

# 静的締固め杭（SDP工法）工法の開発

佐藤道祐

東洋建設株式会社 技術開発部（〒101-8463 東京都千代田区神田錦町 3-7-1）

SDP工法は貫入装置に連結された外管ケーシングと油圧シリンダーに連結した内管ケーシングの二重管ケーシングで構成されており、外管ケーシングの回転により地中に貫入を行い、内管ケーシングの上下運動及び管内圧気により強制的に補給材（セメント系固化材を添加した建設発生土）を押し出し、密度増大及び有効応力増大を図ることによりパイル及び周辺地盤を締固める工法である。静的な締固めにより振動が低減され、建設発生土の有効利用によりリサイクルを促進し、周辺環境に配慮した地盤改良工法である。

**キーワード：**静的締固め、液状化対策、リサイクル、二重管ケーシング、建設発生土

## 1. はじめに

液状化対策工法として、最も多く実施されているのは、締固め工法である。締固め工法の多くは衝撃あるいは振動等の動的荷重を用いるので施工中の騒音振動が大きく、市街地や既設構造物近傍での適用が難しく、環境条件に左右されないところでの採用率が90%に対し、市街地では約10%と極端に小さくなっている。（図-1参照）

締固め工法は液状化対策工法として最も有用性が認められた工法であり、騒音および振動の発生しない締固め工法の開発は重要な課題といえる。

また、建設工事に伴い発生する建設発生土の有効利用は社会の大きな要請であり、平成5年度の調査によると、排出量4.37億 $m^3$ のうち、3.24億 $m^3$ は最終処分され有効に利用されておらず、さらに多くの建設発生土の利用が望まれている。（図-2参照）

以上のような2つの背景から、騒音・振動防止のため、締固めを動的ではなく静的に行い、建設発生土の有効利用のため補給材として建設発生土を用いる新しい液状化対策工法として静的締固め杭工法（SDP工法）が開発された。

本報告はSDP工法を現場導入し有効性を確認したものである。

なお、SDP工法は独立行政法人港湾空港技術研究所と東洋建設(株)、国土総合建設(株)、井森工業(株)家島建設(株)の民間4社が共同研究により開発した工法である。

SDP工法：S tatic D ensification P ile Method

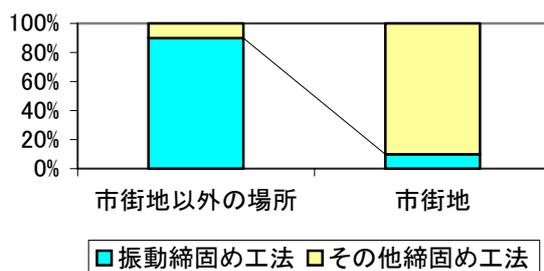


図-1 締固め工法の採用状況

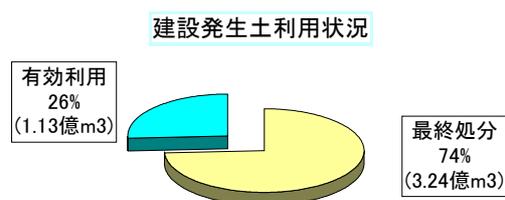


図-2 建設発生土の利用状況

## 2. SDP工法の概要

### (1) SDP工法の位置づけ

SDP工法は造成杭の拡径効果による密度増大有効応力の増大を原理とする密度増大工法に属する静的締固め杭工法である。SDP工法は液状化対策工法では図-3に示す位置に分類される工法である。細粒分の少ない緩い飽和砂地盤の液状化対策工において最も多くの施工実績を有しているのは、補給材

として砂を使用し、振動によって地盤を締固めるサンドコンパクションパイル工法（SCP工法）である。SDP工法は、建設発生土の有効活用を鑑み補給材に建設発生土を使用し施工時の低振動、低騒音を実現した静的締固め工法である。

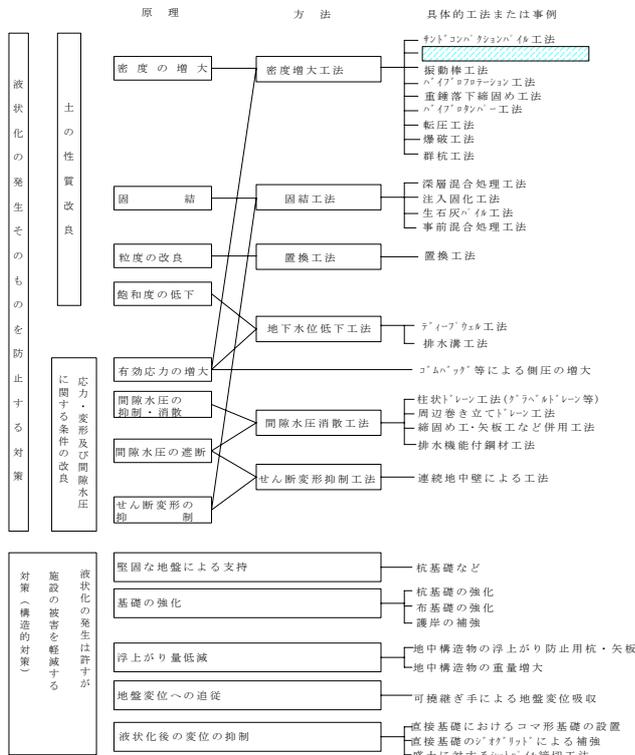


図-3 液状化対策工法分類

(2) SDP工法の機能と特徴

本工法の概要を図-4に示す。

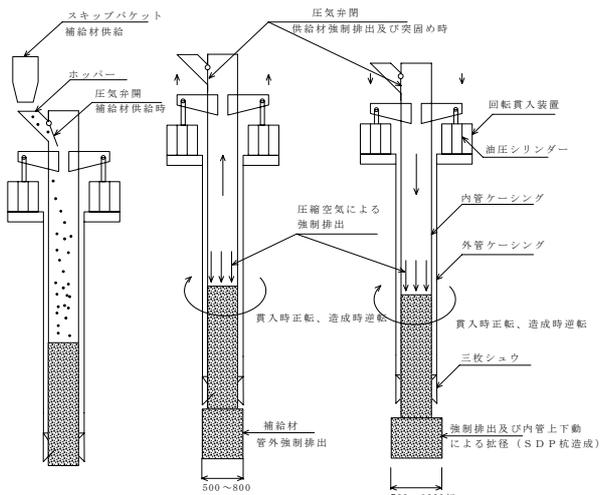


図-4 SDP工法概要

貫入及び孔壁保護用の外管ケーシングと外部から補給材を供給し、圧気して土中に排出し上下動により拡張突固めを行う内管ケーシングの二重管構造を

有しており、施工時の二重管の動作及び役割は以下の通りである。

【外管ケーシングの動作及び役割】

- ・回転貫入装置と連結、正転貫入を行う。
- ・杭造成時には、逆転引抜きを行う。

【内管ケーシングの動作及び役割】

- ・油圧シリンダーと連結、上下運動を行う。
- ・外管ケーシング先端の三枚シュウを押広げる。
- ・杭造成時に上下運動を行いながら、管内圧気により造成杭を拡張しながら突固める。
- ・施工完了後、外管内に収納（写真-1、2参照）二重管の一連の動作により、土中内には固化処理された建設発生土により突固め拡張された均一な締固め杭（φ700~1000）が構築される。拡張杭の構築により、地盤の密度を高め、地震時の液状化に対する強度を向上することができる。本工法の有する特徴は以下の通りである。

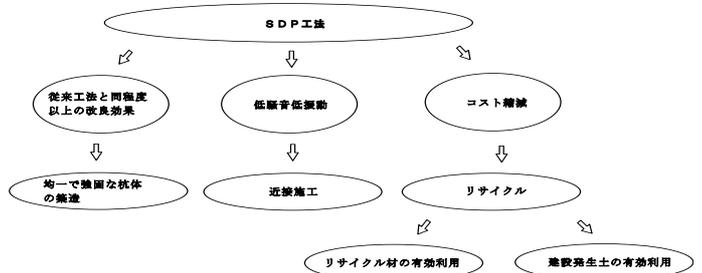


図-5 SDP工法の特徴

- ①高品質の杭造成が可能である。  
二重管方式により均一な杭径を造成し、強固な杭の造成が可能である。
- ②高い改良効果の実現  
SCP工法と同等の改良効果を有する。
- ③低振動低騒音の施工  
回転貫入・油圧による突固めにより振動騒音を抑制できる。
- ④コスト低減  
補給材料にリサイクルを目的とした建設発生土を利用し、処理費を軽減し工費の節約ができる。
- ⑤広範囲の補給材が使用可能  
固化処理（セメント系固化材と混合攪拌）した建設発生土及び砂、グラベル系材料、リサイクル材も使用できるため、用途・目的に応じた補給材の選択が可能である。



写真-1 貫入開始



写真-2 貫入完了

### (3) SDP工法の設備構成

SDP工法の主要な機械装備を表-1にSDP施工機械の全景を写真-3に示す。

表-1 主要な機械装備

機械設備名称	仕様・規格	用途
SDP打設機	リーダ式 40t 吊 丸リーダー 30m	ベースマシン
回転貫入装置	アースオーガ 75KW×2 ケーシング上下装置連結	貫入用
ケーシング上下装置	油圧シリンダ 30t×2 ストローク 1m	突固め用
発動発電機	450KVA	オーガ用動力
	75KVA	ポンプ他動力
空気圧縮機	19m <sup>3</sup> /min	管内圧気
空気槽	7kg/cm <sup>3</sup> ・3m <sup>3</sup>	圧気空気貯留
トラクターショベル	ホイール式 1.2m <sup>3</sup>	補給材投入
多段式ポンプ	φ100mm 22KW	洗浄用
水槽	5m <sup>3</sup>	水貯留
水中ポンプ	φ50mm 5m 0.4KW	洗浄用
外管ケーシング	鋼管 φ609.6~800	貫入用
先端3枚シュウ	外管ケーシング先端部 蝶番付き	貫入補助 流入防止
内管ケーシング	鋼管 φ508~600 ホッパー空気弁付	突固め用
セメントサイロ	30t	固化材貯留
攪拌システム	強制2軸パドル式 計量装置付	補給材製造
バックホウ	平積み 0.6m <sup>3</sup>	発生土投入
施工管理計	4ペン式	施工管理
	深度・砂面他	



写真-3 SDP施工機全景

### (4) 施工方法

SDP工法の施工手順を図-5に示す。

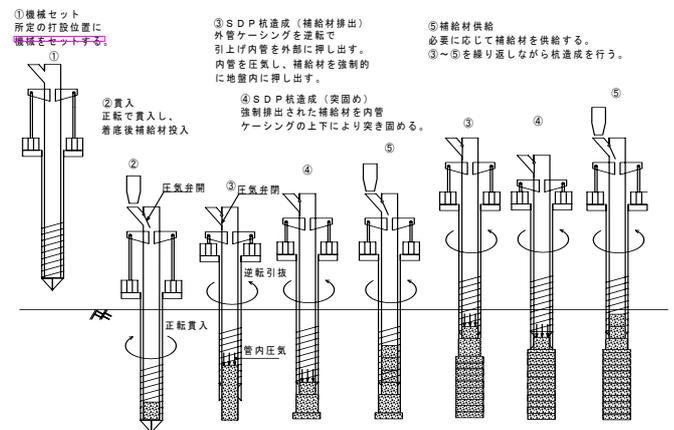


図-5 SDP工法施工フロー

#### ①機械本体の据付、ケーシングセット

敷鉄板を敷設し、打設位置に機械本体を据付け目釘の位置にケーシングをセットする。

#### ②外管ケーシング貫入、補給材の投入

外管ケーシングを正転貫入し、底着後、改良材を内管ケーシング内にバケット・ホッパーを通して投入する。空気弁を閉じて内管ケーシング内を圧気する。

#### ③内管押し出し（補給材排出）

回転貫入装置を逆転で作動させ、外ケーシングを引抜きながら内管を押し出し、三枚シュウの先端

部を押し開く。

④内管突固め

管内圧気のまま、内管ケーシングの上下動により補給材の締固め、拡張を行う。外管は一定速度で引上げ、内管は引上げ打ち戻しを行う。

⑤補給材供給

必要に応じて補給材を補給する。

⑥造成完了

③～⑤を繰り返し、所定深度まで造成を行い、SDP装置を引き上げる。

施工に際して、建設発生土とセメント系固化材を攪拌混合し、打設開始までにSDP杭の補給材の用意を行う。

(5)補給材

補給材は、建設発生土を固化処理したものと及び従来使用している砂やグラベル系の材料を利用することができる。建設発生土は、建設省令砂質土系第1種～第2種発生土(実績有り)、粘性土系の第3種発生土(実験室レベル)が対象となる。固化処理に必要なセメント系固化材の添加量は第1種～第2種発生土で70kg/m<sup>3</sup>、第3種発生土で90kg/m<sup>3</sup>である。

表-2 建設省令建設発生土土質区分基準

区分 (建設省令)	土質区分	コーン 指数 *0 kN/m <sup>3</sup>	日本統一土質分類		備考*0	
			中分類	土質	含水比 (地山) wn(%)	掘削方法
第1種建設発生土 (砂、礫及びこれ らに準ずるもの)	第1種発生土	—	{G} {S}	礫 砂	—	・排水に考慮する が、降水、浸出地 下水等により含 水比が増加する と予想される場 合は、建設省令 1ランク下の区 分とする。  ・水中掘削等による 場合は、建設省令 の2ランク下の 区分とする。
	第1種改良土	—	(改良土)*0		—	
第2種建設発生土 (砂質土、礫質土 及びこれらに準 ずるもの)	第2a種発生土	800	{GF}	礫質土	—	
	第2b種発生土	{8kg/cm <sup>3</sup>	{SF}	砂質土(Fc=15~25%)	—	
	第2c種発生土	以上	{SF}	砂質土(Fc=25~50%)	30%程度以下	
第3種建設発生土 (通常の施工性が 確保される粘性 土及びこれに準 ずるもの)	第3a種発生土	400	{SF}	砂質土(Fc=25~50%)	30~50%程度	
	第3b種発生土	{4kg/cm <sup>3</sup>	{M},{C}	シルト、粘性土	40%程度以下	
	第3種改良土	以上	{V}	火山灰質粘性土	—	
第4種建設発生土 (粘性土及びこれ に準ずるもの (第3種発生土 を除く))	第4a種発生土	200	{SF}	砂質土(Fc=25~50%)	—	
	第4b種発生土	{2kg/cm <sup>3</sup>	{M},{C}	シルト、粘性土	40~80%程度	
	第4種改良土	以上	{V}	火山灰質粘性土	—	
(泥土)*0 液状土のうち おおむねqc200 kN/m <sup>2</sup> (2kg/cm <sup>2</sup> ) 以下のもの及び 建設泥土	泥土a	—	{SF}	砂質土(Fc=25~50%)	—	
	泥土b	200	{M},{C}	シルト、粘性土	80%程度以上	
	泥土c	{2kg/cm <sup>2</sup>	{V}	火山灰質粘性土	—	
			{O}	有機質土	80%程度以上	
			{P}	高有機質土	—	



写真-4 補給材製造状況

3. SDP工法の効果

(1)調査概要

実工事で確認されたSDP工法の効果について述べる。

本報告は、平成11年度新技術活用パイロット事業として、運輸省第二港湾建設局発注の横浜港金沢地区岸壁地盤改良試験工事及び地盤改良工事として施工された実績に基づくものである。

- a. 場所 横浜港金沢地区岸壁
- b. 時期 平成11年9月～平成12年3月
- c. 実験方法

岸壁背面部の液状化防止対策として、SDP工法の施工に先立ち、従来工法と比較を行うために、改良率を同じにして、従来工法のSCP工法とSDP工法で施工し、同一地盤における両工法の施工性改良効果・経済性について比較検討を行った。

(2)調査結果

a)杭径

試験工事において測定したSCP杭と今回工事によるSDP杭の改良杭の杭径を下表に示す。表-2に示すとおりSDP、SCPとも所定の杭径を確保していることがわかる。

表-3 杭径

種別	設計値 (mm)		計測値 (mm)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
SDP	1000	1000	1000	1040
	1000	1000	1010	1030
	1000	1000	1000	1040
SCP	700	700	700	700

b)改良効果

今回工事のSDP杭の杭間N値は15～27を示し、改良地盤全体に締固め効果が見られ、今回工事の目標N値(杭間にて平均19,最低15)を満足している。また、試験工事における動的締固め工法と比較すると杭間N値が11～36であることから、動的締固め工法とほぼ同等の改良効果が得られていると評価できる。

区分	SDP	SCP
改良前N値	1～12	1～30
改良後N値	NO. 1	15～27
	NO. 13	15～27

■ SDPおよびSCPの杭間N値

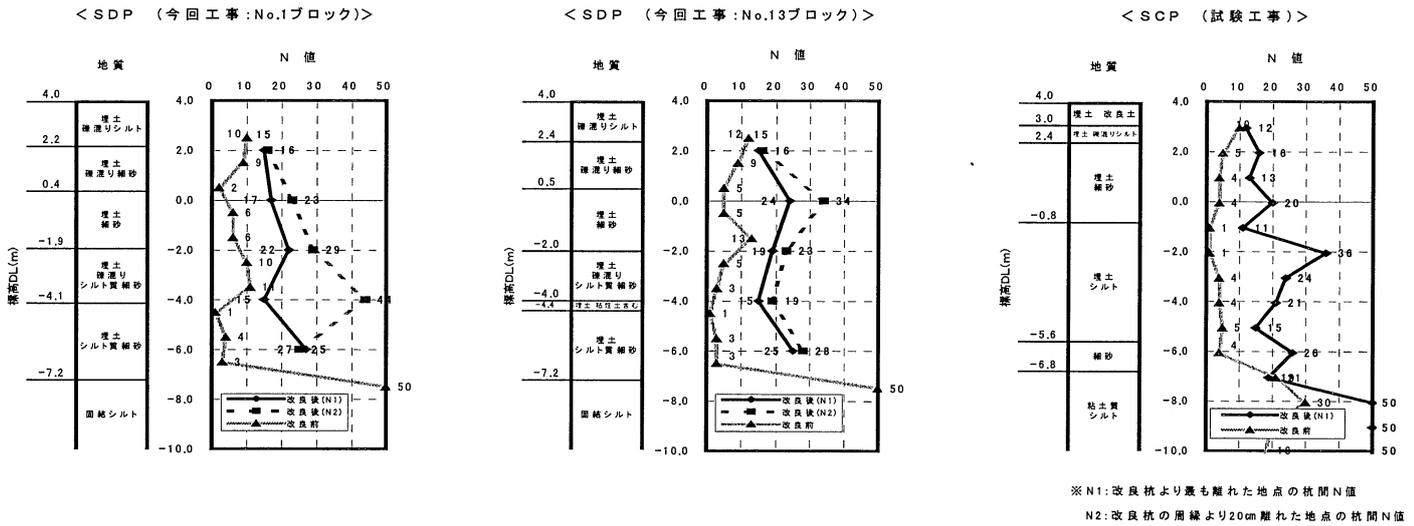


図-6 改良効果

c) 施工能力

下表は杭長 11.3m (改良長 9.5m、ドレイン部 1.8m) 地盤のN値=6程度で杭の造成径はφ1000mmの内貫入速度が上位 60%における施工実績である。

(分)

施工時間	準備	貫入	造成	その他	合計
平均値	6.7	17.9	25.6	2.7	52.9

従来工法のSCP工法の場合

施工時間は  $30 \times 0.9$  (液状化対策) = 27m/時 (平成10年度積算基準参照 尚, 平成11年度より市場単価に移行) 1本当たりの施工時間 =  $11.3 / 27 \times 60 = 25.1$ 分となる。

改良率 20% の場合のピッチ比率がSDP工法: SCP工法 = 2.0m: 1.4m であり, 1㎡当たりの施工時間を計算すると以下の様になる。

SCP工法  $25.1 \text{分} / (1.4 \times 1.4) = 12.8 \text{分}/\text{㎡}$   
 SDP工法  $52.9 \text{分} / (2.0 \times 2.0) = 13.2 \text{分}/\text{㎡}$

SCP工法とほぼ同程度の施工能力となる。

d) 振動・騒音

試験工事におけるSDP工法及びSCP工法の振動・騒音の計測結果を下表に示す。

		SDP工法	SCP工法
振動	10m 離れ	61dB	90dB
	20m 離れ	60dB	85dB
	30m 離れ	55dB	78dB
騒音 20m 離れ	造成時	85dB	80~85dB
	排気時	96dB	98dB

表に示すとおり、振動についてはSDP工法がS

CP工法に比して小さいが、騒音についてはSCP工法と同程度の結果となった。

すなわち、SDP工法はケーシングの貫入及び改良杭の造成を静的に行なえることから振動を低減できるが、改良杭の造成においては、SCP工法と同様にケーシング内に圧気・排気を必要とすることから騒音はSCP同程度のものとなったと考えられる。

e) 周辺への影響

SDP工法及びSCP工法の改良杭造成による既存構造物の変位及び地中の側方変位の計測結果を下表に示す。

	SDP工法	SCP工法
既存構造物の変位	2mm (改良杭側へ)	4mm (改良杭側へ)
地中変位	22mm (海側へ)	40mm (海側へ)

既設構造物の変位:改良杭より 30m 離れた地点の既設岸壁法線の最大変位  
 地中変位:改良杭より 3m 離れた地点に設置した地中変位計の最大値

既存構造物の変位は、SDP工法もSCP工法もどちらも小さい。

地中変位の最大変位量はSDP工法がSCP工法より小さいことがわかる。

f) 経済比較

今回の作業能力を基に、従来工法 (SCP工法) との比較を行う。

【検討条件】

SDP施工能力 今回実績  
 改良率 20% 造成径 φ1000  
 施工ピッチ □@2.0m

材料費として計上する費用

建設発生土攪拌混合費と建設発生土処分費の差額

SCP工法 市場単価

改良率 20% 造成径 φ700 施工ピッチ □@1.4m

#### 【検討結果】

上述した条件で1㎡当たりの施工単価を比較すると以下ようになる。

SCP工法：SDP工法=1.0：0.93

建設発生土を利用すると施工費も従来工法と同程度もしくは安価となる。

#### g) まとめ

調査結果より以下のことが確認できた。

- a 杭の出来形は所定径を満足している。
- b 改良効果は従来工法と同程度である。
- c 施工能力も従来工法と同程度である。
- d 周辺環境に対する振動は従来工法より小さい。
- e 地中変位は従来工法より小さい。
- f 経済性は処理費を考慮すると安価になる。

## 4. SDP工法の今後の課題と対策

実工事における今後の課題について記載する。

### (1) 作業効率の向上

埋立地地盤では、土質が均一でなく、液状化層の中間に粘性土層や障害物が各所に点在しており、作業効率の低下（貫入時間及び打設機の負荷増加）の原因となった。粘性土層や障害物に対して効率を向上させるためには以下の対策が考えられる。

#### ① 先行削孔の実施

造成径より200mm程度小さいアースオーガーにより先行削孔を行い、削孔後、即座に貫入を行う。

#### ② 貫入力の増強

機械反力を増強し（ウェートの設置等）、貫入力を増強する。

#### ③ 貫入抵抗の低減

造成径の大きさを小さくし、貫入抵抗を小さくすることで打設機への負荷を軽減し、作業効率の向上を図る。

### (2) 騒音の低減

SDP施工時に発生する騒音の音源は、補給材供給時の排気音及び造成時の砂面計測孔からのエアの抜ける音である。排気口の設置位置の変更及び消音器の設置、計測孔の消音措置により、施工時の

騒音の低減を図る。

### (3) 建設発生土の適用範囲の拡大

発生土の適用土質条件を拡大し、適用範囲の拡大を図るために改良材の選定及び製造方法の検討を行う。

### (4) 打設に伴う盛上り土砂の対応

施工時に現地盤から盛上り土砂が発生する。貫入促進を図るために外管ケーシングに幅5cmのスパイラルを取付けた。スパイラルは木ねじと同様の作用で貫入時に排土を行いながら、ケーシングを土中に貫入していくため、ケーシング周辺には盛上り土が発生する。

盛上り土は外部から搬入している建設発生土と再攪拌のうえ補給材として再利用している。盛上り土砂の発生を抑えることによりさらなる建設発生土の利用促進が図れる。

### (5) 建設発生土の利用展開

本工法の特長である建設発生土の有効利用について、今回は発生場所及び時期が本工法の施工時期と一致しており、有効に利用することができたが、発生時期と場所が適切でなければ、本工法を有効に活用することができないことになる。

そのため、建設発生土の発生時期及び場所を事前に情報収集し、利用者側が発生土を有効に利用できる体制作りが必要となると考えられる。

## 5. おわりに

施工時の振動騒音を低減し、建設発生土を有効利用できるSDP工法は従来工法と同程度の改良効果を期待でき、建設発生土を利用できれば経済的な優位性があることを確認することができた。

今後は、施工効率の向上を図り、コスト縮減を目指すと共に、建設発生土の使用範囲の拡大を図るためにシステムの改良改善を行い、社会のニーズに応じていきたい。

### 参考文献

- 1) 山崎浩之;高橋邦夫;善功企;田居繁;中里高密. 建設発生土を活用した静的締固め杭工法に関する現地試験. 港湾技術研究資料. NO. 8871997. 12
- 2) 東洋建設 平成 11 年度新技術パイロット事業SDP工法(静的締固め杭工法)実施報告書、2000. 3