

和歌山下津港・日高港の防波堤における耐津波構造検討について

恵良 拓路*・福間 正**・三村 正樹***・細見 知一****・佐藤 広章*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 国土交通省 近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 工務課 課長

****前 国土交通省 近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 工務課 係長

***** (株)ニュージェック 港湾・海岸グループ 海岸・海洋チーム マネジャー

和歌山下津港及び日高港を対象として、発生頻度の高い地震・津波に対して、海上輸送ネットワークの核となる施設における耐震性及び耐津波性の向上の視点から、防波堤の耐津波対策の構造検討を行った。

キーワード：FLIP, 防波堤, 津波対策, 浮力変化

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に太平洋三陸沖を震源として発生した巨大津波によって、我が国の港湾施設は大きな被害を受けた。防波堤も例外ではなく、洗掘による滑動・転倒被害等が数多く報告されている¹⁾²⁾³⁾。これを教訓に、国土交通省は「防波堤の耐津波設計ガイドライン⁴⁾」を作成し、津波に対する防波堤対策を講じる上での共通指針を公表した。これまでの津波に対する防波堤の安定性照査は、防波堤前面の津波水位から堤体に作用する水平力を算出し、滑動、転倒、支持力においてこれに抵抗しうる断面であるか否かを照査するのみであった。今後はこれに加え、防波堤前背面の津波の水位差や流速——特に防波堤を越流した津波水塊が防波堤背後に落下することによってマウンド付近で生じる鉛直方向の流速——にも着目した防波堤の安定性照査が求められる。こうした津波に対する防波堤の安定性照査手法の多様化に伴い、既設防波堤に対する耐津波構造検討の見直しの重要性が高まっている。

本検討の対象地域である和歌山下津港と日高港は、いずれも紀伊水道沿岸に位置しており(図-1)、過去に南海トラフを震源とする巨大地震・津波による被害を受けてきた。これまで、南海トラフを震源とする地震・津波はおよそ 100 年～150 年の周期で発生しており、昭和東南海地震(1944 年)、昭和南海地震(1946 年)からおよそ 70 年が経過した今、次の大地震の可能性が高まってきている(図-2)。

本稿は、和歌山下津港(本港地区と北港地区)(図-3)及び日高港(塩屋地区)(図-4)の第一線防波堤を対象に、津波に対する安定性照査を行い、「粘り強い構造」を前提とした耐津波対策断面の基本設計を行ったものである。



図-1 検討対象位置

2. 設計条件

2.1 対象施設

表-1 に本検討における対象施設一覧を示す。いずれも各港における第一線防波堤であるが、いわゆる津波防波堤ではないため、波浪によって構造諸元が決定されている。

表-1 対象施設一覧

港湾	防波堤名称	延長	構造形式
和歌山下津港 北港地区	北防波堤	193m	混成堤
	防波堤(南)	1000m	直立消波ケーソン堤
和歌山下津港 本港地区	防波堤(外)①	2295m	消波ブロック被覆堤
	防波堤(外)②	1250m	消波ブロック被覆堤
日高港	防波堤(西)	600m	上部パイラー式

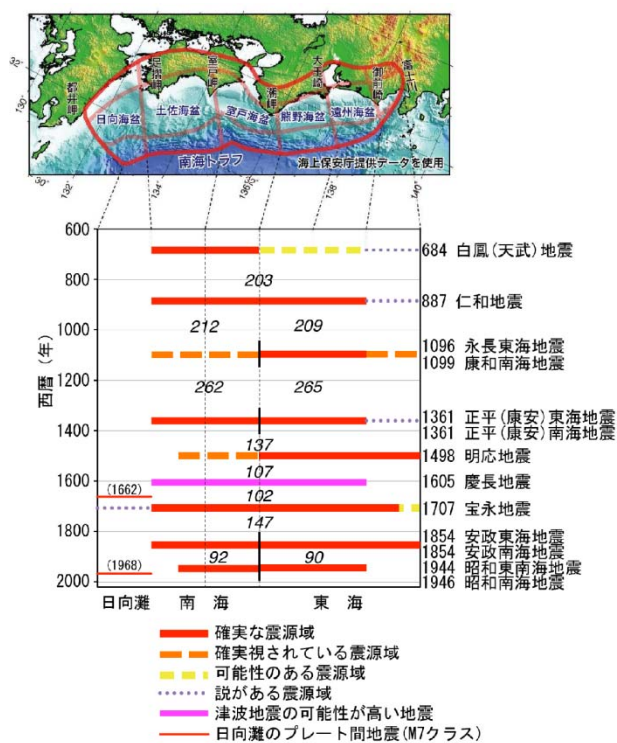


図-2 南海トラフで過去に起きた大地震の震源域の時空間分布⁵⁾



図-3 和歌山下津港の防波堤配置
※黄色表示が本検討の対象断面



図-4 日高港の防波堤配置
※黄色表示が本検討の対象断面

2.2 設計条件及び要求性能

表-2 に検討に際し整理した諸条件一覧を示す。津波条件として過年度検討資料より防波堤前面と背面の水位・流速の時刻歴データを用いた。地震動も過年度の検討資料を参照し、対象位置での NS・EW 方向の 2 成分波を抽出した。地震動の角度補正は、最大速度値が最も大きくなる防波堤法線角度を推定することで行った。なお、本検討の対象津波は「発生頻度の高い津波」であったため、和歌山県地域防災計画に採用されている平成 15 年度中央防災会議策定 3 連動モデル（東海+東南海+南海地震津波）を採用した。

表-2 検討条件一覧

設計項目	設定値
潮位	L. W. L. = D. L. + 0.1m H. W. L. = D. L. + 1.9m H. H. W. L. = D. L. + 3.6m
津波条件 (波源)	H15 中防 3 連動モデル (和歌山県地域防災計画)
津波格子データ	最小 10m (世界測地系第 6 系)
入力地震動	同上 (角度補正あり)
地震応答解析	FLIP (ver. 7.2.3.4)
要求性能	使用性 ・滑動 (1.2) 転倒 (1.2) 支持力 (1.0) に対する安定性の確保・沈下後天端高 $\geq$ 現況天端高の確保・被覆材の必要重量確保 ※0内は構造解析係数 γ_a

3. 地震応答解析

3.1 解析条件

設計に先立ち、二次元地震応答解析を実施し、津波に先行する地震によって生じる沈下量を算定した。入力地震動は南海トラフ 3 連動モデルであり、解析コードには FLIP を用いた。FLIP による動的解析及び設計における静的安定照査に必要な地盤定数については、対象施設近傍でのボーリングデータ及び土質試験データをもとに適宜設定した。表-3 に FLIP に用いる解析条件一覧を示す。なお、防波堤の FLIP 解析においては、構成則に従来モデル、非線形反復計算法に従来法を採用するのが一般的であり、本検討においてもこれを踏襲した。

表-3 FLIP 解析条件一覧

項目	適用した条件
過剰間隙水圧モデル	従来モデル
線形反復計算法	従来法
初期応力状態の評価法	初期自重解析 4 段階
時間積分手法	Wilson θ 法 ($\theta=1.4$)
時間積分間隔	0.001 秒 (置換砂床掘部のみ 0.0001 秒)
要素積分手法	SRI 法: 偏差成分 2 次 平均成分 1 次
レーレー減衰行列	質量行列比例係数 $\alpha=0.0$ 剛性行列比例係数 $\beta=0.03$
側方境界	粘性境界+反力境界
底面境界	粘性境界
バージョン	7.2.3.4

3.2 地震時沈下量の算定

(1) 浮力バネモデル

防波堤は地震動の作用により沈下する。沈下に伴い浮力が増大し、堤体が見かけ上軽くなり、防波堤の設置圧が小さくなることから、沈下が抑止されると考えられる。したがって、従来のFLIPモデルに浮力の変化を考慮し、より実現象に沿った地震応答解析を実施し、適切に沈下量を算定することが重要である。本検討では、沈下の進行に応じた浮力の変化を考慮可能な防波堤の解析モデルとして、以下の手法を採用した。

沈下に応じて増加する浮力は、防波堤に鉛直軸方向非線形バネ（以下「浮力バネ」と略記）を配することでモデル化する（図-5）。浮力バネの非線形特性は、浮力バネ係数を式(1)のように与え、沈下方向の変曲点変位は海面から天端までの距離として、防波堤が完全に水没した後は一定の浮力が作用するように配慮する。

$$\text{浮力バネ係数} = \text{浮力バネの負担幅(m)} \times \text{奥行き(m)} \times \text{水の単位体積重量(kN/m}^3\text{)} \quad (1)$$

この手法は、大きな沈下が生じる（初期状態とは大きく異なる浮力が作用する）場合に特に有効な手段である⁶⁾。

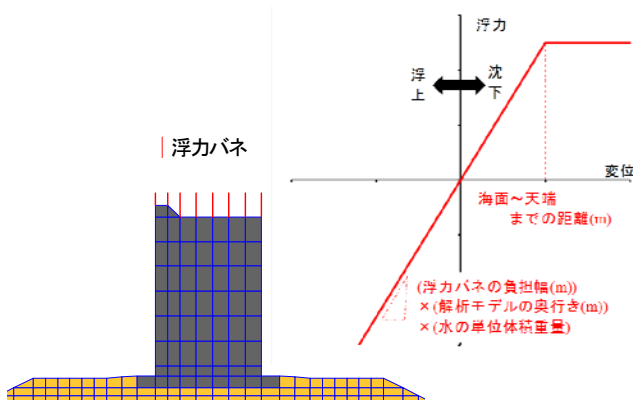


図-5 浮力バネのモデル化

(2) 沈下量の算定

防波堤の沈下量は、FLIPで計算される残留鉛直変位量と排水沈下量（液状化土層の過剰間隙水圧の消散に伴って発生する二次的な沈下量のこと）及び広域地殻変動量の和によって算出される。表-4に沈下量の算定結果を示す。なお、これらはいずれも現況断面に対する地震時の沈下量である。また、図-6にFLIP解析結果の一例として、防波堤（外）②床掘部に対する残留変形図及び過剰間隙水圧比図を示す。

堤体直下をSCP改良している防波堤（南）や防波堤（外）②SCP部では沈下が小さく、逆に堤体直下が未改良の北防波堤や床掘置換砂構造の防波堤（外）②床掘部では沈下が大きくなる傾向にあることが確認された。総沈下量は約0.5m～1.5mであり、対象断面のうちの3断面で津波が防波堤を越流する結果となった。

表-4 防波堤沈下量算定結果（現況断面）

防波堤	沈下量(m)	広域地殻変動量(m)	沈下後の天端高(DL)	津波水位(DL)
北防波堤	1.10 0.09	0.19	4.02	4.76
防波堤（南）	0.42 0.02	0.19	5.87	4.28
防波堤（外）① SD部	0.70 0.07	0.21	4.02	4.48
防波堤（外）① 床掘部	0.54 0.03	0.21	4.22	4.41
防波堤（外）② SCP部	0.35 0.02	0.20	5.95	4.04
防波堤（外）② 床掘部	0.67 0.03	0.20	6.10	4.41
防波堤（西）	0.44 0.07	0.44	7.05	6.18

※沈下量の上段は残留鉛直変位、下段は排水沈下量
赤字…防波堤越流水位

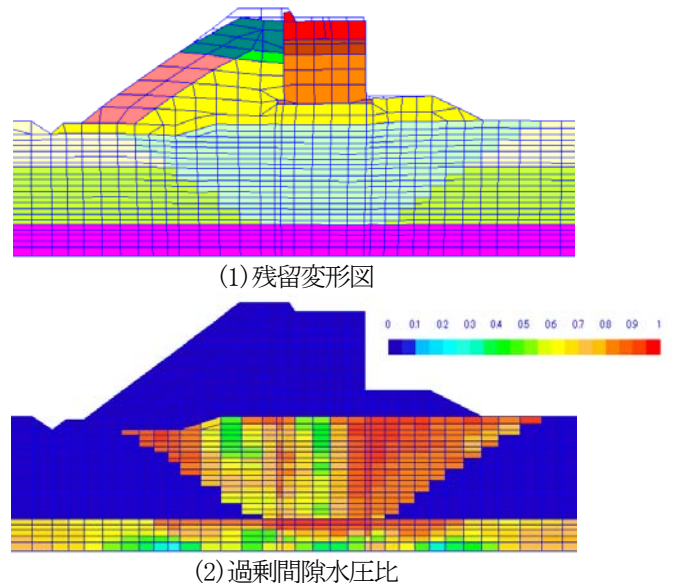


図-6 FLIP 解析例（防波堤（外）②床掘部）

4. 耐津波構造検討

4.1 津波に対する安定性照査

表-5に沈下後の現況断面に対する安定性照査結果を示す。津波が防波堤天端を越流すると想定されるものの、津波流速はそれほど速くなく、被覆材が被災し洗掘を受けると考えられる施設はなかった。なお、被覆材の所要重量の算定には、マウンド近傍の津波流速を用いイスパッシュ式を適用した。

表-6 安定性照査結果（沈下後現況断面）

防波堤	区間	事象	耐力作用比※			津波波力算定式
			滑動	転倒	支持力	
北防波堤	堤幹部	偶発状態 (発生頻度の高い津波)	2.77	5.58	2.34	谷本式
防波堤（南）	SCP部		4.44	8.71	2.07	谷本式
防波堤（外）①	SD部		4.07	8.60	1.32	静水圧式
	床掘部		3.63	6.25	1.40	谷本式
防波堤（外）②	SCP部		5.44	9.76	2.00	静水圧式
	床掘部		3.41	5.54	1.81	静水圧式
防波堤（西）	堤幹部		2.98	4.48	1.62	谷本式

※耐力作用比γa：滑動1.2、転倒1.2、支持力1.0（発生頻度の高い津波時）

4.2 耐津波対策断面の設定

図-7～図-12に本検討で設定した防波堤の耐津波対策断面の標準断面図を示す。沈下後の現況断面においては発生頻度の高い津波作用時の耐力作用比がいずれも許容値以上となることから、すべて波浪によって構造諸元が決定されることとなった。また、被覆材の被災もないため、腹付工の設置といった「粘り強い構造」とする必要もなく、パラペットによる単純な天端の嵩上げ対応可能である。ただし、一部の対策断面においては堤体の沈下に伴い円弧すべりに対する安定性が不足するため、マウンドの延伸と若干の腹付工が必要となった。

対策断面の嵩上げ高は、以下の手順で検討した。まず現況断面に対するFLIP解析を実施し沈下量を設定する。次に、FLIPで得られた沈下量＝嵩上げ高として対策断面を設定し、再度FLIP解析を実施する。その結果沈下量が増加した場合には、再度嵩上げ高を見直した対策断面を設定しFLIP解析を行う。こうして対策断面の沈下後天端高が現況天端高以上となるまで断面設定とFLIP解析を繰返し、最終的に得られた断面を対策断面として採用した。

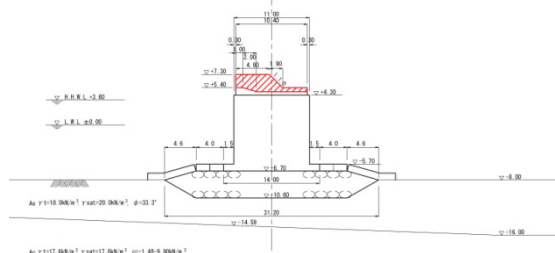


図-7 耐津波対策断面（北防波堤）

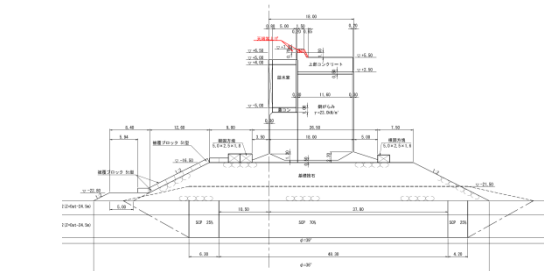


図-8 耐津波対策断面（防波堤（南））

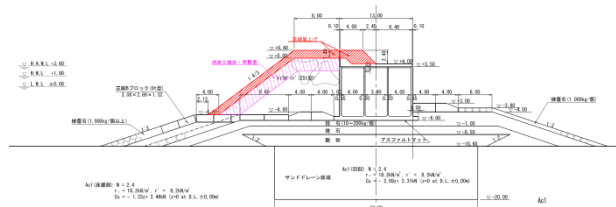


図-9 耐津波対策断面（防波堤（外）①SD部）

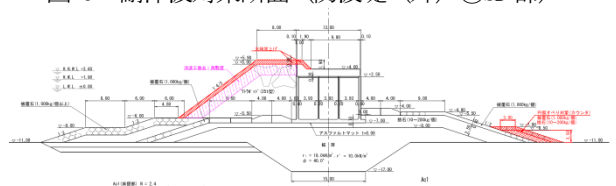


図-10 耐津波対策断面（防波堤（外）①床掘部）

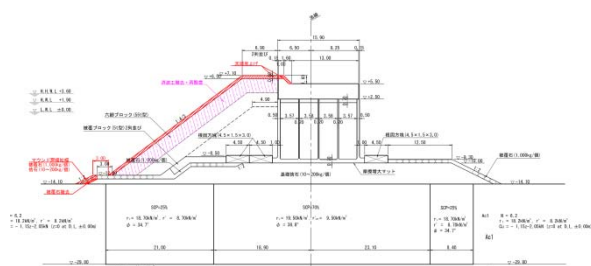


図-11 耐津波対策断面（防波堤（外）②SCP部）

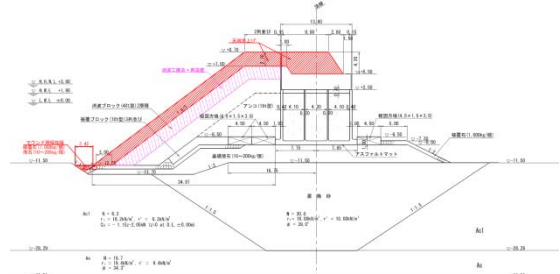


図-12 耐津波対策断面（防波堤（外）②床掘部）

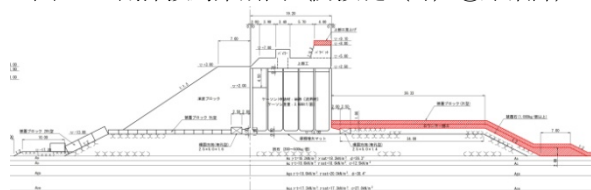


図-13 耐津波対策断面（防波堤（西））

5. おわりに

本検討を実施していく中で、幾つかの技術的課題と設計上の課題が明らかとなった。まず、床掘置換砂工の場合、FLIPにおける加速度波形にノイズが生じ、過度な変形を引き起こすことが確認された。時間積分ピッチを極端に細かくすれば解消されるが、長時間に及ぶ解析が必要となる。二つ目の課題に、数十センチの天端の嵩上げに対する消波ブロックの取り扱いが挙げられる。消波ブロックを現状のままとすれば不完全被覆となるが、1層の増し積みを行うには嵩上げ量が小さく経済的ではない。不完全被覆を前提としたパラペット構造とするか、増し積みを行うかといった経済性比較が重要となるものとする。

参考文献

- 1) 高橋重雄ほか：2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報，港湾空港技術研究所資料，No. 1231，2011。
- 2) 有川太郎ほか：釜石湾口防波堤の津波による被災メカニズムの検討，港湾空港技術研究所資料，No. 1251，2012。
- 3) 富田孝史ほか：2011年東北地方太平洋沖地震津波による八戸港の被害，土木学会論文集B2（海岸工学）Vol. 68，No. 2，2012。
- 4) 防波堤の耐津波設計ガイドライン，国土交通省，2013。
- 5) 南海トラフの地震滑動の長期評価（第二版），地震調査研究推進本部，地震調査委員会，2013。
- 6) 菅野高弘ほか：浮力を考慮した防波堤の地震時応答解析，第67回年次学術講演会論文集，2012。