- ◇技術紹介 Technical Report-

# 世界初の直立浮上式防波堤 New Tsunami Disaster Prevention System: "Vertically Telescopic Breakwater(VTB)" for Ports and Harbors

## 1. はじめに

我が国は大規模地震に起因する津波の被害を幾度とな く被ってきており,2011年3月11日に発生した我が国 観測史上最大のマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖 地震による大津波では,東北地方太平洋側沿岸部を中心 として未曾有の被害を受けた。一方,海外においても, 2004年12月のスマトラ島沖地震において,インド洋沿 岸諸国で約30万人の人命が失われたことは記憶に新し い。今後も,南海トラフを震源とする大規模地震による 津波により多くの沿岸域で人命・財産などに大きな被害 をもたらすことが危惧されている。

津波の被害を低減するためのハード対策の一つとして, 防波堤の設置があげられる。しかし,港の航路部におい ては船舶航行の確保のために防波堤を設置することがで きず,当該部分から侵入する津波等のエネルギーを遮 断・低減することは困難であった。

そこで,船舶航行を確保しつつ津波・高波来襲時など 非常時にのみ防波機能を発揮する「直立浮上式防波堤」 を開発した。常時は鋼管を航路部等の海底面下に沈設し, 津波・高波来襲時など非常時にのみ上部鋼管を浮上させ て港内施設等を守るという全く新しい概念の可動式防波 堤である(Fig. 1参照)。

本報においては,概要を示した後,解決した技術的課 題およびその検証内容について示す。

## 2. 構造概要と浮上機構

本防波堤は Fig. 2 に示すように、上部鋼管が下部鋼管 内側に挿入された鞘管構造となっており、浮上は上部鋼 管内への圧縮空気の送気、沈降は排気バルブの開放によ り遠隔操作で行われる。延長方向には継手を設置してい るため隣り合う鋼管の間に若干の隙間を有する。また、 小林 真 Makoto Kobayashi <sup>(本社土木本部生産技術本部)</sup> 武田 篤史 Atsushi Takeda

浮上後の水平力(波力等)の伝達は上・下部鋼管がオーバ ーラップした部分で行われる。

### 3. 解決した技術課題

本工法の開発においては,確実な浮上・降下を担保し, 50年以上の長期間にわたり機能を維持することを目標 としたが,以下のような技術的課題を有していた。

- 1) 津波・高波に対する遮蔽(防御)効果の確認
- 2) 上・下部鋼管の製作精度(真円度)や下部鋼管の鉛直 打設精度の確認
- 3) 波浪中の浮上・沈降確認
- 4) 長期間格納(沈設)中の生物付着状況,鋼製部材の腐



1g. 2 直立浮上式防波堤の構造模式区 Structural Configuration of VTB



Fig. 1 直立浮上式防波堤のイメージ図 Operation System of VTB

食耐久性等の確認

- 5) 排気バルブ等の遠隔操作システムの信頼性確認
- 6) 上部鋼管から下部鋼管への水平力伝達機構の確認

本報では,1)の課題を解決するために行った大規模水 理模型実験,2)~6)の課題を解決するために行った現地 実証実験,6)の課題を解決するために行った数値解析に ついて説明する。

### 4. 大規模水理模型実験

津波・高波に対する遮蔽(防御)効果を確認するために, 大規模水理模型実験を行った。

実験は、(独)港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総 合水路(長さ184m,深さ12m,幅3.5m)に縮尺1/5の防波 堤模型を設置して行った。防波堤模型は,直径0.4mの 鋼管7本を水路幅方向に固定して設置した。入力は,津 波のほか風波を作用させた。Photo1に実験状況を示す。

実験の結果,透過率は風波に対し0.35~0.4,津波に対しては0.25~0.3 であり,十分な遮蔽効果があることを確認した。

また,合わせて,上部鋼管の応答特性,下部鋼管と地 盤との相互作用,水底部の洗掘影響等についても計測・ 観察を行い,実構造物の設計に必要な知見を得ることが できた。



Photo 1 大規模水理模型実験 Large Scaled Hydraulic Model Experiment



Photo 2 現地実証試験 Field Tests

## 5. 現地実証試験

#### 5.1 試験概要

3章に示す2)~5)の課題を解決することを目的として, 平成18年9月から平成21年5月まで静岡県沼津港の波 除堤ケーソン前面において,現地実証実験を行った。

試験体は,上部鋼管(φ1.422m L=14.75m)および下部鋼 管(φ1.600m L=16.75m)を1組用いて行った。また,その 両側には,海底に固定した鋼管(φ1.422m)2本を建て込ん だ。

試験項目は(1)鋼管製作・打設精度の確認,(2)可動(浮 上・沈降)試験,(3)水平載荷試験,(4)波浪応答試験,(5) 付着生物および鋼材腐食等の調査,(6)制御システム作動 試験の6項目とした。

#### 5.2 試験結果

 (1) 鋼管製作・打設精度 上部鋼管は、肉厚 t=14 ~50mm の4 種類の鋼管を溶接接合して製作した。外径は1422±3mm,鋼管中心線のズレは 0mm であり、十分な 真円度を確保することができた。

下部鋼管の打設精度は、1/300の傾斜に抑えることが でき、上部鋼管浮上時における隣接鋼管の接触などに対 して十分な精度が確認された。

(2) 可動(浮上・沈降)試験 蓄圧タンクから送気し、および排気バルブからの排気により、浮上および沈降の作動試験を行った。

浮上に関しては、浮上シミュレーションとよく合致しており、数分程度での浮上完了が可能であることが確認できた(Fig. 3)。

また、浮上・沈降を延べ100回以上繰り返したが、ト ラブルは無く、送気システムの信頼性が実証された。

(3) 水平載荷試験 浮上させた上部鋼管に対し, 陸側に隣接する波除堤ケーソンを反力として水平載荷 試験を行った。

試験の結果,上下部鋼管オーバーラップ部において,



Fig. 3 浮上シミュレーションと実測値の比較 Raising Test Results Compared to Analytical Results

上・下端で2点支持され、下部鋼管を介して地盤に力が 伝達されるなど、耐荷機構を明らかにすることができた。

(4) 波浪応答試験 波浪に対する応答特性を明ら かにするため,上部鋼管を約2週間浮上させたままの状 態にして,波浪時における加速度を計測した(Photo 3)。

試験の結果,波浪に対する応答特性が明らかになり, 上部鋼管を浮体とする動揺解析により応答を予測できる ことが確認された。ただし,上部鋼管と下部鋼管が接触 する際に衝撃的な加速度が生じることがわかり,高波対 策として本防波堤を利用する場合は衝撃緩和対策を設置 する必要性が示唆された。

(5) 付着生物および鋼材腐食等の調査 沈設から 約1年経過した平成19年11月中旬に上部鋼管を再浮上 させたが,鋼管側面には付着生物や有意な鋼材腐食は確 認されなかった。これは,下部鋼管内部の溶存酸素量 (DO)は,海底面下ではDO<2ppmであり,上部鋼管が光 量や溶存酸素の極めて少ない下部鋼管内に格納されて いたためと考えられる。

(6) 制御システムの作動試験 陸上の機械室と上 部鋼管内の制御システムの通信・電力供給を可能とする 非接触カプラ,無線通信等の制御機器の作動試験を平成 21年に実施し,性能を検証した。

## 6. 上下部鋼管オーバーラップ部の数値解析

本構造物は、上・下部鋼管のオーバーラップ部が構造 上の弱点となっており、十分な補強が必要となる。Fig.4 に補強部の構造を示す。上部鋼管内部には下部鋼管と接 触する上下2箇所に環状補剛材(リングプレート)を取り 付け剛性を増している。一方、下部鋼管は、上端部に外 ダイヤフラム、下端部には補強板を取り付ける。

補強の諸元は,道路橋示方書・同解説 鋼橋編および 鋼管構造設計施工指針・同解説に示される方法で決定し たが,形状が複雑であるため,非線形3次元 FEM 解析 により安全性を確認した。

解析モデルはシェル要素およびコンタクトペア要素 (剥離接触要素)により構成し、津波外力の作用重心に水 平力を単調載荷させた。モデルの妥当性については、5



Photo 3 波浪中の加速度計測 Measurement of Acceleration of Pile Top

章に示す水平載荷試験における挙動と比較することで確認した。

解析結果の例を Fig. 5 に示す。解析の結果, 概略設計 は既往の指針により可能であることや, 終局限界状態を 考慮すべき詳細設計においては非線形 FEM 解析が有用 であることが確認できた。

### 7. 性能向上やコスト削減の方策

本工法は、要求性能に応じて、コスト削減や性能の向 上を見込める方法が選択できる。以下に、その一部とし て、副管による遮蔽性能向上方策と3本連結構造による コストダウン方策について示す。

#### 7.1 副管による開口率低減

本工法は鋼管の打設のため,隣接する鋼管間に開口率 5%程度のスリットを有するが,この部分からわずかに水 塊が背後へ流入する。港内の水域面積が小さい場合など では水位抑制の要求性能を満足できない場合も生じうる。 このような場合には,Fig.6に示す炭素繊維強化プラス チック(CFRP)製の副管と称する部材をスリット間に挟 み込み実質的な開口率を低減させて対応することが可能 である。平常時においては,副管も上部鋼管と同様に地



Fig. 4 オーバーラップ部補強構造 Reinforcement of Overlapped Part



(上部環状補剛材周辺の応力状態) Stresses of Overlapped Part Calculated by FEA



Arrangement of Sub-Tubes

盤中の下部鋼管内に格納させる仕様としている。

#### 7.2 3本連結モデルによる送気設備低減

浮上に要する時間を比較的長くできる場合は、3本の 上部鋼管の天端を鋼製連結桁で連結し、中央の鋼管に のみ送気することで3本を同時に浮上させることが可 能である。この場合、送気管の数量を1/3に減らすこと ができるため、コスト低減を図ることができる(Fig. 7)。

### 8. まとめ

直立浮上式防波堤の構造および性能検証の概要を紹 介した。波浪防御効果,施工性,浮上・沈降システム の性能及び構造特性等はこれまでの一連の試験等で実 証・確立できた。

本防波堤は、南海・東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本体工の 一部となる試験工事が始まっており、本体の一部区間 が 2013 年 2 月に竣工予定である。その後、2019 年まで



Fig. 7 3本連結構造 Triad Structure

に航路部全長 230m が本防波堤により施工される予定 である。本地区は和歌山県の主幹産業が集積しており, 住民,企業から早期の津波対策が熱望されてきた経緯 がある。なお,本防波堤は国交省の約2年間にわたる 検討委員会での審議を経て和歌山市下津港海南地区で 津波防災施設として工法選定されている。

適用範囲の拡大と更なる信頼性向上を目指して,設計面では 5~10 分という短時間で津波が到達する港湾 への対応及び施設全体のコストダウン化,運用管理面 では航行船舶の安全監視や運用方法の仕組みの改善に 取り組んでいく所存である。

## 謝辞

本工法は当社が幹事会社となり,(独)港湾空港技術研 究所,新日鉄エンジニアリング(株),東亜建設工業(株), 三菱重工鉄構エンジニアリング(株)の 5 者で共同開発 した技術である。ここに記し,関係者各位に謝意を表 する。