

# 杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価法入門

## 5. 載荷試験による荷重～変位特性の評価方法（その1）

青 木 一二三（あおき ひふみ）  
日本鉄道建設公団設計技術室

林 正 宏（はやし まさひろ）  
日本鋼管(株)基盤技術研究所

加 藤 一 志（かとう かずし）  
大成建設(株)関西支店

### 5.1 はじめに

#### 5.1.1 緒言

鉛直載荷試験は、杭の鉛直支持力特性に関する資料を得ること、あるいは設計支持力の妥当性を確認することを目的に実施される。鉛直載荷試験は、工期や費用の制約から設計支持力の確認のみで終わることもあるが、杭基礎の設計に有用な情報を得るためにも、荷重の伝達機構や沈下の程度を把握し、荷重～変位特性に関する資料を得ることが望ましい。また、我が国の土木・建築構造の設計が「性能規定設計」に移行しつつある現在、性能を予測する手法として、あるいは信頼性に基づく安全性の定量的評価の手段として、載荷試験は重要な役割を担っている。

#### 5.1.2 各種載荷試験の概要

杭の載荷試験方法は、載荷継続時間によって、表—5.1に示すように、動的効果を考慮するものと、考慮しないものの二つに大別される。動的な効果とは、以下の現象で考えると分かりやすい。例えば、水の中に手を入れることを考えると、ゆっくりと水の中に手を入れるときは、ほとんど抵抗を感じない。一方、叩きつけるように大きな速度と加速度を持って、水の中に手を入れようとするとき、その場にある水の粘性抵抗力と慣性力を受け、大きな抵抗を感じる。これが動的な効果（抵抗力）である。つまり、速度や加速度が大きい場合、物体周囲の粘性抵抗力とその物体の慣性力を考慮して力の釣合いを考えなくてはならない。その粘性抵抗力や慣性力を無視できるのが静的載荷試験であり、粘性抵抗力と慣性力といった動的効果を考慮しなくてはならないのが急速載荷試験や動的載荷試験であるといえる。

静的載荷試験は、油圧ジャッキなどの加力装置により、静的な荷重を載荷するものである。反力杭を反力抵抗体として用い、静的な荷重を杭頭に載荷する試験方法（以下、杭頭載荷試験と呼ぶ）（図—5.1(a)）が杭の載荷試験の基本的な方法であり、数多くの実績を有している。静的な荷重を杭頭に載荷することからデータの解釈方法は容易であるが、試験期間が長く、試験費用も大きいため、1箇所の杭基礎工事現場において、1試験程度実施されるのが一般的である。最近では、杭先端部にジャッキを設置し、周面摩擦抵抗と先端抵抗を相互反力として、反力杭を用いずに載荷する先端載荷試験（図—5.1(b)）が実用化されている。

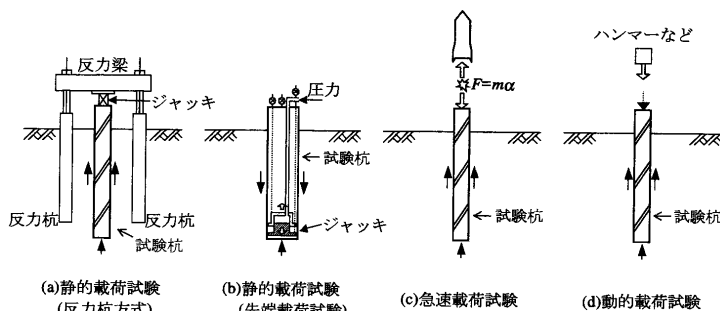
先端載荷試験は、載荷位置（ジャッキ位置）、載荷方向が試験結果に影響を及ぼすものの、杭頭載荷試験でしばしば生じる杭先端への伝達荷重不足や、杭体のひずみから求める先端到達荷重の不正確さの問題がないことなどの特長も有している。なお、この試験から杭頭載荷相当の荷重～変位関係を求めるには、「荷重伝達法（3.2.3参照）」による解析を行う必要がある。

兵庫県南部地震後には、大地震に対応するために、基礎の復元力特性を考慮した耐震設計法が導入される傾向にある。このことから、押込み、引抜きを個別に行う載荷試験のみならず、杭の押込み、引抜きを交互に行う鉛直交番載荷試験の必要性も増してきている。

これらの静的な載荷試験に対し、近年、盛んに研究され、実施されるようになってきた方法として、急速載荷試験と動的載荷試験がある。これらの新しい載荷試験方法は、コンピューターと計測技術の発展により急速に実用化された技術であり、短時間にかつ廉価に実施できることを特長としている。

表—5.1 各種載荷試験方法の特徴

|          | 動的効果を無視       | 動的効果を考慮          |                  |
|----------|---------------|------------------|------------------|
| 載荷試験方法   | 静的載荷試験        | 急速載荷試験           | 動的載荷試験           |
| 載荷継続時間   | 数十分～数日        | 100～200ms        | 10～20ms          |
| 対象杭      | 全ての杭          | 全ての杭             | 鋼管杭、PHC杭         |
| 反力装置     | 反力杭など         | なし               | なし               |
| 実績       | ◎             | △                | △                |
| 試験コスト・時間 | △             | ○                | ◎                |
| データの解釈方法 | ◎<br>試験結果そのもの | ○<br>杭体・地盤の慣性力考慮 | △<br>杭体・地盤の慣性力考慮 |
| 地盤状態     | 非排水条件～排水条件    | 非排水条件            | 非排水条件            |



図—5.1 各種荷重試験方法

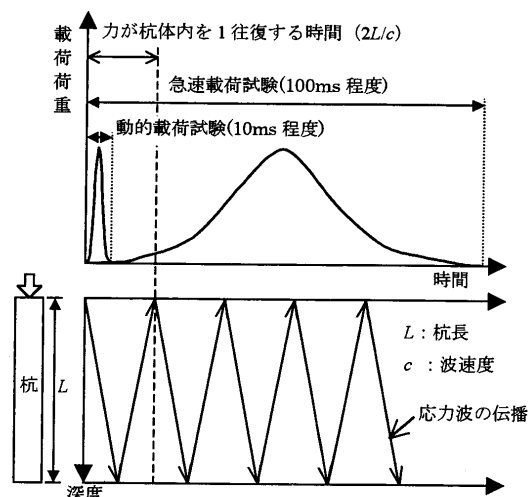
急速荷重試験は、杭頭におけるガス圧などによって生じる推進力で荷重する方法である（図—5.1(c)）。試験時間が短く、静的荷重試験のような反力杭を必要としないため準備時間も短い。また、杭基礎工事現場の任意の杭に適用可能であるため、複数の杭に対して試験を実施することができる。

動的荷重試験は、油圧ハンマーやモンケンなどを用いて杭頭を打撃し、杭頭近くで測定した加速度やひずみなどの動的シグナルから、一次元波動解析を介して荷重～変位関係を求める方法である（図—5.1(d)）。この試験方法は、杭基礎工事現場のすべての杭に適用できるという特長を持っている。

急速荷重試験と動的荷重試験では、図—5.2に示すように、荷重継続時間に違いがある。急速荷重試験では、応力波が杭体内を1往復する5倍程度以上の時間荷重が継続するため、杭中の応力波の波動伝播の影響は一般的に無視できるほど小さく、しかも杭体に引張り力が発生しないという特長がある。このため、引張りクラックの発生しやすい場所打ちコンクリート杭にも適用可能である。一方、動的荷重試験では、荷重継続時間が非常に短いため、応力波の波動伝播が杭体の応答に影響を及ぼし、杭体内に引張り力も発生する。このため、ひび割れが生じる恐れのある場所打ちコンクリート杭などには適用が困難であり、打撃することのできる杭（鋼杭、既製コンクリート杭）に限られる。

急速荷重試験では、杭中の波動現象は無視できるものの、データの解釈においては、質点としてモデル化された杭の慣性力や、地盤抵抗力の速度効果を考慮する必要がある。「除荷点法（5.3.2(1)参照）」と呼ばれる方法を用いれば、現場で簡易に荷重～変位関係を求めることもできる。除荷点法以外にも、各種のデータ解釈法が提案されている。一方、動的荷重試験データの解釈方法としては、杭体内の応力波の波動伝播の影響を考慮できる一次元波動理論に基づく「波形マッチング解析（5.3.2(2)参照）」を実施しなければならず、解析にある程度の熟練が必要とされる。静的荷重試験が直接的に静的な荷重～変位特性を得るのに対し、急速荷重試験や動的荷重試験は計測データの解釈が必要となる間接的な手法である。

ところで、荷重～変位特性を評価するときには、間隙水圧の影響を無視できないため、地盤の排水条件を考慮して解釈する必要がある。各試験時における地盤の状態



図—5.2 荷重継続時間の比較

は、以下のように考えられる。静的荷重試験では、厳密には荷重増加時に地盤は一時的に非排水状態となり、過剰間隙水圧が発生することもある。しかし、荷重保持時間が十分長い場合、この間に土からの排水が生じ、地盤は排水状態での変形に近い挙動を示すものと考えられる。それに対し、急速荷重試験や動的荷重試験では、荷重速度が大きいため、地盤は非排水状態となり、過剰間隙水圧が発生する。

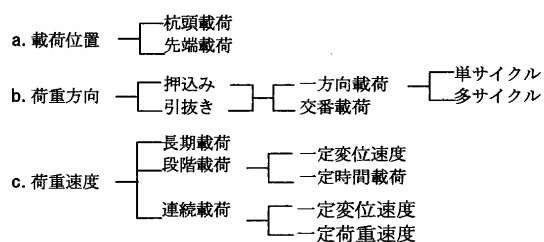
以上、静的な荷重試験（杭頭荷重試験や先端荷重試験）および動的な荷重試験（急速荷重試験や動的荷重試験）の特徴などの概要について説明してきた。以下、本章では、各種の鉛直荷重試験方法によって荷重～変位特性を評価する方法について説明する。その1では、静的荷重試験による評価法について、その2、その3では、急速荷重試験および動的荷重試験による評価法について説明する。

## 5.2 静的な荷重試験

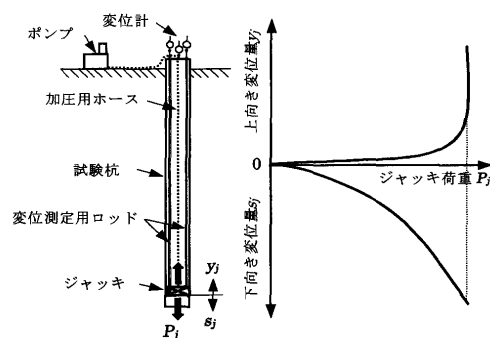
### 5.2.1 静的な荷重試験方法の分類

静的な荷重試験は、図—5.3に示すように、荷重位置、荷重方向、荷重速度によって分類される。

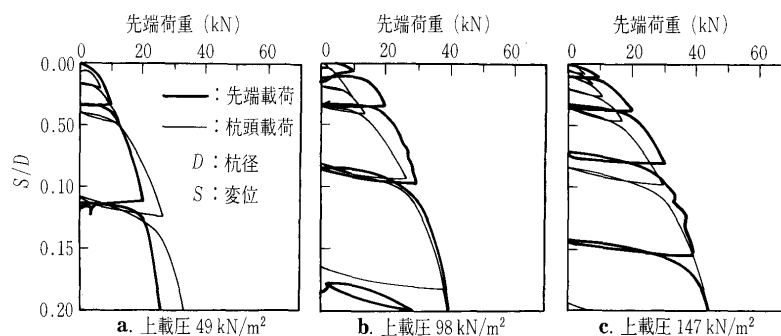
旧基準<sup>1)</sup>では、定変位段階荷重である荷重方法B（各荷重段階の変位速度がある一定値以下になったときに変位の安定とみなし、次の荷重段階に進む方法）と定時間段階荷重である荷重方法A（各荷重段階の荷重保持時間を一定時間に決めておく方法）の2本立てであった。厳密な意味での静的支持力特性を得るためには、可能な限り長時間荷重するのが望ましいが、実務的でないため、



図—5.3 杭の静的荷重試験の分類



図—5.4 先端荷重試験の概念図

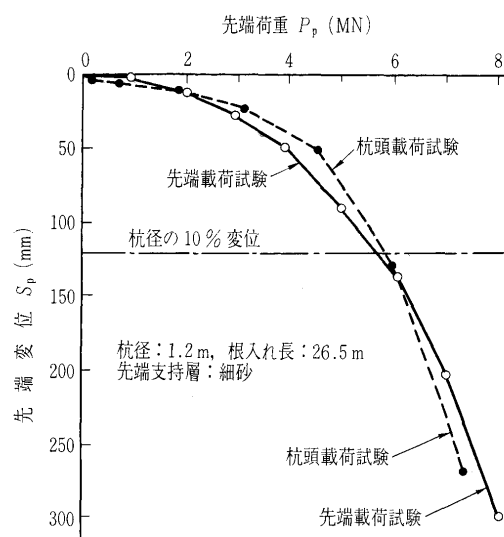
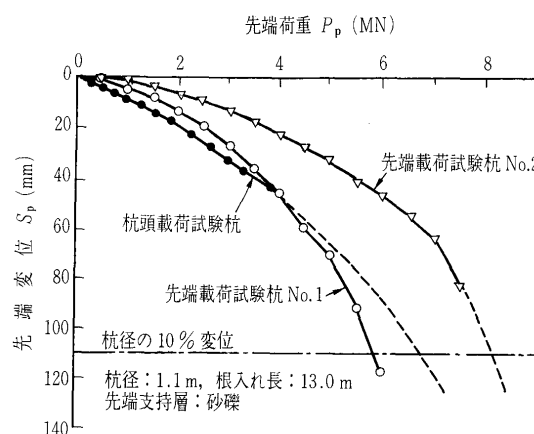
図—5.5 模型杭による杭頭荷重試験と先端荷重試験の比較<sup>6)</sup>

現基準<sup>2)</sup>では、30分以上の一定時間段階荷重のみとなっている。なお、引抜き試験方法<sup>3)</sup>では、15分以上の一定時間段階荷重としている。一方、長期荷重に対する沈下が問題となる杭では、1週間から数箇月間荷重する長期荷重試験が実施されてきた。

杭頭荷重試験では、直接的に杭頭の荷重～変位関係が得られる。また、杭体の計測ひずみなどから換算した軸力分布より、深さ方向の杭周面摩擦力特性や先端支持力特性を求めることができる。

先端荷重試験は、図—5.4に示すように、杭先端近くに装着したジャッキを用いて摩擦抵抗と先端抵抗とを互いに反力にして載荷することにより、ジャッキ荷重とその上・下方向の変位および杭頭変位を計測する。先端荷重試験は、既製コンクリートの打込み杭、埋込み杭、場所打ち杭、深礎杭、さらに地中連続壁工法による壁杭で実施されている。先端荷重試験の発展の歴史的経緯は、文献4)を参照されたい。

先端荷重試験では、ジャッキ位置より上部の摩擦抵抗は、杭頭荷重試験と異なり、杭に対して下向きに作用する。摩擦抵抗と先端抵抗の相互作用の影響、地盤内の応力変化による先端支持力への影響の度合いは、荷重位置や方向によって変化すると予想される。平山<sup>5)</sup>は、この影響を理論的に解析した結果、先端荷重試験の先端抵抗特性は、杭頭荷重試験のそれに比べ、荷重の小さい範囲で変位が小さくなり、杭径の10%変位時の支持力で一般に数%小さくなるとしている。佐藤<sup>6)</sup>が模型杭で比較した事例でも、図—5.5に示すように、同様な傾向が得られている。なお、実杭における先端荷重試験と杭頭荷重試験の先端抵抗特性を比較した事例では、図—5.6<sup>7)</sup>、図—5.7<sup>8)</sup>に示すように、そのような現象が見られるものの、両者の差は少ない。一方、摩擦抵抗については、実杭における反力杭併用方式の先端荷重試験により比較した事例では、海野<sup>9)</sup>が深礎杭で、押込み後押上げた結果、ロームの摩擦力が約6割に低下したが、須藤<sup>10)</sup>が拡底リバース杭で、先例とは逆に押上げ後押込んだ結果、沖積シルトの摩擦力が約7割に低下した。また、押上げ・押込みの交番荷重試験では、新規荷重載荷時の摩擦抵抗の最大値に比べ、両方向とも同程度低下したという報告<sup>11)</sup>もある。これらの結果は、荷重方向よりも荷重履歴の影響の方が大きいことを示唆している。

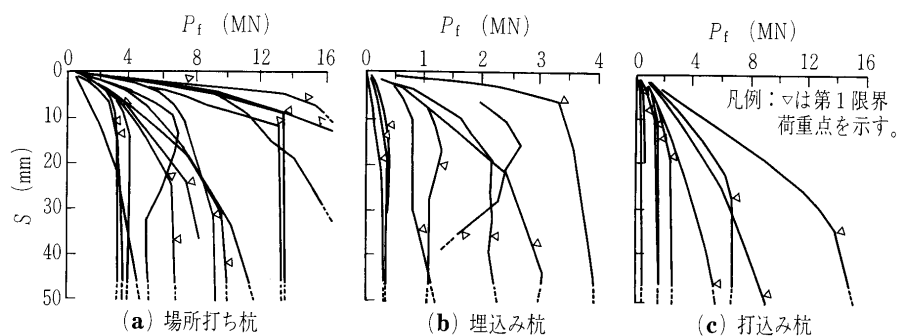
図—5.6 杭先端の荷重～変位関係の比較  
(アースドリル工法)<sup>7)</sup>図—5.7 杭先端の荷重～変位関係の比較  
(オールケーシング工法)<sup>8)</sup>

## 5.2.2 荷重試験結果の整理

(1) 杭頭の荷重～変位曲線による支持力特性値の評価  
鉛直荷重試験方法基準<sup>2)</sup>では、杭頭の荷重～変位曲線から求める鉛直支持力に関する特性値として、第1限界荷重、第2限界荷重および杭頭の鉛直ばね定数を挙げている。

第1限界荷重は、 $S\text{-}\log t$ 法、 $\Delta S/\Delta \log t\text{-}P$ 法、残留変位量の急増点などを参考に  $\log P\text{-}\log S$  曲線に現れる明瞭な折れ点の荷重とする。ここに、 $P$ : 荷重、 $S$ : 杭頭変位量、 $t$ : 新規荷重段階における経過時間、である。

## 講座


図—5.8 杭周面摩擦抵抗  $P_f$ ～変位  $S$  の関係<sup>12)</sup>

載荷試験事例では、図—5.8<sup>12)</sup>に示すように、杭周面摩擦抵抗  $P_f$  と変位  $S$  の関係に第1限界荷重点 (▽) をプロットすると、杭周面摩擦抵抗の折れ点に対応しているものが多い。すなわち、場所打ち杭や埋込み杭における第1限界荷重は、杭周面摩擦抵抗がほぼ極限状態になって、荷重増加に対する変位増加の割合が大きく変化する荷重といえる。

第2限界荷重は、杭先端直径の10%相当の杭先端変位が生じたときの荷重と、杭頭の荷重～変位曲線が変位軸にはほぼ平行とみなされる荷重のうち、小さい方とする。第2限界荷重は、我が国の設計基準類の設計支持力において基準値となるものである。なお、第2限界荷重の力学的意味については、文献<sup>12)</sup>を参照されたい。

杭頭の鉛直ばね定数は、設計荷重を考慮した割線勾配とする方法で求める。図—5.9に示すように、新規荷重に対する場合と繰返し荷重に対する場合の2とおりがあり、次式により求める。

- ① 新規荷重に対する鉛直ばね定数  $K_v$

$$K_v = \frac{P}{S_0} \quad (1)$$

- ② 繰返し荷重に対する鉛直ばね定数

$$K_{vr} = \frac{P}{S_0 - S_{0r}} \quad (2)$$

ここに、 $P$ ：荷重、 $S_0$ ：荷重に対する杭頭変位量、 $S_{0r}$ ：除荷後の残留変位量、である。

## (2) 軸力計測による支持力特性の評価

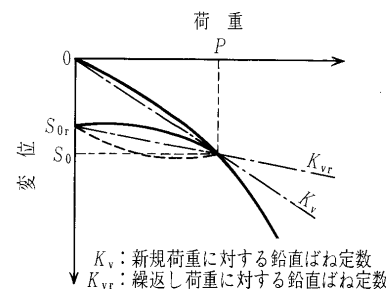
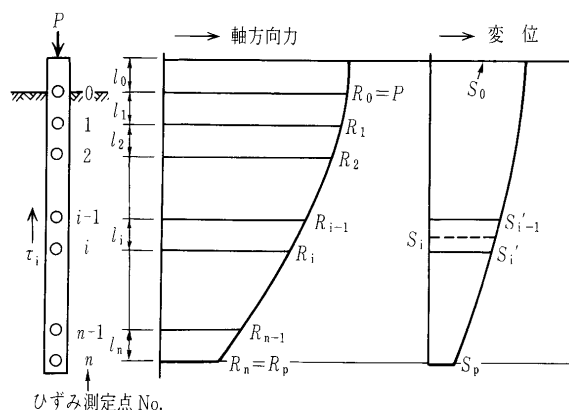
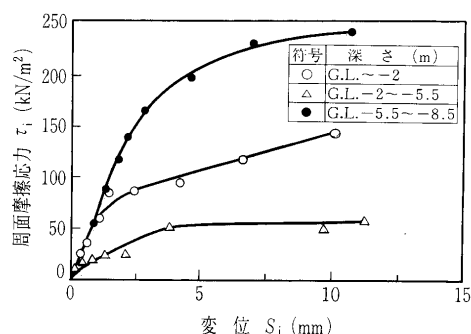
軸力を計測することによって、周面摩擦抵抗特性と先端抵抗特性を得ることができる。これらの抵抗特性は、杭基礎設計における骨組解析モデルによって荷重～変位関係を計算するうえで重要な入力パラメーターとなる。

軸力分布曲線より、各土層での杭周面摩擦応力～変位曲線が求められる。各区間の杭周面摩擦応力  $\tau_i$  は、図—5.10より、次式により求まる<sup>2)</sup>。

$$\tau_i = \frac{R_{i-1} - R_i}{l_i \psi_i} \quad (3)$$

ここに、 $R_{i-1}$ 、 $R_i$  は  $(i-1)$ 、 $i$  点での軸方向力、 $l_i$  は  $(i-1)$ ～ $i$  点間の距離、 $\psi_i$  は  $(i-1)$ ～ $i$  点間の平均杭周長である。

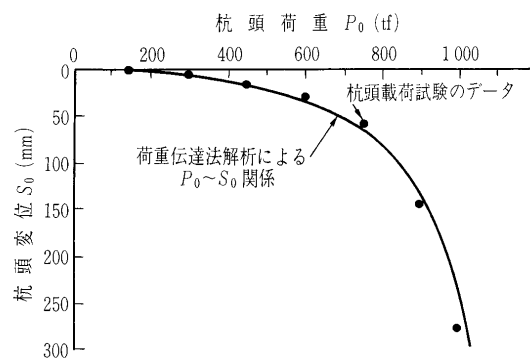
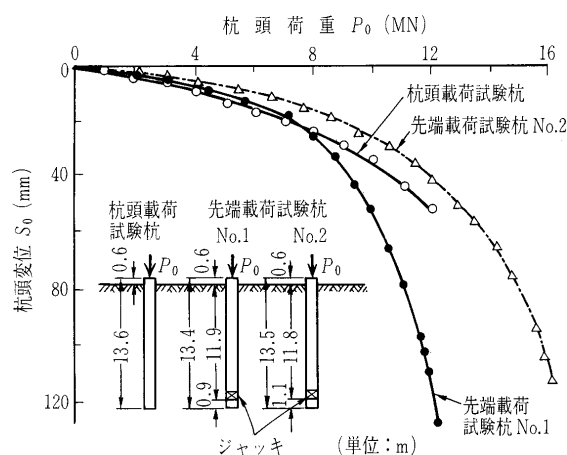
各土層の杭周面摩擦応力  $\tau$  と変位量  $S$  の関係 ( $\tau$ ～ $S_i$  曲線) の例を図—5.11に示す。なお、 $S_i$  (ある深さでの杭変位) は、杭頭変位量  $S_0$  からその深さまでの杭の圧縮量を差し引くことにより求まる。


図—5.9 杭頭の鉛直ばね定数の求め方<sup>2)</sup>

図—5.10 杭の軸方向力および変位分布<sup>2)</sup>

図—5.11 杭周面摩擦応力～変位曲線の例<sup>2)</sup>

杭先端の荷重～変位曲線は、図—5.10から容易に求まる。同図では、最下段計測点の軸力を先端荷重としているが、杭先端と最下段計測点間の距離の影響が無視できない場合、軸方向力分布曲線を外挿して先端荷重を求めればよい。

## (3) 先端載荷試験における杭頭載荷相当の荷重～変位曲線の計算方法

先端載荷試験から得られた周面摩擦抵抗～変位曲線と先端抵抗～変位曲線を用いて、荷重伝達法により杭頭載荷相当の荷重～変位曲線を求めることができる。荷重伝達法による解析には、藤岡ら<sup>13)</sup>の方法と岸田ら<sup>14)</sup>の方法がある。前者は、摩擦抵抗～変位曲線と先端抵抗～変位曲線が杭頭載荷試験と同じと仮定しており、摩擦抵抗と先端抵抗の相互作用の影響を無視しているが、杭頭載荷試験と先端載荷試験を同一地盤で実施した事例と比較すると、図—5.12<sup>7)</sup>、図—5.13<sup>8)</sup>に示すように、荷重伝達法により求めた杭頭載荷相当の荷重～変位曲線は、杭

図—5.12 杭頭荷重～変位曲線の比較事例(1)<sup>7)</sup>図—5.13 杭頭荷重～変位曲線の比較事例(2)<sup>8)</sup>

頭載荷試験のそれとほぼ一致し、実用上問題となる有意差は生じていないようである。

### 5.2.3 設計における載荷試験結果の利用

#### (1) 長期荷重に対する支持力特性

杭基礎は、死荷重のような長期荷重の作用に対して、安定した支持力を保持することと、過大な沈下を生じないことが望まれる。前者の支持力については、ほとんどの載荷試験例で、第2限界荷重に対する第1限界荷重の比率が0.6以上ある<sup>12)</sup>ことから、第2限界荷重に対する長期設計支持力の安全率（一般に3程度）を考慮すると問題ないことがうかがえる。一方、後者の沈下については、単杭による通常の載荷試験の荷重～変位特性から、実基礎（一般に群杭基礎が多い）の長期沈下量を単純に推定すると過小評価になる。場所打ち杭および鋼管杭における長期載荷試験事例では、長期載荷試験による杭頭の鉛直ばね定数は、通常の載荷試験のその0.7倍程度である<sup>15)</sup>。群杭基礎における同様の比較<sup>16)</sup>では、初期荷重載荷時の鉛直ばね定数513 MN/mに対して、長期載荷試験の沈下量を外挿した最終沈下量から求めた長期鉛直ばね定数は284 MN/mであり、その比率は0.55である。その要因として、群杭としての相互作用と表層の軟弱粘性土の圧密が挙げられる。長期荷重による杭基礎の沈下量の推定方法については、地盤の変形係数の非線形性や圧密およびクリープ特性についても考慮しなければならない。これらの詳細は、3.3や文献17)などを参照されたい。

#### (2) 繰返し荷重に対する支持力特性

繰返し荷重に対する累積沈下量は、降伏荷重以下で繰返し載荷しても収束する傾向にあるが、降伏荷重以上で繰返し載荷すると急激に増加する<sup>18)</sup>。この現象は、摩擦杭や引抜き力が繰返し作用する杭において特に問題となる。このように比較的大きい繰返し荷重が常時作用する条件下では、通常の杭基礎においても、長期荷重と繰返し荷重の合計を、第1限界荷重以下に留めるのが望ましい。

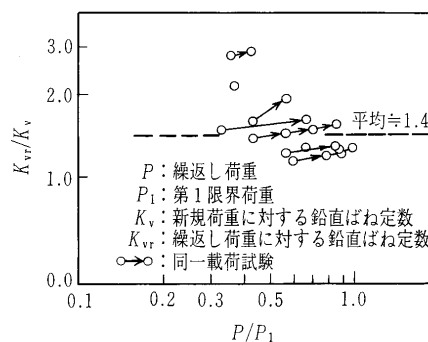
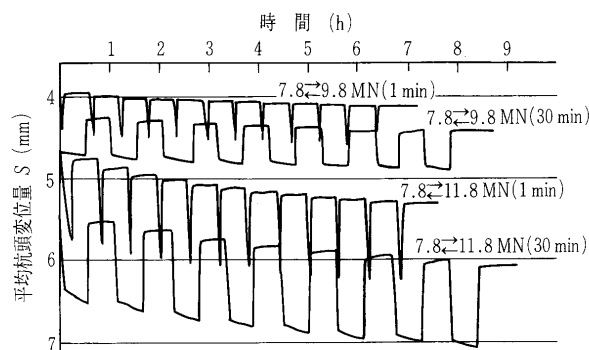
単杭の鉛直載荷試験事例では、図—5.14に示すように、第1限界荷重以下の繰返し荷重時の鉛直ばね定数は、新規荷重時の鉛直ばね定数の1.4倍程度である<sup>15)</sup>。(1)で示した群杭基礎における繰返し載荷試験の杭頭変位の変化を図—5.15<sup>16)</sup>に示す。各回の繰返し変位は同程度となり、繰返し荷重時の鉛直ばね定数は755 MN/mで、初期荷重時の鉛直ばね定数513 MN/mの1.47倍であり、単杭の載荷試験の場合とほぼ同じである。しかし、繰返し荷重載荷による累積変位は、収束に向かうものの、相当大きくなることに留意する必要がある。

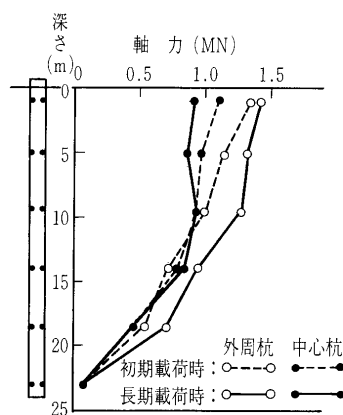
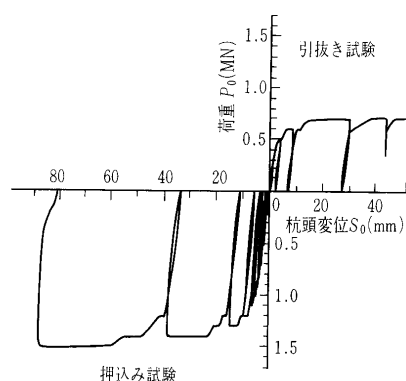
#### (3) 単杭の載荷試験と群杭の支持力特性の相違

(1)で示した群杭基礎の長期載荷試験において、外周杭と中心杭における軸力分布の変化を図—5.16<sup>16)</sup>に示す。初期載荷時と長期載荷後とで比較すると、中心杭の軸力は若干低下しているが、外周杭の軸力は増大している。このことから、群杭の場合には相互作用の影響を無視できないことが明らかである。

### 5.2.4 今後の課題

兵庫県南部地震以降、大地震時の杭基礎の設計法では、道路橋における保有水平耐力法<sup>19)</sup>や鉄道における非線形スペクトル法<sup>20)</sup>など、第1限界荷重を超えた鉛直方

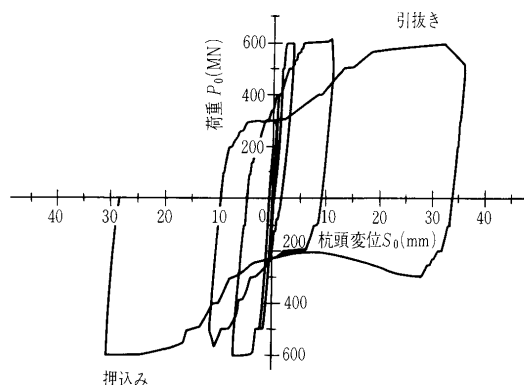
図—5.14  $K_{vr}/K_v \sim P/P_1$  の関係<sup>15)</sup>図—5.15 繰返し載荷による杭頭変位の経時変化<sup>16)</sup>

図—5.16 長期載荷試験による軸力分布の変化<sup>16)</sup>図—5.17 押し込み試験と引抜き試験の杭頭荷重～変位曲線の比較事例<sup>21)</sup>

向の非線形支持力特性を考慮しなければならない。また、動的解析においても、鉛直方向の非線形履歴特性を考慮しなければならない。このような要求に対して、今後、押し込み・引抜きの交番載荷試験が多く実施されるようになると考えられる。同一地盤で実施した押し込み試験と引抜き試験の比較では、図—5.17<sup>21)</sup>に示すように、押し込みあるいは引抜き変位が増加しても荷重の低下が生じないが、同一杭で交番載荷した摩擦杭の事例では、図—5.18<sup>21)</sup>に示すように、荷重が低下するループを描く。このような現象を明らかにするためにも、鉛直方向の交番載荷試験を今後数多く実施する必要がある。

#### 参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説，1972。
- 2) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，1993。
- 3) 地盤工学会：杭の引抜き試験方法・同解説，1992。
- 4) 青木一二三：杭の載荷試験の最近の動向，土と基礎，Vol. 43, No. 5, pp. 13～18, 1995。
- 5) 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，pp. 1715～1718, 1993。
- 6) 佐藤秀人・国府田誠・佐藤有伸・唐鎌成夫・山下利夫・田村昌仁：模型杭による鉛直載荷試験（その2 模型試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 665～666, 1998。
- 7) 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。

図—5.18 鉛直交番載荷試験による杭頭荷重～変位曲線の事例<sup>21)</sup>

- 8) 青木一二三・丸山 修・田中 弘・高瀬昭雄・藤岡豊一：扇状地砂礫地盤における場所打ち杭の鉛直載荷試験（その2：載荷試験結果），土木学会第47回年次学術講演会概要集 第3部，pp. 868～869, 1992。
- 9) 国弘 仁・海野隆哉・栗山道夫・斎藤 淳・小椋仁志：砂礫層に支持された深礎杭の鉛直載荷試験（その2），第28回土質工学研究発表会，pp. 1761～1762, 1993。
- 10) 須藤 隆・久保村覚衛・村田 修・三反畑勇・藤岡豊一：土丹を支持層とする場所打ち杭の鉛直載荷試験（その2：載荷試験結果），土木学会第49回年次学術講演会概要集 第3部，pp. 938～939, 1994。
- 11) 吉福 司・掛川誠一・山田耕三・岸田英明：先端載荷試験法による場所打ち杭の載荷試験，第29回土質工学研究発表会，pp. 1401～1402, 1994。
- 12) 高野昭信・青木一二三・小粥康夫・小笠原政文：第1限界荷重，第2限界荷重の意義と特徴について，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，pp. 47～54, 1991。
- 13) 藤岡豊一・新井邦彦・新井厚生・山田清臣：新しい杭の鉛直載荷試験法の開発，土と基礎，Vol. 39, No. 4, pp. 27～32, 1991。
- 14) Kishida, H. and Tsubakihara, Y.: An analytical method for predicting the displacement of a pile and soil layers, 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore, pp. 565～570, 1993。
- 15) 青木一二三・真田道夫：杭の設計に用いる地盤反力係数，構造物設計資料，No. 83, pp. 20～25, 1985。
- 16) 海野隆哉・青木一二三：場所打ち杭の群杭載荷試験（上），構造物設計資料，No. 84, pp. 19～23, 1985。
- 17) Kuwabara, F., Motomura, O. and Yamato, S.: Long-term settlement characteristics of a friction pile, 土質工学会論文報告集，Vol. 33, No. 4, pp. 26～35, 1993。
- 18) 稲 国芳・岸田英明：一方向の繰返し軸荷重を受ける粘土中の摩擦杭の変形挙動，繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシンポジウム，pp. 99～106, 1990。
- 19) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，pp. 375～384, 1996。
- 20) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），pp. 272～288, 1999。
- 21) 矢島淳二・青木雄二郎・柴崎富士夫：杭の引抜き時と押し込み時における周面摩擦力の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1283～1284, 1992。

本講座では、上記各文献から図表を引用する際、英語表記の和訳、SI単位への換算、記号その他の説明の追加や修正を行っております。