

杭の先端支持力に及ぼす土被り圧と先端形状の影響に関する模型実験

EXPERIMENTAL STUDY ON EFFECTS OF OVERBURDENING PRESSURES AND END SHAPES FOR POINT BEARING CAPACITIES OF PILE

山本 春行*, 李 偉**, 冨永晃司***, 小椋仁志****
Haruyuki YAMAMOTO, Wei LI, Koji TOMINAGA and Hitoshi OGURA

In order to study the point bearing capacity of piles with under-reamed end, a series of model tests were performed by using the steel and mortar model piles in the pressurized model grounds. The test parameters include overburdening pressures of 200,400 and 600kPa and pile end shapes of the convergent angles of 30,45,60 and 90 deg. All model grounds with a relative density of $D_r=90\%$ were created by Toyoura sand. In the series of the mortar piles, the experimental results revealed that the first cracks on the end surface of the flat form of the enlarged base pile occurs when the applied load was between 50% and 60% of the failure load of the pile shaft. On the other hand, in the series of the steel model piles, it was found out that the relative end bearing capacity ratios between the under-reamed end pile and the straight pile with same base diameter were nearly constant values in spite of the different overburdening pressures. And in this test series, it was interesting to see the increase in the coefficient of bearing capacity which becomes less as the set surcharge pressure becomes greater.

Keywords: *Enlarged pile, Vertical load, Point bearing capacity of pile, Model test, Overburdening pressure, End shapes of pile, Non-displacement pile*

拡底杭, 鉛直荷重, 先端支持力, 模型実験, 土被り圧, 先端形状, 非排土杭

1. 序

高層建築物等の重量構造物を支持する場合、杭先端を拡大した拡底場所打ちコンクリート杭が多く用いられてきた¹⁾。これは、周辺地盤の耐力に対して杭本体の耐力には一般にかなり余裕があるため、杭軸部径に対する先端径を相対的に拡大して地盤の支持能力に対する杭本体の支持能力をより経済的に利用するという杭基礎である。ただし、山崎らのFEMによる解析的研究によれば²⁾、杭先端面が平らなフラット型拡底杭では杭周方向に引っ張りひずみが生じるため、先端底面に引っ張り亀裂が発生する結果が得られている。また、先端が尖ったペンシル形状の杭では、周辺地盤から杭中心方向へ向かう拘束圧が発生するため、引っ張り亀裂が生じなくなることも示している。本研究ではこれらの現象を確認するための模型実験を実施し、その結果について述べる。なお、底面での亀裂発生を抑えるために先端を尖らせると杭の貫入性が増加し、同じ杭の貫入量における支持力が低下することが予想される。したがって、本

研究では先端形状(先端部の尖り角度)が異なる模型杭による貫入実験を行い、支持力低下の度合いについても調べた。

一方、現在の拡底杭の先端は強固な支持層に設置する機会が多く、中間層に留めるような場合は殆どない。しかし、地層構成や荷重条件から杭の沈下量を適切に押さえることができるならば、ある程度の層厚と堅さのある中間層に拡底部を留めるなど、より経済的な利用法も考えられる。本研究では、このような中間層に拡底杭を設置する場合も想定し、拡底杭の鉛直支持力に及ぼす土被り圧の影響を調べるために行った模型実験結果についても述べる。

なお、本研究で用いた模型杭や地盤条件は特定の実大物を想定したものではなく、パラメトリックな検討のために採用したものであるが、杭先端底面の尖り部以外の幾何学的な寸法比は実大の標準的な拡底杭の寸法比に一致させている。また、杭の先端支持力を対象にしているため、想定した先端位置の深さに相当する地盤の拘束圧下での模型実験を行うことにより地盤の力学的な相似条件は近似的

本論文の一部は、文献⁶⁾で発表している。

* 広島大学大学院国際協力研究科 助教授・工博

** 広島大学大学院国際協力研究科 博士後期課程・工修

*** 広島大学大学院国際協力研究科 教授・工博

**** (株) ジオトップ 技術開発本部長・工博

Assoc. Prof., Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima Univ., Dr.Eng.

Graduate Student, Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima Univ., M.Eng.

Prof., Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima Univ., Dr.Eng.

General Manager, Technology Development Division, Geotop Co. Ltd., Dr.Eng.

に満たされている。

2. 実験概要

2.1 実験装置

実験装置はその概要を図1に示すように、加圧砂地盤タンク、載荷装置、および計測部で構成されている。加圧砂地盤タンクは、高さ600mm、内径584.2mm、厚さ12.7mmの鋼管で作製した。このタンクの内径は、杭の貫入に伴う地盤変形の影響を考慮し、拡底径の10倍以上とした。また、タンク内壁には、シリコングリスにより2重のテフロンシートを貼付し、内壁面と地盤材料間との摩擦軽減を行っている。模型地盤への加圧は、地盤表面に設置した厚さ30mmの鋼板に4台の5ton油圧ジャッキを用いて行い、最大700kPaまで加圧可能である。

2.2 模型地盤

模型地盤材料には、気乾状態の豊浦標準砂を用いた。表1に豊浦標準砂の諸元を示している。模型地盤の作製は、多重ふるい付きサンドレイナーを用いた空中落下法により行い、相対密度 $Dr=90\%$ の密な地盤に調整した。なお、模型地盤表面の整形は、真空ポンプによる非接触吸引法により行った。

まず、地盤内鉛直土圧性状を調べるための予備実験を行い、前述の摩擦軽減処理の効果を確認した。図2は模型実験用の小型土圧計の埋設位置を、そして図3には設定サーチャージ圧と計測鉛直土圧の関係を示している。同図にはサーチャージ圧が大きくなるに従いちらばりが大きくなり、計測鉛直土圧が小さくなる傾向が見られる。しかし、その差は最大15%程度であり、シリコングリスと2重のテフロンシートによるタンク内壁面と地盤材料間との摩擦軽減処理の効果は十分に発揮されているものと考えられる。

2.3 模型杭

鋼製の模型杭の先端形状は図4に示すとおりであり、これらは軸部 $\phi 1500\text{mm}$ 、拡底部 $\phi 2700\text{mm}$ の原型杭を想定した1/50の模型である。また、比較のために軸部ならびに拡底径と同じ直径をもつ直杭も採用した。さらに、これらの模型杭と同じ形状のモルタル製杭も作製し、先端部における亀裂発生の確認実験に用いた。なお、モルタルは4週圧縮強度 $F_c=21\text{MPa}$ （打設後3週間は水温 20°C の恒温水槽内で水中養生し、残りの1週間は冷暗室で空中養生した）を

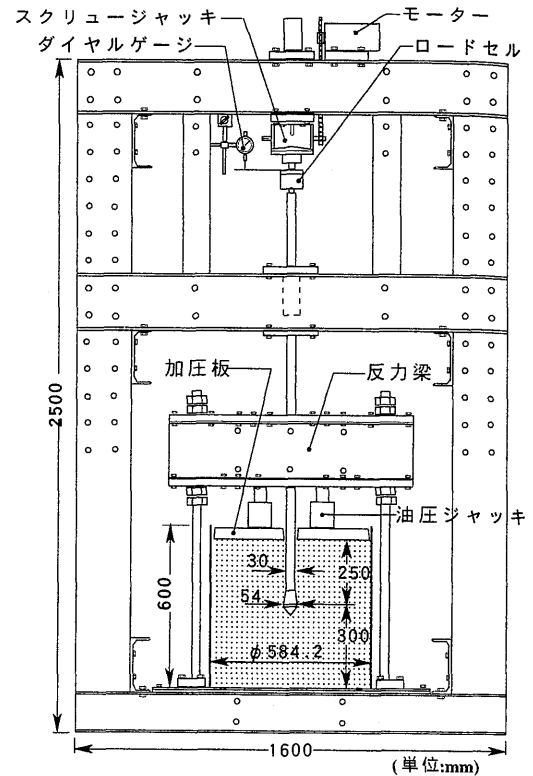


図1 実験装置

表1 模型地盤材料の諸元

平均粒径	0.20 mm
均等係数	1.21
比重	2.656 g/cm ³
最小密度	1.332 g/cm ³
最大密度	1.646 g/cm ³
相対密度	90 %
内部摩擦角	44.0°

(豊浦標準砂)

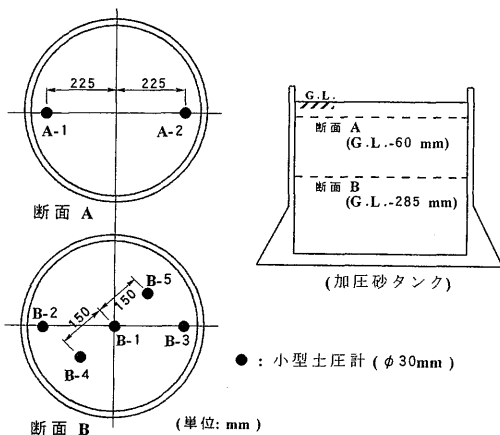


図2 小型土圧計の埋設位置

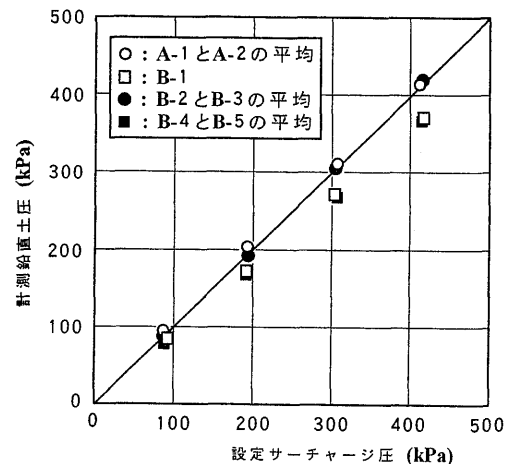
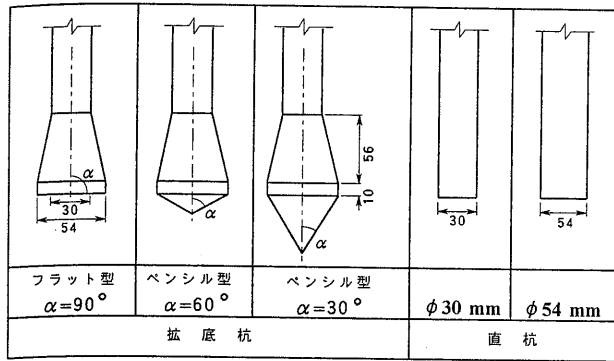


図3 設定サーチャージ圧と計測鉛直土圧の関係



(α : 先端の尖り角度, 単位: mm)

図4 鋼製模型杭の先端形状

目指してキャリブレーション試験を行い、配合重量比（高炉セメント:0.623,ペントナイト:0.377,豊浦砂:1.000,水:0.554）を決定した。図5のモルタル製フラット型模型拡底杭の詳細図に示すように、直径30mmの鋼棒からなる軸部と拡底径54mmのモルタル製の拡底部を接着し、作製した。他の先端尖り角度（モルタル製模型杭の場合には、先端尖り角度 45° のペンシル型杭を追加）のものや直杭も同様に作製し、同図に示しているように、モルタル部分の内部にはスパイラル状と直線状の鉄線を組み合わせた補強筋を設置している。

2.4 実験方法

模型実験において、実際の拡底杭の施工状態を再現することは困難である。そこで本実験では、非排土杭の特性として地盤および杭体に応力履歴を与えないで杭を設置することを第一に考え、実験手順を決定した。具体的には、まず杭先端位置まで地盤を作製し（加圧砂地盤タンク底から300mm）、模型杭を設置した後、改めて杭先端から上部の地盤（250mmの厚さ）を作製した。この作業工程により、地盤には杭の設置による影響を与えず非排土杭に類似した条件を作り出している。模型地盤作成後は、計画設定した杭先端位置の地盤の鉛直応力状態のために油圧ジャッキを用いてサーチャージ圧を加え、模型地盤の安定を待って実験を開始した。杭への載荷実験は、変位制御により、載荷速度0.5mm/minで行った。そして、実験終了後は、杭先端部周辺地盤を注意深く掘削し、杭先端部周辺地盤ならびにモルタル製模型杭の場合には亀裂や破壊状況を観察した。また、モルタル製模型杭の打設と同時に作製し、同じ条件で養生しておいた小型供試体（直径5cm、長さ10cmのものを4体）の圧縮試験を行い、圧縮強度 F_c を確認した。

3. 実験結果とその考察

3.1 モルタル製模型杭を用いた亀裂発生確認実験について

図6(a)は、異なった先端尖り角度を持つモルタル製模型拡底杭の荷重～沈下量関係を比較して示したものである。なお、同図中の点線は実験後のモルタルの圧縮試験から得た圧縮強度の平均値（全ての供試体の平均 F_c は21.9MPaであり、21.3～22.5MPaの間に分布）から算定した杭軸部の圧壊荷重である。同図より、先端尖り角が鋭くなるほど同一荷重下での沈下量が増し貫入抵抗が小さくなるものの、最大耐力（図中の▲印）はほぼ同じであり、前述の杭軸部の圧壊荷重の算定値よりも10～15%程度大き目の値であることが分かる。これは、杭軸部の圧壊荷重は補強筋の拘束効果により、モル

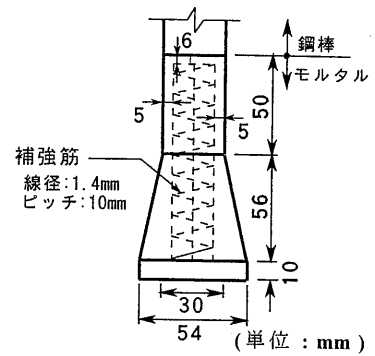
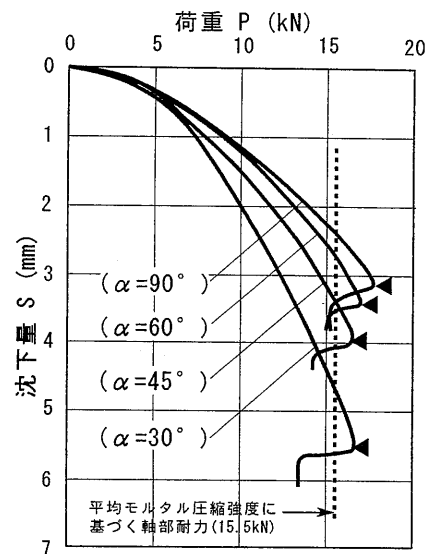
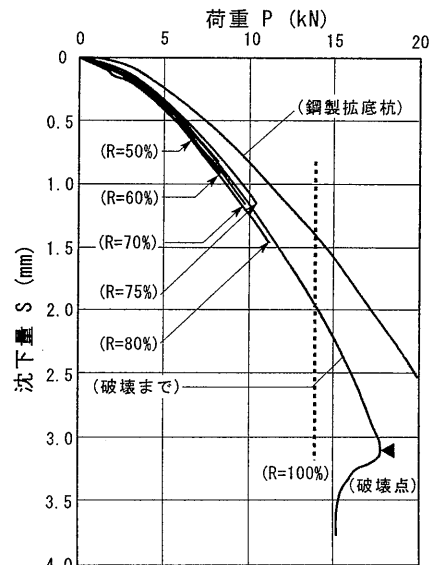


図5 モルタル製フラット型拡底杭の詳細図

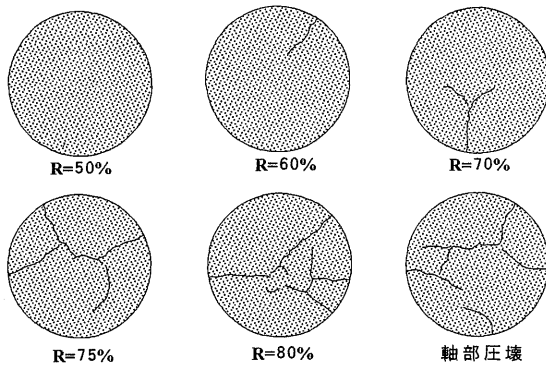


(a) 先端尖り角度の影響



(b) フラット型拡底杭

図6 モルタル製拡底杭の荷重～沈下量関係（サーチャージ圧 $\sigma_{vo}=600\text{kPa}$ ）



(R: 杭軸部の設計耐荷力に対する最大作用荷重)

図7 モルタル製フラット型杭の先端底面に発生した亀裂

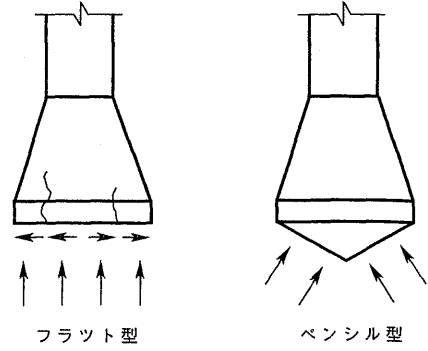


図8 杭先端部に作用する応力の模式図

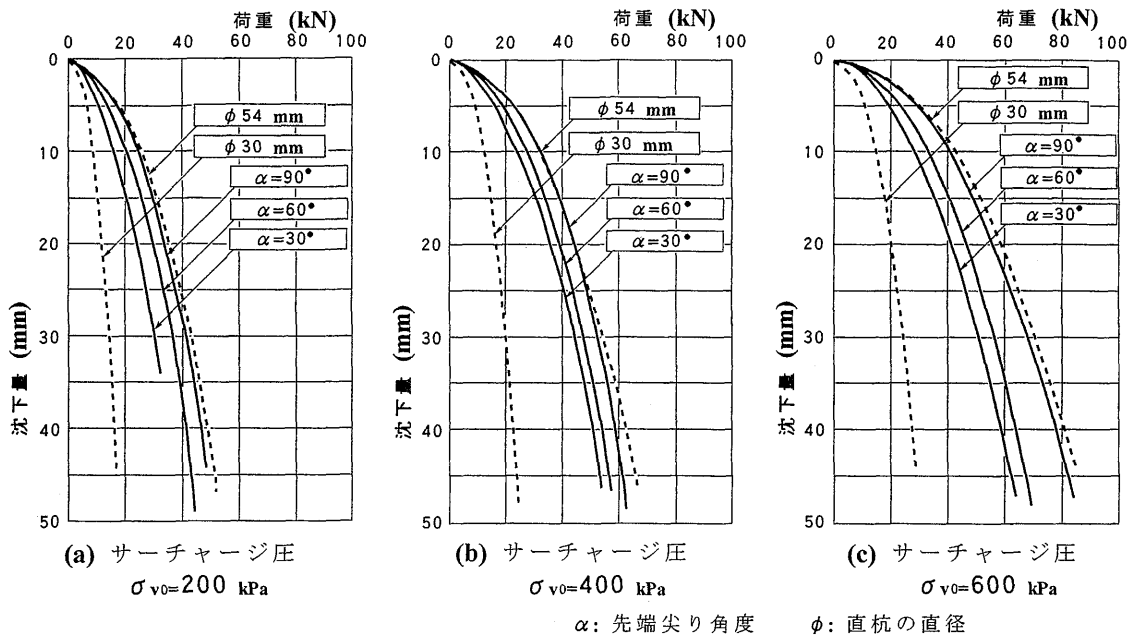


図9 鋼製模型杭の荷重～沈下量関係

タル圧縮強度から算定した値よりも大きくなるのが考えられ、また全ての試験体において、杭軸部での圧壊により最大耐力値が決まるためである。このことは、実験後の掘り出し観察により全て軸部で圧壊していることで確認されている。

一方、杭先端底面への亀裂の発生状況について調べたところ、先端尖り角度 α が $30 \sim 60$ 度のペンシル型では全く亀裂が見られなかったのに対して、 $\alpha=90$ 度のフラット型では底面に円周状ならびに放射状の亀裂がかなり発生しているのが見られた。ただし、これらの亀裂がどの荷重で発生したのか不明であるため、同じフラット型のモルタル製杭をさらに5体用意し、最大耐力に至る手前で荷重を中止し、掘り出し観察により亀裂発生時期を調べることとした。図6(b)は、これらの試験結果をまとめて示したものである。なお、同図には参考のために同じ形状の鋼製模型杭の実験値も併せて示している。それぞれの矢印は荷重を中止した時点を示しており、モルタルの設計計画強度 $F_c=21\text{MPa}$ から算定した軸部耐力に対する荷重

中止時の荷重の比 R(%) を併記している。同図において、モルタル製の杭ではほとんど同じ荷重～沈下量関係を示しており、十分な再現精度のもとで実験が行われていることが分かる。鋼製模型杭の場合には荷重初期からモルタル杭に比べ小さな沈下量を示しており、杭本体の材料の剛性の違いによるものと考えられる。

図7は、掘り出し観察による亀裂の発生状況を示したものである。これらの結果から、フラット型杭の場合には軸部圧壊荷重の1/2程度の荷重段階で先端底面に亀裂が発生し始め、荷重の増加につれて亀裂が拡大していくことが分かる。以上の結果は、山崎らがFEMによる解析的研究により指摘していた結果⁹⁾と整合するものであった。ただし、先端底面に発生するこれらの亀裂が杭の荷重～沈下量関係に及ぼす影響はほとんど無く、荷重～沈下量関係は杭軸部の変形・破壊から大きく影響を受けているものといえる。しかし、補強筋等の腐食の問題を考えれば、底面に発生する亀裂は押さえるべきである。図8の模式図に示しているように先端がペンシル型の杭

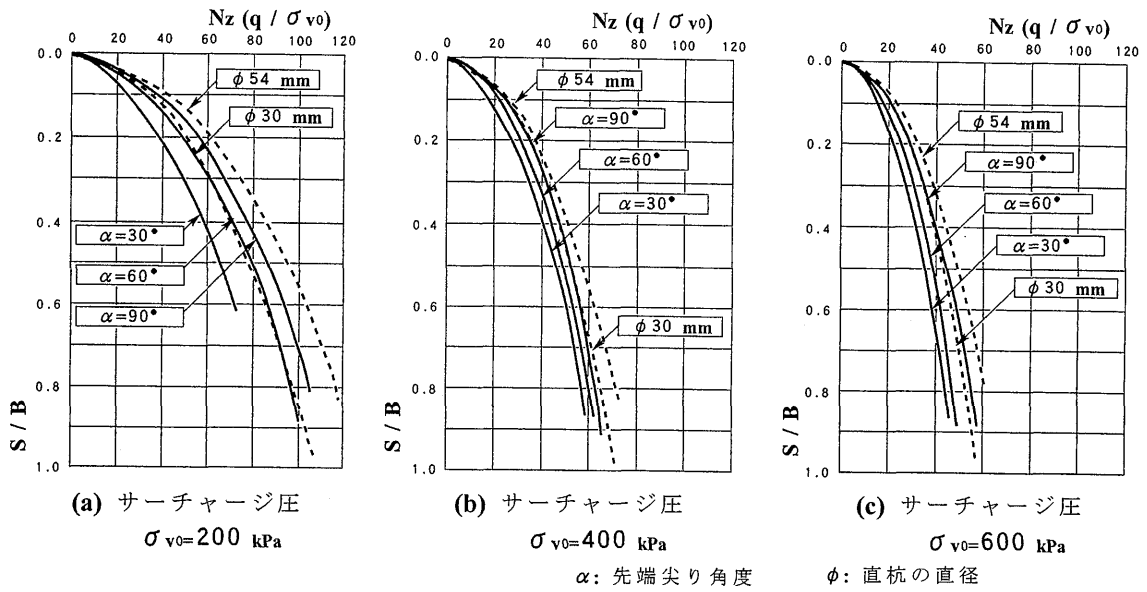


図10 鋼製模型杭のサーチャージ圧に対する荷重比(Nz)～沈下量比(S/B)関係

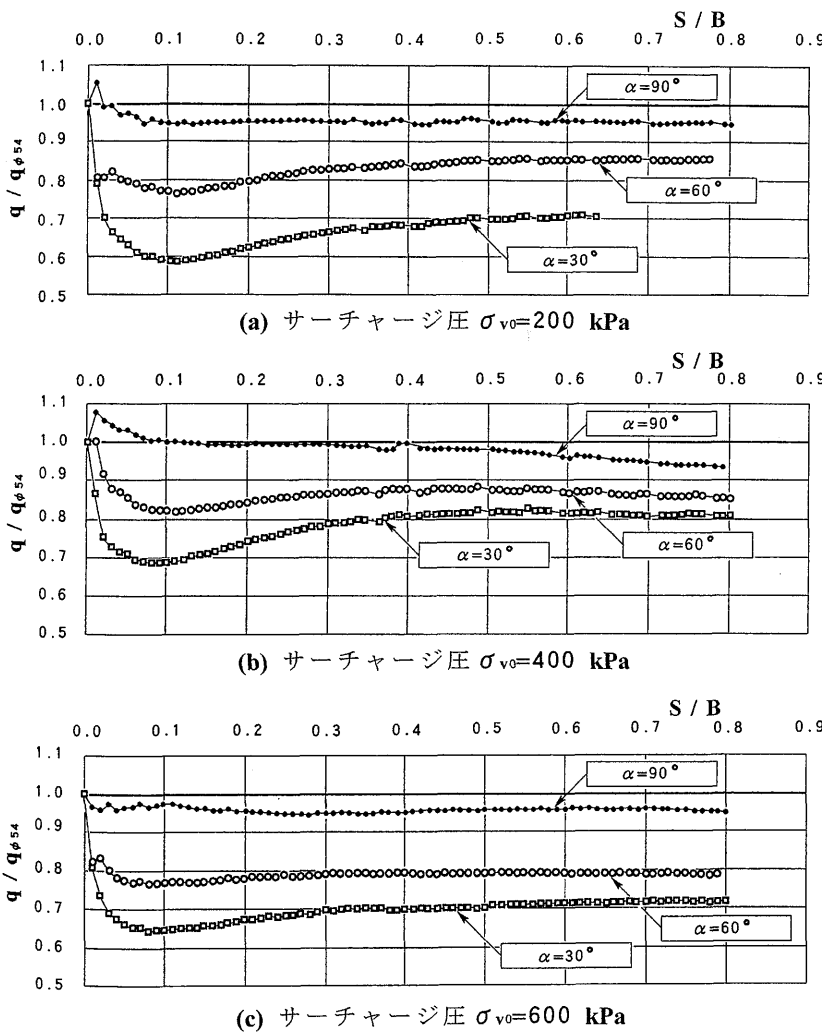


図11 鋼製模型杭の沈下量比(S/B)～直杭に対する荷重比(q/q_{φ54})関係

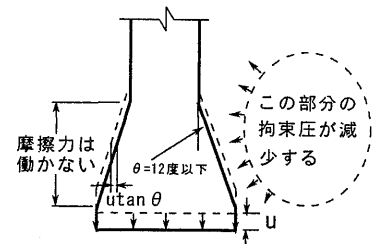


図12 拡底杭先端部と地盤の挙動 (文献¹⁰より)

杭では、杭中心方向へ向かう圧縮力が亀裂の発生を押さえるので、このようなペンシル形状の杭が望ましい。

3.2 鋼製模型杭における荷重～沈下量関係について

作用させたサーチャージ圧毎にまとめて、鋼製模型杭の荷重～沈下量関係を図9(a)～(c)に示す。同図から、拡底杭ならびに直杭ともに作用サーチャージ圧が大きくなる(杭の先端位置が深くなることを意味する)に従って、同じ沈下量に対する支持力値は大きくなること、ならびに先端尖り角が鋭くなるほど貫入性が増すため、先端尖り角の小さいものほど同じ沈下量に対する支持力値は小さくなっていくことが分かる。

図10(a)～(c)は、図9(a)～(c)と同様に作用させたサーチャージ圧毎にまとめて、荷重比(Nz)～沈下量比(S/B)関係を示したものである。ここに、荷重比(Nz)は作用サーチャージ

圧 σ_{vo} と、杭に作用している荷重値を模型杭の最大断面積で除した荷重度値 q の比であり、沈下量比 (S/B) は模型杭の最大直径 B に対する沈下量 S の比である。同図から、作用サーチャージ圧が小さいものほど荷重度比 (N_z) は大きくなる事が分かる。すなわち、サーチャージ圧 $\sigma_{vo}=600\text{kPa}$ の荷重度比に対して、 $\sigma_{vo}=200\text{kPa}$ の荷重度比はほぼ 2 倍程度大きく、作用サーチャージ圧が小さい (杭の先端位置が浅い) のほど杭の先端支持力に及ぼすサーチャージ圧の効果は大きい。

3.3 支持力に及ぼす先端尖り角度の影響について

直径 $\phi=54\text{mm}$ の直杭の荷重度値 $q_{\phi 54}$ に対する他の拡底杭の荷重度値 q との比と、沈下量比 (S/B) との関係を図 1 1 (a)~(c) に示す。同図から杭先端尖り角度が支持力に及ぼす影響の程度が分かる。先端尖り角度が鋭くなるほど貫入性が増すため、支持力値が低下することは前述のとおりであるが、同じ直径を持つ直杭の支持力値に対して先端尖り角度 $\alpha=60$ 度と 30 度の杭では、それぞれ最大 20% ならびに 30 ~ 40% 程度の支持力値の低下が見られる。また、荷重度比 ($q/q_{\phi 54}$) は沈下量比 $S/B=0.1$ 付近で最小となった後、沈下の進行と共にやや増大し $S/B=0.4 \sim 0.5$ 以上ではほぼ一定値となっている。そして、これらの傾向は作用サーチャージ圧の違いに関わらずほぼ同じ性状にあることが分かる。

さらに、フラット型拡底杭の場合の支持力低下率は 5% 程度以下であり、杭の貫入に伴う拡底部周辺地盤の緩み、ならびにこの部分では摩擦抵抗力が発揮できない事など (図 1 2 参照) による影響は、本研究で用いた標準的な拡底杭の形状の範囲内ではそれほど大きくないことが明らかになった。

4. 結 語

杭の先端支持力に及ぼす土被り圧ならびに先端形状の影響を調べること、ならびに拡底場所打ちコンクリート杭の先端底面における亀裂の発生状況を調べることを目的として、鋼製および補強筋入りのモルタル製模型杭を作製し、加圧砂地盤タンクによる実験を行った。得られた主な結果は以下のとおりである。

- (1) モルタル製の模型拡底杭においては、破壊時の最終耐力は杭軸部の圧壊で決まるが、掘り出し観察の結果、フラット型拡底杭の底面には引っ張り亀裂が発生していることを確認した。ただし、この亀裂発生が杭の荷重~沈下量関係に及ぼす影響はほとんど無い。
- (2) 引っ張り亀裂を防ぐためには先端がペンシル型の杭は有効であるが、同時に貫入性も増し支持力の低下も引き起こすので、先

端の尖り角度はフラットに近い僅かな量で十分である。

- (3) 杭先端位置のサーチャージ圧 (土被り圧) と、杭の荷重度値 q の比で定義した荷重度比は、作用サーチャージ圧が小さいものほど大きくなり、作用サーチャージ圧が小さい (杭の先端位置が浅い) のほど杭の先端支持力に及ぼすサーチャージ圧の効果は大きい。
- (4) 拡底部の最大直径と同じ直径を持つ直杭の支持力値に対するフラット型拡底杭の場合の支持力低下率は 5% 程度以下であり、杭の貫入に伴う拡底部周辺地盤の緩み等による影響は小さい。

(謝 辞)

本実験研究を行うにあたり広島大学工学研究科文部科学省技官・原田誠一氏、ならびに広島大学大学院生・深田卓宏氏 (現・旭化成工業 (株))、同・山本秀明氏 (現・(株) フジタ) にご協力を頂きました。ここに記して、謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 山肩邦男：わが国における拡底場所打ちコンクリート杭工法の現状と問題点, 基礎工, Vol.13 No.4, pp.2-10 1985
- 2) 山肩邦男, 町田重美：日本建築センター基礎評定物件における最近の傾向と話題, 基礎工, Vol.17 No.6, pp.1-16, 1989
- 3) 青木功：拡底場所打ち杭工法の現状と課題, 基礎工, Vol.19 No.12, pp.2-8, 1991
- 4) 富永晃司：建築における場所打ち杭の現状, 基礎工, Vol.26 No.7, pp.8-13, 1998
- 5) 山崎雅弘, 長岡弘明, 中村恒善：拡底場所打ちコンクリート杭耐力に対する先端部施工形状の影響の解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 470 号, pp.95-103, 1995
- 6) 深田卓宏 (他)：杭の鉛直支持力に及ぼす先端形状の影響 (載荷実験用加圧砂地盤タンクのキャリブレーション), 日本建築学会中国支部研究報告集, 第 20 巻, pp.165-168, 1997
- 7) 深田卓宏 (他)：拡底杭の鉛直支持力に及ぼす先端形状の影響に関する一実験, 第 32 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1469-1470, 1997
- 8) 山本秀明 (他)：場所打ち拡底コンクリート杭底面に発生するひび割れの確認模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.703-704, 1999
- 9) 山本春行, 徐挺, 富永晃司：拡底杭の鉛直支持力に及ぼす土被り圧の影響, 第 35 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1787-1788, 2000
- 10) 桑原文夫：拡底場所打ち杭の杭先端支持のメカニズムと支持力, 基礎工, Vol.19 No.12, pp.9-15, 1991