

# ソイルセメント本設杭工法の構造性能に関する研究 - 鉛直載荷試験概要および結果 -

竹内 博幸\* 松瀬 陽一郎\*\*  
灌口 雅巳\*\*\*

## 要 旨

ソイルセメント本設杭工法(Permanent Soil Cement Mixing Pile:略称 = P S P)工法は、山留め壁として構築されたソイルセメント柱列壁の一部を支持層まで延長し、本設の支持杭として用いる工法である。

本報は、載荷試験に用いる試験杭の構築方法およびその施工性の検証について述べるとともに、主に P S P 杭の支持力を確認する目的で実施した鉛直載荷試験結果について述べる。

試験杭の先端部は、支持杭の場合はN値 60 の砂礫または細砂、摩擦杭の場合はシルト(一部砂質)とし、単杭と壁杭について載荷試験を行った。

その結果、本工法による杭先端部の沈下特性は、場所打ちコンクリート杭と同様な進行性破壊状況を示し、杭先端の許容支持力は地盤改良指針と同様の式で設計が可能であることを確認した。

なお、本研究は、14 社共研「ソイルセメント本設杭工法研究会」による研究成果の一部で、日本建築総合試験所の建築技術性能評価を取得している。

## 1. はじめに

通常は仮設利用されている山留め壁を本体利用することにより、基礎構造の合理化、環境負荷の低減を図ることが可能となる。

本研究では、山留め壁として構築されたソイルセメント柱列壁の一部を支持層まで延長し、本設の支持杭あるいは摩擦杭として用いる工法として、ソイルセメント本設杭工法(P S P 工法)を開発した<sup>1)</sup>。

本報では、同工法で構築した単杭および壁杭の施工性を検証する<sup>2)</sup>とともに、同工法により構築された単杭および壁杭(3連杭)の構造性能を実証するために実施した鉛直載荷試験の概要とその試験結果について述べる。

## 2. 試験体概要

### 2.1 試験場所および地盤

試験は、茨城県猿島郡における2現場[試験場3:猿島町(図-1)、試験場2:境町(図-2)]にて行った。杭先端部は、支持杭(No.1、3、4)ではN値 60 の砂礫または細砂とし、摩擦杭(No.2、5、6)ではシルト(一部砂質)とし、単杭と3連杭について鉛直載荷試験を行った。

### 2.2 試験杭

試験体の諸元は、表-1に示す通りであるが、基本的な施工条件は同一とし、一般部ではソイルセメントの目標強度を1N/mm<sup>2</sup>とし、先端部では5N/mm<sup>2</sup>として築造したが、試験場2で事前に試験施工した杭からコア採取した試料の一軸圧縮強

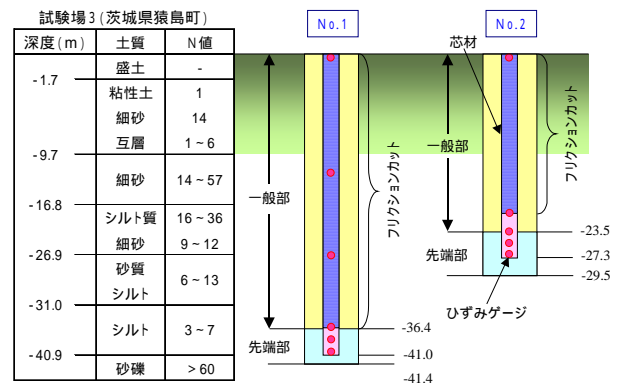


図 - 1 試験地盤および試験杭の概要(試験場3)

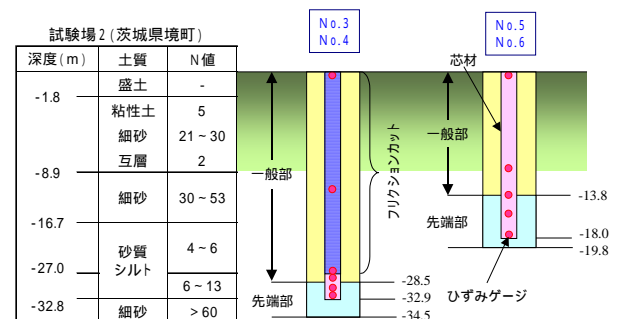


図 - 2 試験地盤および試験杭の概要(試験場2)

\*建築エンジニアリング\*\*大阪支店\*\*\*中国支店

表 - 1 試験体一覧

試験	断面形状	削孔長(m) [先端部]	杭長(m) [先端貫入長]	芯材寸法	頭付スタッド ( )は呼び長さ: mm	フリクション カット	計画最大 荷重(kN)	場 所	先端 地盤
No.1	900×3 連杭	41.4 [5.0]	41.05 [4.65]	H-428×407×20×35	48 × 19(150)@150W	パイル ロック 塗布	24,500	3	砂礫
No.2	900×3 連杭	29.5 [6.0]	27.3 [3.8]	H-582×300×12×17	20 × 13(100)@200W		12,800		シルト
No.3	650×単杭	34.5 [6.0]	32.9 [3.4]	BH-300×300×22×32	48 × 16(100)@150W		6,720		細砂
No.4	650×3 連杭	34.5 [6.0]	32.9 [4.4]	BH-300×300×12×25	48 × 16(100)@150W		14,100		細砂
No.5	650×単杭	19.8 [6.0]	18.0 [4.2]	H-400×400×13×21	20 × 13(100)@200W	なし	6,600	2	砂質シルト
No.6	650×3 連杭	19.8 [6.0]	18.0 [4.2]	H-390×300×10×16	20 × 13(100)@200W		10,300		砂質シルト
No.5' (引抜き)	650×単杭	19.8 [6.0]	18.0 [4.2]	H-400×400×13×21	20 × 13(100)@200W		3,000		-

度の平均値は、5.2N/mm<sup>2</sup>、18.4N/mm<sup>2</sup>であった。図 - 1、2で示すように、試験杭No.1～4では、杭先端到達荷重を確保するために、芯材であるH鋼表面の所定範囲に水分吸収・膨潤タイプのフリクションカット剤を塗布し、H鋼とソイルセメント間の摩擦力を低減した。なお、芯材先端部には荷重伝達のためのシアコネクタとしてウェブに頭付スタッドを配置している。また、載荷による杭の中間・先端での到達荷重と沈下量を測定するために、ひずみゲージと沈下計を取り付けた。

### 2.3 試験杭の施工

削孔・攪拌・セメントミルク注入は、山留め壁施工に用いるベースマシン(DH-608-120M)、アースオーガ(MAC200)を使用して行った。また、注入液の作製は、プラントSHP-30Aを2基設置して行った。杭の施工サイクル例を図-3に示す。削孔長が概ね20mを超える場合は、削孔途中に1回オーガロッド継ぎ足しを行い、所定位置までの削孔を行った。オーガロッド継ぎ足し時には注入液圧送も停止するため、当該深度付近でのオーガ先端が閉塞しないように上下3mの範囲を包含するようにターニングを行い、その近傍でのソイルセメントが所要時間中に流動性を保持するようにした。また、先端部は5mないし6mとし、芯材挿入を容易にするために、先端部以浅を含めて1度ターニングを行う施工サイクルを標準とした。また、最深の削孔底部については3分間同一レベルにて攪拌を行い、その後アースオーガを引き上げた。なお、一般部におけるターニングは、試験場2、3ともにGL-15m近傍が細砂層であったため、その層の上下を含めて粘性の高いソイルセメントが形成されることを意図して行った。施工サイクルにおける施工深度の設定は、単杭の場合はオーガ先端位置とし、3連杭の場合は、中央のオーガ先端位置を削孔深さの基準とした。

### 2.4 試験方法

載荷方式は、地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」<sup>3)</sup>に準拠し、各試験杭の最大荷重に対して9～12段階、5サイクルで載荷した。載荷装置の1例を図-4に、またその載荷サイクルを表-2に、載荷状況を写真-1にそれぞれ示す。なお、反力杭にはセメントミルクで根固めしたH鋼を用いた。

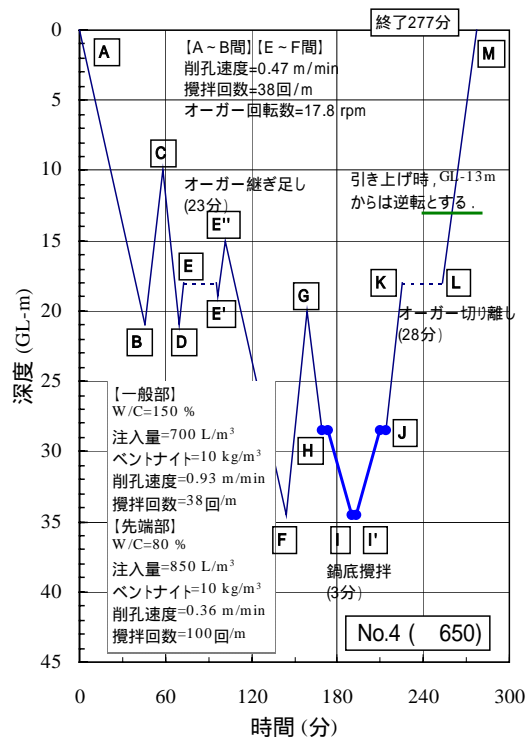


図 - 3 施工サイクル(No.4)

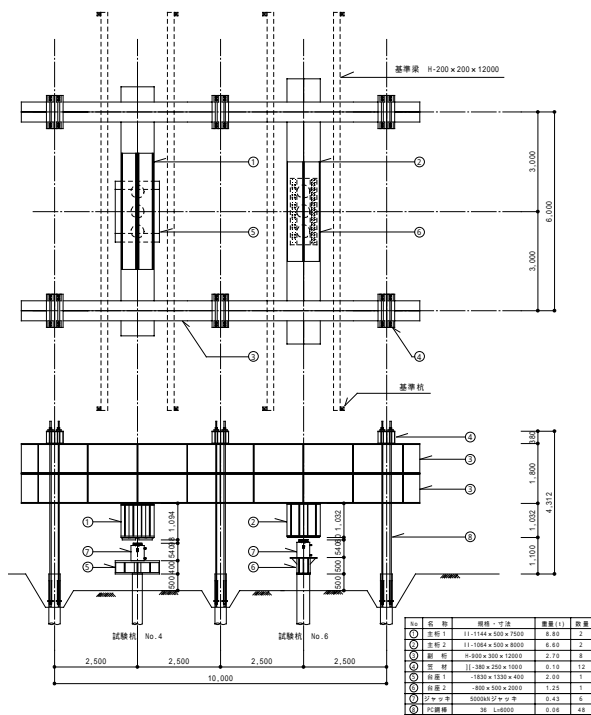


図 - 4 載荷試験装置(No.4,6)

表 - 2 載荷サイクル(No.4)

サイクル	荷重段階 (kN)
1	0 - 1230 - 2460 - 1230 - 0
2	0 - 2460 - 3690 - 4920 - 3690 - 2460 - 0
3	0 - 2460 - 4920 - 6150 - 8610 - 6150 - 4920 - 2460 - 0
4	0 - 2460 - 4920 - 8610 - 11070 - 13530 - 14100 - 13530 - 11070 - 8610 - 4920 - 2460 - 0

■ は処女荷重を示す。



写真 - 1 載荷試験状況(No.6)

### 3. 先端支持力の検討

#### 3.1 軸方向力の算定

軸方向力は次の式により算出した。

$$P_i = i \cdot (E_{si} \cdot A_{si} + E_{ci} \cdot A_{ci})$$

ここで、 $P_i$ :  $i$ 断面の軸方向力

$i$ :  $i$ 断面のひずみ度

$E_{si}$ : 芯材のヤング係数 =  $2.05 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>)

$A_{si}$ :  $i$ 断面の芯材断面積 (mm<sup>2</sup>)

$E_{ci}$ :  $i$ 断面のソイルセメントの変形係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$A_{ci}$ :  $i$ 断面のソイルセメントの有効断面積 (mm<sup>2</sup>)

計算に用いた杭体の所定数を表 - 3、4に示す。杭自重評価のためのソイルセメントの比重は、試験場 2 での試験施工で構築した試験体によるコア試料の試験結果（一般部平均：1.63、先端部平均：1.85）から求めた。また、頭付スタッドの支圧強度 $q_s$ 、および芯材とソイルセメントの付着強度 $s$ は、設計基準強度および同コア試料による実圧縮強度 $B$ （一般部平均：5.24 N/mm<sup>2</sup>、先端部平均：18.40 N/mm<sup>2</sup>）から実験式により求めた値の両方について求めた。同じくソイルセメントの変形係数 $E_{50}$ は、図 - 5に示すように、コア試料による試験結果から深さによる影響を考慮して設定した。

表 - 3 試験体の諸定数

試験体 No.	断面番号	断面位置 (GL-m)	芯材 (H形鋼)		ソイルセメント		
			断面積 $A_n$ (cm <sup>2</sup> )	芯材周長 $u$ (cm)	有効断面積 $A_s$ (cm <sup>2</sup> )	周長 (cm)	$E_{50}$ (N/mm <sup>2</sup> )
No. 1		36.95	1,082	733	16,945	573	1,500
		38.95					3,000
		40.95					4,000
No. 2		18.70	524	702	16,945	573	1,500
		23.20					3,000
		25.20					3,000
		27.20					3,000
No. 3		27.00	244	176	3,318	204	1,500
		28.80					3,000
		30.80					3,000
		32.80					3,000
No. 4		27.00	540	533	8,660	403	1,500
		28.80					3,000
		30.80					3,000
		32.80					3,000
No. 5		8.90	219	237	3,318	204	1,500
		13.90					3,000
		15.90					3,000
		17.90					3,000
No. 6		8.90	408	588	8,660	403	1,500
		13.90					3,000
		15.90					3,000
		17.90					3,000

得られた軸方向力分布の1例を図-6に示す。フリクションカットによる効果が若干弱く、浅層での軸力の低下が小さいが、支持杭 No.4 では杭頭荷重の増加に伴い杭先端に荷重が到達していることが分かる。

### 3.1 荷重 - 沈下関係

荷重 - 沈下量曲線の1例を図-7に示す。支持杭である No.4 の曲線は、最大荷重に到るまで滑らかな曲線を示しているが、杭先端部が進行性破壊性状を示している。一方、支持層に貫入していない No.5 の曲線は摩擦抵抗に依存しているために弾性的な挙動を示している。

表-4 支圧強度 ( $q_s$ ) および付着強度 ( $s$ )

	$q_s (\times 10^3 \text{ N/mm}^2)$		$s (\text{ N/mm}^2)$	
	設計基準強度から	試験体 No.i から	設計基準強度から	試験体 No.i から
一般部	1.07 (1.0)	5.60 (5.24)	0.10 (1.0)	0.25 (5.24)
先端部	5.34 (5.0)	19.7 (18.4)	0.25 (5.0)	0.52 (18.4)

( )内: 設計基準強度 目標強度  
試験体 No.i 実測値

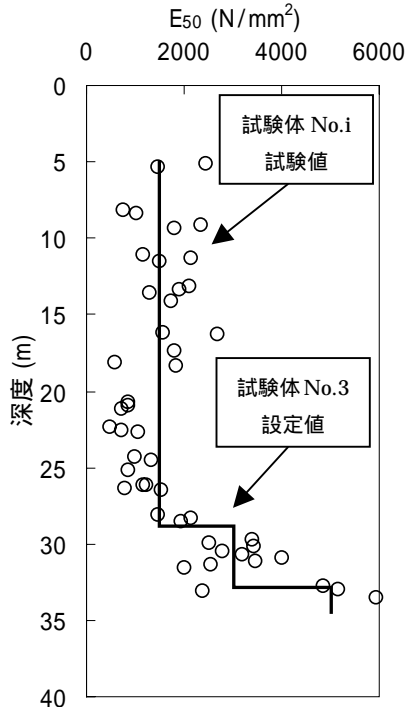
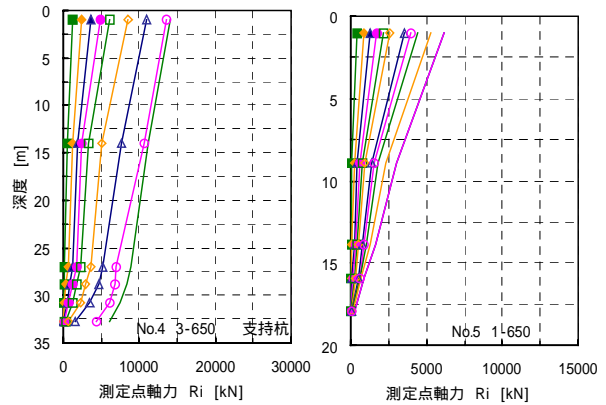
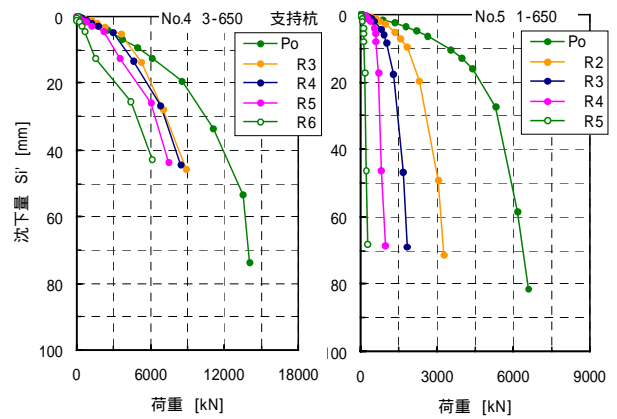


図-5 ソイルセメントの変形係数分布(試験体 No.i)



試験体 No.4 試験体 No.5

図-6 軸方向力分布図



試験体 No.4 試験体 No.5

図-7 荷重 - 沈下量曲線

### 3.2 杭先端の降伏荷重、極限荷重および長期許容支持力

降伏荷重の判定は、杭頭、杭先端について  $\log P \sim \log S$  法、 $S \sim \log t$  法、 $S / \log t \sim P$  法の3方法にて行った。また、一部試験体では、載荷試験装置の能力から極限状態を十分に確認できないものがあつたため、これらについては宇都らの方法にて第2限界荷重を推定した<sup>4)</sup>。図-8、9にその結果の1例を示す。また、表-5には、基準支持力も含めて杭先端荷重結果一覧を示す。

すべての杭先端荷重結果から、降伏荷重の 1/2 または極限荷重の 1/3 から求めた長期許容支持力度の値は、

$$R_p = \cdot N_{ave} \cdot A_s \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

(ここで、 $N_{ave}$ : 杭先端付近のN値、 $A_s$ : ソイル下端面積)

表 - 5 杭先端荷重結果一覧

試験体 No.	先端荷重最大値			降伏荷重			極限荷重		施工径/有効径 10%沈下時*		
	荷重 (kN)	荷重度 (kN/m <sup>2</sup> )	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重度 (kN/m <sup>2</sup> )	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重度 (kN/m <sup>2</sup> )	変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重度 (kN/m <sup>2</sup> )
No.1	4,962	2,928	10.5	10,385	6,129	35.0	16,429	9,696	90	15,173	8,978
									147	16,182	9,550
No.2	2,279	1,345	21.1	1,859	1,097	12.9	2,940	1,735	90	2,937	1,738
									147	2,940	1,735
No.3	2,064	6,220	40.2	1,928	5,810	33.0	3,051	9,194	65	2,626	7,912
No.4	6,164	7,118	54.0	5,391	6,197	35.0	8,529	9,803	65	7,197	8,272
									105	8,106	9,317
No.5	263	793	68.2	171	515	23.0	271	817	65	255	768
No.6	871	1,006	37.8	555	641	8.6	878	1,014	65	878	1,009
									105	878	1,014

\* 上段：施工径 D、下段：有効径 De

における が 150 となった。しかし、基準支持力から算定すると、 は 133~191 の範囲であった(表 - 6)。したがって、砂および砂礫層における先端支持力は、載荷試験を行わない場合でも(財)日本建築センターの「地盤改良指針」<sup>5)</sup>に準拠し、

$$R_p = 75 \cdot N_{ave} \cdot A_s \quad \dots\dots \text{式(2)}$$

で求められることが確認された(図 - 10)。

なお、摩擦杭の試験結果から、粘性土層における杭先端の支持力は

$$R_p = 6 \cdot c \cdot A_s \quad (c: \text{粘性土層粘着力}) \quad \dots\dots \text{式(3)}$$

で求められることが確認された(図 - 11)。

表 - 6 先端支持力の評価式と試験結果の比較

試験杭	$N_{ave}$ $qu$	$A_s$ (m <sup>2</sup> )	$R_p$ 式(2)	$R_p$ 式(3)	$R_p$ 試験値	式(1)
No.1	47	1.69	5,973	7,389 28,847	16,182 4,692	191
No.2	197	1.69	999	1,571	2,940	17.6
	N 値 6		763	5,578	2,279	289
No.3	63.7	0.33	1,583	1,350 4,104	2,626 2,064	133
No.4	63.7	0.87	4,137	4,050 14,904	7,559 6,164	138
No.5	212	0.33	209	480	255	7.3
	N 値 5		124	1,704	263	154
No.6	212	0.87	325	1,053	878	9.5
	N 値 5		553	3,738	871	203

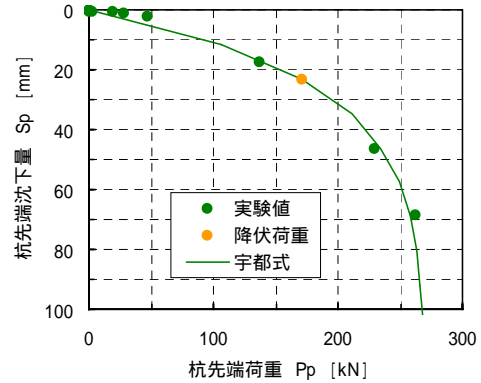


図 - 8 先端荷重度と先端沈下量の関係 (No.4)

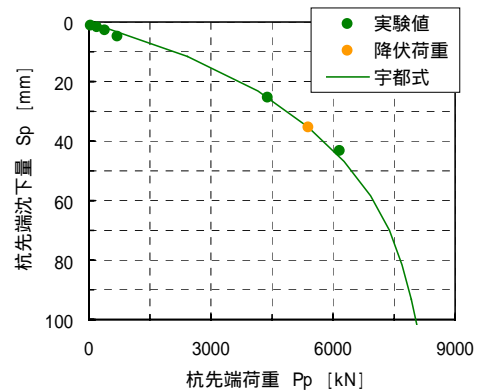


図 - 9 先端荷重度と先端沈下量の関係 (No.5)

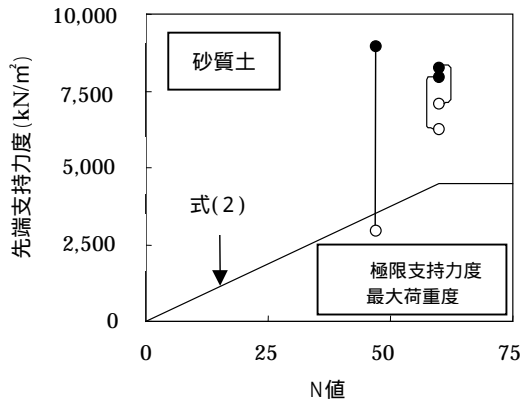


図 - 10 載荷試験結果と設計式の比較  
(先端支持力:砂質土)

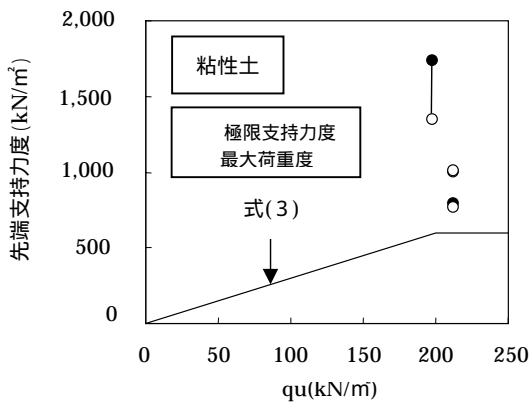


図 - 11 載荷試験結果と設計式の比較  
(先端支持力:粘性土)

#### 4. 周辺摩擦力の検討

##### 4.1 周辺摩擦力の評価

設計上、周辺摩擦力はソイルセメントと周辺地盤間の摩擦力で決定されるとし、芯材週面での付着切れが発生しないように一般部のソイルセメントの強度は設定されている。したがって、フリクションカット部分以外の周辺摩擦力は、ソイルセメント外周面で評価することとした。

周辺摩擦力は、測定点間の軸力差をソイルセメントの周長で除して求め、3連杭ではその外周を包絡する長さを周長とした。表 - 7 に各試験体における測定断面の深度を示す。

表 - 7 測定断面の深度

試験杭 No.	断面	測定深さ (GL-m)	場所	試験杭 No.	断面	測定深さ (GL-m)	場所
No.1		36.95	試験場 3	No.3		27.00	試験場 2
		38.95				28.80	
		40.95				30.80	
No.2		18.70		No.5		8.90	
		23.20				13.90	
		25.20				15.90	
		27.20			17.90		

##### 4.1 周辺摩擦度と沈下量の関係

ソイルセメント周囲の摩擦力度と測定区間での平均沈下量  $S_i$  との関係を図 - 13 に示す。一部を除き、沈下量の増加に伴い  $u_f$  が増加、あるいは降伏して一定値に漸近する傾向が見られた。試験杭 No.3 の区間  $L_c$  では、周辺摩擦力度が最大値に到達後に低下する現象が見られた。これは、この区間がフリクションカット剤塗布部分の直下であり、同剤による何らかの影響が作用した可能性が考えられる。なお、芯材とソイルセメント間のずれは確認されなかった。

##### 4.2 計算式との比較

押込み時の周辺摩擦力の設計式は次式とする。

$$R_{uf} = (10/3 \cdot N_{s_{ave}} \cdot L_s + 1/2 \cdot q_{u_{ave}} \cdot L_c) / 1000 \quad \text{式(4)}$$

$L$ : ソイルセメントの周長 (m)

$N_{s_{ave}}$ : 杭周の砂質地盤の平均 N 値 (上限 30)

$q_{u_{ave}}$ : 杭周の粘土地盤の一軸圧縮強度の平均値 (上限 2000kN/m<sup>2</sup>)

$L_s$ : 杭周の砂質地盤に接する長さの合計 (m)

$L_c$ : 杭周の粘土地盤に接する長さの合計 (m)

式(4)による計算値と試験結果を比較したものを表 - 8 および図 - 14、15 に示す。これより、試験で得られた周辺摩擦力度  $u_f$  (表中:試験  $u_f$ ) は、式(4)による  $u_f$  (表中:式(4)  $u_f$ ) よりいずれも大きく、式(4)は設計式として妥当であることを確認した。

表 - 8 載荷試験結果と設計式の比較

試験杭	土質名	測定断面	砂 $N_{s,ave}$	粘土 $qu_{ave}$ (kN/m <sup>2</sup> )	式(4) $u_f$ (kN/m <sup>2</sup> )	試験 $u_f$ (kN/m <sup>2</sup> )	変位量 (mm)
No.1	シルト	~	-	200	100	110	11
	シルト	~	-	200	100	250	6
No.2	シルト質細砂	~	10.7	-	36	60	22
	シルト質細砂	~	9.3	-	31	90	21
No.3	砂質シルト	~	-	200	100	250	41
	シルト質細砂	~	30.0	-	100	260	40
No.4	砂質シルト	~	-	200	100	140	13
	シルト質細砂	~	30.0	-	100	240	13
No.5	細砂	~	30.0	-	100	140	70
	細砂	~	30.0	-	100	220	69
	細砂	~	21.3	-	71	170	68
No.6	細砂	~	30.0	-	100	190	40
	細砂	~	30.0	-	100	170	38
	細砂	~	21.3	-	71	100	38

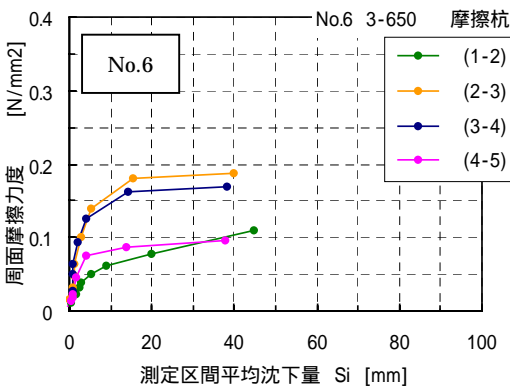
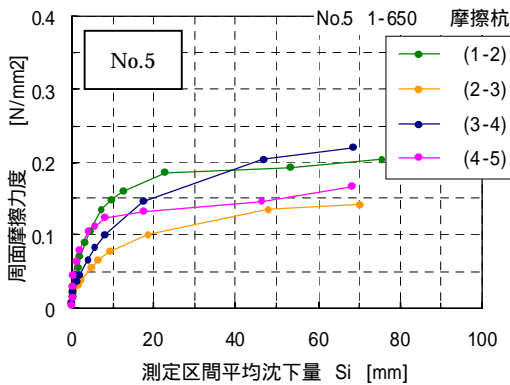
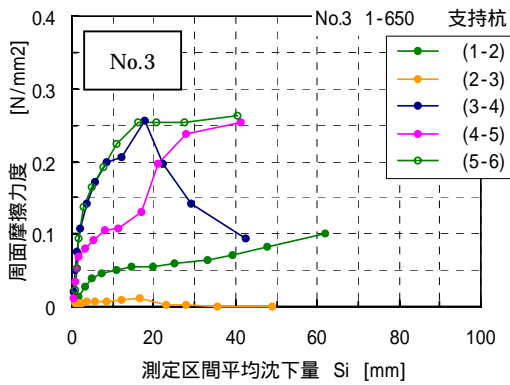


図 - 13 周面摩擦力度と沈下量の関係

5. 引抜き試験による検討

5.1 周面摩擦力と沈下量の関係

引抜き試験 (No.5') における周面摩擦力度と沈下量との関係を 図 - 16 に示す。なお、試験は試験杭 No.5 の鉛直載荷試験の実施後 4 日目に実施した。図 - 13 の押込み試験結果と性状は若干異なるが、これは同試験よりそれほど時間が経過していないことが影響している可能性が考えられる。

5.2 計算式との比較

引抜き試験での周面摩擦力  $R_{ut}$  は次式による。

$$R_{ut} = (4/5) (10/3 \cdot N_{s,ave} \cdot L_s + 1/2 \cdot qu_{ave} \cdot L_c) / 1000 \dots \dots \text{式(5)}$$

式(5)による計算値  $u_t$  と試験結果との比較を表 - 9 に示す。押込み試験時の地盤の乱れが懸念されたが、実測値はいずれも計算値を満足する結果が得られた。

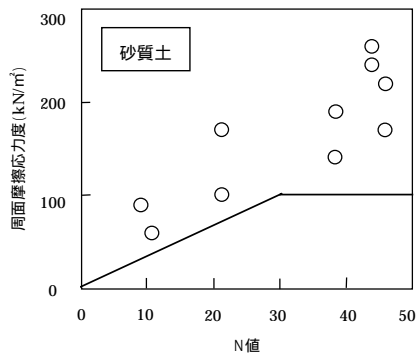


図 - 14 載荷試験結果と設計式の比較  
(周面摩擦力:砂質土)

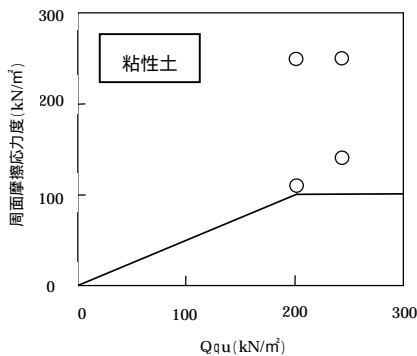


図 - 15 載荷試験結果と設計式の比較  
(周面摩擦力:粘性土)

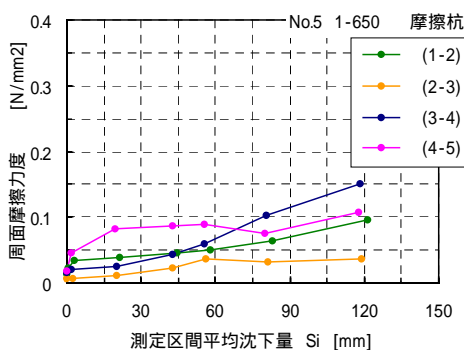


図 - 16 周面摩擦応力度と沈下量の関係  
(引抜き試験)

表 - 9 載荷試験結果と設計式の比較(引抜き試験)

測定断面	砂	粘土	式(5)	試験	引抜量 (mm)	
	$N_{save}$	$qu_{ave}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$ut$ (kN/m <sup>2</sup> )	$ut$ (kN/m <sup>2</sup> )		
試験杭 No.5'	~	30.0	-	80	90	118
	~	30.0	-	80	150	118
	~	21.3	-	57	110	117

## 6.まとめ

本工法で築造されるソイルセメント本設杭の構造性能を確認するために、試験体6体(単杭:3体、3連杭:3体)の鉛直載荷試験および1体(単杭)の引抜き試験を実施した。これらの試験から得られた結果は以下の通りである。

- (1)本工法で築造される単杭および3連杭は、その先端部沈下特性は場所打ちコンクリート杭と同様な進行性破壊性状を示した。
- (2)本工法で築造される杭先端の許容支持力は、地盤改良指針と同様に式(2)および式(3)で設計が可能であることを確認した。
- (3)本工法で築造される杭の周面摩擦力は、押込みおよび引抜き方向に対する計算式をそれぞれ十分満足し、式(4)および式(5)で設計が可能であることを確認した。

本研究は、青木建設、浅沼組、安藤建設、大木建設、奥村組、鴻池組、五洋建設、住友建設(現三井住友建設)、銭高組、鉄建建設、戸田建設、西松建設、松村組、三井建設(現三井住友建設)の14社による共同研究の成果の一部をまとめたものである。

## 【参考文献】

- 1)中村他:ソイルセメント本設杭工法の開発(その1 工法および試験の概要)、2003年度日本建築学会大会、2003.9(投稿中)
- 2)平澤他:H鋼材を芯材とするソイルセメント杭に関する研究(その1)-工法および試験の概要-、2003年度土木学会第58回年次学術講演会、2003.9(投稿中)
- 3)地盤工学会:「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」、pp.147~155、2002
- 4)宇都他:「杭の載荷試験結果の整理方法」、基礎工、pp.21~30、1982.9
- 5)日本建築センター:「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」、pp.44~53.2002