

数値シミュレーションと水理模型実験を活用した別府港海岸（北浜地区1）の護岸断面設計について

鬼童 孝¹・小方 慶樹¹・南 正治²・古家 雅彦²

¹九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室 （〒750-0025 山口県下関市竹崎町4-6-1）

²九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 調査課 （〒750-0025 山口県下関市竹崎町4-6-1）

高潮に対する防護機能と海岸の利用及び自然環境に配慮した里浜づくりが進められている別府港海岸（北浜地区1）において、老朽化した既設の消波ブロック被覆護岸の改良に伴い、利用と防護効果の両立を目的とした二重パラペット型護岸が計画されている。二重パラペット型護岸には反射波対策としての直立消波ブロックと、前後のパラペット間の越波水の排水のための透水層構造を採用した。このような複合的な機能を有する護岸の防護機能を評価するために、数値シミュレーション（数値波動水路）と水理模型実験を実施し、最適な護岸断面の設計を行った結果等を報告する。

キーワード 別府港，海岸護岸，高潮，数値シミュレーション，水理模型実験

1. はじめに

別府港は別府湾の湾奥に位置し、背後に我が国有数の温泉と豊かな風光を持つ国際観光温泉文化都市「別府」の海の玄関口として発展してきた。明治時代中期から後期にかけて中国、四国、阪神地方との航路が相次いで開設され専用客船の就航により内海航路の基盤が整備されてきた。

また、別府港の海岸線は明治から昭和初期にかけては殆どが砂浜であり、砂から噴出する天然海浜砂湯は県内外から多くの人を集め、砂湯、潮干狩り、海水浴、散策など一年中の賑わいであった（写真-1）。

大正期から埋め立てにより整備された海岸護岸には亀裂や風化等の老朽化が広範囲にみられるほか、背後に民家をはじめ温泉旅館街等多数の商業施設、主要幹線道路等公共施設が近接しており、台風等による高潮によって被害が発生したことで安全の確保が課題となっていた（写真-2）。

別府港海岸では、平成13年度に直轄の海岸保全施設整備事業（高潮対策）として「上人ヶ浜地区」，「餅ヶ浜地区」，「北浜地区1」，「北浜地区2」の4地区、延長約2.2kmについて事業に着手し、高潮に対する防護機能と海岸の利用及び自然環境に配慮した「別府港海岸の里浜づくり」を進めている。

平成22年8月に「餅ヶ浜地区」が完成し、「北浜地区2」は平成21年度から、「上人ヶ浜地区」，「北浜地区1」は平成24年度から現地工事に着手する（写真-3）。



写真-1 北浜海水浴場



写真-2 台風による被災状況と護岸の老朽化



写真-3 北浜地区1護岸の全景（着工前）

本報告の「北浜地区1」においては、利用と防護効果の両立を目的とした二重パラペット型護岸への改良を行う。図-1に既設護岸断面を示す。

二重パラペット型護岸には反射波対策としての直立消波ブロック、前後のパラペット間の越波水の排水のための透水層構造（捨石）を採用した（図-2）。

本報告では、このような複合的な機能を有する越波対策護岸の機能を評価するために、数値波動水路（以降“CADMAS-SURF”と記す）による解析と水理模型実験を実施することで、効果的かつ効率的な護岸断面の設計を行った結果を報告する。

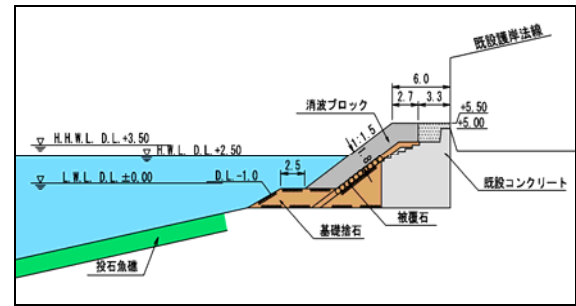


図-1 既設護岸の計画断面

2. 二重パラペット型護岸の特徴

(1) 構造形式の採用の背景

対象地の背後には、集合住宅と宿泊施設が近接しているため、越波の影響を極力抑えて親水性を高めること、また、隣接する船溜まりへ入港する小型船舶への反射波の影響を抑える構造とする必要があった（写真-3）。

これらの要求事項を解決するために、技術検討会やワークショップにおいて地元地域との合意形成を図りながら、護岸構造形式について総合的な比較検討（コスト、機能面、景観面等）を行った結果、直立消波ブロックを用いた二重パラペット型護岸を採用した。

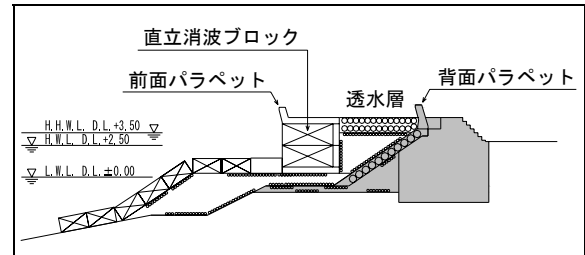


図-2 二重パラペット型護岸の概略断面

表-1 設計条件

項目	条件値	
設計水深(m)	-2.0	
海底勾配	1/10	
検討潮位(m)	H.H.W.L. +3.5	
設計波	換算沖波 H_0' (m)	3.1
	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	3.3
	有義波周期 $T_{1/3}$ (sec)	7.6
許容越波流量($m^3/m/s$)	0.01	

※H.H.W.L.：朔望平均満潮位+最大潮位偏差

(2) 設計条件と構造条件

対象地の前面海域は、別府港海岸の中では急深な海底地形となっており、設計波高も比較的大きい（表-1）。

また、既設護岸断面では、背後地の利用状況等を踏まえて設定した許容越波流量 $0.01m^3/m/s$ を満足しない結果となることがわかっており、防護面においても改良が必要であることが確認されているが、地元地域との調整において既存護岸天端高さ（+5.7m）以上の嵩上げは行わないことが制約条件であった。

(3) 護岸断面の検討の考え方

設計対象護岸は設計条件、構造条件とも特殊であることから、机上で、既往の越波対策護岸の知見と CADMAS-SURF を使って想定断面を決定した。決定した想定断面については、水理模型実験で越波流量を確認するとともに、許容越波流量以下となるよう断面を見直し、護岸断面を決定するという手法を採用した（図-3）。

(4) 二重パラペット型護岸の特徴

図-4 は CADMAS-SURF による二重パラペット型護岸の越波抑制機構を示す例であり、左から①直立消波ブロックの遊水部で反射による越波量の増加を抑え、②前面パラペットを越波した水塊を透水層内に流下・排水し、③排

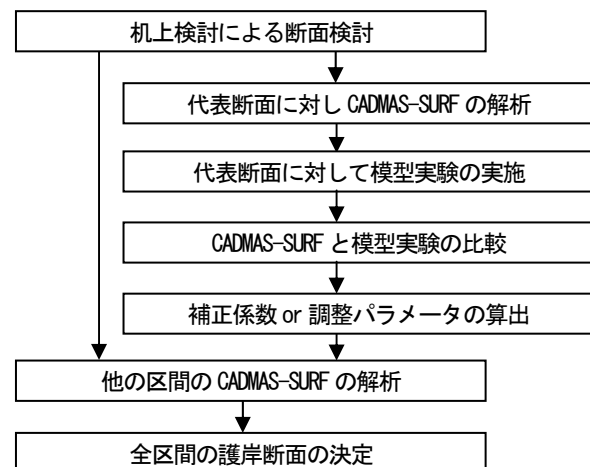


図-3 護岸断面の検討フロー

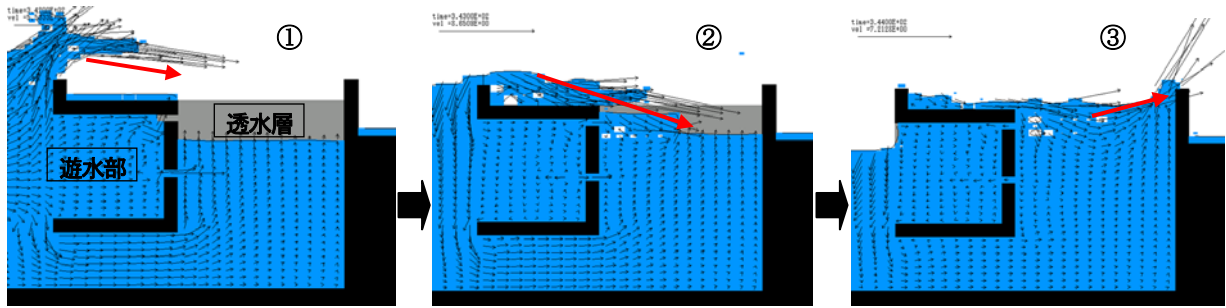


図4 二重パラペット型護岸のCADMAS-SURFでの解析結果

水しきれなかった伝達水を背後パラペットで補足するという特徴がある。

このうち②③については、パラペットの天端高さ、透水層の幅によって、その効果が大きく変化すると想定された。そこで、CADMAS-SURFを用いてパラペット高と透水層幅を変化させ感度分析を実施した。

3. CADMAS-SURFによる越波流量解析

(1) CADMAS-SURFの解析モデル

CADMAS-SURF のモデル化と計算に用いる各種パラメータは、既往の計算例を参考に設定を行った。計算領域の大きさは、水平方向 450m、鉛直方向 35m である。

本護岸の特徴である越波水排水のための透水層は、図-5に示すようにポーラス要素として配置した。そのポーラス要素のパラメータは、実際に使用する予定である石材に合わせて基礎マウンドや裏込石と同条件とした。前面のパラペット高は初期値として既設の護岸計画高と同等の+5.5mに固定した。

(2) 越波流量の解析結果

越波流量の解析には、護岸位置において設計波と同値となるように波高の検定を実施した波群を入射波条件として設定し、越波流量は後部パラペットの背後に溜まった水量を計測時間で除して、単位幅、単位時間あたりの越波流量として求めた。

図-6 は背面パラペット高と透水層幅について感度分析を行った結果であり、背面パラペット高と透水層幅はトレードオフの関係にあることがわかる。例えば、“パラペット高+5.2m で透水層幅 8.5m”と“パラペット高+5.65m で透水層幅 6m”の時に許容越波流量 0.01m³/m/s を満足する。

図-7 は前面パラペット高と背面パラペット高を+5.5mに固定した場合の透水層幅と越波流量の解析結果であり、既設護岸と同等の天端高とする場合には 7.0m 以上の透水層幅が必要な結果となった。

図-8 は許容越波流量 0.01m³/m/s を満足する背面パラペット高と透水層の幅をプロットしたものであり、この関

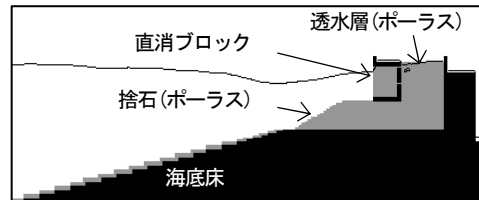


図-5 改良断面（二重パラペット型）

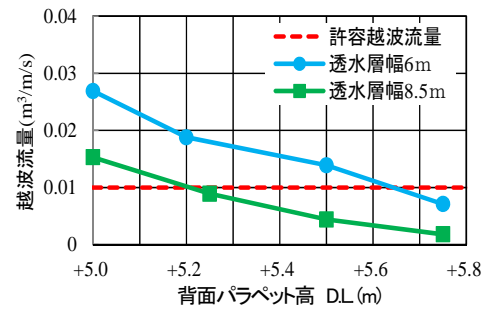


図-6 背面パラペット高と越波流量

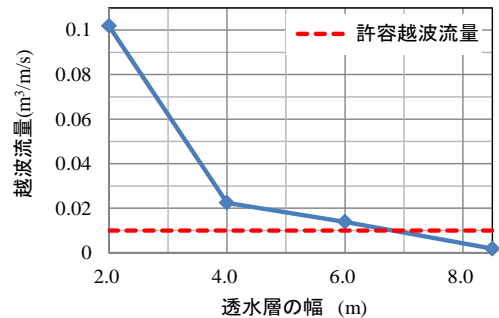


図-7 透水層幅と越波流量

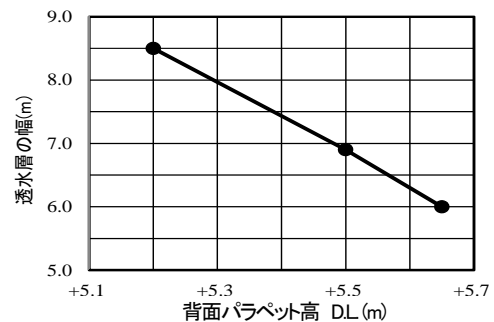


図-8 許容越波流量0.01m³/m/sを満足する透水層幅と背面パラペット高の関係

係をもとに、技術検討会及び地元地域とのワークショップにはかり、許容越波流量を満足する二重パラペット型護岸断面として、前面・背面パラペット高+5.5m、透水層幅7.0mを設定した。

4. 水理模型実験による越波低減効果の検討

(1) 水理模型実験

a) 実験水路及び実験条件

水理模型実験は、下関港湾空港技術調査事務所の断面水路（長さ 50.0m×幅 1.0m×高さ 1.5m）を用いて、1/25の縮尺で実施した（表-2）。

b) 実験断面

実験断面は CADMAS-SURF での検討結果により設定した前面・背面パラペット高と透水層幅を基本として、前面と背面のパラペット天端高の上下と透水層の幅が調整できるように製作した（図-9）。

(2) 水理模型実験の結果

表-3 は、設計波に相当する 3 波群の不規則波を使った越波実験結果である。

前面と背面のパラペット高をともに+5.5m とした場合（Case 1-1）、平均越波流量は $q=0.012\text{m}^3/\text{m/s}$ となり許容越波流量をわずかに満足しなかった。また、前面あるいは背面パラペット高のどちらか一方を嵩上げし、+5.7m とした場合（Case 1-2, Case 1-3）では、どちらのケースも許容越波流量を満足する結果が得られた。

次に、Case 1-2, Case 1-3 とも許容越波流量に余裕があると判断し、透水層幅を 6.0m とした場合、許容越波流量を満足する結果が得られた（Case 1-4）。

なお、透水層がない場合には越波流量が 10 倍程度となり透水層による越波低減効果が大きいことがわかる（Case 1-5）。

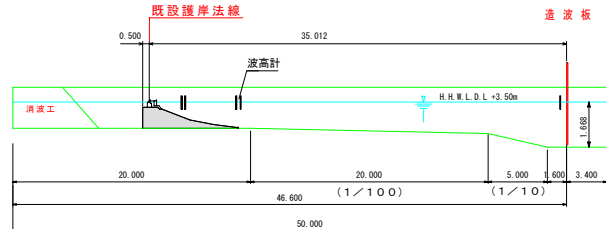
また、写真-4は波群中の高波浪が作用した場合の越波状況であり、前面パラペットで大きく碎波した波が背面パラペット前面の透水層に落下していることがわかる。

5. 実験を踏まえた護岸断面の検討

護岸の標準断面は、実験結果（表-3）を受け、前面天端高+5.5m、背面天端高+5.7m、透水層幅6.0mの断面で決定した（図-10）。また、実験結果とCADMAS-SURFの比較より、CADMAS-SURFの越波流量は実験結果より低く算出されることが分かった。さらに、背面天端高を+5.5m→+5.7mに変更することで、越波流量が低減できることもわかり（表-3）、この結果を他の区間の標準断面の検討に活用することにした。

表-2 現地値と実験縮尺（1/25）

項目	模型	現地
護岸模型寸法 Lr	1.0m	25.0m
波高 $Hr=lr$	13.2cm	3.3m
周期 $Tr=lr^{1/2}$	1.52s	7.6s
越波流量 $qr^{3/2}$	0.8 $\text{cm}^3/\text{cm/s}$	0.01 $\text{m}^3/\text{m/s}$



(単位：m)

図-9 水理模型実験断面図

表-3 実験ケースと越波流量計測結果

Case名	構造諸元			越波流量測定結果 ($\text{m}^3/\text{m/s}$)
	前面天端高 (m)	透水層幅 (m)	背面天端高 (m)	
Case 1-1	+5.5	7.0	+5.5	0.012
Case 1-2	+5.7		+5.5	0.009
Case 1-3	+5.5		+5.7	0.008
Case 1-4	+5.5	6.0	+5.7	0.008
Case 1-5	+5.5	0.0 (透水層無し)	+5.5	0.097



写真-4 越波流量の水理模型実験状況

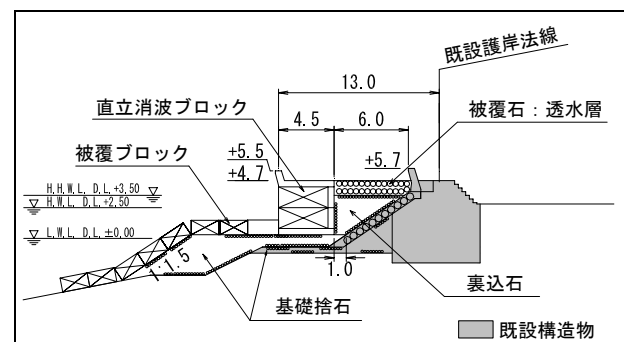


図-10 二重パラペット型護岸の標準断面

6. 他の区間への適用

3～5.までの検討は南側区間を対象としたものであり、北側区間等のその他の区間については、検討結果をもとにCADMAS-SURFを使って机上で護岸断面を決定した。この結果、北側区間の標準断面も図-10と同じ断面とした。

7. まとめ

北浜地区1の護岸断面の検討において、CADMAS-SURFで求めた越波流量と水理模型実験で得られた越波流量との関係性を把握することで、設計実務の効率化につなげることができた。

本報告の主な成果を以下に示す。

- a) 水理模型実験は時間とコストの制約により、多くのケースを実施することが難しいが、水理模型実験とCADMAS-SURFを併用することで、実験ケースを省略することが可能となった。
- b) CADMAS-SURFによる事前検討を予備実験と位置付けたり、感度分析を行うことによって、水理模型実験での検討ケースの設定（パラペット高、透水層幅などのパラメータの絞り込み）が容易となった。
- c) 地元地域との合意形成の観点からも、許容越波流量を満足するために必要となる要素を議論する上での論点が絞りやすくなり、比較的スムーズな合意を導き出すことができた。



写真-5 ワークショップの様子



写真-6 水理模型実験見学会の様子

謝辞：本事業の整備計画策定では、別府港海岸整備計画検討会の委員を始め、その他多くの関係者による御指導、御助言および協働作業により得られた成果である。ここに関係委員および関係各位に改めてお礼申し上げます。