

サンドコンパクションパイルの打設が地盤改良域外の粘土地盤の強度に及ぼす影響

松田 博¹・高橋 総一²・藤原 克久³・来山 尚義⁴

¹正会員 工博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 運輸省第四港湾建設局宇部港工事事務所所長 (〒755-0001山口県宇部市沖宇部沖の山5254-16)

³正会員 工修 五洋建設(株)東京支店 (〒140-8576 東京都品川区南大井6-26-3 大森ベルポートD館)

⁴正会員 復建調査設計(株) (〒732-0052 広島市東区光町2丁目10-11)

粘土地盤に対してSCP(サンドコンパクションパイル)工法を適用する場合、砂杭を圧入すると地盤改良域内のみならず、改良域外においても過剰間隙水圧が発生して強度が低下する。特に改良域外においては、発生した過剰間隙水圧の消散が改良域内のように早期に期待できないという報告もある。そこで、ここでは特に徳山下松港での低置換率SCP工法による地盤改良工事に際して行われた土質試験結果、および多軸単純せん断試験結果をもとに、砂杭の打設が地盤改良域外の粘土地盤の強度に及ぼす影響、また影響が及ぶ範囲について調べた。その結果、砂杭打設直後は改良域外においても粘土のせん断強度が減少すること、また砂杭打設に伴う影響が及ぶ範囲は、受働土圧を受ける粘土地盤のすべり線によって推定できることが明らかになった。

Key Words : sand compaction pile, shear strength, clay, disturbance, passive earth pressure

1. まえがき

サンドコンパクションパイル (SCP) 工法においては、ケーシングパイプをまず土中に貫入し、その後砂を締め固めつつ砂柱を形成していく。飽和した粘土層を改良する場合においては、ケーシングパイプを土中に貫入して砂杭を形成すると、粘土層は著しい攪乱を受ける。そのために砂杭のまわりには過剰間隙水圧が発生し、砂杭打設直後は粘土のせん断強度が低下する。このような砂杭の貫入によって粘土内に過剰間隙水圧が発生し、強度が低下するという現象は、排土杭等の施工あるいはプレッシャーメーターのメンブレンの拡張等を行う際にも生じることが報告されており^{1), 2), 3), 4)}、また、砂杭打設前後に測定された一軸圧縮強度の比較からも強度が低下することが明らかにされている^{5), 6), 7)}。一方、砂杭を粘土層内に打設すると、粘土地盤の一部は砂杭によって置き換えられるため、盛上りを生じるとともに、改良域外の粘土は改良域から受働土圧を受けて変形し強度も変化する。また、地盤改良後の盛土によって生じる応力は改良域内のみならず改良域外にも伝播することから、安定解析を行う際には地盤改良域内のみならず改良域外の粘土の強度についても十分把握する必要がある。ところが、粘土が攪乱

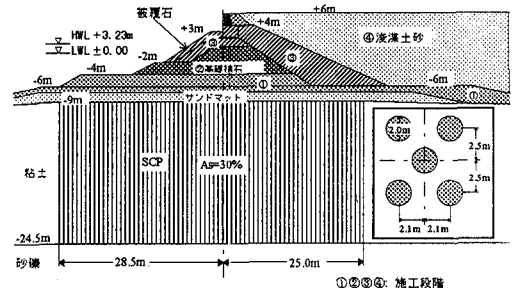


図-1 地盤改良域の標準断面

を受けた場合の強度に関する報告としては、サンプリング、波浪荷重、地震等を対象とした研究においてみられる^{8), 9), 10), 11), 12)}のもの、SCP工法を対象として、粘土の強度が砂杭打設によって受ける影響を実験によって調べた研究^{13), 14)}および砂杭打設の影響が及ぶ範囲(乱れ範囲¹⁵⁾とも呼ぶ)に関する研究は数少なく^{7), 15), 16)}、明確にされていない点も多い。

今回徳山下松港の土砂処分場の建設に際して、延長987mにわたって粘土地盤の改良工事が行われた。護岸および地盤改良域の標準断面を示したものが、図-1である。地盤改良では砂置換率30%のいわゆ

る低置換率サンドコンパクションパイル工法が採用された。

ここでは、砂杭の打設前後に採取された試料について行われた土質試験結果および、砂杭打設にともなう生じた地盤の盛上りの結果をもとに、砂杭打設が粘土のせん断強度に及ぼす影響、および砂杭打設の影響がおよぶ範囲について検討した。

2. サンドコンパクションパイル工法による地盤改良工事の概要

今回SCPによる地盤改良工事が行われた徳山下松港の現場は水深約-10mで、DL-23m付近までは、沖積世の軟弱粘土層、その下には洪積世の砂礫層が分布している。砂杭の打設に際しては、サンドコンパクションパイル打設船の特性により、最終天端付近の砂杭形成のためのケーシングパイプ引き抜き過程において、排出した砂を自立させるため、事前に厚さ約1.5mの敷砂施工を行った。そして、支持層（水深-24.5m）から海底面（水深-10m）まで、及び砂杭打設に伴う盛上がり部を改良した。砂杭は直径2.0m、砂杭の中心間隔は、横断方向に5.0m、縦断方向に4.2mの千鳥配列である。砂杭の打設は平成2年から平成5年まで行われ、打設本数は5070本に達した。

地盤改良域の平面図を示したものが図-2であるが、今回地盤改良を実施した地区においては、改良域全体にわたって水深、洪積砂礫層の位置はほぼ等しく、沖積粘土層が比較的一様に分布している。同図には地盤改良工事前後に試料採取を行った地点と時期についても示しているが、その中の代表的な地点（No. 16）について、地盤改良前の粘着力、N値、粒度の分布を示したものが図-3である。

3. 攪乱を受けた粘土の強度特性に関する室内試験

(1) 実験装置および実験方法

粘土地盤に砂杭を打設する際には、ケーシングを貫入したうえでさらにパイプロットの押し引きを繰返すことによって、砂杭の直径を所定の値に確保している。その際、砂杭周辺の粘土はただ単に一方のせん断を受けるだけではなく、繰返しせん断、圧縮等複雑な変形を受ける。このような挙動を室内において再現することは容易ではないが、浅岡等¹³⁾は三軸圧縮試験装置を用いて載荷-除荷-再載荷を

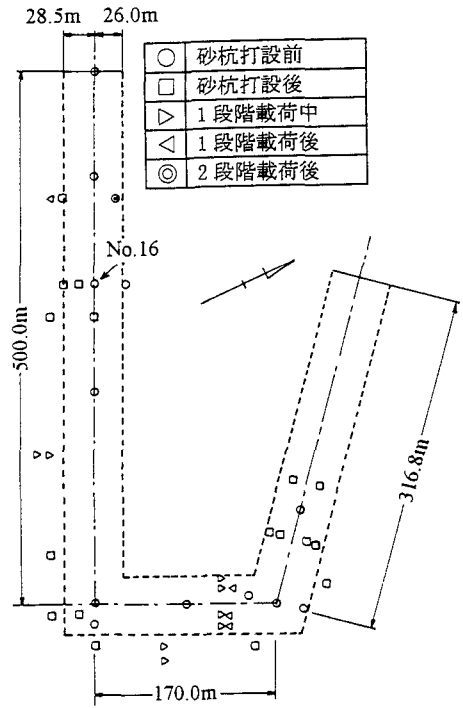


図-2 地盤改良域の平面図

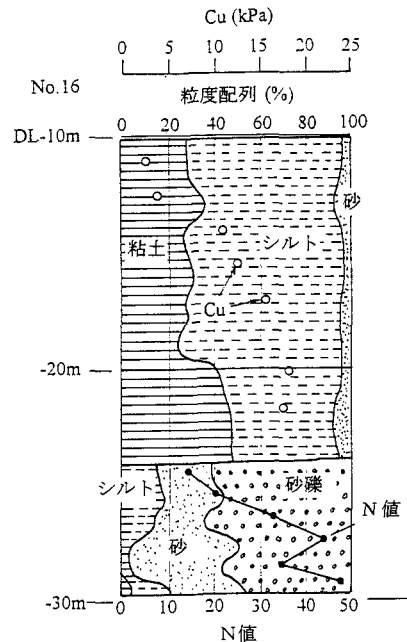


図-3 地盤改良前の地盤の粘着力、N値、粒度分布

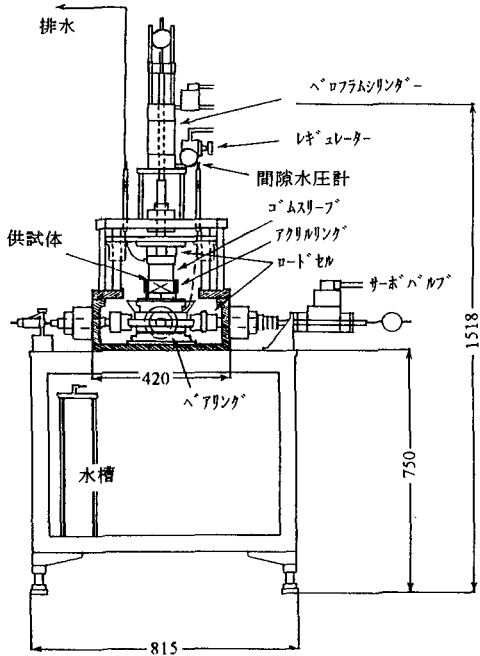


図-4 多軸単純せん断試験機

行なって砂杭打設時の粘土の挙動を再現している。一方、奥村⁸⁾はサンプリングにともなう粘土の攪乱を表現するために単純せん断試験装置を用いて繰返しせん断試験を行ない、繰返しせん断がせん断強度、圧密特性に及ぼす影響を調べている。そこで、ここでは、攪乱の程度をせん断ひずみと繰返しせん断の回数によって変化させることができることから、単純せん断試験によって、粘土の攪乱がせん断強度に及ぼす影響を調べることとした。一方、砂杭打設時においては、砂杭打設船のタイプによって異なるが、ケーシング自体に振動を与えた状態で、粘土中への貫入、引き抜き、打ち戻しという一連の操作が繰返し行われる。その際、粘土が受ける変形は、砂杭の打設順とも関連して、その方向が特定されておらず、また砂杭打設後の盛土施工等によって地盤が受ける変形と砂杭打設時に地盤が受ける変形方向とは必ずしも一致しない。そこで、ここでは繰返しせん断の方向と静的せん断の方向を一致させるかあるいは直行させることの可能な多軸単純せん断試験装置を新たに作製¹⁴⁾して、繰返しせん断に伴う静的強度の変化および繰返しせん断方向と静的せん断方向の違いが静的強度に及ぼす影響を調べた。

多軸単純せん断試験機の概要を示したものが図一

4である。せん断箱（供試体寸法：直径75mm、高さ22mm）はKjellman型と同型であって、水平2方向に移動可能な振動台上に設置されている。また、供試体の上部は水平方向の変位が拘束されているのに対して、供試体下部は水平2方向に移動が自由であって、供試体に対して繰返し単純せん断および静的単純せん断を行うことができる。一方、供試体上部は前述のように水平方向変位が拘束されているが、鉛直方向の変位については拘束することも自由とすることも可能である。したがって、供試体に対して一定圧密荷重条件あるいは定体積条件のもとで繰返しせん断、静的せん断試験を行うことができる。ここでは、水平2方向をそれぞれX方向、Y方向（繰返しせん断を負荷する方向を特にX方向、それと直角方向をY方向と呼ぶ）、鉛直方向をZ方向と呼ぶこととした。X方向の荷重は電気油圧サーボが荷重装置によって行い、Y方向については回転数制御モーター、鉛直荷重（Z方向）は空気圧によって負荷した。また、実験中は、水平2方向の応力と変位、鉛直方向の応力と変位、供試体底部での過剰間隙水圧の測定を行った。なお、水平2方向のせん断力の測定値には供試体のせん断抵抗力以外にゴムスリーブの張力、拘束リングの摩擦、さらに振動台底部のベアリング部の摩擦力等を含むことから、実験に先立ってせん断力の補正值を求めた。

実験で用いた試料は、徳山下松港の地盤改良域（図-2において東側護岸の水深-9.9m~-18.3m）より採取した不攪乱粘土（ $\rho_s=2.680\text{g/cm}^3$ 、 $w_L=113.0\%$ 、 $w_p=37.3\%$ 、 $I_p=75.7$ 、粘土分34%、シルト分46.1%、砂分19.9%、 $D_{50}=0.013\text{mm}$ ）である。採取位置での有効土被り圧は16kPa~45kPaの範囲にある。

実験では、供試体を所定の圧密圧力 σ_{vo} で供試体底面の過剰間隙水圧が消散するまで圧密後、供試体下面非排水、上面排水状態として鉛直変位を拘束したうえで繰返し単純せん断試験を行った。繰返し回数 n は一定とし、ひずみ振幅 $\gamma_{d,m}$ を0~10%の範囲で変化させた。繰返しせん断後は、鉛直方向変位の拘束をとき、再び圧密圧力 σ_{vo} で圧密を行った（再圧密）。そして静的せん断試験は、繰返しせん断直後または再圧密後に行った。その際、再圧密時の圧密期間は供試体底部の過剰間隙水圧が消散するまでとした。また、静的せん断試験は繰返しせん断試験中と同様な排水条件および変位拘束条件で行い、せん断速度は1mm/minとした。また、ここでは不攪乱試料の数量に限りがあるために、圧密圧力 $\sigma_{vo}=98\text{kPa}$ 、および繰返し回数200回に対する実験のみを行った。ここで、繰返し回数を200回と固定した場合、砂杭

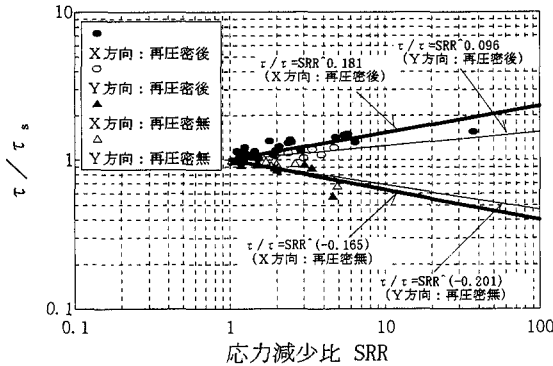


図 5 繰返しせん断後の静的強度と応力減少比 SRR の関係

打設時の粘土の挙動との比較を行う上での相違が考えられるが、粘土の攪乱の程度は繰返しせん断中に発生した過剰間隙水圧の大きさに直接影響することから、ここでは後述するように繰返しせん断中の有効応力の変化で比較検討することとした。

(2) 繰返しせん断履歴後の強度特性

図 5 は繰返しせん断後の静的強度 τ を繰返しせん断履歴のない静的強度 τ_s で正規化した強度比 τ/τ_s と次式で示される応力減少比 SRR の関係を示したものである。

$$SRR = 1/(1 + \Delta\sigma_v/\sigma_{v0}) \quad (1)$$

ここに、 $\Delta\sigma_v$ は 200 回の繰返しせん断後の有効応力減少量、 σ_{v0} は圧密圧力である。すでに SRR と τ/τ_s の関係については次式が成り立つことが示されている¹⁷⁾が、ばらつきはみられるものの、ここでも図 5 に示したように、両者の間には同様の関係があることがわかる。

$$\tau/\tau_s = SRR^\xi \quad (2)$$

ここに、 ξ は実験定数である。

すなわちせん断強度は SRR の増加とともに再圧密の有無に対応して増加または減少する。特に、繰返しせん断直後のせん断強度は、繰返しせん断履歴がない粘土の強度と比較すると SRR の大きさに対応して 10%~30% 程度減少する。また、繰返しせん断の後に再圧密を行なうとせん断強度は増加し、SRR の大きさによっても異なるが、50% 程度の増加を生じる場合のあることがわかる。すでに浅岡等¹³⁾も砂杭の

打設により粘土の強度は増加することを示しており、ここでの結果と一致している。

さらに図 5 には繰返しせん断方向と静的せん断の方向を同一方向とした場合 (X 方向) と直交させた場合 (Y 方向) についての結果を示しているが、繰返しせん断直後は、X 方向の強度の低下が顕著であって、再圧密後は Y 方向の強度増加は X 方向の強度ほど期待できないことがわかる。したがって、繰返しせん断後の強度を推定する場合、特に再圧密後に関しては、繰返しせん断と同一方向のせん断試験によって強度を推定すると、危険側の結果を与えることになる。

4. 砂杭打設に伴う粘土の攪乱がせん断強度に及ぼす影響

粘性土地盤に対して SCP 工法を適用する場合においては、砂杭打設中に砂杭周辺の粘性土が複雑な挙動を示すため、砂杭打設後のせん断強度の評価が容易ではない。また、先述したように飽和した粘土に乱れを与えると粘土内部に過剰間隙水圧が発生しその消散によって間隙比は減少するとともにせん断強度は乱れを与える前に比べて増加する。砂杭間の粘土においては、砂杭までの排水長が短いことから、砂杭の打設によって発生した過剰間隙水圧の消散は早く、そのために砂杭打設後の早い時期にせん断強度の増加が期待できる。

一方、砂杭を打設すると地盤改良域外の粘性土も影響を受ける。砂杭周辺の粘土においては、砂杭打設によって杭間の粘土と同様な乱れの影響を受けるが、改良域からの距離が増すとともに、その影響は小さくなる。また、改良域外においては、杭間粘土のような短い排水長を期待できないことから、一旦低下した強度が回復するには長時間を要する^{7), 15)}。したがって、地盤改良後の盛土施工に対する安定計算にあたっては、砂杭の打設による乱れが強度に与える影響と乱れが生じる範囲を明確にする必要がある。

そこで、ここでは図 2 に示した地盤改良域の内外の各点で砂杭打設前後に採取した試料についての土質試験結果のうちの約 1,400 のデータ、および先述した室内試験結果にもとづいて、砂杭打設によって生じる粘土地盤のせん断強度の変化および砂杭打設の影響が及ぶ範囲について検討した。

砂杭打設前後に採取した試料の含水比と液性限界の関係を示したものが図 6(a), (b) である。図 6(a) は地盤改良域内、図 6(b) は地盤改良域外で

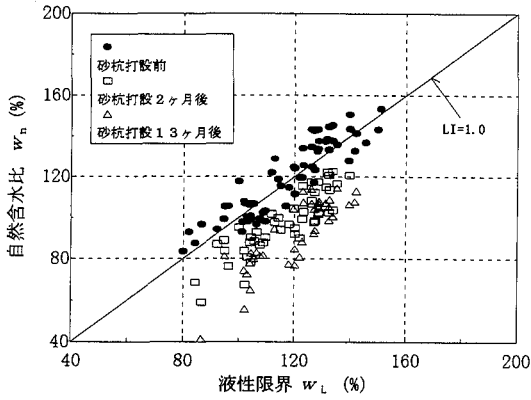


図-6 (a) 自然含水比と液性限界 (改良域内)

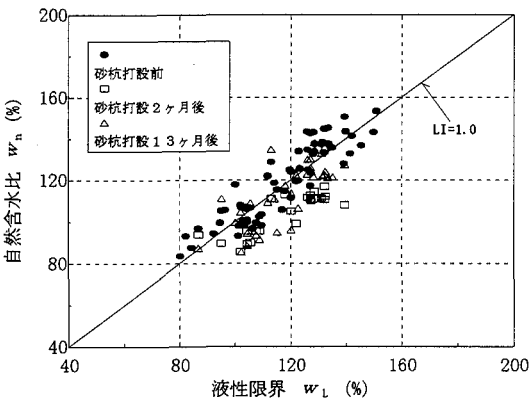


図-6 (b) 自然含水比と液性限界 (改良域外)

採取した試料についての結果である。いずれの図においても砂杭打設前及び打設後2ヶ月、13ヶ月経過後の結果を示している。砂杭打設前においては液性指数はほぼ1であるが、砂杭打設後は時間経過とともに液性指数は減少していることがわかる。特に、改良域外 (図-6(b)) においても液性指数は減少しており、砂杭の打設による影響を受けていることがわかる。

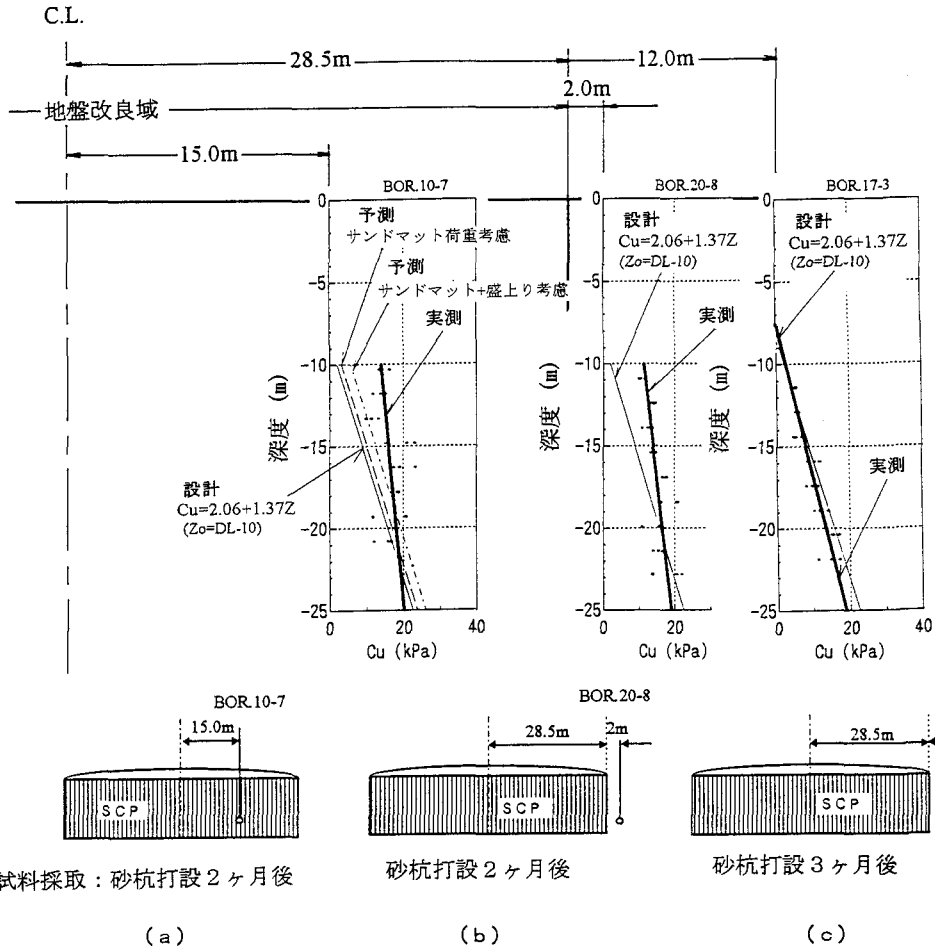
一方、砂杭打設が粘土の一軸圧縮強度の深さ方向の分布に及ぼす影響を示したものが、図-7(a), (b), (c)であって、それぞれ砂杭打設後2または3ヶ月後の結果を示したものである。図-7(a)は改良域内での結果であり、図-7(b), (c)は地盤改良域外の結果であってそれぞれ改良域端から2mおよび1.2m離れた地点での結果である。いずれの図においても、図中のプロットは実測値であり、太実

線は実測値に対して最小2乗法によって直線近似したものである。また、細実線は原地盤の強度を直線近似したものである。図-7(a)においては、原地盤強度に施工済のサンドマットの荷重による強度増加量を加えた強度線および盛り土の荷重を考慮した強度線を示しているが、実測値はいずれの場合よりも大きくなっており、砂杭打設によって強度増加が生じたことを示している。また、図-7(b)においても明確な強度増加が見られる。一方、図-7(c)は改良域から1.2m離れた地点での結果であるが、実測強度は原地盤の強度より小さくなっている。このことより、砂杭打設によって粘土のせん断強度は一旦低下するが、杭間粘土のように排水長が短い場合はせん断強度は短期間に回復すること、また図-7(c)のように改良域から離れていても強度は低下し、その場合は排水距離が長いことから、強度回復には長時間を要すると考えられる。実際、改良域外で採取された多数の試料についての強度の平均値を地盤改良前のそれと比較すると、12ヶ月後においても強度は回復していないことが確認されている。このように、改良域外においても強度が低下するという報告は平尾等⁷⁾、一本等¹⁵⁾によっても示されており、ここでの結果と一致している。また、改良域外の強度の回復の期間についても、砂杭を打設して1.5-3.5ヶ月の間に一旦28%低下した強度の増加が見られないという結果も示されている⁷⁾。

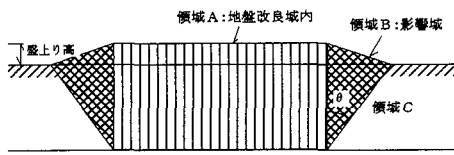
5. 砂杭打設によって粘土地盤が影響を受ける範囲

上述のように、砂杭の打設によって地盤改良域外においてもせん断強度は原地盤強度より低下することがわかった。また強度の回復は杭間粘土のように早期には期待できないことから、砂杭打設後の盛り土に対する安定計算を地盤改良前の強度をもとに行うと危険側の結果を与えることとなる。

先述の実験結果および図-7によると改良域外の強度は10-30%程度低下すると考えられる。このような強度の低下は図-8に示した領域Bにおいて生じると推測される。一方、従来から領域Bと領域Cの境界として角 θ を45°または60°とする手法が経験的に用いられている^{15), 16)}がその理論的背景は示されていない。そこで、ここでは粘土地盤内に砂杭を圧入すると、図-8の領域Bは領域Aから受働土圧を受けることから、領域Bと領域Cの境界は受働土圧作用時のすべり面によってあらわされると考えて検討を試みた。すでに地盤が受働土圧を受ける場合、



図一七 地盤改良域内外における砂杭打設前後の粘土の強度



図一八 地盤改良域, 影響域, 非改良域

壁面摩擦角の大きさによっては、すべり面は直線とはならないことが示されており、ここでもTerzaghi等¹⁸⁾によって示されたように対数螺旋と直線とからなる複合すべり面によって影響域をあらわすことの可否について検討した。

図一九は受働領域を模式的にあらわしたものであって、複合すべり面(曲線bde)は対数螺旋bd部分

と直線部分deから成る。

図一十、図一十一は図一に示した断面に対する複合すべり面を示したものであって、内部摩擦角として $\phi=25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 、また改良域内外の境界部分での摩擦角 δ を、 $\delta=\phi, \delta=2/3\phi$ とした場合の結果である。さらに、図中には $\theta=60^\circ$ 及び 70° の直線も示した。

そこで、ここでは上述の複合すべり面が砂杭打設の影響域を示すかどうかを、砂杭打設による地盤の盛上りの形状、及び砂杭打設の前後に測定された粘土層の自然含水比、湿潤密度、一軸圧縮強度、及び E_{50}/C_u の変化をもとに検討した。ここに、 E_{50}/C_u は変形係数 E_{50} と粘着力 C_u の比であって、 E_{50}/C_u の値が小さいほど乱れの影響は大きいことが示されている¹⁹⁾。

まず、砂杭を打設すると粘土地盤の表面は盛上りを生じる。図一十二は図一のNo. 16の地区で測定さ

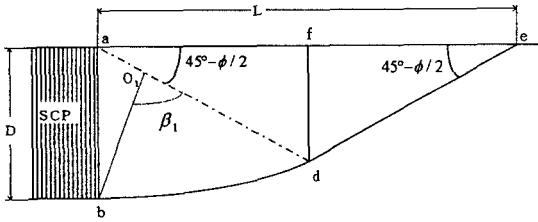


図-9 Terzaghi & Peck による複合すべり面¹⁸⁾

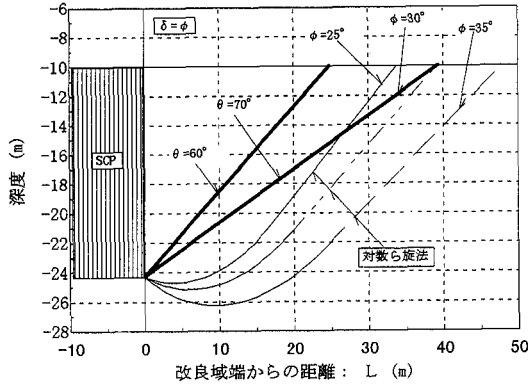


図-10 複合すべり面にもとづいた影響域
($\delta = \phi$)

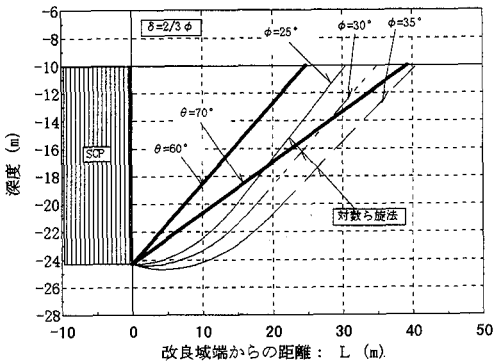


図-11 複合すべり面にもとづいた影響域
($\delta = 2/3 \phi$)

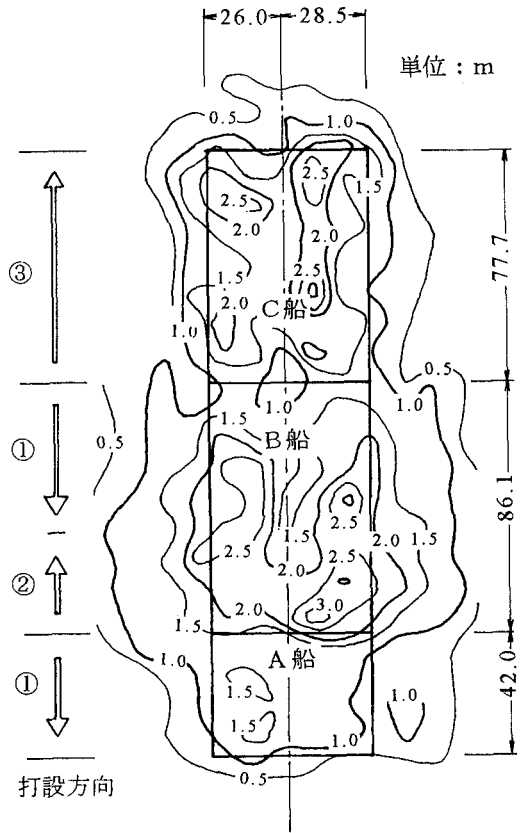


図-12 砂杭打設にともなう盛上り等高線

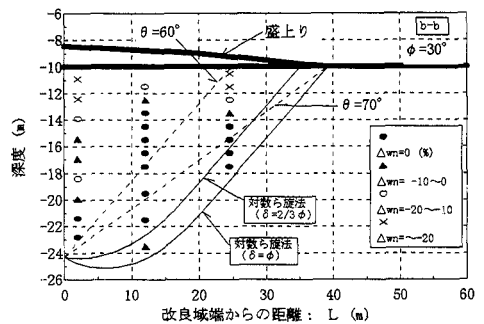


図-13 自然含水比の変化

れた盛上り土の等高線を示したものである。同地区では3タイプの打設船によって地盤改良が行われた。同図には、砂杭打設の順序も示しているが、そのうちB船による施工によって生じた盛上り土の断面形状および砂杭打設前後の自然含水比、湿潤密度、一軸圧縮強度、及び E_{50}/C_u の変化について示したものが図-13、14、15、16である。

また各図中には、図-10、図-11に示したすべり線群もあわせて示しているが、特に図-14、図-16より、 $\theta = 60^\circ$ とした場合は影響域を過小に評価することがわかる。また、 $\delta = \phi$ とした場合には $\delta = 2/3\phi$ に比べて影響域を過大に見積もる傾向のあることがわかる。実際、地盤改良域と改良域外の

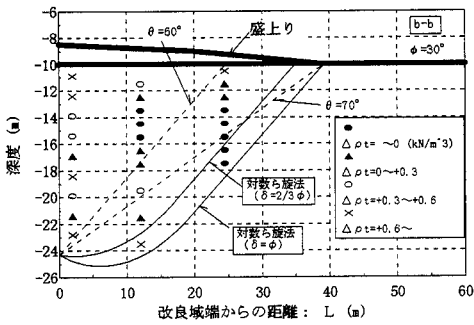


図-14 湿潤密度の変化

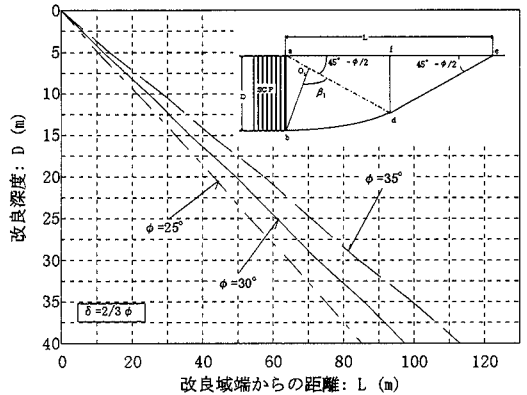


図-17 改良深度と影響域の関係

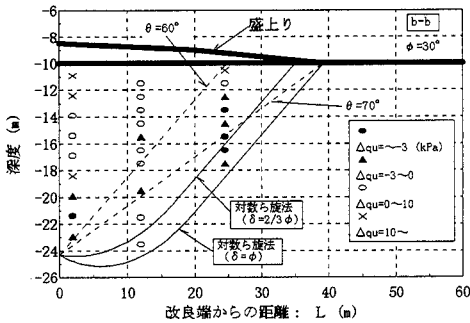


図-15 一軸圧縮強度の変化

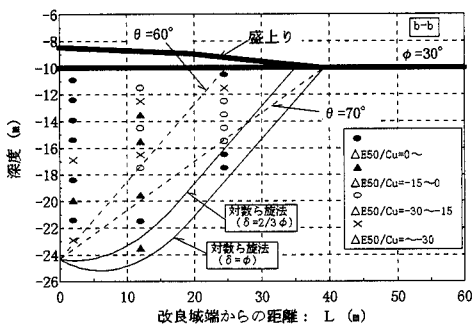


図-16 E_{50}/C_u の変化

境界での摩擦係数を特定することは容易ではないが、実測結果と比較した場合、 $\delta = 2/3\phi$ とした場合が影響域として妥当と思われる。

以上のことより、いま砂杭打設の影響域は複合すべり面によってあらわされると仮定すると、粘土の内部摩擦角と改良境界の摩擦係数、および砂杭の打設深さが決まれば、影響域を推定することが可能で

ある。図-17は改良深度Dと改良域端から複合すべり線の端までの距離Lの関係を粘土の内部摩擦角が $\phi = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ の場合について計算し整理したものである。なお、DとLの関係は粘土の単位体積重量、および粘着力が変化しても影響を受けないことから、図-17はそれぞれの内部摩擦角を持つ粘土地盤に対して適用可能である。すなわち、粘土地盤の内部摩擦角が求まると砂杭打設の影響域は次のようにして求めることができる。1) 図-17により砂杭打設深さDに対するLを読み取る。2) 図-9においてb d部分是对数螺旋であるが、円弧と設定することも可能であることが示されている¹⁸⁾ことから、b d部分は、その中心が、点dを通る直線d eの垂線上にあり、2点b dを通る円弧として求めることができる。

そこで、ここでは図-17がSCPによる地盤改良工事に対しても適用できるかどうかを、SCPによる地盤改良工事が行われた10箇所の現場(舞鶴港と関西国際空港は砂置換率が70%、それ以外は30%以下)を対象にして検討した。ただ、各現場における砂杭打設前後の粘土層の強度の変化等については明確でないことから、ここでは各現場における地盤改良に伴う地盤の盛上り等高線^{20), 21)}をもとに、改良域端から盛上り土の法尻までの距離について比較した。その結果を示したものが図-18である。

図中のプロットは各現場における盛上り土法尻の改良域端からの距離を示したものである。ただ、この距離は、砂杭の打設方向によって異なることから、ここではその平均値を示した。各現場における粘土層の内部摩擦角は明確ではないことから、各現場データとの厳密な比較はできないが、同図より、低置換率の場合、打設深さが浅い場合は、影響域を過大評価する傾向がある。また、関西国際空港のデータ

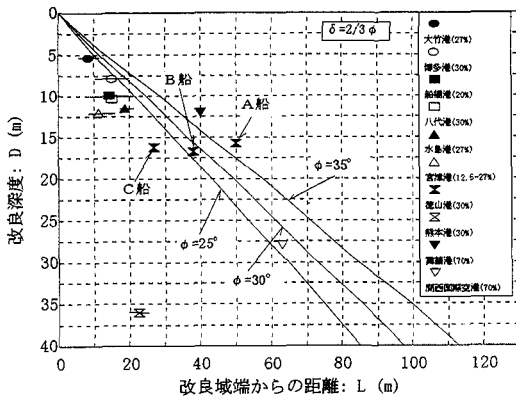


図-18 各地の港湾建設現場における実測値との比較

は砂置換率70%に対する結果であるが、比較的適切に予測している。これに対して舞鶴港(砂置換率70%)の結果は過少評価の結果となっている。また、熊本港の結果は、著しく小さい値を示している。この原因は明確ではないが、これは現場での打設が45m×48mのほぼ正方形に近い区域に行われたためとも考えられる。

このように改良深度が浅い場合は影響域を過大評価する傾向にあるが、これは盛上り土の到達距離を砂杭打設方向とは無関係に平均化したためであって、提案した手法の原理が受働土圧の考え方にもとづいている点を考慮すると、この手法は砂杭打設進行方向に対する影響域の予測に適していると考えられる。

6. 結論

砂杭打設による攪乱が改良域内外の粘土の強度に及ぼす影響、また攪乱の影響が及ぶ範囲について検討した結果以下の結論を得た。

- 1) 徳山下松港で採取した粘土について行った多軸単純せん断試験結果によると、繰返しせん断後のせん断強度は繰返しせん断前と比較すると10-30%程度減少する。しかし、繰返しせん断後に再圧密を行うと、せん断強度は繰返しせん断を与える前に比べて50%程度増加する。
- 2) 繰返しせん断方向と静的せん断の方向を同一方向とした場合(X方向)と直交させた場合(Y方向)の静的強度は異なり、再圧密がない場合はX方向の強度の低下が顕著であって、再圧密後はY方向の強度増加はX方向の強度ほど期待できない。
- 3) 砂杭打設によって地盤改良域外においても、粘

土の強度は低下する。

- 4) 粘土の内部摩擦角と改良境界の摩擦係数、および砂杭の打設深さが決まると、複合すべり面によって砂杭打設の影響域を推定することが可能である。

謝辞: 本論文をまとめるにあたり広島大学名誉教授(現 網干壽夫研究所) 網干壽夫先生のご助言を賜りました。また、実験とデータの整理においては運輸省第4港湾建設局宇部港工事事務所の職員諸氏、ならびに山口大学の学生諸氏の協力を得ました。末筆ながら感謝します。

参考文献

- 1) Carter, J.P., Randolph, M.F. and Wroth, C.P.: Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity, *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, pp.305-322, 1949.
- 2) Lo, K.Y. and Stermac, A.G.: Induced pore pressures during pile-driving operations, *Proc. of 6th ICSMFE*, Vol.2, pp.285-289, 1965.
- 3) Randolph, M.F. and Wroth C.P.: An analytical solution for the consolidation around a driven pile, *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.3, pp.217-229, 1979.
- 4) Rutledge, P.C.: Discussion, *Trans., Soil Mechanics in Engineering Practice*, pp.210-216, 1948.
- 5) 網干壽夫, 中村龍二, 奥村樹郎, 曾我部隆久, 一本英三郎: 軟弱地盤におけるサンドコンパクション工法および深層混合工法の問題点, *土木学会誌*, 増刊号, pp. 22-32, 1982.
- 6) Aboshi, H., Mizuno, Y. and Kuwabara, M.: Present state of sand compaction pile in Japan, *Deep Foundation Improvements; Design, Construction and Testing, ASTM*, pp.32-46, 1990.
- 7) 平尾寿夫, 松尾稔: 締固め砂杭の打設による海底隆起地盤の活用に関する研究, *土木学会論文報告集*, 第364号/Ⅲ-4, pp. 169-178, 1985.
- 8) 奥村樹郎: 粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究, *港湾技研資料*, No. 193, pp. 7-145, 1974.
- 9) Yasuhara, K.: Postcyclic undrained strength for cohesive soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.120, No.11, pp.1961-1979, 1994.
- 10) Matsui, T., Ohara, H. and Ito, T.: Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay, *Journal of the Geotechnical Eng.*, Vol.106, No.GT10, pp.1101-1120, 1980.
- 11) Castro, G. and Christian, J. T.: Shear strength of soils and cyclic loading, *Journal of the Geotechnical Eng.*, Vol.102, No.9, pp.887-894, 1976.
- 12) Andersen, K. H., Kleven, A. and Heien, D.: Cyclic soil data for design of gravity structures, *Journal of the Geotechnical Eng.*, Vol.114, No.5, pp.517-539, 1988.
- 13) Asaoka, A., Kodaka, T. and Nozu, M.: Undrained shear

strength of clay improved with sand compaction piles, *Soils and Foundations*, Vol.34, No.4, pp.23-32, 1994.

- 14) 藤原克久, 松田博, 高橋総一: SCP打設により攪乱を受けた飽和粘土のせん断強度について, 土木学会第51回年次学術講演会, III-A79, pp.158-159, 1996
- 15) 一本英三郎: サンドコンパクションパイル工法の実用設計と実施結果, 第36回土木学会年次学術講演会研究討論会資料, pp.51-55, 1981.
- 16) 一本英三郎, 末松直幹: サンドコンパクションパイル工法, 土と基礎, Vol.29, No.5, pp.13-20, 1989.
- 17) 松田博, 中川義守, 石井一郎: 粘性土の繰返しせん断後の再圧密・強度特性, 粘性土の動的性質に関するシンポジウム発表論文集, II-2, pp.163-168, 1995.
- 18) Terzaghi, K. and Peck, R. B.: *Soil Mechanics in*

Engineering Practice, second edition, John Willey and Sons, pp.210-216, 1948.

- 19) 小林正樹: c と ϕ を考える, 2. 粘土, 土と基礎, Vol.22, No.12, pp.67-72, 1974.
- 20) 甲斐信二: SCP工法による地盤の盛上りについて, 一徳山下松港一, 第四港湾建設局宇部港工事事務所(内部資料), 1992.
- 21) 福手勤, 樋口嘉章, 古市正彦, 坪井英夫: サンドコンパクションパイルの大規模な打設に伴う海底隆起地盤の形状予測, 第33回土質工学シンポジウム—ウォーターフロント開発における土質工学上の諸問題—, II-1, pp.23-28, 1988.

(1997. 5. 21受付)

EFFECTS OF SCP DRIVING ON THE STRENGTH OF CLAY OUTSIDE THE IMPROVED AREA

Hiroshi MATSUDA, Soichi TAKAHASHI, Katsuhisa FUJIWARA
and Naoyoshi KITAYAMA

In Sand Compaction Pile method, when the vibroflot is inserted into a saturated clay layer, the clays around the sand pile are disturbed and even outside the improved area the excess pore water pressure is generated and the shear strength of clay decreases. In this paper, based on the laboratory test results including the multi-directional simple shear tests for undisturbed samples, the effects of the disturbance by the SCP driving operations on the shear strength of clay outside the improved area and the border of the region affected by the SCP driving are investigated. In conclusion, it is clarified that the shear strength of clay decreases immediately after the SCP driving and the border of the disturbed region is given by the surface of sliding under the passive earth pressure condition.