

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

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 Vertical Bearing Capacity on Soil–Cement Mixing Wall Using Permanent Pile

Koji Watanabe Minoru Mizumoto
Makoto Arakawa Hiroyuki Enomoto

Abstract

An examination was performed on the use of soil–cement mixing walls, which have been treated previously as temporary structures left buried in the ground as permanent piles in order to rationalize foundation structures and to reduce environmental burdens. This study aimed for the use of the embedded portion of soil–cement mixing wall as a permanent pile and evaluated the vertical bearing capacity in a full-scale load test. This study first describes the background and the previous studies; second, it indicates the full-scale load tests in order to evaluate the bearing capacity of the soil, then presents the model experiments to estimate the bearing capacity on the pile body, and finally discusses the evaluation method of determining vertical bearing capacity on 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鉛直支持力は、地盤から定まる極限支持力と杭体から定まる極限支持力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、鉛直支持力の評価方法を構築するために実施した実大載荷試験および模型実験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鉛直支持力評価方法を示す。

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鉛直支持力の評価方法は確立されていない現状にあった。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^{1), 2), 3)}。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ことにより杭工事の工期短縮や工事費縮減も期待できる。

山留め壁を本設杭として利用した場合の鉛直支持力に

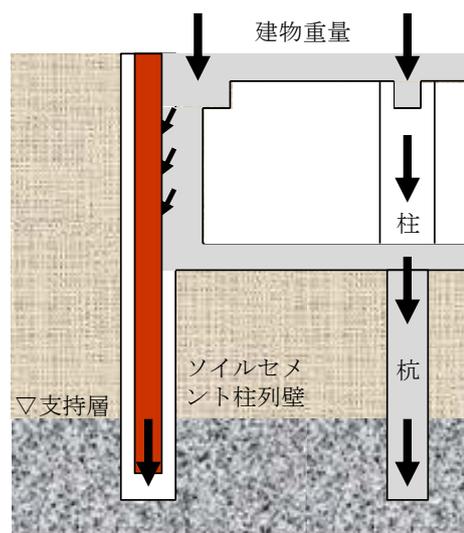


Fig. 1 ソイルセメント柱列壁の本設杭利用
Utilization for Permanent Pile of Soil-Cement Mixing

関する検討は、実大載荷試験や施工試験を中心に数例の

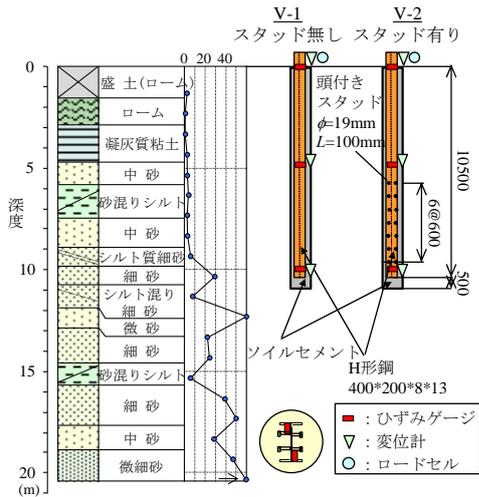


Fig. 2 地盤条件および試験杭 (サイトA)
Soil Profile and Test Piles (Site A)

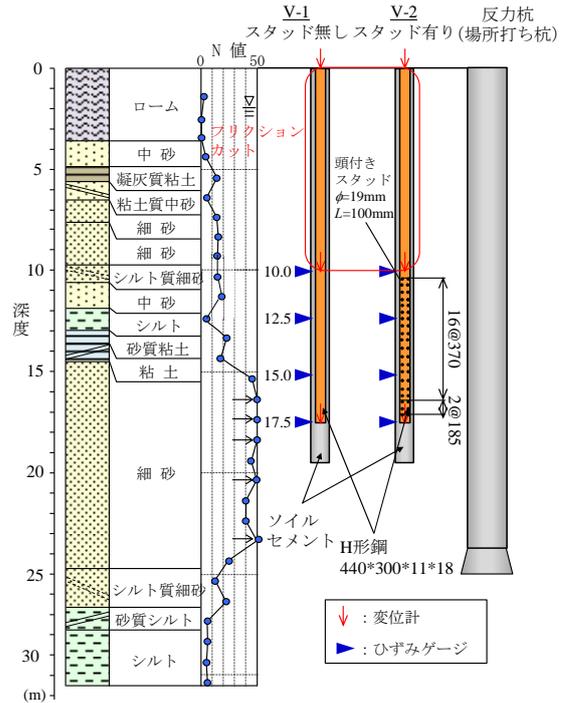


Fig. 4 地盤条件および試験杭 (サイトC)
Soil Profile and Test Piles (Site C)

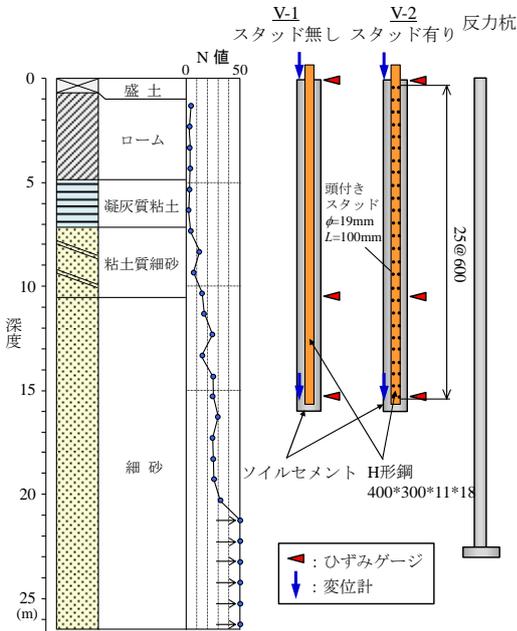


Fig. 3 地盤条件および試験杭 (サイトB)
Soil Profile and Test Piles (Site B)

事例がある。金子は、高強度のソイルセメント柱列壁を構築し、本設杭として利用する工法を開発し、その支持力評価を行っている⁴⁾。田屋らは、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構築し、その支持力評価を実施している^{5), 6)}。いずれも一般的に用いられるソイルセメント柱列壁と異なり、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鉛直支持力は、地盤の破壊とH形鋼-ソイルセメント間でのすべり破壊の2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、鉛直支持力の評価は、地盤から定まる極限支持力と杭体から定まる極限支持力の2通り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圧縮強度の範囲(500~2000kN/m²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、鉛直支持力の評価方法を構築するために実施した実大載荷試験および模型実験について報告するとともに、鉛直支持力の評価方法を示す。

2. 実大載荷試験

本章では、地盤から定まる鉛直支持力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-5.0m程度までがロームおよび凝灰質粘土、GL-5.0m以深が主に中砂および細砂で構成されており、試験杭の杭先端をN値20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程度までがロームおよび凝灰質粘土、GL-7.0m以深が主に粘土質細砂および細砂で構成されており、試験杭の杭先端を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-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Cの試験杭は、GL-10.0mまでに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。

サイトA～Cの試験杭は、スタッドの有無をパラメータとした2本である。スタッドを有する試験杭には、杭全長にわたってスタッドを打設した。ここで、サイトCのスタッドを有する試験杭は、フリクションカット下端以深のみにスタッドを打設した。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φ 600mmを使用した。各サイトで採用した芯材（H形鋼）は以下に示す通りである。

サイトA：H-400×200×8×13

サイトB：H-400×300×11×18

サイトC：H-440×300×11×18

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/m²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/m²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500～2000kN/m²の範囲であった。

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”⁷⁾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。また、試験杭と反力杭の影響範囲も地盤工学会基準に準拠し設定した。具体的には、試験杭と反力杭は杭径の3倍以上の離隔を確保した。

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。杭先端変位は、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. 5～7に示す。各サイトでスタッドの有無に関わらず、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。各サイトでスタッドの有無による初期剛性の差異を比較すると、スタッドの有無による有意な差はないと推察される。しかしながら、変位の進行とともに同一変位における負担荷重がスタッドを有する試験杭で大きくなっており、スタッドの効果が発揮されていると考えられる。

Fig. 8～10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、測定されたH形鋼のひずみに鋼材の弾性係数およびH形鋼の断面積を乗じることにより算出した軸力を用いて、各区間の軸力差を周面積で除して算出した。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。Fig. 8に示すサイトAの結果によれば、上部粘土層において最大周面摩擦力度27～36kN/m²を示しており、その傾向は極限状態に至り残留状態となっている。一方、下部の砂質土層の周面摩擦力度は125kN/m²程度を示しており、極限状態には到達していると判断できる。サイトBにて得られたFig. 9より、上部粘土層において最大周面摩擦力度40～44kN/m²を示しており、その傾向はV-1では極限状態に至り残留状態に、V-2では漸増傾向であり極限に達してい

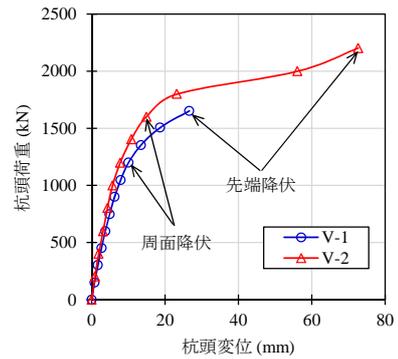


Fig. 5 杭頭荷重-変位関係（サイトA）
Relationships between Load and Displacement at Pile Head (Site A)

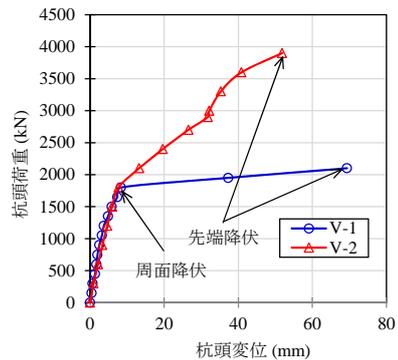


Fig. 6 杭頭荷重-変位関係（サイトB）
Relationships between Load and Displacement at Pile Head (Site B)

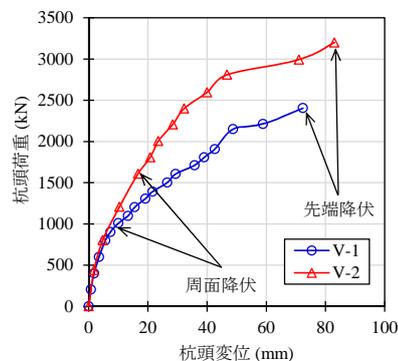
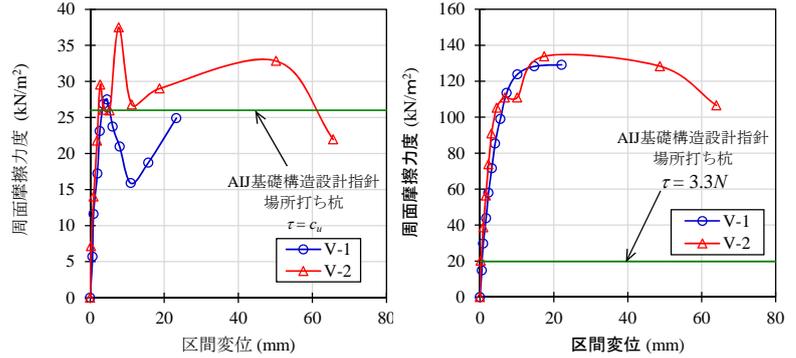


Fig. 7 杭頭荷重-変位関係（サイトC）
Relationships between Load and Displacement at Pile Head (Site C)

ないと推察される。さらに、下部の砂質土層の周面摩擦力度は110kN/m²程度を示しており、V-1では極限状態に到達していると判断できる。Fig. 10に示すサイトCの結果から、上部砂質土層（GL-10.5～12.5m）において最大周面摩擦力度57～59kN/m²程度を示しており、その傾向はスタッド無し・有りともに極限状態に至り残留状態となっている。GL-12.5～15.0mの粘性土層においては最大周面摩擦力度100kN/m²程度を示しており、スタッド無しでは極限状態に到達し残留状態に、スタッド有りでは極限状態となっている。さらに、下部の砂質土層の周面摩擦力度は200kN/m²程度を示しており、極限状態に到達し

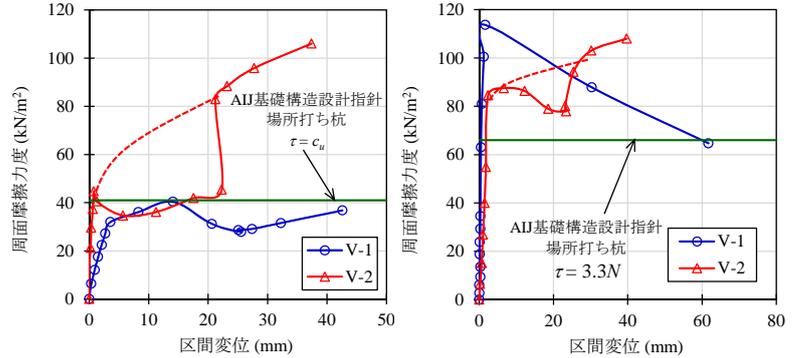
ていると判断できる。周面摩擦力度に関して、日本建築学会・建築基礎構造設計指針⁸⁾に示される場所打ち杭の周面摩擦力度の評価式 (Fig. 8~10の緑実線) と比較すると、粘性土では非排水せん断強度 c_u ($c_u=100\text{kN/m}^2$: 上限値) を、砂質土では $3.3N$ ($N=50$: 上限値, N : 標準貫入試験から得られる N 値) を満足していることがわかる。

Fig. 11に先端支持力度と杭先端変位の関係を示す。また、Fig. 11中には、文献⁸⁾に示されている場所打ち杭の先端支持力度評価式による値 (緑実線) も合わせて示した。なお、先端支持力度は先端到達軸力をH形鋼の包絡面積で除して算出した。Fig. 11から、各サイトともに先端支持力度を発現するために十分な変位が稼働されていることがわかる。また、スタッドを有する杭では、先端支持力度が漸増傾向にあることがわかる。文献⁸⁾に示される先端支持力度の評価式 ($q_p=7500\text{kN/m}^2$: 上限値, $100N$, N : 標準貫入試験から得られる N 値) により算出される値と比較すると、各杭の先端支持力度は評価式による値を上回る傾向を示している。ここで、Fig. 11(c)に示すV-1では評価式による値を下回っている。これは、スタッドが無いため杭体 (芯材-ソイルセメント) の付着切れ



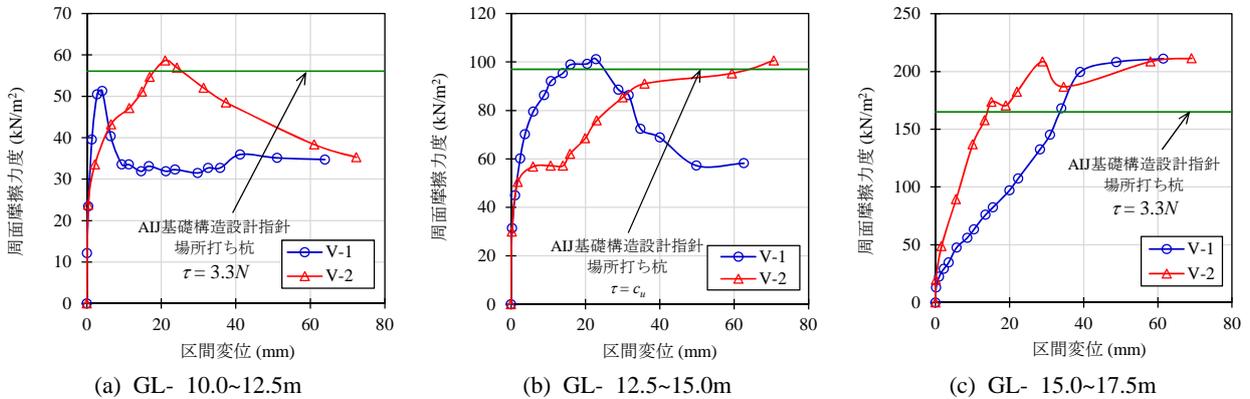
(a) GL- 0~5.25m (b) GL- 5.25~10.25m
Fig. 8 周面摩擦力度-区間変位関係 (サイトA)

Relationships between Shaft Friction and Local Pile Displacement (Site A)



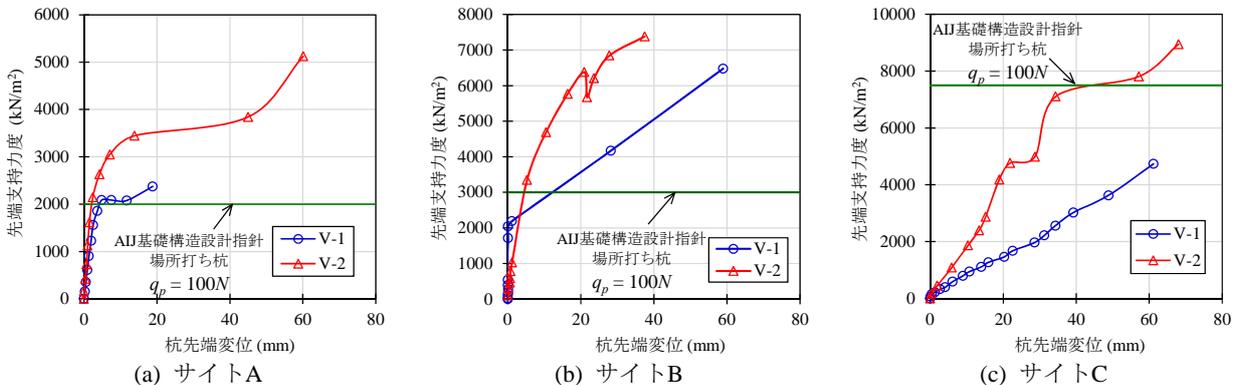
(a) GL- 0~10.5m (b) GL- 10.5~15.5m
Fig. 9 周面摩擦力度-区間変位関係 (サイトB)

Relationships between Shaft Friction and Local Pile Displacement (Site B)



(a) GL- 10.0~12.5m (b) GL- 12.5~15.0m (c) GL- 15.0~17.5m
Fig. 10 周面摩擦力度-区間変位関係 (サイトC)

Relationships between Shaft Friction and Local Pile Displacement (Site C)



(a) サイトA (b) サイトB (c) サイトC
Fig. 11 先端支持力度-杭先端変位関係

Relationships between End Bearing Capacity and Displacement at Pile Tip

が生じ、その後、杭先端変位が漸増しており、芯材先端のソイルセメントに圧縮破壊が生じたためであると推察される。スタッドを有する試験杭では、大きな先端支持力度を示した。これは、スタッドを有することにより、変位の進行とともにH形鋼とソイルセメントが一体として挙動したためであると考えられる。

2.3 実大載荷試験結果の考察

2.2で示した実大載荷試験結果に基づき、周面摩擦力度および先端支持力度の検証を行った。Fig. 12に周面摩擦力度の評価を示す。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。Fig. 12(a)より、砂質土の周面摩擦力度は下限値が3.3N相当となっており、文献⁸⁾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. 12(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⁸⁾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ながわかった。

先端支持力度の評価をFig. 13に示す。ここで、杭先端支持力度は、砂質土地盤のみを対象としているため、杭先端（芯材先端）において標準貫入試験から得られるN値をパラメータとして評価した。なお、杭先端支持力度は、杭（芯材）先端でのソイルセメントの圧縮破壊の発生を考慮して、地盤の先端支持力度が発現されるスタッド有りの場合の結果に基づき評価した。また、先端支持力度は、H形鋼の包絡面積に等価な円の直径の10%の変位レベルの値として整理した。Fig. 13によれば、先端支持力度の下限値は144N程度となり、文献⁸⁾に示される場所打ち杭の先端支持力度の評価式（100N）を上回っており、場所打ち杭と同等以上の評価が可能ながわかった。すなわち、杭体（芯材-ソイルセメント間）の付着切れが生じなければ、評価式を上回ると言える。

3. 杭体の性能に関する模型実験

本章では、杭体から定まる鉛直支持力を評価するために実施した模型実験に関して述べる。模型実験は、H形鋼とソイルセメント間の付着挙動およびH形鋼に打設するスタッドの耐力評価に関して実施した。

3.1 付着挙動の評価

3.1.1 実験条件 気中載荷実験（押抜きせん断実験）の試験体をFig. 14に示す。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形鋼表面に加工は行っていない。Table 1に実験ケースの一覧を示す。本実験では、ソイルセメント強度をパラメータとして押抜きせん断実験を実施した。実施した試験体数は各ケース2体ずつ、計12体である。いずれの試験体も地盤内の状態を模擬するために、ソイルセメントの

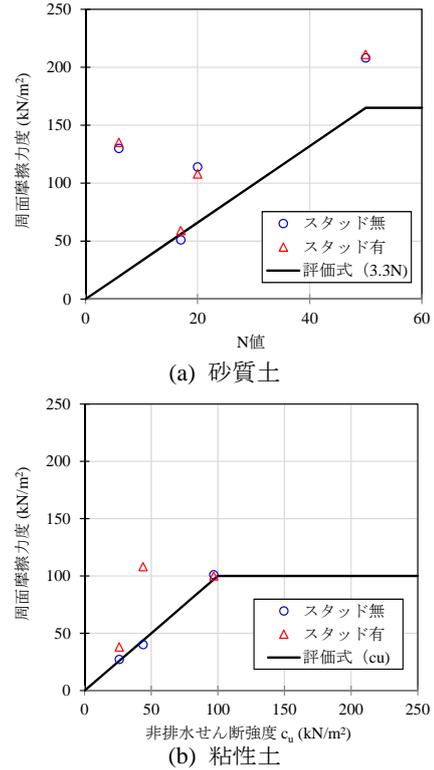


Fig. 12 周面摩擦力度の評価

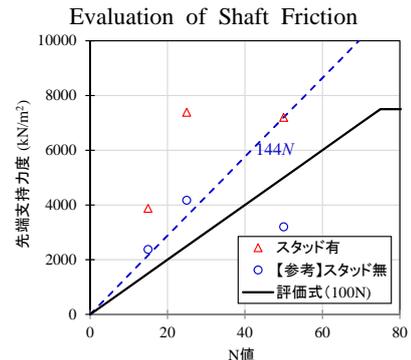


Fig. 13 先端支持力度の評価

Evaluation of End Bearing Capacity

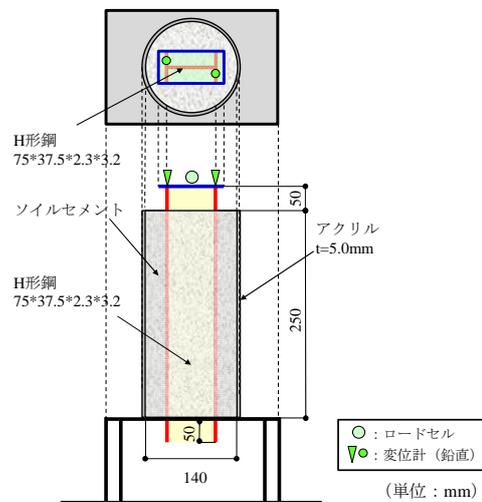


Fig. 14 試験体概要
Schematic View of Test Specimen

周囲をアクリル管で拘束した。計測項目は、載荷点における荷重および変位である。試験体のソイルセメントは、Case 1～Case 3では珪砂6号、高炉セメントB種およびベントナイトを、Case 4～Case 6では珪砂6号および高炉セメントB種を混合することにより作成した。押抜きせん断実験の前には、別途採取した試料を用いて一軸圧縮試験を実施し、強度確認を行なった。押抜きせん断実験の載荷方法は、変位制御で行ない、載荷速度1.0mm/minとした。

3.1.2 実験結果 Fig. 15に各ケースで得られた付着強度-変位関係を配合の種類別に示す。ここで、付着強度は、載荷点において得られた荷重をH形鋼の周面積（H形鋼の周長×H形鋼の長さ）で除して算出した。また、載荷点における変位は、2点計測しており、それらの平均値として整理した。Fig. 15より、いずれのケースでも変位の小さい段階で付着強度が稼働されていることがわかる。付着強度はピークに到達後、変位の進行とともに低下し、残留状態となっていることが確認できた。付着強度がピークに到達する変位は、1～2mm程度であり、ソイルセメント強度が大きいほどピークに到達する変位レベルが大きい傾向にある。Fig. 16には、最大付着強度 τ_b 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。Fig. 16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ことわかる。H形鋼とソイルセメントの付着強度 τ は、文献⁹⁾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. 16 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 τ_{br} と圧縮強度 q_u の関係を Fig. 17 に示す。Fig. 17 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值として評価すると、式(2)に示す通りとなる。

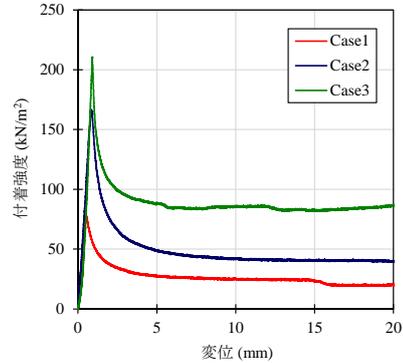
$$\tau_{br} = 0.032q_u \quad (2)$$

3.2 スタッドの抵抗カ評価

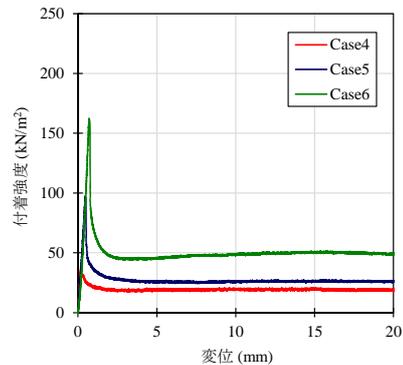
3.2.1 実験条件 スタッドの耐力を評価するために実施した押抜きせん断実験の試験体をFig. 18に示す。本実験は、ソイルセメント強度、スタッドの有無をパラメータとして実施した。計測項目は、載荷点における荷重および変位、ソイル天端における変位、H形鋼のひずみ、ソイルセメント外周の変位である。試験体を拘束するアクリル管には2軸ひずみゲージを設置した。これは、載荷に伴いアクリル管に生じる応力の状態を確認するためである。載荷中のひずみの計測値より、円周方向の応力の

Table 1 実験ケース

	目標強度 (kN/m ²)	単位体積あたりの配合 (kg/m ³)			
		水	セメント	砂	ベントナイト
Case 1	500	464	185	1178	29
Case 2	1000	449	232	1178	28
Case 3	2000	431	286	1178	27
Case 4	500	508	143	1178	0
Case 5	1000	488	205	1178	0
Case 6	2000	464	277	1178	0



(a) Case 1, 2, 3



(b) Case 4, 5, 6

Fig. 15 付着強度-変位関係 Relationships between Bond Strength and Displacement

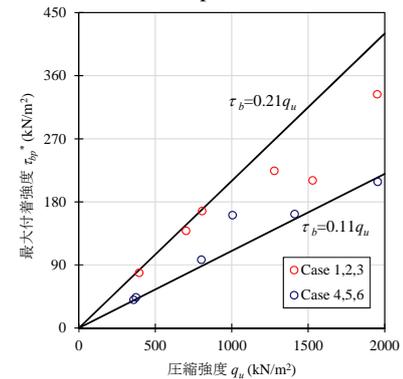


Fig. 16 最大付着強度-圧縮強度関係 Relationships between Maximum Bond Strength and Compressive Strength of Soil-Cement

変化は小さかった。一方、軸方向のひずみは変化が生じたため、載荷中のアクリルとソイルセメント間の付着力の影響は無視できないことがわかった。そこで、荷重-

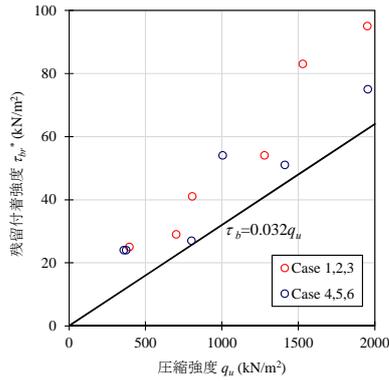


Fig. 17 残留付着強度-圧縮強度関係
Relationships between Residual Bond Strength and Compressive Strength of Soil-Cement

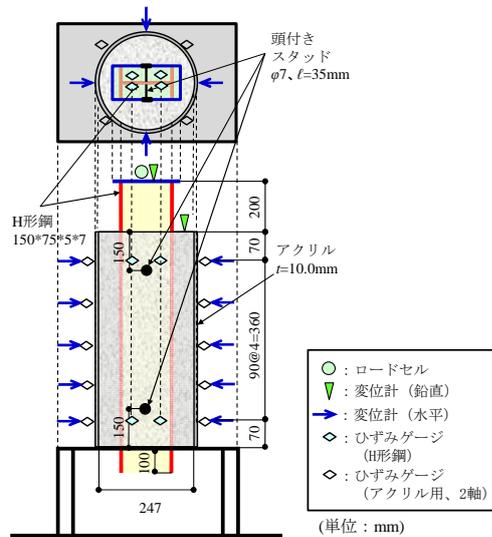
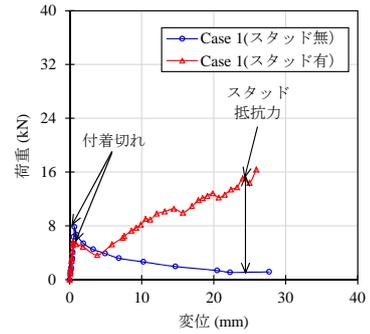


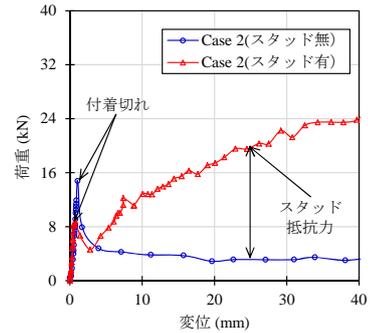
Fig. 18 試験体概要
Schematic View of Test Specimen

変位関係の整理は、載荷中のひずみ値より算出したアクリルとソイルセメント間の付着力を杭頭で得られた荷重の値から減じて整理した。試験体のソイルセメントは、硅砂6号、高炉セメントB種およびベントナイトを混合することにより作成した。押抜きせん断実験の前には、別途採取した試料を用いて一軸圧縮試験を実施し、所定の強度（設計強度：500、1000、2000kN/m²）となっていることを確認している。押抜きせん断実験の載荷方法は、連続載荷方式とした。

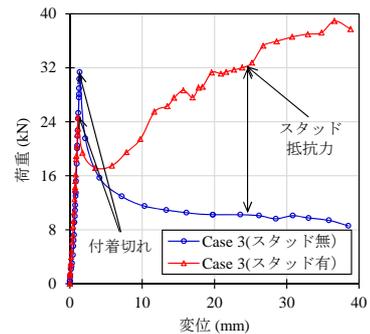
3.2.2 実験結果 Fig. 19 に各ケースで得られた載荷点における荷重-変位関係を示す。Fig. 19 より、スタッド無しの場合には変位の小さい段階で荷重がピークに到達し、変位の進行とともに荷重が低下し、残留状態となっていることがわかる。一方、スタッドがある場合には、変位の小さい段階で付着切れが生じた後、変位の進行とともに荷重が増加していることがわかる。これは、変位の進行とともにスタッドの抵抗力が発揮されたことに起因するためであると考えられる。得られた実験結果より、スタッドの抵抗力に関して検討する。スタッドの



(a) Case 1 (設計強度: 500kN/m²)



(b) Case 2 (設計強度: 1000kN/m²)



(c) Case 3 (設計強度: 2000kN/m²)

Fig. 19 荷重-変位関係
Relationships between Load and Displacement

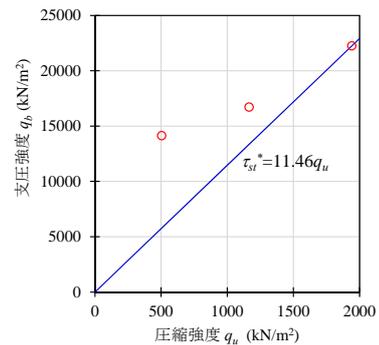


Fig. 20 スタッドの支圧強度-圧縮強度関係
Relationships between Bearing Strength of Stud and Compressive Strength

抵抗力は、スタッドの有無による荷重の差として評価した。ここで、スタッドの抵抗力を評価した変位量は、ソイルセメント改良体径の10% (=24.7mm)とした。Fig. 20には、スタッドの支圧強度と一軸圧縮強度の関係を示す。

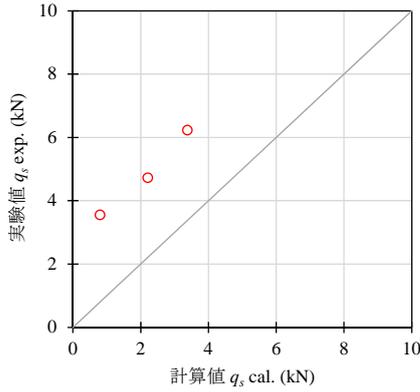


Fig. 21 スタッド耐力の実測値-計算値関係
Relationships between Observed Value and Calculated Value

ここで、スタッドの支圧強度は実験から得られた荷重の差をスタッドの軸部面積で除して算出した。Fig. 20 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. 20 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。

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

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

さらに、コンクリート中のスタッドのせん断耐力 q_s の評価式の適用に関して検討する。コンクリート中のスタッドのせん断耐力は、J. W. Fisher らによる研究¹⁰⁾に基づき、式(4)のように示される。

$$q_s = 0.5_{sc} a \sqrt{F_c E_c} \quad (4)$$

ここで、

$_{sc} a$: スタッド軸部断面積

F_c : 設計基準強度

E_c : ヤング係数

式(4)を用いてスタッドのせん断耐力を算定する際には、設計基準強度およびヤング係数の評価が必要となる。これらの定数には、試験体作成時に採取したソイルセメント試料に対して実施した一軸圧縮試験結果より、設計基準強度には圧縮強度を、ヤング係数には変形係数 E_{50} を用いることとした。式(4)から算出したスタッドの抵抗力と実験から得られたスタッドの抵抗力の関係を Fig. 21 に示す。Fig. 21 より、実験から得られたスタッドの抵抗力は、式(4)により算定した計算値を大きく上回っているのがわかる。式(4)により算定したスタッドの抵抗力は、実験値の2~5割程度となり安全側の評価となる。

4. 本設杭として利用するソイルセメント柱列壁の鉛直支持力評価方法

4.1 鉛直支持力評価方法

本章では、2章および3章で示した鉛直支持力の検討結

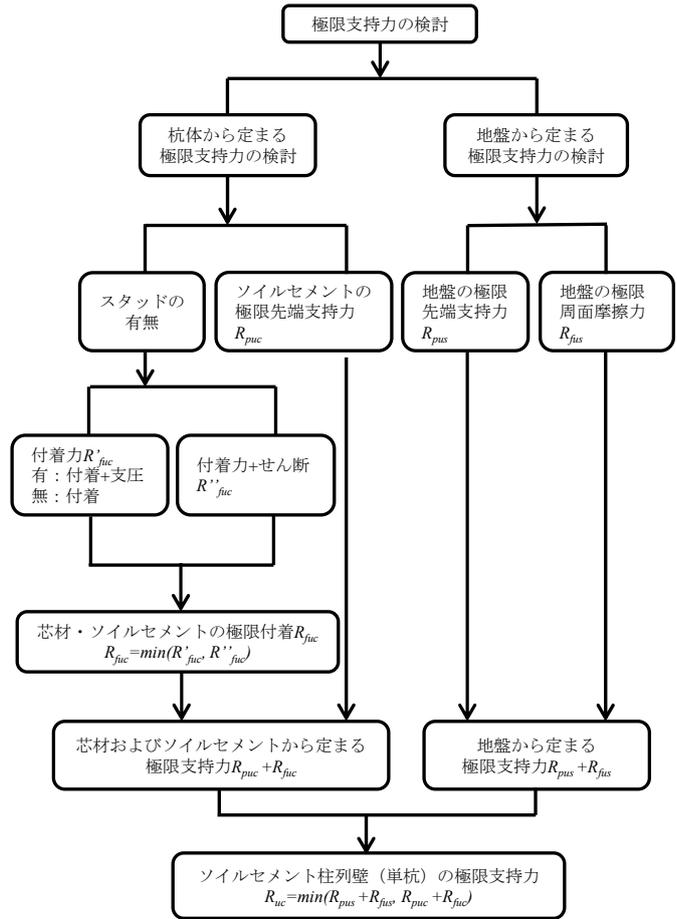


Fig. 22 鉛直支持力評価方法のフロー
Flow for Evaluation of Vertical Bearing Capacity on Soil-Cement Mixing Wall Using Permanent Pile

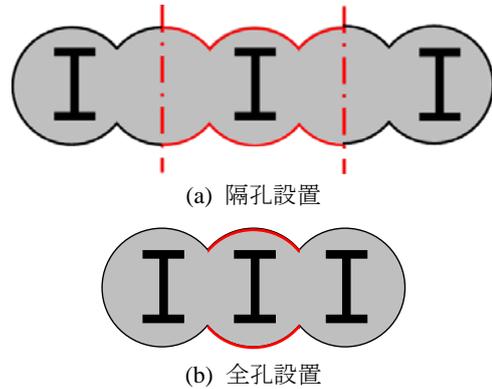


Fig. 23 周長の評価
Evaluation of Pile Perimeter

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鉛直支持力評価方法について示す。鉛直支持力評価方法のフローを Fig. 22 に示す。Fig. 22 に示すように鉛直支持力の検討は、地盤から定まる鉛直支持力と杭体から定まる鉛直支持力の2つのルートで検討することとする。最終的には、両者を比較し小さい方の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鉛直支持力とする。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支持力(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周長は、Fig. 23 (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. 23(a)に示すようにソイルセメント改良体の周長で、全孔設置の場合にはFig. 23(b)に示すようにソイルセメント改良体径の曲線部分で評価する。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。

式(5), (6)に上述の支持力評価式を示す。

$$R_{ac} = \frac{1}{F_s} R_{uc} \quad (5)$$

ここで、

- R_{ac} : 許容鉛直支持力 (kN)
- R_{uc} : 極限支持力 (kN)
- F_s : 安全率(長期 3, 短期 1.5)

$$R_{uc} = \min(R_{pus} + R_{fus} \cdot R_{puc} + R_{fuc}) \quad (6)$$

ここで、

- R_{pus} : 地盤の極限先端支持力 (kN)
- R_{puc} : 芯材およびソイルセメントから定まる極限先端支持力 (kN)
- R_{fus} : 地盤の極限周面摩擦力 (kN)
- R_{fuc} : 芯材およびソイルセメントの極限付着力 (kN)

地盤から定まる極限支持力は、式(7)および(8)に示すように先端支持力と周面摩擦力により算出する。

$$\text{極限先端支持力: } R_{pus} = 100 \bar{N} A_p \quad (7)$$

ここで、

- \bar{N} : 芯材先端上下 1D の範囲の平均 N 値
砂質地盤 $10 \leq \bar{N} \leq 60$ (ただし、60 上限値とし、N 値が 10 未満の場合は本評価法を適用しない。)
- A_p : 芯材の閉塞面積 (m²)
 $A_p = H \times B$ (H: 芯材のせい、B: フランジ幅)

$$\text{極限周面摩擦力: } R_{fus} = \phi \tau_{fu} L = \phi \Sigma (3.3 \bar{N}_s L_s + \bar{c}_u L_c) \quad (8)$$

ここで、

- ϕ : 芯材の設置状況により定まる周長(m)
- τ_{fu} : 地盤の極限周面摩擦力度 (kN/m²)
- L : 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/m²)
 $\bar{c}_u \leq 100$ (kN/m²) (ただし、100kN/m² を上限値とする)
- L_c : 粘土質地盤の区間長 (m)

一方、杭体から定まる極限支持力は、式(9)~式(11)に示すように芯材-ソイルセメント間の極限先端支持力および極限付着力により算出する。

Table 2 芯材およびソイルセメントから定まる極限先端支持力算定時の定数
Constants for Calculation of Pile Tip Bearing Capacity on H-shaped Steel and Soil-Cement

スタッド無し	ソイルセメント設計強度 q_{uc} (kN/m ²)		
	500	1000	2000
定数 v_p (kN/m ²)	8000	16000	32000
スタッド有り	ソイルセメント設計強度 q_{uc} (kN/m ²)		
	500	1000	2000
定数 v_{pst} (kN/m ²)	8500	17000	34000

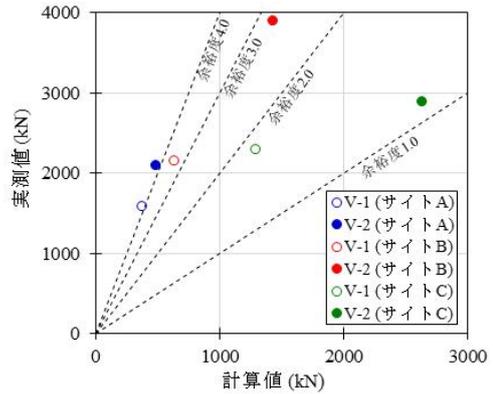


Fig. 24 実測値と計算値の比較
Comparison with Observed Value and Calculated Value on Bearing Capacity

芯材-ソイルセメント間の極限先端支持力:

$$\text{スタッド無しの場合: } R_{puc} = r_u v_p A_p^* \quad (9)$$

$$\text{スタッド有りの場合: } R_{puc} = r_u v_{pst} A_p^* \quad (10)$$

ここで、

- v_p, v_{pst} : 芯材およびソイルセメントから定まる極限先端支持力算定時の定数 (Table 2 に示す値)
- A_p^* : 芯材の実断面積 (m²)
(スタッド有りの場合はスタッドの支圧面積を含む)
- r_u : 実大載荷試験による芯材とのスケール差による低減係数
 - ・芯材の対角線長さが実大載荷試験による最大対角線長さを超えない場合は「1」とする。実大載荷試験により検証したスケールを超えるものについては、H-400*330 に対する増加比率の逆数を低減係数とする。
 - ・例えば、H-700×300 シリーズの場合： $r_u \approx 0.7$ となる。

Table 2 に示す芯材およびソイルセメントから定まる極限先端支持力算定時の定数は、模型実験および実大載荷試験より得られた杭先端到達軸力を実験時のソイルセメント強度および芯材の実断面積で除して算出した係数 α に設計強度を乗じることにより設定した。なお、ソイルセメントの強度が 500~2000kN/m² の範囲では、直線

補間して v_p, v_{pst} を算出する。

$$\text{極限付着力} : R_{fuc} = \min(R'_{fuc}, R''_{fuc}) \quad (11)$$

極限付着力は、スタッドの有無により計算方法が異なる。また、スタッドの有無に関わらず、付着力 (+支圧) R'_{fuc} 、付着力とソイルセメントのせん断力 R''_{fuc} の 2 通りを算出し、小さい方の値を極限付着力として採用する。なお、付着力とせん断力の計算は、スタッドの有無に関わらず同様であり、式(13)により検討を行う。式(12)～(14)に検討方法の詳細を示す。

スタッド無しの場合：

$$R'_{fuc} = \phi_H \tau_{bu}^* L \quad (12)$$

$$R''_{fuc} = 2BL\tau_{bu}^* + 2HL\tau_s^* \quad (13)$$

スタッド有りの場合：

$$R'_{fuc} = \phi_H \tau_{bu}^* L + Q_s \quad (14)$$

ここで、

- ϕ_H : 芯材の周長 (m)
 $\phi_H = 2H + 4B - 2t_w$ (t_w : ウェブ厚)
- τ_{bu}^* : 残留付着力度 (kN/m²)
 $\tau_{bu}^* = 0.03q_{uc}$
- 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
- τ_{st}^* : スタッドの支圧強度 (kN/m²) $\tau_{st}^* = 11.0q_{uc}$
- A_s : スタッドの支圧面積 (m²)
- τ_s^* : ソイルセメントのせん断強度 (kN/m²),
 $\tau_s^* = 0.33q_{uc}$

スタッドの軸方向の設置間隔は、スタッド軸径の7.5倍以上かつ1000mm 以下とする。また、スタッドの軸直角方向の設置間隔は、スタッド軸径の5倍以上とする。

4.2 評価式の検討結果

本節では、4.1 節で示した鉛直支持力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. 24 に実測値と計算値の比較結果を示す。Fig. 24 中には、余裕度(実測値/計算値)1.0～4.0 のラインも合わせて示した。Fig. 24 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鉛直支持力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

ソイルセメント柱列壁を本設杭に利用するために、実大載荷試験および模型実験を実施し、鉛直支持性能を確

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鉛直支持力の評価方法を確立した。以下に、得られた知見を示す。

- 1) 地盤の支持力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支持力は、建築学会・基礎構造設計指針に示される場所打ち杭の支持力評価式と同等以上に評価できることがわかった。
- 2) 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-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、最大値に到達する変形量が小さいこと、最大値に到達後の強度低下が著しいことを考慮して、鉛直支持力評価式では残留付着強度を用いて評価することとした。
- 3) 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の耐力を評価した。スタッドの耐力は、実験から得られた支圧強度の下限値を評価式として適用することとした。

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) 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
- 10) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 2010