

ソイルセメント山留め壁の鉛直支持力に関する研究

—その3 杭体強度から決まる支持力の検討—

日大生産工(院) ○緒方 智之 日大生産工 下村 修一

1.はじめに

都市部の狭隘地などの周辺環境への配慮が必要な敷地での根切り工事では逆打ち工法が採用される場合がある。逆打ち工法では、地下の掘削と同時に上部躯体を構築するため、躯体を主に構造柱で支持するが外周部では構造柱の代わりに山留め壁で支持することが多い。山留め壁にはソイルセメント壁を用いることが多いが、ソイルセメント壁はソイルセメント内に応力材（H形鋼）を挿入し土圧に対する抵抗と止水性を目的としている。そのため一般的な杭と異なり、ソイルセメント強度は低く、ソイルセメント先端深度と応力材（H形鋼）先端深度は地盤条件、施工条件により異なる。

山留め設計指針¹⁾では、本設杭を対象にした鉛直支持力評価式が示されているが、ソイルセメント壁は上述のように応力材（H形鋼）とソイルセメントの複合体であり、ソイルセメント強度や応力材（H形鋼）の先端深度の違いなどにより、杭体の破壊状況が複雑であることが想定される。

ソイルセメント壁の鉛直載荷試験を行った例は数例見られるが^{例えば2)}、ソイルセメント部の破壊機構は明らかとは言い難い。一方、根固め杭を対象として、加圧土槽実験で鉛直支持機構を検討した例^{3,4)}もあるが、根固めの強度が高いことなどから、仮設であるソイルセメント壁の鉛直支持機構を検証するには不十分である。そこで本研究ではソイルセメント壁の鉛直支持力機構を加圧土槽実験で検討する。

前報^{5,6)}では、ソイルセメント杭のソイルセメント強度、応力材（H形鋼）の幅に対しての応力材先端以深ソイルセメント長さの比（H/B）をパラメータとして単杭の鉛直載荷試験を行った。その結果、ソイルセメントの目標強度毎に芯材幅に対しての応力材先端以深ソイルセメント長さが小さいCaseで、より大きい荷重を得た。

本報では前報の実験結果とソイルセメント杭と模型地盤間の周面摩擦力を評価する実験、気中（無拘束下）での圧縮試験を通して山留め設計指針に示される杭体強度から決まる支持力¹⁾と比

較し、支持機構における地盤の拘束の影響について検討する。

2.支持力評価値と実験値の比較

式(1)、(2)及び図1に杭体強度から決まる極限支持力 R_u の計算式およびその概要を示す。

$$R_u = (f_a \varphi_a + f_s \varphi_s) L_h + f_c A_{hp} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$R_u = f_a \varphi_a L_h + f_c A_h \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで、 R_u ：極限支持力(kN)、 f_a ：ソイルセメントの付着強度(kN/m²)、 f_s ：ソイルセメントのせん断強度(kN/m²)、 f_c ：ソイルセメントの圧縮強度(kN/m²)、 φ_a ：ソイルセメントと応力材の付着を考慮する長さ(m)、 φ_s ：ソイルセメントのせん断を考慮する長さ(m)、 L_h ：応力材貫入長さ(m)、 A_h ：応力材断面積(m²)、 A_{hp} ：応力材閉塞断面積(m²)である。本実験では、H形鋼閉塞形状での破壊が生じていたため、杭体強度によって決まる極限支持力は(1)式を用いて検討した。

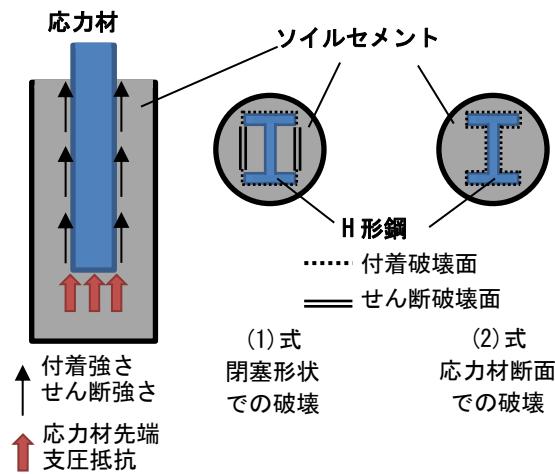


図1 支持力評価の概要

図2に(1)式から決まる極限支持力と前報⁶⁾で示したCase1~6の最大杭頭荷重との比較を示す。(1)式中のソイルセメントの付着強度、ソイルセメントのせん断強度および圧縮強度はそれぞれSMW設計施工指針に示される一軸圧縮強さとの関係を用いた⁷⁾。図2より全Caseで実験結果は(1)式による極限支持力を上回り(1)式では支持力を過小評価する可能性が示された。これは(1)式に用いたソイルセメント強度は地盤内の拘束条件を考慮していないことが影響していると考えられる。そこでソイルセメントの圧縮強度、付着強度及びせん断強度について、拘束圧のある模型地盤中と拘束圧の無い気中の条件で比較した。

3.軸圧縮強度の検討

表1及び図3に応力材先端深度の軸力を計算するために別途行った周面摩擦力を評価する実験の条件、模型杭及び結果を示す。模型杭はH/B=0として杭先端にスポンジを置き、杭先端抵抗を無くした状態で鉛直載荷実験を行った。杭体と模型地盤間の周面摩擦力を計測した結果、最大周面摩擦力はCase7で2.3kN、Case8で2.1kNあり、杭体強度の違いによる差はなかった。

次にソイルセメントの圧縮強度に及ぼす地盤拘束の影響を検討するため、Case1~6と同条件の模型杭を作製し、気中での圧縮実験を行った。表2に実験条件を示す。この結果と前報⁶⁾のCase1~6についてそれぞれ最大杭頭荷重からCase7,8の最大周面摩擦力を引くことで、応力材先端深度における軸力（先端支持力、図4）を求め一軸圧縮強さと比較して図5に示す。なお、いずれの軸力もソイルセメント断面積で除して軸力度を算出した。

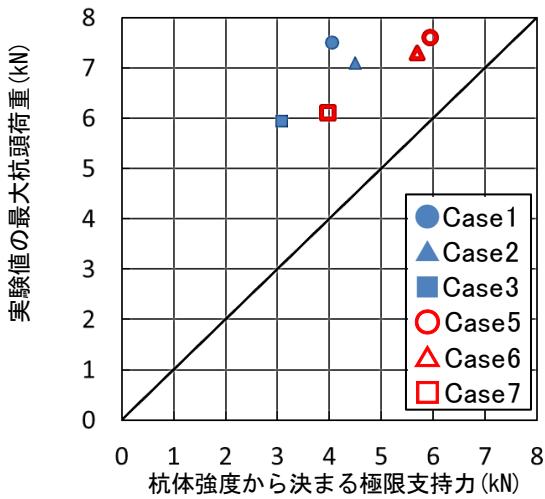


図2 実験値-設計値の関係

表1 周面摩擦力の実験条件

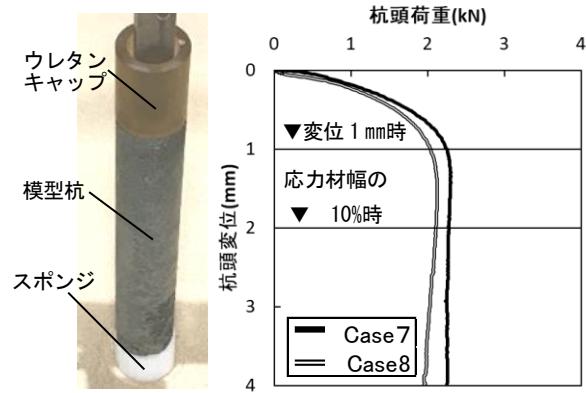


図3 周面摩擦力実験の模型杭と実験結果

表2 気中(無拘束)での圧縮実験条件

Case	目標強度 (N/mm³)	応力材寸法 (mm)	H/B	平均qu値 (N/mm³)
9	1	20x20x3x3	0.5	1.5
10			1	1.5
11			4	1.3
12			0.5	2.0
13			1	2.2
14			4	1.8

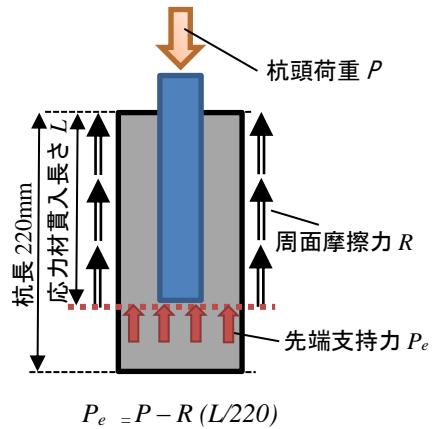


図4 先端支持力の評価方法概要

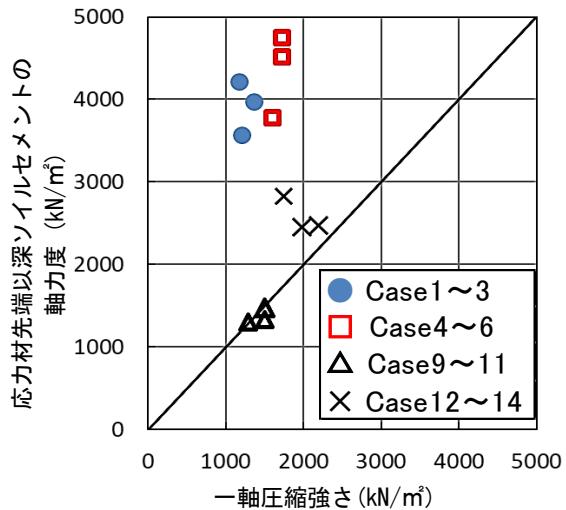


図5 軸力度-一軸圧縮強さ関係

地盤中では軸力度が一軸圧縮強さを大きく上回っているが、地中では一軸圧縮強さとほぼ同じ値を示し、地盤の拘束条件の影響が非常に高いことが分かる。

圧縮強度に及ぼす拘束圧の影響を確認するためにソイルセメントの三軸圧縮試験を行った。表3に試験条件を示す。試験に使用した供試体は、直径50mm、高さ100mmであり、ソイルセメントの配合は前報⁵⁾と同じである。

図6に応力-ひずみ関係を、図7に圧縮強さと拘束圧の関係を示す。拘束圧とソイルセメントの圧縮強さは比例関係にあり、拘束圧の上昇に伴い圧縮強さは増大する傾向が確認された。また、最大拘束圧300kPaにおける圧縮強さはいずれもCase1~6の応力材先端以深ソイルセメントの軸力度より低い値であった。これよりCase1~6においてソイルセメント杭に作用している地盤の拘束圧は300kPaより高い値であると考えられる。なお三軸試験から求めたC、 ϕ は表3に示した。

4. 地盤拘束の影響に関する考察

図8に応力材先端以深の鉛直載荷に伴う地盤から受ける拘束圧変化のイメージを示す。載荷前に地盤の上載圧 $\sigma_v=100kPa$ をかけており、ソイルセメントに初期の側圧が作用している。静止土圧係数 K_0 を0.5とすると側圧は $\sigma_h=50kPa$ である。鉛直載荷に伴い(P)、ソイルセメントは軸方向に縮み、それに伴って側方に膨張しようとする。この膨張に対して周面地盤には水平地盤反力が発生する。建築基礎構造設計指針⁸⁾における杭の水平抵抗の評価では水平地盤反力の最大値にBromsの極限地盤反力⁹⁾¹⁰⁾を採用している。この考え方をソイルセメントの変形に伴う水平地盤反力(拘束圧)の上昇に適用することを考える。砂地盤におけるBromsの極限地盤反力は(3)の式に示すとおりである。

$$P_{max} = 3K_p\sigma_v \quad \dots \dots (3)$$

ここに σ_v : 地盤の有効上載圧(kN/m²)、 K_p : 受働土圧係数である。本研究では(4)式に示すRankine-Resal式から導かれる受働土圧係数を採用する。

$$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad \dots \dots (4)$$

ここに ϕ :せん断抵抗角である。

本実験の模型地盤の相対密度(約80%)からN値をMeyerhofの式¹¹⁾で推定し、このN値から大崎式¹²⁾で推定したせん断抵抗角 ϕ は約37度となる。これより K_p を求め、 $\sigma_v=100kPa$ とすると P_{max} は1207kPaとなる。仮にソイルセメントのせん断抵抗角 ϕ が1207kPa下でも同程度とした

場合、目標強度が1N/mm²のソイルセメントの破壊時の鉛直方向の応力度は5746kPaとなる。この結果は図5に示した地中の軸力度より高い。本実験はソイルセメント全断面積ではなく芯材閉塞断面で押していること、ひび割れが発生しているケースやまだ破壊が生じていないケースなど様々である。これらのこと考慮すると少なくとも実験値では確実に拘束圧による軸力度の上昇があると考えられる。

表3 三軸圧縮試験の条件

Case	目標強度 (N/mm ²)	拘束圧 (kPa)	粘着力C (kN/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (度)
A-1	1	100	209.3	33.8
A-2		200		
A-3		300		
B-1	2	100	466.8	28.1
B-2		200		
B-3		300		

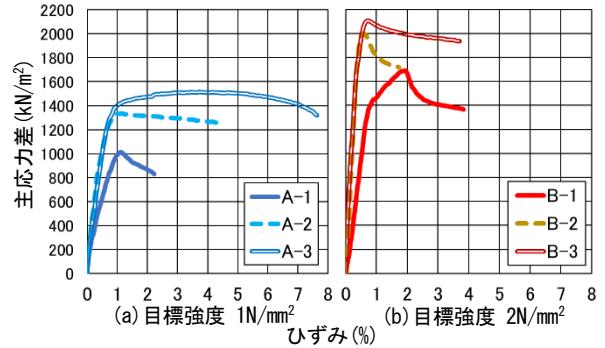


図6 応力-ひずみ関係

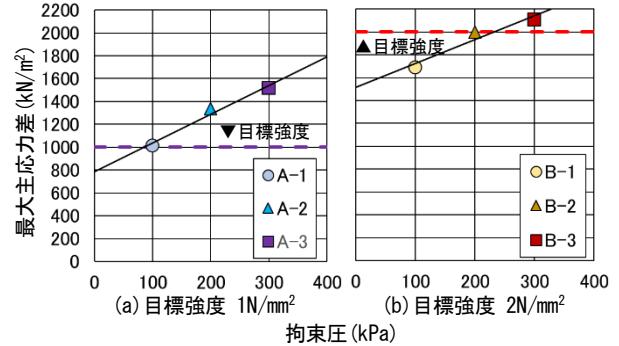


図7 圧縮強さ-拘束圧関係

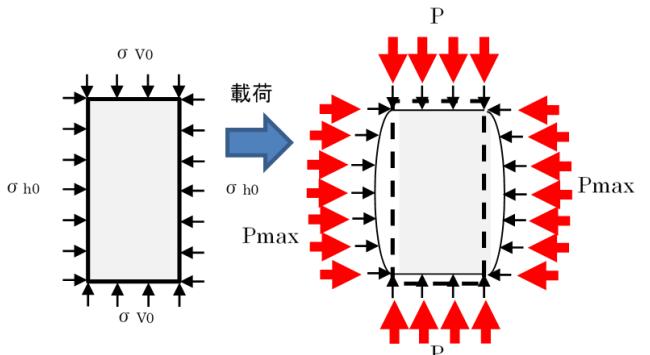


図8 地盤から受ける拘束圧変化の概要

5.付着及びせん断強度の検討

次にソイルセメントの付着強度について地盤中と気中の違いを検討する。表4に実験条件を示す。Case15,17は気中、Case16,18は地盤中での鉛直載荷実験である。模型杭と模型地盤は前報²⁾と同じであるが、図9に示すように応力材をソイルセメント先端から突き出して作製した。またCase16,18ではテフロンシート、グリース、ゴムメンブレンを用いて杭と地盤間の摩擦を切った。いずれの実験条件も角孔を設けた鉄板の上に模型杭を置き、応力材直下のH形鋼閉塞断面の支圧を無くした状態で載荷し、杭頭荷重と杭頭変位を計測した。

図10にCase15～18の杭頭荷重-杭頭変位関係を示す。Case15において、変位0.4mm付近まで荷重が増加し、その後荷重の増加割合が小さくなつた後、変位0.8mm付近で最大杭頭荷重を示した。Case17においては変位0.4mm付近まで荷重が増加し、その後荷重の増加割合が小さくなるが、変位0.6mm付近で増加割合が初期と同等に戻り、変位1mm付近で最大杭頭荷重を示した。Case16,18は変位1mm付近まで変位の進行とともに荷重も増加するが、その後は荷重の増加割合が小さくなる。以後、変位10mmまで荷重は増加し続けており、気中に比べて地盤中の杭頭荷重は明らかに大きい。なおCase15-18は全て応力材形状ではなく、H形鋼の閉塞形状で抜け出ていた(写真1)。

6.おわりに

本報では、ソイルセメント杭の杭体強度から決まる支持力について山留め設計指針に示される設計式との比較から地盤の拘束効果の検討を行つた。その結果、杭体強度から決まる極限支持力は、地盤の拘束効果の影響が非常に大きいことを確認した。

謝辞

本研究の実施にあたり、貴重なご意見を頂きました鹿島技術研究所の實松俊明氏、太田宏氏、実験装置のご協力を頂きました丸藤シートパイルの関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1)日本建築学会：山留め設計指針、pp.130-133、2017.11
- (2)加倉井ら：埋め込み杭(H形鋼杭)の先端根固め部の支持力性状に関する研究、日本建築学会技術報告集、第6号、pp.39-42、1998.10
- (3)石川一真：埋め込み杭における拡大根固め部の支持力機構に関する研究、関西大学博士論文、2013.3
- (4)渡辺ら：ソイルセメント壁の杭利用に関する研究(その1 砂質土地盤での鉛直載荷試験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.667-668、2009.7
- (5)緒方ら：ソイルセメント山留め壁の鉛直支持力に関する研究(その1 実験手法の検討)、第50回日本大学生産工学部学術講演会講演概要、2017.12

表4 付着強さの実験条件

Case	目標強度 (N/mm²)	応力材寸法 (mm)	H/B	平均 q_u 値 (N/mm²)	条件
15	1	20×20×3×3	0	1.3	気中
16				1.2	地盤中
17				1.7	気中
18				1.8	地盤中

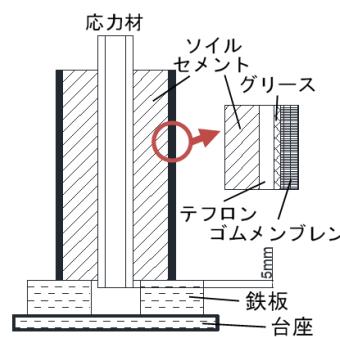


図9 模型杭概要

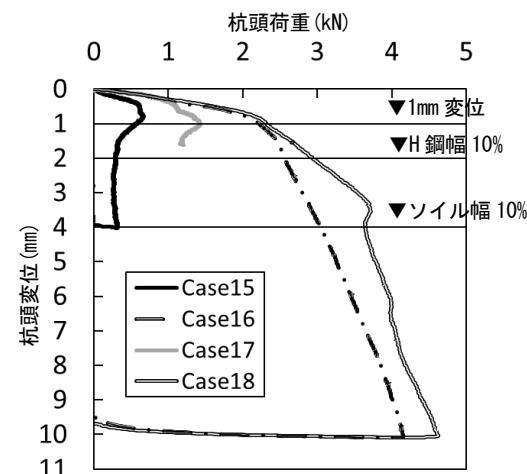


図10 杭頭荷重-杭頭変位関係
(付着実験)

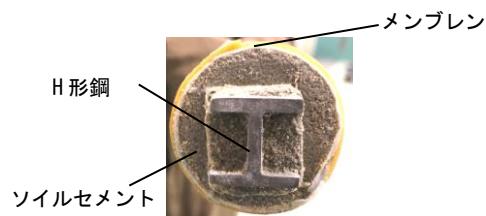


写真1 実験後の模型杭先端の様子

- (6)目時ら：ソイルセメント山留め壁の鉛直支持力に関する研究(その2 単杭を用いた鉛直載荷試験結果)、第50回日本大学生産工学部学術講演会講演概要、2017.12
- (7)日本材料学会：ソイルミキシングウォール設計施工指針、pp.20-21、2002.3
- (8)日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.278-279、2002.4
- (9)Broms, B.B. : Lateral resistance of pile in cohesionless soils, ASCE, Vol.90(SM2), pp.123-156, 1964
- (10)Broms, B.B. : Lateral resistance of pile in cohesion soils, ASCE, Vol.90(SM2), pp.27-63, 1964
- (11)Meyerhof, G.G.: Discussion for Session 1, Proc. 4th International Conference on Soil Mech. and Found. Eng. Vol. 3, pp.11, 1957
- (12)大崎順彦：東京地盤図、技報堂、pp.18-19、1959