

杭先端載荷試験法の概要と適用例

小 椋 仁 志*

1. 序

載荷試験は、基礎杭の設計を行うとき、支持力や変形性状を調べるのに最も直接的で確実な方法である。しかし、試験には多大の費用が必要などの理由で、あまり実施されていないのが現状である。

そこで、反力杭や載荷架構を不要にして試験の費用を低減した静的載荷試験法が、「杭先端載荷試験法」である。本報では、この試験法の概要と、これまでの実施例¹⁾を中心に報告する。

2. 載荷試験の現状と新しい載荷試験法

杭の鉛直載荷試験は、写真-1のように、試験杭の周囲に反力杭やアンカーなどを設置し、その摩擦力を載荷荷重の反力にして杭頭から静的荷重を載荷する方法（以下、「杭頭載荷試験法」と呼ぶ）が一般的である。この方式では反力杭と載荷架構（以下、総称して「反力装置」と呼ぶ）が不可欠であるため、試験には多大の費用

と準備時間を要する。また、建築分野の現行の設計規定には、載荷試験をしたときでも優遇措置がほとんどない。

その結果、よほどの大規模なプロジェクトでない限り、必要な費用や時間をカバーするだけのメリットがないために、杭の設計を目的とした載荷試験が行われることはほとんどない。建築分野で載荷重が300tを超える載荷試験の数を調べたところ、年間の実施数は200~300件程度になる。しかし、その大半は日本建築センターの支持力評定のためのものであって、杭の設計のための試験数は100件に満たないものと推測されている²⁾。

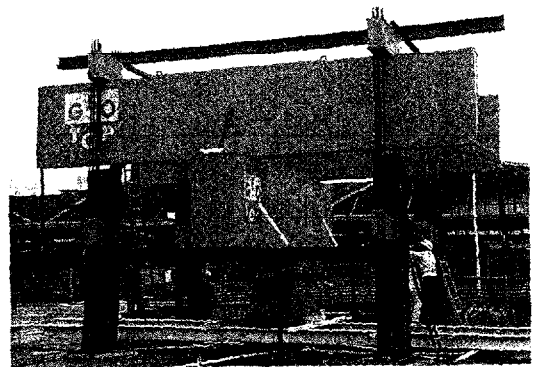


写真-1 杭頭載荷試験法の反力装置

そこで、杭頭載荷試験法の「多大の費用、長い準備時間」という問題を解決するために、反力装置を不要にして「少ない費用、短い時間」で可能な載荷試験法が、いくつか提案されている。まず、杭頭をハンマーで打撃して得られた杭頭のひずみと加速度の測定値に、波動理論を適用して支持力を求めるのが「動的載荷試験法」³⁾である。この試験法は、試験時間が瞬時（載荷時間は5~30ミリ秒）であるため非常に経済的である。また、ハンマーをより軽量にして、設計支持力の確認に重点をおいたミッドレンジ方式の動的試験法⁴⁾も実用化されている。

次に、載荷重の5%の質量を持つ反力体を特殊な推進薬を使って打ち上げ、その反力を杭頭に載荷するのが「急速載荷試験法」⁵⁾である。載荷時間が50~200ミリ秒と動的載荷試験法の約10倍に長くなる結果、杭体内に発生する波動現象

The Concept & the Application Example of Pile Toe Load Test

* OGURA Hitoshi: 株式会社ジオトップ 技術部長、工博

が無視できるようになるため、適用する理論は振動理論で済むことになる。また、荷重～沈下量関係を直接得ることもできるとしている。

これらの試験法は反力装置が不要で試験も瞬時に終わるため、静的載荷試験法に比べて費用が格段に少なくて済む。しかし、得られた結果から静的支持力や荷重～沈下量関係を求めるには、波動理論や振動理論に基づいた解析を行う必要があり、結果の信頼性に問題が残されている。これらの方法に対して、直接、静的な支持力や荷重～沈下量関係を反力装置を使わずに調べる方法が、杭先端載荷試験法である。

3. 杭先端載荷試験法の経緯

杭先端載荷試験法は、図-1のように、杭体の先端付近に取り付けたジャッキによって、先端抵抗と摩擦抵抗とを互いに反力として載荷する試験法である。筆者らは、この試験法を実用化したJ.O.Osterberg（オスターバーグ）米国ノースウエスタン大学名誉教授⁶⁾から1987年に導入し、模型実験⁷⁾やPHC節杭による現場実験⁸⁾を行ってきた。また、岸田英明東京工業大学教授（当時）を委員長とする「杭の簡易試験法に関する調査研究委員会」の場で、この試験法を日本

で実施したときの課題について検討を重ねた。そして、1992年に大阪市のOAP計画敷地で行った場所打ち杭に対する試験⁹⁾を始めとして、20件を超える杭先端載荷試験を実施してきた。

当初はオスターバーグが、「A New Simplified Method For Load Testing」と呼んでいた¹⁰⁾ことや、反力装置が不要で簡便に試験を行えることなどから、「簡易載荷試験法」との名称を用いてきた⁶⁾。写真-2は試験時の杭頭付近の様子であるが、基準梁と計測機器が見えるだけであって、簡便な試験法であることが分かる。

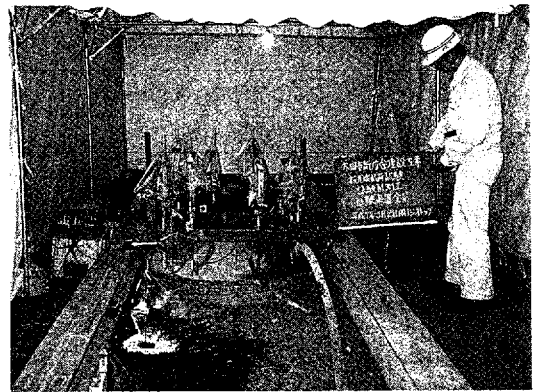


写真-2 杭先端載荷試験時の杭頭付近の様子

その後、この名称では試験の工程の一部を簡略化したものとの誤解を招くことが多いため、現在は「杭先端載荷試験法」の名称を用いている。先端付近から載荷する試験法であること、杭頭載荷試験法に対する言葉であること、後述するように先端地盤の性状を確実に調べることができることなどを考えての名称である。なお、米国でも今は、「Osterberg Cell (O-cell) Testing Method」と呼ばれている¹¹⁾。また、日本でも藤岡らが同様な試験を土木分野を中心に実施している¹²⁾が、その名称は「支持力相反載荷試験法」である。

4. 杭先端載荷試験法の特長

杭先端載荷試験法は先端抵抗と摩擦抵抗とを互いに反力として載荷するため、反力装置が不要となる。このことから次の4点の特長が生じる。

- ①経済的な費用で、杭の支持力が得られる。
- ②短い準備時間で杭の支持力が得られる。
- ③杭頭載荷試験法が敷地状況や上空制限など

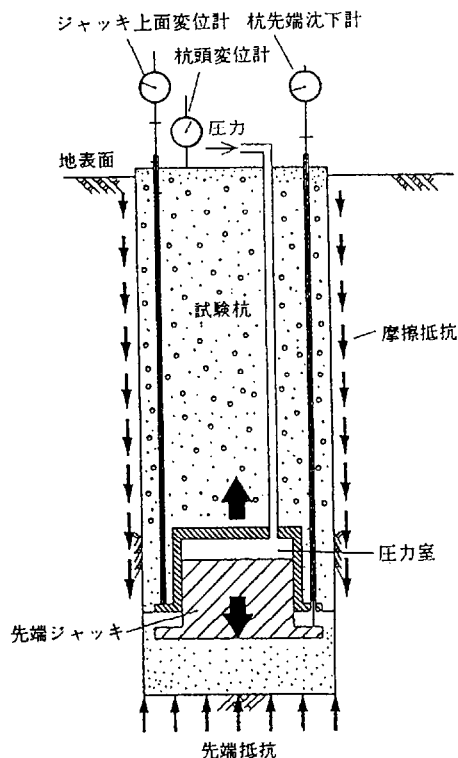


図-1 杭先端載荷試験法（概念図）

の制約のため難しい場所でも、簡単に実施できる。

- ④安全に大きな荷重を杭に載荷することができる。

さらに、杭先端載荷試験法では先端付近の地盤に直接載荷するが、これによる特長は次の2点である。

- ⑤十分な先端抵抗や先端沈下量が確実に得られ、先端地盤の性状を明らかにすることができる。(杭頭載荷試験法では、杭頭からの載荷重の大部分が摩擦抵抗に費やされ、先端まで十分に荷重が伝わらないことが多い。)
- ⑥杭頭載荷試験法では先端抵抗はひずみ値から換算して求めるが、杭先端載荷試験法ではジャッキの載荷重がそのまま先端支持力になるため、精度の良い値が得られる。

以上の特長のうち、①～③を生かすと多大の費用と長い準備時間という杭頭載荷試験法の問題点が解消される。④～⑥からは、大きな先端荷重が作用した時の地盤の挙動を調べることができようになる。たとえば、杭頭載荷試験法では難しいような大口径杭の先端支持力も、簡単に調べることができる。

なお、杭先端載荷試験法は、2倍の荷重を載荷した杭頭載荷試験法に相当する。たとえば、先端荷重として1,000t載荷したとすると、先端面と杭周面にそれぞれ1,000tずつ載荷しているわけであるから、2,000t載荷した杭頭載荷試験法に相当することとなる。

また、載荷試験が終了後、先端ジャッキとその周囲にセメントミルクを注入することによって、試験杭を本設杭として用いる場合もある。ただし、この場合、先端地盤の剛性が周囲の杭より大きくなるため、設計上の配慮が必要にな

る。

5. 杭種別の適用例とジャッキの設置法

筆者らはこれまで20例以上の杭先端試験を行っている。ここでは、場所打ち杭、深礎杭および既製杭に分けて、それぞれの適用例とジャッキの設置法について述べる。

5.1 場所打ち杭

場所打ち杭の載荷試験では、一般に必要な載荷重も大きいので、杭先端載荷試験法の長所を最も発揮することができる。筆者らは場所打ち杭に対して、表-1に示す7現場で9例の杭先端載荷試験を行っている。杭径は1.2mの場合が最も多く、最大は2.2mの大口径杭である。

表-1中のNo.1と2の試験⁹⁾では、オスターバークから導入した先端ジャッキを用いて、米国と同様の方法でジャッキを設置した。しかし、日本の場所打ち杭は長尺であり、また、泥水を使用するため、この方法では施工上の不都合が多々生じた。

そこで、種々検討の結果、No.3以降の試験では図-2に示す設置法を採用している。まず、写真-3のように、ジャッキ(日本製)をあらかじめ鉄筋籠に取り付けておく。次に、水中不分離性混和剤を加えたモルタルをホッパー(トレミー管の場合もある)を用いて掘削孔に投入したのち、ジャッキを取り付けた鉄筋籠を建て込む。

ジャッキを鉄筋籠に取り付けて一緒に設置することによって、ジャッキの底面を杭軸に対して確実に直角にすることができるだけでなく、施工工程が簡単になる。また、水中不分離性混和剤を加えることによって、ジャッキと孔底との間が通常の杭と同じ品質になる。

孔壁を削ることなくジャッキを設置するためには、その径は杭径より15cm以上小さくしておく必要がある。そこで、先端地盤に対する載荷

表-1 場所打ち杭への適用例

No	試験年月	試験場所	施工法	杭径(m)	載荷径(m)	根入れ長(m)	先端地盤	最大先端荷重(t)	特記事項	同現場の他の試験	文献
1	H3.12.	大阪市北区	RCD	1.2	1.2	38.5	細砂	803		杭頭載荷引抜き	9
2	H3.12.			1.2	1.2	38.5	細砂	688			
3	H5.07.	東京都港区	ED	1.2	1.2	47.0	細砂	490	本設杭		13
4	H5.07.	東京都葛飾区	RCD	1.2	1.2	38.0	細砂	1,020	補助反力併用		14
5	H5.10.	東京都中央区	ED	1.2	1.2	26.5	細砂	800	補助反力併用	杭頭載荷水平載荷	15
6	H5.10.			1.2	1.2	30.2	細砂	900			
7	H7.03.	群馬県太田市	全旋回AC	1.2	0.95	27.0	砂礫	830	載荷径小、本設杭		16
8	H8.08.	埼玉県大宮市	ED	2.2	2.2	48.0	細砂	3,165	補助反力併用		17
9	H9.04.	愛知県豊山町	全旋回AC	2.0	2.0	21.6	砂礫	2,360			

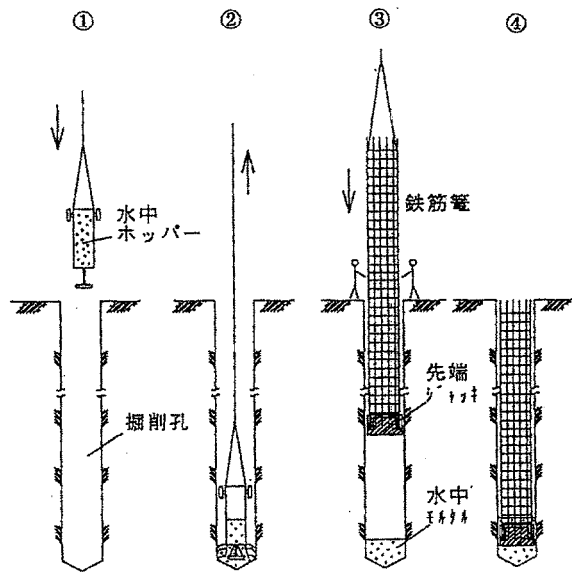


図-2 先端ジャッキの設置手順

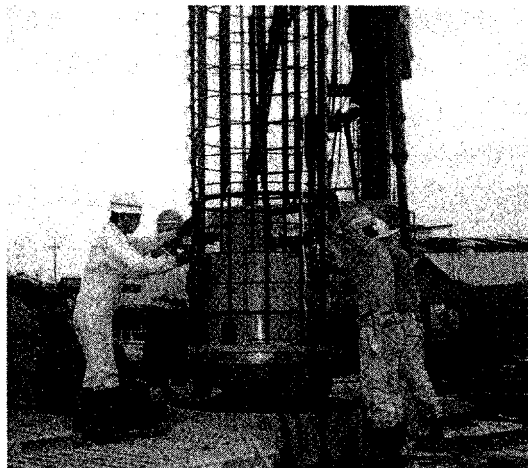


写真-3 場所打ち杭への先端ジャッキの設置状況

面積を杭の断面積と確実に同じにするために、図-3のように、掘削底面との間が0.3~1mになるようにジャッキを設置するのを標準としている。

反対に、図-4のように、ジャッキを孔底まで下ろして、ジャッキ底面を孔底に一致させる場合もある。これは、推定される極限摩擦力が必要な先端荷重よりも小さい場合の対処法の一つであって、6.2節で詳しく述べる。

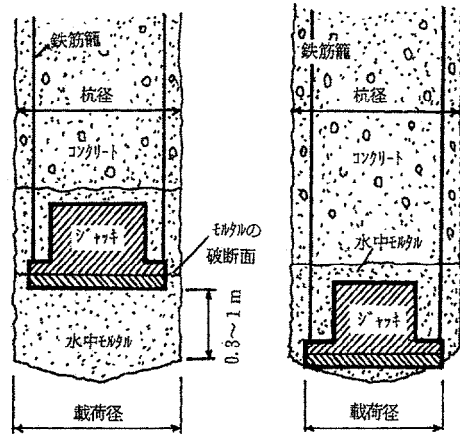


図-3 先端ジャッキの標準位置

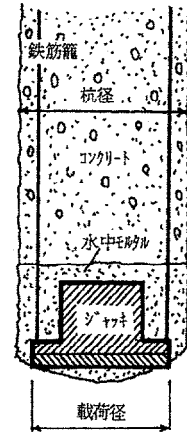


図-4 孔底に設置した場合

5.2 深礎杭

深礎杭は、建築分野では用いられることは少なくなったが、土木分野では多く用いられている。深礎杭の先端地盤の支持力は、掘削底面で平板載荷試験を行って調べることが多い。しかし、平板の周囲の土は拘束されていないため、実際の支持力よりはかなり小さい値になる¹⁸⁾。そこで、JR東日本は深礎杭の支持力性状を調べる実験を行い、その結果、建築物に用いる場合は簡易載荷試験（杭先端載荷試験）を行って支持力を確認することにより、場所打ち杭と同等の支持力を採用できるとしている¹⁹⁾。

表-2は、深礎杭への杭先端載荷試験法の適用例であって、これまで3現場で5例の試験を行っている。

深礎杭にジャッキを設置する場合は、写真-4のように、掘削底に下りて直接設置する。このとき、ジャッキを置く地盤の水平精度の保持に細心の注意を払う。

深礎杭では杭径が大きいのに対し杭長は短く、極限摩擦力は先端支持力よりも小さいことが多い。このため、6.2節で述べるように、載荷面積を杭の断面積より小さくして、杭径の1/3~1/2の径のジャッキを用いるのを標準としている。

表-2 深礎杭への適用例

No	試験年月	試験場所	杭径 (m)	載荷径 (m)	根入れ長 (m)	先端地盤	最大先端荷重 (t)	特記事項	同現場の他の試験	文献
1	H4.10.	東京都小金井市	1.6	1.2	11.5	砂礫	900	先端抵抗試験、載荷径:小	杭頭載荷他	18
2	H5.12.	東京都小金井市	1.2	0.5	10.3	砂礫	240	載荷径:小		20
3	H5.12.		1.2	0.3	10.3	砂礫	100	載荷径:小		
4	H7.06.	福岡県北九州市	1.6	0.6	19.0	軟岩	275	載荷径:小、本設杭		21
5	H7.08.	千葉県八千代市	1.6	0.6	17.0	細砂	260	載荷径:小、本設杭		

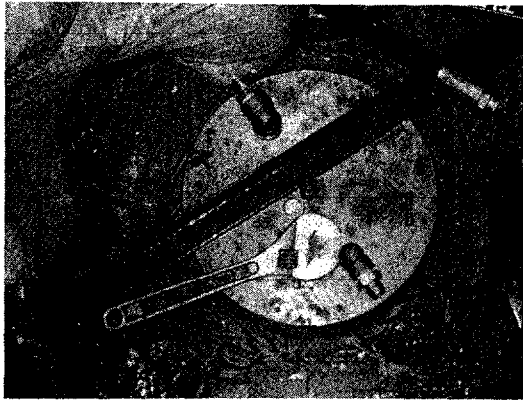


写真-4 深礎杭への先端ジャッキの設置状況

5.3 既製杭

杭先端載荷試験法の既製杭への適用例は、表-3に示す6現場で9例である。オスターバーグは打込み杭にも適用している⁹⁾が、表-3の例はいずれも埋込み工法で施工された杭に用いたものである。

既製杭の場合、ジャッキは写真-5のように、あらかじめ杭体に溶接しておく。したがって、ジャッキの外径は杭径と同一となる。ただし、杭径より小さいジャッキを杭先端に取り付けることによって、載荷面積を杭の断面積より小さくすることもできる。



写真-5 既製杭に取り付けた先端ジャッキ

6. 杭先端載荷試験の実施例

本節では杭先端試験法の実施例を5例述べる。まず、大口径杭への適用例(6.1節)を示し、次に、必要な先端荷重に対して極限摩擦力が小さい場合の対処法として、載荷面積を小さくした例(6.2節)と、補助反力装置を併用した例(6.3節)を紹介する。

さらに、6.4節は杭頭載荷試験法との比較試験例で、両者の先端荷重～先端沈下量を比べる。また、杭先端載荷試験法でも解析によって杭頭荷重～杭頭沈下量関係が得られることを示し、この解析結果を杭頭載荷試験法の実測値と比較する。

最後に、6.5節では、杭先端載荷試験法の応用として開発した先端抵抗試験法と摩擦抵抗試験法を紹介する。

6.1 大口径杭への適用例

表-1中のNo.8の試験は、杭径が2mを超える場所打ち大口径杭に対して行ったものである¹⁷⁾。大口径杭については、載荷装置が大がかりになり膨大な費用が必要なことから、載荷試験はこれまでほとんど行われてこなかった。そこで、大荷重を安全に、かつ、経済的に載荷できる杭先端載荷試験法を適用することによって、大口径杭に対する載荷試験が可能になった。

地盤概要を図-5に示す。杭径は2.2m、根入れ長さは48.0mである。

図-6は得られた先端荷重 P_p ～先端沈下量 S_p 、ジャッキ上面抜け上がり量 U_p 関係である。先端地盤に3,165t載荷したところ、 S_p は531.4mmと杭径の24.2%となった。この値は先端地盤の支持力性状を知るには十分な沈下量である。周面摩擦力は極限值には達していない。

この試験では先端支持力と摩擦支持力がそれ

表-3 既製杭への適用例

No	試験年月	試験場所	杭種類	施工法	杭径(m)	載荷径(m)	根入れ長(m)	先端地盤	最大先端荷重(t)	特記事項	同現場の他の試験	文献
1	H3.06.	大阪府	PHC節杭	セメントミルク工法	0.5	0.5	10.0	粘土	108		杭頭載荷	8
2	H3.06.	堺市			0.5	0.4	10.0	粘土	84	載荷径:小		
3	H5.11.	京都市	PHC節杭	MT工法	0.5	0.5	15.5	粘土	120	杭頭試験と同一杭	杭頭載荷	
4	H6.04.	宮崎市	PHC節杭	MT工法	0.5	0.5	9.5	細砂	80	先端:摩擦抵抗試験	杭頭載荷	22
5	H6.06.	鹿児島県			0.5	0.5	20.0	細砂	100	先端:摩擦抵抗試験	杭頭載荷	
6	H6.07.	隼人町	PHC節杭	ET工法	0.5	0.5	20.0	細砂	85	先端:摩擦抵抗試験	引抜き	22
7	H6.08.				0.5	0.5	6.0	細砂	28	先端:摩擦抵抗試験	掘り出し	
8	H7.03.	大阪府泉佐野市	PHC杭	プレボーリング拡大根固め工法	0.6	0.6	19.0	砂礫	180		水平載荷	23
9	H7.08.	大分県院内町	モルタル合成鋼管杭	モルタル合成鋼管杭工法	0.65	0.65	17.9	礫岩	275	本設杭	杭頭載荷	21

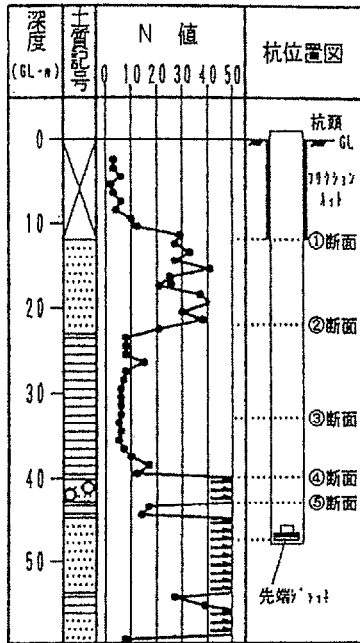


図-5 表-1, No.8の試験地盤

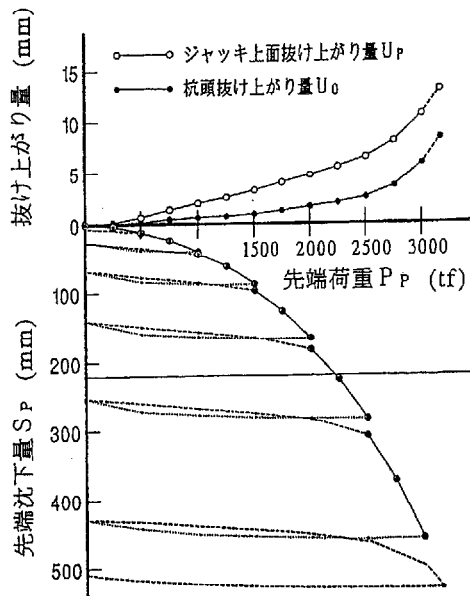


図-6 表-1, No.8の試験結果

それぞれ3,165tずつ確認できたことになる。したがって、杭頭から $3,165 \times 2 = 6,330$ t 載荷した試験に相当している。6,000tを超える荷重を載荷する杭頭載荷試験は不可能ではないが、経済性や安全性を考えると現実的ではない。大口径杭の載荷試験は、杭先端載荷試験法によって、はじめて可能になったものと言えよう。

6.2 載荷面積を杭の断面積より小さくした例

杭先端載荷試験法は、先端抵抗と摩擦抵抗とを互い反力として載荷するため、両者の一方が極限状態に達するとそれ以上載荷することができないという問題がある。杭先端載荷試験の計画に当たっては、この特性をよく理解した上で、試験の目的と予想される先端支持力や極限摩擦力などの諸要因を十分に考慮して、載荷計画やジャッキの設計を行わねばならない²¹⁾。

たとえば、杭先端載荷試験法は、杭の設計で想定した支持地盤の支持力と変形性状を調べることを主目的として計画されることが多い。ところが、この目的にしたがって計画先端荷重の最大値を設定したとき、予想される極限摩擦力がその値より小さく、最大計画先端荷重まで載荷することができない場合がある。その対処法には、次の方法が考えられる。

- i) 試験杭の杭径を小さくする。：杭径を変更できる場合は、杭径を小さくすると、摩擦力は杭径比倍で小さくなるのに対し、先端抵抗は杭径比の2乗倍で小さくなるため、極限摩擦力 > 先端荷重になりやすい。
- ii) 補助反力装置を設置する。：不足する摩擦力の分だけの能力を持つ反力装置を用いると、最大計画先端荷重まで載荷することができる。反力装置が必要になるが、小さい載荷能力で済むため、杭頭載荷試験法よりは経済的になる。この例は次節で紹介する。
- iii) 載荷面積を杭の断面積よりも小さくする。：図-7のように、先端地盤に対する載荷面積を小さくして、単位面積当たりの荷重で計算すると、試験の目的を達成するのに必要な先端荷重は小さくてもいいことになる。この方法を深礎杭に適用した例を、以下に紹介する。この方法は場所打ち杭や既製杭にも適用できる。表-1のNo.7の試験はその例である。

上記iii)の方法の適用例として、表-2中のNo.5の深礎杭の試験例を紹介する。この試験は、駅ビルを新築するために営業中の線路の下で行われた。このような現場条件下では杭頭載荷試験は不可能になるが、杭先端載荷試験なら簡単に行うことができる。第4章で述べた特長③を生

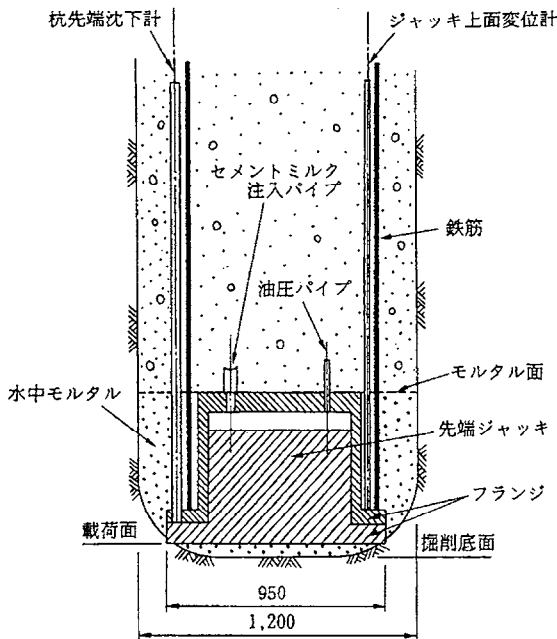


図-7 載荷面積を小さくした場所打ち杭の例¹⁴⁾

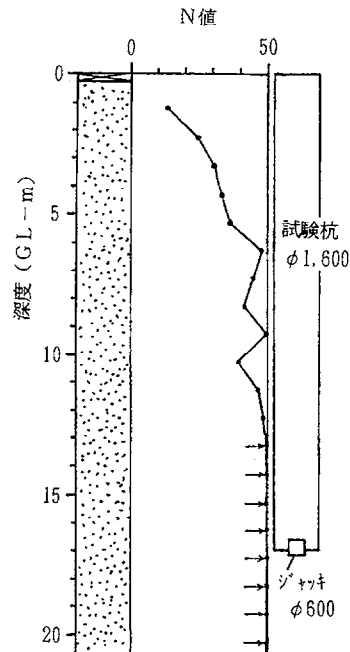


図-8 表-2, No.5の試験地盤

かした例である。

試験地盤を図-8に示す。杭長は17m、杭径は1.6m(断面積 2.01m^2)であって、成田砂層と呼ばれる細砂層を支持層としている。試験は、この層の支持力性状を調べるために行われた。先端地盤に $600\text{t}/\text{m}^2$ 載荷する必要があるが、杭の断面積を載荷面積とすると、 $1,200\text{t}$ 以上の載荷重が必要となる。しかし、極限摩擦力の計算値は 400t 程度である。そこで、ジャッキ下面を先端地盤に直接置き、その径を 0.6m とすると載荷面積 A_p は 0.283m^2 となる。したがって、必要な載荷重は $600 \times 0.283 = 170\text{t}$ と、極限摩擦力より小さい荷重で済むことになる。

図-9は、試験で得られた $P_p \sim S_p$ 、 U_p 関係を示す。 P_p の最大値は 260t ($P_p/A_p = 919\text{t}/\text{m}^2$)で、このときの S_p は 182mm と載荷径の30%を超える沈下量まで載荷でき、先端地盤の支持力や変形性状を十分に把握することができた。これに対して、抜け上がり量は $U_p = 2.3\text{mm}$ と小さく、摩擦抵抗は極限に至っていない。

この例のように、極限摩擦力が小さい場合でも、載荷面積を杭の断面積より小さくすることによって、先端地盤の支持力や変形性状を確実に調べることができる。

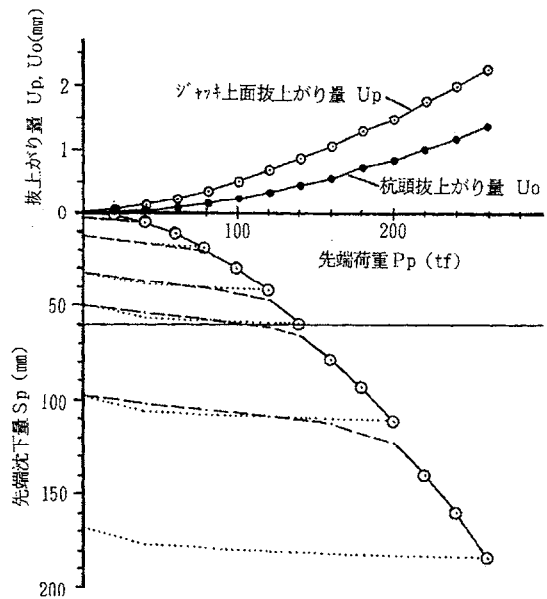


図-9 表-2, No.5の試験結果

6.3 補助反力装置を併用した例

必要な先端荷重に比べて極限摩擦力が小さい場合の対処法として、補助反力装置を併用することもある。ここでは、表-1中のNo.4に示す場所打ち杭での試験例¹⁴⁾を紹介する。杭径は 1.2m ($A_p = 1.13\text{m}^2$)、根入れ長は 38.0m で、施工法はリバース工法である。設計時に先端支持層として細砂層を採用したため、その支持力性状を調べることと、設計支持力(杭の先端面積に対して約 $300\text{t}/\text{m}^2$)の妥当性を確認することを目的にして行われた。図-10に、試験地盤の概要を示す。

この試験では先端地盤に1,000t載荷する必要があるので、地盤調査結果から極限摩擦力は500~700tと推定されたため、所定の先端荷重を載荷することはできない。そこで、杭頭部に図-11のような補助的な反力装置を併用することとした。

この方法は、反力装置が不要という杭先端載荷試験法の最大の特長を損なうものであるが、杭頭載荷試験法よりはるかに小さい載荷能力の反力装置で済むため、経済的になる。もし、杭頭載荷試験法で先端地盤に確実に1,000t載荷しようとする、この試験杭の場合、 $1,000 + 700 = 1,700$ の載荷能力を持つ反力装置が必要となる。これに対し、補助反力装置の載荷能力は

$1,000 - 500 = 500$ tでよく、反力杭も小口径のPHC節杭 ($\phi 500$ -400, 長さ9m, 16本) で済ませた。

試験で得られた $P_p \sim S_p$, U_p 関係が図-12である。先端地盤に $P_p = 1,020$ t ($P_p/A_p = 902.7$ t/m²)まで載荷でき、先端地盤の支持力性状を把握することができた。また、摩擦抵抗は $P_p = 800$ tを保持中に極限に達し、杭体が抜け上がってきた。杭頭に置いたジャッキと載荷桁との間はあらかじめ70mm程度隙間をあけていたため、摩擦力が極限に達した後の残留摩擦力も676tまで測定できた。

杭頭のジャッキが載荷桁に当たると、杭頭抵抗が生じてくる。杭頭のジャッキは、載荷するためではなく、杭頭抵抗を測定するために設置している。この状態では、先端荷重と杭頭抵抗の差が摩擦抵抗となるが、杭体の動きを補助反力装置である程度押さええているため、正確な摩擦抵抗ではない。もし、全く動かないように押さえると、原理的には摩擦力はゼロになる。

この試験から得られる長期許容支持力 R_a は、第2限界荷重491.2tと残留摩擦力676tの和から杭の自重60tを引いた値1,107tを、安全率3で除した369t ($R_a/A_p = 326.5$ t/m²)とするのが妥当であろう。なお、この方法は、試験で得られた先端支持力と摩擦支持力とを単純に加算したものであって、それらの発揮される変位は異なるため、変位の適合条件を満足していない。しかし、実用上は問題ないものと考えられよう。

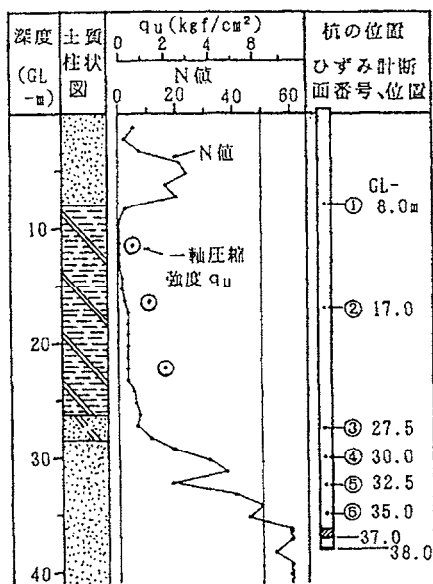


図-10 表-1, No.4の試験地盤

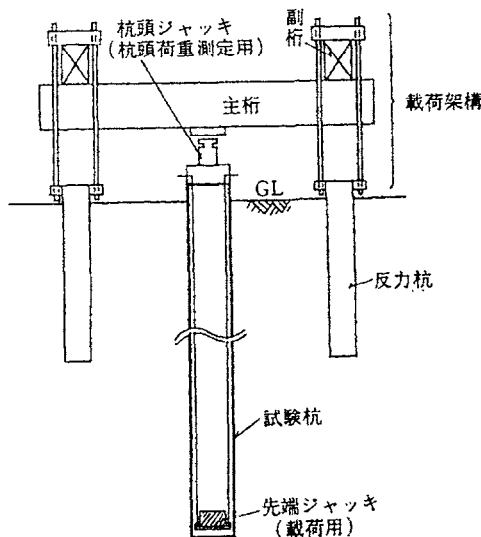


図-11 補助反力装置を併用した試験

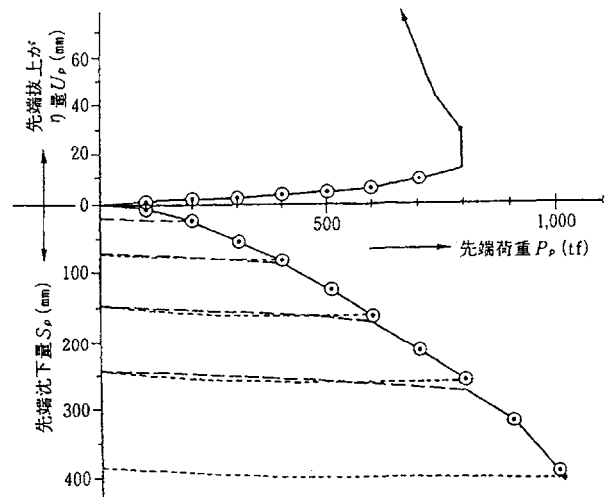


図-12 表-1, No.4の試験結果

6.5 先端抵抗試験・摩擦抵抗試験の例

杭先端載荷試験法では摩擦抵抗の向きが、**図-17 (a), (b)** のように、杭頭載荷試験法とは逆方向になるため、摩擦抵抗～変位量関係、摩擦力の分布、極限摩擦力などが異なったものになる、との指摘がある。これらのうち、摩擦抵抗～変位量関係には作用方向の違いが及ぼす影響は小さい²⁶⁾と考えられ、実用上は杭頭載荷試験法と同一とみて良からう。

極限摩擦力の値には作用方向の影響はある²⁷⁾と考えられるが、筆者らの試験例には比較した例はない。(6.4節で述べた比較試験では、杭頭載荷試験杭にはフリクションカットがされているため比較できない。)杭先端載荷試験法の場合、杭体の移動に伴う地中応力の増減を考えると、得られる極限摩擦力は杭頭載荷試験法によるものより小さくなるものと考えられる。すなわち安全側の値を与えることになり、実用上は問題はないものと考えられる。

杭先端載荷試験法では摩擦抵抗は先端から順に大きくなるため、杭頭載荷試験法よりも支持層付近の摩擦特性が測定できることになる。さらに、杭体の移動方向を考えると、引抜き試験と同じになる。したがって、見方を変えれば、作用方向の問題は、杭先端載荷試験法の長所と見ることもできる。

杭先端載荷試験法での摩擦抵抗の作用方向を、杭頭載荷試験法と同一にする方法として、試験を先端抵抗試験と摩擦抵抗試験に分ける方法がある。先端抵抗試験とは**図-17 (c)** のように、杭頭に補助反力装置を設けた上で、杭頭と杭先端に設置した2台のジャッキを操作して杭体が動かない、すなわち摩擦抵抗が生じない状態において先端地盤のみに載荷する方法である。一方、摩擦抵抗試験は、同図**(d)** のように、先端抵抗試験の終了後、先端ジャッキの油圧を開放して先端抵抗が生じない状態において、杭頭から載荷する試験法であって、摩擦抵抗の作用方向は杭頭載荷試験法と同一になる。

この方法では反力装置が必要になるが、その載荷能力は予想される極限摩擦力程度で済むため、杭頭載荷試験法よりは経済的になることが多い。また、PHC節杭は摩擦抵抗が大きいのに

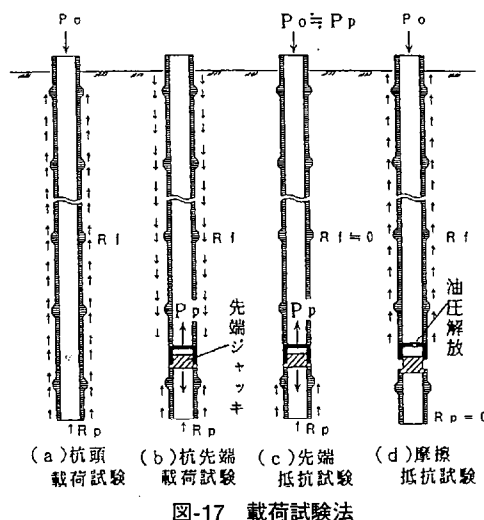


図-17 載荷試験法

対し材料強度は軸部断面で決まるため、杭頭載荷試験法では十分な先端支持力を調べることができないことがある。その場合、この方法が特に有効となる。

ここでは、表-3のNo.6のPHC節杭を用いた試験²²⁾を紹介する。この試験では、同じ地盤で杭頭載荷試験も行っている。地盤の概要を**図-18**に示す。試験杭は、節部径500mm、軸部径400mm、根入れ長さ9.2mのPHC節杭で、施工法は改良セメントミルク工法(MT工法)である。

図-19と**図-20**は、先端抵抗試験と摩擦抵抗試験の結果を、杭頭載荷試験の結果と比較したものである。摩擦力 $P_f \sim S_0$ 関係(**図-20**)では少し差が生じているものの、 $P_p \sim S_p$ 関係(**図-19**)はほぼ一致しており、これらの試験法では杭頭載荷試験法と同等な結果を得られることが分かる。

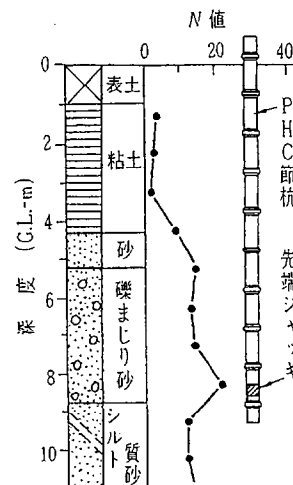


図-18 表-3, No.4の試験地盤

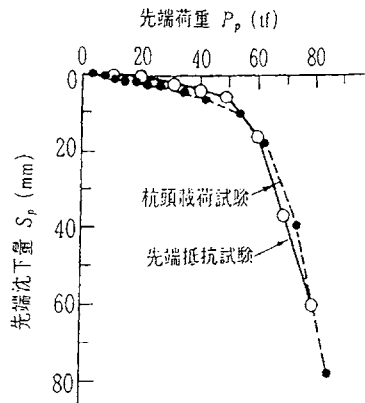


図-19 杭先端荷重 P_p ～沈下量 S_p 関係の比較図

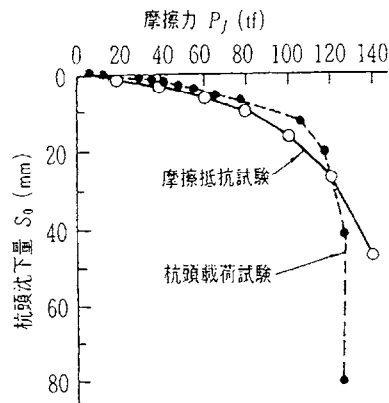


図-20 摩擦抵抗 P_f ～杭頭沈下量 S_p 関係の比較図

7. 杭先端載荷試験で分かった現象

杭先端載荷試験法では、その特長を生かしてこれまでの試験では分かっていた現象を知ることができる。ここでは、先端地盤の変形性状の違いと、極限值に達したあとの摩擦力の挙動について述べる。

7.1 細砂と砂礫地盤の荷重～沈下性状の違い

杭先端載荷試験法では、先端地盤の支持力や変形性状を高精度で調べることができる。そこで、これまで筆者らが行った試験例のうち、場所打ち杭と深礎杭の試験で得られた先端地盤の荷重～沈下性状について考察する。

図-21は、表-1のNo.1～8の試験と表-2の5例の試験で得られた荷重～沈下性状を、先端荷重度 P_p/A_p ～先端沈下量載荷径比 S_p/D_p 関係の形でまとめたものである²⁸⁾。この図から、砂礫層と細砂層では、明らかに荷重～沈下性状が異なっていることが分かる。特に東京地区の細砂層の場合は、砂礫層や大阪地区よりも沈下量が大き

くなっているのが特徴的である。

建築基礎構造設計指針²⁹⁾では、場所打ち杭の支持層の荷重～沈下性状を2つのグループに分けており、その理由を施工の良否としている。しかし、この図からは、2つのグループは、砂礫層と細砂層の差によるものと推察される。

このことを定量的に検討するために、基準先端支持力度 q_b ($S_p/D_p=0.1$ の時の P_p/A_p)と先端地盤のN値との関係を考える。図-22は、図-21から得られた q_b と杭先端から上方 $1D_p$ ～下方 $1D_p$ 間の平均N値との関係である。なお、図-21で S_p/D_p が0.1に達していない3例は省いている。図中の白ぬき点は50以上のN値を換算N値によって評価したものであり、黒点は設計時と同様N値の上限を50としたものである。

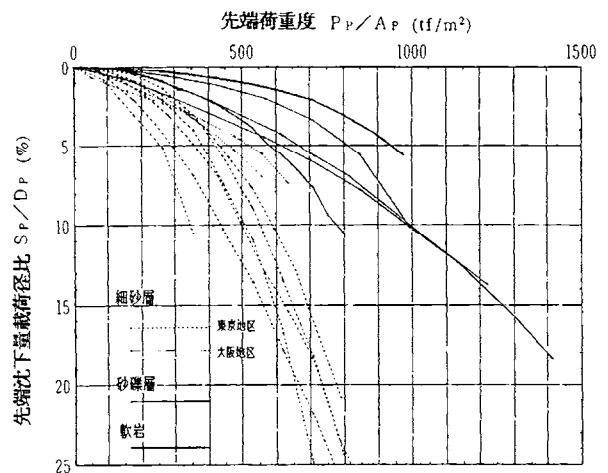


図-21 先端荷重度 P_p/A_p ～先端沈下量載荷径比 S_p/D_p 関係の比較図

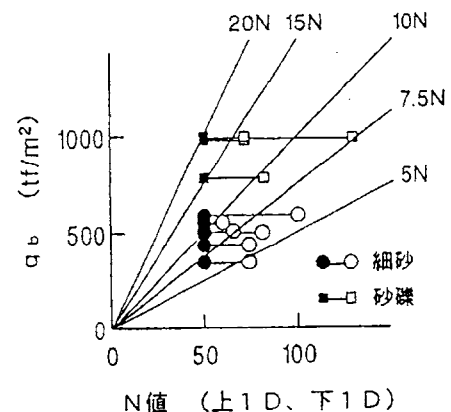


図-22 基準先端支持力度 q_b ～杭先端平均N値関係

上限を50としたN値で考えると、 q_b は砂礫層では15N～20Nの範囲に分布しているが、細砂層では7N～12Nと場所打ち杭の先端支持力の計算式

15Nよりも小さい範囲となっている。これは、①計算式のもとになった試験の大半が砂礫層を支持層とする杭のものである³⁰⁾こと、②計算式は沈下量を考慮せずに求めた極限支持力から作成されていること³¹⁾などの理由によるものであろう。この結果から、細砂層の先端支持力を基準支持力によって評価する場合、計算式による値を採用すると過大評価になるおそれがあると言える。

次に、換算N値で考えると、 q_b は砂礫層では7.5N~15N、細砂層では5N~9Nの範囲となっている。先端支持力を的確に求めるには、N値が50以上の場合でも何らかの方法で評価したN値と関係づける方が合理的と思われる。今後、同様のデータを蓄積することによって、先端支持力を的確に評価できるようになることが望まれる。ただし、50以上のN値の評価法が新たな問題になってくる。ここでは、50回打撃しても貫入量が30cm未満のものを、打撃回数と貫入量が単純に比例するとして求めた換算N値を用いたが、あまり精度はよくない。上載圧の影響なども考慮したより精度の高い方法を用いるなど、精度の高い方法に改良する必要がある。

7.2 極限值に達したあとの摩擦力の挙動

補助反力装置を用いた杭先端載荷試験法の場合、杭先端と杭頭の2つのジャッキを用いて繰り返し載荷試験ができる。そこで、表-1のNo.6の現場¹⁵⁾で、所定の杭先端載荷試験が終了したあとに行った繰り返し載荷試験の結果を紹介する。

地盤概要を図-23に示す。試験杭は杭径1.2m、根入れ長さ30.2mのアースドリル工法による場所打ち杭である。杭先端載荷試験では、 $P_p=700t$ を保持中に摩擦抵抗が極限に達し、杭体が抜け上がってきた。約50mm抜け上がったあと杭頭のジャッキが載荷桁に当たったが、反力装置の能力に余裕があったため杭頭が動かないように杭頭ジャッキを操作した。なお、 P_p の最終値は900tで、その時の沈下量は約300mmであった。

杭先端載荷試験が終了後、先端と杭頭の2つのジャッキを操作して、繰り返し載荷試験を行った。まず、先端ジャッキの油圧を開放した上で、杭頭ジャッキを用いて杭頭沈下量が約50mmに

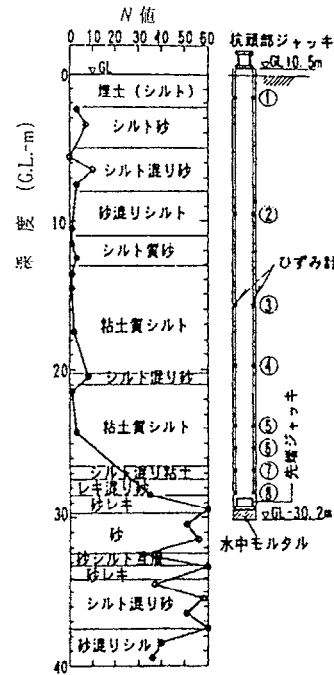


図-23 表-1, No.6の試験地盤

なるまで連続的に載荷し、杭体を押し下げた。次に、杭頭ジャッキのストロークを縮めて載荷桁との間に10cm以上隙間を作った上で、先端ジャッキを用いて杭頭抜け上がり量が約50mmになるまで連続的に載荷し、杭体を押し上げた。この過程を2回繰り返した。

試験の結果を図-24に示す。当初の極限摩擦力は700tであったが、繰り返し後は300~400tに低下している。このことは、摩擦抵抗が極限値に一旦達すると、同じ範囲での摩擦抵抗は半分程度しか期待できないことを意味している。

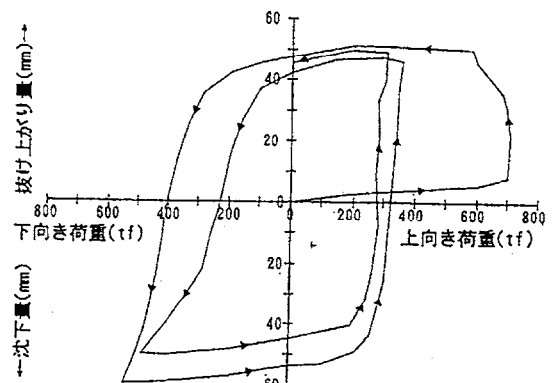


図-24 繰り返し摩擦抵抗試験の結果

同様な繰り返し載荷に関する模型実験を、矢鳥らは三軸加圧型大型実験土槽を用いて行っている³²⁾。しかし、この模型実験では、摩擦抵抗

が半減する現象は見られていない。両者を比較すると、模型実験では側圧は一定に保たれているのに対し、本現場の方は杭体に働く側圧は一定値ではない。したがって、図-24の現象は、一旦、摩擦力が極限に達すると杭と地盤との間に隙間ができて、側圧が十分作用しなくなった結果生じたものと推察される。

山肩は、降伏荷重を超えた荷重で繰り返し載荷を行うと、変位量が非常に大きくなることを指摘している³³⁾。このことと図-24から、杭に作用する摩擦力の大きさによって、次の3つの段階があるものと推測できる。

- ①降伏荷重以下であれば、繰り返し摩擦力が作用しても杭は安全である。
- ②降伏荷重以上になれば、繰り返し摩擦力が作用した場合は杭は危険になる。
- ③極限摩擦力が一旦作用すると、その後は繰り返し荷重でなくても、摩擦力が作用すると危険になる。

杭の設計に当たっては、上記の現象に注意する必要があるものと考えられる。

8. 結語

本報では、杭先端載荷試験法についてその適用例を中心に述べた。また、この試験法を行うことによって初めて分かった現象を紹介した。

杭先端試験法には、まだ多くの課題が残されている。引き続き試験例を重ねることによって、課題を解決していく必要がある。そして、杭先端載荷試験法を始めとする経済的な新しい方法が発展し、その結果、載荷試験が行い易くなることによって、地盤に応じた合理的な杭の設計が行われるようになるものと期待される。

〔謝 辞〕

杭先端載荷試験法の検討に当たってご指導を賜ったJ.O.Osterberg先生と、吉見吉昭先生、岸田英明先生を始めとする(社)建築研究振興協会の委員会の委員諸氏に謝意を表します。また、これまで実施した杭先端載荷試験にご協力を頂いた日建設計(株)の吉福司氏、東洋テクノ(株)の稲村利男氏や山森製作所をはじめとする関係各位に厚く御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 小椋仁志, 須見光二, 岸田英明, 吉福司: 杭先端載荷試験法の場所打ち杭と既製杭への適用例, 土と基礎, Vol.43, No.5, pp.31~33, 1995.5.
- 2) 小椋仁志, カルキーマダ, 境友昭: 新しい載荷試験の動向, 基礎工, Vol.24, No.8, pp.41~47, 1996.8.
- 3) たとえば, 片山猛, 西村真二, 脇屋泰士, 林正宏: 動的載荷試験による鋼管杭の支持力推定法, 土と基礎, Vol.43, No.5, pp.28~30, 1995.5.
- 4) たとえば, 須見光二, カルキーマダ, 境友昭・大岩忠男, 森中宏和: MID-RANGE動的載荷法を用いた杭の健全性試験, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.952~953, 1995.9.
- 5) たとえば, 加藤一志, 篠田善朗, 坂本和雄, 三木正久, 永岡高: 急速載荷試験法によるモデル杭試験報告(その1) - 施工法の異なる杭の荷重沈下特性比較 -, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集3-B, pp.780~781, 1994.9.
- 6) J.O.オスタバーグ(吉見吉昭訳): 杭載荷試験用の新しい加力装置 - 埋込み杭および打込み杭に適用可能 -, 基礎工, Vol.19, No.8, pp.114~119, 総合土木研究所, 1991.8.
- 7) 松井保, 小田和広, 壺山芳郎, 足立陽一: 杭の鉛直支持力に関する新しい載荷試験に関する模型実験, 土木学会関西支部学術講演概要集, pp.Ⅲ-21-1~2, 1988.
- 8) 小椋仁志, 小寺浩二, 椿原康則, 岸田英明: 杭の簡易載荷試験法の基礎的検討, 杭の鉛直載荷試験方法および支持力判定法に関するシンポジウム発表論文集, pp.1~6, 土質工学会, 1991.9.
- 9) 小椋仁志, 須見光二, 鈴木俊雄, 稲村利男, 桑原文夫, 岸田英明: OAP(大阪アメニティーパーク)計画における杭の支持力実験(その3: 簡易載荷試験), 日本建築学会大会梗概集(北陸), pp.1261~1262, 1992.8.
- 10) Osterberg, J.O.: A New Simplified Method For Load Testing Drilled Shafts, ADSC, pp.9~11, 1984.8.
- 11) Schmetmann, J.H., Hayes, J.A.: OBSERVATIONS FROM OSTERBERG CELL TESTS OF BORED PILES, Fulcrum (The Newsletter of the Deep Foundation Institute, Winter'96-'97)
- 12) 藤岡豊一, 垣田繁一, 三反畑勇, 久保村覚衛: 相反載荷試験の最近の事例, 土と基礎, Vol.43, No.5, pp.34~36, 1995.5.
- 13) 小椋仁志, 大杉文哉, 妹尾博明, 岸田英明: 東京地域の細砂層に支持された場所打ち杭の杭先端載荷試験, 日本建築学会大会梗概集(東海), pp.1343~1344, 1994.9.
- 14) 小椋仁志, 桑山晋一, 岸田英明, 五十嵐寛: 杭先端載荷試験による場所打ち杭の鉛直支持力の検討, 第29回土質工学研究発表会(盛岡), pp.1397~1400, 1994.6.
- 15) 吉福司, 山田耕三, 掛川誠一, 岸田英明: 先端載荷試験法による場所打ち杭の載荷試験, 日本建築学会大会梗概集(東海), pp.1341~1342, 1994.9.
- 16) 小椋仁志, 打越瑞昌, 金井重夫, 菱沼登: 太田市新庁舎建設工事における場所打ち杭の杭先端載荷試験, 日本建築学会大会梗概集(北海道), 1995.8.
- 17) 渋谷孝男, 小椋仁志, 川村明, 妹尾博明: 関東郵政局等庁舎新築工事における大口径場所打ち杭の先端載荷試験(その1: 試験の計画と結果), 第32回地盤工学研究発表会(熊本), pp.1431~1432, 1997.7.
- 18) 栗山道夫: 砂質系地盤に支持された深礎杭の鉛直載荷試験と支持力, 基礎工, Vol.23, No.4, pp.38~45, 1995.4.

- 19) 海野隆哉, 山岡英明, 岸田英明, 田極義明, 町田重美: JR東日本における深礎杭の施工管理基準と支持力算定式に関する一考察, 第28回土質工学研究発表会(神戸), pp.1767~1768, 1993.6.
- 20) 齋藤淳, 海野隆哉, 金井重夫: 砂礫層に支持された杭の先端載荷試験(その3), 第29回土質工学研究発表会(盛岡), pp.1395~1396, 1994.6.
- 21) 小椋仁志, 川村明, 山岡英明, 國弘仁, 宮野公博: 杭先端載荷試験の計画上の留意点と深礎杭, モルタル合成鋼管杭への適用例, 基礎工, Vol.24, No.5, pp.98~103, 1996.5.
- 22) 小椋仁志, カルキーマダシ, 須見光二, 金井重夫: PHC節杭による先端抵抗試験と摩擦抵抗試験の妥当性の検討, 第30回土質工学研究発表会(金沢), 1995.7.
- 23) 棚橋秀光, 鶴岡邦夫, 小西厚夫: りんくう国際物流センターのPHC杭の杭頭・杭先端載荷試験, 基礎工, Vol.24, No.8, pp.85~89, 1996.8.
- 24) 平山英喜: 無反力杭式載荷試験における載荷位置・方向の影響, 第28回土質工学研究発表会(神戸), pp.1715~1718, 1993.6.
- 25) Kishida, H. and Tsubakihara, Y.: An analytical method for predicting the displacement of a pile and soil layers, 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, 1993.
- 26) 杉村義広, 大木紀通, 岡部徳一郎ほか: 場所打ちコンクリート杭基礎の引抜き耐力に関する研究(その1~その7), 日本建築学会大会梗概集(近畿), pp.1045~1060, 1987.10.
- 27) 茶谷文雄: 杭の引抜き抵抗について, 日本建築学会大会梗概集(九州), pp.1317~1318, 1989.10.
- 28) 小椋仁志, 渋谷孝男, カルキーマダシ, 齋藤基治: 関東郵政局等庁舎新築工事における人口径場所打ち杭の先端載荷試験(その2: 試験結果の検討), 第32回地盤工学研究発表会(熊本), pp.1433~1434, 1997.7.
- 29) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.232~235, 1988.1.
- 30) 山肩邦男, 富永晃司, 大杉富美一: 場所打ちコンクリートグイおよび埋込みグイの許容支持力計算式, 第9回土質工学研究発表会(京都), pp.553~556, 1974.6.
- 31) 大杉富美一: 各種くいの鉛直支持力と沈下性状に関する考察, 昭和49年度関西大学修士論文, 1975.3.
- 32) 矢島淳二, 柴崎富士夫, 沼上清: 加圧土槽を用いた模型杭の鉛直載荷試験(その1) - 引抜き実験と押込み実験 -, 第29回土質工学研究発表会(盛岡), pp.1493~1494, 1994.6.
- 33) 山肩邦男: 繰返し荷重をうけるくいの変位性状について, 日本建築学会大会梗概集(関東), pp.461~462, 1970.9.