

砂杭改良粘土地盤の力学特性

名古屋大学 浅岡 顕, 小高猛司
不動建設(株) 野津光夫
清水建設(株) 小島英郷

1. はじめに

締固め砂杭の打設は、軟弱粘性土地盤の改良工法として日本では広く用いられる工法の一つである。この工法の改良原理のもともとの発想が、改良後の複合地盤上に建設する構造物を支えるのは砂杭であるという杭基礎の考え方の延長線上にあったことから、複合地盤に関する既往の研究の多くは、砂杭への応力集中等を議論の中心としてきた(例えば、一本・末松, 1981; 網干ら, 1979; 榎ら, 1991)。著者らも載荷する基礎の剛性、砂杭の吸排水条件等を含めて、砂杭への応力集中のメカニズムの解明を中心として、様々な条件での複合地盤の支持力について検討を行ってきた(浅岡ら, 1992, 1994(1))。

ところが近年、地盤改良の経済化を図るために砂の置換率を比較的低くした改良工法(岡田ら, 1989)が、良質砂の枯渇化と相まって注目を集めるようになってきた。そのような低置換率での改良では、粘土地盤自体の圧密による改良効果をも期待していて、改良後の複合地盤の支持力を予測する上で、粘土地盤の強度増加の予測が必要不可欠となる。現状の設計では、サンドドレーンと同様な考え方により、上載荷重による粘土地盤の圧密の効果を取入れて強度増加を評価している。ところが多くの事例を素直に見れば、砂杭打設のみによって、盛土による上載荷重なしで、杭間粘土が強度増加しているのを認めることができる。このことは赤木ら(1980)がすでに指摘したことでもある。著者らは、杭間粘土の強度増加のメカニズムを「締固め砂杭打設に必要な排土、すなわち粘土地盤中での円筒拡幅のための力が、圧密荷重として長く持続して杭周粘土に作用する」、すなわち「円周半径方向に押し拡げられて破壊した杭周粘土は、その時発生する過剰水圧の消散による圧密に伴い再び蘇り、元の粘土より大きなせん断強度を有する粘土となる」と考えて、この強度増加の予測手法を提案した(浅岡ら, 1994(1), 1994(2))。

本論文では、その強度増加予測手法の概略を説明し、その解析を進める上で改良地盤の強度回復の遅れについて知見を得たのでそれをあわせて報告する。また、砂杭の杭径が杭材料の剛性にあわせて変化し、なお粘土地盤を押し拡げる反力が緩和される場合にも粘土の強度増加が起こり得ることも確かめる。

2. 剛塑性有限要素法と弾性変形解析を用いた強度増加予測手法

本手法ではまず始めに、粘土地盤への砂杭打設は、円筒拡幅の境界条件での剛塑性有限要素法を用いてシミュレートする。次に、その後の過剰水圧の消散は、先の剛塑性解析で得られた過剰水圧分布だけを初期値として、砂杭径が変化しないという仮定の下での変位固定境界条件で弾性圧密を行うことによって解析する。結果として、その弾性解析により粘土地盤の各要素での体積収縮量が求められ、要素毎での強度増加を予測することができる(浅岡ら, 1994(1), (2))。剛塑性解析から弾性圧密解析へと、水圧の情報だけを伝達し、土の構成関係から境界条件まで途中で変えて解析することはきわめて乱暴なように読者には感じられるかも知れない。しかし、軸対称条件での拡径による破壊から、その後の破壊した粘土の圧密現象までもを一貫して解析することは、不可能ではないが(浅岡ら, 1994(3))、実用的ではなく、しかも、すでに非排水3軸圧縮試験とその後の圧密試験のシミュレーションによって、強度予測に関しては本手法の結果とほとんど差がないことを別途確かめている(浅岡ら, 1994(4))。

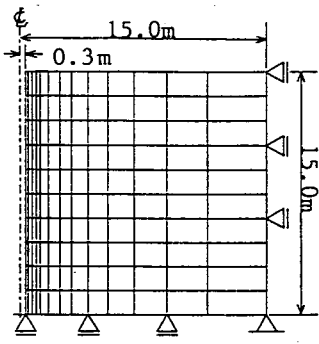


図1 有限要素メッシュ

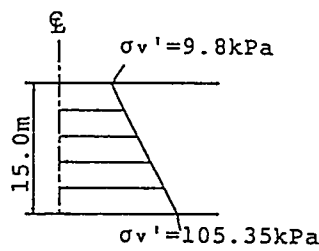


図2 初期有効応力分布

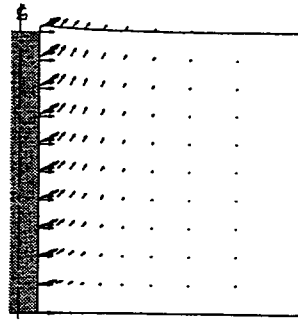


図3 塑性流れ図

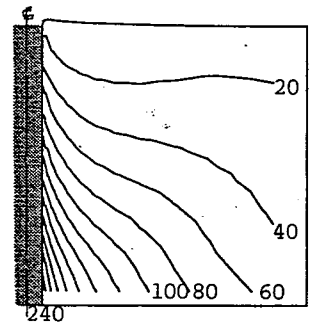


図4 破壊時過剰水圧分布

図1, 2はそれぞれ剛塑性解析に用いた初期の有限要素メッシュおよび地盤の初期応力分布であり、土質定数は表1に示す。図3, 4はそれぞれ直径1.7mまで砂杭を拡幅した場合の塑性流れ図と過剰間隙水圧分布図である。図4の水圧分布を初期値として、置換率25%を想定して直径3.4mの円筒形の範囲にのみ限定して、上端および砂杭に接する内側の境界のみを排水端と仮定し、さらに砂杭に接すると想定する円筒内側の境界はスライドすなわち砂杭径は全く変動しないと仮定して弾性圧密解析を行なった。地盤の透水係数は 1.0×10^{-8} (m/day)とし、弾性定数は表1の弾塑性パラメータと各層での土被り圧から逆算する浅岡ら(1994(2))による手法によって決定したものを使用した。図5は弾性解析の結果、各要素で得られた強度増加の予測値を同じ深さ毎に平均して算出した、一軸強度の強度増加後の予測値である。土被り圧による拘束圧の大きい地盤の深部で強度増加は顕著に起こることがわかる。

表1 土質パラメータ

λ	0.25	γ_t	16.17 kN/m ³
M	1.2	K_0	0.5
κ	0.1304	e_0	2.0 (G.L.)

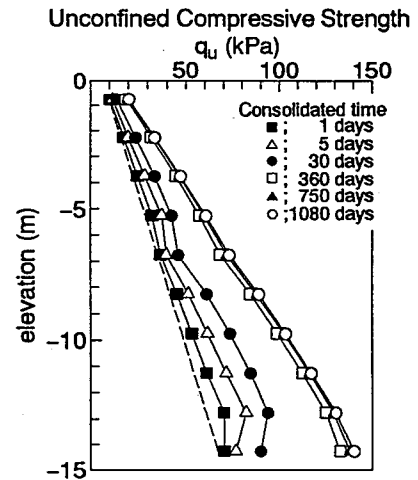


図5 一軸強度の予測値

3. 強度回復の遅れについての考察

図6は舞鶴現場実験(岡田ら, 1989)において計測された、杭間粘土の一軸強度の推移である。実際の現場においても地盤深部の強度が大幅に増加していることがわかる。図7はこの現場の土質定数を用いて2章の手法を用いて強度増加を予測したものである(浅岡ら, 1994(2))。サンドマット程度の上載荷重では説明できない地盤深部の強度増加を精度よく説明していることがわかる。図6中で今回新たに注目したいことは、打設直後から120日経過後まで大きな強度増加は見られないものの、500日経過後にはかなり大きな強度増加が見られることである。この原因は 従来砂杭打設による粘土の乱れと考えられている。ここで、2章の解析において、圧密による間隙比の変化から強度の変化率(現地盤強度に対する比)を計算し、砂杭に最も近い要素を「内側」、逆に離れている方を「外側」として、地盤の深さ方向3ヶ所変えて計6ヶ所選んだ要素における結果を図8に示す。いずれの深さにおいても、外側の強度増加は50日以上経過してから始まる。これは、砂杭打設時に発生する水圧が静水圧のように上下方向のみに勾配をもつのではなく、図4のように水平方向にも勾配を持っているため、圧密初期には砂杭側から外側に向けて水が流れることもあるため、外側の水圧の消散の遅れ、すなわち強度増加の遅れがあると考えている。特に実地盤の調査ボーリングは杭間の中心で行なわれることが多いため、強度増加の遅ればかりが顕著に観測されることが多い。その場合、地盤全体としての強度は調査結果で見ると、もっと増加しているし、もう少しの放置期間をおけば杭間中心の粘土もさらに強度増加が期待できる。

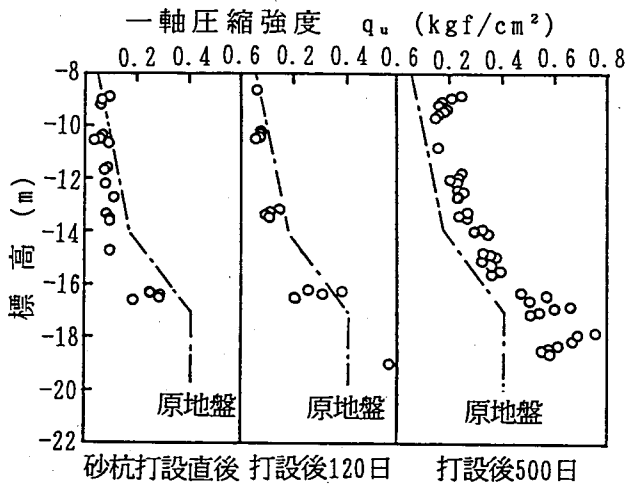


図6 舞鶴での強度回復の遅れとその後の増加(岡田ら, 1989)

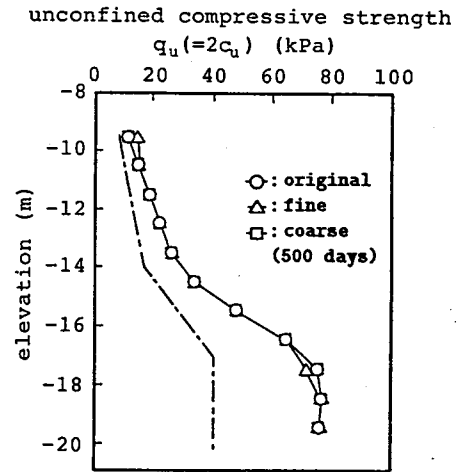


図7 一軸強度(浅岡ら, 1994(2))

4. 砂杭径の変動が強度増加に与える影響

前章までに行った解析では、砂杭を打設した後その砂杭は十分に剛性を保っているために、砂杭の径は全く変化しないと仮定したが、実際にはその剛性は有限であるし、砂以外のもっと低質な材料を用いる改良を将来行うことを想定すると、砂杭が打設後に杭周の粘土地盤に押し返される場合をも含めての強度増加の予測が必要となる。三笠(1964)は、いち早くこの現象に注目し、砂杭から粘土地盤に加えられる反力は著しくリラクゼーションを起こすため、過剰水圧は瞬時に消散してしまい粘土の圧密は起こらないと述べている。このことも含めて種々の疑問を解消するために、有限な砂杭の剛性を用いた圧密解析を行う。

解析は、拡張された粘土地盤(中空円筒型)と砂杭(円筒型)の2つを完全に切り放して行う。これは、砂杭と粘土との摩擦の処理や剛性および透水係数が大きく異なる混合材料の圧密計算の精度上の問題など回避するためであり、ジョイント要素などを使用するよりも適切であると判断した。砂杭の弾性係数(ヤング率)は $70N(tf/m^2)$ 、ただしN値=5および15、として換算し、深さ方向に均質な砂杭を想定した。

図9は砂杭と粘土地盤との境界面の時間的な変化を示す。解析は、粘土地盤の拡張直後の反力を円筒型の砂杭に加え、その反力とつりあう初期境界面をまず探す事から始めるのだが、粘土の拡張が縮小されるにつれて反力が緩和されることも考慮に入れてイタラティブに初期境界面を決定しなければならない。砂杭の剛性が小さいケース(N値=5)では特に、打設後に粘土地盤に押し返される量が多いことがわかる。これらの境界面から圧密解析は始められ、粘土地盤は過剰水圧の消散に伴い収

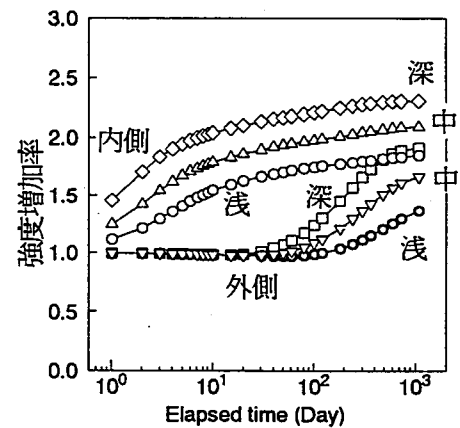


図8 強度増加率の推移

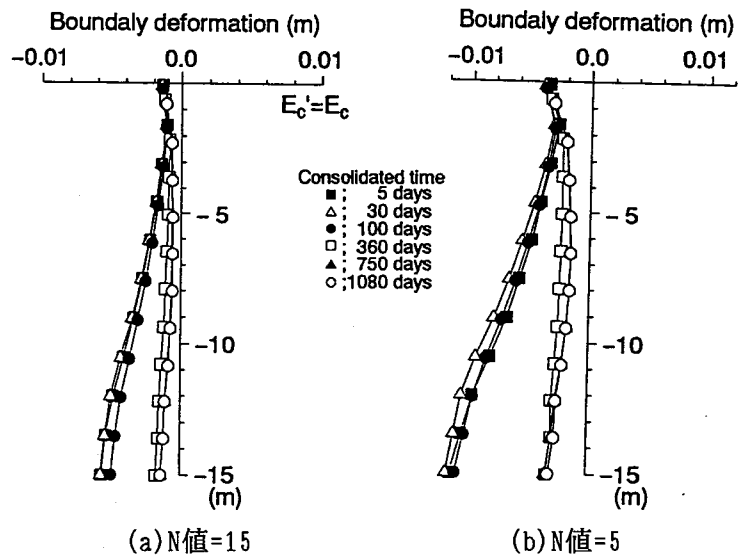


図9 砂杭・粘土地盤の境界面の変化

縮する。これらの境界面から圧密解析は始められ、粘土地盤は過剰水圧の消散に伴い収

縮し、砂杭径が再び膨らむように境界面が変化していく様子を図8は示しているのである。図10はこの条件での圧密解析によって得られる、強度増加後の粘土地盤の一軸強度の予測値である。先の図5は砂杭・粘土の境界が全く変化しない、すなわち図9において境界面が0mmの位置のまま水平方向には固定されているという条件での解析で得られた、一軸強度の予測値であったが、図5と10において両者の差はほとんど認められず、便宜的に砂杭の境界が変化しないと仮定しても全くかまわないことがわかる。このことは

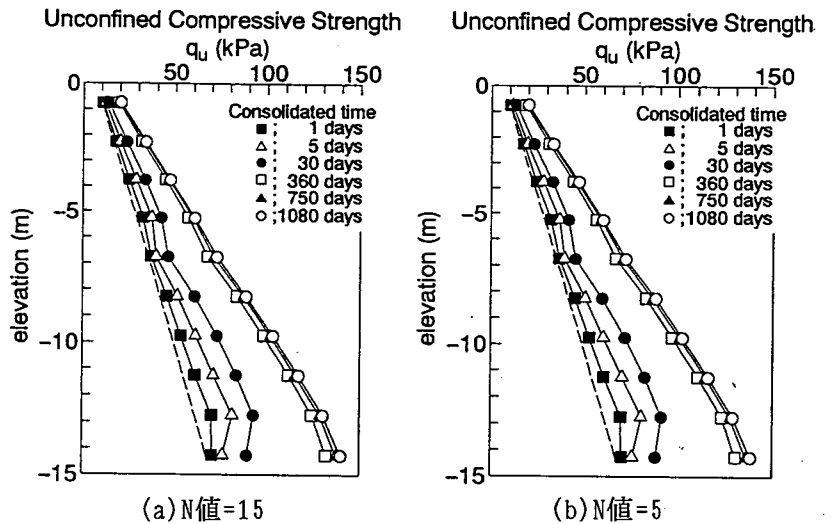


図10 一軸強度の予測値(砂杭境界面が変動できる場合)

すなわち、基準値まで締め固められないような低品質な砂やさらに極端に言えば焼却灰や廃棄物等で改良したとしても、排水性能さえ満足させられれば、粘土地盤の強度上昇は全く同様に得られることを示している。

なお、以上の議論はすべて「円筒拡幅」によるものであって、砂壁のような2次元平面ひずみではこうはいかないので注意する。

5. おわりに

本論文で得られた知見を列挙する。

- 1) 砂杭打設後に粘土地盤の強度回復・増加が遅れる原因のひとつは、砂杭打設によって発生する過剰水圧の勾配が水平方向にも存在するために、圧密中の間隙水は一旦砂杭の逆方向に流れることがあり得るからである。調査ボーリングする地点が砂杭間の中間点で行われるのことが多いのも強度遅れが観測される場合の要因の一つである。
- 2) 砂杭拡幅後に砂杭より粘土地盤に加えられる反力が多少緩和されたとしても、過剰水圧の消散に伴う圧密は順調に起こり、結果として粘土地盤の強度は増加する。したがって、多少剛性の小さな杭材料であっても砂杭打設による円筒拡幅さえできれば粘土地盤の強度を上昇させる改良効果は十分にある。

参考文献

- 1) 赤木(1980):排除型砂杭の打設に伴う間隙水圧と地表面の変動, 第15回土質工学研究発表会, pp. 1633-1636.
- 2) 浅岡ら(1994(1)):Bearing capacity of clay improved with sand compaction piles, Proc. 13th ICSMFE, pp. 763-766.
- 3) 浅岡ら(1994(2)):SD, SCPにおける地盤改良原理の考察とその応用, 土と基礎, 42(2), pp. 7-12.
- 4) 浅岡ら(1994(3)):Soil-Water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, S&F, 34(1), pp. 91-106.
- 5) 浅岡ら(1994(4)):Undrained shear strength of clay improved by sand compaction piles, S&F, to appear.
- 6) 網干ら(1979):The "compozar" - a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns, Proc. of Int. Conf. on Soil Reinforcement, Paris, pp. 211-216.
- 7) 一本ら(1981):サンドコンパクションパイル工法, 土と基礎, 29(5), pp. 13-20.
- 8) 榎ら(1991):Evaluation of bearing capacity analysis method of improved ground, Proc. of Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development (GEO-COAST '91), Vol.1, pp. 305-310.
- 9) 岡田ら(1989):低置換率サンドコンパクションパイル工法による改良地盤の現地破壊実験, 土と基礎, 37(8), pp. 57-62.
- 10) 三笠(1964):圧密現象の見方について-過剰水圧から圧縮ヒズミへ-, 土と基礎, 12(3), pp. 19-25.