場所打ちモルタル杭の摩擦杭としての特性

Properties of cast in place mortar pile as friction pile

1. はじめに

最近,摩擦杭の有用性を再評価する動きがある。この動きは地味だが根強い。

杭基礎には多くの場合支持杭が使われてきた。その理由 は、「支持杭は摩擦杭と比較すると信頼性が高い」と考え られてきたからである。また、支持層が深くない場合は、 杭を長くして支持杭としたほうが大きな支持力を得ること ができ、結局経済的になってきたからである。 条件の悪い所へ追い込まれていく傾向が強く,支持層が非 常に深くなり,支持杭にかわって摩擦杭を採用せざるを得 ない場合も多くなっている。

「支持杭は摩擦杭と比較すると信頼性が高い」というこ とは、換言すれば先端支持力は周面摩擦支持力と比較する と信頼性が高いということである。周面摩擦支持力は先端 支持力と比較すると長期的安定性に欠け、設計値程度の大 きさの荷重に対してもクリープ変形が進行し、杭が次第に 沈下してしまうのではないかと考えられてきた。しかし、



図-1 軟弱な沖積層の土性図,試験杭打設深度

ところが,最近,支持杭は摩擦杭と比較しても必ずしも 信頼性が高く,経済的であるとはいえないような例が多く なってきた。地盤沈下地域に建設した鉄筋コンクリート造 小学校の不同沈下^{1),2)},周辺地盤の沈下による建物外周設 備配管の損傷,同じく周辺地盤の沈下によって起こる杭頭 の相対的な抜上がりなどの例が報告されている。これらは いずれも支持杭を使った例であるが,なかには同じ敷地に 摩擦杭を使って建設した建物と比較すると被害が大きかっ た例もあるようだ。地価の高騰などのために建設地が地盤 このような考えを立証し得るような長期実測例はほとんど ない。

多くの載荷試験結果によれば,設計荷重のほとんどは周 面摩擦支持力が負担し,したがって,初期沈下性状もほと んど周面摩擦支持力の性状によって決まることが明らかに されている。もちろん,極限荷重に近づくに従って,先端 支持力が発揮されてくるのではあるが,通常,設計荷重は周 面摩擦支持力が負担していると考えられ,このような意味 においても摩擦杭の有用性を評価しなければならないと考 えられるようになってきた。最近は,建設公害が法律で規 制されており,打込み杭にかわって場所打ち杭が多く使わ

^{*}清水建設锅研究所 土質研究部 主任研究員 **北海道開発局札幌開発建設部 札幌新道建設事務所工事課第一建設係長



図-3 $q_p \sim S$ の関係, $q_f \sim S$ の関係 (RCD-1)

れるようになっているが³⁰, このようなことは場所打ち杭 の場合一層顕著になる。なかには,掘削中に先端地盤を緩 めてしまい,それにスライムの影響なども加わって先端支 持力がほとんど期待できなくなり,文字どおりすべての荷 重を周面摩擦支持力だけで負担している場合も少なくない。 例えば,次のような報告⁴⁰がある。図一1に示すような地 盤に,径1500 mm,実長33.2 mのリバース杭を打設し, 載荷試験をしたところ図一2に示すような沈下曲線を得た が,図一3に示すように沈下の初期において先端支持力が ほとんど発揮されておらず,沈下量が500 mm 近くになっ てやっと400 tf/m²になったにすぎない。中間層は軟弱な 沖積層であるが,先端はN値50以上の細砂層となっており, 地盤に問題はない。周面摩擦支持力は図一4⁵⁰に逆三角形 の記号で示すように,ほかの事例の場合と同様である。



図-4 大口径場所打ち杭の qfmax ~ N 値の関係

筆者らは場所打ちモルタル杭に関する実験や施工を経験 し、それらに関する資料を数多く蓄積してきた。そこで場 所打ちモルタル杭の摩擦杭としての特性を述べることによ って、いままで述べてきたような、摩擦杭の有用性評価の 一助としたい。

なお、ここでいう場所打ちモルタル杭は所定の深度まで オーガー掘削し、オーガー先端の吐出孔からモルタルを圧 入しながらオーガーを引き上げ、最後に鉄筋や形鋼を挿入 して作る小口径場所打ちモルタル杭、すなわちPIP杭であ る(以下、PIP杭という)。 PIP杭は杭径が 300~700 mm と小さく、簡便な工法で、摩擦杭として使われることも多 い。

2. 摩擦杭と支持杭

摩擦杭と支持杭の相違は相対的なものである。摩擦杭は 先端がいわゆる支持層に到達しておらず、荷重の大部分を 周面摩擦支持力で負担している杭をいい、支持杭は先端が 軟弱な層を貫いて強固な支持層に到達しており、荷重の大 部分を先端支持力で負担している杭をいう。両者の間に絶 対的な境界はないが、先端の地層がN値30~50以上の砂質 土の場合やN値20以上の粘性土の場合を支持杭として区別 することが多い。

例えば、図-5に示すような地盤において先端がGL-13.5mにある杭 (PIP-1)⁶⁾ は摩擦杭で、先端がGL-16.0 mにある杭 (PIP-2)⁶⁾ は支持杭である。両者は杭径は同 じで、杭長が2.5m 違うだけであるが、図-6に示すよ うに極限支持力は PIP-1 が 150 tf, PIP-2 が 565 tf となり 3.8倍の差がある。PIP-1 は荷重が 150 tf に達すると沈下 量が 15 mm に な り、荷重はほぼ 150 tf を保ち沈下量は急 増する。図-7に示すように先端支持力に比較して周面摩 擦支持力のほうが総じて大きい。過去の資料によれば、摩 擦杭は沈下量が 10~20 mm で極限荷重と な り、以後は沈 下量が増大してもほぼその極限荷重を保持することが多い。 PIP 杭は杭径が比較的小さいので、周面摩擦支持力の特性 が杭の挙動に顕著に現れる。PIP-2 は荷重が 250 tf に達す ると沈下量が 11 mm と な る。荷重の沈下量に対する増加



図-5 関東ローム層の土性図



図-6 Q~Sの関係 (PIP-1,2)



割合は減少する傾向を示すが、荷重は 565 tf で最大となり、 これ以上沈下が進むと幾分か減少してしまう。図一8 に示 すように周面摩擦支持力と比較すると先端支持力のほうが 総じて大きく、特に 250 tf 以後にその傾向が著しい。PIP

February, 1982



図-8 試験杭打設深度, N~zの関係 (PIP-2)

杭は先端の施工性が良いため,図一3に示すリバース杭の ようにスライムなどによって先端支持力が発揮されないこ とはない¹²⁾。

3. 周面摩擦支持力

3.1 粘性土における周面摩擦支持力^{7),8)}

図-5に示すような関東ローム層に、PIP 杭, 泥水を使った場所打ち杭, 打込み PC 杭などを打設し引抜き実験をした。試験杭の寸法はいずれも杭径 350 mm, 杭長 10.5 m (地中長9.0 m) である。PIP 杭の試験杭は図-9に示すように杭頭を引張った杭 (PIP-6), 杭体中にあらかじめ埋設した2 重管を使って 杭先端を引張った杭 (PIP-7) の各々 ー体ずつであり,実杭径は公称径と比較すると20~30 mm 大きくでき上がっている。

試験杭の荷重と浮上量の関係は,図一10に示すとおりで ある。PIP 杭は2体ともほぼ同様な曲線を示し,杭寸法が



同じであれば場所打ち杭といえども支持性状に大きな違い がないことが分かる。PIP-7のほうが浮上量の少ない初期 段階においてわずかに大きな支持力となっているが、これ は杭先端を引張っているためその周囲のせん断強度が比較 的高い砂質粘土が先に抵抗するためであり、最大荷重はい ずれも 108 tf である。最大荷重に達するときの浮上量は、 PIP-6 が 30~40 mm, PIP-7 が 10~20 mm である。

泥水を使った場所打ち杭は、図—10に示すように浮上量 が 20~30 mm に達しても荷重が 34 tf までしか上がらず, 以後浮上量が増大してもほぼこの荷重を保ち続けた。この 杭は杭周に泥壁が数 mm 厚で生じており,この泥壁のせん 断抵抗で最大荷重が決まってしまった⁷⁰。PC 杭は 2 体と も PIP 杭とほぼ同様な曲線 を示す。しかし,PIP 杭と比 較すると初期段階において浮上量が大きく,最大荷重は10 %ほど大きくなる。 PC 杭は杭周が平滑であるた め荷重の初期段階において浮上量が大きく,打込 みによって地盤が締め固められたため最大荷重が 10%ほど大きくなったと推定される"。

PIP 杭の周面摩擦力度と相対変位量の関係は図 -11に示すとおりである。杭周地盤は図-5に示 すように三層に分けることができる。上からロー ム,粘土層ローム,砂質粘土である。これらの地 層は,深礎による掘削などによって詳細な土質試 験が行われており,その試験結果のなかからボー リング試料とブロックサンプル試料による一軸圧 縮強度(q_u)を図-11にハッチで示した。一軸圧縮 強度は両試料の値に大きな差があり,ブロックサ ンプル試料の値はボーリング試料の値と比較する と,1.5~2.5倍になる。この理由は,おもに採取 時の試料の乱れにある^{n_o}。周面摩擦力度の値は相 対変位量 5~20 mm で最大になり,その後しばら くはその値を保ち続ける。その値は小さくてもボ ーリング試料の値の $q_u/2$,大きければブロックサ





80

100

相対変位量 S(mm)

60

80

100

図—14 $q_p \sim S$ の関係, $q_f \sim S$ の関係 (PIP-90)

 q_n S

 $q_f \sim S$

ンプル試料の値の qu/2 に近似する。

500

これらのことから、周面摩擦支持力はボーリング試料の qu/2 とすれば十分安全側になり、最大値に達するときの相 対変位量は 5~20 mm であることが分かる。

3.2 砂質土における周面摩擦支持力^{9),10),11)}

図-5に示すような関東ローム層をGL-6.0mまで掘削 し、粗砂を投入しながら均一になるように締め固め、図--

February, 1982

No. 1282



12に示すようなN値およそ15の人工砂地盤を作った。この 地盤に図-12に示すように杭径 350mm, 杭長 4.5m の PIP 杭を打設し、載荷実験をした。杭のでき上がり状況は図一 15に示すとおりで,実杭径は図-12に示すようにおよそ 380~400mm である。

図-17 砂質土における $q_f \sim S$ の関係

荷重と沈下量の関係は図一13に示すとおりである。荷重 が90tf で沈下量は20mm になり,以後50mm で最大荷 重100tfに達する。沈下量が増大すると荷重がやや低下す る傾向があるが,その後ほぼ95tfを保ち続け,最終沈下 量は 500 mm に達している。

200

杭体軸力は図-12に示すように荷重が80tfまでは,深度が深くなるに従い,ほぼ直線的に減少し,先端ではゼロ に近くなる。しかし,最大荷重の100tf付近になると,こ の関係は次第に変化していき,深度の浅い部分の杭体軸力 の勾配が変わらないのに対してGL-2.0m以深の深い部 分の杭体軸力の勾配がたっていき,その分だけ先端到達軸 力が増加していくことが分かる。

周面摩擦力度ならびに先端荷重度と相対変位量の関係は 図一14に示すとおりである。周面摩擦力度は相対変位量25 mm で最大値 19.5 tf/m² に達する。以後相対変位量が増大 すると減少し始め, およそ 200 mm で 9.5 tf/m² になり, その後はこの値を保ち続ける。先端荷重度は周面摩擦力度 が最大に達し,以後減少を続ける間増加し続け,相対変位 量およそ 250 mm で最大値 485 tf/m² に達する。周面摩擦 力度の最大値をN値で表すと 1.3 Ntf/m² となる。

杭の沈下に伴う砂の移動は,図一15に示すように杭周から 10 cm の間で顕著で,その間の貫入抵抗は例えば杭先端付近では図-16に示すように若干低下する。

図一17は過去の資料から周面摩擦力度と相対変位量の関係をまとめて示したものであるが、それによれば周面摩擦力度の最大値は1例(締まった礫層のため200 tf/m²以上になっている)を除いて8.0~55 tf/m²の間に分布しており、相対変位量が5~20 mmの間で最大値に達し、その後相対変位量が増大してもその最大値は保ち続けることが多いことが分かる。周面摩擦力度とN値の比の最大値は、図







図-19 砂質土における qfmax~N値の関係

-18に示すように0.4~4.0の間に分布しており、かなりば らつきが多い。最大周面摩擦力度とN値の関係は図-19に 示すとおりである。各々の点は広範囲に分布しており、最 大周面摩擦力度をN値との関係で表すことは容易ではない が、最低でも N/3 tf/m² を下回ることはなく、平均的に考 えればおよそ N tf/m² に近似することなどが分かる。

これらのことから,周面摩擦支持力は N/3 tf/m² とすれ ば十分安定側になり,平均的に考えれば N tf/m² となるこ とが分かる。また,最大値に達するときの相対変位量は5 ~20 mm であることが分かる。

4. 摩擦杭としての使用例

4.1 岩見沢バイパス¹³⁾

一般国道12号は,札幌市を起点とし旭川を終点とする延 長138.6 kmの主要幹線である。この国道の交通緩和を目 的として岩見沢バイパスを計画した。路線は北海道縦貫自 動車道との接続ならびに土質条件を考慮して,市街の南側 をう回する位置に決定した。バイパス全線の約6割が軟弱 地盤であるため,軟弱地盤処理ならびに施工中と供用開始 後の振動発生防止などを目的として,図一20に示す市街化 区域およそ1190mの区間を PIP 杭によるパイル・スラブ 工法とした。

この区間は沖積低地から台地に続く部分で、地表部の軟弱な沖積粘土層は SP 2000 m 地点では 10 m 以上と厚いが、 SP 3 500 m 地点では 0 m と徐々に層厚を減じている。この 軟弱層は主に粘土であるが、ところどころ写真-1 に示す ようなピート層が介在している。図-22に SP 2 260 m 地点 と SP 2 800 m 地点の地盤調査結果を示す。

パイル・スラブ工法の概要は図ー21に示すとおりである。 一般にこの工法では路盤などの荷重や交通荷重はコンクリ ート床版を経て PIP 杭に伝達されることになり,軟弱層の すべり破壊や圧密沈下を防止すると共に,軟弱地盤の低盛 土道路における交通振動を軽減することができる。









図―21 パイルスラブ工法の概要







写真-2 掘り出した PIP 杭の先端部



写真一3 岩見沢バイパス美園付近

時の先端支持力は全支持力の10%ほどにすぎないことが分かっている。設計支持力は原則として極限支持力に対する 安全率を1.5として求めた。図一24などによれば、水平抵抗はいわゆる降伏荷重はB杭が8.0 tf, C杭が4.0 tf であり、載荷点の変位量(1 cm のとき)から求めた横方向地盤 係数はB杭が1.8 kgf/cm³, C杭が1.2 kgf/cm³である。

昭和56年8月に同現場において杭を引き抜き,杭体の施 工状況などを調査したが,写真-2に示すようにオーガー の歯型が明りょうな先端部が掘り出され,スライムの形跡 のないことが確認できた。岩見沢バイパスは供用開始後6 年以上になるが,写真-3に示すようにパイル・スラブエ 法部分は障害になるような不同沈下もなく,交通振動の軽 減効果も発揮されており,順調である。

No.	施工年月		上部構造の 種類	地	盤	杭	」 の	仕	様
		場所		上部層	支 持 層	径 (mm)	長 さ (m)	本 数 (本)	設計支持力 (tf/本)
1	52. 5	東 京 都	事務所	細砂 N=20	細 砂 N=25	$\binom{600}{700}$	10.0	$\frac{32}{26}$	$54 \\ 68$
2	53. 1	埼玉県	共同住宅	粘 土 N>10	細 砂 N=25	350	11.5	67	20
3	53. 6	北海道	下水処理場	中砂 N=10	中 砂 N=20	$\binom{400}{600}$	15.0 $16.5 \sim 19.5$	$\binom{231}{224}$	
4	53.8	北海道	野球場	シルト	火山灰 N=30	400	26.5	438	28
5	55. 8	北海道	共同住宅	火山灰 N=20	細 砂 N=35	400	9.0	197	30
6	55.10	北海道	小学校	中 砂 N=10	シルト N=20	450	19.0	246	50
7	55. 6	北海道	道路	粘 土 N<10	粘 土 N=20	400	12.5~14.5	283	不 詳
8	55. 7	北海道	道路	火山灰 N=10	火山灰 N=15	500	9.0	469	不詳
9	55.9	千葉県	クレーン	細 砂 N=10	砂 N=25	$\binom{400}{450}$	10.6	76	不 詳
10	56. 1	広島県	橋梁	細 砂 N=15	細砂 N=30	500	11.5	151	不 詳

表一1 摩擦杭としての使用例

4.2 その他の使用例

表一1は最近数年間における PIP 杭の摩擦杭としての使用例をまとめたものである。

表一1によれば、施工場所は広島県から北海道に及んで おり、上部構造は事務所、共同住宅、下水処理場、野球 場、小学校、道路、クレーン、橋梁と様々であり、先端地 盤(表中では支持層とした)はN値20前後の砂質土が多く、 杭径は \u0 mm から \u0700 mm, 杭長は 9 m から 26 m, 設計支持力は 20 tf/本から 60 tf/本に及んでいる。

5. おわりに

以上,場所打ちモルタル杭は摩擦杭として設計,施工さ れた例も多く,これらの例が成功を収めて今日に至ってい ることを報告し,摩擦杭としての特性,周面摩擦支持力の 値などを明らかにした。

摩擦杭は、①よりどころとする周面摩擦支持力の長期安 定性に欠ける,②地震時に液状化するような地盤では支持 力の大部分を失う恐れがある、③地盤沈下地域ではその沈 下と一緒に杭も沈下してしまう恐れがある, ④図-6に示 すように最大荷重に達すると沈下が急増する,などの欠点 があり、支持杭と比較すると信頼性が格段に劣ると考えら れてきた。しかし、摩擦杭についての研究が進むにつれて, 信頼性の格差が相対的なものであり、注意して使えば十分 有用性のある杭であることが明らかになりつつある。例え ば、①については今後の長期測定結果を待たなければなら ないが、多くの場所打ち杭はあるいは図-3の例のように 支持杭といえども本当は摩擦杭と全く同様になっているの かも知れず、それにもかかわらず障害例の報告がほとんど ないのは, 摩擦杭に信頼性がある証拠なのかもしれない。 ②については摩擦杭の適用範囲を明確にし、あるいは地下 室を設けることなどで対応できる。③についてはむしろ摩 擦杭のほうが良いと考えられる場合も多い。上部構造の形 状に注意し、基礎の剛性を高くし、不同沈下を防止するな どの対策を考え、積極的に摩擦杭を活用したい。④につい

ては周面摩擦支持力に対する安全率を高くし,沈下量の検 討をすることなどで対応できる。

今後の課題として,①摩擦杭の長期にわたる安定性に関 して調査しその信頼性を確認すること,②地盤,施工法な どに応じた沈下および支持力の計算法と安全性の評価法を 明確にすること,などがあげられる。摩擦杭の活用を前提 としてこれらを検討していきたい。

参考文献

- 井上嘉信・小粥庸夫:負の摩擦力による建物の不同沈下とその考察,清水建設研究所報, Vol. 22, pp. 17~38, 1974.4.
- Y. Inoue, K. Tamaoki and T. Ogai: Settlement of Building due to Pile Downdrag, Proceedings of the Ninth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 561-564, 1977.
- 3) 大塚義之・小粥庸夫: 建築における場所打ち杭の現状, 基礎 工, Vol. 7, No. 7, pp. 10–19, 1979.7.
- 4) 小粥庸夫・田中達雄・土屋 勉:50 cm 押込んだ載荷試験結果に基づいて考察したリバース杭の支持力,土木学会第35回 年次学術講演会講演概要集,1980.9.
- 5) 日本道路協会:道路橋下部構造設計指針・くい基礎の設計篇, 1976.8.
- 小粥庸夫:杭の支持力,仮設構造物の計画と施工,土木学会, pp. 93-137, 1979.
- 小粥庸夫・大内雅典: PIP くいの支持力機構に関 する研究 (その2)——粘性土地盤と砂礫地盤における周面摩擦支持力 の検討,清水建設研究所報, Vol. 25, pp. 1–24, 1975.10.
- 小粥庸夫:関東ローム層におけるPIP くいの周面摩擦支持力 と同層の強度特性,第11回土質工学研究発表会概要集,pp. 681-684,1976.
- 小粥庸夫:緩い砂層(人工砂層)における PIP くいの支持力, 第12回土質工学研究発表会概要集, pp. 707-710, 1977.
- 小粥庸夫・黒崎富士美: PIP 杭の支持力機構に関する研究 (その3)——砂質土地盤と砂礫地盤における周面摩擦支持力 の検討,清水建設研究所報, Vol. 28, pp. 59-65, 1977.10.
- 小粥庸夫: PIP クイ (Pakt-In-Place pile)の支持力機構に 関する実験的研究——砂質土地盤と砂礫地盤における周面摩 擦支持力,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp. 2069-2070, 1977.
- 12) 小粥庸夫: PIP 杭の先端支持力, 第16回土質工学研究発表会 概要集, pp. 937-940, 1981.5.
- 13) 坂本 稔:パイル・スラブ工法による軟弱地盤処理施工,施 工技術, pp. 49-56, 1974.3.

(原礎受理 1981.10.20)