

## 数値波動水路を用いた護岸の越波対策の検討事例

日本工営(株) ○ 松本 遼  
日本工営(株) 谷口 史一  
日本工営(株) 上原 功  
日本工営(株) 安藤 興太

### 論文要旨

平成30年台風第21号来襲時に発生した高潮・高波時により、護岸背後に越波・浸水被害が生じたため、越波対策を目的とした護岸の改良設計を行った。改良設計では、護岸背後の住宅地からの景観を考慮し、護岸の低天端化を図るため、護岸上部工パラペットを二重に設けるダブルパラペット工法を提案した。ダブルパラペットにおける越波流量の算出にあたっては、一般的な直立護岸の越波流量算定図を用いることができないため、数値波動水路CADMAS-SURFにより越波流量を算出した。さらに、ダブルパラペット間に越波が流入した場合の水位変動を不定流解析によって評価し、水塊の跳ね上がりによる越波流量の増大を考慮した検討を行った。

キーワード：数値波動水路、高潮対策、越波流量、ダブルパラペット工法

### まえがき

平成30年台風第21号により、大阪湾沿岸では高潮・高波による被害が各地で発生した。護岸背後への越波・浸水被害が甚大だった地区については、緊急高潮対策として護岸の嵩上げが行われることとなった。一方、設計対象の護岸背後には住居が建ち並んでおり、景観に配慮するため天端高を低く抑える必要があった。そこで、護岸上部工パラペットを二重に設けるダブルパラペット工法による越波流量・嵩上げ高の低減効果を検証した。

ダブルパラペットにおける越波流量の算出にあたっては、一般的に用いる直立護岸の越波流量算定図<sup>1)</sup>の使用が困難であることから、従来では水理模型実験を行う必要があった護岸形状において、数値波動水路CADAMS-SURF<sup>2)</sup>を用いることで、短期間に検討を進めることができたため、一連の検討内容について報告するものである。

### 1. 検討条件

#### (1) 潮位・波浪条件

潮位・波浪条件を表-1に示す。潮位条件は当該護岸の設計当初の設計高潮位(台風期朔望平均満潮位に伊勢湾台風規模の台風が室戸台風経路を通過した場合に発生すると想定される潮位偏差を考慮した潮位)、波浪条件は50年確率波(近年の気象・海象特性を踏まえて見直した最新の沖波条件)および台風21号来襲時の波浪条件を用いることとした。台風21号来襲時の波浪は、設計当初の波高、周期を超えており、見直しされた50年確率波も波高、周期共に約3割増大している。設計波は、再度災害防止の観

点から、50年確率波と台風21号の両方で越波流量を算出し、必要高が高くなる波浪条件を採用した。ただし、台風21号の潮位は、台風来襲時の潮位(T.P.+3.11m)ではなく、設計当初の設計高潮位T.P.+3.60mを用いた。

表-1 潮位・波浪条件一覧

項目	本設計		設計当初
	台風21号	50年確率波	50年確率波
潮位条件	T.P.+3.60m (台風時潮位 T.P.+3.11m)	T.P.+3.60m	T.P.+3.60m
波浪条件	<SSW> Ho=4.40m T=8.3s Ho/Lo=0.041	<SSW> Ho=4.74m T=8.6s Ho/Lo=0.041	<SSW> Ho=3.63m T=6.5s Ho/Lo=0.055
堤前波高	Ho'=3.26m H <sub>1/3</sub> =2.98m T=8.3s Ho'/Lo=0.030	Ho'=3.13m H <sub>1/3</sub> =2.87m T=8.6s Ho'/Lo=0.027	Ho'=2.01m H <sub>1/3</sub> =1.86m T=6.5s Ho'/Lo=0.030

#### (2) 背後地の利用状況等

当該護岸の背後には住居が建ち並んでいることから、陸側からの景観に配慮し、護岸の嵩上げ高さは極力低くするとともに、地元住民らによる護岸利用が多いことから、利用性にも配慮した構造が求められた(図-1)。

### 2. 数値波動水路による越波流量の算出

#### (1) 解析手法

ダブルパラペット護岸の必要天端高は数値シミュレーションにより検討した。数値シミュレーションには、2次元モデルの数値波動水路CADAMS-SURFを用いた。



図-1 現地状況

CADMAS-SURFの基礎方程式は、2次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式および Navier-Stokes 方程式をポラースモデルに基づいて拡張したモデルであり、自由表面解析モデルとして VOF 法 (Volume of Fluid Method) を使用したものである。CADMAS-SURF では、断面二次元の造波水路で行なうような水理模型実験の水理現象の再現が可能である。そこで、モデル化した堤体断面を設置した状態で CADMAS-SURF による断面二次元の数値計算を行い、沖側から入射する波による護岸背後への越波量を計測した。具体的には、堤体背後に越波升を設けておき、この越波升における水位の経時変化から総越波量を計測し、計測時間で除することで単位幅・単位時間当たりの平均越波流量  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ ) を算出した。

(2) 計算条件

本論文では、対象波浪は台風 21 号来襲時 (換算沖波  $H_o' = 3.26\text{m}$ , 有義波高  $H_{1/3} = 3.0\text{m}$ ,  $T = 8.3\text{s}$ ) の計算ケースについて述べる。設計潮位は H.H.W.L. T.P.+3.60m とした。計算に用いる水深は 15.1m (潮位 3.6m + 水深 11.5m), 許容越波流量は  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$  とした。

計算モデルを図-2に示す。計算モデルは、将来的な地盤沈下や計算精度等の不確実性に対する余裕高を考慮して設定した。

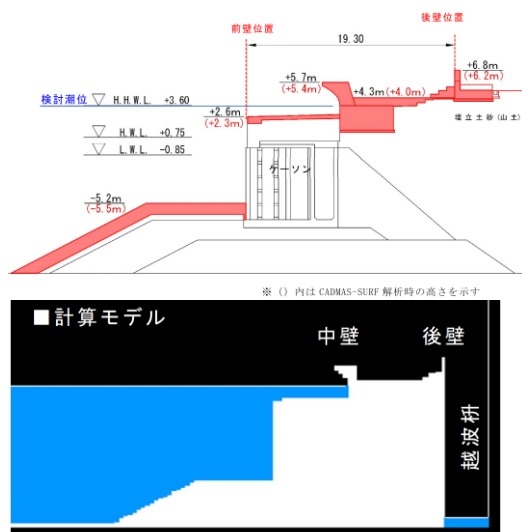


図-2 対策断面と計算モデル (護岸周辺拡大図)

CADMAS-SURF の計算条件を表-2に示す。造波ソースは MATRIX (不規則波) とし、計算時間は 220 周期、造波開始後 20 周期 (166s) から 220 周期 (1,826s) までの 200 波相当を越波量の計測対象期間とした。

計算に先立って、堤体の無い条件で通過波検定を行い、造波条件の感度分析により護岸前面位置において設計波高が再現できるように CADMAS-SURF での入射波を設定した (図-3)。

表-2 計算条件一覧

項目	計算条件
計算モデル	CADMAS-SURF v5.1
時間制御データ	時間刻み: Auto (安全率: 0.2) 計算時間: 1826s (200 波相当)
造波モデル	造波ソース: MATRIX (不規則波) 水深: 15.1m (潮位+3.6m 含む)
開境界データ	微小振幅波による放射境界を使用
減衰領域データ	造波位置における波長の 2 波長分を岸側に設定
連立1次方程式解法	デフォルト (M-ILUBCGSTAB 法)
差分スキーム	VP-DONOR 0.2 (推奨値)
格子データ	水平方向: $\Delta x = 1.0\text{m}$ , 構造物周辺 $\Delta x = 0.5\text{m}$ ( $\Delta x / \Delta z = 2$ 相当), 鉛直方向: $\Delta z = 0.2\text{m}$ (入射波の 1/15 相当)
ポラスメディアデータ	消波工 空隙率: 0.50, 慣性力係数: 1.2, 抵抗力係数: 1.0, 下限値: 10D-1
オプション	気泡上昇速度: 0.2m/s 水滴落下速度: T-DOOR DROP FREE-RUNDOWN WL-AUTO-ADJUST: 24.9

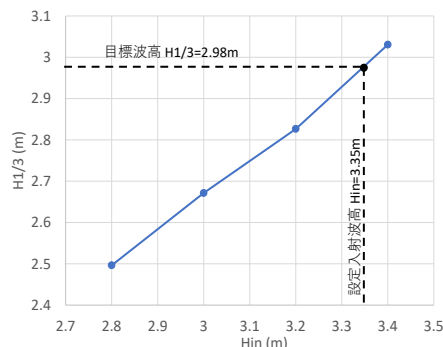


図-3 通過波検定結果

(3) 計算結果と考察

越波流量の時系列変化を図-4に示す。後壁背後の越波流量 (200 波相当) は「 $0.0164 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ 」となり、許容越波流量  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$  を超える結果となった。

護岸周辺の越波状況について波群が来襲したときの経時変化を図-5に示す。護岸の越波状況を見ると、中壁後壁間に越波した水塊が湛水しており、その状態で越波が流入すると水塊が跳ね上がり、後壁背後に水が溢れやすくなっていることがわかった。

一方、中壁後壁間に越波した海水は、実際には護岸延長方向に約 100m 間隔で設置される中壁のスロープ開口部から海側に排出されるため、図-5のように中壁後壁間が常時満水の状態にはならない。そこで、中壁後壁間を護岸延長方向への越波排水路とみなし、越波排水路内の排水水位を考慮した越波流量の算定方法について検討を行った。

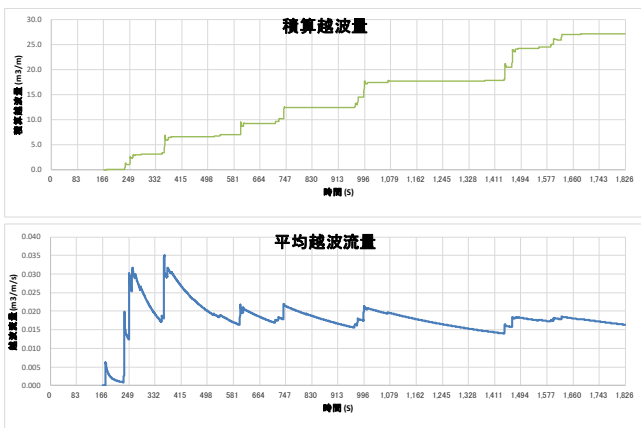


図-4 越波流量の計算結果(越波桁の水量時系列変化)

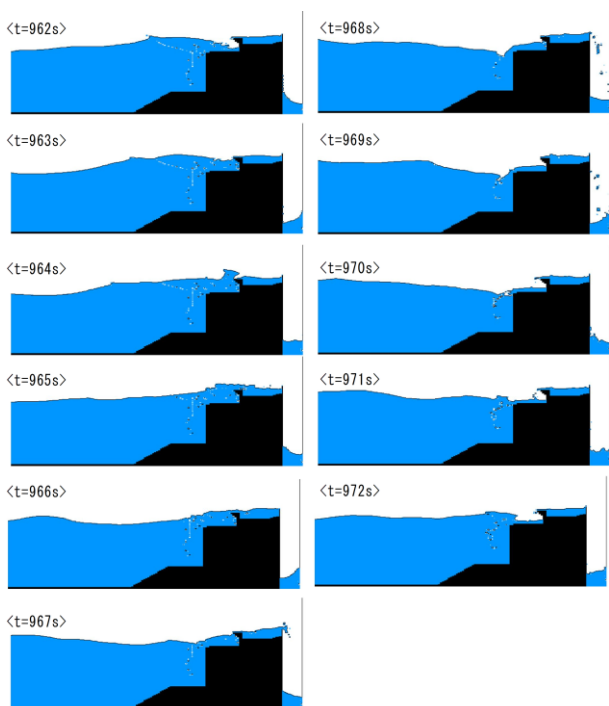


図-5 計算結果(越波状況)

### 3. 越波排水路水位を考慮した越波流量の算出

#### (1) 越波排水路への越波流入量の算出

中壁後壁間に流入する越波流量を求めるため、図-6に示すような中壁後壁間に越波桁1を設けたモデルを作成した。計算モデルは、中壁背後に排水穴(B=0.5m)を便宜的に設け、越波桁1に湛水した越波流量を越波排水路の排水流量として算出した。数値シミュレーションの計算条件は、表-2に示す計算条件と同じとした。

中壁後壁間の越波桁1の水量時系列変化を図-7に示す。中壁後壁間に湛水する越波流量は「0.0860m³/m/s」となった。なお、この時の後壁背後(越波桁2)への越波流量は「0.0088m³/m/s」となり、中壁後壁間に越波水が湛水しない場合は許容越波流量0.01m³/m/s以下となることを確認した。

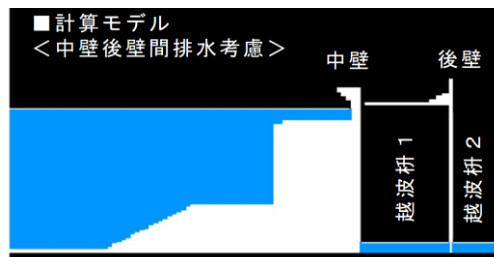


図-6 計算モデル(中壁後壁間の排水考慮)

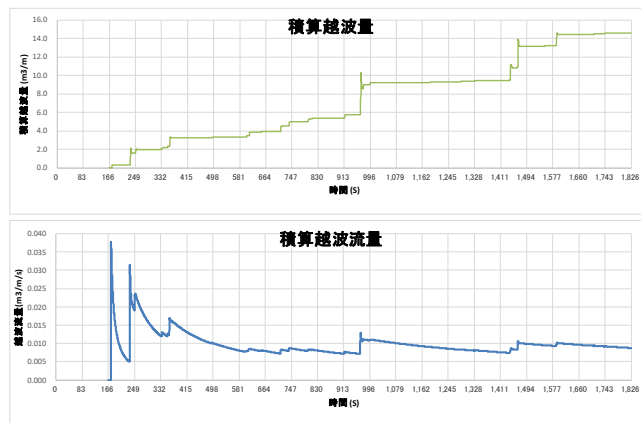
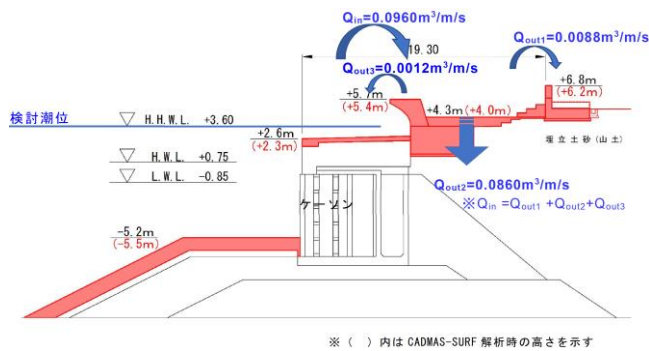


図-7 越波流量の計算結果(越波桁1)

#### (2) 越波排水路内の水位の算出

越波排水路内の水位は、護岸からの越波を横越流とみなした不定流解析<sup>4)5)</sup>により行った。開水路における横流入時の連続の式(開水路の不定流の式)は下式である。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Av}{\partial x} = q$$

また、横流入がある場合の運動方程式は下式で与えられる。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\alpha v^2}{2g} \right\} + \frac{vq}{gA} - i + \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 v^2}{R^{4/3}} = 0$$

ここに、A:通水断面積(m²)、v:流速(m/s)、R:径深(m)、i:水路床勾配、h:水深(m)、n:粗度係数、q:横流入による流量(m²/s)、g:重力加速度(m/s²)である。

水路全長において、前項で算出した中壁後壁間に湛水する越波流量「0.0860m³/m/s」を横流入量として設定した。また、下流水位はH.H.W.L.+3.60mを初期水位として設定

した。開水路は、親水護岸としての利用を考慮して設定した海側へアクセスするスロープの設置間隔を水路長として設定し、標準部、スロープ部、開口部の各断面幅を考慮して計算モデルを設定した(図-8)。

表-3 計算条件一覧

項目	計算条件
計算格子間隔	$\Delta X=1\text{m}$
計算時間	2400s
時間間隔	$\Delta t=0.02\text{s}$
境界条件	水路全長: 横流入量(越波流量) $0.086\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ 下流水位: 初期水位 H. H. W. L. +3.60m
粗度係数	$n=0.015$ (場所打ちコンクリートの標準値)
その他	越波流量は時間空間的に変化しない

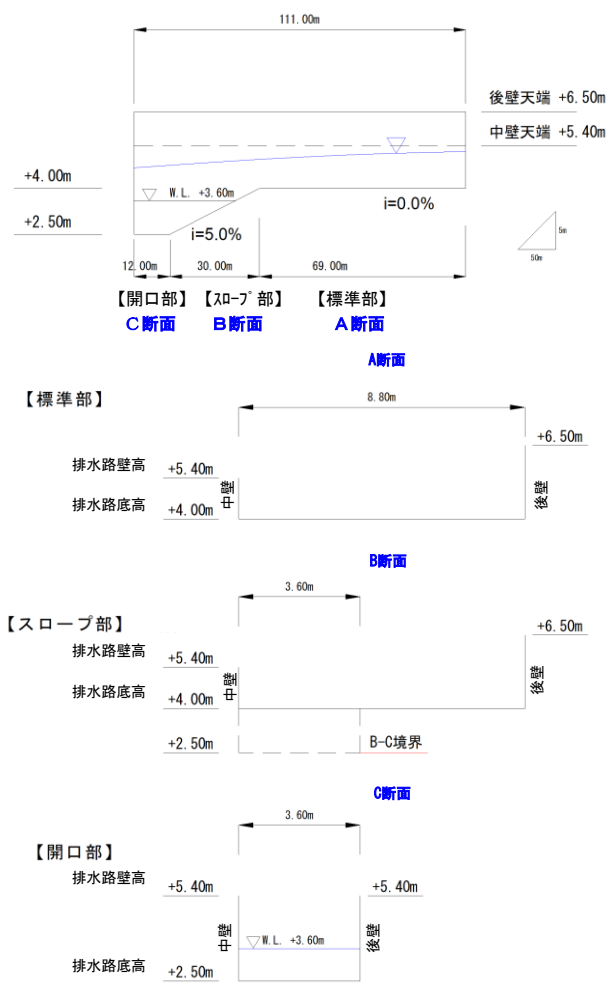


図-8 越波排水路計算モデル

越波排水路の水位計算結果を図-9に示す。上段から排水路内の水位、水深、流量および流速の縦断図を示している。越波排水路内(中壁後壁間)の最大水位は+4.5m(水深0.5m)となり、中壁・後壁の天端高(+5.4mおよび+6.5m)を超えない結果となった。これらより、中壁後壁間に湛水する越波はスロープ開口部からの排水によって排水されることを確認した。

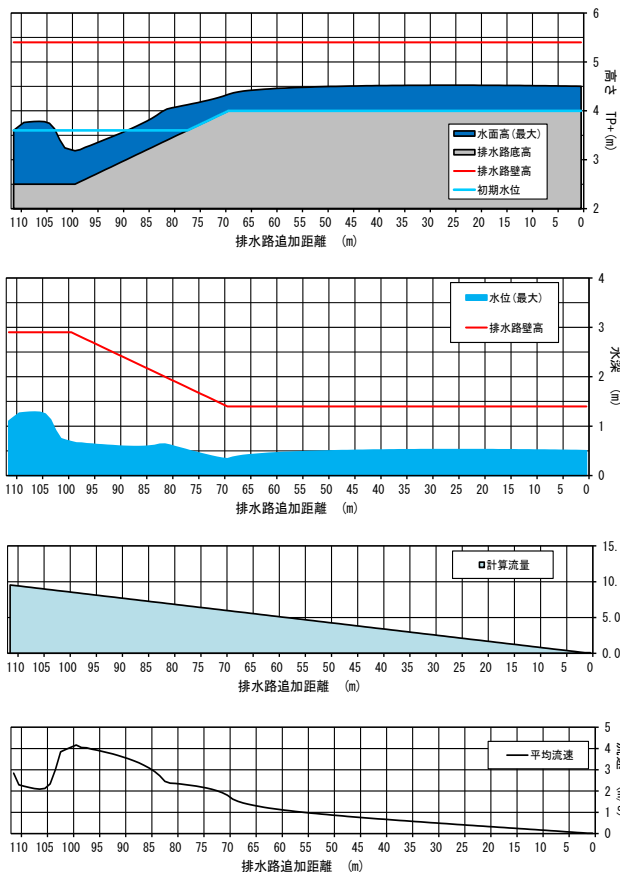


図-9 越波排水路内の計算結果

(3) 越波排水路内の水位を考慮した護岸越波流量の算定中壁後壁間の水位(越波排水路の排水位)が+4.5mとなった場合の越波流量について図-10に示すような計算モデルを作成し、後壁背後への越波流量が許容越波流量  $0.01\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$  を満足するかを確認した。中壁後壁間の水位を不定流解析で求めた越波排水路内の水位にするため、中壁背後の排水穴背後に便宜的に“とめ壁”を設け、“とめ壁”天端を+4.5m とすることで中壁後壁間の水位が一定となるように工夫した。数値シミュレーションの計算条件は、表-2に示す計算条件と同じとした。

計算の結果、後壁背後(越波柵2)への越波流量は「 $0.0090\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ 」となり、許容越波流量「 $0.01\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ 」を満足する結果となった。

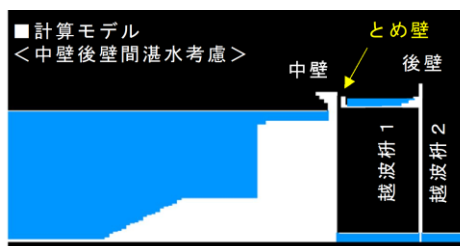


図-10 計算モデル(中壁後壁間水位考慮)

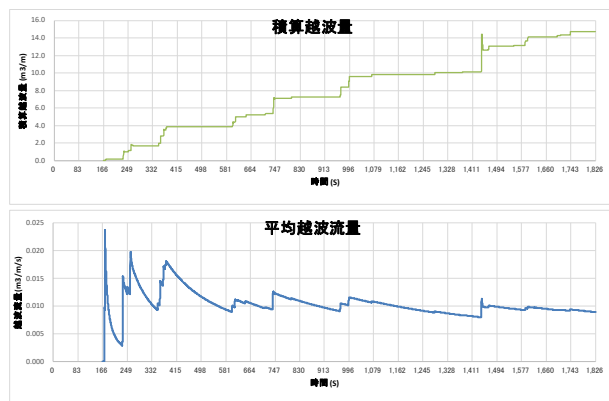
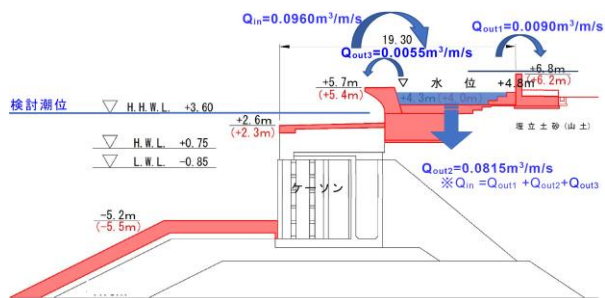


図-1.1 越波流量計算結果

- 3) (財) 沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，沿岸技術ライブラリーNo.30, 306p, 2008
- 4) 土木学会編：水理公式集 [平成 11 年版]，pp.92-98, 丸善株式会社, 1999
- 5) 殿最浩司, 井上雅夫, 目見田哲, 玉田崇：越波排水路の排水能力の評価法について，海岸工学論文集，第 49 巻, pp651~655, 2003

#### 4. まとめ

対象護岸のような複雑な断面形状において、CADMAS-SURF を用いることで越波流量を算定し、護岸の天端高について検討することができた。また、護岸横断方向の越波流量計算と護岸縦断方向の越波排水路水位計算を相互に評価することにより、越波流量の適切な評価を行うことができた。

なお、対象護岸の高潮対策工事は令和元年より着工し、令和3年に完成している。

#### あとがき

今後、気候変動による海面上昇等に伴い、高潮・高波による浸水リスクも上昇するものと考えられる。一方、周辺状況等の制約によって護岸の嵩上げ対策が複雑な構造となり、既往の設計手法の適用が困難となることが想定される。そうした場合に、本論文に記した検討事例が護岸の高潮対策検討の一助となれば幸いである。

#### 参考文献 (または引用文献)

- 1) 合田良実, 岸良安治, 神山 豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 4 号, pp.3~44, 1975.
- 2) (財) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 457p, 2001