

大規模津波に備える粘り強い防波堤補強工法の開発

Development of New Type of Breakwater Reinforced with Steel Piles against a Huge Tsunami

森安俊介* Shunsuke MORIYASU	田中隆太 Ryuta TANAKA	及川森 Shin OIKAWA	辻井正人 Masato TSUJII
妙中真治 Shinji TAENAKA	久保田一男 Kazuo KUBOTA	原田典佳 Noriyoshi HARATA	

抄 録

東日本大震災における甚大な津波被害を受け、防波堤には粘り強い構造が求められるようになっている。そのなかで、新日鐵住金(株)は、鋼製建材を利用して既設の防波堤を補強する工法を開発した。気中模型載荷実験で変形進行後も抵抗力が漸増する粘り強さを把握し、数値解析でその抵抗機構を分析したうえで、水理模型実験で越流や洗掘の影響を調査し、津波作用時の安定性を確認している。これらの主要な研究成果を述べ、実用化に向けた設計法、施工法について報告した。

Abstract

“Persistence” is needed for breakwaters, since the coastal areas of Tohoku have been extensive damaged by Great East Japan Earthquake (Mw9.0). Therefore, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation has been developing a reinforcement method for breakwaters with steel piles. This method has showed persistent characteristic on the lateral load experiment, and clarified the resistance mechanism by FEM. In addition, this method has showed stability for the breakwaters on the hydraulic experiment. This paper shows the main of the study results, and introduces the original plan for the design method and construction method.

1. 緒 言

1.1 東日本大震災における防波堤の被災とその後の動向

東日本大震災では、巨大津波によって甚大な被害が生じた。津波に対する第一の防御である防波堤においては、相馬港で約9割、釜石港で約7割、八戸港で約半数が崩壊しており、後背地の津波被害を十分に食い止めることはできなかった。防波堤の被災状況の一例を写真1¹⁾、2²⁾に示す。



写真1 釜石港湾口防波堤の北堤堤頭部付近の被災状況¹⁾
Damaged breakwaters in Kamaishi Port

このような被害を受けた一方、被災検証において、例えば釜石の場合、防波堤が一定時間抵抗して避難時間を稼いだことが推定されており、防波堤の有効性も認識されている¹⁾。

この被災経験を受け、また近い将来に來襲する可能性の高い東南海・南海地震に備えるため、国土強靱化の取り組みが推進されている。防災・減災は重要なテーマであり、防波堤については、2013年9月に国土交通省から“防波堤の耐津波設計ガイドライン³⁾”が公表されている。詳細は

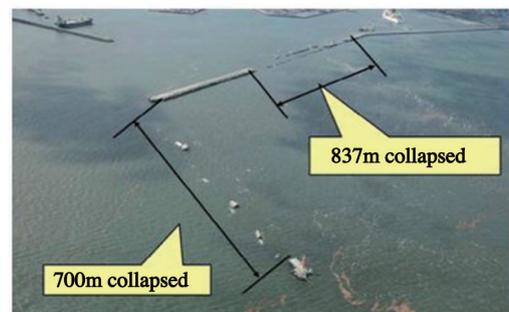


写真2 八戸港八太郎地区北防波堤の被災状況²⁾
Damaged breakwaters in Hachinohe Port

後述するが、東日本大震災クラスの巨大津波に対しても脆性的に崩壊することなく、“粘り強く”抵抗する性能が防波堤に求められている。防災・減災については、ハードウェア面に加えて、災害発生情報の提供及び住民の避難誘導等のソフトウェア面も一体とした総合的な対策が重要である。なかでも防波堤は、津波の遡上を遅らせて避難時間を確保して人命を守る、さらに防潮堤等と併せて後背地を多重に防護する等、その果たす機能は大きいと言える。

1.2 鋼管杭を用いた既設防波堤の補強工法の概要

粘り強い防波堤構造として、新日鐵住金(株)は(国研)港湾空港技術研究所、東京理科大学、(一財)沿岸技術研究センターと共同で、鋼管杭による既設防波堤の補強工法(以下、鋼管杭方式)を開発した。鋼管杭方式の構成は、図1に示すように、ケーソン港内側のやや離れた位置に鋼管杭を打設し、ケーソンと鋼管杭の間に裏込めを施すものである。鋼管杭及び裏込めは、ケーソン延長方向に設置される。この方式の特徴は、鋼管杭によって、ケーソン式混成堤を重力式構造物から根入れ式構造物に転換し、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粘り強さを実現する点にある。なお、防波堤が小規模な場合には、鋼管杭の代わりに鋼矢板を適用することも考えられる。

前述の耐津波設計ガイドラインに示されている補強工法は、基本的に、ケーソン式混成堤の港内側に捨石で裏込めを施工法³⁾(以下、腹付方式)である。腹付方式の概略図を図2に示す。元々、腹付方式は波浪対策として港内の静穏度向上のために適用されてきたが、津波に対する安定

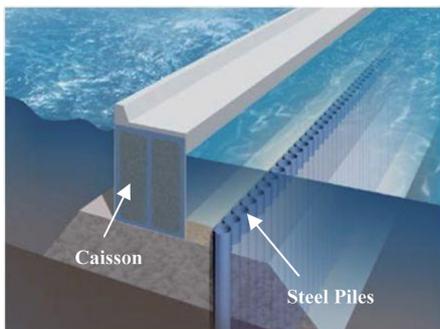


図1 鋼管杭方式による防波堤の補強
Breakwater reinforced with steel piles

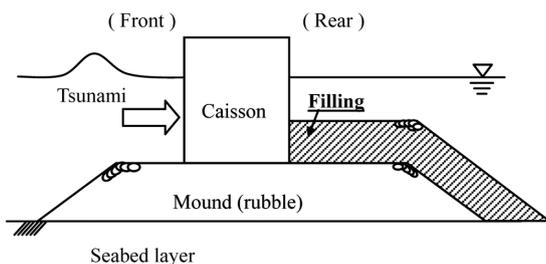


図2 腹付方式による防波堤の補強
Breakwater with widening works

性向上へも応用されつつある。ただし、図3に示すように、腹付方式の補強範囲は既設の防波堤より広くなるため、狭隘な条件では航路を阻害する懸念が考えられる。これに対して、鋼管杭方式は既設マウンドの範囲内に収まるので航路への影響は非常に小さい。

本稿では、鋼管杭方式と腹付方式の補強効果を対比しながら主要な研究成果を示したのち、鋼管杭方式を実際の防波堤の耐津波検討に適用するための設計法、施工方法を紹介する。

2. 開 発

2.1 気中模型載荷実験による基本的抵抗特性の把握

基本的な抵抗特性と補強効果を把握するため、気中条件下の土槽模型実験を実施している⁴⁾。模型の幾何縮尺は実大の1/60とし、矩形土槽内に造成した砂地盤のうえにケーソンを据え、鋼管杭を模擬した鋼板を設置し、ケーソンをジャッキで水平方向に載荷(0.6mm/min)した。実験の様子を写真3に示す。実験ケース及び各ケースのおもな諸元は表1に示すとおりである。

各ケースの荷重変位関係を図4に示す。無対策(Case 1)の抵抗力は1.1N/mmで上限に達している。腹付方式(Case 2)では1.5N/mmまで抵抗力が増大しており補強効果はみられるが、上限に達した後は無対策同様、抵抗力が増加し

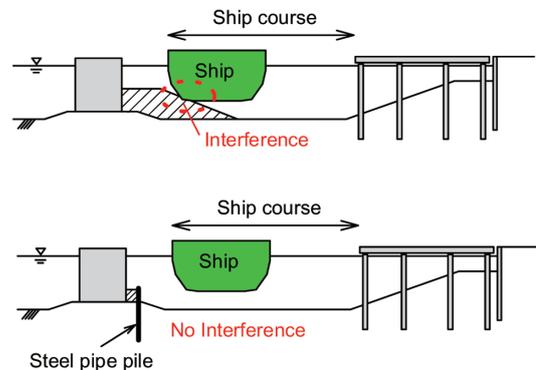


図3 補強範囲の比較イメージ
Comparison of the reinforcement space between the widening works and steel piles

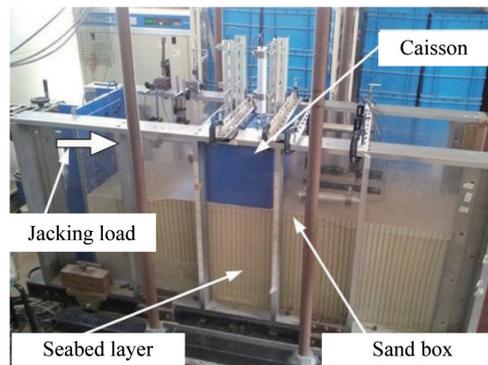


写真3 載荷実験の様子
Photo of the lateral load experiment

表1 荷重実験ケース
Cases of the lateral load experiment

Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Non reinforcement	Widening works	Reinforced with steel piles	Digging of Case3
Unit weight of caisson: 22 kN/m ³ Friction factor of caisson bottom: 0.6		Steel plate 380 D×380 W×3.2 t	Digging depth: 60

(mm)

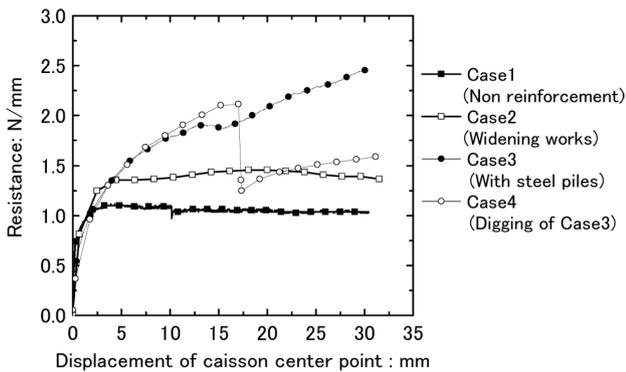


図4 荷重変位関係

Relationship between resistance and displacement

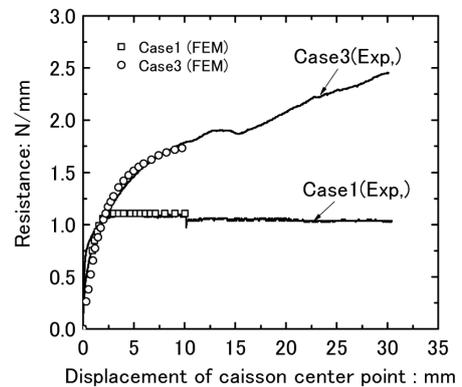


図5 実験とFEMの荷重変位関係の比較

Comparison of the load-displacement relationship between the experiment and FEM

ない。これに対して、鋼管杭方式 (Case3) の場合、約 1.5 N/mm で変形剛性が低下するものの (以下、降伏荷重)、水平変位が大きくなるとともに抵抗力も緩やかに増え続けている。なお、鋼板に生じる応力は中腹部で最大になり、最終荷重において弾性内であることを確認している。洗掘を想定した断面 (Case4) ではケーソン変位約 17mm で一旦除荷し、鋼板背後の地盤を 60mm 掘削したのち、再度載荷した。掘削直後の抵抗力は低下したが、再度抵抗力が増加している。以上により、大荷重・大変形時まで発現される粘り強い抵抗特性、及び洗掘に対する適用性が示唆された。

2.2 数値解析による抵抗機構の解明

前節の実験を対象に FEM による再現解析を行い、抵抗機構の解明を試みた。対象ケースは無対策 (Case1) と鋼管杭方式 (Case3) である。モデル寸法や物性値は実験と同様にし、地盤の構成則にはモールクーロンを用いた。解析アプリケーションは PLAXIS2012 である。FEM で得られた荷重変位関係を図5に示す。微小変形理論を適用して水平変位 10mm 程度 (実物換算 600mm) まで計算できており、この範囲で実験結果と概ね一致し、降伏荷重や以後の緩やかな抵抗増加も再現できている。主要な挙動を分析する意

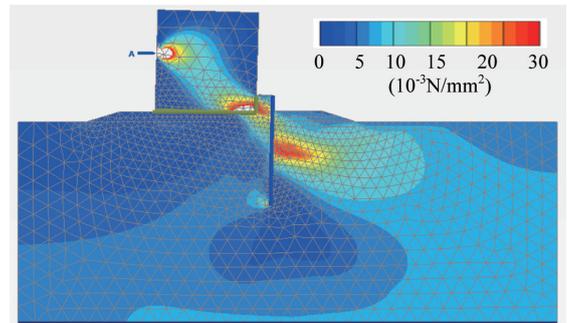


図6 土中の水平応力分布

Compressive soil stress in lateral direction

味で問題のない計算範囲であり、FEM の適用性が確認できた。

以下では FEM の結果から鋼管杭方式の抵抗機構を分析する。まず、図6に示す水平方向応力分布より、載荷重はケーソンの鋼管杭側の底部から、裏込めとその直下地盤を介して、鋼管杭に伝達されていることがわかる。鋼管杭のケーソン反対側の地中部に大きな圧縮応力が生じており、この部分の地盤が抵抗していることを表している。

次に、図7に示すように、ケーソンの底面摩擦力 (R1) と裏込め反力 (R2) を抽出すると、全体の抵抗力 (R) が降

伏荷重に達するあたりで底面摩擦力 (R1) が上限に達し、それ以降は裏込め反力 (R2) のみ増加していることがわかる。このことから、降伏荷重以降では、裏込め反力によって抵抗し続けていると考えられる。

最後に、鋼管杭の地盤反力分布を図8に示す。ここで地盤反力分布とは水平方向の応力分布であり、ケーソン側から鋼管杭に対して垂直方向に作用する土中応力と、ケーソン反対側から働く抵抗応力の差分である。裏込めの接触部分の地盤反力は負の値であり、鋼管杭がケーソン側から押されていること、海底地盤では正の値であり、ケーソン反

対側の地盤が抵抗していることを示している。荷重が大きくなるほど地盤反力の最大値が深くなっており、より深い地盤で抵抗していることがわかる。

2.3 水理模型実験による津波越流時の破壊形態の確認

実際の防波堤の破壊には越流が影響を及ぼすため、前述の気中模型載荷実験に加えて、水理模型実験を実施し、津波越流時における破壊形態を確認している⁶⁾。模型の幾何縮尺は実大の1/25スケールに設定し、砂状の海底地盤のうえに砂利でマウンドを造成している。実験ケース及び主要な諸元は表2に示す通りであり、腹付け方式のCaseBでは砂利で腹付部分を造成し、鋼管杭方式のCaseCではステンレス鋼パイプを埋設して裏込め部分は砂利で製作した。津波は、港内外に水位差をつけて模擬している。港外側水位がケーソン天端を超えると越流が生じる。

実験結果を写真4に示す。無対策のCaseAでは、計画水位差20cm(実大換算5m)において、越流した津波によってマウンドと海底地盤の洗掘が進み、支持力破壊によって崩壊に至った(写真4(b))。次に腹付方式のCaseBでは、計画水位差20cmにおいて、腹付部分が洗掘されるものの、飛散した砂利がマウンド法尻付近に堆積した。その結果、基礎マウンドまで洗掘が進むことはなく、ケーソンは安定していた(写真4(c))。そのままの断面形状を保持して計画水位差を30cm(実大換算7.5m)に引き上げた結果、基礎マウンドの洗掘が進行し、崩壊に至った(写真4(d))。

一方、鋼管杭方式のCaseCでは、計画水位差20cmにおいて、マウンド法尻からケーソンに向かって洗掘が進行するが、鋼管杭からケーソン側は洗掘されなかった(写真4(e))。このような鋼管杭による洗掘抑止効果が確認され、ケーソンは安定した状態を保持していた。その後、計画水位差を30cmに引き上げたところ、鋼管杭背面の洗掘範囲が広がるとともに、ケーソン及び鋼管杭が徐々に港内側に傾斜したが、鋼管杭が地盤に支えられて完全に倒れることなく、ケーソンを支える格好になった(写真4(f))。終局

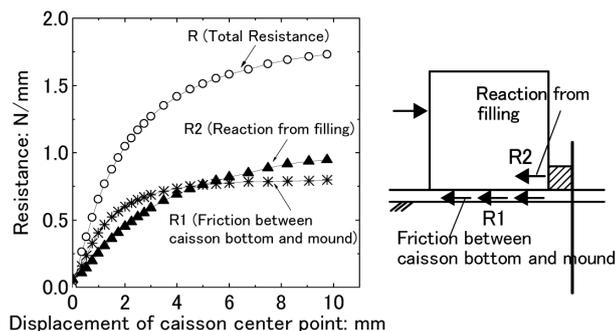


図7 ケーソン - 地盤間の水平方向作用力
Reaction force in horizontal direction

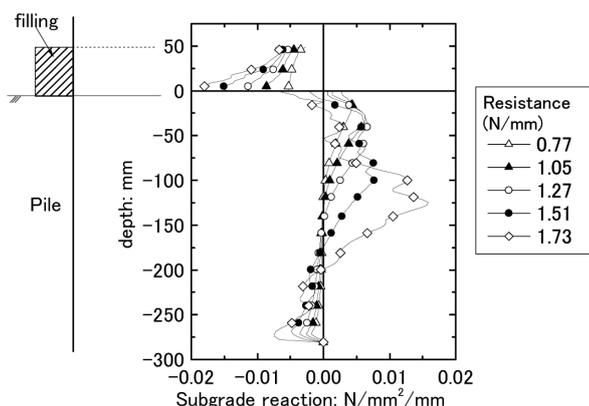


図8 鋼管杭の地盤反力分布
Subgrade reaction of steel pile

表2 水理実験ケース
Cases of the hydraulic experiment

Case A	Case B	Case C
Non reinforcement	Widening works	Reinforced with steel piles
Unit weight of caisson: 22kN/m ³ Friction factor of caisson bottom: 0.6		

(mm)

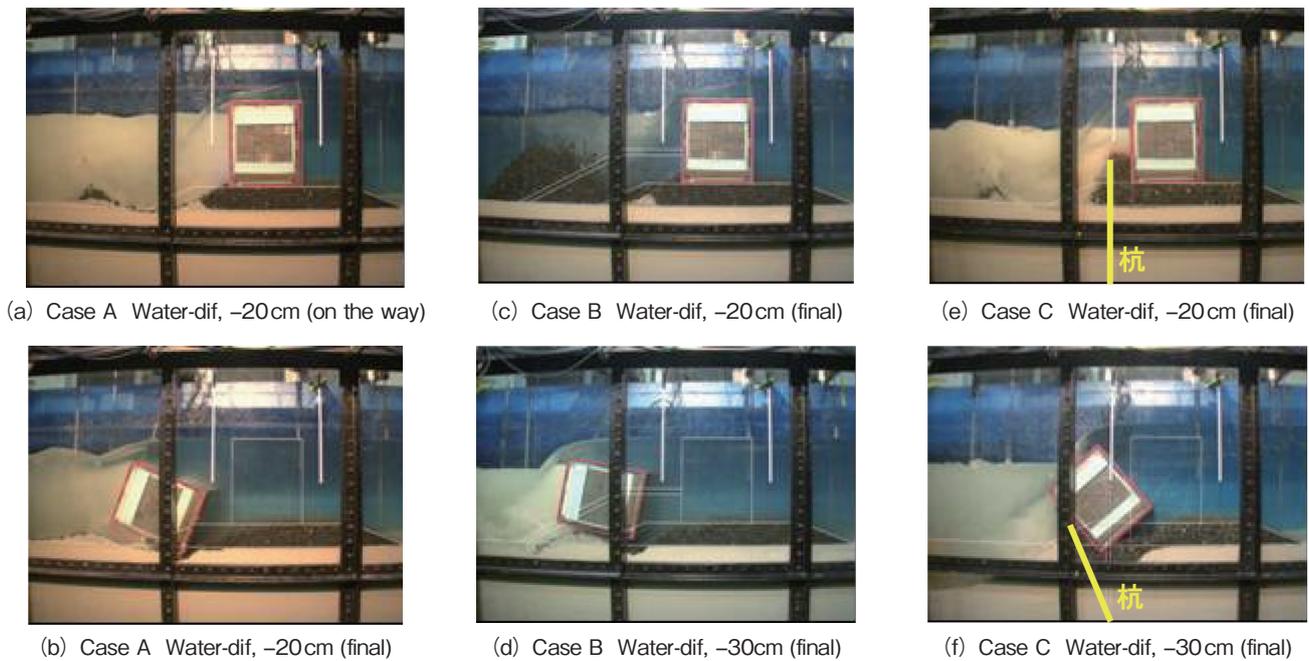


写真4 水理実験結果（各ケースの変形状態）
Deformation of the hydraulic experiment

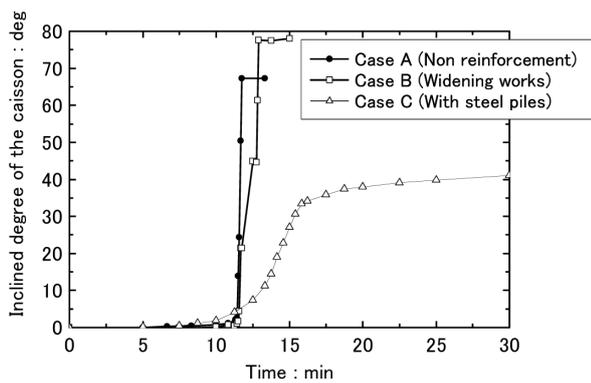


図9 ケーソン傾斜角の時刻歴
Time history of the caisson gradient

状態においてケーソンは傾斜しているが、天端高は初期位置（白枠線）から僅かに下がった程度である。これは、一定の防護機能を維持することを意味する。

各実験ケースにおけるケーソン傾斜角の時刻歴を図9に示す。横軸の時間は実スケールに換算している。Case Cは、それ以外のケースより長い間、傾斜角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に直結するため、人命確保の点から非常に重要である。

2.4 鋼管杭方式の補強効果

以上の実験及び数値解析より、ケーソン変位の小さい範囲では腹付方式と同等の抵抗力を有し、変位が大きくなると腹付方式の抵抗力は上限に達する一方、鋼管杭方式の変形剛性は低下するものの抵抗し続ける特性を把握した。その抵抗機構は、鋼管杭及び裏込めを介して、荷重を地盤に伝達し、根入れ式構造物として地盤で抵抗するものである。

また、津波越流時において、洗掘とともにケーソンが傾斜するものの完全には倒壊せず天端高を維持することが示された。鋼管杭方式は、大規模津波や洗掘等の作用に対して高い補強効果の期待できる、まさに粘り強い防波堤であるといえる。

3. 耐津波設計

鋼管杭方式の設計は、基本的に、冒頭で述べた“防波堤の耐津波設計ガイドライン”に則る。ガイドラインは、津波の規模を二段階とし、数十年から百数十年に一度の“発生頻度の高い津波”と、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”に分けている。そのうえで、設計外力に相当する“設計津波”は発生頻度の高い津波を基準にしつつ、後背地の社会的・経済的重要性に応じて、最大クラスの津波も踏まえて適切に設定する。この設計津波に対して、津波減災効果等の機能を損ねないように防波堤断面を設計する。さらに、その防波堤断面を基本に“設計津波を超える津波”に対して粘り強い構造とするため、付加的な対策を施す。なお、対策の検討においては、水理模型実験や数値解析を最大限活用することが推奨されている³⁾。

この設計指針に従って、鋼管杭方式は、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、変形を許容するが倒壊しにくい粘り強い構造とすることを基本とする。荷重変位関係上では図10に示すように、設計津波は弾性域、設計津波を超える津波は変形剛性の低下している領域のイメージである。設計津波に対する設計は、図11に示すような計算モデルで、鋼管杭への作用力をブジネスク解などの弾性応力解で導出し、鋼管杭の抵抗力を港

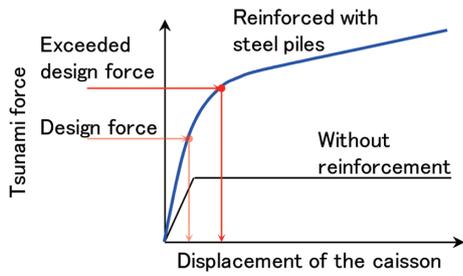


図10 津波荷重と抵抗力のイメージ
Image of the relationship between tsunami force and resistance

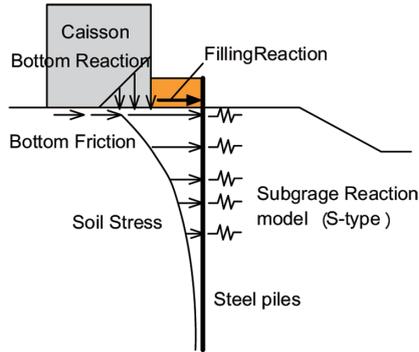


図11 鋼管杭に関する設計モデル
Design model about the steel piles

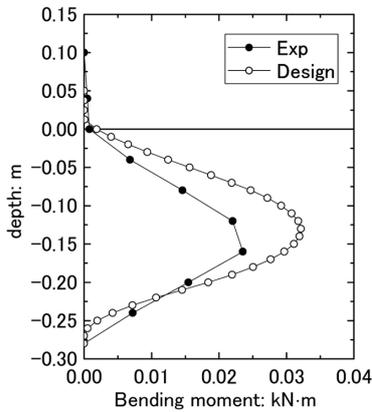


図12 曲げモーメント分布に関する実験値と設計値の比較
Comparison of bending moment between the experiment and design

研方式等の地盤ばねで表現して行く。このモデルに従って、2.1節の実験に対する設計を行うと、図12の曲げモーメント図のようになる。設計値は実験値よりやや大きく安全側の結果になり、最大値の深度は整合していることがわかる。また、設計津波を超える津波については、防波堤の変形も考慮する必要があるため、数値流体解析や2.2節で例示した構造的な数値計算も活用することが望ましい。

4. 施工方法

鋼管杭方式では、ケーソン近傍で鋼管杭を施工することになるため、マウンドを構成する捨石層を打ち抜く必要が



写真5 ジャイロプレス工法による捨石層施工事例⁷⁾
Example of construction that Gyropress method surged the layer of rubbles



(a) Surging the rubbles by Gyropress method



(b) Hollowed rubbles by Gyropress method

写真6 ジャイロプレス工法による陸上での捨石打ち抜き試験
Test that Gyropress method surged the layer of rubbles on shore

ある。これを実現できる工法として次の3つを紹介する。

4.1 全旋回オールケーシング工法

先端に硬質ナットを取り付けたケーシングを、全周旋回式ジャッキで回転圧入させて捨石層を打ち抜き、ケーシング内の削り取った捨石をハンマーグラブで取り除いて砂と置換した後、打撃工法などで鋼管杭を打設する方法である。ただし、海上施工においては全周旋回式ジャッキを設置する仮設栈橋を要すること、先行掘削や砂置換など工種が多く施工時間がかかることが課題である。

4.2 ジャイロプレス工法[®]

ジャイロプレス工法は、回転圧入の機構を有し、施工が完了した杭を把持して反力を取りながら自走する“ジャイロパイラー”で、先端ビット付き鋼管杭を壁状に施工する工法である。一貫施工が可能であり、捨石を打ち抜くこともできる。写真5に示すように、三池港では灯台基礎の近傍に堆積する層厚7m程度の捨石層を打ち抜いている⁷⁾。また、捨石を打ち抜く状況を目視確認するため、新日鐵住金八幡製鉄所構内で陸上での施工試験を行い、写真6に示すように捨石をくり抜きながら打ち抜く様子を確認している。

4.3 ロックバイプロ工法

ロックバイプロ工法⁸⁾は、鋼管杭の先端に高硬度の鋼材を取り付け、バイプロハンマの打撃力で岩盤を切削し、杭頭から注入した水（海水）で岩砕を洗浄しつつ、鋼管杭を貫入する工法である。港湾域での実績も多いが、地盤振動が発生するため、既設ケーソンとの離隔によっては振動の影響を考慮する必要がある。

5. 結 言

東日本大震災における壊滅的な被災状況を目の当たりにし、国民の防災意識が一変するとともに、防災・減災技術への期待が高まるなか、本稿で報告した補強工法の開発に邁進してきた。本工法を活用してわが国の防災に貢献するとともに、今後のさらなる技術創出につなげていきたい。

謝 辞

東京理科大学の菊池教授には、開発初期から多大なご指導及びご教示を頂いた。また、港湾空港技術研究所、沿岸技術研究センターには、水理模型実験による性能検証や設計法構築など実用化に向けた取り組みにおいて、ご尽力、ご助力を頂いた。ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 高橋重雄 ほか：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。港湾空港技術研究所資料。No.1231, 2011
- 2) 国土交通省 HP (http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/port01_sg_000098.html) を加工して作成。港湾分科会第3回防災部会資料2参考資料。2011
- 3) 国土交通省港湾局：防波堤の耐津波設計ガイドライン。2013
- 4) Kikuchi, Y. et al.: Horizontal Loading Experiments on Reinforced Gravity Type Breakwater with Steel Walls. The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015
- 5) 森安俊介 ほか：鋼杭による防波堤補強工法の抵抗機構に関する数値解析。土木学会論文集 B3 (海洋開発)。71 (2), 611-616 (2015)
- 6) 有川太郎 ほか：鋼管杭による防波堤補強工法の津波越流時の安定性に関する研究。港湾空港技術研究所資料。No.1298, 2015
- 7) (株)技研製作所：ウェブページ (圧入工法実績、三池港 (内港北地区) 航路 (-10m) (床止) 法面補強工事 (第三次))
- 8) (株)廣瀬産業海事工業所：ウェブページ (杭打ち工事 ロックバイプロ工法)



森安俊介 Shunsuke MORIYASU
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



妙中真治 Shinji TAENAKA
鉄鋼研究所 鋼構造研究部 主幹研究員
Ph.D.



田中隆太 Ryuta TANAKA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室 主査
(一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会出向中)



久保田一男 Kazuo KUBOTA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室 主幹



及川 森 Shin OIKAWA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室



原田典佳 Noriyoshi HARATA
建材事業部 建材開発技術部
土木基礎建材技術第二室長



辻井正人 Masato TSUJII
鉄鋼研究所 鋼構造研究部長 Ph.D.