

消波護岸への越波に関する現地観測

Field survey of wave overtopping on seawall covered with armor units

榑山 勉*・鹿島遼一*・今井澄雄**・清水琢三***・片山裕之***

Tsutomu Sakakiyama, Ryoichi Kajima, Sumio Imai, Takuzo Shimizu and Hiroyuki Katayama

Abstract: Field survey on wave overtopping was carried out at Fukui port during winter season in 1996. Water depth in wave drainage channel between the walls which sectioned the wave drainage channel was measured during the wave overtopping. Overtopping rate was estimated by two ways: Rate of volume change to the time and the discharge formula over suppressed weir using the water depth of overflow. The significant wave height 6.1m with its wave period 11.6s resulted in the mean overtopping rate of 10^{-4} m³/s/m in the order of magnitude. Overtopping rate due to wave group is also estimated to be about ten times the mean overtopping rate. The mean overtopping rate are compared with estimated ones using the experimental formula by Takayama *et al.*(1972).

Key words: wave overtopping, field observation, seawall, armor units

1 はじめに

護岸への越波流量は、水理実験に基づく合田ら(1975)の越波流量算定図やこの算定図を定式化した高山ら(1982)の実験式を用いて算定することができる。しかし、重要な構造物や上記の方法の適用範囲外の場合には水理実験により確認する場合が多い。著者らは、人工島式立地発電所を対象に人工島防波護岸の越波量を評価するために大型模型を含む異なる縮尺模型を用いた水理実験を行い研究を進めてきた(鹿島ら,1992; 関本ら,1992; 鹿島ら,1993; 榑山ら,1994a;1994b)。水理実験は、通常フルードの相似則に従って行われ、実験結果を現地に適用するに当たってもフルードの相似則に従って換算される。越波の水理実験に消波工を伴う場合レイノルズ数が小さい実験では越波量を過小評価する場合があります(榑山ら,1994a)、実験に用いる模型スケールの影響が懸念される。この実験スケール効果を検討するに当たって、現地観測データは重要な役割を果たす。しかし、越波の現地観測例としては、福田ら(1973)の報告例がある程度で、現地における越波量と水理模型実験結果との比較は行われていない。

そこで、水理実験結果の現地への適用性を検討するために、先ず現地データの取得を目的として越波に関する現地観測を実施した。本報告は、この現地観測方法ならびに得られたデータの解析方法とその結果を報告するものである。

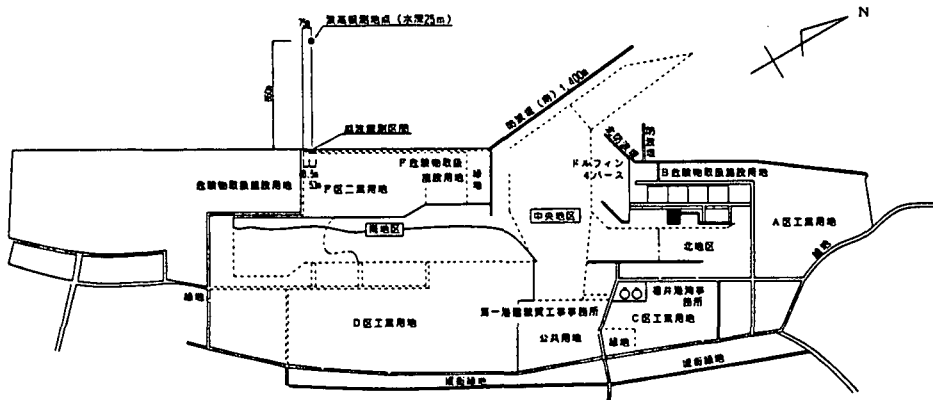


図-1 福井港における越波観測位置

2 現地観測の概要

現地観測は、図-1に示す福井港南側のF埋立護岸で行った。F護岸は総延長約2,350mで、長さ1400mの南防波堤に接続する。F護岸と南防波堤からなる隅角部の影響を避けるために、観測区間はほぼ中央とした。

F護岸の断面図を図-2に示す。護岸のパラペット天端高さはD.L.+9.0mで、重量16tの消波ブロックで被覆されたケーソン式護岸である。パラペット背後には、パラペットと土堰堤からなる幅10mの越波排水路があり、管理用道路を兼ねている。土堰堤の天端高さはD.L.+14.0mであり、飛沫は土堰堤を越えることがあるが越波した水塊は土堰堤により越波排水路内に捕捉される。

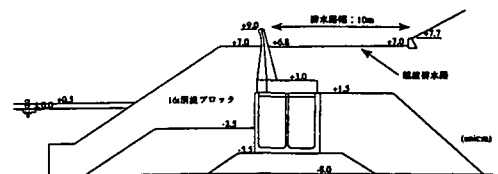


図-2 観測位置の護岸断面

* 正会員 (財)電力中央研究所 〒270-11 我孫子市我孫子 1646

** 正会員 東京電力(株)

*** 正会員 五洋建設(株)

2.1 観測項目および観測方法

2.1.1 入射波浪の観測

観測期間中の越波量と入射波との関係を把握するために、図-1に示した福井港F護岸の法線方向沖合い860mの位置(水深約25m地点)において波浪観測を行った。観測では、水圧センサー付き電磁流速計を用いて、水圧ならびに流速の平面2次元成分を測定し、観測期間中の波高ならびに波向のデータを取得した。観測は、サンプリング間隔1.0sで1回約1ヶ月間の連続観測を行った。

2.1.2 越波量の測定

観測用施設の平面図を図-3に示す。パラペットと土堰堤に挟まれた越波排水路内に、延長53mの区間にわたって越波水を貯えるための工作物を製作した。越波観測区間30mの両端にL型ブロックでパラペットとほぼ同じ高さの仕切壁を幅5mにわたって設けた。この区間に越波した水を中央部に向かう1/10勾配の斜面で集水できるようにした。土堰堤側の5m間は高さ

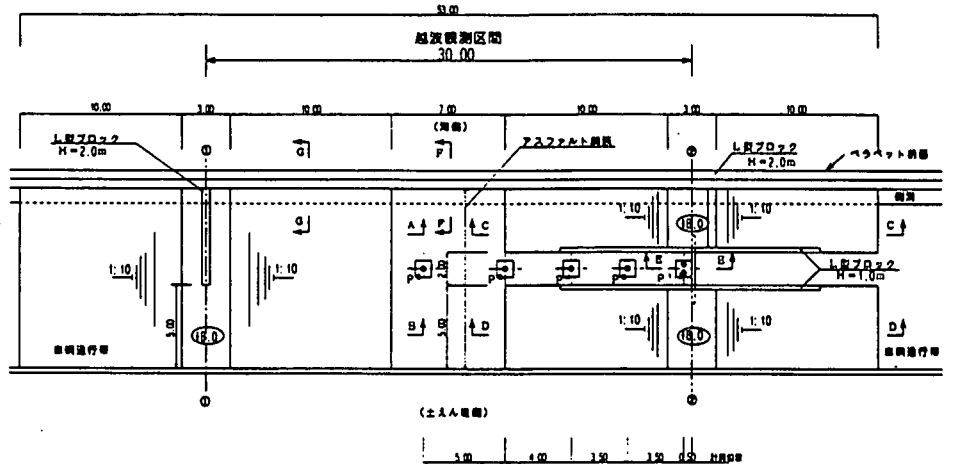


図-3 越波観測区間の平面図と計器配置

1mの1/10勾配斜面のみとし、緊急時にも車両が通行できるように配慮した。集水された越波水は、高さ1.0mのL型ブロック2枚で製作した幅2.0m、長さ8mの排水路を流れ、水深が刃型堰の高さを越えると越流する仕組みになっている。このようにして、沿岸方向に幅30m区間について貯められた越波水の水位測定ならびに片側端に設けた越流堰での流量測定により越波量の定量的評価を行った。

水位測定のための計測機器は、図-4に示すように排水路部に5ヶ所設けた計器設置用の柵(高さ0.8m×幅1.0m×奥行1.0m)の底版に固定した。計測機器は全部で6台使用し、P1からP4の4台は電磁流速計付水圧センサーを用い、同期ケーブルで接続し、同期観測した。また、P5およびP6は水圧センサーを用いた。いずれもサンプリング間隔1.0sの連続観測を行った。観測区間の底面はアスファルトで舗装した。1996年1月27日に水張り試験を行い漏水の度合いを調べた結果、漏水スピードは約4mm/hであることを確認した。

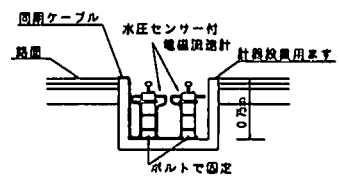


図-4 水圧センサーの設置状況

また、観測期間中の荒天時には、護岸周辺の越波状況をビデオ及びカメラを用いて撮影した。

3 観測結果

3.1 観測期間中の高波浪と越波状況

図-5に観測を行った全期間の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ と越波観測区間の水位の例として堰から0.5m離れた地点での測定結果(P1とP2の水圧値)の経時変化を示した。また、同図上段には気温と気圧の経時変化も示した。

観測期間中の有義波高の最大値として、2月6日午前8時30分頃に有義波高約6.14m(有義波周期11.6s)を記録した。この時の越波状況を図-6に示す。また、図-7は、越流堰での排水状況を示すものである。その他に観測期間中には、有義波高約5mの高波浪が2回、約4mを越えるものが5回程度来襲した。実際、目視観測によって有義波高で3mを越える高波浪時には観測排水路内に越波水が溜まるとともに、堰を越流することを確認した。

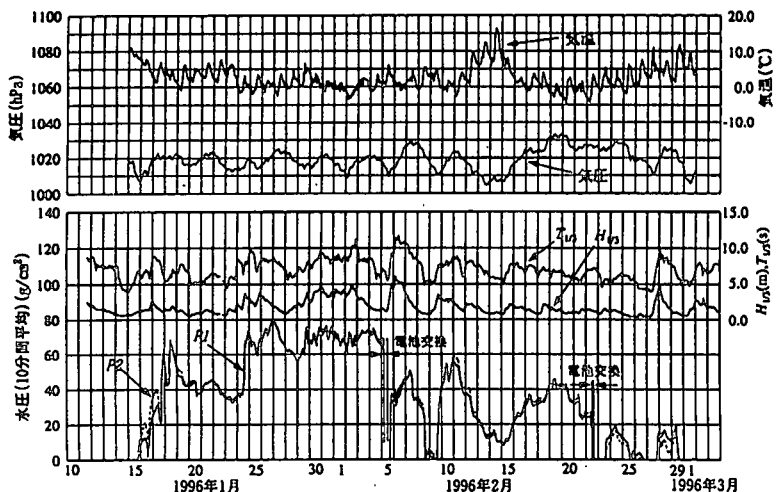


図-5 観測期間中の有義波高、有義波周期、気温、気圧と水圧



図-6 越波状況



図-7 堰での越流状況

図-5に示した水圧値はサンプリング間隔 1.0s の連続水位観測結果を 10 分毎のデータに区切り、その平均を求めその結果を示したものである。圧力値には計器設置直後と 1 月 24 日の高波浪直後に急激なドリフトがみられる。今回、越波水位測定に用いた電磁流速計付き水圧センサー方式の波高計は、設置直後の計器内の圧力を基準として圧力を評価している。本計器は、通常数 m 以上の水深に設置して用いるものである。これに対して、今回の設置場所のセンサー部の水深は高々 10cm~25cm であったため、低気圧通過に伴う気圧の低下や気温変化の影響を受けやすいことがわかった。そこで、気圧や気温と圧力との関係を調べ測定値の補正を行うことにした。

ここで、図-5上段に示した気圧、気温の変化と有義波高と水圧の変化を比較する。例えば、1 月 20 日から 1 月 23 日の間は有義波高が高々 1.5m であり、越波がないにもかかわらず、水圧値が sin 曲線のように変化している。この変化は主に同じ期間の気圧の変化に追随していることがわかる。同様に、2 月 14 日から 2 月 20 日の有義波高が 2m 程度の期間にも、水圧値が約 $20\text{g}/\text{cm}^2$ 上昇している。この上昇の傾向も同期間の気圧の変化に追随している。

3.2 水圧観測データの補正

水圧センサーの測定データには、水張り試験や高波浪来襲時に水位が上昇する様子が観測されており、適切な補正を行うことにより、水位変化の評価が可能になるものと考えられる。図-8と図-9に気圧の変化による水圧センサーの応答とその補正結果を示す。前述のように、1 月 20 日から 1 月 23 日の間と 2 月 14 日から 2 月 20 日の間は越波がなかったにもかかわらず、水圧の変化が観測されている。これらの期間の気圧値と水圧値との相関をとり気圧と水圧の関係性を求め、気圧変動による水圧センサーの測定値の影響分を算出した。図-8と図-9中の(2)がこの成分である。これを生データから差し引くことにより、気圧による水位変化の補正を行うことができる。図中の(1)-(2)がこの結果であり、越波のない期間で水圧がほぼ一定を示し、妥当な結果となった。水圧センサーの測定値は水温にも影響さ

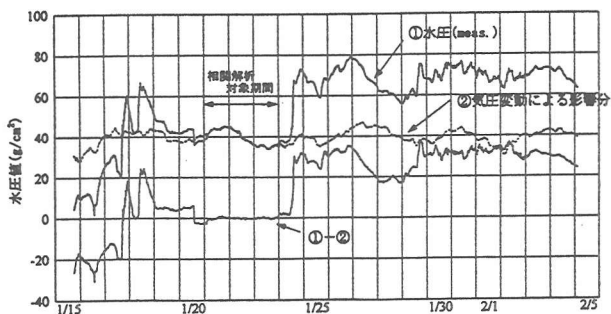


図-8 気圧による水圧値の補正 (1 月 15 日から 2 月 4 日)

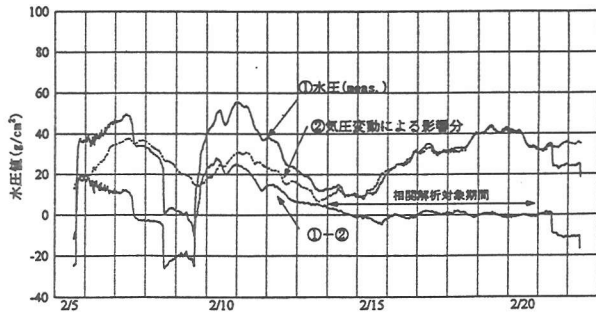


図-9 気圧による水圧値の補正 (2 月 5 日から 2 月 21 日)

れるため、現地観測終了後に、一定水位にした屋外タンク内に観測に使用した計器を数日間放置し、水温と水圧の変化を調べた。図-10は、水温 5°C を基準にして求めた水温による水圧値との関係である。水温と圧力との間にはほぼ線形性が成り立つ。水温による補正を行うための回帰式を求めることができたが、観測では水圧センサーを設置した柵内での水温を測定していないこと、気象台の気温データを入手することはできたが、気温と水温は時間差があることなどから、現時点では観測時の水圧センサーに直接接した水塊の水温の評価を機械的に行うことは困難である。気圧の影響のみを補正し、気温の変化を同時に確認しながら以降の処理を行う。著しい気温変化のある時間帯でのデータについては、現時点では処理方法を確定できないため除外した。

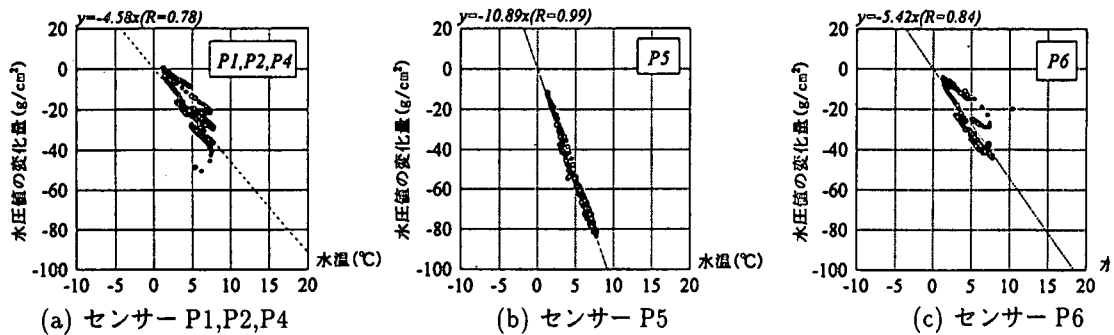


図-10 水温による水圧値の補正

3.3 越波流量の算定

実測値に基づく越波流量の算定方法としては、

- (1) 観測排水路内の水位変化から越波流量を算定する方法、
- (2) 堰での越流水深から越波流量を算定する方法、
- (3) 観測域内の排水路内の水位の空間分布から推定する方法、

が考えられる。ここでは、(1)の方法により高波浪時に水位が上昇する時期を対象として平均越波流量の評価を行った。この場合には、平均越波流量 q は次式で算出できる。

$$q = \frac{S}{L} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 S : 観測排水路の集水面積、 $\partial \eta / \partial t$: 水位変化率、 L : 観測区間の長さである。図-11と図-12の中段には気圧による補正をした水圧値の経時変化を示した。また、上段には同時に気温の経時変化を示した。気温がほぼ一定の期間において高波浪の来襲により越波水位が上昇している期間に着目した。これより図中に番号で示した期間について平均越波流量を算出した。この結果、 $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ オーダーの越波流量を得た。図の下段には入射波より高山式を用いて計算した平均越波流量の推定値の経時変化を示した。観測結果は高山式の推定値と同程度か、若干低めの場合もみられる。

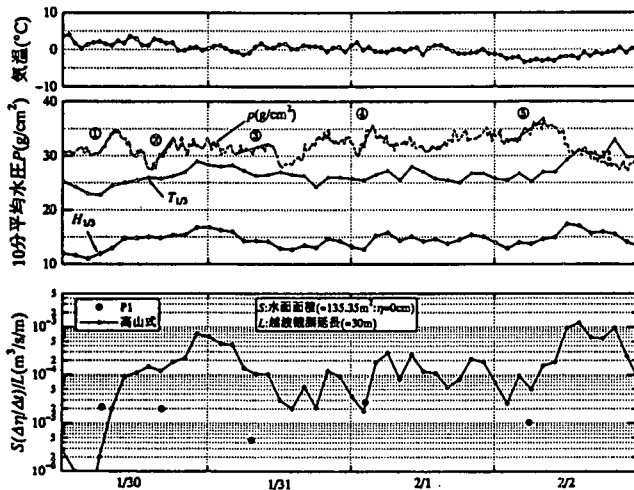


図-11 水位上昇量から算出した平均越波流量 (1月30日から2月2日)

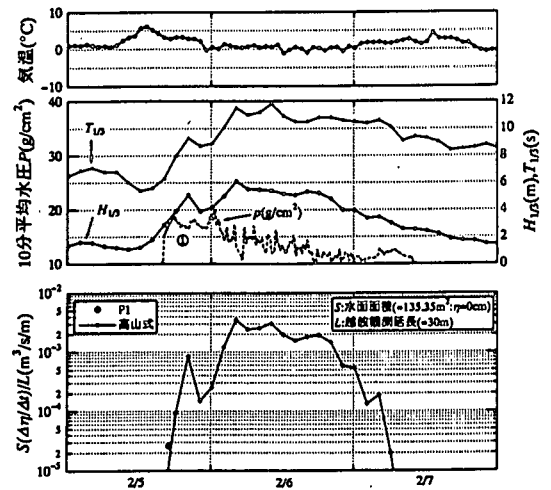


図-12 水位上昇量から算出した平均越波流量 (2月5日から2月7日)

次に(2)の堰の越流量を求め、越波流量を算出する。今回の現地観測では刃形堰の越流水深を直接測定することはできなかったが、水圧センサーのうち最も近いものとして、刃形堰から0.5mの距離に2台設置したセンサーの測定結果を用いる。図-15に2月6日6:00からの1時間の水圧センサーP1のサンプリング間隔1.0sの水圧(細線)とこれに10sの移動平均をかけた水圧(太線)の時系列を示した。2月6日は前夜からの高波浪の来襲により午前0時の有義波高は約4m、午前4時には観測期間中で記録した有義波高の最大値である6.14mに達した。午前6時の有義波高も5mを越え、この日は終日越波が生じた。したがって、図-15に示した時間帯には越波桁は満水になり越流状態になっていたものと考えられる。この日の午前8時頃に撮影したのが図-6と図-7に示した写真である。図-15の細線で示されるように、越波により観測区域内の水位に擾乱が生じていることがわかる。擾乱が連続すると平均水位が上昇し、再度ある一定水深に落ちつく。この間の水位には数回の擾乱がみられる。この時波群による越波が連続して生じていることを観察により確認している。

このことを入射波と越波観測域内の水位変動のパワースペクトルから検討する。図-13は水深 $h=25\text{m}$ の地点で測定した入射波の水位変動のパワースペクトルを示したものである。また、図-14は図-15に示した越波観測域内の水圧センサー P1 の水位変動のパワースペクトルである。入射波のピーク周波数は $f=0.07$ (周期 $T=14.3\text{s}$) である。また、 $f=0.02$ (周期 $T=50\text{s}$) に長周期のピークがみられる。これに対して、図-14のピーク周波数は $f=0.06$ (周期 $T=17\text{s}$) である。この値は入射波のピーク周波数より若干小さくなっているが、入射波のピーク周波数と対応するものである。

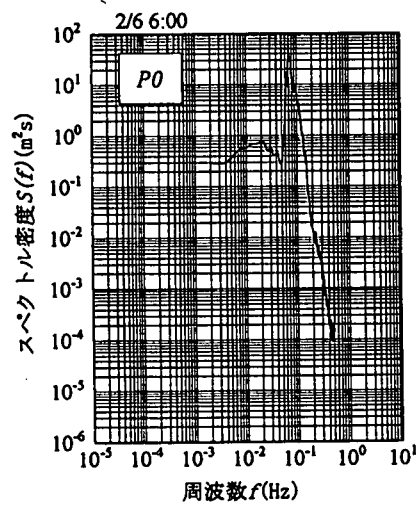


図-13 入射波のパワースペクトル

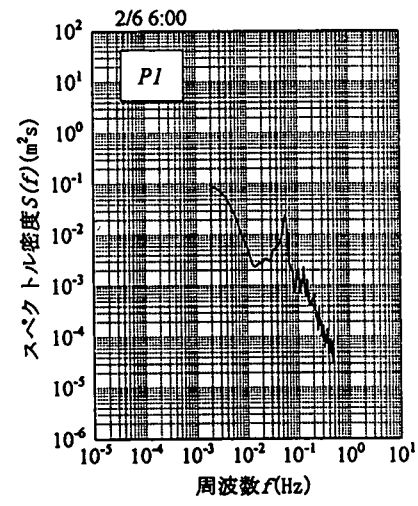


図-14 越波観測域内の水位のパワースペクトル

図-15の図中に引いた水平線は堰の高さを示すものであり、移動平均をとった太線は越流時の P1 における水深を示す。これを越流水深とみなし、刃形堰の越流量の公式から越波流量を算出する。ここでは、式(2)で示す刃形堰(全幅堰)の越流量に関する石原・石田の式(水理公式集,1985)を用いる。

$$Q = CBh^{3/2}(1 + \epsilon), \quad C = 1.785 + (0.00295/h + 0.237h/W) \tag{2}$$

ここに、 $Q(\text{m}^3)$:越流量、 $B(\text{m})$:堰の幅、 $C(\text{m}^{1/2}/\text{s})$:流量係数、 $W(\text{m})$:路面からの堰の高さ(=20cm) ϵ は補正係数で、 $W \leq 1\text{m}$ の時 $\epsilon=0$ 、 $W > 1\text{m}$ の時 $\epsilon=0.55(W - 1)$ である。

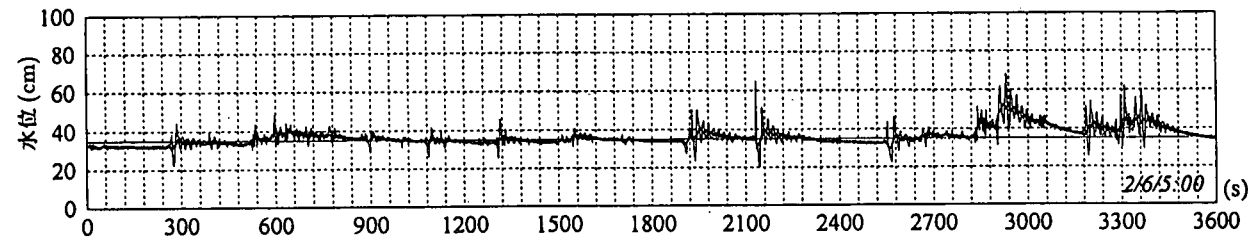


図-15 越波による水位時系列

図-16と図-17は以上の方法で越流水位から越流量を算出し、1時間毎に平均値を求め越波流量に換算して示したものである。これらの図は、それぞれ水位上昇量から算出した平均越波流量を示した図-11と図-12に対応する。図-16の結果では平均越波流量は有義波高の増加とともに上昇し、1月30日から2月2日の間、 $10^{-5}\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ から $10^{-4}\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ の間を変動している。図-17の期間の有義波高は図-16のそれよりも大きい。平均越波流量も最大で約 $5 \times 10^{-4}\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ に達し、 $10^{-4}\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ を越える期間が長く全体的に大きくなっている。このことから有義波高と越波流量との対応も良好といえる。対応する図-11および図-12と比較すると、越流水深から算出した平均越波流量のほうが若干大きめの値を示す傾向がみられる。このため、高山式の結果と一致するところが多くなるが、有義波高の大きいところで観測結果と高山式との差が大きくなる傾向がある。

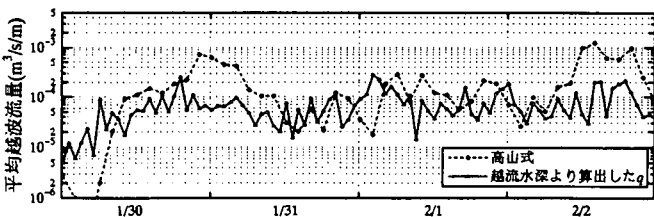


図-16 越流水深から算出した平均越波流量 (1月30日から2月2日)

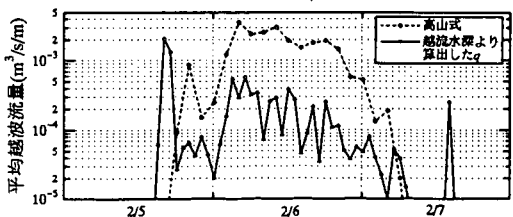


図-17 越流水深から算出した平均越波流量 (2月5日から2月7日)

(2) の越流水深から越波流量を算定する方法では対象とする時間を短く取ることにより短時間越波流量を求めることができる。ただし、図-15に示した水位波形から1波毎の短時間越波流量を求めることはできないが、1波群毎に越流が繰り返され、水深が堰の高さに戻ることから1波群による越波を判定できる。図-18は、堰の越流水深から求めた越波流量を1波群毎に平均して求めた短時間越波流量 q_G を平均越波流量 q に対する比 q_G/q で示したものである。横軸には平均越波流量 q をとった。波群による短時間越波流量は平均越波流量 q が $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度の場合、平均越波流量の10倍のオーダーで $q_G=10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 程度、 $q=10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ で平均越波流量の数倍程度であり、関本ら(1992)の実験結果と概ね一致した結果が得られた。

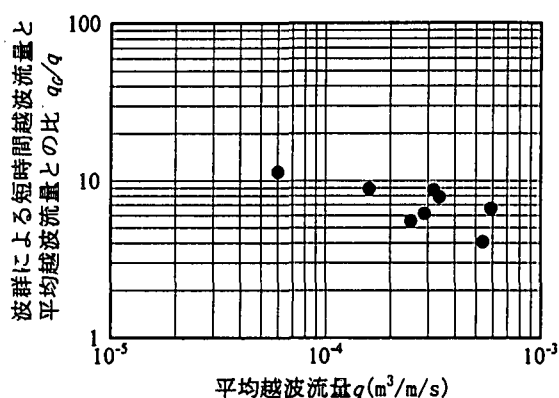


図-18 波群による短時間越波流量

4 おわりに

本研究で得られた主要な結論をまとめると以下の通りである。

1. 現地観測期間中の来襲波浪

1996年1月上旬から3月上旬にかけての2カ月未満の間に来襲した高波浪は、有義波高の最大値が $H_{1/3}=6.14\text{m}$ 、有義波周期が $T_{1/3}=14.6\text{s}$ を観測した。その他に観測期間中には、有義波高約5mの高波浪が2回、約4mを越えるものが5回程度来襲した。このような高波浪の下で、有意な越波データを取得することができた。

2. 平均越波流量

水圧センサーの気圧による変動を適切に補正し、越波観測区域内の水位上昇量の変化率と越流水深から算出した越流量からの2通りの方法で平均越波流量を算出した。観測期間内の高波浪の来襲の下で、平均越波流量として前者の方法で離散的に $q=5 \times 10^{-6}$ から $3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の平均越波流量を、後者の方法では連続的に $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ から $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の平均越波流量を得た。両者には若干の差があるものの、これらの方法は現地観測による越波流量を推定する有効な方法である。

3. 波群による短時間越波流量

波群による短時間越波流量は、平均越波流量 q が $q=10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \sim 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ の範囲で平均越波流量の10倍から数倍程度であった。

今回のデータ解析に当たっては、比較的短い期間の水温の変化の影響しない範囲を対象に気圧の変化の補正を行った。今後水圧センサーの測定値に及ぼす水温の影響を補正を行い、観測期間全体にわたるデータの解析をする予定である。また、水理実験を実施し、現地観測結果との比較も計画している。

最後に、本研究は電力9社と日本原子力発電(株)による電力共通研究の一部として実施したものであることを付記する。また、現地観測の計画に当たって運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長 高橋重雄氏には貴重な助言を頂きました。福井県港湾課長 矢下忠彦氏ならびに同福井港湾事務所長 善藤征夫氏、専門員 藤井賢一氏には越波観測と構造物管理が両立するようにご配慮を頂き、観測を許可して頂きました。現地での観測に当たって五洋建設(株) 福井工事事務所の方々の協力を得ました。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1992): 安定限界を越える波浪に対する消波工の変形と防波機能の変化について, 海岸工学論文集第39巻, pp.671-675.
- 鹿島遼一・榊山 勉・松山昌史・関本恒浩・京谷 修(1993): 安定限界を越える不規則波に対する人工島防波護岸の耐波安定性と越波特性, 海岸工学論文集第40巻, pp.686-690.
- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩(1994a): 多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.656-660.
- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩(1994b): 人工島式立地発電所への越波量評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.661-665.
- 関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷 修・鹿島遼一(1992): 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.581-585.
- 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, 港研報告, 第21巻, 第2号, pp.151-205.
- (社)土木学会:(1985) 水理公式集-昭和60年版-, 第4編発電編, 土木学会, 283p.
- 福田伸男・宇野俊恭・入江 功(1973): 防波護岸の越波に関する現地観測(第2報), 第20回海岸工学講演会論文集, pp.113-118.