

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3590号

土木研究所資料

表面改質超微粒子セメント懸濁液 に対する基礎的実験

平成10年7月

建設省土木研究所
ダム部フィルダム研究室

Copyright © (1998) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

表面改質超微粒子セメント懸濁液 に対する基礎的実験

フィルダム研究室 室 長 吉田 等
主任研究員 山口 嘉一
今林 豊
交流研究員 石川 浩行^{*)}

要 旨

建設工事や廃棄物埋立処分等の地盤環境への影響を最小限に抑えるための止水処理では、耐久性に優れ、かつ比較的安価なセメントを用いた注入工法を採用することが多い。しかし、砂地盤や軟岩地盤のような微細な空隙にその透水性が依存している地盤にセメント懸濁液を浸透注入する場合には、従来の超微粒子セメントを用いても十分な改良効果を得られないことがある。

本研究では、従来の超微粒子セメントをもとに、懸濁液中での分散性を高めるために、最適粒度に調整した後、その表面を水溶性シリコン樹脂で被覆した表面改質超微粒子セメントを用い、その懸濁液の物性および砂供試体に対する浸透特性を把握するための基礎的実験を実施した。

キーワード：ダム、浸透注入、超微粒子セメント、地盤環境、室内試験

＊）交流研究員在職期間（平成8年10月から平成10年3月まで）

ま え が き

人間の経済・社会活動は、地盤環境に様々な変化をもたらす。たとえば、有害物質や廃棄物により土壌や地下水が汚染されたり、建設工事による地盤の改変により地盤沈下や地下水流の変化が生じる。こうした地盤環境の変化は、その影響が人間の生活環境にまで及ぶ場合には深刻な問題となる。

建設工事や廃棄物埋立処分などによる地盤環境への影響を最小限に抑えるために、遮水を目的とした各種の地盤改良工法が実施されている。その中で、セメント系材料や粘土を水と混合した懸濁液（スラリー）を用いた注入工法は、他の工法と比較して適用可能な地盤物性の幅が広く、耐久性にも優れ、安価であることから、最も一般的な工法として多用されている。

しかしながら、砂地盤や軟岩地盤などのように微細な空隙に透水性が依存している地盤に対して一般的な注入材料を用いると、注入による割裂やそれに伴う地盤変位などの地盤の損傷を生じ、均質な改良効果を得ることが容易でない場合がしばしば生じる。このため、砂地盤や軟岩地盤のような地盤中においても、十分な浸透性を示し、かつ耐久性に優れた注入材料を開発することが求められている。

本研究においては、ダム基礎となるマサ地盤などの軟岩基礎を対象とした新しい遮水性改良工法である『粉体圧送グラウチング工法（cement powder grouting method）』¹⁾²⁾用に開発された表面改質超微粒子セメント（surface-treated microfine cement）を試料とし、それと水とを混合した懸濁液の注入特性について検討した。なお、ここでいう表面改質超微粒子セメントとは、従来の超微粒子セメント（microfine cement, non-surface-treated microfine cement）粒子の表面を水溶性シリコーン樹脂で改質処理することで空气中（対象が粉体圧送グラウチング工法であるため）における凝集性や付着性を低下させたものである。

目 次

まえがき

1	研究概要	1
2	使用セメント	2
3	物性試験	4
3.1	試験項目と数量	4
3.2	試験方法	5
3.2.1	凝結試験	5
(1)	試験用器具	5
(2)	操作	6
3.2.2	ブリージング率の測定	7
(1)	試料（セメントスラリー）の作製	7
(2)	試験用器具	7
(3)	操作	7
3.2.3	粘性係数の測定	8
(1)	試料（セメントスラリー）の作製	8
(2)	試験用器具	8
(3)	操作	9
3.2.4	フロー値の測定	9
(1)	試料（セメントスラリー）の作製	9
(2)	試験用器具	10
(3)	操作	10
3.2.5	一軸圧縮試験	10
(1)	供試体の作製	10
(2)	試験用器具	11
(3)	操作	11
4	試験結果	12
4.1	概要	12
4.2	セメントの凝結試験	13

4.3	ブリージング率	14
4.4	見掛けの粘性係数	16
4.5	フロー値	18
4.6	湿潤密度	20
4.7	一軸圧縮強さ	22
5	注入試験	28
5.1	試験条件と数量	28
5.2	試験方法	28
5.2.1	試験装置	28
5.2.2	供試体の作製	28
5.2.3	供試体の透水試験	30
5.2.4	注入試験方法	31
(1)	セメントスラリーの作製	31
(2)	注入	31
(3)	流量、圧力の測定	31
(4)	注入終了	31
(5)	注入後の供試体の観察	31
6	注入試験結果	32
6.1	試験結果	32
6.1.1	表面改質超微粒子セメント (STM)	32
6.1.2	未改質超微粒子セメント (NSTM)	33
6.2	考察	34
6.2.1	浸透距離	34
6.2.2	累積流出量	36
7	まとめ	38
	参考文献	39

1. 研究概要

今回研究対象とするのは、地盤固化作用、耐久性、安全性に優れている、セメント系の注入材料を用いた注入工法である。注入材料はセメントを水と混合・攪拌して懸濁液（スラリー）状態にしたもの（添加剤を加える場合もある）であり、これを地盤内の間隙や亀裂に圧入する。注入材料に要求される基本的な性状は、安定性（分離しにくいこと）、施工に適した粘性、十分な強度の発現等である。

本研究で効果的な遮水性の改良を目指す地盤は、“まえがき”でも述べたように、地盤内の空隙が微細で、従来の注入材料では十分に浸透せず、均質な改良が必ずしも容易でない砂地盤や軟岩地盤である。そして、この目的を達成するためには、懸濁液状態にある注入材料が、安定性等の上記要件を満たしつつ、これらの地盤中で高い浸透性を示すことが必要となる。

注入材料の地盤中への浸透性に寄与する主たる要因は、セメントの粒径、粒度分布および懸濁液中でのセメント粒子の分散性である。地盤内の空隙が微細であるほど、浸透性を高めるためにセメント粒子をより小さくする必要があるが、それと同時にセメント粒子の凝集が発生しやすくなり、結果的に懸濁液中のセメント粒子の見かけ粒径はそれほど小さいものではなくなってしまう。

本研究においては、ダム基礎となるマサ地盤などの軟岩基礎を対象とした新しい遮水性改良工法である『粉体圧送グラウチング工法（cement powder grouting method）』¹⁾⁷⁾用に開発された、超微粒子セメント（microfine cement, non-surface-treated microfine cement）粒子の表面を水溶性シリコーン樹脂で改質処理してその凝集性や付着性を低下させた表面改質超微粒子セメント（surface-treated microfine cement）を試料として、それと水とを混合した懸濁液の各種物性試験を実施して、ブリージング率、粘性係数、フロー値、固化後の一軸圧縮強さ、湿潤密度等を求める。これらの物性に関して、従来の超微粒子セメントや普通ポルトランドセメント（普通ポルトランドセメント粒子の最大粒径は、超微粒子セメントの約 10 倍）の懸濁液と比較する。さらに、これらの物性試験の結果を踏まえた上で、砂供試体に対する注入試験を表面改質超微粒子セメントと従来の超微粒子セメントの懸濁液を用いて実施する。得られた浸透長を比較することにより、表面改質が超微粒子セメント粒子の浸透性向上に与える効果について考察する。

2.使用セメント

表面改質超微粒子セメント (surface-treated microfine cement; STM) は、前述したように、粉体圧送グラウチング工法用に開発されたセメントである。これは、市販の超微粒子セメントの粗粒分および微粒分を除去し、多段分級によって粒度分布の均等化を図った母材セメント (non-surface-treated microfine cement; NSTM) の表面を水溶性のシリコン樹脂で被覆することにより粒子同士の付着を抑えたものである。

多段分級による粒度調整前後の粒度分布を図-2.1 に、また顕微鏡写真を写真-2.1 に示す。

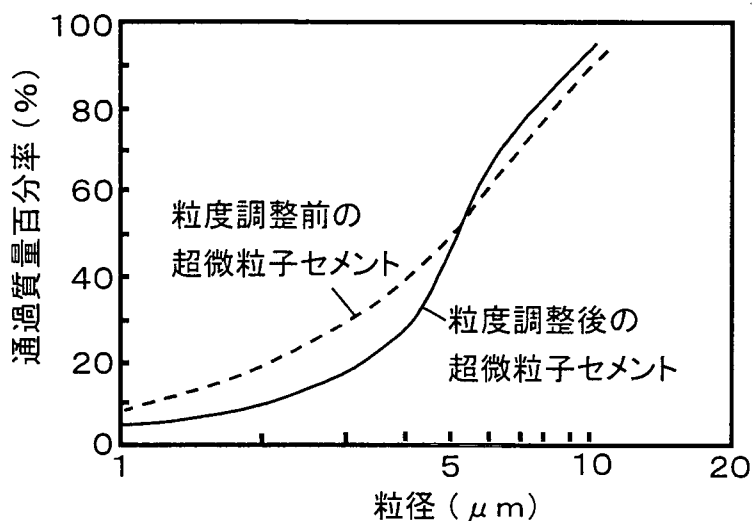
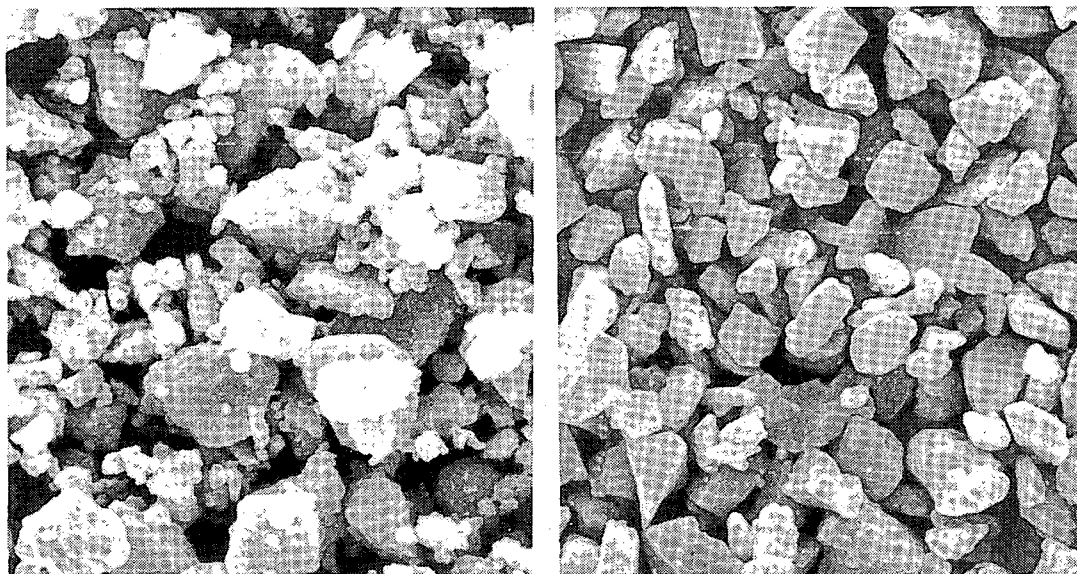


図-2.1 粒度調整前後の超微粒子セメントの粒度分布



(a) 粒度調整前

(b) 粒度調整後

写真-2.1 超微粒子セメントの顕微鏡写真

本研究において使用するセメントは、前述の STM, NSTM のほか市販の普通ポルトランドセメント (normal Portland cement; NP) とした。ただし、NP は物性試験のみに供し、注入試験には用いなかった。使用セメントの基本物性を表-2.1 に示す。

表-2.1 使用セメントの基本物性

セメント	平均粒径 (μm)	最大粒径 (μm)	比表面積 (cm^2/g)	凝結時間(hr-min)	
				始発	終結
STM	5.3	10.6 [*]	7,030	1-50	6-00
NSTM	5.5	10.6 ^{**}	6,350	2-35	4-40
NP	16.5	125.0 ^{***}	3,300	2-24	3-25

^{*}94.7%通過粒径、^{**}94.1%通過粒径、^{***}99.9%通過粒径

3.物性試験

3.1 試験項目と数量

表面改質超微粒子セメント (surface-treated microfine cement; STM) の基本的な物性を把握するために、セメント自体の特性として、1)給水後の凝結の始発および終結までの時間を測定する凝結試験、懸濁液の特性として、2)安定性を評価するためのブリージング率測定、3)回転粘度計による見掛けの粘性係数測定、4)流動性を評価するためのプレパクトフロー値測定、さらには、固化体としての特性として、5)一軸圧縮試験と試験供試体の湿潤密度測定を実施する。

グラウチング用の注入材料としての特性を、その絶対値を持って定量的に評価した事例はほとんどなく、新しい注入材料を開発した場合には、これらの特性を従来から用いられている材料のそれと比較することにより相対的に評価することが一般的である。そこで本研究においても、STM のほか、STM の母材セメントである未改質超微粒子セメント (non-surface-treated microfine cement; NSTM) と市販の普通ポルトランドセメント (normal Portland cement; NP) に対して同様の試験を実施し、得られた特性を比較することにより STM の物性評価を行う。なお、NP の試験結果については、筆者らが別途実施している試験結果⁸⁾を引用した。

セメントの凝結試験以外の試験において試料とするセメント懸濁液の配合、つまり水 (W) とセメント (C) の質量比である水セメント比 (W/C) は、STM、NSTM とともに 100、200、400、600、800% の 5 種類とした。NP については、対応する水セメント比の結果を文献⁸⁾から転載する。

本研究において、STM および NSTM に対して実施する試験項目と数量を表-3.1 にまとめて示す。

表-3.1 試験項目および数量の一覧

試験項目	セメントの種類	配合 (水セメント比)	備考
凝結試験	STM と NSTM	-	2 回の平均値を報告
ブリージング率測定		W/C=100、200、400、600、800% の 5 種類	3 回の平均値を報告
見掛け粘性係数測定			
プレパクトフロー値測定			
一軸圧縮試験			

STM：表面改質超微粒子セメント、NSTM：未改質超微粒子セメント。

3.2 試験方法

3.2.1 凝結試験

凝結試験は、JIS規格「セメントの物理試験方法（JIS R 5201-1992）」⁹⁾に従って、以下の要領で行った。

(1) 試験用器具

1) ビカー針装置

試験に使用したビカー針装置を図-3.1 に示す。

2) セメントペースト容器

試験に使用したセメントペースト容器を図-3.2に示す。

3) 手練り用練混ぜ器具

鉄製の練混ぜ用鉢およびさじを図-3.3に示す。

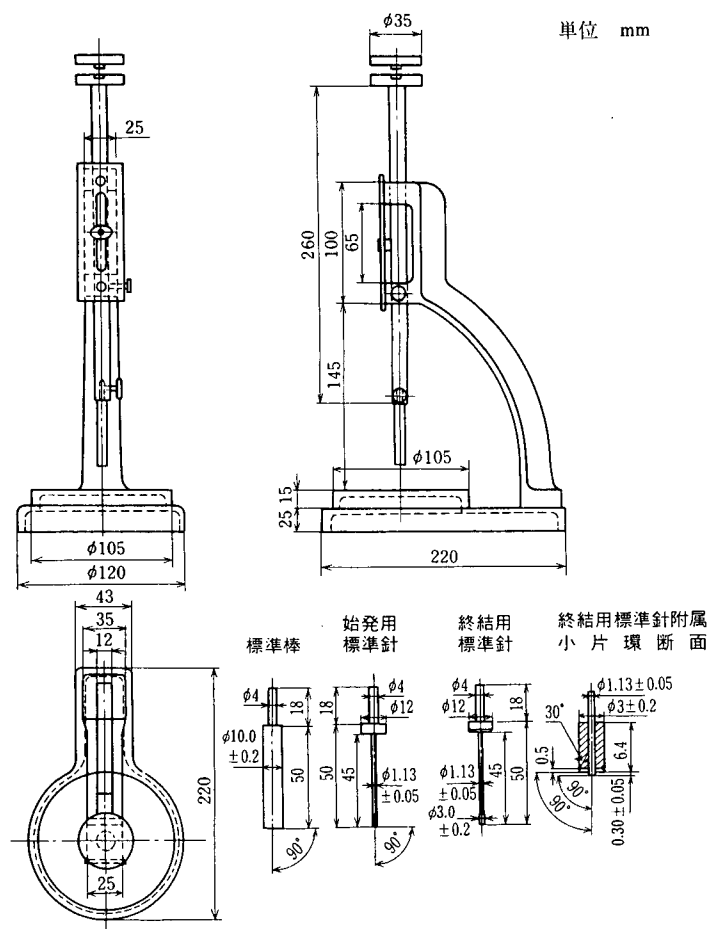


図-3.1 ビカー針装置⁹⁾

単位 mm

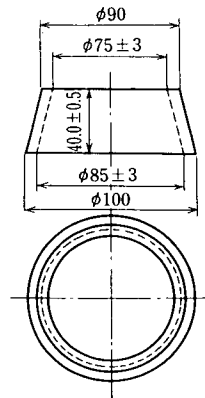


図-3.2 セメントペースト容器⁹⁾

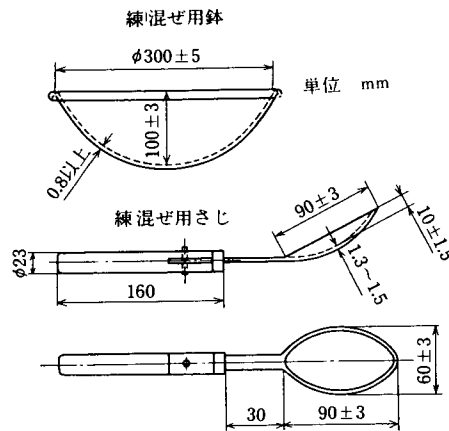


図-3.3 練混ぜ用鉢およびさじ⁹⁾

(2) 操作

1) 練混ぜ

標準軟度のペーストが得られる水量を確認するため試験練りを実施した。その結果、標準軟度のペーストは、鉢に600gのセメントを入れ、STMの場合は180gの水を、またNSTMの場合は220gの水を注ぎ入れ、均質になるまで(3分以上)練混ぜることにより作製できた。このようにして作製した標準軟度ペーストを2分割して、始発および終結時間測定用の試料とした。なお、練混ぜ用の水は、約20℃に温度調整したものを用了。

2) 凝結時間の測定

a) 始発の測定

始発用標準針をビカー針装置の滑り棒の下端に取り付け、滑り棒の上端に円板を載せ、降下するものの全質量を300.0 ± 1.0gとし、セメントペースト中に徐々に降下させる。始発用標準針の先端が底板の上面からおよそ1mmのところにとまるときを始発とし、セメントに注水したときから始発までの時間を始発時間とする。

測定は10分ごとに行う。

b) 終結の測定

終結用標準針をビカー針装置の滑り棒の下端に取り付け、滑り棒の上端に円板を載せ、降下するものの全質量を $300.0 \pm 1.0\text{g}$ とし、セメントペーストの表面に徐々に降下させる。セメントペースト表面に針の跡を止めるが、付属小片環による跡を残さないようになったときを終結とし、セメントに注水したときから終結までの時間を終結時間とする。測定は10分ごとに行う。

凝結時間の測定は約 20°C の恒温室内で2回実施し、その平均値を報告する。

3.2.2 ブリージング率の測定

ブリージング率の測定は土木学会基準「PCグラウトのブリーディング率および膨張率の試験方法（ポリエチレン袋方法）（JSCE-F532-1994）」¹⁰⁾に準拠し、以下の要領で行った。

(1) 試料(セメントスラリー)の作製

試料とするセメントスラリーはホバートミキサーを使用して作製した。セメントスラリーの水セメント比(W/C)は、前述したようにSTM, NSTMとも100、200、400、600および800%の5種類とした。なお、上述の土木学会基準においては、セメントスラリーの作製方法について規定されていないので、以下の手順に従ってセメントスラリーを作製する。

①温度を約 20°C に調整した所定量の水を計量し、ホバートミキサーの攪拌容器内に投入する。この際、STMスラリーには分散剤を添加しないが、NSTMスラリーには所定の分散剤をセメント質量の1%相当量を添加する。この分散剤の種類とその添加量は、粒度調整前のNSTMをグラウト材料として用いる場合に一般的に使用するものと同様である。

②所定量のセメントを計量してホバートミキサーの攪拌容器に投入し、回転数216rpmで3分間攪拌して試料のセメントスラリーとする。

(2) 試験用器具

容量1,000mlのメスシリンダーと土木学会の基準¹⁰⁾を満たす内径約50mm、長さ500mmのポリエチレン袋（以下、ブリージング袋と呼ぶ）を使用する。

(3) 操作

①攪拌が終了して完成したセメントスラリーを、ブリージング袋に高さ約200mmまで空気が混入しないように充填する。

②水を400ml入れたメスシリンダーの中に①のブリージング袋を静かに挿入する。

③メスシリンダー中の水面とグラウト面が一致するまで袋を下げ、このときのメスシリンダーの読みから400mlを差し引くことによりグラウトの体積(V_0)を求める。

④ブリージング袋の上端を結び、これをつるして静置する。0.5, 1, 2, 3, 6, 24時間後に、②、③の方法に従

い、沈降したグラウトの容積 (V_G) を求める。

⑤次式より各経過時間後のブリージング率 (B) を求める。

$$B = (V_0 - V_G) / V_0 \times 100 \quad (\%) \quad (3.1)$$

ブリージングの測定は、約20℃の恒温室内で実施する。また、各セメントと水セメント比の組み合わせごとに3回の測定を実施し、その平均値を報告する。

3.2.3 粘性係数の測定

(1) 試料(セメントスラリー)の作製

試料とするセメントスラリーの作製方法は、3.2.2(1)に示したブリージング率の測定の場合と同様である。

(2) 試験用器具

単一円筒回転粘度計 (DVL-B型：東機産業(株)) (以下、B型粘度計と呼ぶ) と容量500mlのビーカーを使用する。B型粘度計の仕様を表-3.2に、またその外観を写真-3.1に示す。

表-3.2 B型粘度計の仕様

測定範囲と ロータ回転数	測定範囲(注:1,2)	ロータ回転数	ロータ数	フルスケールトルク
	1~2,000,000 mPa・s	0.3/0.6/1.5/3/6/12/30/60 rpmの8段切換	5	67.4 μ N・m
精度	フルスケールの $\pm 2.0\%$			
再現性	フルスケールの0.2%以下			

(注:1)測定上限値

ロータ番号 ロータ回転数(rpm)	Lアダプタ	No.1	No.2	No.3	No.4
60	10	100	500	2,000	10,000
30	20	200	1,000	4,000	20,000
12	50	500	2,500	10,000	50,000
6	100	1,000	5,000	20,000	100,000
3	200	2,000	10,000	40,000	200,000
1.5	400	4,000	20,000	80,000	400,000
0.6	1,000	10,000	50,000	200,000	1,000,000
0.3	2,000	20,000	100,000	400,000	2,000,000

(注:2)測定下限値は、フルスケールの10%。



写真-3.1 B型粘度計の外観

(3) 操作

①試料であるセメントスラリーをビーカーに入れ、回転円筒であるロータが所定の位置まで試料に浸かるようビーカーの設置高さを調整して、静置する。

②ロータを回転させ、デジタル表示される数値が安定するのを待って測定値とする。今回の試験においてこの数値はロータの回転を開始してから20～40秒程度で安定した。

測定においては、ロータの回転数を6rpmおよび60rpmに設定し、それぞれの回転数に対応するずり速度のときの見掛けの粘性係数を求める。

見掛け粘性係数の測定は、約20℃の恒温室内で実施する。測定は、試料の作製直後および1、2、3、6時間後に実施し、同一時刻につき3回測定を行いその平均値を報告する。なお、試料を放置するとセメント粒子が沈降し始めるので、同一時刻の各測定開始直前に試料をガラス棒でかき混ぜた。また、攪拌後1時間以上経過した試料はセメント分が沈殿しているので、ホバートミキサーにより216rpmの回転数で30秒間攪拌してから測定に用いた。

3.2.4 フロー値の測定

フロー値の測定は、土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法（Pロートによる方法）（JSCE-F521-1994）」¹¹⁾に従い、以下の要領で実施した。

(1) 試料(セメントスラリー)の作製

試料とするセメントスラリーの作製方法は、3.2.2(1)に示したブリージング率の測定の場合と同様である。

(2) 試験用器具

Pロート（図-3.4参照）、ストップウォッチ、5000ccポリエチレン容器を使用する。

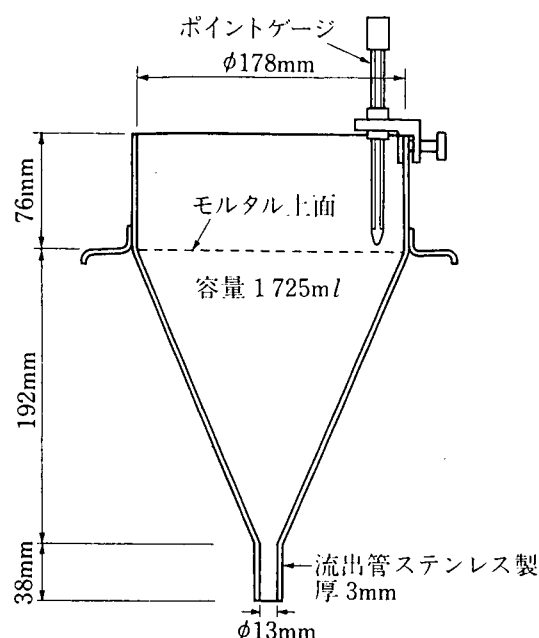


図-3.4 Pロート¹¹⁾

(3) 操作

- ①ロートを鉛直に支持し、ロートの内側を水で濡らす。
- ②試料のグラウトをロート内にそそぎ、流出口から適量のグラウトを流出させた後、指で流出口を押さえ、グラウト面がポイントゲージの先端より上になるまで注ぐ。
- ③流出口を押さえた指をゆるめてグラウトを少しずつ流出させ、グラウト面をポイントゲージの先端と一致させる。このとき、グラウト体積は1725mlである。
- ④指を離してグラウトを流出させ、流出口からの流れが初めて途切れるまでの流下時間をストップウォッチで測定し、フロー値とする。

フロー値の測定は、約20℃の恒温室内で実施する。測定は、試料の混合直後および1、2、3、6時間後に実施し、同一時刻につき3回測定を行いその平均値を報告する。なお、攪拌後1時間以上経過した試料はセメント分が沈殿しているので、粘性係数の測定の場合と同様に試料をホバートミキサーにより216rpmで30秒間攪拌してから測定に用いた。

3.2.5 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、JIS規格「コンクリートの圧縮強度試験方法（JIS A 1108-1993）」¹²⁾に準拠して、以下に示す要領で行った。

(1) 供試体の作製

供試体は、セメントスラリーを静置して沈殿・固結した試料（水和物）を整形することにより作製した。供試体の寸法および形状は、直径50mm、高さ100mmの円柱形である。セメントスラリーの水セメント比(W/C)は、STM、NSTMとも100, 200, 400, 600および800%の5種類とし、混練水には約20℃に調整した水道水を使用した。セメントスラリー作製の手順は以下のとおりである。

①所定量の水を計量してホバートミキサーの攪拌容器に投入する。NSTMの供試体用には分散剤をセメント質量の1%相当量を添加する。

②所定量のセメントを計量してホバートミキサーの攪拌容器に投入し、回転数216rpmで3分間攪拌する。

③上記の操作により作製したセメントスラリーを、各セメントおよび配合におけるブリージング率を考慮して決定した所定量で、内径50mmの塩化ビニール製パイプ（VP-50）を加工して作製したモールド内に流し込み、室温を約20℃に設定した恒温室内で7日間放置する。ただし、NSTMのみ3日材令の供試体に対しても一軸圧縮試験を実施するため、この供試体を作製する場合のみ放置日数は3日とした。

④7日後（NSTMの材令3日強度を測定する試料についてのみ3日後）に、沈殿・固結物（整形前の供試体長は180mm程度になるように、投入するセメントスラリーの量を調整してある）より上の部分のモールドを取り外し、沈殿・固結物を約20℃の水中に入れて養生する。

⑤所定の材令となった整形前の供試体をモールドから取り出して、下端から15mm、上端から65mm程度を電動カッターで水平にカットし、上下端面をグラインダーで磨いて滑らかに仕上げる。

(2) 試験用器具

圧縮試験器（CM-100C 油圧耐圧試験器：(株)東京衡機製造所）、ノギス、はかりを使用する。

(3) 操作

①整形した供試体の高さ、直径（上部直交2方向、下部直交2方向の平均値）および質量を測定する。

②供試体を圧縮試験器の加圧板の中心にセットする。

③供試体に衝撃を与えないように、一定速度で荷重を加える。荷重およびひずみの測定は、静ひずみ測定器（TDS-301 東京測器研究所(株)）とパソコン（PC-9801）により行う。

④次式より、一軸圧縮強さを求める。

$$q_u = 4 \cdot P / (\pi \cdot d^2) \quad (3.2)$$

ここに、 q_u ：一軸圧縮強さ（N/mm²）、

P ：③で求めた最大荷重（N）、

d ：供試体の直径（mm）。

1材令につき、3供試体の一軸圧縮強さを測定した。材令は、STM、NSTMとも7、14および28日を基本とした。ただし、NSTMのみ3日材令の供試体についても測定した。

一軸圧縮試験後に供試体を110℃で2日間乾燥し含水比を測定した。

4. 試験結果

4.1 概要

STMとNSTMに対する物性試験結果の一覧を表-4.1にまとめて示す。次節以降では、これらの試験結果を各項目ごとに整理し、両セメントの差、つまり表面改質の効果について検討する。その検討に際しては、NPの試験結果を適宜文献⁸⁾から転用する。

表-4.1 物性試験結果の一覧

セメント		STM										NSTM									
凝結の始発時間		1hr50min										2hr35min									
凝結の終結時間		6hr00min										4hr40min									
水セメント比 W/C		100%		200%		400%		600%		800%		100%		200%		400%		600%		800%	
ブリージ ング率 (%)	0.5時間後	3		5		16		40		63		2		7		9		5		7	
	1時間後	4		9		33		70		85		3		13		25		11		20	
	2時間後	7		17		54		74		85		5		26		56		90		48	
	3時間後	8		23		57		74		85		9		39		74		88		92	
	6時間後	12		30		59		75		85		18		62		83		89		91	
	24時間後	13		33		59		75		85		32		66		83		88		91	
見掛けの 粘性係数*) (mPa・s)	0時間後	56	11	7	4.8	8	2.5	9	2.5	11	2.2	22	9.2	4	3.8	1.0	2.2	0.6	2.1	0.6	2.1
	1時間後	154	25	16	5.4	7	2.9	9	2.6	11	2.2	22	8.1	3	3.8	0.7	2.5	0.6	2.5	0.8	2.4
	2時間後	155	51	22	7.1	9	4.3	9	3.5	9	2.8	24	9.2	4	3.5	0.9	2.9	0.8	2.2	0.9	2.3
	3時間後	185	120	33	8.6	8	4.7	10	3.9	9	2.9	23	9.5	5	3.8	1.1	2.5	0.7	2.2	0.8	2.2
	6時間後	762	237	44	18	12	6.8	13	7.4	8	4.0	37	10.8	8	4.0	0.8	2.4	0.7	2.4	0.7	2.5
	フロー値 (s)	0時間後	9.2		8.9		7.6		7.7		7.7		8.2		8.0		7.8		8.0		7.8
1時間後		11		8.8		8.0		8.0		7.9		8.4		8.2		7.8		8.0		7.9	
2時間後		12		8.3		8.7		8.8		8.0		8.6		8.0		8.5		7.9		8.1	
3時間後		13		8.8		8.2		8.2		8.1		8.8		8.0		8.2		7.9		7.8	
6時間後		12		9.1		8.7		8.3		8.7		8.5		8.0		7.9		7.8		8.3	
一軸圧縮 強さ (N/mm ²)		材令3日	-		-		-		-		-		6.90		10.09		9.06		8.25		5.94
	材令7日	2.29		0.60		0.42		0.24		0.34		19.01		22.05		21.46		21.36		18.91	
	材令14日	14.60		6.49		2.81		2.19		3.00		33.42		37.93		38.32		38.12		39.59	
	材令28日	22.34		12.05		7.90		6.73		7.27		46.75		48.80		50.67		52.23		52.04	
	変形係数 E ₅₀ (N/mm ²)	材令3日	-		-		-		-		-		2695.0		3253.6		2734.2		2528.4		2420.6
材令7日		999.6		254.8		117.6		77.4		97.0		4459.0		5076.4		5350.8		5135.2		5056.8	
材令14日		2802.8		1499.4		872.2		548.8		999.6		6232.8		6781.6		7065.8		7467.6		7977.2	
材令28日		5517.4		3439.8		2577.4		2087.4		2538.2		8908.2		9466.8		9809.8		9868.6		9927.4	
含水比 (%)		材令3日	-		-		-		-		-		40.4		37.9		35.9		35.3		30.7
	材令7日	71.4		114.9		156.4		183.6		149.5		45.2		39.7		38.1		37.8		33.3	
	材令14日	68.7		108.5		151.7		168.0		136.9		43.7		38.8		37.8		38.2		36.0	
	材令28日	65.4		106.2		149.6		162.7		139.2		43.4		37.1		36.8		36.3		32.0	
	湿潤密度 (g/cm ³)	材令3日	-		-		-		-		-		1.705		1.771		1.801		1.803		1.833
材令7日		1.549		1.391		1.304		1.271		1.310		1.747		1.794		1.805		1.797		1.808	
材令14日		1.569		1.409		1.318		1.293		1.346		1.760		1.796		1.801		1.797		1.812	
材令28日		1.598		1.409		1.311		1.296		1.341		1.762		1.778		1.813		1.806		1.801	
乾燥密度 (g/cm ³)		材令3日	-		-		-		-		-		1.214		1.285		1.325		1.333		1.402
	材令7日	0.904		0.647		0.509		0.448		0.525		1.203		1.284		1.307		1.304		1.356	
	材令14日	0.930		0.676		0.524		0.482		0.568		1.225		1.294		1.307		1.300		1.333	
	材令28日	0.966		0.683		0.525		0.493		0.561		1.229		1.297		1.325		1.326		1.364	

*) 見掛けの粘性係数は、各W/Cにおいて左欄がローター回転数6rpmにおける値、右欄が60rpmにおける値を表す。

4.2 セメントの凝結試験

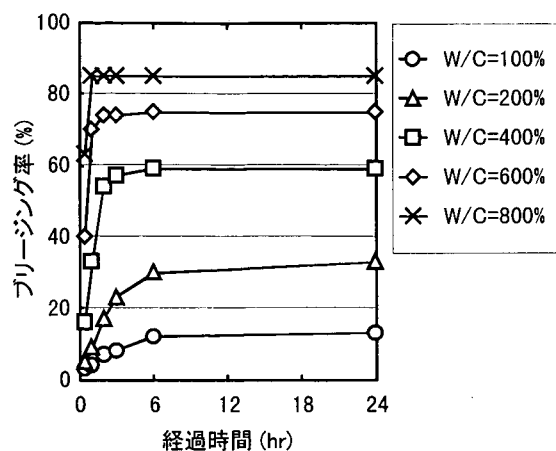
STMとNSTMの凝結試験の結果は、表-4.1に示したとおり、STMの始発が1時間50分、終結が6時間で、NSTMはそれぞれ2時間35分、4時間40分である。この結果において注目すべき点は、本来水溶性シリコーン樹脂による表面改質により水和反応の遅れが指摘されている^{4),6)}STMの方がNSTMよりも凝結の始発時間が短いことである。これは、表面改質剤であるシリコーン樹脂が、ペースト中での溶解途中において、一時的に緩やかな結合を発現しているのが原因ではないかと考える。

4.3 ブリージング率

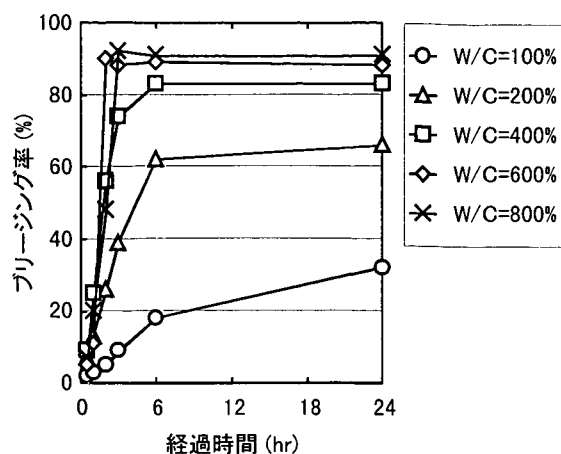
図-4.1に、STMとNSTMのブリージング率の経時変化を示す。また、ブリージングの経時的進行度を詳細に分析するために、両セメントの水セメント比（W/C）と、1, 3, 6時間後のブリージング率を最終段階24時間後のブリージング率で除した値であるブリージング比との関係を図-4.2に示す。これらの図より以下のことがわかる。

- ①セメントの種類によらず、W/Cが大きいほど、ブリージングが終結するまでの時間が短い。
- ②同じセメントであれば、W/Cが大きいほどブリージング率が高い。
- ③同じW/Cであれば、STMの方がNSTMよりブリージングが終結するまでの時間が短い。
- ④同じW/Cであれば、STMの方がNSTMよりブリージング率が小さい。

上記④を詳細に分析するため、STM, NSTMおよびNPの3種類のセメントの24時間後のブリージング率を図-4.3に示す。セメントスラリーのブリージング率は、3種類全てのセメントでW/Cの増加に伴い大きくなり、一般的な傾向を示している。NSTMのブリージング率は、いずれのW/CにおいてもNPよりも大きい。これは両セメントの化学成分および粒度構成の違いに起因するものと考ええる。一方、STMのブリージング率は、いずれのW/Cにおいても、NSTMやNPよりかなり小さい。このことから、表面改質によるセメントスラリーの安定性改善効果は、かなり高いものと考ええる。

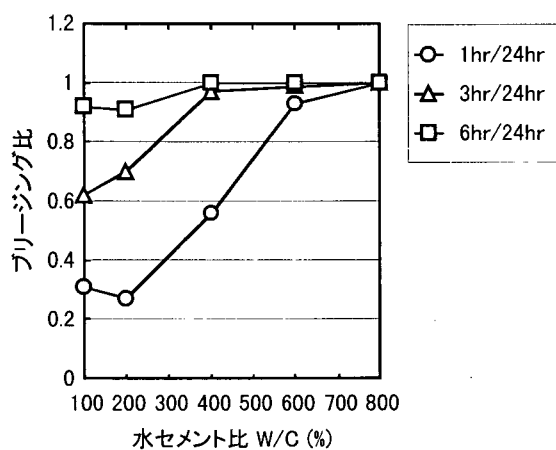


(a) STM

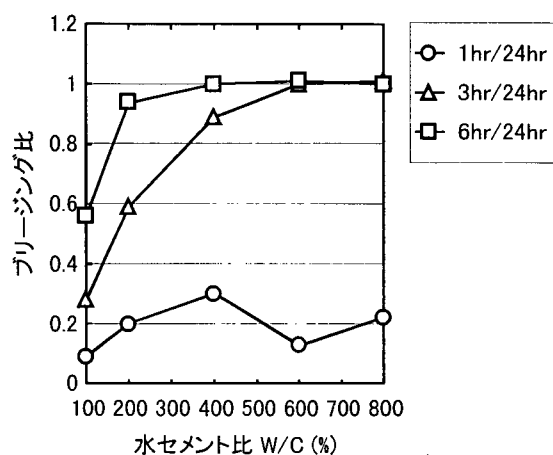


(b) NSTM

図-4.1 ブリージング率の経時変化



(a) STM



(b) NSTM

図-4.2 ブリージングの経時的進行度

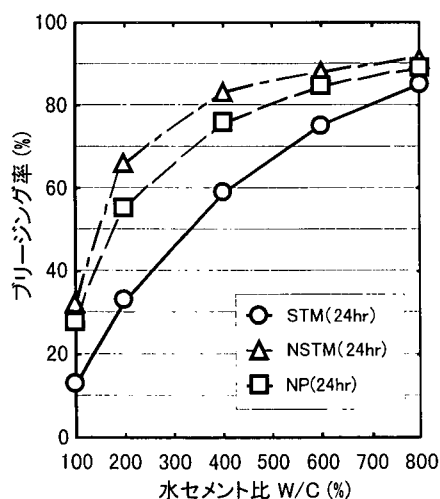


図-4.3 水セメント比とブリージング率
(24 時間後)の関係

4.4 見掛けの粘性係数

STM、NSTMおよびNPのセメントスラリー作製直後（0時間）、作製後1，2，3時間経過時のロータ回転数60rpmの見掛け粘性係数を用いて整理した見掛け粘性係数の経時変化を図-4.4に示す。STMとNSTMについて、スラリー作製後6時間経過時の結果を図中に示さなかったのは、NPにはこれに対応する試験結果がなかった⁸⁾ことに加えて、STMおよびNSTMスラリーとも作製後6時間経過時のデータを表示しなくてもその経時変化を明瞭に示すことができると判断したためである。また、ロータ回転数60rpmの測定結果のみを示したのは、回転数6rpmの場合の経時変化の傾向が60rpmのそれとほぼ一致するためである。

また、水セメント比に対するロータ回転数60rpmで測定した作製直後のセメントスラリーの見掛け粘性係数の関係を図-4.5に示す。これらの図から以下のことがいえる。

①作製直後のセメントスラリーの見掛け粘性係数は、いずれのセメントにおいても、W/Cが100～400%に増加するときに明瞭な減少傾向を示すが、W/Cが400%以上になるとほぼ一定値に収束する。

②見掛け粘性係数は、NSTMおよびNPではほとんど経時変化しないのに対し、NSTMを母材とするSTMの見掛け粘性係数は、時間経過によって上昇する傾向がみられる。特に、W/C=100%のスラリーにおいて、この傾向が顕著に表れている。この傾向は、セメントの凝結始発時間が、NSTMよりもSTMの方が早いことと対応している。よって、この現象は、STMの表面改質剤であるシリコーン樹脂が、水中での溶解途中において、一時的に緩やかな結合を起こしていることに起因するのではないかと推察する。

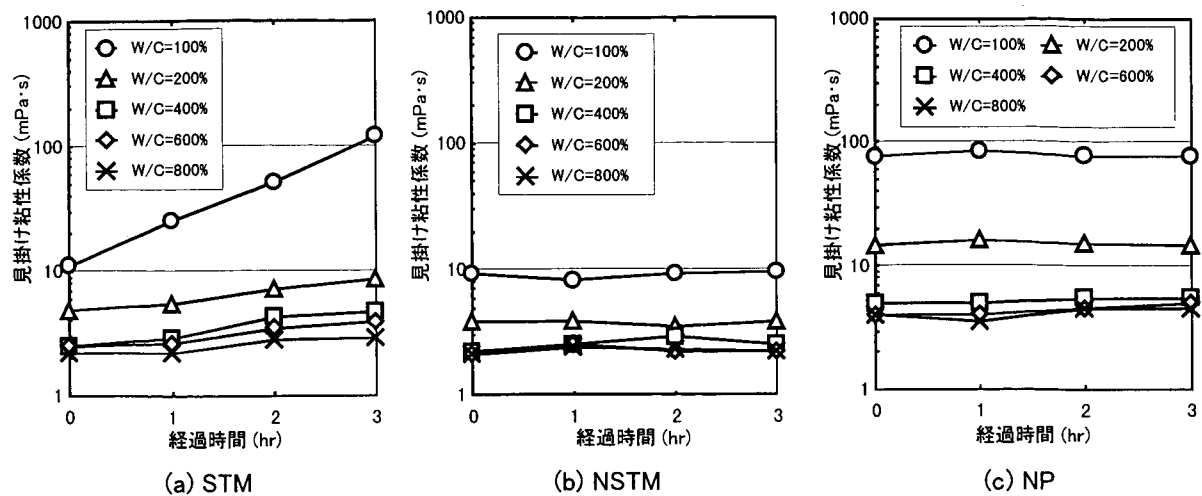


図-4.4 見掛け粘性係数の経時変化(ロータ回転数60rpm)

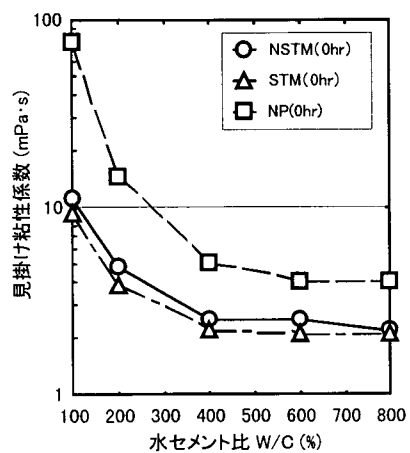


図-4.5 水セメント比と作製直後の
見掛け粘性係数の関係
(ロータ回転数 60rpm)

4.5 フロー値

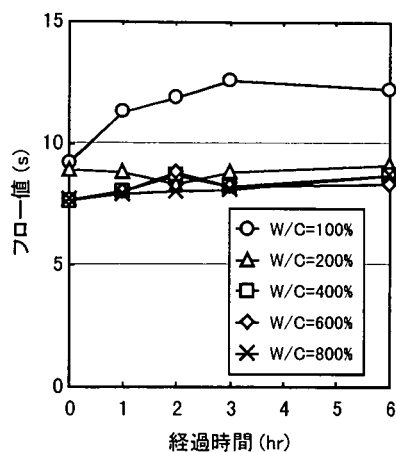
STMおよびNSTMのセメントスラリー作製直後（0時間）および作製後1、2、3、6時間経過時のフロー値の経時変化を図-4.6に示す。また、水セメント比(W/C)に対する作製直後のセメントスラリーのフロー値を図-4.7に示す。なお、20℃の水のフロー値は7.8sである。これらの図から以下のことがいえる。

①作製直後のセメントスラリーのフロー値は、STMにおいては、W/Cが100～400%に増加するときに若干減少する傾向を示し、W/Cが400%以上になるとほぼ一定値に収束するが、NSTMについては、水セメント比によらずほぼ一定値を示す。なお、STMのW/Cが400%以上のフロー値とNSTMのフロー値は、水のフロー値とほぼ同値である。

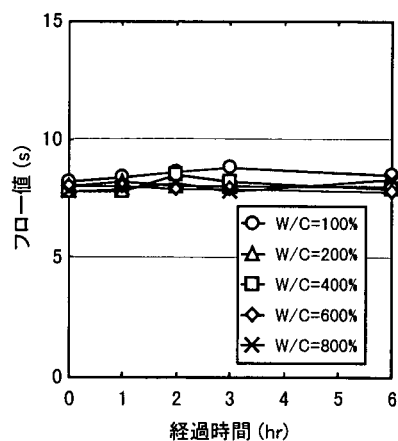
②フロー値の経時変化については、NSTM がほとんど経時変化しないのに対し、STM は時間経過によって若干上昇する傾向がみられる。特に、W/C=100%の STM スラリーにおいて、この傾向が顕著に表れている。この傾向は、前節の見掛け粘性係数の傾向と非常に良く対応している。

前節の見掛け粘性係数と本節のフロー値の測定結果から、STM スラリーの粘度について考察する。

STM スラリーの粘度は、その W/C が 100%と今回の試験において最も小さい場合において、経時的にかなり上昇する傾向がみられたが、その他の W/C ではこのような経時的上昇傾向は顕著でなく、かつ表面改質を施していない NSTM のスラリーとほぼ同程度の粘度であった。よって、実務的には、W/C が小さい場合、STM スラリー作製後あまり長い時間をおかずに注入に供することで、粘度上昇による浸透性低下の問題発生の可能性を低減することができる。



(a) STM



(b) NSTM

図-4.6 フロー値の経時変化

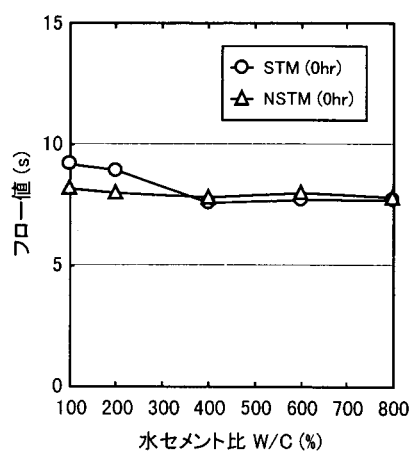


図-4.7 水セメント比と作製直後の
フロー値の関係

4.6 湿潤密度

STM、NSTMおよびNPの一軸圧縮試験用円柱形供試体の材令と湿潤密度の関係を図-4.8に示す。また、水セメント比（W/C）に対する材令28日供試体の湿潤密度を図-4.9に示す。これらの図から以下のことがいえる。

①材令28日供試体の湿潤密度については、STMはW/Cが100～600%まではW/Cの増加に伴い減少し、W/Cが600～800%になるとわずかに増加する傾向を示すのに対し、NSTMはW/Cが増加するに従って緩やかな増加傾向、NPはNSTMと逆で緩やかな減少傾向を示す。また、絶対値で比較すると、概ねNSTM、NP、STMの順に湿潤密度が小さくなっている。さらに、NSTMとNPの差に比べてNPとSTMの差がかなり大きい。これらの湿潤密度における定量的な大小関係は、4.3に示した各セメントスラリーのブリージング率の大小関係との対応で説明できる。

②湿潤密度の経時変化については、どのセメント供試体でも同じ W/C であれば、その材令によらずほぼ同じような値を示す。

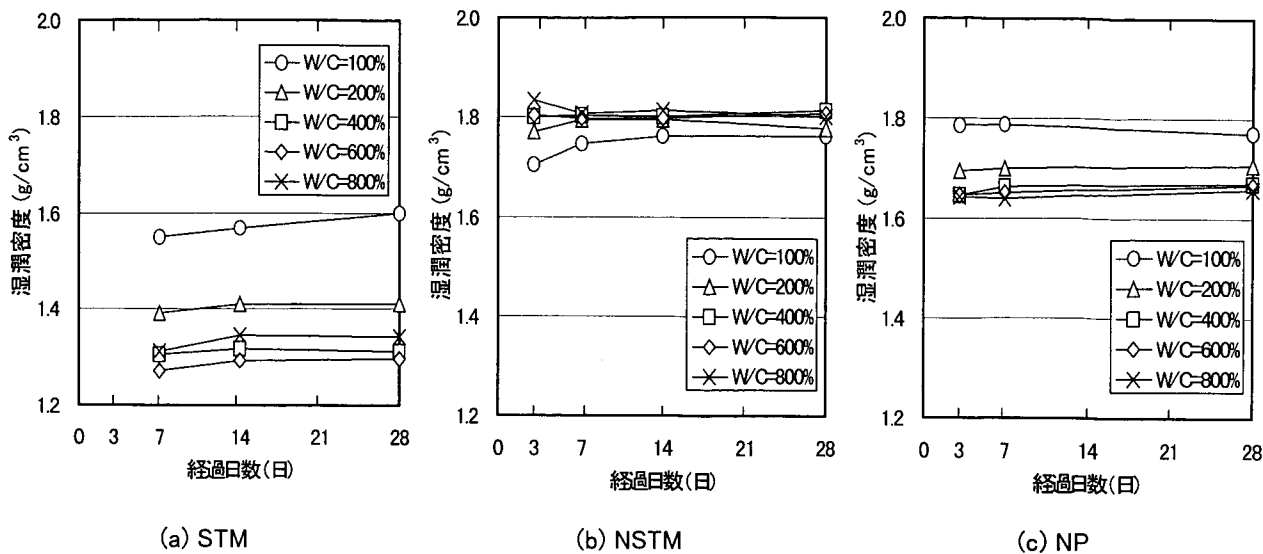


図-4.8 湿潤密度の経時変化

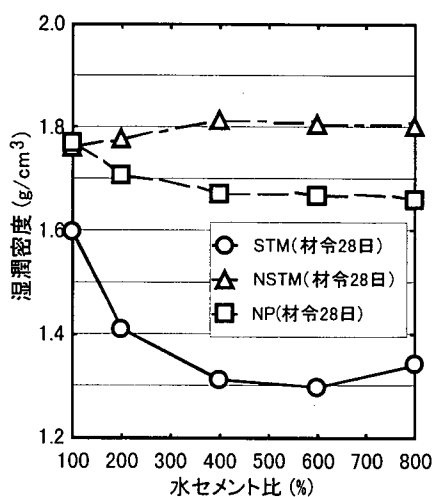


図-4.9 水セメント比と材令 28 日供試体の湿潤密度の関係

4.7 一軸圧縮強さ

STM、NSTMおよびNP固化体の材令と一軸圧縮強さの関係を図-4.10に示す。また、水セメント比 (W/C) に対する材令28日供試体の一軸圧縮強さを図-4.11に示す。これらの図から以下のことがいえる。

①どのセメント固化体の一軸圧縮強さも経時的に増加傾向を示す。

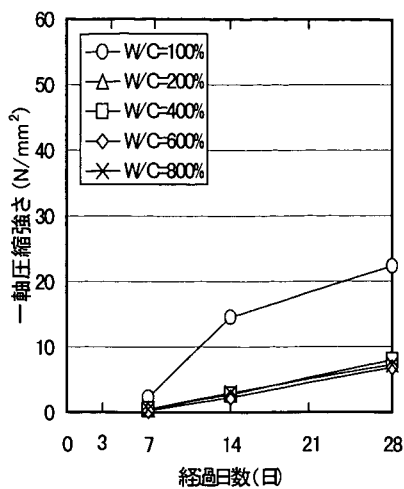
②材令28日供試体の一軸圧縮強さについては、STMとNPはW/Cが100～800%と増加するに従って明瞭な減少傾向を示すのに対して、NSTMは緩やかな増加傾向を示す。次に、各セメント固化体の一軸圧縮強さの絶対値について考察する。STMは、その母材であるNSTMに比べて、小さい一軸圧縮強さを有する。これは、STMスラリーの方がブリージング率が小さく、その結果として固化体の湿潤密度が相対的に小さくなることと対応している。しかし、STMは、NPに比べてブリージング率が小さいため、その固化体の湿潤密度がNPより小さくなるにもかかわらず、NPとほぼ同程度の一軸圧縮強さを有する。さらに、材令28日供試体の一軸圧縮強さは、最小値でも7N/mm²程度と、一般的な軟岩のそれよりもはるかに大きく、対象地盤を軟岩および砂地盤とした場合、STMのグラウト材としての強度上の問題は全くないと考える。

次に、一軸圧縮強さと湿潤密度および変形係数 E_{50} の関係について考察する。そこで、湿潤密度と一軸圧縮強さの関係を図-4.12 (標準目盛) と4.13 (片対数目盛：一軸圧縮強さの対数) に、一軸圧縮強さと変形係数の関係を図-4.14 (標準目盛) と4.15 (両対数目盛) に示す。これらの図から以下のことがわかる。

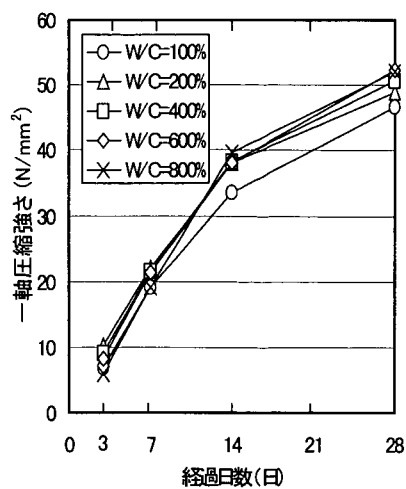
①各セメントとも、発現強度が小さい材令3日の結果を除いて同一材令でみると、湿潤密度と一軸圧縮強さには比較的良い正の相関があることがわかる。

②表面改質の有無によるブリージング率の差により、STMとNSTMの湿潤密度には差が見られる。しかし、母材が同じ両セメントでは、表面改質の有無によらず湿潤密度と一軸圧縮強さの関係がほぼ同一相関式で表現できる。よって、一軸圧縮強さの差は主に湿潤密度の差に起因するのではないかと考える。つまり、STMのスラリーの固化体については、表面改質剤の溶解・希釈に十分な量の水が存在するため、表面改質がセメント強度発現の遅延に与える影響は小さいと考える。

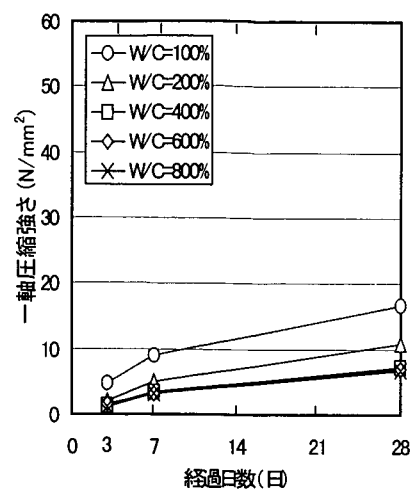
③データ分布範囲の狭い材令3日の結果を除いて、STMとNSTMの一軸圧縮強さと変形係数にはかなり高い正の相関性が認められる。



(a) STM



(b) NSTM



(c) NP

図-4.10 一軸圧縮強さの経時変化

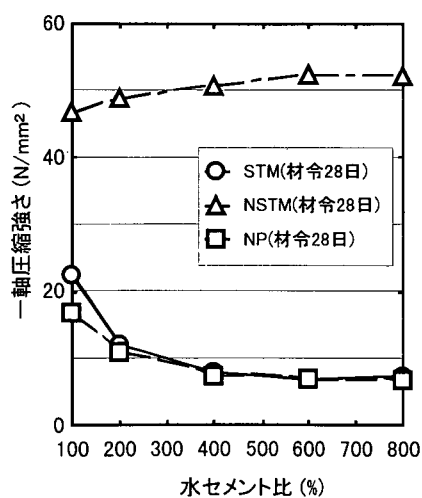
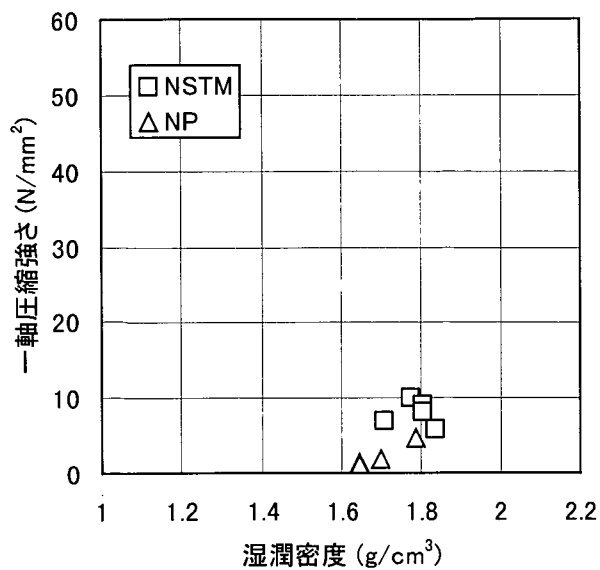
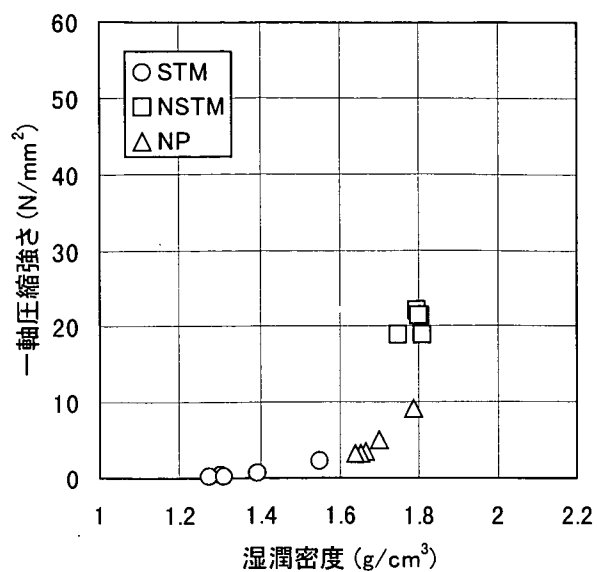


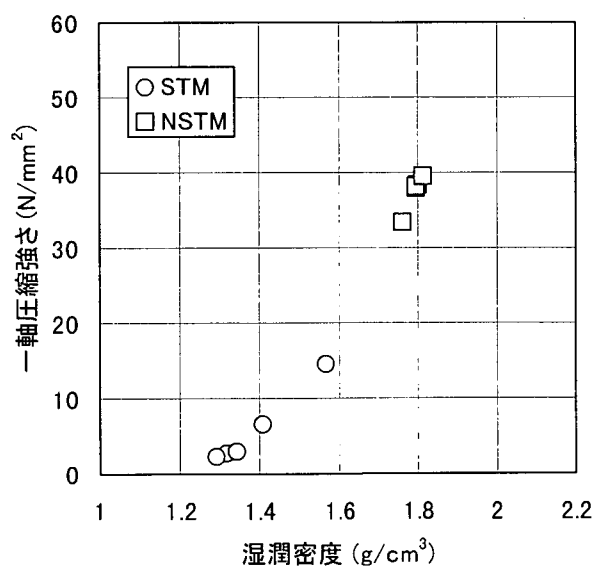
図-4.11 水セメント比と材令 28 日
供試体の一軸圧縮強さの
関係



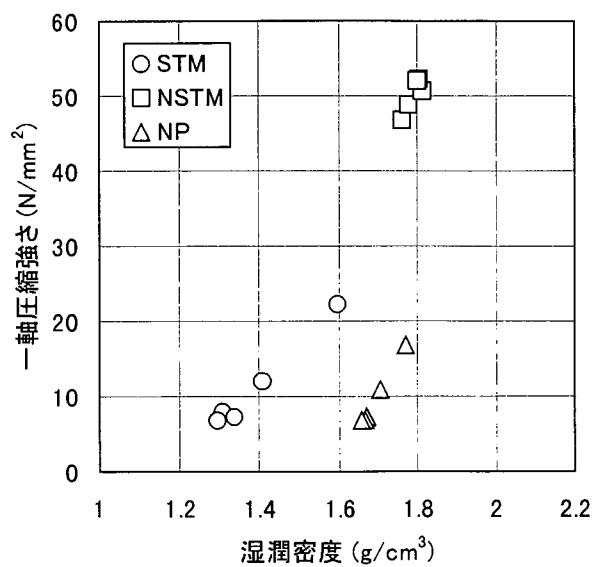
(a) 材令 3 日



(b) 材令 7 日

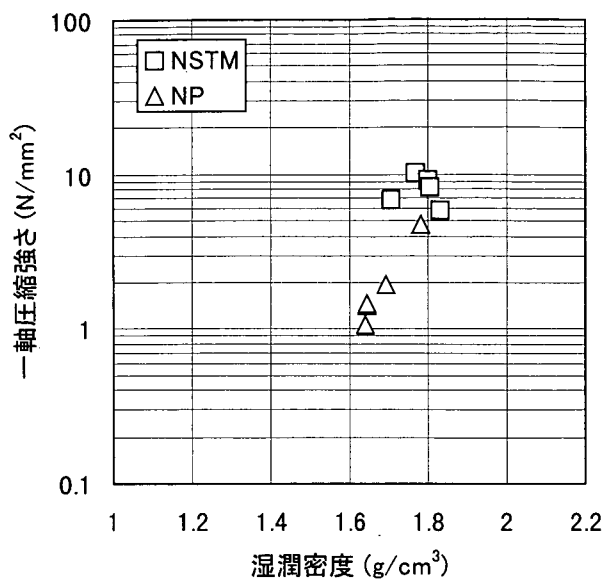


(c) 材令 14 日

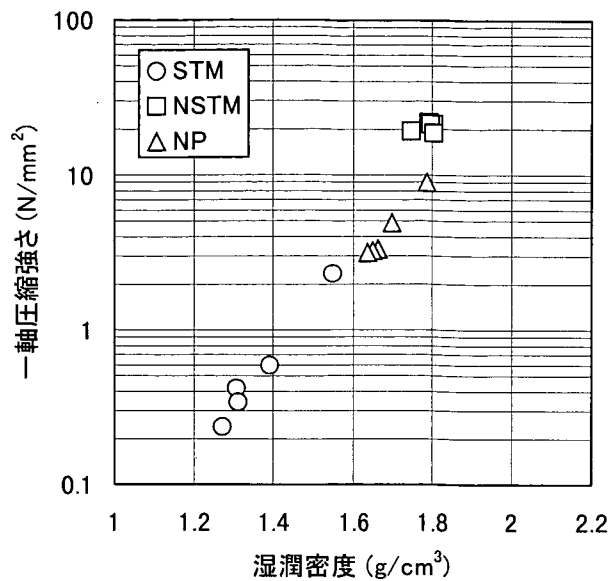


(d) 材令 28 日

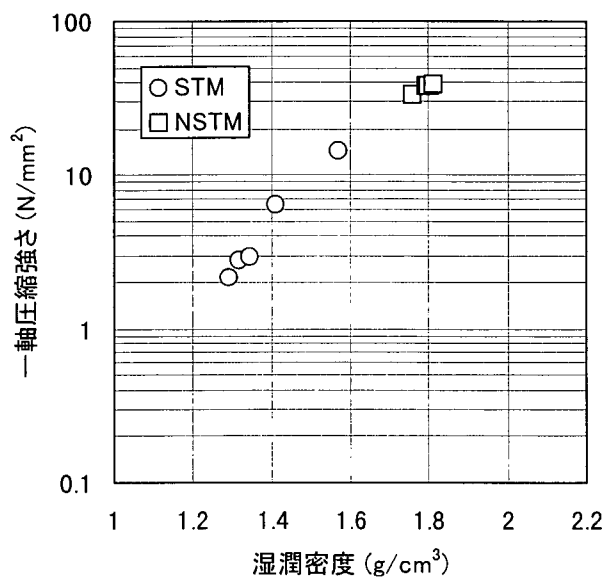
図-4.12 湿潤密度と一軸圧縮強さの関係(標準目盛)



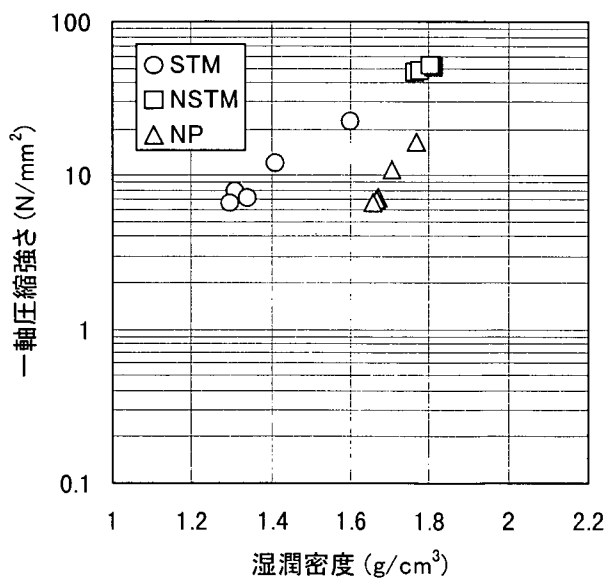
(a) 材令 3 日



(b) 材令 7 日

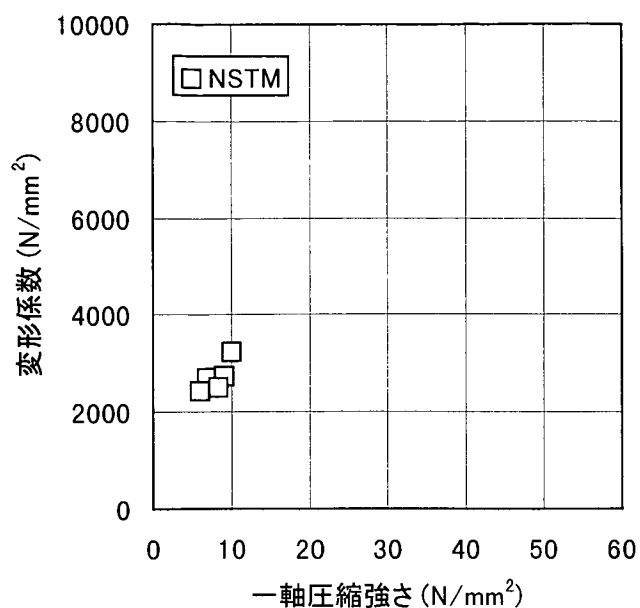


(c) 材令 14 日

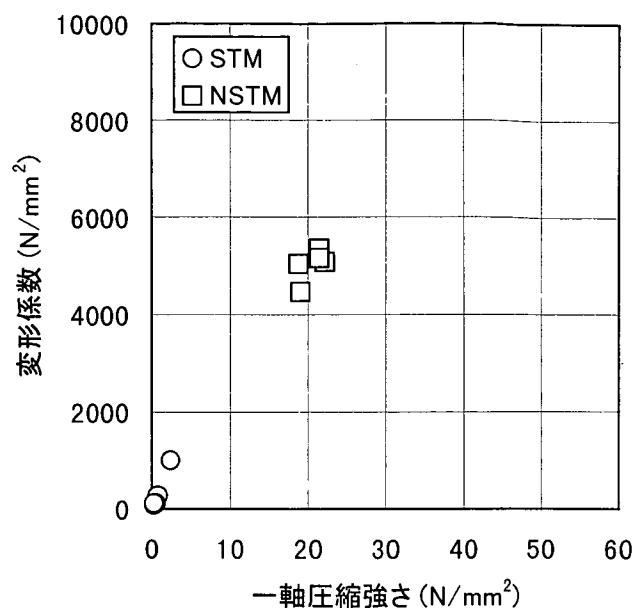


(d) 材令 28 日

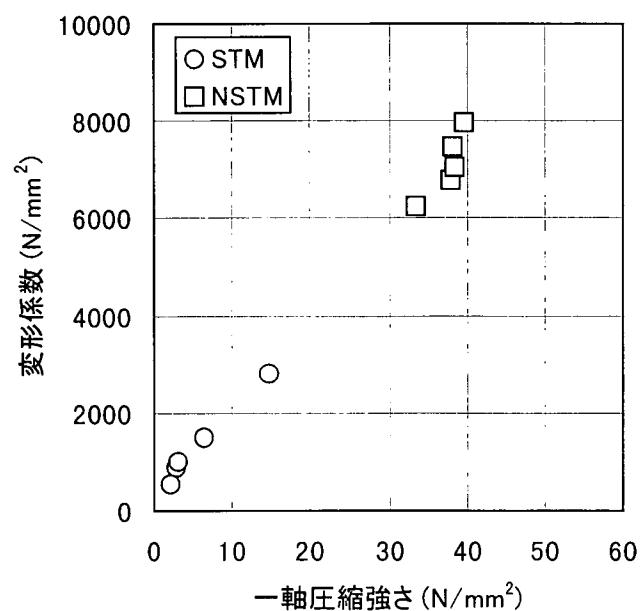
図-4.13 湿潤密度と一軸圧縮強さの関係(片対数目盛)



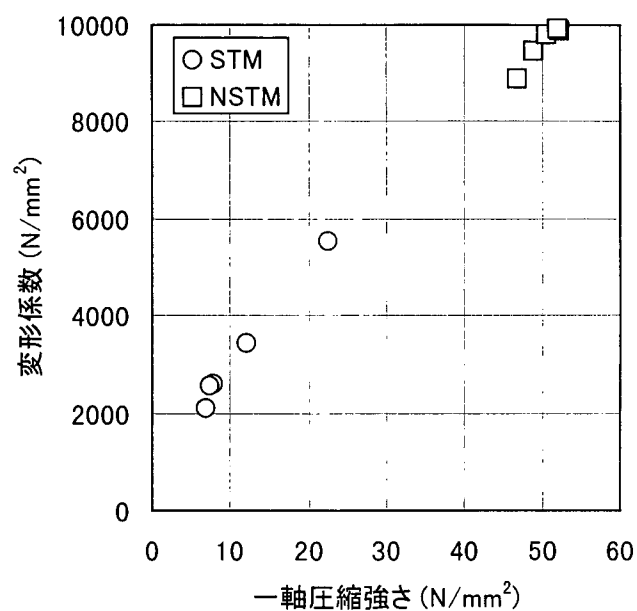
(a) 材令 3 日



(b) 材令 7 日

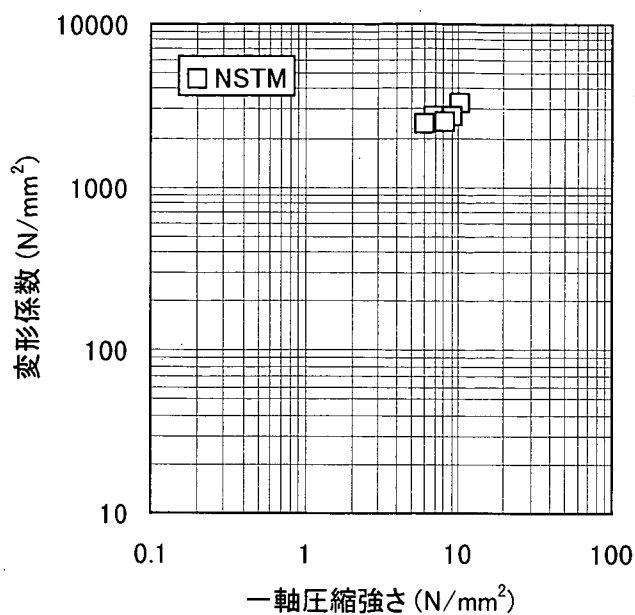


(c) 材令 14 日

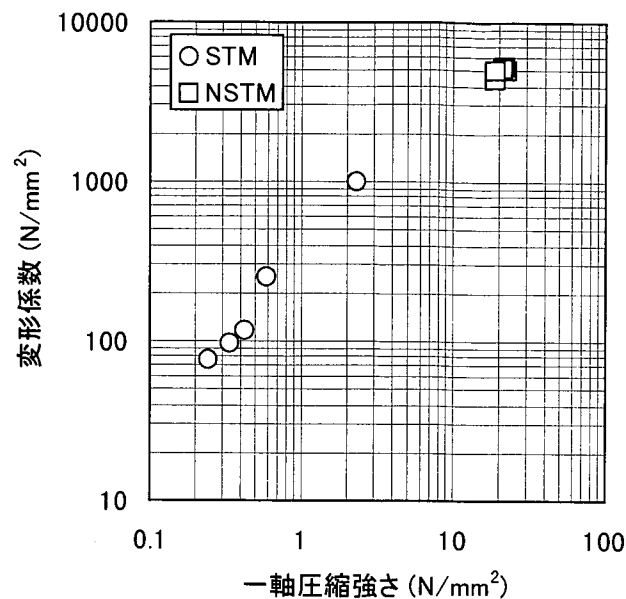


(d) 材令 28 日

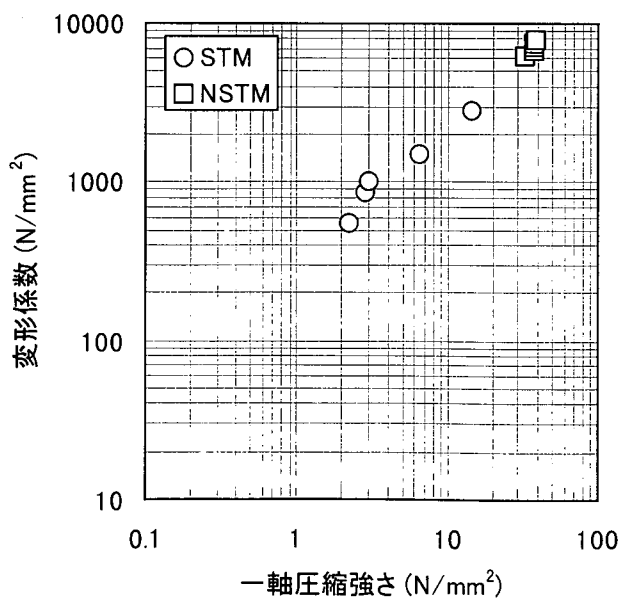
図-4.14 一軸圧縮強さと変形係数の関係(標準目盛)



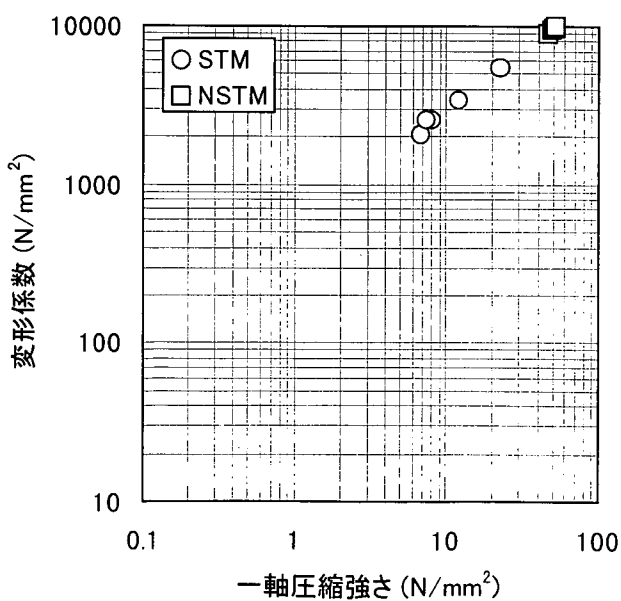
(a) 材令 3 日



(b) 材令 7 日



(c) 材令 14 日



(d) 材令 28 日

図-4.15 一軸圧縮強さと変形係数の関係(両対数目盛)

5. 注入試験

5.1 試験条件と数量

3、4 章においては、表面改質超微粒子セメント（surface-treated microfine cement; STM）の物性試験を行い、STM の母材セメントである未改質超微粒子セメント（non-surface-treated microfine cement; NSTM）や普通ポルトランドセメント（normal Portland cement; NP）と、特に懸濁液状態での物性比較を実施し、いくつかの重要な知見を得た。しかし、これらの物性比較では、本来の目的である対象セメントの砂地盤や軟岩地盤への注入、浸透特性を直接把握することはできない。そこでここでは、7 号珪砂により作製した供試体に対して、STM と NSTM のスラリー（懸濁液）を圧入する注入試験を実施し、両セメントの浸透特性の比較を行った。

セメントスラリーの水セメント比（W/C）は、100、200、400、600、800%の 5 種類とした。また、砂供試体については、供試体の含水比条件としては、飽和状態と乾燥状態の 2 種類を設定した。飽和供試体については、セメントスラリー注入開始前に透水試験を実施して、その透水性を測定する。

なお、注入試験に用いるセメントスラリーについては、注入試験前にブリージング率、見掛け粘性係数およびプレパクトフロー値の測定を行い、それらの値が 4 章に示した試験結果と変わらないことを確認している。

注入試験条件と数量を表-5.1 に示す。

表-5.1 注入試験条件と数量の一覧

セメントの種類	配合（水セメント比）	供試体の含水比条件	備考
STM	W/C=100、200、400、600、800% の 5 種類	飽和状態	1 回のみの実施
		乾燥状態	
NSTM		飽和状態	
		乾燥状態	

STM：表面改質超微粒子セメント、NSTM：未改質超微粒子セメント。

5.2 試験方法

5.2.1. 試験装置

注入試験に用いる試験装置と砂供試体用の注入モールドの構成を図-5.1に示す。

5.2.2 供試体の作製

供試体の作製方法は以下のとおりである。

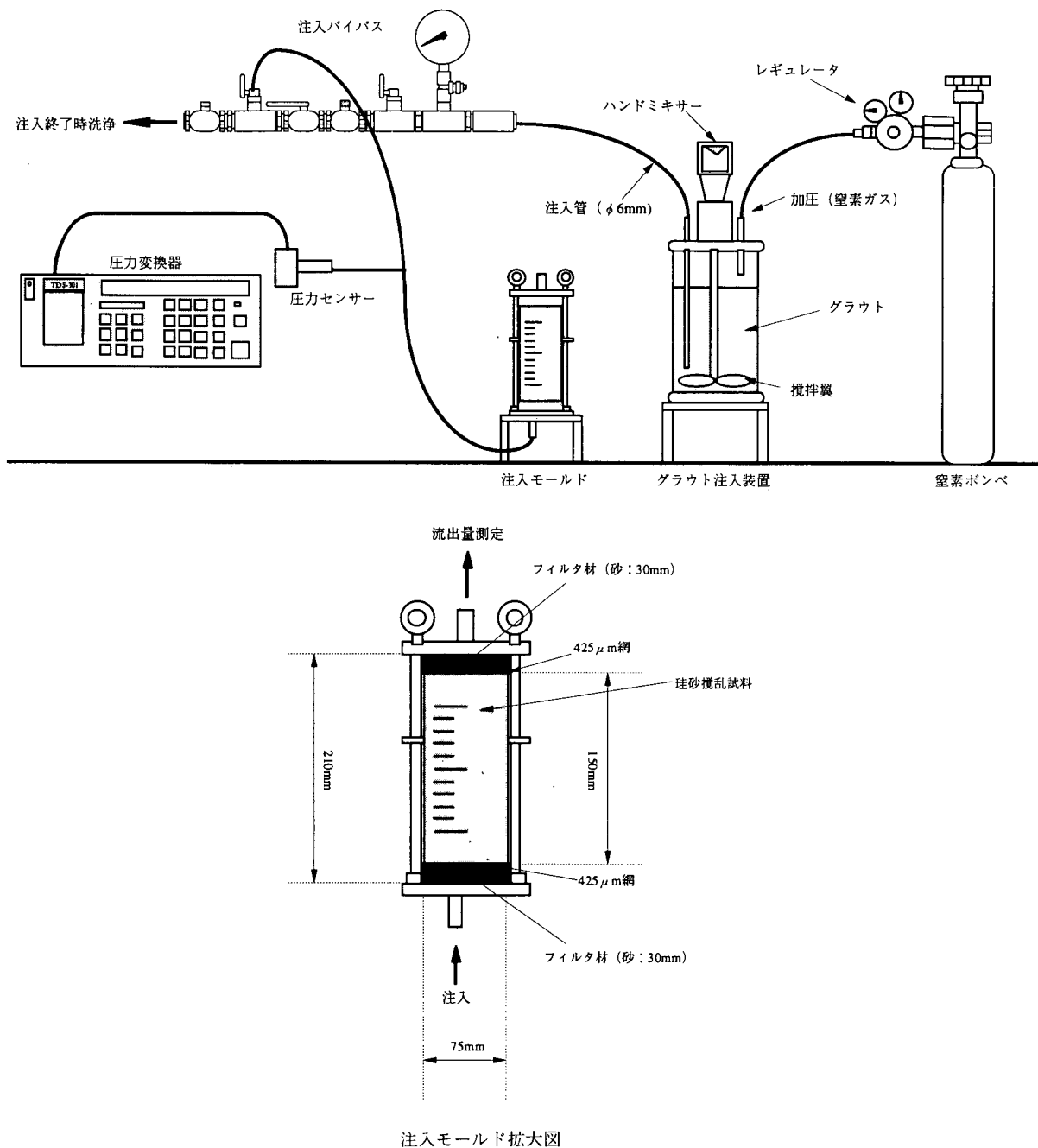
①呼び寸法425 μm の金網を、モールド金具（下部）に取り付けた内径75mm のアクリル円筒管モールド内の底部に設置し、フィルタ材としてふるいで2mmを通過し425 μm に残った清浄な砂を厚さ30mmに敷き詰める。さらに、そのうえに上記と同じ寸法の金網を設置する。

②フィルタ材の上に、乾燥した7号珪砂を所定の乾燥密度1.48g/cm³で30mm厚になる量を敷き詰め、それをランマーで締め固めて30mm厚に調整する。

③②の操作を5回繰り返して7号珪砂の厚みを150mmにし、その上に①と同じ寸法の金網を設置する。

④さらにその上に、厚さ30mmのフィルタ材（①と同じもの）を敷き詰め、再び①と同じ寸法の金網を設置して、モールド金具（上部）を取り付ける。

本試験で用いる砂の種類、締固め密度、供試体寸法等については、粉体圧送グラウチングの実用化研究に際して、対象実験として実施したセメントスラリーの注入試験方法¹⁾に準拠した。



図－5.1 注入試験装置の構成

5.2.3 供試体の透水試験

飽和供試体については、図-5.2に示す定水位透水試験装置を使用して、供試体に一定水位差（ $h=h_1-h_2$ ）580mmで1時間通水した後、累積流出量が100cm³になるまでの時間（s）を測定し、次式により透水係数 k を算出した。

$$k = \frac{Q}{Ai} = \frac{V}{t} \cdot \frac{1}{Ah} \quad (5.1)$$

ここに、 k ：透水係数（cm/s）

Q ：流出流量（cm³/s）

A ：通水断面積（ $=7.5^2\pi/4=44.2\text{cm}^2$ ）

i ：動水勾配

V ：規定流出量（ $=100\text{cm}^3$ ）

t ：規定流出量が流出するのに要する時間（s）

l ：供試体高さ（cm）

h ：上下流水位差（cm）

各供試体に対する透水試験は2回実施し、得られる透水係数に大差がないことを確認したうえで、その2回の平均値を記録した。

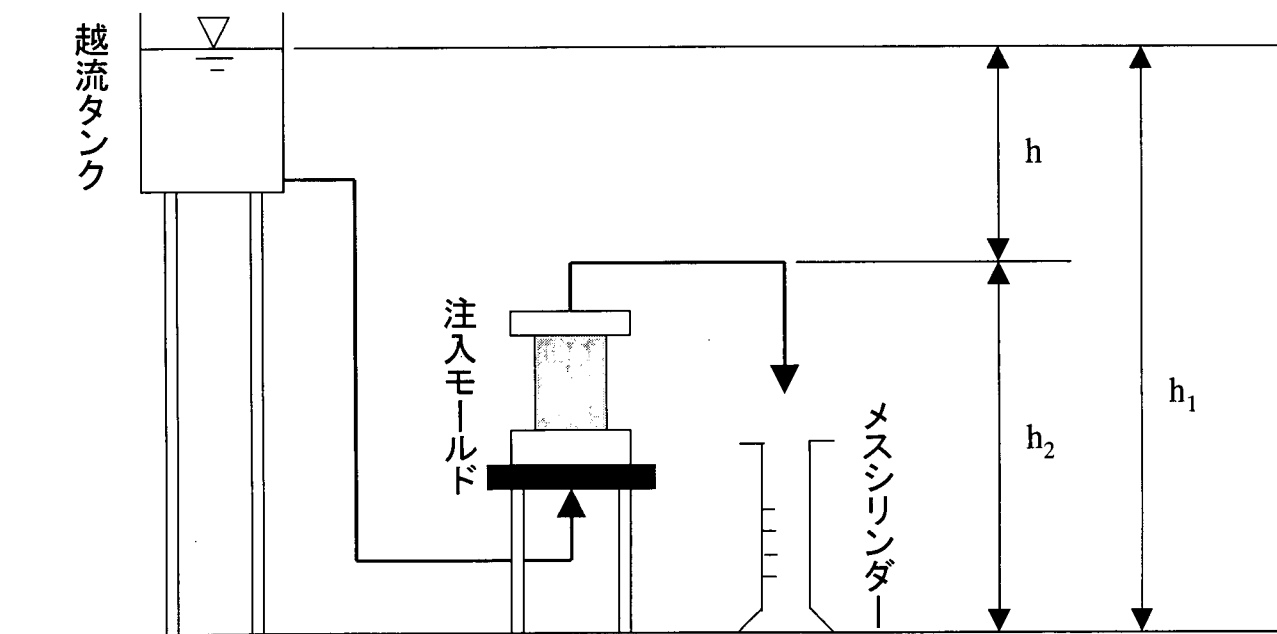


図-5.2 定水位透水試験装置の構成

5.2.4 注入試験方法

(1)セメントスラリーの作製

セメントスラリーの作製方法は、3.2.2(1)に示したブリージング率の測定の場合と同様である。

(2)注入

注入圧力を一定の196kPaに調整しながら、作製後短時間のうちにセメントスラリーを砂供試体へ注入した。注入中は、セメント粒子の沈殿を防止するため、セメントスラリー（グラウト）注入装置の攪拌翼を常時回転させておいた（図-5.1参照）。

(3)流量、圧力の測定

注入中のモールド上部からの水またはセメントスラリーの流出量は、メスシリンダーを使用して15秒間隔で測定した。また、注入圧力は、モールド下部に設置した水圧計で計測し、データロガーに表示させて管理・記録した。

(4)注入終了

注入を開始して10分経過後、注入を終了した。

(5)注入後の供試体の観察

注入を終了した供試体は、水中で硬化養生した後、固結していない砂を水で洗い流してセメントの浸透距離の測定および浸透状況の観察を行った。

6. 注入試験結果

6.1 試験結果

6.1.1 表面改質超微粒子セメント(STM)

STM スラリーの注入試験結果の一覧を表-6.1 に示す。全ての試験条件における 10 分間の注入試験において、供試体上部からセメントスラリーは流出することはない、水のみが流出してきた。また、表中の 7 号珪砂の飽和供試体の透水係数は、水温 20℃の値に補正したものである。セメント浸透距離の平均値は、最大値と最小値の 2 点平均として求めた。また、浸透状態の略図パターンは図-6.1 に示したとおりである。5 体の飽和供試体の透水係数は、 $2.1 \sim 4.9 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ (5 供試体の平均： $3.6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$) の範囲にあり、透水場として比較的ばらつきの少ない状態で仕上がっていると考えられる。

表-6.1 STM スラリーの注入試験結果一覧

供試体 No.	水セメント比(W/C) (%)	供試体 の状態	供試体の透水 係数(cm/s) [*]	累積流出量 (cm^3)	浸透距離(cm)			浸透状態	略図 パターン ^{***}
					最大	最小	平均 ^{**}		
1	800	飽和	3.5×10^{-3}	734	7.9	6.2	7.1	中央部に凹み	B
2	600	"	2.1×10^{-3}	451	7.0	4.2	5.6	片側に傾斜	C
3	400	"	4.9×10^{-3}	393	6.3	4.1	5.2	中央部に凹み	B
4	200	"	3.2×10^{-3}	111	3.2	1.4	2.3	片側に傾斜	C
5	100	"	4.1×10^{-3}	42.5	1.7	0.8	1.3	ほぼ平坦	A
6	800	乾燥	-	548	11.8	7.4	9.6	中央部に凹み	B
7	600	"	-	274	10.2	5.7	8.0	中央部に凹み(6箇所)	B
8	400	"	-	60	8.5	3.8	6.2	周辺部の一部に凹み	D
9	200	"	-	0	2.4	1.0	1.7	ほぼ平坦	A
10	100	"	-	0	1.1	0.6	0.9	ほぼ平坦	A

^{*} 水温 20℃の値に補正している。

^{**} 最大値と最小値の平均値である。

^{***} 浸透パターンは、図-6.1を参照。

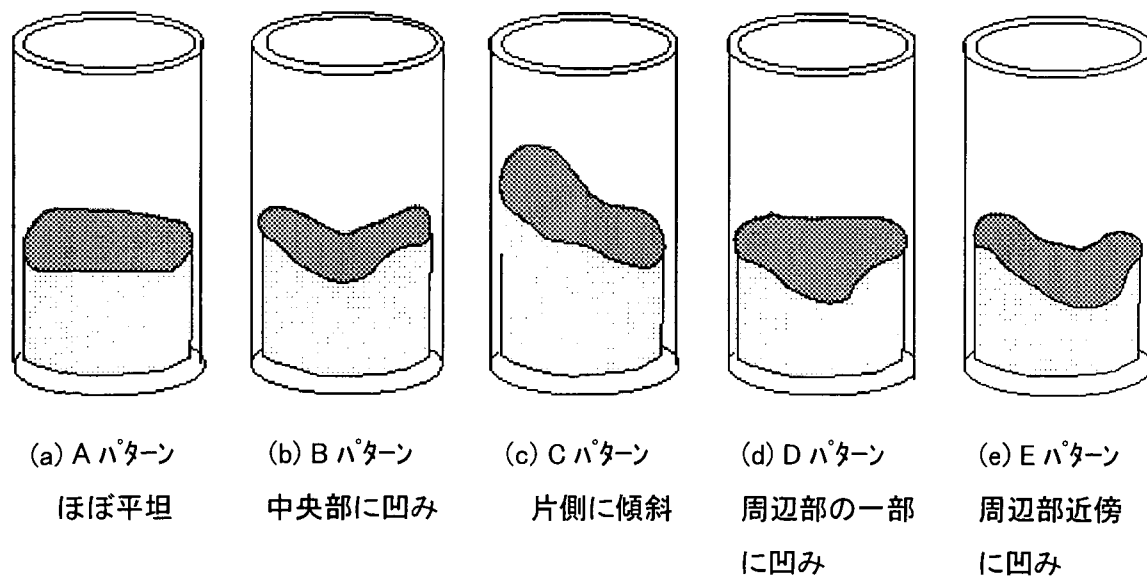


図-6.1 セメントの浸透パターン

6.1.2 未改質超微粒子セメント(NSTM)

NSTM スラリーの注入試験結果の一覧を表-6.2 に示す。STM スラリーのケースと同じく、全ての条件における 10 分間の注入試験において、供試体上部からセメントスラリーは流出することはない、水のみが流出してきた。

5 体の飽和供試体の透水係数は、 $3.1 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ (5 供試体の平均： $3.9 \times 10^{-3} \text{cm/s}$) の範囲にあり、透水場として比較的ばらつきの少ない状態で仕上がっていると同時に、STM スラリー用供試体の透水係数よりも 2 割程度大きいものの、ほぼ同程度であることがわかる。

表-6.2 NSTM スラリーの注入試験結果一覧

供試体 No.	水セメント比(W/C) (%)	供試体 の状態	供試体の透水 係数(cm/s)*	累積流出量 (cm^3)	浸透距離(cm)			浸透状態	略図 パターン***
					最大	最小	平均**		
1	800	飽和	3.5×10^{-3}	591	8.8	4.6	6.7	中央部に極端な凹み	B
2	600	"	3.6×10^{-3}	618	13.0	8.3	10.7	周辺部近傍に凹み	E
3	400	"	6.0×10^{-3}	379	8.3	5.6	7.0	中央部に凹み	B
4	200	"	3.1×10^{-3}	146	3.1	1.6	2.4	ほぼ平坦	A
5	100	"	3.5×10^{-3}	40.5	2.0	1.3	1.7	ほぼ平坦	A
6	800	乾燥	-	426	12.0	8.7	10.4	周辺部近傍に凹み	E
7	600	"	-	322	11.3	8.3	9.8	中央部に星形の凹み	B
8	400	"	-	100	10.8	6.6	8.7	中央部に凹み	B
9	200	"	-	0	3.3	1.4	2.4	ほぼ平坦	A
10	100	"	-	0	1.3	0.6	1.0	ほぼ平坦	A

*) 水温 20°C の値に補正している。

**) 最大値と最小値の平均値である。

***) 浸透パターンは、図-6.1を参照。

6.2 考察

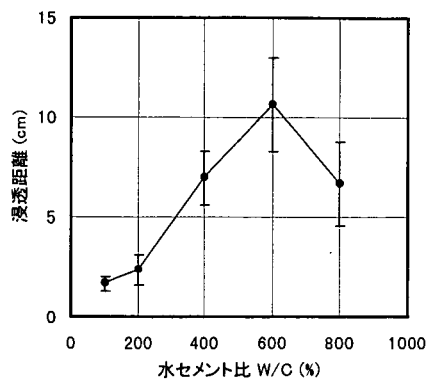
6.2.1 浸透距離

水セメント比 (W/C) に対する STM および NSTM の浸透距離の最大値、最小値、平均値をそれぞれ図-6.2 および図-6.3 に示す。また、W/C に対する STM と NSTM 平均浸透距離を供試体の含水状態 (飽和、乾燥) に分けて比較したものを図-6.4 に示す。これらの図から以下のことがわかる。

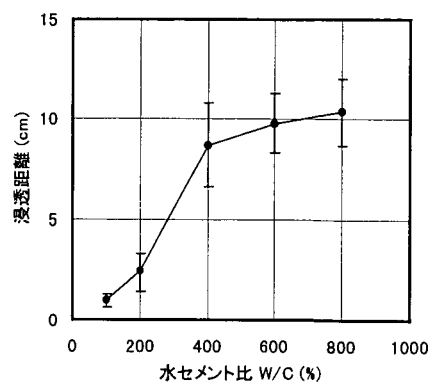
①セメントの種類、供試体の含水状態が同じであれば、W/C が大きくなるほど浸透距離が長くなる。しかし、W/C が 400% 以上になるとあまり浸透距離は伸びない。

②セメントの種類、W/C が同じであれば、乾燥供試体の浸透距離の方が飽和供試体のそれよりも長い。

③飽和および乾燥供試体ごとに見ると、STM の方が NSTM よりも浸透距離が長いことがわかる。さらに、5 体の飽和供試体の平均透水係数で比較すると、STM スラリー用の供試体の方が NSTM スラリー用の供試体よりも 2 割程度小さい。この状況下でも、STM スラリーの浸透距離の方が長いことから、水溶性シリコン樹脂によるコーティングにより超微粒子セメントの浸透性がかなり改善されたことがわかる。

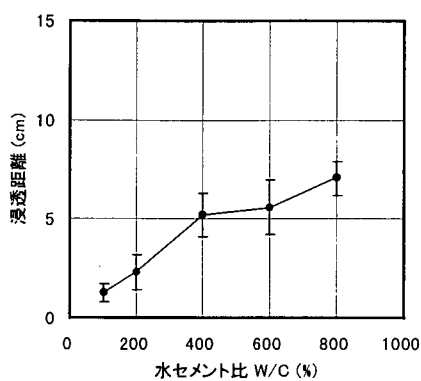


(a) 飽和供試体

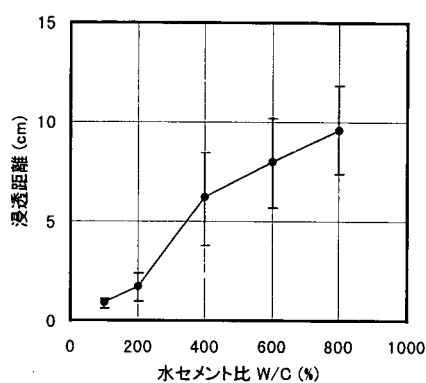


(b) 乾燥供試体

図-6.2 STM の浸透距離(最大値、最小値、平均値)

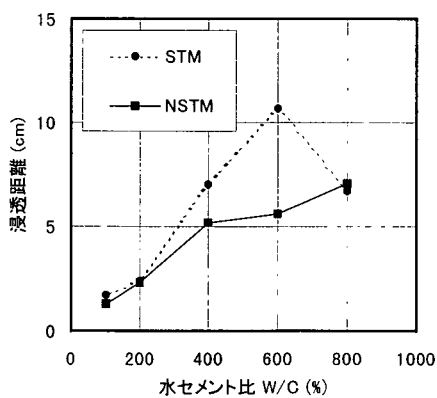


(a) 飽和供試体

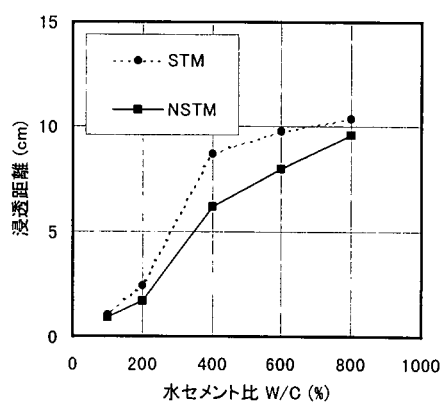


(b) 乾燥供試体

図-6.3 NSTM の浸透距離(最大値、最小値、平均値)



(a) 飽和供試体



(b) 乾燥供試体

図-6.4 STM と NSTM の平均浸透距離の比較

6.2.2 累積流出量

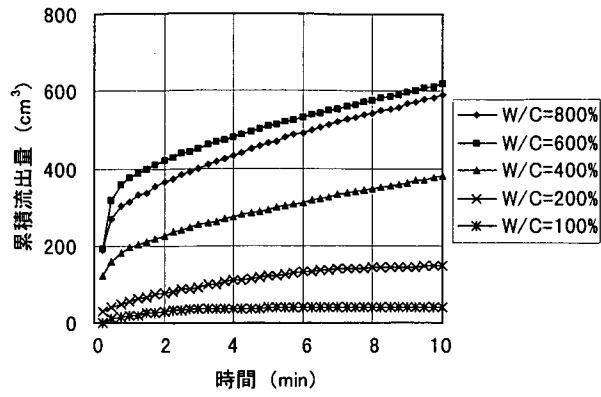
注入試験中の供試体上部からの累積流出量は、セメント粒子の浸透距離を間接的に表す指標の一つと考える。そこで、STM および NSTM スラリーの注入試験における供試体上部からの累積流出量の経時変化を、それぞれ図-6.5 および図-6.6 に示す。また、W/C と 10 分間の累積流出量の関係を図-6.7 に示す。これらの図から、以下のことがわかる。

①累積流出量の経時変化を見ると、一部 W/C の小さい、つまりスラリー濃度の濃いものを除いて、10 分間の注入で累積注入量は一定値に近づいている傾向は見て取れるが、完全に一定値には達しておらず、注入時間を延ばすことによって、浸透長が長くなる可能性がうかがえる。

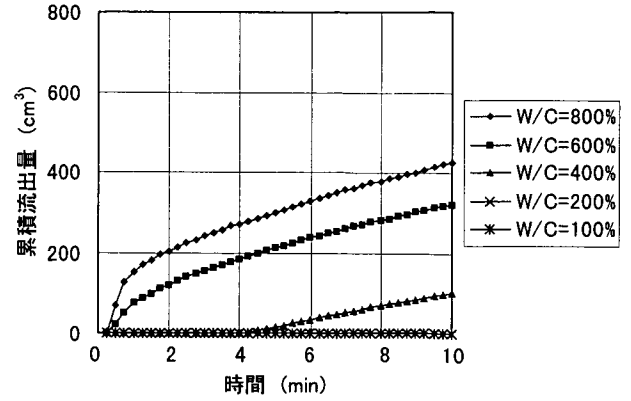
②セメントの種類、W/C が同じであれば、飽和供試体の方が乾燥供試体よりも累積流出量が多い。これは、飽和供試体の場合、注入開始と同時に供試体の空隙を充たしていた水が押し出されるのに対して、乾燥供試体の場合は、供試体の空隙が水ないしはセメント粒子によって充填された後、水が供試体上部から流出するためである。

③飽和および乾燥供試体ごとに見ると、W/C が同じであれば 10 分間の累積流出量は STM スラリーと NSTM スラリーでほとんど差がない。しかし、5 体の飽和供試体の平均透水係数で比較した場合、STM スラリー用の供試体の方が NSTM スラリー用の供試体よりも 2 割程度小さいことから、STM の方が NSTM よりも若干浸透性が良いと考えられる。

浸透距離および累積流出量に関する考察から、水溶性シリコン樹脂によるコーティングにより超微粒子セメントの浸透性がかなり改善されたことがわかった。ただし厳密には、作製後あまり長い時間をおかずセメントスラリーを注入試験に供しているため、STM の W/C=100%スラリーに見られた粘度の経時的上昇がその浸透性に与える影響については未検討である。

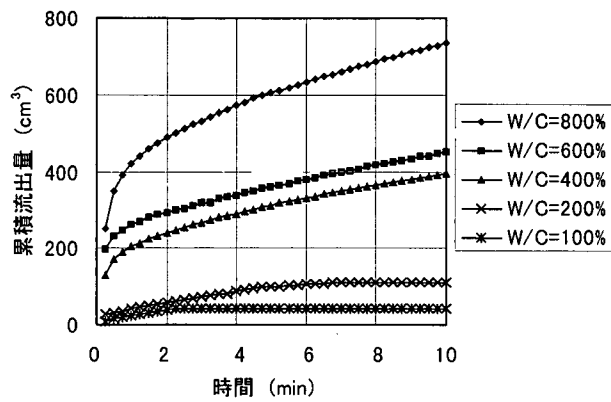


(a) 飽和供試体

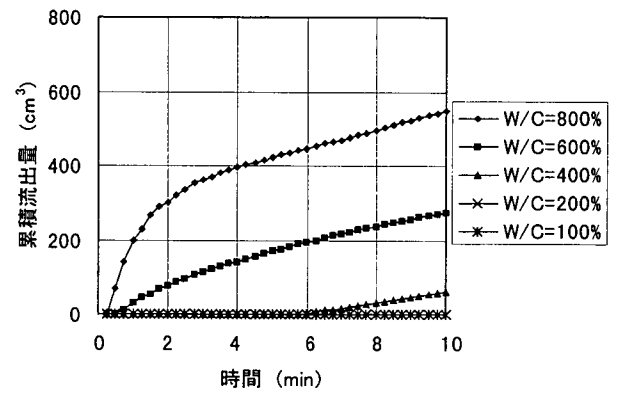


(b) 乾燥供試体

図-6.5 累積流出量の経時変化(STM スラリー注入試験)

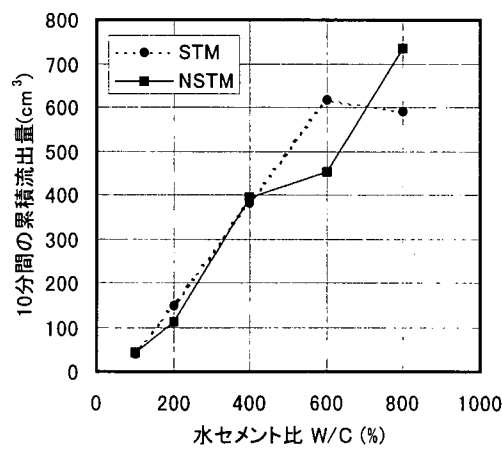


(a) 飽和供試体

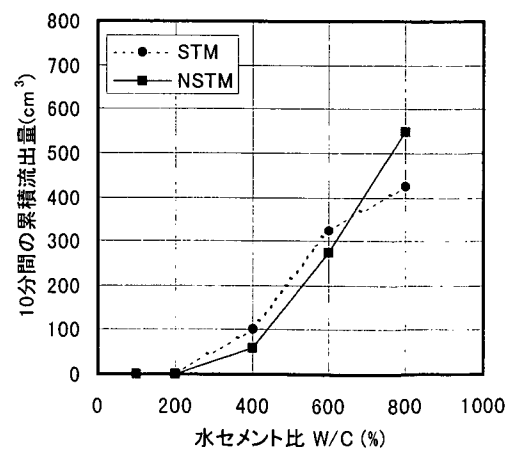


(b) 乾燥供試体

図-6.6 累積流出量の経時変化(NSTM スラリー注入試験)



(a) 飽和供試体



(b) 乾燥供試体

図-6.7 水セメント比と10分間の累積流出量の関係

7. まとめ

本研究では、市販の超微粒子セメント粒子の表面を水溶性のシリコーン樹脂で改質処理してその凝集性や付着性を低下させた表面改質超微粒子セメント（surface-treated microfine cement; STM）の基本物性とグラウト材としての注入特性を把握するための室内試験を実施した。なお、グラウティング用の注入材料としての特性を、その絶対値を持って定量的に評価することは難しいため、STMのほか、STMの母材セメントである未改質超微粒子セメント（non-surface-treated microfine cement; NSTM）と普通ポルトランドセメント（normal Portland cement; NP）についても同様の試験を行い、得られた結果を比較することでSTMの特性評価を行った。

本研究において得られた主たる知見は以下のとおりである。

(1) 凝結試験の結果、従来水溶性シリコーン樹脂による表面改質により水和反応の遅れが指摘されているSTMの方がNSTMよりも凝結の始発時間が短いことが判明した。これは、表面改質剤であるシリコーン樹脂が、ペースト中での溶解途中において、一時的に緩やかな結合を発現しているのが原因ではないかと考える。

(2) STMのブリージング率は、NSTMやNPよりかなり小さく、シリコーン樹脂による表面改質により懸濁液（スラリー）状態での安定性がかなり改善されることがわかった。

(3) 懸濁液（スラリー）作製後の経過時間が短ければ、STM懸濁液とNSTM懸濁液の粘度（見掛け粘性係数、フロー値）はほぼ同程度であり、表面改質剤であるシリコーン樹脂の溶解が懸濁液の浸透性に悪影響を及ぼすことはないとする。しかし、水セメント比（W/C）が小さい場合には、STM懸濁液の粘度は経時的に上昇する。この現象は、STMの表面改質剤であるシリコーン樹脂が、水中での溶解途中において、一時的に緩やかな結合を起こしていることに起因するのではないかと考察する。よって、実務的には、W/Cが小さい場合、STMスラリー作製後あまり長い時間をおかず注入に供することで、粘度上昇による浸透性低下という問題発生の可能性を低減する必要がある。

(4) STM固化体は、その母材であるNSTMに比べて小さい一軸圧縮強さを有する。これは、STM懸濁液の方がブリージング率が小さく、その結果として固化体の湿潤密度が相対的に小さくなることと対応している。しかし、STMは、NPに比べてブリージング率が小さいため、その固化体の湿潤密度がNPより小さくなるにもかかわらず、NPとほぼ同程度の一軸圧縮強さを有する。さらに、STMの材令28日供試体の一軸圧縮強さは、今回設定した100～800%の水セメント比（W/C）の中の最小値でも7N/mm²程度と、一般的な軟岩のそれよりも大きく、対象地盤を軟岩および砂地盤とした場合、STMのグラウト材としての強度上の問題はないと考える。

(5) STMおよびNSTM懸濁液の砂供試体に対する注入試験の結果として得られたセメントの浸透距離および供試体下流部からの累積流出量に関する考察から、水溶性シリコーン樹脂によるコーティングにより超微粒子セメントの浸透性がかなり改善されたことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所ダム部フィルダム研究室、ほか：粉体圧送グラウチングによる基礎岩盤遮水性改良に関する研究、建設省土木研究所共同研究報告書、No.129、1995年6月。
- 2) Matsumoto, N., A. Nakamura, Y. Yamaguchi, E. Onuma, T. Hashimoto and H. Yamagata: Development of grouting material for cement powder grouting, Proc. The 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems, pp.59-64, May 1996.
- 3) Takebayashi, S., T. Fujisawa, N. Yasuda, M. Kobayashi, Y. Yoneda and N. Tahara: Applicability of cement powder grouting method, Proc. The 2nd Int. Conf. Ground Improvement Geosystems, pp.83-88, May 1996.
- 4) 中村 昭・山口嘉一・小沼栄一・佐々木豊：粉体圧送グラウチング用改質セメントの開発、粉体工学会誌、Vol.33、No.9、pp.38-43、1996年9月。
- 5) 中村 昭・山口嘉一・小沼栄一・佐々木豊・橋本 保・小林正宏：粉体圧送グラウチング用改質セメントの浸透性試験における空気湿度の影響、粉体工学会誌、Vol.34、No.9、pp.62-67、1996年9月。
- 6) 藤澤侃彦・中村 昭・山口嘉一・小林正宏・小沼栄一・山縣秀年：粉体圧送グラウチングの適用地盤と標準的な注入仕様に関する、土木学会論文集、No.582/Ⅲ-41、pp.183-196、1997年12月。
- 7) 中村 昭・山口嘉一・小林正宏・橋本 保・長谷川悦央：改質セメントを用いた粉体圧送グラウチングによるまさ地盤の固化特性、材料、Vol.47、No.2、pp.144-147、1998年2月。
- 8) 吉田 等・山口嘉一・佐藤弘行・石川浩行・阿部義宏：セメントベントナイト（CB）グラウトに関する基礎的実験、建設省土木研究所資料（印刷中）、1998年**月。
- 9) 土木学会：セメントの物理試験方法、コンクリート標準示方書（平成8年制定）〔規準編〕、pp.20-35、1996年3月。
- 10) 土木学会：PC グラウトのブリーディング率および膨張率の試験方法（ポリエチレン袋方法）、コンクリート標準示方書（平成8年制定）〔規準編〕、p.387、1996年3月。
- 11) 土木学会：プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法（P 漏斗による方法）、コンクリート標準示方書（平成8年制定）〔規準編〕、pp.381-382、1996年3月。
- 12) 土木学会：コンクリートの圧縮強度試験方法、コンクリート標準示方書（平成8年制定）〔規準編〕、pp.484-485、1996年3月。