

4. ソイルセメント改良体工法（PSPII 工法）の開発

An Experimental Study on Permanent Soil Cement Mixing Pile (PSPII) Method

寺内将貴* 波田雅也**

—概要—

本研究では、ソイルセメント改良体工法（以下、PSPII 工法）の鉛直引抜き支持力について示す。

2003年に前身のPSP工法として、仮設山留め壁であるソイルセメント壁を本設構造物の鉛直支持力に適用できる技術として建築技術性能証明を取得した。その後、塔状比の大きい建物で適用する際に、地震時に建物基礎に引抜き荷重が作用する場合があった。そこで、鉛直引抜き支持力として適用できる仕様を追加したPSPII工法の開発を行った。

本報では、原位置での鉛直引抜き載荷実験（写真1、図1、図2）を実施し、本工法を適用した芯材を有するソイルセメント柱の引抜き抵抗力を確認し、その算出式を提案、妥当性を示した。

—技術的な特長—

本工法は、従来、仮設山留め壁として用いられるソイルセメント壁を本設の構造物として利用することで、基礎工事の工期短縮やコスト削減、環境負荷の低減を図ることができる技術である（図3）。

本設構造物に適用することから、品質確保のため設計基準強度や削孔速度、攪拌回数などを規定している。



写真1 鉛直引抜き載荷実験状況

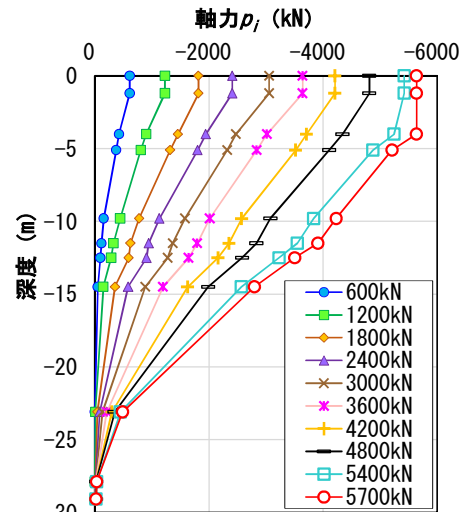


図1 単軸試験体の軸力の深度分布

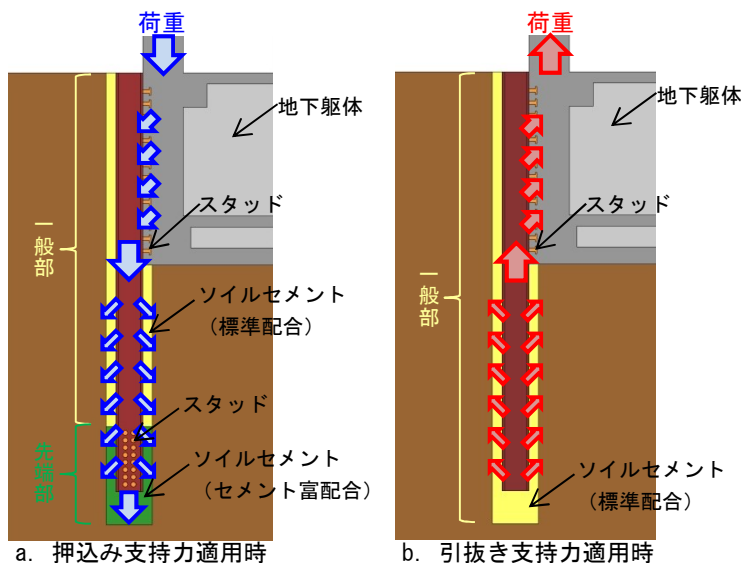


図3 PSP II 工法概念図

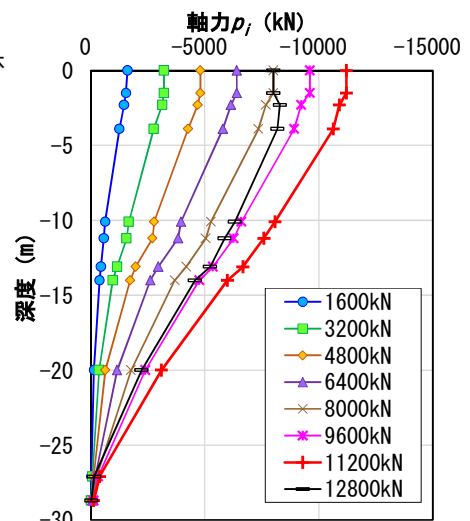


図2 三軸試験体の軸力の深度分布

※本報の内容は、安藤ハザマ、奥村組、鴻池組、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、第55回地盤工学研究発表会（21-8-1-05,06 2020.07）にて発表済みである。

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室 **技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

ソイルセメント改良体工法（PSPII 工法）の開発 An Experimental Study on Permanent Soil Cement Mixing Pile (PSPII) Method

○寺内 将貴*
Masaki TERAUCHI

波田 雅也**
Masaya HADA

ABSTRACT The Permanent Soil Cement Mixing Pile (hereafter, PSP II) method is used as a temporary earth retaining wall in a permanent structure. By using PSP II, it is possible to rationalize foundation structure and reduce the environmental burden. For a building with large aspect-ratio, the rational pull-out strengths are required while it is subjected to earthquake forces. In this paper, full scale experiments of PSP II are performed in order to clarify structural performance. As a result, the evaluation of pull-out strength can be carried out easily.

Keywords :ソイルセメント壁, 実大載荷実験, 引抜き抵抗力
Soil cement mixing wall, Full scale experiment, Pull-out strength

1. はじめに

ソイルセメント改良体工法（Permanent Soil Cement Mixing Pile、以下、PSPII 工法）は、仮設山留め壁として用いられるソイルセメント壁を本設の構造物として利用することで、基礎工事の合理化や環境負荷の低減を図ることができる。既往研究¹などでは、現場施工実験、原位置載荷実験を実施し、品質や施工性および主に押し込み荷重（図 1-a.）について必要な構造的な性能を有することを確認している。

一方、塔状比が大きい建物では、地震時に建物基礎に大きな引抜き荷重が作用する場合があります、本設地盤アンカーやカウンターウェイトなどを用いて、引抜き荷重に抵抗する例が見受けられる。このような場合に、本工法を適用すれば（図 1-b.）、より基礎工事を合理化できるが、ソイルセメント壁の引抜き抵抗力に関する知見は少ない²⁾。

そこで、芯材を有するソイルセメント柱の引き抜き抵抗力を確認するため、実大ソイルセメント柱の鉛直引抜き載荷実験を実施した。本報では、現場施工実験および鉛直引抜き載荷実験について報告し、引抜き抵抗力の評価方法について提案式の妥当性を示す。

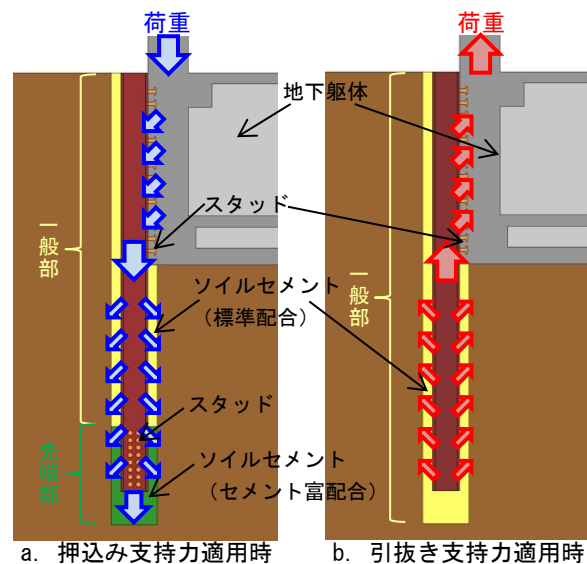


図 1 PSPII 工法概念図

2. 実験概要

実験は、茨城県境町にある試験場にて行った。

2.1 試験体諸元

試験体諸元を表 1 に、試験場の地盤と試験体に取り付けたひずみゲージ位置を図 2、図 3 に示す。

試験体はソイルセメント径が 650mm 掘削長 31m、芯材は H-350×350×12×19、長さ L=30m (L=15m×2 本)、継手部はボルト接合とした。芯材にはスタッド等は設けず、フリクションカットも施していない。また、ひずみゲージはひずみ

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室
**技術研究所 構造研究部 土木構造研究室

表1 試験体の諸元

試験体	単軸	三軸
ソイルセメント径	650mm	
削孔長	31.0m	
芯材	H-350×350×12×19	
芯材長	30.0m (15.0m×2本)	
継手	ボルト継ぎ手	

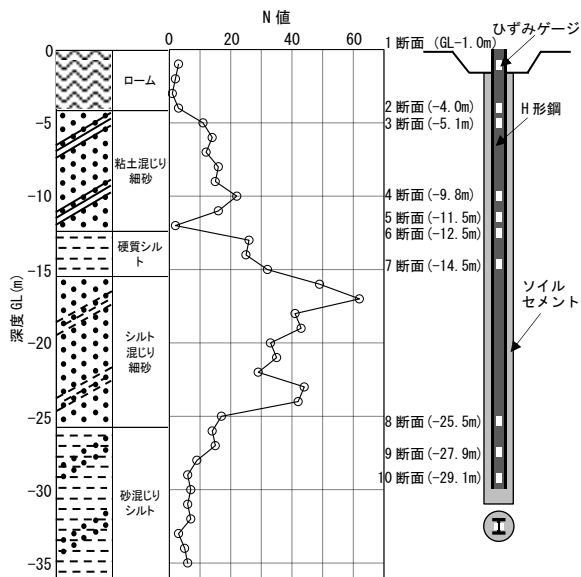


図2 単軸試験体の地盤とひずみゲージ取り付け位置

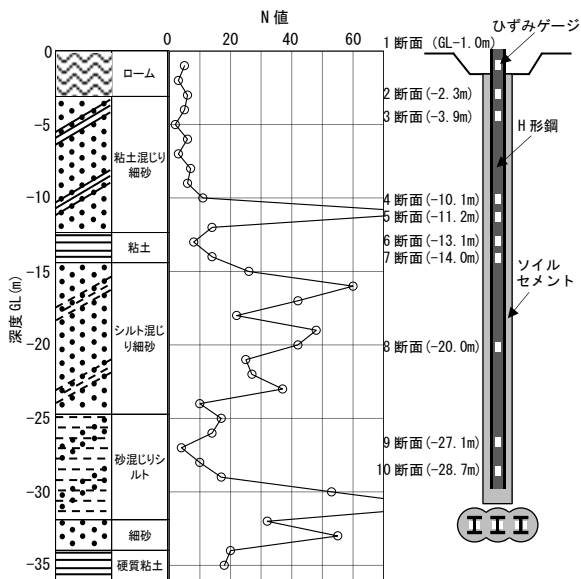


図3 三軸試験体の地盤とひずみゲージ取り付け位置

計測位置 i 断面 (i=1~10) における芯材のウェブ両面に貼り付けた。

2.2 荷重装置および荷重サイクル

荷重装置は反力杭を使用する反力杭式荷重装置とした(図4、写真1)。荷重装置は、最大容量5000kNの油圧ジャッキを複数台使用し、試験最大荷重に対して2割以上の安全率を有するように設計した。

荷重サイクルは地盤工学会基準³⁾に準拠し、段階荷重の多サイクル方式とし、芯材頭部に引抜き荷重を作用させた。

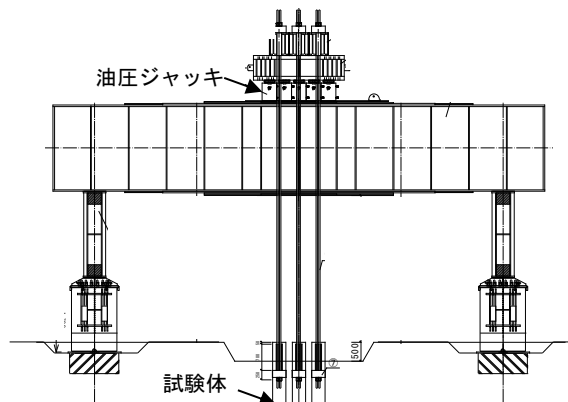


図4 荷重試験装置(三軸試験体用)



写真1 荷重試験装置全体

2.3 ソイルセメントの施工と強度

ソイルセメント柱の注入液の配合を表2に示す。試験体の施工方法は通常のソイルセメント壁の施工に準拠⁴⁾し、本設の構造物としての品質確保のため設計基準強度や、削孔速度、攪拌回数などを規定している。

また、強度等の品質確認のため、試験体施工前に同条件で芯材を挿入しないソイルセメント柱を施工し、オールコアボーリングにて試料を採取した。図5、図6にそれぞれの試験体の材齢4週

と載荷試験日の一軸圧縮強度 q_u および変形係数 E_{50} の深度分布を示す。

単軸、三軸試験体ともに一軸圧縮強度 q_u は、深度方向に増加する傾向にあり、表層 (GL-4m) 付近を除いて、設計基準強度 $F_c=500\text{kN/m}^2$ を上回った。また、変形係数 E_{50} と一軸圧縮強度の関係は、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 (単軸試験体 $E_{50}=263 \cdot q_u$ 、三軸試験体 $E_{50}=282 \cdot q_u$) であった。

3. 実験結果

3.1 単軸試験体荷重-変位関係

単軸試験体の引抜き荷重と芯材の頭部および先端部の変位関係を図7に示す。

図7より、第7段階荷重載荷付近で折れ曲がり確認できる。また、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 (382N/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。

3.2 単軸試験体ひずみ軸力分布

図8に芯材ひずみの深度分布、図9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 p_i は式(1)により評価した。

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

- p_i : i断面における軸力 (kN)
- ε_i : i断面のひずみ
- E_H : 芯材のヤング率
- A_H : 芯材断面積 (=0.01719m²)
- E_{SCi} : i断面ソイルセメント変形係数 (kN/m²)
- A_{SC} : ソイルセメントの有効断面積 (m²)
(設計径 $\phi 650$ 断面積 - 芯材断面積 = 0.31464m²)

ソイルセメントの一軸圧縮強度が試験体下部で大きくなっていることから、図5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、降伏ひずみを超えた部分は不定として破線で示した。

表2 注入液の配合 (kg/掘削土 1m³)

水セメント比	水	セメント (BB)	ベントナイト	流動化剤
240%	384	160	3	6+9

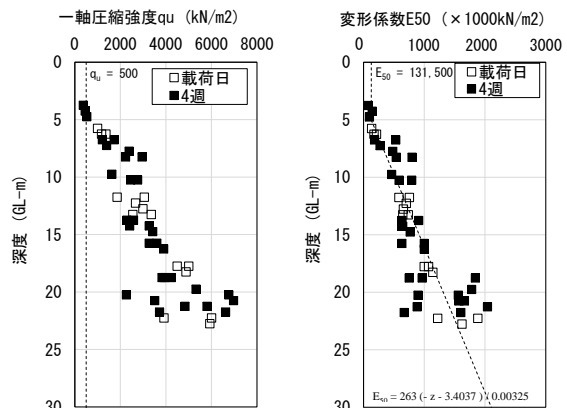


図5 単軸試験体の深度と一軸圧縮強度および変形係数関係

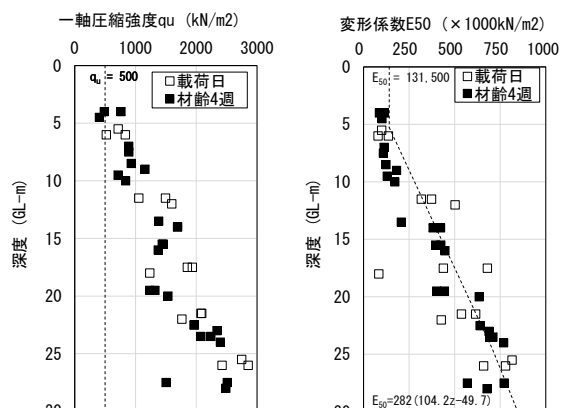


図6 三軸試験体の深度と一軸圧縮強度および変形係数関係

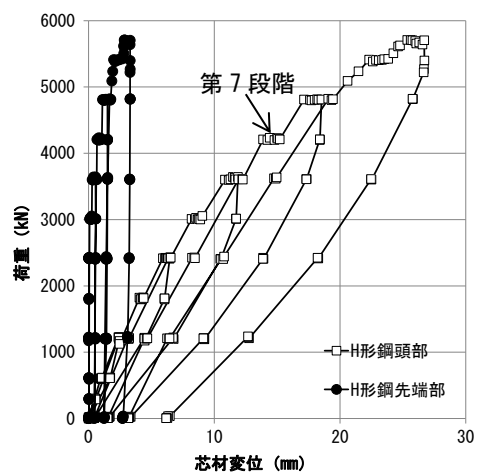


図7 荷重-変位関係

図8、図9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。第8段階(4800kN)から第9段階(5400kN)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10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。これは、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值を上回る摩擦力度が發揮されている。

3.3 三軸試験体荷重-変位関係

三軸試験体の引抜き荷重と芯材の頭部および先端部の変位関係を図11に示す。

4サイクル目の最大荷重(12800kN) 荷重終了後、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荷重を終了した。

3.4 三軸試験体ひずみ軸力分布

図12に芯材ひずみの深度分布、図13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12、図13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發揮されている。

図14に周面摩擦力度と芯材の区間中央変位の

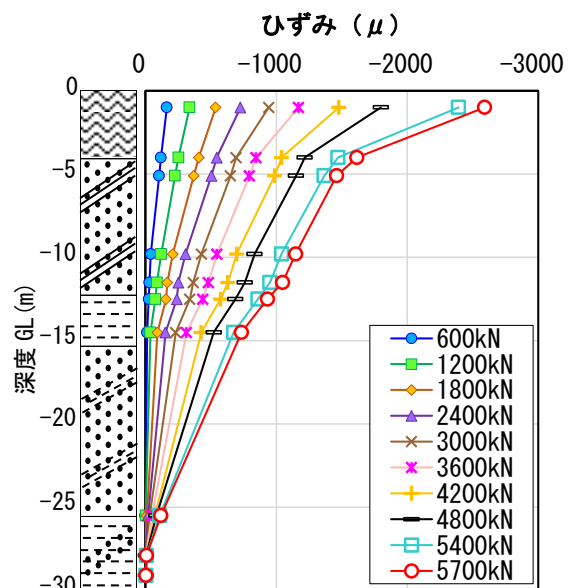


図8 単軸試験体の芯材ひずみの深度分布

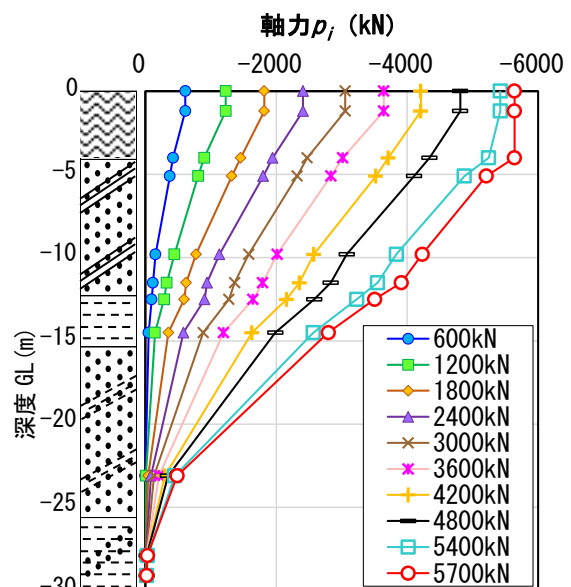


図9 単軸試験体のソイルセメント柱の軸力の深度分布

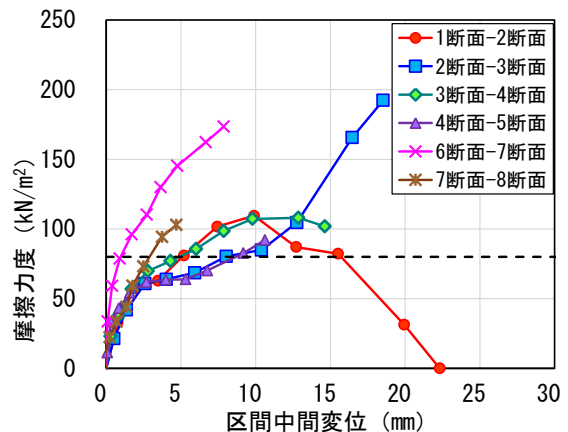


図10 単軸試験体の周面摩擦力度と芯材の区間中央変位の関係

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、表層付近のソイルセメントが安定しないといった傾向が見られた範囲(図 6)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值を上回る摩擦力度が発揮されている。

4. 引抜き抵抗力の評価方法

本工法を適用したソイルセメント改良体の短期引き抜き抵抗力 R_{TV} 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)) をもとに式(4)~式(6)にて算出することとした。

式(5)により算定した極限引抜き抵抗力和鉛直引抜き載荷実験から得られた最大載荷荷重を表 3 に示す。

鉛直引抜き載荷試験で確認された最大荷重は、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力 R_{tu1} 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} から算出した極限引抜き抵抗力和 R_{TV} 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であることを示した。

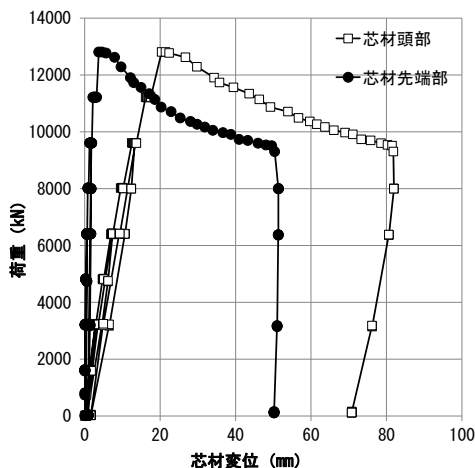


図 11 三軸試験体荷重-変位関係

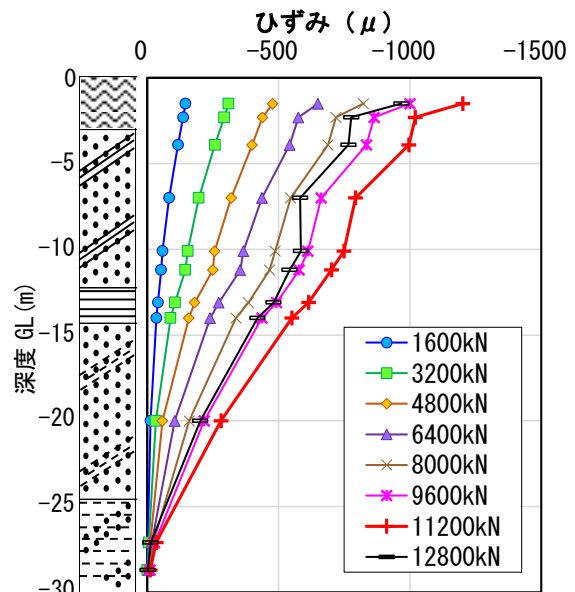


図 12 三軸試験体の芯材ひずみの深度分布

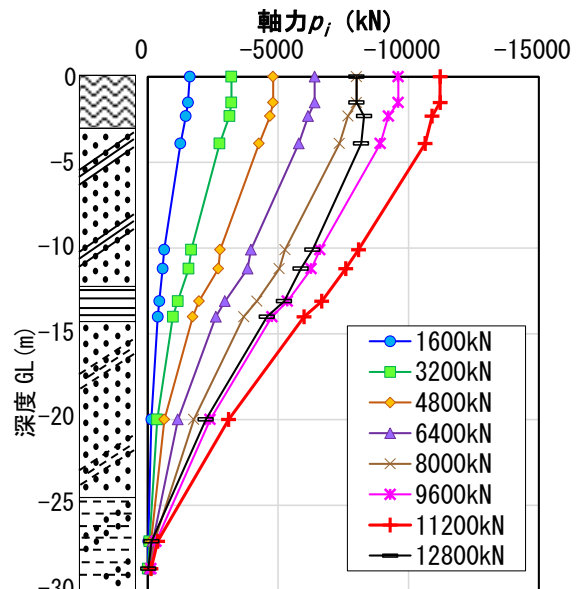


図 13 三軸試験体のソイルセメント柱の軸力の深度分布

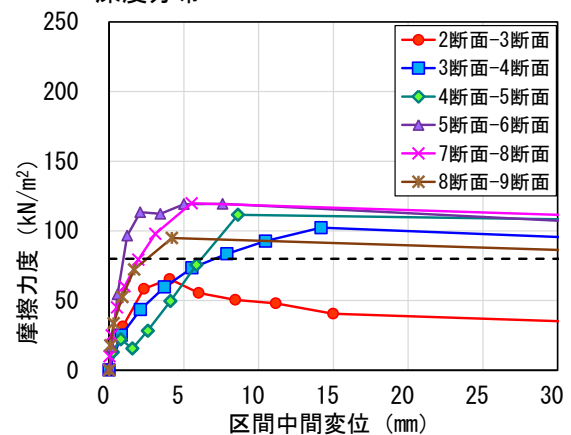


図 14 三軸試験体の周面摩擦力度と芯材の区間中央変位の関係

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

R_{tu1} : 極限周面摩擦力 (kN)
 ϕ : ソイルセメントの周長 (m)
 $N_{s\text{ave}}$: 改良体の周囲の地盤のうち砂質土地盤の平均 N 値 (上限を 30 とする)
 L_s : 改良体の周囲地盤のうち砂質土地盤に接する層厚 (m)
 $q_{u\text{ave}}$: 改良体の周囲地盤のうち粘性土地盤の一軸圧縮強度平均値 (上限 200kN/m²)
 L_c : 改良体の周囲地盤のうち粘性土地盤に接する層厚 (m)

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

R_{tu2} : 極限付着抵抗力 (kN)
 τ_b : 付着強度 (kN/m²)
 ϕH : 芯材の周長 (mm)

$$R_{TY} = (2/3) \cdot R_{TU} + w_p \quad \dots (4)$$

R_{TY} : 短期引抜き抵抗力 (kN)
 R_{TU} : 極限引抜き抵抗力 (kN)
 w_p : ソイルセメント改良体の自重 (kN)
 F_s : 安全率 (短期荷重に対して 1.5)

$$R_{TU} = \Sigma(\min(R_{tu1}, R_{tu2})) \quad \dots (5)$$

$$\Sigma R_{tu1} < \Sigma R_{tu2} \quad \dots (6)$$

表 3 載荷試験結果と提案式による引抜き抵抗力の比較

試験体名	提案式による極限引抜き抵抗力	最大載荷荷重
単軸	2506kN	5640kN
三軸	5848kN	11215kN

5. まとめ

ソイルセメント改良体 (PSPII) 工法の引抜き抵抗荷重を確認するために実施した鉛直引抜載荷実験で得られた結果を以下にまとめる。

- ① 芯材を有するソイルセメント柱の鉛直引抜き載荷実験を実施した結果、最大荷重は、単軸試験体で 5640kN、三軸試験体で 11215kN となった。
- ② 国交省告示第 1113 号の評価式を参考にした極限周面摩擦力 R_{tu1} と芯材とソイルセメントの付着抵抗力 R_{tu2} から算出される極限引抜き抵抗力 R_{TU} を、単軸試験体、三軸試験体ともに上回った。
- ③ ①、②より、本工法を本設の構造物として地震時の建物に作用する引抜き荷重の抵抗として適用する場合の提案式の妥当性が示された。

なお、本工法は、2020 年 3 月 25 日付で (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 『P S P II 工法 - 芯材を有するソイルセメント改良体工法 (改定 2)』を取得している。

[謝辞]

本報告は、安藤ハザマ、奥村組、鴻池組、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、関係各位には、ご協力いただきまして、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) 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
- 3) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 2002
- 4) 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
- 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