

港口における可動式津波防波堤の適用性について

黒川 文宏¹

¹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 (〒651-0082 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

港湾では、津波が発生した場合、津波が港口部から港内に流入し、港湾の背後地に大きな被害をもたらすことが想定される。しかしながら、港口部は、船舶の航路として利用されており、通常の津波防波堤等により遮蔽することが困難である。

和歌山下津港海南地区では、近い将来の発生が予測されている東海・東南海・南海地震とその地震に伴う津波により、大きな被害が想定され、津波対策が急務である。

本研究は、和歌山下津港を事例として、港口部における津波対策としての可動式津波防波堤の適用性について検討するものである。

キーワード 港口，可動式津波防波堤，東海・東南海・南海地震，津波対策

1. はじめに

ことが予測されており、津波対策が急務となっている。

歴史的に幾度となく大津波を経験してきたわが国では、津波による被害から背後地域を防護するための対策が急務である。

特に港湾では、津波が発生した場合、津波が港口部から港内に流入し、港湾の背後地に大きな被害をもたらすことが想定される。しかしながら、港口部は、船舶の航路として利用されており、通常の津波防波堤等により遮蔽することが困難である。

以下本稿では、和歌山下津港を事例として、港口部における津波対策としての可動式の津波防波堤の適用性について検討した結果について述べる。



図-1 和歌山下津港海南地区²⁾

2. 和歌山下津港海南地区の状況

文部科学省の地震調査研究推進本部が公表している「海溝型地震の長期評価の概要」によれば、今後50年以内に南海トラフの地震が発生する確率は、東南海地震(マグニチュード8.1前後)が90%程度以上、南海地震(マグニチュード8.4前後)が80~90%とされており¹⁾、東南海地震と南海地震の同時発生の可能性も指摘されている。この大規模地震と地震により発生する津波によって、和歌山県では甚大な被害が発生することが予想されている。

特に和歌山下津港海南地区は、図-1に示すように、リアス式海岸の入り江に位置しており、臨海部の平地に発電所、工場等の産業や、市役所、消防署等の行政の中核機能が集積する地区である。このような地形的特性から、海南地区は津波による広範囲の浸水被害が発生する

3. 津波防護の考え方

(1) 対象とする津波浸水範囲及び浸水深の検討

東海地震・東南海地震・南海地震が同時発生する場合の津波を検討対象とし、海南地区における浸水範囲及び浸水深を計算する。計算条件を表-1に示す。

ここで、護岸の天端高は、地震に伴う液状化による沈下の影響を考慮し、1.3m~1.6m沈下した条件を与える。なお、沈下量の算定にあたっては、沿岸構造物のチャート耐震診断システム³⁾を用いる。

表-1 津波シミュレーションの計算条件

	設定項目	設定値
計算手法	基礎式	非線形長波理論式および連続式
	差分スキーム	(空間差分)スタッガード格子法 (時間差分)リーブ・フロッグ法
	越流公式	本間公式
	遡上境界条件式	岩崎・真野公式(露出処理)
計算条件	波源(断層)モデル	中央防災会議で想定されている東海・東南海・南海地震のモデル
	計算格子間隔	1350m 450m 150m 50m 25m 12.5m
	計算潮位	朔望平均満潮位(H.W.L.T.P.+0.8m)
	計算時間間隔	t=0.2s
	計算時間	6時間
	沖側境界条件	透過境界
	陸域境界条件	陸上遡上(浸水計算)・完全反射計算
	粗度係数	海域：0.025 陸域：0.035~0.055 (土地利用状況によって設定)

計算結果を図-2 に示す。広範囲にわたって浸水し、浸水深が 3m 以上となる箇所も存在することから、大きな被災が想定される。

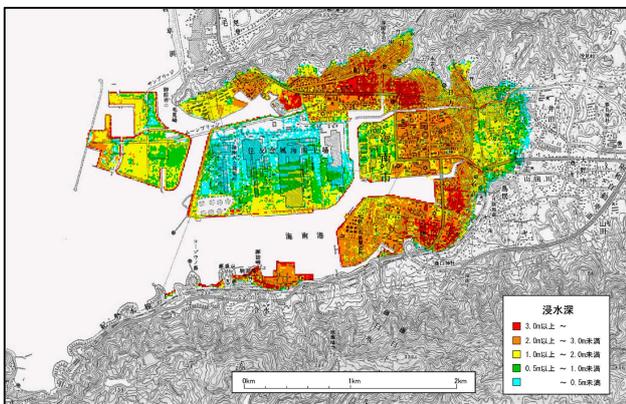


図-2 海南地区における浸水範囲及び浸水深

(2) 津波防護ラインの検討

一般に、海岸保全施設による津波対策としては、天端高の不足している護岸の高上げや津波の来襲時に閉鎖できるような水門の設置等が考えられ、それらを適切に組み合わせることで防護ラインを形成する必要がある。

図-3 に示すように、海南地区では、港内の護岸の高上げに対し、工場の各種配管、岸壁利用等の制約から、極めて対応が困難である。

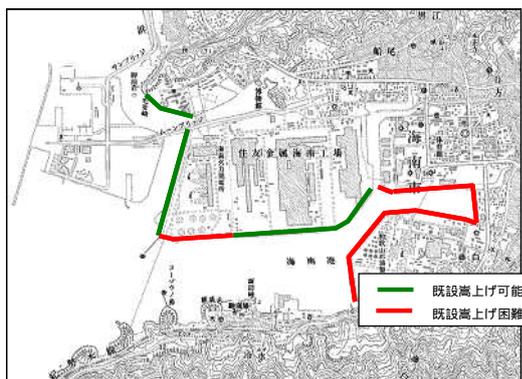


図-3 現地調査結果

したがって、海南地区では、図-4 に示すように港口部の航路に大型水門を設置し、最前線の護岸のみ高上げる対策により、津波防護ラインとする。

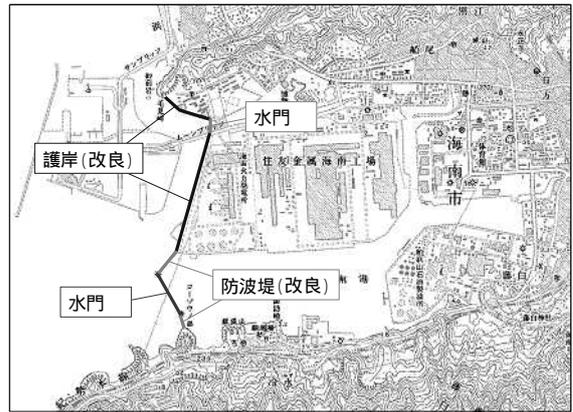


図-4 海南地区における津波防護ライン

護岸(改良)及び防波堤(改良)の区間は、既設構造物の天端高の高上げと津波波力に対する構造物の補強の実施を検討する。水門の区間は、計画水深 2m の水路の河口部にあたり、小型船舶等が通航することから、水門の設置を検討する。水門の区間は、背後企業の大型船舶等が通航する計画水深 13m の航路部にあたり、航路幅も 200m (設置延長 230m) ある。このような水深も延長も大型となる水門を設置するにあたっては、既往の工法では対応が困難となることが想定され、構想段階の新技术等も含めて比較検討し、最適な構造形式を選定する。

4. 津波防護形式の選定

(1) 前提条件

水門の区間は、計画水深 13m、幅 200m (設置延長 230m) である。当該区間の大型水門は、常時、航路水深及び幅を確保し、津波来襲時には津波を防護できる可動式の構造とする。

ここで、津波防護の必要天端高は、東海・東南海・南海地震による津波シミュレーションの結果より、D.L.+8.0m となる。したがって、常時は水深 D.L.-13m を確保し、津波来襲時には天端高 D.L.+8.0m を確保する構造となる。

また、内閣府中央防災会議の「東南海、南海地震等に関する専門調査会」の検討結果によると、津波の第一波により海南地区の水面上昇が開始するまでの時間が 40 分程度と想定されており⁴⁾、船舶の安全確保に要する時間も考慮すると、短時間に確実に閉鎖できる構造とする必要がある。

(2) 可動式の水門の構造形式

大型水門の構造形式は、支承部分の形式によって図-5 のように分類することができる。

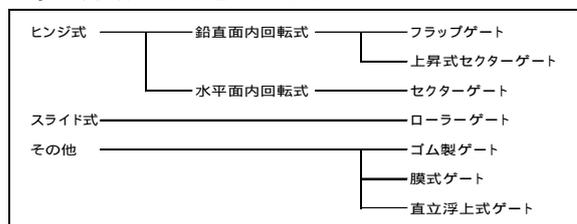


図-5 大型水門構造形式の分類

各形式について，研究段階のものや構想段階のものを含めて，海南地区への適用性について比較検討する．

a) フラップゲート

フラップゲートは，図-6 のように扉体下端のヒンジを支点として開閉動作を行う形式である．常時は扉体が倒伏して海底に格納されており，津波来襲時は扉体を起伏させて水路を閉鎖する構造である．駆動方式としては，機械によって駆動させる方式や給排気による浮力によって駆動させる方式が考えられる．10 分程度での閉鎖が可能である．類似の構造がイタリア（ベネチア）の高潮対策であるモーゼ計画での設置が進められている．

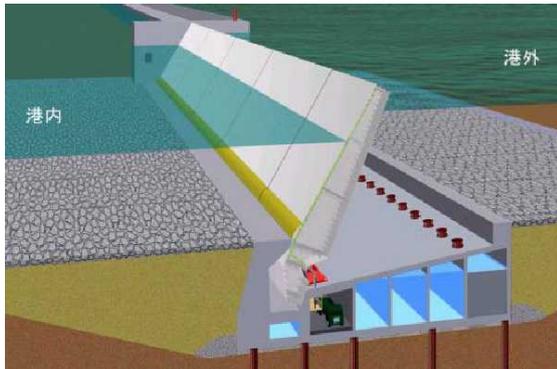


図-6 フラップゲートの模式図

b) 上昇式セクターゲート

上昇式セクターゲートは，図-7 のようにイギリスのテムズバリアでも採用されている形式であり，左右の円盤とシェル構造の扉体からなる回転式の構造である．常時は海底に扉体が格納されており，高潮時に円盤を回転させて扉体を起立させて水路を閉鎖する構造である．構造上，扉体の延長に制約があり，全体延長が長い場合には，中間にピアを設ける必要がある．1 基あたり約 15 分での閉鎖が可能である．



図-7 上昇式セクターゲート（テムズバリア）

c) セクターゲート

セクターゲートは，図-8 のようにオランダのマエスラント堰でも採用されている形式であり，左右の巨大な扇形の扉体からなる構造である．常時は左右のドライドックに格納されており，高潮時にはゲートをスイングさ

せて水路を閉鎖する構造である．構造上，周辺にゲートを格納するスペースの確保が必要となる．閉鎖は，マエスラント堰の事例では2時間程度を要する．



図-8 セクターゲート（マエスラント堰）

d) ローラーゲート

ローラーゲートは，図-9 のように，オランダのハーテル防潮ゲートでも採用されている形式であり，鋼鉄製の開閉用ゲートにローラーがついた構造である．常時は水路の上空にあり，高潮時にワイヤロープ等により扉体を垂直に下ろして水路を閉鎖する構造である．20 分程度での閉鎖が可能である．



図-9 ローラーゲート（ハーテル防潮ゲート）

e) ゴム製ゲート

ゴム製ゲートは，図-10 のようにゴムチューブ内に空気及び水を注入することによりゴム製の扉体を起伏させる形式であり，オランダのラムスポールでも採用されている．常時はゴムチューブ内の空気と水をすべて抜いた状態で海底に倒伏している．1 時間程度での閉鎖が可能である．

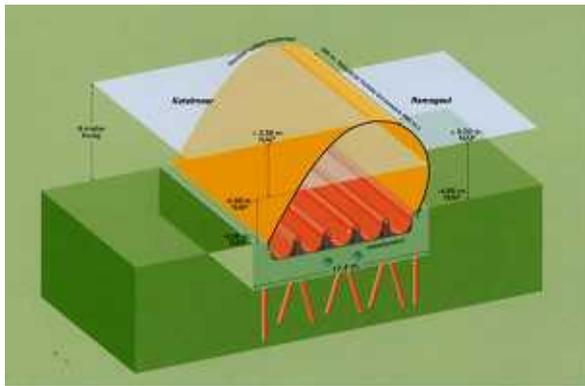


図-10 ゴム製ゲートの模式図(ラムスポール)

f) 膜式ゲート

膜式ゲートは、図-11 のように、ワイヤーと締切膜により水路を閉鎖する構造である。常時は締切膜をすべて収納する。なお、これまで採用された実績はない。

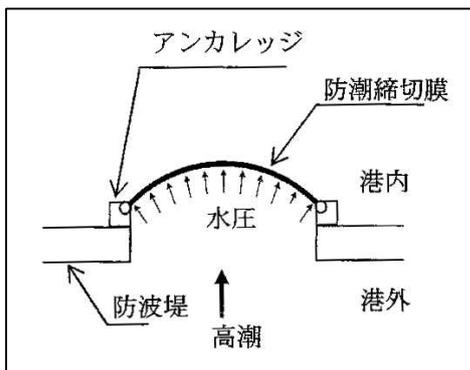


図-11 膜式ゲートの模式図

g) 直立浮上式ゲート

直立浮上式ゲートは、図-12 のように上部鋼管と下部鋼管から構成される鞘管形式の構造である。常時は海底に設置された下部鋼管内に上部鋼管が格納され、津波来襲時は上部鋼管内に空気を送気し、浮力により浮上させて水路を閉鎖する構造である。また、空気を排気することにより再び上部鋼管を格納することができる。10 分程度での閉鎖が可能である。なお、これまで採用された実績はない。

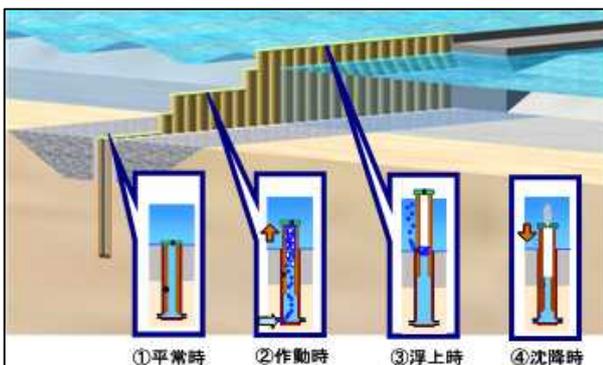


図-12 直立浮上式ゲートの模式図

(3) 適用可能な構造形式の抽出

上記の構造形式の中から、海南地区における最適な構造形式を選定するにあたって、大きく分けて以下の三点について検討し、適用可能な構造形式を抽出する。

閉鎖に要する時間

地震発生後、津波が到達するまでに航路を確実に閉鎖する必要がある。海南地区において津波に伴う水面上昇が開始するまでは 40 分程度と想定されているが、地震発生から津波警報の発令までのタイムラグ、航路上の船舶等への周知・警報、航路上の船舶等の有無の確認等に時間を要するため、実質的に閉鎖に要する時間は 10～20 分程度と設定する。

航路延長と高さの確保

海南地区の航路は、常時は背後企業等の大型船舶が通行するため、延長 200m の航路内や航路上空に構造物を設置することはできない。

地形的制約

海南地区においては、航路の両岸には利用可能な土地がほとんどないことから、大規模な土地等を必要とする構造形式は適用することができない。

(2)で掲げた構造形式について、～ の条件への適用状況を示したのが、表-2 である。なお、表中の「」は適用可能、「×」は適用不可能、「」は適用可能性について詳細な検討が必要であることを示している。

表-2 より、海南地区に適用可能な構造形式として、フラップゲートと直立浮上式ゲートが抽出される。

表-2 構造形式の比較

	閉鎖に要する時間	航路延長と高さの確保	地形的制約
フラップゲート			
上昇式セクターゲート		×	
セクターゲート			×
ローラーゲート		×	
ゴム製ゲート		×	
膜式ゲート		×	
直立浮上式ゲート			

(4) 最適な構造形式の選定

(3)で抽出された可動式津波防波堤形式のフラップゲート及び直立浮上式ゲートについて、詳細に比較検討する。両形式とも、津波防波堤としての実績がなく、津波防護については開発中の形式であることから、特に津波防護の确实性に重点をおいて比較検討する。表-3 に評価を実施する項目を示す。

表-3 比較検討項目

項目		評価事項
津波防護の確実性	要求性能	要求性能 ・港内浸水抑制機能 ・港内水位低下抑制機能
	動作性能	動作性能 ・所定時間内の確実な浮上・起立 ・漂流物・堆積物等による影響
		バックアップシステム ・信頼性のあるバックアップシステムによる確実な浮上
	構造設計	津波外力に対する設計 ・津波外力に対する安定性 ・設計手法の妥当性 ・想定外の外力に対する防護機能
		耐震性・耐久性 ・本震、余震に対する耐震性 ・本体以外の設備等の耐震性 ・適切な防食対策
		基礎の安定 ・常時における基礎部の安定性 ・津波来襲時の基礎部の安定性 ・地震による機能障害の有無 ・地盤の洗掘・吸出し対策
		その他 ・漂流物の衝突による影響の有無
	通常時の船舶航行安全性	偶発的浮上 ・常時における偶発的な浮上の防止に対する信頼性
	津波沈静後の航路解放の確実性	動作性能 ・津波沈静後の格納の確実性
	点検・補修時の津波防護の確実性	バックアップシステム ・点検・補修時のバックアップ機能の確保
維持管理	維持管理 ・維持管理内容の妥当性	
施工性	施工性 ・施工の確実性	

表-3 に示した項目のうち、特に重要と考えられる項目について、以下に詳述する。

a) 動作性能

動作性能については、浮上・起立の確実性と漂流物・堆積物・沈殿物等による動作性能への影響の有無について評価している。浮上・起立の確実性については、短時間での浮上・起立が必要であることや開発中の形式であることを考慮すると、シンプルな構造形式であることが重要であると考えられる。また、稼働頻度が極めて低い施設であることを考慮すると、待機時に漂流物・堆積物・沈殿物等による影響を受けにくい形式であることが重要であると考えられる。

b) バックアップシステム

確実に浮上・起立させるためには、一系統による作動システムだけではなく、バックアップシステムを含めた多系統による作動システムを確保することが必要である。また、それぞれのシステムも高い信頼性を有していなければならない。

c) 津波外力に対する設計

津波からの防護を目的とする施設であるため、津波外力に対して構造全体の安定性を確保する必要がある。また、津波外力は繰り返し作用するため、特に負荷が集中する部材等の応力を照査し、安定性を確保できるようにしなければならない。

d) 耐震性・耐久性

可動式津波防波堤は、大規模地震発生後の津波から防護する施設であることから、大規模地震の地震動により施設が損傷し、本来の津波防護機能を発揮できなくなる

ことがあってはならない。したがって、十分な耐震性を有している必要がある。また、施設の浮上・起立後に余震が発生することが想定されるため、浮上・起立時の耐震性も確保する必要がある。

e) 基礎の安定

可動式津波防波堤が機能を発揮するためには、基礎の安定性が確保されている必要がある。基礎の安定性は地盤条件や波浪条件等により影響を受けるため、詳細な地盤調査や解析等による検証が必要である。

以上の項目について比較検討を実施した結果、海南地区においては、技術的な熟度が総合的に高いと判断し、また建設コスト等も勘案して、直立浮上式ゲートを最適な構造形式として選定した。

5. 課題と展望

これまで述べてきたように、和歌山下津港では直立浮上式ゲートを最適な構造形式として選定した。

しかしながら、直立浮上式ゲートの設計・施工・運用にあたり、様々な課題がある。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) 信頼性の確保

津波来襲時に確実に浮上させるためには、浮上動作を制御するシステムの信頼性の確保が極めて重要である。特に、浮上動作は電気系統による操作となるため、システムを構成する各種の電子機器、計測器等の信頼性を評価するとともに、バックアップによるシステムの多重化等を図ることにより、信頼性を確保する必要がある。

(2) 施工精度の確保

直立浮上式ゲートは、構造上、隣接する上部鋼管の間に開口部を有することとなる。要求される津波防護性能を確保するためには、開口部を所定の間隔以下にする必要があり、下部鋼管を高い精度で打設する必要がある。下部鋼管は大口径の鋼管杭となることから、打設の際の導棒を工夫するなど、施工精度を確保する必要がある。

(3) 維持管理手法の確立

可動式津波防波堤は、稼働頻度が極めて低い施設であり、維持管理手法を検討するにあたってはその特殊性を考慮する必要がある。また、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。したがって、施設を常に健全な状態に保つことを目的として、点検・整備の項目・方法・頻度等を検討するとともに、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なる。

(4) 運用体制の確立

可動式津波防波堤は、いつ来るか分からない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 時間体制で運用する必要がある。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るため、既存の 24 時間体制の組織等と連携を図りながら体制を構築していく必要がある。

6. まとめ

本稿では、和歌山下津港を事例として、可動式津波防波堤の適用性について検討した結果について報告した。和歌山下津港においては、直立浮上式ゲートが最適な構造形式として選定したが、求められる性能や地形的制約等の地域特性によって、選定される構造形式も変わる。

可動式津波防波堤は、大規模地震に伴う津波被害が想定される沿岸域等において適用が期待されており、新しい構造形式等の技術開発も進められている。本稿で示した検討過程が、今後の可動式津波防波堤の適用性を検討する際の一助となれば幸いである。

謝辞：本研究は、「新技術を活用した津波対策の適用性に関する技術検討委員会（委員長：高山知司京都大学名誉教授）」の検討結果をもとに進めております。委員各位にここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 文部科学省地震調査研究推進本部：海溝型地震の長期評価の概要，2009
- 2) 和歌山県ホームページ，<http://www.pref.wakayama.lg.jp/>
- 3) 東島義郎，藤田郁夫，一井康二，井合進，菅野高広，北村道夫：沿岸構造物のチャート式耐震診断システムの開発，海洋開発論文集，第 22 巻，pp. 511-516，2006
- 4) 内閣府中央防災会議：東南海，南海地震等に関する専門調査会（第 16 回），2003