

# 本設杭に用いるソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗評価

渡 邊 康 司 水 本 実  
(本社建築本部)

荒 川 真 榎 本 浩 之  
(本社建築本部) (本社設計本部)

## Evaluation of Tensile Resistance on a Soil-Cement Mixing Wall Using a Permanent Pile

Koji Watanabe Minoru Mizumoto  
Makoto Arakawa Hiroyuki Enomoto

### Abstract

Soil-cement mixing walls are usually considered temporary structures, and left buried in the ground. Soil-cement mixing walls using permanent piles are investigated to rationalize foundation structures and reduce environmental burdens. The use of the embedded portion of a soil-cement mixing wall as a permanent pile was examined, and the tensile resistance of soil-cement mixing wall was evaluated in full-scale load tests. This paper describes background and previous studies, indicates the full-scale load tests required to evaluate tensile resistance on the soil, presents the model experiments to estimate the tensile resistance on the pile body, and finally discusses the evaluation method of tensile resistance on a soil-cement mixing pile.

### 概 要

ソイルセメント柱列壁は、従来、掘削工事の際の山留め壁として用いられ、仮設構造物として取り扱われてきた。しかしながら、近年、基礎構造の合理化や環境負荷の低減などのニーズが高まりつつあり、仮設構造物として扱われてきたソイルセメント柱列壁を本設杭として利用するための検討を進めてきた。基礎底以深の根入れ部分を本設杭として利用する際のソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗は、地盤から定まる引抜き抵抗（杭体と地盤間、コーン状土塊と地盤間の破壊）、および杭体から定まる引抜き抵抗で評価することとなる。本報では、仮設構造物として用いられる一般的な施工方法を用いて構築されたソイルセメント柱列壁を対象として、引抜き抵抗の評価方法を構築するために実施した実大載荷試験結果および模型実験結果について報告するとともに、本設杭として使用するソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗の評価方法を示す。また、本報で示す評価法は日本建築センターの認証を受けており、実務設計において適用が可能である。

### 1. はじめに

ソイルセメント柱列壁は、原位置でセメントミルクを注入しながら地盤を攪拌・混合することによって造成したソイルセメントに、応力伝達材となる芯材としてH形鋼を挿入し構築される。ソイルセメント柱列壁は、従来、掘削工事の際の山留め壁として用いられ、仮設構造物として取り扱われてきた。したがって、建物本体の荷重を負担させることやそのような場合を想定した引抜き抵抗の評価方法は確立されていない。しかしながら、近年、基礎構造に対する合理化や環境負荷の低減などのニーズが高まりつつあり、Fig. 1に示すように仮設構造物として扱われてきたソイルセメント柱列壁を本設杭として利用するための検討を進めてきた<sup>1) 2) 3)</sup>。また、このように仮設構造物として使用されていたソイルセメント柱列壁を本設杭として利用することで、新たに施工される本設杭が削減できるため、杭工事の工期短縮や合理化も期待できる。

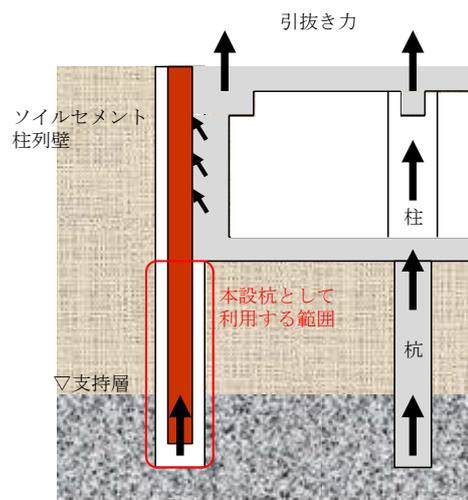


Fig. 1 ソイルセメント柱列壁の本設杭利用  
Utilization for Permanent Pile of Soil-Cement  
Mixing Wall

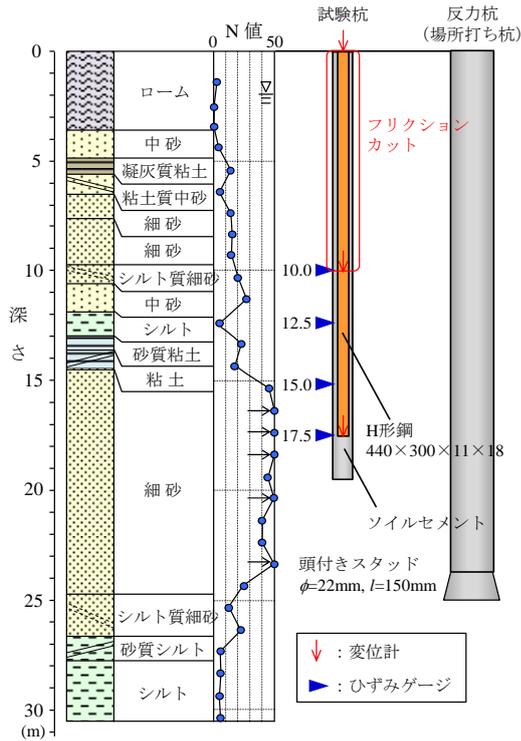


Fig. 2 地盤条件および試験杭 (サイトA)  
Soil Profile and Test Piles (Site A)

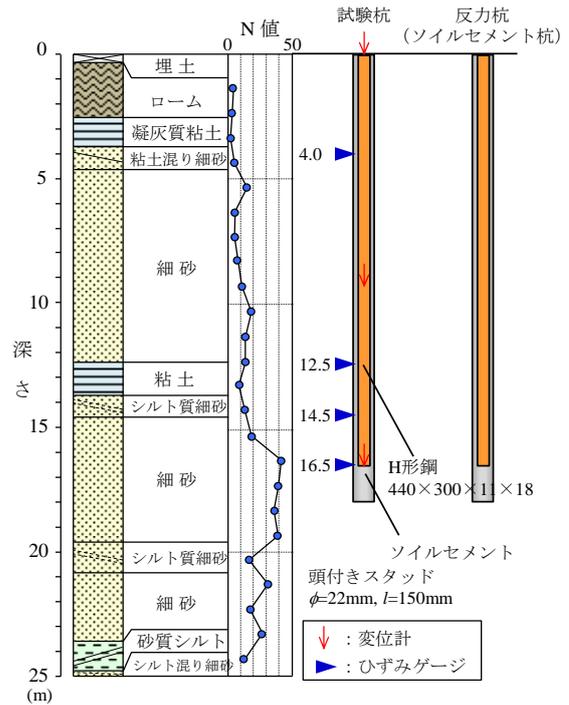


Fig. 4 地盤条件および試験杭 (サイトC)  
Soil Profile and Test Piles (Site C)

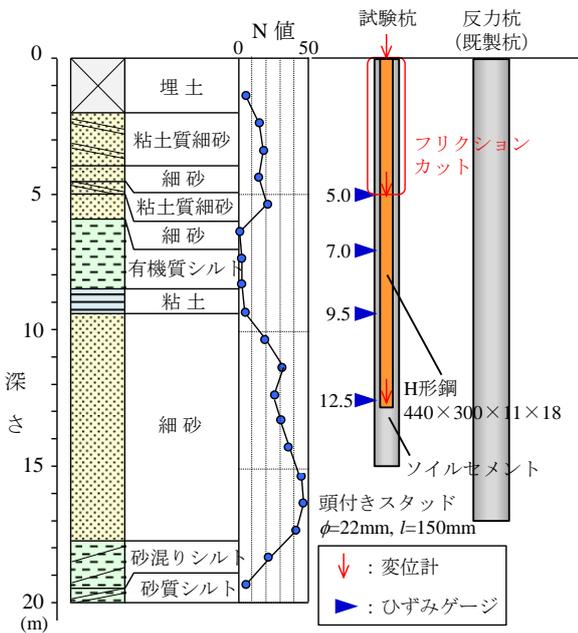


Fig. 3 地盤条件および試験杭 (サイトB)  
Soil Profile and Test Piles (Site B)

山留め壁を本設杭として利用した場合の引抜き抵抗に関する検討は、実大載荷試験や施工試験が数例ある。金子は、本設杭として利用するため、高強度のソイルセメント柱列壁を用いて、本設杭として利用する工法を開発し、その引抜き抵抗の評価を行っている<sup>4)</sup>。田屋ら<sup>5)</sup>、吉岡ら<sup>6)</sup>は、施工管理方法や施工機械を改良し、高強度の

ソイルセメント柱列壁を用いて、その引抜き抵抗の評価を実施している。いずれの研究も、一般的に用いられるソイルセメント柱列壁と異なり、施工方法を改善し高強度のソイルセメント柱列壁を構築することを前提としている。

基礎底で深の根入れ部分の本設杭として利用する際のソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗は、地盤とソイルセメントの間で生じる破壊、H形鋼とソイルセメント間でのすべり破壊、コーン状土塊と地盤間の破壊の3種類の破壊モードを想定し検討する必要がある。したがって、ソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗を評価する際には、地盤から定まる極限引抜き抵抗（地盤と杭体間の破壊、コーン状土塊と地盤間の破壊）と杭体から定まる極限引抜き抵抗が重要となる。本報では、仮設構造物として用いられる一般的な圧縮強度の範囲（500～2000kN/m<sup>2</sup>程度）および施工方法を用いて構築されたソイルセメント柱列壁を対象として、引抜き抵抗の評価方法を構築するために実施した実大載荷試験結果および模型実験結果について報告するとともに、引抜き抵抗の評価方法を示す。

## 2. 実大載荷試験

本章では、地盤と杭体間から定まる引抜き抵抗を評価するために実施した実大載荷試験に関して述べる。なお、実大載荷試験は、3つのサイトで実施した。

### 2.1 載荷試験条件

サイトA～Cの地盤条件および試験杭をFig. 2～4に示す。

サイトAの試験地盤はGL-7.0m程度までがロームおよび凝灰質粘土，GL-7.0～12.0mが主に細砂および中砂，GL-12.0～15.0mがシルトおよび粘土，GL-15.0m以深が細砂で構成されている。サイトAの試験杭は，GL-10.0mまでに芯材とソイルセメント間のフリクションカットを施し，杭先端をN値50程度の地盤に根入れした。また，サイトBの試験地盤はGL-7.0m程度までが粘土質細砂および細砂，GL-7.0～9.5mが有機質シルトおよび粘土，GL-9.5m以深が細砂で構成されている。サイトBの試験杭は，サイトAと同様にGL-5.0mまでに芯材とソイルセメント間のフリクションカットを施し，杭先端をN値30程度の地盤に根入れした。さらに，サイトCの試験地盤はGL-4.0m程度までがロームおよび凝灰質粘土，GL-4.0～12.5mが細砂，GL-12.5m～14.5mが粘土およびシルト，GL-14.5m以深が細砂で構成されている。サイトCの試験杭は，フリクションカットを施しておらず，杭先端をN値40程度の地盤に根入れした。

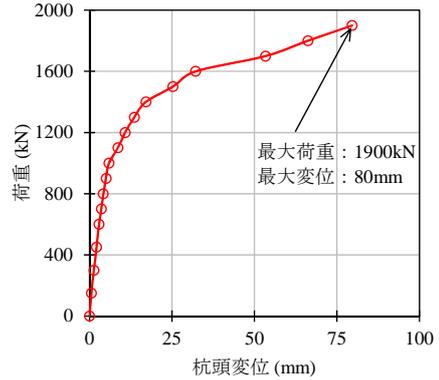
地盤とソイルセメント間の引抜き抵抗（周面摩擦）を確認するために，全サイトの試験杭にスタッドを打設した。スタッドの打設範囲は，フリクションカットの下端以深，もしくは杭全長である。各サイトのスタッドの打設ピッチは，サイトAで320mm，サイトBで400mm，サイトCで600mmである。また，試験杭のソイルセメント改良体径（杭径）は，各サイトともに $\phi 600$ mmである。さらに，各サイトで用いた芯材（H形鋼）は，いずれもH-440 $\times$ 300 $\times$ 11 $\times$ 18（mm）である。

ソイルセメント改良体の設計強度は，サイトA～Cともに500kN/m<sup>2</sup>である。載荷試験後に実施したコア抜き試料の圧縮試験結果より，ソイルセメント改良体の強度が設計強度500kN/m<sup>2</sup>を満足していることを確認しており，その強度の範囲は概ね500～2500kN/m<sup>2</sup>の範囲であった。特に，ソイルセメントの脱水効果が生じやすい砂質土地盤において，大きな強度が得られた。

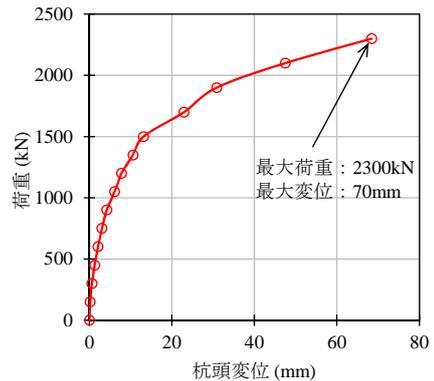
本章で示す実大載荷試験は，すべて地盤工学会基準“杭の鉛直載荷試験基準・同解説”<sup>7)</sup>に準拠して実施した。載荷方法は，段階載荷・多サイクル方式を採用し，新規荷重保持時間30分，履歴荷重保持時間2分，ゼロ荷重保持時間を15分とした。各載荷試験では，単調載荷の引抜き試験を実施後に，同一の試験杭に対して長期荷重を保持した長期載荷試験を実施し，長期の引抜き力に対する影響を検証した。サイトA，B，Cの長期荷重保持時間はそれぞれ5日間，7日間，10日間である。なお，長期載荷試験を開始するまでの期間は，全サイトで7日間程度である。

また，試験杭が周辺地盤に影響を及ぼす影響範囲も地盤工学会基準に準拠して評価した。具体的には，試験杭と反力杭の中心距離を，杭径の3倍以上となるように設定した。

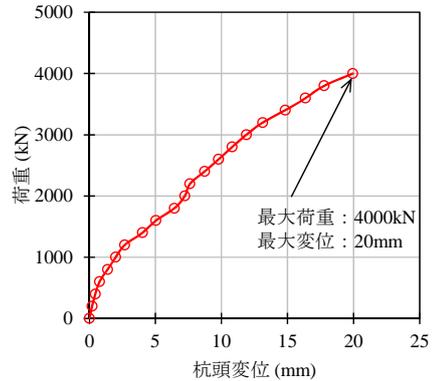
測定項目は，杭頭における荷重および変位，H形鋼のひずみである。なお，荷重および変位は，引抜き方向を正として取り扱った。また，変位測定時の不動点は，試験杭の影響範囲外の地表面に設けた。杭先端変位と杭中



(a) サイトA



(b) サイトB



(c) サイトC

Fig. 5 杭頭荷重-変位関係

Relationships between Load and Displacement at Pile Head

間深度の変位は，二重管方式により測定した。

## 2.2 載荷試験結果

各サイトで得られた杭頭部における荷重-変位関係を Fig. 5に示す。なお，Fig. 5中の荷重は引抜き荷重を意味する。各サイトにおいて，載荷初期から曲線が立ち上がり，最大荷重に到達している。各サイトで得られた最大荷重と最大変位を図中に示す。

Fig. 5に示す杭頭荷重-変位関係において変位が増加する際の荷重と，極限引抜き抵抗（杭径の10%変位=60mmにおける荷重）もしくは最大荷重に長期の安全率3.0を考

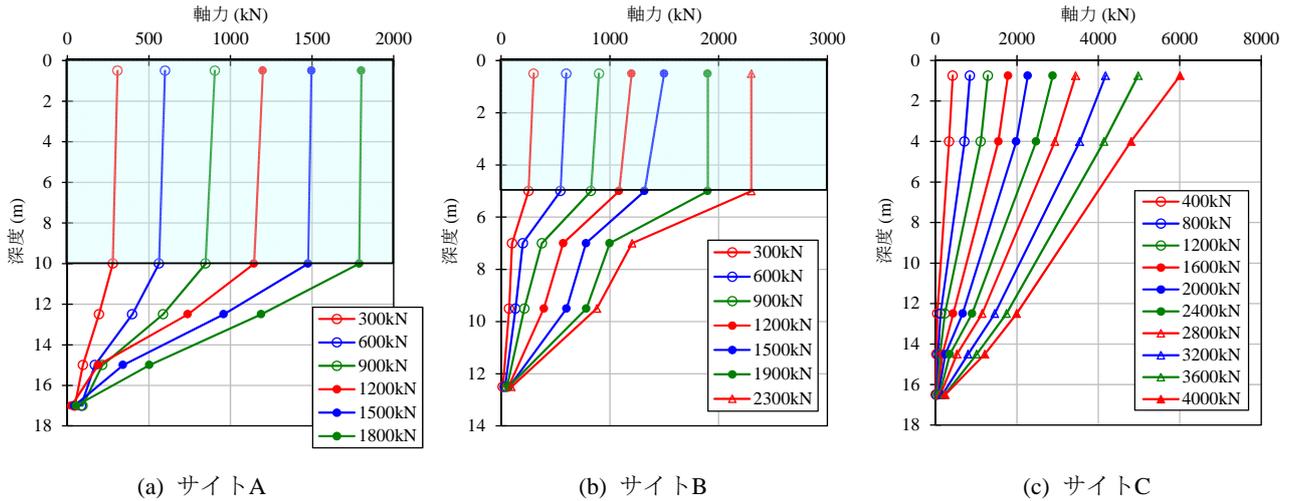


Fig. 6 軸力分布

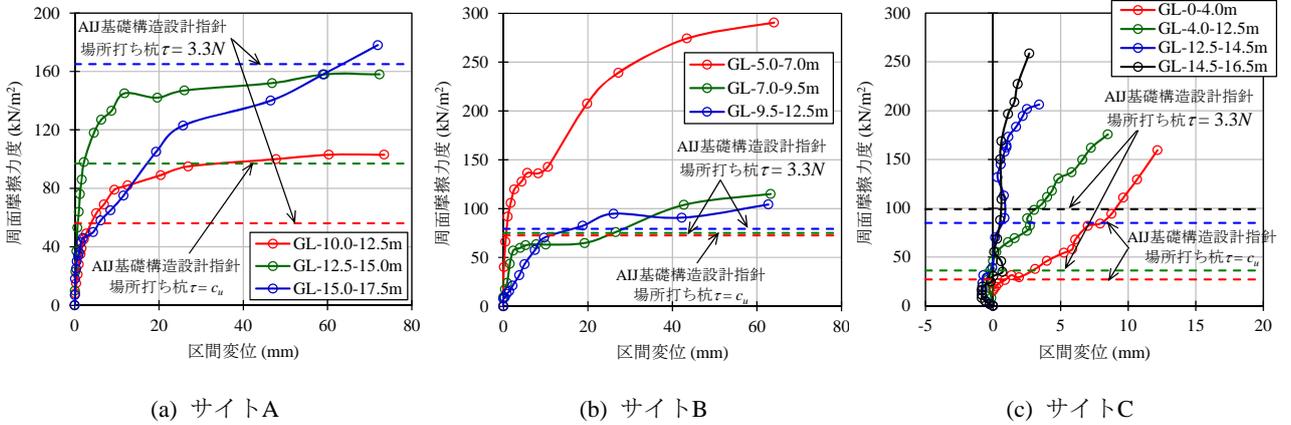


Fig. 7 周面摩擦力度-区間変位関係

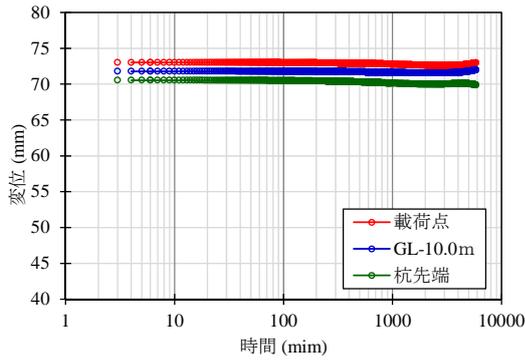
Relationships between Shaft Friction and Local Pile Displacement

慮して長期荷重試験の荷重を設定した。

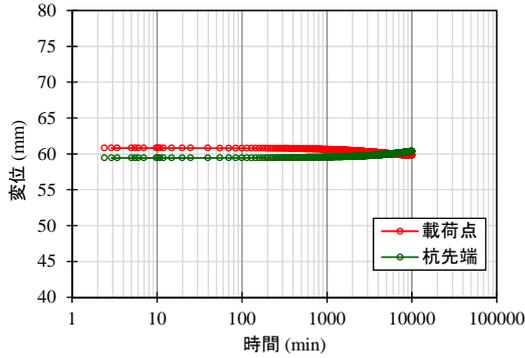
Fig. 6に各サイトで得られた芯材に生じる軸力の深度分布を示す。ここで、軸力は測定されたH形鋼のひずみに材料試験結果から得られた鋼材の弾性係数およびH形鋼の断面積を乗じるにより算出した。また、図中のハッチング部分はフリクションカットの区間を示す。Fig.6より、フリクションを有する区間において引抜き荷重の増加に伴い軸力差の勾配が大きくなっていることがわかる。また、杭頭部にフリクションカットを施したサイトAおよびサイトBにおいて、フリクションカットを施した区間で軸力差はほとんど生じておらず、フリクションカットが有効に機能したと考えられる。

Fig. 7に各サイトで得られた周面摩擦力度と区間変位の関係を示す。ここで、周面摩擦力度は、Fig. 6に示した軸力を用いて、各区間の軸力差を周面積で除して評価した。なお、周面積の算出には、ソイルセメント改良体径を用いた。さらに、区間変位は杭頭部で測定された変位と試験杭の地層境界にて測定されたひずみの値により算出した。Fig. 7の各図中には、各区間の曲線と同色の破線で日本建築学会・基礎構造設計指針<sup>8)</sup>に示される場所打

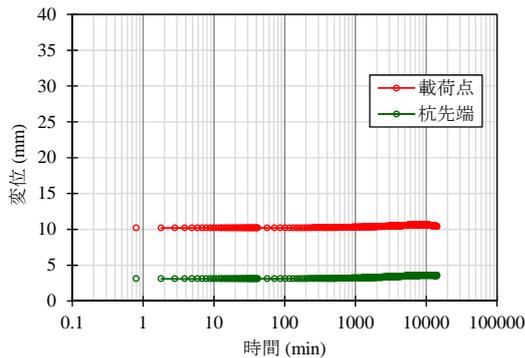
ち杭の周面摩擦力度の評価式により得られる周面摩擦力度の値を合わせて示した。Fig. 7(a)に示すサイトAの結果によれば、上部砂質土層 (GL-10.0~12.5m) において最大周面摩擦力度100kN/m<sup>2</sup>程度を示しており、極限状態を超え残留状態に至っている。また、粘性土層 (GL-12.5~15.0m) において最大周面摩擦力度160kN/m<sup>2</sup>を示しており、上部砂質土層と同様に極限状態を超え残留状態に至っている。一方、下部の砂質土層 (GL-15.0~17.5m) の周面摩擦力度は180kN/m<sup>2</sup>程度となっており、漸増傾向にあり、極限状態に到達していないと判断できる。サイトBで得られたFig. 7(b)より、上部砂質土層 (GL-5.0~7.0m) において最大周面摩擦力度280kN/m<sup>2</sup>程度を示している。その他、粘性土層 (GL-7.0~9.5m) において最大周面摩擦力度100kN/m<sup>2</sup>を、下部砂質土層 (GL-9.5~12.5m) では最大周面摩擦力度110kN/m<sup>2</sup>を示した。すなわち、すべての区間で極限状態に到達し残留状態に達していると推察される。Fig. 7(c)に示すサイトCの結果から、上部粘性土層 (GL-0~4.0m) および下部粘性土層 (GL-12.5~14.5m) において最大周面摩擦力度150~200kN/m<sup>2</sup>程度を示しており、漸増傾向にあり、いまだ極



(a) サイトA



(b) サイトB

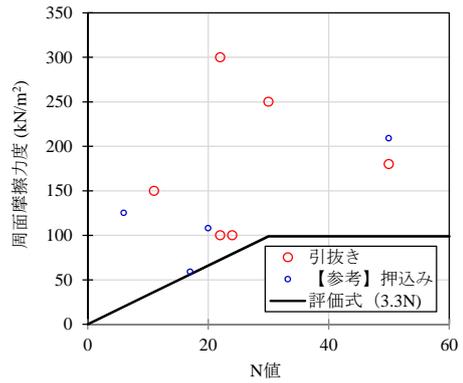


(c) サイトC

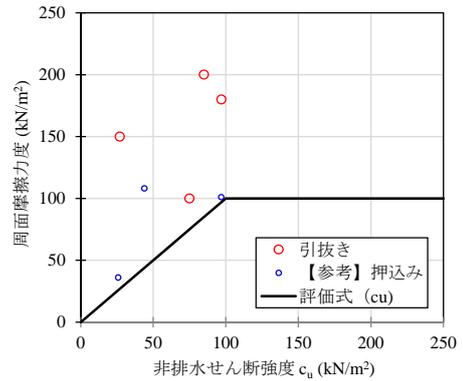
Fig. 8 変位の時刻歴変化  
Time History Curves of Displacement

限状態に至っていない。さらに、上部砂質土層(GL-4.0～12.5m)および下部砂質土層(GL-14.5～16.5m)の周面摩擦力度は180～250kN/m<sup>2</sup>程度を示しており、粘性土層と同様に極限状態には到達しておらず漸増傾向にあると判断できる。周面摩擦力度に関して、日本建築学会・建築基礎構造設計指針<sup>8)</sup>に示される場所打ち杭の周面摩擦力度の評価式 (Fig. 7(a)~(c)の破線) と比較すると、粘性土では非排水せん断強度 $c_u$  ( $c_u=100\text{kN/m}^2$ : 上限値) を、砂質土では $3.3N$  ( $N=50$ : 上限値,  $N$ : 標準貫入試験から得られるN値) を満足していることがわかる。したがって、引抜き力が作用した場合の周面摩擦力度は、基礎構造設計指針に示される場所打ち杭と同等以上に評価することが可能であると考えられる。

Fig. 8には、単調荷重の引抜き試験終了後に同一の試験杭に対して実施した長期荷重試験の結果を示す。なお、



(a) 砂質土



(b) 粘性土

Fig. 9 周面摩擦力度の評価  
Evaluation of Shaft Friction

サイトA, B, Cにおける長期荷重は、それぞれ500kN, 700kN, 1500kNであった。

同図より、載荷点および杭先端部（サイトAはフリクションカット下端も含む）で長期の引抜き力を保持した際に大きなクリープ変位が生じていないことがわかる。したがって、ソイルセメント柱列壁に長期の引抜き力が作用した場合にも十分に抵抗できると考えられる。

### 2.3 実大荷重試験結果のまとめ

Fig. 9に周面摩擦力度とN値および非排水せん断強度との関係を示す。ここで、周面摩擦力度は、砂質土では標準貫入試験から得られるN値を、粘性土では非排水せん断強度をパラメータとして評価した。なお、Fig. 9中には同種の杭の支持力を評価するために実施した押込み荷重試験により得られた周面摩擦力度の値<sup>9)</sup>も合わせて示した。Fig. 9(a)より、引抜き時における砂質土の周面摩擦力度は最小でも3.3N程度となっており、文献<sup>8)</sup>に示される場所打ち杭の周面摩擦力度と同程度以上の評価が可能である。一方、Fig. 9(b)に示される粘性土の周面摩擦力度も、非排水せん断強度 $c_u$ を下限値とする評価と同程度以上となっており、砂質土と同様に文献<sup>8)</sup>に示される場所打ち杭の周面摩擦力度と同程度以上の評価が可能になった。

さらに、浮力のような長期の引抜き力を想定した引抜き力を強制的に作用させた場合にも、杭体各部の変位が載荷時間に対してほぼ一定値を示しており大きなクリープ変位は生じないことから、長期荷重に対しても十分な引抜き抵抗を有していることがわかった。したがって、浮力が作用するようなケースにおいて、ソイルセメント柱列壁に長期荷重を負担させることが可能であると考えられる。

### 3. 杭体の引抜き性能に関する評価<sup>9)</sup>

本章では、杭体から定まる引抜き抵抗を評価するために模型実験から得られた評価方法に関して述べる。なお、本章の詳細は参考文献<sup>9)</sup>に示す鉛直支持力の評価において示している。

#### 3.1 付着挙動の評価

ソイルセメントとH形鋼の付着挙動を評価するために、ソイルセメント強度をパラメータとした気中載荷実験(押抜きせん断実験)を実施した。なお、本実験はH形鋼とソイルセメントの付着挙動を調査することが目的であるため、H形鋼表面に特殊な加工は行っていない。また、ソイルセメントを構成する地盤材料による付着挙動の違いを把握するため、細粒分を含まない配合Aと細粒分を含む配合Bの2種類に対して実験を行った。

Fig. 10には、最大付着強度 $\tau_{bp}$ と圧縮強度 $q_u$ の関係を示す。ここで、圧縮強度は試験体作成時に採取したモールド試料に対して、押抜きせん断実験時に実施した一軸圧縮試験により得られた圧縮強度(実強度)で整理している。また、最大付着強度は実験で得られた付着強度のピーク値として評価した。Fig. 10より、一軸圧縮強度が大きくなるにつれて、最大付着強度も大きくなるがわかる。H形鋼とソイルセメントの付着強度 $\tau$ は、文献<sup>10)</sup>において丸鋼および平鋼とソイルセメントの付着試験結果から式(1)のように示される。

$$\tau = (0.11 \sim 0.21)q_u \quad (1)$$

Fig. 10 中に実線で示したように、本実験で得られた最大付着強度は式(1)で算定される付着強度の範囲をほぼ満足していると考えられ、最大付着強度の算定に式(1)を用いることが可能であることを示唆している。

残留付着強度 $\tau_{br}$ と圧縮強度 $q_u$ の関係を Fig. 11 に示す。ここで、残留付着強度はピーク後に付着強度が低下し、一定値に落ち着いた値として評価した。Fig. 11 から、残留付着強度に関しても一軸圧縮強度が大きくなるにつれて、大きくなる傾向があることがわかった。残留付着強度に関して、実験から得られた付着強度の下限値として評価すると、式(2)に示す通りとなる。

$$\tau_{br} = 0.032q_u \quad (2)$$

以上より、最大付着強度(式(1))と残留付着強度(式(2))を比較すると、残留付着強度は最大付着強度に対して8~18%程度低下することがわかる。したがって、4章

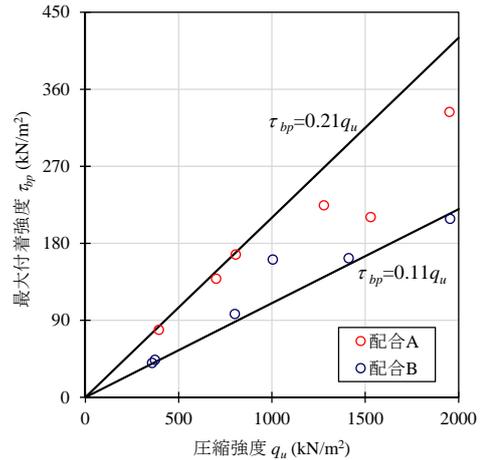


Fig. 10 最大付着強度-圧縮強度関係  
Relationships between Maximum Bond Strength and Compressive Strength of Soil-Cement

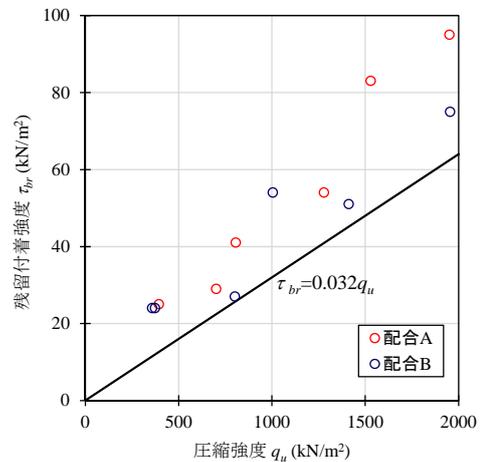


Fig. 11 残留付着強度-圧縮強度関係  
Relationships between Residual Bond Strength and Compressive Strength of Soil-Cement

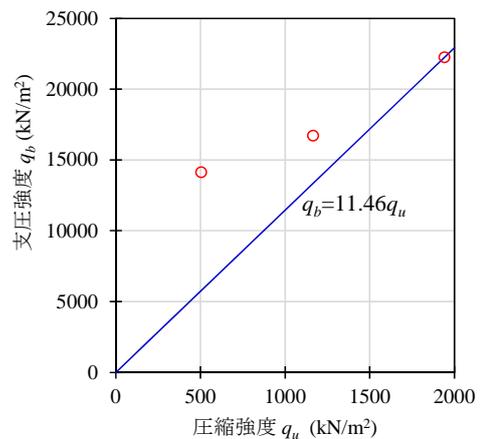


Fig. 12 スタッドの支圧強度-圧縮強度関係  
Relationships between Bearing Strength of Stud and Compressive Strength

で示す引抜き抵抗評価において、ソイルセメントと芯材の付着力は付着切れ後の付着強度が担保できる残留付着強度を用いて評価する。

### 3.2 スタッドの抵抗力評価

H形鋼に打設するスタッドは、H形鋼とソイルセメントの引抜き抵抗を向上させるために打設される。スタッドの抵抗力の評価は、ソイルセメント強度、スタッドの有無をパラメータとして、気中載荷実験（押抜きせん断実験）により確認した。

Fig. 12には、スタッドの支圧強度と一軸圧縮強度の関係を示す。ここで、スタッドの支圧強度は押抜きせん断実験から得られたスタッド有りの試験体とスタッド無しの試験体の極限荷重の差をスタッドの水平面への投影面積で除して算出した。ここで、極限荷重は、ソイルセメント改良体径の10%変位量における荷重とした。Fig. 12より、一軸圧縮強度が大きくなるにつれて、スタッドの支圧強度も大きくなるのがわかる。スタッドの支圧強度を Fig. 12 に示した支圧強度の下限値として評価すると、式(3)に示す通りとなる。

$$q_b = 11.46q_u \quad (3)$$

ここで、

$q_b$  : スタッドの支圧強度

$q_u$  : ソイルセメントの一軸圧縮強度

H形鋼にスタッドを打設する場合のスタッドの支圧抵抗力は、式(3)を用いて評価することとし、下限値を用いることで実験により確認したソイルセメント強度の範囲内では、安全側の評価が可能であると考えられる。なお、式(3)の適用は、一軸圧縮強度  $500 \leq q_u \leq 2000$  (kN/m<sup>2</sup>)の範囲である。

## 4. 本設杭として利用するソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗評価方法

### 4.1 引抜き抵抗評価方法

本章では、2章および3章で示した引抜き抵抗の検討結果に基づき、本設杭として利用するソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗の評価方法について示す。引抜き抵抗の評価方法のフローをFig. 13に示す。Fig. 13に示すよう、引抜き抵抗の検討を行う際には、はじめにコーン破壊が生じるか否かの検討を行うこととする。これは、杭体の地盤への根入れ長が短い場合に、杭体周辺の土塊がコーン状に引き抜けて破壊することを考慮したためである。その結果、コーン破壊が生じない場合には、地盤と杭体間から定まる引抜き抵抗と杭体から定まる引抜き抵抗の2つのルートで検討することとする。

一方、コーン破壊が生じる場合には、地盤と杭体間から定まる引抜き抵抗、杭体から定まる引抜き抵抗およびコーン状土塊と地盤間の破壊から定まる引抜き抵抗の3つのルートで検討することとする。最終的には、コーン破壊が生じる場合と生じない場合であっても算定される

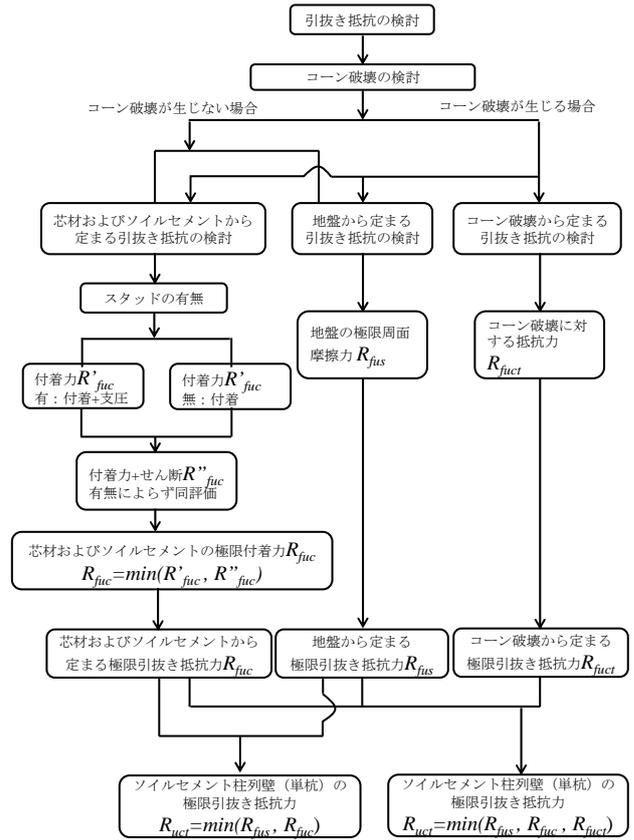


Fig. 13 引抜き抵抗評価方法のフロー  
Flow for Evaluation of Tensile Resistance on Soil-Cement Mixing Wall Using Permanent Pile

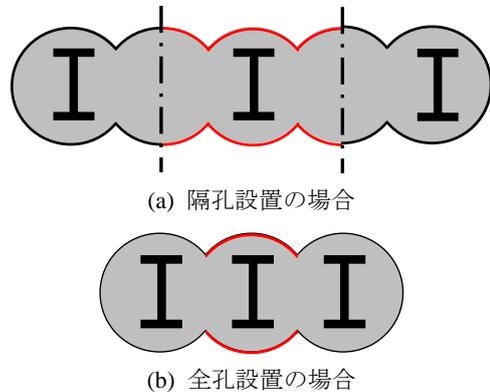


Fig. 14 周長の考え方

Ideal Perimeter of Soil-Mixing Wall

各引抜き抵抗を比較し、小さい値を本設杭として利用する場合のソイルセメント柱列壁の極限引抜き抵抗とする。なお、本評価法は芯材(H形鋼)を挿入した1コラムに対しての評価方法であり、ソイルセメント柱列壁への芯材の設置状況により引抜き抵抗(極限周面摩擦力)を評価する際の周面積の取り扱いに留意が必要となる。杭周面積を算定する際の杭の周長は、Fig. 14 (赤線部分) に示すように芯材の設置状況により規定する。具体的には、隔孔設置の場合にはFig. 14(a) に示すように隣接する無芯孔

の中心までの地盤に接する面の周長で、全孔設置の場合にはFig.14(b)に示すように1孔あたりの地盤に接する面の周長で評価する。また、その他の場合には隔孔設置と全孔設置の組み合わせにより評価する。

4.1.1 引抜き抵抗の評価式 式(4)～式(6)に上述の引抜き抵抗の評価式を示す。

$$R_{act} = \frac{1}{F_s} R_{uct} + w_p \quad (4)$$

ここで、

- $R_{act}$  : 許容引抜き抵抗力 (kN)
- $R_{uct}$  : 極限引抜き抵抗力 (kN)
- $F_s$  : 安全率(長期3, 短期1.5)
- $w_p$  : 杭の自重(地下水位以深は浮力を考慮) (kN)

コーン破壊が生じない場合

$$R_{uct} = \min(R_{fus}, R_{fuc}) \quad (5)$$

コーン破壊が生じる場合

$$R_{uct} = \min(R_{fus}, R_{fuc}, R_{fuct}) \quad (6)$$

ここで、

- $R_{fus}$  : 地盤とソイルセメント間の極限周面摩擦力 (kN)
- $R_{fuc}$  : 芯材とソイルセメント間の極限付着力 (kN)
- $R_{fuct}$  : コーン破壊に対する引抜き抵抗 (kN)

4.1.2 地盤と杭体の極限引抜き抵抗力 地盤と杭体間から定まる極限引抜き抵抗力は、式(7)に示すように極限周面摩擦力により算出する。

$$R_{fus} = \phi \tau_{fu} L = \phi \sum (3.3 \bar{N}_s L_s + \bar{c}_u L_c) \quad (7)$$

ここで、

- $\phi$  : 芯材の設置状況により定まる周長(m)
- $\tau_{fu}$  : 地盤とソイルセメント間の極限周面摩擦力度 (kN/m<sup>2</sup>)
- $L$  : 極限周面摩擦力を算定する区間長 (m), (杭先端部から上部0.5mを減じた長さ)
- $\bar{N}_s$  : 砂質地盤のN値  
 $\bar{N}_s \leq 30$  (ただし, 30を上限値とする)
- $L_s$  : 砂質地盤の区間長 (m)
- $\bar{c}_u$  : 粘土質地盤の非排水せん断強度 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\bar{c}_u \leq 100$  (kN/m<sup>2</sup>) (ただし, 100kN/m<sup>2</sup>を上限値とする)
- $L_c$  : 粘土質地盤の区間長 (m)

なお、2.3で得られた結果より、地盤とソイルセメント間の周面摩擦力度は、砂質土3.3N、粘性土 $c_u$ とした。

4.1.3 杭体の極限引抜き抵抗力 杭体から定まる極限引抜き抵抗力は、式(8)に示すように、芯材とソイルセメント間の極限付着力により算出する。

$$\text{極限付着力} : R_{fuc} = \min(R'_{fuc}, R''_{fuc}) \quad (8)$$

スタッドの有無により、芯材とソイルセメント間の極限付着力の算定方法は異なる。すなわち、スタッドによ

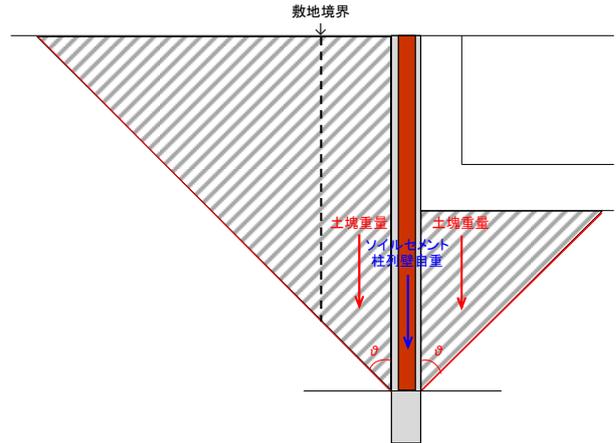


Fig. 15 コーン破壊面  
Cone Failure Surface

る支圧抵抗力を累加する違いであり、後述の式(9)と(11)において、それを反映している。また、フランジ面の付着力とフランジ間のソイルセメントのせん断力はスタッドの影響を受けないため、スタッドの有無に関わらず式(10)で与えることとした。式(9)~(11)に検討方法の詳細を示す。

スタッド無しの場合：

$$R'_{fuc} = \phi_H \tau_{bu}^* L \quad (9)$$

$$R''_{fuc} = 2BL\tau_{bu}^* + 2HL\tau_s^* \quad (10)$$

スタッド有りの場合：

$$R'_{fuc} = \phi_H \tau_{bu}^* L + Q_s \quad (11)$$

ここで、

- $\phi_H$  : 芯材の周長 (m)  
 $\phi_H = 2H + 4B - 2t_w$  ( $t_w$ : ウェブ厚,  $H$ : ウェブ高さ,  $B$ : フランジ幅)
- $\tau_{bu}^*$  : 残留付着力度 (kN/m<sup>2</sup>)  
 $\tau_{bu}^* = 0.03q_{uc}$
- $L$  : 付着力を算定する区間長 (m)  
(杭先端部から上部0.5mを減じた長さ)
- $Q_s$  : スタッドの支圧抵抗力 (kN),  $Q_s = nA_s \tau_{st}^*$
- $n$  : スタッドの本数
- $\tau_{st}^*$  : スタッドの支圧強度 (kN/m<sup>2</sup>)  $\tau_{st}^* = 11.0q_{uc}$
- $A_s$  : スタッドの支圧面積 (m<sup>2</sup>)
- $\tau_s^*$  : ソイルセメントのせん断強度 (kN/m<sup>2</sup>),  
 $\tau_s^* = 0.33q_{uc}$

芯材とソイルセメント間の極限付着力を算定する際の残留付着力度およびスタッドの支圧強度は、3.1および3.2で得られた結果に基づき設定した。

4.1.4 コーン状土塊と引抜き抵抗力 コーン状土塊と地盤間の破壊から定まる極限引抜き抵抗力は、式(12)により算出する。その際、コーン破壊面はFig.15に示すように設定する。また、土塊重量の算定範囲が隣地との敷地境界に干渉する場合には、敷地境界までの土塊重量

を算定することとする。

$$R_{fuct} = W_s + W_{scp} \quad (12)$$

ここで、

- $W_s$  : コーン破壊面上部の土塊重量 (kN)
- $W_{scp}$  : ソイルセメント柱列壁の自重 (kN)
- $\theta$  : コーン破壊面の傾斜角 (deg.)  
( $30^\circ$  もしくは  $45^\circ$  とする。)

#### 4.2 評価式の検討結果

本節では、4.1節で示した引抜き抵抗の評価式により算出した計算値と実大載荷試験から得られた実測値の比較を行った。Fig. 16 に実測値と計算値の比較結果を示す。Fig. 16 中には、余裕度(実測値/計算値)1.0~3.0のラインも合わせて示した。Fig. 16 から、各サイトの比較結果のプロットは、スタッドの有無に関わらず余裕度 1.0 のラインより上方に位置しており、評価式により算出した結果が安全側であることを示唆している。したがって、本設杭に用いるソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗評価に本報で示した評価式を適用することが可能であると考えられる。

#### 5. まとめ

一般的に仮設構造物として用いられるソイルセメント柱列壁を本設杭として利用するために、実大載荷試験および模型実験を実施し、引抜き抵抗を確認した。さらに、ソイルセメント柱列壁を本設杭として利用する場合の引抜き抵抗の評価方法を確立した。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 地盤と杭体間の引抜き抵抗を確認するために実施した実大載荷試験より、ソイルセメント柱列壁の引抜き抵抗は、建築学会・基礎構造設計指針に示される場所打ち杭の周面摩擦力度の評価式で算定される値と同等以上に評価できることがわかった。
- 2) 長期の引抜き力が作用した場合の引抜き抵抗を長期載荷試験により確認した。安全率3.0を採用した場合、長期の引抜き力を作用させても大きなクリープ変位が生じず、長期荷重に対して十分抵抗できることがわかった。
- 3) 付着挙動を確認するために実施した押抜きせん断試験より、H形鋼とソイルセメント間の付着強度を評価した。付着挙動においては、付着切れが生じた場合の安全性を確保するために、引抜き抵抗の評価式では残留付着強度を用いて評価することとした。
- 4) スタッドの抵抗力を評価するために実施した押抜きせん断試験より、ソイルセメント中のスタッドによる支圧強度を評価した。スタッドの支圧抵抗力は、支圧強度の下限値を評価式として適用することとした。なお、スタッド自体の耐力の照査は別途実施することとする。

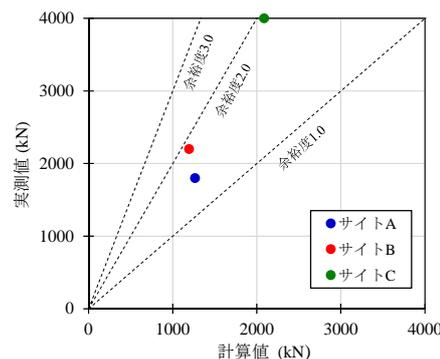


Fig. 16 引抜き抵抗力の実測値と計算値の比較  
Comparison with Observed Value and Calculated Value on Bearing Capacity

- 5) ソイルセメント柱列壁を本設杭として利用する場合の引抜き抵抗の評価方法を確立した。引抜き抵抗の評価においては、地盤から定まる引抜き抵抗(杭体と地盤間、コーン状土塊と地盤間の破壊)、および杭体から定まる引抜き抵抗でから定まる引抜き抵抗で検討することとした。
- 6) 本評価法は、日本建築センターにて認証を受けた評価法であり、実務設計に適用可能となった。

#### 参考文献

- 1) 渡邊康司, 他: ソイルセメント柱列壁の実大載荷試験, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 I, pp.487-488, 2013.9
- 2) 渡邊康司, 他: 本設杭利用するソイルセメント柱列壁の付着挙動に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造- I, pp.437-438, 2014.9
- 3) 渡邊康司, 他: 本設杭として利用するソイルセメント柱列壁の実大鉛直載荷試験, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造- I, pp.451-452, 2015.9
- 4) 金子治: ソイルセメントH形鋼合成杭工法の荷重-変位特性, 第49回地盤工学シンポジウム論文集, pp.127-132, 2004.11
- 5) 田屋裕司, 他: ソイルセメント壁の杭利用に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造- I, pp.667-668, 2009.8
- 6) 吉岡典哉, 他: ソイルセメント壁の杭利用に関する研究(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造- I, pp.669-670, 2009.8
- 7) 地盤工学会: 地盤工学会基準, 杭の鉛直載荷試験方法・同解説, 2002
- 8) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001
- 9) 渡邊康司, 他: 本設杭に用いるソイルセメント柱列壁の鉛直支持力評価, 大林組技術研究所報, No. 80, 2016
- 10) 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