

技術論文

大地震時設計(二次設計)に対応する建築基礎向け鋼管杭の取り組み

Approach of Steel Pipe Pile for Building Foundation to Adjust to Large Earthquake Design

内藤 彩乃* 北市 さゆり
Ayano NAITO Sayuri KITAICHI

抄 録

建築基礎分野においては、振動・騒音などの環境配慮、高支持力化、地震時の安全性確保など、鋼管杭の誕生から現在までに多様なニーズが生じ、日本製鉄(株)ではその社会的要請に応えるべく、鋼管杭の材料面のみならず、工法、構造、設計方法等の開発を行ってきた。近年、大地震の経験から基礎杭に対する大地震時の設計(いわゆる二次設計)導入の機運が高まっている。日本製鉄ではこの設計大変換の萌芽を受けて、鋼管杭の性能解明とそれを活用した設計基盤の整備や、大地震時の水平力に耐えうる商品群の開発を行っている。本稿では歴史的な鋼管杭の技術変遷をレビューするとともに、さらに、様々な組み合わせることで大地震時対応など複合的なニーズに対応可能な日本製鉄の代表的な商品群を紹介する。

Abstract

In the building foundations field, various needs have arisen since the birth of steel pipe piles, including environmental considerations such as vibration and noise, higher bearing capacity, and safety assurance during earthquakes. In recent years, the experience of major earthquakes has given momentum to the introduction of design for large earthquakes (so-called “secondary design”) for foundation piles. In response to the emergence of this major change in design, Nippon Steel Corporation is working to clarify the actual performance of steel pipe piles, develop a design foundation that utilizes this performance, and develop a line of products that can withstand large horizontal forces. In this paper, we look back on the historical evolution of steel pipe pile technology and introduce some of our representative products that can be combined in various ways to respond to major earthquakes and other complex needs.

1. はじめに

建築基礎分野においては、高度成長期に鋼管杭の打撃工法が多く利用された一方で、その後都市における騒音・振動等の環境問題への対応として、高支持力中掘杭や無排土の回転杭等の工法開発が進んだ。最近では、大地震の経験から、大地震時の設計(いわゆる二次設計)の必要性の議論が高まっている。日本製鉄(株)は、大地震時における鋼管杭の性能、特に変形性能について規定し、これを活用した設計法確立に向けて活動するとともに、二次設計を考慮した周辺技術開発を行っている。

本稿では、鋼管杭の誕生から現在までの代表的な社会ニーズとそれに耐える鋼管杭の技術変遷を振り返り、韌性に富み強度も高い鋼管杭に大きな役目が期待される、大地震時の設計に対する日本製鉄の取り組みやこれに耐えうる商品群を紹介する。

2. 建築分野における鋼管杭の歴史と、工法の開発

建築物を支える構造としての杭基礎は、古来より木製の杭が利用されていたが、明治末期より鉄筋コンクリート造等の建物が増えたことで場所打ちコンクリート杭が導入された。戦後の高度経済成長期において、軟弱な地盤の都市部・沿岸部に建設される大型の建物を支えるために、材料の信頼性、入手性、施工速度等のメリットから鋼管杭の打撃工法が急速に普及した。一方で、1968年・1970年に騒音規制法・振動規制法が公布されたことによって都市部における打撃杭の需要が減少し、1980年代からは騒音・振動の発生の少ない中掘鋼管杭工法やソイルセメント杭工法の開発、採用が進んだ。

また建物の大型化・高層化に伴い、さらに支持力性能の大きな杭基礎が要求されてきた。2001年には“国土交通省告示第1113号”が定められ、この告示によって、一般的な

* 厚板・建材事業部 建材開発技術部 土木建材技術室 土木技術第一課 東京都千代田区丸の内 2-6-1 〒100-8071

杭基礎に加えて、新規に開発された工法の支持力を定めることが可能となった。これにより、鋼管杭の先端部を拡大することで大きな支持力を取れる高支持力杭の開発や、鋼管の先端に螺旋状の羽根を設けることで環境に優しい施工の可能な回転杭工法の開発がなされ、経済的で環境に配慮した設計・施工が可能となった。

3. 建築分野における耐震設計の変遷

3.1 耐震に係る基準や指針の変遷と大地震設計の必要性

1981年に建築基準法が改正され、上部構造物においては、震度5程度の中規模地震に対しては建築物が損傷を受けず、震度6または7の大規模地震が発生しても倒壊しない耐震性能を有することが定められた。この改正による耐震基準を“新耐震基準”、それ以前の耐震基準を“旧耐震基準”と呼ぶようになった。杭基礎に対しては、これまで鉛直力の検討のみであったものに水平力の検討も加わったが、依然震度5程度の地震時の検討方法が示されるのみであった。構造物や人命に甚大な被害を及ぼした1995年の兵庫県南部地震においても、倒壊した建物が新耐震基準以前の建物であったこと、新耐震基準にて設計された杭基礎構造物に大きな被害がなかったことから、大地震に対する設計は見送られていた。

一方で、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）、2016年に発生した熊本地震の経験から、大地震時の検討を行わなかった杭基礎の崩壊によって建物が傾斜し、使用できなくなった事例が見られた。これが、地震後に継続的な使用が必要な公共建物に生じたことによって、基礎に対しても大地震時の設計が必要である旨の議論が巻き起こった。

そこで国土交通省が、2017年に“防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン”⁷⁾を発行し、大地震後に防災拠点等となる建築物（庁舎、避難所、病院等）については、基礎に対しても大地震時の設計を行うように記載がなされた。また、2019年に（一社）日本建築学会より“建築基礎構造設計指針”²⁾が改定され、大地震に対する設計（いわゆる二次設計）を原則として行うことが明記された。

3.2 鋼管杭の変形性能を活かした大地震時設計（二次設計）の基盤整備

鋼管杭は弾性域を超えた塑性後の変形性能（靱性）やエネルギー吸収性能において能力を発揮する素材であり、鋼管杭のこれら特性の解明と把握、それを活かした設計基盤整備によって、従来よりも合理的な設計が可能となる。日本製鉄はこの設計基盤整備に向け、（一社）鋼管杭・鋼欠板技術協会の一員として実験や解析を実施することによって、これまで建築基礎分野において利用されてこなかった鋼管杭の変形性能（靱性）を規定し、日本建築学会の発行

する“建築基礎構造設計指針”や“基礎部材の強度と変形性能”³⁾に反映した。この他、（一社）日本鉄鋼連盟並びに（一社）日本鋼構造協会と協働して、コンクリート充填鋼管杭の大地震時の性能を解明し、また鋼管杭並びにコンクリート充填鋼管杭の変形性能（靱性）を活かした設計方法の技術解説書の発行、変形性能を活かすことによるメリットについての定量的な評価を行っている⁴⁾。

4. 大地震時に耐えうる鋼管杭工法の紹介

4.1 建築基礎鋼管杭工法の紹介

日本製鉄は、1章で記した高支持力杭としてTN-X工法、回転杭としてNSエコパイル[®]を有しており、この2工法について紹介する。

4.1.1 TN-X工法

TN-X工法は、**図1**に示すように、杭軸部が鋼管であり、杭の先端部に杭径の1.25～2倍のソイルセメントによる拡大根固めを築造した杭工法である。**写真1**に示すような先端部の根固めにより常時の軸力で1杭当たり最大17900kNもの大きな支持力を取る事が可能である。

本工法は、開発当初においては他工法に比較しても大きい支持力によって杭本数の低減による経済設計が可能であることに加えて、70mという大深度まで施工できる優位性から、東京沿岸部、軟弱地盤の上に建つ大規模倉庫やホテルといった建物における採用が多かった。これに加えて近年では特に杭基礎に大地震時の設計（二次設計）を行う建物について、鋼管杭の持つ曲げ性能を優位に利用し採用に至る例が増加している。

4.1.2 NSエコパイル[®]

NSエコパイル[®]工法は、**写真2**に示すように鋼管の先端部に、鋼管径の1.25～2.5倍の螺旋羽根を取り付けた工法である。**図2**に示すように大きな羽根を回転させながら

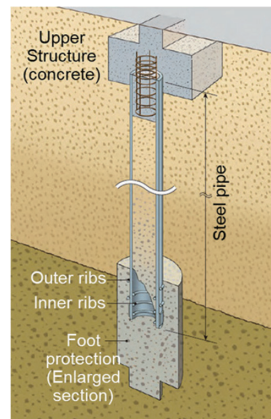


図1 TN-X工法⁵⁾
TN-X method⁵⁾



写真1 先端根固め部⁵⁾
Expanded foot protection section⁵⁾

地面に貫入させることで、低騒音・低振動での施工に加えて、施工時に排土が全くないことが特長である。この羽根により大きな鉛直支持力性能並びに、杭に引張力が発生した際にも羽根のアンカー効果により引抜に耐えることができる。杭径は 101.6mm から 1600mm まで対応可能である。

施工については、小径のものは写真 3 に示すように小型杭打機での施工が可能であり、省スペース、空頭制限下での施工、土地制限等のある場所にも適している。大径のものは写真 4 のような胴体回転方式で施工を行う。施工においてセメントミルクを全く使用しないことから、セメントプラントが不要なため省スペース施工が可能であり、またセメントミルク流出の心配もないことから、例えば地下水利用地域、名水・酒造地域、都市部等で環境に配慮した工法として採用されるケースが多い。

4.2 水平抵抗力を付加する周辺技術の紹介

大地震時において増加する水平力に耐えうる周辺技術として、高強度鋼管杭 NSPP®540、ハイブリッド鋼管杭工法、拡頭リング工法®の商品群を揃えており、近年それらの更なる開発を実施した。これら周辺技術は重複適用も可能であり、さらに 4.1 にて紹介した TN-X 工法、NS エコパイル®工法とも組み合わせることで、さらに大きな地震力への対応や、耐力だけではなく複合的なニーズへの対応も可能である。



写真 2 NS エコパイル®
NS ECO-Pile™

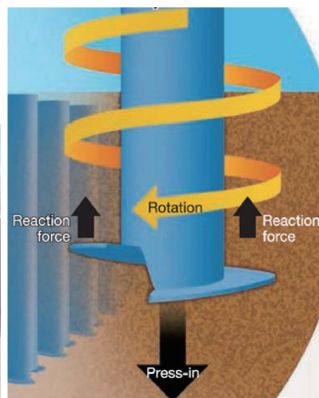


図 2 回転貫入®
Rotation press-in pile®



写真 3 小型杭打機®
Small pile rotary machine®



写真 4 全周回転機®
Pile rotary machine®

4.2.1 高強度鋼管杭 NSPP®540

杭基礎に利用する鋼管杭は主に JIS G3444 に規定される STK400、STK490 並びに JIS A5525 に規定される SKK400、SKK490 であるが、日本製鉄が製造・販売を行う大径（杭径 600mm 以上）の範囲は、主に SKK を利用する。これらは 2000 年の“建設省告示第 2464 号”にて基準強度が定められており、SKK400 は 235 N/mm²、SKK490 は 325 N/mm² である。

日本製鉄は上記材料に加えて高強度鋼管杭 NSPP®540 を開発し、基準強度 F 値 400 N/mm² にて大臣認定を取得している。これによって鋼管の小径・薄肉化による経済的な設計を可能としている（図 3）。NSPP®540 材はセルフシールド溶接が可能な溶接ワイヤがあるため、既存の SKK400・490 材と同様の現場溶接が可能である。

4.2.2 ハイブリッド鋼管杭工法

(1) ハイブリッド鋼管杭工法

ハイブリッド鋼管杭工法は、施工後の鋼管杭の杭上部にコンクリートを充填し、コンクリート充填鋼管とした杭体を構築する工法である。コンクリートを充填する区間の鋼管内面にずれ止めを設けて、鋼管とコンクリートの一体化を図り、より大きな地震力に耐える曲げ性能を持った工法であり（図 4）、2008 年に（一社）日本建築総合試験所にて性能証明を取得した。図 5 に示す作用軸力と曲げ耐力の関係図より、杭径 1200mm、板厚 16mm の鋼管にコンクリートを充填することで板厚 25mm に増厚した場合とほぼ同様の曲げ耐力（軸力比 15% 程度以内の圧縮域）まで向上することがわかる。本工法は 2013 年に、高強度鋼管杭 NSPP®540 材を加えて性能証明を取得し、組み合わせることでさらに大きな地震力に耐えることができるようになった。

本工法の特長は、鋼管内面のずれ止めにおいて日本製鉄独自技術である“溶接成型突起”を利用できることである。溶接成型突起は、溶接ワイヤを鋼管表面に溶け込ますことによって従来突起（棒鋼の溶接）と異なり鋼管と一体化した信頼性の高い突起を成型する（図 4 右上）。

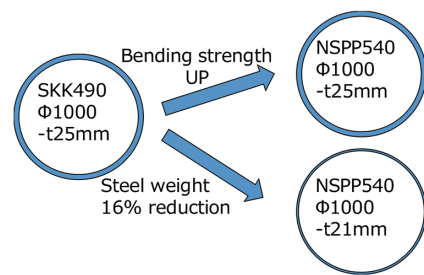


図 3 NSPP®540 適用効果事例
Effect of using NSPP™540

(2) 洗浄装置の開発

ハイブリッド鋼管杭工法の施工においては、図6に示すようにコンクリートを確実に充填するために鋼管内部の洗浄が必要である。確実に内部を洗浄し、合成構造としての耐力を発揮するために、2014年に(株)テノックスと共同で写真5に示すような鋼管内洗浄装置を開発、特許を取得している。本洗浄装置は図7に示すように内部に付着した土砂を物理的にかき落とす“スクレーパー”並びに水圧と空気の混合によって土砂を洗浄する装置を有することを特

長としており、写真6に示すように鋼管内付着物を完全に除去できることを試験によって確認した。

4.2.3 拡頭リング工法[®]

(1) 拡頭リング工法[®]

清水建設(株)と共同で開発を行った拡頭リング工法[®]は、杭とパイルキャップを接続する杭頭接合部を高耐力化し、鉄筋の過密配置の解消や、現場溶接の省略による品質確保、杭頭接合部の現場作業短工期化を実現する工法である。鋼管杭をはじめ、SC杭、場所打ち鋼管コンクリート杭などにも適用可能である。本工法は、図8に示すように工場製作した杭径の1.35～1.75倍径の管状鋼殻を施工後の杭に被せ二重管構造とし、内部にコンクリートを充填することによって、接合部を一体化する。

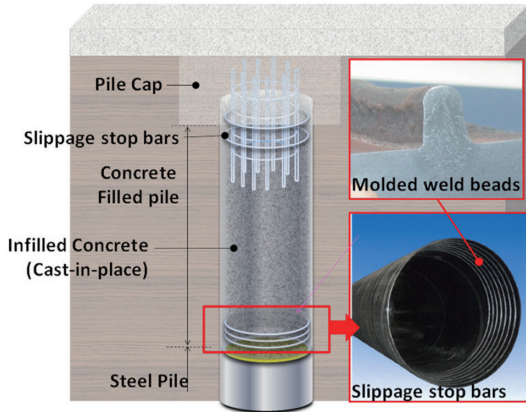


図4 ハイブリッド鋼管杭工法[®]
Concrete filled steel pipe pile method[®]

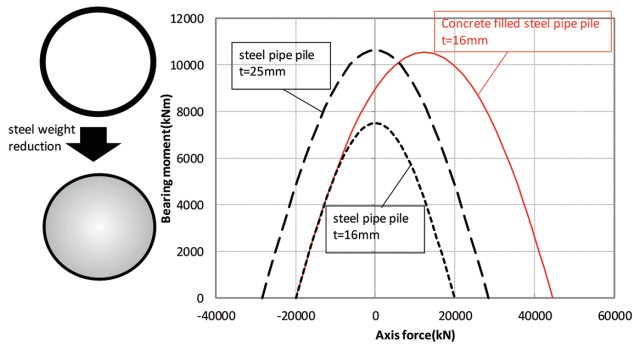


図5 ハイブリッド鋼管杭工法による耐力向上例
Improvement of bearing capacity using concrete filled steel pipe pile

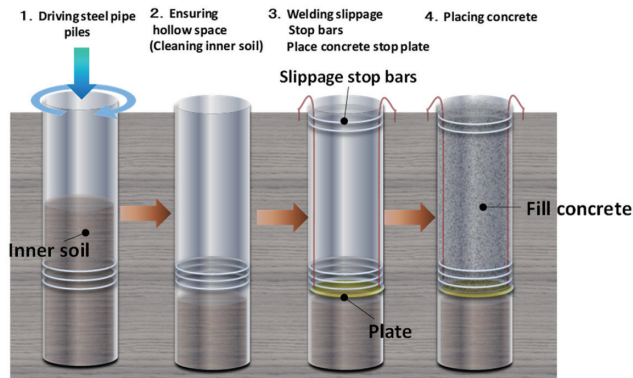


図6 ハイブリッド鋼管杭工法の施工[®]
Construction procedure of filling concrete[®]



写真5 鋼管内洗浄装置
Cleaning machine

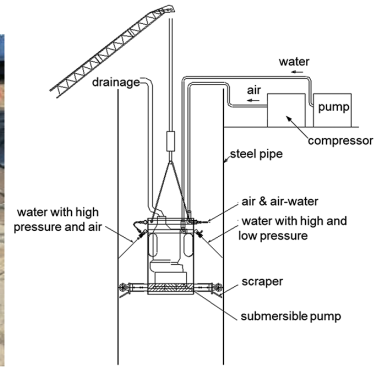


図7 洗浄装置概略図
Cleaning machine



写真6 洗浄前後の鋼管内部の様子
Before and after cleaning inside steel pipe pile

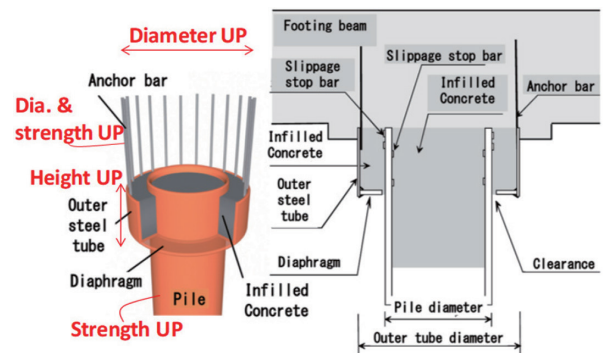


図8 拡頭リング工法[®]
Pile head connection using enlarged outer steel tube[®]

(2) 拡張リング工法®の拡張開発

近年特に増加している大地震時設計（二次設計）に対応するため、従来比約1.5倍以上に高耐力化する拡張開発を実施した。開発にあたり、“厳しい荷重条件が予想される高支持力杭を想定しても、大地震時レベルの荷重に抵抗すること”を要求性能として、図8中赤字で示すように、杭や鉄筋の材料強度アップや拡張リングの径や高さのサイズアップで高耐力化を図った。二重鋼管構造である本構造は、杭の動きを周囲のコンクリートが拘束することで、コンクリートの支圧力が外側の鋼管に伝達され、鋼管にフープテンションが生じ、耐力が発現する。外側鋼管のサイズアップを行っても、コンクリートから外側鋼管への複雑な荷重伝達が適切になされるかという点について大規模な試験や解析を行い、期待した耐力が発現することを確認し、2021年2月に日本建築総合試験所の性能証明を取得した。2021年10月には、某研究施設の施工現場で拡張開発した拡張リング（外径2.1m）が初適用され（写真7）、大地震設計に対応した高耐力化を実現するとともに（図9）、1基約10分で設置可能なことを実証し、施工短縮化にも貢献した。



写真7 拡張拡張リング適用例
Setting of enlarged outer steel tube

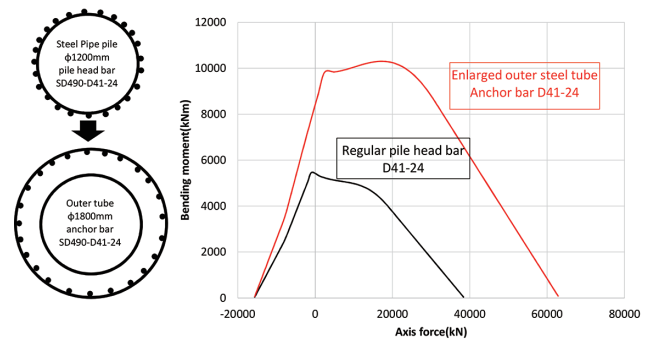


図9 拡張拡張リング適用による耐力向上例
Improvement of bearing capacity using enlarged outer steel tube

5. おわりに

建築基礎分野においては、鋼管杭の施工性、騒音・振動など周辺環境へ配慮した工法の開発と普及に加えて、近年増加する大地震時の設計に対して本来鋼材が持つ強みである終局時の粘り強い性質の解明と規定化、その性質を活かした設計法の提案や高耐力を付加する周辺技術開発に取り組んでいる。時代のニーズに合わせて開発してきた工法・材料特性・設計法・構造などの製品群や各種利用技術は、様々に組み合わせることで、省力施工や経済設計、地震時安全性確保など、複合的なニーズに対応可能と考えている。一方で世界に目を向ければ、持続可能な社会形成を目指すカーボンニュートラルの動きが加速している。鋼材が有するリサイクル性や設計合理化・工期短縮による二酸化炭素削減効果等は、鋼材の新たな強みになり得ると考えている。今後も日本製鉄は、維持管理・更新、リユースなど構造物のライフサイクルの視点を考慮しつつ鋼材の強みを活かした製品・サービスの提供によって、国内外の持続可能な社会形成の一翼を担っていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン，2018.5
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019
- 3) 日本建築学会：基礎部材の強度と変形性能，2022
- 4) 日本鋼構造協会：テクニカルレポート No.127，建築基礎鋼管杭の二次設計法確立に向けた研究小委員会，2022
- 5) 日本製鉄，テクノックス：TN-X 工法カタログ，2019
- 6) NS エコパイル工法協会：NS エコパイル®カタログ
- 7) 日本製鉄：Steel Pipe Piles，2020
- 8) 日本製鉄：ハイブリッド鋼管杭工法リーフレット
- 9) 田中宏征 ほか：拡張リング工法－鋼製拡張部材を用いた杭頭接合構造，GBRC，32 (4)，11-22 (2007)



内藤彩乃 Ayano NAITO
厚板・建材事業部 建材開発技術部
土木建材技術室 土木技術第一課
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



北市さゆり Sayuri KITAICHI
鉄鋼研究所 鋼構造研究部
鋼構造研究第一室 研究第一課 主任研究員