最大クラスの津波に粘り強く抵抗する 防波堤補強工法

Breakwater Reinforced by Steel Piles Resilient to Largest Class Tsunami

日本製鉄(株) 鉄鋼研究所 鋼構造研究部 室長

連携記事

妙中真治 Shinji Taenaka

日本製鉄(株) 鉄鋼研究所 鋼構造研究部 **森安俊介** 課長(主幹研究員) Shunsuke Moriyasu

し はじめに

日本は、歴史的に度重なる大災害を受けてきており、これ らの災害・被害から得られた教訓を踏まえ、様々な取り組み や技術開発が行われてきた。特に防災対策の大きな転換期と なった3つの大災害がある。1959年の「伊勢湾台風」では、大 規模な台風が多数の人的・物理的被害をもたらし、これを契 機に災害対策の基本となる「災害対策基本法」¹⁾が成立した。 また防潮堤・堤防の設計高の基準は本災害をもとに決定され た経緯がある。1995年には、観測史上最大震度7の直下型地 震が大都市を直撃する「平成7年兵庫県南部地震」(阪神・淡 路大震災)が発生し、住宅・建物や道路高架橋の倒壊、ライ フラインの寸断、交通システムの麻痺など、都市型災害によ り甚大被害を与えた。その教訓から建築・インフラ構造物の 設計基準の見直しも進み、住宅・建物の耐震化やインフラ構 造の耐震補強などが加速的に進められた。

今年で10年の節目を迎えた「平成23年(2011年)東北地方 太平洋沖地震」(以下、東日本大震災)は、国内観測史上最大 規模となるM9.0を記録し、宮城県北部で最大震度7の激し い揺れが発生した。その後に来襲した巨大津波は遡上高(津 波が陸地を駆け上がるときの最大到達高度)が40mを超え、 東日本の太平洋側に甚大かつ広域な被害をもたらした。政府 は、本震災をうけ最大クラスを想定した災害への備えが不十 分であったとの教訓に基づき、最大クラスの災害にあっては 完全に災害を防ぐことは不可能なことから、さまざまな対策 を組み合わせて災害に備え被害を最小とする「減災」の考え 方を、はじめて防災対策の基本理念として位置付けた。また 東日本大震災から2年後には防災・減災などに資する「国土 強靱化基本法」²⁾を成立させ、いかなる自然災害が発生しよ 主査 Shin Oi

建材開発技術部

日本製鉄(株)厚板・建材事業部

及川 森 Shin Oikawa

うとも人命を守り、また社会機能の被害が致命的にならず、 被害を最小化して迅速に回復する「強さ」と「しなやかさ」を 備えた国土・社会システムを構築することとした。

近年、防災・減災と国土強靱化の重要性はさらに高まって いる。首都直下地震や南海トラフ地震という巨大地震の発生 も間近に予想されており、防災・減災と国土強靱化に資する 技術の開発・実装が強く求められている。これらのニーズや 課題の克服に貢献する構造としては、鋼材を用いた工法・構 造の開発が重要である。鋼製の杭・矢板を有効活用した防波 堤補強工や海岸堤防補強工は、巨大な津波に粘り強く抵抗す る構造の代表的な例である。本報では、港湾空港技術研究所、 東京理科大学、沿岸技術研究センターと日本製鉄の共同研究 の成果に基づき実用化された鋼管杭による既設防波堤の補強 工法(図1)をとりあげ、鋼材を用いた防波堤の粘り強い構造 について述べる。

2 鋼材を用いた防波堤の粘り強い構造

東日本大震災では巨大な津波により防波堤、防潮堤や海岸 堤防が破壊され、港湾施設や後背地が甚大な被害を受けた。 これらの教訓から津波対策には、従来の防波堤などの"線" による防御から、さらに堤防・河川・道路などを組み合わせ た"面"による「多重防護」が求められるようになった。また 個々の防護施設は、想定以上の外力が作用しても直ぐに崩壊 に至るのではなく、少しでも「粘り強く」機能を維持させ、避 難時間を確保することの重要性が提言された³。

湾口部や沖合に設置されている防波堤は多重防護において は第一の防護線となる。東日本大震災の津波では多くの防波 堤の崩壊が観察されたものの、防波堤により津波高を低減させ

11

津波襲来を遅延させる効果があったことが報告されている⁴。 被災事例の一例を写真1に示す。これらの被災の分析結果や その後の検討を踏まえて取りまとめられた「防波堤の耐津波 設計ガイドライン」⁵⁾(以下、ガイドライン)では、津波の規 模や発生頻度から二つのレベルが設定されている。一つは、 数十年から百数十年に一度の"発生頻度の高い津波"である。 もう一つは、発生頻度は極めて低いものの人命、財産又は社 会経済活動に極めて重大な影響を及ぼす規模の"最大クラス の津波"であり、この津波レベルでは越流・洗堀に対しても 倒壊しにくい「粘り強い構造」を検討することが必要となる。

従来の防波堤の多くは海底面状の捨石等のマウンドにケー ソン (大きな箱状のコンクリート製構造物)を設置した重力 式である。このため津波の規模が大きくなると一方向の強い 流れがケーソンを滑動させ、とくに津波が防波堤を越流する 場合には防波堤背後(港内側)の基礎マウンドや海底地盤の 洗掘が発生しケーソンの倒壊に至る(図2左)。そのため防波 堤を粘り強い構造とするためには、増大する津波外力に対す る安定性を検討するとともに、越流による背後基礎マウンド や海底地盤の洗掘現象を適切に検討し、津波の規模に応じた 防波堤構造の弱点を抽出し、その弱点部分に付加的な対策を 施すこととなる。

ガイドラインや港湾の施設の技術上の基準・同解説⁶に よれば、既存の重力式防波堤の安定性を向上させる補強例 として、従来からのケーソン背面に捨石を積む腹付工法のほ かに、鋼管杭等により構造的な補強を施した工法の記述があ る。改訂版ガイドライン⁷⁷では、破壊に至るまでの定量的な 検証がなされている技術として鋼管杭式防波堤補強工法(以 下、鋼管杭式)を設計法も含めて紹介している。

鋼管杭式の構成は、図1に示すように、ケーソン港内側 (防波堤背後側)のやや離れた位置に鋼管杭を壁状に配置し、 ケーソンと鋼管杭の間に中詰を施すものである。この鋼管杭 式の特徴は、鋼管杭によって、防波堤を従来の重力式から根 入れ式構造へ転換し、鋼材が元来有する粘り強さと地盤の抵 抗を積極的に活用することであり、洗掘が生じた際にも補強 として機能し粘り強い構造を実現する点である(図2右)。腹 付工法が既設防波堤背後に広範な補強範囲を必要とすること に比べて、鋼管杭式は既設マウンドの範囲内での補強が可能 であるため、特に狭隘な航路や泊地や堤頭部等においても、 背後地を阻害しないメリットを有する(図3)。



図1 鋼管杭式防波堤補強工の概要



写真 1 釜石港湾口防波堤の北提堤頭部付近の被災状況4)



図2 越流・洗掘時のケーソンの挙動イメージ(左:無対策;右:鋼管杭式)

次章以降では腹付工法と対比しながら、増大する津波外力に 対する鋼管杭方式の安定性向上効果や粘り強さについて述べる。

 $\mathbf{3}$ 増大する津波外力に対する抵抗特性

増大する津波外力に対する鋼管杭式の基本的な抵抗特性 は、気中条件下での模型土槽実験⁸⁰(以下、気中土槽実験)に より明らかにされている。東京理科大学で行われた本実験で は、矩形土槽内に海底地盤(砂地盤)を造成し、そのうえに ケーソン模型(1/60スケール)を据え、ケーソンをジャッキ で水平方向に載荷(0.6mm/min)した。検討ケースは無対策・ 腹付工法および洗掘ありを含む鋼管杭式である(図4;本ケー ス比較ではマウンドを省略している)。腹付け工法は、腹付 け高を100mm(ケーソン高さの1/3)としている。鋼管杭式 ではケーソン背面から離間50mmの位置に鋼管杭(実大ス ケール相当で鋼管径1000mm板厚12mm)を模擬した鋼板を 設置し、ケーソンとの間に高さ50mmの中詰を行った。さら に鋼管杭式では洗掘を想定し、載荷途中で鋼板背後の地盤を 60mm掘削したのち再度載荷するケースを準備した。

各ケースの荷重-変位関係を図5に示す。無対策は400N付 近から荷重の増加がみられず、それ以降は変位のみが増加し ている。腹付工法では、腹付により抵抗力が約500N超まで 増加しており、無対策に対して余力(冗長性)が確保されて いる。しかし小さい変位で上限に達した後は無対策同様、抵



図3 狭隘地での防波堤補強(上:腹付工法;下:鋼管杭式)

抗力は増加していない。

一方、鋼管杭式は約500N以降、水平変位の増加に伴って 抵抗力が漸増する挙動を示しており、想定外の外力が作用し た場合でも変形の急激な増大を抑制することができる。また 洗掘を想定したケースでは掘削により抵抗力の低下はみられ たが、再度抵抗が上昇し、ケーソンの変位に伴って抵抗力が 増加している。これらの挙動から、鋼管杭式は想定外の津波 外力においても一気に全体的な崩壊にはつながらない粘り強 い抵抗特性を有することが示唆されている。

-4 水理実験による越流時における 破壊挙動の確認

ガイドラインでは、粘り強い構造を検討する際は水理模型 実験や数値解析を最大限活用することにより、防波堤全体安 定性を確認することが推奨されている⁵⁾。粘り強い構造の効 果は、実際の変形モードを適切に評価した上で、最終的には 防波堤がどの程度の規模の津波まで倒壊せず粘り強い構造を 保持できるかについて慎重に検討を行い、様々な視点から総 合的に評価する必要がある。ここでは、鋼管杭式補強工法の 津波越流時に対する粘り強さの実証を主眼として、港湾空港 技術研究所の施設にて行われた水理模型実験を紹介する⁹⁾。



図5 気中土槽実験による津波外力への抵抗特性



図4 検討ケース

実在する防波堤をモデルとして、砂状の海底地盤上に砕石 で造成した基礎マウンドを準備し、1/25スケールのケーソン 模型を設置した。検討ケースは、気中条件下での模型土槽実 験と同様、無対策・腹付工法、鋼管杭式とした。腹付工法で は砂利で腹付部をケーソン高さの1/3まで造成し、鋼管杭式 ではステンレス鋼パイプを埋設してケーソン高さの1/3の突 出高を有する地中壁を設置し、ケーソンとの間の中詰部分は 砂利で製作した。津波は、港内外 (ケーソン前背面) に水位差 を与えることで越流現象を再現した (図6)。

実験結果を図7に示す。まず無対策ケースで、目標水位差



図7 水理模型実験における各ケースの最終阿破壊形態

20cm (現地スケールで水位差5mに相当) で越流を生じさ せたところ、ケーソン背面のマウンドと海底地盤の洗掘が 進み、崩壊に至った (図7左下)。次に腹付工法で同じ水位差 20cmで越流させたところ、最初は腹付部での洗掘が進み砂 利が飛散するものの、約10分 (実現象で50分相当) 経過後に 洗掘が止まり、基礎マウンドまで洗掘は進行せず、約18分越 流を続けたが破壊には至らなかった (図7中央上)。そのまま 断面形状を保持して、水位差を30cm (現地スケールで水位差 7.5mに相当) まで引き上げたところ、基礎マウントの洗掘が 進行し、崩壊に至った (図7中央下)。

一方、鋼管杭式は、水位差20cmでの越流時においてマウ ンド法尻付近で洗掘が進行するが、鋼管杭からケーソン側の 中詰部では洗掘は発生しなかった(図7右下)。結果、ケーソ ンはほとんど変位せず安定した状態を保持した。その後、同 様に水位差を30cmまで引き上げたところ、鋼管杭背面の洗 掘が進み、ケーソンおよび鋼管杭が徐々に港内側に傾斜した が、鋼管杭は完全に倒れることなく、ケーソンを支える格好 となった(図7右下)。鋼管杭の根入れ部における地盤反力が 鋼管杭と中詰部を介して有効にケーソンへと伝達されること で安定性が保持されている。終局状態において、ケーソンは 傾斜しているがマウンド上に留まり、ケーソンの天端高は初 期位置(写真中の白線)から僅かに下がった程度である。つ まり鋼管杭式のケースでは、津波による洗掘が進行し防波堤 の安定性が悪化しても、破壊の進行および変形が抑制される ため、防波堤直立部がマウンド上に留まり、防波堤高さの低 下を抑制できるといえる。

各検討ケースにおけるケーソンの傾斜角の時刻歴を図8に 示す。ここでは、横軸の時間は実現象スケールに換算してい る。無対策・腹付工法ではケーソンの傾斜は急激に生じてお り脆性的な倒壊となっている。一方、鋼管杭式は長い間、傾 斜角の進展を抑えることができている。このように崩壊に至 る時間を稼ぐことは避難時間の確保に直結するため、人命保 護の点から非常に重要である。

5 社会実装に向けて

本鋼管杭式の技術開発・実用化においては、前述した気中 土槽実験や水理実験以外にも数多くの技術検討が実施されて いる。気中土槽実験の再現解析¹⁰⁾ や水理実験の詳細な分析¹¹⁾ は、構造安定におけるメカニズムの理解を進め、設計法構築 に大きく貢献している。また津波のみならず地震に対する配 慮も行われており、地震・津波の複合災害における挙動も評 価がなされている¹²⁾。実適用に向けては、複数の現場条件で の設計検討¹³⁾ や鋼管杭の施工検討¹⁴⁾ も行われており、津波 時の挙動評価にとどまらず構造設計や現地施工などの実用面 での技術検討が体系的に行われており、研究成果の実装準備 が整っている。

一連の成果により、鋼管杭式防波堤補強工法は、大規模津 波採用時の破壊至る過程が定量的に確認された3つの工法の 一つとして、国土交通省港湾局発行の「防波堤の耐津波設計 ガイドライン (2015年12月一部改訂)」⁷⁾に、設計事例ととも に採り上げられている (鋼材を用いた工法としては唯一であ る)。また2019年には「水産公共関連民間技術確認審査・評 価」¹⁵⁾を取得している。

実プロジェクトでの採用検討も進んでいる。ここでは兵庫 県福良港での適用事例を紹介する^{16,17)}。兵庫県福良港は、急 な地形を有するため津波水位が著しく高いと予想されてお り、大幅な嵩上げが必要となる防潮堤整備が現実的ではな い。そこで湾口防波堤の整備を進め、本整備事業によりレベ ル1津波で浸水面積を約6割低減し、レベル2で約3割低減す るものである。防波堤は既存防波堤の嵩上げと防波堤新設が あり、延長1.1km、高さ約6.0mで航路用の開口部なども有す る。このうちメイン航路の整備では高さ3.0mある既存防波 堤をおよそ2倍の高さまで嵩上げをするが、嵩上げ後の安定 性向上のため鋼管杭式が採用された。使用された鋼管杭は鋼



図8 ケーソン傾斜角の時刻歴



写真2 福良港工事鋼管杭施工状況 15)

管径800mm板厚9mm長さ10.5~12.0mである。鋼管杭の施 工状況を写真2に示す¹⁵⁾。

6 まとめ

本報では、多重防護の第一の防護線である防波堤を対象 に、鋼材を用いた粘り強い構造の実現について述べた。第二 の防護線となる海岸堤防は一般的に盛土で造成されるため津 波が越流すると盛土が削られ決壊してしまう。東日本大震災 では約300kmが被災しており、海岸堤防も防波堤と同様に粘 り強い構造が求められる。この課題に対しても、海岸堤防内 に2重に鋼矢板を打設し、津波が越流してもコアとなる部分 を破壊させないように鋼材を上手く活用した構造が提案され ている¹⁸⁾。粘り強い構造への鋼材の活用方法は多様である。

南海トラフ地震はM8~M9の規模で、30年以内の地震発 生確率は70~80%と言われており、切迫した状況である。ま た近年、気候変動の影響により気象災害が激甚化・多発化し ている。大規模地震や激甚化する風水害への対策は未だ十分 とは言えない。さらには、このような危機があろうとも、大 規模自然災害等に備えた強靭な国づくりを目指す国土強靱化 も進められている。鋼材が元来有する粘り強さを活かした技 術開発を継続的に行い、社会貢献を進めていくことが重要で ある。益々研鑽し、努力していきたい。

参考文献

- 1) 災害対策基本法(昭和三十六年法律第二百二十三号).
- 2)強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災に 資する国土強靱化基本法(平成二十五年法律第九十五号).
- 第日本震災復興構想会議:復興への提言~悲惨のなかの 希望~,(2011).
- 4)高橋重雄,戸田和彦,菊池喜昭,菅野高弘,栗山善昭,山 﨑浩之,長尾毅,下迫健一郎,根木貴史,菅野甚活,富田 孝史,河合弘泰,中川康之,野津厚,岡本修,鈴木高二朗, 森川嘉之,有川太郎,岩波光保,水谷崇亮,小濱英司,山 路徹,熊谷兼太郎,辰巳大介,鷲崎誠,泉山拓也,関克己, 廉慶善,竹信正寬,加島寬章,伴野雅之,福永勇介,作中 淳一郎,渡邊祐二:港湾空港技術研究所資料, No.1231

(2011).

- 5)国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン, (2013).
- 6)(公財)日本港湾協会:港湾の施設の技術上の基準・同解 説,(2018).
- 7)国土交通省港湾局:防波堤の耐津波設計ガイドライン;
 一部改訂,(2015).
- 8) Y.Kikuchi, S.Kawabe, S.Taenaka and S.Moriyasu : Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2 (2016) 35, 1267.
- 9)有川太郎,及川森,森安俊介,岡田克寬,田中隆太,水谷 崇亮,菊池喜昭,八尋明彦,下迫健一郎:港湾空港技術研 究所資料, No.1298 (2015).
- 10) 森安俊介,菊池喜昭,田中隆太,妙中真治:土木学会論文 集,B3,71 (2015) 2, I_611.
- 11)有川太郎,及川森,森安俊介,岡田克寛,田中隆太,原田典佳, 水谷崇亮,菊池喜昭,八尋明彦,下迫健一郎:土木学会論文 集, B2, 71 (2015) 2, I_1093.
- 12) 森安俊介, 及川森, 久保田一男, 妙中真治, 菊池喜昭, 兵動太 一, 引地宏陽: 土木学会論文集, B3, 73 (2017) 2, I_132.
- 13) 王丸冬二, 谷島義孝, 山部道, 伊藤春樹: 沿岸技術センター 論文集, (2017) 17, 35.
- 14) 久保田一男, 及川森, 梶野浩司, 木村育正:地盤工学会誌,
 64 (2016) 1, 28.
- 15)(一社)漁港漁場新技術研究会:水産公共関連民間技術確認審査・評価報告書,第19-A-001号(2020).
- 16) 福良港湾口防波堤整備事業の概要, 兵庫県, https://web. pref.hyogo.lg.jp/awk11/fukura_gaiyou.html, (accessed 2021-6-25).
- 17) 神戸新聞: 2019年11月2日, https://web.pref.hyogo.lg. jp/ks04/documents/r011102_tsunamitaisaku.pdf, (accessed 2021-6-25).
- 18) 三戸部佑太, 乙志和孝, 黒澤辰昭, M.B.Adityawan, 盧敏, 田中仁: 土木学会論文集, B2, 70 (2014) 2, I_976.

(2021年5月27日受付)