UDC 624.154.7

技術論文

サットインパイル工法®（１柱１杭基礎）の開発と利用

Development and Application of Sat-in Pile Foundation

内藤寛子* Hiroko NAITO
高野良広 Yoshihiro TAKANO
赤司有三 Yuzo AKASHI
辻井正人 Masato TSUJII
椛山義規 Yoshinori KABAYAMA
妙中真治 Shinji TAENAKA
石濱吉郎 Yoshiro ISHIHAMA

抄 録

プラント設備に多くある架構構造物や建築物の基礎は，杭基礎の場合，杭天端に型枠，配筋，コンクリート打設からなるフーチングおよびそれらをつなぐ地中梁を構築することが一般的であり，多数の工種，工程を必要とする現場作業が多く，労務依存型の基礎構造となっている。新日鐵住金(株)では建設コスト削減および短工期化を目的に，現場作業の省力化が図れる内面突起付き鋼管杭を利用した１柱１杭基礎形式の基礎構造（サットインパイル工法®）を開発した。本稿では，その設計手法および適用実績とその効果について報告した。

Abstract

Conventional pile foundations for plant equipment such as frame structures are designed with a concrete footing and ground beams connecting each. Therefore, the construction process depends on on-site labor, since it involves formwork, re-bar work and concrete pouring at the site, which means there are numerous work stages and requires long construction time. The Sat-in Pile Foundation has been developed by Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation, capable of saving labor required concrete works at site, achieving efficiency and shortening construction term. This paper introduces the developed pile foundation, composed of just one steel pipe pile with protrusions on the inner surfaces and filling concrete for one column.

1. はじめに

プラント設備に多くある架構構造物や建築物の基礎は，杭基礎の場合，杭天端に型枠，配筋，コンクリート打設からなるフーチングおよびそれらをつなぐ地中梁を構築することが一般的であり，多数の工種，工程を必要とする現場作業が多く，労務依存型の構造となっている。

一方，建設現場では熟練工の高齢化および若年労働者不足が原因で，1990年代以降，労務費が上昇してきたため，建設コスト削減および短工期化を目的に，新日鐵住金(株)で開発してきたのが，サットインパイル工法®である。この工法は，基礎として用いる１本の鋼管杭の中へ１本の柱を納め，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１柱１杭形式の基礎構造である。この構造はサットインパイル工法®として，2003年に(一財)日本建築センターの評定（評定番号：BCJ評定-FD0061-01）[1]を取得しており，社内外プラントを中心に約20件を超える適用実績を保有している。本稿では，サットインパイル工法®の設計手法，載荷実験結果および適用実績とその効果について報告する。

2. サットインパイル工法®の概要

2.1 工法の概要

サットインパイル工法®（以下，本工法と略す）は，図1に示すように鋼製柱，充填コンクリート（無筋コンクリート）および鋼管杭の３点から構成されている。上部構造の荷重を確実に伝達する構造とするため，鋼製柱は鋼管杭内部に挿入されており，コンクリートが鋼管杭内部に充填された構造となる。鋼管杭は，この充填コンクリートとの一体性を確保する目的で，内面突起（リブ）付き鋼管ぐい（JIS A 5525付属書A）を利用する。本鋼管は写真1に示す高さ2.5mm以上の突起を40mm以下の間隔で配置された圧延鋼帯を，図2に示すようにスパイラル造管された製品である。

* 設備・保全技術センター 土木建築技術部 土木技術室 主査 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

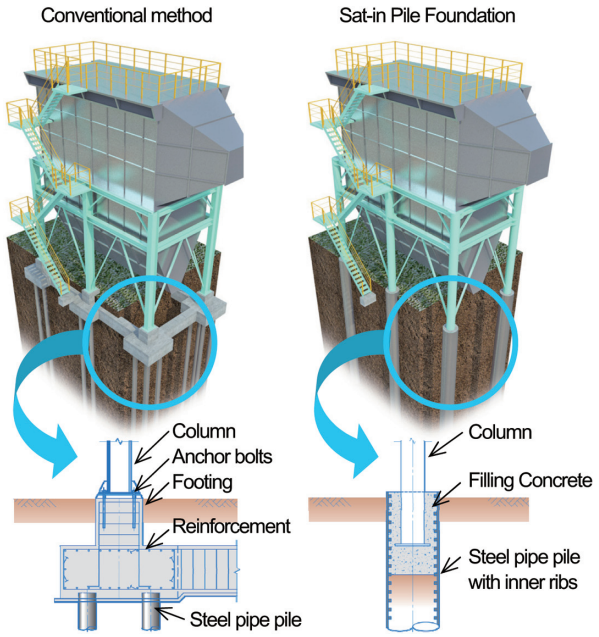


図１　サットインパイル工法®（１柱１杭基礎構造）
Sat-in Pile Foundation

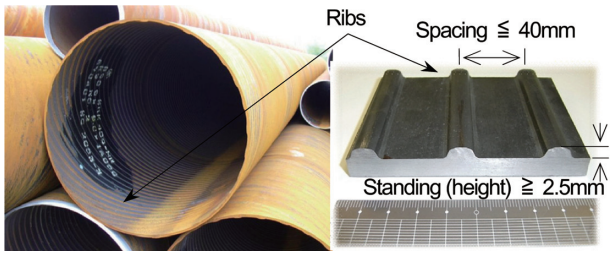


写真１　内面突起付き鋼管杭と突起詳細
Steel pipe with inner ribs and the detail

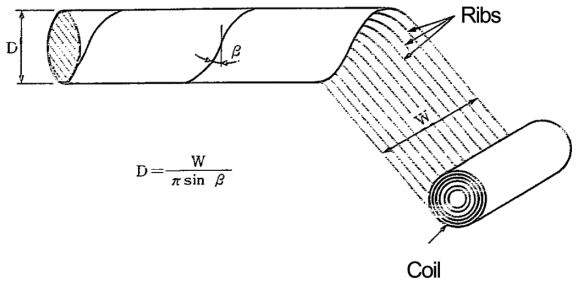


図２　スパイラル造管
Spiral pipe mill

表１　施工手順と工期短縮効果（試算）
Construction process and estimation of total construction period

	Conventional method	Sat-in Pile Foundation
Piling	Pile driving	Pile driving
Soil work	Excavation	↓
Concrete work	Rebar arrangement	↓
	Anchor bolt or column setting	Anchor bolt or column setting
	Formwork	↓
	Concrete pouring	Concrete pouring
Soil work	Backfill	↓
Total construction period	Base	Base × 60 to 70%

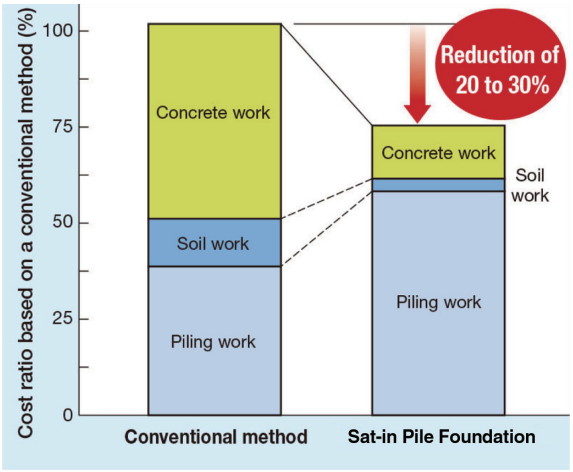


図３　建設コストの削減効果（試算）
Estimation of cost reduction

写真２　斜面への施工状況
Application on a slope

2.2　工法の特徴

本工法は，柱を鋼管杭内に納める必要があるため，従来構造に比べて鋼管杭のサイズは大きくなるが，鋼管杭本数を削減できる。これに加えて，**表１**に示すように，労務依存型の土工事やコンクリート工事の削減（型枠レス，鉄筋レス）だけでなく，排土量の削減もできる。その結果，30～40%の工期短縮が可能となるとともに，**図３**に示すように，基礎工事におけるトータルコストを 20～30%削減できる（社内工事実績）。また，フーチング基礎に比べ土地の占有面積が小さいため建設面積に制約がある場所や，**写真２**に示すような斜面での適用も可能である。

2.3　工法開発における課題

本工法の開発においては，柱から杭への荷重伝達機構を明らかにするとともに，その構造設計の評価方法を確立しておくことが必要である。また，実際の施工における問題点および上部構造や柱仕様において適用制約を受けないように，構造設計の自由度を高めておくことも，実プロジェクト適用では非常に重要なポイントとなる。

以下では，上記の構造設計の考え方やその検証実験結果についての取組み概要とともに，開発を行った各種接合タ

イプについても述べる。

3. 設計方法

3.1 荷重伝達の考え方

上部構造の柱から鋼管杭への荷重の流れを図4に示す。鉛直荷重は，柱下端部に設置されているベースプレートから充填コンクリートへ伝達され，鋼管杭の突起により充填コンクリートが拘束されることで抵抗することとなる。一方，曲げモーメントおよび水平せん断力は，埋込まれた柱側面の支圧により充填コンクリートへ荷重が伝達され，鋼管杭のフープテンションにより充填コンクリートが拘束されることで抵抗することとなる。

3.1.1 鉛直荷重に対する設計

押込み方向の鉛直荷重に対する設計では，ベースプレートより下側のコンクリート部分で想定される破壊形式を評価することが必要である。想定される破壊形式は，下記の(1)～(3)となる。

(1) ベースプレート下面の充填コンクリートの支圧破壊
(2) 内面突起付き鋼管とコンクリートの付着界面での破壊
(3) ベースプレート周長でのコンクリートのせん断破壊

鉛直荷重は，図4の中央の図のようにベースプレート下面から充填コンクリート内を45度の角度で分散し，鋼管杭へと伝達されて支持されると考える。そのため，分散長を考慮したコンクリートの充填長さを設定したうえで，上記の破壊形式に対する照査を行う。

また，充填コンクリートと内面突起付き鋼管の付着抵抗力は，突起部の支圧抵抗とそれ以外の付着抵抗に，鋼管のフープテンションによる拘束効果も加わった複雑な抵抗であるため，構造実験をもとに，十分安全側となる鋼管杭径の1.5倍以上を確保することを標準としている。また，引抜方向の鉛直荷重に対しても，ベースプレートからの上側のコンクリートの充填長さが重要であり，押込方向と同様の考え方に基づいた設計を行う。

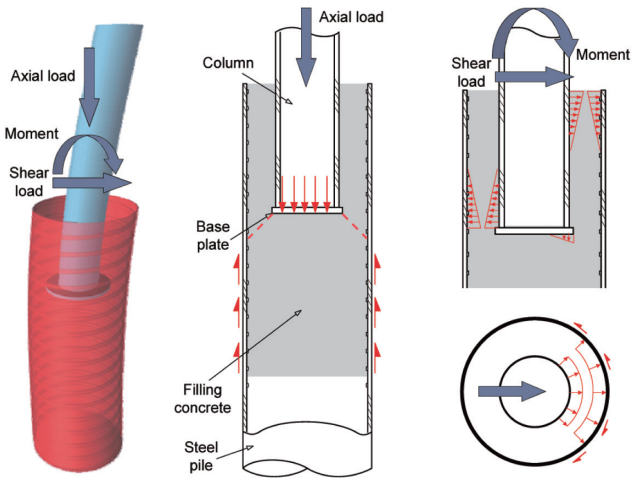


図4 サットインパイル工法®の荷重伝達
Load transfer in Sat-in Pile Foundation

3.1.2 曲げモーメントおよび水平せん断力に対する設計

曲げモーメントおよび水平せん断力による荷重は，図4の右端の図のように，柱側面に発生する三角形分布の圧縮力が充填コンクリートを介して，鋼管杭の内側を押し広げようとする圧縮力となり，鋼管杭の周方向力で支持されると考える。そのため，設計においては，充填コンクリートと，これを拘束する鋼管杭のフープテンションによる破壊形式を評価することが必要である。つまり下記の(1)および(2)の破壊形式が想定される。

(1) 柱埋込み部の側面に作用するコンクリートの支圧破壊
(2) 鋼管杭の周方向引張応力による鋼材破壊

上記の荷重伝達および破壊については，後述する構造試験において詳しく述べる。

3.2 幾何学的な制約条件

3.2.1 柱および鋼管杭の埋込み長さ

一般的な埋込み柱脚の設計では，柱の基礎コンクリートへの埋込み深さを柱せいの2倍以上とすることで，柱脚は柱の全塑性モーメントを伝達でき，剛接合として取り扱うことができるため[2]，本工法においても，柱の充填コンクリートへの埋込み長さは，柱せいの2倍以上とする。

3.2.2 柱，鋼管杭のサイズの関係

柱せいに対して鋼管杭の径が過大な場合には，柱から鋼管杭への荷重伝達機構が異なる可能性が考えられるため，柱から鋼管杭への荷重伝達が実験で確認されている範囲から[1]，杭径は，柱せいの3倍を超えないように定めている。

3.3 施工における制約条件

鋼管杭の施工方法には制約はなく，打撃工法や中掘工法，回転圧入工法などで施工された鋼管杭にも適用可能である。ただしフーチングを介さず，鋼管杭と柱を接続する構造形式であることから，杭打精度は一般的な値よりも厳しく管理する必要があり，本工法では杭芯ずれを1/10D（D：鋼管杭径）かつ50mm以下と設定している。

一方，本工法におけるコンクリート打設では，掘削された鋼管杭内をポンプ排水等にてドライな状態とした後に行うことが必要であり，地下水のレベルや雨水侵入には注意を要する。

4. 構造試験

本工法の特徴である鉛直荷重を伝達する内面突起付き鋼管杭とコンクリートの間の付着強度，および，曲げモーメントおよび水平せん断力を伝達する接合構造の性能を確認するため構造試験を実施した。ここでは鉛直荷重および曲げモーメントの荷重伝達を照査した2種類の試験を紹介する。

4.1 鉛直荷重の伝達機構確認

内面突起付き鋼管杭と充填コンクリート間の付着強度の確認のため，パラメータを表2のように設定し，押抜き試験を図5の要領で実施した。最大載荷荷重を内面突起内側の周長とコンクリート充填長Lの積（内面突起付き鋼管杭の内面積）で除した値を付着強度 τ_u とし，これとコンクリート強度 F_c との関係を内面突起の形状別に示したのが，図6である。これより，τ_u は突起の間隔sや高さhにはあまり依存せず，F_c に依存する傾向が伺われる。充填コンクリート部の付着を鉛直荷重伝達のクリティカルとさせないためには，付着強度と付着面積（内面突起付き鋼管杭の内面積）の積，すなわち全付着力が鉛直荷重より大きいことが必要である。鉛直荷重は，F_c と内面突起付き鋼管杭部のコンクリートの面積Acの積で求められる値が最大となることから，全付着力をこれより大きくすれば，突起付き鋼管の付着が先行破壊することはない。そこで，これを満足する式(1)から，鋼管径Dに対する付着長さLの比ごとの関係を求めた結果を図7に示す。

$$\{F_c \times (1/4)\pi D_{in}^2\}/(\pi D_{in} L \tau_u) \leqq 1 \quad (1)$$

ここに，F_c：コンクリート設計基準強度（MPa），D_{in}：鋼管径より板厚と突起高さを引いた値（mm），L：コンクリート充填長（mm），τ_u：付着強度（MPa）とする。これより，付着が先行破壊しない限界である縦軸1.0以下となるには，付着長さを鋼管径の1.5倍以上を確保すべきことが分かる。このことから本工法では，充填部長さの標準として，杭径の1.5倍以上をベースプレート下部に確保するようにしている。

表2　押抜き試験条件
Case of punching shear tests

Diameter of steel pipe	D (mm)	250, 400, 600
Height of shear keys	h (mm)	2.5, 3.0, 4.1
Spacing of shear keys	s (mm)	36, 40
Compressive strength of concrete	Fcu (MPa)	25 to 50
Angle of ribs	θ (deg.)	0, 30, 40

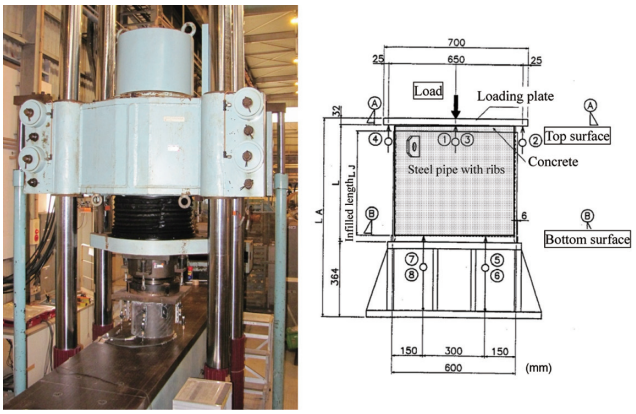


図5　押抜き試験概要
Outline of the punching shear test

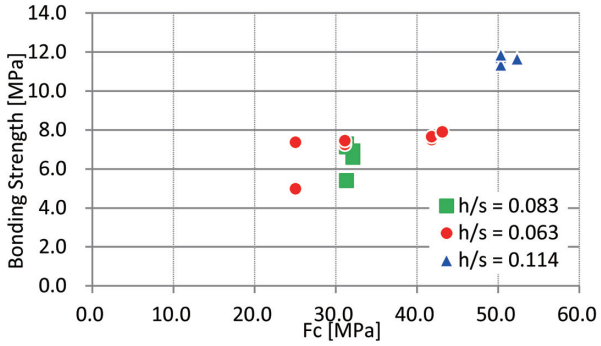


図6　内面突起付き鋼管のコンクリートとの付着強度
Bonding strength of the interface between concrete and steel pipe with ribs

4.2 曲げモーメントの伝達機構確認

柱を鋼管杭に埋込んだ接合部の荷重伝達機構や接合部耐力を把握するため，鋼管杭1200mm径×9mm厚と鋼管柱900mm径×16mm厚を接合した供試体を作成し，曲げ試験を実施した。試験は，図8に示すように，接合部の両側の2点の載荷点と支点2点の4点曲げにて，曲げモーメ

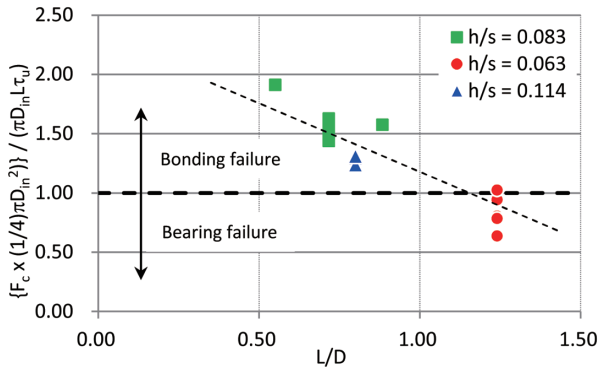
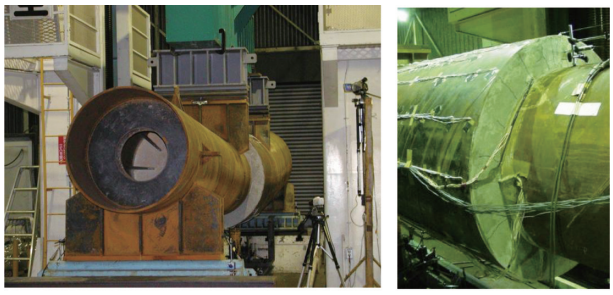


図7　コンクリート充填長とその破壊条件の関係
Relationship of concrete length to the failure mode



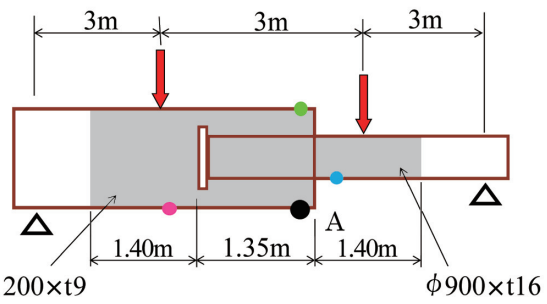


図8　曲げ試験概要
Outline of the bending test

ントを作用させた。本試験では接合部の破壊を先行させるため，埋込み深さを柱せいの1.5倍と短くし，さらに，柱が先行して降伏しないよう，接続部の柱内部にはコンクリートを充填した。

図8のA点での荷重変位関係を図9に示す。各部の降伏過程は，まず鋼管柱900mm径の引張方向の軸方向ひずみが2242kNで降伏し，続いて鋼管杭1200mm径の引張方向の軸方向ひずみが2443kNで降伏に至り，その後鋼管杭1200mm径の天端の周方向ひずみが3204kNで降伏した。柱や鋼管杭の降伏耐力より接合部の耐力は高いこと，また曲げモーメントや水平力を拘束する鋼管杭のフープテンションによる降伏は，鋼管杭の軸方向の降伏よりも遅れて発生することが確認された。これより，本試験の接合部のディメンジョンが確保されていれば，柱や鋼管杭は通常の設計を行えばよく，本接合部がクリティカルになることはないことがわかった。

次に，鋼管柱900mm径の軸方向ひずみが降伏に至った載荷荷重2242kN時の鋼管杭1200mm径の周方向ひずみの軸方向分布を図10に示す。柱埋込み中心を境にして，鋼管杭の上面側と下面側で逆方向の三角形のひずみ分布となっていることから，柱は埋込み中心で回転し，柱側面に発生した三角形分布の圧縮応力がコンクリートを介してそのまま杭へ三角形部分で伝達されており，図4の右端の図に示す荷重伝達機構が妥当であることが確認できた。

本試験より，柱の埋込み長さを十分に確保するなど適切な設計を実施することで，接合部よりも埋込み柱部を先行降伏させることが可能であり，接合部がクリティカルとならない設計を行うことが可能であることがわかった。

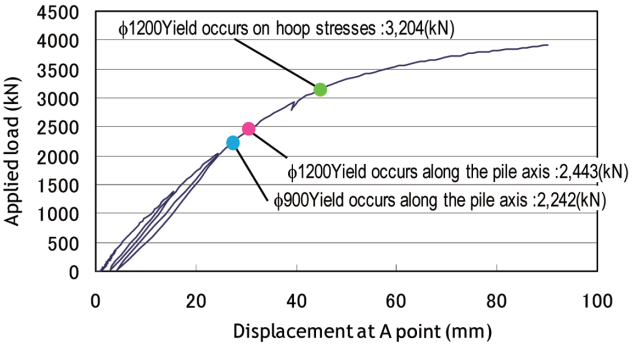


図9　荷重変位関係
Relationship between load and displacement

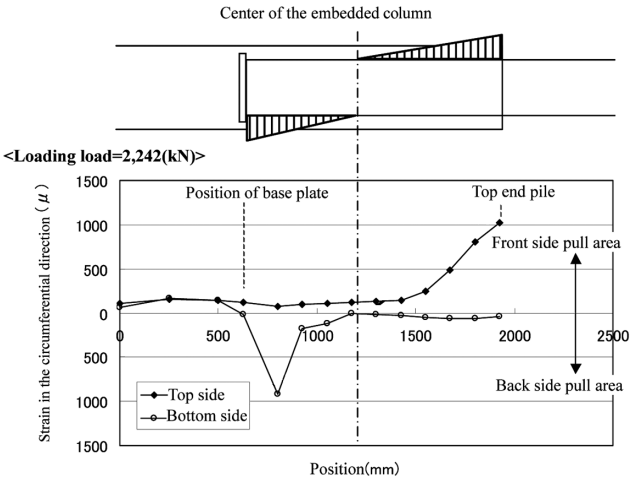


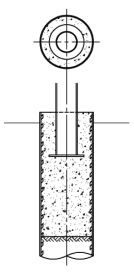
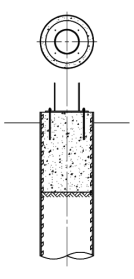
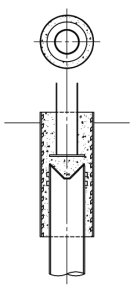
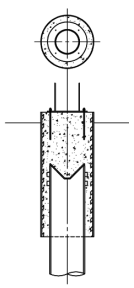
図10　周方向ひずみの軸方向分布
Axial direction distribution of the strain in the circumferential direction

5.　接合部の種類

プラント架構は，水平力を筋交いで負担させる構造が多く，この場合，柱脚部はピン接合となり，鉛直荷重や水平荷重が大きく，大きな曲げモーメントは作用しない。また，柱を埋込むのみの剛接合のメニューのみでは，架構の建て方と柱脚部をコンクリートで固定する工程が錯綜し，本工法の工程メリットが享受しにくくなる等の課題もある。これらを考慮し，上部架構の特徴も加味した表3に示す接合メニューを開発した。

まず接合構造には，上部構造と下部構造が剛接合となる埋込接合タイプ（Embedded Joint Type）とピン接合となるアンカーボルト接合タイプ（Anchor Bolt Joint Type）の2種類がある。また，本工法は，柱やベースプレートが，鋼管杭の平面寸法の中に物理的に納まる必要があるため，柱やベースプレートのサイズによっては，鋼管杭のサイズを，杭として必要なサイズ以上にする必要が生じ，不経済な設計となる場合がある。このことに対応するため，鋼管杭よりひと回り大きな径の内面突起付き鋼管を用いた鞘管（Socket pipe）にて，柱と鋼管杭を接合する鞘管接合構造も開発している。この場合の柱脚部の接合構造も，埋込接合タイプ，アンカーボルト接合タイプの2種類を具備しており，これらを架構の荷重や取り合い条件，寸法条件等を加味して適宜使い分けることで，合理的かつ経済的な設計ができるようにしている。なお，開発当初は，鋼管柱を対象としていたが，H形鋼柱に対しての適用実績も多く，柱とベースプレートの形状は，矩形でも円形でも対応可能である。

表3　サットインパイル工法®の接合タイプ
Joint type of Sat-in Pile Foundation

Joint type			
Embedded	Anchor bolt	Embedded with socket pipe	Anchor bolt with socket pipe
			

Type	Joint type
A	Embedded
B	Anchor bolt
C	Embedded with socket pipe
D	Anchor bolt with socket pipe

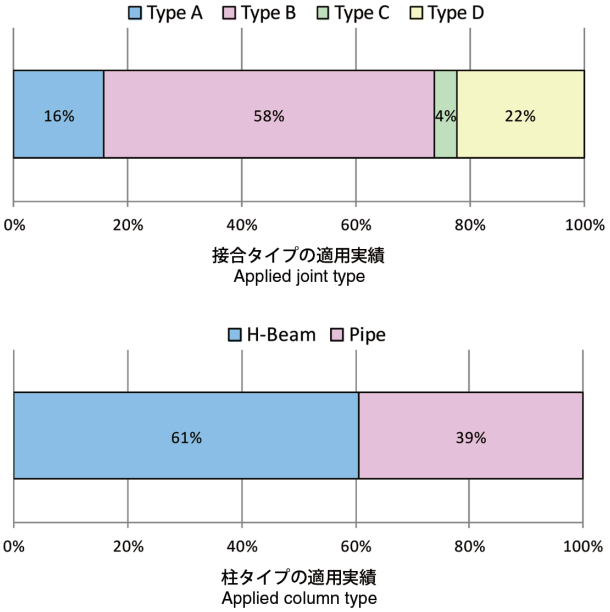


図 11　国内適用実績
Past domestic records of Sat-in Pile Foundation

図 11 に，接合タイプおよび柱形状ごとの適用の割合を示す。この結果から，実際の適用では H 形鋼柱を対象としたアンカーボルト接合タイプの実績が最も多いことが分かる。

6.　適用実績

6.1　国内案件での適用実績

社内の製鉄プラント基礎を中心に，プラント設備に多くみられる鋼製柱で設備を支える電気集塵機，サイロ，配管・配線架構の基礎を中心に 1 柱 1 杭構造の適用を進め，1994 年以降，約 20 件（約 360 本）を超える適用実績があり，工期短縮やコスト削減の効果を発揮している。

東日本大震災において被害を受けた釜石製鉄所において自家発電所の電気集塵機およびフライアッシュサイロへ本工法を適用していたが，本工法を用いた基礎や基礎表面の後打ちコンクリートにひび割れや隙間の被害がないことを確認している（写真 3）。なお，当設備のある製鉄所では震度 6 弱が記録されている。

6.2　海外案件適用事例

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 [3] では，本工法の無排土工事化と基礎工事の省力化を実現できる効果を評価され，大量に採用された。これは，環境に厳

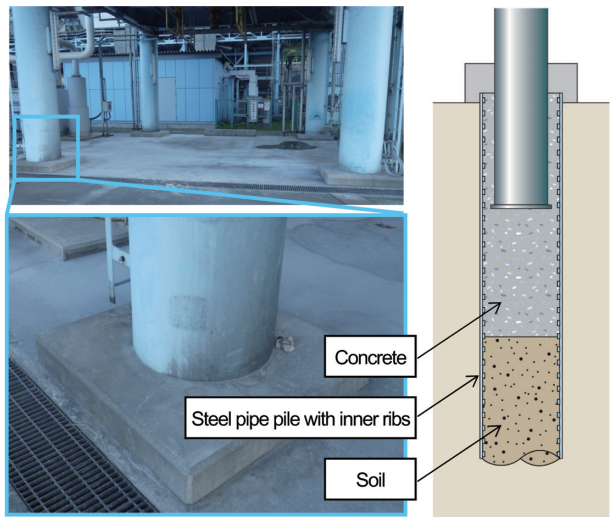


写真 3　東日本大震災後のサイロ基礎
Silo foundation after the Great East Japan Earthquake

格で比較的人件費の高い豪州マーケットに適合したからである。これに加えて，イクシス LNG プロジェクトでは，据付工事短縮のために上部架構をブロック施工するため，昼夜の気温差により上部架構が熱変形するが，本工法の柱埋込接合タイプはこれを吸収できる構造であることも評価されたポイントであった。採用に至るまでは，適用実績の提示，設計方法の議論，施工現場見学等を実施し，本工法に対する理解や信頼を獲得することに努めた。さらに，採用決定後も，詳細構造設計や現地施工条件に伴う設計条件変更等の議論にも迅速に対応した。

7.　今後の方向性

本工法は前述したとおり 2003 年に日本建築センター評定を取得しているが，当時は許容応力度設計法が主流であったことや適用範囲が限定されていることなどの問題があった。国内外の社外案件への適用を拡大していくためには，下記の課題を解決していく必要がある [4]。

1）設計法：限界状態設計法（LRFD）への移行
2）構造規模：杭径 1200 mm 以上への対応
3）認証：第三者機関における国際認証の取得

1）については，国内では許容応力にもとづく設計法が確立しているため，想定される破壊モードを再整理し，限界状態設計法に準じた設計式へと移行することで対応可能である。

2）については，国内評定では，鋼管の拘束効果を反映していない付着強度を設定していたが，既往試験データの再整理および追加試験を実施し，鋼管の径厚比および鋼管杭内面突起をパラメータとした拘束効果を考慮した付着強度式を確立することが必要である [5]。

3）については，数多くのジャケット基礎などの設計基準，プロジェクト承認の実績が豊富な DNV（Det Norske Veritas：現 DNV-GL）による構造および設計法の承認（Technical

Qualification）を進めている[6,7]。現在，認証の最終段階である施工および品質管理の規定に対する議論が進んでおり，早期に完了させ，より活用しやすい工法へと基盤整備を進めていく。

8. おわりに

本稿では，製鉄プラント建設工事における敷地制約や短工期化，省力化などのニーズに応えて開発したサットインパイル工法®（内面突起付き鋼管杭を利用）について紹介してきた。本工法は，イクシスLNGプラントなどの例でも示された通り，同様のニーズがあるプラント設備においても有用であると考える。今後も社内外案件を通じてこれらのニーズに応えるべく，鋼材を有効に活用した単体あるいはコンクリートとのハイブリッド構造の開発をしていくこととする。

※サットインパイル工法®は新日鉄住金エンジニアリング（株）の登録商標です。

参照文献

1) （一財）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
2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針．第2版．東京，丸善（株），2006，p. 298
3) 日揮（株）：ホームページ，実績 http://www.jgc.com/jp/03_projects/01_epc_energy_chemical/03_lng_pj_06.html
4) 龍田昌毅 ほか：新日鉄住金技報．(403)，130 (2015)
5) Taenaka, 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
6) DNV: Service Specification –DNV-RP-A203– Technology Qualification
7) DNV: Service Specification –DNV-OSS-401– Technology Qualification Management

内藤寛子　Hiroko NAITO
設備・保全技術センター
土木建築技術部　土木技術室　主査
千葉県富津市新富20-1　〒293-8511

高野良広　Yoshihiro TAKANO
設備・保全技術センター
土木建築技術部　上席主幹

赤司有三　Yuzo AKASHI
スラグ・セメント事業推進部　市場開拓室
主幹

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

椛山義規　Yoshinori KABAYAMA
スラグ・セメント事業推進部　市場開拓室
主幹

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

石濱吉郎　Yoshiro ISHIHAMA
鉄鋼研究所　鋼構造研究部　主幹研究員