単杭の静的押込み試験法に関する考察

CONSIDERATIONS ON METHOD FOR AXIAL STATIC COMPRESSIVE
LOAD TEST OF SINGLE PILES国府田 誠^{*1}, 山下利夫^{*2}, 斎藤英明^{*3}, 田村昌仁^{*4}佐藤秀人^{*5}, 笹沼美和^{*6}, 刑部 徹^{*7}Makoto KOUDA, Toshio YAMASHITA, Hideaki SAITO, Masahito TAMURA,
Hideto SATO, Miwa SASANUMA and Toru OSAKABE

In the static axial compressive load tests of a single pile, various methods are in existence, i.e.: the direct loading method, the method using reaction piles, the method using masses as loading reaction, the pile-toe loading method and so on. However, in these methods, influence of the loading reaction has not been compared and discussed enough. We carried out various load tests of model piles in order to examine the above problems. From these results, we could understand that the initial rigidities of compressive loads are evaluated larger and the ultimate bearing capacities are evaluated smaller in the cases of using reaction devices.

Keywords: Single Pile, Axial Compressive Loading Test, Load Reaction, Pile Skin Friction, Pile-toe Load

単杭, 押込み試験, 載荷反力, 杭周面摩擦力, 先端荷重

1. 序 論

杭の支持力～沈下関係は載荷試験によって求めるのが原則とされている。また、載荷試験は実杭を用い、より実状に近い実荷重下で実施することが望ましい。しかしながら、杭の発達により支持力が増大している現状において、実杭を用い、実荷重を直接的に載荷する試験の実施が困難となっている。そのため載荷反力を用いた静的押込み試験の適用が余儀なくされている。本論文は各種静的押込み試験法について模型試験によって考察するものである。

(1) 押込み試験法の概要

図1に、主な静的押込み試験法について、その載荷方式と荷重伝達線の模式図を示す。なお、本荷重伝達線図は、載荷によって新たに発生する応力において、絶対主応力が最大となる主応力線を結んだものと定義し、次の3原則を設定することにより、推測によって描いたものである。

- i) 荷重～反力機構において、荷重の全ては反力体に伝達される。
- ii) 荷重伝達線は荷重点から反力点に向かい、途切れたり、分岐

したりしない。

iii) 同一荷重源から発生する荷重伝達線は交わらない。

ただし、i) は力の釣合いの原理・原則によるものであり、ii),

iii) は磁石の正極および負極が、杭の載荷試験法の載荷および反力に対応するものとし、磁力線の原則を参考にしたものである。

図1において、実載荷方式(a)は、前述したように反力の影響の無い理想的な試験法であり、荷重伝達線は広がりをもって地中深くに伝達する。実重量反力方式(b)は、一般には実荷重方式と呼ばれているものであり¹⁾、コンクリート塊や鋼材などのような重量物を載せた架構を載荷反力とするものである。本論文では実載荷方式(a)との混乱を避けるため、実重量反力方式と呼ぶことにした。なお、載荷が始まると、この方式の架構の支点反力は載荷に等しい分だけ減少することになる。載荷前の架構支点から地中に伝達される応力(b-A)を無視すると、載荷によって新たに発生する荷重伝達線は、上記原則に従い、杭周面および杭先端から架構の支点に向かう形状となり、あたかも引抜き抵抗体が支点の下に存在している

本論文の一部は、文献7)～10)で発表した。

^{*1} 日本大学理工学部海洋建築工学科 教授・工博

^{*2} 東京電力(株)原子力技術部 部長・工博

^{*3} 東京電力(株)電力技術研究所 耐震グループ室長・工修

^{*4} 建築研究所 上席研究員・工博

^{*5} 日本大学理工学部海洋建築工学科 専任講師・工博

^{*6} 東京電力(株)電力技術研究所 耐震グループ主任・工修

^{*7} 日本大学大学院理工学研究科 博士後期課程・工修

Prof., Dept. of Oceanic Architecture & Eng., Nihon Univ., Dr. Eng.

G.M., Nuclear Power Engineering Dept., TEPCO, Dr. Eng.

G.M., Power Engineering R&D Center, TEPCO, M. Eng.

Chief Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

Assist. Prof., Dept. of Oceanic Architecture & Eng., Nihon Univ., Ph. D.

Power Engineering R&D Center, TEPCO, M. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Science & Tech., Nihon Univ., M. Eng.

かのような形状になることが推測される (b-B)。これは、この方式が実荷重を直接的に作用させる方式ではなく、実重量を反力とする方式であり、載荷反力の影響を受ける試験法であることを意味している。反力杭方式 (c) は、試験杭近傍に設置された杭 (反力杭) を載荷反力とするものであり、杭頭押込み試験法の基準的な存在となっている。この方式の荷重伝達線は、上記原則に従って杭周面および杭先端から反力杭に向かう形になることが推測される。先端載荷方式 (d) は、押込み試験の簡易化を目的として開発されたものである²⁾。これは杭先端部にジャッキを備え、ジャッキのストローク先端を杭先端とし、自杭の負の周面摩擦力を載荷反力として杭先端地盤を押込むものである。この方式による荷重伝達線は、上記原則に従って、杭先端から自杭周面に向かう形状になることが推測される。地盤アンカー方式 (e) は、反力梁に連結された地盤アンカーを載荷反力として杭頭載荷するものであり、荷重伝達線は、上記原則に従って、杭周面および杭先端からアンカー抵抗体に向かい、引張り材を通して反力梁に伝達されることが推測される。

図1 載荷原理と荷重伝達線の模式図

(2) 押込み試験法の予想される問題点

載荷反力を用いた各種試験法 (図1b～e) の荷重伝達線は、反力方向に曲げられることが推測されるため、実載荷方式 (a) のものとは地中の応力状態が異なったものになることが予想される。また、載荷による地盤変位と載荷反力による地盤変位は、互いに相殺関係にあるため、荷重～沈下関係への影響が想像される。

載荷反力による上記何れの方式も、実載荷方式との比較検討による研究は見当たらず、載荷反力による影響に関して不明な点が残されているものと思われる。ただし、先端載荷方式については、反力杭方式を基準とした青木ら³⁾、岸田ら⁴⁾、小椋ら⁵⁾の実大杭を用いた研究、杭周面摩擦力に着目した模型杭による吉村ら⁶⁾の研究がある。これらの研究によると、先端載荷方式によって得られる結果は、反力杭方式によるものよりも初期剛性を高く評価し、極限支持力を低く評価する傾向にあることが報告されている。

(3) 本研究の概要

模型杭に対しては、荷重規模が小さいため実杭に対してほとんど不可能とされていた実載荷試験が可能となる。模型試験は定量的な把握が困難とされているが、i) 同一条件下での比較試験が可能である。ii) 多数の試験をパラメトリックに行なえる。iii) 少ない経費で試験が出来る。などの長所を有しており、定性的な把握は可能と思われる。

筆者らは、1998年^{7), 8)}において、模型杭に対して実載荷方式、反力杭方式、先端載荷方式による押込み試験を行い、試験法の違いによって得られる支持力性状が異なることを把握した。また、その影響因子が試験杭の周面摩擦力や載荷反力による先端地盤の鉛直拘束圧～沈下関係にあることを推察した。そして1999年⁹⁾、2000年¹⁰⁾において、i) 長方形土槽から円形土槽への改良、ii) 杭先端と土槽底間の距離の確保による土槽底剛境界の影響の低減化、iii) 載荷方法の改良、などを行い、模型杭に対する各種押込み方式 (実載荷方式、反力杭方式、先端載荷方式、地盤アンカー方式) の試験を行った。本論文は、実載荷方式を基準とした各種試験法の比較検討を行い、それぞれの荷重～沈下特性について考察するものである。

2. 試験概要および載荷方法

2.1 試験概要

表1に試験一覧を示す。これらは長い模型杭を対象とし、先端部分 (288 mm) を模型地盤に根入れさせ、模型地表面にはその上に仮想される土被り圧 (100 kN/m²) を作用させている。

表1 試験一覧

試験番号	載荷方式	杭径 D (mm)	杭周面摩擦	上載圧 (kN/m ²)	アンカー深さ
I	実載荷方式	27	有り	100	—
		48			
		76			
II	実載荷方式	27	無し	100	—
		48			
		76			
III	実載荷方式 (擬似)	48	有り	100+ $\Delta\sigma$	0D
IV	反力杭方式 (擬似)			100- $\Delta\sigma$	
V	先端載荷方式 (擬似)			100- $\Delta\sigma$	
VI	地盤アンカー方式	48	有り	100	5D
					10D
					—

注1) $\Delta\sigma$: 上載圧の変動量

注2) アンカー深さ: 杭先端からの距離

ただし、試験Iは、土被り部分における杭の周面摩擦を排除した部分フリクションカット杭 (図9)、試験IIは杭全長にわたって周面摩擦を排除した全フリクションカット杭に対する実載荷方式であり (図10)、これらは杭周面摩擦が杭先端支持力性状に与える影響を調べることを目的としたものである。

試験IIIは土被り部分の杭の周面摩擦力による影響 (杭先端近傍の鉛直圧の増大) を加圧板-バネモデル (図11) によって擬似的に再現する実載荷方式、試験IVは土被り部分の反力杭 (4本) の引抜き抵抗体による影響 (杭先端近傍の鉛直圧の減少) を反力体-バネモデル (図12) によって擬似的に再現する反力杭方式、試験Vは、試験IVと同一の反力体-バネモデル (図13) によって、土被り部分に

おける自杭の負の摩擦力による影響（杭先端近傍の鉛直圧の減少）を擬似的に再現する先端荷重方式であり、これらの試験法の杭先端支持力～沈下曲線の定性的な把握を目的としている。

試験Ⅵは、土被り部分の摩擦を排除した杭（試験Ⅰと同一杭）に対する地盤アンカー方式であり（図14）、アンカー抵抗体の深さ（杭先端からの深さ）による影響を調べることを目的としたものである。

2.2 試験諸元

(1) 実験装置

図2に試験装置の全体概要を示す。試験土槽は直径1400mm、高さ1300mmの鋼製円筒で、模型地表面に上載圧を作用させることが可能な加圧室を有している。加圧の方法は、模型地表面上に複数の細長い空気袋を置き、鋼製蓋と鋼製梁で抑え、圧搾空気の入力によって地表面を加圧する。

図2 試験装置

図3 砂詰め装置

使用砂	珪砂5号(砕砂)
産地	山形県飯豊
土粒子密度	2.66 g/cm ³
試験時密度	1.76 g/cm ³ (気乾状態)
相対密度	95%
均等係数	2.1

図4 粒径加積曲線

a. 上載圧 0kN/m² b. 上載圧 50kN/m² c. 上載圧 100kN/m²

図5 換算N値分布

表3 杭、仕切り円筒管寸法

番号	模型杭			仕切り円筒管	
	外径 [mm]	肉厚 [mm]	杭周囲の仕上げ	外径 [mm]	肉厚 [mm]
試験Ⅰ	27	1.5	ネジ(ピッチ1mm)	48	2.3
	48			76	2.3
	76			102	3.2
試験Ⅱ	27	1.5	テフロン2重	48	2.3
	48			76	2.3
	76			102	3.2
試験Ⅲ	48	1.5	ネジ(ピッチ1mm)	76	2.3
試験Ⅳ	48	1.5	ネジ(ピッチ1mm)	76	2.3
試験Ⅴ	48 (外杭)	1.5	ネジ(ピッチ1mm)	76	2.3
	30 (中杭)				
試験Ⅵ	48	1.5	ネジ(ピッチ1mm)	76 (主杭)	2.3
				27 (引張材)	

注) ネジ形式: 三角ネジ

図6 模型杭

図7 先端荷重杭

図8 地盤アンカー

(2) 砂詰め装置

実験土槽への砂詰めは、図3に示すような砂詰め装置を用いた。本装置は、砂タンク、砂を分散させる2枚の網を基本構成とし、砂タンクの底には開閉が可能な砂落下孔（径6.0mm）が縦、横20cm間隔で千鳥状に配列してある。また、分散網（網径2.0mm）は、砂落下孔から下300mmの位置に150mmの間隔で2枚が取り付けられている。落下孔を開くと、各孔から筋を引いたように一斉に砂が落下し、2枚の網で分散され、試験土槽にはほぼ一様に堆積する。なお、試験土槽内の各場所で密度を測定した結果、それらがほぼ均一であることを確認している。

(3) 模型地盤

模型地盤には気乾状態の珪砂5号を用いた（表2、図4）。地盤作成は、最初に杭先端レベルまで砂詰めし、その上に杭体を置き、所定の高さまで砂詰めした。図5に上載圧0、50、100kN/m²下における本地盤の換算N値を示す。なお、これらは同一地盤であっても鉛直拘束圧によって換算N値が変化することを示している。ただし、本換算N値は、浅い模型地盤を対象としているため、標準貫入試験機による打撃貫入を地表面から所定の深さまで連続して行い、1打撃毎の沈下量から30cm貫入に必要な打撃数を求めた（30cmを一打撃の貫入量で除した値）。上載圧100kN/m²の場合に見られるN値分布の乱れは、0、50kN/m²においては大きな乱れが認められないことから、砂詰めの不均一性によるものではなく、砂の不安定さ（砂粒子の強度不足など）によるものと思われる。

(4) 模型杭, 地盤アンカーおよび仕切り円筒管

模型杭 (反力杭を含む) は鋼管を使用し, 十分な摩擦力が得られるように周面にネジ切り加工した (図6)。周面摩擦力の排除は, 杭周面にテフロン製シートを二重に巻き付ける方法で行なった。先端載荷方式 (試験V) に用いる杭は二重管構造のものを用いた (図7)。地盤アンカーは, $\phi 48\text{mm}$, 高さ 70mm の円筒形の支圧形抵抗体, 引張り材は $\phi 9\text{mm}$ の PC 鋼棒を使用し, プレストレスの導入のない待ち受け形式で使用した (図8)。なお, 表3に杭, 杭周面の仕上げ状態および仕切り円筒管の寸法を示す。

(5) 杭の荷重, 沈下および地盤の鉛直圧の測定

杭の変位および杭頭荷重は, 杭頭に設置したダイヤルゲージおよびロードセルで測定した。杭先端荷重は杭先端部に装備したロード

セルで測定した (図6)。ただし, 先端載荷方式については, 二重構造の中杭頭部に設けたロードセルにより測定した。周面摩擦力は杭頭荷重と杭先端荷重の差から求めた。なお, 先端載荷方式の周面摩擦力は杭先端荷重に一致するため, これを周面摩擦力とした。

また, 杭先端から水平方向に $3D$, $6D$, $9D$ (D : 杭径) の距離に土圧計を配置し, 杭先端レベルでの鉛直圧を測定した (図2)。

2.3 載荷装置および載荷システム

(1) 試験Iおよび試験II (実載荷方式)

試験Iおよび試験IIの載荷方法は, 所定の仮想土被り圧 (100 kN/m^2) を与えた後, 試験土槽の外に反力を設けた電動式の載荷装置を用い, 杭頭に反力の影響の無い実荷重を直接的に与えた (図9, 図10)。ただし, 試験杭は加圧室内の空気袋や押さえ蓋に接触しな

図9 試験I (部分フリクションカット杭)

図10 試験II (全フリクションカット杭)

図11 試験III (実載荷方式)

図12 試験IV (反力杭方式)

図13 試験V (先端載荷方式)

図14 試験VI (地盤アンカー方式)

ように、薄肉鋼管製の仕切り円筒管（表3）で保護している。

(2) 試験Ⅲ（実載荷方式）

試験Ⅲの載荷方法は、図11に示すような加圧板（径800mm）、加圧室を貫く4本の柱を持つ台座、3個のつる巻きバネ（総バネ係数3.0 kN/mm、弾性限界時の圧縮量20mm）から構成した加圧板-バネモデルを使用する。載荷システムは、所定の圧力（仮想土被り圧100 kN/m²）で模型地表面を加圧した後、バネ上端と杭頭が同一高さとなるように調整し、その上に載荷板を置き、バネと杭頭を同時に押込むことによって、杭頭載荷と杭近傍における模型地表面の鉛直圧の増大を同時に行うものである。ただし、この鉛直圧の増分は、杭頭沈下量と模型地表面の沈下量の差にバネ係数（3.0 kN/mm）を乗じ、これを加圧板面積（0.50 m²）で除した値となる。

(3) 試験Ⅳ（反力杭方式）

試験Ⅳの載荷装置は、図12に示すような嵌合する上下2つの円形箱（径800mm）内に3個のつる巻きバネ（試験Ⅲに同じ）を内蔵させた反力体-バネモデルを使用する。試験杭および反力杭（4本）は仕切り円筒管（表3）で保護しており、反力杭用の仕切り円筒管は反力体の上箱に結合させている。載荷システムは、模型地表面に所定の仮想土被り圧（100 kN/m²）を与え、反力体がプレストレス状態となった後、反力杭頭部と反力杭用仕切り円筒管の頭部とを厚鋼板で結合し、これを反力として杭頭をジャッキで押込むものである。載荷に伴って反力体のプレストレス量が減少し、反力体底面下の接地圧が低下する。この模型地表面における鉛直圧の減少量は、杭頭荷重（＝仕切り円筒管頭部の引張り力）から反力杭（4本）の地中部の引抜き抵抗力を差し引き、これを反力体底面積（0.50 m²）で除した値となる。

(4) 試験Ⅴ（先端載荷方式）

試験Ⅴの載荷装置は、試験Ⅳと同一の反力体-バネモデルを使用する。載荷システムは、地表面の加圧によって反力体をプレストレス状態（100 kN/m²）とした後、杭外管と反力体が一体となって抵抗するように、外杭と4本の仕切り円筒管頭部とを厚鋼板で結合し、これを反力として中杭頭部をオイルジャッキで押込むものである（図13）。載荷によって反力体のプレストレス量が減少し、反力体底面下の接地圧が低下する。この模型地表面における鉛直拘束圧の減少量は、杭先端荷重（ジャッキ荷重）から自杭地中部の引抜き抵抗力を差し引き、これを反力体底面積（0.50 m²）で除した値となる。

(5) 試験Ⅵ（地盤アンカー方式）

試験Ⅵは、待ち受け形式の地盤アンカー4本を用いる（図14）。載荷は、模型地表面に所定の仮想土被り圧（100 kN/m²）を与えた後、アンカー引張り材頭部を反力板に連結し、これを反力として杭頭をオイルジャッキで押込むものである。

3. 試験結果の考察

本試験の全ての杭先端荷重～沈下関係（R- δ 曲線）および土圧計1, 2, 3の土圧変動量～沈下関係（ $\Delta\sigma$ - δ 曲線）を、文末に試験結果一覧として示してある。

3.1 杭周面摩擦力の影響（試験Ⅰおよび試験Ⅱ）

図15は、試験Ⅰ（部分フリクションカット杭）および試験Ⅱ（全フリクションカット杭）の杭先端荷重～沈下関係の杭径別による比較である。これらの曲線の立ち上がり勾配（初期剛性）は、何れも

試験Ⅱの方が試験Ⅰよりも大きくなっている。また、沈下がある大きき以上になると、これらの杭先端荷重の関係は、試験Ⅰの方が試験Ⅱよりも大きくなる傾向が認められ、曲線形状の推測から、試験Ⅰの杭先端極限荷重は試験Ⅱよりも大きくなることが推察される。これらは以下のように説明される。

① 杭先端近傍の鉛直圧

杭周面摩擦を有する杭の杭頭荷重は、杭周面摩擦力および杭先端荷重として地中に伝達され、杭先端レベルにおける杭近傍の鉛直圧は、杭周面摩擦力によって増大することが予想される。図16は杭先端レベルの土圧計1（図2）の土圧変動量～沈下関係を示したものであるが、何れの杭においても試験Ⅰの鉛直圧は試験Ⅱよりも大きくなっており、杭先端近傍の鉛直圧は上部杭の周面摩擦力によって増大することを検証している。

② 杭先端荷重の初期剛性

杭周面摩擦を有する杭の荷重初期における杭頭荷重は、主に杭周面摩擦力によって支持され、その残りが杭先端へ伝達されるため、初期荷重時における沈下は、主に杭周面摩擦力による鉛直圧によって引き起こされることになる。また、杭周面摩擦力が大ききものほど、それによる沈下が大きく、杭先端に伝達される荷重値が低くな

図15 試験Ⅰ, ⅡのR- δ 曲線の比較

図16 試験Ⅰ, Ⅱの $\Delta\sigma$ - δ 曲線の比較

図17 試験Ⅰ, ⅡのR/R_{0.1}- $\delta/\delta_{0.1}$ 曲線の比較

ることが考えられる。即ち、杭周面摩擦を有する杭の方が杭周面摩擦を排除した杭よりも、初期剛性が低くなることが推察される。

③ 杭先端極限荷重

沈下が進み、杭周面摩擦抵抗力の増大傾向が低下すると、杭先端へ伝達される荷重が増大し、やがて極限状態に至る。この過程において、杭周面摩擦力が大きなものほど、杭先端地盤に対する鉛直圧が大きくなり、その鉛直拘束圧によって杭先端地盤の強度が増大することになる。したがって、ある沈下量になると、荷重初期の杭先端荷重の関係が逆転し、杭周面摩擦を有する杭の方が、杭周面摩擦の無い杭よりも杭先端荷重が大きくなることが推測される。また、極限状態において、杭周面摩擦を有する杭の方が、杭周面摩擦の無い杭よりも杭先端極限支持力が大きくなることが推測される。

④ $R/R_{0.1} - \delta/\delta_{0.1}$ 曲線

図 17 は、 $R - \delta$ 曲線（杭先端荷重～沈下曲線）を、縦軸に 0.1 D 時沈下量（ $\delta_{0.1}$ ）を基準とした無次元沈下量（ $\delta/\delta_{0.1}$ ）、横軸に 0.1 D 沈下時の杭先端荷重値（ $R_{0.1}$ ）を基準とした無次元荷重値（ $R/R_{0.1}$ ）として表したものである。これらは $\delta/\delta_{0.1} < 1$ において試験Ⅱの方が試験Ⅰよりも外側に膨らんだ曲線形状を示しており、杭周面摩擦力の影響（杭先端近傍の鉛直圧の増大）が明確に現れている。

3.2 試験法の比較検討

（1）実載荷方式、反力杭方式と先端載荷方式の比較検討

図 18 に試験Ⅲ～試験Ⅴの杭先端荷重～沈下関係を示す。実載荷方式の初期時における杭先端荷重は反力杭方式および先端載荷方式よりも低く、沈下がある程度進んだ時点から、実載荷方式の方がそれらよりも大きくなっている。また、実載荷方式の曲線の形状は、反力杭方式および先端載荷方式よりも初期剛性が小さく、それらよりも杭先端極限荷重が大きくなることが推察される S 字形曲線を示している。

これらは以下のように説明される。

① 杭先端荷重の初期剛性

載荷反力による地盤変位は、載荷による地盤沈下を相殺する方向に働く。したがって、反力杭方式および先端載荷方式による杭の沈下は、反力の影響の無い実載荷方式よりも小さく評価され、初期剛性は高く評価されることになる。

② 杭先端極限荷重

実載荷方式において、沈下がある大きさ以上になると、杭周面摩擦抵抗力の増加傾向が低下し、杭先端に十分な荷重が伝達されるようになることは、試験Ⅰと同様である。杭先端地盤の支持力が鉛直拘束圧に支配されることを考えると、杭周面摩擦力が鉛直拘束圧として働く実載荷方式の方が、反力によって鉛直圧が減少する載荷反力による方式（試験Ⅳ、試験Ⅴ）よりも杭先端極限荷重が大きくなることが推察される。なお、図 19 に示した杭先端レベルの土圧計 1（図 2）の土圧変動量～沈下関係を見ると、実載荷方式の土圧変動量は増大しているのに対し、反力杭方式および先端載荷方式は減少しており、上記、鉛直拘束圧の考察に対応している。

（2）反力杭方式と先端載荷方式の比較検討

反力杭方式（試験Ⅳ）と先端載荷方式（試験Ⅴ）の、杭および模型地表面の加圧システムは同様な条件下にあり、量的な比較検討が可能である。これらの比較において（図 18）、沈下が大きくなると、杭先端荷重は反力杭方式の方が先端載荷方式よりも大きくなってい

る。また、曲線の性状から推測して、反力杭方式における杭先端極限荷重は先端載荷方式よりも大きくなることが推察される。これは既往の研究^{3)～6)}と同様な結果である。またこれは、図 19 において反力杭方式（試験Ⅳ）の土圧変動量は先端載荷方式よりも大きな値を示しており、杭先端極限支持力は、反力杭方式の方が先端載荷方式よりも大きくなることに対応している。

（3）実載荷方式と地盤アンカー方式の比較検討

図 20 は、実載荷方式（試験Ⅰ）と地盤アンカー方式（試験Ⅵ）の杭先端荷重～沈下関係を示したものである。これらは、抵抗体の杭先端からの深さが杭径の 5 倍以上になると実載荷方式のものに漸近している。図 21 は杭先端レベルの土圧計 1（図 2）の土圧変動量～沈下関係を示したものである。これらも同様に、抵抗体の深さが杭径の 5 倍以上になると実載荷方式のものに漸近している。これはアンカー深さが増大すると、荷重伝達線が地中深くまで広がり、支持力性状に影響する領域での荷重伝達線が実載荷方式のものに近

図 18 試験Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの
 $R - \delta$ 曲線の比較

図 19 試験Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの
 $\Delta\sigma - \delta$ 曲線の比較

図 20 試験Ⅰ、Ⅵの
 $R - \delta$ 曲線の比較

図 21 試験Ⅰ、Ⅵの
 $\Delta\sigma - \delta$ 曲線の比較

図 22 試験Ⅲ、Ⅳ、Ⅴの
 $R/R_{0.1} - \delta/\delta_{0.1}$ 曲線

図 23 試験Ⅰ、Ⅵの
 $R/R_{0.1} - \delta/\delta_{0.1}$ 曲線

づくためと推測される(図1aおよび図1e参照)。

(4) 杭先端荷重～沈下曲線の性質

図22は反力杭方式(試験Ⅳ)と先端載荷方式(試験Ⅴ), 図23は地盤アンカー方式(試験Ⅵ)の杭先端荷重～沈下無次元曲線($R/R_{0.1}-\delta/\delta_{0.1}$ 曲線)である。図22には試験Ⅲ(実載荷方式)と山肩の曲線式④が, 図23には試験Ⅰ(実載荷方式)と山肩の曲線式が記載してある。ただし, 図23において, 試験Ⅵ-0D, 試験Ⅵ-5D および試験Ⅰ-48φの各曲線の出発点が原点から若干離れていることが認められるが, これは載荷前の準備段階で, 何らかの原因で杭頭に荷重を加えてしまい, その除荷の状態をゼロ状態として測定したことによる荷重履歴の影響(再荷重による高剛性)が現れたものと思われる。

これらを見ると, 反力杭方式と先端載荷方式のものは膨らみのある山肩式の曲線に近似している。これに対して実載荷方式および地盤アンカー方式による曲線は直線的なものとなっている。山肩の曲線式は, 載荷反力を用いた載荷試験結果から導いたことを考えると, 本反力杭方式が山肩の曲線に近似することは当然の結果と判断される。

なお, 無次元曲線(図22, 23)の形状は, 曲率が最大となる点が, $\delta/D > 0.1$ か $\delta/D < 0.1$ かに支配され, 前者ならばより直線的であり, 後者ならばより膨らみのある曲線になる。したがって, 曲率が最大となる沈下量は, 実載荷方式の方が載荷反力を用いたものよりも大きくなることが推察され, より直線的な形状を示す実載荷方式の最大曲率の位置は $\delta/D > 0.1$ であることが推察される。

4. 結 論

模型杭による実載荷方式および載荷反力を用いた各種押込み試験を実施し, 以下のことが考察された。

① 実載荷方式による杭周面摩擦力の影響

杭周面摩擦を有する杭の杭先端荷重～沈下関係において, 初期剛性は, 杭周面摩擦を排除した杭よりも低く評価され, 杭先端極限支持力は, 杭周面摩擦を排除した杭よりも大きく評価される。

② 反力杭方式による杭先端荷重～沈下関係

反力杭方式によって求められる杭先端荷重～沈下関係において, 初期剛性は, 実載荷方式よりも高く評価され, 杭先端極限支持力は低く評価される。

③ 先端載荷方式による先端荷重～沈下関係

先端載荷方式によって求められる杭先端荷重～沈下関係において, 初期剛性は, 実載荷方式によって求められるものよりも高く評価され, 杭先端極限支持力は実載荷方式および反力杭方式よりも低く評価される。

④ 地盤アンカー方式による杭先端荷重～沈下関係

地盤アンカー方式において引抜き抵抗体を杭先端下の深い所(本模型実験では杭径の5倍程度以上)に置くと, 実載荷方式のものに近似した杭先端荷重～沈下関係が得られる。

⑤ 杭先端荷重～沈下曲線の形状

実載荷方式における杭先端荷重～沈下曲線は, 反力杭方式や先端載荷方式よりも, 初期剛性が低く, 杭先端極限支持力が大きいS字形曲線を呈する。

⑥ $R/R_{0.1}-\delta/\delta_{0.1}$ 曲線の形状

杭先端荷重～沈下無次元曲線($R/R_{0.1}-\delta/\delta_{0.1}$ 曲線)において, 実載荷方式は, 直線に近い曲線を示すのに対し, 反力杭方式および先端載荷方式のものは膨らみのある曲線を呈する。

(総 括)

模型杭を用いることにより, 実大杭に対して困難であった実載荷方式による試験が可能となった。しかし, 載荷反力による試験は, 同一土槽内に反力体を設置する必要があるため, 実載荷方式よりも難しい試験となった。

模型試験であるため, 定量的な把握が出来なかったが, 各種押込み試験法によつての特性が理解された。特に, 地盤アンカー方式が, 実大杭に対する実載荷方式に近似した結果を得る一つの実施可能な方法になり得ることが解った。この方法を含め, 実大杭に対する荷重～沈下関係を推測する方法を見出すことは, 今後の大きな課題になるものと思われる。

本試験における沈下の測定は, 実験土槽外の絶対的不動点を基準として測定したが, 実試験における測定は, 杭近傍を不動点とする相対沈下を測定しており, 不動点に対する載荷反力による影響が無視されている。これを考慮すると, さらに新しい見解が生まれることが想像される。これも今後の大きな研究課題として残されているものと思われる。

謝 辞

最後に, 本試験は東京電力(株)の協力により行ないました。実験等は当時大学院生であった唐鎌成夫氏, 佐藤有伸氏, 成山嶺高氏の修士論文として行なったものであることを申し添えておきます。

〔参考文献〕

- 1) 地盤工学会基準: 杭の鉛直載荷試験法・同解説 第一回改訂版, 2002
- 2) 藤岡豊一, 新井邦夫, 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.
- 3) 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回年次学術講演会梗概集 第3部, pp.868~869, 1992
- 4) 岸田英明, 桑原文夫, 鈴木俊雄, 川村浩, 小椋仁志, 須見光二: OAP 計画における杭の支持力実験(その4: 先端抵抗と摩擦抵抗の検討), 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), Vol.B-1, pp.1263~1264, 1992
- 5) 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, 土と基礎, Vol.43, No. 5, pp.31~33, 1995
- 6) 吉村啓太, 佐々木隆光, 末政直晃, 片田敏行, 吉田茂: 杭の周面摩擦の作用方向が先端荷重～沈下特性に及ぼす影響, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1595~1596, 2001
- 7) 国府田誠, 山下利夫, 田村昌仁, 佐藤秀人, 唐鎌成夫, 佐藤有伸, 他: 模型杭による鉛直載荷試験法の検討 その1~その3, 第33回地盤工学研究発表会(山口), pp.1429~1434, 1998
- 8) 国府田誠, 山下利夫, 田村昌仁, 佐藤秀人, 唐鎌成夫, 佐藤有伸, 他: 模型杭による鉛直載荷試験 その1~その2, 日本建築学会学術講演梗概集(福岡), Vol.B-1, pp.663~666, 1998
- 9) 国府田誠, 山下利夫, 田村昌仁, 斎藤英明, 佐藤秀人, 笹沼美和, 成山嶺高, 他: 模型杭による各種載荷試験とその考察 その1~その3, 日本建築学会学術講演梗概集(中国), Vol.B-1, pp.679~684, 1999
- 10) 国府田誠, 山下利夫, 田村昌仁, 斎藤英明, 佐藤秀人, 笹沼美和, 他: 模型杭による杭の鉛直載荷試験法に関する研究 その1~その2, 第35回地盤工学研究発表会(岐阜), pp.11~14, 2000
- 11) 山肩邦男, 伊藤淳志, 山田毅, 田中健: 場所打ちコンクリート杭の極限先端荷重および先端荷重～先端沈下量特性に関する統計的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.423, pp.137~146, 1991.5

[試験結果一覧]

付図1 試験Ⅰ (実載荷方式：部分フリクションカット杭)

付図2 試験Ⅱ (実載荷方式：全フリクションカット杭)

付図3 試験Ⅲ (実載荷方式)

付図4 試験Ⅳ (反力杭方式)

付図5 試験Ⅴ (先端載荷方式)

付図6 試験Ⅵ (地盤アンカー方式)

※ 設置深さは杭先端からの深さ

(2002年7月10日原稿受理, 2003年1月9日採用決定)