理特性実験と LES 数値計算, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.631-635, 2003.
- 4) 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則: 護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.911-915, 2000.

(2016.2.4 受付)

WAVE FORCES DUE TO WAVE OVERTOPPING ON THE VEHICLE ON THE ROAD BEHIND GENTLY SLOPING SEAWALL

Masashi OCHI, Katsutoshi KIMURA, Shougo NAKAMURA, Makoto MIYATAKE, Katsumi KAMIKUBO and Hiroki SODENO

Traffic hindrances were often caused by overtopping waves under storm wave conditions on coastal roads behind gently sloping seawalls. In this study, the damage risk of vehicles due to wave overtopping was revealed by the field observation data. Based on the results of hydraulic model experiments with irregular waves, the characteristics of wave overtopping water thickness, wave overtopping rate and the horizontal wave force on the vehicle were disclosed for three wave period conditions at the sea side road section. The relationship between maximum wave overtopping thickness and offshore wave height was shown for wave period conditions. In order to examine the stability of vehicles for the longest wave period condition, the wave pressure distribution was formulated as a function of the wave overtopping thickness on the road. The validity of the calculation formula was also confirmed by the sliding experiment of vehicles.