

オンサイト越波計の開発と現地適用性

永井紀彦*・平石哲也*・服部昌樹**
安田誠宏*・高山俊裕***

遊歩道付き護岸等の親水性施設での安全管理に役立てることを目的として、護岸での越波や越流をリアルタイムで計測するためにオンサイト越波計が開発された。オンサイト越波計は、ステップ式波高計を改良して、5 cm 間隔で電極を張り付けた長さ 1 m の測定棒を護岸上に設置したものである。オンサイト越波計の現地適用性を調べるために、神奈川県久里浜湾の護岸で現地観測が実施された。2002 年 10 月 1 日の台風 0221 号来襲時の観測において、越流高から計算された 10 分間平均越波流量は、同時に観測された集水升による越波流量に一致し、オンサイト越波計の現地適用性が検証された。

1. はじめに

遊歩道付き護岸等の親水性施設が全国のウォーターフロント整備で重要な要素となっている。一方、防波堤等の上層に人が立ち入った場合には、うねりの侵入に伴う突発的な越波や越流により、転倒し流されたり、水流により怪我を被る危険性が高くなる。鈴木ら (1994) は全国の親水性施設の被災状況を調べ、これまでの施設設計に用いられた許容越波流量 (たとえば合田, 1977) 以下の平均越波流量でも歩道やベンチなどの付帯設備が破壊されることを示した。高橋ら (1993) は、堤防上の越流で歩行者が転倒する危険度を示している。

このように、親水性施設では、時間的に変動する越波流量を正確に推定し、人が安全に立ち入れるような設備を備える必要がある。また、現地でも越波や越流に関する情報を利用者に適切に伝達しておくことが事故を防ぐためにも重要である。特に、夜間の親水性施設では、海面の状況が視認できないので、波高増大を認知した迅速な避難に支障が生じる。そこで、護岸における越波および越流をリアルタイムで計測し、付属アラーム装置により警報を発信し歩行者や自転車通行者に危険を知らせることが可能になる“オンサイト越波監視計”を開発した。

本装置の現地適用性を検証する目的で、東京湾口に位置する横須賀市久里浜の護岸 (国土交通省国土技術政策総合研究所敷地) にオンサイト越波監視計の試作機を設置し、2002 年 9 月から運用を開始した。運用中の 10 月 1 日の台風 0221 号来襲時に護岸上で越波観測を実施し、越波流量の時刻毎の変化を調べた。そして、同時に実施したビデオ観測や集水升による測定値との比較、沖合波浪観測結果との相関性の検討等の総合的な検証から、オンサイト越波監視計の現地適用性を把握した。

2. オンサイト越波計の構成

図-1 にオンサイト越波監視計の設置イメージを示

す。本装置はステップ式波高計の原理を活用したもので、高さ方向に 5 cm 間隔で水面感知センサーを張り付けた長さ 110 cm の測定棒を、護岸端部に鉛直に固定したものである。測定した水面高さは護岸天端上の越流高として 0.2 s 間隔で記録されるとともに、リアルタイムでモニター表示される。本観測では、3 本の測定棒を使用することにより、護岸に沿った越波時の越流高の変化を面的に把握した。また、越波が大きい場所では測定棒の設置が困難になるので、近似的に越流高が測定できるように水压式センサーを併用したので、その観測結果も概述する。

設置場所は、神奈川県横須賀市の久里浜湾に面する護岸で、護岸天端高 h_c および水深 h は、C.D.L. を基準として、 $h_c=3.60$ m および $h=3.0$ m である。測定棒は、護岸に從來から設置されているガードレールの支柱を利用して固定し、2 m 間隔で 3 本設置した。水压センサーは 1 台とし、護岸の側溝に取り付けた。観測越流高は有線で直近の観測室内のパソコンに収録した。写真-1 は、オンサイト越波計の取り付けと観測状況を示す。なお、本研究で製作した越波計の高さは 110 cm なので、測定できる護岸上の越流高の最大値は 110 cm である。越流高が 110 cm 以上になると測定棒全体が水没し、観測ができません。

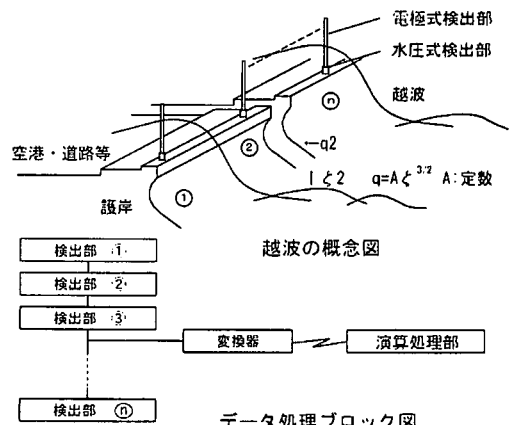


図-1 オンサイト越波監視計の設置イメージ

* 正会員 工博 (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
** (独法) 港湾空港技術研究所海洋・水工部
*** 正会員 協和商工(株)技術部

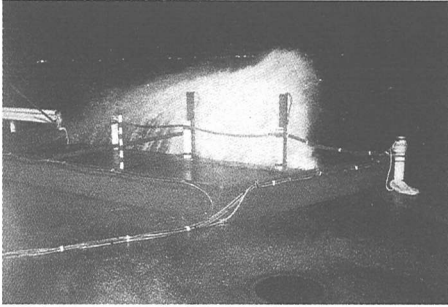


写真-1 オンサイト越波監視計による観測状況

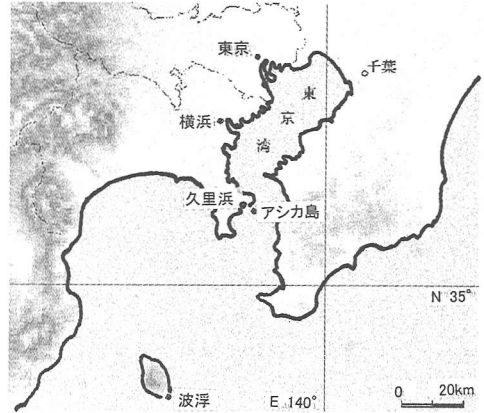


図-2 波浪と越波の観測点の位置

い。
計測結果の妥当性を検証する目的で、オンサイト越波計と同時に、近傍の観測室から越波状況をビデオ (VTR) で連続的に撮影し、画面上の測定棒長を基準値として、1 波毎にピークの越波高を読みとった。夜間の観測となり、できるだけ照明を明るくした。さらに、越波監視計で測定された越波流量の妥当性を検証するために、監視計設置場所周囲の海側を除いた 3 周を高さ 40 cm の鉄板で囲って、集水升を作成した。集水升には 1 波毎に越流した海水が一時的に滞水するので、集水升の中央に直立させたスタッフからピーク浸水深を読みとることによって、1 波毎の越波流量を計算することができる。

なお、オンサイト越波計で測定された越波高 h_k と基準面上の護岸天端高から、初期水面上の水位 $\eta(t)$ が求まる。越波流量は平石ら (1996) に従い、次式で求めた。

$$q(t) = \begin{cases} C_0(2g)^{1/2}(\eta(t) - h_c)^{3/2} & : \eta(t) \geq h_c \\ 0 & : \eta(t) < h_c \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 h_c は観測潮位で補正した潮位面からの護岸天端高、 t は時刻を示す。 C_0 は越流係数で、ここでは直立護岸に適するものとして、 $C_0 = 0.5$ とした。

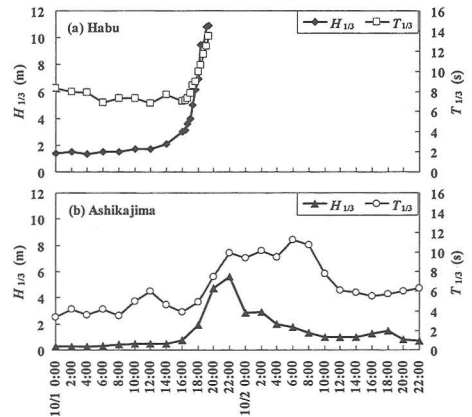
集水升の 1 波毎の越波量 $Q(\text{m}^3/\text{m})$ は次式で計算した。

$$Q = dA/\ell \quad (2)$$

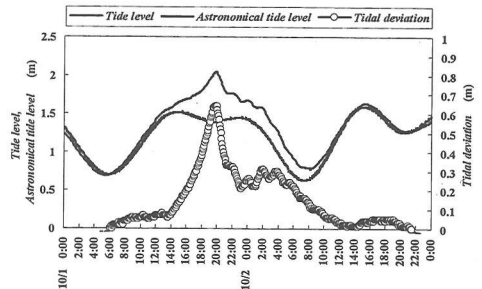
ここで、 d は集水升内の標尺読みとり値、 A は集水升の面積、 ℓ は集水升の間口長 ($= 8 \text{ m}$) である。

3. 観測期間中の海象

本研究で対象とした観測期間は、台風接近時の 2002 年 10 月 1 日 18:00 より、台風中心の通過による久里浜湾の高潮により護岸本体が破壊された 21:00 まで実施した。観測期間中の波浪状況は、全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) (永井ら, 2002) を活用して、伊豆大島波浮港および久里浜湾口のアシカ島の超音波波高計の観測データを解析して調べた。波浮港での観測は、毎正時前後 20 分間、アシカ島での観測は 2 時間毎に 20 分間の観



(1) 波浮港とアシカ島での波高・周期



(2) 久里浜湾での潮位

図-3 久里浜護岸での越波観測中の海象条件

測データが使用できた。また、越波監視計近傍の観測室に設置されているフース型潮位計を用いて潮位データを収集した。図-2 に波高観測点と久里浜湾の位置を示す。台風 0221 号は、10 月 1 日午後東京湾を暴風域とし、20:00 頃に神奈川県川崎市付近に上陸した。

図-3(1) は、台風接近時の波浮港およびアシカ島における有義波高および有義波周期の観測値を示す。図-3

(2) は、天文潮位、高潮偏差および合成潮位の時間変化を示す。波浮においては、19:30頃波高計のケーブルが断線してしまい、それ以降の観測はできなかった。観測期間中では、19:20の $H_{1/3}=10.9$ m、 $T_{1/3}=13.5$ sが最大値であった。アシカ島では、22:00に最大値 $H_{1/3}=5.64$ m、 $T_{1/3}=9.9$ sが観測できた。高潮偏差の最大値は0.62 mで、この値は横須賀港では、観測史上2位の記録である。高潮の発生がほぼ満潮と重なったため、最高潮位は、2.05 mになった。高潮位と最大波高の発生時刻はほぼ一致し、久里浜湾に面した護岸では、パラベットの破壊、護岸本体の亀裂など大きな被害が生じた。オンサイト越波計自体も20:00に倒壊し、それ以降の記録は取れていない。

4. 越波監視計の適用性

図-4は、観測波高が急激に大きくなった19:12におけるオンサイト越波計の観測水位を示す。図中の番号は監視計の位置を示し、南側よりステップ①、②、③である。護岸が南北方向に設置されており、①番の越波計が沖側に位置し、護岸法線に対して斜めから波が入射するために、越波計①から順に、越流波形が観測できることになる。観測水位は、波が護岸を越えたときだけ測定され、不連続な波形になる。3本の測定位置が近接しているため、ほぼ同じ水位が観測されており、1本だけ大きく異なるような結果は得られず、3本すべてがノイズを含まずに正確に水位の頂点を記録できているものと判断した。水位の時間変化が記録できると、1波あたりの越波流量が式(1)で計算できる。

ある一定時間内に波は何回も繰り返し作用する。そこで、一定時間内に含まれるすべての1波あたりの越波量を積分し、総越波量を求め、その値を対象時間で除すると単位時間あたりの越波流量が算出できる。図-5に平均越波流量の算出方法のイメージを示す。越波監視計で取得された越流高は、0.2 s間隔のデジタル値として記録される。したがって、図-5の最上段(右肩)のように越波波形は階段状になる。越流時間で積分すると1波毎の越波量が算出でき、図-5中段のような離散的な1波あたりの越波量時系列が求まる。次に10分間で観測された越波量の総量を求める。これを10分で除して、図-5下段のように10分間平均越波流量が推定できる。平均時間は任意に設定できるが、短くしすぎると1波毎のばらつきが大きく表れ、時間によって越波量がどのように変化するかをトレンドとして表しにくい。そこで、ここでは10分を平均化の基準値として採用した。

次に、オンサイト越波計による観測結果とビデオ撮影および集水弁による越波流量の結果を比較した。図-6に、台風中心が東京湾に最も近接した10月1日18:

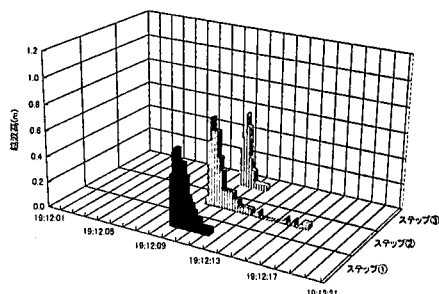


図-4 オンサイト越波計の水位観測記録

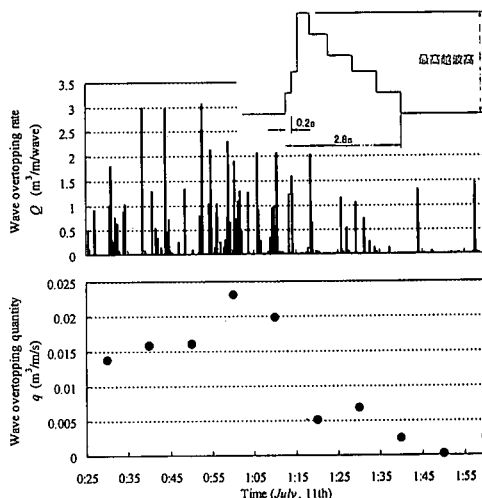


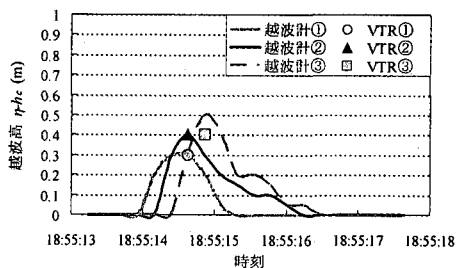
図-5 短時間越波流量の算出法

00~19:00におけるオンサイト越波計で観測した越流波形を示す。図では、3本の測定棒での観測値を黒実線、灰色実線、灰色破線で示した。図中のVTR記号で示した値は、比較のために、それぞれの測定棒の没水状況をビデオ撮影して、ビデオ画像から推定した越流頂の高さである。いずれの図でも、沖側に設置した越波計①から順に越波高のピークが計測されていることがわかる。観測された越流波形の出現時間は、数秒程度で瞬間的であるが、観測値には欠測やノイズ波形は現れず、越波計センサーが越波に対して的確に反応していたことがわかる。越波監視計測定波形のピーク出現時刻とビデオ解析によるピーク出現時刻はよく一致しており、越波監視計は現地での越波状況を把握するために適していることがわかる。夜間の観水性護岸等では、照明設備の不足からビデオ観測による危険感知が困難である。また、ビデオによる常時監視は、近隣住民のプライバシー保護の観点から好ましいとはいえず、越波監視計の活用による危険感知が適切である。越波高のピーク値においては両者に誤差が生じた。たとえば、越波計②では、18:58には、越波監視計でのピーク値がVTR観測値より高くなったが、

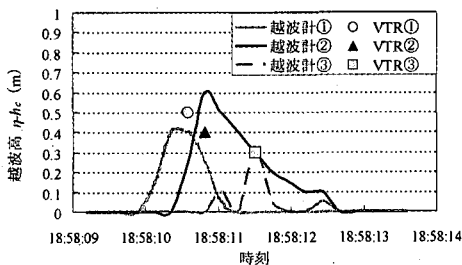
19:31にはVTR観測値がより高くなった。これは、VTR値の読みとりの際に純粋な越波高と飛沫部分の区別がつきにくいことや、逆に越波計のセンサーが飛沫部分を検知してしまったことなどが要因として考えられる。

次に、式(1)の越流公式を用いて、図-5に示した算出法からオンサイト越波計の測定値によって10分間越波流量を求めた。オンサイト越波計の平均越波流量は3本の測定棒からそれぞれ求めた越波流量を平均している。図-7は、オンサイト越波計観測による10分間越波流量と集水升による10分間平均越波流量の比較を示したものである。集水升の測定値は式(2)で求めた1波毎の越波量の10分間平均値である。図中には各測定棒で求めた越波流量の差を*印で示している。越波流量が比較的小さい場合には、3本の測定棒の観測値間には、ばらつきが現れ、18:50すなわち、18:45から18:55までの平均値には1オーダー程度の差が生じている。これは、波高が小さいために越波する場所が限定され、2mの間隔においても場所的な越波流量の差が生じることと、測定データの解析式に含まれる真値からの誤差が相対的に大きく現れるためと考えられる。越波流量 q が 10^{-3} のオーダー以上になると、3本の測定棒間の観測値の差は小さくなり、 $q > 10^{-2}$ のオーダーではほとんど差が現れない。これは、越流量が大きくなると、護岸の局所的な波の作用程度が均一化し、ほぼ同様な越流高と越流時間を持つようになるためと考えられる。本観測では近傍に3本の測定棒を配置したが、現地の運用においては、広い間隔をあけて複数の監視計を設置し、護岸の位置や構造による越波流量の差を観測できるようなシステムが望ましい。

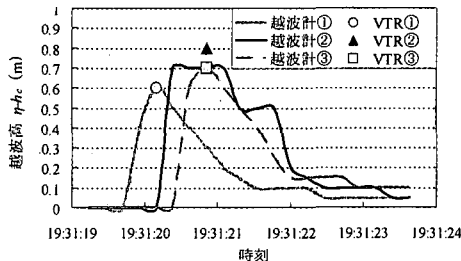
図-7において、オンサイト越波計から得られた越波流量と集水升による測定量を比較すると、両者は観測期間前半の越波流量が比較的小さいときには、よく一致している。これは飛沫による影響が少なく、センサーと集水升中の標尺読みとり値との誤差が小さかったためと考えられる。越波が 10^{-3} を越えた観測期間後半には飛沫による影響も大きくなり、オンサイト越波計と集水升による観測値との誤差は相対的に大きくなった。ただし、両者のオーダーが一致しなくなることはなく、両者とも時間がたつにつれて越波流量が増大していく様子をよく表しており、越波監視計によって越波流量そのものの観測と監視が可能であることがわかる。なお、20:00以降は、集水升の壁面が越波によって破壊され、観測はできなかった。オンサイト越波計は、引き続き20:30まで観測を行っているが、20:00以降は、最大の測定範囲110cmを超えた越流高が出現し、実際の越波流量が推定できていない。そのために、越波計による測定越波流量は、 $q =$



(1) 2002年10月1日 18:55



(2) 2002年10月1日 18:58



(3) 2002年10月1日 19:31

図-6 越波計による観測越波波形とビデオ越流高

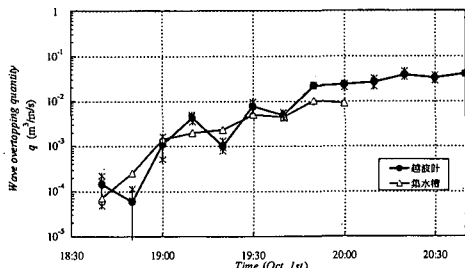


図-7 オンサイト越波計で観測された平均越波流量と集水升の観測結果との比較

$0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$ 程度で一定となっている。しかし、実際には20:00以降は護岸からの浸水が基大になり、さらに大きい越波流量が記録されるべきである。したがって、現地での越波監視を実施するためには今回製作した試作機よりも測定範囲が長いセンサーが必要である。

今回の観測場所の沖合に位置するアシカ島と波浮港で

の波浪観測結果を比べると、図-3に示したように波浮で波高増大が始まった時点から、約1~2時間後にアシカ島で急激な観測有義波高の増大が見られる。2002年7月10日の台風0206号、2001年9月11日の台風0115号において波高観測値を比較しても、ほぼ波浮港の波高観測値が急激に増加しはじめてから1~2時間後に東京湾口のアシカ島で波高増大が始まっている。両者の距離が約60 kmであり、観測波浪の周期が10~12 sである。深海波の波速が $C=150\sim200$ m/sとなり、伝搬時間はほぼ1時間となり、アシカ島での波高ピークの遅れは、外洋からのうねり性の波浪の伝搬に起因するものであることがわかる。このように沖合波浪観測ネットワークの観測データが常時取得できる場所では、オンサイト越波計との組み合わせで、より安全な越波監視が可能になる。すなわち、オンサイト越波計の電源等を常時稼働させていなくても、沖合波浪観測により数時間後に湾内の波浪と越波増大が予測される場合に、電源を投入して監視を開始して、警報発信の準備を行う安全管理が可能となる。

5. 水圧式監視計の可能性

水圧センサー観測では、工場内の水槽で、あらかじめ検定を行い、水圧を水柱高さに換算し、現地では越流速による負圧の影響を低減できるように、測定部に側面カバーをつけた。図-8に水圧式とステップ式波高計による越波計で観測された10分間越波流量の比較を示す。ここで取り付けた水圧式センサーは、水柱高さが約1 m以上にならないと圧力変動を検出できなかったもので、20:00以降の観測結果を示す。図に示すように、越波流量の時間的な変化の様子はほぼ表されており、水圧式センサーの適用も可能と考えられる。

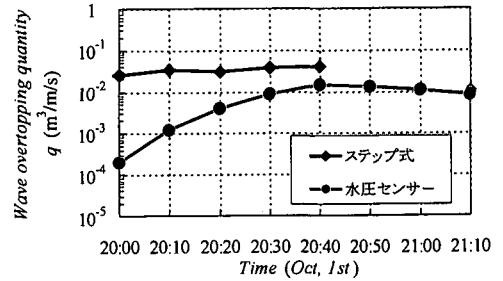


図-8 水圧センサー観測値から推定した平均越波流量

6. あとがき

本研究では、ステップ式波高計を活用した現地越波監視計の観測結果を示した。そして、台風接近に伴う短時間平均護岸越波流量の増大を適切に取得し、監視計が親水施設での越波災害防止に適用できることを示した。

参考文献

- 合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, p. 120.
- 鈴木康正・平石哲也・望月徳雄・森川高徳 (1994): ヒアリングによる護岸の越波被災調査, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 681-685.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1993): 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1126-1130.
- 永井紀彦・額田恭史・岩崎孝夫・久高将信 (2002): 切れ目のない連続観測とスペクトル周期帯表示による全国沿岸の長周期波観測情報システム, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 149-154.
- 平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榎本達也 (1996): 護岸越波量における波の多方向性の影響, 港研報告, Vol. 35, No. 1, pp. 39-64.