

# 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

三井 隆<sup>1</sup>・吉川 正<sup>2</sup>・池田 昭彦<sup>3</sup>・青山 要<sup>4</sup>・中川 浩二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 鹿島建設建設㈱ 土木技術本部 (〒107-8388 東京都港区元赤坂1-2-7)

<sup>2</sup>正会員 工修 鹿島建設建設㈱ 東京支店 (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

<sup>3</sup>正会員 ケミカルグラウト㈱ 技術本部 (〒107-8309 東京都港区元赤坂1-6-4)

<sup>4</sup>正会員 住友大阪セメント㈱東京支店開発チーム (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町1-8)

<sup>5</sup>正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台)

最近の噴射搅拌工法は有効径の拡大化、産業廃棄物（汚泥<sup>1)</sup>）の抑制等により、改良体を造成する際に排出される泥土（スライム）量を抑えた工法が採用される方向にある。これらの改良体では、土の混入比率が大きく、硬化材そのものの強度特性だけでは改良体の強度を推定することが難しい。筆者らは土の細粒分含有率が改良体強度に及ぼす影響に着目し、モデル地盤材料を用いて改良体強度に関して室内配合試験による基礎的研究を実施した。その結果、改良体中の硬化材の配合、投入量および土の細粒分含有率が改良体強度に影響を及ぼしていた。特に土の粒度構成に着目した場合、改良体強度の変化領域が土の細粒分含有率の30%付近にあることが推定された。

*Key Words : jet grouting method, cement deep mixing method, the strength of jet grouting, the fine fraction content of the soil, soil improvement reliability*

## 1. はじめに

地盤搅拌改良工法は、機械搅拌工法と噴射搅拌混合工法とに大別される。SMW工法 (Soil Mixing Wall) 等の機械搅拌工法の改良体は、搅拌翼で機械的に土とペントナイトが含まれているセメント等の硬化材を搅拌して築造する<sup>2), 3)</sup>。一方、噴射搅拌工法は地盤中で高圧水を噴射して土を切削し、その強制的に造った空隙に硬化材を噴射しながら土と混合・搅拌して改良体を築造する工法である<sup>4), 5)</sup>。

搅拌工法は地盤中に硬化材を混入させ改良体を築造するため、土、硬化材、切削水が混合され、泥土が地表面に排出される。噴射搅拌工法では泥土化された排出物をスライムと呼ぶ。地盤中には混入された硬化材と搅拌・混合された土が硬化して改良体コラムが形成される。設計上のコラムの強度は一般に機械搅拌工法に比べ噴射搅拌工法の方が大きく設定している場合が多い。噴射搅拌工法の一種であるJG工法（ジェットグラウト工法）のように硬化材が原地盤の土と置き換わる比率が大きい場合、すなわち泥土化されて地表面に排出されるス

ライム量が多くなる場合は、予め確認されている硬化材の強度を基に安全率を考慮して設計する手法が用いられる<sup>6)</sup>。しかし、硬化材が土と置き換わる比率が小さい、すなわち改良体に含まれる原地盤の土の量が多くなる場合は、強度の推定が難しく、改良範囲や配合設計をより安全側に設定して対応している。このように安全側に設計することにより、改良体強度が想定していたコラムの強度より大きくなりすぎて施工上の工程等に支障を与えることもあり、特に改良後に改良体を掘削するような工事では適切な強度の発現が望まれている。最近の噴射搅拌工法において施工の効率化、経済性を配慮して改良体の有効径の拡大や産業廃棄物であるスライム量を抑えた工法が多用され、特に改良体中の土の混入量を多くした工法が主流になりつつある。そのため、地盤に適合した改良体強度の発現を推定し配合設計や改良範囲の設計を行なうことが要求されている。

筆者らは、改良体の強度は硬化材の配合や硬化材の投入量だけでなく、改良体中に含まれる土の粒度構成が改良体の力学特性に影響を与えていた現象に着目し、特に、土の粒度構成と改良体強度との関係について実験を行な

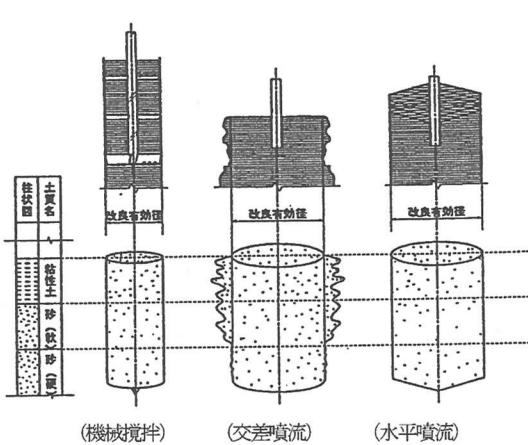


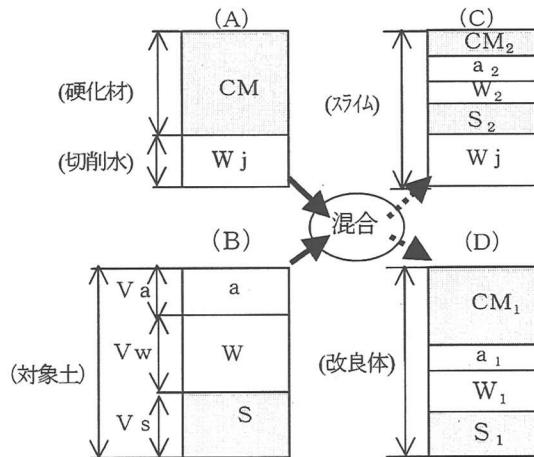
図-1 改良体イメージ図<sup>5), 7), 8)</sup>

い、強度推定の一要因として検討した。実験は、粒度を調整した模擬土に対して、硬化材の配合と混入する硬化材量を変えた供試体を作製し強度試験を実施した。ここでは特に硬化材の投入量を一定とした噴射搅拌工法の改良体を想定したが、硬化材の配合による影響も確認するために噴射搅拌工法では一般に用いられないW/Cの大きい配合についても試験を実施した。これらの室内配合試験結果から、土の細粒分含有率が改良体の強度特性に与える影響を定量的に評価した。この結果を実際の改良対象地盤の土を用いた場合の強度試験結果と比較した。その結果、硬化材投入量が安定している改良体の強度を推定する要因の一つとして、土の特性のうち、細粒分含有率が有用である知見を得た。

## 2. 改良体と対象土の想定および模擬土設定

### (1) 改良体の概要

本文では、地盤改良された混合土が硬化したものを作成し、改良前の地盤を対象土と呼ぶ。また、対象土の単位体積に対して必要とする硬化材量を硬化材投入量と呼び、改良体中の硬化材と土の量の比率を投入率とした。機械搅拌工法で用いる硬化材としてはSMW工法(Soil Mixing Wall)等のソイルセメントやCDM工法(セメント系深層混合処理工法)等に用いるセメントスラリー等があるが、噴射搅拌工法の硬化材の配合は一般にW/C=100~150%の範囲で使用されていることが多い、機械搅拌工法に比べW/Cは比較的大きい。改良体のコラム径は一般に機械搅拌工法の方が小さく、対象土の単位体積当りの硬化材投入量および地上に排出される土量は噴射搅拌工法の方が多い。改良体のイメージは図-1に示すようになり、機械搅拌工法では、攪拌翼径が



$$\text{ミルク : } CM = CM_1 + CM_2$$

$$\text{土中の空気 : } a = a_1 + a_2 \quad \text{土中の水 : } W = W_1 + W_2$$

$$\text{土粒子 : } S = S_1 + S_2$$

$$CM : \text{改良対象土に投入する硬化材量}$$

$$CM_1 : \text{改良体中の硬化材量} \quad CM_2 : \text{スライム中の硬化材量}$$

$$W_j : \text{改良対象土を切削する際の水量}$$

$$a : \text{改良対象土中の空気量} \quad a_1 : \text{改良体に混入する空気量}$$

$$a_2 : \text{スライム中の空気量}$$

$$W : \text{改良対象土中の水分量}$$

$$W_1 : \text{改良対象土中に残る水分量}$$

$$W_2 : \text{改良対象土から排水される水分量}$$

$$S : \text{改良対象土の土粒子量} \quad S_1 : \text{改良体に混入する土粒子量}$$

$$S_2 : \text{スライム中の土粒子量}$$

図-2 改良体模式図

コラムの有効径になる。噴射搅拌工法は、ロッドから水平方向に高圧水を噴射する工法(ジェットグラウト工法)が一般的に知られているが、最近の噴射搅拌工法の傾向として、ジェット噴流に硬化材をそのまま用いる工法<sup>9)</sup>や高圧水を交差させて噴射することにより改良範囲を限定しスライム量を抑えた工法<sup>10)</sup>が多用される傾向にあり、このように地上に排出する土の量を抑え、改良体中に混入する土の量を多くした工法が主流になりつつある。

### (2) 改良体の想定

室内試験で用いる硬化材にはセメントミルクを使用した。改良体は施工後にサンプリングしたものではなく、室内試験の供試体として扱うため、本来は実際の改良体の素材構成を調査して供試体の配合を設定することが望ましい。そこで改良体中に混入した硬化材、水分、土の量を求めるため、改良体中の硬化コンクリート配合推定試験方法にある硬化後の供試体のカルシウム量から配合を推定する手法<sup>20), 21)</sup>で試みたが改良体中の硬化材量を推定できるまでの結果は得られなかつたため、噴射搅拌工法の改良体を図-2の改良体模式図のようにモデル化

表-1 模擬土の土性値

細粒分含有率	Fc (%)	0	5	10	15	20	30	40	50	70	100
土粒子の密度	Gs	2.710	2.698	2.690	2.685	2.681	2.670	2.661	2.640	2.631	2.610
含水比	Wn <sub>2</sub> (%)	10.4	11.4	13.5	15.2	18.1	22.2	28.1	34.1	47.6	58.0
湿潤密度	$\rho_{t_2}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.805	1.894	2.029	2.102	2.088	2.007	1.948	1.850	1.721	1.620
間隙比	e <sub>2</sub>	0.622	0.623	0.618	0.586	0.694	0.812	0.921	1.075	1.414	1.676
飽和度	S <sub>r<sub>2</sub></sub> (%)	45.3	49.3	58.8	69.6	69.9	73.0	81.1	83.7	88.5	90.3

表-2 試料土の素材

材料名	種類・产地・物理的性質
粗粒土 (粒度調整)	山梨県上野原産 比重 2.71 (粒度 2.0 mm~0.075 μm)
細粒土 (粒度調整)	栃木県葛生産の山砂の 比重 2.61 パインガーフを使用(粒度 75 μm未満)

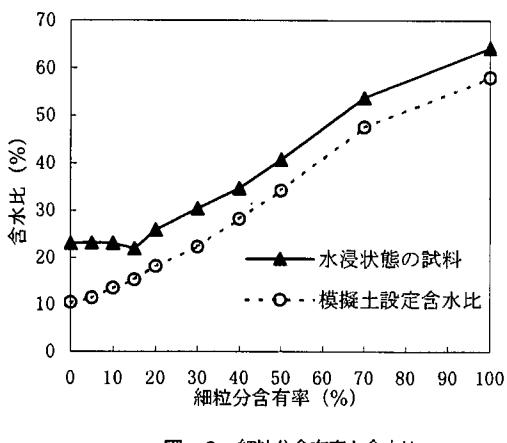


図-3 細粒分含有率と含水比

して考えた。図中の(A)の硬化材と切削水が対象土(B)に加わり混合されてスライム(C)は地上に排出さて硬化材と土とが混合された改良体(D)が地盤中にコラムとして造成される。実際の施工では所定の深度までせん孔した後に、改良範囲をウォータージェットで切削しつつ硬化材を投入する。硬化材の吐出口位置は切削ロッドの切削水噴射位置の下方にあり、硬化材と水の比重差から切削水はスライム化されるものと仮定した。図-2における(A)(B)(C)(D)の体積は、次のようになる。

$$V_{(A)} = V_{(C)}, \quad V_{(B)} = V_{(D)} \quad (1)$$

ここに、 $V_{(A)}$ :図-2における(A)の体積、 $V_{(B)}$ :図-2における(B)の体積、 $V_{(C)}$ :図-2における(C)の体積、 $V_{(D)}$ :図-2における(D)の体積である。強度試験に用いる供試体はこの改良体(D)を想定しなければならない。すなわち、投入したミルク量は切削に伴い土は乱された状態になり、土中の一部はスライム化され排水されるものとして扱うこととした。

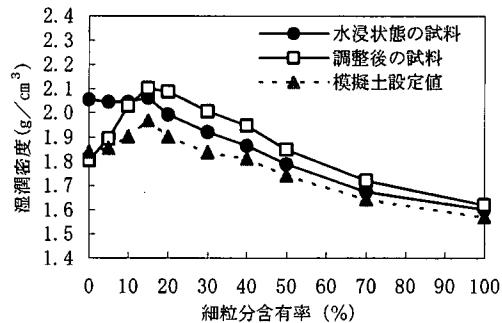
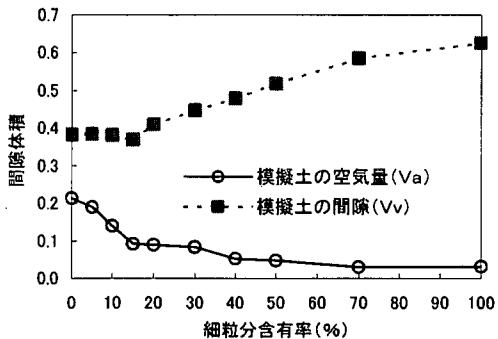


図-4 細粒分含有率別と湿潤密度

図-5 細粒分含有率と(V<sub>a</sub>)空気体積と(V<sub>v</sub>)間隙

### (3) 模擬土の設定

ここでは表-2に示す素材である粗粒土と細粒土を試験用に配合した土を試料土と呼び、試料土に水を加え、さらに排水調整した土を模擬土と呼ぶ。一般に改良対象となる地盤は、地下水位以下にあることが多く、砂質土は単一の土粒子が単粒構造になっているため土の粒子間の結合は弱く、地下水位以下では地下水に浸されて飽和度は大きくなる。このような土を切削、搅拌すると乱されて自由水は排水されると考えられる。粘性土は砂質土とは異なり透水性は悪く、吸着水や化学的結合水が土粒子間の分子が引き付けられて保留在となり自由に動く水量は少ないことが知られている<sup>11), 28)</sup>。室内試験に用いる模擬土は、自然状態の地山に近づけるため、表-2に示す2種類の試料土を粒度調整した後に水中で突き固めた後に水浸状態で加圧した。加圧は最初に細粒分含有率0%, 100%について行い、数回の調整から0.196MPaで24時間行うものとした。排水後の模擬土の体積は、排水前に比べて小さくなるが、切削、搅拌により土は

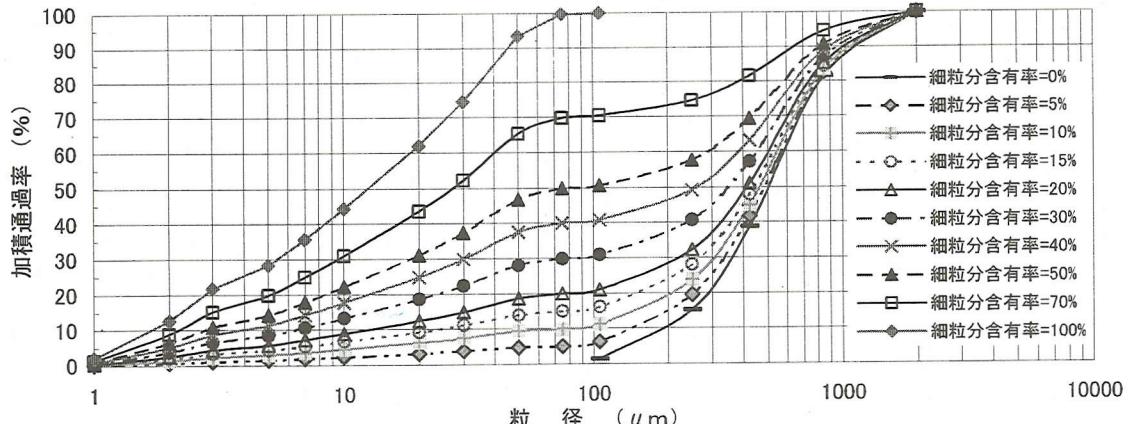


図-6 模擬土の粒度特性

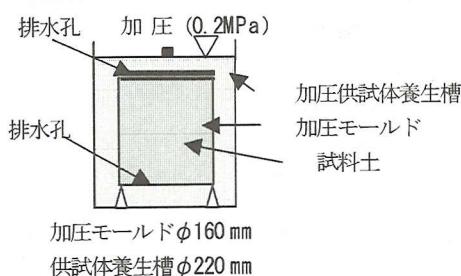


図-7 試料土の排水装置

乱され、土の自由水は排水されると想定されるため、加圧前の飽和状態の体積との差を土の空気量とみなし、改良体を作製すると模擬土の湿潤密度は、加圧前の状態の体積を用いることになり次のように算出される。

$$V_a = V_w, \quad V_1 = V_0 - V_w \quad (2)$$

$$\rho_{t0} = M_0 / V_0, \quad \rho_{t1} = M_1 / V_1, \quad \rho_t = M_1 / V_0 \quad (3)$$

ここに、 $V_a$ ：空気量、 $V_w$ ：排水量、 $V_1$ ：加圧後の土の体積、 $V_0$ ：加圧前の土の体積、 $\rho_{t0}$ ：加圧前の湿潤密度、 $\rho_{t1}$ ：加圧後に実測した湿潤密度、 $M_0$ ：加圧前の土の質量、 $M_1$ ：加圧後の土の質量、 $\rho_t$ ：模擬土の湿潤

密度である。図-4に細粒分含有率別の湿潤密度を示した。模擬土の土性値は表-1のよう設定し、所定の硬化材を投入して改良体(供試体)を作製した。図-3に細粒分含有率別の水浸状態の含水比と模擬土設定含水比を示す。図中の模擬土設定含水比が供試体を作製するときの模擬土の含水比である。図-3において、細粒分含有率0~15%の範囲では水浸状態の含水比は、ほぼ同じ値であり、この範囲の細粒分含有率は排水量が多くなる傾向を示している。これは、模擬土の素材に使用した細粒土が持つ水分保持特性により細粒分含有率が大きくなるにつれ含水比が増大したものと考えられる。土の含水比は液性限界、塑性限界についても影響は大きく、細粒分含有率との関係は大きいものと考えられる。図-5に各細粒分含有率別の模擬土の $V_a$ (空気体積)と $V_v$ (間隙)を示した。模擬土の $V_a$ (空気体積)の変化と関連し排水により生じた空気体積は排水量と等しく、細粒分が15%以上から飽和度が大きくなり排水しにくくなっている。各細粒分含有率の模擬土の粒度特性を図-6に示す。

### 3. 改良体の強度推定と検証方法

#### (1) 改良体強度推定

改良体強度の予測に関する細粒分含有率に着目した研究報告は少なく、地中連続壁工法におけるソイルセメント改良体に関する報告がいくつかある。<sup>1,2), 1,3), 1,4)</sup>

例えば鈴木<sup>1,5)</sup>らは地中連続壁工法におけるソイルセメントの材料特性に関して改良体に含まれる砂分の含有量が強度に影響を与えており、改良体に含まれる砂分量を砂分含有率と称している。強度予測では、次式に示すように砂分含有率が80%までの範囲内では直線回帰式と砂分含有率0%の強度から予測することを提案し

ている。

$$q_{u28} = m \cdot S + n \quad (4)$$

ここに、 $q_{u28}$ ：材令 28 日の一軸圧縮強さ、 $m$ ：直線勾配、 $S$ ：砂分含有率（%）、 $n$ ：砂分含有率 0% の一軸圧縮強さである。

この報告では、土の分類の細粒分粒径（75 μm 未満）が 50% 以上含まれる細粒土では改良体強度のはらつきが大きく定量的に示すのが困難であると報告されており、このような土の改良体強度推定については解明されていない。また、ソイルセメントを使用する地中連続壁工法を含む機械攪拌の改良体は、硬化材の投入量が少なく改良体中のセメント量も少ない。一般には機械攪拌工法の硬化材投入量は噴射攪拌工法の 1/2 以下であり、改良体強度は噴射攪拌工法の方がはるかに大きくなり、この提案式では噴射攪拌工法の改良体の強度推定することは困難である。本研究では、主に噴射攪拌工法のように硬化材投入量が多い場合の改良体を対象とし、細粒土と粗粒土を混合して細粒分含有率、含水比、湿潤密度の異なる模擬土を作製して、特に粒度特性が改良体の強度に及ぼす影響を明らかにするための基礎的な実験を実施した。これらの実験は、今後の研究計画に役立てられるように、混入する土の粒度構成を広範囲に設定し、投入量、硬化材配合等をパラメータとして、要求強度から投入量および硬化材の W/C を設定するための検討資料および今後の室内試験等の実験計画に活用できるように計画した。

## （2）検証方法の検討

攪拌混合工法の改良体は、コンクリートやモルタルの配合設計上、強度に悪影響を及ぼすとされる骨材、すなわちシルト、粘土等の細粒分が多量に混入していることを前提としている<sup>16)</sup>。そのため改良体強度の推定にコンクリートやモルタルの場合のように水セメント比を用いて考えるには前提条件が異なる。また、攪拌工法の改良体強度の設計は土質調査結果と日本統一土質分類から粗粒土と細粒土を大別し、土質により改良体の設計基準強度を定め配合設定している<sup>17)</sup>。なかでも噴射攪拌工法では土の粒度分布で 75 μm 未満の粒径が多く含まれている土とそうでない土に分けて設計基準強度を定め、それぞれの硬化材配合を標準化している<sup>18)</sup>。攪拌工法も他の硬化材を使用する他の地盤改良工法と同様に、これら改良体の強度試験には一軸圧縮強さが用いられることが多い。現場でサンプリングした供試体や過去の試験結果等の実績からも改良体の一軸圧縮強さは粗粒土が多い土に比べ細粒土が多い土の方が低強度を示し、設計に用いる改良体強度もこれに準じて細粒土が多く含まれたシルト

質土および粘性土の設定強度は粗粒土が多い砂質土と比べ低強度である<sup>19)</sup>。これらを背景に本研究では次の項目について模擬土を用いた室内試験で次に示す項目を検討し、後述する現場採集土試験で確認と検証を行うこととした。

- ① 土質分類は実務上、土の粒度構成で大別しているので土の細粒分含有率（試料土中に粒径が 75 μm 未満の土が含まれる質量比率）が異なる模擬土で供試体を作製して強度比較を行いその傾向について検討する。
- ② 硬化材の固結後の強度・模擬土の強度・改良体の強度を三軸圧縮試験から比較検討する。
- ③ 模擬土に混入する硬化材の配合を変えて強度比較を行い W/C と強度の関係について検討する。
- ④ 模擬土体積に対する硬化材の投入量は噴射攪拌工法の実績を参考に設定し、投入量と強度の相関性について検討する。
- ⑤ 各模擬土は表-2 に示すように細粒分含有率により含水比が異なっており、模擬土中の水分を硬化材配合の水量に加えた W/C を算出して、後述する換算 W/C と強度の関係を調べる。
- ⑥ 改良体は、まだ固まらない状態でブリーディングが生じると想定される。ブリーディングの傾向についても概ね上記より強度推定に有用であると思われるものについて関係を調べる。

## 4. 改良体試験方法と改良体構成

### （1）硬化材配合設定および投入量

細粒分含有率と強度の関係を検討する試験に使用する硬化材の配合および投入量は噴射攪拌工法の施工実績で多く用いられている配合の W/C = 100% を基準に投入する硬化材の単位セメント量を同量にした。硬化材の投入量は、施工前の配合試験と同様に、実施工の改良体施工速度と硬化材投入速度より模擬土 1 m<sup>3</sup>当たりの投入量を算出し、0.395, 0.495, 0.595 m<sup>3</sup> の 3 配合とした。実験に用いる硬化材は普通ポルトランドセメントと水を表-3 に示す配合で、模擬土とは別に混練した。

### （2）改良体の強度試験方法

試験は細粒分含有率別に調整した各模擬土に対しての硬化材投入量を表-3 に示す配合別に設定してホバートミキサーで攪拌し、型枠中で養生して供試体とした。この供試体は細粒分含有率と強度との関係を調べる目的で作製した。また、模擬土中の水分が改良体全体の W/C を大きくして改良体の強度に影響を及ぼさないかという疑問も生じたため、細粒分含有率 30% の土を用いて改良体（供試体）中のセメント量、土粒子量、水分量が同じ

表-3 模擬土  $1\text{m}^3$ に対する硬化材量および配合

硬化材配合			硬化材 投入量 (Q) $\text{m}^3$	硬 化 材 の質量 kg	改 良 体 の体積 (V) $\text{m}^3$	単位セメント ト量 (C/V) $\text{kg}/\text{m}^3$
種類	W/C %	セメント (C)kg	水 kg			
a	100	300	300	0.395	600	1.395
b	133	300	400	0.495	700	1.495
c	167	300	500	0.595	800	1.595
						188

表-4 試験項目

試験項目	試験方法	目的等
土の物理試験	JIS A1202 JIS A1203 に準ずる <sup>20)</sup>	試料土の土性値を調べ、模擬土設定を行う。
土の粒度試験	JIS A1204 に準ずる <sup>20)</sup>	模擬土の粒度調整を行なう。
一軸圧縮試験	JIS A1216 に準ずる <sup>20)</sup>	模擬土の粒度構成と強度の関係 硬化材配合、投入量と強度の関係について検討。
三軸圧縮試験 (UU)	JSF-T-521 に準ずる <sup>20)</sup> (非圧密排水)	内部摩擦角、粘着力が改良体強度にどのように影響しているか調べる。
ブリーディング試験	JSC-E-F522に準ずる <sup>21)</sup>	硬化後の改良体中の残留セメント量算出および換算W/Cを求める。

配分になるように硬化材のW/Cと土の含水比だけを変化させて表-5に示す2種類、6配合の供試体を作製し強度比較を行った。強度および物理試験項目を表-4に示す。

一軸圧縮強さ  $q_u$  は、細粒分含有率と改良体の強度の関係、硬化材の強度を調べると共に三軸圧縮試験（非圧密排水試験UU）から得られる内部摩擦角  $\phi$  や粘着力Cと比較を行う等、本実験の比較基準になるもので3日、7日、28日の3材齢について実施した。また、模擬土の三軸圧縮試験は、粘着力が確実に測定できる細粒分含有率50%以上の改良体を供試体とした。改良体については細粒分含有率別の各供試体について材齢7日、28日で実施した。硬化材（ミルク）の場合は高強度となり、使用した三軸圧縮試験機の側圧では材齢7日までの測定までしか対応できないため、模擬土、改良体、硬化材（ミルク）の三軸圧縮試験の結果比較は材齢7日で行った。

### (3) 模擬土中の水分の影響

模擬土中の水分が、改良体の強度発現において影響を及ぼすことが考えられる。すなわち、改良体全体の組成から模擬土の水分が改良体全体のW/Cに影響を与え改良体強度の低下原因になる可能性が考えられる。本実験では、細粒分含有率30%の模擬土を用いて表-5に示す改良体から、模擬土の水分Wwと硬化材中の水W<sub>o</sub>の合計をWとして求めた換算W/Cと強度の関係についても確

表-5 模擬土  $1\text{m}^3$ 中の水分構成配合

種類	模擬土構成			硬化材構成			改良体	
	含水比 %	土粒子 kg	水分 kg	W/C %	セメント kg	混練水 kg	水分 kg	体積 $\text{m}^3$
A	20	1,300	260	100	215	215	475	1.028
	10	1,300	130	160	215	345		
	0	1,300	0	220	215	475		
B	20	1,300	260	130	215	280	540	1.093
	10	1,300	130	190	215	410		
	0	1,300	0	250	215	540		

認した。換算W/Cを次式に示す。

$$\text{換算W/C} = (W_{oi} + W_w) / C \quad (5)$$

ここに、W<sub>oi</sub>: 投入した硬化材中の水の質量、C: 硬化材中のセメント質量、W<sub>w</sub>: 模擬土中の水分質量である。

### (4) ブリーディングの影響

ブリーディング試験は、硬化後の改良体の体積と換算W/C（改良体中の全水量とセメント量の比率）を算出するために実施した。換算W/Cの逆数として固化材・総水量比C/W<sub>T</sub>として評価しているもの<sup>23)</sup>もあるが、本文では硬化材のW/Cとの比較も行っているので、便宜上、換算W/Cとして論ずる<sup>22)</sup>。ブリーディング量が多い場合は硬化供試体の体積は小さくなり供試体中の換算W/Cが小さくなるので、細粒分含有率とブリーディングの関係についても検討した。

## 5. 結果と考察

### (1) 軸圧縮強さと細粒分含有率区分値

表-3に示すa～bの3種類の配合について細粒分含有率別に改良体を作製し一軸圧縮強試験を実施した。結果を図-8～10に示す。細粒分含有率と硬化材投入量が同条件の改良体では、硬化材のW/Cが小さく、単位セメント量が大きい改良体の方が一軸圧縮強さは大きい。硬化材投入量の条件が同じ場合では、各材齢において一軸圧縮強さは細粒分含有率の増加と共に低下し、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と比較的小さく受けている範囲がある。特に細粒分含有率が30%付近から100%までの一軸圧縮強さは低位に安定する傾向が見られた。また、地盤改良の配合設計において土の細粒土と粗粒土の構成から大別する現状の取扱いからも<sup>24)</sup>、この範囲を明確にすることは有用と考え、細粒分含有率が30%付近からの改良土の強度発現に着目して、細粒分含有率30%を中心に各材齢の細粒分含有率を(0～20%, 20～100%), (0～30%, 30～100%), (0～40%,

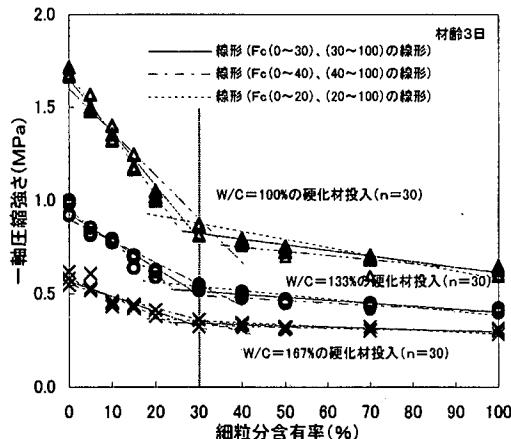


図-8 細粒分含有率と一軸圧縮強さ（材齢3日）

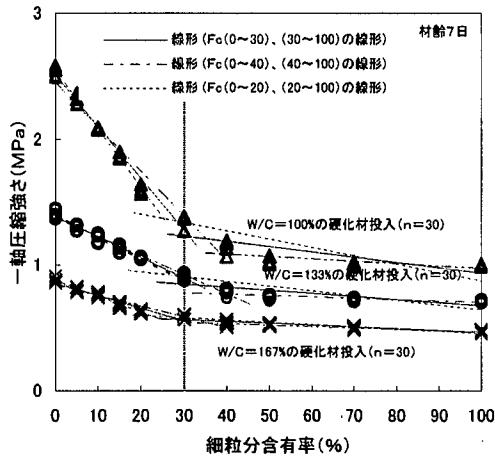


図-9 細粒分含有率と一軸圧縮強さ（材齢7日）

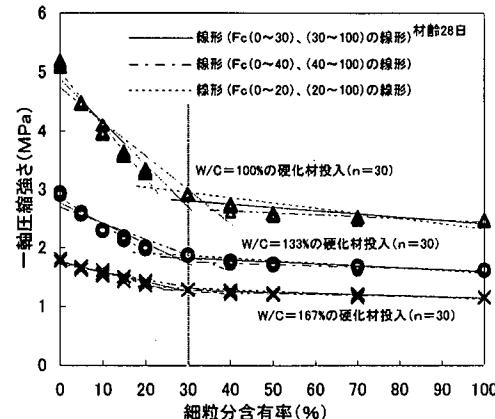


図-10 細粒分含有率と一軸圧縮強さ（材齢28日）

40～100%の領域に分けて、それぞれの試験結果を直線近似し、相関係数と回帰直線の交点の細粒分含有率座標値を求めた。表-6に例として材齢28日の細粒分含有率の区分値のFcを20%, 30%, 40%にした場合の回帰式、相関係数、両回帰式の交点となる細粒分含有率を示す。

0～Fc%の場合、区分値が20, 30, 40%において相関

表-6 強度変局領域の検討

Fc %	W/C %	0～Fc %区分		Fc～100 %区分		交点 %
		回帰式	R <sup>2</sup>	回帰式	R <sup>2</sup>	
20	100	$y = -0.091x + 5.018$	0.97	$y = -0.009x + 3.214$	0.69	22.02
	133	$y = -0.046x + 2.853$	0.96	$y = -0.004x + 1.997$	0.81	20.60
	167	$y = -0.019x + 1.777$	0.94	$y = -0.003x + 1.392$	0.75	23.08
30	100	$y = -0.073x + 4.856$	0.94	$y = -0.006x + 2.967$	0.76	28.38
	133	$y = -0.035x + 2.766$	0.91	$y = -0.003x + 1.918$	0.86	27.08
	167	$y = -0.017x + 1.757$	0.95	$y = -0.002x + 1.331$	0.89	28.56
40	100	$y = -0.058x + 4.743$	0.90	$y = -0.004x + 2.818$	0.78	35.18
	133	$y = -0.027x + 2.699$	0.86	$y = -0.002x + 1.852$	0.94	33.97
	167	$y = -0.013x + 1.724$	0.90	$y = -0.002x + 1.313$	0.85	35.21

係数は0.86～0.97であり相関性が良いと判断されるが、Fc～100%の場合、区分値20%では0.69～0.81となる。また、区分値30%, 40%では相関性はいくらかなくなる。すなわち、区分値を大きくすることにより、圧縮強度差の少ない値がFc～100%の範囲に入り相関性が良くなると同時に0～Fcの領域の相関性は若干低下する。

設計上の改良体強度の推定を考えて区分値を設定する際、硬化材の配合および投入量が同条件の場合では施工対象土の細粒分含有率(Fc)は、実際より大きく設定した方が改良体の強度は小さくなる傾向にある。すなわち、設計上のFcは安全を配慮すると30%以上に設定することにより推定値は低目になる。しかし、硬化材配合等の要素を配慮した場合、改良体の要求強度を満たす手段は硬化材の性能も大きな要因になる。噴射搅拌工法は、改良体造成速度から硬化材の投入量の変化は少ないので改良体の配合、すなわちW/Cを小さくすることや硬化材の素材である固化材の種類を変えて実際の現場では要求強度を満たしている。これらを背景に、改良体強度は実施工においては、すでに硬化材等により安全を配慮していることから、本研究では細粒分含有率の区分値Fcは30%付近にあるものとして考えることにした。

## (2) 粘着力、内部摩擦角

硬化材ならびに細粒分含有率が異なる硬化後の改良体の内部摩擦角および粘着力は三軸圧縮試験を実施して測定した。摸擬土、硬化材、改良体、それぞれの内部摩擦角と粘着力の比較は材齢7日の値を用いた。図-11に細粒分含有率と粘着力の関係を示す。図中には細粒分含有率30%を区分値とし、回帰直線を示している。細粒分含有率が同じ場合、硬化材のW/Cに対応する粘着力Cの値は、細粒分含有率0%のとき、W/C=100, 133, 167%でそれぞれC=1.29, 0.84, 0.58MPaで細粒分含有率100%のときC=0.67, 0.33, 0.21MPaとなり、細粒分含有率に関わらずW/Cによる差が顕著である。

図-12は、細粒分含有率と硬化後の内部摩擦角の関係および回帰直線を示したものである。図によれば硬化材

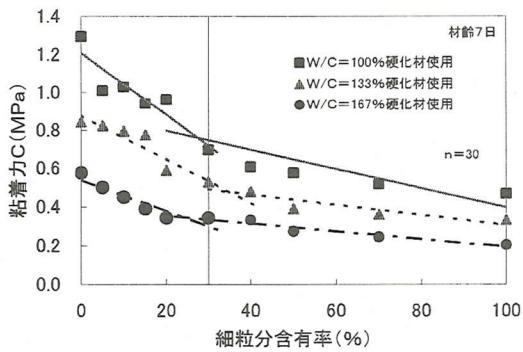


図-11 改良体中の細粒分含有率と粘着力（材齢7日）

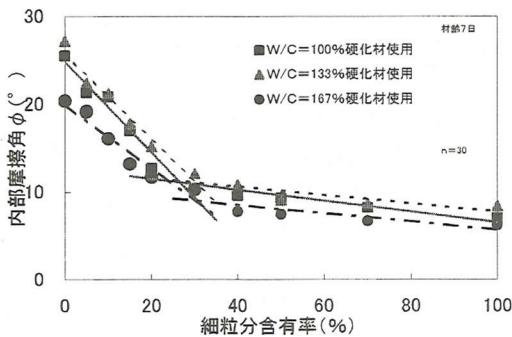


図-12 細粒分含有率と内部摩擦角（材齢7日）

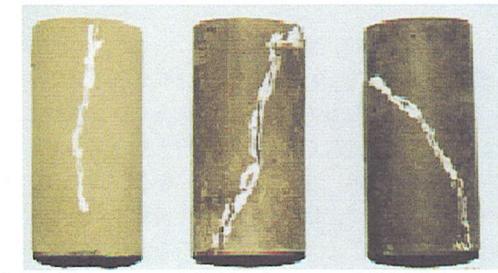


写真-1 試験後の破壊線を示す供試体

のW/Cが小さいほどいくらか内部摩擦角は大きく、細粒分含有率が増加すると内部摩擦角は小さくなっている。しかし、同一の細粒分含有率に着目した場合、W/Cをパラメータに内部摩擦角 $\phi$ の値を比較するとその差は粘着力Cの場合のように顕著ではない。このことから仮に一軸圧縮強さを粘着力と内部摩擦角から解釈すれば改良体の強度は粘着力Cが大きく寄与していると考えられる。表-7の各供試体の $\phi$ とCの比較においても、模擬土に比べ硬化材を投入した改良体の内部摩擦角は $F_c=50\%$ の場合、約3.0~3.6倍に粘着力は約7.0~14.8倍に増大している。また、改良体の粘着力は $F_c=50\%$ の場合、硬化材の粘着力の約8~12%， $F_c=100$ の場合では約6~10%の値になっている。このように改良体の強度は、改良体に混入した土の影響により粘着力が低下して与えられると考えることも可能である。図-13に三軸圧縮

表-7 各供試体の $\phi$ とCの比較（材齢7日）

種類	供試体概要	$\phi$	C MPa
模擬土	細粒分含有率50% ( $F_c=50\%$ )	2.5	0.039
	細粒分含有率100% ( $F_c=100\%$ )	1.0	0.049
硬化材	W/C=100%	14.6	4.773
	W/C=133%	12.6	3.518
	W/C=167%	8.6	3.450
改良体 $F_c=50\%$	W/C=100% 投入率 39.5%	9.1	0.578
	W/C=133% 投入率 49.5%	9.3	0.392
	W/C=167% 投入率 59.5%	7.5	0.274
改良体 $F_c=100\%$	W/C=100% 投入率 39.5%	7.0	0.470
	W/C=133% 投入率 49.5%	8.4	0.333
	W/C=167% 投入率 59.5%	6.2	0.206

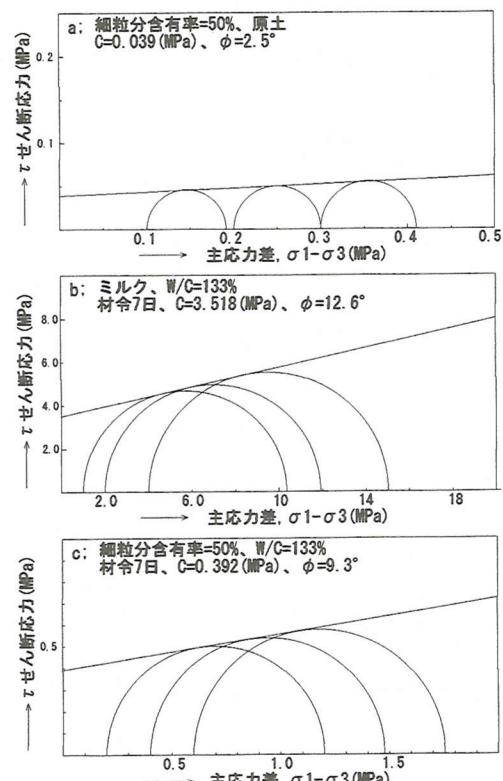


図-13 三軸圧縮試験の結果

試験の結果をモール円で表示した例を示す。図中のa, b, cは、それぞれ模擬土( $F_c=50\%$ 、原土)、硬化材(W/C=133%の硬化材)、改良体(投入率49.5%)である。

また、三軸圧縮試験とは試験条件が異なるが、一軸圧縮試験の供試体の破壊状況を観察すると、写真-1に示すように破壊面の角度は供試体に混入している土の細粒分含有率が大きくなるにつれ小さくなっている事が判る。この破壊面の角度は、細粒分含有率が30%付近から大きくなるにつれ角度が緩やかになる傾向である。

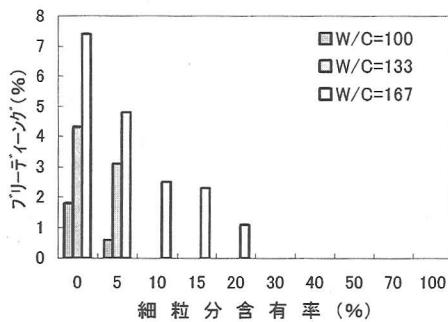


図-14 細粒分含有率とブリーディング

表-8 換算W/Cと一軸圧縮強さ（細粒分含有率30%）

ケース	換算W/C	投入率%	混練水kg	土の含水比%	配合W/C%	$q_{u28}$ MPa
A	220.9	38.0	215	20	100	3.54
		67.2	345	10	160	2.69
		112.0	475	0	220	2.21
B	251.2	46.7	280	20	130	2.19
		77.7	410	10	190	1.65
		125.3	540	0	250	1.32

注) 投入率(%) =  $100 \times (\text{硬化材投入体積} / \text{模擬土体積})$

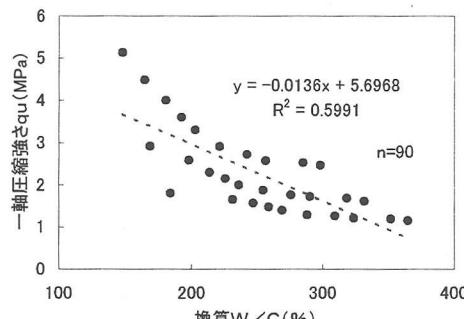


図-15 換算W/Cと一軸圧縮強さ

### (3) まだ固まらない改良体のブリーディング

硬化材が土に投入され硬化するまでの間、未水和の水分や硬化材から分離した水が改良体の表面にブリーディングとして現れる。図-14は、改良体のブリーディングを改良体の細粒分含有率別に示したものである。ブリーディングは、模擬土に硬化材を投入してから24時間後に測定しブリーディング率(ブリーディング水/まだ固まらない改良体の体積)として示した。試験結果からブリーディングは、改良体中の土の細粒分含有率が小さいと大きく、投入した硬化材のW/Cが100%、133%では、細粒分含有率が10%以上でブリーディングは発生しないが、硬化材のW/Cが167%に関する細粒分含有率が20%まで発生することが認められた。模擬土の細粒分含有率が20%以上になると水分保持特性が良く排水しにくい状態であると考えられる。この現象は試料土の排水量を示す図-3と対応し、細粒分含有率の大きい土

は水分保持力が強いと考えられる。細粒分含有率が小さい土は、水分保持特性に劣りモルタルの場合と同じようにブリーディングが発生する。

### (4) 換算W/Cについて

模擬土は細粒分含有率が大きくなると、含水比も増大する。また、細粒分含有率が増大すると一軸圧縮強さは低下することが示された。その要因の一つとし、図-3に示すように細粒分含有率の増大に伴い含水比が増大し、改良体中の総水分量が多くなるので強度発現に影響を及ぼしている可能性も考えられる<sup>25)</sup>。そこで、表-8に示すように土粒子の細粒分含有率と乾燥土量を同量にして改良体の換算W/C(供試体中の水分とセメントの質量比)を同一にするためセメント量を固定し、混練水と含水比を調整した2種類の供試体で強度比較を行った。試験は強度推定の区分値である細粒分含有率30%の模擬土を使用した。この試験は、改良体中に含まれる土の含水比に相当する水分を混練水に加算しているので改良体中の土粒子、水分量、セメント量は各ケース毎に同量である。試料A、Bではセメント量は、同量であるが硬化材のW/Cは試料Aが小さいものを使用している。表-8に示す試験結果( $q_{u28}$ )から改良体中のセメント量、水分量が同量でも硬化材のW/Cによるミルク濃度の影響が強度に反映しているようである。モルタル、コンクリートの配合設計においては吸着水に配慮し、表面乾燥飽和状態を基準として細骨材の含水比を配慮してセメント量に見合った混練水量を変化させる。本研究で取り扱う改良体の場合のように細粒分含有率が大きく、模擬土中の吸着水が大きくなるものは特に、この吸着水の影響が大きく、改良体の全水量とセメント量の比率だけでは評価できないことがいえる<sup>25)</sup>。これについては図-15に示す換算W/Cと一軸圧縮強さの関係からもいえる。この図は換算W/Cと一軸圧縮強さについて散布図にしたものであり、本実験で実施した硬化材のW/Cと投入率の範囲では相関係数R=0.599であり相関性は必ずしも高くない。

## 6. 施工現場の採取土を用いた検討

模擬土を用いた実験で得られた改良体の一軸圧縮強さに及ぼす細粒分含有率の影響の一般性を検討するため、5箇所の施工現場の土をサンプリングして模擬土を用いた場合と同様な実験を行った。採取した土は、サンプリング時に自由水は排水されているものとして、改良体中に混入する土の土性値は土質試験結果から求めたものを用いた。試験ではW/C=100, 133, 167%の3種類の硬化材を所定量投入し養生の上、一軸圧縮試験を行った。

表-9 現場採取土の土性値

採取土の記号	a	b	c	d	e
細粒分含有率 $F_c(\%)$	9	12	26	44	60
含水比 $W_n(\%)$	14.9	19.6	33.5	55.9	73.1
湿潤密度 $\rho_t$ ( $g/cm^3$ )	1.792	1.809	1.824	1.639	1.530
乾燥密度 $\rho_d$ ( $g/cm^3$ )	1.560	1.513	1.366	1.051	0.884
飽和度 $S_r(\%)$	54.4	67.2	92.1	95.9	95.8
シルト分5~75 $\mu m$ (%)	9	5	9	17	25
粘土分 5 $\mu m$ (%)	0	7	17	27	35
均等係数 $U_c$	4.0	9.0			

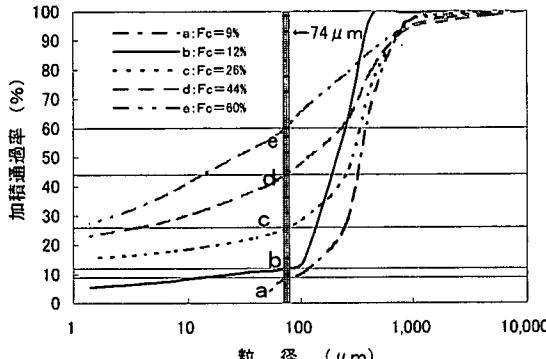


図-16 現場採取土の粒度特性

現場採取土の土性値を表-9に、粒度特性を図-16に示す。a, b, c, d, e, 5種類の現場採取土の細粒分含有率はそれぞれ、9, 12, 26, 44, 60%である。採取土bでは0.1~0.4 mmの粒径が約85%を占めており、他の採取土と比べ著しく異なった粒度分布となっている。

材齢28日の一軸圧縮試験結果を図-17にプロットした。図には模擬土を用いて行った実験結果から得られた後述する推定式に各現場採取土を用いた供試体のW/C、投入率を代入して求めた細粒分含有率に対する推定値を直線で示している。図-17によると現場採取土を用いた供試体の試験結果は採取土bを除いて、幾分大き目ではあるが推定式で予測される結果とほぼ一致している。採取土bを用いた結果のみ幾分低目となっているが、これは図-16に見られる特異な粒度分布の影響を受けたものと思われる。強度予測上、このような偏った粒度構成についても配慮しなければならないことがわかった。以上のことより強度推定に模擬土による実験結果を適用するためには、さらに細粒分含有率の詳細な要素や土性値の要素を配慮する必要があるが、これらの要素を除けば細粒分含有率が改良体の強度発現に影響を与えることが示された。

## 7. 改良体強度の推定

本実験では主として細粒分含有率に着目して改良体の

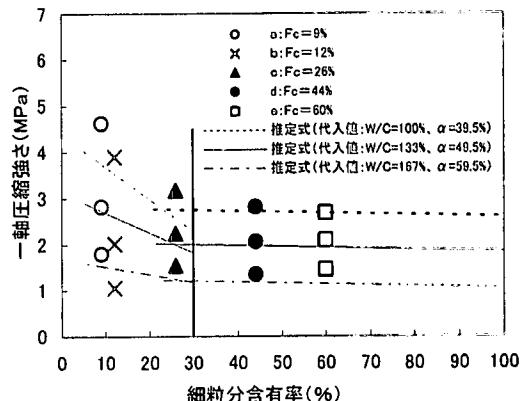


図-17 現場採取土と模擬土の一軸圧縮強さの比較

強度を検討した。また細粒分含有率を0~30%, 30~100%に分けて強度推定を行うことが有効であることが示され、対象土の粒度が崩っているような均等係数が小さい土質、または硬化材との水和反応に支障を来たすような化学的特性等をもたない土質を除けば、硬化材のW/C、投入量を定めれば、細粒分含有率と一軸圧縮強さの関係から強度が概ね推定されることが示唆された。

### (1) 細粒分含有率による強度変化

図-8~10に示すように改良体の一軸圧縮強さは細粒分含有率30%を境にして細粒分含有率の影響を受ける程度が大きく異なることが示された。すなわち、細粒分含有率が30%以下になり砂分の含有量が増加するにつれ改良体の一軸圧縮強さは大きくなる。また、細粒分含有率が30%から増加し75  $\mu m$ 未満の粒状土分が多くなるにつれ改良体の一軸圧縮強さは低下するものの、その度合いは小さく、表-6に示す一軸圧縮強度（材齢28日）の回帰式の勾配で比較すると、30%以下の勾配の約1/10が30%以上の勾配であり、大まかな強度推定であれば細粒分含有率30%以上の場合、細粒分含有率の増加に伴う強度変動はないものとして考えることも出来る。

### (2) 改良体強度の推定

本実験では改良体中の硬化材と土の量の比率を投入率としている。硬化材配合別に、この投入率を変化させて改良体中の単位セメント量が約200 kg/m<sup>3</sup>になるように改良体を作製し強度試験を行った。また改良体に混入する土の細粒分含有率10%, 50%については硬化材のW/C=100, 133, 167%のそれぞれについて投入率を39.5~59.5%の範囲で5段階試験を行っている。これらの試験条件は現状の噴射搅拌工法で用いているW/C=100~130%, 投入率36%~60%の範囲にほぼ対応している。改良体の強度推定する上で、設計、施工管理上の次の5ケースが考えられる。

- ①細粒分含有率が予め判っている土質に対して、要求される改良体強度に対して配合および投入率を定める場合。
- ②工法上、所定の配合、投入率を定めているものを採用し、細粒分含有率から改良効果を推定する。
- ③対象土の土質だけが判っているが、細粒分含有率等の詳細情報がない場合に、施工条件から改良体強度を想定する。
- ④予め試験工事等を実施して改良体強度から改良効果を推定する。
- ⑤現場採取土を用いて室内試験より改良効果を推定する。

①②の場合のように、事前に細粒分含有率が判っている場合と③のように判らない場合がある。また、④⑤の場合、施工する土質が大幅に異ならない限り、強度推定は容易に行えるが⑤のように室内試験の値については安全を配慮する必要がある。③のような場合は、①②に比べ設計上、安全を配慮した想定となる。漠然と砂質土と粘性土というように区別された場合において、粘性土としては細粒分含有率100%の状態で想定し、砂質土については土質調査のN値等から想定しつつ、なるべく細粒分含有率が大きい値で設定した方が推定値は小さくなり安全側の設計になると考える。これらを背景に本研究から得られた成果から細粒分含有率の範囲を大きく2領域に分けて改良体強度推定に関して検討した。

#### a) 細粒分含有率30~100%の場合

細粒分含有率が30%以上の場合、図-10に示すように $W/C = 100, 133, 167\%$ の回帰直線の勾配は小さく、細粒分含有率が30%から増大するに伴い、若干ではあるが一軸圧縮強さは低下している。推定上の安全を配慮すると細粒分含有率30%以上の一軸圧縮強さは、詳細な土質情報が無い場合の推定では、細粒分含有率100%の値を用いても良いと考えられる。ここでは、細粒分含有率30%から増加するに伴い一軸圧縮強さが低位であるが、減少するものとして推定することとした。次式に推定式を示す。

$$q_u' = \{4.750 - 0.022(W/C) - 0.002(F_c - 30)\} \times (1 + 0.002\alpha) \quad (6)$$

ここに、 $q_u'$  : 推定強度 (MPa),  $F_c$  : 細粒分含有率 (%),  $W/C$  : 硬化材の水セメント比 (%),  $\alpha$  : 硬化材の投入率 (%) である。

#### b) 細粒分含有率0~30%の場合

細粒分含有率30%以下の領域では、細粒分含有率の減少に伴う強度変化は大きく、表-6に示す回帰直線

の勾配と $W/C$ の関係から、硬化材の $W/C$ による改良体強度から得られる配合別の勾配を求め、細粒分含有率30%における一軸圧縮強さを原点として、硬化材の $W/C$ 、投入率の要素を配慮して細粒分の変化に伴う強度を推定すると次式のようになる。

$$q_u' = \{m + \{4.75 - 0.022(W/C)\} \times (1 - (50 - \alpha)/100)\} \quad (7)$$

ここに、 $q_u'$  : 推定強度 (MPa),  $m$  : 細粒分含有率に伴う強度増加係数,  $F_c$  : 細粒分含有率 (%),  $W/C$  : 硬化材の水セメント比 (%),  $\alpha$  : 硬化材の投入率 (%),  $m$  : 細粒分含有率に伴う強度増加係数であり、次式のようになる。

$$m = \{-0.0008(W/C) + 0.15\} (30 - F_c) \quad (8)$$

推定は、室内試験の細粒分含有率と改良体の一軸圧縮強度(材齢28日)の結果から、強度が大きく変化する領域を細粒分含有率0~30%と30~100%の2領域に分けて回帰した結果を基に各領域別に推定式を考えた。細粒分含有率0~30%の場合は、図-10に示すように各回帰直線の勾配は大きく、この範囲の強度推定をするためには硬化材の $W/C$ 、投入率と各勾配値の相関を検討する必要があり、これらの要素から細粒分含有率に伴う強度増加係数を求め、細粒分含有率の増減による強度変動を求めるようにした。一方、細粒分含有率30~100%の領域では、上記と異なり回帰直線の勾配は著しく小さく、噴射搅拌工法の実績から、投入率が60%以上、硬化材の $W/C$ が150%以上にならないということから、今回の試験から得られた回帰直線の最も緩い勾配を用いて推定式を立案した。

図-17は、現場採取土を用いて摸擬土の場合と同条件の $W/C$ と投入率で改良体を作製したときの強度と式(6)、式(7)に諸条件を代入した推定値とを比較したものである。これによると、式(6)は $W/C = 167\%$ と投入率 $\alpha = 59.5\%$ の試験結果から求めた回帰式の傾きを用いているので $W/C$ と投入率が、この値より小さい場合、両式から求めた推定値は、細粒分含有率30%以下で交差する。

現時点では、海成粘土のような硬化材との水和に影響を及ぼす土の化学的特性や、土の粒径が偏った粒度構成等を除いた場合についての改良体強度の影響について、細粒分含有率、硬化材の $W/C$ 、投入率との関係が深く強度推定する上で重要な要因であることを確認した。現段階で適応できる対象土は限られた条件下ではあるが、噴射搅拌工法における硬化材は、 $W/C = 100\sim 150\%$ 、投入率は30~60%の範囲で施工されていることを配慮

すると上記の特殊な場合を除けば、概ね本推定式で適応可能であると思われる。今後、さらにデータ蓄積をして推定式の修正や細粒分含有率以外の要因についても研究する必要がある。特に、細粒分含有率が30%以上については細粒分含有率の増加に伴う強度発現が小さく、細粒分含有率30%以上の土に適合できる土性値、例えば土のコンシステンシーや含水比等の値との相関から求める手法も今後の課題である。

## 8.まとめ

本研究では、土砂を取り込んだ搅拌工法の改良体の設計を行う場合、品質のバラツキを考慮した安全側の設計基準強度の設定とし、これを確保するために現場で目標強度を経験的に決めてきたことに対し、改良体に取りこまれる土の特性から改良体の強度推定することを提案し、土の細粒分含有率と硬化材の配合、投入率が強度に影響を及ぼすことを実証し、今後の強度推定の方向性について検討した。その結果得られた知見を列挙すると以下のようになる。

- 1) 細粒分含有率の異なる土が混入した改良体強度は、混入する土の細粒分含有率により異なる。
- 2) 細粒分含有率が30%を超えると強度は低位に安定し、W/Cが小さい硬化材を使用した改良体の方が強度は大きくなる。
- 3) 仮に、改良体強度を三軸圧縮強度の結果から得られる粘着力と内部摩擦角で説明すると、改良体強度は細粒分含有率の変化と硬化後の粘着力の影響を大きく受け、内部摩擦角の影響は小さい。
- 4) 実験で使用した硬化材のW/Cの範囲では、対象土に30%以上の細粒分が含まれるとブリーディングは生じない。
- 5) 現場採取土を用いた改良体強度は模擬土を用いた試験結果から細粒分含有率をもとに推定しうる。
- 6) 改良体強度は細粒分含有率、硬化材のW/C、硬化材投入率から細粒分含有率30%以上と30%以下に分けて実験に用いた土質に近い土性値であれば、簡単に推定できる。しかし、細粒分含有率と強度との相関だけでは、あらゆる土質には対応しかねる。特に、土の粒度が偏っているような土質や硬化材との水和が土の化学的特性に影響を受けるものについてはデータが不足している。また、細粒分含有率30%以上の改良体強度は変動量が小さく、細粒分含有率以外の要素との相関も検討すべきである。

## 参考文献

- 1) (財)日本産業廃棄物処理センター:最新建設廃棄物処理指針、建設廃棄物処理ガイドライン改訂版、株式会社、pp. 14-21, 1999.
- 2) ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針作成委員会編:ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針、(社)日本材料学会、1987.
- 3) CDM研究会:セメント系深層混合処理工法CDM工法、設計と施工マニュアル(設計・施工編)、1992.
- 4) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編:最新地盤注入工法技術総覧、第3編ジェットグラウト工法、pp. 695-866、1997.
- 5) 日本ジェットグラウト協会:ジェットグラウト工法(JSG・コラム・ジエットグラウト)技術資料、1997.
- 6) 柴崎光弘:噴射・搅拌・混合処理工法の実績と適用上の留意点、基礎工、Vol. 17, No. 8, pp. 9~15, 1989.
- 7) テノコラム協会:テノコラム・マニュアル基礎設計編、株式会社テノックス、pp. 1, 1998.
- 8) クロスジェット研究会:クロスジェット工法カタログより引用、1997.
- 9) SUPERJET研究会:SUPERJET工法技術資料、1995.
- 10) クロスジェット研究会:クロスジェット工法技術資料、1997.
- 11) 建設産業調査会:土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック、第4章軟弱土の工学的特性、pp. 91-115、1989.
- 12) 後藤改昭、日比義彦、後藤拓治:セメント混合処理土の強度発現に影響する土性値に関する考察、土質工学会研究発表会発表講演集、Vol.28h, No.2-2, pp. 2545-2548, 1993.
- 13) 伊藤政彦、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.
- 14) 國藤祚光、貢嶋光保:ソイルミキシングウォールの材料力学特性に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集第3部、Vol.44th, pp. 62-63, 1989.
- 15) 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.
- 16) 土木学会:わかり易い土木講座10コンクリート工学(I)施工、pp. 39, 1992.
- 17) (社)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. 29-49, 1994.
- 18) 日本ジェットグラウト協会:ジェットグラウト工法(JSG・コラム・ジエットグラウト)技術資料、1997.
- 19) (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. 265-268, 1997.
- 20) (社)地盤工学会:土質試験の方法と解説、pp. 43-53, pp. 320-330, pp. 339-348, 1997.
- 21) (社)土木学会:コンクリート標準示方書、プレパクトコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および耐膨張率試験方法(ボリエチレン

- 袋方法), pp. 383-384, 1996.
- 22) テノコラム協会:テノコラム・マニュアル基礎設計編, 株テノックス, pp. 177-181, 1998.
- 23) (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. 275-276, 1997.
- 24) (社)地盤工学会:土質試験の方法と解説, pp. 339-348, pp. 186-200, 1997.
- 25) 建設産業調査会:土木・建築技術者のための最新軟弱地盤ハンドブック, 第4章軟弱土の工学的特性, pp. 91-115, 1989.
- 26) (社)セメント協会コンクリート専門委員会:硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, pp. 355-378, 1967.
- 27) 国分正胤:土木材料実験、硬化コンクリートの配合推定試験, pp. 404-410 1969.
- 28) 久保田敬一, 河野伊一郎, 宇野尚雄:透水-設計へのアプローチ, pp. 3-8, 鹿島出版会, 1976.

(2001. 7. 20 受付)

## EFFECT OF GRADATION AND CEMENT CONTENT ON STRENGTH OF CEMENT MIXED SOIL

Takashi MITSUI, Tadashi YOSHIKAWA, Akihiko IKEDA,  
Kaname AOYAMA and Koji NAKAGAWA

Portland cement based materials are widely used for enhancing strength of soil mass as in jet grouting or other similar methods. However, degree of improvement depends not only on characteristics of cement but also on types of soil and their fine content. The relations between the soil's fine content and degree of improvement were studied in laboratory by changing both cement amount mixed and fine content. With the level 30% of fine content in the original soil as threshold, the effect of cement mixing differs widely. The authors are proposing two sets of simple formulae for soil with fine component less than 30 % and for soil with more than 30% of fine content.