和歌山下津港海岸（海南地区）津波防波堤の照査法について

小野寺隆柔*・由木　誠**・中島　晋****・河崎尚弘***・黒川文宏*****

*　（財）沿岸技術研究センター　調査部　主任研究員
** 前（財）沿岸技術研究センター　研究主幹
**** 国土交通省　近畿地方整備局　神戸港湾空港技術調査事務所　所長
***** 国土交通省　近畿地方整備局　神戸港湾空港技術調査事務所　技術開発課　課長
****** 前 国土交通省　近畿地方整備局　神戸港湾空港技術調査事務所　技術開発課　技術開発第一係長

和歌山下津港の海南地区においては，近い将来に発生が予測されている東南海・南海地震とそれらの地震に伴う津波によって，大きな被害が発生することが想定されており，被害を軽減するための津波対策が急務となっている．本論文では，和歌山下津港港口部に津波対策として直立浮上式防波堤を設置する際に，必要となる基本断面の設定に対して検討した事項について報告する．

キーワード：津波，直立浮上式防波堤，照査法，3 次元 FEM 解析

1.　はじめに

近畿地方は，巨大な海溝型地震に属する東海・東南海・南海地震とそれらの地震に伴う津波によって過去に大きな地震動と浸水の被害を受けている．特に和歌山下津港海岸海南地区は，図-1 に示すような紀伊水道に面したリアス式海岸の湾奥に位置し，その地形的特性からこれまで昭和南海地震やチリ地震等による津波浸水被害を度々被っている．

しかも，今後 30 年以内に 60～70%の確率で発生が予測されている東南海・南海地震等においては，現状の防潮高さを遙かに超える津波が襲来することが予想されている．

特に，津波浸水予測地域には，行政・防災機関や主要交通網があることから，人的被害はもとより，発災後の危機管理体制や緊急輸送ネットワークの確保に大きな影響を及ぼすとともに，復興の長期化や沿岸部には鉄鋼，電力等の多様な産業の集積が形成され，わが国のみならず世界経済への影響も懸念される．

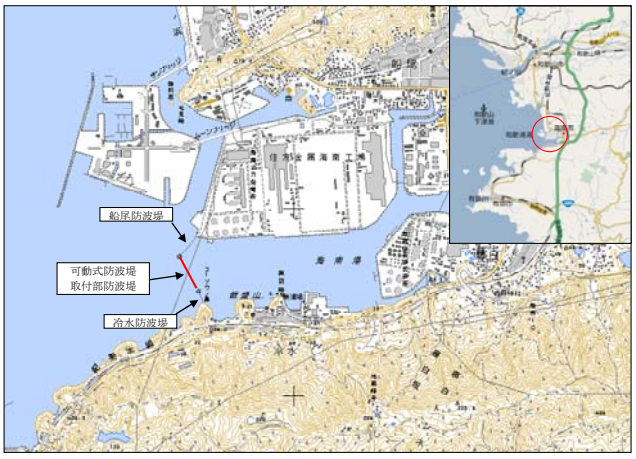

図-1　検討位置図

このため，津波を遮蔽することを可能とした対策が急務となっている．

本論文では，和歌山下津港の港口部における津波対策としての，直立浮上式防波堤の設計における重要な項目である照査法ついて検討した結果について報告する．

2.　設計条件

2.1　天端高

各施設の天端高は津波シミュレーション結果（STOC）の防波堤直近位置における最大津波水位，地殻変動量及び余裕高を考慮し，表-1 に示すとおり設定した．

表-1　施設の天端高

施設名	STOC 最大津波水位※ (T.P.)	T.P.と C.D.L.の差	地殻変動量	余裕高	天端高 (C.D.L.)
津波防波堤（可動部）	+5.53m	+1.10m	0.24m	0.63m	+7.50m

2.2　津波波力

３連発地震（東海・東南海・南海地震）の津波波力は，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」より式（1）により算定した．

$$\left.\begin{aligned} \eta^* &= 3.0a_I \\ p_1 &= 2.2\rho_0 g a_I \\ p_u &= p_1 \end{aligned}\right\} \quad \cdots \text{式 (1)}$$

ここに，

η^*：静水面上の波圧作用高さ（m）
a_I：入射津波の静水面上の高さ（振幅）（m）
$\rho_0 g$：海水の単位体積重量（kN/m^3）
p_1：静水面における波圧強度（kN/m^2）
p_u：前面下端における揚圧力（kN/m^2）

想定外の津波については，想定津波がソリトン分裂し，砕波状態になって作用すると仮定して，式（1)中にある p_1 の波圧を 1.6 倍した波圧を用いることにした．この倍率は，池野ら（1998）によって提案されている砕波状態での波圧式を参照して設定している．

2.3　漂流船舶の衝突

防波堤に衝突する漂流物としては，近郊のマリーナシテイに係留している最大級の船型として，全長 17m，質量 25.6t の船舶を考え，衝突力を次式で計算した．

$$P = 0.1 W_v v \quad \cdots \text{式 (2)}$$

ここに，P ：衝突力の力積

W_v ：漂流船舶の仮想質量

v ：津波の流速

津波の流速としてはSTOCによる津波の伝播計算結果から V=1.32m/s として与えている．

3.　安定性の照査

3.1　対象作用の選定

直立浮上式防波堤の標準断面を図-2 に示す．この様な形状の防波堤に対する作用の組み合わせから最もクリティカルとなる作用を選定するため，海底面回りの曲げモーメントを算出して比較した．設計における作用の組み合わせは表-2 に示す通りで，①～⑤が想定津波，⑥が想定外津波による曲げモーメントである．想定津波に関しては曲げモーメントが最も大きくなる②の組合せと想定外津波に関して以下のような性能規定を設定した．

② 津波＋余震の性能規定：降伏以下

⑥ 想定外津波の外力における性能規定：全塑性モーメント以下

表-2　海底面回りの曲げモーメント比較（単位；kN･m）

	津波による曲げモーメント	動水圧による曲げモーメント	慣性力または衝突によるモーメント	合計曲げモーメント
①津波(3連発)	9,611	－	－	9,611
②津波(3連発)＋余震	6,683	5,369	444	12,496
③津波(南海)＋地震(東南海)	6,683	3,088	207	9,978
④津波(東南海)＋地震(南海地震)	－	4,610	460	5,070
⑤津波(3連発)＋漂流船舶の衝突	9,611	－	366	9,977
⑥想定外の津波外力	15,379	－	－	15,379

3.2　応力度の考え方

上部鋼管間には隙間があるが，副管によって隙間が塞がれることを考慮して上部鋼管１本に作用する津波波力や動水圧等の外力は，連続した壁に作用するものと考え，作用幅は

作用幅 ＝ 下部鋼管径(φ3.000m) ＋ 継手幅(0.065m)

＝ 3.065m

とした．

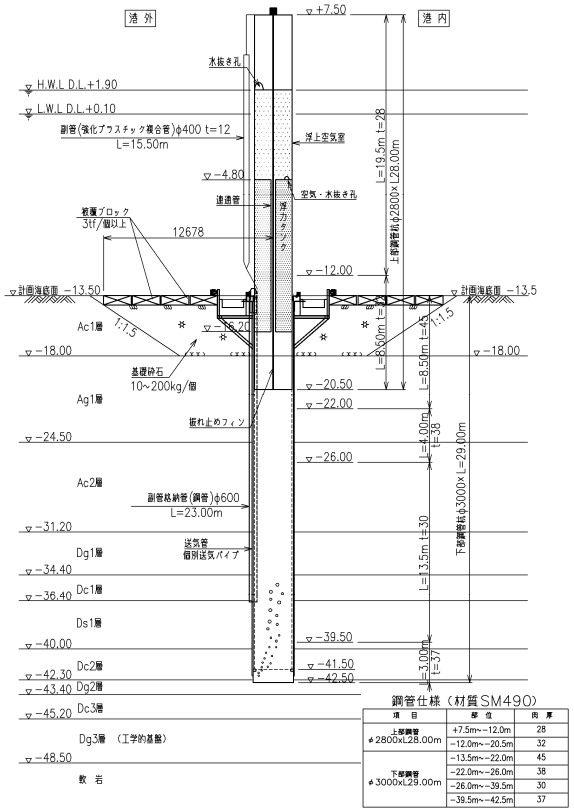

図-2　標準断面図

3.3　構造検討

上部鋼管は，設計外力に対して海底面を固定端とする片持ち梁として設計し，また，下部鋼管は，設計外力によって上下部鋼管ラップ部に生じる支点反力を外力とし，海底地盤によって支持された弾性支承上の梁として設計する．

図-3 における支点反力 RA は支点 RB 回りの設計外力によるモーメントとの静的な釣合いで求め，支点反力 RB は設計外力と支点反力 RA との力の釣合いから求める．オーバーラップ部の長さについては，過大な支点反力が生じないように上部鋼管径の 2.5 倍として，

L＝2.8×2.5＝7.0m とした[1)]．

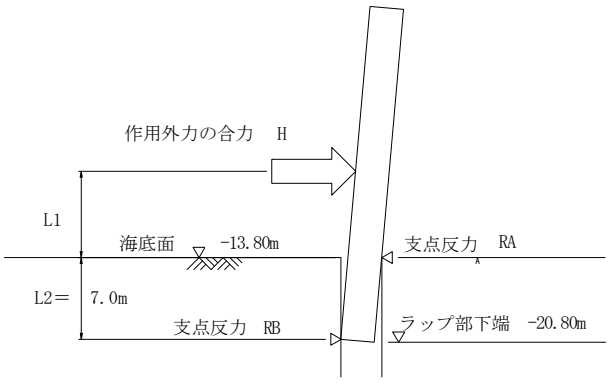

図-3　支点反力位置図

3.4　断面力の算定

解析ケースを表-3 に示す．地盤バネの設定（バネの強弱）によって，変位量や部材応力が大きく変動する可能性があることから，地盤バネについて下記の設定方法を用いて検討し，総合的に判断した．

表-3　解析ケース一覧

	荷重条件	地盤バネの設定方法	
CASE-1 前回委員会時検討	津波３連発 ＋余震	LLT結果より　Ac層を設定	
CASE-2		Cu値より　Ac層を設定	
CASE-3		港湾基準式 水平支持に支配的な層について設定	ラップ部補強材に厳しい条件 ABAQUSに用いたバネ
CASE-4			杭応力に厳しい条件
CASE-5 前回委員会時検討	想定外津波	LLT結果より　Ac層を設定	
CASE-6		Cu値より　Ac層を設定	
CASE-7		港湾基準式 水平支持に支配的な層について設定	ラップ部補強材に厳しい条件 ABAQUSに用いたバネ
CASE-8			杭応力に厳しい条件

CASE-1，5 に比べ CASE-2，6 は，変位量も多く，断面力も大きい結果となった．いずれも変位量は 4～6cm あり，線形バネとしては変位が大きいものであった．

一方，港湾基準式を適用した CASE-3，7 及び CASE-4，8 の変位量は 6.1～9.6cm とより大きな値となっているが，同式は地盤バネの非線形性を考慮しており，変位量の評価として問題ないものと考えられる．

以上が部材の評価として，港湾基準式を用いた解析結果を用いるものとした．

CASE-3，7 は上部鋼管と下部鋼管のラップ部がある Ac1 層のバネを比較的強く設定したケースである．このため，ラップ部上端のダイアフラム等の補強材に応力が大きく発生するものと考えられ，ABAQUS による解析のモデルとした．図-4 は CASE3，7 における下部鋼管の曲げモーメントと変位を示したものである．最大の曲げモーメントは支点反力 RB 付近，最大の変位は海底面で生じている．

CASE-4，8 では逆に Ac1 層の地盤バネを弱く設定しているため下部鋼管の変位も大きく，発生する応力も大きくなることから，下部鋼管の応力照査に用いるものとした．

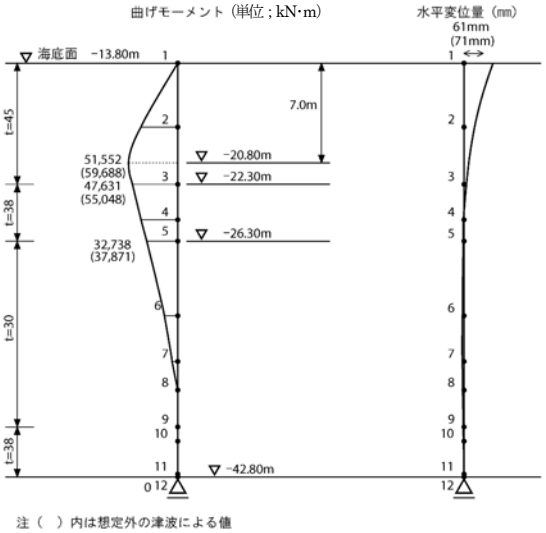

図-4　CASE-3，7 断面力図および変位図

3.5　局部破壊に対する検討

本防波堤は鞘管方式で外力に抵抗するため，外力作用時には上下部鋼管ラップ部の上端及び下端には支点反力が生じる．そこで，この反力に対して上下部鋼管が局部的に破壊しないように補強を行っている．

腐食量については，図-5 に示すような構造形式が鞘管構造であるため，上部鋼管の外面と下部鋼管の内面には電気防食を行うことができない．また，上部鋼管内面の浮力タンク下部については，電気防食は可能であるが，定期的に電位測定を行うことが難しい．

「港湾の施設の技術上の基準・解説」によれば，海水中に位置する鋼構造物では鋼材の腐食速度は 0.1～0.2mm/年程度であるが，上下部鋼管は通常は海底に設置され，上下部鋼管の隙間の海水はほとんど動くことがなく，フレッシュな海水と置換されることはない．そこで，上下部鋼管の間隙水に含まれる溶存酸素量から鋼管の腐食量の試算結果より，腐食速度 0.010mm/年で対応する事にした．

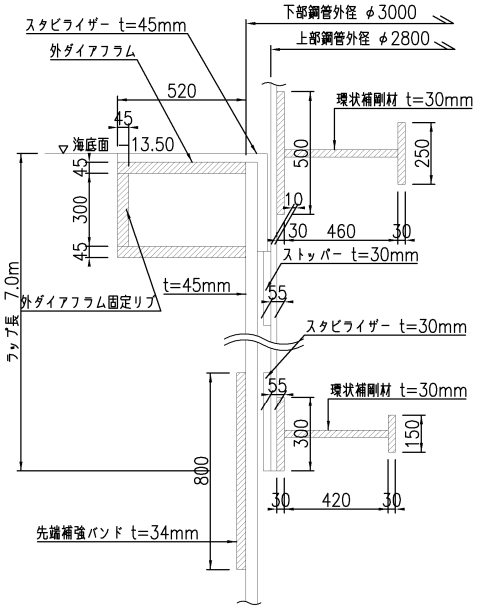

図-5　上下部鋼管ラップ部の補強

3.6　3 次元 FEM 解析によるラップ部の応力照査

(1)概要

３次元有限要素法解析プログラムは，接触問題に対応できるプログラム「ABAQUS」を用いるものとした．ABAQUS は，構造解析と伝熱解析を行うことのできる汎用有限要素プログラムであり，自動車，橋梁，建築構造物，港湾構造物などの応力解析などに幅広く利用されている．また，自動車のエンジンの内部構造解析，原子力発電所の配管解析（温度変位，摩耗など）など接触が点から面へ変化する応力解析において秀でている．今回の上部鋼管と下部鋼管の構造形式から接触も点から面への接触であるため，ABAQUS を採用した．

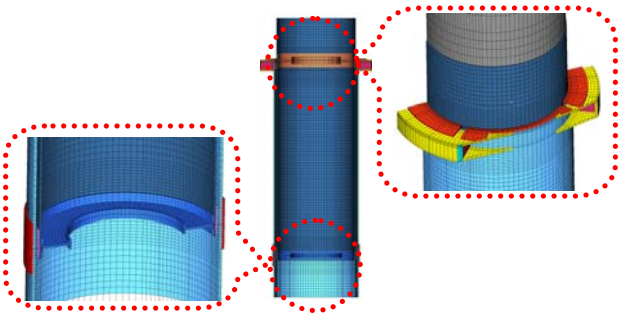

図-6　上下部ラップ部解析モデル

(2) 解析結果

①ケース 1（津波＋余震）

津波防波堤（可動部）の鋼管本体の材質は基本的に SM490（降伏応力度；315MPa）を使用している．ただし，SM490 材で肉厚 40mm を超える場合の降伏応力度は 295MPa である．

解析の結果，外ダイアフラムの縁で降伏応力度を超える応力が発生するため，外ダイアフラムは SM520 材（降伏応力度；335MPa）を使用するものとした．

ABAQUS を用いた解析の結果，部材に発生する応力は，いずれの部材も発生最大応力は降伏応力度以下であり，性能規定を満足している．

②ケース 2（想定外の津波外力）

想定外津波外力に対しても部材に発生する発生最大応力は降伏応力度以下であり，性能規定を満足している．

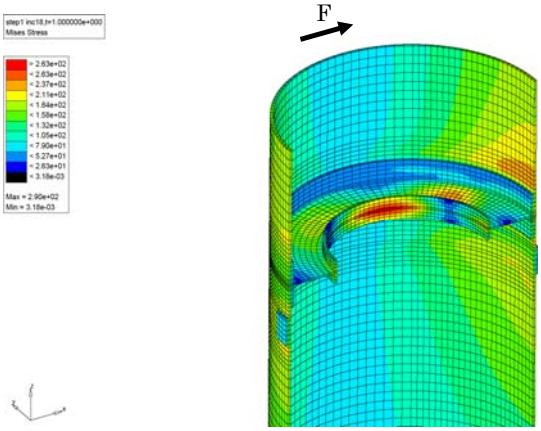

図-7　ラップ部上端の応力図

4.　課題と展望

直立浮上式防波堤を設計するにあたって，いくつかの課題がある．以下に主な課題を列記するとともに，それらの解決方策や展望について記述する．

(1) 構造物の耐力解析

直立浮上式防波堤は，三連動地震で発生する津波に余震を作用させた外力や想定外の外力に対しても耐えられることを検討した．しかし，東北地方太平洋沖地震のような津波がこの地域で起こる確率は極めて低いと考えられるが，設計した構造物がどのくらいまでの外力に耐えられるか確認しておく必要がある．

(2) 維持管理の検討

可動式津波防波堤は，稼働頻度が極めて低い施設であり，その特殊性のある施設を長期にわたり維持するための維持管理方針を検討する必要がある．また，ひとたび津波が発生すると，短時間で安全かつ確実に稼働する必要があり，通常時の維持管理が極めて重要である．

そのため，施設を常に健全な状態に保つことを目的として，ハード的な点検・整備方法・頻度等を検討するとともに，ソフト的な点検として定期的に施設を稼働させる管理運転等を実施することが必要と考えられる．

(3) 現地適用性の検討

可動式防波堤を稼動するにあたり，送気設備は重要な設備である．特に送気配管のルートは，津波災害時に地震による地盤流動や浮遊物の衝突等で切断されることなく稼動するルートを選定する必要がある．また，浮上性能確保に向けた検討として，下部鋼管の打設精度，その計測方法，岩盤を有する地盤での施工方法等を含めた内容の再整理を行う必要がある．

また，可動式防波堤を稼動させる場合，一時的に港と外海が遮断されると同時に船が近くにいると危険なため，海上保安庁や港利用者との綿密な利用に関する規定を定める必要がある．

(4) 運用体制の確立

可動式津波防波堤は，突発的に発生する津波に対して短時間で確実に稼働させる必要があるため，24時間体制での運用が必要である．一方で，稼働頻度が極めて低い施設であることから，可動式津波防波堤を運用するためだけの体制を構築することは，行政コストを増大させる要因ともなり，既存の24時間体制の組織等との連携を図りながら運用体制を構築していく必要があると考えられる．

5.　まとめ

今後，試験堤施工（10m 区間），本体工事と実施工が進行する短い時間の中で，設計・施工・運用における課題について更なる検討が必要である．

6.　謝辞

本稿は，国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所発注による業務の一部を取りまとめたものである．検討に際し，検討委員会の委員各位および整備局関係者には，貴重なご意見・ご指導をいただいた．ここに記して厚く御礼申し上げます．

参考文献

1)　国土交通省近畿地方整備局：平成 18 年度　効率・効果的な津波対策の整備手法に関する技術的検討 報告書，P.2-13，2007.