

親水護岸における越波飛沫の現地観測と利用者の安全性に関する一考察

On-site Observation of Wave Splash and Safety Management for Visitors at Amenity-Oriented Seawall

北海道開発土木研究所港湾研究室 ○正会員 山本泰司 (Yasuji Yamamoto)
 北海道開発局稚内港湾事務所 正会員 宮部秀一 (Syuichi Miyabe)
 室蘭工業大学建設システム工学科 正会員 木村克俊 (Katsutoshi Kimura)

1. はじめに

防波護岸の設計においては、背後の利用状況等に応じて許容越波流量を設定し、適切な構造および天端高を設定する。護岸を親水施設として市民に開放する場合は、特に利用者の安全性に十分配慮して設計する必要がある。護岸の直背後の歩行者の安全性に対する許容越波流量は、 $q=2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ (50%安全度)、 $q=3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m/s}$ (90%安全度) という値が提案されている¹⁾。これらは、新潟港の防波護岸で1972~1973年に実施された越波量観測と、同時に撮影された越波状況の映像に対する8人の被験者の判断を基に導かれたものである。護岸の越波量を現地で観測した例は非常に少なく、上に述べた例のほかに、1996年に福井港で実施された例²⁾があるだけである。本報では、現地において整備中の親水護岸の越波状況をビデオ撮影し、越波飛沫の打ち上げ特性を調べて利用者の安全性に関する検討を行った。

2. 現地観測概要

北海道北端に位置する宗谷港では、図-1 および図-2 に示すように、外海に面した位置にダブルデッキ構造の親水護岸を整備している。本護岸は、護岸背後の岸壁における漁労者の就労環境改善と観光客等に宗谷海峡を眺望できる場を提供することを目的としている。

護岸構造は消波ブロック被覆型護岸であるが、デッキ上の利用者の安全性を考慮して、波浪警報発令基準相当の5年確率波 ($T_0=10.5\text{s}$, $H_0=5.12\text{m}$) に対して、越波流量が $q=2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/s}$ 以下となるように設計されている。しかしながら、波浪により発生する越波飛沫が利用者に与える影響については不明なため、波の打ち上げ状況を把握する目的で現地観測を行った。

打ち上げ高調査は、2003年11月17日から2004年1月15日の間の計6回、9時から16時までの毎正時前後10分間、図-1に示した位置から打ち上げ状況のビデオ撮影を行った。ただし6回目の調査は悪天候のため9時から10時までの観測となった。護岸上には高さの目安となるポールを立て、画像から判別可能な範囲で飛沫の打ち上げ高を1波毎に読み取った。また、護岸沖合の水深-12m地点において水圧式波高計による波浪観測と、港内の1地点において風況観測を行った。風向風速計の設置高は+10.1mとした。

3. 波浪条件と打ち上げ高

図-3は観測期間中の波浪と越波飛沫の、静水面からの打ち上げ高の関係を示している。波浪データは水深-12mの観測地点のもので、護岸位置(水深約6m)における値ではない。また、入射角 β は護岸法線直角方向と波浪観測地点における平均波向きとのなす角である。



図-1 宗谷港平面図

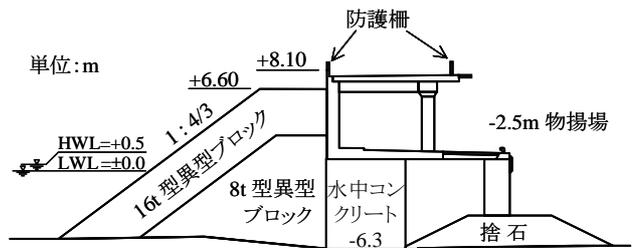


図-2 宗谷港親水護岸断面図

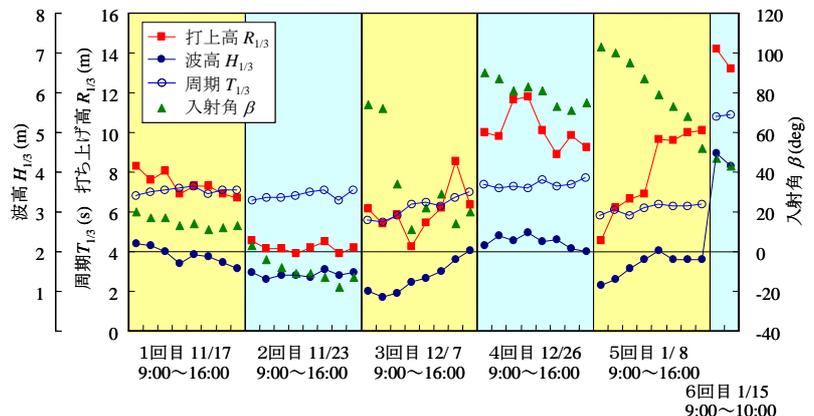


図-3 波浪条件と打ち上げ高

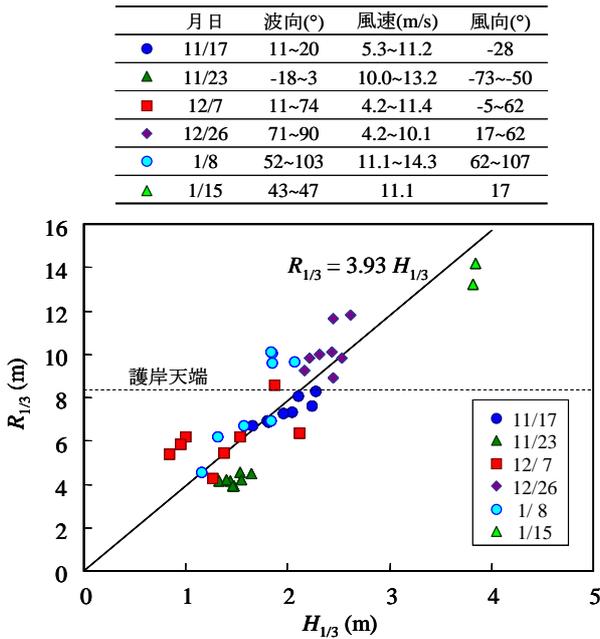


図-4 波高と打ち上げ高の関係

$R_{1/3}$ は有義打ち上げ高であり、打ち上げ高の観測値の上位 1/3 の平均である。

期間中の最大有義波高は 2004 年 1 月 15 日 9 時の $H_{1/3}=4.47\text{m}$ で、このときの打ち上げ高は $R_{1/3}=14.2\text{m}$ であり、護岸天端高+8.1m を大きく越えている。全体的にみると、波高が大きいときに打ち上げ高も大きくなる傾向がある。波向きの影響については明瞭ではない。

図-4 は、護岸への入射波高 $H_{1/3}$ と有義打ち上げ高 $R_{1/3}$ の関係を、観測日ごとに示したものである。各観測日の波向、風向風速は上段の表にまとめてある。ここで風向は、波向と同様に防波堤法線に対して直角沖側からの風を 0° とし時計回りを正として表している。

図から、波高と打ち上げ高はほぼ比例関係にあることが分かる。図中の直線は $H_{1/3}$ と $R_{1/3}$ が比例すると仮定した近似直線である。波向きとしては 30° 以上の斜め入射条件も多いが、波向きの影響はあまり現れていない。また、風向風速が打ち上げ高に与える影響についても明確ではない。

同図には、護岸天端高を示してあるが、波高 $H_{1/3}$ が概ね 2.0m 以上のとき有義打ち上げ高 $R_{1/3}$ は天端高を超えている。

4. 打上高の頻度分布

図-5 は、1 日の観測における 1 波ごとの打ち上げ高 R の頻度分布をみたものであり、横軸は平均打上高に対する相対打ち上げ高 R/R_{MEAN} 、縦軸はその発生確率を表している。上段に示した 12 月 7 日は平均有義波高が $H_{1/3}=1.34\text{m}$ であり波高が小さいケースである。各時間帯とも同じような分布形となっていて、全体的にやや歪んだ形状となっていることがわかる。図には対数正規分布とレーリー分布曲線もあわせて示してあるが、相対打ち上げ高の分布形は対数正規分布 $[\ln(R/R_{MEAN})]$ の平均値

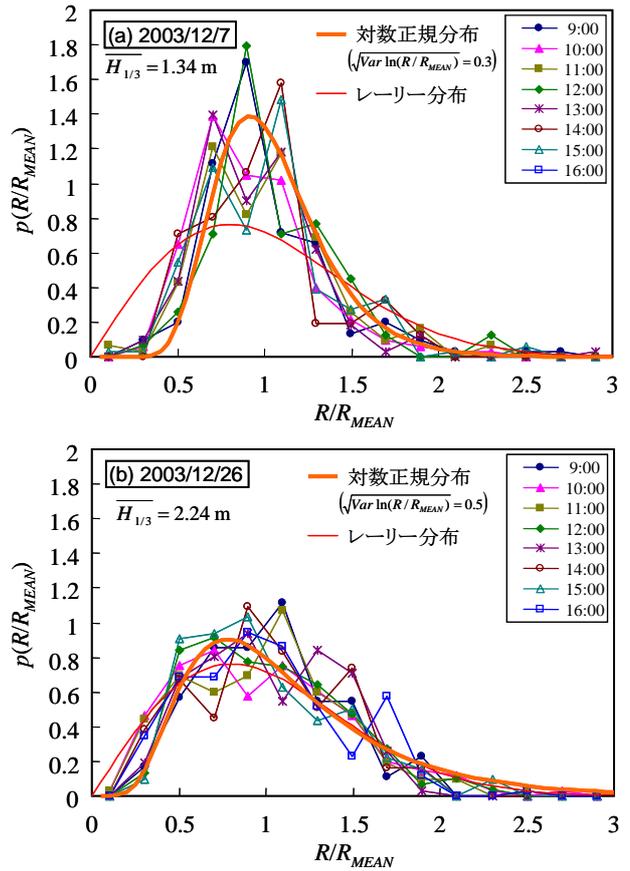


図-5 打ち上げ高の頻度分布

表-1 $R_{1/3}$ および $R_{1/10}$ に対する超過確率

	σ	$\frac{R_{1/3}}{R_{MEAN}}$	$p R>R_{1/3} $	$\frac{R_{1/10}}{R_{MEAN}}$	$p R>R_{1/10} $
対数正規分布	0.3	1.406	12.8	1.707	3.74
	0.4	1.585	12.5	2.048	3.66
	0.5	1.794	12.1	2.462	3.58
レーリー分布		1.597	13.5	2.031	3.92

※対数正規分布における R/R_{MEAN} の平均値は 0、標準偏差は σ

0、標準偏差 0.3] で比較的良好に表されることが分かる。レーリー分布とは分布形が大きく異なっているが、このことは 1 波毎の打上高が必ずしも波高と比例関係にはないことを示しているが、小さな打ち上げに対する画像の読み取り精度が影響している可能性もある。

下段図の 12 月 26 日は平均有義波高が $H_{1/3}=2.24\text{m}$ であり波高が比較的大きいケースである。この場合も対数正規分布 $[\ln(R/R_{MEAN})]$ の平均値 0、標準偏差 0.5] で分布形を表すことができるが、前述のケースに比べて分布幅が広がり、レーリー分布に近くなる。

表-1 に各確率分布に対する $R_{1/3}/R_{MEAN}$ および $R_{1/10}/R_{MEAN}$ の値とその超過確率を示す。ここで $R_{1/10}$ は打ち上げ高の観測値の上位 1/10 の平均である。表に示すように、どの確率分布に従うとしても $R_{1/3}$ および $R_{1/10}$ に対する超過確率はほとんど変わらず、打ち上げ高 R が $R_{1/3}$ を超過する確率は 12~13% 程度、 $R_{1/10}$ を超過する

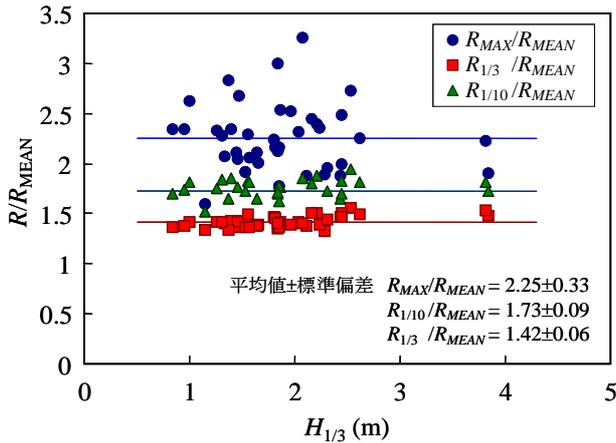


図-6 打ち上げ高の統計量の比較

確率は3.5～4%程度である。

図-6 は、全観測期間における波高に対する R_{MAX} 、 $R_{1/10}$ 、 $R_{1/3}$ のばらつきを示したもので、縦軸はそれらの相対値 R/R_{MEAN} である。 R_{MAX}/R_{MEAN} は1.5～3.3の間で大きくばらついているが、 $R_{1/10}/R_{MEAN}$ の値は平均1.73、 $R_{1/3}/R_{MEAN}$ は平均1.42で両者ともばらつきが少なく波高に無関係に安定している。このことから、打ち上げ高の指標としては R_{MAX} よりも $R_{1/10}$ や $R_{1/3}$ を用いることが適当と考えられる。

5. 親水護岸の利用限界条件の考察

図-7 は、横軸に護岸水深における有義波高 $H_{1/3}$ 、縦軸に越波飛沫の打ち上げ高 $R_{1/3}$ と越波流量 q の推定値をとって示したものである。 q は越波流量の推定図³⁾から求めた。ただし、現地で観測された波高 $H_{1/3}$ と周期 $T_{1/3}$ はほぼ直線的な関係にあることから、この関係を用いて越波流量を推定している。

越波飛沫に着目すると、 $H_{1/3}$ が2.0mを越えると $R_{1/3}$ は護岸天端を超える。一方、護岸直背後の人の安全性に配慮した越波流量 $q=2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m/s}$ に対応する波高は $H_{1/3}=4.1\text{m}$ であり、このとき $R_{1/3}$ は15mにも達する。

次ページに示す図-8 はビデオ観測を行ったときの越波飛沫状況であり、波高ランク別に代表的な画像を示している。

上段の画像は有義波高が $H_{1/3}=2.1\text{m}$ のときで、有義打ち上げ高と護岸天端高の比は $R_{1/3}/h_c=1.00$ である。護岸天端を超える飛沫も発生するが、親水デッキ利用者の安全が脅かされる程ではないと思われる。ただし、利用者に海水がかかる。

中段図は $H_{1/3}=2.6\text{m}$ 、 $R_{1/3}/h_c=1.45$ のときの画像である。飛沫の打ち上げ高は上段のケースよりも高くなるものの、護岸を水塊が超えている状況ではなく利用者の安全に直ちに影響するほどではないと思われる。ただし、利用者はより多くの飛沫を受けることになる。また、利用者が観光客等の不特定多数の場合、この程度の状況においても恐怖心を覚える者があると思われる。

以上から、不特定多数の利用者に対しては消波工からの飛沫の打ち上げ高に着目して、 $R_{1/3}/h_c$ を指標として用

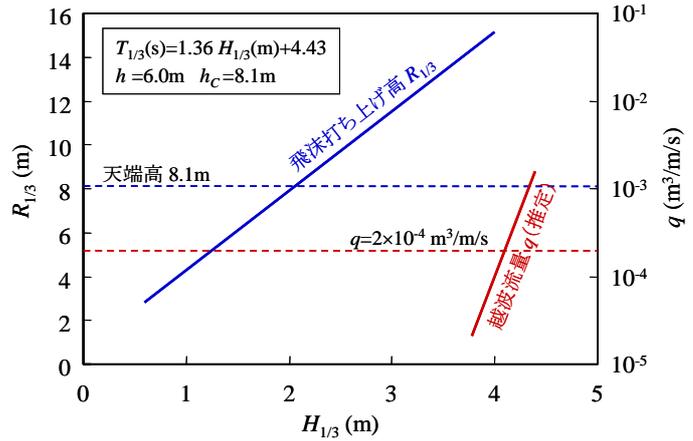


図-7 入射波高と打ち上げ高、越波流量の関係

いることが適当と考えられる。

下段図は $H_{1/3}=3.8\text{m}$ 、 $R_{1/3}/h_c=1.75$ のときの画像であり、観測したケース中で最大の波浪が来襲したときの状況である。このケースでは、越波水塊が護岸天端を超えており、親水デッキ上の利用者はやや危険な状況と考えられる。護岸法線に対して沖から岸向きに平均風速11m/sの風があったことも影響しているようである。このケースでは、越波流量の推定値は $q=4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度であり、設計時に設定した許容値 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m/s}$ より1オーダー小さい。この許容値ははじめに述べたように、護岸直背後の歩行者の50%安全度に対するものであるとされており、一般利用者の安全性に十分配慮する場合は90%安全度として提案されている $3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度を用いることが適当と考えられる。しかし、このような小さなオーダーの越波流量は現地の地形や護岸構造等により推定誤差が大きくなると考えられるため、利用者の安全を確保する必要がある場合は、現地の状況に応じた検討が求められる。

6. まとめ

現地に建設されている消波工付き親水護岸を対象に、越波飛沫の調査を行った。主要な結論を以下にまとめる。

- (1) 消波工で発生する飛沫の打ち上げ高は波高とほぼ比例関係にあり、波向きの影響は少ない。
- (2) 打ち上げ高の確率分布は対数正規分布でよく表すことができ、波高が大きくなるとレーリー分布に近づく。
- (3) 不特定多数の利用者の快適性や心理的な恐怖心を考慮すると、安全性の指標としては有義打ち上げ高と護岸天端高の比 $R_{1/3}/h_c$ を用いることが適当であり、 $R_{1/3}/h_c > 1$ の条件では快適性が確保できない。
- (4) 利用者の転倒などの被害を考慮すると、安全性の指標としては越波流量 q を用いることが適当であり、一般利用者の安全性に十分は考慮する場合は $10^5 \text{ m}^3/\text{m/s}$ のオーダーの流量を許容値とする必要がある。

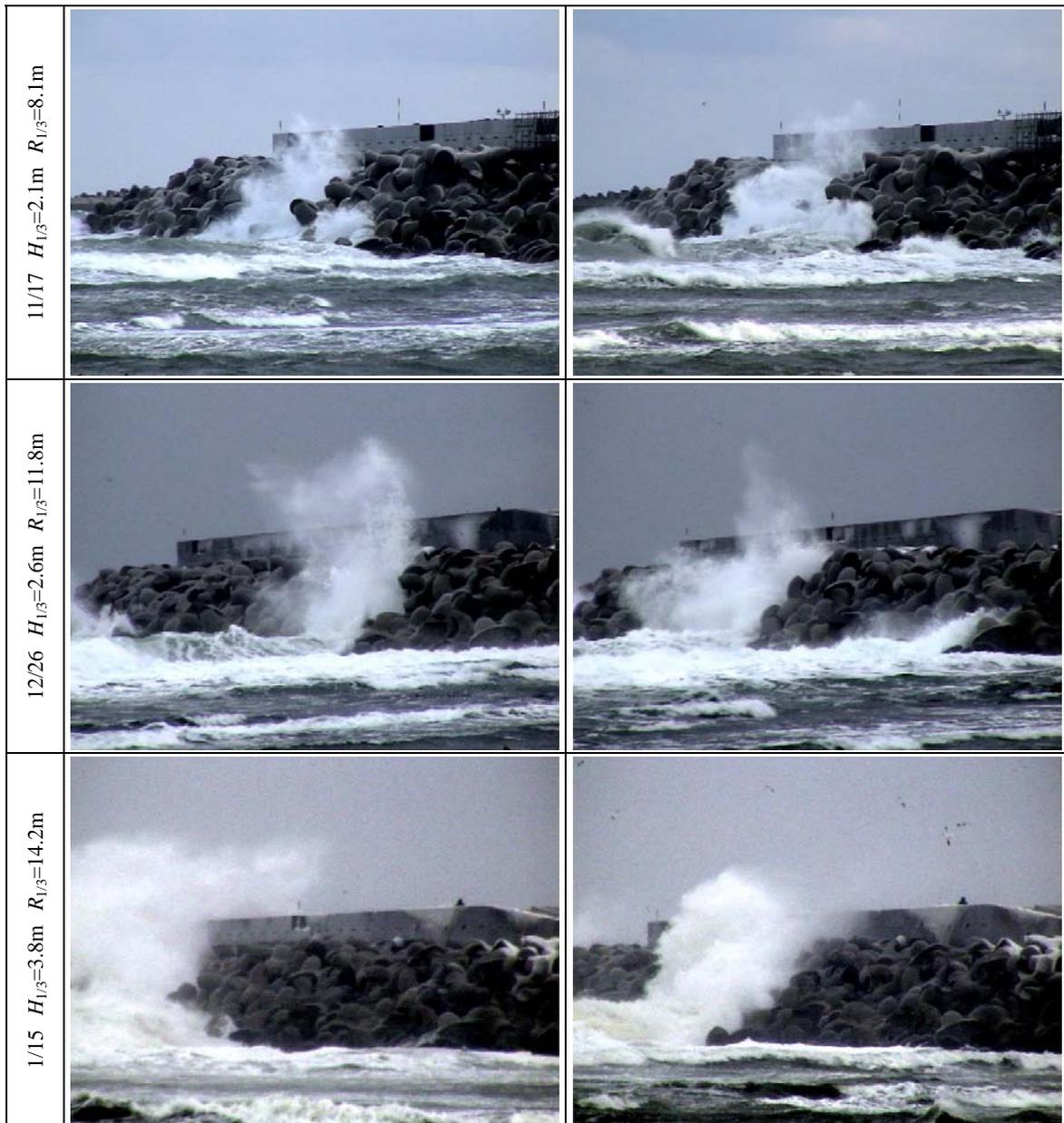


図-8 波高ランク別の打ち上げ状況

参考文献

- 1) 福田伸夫、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回海岸工学講演会論文集、pp.113-118、1973.
- 2) 榊山勉・鹿島遼一・今井澄雄・清水琢三・片山裕之：消波護岸への越波に関する現地観測、海洋開発論文集、Vol.12、pp.291-296、1996.
- 3) 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、1975.