

# ソイルセメント改良体工法 (PSP II 工法) の開発

## Development of Permanent Soil Cement Mixing Pile (PSP II) Method

森清 宣貴\*1  
Nobuki Morikiyo

### 要旨

ソイルセメント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 工法の押し込み抵抗に加えて引抜き抵抗も有効利用するために原位置での載荷試験を実施した。本報告では、載荷試験の結果および引抜き抵抗の評価について述べる。

キーワード：山留め壁 ソイルセメント改良体 載荷試験 引抜き抵抗

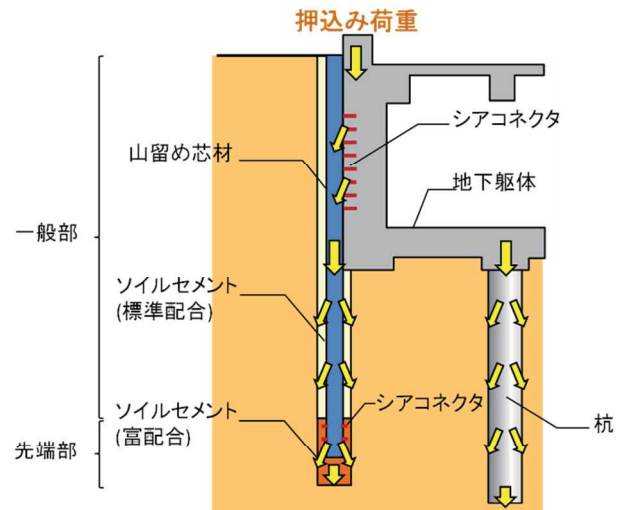
## 1. はじめに

仮設構造物のソイルセメント改良体 (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。これまでの研究<sup>1)</sup>では、現場施工実験、原位置載荷試験等を実施し、主に押し込み抵抗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、PSP 工法として建築技術性能証明を取得している。一方、塔状比の大きな建物等で地震時に建物基礎に大きな引抜き荷重が作用する場合には、一般的にカウンターウェイトや引抜き抵抗用の杭を用いる。引抜き荷重に対してもソイルセメント改良体を抵抗要素として用いることができれば、基礎工事の合理化につながるが、ソイルセメント改良体の引抜き抵抗に関する知見は少ない<sup>2),3)</sup>。そこで、芯材を有するソイルセメント改良体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改良体の鉛直引抜き載荷試験を実施した。

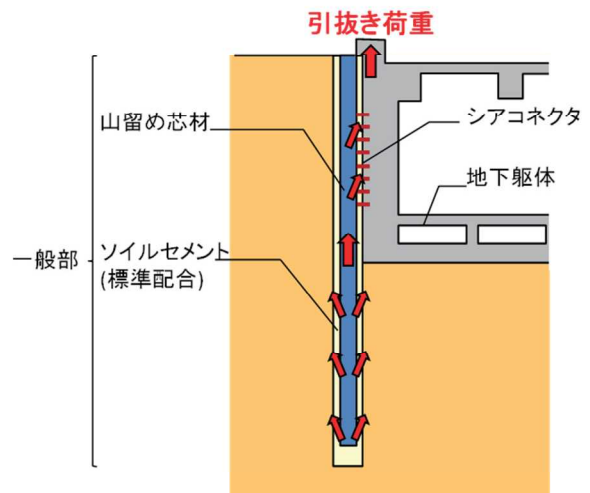
本報告では、引抜き荷重に対応した PSP II 工法の概要を述べた上で、現場施工実験および鉛直引抜き載荷試験について報告し、引抜き抵抗の評価方法について提案式の妥当性を示す。なお、本報告は第 55 回地盤工学研究発表会で発表した論文<sup>4)</sup>を加筆修正したものである。

## 2. PSP II 工法の概要

2003 年度に開発した PSP 工法の荷重伝達機構は、図 1 (a) に示すように、建物外周部に設置させる場合、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)、鉛直荷重を芯材に伝達した後、



(a) 押し込み荷重に対する適用時



(b) 引抜き荷重に対する適用時

図 1 PSP II 工法概念図

\*1 技術研究所

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とソ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は、砂質土・砂礫地盤では一般部を  $1.0 \text{ N/mm}^2$  (標準配合)、先端部を  $5.0 \text{ N/mm}^2$  (富配合)、粘性土地盤では一般部、先端部とも  $1.0 \text{ N/mm}^2$  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 PSP II 工法では、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  $0.5 \text{ N/mm}^2$  あるいは  $1.0 \text{ N/mm}^2$  として、通常のソイルセメント改良体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1(b))。また、最近のソイルセメント改良体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。

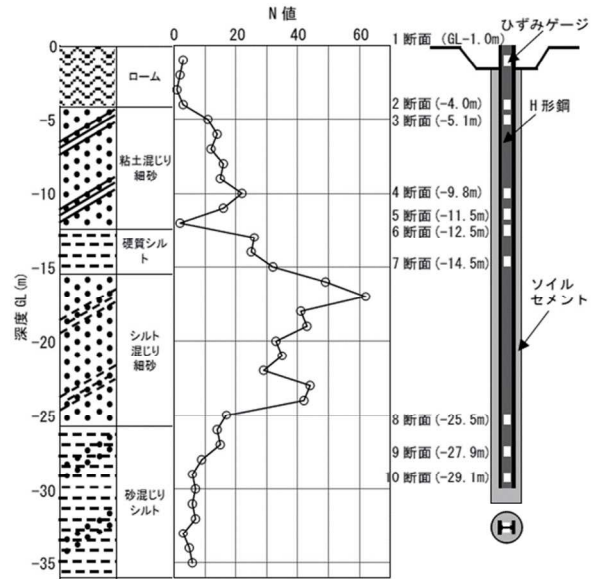
### 3. 原位置引抜き载荷試験

#### 3.1 試験の概要

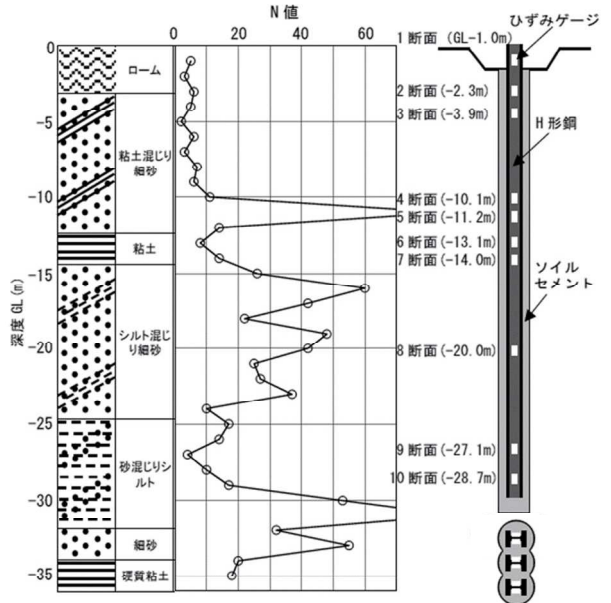
原位置における引抜き载荷試験は、茨城県境町の2地点で単軸および三軸のソイルセメント改良体を施工して実施した。地盤と载荷試験体の概要を図2に示す。単軸のソイルセメント径は  $650 \text{ mm}$ 、芯材は H 形鋼  $\text{H-350} \times 350 \times 12 \times 19$ 、長さ  $30 \text{ m}$  ( $L=15 \text{ m} \times 2$  本)、継手部はボルト接合とした。三軸も単軸同様にソイルセメント径  $650 \text{ mm} \times 3$  連、芯材は H 形鋼  $\text{H-350} \times 350 \times 12 \times 19$  を3本、長さ  $30 \text{ m}$  ( $L=15 \text{ m} \times 2$  本)、継手部はボルト接合とした。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フリクションカット材は施していない。载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改良体に用いられる方法<sup>5)</sup>に準拠している。また、ソイルセメント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改良体を施工し、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た。



(a) 単軸試験体の地盤とひずみゲージ取り付け位置



(b) 三軸試験体の地盤とひずみゲージ取り付け位置

図2 地盤と試験体の概要



写真1 载荷試験の実施状況

図3に材齢4週と載荷試験日(材齢45日)の一軸圧縮強さ $q_u$ 、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。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と同程度(単軸： $E_{50}=263\cdot q_u$ 、三軸： $E_{50}=282\cdot q_u$ )であった。

### 3.3 載荷試験方法

引抜き載荷試験は地盤工学会基準<sup>6)</sup>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 $600\text{ kN}\times 10$ 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、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中に示す位置で芯材のウェブ両面に貼付した。

### 3.4 載荷試験結果

#### 3.4.1 単軸試験体の載荷試験結果

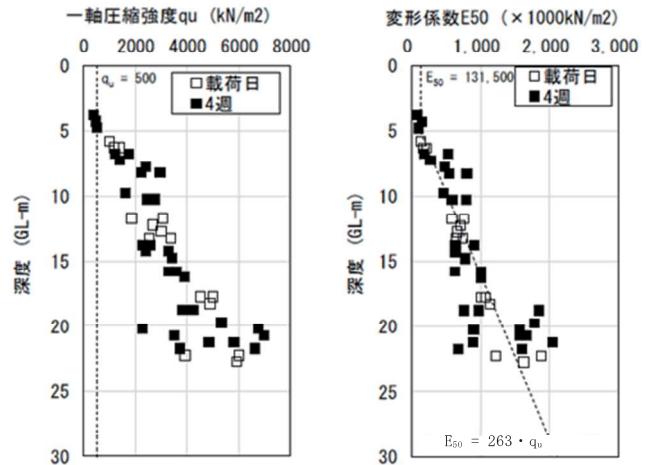
図4に引抜き荷重と芯材の頭部、先端部の変位との関係を示す。第7荷重段階(4209 kN)で頭部変位が15.2 mmとなり、次の荷重段階で芯材頭部のひずみが実降伏点( $382\text{ N/mm}^2$ )に相当するひずみを超え、最終段階で荷重の保持が困難となったため試験を終了した。確認できた最大荷重は5640 kN(頭部変位26.6 mm)であった。

図5に芯材ひずみの深度分布、図6に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。ソイルセメントの強度が下部になるほど大きいことから、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、降伏ひずみを超えた部分は不定として破線で示した。

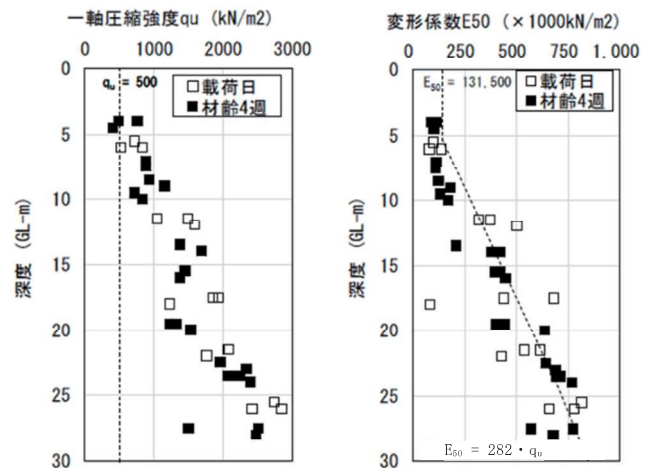
$$P_i = \varepsilon \cdot (E_H \cdot A_H + E_{Sci} \cdot A_{Sc}) \quad (1)$$

$P_i$  :  $i$ 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 ( $=2.05 \times 10^8\text{ kN/m}^2$ )  
 $A_H$  : 芯材断面積 ( $=0.01719\text{ m}^2$ )  
 $E_{Sci}$  :  $i$ 断面ソイルセメント変形係数 ( $\text{kN/m}^2$ )  
 $A_{Sc}$  : ソイルセメントの有効断面積 ( $\text{m}^2$ )  
 (設計径 $\phi 650$ の断面積-芯材断面積  
 $=0.31464\text{ m}^2$ )

図5, 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発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



(a) 単軸試験体の施工場所で採取したコア試料



(b) 三軸試験体の施工場所で採取したコア試料

図3 ソイルセメントコアの強度変形係数

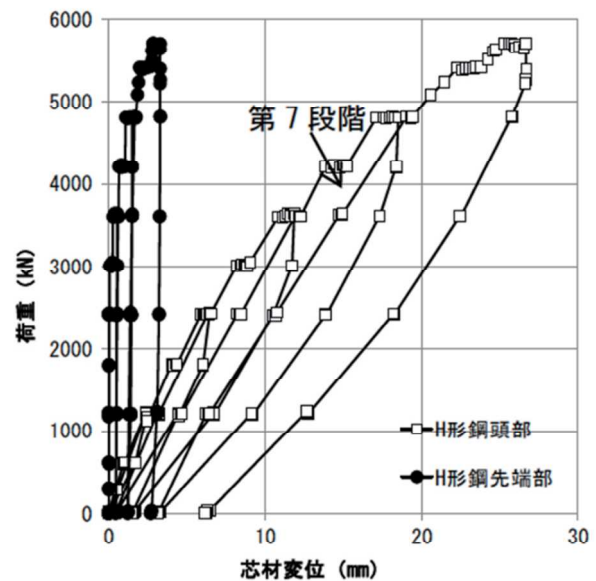


図4 単軸試験体の荷重-変位関係



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、その低下分を下部の2-3断面が負担し、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ていない区間もあるが、最終荷重段階までに告示評価式の上限値を上回る摩擦力度が発揮されている。

3.4.2 三軸試験体の載荷試験結果

三軸試験体の引抜き荷重と芯材の頭部、先端部の変位との関係を図8に示す。4サイクル目の最大荷重(12800kN) 載荷終了後、荷重保持中に変位が進行し、荷重保持が困難となった。その後、変位計および油圧ジャッキのストロークエンドに達したため載荷を終了した。

図9に芯材ひずみの深度分布、図10に芯材を含むソイルセメント柱の軸力の深度分布を示す。また、i断面における軸力は、単軸試験体と同様に式(1)により評価した。図9, 10より、単軸試験体と同様に芯材ひずみ、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発揮されている。

図11に周面摩擦力度と芯材の区間中央変位の関係を示す。周面摩擦力度および区間中央変位は単軸と同様の方法にて算出している。設計で抵抗を期待しない表層の2-3断面で、最大載荷荷重時の周面摩擦力度が告示評価式を下回っている。これは、有機物の混入などでソイルセメントの圧縮強度が安定しないといった傾向が見られた範囲(図3(b))であることが影響していると考えられる。一方、3断面以深については、最終荷重段階までに告示評価式の上限値を上回る摩擦力度が発揮されている。

3.5 引抜き抵抗力の評価

本工法を適用したソイルセメント改良体の短期引抜き抵抗 $R_{TY}$ は、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 $R_{tu1}$ (式(2))と、芯材とソイルセメントの付着抵抗から決まる極限付着抵抗 $R_{tu2}$ (式(3))をもとに式(4)~式(6)にて算出することとした。式(4)により算定した極限引抜き抵抗と鉛直引抜き載荷試験から得られた極限支持力時の引抜き荷重を表1に示す。

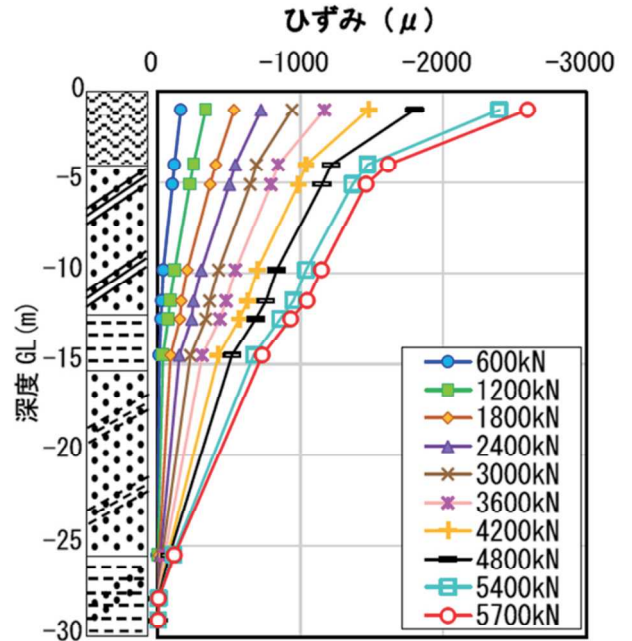


図5 単軸試験体の芯材ひずみの深度分布

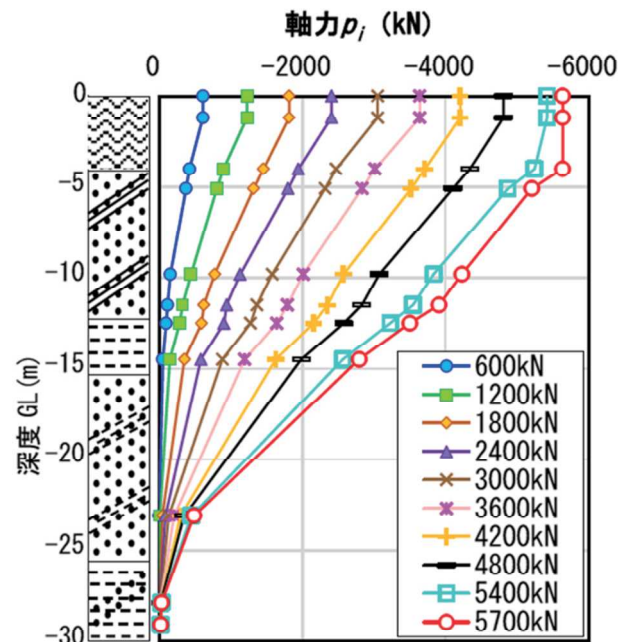


図6 単軸試験体の軸力の深度分布

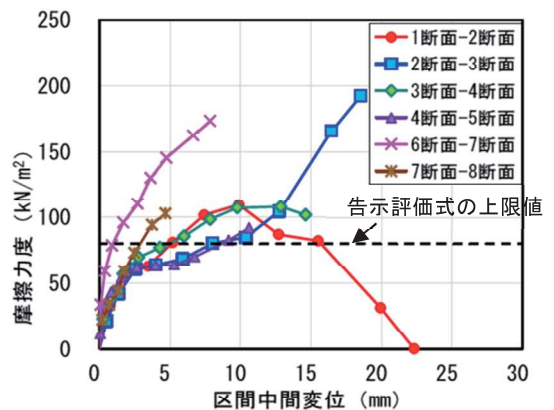


図7 周面摩擦力度と芯材区間変位の関係

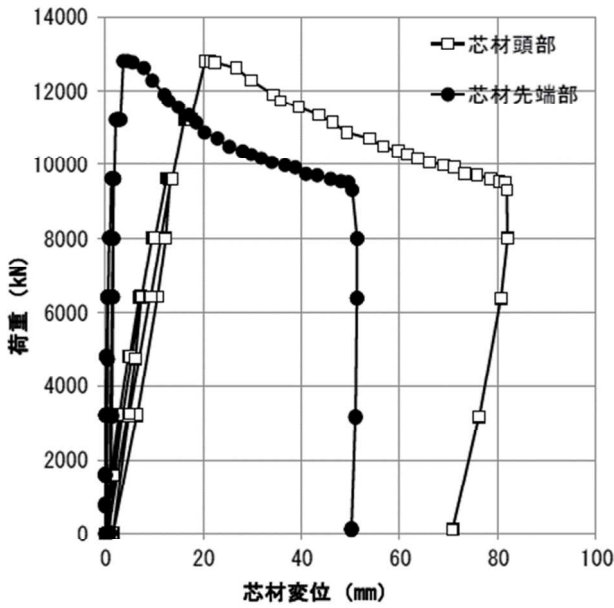


図8 三軸試験体の荷重—変位関係

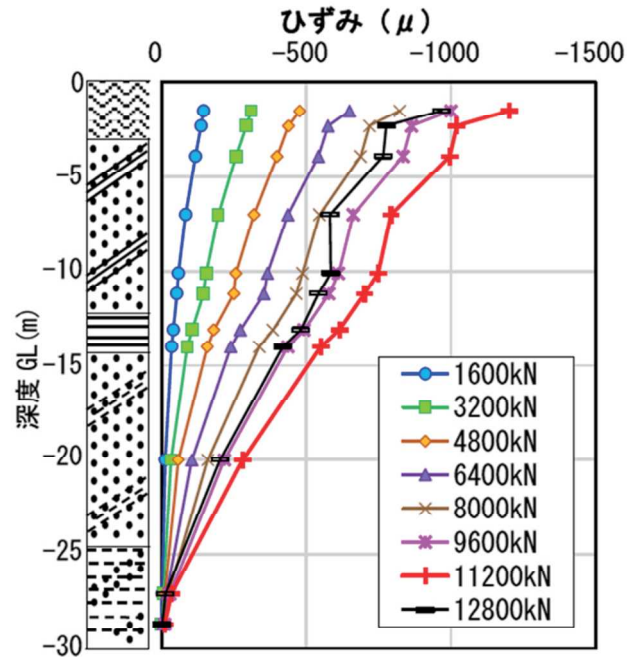


図9 三軸試験体の芯材ひずみの深度分布

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

- $R_{tu1}$  : 極限周面摩擦力 (kN)
- $\phi$  : ソイルセメントの周長 (m)
- $N_{s\text{ ave}}$  : PSP 体周囲の地盤のうち砂質地盤の平均 N 値 (上限 30)
- $L_s$  : PSP 体周囲の地盤のうち砂質地盤に接する層厚 (m)
- $q_{u\text{ ave}}$  : PSP 体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 200kN/m<sup>2</sup>)
- $L_c$  : PSP 体周囲の地盤のうち粘性土地盤に接する層厚 (m)

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

- $R_{tu2}$  : 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)

$$R_{TU} = \sum(\min(R_{tu1}, R_{tu2})) \quad (4)$$

- $R_{TU}$  : 極限引抜き抵抗力 (kN)

$$\sum R_{tu1} < \sum R_{tu2} \quad (5)$$

$$R_{TY} = (2/3) \cdot R_{TU} + W_p \quad (6)$$

- $R_{TY}$  : 短期引抜き抵抗力 (kN)
- $W_p$  : ソイルセメント改良体の自重 (kN)

表1 提案式による引抜き抵抗力と載荷試験結果の比較

	提案式による 極限引抜き抵抗力 [kN]	引抜き荷重 (極限支持力時) [kN]
単軸	2506	5640
三軸	5848	11215

提案式により算定した極限引抜き抵抗力に対して、載荷試験で確認された最大荷重が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。

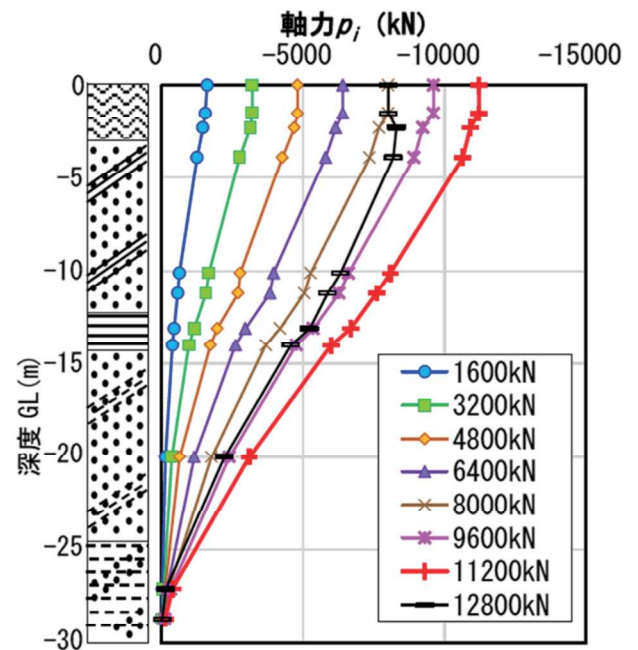


図10 三軸試験体の軸力の深度分布

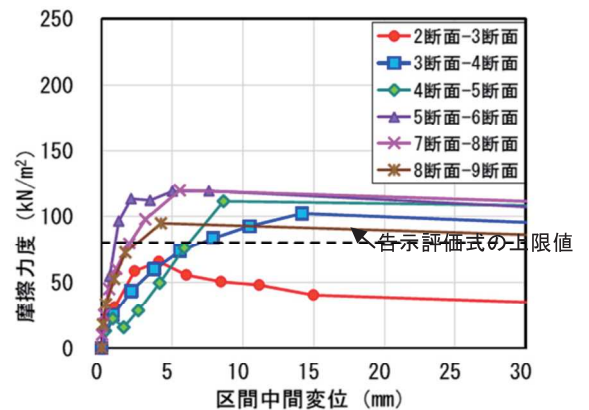


図11 三軸試験体の周面摩擦力度と芯材区間変位の関係

## 4. まとめ

ソイルセメント改良体（PSPⅡ）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。なお、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『PSPⅡ工法 - 芯材を有するソイルセメント改良体工法（改定 2）』を取得している。

### 謝辞

本報告は、青木あすなる建設、安藤ハザマ、奥村組、五洋建設、鉄建建設、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. 09
- 2) 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. 09
- 3) 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. 09
- 4) 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. 07
- 5) 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
- 6) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説、2002