

## 山土を用いたサンドコンパクションパイル工法

## Sand Compaction Pile Method with Granite Soil

門脇 雄二 \* (Yuji Kadowaki)  
花井 光昭 \*\* (Mitsuaki Hanai)  
向井 雅司 \*\* (Masashi Mukai)  
塩尻 道元 \*\* (Michimoto Shiojiri)

キーワード：締固め砂杭／軟弱地盤／事例／内部摩擦角／透水性（IGC：K-6/E-2）

## 1. まえがき

サンドコンパクションパイル（以下SCPとかく）工法は、軟弱な地盤内に締固まった砂杭を造成することにより、地盤のせん断強度の増加と上載荷重に対する沈下低減、圧密促進を図る工法で、構造物の基礎地盤の改良、埋立地のすべり安定、沈下の対策等に数多く用いられ、効果を上げている。この時、締固まった高強度のSCPを造成するためには、SCP材として良質の砂が必要で、一般には粗粒で均質な海砂が最適とされている。

ところが、最近では良質の海砂が枯渇してきており、供給がだんだんと難しくなっていく傾向にあり、特に山陰地方ではこの傾向が顕著で、入手できても非常に高価なのが現状である。このため、これにかわるSCP材として使用可能な砂の規格・品質に関して研究が進められているものの、現段階では確立されていない。

このような状況の中で、出雲空港滑走路延長工事において、SCP材として、これまでの改良効果に優れ施工実績の高い海砂にかわって山土を用いた地盤改良工事を行った。本報告は、この工事の結果について報告するとともに、山土を用いたSCP改良の効果と問題点についてまとめたものである。

## 2. 地盤概要

出雲空港は、宍道湖西岸に位置し、滑走路延長計画にあたっては種々の調査および検討の結果、宍道湖を約10ha埋立てて東側へ延長することとした。

この埋立造成地域の地盤概要を図-1に示す。当地域は、中国山地から宍道湖へ流れこむ斐伊川の流砂の堆積地の先端部にあたり、水深は2~4mであった。地層状態は、湖底面より沖積粘性土層がT.P-18~28m付近まで堆積しており、その層厚は16~24mに及び、現有滑走路との取付部から延長部の先端に向かって厚くなっている。それ以深は、沖積砂質土と洪積層（砂と粘土の互層）が数メートル堆積し、基盤岩となる。

埋立工事において最も問題となるのが沖積粘性土層であり、この粘性土層は大部分で細粒土分が90%以上で、T.P-17m付近までは自然含水比も $W_n=100\sim150\%$ と高く、軟弱地盤の様相を呈している。粘着力も表層付近では $0.5\text{tf/m}^2$ 程度しかなく、ばらつきはあるものの深度方向に増加する傾向があり、粘着力増加率も $C_u/P=0.25\sim0.3$ 程度に評価される。圧密特性としては、表層付近で一部やや過圧密傾向を示しているが、全体的にはほぼ正規圧密状態にあるものと考えられる。

\* 島根県出雲土木建築事務所 空港整備室長

\*\* 復建調査設計（株） 第二事業部

### 3. 埋立工事概要

前述のように、当地区は軟弱な粘性土層が厚く堆積しており、埋立造成工事にあたっては、盛土荷重による長期間にわたる圧密沈下や場所的な不同沈下が生じ土地利用や構造物築造に障害を与えること、また、盛土施工時における地盤のすべり破壊、等が懸念された。そこで、これらの問題に対処するため、地盤改良を行うこととし、図-2の地盤改良平面図に示すように、埋立地内はペーパードレーン工法で、護岸部はSCP工法で改良することとした。図-3に護岸部の標準断面を示す。

このうち、SCP工法は打設間隔を1.9mの正方形配置とし、改良率 $a_s$ を図-2に示すように、地盤状態を考慮の上、砂杭径 $\phi 1.60$ mの $a_s=56\%$ 、 $\phi 1.50$ mの $a_s=49\%$ 、 $\phi 1.40$ mの $a_s=43\%$ の3段階の改良仕様で施工された。施工にあたっては、原地盤の盛上りを考慮し、作業船の吃水が確保できるようにT.P-6m付近まで床掘した後に、サンドマットを1.0m敷均してSCP打設を行った。ここで、SCP用の砂は、供給地、経済性等の問題より埋立地域の背後地にある埋立土の採土地の山土を用いた。

### 4. SCP材の品質管理

SCP工法は、せん断強度の増加と沈下低減・圧密促進効果を期待しているため、所定の改良率と強度、透水性を有し、砂杭への応力集中が認められなければならない。そのため、本工事において用いる山土の材質については十分に留意する必要がある、その管理基準値としては、既往の工事の実績を参考に

- ① 粒度 : 細粒分含有率  $F_c < 10\%$
- ② 強度 : 内部摩擦角  $\phi > 30^\circ$
- ③ 透水性 : 透水係数  $k > 1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$

で規定することとした。ただし、細粒分含有率が10%を超える場合でも、②、③が満足されれば使用可能と考えた。

#### 4.1 材料試験

施工に先立って、現場での材料の管理方法を決定するため、使用する山土の材料試験を実施した。この材料試験は

- ・物理試験 (比重, 含水比, 粒度)
- ・締固め試験
- ・透水試験

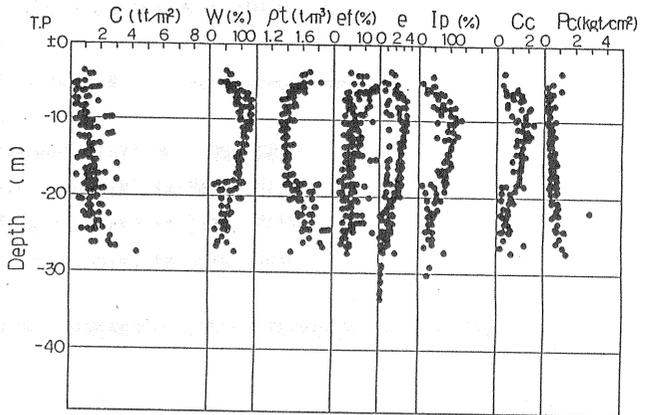


図-1 土性一覧図

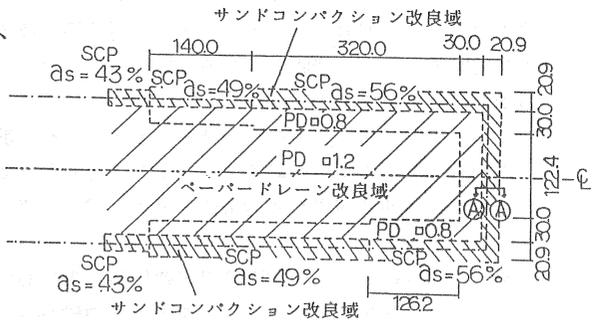


図-2 地盤改良平面図

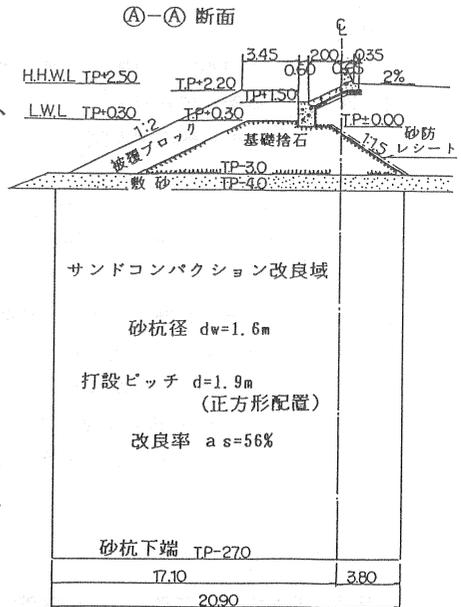


図-3 護岸標準断面図

・三軸圧縮試験 (CD)  
 ・相対密度  
 の各項目について行った。  
 各試験結果は図-4~7に示すが、これより

- (1) 砂杭の内部摩擦角は、細粒分含有率、相対密度、間隙比から推定可能である。
  - (2) 砂杭の透水係数が  $k \geq 1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$  となるためには  $F_c < 10\%$  の材料を用いて、かつ  $D_r \leq 70\%$  とする必要がある。
  - (3) 図-8に示すよう締固めによって粒子破砕が起り、締固め後は細粒分含有率が2~3%増加する。
- が推察された。したがって、SCP材の管理基準値を満足させるためには、

- ① 細粒分含有率が10%以下であること
- ② 相対密度が40~70%であること

の2点が必要条件となり、現場では、SCP材としてのこの必要条件を満足する材料の搬入方法・管理体制を整えることとした。

#### 4.2 SCP打設後の調査

図-9にSCP打設後、代表地点で実施した杭芯チェックボーリング結果を示す。同図に示すように、上端から全長の1/3付近までのN値は、それ以降のものと比較してやや低い値となっている。しかし、これは、地盤の拘束圧が小さいためと考えられ、SCP全体として考えれば、平均的なN値は10回程度で砂杭の内部摩擦角は  $\phi = 30^\circ$  が期待できるものと考えられた。

また、杭芯、杭径調査におけるN値の測定、サンプラーにより採取した試料の密度、含水比、粒度試験の結果を図-10~14に示す。

図-10は、乾燥密度  $\rho_a$  とN値の関係を示したものであるが、 $\rho_a$  が大きくなるとN値も増加する傾向にある。

N値から Gibbs-Holtz の(1)式を用いて算出した相対密度と深度の関係を示したのが図-11である。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{P' + 0.7}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $D_r$ : 相対密度、 $N$ : N値  
 $P'$ : 有効土被り圧

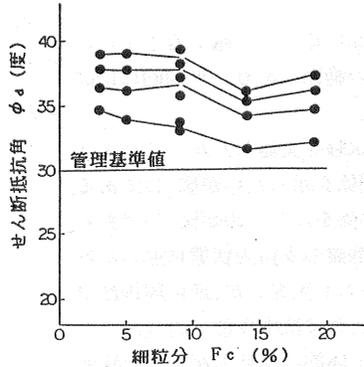


図-4  $F_c \sim \phi_a$  関係図

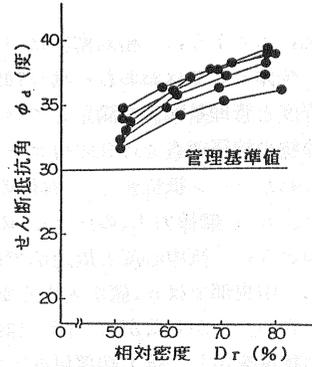


図-5  $D_r \sim \phi_a$  関係図

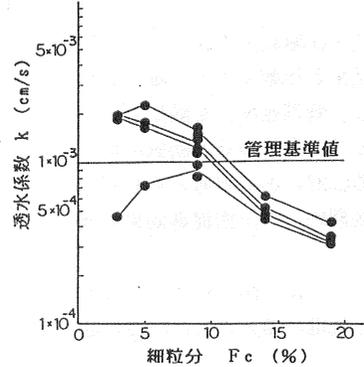


図-6  $F_c \sim k$  関係図

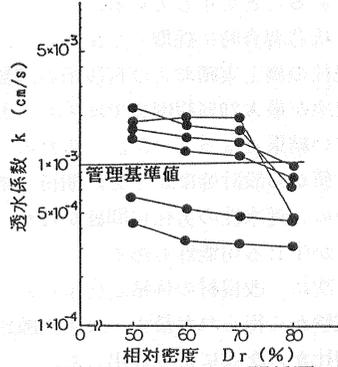


図-7  $D_r \sim k$  関係図

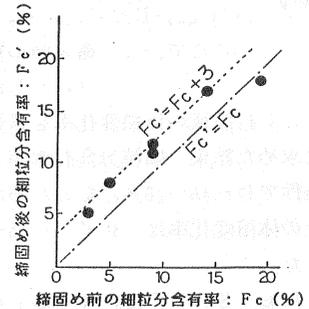


図-8  $F_c \sim F_c'$  関係図

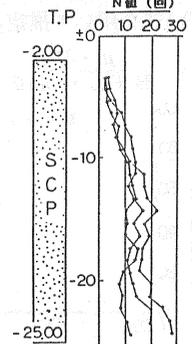


図-9 杭芯N値

同図に示すように、相対密度は中央部に比べ上下端で若干小さいが、全体としてはおおむね40~70%の範囲にあり、平均的には60%程度と管理基準値を満足している。

砂杭の杭径調査では3成分コーン試験を実施したが、これより得られたコーン抵抗値 $q_c$ とN値の関係を示したのが図-12である。また、 $q_c$ と摩擦比 $f_s$ の比と $q_c$ の関係を示したのが図-13である。このように、杭中心部と周辺部では地盤の支持力状態に違いがみられ、中央部では $q_c$ 値が大きく支持力も大きい、逆に周辺部では小さい。しかしながら、図-13によれば杭中央部・周辺部とも同じ状況を示し、杭上端部付近では全体的に支持力が小さい状態にあることを示している。

杭芯調査時に採取した試料による粒度試験結果を図-14に示す。既往の施工実績および打設前の試験結果と比較すると、細粒分含有率が最大20%程度まで増大しており、管理基準値を満足していない結果となっていた。このため、SCP自体のせん断強度は、N値から設計強度が十分に期待できる状況にあると考えられるものの、透水性の劣化に問題が残り、長期的には圧密促進効果の低下が生じる可能性もある。

次に、改良材の体積変化率 $R_v'$ については、図-15に示す室内試験から得られた最大・最小間隙比と現地に搬入された時点の間隙比から次式により算出した。

$$R_v' = \frac{1 + e_0}{1 + (e_{max} - D_r)(e_{max} - e_{min})} \dots (2)$$

ここで、 $e_0$ : 搬入時の初期間隙比  
(ほぐした状態)

SCP打設後の体積変化率を各相対密度毎に求めた結果、細粒分含有率が $F_c < 5\%$ の条件で $D_r = 40 \sim 70\%$ となるために必要な山土の体積変化率は、 $R_v' = 1.15 \sim 1.26$ となった。

なお、SCP打設に伴う盛り高さは、事前には改良幅・打設長・改良率等から(3)式を用いて推定した。

$$H = \frac{\mu \cdot V_s}{B + L \cdot \tan \theta} \dots (3)$$

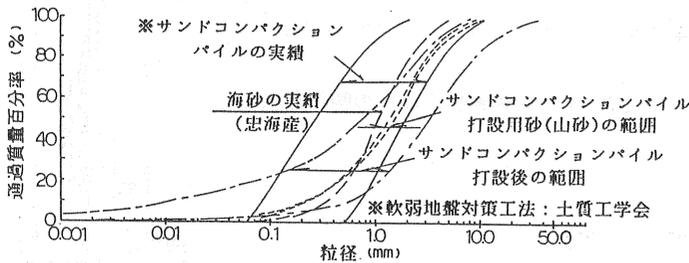


図-14 山土の粒径加積曲線

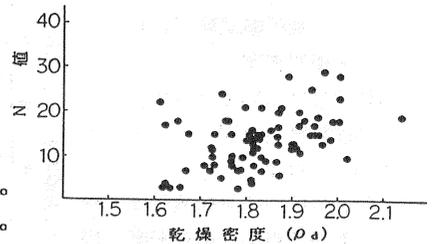


図-10  $\rho_d \sim N$ 値関係図

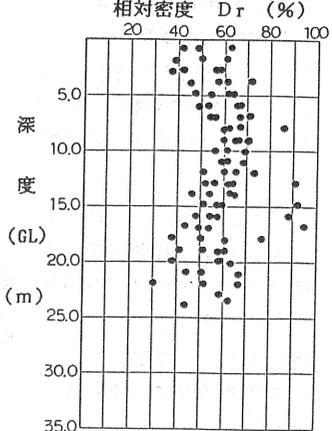


図-11 N値より算出した相対密度

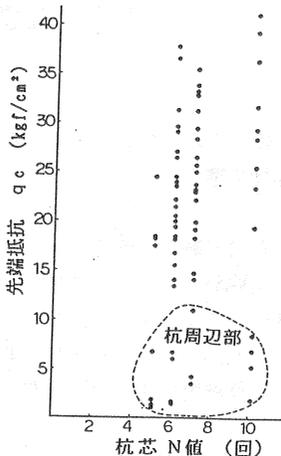


図-12  $q_c \sim N$ 値関係図

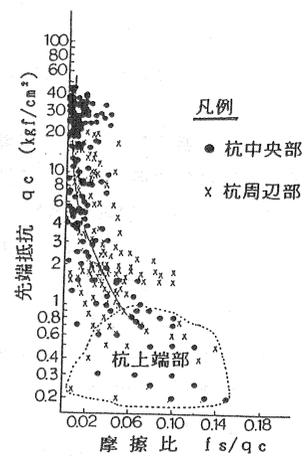


図-13  $q_c \sim f_s/q_c$ 関係図

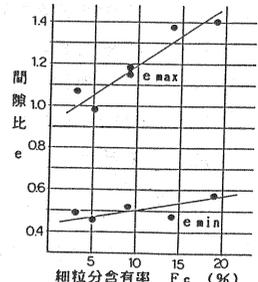


図-15  $F_c \sim e$ 関係図

ここで、  $H$  ; 盛り高さ  $B$  ; サンドコンパクション改良幅  
 $\mu$  ; 盛り係数  $L$  ; サンドコンパクション改良長  
 $V_s$  ; 設計投入砂量  $\tan\theta$  ; 盛り影響角

その結果、 $H = 0.95 \sim 1.45\text{m}$  程度と予測していたが、実測結果によれば、図-16に示すように全体的には予測値の2倍前後に及び、最大では4mもの高さの盛り高が確認された。ただし、盛り範囲については予測幅より狭いものであったが、これらは、床掘りを行っているため、周辺部が押え盛土の働きをしていたためと考えられた。

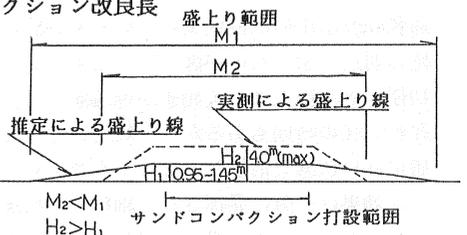


図-16 SCP打設による盛り

5. 計測管理

本埋立護岸は、圧密に伴う粘性土地盤の強度増加、砂杭への応力集中およびそれによる沈下低減等を考慮した複合地盤として護岸断面が設計されている。このため、施工に際しては、各施工ステップ毎に実際の強度増加、沈下等と設計で想定しているものとを比較検討し、設計の妥当性を確認しながら次段階の施工を進めていく必要がある。そこで、本工事においては、代表地域に管理工区を設け、各種計測器を設置し改良地盤の挙動を経時的に観測するとともに、随時チェックボーリングを実施して管理していった。この管理工区は、事前の土質調査結果および護岸設計の考え方をふまえ、最も脆弱と考えられた東側護岸、南側護岸の一部区域とした。

5.1 計測結果

東側護岸の管理工区での実測沈下と事前の調査結果に基づいて設定した土質定数を用いた理論沈下の対比を図-17に、また、地中の水平変位状況を図-18, 19に示す。同図で、捨石施工時に大きな実測沈下が発生し、水平変位も浅い深度で大きな変形を生じている。一般に载荷直後の変形は、地盤の圧密変形と非排水せん断変形が複合して発生するが、これを区別して計測することは難しい。そこで、载荷盛土による弾性変形を計算で算出し比較してみた。これは、土質試験結果・盛土施工状況を基に条件を設定し、変形量を求めたが、実測値に比較して非常に小さく、捨石施工時に生じた変形は非排水せん断変形が卓越していたものと推定された。一方、その後の護岸背面の埋立盛土施工時における変形量は、計算値と実測値がほぼ一致しており、排水を伴う圧密変形が卓越し、安定した地盤状態にあったことを示している。

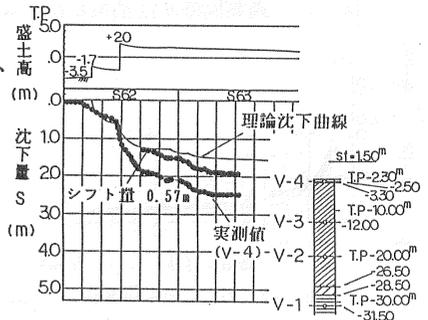


図-17 実測沈下と理論曲線(東側護岸)

次に、本護岸基礎地盤は、軟弱粘性土層の強度増加と沈下低減を期待した設計となっているが、これらに大きく影響するのが砂杭と杭間粘性土の応力分担状況であり、これを土圧計により計測し設計値と比較したものが図-20である。

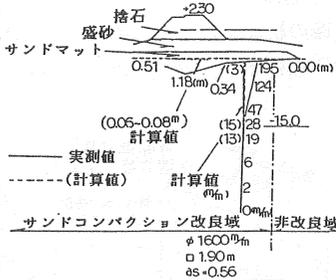


図-18 地中水平変位 (護岸捨石施工時)

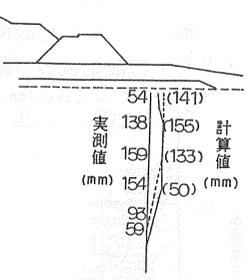


図-19 地中水平変位 (護岸盛土時)

同図に示すように、東側護岸では捨石施工時に大きな変形が生じ、それに伴って砂杭への応力集中も大きくなっているが、以降、圧密の進行とともに減少し、設計値 ( $n = 3$ ) よりも小さい  $n = 2$  程度で一定となっている。応力分担比は、载荷状況、地盤状態、土性等によって変わり、南側護岸では  $n = 3 \sim 4$  と東側護岸に比べやや大きい値となっている。

また、盛土荷重によって粘性土中に発生する過剰間隙水圧の消散状況について実測値と理論値の対比を示したのが図-21, 22である。埋立初期の捨石施工後に実測値が理論値に比べやや遅れ気味の時期もあるが、全般的にはほぼ理論値に近い状態で消散しているようであり、ドレーン効果は十分に発揮され、細粒分の増加が見られたものの、本工事ではドレーン材の透水性に特に問題はないと考えられた。

以上の結果をふまえ、沈下に関する理論値の見直しを行い、それと実測値を比較したのが図-23, 24である。このように、現場においては、計測結果より設計定数を見直し、理論計算の修正を行うとともに、実測沈下からの将来予測結果もふまえながら沈下の管理を行った。

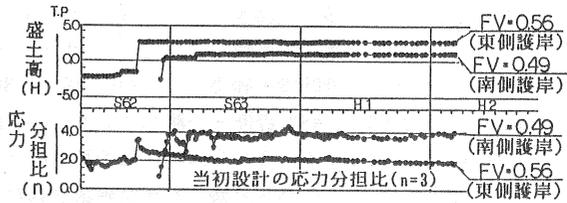


図-20 土圧計による応力分担比

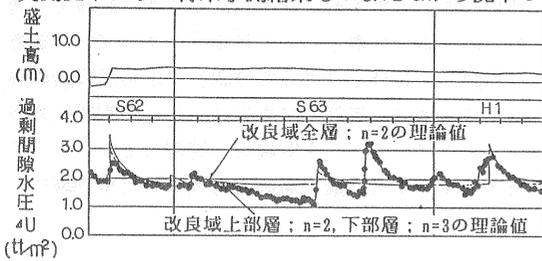


図-21 過剰間隙水圧消散状況 (東側護岸)

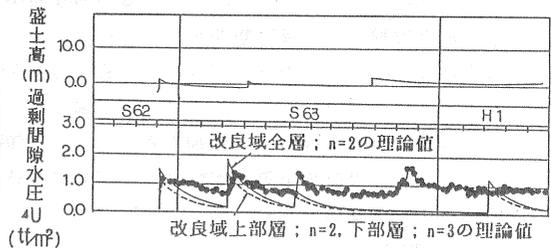


図-22 過剰間隙水圧消散状況 (南側護岸)

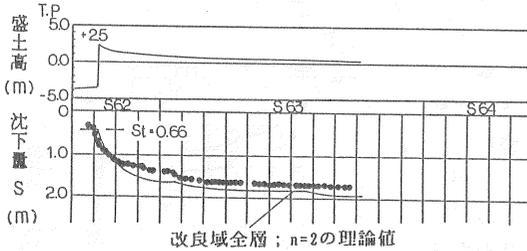


図-23 沈下～時間関係図 (東側護岸)

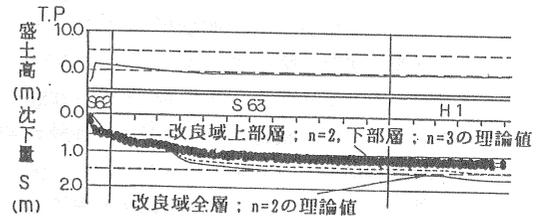


図-24 沈下～時間関係図 (南側護岸)

## 5.2 チェックボーリング結果

一般に、SCP打設直後の杭間粘性土は打設による乱れの影響を受け強度低下を生じる。本工事におけるSCP打設前後の一軸圧縮強度  $q_u$  の分布を図-25に示すが、ばらつきはあるものの全般的に20~30%の一軸圧縮強度  $q_u$  (kgf/cm)

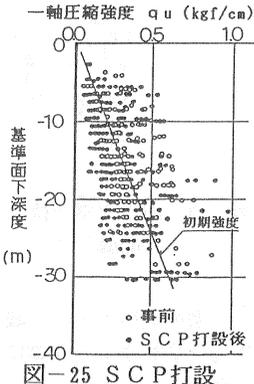


図-25 SCP打設による強度低下

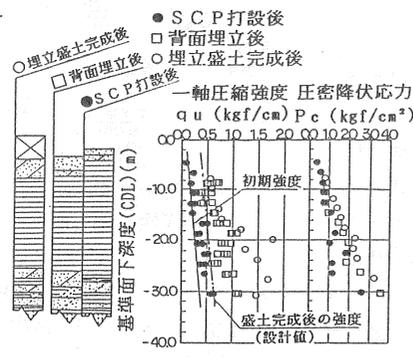


図-26  $q_u, P_c$  の変化 (東側護岸)

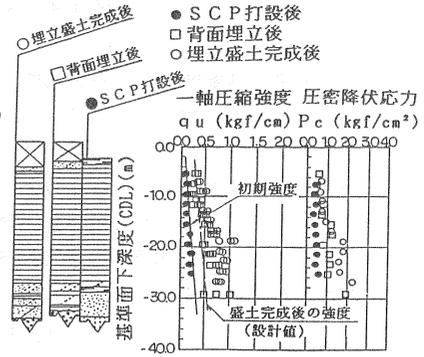


図-27  $q_u, P_c$  の変化 (南側護岸)

強度低下と考えられた。これは、既往の事例とほぼ同程度であり、SCP材の違いによる影響はないようである。

また、盛土荷重による圧密の進行に伴って杭間粘性土の土性が変化していく。それが最も顕著に表れるのが、一軸圧縮強度 $q_u$ 、圧密降伏応力 $P_c$ であり、その結果を示したのが図-26, 27である。このように各盛土施工による載荷重の増大に伴って、粘性土層全体で強度が増加しており、その値もほぼ理論通りであり、山土を用いたSCPの圧密促進効果に問題のなかったことがこの結果からもうかがえる。

## 6. 結論

山土を用いたSCP改良工事の概要と計測管理結果について述べたが、これらをまとめると次のようになる。

- (1) 山土を用いる場合、SCPとして具備すべきせん断強度と透水性を確保するためには事前の材料試験は不可欠であり、その結果より管理基準を満足させるためには細粒分含有率と相対密度で管理すればよいことがわかった。
- (2) 打設後の調査結果によれば、砂杭の上端部の一部でN値と相対密度が低くなっているが、全体としてはN値が10回程程度で相対密度も基準範囲内にあり、目標とするSCPの造成はできたと考えられる。
- (3) 盛土施工の初期段階に、上端部において大きな変形がみられた。この変形は、安定管理基準値内にあり、特に対策は必要としなかったが、大半は非排水せん断変形によるものと推定され、砂杭の強度が小さいことも一因と考えられた。すなわち、拘束圧の小さい部分でのSCPの締固めには限界があり、強度が小さい部分が生じることは避けられないが、盛土施工においては動態観測を併用し、慎重な施工を行うことによって対処可能と考えられる。
- (4) 砂杭の応力分担比は $n = 2 \sim 4$ と計測され、海砂と同程度の応力集中が期待できる。
- (5) 本工事では、計測管理、チェックボーリングの結果よりSCPの圧密促進効果は十分に発揮されたことが確認され、山土もドレーン材として十分に適用可能と考えられた。ただし、細粒分含有率は打設後には粒子破碎の影響により増加の傾向がうかがえ、本工事では透水性あるいはせん断強度への影響はみられなかったものの、長期的には透水性の低下等の問題を生じる可能性がある。すなわち、山土を用いる場合、打設に伴う粒子破碎の影響については事前に十分に留意しておく必要がある。

以上のように、山土は土性のばらつきが大きく、たとえ同一の採土地でも一定の品質の材料を多量に搬出することが難しいといった欠点はあるものの、材料試験と施工管理を十分に行うことによって、海砂に代わるSCP材として使用することは十分に可能と考えられる。今後は、SCP材として山土を用いるケースも増加すると考えられ、それらのデータをさらに蓄積していけば、SCP材としての山土の管理基準等がより明らかにできるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 土質工学会編(1988)；軟弱地盤対策工法 ——調査・設計から施工まで——
- 2) 土質工学会編(1979)；風化花崗岩とまき土の工学的性質とその応用
- 3) Gibbs, H. J. & W. G. Holtz; Research on Determining the Density of Sand by Spoon Penetration Test, Proc. 4th I. C. S. M. F. E., Vol. I, pp. 35~39, 1957.
- 4) 堀内孝英, 川村国夫(1977)；信頼性設計のための土質の統計的性質, 土と基礎, Vol. 25, No. 11, P11~18
- 5) 塩見光男, 河本憲二；SCP打設に伴う盛上り土の予測, 第21回土質工学研究発表会