
低騒音・低振動鋼管杭（ドリル杭）の施工技術の研究

Analysis of Construction Technique and Penetration Characteristics of Low Noise and Low Vibration Steel Pipe Pile

橋本 正治(Masaharu Hashimoto) 西澤 信二(Shinzi Nishizawa) 佐藤 清治(Seiji Sato) 櫻井 有哉(Yuya Sakurai) 橋本 修身(Osami Hashimoto) 高橋 千代丸(Chiyomaru Takahashi)

要旨：

ドリル杭工法は、先端内外面にスパイラル状のリブとバイトを取り付けた開端鋼管杭を汎用の施工機械と専用の回転治具を用いて回転貫入させる工法である。10 数件の施工実績を重ねていく段階で器具類も改良され、効率的な施工手順を確立することができた。また、本工法特有の Doctor (施工管理) システムを用いて蓄積された施工データを解析した結果、貫入完了時の回転貫入抵抗値($\sqrt{Tt}$ 値) には、中間層における管内・管外の周面摩擦抵抗が大きく影響しており、その増加分を取り除くことで杭先端N値との相関性を高められることが分かった。鉛直・引抜・水平載荷試験結果をもとに、ドリル杭工法の貫入特性、特に施工上建懸念される事項について分析した。

Synopsis：

Drill pile method is low-noise/low-vibration piling method using a steel pipe pile which has spiral ribs and bits on both the inner and outer surfaces at the toe portion. The pile is twisted into the ground by means of a conventional pile driving machine and particular jigs. Through many application results for foundation construction, the effective construction procedure has been established by the improvement of the supporting process and instruments including the penetration monitoring/controlling system (Doctor system). Rotary penetration resistance ($\sqrt{Tt}$ value), which is obtained from the Doctor system, correlates to both ground strength (N-value) at the pile toe portion and frictional resistance acting on inner and outer pile surfaces. The correlation between the $\sqrt{Tt}$ value and the average N-value at the bearing stratum becomes clearer, when the effect of the frictional resistance is eliminated using the formulae in this paper. The adequacy of the construction procedure has been proved based on the field experiments including pull-out and horizontal load tests.

本文は次のページから閲覧できます。

Analysis of Construction Technique and Penetration Characteristics of Low Noise and Low Vibration Steel Pipe 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
(部長補)



西澤 信二
Shinji Nishizawa
エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(樹長)



佐藤 清治
Seiji Sato
エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(樹長)



櫻井 有哉
Yuya Sakurai
エンジニアリング事業
部 建材技術部



橋本 修身
Osami Hashimoto
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所土木
建材研究室 主任研究
員(課長補)



高橋 千代丸
Chiyomaru Takahashi
エンジニアリング事業
部 建材技術部長

1 緒 言

ドリル杭工法は、先端内外周面にスパイラルリブとバイトを取り付けた鋼管を回転貫入させる工法で、杭外周土の乱れを最小限としながら、杭先端原地盤に先行圧力を加えつつ管内土を閉塞させることを特徴としている¹⁾²⁾。本工法は外径 508 mm までの径に適應でき、主に中低層建築構造物向けの低騒音・低振動・無排土の鋼管杭工法として開発された。1990 年 6 月に日本建築センター基礎構造評定を受けた後、同 7 月に建設大臣の認定を取得し、施工実績は 1991 年 12 月現在、約 5 000 t (約 3 700 本) となっている。

本報では、施工実績を重ねていく段階で改良を行った施工機械・器具や施工方法について詳しく述べるとともに、施工時に懸念された外周土の乱れと締め固め機構に関しても、引抜・水平載荷試験の

要旨

ドリル杭工法は、先端内外面にスパイラル状のリブとバイトを取り付けた開端鋼管杭を汎用の施工機械と専用の回転治具を用いて回転貫入させる工法である。10 数件の施工実績を重ねていく段階で器具類も改良され、効率的な施工手順を確立することができた。

また、本工法特有の Doctor (施工管理) システムを用いて蓄積された施工データを解析した結果、貫入完了時の回転貫入抵抗値 ($\sqrt{TI}$ 値) には、中間層における管内・管外の周面摩擦抵抗が大きく影響しており、その増加分を取り除くことで杭先端 N 値との相関性を高められることがわかった。

鉛直・引抜・水平載荷試験結果をもとに、ドリル杭工法の貫入特性、特に施工上懸念される事項について分析した。

Synopsis:

Drill pile method is a low-noise/low-vibration piling method using a steel pipe pile which has spiral ribs and bits on both the inner and outer surfaces at the toe portion. The pile is twisted into the ground by means of a conventional pile driving machine and particular rotary jigs. Through many application results for foundation construction, the effective construction procedure has been established by the improvement of the supporting process and instruments including the penetration monitoring/controlling system (Doctor system). Rotary penetration resistance ($\sqrt{TI}$ value), which is obtained from the Doctor system, correlates to both ground strength (N -value) at the pile toe portion and frictional resistance acting on inner and outer pile surfaces. The correlation between the $\sqrt{TI}$ value and the average N -value at the bearing stratum becomes clearer, when the effect of the frictional resistance is eliminated using the formulae proposed in this paper. The adequacy of the construction procedure has been proved based on the field experiments including pull-out and horizontal load tests.

データをもとに説明した。また、本工法特有の支持層への根入れ管理手法である Doctor システムのデータを解析し、回転貫入完了時における貫入抵抗値と杭先端 N 値 (以下 $\bar{N}$ 値と記す) との関係を定量化することの提案を行った。

2 施工実績と施工方法の効率化

2.1 施工実績

ドリル杭の形状は Fig. 1 に示したとおりで、通常、Fig. 2 に示した三点支持式杭打機に汎用のアースオーガを取り付けた装備を用

* 平成 4 年 4 月 17 日原稿受付

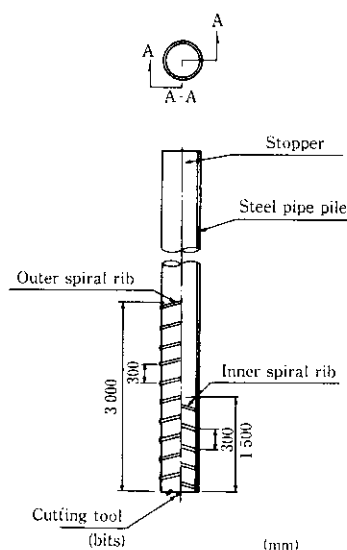


Fig. 1 Schematic view of drill pile

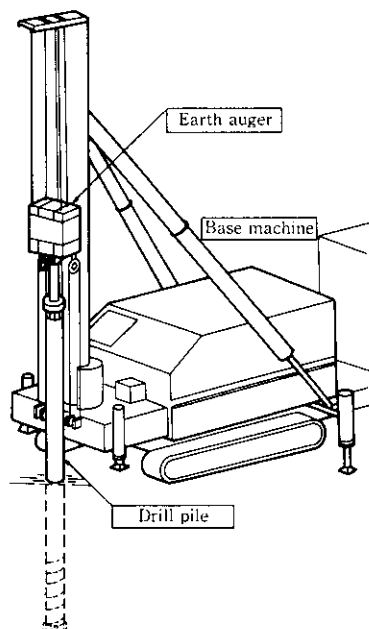


Fig. 2 Diagram of drill pile method

いて杭を回転貫入させ、支持層に根入れする。ドリル杭工法の適用先端地盤は、 N 値が 25 以上の砂と砂礫または礫で、杭を支持層に杭径の 3 倍以上根入れさせることを原則としている。しかし、実際に設計する場合には、支持層を判定する際に、構造物の重要度や支持地盤の土質、地盤の圧密特性など多くの要因を考慮する必要がある。さらに実工事では支持層の不陸がある場合があり、Doctor システム（後述）を用いた根入れ管理等によって杭を適正な状態に根入れさせることが重要である。

Table 1 に主な施工実績の施工歩掛りを整理した。用いた施工機械は、外径 508 mm の杭で 150~240 馬力、外径 318.5 mm の杭では 120 馬力となっているが、杭径・杭長や地盤状況によって差があるものの、ほぼ 100 m/台・日（実働日）の水準を上回っており、施工条件が良い場合には 150 m/台・日以上施工能率をあげることも可能であった。ここで補助工法を用いた場合には、通常の施工方法に比べ、多少施工歩掛りが減少していることがわかる。補助工法による施工性の低下を極力おさえ省力化するために、回転治具下端

Table 1 Construction records of drill pile method

Con- struction site	Pile dia (mm)	Length (m)	Amount	Bearing stratum (N value)	Supple- mental method	Execution efficiency (m/ machine/d)
A	318.5	24.0	75	Sand (51)	—	105.9
B	318.5	15.5	108	Gravel (60)	Preboring (12.5 m)	98.2
C	318.5	9.5	96	Sand (45)	—	108.4
D	508.0	34.1	202	Sand (50)	Inner ex- cavation (21.0 m)	134.0
E	508.0	12.6	799	Sand (25~50)	—	165.3
F	508.0	9.5	147	Sand (34)	—	127.0
G	508.0	18.1	829	Sand (30~40)	Preboring (15.5 m)	137.8

に直接スクレーを取り付けられるような工夫もして、その後実施している。なお、C 現場のケースでは、補助工法による歩掛り低下に加え、設計上の問題で杭間隔が離れていることにより、杭打機械移動の手間どりによる影響が出ている事例もある。

2.2 施工方法の効率化

2.2.1 施工方法と使用機械器具

ドリル杭工法において使用する主な施工機械を Table 2 に示した。アースオーガと杭は Fig. 3 のような回転治具と杭頭部内側に取り付けしたストッパーを噛み合わせて連結する。また、回転貫入時に押込力を負荷させるために、アースオーガ下部に滑車を取り付け、滑車を介してワイヤーによって杭打機と連結させる構造としている。杭の設計天端が杭打地盤より低い場合には、アースオーガと回転治具の間にヤットコ用ロッドを取り付けることにより、所定の深度まで杭を回転貫入することができる。ヤットコ長は杭長や土質条件によって異なるが、4 m 程度までの実績がある。施工は以上の機械器具を用いて杭に回転力、押込力および多少の抜き差し動作を加えることによって行う。Fig. 1 に示したように、ドリル杭先端内面には、スパイラル状のリブが 1.5 m の区間に取りつけてあるため、表層・中間層において締め固まりやすい砂などを杭内に取り込むと、管内閉塞が助長され貫入抵抗が増大することになる。貫入途中で多少の抜き差し動作を行うのは、管内土を移動させることにより表層・中間層での貫入性を向上させる意味がある。このような貫入操作を行いながら、支持層の砂もしくは砂礫を取り込み、貫入を完了することになる。通常の埋込み杭工法の場合、支持力発現を目

Table 2 Construction machine and equipment for drill pile method

Machine or equipment	Specification
Direct support type pile driver	Crane capacity 40~60 (t)
Crawler crane or track crane	Auger motor 90~180 (kW)
Power generator	250~500 (kVA)
Rotary jig	Pile dia ϕ 318.5~ ϕ 508.0 (mm)
Follower	—
Doctor system	—

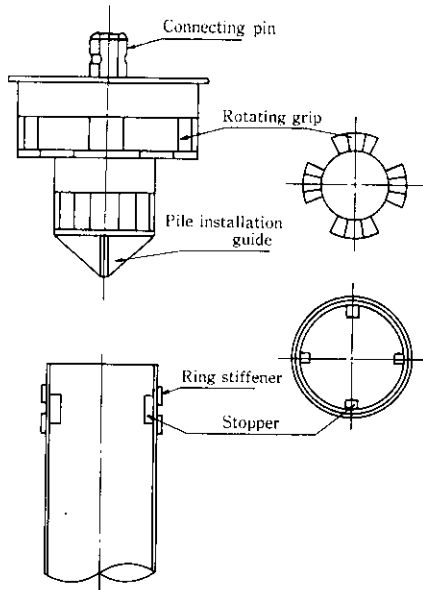


Fig. 3 Pile installation and rotation jigs

的としたセメントミルク等の根固め材を注入するが、本工法ではその必要がないために、根固め材の品質管理が不要であることに加え、現場のクリーン度も向上している。

本工法で行う施工管理項目には、材料管理、施工機械器具類の点検・整備、杭の建込み、回転・貫入・根入れ管理、精度管理、安全管理などがあるが、このうち特に重要な施工管理項目は根入れ管理であるといえる。本工法では、Fig. 4 に示した Doctor システムにより杭の貫入長、アースオーガの負荷電流値および時間を測定し、内蔵のコンピュータにより貫入深度ごとの $\sqrt{Tt}$ 値 (回転トルク T と単位貫入長当りの貫入時間 t の相乗平均) を算出し、その値や増加傾向等により支持層の深度や支持層への杭の根入れ長の確認を行っている。この $\sqrt{Tt}$ 値は既報^{1,4)} で述べたように、杭先端地盤の N 値との間に相関性があるため、例えば N 値が急増するような地盤では $\sqrt{Tt}$ 値も同様の傾向を示すことがわかっている。

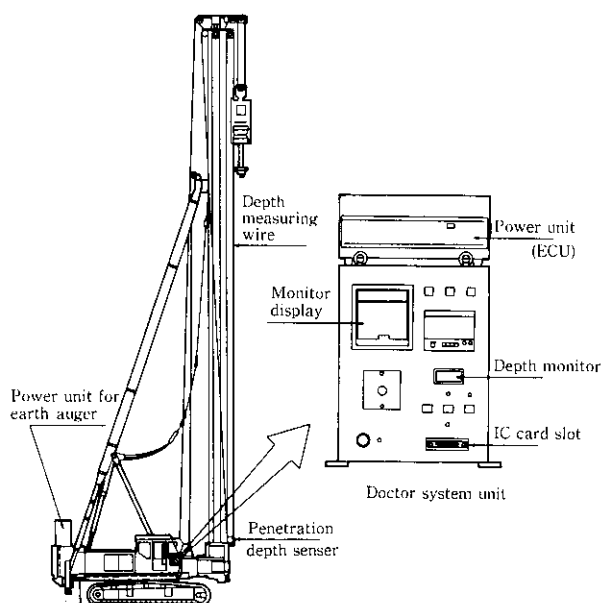


Fig. 4 Penetration control system (Doctor system)

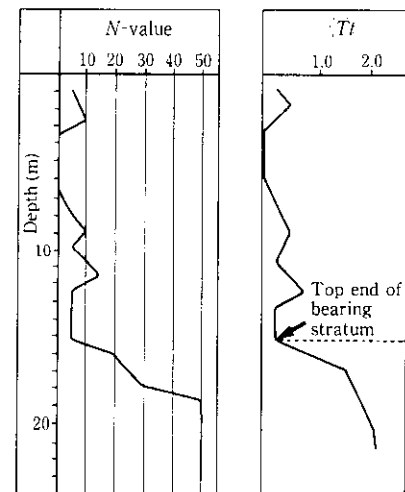


Fig. 5 Typical example of penetration control data

なお、 $\sqrt{Tt}$ 値を出力する際に、貫入長に対しチャート紙の送り速度を対応できるようにしてあるため、各深度におけるデータが明確に判断でき、土質柱状図との対比も容易にできるという特長を有している。Fig. 5 に Doctor システムのデータの例を土質柱状図と対比して示した。

2.2.2 補助工法の適用

本工法では表層あるいは中間層に障害物や硬い地盤がある場合に、杭径より小さな径のスクリーを用いてプレオーガや中掘りといった補助工法を採用している。補助工法の有無にかかわらず、ドリル杭工法における鉛直支持力算定式は(1)式を適用している。

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

ここで、 R_u : 極限支持力 (tf)

α : 設計杭先端 (先端支持力評価位置) 支持力係数

$L_b/d \geq 3$ のとき $\alpha = 25$

$L_b/d < 3$ のとき $\alpha = \frac{25}{3} \left(\frac{L_b}{d} \right)$

L_b : 支持層への根入れ長 (m)

d : 杭径 (m)

$\bar{N}$: 杭本体の下端より下方へ $1d$ 、上方に $4d$ 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 (m²) (鋼管本体の閉塞断面積とする)

$\bar{N}_s$: 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/m²)。ただし、 $\bar{q}_u \leq 10$ (tf/m²) とする。

L_c : 設計杭長の中で粘性土地盤に接する長さ (m)

ϕ : 杭周長 (m)

なお、設計杭長 (周面摩擦係数評価範囲) は以下のように定義する。

$L_b/d \geq 3$ のとき $L_s = 3d$

$L_b/d < 3$ のとき $L_s = L_b$

ここで、 L_s : 杭が地盤と接している長さ (m)

これらの式および定めた数値が土質、地層状況いかにかわらず、定められた施工法によって施工すれば上式が確保できることを実証しておく必要がある。

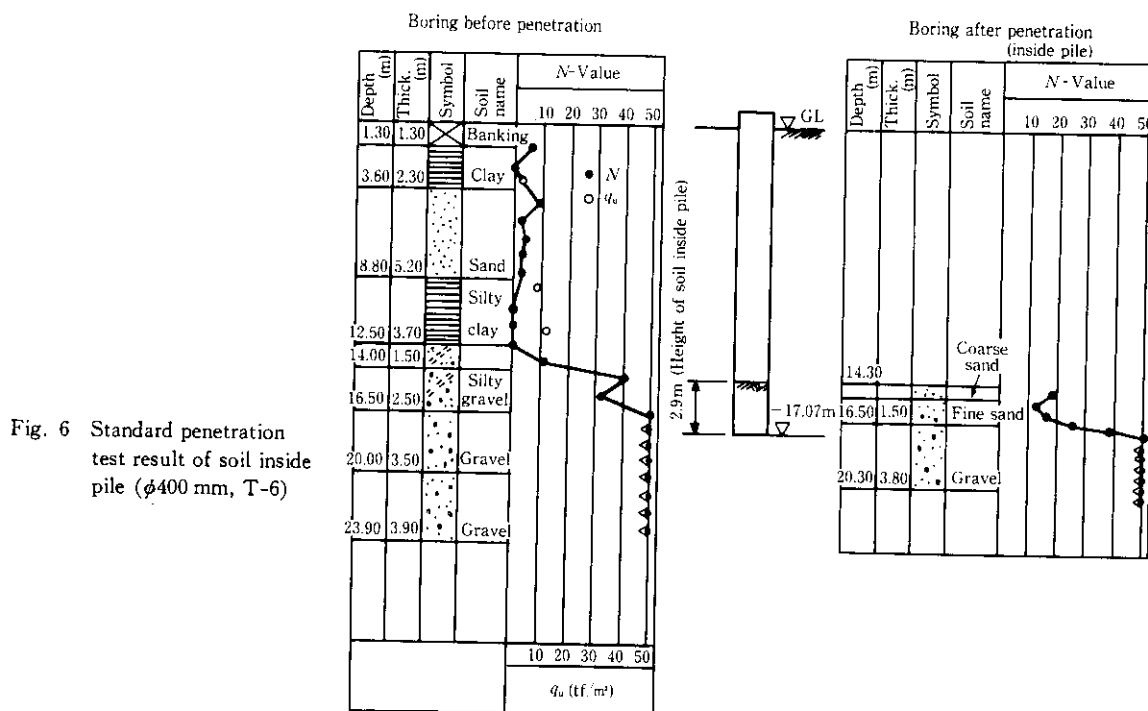


Table 3 Vertical loading test results

Test No.	Pile dia (mm)	Penetration depth (m)	Bearing stratum	$\frac{L_b}{d}$	Bearing capacity (tf)	
					Measured	Designed
T-1	318.5	22.0	sand	3.5	213.0	152.0
T-2	318.5	10.5	sand	12.6	230.0	175.0
T-3	508.0	18.0	sand	5.7	275.0	178.0
T-4	508.0	40.0	sand	5.9	556.0	400.0
T-5	508.0	27.8	gravel	4.5	425.0	322.0
T-6	400.0	17.1	gravel	1.7	265.0	227.0
T-7	318.5	23.0	gravel	8.2	250.0	188.0

L_b : Setting depth into bearing stratum

d : Pile diameter

ドリル杭工法の貫入・支持力機構については既報²⁾において詳述した。支持層への根入れを原則として杭径の3倍以上とすることで所要の先端閉塞が達成されと考えられる。このことは、支持地盤より上層で補助工法を用いた場合やその上層が軟弱地盤である時に効力を発揮している。表層および中間層において、杭径より小径のスクリーを用いて土を攪拌した状態でドリル杭を回転貫入した時に設計杭先端支持力を十分満足した事例を紹介する。Table 3の鉛直載荷試験の結果を基に説明する。まず先端支持力について、支持層直上の中間層が軟弱層で、支持層への根入れが $3d$ 以下でも、閉塞するかどうかという観点から実験した例として、Fig. 6のT-6杭がある。支持層への根入れが杭径の1.7倍であるが、他の杭と同様 $25\bar{N}_A$ 以上の先端支持力が発現され、杭の先端が支持層の砂礫で閉塞されていることが確認された。さらに、中間層部で中掘りによる補助工法を採用したT-4杭でも同様に $25\bar{N}_A$ 以上の値が得られている。これらのことから支持層上層の地層状況が軟弱な粘性土層や、オーガスクリーで小範囲乱された状態であっても、しっかりした支持層へ確実な根入れができれば所定の先端支持力が確保できることがわかった。なお、T-4杭で採用した中掘りは、外径400mmのスクリーを用い、杭下端上方2mの位置まで施工され

ている。また、周面摩擦力についても、T-4杭において砂質土で $N/5$ 、粘性土で $q_u/2$ 以上の周面摩擦力度が得られていることなどが確かめられている²⁾。

3 貫入特性の検証

3.1 貫入特性

ドリル杭の先端内外周面に取りつけたスパイラルリブとバイトには、貫入性向上の機能と支持力発現の機能を有することがわかっている。貫入面ではバイトが原地盤に噛み込み、外周面のスパイラルリブによって先端部付近の土が上方へ供給されるために貫入性が向上する。外周面のスパイラルリブによる貫入性向上については、一般的なフリクションカッターの作用と考えられがちであるが、実際にはネジ効果として機能している。逆に内周面のスパイラルリブは管内土の移動の抵抗となり、貫入性低下の要因となる。支持力面では外周面のスパイラルリブによって供給された土が杭外壁と周辺土の隙間に充填され、締め固められる。内周面スパイラルリブにより移動を制約された管内土は貫入に伴い締め固められ、先端閉塞が助長される機構になっている。

以上の特性は模型実験や鉛直載荷試験などによってほぼ確認されている。特に杭外周土の乱れと締め固め効果に関しては、施工時の抜き差し動作などの影響によっても低下するという懸念があり、引抜抵抗力あるいは水平抵抗力に対する影響と、設計値を満足するその程度を確認する目的で以下に述べる載荷試験を行って検証した。

3.2 載荷試験による検証

3.2.1 引抜試験結果

引抜試験は、Fig. 7に示すように外径318.5mmの杭で2本実施した。引抜試験方法は、両試験とも土質工学会の鉛直載荷試験方法³⁾に準拠し、多サイクルA載荷法に基づいて実施した。

試験杭は両杭共に補助工法を併用せず砂礫に根入れした杭で、施工時間はTP-1杭で80分、TP-2杭で33分、回転貫入後の放置期

Fig. 7 Soil characteristics for pull-out test

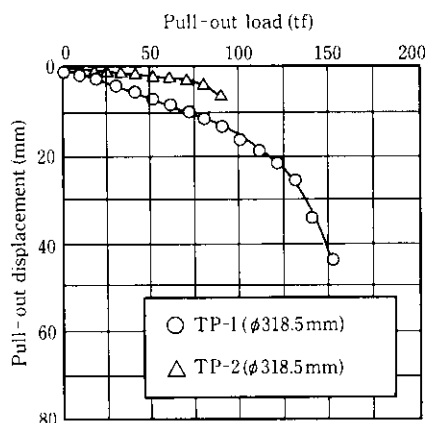
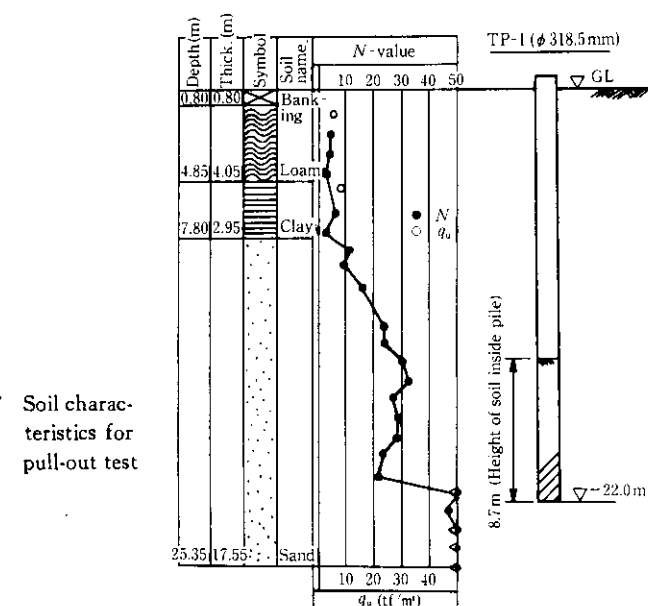


Fig. 8 Pull-out load vs displacement curve at pile head

Table 4 Pull-out test results

Test No.	Pile dia (mm)	Penetration depth (m)	Pull-out capacity (tf)	
			Measured	Designed
T-1	318.5	22.0	147.7	94.3
T-2	318.5	10.5	88.5	52.6

間はそれぞれ24日と16日であった。Fig. 8が引抜試験を行った杭の杭頭荷重と杭頭引抜量の関係で、鉛直支持力算定式((1)式)の周面摩擦力の項で求めた計算値と比較したのがTable 4である。引抜試験結果からは杭の自重と管内土重量を差し引いて比較を行った。比較の結果、両杭ともに実測値は計算値の約1.6倍の値となった。

3.2.2 水平載荷試験結果

水平載荷試験を行った杭は外径が508mm、板厚9mmの杭で、試験杭位置における地盤調査結果および杭の根入れ状況をFig. 9に示した。

試験杭は、補助工法を併用せずに約20mの砂層を貫通した杭で、

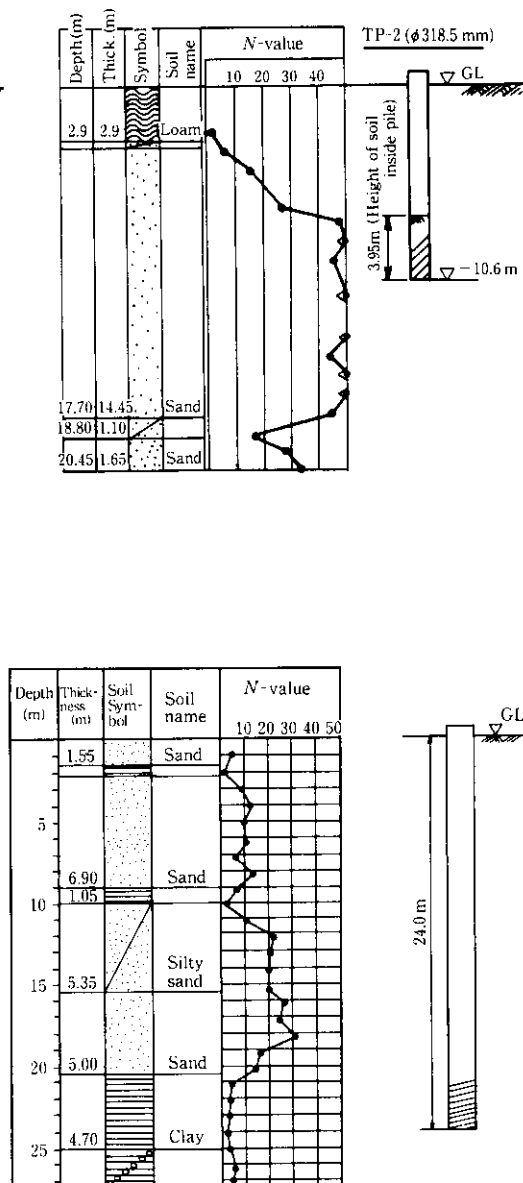


Fig. 9 Soil characteristics for horizontal loading test (φ508mm)

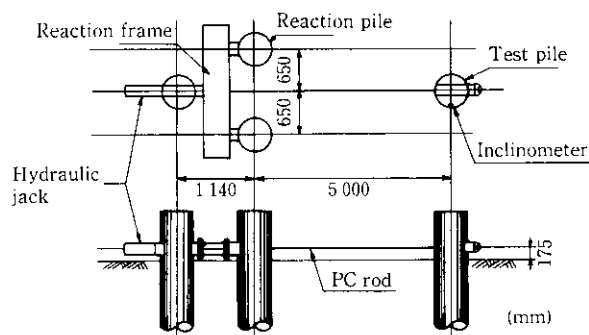


Fig. 10 Horizontal loading test apparatus

施工時間は35分、放置期間は26日であった。

なお、載荷方法は、土質工学会の水平載荷試験方法⁶⁾に準拠し、Fig. 10にあるようにセンターホールジャッキ(100tf、ストローク200mm)を用いて一方向載荷(引張)を行った。また、計測は試

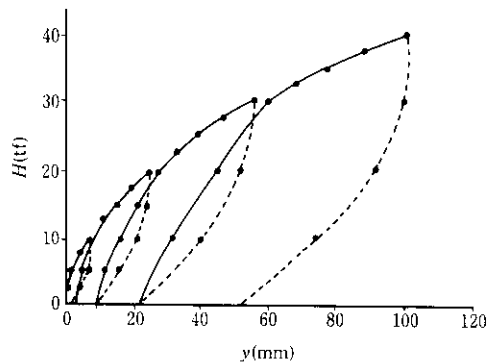
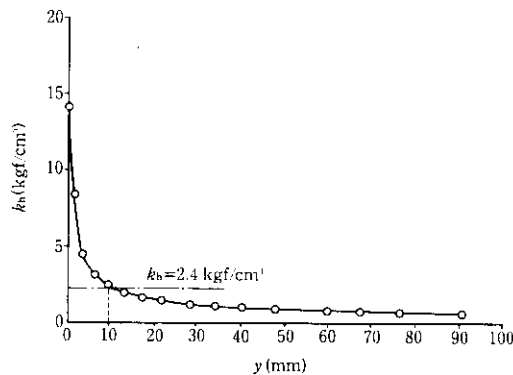
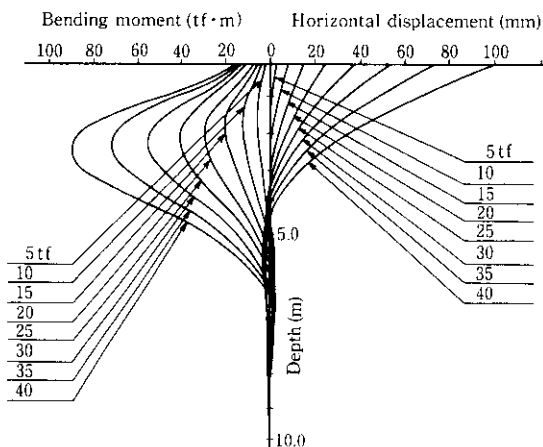
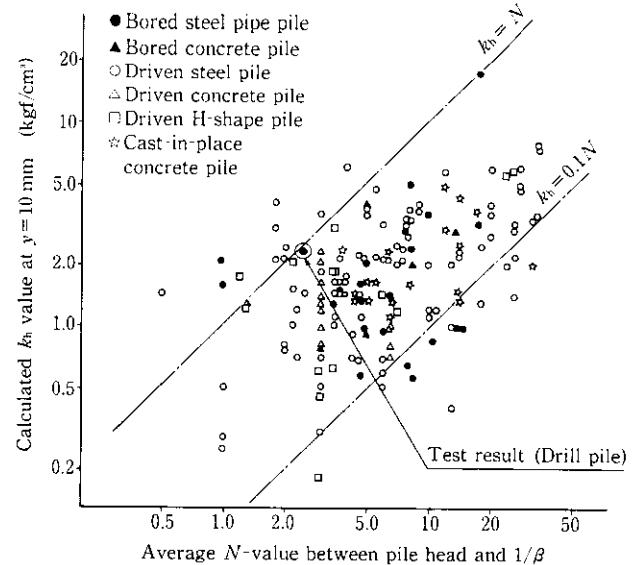
Fig. 11 Horizontal load H vs displacement y curveFig. 12 Coefficient of horizontal subgrade reaction k_h vs pile head displacement y 

Fig. 13 Distribution of horizontal displacement and bending moment along pile shaft

験杭杭頭（地表面上方 17.5 cm の位置）荷重および変位置、反力杭杭頭の変位置、時間に加え、あらかじめ杭内に取りつけておいた角パイプ（75 mm □）を利用して各処々荷重、0 荷重段階に杭深度方向 50 cm ごとに傾斜計を用いて杭体の傾斜角を測定した。

杭頭荷重 H —杭頭変位置 y の履歴曲線を Fig. 11 に示したが、この結果を基に、Chang の式によって逆算した水平地盤反力係数 k_h と杭頭の水平変位置 y との関係を Fig. 12 に示した。この図を見ると、 $y=1.0$ cm の時の k_h の値は、 2.4 kgf/cm^3 となり、 N 値より推定した値（ $N=4.7$, $k_h=1.4 \text{ kgf/cm}^3$ ）と比較して大きな値が得られている。Fig. 13 は傾斜計により測定した傾斜角から換算

Fig. 14 Relationship between N -value and k_h

した杭の水平変位置と曲げモーメントの深度分布であるが、約 7 m 以深の地層で杭が固定されていることがわかる。また傾斜角から求めた杭頭部の水平変位置は変位計を用いて計測した値とほぼ等しかった。

3.2.3 結果の考察

鉛直荷重試験結果より、杭外周の周面摩擦力はスパイラルリブだけでなく、一般部においても(1)式に示した値が得られることが確認されている。杭に引拔力が作用した場合には、外周土の破壊機構が異なるため、鉛直支持力における周面摩擦力とは多少異なることが予想されるが、引抜試験の結果より、施工途中の杭の抜き差し作業による地盤の乱れにもかかわらず、通常の鉛直支持力試験から得られた周面摩擦力と同等以上の抵抗力を有することが確認された。これらの実験結果から判断して、設計上は日本建築センターの「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」⁷⁾に規定された打込杭の引抜荷重載荷時の土質定数（砂質土、 $N/5$ ；粘性土、 $q_u/4$ ）を用いることとした。

次に外側スパイラルリブにより、地表面付近で施工途中に隙間が生じることがあることや、外周土の乱れが水平抵抗力低下の要因として懸念された。この点を解消するために水平荷重試験を行ったものである。試験結果を見ると、まず、Fig. 13 より荷重初期段階において水平地盤反力が大きくなっており、杭周辺土の抵抗が確実に発揮されていることがわかる。つまり、模型試験や他の荷重試験などで確認された杭周辺土の締め固め効果をさらに裏付けるデータといえる。Fig. 14 は $1/\beta$ 間の平均 N 値と杭頭変位置 $y=1.0$ cm 時の逆算 k_h の値の関係を他工法の結果⁹⁾と比較して示したものであるが、打込杭や場所打ちコンクリート杭など比較的地盤反力が大きいと考えられる工法に比べても同等以上の評価ができる。したがって、水平抵抗力についても打込鋼管杭で使用されている設計方法を適用することとした。

4 施工管理手法の改良

ドリル杭工法では前述のように、回転貫入時に得られる抵抗値 $\sqrt{Ti}$ 値を杭先端到達地盤における N 値や土質状況と対比しながら支持層への根入れ管理を行っている。

ここでは、本工法の施工管理データである $\sqrt{Ti}$ 値に含まれた諸

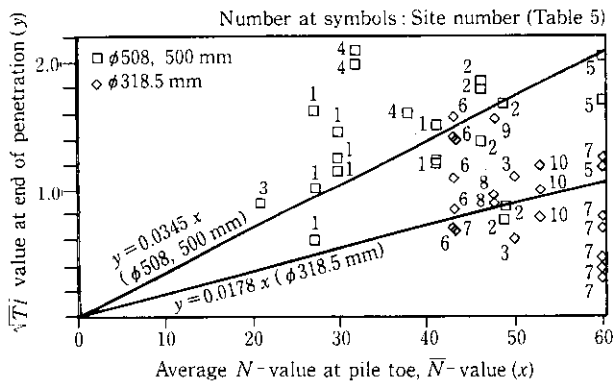


Fig. 15 Relationship between $\sqrt{Ti}$ value at end of penetration and average N -value at pile toe

Table 5 Drill piles for analysing the relationship between $\sqrt{Ti}$ and N -value

Site	Pile dia (mm)	Length (m)	Bearing stratum
1	508	13	Fine sand
2	508	9.5	Fine sand
3	508 and 318.5	18 and 44	Fine sand
4	508	26 and 27.8	Gravel
5	500 and 318.5	22 and 23	Gravel
6	318.5	9.5	Gravel
7	318.5	15 and 15.5	Silty sand
8	318.5	22	Fine sand
9	318.5	22	Fine sand
10	318.5	10.5	Fine sand

要因の内、最も影響度が高いと思われる杭径と貫入過程における抵抗の関係に着目して解析を行い、 $\bar{N}$ 値との相関性を評価した。

Fig. 15 は、Table 5 に示した 10 件の現場における杭の貫入時の $\sqrt{Ti}$ 値を $\bar{N}$ 値と対比させたものである。これらの比較では、 $\sqrt{Ti}$ 値そのものは回転貫入抵抗を表す指標であり、 $\bar{N}$ 値等の支持力特性値と直接比較するのは無理があるようである。双方の相関性が低いのは、 $\sqrt{Ti}$ 値に管外周の周面摩擦力と管内に取り込まれた土と管内壁との摩擦力が含まれているため、支持層における $\sqrt{Ti}$ 値からその影響分を取り除くことで $\bar{N}$ 値等との相関性が高まると考えられる。ここでは、Fig. 16 に示したように支持層と中間層における貫入抵抗とに分けて解析を行ってみた。なお、ここでドリル杭の支持層への根入れが杭径の 3 倍以上であることから、杭先端上方杭径の 3 倍の位置を支持層天端と設定した。

貫入に要するエネルギーはその区間の貫入抵抗 $\sqrt{Ti}$ 値を積分することにより表現されと考えられるので、 $\bar{N}$ 値に対する支持層における貫入エネルギーの比率と中間層での貫入エネルギーとの関係をそれぞれ $\sqrt{Ti}$ 値を積分して Fig. 17 に示した。また、支持層内における平均 $\sqrt{Ti}$ 値と貫入完了時（貫入完了直前 30～40 cm の区間）の $\sqrt{Ti}$ 値の関係を Fig. 18 に整理した。図中には杭径別に最小自乗法で求めた相関式も示した。この関係を定式化すると以下の (2) および (3) 式ようになる。

$$\frac{\int_{h_1}^{h_2} \sqrt{Ti} dh}{\bar{N}} = \beta \cdot \int_0^{h_1} \sqrt{Ti} dh + \gamma \quad \text{.....(2)}$$

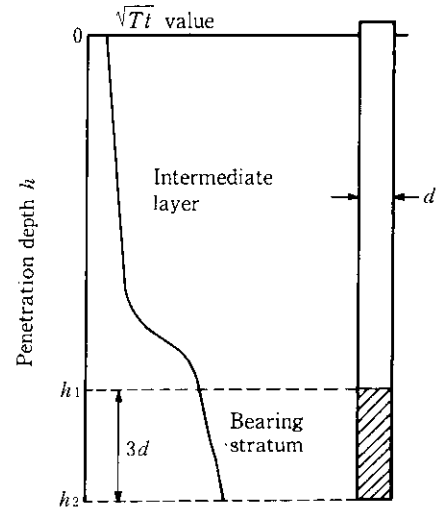


Fig. 16 Classification of bearing stratum and intermediate layer

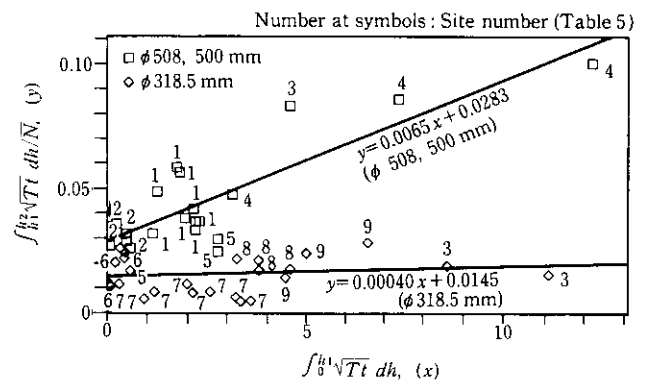


Fig. 17 Relationship between penetration energy at bearing stratum $\left(\int_{h_1}^{h_2} \sqrt{Ti} dh / \bar{N}\right)$ and at intermediate layer $\left(\int_0^{h_1} \sqrt{Ti} dh\right)$

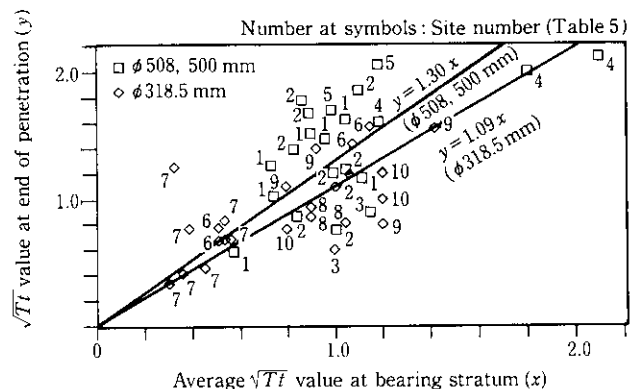


Fig. 18 Relationship between average $\sqrt{Ti}$ at bearing stratum and $\sqrt{Ti}$ at end of penetration

$$\sqrt{Ti} \text{ (貫入完了時)} = \frac{\delta}{3d} \int_{h_1}^{h_2} \sqrt{Ti} dh \quad \text{.....(3)}$$

ここで、 T : 回転トルク (tf・m)

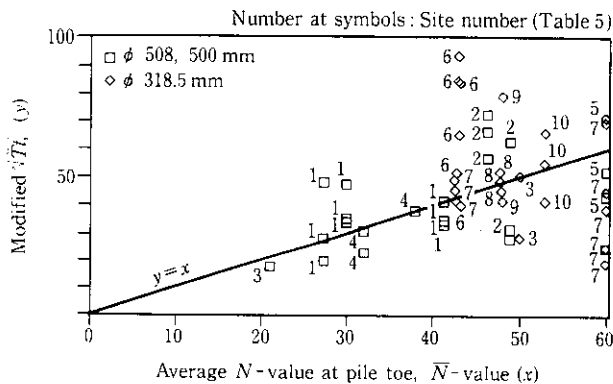


Fig. 19 Relationship between modified $\sqrt{Tl}$ and average N -value at pile toe

t : 単位長さ当り貫入時間 (h/m)

h_1, h_2 : 杭先端深度 (m) (Fig. 8 による)

β, γ, δ : 杭径による定数

Fig. 17 では、杭径が大きくなると、中間層における管内および管外の周面摩擦抵抗の影響が大きくなるため、支持層での貫入エネルギーが大きくなっていることがわかる。また、Fig. 18 は支持層における貫入抵抗の上昇度を表すものと考えられるが、杭径が大きくなると上昇度も多少大きくなる傾向にある。つまり、杭径が大きいほど管内土の閉塞が遅れるため、貫入長が増すにつれ上昇度が大きくなるものと考えられる。(2) および (3) 式の関係から (4) 式が誘導され、中間層における貫入抵抗および杭径の要因を含んだ $\sqrt{Tl}$ 値と実際の $\bar{N}$ 値を比較したのが Fig. 19 である。

$$\frac{3d \sqrt{Tl} \text{ (貫入完了時)}}{\delta \left(\beta \int_0^{h_1} \sqrt{Tl} dh + \gamma \right)} = \bar{N} \quad (4)$$

なお、図中で No. 6 の現場の土質は砂礫地盤で 200 mm 以上の径の礫も含まれた地盤であることから、貫入完了時において $\sqrt{Tl}$ 値が急増したものと思われる。また、No. 7 の現場は、支持層の土質がシルト混り砂であり、シルトの影響によって貫入抵抗が低下したものであると推測される。

Fig. 19 より、No. 6 および 7 のデータを除いて Fig. 15 と比較すると、データの相関性が向上しており、貫入完了時の貫入抵抗には貫入途中時の抵抗が影響していることがわかる。また、土質条件等の影響によって相関性が低くなる場合にも、比較的容易にその原因を追求することができる。

以上の解析は貫入抵抗である $\sqrt{Tl}$ 値より、先端支持力算出の指標である $\bar{N}$ 値を推定する手段を見出すために行ったものであるが、

層の分類をさらに細かくしていくとともに、土質や施工機械の能力などの要因も含めた解析を行い、精度を向上させる必要がある。

5 結 語

本報は、施工方法や施工管理技術の向上、あるいは施工方法が及ぼす貫入機構への影響の確認を目的とした研究の成果を述べたものである。

得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 施工方法や治具類の確立により、100 m/台・日以上施工能力が可能となり、施工条件が良い場合には、150 m/台・日以上施工能力をあげることができた。
- (2) 表層と中間層に障害物や硬い地盤がある場合、プレオーガや中掘りといった補助工法を採用するが、杭径より小さなスクリーを用い、支持層に確実に根入れすることで、通常の施工方法を用いた杭と同様の周面摩擦力、先端支持力を発揮することができる。
- (3) 鉛直、引抜および水平の各載荷試験結果より、ドリル杭先端外周面に取りつけたスパイラルリブには杭外周土の乱れを最小限にし、しかも締め固める効果があるという貫入機構が確認され、施工時に懸念された問題も解消された。
- (4) 施工管理に用いている Doctor システムのデータを解析した結果、貫入完了時の回転貫入抵抗には、貫入途中の杭内外周面と土との摩擦抵抗の要因が含まれているため、その影響力を取り除くことで $\bar{N}$ 値との相関性を高めることができる。

最近、市街地での建設工事においては規制値以上の騒音・振動等の対策や建設廃材・廃土等に対する万全の処理体制が求められている。そういった情勢において、杭工法でも低公害化が進められてきている。ドリル杭工法は開端鋼管杭の特長を生かし、従来の埋込み杭にない無排土施工を可能にした工法であり、施工環境・周辺環境が向上するものと考えられる。支持力発現のためのセメントミルク等の材料を使用しないことも低公害化に寄与している。また、根入れ管理がリアルタイムにしかもビジュアルに確認できる手法が使え、使用者はもちろんのこと、施工者および施工管理者にとっても大きなメリットである。

今後はさらに、施工方法の改善とともに施工用治具類を改良(回転治具、補助工法用治具等)し、工期短縮、経済性向上をめざしていく予定である。また、建築構造物の大型化、都市内土木構造物の増加、狭あい地・高さ制限のある場所での適用等を考慮し、杭径の拡大、施工機械の小型化といったテーマについても開発を進めて、一日も早く実用化をはかりたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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, 65-72
- 3) 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, (1989), 1297-1298
- 4) 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
- 5) 土質学会編: 「クイの鉛直載荷試験基準・同解説」, (1988)
- 6) 土質学会編: 「杭の水平載荷試験方法・同解説」, (1983)
- 7) 日本建築センター編: 「地震力に対する建築物の基礎の設計指針」, (1984), 18-19
- 8) 藤 文詩, 中島孝裕: 「鋼管杭の水平載荷試験」, 基礎工, 15 (1987) 8, 68-73