

道路護岸における波の打ち上げ特性に関する現地観測

木村克俊*・藤池貴史**・上久保勝美**
安倍隆二***・石本敬志****

1. はじめに

臨海部の道路において自動車の安全な通行を確保するためには、越波による影響を抑えることのできる適切な護岸を設置する必要がある。しかしながら、既設の道路護岸の場合には、種々の制約により護岸改良が行えない場合が少なくない。こうした個所において道路管理者は、現地の越波状況を把握し、通行車両に危険が及ぶ場合には通行止め等の規制を行う必要がある。通行車両の安全性に直接的な影響を及ぼす波の打ち上げ特性に関しては既往の検討事例は少なく、現地においては主として経験に基づいて対処しているのが現状である。

本研究では、臨海道路を対象として高波時の管理手法の高度化を目的として、越波状況の現地観測と水理模型実験を行い、波の打ち上げ特性を調べた。さらに現地における事故事例を分析し、高波時の交通障害と海象条件との関係を調べた。なお、今回の検討では法先水深が比較的小さな直立護岸を対象とした。

2. 現地の状況

北海道日高管内の国道 336 号、通称「黄金道路」は越波の多発地帯である。現地観測はとくに越波が顕著な、えりも町字日黒の荒磯海岸において実施した。同地点では高波時に写真-1 に示すような越波が発生している。

図-1 に現地の平面地形を示す。護岸前面はほぼ平行等深海岸で、海底勾配は 1/50~1/150 程度である。護岸前面の水深は、庶野漁港での潮位観測データを用いて推定した。沖波の波浪諸元は波浪推算によって求め、観測地点から北に 60 km に位置する大津漁港で得られた波浪データにより推算値の妥当性を確認している。なお近隣における風資料が入手できなかったため、今回は風に関する検討を行っていない。

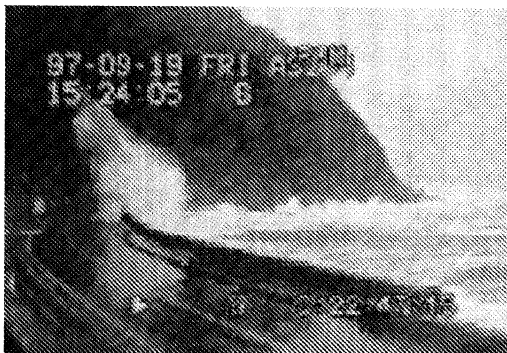


写真-1 現地における越波状況

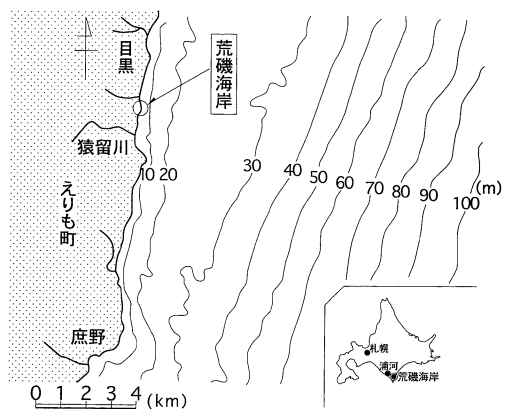


図-1 現地観測を行った荒磯海岸

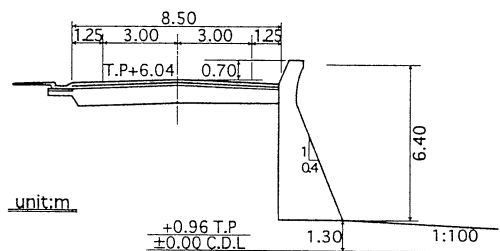


図-2 護岸の断面形状

- | | | | | |
|----------|----|--------|---------|-------------|
| * 正会員 | 工博 | 北海道開発局 | 開発土木研究所 | 港湾研究室副室長 |
| ** 正会員 | | 北海道開発局 | 開発土木研究所 | 港湾研究室 研究員 |
| *** 正会員 | | 北海道開発局 | 開発土木研究所 | 維持管理研究室 研究員 |
| **** 正会員 | 理博 | 北海道開発局 | 開発土木研究所 | 道路部長 |

図-2に観測対象とした直立護岸の断面形状を示す。法面勾配が1:0.4で、上部にはパラペットが設置されており、高潮位(H.W.L.+1.8m)で法先水深は0.5mとなる。

3. 波の打ち上げ特性に関する水理模型実験

(1) 実験の方法

水理模型実験は長さ85m、幅1.6m、高さ3.0mの造波水路において実施した。実験模型の断面形状を図-3に示す。護岸の形状は前出図-2に示した直立護岸を縮尺1/10で再現したものである。ただし護岸形状は単純な直立壁とし波返し工は省略した。また護岸前面の海底勾配は1/30とした。

写真-2は実験における波の打ち上げ状況を水路の沖側から撮影したものである。堤体背後には青色のシートを配置して越波状況を見やすくしている。目視観察は越波の実質部分に相当する「水塊」と、これよりも小さな「飛沫」に区別した。ここでは両者の静水面からの打ち上げ高さを読み取り、水塊の場合を R_w 、飛沫の場合を R_s と定義した。

水塊部分に着目した打ち上げ実験はすべて不規則波(1波群150波)で行い、護岸の法先水深 h を0~9cm、波の周期 $T_{1/3}$ を2.00~3.79s、換算沖波波高 H'_0 を7.0~31.0cmに変化させた。水塊の打ち上げ状況はビデオ

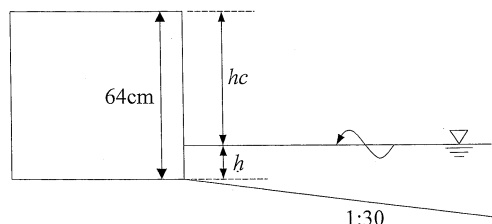


図-3 実験模型の断面形状

カメラで撮影し、静水面からの高さを一波ごとに読み取り、有義波諸元に相当する打ち上げ高さ $R_{w1/3}$ を求めた。

一方飛沫部分に関しては、観測自体が難しいため規則波を用いた。ビデオカメラにより飛沫と水塊の打ち上げ高さを求め両者の比を求めた。実験範囲は前面水深 h を0~12cm、波の周期 T を2.00~3.79s、換算沖波波高 H'_0 は7~31cmで変化させた。

(2) 越波水塊の打ち上げ特性

図-4は波形勾配 H_0/L_0 をパラメーターとして、 $R_{w1/3}/H'_0$ と水深波高比 h/H'_0 の関係を示している。 $R_{w1/3}/H'_0$ は h/H'_0 とともに増大する傾向がある。また H_0/L_0 が小さいほど打ち上げ高さが大きいのは、汀線近傍における水位上昇の影響を受けるためと考えられる。また、 $R_{w1/3}$ を h/H'_0 と H_0/L_0 を用いて以下のように定式化した。

$$R_{w1/3} = H'_0 \left(1.991 \left(\frac{h}{H'_0} \right)^2 + 3.864 \left(\frac{h}{H'_0} \right) + 0.150 \left(\frac{H_0}{L_0} \right)^{-0.5} \right) \dots\dots\dots (1)$$

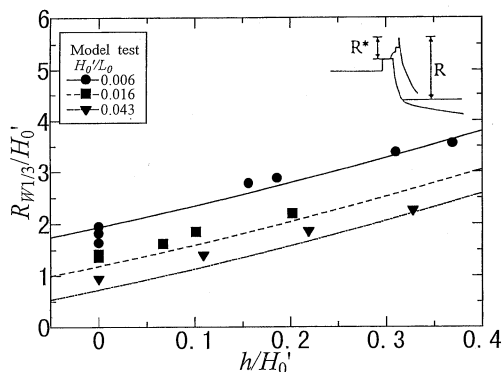


図-4 越波水塊と打ち上げ高さ

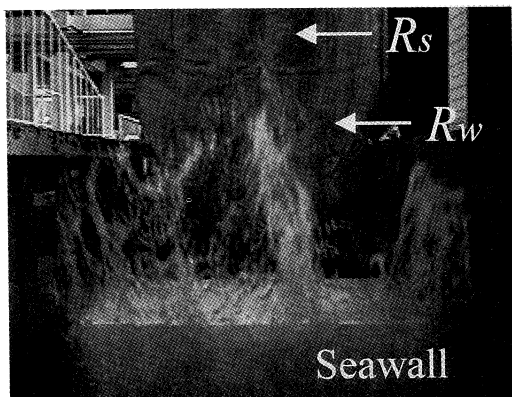


写真-2 越波水塊および飛沫の飛散状況

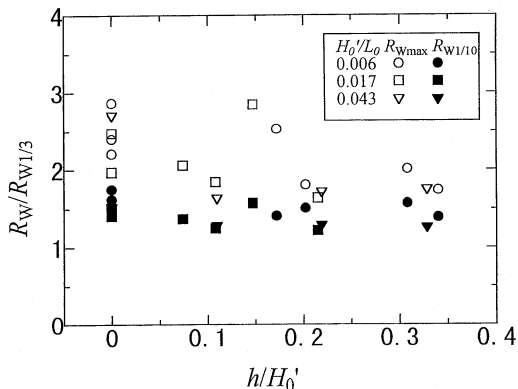


図-5 打ち上げ高さ代表値

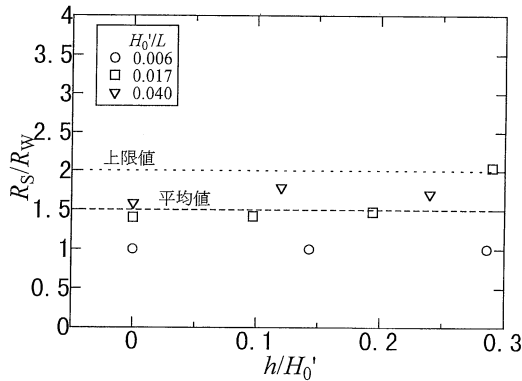


図-6 越波飛沫の打ち上げ特性

ここで、 H_0 : 換算沖波波高, h : 法先水深, L_0 : 波長である。なお, 式(1)の適用範囲は, $h/H_0=0\sim 0.4$ とする。

図-5は越波水塊の打ち上げ高さについて代表値の関係を示している。横軸は h/H_0 をとり, 縦軸は最高値 R_{Wmax} および 1/10 最大値 $R_{W1/10}$ と $R_{W1/3}$ の比を示している。

$R_{W1/10}/R_{W1/3}$ は平均的に 1.3~1.4 程度で安定している。 $R_{Wmax}/R_{W1/3}$ にはばらつきが大きく, h/H_0 が小さいほどその値が大きくなる傾向がある。こうした代表値の比率は, 波高の場合に比べてやや大きい傾向が明らかとなった。

(3) 越波飛沫の打ち上げ特性

図-6は規則波実験で得られた飛沫と水塊の打ち上げ高さ比 $R_s/R_w (=k)$ を示している。実験結果にはばらつきが大きい, 波形勾配 H_0/L_0 の影響は小さく, 実験範囲内の平均値をとると k は 1.5 程度, 上限値をとると k は 2.0 程度となる。

4. 現地における波の打ち上げ特性と通行障害

(1) 現地観測システム

現地観測には, Ishimoto et al. (1995) が開発した越波監視システムを用いた。このシステムでは観測地点に設置したビデオカメラをトリガー信号により起動させ, 越



図-7 センサーのトリガーポイント

波状況を自動録画することができる。図-7の上側に示すように, あらかじめ画面上にトリガーポイントを設定した。ここではトンネルの山肌を利用して, 越波とのコントラストが表れやすいようにした。越波が作用すると, 同図の下側に示すように画素が変動し, トリガーが動く。その際トリガー信号を受けてから, 実際に録画が始めるまでの時間遅れを解消するため, 数秒前のメモリー画像を含めて連続的に一定時間録画している。

取得された越波画像は, 図-8に示すように波のない画像の差分画像を求め, 白黒2値化処理を行った。ここで単位画素当りの高さを与えることにより越波の規模を計測することができる。今回はさらに画像に対して遠近補正等の修正を行ってパラペットからの打ち上げ高さを求めた。本システムは昼間のみの運用としているが, 暗

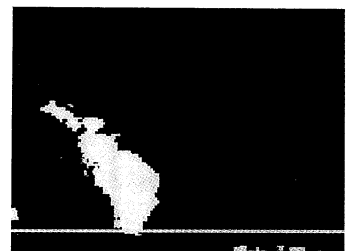


図-8 画像処理の方法

表-1 現地における越波飛沫の解析ケース

日時	越波回数	T(s)	H ₀ (m)	h(m)	H ₀ /L ₀	h/H	R _{ST1/3} [*] (m)	R _{L1/3} (m)
97/2/14 7時~8時	153	12.8	2.6	0.40	0.010	0.15	3.34	9.34
97/9/19 6時~7時	198	10.6	3.1	0.48	0.018	0.22	5.28	11.20
97/9/19 13時~14時	112	11.0	3.3	0.02	0.017	0.01	3.55	9.93
97/9/19 14時~15時	213	10.9	3.3	0.20	0.018	0.09	5.95	12.15
97/9/19 15時~16時	265	11.2	3.4	0.38	0.017	0.17	7.81	13.83

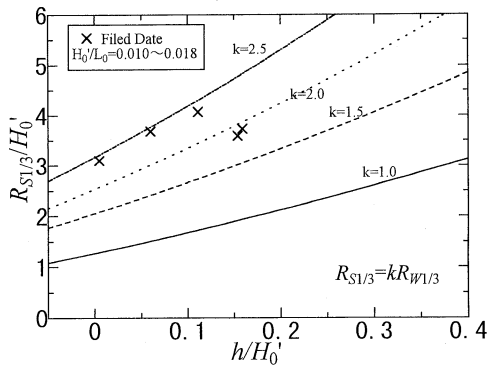


図-9 現地データとの比較

視カメラを使用することで夜間の使用も可能である。

(2) 越波飛沫の打ち上げ特性

現地においては1995年1月から現在に至るまで、越波画像の取得が継続されている。このうち表-1に示すケースを解析対象とする。これらは1時間当りの越波回数が100回を超える場合を選んだもので、沖波諸元から求めた波数に対して、打ち上げ高さの1/3最大値を計算するための必要波数を満たしている。

現地で得られた5例を図-9中に×印でプロットした。係数k=2.5の曲線が現地データのほぼ上限を示している。これに対し、先に示した実験結果は現地データに比べて小さな値となっている。石田ら(1982)は縮尺1/30の模型実験を行い、構造物に波面が衝突した際に発生する飛沫にはフルード則が適用できないことを明らかにしている。今回は実験縮尺1/10であり、比較的大きな模型を用いたけれども、飛沫の打ち上げ高さに縮尺効果が現れており、こうした検討には現地データとの比較が必要である。

5. 通行車両障害事例に関する検討

(1) 車両災害事例の分析

越波水塊の落下によって普通乗用車のフロントガラス

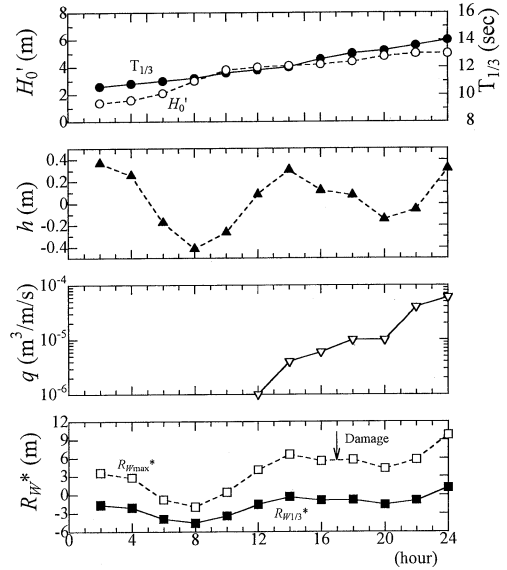


図-10 通行障害時の状況

が破損したケースについて検討した。図-10は当日の波高、周期、法先水深と、護岸天端上を基準とした水塊の打ち上げ高さR*および越波流量qの計算値を示している。越波流量は合田ら(1975)の算定図を用いた。同算定法は越波流量が10⁻⁴m³/m/s以上を対象としているため、これより越波流量が小さい条件に対しては計算曲線を外挿した。

自動車に被害が発生した16時55分ごろは潮位が高く、またH₀'も増大している。R_{W1/3}*は、護岸天端を越えることはないが、R_{Wmax}*では6.0m程度と推定される。

一般に自動車の安全な通行を確保するためには、護岸の越波流量を10⁻⁴m³/m/s以下に設定することが基準値である(たとえば合田;1990)。しかしながら、この時の越波流量は10⁻⁵m³/m/sのオーダーであり、基準値を下回っているが、通行障害が発生したことが明らかになった。

(2) 通行止め規制の事例

越波水塊の打ち上げにより通行止めを行った例について検討した。図-11は、1997年9月15日~21日までの波高、周期、法先水深と打ち上げ高さ(護岸天端上を基準)の計算値を示している。道路管理者が通行止めを行った期間が、18日の20時~20日の18時までである。17日の12時過ぎから次第に波高が大きくなり、波高が3m程度になると、R_{W1/3}*では護岸天端を頻繁に越えることになる。また、前出図-10に示した被害発生時とほぼ同じ状況であり、通行に障害が生じる危険があったことがわかる。

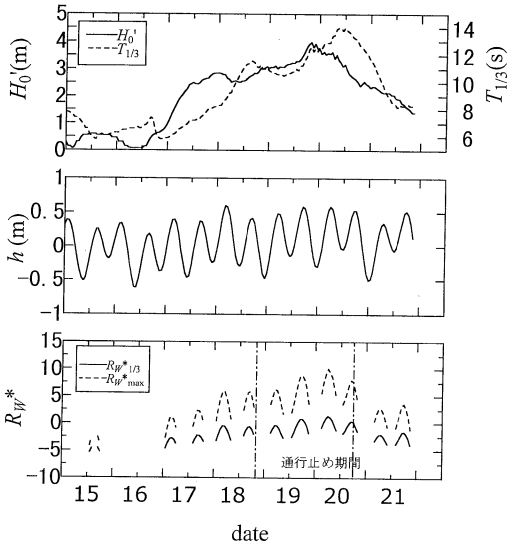


図-11 通行止め規制の状況

6. まとめ

道路護岸における波の打ち上げ特性を明らかにするとともに、高波時の通行車両への障害と海象条件の関係を分析した。主要な結論は以下のとおりである。

- ① 直立護岸を対象として行った越波実験結果に基づいて、水塊の打ち上げ高さの1/3最大値 $R_{W1/3}$ を換算沖波波高 H_0 と法先水深 h の関数として定式化した。
- ② 現地観測結果に基づいて飛沫の打ち上げ高さを定式化した。飛沫のような小規模な現象に対しては、縮尺1/10の模型実験では現地よりも小さな値が得られた。
- ③ 通行障害事例を分析した結果、越波流量が $10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ の場合に、護岸天端からの水塊の最大打ち上げ高さ $R_{W* \text{max}}$ が6.0 m程度でフロントガラスの破損が発

生したことが確認された。

本論で示した波の打ち上げ高さのうち、水塊は通行車両に直接的被害を与える指標であり、推定精度を上げると通行止めの判断基準に、また飛沫は運転者の一時的な視界障害や他車線への回避といった間接的な影響を示す指標となりうる。一連の研究結果は道路の維持のほか道路利用者への情報提供など多様に活用できる可能性がある。

また今回は法先水深が比較的小さな直立護岸を対象としたものであり、水深の大きな場合や消波型の護岸構造に対しては別途検討する必要がある。水塊や飛沫の飛散に及ぼす外力としては風の影響も無視できない。今後現地において風が飛散分布に及ぼす影響についても検討する予定である。

現地における越波データの取得に当たっては、室蘭開発建設部浦河道路維持事業所の協力を得た。またデータ解析に当たっては(財)日本気象協会北海道本部海洋調査課の西村修一課長、ならびに(有)スタジオムーン堀川和典氏の協力を得た。さらに現地における海象データの取得に際して、帯広開発建設部十勝港湾建設事業所ならびに室蘭開発建設部浦河港湾建設事務所の協力を得た。ここに記して関係各位に謝意を表する次第である。

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回海岸工学講演会論文集, pp. 385-388.
- 合田良實 (1990): 港湾構造物の耐波設計 (増補改定版), 鹿島出版会, 333 p.
- 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, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, pp. 3-44.
- Ishimoto, K., T. Chiba and Y. Kajiya (1995): Wave overtopping detection by image processing, Proc. of 2nd World Congress on Intelligent Transport System, pp. 515-518.