

## ソイルセメント改良体（PSPⅡ）工法の引抜き対応

尻無濱 昭三\*1

## 概 要

地下空間の有効利用，地下工事の省力化を可能とする工法として，仮設の山留め壁を本設の地下外壁として利用するRCS合成壁工法を実用化している。さらに，山留め壁芯材の一部を地盤の支持層まで延長し，本設の地盤改良体として利用できるPSP（Permanent Soil Cement Mixing Pile）工法を開発・実用化している。近年，大規模な超高層建築物や狭隘敷地における中高層建築物など塔状比が大きな建築物では，合理的な引抜き対策が求められている。そこで，PSP工法の押込み力に加えて，引抜き方向の抵抗力も有効利用するために原位置での載荷試験を実施した。本報は，その試験結果等について述べたものである。

キーワード：山留め壁，ソイルセメント壁，載荷試験，引抜き抵抗

CORRELATION OF UPLIFT RESISTANCE FOR  
THE PERMANENT SOIL CEMENT MIXING PILE (PSPⅡ) METHOD

Shozo SHIRINASHIHAMA \*1

## Abstract

For enabling effective use of underground space, and to save labor during underground construction projects, a method for constructing a composite wall (RCS composite wall) was developed and has been put to practical use. Furthermore, based on this method, we developed a technique for constructing permanent soil cement mixing pile (PSP) with part of the cores (steel shapes) extended to the bearing stratum. Recently, practical tensile countermeasures have been required for buildings with a large aspect ratio, for example, large-scale super high-rise buildings, and mid-to-high-rise buildings on narrow sites. Therefore, as part of the effective use of the PSP method, the tensility resistance was utilized in addition to compressive force. This paper discusses an overview of PSP techniques for in-situ static axial tensile loading tests.

Keywords: Earth Retaining Wall, Soil Cement Wall, Static Axial Load Test, Uplift Resistance

---

\*1 General Manager in Architectural Technology Development, Architecture Division

## ソイルセメント改良体（PSP II）工法の引抜き対応

尻無濱 昭三\*1

## 1. はじめに

建設工事において、建築物の基礎構造、地下階を構築する上で施工する仮設の山留め壁（ソイルセメント壁等）を本設構造物として利用することで基礎工事の合理化、環境負荷の低減が可能となる。これまでの既往研究<sup>1),2)</sup>では現場施工実験、原位置載荷試験等を実施し、主に押し込み荷重について必要な構造性能が確保されていることを確認して、PSP工法として建築技術性能証明を取得している。一方、塔状比の大きな建築物では地震時に大きな引抜き荷重が基礎に作用する例も見受けられるが、引抜き抵抗用の基礎杭やカウンターウェイトによる対策が一般的で、ソイルセメント壁の引抜き抵抗に関する知見は少ない<sup>3),4)</sup>。

そこで、芯材を有するソイルセメント柱の引抜き荷重に対する構造性能を確認するために、原位置における実大ソイルセメント柱の鉛直引抜き載荷試験を実施した。また、開発当初に設定したPSP工法における押し込み荷重用の仕様を見直した。本報告では、引抜き対応として実施した原位置での載荷試験と追加変更した仕様等の概要について述べる。

## 2. PSP II工法の概要

2003年度に開発したPSP工法は、図-1 a) に示すように、荷重伝達機構は、建物外周部に設置させる場合は、芯材フランジ面に取り付けたシアコネクタを介して（中杭として利用する場合は、底盤に直接）、芯材で鉛直荷重を受けた後、芯材とソイルセメントの付着力およびソイルセメントの周面摩擦力により周辺地盤へ荷重を伝達し、付着力および先端部の芯材ウェブに設置したシアコネクタ（頭付きスタッド）とソ

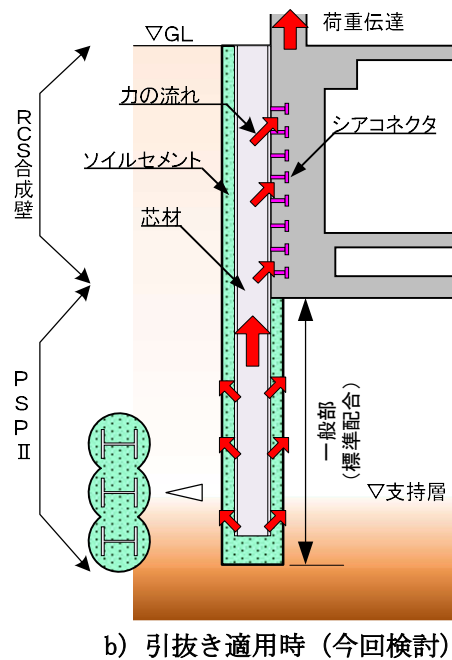
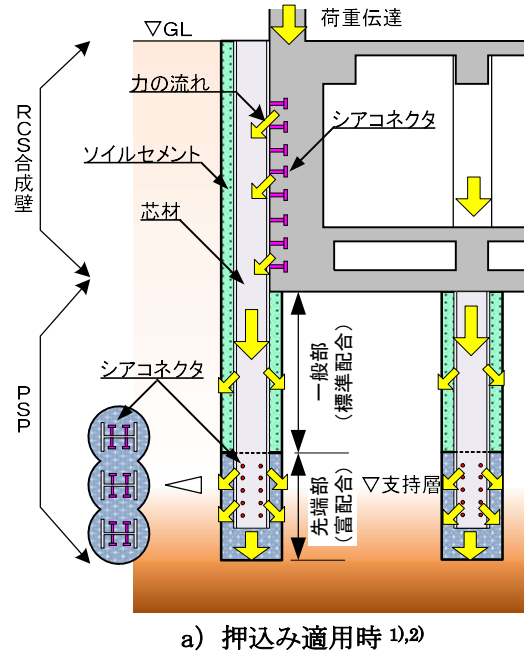


図-1 PSP II工法の概要

\*1 建築本部 建築技術部 企画・開発部長

イルセメントの支圧，あるいは芯材先端面とソイルセメントとの支圧を介して先端部の支持地盤に伝達させるものである。また，仕様規定としてソイルセメントの設計基準強度を砂質土・砂礫地盤では，一般部を  $1.0\text{N}/\text{mm}^2$  (標準配合)，先端部を  $5.0\text{N}/\text{mm}^2$  (富配合)，粘性土地盤では一般部，先端部とも  $1.0\text{N}/\text{mm}^2$  としている。さらに，芯材の先端部にシアコネクタとして頭付きスタッドを設置することになっている。

今回の引抜き対応にあたり，既評定の内容に加えて，ソイルセメントの設計基準強度を引抜き方向の支持力のみ期待する場合は，土質によらず，一般部  $0.5\text{N}/\text{mm}^2$  あるいは  $1.0\text{N}/\text{mm}^2$  として，通常のソイルセメント壁の標準強度まで適用範囲を拡大する。それにより，先端部に設置していたシアコネクタは省略できる (図-1b)。また，最近のソイルセメント壁の施工機械の実績を踏まえて，単軸，多軸掘削機による施工に加えて，等厚壁工法 (鉛直に吊るしたカッターチェーンを水平方向に移動させて削溝攪拌する方式，水平多軸回転カッターを鉛直方向に移動させて削溝攪拌する方式) を追加している。

### 3. 原位置の引抜き載荷試験

#### 3.1 試験の概要

原位置における引抜き載荷試験は，茨城県境町の2地点で単軸および三軸のソイルセメント柱を施工して実施した<sup>5)</sup>。地盤と載荷試験体の概要を図-2に示す。単軸のソイルセメント径は  $650\text{mm}$ ，芯材はH形鋼 H-350×350×12×19，長さ  $30\text{m}$  ( $L=15\text{m}\times 2$  本)，継手部はボルト接合とした。三軸も単軸同様にソイルセメント径  $650\text{mm}\times 3$  連，芯材はH形鋼 H-350×350×12×19を3本，長さ  $30\text{m}$  ( $L=15\text{m}\times 2$  本)，継手部はボルト接合で芯材にはスタッド等のシアコネクタを用いず，引抜き荷重は芯材とソイルセメント間の付着力によってソイルセメントに伝達し，ソイルセメントから周辺地盤には周面摩擦力により伝達される。芯材とソイルセメント間には，

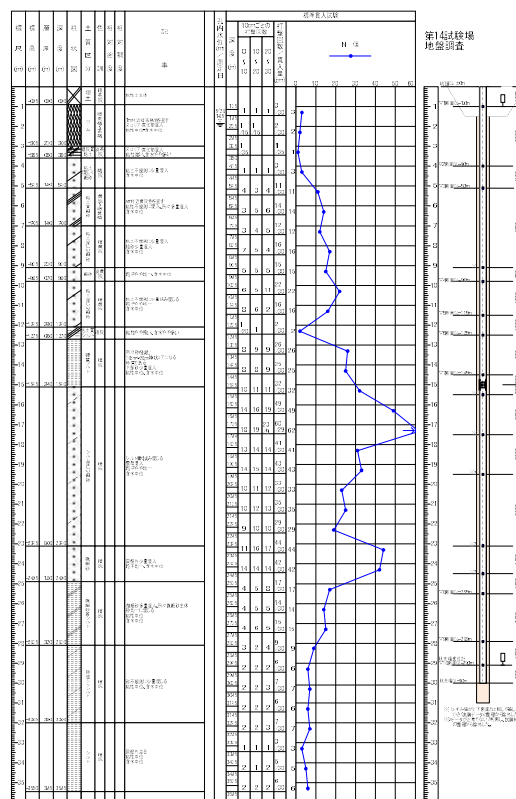


図-2 地盤と載荷試験体概要 (単軸)



写真-1 載荷試験の実施状況

フリクションカット材は施していない。載荷試験の実施状況を写真-1に示す。

#### 3.2 ソイルセメントの強度

試験体の施工方法は通常のソイルセメント壁に用いられる方法<sup>6)</sup>に準拠しているが，本設構造体として品質を確保するための管理項目，設計基準強度 ( $F_c=0.5\text{N}/\text{mm}^2$ )，削孔・引上速度， $1\text{m}$  当りの攪拌回数などを規定している。また，ソイルセメント強度等の品質性能を確認するために引抜き試験体の施工前に同条件で無芯のソ

イルセメント柱を施工し、オールコアボーリングで試料を採取して、各種材料試験を実施している。以下に、単軸の試験結果を示す。

図-3に材齢4週と載荷試験日(材齢45日)の一軸圧縮強さ  $q_u$ 、湿潤密度、変形係数  $E_{50}$  の深度分布を示す。GL-24m以深は採取したコアに地山が一部含まれており、試験自体ができていない。一軸圧縮強さ  $q_u$  は深度方向に増加し、表層付近を除いて設計基準強度  $F_c=500\text{kN/m}^2$  ( $0.5\text{N/mm}^2$ ) を上回っている。湿潤密度も深度とともに漸増し、深度および強度との関係が示唆される。また、変形係数  $E_{50}$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  の関係は、地盤改良等のソイルセメントにおける既往の関係 ( $E_{50}=180 \cdot q_u$ ) と同程度の関係 ( $E_{50}=263 \cdot q_u$ ) であった。

### 3.3 載荷試験方法および結果

引抜き載荷試験は地盤工学会基準 7) に準拠し、載荷方法は段階載荷の多サイクル方式、サイクル数は5サイクル、荷重段階は@600kN×10段階で計画した。載荷は油圧ジャッキを用いて行い、芯材頭部に引抜き荷重を作用させた。主な計測項目は載荷荷重(ジャッキ荷重、油圧から換算)、芯材頭部および先端部の変位、芯材の軸方向ひずみであり、ひずみゲージは図-2に示すひずみ計測位置  $i$  断面 ( $i=1\sim 10$ ) における芯材のウェブ両面に貼付した。

図-4に引抜き荷重と芯材の頭部、先端部の変位との関係を示す。第7荷重段階(4209kN)で頭部変位が15.2mmとなり、次の荷重段階で芯材頭部のひずみが実降伏点 ( $382\text{ N/mm}^2$ ) に相当するひずみを超え、最終段階で荷重の保持が困難となったため試験を終了した。確認できた最大荷重は、5640kN(頭部変位26.6mm)であった。図-5に引抜き荷重、頭部変位関係の両対数表示 ( $\text{Log}P-\text{Log}S$  関係) を示す。第7段階付近で折れ曲がりが見られるが芯材頭部の鋼材の降伏による影響と考えられ、弾性戻り量や芯材先端部変位の傾向、 $P-\Delta S/\Delta \log t$ 、 $S-\log t$  関係において明瞭な変化が見られないことから、第一限界抵抗力には達していないと

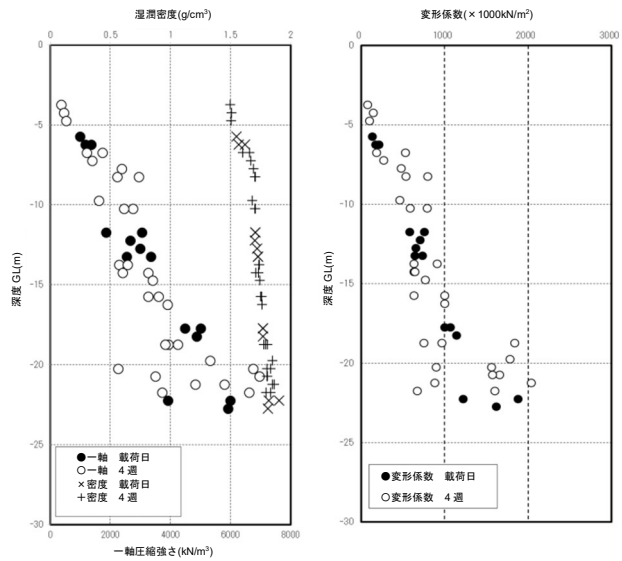


図-3 ソイルセメントのコア強度、湿潤密度および変形係数

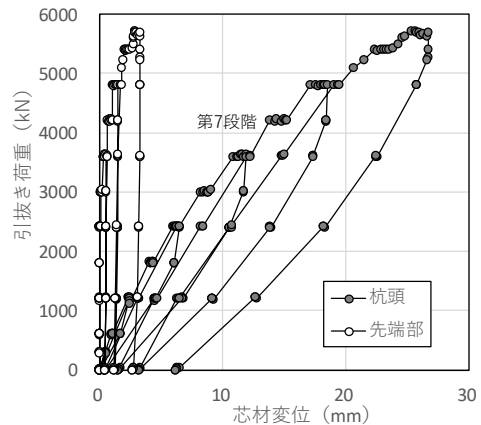


図-4 荷重-変位関係

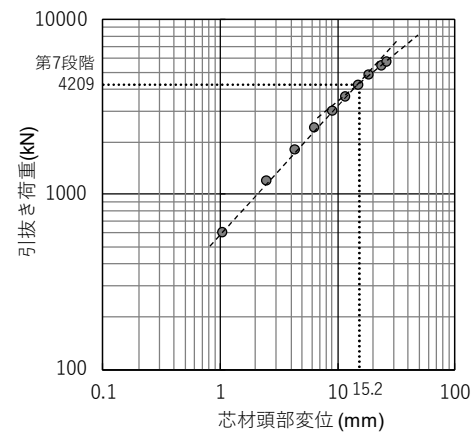


図-5  $\text{Log}P-\text{Log}S$  関係

考えられる。

図-6のa)に芯材ひずみの深度分布を示す。降伏ひずみを越えた点のマーカ―は示していない。図-6のb)には芯材を含むソイルセメント柱の軸力の深度分布を示す。i断面における軸力 $p_i$ は式(1)により評価した。ソイルセメントの圧縮強度が特に下部では大きいことから、図-3に示すソイルセメントの変形係数と深度の関係で設定したソイルセメントの剛性を全長にわたり考慮した。芯材頭部はジャッキ荷重と同値とし、降伏ひずみを越えた部分は不定として破線で示した。

$$p_i = \varepsilon_i \cdot (E_H \cdot A_H + E_{SCi} \cdot A_{SC}) \quad (1)$$

ここに、

$p_i$  : i断面における軸力 (kN)

$\varepsilon_i$  : i断面のひずみ

$E_H$  : 芯材のヤング率

$A_H$  : 芯材断面積 (=0.01719 m<sup>2</sup>)

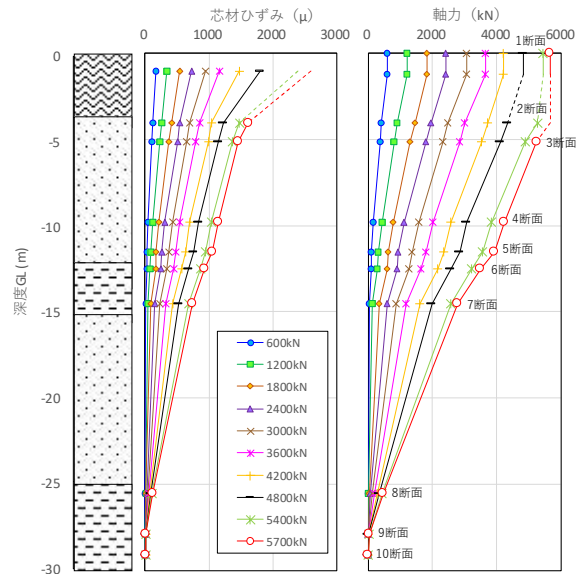
$E_{SCi}$  : i断面ソイルセメント変形係数 (kN/m<sup>2</sup>)

$A_{SC}$  : ソイルセメントの有効断面積 (m<sup>2</sup>)

(設計径φ650断面積-芯材断面積=0.31464m<sup>2</sup>)

図-6より、芯材ひずみ、軸力は深さ方向に単調に減少し、全長にわたって周面摩擦抵抗が發揮されていることが確認できる。第8から第9荷重段階にかけてひずみ増分が大きく、表層付近で抵抗機構が変化している可能性がある。

図-7に周面摩擦力度と芯材の区間中央変位の関係を示す。摩擦力度は断面間の軸力の差をソイルセメントの設計区間表面積で除して求め、区間中央変位は各断面間の中央位置の変位をひずみ値から算定した。設計で抵抗を期待しない表層の1-2断面は芯材降伏前から摩擦力度の計算値が減少し、次段階以降2-3断面の増加が大きい。1-2断面では引抜き変位に伴う摩擦抵抗の減少と芯材との付着抵抗の低下が考えられ、その低下分が下部の2-3断面に負担されてそこでの計算値が増大した可能性が考えられる。他の区間では変位が少なく最大値まで確認でき



a) 芯材ひずみ      b) 軸力  
図-6 芯材ひずみと軸力の深度分布

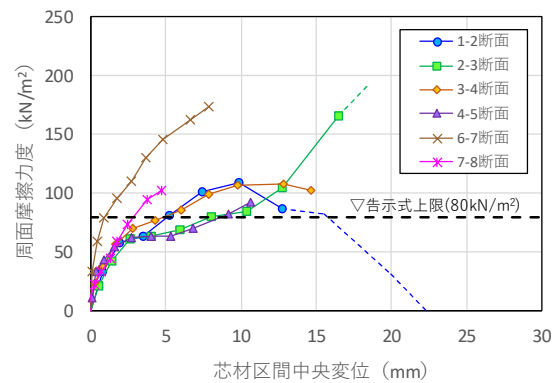


図-7 周面摩擦力度と芯材区間変位の関係

ていない区間もあるが、最終荷重段階までに後述の告示評価式の上限値を上回る摩擦力度が發揮されている。

### 3.4 引抜き抵抗力

載荷試験結果から得られた極限支持力時の周面摩擦力と国土交通省告示 第1113号第5項を参考に設定した極限周面摩擦力  $R_{tu1}$  (式(2)) と、芯材とソイルセメントの付着抵抗力から決まる極限付着抵抗力  $R_{tu2}$  (式(3)) の比較を表-1に示す。

$$R_{tu1} = \phi(4/5)(10/3N_{s\text{ ave}}L_s + 1/2q_{u\text{ ave}}L_c) \quad (2)$$

ここに、

$R_{tu1}$ : 極限周面摩擦力 (kN)

$\phi$ : ソイルセメントの周長 (m)

$N_{s,ave}$ : PSP 体の周囲の地盤のうち砂質土地盤の平均 N 値 (上限 30)

$L_s$ : PSP 体の周囲の地盤のうち砂質土地盤に接する層厚 (m)

$q_{u,ave}$ : PSP 体の周囲の地盤のうち粘性土地盤の一軸圧縮強度平均値 (上限 200) (kN/m<sup>2</sup>)

$L_c$ : PSP 体の周囲の地盤のうち粘性土地盤に接する層厚 (m)

$$R_{tu2} = \tau_b \cdot \phi_H \cdot (L_s + L_c) / 1000 \quad (3)$$

ここに、

$R_{tu2}$ : 極限付着抵抗力 (kN)

$\tau_b$ : 付着強度 (kN/m<sup>2</sup>)

$\phi_H$ : 芯材の周長 (mm)

表一 1 載荷試験結果と提案式による引抜き抵抗力の比較

	極限引抜き抵抗力	極限付着抵抗力	最大載荷荷重時
	$R_{tu1}$	$R_{tu2}$	
単軸	2660kN	2661kN	5640kN
三軸	5295kN	8187kN	11215kN

提案式により算定した極限引抜き抵抗力より、芯材とソイルセメントの付着抵抗力から決まる極限付着抵抗力は載荷試験で確認された最大荷重を上回っていることが確認され、提案式による引抜き抵抗力の評価が可能となった。

#### 4. まとめ

ソイルセメント改良体 (PSP II) 工法の引抜き対応として実施した載荷試験結果の概要について述べた。

原位置引抜き試験を実施した結果、最大載荷荷重は国交省告示 第 1113 号の評価式を参考とした極限引抜き抵抗力を上回り、各区間にて告示評価式以上の周面摩擦力度が発揮されたことが確認でき、引抜き抵抗として使用する場合の

評価方法の妥当性が示された。また、引抜き適用時の追加仕様 (ソイルセメントの設計基準強度、シアコネクタ、等厚壁工法の施工機械等) について示した。

本工法は 2020 年 3 月 25 日付けで (一財) 日本建築総合試験所より、建築技術性能証明 第 02-22 号 改 2『PSP II 工法 - 芯材を有するソイルセメント改良体工法 (改定 2)』を取得しており、詳細な設計・施工方法は、「建築技術性能証明 評価概要報告書」を参照されたい。

#### 謝辞

本報告は、青木あすなろ建設、安藤ハザマ、奥村組、鴻池組、五洋建設、戸田建設、西松建設、松村組との共同開発成果の一部をまとめたものであり、ご協力をいただいた皆様に深く感謝を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 中村良雄ほか: ソイルセメント本設杭工法の開発 (その 1~7), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.671-684, 2003.9
- 2) 尻無濱昭三ほか: ソイルセメント本設杭工法の開発, 鉄建技術報告 No.17, pp.57-66, 2003
- 3) 田屋裕司ほか: ソイルセメント壁の杭利用に関する研究 (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.507-508, 2010.9
- 4) 渡邊康司ほか: 本設杭として利用するソイルセメント柱列壁の鉛直交番載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.741-742, 2018.9
- 5) 西正晃ほか: ソイルセメント壁の有効利用に関する研究 (その 1, 2), 第 55 回地盤工学研究発表会, 21-8-1-05,06, 2020.7
- 6) 日本材料学会: ソイルセメントミキシングウォール (SMW) 設計施工指針, 2002
- 7) 地盤工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 2002