

Techno Scope



津波に備える防潮堤・防波堤

甚大な被害となった東北地方太平洋沖地震から10年が経過した。震災以降、防潮堤や防波堤等の設計の考え方が変わり、巨大な津波に対して「粘り強く」抵抗することが求められている。これを受けて、新しい防潮堤や防波堤の開発が進んでおり、鉄鋼材料を活かした製品、工法を紹介する。

写真提供:JFEエンジニアリング(株)

震災以降、変化した津波対策のあり方

2011年3月11日14時46分、東北地方太平洋沖地震が発生した。津波は防波堤や防潮堤、海岸堤防などを軽々と超え、沿岸の町が浸水した。特に巨大な津波が海岸を襲った岩手県、宮城県、福島県では、防波堤や防潮堤なども大きな被害を受けた(図1、2)。

「防潮堤」は陸上にあり、高潮・高波・津波などの浸入を防ぐための堤防で、「防波堤」は海の中にあり、一般には港湾内静穏に保つために港の入り口に設置するものであるが、津波の高さや速さ、波力等を抑制するための堤防を特に「津波防波堤」と呼ぶ(本記事では津波防波堤を「防波堤」と表記する)。

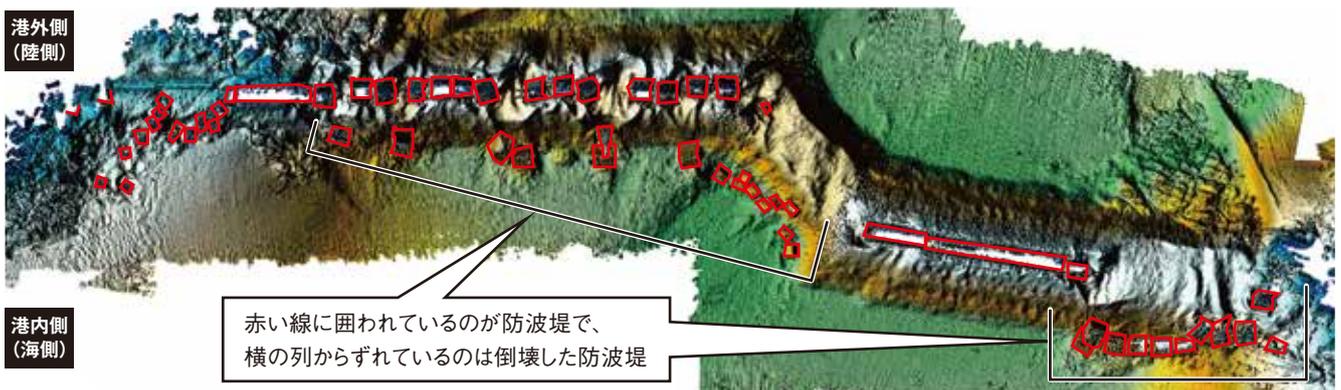
震災後の検証によって、防潮堤や防波堤等は津波を完全に食い止めることはできなかったが、それでも一定時間抵抗し

浸水範囲の縮減や避難時間の確保に効果があったことが明らかになった。図3に示すように、釜石港のシミュレーションでは津波は防波堤無しの場合13.7 mに達し、防潮堤を超えるまでに28分要した。一方、防波堤がある場合、東日本大震災での

◆被災した防波堤(釜石湾口防波堤)(図1)

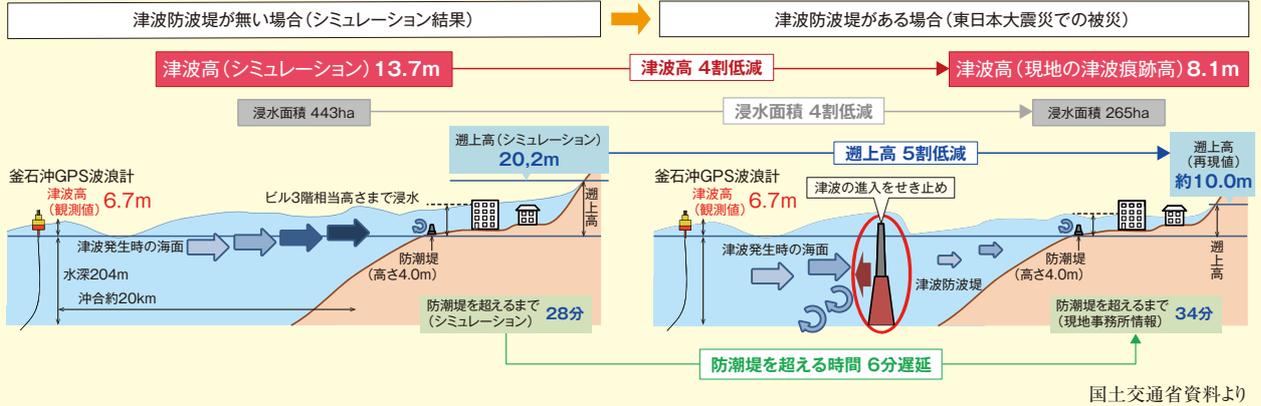


◆ナローマルチビームによる側深データ(釜石湾口防波堤)(図2)

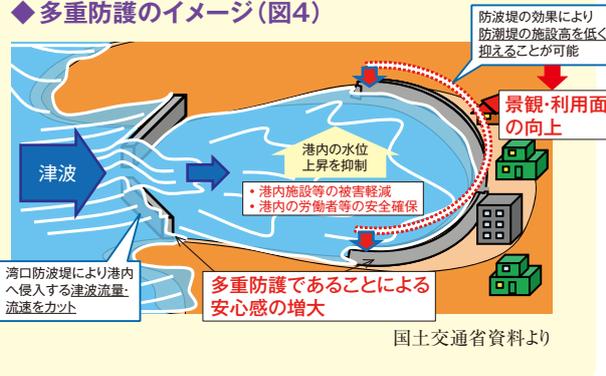


2011年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報(独立行政法人 港湾航空技術研究所)より

◆減災効果(釜石港の事例)(図3)



◆多重防護のイメージ(図4)



被災では津波高は8.1 m、防潮堤を超えるまでに34分かかった。津波高は4割低減、^{せじょうこう}遡上高(津波が海岸から内陸へはい上がった最高地点)は5割低減、浸水面積も4割減少した。図3の沿岸部の住居をみると、防波堤無しの場合には建物の上部まで浸水しているが、防波堤ありの場合、集合住宅の人は3、4階以上へ、戸建て住宅の人は2階へ逃げることができれば、助かる可能性があることがわかる。

このように完全に倒壊しなかった防波堤や防潮堤は地震や津波発生時及び発生後において一定の機能を保ったことがわかったため、防波堤や防潮堤などを組み合わせた「多重防護」による津波対策が考えられるようになってきている(図4)。これは複数の防護施設を組み合わせることで効率的かつ効果的に人命・財産等の「減災」を図るものである。これまでの津波対策の考え方は、災害を完全に防御する考えが基本となっていたが、東日本大震災をもたらした発生頻度が低く規模の大きい津波に対しては、その限界が改めて認識された。完全防護という考えで事前対策を行うにはリスクを事前に完全に認知する必要があるが、災害の事前予測には限界があり、それを越えるものに対しては想定外の事象が生じる。不確実性を伴う事象に対し莫大な費用を掛ける経済的合理性の判断の難しさもある。そこで、災害を可能な限り減らす減災へと、根本的な考え方が

変わり、被害を許容したうえで、災害の最小化を目指す方向で施策が考えられるようになった。

新たに求められる「粘り強さ」

防波堤や防潮堤に求められる性能や機能の見直しも図られた。2011年9月、政府の中央防災会議では、「海岸保全施設等の整備については、設計対象の津波高を超えた場合でも施設の効果が粘り強く発揮できるような構造物の技術開発を進め、整備していくことが必要である」としている。新たに加わった「粘り強さ」は、施設が破壊、倒壊するまでの時間を少しでも長くする、あるいは施設が全壊に至る可能性を少しでも減らすことを指している。

これを受けて、例えば国土交通省港湾局では津波を「発生頻度の高い津波(L1)」と「最大クラスの津波(L2)」の二つのレベルに分けた。発生頻度の高い津波(L1)とは、津波高は低いものの大きな被害をもたらす津波を指し、住民財産の保護や地域経済の安定化などの観点から津波防護施設を整備する。一方、最大クラスの津波(L2)は東日本大震災において発生した、頻度は低いものの発生すれば甚大な被害をもたらす津波を指し、住民等の生命を守ることを最優先とし、住民の避難を軸に手段を尽くした津波対策の確立を目指すこととしている。

津波防護施設の高さの基準となる「設計津波」は、設置する海岸の津波水位分布を算出し、地形特性や津波特性を考慮して設定するが、震災後の見直しによって発生頻度の高い津波を基準にしつつ、最大クラスの津波も踏まえて適切に設定するよう求められている。一例で言うと、従来、宮城県の気仙沼港の防潮堤の高さは2.8 m～4.5 m程度となっていたが、東日本大震災により被災した津波高さ(L2津波相当)は14.6 m、震災後に見直されたL1津波相当の設計津波が6.2 mとなり、防潮堤の高さは7.2 mに見直されている。

◆HB防潮堤の特徴(図5)



完成した防潮堤(山田漁港)

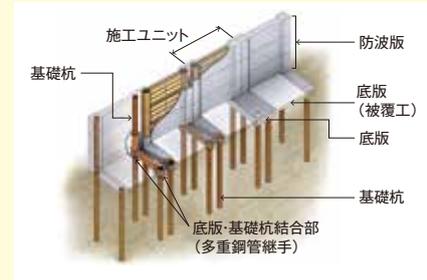


施工前の山田漁港の様子



施工中の様子(山田漁港)

構造



津波に対して粘り強く抵抗する機構



資料提供:JFEエンジニアリング(株)

早期復興に役立つ防潮堤

このようなガイドラインの変更を受けて、新しい防潮堤や防波堤の開発が進められた。中でも強度と粘り強さを兼ね備えた鉄鋼材料の特性を生かした製品を紹介する。

例えば、震災後、早期復興に役立つと採用実績を伸ばしているのが「ハイブリッド防潮堤®(以降、HB防潮堤と記す)」(JFEエンジニアリング(株))である(図5)。復興工事には資材や現場作業員が不足しがちだが、この防潮堤は、鋼管杭に鉄殻をコンクリート被覆したハイブリッド式プレキャスト底版と防波版をはめ込む構造となっており、現地で基礎鋼管杭を施工している間に工場で堤体ブロックを製作(プレファブ)し、基礎杭施工後わずか数日間で堤体と基礎を一体化できる。従来のRCコンクリート製の直立防潮堤と比較して現地生コン使用量を約80%、型枠を約95%削減し大幅な省力化を図り、現地工期を60%程度短縮することができる。

また支持機構に鋼管杭を用いることで津波が設計津波を超えた場合でも粘り強く抵抗することができる。さらには津波荷重が作用した際に最も応力が発生する防波版の基部は基礎杭とさや管の二重構造となっており、基礎杭とさや管の間隙はグラウト材(充填コンクリート)を注入することで一体化し、通常の杭の2倍の剛性を確保している。剛性を高め、設計津波に対して粘り強く抵抗させることで、杭の巨大化を防ぎ合理的な杭設計を可能としている。

HB防潮堤は2011年の震災直後から開発が始まり、ジャケットやケーソン等の既存の港湾設備の保有技術を応用することで

開発期間の短縮を図り、いち早く実用化した。2013年には岩手県の山田漁港(924 m)に採用され、新規開拓の製品としてはかなりのスピードで採用に至っている。それは現地の状況を把握したうえで開発に臨んだことや既存技術の応用、さらにはこれまでの防護施設では津波に到底太刀打ちできないことから、新しい発想の防潮堤を求めるニーズがあったからと思われる。現場作業量を最小限に抑えることができるため高く評価され、プレキャスト防潮堤としては現在トップの実績を誇る。2015年度には第17回国土技術開発優秀賞を受賞している。

最近では、浸水が許されない原子力施設を覆う壁として採用されたり、近年、激甚化する台風や集中豪雨に対して、防水壁として展開するなど、HB防潮堤の応用が進められている。

大きな津波に粘り強く抵抗する防波堤

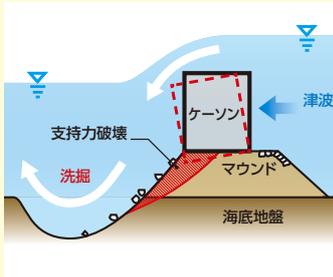
新しい防波堤も鉄鋼材料を利用して「粘り強い」構造が実現している。

東日本大震災では防波堤の多くは崩壊し、福島県の相馬港で約9割、岩手県の釜石港で約7割、青森県の八戸港で約半数の防波堤が崩壊した。特に釜石港の防波堤はギネスブックにも登録された世界最大水深(63 m)の防波堤であり、31年の歳月をかけて2009年に完成した。その防波堤が崩壊する様を東日本大震災で目の当たりにした関係者は、大きな衝撃を受けた。

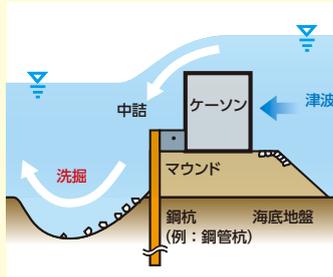
そのため震災直後から、新しい防波堤の開発が始まり、そのうちの粘り強い防波堤の一つが「鋼管杭式防波堤補強工法」(図6)である。本工法は日本製鉄(株)が考案し、挙動特性把握やメ

◆鋼管杭式防波堤補強工法の特徴(図6)

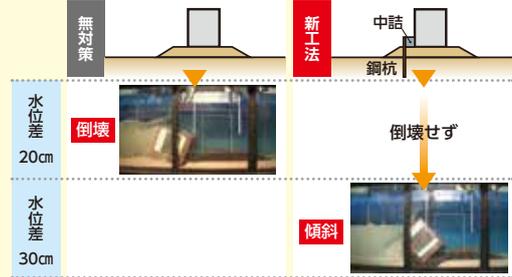
・従来のケーソン式防波堤



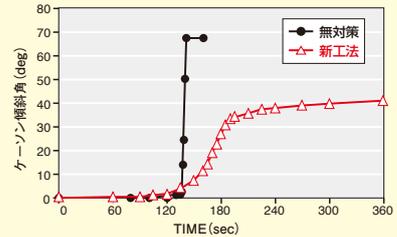
・新工法



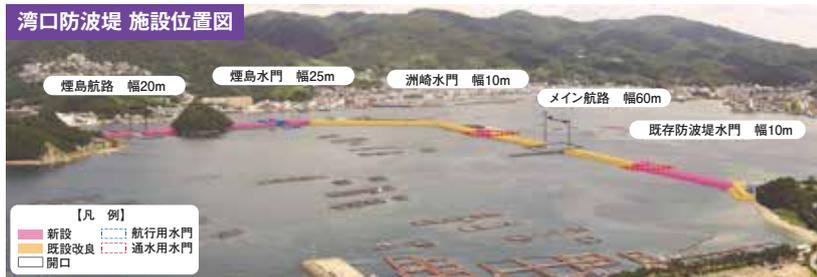
・水理模型実験(実物の1/25サイズ)



ケーソン傾斜角



資料提供:日本製鉄(株)



新工法が採用された福良港

資料提供:兵庫県 淡路県民局 洲本土木事務所

カニズム解明等は東京理科大学、(国研)港湾空港技術研究所、(一財)沿岸技術研究センターとの4者共同研究にて取り組み、その研究成果に基づき工法が完成しており、設計津波に対して安定性を保ち、設計津波を超える津波に対しては変形は許容するが倒壊しにくい特性を発揮する。これまで主流の防波堤の構造は、比較的硬質な海底の上に土台があり、その上に「ケーソン」と呼ばれるコンクリート製の重力式構造物が載せてある。このケーソン式防波堤に津波や波力として水平力が作用すると底面の摩擦で抵抗するが、想定以上の水平力が作用するとケーソン自体が土台の上を滑動したり、海底の土が削り取られる「洗掘」等により土台の支持力が失われてケーソンが倒壊したりする。そこで、ケーソン式防波堤の背面に鋼管杭の鋼壁を根入れし、ケーソンと鋼壁の間に中詰をし補強する工法が考案された。この工法は鋼管杭によってケーソン式防波堤を重力式構造物から根入れ式構造物に転換し、津波によって防波堤に大きな力が作用しても、鋼材がもともと持つ粘り強さと地盤の抵抗を積極的に活用することで防波堤全体の安定性を向上させる。他工法として防波堤の港内側に石材を設置する腹付盛土工法があるが、背後に十分な面積が取れないと設置が困難な場合があるのに対し、本工法では省スペースで補強できるのが特徴的である。

港湾空港技術研究所で行われた水理模型試験(模型は実物の1/25のサイズ)では、津波を模擬した水流を流すと、まず補強がない防波堤の場合、港内外の水位差が20cm(実際は5mの津波に相当)の水流で、ケーソンを乗り越える「越流」によって洗掘が起こり、支持力が失われ、ケーソンが倒壊した。一方、鋼管杭式防波堤補強工法の場合、水位差20cmの水流で

は洗掘が起こるものの倒壊せず、さらに水位差30cm(実際は7.5mの津波に相当)の水流では洗掘範囲が広がりケーソンが傾斜したが、完全な倒壊には至らなかった。注目すべきは鋼管杭を利用した新工法は、7.5m相当の津波が襲った場合、ケーソンが40度傾斜したものの、土台内に留まったことである。ケーソンの高さは初期からわずかに下がったが、それでも一定の防護機能を保有している。つまり、大きな津波に対して粘り強く抵抗することが確認されたのである。

兵庫県の最南端に位置する福良港では、今後、南海トラフ巨大地震が起こった場合、最大8.1mの津波が発生することが予想されるため、湾口防波堤のメイン航路部にこの鋼管杭式防波堤補助工法を採用し、整備を進めている。完全に津波から防護することは不可能なため、防波堤は避難を前提として浸水被害の軽減を図ることを目的としている。T.P.* + 2.8mの既存の防波堤をT.P. + 5.9mにかさ上げし、かさ上げ後に防波堤の安定と津波への抵抗力を上げるため、メイン航路の両側に直径80cm、長さ10.5~12.5mの鋼管を杭打ち船から合計34本打設して補強する。

一人でも多くの命が助かるように、震災直後から開発が始まった新しい防護施設は、開発者の切なる思いによって実現した製品である。鉄の粘り強さを活かすことで、簡単には倒壊せず、津波に粘り強く抵抗する力を備えている。海に囲まれた日本。今後、南海トラフ巨大地震など、予想される大型地震に対して、この力が広く認められ、多くの海岸でその役割を果たしていくことが期待される。

* T.P.は高さの基準を示す記号で、「東京湾平均海面(Tokyo Peil)」を高さの基準としていることから、T.P.と表記している。

●取材協力 JFEエンジニアリング(株)、日本製鉄(株) ●文 藤井 美穂