

杭の載荷試験法の基準類の背景

Backgrounds of Codes/Standards for Pile Loading Tests

平山英喜 (ひらやま ひでき)

(株)ジオトップ 基礎研究室

1. まえがき

標題に関して、2章で、土木・建築分野の設計基準類における試験法と適用法についてまとめる。3章で、鉛直載荷・水平載荷・引抜き試験の標準的な試験方法と結果の整理法を詳細に規定している土質工学会基準についてまとめる。4章で、両対数グラフをパソコンで作図する場合の留意点、杭径の10%の沈下量における支持力の歴史的経緯と物理的意味、単杭の載荷試験で測定された沈下量の意義と限界、について述べる。

2. 設計基準類における載荷試験法とその適用法

2.1 概説

杭基礎の設計における、土木（道路・鉄道・港湾）、建築関係の設計基準類の背景に関しては、以前講座¹⁾²⁾にまとめた。また文献³⁾の付録に、設計に際して準拠すべき基礎構造の基準類等のリストがまとめられている。

2.2 道路関係

現行設計基準は、道路橋示方書⁴⁾（以下、道示と略記）である。また、道示の背景や基本的な考え方などを解説した杭基礎設計便覧⁵⁾（以下、便覧と略記）が、道示を補完するものとして刊行されている。杭の載荷試験法に関しては、便覧に、次章で説明する土質工学会基準に基づき概説されている。

道示の1990年版の改訂において、杭の載荷試験法とその適用法に関連して、次の二つの変更があった。

- ① 載荷試験において、明確な極限荷重が見られない場合は、杭径の10%の沈下量のときの荷重をもって極限支持力とする。
- ② ほぼ水平な地盤構成条件の所で、ほぼ杭長が同じ支持杭を採用する場合に、原位置における載荷試験を実施して支持力を推定した場合には、安全率の補正係数 γ を1.2とすることができる。

上記①の定義は、後述するほかの基準類とほぼ同様である。ただし、ほかの基準類では、基準支持力や第2限界荷重と呼ばれている。統計解析の結果、打込み杭や場所打ち杭では、杭径の10%の沈下を生じたときの支持力と極限支持力の比率はおおむね100%に近いことが、①の背景として便覧に解説されている。ただし、解析に際してワイブル分布曲線式によるあてはめが行われているので、上記の極限支持力は外挿による推定値である。杭長/杭径や地盤条件にもよるが、上記の結論は場所打ち杭に関しては必ずしも一般的なものではない。これに

関しては、4.2節で述べる。

上記②の背景として、信頼性設計法を採用した試算による補正係数導入の意義が、便覧の参考資料に示されている。杭の支持力は、支持力算定式で推定するよりも載荷試験で推定する方が望ましいのは当然のことである。しかし、現実には、載荷試験を行う目的は、支持力算定式の確認である場合がほとんどである。このような補正係数の導入による安全率の見直しは、多大な費用と労力を要する載荷試験に経済的な意義を与え、その地盤基礎工学的役割を高めるのに寄与するものと期待される。

2.3 鉄道関係

国鉄建造物設計標準解説⁶⁾においても、杭の載荷試験法は、土質工学会基準によると定められている。載荷試験結果から、設計に用いる杭の鉛直支持力・鉛直ばね定数や水平方向地盤反力係数を求める場合は、杭基礎の特殊設計条件に分類され、杭の形状寸法、根入れ深さ、荷重条件等に関する補正を行うように定められている。

杭径の10%の沈下における支持力を基準支持力と定義して、日本の設計基準類では最初に導入された。その背景・理由については、文献⁷⁾などに説明されている。

2.4 港湾関係

港湾構造物の杭としては、栈橋の基礎杭や矢板式係船岸の控え杭が大半を占める。したがって、海洋工事が主であること、水平荷重が支配的であることなど、陸上工事と異なる特徴がある。

そのため、港湾の施設の技術上の基準⁸⁾における杭基礎の項は、打込み鋼管杭を対象とすること、水平抵抗の解析方法は港研方式を標準とすることなどの特徴がある。杭の載荷試験法や結果のまとめ方に関しても、港湾調査指針⁹⁾によるのが望ましいが、土質工学会基準を参考にすることができるかと解説されている。

港湾調査指針の「杭の支持力試験」の章には、鉛直載荷・引抜き・水平載荷試験に加えて、杭打ち試験が取り上げられている。海上で載荷試験を行う場合の留意点として、①鉛直載荷試験に際して、海上では試験杭の自由長が長い場合が多く、安全のため水平変位を防止する装置をつけることが望ましい；②水平載荷の試験杭の選定に際して、海上で行う場合、波圧による杭の変位を防ぐためにも、波浪の進入の少ないところにある杭を選定する必要がある；ことなどが説明されている。

2.5 建築関係

杭の許容支持力を定める具体的な方法は、「建築基準法施行令」（1950）93条の規定に基づく「建設省告示111

号」(1971)(告示1623号(1978)により一部改正)に示されている。支持力算定式、杭載荷試験結果、杭打ち試験結果のいずれかの算定式によって求めることができるが、支持力算定式で設計し、必要に応じて載荷試験または杭打ち試験で設計値を確認するのが一般的である。確認申請を実際に審査する特定行政庁(人口25万人以上の市、都道府県等の地方行政庁)では、法令に抵触しない範囲内で各地方の条件・実状や後述する学会指針等を考慮した内規を定めて行政指導を行っている⁹⁾。

以上のように、建築実務における設計基準類の構成はきわめて複雑であるが、文献¹⁰⁾に建築構造全体の関連法規の一覧表がまとめられている。また、上記の内規も含めて、建築士事務所協会等により設計指針や確認申請のマニュアル類が発行されている地方もある。これらの中には、杭の載荷試験法に関して、土質工学会基準によることを明記したものもあるが、明記されていない場合でも、通常は土質工学会基準によっている。

建築基準法38条(特殊な材料または工法に関する規定)に基づき、埋込み杭の新工法に対して建設大臣の認定を受ける場合の載荷試験に関しては、日本建築センターの評定の基本方針による¹¹⁾。1992年の改訂で、載荷試験数、支持力の評価方法が明確にされている。例えば、支持力の基準値として、杭先端沈下量が杭先端径の10%に達したときの値とすること等が示されている。

建築学会の建築基礎構造設計指針¹²⁾は、基礎設計をする上での基本的な考え方の参考書的なものであり、ここまで説明してきた基準類と異なり、この指針自体には法的な規制力はない。載荷試験結果から降伏荷重を判定する方法として、① $\log P - \log S$ 法、② $S - \log t$ 法、③ $\Delta S / \Delta \log t - P$ 法、に加えて、④ 軸力分布グラフで、軸力分布勾配が前荷重段階の分布勾配とほぼ等しく平行になりかけたときの荷重、を総合して決めると解説されている。また、場所打ち杭のように、真の極限鉛直支持力に達するのに非常に大きな沈下量を要する場合には、杭径の10%の沈下に達した時点での荷重を基準支持力としている。場所打ち杭の杭先端基準支持力の算定式として、単位面積当たり $\alpha \cdot 15\bar{N}$ (tf/m²) が提案されている。補正係数 α は、載荷試験で確認しない場合については0.5とする。この値は、既往の載荷試験例の下限値にほぼ対応するものから提案されているが、2.2節で述べた道示における補正係数 γ と同様の意義を載荷試験に与える。

3. 杭の載荷試験法に関する土質工学会基準

3.1 概説

学会等で制定された基準類は、それ自体には法的な規制力はないが、前章で説明したように、ほとんどの設計基準類において、杭の載荷試験法に関しては土質工学会基準による、とされている。杭の載荷試験法に関する土質工学会基準としては、鉛直載荷試験(JSF 1811-1993)、水平載荷試験(JSF 規格:T 32-83からJSF 1831-1983に変更)、引抜き試験(JSF 規格:T 41-89からJSF

1821-1989に変更)が制定されている(JSF 番号変更の背景については、文献¹³⁾を参照されたい)。

これらの基準は、研究委員会等やシンポジウムで検討を重ね、基準案を学会誌「土と基礎」に掲載して会員からの意見を受け付けた後に、正式に決定されたものである。そして、詳細な解説を加えた基準書が出版されているので、背景はこれらに詳しい。そこで、基準案資料・シンポジウム論文集・基準書の紹介を中心にまとめる。

3.2 鉛直載荷試験法

現行の基準 JSF 1811-1993は、1971年に制定された基準を改訂したものである。

旧基準制定に際して問題になったのは、基準案資料¹⁴⁾・シンポジウム論文集¹⁵⁾・基準書¹⁶⁾によると、降伏荷重と極限荷重の判定法、載荷重の増減法および荷重保持時間、沈下量測定の方法の設定法などである。

現行基準は、旧基準制定後の約20年間の種々の進歩・変化を反映すべく、改訂されたものであり、基準案資料¹⁷⁾・シンポジウム論文集¹⁸⁾・基準書¹⁹⁾に、背景が詳しく説明されている。現行基準においても、問題になったのは、降伏荷重と極限荷重に対応する荷重の新しい定義とその意義、荷重保持時間などである。

旧基準における降伏荷重・極限荷重が第1限界荷重・第2限界荷重に変更され、定義も一部変更された。呼称に関しては、多くの案が検討されたが、結果的に限界状態設計法の導入を考慮して提案された²⁰⁾。

第1限界荷重は、 $S - \log t$ 法、 $\Delta S / \Delta \log t - P$ 法、残留沈下量の急増点などを参考に $\log P - \log S$ 曲線に現れる明瞭な折れ点の荷重をいう。これに関連して、4.1節に、両対数グラフを作図する場合の留意点を述べる。

第2限界荷重は、杭先端直径の10%相当の杭先端(杭頭でも可)沈下量が生じたときの荷重と、杭頭の荷重-沈下量曲線が沈下量軸にほぼ平行とみなされる荷重のうち、小さい方とする。すなわち、前章で説明した設計基準類における基準支持力の定義に対応する荷重と、旧基準の極限荷重の小さい方となっている。この背景等について4.2節でコメントする。

処女荷重時の荷重保持時間に関しては、旧基準のA法(15分以上の一定時間)、B法(沈下速度が一定値以下に安定するまで)の併立から、30分以上の一定時間に一本化された。これは、荷重保持時間が30分以上あれば、推定された第1限界荷重・第2限界荷重は、60~180分の保持時間から推定されたものと数%の差しか生じないことが、既往のデータの検討から確かめられたことにより²¹⁾、支持力を判定する立場に立って、載荷試験の省力化の要望に応えたものである²²⁾。杭の載荷試験で測定した沈下量の意義について4.3節で考察する。

3.3 水平載荷試験法

日本の場合、下部構造物の規模が、地震時の荷重条件で決まることが多いという特殊な環境にあるため、外国に比べると多くの水平載荷試験が行われてきた。1976~1980年に水平載荷試験に関する研究委員会が設置され、1979年にシンポジウム²³⁾が開催された。1980年

から基準化委員会が設置されて1982年に基準案²⁴⁾が作成され、1983年に基準書²⁵⁾が刊行された。

杭基礎の耐震設計を念頭におき、地震外力を考慮することを目的としているので、荷重保持時間は約2分となっており、0分時(載荷した瞬間)の測定を重視している。

杭頭自由の条件で行うのを標準としているので、荷重に合わせた水平方向地盤反力係数 k 値ではなく、変位量に合わせた k 値を用いて、設計条件での検討をする必要がある。

長期載荷試験等の特殊な試験については、既往の実施例の文献を参照するように解説されている。このような場合、鋼管杭協会編集の文献抄録集^{26),27)}のキーワード索引などが役に立つ。しかしながら、1986年以降の分は著作権法の関係で公刊されていないのは残念である。

3.4 引抜き試験法

従来、杭の引抜き抵抗は、送電線鉄塔など限られた構造物の基礎で考慮されていたにすぎなかった。しかし、耐震設計の強化に伴って、一般構造物の基礎においても設計で考慮するようになってきた。このような状況から早急な基準化が望まれ、共通事項の多い鉛直・水平載荷試験法の学会基準がすでにあることなどから、研究委員会・シンポジウムなしで、基準案²⁸⁾が直接作成され、基準書²⁹⁾が刊行された。

引抜き試験の特性から、①引抜き抵抗は、周面摩擦抵抗が主であるため、小さな変位量でピークに達して急激な変化を示すことが多いので、この点を十分考慮したうえで計画する；②杭頭近辺の地盤はコーン状に浮き上がるので、周辺地盤の変位量やひび割れ量を測定・観察する；③コンクリート杭では、杭材料の非線形性を考慮し、クラックの発生が予測される場合には事前に対処しておく；④打込み杭の場合は、試験開始前に残留軸力が生じている可能性が高いので、ある層の周面摩擦抵抗応力を押し込み試験のものと比較したりする場合には、初期値の設定時期に留意する必要がある³⁰⁾(この場合、杭の上部の方では上記②も影響する可能性がある)；ことなどが解説されている。

4. 載荷試験結果の解釈上の留意点

4.1 両対数グラフにおける留意点

荷重-沈下(P - S)関係をグラフ化するとき、 P 軸と S 軸のスケールの取り方で曲線の性質、例えば最大曲率点を与える点での P の値が変わることは、以前から指摘されてきた。グラフ上での曲線の接線勾配は dP/dS であるが、座標軸のスケール比で第一階および第二階導関数が増えるので、これらの関数である曲率はもちろんその分布特性も変化する。

両対数の場合の接線勾配は $(dP/P)/(dS/S)$ で、無次元になり単位の取り方に無関係になる。市販の両対数グラフを利用すれば、例えば単位の変換としてmmからcmといった10の整数乗の場合だけでなくinchからcmといったものを行ったとしても、比が差になる対数の特

性から曲線はそのまま平行移動するだけである。しかし、この場合も座標軸のスケール比で曲線の性質が変化するのは同様である。最近ではパソコンでグラフ作成ソフトを利用して作図することも多くなってきた。このような場合、縦横の対数目盛りの1サイクルの長さが異なるグラフを作図しているケースが見られる。両対数グラフ上で完全に直線であれば、軸スケールにかかわらず直線であるが、実際には程度の差はあれ直線近似しているので、 P - S 曲線で指摘されてきたことが $\log P$ - $\log S$ 曲線でも生じうる。パソコンで作図する場合でも、縦横同スケールの両対数グラフに限定すべきであろう。

この問題に関する数学的考察やグラフによる具体例の紹介については、誌面の都合で別の機会³¹⁾に述べる。

4.2 杭径の10%の沈下量における支持力

一軸や三軸圧縮試験のように、実用的に十分な大ひずみまで載荷できれば、ピーク値が見られない場合でも極限強度の定義にさほど問題は生じない。しかしながら、杭の場合は十分な沈下量まで載荷できずに、荷重の増加がまだかなり見込める段階で試験を終了するケースが多い。この傾向は、物理的極限先端支持力に至るのに杭径以上の沈下量を要する場所打ち杭のようなnon-displacement杭が増加して、一層顕著になった³²⁾。このため、「載荷試験は答を与えるものでなく、解釈するためのデータを与えるだけのものである」³³⁾とも言える。実際に、載荷試験の解釈のために、数多くのultimate bearing capacityや極限支持力と呼ばれるものが定義され用いられてきた。

2,3章で説明したように、日本の基準類では呼称はまだ様々であるが、明確な極限荷重が見られない場合には、杭径の10%の沈下量での荷重を採用することでほぼ統一されてきた。この杭径の10%の沈下量は、Terzaghi(テルツァーギ)³⁴⁾が打込み杭に対する極限先端支持力のために提案したのが最初であるとされており、英国の基準などにかかなり以前から採用されている。

埋込み杭を貫入するモデル実験の除荷・再載荷時の荷重-沈下量関係において、除荷前の最大先端応力 q_R と再載荷時の杭径の10%の沈下量での先端応力 q_{10} の比を調べた結果によると、 $q_{10}/q_R=0.92\sim 1.0$ となっている²⁰⁾。実際の載荷試験結果で杭径の5%・10%・20%の杭頭沈下量における杭頭荷重を $P_5 \cdot P_{10} \cdot P_{20}$ とすると、 P_5/P_{10} と P_{20}/P_{10} の値は、打込み杭で0.921, 1.016となっている(なお、場所打ち杭では0.890, 1.165, 埋込み杭では0.847, 1.182となっている)²⁰⁾。これらの結果から、Terzaghiが提案したように、打込み杭のようなdisplacement杭では、杭径の10%の沈下量での荷重はほぼ実質的な極限荷重と見なしうる。

各基準類でも解説されているように、杭径の10%の沈下量での支持力の物理的意味は、打込み杭の極限支持力と同じ沈下量を基準とした支持力である。ただし、設計でこれを打込み杭の極限支持力と同等に扱えるかどうかは、議論が分かれるところであり、設計法が限界状態設計法に移行する過程で、さらに検討される問題である

う。

4.3 単杭の載荷試験における沈下量の意義と限界

載荷による杭の沈下は、力学的要因によると次のように分類しうる。

- ① 土のせん断変形に起因する沈下。すなわち、杭軸周辺の土の単純せん断を要因とする沈下と、杭先端下部周辺の土のせん断ひずみを要因とする沈下。
- ② 土の圧密変形に起因する沈下。すなわち、地盤内の有効応力増加による排水による沈下。
- ③ 杭体の圧縮による沈下。

②は当然であるが、①に関してもせん断応力に関する安全率が3程度以下になると、時間依存性を示す。したがって、長期荷重時における杭の沈下量に関しては、標準的な載荷試験ではなく、長期載荷試験が必要となる。荷重保持時間3時間のデータから、それ以降の沈下量を $\log t$ に比例すると仮定して検討した結果によると、この程度の荷重保持時間から長期沈下量を正確に推定することは困難であるという結論が示されている¹⁹⁾。

群杭の場合、①に関して、群杭効果、すなわち杭-土-杭間の相互作用により、各杭の平均荷重の条件での単杭の沈下量より大きくなる。さらに、群杭による地盤内応力増加の量・領域は、基礎フーチング・スラブの面積が増加するにつれ、単杭のものより大きくなる。したがって、杭先端レベル以深に②に関与するような層が存在する場合の沈下に関しては、単杭の載荷試験は浅い基礎における平板載荷試験と同じ問題点を有することになり、別途検討する必要がある。杭先端から杭長の1/3上のレベルなどに仮想載荷面を仮定する方法が、設計基準類で用いられている。この方法の背景と留意点については、文献^{35),36)}を参照されたい。

参 考 文 献

- 1) 平山英喜：講座 基礎設計における基準の背景と用い方 7-1 杭基礎の設計 (鉛直支持), 土と基礎, Vol. 40, No. 6, pp. 57~64, 1992.
- 2) 平山英喜・岡田鉄三：同上 7-2 杭基礎の設計 (水平抵抗), 土と基礎, Vol. 40, No. 7, pp. 75~79, 1992.
- 3) 土質工学会：杭基礎の調査・設計から施工まで (第2回改訂版), pp. 584~612, 1993.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 1990.
- 5) 日本道路協会：杭基礎設計便覧, 1992.
- 6) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説一基礎構造物・抗土圧構造物一, 1986.
- 7) 真田道夫・海野隆哉・青木一二三・柳村史郎：場所打ち杭の先端支持力と周面摩擦力の推定式, 第19回土質工学研究発表会講演集, pp. 987~988, 1984.
- 8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 (改訂版), 1989.
- 9) 日本港湾協会：港湾調査指針, 1987.
- 10) 中田捷夫・大和陽子・後藤美智子：「構造法規」の成り立ち, 建築雑誌, No. 1343, pp. 20~21, 1993.
- 11) 日本建築センター基礎評定委員会：基礎評定委員会の評定・評価に関する基本方針の改訂 (1992) について, ビルディングレター, No. 287, pp. 57~64, 1992.
- 12) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 1988.
- 13) 足立格一郎・今井五郎：学会基準の見直しおよび「土質試験法」の改訂について, 土と基礎, Vol. 38, No. 2, pp. 95~105, 1990.
- 14) クイ載荷試験委員会：クイの鉛直載荷試験基準案, 土と基礎, Vol. 18, No. 7, pp. 30~34, 1970.
- 15) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験法の諸問題に関するシンポジウム発表論文集, 1970.
- 16) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説, 1972.
- 17) 軽部大蔵・山肩邦男：土質工学会基準改訂案「杭の鉛直載荷試験方法」について, 土と基礎, Vol. 39, No. 6, pp. 78~82, 1991.
- 18) 土質工学会：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, 1991.
- 19) 土質工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 1993.
- 20) 高野昭信・青木一二三・小粥庸夫・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, 文献18), pp. 47~54.
- 21) 野邑正美・青木一二三：支持力判定における荷重保持時間の影響について, 文献18), pp. 43~46.
- 22) 山肩邦男：杭の鉛直載荷試験における支持力判定法と処女荷重階荷重保持時間に関する考察, 文献18), pp. 31~34.
- 23) 土質工学会：杭の水平載荷試験法に関するシンポジウム発表論文集, 1979.
- 24) 赤木俊允・岸田英明：土質工学会基準案「杭の水平載荷試験方法」について, 土と基礎, Vol. 30, No. 9, pp. 59~62, 1982.
- 25) 土質工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説, 1983.
- 26) 鋼管杭協会：杭に関する文献の抄録集 (1970~1979), 文一総合出版, 1981.
- 27) 鋼管杭協会：同上 (1980~1985), 山海堂, 1987.
- 28) 足立格一郎・山田清臣：土質工学会基準案「杭の引抜き試験方法」について, 土と基礎, Vol. 36, No. 10, pp. 125~128, 1988.
- 29) 土質工学会：杭の引抜き試験方法・同解説, 1992.
- 30) 平山英喜：長尺摩擦杭の支持機構から見た設計上の留意点, 土と基礎, Vol. 40, No. 2, pp. 35~40, 1992.
- 31) 平山英喜：両対数グラフの特性と留意点, 第30回土質工学研究発表会講演集, 1995 (投稿中).
- 32) 平山英喜：沈下量の関数で定義した場所打ち杭の先端支持力, 第24回土質工学研究発表会講演集, pp. 1277~1280, 1989.
- 33) Fellenius, B. H.: Test loading of piles and new proof testing procedure, Jour. of Geotech. Eng., ASCE, Vol. 101, No. 9, pp. 855~869, 1975.
- 34) Terzaghi, K.: Discussion of "Pile-driving formulas", Proc. ASCE, Vol. 68, pp. 311~323, 1942.
- 35) 平山英喜：群杭基礎のミンドリン解に基づく地盤内応力分布とその簡便法, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp. 1445~1448, 1994.
- 36) Hirayama, H.: A simplified method for evaluating stresses in soils due to pile-group loading, Proc. IS-Hiroshima '95, Balkema, 1995 (to be published).

(原稿受理 1994.12.21)