

# 直立浮上式防波堤による津波制御技術

小林 真

(株)大林組 土木本部 海洋土木技術部 副部長



津波・高波から港湾施設と後背地を防御する目的で全く新しい概念の可動式防波堤を開発した。この防波堤は上部・下部鋼管から成る二重鋼管構造であり、津波や高波来襲時に上部鋼管が海底から瞬時に浮上して壁状の鋼管防波堤を形成するものである。これまで、大規模水理模型実験、実海域実証試験、数値解析（構造及び流体関連）等により構造物の信頼性検証を行い、①津波や高波に対する消波性能、②上部鋼管の浮上・沈降性能、③構造設計手法、④大口径鋼管の製作・打設精度、⑤海底格納時の生物付着・鋼管腐食状況等の確認を行った。その結果をもとに設計・施工マニュアルを作成し、和歌山下津港海南地区で建設計画が進行している。

## 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、海外においては、2004年12月に発生したインド洋大津波において、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。そのような中、東海、東南海・南海地震などの大規模地震発生への切迫性が危惧されており、その津波により沿岸の多くの地域で人命・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。

津波の被害でこれまで抜本的な対策が取りにくかったのが港の航路部（港口部）から侵入する津波の防御である。航路部ではこれまで防波堤を設置できなかったことから、当該部分から侵入する津波等のエネルギーを遮断・低減することは難しいのが現状であった。

5者共同で開発を進めてきた直立浮上式防波堤はこの問題を解決すべく、常時は鋼管を航路部等の海底面下に沈設し、津波来襲時など異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（図-1参照）。

本報文では、これまでに行った本防波堤の可動（浮上・沈降）性能、津波等の防御効果及び構造特性について、大規模水理模型実験と実海域実証試験の成果を中心に紹介する。

## 2. 構造概要と浮上機構

本防波堤は図-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

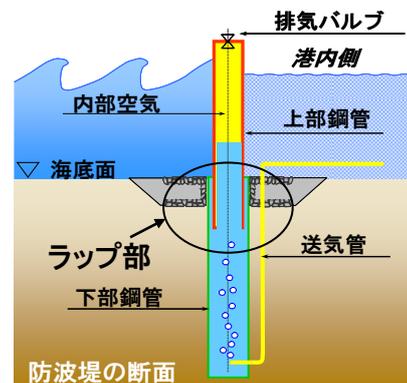


図-2 構造概要（断面図）

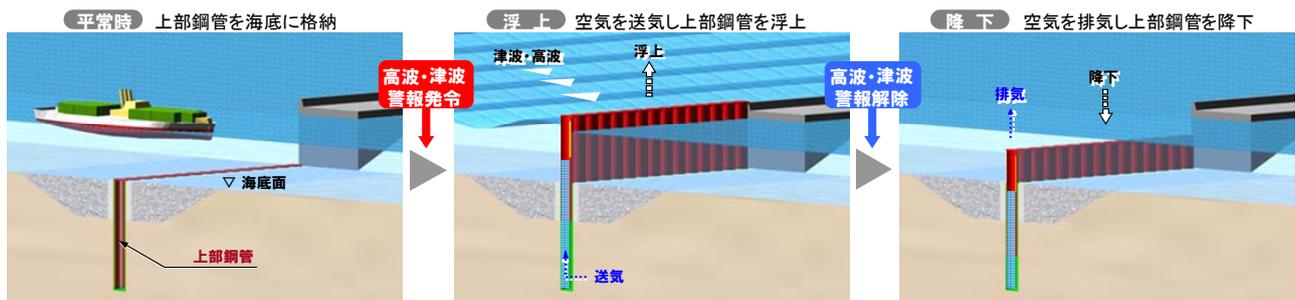


図-1 直立浮上式防波堤の概念図

内への送気，沈降は排気バルブの開放により行われる。法線方向には隣り合う鋼管の間に若干の隙間を有する。また，浮上後の水平力（波力等）の伝達は上・下部鋼管がラップした部分で行われる（図-3 参照）。

図-4に浮上機構の詳細を示す。浮上空気室に送気管を挿入せず分離構造としていること，浮上に空気の膨張を利用して大きな特徴がある。

### 3. 技術的課題と解決方法

上述した構造的特徴のため，本防波堤の開発に際し以下のような技術的課題があった。

- ①法線方向に開口部を有するため，津波・高波に対する遮蔽（防御）効果を明らかにする必要がある。
- 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を現地施工試験で確認する必要がある。
- ③波浪中においても，円滑かつ確実に浮上・沈降するかを確認する必要がある。
- ④上部鋼管から下部鋼管への水平力の伝達機構を確認する必要がある。

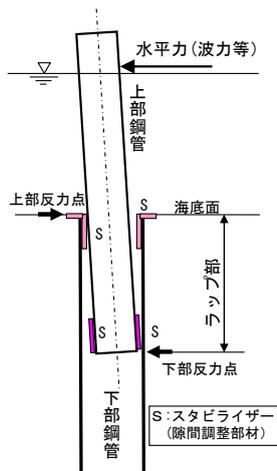


図-3 水平力の伝達機構

⑤長期間格納（沈設）中の生物付着状況，鋼製部材の腐食耐久性等を確認する必要がある。

本研究開発では以上のような課題を解決し，確実な浮上・降下を担保し，長期間にわたり機能を維持することが可能な防波堤の開発を目標とした。

### 4. 性能確認試験

#### (1) 大規模水理模型実験<sup>1)</sup>

実験は，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 の鋼管模型を設置して行った。上部鋼管が浮上した状態を対象として，直径 0.4m の鋼管 7 本を水路幅方向に設置した。実験波は風波（3.6s～5.4s：現地換算値 8s～12s）と津波（20.1s～26.8s：現地換算値 45s～60s）を対象とした。写真-1 に実験状況を示す。また，図-5 に鋼管の開口率と透過率  $K_T$ （透過波高/入射波高）の関係を示す。同図より，開口率が大きくなると透過率が大きくなっていることが分かる。開口率 0.05 の場合，風波対象波に対し透過率 0.35～0.4，津波対象波に対し透過率約 0.25～0.3 となる。

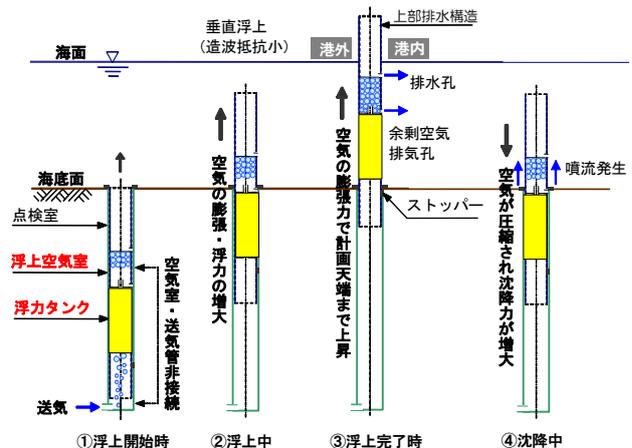


図-4 浮上機構の詳細



写真-1 実験状況（津波）

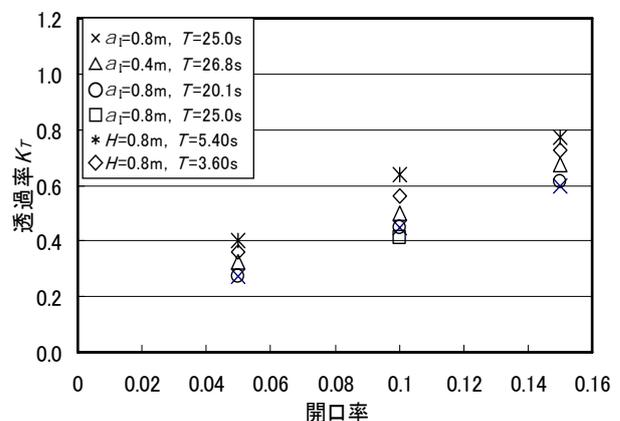


図-5 開口率と透過率  $K_T$  の関係



### ③水平載荷試験

本試験により、図3に示したようにラップ部の上・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ことが改めて確認された。

### ④波浪中耐久性試験

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（計測期間最大波高  $H_{max}=0.87m$ ）における波圧、加速度、ひずみを計測した（写真-5）。特徴的な事象は上部鋼管が下部鋼管に接触する際に衝撃的な加速度が生じることであり、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が必要であることが分かった。実証試験後に別途実施した試験で、ゴム等の緩衝材の設置や上・下部鋼管の隙間縮小が衝撃緩和対策として非常に有効であることが明らかになった。

### ⑤付着生物等の調査

施設の最終沈設から約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直後の状況を写真-2に示している。鋼管側面部には付着生物は確認できなかった。これは、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（図-8）、本施設を維持・管理する上での大きな利点となる。

その他、接触によるラップ部の磨耗はほとんど無く、上・下部鋼管隙間からの土砂侵入も写真-3に示すシルブラシにより防止されていたことが確認された。



写真-5 波浪中耐久性試験の状況

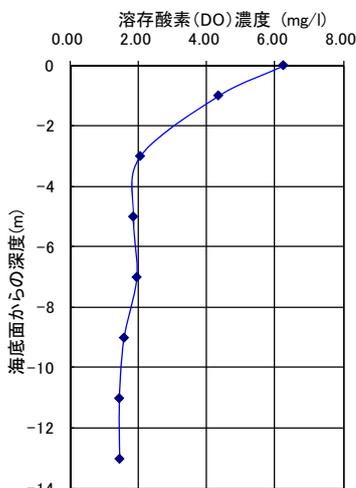


図-8 下部鋼管内の溶存酸素実測結果

## 3. ラップ部における局部補強の数値解析<sup>3)</sup>

### (1)補強方法

本構造物は、上述したように上・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。図-9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、上端部に外ダイアフラム、下端部には補強板を取り付ける。これらの補強部材は、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・同解説に示す方法で諸元を決定した。

### (2)補強断面の応力検証

「水平載荷試験」で述べたように、全体構造解析と試験結果は一致していることを確認しているが、支持点における局部的な応力状態を検証する必要がある。詳細検討における補強断面構造の妥当性検討では、局部荷重の広がりや考慮する必要があるため、検証手段としてオーバーラップ部をソリッド要素でモデル化した FEM 計算を行った。解析ソフトは「ABAQUS」である。

検証方法は、ケーススタディとして、設計外力を通常時（設計水平外力  $H=1,540 kN$ ）、異常時（設計水平外力  $H=3,300 kN$ ）で設定した。また、鋼管構造は2タイプを想定し、上部鋼管は外径  $\phi 2000 mm$  及び  $3000 mm$ 、肉厚  $t20 \sim 40mm$ 、下部鋼管は外径  $\phi 2200 mm$  及び  $3200 mm$  肉厚

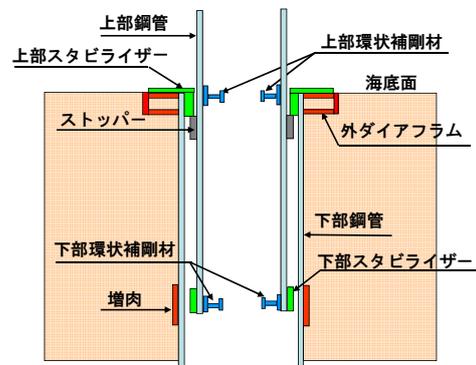


図-9 ラップ部の補強構造

表-1 ラップ部の発生応力

防波堤の用途	項目	上部鋼管補強部		下部鋼管補強部	
		上部環状補剛材	下部環状補剛材	外ダイアフラム	板厚増（補強バンド）
波浪対応の場合	CASE-1 ( $\phi 2000$ )	192 (161)	134 (60~80)	159 (80~100)	186 (100~10)
	CASE-2 ( $\phi 3000$ )	168 (173)	154 (60~80)	193 (100~120)	167 (120~140)
津波対応の場合	CASE-1 ( $\phi 2000$ )	236 (269)	183 (35~120)	316 (145~260)	229 (125~190)
	CASE-2 ( $\phi 3000$ )	234 (233)	241 (70~150)	287 (185~240)	260 (120~190)

- 注) 1. 使用鋼材：SKK490、SM490Y  
 2. 常時の許容応力度  $\sigma_{sa}=210MPa$   
 3. 保証降伏応力度  $\sigma_y=355MPa$  ( $16mm \leq t \leq 40mm$ )  
 $\sigma_y=335MPa$  ( $40mm \leq t$ )  
 4. ( ) 内は補強部周辺における鋼管母材のミゼス応力を示す。

t22~60mmとして構造計算を行った。

その結果、波浪時は降伏応力の 1/1.7 (210MPa SKK490材) 以下、津波時は降伏応力以下 (355MPa SKK490材) に収まっており、構造上問題が無いことを確認した。オーバーラップ部の補強方法の妥当性については以下のことが確認できた。

- ①二重管の非接触部の応力伝達を FEM 解析で再現できることを確認した。
- ②オーバーラップ部の補強構造は「道路橋示方書」や「鋼管構造設計指針」に示される設計式で概略決定できることを確認した。
- ③ソリッド要素を用いた FEM 解析により局部の荷重伝達のメカニズムを解明した。

表-1 に波浪時・津波時の発生応力、図-10 に上部鋼管φ3000の津波時の FEM 解析結果例を示す。応力はいずれも所定の許容応力以内に収まっている。接触面からの荷重の広がりについては、杭の径が大きい場合、荷重の広がりが大きく、荷重分散効率が良いことを示している。

#### 4. あとがき

大規模水理模型実験及び実海域実証試験等により、本防波堤の波浪防衛効果、施工性、浮上・沈降システムの性能及び構造特性等を確認することができた。

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実証試験の実

施を含めた詳細の検討が進められているが、今後の課題としては以下の点が挙げられる。

- ①防波堤の一般的な耐用年数は 50 年以上を想定しており、機械(送・排気)設備や安全監視システムの維持管理費を極力削減する必要がある。
- ②航路閉鎖・開放時の安全性を担保し、合理的な運転計画を策定するため、施設の維持管理・運用方法の仕組みを関係者間で十分検討する必要がある。

#### 謝辞：

最後に、本報告は、(独)港湾空港技術研究所、(株)大林組、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)の共同技術開発成果であることを付け加える。また、静岡県建設部港湾局、沼津土木事務所の皆様には実証試験等に際し多大なるご支援を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 有川太郎, 中野史丈, 野村逸人, 下迫健一郎, 宮島正悟, 小林真, 虎石龍彦, 荒井清, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の津波・風波に対する水理特性, 港空研資料, No.1156, June 2007.
- 2) 有川太郎, 坂口章, 小林真, 虎石龍彦, 櫻井良宏, 木原一禎: 直立浮上式防波堤の実海域実証試験, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.93~98, 2008.
- 3) 有川太郎, 坂口章, 木原一禎, 小林真, 山本邦弘, 永友久信: 直立浮上式防波堤ラップ部の補強方法に関する研究, 第64回年次学術講演会講演概要集, 第I部門, pp.1265~1266, 2009.

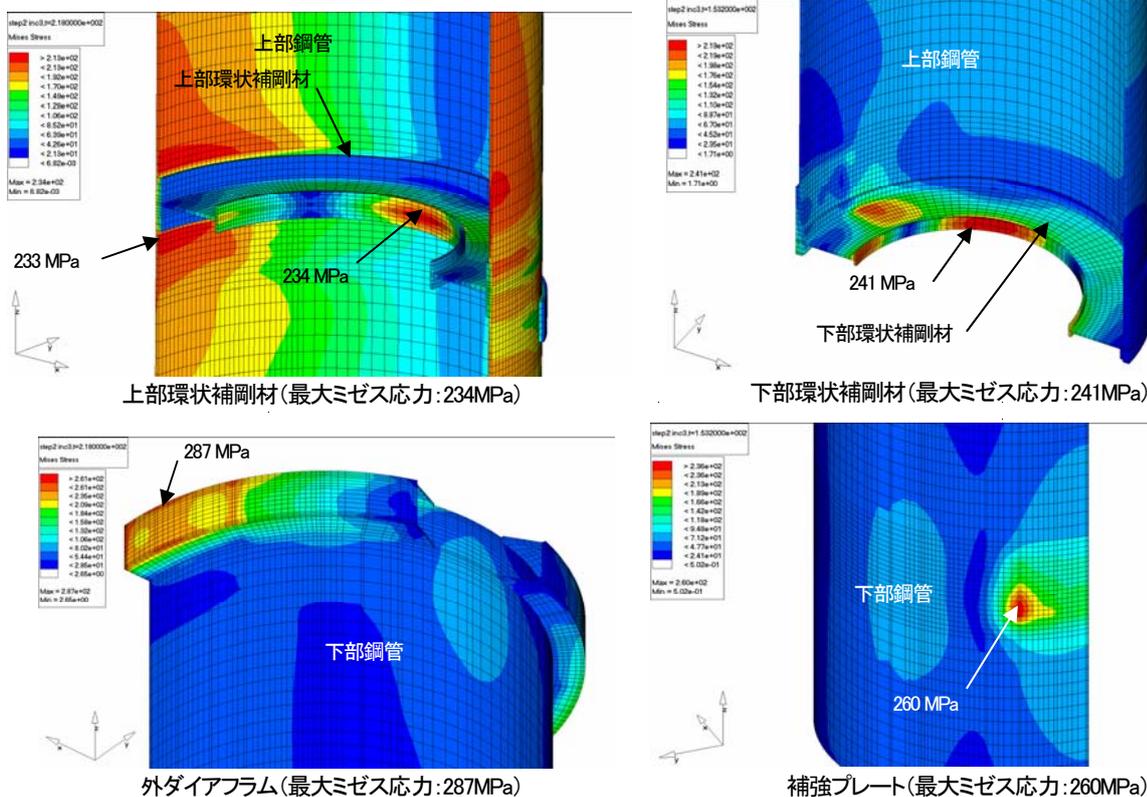


図-10 ラップ部のFEM解析結果(津波対応; CASE-2; φ3000)