

道路護岸の越波に関する予測手法 の現地への適用

PREDICTION METHOD OF THE WAVE OVERTOPPING ON COASTAL ROAD AND ITS APPLICATION TO THE FIELD

今村文彦¹・川崎浩司²・永井紀彦³・平山克也⁴・清水勝義⁵・橋本孝治⁶
Fumihiko IMAMURA, Koji KAWASAKI, Toshihiko NAGAI, Katsuya HIRAYAMA,
Katsuyoshi SHIMIZU and Koji HASHIMOTO

¹正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11)

²正会員 博(工) 名古屋大学准教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区)

³正会員 工博 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁴正会員 博(工) 内閣府政策統括官(科学技術政策担当)付 参事官補佐 (〒100-8970 千代田区霞ヶ関3-1-1)
(前 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 主任研究官)

⁵正会員 (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 海象情報研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 修(工) 岐阜大学大学院 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

In Japan, a great number of roadways along coastlines exist as community's lifelines. Therefore, prediction of wave overtopping on coastal road is one of the most critical issues. The purpose of this paper is to present the prediction model of wave overtopping. Field data of nearshore wave, wave overtopping on a coastal road, and wind conditions were collected by on-site overtopping sensors and video recordings. Numerical wave simulation model named as CADMAS-SURF was improved by adding features including the capability of dealing with random waves and the function to calculate the quantity of wave overtopping. Finally, the CADMAS-SURF is examined by comparing with the field data and is presented as a prediction model of wave overtopping on coastal road. This model gives a criterion of traffic regulation. In addition, the simplified real-time prediction system for the quantity of wave overtopping is created. This system can work with wave data from NOWPHAS and wind speed data from AMEDAS.

Key Words : Wave overtopping, field observation, prediction model, traffic regulation

1. はじめに

我が国では、海岸線沿いに国道等の道路が位置していることが多く、これらの道路は、地域のライフラインとして重要な役割を果たしている。道路管理者は、道路護岸の越波に対して自動車の安全な通行を確保するために、気象情報および監視員や監視カメラ等をもとに、片側通行や全面通行止め等の交通規制を行っている状況にある。このため、道路護岸の越波状況を予測することは、道路管理における重要な課題の1つとなっている。

堤防・護岸の越波流量や波の打ち上げ高を算定する一般的な方法としては、合田ほか¹⁾や中村ほか²⁾の算定図が広く用いられているが、地形が複雑・特殊な海岸および離岸堤や人工リーフ等の海岸構造物が設置されている海岸では、これらの方法を適用することが難しい場合もある。最近では、佐貫ほか³⁾、

平山ほか⁴⁾等のように、越波量を数値的に求める手法について検討が進められており、現地への適用が可能な段階に達しているものと考えられる。

本研究は、現地における道路護岸の越波量を予測する手法の確立を目指して、数値波動水路(CADMAS-SURF)を用いた越波算定モデルの検討を行い、現地観測結果をもとに算定モデルの再現性を確認した。また、算定モデルの現地への適用方法の検討および算定モデルを用いた越波流量の推算結果にもとづく道路の通行規制基準の提案に加えて、簡易的な越波予測システムの検討を行ったものである。

2. 越波の発生状況

(1) 対象地区の越波状況

図-1に示す一般国道7号の山形県温海町鼠ヶ関へ

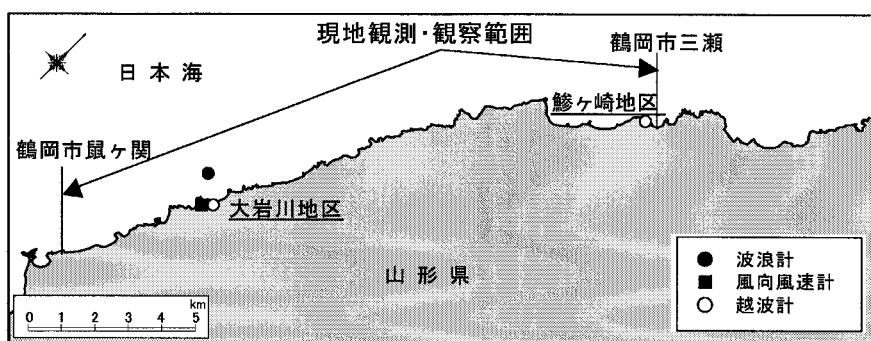


図-1 検討対象位置図

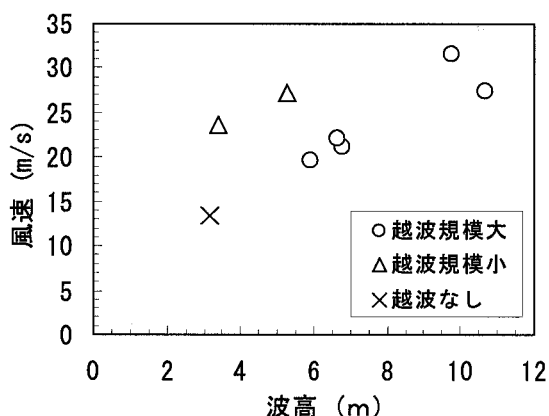


図-2 越波規模と酒田港の波高・風速の関係



写真-1 大岩川の越波状況 (2005年11月30日8時52分)

鶴岡市三瀬の区間では、台風や冬季風浪等による高波浪の来襲時に道路護岸への越波が著しく、片側通行等の交通規制が度々実施されている状況にあった。図-2は、1994年～1996年および2004年～2005年における越波状況を越波発生期間内の酒田港における波高と風速の最大値により整理した結果であり、越波状況は、道路監視員の目視観察によるものである。なお、酒田港の波浪観測結果については、永井・里見⁵⁾、清水・佐々木・永井⁶⁾等の全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS)のデータを用いている。

大規模な越波は、波高が6m以上、風速が20m/s以上の時に発生しており、波高が10mを超えたケースでは、全面通行止めとなっていた。越波の発生がないケースは、波高が約3m、風速が10m/s程度と小さくなっている。また、風速が増大すると波高も

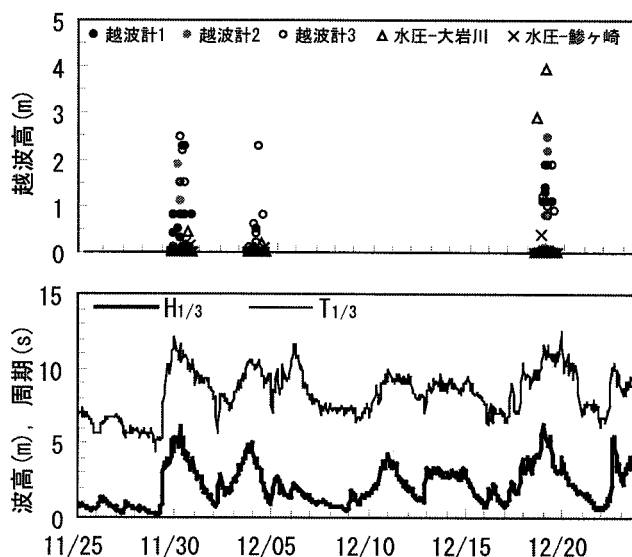


図-3 越波計による越波高と波浪の経時変化

増大する傾向が認められ、酒田港の観測結果の解析によっても波高と風速の相関性が高いことが確認されている。越波が発生する高波浪の波向は、海岸線に対してほぼ直角方向のNWが卓越している。

なお、現在は、消波工や離岸堤による越波対策が実施されており、越波による通行障害は解消されている状況にある。

(2) 越波に関する現地観測

対象地区では、酒田河川国道事務所により越波に関する現地観測が行われている。現地観測としては、図-1中に示した大岩川地区および鶴ヶ崎地区において高波浪来襲時に越波観測が実施されており、大岩川地区では、沖合700m地点(水深20m)で波浪観測、海岸線付近で風の観測が実施されている。また、越波発生時には、大岩川および鶴ヶ崎を含めた地点において、ビデオ撮影や目視による越波状況観察も行われている。越波観測には、永井ほか⁷⁾によるオンサイト越波計が用いられており、大岩川地区ではステップ式越波計(3台)と水圧式越波計(1台)、鶴ヶ崎地区では水圧式越波計(1台)が設置されている。

図-3に2005年11月～12月に実施された大岩川と鶴ヶ崎における越波観測結果および大岩川沖の波浪

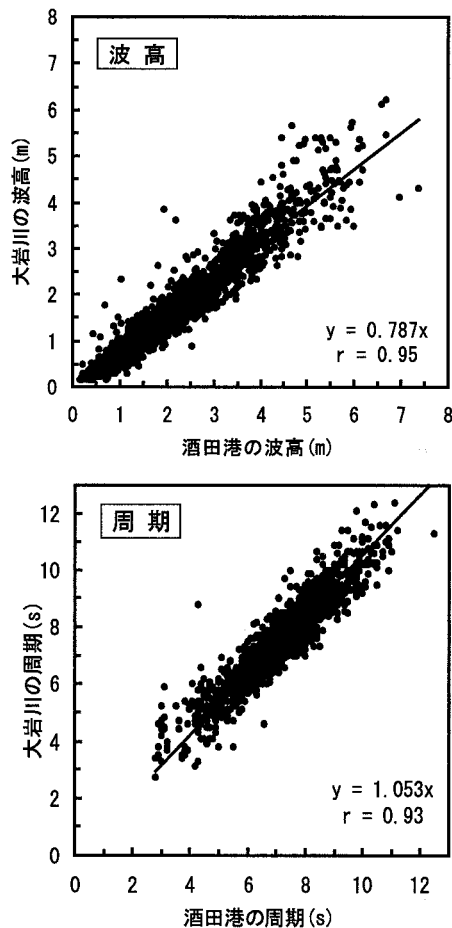


図-4 酒田港と大岩川沖の波浪の相関

観測結果を示す。観測結果によると、波高の増大に伴って越波高も大きくなる傾向が認められ、波高5m、周期10～11s程度以上の時に顕著な越波が生じている。ただし、越波高については、写真-1に示すビデオ撮影による大岩川の越波状況のように、波の実質部分が越流する状況とは異なり、道路護岸および前面の消波工に達した波が水塊として上方に跳ね上がって護岸を越えている状況にあり、越流状態の越波高さとなっていない場合が大半を占めている。

また、図-4に大岩川沖と酒田港の波浪観測結果による波高および周期の相関を示す。図中に示したように、波高および周期の相関係数 r は、波高が $r = 0.95$ 、周期が $r = 0.93$ となっており、酒田港の観測結果を用いて大岩川沖の波浪を推定可能であることが分かる。

3. 越波算定モデル

(1) 計算方法の概要

現地海岸における越波流量の計算モデルとしては、(財)沿岸開発技術研究センター(現 沿岸技術研究センター)⁸⁾による数値波動水路(CADMAS-SURF)を用いるものとした。CADMAS-SURFは、複雑な断面地形や離岸堤・人工リーフ等が設置されている場合

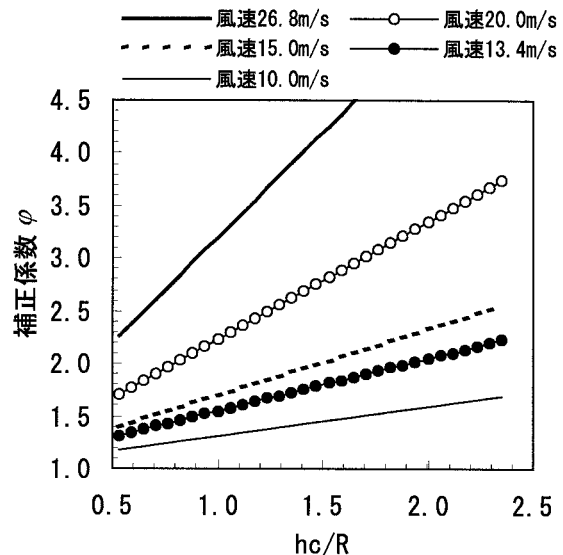


図-5 風速による越波流量の補正係数

にも、直接的に越波量を計算することが可能である。本研究では、現地への適用性および効率的な計算を考慮して計算モデルおよび計算方法の改良を行った。

CADMAS-SURFは、断面二次元モデルであることから、平面的な地形の影響による波浪変形を考慮することができない。このため、エネルギー平衡方程式を用いた平面波浪場の計算を行い、入力する波浪条件の補正を行った。具体的には、越波が発生する高波浪時の波向(W, WNW, NW)について平面波浪場の計算を行い、大岩川沖における波向別の波高変化率を求めて入力波浪条件を設定した。なお、周期は、高波浪時の平均的な値として11.0sとした。計算結果によると、各波向の波高変化率は、Wが0.98, WNWが1.08, NWが1.10である。

また、波の不規則性を考慮するために、不規則波の造波データを入力できるようにCADMAS-SURFを改良した。不規則波の造波ソースは、合田⁹⁾による方法に基づき、位相角を考慮して50個に分割した成分波を線形に重ね合せたものであり、不規則波の周波数スペクトル形状はJONSWAP型を採用した。造波データは、不規則波の統計において目安となる100波とし、周期に応じて造波時間を設定した。

越波量の算定は、佐貫ほか³⁾と同様に計算モデル内の護岸の背後に越波枡を設けることで行った。さらに、現地の越波状況によると、越波・飛沫に対する風の影響が大きいものと推察されることから、現地観測結果と数値計算結果との比較検討を行い、越波量の算定結果を補正する形で風の影響を考慮した。具体的には、CERC¹⁰⁾による式(1)で求められる無風時の越波量に対する補正係数 ϕ を用いて風の影響を考慮する。

$$\phi = 1.0 + W_f \left(\frac{h_c}{R} + 0.1 \right) \sin \alpha \quad (1)$$

ここに、 W_f : 風速に依存する係数(無風時: 0.0, 13.4m/s: 0.5, 26.8 m/s以上: 2.0)、 h_c : 静水面上の

天端高, R : 波の打ち上げ高, α : 直立を 90° としたときの構造物の傾斜角である。

図-5は, 上式より求めた直立壁($\sin \alpha = 1.0$)に対する補正係数 ϕ と h/R の関係であり, この図を用いて風の影響に対する越波量の補正を行う。なお, 風速が20m/s, 15.0m/s, 10m/sの時の補正係数は, 各々の W_f の値を2次曲線近似と仮定して求めた。

(2) 検証計算結果

検証計算は, 写真-1に示した大岩川において越波観測とビデオ撮影が同時に実施されている2005年11月30日8時52分頃の越波状況を対象に行った。この時の越波に関する諸量を表-1に示す。写真-1から分かるように飛沫等による越波が顕著であるが, 道路護岸を越流に近い状態で越波している時の最大越波高は0.1mであり, 式(2)に示す永井ほか⁶⁾の算定式を用いて単位時間当たりの越波流量を求めると, $2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ となる。

$$q = C_o \sqrt{2gh}^3 \quad (2)$$

ここで, q : 1波当りの越波量, C_o : 越流係数, h : 越波高である。

越流係数については, 永井ほか⁷⁾は $C_o = 0.5$ としているが, 今回の算定では $C_o = 0.025$ を用いている。これは, 表-2に示す高田¹¹⁾による越波状況と越波量の関係をもとに, 検証時の越波状況としては, 「飛沫, 跳波(かなりの水塊)が越える」に該当し, かつ越波の発生頻度が比較的高いことから, 越波流量を $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 程度と想定して越流係数を設定した結果である。平山ほか⁴⁾によると, 飛沫が顕著な越波の場合には, 越流係数が1オーダー程度小さくことが指摘されており, 今回の検討結果もほぼ同程度の値となっている。

図-6に検証計算の計算モデルの模式図を示し, 表-3に検証計算の結果を示す。検討には, 越波計による観測を実施している大岩川の断面を用いている。なお, 離岸堤は, 空隙率を0.5, 慣性力係数を1.5,

表-1 大岩川地区の越波発生時の状況(2005年11月30日)

有義波(酒田港)			風		最大	越波流量
波向	波高	周期	風向	風速	越波高	(m^3/s)
WNW	5.28m	11.4s	SSW	10.1m/s	0.1m	2.1×10^{-3}

表-2 越波状況と越波量の関係(高田¹¹⁾をもとに作成)

越波の状況	一周期の無次元越波量 $2\pi Q/(H_o \cdot L_o)$	$H_o=5\text{m}$, $T=10\text{s}$ の時の 越波流量 $q: \text{m}^3/\text{s}$
飛沫(水塊)が越える	$< 1.0 \times 10^{-4}$	$< 5.0 \times 10^{-5}$
飛沫, 跳波(かなりの水塊)が越える (波の実質部分がわずかに溢流)	$1.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-3}$
波の実質部分が連続流となって溢流する	$5.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$	$2.5 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$
波形そのものが乗り越えるような状況で 多量に溢流する	$1.0 \times 10^{-2} <$	$5.0 \times 10^{-3} <$

抵抗係数を0.9に設定している。

越波流量は, 100波の不規則波を造波させた計算結果から時間平均を求めた値であり, 有義打ち上げ高 R が $R=3.82\text{m}$ (T.P.+4.22m)であることから分かるように, 飛沫による越波が大半を占めている。

CADMAS-SURFにより算定された越波流量は, $1.21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ であるが, 風の影響を考慮した越波流量は, $1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ となり, 越波観測にもとづく推定越波流量の $2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ とほぼ一致している。

以上の結果から, CADMAS-SURFを改良した越波算定モデルにより, 現地海岸における道路護岸の越波状況を再現することが可能であると判断される。

4. 越波算定モデルの現地への適用

(1) 波高と越波量の関係

道路護岸の越波状況を予測するために, 波高と越波量の関係について検討を行った。検討を行った波高は, 飛沫程度の発生を想定した $H=4.0\text{m}$ から, 大規模な越波を想定した $H=9.0\text{m}$ までの10ケースとし, 周期は, 酒田港の観測結果から求めた波高と周期の相関関係により設定した。潮位は, 常時の危険な状況として朔望平均満潮位(H.W.L.)とした。なお, 計算パラメータ, 計算モデル等は, 検証計算と同様であるが, 離岸堤および消波堤が設置されていない自然状態の断面地形とした。

計算結果から求めた波高と有義打ち上げ高の関係を図-7に示し, 波高と越波流量の関係を図-8に示す。これらの図によると, 波高の増大に伴って有義打ち上げ高および越波流量も増大しており, いずれも波高との相関性が高い。また, 図中に示した相関式は, 最も良く適合した指数近似によるものであり, 相関

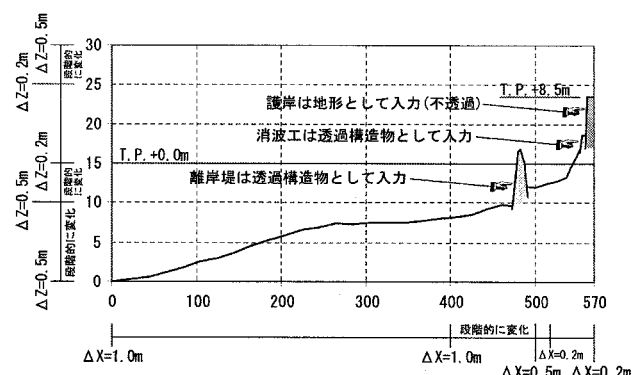


図-6 検証計算のモデルの概要

表-3 検証計算の計算条件と計算結果

計算条件			越波計算結果		
入射波高 $H_m(\text{m})$	周期 $T(\text{s})$	潮位 (T.P., m)	有義 打ち上げ高 $R_{1/3}(\text{m})$	時間平均 越波流量 $q_{\text{ca}}(\text{m}^3/\text{s})$	風による補正後の 越波流量 $q(\text{m}^3/\text{s})$
5.70	11.4	+0.40	3.82	1.21×10^{-3}	1.96×10^{-3}

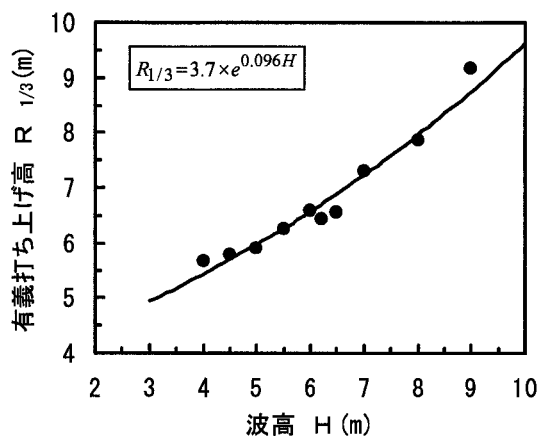


図-7 波高と有義打ち上げ高の関係

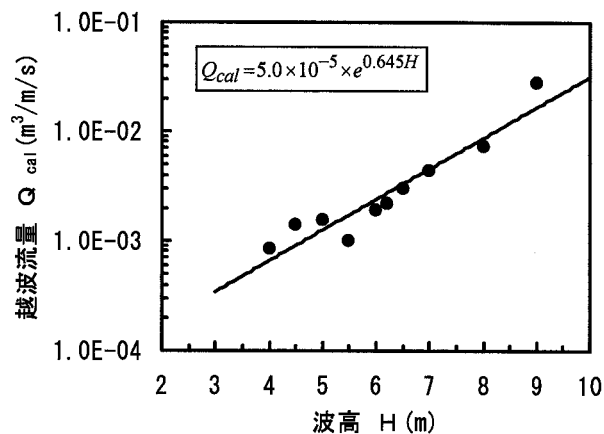


図-8 波高と越波流量の関係

係数 r は、有義打ち上げ高が $r=0.98$ 、越波流量が $r=0.95$ と非常に良い値となっており、これらの関係式の適用性は高いものと考えられる。ただし、風の影響が考慮されていないこと、適用範囲が波高3～4m程度より大きい場合であることに留意する必要がある。

なお、離岸堤の越波低減効果については、 $H=8.0\text{m}$ の計算結果によると、離岸堤のない場合の値に対して有義打ち上げ高で80%、越波流量で10%となっており、高波浪時には有義打ち上げ高に比べて越波流量に対する効果が高いものと推察される。

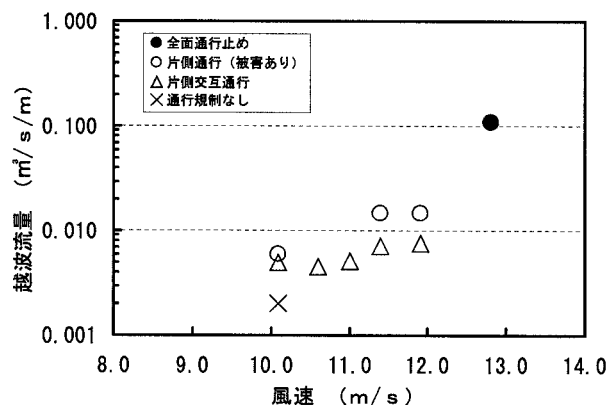


図-9 過去の交通規制時の推定越波流量

(2) 越波流量と通行障害の関係

道路護岸の越波においては、越波による通行車両に対する影響が大きな問題となる。越波による通行障害に関しては、福田ほか¹²⁾、木村ほか¹³⁾などの研究成果があるが、越波量と通行規制を具体的に検討した事例は少ない。ここでは、過去の通行規制の実績をもとに越波流量と通行規制の関係について検討を行う。

図-9は、過去の通行規制時における越波流量の推定結果である。越波流量の推定は、図-4に示したように酒田港と大岩川沖の波高および周期の相関性が高いことから、酒田港の波浪観測結果を用いて図-8中に示した相関式により越波流量を算定し、さらに風の影響による補正を行ったものである。これらによると、片側通行等の規制が行われた時の越波流量は $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度以上、片側通行でフロントガラスの破損等の被害が生じた時の越波流量は $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度、全面通行止めの時の越波流量は $1 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度となっている。ただし、越波流量は大岩川地区における算定結果であるが、通行規制は大岩川地区以外で行われたものも含まれている。

また、通行規制に至らない場合にも、通行車両に飛沫の発生を知らせて注意を喚起することも必要である。これについては、表-2に示した越波量と越波状況の関係から判断すると、越波流量が $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度以上に相当するものと考えられる。

表-4 越波流量による交通規制の判断基準案

交通規制	越波流量
レベル・0 (問題なし)	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 未満 (僅かな飛沫程度以下)
レベル・1 (通行注意)	$1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以上 (顕著な飛沫)
レベル・2 (片側通行規制)	$5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以上 (小規模な越波)
レベル・3 (全面通行止め)	$1.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以上 (大規模な越波)

これらをもとに設定した越波流量による交通規制の判断基準案を表-4に示す。この判断基準案では、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以上の時に通行注意、 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以上の時に片側通行規制、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m/s}$ の時に全面通行止めとしている。

ただし、表-4については、一応の目安であり、適用するには対象とする道路の重要度や交通量等にもとづいて検討を行う必要がある。

(3) 簡易的な越波予測システム

大岩川のように波高と越波流量の相関性が高い場合には、この越波算定モデルを用いて簡易的なリアルタイム越波予測システムを構築することも考えら

れる。すなわち、対象地点において、この越波算定モデルを用いて波向別・波高別・風速別の越波流量テーブルをあらかじめ作成しておくことにより、ナウファスの波浪データ、アメダスの風速データから越波流量を即座に求めることが可能である。また、潮位を変えて越波流量テーブルを作成することにより、台風来襲時等の潮位上昇時の越波流量を求めることもできる。

対象地点の越波流量テーブルを用いたリアルタイム簡易予測の手順は、以下の通りとなる。

- ① ナウファスから対象地点近傍における波高および波向を確認する
(<http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)
- ② アメダスから対象地点近傍における風速を確認する
(http://www.jma.go.jp/jp/amedas_h/map24.html)
(陸上地形の影響を避けるため、沿岸部における観測地点の海風の最大風速を用いることが望ましい)
- ③ 波向毎の波高と風速による越波流量テーブルを用いて越波流量を算定する
(事前に対象地点とナウファス観測地点との波向別の波高の相関性を検討しておくことが必要となる)
- ④ 台風等により高潮の発生が想定される時には、潮位が高い場合の越波流量テーブルを用いる
(通常はH.W.L.とし、高潮想定時にはH.H.W.L.とすることが考えられる。)

ただし、越波予測モデルの現地への適用に際しては、越波高や越波流量の現地観測結果を用いた検証が不可欠である。

5. おわりに

本研究では、常時観測が行われている気象・海象データの活用によるリアルタイム越波予測システムの検討・開発を行うことを目的に、オンサイト越波計等による現地観測を行い、現地の越波特性を分析するとともに、数値波動水路(CADMAS-SURF)の一部改良を含めた道路護岸の越波流量の算定モデルについて検討を行い、算定モデルの現地における再現性を観測結果等により検証した。さらに、この越波算定モデルの現地予測への適用を検討した結果、有義打ち上げ高および越波流量は波高と相関性が高く、波高によって越波状況の予測が可能であることを明らかとし、予測モデルとしての適用性も確認した。また、越波による交通規制の実績および越波算定モデルによる越波量の推算結果をもとに、越波流量による交通規制の判断基準案を提案することができた。そして、リアルタイムで入手可能な酒田港沖ナウファス波浪データと近隣のアメダス風データより、越波流量を求める簡易的なリアルタイム越波予

測システムについて提案を行った。

ただし、越波算定モデルの再現性やパラメータ設定については、限られた観測結果を用いて行っていることから、今後も越波に関する観測データの蓄積と越波算定モデルの検討を進め、予測精度の更なる向上を図る必要がある。また、今回の検討では、日本海の冬季風浪による越波を対象としており、越波が生じるような高波浪時の波高と周期の相関性が高いことが前提となっているため、台風によるうねり等の異なる波浪条件下における越波予測モデルの適用性についても検討を行う必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、国土交通省東北地方整備局酒田河川国道事務所より越波に関する観測結果等の貴重な資料のご提供を戴いた。ここに記して深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 合田良美・岸良安治・上山豊：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.3-44，1975。
- 2) 中村充・佐々木泰雄・山田譲二：複合断面における波の打ち上げ高に関する研究，第19回海講論文集，pp.309-312，1972。
- 3) 佐貫宏・藤田龍・関本恒浩・清水琢三：数値モデルによる越波量の評価に関する研究，海岸工学論文集，第48巻，pp.736-740，2001。
- 4) 平山克也・長谷川準三・長谷川巖：越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算，海岸工学論文集，第53巻，pp.706-710，2006。
- 5) 永井紀彦・里見茂：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2004)，港湾空港技術研究所資料，No.1118，89p.，2006。
- 6) 清水勝義・佐々木誠・永井紀彦：全国港湾海洋波浪観測年報(NOWPHAS 2005)，港湾空港技術研究所資料，No.1161，92p.，2007。(印刷中)
- 7) 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・安田誠宏・高山俊裕：オンサイト越波計の開発と現地適用性，海岸工学論文集，第50巻，pp.626-630，2003。
- 8) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，2001。
- 9) 合田良美：[増補改訂]港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説，鹿島出版会，pp.258-262，1991。
- 10) Coastal Engineering Research Center：Shore Protection Manual, U.S.Army Corps of Engrs., U.S.Govt. Printing Office, Vol.II，1984。
- 11) 高田彰：うち上げおよび越波，水工学に関する夏期研修会講義集，Vol.13，pp.B2-1-B2-18，1977。
- 12) 福田伸男・宇野俊泰・入江功：防波護岸の越波に関する現地観測(第2報)，第20回海講論文集，pp.113-118，1973。
- 13) 木村克俊・藤池貴史・上久保勝美・安部隆二・石本敬志：道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測，海岸工学論文集，第45巻，pp.676-680，1998。