

管内防波堤耐津波安定性検証業務

技術開発課

概要

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波は、それまでの想定を大きく超えるものであり、東北地方沿岸に甚大な被害をもたらした。これを踏まえ、中央防災会議では、西日本地域の想定津波の見直しを行っており、中部地方整備局管内港湾においてもこれまでの想定を大きく超える津波の襲来が予想されている。本業務は清水港、御前崎港、三河港、衣浦港、名古屋港、四日市港を対象に防波堤の耐津波性能を評価する手法を検討するとともに、想定される地震・津波に対して粘り強い防波堤の構造を検討した。

業務内容

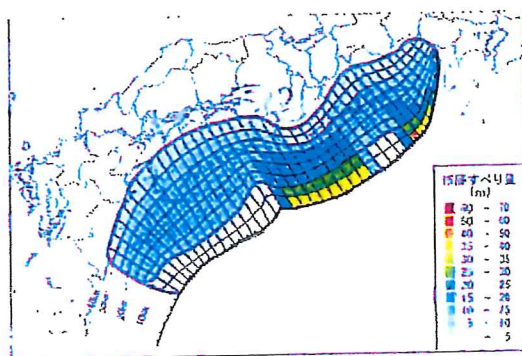
1. 想定地震・津波の設定

本業務で想定する津波の規模は、「港湾における総合的な津波対策のあり方」(交通政策審議会港湾分科会防災部会)に基づき、以下のように定義した。

表1 想定津波

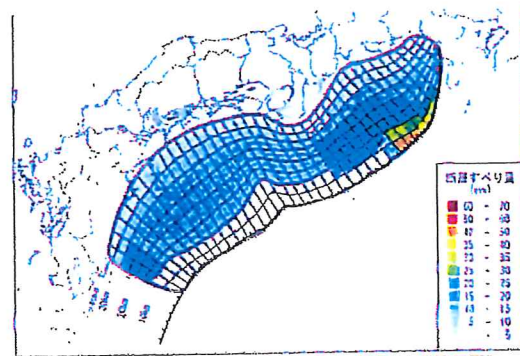
	発生頻度・規模	防護の考え方
発生頻度の高い津波 (レベル1津波)	数十年から百数十年に1回程度	・人命、経済活動等を守る「防災」 ・防潮堤から背後地(堤内地)への浸水を防止
最大クラスの津波 (レベル2津波)	発生頻度は極めて低いが影響が甚大	・人命を守り、経済的損失を軽減する「減災」 ・防潮堤からの浸水は許容するものの、土地利用や避難対策と一体となった総合的な対策を講じる

「発生頻度の高い津波」は、平成15年に中央防災会議から公表された3連動地震津波(東海+東南海+南海)とした。一方「最大クラスの津波」については、「南海トラフの巨大地震モデル検討会 第一次報告(3月31日公表)」を用いた。一次報告では大すべり域等の組合せによって11ケースの断層モデルが提案されており、対象港で津波高が最大となるケースを設定した。



【ケース⑧ 駿河湾～愛知県東部沖、三重県南部沖～徳島県沖に大すべり域を設定】

清水港へ設定した津波



【ケース⑥ 駿河湾～紀伊半島沖に大すべり域+分岐断層】

御前崎港へ設定した津波

図1 「最大クラスの津波」の波源モデル

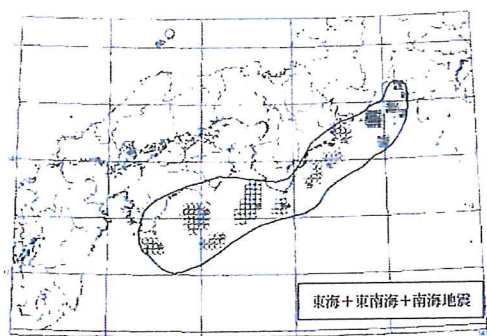


図2 東海・東南海・南海地震の強震動生成域

出典：中央防災会議「第16回東南海、南海地震等に関する専門調査会」報告書（図表集）

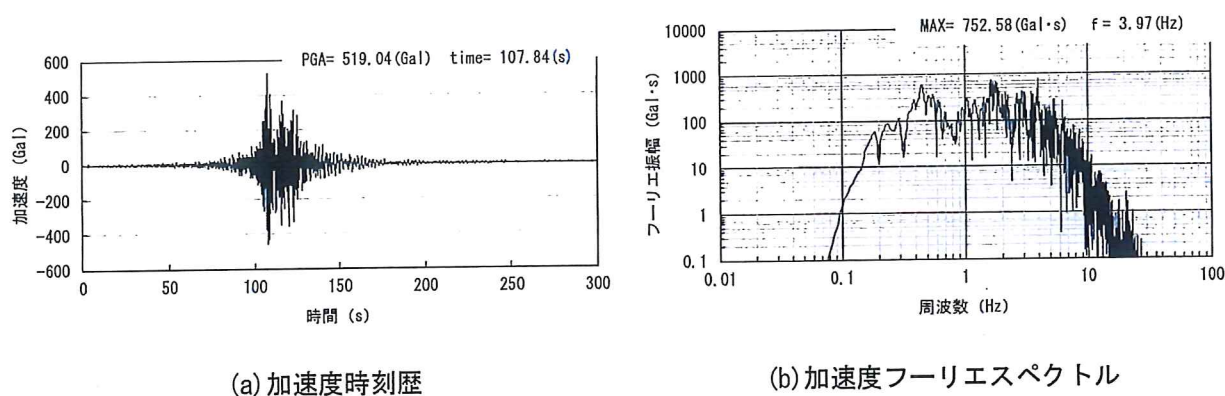


図3 発生頻度の高い津波を引き起こす地震動（御前崎港・東防波堤）

「発生頻度の高い津波を引き起こす地震動」は、平成15年に中央防災会議から公表された3連動地震津波（東海+東南海+南海）とした。一方「最大クラスの津波を引き起こす地震動」については、「南海トラフの巨大地震モデル検討会 第一次報告（3月31日公表）」の強震断層モデル（(a)～(d)の4ケース）をもとに、港空研が提案している SPGA モデルにより算出した地震動（90%非超過）とした。

2. 要求性能

本検討における防波堤の要求性能は、「発生頻度の高い津波」に対しては使用性（安全率1.2以上）を確保することを、「最大クラスの津波」に対しては、第1波で被害を受けたとしても倒壊せず第2波目以降にも最低限の耐力を保持する「粘り強さ」を要求性能とした。

照査項目は、防波堤の滑動・転倒、基礎地盤の支持力に加えて被覆材の安定性とした。被覆材の安定性については、津波の流れに対する安定質量と既設被覆材の質量を比較することにより照査した。

また、第一線防波堤であることから、レベル1津波地震後に表2の必要天端高を満足するものとした。

表2 要求性能（防波堤天端高）

- 地震後の復旧期間中の港内静穏度を確保するために必要な天端高
- 「発生頻度の高い津波を引き起こす地震動」による沈下後に、
「H.W.L. (若しくは10年確率高潮位) + 0.6 × H_{1/3} (10年確率波高)」を確保
- 御前崎港・東防波堤 : H.W.L. + 0.6 × H_{1/3} ⇒ D.L. + 1.7m + 0.6 × 8.0m = D.L. + 6.5m

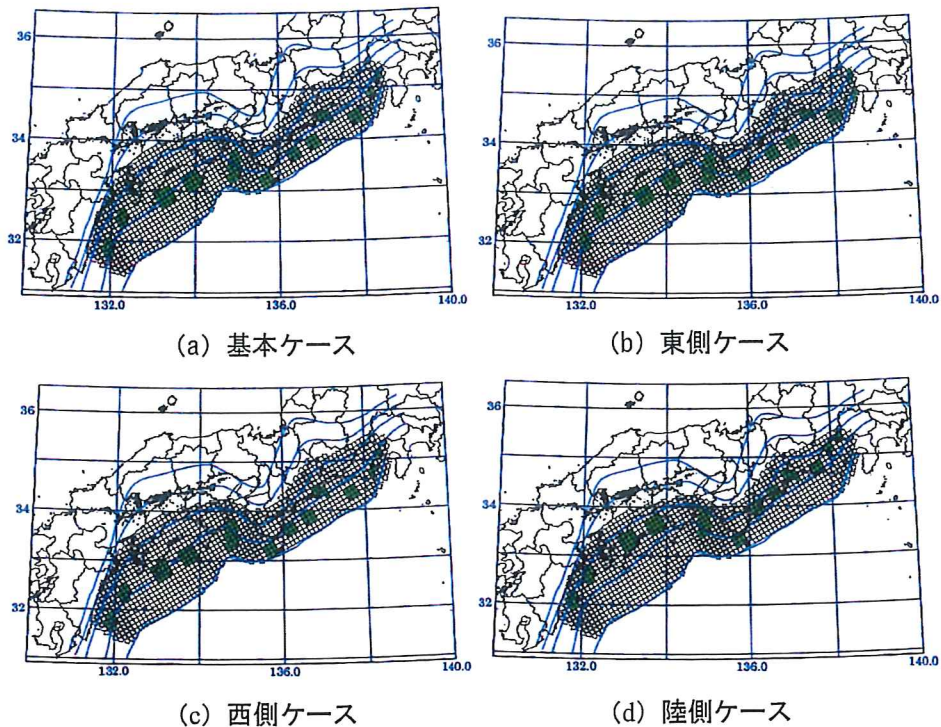


図4 強震動生成域の設定の検討ケース

出典：内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」公表資料

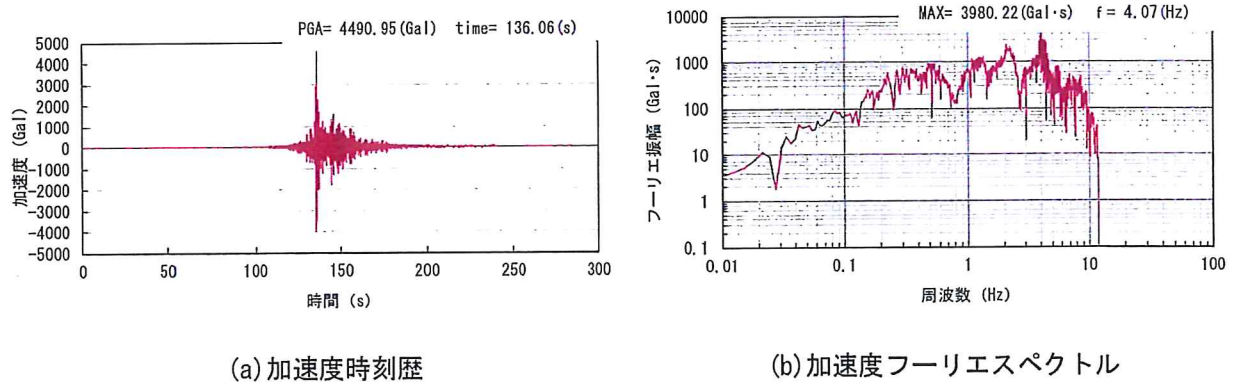


図5 最大クラスの津波を引き起こす地震動（御前崎港・東防波堤）

3. 検討手法

津波に対する安定照査は、以下の手順により行った。

- (1) 上記の震源モデルから作成した各港湾における地震動を用いて防波堤の地震応答解析を行い、各検討断面の沈液状化下量を求める。地殻変動による地盤沈降量と過剰間隙水圧消散による沈下量を加え対象施設の総沈下量を設定する。
- (2) 津波シミュレーションにより防波堤前面の最大津波高を求める。津波が防波堤を越流する場合は、防波堤前面と背面の最大水位差を求める。また、防波堤周辺の最大津波流速を求める。
- (3) 総沈下量を考慮した断面に津波高から算出した津波波力を作用させ、堤体の安定性を照査する。
- (4) 最大津波流速からイスパッシュ式により被覆材の必要質量を算定し、被覆材の安定性を照査する。
- (5) 安定性を満足しない場合は、対策案を検討し、対策断面についても同様の手順によって安定性を照査する。

検討フローを以下に示す。

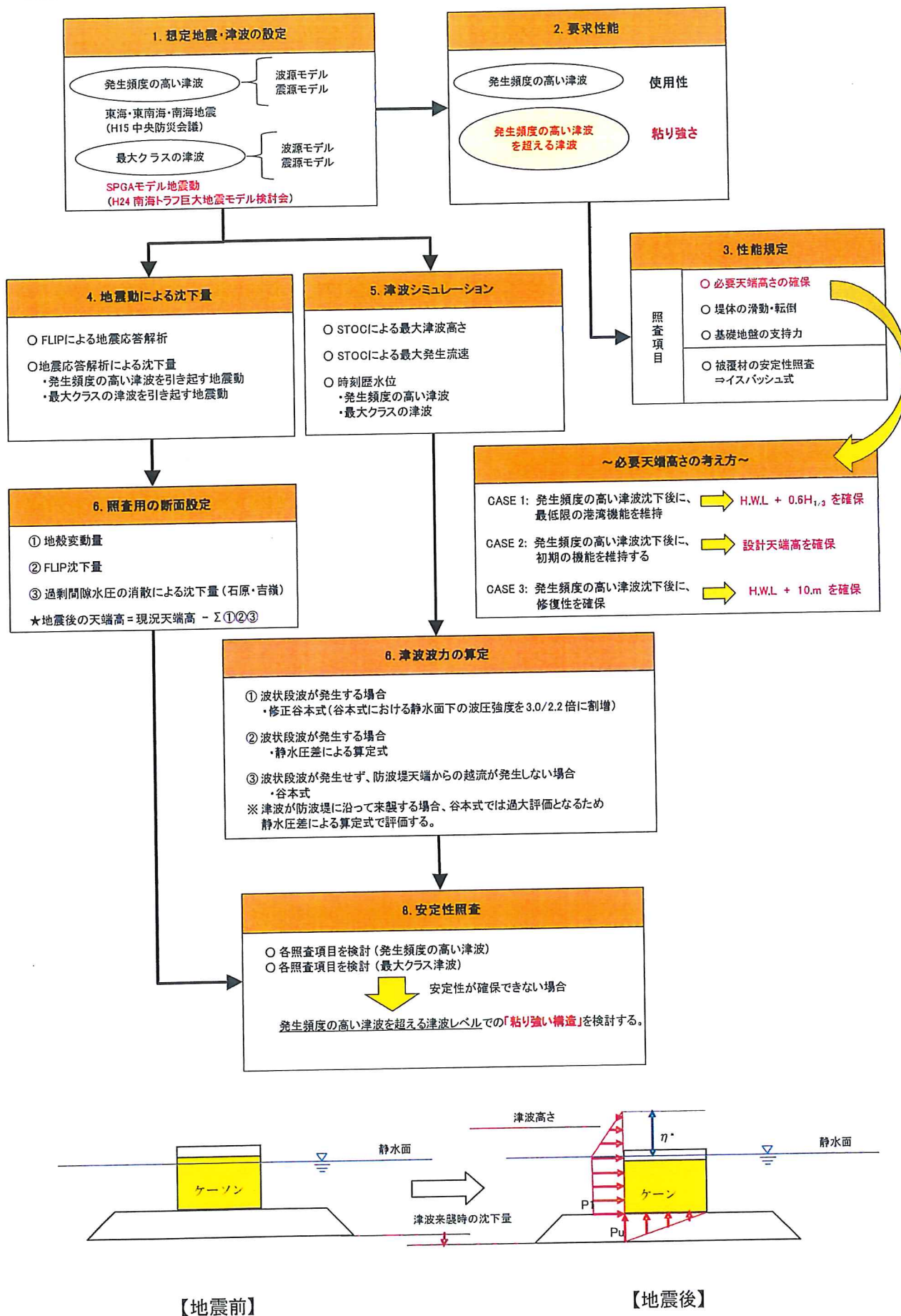


図6 耐津波安定性照査フロー

4. 地震応答解析による沈下量の算定

液状化による防波堤の沈下量は2次元動的有効応力解析プログラム FLIP (Ver. 7.1.9-6-2) により算出した。算出した沈下量は、津波シミュレーションへ反映するとともに防波堤の耐津波安定照査に用いた。

FLIP の解析条件を表3に示す。重力式防波堤の FLIP 解析については、港湾空港技術研究所資料 No. 1227 「防波堤基礎地盤の地震時変形特性に関する 1g 場模型振動実験と有効応力解析」において、模型実験と FLIP による再現解析が行われており、構成則や非線形反復計算法、捨石物性値等を全て従来法として解析することで精度良く模型実験の結果を再現できることが確認されている。そのため、本検討でも全て従来法として解析を行うこととしたが、この条件で解析を行った際に、一部の断面において時刻歴結果にノイズが生じ、沈下量が異常に大きくなる現象が生じた。

本検討では、時刻歴結果に生じたノイズを除去するため非線形反復計算法を改良法として解析を行った。また、地震動によって防波堤が沈下して没水した際に生じる浮力を以下に示すように、堤体天端の両端に2本の非線形バネを設けて工学的基盤と結ぶことで考慮した。

図8に対象施設（御前崎港東防波堤）の FLIP 解析結果（発生頻度の高い津波を引き起こす地震動による防波堤の動的鉛直変位）を示す。

表3 FLIP 解析条件

構成則	従来法
非線形反復計算法	従来法（一部、改良法）
ジョイント要素	従来法
時間間隔	0.01
捨石物性値	捨石旧定数 ($C=0, \phi=40^\circ$)
レーレー減衰 β	非線形非液状化解析で最大応答変位分布が変化しなくなる臨界値

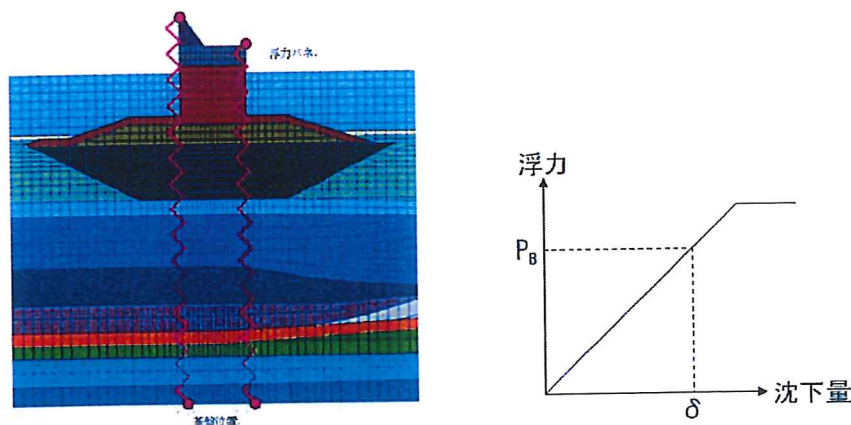


図7 浮力を考慮したモデル化のイメージ

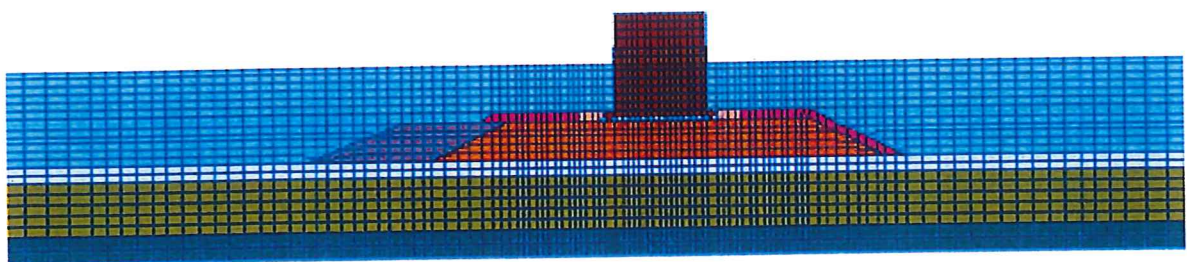


図8 FLIP 解析モデル（御前崎港・東防波堤）

5. 津波シミュレーション

津波伝播計算は港湾空港技術研究所で開発された海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波シミュレータ STOC を用いた。計算条件を表4に示す。

マウンド被覆材の安定照査のためマウンド上の津波流速を正確に算出する必要があり、防波堤周辺のみ計算格子間隔を5mとした。

御前崎港における津波シミュレーション結果を図9に示す。対象工区で最大の津波高（津波が越流する場合は港内外水位差）および津波流速を安定照査の外力とした。

表4 STOC 計算条件

	設定項目	設定値
計算手法	計算法	STOC-ML (単層)
	基礎式	連続方程式、 x, y 方向運動方程式、自由表面の式
	差分スキーム	空間差分：スタガード格子法 時間差分：リーブ・フロッグ法
	初期地盤変位量	Mansinha and Smylie の式から算出 (沈下は考慮、隆起は考慮しない)
	遡上境界条件式	岩崎、真野 (1979) の式を準用
計算諸元	断層モデル	L 1 津波：想定 3 連動 L 2 津波：内閣府モデル (3 月)
	地形形状	既往報告の地形データを参考に現況地形を作成
	計算潮位	H.W.L 名古屋：T.P. +1.19[m] 御前崎：T.P. +0.88[m] 三河：T.P. +1.16[m] 衣浦：T.P. +1.03[m] 四日市：T.P. +1.05[m] 清水：T.P. +0.92[m]
	計算格子間隔	名古屋、三河、衣浦： 1800→600→200→100→50→25→5[m] 御前崎、四日市、清水： 1350→450→150→50→25→5[m]
	計算時間間隔	C.F.L 条件より適時設定
	計算時間	名古屋、三河、衣浦、四日市：5 時間 御前崎、清水：3 時間
	沖側境界条件	透過境界
	陸側境界条件	完全反射、最小領域は遡上
	粗度係数	海域：0.025 (マンニングの粗度係数) 陸域：土地利用により定める
	防波堤の沈下	考慮

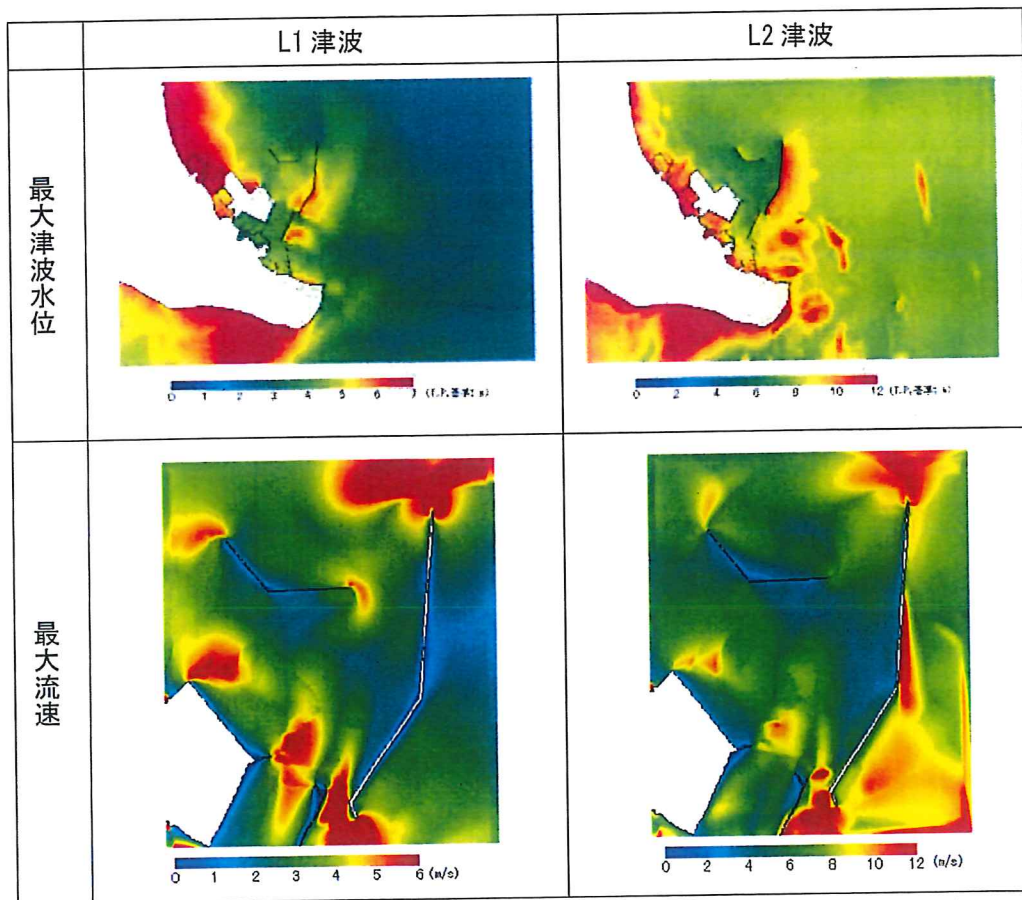
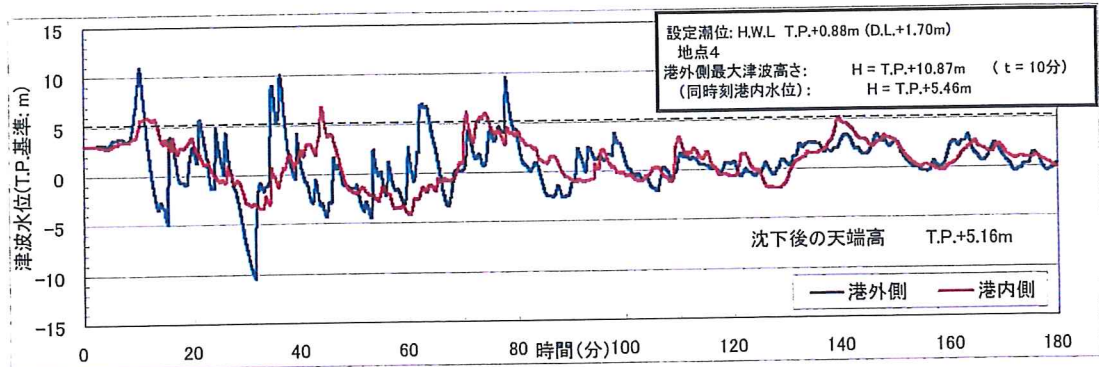
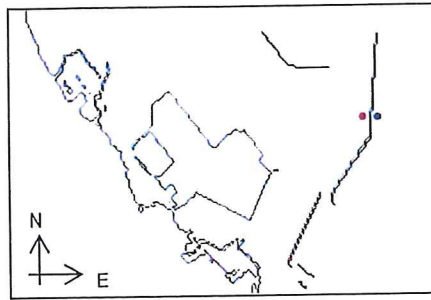


図9 津波シミュレーション結果 (御前崎港)

6. 対策断面の検討

(1) 御前崎港防波堤（東）

「発生頻度の高い津波」に対しては、堤体の安定性は確保されているが、「最大クラスの津波」に対しては被覆材の安定性が確保されていない。また、地震後に必要天端高は確保されているものの余裕が無い。よって、対策工法はマウンドの洗掘を防止する「被覆工法」及び、「上部工嵩上げ」とした。

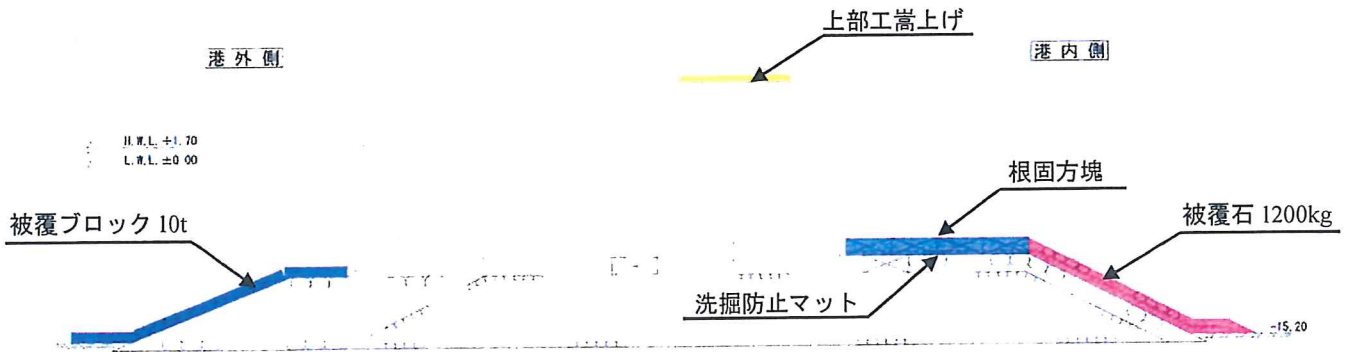
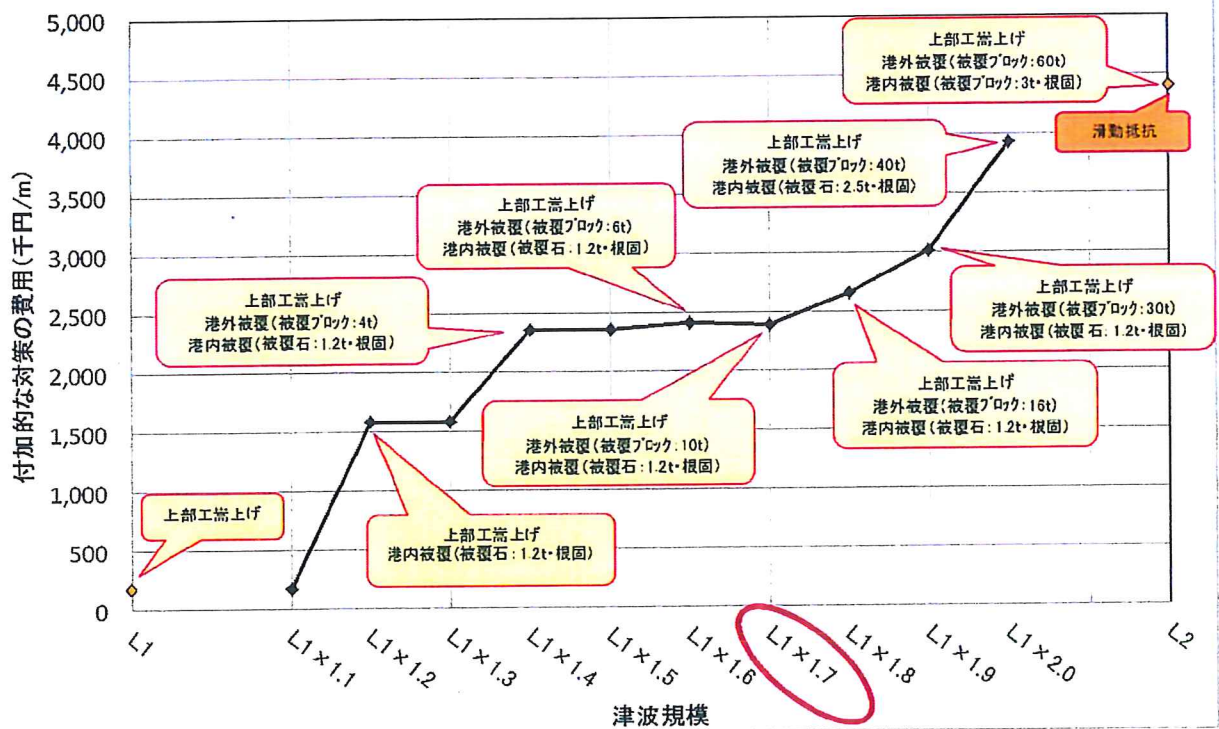


図10 対策断面案（御前崎港防波堤（東）L1×1.7）

御前崎港 防波堤（東）津波規模の変化における対策費用の推移



7. まとめ

本検討では、御前崎港防波堤（東）を対象に、設計津波（発生頻度の高い津波）に対する安定性照査手法を検討するとともに、想定を超える津波に対して粘り強い構造とするなど必要に応じた対策について検討した。

今後、最新の技術的知見を踏まえて今回の検討結果を見直すとともに、さらに検討を深める必要がある。