

鋼管杭の技術の変遷と最近の技術開発動向

Challenges Up to the Present and for the Future on Installation Technologies and Design of Steel Pipe Piles

田中宏征* 日下裕貴
Hiroyuki TANAKA Hiroki KUSAKA

抄 録

鋼管杭は1950年代に打撃工法を主体に採用が増加し、その後、低騒音、低振動、低排土、高支持力、低コスト等の時々の社会環境やニーズに対応するために我が国独自の多様な鋼管杭工法が開発され、発展してきた。近年では高支持力杭の登場や設計地震力の増大等を背景に高耐力、高剛性の鋼管杭材料・部材や接合構造へのニーズが増加傾向にあり、また都市内の急速・狭隘地施工や更新・補強工事における空頭制限等の制約条件下施工、品質管理の厳格化や技能者不足への対応等、様々な課題に対応する工法や技術が求められている。鋼管杭の技術変遷を総括した上で、近年の鋼管杭分野における技術課題を取り上げ、それらの要求に応えるための技術開発動向と新技術を紹介した。

Abstract

Steel Pipe Piles had come into wide use in the 1950's according to the improvement of the impact hammer method, and then high performance pile driving methods have been developed to reply requirements such as pile installation with low noise - low ground vibration, reduction of waste soil, cost saving and so on. In recent years, high performance materials and structural elements are required to meet demands due to the increase of bearing capacity of a pile and seismic force considered in design. Available application technologies under the conditions of rapid construction, space limitation and shortage of skilled worker are also required. This paper shows the historical development on technologies of steel pipe pile and introduces challenges to provide the solutions for recent technical demands.

1. はじめに

我が国で最初の鋼管杭は、大阪の高麗橋建設において1870年に英国から輸入された先端がスクリー状の棒鋼杭と言われており、その後1899年から建設された横浜港山下大棧橋でもスクリー型のねじ込み杭を使用したことが知られている¹⁾。戦後、1954年に塩釜港棧橋で使用されたのを契機として、高度成長期にかけて打撃工法による鋼管杭が増加し、その後も社会環境の変化に対応しながら発展してきた。1960年代には騒音、振動等の環境に配慮した工法が登場し、以降も多様化、先鋭化する社会的要請に応えるべく我が国固有の多数の工法が実用化されている²⁾。これまでの鋼管杭発展の歴史は、まさに社会環境・ニーズに対応する工法開発の歴史であった。

近年では高支持力杭の登場や設計法の高度化、設計荷重の増大等を背景に高耐力、高剛性の鋼管杭材料や部材へ

の要求が高まり、また都市内の急速・狭隘地施工や更新・補強工事での空頭制限等の制約条件下施工への適応、品質管理の厳格化や技能者不足等への対応が求められ、鋼管杭分野における技術開発は、既存工法を新しい社会的要求に順応させるための工法改良や鋼管杭材料・部材・接合構造の開発等が主流になっている。ここでは、鋼管杭の技術の変遷を振り返った上で、近年の鋼管杭分野における技術課題を取り上げ、それらの要求に応えるための技術開発動向と新技術を紹介する。

2. 鋼管杭の技術の変遷

2.1 打撃杭の発展による鋼管杭の普及拡大

1950年代中盤から鋼管杭が本格的に採用されるようになり、1970年初頭には現在の量を超える年間80～100万トンの鋼管杭が生産されていた。この頃は打撃工法による鋼管杭が主流であり、ハンマ等の施工機材の大型化、高能率

* 建材事業部 建材開発技術部 土木基礎建材技術第一室長 博士(工学) 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

化が高度成長期における大型構造物の急速施工を可能にした。打撃工法は鋼管杭の材料特性（薄肉，高強度）を活かした施工法で支持力や施工速度が大きく，掘削残土も発生しないため経済性に優れ，動的支持力管理式による打ち止め管理が可能で信頼性も高い工法である。これらの点は現在も変わらず，コストパフォーマンスと信頼性の観点からは最も優れた工法の一つであり，振動，騒音の制約が比較的緩い港湾分野等では，今なお打撃杭が多用されている。しかしながら，1960年代からは公害問題への関心の高まりによって騒音，振動や油煙の飛散が問題となりはじめ，1968年の騒音規制法，1976年の振動規制法制定により，都市部での打撃施工は実質的に困難になった。

2.2 低騒音・低振動工法の登場

～中掘り工法，バイブロハンマ工法の開発

鋼管杭は軟弱地盤での長尺施工が求められる条件において適用性が高いことから，都市部での適用制約は大きな課題であり，その解決に主眼を置いた杭工法の開発が精力的に行われることとなった。

低騒音・低振動施工を可能にし，その後の多様な鋼管杭工法の源流の一つとなったのが写真1に示す中掘り杭工法である。1960年代には開発が始まり，その後，掘削方法や杭先端根固め方法に特徴を有する複数の工法の登場を経て，1992年に道路橋示方書³⁾において支持力評価法が標準化されるに至っている。新日鐵住金(株)でも(株)テクノックスとセメントミルクの高圧噴射攪拌により杭先端根固めを構築するTN工法を共同開発し⁴⁾，道路橋等の杭基礎や鋼管矢板基礎の施工に用いられている。中掘り杭工法は施工時に地盤の周辺への押し抜けや打撃による応力履歴がないため支持力が小さいこと，掘削残土が発生すること，支持層確認や支持力管理が難しいこと等，打撃杭と比べると失った特長も多い。それでも鋼管杭の強度，剛性等の特長により，橋梁他の都市内の土木構造物基礎を主体に大量に採用され，その後の多様な工法の出現によって最盛期を過ぎた感はあるが，現在でも一定の採用実績を維持している。

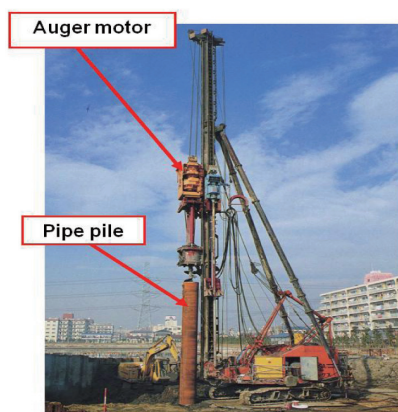


写真1 中掘り杭工法の施工状況
Inner excavation method

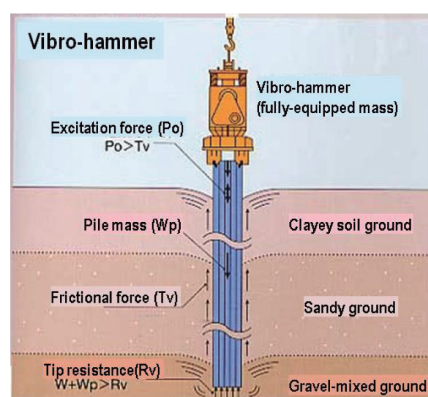


図1 バイブロハンマ工法
Vibratory hammer method

もう一つの流れとして，オーガー掘削やセメントを用いずに打撃杭の特長をある程度踏襲しながら騒音・振動低減を狙った図1に示すバイブロハンマによる振動工法の開発がある。バイブロハンマ工法はハンマ重量と振動により杭体を地盤内に貫入する工法で，1970年頃から普及し，その後，起振力，振幅の可変制御化や高周波化により地盤振動の低減が図られ，近年ではウォータージェットにより先端地盤をほぐしながら杭を沈設するウォータージェット併用バイブロハンマ工法も実用化されている。ただし，支持杭としての本格活用の歴史はまだ浅く，支持力データの蓄積と2002年の道路橋示方書³⁾における支持力評価を待つことになる。

2.3 高性能化と多様なニーズへの対応

～日本独自の技術発展

中掘り杭工法は騒音・振動問題を克服したものの支持力や施工速度の低下，排土の発生，打ち止め管理の難しさの課題が残った。バイブロハンマ工法では軽減されたとは言え振動が発生し，その対策としてのウォータージェット併用工法には支持力への懸念が残された。これらの課題を克服して，コストパフォーマンス，環境性能，信頼性等の向上を図ることに次の開発の視点が向けられた。新日鐵住金では以下に示すような独自の杭工法を開発，実用化している。

2.3.1 ガンテツパイル[®]

～土木分野における高支持力・低排土工法

ガンテツパイルはテクノックス他との共同開発工法で，図2に示すように，セメントミルクを注入しながら地盤を掘削，攪拌混合してソイルセメント柱を構築し，外面突起付き鋼管と一体化させる鋼管ソイルセメント杭工法であり，低騒音・低振動施工が可能で，高支持力化と原位置土活用による排土量軽減を図っている⁵⁾。先端支持力や周面摩擦力をソイルセメント柱径で評価できるため大きな支持力を期待でき，条件によって場所打ちコンクリート杭よりも安価に構造物基礎を構築することが可能となる。

1990年に建築物基礎に初採用され、その後、先端支持力のみならず高い周面摩擦力と水平抵抗特性のバランスを活かして、設計において引抜きや水平変位も支配因子となりやすい土木分野で主に用いられており、道路橋基礎を中心に400件を超える実績を有している。近年では支持層が深く先端支持杭では高コストとなる場合に摩擦杭として適用される事例も増加し、また風化岩や軟岩（CL級）等のより硬質な地盤への適用拡大が図られる等、今なお適用法や適用範囲の拡大が続けられている。

2.3.2 TN-X 工法

～建築分野における超高支持力工法

TN-X工法はテノックスと共同開発した先端拡大根固め鋼管杭工法であり、図3に示すように、杭先端に最大で杭軸径の2倍の径を有する拡大根固め球根を築造することに

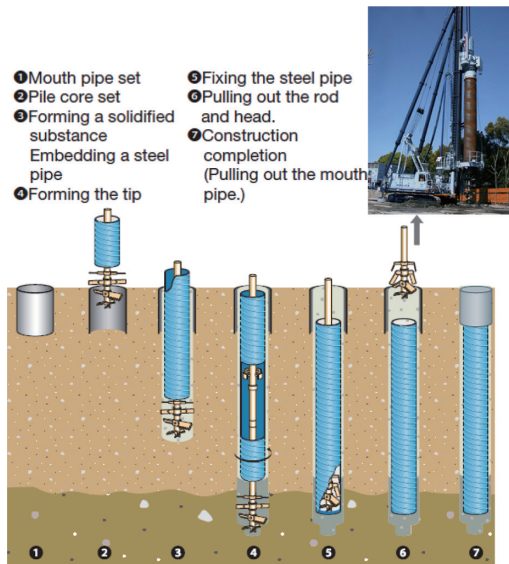


図2 ガンテツパイル®

Gantetsu Pile™ (steel pipe - soil cement composite pile)

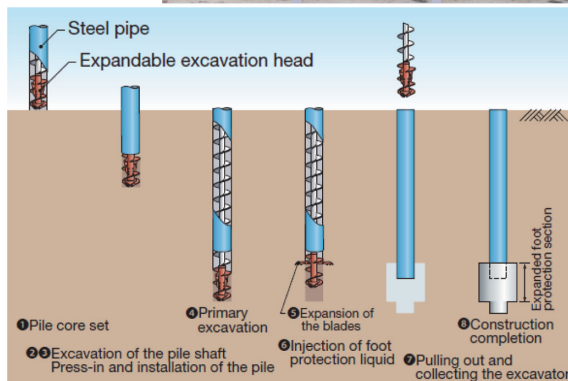


図3 TN-X 工法

TNX™ method (expanded foot protection steel pile)

より、同軸径の中掘り杭に対して4倍近い先端支持力を発揮する。杭先端のみを拡大掘削するため、支持力あたりの掘削土量の抑制が可能である。大深度までの中掘り施工が可能という特長もあり、軟弱地盤で支持層が深い湾岸部に建設される柱荷重の大きな物流倉庫等で多くの実績を有する。

2005年の初採用以降、鉛直支持性能への要求が高い建築基礎分野で用いられており、杭芯ずれが小さく、精度の高い施工も可能であるため杭頭免震構造との組み合わせで適用される事例も増加している。TN-X工法や同レベルの先端支持力を有する既製コンクリート杭のプレボーリング拡大根固め工法の登場によって、後に述べる杭体側の耐力とのバランスや設計・施工上の不確実性に対する冗長性確保の観点等から杭の高支持力化は一定の限界に到達した感がある。

2.3.3 NS エコパイル®

～土木・建築分野の環境配慮型高支持力杭

高支持力で無排土、支持層到達管理が容易で水やセメントを用いないという打撃鋼管杭の特長を保持し、さらに振動、騒音をほとんど発生させない回転杭が2000年頃から実用化され、新日鉄住金では図4、写真2に示すNSエコ

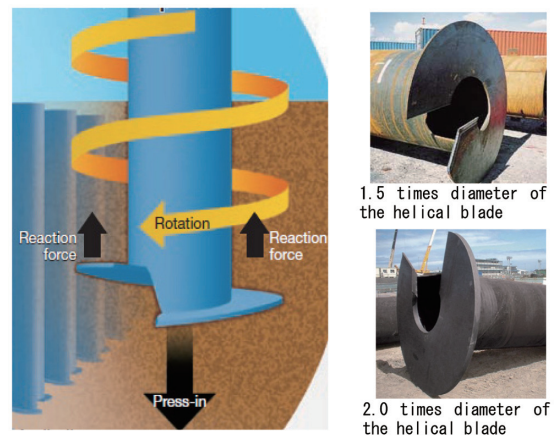
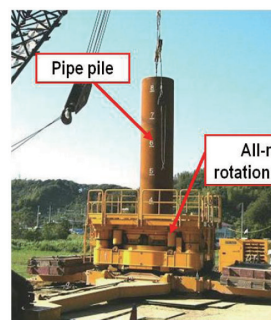


図4 NSエコパイル®

NS Eco-Pile™ (rotation press-in pile)



(a) Large-diameter pile



(b) Small-diameter pile

写真2 NSエコパイル®の施工状況
Example of construction using NS Eco-Pile™

パイルを開発、2000年に建築基礎の建設大臣認定を、2004年には土木一般工法としての建設技術審査証明を取得し、(公財)鉄道総合技術研究所での支持力評価も受けている。先端羽根径は軸径の1.5倍または2倍が一般的で、2倍径での押し込み支持力は同径の打撃杭や鋼管ソイルセメント杭を上回り、さらに羽根のアンカー効果による大きな引き抜き抵抗力も有している。その他、セメントを用いないため被圧地下水や伏流水が存在する条件への対応が可能、必要な機材が少なく狭隘地での施工が可能、斜杭施工が可能、逆回転による引抜き撤去が可能等の多様な特長を有し、建築構造物基礎、道路や鉄道等の土木構造物基礎で幅広く用いられ、様々な課題解決に貢献している。

2.3.4 RS プラス® 工法

～港湾分野の低騒音・低振動・高支持力杭工法

港湾分野においても騒音、振動への配慮が求められるケースが増加し、ウォータージェット併用バイプロ工法の検討が増加しているが、一方でウォータージェットによる支持層地盤の乱れや支持力に及ぼす影響の評価が課題となっていた。これに対し、(国研)港湾空港技術研究所、調和工業(株)と共同でRSプラス工法を開発、2009年に実用化している⁸⁾。RSプラス工法は杭先端の内面あるいは外周部に数枚のリブを取り付けた鋼管杭を用い、所定深度到達後にウォータージェットをセメントミルク噴射に切り替えて杭先端部に根固め球根を築造することにより大きな支持力を発揮する工法である。RSプラスについては後の別報において詳述されているので参照されたい。

2.3.5 ジャイロプレス工法®

～環境配慮、省スペース、硬質地盤施工

低騒音、低振動で自走式による省スペース施工が可能な圧入工法が鋼矢板向けに開発され、1990年頃には鋼管杭向けの圧入機も実用化されて都市部を中心に普及しているが⁹⁾、この圧入工法も独自の進化を果たしている。既設構造物の改修・補強・更新工事の増加を受け、環境性能や省スペース施工は勿論のこと、既設障害物やより硬質の地盤への貫入を可能にしたジャイロプレス工法を(株)技研製作所と共同で開発している¹⁰⁾。

2004年に実用化後、都市河川護岸や道路擁壁の改修、防災事業等に採用されて急速に普及拡大している。現状では先端支持力特性が必ずしも明らかではないため通常の圧入工法同様に横抵抗を期待する壁構造への適用が主体であるが、近年は載荷試験データの収集や圧入機によって施工後の杭体に押し込み力を載荷して支持力確認する手法の開発も進み、支持杭活用に向けた検討も行われている¹⁰⁾。さらに、施工可能杭径の拡大、より硬質の岩盤やコンクリート障害物への適用拡大等が進められている。それらのジャイロプレス工法の適用拡大に関する取組みは後の別報で詳

しく紹介している。

3. 鋼管杭の新たな課題と最近の技術開発動向

多様な新工法の開発により鋼管杭の性能は格段に向上した。特に支持力性能の向上は目覚ましく、それに加えて1995年阪神大震災、2011年東日本大震災の経験による設計外力の増大や要求性能の高度化もあり、杭に作用する荷重の増大に起因する技術課題が生じてきた。また、インフラストラクチャ維持・更新工事における様々な制約条件下での施工、職人不足や熟練工の減少に対する品質確保の課題等、各工法に共通の新たな課題への対応が求められるようになった。既に多数の工法が実用化されていることに加え、市場拡大が期待しづらい中でニーズが多様化して大規模投資を要する新工法開発が難しくなっているという時代背景も相まって、近年の鋼管杭分野の技術開発は、新しい工法の開発よりも高性能の材料・部材・接合構造の開発、現場施工の時間短縮、省力化、信頼性向上等に主眼を置いた既存工法の改良等が主流となっている。

3.1 杭の高耐力・高剛性化に関する要求への対応

1961年のJIS G 3444(一般構造用炭素鋼管)、1963年のJIS A 5525(鋼管杭)の制定以降、鋼管杭の材料種類には長らく大きな変化がなかった。しかし、高支持力化と地震荷重の増大によって、杭体に軸力や水平力に対する大きな抵抗力が求められるようになり、従来の杭材料や寸法では耐力や剛性が不足するケースが増えてきた。

3.1.1 高強度鋼管杭材料の開発

鋼管杭の耐力向上策としては板厚を増加させる方法がある。一般に大径の鋼管杭には熱間圧延コイルを螺旋状に巻いて溶接製管したスパイラル鋼管が用いられるが、最大製管板厚は25mm程度で、それを超えると厚板を曲げ加工した板曲げ鋼管が必要となり、コストや納期が増加する傾向にある。そこで、強度の高いスパイラル鋼管杭が開発されはじめている。従来はJIS A 5525に規定されるSKK400(基準降伏点235N/mm²)、SKK490(同315N/mm²)が用いられてきたが、新日鐵住金では540N/mm²級鋼管杭NSPP®540やさらに高強度の570N/mm²級鋼管杭を実用化している。

それらの機械的性質を表1に示す。前者は建築構造物基礎向けの鋼管杭として国土交通大臣認定を取得した材料で、後者はSM570の鋼板の規格をベースに鋼管杭用に拡張した材料である。これらは降伏強度がSKK490よりも25～40%程度高く、大きな曲げ抵抗を発揮し得る。現段階ではJISでの規格化はされておらず、製造可能な寸法や現場溶接の取り扱いにおける制約があり、また剛性は従来材と同一のため変位が設計決定要因の場合には効果的な対策手段とはなりにくい。しかし、鋼管杭の応力が不足する場合には有効な対策となるため採用の実績が増加している。

表1 高強度鋼管杭材料の機械的性質
Mechanical properties of high strength spiral steel pile

(a) NSPPTM 540

Thickness t (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield stress (N/mm ²)	Yield ratio (%)	Elongation (gauge length 50 mm) (%)	Charpy impact absorbed energy of base material (J)	Tensile strength of weld part (N/mm ²)
6	540 min	400-580	90 max	19 min	27 min at 0°C	540 min
6 < t ≤ 9				22 min		
9 < t ≤ 12				24 min		
12 < t ≤ 16				27 min		
16 < t ≤ 19				29 min		
19 < t ≤ 22				31 min		
22 < t ≤ 25				33 min		

(b) 570N/mm² class spiral steel pipe pile

Thickness t (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield stress (N/mm ²)	Elongation (gauge length 50 mm) (%)	Charpy impact absorbed energy of base material (J)	Tensile strength of weld part (N/mm ²)
5 < t ≤ 16	570 min	460 min	19 min	47 min at -5°C	570 min
t < 16		450 min	26 min		

3.1.2 溶接成形突起付き鋼管の開発

～コンクリートとの合成構造化

杭体耐力向上の他の方策としてコンクリートとの合成構造化が考えられ、そのための材料・部材開発も進められている。合成構造化のための材料としては、従来から内面突起付き鋼管があり、場所打ち鋼管コンクリート杭用の材料等として用いられてきた。内面突起付き鋼管は、熱間圧延コイル製造段階で圧延により突起を形成するため製造効率が高く大量生産に適するが、板厚の異なる鋼管を少しずつ必要とする場合には非効率となる場合がある。また、圧延可能な突起高さや板厚、材料強度にも制約がある。

そこで、新日鐵住金では、通常の鋼管を製造した後に必要な箇所に必要な段数だけの突起を設置する技術として、鋼管表面に溶接金属を連続的に盛り付けて所定高さの突起（以下、オンビード突起と呼ぶ）を成形する技術を開発し、様々な用途に活用している。オンビード突起付き鋼管を写真3に示す。この方法によれば板厚や材質によらず突起付き鋼管を製造することが可能であり、小ロットでの対応も比較的容易になる。逆に、杭全長に突起が必要な場合等、段数が多い場合には従来の圧延突起付き鋼管の適用が有利な場合もあり、条件に応じて両者を合理的に使い分けている。

(1) オンビード突起の種類と用途

標準的に用いられているオンビード突起には6mm, 8mm, 13mmの3種類の高さがあり、用途や適用構造物に応じて使い分けられている。突起は鋼管内・外面のいずれにも設置可能で、専用機を用いて製造するため、突起を設置できる範囲（管端からの距離）には鋼管径や使用機械等による制約があるが、安定した寸法、形状の突起を形成す

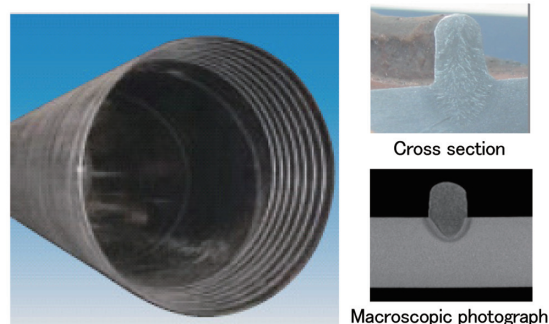


写真3 オンビード突起付き鋼管
Steel pipe pile with molded weld beads

ることができる。オンビード突起の形状、品質、強度に関しては、様々な鋼管径・板厚・材質の組み合わせに対する試験を行い製造技術を確立している。写真3に示した突起部のマクロ写真例では母材への溶け込みが確保され、鋼管と一体成形されていることを確認できる。

その他、突起せん断試験や溶接金属引張試験等によって突起部が十分な強度を有することを、また突起を設けた鋼管から切り出した試験片による管軸方向・円周方向引張試験によって鋼管母材が所要の性能を保持していることを確認している。これらの確性試験はNSPPTM540や570N/mm²級鋼管杭に対しても実施しており、所定の形状、品質、強度の突起成形が可能であることを確認している。

オンビード突起は場所打ち鋼管コンクリート杭の他に、図5に示すハイブリッド鋼管杭（コンクリート充填鋼管杭）¹¹⁾や図6に示す杭先端の根固めとの一体化を図るためのずれ止め突起等に活用されている。オンビード突起と固化体との付着性能に関しては、用途ごとの技術評価や認証の中で適用分野・条件に応じた評価法が示されている。一

例として、鋼管内面突起と充填コンクリートとの付着強度に関する鉄道分野での評価法を図7に示す¹²⁾。コンクリート強度 f_{cu} 、突起高と突起間隔の比 h/s に加えて鋼管の拘束効果を考慮するために板厚径比 t/D を考慮したパラメータを用いて、多くの条件での試験データをまとめた付着強度の評価法であり、オンビード突起についても平鋼溶接や棒鋼溶接によるずれ止め突起と同様の付着性能を有することが示されている。

(2) ハイブリッド鋼管杭工法

図5に示すとおり、鋼管杭の地表面近傍の必要区間にコ

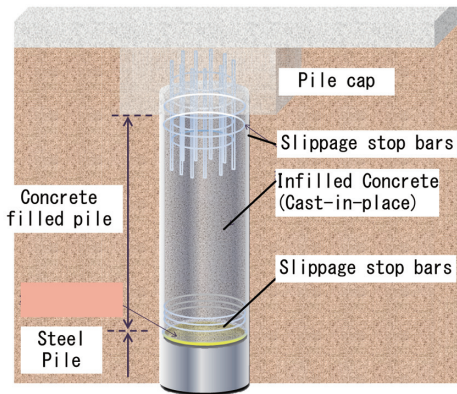


図5 ハイブリッド鋼管杭工法
Concrete filled steel pipe pile method

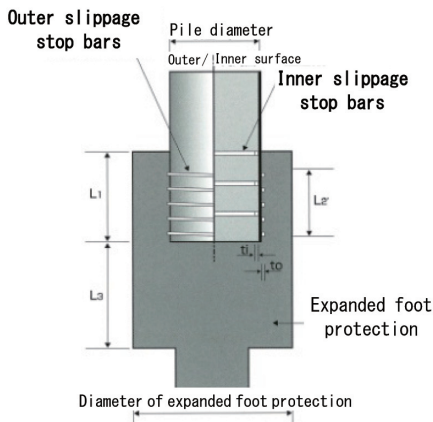


図6 オンビード突起による杭先端ずれ止め
Application of weld bead to slippage stop bar of pile tip

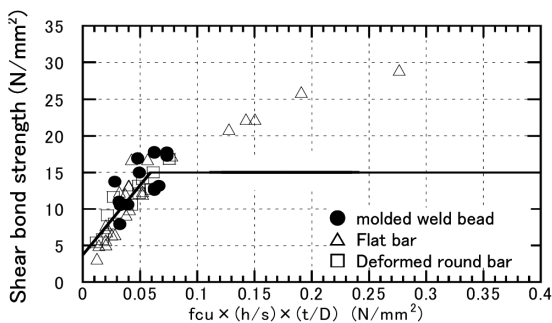


図7 鋼管内面突起によるコンクリート付着強度
Shear bond strength between steel pipe with inner ribs and infilled concrete

ンクリートを充填して合成構造化する工法で、コンクリート充填区間上下端部付近の鋼管内面にずれ止め突起を設けている。このずれ止め突起の種類の一つとしてオンビード突起が用いられている。建築分野では2008年に(一財)日本建築総合試験所でその設計法について性能証明を取得¹³⁾、2013年には高強度鋼管杭を用いたコンクリート充填構造として鋼管種類にNSPP540を追加している¹⁴⁾。土木分野では回転杭工法の建設技術審査証明報告書¹⁴⁾の中で設計法が示されている。

鋼管内へのコンクリート打設は、杭施工後に管内土を排出して鋼管内面に付着した土砂を洗浄した後に行われる。鋼管内面洗浄は地表面から実施することが多いため、コンクリート充填が可能な深さは5m程度が一般的であったが、高圧水とエアを組み合わせて用いる洗浄装置の開発によって、より深い位置までの鋼管内面洗浄が可能となり、コンクリート充填長が10mを超えるハイブリッド鋼管杭の施工も可能になっている。

3.1.3 杭の大径化

杭の大径化によっても杭体耐力や剛性の向上が可能となる。大径化は施工機械の大型化、使用材料や掘削残土の増加を伴い、水平耐力不足のために杭径を大きくすると支持力を余すことが多いためコストアップにつながりやすい。しかし、地震時の変形抑制のための杭体剛性の向上には最も効果的な方法で、厚肉化や高強度化、合成構造化よりも経済的となる場合もあり、設計時に最も合理的な対応策を選択することが重要となる。

適用可能な鋼管杭径は、工法種別や適用分野により異なっている。施工が可能な杭径は現存する施工機械・機材の能力により制約されるが、それに加えて、実績や載荷試験によって支持力特性が明確化されている範囲を考慮して各設計基準類の中で適用範囲が設定されている。例えば、道路橋示方書¹⁵⁾では工法毎の支持力推定式の適用性が確認されている杭径として表2の範囲が示されている。建築

表2 道路橋示方書における支持力推定式の適用範囲
Application range of conventional bearing capacity formula in specification for highway bridges

Pile installation method	Application range of conventional bearing capacity formula	Bearing layer
Impact hammer Vibratory hammer	Approximately up to 1500 mm in pipe diameter	Sand, gravel, clay
Inner excavation (type of soil cement foot protection)	Approximately 500-1000 mm in pipe diameter	Sand, gravel
Steel pile - soil cement composite	Approximately 800-1300 mm in pipe diameter	Sand, gravel
Rotation press-in pile (screwed pile)	Approximately 400-1200 mm in pipe diameter	Sand, gravel

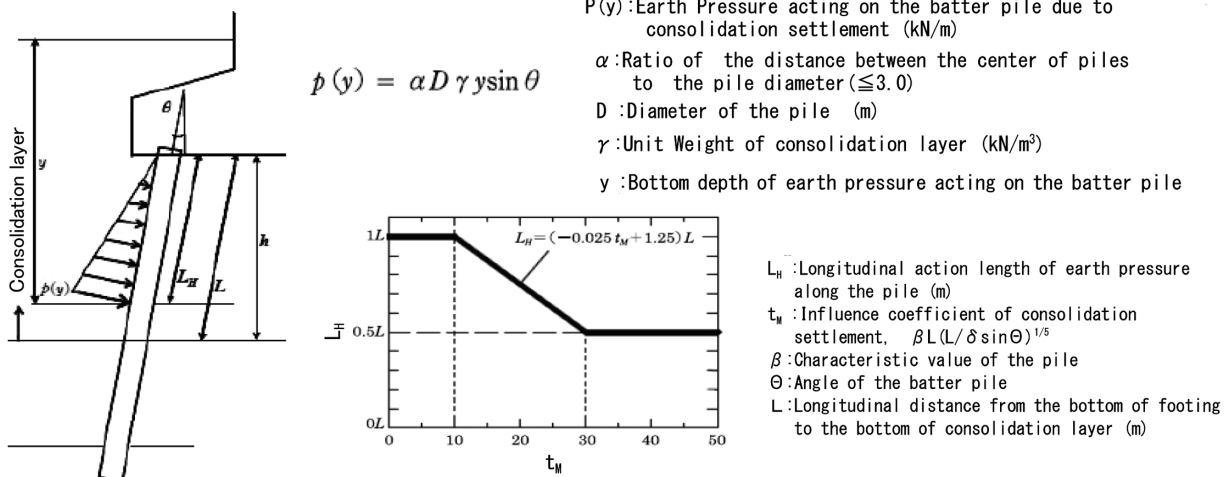


図8 圧密沈下により斜杭に生じる曲げモーメントの算定方法¹⁵⁾
 Estimation method on the bending stress of the batter pile due to consolidation settlement

分野では工法毎の認証範囲等によるが、従来は1200mm程度までが一般的であった。

一方、適用範囲拡大を狙って個別工法毎の施工杭径拡大も進められている。ガンテツパイルは鉄道分野において鋼管径で1500mmの適用実績があり、RSプラスは1600mmまで施工可能なことが実証され¹⁶⁾、1500mmの採用事例も出てきている。ジャイロプレス工法は大型施工機の開発により最大径2500mmまでの施工が可能になっている。また、TN-X工法は最大杭径を従来の1200mmから1400mmへ拡大¹⁷⁾、エコパイルは1600mmへ拡大¹⁸⁾して第三者機関の技術評価を取得している。

3.1.4 斜杭基礎の復活

地震力の増大に対して杭体の高耐力化だけでなく、構造形式による対処として斜杭基礎が注目されている。斜杭は水平力の一部を軸方向力に変換して良質な支持層に伝達するため水平方向の抵抗が大きい構造形式である。そのため軟弱地盤における水平変位の抑制や用地制約下における基礎のコンパクト化が期待できる。道路橋示方書の前身である1964年の道路橋下部構造設計指針(基礎設計篇)¹⁹⁾において斜杭基礎の基本的な設計の考え方が示されていたこともあり、1970年代頃までは斜杭基礎が多く採用されていた。しかし、①斜杭施工が可能な打撃工法が陸域で用いられなくなったこと、②適用機会が多いと想定される軟弱粘性土地盤における圧密沈下が斜杭に及ぼす影響の評価法が確立されていなかったこと、③兵庫県南部地震以降の大規模地震動に対する設計法における耐荷力、変形性能の評価法が未整備であったこと等から、近年では陸域の橋梁基礎等ではほとんど斜杭が採用されなくなっていた²⁰⁾。

これに対し、①については斜杭施工の可能な回転杭工法が普及し、②、③についても(国研)土木研究所や(一社)鋼管杭・鋼矢板技術協会によって精力的な研究が進められ、

斜杭活用の環境が整った。③については組杭による載荷実験結果に基づいて大規模地震動に対する斜杭の抵抗メカニズムの説明や許容塑性率が提案され²¹⁾、残る②についても圧密沈下によって生じる斜杭の変形メカニズムの解明と図8¹⁵⁾の実務的な曲げモーメント評価法の提案が行われた²⁰⁾。これにより、2012年の道路橋示方書改定で斜杭の設計の考え方に関する記載が復活し¹⁵⁾、徐々に採用実績が増加しつつある。

3.2 現場溶接時間の短縮・省力化と品質確保への対応

鋼管杭の大径・厚肉化や高強度化、さらにはインフラストラクチャ更新・補強工事で見られる桁下施工や鉄道近接工事等の制約条件下での施工の増加に伴って現場溶接に関する課題が顕在化してきた。大径・厚肉化すると溶接時間が増大し、空頭制限下での短尺杭施工では溶接箇所が増加し、杭の貫入速度よりも溶接時間が施工時間全体を支配する傾向が強くなる。高強度鋼管では溶接材料や条件における制約が加わる場合も出てくる。さらに熟練工の減少により多様な現場環境下での溶接品質確保懸念や品質厳格化の流れから検査内容・頻度への要求も高まっており、現場溶接作業にかかわる懸案や負荷が増大する傾向にある。

そのような背景のもと、径や板厚によらず短時間で接合が可能な機械式継手への関心が高まっている²²⁾。その一つが図9に示すラクニカンジョイント®であり、近年、採用機会が急増している。機械式継手は時間短縮だけではなく、技量や天候等に左右されず安定的な品質確保が可能という時代のニーズに則した特長を有するが、高強度材料を用いて精緻な機械加工を施すため高価なことが課題となっている。そこで、徹底的な構造合理化を図った新型の機械式継手の開発を進めており、後の別報で紹介しているので参照されたい。

この他に鋼管杭の現場溶接の自動化に向けた動きも始

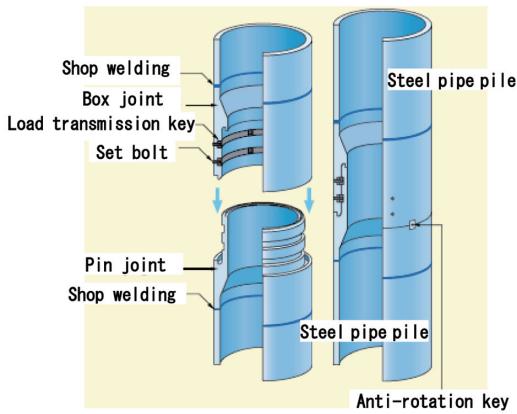


図9 ラクニカンジョイント®
Rakunikan Joint™

まっている。溶接時間の短縮よりも品質安定性確保、溶接位置・姿勢による制約や作業員負荷の緩和が主眼のようであるが、いくつかの方法が実用化されている^{23,24)}。現状では事前準備や溶接管理・調整で人が介在しなければならない作業も残されているようであるが、今後は他産業分野と同様にさらなる自動化レベルの向上や省人化が指向されていくものと思われる。

3.3 杭頭接合部の高耐力化と品質確保への対応

杭体の高耐力化と合わせて鋼管杭とフーチングや基礎梁との接合構造の耐力確保も必要である。鋼管杭の杭頭接合構造としては、鉄筋籠を鋼管杭内に落とし込み杭頭部の充填コンクリートとフーチングコンクリートに定着させる鉄筋籠方式が一般的であったが、杭体の高耐力化に伴い鉄筋籠に加えて鋼管杭頭部の外周に鉄筋をフレア溶接するひげ筋併用方式の採用が増加していた。しかし、現場でのフレア溶接の品質確保への課題等から使用を制限する動きがあり、例えば、最新の道路橋示方書では鉄筋溶接による方法は用いないこととされた¹⁵⁾。

3.3.1 鉄筋籠方式の接合部耐力評価法の見直し

道路橋示方書ではひげ筋方式を禁止する一方で、接合部設計法の合理化を図り、フーチング内部に仮定する仮想鉄筋コンクリート（RC）断面の直径の見直しを行うとともに、設計基準強度 30N/mm² のコンクリートと組み合わせる前提で高強度の SD390 や SD490 の使用を可能としている¹⁵⁾。仮想 RC 断面は土木研究所や鋼管杭・鋼矢板技術協会らによる研究成果を踏まえて、従来の杭径 D に一律 200mm を加えた値から、図 10 に示す評価法に変更され、 $D \geq 400\text{mm}$ では仮想 RC 断面の直径が大きく取れるようになった^{15,25)}。これは、従来の一律 200mm を加える考え方は杭径 400mm 程度の試験結果に基づいて設定されたものであったが、新たに杭径の大きな領域での実験や解析を追加することで杭径 D の関数として定式化したものである。

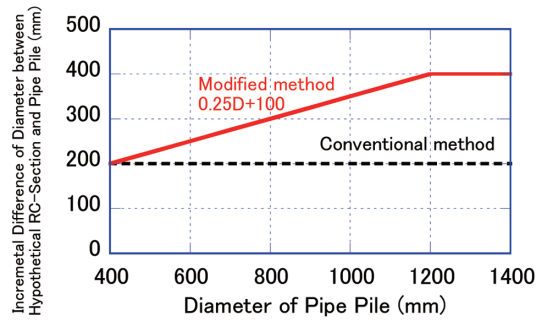


図 10 仮想 RC 断面の直径の考え方
Diameter of hypothetical RC-section in design of pile head connection

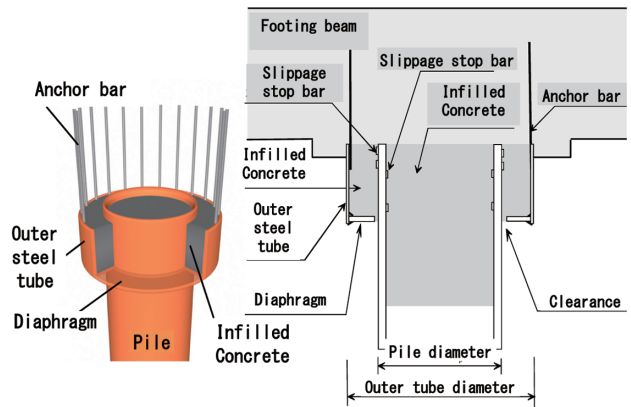


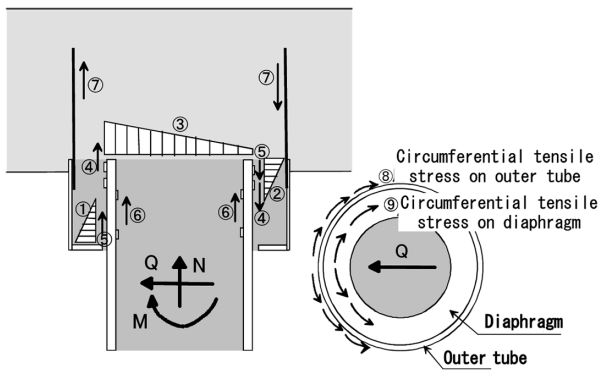
図 11 拡頭リング工法²⁷⁾
Pile head connection using enlarged outer steel tube



写真 4 拡頭リング工法の施工状況²⁷⁾
Setting of enlarged outer steel tube

3.3.2 高い耐力と変形性能を有する新しい接合法

新日鐵住金では清水建設(株)と共同で図 11²⁷⁾、写真 4²⁷⁾ に示す鋼製拡頭部材を用いた杭頭接合法である拡頭リング工法を開発、実用化している。日本建築総合試験所の建築技術性能証明²⁶⁾を取得しており、これまでに建築構造物の基礎杭を主体に約 30 件の適用実績がある。外径が杭径の 1.35 程度または 1.50 程度、長さが杭径の 0.5 倍程度の外鋼管とダイアフラムおよび定着鉄筋で構成された工場製作の拡頭リングを鋼管杭の杭頭部に設置し、コンクリートを充填することによって一体化する。杭より大径の拡頭リングを介して基礎コンクリートとの荷重伝達を行うため、接合部耐力の向上や過密配筋の解消を図ることができ、また、現場溶接が不要で工期短縮や品質確保が図られ、杭の施工法による適用制約も少ない。



- ①, ②: Horizontal bearing pressure to infilled concrete
- ③: Vertical bearing pressure to footing concrete
- ④: Vertical bearing pressure on outer slippage stop bars
- ⑤: Friction force due to horizontal bearing pressure
- ⑥: Vertical bearing pressure on inner slippage stop bars
- ⑦: Tensile and compressive stress transmitted by anchor bars

図 12 接合部の応力伝達機構²⁷⁾
Stress transfer mechanism of pile head connection

本工法による杭頭接合部の応力伝達機構を図 12²⁷⁾に示す。杭頭部に生じる軸力、せん断力、曲げモーメントの一部は杭頭に接する基礎コンクリートへ直接伝達され、残りが充填コンクリートを介して拡頭リングへ、さらに定着筋を介して基礎コンクリートへ伝達される。杭頭接合部の耐力、変形性能に関する多数の実験・解析結果より^{26, 27)}、杭体から充填コンクリートを介して伝達される水平力に対して拡頭リングが外鋼管とダイアフラムの周方向引張力によって抵抗し、外鋼管の局所的な変形はダイアフラムによって拘束されるとともに、充填コンクリートは外鋼管とダイアフラムによって拘束されるために安定的で変形性能に優れた抵抗機構が構成されることを確認している。

接合部の耐力は①拡頭リング部、②杭体の埋込み部、③基礎コンクリートへの定着部のうちのいずれか耐力の小さい箇所で決定されるため、設計においてはそれら各部の耐力を評価して作用荷重に対して安全であることを照査する。この時、拡頭リングを適切に設計することにより想定する破壊モードを確実に発現させ、杭頭接合部の先行破壊を防止することができる。設計法の詳細については文献²⁷⁾に詳しく記載されているので、そちらを参照されたい。その他、杭頭固定度や回転剛性は従来の杭頭接合構造と同様に軸力依存の傾向を示すが、実験結果から降伏時の固定度は 0.7 ~ 0.9 程度と見込まれ、従来の定着筋方式の剛接合と同程度の値であることが確認されている²⁷⁾。

3.3.3 その他の特殊な杭頭接合方法

従来の杭頭剛接合構造は要求性能と設計上の取り扱いが明解であるが、杭頭付近に大きな曲げモーメントが発生し、杭径や板厚の増大を招きやすい。上下部一体解析技術の発達もあり、最近では杭頭付近の曲げモーメントやせん断力の集中を緩和するために杭頭半剛接合や杭頭免震構造の採用も増加している。杭頭部に生じる断面力を軽減する

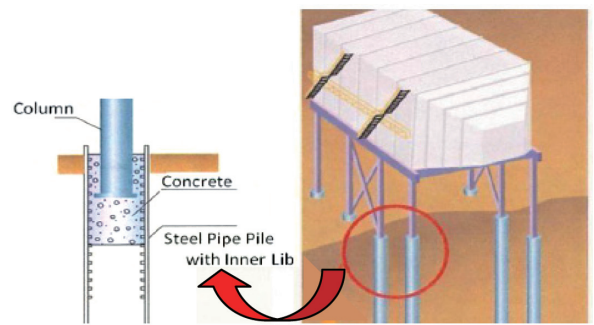


図 13 サットインパイル
Sat-in pile foundation

ことにより、杭体のみならず基礎梁や上部構造物への伝達応力を緩和できるため、上下部合わせた設計の合理化を追求できる可能性がある。杭頭免震では上下スラブ間に免震装置を設置しないため、構造合理化や省スペース化のメリットもある。半剛接合構造や免震装置については多様なものが開発、実用化されている。

その他、1 柱 1 杭形式で杭内に柱材を埋め込み定着する構造も開発されている。図 13 のサットインパイル²⁸⁾は杭の大径化による本数削減と基礎梁や柱定着構造の省略により低コスト・省力化を狙った構造で、(一財)日本建築センターの評定を取得しており、プラント基礎を中心に国内外で約 20 件の実績がある。

4. おわりに

鋼管杭の発展の歴史を総括した上で、近年の技術ニーズ・課題に対応する新技術を紹介した。他にもライフサイクルコスト低減や長寿命化に係る防食・耐久性向上技術など紙面の制約で紹介できなかったものも多く、新技術や設計法の開発によって多様なニーズへのソリューション提供を続けているが、未だ発展途上の技術領域も多い。そして、今後も社会環境の変化に伴って新しい課題の解決を求められ続けるであろう。最後に残された課題や今後の技術開発への期待を述べて結びとしたい。

品質・技術水準の担保と技能者不足への対策、更新、補強における急速・狭隘地施工対策の技術ニーズは益々高まると予想され、国内建設市場の拡大は難しいものの、鋼材の特長が活きる機会の割合は増加すると思われる。制約の大きい難工事における課題解決に貢献するために、鋼管杭を便利に安心して使用できる利用技術整備を進めていくことは不可欠である。信頼性設計への移行も鋼材の品質や施工管理上の特長を再評価する好機であろう。例えば、回転杭は地盤条件に応じた施工トルクの変化をリアルタイム計測できるため、支持層への到達確認のみならず打撃工法のように支持力値やその発現を施工データから直接評価する技術を確認すればさらに信頼性の高い工法へと進化する。材料や工法の信頼性と付加価値を加味したトータルの性能を追求し、信頼性設計法の中で定量評価していく取り組み

が必要である。

また地方部の道路整備や海岸防災等で硬質地盤への杭打設が増加しているが、施工法や支持力評価法が未整備なこともあり鋼管杭の適用は多くない。施工技術の進化により杭施工は可能となってきたり、支持力評価等の使用環境を整えれば、従来は実績の少ない領域でも鋼管杭が活躍、貢献できる余地は残されている。最後に、新工法開発は容易でない環境になっているが、長期的視点に立って、良質であるが高価という現在の鋼管杭に対する既成概念に一石を投じるような新工法開発への挑戦にも期待したいところである。

参考文献

- 1) 五十畑弘：鋼製杭基礎とスクリーパイルに関する歴史的調査。土木学会論文集。No.744/IV-61, 139-150 (2003)
- 2) 山下久男 ほか：我が国における鋼管杭設計・施工技術の発展と今後の課題。土木学会論文集 F. 66 (3), 319-336 (2010)
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編。1992
- 4) 鋼管杭協会：鋼管杭の中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）施工要領。2008
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編。2002
- 6) 国土開発技術センター：一般土木工法・技術審査証明報告書 - 同時埋設合成鋼管杭工法（ガンテツパイル）。1995
- 7) 平田尚 ほか：都市再生プロジェクトに寄与する新鋼管杭工法の開発。新日鉄技報。(387), 17-23 (2007)
- 8) 菊池喜昭 ほか：鋼管杭における水とセメントミルクジェット併用パイプロハンマ工法の開発。港湾空港技術研究所資料。No.1196, 2009
- 9) 国際圧入学会：圧入工法設計・施工指針。2015
- 10) 国際圧入学会：ジャイロプレス（回転切削圧入）工法による鋼管土留め擁壁設計・施工指針。2014
- 11) 日本総合建築総合試験所：建築技術性能証明評価概要報告書 - ハイブリッド鋼管杭工法(改定)。2013
- 12) 鉄道技術総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - 基礎構造物 杭体設計の手引き（暫定版）。2015
- 13) 日本総合建築総合試験所：建築技術性能証明評価概要報告書 - SM ハイブリッド鋼管杭工法。2008
- 14) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書 - 先端翼付き回転貫入鋼管杭“ジオウイング・パイル II”。2009
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編。2012
- 16) 水谷崇亮：ウォータージェットとセメントミルクジェットを併用したパイプロハンマ工法の大径鋼管杭への適用。港湾空港技術研究所報告。53 (3), (2014)
- 17) 新日鐵住金, テノックス：パンフレット。TN-X 工法。2013
- 18) 国土技術研究センター：建設技術審査証明報告書 - NS エコパイル。2004
- 19) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 - くい基礎の設計篇。1964
- 20) 土木研究所：地盤の圧密沈下により斜杭に作用する曲げの評価に関する研究。土木研究所資料。第 4231 号, 2012
- 21) 土木研究所：鋼管杭を用いた斜杭基礎の変形性能に関する載荷実験。土木研究所資料。第 4108 号, 2008
- 22) 高木優任 ほか：東京国際空港 D 滑走路建設工事における鋼管矢板打設工事への機械式継手の適用。土木学会 土木建設技術発表会 2009。2009
- 23) 横山基礎工事：パンフレット。鋼管杭・鋼管矢板自動現場溶接機ぐるりっと。2014
- 24) 三誠：パンフレット。G-ECS PILE ECS-AW。2014
- 25) 土木研究所 ほか：杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書（杭頭結合部に関する研究）。第 433 号, 2012
- 26) 日本総合建築総合試験所：建築技術性能証明評価概要報告書 - 拡頭リング工法(改定)。2009
- 27) 田中宏征 ほか：拡頭リング工法 - 鋼製拡頭部材を用いた杭頭接合構造。GBRC。32 (4), (2007)
- 28) Taenaka, S. et al.: 10th Intl. Conf. on Advanced in Steel Concrete Composite and Hybrid Structures. Singapore, 2012-7



田中宏征 Hiroyuki TANAKA
 建材事業部 建材開発技術部
 土木基礎建材技術第一室長 博士(工学)
 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



日下裕貴 Hiroki KUSAKA
 建材事業部 建材開発技術部
 土木基礎建材技術第一室 主幹