

## プレボーリング杭工法の根固め部における ソイルセメントの室内配合試験による強度特性

今 広人<sup>1</sup>, 吉田 映<sup>2</sup>, 細田 光美<sup>3</sup>, 木村 亮<sup>4</sup>

- 1 ジャパンパイル・技術企画室
- 2 ジャパンパイル・技術企画室
- 3 ジャパンパイル・施工推進部
- 4 京都大学大学院・工学研究科 社会基盤工学専攻

### 概 要

節杭を用いたプレボーリング杭工法は、現地の土砂をセメントミルクで混合攪拌して造成するソイルセメントと、その中に建て込んだ節杭（既製コンクリート杭）で構成される。本杭の杭先端の根固め部のソイルセメントは鉛直支持力に大きく影響する要因であり、要求されるソイルセメントの一軸圧縮強さは深層混合処理工法などの安定処理土（ソイルセメント）に比べてはるかに大きい。そこで、本研究では本杭の根固め部のソイルセメントを対象として室内配合試験を行い、その特性に関する基礎的研究を実施した。その結果、根固め部のソイルセメントの一軸圧縮強さは有効セメント水比との間で良い相関性があることが分かり、この関係により本杭の施工におけるセメントミルクの配合や注入量などを選定することができる。また、ソイルセメント中の礫分の混入割合や細粒分含有率が根固め部のソイルセメントの一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：ソイルセメント，根固め部，室内配合試験，プレボーリング杭工法

### 1. はじめに

プレボーリング杭工法は、埋込み杭工法の一つで、あらかじめ掘削液（水またはベントナイト溶液）を用いて現地盤を掘削した後、セメントミルクを注入し、掘削孔内の泥土と混合攪拌したソイルセメントに、既製杭を建て込む工法である。プレボーリング杭工法の概要図を図1に示す。本杭は、杭先端の根固め部と称する部分と、杭頭から根固め部上端までの杭周部と称する部分で構成される。根固め部には高強度のソイルセメント（一軸圧縮強さ  $q_u = 10\text{N/mm}^2$  程度）を、杭周部には低強度のソイルセメント（一軸圧縮強さ  $q_u = 1.0\text{N/mm}^2$  程度）を造成する。

本杭の地盤から決まる鉛直支持力については多くの載荷試験結果に基づく支持力推定式が提案されている<sup>1)</sup>。本杭は、支持杭として適用することが多く、杭先端の根固め部の品質（出来形や強度）は鉛直支持力発現に大きく影響する要因である。地盤から決まる鉛直支持力を発現させるためには、杭とソイルセメントが一体となって挙動すること、もしくは杭およびソイルセメントに作用する荷重を地盤に確実に伝達しなければならない。筆者らは実杭で載荷試験により本杭の地盤から決まる極限支持力に至るまでの荷重履歴を受けた根固め部を掘出して調査を行い、節杭

とソイルセメントが一体となって挙動したことを報告した<sup>2)</sup>。また、根固め部に着目した節杭とソイルセメントの押抜き試験を行い、節部がソイルセメントとの付着に与える効果を確認し、様々な条件（節部高さや側圧など）での節杭とソイルセメントの付着性能を定量的に評価した<sup>3)</sup>。

深層混合処理工法などのセメントを用いた安定処理土（ソイルセメント）では、室内配合試験によって様々な検討が実施され、現地土の粒度構成や湿潤密度、セメント含有量などがソイルセメントの強度に及ぼす影響が分かっている<sup>4)5)6)7)</sup>。しかしながら本杭の根固め部のソイルセメントの強度は深層混合処理工法などで要求されている強度の数倍～数十倍と非常に大きく、上記の評価を本杭にそのまま適用することは困難である。深層混合処理工法においても高強度のソイルセメントに関する研究が報告されている<sup>8)</sup>。しかし、深層混合処理工法とは異なり、本杭は地盤を掘削する際に掘削液を併用するために、ソイルセメント造成時の地盤状態（含水量や湿潤密度など）は初期状態より変化する。このため、本杭の根固め部のソイルセメントでは、現地盤の状態の変化がソイルセメント強度に及ぼす影響を検討しなければならない。本杭を対象とした室内配合試験も数例実施されており<sup>9)10)</sup>、現地土に含まれる細粒分含有量の影響などが報告されているが、現地土とし

て主に砂や粘土を対象としている。本杭は礫質地盤においても根固め部を築造することも多く、礫の粒径や礫の混入割合に対するソイルセメントの影響も検討する必要がある。

そこで、本研究では本杭の根固め部に着目した室内配合試験を行い、支持層として適用する土質に対するソイルセメント強度の特性を調べ、これらの影響を考慮した必要なセメントミルクの配合や注入量の選定方法を検討する。

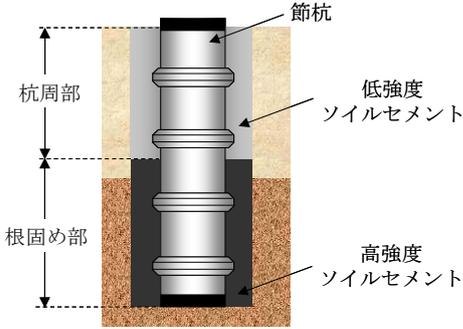


図1 プレボーリング杭工法の概要図

## 2. 試験概要

図2に本杭の標準的な施工手順を示す。適宜掘削液（水またはベントナイト溶液）を送りながら所定の深度まで掘削した後、杭周充填液（貧配合のセメントミルク）を用いて杭周部を築造し、続いて根固め液（富配合のセメントミルク）を吐出しながら根固め部の範囲を上下反復し、現地土と混合攪拌して根固め部のソイルセメントの築造を行う。このためソイルセメント造成時の現地土の状態は初期状態とは異なる。そこで、本研究では供試体作製時に所定深度までの掘削による影響で初期状態から土の含水量、すなわち湿潤密度が変化することを加味した。図3に根固め部築造工程における土粒子、水分の概念図を示す。根固め部築造工程で、掘削前と掘削後さらにセメントミルク注入後で土粒子および水分の構成が変化する。試験項目としては、一軸圧縮試験、ブリーディング試験、供試体の含水比、密度の測定を行った。

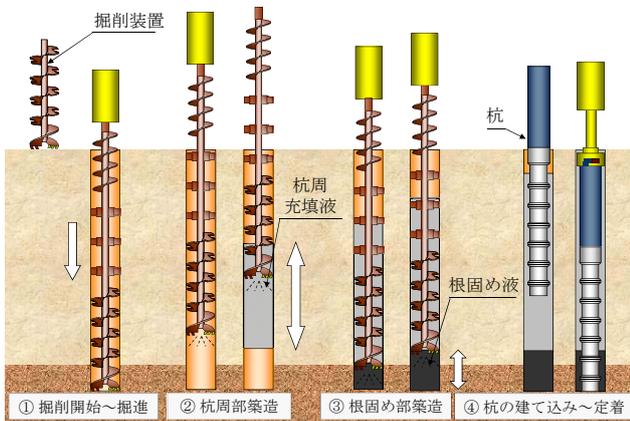
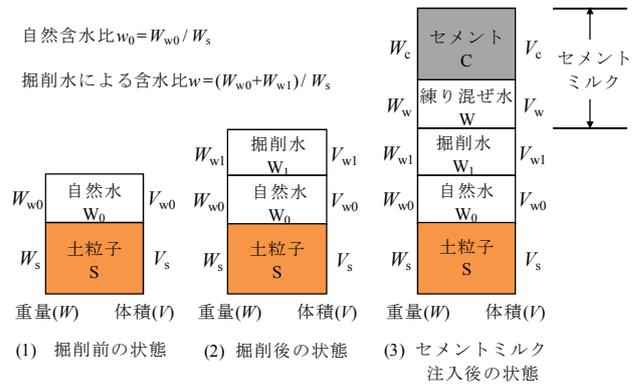


図2 本杭の標準的な施工手順



※ 掘削によって土粒子Sが変化しないものと仮定

図3 根固め部築造工程における土粒子、水分の概念図

### 2.1 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランドセメント（JIS R 5210, 比重 3.15）および高炉セメント B 種（JIS R 5211, 比重 3.05）である。使用した水は水道水である。試験に用いた土は、砂質土としては珪砂 6 号および豊浦砂である。細粒土としては藤森粘土および笠岡粘土である。使用した砂質土および細粒土の物理的性質を表 1 に、粒径加積曲線を図 4 に示す。砂質土に含まれる細粒分および細粒土に含まれる砂分は供試体作製時にふるい分けを行い除去した。礫質土として使用した礫は、3つの異なる現場から採取した礫を、土の粒度試験方法（JIS A 1204）に準じて粒径が 4.75～9.5mm（土粒子密度 $\rho_s$ : 2.63g/cm<sup>3</sup>, 以後 10mm と呼ぶ）、19～26.5mm（ $\rho_s$ : 2.81 g/cm<sup>3</sup>, 以後 25mm と呼ぶ）、53～75mm（ $\rho_s$ : 2.75 g/cm<sup>3</sup>, 以後 75mm と呼ぶ）の範囲になるように調整した。このために粒径により密度などの物性は異なっている。写真 1 に礫の写真を示す。また、ソイルセメント中の材料分離やブリーディングを防止する目的の試験ケースでは供試体にベントナイト（密度：2.60g/cm<sup>3</sup>）を添加した。

表 1 砂質土および細粒土の物理的性質

	珪砂 6 号	豊浦砂	藤森粘土	笠岡粘土
土粒子密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.62	2.65	2.67	2.65
粒度	礫分(%)	0.0	0.0	0.0
	砂分(%)	98.8	99.8	5.4
	細粒分(%)	1.2	0.2	94.7

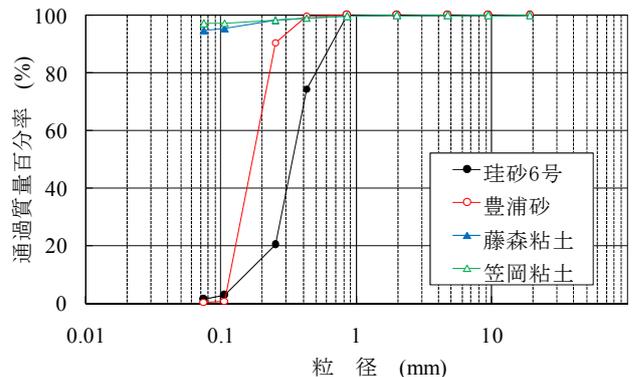


図4 砂質土および細粒土の粒径加積曲線

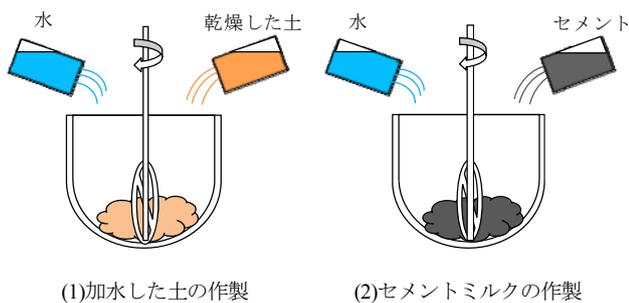


(1)4.75～9.5mm の礫 (2)19～26.5mm の礫 (3)53～75mm の礫

写真 1 礫の写真

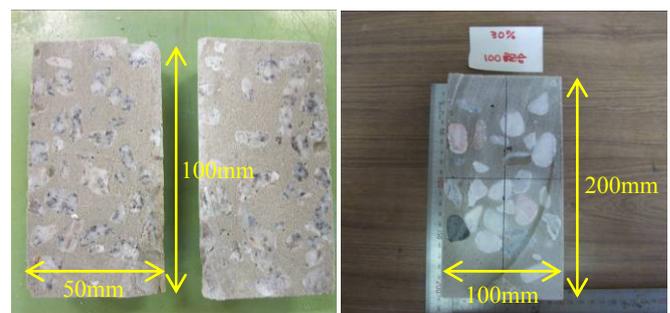
## 2.2 供試体作製方法

ソイルセメントの作製方法は、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法（地盤工学会基準 JGS0821-2000）<sup>11)</sup> に準じて行った。図 5 に供試体作製手順を示す。電動ミキサーを用いて、まず所定の湿潤密度になるように乾燥した土（ベントナイトを用いる場合は乾燥した土にベントナイトを添加）と水を十分練り混ぜて人工的に加水した土を作製する。所定の配合になるようにセメントと水を練り混ぜて作製したセメントミルクを加水した土に投入し 10 分程度攪拌した。練り混ぜ完了後にブリーディング袋（直径 50mm）にて 3 本採取した供試体を 20℃で恒温養生を行った。



(1)加水した土の作製

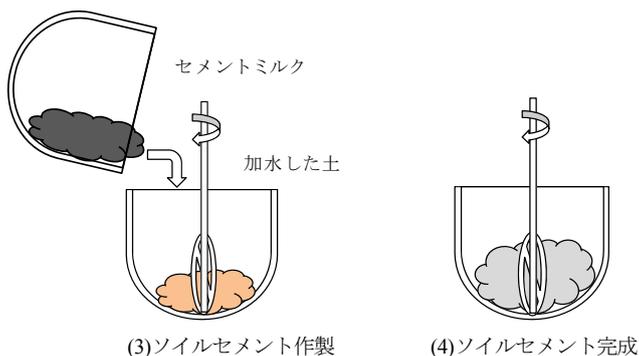
(2)セメントミルクの作製



(1) 4.75～9.5mm の礫

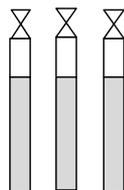
(2) 19～26.5mm の礫

写真 2 供試体内の礫質土の分布状況



(3)ソイルセメント作製

(4)ソイルセメント完成



(5)供試体作製

図 5 供試体作製手順

礫質土を使用する供試体では、図 5 のように電動ミキサーにて礫質土を同時に練り混ぜることができないために、

礫質土を含まないソイルセメント（礫の材料分離防止のためにベントナイト添加）を先行で作製し、モールド管（直径は用いる最大粒径の 4～5 倍程度）に投入した直後にその上部から所定の量の礫質土を投入する。その後モールド管内で鉄筋棒を用いて均一になるように攪拌する方法とした。供試体内の礫質土が均一に分布するかを確認する目的で、写真 2 に示すように固化後の供試体を軸方向に半割りに切断して礫の分布状況を確認した。礫径が 26.5mm までの礫質土では、礫分が局部的に集中することや下部に大量に沈降することはなく、均等に分布していた。なお礫径が 53～75mm の礫質土については、詳細は 3.2.2 節に示すが、供試体の下部に多くの礫が沈降する結果となった。ソイルセメントの 24 時間経過後のブリーディング率（練り混ぜ完了直後からの経過時間に応じてソイルセメントから分離した水の体積を練り混ぜ完了直後のソイルセメントの体積で除した値）の測定を JSCE-F 522-1999<sup>12)</sup> に準じて実施した。また材齢 28 日で JIS A 1216 および JIS A 1108 に準じて一軸圧縮試験を実施した。試験終了後に供試体の含水比を JIS A 1203 に準じて求めた。

## 2.3 試験ケースと配合

本試験は目的別に A, B シリーズに分けて行った。A シリーズでは施工条件（セメントの添加量、セメントミルクの注入量、掘削水の使用に伴う土の湿潤密度の影響）をパラメータとしたソイルセメントの特性を把握する試験を行った。B シリーズでは地盤条件（土の湿潤密度、細粒含有率、礫分混入率：ソイルセメント 1m<sup>3</sup> に対する礫分の混入体積）をパラメータとしたソイルセメントの特性を把握する試験を行った。

表 2 に各シリーズでの対象土 1m<sup>3</sup> あたりのセメントミルクの実験配合を示す。セメントミルクの水セメント比  $W_w/W_c$  は、根固め部を築造するプレボーリング杭工法では 60～70% とする例<sup>13)</sup> が多いことから、本試験では 65% と設定した。

A シリーズでは、対象土としては砂質土のみ（珪砂 6 号）とし、施工条件としてセメント添加量とセメントミルクの注入量および掘削水の使用に伴う土の湿潤密度の影響を比較する。ただし、本試験ではセメントミルクの  $W_w/W_c$  が一定なので、セメントの添加量とセメントミルクの注入

量は同じ比率で変化する。このため実験データはセメントの添加量にて整理する。表 3 に A シリーズでのセメントミルク注入時の土の状態例（セメントミルク注入前の加水した土の状態）を示す。プレボーリング杭工法では支持層を掘削する際に掘削水を用いることによって、湿潤密度 $\rho$ は掘削前の初期状態から変化する。しかし、掘削水量は現場毎に異なることなどから、その変化後の値を明確に把握できていない。このため A シリーズではセメントミルク注入時の $\rho$ を 1.0~2.2t/m<sup>3</sup>の範囲で幅広く変化させることとし、 $\rho=1.2, 1.5, 1.7, 2.1\text{t/m}^3$ の 4 通りの土の状態を再現して実験した。 $\rho=1.4\sim 1.8\text{t/m}^3$ の値は、支持層を掘削する前の砂質土の湿潤密度を 2.0t/m<sup>3</sup>と仮定する<sup>14)</sup>と、直径 0.6~1.4m で長さ 2m の根固め部を 0.2m<sup>3</sup>/分の掘削水を吐出しながら 0.5~2.0m/分の速度で支持層を掘削したときの掘削水量を含んだ土に相当する。また A シリーズでは、材料分離による影響を抑える目的で、すべての供試体にセメント重量の 5% のベントナイトを土に添加することとした。

表 2 対象土1m<sup>3</sup>あたりのセメントミルクの実験配合

配合番号	セメント種類	$W_w/W_c$ (%)	セメント $W_c(\text{kg/m}^3)$	練り水 $W_w(\text{kg/m}^3)$	注入量 $Q(\text{m}^3/\text{m}^3)$
1	高炉セメント B種	65	511	332	0.5
2			1023	665	1.0
3			1534	997	1.5
4			2045	1329	2.0
5	普通ポルトランド	65	1034	672	1.0
6			1550	1008	1.5
7			2067	1344	2.0

表 3 A シリーズでのセメントミルク注入直前の土の状態例

配合番号	対象土種類	湿潤密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	乾燥土 $W_s(\text{kg/m}^3)$	自然水 + 掘削水 $W_{w0}+W_{w1}$ (kg/m <sup>3</sup> )	含水比 $w$ (%)
Aa	珪砂 6 号	1.2	323	877	271.5
Ab		1.5	809	691	85.4
Ac		1.7	1132	568	50.2
Ad		1.9	1456	444	30.5
Ae		2.1	1779	321	18.0
Af		2.2	1941	259	13.3

B シリーズでは、対象土は砂質土に細粒土または礫を混合した土とし、地盤条件として、細粒土の混合量（細粒分含有率）および礫径と礫分混入率の影響を比較する。表 4 に B シリーズでの比較項目の一覧を示す。地盤条件として、細粒土の混合量に着目した B1 シリーズでは、2 種類の砂質土と 2 種類の粘土を用い、細粒分含有率  $F_c$ （細粒土の重量/全土重量）が 0~100% の範囲の数点の  $F_c$  となるように土量を調整して初期状態（掘削前）の土とした。なお、本 B1 シリーズでは実杭の施工時に材料分離防止する目的で使用されることがあるベントナイト使用の有無の影響も検討した。礫径および礫混入率に着目した B2 シリーズでは、前節で記載した礫質土を含む供試体の製造方法で礫分を均等に分布させるために礫分混入率を体積比とした。礫分混入率（礫分の体積/ソイルセメントの体積）を 0~

50% および礫の粒径を 3 種類（10, 25, 75mm）変化させて、その影響を比較する。礫の粒径の影響を検討する上で、供試体の大きさという要因は考慮しなければならない。本試験では、文献 11) を参考に供試体の径と礫の粒径の比を 4~5 程度に設定し、長さは供試体の径の 2 倍とした（粒径 10mm で供試体径 50mm×長さ 100mm, 粒径 25mm で供試体径 100mm×長さ 200mm）。また、実用的な見地から本杭を実現場にて施工することが可能な最大礫径は 100mm 程度である<sup>15)</sup>。本試験では 75mm の粒径の礫を用い、直径 300mm×長さ 600mm の供試体を 2 体（礫分混入率 0, 30%）作製することとした。

表 5 に B シリーズでのセメントミルク注入時の土の状態例を示す。A シリーズと同様に、本杭施工時の掘削水の影響を考慮して、初期状態の土に湿潤密度が 1.4~1.8t/m<sup>3</sup> となるように加水して、セメントミルク注入時の土の状態を再現した。なお、珪砂 6 号と藤森粘土の土粒子密度が若干異なるために、配合番号 Ba~Bc では粘土の混合量の違いによる乾燥土量や水量の変化を考慮した。

表 4 B シリーズでの比較項目一覧

対象土	配合番号	比較項目			
		B1 シリーズ		B2 シリーズ	
		細粒分含有率	ベントナイト使用	礫分混入率	礫の粒径
砂質土	Ba, Bb, Bc	○	○	—	—
	Bd, Be	○	—	—	—
礫質土	Bf	—	—	○	○
備考		0~100%	—	0~50%	10, 25, 75mm

※ベントナイト使用の場合はセメント重量の5%を土に添加

表 5 B シリーズでのセメントミルク注入直前の土の状態例

シリーズ	配合番号	対象土種類	湿潤密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	乾燥土 $W_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	自然水 + 掘削水 $W_{w0}+W_{w1}$ (kg/m <sup>3</sup> )	含水比 $w$ (%)
B1	Ba	珪砂 6 号 + 藤森粘土	1.4	647*	753	116.4
	Bb		1.6	970*	630	64.9
	Bc		1.8	1294*	506	39.1
	Bd	豊浦砂 + 笠岡粘土	1.6	964	636	66.0
	Be	1.8	1285	515	40.1	
B2	Bf	珪砂 6 号 + 礫質土	1.6	970	630	64.9

※ $F_c=0\%$ 時の数値を記載

### 3. 試験結果と考察

本試験結果において、一つの試験水準に対して 3 本の供試体を作製しており、各測定項目（一軸圧縮強さ、ブリーディング率、供試体の密度および含水比）は 3 本の供試体の平均値を示すこととする。

#### 3.1 施工条件での比較（A シリーズ）

A シリーズとして、施工条件（セメントの添加量、セメントミルクの注入量、掘削水の使用に伴うセメントミルク

の注入前の土の湿潤密度の影響)をパラメータとして比較する。セメントの添加量と一軸圧縮強さの関係を図6に示す。セメントミルクの注入前の土の湿潤密度をパラメータとすると、セメント添加量(セメントミルクの注入量)に比例して一軸圧縮強さは増加する。表6にセメントの添加量と一軸圧縮強さの増加比率を示す。セメントの添加量の増加比率と一軸圧縮強さの増加比率はほぼ同等の数値で増加し、一軸圧縮強さの増加比率はセメントの添加量(セメントミルクの注入量)の増加比率との相関性が高いことがわかった。

セメントミルク注入前の土の湿潤密度と一軸圧縮強さの関係を図7に示す。セメントの添加量(セメントミルクの注入量)が同一の場合、セメントミルク注入前の土の湿潤密度に比例して、一軸圧縮強さは増加する。セメントの添加量だけではなく、セメントミルク注入前の土の湿潤密度が大きいほど、一軸圧縮強さが大きくなる傾向を示す。詳細は後述するが、これは同一の土では湿潤密度が大きいほど土に含まれる水分量が少なくなるために、出来上がりのソイルセメントの  $W_w/W_c$  を減少させていることが原因で強度が増加すると考えられる。

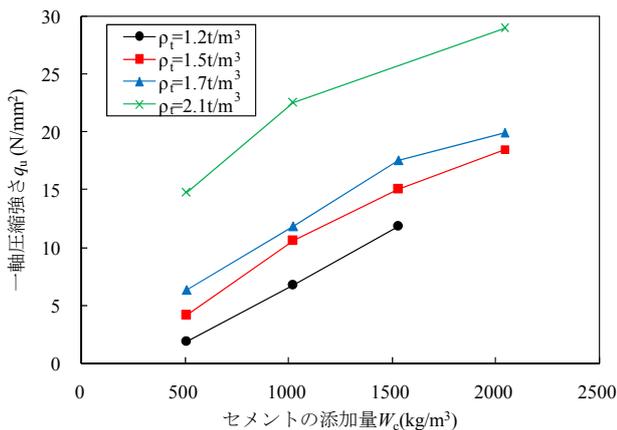


図6 セメント添加量と一軸圧縮強さの関係

表6 セメント添加量と一軸圧縮強さの増加比率( $W_c=511$ に対する)

湿潤密度 $\rho_t$ (t/m <sup>3</sup> )	セメント $W_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	セメント 添加量比率	一軸圧縮強さ $q_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$q_u$ 増加比率
1.5	511	1.00	4.1	1.00
	1023	2.00	10.6	2.59
	1534	3.00	15.1	3.68
	2045	4.00	18.5	4.51
1.7	511	1.00	6.3	1.00
	1023	2.00	11.8	1.87
	1534	3.00	17.5	2.78
	2045	4.00	19.9	3.16

供試体の密度と一軸圧縮強さの関係を図8に示す。同一のセメントの添加量(セメントミルクの注入量)で比較すると、供試体の密度に比例して、一軸圧縮強さは増加する。図9にセメントミルク注入前の土の湿潤密度と供試体の密度の関係を示す。セメントミルク( $W_w/W_c=65\%$ )の密度  $1.69\text{g/cm}^3$  よりも供試体の密度が大きくなるということは、

密度の重い土粒子(珪砂6号)が多く含有していることを示しており、逆にセメントミルクの密度に対して小さくなるということは、密度の軽い水が多く含有していることになる。このことから、供試体の密度はセメントの添加量だけでなく、土粒子や水の含有量によって変動することになる。

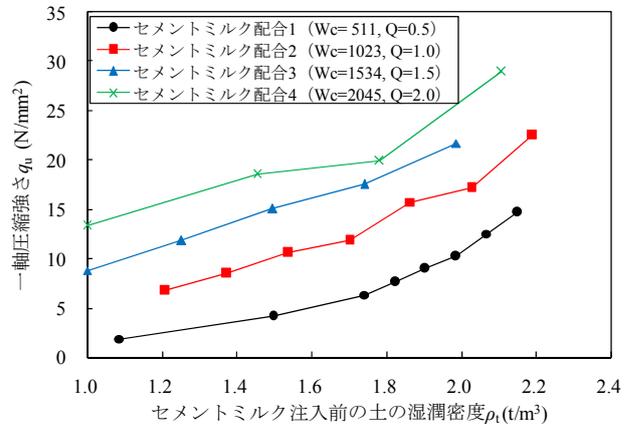


図7 土の湿潤密度と一軸圧縮強さの関係

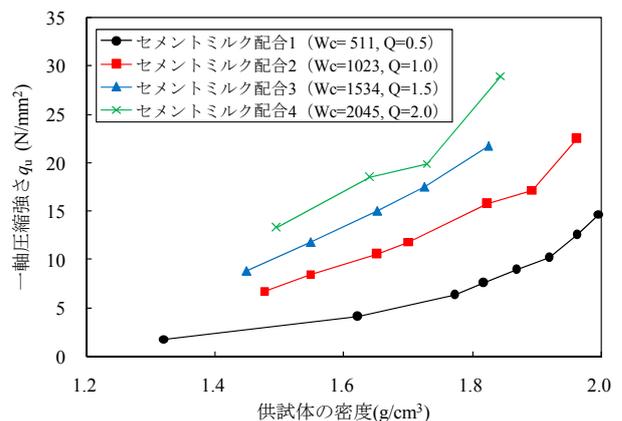


図8 供試体の密度と一軸圧縮強さの関係

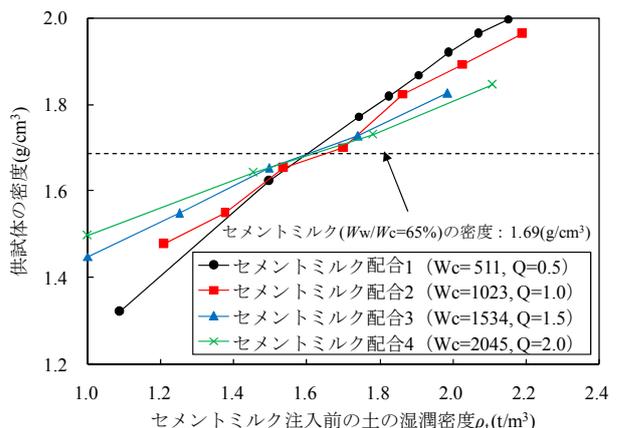


図9 土の湿潤密度と供試体の密度の関係

図10にセメントミルク注入前の土の湿潤密度ごとに比較した供試体の密度と一軸圧縮強さの関係を示す。セメントミルクの密度 ( $1.69\text{g/cm}^3$ ) よりもセメントミルク注入前の土の湿潤密度が小さい場合 ( $1.2\text{t/m}^3$ ) は、セメント添加

量が増加することにより、一軸圧縮強さと供試体の密度はともに増加する。一方、セメントミルクの密度 (1.69g/cm<sup>3</sup>) よりもセメントミルク注入前の土の湿潤密度が大きい場合 (2.1t/m<sup>3</sup>) は、セメント添加量が増加することによって、一軸圧縮強さは増加するが、供試体の密度は減少する。セメントミルクの密度 (1.69g/cm<sup>3</sup>) に近いセメントミルク注入前の土の湿潤密度 (1.5, 1.7t/m<sup>3</sup>) の場合はセメント添加量が増加することにより、一軸圧縮強さは増加するが供試体の密度に大きな変化が見られない。よって、セメントミルク注入前の土の湿潤密度がセメントミルクの密度の値よりも大きい場合には、供試体の密度が大きいからといって一軸圧縮強さが必ずしも大きくならないことになる。

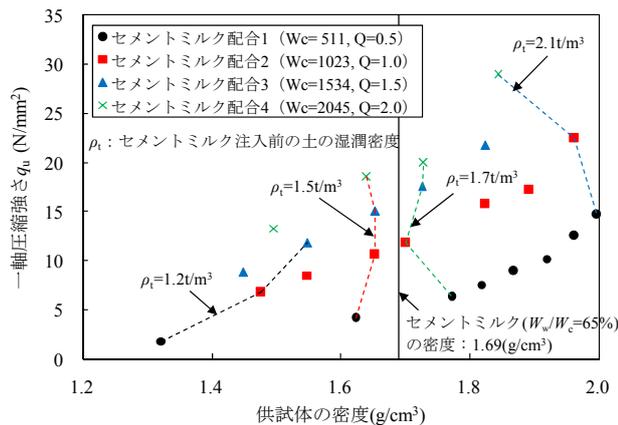


図 10 土の湿潤密度による供試体の密度と一軸圧縮強さの関係

図 11 に  $W_s/W_t$  と一軸圧縮強さの関係を示す。 $W_t$  は供試体内部の全有効水量であり、式 1 に示すように全有効水量は自然水量  $W_{w0}$  と掘削水量  $W_{w1}$  とセメントミルクの練り混ぜ水  $W_w$  を足して、硬化時に発生するブリーディング水量  $W_b$  (各試験体のブリーディングは練り混ぜ完了から 24 時間後にはほぼ完了していたので、24 時間後のブリーディング水量を硬化時のブリーディング水量とした) を引いた値とする。セメントの添加量 (質量) を全有効水量 (質量) にて除して求めた質量比  $W_s/W_t$  を有効セメント水比と呼ぶこととする。 $W_s/W_t$  と一軸圧縮強さの間には良好な相関関係がみられ、一軸圧縮強さはセメントの添加量と供試体内部の全有効水量の比によって推定できることが分かった。深層混合処理工法やセメントを用いた安定処理土においても同様に有効セメント水比と一軸圧縮強さの間には良好な相関関係が示されている<sup>8)16)17)18)</sup>。

$$W_t = W_{w0} + W_{w1} + W_w - W_b \quad (1)$$

ここで、

- $W_t$  : 供試体内部の全有効水量 (kg/m<sup>3</sup>)
- $W_{w0}$  : 自然水量 (kg/m<sup>3</sup>)
- $W_{w1}$  : 掘削水量 (kg/m<sup>3</sup>)
- $W_w$  : セメントミルクの練り混ぜ水量 (kg/m<sup>3</sup>)
- $W_b$  : 硬化時に発生するブリーディング水量 (kg/m<sup>3</sup>)

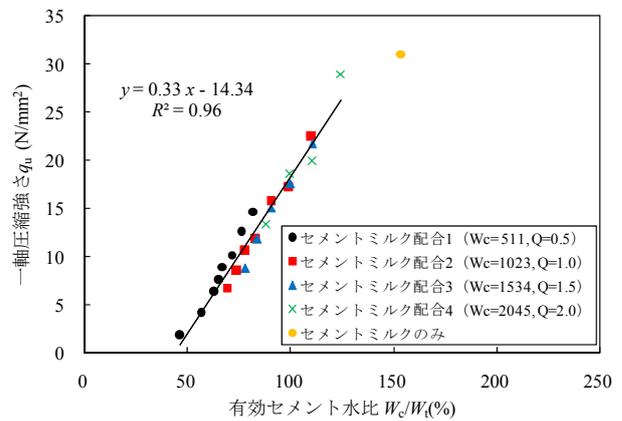


図 11 有効セメント水比  $W_s/W_t$  と一軸圧縮強さの関係

### 3.2 地盤条件での比較 (B シリーズ)

本杭は支持層に根固め部を築造するために、支持層として適用することが多い地盤である砂質土および礫質土について検討した。砂質土や礫質土においては、粒径により名称 (中砂、粗礫など) が区分され、さらに細粒分含有率や礫分含有率により土質表記 (細粒分まじり砂、細粒分質礫など) が細かく分類される<sup>19)</sup>。B シリーズとして、地盤条件 (細粒分含有率、礫分混入率、粒径) をパラメータとして比較する。また、ベントナイト添加有無の影響についても比較する。

#### 3.2.1 砂質土での比較 (B1 シリーズ)

図 12 に湿潤密度の違いによる細粒分含有率と一軸圧縮強さの関係を示す。本供試体 (配合番号 Bd, Be) はベントナイトを添加しないでソイルセメントを作製した。一軸圧縮強さが細粒分含有率の影響を大きく受けている範囲 ( $F_c=0\sim 20\%$ ) と比較的小さく受けている範囲 ( $F_c=20\sim 100\%$ ) がある。細粒分含有率が 20% 付近から 100% までの一軸圧縮強さは、ほぼ低位にて一定の値となる傾向である。ベントナイトの添加有無による細粒分含有率と一軸圧縮強さの関係を図 13 に示す。ベントナイトを添加していない場合は細粒分含有率の増加に伴い、一軸圧縮強さは次第に減少していく。一方、ベントナイトを添加した場合は、細粒分含有率の増加による影響は現れず、低位にてほぼ一定の一軸圧縮強さになる傾向であった。その値はベントナイトを添加していない場合の細粒分含有率 100% の供試体の一軸圧縮強さとほぼ同等の数値 (供試体 No.Bb-2-無: 8.8N/mm<sup>2</sup>, Bb-3-無: 11.6N/mm<sup>2</sup>, Bb-4-無: 13.6N/mm<sup>2</sup>) である。ベントナイトの添加有無に関わらずに、一軸圧縮強さはセメントの添加量に比例して増加しており、前節に示した同様の傾向となった。

図 14, 15 に細粒分含有率とブリーディング率の関係を示す。ベントナイトを添加したことで Bb-2-有, Bb-3-有, Bb-4-有の供試体はブリーディングが発生しなかった。ベントナイトを添加しない供試体は、細粒分含有率の増加につれて、ブリーディング率が小さくなっていくことがわかる。また、湿潤密度が大きいほどブリーディング率は小さ

くなっている。

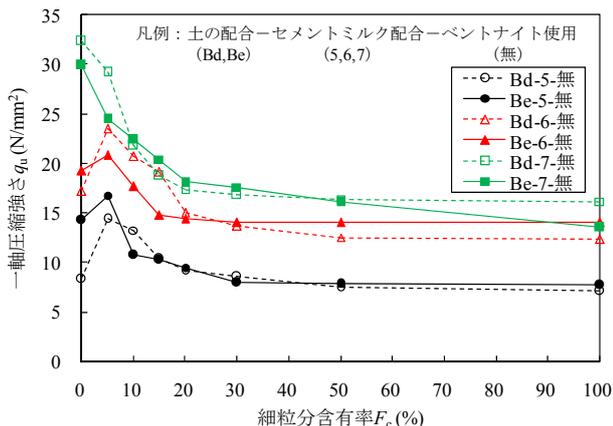


図 12 細粒分含有率と一軸圧縮強さの関係  
(湿潤密度による影響)

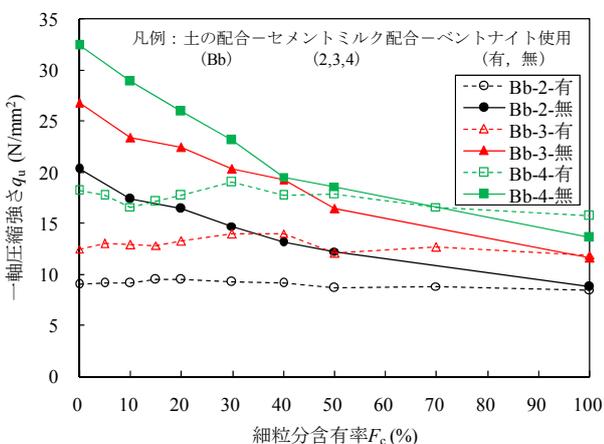


図 13 細粒分含有率と一軸圧縮強さの関係  
(ベントナイトの添加有無による影響)

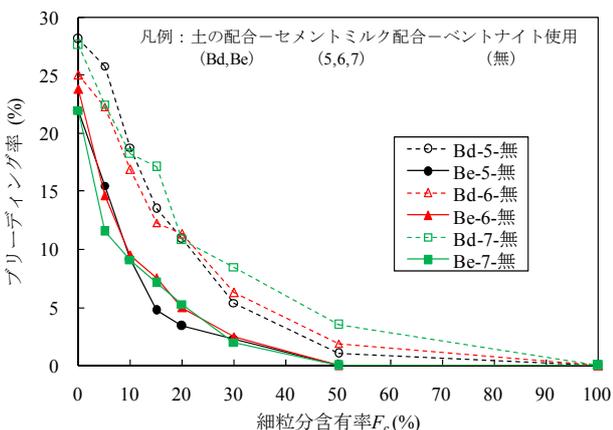


図 14 細粒分含有率とブリーディング率の関係  
(湿潤密度による影響)

図 16, 17 に細粒分含有率と供試体の含水比の関係を示す。ベントナイトを添加することで Bb-2-有, Bb-3-有, Bb-4-有の供試体の含水比は細粒分含有率の増加による影響を受けずにほぼ一定の値となった。ベントナイトを添加しない供試体は、細粒分含有率の増加につれて、含水比は大きくなっていく。また湿潤密度による影響はブリーディング

率が大きくなった細粒分含有率が 0~20%の範囲においては大きな差異はみられなかった。以上のことから、細粒分含有率が大きくなると、材料分離を防止し、供試体内の水のブリーディングを防止するので、均一な供試体が作製でき、ベントナイトの添加と同じ効果がある。すなわち供試体は内部に水を多く含んだままでソイルセメントが硬化することで、有効セメント水比  $W/W_1$  が小さくなり、一軸圧縮強さが小さくなると考えられる。

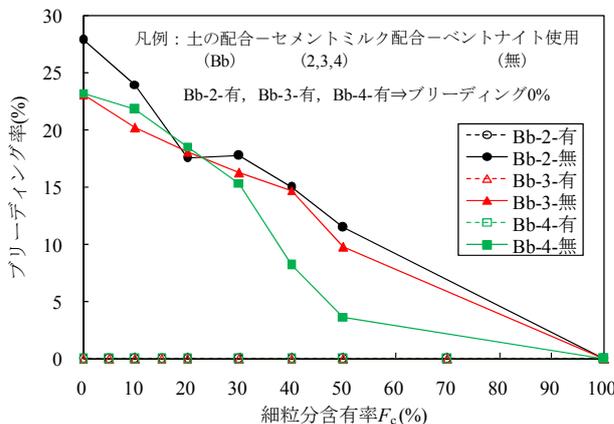


図 15 細粒分含有率とブリーディング率の関係  
(ベントナイトの添加有無による影響)

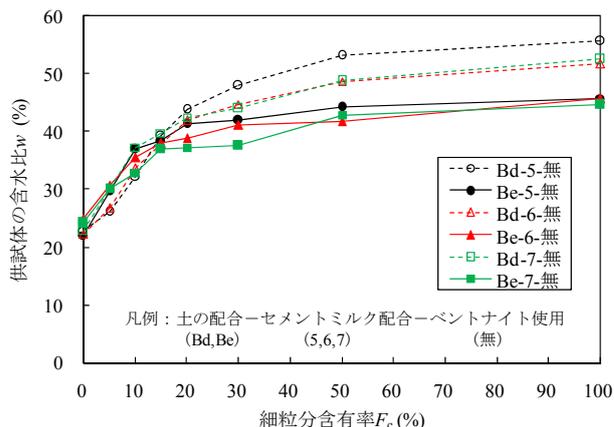


図 16 細粒分含有率と供試体の含水比の関係  
(湿潤密度による影響)

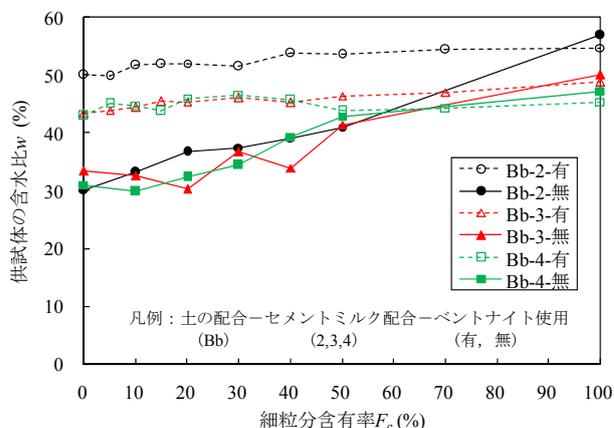


図 17 細粒分含有率と供試体の含水比の関係  
(ベントナイトの添加有無による影響)

図 18 に地盤条件別の  $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの関係を示す。この図は、2 種類の対象土（珪砂 6 号+藤森粘土、豊浦砂+笠岡粘土）に対して、セメント種別、セメントミルクの配合、細粒分含有率、湿潤密度、ペントナイトの添加有無を組み合わせで作製した供試体の全データをプロットした。 $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの間には高い相関関係がみられる。深層混合処理工法やセメントを用いた安定処理土においても  $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの間には相関関係がみられるが、粒度や粒径の違いで  $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの関係が影響を受けることが知られている<sup>4)5)6)</sup>。また、砂質土を対象としたセメント改良土の  $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの関係で相関係数 R が 0.62~0.67 とする報告がある<sup>18)</sup>。今回の試験では対象土の粒度や粒径が違っても、 $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの間には高い相関関係がみられた。深層混合処理工法やセメントを用いた安定処理土に比べて、本杭の根固め部築造に用いるセメント添加量やその一軸圧縮強さが数倍~数十倍と大きいために、土粒子による影響が小さくなったものと考えられる。しかし今回の試験に用いた対象土の種類や組み合わせは限られているので、多くの種類の対象土についても同様の傾向が得られるかは、今後試験データを追加して検討する必要がある。

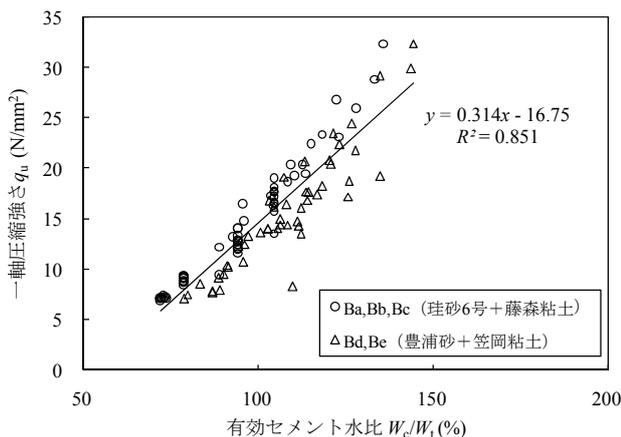


図 18 地盤条件別の有効セメント水比  $W_c/W_l$  と一軸圧縮強さの関係

### 3.2.2 礫質土での比較 (B2 シリーズ)

礫質土を含むソイルセメントの応力ひずみ関係を示した知見が少ないことから、図 19 に粒径 25mm の礫分混入率別の応力ひずみ関係を示す。礫分混入率 0~40% の範囲では、礫分混入率が増加することで、最大応力は小さくなる傾向にあるが、変形係数  $E_{50}$  については礫分混入率による影響はみられず、1268~1342N/mm<sup>2</sup> の範囲でほぼ同じ数値となった。また、粒径 10mm の供試体も同様の傾向がみられており、変形係数  $E_{50}$  については礫分混入率による影響はみられなかった。

礫分混入率と一軸圧縮強さの関係を図 20 に示す。粒径 10mm と 25mm で比較すると、一軸圧縮強さの減少傾向は粒径により異なるが、礫分混入率の増加に伴い、一軸圧縮強さは減少していく。これはコンクリートにおいては、粗骨材の粒径や量が圧縮強度に及ぼす影響に関する研究が

なされており、同一のモルタル部（細骨材とセメントと水）の配合であれば、粗骨材の粒径が大きくなると圧縮強度は減少し、また粗骨材の量が多いほど圧縮強度は低くなると報告がされている<sup>20)21)</sup>。このことから、本試験においても、ソイルセメント中の礫分がコンクリートの粗骨材と同様に一軸圧縮強さを低下させる要因になったと考えている。一方、写真 3 に示す粒径 75mm の供試体に関しては、礫分混入率が 0% から 30% に増加することで一軸圧縮強さは 10% 程度増加した。この原因は試験後の破壊状況から礫径の 10mm と 25mm の供試体が全体にわたって破壊していたのと異なり、75mm の供試体は上部に破壊が集中したことによる影響や、供試体の下部に多く礫が沈降したことによる影響など想定されるが、明確に把握できておらず、今後の検討課題である。また、寸法効果による影響<sup>22)</sup>のために、供試体寸法が大きいほど一軸圧縮強さは小さくなった。礫分混入率 0% での供試体径 50mm に対する強度低下割合を表 7 に示す。300mm 供試体の一軸圧縮強さは 50mm 供試体の 38.6% まで強度が低下した。コンクリートでの寸法効果の影響に関する実験結果<sup>23)</sup>によると、600mm 角試験体（無筋、コンクリート強度 20N/mm<sup>2</sup>）の最大応力は、194mm 角試験体（無筋、コンクリート強度 20N/mm<sup>2</sup>）の 55% 程度まで強度が低下するとし、コンクリート強度が低いほど、その影響は大きいとしている。このことから、ソイルセメントにおいてもコンクリートと同様に寸法効果による影響がみられることがわかった。

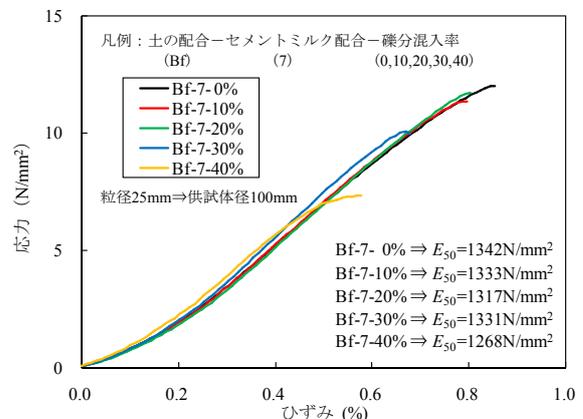


図 19 粒径25mm での代表的な応力ひずみ関係

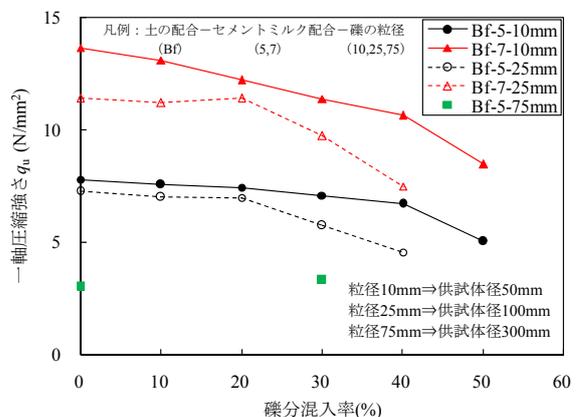


図 20 礫分混入率と一軸圧縮強さの関係



(1)試験状況 (2)供試体の破壊状況  
写真 3 粒径75mmの供試体

表 7 供試体径50mmに対する強度低下割合（礫分混入率0%）

配合番号	供試体径(mm)		
	50	100	300
Bf-5	100	93.1	38.6
Bf-7	100	83.6	-

単位(%)

図 21 に粒径ごとの礫分混入率と礫分混入率 0%に対する一軸圧縮強さ比率を示す。粒径 25mm では、礫分混入率 0~20%までの範囲ではほとんど一軸圧縮強さ比率は変わらず、強度低下がみられないが、礫分混入率 20%以上で強度低下がみられた。礫分混入率 30%で 15~21%の強度低下に、礫分混入率 40%で 35~38%の強度低下になった。一方、粒径 10mm では、礫分混入率 40%まで一軸圧縮強さ比率は漸減していく傾向であり、礫分混入率 40%以上で強度低下が急増した。またセメント添加量が異なる試験体（Bf-5 と Bf-7）は、粒径 10mm、25mm ともにほぼ同じ傾向を示しており、ソイルセメント部分（礫分を含まない砂質土とセメントミルク）の強度が異なっても礫分混入率による強度低下は同じ傾向を示している。このことから、粒径により強度低下の傾向や強度低下が急増を開始する礫分混入率が異なること、粒径が大きくなることにより強度低下が急増を開始する礫分混入率が小さくなること、ソイルセメント部分の強度が異なっても礫分混入率による強度低下の傾向は同じであることがわかった。

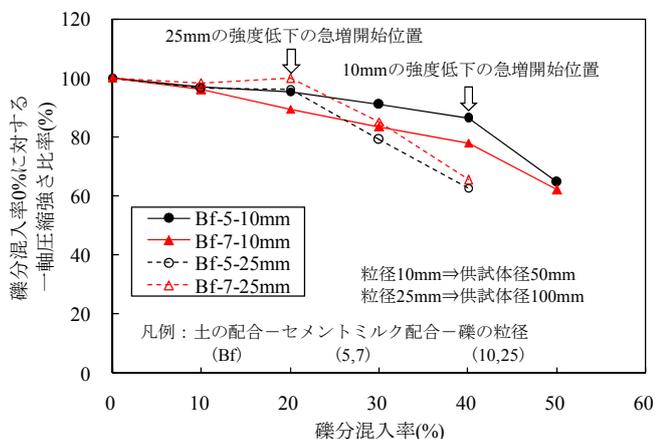


図 21 粒径ごとの礫分混入率と一軸圧縮強さ比率の関係

#### 4. 原位置で採取した現地土を用いた検討

##### 4.1 現地土と人工土の比較

前章にて人工的に作製した土を用いた室内配合試験で得られた一軸圧縮強さに及ぼす様々な影響の一般性を検討するために、原位置で現地土を採取して、人工土を用いた場合と同様の手順で室内配合試験を行った。表 8 に現地土の土質試験結果を示す。なお、採取した土は最大粒径が 9.5mm 以下になるようにふるい分けをして粒度調整を行った。試験では、普通ポルトランドセメントを用いて、セメントミルクの水セメント比  $W_w/W_c$  は 60%とした。試験ケースを表 9 に示す。対象土 1m<sup>3</sup>あたりのセメントの添加量（セメントミルクの注入量）と土の湿潤密度を加水により調整して供試体を作製した。試験項目としては、一軸圧縮試験、ブリーディング試験、密度の測定を行った。図 22 に有効セメント水比  $W_s/W_t$  と一軸圧縮強さの関係を示す。図には前章で述べた人工土で求めた  $W_s/W_t$  と一軸圧縮強さの結果も示している。今回用いた現地土の試験結果は、人工土で得られた結果と同様の傾向となり、その分布範囲も類似しており、現地土においても人工土と同様な  $W_s/W_t$  と一軸圧縮強さの相関性が確認された。現地土と人工土の粒度や粒径は異なるが、前章で述べたように深層混合処理工法やセメントを用いた安定処理土に比べて、本杭の根固め部に築造されるソイルセメントでは土粒子による影響が小さくなり、粒度や粒径による影響が小さくなったことが一因と考えられる。しかし人工土の項で述べたと同様に、今回の試験に用いた現地土の種類やセメントミルクの注入量との組み合わせが限られているので、多くの種類の現地土についても同様の傾向が得られるかは今後試験データを追加して検討する必要がある。

表 8 現地土の土質試験結果

試験項目	A 地盤	B 地盤	
自然含水比 $w_0$ (%)	29.2	14.4	
土の湿潤密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.913	2.190	
土の乾燥密度 $\rho_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1.481	1.914	
粒度	礫分(%)	1.6	31.0
	砂分(%)	72.3	50.6
	細粒分(%)	26.2	18.3

表 9 試験ケース

配合番号	対象土	湿潤密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	セメント $W_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	注入量 $Q$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
A-1	A 地盤	1.913	1091	1.0
A-2		1.6	1091	1.0
A-3		1.7	1091	1.0
A-4		1.8	1091	1.0
B-1	B 地盤	2.190	1091	1.0
B-2		1.6	1091	1.0
B-3		1.7	1091	1.0
B-4		1.8	1091	1.0
B-5		1.7	1636	1.5
B-6		1.7	2182	2.0

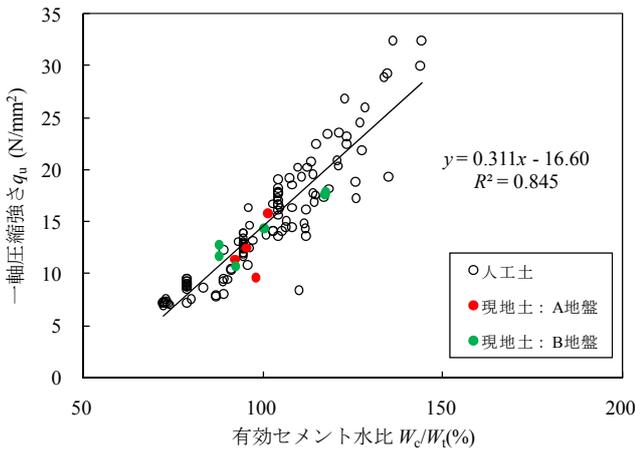


図 22 有効セメント水比  $W_c/W_t$  と一軸圧縮強さ比率の関係

#### 4.2 本室内配合試験結果の原位置への適用に向けて

室内配合試験結果から得た  $W_c/W_t$  と一軸圧縮強さの関係を用いた原位置でのソイルセメント作製時の仕様選定の考え方を図 23 にフローチャートで示す。本フローチャートは対象とする土質を砂質土、ソイルセメントの硬化時に発生するブリーディング水量  $W_b=0$  とした場合での考え方である。礫質土を含む土質については最大粒径 (75mm) の挙動が不明確であり、原位置でのソイルセメントのブリーディング水量  $W_b$  の評価方法も未確立であるため、適用範囲を砂質土、 $W_b=0$  の場合に限定した。さらに、本杭の根固め部を築造する土質は多くが飽和土であり、現地土の物性値 (土粒子密度, 自然含水比, 湿潤密度) から自然水量  $W_{w0}$  を評価することは可能であるが、施工時に用いる掘削水量  $W_1$  は施工方法や土質によって掘削時間が異なるため、その評価方法を確立する必要がある。施工時に用いる掘削水量  $W_1$  やブリーディング水量  $W_b$  の評価方法および礫質土を含む土質への適用方法については今後の検討課題と考えている。

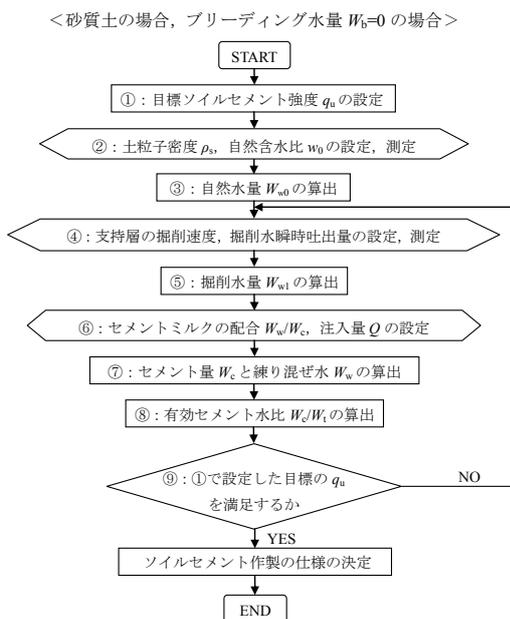


図 23 ソイルセメント作製の仕様選定の考え方

人工土や現地土の室内配合試験結果から得た  $W_c/W_t$  と一軸圧縮強さの関係から導いた近似式を適用することにより、根固め部におけるソイルセメントに要求される一軸圧縮強さに対して、本杭の施工におけるセメントミルクの配合、セメントの添加量 (セメントミルクの注入量)、支持層掘削時の掘削水量  $W_{w1}$  の目安 (上限値) を事前に選定することができる。さらに施工時に掘削水量が予定よりも過大に使用した場合 (支持層が硬いために掘削時間が予定よりもかかった場合) などの予期せぬ変化への対処方法としても、迅速に必要なセメントミルクの注入量を増量するなどの対策も可能になり、ソイルセメントの強度低下に対するリスクを軽減できるものと考えている。

#### 5. まとめ

本研究では、節杭を用いたプレボーリング工法の根固め部に着目し、ソイルセメントの室内配合試験を行った。支持層として適用する土質 (砂質土, 礫質土) に対するソイルセメントの強度特性を調べ、これらの影響を考慮した必要なセメントミルクの配合や注入量の選定方法を検討した。以下に、本研究により得られた知見をまとめる。

- 1) 砂質土においては、一軸圧縮強さはセメント添加量 (セメントミルクの注入量) に比例して増加する。セメントの添加量 (セメントミルクの注入量) の増加比率と一軸圧縮強さの増加比率はほぼ同等に増加し、一軸圧縮強さの増加比率はセメントの添加量 (セメントミルクの注入量) の増加比率との相関性が高いことがわかった。
- 2) 砂質土においては、有効セメント水比  $W_c/W_t$  と一軸圧縮強さの間には良好な相関関係がみられ、この関係より一軸圧縮強さはセメントの添加量と供試体内部の全有効水量の比によって推定できることが分かった。
- 3) 細粒分を多く含む砂質土は、ベントナイトを添加した場合と同様に供試体内の材料分離を防止し、供試体内の水のブリーディングを防止する効果がある。また細粒分含有率の増加によって供試体は内部に水を多く含んだままで硬化することで、有効セメント水比  $W_c/W_t$  が小さくなり、一軸圧縮強さが小さくなることが分かった。
- 4) 細粒分を多く含む砂質土においても、 $W_c/W_t$  と一軸圧縮強さの間には高い相関関係がみられる。今回の試験に用いた対象土やセメントミルクの配合では砂質土の粒度や粒径による影響は小さいことが分かった。
- 5) 礫分を含む砂質土において、粒径 10mm と 25mm で比較すると、礫分混入率の増加に伴い、一軸圧縮強さは減少していく。また、粒径により一軸圧縮強さの低下傾向や一軸圧縮強さの低下が急増を開始する礫分混入率が異なる。また粒径が大きくなることにより、一軸圧縮強さの低下が急増を開始する礫分混入率が

小さくなることがわかった。

- 6) 人工土を用いた場合と現地土を用いた場合の室内配合試験結果においても  $W_0/W_1$  と一軸圧縮強さの関係で整理すると、ほぼ同様の傾向となり、その相関性が確認された。

各工事の前に室内配合試験を実施することによって、人工土や現地土から得た有効セメント水比  $W_0/W_1$  と一軸圧縮強さの関係から導いた近似式を把握することにより、根固め部のソイルセメントの強度確保が可能になるセメントミルクの配合や注入量の目安を事前に把握できるメリットがあり、また予期せぬ施工条件や地盤条件の変化によって、ソイルセメントの強度が低下するような場合でもそのリスクを軽減できると考えている。

今後は、室内配合試験にて作製したソイルセメントと実現場にて施工したソイルセメントの関連性の把握を進めていき、本杭の支持力性能や支持力品質の向上につなげていきたい。また、様々な地盤でのデータを収集蓄積することにより、室内配合試験結果から本杭における根固め部のセメントミルクの配合や注入量などを容易に選定できるものと考えている。

#### 参 考 文 献

- 1) 小椋仁志, 小松吾郎, 真鍋雅夫, 大島章, 千種信之, 細田豊, 須見光二, 三村哲弘: 既製杭のプレボーリング拡大根固め工法の拡大掘削径と鉛直支持力, GBRC, Vol.32, No.1, pp.10-21, 日本建築総合試験所, 2007.
- 2) 今広人, 吉田映, 樺澤和宏, 小松吾郎, 桑原文夫, 木村亮: 先端載荷試験後に掘り出した節杭を用いたプレボーリング工法の根固め部の調査, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.4, pp.615-623, 2010.
- 3) 今広人, 吉田映, 木村亮: 節杭を用いたプレボーリング工法の根固め部における節杭とソイルセメントの付着性能に関する検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.361-375, 2012.
- 4) 三井隆, 吉川正, 池田昭彦, 青山要, 中川浩二: 細粒分含有率が異なる改良土の室内配合試験による基礎的研究, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp.117-129, 2001.
- 5) 伊藤亜政, 辻幸和: セメントを安定材に用いた事前混合処理土の強度に及ぼす粒度の影響, 土木学会論文集, No.451/V-17, pp.337-340, 1992.
- 6) 福島伸二, 谷茂, 北島明, 西本浩司: 底泥土の固化処理強度に及ぼす粒度と含水比の影響, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp.376-388, 2007.
- 7) 太田宏, 山田雅一, 安達俊夫: セメント系砂質改良土の強度・変形特性(その12. 長期材齢における一軸圧縮強度の推定方法), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.703-704, 2007.
- 8) 加藤誠, 田中憲章, 太田和善, 金城徳一, 田坂行雄: 高強度ソイルセメントに関する研究・その1, 第36回地盤工学学会研究発表会講演集, pp.745-746, 2001.
- 9) 栗原淳, 土屋富男, 内田明彦: 高支持力埋込み杭の根固め部ソイルセメントの強度予測について, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.357-358, 2011.
- 10) 渡邊徹, 長尾俊昌, 岡沢良昭, 小林祥一, 安川真知子, 植谷忠興: 高支持力埋込杭の根固め部の試験施工と各種試験, 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.359-360, 2011.
- 11) (社)地盤工学会: 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, pp.308-316, 2000.
- 12) (社)土木学会: コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準, pp.210-211, 2005.
- 13) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, pp.558-565, 2012.
- 14) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, pp.45-47, 2012.
- 15) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, p.613, 2012.
- 16) 菅井正澄, 藤山哲雄: セメント改良粘土の一軸圧縮強度に影響を及ぼす要因について, 土木学会第55回年次学術講演会講演梗概集, III-B213, pp.426-427, 2000.
- 17) 御手洗義夫, 永留健, 青木雅俊: 固化処理土の強度発現と湿潤密度の関係, 第43回地盤工学研究発表会, pp.685-686, 2008.
- 18) (財)日本建築センター: 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—, pp.313-314, 2002.
- 19) (社)地盤工学会: 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, pp.214-237, 2000.
- 20) 川上英男: 粗骨材粒径とコンクリート強度, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造系, pp.11-12, 1968.
- 21) 川上英男: 粗骨材の粒径と量がコンクリート強度に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造系, pp.341-342, 1969.
- 22) (株)朝倉書店: コンクリート工学ハンドブック, p.275, 1978.
- 23) 疋田次峰, 倉本洋, 田中仁史, 中治弘行: コンクリートの一軸圧縮応力-ひずみ関係に及ぼす寸法効果の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.193-198, 2002.

(2012. 10. 5 受付)

## A study on laboratory mixing test of soil cement by pre-bored piling method

Hirohito KON<sup>1</sup>, Ei YOSHIDA<sup>2</sup>, Terumi HOSODA<sup>3</sup> and Makoto KIMURA<sup>4</sup>

- 1 Engineering Division, Japan Pile Corporation  
(Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University)
- 2 Engineering Division, Japan Pile Corporation
- 3 Construction Division, Japan Pile Corporation
- 4 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

### Abstract

Pre-bored piling method using nodular pile (precast concrete pile) consists of pitching the nodular pile into soil cement formed by mixing and agitating cement slurry and soil. In pre-bored piling method, soil cement affects the vertical bearing capacity. Unconfined compressive strength of soil cement in base bulb is much larger compared to the deep mixing method. In this study, laboratory mixing test of soil cement in base bulb was carried out to clarify the characteristics of soil cement. From the examinational results, unconfined compressive strength of soil cement in base bulb is a good correlation between the effective cement-water ratio. It was found out that amount of gravel fraction and fine fraction content affects unconfined compressive strength of soil cement in base bulb.

Key words: soil cement, base bulb, laboratory mixing test, pre-bored piling method