地盤と建設
Vol.11, No.1, 1993

ＳＣＰ打設後の粘土地盤の強度・変形特性に関する研究

Shear Strength and Deformation of Clay Layer
Subjected to the SCP Driving

松田　博*　(Hiroshi Matsuda)
石井　一郎**　(Ichiro Ishii)
横山　壽一***　(Juichi Yokoyama)
本田　一光****　(Kazumitsu Honda)
中川　義守*****　(Yoshimori Nakagawa)

ＳＣＰ（サンドコンパクションパイル）工法は、我が国の港湾工事において最も多く使われている軟弱粘性土地盤を対象とした地盤改良工法の一つであるが、砂杭打設中及び打設後において、周辺地盤は複雑な挙動を示すため、解明すべき課題も多く残されている。今回、徳山下松港の土砂処分場護岸工事において、ＳＣＰ工法による地盤改良工事が行われ、ＳＣＰ打設前後に多くの土質試験を行った。そこで、ここではその結果をもとに、砂杭打設により撹乱の影響を受けたいわゆる”ＳＭＥＡＲ　ＺＯＮＥ”の土質特性の変化について検討を行った。その結果、ＳＣＰ打設により、湿潤単位体積重量は影響を受けるが、拘束圧が小さい上層部においてその影響は著しいこと、液性限界と自然含水比の関係から、ＳＣＰ打設による地盤改良の効果を見出すことができること、ＳＣＰ打設後に採取した試料についてのＣvは、粘土が撹乱を受けているために低下するが、圧密圧力が増加するとＳＣＰ打設の影響はみられなくなること、さらに粘土層の一軸圧縮強度は、ＳＣＰ打設により増加するが、ＳＣＰ打設方法によっても異なるという結論を得た。

キーワード：圧密、変形、一軸圧縮試験、地盤、コンシステンシー限界、粘土、施工、せん断強さ、試料の乱れ
（ＩＧＣ：D7/D6/D5）

1.　まえがき

ＳＣＰ（サンドコンパクションパイル）工法は我が国の港湾工事において最も多く使われている軟弱粘性土地盤を対象とした地盤改良工法の一つである。本工法は、圧入された砂柱によって軟弱粘土層の一部を置き換え、造成された砂柱群と粘性土から構成される複合地盤を形成することによって、地盤のせん断強度や支持力の増加、全沈下量及び不等沈下量の減少を図るものである。

しかし、砂杭打設中及び打設後において、周辺地盤は複雑な挙動を示すため、解明すべき課題も多く残されている。特にＳＣＰ工法においては、砂杭の打設による周辺の粘性土の乱れが議論されることがあるが、通常の設計ではこれを考慮しないことが多い。これは乱れに伴う強度低下が１～３カ月で回復することによっている。しかし、砂杭打設直後に構造物を築造するときなどは強度の低下を考慮に入れた設計を行う必要があり、それらの予測が必要となってくる。

ＳＣＰ工法による軟弱粘土の強度増加について赤木[1]によると、ＳＣＰ打設直後において砂杭周辺の粘性土の非排水強度は、ケーシングの振動やケーシング先端からの砂の排出の影響を受けて、一旦初期強度の６割から９割位まで低下する。その後ＳＣＰ打設により残留した過剰間隙水圧の消散が生じ、強度は徐々に回復して、最終的にはもとの地盤の強度を上回るとしているが、これは現在ではよく知られている現象であり、排除型砂杭の基本的な見解でもある。

一方、ＳＣＰ打設による地盤の振動が砂杭周辺の粘土地盤に及ぼす影響について、小林ら[3]は、火山灰とローム層の互層地盤において、ローム層の天端からＳＣＰ打設面までの土被り厚（拘束圧）を変化させ、どのケースが上部ローム層を乱すことなく所定の砂杭打設が可能であるかを検討した。その結果、土被り厚を２ｍ以上とした場合は、ＳＣＰ打設前と打設直後の一軸圧縮強度はほぼ同様の値を示し、振動によるローム層の強度変化は認められないこと、また土被り厚を1.5ｍとした場合は、杭頭部の変形が著しいことから、杭打設時の拘束力が過少であったと報告している。

つまり、この研究は赤木[1]の考え方に対し、ＳＣＰ打設直後の強度は、必ずしも撹乱されて低下するとは

*山口大学工学部社会建設工学科　助教授，　**運輸省第四港湾建設局宇部港工事事務所　所長，　***同　次長，
****同　工務課第二工務係長，　*****山口大学大学院

限らず、土被り厚すなわち盛土高をも考慮に入れて、検討しなければならないことを指摘している。

これらは、いずれも撹乱が粘土の強度・変形特性にどのように影響するかということと関係している。この点に関して、粘土に撹乱を与えると通常粘土内部には過剰間隙水圧が残留するが、その大きさが最も重要なファクターであることが指摘されている。また過剰間隙水圧消散に要する時間、あるいは過剰間隙水圧消散後の強度・変形特性などは設計・施工上明確にされるべき点である。しかし、これらの分野については、解明されていない点が多く、特に現場との対応を考慮した報告は少ない。

本研究では、徳山下松港の土砂処分場護岸工事において、ＳＣＰ工法による地盤改良工事が行われ、ＳＣＰ打設前後に行われた多くの土質試験結果をもとに、砂杭打設により撹乱の影響を受けたいわゆる“ＳＭＥＡＲ　ＺＯＮＥ”の土質特性の変化について検討を行った。

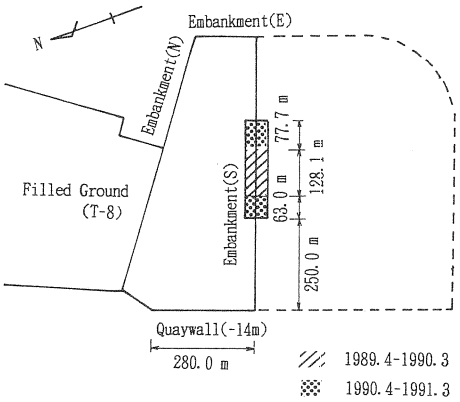

Fig.1　土砂処分場位置図

2.　徳山下松港土砂処分場護岸工事の概要

2.1　土砂処分場護岸工事

瀬戸内海に位置する特定重要港湾「徳山下松港」は、基礎素材産業が立地する古くからの工業流通港である。運輸省第四港湾建設局では、徳山下松港晴海埠頭地先において大型公共岸壁、航路、泊地の整備を行っており、その一環として航路、泊地の浚渫土を収容する土砂処分場の護岸造成工事を平成２年度より進めている。(Fig.1)

同工事は、層厚１３～１５ｍの沖積軟弱粘性土地盤上に Fig.2 に示すように基礎捨石、被覆石、コンクリート製ブロック等により傾斜式護岸を築造するものである。特に、構造物の安定性を確保するためには軟弱粘性土の強度増加を図る必要があり、このためＳＣＰ工法による地盤改良工事を実施した後、載荷重による地盤強度の増加効果も考慮しながら四段階に分けて護岸本体を築造する方法を採っている。

またＳＣＰ工法は、施工性、経済性に優れた砂置換率３０％の「低置換率ＳＣＰ工法」を採用している。

本報告では、平成２年度より Fig.1 に示した護岸（南）の地盤改良工事で得た土質試験結果について解析を行った。

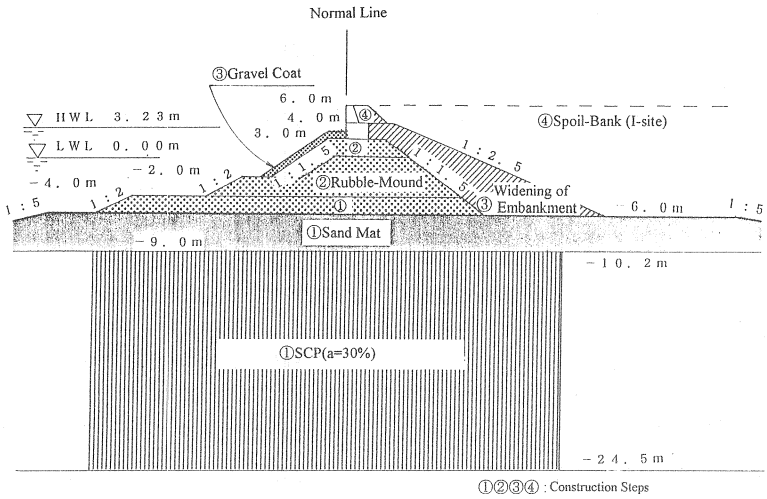

Fig.2　護岸（南）標準横断面図

2.2　原地盤の土質特性

今回ＳＣＰの打設が行われた現場は、徳山下松港晴海埠頭の地先（Fig.1）にある。現場は、水深約 -10m で、DL-23 m 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。今回の調査では、DL-29 m 付近までボーリング調査を行っており、この区間内における土質を上位から区分すると、粘性土層（Ａｃ）、礫質土層（Ｄｇ）に分けられる。

粘性土層（Ａｃ）は、層厚 12～13 m のほぼ均質なシルト質粘土からなっており、最下部には薄い砂質土層をはさむこともある。礫質土層（Ｄｇ）は、今回 5 m までしか層厚を確認していないが、12 m以上あると考えられる。礫径は、10～30 mm程度であり、100 mm 程度の粒子が含まれていることもある。

各層の土の物理的性質をまとめて示したものが Table 1 である。同表には、我が国と、瀬戸内海沿岸における土質特性の代表値も示した。比重は、粘性土層（Ａｃ）が 2.64 ，礫質土層（Ｄｇ）が 2.77 であり、両層内においてはばらつきは少なく、いずれも無機質土である。

液性限界、塑性限界に関しては、本調査域での値を全国９１及び瀬戸内海１９の港湾で得られた値の平均値[9]と比較したところ、本調査域の液性限界は著しく大きい値を示しており、塑性指数もかなり大きくなっている。

Fig.3 に液性限界 w_L と塑性指数 PI の関係を示す。図中には、Ａ線もあわせて示しているが、測定結果はいずれもＡ線より上に位置しており、このような傾向は、国内では西南太平洋や日本海で多くみられる。

液性限界 w_L と自然含水比 w_n の関係を Fig.4 に示す。同図より液性限界と自然含水比はほぼ等しくなっており、土が外的撹乱作用を受ける場合、流動化しやすい不安定な状態にあることを示している。

圧縮指数Ｃ$_c$と液性限界 w_L の関係を示したものが Fig.5 である。Ｃ$_c$と w_Lの代表的な関係式としては、Skemptonの式

$$C_c = 0.009\,(w_L - 10) \qquad (1)$$

があるが、小川、松本ら[6]は、地域性を考慮し次式を提案した。

Table 1　地盤の土質特性

	Clay (Ac)	Gravel (Dg)	Average Japan	Average Seto Inland Sea
Gravel (%)	0.30	54.80		
Sand (%)	3.50	28.30		
Silt (%)	60.80	16.80		
Clay (%)	35.50		42.63	38.66
Liquid Limit (%)	117.60		77.73	74.32
Plastic Limit (%)	37.90		32.82	37.90
Plasticity Index	79.80		44.89	43.13
Specific Gravity Gs	2.64	2.77	2.667	2.66
Natural Water Content (%)	120.10			
Unit Weight (kN/m^3)	13.72			
Void Ratio e	3.15			
Sr (%)	100.30			

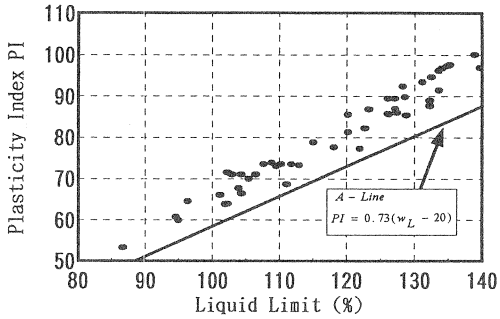

Fig.3　原地盤の液性限界～塑性指数の関係

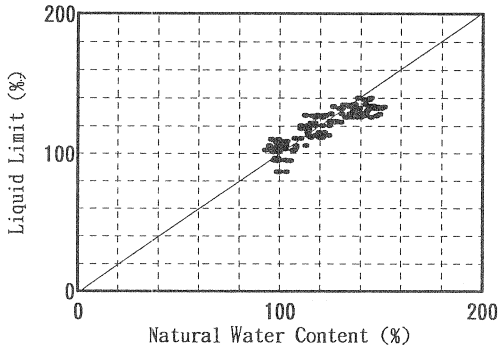

Fig.4　原地盤の自然含水比～液性限界の関係

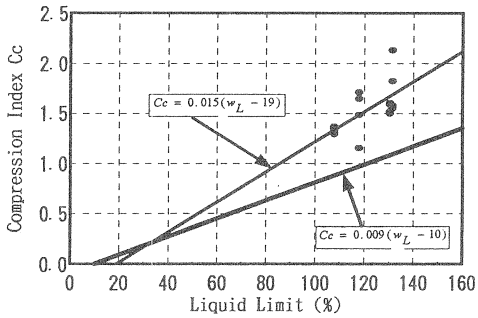

Fig.5　原地盤の液性限界～圧縮指数の関係

$$C_c = 0.015\,(w_L - 19) \qquad (2)$$

Fig.5 において、実測値は式(2)の直線とよく一致しているが、式(1)によるとC_cはやや過小評価することとなる。また、この傾向は、西南日本海、大阪湾、瀬戸内海沿岸の粘土でよくみられる[8]。

2.3　ＳＣＰ工法の概要

ＳＣＰ工法による地盤改良工事は、Fig.6 の施工断面図に示すように支持層（水深-24.5m）から海底面（水深約-10m）及びＳＣＰ打設に伴う盛り上がり部を改良することとした。なお、サンドコンパクションパイル船の特性により、ケーシングパイプ引き抜き過程に於て、最終天端付近の砂杭形成、すなわち排出した砂を自立させることを目的として、事前に厚さ約 1.5 m の敷砂施工を行っている。

また Fig.7 に示すように、砂杭の直径は2.0m、砂柱の中心間隔は、横断方向に5.0m、縦断方向に4.2mで、千鳥配列となっている。

地盤改良工事は３種類のサンドコンパクションパイル船によって実施し、Fig.8 に示すように、平成２年度から平成４年１０月までの施工延長は、268.8 m（1408 本）である。使用したサンドコンパクション船の種類によって打設方法を分類すると、ＳＣＰ（サンドコンパクションパイル）工法（Ａ船：２連装、Ｂ船：３連装）、ＳＳＰ（ストロングサンドパイル）工法（Ｃ船：３連装）に分けられる。この内、ＳＣＰ工法は、ケーシングパイプの引き抜き過程において砂杭形成に必要な砂量（通常、砂杭長さ１ｍ分）を排出した後、頭部のバイブロハンマーを作動させてケーシングパイプの先端部で打ち戻し・締固めを繰り返しながら砂杭を打設するのに対し、ＳＳＰ工法はケーシングパイプの先端に装備された円周方向にエネルギーを伝えるバイブロフロットの働きで排出された砂を直接締固めることが可能なため、一連のケーシングパイプの引き抜き動作のみで連続的に締固め砂杭を打設する工法である。

また、砂杭の打設順序は Fig.9 に示すように、横断方向は中心線から両端部に向けて、縦断方向は初年度は始点部と中央部から同一方向へ、次年度は既設杭から端部に向けて打設し、盛り上がり土を極力均等に

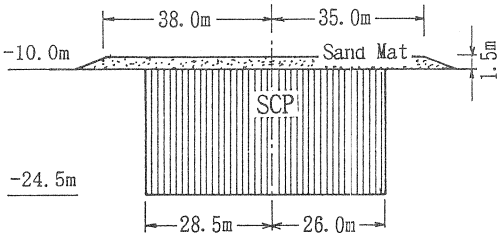

Fig.6　ＳＣＰ施工断面図

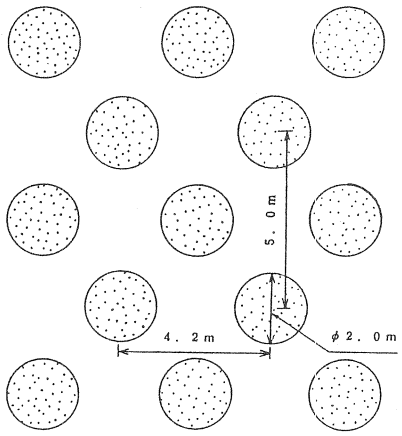

Fig.7　ＳＣＰ打込み間隔平面図

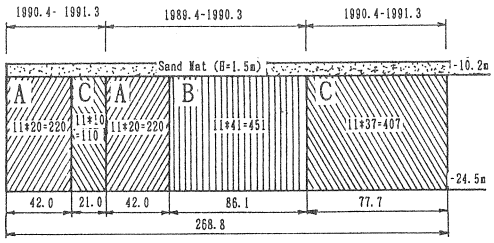

Fig.8　ＳＣＰ施工縦断面図

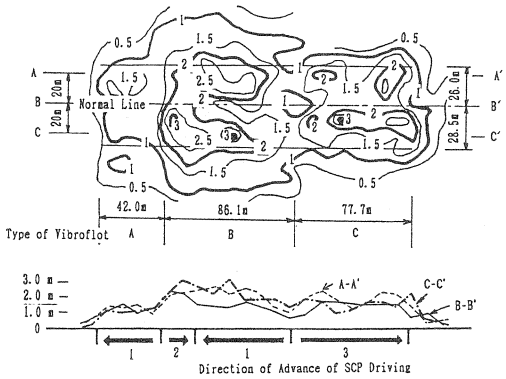

Fig.9　ＳＣＰ打設によって生じる盛上がり

分散させるようにして、均一に仕上がるように配慮した[2)]。

３．　ＳＣＰ打設に伴う粘土地盤の土質特性の変化

3.1　ボーリング調査実施時期と調査位置

ボーリング調査実施時期を Table 2 に、ボーリング調査箇所の平面図を Fig. 10 に示す。ここではシンウォールサンプラーによる不撹乱試料採取をＳＣＰ打設前、およびＳＣＰ打設２ヶ月後、６ヶ月後、１２ヶ月後、１６ヶ月後に行った。なお、地盤改良後の改良区域内のボーリング調査位置は、砂杭の中央になるよう位置出しを行って実施した。一方、土質試験は、採取試料について、圧密試験、一軸圧縮試験、液性・塑性限界試験、粒度試験を実施した。

Table 2　ボーリング調査実施時期

Sampling	Boring Number	Type of Vibloflot
Pre-SCP or Post-SCP, but without effect of SCP Driving	No. 14, 15, 16, 17, 18, 19, 4, 2	****
2 months after SCP Driving	No.7, 8	C
6 months after SCP Driving	No.3	C
12 months after SCP Driving	No.9	B
16 months after SCP Driving	No.1	B

ＳＣＰ打設によって、粘土層は著しく盛り上がる。Fig. 9 において、ＳＣＰ打設域の打設後の盛上がり等高線を示した。またＳＣＰ打設域内の ボーリング箇所No. 1, 3, 7, 8, 9 の盛り上がり断面図とその地点において砂杭と粘性土層の応力分担比ｎを３として得た鉛直応力σ_z の深さ方向の分布を Fig. 11 に示す。なお、同図において No. 1, 9 のボーリング箇所は、ＳＣＰ打設により盛り上がった地盤にさらに敷砂や雑石が敷設されていることから、それらの荷重も考慮してσ_z を求めた。また、図中AC1層のγ_t'は0.35tf/m³、AC2層のγ_t'は0.45tf/m³として計算した。ただし、盛り上がり土の圧密沈下による土被り圧減少の影響は考慮していない。

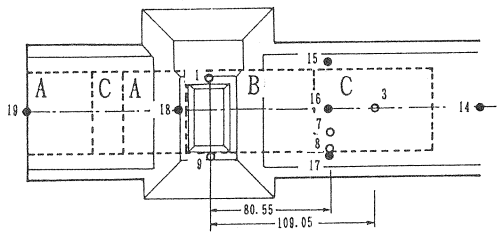

Fig. 10　ボーリング調査位置図

3.2 物理的特性の変化

ここでは、以上の点をふまえて、ＳＣＰ打設に伴う粘土層の物理的諸特性の変化を調べた。まず、深度～湿潤単位体積重量γ_tの関係を示したものが Fig. 12 である。図中のNo. 14-19 （×印）はＳＣＰ打設前の結果であり、No. 1, 3, 7, 8, 9 はＳＣＰ打設後の結果である。γ_tはＳＣＰ打設によって、深さ方向にほぼ一様に増加しているが、上層においてその増加は顕著にみられる。これは上部層においては敷砂による圧密荷重の増加による影響を受けること、および排出砂

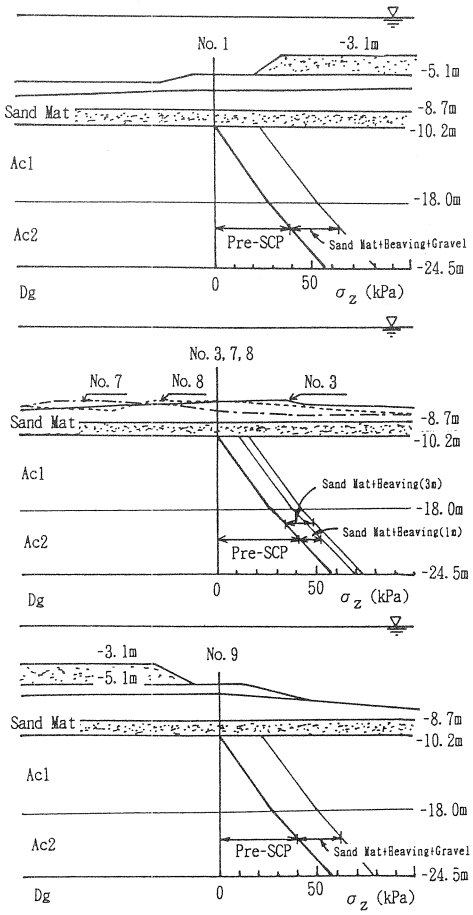

Fig. 11　ＳＣＰ打設前後の鉛直応力の分布

と粘性土の混成土となっていることが原因とも考えられる。

またＳＣＰ打設後、時間の経過とともにγ_tが増加していく傾向は見られず６ヶ月後から１２ヶ月後にかけて再び低下している。これは、施工を先述のように３種類のＳＣＰ打設船で行っており、各船ごとにケーシングパイプの連装数や砂杭打設方法も異なることから砂杭の締まり具合いや打設時に粘土層に与える撹乱の影響などが異なるためと考えられる。

そこで各船の施工範囲についてＳＣＰ打設後の経過時間とγ_tの関係を検討する。各船の施工範囲はFig. 9に示したとおりである。同図においてＢ船とＣ船の施工区域でのＳＣＰ打設後の盛り上がり高を比較すると、Ｂ船の施工区域の方が明らかに大きくなっていることが分かる。そこで Fig. 12 においてＢ船での施工区域（No. 1, 9）とＣ船での施工区域（No. 3, 7, 8）を区別して比較すると、時間経過とともにγ_tが徐々に大きくなる傾向が見られる。

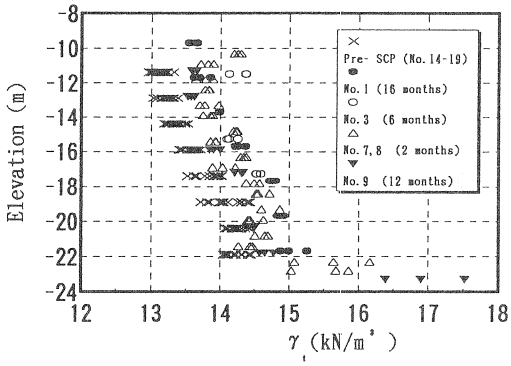

Fig. 12　SCP打設に伴う単位体積重量の変化

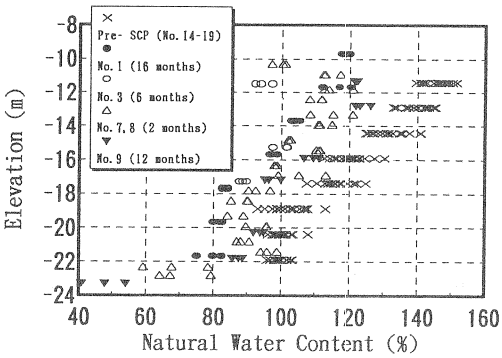

Fig. 13　自然含水比の変化

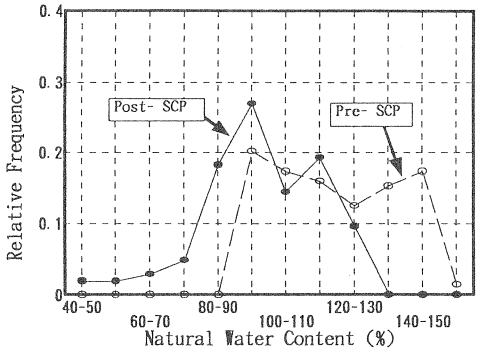

Fig. 14　ＳＣＰ打設前後の自然含水比の相対頻度分布

次に、ＳＣＰ打設による自然含水比w_nの変化を把握するためにFig. 13 に深度とw_nとの関係を示した。同図においては、w_nは粘土層の下部より上部の方が小さくなっている。また最上部と最下部において特にw_nが小さいのは排出砂や砂礫が混入したためと考えられる。また、Fig. 12 と Fig. 13 を比較すると、ＳＣＰ打設による変化は、単位体積重量より含水比において顕著に見られる。

Fig. 14 は自然含水比w_nに関して、ＳＣＰ打設前の採取試料による試験結果144 データ、打設後の採取試料による試験結果 104データをもとに、相対頻度分布を示したものである。いずれの図においても○印はＳＣＰ打設前の結果であり、●印はＳＣＰ打設後の結果である。明らかにＳＣＰ打設後の自然含水比が低下している。またＳＣＰ打設後は含水比のばらつきが比較的小さくなっている。

さらに、Fig. 15に液性限界w_L～自然含水比w_nの関係を示した。ＳＣＰ打設前においては、$w_L = w_n$

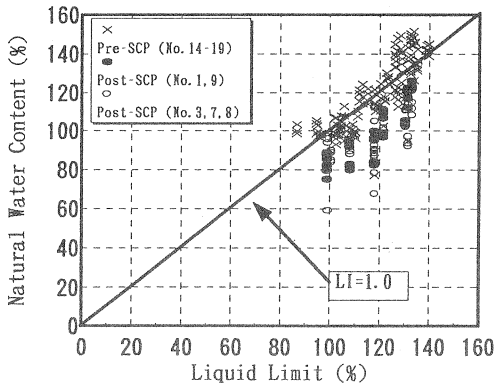

Fig. 15　液性限界～自然含水比関係の変化

で不安定な状態にあるが、ＳＣＰ打設後は$w_L > w_n$となっており、地盤が改良され安定した状態になっていることを示している。

3.3　圧密特性の変化

ＳＣＰ打設前およびＳＣＰ打設後に採取した不撹乱試料について圧密試験を行った。その結果得られたe～log p 関係をFig. 16 に示す。図中、×印はＳＣＰ打設前、△、▼印はＳＣＰ打設後の結果である。同図よりe ～ log p 曲線は、明らかにＳＣＰ打設後下方に移動していることがわかる。ただ、同図においては初期間隙比のばらつきが大きいために撹乱が e～log p 曲線に及ぼす影響を明確にすることが困難である。そこで、ここでは特に海面下-11m、および-17mの位置で採取された試料について得たe ～log p 関係をもとに、各荷重段階での間隙比ｅの平均値を求め、圧密圧力p'との関係で整理した。その結果がFig. 17, 18 である。図中○印はＳＣＰ打設前、●印はＳＣＰ打設後を示している。同図より明らかにＳＣＰ打設により圧密初期のe ～log p 曲線は、ＳＣＰ打設前のe ～log p 曲線より下方にあることが分かる。

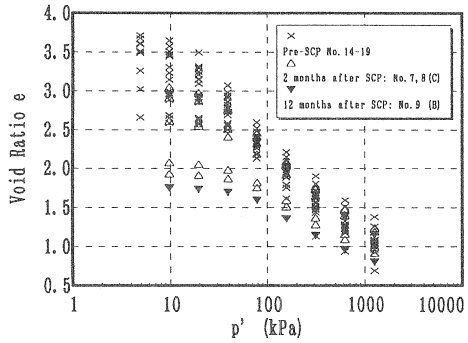

Fig. 16　SCP打設に伴うｅ－log p 曲線の変化

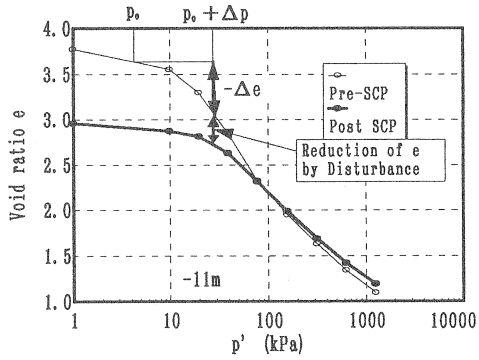

Fig. 17　ｅ－log p 曲線の変化（－１１ｍ付近）

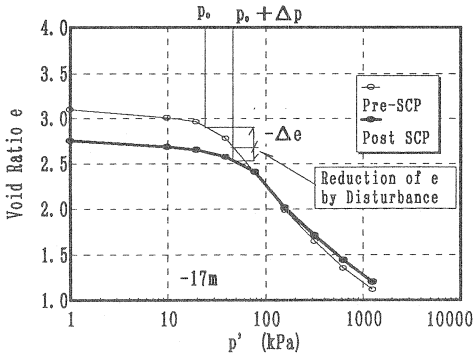

Fig. 18　ｅ－log p 曲線の変化（－１７ｍ付近）

ところでFig. 17, 18 は、以下のような履歴を持つ粘土についてのe ～log p 関係である。すなわち、Fig. 19 においてＳＣＰ打設前の試料は、①－④－⑤の履歴を持つのに対して、ＳＣＰ打設後の試料は①－②－③－④－⑤の履歴を持つ。そのために、ＳＣＰ打設前後では先行荷重（土被り圧）がかなり変化しており、撹乱によるｅの低下を考えるとき、この影響を考慮する必要がある。

そこでいま原地盤のe ～log p 曲線において土被り圧に相当する圧密圧力をp_0とする。また敷砂、盛上がり、雑石等による応力増分をΔpとすると、Fig. 17, 18 に示したΔｅは土被り圧増加によるｅの低下に相当し、ＳＣＰ打設前後のｅの値の差が撹乱による

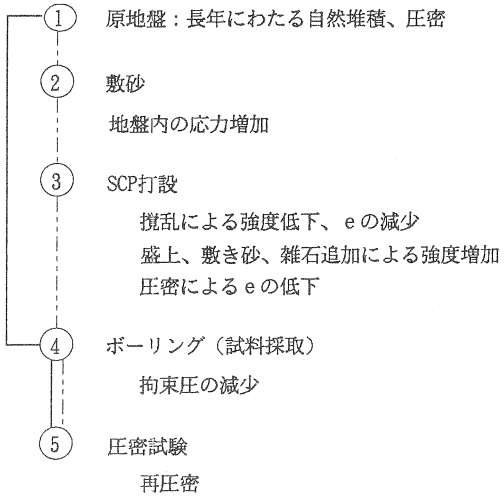

Fig. 19　SCP打設が地盤に及ぼす影響

eの低下量であると考えられる。このような考え方に基づいて両図を比較すると、上層（-11m)の方が撹乱を大きく受けていることになる。これは、拘束圧が低下すると、撹乱の影響をより受け易いことを示している。

粘土の撹乱を定量的に評価することは容易ではないが、一つの手法として単純せん断試験機を用いることにより、撹乱の程度をひずみ振幅と繰返し回数というパラメーターに置き換えることが可能となる。Fig. 20はその一例を示したもの[7]であって、図中ではひずみ振幅を変化させたときのe ～log p 曲線の変化を示しているが、この結果とFig. 16, 17, 18 の結果を比較することによりＳＣＰ打設による撹乱の程度を定量的に把握できるであろう[8]。すなわち、Fig. 20における状態経路は繰り返しせん断による撹乱ー排水ー除荷ー再圧密となっているのに対して、Fig. 16, 17, 18ではＳＣＰ打設による撹乱ー排水ーサンプリングによる応力解放ー再圧密となり、状態経路の対比が可能である。また、Fig. 20においては撹乱の程度がひずみ振幅と繰返し回数によってあらわされていることから、現場の粘土の撹乱の程度を繰返しせん断ひずみレベルによって置き換えることができる。

次にＳＣＰ打設が圧縮指数C_cに及ぼす影響を調べるためにC_cと液性限界w_Lの関係を Fig. 21 に示す。ＳＣＰ打設前は、 C_cが式（２）で示される直線上にあるが、ＳＣＰ打設２ヶ月後（△印）では、明確に

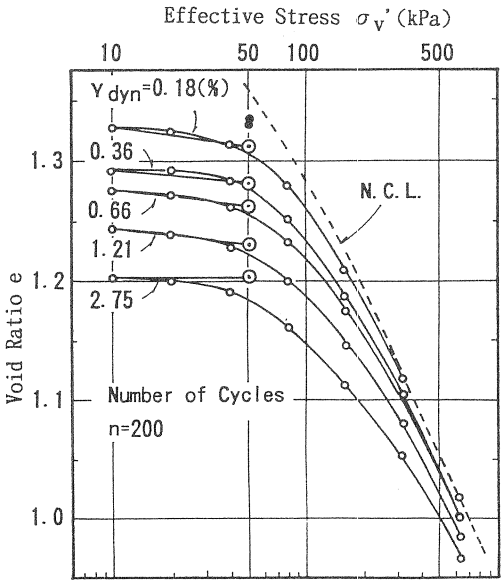

Fig. 20　撹乱がe-log p曲線に及ぼす影響

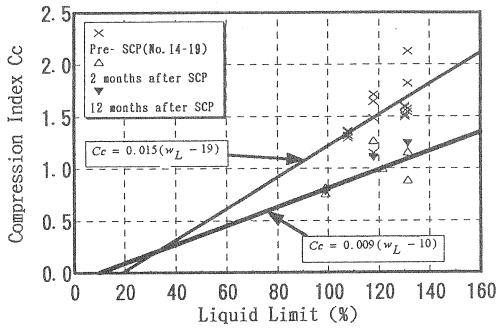

Fig. 21　液性限界～圧縮指数関係

C_cの値が低下し、式(1)で示される直線上にあることがわかる。また、▼印は１２ヶ月後の結果であって、ＳＣＰ打設後、時間経過とともにC_cはやや回復する傾向がみられ、セメンテーション効果があらわれたものとも考えられる。ただ、沖積世から長年にわたって堆積してきた粘土層のC_c～w_Lの関係にまで回復するにはかなりの年月を要するものと思われる。

ＳＣＰ打設前後の塑性指数～圧縮指数の変化を示したものがFig. 22 である。Wrothは両者の関係式として次式を提案した。

$$C_c = (0.5 \times G_s \times PI) / 100 \qquad (3)$$

本施工区域の粘性土層はＳＣＰ打設前はWrothが示した値よりＣｃがやや大きいが、ＳＣＰ打設によりWrothの示したラインまで低下し、Fig. 21と同様の傾向を示している。

Fig. 23 に土被り圧p'と圧密降伏応力p_cとの関係を示す。原地盤はやや過圧密の状態にあるが、ＳＣＰ打設後はほぼ$p' = p_c$となり、ＳＣＰ打設に伴う撹乱により、Aging効果が減少したことを示している。

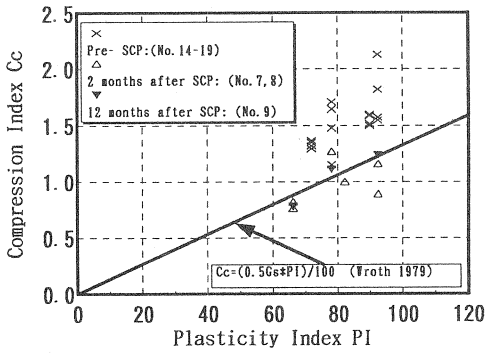

Fig. 22　塑性指数～圧縮指数関係

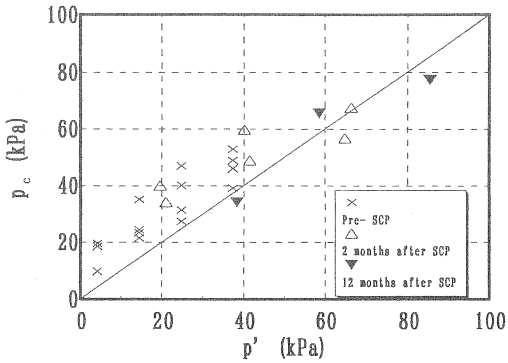

Fig. 23　土被り圧 p' ～圧密降伏応力 p_c 関係

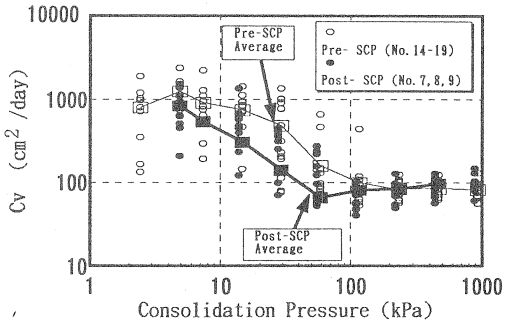

Fig. 24　圧密圧力～圧密係数の関係

次に、ＳＣＰ打設前後の圧密圧力 p ～圧密係数Ｃｖの関係を示したものがFig. 24 である。ＳＣＰ打設後のＣｖは、撹乱を受けることにより明らかに減少している。そして、圧密圧力を増加するとＳＣＰ打設による影響はみられなくなる。すなわち撹乱を受けると粘土のＣｖは減少する。しかし、ここで注意をしなければならない点は、同図はＳＣＰ打設後過剰間隙水圧が一旦消散した状態の試料を不撹乱状態で採取した試料についての結果であって、ＳＣＰ打設後の過剰間隙水圧消散過程での圧密速度とは異なっている点である。すなわち、ＳＣＰ打設直後の間隙水圧消散に伴う圧密の速さについては実測できないが、撹乱を受けた粘土の間隙水圧消散速度は、撹乱を受けない粘土に比べると大きくなるという報告がなされている[4)]。

3.4　強度特性変化

Fig. 25 はＳＣＰ打設前後の一軸圧縮試験における破壊ひずみの相対頻度を示したものである。ＳＣＰ打設によって明らかに破壊ひずみが増加しており、ＳＣＰ打設による撹乱の影響としてとらえることができる。

また、ＳＣＰ打設によって一軸圧縮試験における破壊ひずみが時間とともにどのように変化するかをみるために、経過時間との関係で整理したものがFig. 26 である。ＳＣＰ打設による粘土層の撹乱によって明らかに破壊ひずみはＳＣＰ打設前に比べると増加していることがわかる。ただ、図中０～６ヶ月の間に破壊ひずみは急速に増加するが、１２ヶ月～１６ヶ月の間にも再び増加する傾向がみられる。これは、同図においてボーリングNo. 3, 7, 8はＣ船の施工域、ボーリングNo. 9, 10はＢ船の施工域での結果であることから、先述のようにＳＣＰ打設方法の相違による撹乱の度合の差が破壊ひずみにも影響を与えるものと考えられる。このように、ＳＣＰ打設方法は確かに撹乱に対する影響因子として挙げることができるが、長期的な観点からは全体として破壊ひずみは減少傾向にあることがわかる。

一方、一軸圧縮試験において撹乱の程度を表す指標として破壊ひずみと同様に E_{50}/C_u を用いることがある。そこで、ここでもＳＣＰ打設前後の E_{50}/C_u

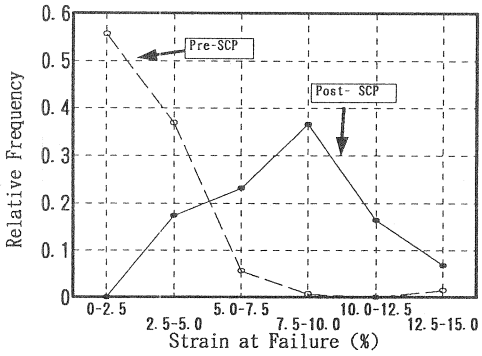

Fig. 25　ＳＣＰ打設前後の破壊ひずみの相対頻度分布

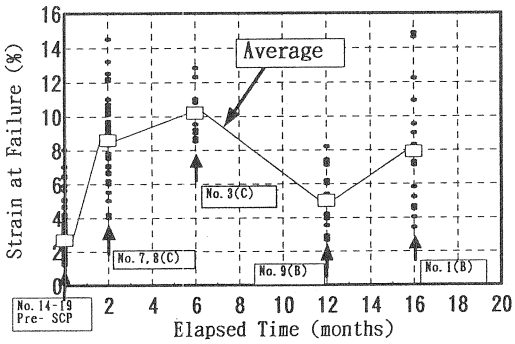

Fig. 26　破壊ひずみの経時変化

の相対頻度分布をFig. 27 に示した。一般にE_{50}/C_uの値が小さいほど乱れの影響が大きいとされているが、本粘土層においても撹乱によりE_{50}/C_uは明らかに減少していることがわかる。

次に、一軸圧縮強度q_uの深さ方向の変化を示したものがFig. 28 である。同図はＢ船の施工区域について試験結果を整理したものである。図中×印はＳＣＰ打設前のサンプリング試料についての結果、▼印はＳＣＰ打設１２ヶ月後、●印はＳＣＰ打設１６ヶ月後のサンプリング試料についての結果である。また図中の直線はFig. 11 で示した地盤内の鉛直応力をもとにSkemptonが示した$c_u/p=0.11+0.0037PI$ によりq_uを推定した結果である。上部層においては１２ヶ月後から１６ヶ月後にかけてq_uはやや低下する傾向がみられる。これは、先述したように１２ヶ月後から１６ヶ月後にかけて破壊ひずみが増加することと考えあわせると、その期間に実施した基礎捨石、敷砂の追加に伴う載荷重の増加によるものと考えられる。

Ｃ船の施工区域でのq_u の深さ方向の変化とFig. 11 に示した地盤内の鉛直応力をもとにq_u を推定した結果がFig. 29である。図中×印、△印、○印はそれぞれＳＣＰ打設前、ＳＣＰ打設２ヶ月後、６ヶ月後の結果である。明らかにＳＣＰ打設後、強度は増加する傾向がみられる。特に上部層においては砂杭の側方拘束圧が小さくなること、及び排出砂と粘性土の混成地盤となっている可能性が考えられ、推定値と比較してもかなりq_u が大きくなっている。

西田[5]は、鋭敏粘土では外的作用力が小さく、土構造骨格を破壊し得ない状態では圧密効果が上がらず、ある程度の外的作用力が作用して構造骨格の破壊が生じると初めて圧密効果が顕著に現れ強度が増大するということを指摘した。また土構造が破壊されると強度の増加の割合は普通の粘土に比べて小さくなること、

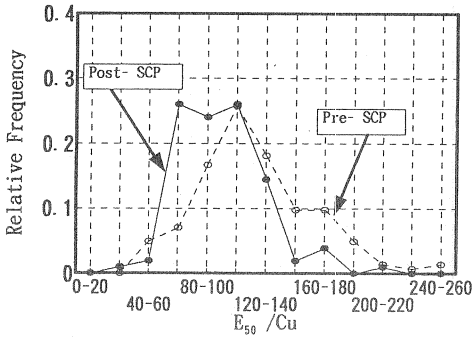

Fig. 27　ＳＣＰ打設前後のE_{50}/C_uの相対頻度分布

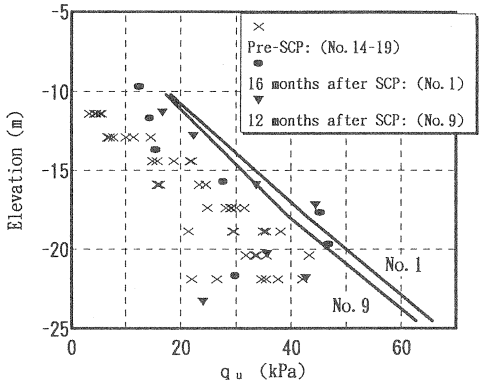

Fig. 28　一軸圧縮強度の分布（Ｂ船施工区域）

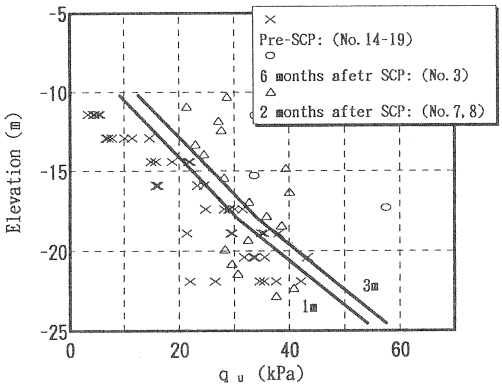

Fig. 29　一軸圧縮強度の分布　（Ｃ船施工区域）

即ち鋭敏粘土は脆性的性格が強く、土粒子間の結合力を破壊するにはかなりの外的作用力を必要とするが、一旦結合が切れるとそれらを回復させるのはかなり難しいということも指摘した。本施工区域においても粘土層の鋭敏比は７～１７であって、ＳＣＰ打設による撹乱の度合の差がこのように強度の変化に顕著にあらわれたものと考えられる。

4.　結論

本研究ではＳＣＰ打設に伴う地盤の土質特性の変化を、徳山下松港における土砂処分場護岸工事において実施された土質試験結果をもとに調べた。その結果として次のような事が明らかになった。

１）ＳＣＰ打設により、湿潤単位体積重量、自然含水比は影響を受けるが、拘束圧が小さい上層部においてその影響は著しい。

２）液性限界と自然含水比の関係から、ＳＣＰ打設に

よる地盤改良の効果を見出すことができる。
３）ｅ～log p 曲線においては、拘束圧が小さい方がＳＣＰ打設による撹乱の影響が顕著にあらわれる。
４）Ｃｃ－w_L関係、およびＣｃ－PI関係はいずれもＳＣＰ打設により変化する。また、ここでの試験結果に関する限りにおいて、ＳＣＰ打設後のＣｃ－PI関係は、Wrothが示した関係式と一致する。
５）ＳＣＰ打設後に採取した試料についてのＣvは、粘土が撹乱を受けているために低下するが、圧密圧力が増加するとＳＣＰ打設の影響は見られなくなる。
６）破壊ひずみの頻度分布によって、ＳＣＰ打設による撹乱の影響を見い出すことができる。
７）一軸圧縮強度は、ＳＣＰ打設により増加するが、ＳＣＰ打設方法によっても異なる。

ＳＣＰ打設にともなう乱れの影響を設計・施工にフィードバックするためには、現時点では未解決な部分も数多く残されている。今後は、現場データをより多く蓄積するとともに、乱れを力学的な視点からとらえることによって、設計に反映させていければと考えている。

参考文献：

１）赤木俊充(1977)：「サンドコンパクションパイルによる軟弱粘土の強度増加」、第１２回土質工学研究発表会、pp. 1241-1244。
２）甲斐信二(1992)：「ＳＣＰ工法による地盤の盛り上がりについて　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）。
３）小林義治、鷹羽信勝、浅見秀樹(1988)：「サンドコンパクションパイルの振動が鋭敏な粘性土に及ぼす影響」、第２３回土質工学研究発表会、pp. 2149-2152。
４）松田博、柚木紀生、大原資生(1989)：「中空ねじりせん断試験試験機による粘土層の繰返しせん断に伴う沈下特性」、第41回土木学会中国四国支部研究発表会、Ⅲ-6,、pp. 260-261.
５）西田一彦(1988)：「大阪鋭敏粘土の工学的性質」、技苑No. 54、pp. 29-31。
６）小川冨美子、松本一明(1977)：「港湾地域における土の工学的諸係数の相関性」、港湾技術研究所報告、第１７巻、第３号、pp. 3-89。
７）O-hara S. and Matsuda H. (1988): "Study on the Settlement of saturated Clay Layer Induced by Cyclic Shear" Soils and Foundations, Vol. 28, No. 3, pp. 103-113.
８）奥村樹郎(1974)：「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。
９）田中洋行、榊原基生(1991)：「港湾地域における土の一次性質の統計解析」、港湾技研資料, No. 719。