自然磯浜海岸に計画される面的防護施設による越波抑制効果に関する 水理模型実験

Hydraulic Model Experiments on the Reduction of Wave Overtopping by the Integrated Shore Protection Facility Planned near Natural Rocky Beaches

上島顕司¹・南 正治²・古家雅彦³・島添秀行⁴・西井康浩⁵・小畑友紀⁶

Kenji UESHIMA, Masaharu MINAMI, Masahiko KOGA, Hideyuki SHIMAZOE
Yasuhiro NISHII and Tomonori KOBATA

When considering the wave overtopping problem, conventional design techniques have used two-dimensional graphical solutions and calculation formulae. However, these techniques are not accurate enough when applied to complex wave fields where wave setups by breaking waves and reflected waves are dominant. The Shonin-ga-hama district is located at the center of Beppu coast of complex terrain. To solve the wave overtopping problem of the integrated shore protection facility there, hydraulic model experiments, in which three-dimensional wave fields are reproduced, were conducted. By directly measuring wave overtopping rates, effective coastal structures were investigated.

1. はじめに

大分県別府湾に位置する別府港海岸では、水際線の背後地域において度重なる高潮、越波等の災害を受けていることから、住民の人命や財産を防護することが急務であった。そこで、国土交通省九州地方整備局は、直轄の海岸保全施設整備事業として、上人ヶ浜地区、餅ヶ浜地区、北浜地区1および北浜地区2の4地区において、平成13年より延長約2.2 kmについて事業化を開始した。本事業では、整備計画案の策定段階から住民参加型計画手法が取り入れられ、意見集約が図られてきた。

図-1に示す上人ヶ浜地区では、防災・利用・環境・景観などの観点から、自然とふれあう海辺空間の創出と高潮対策に優れる面的防護施設の整備計画を目指し、平成21年度に策定された基本計画案に対し、平成22年度と平成23年度に水理模型実験を実施した。基本計画案では、面的防護施設の有効的な配置検討が数値解析で進められると同時に、越波低減効果の課題については主に標準断面を使った構造の最適化が既往の設計手法を使って検討されていた。このような従来の護岸施設の構造設計では、越波量算定法に算術式や図解法が多用され、複雑な断面でもせいぜい断面2次元の数値モデルが使われる程度で

図-1 別府港海岸上人ヶ浜地区全景

ある。これらの方法は、地形や碎波に由来する複雑な水位上昇が卓越し、その上来襲波や反射波や沿い波が重合する護岸前面の平面波浪場に適用するには、精度を担保する算定法になっているとは言い難い。当該地区は遠浅の自然磯浜に面し、自然環境とふれあう親水護岸、護岸背後に保養所・旅館が密集する商業施設、さらに中央浄化センターが建つ埋立地等が複雑な地形を形成し、沖合の海域では、魚礁群や石積式の増殖場が広域に点在している。このような複雑な地形で且つ利用上の防護基準も異なる海域において、精度を担保する面的防護施設の越波低減効果を検証するには、多様な越波要素を直接取り込むことができ、現象の視認が容易となる大型平面模型を用いた水理実験による再現予測が効果的である。

そこで本研究は、別府港海岸上人ヶ浜地区に計画されている護岸、潜堤群および周辺地形を再現した大型平面模型を製作し、護岸の越波流量を主な評価指標とする水理模型実験により、防災対策に有効な防護施設の構造諸元を策定することを目的に越波低減効果の検証を行った

1	正会員	農(修)	国土交通省九州地方整備局 関門航路事務所 所長
2			国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 調査課長
3			国土交通省九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 調査第一係長
4			国土交通省九州地方整備局 関門航路事務所 船舶課 船舶整備係長
5	正会員	博(工)	(株)三洋コンサルタント 調査部長
6			(株)三洋コンサルタント 係員

ものである。

2. 越波実験の内容

(1) 実験条件

a) 実験水槽と実験縮尺

実験は、国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所所有の水理実験センター屋内にある潮流・波浪実験水槽（長さ61.0 m、幅48.5 m、高さ1.5 m）を使用して実施した。この水槽内に設置されている造波装置はピストン型の造波機で、一方向不規則波を造波させることができる。実験縮尺は、模型再現範囲、水槽規模および波浪条件を考慮し、長さ縮尺1/30のフルード相似則を採用した。越波流量については、同じくフルード相似則より、実験値に $1/(1/30)^{3/2}$ を乗じて現地値へ換算した。

b) 地形の模型化と配置

海底地形は、上人ヶ浜地区の対象海域・20 m以浅の地形を図-2に示す海底床（固定床）模型として再現し、さらに浅海域に潜堤や増殖場や魚礁を模擬して設置した。

模型護岸は、既設護岸に即した構造形式や現地の天端高等の諸元を参考にした。潜堤と増殖場は石材で構造を再現し、魚礁は実際に使われているブロックを縮尺に合わせて個別に製作し、海底床に接着させた。また護岸は、北部エリアの中央浄化センター埋立地護岸、中央エリアの商業施設や旅館の護岸、南部エリアの保養所や臨海公園の護岸を対象に、護岸平行方向に既設護岸の天端高に追従させて模型天端高を変化させた。以上の地形や施設を再現した模型は、図-2に示すように岸沖方向に約20 m、護岸平行方向に約30 m、高さ方向に約0.9 mの模型寸法の諸元をもたせて水槽内に製作した。

(2) 実験ケース

実験は、模型護岸の越波流量を越波低減効果の主な評価指標とし、2年間測定した。さらに平成23年度では、沖側潜堤背後水域の波高分布と流速分布も合わせて測定した。ここでは、実験ケースの対象が2ケ年で異なるた

表-1 平成22年度の実験ケース（現地値）

実験ケース	南部エリア		中央エリア	
	円形テラス部の護岸構造		沖側岸側潜堤の幅と基数	
C-1	現況		—	
C-2	前面消波工撤去		40 m×2	—
C-3	パラベット後退型	不透過	50 m×2	—
C-4		透過	30 m×2	—
C-5			30 m×2	20 m×2 天端高±0.0 m
C-6			50 m×2	20 m×2 天端高+1.0 m

表-2 平成23年度の実験ケース（現地値）

実験ケース	中央エリア	
	沖側潜堤の延長と基数	既設護岸天端高
C-1	現況	
C-7	250 m×1	—
C-8	250 m×1, 150 m×1	—
C-9	150 m×3	—
C-10	200 m×1, 100 m×1	+5.06 m → +5.9 m +5.28 m → +5.5 m
C-11	150 m×1, 100 m×1	+5.06 m → +5.9 m +5.28 m → +5.5 m

め、以下に示すように年度別の実験ケースで整理した。

a) 平成22年度の実験

平成22年度は、表-1に示すように沖側潜堤幅と円形テラス部の護岸の最適構造（前面消波工、パラベット後退型）を検討した。このときの沖側潜堤の延長は、1号が250 m、2号が150 mである。

b) 平成23年度の実験

平成23年度は、表-2に示すように岸側潜堤設置の影響や高越波域の護岸天端嵩上げ効果を検討した。このときの沖側潜堤の堤体幅は、全て50 mである。

3. 越波実験の準備と測定方法

(1) 実験波の検定

対象とした波浪は、高潮時（H.H.W.L;D.L.+3.50 m）の50年確率波を想定したものである。入射波に用いた換算沖波の諸元は、波高 $H_o'=3.3$ m、周期 $T_o'=7.2$ s、波向 $\theta_o'=E9^\circ S$ である。越波実験では波の連なりが越波流量に影響を及ぼすことを考慮し、今回は波高の出現確率を示すレーリー分布の理論曲線に対して、波形の連なりの違いにより相対度数分布が異なる実験波を3波群準備し、いずれの実験ケースに対しても3波群の波を作用させた上で越波流量の平均化を試みた。

実験波の検定は、図-2に示す波高計（H3）における不規則波造波信号の作成、波高計（H1～H5）における波高分布の確認と定常待ち時間の把握、および波高計（H3）

図-2 海底床模型の水槽配置

図-3 越波集水装置 (左: 平面図, 右: 断面図)

図-4 集水状況 (左: 越波集水装置, 右: 波遮断工)

での周期と波高計 (H6) での通過波高検定をもって行った。その結果、不規則波造波信号は、標準形スペクトル (修正プレットシュナイダー・光易型) に対し、いずれも目標周期 $\pm 3\%$ 以内を満たした。波高分布は、3波群で異なる相対度数分布が得られた。造波機前面の波高計 (H1~H5) の波高経時変化は、いずれも5分を経過した当たりから目標波高値に漸近し、10分過ぎから一定値を呈したので、定常待ち時間は10分とした。通過波の周期は波高計 (H3) で、同じく波高は波高計 (H6) でいずれも目標周期 $\pm 3\%$ 以内を満たした。

(2) 越波の測定と整理

越波の集水方法については、定常待ち時間中や測定終了後に越波が集水枡に入らないように工夫する必要がある。これに対し、模型地形が複雑なこと、天端高が護岸毎に違うこと、さらに護岸の前面形状が異なることから、一様な波遮断工では遮水に対応できないと考え、図-3に示す越波集水装置と図-4にある波遮断工を一部の護岸前面に設けることにより、測定時間外の越波流入を遮断することができた。

越波流量は、集水枡に溜まった越波量を集水枡断面積と波の作用時間で除して算出し、図-6に示す護岸平行方向の空間分布として整理した。図中の越波流量 $0.02 \text{ m}^3/\text{m/s}$ と $0.01 \text{ m}^3/\text{m/s}$ にある直線は、各々のエリアの許容越波流量を表す。波高分布は、図-7および図-8に示す沖側潜堤背後水域の格子点で波高を測定し、これを基に等波高線で整理した。測定は、実験ケース毎に3波群それぞれ波を作用させ、波高計を格子点に移動させながら繰り返し行った。

4. 越波実験の結果と考察

(1) 越波流量の空間分布

図-5にある集水枡で測定した護岸平行方向の越波流量

を図-6に示す。平成22年度の実験で南部エリアの円形テラス部の前面消波工を撤去する当初計画を検討したところ、撤去時 (C-2) の越波流量が現況 (C-1) の前面消波工に対して4倍強となり、許容越波流量を超えた。これに対し、景観性と利便性に配慮したパラベット後退型護岸の天端部に透過機能を付加した実験ケースを検討したところ、不透波の実験ケース (C-3) では、改良護岸の一部で許容越波流量を超えた。しかし50%透過機能を持たせた実験ケース (C-4~C-6) では、いずれも許容越波流量を満足した。同時に、これら6ケースで潜堤が護岸の越波低減に及ぼす効果を評価したところ、中央エリアの中間部のホテルと北側の商業施設では越波流量が許容越波流量の3~4倍となり、潜堤群だけでは越波低減効果を確保できなかった。これに対し、北部エリアではいずれの実験ケースも許容越波流量を満たした。次に、平成23年度の実験では、平成22年度の検討で達成できなかった中央エリアの越波低減効果について、潜堤群で対応する実験ケース (C-7~C-9) と潜堤と護岸を組み合わせた面的防護施設で対応する実験ケース (C-10~C-11) に関して越波低減効果を調べた。ここでは、潜堤と護岸天端の嵩上げを組み合わせた面的防護施設 (C-10) が、北側の商業施設の越波流量を許容越波流量内に納める効果を有していることが分かった。これに対し、護岸の嵩上げができない中間部のホテルでは、同じ実験ケースでも許容越波流量を満足できなかった。つまり、波エネルギーが収斂しやすい中央エリアでは、護岸の嵩上げによる対策が越波低減効果に有効であると言える。

(2) 波浪場の特性

波群2を使用した平成23年度の波浪場解析について、現況 (C-1) と潜堤群設置 (C-8) の両ケースの結果を、図-7および図-8に示す。波高分布に関して両ケースを比較すると、2基の沖側潜堤が入射波をよく減殺させていることが分かり、潜堤背後域では北端部の一部を除き、静穏域が広く分布している。同じく平均水位分布に関しては、潜堤背後域で潜堤効果の水利特性の一つである水位上昇が顕在化している。ただし、中央エリア南側から南部エリアの護岸前面海域では、現況と同程度の水位上昇が見られる。次に、これら波浪場の特性と越波流量の相関を調べてみた。着目したのは、図-6において高越波流量を発現している中央エリアの商業施設 (No. 26~28) とホテル (No. 37) である。現況 (C-1) と潜堤群設置 (C-8) の両ケースを比較すると、中央エリアの商業施設の内、特に (No. 28) では波高と平均水位が減少しているにもかかわらず、越波流量はほとんど変化がなく (C-1 ; $0.0370 \text{ m}^3/\text{m/s}$, C-8 ; $0.0358 \text{ m}^3/\text{m/s}$)、ホテル (No. 37) では波高と平均水位が同様に減少しているが、越波流量は減少 (C-1 ; $0.0300 \text{ m}^3/\text{m/s}$, C-8 ; $0.0247 \text{ m}^3/\text{m/s}$) に転

図-6 護岸法平方向の各集水柵の平均越波流量 (現地値)

(b) 平均水位分布

図-7 現況 (C-1) 波浪場の平面特性

(b) 平均水位分布

図-8 潜堤群設置 (C-8) の波浪場特性

(a) 前面海域 (b) 集水柵 (No.37) 内
図-9 水面変動と移動平均水位 (実験値)

じている。ただし、許容越波流量を満足するまでには至っていない。ここでは、波浪場の特性と越波流量に関して明確な相関を見出すことができなかった。

(3) 越波量の経時変化

前節で評価対象とした越波流量は、集水した越波量を集水柵の面積と波作用時間で除した平均値である。越波量の変動は、波の連なりや反射が影響すると考えられるため、ここでは越波量の時間的変化を断面方向で調べた。具体的には、高越波流量を発現している中央エリアのホテル (No.37) 前面海域と背後の集水柵内に波高計を設置し、水位変動量を計測した。代表として波群2による波高と水位の時系列変化の特徴的な箇所を図-9に示す。

図-9の前面海域の①と集水柵内の①'にあるように、比較的大きな波高が連続して来襲した後に水位が上昇し、越波量が増大する傾向にあることが確認できる。同じく②と②'にあるように、波群中の最大波高が発生した後も越波量が増大が見て取れるが、①と①'の変化に比べると小さい。つまり、断面方向の越波特性については、ある程度大きな波が連続して来襲した後に、越波量が増大する傾向にあると考えられる。①と①'、②と②'の時間軸のずれは、波高計設置位置の違いによるタイムラグである。

5. 数値計算を用いた越波特性の検証

(1) 数値モデル

浅海域における波の変形要因の再現性に富み、水位や流速の時間変動を得ることができる数値モデルにブシネスクモデルがある。今回は、NOWT-PARIに平山ら (2006) が提案している遡上モデルと越波モデルを組み込んだ改良版NOWT-PARIを用い、波高分布と越波流量を評価指標にとり、実験との検証を試みた。計算対象としたのは、越波低減に効果的であった潜堤と護岸天端の嵩上げを組み合わせた面的防護施設 (C-10) の実験ケースである。

(2) 計算結果と実験結果の比較検証

図-8(a) と図-10の波高分布を比較すると、画角の違い

図-10 波高比分布と越波流量分布

や等比線の分解能や潜堤長の問題から、全域を俯瞰して両者に明瞭な差異を見出すことは難しいが、局所的に見れば共通の波浪場特性を呈している箇所があることが分かる。特に、潜堤背後域の波浪場では共に波高減衰を示し、また北部エリアの護岸前面の一部では波高増大を示している。図-10における越波流量については、越波を許容する中間部のホテル箇所で、実験値に対して計算値が若干低く再現されるものの、越波傾向は比較的一致している。以上より全体を俯瞰すれば、数値計算による検証は、概ね定性傾向を再現させていると言える。

6. おわりに

本研究で得られた主要な成果を以下に示す。

- 1) 大型模型を用いた波浪場と越波特性を再現する水理実験は波の変形要素が直接取り込め、また波浪と越波の関係や表層の流れ場を目視できることから、今回は波が重合する波浪場での越波状況や北部エリア方向へ卓越する沿岸流を視認することができた。
- 2) 当該海岸のように、整備に関して自然とふれあう海辺空間の創出が付帯条件として設定されている場合、潜堤と護岸天端の嵩上げを組み合わせる面的防護が、越波低減効果に優位であることを確認した。
- 3) 統計量を含む波浪場と平均値となる越波流量は、明確な相関関係があるとは言えず、今回の実験では波の連なりが越波量に影響していることを確認した。
- 4) 数値モデルを用いた波高および越波の再現では、水理模型実験結果と定性的な傾向の一致を確認した。

参考文献

- 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所・(株)三洋コンサルタント (2011): 別府港海岸水理特性調査報告書, pp. 10-54.
- (株)三洋コンサルタント (2012): 別府港海岸 (上人ヶ浜地区) 水理特性調査報告書, pp. 10-95.
- 平山克也・長谷川準三・長谷川 巖 (2006): 越流を考慮したブシネスクモデルによる不規則波の越波量に関する数値計算, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 706-710.