

水圧センサーを用いたオンサイト越波計の開発に関する模型実験

平石哲也¹・長谷川 巖²

現地の親水性護岸や岸壁において、越流水位を測定し、冠水の危険性を警告するシステムとしてオンサイト越波計が実用化されている。ただし、装置は大型ステップ式波高計を護岸に取り付けたもので、取り付け工事が大掛かりで、高波浪時には支柱自体が倒壊する危険性を有している。そこで、水中や岸壁上に水圧センサーを取り付け、簡易に越流水深を観測する改良型オンサイト越波計の開発を目的として、水圧と越流水位の関係を模型実験で調べた。実験の結果、護岸前面の海中に設置された水圧計から得られた水圧波形に、波の位相に応じた補正係数を乗じることによって越流水深を求めることができた。また、越流流速を越流水深から求める係数を導いた。

1. はじめに

最近の気候変動に伴い台風来襲時の越波や浸水被害が多発している。2004年の台風による全国の越流災害や2005年のハリケーンによる米国での被災は記憶に新しい。越波や越流による被害を軽減するためには護岸の嵩上げや改良が必須であり、護岸背後の施設の重要度や利用状況に応じて許容越波流量（海岸保全施設技術研究会、2004）を設定し、護岸嵩上げ等によるハード対策を講じなければならない。しかし、人の歩行時の安全性を確保する越流量許容値は非常に小さく、護岸等のハード施設は大型になり、景観や利便性に支障が生じる。そこで、許容値としては背後家屋に浸水被害をもたらさない越波流量を設定し、歩行者や通行車両については、越流状況を的確に伝達し、早期の避難や通行の遮断を促すことによって危険を回避する考え方が必要になる。そこで、著者ら（永井ら、2003）は、緊急の越波・越流警報システムとしてオンサイト越波計を開発し、その適用性を現地試験で明らかにした（安田ら、2003）。現在は、護岸背後の人家や国道に冠水の危険性を警告し、避難を勧めたり、車両通行を規制するために活用されている。写真-1に港湾の岸壁上への越波を監視している装置を示す。

ただし、これまでのオンサイト越波計はステップ式大型波高計を大型の支柱に固定し、支柱ごと護岸に取り付けたもので、大型支柱を現場工事で取り付けのために建設コストは高価になり、高波浪時には支柱自体が倒壊する危険性が高い。そこで、本研究では、取り付けが容易な水圧センサーを護岸や道路へ取り付け、護岸の前面海底に設置して、工事費低減と装置の安全性向上を図れる水圧センサー式オンサイト越波計の開発を目指した。そして、設置点で観測される水圧から越流水位を測定できるかどうかを実験で検証し、水圧データの補正法

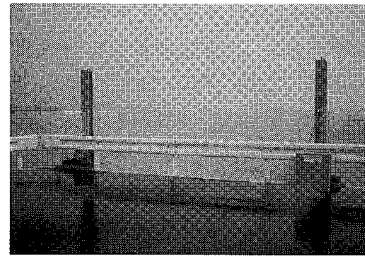


写真-1 清水港におけるオンサイト越波観測
(2003年5月～2004年2月)

を提案した。次に、越流水深から家屋や人の安全性を決定する要素になる越流流速を求める実験式を提案した。

2. 実験の内容

(1) 模型実験の条件

越波による浸水被災が生じた空港島護岸（平山ら、2005）をモデルとして、長さ35m、幅0.5mの不規則波造波水路に1/30縮尺の模型を設置した。図-1に模型護岸の断面を示す。波圧計（小型水圧センサー）は護岸直立面、直立面より9mおよび21m岸側の護岸上（数値は現地換算値）の3カ所に設置し、同一地点（21m地点は除く）に容量式波高計を設置して、護岸直前および護岸上の水位と水圧を測定した。

護岸背後には越波流量集水函を埋め込んで時間的に変化する越波流量を求めた。作用波は、現地換算値で波高

表-1 実験の波浪・潮位の条件

護岸天端高 C.D.L. (m)	潮位 C.D.L. (m)	波種類	H(m)	T(s)
+4.7	+2.3	規則波	4.0	8.0
			4.0	10.0
			5.0	10.0
	+1.6	不規則波	3.5	11.1
			4.0	10.0
			3.6	7.3

(H及びTは、規則波の場合は平均波、不規則波の場合には有義波である。)

1 正会員 博(工) (独)港湾空港技術研究所海洋・水工部
2 正会員 (株)エコ 水理実験部

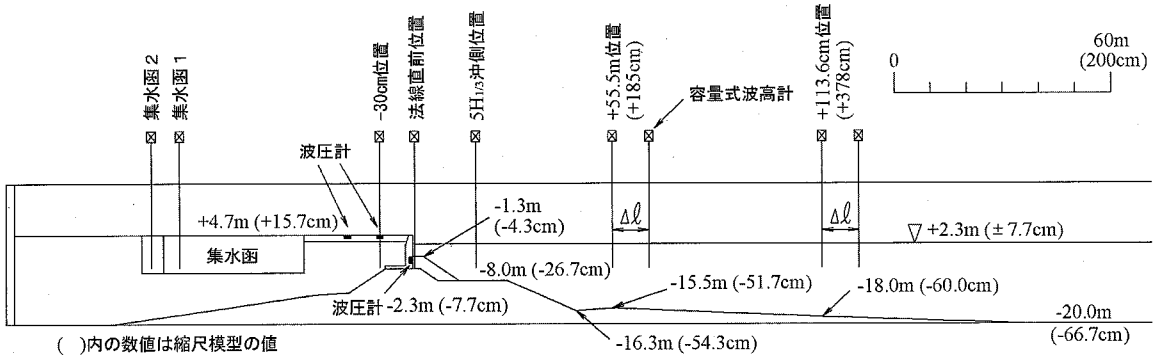


図-1 実験で用いた模型断面と計測器の配置

4~5 m, 周期 8~10 s の規則波および有義波高 3.5 m, 有義波周期 7.3~11.1 s の不規則波である。護岸天端高は C.D.L.+4.7 m, 潮位は C.D.L.+1.6~+2.3 m である。護岸のマウンド天端は C.D.L.-8 m に位置し, やや岸側へ傾斜している。表-1 に実験条件をまとめる。造波機前面の一樣水深部で目標波が再現できるように造波信号を調整した。

(2) 解析項目

実験においてはケース毎に不規則波で 250 波, 規則波で約 20 波を造波した。波形データは不規則波については波周期の約 1/30 間隔で, 規則波については 0.01 s 間隔でデジタル値に変換し, 波高および周期を求めた。

越波の計測では, 波を作用させている期間に護岸を越えた水塊を集水函に集めて, 計測後, 総水量から時間平均越波流量 q を求めた。一方, 集水函の水面は変化するので容量式波高を函内に設置することで時間的に変化する短時間越波量も測定できる。実験では, 集水函内に仕切り板を挿入し, 仕切り板前面の水位変動を“集水函 1”として, 仕切り板背後のフィルターを介した水位変動を“集水函 2”として表した。

改良型オンサイト越波計では水圧センサーを用いるので, 測定水圧からセンサー上の水深を推定する。測定水圧から水位を換算する式は, 下記の手法で検討した。

- ①水圧式センサーと容量式センサーの計測波形を比較して, 換算する区間を決める。
- ②換算区間内で容量式センサーと水圧式センサーの計測波形の比を求め, 位相と波形比の近似式を求める。

3. オンサイト越波計による越流水位計測

(1) 護岸前面の換算水位

護岸前面での水圧から換算できる水位波形 η_p と容量式波高計で直接測定した水位波形 η_w は図-2 のように一致せず, 実際の波の峰の高さの 57% までしか追従しなかった。波形を比較すると, 直立壁前面で波の谷の形は

両者で一致しているが, 波の峰では有限振幅性の影響(合田・柿崎, 1966)もあり, 水圧波形は頭が低い双峯型になっている。ただし, 捨て石斜面上の水圧波形なので峰高は小さく, ほぼ平坦と仮定できる。すなわち水圧式波形は護岸天端まで測定できるものの, 正しいピークの値が計測できないことが特徴である。図-3 は 1 波毎に波の峰の高さと谷の深さの片振幅の解析を行い, 容量式と水圧式波高計で得られた値を比較した結果である。

図-3 の不規則波の場合には, 容量式と水圧式で測定された振幅比のばらつきが大きく, 峰の高さは波高 2 m で容量式が水圧式の 1.2 倍程度, 波高 8 m では 1.8 倍程度である。谷の深さは両者がほぼ同程度になった。

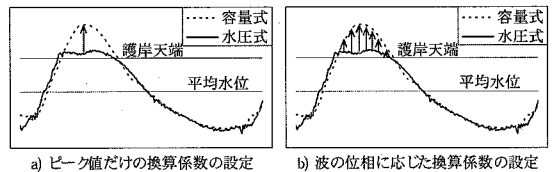
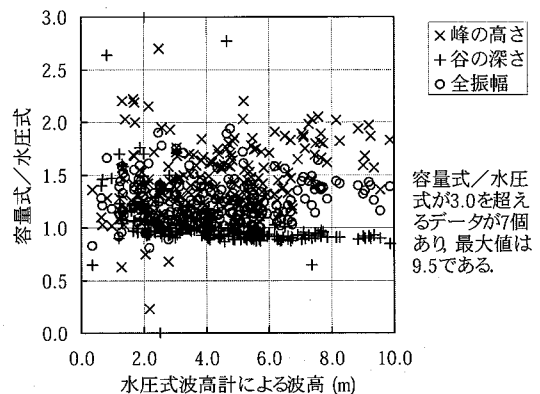


図-2 波形補正式の考え方 (本研究では(b)のイメージで位相毎に補正する)

図-3 水圧式および容量式波高計で測定された波の振幅の比較 ($T_{1/3}=11.1$ s, $H_{1/3}=3.5$ m, 潮位+2.3 m)

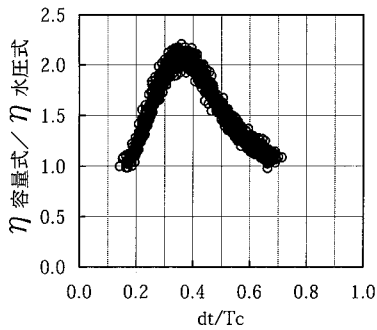


図-4 波の位相に応じた規則波の換算係数 (潮位+1.6m, $T=10.0s$, $H=4.0m$)

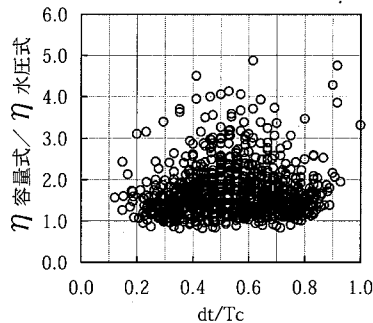


図-5 波の位相に応じた不規則波の換算係数 (潮位+1.6m, $T_{1/3}=7.3s$, $H_{1/3}=3.6m$)

規則波の場合は、全データのばらつきが小さく、容量式による峰の高さは水圧式の1.76倍で、谷の深さは容量式が水圧式の0.9倍であった。全振幅は、容量式が水圧式の約1.76倍となった。水圧式センサーによる波形の換算手法としては、図-2に示すように波の位相によって水位の比は異なるので、図-2(b)のような位相による換算係数の設定が必要になる。そこで、水面の高さが波の峰の高さの0.5倍以上になる位相を選び、容量式センサーによる水面高さ η_w と水圧式センサーによる水面高さ η_p の比を位相毎に求めた。図-4に規則波データを用いた換算係数の変化を、図-5に不規則波データを用いた変化を示す。

規則波の場合には、約20波の換算係数がほぼ重なって、きれいな山形の分布となっている。不規則波の場合には分布形のばらつきが大きく、波の位相と換算係数に明確な対応を見つけることがやや困難である。そこで、波高および周期を変化させた規則波の全データを用いて平均的な換算係数を求めることにより、不規則波についても近似的に波形のピークを推定できるようにした。図-6に水圧センサーと容量式センサーのピーク水位の比と最小二乗法で求めた換算係数を示す。図中の丸印が全実験データの波形補正係数で、直線が平均補正係数である。補正係数は次式で求められた；

$$\begin{aligned}\eta_w/\eta_p &= 6.1 \times dt/T_c & (0.15 \leq dt/T_c < 0.35) \\ \eta_w/\eta_p &= -3.3 \times dt/T_c + 3.3 & (0.35 \leq dt/T_c < 0.7) \\ & \dots\dots\dots (1)\end{aligned}$$

ここで、 dt は、ゼロアップクロス点からの時間、 T_c はゼロアップクロス点からゼロダウンクロス点までの峰周期である。

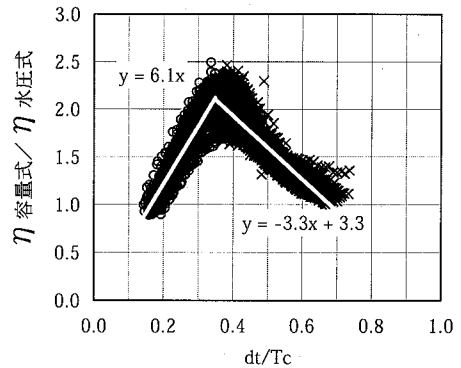
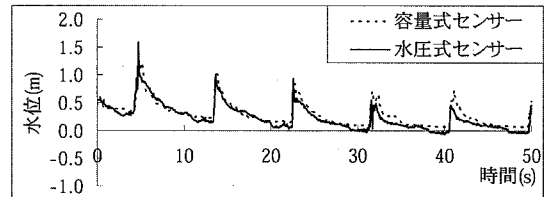


図-6 水圧センサーの計測波形の実波形への補正式

(2) 護岸上の水位計測

図-7は護岸上に設置された水圧センサーから換算した水位と容量式波高計で観測した水位の比較である。護岸上の観測値を比較すると、水圧センサーからの換算値がほぼ護岸上水位を表していることが判る。したがって護岸上に水圧式センサーを設置したオンサイト越波計では測定水位を補正する必要はないと考えられる。

規則波 潮位C.D.L.+1.6m 波高4.0m 周期10.0s



規則波 潮位C.D.L.+2.3m 波高5.0m 周期10.0s

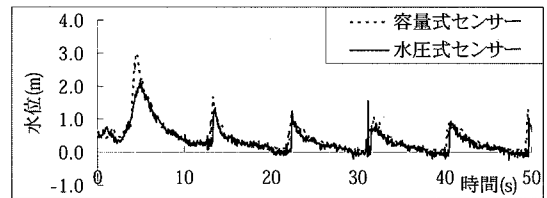


図-7 護岸上で観測された水位

4. オンサイト越波計による越波流量観測

オンサイト越波計では護岸を越流した水位だけでなく家屋への作用する流体力や避難時の安全性を評価するために必要な氾濫水の流速 (浸水流速) に関する情報を発

信することが必要になる。護岸上の浸水流速は瞬間的に大きな値を示し、実験によって測定することが困難で、ばらつきも大きく(鈴木ら, 2003), 流速計による測定値で検証することは適切ではない。ここでは集水函で測定できる越波流量から推定して浸水流速を求めた。

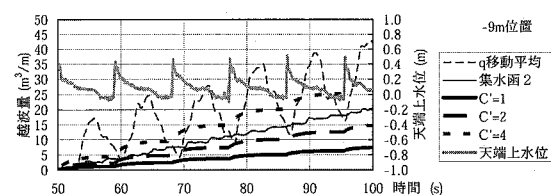
(1) 護岸上の浸水流速

護岸上の流速は、長波の波速に比例するものとして、 $u (=C'\sqrt{gh})$ で表す。ここで、 g は重力加速度、 h は水圧センサーから補正せずに測定できる浸水深、 C' は護岸上の越流係数である。単位幅あたりの越波流量 Q は次式で与えられる。

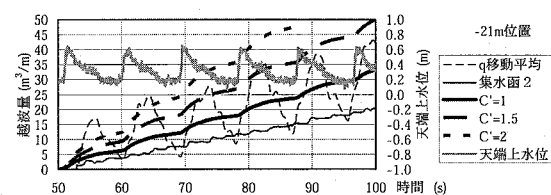
$$Q = C'uh = C'\sqrt{gh}h = C'g^{1/2}h^{3/2} (\text{m}^3/\text{m}/\text{s}) \quad (2)$$

実験で用いた水圧センサーで得られる越流水深、集水函で測定した単位時間毎の Q を式(2)に代入すると、 C' が推定できる。図-8に護岸上の2点で測定した結果を示す。

図において“集水函2”は仕切り板の背後で測定された水位変化に集水函面積を乗じて求めた総越波量の経時変化である。“ q 移動平均”は仕切り板前面の水位計で観測された水位を移動平均して集水函の水面固有振動に相当する振動を除去した水位変化から換算できる越波量の変化である。 C' を変化させて示した推定値は、式(2)で求めた単位時間越波量を時間で積分して計算できる越波量の経時変化である。集水函2で測定した越波量の変化は、“ q 移動平均”として測定できる変化より時間的に遅れている。護岸上の水位変化に対応しているのは、“ q 移動平均”の変化であり、集水函2のようにフィルターを介して得られたデータは長時間の平均値と



(a) -9m 位置



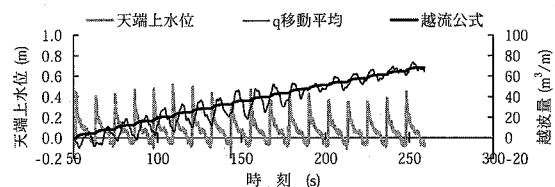
(b) -21m 位置

図-8 天端上越流量の推定値と観測値(規則波, 潮位+1.6m, $T=10.0\text{s}$, $H=4.0\text{m}$)

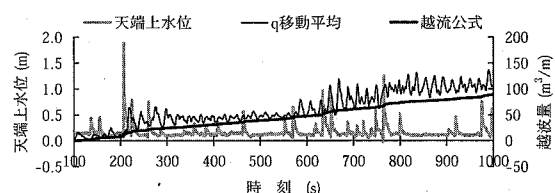
しては正確な値を得られるものの、短時間で変化する越波流量としては適切な結果を示していない。

そこで、計測終了時点の“ q 移動平均”と式(2)の推定結果が一致するように C' を決定し、その C' を使って式(2)で計算した越波流量の経時変化は図-9のとおりである。不規則波は3,000s以上の実験を行っているが、図では1,000sまでを表示してある。

図-9を見ると、上記方法で決定した C' によって越波量の時間変化をほぼ正確に推定できることがわかる。その他のケースについても同様な解析を行って、係数 C' を整理すると表-2のとおりである。表の右端の「直立部」は次項の(2)で求める係数 C_0 である。規則波で-9m地点での C' が大きいのは、護岸を越流した水塊が不安定な状態のまま-9m位置に到達するので、水圧式センサーの測定値が不安定となるためである。その他の条件で平均した値から判断して、天端上で C' は0.71から1.75まで変化するので、天端上の越流係数として $C'=1.2$ が採用できる。



(a) 規則波, 潮位+1.6m, $T=10.0\text{s}$, $H=4.0\text{m}$



(b) 不規則波, 潮位+2.3m, $T_{1/3}=11.1\text{s}$, $H_{1/3}=3.50\text{m}$

図-9 天端上越流量の推定値と観測値(-9m位置)

表-2 越流係数の推定値

波の種類	潮位	周期(s)	波高(m)	越波流量 ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$)	越流係数 C' または C_0		
					- 9 m	- 21 m	直立部
規則波	+ 1.6 m	10.0	4.0	0.453	3.09	0.74	0.24
	+2.3 m	8.0	4.0	0.740	3.52	1.95	0.25
		10.0	4.0	0.736	3.37	2.06	0.26
		10.0	5.0	1.273	3.02	2.23	0.31
不規則波	+ 1.6 m	7.3	3.6	0.063	1.23	0.46	0.56
	+ 2.3 m	11.1	3.5	0.156	1.12	0.95	0.15
平均値				規則波	3.25	1.75	0.27
				不規則波	1.18	0.71	0.36

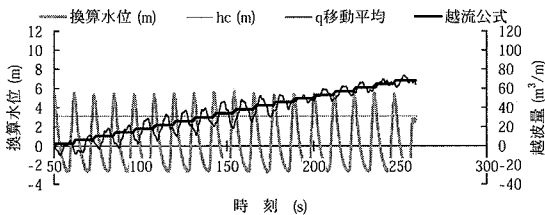
(2) 護岸前面での観測による越波量推定

水圧式センサーを用いた場合には、護岸の天端上で水位を測定することで、補正を行わずに越流水深を観測でき、同時に越流流速を推定できる。現地においても、オンサイト越波計を実用化するためには、天端上に水圧センサーを複数配置して面的な浸水の状況を監視することが望ましい。ただし、現地の地形や利用状況によっては、天端上にセンサーを設置できない場合がある。そこで、護岸の海側の壁面などに水圧センサーを設置し、越波流量を観測できるように適切な係数を提案する。

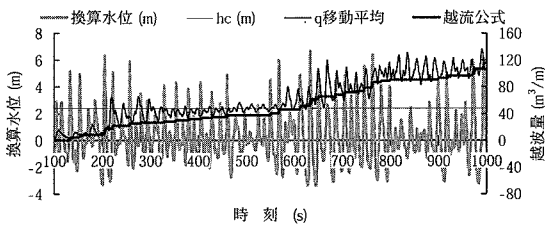
護岸前面の水位 h の時間変化から越波流量を算出する式として、オンサイト越波計では、安田ら (2003) による次式を採用している。

$$q(t) = \begin{cases} C_0 \sqrt{2g} (\eta(t) - h_c')^{3/2} & \eta(t) \geq h_c' \\ 0 & \eta(t) < h_c' \end{cases} \dots\dots (3)$$

ここで、 t は時間、 h_c' は初期水位からの護岸天端高、 C_0 は護岸前面水位に対応する越流係数で $C_0=0.5$ が標準的に用いられる。護岸上の浸水流速の検討と同様に、



(a) 規則波, 潮位+1.6m, $T=10.0s$, $H=4.0m$



(b) 不規則波, 潮位+2.3m, $T_{1/3}=11.1s$, $H_{1/3}=3.50m$

図-10 護岸前面で測定された水位から推算した越波流量と集水函で測定した越波流量の比較

計測終了時点の実測越波流量と式 (3) による推定結果が一致するように C_0 を決定した。この C_0 を使って式 (3) で計算した越波流量の時間変化は図-10 のとおりで、実測越波流量とほぼ同じ時間変化を推定できている。

その他のケースについても同様な解析を行い、係数 C_0 を整理すると表-2 の右端の「直立部」のとおりである。不規則波の実験結果では条件によって C_0 の値が若干異なるが、規則波と不規則波のどちらも、 $C_0=0.3$ として算定することが適切と考えられる。この値は、これまでに標準値として用いていた値よりやや小さい。

5. あとがき

水圧式センサーを用いたオンサイト越波計を開発するために、水圧情報から護岸上の水位と流速および越波流量を推定できる実験式を提案した。主な結論を示す。

1) 護岸上の越流水位は、護岸天端上にセンサーを設置したときは換算せずに測定できる。護岸前面の水圧波形を用いるときは波の位相に応じた換算係数を用いることができる。

2) 護岸上の越流流速は、越流水深を用いて求めた長波流速の約 1.2 倍として評価できる。

本実験の実施にあたり、港湾空港技術研究所海洋・土工部永井紀彦部長から助言を頂いたことを感謝します。

参考文献

- 海岸保全施設技術研究会 (2004) : 海岸保全施設の技術上の基準・同解説, 海岸保全施設技術研究会, pp. 2-63~2-64.
- 合田良実・柿崎秀作 (1966) : 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港研報告, Vol. 5, No. 1, 57p.
- 鈴木崇之・岡安章夫・田中真史 (2003) : 緩傾斜護岸の越波水理特性実験と LES 数値計算, 海工論文集, 第 50 巻, pp. 631-635.
- 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・安田誠宏・高山俊裕 (2003) : オンサイト越波計の開発と現地適用性, 海工論文集, 第 50 巻, pp. 626-630.
- 平山克也・平石哲也・南靖彦・奥野光洋・峯村浩治 (2005) : 2004 年台風による高波災害の被災パターンについて, 海工論文集, 第 52 巻, pp. 1316-1320.
- 安田誠宏・服部昌樹・平石哲也・平山克也・永井紀彦・小川英明 (2003) : 久里浜湾における越波被災の要因と特性—ナウファスを用いた臨海部の越波災害予知法の構築—, 港空研報告, Vol. 42, No. 2, pp. 193-220.