

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

泉宮尊司*・馬場真宏**・石橋邦彦***

本研究では、電波流速計と空中発射式超音波水位計を用いて、新潟県糸魚川市親不知海岸にある高架橋波浪対策護岸の越波量の現地観測を行った。この波浪対策護岸は、天端高3.1mの低天端消波護岸で、背後は7%勾配のコンクリート斜面でできている。電波流速計で観測された越流速は4m/sから7m/sとかなり大きいことが分った。水位計で観測された越流水深と流速を用いて越波流量を算定したところ、その最大値が瞬間的には $0.2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ を超えることがあることが分った。しかしながら、5分間の移動平均による越波流量は、最大値より1オーダー小さい量であり、合田の越波量算定公式による結果と良く一致することが確認された。

1. 諸 言

新潟県糸魚川市親不知海岸に設置された高速道路高架橋橋脚は、冬季暴浪と海岸を構成している砂礫によりその磨耗が激しく、頻繁に補修が行われていた。しかしながら、近年海岸侵食が急激に進み、補修を行うにも海中工事となるため、年々補修経費が増加してきたため、その抜本的対策として、低天端の消波護岸を設置することになった。橋脚の磨耗を防止するための護岸であるため、一般の海岸保全施設とは異なり、その天端高はT.P.3.1mと低く、越波量はかなり大きくなることが予想された。

しかしながら、道路護岸の打上げ等に関しては木村ら(1998,2003)の一連の研究があるが、現地観測によって越波量を測定した例も西村ら(1972)、福田ら(1973)および榊山ら(1997)等数例あるに過ぎない。また合田ら(1975)による室内実験結果を基にした越波量算定図や高山ら(1982)の算定式の適用性を現地観測で確かめた例は殆ど存在しない。これは現地においては、越波量が大きい場合には越流速も大きく、海水の容積や越流速を短時間で計測することが極めて困難であったことにも拠っている。このように現地で越波量の測定が困難であったために、越波量に関する設計基準の妥当性や越波の時間変化特性については、殆ど確かめることができなかった。

そこで本研究では、高速流速でも測定可能な電波流速計と越流水位を計測する空中発射式超音波水位計を越波量の測定に初めて用い、それぞれの測定結果の精度や特性について調べる。また、越流速、越流水深および越波量の時間変化特性を明らかにすると共に、本システムによって測定された平均越波量と既存の越波量算定式によ

る結果とを比較し、越波量を計測するシステムを開発することを研究の最終目的とする。

2. 越波に関する現地観測の概要

越波に関する現地観測は、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、写真-1に示すように前述の橋脚を磨耗から守るために設置されたもので、天端高はT.P.3.1mで、堤脚水深は約4.9mである(泉宮ら, 2004)。護岸前面には波浪に対する安定性と磨耗を考慮して、公称20t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。

沖波の波浪は、2003年11月20日から2004年3月10日まで観測を行い、超音波式波高計、水圧式波高計および電磁流速計を親不知海岸の沖合水深約20mの位置に設置して観測した。越波の観測は、沖波の波浪観測期間中で波浪の比較的大きい日を選び、2004年1月8日、14日から15日および2月16日に行った。越波の観測には、10m程度離れて高流速が計測できる電波流速計、および越流水深を計測するために空中発射式超音波水位計を用



写真-1 親不知高架橋波浪対策護岸

* 正会員 工博 新潟大学教授工学部建設学科
** (株)開発技術コンサルタント
*** 正会員 新潟大学技術職員工学部建設学科

いている。また、波浪および越波の様子を観測するために、高架橋背後にある旧護岸の天端付近に録画装置を設置して録画した。越波流速の計測に用いた電波流速計は、横河電子機器社製のもので、マイクロ波のドップラ効果により非接触で計測できる利点がある。

沖波波浪は、水圧式波高計と超音波式波高計の2台で計測しているが、それぞれ図-1 および図-2 に示すように、水圧式波高計による結果が約10%から20%程度大きな値となっている。これは、圧力変動を水面波に換算する際に用いる伝達関数に誤差があることから生じるものである。したがって、本研究では気泡の影響を除去した超音波式波高計のデータを用いることにする。

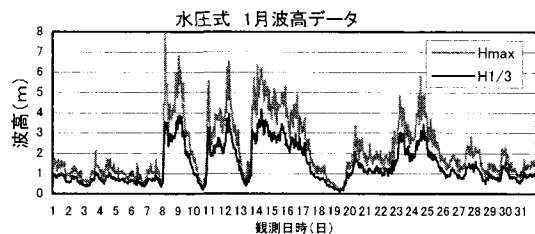


図-1 水圧式波高計による波高データ

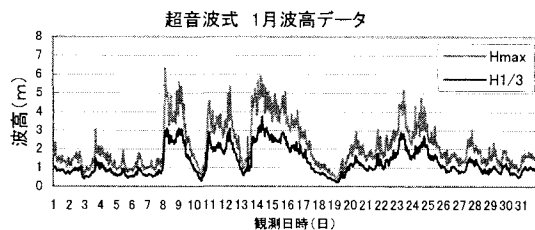


図-2 超音波式波高計による波高データ

図-2 の1月の波高は、4回程度の時化が襲来しており、その時の有義波高は約3mで最大波高が5m前後で時化であり、日本海側の新潟県沿岸における平均的な時化である。越波観測を行った2004年1月8日および14日から15日は、有義波高2mから3mの典型的な時化であったことがこの図より分る。

3. 越流速および越流量の測定結果および考察

(1) 越流速および越流量の時間変化特性

電波流速計により測定された越流速の時系列変化の例を図-3に示す。この測定結果は、2004年1月14日の18時から15分間のデータである。越流が生じるのは波高の大きい波の峰が来たときであり、数波から10波程度の間隔で大きな越流速が観測されている。越流速の最大値は、4m/sから7m/sに及びかなり大きいことが分る。これらの速度は、ビデオ映像から推定される越流先端の速度におおよそ等しい値である。この図より、7%の逆

勾配をもつコンクリート斜面上の流速は想像される以上に大きいことが分る。他の時間帯もほぼ同様であり、流速が大きい時には4m/sから7～8m/sの流速が観測されている。

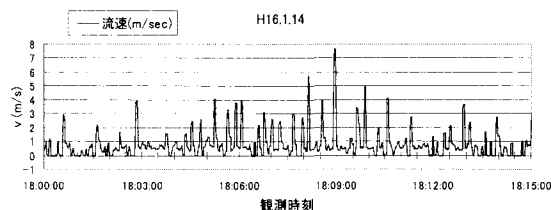


図-3 越流速の測定結果

一方、越流した海水は最高地点まで達すると、緩やかに海側へ流れて行くが、この時の負の流速は電波流速計では上手く測定できていないことが、図-3からも分かる。これは、引き波状態にある時は水面がほぼ滑らかであり、Bragg 共鳴による後方散乱強度が小さくなることに拠っていると考えられる。

越流水深と流速のデータを用いて、流速分布が一様であるとの仮定のもとに越流量 q を評価することができる。図-4 は、2004年1月14日19時27分頃の越流水位と越流量の時間変化を示したものである。越流水位は最大でも10 cm 程度であり、極めて薄い層状で越流していることが分る。しかしながら、越流速が大きいため、越流量としては短時間ではあるが、約 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ にも達している。

図-5 は、同じく1月14日の21時頃の越流水位と越流量の時間変化を示したものである。越流水位は図-4と同様に10 cm 以下であり、かなり薄い状態で越流しているが、流速が大きいために越波量としては瞬間的には

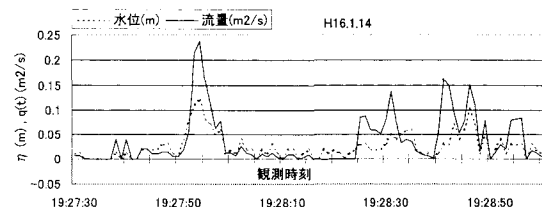


図-4 越流水深と越流量(19時27分頃)

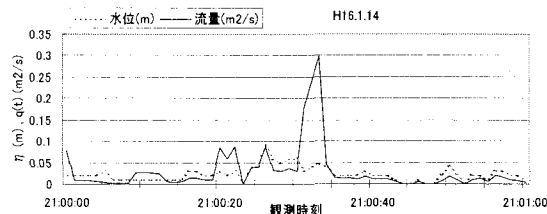


図-5 越流水深と越流量(21時頃)

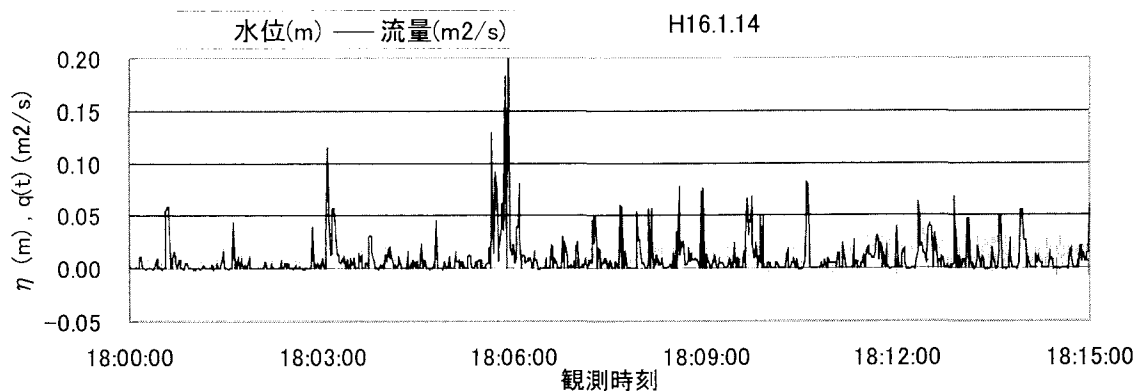


図-6 越流水位と越流量(1月14日18時頃)

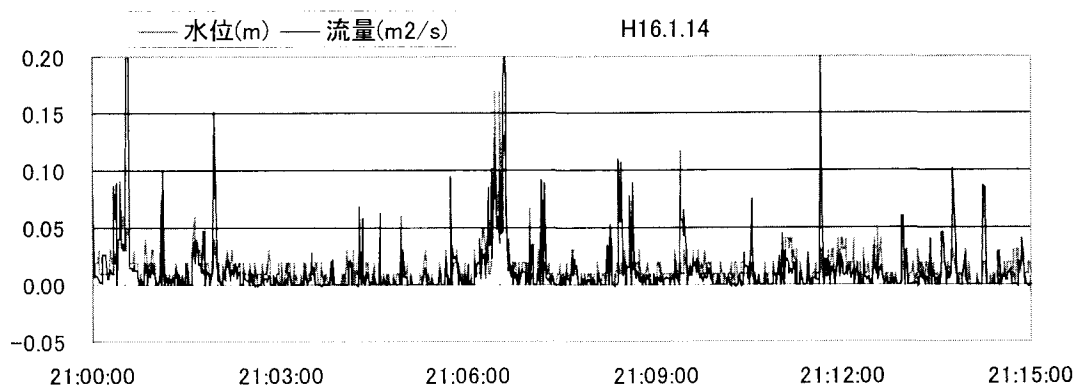


図-7 越流水位と越流量(1月14日21時頃)

0.2 m³/s/m 以上となっている。

図-6 および図-7 は、もう少し長い15分間の越流水位と越流量の時間変化を示したもので、1月14日18時から15分間と同じ日の21時からのデータである。18時および21時の水深20 m の地点の有義波高および有義波周期は、それぞれ2.6 m, 9.9 s, および2.5 m, 8.7 s である。越流は各波毎に生じるのではなく、数波から10数波に一度の割合でやや大きい越流が生じている。有義波高および有義波周期のやや小さい図-7 の方が、越流間隔は多少長くなっているが、一旦越流が生じるとやや大きな越流量が観測されている。これは、有義波高および有義波周期が小さい21時頃の方が、波が護岸前面で丁度碎波する割合が増加し、そのために越流量が増加したものと考えられる。したがって、有義波高だけでなく護岸前面で碎波するかどうかで最大越流量の大きさを左右していると考えられる。

(2) 5分平均越流量の変化特性

一般に越流量は、期待値あるいは時間平均値で評価されている。図-4 から図-7 に見られるような大きな越流量も時間平均することにより、瞬間的な最大越流量より

も1オーダー小さな値となる。

図-8 は、5分間移動平均した越波量の時間変化を示したものである。図-9 には、その時間帯における水深20 m 地点における有義波高および波形勾配の変化を示している。これらの図から、有義波高は変動しながら僅かに小さくなっているが、移動平均した越波流量は数10分程度の変動が顕著であり、3時30分から4時30分頃にかけてやや大きくなっている。この時間帯には有義波高は2.3 m 程度に若干小さくなり、逆に波形勾配は約2%とやや大きくなっている。このように平均越波量は、波高と波形勾配が少しでも変化し、護岸前面で丁度碎波する条件が整うとやや大きくなる傾向にあることが分る。

図-10 は、同じく2004年1月15日の16時から16日の9時までの5分間移動平均した越波量の変化を示したものである。この時間帯では、図-11 に示すように有義波高は減少傾向にあるが、越波流量は単純には減少していない。図-8 に見られたように、有義波高が2.3 m, 波形勾配が2%に近づく越波流量が大きくなっていく様子が22時前後に見られる。また、図-10 の16時から21時頃にかけて、越波流量はやや大きく変動しながら有義波高と

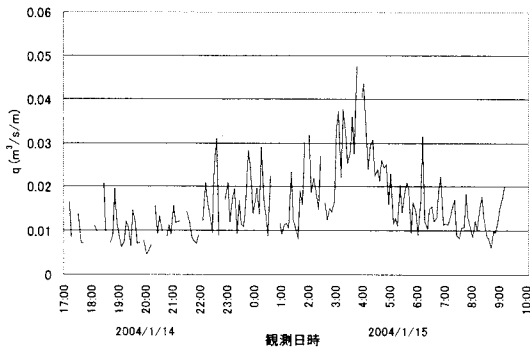


図-8 5分間移動平均の越波流量の変化(その1)

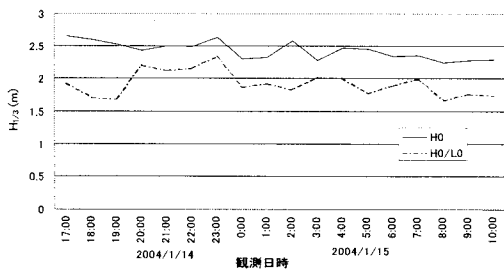


図-9 有義波高および波形勾配の変化(その1)

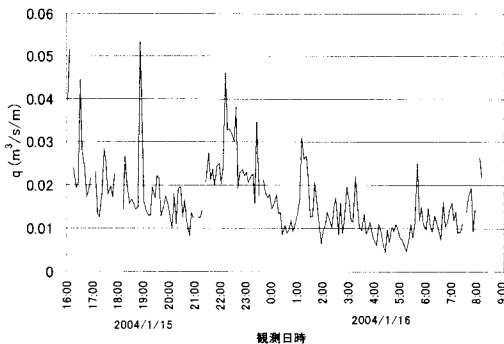


図-10 5分間移動平均の越波流量の変化(その2)

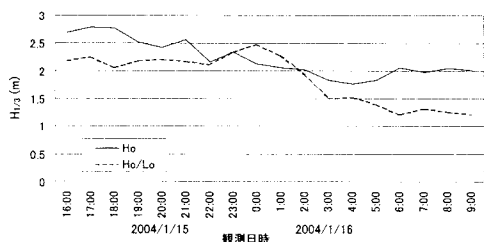


図-11 有義波高および波形勾配の変化(その2)

同様な減少傾向にある。1月16日の4時頃に波高は最小となっているが、越波流量も平均的にみれば最小値に近い値をとっており、電波流速計と超音波式水位計を用い

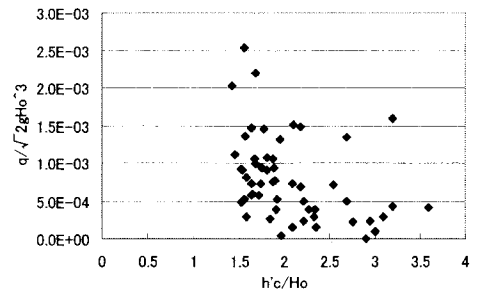


図-12 無次元越波量と相対天端高との関係

た越波計測システムの有効性を示すものと考えられる。ただし、図-8および図-10に見られる越波流量の数10分周期の変動については、測定装置の測定誤差に由来するものか、あるいは実際の波群特性に依存して発生しているのかについては、まだ明確となっておらず、今後の課題としたい。

図-12は、無次元越波量と相対天端高との関係を示したものである。この図より、相対天端高はおおよそ1.5から2.5であり、無次元越波流量は $1.0 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度の値となっている。護岸の法先水深 h が約4.9 mであるので、相対水深 h/H_0 は0.4から0.6程度であり、合田ら(1975)による越波量算定図によると、海底勾配1/10の無次元越波量は $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度の値であり、驚くほど一致していると言える。したがって、本研究で用いた電波流速計および超音波式水位計を用いた越波量観測システムは、平均越波量に関しては信頼性が十分に高いと言える。

本研究で行った低天端の消波護岸は、越波量が多い場合には合田の越波量公式が適用できないと思われたが、有義波高2 m～3 mの波高であれば良い一致を示すことが分った。しかしながら、図-4から図-7に見られるような瞬間的な越波流量はかなり大きく、越波の期待値あるいは時間平均値だけでなく、1/3最大値や最大2%値などの代表値や変動特性値を用いて越波量を評価する必要性もあることが示唆された。

4. 結 論

電波流速計と空中発射式超音波水位計からなる現地用越波量測定システムを開発し、低天端消波護岸において現地観測を行ったところ、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 電波流速計を用いて、消波護岸背後のコンクリート斜面の越流速を測定したところ、最大流速が4～7 m/s程度の高流速であることが分った。一方、空中発射式超音波水位計から得られた越流水深は、大きくても0.1 mから0.3 m程度であり、極めて薄い層状で

越流していることが分った。

- (2) 今回現地観測を行った波浪対策護岸の天端高は3.1 m とかなり低いので、瞬間的な越波流量は有義波高が3 m 程度で $0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ を超えることがあるが、5 分間の移動平均した越波流量は、1 オーダ小さい $10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ のオーダであった。越波流量は、沖波波高の大きさにほぼ対応して変化しているが、波形勾配にも関係しており、今回の観測では有義波高が約2.3 m で波形勾配が2 %程度で、越波量がやや大きくなることが確認された。
- (3) 越流水深が0 cm から1 cm 程度以下の時、水表面が滑面過ぎて正確な流速が得られない場合があり、特に沖に向かう負の流速は測定できないことが分った。しかしながら、この位相では越流水深およびその流速の絶対値が小さい値として観測されるので、越波量の評価には余り影響を及ぼさない。
- (4) 観測された無次元越波量は、合田ら(1975)の越波量算定図によるものと、オーダだけでなく数値も良い一致を示していた。このことは、本研究で用いた電波流速計および超音波式水位計を用いた越波量観測システムが平均越波量に関しては十分に信頼性があることが確認された。
- (5) 瞬間的な越波流量は5 分間移動平均量よりも1 オーダ大きいことが、本現地観測より明らかとなった。今後、平均越波量だけでなく、このような越波量の時間変動特性の評価が重要となることが示唆された。

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.
- 木村克俊・藤池貴史・上久保勝美・安倍隆二・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，海岸工学論文集，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・岸良宏治・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3号，pp. 3-44.
- 榊山勉・鹿島遼一(1997)：消波護岸の越波に関する現地観測と水理実験との比較，海岸工学論文集，第44巻，pp. 736-740.
- 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.
- 西村一男・入江功(1972)：防波護岸の越波に関する現地観測（第1報），第19回海講論文集，pp. 297-302.
- 福田伸男・宇野俊泰・入江功(1973)：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.