

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)

正会員 ○ 深田 卓宏*1
 (同) 徐 挺 *2
 (同) 小椋 仁志*5
 (同) 山本 春行*3
 (同) 富永 晃司*4

§ 1. はじめに

近年、施工時の騒音・振動問題などにより、排土杭（打ち込み杭）から非排土杭（埋め込み杭及び場所打ちコンクリート杭）への移行が顕著に見受けられる。また現在では、構造物の重量化に伴い、杭に要求される支持力が大きくなってきている。このような背景から、杭径が軸方向に変化しない杭（以降、ストレート杭と呼称）に対して、先端部を拡径した拡底場所打ちコンクリート杭が多く採用されるようになってきた。しかしながら、拡底杭の支持機構はストレート杭に比べて複雑であり、その詳細について検討した研究は数少ない。

その数少ない研究のうち、山崎らの論文^{1),2)}は、拡底場所打ちコンクリート杭先端部の構造耐力を扱った特筆できる研究の一つである。この研究では有限要素法（FEM）を用いた数値解析を行っており、先端部がフラットに近い形状の拡底杭では、設計上の地盤支持力より小さな荷重で杭体に破壊が生じてしまうことがあるという結論が示されている。したがって、この種の杭では、設計に採用される支持力が得られない危険性があることが指摘できる。ただし、この現象はあくまでも数値解析によって得られたものであり、実際の実験による確認はなされていない。

本研究の目的は、以上の現象を小型模型実験により確認し、拡底部の支持機構を解明することにある。この目的に則した実験を行うため、模型杭先端部周辺地盤の応力状態を実地盤に合わせ、地盤の力学的相似条件を満足させることとした。模型杭先端部周辺の応力状態の再現には、加圧砂地盤タンクを用いている。

本報では主に、実験に先立って行われた、加圧砂地盤タンクのキャリブレーション結果について報告する。

§ 2. 実験概要

2-1. 実験装置

本実験に用いる実験装置の概要を、図1に示す。本装置は、加圧砂地盤タンク、載荷装置及び計測部から構成されている。

加圧砂地盤タンクは、その内部に直径 584.2mm、高さ 600mm の円筒形模型地盤を作製することができる。同タンクは、杭の貫入に伴う地盤の変形範囲を杭径の 8~10 倍と仮定した場合、内径が拡底径の 10 倍以上になっており、十分な大きさであると判断できる。

模型地盤への加圧は、模型地盤の上端面に設置した厚さ 30mm の鋼板に、4 台の 5ton 油圧ジャッキで加力することにより行う。設計上、最大 7kgf/cm² の上載圧を模型地盤に加えることが可能である。なお、グリスと 2 重のテフロンシ

ートにより、壁面と地盤材料間の摩擦軽減を試みている。杭への載荷には、5ton スクリュージャッキを用いる。

2-2. 模型杭

模型杭は、φ 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、作製することとした。杭先端形状の詳細を図2に示す。なお、この模型杭は、解析において設定されている軸部φ 1500mm、拡底部φ 2700mm の杭の 1/50 模型である。

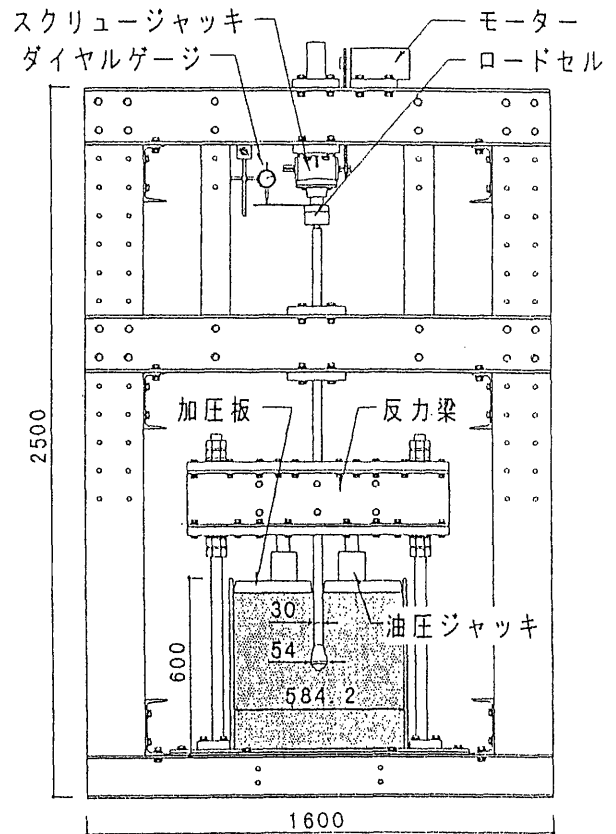


図1. 実験装置図 (単位: mm)

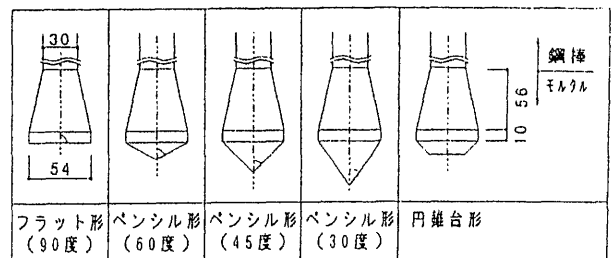


図2. 模型杭の先端形状

*1 広島大学大学院生

*2 同助手・工博

*3 同助教授・工博

*4 同教授・工博

*5 (株)ジオトップ・工博

2-3. 模型地盤

模型地盤に用いた地盤材料は、気乾状態の豊浦標準砂である。地盤材料については、あらかじめ JIS 規準に基づいた予備試験を行っており、これらの試験で得られた諸元を表 1 に示しておく。

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 $D_r=90\%$ の密な地盤に調整する。なお、模型地盤表面は、真空ポンプによる非接触吸引により平坦に整形することとした。

2-4. 実験方法

本実験で対象とする場所打ちコンクリート杭は、本来、地盤を削孔してできた孔内に鉄筋を挿入し、コンクリートを打設して造成するものである。したがって、掘削時における地盤の乱れ、応力の変化、杭体の地盤への付着等、様々な影響が考えられる。しかしながら、模型実験でこの施工状態を再現することは非常に難しい。そこで本実験では、地盤及び杭体に応力履歴を与えないで、杭を設置することに主眼を置くこととした。具体的には、まず杭先端部の位置まで地盤を作製し、杭をセットした後に、改めて杭周辺（杭先端から上部）の地盤を作製する。この作業工程により、通常の場合打ちコンクリート杭に類似した条件を作り出している。

模型地盤作製後は、設定した地盤の応力状態を再現するため、油圧ジャッキを用いて上載圧を加え、模型地盤の安定を待って実験を開始することとした。実験は、変位制御で行い、載荷速度は $0.5\text{mm}/\text{min}$ に設定している。また、実験終了後は、杭先端部周辺地盤を注意深く掘削し、杭先端部の破壊状況を観察することとした。

§ 3. 加圧砂地盤タンクのキャリブレーション

3-1. 実験概要

側面及び底面が拘束されている模型地盤の実験では、土槽の影響を十分に考慮しなければならない。本実験では、杭先端部周辺の応力状態を実地盤と合わせ、地盤の力学的相似条件を満足させることが重要となってくる。そこで、まず最初に、模型地盤内に土圧計を設置し、模型地盤に上載圧を加えた場合の応力の伝達状況を確認する実験を行った。

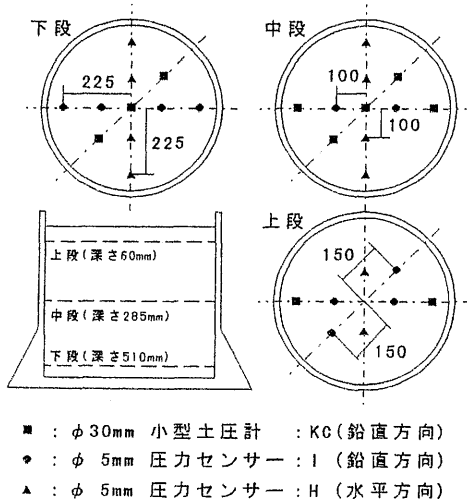


図 3. 土圧計配置図 (単位: mm)

この確認実験は、図 1 に示した杭の載荷実験用の装置を用い、模型地盤の作製も、本実験で計画している方法と同様に行った。なお、地盤中の土圧の計測には、 $\phi 30\text{mm}$ の小型土圧計と $\phi 5\text{mm}$ の圧力センサーを併用した。これらの土圧計の設置個所については、図 3 を参照されたい。

3-2. 加圧砂地盤タンク内の土圧分布

確認実験で得られた結果を図 4 及び図 5 に示す。

図 4 は、一定の圧力をかけて放置した時の測定土圧及び地盤沈下量を、時系列で示したグラフである。ここでは、土槽側面の摩擦の影響が最も大きいと思われる土槽最深部中央点の時間-土圧関係について検討を加えてみる。

土槽最深部中央点で測定された土圧は、載荷圧力・地盤表面の沈下量に連動しており、載荷後約 30 分までは増加し、それ以降は一定値に安定する。このことから、応力伝達のタイムラグは小さいと考えられるので、地盤内応力の時間経過による変化は、油圧ポンプの特性からくる載荷圧力の変化であると推測できる。

また、図 5 には、各点での測定土圧と載荷圧力の関係をしてある。ただし、縦軸の測定土圧値には、同一平面上で幾何学的に対称な位置にある土圧計の安定値の平均を用いている。

図 5 (a) は、地盤表面から 60mm の位置に設置した土圧計の測定値である。この位置は、載荷板からの距離が近いいため土槽側面の影響が少ないと考えられる。このことは、小型土圧計の測定値が載荷圧力とほぼ同じであることから説明できる。従って、図 5 (a) は、小型土圧計および圧力センサーのキャリブレーションとして採用することができる。この図から、 $\phi 30\text{mm}$ の小型土圧計に関しては、非常に精度良く測定が行われていると言える。しかしながら、 $\phi 5\text{mm}$ の圧力センサーは、 $\phi 30\text{mm}$ の小型土圧計に比べてかなり小

表 1. 地盤材料の諸元

産地		山口県豊浦
50%粒径	D_{50}	0.20 (mm)
均等係数	U_c	1.21
土粒子の比重	G_s	2.66
最大密度	ρ_{\max}	1.646 (gf/cm ³)
最小密度	ρ_{\min}	1.332 (gf/cm ³)

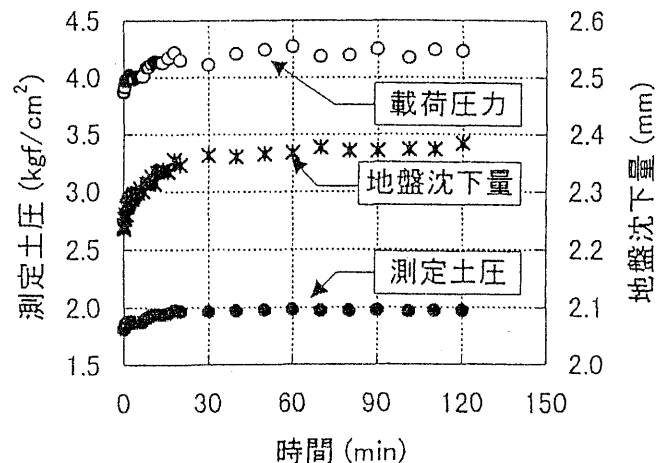
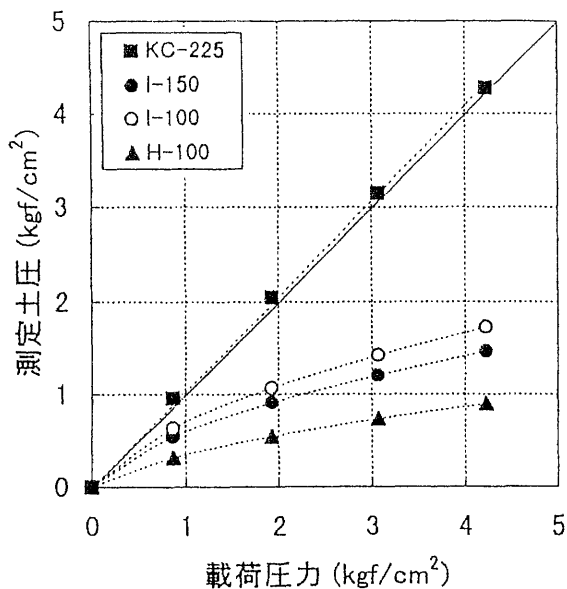
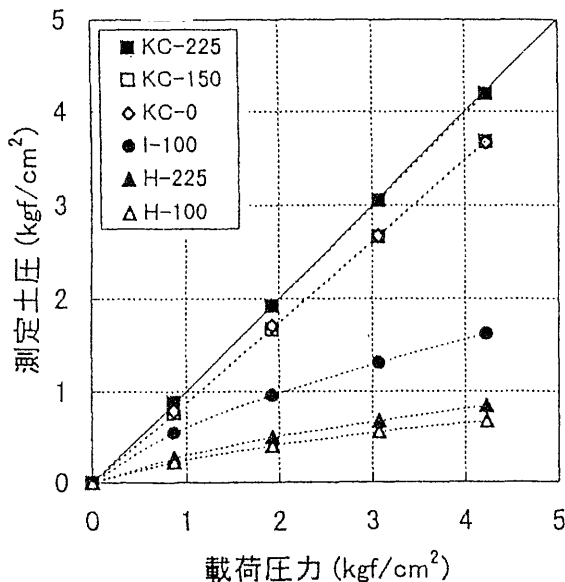


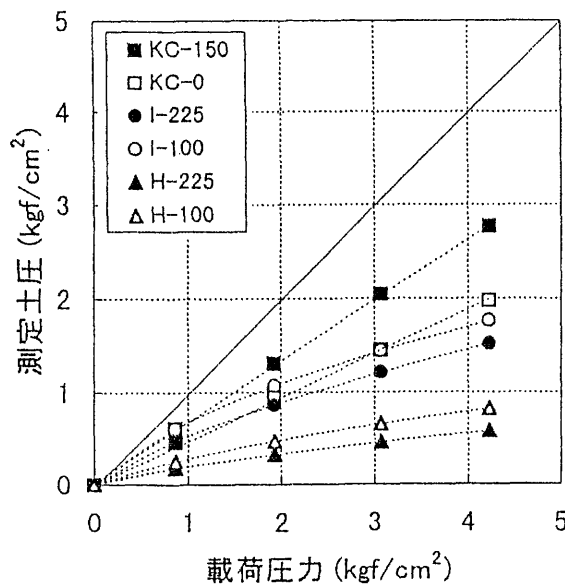
図 4. 土槽最深部中央点の時間-土圧関係



(a) 上段 (地盤表面から 60mm)



(b) 中段 (地盤表面から 285mm)



(c) 下段 (地盤表面から 510mm)

図 5. 測定土圧—載荷圧力関係

さい値を示している。また、測定土圧と載荷圧力の関係も、非線形性を示すことが分かった。この結果に基づけば、φ5mmの圧力センサーは流体圧を測定するためのものであるため、粒状体の圧力は正確に測定できないものと判断できる。ただし、鉛直方向と水平方向は同一の圧力センサーを用いていることから、土圧係数 K (=水平方向圧力/鉛直方向圧力) に関しては、有効な値が得られていると考えられる。この観点から、各地点での土圧係数 K を計算し、その結果を表 2 に示しておく。

次に、深さ方向の摩擦の影響に関して検討を行う。杭の先端部に相当する地盤表面から 285mm の地点では、大きな応力の減少は認められない (図 5 (b) 参照)。しかしながら、土槽底 (地盤表面から 510mm, 土槽底から 40mm) では、小型土圧計の土圧が大幅に減少している (図 5 (c) 参照)。しかしながら、鉛直方向の圧力センサーは減少傾向を示していないため、応力の低下が摩擦の影響であるとは断言し難い。ただし、中心部の方が側面近傍よりも低下率が高いこと、また、土圧を精度良く測定できる小型土圧計において応力の低下が認められたこと等、摩擦の影響ではないかと考えられる要因も多々ある。このことから、今後行う杭の載荷実験においても土圧計を設置し、地盤内応力の確認を行う必要があることが分かった。

3-3. 模型地盤の密度

地盤の沈下量を基に、地盤密度の変化についての検討を加えてみる。地盤沈下量と載荷圧力の関係を図 6 に、間隙比及び相対密度と載荷圧力の関係を図 7 に示す。

図 6 より、低い載荷圧力では沈下量が大きい、載荷圧力が高くなるに従って圧力の増分に対する沈下量の増分の割合が低くなる傾向が認められる。これは、一般的に言われている現象と同じである。

地盤沈下量と載荷圧力の関係を、別の角度から検討してみる。式 (1) を援用³⁾し、計算値との比較を行った。

$$S = m_v H \Delta p \quad \dots (1)$$

S : 沈下量

m_v : 体積圧縮係数

H : 地盤の厚さ

Δp : 上載圧の変化量

なお、体積圧縮係数には、Skempton の提案値³⁾ $m_v = 1800 \times 10^{-6} (\text{cm}^2/\text{kgf})$ を用いている。体積圧縮係数は、載荷圧力により変化する値であるため、 $p=1.0 (\text{kgf}/\text{cm}^2)$ の時の比較のみ行ってみる。その結果、沈下量は、計算値 0.99 (mm) に対し実測値 1.06 (mm) と、密な地盤として良好な結果が得られている。

以上の結果において、相対密度の変化は最大 2% 程度であり、実験結果に大きな影響を及ぼすものではないと判断できる。

表 2. 土圧係数

	上段 (60mm)	中段 (285mm)	下段 (510mm)	
1kgf/cm ²	0.50	0.41	0.43	0.38
2kgf/cm ²	0.51	0.42	0.45	0.38
3kgf/cm ²	0.51	0.42	0.46	0.38
4kgf/cm ²	0.52	0.42	0.47	0.38

§ 4. 拡底杭の載荷実験結果における

杭先端拡底部破壊状況

載荷実験後の杭先端拡底部破壊状況の写真を図8に示す。文献^{1),2)}で示されている解析結果と同様に、杭底面に円周方向のクラックと、そこから半径方向に伸びるクラックが発生している。ただし、杭軸部（鋼棒）と拡底部（モルタル）の接合面直下においてコーンが形成されており、その影響による軸方向（鉛直方向）のクラックも確認されている。したがって、現段階では、拡底部に生じたクラックが解析結果に準ずるものであるのか、コーンの貫入の影響による破壊であるのか結論付けることは難しい。この点を明らかにするため、今後の実験では杭軸部の一部もモルタル製にし、コーンの影響が拡底部に及ばないように改善する予定である。

§ 5. 結論

土圧分布測定結果から、載荷圧力が模型地盤内において均一に分布していない可能性があることが明らかになった。この結果を受け、今後の載荷実験でも土圧計を設置し、地盤内応力の測定を行っていく計画である。なお、鉛直方向と水平方向の測定土圧値より、地盤の状態としては、 K_0 状態に近い地盤が再現できていると推定できる。

杭の載荷実験では、杭先端部のクラックの発生順序が分からないことから、破壊のメカニズムを捉えることは困難であった。今後、実際の杭とは異なっている鋼棒とモルタルの接合部に着目し、この部分が破壊のメカニズムに影響を及ぼさないよう改善していく予定である。

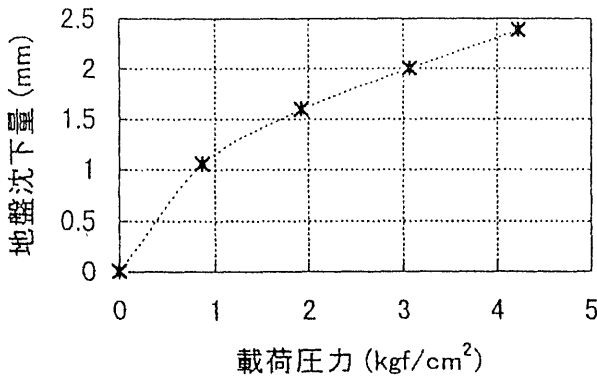


図6. 地盤沈下量－載荷圧力関係

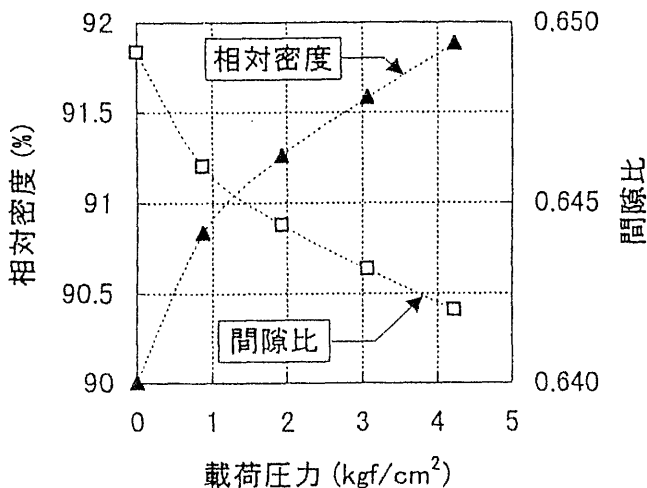
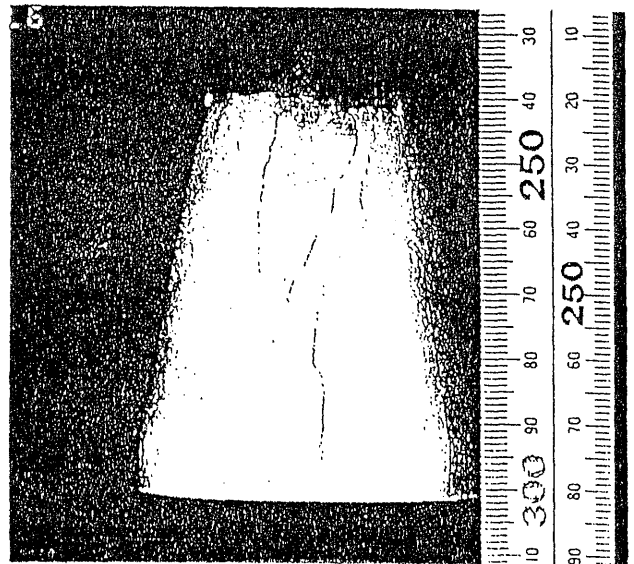
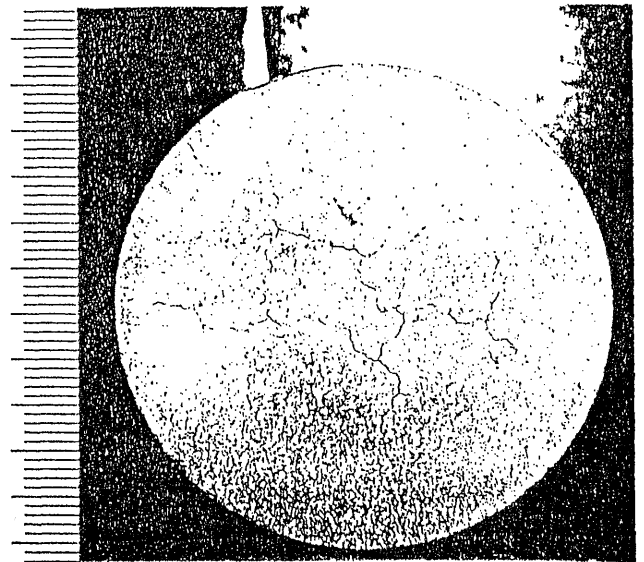


図7. 間隙比・相対密度－載荷圧力関係



(a) 側面



(b) 底面

図8. 杭先端部（拡底部）破壊状況

【謝辞】

最後に、本実験の計画から実施に至るまで、広島大学工学部技官・原田誠一氏、および学部4回生景山和弘氏には多大な協力を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 山崎ら：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，1995.4
- 2) 山崎ら：既製コンクリート杭根固め部構造耐力の施工形状依存性，日本建築学会構造工学論文集，Vol.41B，1995.3
- 3) 山肩邦男：建築基礎工学，1993