

消波護岸の越波流量の確率分布特性に関する研究

泉宮尊司¹・濱田良平²・石橋邦彦³

本研究では、越流水位の観測に空中発射式超音波水位計を、越流流速の測定には電波流速計を用いて、時々刻々の越波流量を計測している。計測された越波流量の精度を確かめるために、高山らの越波流量に関する公式と比較して、一致度が高いことが示された。また、計測された越波流量の確率分布を調べたところ、形状母数が $k=1$ の Weibull 分布すなわち指数分布に従うことが分った。求められた確率分布関数より、超過確率 $x\%$ 値の越波流量を求めて、観測値と比較している。観測値との一致度は高く、越波流量の確率分布が指数分布であることがより明確に確かめられた。さらに、超過確率が 1% 値および 2% 値の越波流量は、それぞれ平均越波流量の約 5 倍および 6 倍程度であることも示されている。

1. はじめに

これまで越波流量は平均値あるいは期待値で評価され、護岸の天端高等の設計に活用されてきた (合田, 1990)。しかしながら、平均越波流量が比較的小さくても、数秒程度の時々刻々の越波量はかなり大きな値となることが、泉宮ら (2004, 2005) の現地観測より明らかとなっている。このような越波の変動特性は、海岸道路の交通規制の条件や塩水飛沫発生量などに関係するため、その特性を明らかにすることは極めて重要である (木村ら, 2001, 2003)。

不規則波による越波流量は、合田ら (1975) が行ったように波高分布を用いて、越波量の期待値をとる形で評価されている。このため、個々の波に対する越流量を評価できないが、護岸の設置水深がやや大きい場合には、非碎波の大きな波高をもつ波が存在するので、かなり大きな越波流量が発生する可能性がある。近年では、海岸侵食が全国的に発生し、海岸道路の護岸前面の砂浜が失われつつあり、堤脚水深増大によりこれまでより大きな越波量が発生しやすくなっている。このような状況にある中で、超過確率の小さい越波量はかなり大きくなっている可能性がある。これを調べるためには、越波量の確率分布を調べる必要がある。

そこで本研究では、新潟県糸魚川市の親不知海岸高架橋波浪対策護岸において、超音波水位計および電波流速計を用いた現地観測により得られた時々刻々の越波流量の確率分布特性を調べることにした。さらに、平均越波量、超過確率 1% および 2% の越波量を算定し、それらの関係を明らかにすることを研究の目的とする。

2. 越波流量の観測方法の概要

越波に関する現地観測は、泉宮ら (2004, 2005) と同じ

く新潟県糸魚川市 (旧西頸城郡青海町) 親不知海岸にある北陸自動車道親不知高架橋の波浪対策護岸で行った。この波浪対策護岸は、天端高は T.P. 3.1 m、堤脚水深は約 4.9 m であり、その護岸前面には公称 20 t の消波ブロックが、天端 2 列配置で 1:4/3 の勾配で設置されている。護岸の背後は、越波した海水をスムーズに排水できるように、7% 勾配のコンクリート斜面が設置されている。

越波流量の観測には、10 数 m 程度離れても数 m/s の高流速が計測できる電波流速計を旧護岸の天端付近に設置して越流速を測定し、越流水深は空中発射式超音波水位計により記録周波数 1 Hz で計測した。越波の観測は、2004 年 1 月 8 日、14 日から 15 日および 2 月 16 日に行った。沖波の波浪は、親不知海岸の沖合水深約 20 m の位置に超音波式波高計、水圧式波高計および電磁流速計を設置して観測した。

3. 観測された越波流量と高山式との比較

本研究で用いている越波観測システムは、電波流速計と空中発射式超音波水位計を用いており、どの程度の精度で越波量が測定されるのか、未だ明らかになっていないため、越波量に関する高山ら (1982) による評価式と比較することにした。

越波流量の評価法は泉宮ら (2005) と同様であり、観測された越波量を時間平均する際には、統計的安定性と現地波浪が定常とみなせる時間を考慮して、10 分間の時間平均をとることにした。これは、越波量が 1 s 毎に得られているので、600 個のデータの平均値を取っていることになる。

図-1 は、電波流速計と超音波式水位計で計測された無次元越波流量と高山らの算定式による結果とを比較したものである。図中の真中の実線は完全一致を示し、上下の直線は、合田ら (1975) による越波流量の推定値に対する真値の想定範囲を示している。すなわち、この上下の直線の範囲内であれば、両者はよく一致していると

1 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科

2 北川ヒューテック (株)

3 正会員 新潟大学技術職員 工学部建設学科

判断される。この図をみると、本越波流量観測システムにより得られた結果は、ほぼ上下の直線の範囲内にあり、比較的良好に一致していることが分かる。同じく図-2は、越波流量そのものを比較したものである。両者は比較的良好に一致しているものの、本計測システムで計測された結果の方が多少大きい値を示す傾向にあることが読み取れる。これは、電波流速計を用いた本計測システムでは、半値角が10度であるので、その領域内で最大に近い流速が計測されているためと考えられるが、より詳細な検討が必要である。

4. 越波流量の確率分布の評価

(1) 越波流量の確率分布

期待越波流量は、越流公式を用いて表され、次式で表される(合田ら, 1975)。

$$\frac{q_{\text{exp}}}{\sqrt{2gH_0^3}} = \int_0^\infty q^*(x)p(x)dx \quad (1)$$

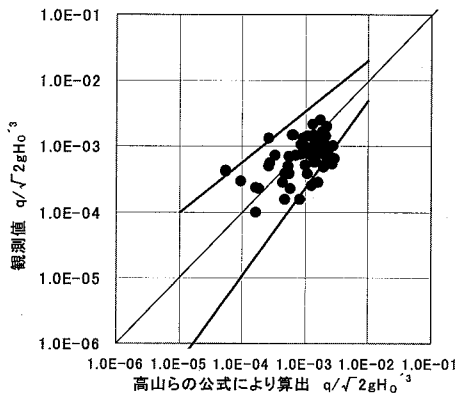


図-1 無次元越波流量の比較

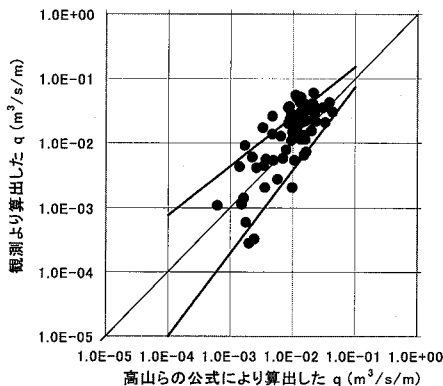


図-2 越波流量の比較

$$q^*(x) = \frac{q(x)}{\sqrt{2gH_0^3}} \\ = A_0 \left(\frac{K}{1+K} \right)^{3/2} x^{3/2} \left[1 - \frac{h_c}{H_0} \frac{1}{Kx} \right]^{5/2} \quad (2)$$

ここに、 $x=H/H_0$ 、 $K=\eta_c/H$ であり、 H は波高、 H_0 は換算沖波有義波高、 η_c は波頂高、および $p(x)$ は無次元波高分布関数である。これらの関係式より、無次元越波流量の確率分布 $f(q^*)$ は、

$$f(q^*) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-iq^*s) \varphi(s) ds \quad (3)$$

$$\varphi(s) = \int_0^\infty \exp(iq^*s) f(q^*) dq^* \\ = \int_0^\infty \exp(iq^*(x)s) p(x) dx \quad (4)$$

で求められることになる。しかしながら、無次元波高分布 $p(x)$ は浅海域で碎波すると、もはやRayleigh分布とは異なり、数値計算によらなければならないので(合田, 1975)、式(3)および式(4)の計算も理論的に行うことができない。そこで、観測された越波流量の確率分布を見た上で、より適用性の広い確率分布を採用することにした。

(2) 越波流量の確率分布の適用性

計測された越波流量の確率分布は、図-3および図-4に示すように指数分布に近い分布を示していたので、Weibull分布およびRayleigh分布を候補確率分布として適合性を調べることにした。図-3及び図-4における基準化変量 y とは、尺度母数 A と位置母数 B で無次元化した量である。

越波流量の確率分布を求めるために、波高の極値解析と同様な手法を用いて、母数を決定することにした。図-5および図-6は、Weibull分布を当てはめた時の基準化変量 y_m との関係を示したものである。これらの図において、越波流量が0となるものを除外してプロットしている。これらの図より、越波流量が小さい値からかなり大きな値まで、Weibull分布の適合性が高いことが分かる。

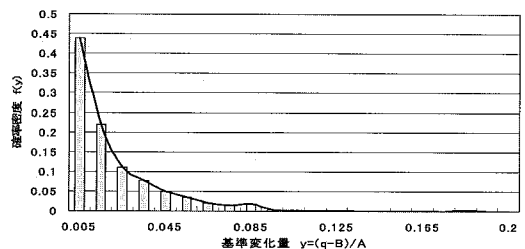


図-3 計測された越波流量の確率分布 (Case-1)

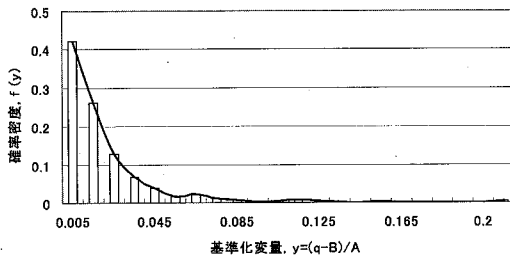


図-4 計測された越波流量の確率分布 (Case-2)

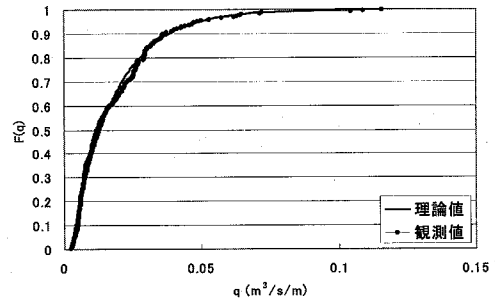


図-7 越波流量の非超過確率分布関数の比較 (Case-1)

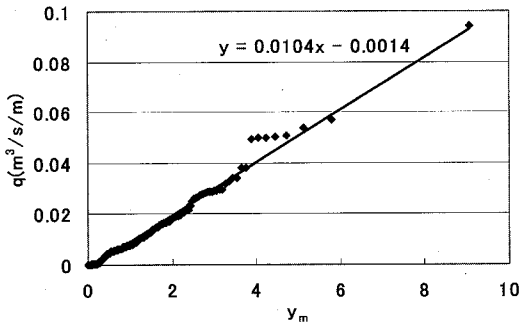


図-5 越波流量のWeibull分布との比較 (Case-1)

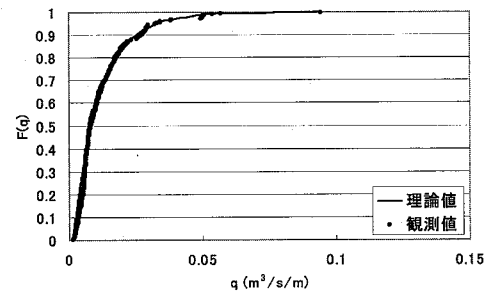


図-8 越波流量の非超過確率分布関数の比較 (Case-2)

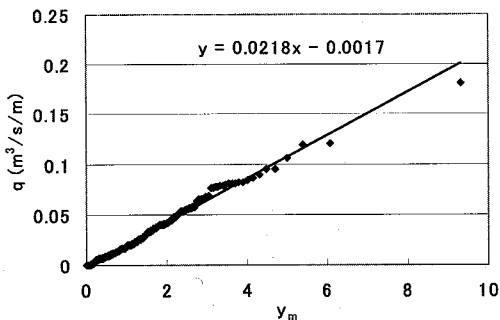


図-6 越波流量の Weibull 分布との比較 (Case-2)

図-7 から図-8 は、越波流量の非超過確率分布関数を比較したものである。実曲線は、Weibull 分布関数の母数を最小二乗法により推定した関数であり、・印は合田 (1990) によるプロットング公式を用いてプロットしたものである。これらの図によると、越波流量 q の小さい値から $0.1 \text{ (m}^3/\text{s/m)}$ 程度のかかなり大きい値まで、ほぼ Weibull 分布に従っていることが分かる。

次に Rayleigh 分布の積分関数を確率密度関数とした関数の適合性を調べるために、確率密度関数 $f(q)$ を次式で表す。

$$f(q) = \exp\left\{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{q}{q_{ave}}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (5)$$

上式において、 q_{ave} は平均越波流量である。この密度関数を積分することにより、誤差関数を用いて非超過確率分布関数が得られる。

図-9 は、非超過確率分布を比較したものである。この図を見ると、越波流量が比較的小さい $0.02 \text{ m}^3/\text{s/m}$ 以下では類似した分布を示しているが、その値以上ではかなり異なった分布となっている。Weibull 分布では、形状母数が $k=1$ のとき一致度が最も高かったので、指数関数の指数が q に比例して減少するが、Rayleigh 分布の積分関数を密度関数とした場合には、 q^2 に比例して減少するため計測値との差異がやや大きくなったものと考えられる。このため、これ以降の議論では、形状母数が $k=1$ の Weibull 分布を用いたものを使用することにする。

5. 越波流量の超過確率 $x\%$ 値の評価とその特性

実測の越波流量を用いて Weibull 分布の母数を推定すると、越波流量の確率分布関数が定まることになるので、容易に超過確率 $x\%$ 値を評価できる。

図-10 は、このようにして算定された越波流量の超過確率 $x\%$ 値の変化を示したものである。中央値である超過確率 50% 値は、 $0.04 \text{ (m}^3/\text{s/m)}$ 以下と比較的小さいが、超過確率 10% 値になるとほぼ 2 倍程度の値となり、越波流量の変化波形が相似的に引き伸ばされたような結果となっている。さらに、超過確率が 2% および 1% 値になると、越波流量はさらに大きくなり、中央値の約 4~5 倍にもなっていることが分かる。

これら越波流量の超過確率 $x\%$ 値が正確に評価できているかどうかを確認するために、越波流量の実測値より評価した超過確率 2% 値と同定した確率分布関数より評価した値とを比較したのが、図-11 である。この図より、確率分布から評価した越波流量の超過確率 2% 値が、実測結果をよく表していることが分かる。

越波流量の超過確率 1% 値についても、図-12 に示すように確率分布関数から推定した値とよく一致している。これらのことより、Weibull 分布が超過確率のかなり小さい所まで適用できることを示していることの証であると考えられる。

従来より用いられてきた平均越波流量と超過確率 2% および 1% 値との関係を調べたのが、図-13 および図-14 である。この図において、実線は越波流量の平均的な関係を示し、その上下の破線は推定値の広がり幅を示している。これらの図より、いずれの超過確率値の越波流量においても、平均越波流量にほぼ比例する関係にあり、超過確率 2% 値および 1% 値の越波流量は、それぞれ約 5 倍および 6 倍程度であることが分かる。この関係より、超過確率 1% 値の越波流量は超過確率 2% 値の越波流量とそれほど大きさは変わらず、1.2 倍程度しか変化していないことを示している。このように、超過確率

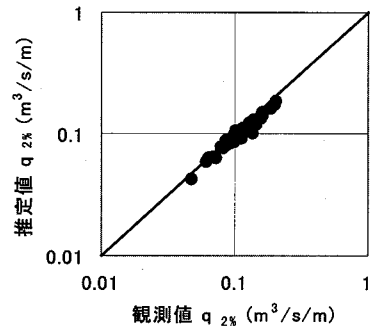


図-11 越波流量の超過確率 2% 値の比較

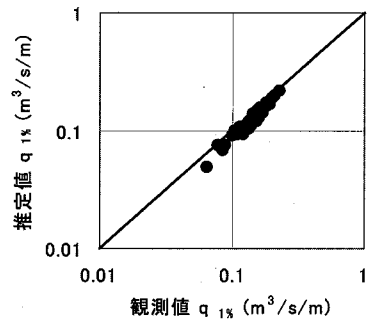


図-12 越波流量の超過確率 1% 値の比較

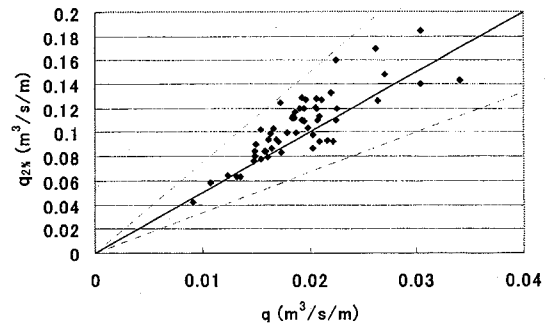


図-13 平均値および超過確率 2% 値の越波流量の比較

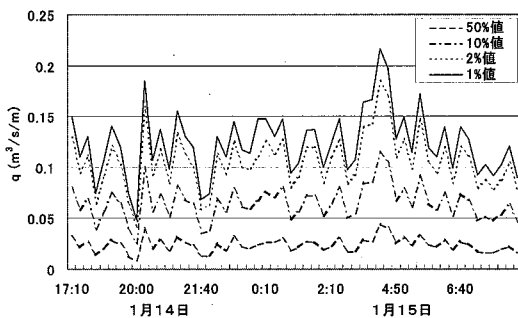


図-10 越波流量の超過確率 $x\%$ 値の変化

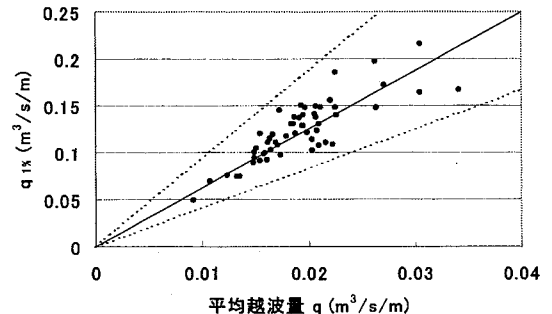


図-14 平均値および超過確率 1% 値の越波流量の比較

2%値と同じく1%値の越波流量の値が大きく異ならないのは、越波流量の確率分布が $k=1$ のWeibull分布、すなわち指数分布に従っていることに由来していると考えられる。

6. 結 論

超音波水位計および電波流速計を用いた現地越波流量について、その確率分布特性を調べ、以下の事柄が明らかとなった。

- (1)電波流速計と超音波水位計のデータを用いて観測した越波流量は、高山らの算定式を用いて推定された越波流量とほぼ一致することから、この越波計測システムは信頼性があることが示された。
- (2)越波流量が $0\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ となる値を除いた場合の確率分布は、Weibull分布の $k=1$ の分布の適合性が最も高かった。すなわち、越波流量の分布は指数分布に近く、推定される位置母数がほぼ0に近いので流量変動の標準偏差と平均値がほぼ一致するほど、変化の大きい分布であることが明らかとなった。
- (3)越波流量の超過確率2%値の観測値と当てはめた分布関数より算定した同じく2%値は、非常に高い一致を示していた。1%値についても同様なことが言え、 $k=1$ のWeibull分布の適合度が高いことが別の視点から示された。
- (4)新潟県親不知海岸高架橋波浪対策護岸で観測された越波流量から、中央(50%)値、超過確率10%、2%および1%値を評価し、それらの時系列変化を調べたところ、中央値が若干増加するだけで2%および1%値は非常に大きく増加していることが明らかとなった。
- (5)越波流量の平均値と超過確率が1%値および2%値と

を比較すると、後者は前者の5倍程度の関係があり、平均越波流量が大きくなるほど超過確率2%および1%の越波流量もほぼ比例して大きくなる傾向にあることが確認された。

なお、本研究で用いた波浪および越波観測データは、日本道路公団北陸支社信越工事事務所(現東日本高速道路株式会社)によって取得されたものであり、越波流量等の解析は新潟大学が行ったことを付記し、データ提供に関して感謝いたします。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・中野秀紀・石橋邦彦(2004):高架橋波浪対策護岸における越波および水塊打上げ高の確率分布特性, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 119-124.
- 泉宮尊司・馬場真宏・石橋邦彦(2005):電波流速計を用いた低天端消波護岸の越波量の現地観測とその評価, 海岸工学論文集, 第52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, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 756-760.
- 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.
- 合田良実(1975):浅海域における波浪の碎波変形, 港研報告, 14巻, 3号, pp. 59-106.
- 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.
- 合田良実(1990):港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説—, 鹿島出版会, pp. 278-287.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982):各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第21巻, 第2号, pp. 151-206.