The Japanese Geotechnical Society

報文—2299

低置換率SCP工法の開発と港湾工事への適用

Development of SCP Method with Low Replacement Area Ratio and its Application to Port Construction

北 詰 昌 樹（きたづめ まさき）
運輸省港湾技術研究所土質部地盤改良研究室 室長

1. はじめに

海底の軟弱な粘性土地盤上に係船岸や防波堤などの港湾構造物を建設する場合の地盤改良工法として，必要範囲の原地盤粘性土を取り除いて，そこへ良質の砂質土を施工する床掘り置換工法や，原地盤粘性土の圧密による強度増加を促進するサンドドレーン工法（SD工法）などが用いられることがこれまで多かった。しかし，床掘り置換工法では取り除いた粘性土の土捨場の確保が困難になってきていること，SD工法は圧密を促進する工法とはいえ，所要の強度に達するまでには比較的長い期間が必要で，急速施工には適さないといった欠点がある。

このような状況の下，締め固めた砂杭を地盤中に打設するサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）が広く用いられるようになってきた。SCP工法は当初は緩い砂質土を締め固め，地震時の液状化防止などを目的に開発されてきた工法であるが，現在では粘性土地盤を対象に，締め固めた砂杭と原地盤の粘性土からなる複合地盤を形成することによって，地盤の支持力増強，すべり破壊の防止，圧密沈下の低減などにも広く用いられている。

ここでは，粘性土地盤を対象とした低置換率SCP工法の特徴，開発の経緯ならびに港湾での施工例を簡単に紹介する。

2. 低置換率SCPの特徴と開発の経緯

現在一般に打設されている砂杭の直径は70～200cm程度であり，対象とする構造物・地盤条件によって打設範囲ならびに打設ピッチを変えて砂杭を造成する。置換率（A_s）は地盤中で砂杭の占める割合で定義され，主に砂杭の打設ピッチで決定される。

盛土のように上部構造物が比較的軽量な場合には，これまでも置換率20～40%程度の「低置換率」のケースも多く見られる[1]。一方，港湾工事においては，砂杭自体による支持力・せん断強度の増加効果を期待し，置換率が70%程度の「高置換率」と呼ばれる施工が一般的である[1]。

低置換率SCP工法は，SD工法と高置換率SCP工法との中間的な存在として，以下のような特徴があげられる[2]。

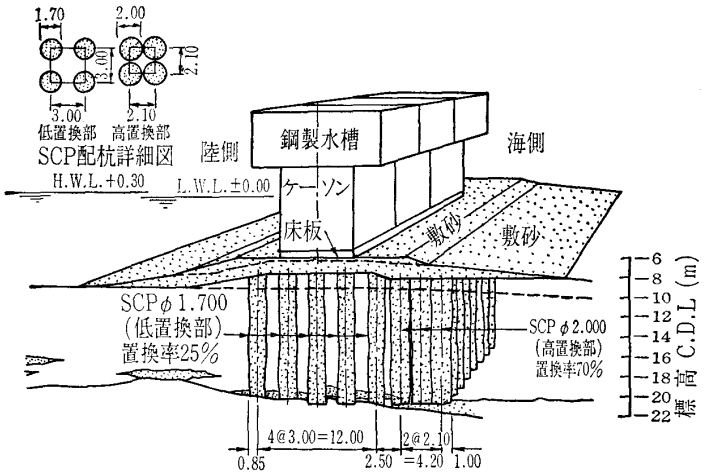
① 高置換率SCP工法と比較して経済的である。
② SD工法と比較して沈下量を小さく抑えることができる。
③ SD工法と比較して工期も短縮できる。
④ 高置換率SCP工法と比較して盛上がり土量を少なくできる。

このような利点を的確に設計・施工に反映させるためには，①複合地盤のせん断抵抗の推定方法，②置換率と応力分担比の関係，③沈下量と沈下低減係数の関係などの改良地盤の挙動をより詳細に検討する必要があった。これらの課題は，低置換率特有のものではなく高置換率の場合にもあてはまる課題である。しかし，高置換率の場合には，個々の砂杭が互いに接するまで密に打設された状態であるため，これまでは複合地盤というよりは強制的に置き換えられた一種の砂地盤と割り切って考え，杭間の粘性土の強度を無視した設計が主に行われてきた。一方，低置換率の場合には，砂杭は粘土地盤中に，いわばまばらに打設されるため，改良地盤を砂杭と粘性土の複合地盤と考え，砂杭と杭間粘性土で応力を分担させ，かつ杭間粘性土の圧密による強度増加にも期待するというような設計思想の変更が必要であった。

そこで，運輸省では昭和61年度より現地試験[3),4)]，

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—1　試験堤構造図

遠心模型実験[5]や実用設計法の吟味[6]などの研究プロジェクトを進めてきた。現地試験として，改良地盤の支持力特性を把握するため，昭和61年～63年にかけて舞鶴（京都府）で大規模な現地載荷実験を中心とする実証試験を行った[3),4)]。試験堤の構造図を図—1に示した。原地盤はケーソン直下の幅12m，長さ50mの範囲にわたり低置換率SCP（A_s=25%，砂杭径1.7m，杭間隔3.0m）で改良され，この区域に隣接した幅4.2m，長さ50mの範囲は，載荷によって堤体がこの方向へ滑るのを防止するため高置換率SCP（A_s=70%，砂杭径2.0m，杭間隔2.1m）で改良されている。改良地盤上には砂マウンドとコンクリート製床版およびケーソン3函が投置されている。ケーソン内に中詰め注水を行った状態で約10か月放置して，砂杭打設時に乱れ，強度低下した杭間粘性土の圧密強度増加を待った。載荷はケーソンおよび鋼製水槽へ注水して鉛直荷重を増加させて地盤を破壊させた。

遠心模型実験では，50gの遠心加速度の下，ケーソンによる鉛直荷重を作用させた後，波力に相当する水平荷重を作用させて改良地盤を破壊させた。鉛直荷重を極限鉛直支持力までの数段階に変化させた実験を行い，破壊時の水平荷重の変化を調べた。次に，現地実験結果ならびに模型実験結果とSCP改良地盤の代表的なせん断抵抗式による計算値と比較検討した[6]。これらの検討を踏まえ，実用設計法として改良地盤を複合地盤と考え修正フェレニウス法を基にした設計法を確立した[7]。

3. 低置換率SCP工法の港湾への適用[8]

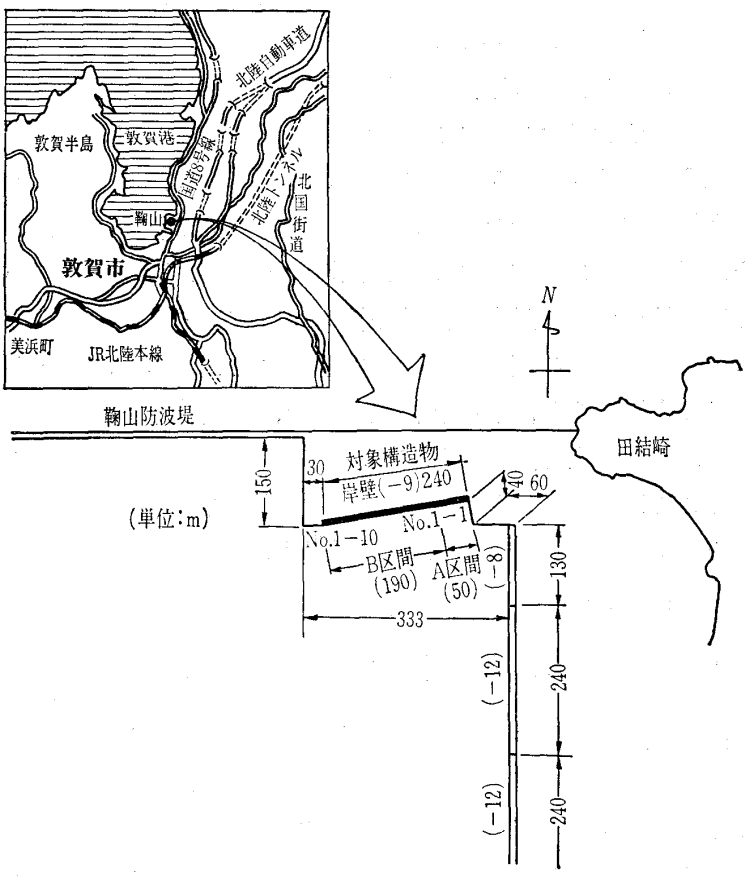
ここでは，福井県敦賀港の一般貨物およびフェリー用岸壁への低置換率SCP工法の適用例を紹介する。

3.1 工事概要

改良工事の対象となった岸壁は一般貨物およびフェリーを対象とした−9.0m岸壁（全長240m）である（図—2）。本岸壁では97.5%の稼働率を満足し，フェリーバースの波しぶきを避けるために消波構造が必要とされ，横スリットケーソンを採用することとした。スリットケーソンの消波機能を十分に発揮させるためにはスリット位置の確保が重要で，そのためには施工中・供用中の圧密沈下を精度良く推定することが必要である。総沈下量そのものは40～50cm程度と推定されたが，施工期間が限られているため，圧密沈下に要する時間はなるべく短縮する必要があった。

3.2 土質概要

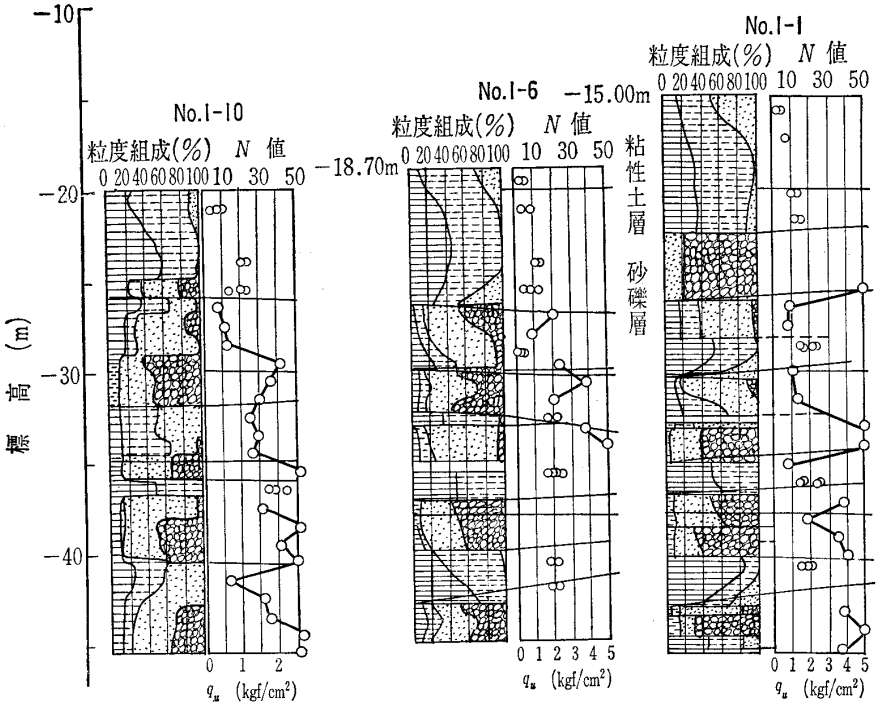
建設地点は敦賀湾の湾奥部東側に位置している。



図—2　岸壁位置図

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

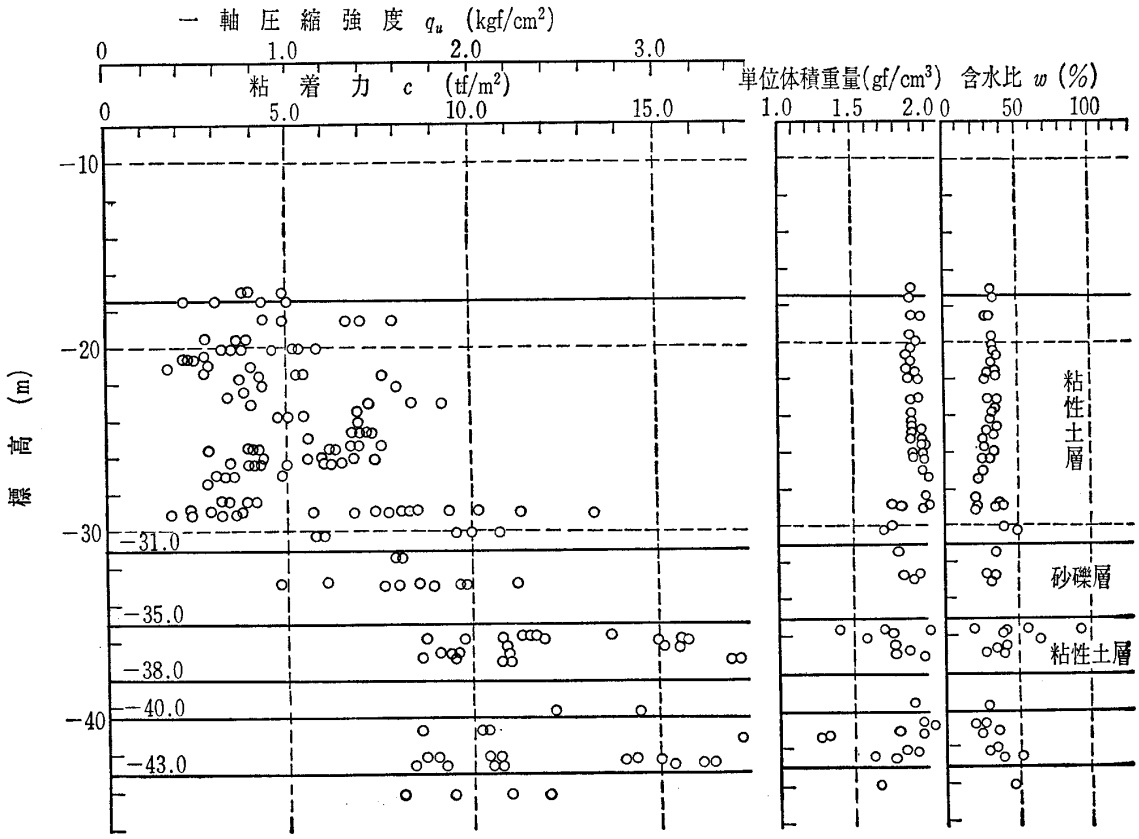


図—3　土質性状図

敦賀湾は沈降湾で湾の東西は山に囲まれ，海底地形は湾の中央部に向かって傾斜している。当地点は基盤岩上に氷河期および間氷期の海面の上下等に伴い堆積したと思われる粘性土，砂質土，礫質土の各層がほぼ水平に互層をなして形成されている。

土質調査から得られた土質性状の代表例を図—3に示す。上層の粘性土層の海底面は，−15.0m から −20.0m へと傾斜しているが層の下側はほぼ水平であり，層は沖に向かって薄くなっている。粘性土層下部の −25m〜−35m には砂礫層がほぼ水平に連続的に分布している。それ以深についてはほぼ水平方向に連続する粘性土層と礫層が互層をなしている。

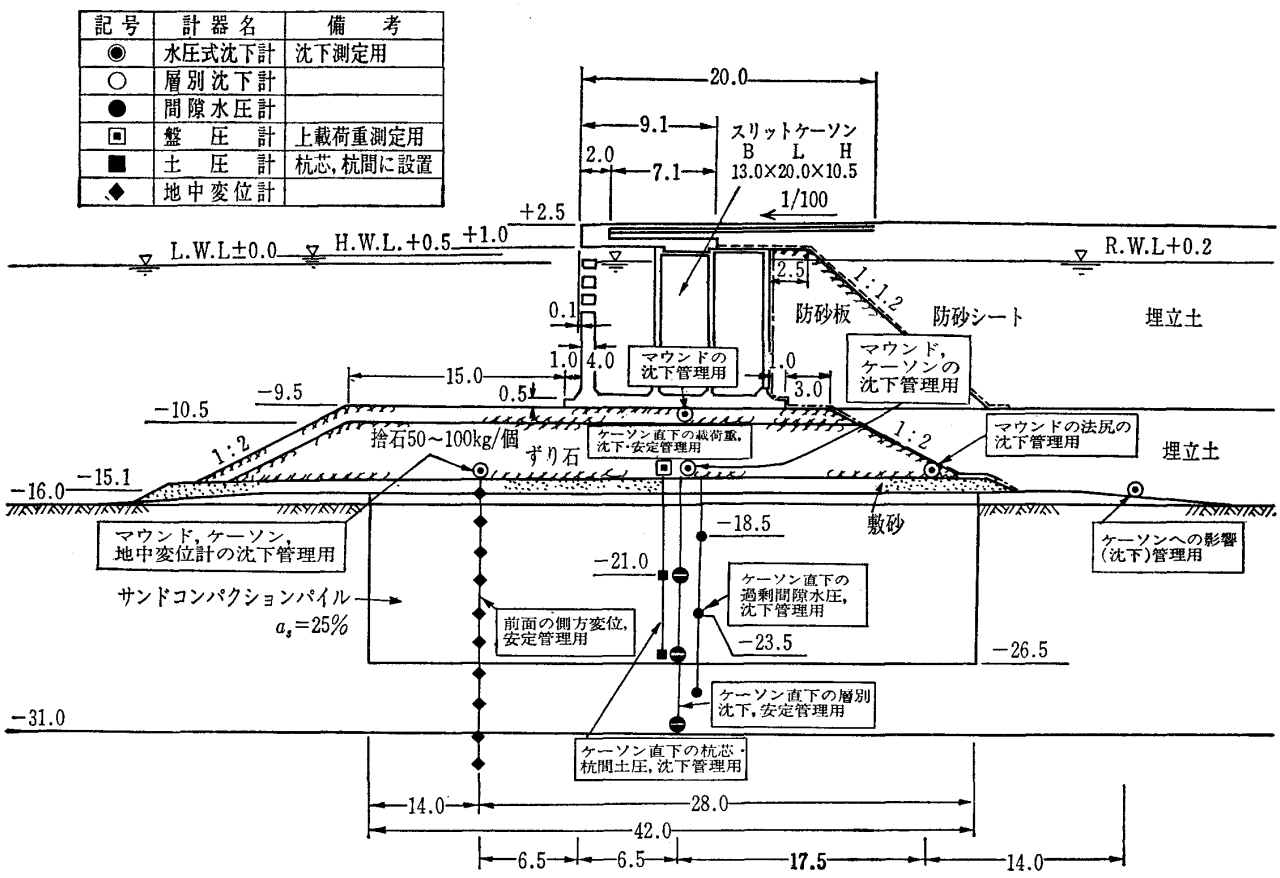
土質試験結果の代表例を図—4に示した。上部粘性土層の単位体積重量は1.9gf/cm³と粘性土としては非常に大きく，ばらつきも少ない。また，含水比も約30%と小さく全層にわたりほぼ一定している。一軸圧縮強度(q_u)は上層部で q_u=0.6〜1.6kgf/cm²，下層部で0.6〜2.4kgf/cm²と高い値を示しており，全般的には深度方向に強度が増加する傾向が見られる。粘性土層下に位置する砂質礫層は，最大径 ϕ150 mm 前後のものが非常に多く点在する玉石混じり層であり，N値は35〜50程度である。また，砂礫層下の粘性土層は所々に細砂や貝殻片を含むやや不均質な砂質シルトで，その単位体積重量は1.4〜



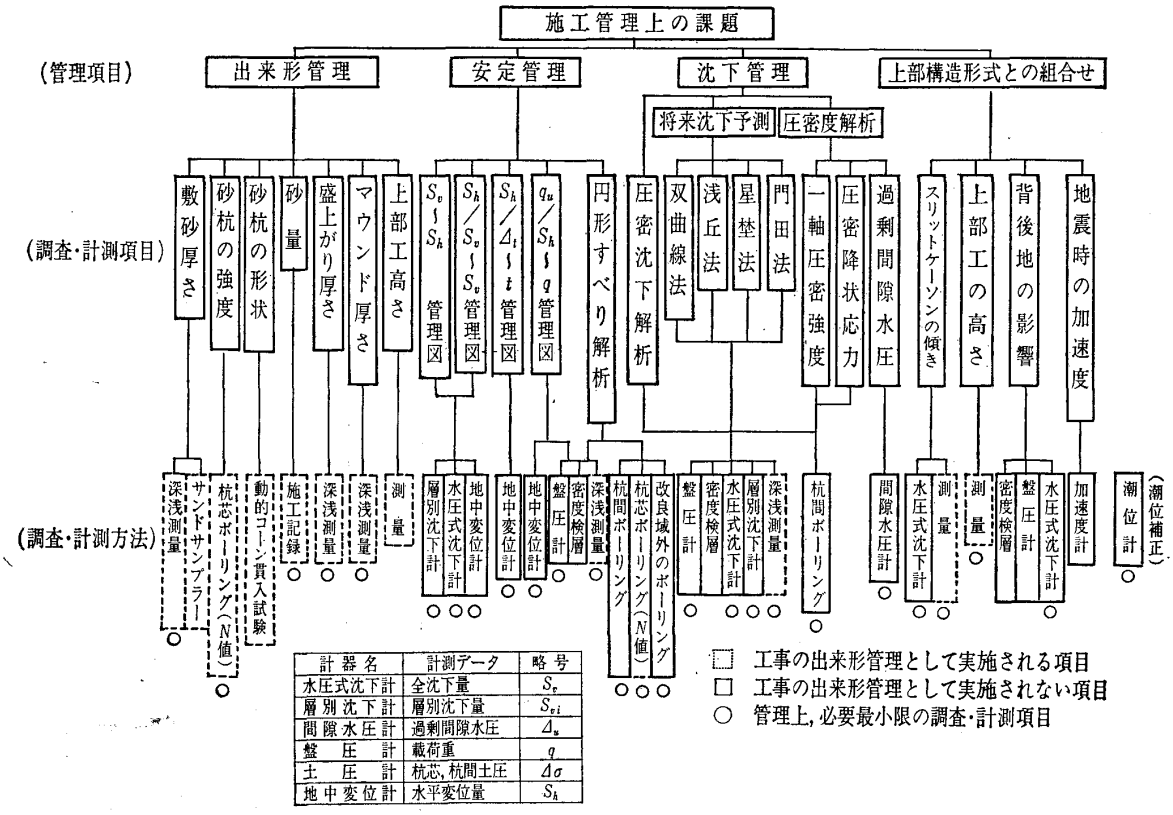
図—4　土質試験結果

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society



図—5 構造断面図



計器名	計測データ	略号
水圧式沈下計	全沈下量	S_v
層別沈下計	層別沈下量	S_{vi}
間隙水圧計	過剰間隙水圧	Δ_u
盤圧計	載荷重	q
土圧計	杭芯,杭間土圧	$\Delta\sigma$
地中変位計	水平変位量	S_h

図—6 施工管理のための調査・計測項目

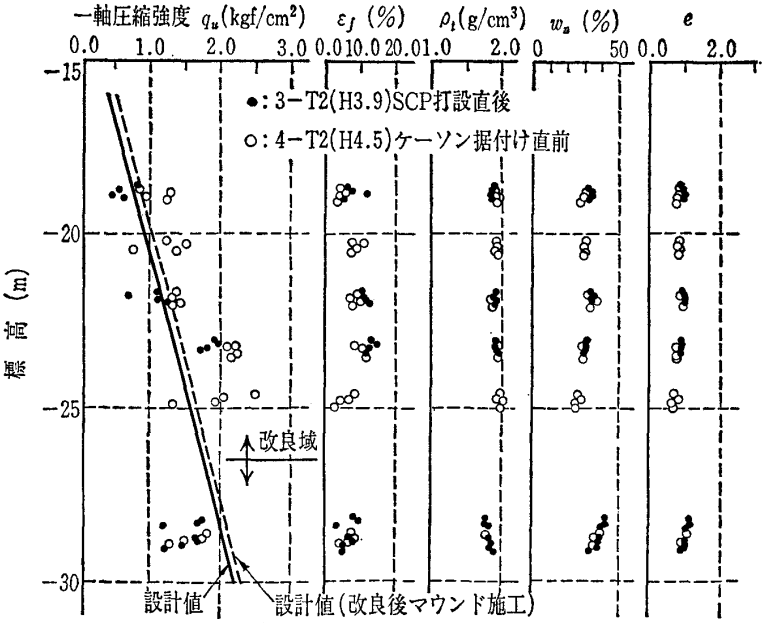
NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

2.0 gf/cm³ であり，含水比は20～90%程度と大きくばらついている。また，一軸圧縮強度（q_u）も 1.8～3.4 kgf/cm² 程度で，N 値は 6 ～20程度である。

3.3 設計

粘性土を対象とした地盤改良工法として，置換工法，サンドドレーン工法，サンドコンパクションパイル工法，深層混合処理工法などがあげられるが，当海域においては土捨場が確保できないことから，置換工法は採用しなかった。また，当地点の粘性土層の強度が比較的高いことから，経済性に優れかつ盛上がり土の発生を極力抑えることができる低置換率サンドコンパクションパイル工法（置換率25%）を採用することとした。



図—7 土質調査結果

(1) 岸壁の安定性の検討

岸壁の安定上の課題のうちで最も重要な課題はSCP打設に伴う原地盤の強度低下とその回復の評価であった。舞鶴港での現地試験[3),4)]ではSCP打設による原地盤の強度低下は30%で，その後4か月で元の強度の90%までに回復することが得られている。しかし，本岸壁の場合には改良対象土が過圧密粘土であり，土性もかなり異なっているので舞鶴と同じになるとは限らなかった。そこで設計では，乱れによる強度回復をパラメーターとして50%から100%まで変化させ，安全率に対する感度分析を行った。また，改良域下端・側方の地盤の乱れの影響についても考慮した計算も行い，代表的な断面として図—5に示す構造が得られた。

(2) 沈下の検討

沈下量の推定値は計算方法によってかなり異なった。基本設計では m_v 法を用い，完成時の最終沈下量としては 37～47 cm を得たが，e～log p 曲線を用いる方法では同じ条件でも 34～36 cm となった。当該地区の粘性土は e～log p 曲線のばらつきが大きいので，上・下限に近い曲線を用いると同条件で25～39 cm の範囲になる。これらの差異を岸壁区間別に整理すると不同沈下量は 12～21 cm となり，最大20 cm 程度は不確実ということになる。

3.4 施工

施工にあたって，まず設計どおりの出来形（形状，強度）の低置換率SCPが造成できるか，そして段階施工において乱された粘土層の強度が所定の期間内に回復し，また圧密により強度が増加し，計画どおりに安全に施工することができるか，といった点について十分に管理する必要があった。特に本岸壁は早期完成が望まれており，SCP打設による地盤の乱れ後の強度回復および圧密による地盤強度増加の確認を速やかに行い，各工種に対する地盤の安定性を確認する期間をなるべく短縮する必要があった。さらに，ケーソン本体は横スリットタイプの遊水部を有するもので，据付け後の沈下に対応しにくいため，早期に高い精度で最終沈下量を見極め，マウンド天端高を決定しなければならなかった。これらの課題に対処し，計画どおりの施工を進めるため図—6に示す調査・計測項目および方法に従い施工を行った。また，図—5に示したように各種の計測器を設置した施工管理システムを構築し，情報化施工を導入し，工期の短縮化および経費節減，省力化を図った。

施工は平成2年9月より開始し，SCP改良工事（平成3年6月～平成3年8月），マウンドの建設，ケーソン設置，岸壁背後の埋立て等を行い，平成7年12月完成予定である。

3.5 計測結果

(1) 沈下量

これまでの沈下量の経時変化より，ケーソン据付

NII-Electronic Library Service

The Japanese Geotechnical Society

け後約2か月で，A区間（図—2参照）では約10 cm，B区間では約20 cmの沈下量が計測された。現地での予測値と比較すると，A区間で19～28 cm，B区間で19～30 cmであり，B区間ではほぼ予測値の下限値と等しくなったが，A区間では予測値が約2倍となっている。

(2) 地盤の強度増加

図—7は，B区間のSCP打設直後とケーソン据付け直前での土質調査結果を示している。一軸圧縮試験での破壊時の圧縮ひずみ(ε_f)について見ると，SCP打設直後は3～15%の範囲で事前の調査結果(ε_f<10%)に比べ増加しており，SCP打設に伴う乱れの影響が多少見られる。しかし，強度自体は設計値とほぼ同程度で強度低下は見られず，乱れの影響が小さいことが分かった。また，ケーソン据付け直前では，SCP打設(−26m)以浅の粘性土の一軸圧縮強度は改良前に比べて強度増加しており，当初想定していた強度より高い値を示している。

4. おわりに

本報文では港湾での低置換率SCP改良地盤の開発の経緯とその適用例を簡単に紹介した。低置換率SCP地盤の支持力特性は杭間粘性土の強度特性や砂杭と杭間粘性土の応力分担比などに大きく影響される。今後，港湾をはじめ陸上で本工法の積極的な適用が図られ，杭間粘性土の強度特性や応力分担比などの計測データが蓄積されることを期待したい。

参考文献

1) 末松直幹：サンドコンパクションパイル工法—現況報告—，複合地盤の強度および変形に関するシンポジウム，pp. 13～26，1984.
2) 柳生忠彦：サンドコンパクションパイルによって改良された粘土地盤上の港湾構造物の挙動に関する研究，東京工業大学学位請求論文，1990.
3) 柳生忠彦・幸田勇二：海上における低置換率SCP改良地盤破壊実験，第24回土質工学研究発表会，pp. 1891～1894，1989.
4) 岡田靖夫・柳生忠彦・幸田勇二：低置換率コンパクションパイル工法による改良地盤の現地破壊試験，土と基礎，Vol. 37，No. 8，pp. 57～62，1989.
5) 寺師昌明・北詰昌樹：低置換率SCP工法により改良された粘性土地盤の支持力，港湾技術研究所報告，Vol. 29，No. 2，pp. 119～148，1990.
6) 神田勝己・寺師昌明：粘性土地盤を対象とするSCP工法の実用設計法—感度分析と実態調査—，港湾技研資料，No. 669，pp. 1～52，1990.
7) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（改訂版），1989.
8) 第一港湾建設局敦賀港工事事務所，(財)沿岸開発技術研究センター：敦賀港（鞠山地区）岸壁（−9 m）情報化施工調査報告書，1991.

（原稿受理 1993. 9. 8）

NII-Electronic Library Service