

土木海外建材市場における需要開拓の取組み

Approach for Developing Overseas Construction Steel Product Market in Civil Engineering Field

龍田 昌毅*
Masataka TATSUTA

豊島 径
Kei TESHIMA

松井 延行
Nobuyuki MATSUI

妙中 真治
Shinji TAENAKA

富永 智矢
Tomoya TOMINAGA

永津 亮祐
Ryohsuke NAGATSU

抄 録

新日鉄住金(株)では、海外において競争力があり、独自性の高い商品、ハイエンド商品へ重点を置き需要開拓に取り組んでいる。ハット形鋼矢板、直線形鋼矢板、リブ付鋼管杭を用いたハイエンド商品、ハット+H矢板、鋼矢板セル、サットインパイル工法についてその取組み、実績例について紹介した。

Abstract

Approach for developing overseas construction steel product market in civil engineering field are now being focused on our competitive, proprietary products, 'high-end products'. Hat+H piles, sheet-pile cells and Sat-in Pile Foundation as the representative high-end products are introduced along with their application to actual projects.

1. はじめに

発展途上国の成長に伴い世界のエネルギー、インフラストラクチャ需要は拡大を続けており、建設需要は今後も継続して増加していくものと考えられる。新日鉄住金(株)はこれまでODA関連のプロジェクトを中心に海外での鋼構造市場開拓に取り組んできた。2011年にはベトナムの南部フーミーに鋼管工場NPV(Nippon Steel & Sumikin Pipe Vietnam)を立ち上げ、海外での安定的な供給体制整備を進めてきた。

現在は、新日鉄住金の技術を生かした海外で競争力を有する商品、ハイエンド商品の需要開拓を重点的に進めている。本稿では、新日鉄住金の独自性の高い商品、ハット形鋼矢板、直線形鋼矢板、内面リブ付鋼管杭を用いた、(1)ハット+H矢板、(2)鋼矢板セル、(3)サットインパイル工法について、これまでの海外における市場開拓への取組みおよび実績について述べる。

2. ハット+H矢板

2.1 経済性、施工性に優れる高剛性矢板：ハット+H矢板

ハット+H矢板は900mm幅のハット形鋼矢板とH形鋼

を組み合わせた新しいタイプの鋼矢板である(写真1)。ハット+H矢板の特徴を以下に示す。

- 1) H形鋼を組み合わせることにより、ハット形鋼矢板単独では対応できない高い剛性が必要とされる大水深の護岸、岸壁、大規模な土留めに適用可能である。
- 2) H形鋼のバリエーションにより、さまざまな断面性能に対応でき、経済的な断面を選定することが可能である。
- 3) 現場でハット形鋼矢板とH形鋼を溶接して組み立てることが可能であり、製造コスト、輸送コストが削減できる。
- 4) 矢板全体の剛性が高く、長尺の場合も非常に優れた施工

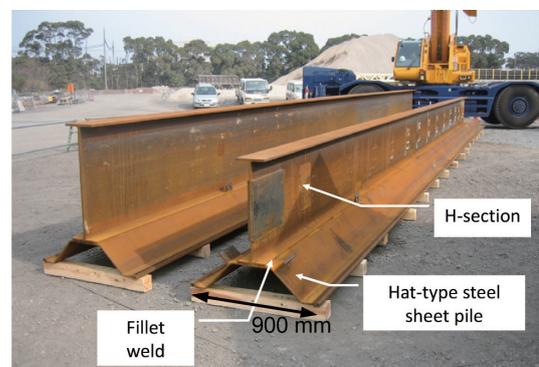


写真1 ハット+H矢板
Outline of the Hat+H piles

性を発揮する。

2.2 ハット+H 矢板の断面性能

ハット+H 矢板の断面性能は、ハット形鋼矢板と H 形鋼の合成断面として評価される (図1)。

断面2次モーメント:

$$I = I_s + A_s \cdot y_s^2 + I_H + A_H \cdot y_H^2$$

I : ハット+H 矢板の1本当りでの断面2次モーメント

I_s : ハット形鋼矢板の1枚当たりの断面2次モーメント

A_s : ハット形鋼矢板の1枚当たりの断面積

I_H : H 形鋼1本当りでの断面2次モーメント

A_H : H 形鋼1本当りでの断面積

y_s : ハット形鋼矢板の図芯からハット+H 矢板中立軸までの距離

y_H : H 形鋼の図芯から Hat + H 矢板中立軸までの距離

表1にハット+H 矢板の断面性能の一例を示す。ハット形鋼矢板と H 形鋼は断続のすみ肉溶接により一体化される。溶接長は用いられるハット形鋼矢板および H 形鋼の組み合わせにより決定されるサイズ、溶接長さが、一般的に6~8mmの溶接サイズで全長の40~60%の溶接長で断面の一体化を確保することができる。

(1) ハット+H 矢板の実大曲げ試験

ハット+H 矢板の断面性能を確認するために実大の曲げ試験を実施した。実験の概要は図2、表2に示す。図3に試験結果より得られた曲げモーメントと曲率の関係を示す。図より実験値は降伏レベルまで計算値と一致している。し

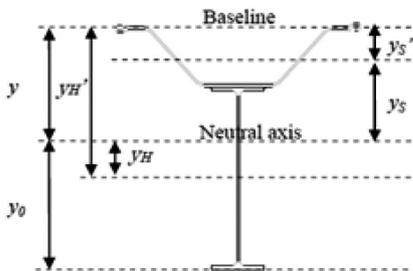
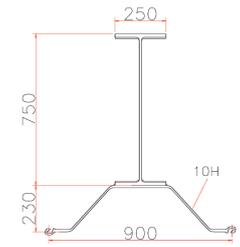


図1 ハット+H 矢板の断面性能
Calculation of Hat + H piles

表1 ハット+H 矢板の断面性能例

Example of the cross section and property of Hat + H piles

	10H+H750×250×12×19
Cross section (unit: mm)	
Weight (kg/m)	256
Section modulus Z (cm ³ /m)	6770
Moment of inertia I (cm ⁴ /m)	379000

たがって、ハット+H 矢板は合成断面として評価できることが確認された。

2.3 ハット+H 矢板の加工

ハット形鋼矢板と H 形鋼は断続のすみ肉溶接により一体化されるため大きな矯正の必要は生じず、加工は工場だけではなく施工現場においても十分適用可能である。また、写真2に示すように二か所同時に溶接を行うことにより矢

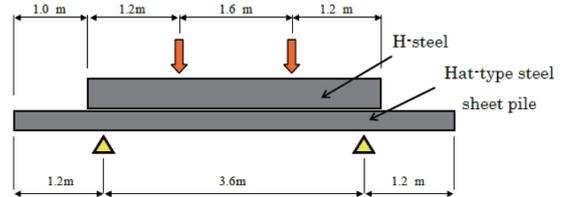


図2 実大曲げ試験概要
Outline of the flexural test

表2 試験体の断面諸元
Specimens and sectional properties

Sheet Pile	H shape (H×B×t _w ×t _f) (mm)	Sectional properties (per 1 m length)		
		Weight (kg/m)	Moment of inertia (cm ⁴ /m)	Section modulus (cm ³ /m)
10H	400×200×9×12	169	88074	2320

H: Depth of section, B: Width of section, t_w: Web thickness
t_f: Flange thickness

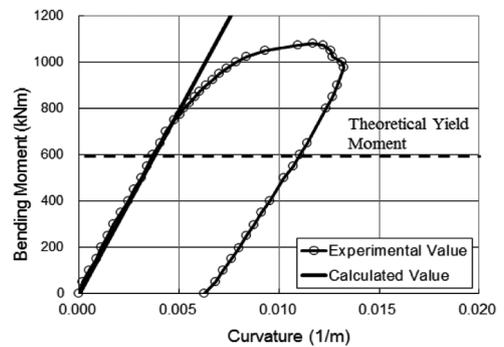


図3 曲げモーメントと曲率の関係試験結果
Bending moment to curvature



写真2 ハット+H 矢板の現場加工状況
Fabrication on site

板全体のねじれを防ぐことができる。施工現場近くのヤードで一体化できることにより、輸送、保管の手間が大幅に削減される。

2.4 ハット+H矢板の施工

(1) 施工方法

ハット+H矢板は、バイブロハンマー工法、打撃工法等一般的な機械により施工が可能である（写真3、写真4）。また、矢板の全体剛性が高く、施工速度が速く、精度よく施工ができる。

(2) 繰り返し施工試験

ハット+H矢板のバイブロハンマーによる繰り返し打設の施工試験をシンガポールにて実施した。使用した矢板断面を図4に、地盤条件を図5に示す。試験は3セットの矢板（H形鋼長さ：24m、矢板長さ：23m）を用い、継手を勘合させて6回の打設、引き抜きを繰り返した。図6に示すように6回の繰り返し打設において打設時間に大きな影響は無かった。図7に示すように打設に影響を与える矢板の曲がり（Sweep）はJISの規定値（25mm）内に収まっており、また、図8に示すように継手開口幅も部分的な変形は生じているものの、変形は主として両端にのみ生じており、繰り返し打設にも十分な耐久性を有していることを確認することが



写真3 バイブロハンマー工法による施工
Installation by vibratory hammer



写真4 打撃工法による施工
Installation by impact hammer

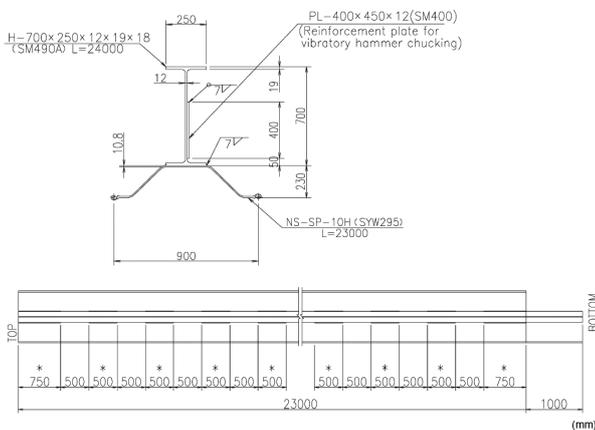


図4 ハット+H矢板試験体
Specimen of the pile

できた。

2.5 他工法との比較（仮設適用を例として）

これまで東南アジアで使われてきた大規模な土留め構造としてソルジャーパイルがある。ソルジャーパイルはH形鋼とU形鋼矢板を別々に打設し、土留めとしたものである。土圧は鋼矢板を介してH形鋼に伝達される構造となっている。矢板とH鋼が別々に打設されるため、施工精度に課題があり、信頼性、安全性に問題となる場合がある。ハット+H矢板とソルジャーパイルとの比較例を表3に示す。断面性能（Z、I）をほぼ等価として比較している。ハット+H矢板は鋼矢板とH形鋼が一体化されているため、効率的に断面性能を発揮することが可能となり、重ね壁で断面が評価されるソルジャーパイルに比べて25～50%の重量削減が実現でき、経済的な土留め構造となっている。

2.6 実プロジェクトへの適用

(1) フィリピン/パシグマリキナ川の洪水対策工事の本設護岸への適用

本工事はマニラ首都圏を流れるパシグマリキナ川の洪水被害を抑え、河川沿いの環境改善を図るための護岸改修工事である。日本政府のODA・STEP案件として実施された。工事地域はマニラ都市部の住居が密集する地域であり、狭隘地での施工が要求された。新日鐵住金では現地加工、

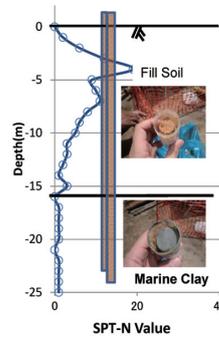


図5 地盤条件
Soil condition

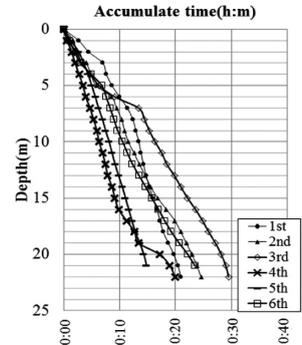


図6 打設時間
Driving time

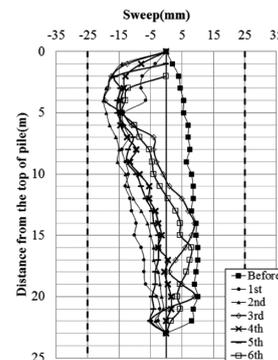


図7 矢板曲がり
Sweep of the sheet pile

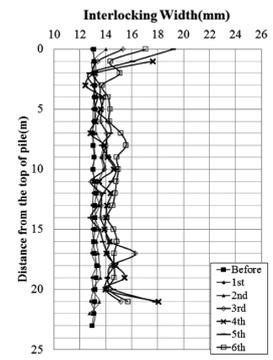


図8 矢板継手開口幅
Interlocking width

表3 ハット+H矢板とソルジャーパイルとの比較例
Comparison study with the soldier pile system

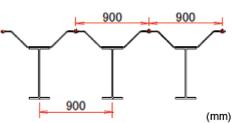
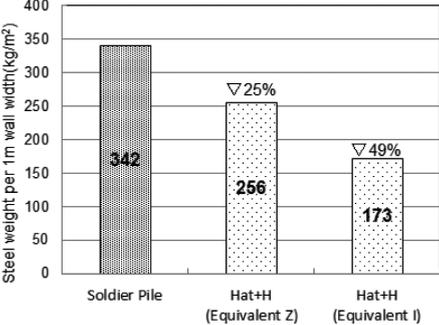
Type	Soldier pile	Hat+H
	Built-up section	Composite section
Outline		
Section	H-shape: UB610×229×243 (mm)	Equivalent Z=6770cm ³ /m
	U-type steel sheet pile FSP-IV	10H+HY750×250×12×19 (mm)
	Section modulus Z=6264cm ³ /m	Equivalent I=171000cm ⁴ /m
	Moment of inertia I=168000cm ⁴ /m	10H+HY700×250×12×19 (mm)
Comparison		



写真6 シンガポール／MRTトムソンライン駅舎工事の施工状況
Installation of Hat+H at MRT Project in Singapore



写真7 シンガポール／ハット+H打設後状況
Installed Hat+H at MRT Project in Singapore



写真5 フィリピン／護岸工事でのハット+H矢板の施工状況
Application to river revetment in Philippines (during construction)

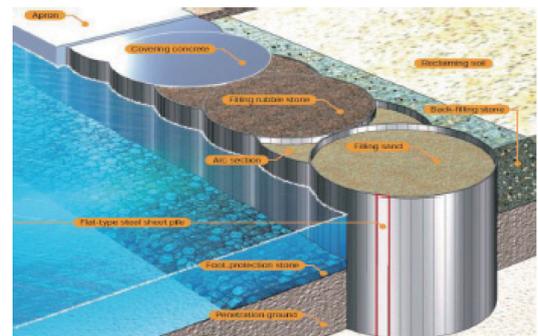


図9 鋼矢板セル工法
Outline of steel sheet pile cell method

施工試験を実施し、その適用性を実証して採用に至った。工事は2010年に開始され、2013年に完工した(写真5)。

(2) シンガポール／地下鉄トムソン・イーストコーストライン駅舎建設工事の仮設土留め壁への適用

本工事はシンガポール陸上交通庁発注の地下鉄トムソン・イースト・コースト・ラインのガーデンズ・バイ・ザ・ベイ駅舎建設工事である。駅舎工事の仮設土留め壁としてハット+H矢板が適用された。本工事では、ハット+H矢板の持つ、高剛性かつ効率的な断面性能、現場近くでの加工、優れた施工性が評価され採用された(写真6, 写真7)。

2.7 今後の展開

以上述べてきたようにハット+H工法は構造的に信頼でき、かつ、経済性、施工性に優れ、仮設土留めとして繰り返し利用も可能である。また、海外での実績を確実に積み上げてきており、海外において高剛性の鋼矢板として護岸、岸壁

への適用および大規模な仮設土留めへの適用を進めていく。

3. 直線形鋼矢板セル工法

3.1 埋立護岸、岸壁に適した鋼矢板セル工法

鋼矢板セル工法に使用される直線形鋼矢板は、我が国で1953年より製造が開始され、数々の港湾施設、東京湾横断道路木更津人工島等人工島建設プロジェクトに適用されてきた。鋼矢板セル工法とは、図9に示すように直線鋼矢板を円筒状に組み立て、内部に土砂を中詰めし、外力に抵抗する構造物である。鋼矢板セル構造は、施工速度が早い、地盤への根入れが可能であり地盤改良が少なくて済む、中詰め完了後は施工時においても安定性が高い、鋼材量が少なくて経済性が高い、などの特長を有しており、埋立護岸、岸壁への適用性が高い。直線形鋼矢板は以下の特長を有する。



写真8 香港/HKCBFにおける低空頭起重機船
Installation barges for limited height for construction

- 1) 勘合引張強度が大きい：NS-SP-FXLは5.88MN/m以上
 - 2) 継手嵌合角度の裕度が大きい：±10度以上
 - 3) 最大製造可能長が長い：38m
- これらの特長により、セル構造の適用可能水深が大きくなり、施工性が向上する。

3.2 香港/香港・珠海・マカオ大橋人工島護岸への適用

本件は、香港とマカオの間を結ぶ約40kmの連絡道路を建設する大型プロジェクトのうち、香港側の入出境管理施設設置を目的として香港国際空港の東側に築造される香港人工島(HKCBF: Hong Kong Boundary Crossing Facilities)の建設工事である。本工事では、1) 希少動物(ホワイト・ドルフィン)が生息する施工区域に適したエコロジー工法であること、2) 空頭制限をクリアーできる工法であること、3) 国内外における豊富なプロジェクト経験に裏打ちされた製造、設計、施工、デリバリーに関する一貫した支援が高く評価されたことにより、鋼矢板セル工法の採用に至った。

- 1) 希少動物保護のために本現場では打撃工法およびウォータージェットの使用が禁止されており、鋼矢板セル工法はバイプロハンマーのみで施工が可能。
- 2) 本工事は香港国際空港に隣接しており、工事中も厳しく空頭が制限されている。それに対応するために、専用の起重機船(写真8)を製作。
- 3) 本工事では径26.9m、31.194m、長さ23.6~37.1mの鋼矢板セルが85函用いられた。セルは1/4に分割したものを陸上で組み立て、現場まで専用台船で運ばれ、現場で一つのセルに連結するセミプレファブ工法が採用された(写真9)。施工は2012年に開始され、鋼矢板セルの施工は2014年に完了した(写真10)。

今後この実績を基に香港を初めとして海外での空港、産業廃棄物の処分場、道路等大規模埋立護岸へさらなる適用を進めていく。

4. サットインパイル工法

4.1 現場省力化を実現する鋼管杭基礎工法

活況な資源・エネルギー投資を背景に探鉱エリアは世界中に拡大している。それに伴いこれまでは積極的に開発が



写真9 香港/HKCBF工事における4分割セルの輸送
Delivery the fabricated quarter cells



写真10 香港/HKCBFにおける鋼矢板セルの施工
Installation of steel sheet pile cell at HKCBF in Hong Kong

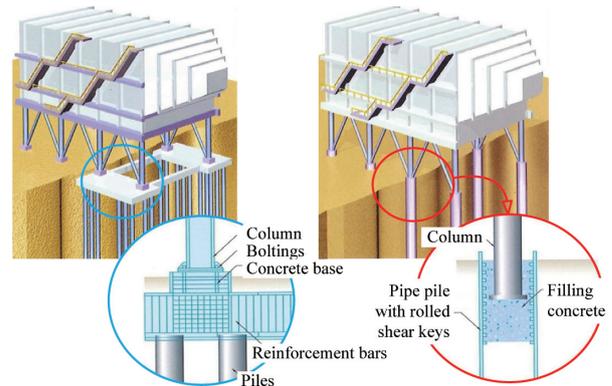


図10 サットインパイル工法
Sat-in pile foundation

行われていなかったリモートエリアでの探鉱やそれに伴う近傍での陸上プラント建設が進んできた。これらのエリアは現地作業員の手配が難しく、国によっては気候面での課題、安全上の問題、労務費高騰さらには厳格な環境規制もあり、現場作業の省力化ニーズは高い。

サットインパイル工法は、図10に示すように比較的大きめの鋼管杭の内部に、上部構造の柱を直接、建て込んで結合する1柱1杭形式であり、鉄鋼プラントにおける基礎工事の省力化・工期短縮工法のひとつとして開発された基礎形式である。国内では2003年に(財)日本建築センターの評定(評定番号:BCJ評定-FD0061-01)³⁾を取得しており、プラント基礎を中心に約20件を超える適用実績がある。従来のコンクリート製フーチング基礎と比較すると、労務

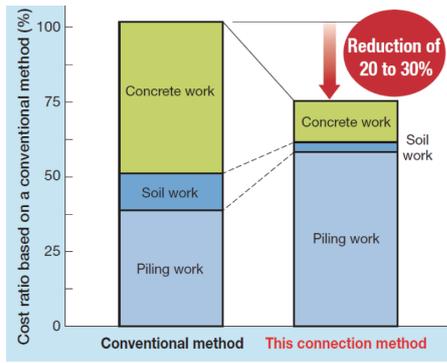


図 11 建設コストの削減効果の試算
Estimation of cost reduction

型作業の中心となる土工事とコンクリート工事を削減することが可能であり、図 11 に示すように基礎におけるトータルコストを約 20～30%削減できるとともに、約 30～40%の工期短縮が可能となる。またコンクリート製フーチング基礎に比べて面積占有率も低く、プラント建設に不可欠な地下埋設の配管・配線工事の自由度を向上させることも可能である。

4.2 サットインパイル工法の構造概要とその荷重伝達

サットインパイル工法は、基礎となる鋼管杭の杭頭内部に柱を建てこみ、その鋼管杭の内部にコンクリートを充填することにより構成した杭と柱の接合工法である。鋼管杭は、上部構造からの荷重を充填されたコンクリートを介して確実に伝達するため、鋼管内面にリブ（突起）のついた突起付き鋼管ぐい（JIS A 5525）⁴⁾を用いる。写真 11 に示すように、2.5mm 以上の高さの突起を 40mm 以下の間隔で配置された圧延鋼帯をスパイラル法によって造管しており、鋼管内面に突起をスパイラル状に配置している。鋼管杭の施工方法に制約はなく打撃工法や中堀工法、回転杭工法などで施工された鋼管杭にも適用可能である。

上部構造から作用する荷重のうち、鉛直荷重は内部柱底面に設置されたベースプレートの支圧により下部分の充填コンクリートに伝達され、その充填コンクリートが下方の外側鋼管の内面突起に支えられることで支持される。一方、作用する曲げモーメントと水平せん断力は、主に柱側面による支圧により上部分の充填コンクリートに伝達され、外側鋼管に伝達され、フープテンションへ変換されることで支持される（図 12）。

4.3 サットインパイル工法の海外プラント基礎への適用

(1) 適用上の主な課題

サットインパイル工法は、国内では日本建築センター評定を有し実績のある工法であるが、海外における陸上プラント基礎へ適用するためには下記の課題がある。

1) 設計法：限界状態設計法（LRFD）への適用

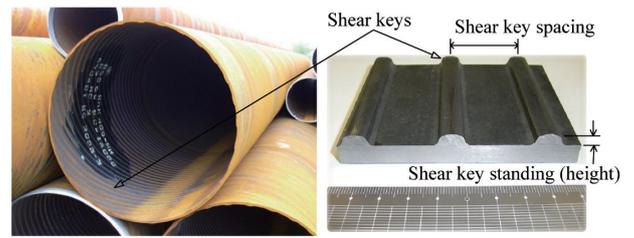


写真 11 内面突起付き鋼管と突起の詳細
Steel pipe with ribs and the detail

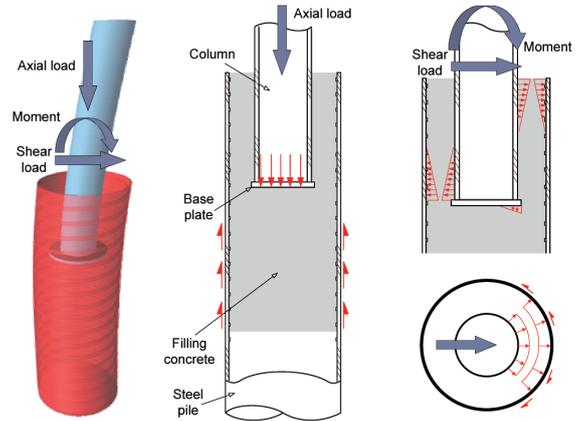


図 12 サットインパイル工法の荷重伝達
Load transfer in Sat-in pile foundation

2) 構造規模：杭径 1200mm 以上への対応

3) 認証：海外における第三者による国際認証の取得
そこで数多くのジャケット基礎、最近では風車構造のモノパイル基礎などの設計基準、プロジェクト承認に実績が豊富な DNV（Det Norske Veritas；現 DNV-GL）で構造、設計法の承認（Technical Qualification^{5,6)}）を獲得することとし、上記の課題に対する各技術課題の解決に向けた検討を行った。

既に、国内では許容応力度に基づく設計法は確立されているため、限界状態設計法への移行では、想定される破壊モードを再度整理し、限界状態設計法に準じた設計式へと移管することで対応が可能である。

技術課題の中では適用範囲（構造規模）の拡大となる杭径 1200mm 以上の対応が必要であった。特に、鉛直荷重の伝達を支配する内面突起付き鋼管の付着性能の評価が重要である。国内での評定では内面突起付き鋼管の付着強度は、突起部分による支圧強度と隣接する突起の間で発生するコンクリートのせん断強度を算出し、その小さい値を用いて決定しており、鋼管の径や板厚などの仕様は強度算出には考慮されていない。しかし、突起付き鋼管の内面付着性能は、鋼管の拘束効果に依存することが知られており、主に鋼管の径厚比の影響を強く受ける。そのため、従来の付着強度の算出方法を杭径拡大により、そのまま適用することは困難であり、算出方法の見直しが必要であった。

(2) 付着性能の評価方法改善⁸⁾

付着性能の見直しにあたり評定申請時の既往データを収

集しデータ分析を行うとともに、追加試験を実施した。そのデータは、鋼管の径厚比 (D/t ; D は杭径, t は板厚) で 38~67, コンクリート強度 (F_{cu}) は 25~50 N/mm², シェアキー比 (h/s ; h は突起高さ, s は突起のピッチ) は 0.06~0.12 と実用上の範囲をほぼ網羅する。

図 13 に押し抜き試験による内面突起付き鋼管の付着強度 (F_{bu}) の試験結果を示す。この結果より、付着強度は突起形状とともに、鋼管の径厚比を考慮することで非常に精度よく評価できることが分かる。DNV との技術協議の結果、洋上風力におけるモノパイル基礎のシェアキー形式グラウト接合における算出式⁹⁾を参考としつつ、以下の評価方法を最終的に採用した。実験結果と本評価式を比較した結果を図 14 に示す。非常に精度よく安全側に付着強度を評価できることが確認できる。

$$F_{bu} = \left[2 \left(\frac{400}{D} \right) + 140 \left(\frac{h}{s} \right)^{0.8} \right] \left(\frac{D}{t} \right)^{-0.6} F_{cu}^{0.3} \quad (1)$$

サットインパイル工法の海外プラント基礎への適用について、前述した限界状態設計法への移行や内面突起付き鋼管の付着強度の見直しを果たしてきた。これらの検討は DNV と協議を重ねて実行してきており、構造フィージビリティの審査と構造設計法の提案を既に完了した。最終段階で実施予定の施工・品質管理規定の整備は残っているものの、構造安定性の確認や設計方法は完了しており実構造物

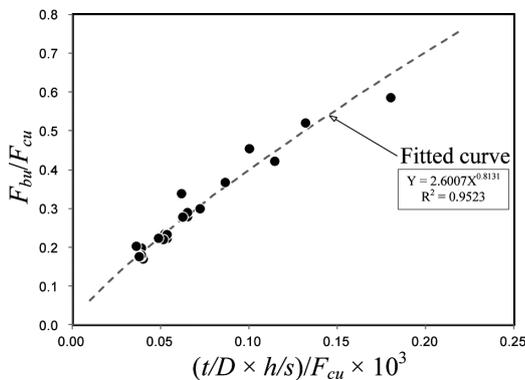


図 13 押し抜き付着試験結果の再分析
Analysis on the datasets from push-out tests

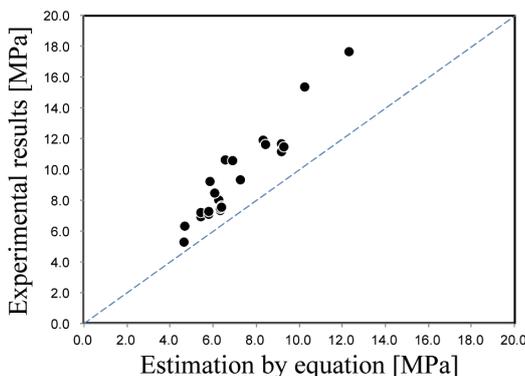


図 14 評価式と試験結果の比較
Experimental data against estimation

への適用が可能である。

4.4 国際認証の取得および今後の展開

サットインパイル工法は国内で多数の実績を有するとともに、本稿で紹介した技術検討をベースとして国際石油開発帝石(株)(INPEX)が運営するオーストラリア・ダーウィンで建設中のイクシス LNG プロジェクトにて内面突起付き鋼管杭が大量に採用されており、現地での無排土工事化と基礎工事の省力化に大きく貢献している。これらの実績および国際認証の取得を背景に、遠隔地におけるエネルギー施設建設時の大型モジュール構造の結合方式への適用を進めていく。

5. おわりに

本稿では、土木建材の主要商品である鋼矢板、鋼管杭のハイエンド商品についてこれまでの海外における市場開拓への取り組み、実績について述べてきた。海外へ市場を拡大していくためには、商品、工法が各国の事情にあったメリットがあり、かつ、競合商品に対して競争力を有するものでなければならない。今後も、これまで日本で培ってきた新日鐵住金の技術(急速施工, 狭隘地施工, 省力化等)をベースに海外に適した商品, 工法の開発および既存商品, 工法の改良を行い、海外土木建材の需要開拓に取り組んでいく。

参考文献

- 1) Matsui, N. et al.: Novel Compound Steel Sheet Pile for Earth Retaining Works. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering. 2015
- 2) Teshima, K. et al.: Application of High Stiffness Steel Sheet Pile for the Retaining Wall and Quay Wall. Seminar dan Pameran HAKI 2012. Jakarta, Indonesia, 2012
- 3) (財)日本建築センター: 1柱1杭(サットインパイル)杭頭接合構造の耐力評価 (BCJ 評定 -FD0061-01). 2003
- 4) 日本工業規格: JIS A 5525 鋼管ぐい. 2009
- 5) DNV: Recommended Practice - DNV-RP-A203 - Technology Qualification
- 6) DNV: Service Specification - DNV-OSS-401 - Technology Qualification Management
- 7) 高木 ほか: 内面に溶接ビードを設けたコンクリート充填鋼管柱の付着性状に関する実験的研究. 日本建築学会学術講演便覧集. 関東, 1997.9
- 8) Tanenaka, S. et al.: Steel Pipe with Roll-Formed Shear Keys and their Application in Foundation Systems. 10th Intl. Conf. on Advanced in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures. Singapore, 2012.7
- 9) DNV: Design of Offshore Wind Turbine Structures (DNV-OS-J101). 2014.5



龍田昌毅 Masataka TATSUTA
建材事業部 建材開発技術部
海外建材技術室 上席主幹
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



豊島 径 Kei TESHIMA
ニッポン・スチール&スミトモ・メタル サウス
イーストアジア社 シニアマネジャー



松井延行 Nobuyuki MATSUI
ニッポン・スチール&スミトモ・メタル サウス
イーストアジア社 マネジャー



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



富永智矢 Tomoya TOMINAGA
建材事業部 建材開発技術部
海外建材技術室 主幹



永津亮祐 Ryohsuke NAGATSU
新日鐵住金諮詢(北京)有限公司
上海分公司 主査