
低騒音低振動鋼管杭（ドリル杭）の貫入・支持力特性

Characteristics of Penetration and Bearing Capacity by Low Noise and Low Vibration Steel Pipe Pile (Drill Pile)

橋本 正治(Masaharu Hashimoto) 橋本 修身(Osami Hashimoto) 西澤 信二(Shinji Nishizawa) 佐藤 清治(Seiji Sato) 豊原 陽登志(Hitoshi Toyohara) 高橋 功(Isao Takahashi)

要旨：

ドリル杭工法は、従来の埋込杭と異なり鋼管杭のもつ薄肉でねじり剛性の高い特性を利用し、回転貫入でしかもセメントミルクを用いず、無排土で施工する工法である。実杭の1/5スケールで模型実験を行い、ドリル杭の貫入機構と支持力機構に関し、圧入杭との比較を行ってその特性を明らかにした。また砂地盤や砂礫地盤など異なる地盤で実杭を用いて貫入性の施工実験と支持力を求める鉛直載荷実験を行った。施工実験を通じて、貫入時の周辺・管内土の調査を行い模型実験で確認された土の締固め機構を実証することができた。鉛直載荷試験では、杭体ひずみ測定を行い、杭の周面摩擦力と先端支持力を検出し、本工法独自の支持力算定式を設定した。実測値と計算値との比較検討の結果、算定式が実用に供することを確認した。

Synopsis：

Rotary-penetration steel pipe pile is twisted into ground using rotational force until it penetrates into the bearing stratum. Little disturbed soil, no discharged soil and no cement grouting characterize the piling method compared with conventional low-noise and low-vibration piles such as bored cast pile. The 1/5 scale model test clarified the unique penetration and bearing mechanism of the pile method. The mechanism was proved through actual-sized field tests including installation and vertical load tests. Skin friction and point bearing capacity of the pile were separately evaluated through vertical load tests, and an adequate bearing capacity formula was derived.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Characteristics of Penetration and Bearing Capacity by Low Noise and Low Vibration Steel Pipe Pile (Drill Pile)



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)



橋本 修身
Osami Hashimoto
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(掛長)



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 主査
(掛長)



豊原 陽登志
Hitoshi Toyohara
エンジニアリング事業
部 建材技術部



高橋 功
Isao Takahashi
エンジニアリング事業
部 研究開発センター
建材研究室 室長(部長
補)・工博

1 緒 言

都市部市街地での杭施工の増加に伴い、多種多様な低騒音・低振動工法が各所で開発され、施工機械の低公害化も進められてきている^{1,2)}。これらの工法をみると、非排土杭 (nondisplacement pile) 工法が多く、以下のような問題がある。

- (1) スライム処理や土の乱れなど、施工管理が難しい。
- (2) 支持層への根入れ長の管理、支持力管理が難しい。
- (3) セメントミルクを使用するオーガ併用工法では、排土される土が産業廃棄物となり環境問題、処分場の問題等が生ずる。

ドリル杭工法³⁾は、これらの問題点を解決して、しかも、鋼管杭のもつ薄肉かつ、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。また、杭外周土の乱れを最小限にして周面摩擦力の低下を防ぎ、杭先端についても同様に原地盤を乱さず、管内土 (せん断抵抗と圧縮

要旨

ドリル杭工法は、従来の埋込杭と異なり鋼管杭のもつ薄肉でねじり剛性の高い特性を利用し、回転貫入でしかもセメントミルクを用いず、無排土で施工する工法である。

実杭の1/5スケールで模型実験を行い、ドリル杭の貫入機構と支持力機構に関し、圧入杭との比較を行ってその特性を明らかにした。

また砂地盤や砂礫地盤など異なる地盤で実杭を用いて貫入性の施工実験と支持力を求める鉛直載荷試験を行った。施工実験を通じて、貫入時の周辺・管内土の調査を行い模型実験で確認された土の締固め機構を実証することができた。

鉛直載荷試験では、杭体ひずみ測定を行い、杭の周面摩擦力と先端支持力を検出し、本工法独自の支持力算定式を設定した。実測値と計算値との比較検討の結果、算定式が実用に供することを確認した。

Synopsis:

Rotary-penetration steel pipe pile is twisted into ground using rotational force until it penetrates into the bearing stratum. Little disturbed soil, no discharged soil and no cement grouting characterize the piling method compared with conventional low-noise and low-vibration piles such as bored cast pile.

The 1/5 scale model test clarified the unique penetration and bearing mechanism of the pile method. The mechanism was proved through actual-sized field tests including installation and vertical load tests.

Skin friction and point bearing capacity of the pile were separately evaluated through vertical load tests, and an adequate bearing capacity formula was derived.

性)と原地盤の強度をバランスさせながら貫入するため、排土杭 (displacement pile) としての特長を持ち、品質管理および支持力発現に対して施工上の人為差の少ない工法である。さらに、貫入データ (例えば貫入トルク、貫入速度) を現場でリアルタイムに計測することにより、支持層への根入れ長の確認を行うことができる。また従来の低騒音・低振動工法より省力化が一段と進んでいる点も特徴の一つといえる。

本報では、ドリル杭に関して室内模型実験で貫入状況の調査、他工法との支持力の比較を行ってその特性を明らかにしたこと、および支持地盤の異なる各地区で実施した現場実験から、貫入による周辺土・管内土の締固め効果を確認したこと、さらに鉛直載荷試験の結果から支持力算定式を提案したことなどについて述べるものである。

* 平成2年8月8日原稿受付

2 模型実験

乾燥砂を用いた模型地盤での回転貫入ならびに載荷試験から、本工法による杭の貫入・支持力特性を圧入杭との比較において検討した。

2.1 実験概要

供試杭として外径 114 mm、管厚 4.5 mm の鋼管を用い、リブの有無および設置方法（回転貫入杭、圧入杭）をパラメータとして実験を行った。Table 1 に各模型杭の仕様を示す。回転貫入杭については Fig. 1 に示すように、杭体の内外表面に 3.2 mm φ の丸鋼を 68 mm ピッチでフレア溶接するとともに、リブと同一板厚のバイトを杭先端の外周 2 箇所に取り付け付けた。

鹿島珪砂 6 号（平均粒径 0.16 mm、均等係数 1.5）を熱風乾燥した後、気乾状態（含水比 0.5% 以下）で実験に用いた。Fig. 2 に示す内径 968 mm、高さ 1.8 m の円形土槽により、一層の厚さ 10 cm ごとにバイブレータによる振動締固めを行って相対密度 (D_r) 65% ならびに 90% の模型地盤を成形した。一部の試験では、原地盤中に着色層を約 1 mm の厚さで水平に置くとともに、地表面から $6d$ (d : 杭径) の位置に土圧計（受圧面径 30 cm）を設置し、杭の貫入に伴う周辺地盤の動き、地盤内応力の変化を調査した。

本実験では根入れ長をいずれの場合も杭径の 5 倍とした。回転貫入杭では油圧モーターを用いて 4 rpm の回転を杭に与えつつ油圧ジャッキにより貫入深さに応じて押し込み力を漸増させる方法（max

Table 1 Specifications of model test specimen

Test No.	RP-IO	RP-O	J
Installation	Rotary penetration		Jacked
Spiral rib	Outer rib and inner rib	Outer rib only	None
Pile tip	Open		Open
Pile dia.	114 mm		
Wall thickness	4.5 mm		

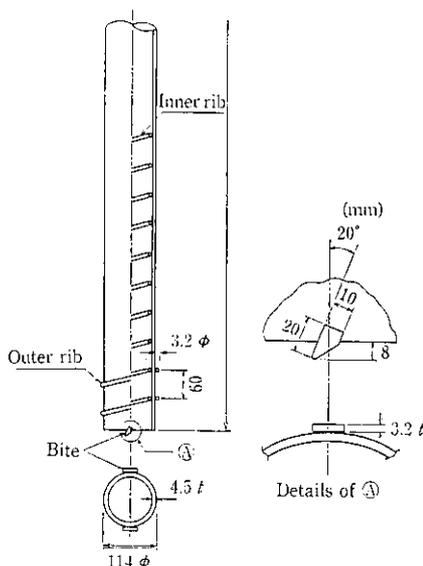


Fig. 1 Model pile (RP1)

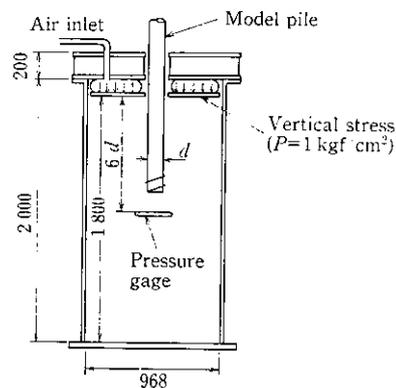


Fig. 2 Test apparatus

2.6 tf) で貫入を行った。また、圧入杭では油圧ジャッキにより地表面から 1 cm/min の速度で静的に貫入させた。回転貫入・載荷試験を通じて、試験中は 32 mm 厚の鋼板を介して空気圧による上載圧 1.0 kgf/cm² を負荷している。

通常の杭の載荷試験において先端支持力と周面摩擦力とを分離して評価するためには、杭体に貼付した歪ゲージにより深さ方向各位置での杭体の軸力変化量を計測する方法が一般的である。しかしながらこの方法では、特に杭先端近傍において、管外面の摩擦力 (R_o) と管内土による管内面の摩擦力 (R_i) の双方が軸力変化に関係するため、先端支持力の一部として評価されるべき管内面の摩擦力 (R_i) が管外面の摩擦力 (R_o) に含まれた形で計測され、その分先端支持力を過小に、摩擦力を過大に評価するおそれがある。

そこで、ここでは下記の方法によりテフロンシートを用いて杭外周の摩擦力を除去することで R_i を含めた先端支持力を直接計測し、回転貫入杭と圧入杭との支持挙動を比較した。

- (1) 杭設置後、杭頭を固定して杭先端から 20 mm 上部までの周辺土を静かに除去し、杭の外周に厚さ 2 mm のテフロンシートを 2 重に巻き付ける。
- (2) 周辺土を埋め戻し、面状バイブレータを用いて地盤成形と同一の方法で締め固める。
- (3) 上載圧 1 kgf/cm² を再度負荷して載荷試験を実施する。

2.2 貫入特性

回転貫入後の杭（内外リブ）の外周には、Fig. 3 に示すように全長にわたって土粒子が隙間なく付着し、原地盤中の着色部は上方の付着層内にテーパ状に分布していた。これより、杭先端近傍の土粒子は杭の回転貫入に伴い外面リブに沿って上方へ移送されることがわかる。

Fig. 4 は D_r 90% の模型地盤において、設置後の杭外周地盤の締固め状態を原地盤との比で示したものである。締固め度の計測は、杭設置後に地表面から順に所定の深さまで上方の砂を除去したのち、先端を平頭 (12.8 mm φ) に改造したポケットペネトロメータを用いて、5 mm 貫入させるのに要する荷重を読みとることによって行った。圧入杭では一般的に言われているように杭直下での締固めが著しいのに対し、回転貫入杭では、杭直下でのコーン指数の増加はわずかではあるものの、周面においてリブ部も含めた杭全長にわたって締固めが促進されていた。これより、回転貫入杭の場合、杭の回転貫入によっていったん乱された周辺地盤に対して下方から土粒子が供給され圧縮されることで、初期の水平圧力以上の側圧が負荷された状態になっていることがわかる。

Fig. 5 は回転貫入に伴う管内土の上昇を内面リブの有無で比較

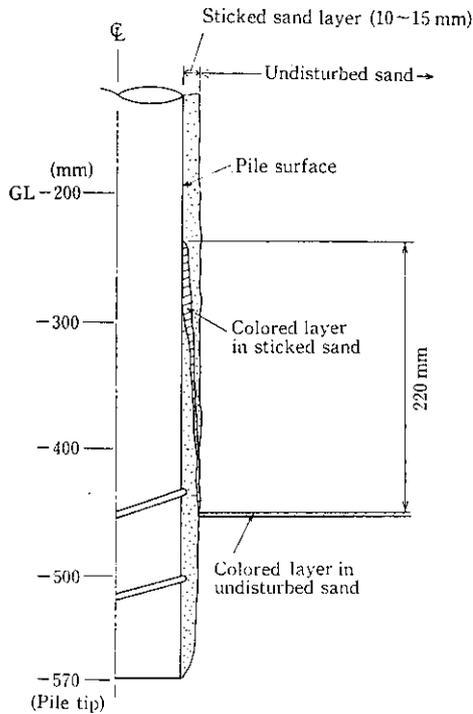


Fig. 3 Soil displacement behavior during pile installation

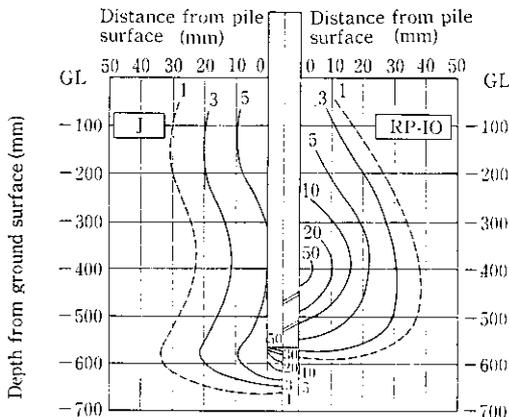


Fig. 4 Compaction effect after pile installation (Numerical value denotes cone index ratio to undisturbed soil)

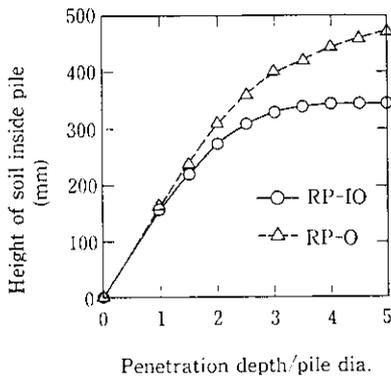


Fig. 5 Effect of inner rib on the behavior of the soil inside pile during installation

したものである。いずれの場合も貫入が進むにつれて管内土の増加の割合が低下するが、上昇鈍化の傾向は特に内面リブを付与した場合に顕著であり、貫入深さ 4d 以降ではほとんど管内土の上昇は認

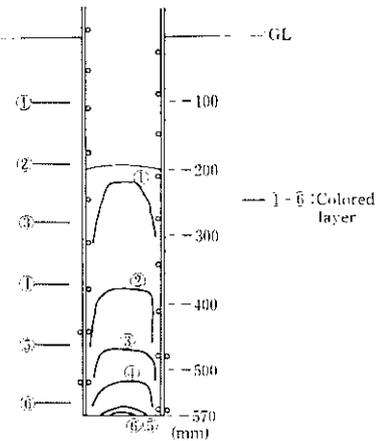


Fig. 6 View of the soil inside pile (RP-IO)

められなかった。しかしながら、5d 貫入後にこの杭を切断して管内への土の進入挙動を調べたところ、Fig. 6 に示すように管内土の上昇が止まった 4d (456 mm) より深い位置の土も圧縮されて管内に取り込まれていた。この結果より、既往の実験結果にもみられるように、内面リブは、管内面のせん断抵抗を増して管内に取り込まれた土の上方への滑りを拘束することで、特に杭先端近傍の管内土の締り込めを促進し先端閉塞を助長する効果を有することがわかる。

2.3 支持力特性

Fig. 7 に貫入に伴う回転貫入杭の先端土圧の変化を示す。Fig. 8 は D_r 90% の場合の載荷試験から得られた杭頭荷重-沈下曲線を内面リブの有無で比較したものである。これらの図から次のことがわ

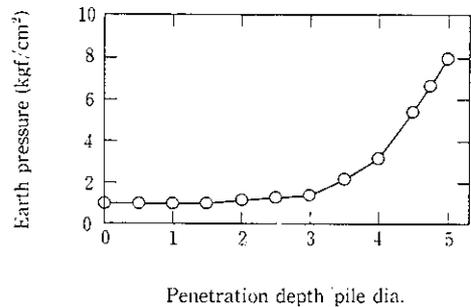


Fig. 7 Vertical stress increase at pile tip during RP-IO pile installation

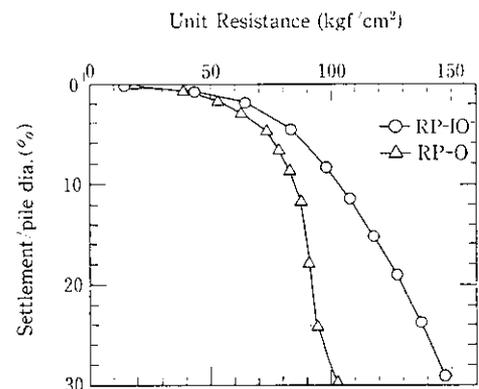


Fig. 8 Effect of inner rib on load bearing capacity

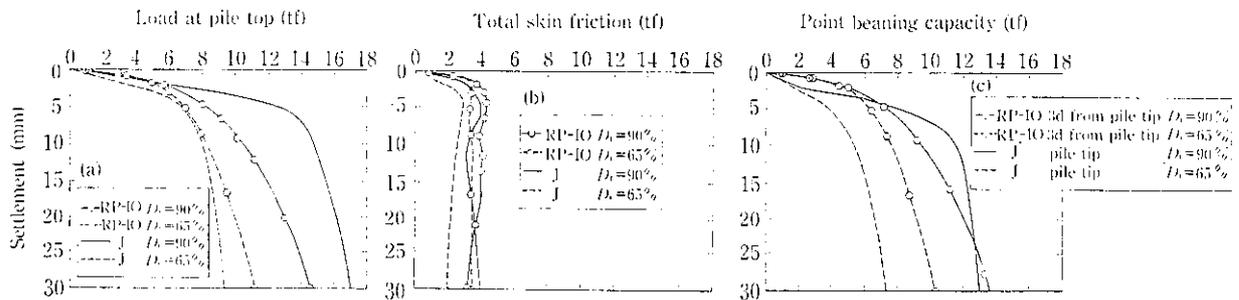


Fig. 9 Load-settlement relationship of RP pile and jacked pile

かる。

打込杭では杭先端への先行圧力として 100 kgf/cm^2 にも及ぶ高圧が作用するとされている。回転貫入杭においても打込杭ほど顕著ではないものの、ある程度の先行圧力を継続的に先端地盤に負荷しつつ貫入していることが認められた。

したがって、回転貫入杭の先端支持挙動は先端地盤を締め固めながら貫入する打込杭と、掘削により先端地盤内応力を解放する場所打ち杭（埋込杭）の中間的なものと推察される。

内面リブの有無による回転貫入杭同士を比較すると、沈下量が約 2 mm までは内面リブの有無にかかわらず両者の沈下挙動はほぼ同等であるが、それ以降では同一の荷重に対する沈下量が内面リブのない場合に大きくなった。上記の支持力の相違は主として先端抵抗の差によるものと考えられ、内面リブによる先端閉塞助長効果が先端支持力発現に寄与していることを示すものである。

Fig. 9 (a)~(c) に回転貫入杭の支持力曲線を比較して示す。Fig. 9 (b) の周面摩擦力（杭外周）は、2.1 で述べた方法による杭先端支持力を、通常の設置方法によって別途実施した杭頭荷重沈下曲線（Fig. 9 (a)）から差し引くことで求めた。したがって、回転貫入杭では杭先端の外周リブ部（長さ 136 mm ）とその上方の一般部の双方の摩擦力を合計した値である。回転貫入杭では沈下の初期段階から圧入杭に比べて大きい摩擦力が発現されているが、これは設置に伴う杭周辺土の締め固め効果が圧入杭よりも大きいこと（Fig. 4）を反映した結果と考えられる。

回転貫入杭の支持力算定式においては、後述するように（Fig. 17）実際の杭先端から $3d$ 上を仮想杭先端として先端支持力を評価している。これより、Fig. 9 (c) に示す先端支持力については、2.1 で述べた方法による圧入杭先端の支持力曲線と、杭先端から $3d$ 上の歪ゲージ値（軸力値）で評価した回転貫入杭の支持力曲線とを比較した。なお、本模型実験では回転貫入杭の管内土がいずれの地盤条件でもゲージ位置より下であったため、この位置での軸力値には杭内面の摩擦の影響はない。したがって、歪ゲージによる方法で杭内面の摩擦（ R_1 ）および $3d$ 分の外周摩擦（ R_0 ）を含む値として回転貫入杭の支持力が求められている。 D_r 90% の場合、回転貫入杭の先端支持力は圧入杭とほぼ同等もしくははやや下回る程度と評価され、 $5d$ の根入れに要する荷重すなわち両者の先行圧力の差（圧入杭 16.2 tf 、回転貫入杭 2.6 tf ）ほどの大きな相違は認められない。さらに、 D_r 65% の場合には、先端支持力および杭頭支持力ともに回転貫入杭が圧入杭を上回る値となった。これは、現場実験の場合³⁾と同じく両者の閉塞性の差に起因するものと解釈される。したがって、この結果より打込杭では十分な先端閉塞が達成できないような低い N 値の地盤で打ち止めた場合でも、回転貫入杭では内面リブの効果によって高い閉塞性が得られることが示唆される。

3 現場実験

模型実験を実施した結果、ドリル杭は回転貫入によって周辺土をゆるめることなく、周辺土および杭先端部管内土の締め固めを促進する効果があること、杭先端および杭周面にセメント系材料を使用しなくても一般の埋込杭と同等以上の支持力が発現することなどがわかった。

実杭による現場でのこれらの確認は、既報でも一部述べているが、その後実験を積み重ね、貫入時の周辺・管内土の状況および鉛直支持力特性と鉛直支持力の算定法がより明確になったので、代表的な現場実験の例をもとに以下に述べる。

3.1 貫入試験

ドリル杭工法は、先端に取り付けた内外面スパイラルリブによって杭周辺土の締め固め、先端閉塞を同時に達成しながら回転貫入するという排土杭（displacement pile）の基本原理に類似した工法であるといえる⁶⁾。したがって、貫入による杭周辺土や管内土の変化を見極めておくことがドリル杭の支持力発現の機構を解明するうえで非常に重要になってくる。

また、ドリル杭の場合、汎用機械、すなわち3点支持式杭打機、アースオーガおよび専用の回転器具を用いて施工するのであるが、地盤によって貫入性も当然異なってくるので貫入特性を把握すること、また、杭の貫入後、支持力を確実に得ることなどのために適切な施工管理が必要となる。

3.1.1 周辺土・管内土調査

貫入した杭の周辺地盤および杭先端部管内土がどのように変化しているかを調べるために、土質調査を行い、さらに貫入した杭を引き抜いて観察した。

まず貫入試験杭を用いて、Fig. 10 に示すように杭周辺（杭表面より 30 cm 、 50 cm の位置）において標準貫入試験を実施して原地盤との比較を行った。

この試験は周辺地盤の乱れ、すなわち地盤の強度（ N 値）低下の有無を確認するために実施したものであるが、その結果をみると強度の低下はなく、逆に上層砂層では原地盤の N 値に比べ高い値が得られた。

次に、管内土の調査を行うために砂礫地盤に回転貫入した杭を貫入後直ちに引き抜いて半割にして観察してみると、杭先端部に支持層の砂礫を取り込んでおり、非常に密な状態で閉塞されていることが確認された（Photo 1）。

3.1.2 施工管理手法

貫入した杭が荷重条件を十分満足する支持力を得るためには、所定の地盤に必要なだけの根入れをすることが前提条件であり、変化

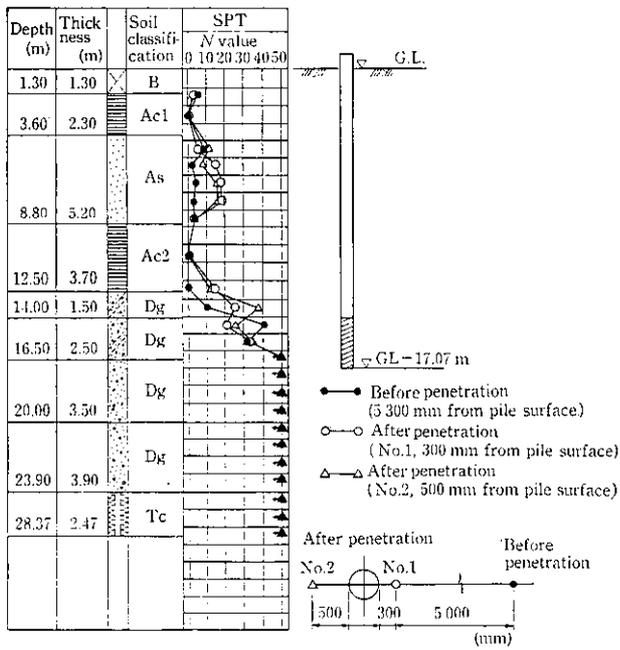


Fig. 10 Change of N-value around pile after penetration

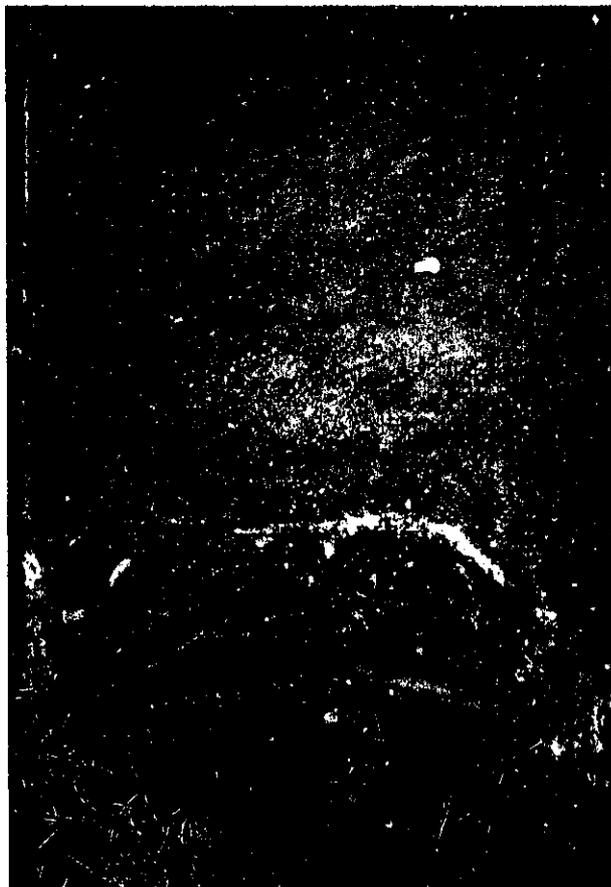


Photo 1 View of inside soil at the tip of pile

している地盤にも追従して支持層を確認できることが杭の施工管理上特に重要である。

施工管理の確実性を向上させ、設計支持力を確保させるためには、さらに一歩進めた施工管理手法が求められる。そこで貫入時に

得られたオーガ負荷電流値を負荷トルクに換算した値(T)と単位長さ当たりの貫入時間(t)との相乗平均(\sqrt{Tt})⁷⁾で貫入抵抗をあらわし、地盤強度との相関性を評価する手法として \sqrt{Tt} 法の提案を行った^{3,8,9)}。その後、砂地盤および砂礫地盤での実杭貫入実験を数多く実施し、本手法の有用性を確認した。

3.2 鉛直載荷試験^{3,5)}

ドリル杭の支持力機構は、基本的には模型実験の結果から説明することができる。

しかし実杭では地盤の種類、杭径、支持層への根入れの状態などが支持力の発現に大きな影響を及ぼすものと考えられる。そのために実杭による鉛直載荷試験を数多く実施し、支持力のバラツキの中から適切な支持力算定式を設定し、実用に供することが求められる。

3.2.1 鉛直支持力特性

鉛直載荷試験を実施した砂地盤の4例、砂礫地盤の3例の仕様をTable 2に示す。このうち載荷試験杭のひずみ測定を実施したものの4例を取り上げて、先端支持力と周面摩擦力の評価を行った。

試験結果から P_s (杭頭荷重) - S_p (杭頭沈下量) 曲線をまとめてFig. 11に示す。

(1) 周面摩擦力

前述のようにドリル杭の周面摩擦力の発現機構は従来の埋込杭工法には例がないので、支持力を明らかにするためには周面摩擦力を定量的に評価する必要がある。そこで、鉛直載荷試験時に杭体ひずみ計を取り付けて測定した杭について、砂質土と

Table 2 Specifications of vertical load tests (field test)

Pile No.	Pile dia. (mm)	Penetration depth (m)	Bearing stratum	Depth into bearing stratum per pile dia.
T-1	318.5	22.0	Sand	3.5
T-2	318.5	10.5	Sand	12.6
T-3	508.0	18.0	Sand	5.7
T-4	508.0	40.0	Sand	5.9
T-5	508.0	27.8	Gravel	4.5
T-6	400.0	17.1	Gravel	1.7
T-7	318.5	23.0	Gravel	8.2

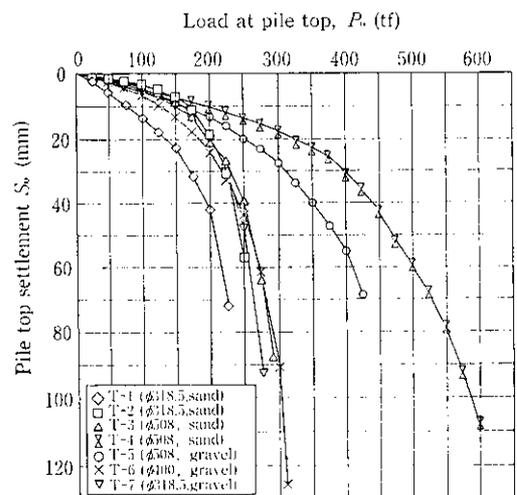


Fig. 11 Load—settlement relationship at pile top

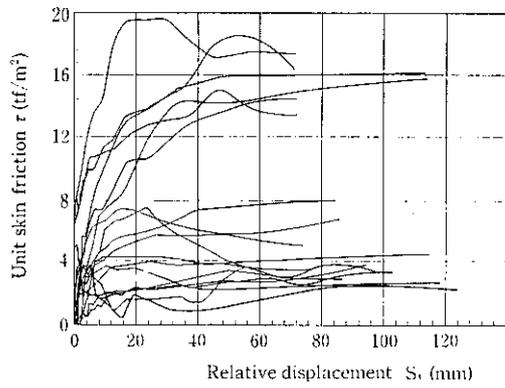


Fig. 12 Skin friction mobilization vs. relative displacement between pile surface and soil (measured at sand)

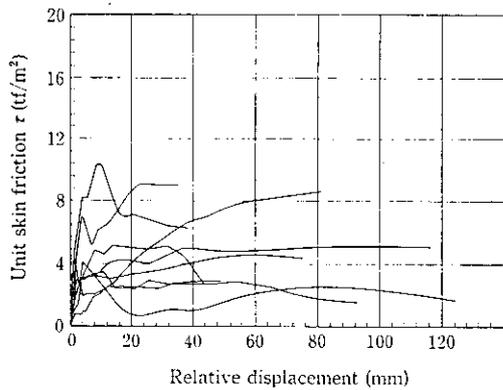


Fig. 13 Skin friction mobilization vs. relative displacement between pile surface and soil (measured at clay)

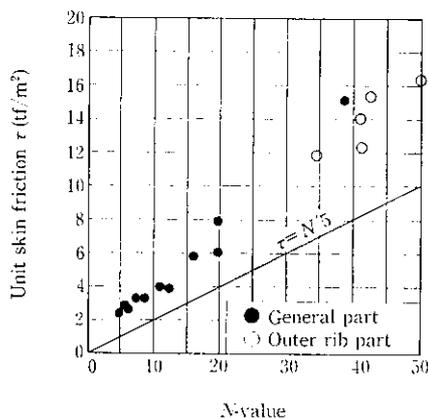


Fig. 14 Correlation of unit skin friction with N -value (measured at sand)

粘性土に分けて原地盤強度との関係を調べた。Fig. 12 および Fig. 13 はそれぞれ砂質土層と粘性土層における杭と地盤の相対変位量に対する周面摩擦力度の推移を示す。また Fig. 14 および Fig. 15 は杭先端沈下量が杭径の 10% に達した時点（10% に達していない杭は最大荷重時）での砂質土層と粘性土層での杭の周面摩擦力度と原地盤強度の関係をプロットしたものである。なお、砂質土ではスパイラルリブのない一般部と先端の外側スパイラルリブ部分とに分けてプロットした。

これらの図より、杭と周辺地盤の相対変化量が 10~30 mm に達した状態で、ほとんどの部位において最大の周面摩擦力度が発揮されていることがわかる。また、砂層の杭周面摩擦力度は一般部およびスパイラルリブ部ともに $N/5$ (tf/m^2) 以上に分布

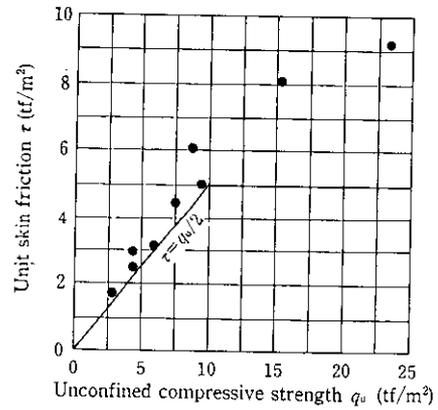


Fig. 15 Correlation of unit skin friction with unconfined compressive strength (measured at clay)

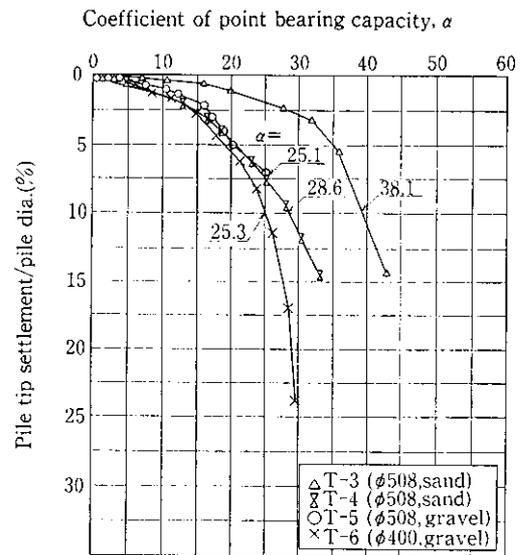


Fig. 16 Coefficient of point bearing capacity (α)—unit settlement relationship

しており、粘性土では $q_u/2$ (tf/m^2) 以上に分布している。これらの周面摩擦力を評価すると、セメントミルク固定液で杭周面を固めた埋込杭¹⁰⁾と比べても同等以上の値となっている。

(2) 先端支持力

杭先端荷重と杭先端沈下量の関係を調べるために、杭体ひずみ計を取り付けた。杭体ひずみ計は最深で杭端上方 0.5 m の位置まで取り付けているが、本工法の場合、特に先端部付近の杭外周面の摩擦力を評価することは非常に困難である。一部の実験では鋼管の肉厚部 (16 mm) に溝加工を施し杭体ひずみ計を設置させているが、杭先端部のスパイラルリブ部では、杭内壁に発生する管内土との摩擦力と杭外周面の摩擦力が含まれた状態でひずみ測定をせざるをえない。さらに周面摩擦力の状態を複雑にしているのが杭内外面のスパイラルリブの存在である。検出されたひずみは、これらのことが含まれた値であると考え、この複雑な軸力、摩擦力が発生する部分も先端支持力の一部として、仮想上の杭先端として取り扱ってみた。杭先端上方で杭径の 3 倍の範囲の周面摩擦力を、杭先端部分に包含して整理したのが Fig. 16 の Q_p-S_p 曲線である。ここで先端支持力の評価位置を杭先端から上方 $3d$ として、その位置を設計杭先端と呼称する。

Fig. 16 で設計杭先端沈下量が $0.1d$ に到達したとき、図中

の数値が示すように設計杭先端支持力係数 (α) は 25 以上の値が得られた。荷重の上昇度に比べ沈下量が非常に大きくなる極限支持力状態では α が約 30 以上の値となった。

3.2.2 鉛直支持力算定方法

ドリル杭を実用に供するとき使用する鉛直支持力算定式は、適当な類似工法がないために、本工法独自のものを提案する必要がある。それには数多くの現場実験データが必要であるが、今までの模型実験と現場実験の研究から、貫入特性と支持力特性を考慮して算定式を設定することにする。前述のように開端杭の場合、載荷時に杭先端部で管内土と管内壁との摩擦抵抗を生じ、管外面の周面摩擦力と分離することが難しいこと、またドリル杭の杭先端管内には管内土と管内壁のせん断抵抗を大きくする目的で内側スパイラルリブを取り付け、その内面のスパイラルリブの取付範囲は杭先端より 1.5 m ($3d \sim 5d$) にしていること、などから鉛直支持力の算定式の考え方を Fig. 17 のように設定した。

これらの定義にしたがって、周面摩擦力と設計杭先端支持力の算定用定数を前述の実験データをもとに設定する。

(1) 周面摩擦力

まず、砂質土地盤における周面摩擦力度をみると、Fig. 14 に示したとおり、平均 $N/2.6$ であり N 値 50 までのすべてのデータにおいて一般部、スパイラルリブ部ともに $N/5$ の値が得られている。したがって、設計に用いる周面摩擦力度を $N/5$ ($N \leq 50$) に設定することとした。

粘性土地盤の周面摩擦力度については、過圧密粘土などの強度の高い土では、施工によって乱されると強度は容易に回復しないことがわかっている¹³⁾。そのために、通常埋込杭や場所打ちコンクリート杭等の場合、粘性土地盤における杭の周面摩擦力度は上限値を設けている。本工法でも実測値を検討した結果、周面摩擦力度は、 q_u 値が 10 tf/m^2 以下では $q_u/2$ とし、 10 tf/m^2 以上の場合には $\tau = 5 \text{ tf/m}^2$ という上限値を用いることとした。

(2) 設計杭先端支持力

Fig. 16 にはそれぞれの試験杭の設計杭先端が $0.1d$ 沈下したときの設計杭先端支持力係数 (α) の値を示したが、先端地盤が砂および砂礫の土質において α 値は 25 以上であった。

また支持層への根入れと α 値の関係をみると、支持層へ $1.7d$ 以上根入れさせたすべての杭で α 値が 25 以上であった。そこ

で、支持層への根入れ長が $3d$ 以上のときは α 値として 25 を採用し、支持層への根入れが $3d$ 未満のときは、中小口径の打込み開端杭の考え方と同様、管内土の閉塞性が低下する可能性があるため杭先端支持力を低減する。

すなわち、支持層への根入れ比 (L_b/d) と設計杭先端支持力係数 (α) の関係は次のようになる (Fig. 17 参照)。

$$L_b/d \geq 3 \text{ のとき } \alpha = 25$$

$$L_b/d < 3 \text{ のとき } \alpha = \frac{25}{3} \left[\frac{L_b}{d} \right]$$

ここで、 L_b : 支持層への根入れ長 (m)
 d : 杭径 (m)
 α : 設計杭先端支持力係数

以上のことから、ドリル杭の鉛直支持力算定式は次の (1) 式のようになる。

$$R_u = \alpha \bar{N} A_p + \left[\frac{\bar{N}_s L_s}{5} + \frac{\bar{q}_u L_c}{2} \right] \psi \dots\dots\dots (1)$$

- R_u : 極限支持力 (tf)
- \bar{N} : 杭本体の下端より下方へ $1d$ 、上方へ $4d$ の間の地盤の N 値の平均値。ただし、個々の N 値の最大値を 100 とし、 $\bar{N} \leq 60$ とする。
- A_p : 杭先端の閉塞断面積 (m^2)
- \bar{N}_s : 設計杭長部の杭周地盤中、砂質土地盤の平均 N 値。ただし、 $\bar{N}_s \leq 50$ とする。
- L_s : 設計杭長の中で砂質土地盤に接する長さ (m)
- \bar{q}_u : 設計杭長部の杭周地盤中、粘性土地盤の平均一軸圧縮強度 (tf/m^2)。ただし、 $\bar{q}_u \leq 10 (\text{tf/m}^2)$ とする。
- L_c : 設計杭長の中で粘性地盤に接する長さ (m)
- ψ : 杭周長 (m)

なお、設計杭長は $L_b/d \geq 3$ のとき $L_a - 3d$ 、

$L_b/d < 3$ のとき $L_a - L_b$ とする。

L_a : 杭が地盤と接している長さ (m)

(3) 算定値と実測値の比較

鉛直載荷試験を行った 7 例について (1) 式を用いて算定した支持力と実測値との比較を Fig. 18 に示した。7 例の平均で見ると、実測値は算定値のほぼ 1.3 倍程度の値となっており、(1) 式の妥当性が確認できた。これらの結果とセメント系の材

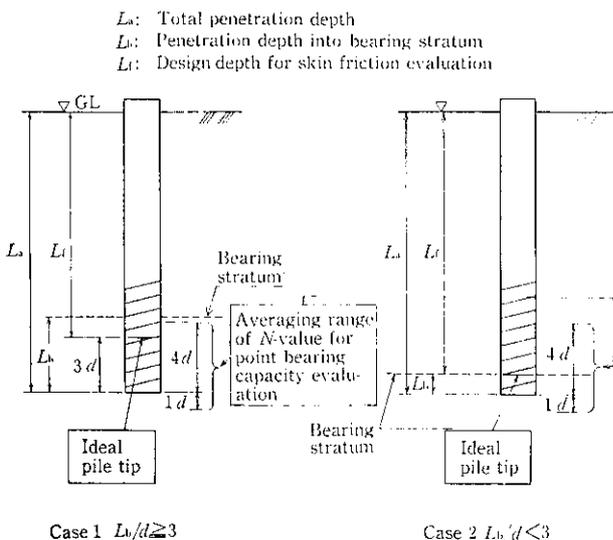


Fig. 17 Interpretation of design bearing capacity

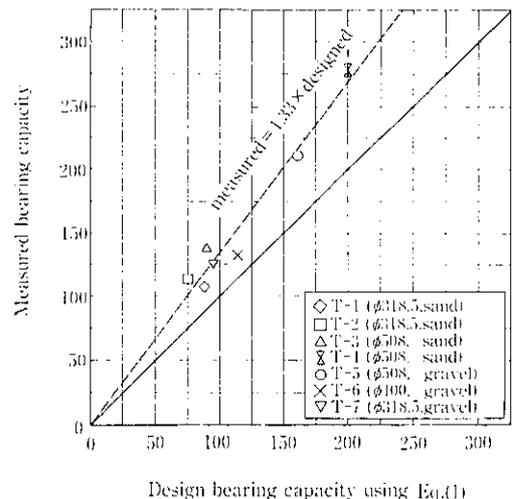


Fig. 18 Comparison of long-term bearing capacity between measured and design values

料を用いて補強する従来の埋込杭の支持力評価を勘案してみても、これらの杭と同等以上の鉛直支持力が得られていることがわかった。

4 結 言

ドリル杭工法における貫入機構と支持力機構を検証するために、模型実験と実杭の施工試験および鉛直載荷試験を行った。この結果から以下のことが明らかとなった。

- (1) 模型実験によって、杭先端周辺部の土は外側のスパイラルリブにより上方へ押し上げるとともに原地盤側方にも押しつけ、初期の水平圧力以上の側圧が負荷された状態になることがわかった。一方、内面のスパイラルリブは、管内に取り込まれた土の上方への滑りを拘束することで、杭先端近傍の管内土の締固めを促進し先端閉塞を助長することがわかった。
- (2) 貫入した実杭の周辺地盤および杭先端管内土を調査した結果、周辺地盤は回転貫入による強度低下がなく、杭先端管内土は非常に密な状態で閉塞していることがわかった。
- (3) 実杭の鉛直載荷試験により、砂層で $N/5$ (tf/m^2) 以上、また粘性土で $q_u/2$ (tf/m^2) 以上の周面摩擦強度が発揮されていることがわかった。さらに、先端支持力は α が 25 以上の値が得られており、従来の埋込杭と同等以上の鉛直支持力が発揮されて

いることが確認できた。

- (4) 設定した鉛直支持力算定式を用いて算定した支持力と実測値の比較結果では、実測値は算定値の 1.3 倍程度であり本式の妥当性が確認できた。

最近の市街地での基礎工法の課題として、施工面では騒音・振動、泥水・廃土、作業員・技術者の不足および根入れ長、支持力の不確実性などが挙げられている。

施工者は工事区域周辺へ及ぼす騒音・振動、泥水・廃土の運搬交通公害、処分地の強引な確保およびその地域への捨土の影響など、施工者のエゴで、周辺居住者、通行者の生活環境を犯すことがあってはならない。それと同時に、若い建設従事者の魅力ある建設現場とするためにも、危険作業のないクリーンな状態での作業が可能な施工環境を提供することが求められる。そして構築される基礎構造物の機能が十分発揮され、しかもそれが最小限の投資で実現できる工法を選択できることが望ましい。

ドリル杭工法は、施工環境の改善、施工管理の確実性、容易性、支持力の確保など上記課題の打開のために開発してきたものである。今後は生活水準が高度化し、市街地における低騒音・低振動・無排土の鋼管杭の特性を生かした工法の必要性はますます高まるであろう。鉛直支持力特性と \sqrt{TE} 法による根入れ状態の施工管理に優れたドリル杭工法は、そのための有力な工法の一つであると考えている。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：「杭基礎の低騒音・低振動工法と支持力」，(1986)，1-15
- 2) 齊藤二郎：「最近の低振動・低騒音工法の現状と課題」，基礎工学，16 (1988) 10，2-17
- 3) 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
- 4) 小林洋一，山川純男：「鋼管杭の貫入抵抗に及ぼす影響因子」，第 37 回土木学術講演概要集，III-250，(1982)，497-498
- 5) 豊原陽登志，橋本正治，西澤信二，佐藤清治，橋本修身：「回転貫入鋼管杭（ドリル杭）工法の鉛直支持力特性」，第 25 回土質工学研究発表会講演集，(1990)，1325-1326
- 6) 土質工学会編：「杭基礎の調査・設計から施工まで」，(1988)，78-95
- 7) 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講演集，(1987)，1239-1240
- 8) 橋本正治，富永眞生，植木八寿彦，西澤信二：「回転貫入式鋼管杭（ドリル杭）の貫入特性」，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），(1989)，1297-1298
- 9) 西澤信二，橋本正治，豊原陽登志，高橋千代丸，富永眞生：「回転貫入鋼管杭（ドリル杭）工法の適用について」，第 25 回土質工学研究発表会講演集，(1990)，1327-1328
- 10) 石井武則：「場所打ち杭・埋込み杭の支持力と設計」，7. 施工法と支持力性状，土と基礎，38 (1990) 4，73-80
- 11) 日本建築学会編：「建築基礎構造設計指針」，(1988)