

宮崎県細島港における防波堤の耐津波対策と水理模型実験による検証

パシフィックコンサルタンツ(株)大阪本社 ○ 諸 澤 朱 里
パシフィックコンサルタンツ(株)大阪本社 辻 尾 大 樹
パシフィックコンサルタンツ(株)大阪本社 熊 谷 健 蔵

論文要旨

東日本大震災を契機として、港湾の防護施設、特に防波堤の津波対策の重要性が認識されている。大規模な津波が発生するポテンシャルを有している、宮崎県の重要港湾・細島港においても例外ではない。本研究は、細島港の防波堤を対象に、設計津波および最大クラスの津波に対して耐津波対策を検討し、水理模型実験を実施して、粘り強い構造化を図ることを目的としている。本研究では、津波シミュレーションによる最大流速を用いたイスパッシュ式での必要質量は、マウンド勾配を考慮すると著しく大きくなり、勾配を考慮しない場合に水理模型実験結果と概ね整合した。水理模型実験結果からアスファルトマットによるブロックの安定性向上の効果を確認した。被覆ブロック質量とマット有無等の対策の組合せから、当該防波堤の最適な対策案を選定した。

キーワード：津波、防波堤、水理模型実験、被覆ブロック、粘り強い構造

まえがき

2011年の東日本大震災では、東北地方太平洋沖地震で発生した津波の来襲によって、多くの人命や資産が失われた。東北地方の太平洋岸の数100kmに渡る範囲で港湾施設や海岸施設等の防護施設も大きな被害を受けた。特に、湾口防波堤(釜石港、大船渡港など)や第一線防波堤(八戸港や女川港など)が、津波の来襲によって滑動や転倒、倒壊する被害を被った。防波堤の被災メカニズムとしては、津波波圧によるもの、津波の越流による背後マウンド洗掘に起因するケーソンの支持力喪失、内外水位差によるケーソンの不安定化などが指摘されている。

一方、東北地方以外の臨海部でも津波による被害が懸念されている。特に、東海・東南海・南海地震、南海トラフ巨大地震、日向灘地震等、西日本の太平洋岸の沿岸部でも津波リスクが高まっている。宮崎県においても例外ではなく、南海トラフや日向灘等、大規模な津波が発生するポテンシャルを有している。宮崎県の北部に位置する重要港湾である細島港(図1参照)においても災害時における港湾機能を維持するために、防波堤の津波対策が求められている。特に細島港は、沿岸部に物流・海運会社等の民間企業の建物や倉庫が張り付いており、九州東岸の物流拠点であるため、臨災時あるいは事後の物流機能維持の観点から非常に重要な港湾施設である。

また、東日本大震災による被害を受けて、国土交通省は「防波堤の耐津波設計ガイドライン¹⁾(以下、ガイドライン)に防波堤の津波対策の設計方針を示している。ガイド

ライン²⁾中には、粘り強い構造検討に関して、静的な安定計算に加えて、水理模型実験や解析技術を駆使することが推奨されている。津波に対する粘り強い防波堤の水理模型実験として、辻尾ら³⁾は、ケーソン背後に方塊ブロックや腹付マウンドを設置したケースで水理模型実験を実施している。また、有川ら⁴⁾は、腹付工による津波越流時に生じる基礎地盤、捨石部の洗掘対策を検証している。三井ら⁵⁾は被覆材の安定性照査手法の検証を試みている。

本研究は、宮崎県北部に位置する細島港において、港外に位置する2つの防波堤(北沖防波堤、余島防波堤)を対象に、設計津波および最大クラスの津波に対して耐津波対策を検討し、水理模型実験を実施して、粘り強い構造化を図ることを目的としている。

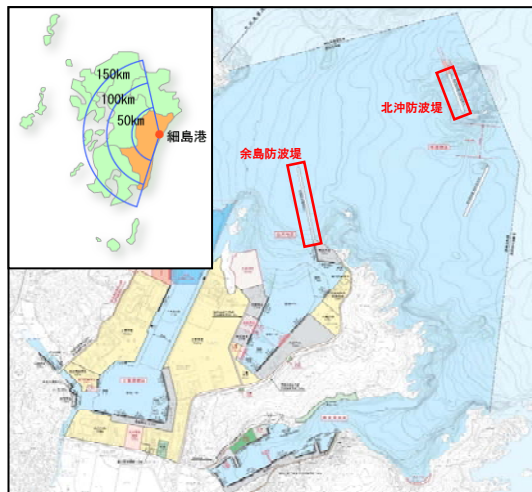


図1 細島港位置図

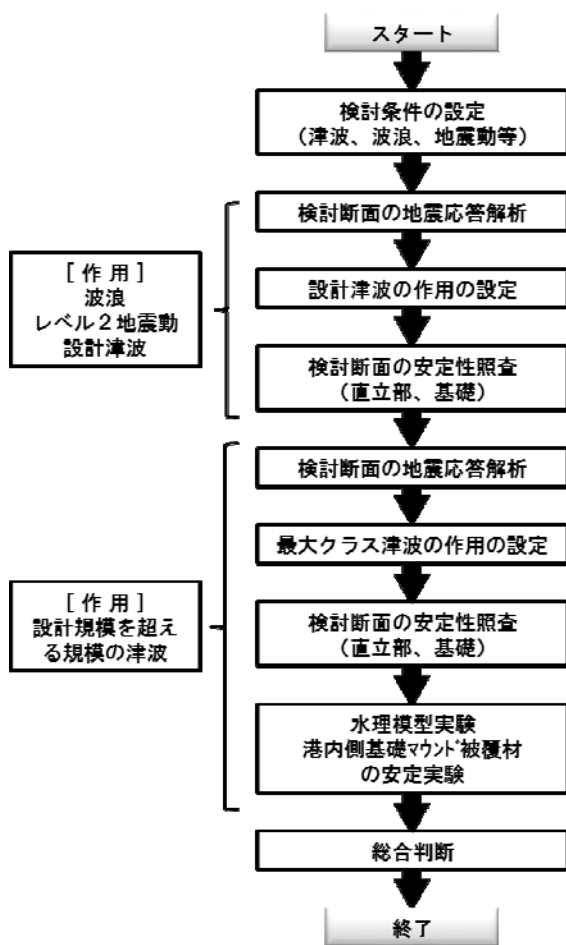


図 2 検討フロー

1. 検討手法

本研究において、基本的にはガイドライン¹⁾での設計フローに従って、防波堤の耐津波対策を検討した。しかし、本施設は既設の防波堤であるため、ガイドライン¹⁾の設計フローを少し変更して、図 2 に示す検討フローで耐津波対策を進めた。なお、本防波堤は、当初、高潮時の波浪に対して安定性を満足するように設計されており、津波は設計対象とされていなかった。

まず、検討対象となる津波、波浪、地震動等の条件を設定する。津波は2種類設定し、発生頻度の高い津波(設計津波、L1 津波)と設計規模を超える規模の津波として、最大クラスの津波(L2 津波)とした。地震動に関しては、それぞれの津波に先行する地震動とした。また波浪は設計当初から沖波条件が見直されているため、最新の設計波で新たに波浪条件を設定した。

次に、既存の検討断面に対して、L1 津波に先行する地震動を用いて、地震応答解析を実施して津波来襲時の沈下量を算定した。また、設定した L1 津波条件から津

波シミュレーションを実施して、防波堤地点での津波計算結果を抽出して、設計条件を設定した。これらの設計条件に基づいて、直立部および基礎の安定性照査を実施し、必要に応じて対策断面を検討する。本設計条件では、安定性を満足していたため、現況断面を対象に、次の L2 津波に対する検討を実施した。

次に、L2 津波に対する検討として、L1 津波時と以上に、地震応答解析および津波シミュレーションを実施して、設定した設計条件に基づいて、直立部および基礎の安定性照査を実施した。本研究では、基礎の安定性で対策が必要となったため、水理模型実験を実施して、港内側マウンドの被覆材の安定性実験を実施して、L2 津波に対する粘り強さを検証した。最終的には安定性を満足する対策断面の中から施工性や経済性等を総合的に判断して、最適な対策案を決定した。

2. 津波シミュレーション

(1) 計算条件

図 2 の検討フローに従って、設計条件を設定するために、外力となる津波条件を設定する必要がある。既往検討では、詳細な構造物データを設定されていなかったため、本研究で津波シミュレーションを実施し、構造物地点での津波条件を設定した。対象とした L1 津波は、東南海・南海連動型地震(2003 年中央防災会議モデル⁵⁾)である。L2 津波は、南海トラフ巨大地震(内閣府⁶⁾)と宮崎県独自モデル⁷⁾を比較して、対象地点での最高津波水位が大きい南海トラフ巨大地震を採用した。計算条件は表 1 に示す通りであり、地形条件として、北沖防波堤の延長が現況の場合と計画まで延伸した場合の2ケースを実施した。

表 1 津波シミュレーションの計算条件

項目	設定値
計算モデル	非線形長波方程式(平面二次元非定常モデル)
地形データ	中央防災会議データを更新
格子幅	2730 m→810 m→270 m→90 m→30 m→10 m の 6 段階のネスティング
波源モデル	L1: 東南海・南海連動型地震 ⁵⁾ L2: 南海トラフ巨大地震 ⁶⁾
潮位条件	H.W.L. T.P. + 1.15 m (=D.L. + 2.30 m)
計算時間	6 時間

(2) 計算結果

計算結果として、細島港周辺の L1 津波の最大水位と最大流速を図 3, L2 津波の最大水位と最大流速を図 4 に示す。なお、北沖防波堤の現況天端高は、D.L.+9.0m であり、一方の余島防波堤の現況天端高は、D.L.+7.0~8.0m である。

図 3, 図 4 の最大津波水位の計算結果は、TP基準であることに留意する必要がある。図 3, 図 4 に示すように、北沖防波堤及び余島防波堤の L1 及び L2 津波時の最大津波水位は、それぞれ D.L.+4.0m, +10m 程度であった。L1 津波時には、両防波堤とも、津波高が天端高を上回ることなく、越流は発生しない。しかし、L2 津波時には両防波堤とも数 m 規模で越流が発生し、特に余島防波堤では越流深が大きいことがわかった。また、津波来襲時には、津波に先行する地震動によって構造物が沈下している可能性があり、越流深はさらに大きくなるのが想定される。

一方、津波流速に関して、北沖防波堤及び余島防波堤周辺での L1 及び L2 津波時の最大流速は、それぞれ約 5 m/s, 7 m/s 程度であった。これらの津波条件を用いて、安定性照査を実施した。

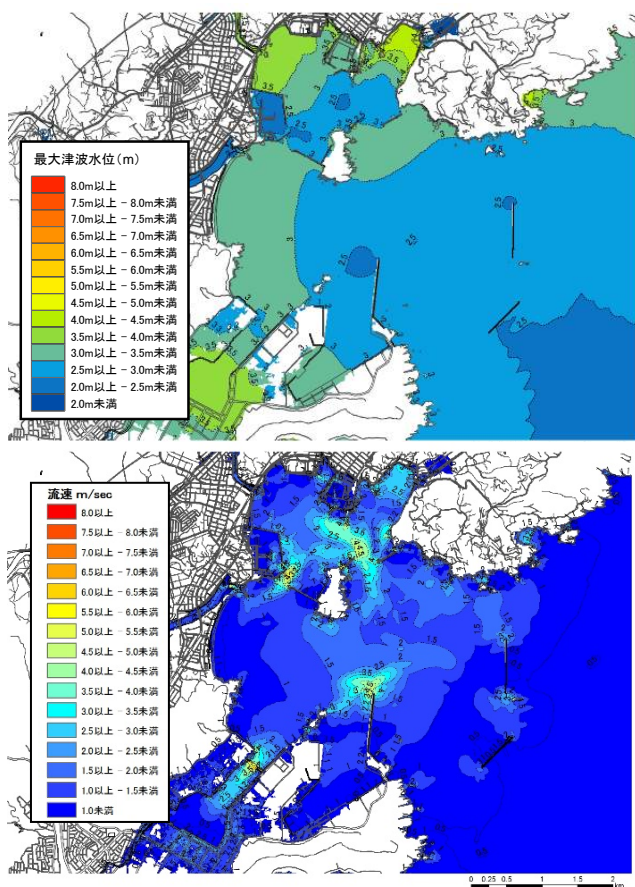


図 3 L1 津波の最大水位(上)と最大流速(下)

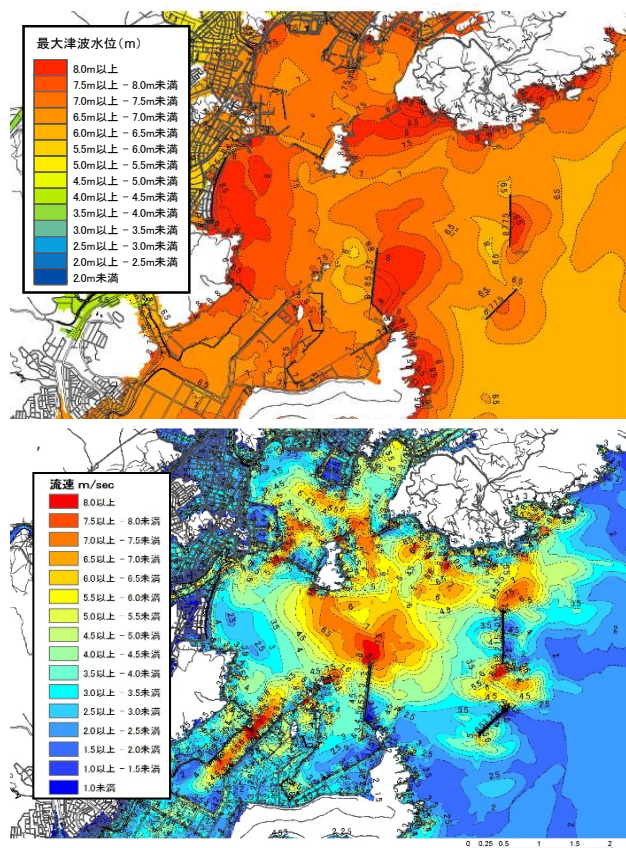


図 4 L2 津波の最大水位(上)と最大流速(下)

3. 沈下量解析

(1) 計算条件

本研究では、2次元地震応答解析 FLIP⁸⁾ (Finite Element Analysis Program for Liquefaction Process) を用いて、L1・L2 津波に先行する地震動に対する沈下量を算定した。解析対象の断面は、代表断面として北沖防波堤から2断面、余島防波堤から2断面を選定した。入力地震動は、L1 津波に先行する地震は、中央防災会議 2003 年モデルの工学的基盤での地震動とし、L2 津波に先行する地震は、細島港を対象にして野津ら⁹⁾の手法で作成された南海トラフ巨大地震の工学的基盤での地震動を用いた。

(2) 計算結果

計算結果の例として、L1 津波及び L2 津波先行地震に対する余島防波堤の区間 2 の残留変位図を図 5 に示す。図 5 では、L1 津波先行地震時:0.11m, L2 津波先行地震時:1.75m の残留沈下量であり、同一地盤であっても L1 津波時と L2 津波時で沈下量が大きく異なることがわかる。次に、石原・吉嶺¹⁰⁾が提案した体積ひずみと最大せん断ひずみの関係図を用いて、排水沈下量を算出した。L1 津波及び L2 津波発生時の初期地盤沈降と FLIP による残留沈下量、排水沈下量を併せて合計沈下量として求め、表 2 に示す。L1

津波時には、北沖防波堤、余島防波堤の合計沈下量は0.16m～0.29m程度と比較的小さかった。一方、L2津波時には、北沖防波堤、余島防波堤の合計沈下量は0.87m～2.7mとなり、直下地盤等の条件によって沈下量が大きく異なることから、安定性照査に適切に反映する必要があるとわかった。

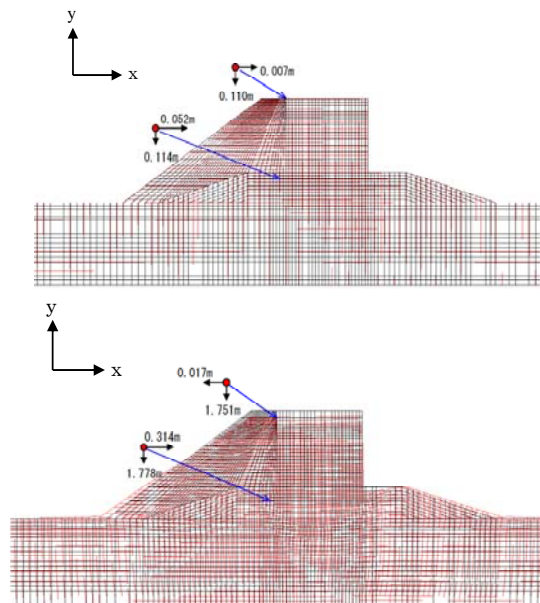


図5 余島防波堤の残留変位(上: L1津波, 下: L2津波)

表2 沈下量解析結果

津波	防波堤	余島防波堤		北沖防波堤	
	区間	1	2	1	2
L1 津波	地盤沈降量	0.15 m	0.15 m	0.16 m	0.16 m
	残留沈下量	0.14 m	0.11 m	0.00 m	0.00 m
	排水沈下量	0.01 m	0.01 m	0.00 m	0.00 m
	合計沈下量	0.29 m	0.27 m	0.16 m	0.16 m
L2 津波	地盤沈降量	0.83 m	0.83 m	0.84 m	0.84 m
	残留沈下量	0.88 m	1.75 m	0.15 m	0.02 m
	排水沈下量	0.07 m	0.11 m	0.00 m	0.01 m
	合計沈下量	1.75 m	2.69 m	0.99 m	0.87 m

4. 安定性照査

(1) 堤体部の安定性照査

次に、設定した津波条件に基づいて、防波堤の沈下量を考慮して、津波波圧作用時の堤体の安定性を照査した。津波波圧の算出式は、ガイドライン¹⁾に従い、越流が発生しない条件では谷本式、越流後は静水圧差式を適用した。越流が発生するL2津波時には、港外側水位最大時に加えて、水位差最大時、越流直前時、越流直後の4パターンで安定性を照査した。沈下量は簡単のため、海底地盤及びマウンド、堤体の施設全体が前章で算出した合計沈下量分、全体的に沈下する仮定した。

安定性照査の結果のまとめを表3に示す。北沖、余島防波堤とも、L1及びL2津波による波圧作用に対して、滑動の耐力作用比1.6～12と十分に安定するとわかった。

表3 堤体の安定性照査結果

津波	防波堤	余島防波堤		北沖防波堤	
	区間	1	2	1	2
L1 津波	水位最大	○	○	○	○
L2 津波	水位最大	○	○	○	○
	水位差最大	○	○	○	○
	越流直前	○	○	○	○
	越流直後	○	○	○	○

表4 港内側マウンド被覆材の安定性照査結果

防波堤	余島防波堤 現況: 2t		北沖防波堤 現況: 1t~75t	
	現況	将来	現況	将来
L1 津波流速 (勾配有) (勾配無)	4.75m/s	4.68m/s	2.21m/s	0.70m/s
	2.43t: NG	2.23t: NG	0.07t: OK	0.00t: OK
	0.62t: OK	0.56t: OK	0.01t: OK	0.00t: OK
L2 津波流速 (勾配有) (勾配無)	7.24m/s	7.24m/s	8.08 m/s	4.66m/s
	30.5t: NG	30.5t: NG	167t: NG	3.67t: NG
	7.72t: NG	7.72t: NG	14.9t: OK	0.33t: OK

(2) 基礎の安定性照査

次に、ガイドライン¹⁾に従い、港内側のマウンド被覆材の安定性を照査する。基礎に作用する津波は、大きく、越流後の流れと法線平行方向への流れの2種類ある。前者は水理模型実験で安定性を確認し、後者はL1津波及びL2津波のシミュレーションで算出された最大水平流速を用いて、イスバッシュ式¹⁰⁾で評価した。イスバッシュ式には、斜面勾配のパラメーターがあり、マウンドの勾配を考慮した場合と考慮しない場合の2通りの必要質量を算出した。なお、イスバッシュ数は1.08を用いた。

基礎の安定性照査の結果のまとめを表4に示す。マウンドの勾配を考慮しない場合には8tブロック、考慮した場合には30t～170tが必要となり、津波対策が必要であることがわかった。なお、対策は水理模型実験によってその有効性を確認することとした。

5. 水理模型実験

(1) 実験条件

越流時の被覆材の安定性を確認するために、水理模型実験を実施した。実験は、1/50スケールで長水路(長さ20m, 幅0.6m, 高さ0.7m)を用いて、水路の両端に設置したポンプで循環流を発生させ、L2津波時の港内外水位(例: 余島防波堤・区間2はD.L.+10.32m)を再現した。なお、実験においても3章で算出した津波来襲時の総沈下量を考慮して、海底地盤、マウンド、堤体等、構造物全体を沈下させてモデル化を実施した。

まず、現況断面の被覆材を設置して、安定性を確認し、安定性が確保できない場合には、被覆ブロックの質量増加やブロック直下にアスファルト(As)マット(Asマットを5mm厚程度で製作)を設置したケースを実施し、被覆

ブロックの安定性向上の有無を確認した。実験ケースの一覧は表 5 に示す通りである。また、断面方向(法線直角方向)に越流する状況の実験に加え、法線平行方向へ津波流速を作用させた安定性実験も実施した。

表 5 実験ケース一覧および結果

対象施設	構造物/対策工	結果
北沖防波堤 区間 1	・現況(被覆石 1t)	安定
北沖防波堤 区間 2	・現況(被覆石 1t)	安定
余島防波堤 区間 1	・現況(被覆石 2t) ・8t ブロック ・16t ブロック/+As マット	崩壊 崩壊 安定/安定
余島防波堤 区間 2	・現況(被覆石 2t) ・2t ブロック/+As マット ・4t ブロック/+As マット ・8t ブロック/+As マット ・16t ブロック/+As マット	崩壊 崩壊/崩壊 崩壊/安定 安定/安定 安定/安定

(2) 実験結果

実験状況の例として、図 6 および図 7 に越流状況の図を示す。図 6 余島防波堤・区間 2 における現況の 2t 被覆石、図 7 は対策として 8t ブロックを設置したケースである。図 6 の現況では、越流後の津波流速によって渦状の流れが発生し、被覆石(図中の白色)及び基礎マウンドが流失していることがわかる。一方、図 7 の被覆石の上に 8t ブロックを設置したケースでは、法尻部で一部流失しているが、法肩および法面で被覆材が安定していることがわかる。その他の実験結果は、表 5 に示しているが、余島防波堤・区間 2 において、4t ブロックのみのケースでは、被覆材は崩壊したが、4t ブロック+As マットのケースでは、被覆材は安定していることがわかった。これは、As マットによって被覆材の摩擦が増大したことや浸透力が軽減されたことに起因すると推察される。

また、法線平行方向の津波に対する実験では、余島防波堤の区間 2 以外では、現況被覆材で安定する結果となり、表 4 の勾配無の計算結果と整合する結果となった。



図 6 実験状況(現況 - 2t 石)



図 7 実験状況図(対策-8t ブロック)

(3) 対策案の決定

余島防波堤・区間 2 に関して、上記の通り、4t ブロックのみでは不安定、4t ブロック+As マットでは安定であった。また 1 ランク上のブロックの 8t ブロックでも安定であることがわかった。そのため、図 8 に示す 2 つの断面に対して、総合的に比較して、対策案を決定した。図 8 上段 4t ブロック+As マット案は、約 70 万円/m、図 8 下段の 8t ブロック案は、約 50 万円/m となり、その他、施工性等も考慮して、8t ブロック設置案を最適対策案と決定した。

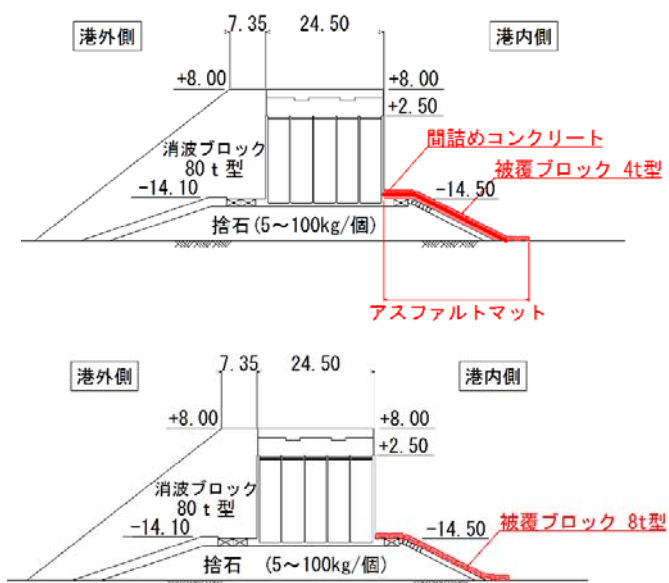


図 8 余島防波堤・区間 2 の対策案断面図

(上: 4t ブロック+As マット設置案、下: 8t ブロック設置案)

6. おわりに

本研究では、細島港港外の北沖・余島防波堤に対して、L1 及び L2 津波に対して、港内側マウンドに被覆ブロックを設置してマウンド補強による粘り強い構造断面を検討した。主要な知見は以下の通りである。

- 1) 本研究では、津波シミュレーションによる最大流速を用いたイスバッシュ式での必要質量は、マウンド

- 勾配を考慮すると、著しく大きくなり、勾配を考慮しない場合、水理模型実験結果と概ね整合した。
- 2) 水理模型実験結果からAsマットによるブロックの安定性向上の効果を確認した。
 - 3) 水理模型実験によって安定性を確認した i) 被覆ブロック 4t+As マット案, ii) 被覆ブロック 8t 案の2案から、経済比較等によって ii) 8t ブロック案を最適な対策案とした。

本研究では、As マットを使用した方が、不経済となったが、津波条件や断面によっては、経済的に優位となる場合もある。さらに、法尻までAs マットを設置することで、海底地盤の洗掘の可能性を低減することができる。そのため、防波堤の津波に対する粘り強い構造化対策は検討対象の条件を考慮して、最適な対策を決定する必要がある。また、海底地盤の洗掘に関しては、水理模型実験を実施することが望ましいが、CADMAS-SURF や粒子法等を用いた洗掘を考慮した数値解析¹²⁾を併用して洗掘過程を検証する必要があると考える。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン、平成27年12月 一部改訂、2015。
- 2) 辻尾大樹、安田誠宏、間瀬肇、森信人、前田恭兵、山口佑太：設定を超える津波に対するケーソン防波堤の補強効果に関する実験的研究、土木学会論文集 B3(海洋開発) Vol.68, pp.I_473-I_478, 2013。
- 3) 有川太郎、佐藤昌治、下迫健一郎、富田孝文、廉慶善、丹羽竜也：津波越流時における混成堤の被災メカニズムと腹付工の効果、港湾技術研究所資料、No.1269, 2013。
- 4) 三井順、松本朗、半沢稔：イスバッシュ式の導出過程と防波堤を越流する津波への適用性、土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No. 2, p. I_1063-I_1068, 2015。
- 5) 中央防災会議：東南海、南海地震の被害想定について、東南海、南海地震等に関する専門調査会(第14回)、資料2, pp. 38-40,
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/14/>参照 2011-11-23。
- 6) 内閣府：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)(オンライン),
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2012082_9_2nd_report01.pdf, 参照 2013-12-19。
- 7) 宮崎県：県における南海トラフ巨大地震等に伴う被害想定について,
http://www.pref.miyazaki.lg.jp/kiki-kikikanri/kurashi/bosai/documents/4579_20160423041700-1.pdf, 参照 2017-05-01。
- 8) FLIP 研究会：FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ, <http://www.flip.or.jp/file/jirei.pdf>, 参照 2017-05-01。
- 9) 野津厚, 若井淳, 長坂陽介:SPGA モデルによる歴史地震の震度分布の再現—その手順の一例—, 港湾空港技術研究所資料, No.1290, 2014。
- 10) 石原研而, 吉嶺充俊：地震時の液状化に伴う砂地盤の沈下量予測, 第26回土質工学研究発表会, 1991。
- 11) Coastal Engineering Research Center : Shore Protection Manual, U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Govt. Print-ing Office, Vol. II, pp. 7_213-7_216, 1977。
- 12) 大久保陽介, 熊谷健蔵, 辻尾大樹, 永澤豪, 加藤史訓：津波越流時における海岸堤防の洗掘に関する数値解析モデルの構築, 土木学会論文集 B2(海岸工学) 70(2), I_991-I_995, 2014。

あ と が き

本研究を進めるにあたり、宮崎県土整備部の田上剛氏、疋田大輔氏、宮崎大学工学教育研究部の村上啓介教授にご協力頂いた。ここに、謝意を表します。