

氏 名	こ ばやし ゆき お 小 林 幸 男
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 15 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 39 年 3 月 名古屋工業大学工学部建築学科卒業
学 位 論 文 題 目	硬質粘土中に設置された杭の先端支持力に関する 実験的研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 杉村 義広 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 山田 大彦 東北大学教授 柳澤 栄司

論 文 内 容 要 旨

本論文は、硬い粘土層中に設置された杭の先端支持力機構を明確にするとともに、杭先端支持力の評価方法、および地盤を締め固めることなく設置される埋込み杭の先端沈下評価方法を提案することを目的として実施した研究の内容とその成果を記述したものであり、次の 4 章で構成されている。

第 1 章 序論

第 2 章 実験計画と実験結果

第 3 章 実験結果の考察

第 4 章 結論

本論文は、標題に記すように実験で得られた成果に基づいている。実験としては、原位置実大実験と模型実験を実施した。原位置の実大実験では、載荷実験を実施して杭先端の荷重と沈下量の関係を調べた。その後、杭の周辺および杭先端部地盤を掘削しながら調査するとともに、ブロックサンプリングを実施して、地盤に現れていたクラックや地盤の破壊状況と土性の変化を調査した。

地盤が一様でないで得られた結果の解釈が難しいこと、地盤条件をある程度任意に設定できることから、模型実験は本研究に不可欠であると考えた。模型地盤の条件として非排水せん断強度： C_u の他に、原位置実大実験結果の「杭は地盤を締め固めながら貫入する。」という事実から、締め固まるのは間隙が存在するからであり、それは杭先端支持力を支配している要因の 1 つであると推察して、間隙： e を模型地盤の条件に取り入れた。これらの値としては、対象地盤とした洪積お

よび第三紀の粘土を包括するような値、 $C_u = 1 \sim 25 \text{ kg/cm}^2$ と $e = 0.9 \sim 2.0$ を採用した。模型実験としては、大きな沈下量領域における荷重と沈下量の関係と地盤破壊状況を調べることを目的とした模型実験（以下大沈下量領域模型実験と称す）と小さな沈下領域における荷重と沈下量の関係と地盤破壊状況を調べることを目的とした模型実験（以下小沈下量領域模型実験と称す）および杭径が杭先端の荷重～沈下量に与える影響を調べるための遠心模型実験を実施した。実大実験で明らかになった杭先端地盤の破壊状況と模型実験のそれとの比較から、模型実験は実大杭の挙動を再現していることを証明できた。また、大沈下量領域模型実験で模型地盤周面における境界の影響および土槽底盤の影響を検討し、 $\phi 50 \text{ mm}$ の模型杭の場合には少なくとも杭径の20%以内では両者の影響はないこと、 $\phi 31 \text{ mm}$ の模型杭の場合には両者の影響は無視できることを証明できた。

得られた結果を考察することにより杭先端の支持力機構を明確にするとともに、それに基づいた杭先端基準支持力と極限支持力の評価方法、および埋込み杭の先端沈下評価方法を提案し、実験値で評価方法の検証をした。以下に各章の研究成果をまとめて示す。

第1章では、既往の研究の現状と問題点を概観し、本研究の目的を記した。既往の研究の現状と問題点は次のとおりである。

- ①地盤の破壊状況に関しては、実大杭を載荷した後で、杭先端下地盤の破壊状況を調べた結果、杭先端下には「尖った先端を切り取った円錐の形をした土塊が形成されていた」ことを示し、その形状から地盤は押し抜きせん断されたことと結論付けている論文がある。地盤の非排水せん断強度は本研究の対象範囲とほぼ同じであるが、この論文では間隙比は考慮されておらず、また、杭の最終沈下量が25%程度までの結果である。
- ②ロンドン粘土層に設置された実大杭の載荷実験結果に基づいた、埋込み杭の先端極限支持力を評価する方法が約40年以前に提案されて、現在も設計で使われている。この方法では非排水せん断強度だけが関数であり、先端極限支持力は非排水せん断強度に正比例している。この方法がアメリカのテキサスの地盤では必ずしも成立しないことを指摘する論文があり、それは杭先端支持力を支配する要因として、少なくとも、もう1つは取り入れる必要があることを示唆している。
- ③打込み杭の先端支持力については、浅い基礎の支持力理論を適用する方法と球空洞の膨張理論を適用する方法が提案されている。前者は地盤の破壊パターンを再現していないし、後者はデータで裏付けられていない。
- ④杭先端沈下量の評価方法としては、剛押し抜きの弾性理論解や、実験結果が双曲線で近似できたことから双曲線を使う方法が提案されている。前者は、沈下初期には適用できても地盤が降伏した後では使用できないし、後者は、特定の地盤には適用できても普遍的に使用できる方法とは言い難い。

以上のように、硬質粘土中に設置された杭の先端支持力に関しては不明な点が多々あり、さらに研究する必要がある。

近年、粘土地盤といえば支持力が小さいとみなして、何がなんでも杭を砂層や砂礫層に支持させ

る傾向が強い。硬質粘土中に設置された杭の先端支持力について正確な評価ができるようになれば、硬質粘土層を支持層とすることが可能になり、経済的な設計が可能になる。硬質粘土層を支持層にすれば、場所打ち杭の施工においてサクションをかけることができるので、杭先端のスライムを完全に除去できるということや、掘削による上載圧力除去や掘削に伴う先端地盤の緩みの問題もなくなるというメリットもある。このような面からみても本研究の必要性は高いと言える。

第2章では実験計画と結果について述べている。前述のように実験は、実大実験と模型実験で構成され、模型実験は大沈下量領域実験と遠心模型実験および小沈下量領域実験で構成されている。これらの実験で得られた本章の成果は次のとおりである。

- ①原位置における実験は、埋込み杭2本と打込み杭1本の実大杭を用いて実施した。載荷実験後に杭周囲を掘削しながら地盤を調査するとともに、杭先端下の地盤をブロックサンプリングして調査した。その結果、杭から外側に向かうクラックが発生すること、埋込み杭先端には逆円錐形の土塊が形成されること、杭を地盤中にかなり貫入すると逆円錐形の土塊中の杭先端下にコアが形成されること、地盤が締め固められた体積分は貫入した杭の体積に匹敵することなどを指摘できた。また、コアの形状や大きさは砂地盤の場合とほとんど同一であること、杭先端下の破壊状況も砂地盤に類似していることを指摘できた。さらに、打込み杭がより硬い地盤を貫入してゆくときには、それまでに形成されたコアが削られてより硬い地盤と置き換わること、削られた土は杭周面に残ることも指摘できた。
- ②大沈下量領域模型実験では、地盤の破壊状況の観察から地盤は押し抜きせん断されていることを確認できた。
- ③小沈下量領域模型実験では、沈下初期における地盤破壊状況が実大杭の場合と同じであり、かつ、地盤は押し抜きせん断されていることを確認できた。
- ④遠心模型実験では、加速度を10g、20g、30gと段階的にかけた状態で杭を貫入させた。得られた荷重～沈下関係が加速度による影響を受けないことから、杭径が150cmまでは杭径による寸法効果は無いことを証明できた。

第3章では、主とした大沈下量領域模型実験の結果を検討して次のような成果を得た。

- ①埋込み杭の先端支持力機構は、次のように3段階に分けられることを指摘した。

〈第1段階〉

第1段階の沈下量の範囲は、杭径の0.5%程度までである。第1段階では、荷重と沈下の関係は弾性的挙動を示し、それは剛押し抜きの弾性理論解で表すことができる。

〈第2段階〉

杭先端下地盤は押し抜きせん断され、柱状の土塊が形成されてゆく。沈下が進むと、杭は柱状土塊を壊しながら、かつ締め固める。その際に柱状土塊内に逆円錐状の土塊が形成される。さらに沈下が進行すると、杭先端下は締め固められて、逆円錐状土塊内の杭下面下にコアが形成される。

〈第3段階〉

逆円錐状土塊内にコアが完成するときが、第3段階である。この段階では、沈下が進行しても荷重は増加しない。第3段階に到達するのに、沈下量は少なくとも杭径の2～3倍は必要である。

この支持力機構は砂地盤の場合と同種であることも指摘できた。

なお、打込み杭の先端支持力機構は第1段階と第3段階の2段階からなり、かつ、第1段階の沈下量の範囲は杭径の数％であり、埋込み杭の0.5％に比べて格段に大きくなっていることを示した。

- ②沈下速度が100倍ないし1/100になると杭先端支持力は10％程度増減するが、その後は頭打ちの傾向にあることを示した。
- ③載荷方法が沈下制御でも荷重制御でも、載荷に要した時間が同程度なら両者の先端支持力性状にはほとんど差はみられないことを指摘した。
- ④杭径の10％沈下時の支持力である杭先端の基準支持力は、間隙比に反比例し、非排水せん断強度に比例はするが正比例はしないことを指摘した。
- ⑤柱状土塊の周面に働くせん断力の合計を先端支持力とし、柱状土塊が圧密試験と同じ状態で圧縮すると仮定した杭先端基準支持力評価方法を提案した。実験値で照合し、良好な結果を得た。
- ⑥先端極限支持力は、既往の評価方法による値の2～3倍あり、また、先端極限支持力は間隙比に反比例し、非排水せん断強度に比例はするが正比例はしないことを指摘した。
- ⑦埋込み杭の先端沈下量推定法として、第1段階に剛押し抜きの理論解を適用し、第2段階に先端技術支持力を求めるために提案した方法を適用する。実験値で検証した結果、間隙比が0.9で非排水せん断強度が20～25kg/cm²の第1段階部分を除いて、杭径10％程度までは提案した方法は実験値をほぼ再現できることを検証した。

審 査 結 果 の 要 旨

硬質粘土中に設置された杭の先端支持力の研究に関する歴史は古く、1950年代にロンドン粘土を対象として A. W. Skempton などが行った実大杭の実験に基づく研究が著名であり、その提案式は現在でも使用されている。しかし、その後に行われた研究も含めて従来の研究は、破壊パターンの詳細な調査に基づく支持機構の究明にやや欠けるものがあり、またロンドン粘土など特定の地盤に適用可能な成果である。したがって、広範囲の地盤条件に適用できる支持力評価方法の提案は未解決な問題として残されてきた。本論文は、原位置における実大実験と室内模型実験により、地盤の破壊パターンと土質性状の変化についての調査を詳細に行って、杭の先端支持力機構を明確にしている。さらに、広範囲な地盤条件に適用可能とするために、実験因子に間隙比を導入するとともに、幅広い地盤強度を対象とした模型実験により、地盤を締め固めることなく設置される埋込み杭の先端沈下量を推定する新しい方法を提案したものであり、全編4章からなっている。

第1章は序論であり、既往の研究の問題点と本研究の目的について述べている。既往の研究に関しては、破壊パターンは未だ不明確な点が多いこと、提案されている杭の先端支持力あるいは沈下評価方法は特定の地盤にのみ適用可能であることなどに問題点があると指摘している。そして、これらの問題点を解決し、広範囲な地盤条件に適用可能な杭の先端支持力と沈下の評価方法を確立することが本研究の目的であると述べている。

第2章では、原位置の実大実験と室内模型実験の計画と実験結果について述べている。原位置の実大杭の実験では、杭はその体積分だけ地盤を締め固めながら貫入すること、杭先端には円錐状土塊とコアが形成されること、杭から外側に向かう放射状クラックが発生することなどを明らかにしている。室内模型実験では、破壊パターンを明確化するとともに、杭径の相違による寸法効果は無いことを見い出している。

第3章では、実験結果について考察を行っている。地盤の破壊パターンを詳細に分析することにより、杭は押し抜きせん断で破壊すること、杭先端の荷重～沈下の関係は3段階に分けることができ、第1段階は弾性域、第2段階は杭が地盤を締め固めながら貫入する領域、第3段階は極限領域であることを指摘している。第1段階の弾性域を除いて、間隙比が杭の先端支持力を支配する要因となっていることを見い出すとともに、埋込み杭の先端荷重～沈下関係に対しては、杭径の10%程度の沈下量までの沈下予測法として第2段階における杭貫入に伴って地盤が締め固まる事実を導入した新しい方法を提案している。さらに、極限支持力は、従来考えられていた値よりも数倍以上大きくなりうることも指摘している。

第4章は結論である。

以上、本論文は硬質粘土中に設置された杭の先端支持力についてその機構を明確にするとともに、埋込み杭の先端沈下について実用的かつ合理的に評価する方法をとりまとめたものであり、杭の支持力評価に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。