

土の粒度特性を考慮した 改良土の特性と配合設計に関する研究

青山 要¹・宮森 建樹²・脇山 哲也³

¹正会員 住友大阪セメント㈱セメント営業技術部 (〒101-0054 東京都千代田区六番町 6-28)

²正会員 工博 日本大学理工学部教授 社会交通工学科 (〒247-8501 千葉県船橋市習志野台 7-21-1)

³正会員 住友大阪セメント㈱セメント営業技術部 (〒101-0054 東京都千代田区六番町 6-28)

地盤改良の現場配合は、室内試験の改良土の一軸圧縮試験結果から目標強度や施工上の安全等を配慮して決定されることが多い。改良土の強度特性は改良材の配合条件が同じであっても、土の種類や状態により大きく異なる。また、施工後の改良土の強度においても室内配合試験結果と大きく異なっていることがある。筆者らは、室内配合と現場採取の改良土の強度差の要因として考えられる土圧等の環境条件を除き、改良対象土の粒度特性と改良土の体積変化に着目し、ガラスビーズと現場採取土を用いた室内配合試験を実施した。その結果、土の細粒分含有率によって異なる改良土の体積変化および強度特性等から改良土の配合を検討する上で有用な知見を得ることができた。これらを背景に配合決定のフローについて提案した。

Key Words : cement deep mixing method, mix proportion, design strength, fine fractions of soil

1. はじめに

地中に改良材を供給して現地盤の土と攪拌混合する工法は深層混合処理工法に代表される。深層混合処理工法は、改良材を粉体の状態で地中に供給する工法とスラリーの状態では供給する工法に分けることができる。改良材で分類した粉体系とスラリー系の工法では、後者の方が工法の種類が多く¹⁾ 広く用いられている。

一般にセメントが化学的に結合する水はセメント質量の約 25~28%といわれている^{2)・3)}。改良土中のセメントは水和に必要な水分が確保できると、アルカリ度が高くなりセメントの水和反応が活発になって、その水和過程でセメントの比表面積が著しく増大⁴⁾、土と結合して改良土が強度発現するものと考えられている。深層混合処理工法で用いられているスラリー系の改良材の配合は、攪拌機構から工法分類される機械攪拌式の場合、水セメント比は $W/C=80\sim 120\%$ ^{5)・6)}の範囲であり、噴射攪拌式の場合は $W/C=75\sim 150\%$ ^{7)・8)・9)}の範囲で施工されていることが多い。改良材の配合は、一般に用いられているモルタルおよびコンクリートの水セメント比の $W/C=60\%$ 以下¹⁰⁾に比べると大きく、ブリーディング量も大きい^{11)・12)}。このような改良材を使用した場合、土の種類によってはブリーディング

の影響により改良土の体積変化および強度発現に影響を及ぼすものと考えられる。

深層混合に用いる改良材の配合は、設計強度を基準に施工条件等を考慮して、施工前に行う室内配合試験から決める事が多く、配合別に実施した改良土の強度試験結果から検討する。スラリー系の改良材の配合検討は、改良対象土 1 m³に対して投入する改良材の配合から粉体の状態のセメントまたは固化材の質量を換算し、この添加量と改良土の一軸圧縮強さを比較して検討している。

改良土の室内配合試験における一軸圧縮試験用の供試体は、地盤工学会基準の安定処理土の締固めをしない供試体作製方法 (JGS-0821-2000) に準じて行われている¹³⁾。配合試験で得られた改良土の一軸圧縮強さ q_{u1} と施工現場から採取した改良土の一軸圧縮強さ q_{u2} との強度比を q_{u2}/q_{u1} として調査した結果では、粘性土の場合は $q_{u2}/q_{u1}=1\sim 1/3$ 、砂質土の場合では $1\sim 1/2$ であり、室内試験結果の方が現場に比べ大きいと報告されている^{5)・6)}。配合設計では、この強度比 q_{u2}/q_{u1} を安全率として配合を設定している¹³⁾。しかし、砂質土の現場施工において改良土の強度が著しく大きくなっている場合の報告もある^{14)・15)}。また、砂質土が混入している改良土は粘性土が混入している場合と比較すると強度バラツキが大きいという報告もある¹⁶⁾。

本来ならば、室内試験の強度と現場採取の改良土の強度が近似していれば、このような例は少なくなり経済的な配合が検討できる。しかし、先に述べたように一般化されている強度比から現場配合を設定しているのが現状である。

最近の深層混合処理工法は、攪拌性を向上させるための攪拌翼の研究^{17)・18)・19)・20)}もされてきているが、強度比に関しては最近の調査が少なく1990年以前の資料に基づいているようである。

実務における土質工学的な検討を行う際に、土質を単純化して砂質土と粘性土という二つのモデルで考える場合がある。実際の地盤は単純ではないが、設計法や設計基準ではこのような考えで組み立てられていることが多い²¹⁾。深層混合における各種工法の技術資料等^{22)・23)・24)}に公表されている強度や配合等についても同様に、改良対象土は砂質土と粘性土という表現である。しかし、施工後の改良土の強度を推定するためには、さらに詳細な資料が必要になるものと考えられる。

地中の改良土の養生状態は、現場の環境により異なる。一般の室内配合試験では、これら現場環境条件を考慮した改良土の作製はできないが、改良土中の改良材と土の配合量が設定できれば、現場採取と室内配合試験の改良土の強度差は現場の養生状態や施工上の要因が主となり、安全率の設定条件が簡素化されるものと考えられる。また、最近では改良体の強度を低強度にするようなニーズも多くなってきているため、改良土の配合設計に関する研究も重要になってくるものと考えられる。

筆者らは、改良対象土の細粒分含有率により改良土の強度特性やブリーディングの状態が異なることに着目して、改良対象土と改良材が混合して改良土になる状態を想定し、改良土の体積変化および改良土の強度特性等について調べた。その結果、改良対象土の細粒分含有率が配合検討上の指標になるものと考えられ、室内配合試験方法に関する検討を行った。

2. 改良土からの排水を考慮した配合設計の必要性について

改良対象土の粒度特性と改良土に関する他の研究によれば、改良材配合(W/C)および改良材の投入率等の配合が等しい場合、改良土の一軸圧縮強さは、改良対象土の細粒分含有率の減少とともに大きくなるという傾向があると報告^{25)・26)}している。木下らの報告²⁵⁾では、原位置では土粒子の分離、沈降、周辺地盤からの拘束圧力などの現象もあり、

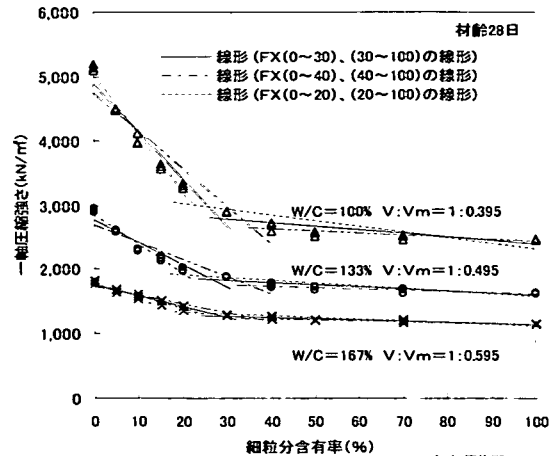


図-1 細粒分含有率と一軸圧縮強さ²⁵⁾ 加修修正

周辺地盤に改良土中の水分が逸散されている可能性がある」と述べられており、従来の配合設計法は塑性指数の小さいシルト～砂の改良土の強度について過小評価の傾向があるということをつけ加えている。また、砂分含有率とで比較した研究^{27)・28)}では砂分含有率の増大に伴い強度が大きくなるという傾向を報告している。どちらの場合においても土の粒度分布に着目した研究であり、改良土の強度は細粒土が多い場合には小さく、粗粒土が多い場合は大きいというもので、強度の傾向に関しては共通している。筆者らが実施した試験においても、同様の傾向が確認されている。三井らの研究²⁵⁾で述べている細粒分含有率の異なる改良土の一軸圧縮試験結果の例を図-1に示す。図-1は細粒土と粗粒土を所定の細粒分含有率になるように調整した試料土を用いて、配合条件が等しい改良材を混合した改良土の一軸圧縮強さを示したものである。試料土の細粒分含有率の増大に伴い一軸圧縮強さは小さくなるが、細粒分含有率が約30%以上になると0~30%付近までの範囲とは異なり、一軸圧縮強さの変化は細粒分含有率が増大しても小さいことがわかる。また、この研究では、細粒分含有率30%以下の試料土が混入している改良土についてはブリーディングが発生していることも報告されている。

このように細粒分含有率が小さい土が混入している改良土の強度が大きくなる傾向の因子として、改良土からの排水が考えられる。施工現場の改良体は地中で造成されるため、室内試験の場合の型枠と排水条件が異なり、改良土に加わる圧力、すなわち、自重および土圧等により改良土中の水分は周辺の地山や地上に排水される。これにより改良土の湿潤密度は大きくなり、改良土中のセメント量は計画時よりも増大しているものと考えられる。しかし、一般

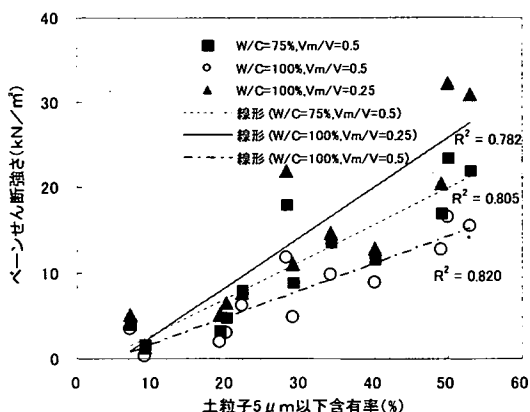


図-2 粘土分含有率とベーンセン断強さ³⁰⁾

に行われる室内配合試験では改良土中のセメントおよび固化材の添加量は、ブリーディングによる体積変化を考慮していない机上の配合計算値より求められている。すなわち、配合上は使用する改良材の体積と改良対象土の体積の和を改良土体積としており、排水による体積変化からの体積の補正がなされていない状態で、改良材中のセメント量を算出して強度との比較を行っている。

ブリーディングは、一般にモルタルの場合、ペーストの力学的性状と関係し²⁹⁾、まだ固まらない改良土の粘性やせん断力が影響しているものと考えられる。細粒分含有率が大きい土の場合は、粘土分も多く含まれて比表面積も大きい。図-2 は改良土中の粘土分の含有率とまだ固まらない改良土のベーンセン断強さについて報告した研究例³⁰⁾であり、粘土分の増大に伴い改良土のベーンセン断強さが大きくなっていることがわかる。ベーンセン断強さを粘性抵抗力と考えた場合、まだ固まらない改良土の粘性抵抗力が増大することにより水分の浸透性が失われブリーディング量が少なくなるものと考えられる。

改良土中で土粒子が受ける力がニュートン流体としてつり合う³¹⁾場合、このつり合いは土粒子径が球状と仮定した場合、まだ固まらない改良土中の土粒子重量、浮力および粘性抵抗力と関係して式(1)のよう示され、この粘性抵抗力Eはストークスの法則を適用すれば、式(2)のようになる。

$$(4\pi r^3/3)\rho g - (4\pi r^3/3)\rho_m g - E = 0 \quad (1)$$

$$E = 6\pi r\eta v \quad (2)$$

ここに、 r : 土粒子半径、 ρ : 土粒子質量、 E : 改良土の粘性抵抗力、 ρ_m : 改良土の密度、 g : 重力加速度、 η : 改良土の粘性係数、 v : 土粒子の沈降

速度である。

すなわち、土粒子の粒径、改良土との密度の差が大きいほど、改良土の粘性係数が小さいほどブリーディングが生じる。さらに、この粘性は粘土分の影響が大きく、土粒子の表面にある負電荷に改良材の陽イオンであるカルシウムイオンが吸着するものと考えられ、改良対象土の陽イオン交換容量(CEC)との関係もあるといわれている³⁰⁾。すなわち、改良土のブリーディングは、粗粒土が多く含まれた透水性の良い土が改良土に混入している場合の方が発生しやすく、改良土の体積変化は細粒分含有率に影響しているものと考えられる。配合設計において、改良対象土と改良材の投入比を設定する際に改良土の体積変化を把握しておくことは重要なことである。特に、改良土の体積減少は、配合設定時の安全率により富配合になり、施工後の改良土の強度が過大になってしまうこともある³²⁾。改良目的によっても異なるが、改良土の強度は大きければ良いというものではなく、所定の強度を確保した方が経済的であるとえられる。筆者らは、室内配合試験において改良土の状態を把握することは経済的な配合設計を行う上で重要なことであると考える。

3. 改良土からの排水による体積変化

(1) 改良土の特性を考慮した改良対象土の分類

改良土の配合は強度特性だけでなく、改良対象土によって異なる改良土の体積変化やまだ固まらない改良土の粘性やせん断力の特性も考慮して、総合的に検討する必要がある。

改良土の構成模式図を図-3に示すように考えた。現状の配合設計では、図-3の(A)改良土の構成模式図の改良対象土の体積 V と改良材の体積 V_m を加えた混合時の体積 V_1 を改良土の体積としており、改良土のブリーディングや乱された土の体積変化および排水等の影響を考慮したものになっていない。すなわち、改良土が体積変化した場合、実際の改良土の体積は図-3に示す V_2 のようになり、土と改良材との混合体積 V_1 から換算したセメント混入量と強度の関係から配合選定する現状の室内配合試験では、改良対象土や配合によっても異なるが、実際の改良土中のセメント量と大きく異なる場合もある。

改良土の体積変化を考慮した配合検討を行うためには、改良対象土を粘性土、砂質土というような分け方ではなく、改良土の体積変化の要因と考えられるブリーディングが発生する土とそうでないものに分ける必要がある。すなわち、土の比表面積あるい

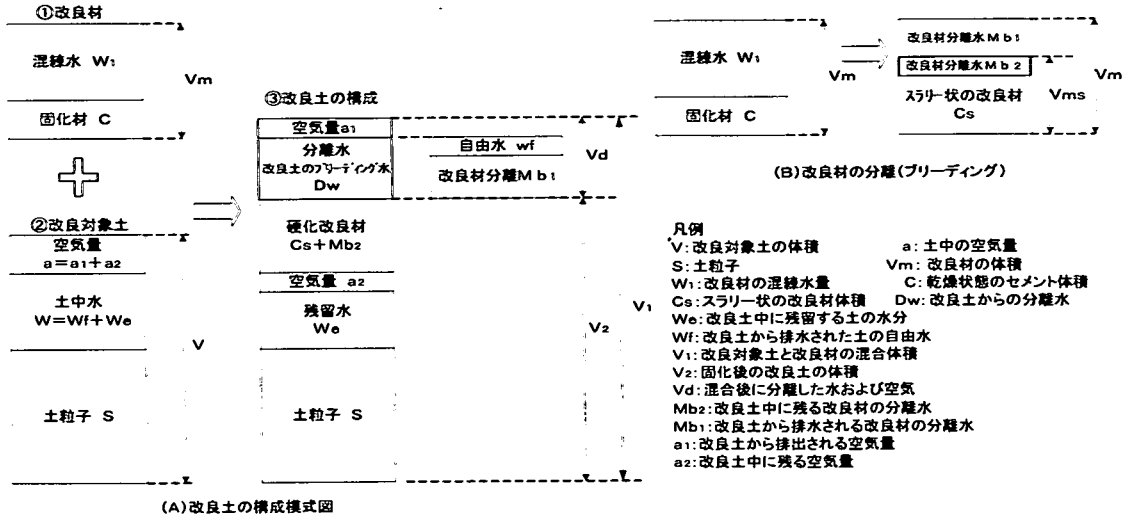


図-3 改良土の構成模式図および改良材の分離模式図

はイオン交換能等が改良材の水和反応に影響を及ぼす土と改良材の水和反応が主になる土、または、透水性の良い土と悪い土に分けることである。

一般に土の粒径により土質を分類する場合、日本統一分類法(地盤材料の工学的分類方 JGS0051-2000)¹³⁾ が用いられ、土質材料としては質量比に基づき細粒分含有率 50%以上のものを細粒土、50%以下を粗粒土とし大別している。一方、各種地盤改良等の施工技術マニュアル等^{8), 9), 22), 23)} で述べられている砂質土および粘性土という表現は、先に述べているように実務的に土質をモデル化して分類したものであるものと考えられる。また、現場慣用語である土質柱状図などに記載されている土質名は主に目視観察(一般に体積比を反映しているものと見られる)で判別している¹³⁾。このように、土質分類の物差しは検討内容によって異なっている場合がある。本研究では土の粒度分布に基づき、細粒分含有率から検討している。

図-1 に示した細粒分含有率と改良土の一軸圧縮強さでは、細粒分含有率 0~30%の範囲は、細粒分含有率の増加に伴い強度は小さくなる傾向を示すが、30%以上になるとその強度は細粒分含有率が增大しても強度の変化は小さいという傾向がある。ブリーディングについては、改良対象土の細粒分含有率が增大すると土の比表面積が大きくなり、改良材との付着力等により改良土の浸透性が失われてくるものと考えられる。改良土の配合により異なるが、改良対象土の土粒子径が 0.075 mm 以下の細粒土が 30%以上含まれているものはブリーディングが発生していないという報告もあり²⁵⁾、これらを背景に筆者らは、改良対象土の細粒分含有率 30%を境界に2つの

範囲に分けて配合上の留意点を検討した。

(2) 改良土の構成

図-3 の (A) 改良土の構成模式図において、図中の①は改良材のセメントミルクを示し、②は改良対象土を示している。③は改良対象土と改良材が混合され状態を改良土の構成として示している。改良の際に削孔や攪拌が行われ、改良対象土は乱された状態で改良材と混合される。このとき改良土から分離した水分 D_w は、周辺地盤に排水されるものと仮定すると改良土の体積は V_2 になる。この改良土の体積 V_2 が硬化後の体積になるものと考えた。改良対象土の種類によっては土中水の排水量が異なるものと考え、排水量は土の間隙が大きいほど体積変化を起こすものと考えられる。改良土の体積 V_2 は模式図を参考にすると式 (3) で表される。

$$V_2 = V_1 - V_d \quad (3)$$

硬化後の体積は、改良材の配合や改良対象土中の水分量と空気量により異なり、改良後の強度にも影響を与えるものと考えられる。改良土体積 V_2 を基準に配合を検討する場合、混合後に分離した土中水 W_f 、空気量 a_1 および改良材のブリーディングの和である V_d の量を求めなければならない。ブリーディング試験により改良土からの分離水 D_w および改良土体積 V_2 が計測できるので、空気量 a_1 は地下水水位以下の混合により空気が巻き込まれない場合を仮定すると式 (4) のようになる。

$$a_1 = V + V_m - V_2 - D_w \quad (4)$$

図-3 に示した (B) 改良材のブリーディング水 Mb_1 と Mb_2 は、改良土の粘性が大きくなりブリーディングが生じない場合は $Mb_1 = 0$ 、 $Wf = 0$ になり改良土の体積変化の因子は空気量 a_1 だけになる。また、 Vd は改良対象土の飽和度 $Sr = 100\%$ のとき、 $a_1 = 0$ になり、式 (5) のようになる。

$$Vd = Wf + Mb_1 \quad (5)$$

混合により改良対象土は乱されて空気間隙が小さくなり、改良材が土の空気間隙に相当する体積を満たした場合は、 $a_2 = 0$ になるため、改良対象土の体積 V_2 は容易に求めることができる。この状態を確認するため、細粒分含有率 0% の土の代替として粒径の異なるガラスビーズを用いて、改良土のブリーディングの状態と改良土の強度試験を行った。さらに細粒分含有率 30% 以下の現場採取土を用いて、細粒分含有率による体積変化の影響を確認するために改良土のブリーディング試験を行った。

4. 試験概要および試験試料

(1) 試験概要

前項にも述べているが、一般に行われている深層混合処理工法の現場配合は、室内配合試験において所定の改良材配合で改良土を作製して、改良対象土 1 m³ 当りに投入する改良材の量を設定し、そこから換算したセメントまたは固化材の粉体状態の添加量と一軸圧縮強さの結果から現場配合を決定している。しかし、本研究では経済的な配合検討が行えるように、最終的には出来上がり改良土の体積 1 m³ 中に混入している量で検討したいため、改良土の体積変化および改良材自体の分離状態を考慮しなければならない。これらの特性は改良対象土の性状により異なるため、改良対象土を予め分類する必要がある。試験では先に述べたように、改良土の強度特性等から改良対象土の区分を細粒分含有率 30% とした。改良土からの排水は改良材配合と改良対象土の間隙率や飽和度により改良土の体積が異なり、改良後の強度にも影響するものと考えて、次に示す試験を行った。

- ① ガラスビーズによる細粒分含有率 0% の模擬土を用いた改良土の体積変化と強度特性。
 - ② 2 種類の細粒土と粗粒土から細粒分含有率の異なる試料土を用いた細粒分含有率の影響による改良土の体積変化と強度特性。
 - ③ 現場採取土を用いた改良土の強度特性。
- 改良対象土の細粒分含有率が小さい改良土は、ブ

リーディングにより改良土体積が減少し、改良土中の改良材混入率は、配合設計時点より増加しているものと考えられる。粗粒土の場合、土粒子および水系の界面化学的な作用はほとんどないといわれている^{3,3)} ことから、細粒分が含まれていないガラスビーズを模擬土として①の試験を実施した。

②の試験に用いた試料土は鉱物組成等による化学的作用の影響を受けないようにするため、2種類の細粒土と粗粒土を混合して細粒分含有率の異なる試料土を作製した後に改良材を投入して改良土とした。

③の試験は細粒分含有率の異なる現場の土を用いて改良土の強度試験とブリーディング試験を行い改良土の体積変化の傾向を調べた。

使用した改良対象土の細粒分含有率 30% 以上と 30% 以下の試料土の体積は次のように求めた。

a) 細粒分含有率 30% 以上の場合

飽和度は約 95% 付近で飽和状態に近いため、この状態の湿潤密度試験 (JIS A 1255) で得られた試験値を基準にして配合検討した。

b) 細粒分含有率 30% 以下の場合

地下水位以下の改良土を想定しているため、細粒分含有率 30% 以下については飽和状態の密度を基準にした。測定はメスシリンダーに試料土を入れた後、過飽和状態になるようにイオン交換水で水浸させ、試料土の沈降後の体積を計測し、得られた乾燥密度 ρ_d' を基準にした。確認のため数種の試料土を用いて突固めによる土の締固め試験 (JIS A 1210) で得られ最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ および砂の最小最大密度 (JIS A 1224) で得られた最大密度 $\rho_{d,max}$ 、最小密度 $\rho_{d,min}$ と比較を行った結果、締固め度は約 90% 付近に、相対密度は約 50% 付近であった。

その他の土質試験は JIS 規定の試験方法に準じて行い、土の陽イオン交換容量 (CEC) は日本ペントナイト工業会標準試験法に準じて、土粒子の比表面積は BET 一点法 (ガス吸着法) により測定した。改良土のベーンせん断強さは簡易ベーン試験器を用いて測定し、一軸圧縮試験は JIS A 1216 に準じて一軸圧縮さを測定した。これらの供試体は締固めをしない供試体の作製方法 (JGS 0821-2000) に準じて行った。

本研究における改良土のブリーディング試験のブリーディング率とは、コンクリート中の水量に対するブリーディング水量との百分率で表している^{3,4)} ものとは異なり、改良土の体積とブリーディング水量の比率とし、メスシリンダーを使用して所定時間後 (180 分後) の全体積と沈降した体積を測定した。式 (6) に改良土のブリーディング率を示す。

表-1 改良材の配合とブリーディング率

改良材配合	W/C=75%	W/C=100%	W/C=125%
ブリーディング率	27.2%	30.4%	36.4%

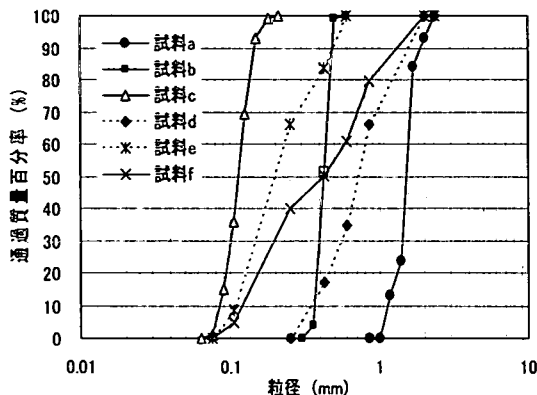


図-4 試験に用いたガラスビーズの粒度分布

表-2 各試料の乾燥密度と均等係数および50%粒径

試料番号	ρ_d (g/cm ³)	n(%)	D ₅₀	Uc
a	1.502	39.8	1.531	1.4
b	1.539	38.2	0.423	1.2
c	1.484	40.1	0.114	1.4
d	1.643	33.6	0.721	2.3
e	1.595	35.7	0.209	2.1
f	1.719	30.8	0.420	4.6

γ_d : 乾燥密度, n: 間隙率, D₅₀: 50%粒径, Uc: 均等係数

表-3 各試料の飽和度と改良材の配合および投入量

Sr(%)	W/C(%)	V _m
30,60,80,100	75	0.50
	100	0.25,0.50,0.75
	125	0.50

Sr: ビーズの飽和度, W/C: 改良材の水セメント比 (改良材の配合)
V_m: ビーズ体積V=1に対する改良材の投入量

$$\text{ブリーディング率} = 100 \cdot Dw / (V_2 + Dw) \quad (6)$$

ここに, Dw: 改良土から排出された水分量, V₂: 改良土の体積である。

(2) 試験試料

本研究に用いた改良材は, 普通ポルトランドセメントを用いて, 所定のW/Cで配合したものを使用し, 事前に表-1に示すように配合別のブリーディング率を求めた。改良対象土は各試験の目的により次に示すようなものを使用した。

① ガラスビーズを模擬土とした改良土の特性

ガラスビーズは図-4に示すように6種類を用いた。表-2には乾燥密度, 間隙比, 均等係数, 平均粒径を示した。改良土は表-3に示すように各ガラスビーズに対して飽和度を設定し, 所定の配合の改良材を投入して改良土を作製した。

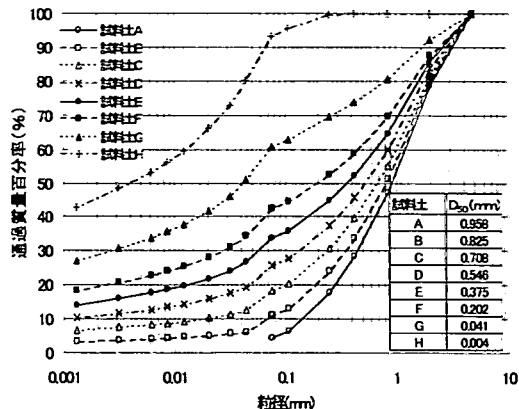


図-5 各試料土の粒度分布

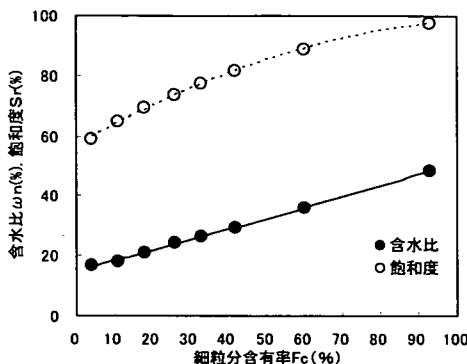


図-6 各試料土の細粒分含有率の飽和度と含水比

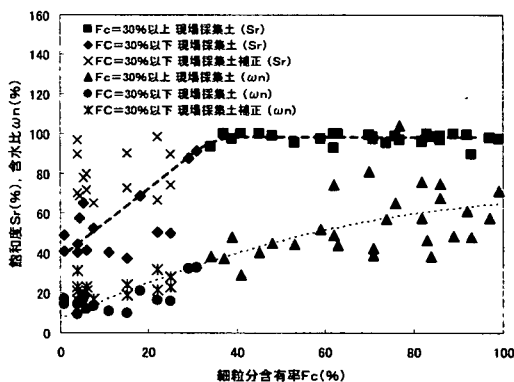


図-7 現場採取土の細粒分含有率と飽和度, 含水比

② 細粒分含有率の異なる試料土を用いた改良土の特性

図-5の粒度分布の試料土Aと試料土Hを用いて, 所定の細粒分含有率になるように調合し改良土を作製した。この8試料土に所定量の改良材を投入して改良土を作製した。図-6に試料土の細粒分含有率と飽和度および含水比を示す。

③ 現場採取土を用いた改良土の特性

採取土の細粒分含有率 30%以上のものについては,

図-7に示すように飽和度が約95%付近であり、飽和状態に近いので、この状態で改良土を作製した。細粒含有率30%以下の採取土は、図-7に示すように採取時の飽和度および乾燥密度を基準に加水した場合の飽和度と排水された状態の飽和度について採取土を調整して改良土を作製した。

5. 試験結果と考察

(1) ガラスビーズを用いた改良土

図-4に示す6種類のガラスビーズを用いて、所定の配合で改良土を作製しブリーディング試験を行い、図-8に示すように改良土中の模擬土の水量 W と配合設計時の改良土の体積 V_1 の比率を求めて比較した。これによると改良土のブリーディング率は改良土中の模擬土の水量の含有率(W/V_1)に比例して増大する。改良土中の模擬土の水量と改良土の W/C が同じ場合、改良材投入比 V_m が大きいほどブリーディング率が大きい。また、投入比 V_m が等しい場合は W/C が大きいほどブリーディング率が大きくなっていることがわかる。

$W/C=100\%$ の改良材を用いて改良材投入比を変化させた場合の改良土の排水水(ブリーディング)を測定した結果を図-9、図-10、図-11に示した。図は6種類の模擬土の各飽和度における実験結果を体積率としてプロットし、これの回帰直線も併記している。

図-9は、改良材の配合を $W/C=100\%$ として、改良材投入比 $V:V_m=1:0.5$ の場合の体積率の変化を示したものである。図によると飽和度が大きくなると、模擬土中の水分も多くなり改良土からの排水水 D_w が増大する。改良土の体積 V_2 は飽和度が小さくなるのに伴い減少し、模擬土中の空気 a は増大して、排水水 D_w は減少している。この場合の模擬土中の空気量 a と改良土から排出された空気量 a_1 の変化を示す回帰直線は重なっており、模擬土中の空気のほとんどが排出されたことを示している。すなわち、硬化後の体積減少の要因として排水水の他に模擬土中の空気量の排出が考えられる。

図-10は、改良材投入比 $V:V_m=1:0.25$ の場合であり、図-9の場合の空気量 a と排出空気 a_1 はほぼ等しく、これに比べ改良材の投入率が小さい。図から飽和度が小さいほど、空気量 a と排出される空気 a_1 の差が生じていることがわかる。すなわち、改良土中に空気が混入して残るため改良土の密度は小さくなるものと考えられる。

図-11は、改良材の投入比が $V:V_m=1:0.75$ の

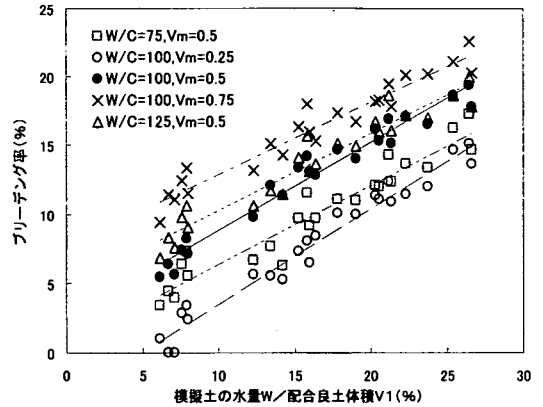


図-8 模擬土中の水量とブリーディング率

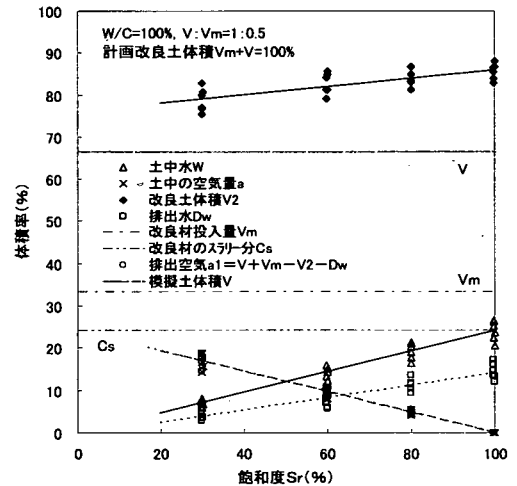


図-9 飽和度と体積率 ($V:V_m=1:0.5$)

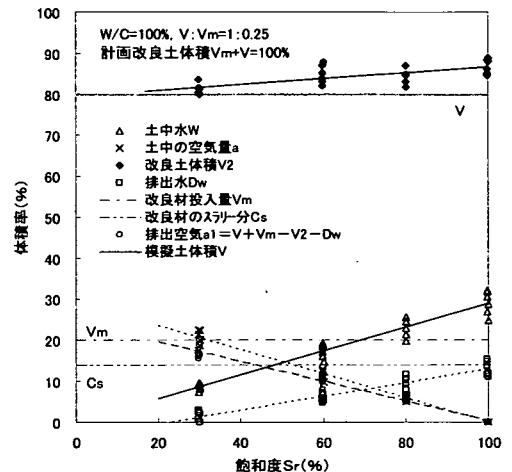


図-10 飽和度と体積率 ($V:V_m=1:0.25$)

場合である。模擬土中の空気 a は、図-9の場合と同様にほとんどが改良土から排出されたものと考え

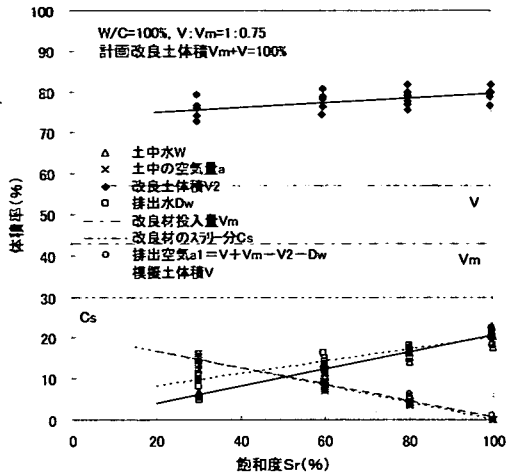


図-11 飽和度と体積率 (V:Vm=1:0.75)

られる。また、改良土体積 V_2 は図-9、図-10 の例と比べて大きく、排水水 D_w は模擬土中の水分量より多く、改良材から排水されたものと考えられる。改良材投入比によっても改良材の分離水が異なり排水に影響を与えるものと考えられる。

配合設計の混合時体積と実際の改良土体積を比較するため、模擬土 c を用いた改良土の体積減少率を式 (7) で求め、飽和度の関係を図-12 に示した。

$$\text{改良土体積減少率 (\%)} = \frac{(V_m + V - V_2)}{(V_m + V)} \times 100 \quad (7)$$

ここに、 V : 改良対象土の体積、 V_m : 改良対象土に投入する改良材の体積、 V_2 : 硬化後の改良土体積である。

図-12 は同じ模擬土を用いて、改良材の配合および投入比を変化させた場合の改良土体積減少率を示したものである。これによると W/C の条件が同じ場合は投入比が大きくなるほど改良土体積減少率は大きくなっている。また、改良材の投入比が同じ場合は W/C が大きくなるほど改良土体積減少率は大きくなっている。飽和度が小さいと改良土体積減少率は大きく、改良土の体積は模擬土の条件が同じ場合でも改良材の配合や投入比が異なっていれば、改良材自体の分離水等の影響により異なるものと考えられる。

図-13 に表-1 に示した模擬土 c および d を用いた改良土の一軸圧縮強さと飽和度の関係を示した。模擬土の飽和度が小さくなるにしたがい改良土の一軸圧縮強さは大きくなることわかる。これは、先に述べたように、模擬土の飽和度が小さいほど体積減少率は大きくなっていることから、改良土中のセメント混入量が相対的に増大した影響と考えられる。

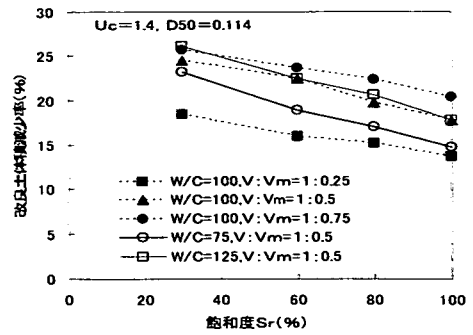


図-12 飽和度と改良土体積減少率

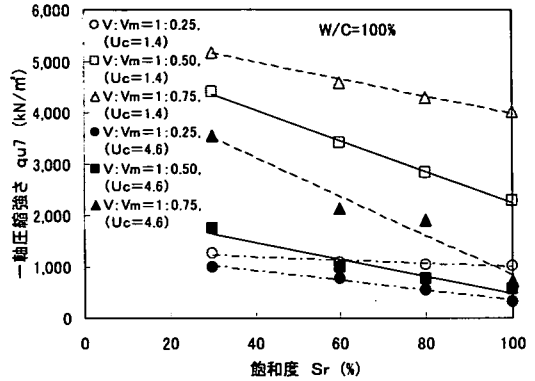


図-13 飽和度と一軸圧縮強さ (材齢 7 日)

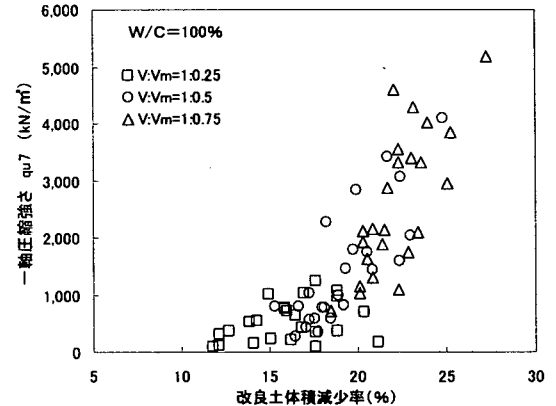


図-14 改良土体積減少率と一軸圧縮強さ

図-14 に改良土体積減少率と一軸圧縮強さの関係を示す。この図から改良材投入比 $V : V_m = 1 : 0.25$ は $V_m = 0.5$ 、 0.75 に比べると改良土体積減少率が小さく、改良土の強度も小さい。細粒分の影響がない場合、改良土体積減少率は改良対象土の飽和度に影響している。改良材の配合によっても異なるが、改良対象土の飽和度は、改良土の体積変化および強度特性に影響を与えることから改良材投入比を設定する目安になるものと考えられる。

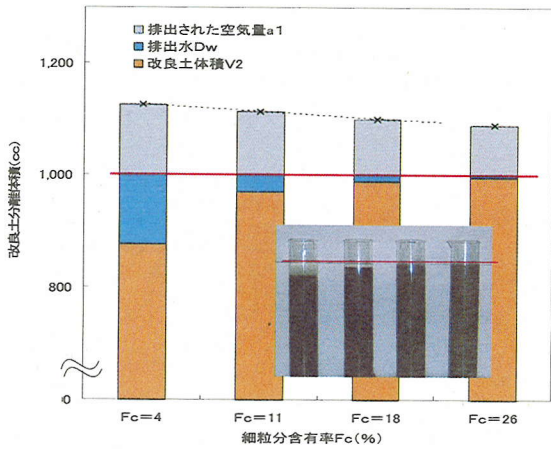


図-15 改良土のブリーディング試験

(2) 細粒分含有率を設定した試料土を用いた改良土の特性

図-5 に示した細粒分含有率が異なる試料土A～Hを用いて改良土を作製し、改良土のブリーディング試験および強度試験を行った。図-15はその試験状況とブリーディングの状態を示したものである。図中に示した排出された空気量は、混合前の状態の試料土の空気量と改良土体積から算出したものであり、図中の写真からも細粒分含有率が小さいほど体積変化が大きいことがわかる。細粒分含有率とブリーディング率については図-16に示し、改良土体積減少率と比較した。この試験結果では、細粒分含有率30%以上になると改良土の体積の減少は顕著に見られなかった。これは細粒分含有率が大きくなると試料土の比表面積が大きくなり、改良材との接触面積が広がり、前項で述べた改良土の増粘作用により水分の浸透性がなくなったためと考えられる。これについては、図-17に細粒分含有率と比表面積の関係を示した。細粒分含有率の増大に伴い比表面積も大きくなっていることがわかる。

改良土のブリーディングは、前に述べた式(1)からも粘性抵抗力に影響しているものと考えられる。すなわち、この粘性抵抗力をまだ固まらない改良土のせん断力と仮定し、図-18に示すように細粒分含有率と改良土のベーンせん断強さの関係について調べた。図によると細粒分含有率の増大に伴いベーンせん断強さも大きくなっており、細粒分含有率30%以上から変化しはじめていることがわかる。

改良土の粘性については、改良土中の細粒土の表面の負電荷と改良材中のカルシウムイオン(陽イオン)が引き合って凝集して増粘するものと考えられる。これについては試料土の陽イオン交換容量を測定し、図-19に示すように細粒分含有率との関係を示

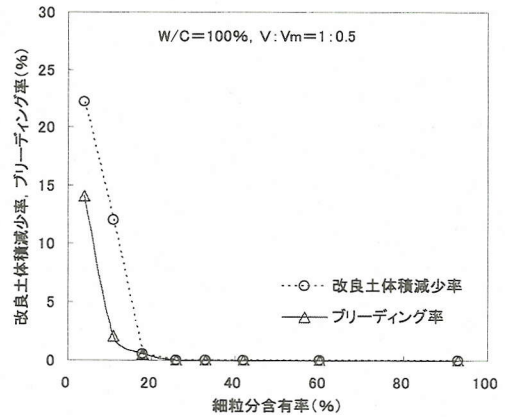


図-16 細粒分含有率と改良土のブリーディング率および改良土体積減少率

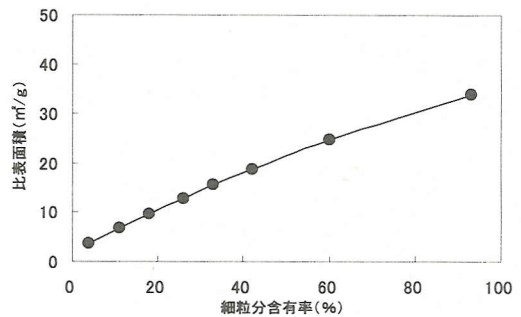


図-17 試料土の細粒分含有率と比表面積

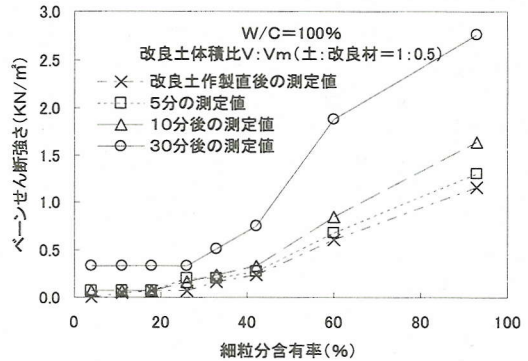


図-18 細粒分含有率と改良土のベーンせん断強さ

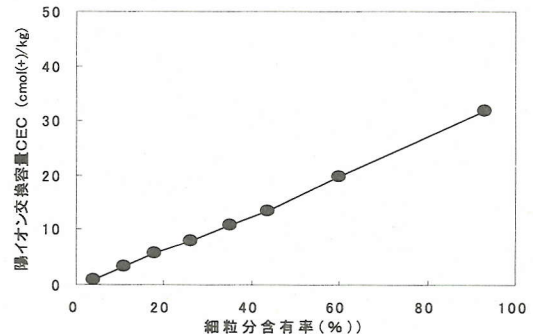


図-19 試料土の細粒分含有率と陽イオン交換容量

した。試料土の陽イオン交換容量は細粒分含有率の増大に伴い大きくなっていることがわかる。改良土のブリーディングについては、改良材と土とのイオン交換能等によるものだけでなく、改良材の分離や土粒子の骨格等の影響も考えられる。

図-20 は試料土の細粒分含有率と改良土体積、改良土からの分離水、投入した改良材と試料土の空気間隙量、間隙水量、間隙量および式(7)から求めた体積減少率の関係を示したものである。各体積率は、混合時体積($V+V_m$)との百分率として算出したものである。この図から細粒分含有率が小さくなるに伴い改良土体積 V_2 が減少していることがわかる。改良土からの分離水 D_w は、細粒分含有率が約20%以下になると急激に増大している。図中では試料土の空気間隙量 a は細粒分含有率20%以上になると改良土体積減少率とほぼ同じ値になっている。すなわち、細粒分含有率が大きくなるにつれ、排水量は減少し、空気だけが排出された状態になっていることを意味している。

改良土の強度は、改良土中に混入されているセメント混入量の変化が影響しているものと考えられ、改良土中のセメント量を細粒分含有率との関係として図-21に示した。固化後の改良土中のセメント混入量は、混合時のセメント混入量と比べると細粒分含有率が小さいほど差異が大きくなっている。

図-22 は一軸圧縮強さとセメント混入量の比率を改良材の強度寄与率として細粒分含有率との関係を示したものである。図より細粒分含有率が約30%以上になると強度寄与率は緩やかな勾配で推移していることがわかる。改良土に混入している土の細粒分含有率は、前述にあるように改良土の体積変化と強度に関係のあるセメント混入量が影響しているものと考えられ、土の細粒分含有率は改良土の強度発現傾向の目安になるものと考えられる。

一般に知られている改良土の強度に与える因子として、改良対象土の有機分や pH 等、改良材の配合、改良時の攪拌性および改良土の養生条件等が挙げられている³⁵⁾が、改良土の体積変化もその因子の一つとして挙げられるものと考えられる。

(3) 現場採取土を用いた改良土の特性

現場採取土については、細粒分含有率と強度等との関係から、細粒分含有率を30%で区分して次のように扱った。

① 細粒分含有率30%以下の改良対象土は、施工時の土の含水比が採取時より大きいことも考えられ、図-9に示すように採取時の乾燥密度を基準に飽和度を変化させた状態の試料土も作製

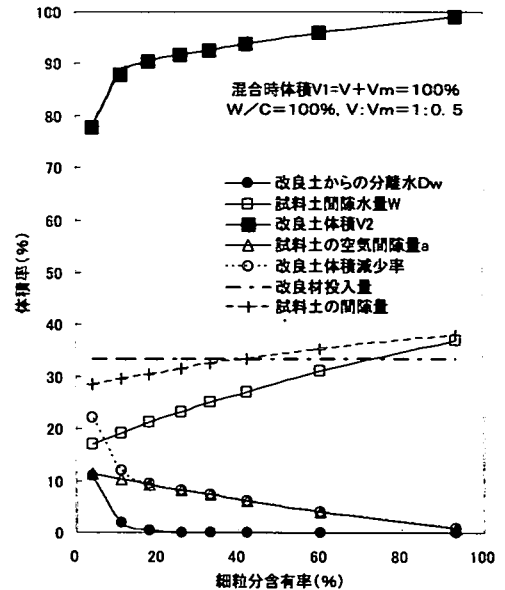


図-20 細粒分含有率と各体積

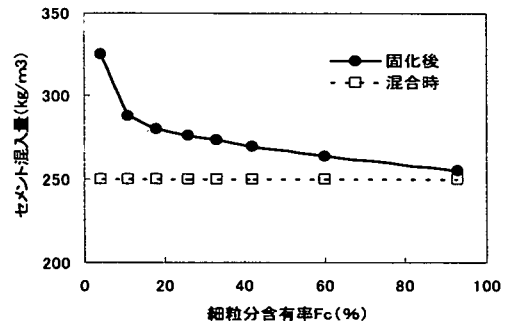


図-21 改良土中のセメント混入量

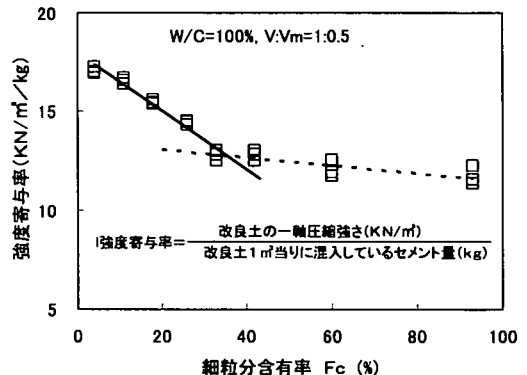


図-22 固化材混入量当りの一軸圧縮強さ

し、改良土の体積変化について検討した。

② 細粒分含有率30%以上の土は、採取時に測定した土性値を基準に配合し、改良土を作製して強度試験を実施した。

図-23 に現場採取土を用いた改良土の一軸圧縮

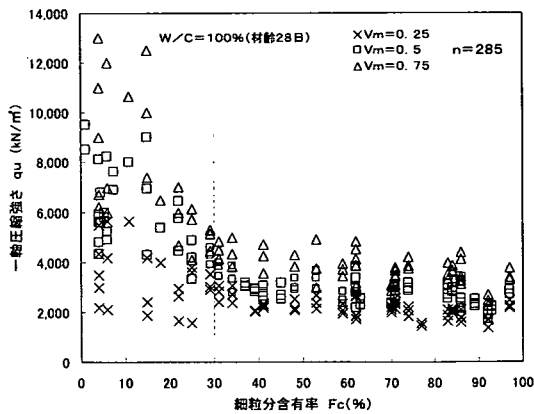


図-23 現場採集土の細粒含有率と一軸圧縮強さ

強さを示す。細粒含有率 30%付近を境に、改良土の強度傾向が異なっていることがわかる。細粒含有率 30%以上の現場採取土のほとんどが飽和度 95%以上であり、ブリーディングも顕著に見られなかったため、強度に寄与する改良土中の単位セメント量は細粒含有率 30%以下の改良土に比べ小さくなっている。

強度が相対的に大きい細粒含有率 30%以下の採取土に着目し、改良対象土の飽和度と改良土の体積減少率を図-24 に示した。ガラスビーズを用いた模擬土の例と同様に、改良対象土の飽和度が大きくなると体積減少率は小さくなる。細粒含有率が小さい場合の体積変化は、乱された状態において改良対象土の間隙量に変化することによって生じるものと考えられる。また、乱された後に改良材と混合して堆積する際に、土粒子の骨格構造も影響しているものと考えられるが、本研究ではそこまで検証できなかった。次に改良土体積減少率と一軸圧縮強さの関係をみると図-25 のようになり、細粒含有率 0~30%の範囲の一軸圧縮強さは、体積減少率の増大とともに大きくなる。改良土の体積減少による改良土中のセメント量は改良材の配合や投入量によっても異なるため、図-26 に改良土中のセメント混入量と一軸圧縮強さの関係を示した。一方、細粒含有率 30%以上の場合の改良土体積は、改良対象土の体積 V と改良材体積 V_m の和にほぼ等しい。図-20 に示すように改良土体積減少率と空気間隙量 a_1 は、ほぼ等しく体積減少は空気の実出によるものと考えられる。すなわち、改良土中の土の細粒含有率が大きく飽和状態に近い場合、体積変化量は小さくなるため、配合上の補正は考慮する必要がないものと考えられる。

改良土の体積変化において、細粒含有率 30%以下の改良土の場合、式 (7) に示す配合設計の混合

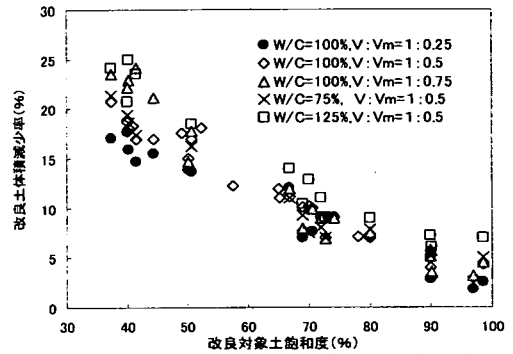


図-24 現場採集土の体積減少率 ($F_c=30\%$ 以下)

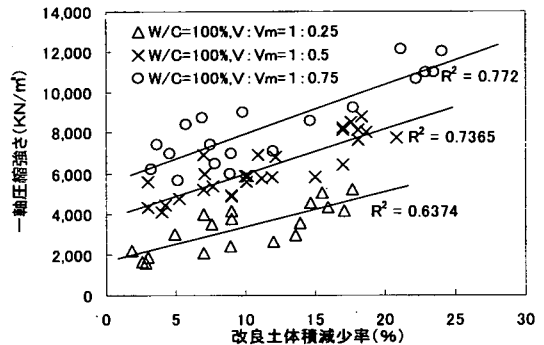


図-25 改良土体積減少率と一軸圧縮強さ ($F_c=30\%$ 以下)

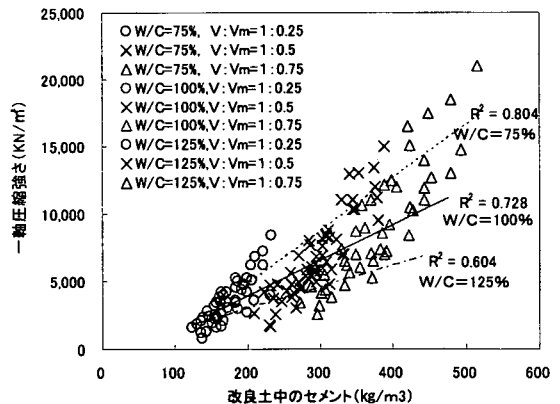


図-26 セメント混入量と一軸圧縮強さ ($F_c=30\%$ 以下)

時体積 V_1 は、改良対象土の飽和度が小さい場合、土が乱され改良材と攪拌混合されるため、改良後の体積は減少するものと仮定すると、改良土の体積は式 (8) の状態になるものと考えられる。

$$V_1 = V + V_m \quad (7)$$

$$V_2 = V + V_m - a_1 - W_f - M b_1 \quad (8)$$

ここに、 V_1 : 混合時の改良土体積、 V : 改良対象土の体積、 V_m : 改良材の投入量、 V_2 : 改良土体積、 a_1 : 改良対象土から排出された空気量、 W_f : 改良対象土から排出された水分量、 $M b_1$: 改良材からの分離水である。

細粒分含有率 30%以上の改良土の体積減少率は前に述べたように小さく、図-22 に示すように細粒分含有率 30%以上の場合、改良材の強度寄与率からみても相対的に強度発現性に劣るため、設計強度によっても異なるが、配合設計では強度および増粘作用の対策を主に検討を行うべきであると考えられる。

6. 改良土の配合手法の提案

本研究の試験では、改良土に細粒分含有率 30%以上の土が混入している場合、ブリーディングは顕著にみられなかった。粘土分が多い改良土は、増粘作用により攪拌性を悪化するものと考えられるため、このような対策についても検討できる配合試験が好ましいものと考えている。また、細粒分含有率 30%以下の場合については改良土の体積減少を考慮する必要があることがわかった。改良土の体積減少はブリーディングの他、土粒子が乱された後に沈降する際に、粗粒土の骨格構造が体積変化に影響しているものと考えられる。これについては、砂と粘土の混合土の圧縮特性の研究³⁶⁾からも混合土の体積圧縮率は細粒分含有率と関係があることが報告されている。

図-27 に改良対象土の特性から配合検討する手法を提案する。提案した室内配合試験フローの特徴は、改良対象土の細粒分含有率により検討方法が異なっていることと、強度試験以外にまだ固まらない改良土の試験から検討した後に修正配合を行い再検討をしていることである。

細粒分含有率 30%以上の土を改良土にした場合、ブリーディングによる体積変化が見られなかった。また、粘土分が多く混入している場合については、改良土の急激な増粘もある³⁰⁾ので配合検討上の留意事項になる。改良土の性能に関する品質管理の現状について調べた報文³⁷⁾によると細粒分含有率 80%以上においては攪拌性が悪化すると報告されている。これらを配合設計に反映させるため、主に攪拌性等を重要視した改良土の粘性を検討項目に入れている。配合検討では、改良対象土の土質試験結果の塑性指数等を目安にしても良いが、改良土の凝集による増粘については電気伝導率や陽イオン交換容量を参考にして、イオン交換能について調べておく改良材の選定が容易になるものと考えられる。ま

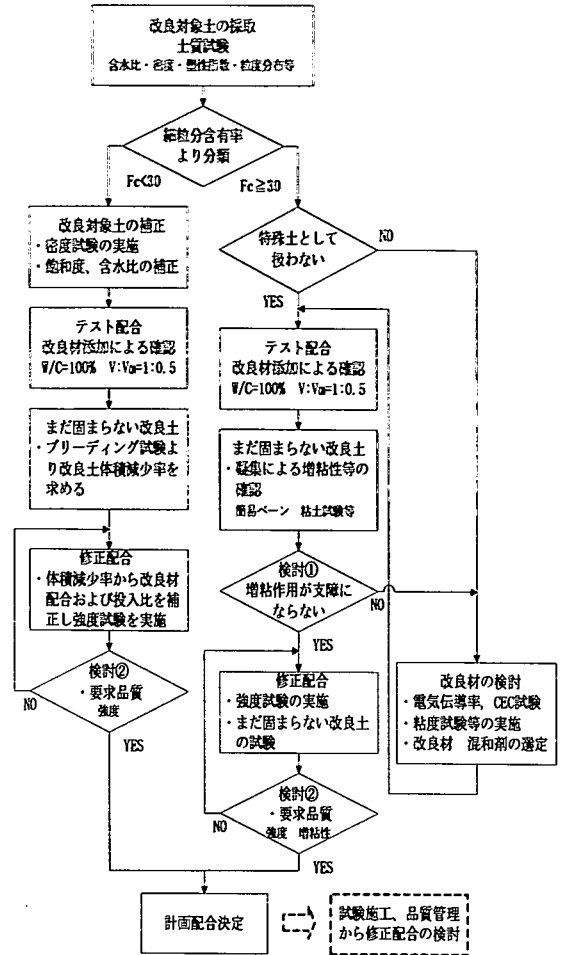


図-27 提案する室内配合試験フロー

た、図-27 に示す室内配合試験フロー中のまだ固まらない改良土の試験においては、粘度やせん断強さの経時変化量から施工性について検討し、改良土の増粘作用により施工に支障を与える恐れがある場合には、必要に応じて混和剤や改良材の種類を選定して修正配合試験を行い、強度等の要求性能を満たしているのかを確認する必要がある。

一方、細粒分含有率 30%以下の場合についてはブリーディングや土の性状により改良土の体積が減少している。改良対象土については土の間隙および飽和度によって改良材投入比を検討しなければならないものと考えられる。体積減少による補正は、まだ固まらない改良土の試験において、深層混合の標準的配合である $W/C=100\%$ の改良材を用いて改良材の投入比を $V : V_m=1 : 0.5$ したブリーディング試験から体積変化を把握し、この体積変化量と強度試験結果から修正配合を行うように考えた。

提案した改良土の配合手法は、細粒分含有率によ

り検討手法が異なっているが、いずれの場合においても、標準的な改良材配合で配合試験を行い修正配合を行うようにしている。図-27 に示す室内配合試験フローは、改良材の配合や改良材投入比等だけでは解決できない問題もあり、特にイオン交換能が大きい土、例えば海成粘土では改良土の増粘が著しく、混和剤や特殊固化材等も必要に応じて使用しなければならないものと考えられる。

室内試験配合から得られた配合で施工する場合、各種地層が互層になっている場合もあり、改良体の要求性能および施工性等を考慮した配合に修正する必要があるものと考えられる。本来ならば、試験施工により適切な配合を決定するのが理想的であるが、大規模工事以外では試験施工が行われないケースの方が多い。施工管理においても強度試験が優先されているが、改良体の均一性を確保するための管理として、まだ固まらない改良土の試験を実施しても良いものと考えられる。

また、現場採取の改良土の評価においては、各種工法のデータベースが必要となるが、最近の各種工法の攪拌機構の改善から攪拌性も向上してきていることから、なるべく最近のデータを用いて、現場の環境条件を配慮しながら評価することが好ましいものと考えられる。

7. まとめ

改良土の特性について本研究では、改良対象土の細粒分含有率から検討し、配合検討の手法について提案した。主な結果をまとめると次のようになる。

① 改良土のブリーディングの傾向

細粒分含有率0%の模擬土としてガラスビーズを用いた試験では、改良材のW/Cおよび投入量が大きいほどブリーディングが大きくなる傾向がみられ、模擬土の飽和度や間隙量によっても異なることを確認した。

細粒分含有率を設定した土および現場採取土を用いた試験では、細粒分含有率30%以上になるとブリーディングが発生していなかった。土の比表面積や陽イオン交換容量が細粒分含有率の増大に伴い大きくなり、改良材と吸着しやすい環境になったものと考えられる。一方、細粒分含有率30%以下ではこの影響は少なく、計画時の改良土体積と比較すると改良土体積は減少している。

② 改良土の体積減少と改良土の強度

細粒分含有率の増大に伴い改良土の一軸圧縮強さが大きくなり、細粒分含有率30%以下の土を

を用いた試験では、改良対象土の飽和度が小さいほど体積減少率は大きくなり、一軸圧縮強さが大きくなることを確認した。

細粒分含有率を調整した試料土を用いた改良土について、セメント量と一軸圧縮強さの比を強度寄与率として検討した結果、細粒分含有率が小さくなるにつれ強度寄与率は大きくなり、細粒分含有率30%付近からさらにその傾向は大きくなることを確認した。体積減少により、改良土中のセメント量は相対的に増大し、強度に反映したものと考えられる。また、現場採取土を用いた場合についても同様な結果が得られた。

③ 改良対象土と改良土

まだ固まらない改良土のベーンせん断強さは細粒分含有率30%以上になると大きく変化することを確認した。これも、ブリーディングが見られない改良土の場合と同様に、細粒土中の鉱物組成や比表面積および陽イオン交換容量等の物理化学的特性が関与しているものと考えられる。改良土の配合検討において土の細粒分含有率を基準にした場合、細粒分含有率30%以上になるとまだ固まらない改良土の増粘により、せん断強さが増大して実施工では攪拌性に支障を与えるものと考えられる。

本研究で得られた成果およびこれまでの知見から、改良土の配合検討に関して細粒分含有率を基準にした配合手法を提案した。実際の現場では各種地層が互層になっている場合や改良土の養生条件も異なることもあり、計画した配合では対応できない場合もある。そのためには、現場における品質管理の手法も今後検討しなければならないものと考えられる。

最近では、地盤改良の目的によっても異なるが低強度の改良体の造成も行われてきているが、低強度ということでW/Cを大きくして貧配合にしてしまうことも考えられる。その場合、改良材の配合は体積変化にも影響を及ぼす要因であり十分な検討が必要であるものと考えられる。

深層混合処理工法は、機械攪拌式の他に噴射攪拌式および機械攪拌噴射併用式もあり、特に最近の噴射攪拌においては、 $\phi 4,000$ mm以上のコラムも造成できるようになっており、攪拌性については攪拌メカニズムだけでなく改良材も攪拌性について考慮したものが要求されるようになってきている。改良土の配合検討は、改良土の強度バラツキを抑えるための対策等や攪拌性を上げるための改良材の研究も取り入れ、総合的に評価できるものを今後検討していきたい。

参考文献

- 1) 吉田茂, 村山篤史: 深層混合処理工法混合と基礎工, 基礎工, pp. 25-29, VOL. 28, NO. 9, 2000.
- 2) W. チェルニン著 徳根芳郎訳: 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学, pp. 39-45, 1985.
- 3) 山田順治: セメント・コンクリートの知識, pp. 60-61, 1983.
- 4) (株)セメント協会: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, 改良土の特性, pp. 17-48, 1994.
- 5) 財団法人研究センター: 陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル, pp. 69-74, pp. 47, 1999.
- 6) 財団法人沿岸開発技術研究センター: 海上工事における深層混合処理工法工法技術マニュアル, pp. 76-88, 1999.
- 7) 日本ジェットグラウト協会: ジェットグラウト施工テキスト第二, pp. 98-102, 1997.
- 8) クロスジェット研究会: クロスジェット工法技術資料, 1997.
- 9) Superjet 研究会: Superjet 技術資料(第6版), pp. 16, 2001.
- 10) 国土交通省官房技術第61号: 2001.
- 11) 木下健二, 魚本健人: プリーディング挙動に対する高性能減水剤の影響, 第48回セメント技術大会講演集, pp. 380-385, 1944.
- 12) 沢出稔, 池谷純一: セメントおよびコンクリートのプリーディング水の挙動に関する速度的解析, 清水建設研究報告, 第52, 1990.
- 13) (株)地盤工学会: 土質試験の方法と解説 第一回改定版, pp. 93-105, pp. 213-245, 2000.
- 14) 木下文男, 中山克己, 森嶋洋一: 深層混合処理地盤改良工法による固化材の強度に及ぼす因子, 第26回土質工学研究発表会, pp. 1963-1964, 1991.
- 15) 塩沢俊彦, 中谷内信一, 酒井洋一, 斎藤聰, 木下佳: セメント系改良材により改良された砂地盤の土質性状, 第28回土質工学研究発表会, pp. 2559-2562, 1993.
- 16) 酒井成之, 高野重久, 小川和也: 深層混合処理工法における目標室内強度について, 第31回地盤工学研究会, pp. 131-132, 1997.
- 17) 西林清茂, 松尾龍之, 細谷芳巳, 平井吉久, 島正憲: 深層混合処理工法における攪拌混合装置の実験的研究(その4), 第20回土質工学研究発表会, pp. 1747-1750, 1985.
- 18) 青井実, 元吉誠, 辻本圭介: D J M工法における改良材の供給・攪拌混合に関する研究, 第21回土質工学研究発表会, pp. 2003-2006, 1986.
- 19) (株)日本建設機械化協会: 最近の軟弱地盤工法の施工例, 10 深層混合攪拌装置の改良, pp. 427-436, 1991.
- 20) 又吉直哉, 日比野信一, 吉田茂, 加藤直也: 深層混合処理工法における攪拌効果について, 第30回土質工学研究発表会, pp. 2219-2220, 1995.
- 21) 平井利一: 土質工学をかじる, 理工図書(株), pp. 31-42, 2001.
- 22) CDM研究会: セメント系深層混合処理工法CDMI工法, 設計と施工マニュアル(設計・施工編), 1992.
- 23) D J M工法研究会: 粉体噴射攪拌工法(D J M工法)技術マニュアル, 2002.
- 24) 日本ジェットグラウト協会: ジェットグラウト工法(J S G・コラムジェットグラウト)技術資料, 1997.
- 25) 三井隆, 吉川正, 池田昭彦: 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.
- 26) 氏家剛, 宮森建樹: 粒度構成が異なる改良土に関する基礎的研究, (株)土木学会関東支部編 第27回関東支部技術研究発表会, pp. 556-557, 2000.
- 27) 鈴木健夫, 國藤祚光: ソイルセメント地中連続壁の材料特性に関する基礎実験, 土と基礎, Vol. 42, No. 3, pp. 19-24, 1994.
- 28) 國藤祚光: 各種地盤の改良強度とセメント配合, 基礎工, VOL. 22, No. 5, pp. 20-25, 1994.
- 29) 遠藤裕悦, 前川宏一, 小川一雅: 粉体の保水性におよぼす分散構造の影響, コンクリート工学年次論文報告集, pp. 315-320, 1988.
- 30) 青山要, 宮森建樹: 土の物理化学的性質が改良土の初期性状と強度に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 721/VI-57, pp. 207-219, 2002.
- 31) 村田二郎: コンクリート技術100講, (株)山海堂, pp. 104, 1990.
- 32) 石橋正光, 山田清臣, 斎藤聰: 深層混合処理工法の砂地盤改良における室内配合試験の基礎的検討, 第32回地盤改良研究発表会, pp. 2399-2400, 1997.
- 33) 嘉門雅史, 浅川美利: 土木学会編 新体系土木工学16土の力学(I)土の分類・物理化学的性質, pp. 23-33, pp. 50-53, pp. 87-97, 1988.
- 34) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版, pp. 40-42, 1975.
- 35) (株)地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ11 地盤改良効果の予測と実際, pp. 203-219, 2000.
- 36) 大嶺聖, 落合英俊, 林重徳, 梅崎健夫: 砂と粘土の混合土の圧縮特性, 第26回土質工学研究発表会, pp. 284-285, 1991.
- 37) 日比野信一, 川村政史, 田村昌二, 渡辺一弘, 藤井衝: 性能を基盤とした深層混合処理工法の品質管理の現状と課題, 地盤工学研究発表会, pp. 799-800, 2001.

(2003. 7. 3 受付)

A STUDY ON THE SOIL MIX AND THE CHARACTERISTICS OF IMPROVEMENT SOIL FROM A VIEWPOINT OF PARTICLE SIZE

Kaname AOYAMA, Takeki MIYAMORI and Tetuya WAKIYAMA

Combination of foundation improvement is determined, based on the data obtained from unconfined compression strength of laboratory test, so as to secure the safety during construction. However, the intensity of the improvement soil after actual construction may differ from it considerably. Writes focused on volume change of the improvement soil, the strength property and investigated volume change of grain size distribution of the soil and the improvement soil. Consequently useful knowledge was obtained when examining design mix from now on.