

港口における可動式津波防波堤の 適用性に関する一考察

APPLICATION OF MOVABLE TSUNAMI BREAKWATERS TO HARBOR ENTRANCES

杉田博章¹・黒川文宏²・平澤充成³・齋藤輝夫⁴

谷島義孝⁵・須野原豊⁶・由木誠⁷・村井伸康⁸

Hiroaki SUGITA, Fumihiro KUROKAWA, Mitsunari HIRASAWA, Teruo SAITO,
Yoshitaka TANISHIMA, Yutaka SUNOHARA, Makoto YUUKI and Nobuyasu MURAI

¹ 正会員 工修 国土交通省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 7-30)

² 国土交通省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 7-30)

³ 正会員 工博 国土交通省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 7-30)

⁴ 国土交通省近畿地方整備局港湾空港部 (〒650-0024 神戸市中央区海岸通 29)

⁵ 国土交通省近畿地方整備局港湾空港部 (〒651-0082 神戸市中央区海岸通 29)

⁶ 正会員 前国土交通省港湾局 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関 2-1-3)

⁷ 財団法人沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

⁸ 正会員 工修 財団法人沿岸技術研究センター (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

Port and harbor area has a difficulty in protecting the rear area against the inundation caused by tsunami disaster. Applying a movable tsunami breakwater to the harbor entrance is one of the effective solutions for the disaster mitigation. This paper presents a case study of applying a movable tsunami breakwater to the harbor entrance of the Wakayama-Shimotsu port. Comparing many types of movable tsunami breakwater, buoyancy-driven vertical piling breakwater is the most suitable type to apply to the Wakayama-Shimotsu port.

Key Words : movable tsunami breakwater, earthquake, disaster mitigation, harbor entrance

1. はじめに

歴史的に幾度となく大津波を経験してきた我が国においては、津波による被害から背後地域を防護するために、防波堤・堤防・護岸・水門等の海岸保全施設の整備が進められてきている。しかしながら、我が国の海岸延長は非常に長いこと、想定津波高に対して天端高の不足している施設が依然としてある一方で、整備後においても長時間の経過による老朽化や沈下等により機能が低下した施設も見受けられるところである。

また、港湾においては、港口部が船舶の航路として利用されていることから、通常の津波防波堤等により港口部を遮蔽することは困難である。このため、ひとたび津波が発生すると、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ている。

和歌山下津港の海南地区においては、近い将来の発生が予想されている東南海・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報告する。

2. 和歌山下津港海南地区の状況

和歌山県は、これまで 1854 年の安政南海地震や 1946 年の昭和南海地震等により、大きな津波被害を被っている。また、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、和歌山県においても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している地区である。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ことが予測されており、津波対策が急務となっている。



図-1 和歌山下津港海南地区²⁾

3. 津波防護の考え方

(1) 対象とする津波の検討

海南地区に大きな被害をもたらす可能性のある津波として、東海地震・東南海地震・南海地震が同

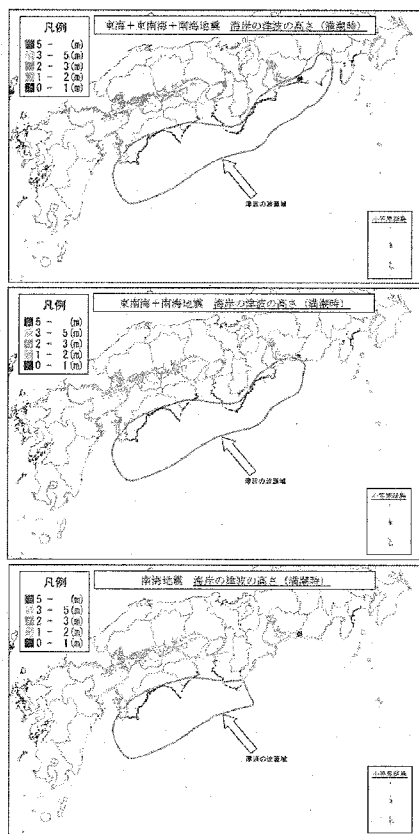


図-2 地震による津波の高さ³⁾

時に発生する場合の津波、東南海地震・南海地震が同時に発生する場合の津波、南海地震が単独で発生する場合の津波が想定される。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」で算定されている、海南地区におけるそれぞれの地震による推定最大津波高さを図-2に示す。(詳細は参考文献参照)。

図-2によると、最大津波高さにほとんど差異が見られないことから、東海地震・東南海地震・南海地震が同時に発生する場合の津波を津波防護対策の検討対象とする。

(2) 浸水範囲及び浸水深の検討

海南地区において、東海地震・東南海地震・南海地震の同時発生に伴う津波によ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。また護岸の天端高については、地震に伴う液状化の影響により沈下することを考慮して、1.3m～1.6m沈下した条件を与えている。沈下量の算定にあたっては、沿岸構造物のチャート式耐震診断システム⁴⁾を用いている。

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agger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	$\Delta t=0.2s$
	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-3に示す。広範囲にわたって浸水し、浸水深が3m以上となる箇所もあるなど、非常に大きな被災を受ける可能性があることが分かる。

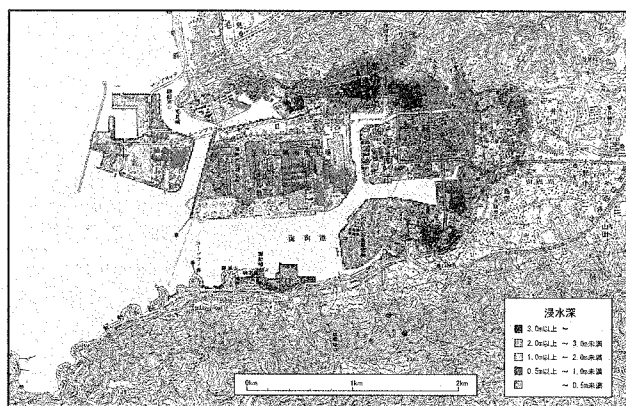


図-3 海南地区における浸水範囲及び浸水深

(3) 津波防護ラインの検討

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嵩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て防護ラインを形成する必要がある。海南地区における津波対策の考え方としては、大別して以下の三案が考えられる。

- 対策案①：護岸の嵩上げを主体として水路の河口部に水門を設置する
- 対策案②：港口部の航路に大型水門を設置して最前線の護岸のみ嵩上げる
- 対策案③：湾奥部に大型水門を設置してその他のところは護岸を嵩上げる

湾内の護岸の嵩上げの可否について現地の状況等を確認したところ、工場等の各種配管があるために嵩上げが困難な箇所や常時利用されている岸壁があるために背後に大きな陸開を設けなければならない箇所が見受けられるなど、対策案①及び対策案③による対策は極めて困難であることから、対策案②による対策を検討することとする。

対策案②に基づいて設定した海南地区の津波防護ラインを図-4に示す。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嵩上げと津波波力に対する構造の補強の実施を検討する。水門②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①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るため、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こととする。

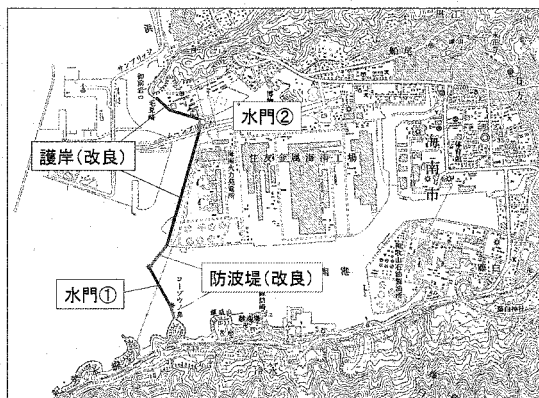


図-4 海南地区における津波防護ライン

4. 津波防護形式の選定

(1) 前提条件

海南地区の港口部の航路は、計画水深13m、幅200mである。大型水門は、航路に対して斜めに設置されるため、延長230mについては、常時は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

動式の構造とする必要がある。

大型水門の必要天端高は、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を確保できる構造とする必要がある。

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³⁾、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。

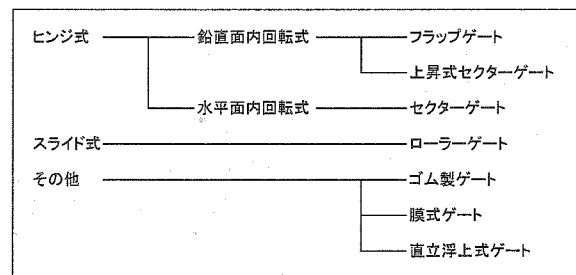


図-5 大型水門構造形式の分類

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水による浮力によって駆動させる方式が考えられる。閉鎖時間としては、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。

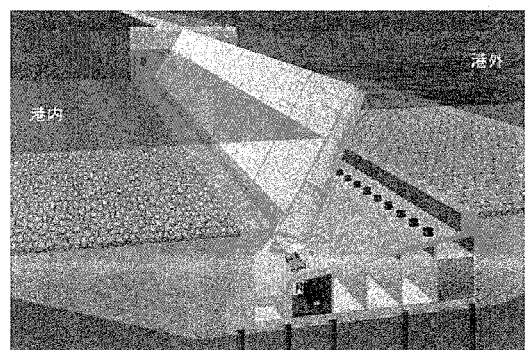


図-6 フラップゲートの模式図

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。閉鎖時間としては、1基あたり約15分での閉鎖が可能である。

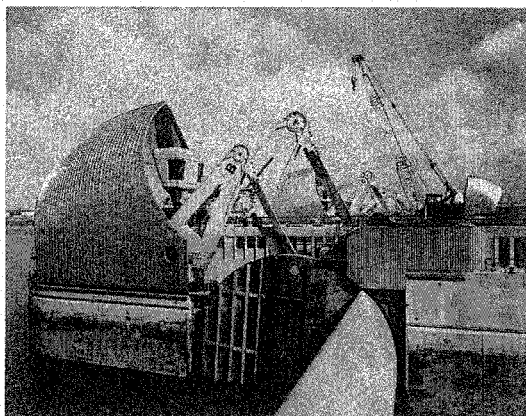


図-7 上昇式セクターゲート（テムズバリア）

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。閉鎖時間としては、マエスラント堰の事例では2時間程度を要する。

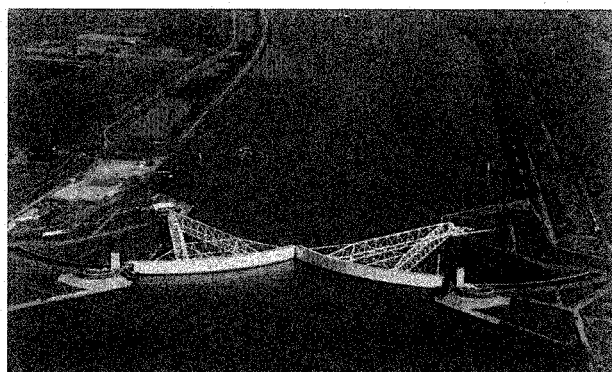


図-8 セクターゲート（マエスラント堰）

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。閉鎖時間としては、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。閉鎖時間としては、1時間程度での閉鎖が可能である。

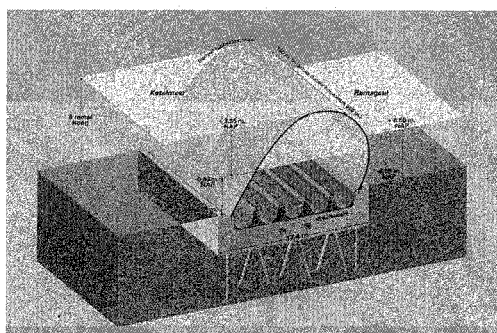


図-10 ゴム製ゲートの模式図（ラムスポール）

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。

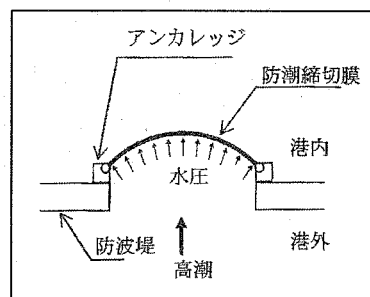


図-11 膜式ゲートの模式図

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。閉鎖時間としては、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。

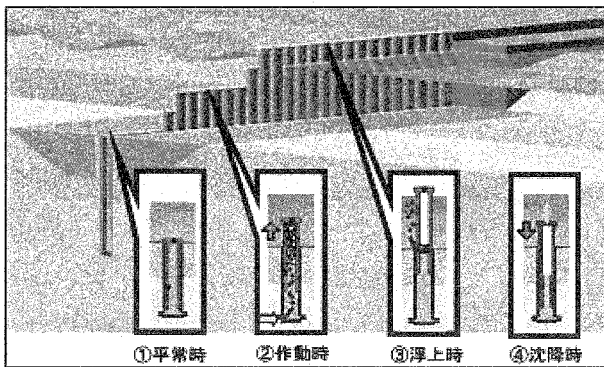


図-12 直立浮上式ゲートの模式図

(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。

①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 分程度にする必要がある。

②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。

③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、①～③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

	①閉鎖に要する時間	②航路延長と高さの確保	③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、特に津波防護の確実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	・港内浸水抑制機能 ・港内水位低下抑制機能
	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
		・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
		・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
		・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		・偶発的な浮上 ・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		・維持管理内容の妥当性
施工性		・施工性 ・施行の確実性

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。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。

当該項目については、直立浮上式ゲートが水理模型実験や現地実証実験による検証が進んでいることが評価される。

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。

当該項目については、両形式ともに信頼性向上の更なる検討が必要であると評価される。

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。

当該項目については、両形式ともに十分に検証されていると評価される。

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。

当該項目については、両形式ともに十分に検証されていると評価される。

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、基礎の安定性の確保が必要である。基礎の安定性は地盤条件や波浪条件等による影響を受けるため、詳細な地盤調査や解析等による検証が必要である。

当該項目については、今回の現地条件においては、フラップゲートが基礎の安定性について更なる検証が必要であると評価される。

以上の項目について比較検討した結果、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、また地域特性、建設コスト等も勘案して、直立浮上式ゲートが最適な構造形式として選定された。

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されたが、実際に直立浮上式ゲートを設計・施工・運用するにあたっては、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、打設の際の導枠を工夫するなど、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、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る。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と考えられる。

(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と考えられる。

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されたが、求められる性能や地形的制約等の地域特性によって、当然のことながら選定される構造形式も変わることとなる。

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) 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
- 4) 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
- 5) 財団法人沿岸開発技術研究センター：大型水門に関する海外調査報告書，2003