

港湾の利用と水域環境に配慮した新形式津波 防災システム(直立浮上式防波堤)の開発

DEVELOPMENT OF NEW PREVENTION SYSTEM OF TSUNAMI DISASTERS
(BOUYANCY-DRIVEN VERTICAL PILING BREAKWATER)
CONSIDERING PORT ACTIVITIES AND WATER ENVIRONMENT

須野原豊¹・稲垣紘史²・有川太郎³

Yutaka SUNOHARA, Hirofumi INAGAKI, Taro ARIKAWA

¹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)

²正会員 博(工) (株)大林組 (〒108-8502 東京都港区2-15-2)

³正会員 博(工) (独) 港湾空港技術研究所津波防災センター(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

In Japan, many people live and major economical activities are done in the coastal areas, and the Japanese economy depends on the world trade. But, the coastal areas are exposed to the threat of natural disasters such as tsunami and high wave. Therefore, tsunami breakwaters in the water areas, tsunami seawalls in the coastal lines, water gates in the rivers and locks have been constructed as the countermeasures by hardware. But, the entrance channel in the port area which requires some width to cope with incoming and outgoing vessels could become the approach of tsunami waves that may cause severe damage to the port facilities and the hinterland. Though the narrower entrance of bay raises safety of port for tsunami disaster, it also worsens water cycle between inside and outside of the breakwater, which may cause new environmental problems such as the aggravation of the quality of water and bottom materials. The new prevention system with buoyancy-driven vertical piling breakwater maintains port activities in normal time and prevents and mitigates tsunami disaster in the port area and the hinterland.

This paper shows the present situation of the development of new prevention system.

Key Words: *Tsunami, Tsunami Breakwater, Buoyancy-driven vertical piling breakwater, Port activity, Quality of water*

1. はじめに

地震大国に位置する我が国では、過去から大規模地震による被害とともに、地震に起因する津波の被害を歴史的に幾度となく被ってきた。更に、諸外国においても、2004年12月に発生したインド洋大津波では、インド洋沿岸諸国で30万人以上の人命が失われるなど、津波被害の甚大さと広域性とともに、津波対策の重要性が認識されだしてきた。

我が国は、資源を輸入し製品を輸出する加工貿易によって発展してきた。このため、臨海部に人口・産業が集積し、外海に開けた湾等では湾奥部に港湾都市が形成されている。石油精製・化学や鉄鋼、発電等の基礎素材型産業が高度成長期に立地した臨海部には、近年は自動車等の加工組立型の産業に加えて、電機・電子等従来は内陸部に立地していた産業までも立地しつつあり、臨海部への産業・資産の集積が進んでいる。

一方、物流の効率化とコスト削減等のため、資源を輸入する船舶とともに、製品の輸出入を担っているコンテナ船も大型化が進み、これら大型船に対応する岸壁の整備や航路の確保が求められている。

これまでの津波防災対策は、ハード面の対策として、湾口部や港口部に防波堤、海岸部に護岸等の海岸保全施設、河口部に水門等を整備して対応してきた。しかし、既存施設の中には耐震性が不十分なもののや、今後想定される津波に対して必要な高さを確保できていないものもある。また、施設完成後長期間を経過して、老朽化や沈下等により必要な機能が確保できていない施設も増加している。

また、津波防災効果を高めるために、防波堤等により湾内の閉鎖性を高めた結果、堤内外の水循環を弱めて、長期的な湾内水質・底質等の悪化等の新たな課題が生じてきている地区もある。

東海・東南海・南海地震等の大規模地震の発生について、その切迫さが指摘されている今、平常時は円滑な港湾活動や産業活動を支えつつ、津波防災能

力を強化することが、港湾地帯においてこれまで以上に重要な行政課題になっている。

このため、既存の津波防災施設の機能を維持・強化しつつ、港湾活動や水域利用、水環境に対して影響の少ない新たな津波防災システムの開発が求められている。

本稿では、この様な行政目的を達成するために、新たな津波防災システムとして開発が進められている直立浮上式防波堤について、その特性とともに、これまでの開発経緯や今後の事業化の可能性について示す。

2. 港湾の特性と津波防災対策

(1) 港湾地帯の特性

我が国の海岸線長約35,000kmの内、背後の利用等からその防護を必要とする海岸は約15,000kmである。そのうち、港湾地帯にある海岸線は4,300kmで全体の約30%であるが、防護すべき人口は全体1,200万人の62%, 760万人を占めている。また、港湾所在の市区町村の工業出荷額は、平成18年で全国315兆円の約45%, 140兆円である。更に、今日では食糧自給率の低下とも相まって、日常生活においても世界に依存する割合が高まっている。

このため、港湾地帯において津波防災対策を計画する際は、平常時は円滑な港湾活動や産業活動を確保し、大規模地震発生等による津波襲来時には、防災機能を発揮して津波から背後地域の人命・財産を守ることが求められる。

更に、港湾では漁船、プレジャーボート等の小型船からコンテナ船、タンカー等の大型船に至るまで様々な船舶が入・出港し、荷役活動や休憩のために係留されている。近年の津波災害では、船舶やコンテナ等の漂流により、港湾内はもとより背後地域での被害を大きくしており、津波襲来時の船舶等への影響を極力低減することも重要な課題である。

(2) 津波防災対策の現状と課題

a) 津波防災対策の現状

港湾における津波対策は、湾の形状、港湾の利用状況、海岸保全施設の整備状況等を踏まえて、東海・東南海・南海地震等の大規模地震発生 of 切迫性が高い地域等を中心に、ハード・ソフトの施策が進められている。

ハード面では海岸堤防や防潮堤等の耐震化、水門の自動化、避難施設の整備とともに、津波防波堤の整備も重要な施策となっている。港湾施設背後に設置される津波防潮堤は、津波災害の防止を第一目的にした施設であり、想定される津波高さより高い天端高で建設する必要があるが、想定津波高さが極端に高い場合、土地利用や日常生活などに様々な障害

となる。特に港湾では、水際線直背後に工場や物流施設が立地しているため、円滑な港湾活動・企業活動の確保と背後地の防護が併せて求められ、津波の港湾内への侵入をいかに防ぐかが重要である。

このため、湾内が広く深く、湾奥に港湾都市が発達している地区などでは、湾口部に防波堤(津波防波堤)を建設して、背後地の堤防等と一体となって津波防災機能を確保する対策が採られてきた。また、地域の津波防災機能の一元的発揮と早期情報伝達を目指して津波・高潮防災ステーションの整備も進められている。

更に、ソフト面の施策として、地域一体となったハザードマップの作成・普及によって、市民の津波防災意識の啓蒙等も図られている。

b) 施設の老朽化と防災能力の向上

海岸保全施設の整備は、戦後の伊勢湾台風やチリ地震津波などの大規模災害を契機として進められてきた。そのため、施設の整備から50年近く経過したものが多く、老朽化により損傷や機能低下が進んでいる。また、耐震性の点でも、大規模地震発生時には、地盤の液状化などでその機能を確保できない可能性の施設も数多く存在している。

大規模地震発生 of 切迫性が指摘されている地域では、早急に老朽化対策や耐震性の向上、必要天端高さの確保等を図る必要があるが、近年の公共事業関連予算が削減される中で、津波防災対策の主体をなす海岸事業予算も減少し続けている。

更に、今後は老朽化した既存施設の改良や更新のための投資が増大して、新規の施設整備が益々困難になっており、今まで以上に効果的・効率的な整備が必要である(図-1 参照)。

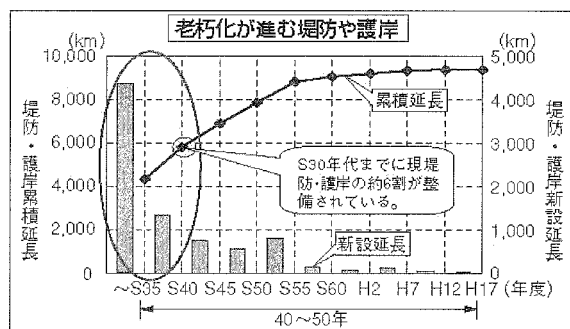


図-1 老朽化施設の増大と進まぬ新設¹⁾

c) 津波防波堤の整備と課題

津波防波堤は、1960年のチリ地震津波の被災を契機に建設された岩手県大船渡港の他、同じ岩手県内の釜石港(2009年度完成)、久慈港とともに高知県の須崎港や和歌山県湯浅広港でも建設が進められている。

津波防波堤は津波の進入を湾口の防波堤で低減させ、湾内水位の上昇を押さえるものである。このため、堤内の水域が広く深いほど効果が高く、限られた地区での採用となっている。更に、海中に大型の構造物を建設するため、建設費が高く、完成まで

に長期間を必要とする。

また、津波防波堤建設後30年以上経過した大船渡湾では、写真-1に示すように高い閉鎖性により津波防災機能が確保されたが、堤内外の海水交換機能が低下して、湾内の環境負荷の増加とそれに伴う底質・水質の悪化など長期的に解決すべき新たな課題が発生している。

このため、岩手県と大船渡市は平成12年に「大船渡湾水環境保全計画」を策定し、水域のCOD濃度を2ppm以下にするよう、地域全体で水質改善に取り組んでいるが、図-2に示すように目に見える改善には至っていない²⁾。また、国土交通省においても堤内水質改善のための調査研究を平成8年度以降進めてきた。18年度まで行われた調査の結果、効果的な水質改善には、堤内の低層水を強制的に堤外に排出するシステムが有効とされた。そのためには確実に低コストのシステム開発が必要である。



写真-1 大船渡湾の津波防波堤と水質調査地点

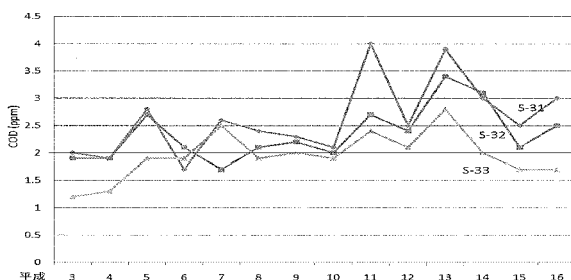


図-2 大船渡湾の水質の経年変化

d) 船舶の大型化に対応した航路確保と津波防災

港湾活動を円滑に維持していくためには、その港湾を利用する船舶の安全な入・出港が不可欠である。航路幅員は、対象船舶の長さ・幅や航行する船舶量、波浪・流れなどの自然条件、港口部の利用状況などによって決まり、一般的には最大対象船舶の長さ以上の幅が必要である。また、航路水深はその船舶の喫水に余裕水深を持った深さが必要である。

一方、物流の効率化と輸送コスト削減のため、近年コンテナ船やバルク船等の大型化が進み、航路計画の見直しを必要とする事例も生じてきている。2014年に完成予定のパナマ運河の拡張により、利用船舶の大型化がさらに進むものと考えられる。

港湾では、船舶の入・出港のための航路が津波の

進入口ともなる。通常時の船舶の安全な入・出港と、津波襲来時の港湾内への侵入防止を図る新たな防災システムの構築が喫緊の課題である。

3. 新たな津波防災システムの構築

(1) 新たな津波防災システムの具備要件

今後、国際間の競争が益々激しくなる中で、企業活動や国民生活とともに、地域の安全・安心を支えていくためには、より円滑かつ効率的な港湾活動の確保と防災機能の向上が求められている。

このため、港湾における新たな津波防災システムでは、既設の津波防災施設の活用・強化を図るとともに、以下の点を考慮した施設計画とすることを目指す。

- ① 地震時の安全性の確保
- ② 港湾活動や水域利用・水環境との整合性
- ③ 津波防災機能の確実な発現とフェールセーフ
- ④ 津波波力に対する安全性
- ⑤ 長期間にわたる津波防災機能の保持
- ⑥ 施行の確実性と建設コスト
- ⑦ 維持管理・運用の容易性とコスト

また、具体的な事業計画を検討する際は、地域防災計画等と十分に整合を図らなくてはならない。

(2) 既存の大型水門等の適用性

港口部・河口部に設置されている大型の施設としては、主にヨーロッパ、特にオランダ等の北海沿岸で建設された可動式の大型水門等がある。これらの施設は、高潮対策や運河の船舶航行、大型船入港時の港内側の水位確保などのために建設されたものである。

構造形式別にはフラップゲート、セクターゲート、ローラーゲート、ゴム・膜式ゲート等がある。近年頻繁に高潮災害に見舞われているイタリア・ベネチアで、高潮対策として進められているモゼ計画では、フラップゲート方式を採用している³⁾。

これらの施設は、いずれも地震直後に襲来し、押し波・引き波を有する津波対策を目的としたものではない。

このため、通常時の港湾利用とともに、地震直後の津波襲来時に確実に機能する、新たな津波防災システムの検討を行った。

4. 直立浮上式防波堤の特性と評価

直立浮上式防波堤は、図-3に示すように上部鋼管(内鋼管)と下部鋼管(外鋼管)から形成される鞘管方式の二重鋼管を壁状に構築した構造物である。このシステムでは、浮上させる上部鋼管は、通常時は海底に埋設された下部鋼管の中に格納されている。津波や高潮の襲来時に、陸上からコンプレッサー等

で空気を圧走して上部鋼管を水面上に浮上させ、防波堤として開口部を閉鎖して津波等の港内への侵入を防ぐ。また、津波等が収まると上部管の空気を排出して沈降させ、下部鋼管内に収納する⁴⁾。

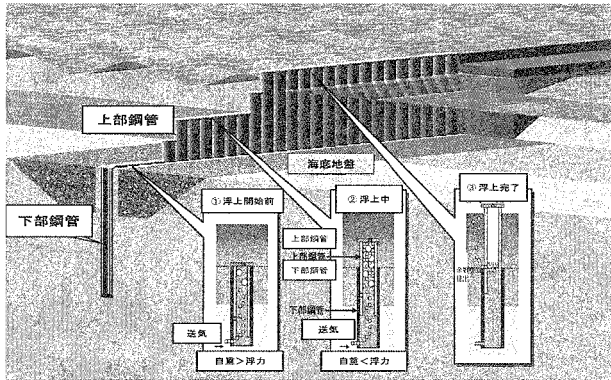


図-3 直立浮上式防波堤のシステムイメージ

津波防災システムとして具備すべき要件に対する直立浮上式防波堤の特性、水理模型実験・実海域実験等から得られた結果は次の通りである。

(1) 地震時の安全性の確保

直立浮上式防波堤の防波堤本体は、通常時は地中に埋設されているため、地震発生時には地盤の変状に追従した動きを示す。鞘管(下部管)に想定地震による地震力を与えて FEM 解析を行い、図-4 に示すように所用の安全性を有していることを確認している。また、地震時の地盤の液状化に対しては、管体重量が鋼管敷設のために中掘掘削した土の重量とほぼ同じであるため、通常的地盤であれば液状化に対しても強い構造物である。液状化の可能性が高い地盤の場合には、鋼管打設に先立ち、地盤改良等の液状化対策を実施して対応する。

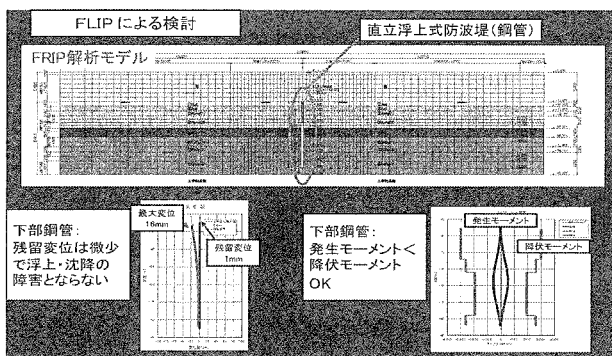


図-4 鋼管の地震時の耐力

(2) 港湾活動や水域利用・水環境との整合性

従来の津波防波堤の整備では、対象とする入港船舶の大きさに対応した港口を確保しつつ、開口部の幅・水深を極力狭めて津波の進入を低減している。このため、堤内側の水域が広く・深い地区など、開口部から侵入した津波外力が堤内側で大きく弱められる場所での建設となっている。一方、本システムは、通常は地中に埋設されている防波堤(鋼管)が浮

上して港口を閉鎖するため、現在の港湾活動や水域利用等に大きな制約を加えることなく計画できる。

また、大船渡湾で見られるように、堤内外の海水交換機能が低下して堤内側が閉鎖性海域となり、新たな環境問題等が発生することも回避できる。更に、将来の航路の拡幅や増深等に対しては、それを施設計画の前提として対応する。

(3) 津波防災機能の確実な発現とフェールセーフ

地震発生後、間を置かずに襲来する津波に対して防災機能を発現させるためには、地震発生後すぐに防波堤としての構造体を形成する必要がある。直立浮上式防波堤は、陸上部より送気して上部管を浮上させて、鋼管群として防波堤を形成する。このため、構造体の検討では波浪中でも数分間で浮上を完了させることを目指した。この浮上システムの特徴は、図-5 に示すように、

- ① 構造が造波抵抗の小さい直立浮上方式
- ② 上部管内に浮力タンクを内蔵させ、浮上のための供給空気量を低減
- ③ 浮上時に空気が膨張し浮力が増大等である。

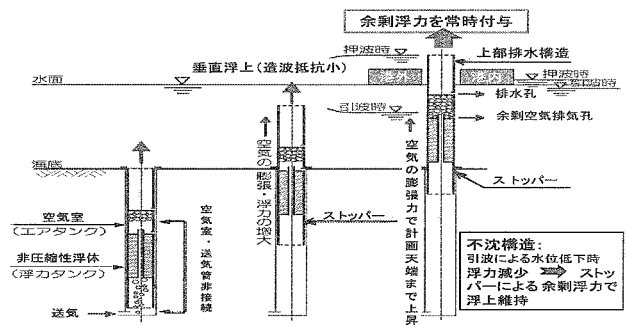


図-5 直立浮上式防波堤の浮上機構

浮上時間等について、陸上で 1/2 縮尺での実証実験を行い、静岡県沼津港では実海域実験を行った。共に送気開始から数分間で浮上完了して、初期の目標通りの結果を得ている(図-6 参照)。

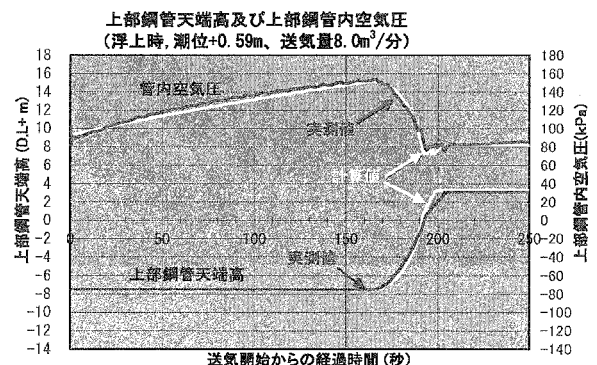


図-6 実海域実験(沼津港)における浮上試験結果

鋼管を複数浮上させて防波堤とするこのシステムでは、送気システムの工夫によって浮上させる鋼

管を任意に組み合わせることができる。このため、地震時の被害等により、一部鋼管の浮上機能に不具合が生じた場合でも、残りの鋼管群の浮上により津波防護機能を確保することができる。また、地震から津波到達までに十分時間的余裕がある場合などは、津波到達直前まで開口部を最小限確保して、港内船舶の沖合への避難に対応することも可能である。

更に、津波では引き波を伴うことが多い。引き波で港内水位が低下し、港内の船舶の座礁・流出が生じる。浮上した防波堤が、引き波による急激な水位低下をおさえて次の押波に備えるために、排気口の港内側への設置やストッパーによる余剰浮力の確保により、必要な天端高さを確保することとした。

(4) 津波波力に対する安全性

津波防波堤の想定津波の波力に対する安全性については、数値解析とともに（独）港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路による模型実験により検討した（写真-2 参照）。

津波波力に対して、基本的には上部管の長杭としての横抵抗で抵抗する構造である。津波波力作用時の鋼管の応力・変位、地盤変位等を評価して、必要な耐力を有していることを確認している⁵⁾。



写真-2 大規模水理模型実験（固定型鋼管）

(5) 長期間にわたる津波防災機能の保持

大規模地震発生とそれに起因する津波の襲来に対しての警戒は長期間にわたる。このため、新たな津波防災システムは、長期的に津波防災能力を保持できるシステムでなければならない。

二重鋼管式の本システムについて、沼津港の実海域実験で、敷設後3年経過した時点に再浮上させ、生物の付着や腐食の進行状況等、長期的課題となる要素について調査を行った。

その結果、再浮上性能は設置当初と大きな変化はなく、生物の付着や異物の挟み込み等による必要浮力の増加も確認されなかった。管は地中に埋設されているため海水交換が少なく、管内 DO が低減して鋼管側面には付着生物は確認されなかった。鋼管の上蓋部分は海水交換があるためフジツボが3mm程度付着していた。腐食については、上蓋（無防食）の腐食は0.2mm程度進行していたが、鋼管側面の腐食は進行していなかった（写真-3 参照）。

今後の長期的な経過観察は必要だが、この結果から、二重鋼管による直立浮上式防波堤は長期間の津波防災システムとして有効に機能すると考えられる。



写真-3 敷設3年後の再浮上調査（沼津港）

(6) 施工の確実性と建設コスト

本システムの主要な構成要素は上部・下部の二重鋼管と上部鋼管への送気システム及び付帯設備である。

二重鋼管は下部鋼管を地中に打設し、上部鋼管を挿入するため、下部鋼管を確実かつ低廉に打設する必要がある。鋼管式の海洋構造物は、栈橋式の岸壁を始め様々な地区で実績があり、現在建設中の羽田空港の第4滑走路は、埋立・栈橋併用型の構造である。また、関西国際空港等において類似構造物として鋼管防波堤が施工されている。以上のことから、既存工法により必要精度での施工が可能である。

送気システムは陸上部に設置するため、施工に対して特別の障害にはならない。必要送気量を削減するため、上部管に敷設時に浮力タンクを設けるなど、浮上時間の短縮とともに送気設備等の運転設備の縮小を図っている。

(7) 維持管理・運用の容易性とコスト

a) 維持管理・運用主体

海岸保全施設は国が直轄事業で施工したものであっても、完成後は海岸管理者（通常都道府県で港湾海岸の場合港湾管理者）が管理し、その維持・管理費用は海岸管理者が負担している。更に、高潮防潮堤等に設けられている陸閘等の開閉作業を、地元自治体や自治会等に委ねている場合もみられる。また、地域の防災や住民の避難等は一義的には基礎自治体の長である市町村長が担っている。

このため、直立浮上式防波堤についても、通常の維持管理や津波襲来時のシステムの作動を、海岸管理者や地元自治体が行うことを想定して、運用システムの単純化・費用の低減化を極力進めることとしている。

b) 維持管理・運用の進め方

本システムの開発目標は、津波襲来時に確実に上部管を浮上させる状態を、長期間・常時維持していくことである。このため、定期的な機器類の点検・補修はもちろん、鋼管を定期的に浮上させ、浮上性能等を確認する必要がある。この浮上試験は、地域の津波防災訓練や避難訓練等と併せて実施して、システムへの信頼性の確保と地域の津波防災意識の保持につなげることが望ましい。

また、この浮上試験では、埋設されている鋼管の

状況確認を行い、必要な補修・改良を実施して維持・管理コストの低減化を図る。

5. 事業化に向けた取り組みと課題

直立浮上式防波堤は、津波襲来時に港湾の港口部を閉鎖して、港内及び背後地を防護するものであり、東南海・南海地震発生時に大きな津波被害が想定されている和歌山下津港において、事業化の検討が進められている。

(1) 和歌山下津港海南地区の津波浸水対策

和歌山下津港海南地区は、港内に鉄鋼・電力・石油精製等の企業が立地し、背後地には海南市の市街地が形成された、産業・人口が集積した地区である。東南海・南海地震に起因する津波災害を防止するための津波浸水対策が計画され、現在事業化に向けて様々な取り組みがなされている。施設計画としては、写真-4 に示すように、埋立地前面の既設の護岸や防波堤は耐震化・嵩上げ等の改良を行い、港口部の一部に固定型の津波防波堤を、航路部分（計画水深13m、幅 200m）に直立浮上式防波堤を、河口部に小型船用の水門を設置するものである。この事業の完成によって津波から防護される面積は約 390ha、防護戸数は5,200戸である。

この津波対策の全体事業費は約 250 億円で、事業は既設護岸の耐震化・嵩上げ等の改良工事に着手している。直立浮上式防波堤については、これまでの基本的な施設設計等を踏まえ、事業化に向けて細部の検討やシステムの維持管理・運用のための仕組み作り等が進められている。

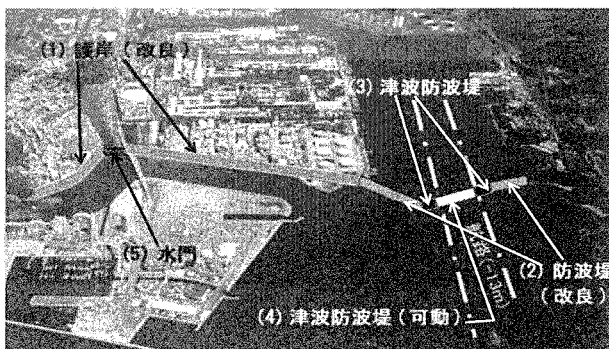


写真-4 和歌山下津港海南地区における津波浸水対策⁶⁾

(2) 今後の課題

東海・東南海・南海地震等の大規模地震の震源域に近接した沿岸域では、地震発生から津波の襲来までの時間的余裕がない。このため、短時間に津波防災機能を発現できる直立浮上式防波堤は、地域の津波防災計画を検討する際に有効なシステムである。

しかしながら、本システムの導入を検討する際は以下の点を考慮する必要がある。

a) 設置範囲・水深と建設適地

鋼管浮上による津波防災システムであることから、

比較的限られた範囲に設置して、大きな津波防災効果が期待できる地区に適する。しかし、浮上した鋼管で津波波力に抗することから、大水深域での設置には課題を残している。このため、大水深の航路を持つ港湾等においては、小型船だまり等の入口に設置して、小型船だまりや背後の陸域を防護するとともに、津波による小型船等の流出による二次災害の発生を抑えることに有効である。

b) 他の津波防災施設等との組み合わせ

和歌山下津港海南地区の計画のように、既存の護岸・防波堤等の改良や避難施設・避難路の整備等と組み合わせる津波防災計画を策定して、着実に事業を進め、地域全体の津波防災能力の向上を図ることが重要である。

c) 施設の維持管理・運用

計画地点は、通常時は港湾活動や水域利用等がなされている。このため、施設の維持管理・運用の仕組みを関係者間で十分検討して、非常時に安全かつ確実に津波防波堤の機能を発現できるような体制作りが必要である。また、作動システムについては、大規模地震発生直後の混乱時においても確実に作動できる様、フェールセーフと単純化が求められる。

更に、この津波防災システムの運用では、港湾利用者、漁業者とともに周辺地区の理解・協力が不可欠であり、実際の運用などについて、定期的な浮上試験などを通して、関係者や市民等に広く周知しておくことが重要である。

6. まとめ

本稿では、港湾活動や水域利用、水環境の保全を考慮した新たな津波防災システムとして、直立浮上式防波堤を提起して、これまでの検討状況について報告した。現在、事業化のための詳細な検討が進められているが、他の津波襲来危険地域においても、本システムの導入を検討している地区もある。早期に事業化され、津波防災施設として地域の安全・安心に貢献できることを願っている。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：平成 21 年度港湾局関係予算概算要求概要，pp. 45, 2008. 8
- 2) 大船渡湾水環境保全計画推進協議会：大船渡湾水環境保全計画アクションプラン(改訂版)，pp. 1, 2006. 8
- 3) 財) 沿岸開発技術開発センター：大型水門に関する海外調査報告書，2003. 3
- 4) 山根隆行，有川太郎，伊藤政人，増山琢也，亀井幸雄，宮坂政司：直立浮上式防波堤の開発，海洋開発論文集，第 21 巻，pp. 115-120, 2005
- 5) 有川太郎，下迫健一郎，小林真，虎石龍彦，荒井清，木原一禎：大規模水理模型実験による津波・高潮に対する直立浮上式防波堤の水理特性に関する研究，海洋開発論文集，第 23 巻，pp. 117-122, 2007
- 6) 国土交通省近畿地方整備局和歌山港湾事務所：和歌山下津港海岸 海南地区津波対策事業，pp. 6