

直立浮上式津波防波堤の実証実験工事から得られた課題と今後の対応について

杉田 徹¹・三村 正樹²

¹近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 海岸課 (〒640-8404 和歌山市湊薬種畑の坪1334)

²近畿地方整備局 和歌山港湾事務所 工務課 (〒640-8404 和歌山市湊薬種畑の坪1334)

和歌山県の海南市沿岸部は、東南海・南海地震等が発生した場合、津波浸水想定区域の中に行政・防災中枢機能や高付加価値製品製造企業が集中しており、甚大な被害が危惧されている。当地区の人命、財産を守るため、湾口を塞ぎ津波の侵入を防ぐ計画で津波対策事業を進めているが、湾口部には航路があるため、航路利用と非常時津波の侵入を防ぐ両方を満足する整備が求められている。よって、航路部においては平常時は海底に格納し、津波来襲時に可動させる世界初の構造形式である、直立浮上式津波防波堤を計画している。本稿では、高い精度の施工を行った実証実験工事の経過及びそこから得られた課題と今後の対応について報告する。

キーワード 津波対策, 新技術

1.はじめに

紀伊半島に位置する和歌山県においては、今後 30 年以内に 60～80%の確率で発生するとされている東南海・南海地震等が発生した場合に、甚大な被害が危惧されている。和歌山県北部に位置する海南市は、紀伊水道に面したリアス式海岸の湾奥にあり、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受けている。東海・東南海・南海地震が同時発生した場合、当市には最大津波水位 T.P+5.9mの津波が来襲すると予測され、被害は県下で最大規模である 5,000 億円と試算されている。

このため、近畿地方整備局和歌山港湾事務所では、当地区の人命、財産を守るため津波対策事業を進めている。

には幅200mの航路があるため、通常の防波堤では航路を塞ぐことになり船舶が航行できなくなる。よって航路部においては、平常時には航行船舶の障害とならず、地震時には津波に対して機能する構造形式を検討した。その結果、平常時は鋼管を海底に格納し、津波来襲時に海面に浮上させる、世界に類のない直立浮上式津波防波堤を採用している。(図-1,2)

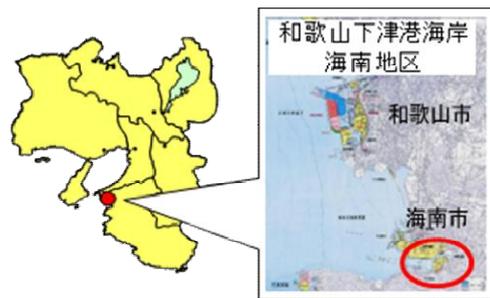


図-1. 和歌山下津港海岸(海南地区)位置図

2. 津波対策事業について

当該津波対策事業は、総事業費約250億円、事業期間は2009年度～2019年度の計画で整備を進めている。当該地区については、民家や学校を始め、企業や病院、他にも行政機関などの中枢機能が集中しており、津波の来襲時には甚大な被害が危惧されている。そのなかで、津波浸水対策を行うに当たっては、臨海部に企業が立地しているため、従来の沿岸部既設護岸を嵩上げする対策を行った場合、船舶荷役など背後利用への支障が大きい。このため、当地区については湾口を塞ぎ津波浸水想定区域前面で防護ラインを形成する計画としているが、湾口部



図-2. 和歌山下津港海南地区全体図

3. 実証実験工事の概要と防波堤の構造

(1) 直立浮上式津波防波堤の構造と特徴

直立浮上式津波防波堤は、海底に設置された直径3mの下部鋼管と、その内側に挿入された浮上・沈降が可能な直径2.8mの上部鋼管（可動鋼管）からなる二重管の構造である。津波来襲時には、送気管を介して上部鋼管内部に空気を送り込み、浮力で上部鋼管が海面上に浮上する仕組みとなっている。浮上させた際に壁を形成するよう、鋼管を防護ライン上に連続で配置することとしているが、隣り合う上部鋼管との間は下部鋼管の板厚等の関係から数センチの隙間が生じるため、防波堤の延長に対して微少な開口部を有することになる。このため、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）製の副管を設置することで、押し波時には開口部の一部をこれで塞ぐ構造となっている。（図-3,4,5）

海底に固定されている下部鋼管には、陸上の送気設備とつながる送気管が設置されており、上部鋼管を浮上させる際にはそれを介して下端から上部鋼管内に空気を送る。空気による浮力が上部鋼管内の水中有効重量を上回ると浮上を開始し、下部鋼管に設置したストッパーにより所定の高さで停止するようになっている。

津波終息後の上部鋼管の沈降については、上部鋼管内に取り付けられた排気バルブを開放し、上部鋼管内の空気を排出する構造となっている。排気バルブの操作は、無線通信により作動させる。

本体構造は上部鋼管3本を1セットとしており、3本の内、中央の管だけに空気を送り込み浮力を与え3本の上部鋼管を浮上させる構造となっている。

これは、予め側管に空気室を設置し、浮上に必要な浮力の約95%の浮力を与えておき、残り約5%の浮力を中央管に空気を送り込み与えることにより、所定の時間内に浮上させられる構造としている。

(2) 工事概要

本工事は、和歌山下津港海岸（海南地区）において計画されている直立浮上式津波防波堤について、世界初の試みであることから、航路に隣接する箇所において実証実験管3本についてを施工することで、施工精度や浮上制御システム等の確認を行うことを目的に実証実験工事を行った。

施工にあたっては、鋼管等を打設する本体工、浮上制御システム等を設置する機械設備工、浮上に関わる一連の動作が正常に行えるかの確認を行う浮上動作確認工等を実施するものである。（図-6）

工事内容：施工延長約9m、可動鋼管3本（下部鋼管（直径3m、長さ29.45m、厚さ30~45mm）打設3本、上部鋼管（直径2.8m、長さ28.45m、厚さ28~32mm）挿入3本）、可動設備 1式、動作確認試験 1式

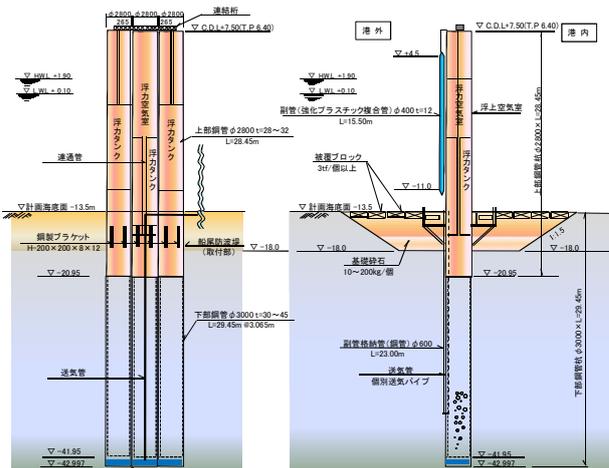


図-3. 直立浮上式津波防波堤の構造



図-4. 開口部を塞ぐ副管

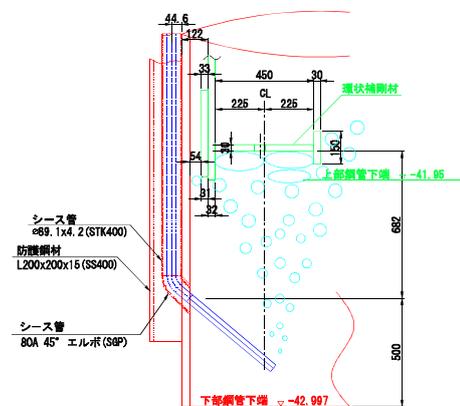


図-5 下部鋼管下端からの送気



図-6. 実証実験工事の位置

(3) 実証実験工事の内容

直立浮上式津波防波堤は、下部鋼管が直径3mの大口徑の鋼管であり、これまで国内における海上打設の実績が無かった。更に、その構造が上部・下部鋼管からなる二重管構造であるため、下部鋼管の打設精度によっては上部鋼管の浮上及び上部鋼管を挿入に支障が生じるため、下部鋼管鋼管の打設には鉛直性及び真円度について、非常に高い施工精度が求められた。

このため、鋼管製作においては高い品質管理を行うとともに、下部鋼管の海上施工においても専用の打設装置、管理システムを使って施工を行った。また、世界で初めての構造物の施工であったため、新たに施工管理基準を設定する必要があったため、有識者等からなる委員会での意見を踏まえて「施工管理マニュアル(案)」を作成し施工管理を行った。

施工ステップは、上部・下部鋼管を工場にて製作を行い、現地まで海上運搬後、ウォータージェット併用2連動パイロハンマにより、下部鋼管を海底に打設を行った。その後、下部鋼管内の土をハンマーグラブを使って中掘した後、鋼管内の洗浄を行った。下部鋼管周辺の基礎及び送気配管を格納する共同溝等を施工した後、上部鋼管を挿入し、浮上に必要な設備工事を行った(図-7)。各工種毎の詳細については以下に示す。

a) 鋼管製作

鋼管の製作にあたっては、鋼管が大口徑であることや上部鋼管には浮上のための空気室を設ける構造のため、一般的な製作方法であるスパイラルでは製作できない。このため、板厚30mm~45mm、長さ2.5m~4mの溶接構造用圧延鋼材を専用の機械で板巻きして鋼管状にしたものをつなぎ合わせ鋼管を製作した。(図-8,9,10)

下部鋼管と上部鋼管の打設後、隙間が一番狭い箇所46mmとクリアランスが少ないため、鋼管の真円度を製作時に0.5%以下、下部鋼管については打設後で1%以下と規定した。

鋼管製作について非常に高い精度が要求され、工場での製作においては、施工途中の曲げ精度確認を行うとともに、1mピッチで測定を行うなど厳しい施工管理を行った。また、上部鋼管については、浮上空気室及び浮力タンクを設ける構造となっているため、厳しい水密性が求められた。このため、溶接部の非破壊検査として、超音波探傷試験及び浸透探傷試験を行うと共に、気密試験を実施するなど通常の鋼管製作の管理よりも厳しい基準で品質管理を行った。

b) 下部鋼管打設

下部鋼管の打設は、大型起重機船により、下部鋼管及び打設のための専用機材を吊り上げ、ウォータージェット併用2連動パイロハンマを使用した。(図-11,12)

打設に当たっては、鋼管の鉛直精度を確保するため、

水中部で鋼管を保持出来るパイルキーパーという専用の打設装置を使用した。また、以下に示す計測管理システムにて打設精度の確認を行った。(図-13,14,15)



図-7. 施工フロー図



図-8. 鋼管製作フロー図



図-9. 鋼材の板巻き



図-10. 鋼管のつなぎ合わせ

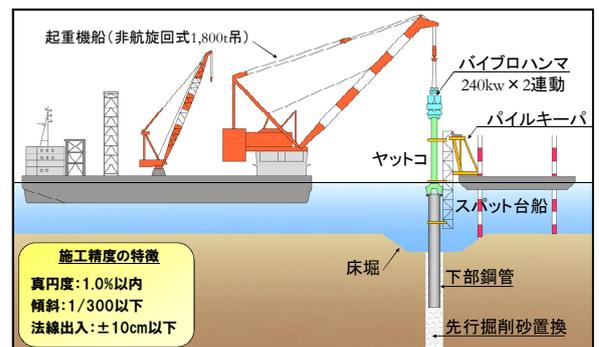


図-11. 下部鋼管打設イメージ図

① 鋼管打設位置の確認

パイルキーパー台船の位置決めについては、施工箇所隣接した位置に設置した2台の「自動追尾式トータルステーション」にて、パイルキーパーで保持した「ヤットコ（上端部）」と「下部鋼管（天端部）」に取り付けた「反射プリズム」を視準することで所定の位置まで誘導し、正確な打設位置決めを行った。また、プリズムの位置データを計測管理システムで即時解析することにより、鋼管の位置座標をリアルタイムで把握した。

② 鉛直精度確認

鋼管の打設精度について、通常の鋼管打設の許容範囲が 1/100 以内に対して今回は 1/300 以内と非常に高い鉛直精度が求められた。

下部鋼管の打設の際には、パイルキーパーに設置させた3対のキーパーアームにて鋼管を把持し、打設精度の管理を行った。キーパーアーム上の可変式ガイドローラ部に装備したストロークセンサーにより、各キーパー部における下部鋼管（及びヤットコ）軸の中心位置の水平方向偏芯量を計測するとともに、パイルキーパーのリーダー部に設置した傾斜計で傾斜度の計測を行った。

c) 下部鋼管手順の検討

下部鋼管については上部鋼管を挿入するため内部を中掘・洗浄する必要があるが、今後航路部に展開していくに当たっては、中掘・洗浄した中空の鋼管の横に鋼管を打設していくことになるため、鋼管打設による既設の中空鋼管への変形等の影響が懸念された。このため、中央

の下部鋼管打設後に先に中掘・洗浄を行った後、航路側の下部鋼管を打設することで、隣接管への影響を調べることにした。

先に中掘・洗浄を行う中央の下部鋼管について中掘・洗浄後に真円度計測を行い、航路側の下部鋼管打設後に、再度真円度計測を行い比較することで影響を調べた。

打設前後の真円度の比較を行ったところ真円度の計測結果に差はなく、隣接管打設による影響は生じないことが確認できた。

d) 下部鋼管中掘・洗浄時期の検討

今回の工事では、別件工事で先行掘削砂置換を行った地盤に対してウォータージェットとパイプロハンマを使用して打設を行った。ウォータージェット等を使用したことにより、周辺の置き換え砂が乱されたために一時的に地盤強度の低下が見受けられた。

よって、実証実験工事という位置づけから、ウォータージェットとパイプロハンマの出力を考慮しながら打設を行い、打設後には現地にてボーリングを実施し、地盤強度の回復状況の確認を行った。このような試行錯誤の結果、中掘・洗浄後も鋼管の鉛直精度等について所定の許容範囲内におさまった。

e) 上部鋼管の挿入

上部鋼管の挿入については、台船にて現地まで運搬してきた上部鋼管を2隻の起重機船で相吊りにて建て起しを行った。下部鋼管が設置されている位置までの誘導については潜水士により行った。（図-16）



図-12. 下部鋼管打設の様子

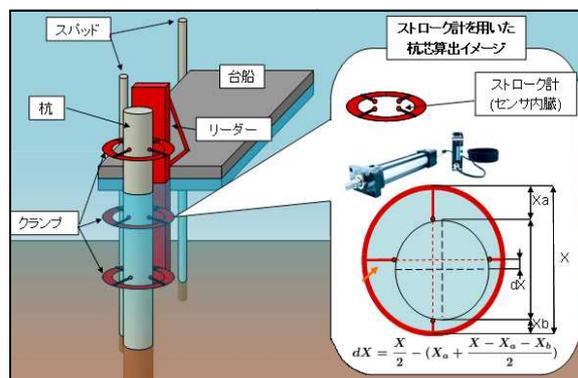


図-14. パイルキーパーイメージ図



図-13. パイルキーパーと反射プリズム

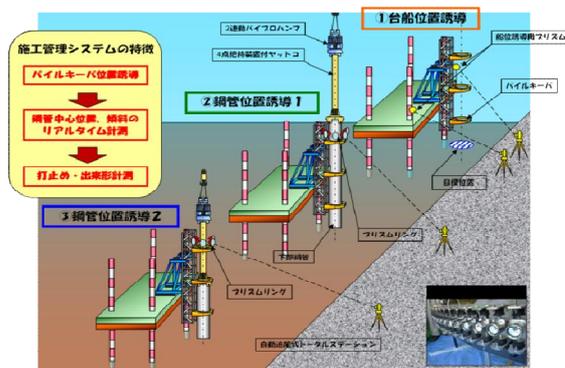


図-15. 計測管理システムイメージ図

さらに、通常の鋼管打設等では建て起しのために予め鋼管に吊筋を設置しているが、上部鋼管については下部鋼管に挿入できなくなるため、吊筋の設置ができなかった。よって上部鋼管を吊るための専用の治具を用いて建て起しを行った。

4. 実証実験工事にて得られた知見と今後の対応について

今回の実証実験工事から以下の知見と課題を確認することができた。今後の課題について以下に示す。

(1) 下部鋼管打設による隣接鋼管への影響

下部鋼管打設による隣接管への影響を把握するため、打設手順を工夫して実施した結果、隣接鋼管打設による影響はないものと考えられる。

(2) 下部鋼管後の次施工への判断基準

今回の実証実験工事において、途中、下部鋼管周辺地盤強度の低下が見受けられた。このことから、打設後の中掘・洗浄の作業に進める判断には、下部鋼管周辺地盤（置換砂）の摩擦力の回復状況を適切に把握する必要があると考えられる。これについては、今後、航路部の施工への展開も鑑み、簡易かつ適切な調査方法を検討する必要がある。

(3) 「施工管理マニュアル」への反映

今回の実証実験工事を行うに当たって、新たに施工管理基準を設定していたが、実証実験工事を踏まえて、「施工管理マニュアル」等に反映すべき点について述べる。

a) 鋼管製作時の管理基準の見直し

鋼管製作は、下部鋼管が設計値より全体的に小さめに製作されており、上部鋼管との整合性から挿入に際して厳しい条件となっていた。このことから、製作時の許容値の設定見直しを検討することが望ましい。



図-16. 起重機船2隻による上部鋼管建て起し

b) 鋼管打設計画書の策定

今後の下部鋼管打設に当たっては、地盤調査結果を基に、ジェット配管数、ジェット圧管理、パイプロハンマ出力管理等を含めた鋼管打設の計画書策定を定めることなどを「施工管理マニュアル」に位置づけることが望ましいと考える。

c) 情報化施工の検討

本構造形式を踏まえると打設中の「傾斜」、「曲がり」、打設後の「真円度」を測定することが必要であるが、その計測方法については今後検討が必要である。

例えば、曲がり、傾斜については打設中に連続的に計測できるようにウォータージェット配管等を利用して打設前に簡易な傾斜計測計の設置が可能かどうか等、情報化施工に関する検討が必要である。

(4) 設計に関する留意事項

今回施工した鋼管の鉛直精度は、浮上機能を勘案して許容値 1/300 と定めていた。今回はこの許容値内で施工ができたものの現地においては非常に厳しい施工であった。

今後の施工が航路部へ展開することを考えると、上部鋼管の浮上に支障がない範囲で鉛直精度の許容値を見直し、現地での施工性を向上させる方向で設計を検討することが望ましいと考える。

また、打設後の真円度計測の結果（歪み等）をみると、傾向として肉厚の薄い部分の真円度誤差が大きかった。このため、鋼管径と肉厚の関係を念頭において、コスト面の比較とともに、施工面を考慮した鋼管の肉厚を設定することが望ましいと考える。

5. おわりに

今回の実証実験工事は、世界初の試みであることから現地での施工精度の確認や浮上制御システム等の確認を行うとともに、今回の工事を踏まえて新たな課題も把握することができた。今後は、これらの課題解決に向けて検討を進めていくこととする。

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震を踏まえて、昨年 8 月末に内閣府より新たな津波想定が内閣府から発表されたことから、直立浮上式津波防波堤についても、実証実験工事にて得られた知見なども活かしながら、さらに必要な検討や検証を進めているところである。

また、地元からは当津波対策事業について早期の完成を望まれており、これらに応えられよう進めていきたいと考えている。

最後に、実証実験工事の施工に当たっては、有識者からなる検討部会において貴重な意見を頂いたものであることをここに付記しておく。