

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

Analysis on a windshield damage of a vehicle by wave action on a coastal road

清水敏明¹・木村克俊²・高橋 翼³・山本泰司⁴・上久保勝美⁵・名越隆雄⁶・吉野真史⁷

Toshiaki SHIMIZU, Katsutoshi KIMURA, Tasuku TAKAHASHI, Yasuji YAMAMOTO
Katsumi KAMIKUBO, Takao NAKOSHI and Masafumi YOSHINO

On October 21, 2007, the vehicle accident to which the windshield was damaged by wave action occurred on a coastal road along the Japan Sea. In this study, the situation when the accident occurred was clarified by the hearing such as those who drove and the road administrator. Wave overtopping rate and vertical wave force acting on the vehicle were reproduced by two dimensional hydraulic model tests with irregular waves. The hydrodynamic pressure that acted on the windshield was formulated by using the speed of the vehicle. The hydrodynamic pressure is proportional to the second power of the speed of the vehicle, and the influence of the angle of the windshield became clear. The limitation of the speed of the vehicle is also proposed to evade the vehicle damage.

1. はじめに

海岸道路では、高波時の越波によって走行車両に被害をもたらす危険性があるため、道路管理者は、気象・海象情報を把握しながら、必要に応じて徐行、片側交互通行あるいは全面通行止めの規制を講じる必要がある。しかしながら、現状では海岸道路の通行規制については明確な基準が定められておらず、高波時において通行車両に被害が発生する事例も少なくない(木村ら, 2001, 2003)。

本研究では、高波によるフロントガラス被害事例を対象として、水理模型実験と粒子法を用いた数値解析によりその要因について分析し、車両被害への走行速度の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 事故の状況

2007年10月21日、写真-1に示す日本海に面する2車線の海岸道路において越波による車両被害事故が発生した。写真-2は事故車両の全景とフロントガラスの損傷状況を示したものである。フロントガラス全体に亀裂が入ったが、側面部には被害が生じていない。被害発生地点の路面上には砂礫等の散乱はなく、越波水の打ち込みによりこうした被害が発生したものと推定された。

運転者の証言によると、事故当時は時速約60kmで海側の車線を走行していた。前方の路面は濡れていたもの

の越波が路面上まで達する状況は見られなかった。走行中突然、海からの激しい越波水塊に襲われ一瞬視界が奪われた。その直後、激しい水しぶきがフロントガラス全体を叩き、ガラスに亀裂が生じた。越波からフロントガラスが損傷するまでは一瞬の出来事であり、ブレーキをかけて減速する余裕は全くなかった。

図-1は、気象庁配信のGPV (Grid Point Value) より事故発生当日の現場海域の波浪状況(推算値)を示している。これによると、当日は未明より徐々に波高が高まり、



写真-1 事故が発生した海岸道路



写真-2 事故による被害車両

1		日本データーサービス(株) 水工部
2	正会員	博(工) 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授
3		修(工) 東亜建設工業株式会社
4	正会員	博(工) (独法)土木研究所 寒地土木研究所
5		(独法)土木研究所 寒地土木研究所
6	正会員	(株)ドーコン 防災保全部
7	正会員	(株)アルファ水工コンサルタンツ

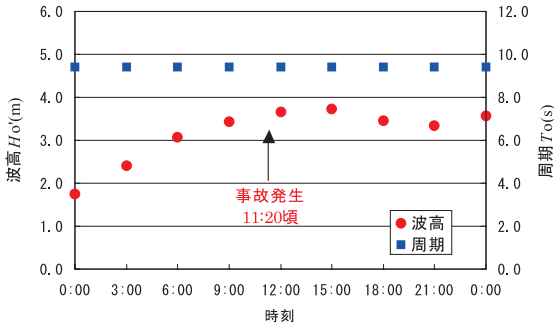


図-1 事故発生当日の波浪 (GPVによる推算値)

正午すぎにピークをむかえている。事故発生時刻は、ちょうどこの波高がピークを迎えた時間帯に一致する。

3. 越波および打込み波圧実験

(1) 実験方法

実験は現地を再現した縮尺1/15の条件で行った。図-2に示す通り実験水路には、1/20勾配の固定床海底面とこれに続く水平部を作製した。被害発生地点の道路護岸は図-3のように再現した。消波部には1.9kg (現地換算6.4t)のテトラポッドを使用した。堤体設置位置での水深は22.9cm (現地換算3.43m) で一定とした。

実験は全て不規則波 (1波群150波) とし、実験波の周期は $T_{1/3} = 9.0s, 11.0s$ の2種類、波高 H_o' は1.5~6.0mの範囲で6~7種類に変化させた。実験では越波流量と打込み波圧の計測を行った。

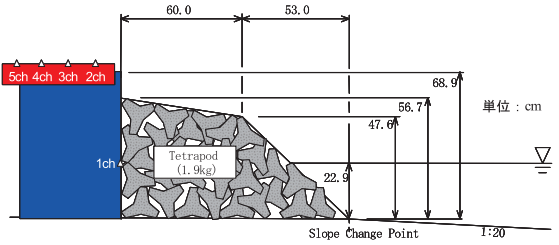


図-3 道路護岸の断面モデル

越波流量の観測は、天端上に導水樋 (幅10cm, 高さ10cm, 長さ150cm) を設置し、回収した越波水量を単位幅・単位時間当たりの越波流量 q ($m^3/m/s$) に換算した。越波流量は1つの波高条件に対して3回測定を行ってその平均値を採用した。

波圧は、護岸前面に働く水平波圧を1箇所 (1ch) と走行車両のフロントガラスの位置 (路面上1.5m) における鉛直波圧を4箇所 (2ch~5ch) で計測した。護岸前面の1chはゼロアップクロス法により波圧データを1波ごとに区切るために設置したものである。波圧ははばらつきが大きいことを考慮して1つの波高条件に対して10回測定を行った。

(2) 実験結果

越波状況を写真-3に示す。消波ブロック法面から打上げられた水塊が路面上に上方から打込む状況が見られる。

図-4は、換算沖波波高 H_o' と越波流量の関係を示している。周期 $T_{1/3} = 9.0s, 11.0s$ のいずれの場合でも $H_o' = 3.0m$ で越波流量 q は $1 \sim 2 \times 10^{-4} m^3/m/s$ 程度でピークを示

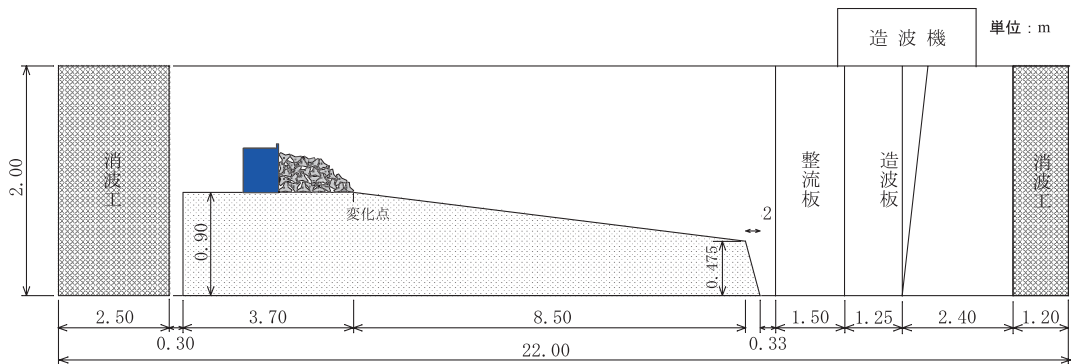


図-2 実験水路



写真-3 越波状況 ($T_{1/3}=11.0s, H_o'=3.0m$)

している。この値は福田ら (1973) による走行中の自動車を対象とした許容越波流量である $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m/s}$ (90%安全度) $\sim 2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ (50%安全度) を越えている。

図-5は、被害発生時の波浪条件に近い $T_{1/3} = 9.0\text{s}$, $H_o' = 2.5\text{m}$ と 3.0m に対する打込み波圧 p の最大値 (各回の最大値の平均値) の分布を示している。海側車線での打込み波圧はおよそ 10kN/m^2 であることから、落水圧力としてこの値を用いることとした。

図-6は3chにおける $T_{1/3} = 9.0\text{m}$, $H_o' = 3.0\text{m}$ での波圧の出現頻度を示している。 10kN/m^2 を越える波圧は全10回 (1500波) の観測で3回出現しており、その確率は0.2%になる。

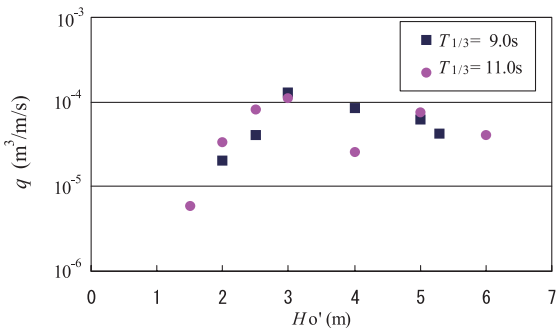


図-4 越波流量

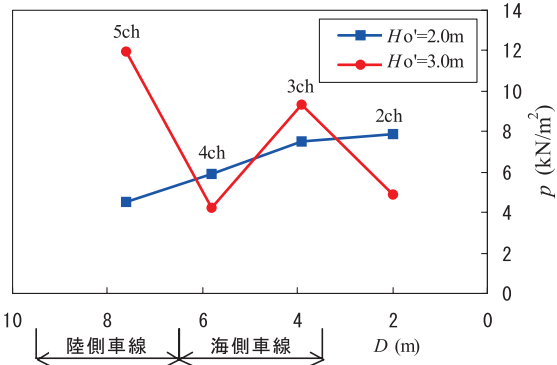


図-5 打込み波圧の分布

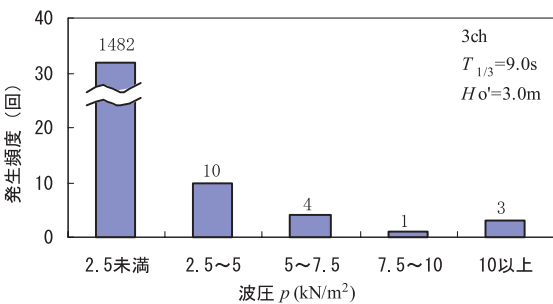


図-6 打込み波圧の出現頻度

4. 車両走行実験

(1) 実験方法

図-7に示す実験水槽 (長さ2.00m, 幅0.97m, 深さ1.00m) の上部に越波による落水を想定した吐出口を設置し、水平面に働く水圧が現地換算で 10kN/m^2 となるようポンプの流量を調整した。水槽内には走行台車を設け、その上に車両模型を固定した。車両に取り付けたゴムの長さを調節することにより、車両速度を変化させた。車両模型の縮尺は1/40とし、走行速度はビデオカメラで撮影した画像を解析して求めた。波圧計 (受圧面の直径約1cm) はフロントガラス部の中央に1点設置し、水流の衝突によって生ずる流体圧力を測定した。

実験を行った車両のフロントガラス角度と走行速度は表-1に示す通りである。

(2) フロントガラスに働く流体圧力

図-8は、速度 V_0 の落水が、速度 V_D で走行する車両に衝突する際に働く流体圧力の発生パターンを示している。車両のフロントガラスに作用する流体圧力 p は次式で表される。

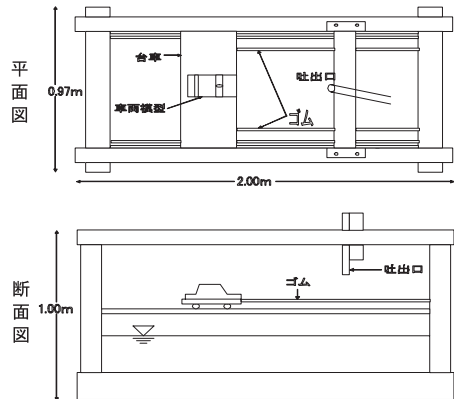


図-7 車両走行実験装置

表-1 実験ケース

フロントガラス角度 θ ($^\circ$)	30, 45, 60
走行速度 V_D (cm/s) 現地換算速度 (km/h)	74.2, 133.4, 181.1, 249.5 (17, 30, 41, 57)

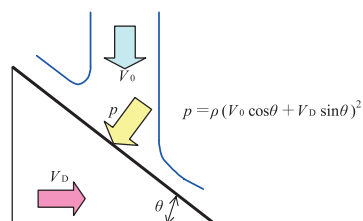


図-8 フロントガラスに働く流体圧力

$$p = \rho(V_0 \cos\theta + V_D \sin\theta)^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 θ はフロントガラスが水平面と成す角度である。

(3) 実験結果

図-9はフロントガラスの傾斜角度 θ が 45° の場合について、走行速度 V_D と圧力 p の実験結果を示している。実線で示した式(1)による理論値は実験値とほぼ一致し、圧力 p が走行速度 V_D の2乗に比例する傾向が認められる。

図-10は、走行速度 V_D を4種類に変化させたときの、フロントガラスの角度 θ と圧力 p の関係を示している。 θ がある程度の大きさになるまでは圧力 p は増大するが、その後は圧力 p が減少する傾向が見られる。こうした傾向は、式(1)を用いて求めた実線とほぼ一致している。

5. 数値解析による検討

(1) 解析手法

走行時にフロントガラスが受ける落水圧力の解析は、粒子法により実施した。粒子法は連続体を有限個の粒子によって表し、その挙動を粒子運動によって計算する方法である。メッシュデータを必要とせず、粒子で構成された解析データにより、飛沫を伴う流体の自由表面流れや分離・合体を解析できる手法である。本解析ではKoshizukaら(1995)により提唱されているMPS法(Moving particle semi-implicit)による解析ソフトウェア

「FLUIDSISTA Ver.2.0」(プロメテック・ソフトウェア株式会社・日本SGI株式会社の共同開発)を使用した。

図-11は、解析のモデルである。越波水の打込みを一樣な落水で表現し、その中を一定速度の車両が突き抜ける際のフロントガラス部に作用する流体圧力を求めた。なお、落水条件は路面上1.5mの位置での流体圧力が打込み波圧の実験で得た 10kN/m^2 となるように調整した。

解析は、初期粒子間距離 0.1m 、最大計算ステップ 0.005s 、出力間隔 0.01s で行った。解析ケースを表-2に示す。

図-12は $V_D=10\text{m/s}$ 、 $\theta=45^\circ$ のケースの解析図(抜粋)である。フロントガラスに衝突した水粒子は、落下す

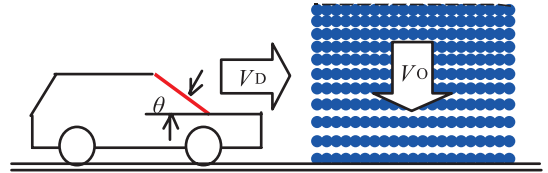


図-11 MPS法による解析モデル

表-2 解析ケース

フロントガラス角度 θ ($^\circ$)	30, 45, 60, 90
走行速度 V_D (m/s) (km/h)	0, 5, 10, 15, 20 (0, 18, 36, 54, 72)

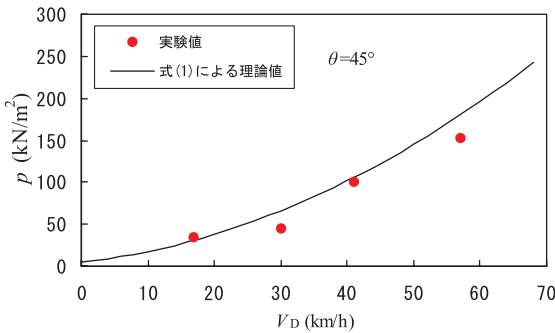


図-9 走行速度の影響

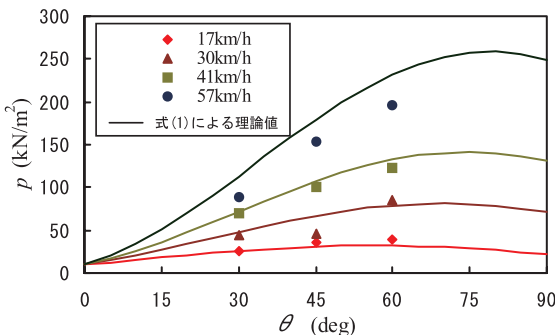


図-10 フロントガラス角度の影響

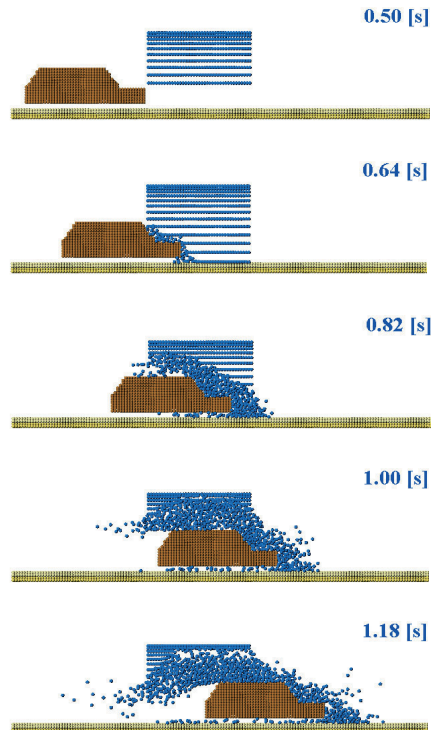


図-12 MPS法による解析図 ($V_D=10\text{m/s}$ 、 $\theta=45^\circ$)

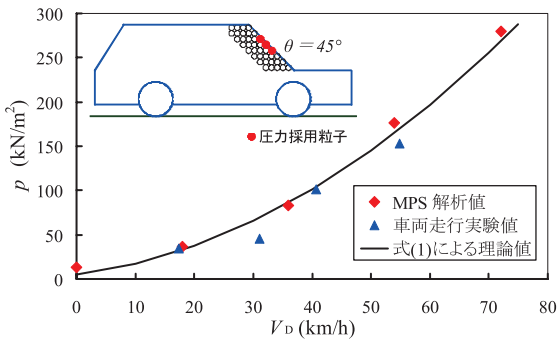


図-13 車両走行実験結果との比較 ($\theta = 45^\circ$)

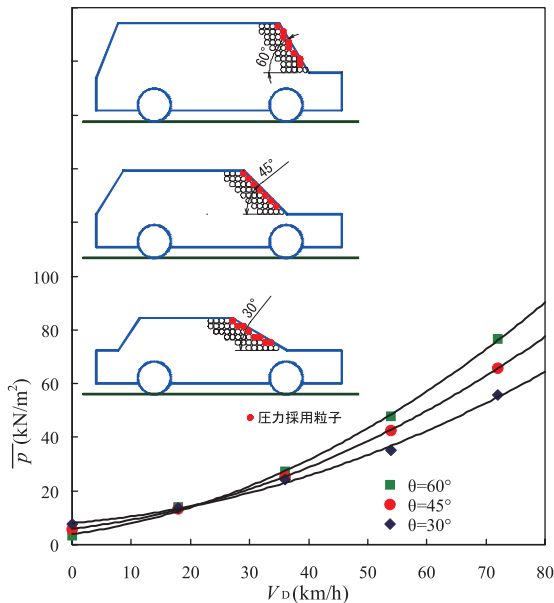


図-14 車両走行速度と平均圧力の関係

る水粒子を巻き込み、激しく前方へ飛散する状況が見られる。

(2) 車両走行実験との比較

落水内を走行中にフロントガラス部の中央部に発生する最大圧力 p を前述の車両走行実験の結果と比較する。

図-13は $\theta = 45^\circ$ のケースでの比較結果である。図中のMPS解析値は車両走行実験での波圧計の設置位置に対応したフロントガラス面中央の3粒子平均の最大値を p として採用している。

MPSによる解析値は、車両走行実験値および式(1)から得られる理論値と概ね一致しており、解析手法の妥当性を確認することができる。

(3) フロントガラス全体への作用圧力

フロントガラス全体が落水範囲内に位置する時間帯を

対象として、MPS解析によるフロントガラス面を構成する全粒子の圧力の平均値 \bar{p} を求めた。図-14は $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ および 60° の場合の車両走行速度 V_D とその平均圧力 \bar{p} の関係を示したものである。

図中の実線はそれぞれの近似曲線である。 V_D が概ね20km/h以上になると、フロントガラス角度が大きい場合でより大きな圧力が作用する傾向が見られる。

なお、いずれの角度の場合でも、走行速度 V_D が概ね30km/h以上になると、フロントガラスの破損荷重である20kN/m²(厚4mmの強化ガラス)を平均圧力 \bar{p} が上回る。

このことから、車両の走行速度の制限が車両被害を回避するために有効であることが確認できる。

6. まとめ

海岸道路における車両被害の発生要因について検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 高波により発生した車両フロントガラスの損傷事故に関して、運転者および道路管理者等へのヒアリングを行い、事故発生時の状況を明らかにした。
- 2) 二次元造波水路を用いた不規則波実験により、事故発生時の越波状況と打込み波圧を再現した。
- 3) フロントガラスに作用する流体圧力を車両速度を用いて定式化した。
- 4) 流体圧力は車両速度の2乗に比例するとともに、フロントガラス角度の影響を明らかにした。
- 5) 車両の走行速度の制限が車両被害を回避するために有効であることを明らかにした。

謝辞：本研究に際し、事故に関連する資料は、道路管理者から提供を頂いた。また、実験の実施にあたっては室蘭工業大学 平成21年度卒業の染野 裕考君の協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 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.766-770。
- 木村克俊・浜口正志・岡田真衣子・清水敏晶 (2003)：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。
- 福田伸夫・宇野俊泰・入江 功 (1973)：防波護岸の越波に関する現地観測 (第2報)，第20回海岸工学講演会論文集，pp.113-118。
- Koshizuka, S., H. Tamako, and Y. Oka, (1995)： A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, *Computational Fluid Dynamic J.*, Vol.4, No.1, pp.29-46。