

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

木村克俊*・浜口正志**・岡田真衣子**・清水敏晶***

消波工を有する道路護岸を対象として、越波飛沫の飛散特性と通行車両への影響を検討した。北海道内において過去 10 年間に発生した高波時の通行障害の実態を示すとともに、越波流量が許容値以下であっても、越波飛沫の飛散によって通行車両に影響が及ぶ危険があることを明らかにした。次に水理模型実験結果に基づいて、越波飛沫の打ち上げ高さおよび水平方向の飛散距離の算定法を提案するとともに、越波飛沫の現地観測を行ってその妥当性を確認した。さらに、高波時の安全対策についてハードおよびソフトの両面から検討を加え、具体的な対策工法を示した。

1. はじめに

護岸を設計する際には、背後地の利用形態に応じて適切な越波流量を設定する必要がある。海岸線に設置された道路では、自動車の安全な走行を確保するために、高波時の波の打ち上げを抑えることが重要である。福田ら(1973)は、現地観測結果に基づいて背後地の利用状況と許容越波流量の関係について検討している。また、構造物への波の衝突による越波飛沫の発生に関しては、石田ら(1982)が実験的な研究を行っている。しかしながら、実際の臨海道路における通行障害を分析した研究は少ない。

これまで筆者らは、道路護岸を対象として越波状況の現地観測を行い、越波と通行障害の関係を分析してきた(木村ら, 1998; 木村ら, 2001)。本研究では、消波ブロック被覆式護岸(以下、「消波護岸」と表記する)を対象として高波による通行障害の実態を明らかにする。さらに、水理模型実験と現地観測の結果に基づいて、越波飛沫の飛散特性を明らかにするとともに、臨海道路の具体的な越波対策について検討を行う。

2. 高波による通行障害事例

(1) 通行止めの実態調査

北海道内の臨海道路を対象として、高波による通行規制の実態調査を行った。調査対象は 1991~2000 年の 10 年間とし、全面通行止の開始および終了時刻と、その判断根拠に関するヒアリングを行った。調査期間中に、合わせて 15 区間で高波による全面通行止が実施され、その回数はおよそ 30 回、平均通行止時間は 20.4 時間であった。表-1 は、調査期間中に全面通行止が 2 回以上行われた区間を示している。A 区間では、平均してほぼ 1 年に一回全面通行止が行われている。表中にはそれぞれの区間で越波が顕著であった消波護岸の設計条件を示している。50 年確率波に対する越波流量は $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ (m}^3/\text{m/s)}$

表-1 全面通行止の実施区間

区間名	区間長 (km)	全面通行止		消波護岸の設計条件			備考
		回数	平均時間 (h)	設計波高 H_d (m)	設計波周期 T (s)	越波流量 q ($\text{m}^3/\text{m/s}$)	
A	16.0	9	19.1	7.8	12.0	4.8×10^{-3}	
B	19.8	4	32.6	8.6	15.0	5.1×10^{-3}	現地観測 (2002 年 10 月)
C	5.2	3	22.1	9.3	12.7	6.7×10^{-3}	
D	15.2	2	22.1	8.2	11.3	2.4×10^{-2}	
E	0.5	2	31.9	8.0	13.5	8.0×10^{-3}	現地観測 (2002 年 8 月~12 月)

s) であり、現行の設計基準による許容値 $10^{-4} \text{ (m}^3/\text{m/s)}$ を上回っていることがわかる。

こうした海岸道路の多くは陸側が急峻な崖であり道路の拡幅用地が少なく、海側も漁業者との調整が難しいため適切な護岸改良が行えないのが現状である。このためパトロールを行って越波の状況を目視で把握した上で、全面通行止以外にも徐行や片側通行止等の通行規制により安全が確保されている。また、波浪注意報や警報は、規制準備を行う際に有効な情報ではあるが、比較的広域を対象とした沖波の予測値に基づくものであり、危険区間に当てはまらない場合もある。このように、規制の実施は担当者が経験に基づいて判断しているのが現状である。それぞれの規制に対して、具体的な越波状況を明示した客観的な判断基準を定める必要がある。

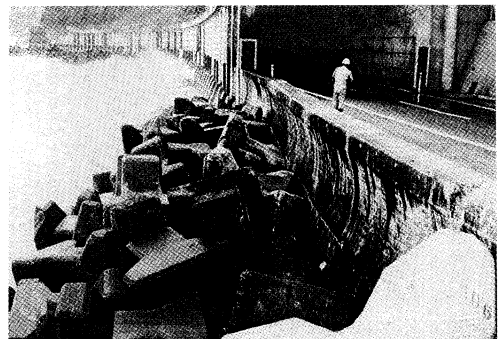


写真-1 車両事故が発生した消波護岸

* 正会員 博(工) 室蘭工業大学助教授 工学部 建設システム工学科
 ** 学生会員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻
 *** 正会員 日本データ・サービス(株) 技術開発室

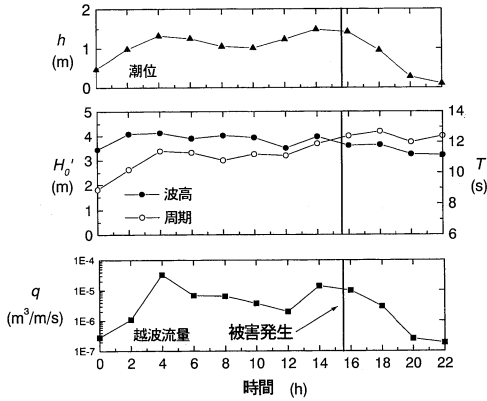


図-1 車両被害発生時の状況

(2) 通行車両への被害

前出表-1のB区間においては越波による車両被害が発生している。写真-1に示す海岸沿いの覆道内を、30 km/hで走行中の小型トラックに越波が作用し、車両の正面および側面のガラス全体に亀裂が生じた。

図-1は、被害発生当日の潮位および波浪と、合田ら(1975)の方法で計算した越波流量を示している。被害発生時の越波流量は 1.1×10^{-5} (m³/m/s)であり、基準値を下回る条件においても、車両被害が生じることが明らかとなった。このように時間平均で表した越波流量は小さくとも、越波飛沫は広範囲に到達し、これに車両の走行速度による影響が加わることで、衝撃力が増大する危険がある。また、比較的小規模な越波飛沫であっても運転者の一時的な視界障害をもたらす、交通事故の要因となる危険性がある。こうした通行車両への直接的および間接的な影響を把握するため、越波飛沫の飛散特性を調べた。

3. 越波飛沫の飛散特性

(1) 越波飛沫の発生パターン

消波護岸における越波飛沫は図-2に示すように、まず波面が消波ブロック法面に作用したときに、斜め上方に飛沫が発生する。その後、消波ブロックを透過した波面が直立部に作用したときに、ほぼ真上に飛沫が発生する。ここでは、前者をphase 1、後者をphase 2と定義する。両者の大小関係は波浪条件や構造条件により異なる。以下、それぞれの phase ごとに飛散特性について検討を行う。

(2) phase 1における越波飛沫の飛散特性

phase 1に対しては、外力を重力に限定すると、質点の放物運動によって越波飛沫の軌跡を推定できる。図-3に示すように、消波ブロック法面と静水面との交点を原点とし、水平方向岸向きにx軸、鉛直上向きにz軸をと

る。飛沫の初速度 v_s および飛沫の打ち出し角度 β がわかれば、越波飛沫の最大到達高さおよび水平飛散距離を求めることができる。

実験は2次元造波水路(長さ28 m, 幅0.6 m, 高さ1.2 m)を用いて、図-4に示す堤体模型を設置して行った。一般的な道路護岸を想定すると、模型縮尺は1/50程度となる。消波ブロックの天端幅を一定として、法面勾配を1:1~1:3の4種類に変化させた。実験はすべて不規則波で行い、1波群150波を標準とした。実験波の周期 $T_{1/3}$ は1.70 sで一定とし、波高 $H_{1/3}$ は4.0~20.0 cmに変化させた。

越波状況は、堤体側に設置したデジタルビデオカメラを用いて撮影した。静水面を基準として、越波飛沫の打ち出し角度を一波ごとに読み取った。各波群の最大到達高さの1/3最大値に相当する波を対象として、打ち出し角度の平均値を求めた。

図-5は、消波ブロックの法面勾配と打ち出し角度の関係を示している。phase 1で発生する飛沫は消波工の法面に沿って飛散するので、法面勾配が急になるにつれて、飛沫の打ち出し角度も大きくなる。ここでは図中の

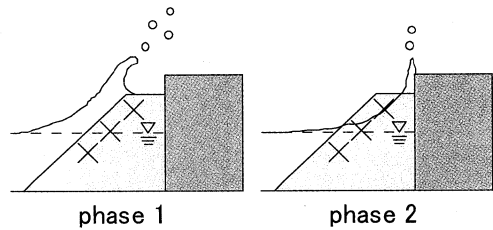


図-2 消波護岸における越波飛沫の発生パターン

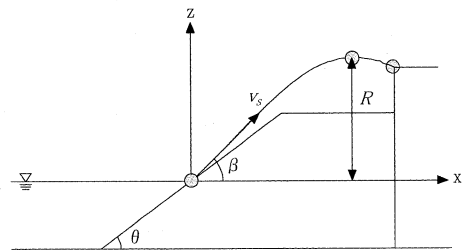


図-3 phase 1での越波飛沫の軌跡

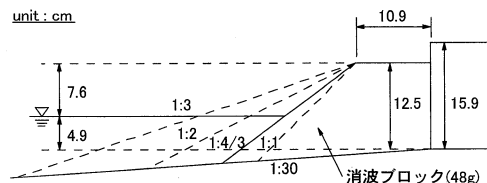


図-4 模型の断面形状

実線のように近似して、phase 1 における飛沫の打ち出し角度を以下のように表した。

$$\beta = 71.5 \exp(-0.07 \cot \theta) \dots\dots\dots (1)$$

一般的な法面勾配である 1 : 4/3 の場合には $\beta = 65^\circ$ になることがわかった。図-6 は、法面勾配が 1 : 4/3 の条件における水深波高比と飛沫の初速度の関係を示している。水深波高比が小さくなるにつれて、飛沫の初速度は大きくなる。波形勾配の影響は小さいことから、実験値の平均的な傾向に着目して、phase 1 における飛沫の初速度を以下のように定式化した。

$$v_{S1/3} = k_D \sqrt{gH_{1/3}} / \sin \beta \dots\dots\dots (2)$$

$$k_D = \begin{cases} 3.64 & (0 \leq h/H_0 \leq 1.0) \\ 4.53 - 0.91(h/H_0) & (1.0 \leq h/H_0 \leq 2.5) \end{cases} \dots\dots (3)$$

(3) phase 2 における越波飛沫の飛散特性

phase 2 における打ち上げ高さを $R_{S1/3}$ とし、これと同一条件の直立護岸の打ち上げ高さを $R_{V1/3}$ とする。図-7 は、浜口ら (2002) の実験結果を再整理して、 $R_{S1/3}/R_{V1/3}$ と消波工の相対天端高さ $h_{CB}/H_{1/3}$ の関係をまとめたものである。 $h_{CB}/H_{1/3}$ が 1.0 以上の範囲では、消波ブロックによる波の減衰が顕著となるため、打ち上げ高さは直立護岸よりも小さくなる。また、 $h_{CB}/H_{1/3}$ が 1.0 以下の範囲では、無次元消波工幅 $B/L_{1/3}$ が小さいほど、消波ブロックの効果が小さくなり、条件によっては直立護岸よりも打ち上げ高さは大きくなる。実験値の平均的な傾向を図中の曲線で表し、以下のように定式化した。

$$R_{S1/3} = 0.8 \{0.6 + p \cdot \exp(-q \cdot h_{CB}/H_{1/3})\} R_{V1/3} \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$\begin{cases} p = 0.806 \ln(B/L_{1/3}) + 0.873 \\ q = 27.8(B/L_{1/3}) + 1.98 \end{cases}$$

なお、直立護岸における飛沫の打ち上げ高さ $R_{V1/3}$ に関しては、水塊に対する算定式 (木村ら, 2001) を補正して、以下の式を得た。

$$R_{V1/3} = \begin{cases} 13.5H_{1/3} & (0 \leq h/H_0 \leq 1.0) \\ \{17.0 - 3.5(h/H_0)\}H_{1/3} & (1.0 \leq h/H_0 \leq 4.0) \\ 3.0H_{1/3} & (4.0 \leq h/H_0) \end{cases} \dots\dots\dots (4)$$

4. 越波飛沫に関する現地観測

前出表-1 に示した B および E 区間を対象として、越波飛沫に関する現地観測を行った。2002 年 10 月 22, 23 日に、E 区間において $H_0 = 3.0 \sim 5.7$ m, $T_0 = 9.7 \sim 13.8$ s の波浪が来襲し、片側交互通行による規制が行われた。図-8 に道路護岸の断面形状を示す。前面の海底勾配は約 1/30 で、消波ブロック法先水深が 3.7 m である。護岸の直背後には 2 車線道路が設置されている。現地観測された越波データを分析したところ、phase 1 での打ち上げ高さが卓越していることがわかった。そこで、越波飛沫の水平飛散距離と式 (2), (3) による算定値を比較したところ、図-9 に示すように両者は概ね一致することが確認された。

2002 年 8 月~12 月に、B 区間の図-10 に示す護岸において越波飛沫に関する現地観測を行った。 $H_0 = 0.5 \sim 4.3$ m, $T_0 = 5.0 \sim 13.4$ s の波浪条件に対する合計

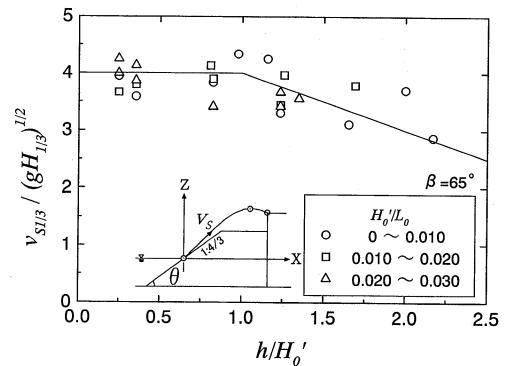


図-6 飛沫の初速度

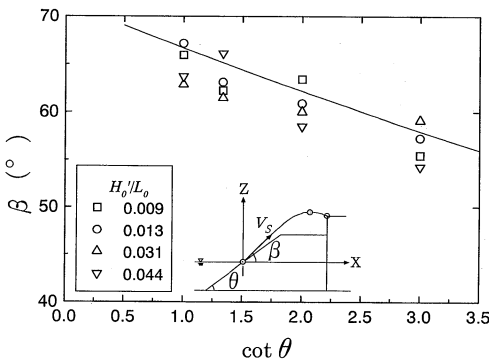


図-5 飛沫の打ち出し角度

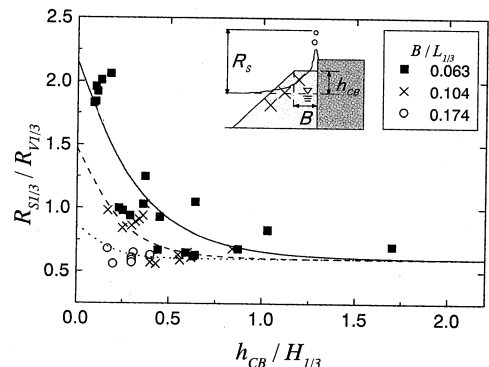


図-7 phase 2 の打ち上げ特性

19個の越波飛沫データが得られた。いずれのデータも phase 2 での打ち上げ高さが卓越していることが確認された。式 (4), (5) による越波飛沫の打ち上げ高さの算定値と現地観測値を比較したところ、図-11 に示すように両者は概ね一致しており、算定式の妥当性が示された。

5. 対策工の検討

(1) ハード的対策

臨海道路の高波に対する安全性を高めるためには、図-12 に示すようなハード的対策が考えられる。海側からの改良工事が可能な場合は、消波工の拡幅や嵩上げが有効である。今回提案した算定式を用いて、phase 1 に対しては飛沫の発生点を道路から遠ざける効果、phase 2 に対しては消波工による波の減衰効果を評価できる。

陸側の対策としては、phase 1 が卓越する場合には、防波フェンスの設置や道路のセットバックが有効である。これらの設計においては、越波飛沫の水平飛散距離を計算して各部の諸元を決定することができる。また phase 2 が卓越する場合には、パラペットを沖側に突き出し、波返し効果を高める工法も効果が期待できる。

しかしながら、こうしたハード的な対策の実施には多くの工費が必要となる。通行規制による経済的な損失と、その発生頻度を考慮した上で、改良工事を実施する必要がある。

(2) ソフト的対策

高波時の通行規制は、波浪条件に応じて、徐行、片側交互通行、全面通行止と、段階的に行われる。特に全面通行止を行う際には、沿線住民への周知や路線内の車両確認が必要である。波浪の急速な発達が満潮時と重なった場合には、規制が間に合わないことが少なくない。このため危険箇所に対しては、的確な波浪予測を行って危険度を予め評価し、規制実施のタイミングを決定する必要がある。これと同様に、規制解除に関する情報も利用者にとって重要である。通行再開のタイミングを事前に周知させることで、地域の経済活動への影響を最小限に抑えることができる。

6. まとめ

本研究の結論を要約すると、以下のようになる。

- ①越波流量が許容値以下であっても、越波飛沫の飛散によって通行車両に影響が及ぶ危険がある。
- ②越波飛沫は消波工の法面と直立部の2箇所が発生する。水理模型実験結果に基づいて、これら2つのパターンに対する越波飛沫の軌跡の算定法を提案するとともに、現地観測を行ってその妥当性を確認した。
- ③高波時の安全性を向上させるための道路護岸の改良工法と、波浪予測を組合せたソフト的対策を示した。

臨海道路における通行障害事例の調査および越波飛沫

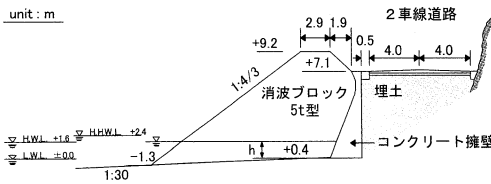


図-8 E 区間の道路護岸の断面形状

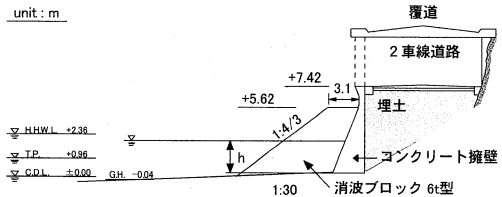


図-10 B 区間の道路護岸の断面形状

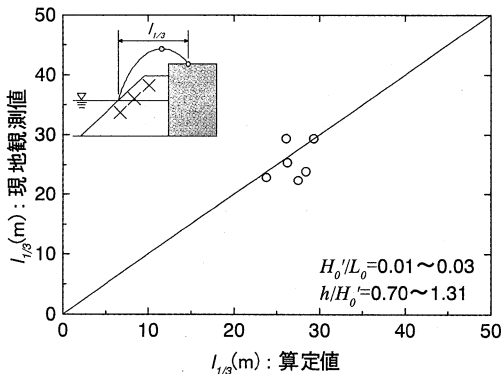


図-9 phase 1 における水平到達距離

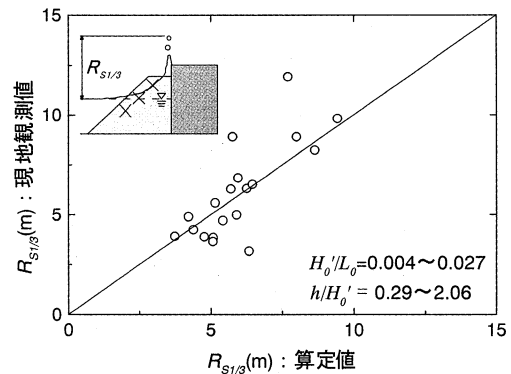


図-11 phase 2 における打ち上げ高さ

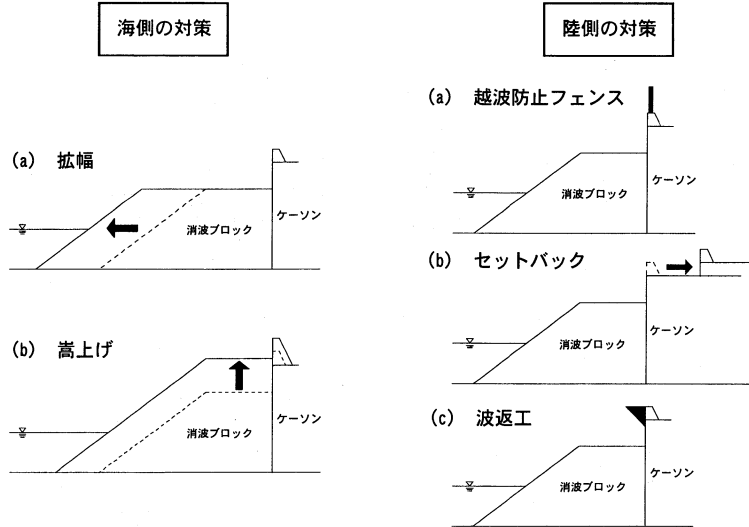


図-12 越波飛沫の対策工

の現地観測に関しては、北海道開発局の関係部局の協力を得た。海象および気象データは、北海道、北海道開発局ならびに(財)日本気象協会北海道支社より提供を受けた。水理模型実験の実施に当っては(独法)北海道開発土木研究所の協力を得た。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参 考 文 献

石田 昭・花田昌彦・細井正延 (1982): 飛沫の発生に関する実験的研究, 第29回海講論文集, pp. 385-388.
 木村克俊・藤池貴史・上久保勝美・安部隆二・石本敬志 (1998): 道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測, 海講

論文集, 第45巻, pp. 676-680.
 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, 海講論文集, 第48巻, pp. 766-770.
 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 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, 港研報告, 14巻, 4号, pp. 3-44.
 浜口正志・木村克俊・安田佳乃子・山本泰司・三船修司 (2002): 消波護岸における越波飛沫の打ち上げ特性に関する研究, 土木学会第57回年次学術発表会講演概要集, pp. 91-92.
 福田伸男・宇野俊泰・入江 功 (1973): 防波護岸における越波に関する現地観測(第2報), 第20回海講論文集, pp. 113-118.