

杭の簡易載荷試験法の基礎的検討

榑武智工務所 正会員○小椋仁志 同 小寺浩二
東京工業大学 正会員 椿原康則 同 岸田英明

1. 序

杭基礎の持つ問題点の一つに、でき上がった杭の品質を保証するのが難しいことが挙げられる。しかし、建設の分野においても品質保証の問題が論じられるようになっており¹⁾、現在検討されている製造物責任制度や基礎構造の限界状態設計法などが実施されると、杭についても現状より多くの頻度でその品質を保証することが要求されるようになって考えられる。

載荷試験は、杭が所定の性能を満足するものであるか否かを確かめる方法として最も確実な方法である。しかし、現在行われている杭の鉛直載荷試験法では、大がかりな載荷装置を用いるため、多額の費用と時間が必要となって数多く実施することはできない。さらに、載荷桁の能力や反力杭として本設杭を利用することなどの問題から十分な荷重を試験杭に載荷することができないことが多い。多額の費用と時間を費やしているにもかかわらず、ほとんどの載荷試験で、極限支持力はもちろん降伏支持力をも得られていないのが実状である²⁾。このような試験では設計支持力の確認はできるものの、杭と地盤の情報、特に杭先端地盤について十分な情報が得られないことになる。

筆者らは、現行の載荷試験法が将来の杭の品質管理法として問題があると考え、より簡便な試験法を検討している。本報告では、その一つの方法として、杭の先端抵抗と摩擦抵抗とを互いに反力として載荷することによって載荷桁や反力杭が不要な「簡易載荷試験法」を取り上げ、模型実験や現場実験の結果を通して、この試験法の実用性や問題点などについて基礎的な検討を加えることとする。

2. 簡易載荷試験法の概要

簡易載荷試験法の考え方は、いくつか提案されているが、大きく2種類に分けられる。一つは、図1(a)のように、杭頭のジャッキからロッドを先端部まで伸ばして載荷を行うものである³⁾。この方式は、杭体に引っ張り力が働くためコンクリートの杭では使いにくい。もう一つは、図1(b)のように、杭の先端部に直接載荷する方式であって、角井⁴⁾やOsterberg^{5) 6)}が提案しているものである。

角井の方法は、既製杭の先端抵抗の測定を目的としており、先端部に取り付けた油圧ジャッキで先端部を押すものである。試験後は、杭本体と先端部の間にグラウト注入を行って、本設杭として使用できるとしている。

Osterbergの載荷試験法は、主に場所打ち杭を対象としているが、既製杭にも適用できるとしている。場所打ち杭の場合、図2(a)のように、先端部に組み込むジャッキは、2枚の円板とその間にある蛇腹から成り立つ簡単なものである。既製杭の場合は、同図(b)のような単純化したジャッキを用いる。ジャッキの中心軸上には、ある程度剛性のある2重管を取り付けて、外管は上板に、内管は下板にそれぞれ固定されている。ただし、両管とも板を貫通している。ジャッキには外管と内管との隙間を通して、油か水が送られるようになっている。内管は、場所打ち杭の場合に、下側の円板と地盤面との間に生じる隙間を充填するためのコンクリートを送る時にも用いる。したがって、既製杭の場合は、内管はロッドでもよい。

この方式では、外管をジャッキ上板の抜き上がり量の、内管を先端沈下量の測定にそのまま利用できる。ただし、場所打ち杭の場合は、外管とコンクリートとの付着を避けるため、さらに外側に管が必要となる。

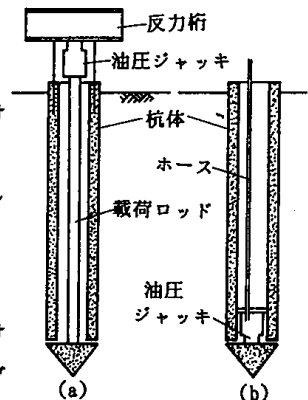


図1 簡易載荷試験法

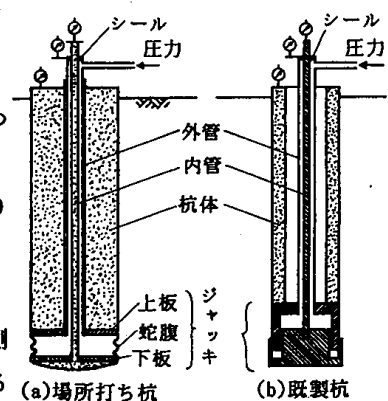


図2 Osterbergの方法

A Study on a Simplified Load Testing Method of a Pile; H.Ogura, K.Kodera(Takechi Engineering Co.,Ltd.), Y.Tsubakihara, H.Kishida(Tokyo Institute of Technology)

また、試験終了後、ジャッキの中にモルタルを充填すると、試験杭を本設杭として使用できるとしている。

Osterbergの方法は、すでに米国を中心に実用化されている。表1は、文献⁶⁾に紹介された試験例をまとめたものである。支持層の地盤に岩盤

表1 Osterbergによる載荷試験例

杭の種類	場所	土被り厚 (m)	支持層	支持層への根入れ		最大荷重 (tf)	最大変位量(mm)		備考
				深さ(m)	直径(m)		上向き	下向き	
1 場所打ち杭	米国	4.9	風化頁岩	1.8	0.91	220	47	16	
2 場所打ち杭	米国	6.4	砂岩	1.8	0.58	408	46	2	
3 場所打ち杭	香港	14	花崗岩	3	1	1,470	2	7	
4 場所打ち杭	米国	20	砂質石灰岩	4.6	1.3	320	0.5	72	本設杭
5 場所打ち杭	米国	22	砂質石灰岩	3	0.89	230	0.2	152	
6 打込み杭	米国	32	濃硬粘土	微小	(0.46)	130	7	微小	鋼管杭
7 打込み杭	米国	27	濃硬粘土	微小	(0.46)	195	8	2	鋼管杭

(ただし軟岩と推測される)が多いのは、日本とは異なった点である。

簡易載荷試験法をこれまで国内で行ったものとしては、松井らの模型実験⁷⁾と新井らの現場実験⁸⁾がある。前者はOsterbergの方法を小型の模型実験で試み、その結果、この試験法で得られた先端抵抗や摩擦抵抗が通常の試験法から得られたものとはほぼ等しいとしている。後者は、油圧ジャッキを既製杭の先端に取り付けたものによる現場実験である。この報告では、実験の結果を荷重伝達法によって解析し、杭頭荷重～杭頭沈下量関係の推定法を提案している。また、先端部に取り付けたジャッキを回収できる方式も示している。

3. 模型実験

簡易載荷試験法を実際に試すため、大型の模型実験を行った。この実験は、長さ6m、幅4m、深さ5mの大型土槽に、図3のような先端載荷装置を持つ場所打ち杭を設置して行ったものである。地盤は砂(瀬戸砂6号)をパイプハンマーで締め固めたものであり、試験杭は直径35.5cmの鋼製ケーシング内にコンクリートを投入して作製したものである。

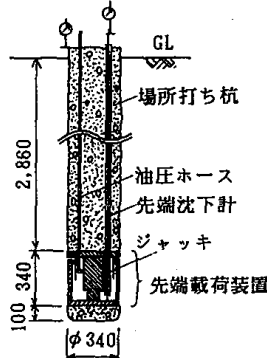


図3 試験杭の概要

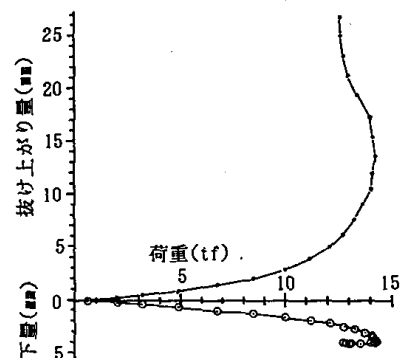


図4 模型実験の結果

実験の結果得られた荷重と杭頭の抜け上がり量および先端沈下量との関係を図4に示す。この図から、極限の摩擦抵抗は約14tfであって、この杭の極限支持力は28tf以上であることが分かる。この実験では杭の根入れ長さが小さいため、極限摩擦抵抗は非常に小さい。このため、先端沈下量は杭径の1%程度しか得られていない。このように簡易載荷試験法では、先端抵抗と摩擦抵抗の極限值が極端に異なる場合に十分な載荷ができないことになる。

4. 現場実験

簡易載荷試験法と通常の試験法とを比較するため、既製杭を用いた現場実験を行った。以下、この実験の概要と結果を示す。

実験概要 実験場所は大阪府堺市で、図5のように粘性土が主体の地盤である。試験杭としては、図6(a)~(c)のように3本のPHC節杭(節部径50cm、軸部径40cm)を用いた。(a)は通常の載荷試験に用いる杭(以下「通常型」と呼ぶ)で長さは12mである。(b)と(c)は、簡易載荷試験に用いる長さ13mの杭である。(b)は杭の先端面に、(c)は最下端の節部の上に単純化したジャッキ(ストローク15cm)を、それぞれ取り付けている。(b)を先端型、(c)を中間型と略称する。中間型は、最下端節部が先端面と同様の抵抗機構となる⁹⁾ことを考慮したものである。

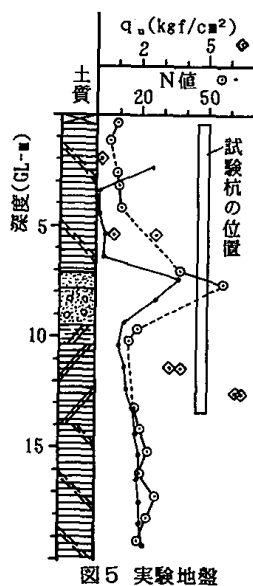


図5 実験地盤

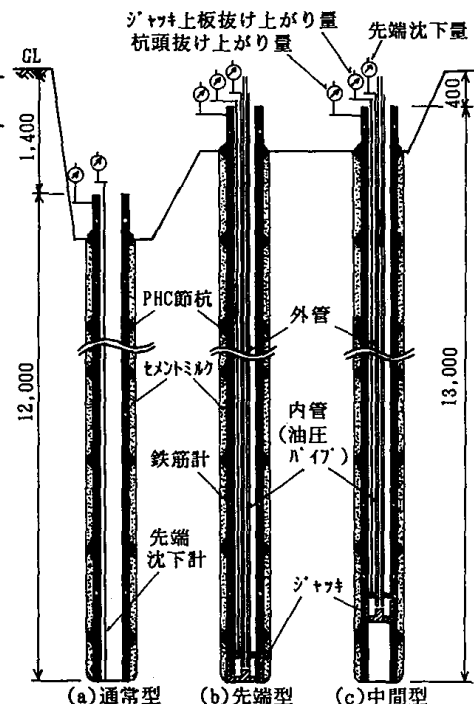


図6 現場実験の試験杭

ジャッキの構造はOsterbergの方式とは少し異なっており、内管を通して油圧を与えるようになっている。外管はジャッキの下板に固定して内管の保護と先端沈下量の測定に用いる。ジャッキの上板の抜け上がり量は別のロッドを設けて測定する。また、試験杭には、軸力測定用の鉄筋計（8断面×4）を取り付けている。

試験杭はセメントミルク工法で埋め込んだ。使用したアースオーガーの外径は55cmである。セメントミルクの配合はw/c=75%であって、圧縮強度は150kgf/cm²程度（他の実験からの推定値）である。実験は、杭を埋め込んだあと2週間経過してから、一段階の荷重を12tf、処女荷重時の荷重保持時間を30分として行った。

実験結果 通常型の杭の荷重～沈下量の各関係を図7に、軸力の分布図を図8に示す。設計荷重(30tf)の6.4倍の192tfを載荷しても、杭頭沈下量は5mm以下であり、杭先端には荷重がほとんど伝達されていない。もちろん降伏荷重も得られていない。しかし、これ以上載荷すると反力杭と載荷桁に障害が起きるおそれがあったため、この時点で載荷を中止せざるを得なかった。現行の載荷試験法の問題点が、現われた例であると言えよう。

図9は、中間型の杭の場合の荷重と先端沈下量および抜け上がり量との関係である。抜け上がり量は、杭頭のものとはジャッキの上板のものを示している。先端の地盤がシルト層であるため先端沈下量が多い。これに対して、抜け上がり量は非常に小さく、摩擦抵抗が大きいことが分かる。図は省略するが、先端型の杭でも同様である。この実験では、先端抵抗についての情報は得られたものの、摩擦抵抗については抜け上がり量が小さく十分とは言えない。模型実験と同様、先端抵抗と摩擦抵抗の大きさが極端に異なる場合の問題点が現われている。

なお、この杭の実験結果から得られる許容支持力は、先端沈下量が杭径(節部径)の10%の時の荷重102tfを安全率3で除した34tfと、最大荷重時の摩擦抵抗108tfの1/3の36tfとを合計した70tfとしてよからう。

図10(a)に中間型の杭の軸力分布図を示す。簡易載荷試験では杭頭の抵抗が0になるため、予め杭の圧縮試験を行い、得られた較正係数を用いて軸力を計算した。同図(b)は最大荷重時の摩擦応力の分布である。この図には、通常型の杭のPo=120tf時(摩擦抵抗は104.5tf)の摩擦応力も併記している。これら図から、中間型の杭の場合、深い位置ほど摩擦抵抗は大きくなっていること、GL-7～9.5mの砂質土層の影響は見られないことなどが分かる。図は省略するが、先端型の杭の場合も同様である。

これに対して、通常型の杭の場合、砂質土層を含む深さの摩擦応力が大きくなっている。これは、簡易載荷試験では摩擦抵抗の方向が通常の試験とは逆になっているためや、地中部に上向きの力を加え杭体が上方に移動することから、地盤内の応力分布が通常の状態とは違ったものになっているためと推測される。これらのことは簡易載荷試験で得られた摩擦抵抗を評価する上で重要な問題点であり、今後検討していかねばならない課題の一つである。

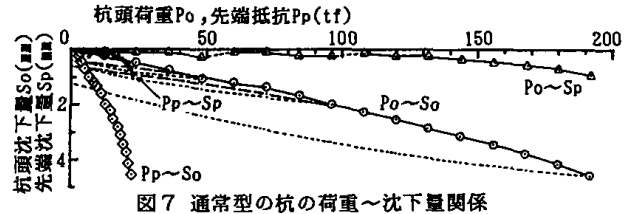


図7 通常型の杭の荷重～沈下量関係

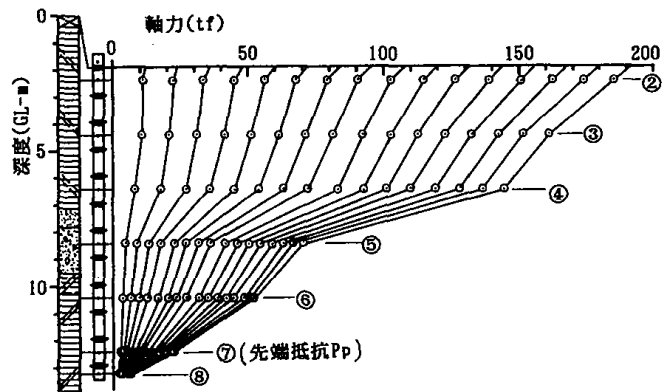


図8 通常型の杭の軸力分布

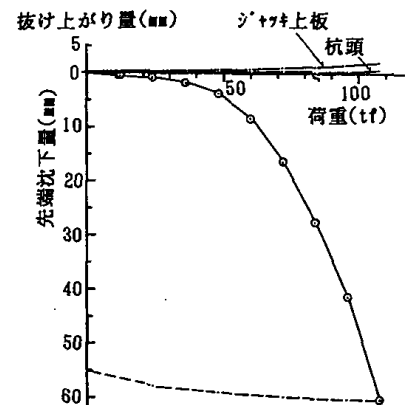


図9 中間型の杭の荷重～沈下量、抜け上がり量関係

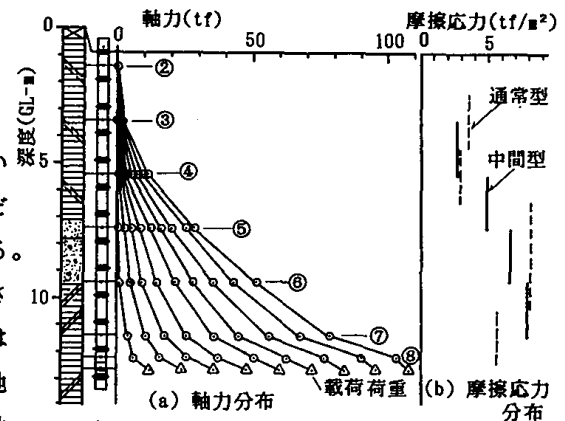


図10 中間型の杭の軸力と摩擦応力の分布

5. 現場実験の解析

解析法の概要 本現場実験では、試験杭に予め鉄筋計を取り付けて軸力分布を測定しており、これによって各深さの伝達関数（杭周面摩擦応力と杭変位量との関係）を求めることができる。しかし、簡易載荷試験法が実用に供されるとなると、杭体の軸力分布を測定せずに通常型の杭の挙動を推定する方法が必要となる。そこでここでは、杭周辺の原位置粘性土試料を用いた境界摩擦要素の室内試験を行い、この試験結果と杭周辺地盤のせん断変形量を考慮することにより、上述の伝達関数を求める手法を提案する。更に、求めた伝達関数を使用して、杭体の軸方向弾性変形を考慮した通常型の杭の沈下量解析を試みる。なお、摩擦の上向きと下向きの伝達関数は等しいと仮定し、試験杭は直径55cmの節の無い杭と見なした。また、杭先端の反力と沈下量との関係は、中間型の杭において測定されたものを使用した。（図9参照）

室内試験 ■概要 ①土試料 不攪乱の粘性土で、杭表面と垂直方向に円柱状に切り出したものを使用した。寸法は、直径60mm、厚さが20mm程度である。圧密圧力 σ_v は、採取深度における有効上載圧 σ_v' に静止土圧係数 K_0 （=0.5と仮定）を乗じた値とした。

表2 地盤の諸元

深度 (m)	土質記号 (土質区別)	不攪乱粘性土試料						砂質土試料		G (層内で一定) (kgf/cm ²)	
		採取深度 (m)	Q_u (kgf/cm ²)	E_{50} (kgf/cm ²)	P_c (kgf/cm ²)	OCR	I_p	粒度組成 (%)	採取深度 (m)		粒度組成 (%)
5	A (clay)	1.50	0.24	160	8.45	28	47.9	8.80	9.35	A	55
	B (clay)	2.35	1.74	230	13.24	15	44.6			B	80
10	C (sand)	5.00	11.00	—	—	—	—	8.80	9.35	C	—
	D (clay)	11.90	3.57	280	13.15	10	40.2			D	95
	E (clay)	12.00	6.43	530	—	—	33.3			E	180
15	E (clay)	12.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ただし、 σ_v' は、土の単位体積重量を粘性土層で1.6t/m³、砂質土層で1.7t/m³と仮定し、静水圧を差し引いて計算した値である。4箇所の深さから採取し、各深さの σ_v は、0.15、0.43、0.67、0.70kgf/cm²である。各土試料の諸元を表2に示す。なお、地盤は杭の沈下量解析のために、A~Eの5つに層区分されており、A、B、D、Eの粘性土層に対する伝達関数には、各層の深度に対応する土試料の結果が用いられる。

②杭試料 PHC節杭をセメントミルク工法により設置したので、杭表面の試料として、モルタル（圧縮強度：360kgf/cm²）を用いた。杭表面は充分粗いことが予想されるので、モルタルの表面を摩擦方向と直角にキズをつけて粗くした。この時の表面粗さは約50 μ mR_{max}, L0.2mm（JIS B 0601-1976）である。なお、この摩擦試験の他に、境界面（モルタル面）で滑りを生じない場合に相当する土試料のせん断試験も同時に行った。

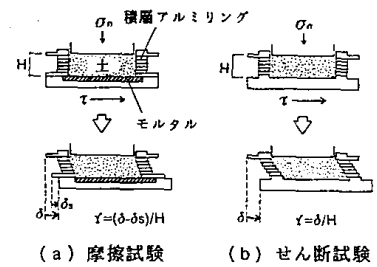


図11 試験装置の模式図

③試験装置 図11(a)に摩擦試験装置を、同図(b)に土試料のせん断試験装置の模式図を示す。どちらも単純せん断型のものであり、全変位量 δ の他に、土試料のせん断歪 γ （および境界面での滑り量 δ_s ）を測定することができる。土試料の拘束棒は各1mm厚の積層アルミリングである。

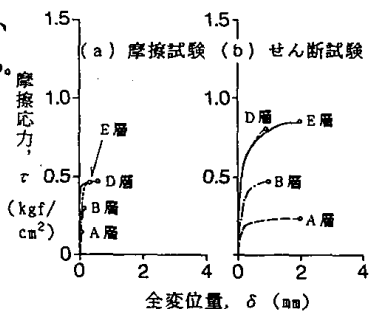


図12 室内試験の結果

④荷重方法 所定の σ_v で圧密（12時間程度）した後、 σ_v を一定にしたまま荷重速度0.1kgf/cm²/hourで載荷した。なお、荷重速度は現場実験の平均載荷速度（12tf/30minを、杭の全周面積で除した値）と一致させた。

■試験結果 図12(a)、(b)に、各土試料に対する摩擦応力 τ と全変位量 δ との関係を示す。摩擦試験は、最大強度付近までは境界面で滑りが殆ど発生していないので、ほぼせん断試験の曲線と重なる。また、モルタル表面をかなり粗く仕上げたのにも関わらず、境界面で滑りが発生し、最大強度が土試料のせん断強度と比べて予想より小さくなった。しかし現場杭の設置では、境界面の全ての凹凸にセメントミルクが充填されているので、実際には境界面で滑りを生じていないと考えられる。

杭周辺地盤のせん断変形量の計算 図13に、ある杭要素の半径方向に考えた地層のせん断変形を表した図を示した。本研究の境界摩擦要素が無く、杭

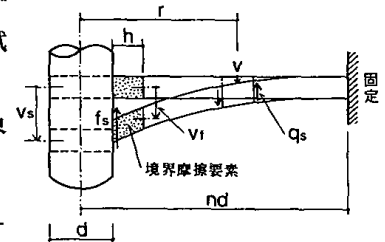


図13 杭周辺地盤のせん断変形

周面で滑りが発生しないと仮定すると、Cooke¹⁰⁾と同じモデルとなる。この地層は弾性でせん断剛性率Gを持ち、杭径dの10倍以上離れたところでは殆ど変形しない¹¹⁾ (即ち、 $n=10$)と仮定すると、杭周面にせん断応力 f_s が加わった時の境界摩擦要素(厚さh)より外側の地層のせん断変形量 v_r は、

$$v_r = (d \cdot f_s) / (2G) \cdot \ln \{ (d/2 + h) / (10d) \} \quad \text{となる。}$$

なおGの値(粘性土層)は、土試料の一軸圧縮試験の E_{50} をヤング率Eとし、ポアソン比 ν を0.45と仮定して求めた。 $G = E / \{ 2(1 + \nu) \}$ (表2参照)

伝達関数 伝達関数は、室内試験の $\tau \sim \delta$ 曲線に $f_s \sim v_r$ 曲線を変位に関して重ね合わせるにより求めた。図14(a)、(b)に、それぞれB層、D層に関して、室内試験より得られた伝達関数を現場実験の結果と併せて示した。更に、Gの値の妥当性を検討するために、せん断剛性を無限大($G = \infty$)とした場合の室内試験の結果も示した。ただし、横軸の変位は全て各深度の杭変位量である。また、現場杭の摩擦応力には、各層に近い区間の結果を用いた。(図中に区間名を付記)なお、A層は表土、E層はジャッキ付近であるので、ここでは現場実験の結果と比較していない。

C層(砂質土層)については、室内試験が行えなかったので、現場の実測値(通常型、④-⑥区間)をそのまま使用した。図15に、実験結果を計算用の伝達関数(破線)と一緒に示した。

これらの図より次のことが分かる。まず、室内試験の結果で $E = E_{50}$ の場合、現場杭より同じ荷重で大きい杭変位を生じてしまう。これに対して、 $G = \infty$ の場合は、現場杭に近い結果となっている。境界摩擦要素より外側の地層のせん断歪はかなり小さいことが考えられるので、Gの値は上記のことからもっと大きくする必要がある(例えば、 $E = 3E_{50}$ ¹²⁾) また、摩擦強度に関しては、現場杭では最大強度まで達しないで実験を終了していることから、室内試験の結果は小さい値であることが分かる。これは、試験時の圧密圧力 σ_v を決める場合、 $K_0 = 0.5$ と一律に仮定したことが原因の一つであると考えられる。表2に示すように粘性土試料の過圧密比(OCR)は10以上であり、 K_0 をもっと大きく仮定すべきであると思われる。(例えば、 $K_0 = 0.5\sqrt{OCR}$)ただし、この時杭の設置方法等も考慮すべきと思われる。

杭の沈下量解析 上述した伝達関数および中間型の杭より得られた杭先端の荷重～沈下量関係を使用して、通常型の杭の沈下量を荷重伝達法により計算した。ただし、伝達関数等は、簡単のために完全弾塑性に近似して使用した。(例、図15)また、杭体の軸方向剛性(ヤング率×断面積)には、節杭のみの校正值 $0.32(tf/10^6)$ を使用した。図16に、せん断試験結果および摩擦試験結果を用いて推定した杭頭の荷重～沈下量関係を、通常型の杭の実測値と併せて示した。図14での

比較からも予想できるように、 $E = E_{50}$ の場合よりも $G = \infty$ の場合の方が、より実測値に近い結果を推定している。更に K_0 をより大きな値にすれば、杭頭荷重が大きな場合にも近い結果を推定出来るものと思われる。また、図14から分かるように摩擦試験は載荷の途中までせん断試験と同じ挙動を示し、杭周面の各箇所でも周面摩擦力が降伏するに従って、大きな変位量が発生している。

結び 本解析では、砂質土層の伝達関数を室内試験から得ることが出来なかった。しかし、少なくとも粘性土層のみの地盤であれば、本解析法が適用可能であると思われる。

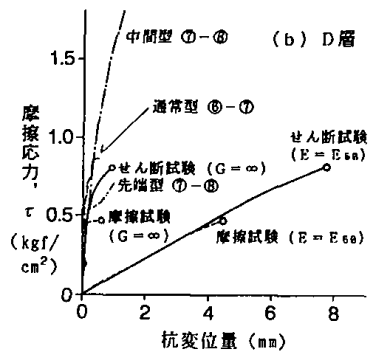
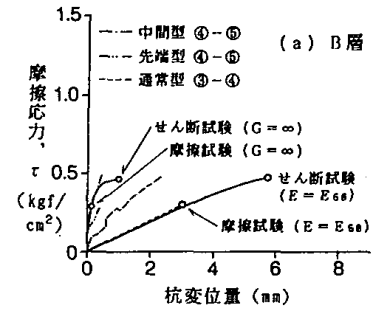


図14 粘性土層の伝達関数

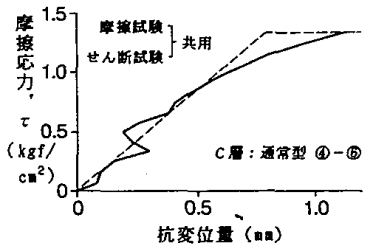


図15 砂質土層の伝達関数

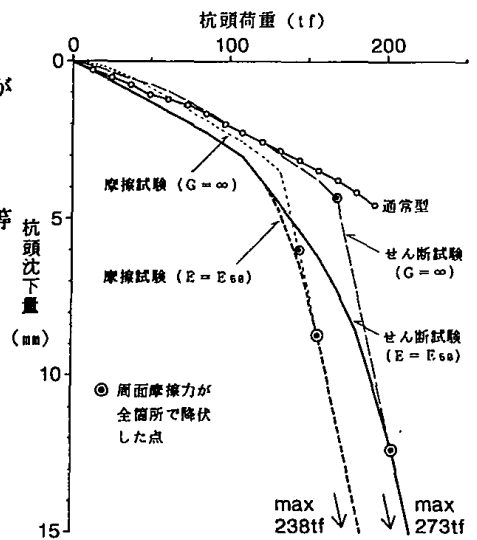


図16 杭の沈下量解析結果

6. 簡易載荷試験法の問題点

簡易載荷試験法は、載荷桁や反力杭が不要であることを始めとして多くの長所を持っている。しかし、実験の結果を通して見られたように、実用化に当たっては以下に挙げるような基礎的な問題点が存在している。

① 杭の全体としての支持力や変形性能が得られないこと

簡易載荷試験は、基本的には、杭先端面での平板載荷試験（深層載荷試験）と摩擦抵抗の試験（引き抜き試験）という独立した2つの試験を同時に行うものであって、杭全体としての支持力や変形は得られない。たとえば、杭頭荷重～杭頭沈下量関係も、5節で述べたような解析法によって推定することになる。

② 先端抵抗と摩擦抵抗の小さい方の極限值までしか載荷できないこと

実験で顕著に見られたように、載荷荷重は先端抵抗と摩擦抵抗の小さい方の極限值が限度となるため、両者が極端に異なる場合には十分な載荷ができないことになる。最悪の場合、試験杭が設計支持力を満足しているかどうかの判定さえもできないおそれがある。

これに対しては、ジャッキをより上方に取り付ける⁶⁾、補助的な載荷桁を設ける⁶⁾、などの対策が考えられている。しかし、これらの対策にも許容支持力の算定時や反力杭の必要性など別の問題が生じてくる。

③ 最大変位量がジャッキのストロークに制約されること

載荷荷重に関してはジャッキの能力に問題はないが、最大変位量は盛り替えができないためジャッキのストロークが限度となる。もし、先端部に厚いスライム層が残っていると、極限抵抗が発揮されるのに必要な変位量が大きくなり、十分な荷重まで載荷できないおそれがある。

④ 摩擦抵抗が通常とは反対の方向になること

杭の先端部から載荷するため、周面摩擦力の方向は通常とは逆になる。土被り圧を考えると、上向きと下向きの摩擦抵抗のメカニズムは異なるものと思われる。したがって、簡易載荷試験で得られた摩擦抵抗を、そのまま鉛直支持力の算定に使っていかどうかの検討が必要となる。

⑤ 地盤内の応力分布が通常とは異なる状況になること

簡易載荷試験では、地中部に上向きの力が加わり、杭体が上方に移動する。このため地盤内の応力分布が、通常とは異なった状況下にあることになる。これが摩擦抵抗や先端抵抗に及ぼす影響を検討する必要がある。

以上の他にも、ジャッキの底面と掘削底とのフィッティングの問題やジャッキの設置方法など多くの課題が残されている。

7. 結語

本報では簡易載荷試験に関して、模型実験と現場実験の結果を通して得られた基礎的な問題点について検討した。この試験法を実用化するためには、本報告で述べた多くの問題点を解決していかねばならない。

しかし、序でも述べた通り、杭の品質を保証するための簡便な試験法が必要となるであろう。今回検討した簡易載荷試験法も、動的測定法などと並んで今後必要となる試験法の一つであると考えられる。今後も簡易載荷試験法を実用化するため、実験や検討を重ねていきたい。

謝辞 3節の模型実験に際して、ご指導を賜った大阪大学松井保教授に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 加登文士：建設における施工管理—どこまでできる品質保証—、土と基礎、Vol.39, No.7, pp.1~6, 土質工学会, 1991.7.
- 2) 節杭協会学術委員会：節杭便覧(1990年版)、平成2年3月
- 3) たとえば、B. Cernak, J. Hlavacek, K. Klein: A new method of static pile load test system VUIS-P, Proceedings of the 1st International Geo-technical Seminar on Deep Foundations on Board and Auger Piles, pp.291~302, Ghent, 1988.7.
- 4) 角井五平次：既成杭の先端載荷試験方法、特許公報 昭53-12723, 昭和53年5月4日
(この考え方に関する論文や報告が見当たらないため、ここでは特許公報を参考文献とした)
- 5) J. O. Osterberg: A New Simplified Method For Load Testing Drilled Shafts, ADSC, pp.9~11, 1984.8.
- 6) J. O. オスターバーグ(吉見吉昭訳)：杭載荷試験用の新しい加力装置—埋め込み杭および打ち込み杭に適用可能—、基礎工、Vol.19, No.8, pp.114~119, 総合土木研究所、平成3年8月
- 7) 松井保、小田和広、榎山芳郎、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、昭和63年度土木学会関西支部学術講演概要集、pp.Ⅲ-21-1~2, 1988.
- 8) 新井邦彦、藤岡豊一、新井厚生、山田清臣：新しい杭の鉛直載荷試験法の開発、第25回土質工学研究発表会(岡山)、pp.1297~1300, 平成2年6月
- 9) 小椋仁志、山肩邦男、岸田英明：模型実験による節付き円筒杭の支持力特性の検討、日本建築学会構造系論文報告集、No.374, pp.87~97, 昭和62年4月
- 10) R. W. Cooke: The Settlement of Friction Pile Foundations, Proc. Conf. Tall Buildings, Kuala Lumpur, pp.7~19, 1974.
- 11) R. W. Cooke and G. Price: Strains and Displacements around Friction Piles, Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech., Moscow, 2.1, pp.53~60, 1973.
- 12) F. Kuwabara: Settlement Behaviour of Non-Linear Soil around Single Piles Subjected to Vertical Loads, Soils and Foundations, Vol.31, No.1, pp.39~46, 1991.