

Development of Low Noise and Low Vibration Steel Pipe Pile (Drill Pile) Method



館野 次郎
Jiro Tateno

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
建材研究室 主任研究
員(部長補)



橋本 正治
Masaharu Hashimoto

エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(課長)



西澤 信二
Shinji Nishizawa

エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(掛長)



佐藤 清治
Seiji Sato

エンジニアリング事業
部 建材技術部



豊原 陽登志
Hitoshi Toyohara

エンジニアリング事業
部 建材技術部



志賀 厚
Atushi Shiga

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 室長(部長
補)

1 緒 言

市街地における杭打機を使用する作業は、特定建設作業として騒音規制および振動規制法の対象になり、鋼管杭の打撃工法は次第に姿を消した。一方、鋼管杭の持つ耐震力特性は建築用杭基礎の耐震設計法確立後認識が高まった。現在までに各種の騒音振動対策工法が開発され、施工機械も防音対策など低公害化が進められている。鋼管杭を対象とした騒音振動対策工法は二つの型が基本になっている。すなわち、打設する際、鋼管杭内部の土を掘りながら鋼管を沈めていく中掘圧入型と、事前に穴を掘った後に鋼管杭を埋め込むプレボーリング型である。しかし、この両型共に先端部および杭周面をセメントモルタルで根固めする工法を併用している。鋼管杭を市街地で使用するためには施工が容易で高い支持力が得られる経済的騒音振動対策工法の開発が望まれている。

杭の回転貫入法は騒音振動対策工法として古くからあるアイデア

要旨

当社が開発した回転貫入鋼管杭工法は、低騒音、低振動、かつ排土のない低公害型を指向した新しい工法である。杭体は開端の先端部内外周面に丸棒のスパイラルリブを取り付けた構造で、杭外周土を大きく攪乱することなく貫入でき、かつ支持層において杭先端の自然閉塞を完了させてそのまま支持杭とすることができるため、在来工法に比べ経済性に優れた工法である。

実杭の貫入比較試験を実施し、スパイラルリブの効果の検証と貫入した杭の先端部閉塞状況の観察などを行い、貫入機構の考察を行った。さらに、施工管理について貫入中のデータから杭先端土質性状を推定し、支持層への根入れ長を管理する方法を調査した。支持力特性については、載荷試験結果から、先端根固めしないで十分な支持力が得られることがわかった。また、杭内周面スパイラルリブの取り付けは、自動溶接法を開発し総合技術として実用化の見通しを得た。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed an innovative rotary-penetration steel pipe pile method, which uses an open end with a helical projection composed of 13-mm-diameter round rods arranged on both the outer and inner circumferences of the pile at a length part less than ten times the diameter of the pile.

The pile head is held with a rotary device, and twisted into the ground using a rotational force until it penetrates into the bearing stratum. Little disturbed soil, while the pile is penetrating and strong blockade soil at the tip of the pile realize economical pile method. Vertical load test results indicate adequate bearing capacity can be attained. Low vibration and low noise during the execution of the work, better workability. Clean execution of the work without discharging soil and better cost efficiency can be obtained. Besides, this method can provide an economical means of forming an automatic and mechanical fixity of the inner spiral rib.

In conclusion, we are convinced of the feasibility of this pile method.

である。しかしながら、在来工法は、閉塞杭の外周に掘進能を重視し幅広の板状の羽根をスパイラル状に取り付けたものが多い。したがって、周面摩擦力の回復が遅く支持力が小さい。また、杭体の加工費も高く、さらに、先端閉塞杭なので硬い地盤への貫入が難しいという欠点がある。

本工法は、開端の鋼管杭を回転貫入しそのまま支持杭とする工法である。低騒音、低振動、無排土の無公害型、かつ打ち込み工法に代わる簡易な施工を目指している。本工法に使用する杭は、開端杭の先端部内外周面にスパイラルリブを設け、先端掘削により貫入性

* 平成元年11月21日原稿受付

を良くし、支持力に対しても外面リブの効果により外周面摩擦力を大きくし、さらに、内面リブによる先端閉塞効果によって先端支持力の発現を期待している。

杭体の加工は、杭先端部のみにリブを取り付けるので、施工費のみならず加工費も安く全体として経済的な工法である。

本論文では、その貫入性、支持力特性および施工管理について現場施工試験結果から論述し、さらに、杭体の製造法の開発について言及する。

2 工法の概要

Photo 1 に本工法に使用する鋼管杭の構造を示す。杭先端部内外周面に丸棒のスパイラルリブを溶接で取り付け。さらに、貫入時の地盤へのくい込みを容易にするためバイトを設ける。杭体の回転は杭頭部または杭胴体部を駆動して行う。

外周面スパイラルリブは、13 mm 程度の高さにしているため杭外周土の攪乱が少ない。また、スパイラルリブは杭周面の土砂を杭外

周面に押し付け、押し上げる作用をしていることから杭周面摩擦の回復が早い。さらに、リブ取り付けを先端部のみにしているために押し上げられた土砂は地中にとどまり、排土を伴わないクリーンな貫入を可能にしている。

内周面スパイラルリブは、貫入最終段階の支持層中において杭先端の管内土の閉塞性を促し、管内壁摩擦抵抗力を増して杭先端支持力の発現に寄与する。内面リブの支持力への寄与については模型試験¹⁾および載荷試験でその可能性を検証している。

以上のような構造的特徴を持った鋼管杭を回転貫入する施工機械は、汎用機である三点支持式杭打機を利用することができる (Fig. 1)。杭頭部とアースオーガの装着は特殊回転治具を用い遠隔脱着が可能であるため、杭建て込み時、継ぎ杭時の高所作業がなく安全性が高い。今後さらに施工性の向上と本工法に適合した機械能力を検討し、専用機の開発も進める必要がある。

次に、施工時の騒音振動測定結果は、当然ながら規制値を十分下まわっている。主騒音源は原動機であり防音対策がとられている。振動については全く問題にならない。さらに、Photo 2 に示すように施工中排土がなくクリーンな工法である。排土処理が不要になり市街地施工に有利な公害対策工法である。



Photo 1 View of drill piles

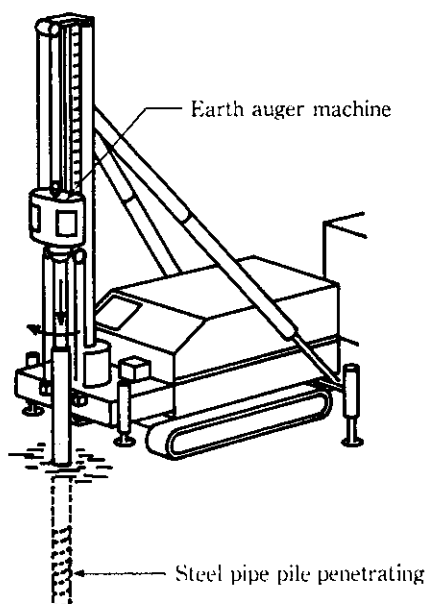


Fig. 1 Schema of pile driving

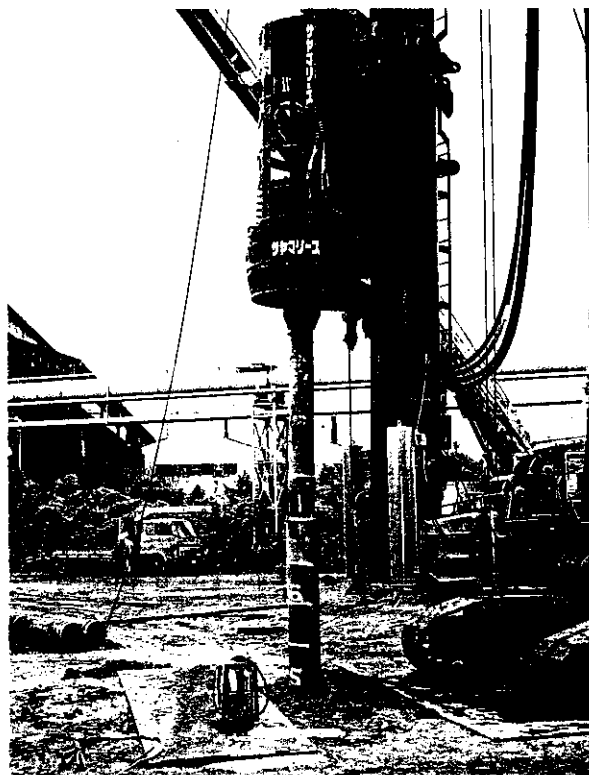


Photo 2 View of clean execution of work

3 貫入性の調査

鋼管杭の構造決定と貫入状況を検証するために外径 318.5 mm の実杭による回転貫入比較試験を実施した。

3.1 調査方法

3.1.1 位置および地盤

貫入比較試験は、当社研究開発センター（千葉市長沼町）地内で実施した。Fig. 2 は試験杭の配置と地盤の土質柱状図を示す。GL

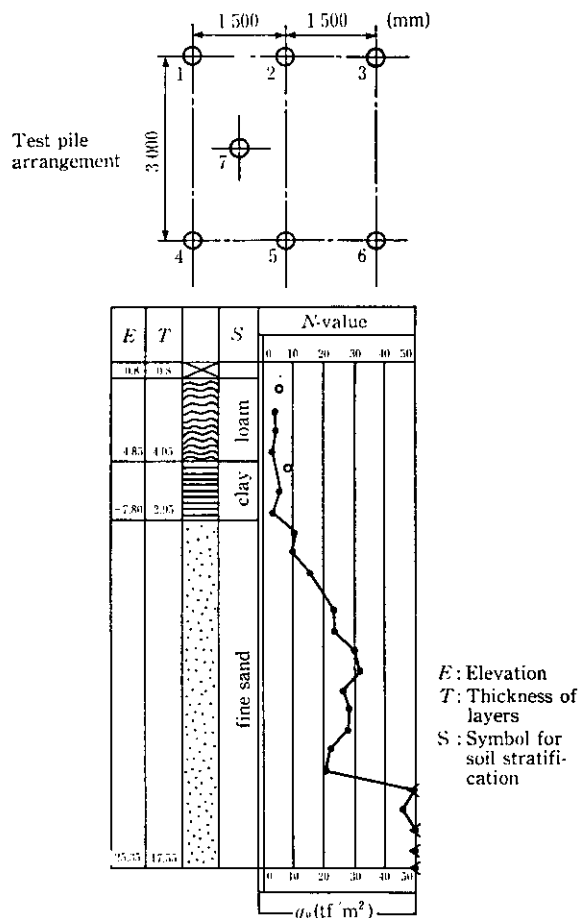


Fig. 2 Soil data (N-value) and test pile arrangement

Table 1 Penetrating test conditions

Case	Spiral rib pitch, p (mm)		Shape of test pile
	Inside	Outside	
1	300	300	
2	none	300	
3	300	none	
4	none	none	
5	150	300	
6	300	150	

−8 m までがロームおよび凝灰質粘土層でありその下層に細砂の成田層が続いている。GL−11 m〜−20 m まで N 値が 20~30, GL−21 m で $N \geq 50$ の支持層が現れる。実験場所の地盤はほぼ均一な地層である。

3.1.2 貫入試験

貫入試験に使用した鋼管杭形状を Table 1 に示す。内側および外側スパイラルリブの存在効果を Case 1~4 で調査し、Case 5~6 でリブの形状効果を調べた。施工機械は、三点支持式杭打ち機とアースオーガを用いた。

施工条件は、比較試験のため回転数 (15 rpm) 押し込み力 (20 t 以下) を各試験ともほぼ同一条件として、貫入時間、貫入トルクおよび押し込み力を測定し比較した。

3.2 調査結果

3.2.1 管内外スパイラルリブ効果

Case 1~4 の貫入速度、貫入トルクを Fig. 3 に示す。Case 1 を基準に比較すると、Case 2 の管内リブ無しの杭は、一時的に砂層到達時貫入が遅れるが、その後スムーズに貫入しており外リブの効果を証明している。また、Case 3 の外リブ無しの杭は、Case 1 に比較し貫入速度が遅く同様に外リブ効果を示している。さらに、Case 4 の管内外リブ無しの杭は、GL−11 m の砂層到達部で貫入停止し杭押し込み力を増しても効果がない。以上スパイラルリブの存在効果を示唆する結果が得られた。

Fig. 4 に示す Case 5, 6 は、スパイラルリブ形状効果を確認したものである。

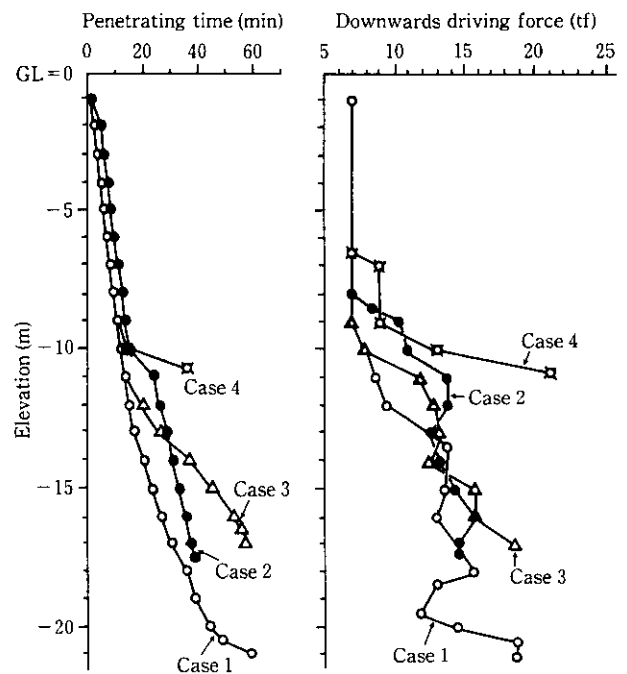


Fig. 3 Comparison of penetrating time and downwards driving force (case 1~4)

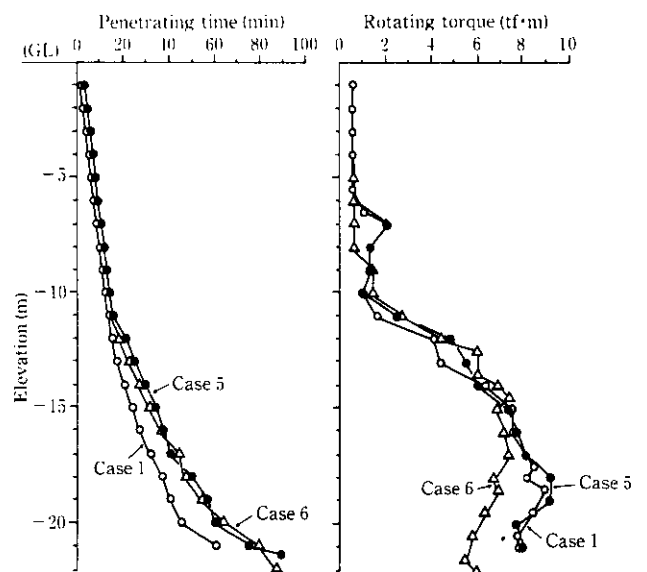


Fig. 4 Comparison of penetrating time and rotating torque (case 5, 6)

一般的にネジ原理からすればピッチを細かくすればトルクが小さくなり貫入速度が遅くなる。本工法では回転数をスパイラルピッチに合わせていないが、砂中においても同様の現象が認められる。

Case 5, 6 の杭は、それぞれ、管内リブ、管外リブのピッチが、Case 1~4 のピッチ（杭径）の 1/2 である。Fig. 4 に示すように、Case 1 に比べ Case 5, 6 は貫入速度が遅れる。

Case 5 で管内リブピッチが貫入速度に影響を与えているのは、杭先端から管内に土を取り入れながら貫入している段階において、管内への土の貫入速度が杭の貫入速度に影響を与えたと考えられる。

Case 6 では、貫入速度と共に貫入トルクが減少している。外リブピッチが影響を与えており、ネジ原理に相当する効果を証明している。すなわち、外リブは杭体に推力を付与し貫入性を助けている。

3.2.2 管内土の状況

管内土の進入状況については、貫入途中一時停止し先端からの高さを測定した。Case 1 に相当する内外リブ有り杭の測定結果 2 例を Fig. 5 に示す。

ある深さ以上の限界貫入深さに近くなると管内土の上昇は停止する。杭先端土を圧縮しながら先端閉塞状態で貫入していると推定される。

貫入した杭を引き抜き先端部の管内土を観察した。Photo 3 にその状況を示すように先端閉塞が確認されている。先端部の管内土は

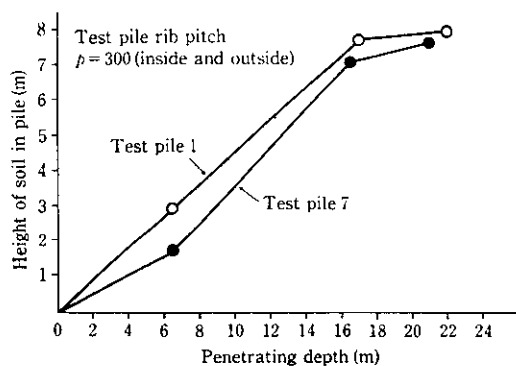


Fig. 5 Height of soil in pile during penetrating

原地盤と同等程度のN値が得られている。管内土の標準貫入試験結果の一例を Fig. 6 に示す。

3.3 貫入機構の考察

現在、各種地盤で施工データを蓄積中であるが、当然ながら、地盤の土質性状により貫入性に差がある。

基本的に貫入性は砂質土の管内への進入に依存している度合いが大きい。杭先端に進入した管内土の締め固まり状況と杭直下の土の強



↑
Tip of pile

Photo 3 View of inside soil at the tip of pile

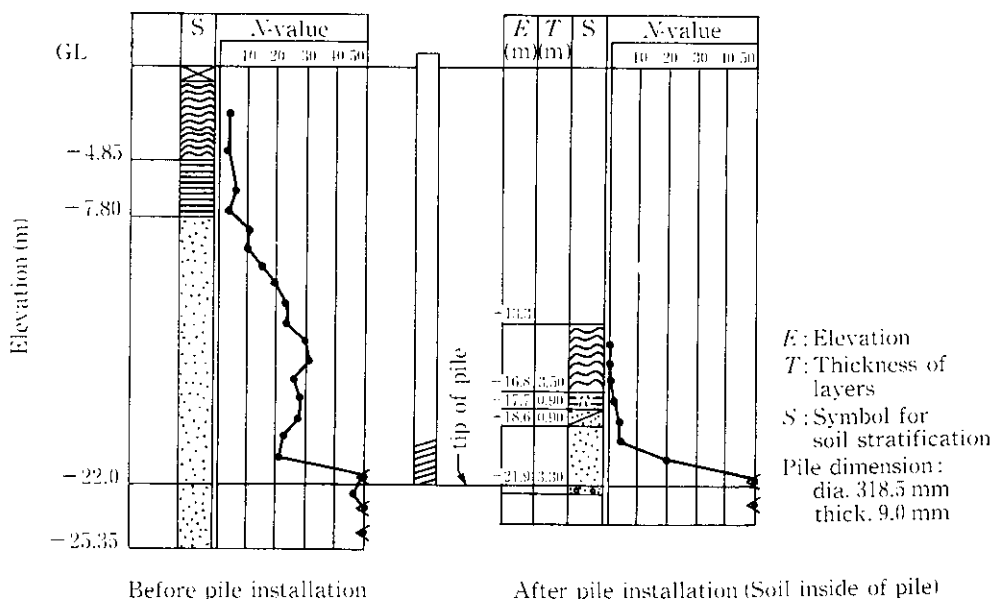


Fig. 6 Comparison of boring data (N-value) for before vs. after installation of pile

度バランスにしたがい、土を管内へ取り込むか管外へ押し出すかを選択しながら貫入していると考えられる。地表への排土がないことから管外へ出た土は管内と周辺土を締め固めている。このことは、施工した杭の周辺の土を掘削して観察した結果、杭周囲に土が固着している状況からも確認されている。

貫入試験から得られた知見を総合して貫入機構を貫入の進行にしたがいまとめると以下になる。

- (1) 杭先端に取り付けた歯形形状のバイトが杭の回転作動により杭直下の地盤に噛み込む。
- (2) 杭先端地盤の土は杭内に進入するか杭外周面に排土される。
- (3) 杭外周面に排土された土は、杭の壁面に作用する土圧により拘束を受けつつ、杭外周のスパイラルリブ効果で押し上げられリブ間を充填すると共に外周土を押し付け圧縮する。
- (4) 外周スパイラルリブの上端上方のリブのない部分にも土が供給されて、上方の土被りにより拘束を受けつつ締め固められていく。
- (5) 一方、杭内に進入した土は管内スパイラルリブにより周面抵抗を受けつつ徐々に杭先端を閉塞する。
- (6) 管内閉塞が助長するにつれて貫入抵抗が増大するが、完全閉塞していない段階では、杭頭部からの押し込み力および外周スパイラルリブの効果による推力により管内土を上方に移動して貫入する。
- (7) 杭先端が支持地盤に到達する深度に近くなると、管内土の圧縮のみ土が進入する。管内土の締め固めが進むにつれて杭先端部の土は下方地盤を圧縮し杭周面地盤と共に締め固めが進行する。
- (8) 杭先端部の支持地盤への根入れ完了は、先端抵抗および周面摩擦抵抗によるトルクの増大と貫入速度の低下により判定する。

3.4 施工管理について

施工管理は、支持力を根入れ長で管理するために所定の地盤に的確に根入れすること、あるいは不均一な地盤でも貫入中に支持層が確実に把握できることが課題である。

貫入中のトルクおよび貫入時間などのパラメータを利用して、施工前に入手した土質柱状図と照合しながら支持層の確認とその根入

れ長を管理する方法²⁾を調べた。貫入トルク T (tf・m) と単位貫入長当たり貫入時間 t (min/m) の積の平方根 $\sqrt{T \times t}$ が、 N 値と相関が認められるかについて調査した。Fig. 7 にその一例を示す。これらの分布は N 値の傾向と類似しており施工管理データとして十分適用可能である。現在施工例を蓄積している。

実際の施工時には、作業現場環境、操作性を十分考慮した専用の管理計器を用意し、計器には各深度ごとに $\sqrt{T \times t}$ を計算して深度軸のグラフに出力させる。施工者は、 N 値と対比して杭の貫入状況を管理すると共に貫入データの自動記録を行うことを考えている。

4 支持力特性

貫入試験で N 値 30~50 以上の砂層への貫入が可能であることが実証できた。さらに、鉛直載荷試験を実施し鉛直支持力を確認した。

Fig. 8 に水島製鉄所地内において実施した載荷試験結果を示す。この図中の破線は、平山の提案³⁾による推定式で求めたものであり、実測の P_0 (杭頭荷重)- S_0 (杭頭沈下量) 曲線から先端支持力と周面摩擦力の各係数を推定し次の支持力算定式を得た。

$$R_u = \alpha \bar{N} A_p + (L_s \times \bar{N}_s / \beta + L_c \times \bar{q}_u / 2) \phi \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 R_u : 極限支持力 (tf)

α : $\geq 25 \sim 30$

$\bar{N}$: 杭先端地盤の平均 N 値 ($N \leq 60$)

A_p : 杭先端の閉塞断面積 (m^2)

$\bar{N}_s$: 砂質地盤中の平均 N 値 ($N \leq 50$)

L_s : 砂質地盤中の杭長 (m)

β : ≤ 3

$\bar{q}_u$: 粘性地盤中の一軸圧縮強度 (tf/ m^2 , $q \leq 16$ tf/ m^2)

L_c : 粘性地盤中の杭長 (m)

ϕ : 杭周長 (m)

さらに、詳しく支持力を解明するために先端支持力と周面摩擦力を分離して評価する必要があるので、杭体にひずみ計を取り付けて鉛直載荷試験を行った。Fig. 9 は、試験地の土質柱状図ならびに載荷試験結果の杭体ひずみ測定によって得られた杭体軸力分布と周面摩擦力の実測値と計算値の比較を示したものである。ただし、杭先端から 3 m はひずみ計が取り付けられず杭先端荷重の値は推定値とした。Fig. 8 に載荷試験結果の P_0 - S_0 曲線と平山の式による推定曲線を示したが、ひずみ測定からも式 (1) に示した程度の周面摩擦力が確認された。

次に、Fig. 10 に杭先端における P_p (杭先端荷重)- S_p (杭先端沈下量) 曲線を示す。杭先端沈下量は、杭頭沈下量から杭体の弾性圧縮量を差し引いて求めたものである。先端支持力は $25 \sim 30 \bar{N} A_p$ 程

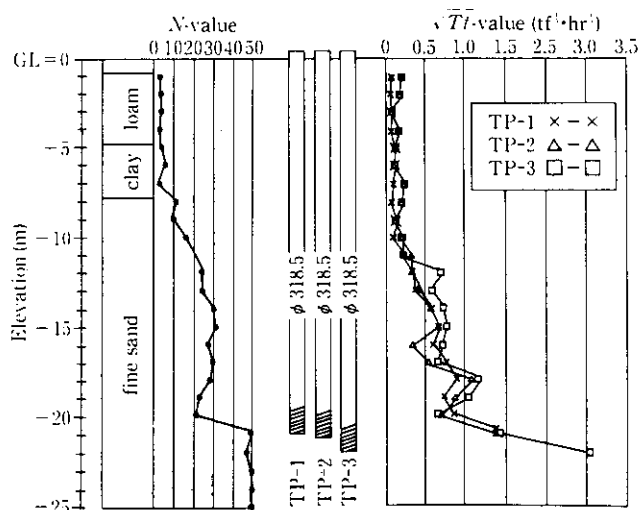


Fig. 7 Correlation of $\sqrt{Tt}$ -value with N -value

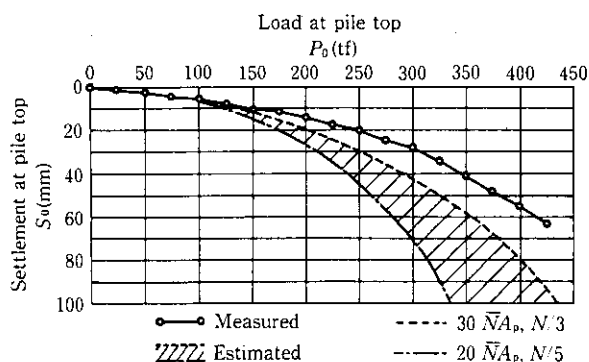


Fig. 8 Load vs. settlement curve (at pile top)

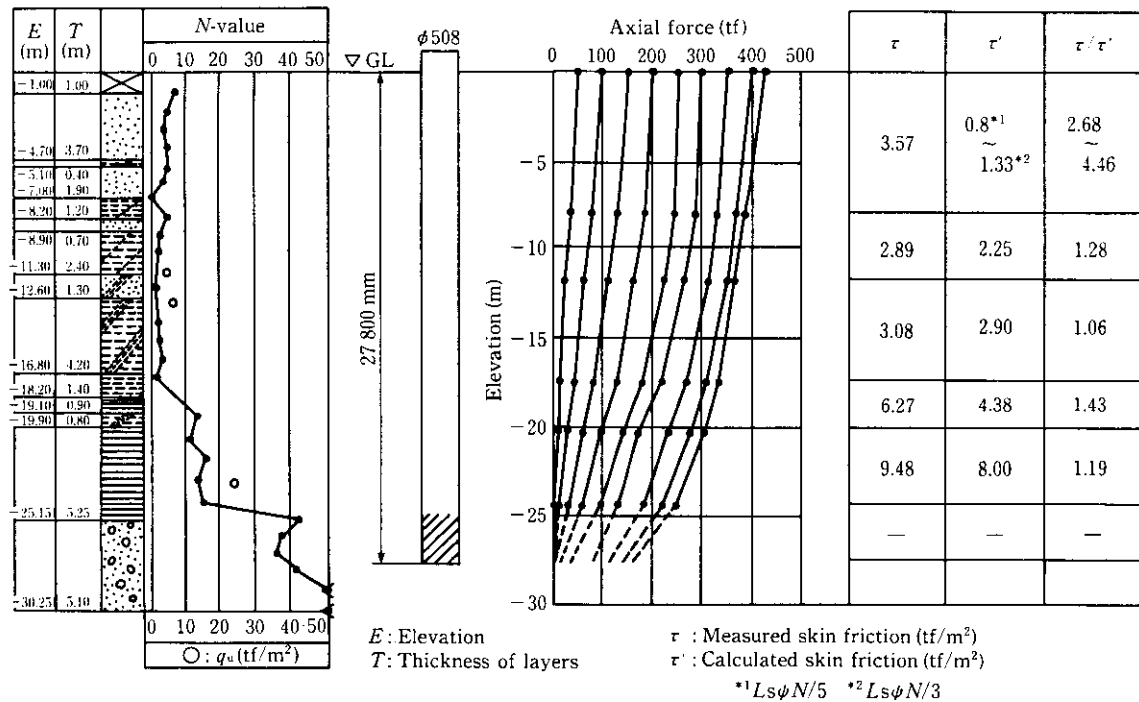


Fig. 9 Measured results of axial force and estimation of skin friction

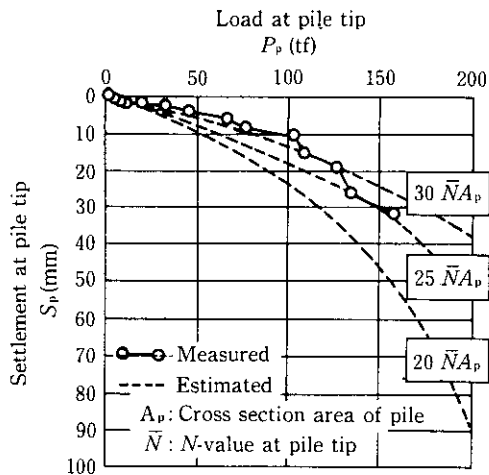


Fig. 10 Load vs. settlement curve (at pile tip)

度の値が期待できる。

これらの載荷試験結果の荷重—沈下量曲線と杭体ひずみ測定の結果

果から支持力を評価すると、先端根固めしないで十分な支持力が得られるという本工法の目的は十分満足したものになっている。

5 杭体製造法の開発

開端杭先端にスパイラルリブを成形する方法、特に内面リブの取り付けが問題である。

成形法としては、まず、あらかじめリブ突起を付形した鋼板を製管する方法、あるいは製管時同時にリブを溶接で取り付ける方法等が考えられる。しかしながら、これらの方法は設備費が高いため、将来量産時に考慮するものとして、当面経済的と考えられる杭先端部に直接リブを溶接する方式を開発した。内面リブは、あらかじめスパイラル状に成形した丸棒のリブを管端から挿入し、管端のみ仮付け溶接し、自動的かつ機械的に溶接する。

装置の概略を Fig. 11 に示す。所定の杭を走行台車上の 2 台のターニングローラーに乗せ、内面溶接装置は、固定の片持ち梁のアーム先端にトーチおよびリブ倣い装置を設けている。杭体を 1 回転で 1 ピッチ移動させながら下向きで溶接を行う。溶接は管端から始

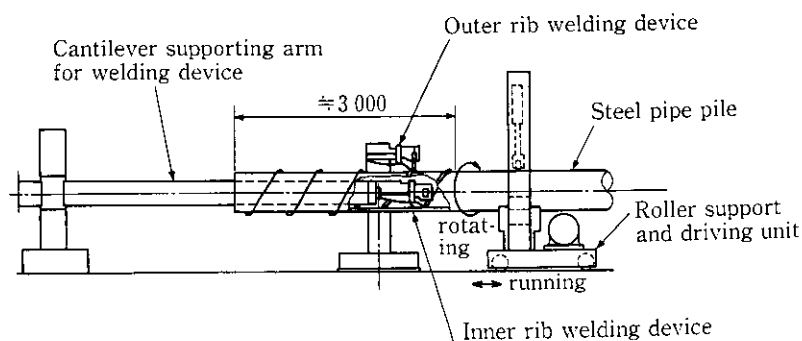


Fig. 11 Spiral rib welding apparatus

めて管内部へ進めていく。リブ成形寸法を規定する必要があるが、本法により完全な溶接ができることが確認されている。

また、外面リブの溶接は、同様に仮付けされたスパイラルリブを倣いながら行う。ほぼ同ピッチのスパイラルリブであれば内外面リブを同時溶接することにより製造能力を向上することができる。

6 ま と め

当社が開発した回転貫入鋼管杭工法は、鋼管杭の先端の内外面に丸棒のリブを取り付けたものを用い、低騒音、低振動、無排土で、かつセメント処理などを用いない簡易な施工を可能にするものである。各種の現場施工試験の結果、鋼管杭の公害対策工法として実用化の見通しを得た。すなわち、実杭による比較回転貫入試験により貫入性へのスパイラルリブ効果を検証し、また、鉛直載荷試験を行いその支持力に対する効果も判明した。また、施工管理も容易に行えることがわかった。さらに、新方式の内面スパイラルリブの自動溶接法を開発し、その製造法を確立した。本工法の特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) 施工中の騒音振動は規制値内であり、さらに、排土がないことは作業現場環境を改善すると共に排土処理が不要になり、優れた公害対策工法といえる。
- (2) 貫入試験において汎用の杭打機とオーガにより N 値 30 以上の砂層を約 10 m 貫通し砂地盤支持層に貫入できた。内外周面スパイラルリブ形状の貫入性に及ぼす影響を調査し、その効果

を検証した。

砂層中において外周面スパイラルリブは、ネジ原理に相当する効果があり、回転が貫入時の外周面摩擦抵抗を低減するのみでなく、スパイラル効果により杭体に推進力を付与し貫入性を助けている。杭の押し込み力が施工機自重の範囲に制限されることからこの効果を有効に利用することができる。

- (3) 鉛直載荷試験結果から外周面スパイラルリブにより周面摩擦力の早期回復が期待できることが判明し、さらに、先端支持力の発現が実証され先端根固めを必要としないことが明らかとなった。貫入中の管内土進入状況から内面スパイラルリブは、支持地盤近くで杭先端の締め固めを助長して杭先端の閉塞度を高めている。

砂地盤においてスパイラルリブは顕著な効果を示した。今後各種地盤で施工例を蓄積し支持力算定式を確定する。

- (4) 貫入中の地盤の土質性状を貫入中のデータから推定し土質柱状図と照合することにより、杭の支持層への根入れ長を確認する施工管理が可能である。
- (5) 杭体の主たる加工であるスパイラルリブの取り付けは、特に内面リブが問題であったが、自動溶接法により能率的に製造することができる。

現在、全国各地の砂ならびに砂礫層を支持地盤とする各種地層で、施工実験と載荷試験を実施している。施工例と支持力特性に関する模型実験の結果については次報で報告する予定である。

参 考 文 献

- 1) 橋本修身, 金子忠男, 館野次郎, 高橋千代丸: 「回転貫入式鋼管杭（ドリル杭）の支持力特性に関する模型実験」, 日本建築学会大会学術講演概要集, (1989), B, 1299
- 2) 船曳晴治, 岡嶋一仁, 妹尾博明: 「埋込み杭工法における支持地盤確認

方法の提案」, 第 22 回土質工学研究発表会, (1987), 1239

- 3) 平山英喜, 本郷隆夫: 「双曲線型抵抗を用いた Load-Transfer 法による杭の荷重—沈下曲線算定」, 第 23 回土質工学研究発表会, (1988)