

Technical Developments and Future Prospects on Steel Pipe Piles



橋本 正治
Masaharu Hashimoto
建材センター 建材技術部長

要旨

本論文では鋼管杭の現状の利用状況を再認識するとともに、鋼管杭に関する川崎製鉄の技術開発の歩みと、今後の技術展望について述べた。鋼管杭の利用状況としては鋼管杭の需要動向と適用分野ごとの要求性能について述べた。川崎製鉄の技術開発の歩みについては、川崎製鉄の鋼管杭の利用技術が製鉄所の建設を核として確立され、近年では都市部向けの低振動・低騒音工法の開発などを行うことでその技術をさらに発展させてきたことを述べた。今後の展望として、将来の性能規定型の設計体系への移行を踏まえ、鋼管杭の性能が適切に反映されうる環境の整備に努めること、品質の向上・コストの縮減などの時代のニーズに即した技術開発を継続することが重要であることを述べた。

Synopsis:

This paper describes the recent circumstances of steel pipe pile usage, the history of technical developments in Kawasaki Steel and the future prospects of the piles. As the circumstances of steel pipe piles usage, this paper shows the demand trend, and required performances in individual application fields. With respect to the history of technical developments, it is described that the application technologies have been established through the construction of steel works in Kawasaki Steel, and later, these technologies have been evolved by the recent developments, such as, low vibration and low noise piling methods for urban area. As the future prospects, it is necessary to make efforts to have the performance of the steel pipe piles properly approved, since the design method will change into performance regulations. Furthermore, it is important to continue to develop the technologies which meet social needs, such as quality improvement, cost down, and so on.

1 はじめに

鋼管杭は材質として耐曲げモーメント、耐せん断力に優れているために、大きな打撃力に耐え、深い支持層まで確実に到達でき、かつ大きな支持力を発揮するという特徴を持っている。したがって軟弱地盤層が厚い臨海部埋立地帯に構造物を建設する場合に非常に適した基礎杭であり、今なお臨海埋立部においては主要な杭製品・工法の一つとなっている。

一方、都市部においては、1960年代からの公害問題に対する住民意識の高まりとともに、都市部における騒音・振動の法令規制が厳格化され、鋼管杭の打込み工法の適用が困難になり、それに代わって安価な場所打ち杭やコンクリート杭(PC杭)の埋込工法が幅広く使われるようになった。1970年代後半には、既製杭(鋼管杭、PC杭)と場所打ち杭がより低価格をめぐる低振動、低騒音工法の技術開発競争を展開し、そのまま今日を迎えている。

杭の総需要量を鋼管杭に置き換えて推定すると約1000万tであり、そのうち場所打ちコンクリート杭は71%、PC杭が21%、鋼管

杭は8%となっている。特に都市部での民間建築では鋼管杭はほとんど使われなくなっており、これは材料の価格差が大きな要因で、材料の特性はほとんど問われなくなっている。その後、耐震性に配慮してコンクリートと鉄の特性を活かした複合杭が開発されてきた。

1995年1月に発生した兵庫県南部地震においては、多くの構造物が甚大な被害を受けた。杭基礎に関する調査結果^{1,2)}では、鋼管杭は被害が少なく高い耐震性を有していたことが報告されている。新たな耐震性能の要求に対しては、近年破壊耐力や変形性能の評価に関する研究³⁻⁵⁾が精力的に行われて、鋼管杭の高い耐震性能が再認識されつつある。

一方、設計技術に目を向ければ、合理的な設計法の確立を目指してこれまでの仕様設計から性能設計に向かいつつあり、限界状態設計法⁶⁾への移行もその流れの一つであるといえる。こうした設計法によれば、安定した品質と高い耐力を有する鋼管杭の特性が今まで以上に確実に評価されるようになってくると考えられる。

本論文では鋼管杭の優れた特性を活かし、さらに利用しやすい製品にするために、現状の利用状況を再確認し、これまで当社の果たしてきた技術的役割と近年の研究開発の流れについて述べるとともに、今後の技術開発における展開について提言する。

*平成10年8月24日原稿受付

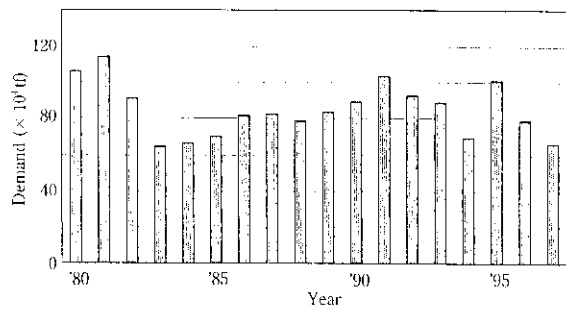


Fig. 1 Demand trend of steel pipe pile

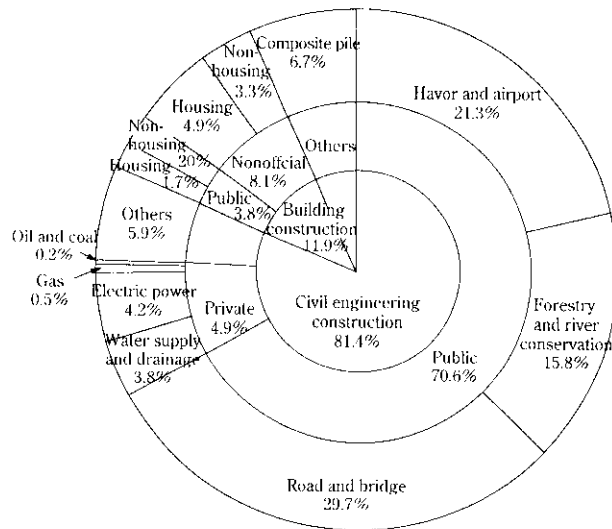


Fig. 2 Application fields of steel pipe pile

2 鋼管杭の用途と技術開発

2.1 鋼管杭の適用分野とその特徴

鋼管杭は基礎工法の合理化に大きな役割を果たしてきており、現在でも大型構造物の比率が高い土木分野を中心に基礎工法の一つとして確固たる地位を占めている。Fig. 1 に鋼管矢板も含めた鋼管杭需要の推移を示す。Fig. 2 は 1997 年の鋼管杭の分野別使用実績を示したものである。土木分野での使用が全体の 81.4%、その中でも港湾と道路・橋梁分野での使用比率が高いことがわかる。

港湾・河川分野で鋼管杭が用いられる代表的なケースとしては、護岸・岸壁を構築するための棧橋、二重壁、ジャケット構造などがあげられる。構造体としては鉛直荷重以上に水平方向の土圧に抵抗する機能が要求されている。すなわち、鋼管杭の要求性能としては大きな鉛直支持力を持つことと、さらに水平抵抗力があることが必要である。

橋梁基礎分野においては、鋼管杭基礎・鋼管矢板基礎・ケーソン基礎・場所打ちコンクリート杭基礎などの基礎形式が、荷重・地盤・施工・環境条件などを考慮して経済性、工期などの判断基準に基づいて決定される。一般に、鋼管杭基礎は材料自体の有する高耐震性に加えて、施工性の良さから採用されるケースが多い。また、鋼管矢板基礎は基礎本体と橋脚建設時の仮締切りを兼用できることから、特に、沿岸や河川などの水中基礎として多用されている。

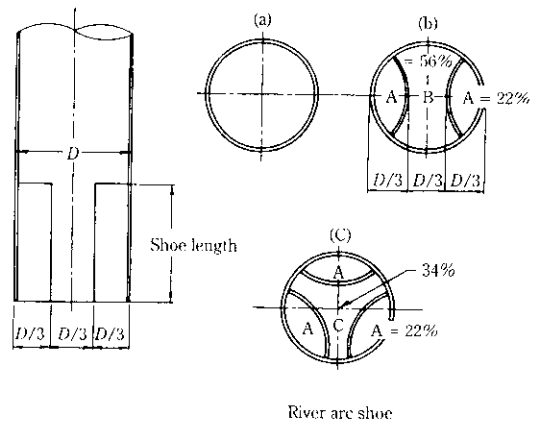


Fig. 3 River arc shoe

建築基礎分野では、施工される地盤・環境条件によって鋼管杭に求められる性能が異なる。埋め立て地盤などでは環境的な制約は少ない代わりに、地盤沈下、側方流動、埋立材料によっては地中障害物といった課題がある。一方、旧来地盤の場合には既存の各種建築物があるため、周辺環境に影響の少ない低騒音・低振動施工が当然の条件となる。

こうした、それぞれの分野における要求性能に応えるべく、当社は技術開発を進めてきた。以下に取り組んできた内容について述べていきたい。

2.2 当社の技術開発の歩み

我が国の鋼管杭の技術開発は、1960 年代の高度成長期と密接に関連している。なかでも、戦後急速に発展した産業の一つである鉄鋼業の場合、大規模な土地を必要とし、また原材料の大半を海外からの輸入に依存せざるを得ないため、当社千葉製鉄所を始めとして戦後建設された一貫製鉄所のほとんどは臨海部に立地し、これらの土地は浚渫埋立などによって造成されていった。

これらの埋立造成地を形成する地盤は上層が軟弱な沖積層であることが多く、このような地盤上に重要構造物（溶鉱炉、熱風炉、圧延設備、大型岸壁など）を短期間で建設するためには、打込み工法による鋼管杭工法が最適であり、その支持力特性に関する研究が精力的に行われてきた。特に、大口径化にともなう先端閉塞効果については不明確な点が多く、千葉、水島の製鉄所の建設に際して数多くの実験を行い、設計・施工上の試行錯誤が繰り返されてきた。開端杭の先端閉塞効果の問題は、外径が大きくなるにつれて杭先端の管内上による閉塞性が低減し、先端支持力が低下してしまうことである。この問題に関して、当社は $\phi 1000 \sim 1500$ mm の大口径鋼管杭を中心に、先端閉塞効果に及ぼす支持層への根入れ長、杭径、先端シュー (Fig. 3) の影響について、現場載荷試験による体系的な研究^{8,9)}を実施し (Table 1, Fig. 4)、大口径鋼管杭の先端支持力特性を明らかにしていった。

また、重量構造物の代表格である溶鉱炉基礎に対して、1965 年に水島製鉄所 1 号溶鉱炉基礎に鋼管矢板基礎が適用され、その後この基礎工法が溶鉱炉基礎として定着した。本工法が初めて社外に登場するのは 1969 年に建設された石狩川河口橋¹⁰⁾である。その後、仮締切り兼用工法の開発¹¹⁾ (Fig. 5) が進められ、実物実験¹²⁾を踏まえて、岡山県高梁川の水島大橋¹³⁾で採用されるなど、橋梁基礎に数多く使われるようになった。また、この工法では、仮締切りとして使用した鋼管矢板壁の水底近くで不要となる上の部分を水中または上砂中で切断し撤去する必要がある。このため、Fig. 6 に示すよ

Table 1 Results of loading test

Pile No.	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Length (m)	Tip shape	Penetration into gravel layer (m)	Driving test	Loading test	
						Pd (tf)	Py (tf)	Pu (tf)
101	1016	10.3	20	○	1.8	650	135	260
102	1016	10.3	28	○	9.8	520	360	700
103	1016	10.3	21	⊗	3.2	950	400	750
104	762	7.9	21	⊗	3.0	460	400	550
105	660	10.3	20	○	1.8	520	170	250
106	457	7.9	23	○	4.0	240	130	200
107	457	7.9	23	●	4.0	280	180	250

Tip shape remarks

○ Open

⊗ River arc shoe

⊗ Sand blugging

● Close

Pd: Dynamic ultimate capacity ($Pd = \{ (e_r \cdot 2W_h \cdot H) / (S + K/2) \} e_r = 0.4$)

Py: Yield capacity (logP~logS method) by loading test

Pu: Static ultimate capacity by loading test

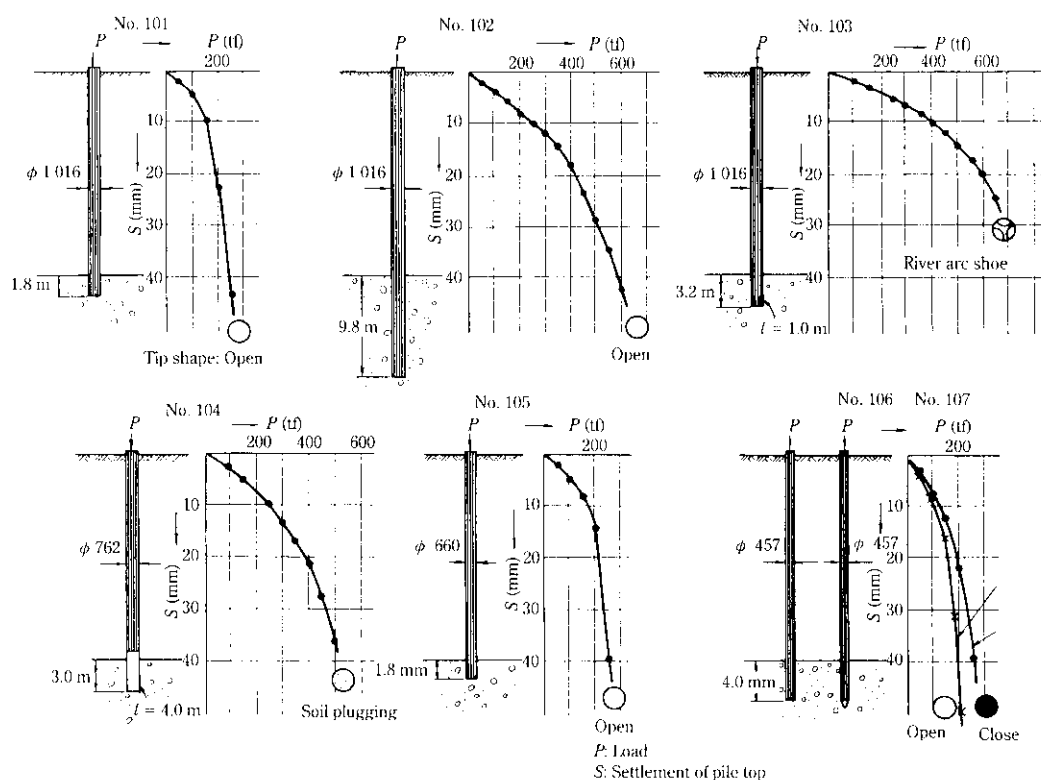


Fig. 4 Results of loading test (No. 101~107)

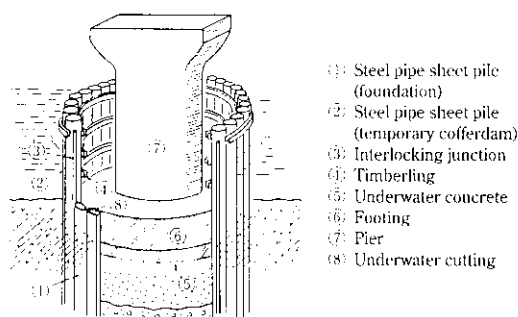


Fig. 5 Sheet pile foundation

うにあらかじめ継手の一部をガスカットし、鋼管矢板本管を砥石カッタ¹⁰⁾やディスクカッタ¹⁵⁾などで切断するプレカット工法や、継手をガスカットせず継手と本管を同一装置（プラズマカッタ¹⁶⁾、

Photo 1) で高能率に切断するノンプレカット工法の実用化など、周辺技術の開発がこの工法の発展を大きく支えた。

埋立地を造成するための護岸・岸壁の建設を通じて、鋼管杭を利用した各種港湾施設の建設技術が蓄積されてきた。とくに独自の施工技術として水中格点工法¹⁷⁾ (Photo 2) や STEP 工法¹⁸⁾ (Photo 3) がある。水中格点工法は水中において鋼管を用いて格点構造を構築する工法であり、任意に斜材・水平材を配置することで水平耐力を飛躍的に増加させるものである。また、STEP 工法は打設した杭の上に梁を架設しながら杭打ち機を進めていく工法であり、杭打ち船のように波浪の影響を受けないため、杭打ち精度と杭打ち機の稼働率を向上させることができる。この工法は港湾施設の建設のみならず、遊水池や線路上空における人工地盤の構築工法^{19, 20)} としても発展してきている (Photo 4)。

このように、当社は製鉄所の建設を通じて、打込み工法を中心とした鋼管杭の利用技術を確立してきた。しかし、都市部市街地での

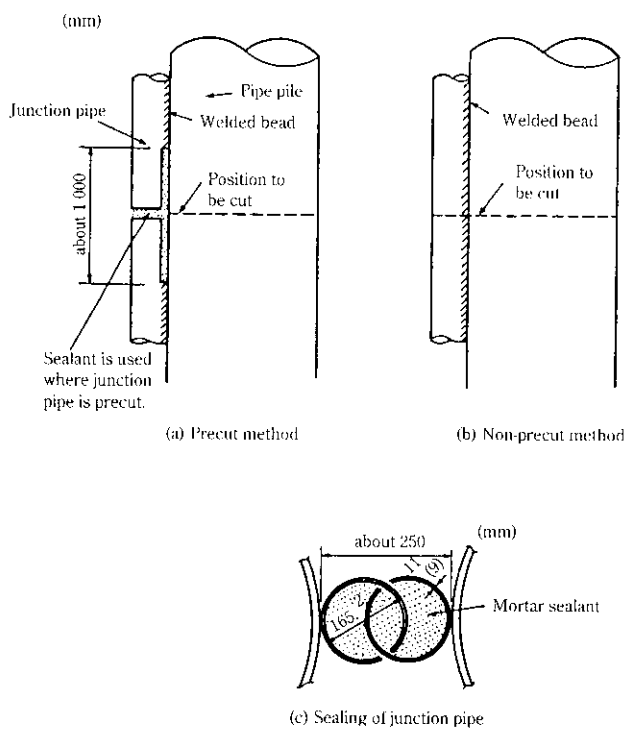


Fig. 6 Precut and non-precut configurations of junction pipes

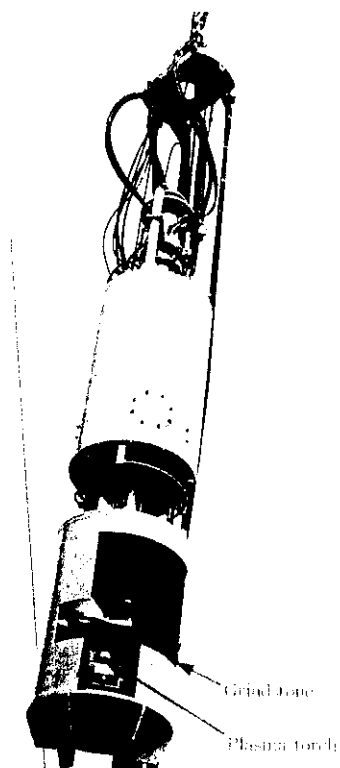


Photo 1 General view of the newly developed underwater cutting apparatus

施工の増加により、騒音、振動は公害問題としてとりあげられ、騒音規制法（1968 年）、振動規制法（1976 年）により施工面からの制約が一段と強まった。このような背景のもと、多種多様な低騒音・低振動工法が各所で開発されるようになり、当社としても後述する

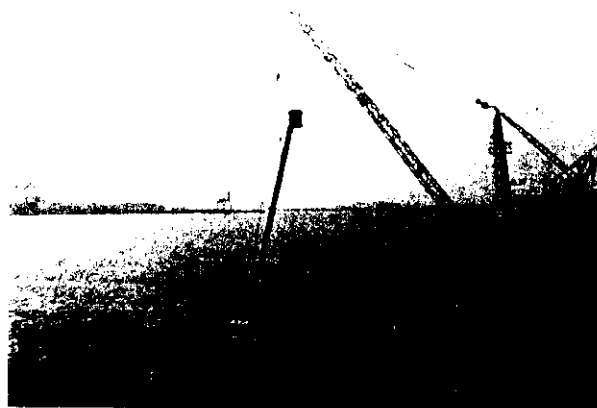


Photo 2 Underwater junction being installed at Chiba raw material berth

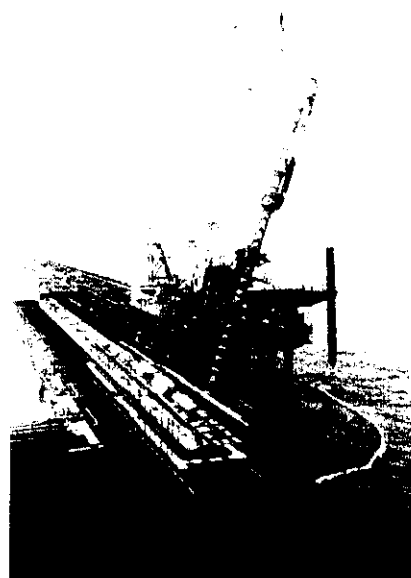


Photo 3 Pile driving by fast marin erect system at Chiba product berth

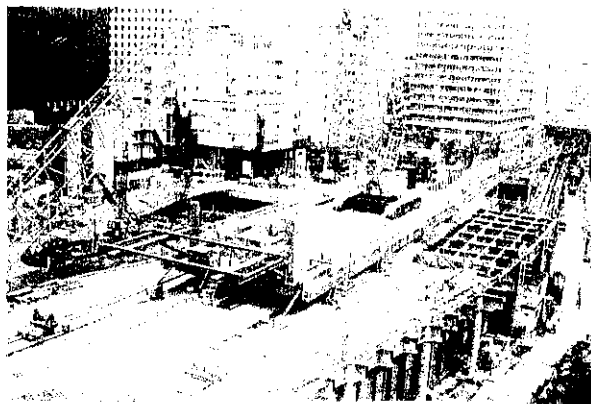


Photo 4 Lifter wagon method

ように各種の低公害工法を実用化してきた。次節ではこうした近年の当社の技術開発について紹介していきたい。

3 最近の当社の技術開発について

3.1 鋼管杭の設計・性能評価に関する研究

鋼管杭の利用を進めていくために、設計法などの鋼管杭メーカーに共通の技術課題については当社を含めた鋼管杭協会を中心に研究が行われている。兵庫県南部地震を契機に新たな耐震性能が要求されてきており、橋梁基礎の分野においては、耐震設計は震度法だけでなく地震時保有水平耐力法によっても行うこととなった。鋼管杭や鋼管矢板基礎に関する新耐震設計法の研究は官庁や大学と共同で載荷試験などを実施し、鋼管杭基礎は他工法に比べても十分な変形性能を有していることが確認²⁹⁾されている。

また、建築分野においては、限界状態設計法への移行が進められており、信頼性理論に基づいて各工法ごとに杭材料、施工法、検査方法などの違いによるバラツキを評価する研究が進められている。鋼管杭の場合には、既製杭として材料の品質が非常に安定していることを利用して、打ち込み工法での施工管理は、動的支持力式による管理からさらに波動理論を用いた手法へと研究が進められ、実用³⁰⁾に供されている。

3.2 打ち込み工法に関する技術開発

前述のように、製鉄所の建設を通じて打ち込み杭工法の基本的な利用技術は確立されてきた。そうしたさまざまな利用技術を活かし、さらに鋼管杭の競争力を高めるためには、限界状態設計法への移行を踏まえながら、施工した杭の支持力を保証し、信頼性の高い基礎工法としてユーザーに提供していく必要があった。したがって、最近の打ち込み工法に関する当社の技術開発として支持力管理技術の開発が挙げられる。

支持力を確認する方法のうち、最も信頼性の高いものとして静的載荷試験がある。この方法は、現場において実杭の支持力を直接確認するもので、大がかりな装置とそれとともなって、多額の費用を要する点に問題がある。近年の大口径・長尺化の方向にあっては、ますます装置が大型化し費用も増大している。

そこで当社は、簡易にかつ精度の高い支持力を確認する技術の開発にいち早く取り組み、PDA (pile driving analyzer)²⁰⁾と呼ばれる支持力確認システムを米国より技術導入し、その適用性を確認するとともに実用化を図ってきた²⁹⁾。この方法は杭打設時に発生する応力波を測定し、波動理論に基づいた解析を行って、支持力を推定する方法であり、動的載荷試験法とも呼ばれている。1990年頃より、製鉄所の建設工事、東京湾横断道路の本更津人工島のジャケット工事²⁹⁾、および人工地盤建設における杭の施工管理に利用されてきた。また、海外では動的載荷試験による支持力確認がスペックインされている場合が多く、フィリピンのマニラ南港²⁹⁾やマレーシアのラハダツでの港湾施設の建設において、経済性と信頼性向上を両立すべく適用された。

また、動的載荷試験法などの支持力確認技術の開発に加え、こうした技術を有効に活用し、摩擦杭あるいは中間層に打ち止める不完全支持杭を用いて、より経済的な基礎を構築するための技術開発も行ってきた。すなわち、杭の周面摩擦力や長期沈下特性を適切に評価し、従来の長尺支持杭を用いた設計を見直し、杭の短尺化による経済性の向上を図るものである。

千葉製鉄所西工場のリフレッシュ工事においては、短期および長

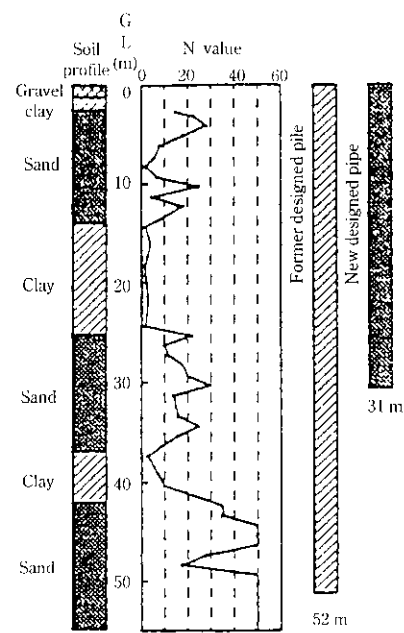


Fig. 7 Soil profile

期載荷試験を実施して、杭の支持力特性を確認することで、Fig. 7に示すように、従来の GL-50m 以深の支持層に打ち止める設計から中間層に打ち止める設計に変更した。さらに杭打設時には、中間層の層厚や深度の変化にともなう支持力への影響を確認するため、動的載荷試験により支持力管理を行い、すべての杭で所定の支持力が確保できていることを確認している²⁹⁾。

今後、限界状態設計法に移行し性能設計が行われるようになれば、動的載荷試験を用いて簡易に支持力を確認し杭基礎全体の信頼性を高めることが、杭長や安全率の見直し、ひいては経済性の向上に結びつき、より合理的な基礎の構築を可能にすると考えられる。このような考え方を基準・指針などに反映させていくためには、杭打設後の支持力の回復現象であるセットアップ効果の研究や、載荷試験結果との比較データの蓄積などが今後の課題であるといえる。

3.3 低公害工法に関する技術開発

既製杭を施工するための低振動・低騒音工法は、大きく 2 種類の施工方法に分けられる。すなわち、事前に孔を掘った後に杭を埋め込むプレボーリング工法と、杭内空部にオーガースクリューを挿入して、杭内部から土を排土しながら杭を沈設していく中掘工法である。プレボーリング工法は、一般に孔壁の崩壊と垂直性の確保の問題から小口径で比較的短い杭に適した工法であるといえ、中掘工法は、杭をケーシング代わりにして杭の沈設が行えることから、大口径・長尺杭の施工に適しており、コンクリート杭に比べて内空部の大きな鋼管杭に有利な工法である。これらの工法では施工の際に地盤を緩めることから支持力が低下する可能性があり、その問題を解決するための支持力増強技術の開発が最も重要な技術課題である。これら 2 種類の施工法はいずれも杭周面固定や杭先端根固めのためにセメントミルクを使用する。そのため残土処理が避けられない工法であるが、当社が開発したドリル杭工法^{26)~28)}は全く新しい概念に基づくものである。当社が保有する低振動・低騒音工法を Table 2 に示す。

ドリル杭工法は、Fig. 8 に示すように杭先端部の鋼管内面と外面にスパイラルリブとバイトを溶接で取り付け、鋼管杭のもつ薄肉か

Table 2 Low vibration and low noise methods possessed by Kawasaki Steel

Piling method	Feature
Drill pile method	Nondisplacement Pile rotating penetration method
KKTB method	Composite pile of steel pipe pile and bored concrete pile
KSD method	Penetration by pre-boring method Pile tip driving
KING method	Penetration with inner pile drilling Pile tip mortar protection

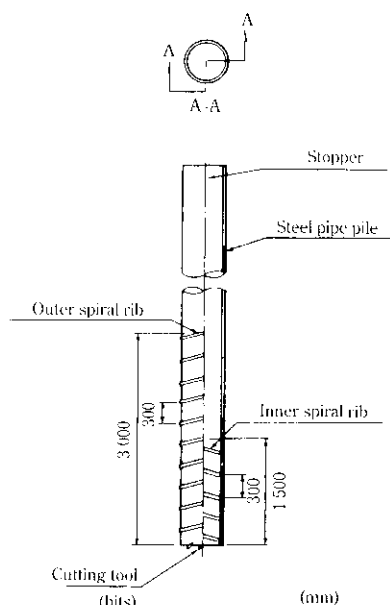


Fig. 8 Schematic view of drill pile

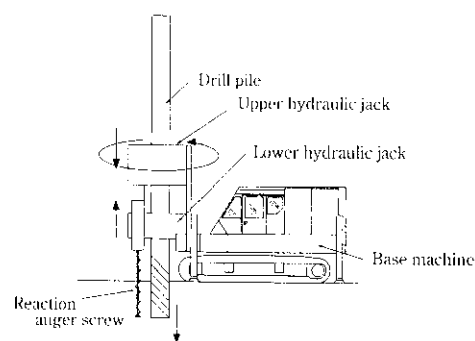


Fig. 9 Piling machine with pile body turning mechanism

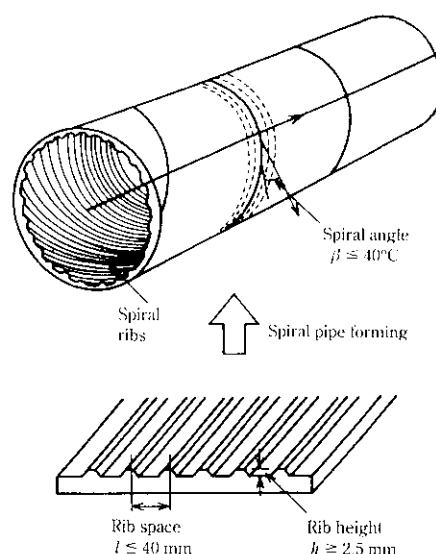


Fig. 10 Steel pipe for KKTB pile

つねじり剛性が高いという特性を生かし、回転貫入により低騒音・低振動、さらに無排土で施工するものである。さらに、貫入データ（貫入トルク・貫入速度）を現場でリアルタイムに計測（ドクターシステム）することにより、支持層の強度や根入れ長の確認を行うことができる。また、高さが制限されている現場や汎用杭打ち機が入れない狭隘地での施工機械として、Fig. 9 に示すような胴体回転機の開発もあわせて行い送電鉄塔基礎や都市内建築基礎などの施工に用いられている。これらの特長を活かして、現在では低・中層建築物基礎に100件以上の実績を挙げるに至り、鋼管杭の新しい市場を築きつつある。

高層化する建築物の基礎としての低騒音・低振動工法である場所打ちコンクリート杭とリブ付き鋼管を合成し、耐震性能の著しい向上を図った低振動・低騒音工法として耐震場所打ちコンクリート杭、すなわちKKTB杭（Fig. 10）がある。KKTB杭^{29）}とは、従来の場所打ちコンクリート杭の耐震性をより向上させるため、杭頭などの曲げモーメントやせん断力の大きい部分を鋼管コンクリート杭でおきかえた複合場所打ち杭である。この工法は、高層住宅、事務所建築、倉庫などの基礎として数多く採用されてきている。

プレボーリング工法としては、現在KSD（杭先端打撃）工法^{30）}を開発中である。この工法は、まず杭の先端に鋼製のキャップを取り付け、プレボーリングされた孔の中に建て込み、所定の深度まで沈設を行う。その後、中空ダブルハンマを使用して、杭内に挿入さ

れた下部ハンマにより杭先端のキャップを、上部ハンマにより杭頭部を軽打しながら支持層に貫入させるものである。

杭先端を直接打撃することから、従来の杭頭打撃に比べて2倍以上の打撃効率を有し、小さなエネルギーで杭の打設が可能となる。また、先端支持力は打ち込み工法と同等の値（ $\alpha=30$ ）が取れるため、一般の低振動・低騒音工法の1.2倍の支持力を得ることができる。本工法はすでに、基礎試験および載荷試験を実施して、結果を整理・分析中であり、今後、日本建築センターの評定を申請する予定である。

中掘りによる施工方法としてKING工法^{31,32)}がある。KING工法では機械的に拡張する特殊ビット（KINGビット：特許出願中）を取り付けたオーガーを杭内部に挿入し、通常の方法で中掘沈設を行った後、支持層においてKINGビットを拡張させ、セメントミルクを噴出しながら杭径の約1.2倍の拡大根固め球根の築造を行う。

特徴としては、KINGビットが支持層において確実に拡張できる機構を有しており、均質で高強度な根固め球根を築造する技術を開発したことで確実な支持力が得られること、KINGビットを用いれば、汎用の中掘装置で施工が可能となりコスト競争力の高い工法となっていることなどがあげられる。1998年5月に日本建築センターの評定、6月に大臣認定（杭径400mm～800mmまで）を取得済みである。

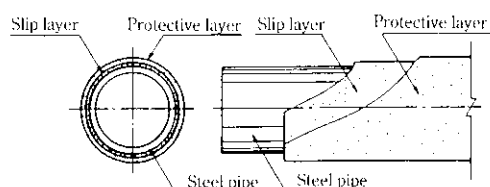


Fig. 11 Composition of KSLP

Table 3 Products for landslide control steel pipe piles

Landslide control steel pipe piles		Joint method
Standard	Tensile strength (N/mm ²)	
SKK 400 SKK 490	400 ≧ 490 ≧	Welding, Mechanical joint
K-60 (SM 570 equivalent)	570 ~ 720	Welding, Mechanical joint

 : Newly developed

3.4 周辺技術に関する技術開発

鋼管杭は、臨海沿岸域の埋立て地盤などの軟弱地盤における大規模工事の増加によって急速に普及する過程において、沿岸域特有の問題である耐食性や地盤沈下の問題に絶えず直面してきた。

沿岸域や海洋環境における鋼管杭の防食法としては、主として電気防食法と無機質ライニング、塗装などが併用されてきたが、維持管理をとまなうことから、経済的な長期防食法が求められてきた。このようなニーズに応えるものとして、ラインパイプなどの被覆技術をベースに、ポリエチレン被覆重防食鋼管杭 KPP パイルを実用化し多くの実績をあげている。また、地盤沈下にとまなう負の摩擦力（ネガティブフリクション、NF）の低減を目的として、Fig. 11 に示す保護層付きネガティブフリクション対策用鋼管杭 KSLP³³⁾ を実用化している。

一方、沿岸域以外における用途として、鋼管杭が持つ高い曲げ耐力を利用して地滑り抑止用のくさび杭として小口径で厚肉の鋼管杭が多く用いられるようになってきた。傾斜地の地滑り対策を目的とした抑止杭は、建設費削減などの背景を受けて高強度化が進み、最近では 570 N/mm² 級の引張強度を有する高強度地滑り抑止杭 K-60³⁴⁾ が実用化されるに至っている (Table 3)。また、抑止杭は厚肉であることから、現場での溶接作業に多くの時間を要し施工管理が難しいなどの問題もあった。そこで、特殊技能を要せず確実な継手強度が得られる無溶接タイプのメカニカル継手として、メカネジ³⁵⁾ (Photo 5) を開発・実用化した、この技術は傾斜地などでも施工性が良く、通常 $\phi 400 \times t 30$ mm の溶接時間には 150 min かかるのに対して、わずか 15 min で施工できる。すでに日本道路公団、地方自治体や JR などでの実績を挙げてきており、着々と普及拡大に努めている。

4 今後の展開

当社における鋼管杭の歴史をみると、打ち込み杭の先端支持力、すなわち開端杭の閉塞効果に関する研究に始まり、支持力管理手法や海洋、埋め立て地、都市、山岳地などの環境条件に即した施工方

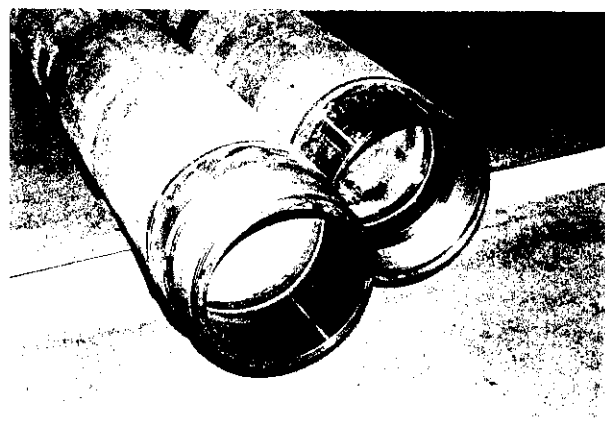


Photo 5 Mechanical joint "Mecha-Neji"

法、周辺技術の開発といった方向で研究が進められてきた。この流れは、基本技術から応用・利用技術の開発へと推移してきた我が国の杭に関する技術の流れと同様であり、支持力原理に忠実であること、社会的なニーズに対する最適技術を提供することなど一貫したコンセプトを保持し続けてきた。

今後の趨勢として ISO をはじめとする国際標準化、基準化の動きが加速されつつある現在、基礎設計の面でも ISO 2394 (構造物の信頼性に関する一般原則) に記述されているように、限界状態設計、性能規定型の設計法への移行が予測される。こうした中で杭基礎に対しては、上部構造の安全性・機能性を想定される限界状態のいずれにおいても満足させるべく、一本一本の杭の支持力のばらつきを考慮して基礎全体の支持機能の信頼性 (安全性) を評価することが要求されよう。打ち込み杭やドリル杭ではそれぞれの杭の信頼性を全数管理できるため、いずれもより高いレベルで基礎全体の安全性の確認が可能である。今後は、中掘系の杭工法についても同様に施工中の情報をもとに信頼性の高い支持力確認手法の確立が不可欠である。将来的には、性能保証が可能な工法に関しては、例えば安全率を下げ設計ヘッードバックできるような行政的なしくみが必要であると考えられる。

上部構造の機能という面から基礎構造の支持挙動を評価する性能規定型の設計体系においては、基礎全体の沈下・変形挙動と上部構造の安全性・信頼性との関係を明確化する必要がある。すなわち、従来の「支持力」という力の釣りの概念から一歩進めて、基礎の沈下量、あるいは不同沈下などの沈下性状との関係において構造物の性能を保障することが重視される。このような観点からは、通常の供用状態を対象とする場合には、比較的小さな沈下量 (杭径の 1~2%) で最大の支持力を発現する周面摩擦支持力と、一方、最大耐力に至るまでに大きな変形 (杭径の 10% 以上) を必要とする先端支持力のそれぞれに対して異なる安全係数を用いることが合理的といえる。また、地盤条件によっては摩擦支持力を重視した杭基礎 (長尺摩擦杭あるいは不完全支持杭) の積極的な適用も図っていく必要がある。

これらの技術的動向を踏まえた上で、工法開発に関しては、経済・産業の発展や社会通念の変化に応じた、適正なテーマを見極めていく必要がある。つまり、耐震性や高耐久性といった品質の向上、あるいはコスト削減、環境への配慮、首都移転や都市再開発への対応など、時代のニーズに即した商品開発が必要である。我々が今後必要かつ有効と考えている材料・工法の技術分野を以下に挙げる。将来的に有効な鋼管杭に関する技術としては、(1) 高耐力・高耐久

性材料・構造形式、(2) 合理的鋼管継手、上部工との結合技術、(3) 地盤改良やコンクリートとの複合技術、(4) 現地上活用技術、(5) 低空間・低公害対応型施工技術 (6) 安価な防食法などである。

5 おわりに

鋼管杭に関する技術開発の流れと鋼管杭基礎工法の開発に対して、当社が果たしてきた役割および最近の開発事例と今後の展開について紹介した。特筆すべき鋼管矢板井筒工法をはじめとして、当社における鋼管杭に関する技術ポテンシャルは種々の工法開発や実工事への適用・改良を踏まえて今日まで継承されてきた。

しかし、その多くは社内の建設を主体に、実物実験を通して開発したものが世の先駆になっている。今後は、社外に舞台を移して、外部と共同で開発していく機会が多くなっていくものと思われるし、またその兆候も現れてきている。

阪神・淡路大震災は我が国の国民に地震に対する怖さを再認識させるとともに、国民生活を支える構造物の建設・維持に携わる土木・建築技術者の目を覚まさせた出来事でもあった。鋼管杭基礎の被害調査が鋼管杭協会を中心に行われてきたが、道路構造物や建築物の基礎杭として鋼管杭の優れた耐震性能を実証した結果が得られている。しかし、ケーソン護岸沿いに建造された鋼管杭式栈橋において、ケーソン直下の置換砂や捨て石層の強度低下にともなうケーソン移動によって、杭が変形するといった現象も発生しており、従来の設計手法における問題点が浮き彫りにされたのも事実である。我々鋼管杭に関わる技術者は、製造から設計・施工・施工管理に至るまで、品質的、価格のあるいは環境的にも適正な製品・工法を供給していく使命を担っている。今後は社会的ニーズに対して最適技術の追求をベースとし、社会情勢や技術通念の変化に対応しながら高耐久材料やコンクリートとの複合技術といった次世代の工法開発に取り組んでいく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 鋼材倶楽部・鋼管杭協会 杭基礎合同調査団：「兵庫県南部地震鋼管杭基礎調査報告書（第1次）」、(1995)、3
- 2) 鋼管杭協会：「兵庫県南部地震鋼管杭基礎調査報告書（第2次）」、(1996)、3
- 3) 岡原美知夫、木村嘉富、高木 繁、大堀裕康：「群杭の水平載荷試験およびシミュレーション解析」、構造工学論文集、**39A** (1993)
- 4) 木村嘉富、龍田昌毅、春日正己：「大変形時における杭の水平抵抗の非線形性の評価」、基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム発表論文集、(1995)
- 5) 長谷川明、塩井幸武、木村 亮、松田秀高：「鋼管杭頭部の応力伝達機構に関する実験的研究」、構造工学論文集、**43A** (1997)、1391-1396
- 6) たとえば、基礎構造物の限界状態設計に関する研究委員会(限界状態の定義ワーキンググループ)：「基礎構造物における限界状態」、土と基礎、**42**(1994)9、9-14
- 7) 富永眞生、小阪 清、越後勇吉：「川崎製鉄の土木建築技術の特色」、川崎製鉄技報、**20**(1988)4、251-260
- 8) 小松雅彦、脇黒和彦、富永眞生：「大口径鋼管ゲイの閉そく性に関する2,3の実験」、土と基礎、**17**(1969)5、22-27
- 9) 富永眞生、越後勇吉、鹿毛征二：「大口径鋼管ゲイの支持力について」、第11回土質工学会発表会講演集、(1976)、653-656
- 10) 高橋陽一：「橋脚基礎に用いた鋼管矢板セル型ウエル工法について」、土木学会第26回年次学術講演会講演集、第3部、Ⅲ-75、(1971)、227-228
- 11) 脇黒和彦、嶋 文雄：「橋梁基礎の新工法—仮締切兼用鋼管矢板井筒工法」、土木学会誌、**57**(1972)9、12-19
- 12) 石渡正夫、富永眞生、行友 浩、石田昌弘：「仮締切兼用鋼管矢板井筒の実物載荷試験」、川崎製鉄技報、**5**(1973)1、101-115
- 13) 脇黒和彦、富永眞生、柳 豊和：「仮締め切り兼用鋼管矢板井筒工法による本島大橋基礎工事の施工」、土木施工、**14**(1973)3、67-72
- 14) 斉藤 柊、白石 環、野中節男：「鋼管の新しい水中切断法について」、川崎製鉄技報、**8**(1976)2、291-300
- 15) 栗田邦夫、市川文彦、武村忠志、白石 環：「鋼管杭の水中切断と自動検知装置」、川崎製鉄技報、**14**(1982)4、524-533
- 16) 藤田 勉、井村英俊、赤秀公造、小関祐志、橋本正治：「プラズマアークを用いた鋼管矢板水中切断工法・装置（プラズマカッター）の開発」、川崎製鉄技報、**20**(1988)4、279-284
- 17) 堤 一高、根井基雄、城 郁夫：「川崎製鉄千葉製鉄所 15 万トン原料岸壁建設工事について」、第25回全国港湾工事報告会報告概要集、(1979)、217-222
- 18) 富永眞生、源波修一郎、小城 亘：「臨海杭打工法（KST 工法）の開発」、建設の機械化、(1986)、21-26
- 19) 福若雅一、上肥宏一郎、新宮和周、尾関史洋：「埼玉県南卸売団地入
- 20) 土地盤構築工事における STEP 工法」、基礎工、**20**(1992)9、42-50
- 21) 三好弘高、高部良二、新宮和周：「鋼製人工地盤の設計・施工」、川崎製鉄技報、**27**(1995)4、229-234
- 22) G. Likins：「Field Measurements and Pile Driving Analyzer」, 2nd. Intl. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Stockholm (Sweden), (1984)、126-133
- 23) 福若雅一、橋本修身、脇黒泰士、沖 健、四宮秀夫、尾関史洋：「波動理論による杭の支持力管理システム」、川崎製鉄技報、**24**(1992)3、201-208
- 24) 古閑桂吾、平本高志、古室健史：「東京湾横断道路本更津人工島ジャケット工事」、川崎製鉄技報、**25**(1993)3、183-187
- 25) 上肥宏一郎、平川雅人、山本武志：「マニラ南港における港湾構造物の機能診断技術と改修技術」、川崎製鉄技報、**28**(1996)3、165-169
- 26) 脇黒泰士、橋本修身、堀之内義夫、中村茂樹、辻本和仁：「波動理論を用いた支持力推定法の支持力管理への適用」、土木学会第48回年次学術講演会講演集、(1993)、788-789
- 27) 館野次郎、橋本正治、西澤信二、佐藤清治、豊原陽登志、志賀厚：「新しい低騒音低振動鋼管杭（ドリル杭）工法の開発」、川崎製鉄技報、**22**(1990)1、37-43
- 28) 橋本正治、橋本修身、西澤信二、佐藤清治、豊原陽登志、高橋功：「低騒音低振動鋼管杭（ドリル杭）の貫入・支持力特性」、川崎製鉄技報、**22**(1990)4、283-290
- 29) 橋本正治、西澤信二、佐藤清治、櫻井有哉、橋本修身、高橋千代丸：「低騒音低振動鋼管杭（ドリル杭）の施工技術の研究」、川崎製鉄技報、**24**(1992)3、193-200
- 30) 橋本正治、江面行正、大久保純美弘：「KKTB 場所打鋼管コンクリート杭」、川崎製鉄技報、**25**(1993)3、231
- 31) 石川達夫、山内直利、古後 亮：「先端打撃による既製コンクリート杭の打ち込み工法」、佐賀大学理工学部集報、**17**(1988)1、51-59
- 32) 元木卓也、脇黒泰士、沖 健、森本宣弘、沼田博昭、山本陽一：「機械式根固め鋼管杭の先端支持力」、日本建築学会学術講演梗概集、(1998)、683-684
- 33) 脇黒泰士、元木卓也、須見光二、福田 大、大橋保夫、大久保政宣：「拡大根固め鋼管杭の FEM 解析」、日本建築学会学術講演梗概集、(1998)、685-686
- 34) 清水正則、村上宗義、江面行正、坂本真也：「保護層付ネガティブフリクション対策用鋼管杭 KSLP」、川崎製鉄技報、**22**(1990)4、298-299
- 35) 江面行正、豊原陽登志、清水正則：「高強度地すべり抑止杭「K-60」およびメカニカル継手「メカネジ」」、川崎製鉄技報、**29**(1997)2、119-120
- 36) 豊原陽登志、日井一也、置田孝一：「地すべり抑止杭用ねじ継手「メカネジ」」、川崎製鉄技報、**30**(1998)4、209-214