

最大クラスの津波に対する 防波堤の粘り強い構造について

仲岡 優¹

¹神戸港湾空港技術調査事務所 (〒651-0082神戸市中央区小野浜町7番30号)

東日本大震災より、防波堤の耐津波設計の考え方が見直され、防波堤を「粘り強い構造」とする考え方が出てきた。これは、設計津波を超える最大クラスの津波に対して、構造の安定に重大な影響を及ぼすのをできるだけ遅らせ、人命の確保及び減災効果を図るものである。今回、近畿地方整備局においては「和歌山県国土強靱化計画（平成27年9月）」を受け、和歌山下津港本港地区及び日高港塩屋地区の第一線防波堤において、施設の効果を粘り強く発揮できるように対策断面の検討を行った。

キーワード 防災，災害，設計

1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震において、防波堤が浸水被害を抑制し、減災効果が発揮された一方で、防波堤などの港湾施設が壊滅的な被災を受けて、港湾機能が停止し海上からの支援物資の輸送や東北沿岸に立地する多くの企業も被害を受け、経済活動に大きな損害を被った。

本稿では、和歌山県国土強靱化計画（平成27年9月）¹⁾に基づき、南海トラフ巨大地震発生時の津波による被害の軽減並びに緊急物資輸送や産業活動の早期回復に寄与するため、地震発生後においても港湾施設としての機能（港内静穏度の確保）を継続的に発揮することを目的とした。和歌山県内において第一線防波堤である和歌山下津港本港地区防波堤（外）（1）及び日高港塩屋地区防波堤（西）を粘り強い構造とし、人命の保護及び減災効果を図るための断面検討を行った。ただし、破壊メカニズム、粘り強い化の定量的な効果等、技術的に解明されていない事象が多く、また既存施設の改良による耐津波設計であり、改良できる範囲に制限が生じた。これら諸課題を克服しながら、検討を実施した。

なお、本施設の検討にあたっては、港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾（以下「港湾基準」という）及び「防波堤の耐津波設計ガイドライン」³⁾（以下「ガイドライン」という）に基づき検討を実施した。



図-1 和歌山下津港及び日高港位置図

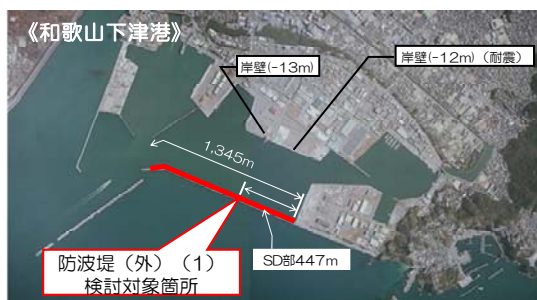


図-2 和歌山下津港本港地区防波堤（外）（1）
検討対象位置図



図-3 日高港塩屋地区防波堤(西) 検討対象位置図

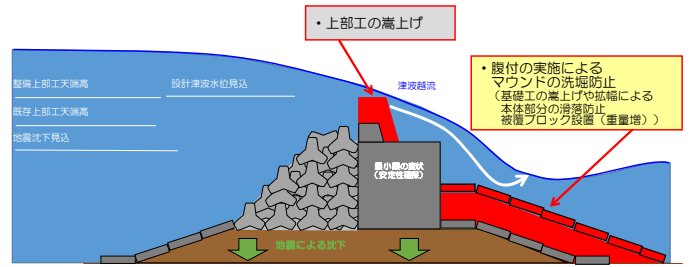


図-5 粘り強い構造断面のイメージ

2. 耐津波設計の検討方針

(1) 検討のフロー

「ガイドライン」では、「設計津波」に対して、津波の越流を許さず、破壊させないことを条件に、天端高の設定や安定性の照査を実施することとしている。「設計津波を超える規模の津波」が来襲した際には、越流は許容するが、防波堤が変形しつつも致命的な倒壊に至らない「粘り強い構造」を目指すものとした。津波による防波堤の破壊形態として、「津波波力」・「越流洗堀」・「地盤浸透流」の3つが挙げられている。

検討にあたり、「ガイドライン」及び今回の検討対象範囲に基づき検討フローを設定した。検討フローを図4に、検討断面のイメージを図5に示す。

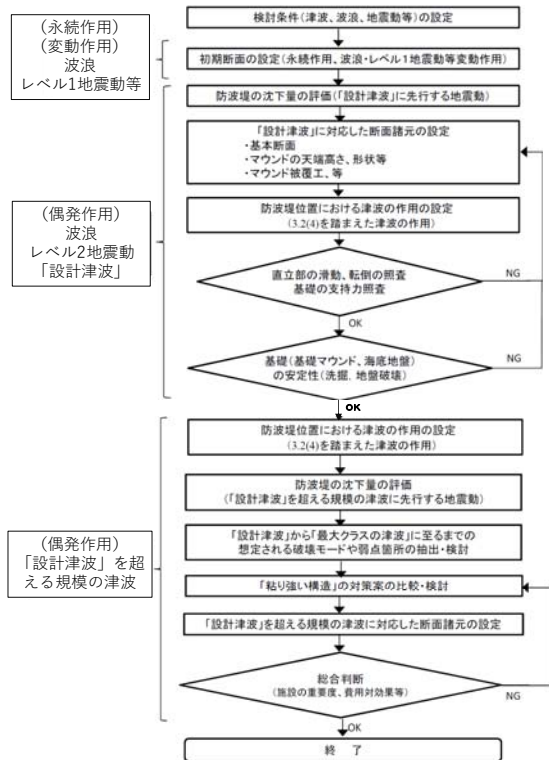


図4 検討フロー

(2) 設計条件の設定

a) 津波と津波に先行する地震動の設定

耐津波設計にあたって、「ガイドライン」では「設計津波」と「設計津波を超える規模の津波」が定義されている。「設計津波」は「発生頻度の高い津波」を対象とすることが多く、今回は数十年から百数十年に発生するものを想定し、東海・東南海・南海地震によって引き起こされる津波とした。「設計津波を超える規模の津波」は、発生頻度は極めて低いが最大クラスの津波として中央防災会議等により公表されている南海トラフ巨大地震によって、引き起こされる津波とした。想定した津波と地震動の関係を図6に示す。

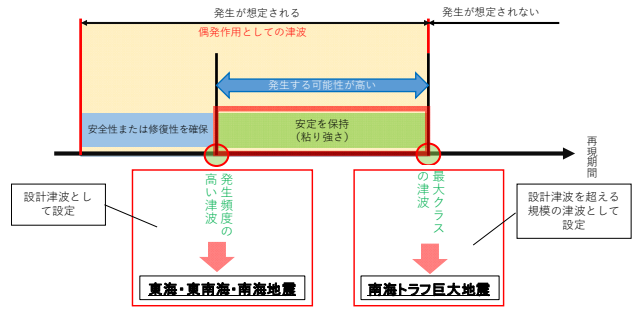


図-6 想定される津波と地震動の関係

b) 土質条件の設定

当該地区では、過去行われたボーリングから供用までに十分な年数が経過しており、粘性土層はケーソン等による圧密が完了していると想定される。今回、土質条件の設定にあたり、検討対象施設ではケーソン据え付け前にボーリングが実施されている箇所とケーソン据付から十分な年数を経たのちにボーリングが実施されている箇所が存在した。同一施設内で圧密が完了した時点でのボーリングデータと非圧密状態でのボーリングデータが存在したため、非圧密状態でのボーリングデータしかない箇所では、ブシネスクの弾性応力解の式(2a)～(2e)

$$\Delta\sigma_y = \frac{q}{\pi} (2\theta + \sin 2\theta \cos 2\phi) \quad (2a)$$

$$\Delta\sigma_x = \frac{q}{\pi}(2\theta - \sin 2\theta \cos 2\varphi) \quad (2b)$$

$$\tau_{xy} = \frac{q}{\pi} \sin 2\theta \sin 2\varphi \quad (2c)$$

$$2\varphi = \alpha_2 + \alpha_1 \quad (2d)$$

$$2\theta = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (2e)$$

を用いて、圧密降伏応力の増加量を求め強度設定を行った。

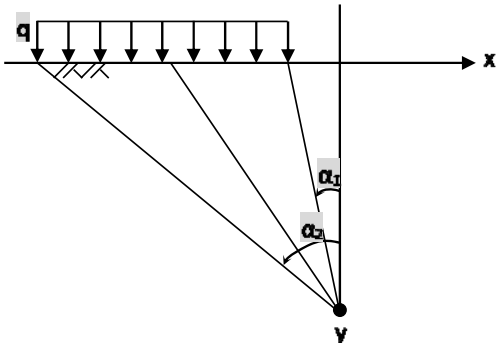


図-7 ブシネスクの弾性応力解 イメージ図

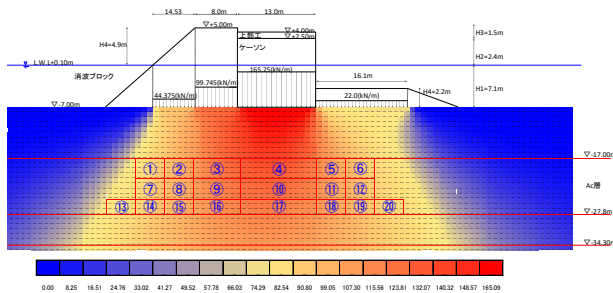


図-8 ブシネスクの弾性応力解を用いて強度増加量を設定した土質条件 (和歌山下津港本港地区防波堤(外) (1) 鉦滓部)

3. 設計津波に対する検討

「設計津波」に対しては構造物で人命・財産を守り切り、津波来襲後も防波堤の機能を継続して維持する構造となるよう検討を行った。具体的には「設計津波」に先行する地震による沈下後の天端高が設計津波より高く、かつ背後の静穏度が確保できる高さ(現況天端以上)となるよう上部工嵩上げ高を設定し、対策断面の沈下前・後の変動波力に対する安定照査および沈下後の津波波力による安定照査により断面を設定した。

今回の検討においては、設計津波高より現況天端高が高いため、沈下後の天端高が現況天端高以上となるよう嵩上げ高を設定した。この嵩上げにより堤体重量の増加と波圧受面積が増大し、偏心傾斜荷重の増加に伴う基礎の支持力不足が想定される。この際、考えられる対策案として不完全被覆堤である今回の検討断面を完全被覆し、波圧増大に備えるという案が考えられたが、1.0~2.0m程度の上部工の嵩上げに対し、消波ブロックを1.0~2.0m程度嵩上げし、完全被覆をするのは容易ではなく、コストが高い。そこで、消波ブロックの積み増しを必要としない、嵩上げを行う上部工の港外側を斜めにカットし、水平波力を鉛直方向への力に変えて偏心傾斜荷重を低減する工夫を行った。ただし、この対策工でも基礎の支持力不足が生じたものについては、港内側のマウンド上にカウンタ盛土を設置することで安定性を確保した。表-1に沈下量と嵩上げ高さの関係と図-9、10に代表的な「設計津波」に対する対策断面を示す。

表-1 沈下量と嵩上げ高さの関係

防波堤	防波堤・区間	現況断面天端高 (D.L.m)	現況断面総沈下量 (m)	沈下後天端高 (D.L.m)	発生頻度の高い津波水位 (D.L.m)	嵩上げ高 (m)	対策断面天端高 (D.L.m)	対策断面総沈下量 (m)	沈下後天端高 (D.L.m)	現況断面天端高 (D.L.m)
和歌山下津港本港地区防波堤(外) (1)	鉦滓部	5.00	-0.59	4.41	> 4.13	1.00	6.00	-0.68	5.32	> 5.00
	SD部	5.00	-0.67	4.33	> 4.11	1.00	6.00	-0.80	5.20	> 5.00
	SD部(開口部)	5.00	-0.67	4.33	> 4.11	1.00	6.00	-0.80	5.20	> 5.00
日高港塩屋地区防波堤(西)	No. 0-200	8.00	-0.47	7.53	> 5.91	1.00	9.00	-0.47	8.53	> 8.00
	No. 0-200(開口部)	8.00	-0.47	7.53	> 5.91	1.00	9.00	-0.47	8.53	> 8.00
	No. 200-350	8.00	-0.63	7.37	> 5.74	1.00	9.00	-0.61	8.39	> 8.00
	No. 200-350(開口部)	8.00	-0.65	7.35	> 5.74	1.00	9.00	-0.66	8.34	> 8.00
	No. 350-450	8.00	-1.62	6.38	> 5.72	2.00	10.00	-1.78	8.22	> 8.00
	No. 350-450(堤頭部)	8.00	-1.73	6.27	> 5.72	2.00	10.00	-1.89	8.11	> 8.00

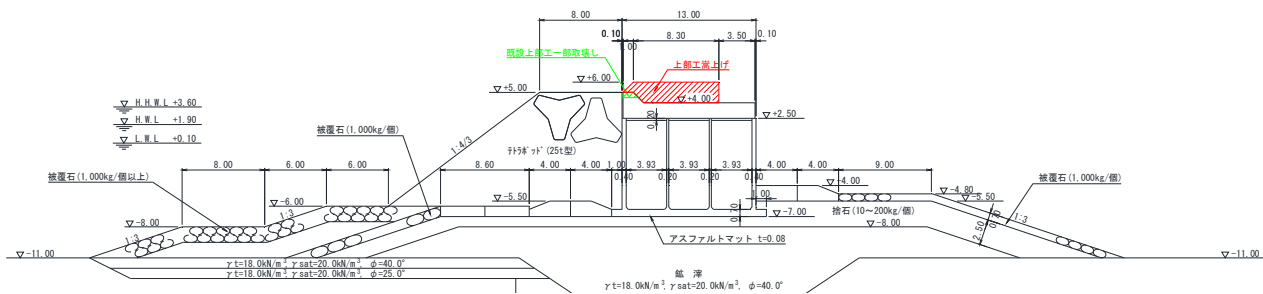


図-9 和歌山下津港本港地区防波堤(外) (1) 鉦津部 嵩上げ対策断面

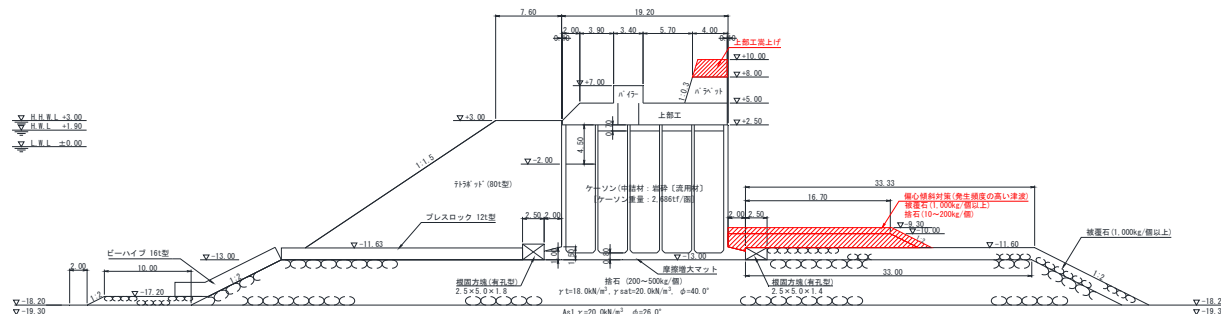


図-10 日高塩屋地区防波堤(西) No.350-450 嵩上げ対策断面

4. 設計津波を超える規模の津波に対する検討

津波による防波堤の破壊メカニズムについては、未だ解明されていないものが多い。「ガイドライン」では東北地方太平洋沖地震を受けて「津波波力」・「越流洗堀」・「地盤浸透流」の3つに対して、付加的な対策を行うことで、変位はするものの倒壊に至らない粘り強さを求めている。

今回の検討においても、3つの破壊メカニズムに対し現地条件を考慮した対策を検討した。ただし、「変位するものの倒壊に至らない」ための数値的な指標は明確に示されていないため、安定性の照査にあたっては構造解析係数を1.0とし、津波による変位が起きるか否か最低限の安全率を確保できる設定とする工夫をした。

(1)津波波力に対する検討

津波が防波堤を越流する際には、直立部に津波の水圧が作用する。直立部の前面壁及び背面壁に作用する水圧から安定性の照査を実施し、適正な断面の検討を行う。

津波波力による安定性の照査(滑動、転倒、偏心傾斜荷重による支持力照査)を実施した結果、全ての断面で粘り強い構造に必要な安定性は確保されている。従って、今回の検討対象施設では津波波力による影響は小さく、津波波力に対しての新たな対策は講じないものとした。

(2)越流洗堀に対する検討

東北地方太平洋沖地震では、津波が防波堤を越流する

ことによって発生する基礎マウンドの洗堀によって多くの防波堤が被災する結果となった。代表的な対策としては、腹付工を設置する対策工がある。これにより越流した波が直接基礎マウンドに当たっても倒壊しにくい構造となる。

本検討においては越流による基礎マウンドの洗堀に対する影響を把握するため、越流した津波のマウンド上での流速を算定し、イスバッシュ式により基礎マウンドの被覆材の安定照査を行う。マウンド上での流速の算定においては津波シミュレーションにより算定する方法もあるが、津波シミュレーションは平面二次元計算であり、防波堤を越流した水塊の防波堤背後への打ち込みといった鉛直方向の津波の挙動や流速を把握できない欠点がある。そこで今回は断面二次元計算で水脈・飛沫および空気混入を比較的精度良く再現できる断面二次元流体解析プログラム(粒子法型数値波動水路)によりマウンド上の最大流速を算定(図-11、12参照)し、イスバッシュ式で被覆材の安定照査を行った。結果、得られた津波の最大流速に対して既設の被覆材や消波ブロックが洗堀防止に寄与していることがわかり、越流洗堀に対して対策を必要としない結果となった。ただし、堤体の滑動や地盤の偏心傾斜荷重による支持力に対する安定性が不足した場合、対策として洗堀防止にも寄与した腹付工を堤体の背面高さ1/3まで実施するものとした。

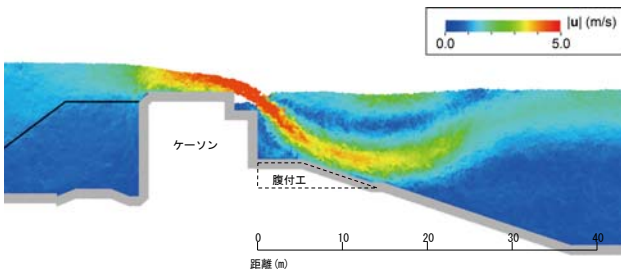


図-11 和歌山下津港本港地区防波堤(外) (1)
断面二次元流体解析プログラムによる流速分布図

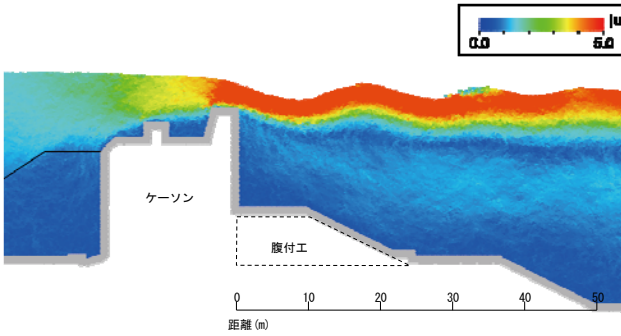


図-12 日高港塩屋地区防波堤(西)
断面二次元流体解析プログラムによる流速分布図

(3)地盤浸透流に対する検討

防波堤により津波の港内側への流入が遮られると、港内側で水位差が生じ基礎マウンド内に浸透流が発生し、基礎の安定性が低下する可能性がある。浸透流による影響は、基礎地盤が砂地盤かつ防波堤前後の水位差が大きい場合(水位差10m程度)に影響を受けるとされているが、今回の検討対象施設では基礎直下の地盤は粘性土かつ前後の水位差も最大で2.8mとなっているため、地盤浸透流による被災も考えにくいので、地盤浸透流に対する対策は行わないものとした。

(4)粘り強い構造断面の設定

(1)~(3)の検討を基に、和歌山下津港防波堤(外) (1)では上部工の嵩上げを1.0m実施するものとし、日高港塩屋地区防波堤(西)では上部工を1.0m~2.0m嵩上げし、堤体の背面高さ1/3まで腹付工を実施するものとした。図-13、14に代表的な「設計津波を超える規模の津波」に対する断面図、つまり「粘り強い構造」となった防波堤の断面図を示す。

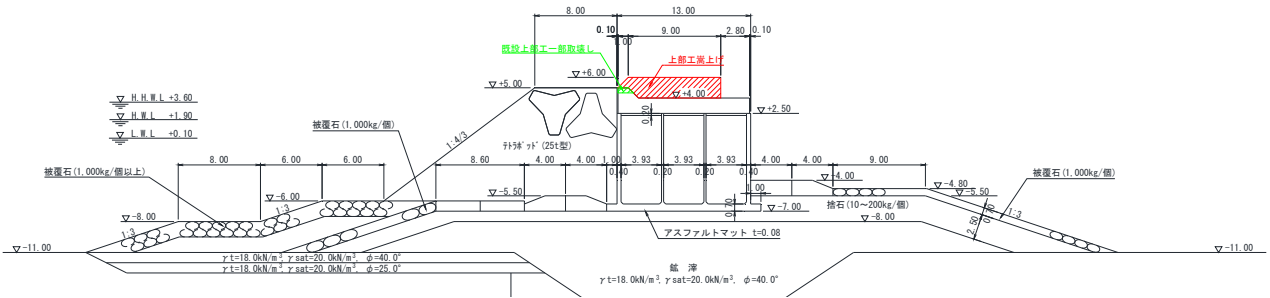


図-13 和歌山下津港本港地区防波堤(外) (1) 鉚津部 粘り強い構造断面

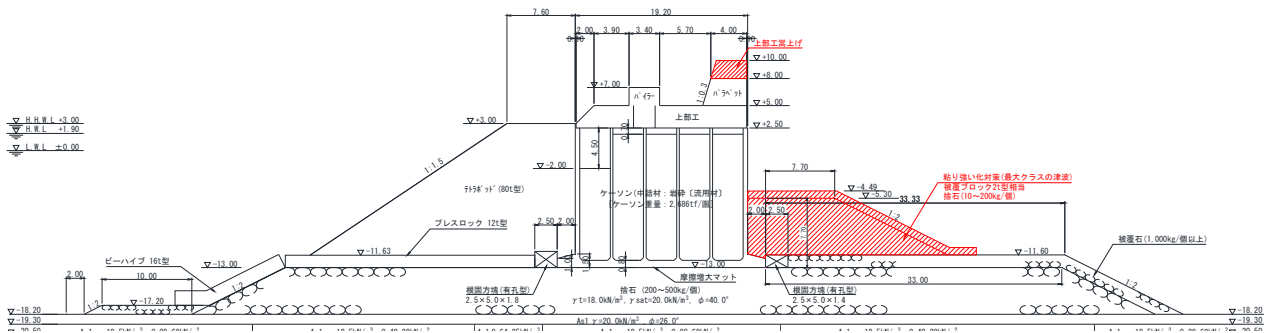


図-14 日高港塩屋地区防波堤(西) No.350-450 粘り強い構造断面

5. 粘り強い構造の検討結果

和歌山下津港は県北部の大阪湾入り口に面し、各種工業の流通拠点として重要な役割を果たしている。日高港は県中央部の荷役拠点としての役割や関西電力の発電所を背後に抱えている。今回の検討対象施設では、一度大きな被害を被ると物資輸送の停止や電力供給の停止などが懸念される。和歌山下津港本港地区防波堤（外）

(1) 及び日高港塩屋地区防波堤（西）を粘り強い構造にすることによって、背後地の浸水深は、ほぼ全域で浅くなる結果となった。和歌山下津港及び日高港を粘り強い構造としたときの津波シミュレーション結果（差分図）を図-15、16に示す。

粘り強い構造とは、防波堤が変位はするものの倒壊に至らないことによって減災効果を期待するものであり、減災効果が発揮されることによって、津波から逃げ切る時間の確保や被害の低減、人命の保護に伴い、背後地の早期復旧に繋がると想定される。

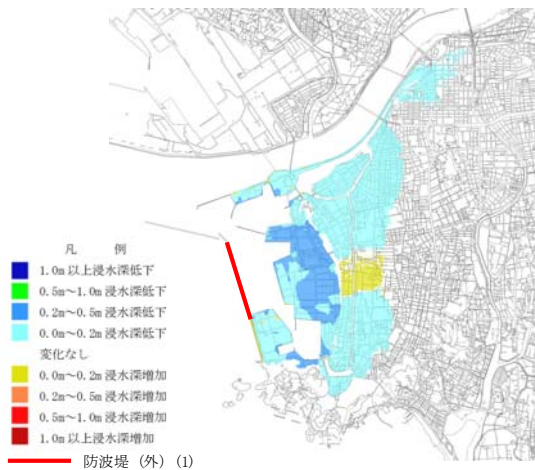


図-15 和歌山下津港本港地区防波堤（外）(1) を粘り強い構造としたときの津波シミュレーション結果（差分図）

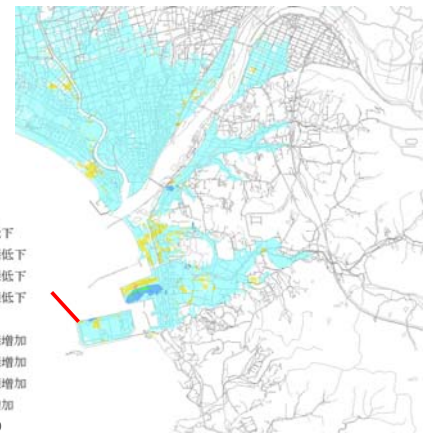


図-16 日高港塩屋地区防波堤（西）を粘り強い構造としたときの津波シミュレーション結果（差分図）

6. 今後の課題

津波作用時の構造物の挙動は、技術的にまだ解明できていない部分も多い。十分な知見が無い中、実際にどのような変形の仕方や壊れ方をするのかイメージ・確認をした上で対策工を選定する必要がある。今回の検討にあたって、構造解析係数を1.0と設定し机上の検討において、「粘り強い構造」を定量的に評価する工夫を講じた。しかし、所要の安全率を満足するというのはあくまで設計上の目安であり、安全率という概念にとらわれすぎないように注意する必要がある。今後は定量的な評価に向け水理模型実験の実施や設計事例の蓄積等、机上と実現象を照らし合わせた確認をしていく必要がある。

今回の机上の検討が、防波堤の粘り強い構造への設計事例として蓄積され、今後の設計方針や定量的な評価に向け活用されれば幸いである。

参考文献

- 1)和歌山県：和歌山県国土強靱化計画 平成27年9月
- 2)(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成19年7月
- 3)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25年9月