

土 木 研 究 所 資 料

超微粒子セメント懸濁液の砂地盤
への注入特性に関する室内実験

平成9年2月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター
動土質研究室

超微粒子セメント懸濁液の砂地盤への注入特性に関する室内実験

動土質研究室	室 長	松 尾 修
		古 関 潤 一*
	研 究 員	近 藤 浩 市
	交流研究員	有 間 一 浩**
	〃	佐 野 昌 明***
	〃	市 川 公 彦****
	〃	瀧 上 憲 児*****

要 旨

既設の地中構造物を対象とした液状化対策工法の一つとしての、超微粒子セメントを用いた注入工法の実用化のための研究結果をとりまとめたものである。まず、基礎的研究として、室内一次元注入試験を実施した結果、広い固結範囲を得るための注入材の配合条件は水セメント比が約 1000%, 施工効率の観点から分散剤混入率 8~10%が最適であること、固結長は砂地盤の透水係数との相関が高いこと、浸透注入施工が可能な地盤は透水係数が約 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 以上であること、等がわかった。また、材令 3 年の間で固結体の強度劣化は見られなかった。次に、大型土槽で三次元注入実験を行い、珪砂 6 号 ($k=3 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$) において最大径 3.5m のほぼ直径 2.0m の円柱と同等の固結体を、珪砂 7 号 ($k=7 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$) においては水平方向最大径 2.3m、鉛直方向最大径 1.4m の扁平球状の固結体を形成することができた。地中構造物の側方に改良柱体を配した条件で模型振動台実験を行い、構造物直下と改良杭体頭部が接合している場合、地中構造物の浮き上がり防止に有効であることがわかった。

キーワード：液状化対策、注入工法、超微粒子セメント、水セメント比、分散剤、模型実験

* 現東京大学生産技術研究所助教授（平成 7 年 3 月まで動土質研究室）

** 交流研究員在職期間（平成 4 年 9 月～平成 6 年 3 月）

*** 交流研究員在職期間（平成 6 年 4 月～平成 7 年 3 月）

**** 交流研究員在職期間（平成 7 年 4 月～平成 8 年 3 月）

***** 交流研究員在職期間（平成 8 年 4 月～平成 9 年 3 月）

目 次

第1章 研究概要	1
第2章 薬液注入工法の現状	4
2.1 薬液注入工法の概要	4
2.1.1 薬液注入工法とは	4
2.1.2 注入の形態	4
2.1.3 注入材の種類	6
2.1.4 施工法の種類	9
(1) 混合方式による分類	9
(2) 注入管形態による分類	10
2.1.5 薬液注入工法の使用機材	13
2.2 薬液注入工法の施工例	14
2.2.1 薬液注入工法の現在の用途	14
2.3 薬液注入の既往の研究調査事例	16
2.3.1 調査目的	16
2.3.2 対象文献	16
2.3.3 調査要領	16
2.3.4 調査結果	16
(1) 注入特性について	17
(2) 固結土の強度特性について	22
(3) 砂質土への浸透特性	31
2.4 超微粒子セメントに関する既往の研究・施工事例（国内、海外）	36
2.5 注入効果の確認法	42
第3章 液状化対策に適した注入材の選定	46
3.1 注入材の必要条件	46
3.2 一軸圧縮強度と耐久性の関係	46
3.3 浸透性と経済性の関係	47
3.4 注入材の選定結果	47
第4章 注入材の基本物性試験	49
4.1 試験目的	49
4.2 試験方法	49
4.2.1 使用材料	49
4.2.2 試験内容	50
4.3 試験結果と考察	50

4.3.1 超微粒子シリカの基本的物性	50
4.3.2 超微粒子セメントの基本的物性	54
4.4 まとめ	55
第5章 一次元条件における浸透特性の検討	56
5.1 一次元注入実験(その1)	56
5.1.1 実験目的	56
5.1.2 試料及び試験方法	56
(1) 定圧による注入限界量までの注入	59
(2) 定圧による一定量までの注入	60
(3) 定圧による分散剤を先行注入した場合の注入	60
(4) 定圧による懸濁液の温度を変えたときの一次元長尺注入実験	61
5.1.3 実験結果と考察	62
(1) 定圧による注入限界量までの注入	62
(2) 定圧による一定量までの注入	70
(3) 定圧による分散剤を先行注入した場合の注入	73
(4) 定圧による懸濁液の温度を変えたときの一次元長尺注入実験	73
5.1.4 まとめ	74
5.2 一次元注入実験(その2)	75
5.2.1 実験目的	75
5.2.2 試料及び試験方法	75
5.2.3 実験結果と考察	76
(1) 最適分散剤	76
(2) 最適水セメント比(W/C)	76
(3) 最適水分散剤混入率(D/C)	78
5.2.4 まとめ	80
5.3 一次元注入実験(その3)	81
5.3.1 実験目的	81
5.3.2 試料及び試験方法	81
(1) 浸透限界の確認	81
(2) 相対密度の変化に対する浸透性	82
(3) 各種の砂に対する浸透性	83
5.3.3 実験結果と考察	85

(1) 浸透限界の確認	85
(2) 相対密度の変化に対する浸透性	87
(3) 浸透能の支配要因	89
5.3.4 まとめ	93
第6章 超微粒子セメント懸濁液の固結体強度に対する長期耐久性の検討	94
6.1 実験目的	94
6.2 実験方法	94
6.3 実験結果と考察	95
6.4 まとめ	96
第7章 動的強度試験	97
7.1 試験目的	97
7.2 試験方法	97
7.2.1 一次元注入による供試体作成	97
7.2.2 予備試験（一軸圧縮強度）	97
7.2.3 非排水繰返し三軸試験	97
7.3 実験結果と考察	98
7.3.1 予備試験（一軸圧縮強度）	98
7.3.2 超微粒子セメント注入による固結砂の非排水繰返し三軸試験	99
7.3.3 超微粒子シリカ注入による固結砂の非排水繰返し三軸試験	101
7.4 まとめ	103
第8章 三次元条件における浸透特性の検討	104
8.1 小型三次元モールド浸透実験（その1）	104
8.1.1 実験目的	104
8.1.2 実験方法	104
8.1.3 実験結果	105
8.1.4 まとめ	108
8.2 小型三次元モールド浸透実験（その2）	109
8.2.1 実験目的	109
8.2.2 実験方法	109
8.2.3 実験結果	109
8.2.4 まとめ	112

第9章 土槽注入実験（その1）	113
9.1 実験目的	113
9.2 実験方法・条件	113
9.2.1 模型地盤	113
(1) 土 槽	113
(2) 地盤材料	113
(3) 地盤作成方法	113
(4) 地盤性状	114
9.2.2 注入試験方法	119
(1) 注入材料と配合の設定	119
(2) 注入方式	120
(3) 注入条件	121
(4) 注入機械の仕様	122
9.3 実験結果	123
9.3.1 総注入量	123
9.3.2 注入圧力と注入流量の経時変化	123
9.3.3 固結形状	124
9.3.4 注入材の充填状況	128
9.4 まとめ	129
第10章 土槽注入実験（その2）	130
10.1 実験目的	130
10.2 実験方法・条件	130
10.2.1 模型地盤	130
(1) 土 槽	130
(2) 地盤材料	130
(3) 地盤作成方法	130
(4) 地盤性状	130
10.2.2 注入試験方法	132
10.3 実験結果	132
10.3.1 総注入量	132
10.3.2 第一注入状況	132
10.3.3 第一注入固結形状	133
10.3.4 第一注入充填状況	135
10.3.5 第二注入状況	135

10.3.6 第二注入固結形状	136
10.3.7 まとめ	136
10.4 注入後の改良範囲確認方法の検討	137
10.4.1 ロータリーサウンディング	137
(1) ロータリーサウンディングの特徴	137
(2) システムの機構	137
(3) 調査位置	139
(4) 調査方法と条件	139
(5) 調査結果	140
10.4.2 比抵抗トモグラフィー（物理探査）による注入領域探査	142
(1) 注入材の見掛け比抵抗	142
(2) 土槽注入地盤における比抵抗トモグラフィー解析	144
(3) 解析結果と考察	144
第11章 液状化対策工としての効果に関する振動台実験	147
11.1 実験目的	147
11.2 実験方法	147
11.3 実験結果と考察	148
11.4 まとめ	149
第12条 全体のまとめと今後の課題	150
〈巻末資料〉	153
1、繰返し三軸試験時刻歴	155
2、超微粒子セメント注入に関する発表論文一覧	176

第1章 研究概要

既設の地中構造物や基礎構造物を対象にした液状化対策として、従来工法では施工不可能な既設構造物直下地盤の地盤改良が可能で、騒音、振動、隣接構造物への影響など施工上の制約を受けない注入工法の適用が考えられる。注入工法は、注入材を地盤の間隙へ圧入し固結させる工法であり、液状化対策として既設の地中構造物直下あるいは側方の緩い砂地盤への注入を行うに当たっては、

- 1) 構造物の変位が生じないよう地盤の動きを最小限に抑えること
- 2) 構造物側方の注入孔から構造物直下までの距離を注入できること
- 3) 液状化対策工としての改良部の耐久性
- 4) 液状化強度の増強

が必要とされる。

本研究では、以上の要件を満たせる注入材として、既存の研究より耐久性が示されている超微粒子セメントを用いて以下に示す実験と考察を行い、液状化対策として注入工法の適用性について検討を行い、注入工法の実用化を図ることを目的にしている。平成4年から平成8年度までの研究内容・成果の概要を表-1.1に示す。

本研究は、共同研究『液状化対策工法に関する共同研究』の一環として行われたものである。

①浸透特性の把握

a) 室内一次元注入試験

- ・最適水セメント比(W/C)の設定
- ・最適分散剤の設定
- ・最適分散剤混入率(D/C)の設定
- ・浸透限界の確認（細粒分含有率および透水係数と浸透特性の関係の把握）

b) 粘度測定試験

- ・水セメント比(W/C)および分散剤混入率(D/C)と粘度の関係の把握

c) 小型三次元モールド浸透試験

- ・浸透における三次元特性の把握

d) 土槽注入実験

- ・限界注入における浸透性の確認
- ・施工時における変位等の観測
- ・三次元注入における強度特性の把握

②液状化に対する抵抗性の確認

a) 固結体の非排水繰返し三軸試験

③固結強度に対する長期耐久性の確認

a) 固結体の一軸圧縮試験

- ・長期材令における耐久性の確認
- ・水セメント比(W/C)および分散剤混入率(D/C)が強度に及ぼす影響の把握

b) 水和熱測定試験

- ・分散剤混入率(D/C)と強度遅延の確認

④液状化対策としての施工仕様の設定

a) 振動台実験

- ・固結体の配置および形状の設定

表-1.1 平成4年度から平成8年度までの研究内容と成果の概要

研究項目	平成4年度	平成5年度	平成6年度	平成7年度	平成8年度
1. 注入材としての浸透特性	(内容) 注入材の選定 (成果) 超微粒子セメント及び超微粒子シリカ (内容) 粘度測定試験 (成果) W/CおよびD/Cを大きくすると粘度は低下する	(内容) 一次元注入実験(その1) (2次元モード) (成果) 分散剤混入率と注入圧力が大きいほど浸透性が高い。水セメント比W/C=1000%付近の浸透性が高い	(内容) 一次元注入実験(その2) (2次元モード) (成果) 浸透性における最適水セメント比は、W/C=1000%付近最適分散剤混入率はB/C=8~10%である。 最適分散剤はβ-ナフタレン系、ナフタレン系である。	(内容) 一次元注入実験(その3) (2次元及び1次元モード) (成果) 同じ粒径の砂でも密度の変化によって固結長は大きく変化する。浸透は透水係数との相関がある。浸透の限界域は透水係数で$k=10^{-3}$ cm/sec付近である。	
2. 固結体の強度に対する長期耐久性	(内容) W/Cを変えた供試体の長期耐久性 (成果) 材令90日：強度上昇傾向	(内容) 継続 (成果) 材令1年：強度低下なし (内容) 分散剤混入率(1~3%)を変えた供試体の強度 (内容) 影響なし	(内容) 継続 (成果) 材令2年：強度低下なし (内容) 分散剤混入率(1~10%)を変えた供試体の長期耐久性 (内容) ピーク強度は低下するが、長期の耐久性は確保 材令：200日	(内容) 継続 (成果) 材令3年：強度低下なし (内容) 分散剤混入率(4~15%)を変えた供試体の長期耐久性 (内容) 材令：1年 強度低下なし	(内容) 継続 (成果) 材令5年：来年予定 (内容) 分散剤混入率(4~15%)を変えた供試体の長期耐久性 (内容) 材令：2年 強度低下なし
3. 施工仕様の設定	(内容) 非排水繰返し三軸試験 (成果) W/C=1000, 2000%でも未改良砂の3倍以上の液状化抵抗	(内容) 土槽注入実験(その1) (成果) 三次元的浸透特性及び固結試料砂の強度特性 (山形珪砂6号、W/C=750%、B/C=1%)	(内容) 土槽注入実験(その2) 小型三次元モード(その1) (成果) 三次元的浸透特性及び固結試料砂の強度特性 (東北珪砂7号、W/C=1000%、B/C=10%β-ナフタレン系)	(内容) 小型三次元モード(その2) 浸透実験、現場試験施工 (成果) 充填率と固結体積、固結形状の確認	(内容) 現場試験施工 (成果) 注入量(充填率)による固結形状の確認、適用限界地盤の確認、ピッチ(水平・鉛直)、固結試料砂の強度特性(Ca分析)
4. 設計法の設定			(内容) 模型振動台実験 (成果) 改良杭体の配置は接円、頭部(頸部)は結合の場合浮上がり防止に効果あり		

第2章 薬液注入工法の現状

2.1 薬液注入工法の概要

2.1.1 薬液注入工法とは

注入工法（グラウト工法）は、固化工法の一つとして位置づけられ、図-2.1.1のように分類される。

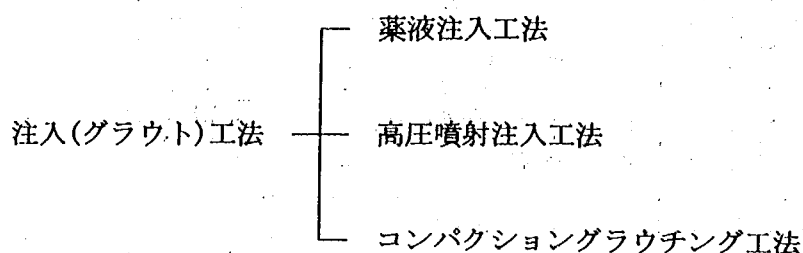


図-2.1.1 注入工法の種類

これらの工法は、機械的な規模や基本設備のほとんどは同じであるが、この中では、薬液注入工法は注入圧力が小さく、地盤の土の骨格構造の破壊を最小限に抑え、周辺地盤や既設構造物に最も影響が小さいのが特徴である。

薬液注入工法の設計・施工指針¹⁾では、「薬液注入工法とは、凝固する性質を有する化学材料（いわゆる薬液）を地盤中の所定の箇所に注入管を通じて注入し、地盤の止水または強度を増大させることなどを目的とする工法」と定義している。すなわち、注入材を土粒子間の間隙部へ浸透注入あるいは割裂注入することにより、改良範囲全体を固結させる工法である。

2.1.2 注入の形態

薬液注入工法において地盤中での、注入液の注入形態には以下のようなものがある。²⁾

(1) 浸透注入(permeation grouting)

地盤中の土粒子の配列を変えずに、粒子間の間隙に存在していた自由水やガスなどを追い出し、注入材で埋めて行く注入形態をいう。砂質土に対する注入のメカニズムの大部分がこれにあたる。

(2) 割裂注入（脈状注入 fracturing grouting）

注入圧力により、地盤が割裂し、その中に注入材が入り割裂脈を形成し、注入材が割裂脈と共に地盤中に伸びていく注入形態をいう。地盤内に侵入した注入材が地盤を局部せん断させることにより改良範

囲が拡大する。主には粘性土に対する注入形態となる。

(3) 割裂浸透注入(fracturing-permeation grouting)

砂質土では、割裂現象が生じると、注入面積が増加する。このときに割裂注入の末端部の注入圧力が低下するため割裂の進展は止まり浸透注入が行われる形態である。

(4) 境界注入(roofing)

相異なる2種類の土層が水平に堆積している場合、その注入の意図するものが浸透注入、割裂注入のどちらであっても、まず境界に板状に入っていく形態である。

(5) 昂上注入(uplifting grouting)

意識的にかなり広い範囲に水平に境界注入を行うことにより、その上の地盤と一緒に地表の構造物も持ち上げる形態である。一種のアンダーピニング工法となる。

以上が注入形態の概要であるが、基本となるのは(1)～(3)である。注入形態を左右する要因としては地盤条件、注入材等の諸条件があるが、最も重要なものは注入圧力の設定である。砂質土の場合、割裂注入(割裂浸透注入)は方向性のコントロールが困難なため、浸透注入が基本となる。図-2.1.2に土質と注入形態の関係を示す。

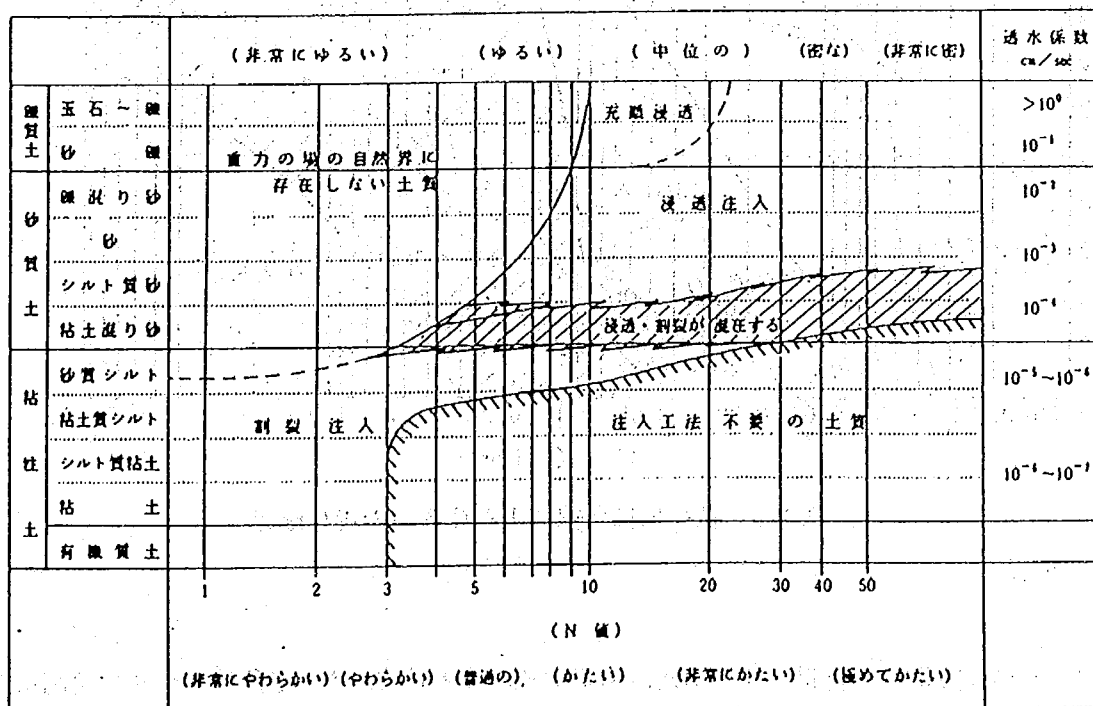


図-2.1.2 土質と注入形態¹⁾

注入材を圧入して地盤改良を行う場合に、土粒子の骨格構造は乱さずにその中の間隙水と置換することができれば地盤土本来の摩擦抵抗に加えて注入材の粘着力が加わることとなり、最も理想的な注入形態となる。特に懸濁液に関しては、既往の研究結果より、地盤土の粒径と注入材の粒径の大きさが注入形態に関係があるとされ、注入可能限界を示す値としてグラウトビリティー比 (groutability ratio、GR) が提案されている²⁾。懸濁型注入材の85%粒径 G_{85} と地盤土の15%粒径 D_{15} をそれぞれの最大代表径として、以下の式で表され、

$$\text{グラウトビリティー比} \quad GR = \frac{D_{15}}{G_{85}}$$

$GR > 2.5$ であればまず注入可能だが、 $GR < 1.1$ であれば注入不可能とされている。

他方、溶液型については、従来の経験から浸透注入が可能な地盤土の粒度限界をおおまかな粒径加積曲線として両者を同時に図-2.1.3のようにして描くことができる。

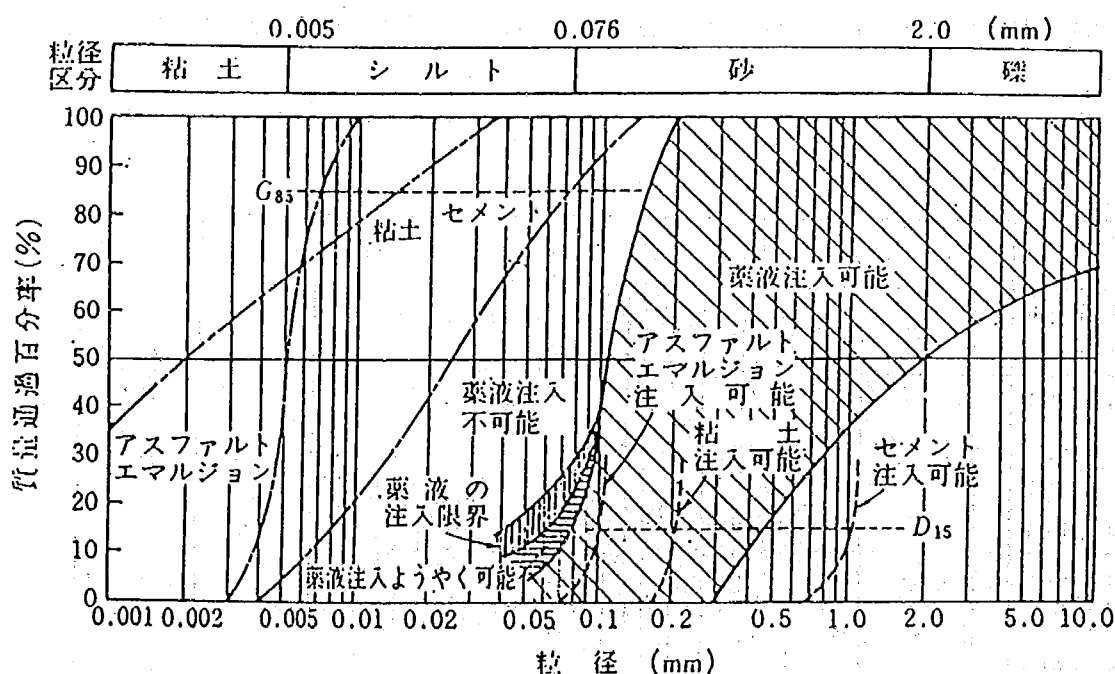


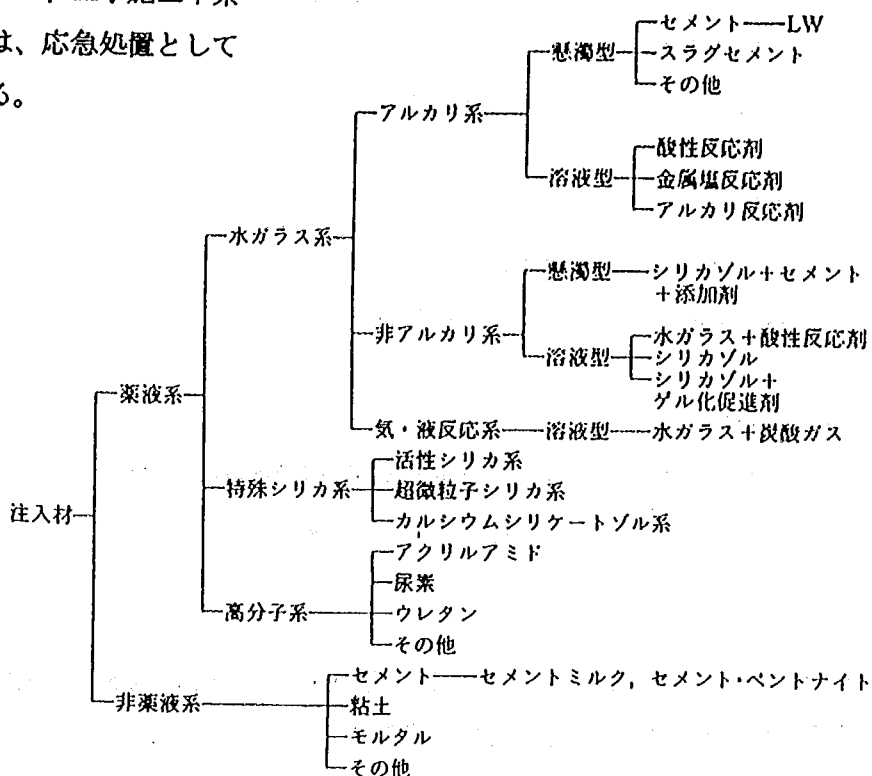
図-2.1.3 粒径加積曲線による注入材の適用限界²⁾

2.1.3 注入材の種類

注入材料の分類の仕方には、材料、反応形式、施工形式、注入目的、土質適用性、ゲル化時間などによる方法がある。このうち、材料による分類を表-2.1.1に示す。注入材は、非薬液系、薬液系に大きく分けられる。これらの材料のうち高分子系の使用は、昭和49年7月10日に建設省の「薬液注入工法による建設工

事の施工に関する暫定指針」により原則的に禁止されている。ただし、工事施工中緊急事態が発生したときは、応急処置としての使用が認められている。

表-2.1.1 注入材の種類³⁾



これらの注入材のうち代表的なものを以下に簡単に説明する。

①アルカリ系溶液型水ガラス（有機）

主剤に水ガラス（ケイ酸ソーダ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）溶液、反応剤に有機反応剤（グリチザール・エレングリコール・アセト・キシエチル etc）が用いられ、これらを混合することでゲル化する。水ガラスは強アルカリで、ゲル化時間の調節が容易である。

②アルカリ系溶液型水ガラス（無機）

主剤に水ガラス、反応剤に酸性反応剤（リン酸・炭酸水素ナトリウム etc），金属塩反応剤（塩化カルシウム・塩化ナトリウム・硫酸マグネシウム etc），アルカリ剤（アルミン酸アトリウム）などが用いられ、これらを混合することでゲル化する。ゲル化時間の調整は非常に困難である。ゲル化時間を遅らせると強度が低下する傾向にある。

③LW〔アルカリ系懸濁液型水ガラス（無機）〕

主剤に水ガラス、反応剤にセメント（最近では粒子が細かく浸透性の高い超微粒子セメントが用いられている）を用い、これらを混合することでゲル化する。Labiles Wasserglass（ドイツ語：不安定化した水ガラスという意味）を略してLWと呼ぶ。ゲル化時間はセメント量により決まる。

④シリカゾル（非アルカリ系溶液型水ガラス（無機））

主剤にシリカゾル、反応剤に促進剤（塩基性塩・酸性塩・水ガラス）が用いられ、これらを混合することでゲル化する。強アルカリの水ガラスを、アルカリを除去して酸性領域に調整するとシリカゾルになる。これにアルカリ性を呈する反応剤を加えるとほぼ中性領域でゲル化する。

⑤超微粒子シリカ（特殊シリカ系）

水ガラスのアルカリ分をイオン交換樹脂により除去したうえでシリカを増粒（粒径 $10\sim 20\mu\text{m}$ ）させ安定処理してある。これに添化剤を加えてゲル化させる。

⑥ウレタン（高分子系）

主剤のウレタンポリマーのイソシアネート基と地中の水が結合し、ウレタン樹脂が土中に形成される。公害問題等から「暫定指針」により現在は使用を禁止されている。

⑦超微粒子セメント

コロイドセメントの粒子（ $40\mu\text{m}$ ）よりさらに小さいセメント粒子を持つ。最大粒径 $10\mu\text{m}$ 、平均粒径 $4\mu\text{m}$ 、プレーン比表面積 $8000\sim 9000\text{cm}^2/\text{g}$ と非常に微粒である。

以上、代表的な注入材を挙げたが、多様な性質のものがあることが分かる。

この他に、一つの分類として液型によっても分かれる。懸濁液型はセメントやベントナイトなどの粒子が含まれる液で、地盤への浸透性はあまり高くなく、砂礫に対しては浸透注入が可能であっても、砂質土に対しては浸透注入は困難で脈状に注入されることが多い。

しかし、最近は超微粒子系のものができ、浸透性が高くなり砂質土に対しても使用されている。一方、溶液型は粒子形状のない液で、浸透性に優れているが、耐久性に欠ける面がある。

また、もう一つの分類としてゲル化時間による分類がある。注入工法、注入目的によってゲル化時間は設定されるが、ゲル化形態として瞬結型（ゲル化時間数秒単位）、急結型（ゲル化時間数分単位）、緩結型（ゲル化時間数十分単位）がある。浸透注入を行うには、ゆっくり時間をかけて行う方がよい。つまり、緩結型の注入材が有効である。

注入材を選定する場合、注入材の特性を十分把握した上で、注入目的、注入対象地盤の状況に応じて、安全性、施工性、経済性等を総合的に検討して選定を行うことが必要となる。

2.1.4 施工法の種類

(1)混合方式による分類

薬液注入では1液や2液を混合する注入材が用いられるが、それぞれゲル化時間が異なる。このため、注入材の性質により混合方式の分類ができ、次のように分けられる。

1) 1ショット注入(1液1系統式注入)

1ショット注入は所定の配合でミキサーに投入し、あらかじめ十分攪拌した後、1液の状態で圧送し注入する方式である。この方式は、セメント系注入材もしくは、ゲル化時間の長い(20分以上)注入材の注入に用いられる。

2) 1.5ショット注入(2液1系統式注入)

1.5ショット注入はA、B 2液を別々のミキサーに用意し、別々の注入ポンプにより別経路で圧送し注入管頭部で合流させ注入管を流下する間に混合させ注入する方式である。この方式は、注入材が注入管内で混合され、注入孔から流出し所定の注入範囲でゲル化しなければならず、ゲル化時間の調整が非常に困難である。

3) 2ショット注入(2液2系統式注入)

2ショット注入はA、B 2液を1.5ショット注入と同様に注入管頭部に圧送し二重管を用いて注入孔まで別々に圧送し、注入孔を出る瞬間に混合させるものと、A、B液を交互に圧送し、地盤中で混合させるものがある。ゲル化時間の非常に短い注入材に用いられる。

(2) 注入管形態による分類

注入工法では注入材の混合方式に適応するように、管路構成や注入モニターが工夫されている。
注入管の形式は大きく単管注入と二重管注入とに分けられる。表-2.1.2に薬液注入工法の種類を示す。

表-2.1.2 薬液注入工法の注入管形態による分類²⁾

注入管の構成	工 法 形 式	ゲル化時間	混合方式
単 管	単 管 ロ ッ ド	急 結	1.5ショット
	単 管 ストレナー		
二 重 管	二重管ダブルパッカー	緩 結	1ショット
	二 重 管 単 相	瞬 結	2ショット
	多 重 管 複 相	瞬結+急結(緩結)	2ショット+1.5(1)ショット

以下、工法概要を説明する。

1) 単管ロッド工法

単管ロッド工法は、ボーリングロッドをそのまま注入管として使用し、先端から注入する方法である。
施工順序を図-2.1.4に示す。ボーリング機械を用いて所定の深度まで削孔し、削孔水を注入材に切り換えて、ステップアップ（規定の注入時間後、規定の幅で引き上げる）で注入する。注入材の混合は、ロッドの上部にY字管を装着し1.5ショットによる。

この工法は、注入設備や作業が簡単であるが、注入材の全量がロッドの先端から吐出されるため注入抵抗が大きい上、パッカー作用が期待できずロッドに沿って地表に噴出したり、地層の弱線を通して流出したりすることが多く、現在ではほとんど用いられていない。

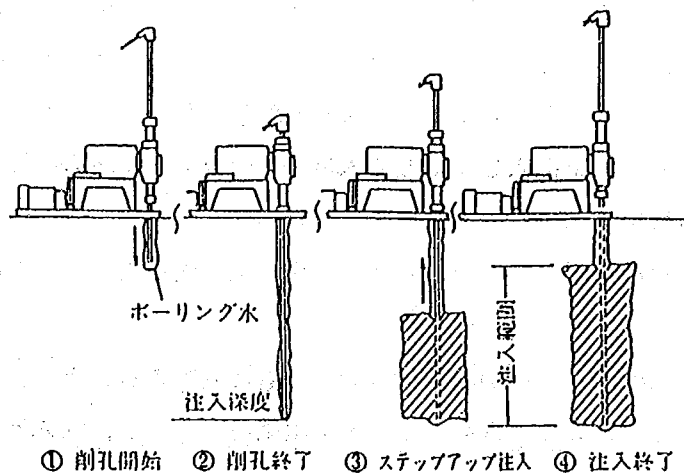


図-2.1.4 単管ロッド工法の作業手順²⁾

2) 単管ストレーナー工法 (ストレーナー工法)

単管ストレーナー工法は、削孔後多孔注入管 (ストレーナー管) を設置し、ストレーナーの各孔から注入する工法である。施工順序を図-2.1.5に示す。ボーリング機械を用いて所定の深度まで削孔し、ストレーナー管 (鋼管または硬質ビニル管) を建て込み、管内に砂またはホモゲルを充填する。次に、ストレーナー管と孔壁の間に粘土または注入材を充填しパッカーとする。そして、上方から注入ステップの間だけ管内を洗い出し注入を行う。以降、順次洗い出しと注入の作業を繰り返し、ステップダウンで注入する。注入材の混合は1.5ショット方式が標準となっている。

この工法は、注入管設置工と注入工が独立しているので複数本の注入を同時に行い、平面的に広域にわたって注入することが可能である。また注入材を多孔から分散して水平に吐出するため比較的均一に浸透しやすい。しかし、注入深度が大きくないことや手数がかかり過ぎることなどで今後の普及は望めない。

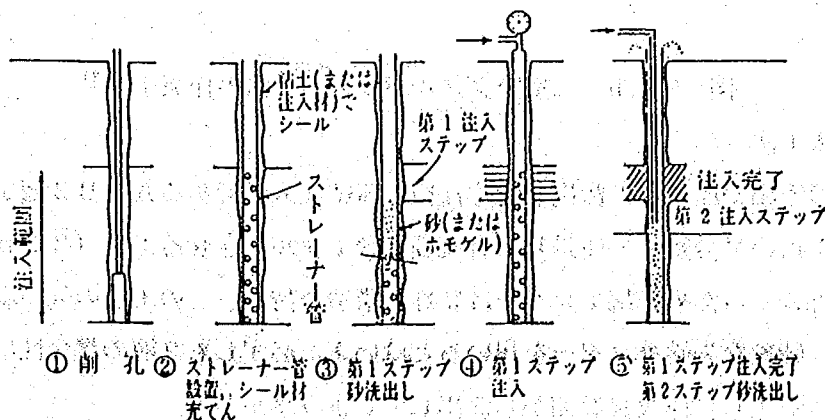


図-2.1.5 単管ストレーナー工法の作業手順²⁾

3) 二重管ダブルパッカー工法

二重管ダブルパッカー工法は、一定間隔（33cm）に注入孔を有しゴムスリーブで被覆した外管を地盤中に固定し、ダブルパッカーを装着した内管を所定の深度に挿入し、1ショット方式の注入材を圧送して注入を行う工法である。施工順序を図-2.1.6に示す。削孔後ケーシングパイプを建て込む。ケーシングパイプ内に注入外管を挿入し、その外周をシール材で充填し、ケーシングパイプを抜き取る。養生後、2段パッカーを装着した注入内管を挿入し任意の注入箇所セットし、注入を行う。また、不均一な地盤に長いゲル化時間の注入材を注入するときは、あらかじめセメントベントナイト液を一次注入して、地層の境界面、水みち、大きな空隙などを充填し地盤の均一化を図った後、二次注入で長いゲル化時間の注入材を注入する。

この工法は、任意の注入深度から、いかなる注入順序でも注入できる。また、各ステップを時間または注入材を変えて重複注入や、補充の注入を行うことが出来る。しかし、注入外管の埋め殺しや大きな径のボーリング機械が必要で、工費が他工法より割高となる。

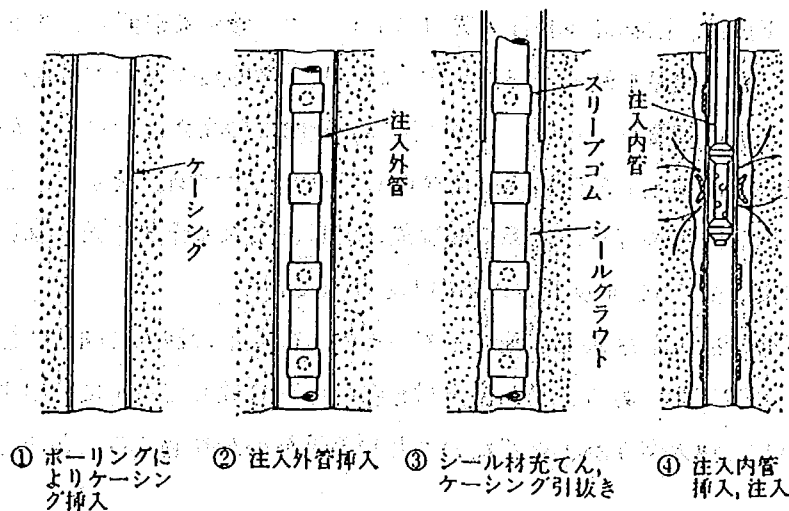


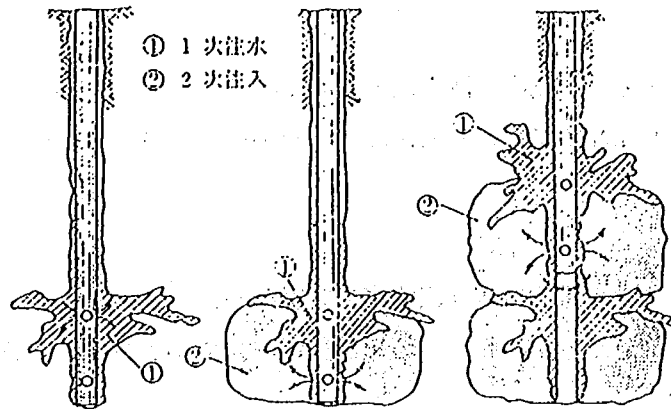
図-2.1.6 二重管ダブルパッカー工法の作業手順²⁾

4) 二重管単相注入工法

注入材の地上への噴出や遠方への流出を防ぐため、瞬結注入材であるA、B 2液を注入管先端の合流点直前まで二重管を用いて分離して圧送し、合流後数秒でゲル化させる工法（2ショット方式）である。2液を合流させて混合するため先端モニターは特殊な構造を持つ。この工法の改良範囲は狭く、止水等に用いる。しかし、特殊な先端モニターを用いるとはいえ、必ずしも2液の混合性は良好でなく、長いゲル化時間となる所が生じ目標改良範囲から流出してしまう事がある。

5) 多重管複相注入工法

この工法は、二重管ダブルパッカー工法の優れた浸透性と二重管単相工法のグラウトパッカー効果を結合させたもので、注入管に二重管または三重管ロッドを用いて、瞬結注入材を注入した後緩結注入材の注入を行う工法である。図-2.1.7に施工法を示す。



(a) 瞬結 1 次注入 (第 1 ステップ) (b) 緩結 2 次注入 (第 1 ステップ) (c) 第 2 ステップ注入

図-2.1.7 多重管複相注入工法の作業手順²⁾

2.1.5 薬液注入工法の使用機材

既設地中構造物上の施工用地は、多くの制約を受けることが考えられる。薬液注入工法は他工法とは異なり、施工機材設備が軽量小型であるため、これらの制約条件を満たすことができる。

図-2.1.8に注入機材の配置とシステムを示す。

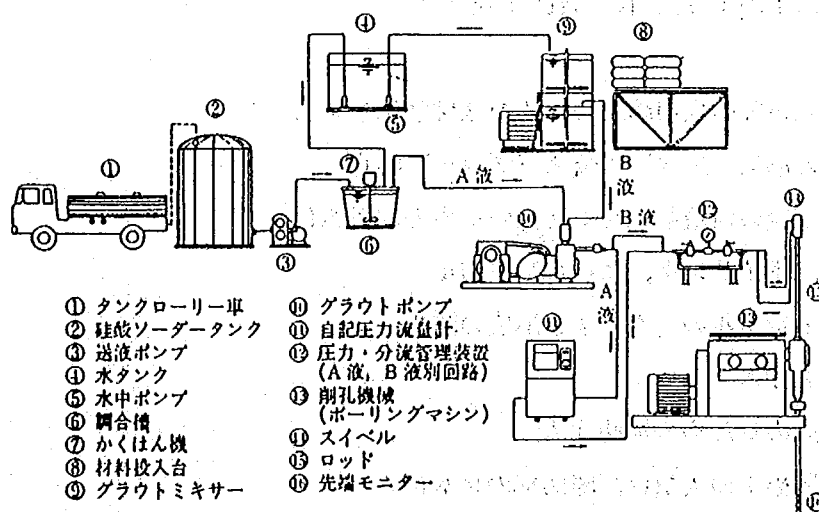


図-2.1.8 注入機材の配置とシステム²⁾

以下、薬液注入工法で使用する主な機材の概略を説明する。

(1) 削孔機械（ボーリングマシン）

注入孔の削孔や注入管の設置をするための機械である。

削孔と注入を一つで行うものと、削孔用と注入管建て込み用に別々に行う形式がある。

(2) グラウトミキサー

注入材を攪拌混合するミキサー機能と注入液を貯めて置くアジテーター機能を持つ。注入工法によって攪拌形式や機械形状が異なるが、どれもかなり軽量かつコンパクトで持ち運びや設置が容易である。

(3) 注入ポンプ

ミキサーからの注入材液を定量的に送り出すポンプである。

注入形式によって多少は異なるが、吐出量の微調整が容易で小容量のことが多い。

(4) 圧力・流量管理用機器

注入圧力・注入流量の管理を行うための機器。圧力計や流量計を備え、注入圧、注入量、注入時間も含め自記記録計を備えている。

(5) 他の設備

その他の設備・機材として、プラント周りは、電気設備、注入材貯蓄タンク、給水設備、排水設備などがある。施工箇所周りとして、注入ホース、ロッド、注入管などがある。

2.2 薬液注入工法の施工例

2.2.1 薬液注入工法の現在の用途

薬液注入工法は現在までに以下のように用いられている^{3) 4)}。

- (1) シールドの発進部と到達部の崩壊防止のための地盤強化と止水
- (2) シールド坑内の圧気の漏気（酸欠）や噴発（ブロー）防止
- (3) シールド掘削による地表の構造物の沈下防止のための地盤強化
- (4) シールド立抗の崩壊、ボイリング、ヒービング防止
- (5) 山岳トンネルや海底トンネルの湧水による崩壊の防止
- (6) 親杭横矢板工法の背面注入
- (7) 柱列工法の止水性を高めるための補助注入
- (8) 開削工事における土留め工の欠損部、離間部の止水補強
- (9) 土留め杭の撤去跡や埋め戻し箇所の空隙の充填と沈下防止
- (10) 構造物基礎などの支持力増強

以上のように、薬液注入工法は仮設的に利用される事が多く恒久的にはほとんど使用されていない。しかし、恒久的使用をする場合（10の場合など）には、セメント懸濁液が用いられている。

図-2.2.1、図-2.2.2、図-2.2.3、図-2.2.4に概略の施工図を示す。

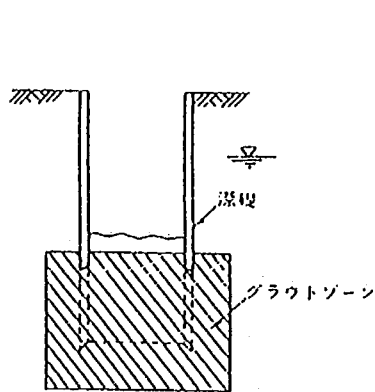


図-2.2.1 ボイリング防止⁴⁾

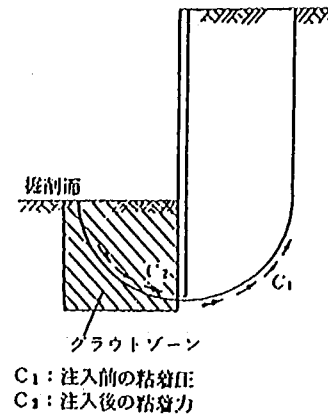


図-2.2.2 ヒービング防止⁴⁾

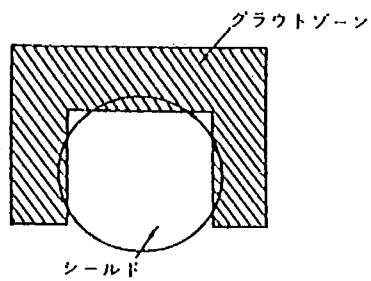


図-2.2.3 シールド掘削による地表面沈下防止⁴⁾

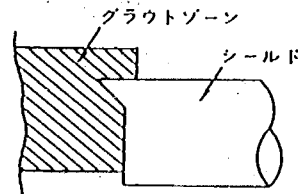


図-2.2.4 ブロー防止⁴⁾

2.3 薬液注入に関する既往の研究調査

2.3.1 調査目的

注入に関する既往の研究文献を収集し、グラウト特性（注入形態）、強度特性、浸透性（浸透距離）に関するものに選択・分類して内容をまとめた。さらに注入材料を強度特性、耐久性、浸透性の三つの観点から種類別に評価して、今回の研究目的の条件に合う注入材料の選定を行った。

2.3.2 対象文献

文献は、1986～1993の中で「土質工学研究発表会梗概集」「土木学会年次学術講演集」「土と基礎」「土木学会論文集」「Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ECSMFE)」「Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE)」「Proceedings of the American Society of Civil Engineering (ASCE)」等を対象とした。キーワードは「薬液注入」「グラウト」を主として抽出し調査した。

2.3.3 調査要領

キーワードを対象とした文献は約130編であった。その中で以下のことを考慮しながら文献を絞り込んでみた。

- i) 工法説明や施工管理方法の性格の強いものは除外
- ii) 注入後の効果確認方法が主なものは除外
- iii) 現場色（説明）の強いものは除外
- iv) 薬液及び注入の特性が挙げられているもの
- v) 薬液注入後の改良体の特性が挙げられているもの
- vi) 複数の薬液の諸特性が比較されているもの

2.3.4 調査結果

上記を考慮して絞り込んだ結果、33編となった。これらの文献の主な内容は以下の通りである。

・浸透及び割裂注入について	9編
・薬液（3液以上）の比較（強度、透水性、浸透性）について	4編
・注入後の液状化について（振動実験）	5編
・長期安定性について	10編
・填充率について	4編
・供試体養生について	3編
・固結土の変形特性について	5編
・薬液の浸透性について	8編

注）文献内容においては重複するものあり

この内容を、大きく分けると3つに分類される。

- ・ 注入特性について（注入材の充填率や、注入時の特徴）
- ・ 固結土の強度特性について
- ・ 砂質土への浸透性について

以下、これらの文献を上記の分類に従いまとめてみることにする。

(1) 注入特性について

砂質地盤の改良を目的とする薬液注入では、砂粒子骨格が変化せず間隙が薬液で置き換えられることが浸透注入の前提（本研は液状化対策に注入を用いるので、割裂注入まで注入形態を広げることとする）である。この事に関して

- ・ 注入速度（流量）および注入圧
- ・ 薬液の間隙間充填率

などが注入形態を支配したり、注入後の固結土の強度や変形特性に大きな影響を与えたりする。よってこれらを主とした注入特性を記した文献を選定してみた。文献名とその内容を表-2.3.1にまとめて示す。

以下にそれらの要点をまとめてみる。（参考に表-2.3.1の文献番号を文末に示す）

- 1) 注水試験を行い、注入速度を決定する。（浸透注入速度の決定）①②
- 2) 充填率と強度・充填率と透水係数より最低でも40%の充填率が必要。③
- 3) 注入において、浸透注入段階・穿孔的浸透注入段階・割裂注入段階に分かれる。④
- 4) 標準注水試験よりp-q曲線を求め、これより割裂発生注入速度を求めることができる。⑤
- 5) 割裂発生注入速度の3倍までは、良好な固結形状ができる。⑦
- 6) 比表面積とホモゲル強度から一軸圧縮強度を求める式がある。⑧
- 7) ホモゲル強度と固結砂強度には相関性がある。⑧
- 8) 混入率2%のセメント懸濁液を用いて改良した場合液状化状態に達しない。⑨
- 9) 注入固結地盤の振動実験において、過剰間隙水圧係数 $rud=0.5$ を下回ると液状化が発生しない。⑩
- 10) 土層が不均一な場合、良好な固結状況に固結させる場合には、ゲル化時間の短い薬液が適している。⑪
- 11) 超微粒子セメント懸濁液はグラウト比 $GR=8$ においても浸透可能である。⑬
- 12) 懸濁液は、水の浸透速度よりグラウトの浸透速度が遅くなり、浸透範囲が注入量と比べ小さくなる。⑮
- 13) 割裂面積は、透水係数、N値、土被り圧に影響される。⑯
- 14) 限界注入速度の概略値を知ることは可能である。⑯

表-2.3.1 注入特性に関する研究 (No. 1)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
①	砂湿度の注入形態に及ぼす注入の影響に関する考察 (その2) 第27土質工学研究発表会 1992.6	垂水 尚志 関根 悦夫 荒木 進 岩佐 弘 関口 智之	(財)鉄道総合研究所 ライト工業(株)	実験土層 (5x4x5m) 注水試験 注入法: 二重管ダブル パッカー工法	溶液型ロングゲルタイム (60min) 鬼怒川砂 日光8号砂	注入前に注水試験を行いこれより注水速度を決定しそれをもって注入し掘削目視観察をしている。
②	薬液注入の注入速度が 注入形態に及ぼす影響 鉄道総研報告 vol16 No7 1992.7	垂水 尚志 関根 悦夫	垂水研究室	小型土槽実験 大型土槽実験 注入試験	緩結性溶液型 (ロングゲルタイム) 7号珪砂	注水速度を変化させ、注入速度と注入圧力の関係を求め割裂注入時の注入速度を求めている。 掘削し目視観察をしている。
③	薬液注入地盤における 注入材の分布と効果 土と基礎 35-5(352) 1987.5	川地 武 喜田 大三	(株)大林組 技術研究所	現場実施工からの サンプリング インナーロード工法 二重管瞬結工法 複合注入工法 ダブルパッカー工法	シリカゾル系 溶液型有機系	非晶質珪酸の含有量より填充率を算出する。 填充率と工法・填充率と強度・填充率透水係数より最底でも40%の填充率が必要。
④	ゲル化時間の短い急結 ・瞬結性薬液地盤における 注入固結形態とその支配条件 土木学会論文集代406号/Ⅲ-I1 1989.6	森 麟 田村 昌仁 原口 賢一	早稲田大学 建設省 建築研究所 大成建設(株)	室内実験 φ80x100cm 注入試験	水ガラス系 瞬結溶液 急結溶液	急結・瞬結と緩結薬液を用い透水係数kの異なる砂質土を使用し浸透注入限界を知ろうとしている。 瞬結薬液について注入圧に及ぼす注入速度、経過時間砂の透水性の影響について述べている。 注入状況において、浸透注入段階・穿孔的浸透注入段階・割裂注入段階の三段階に分かれる。
⑤	ゲル化時間の長い薬液の 砂質地盤における 注入形態とその支配 土木学会論文集第388号/Ⅲ-8 1987.12	森 麟 田村 昌仁 森山 健吉 芝本 真尚	早稲田大学 建設省 建築研究所 佐藤工業(株)	室内試験 φ47x50cm 注入試験	薬液の変わりに水 豊浦砂: 稲荷砂 重量比混合 7 : 3 8 : 2 5 : 5	注入圧・注入量関係に及ぼす砂の透水性と拘束圧の影響。 注入量qと有効注入圧pの関係より割裂の進展と停止砂の透水係数が大きいと割裂が容易に進展しないので有効注入圧が拘束圧より大きくなっても浸透が可能である。
⑥	注入固結土の強度に影響を及ぼす 要因について基礎的実験 第27回土質工学研究発表会 1992.6	熊谷 浩二 高橋 則雄 所 武彦 柳澤 栄司	前田建設工業 日本総合防水 東北大学	室内試験 φ50x500mm 一軸圧縮強度試験	水ガラス系溶液型 ゲルタイム10min	注入圧と一軸圧縮強度の関係 全注入量と一軸圧縮強度の関係 注入供試体の相体密度と一軸圧縮強度の関係 注入供試体の注入填充率と一軸圧縮強度の関係

表-2.3.1 注入特性に関する研究 (No. 2)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑦	実地盤での薬液注入、掘り出し実験 による適切な注入速度の調査研究 土木学会論文集第388号/Ⅲ-8 1987.12	森 麟 田村 昌仁 森山 健吉 芝本 真尚	早稲田大学 建設省 建築研究所 佐藤工業(株)	現場試験 (試験注入) 複相式二重管ロッド 注入	瞬結性薬液 9 緩結性薬液 100	標準注水試験より p-q 曲線を求めそれより割裂発生 注入速度を求めその 1, 3, 10 倍の注入速度で、注 入固結状態を見ている。 割裂発生注入速度の 3 倍までは良好な固結形状が出来る。
⑧	水ガラス系薬液による固結砂の 一軸圧縮強度試験推定の可能性 土と基礎 34-8(343) 1986.8	加賀 宗彦	東洋大学	室内試験 一面せん断試験 一軸圧縮強度試験	有機系水ガラス シリカゾル 活性シリカ 超微粒子シリカ	ホモゲルと固結砂には相関性がある。 比表面積とホモゲル強度から一軸圧縮強度を求める式 $RS = RG (1 + K s)$ RS : 注入固結砂の一軸圧縮強度 RG : ホモゲルの一軸圧縮強度 K : ホモゲルの一軸に左右される係数 S : 砂の比表面積
⑨	セメント懸濁液を用いた液状化 対策に関する振動台実験 第 27 会土質工学研究発表会 1992.6 その 1 要素試験による液状化特性 その 2 平坦地盤を想定した 振動台実験 その 3 傾斜地盤を想定した 振動台実験	森 利弘 渡辺 則雄 濱田 尚人	熊谷組 技術研究所	室内試験 繰返し三軸試験 振動台実験 土槽 (平坦) 振動台実験 土槽 (表面を傾斜させ る・改良部形状はひし 型及び台形)	普通ポルトランド セメント 豊浦標準砂	セメント懸濁液の水セメント比 w/c は 1500% 前後。 (セメント量 1, 2%) 繰返しせん断を行い液状化傾向を見る。 その 1 を発展させ振動台上に改良地盤と未改良地盤を 作成しそれを発展させ過剰間隙水圧の上昇、改良地盤 の変形ともなう動的せん断剛性の簡易的な評価。 改良地盤は液状化しない。 改良地盤は地震力入力による大ひずみが発生しても剛 性は残る。 混入量 2% のセメント懸濁液を用いて改良した場合液 状化状態には達しない。 ひし形状に改良を行うより台形に改良を行った方が改 良部に作用する流動力が小さい。

表-2.3.1 注入特性に関する研究 (No. 3)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑩	超微粒子シリカ系グラウト材による 注入固結砂の諸特性 第27回土質工学研究発表会 1992.6	伊藤 孝男 佐伯 吉勝 吉田 明利	東北工業大学 日産化学工業	室内試験 0.5x0.5x0.5m注入槽 一軸強度圧縮試験 透水試験 乾湿繰返しによる試験 室内注入浸透固結試験 現場試験 現場注入浸透固結試験	シリカゾル	土中(湿潤状態)において固結差の強度劣化は起こりにくいが、空气中にさらすことにより強度劣化が徐々に進行する。 気乾状態の地盤では、地盤内の空気間隙中に薬液が自重で下部に浸透する。 湿潤状態地盤では、注入薬液が土中の水を排除しながら浸透し球状になる。 注入固結地盤の振動試験において、動的過剰間隙水圧係数 $r_{ud}=0.5$ を下回っていることにより液状化が発生しない。
⑪	不均一地盤における溶液型薬液の 注入状況の支配条件 (その1) 第24回土質工学研究発表会 1989.6	森 麟 青木 康司 佐藤 洋一 田村 昌仁	早稲田大学 建設省 建築研究所	室内試験 モールド内に珪砂の不 均一な層を作成	水ガラス系溶液型 緩結型・中結型 瞬結型 珪砂3, 5, 7号	土層が不均一性の場合に良好な固結形状に固結させる場合、ゲル化時間の短い薬液が速し、透水性の高い砂層だけを固結させるにはゲル化時間の長い薬液を用いるのが有効的である。 砂層が不均一でも浸透注入になる場合には、注入圧による土中土圧の増加は少ない。
⑫	Injection of Fine Sands With Very Fine Cement Grout. Journal of Geotechnical Engineering Vol115 No12 1989.12	S. Zeboritz R. J. Krizek D. K. Atmatzidis	Harza Envir Services Northwestern Univ Univ of Patras	室内試験 透水試験	MC-500 普通ポルトランド セメント	水セメント比と粘性の関係。 水セメント比別沈降分離特性の関係。 細粒分(0.074mm)が5%までの砂は注入に速する。
⑬	Microfine Cement Grout Strengthens Foundations Concrete-International 1986.10	E. Winter W. J. Carke J. W. Guthrin		現場施工 一軸圧縮強度	超微粒子セメント 珪酸ナトリウム 懸濁液	他材料との粒土、強度比較。 0.3mステップごとに144注入している。 MCを選んだ理由など。
⑭	砂質地盤における割裂発生機構 土木学会論文集 第383号/III-8 1987.12	森 麟 田村 昌仁 千柄 植	早稲田大学 漢陽大学	室内割裂試験装置	水ガラス系溶液	固結砂と未固結砂を用いて割裂の発生圧を求めている 透水係数や粘性による割裂への影響 割裂圧は $P'f = m \cdot \sigma'_v + \sigma'_v + R$ で表される m : 定数 σ'_v : 有効側圧 σ'_v : 引張強度 R : 亀裂進展抵抗

表-2.3.1 注入特性に関する研究 (No. 4)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑮	砂地盤における懸濁型注入材の注入状況に関する実験的研究 (その1) - 浸透状況に及ぼすグラウタビリティー比と注入材の種類の影響 - 第28回土質工学研究発表会 1993.5	萩野 拓哉 清水 和也 田村 昌仁 他二名	(株)中研コンサルタント 大阪セメント建設省 建築研究所	直径50cm×高さ50cmの三軸注入装置への注入試験	超微粒子セメント 微粒子セメント 普通ポルチランドセメント 珪砂3,5,6,7号	グラウタビリティー比を変えた場合の懸濁液の注入状況を把握した。 GR=8では超微粒子セメントのW/C=800%が浸透可能であったが、水の浸透速度よりも注入材の浸透速度が遅くなり浸透範囲が注入量と比べ小さくなる。
⑯	薬液注入における限界注入速度 q_{cr} の概略値推定法について 土木学会第48回年次学術講演会 1993.9	森 麟 入谷 剛 林 忠	早稲田大学	現場注水試験からの解析		割裂面積は透水係数、N値、地盤拘束圧に支配される また、上記の数値を用いればここで求めた図より限界注入速度の概略値が予測できる。
⑰	砂質土における薬液注入固結体の形状と填充率の分布に関する室内実験 土木学会第48回年次学術講演会 1993.9	熊谷 浩二 須藤 良清 柳澤 栄司	前田建設工業 東北大学	直径30cm×高さ30cm土槽への注入	水ガラス系溶液型 珪砂6号	相対密度と注入圧の関係 注入固結体の体積と強度の比較 化学分析による填充率の分布による評価

(2) 固結土の強度特性について

注入された薬液によって地盤がどのように強化されるかは、薬液注入に求められる最も重要な特性の一つである。薬液を地盤に注入して固結して得られた強度は、地盤の性状、薬液の浸透性状さらには薬液の種類等により大きく変わる。

ここでの文献は、薬液を何種類か使用して強度特性を比較したものと、薬液は一種類ではあるが強度特性がはっきり著してあるものを選定した。抽出した文献名とその要点を表-2.3.2にまとめて示す。

前記と同様、主な概略をまとめてみる。(参考を表-2.3.2の文献番号を文末に示す)

- 1) 水ガラスを主体にした薬液注入は、長期において一軸圧縮強度は半分に低下する。①
- 2) 有機・無機系溶液型緩結液においては、一軸圧縮強度の半分の強度であれば、クリープ変形量も破壊時間も小さくなる。①
- 3) 間隙が注入材によって充填されると地盤の剛性は増す。②
- 4) 破壊歪みと変形係数より充填効果が現れるのは40%前後である。②
- 5) 水ガラス・セメント系のホモゲルは、流水養生の方が定水養生に対して長期強度が劣化する。③
- 6) 水ガラス系薬液注入固結土は、ゲルの不透水性のためせん断変形は非排水状態で生じる。⑥
- 7) 水ガラス系薬液注入固結土は、固結中の砂の摩擦抵抗がなく強度が劣化する。⑥
- 8) 水ガラス系薬液注入は、拘束圧の大きい深部では効果がマイナスになる。⑤
- 9) シリカゾル・超微粒子シリカは、溶脱は極めて小さく長期にわたって強度を保持する。⑦
- 10) 超微粒子シリカは、経時的収縮もなく強度も長期にわたって保持する。⑦
- 11) 無機系水ガラス溶液は溶脱がかなり生じ、強度低下が著しい。⑦⑧
- 12) シリカゾル系は、長期強度は低下しない。(横ばい傾向にある) ⑦⑩
- 13) 砂粒子が小さい(表面積が大きい)場合、注入材の付着面積が大きくなるため強度が大きくなる。⑫
- 14) 超微粒子セメントは、材令が追うごとに強度が増し高強度を得られる。⑧
- 15) 超微粒子シリカは、強度は長期的に上昇傾向だが強度発現がやや小さい。⑧
- 16) 超微粒子LWは、強度発現は大きいが経時的な伸びはなく低下する傾向にある。⑧
- 17) 懸濁液型注入材は、溶液型注入材に比べ高強度が得られる。⑨
- 18) 地盤強化には、長いゲルタイムのものが有効である。⑫
- 19) シリカゾルは、長期的なクリープ変形に関して有効である。⑬
- 20) サンドゲルは、砂に比べ大きなせん断強度を持ちかつ引張強度がある。⑬
- 21) 注入固結砂は、内部摩擦角の変化は少なく、粘着力が増加するだけである。⑬
- 22) 緩い注入固結砂の動的変形特性は、密な砂に類似している。⑬
- 23) 固結砂は、未固結砂に比べ大きなせん断強度をもち、かつ引張強度がある。⑬
- 24) 固結砂は、注入率を増やすと土の見かけの粘着力が増加する。⑬

ここで、強度特性について上記文献内の主なグラフを抜粋して図-2.3.1～図2.3.9に示す。

① 各種注入材の一軸圧縮強さと材令の関係

図-2.3.1より、溶液型 (GS1, GS2, 超微粒子シリカ, ウレタン) では材令7日目から一軸圧縮強さは発現が止まるか減少しているが、懸濁液 (超微粒子セメント, 超微粒子LW) では材令91日目でも強度発現は止まっていない。

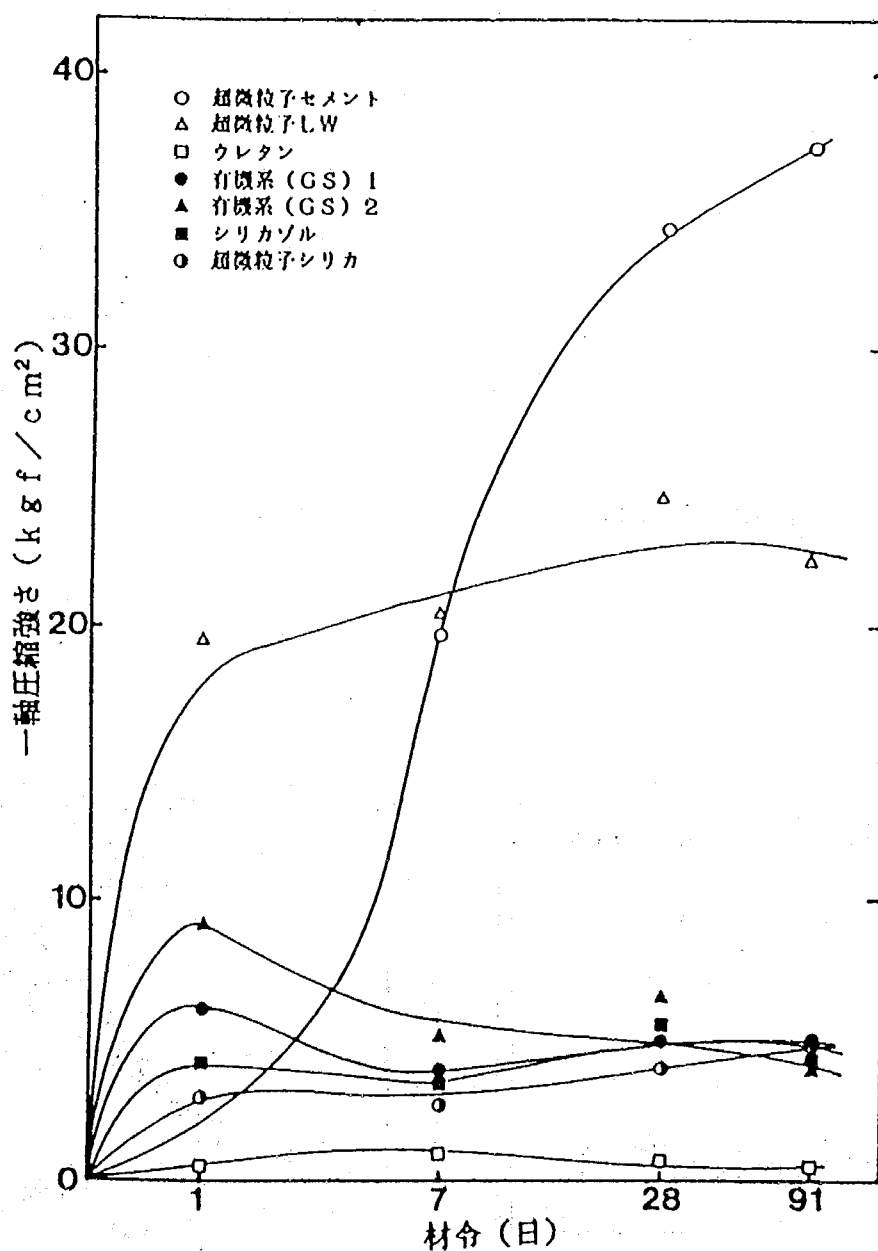


図-2.3.1 一軸圧縮強度と材令の関係⁵⁾

② 各種注入材における養生時間と強度等の関係

図-2.3.2~2.3.5より、長期強度において超微粒子セメント・超微粒子シリカは増加傾向にあり、水ガラス系の溶液は軒並み減少傾向にあることがわかる。

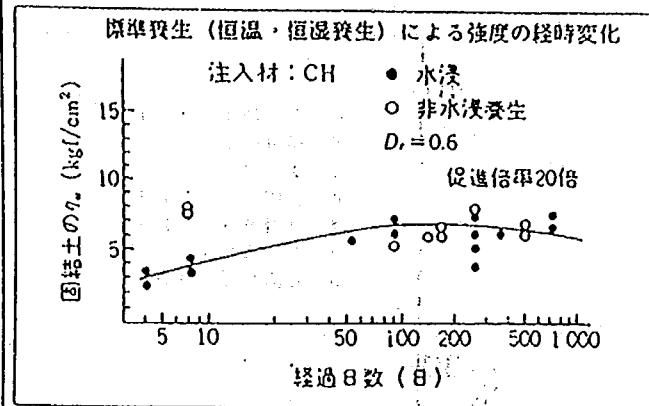
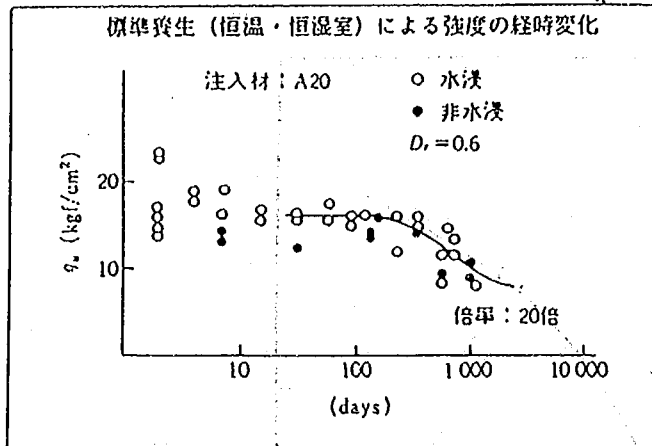


図-2.3.2 アルカリ系水ガラス(有機)⁶⁾

図-2.3.3 シリカゾル系⁶⁾

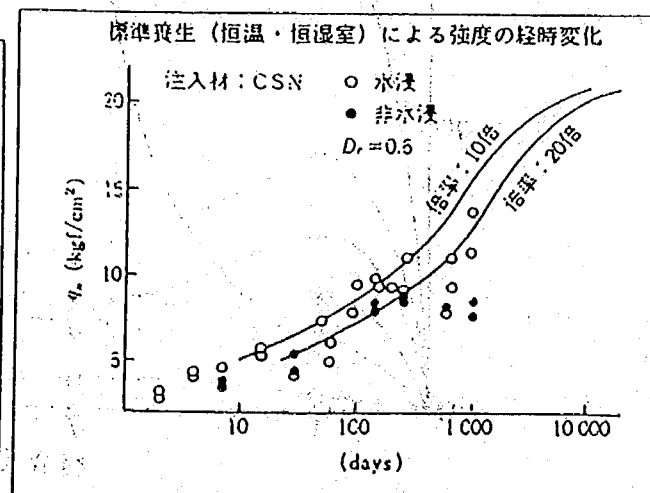
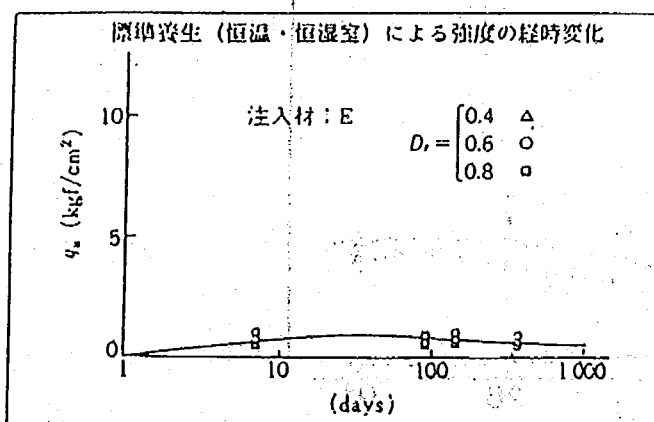


図-2.3.4 アルカリ系水ガラス(無機)⁶⁾

図-2.3.5 超微粒子シリカ⁶⁾

また、耐久性の比較の中で SiO_2 の溶脱率を表したのものや、ホモゲルの体積変化率を表したものなどがある。これらも重要な特性なので代表的なものを図-2.3.6、図-2.3.7に示しておく。

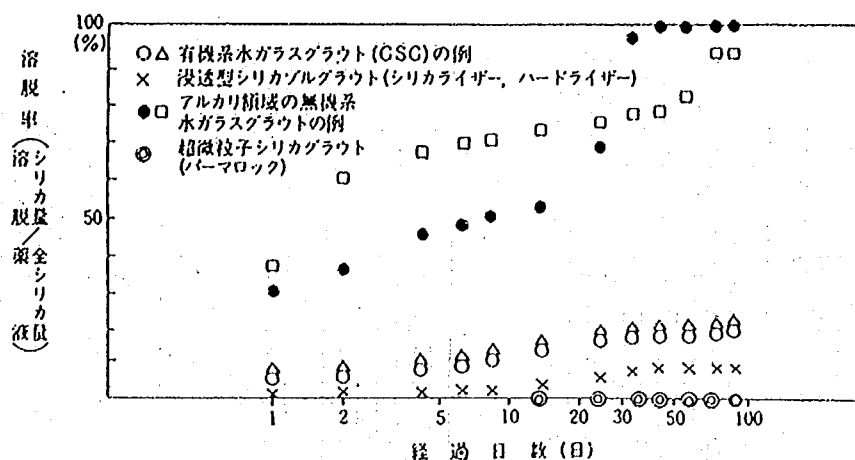


図-2.3.6 長期における SiO_2 の溶脱率³⁾

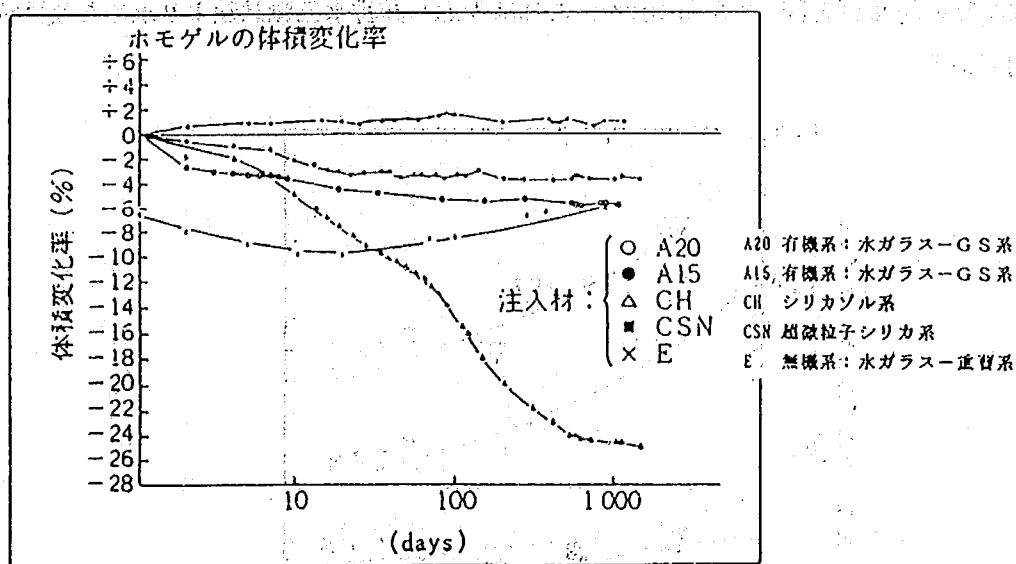


図-2.3.7 ホモゲル体積変化率⁶⁾

これらの図を見て、溶液型においてはシリカゾル系の性質が特に優れていることが分かる。

③ 静的・動的三軸試験についての結果例

静的三軸圧縮試験の結果例を図-2.3.8に示す。これは、圧密排水（CD）三軸圧縮試験の結果例である。砂や注入材が変わっても、傾向としては、内部摩擦角 ϕ は未固結砂とほとんど変わらず、粘着力 C だけが増加している。

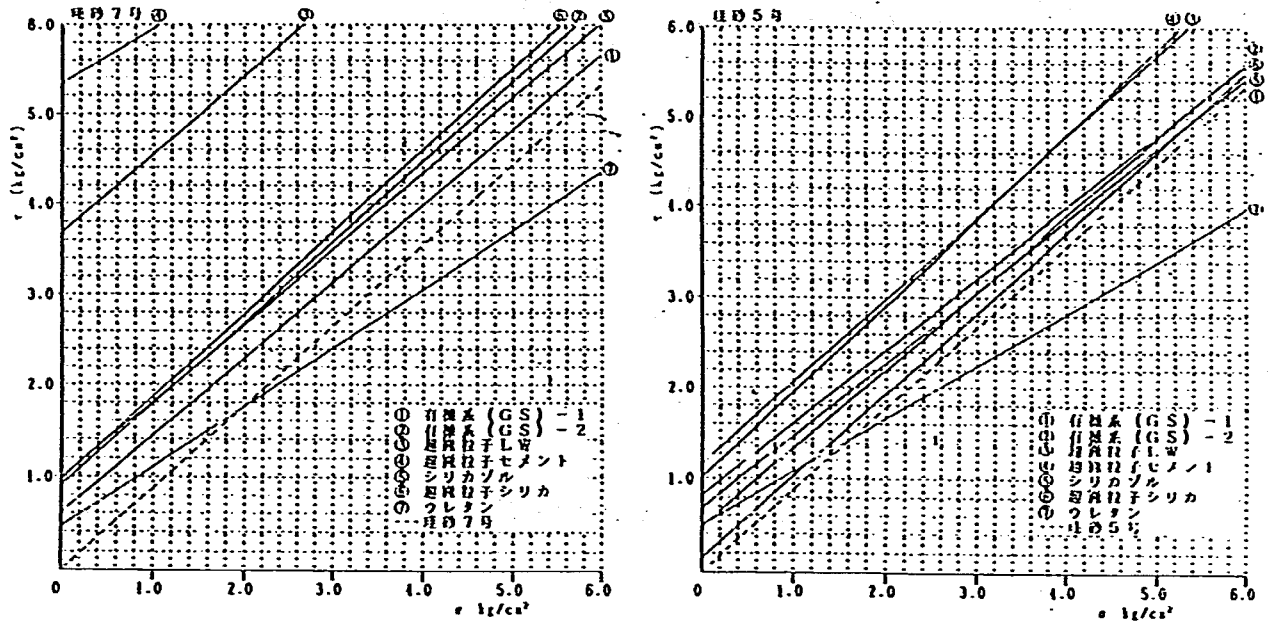


図-2.3.8 静的三軸圧縮試験の結果例⁵⁾

動的三軸圧縮試験の結果例を図-2.3.9に示す。これは繰返し非排水三軸試験より求めた超微粒子セメント懸濁液の結果例である。

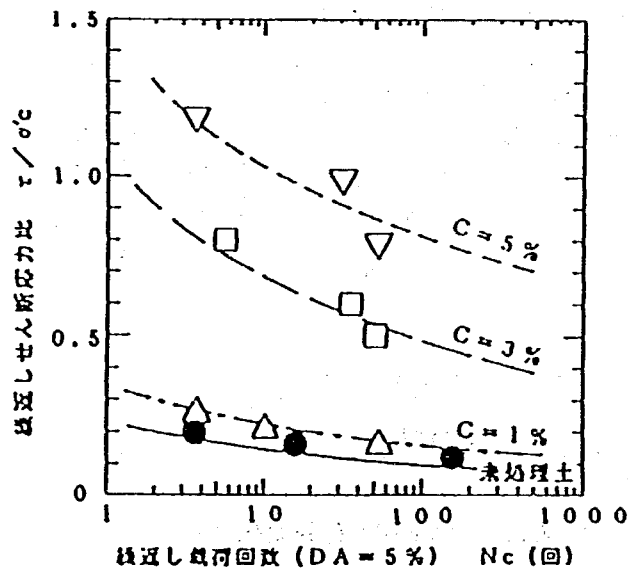


図-2.3.9 動的三軸圧縮試験の結果例⁷⁾

固結砂は、未固結砂に比べ液状化強度が増加する。また充填量（ C :セメント添加率）を大きくすると一軸圧縮強さとともに液状化強度も大きくなり、液状化対策としては有効であると思われる。

表-2.3.2 固結土の強度特性に関する研究 (No. 1)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
①	薬液注入材の長期耐久性について 第18回土質工学研究発表会 1981.6	桧垣 賢司 内藤 清司 山田 邦光	大成建設 技術研究所	室内実験 供試体(φ5x10cm) 長期一軸圧縮試験 クリープ破壊試験	有機系緩結型溶液 シリカゾル 無機系緩結型溶液	長期耐久性 水ガラスを主体にした薬液注入材は一年養生で一軸圧縮強度は約半分に低下する。 クリープ性 一軸圧縮強度の半分程度の強度であれば、クリープ変形量も小さく破壊時間も著しく長い。
②	注入地盤の強度特性について 第27会土質工学研究発表会 1992.6	土井 博己 藤沢 一	東日本旅客 鉄道(株)	現場サンプリング 一軸強度圧縮試験 二重管ロッド複合注入	水ガラス系(有機系) 緩結液及び瞬結液	サンプリングより、填充率を化学分析で求め一軸圧縮強度との関係を調べている。 間隙が注入材によって充填されると地盤の剛性は増加するが、破壊歪みと変形係数では充填効果が表れるのは、充填率40%前後である。
③	水ガラス・セメント系ホモゲルの水中養生における、一年間の強度、安定性の経時変化に関する一考察 土木学会第42回年次学術講演会 1985.9	木次 恭一 久保田清三 花田 行和	小野田ケミコ 佐藤工業(株)	室内試験 供試体(φ5x10cm) 一軸圧縮強度試験	珪酸ソーダ・ セメント系 セメント:ホモグラントセメント スラグセメント	供試体養生を定水と流水にした。 強度的にはスラグ系セメントが大きいし、低下も少ない。 流水養生の方が定水養生に対して長期強度が劣化する(ホモゲルからのイオン溶脱)
④	注入薬液による固結砂の強度特性 土木学会論文集大364号/Ⅲ-4 1985.12	米倉 亮三 加賀 宗彦	東洋大学	室内試験 一軸圧縮強度試験 三軸圧縮試験 Brazilian試験 供試体(φ5x10cm)	アルカリ懸濁液型 セメント水ガラス 溶液型 有機型水ガラス シリカゾル水ガラス 珪砂と標準砂	引張力及び圧縮力領域の範囲において破壊基準にあてはめている。 引張～圧縮の破壊基準を定める。
⑤	薬液注入による砂の 強度特性の劣化について 土木学会年次講演会	森 麟 武田 安敏	早稲田大学	室内試験 非圧密非排水三軸圧縮 試験 供試体(φ5x10cm)	水ガラスを主とした 硬化材がアルテヒド 系とアクリルアルマ イト 相馬・豊浦標準砂	薬液と混ぜたものと単一の砂質の場合のせん断応力、変形係数E ₀ の比較実験。 薬液注入は、土の拘束圧の小さい所において効果は大きいが拘束圧の大きい深部では、効果がマイナスになる場合がある。

表-2.3.2 固結土の強度特性に関する研究 (No. 2)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑥	薬液により固結させた 砂の強度変形特性について 土木学会年次講演会	森 麟 丸山 隆司	早稲田大学	室内試験 供試体 (φ5x10cm) 非圧密非排水三軸圧縮 試験 三軸伸張試験	水ガラスを主材とし た硬化材がアルテヒ ド系	圧縮・伸張・密度等を固結土と砂で比較している。 砂は排水状態でせん断 (排水せん断) するのに対して 薬液注入固結土は、ゲルの不透水性のために非排水状 態でせん断となっている。 薬液注入固結は、ダイレイタンシーによる負の間隙圧 が発生しないような場合固結中の砂の摩擦抵抗がなく 強度劣化となる。
⑦	薬液注入における長期耐久性の研究 土木施工32巻2号施工研究 1991.2	米倉 亮三 加賀 宗彦 島田 俊介	東洋大学 強化土 エンシニアリング	室内試験 一軸圧縮強度試験 供試体 水浸養生 非水浸養生	水ガラス系; アルカリ系 無機系: 水ガラス- 重曹系 有機系: 水ガラス- GS系 非アルカリ系 シリカゾル 超微粒子シリカ	固結土の長期強度とホモゲルの長期的性質をまとめて ある。 シリカゾルは、シリカ溶脱はきわめて小さく長期に渡 って強度を保持する。 超微粒子シリカは経時的な収縮もなく強度も長期に渡 って増加する。 有機系は溶脱がかなりある。
⑧	各種注入材を用いた注入実験(その1) —一次注入供試体の物性— 第27回土質工学研究発表 1992.6	森川 義人 江部 利信 清水 和也 広井 恵二 小野寺誠一	(株)青木建設 大阪セメント(株) 東急建設(株) 建設省 土木研究所	室内実験 供試体 (150,930mm) 一軸圧縮強度試験 透水試験 三軸圧縮試験	有機系 (GS) - 1 有機系 (GS) - 2 超微粒子LW 超微粒子セメント シリカゾル 超微粒子シリカ ウレタン 珪砂7号	各材料の長期一軸圧縮強度試験・透水性・内部摩擦角 粘着力について比較している。 懸濁型の方が長期安定性がある。(高強度を得られる) 有機系の場合は残留応力が徐々に減少する。
⑨	各種注入材を用いた注入実験(その2) —大型土層注入実験— 第27回土質工学研究発表 1992.6	高橋 朋久 後藤 年芳 国村 省吾 広井 恵二 小野寺誠一	大阪セメント(株) (株)青木建設 東急建設(株) 建設省 土木研究所	室内試験 モールド(φ1000 x1300mm) 一軸強度圧縮試験 透水試験	有機系 (GS) - 1 有機系 (GS) - 2 超微粒子LW 超微粒子セメント シリカゾル 超微粒子シリカ ウレタン 珪砂5号・7号	超微粒子シリカ・GS-1・GS-2は、水平距離・ 上中下の違いによつての強度さは小さい。 超微粒子セメント・LWは、高強度が得られるが水平 方向に離れるにつれ強度が低下する。(長期には安定)

表-2.3.2 固結土の強度特性に関する研究 (No. 3)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑩	超微粒子シリカ系グラウト材による 砂質土の固結効果について 第26回土質工学研究発表会 1991.7	伊藤 孝男 佐伯 吉勝 吉田 明利	東北工業大学 日産化学工業	室内試験 供試体 (φ5X10cm) 一軸圧縮強度試験 三軸圧縮試験 透水試験	水ガラスー 重炭酸ソーダ シリカゾルー無機塩	水ガラス系とシリカゾル系の長期的な比較。 水ガラスは28日以降に強度の低下傾向を示している のに対し、シリカゾル系は水ガラス系に比較して約3 倍の強度を示し増加を続けている。 水ガラス系はSiO ₂ が溶脱するため透水性がよくな る。 粘着力Cと養生日数・内部摩擦角と養生日数の関係。 浸透性にもついて少し述べている。
⑪	水ガラスの耐久性について 第24回土質工学研究発表会 1989.6	所 武彦 高橋 則雄 奥村 英二	日本総合防水 日産化学工業	室内試験 一軸圧縮強度試験 透水試験	無機アルカリ系 水ガラス 有機アルカリ系 水ガラス 酸性・中性 シリカゾル	中性シリカゾルが強度が増大するという他にはない特 性を表した。 水ガラス系は、経年変化から初期強度と3.5倍もの開 きがある。
⑫	薬液固結体による地盤補強効果 第24回土質工学研究発表会 1989.6	佐藤 研一 福島 伸二	フジタ工業(株) 技術研究所	室内試験 大型三軸圧縮試験 モールド(φ30X60cm)	水ガラス セメント系薬液 水ガラス系 溶液型薬液 豊浦標準砂	サンドゲルは、砂に比べ大きなせん断力を持ちかつ引 張強度がある。 サンドゲルの注入率を増やすことにより土の見かけの 粘着力が増し地盤の強度が増加する。 供試体の中にサンドゲル透間隔に配置しサンドゲル体 積が供試体体積に占める割合を注入率としている。
⑬	Long-term behavior of chemically grouted soils Proceedings of the twelfth international conference on soil mechanics and foundation engineering, 1989.8	H.Brandl	Technical Uni- versity Vienna Austria	室内試験 クリープ試験 透水試験	Sodium Silicate Silacosol Joosten Process 標準砂	各材料においての長期的なクリープ試験を行っている 長期的なクリープ試験において、シリカゲルよりシリ カゾルの方が効果的である。 シリカゾルは汚濁に関しても有機的な物質を含んでお らず成分浸透も少ない。
⑭	Strength Properties of Chemically Solidified Soils Proceeding of the american society of civil engineers, Vol 98 No 511 1972.11	J. Warner	Intrusion pre- ssure grouting specialists Los Angeles	室内試験 供試体 (φ6.4x22.9cm) 一軸圧縮強度試験 クリープ試験	アクリル・アミド ポリ・フェノール・レジ ン・エマルジョン サンジュール・シリケート	グラウトによる土の強度に関して従来の結果には、供 試体の一様性、養生期間、薬液試験方法に問題がある 水制御には短いゲル時間、地盤強化には長いゲ時間 水中養生は低強度。 粒度等の影響は小さい。

表-2.3.3 固結土の強度特性に関する研究 (No. 4)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑮	超微粒子シリカ系グラウト材による 注入固結砂の動的特性 第28回土質工学研究発表会 1993.5	伊藤 孝男 森 芳信 浅田 秋江 他二名	東北工業大学 日本大学 東北工業大学	静的・動的三軸圧縮試験	標準砂 超微粒子シリカ	静的三軸においては内部摩擦角の変化はほとんど無く粘着力が増加しただけである。 動的三軸では、固結砂は未固結砂のやく3倍の液状化強度を持つ。また緩い砂の注入固結砂は密な砂の挙動に類似している。
⑯	薬液固結体による地盤補強効果 第24回土質工学研究発表会 1989.6	佐藤 研一 田口 善文 他二名	フジタ工業(株)	大型三軸圧縮試験	水ガラスセメント系 水ガラス溶液型 標準砂	固結砂は、未固結砂に比べ大きなせん断強度を持ち、引張強度がある。 注入率を増加すると土の見かけの粘着力が増加し、強度が増加する。
⑰	浸透注入における固結体の形状と一軸 圧縮強さに関する基礎研究 第28回土質工学研究発表会 1993.5	所 武彦 高橋 則雄 松井 悟	日本総合防水 (株)小野田	直径50cm×高さ50cm の土槽	水ガラス系溶液型 超微粒子セメント懸濁液 珪砂6号	溶液型と懸濁型をそれぞれ注入し、注入圧力と供試体内の間隙水圧を測定している。 一軸強度は、懸濁型の方が大きく、間隙水圧の上昇も大きい。 同量を注入すると懸濁型の方が固結体が小さい。

(3) 砂質土への浸透性について

砂質土への浸透性に関して抽出した文献とその要点を表-2.3.3にまとめて示す。

要点を列記すれば以下の通りである。(参考に表-2.3.3の文献番号を文末に示す)

- 1) 懸濁液型注入材(超微粒子シリカを除く超微粒子セメント, 超微粒子LW)は浸透性では溶液型に劣る。⑤
- 2) 間隙水が海水の場合、セメントミルクでは凝集してしまい注入が困難である。③
- 3) 浸透注入するには、薬液のゲルタイムの長いものがよい。②
- 4) 気乾状態の地盤注入では空気間隙中に浸透した薬液が自重で下部に浸透してしまう。②
- 5) 溶液型薬液は、粘度が懸濁液型に比べ大きいので初期注入圧力が大きくなる。④
- 6) 湿潤状態の地盤では、注入した薬液が土中の水を排除しながら浸透する。②
- 7) 有機系水ガラス, シリカゾル, 超微粒子シリカは、水平方向, 上下方向に均等に浸透する。⑤
- 8) 超微粒子セメント・超微粒子LWは、水平方向に離れるにつれて浸透性が悪く、強度が低下する。⑤
- 9) 懸濁液型注入材の中でも超微粒子シリカは、微粒であるため溶液型と浸透性が似ている。④
- 10) 湿潤土を締めて加圧水を通しただけでは、強度のばらつきが大きく浸透距離も短い。③
- 11) モールド長を1 mないし2 mとすると浸透距離と強度の分布の関係が把握できる。③
- 12) 懸濁型溶液は溶液型溶液に比べ、浸透距離が伸びるに従い間隙充填率が低下する割合が大きい。⑥
- 13) シリカゾル系は、材令が28日を過ぎても固結範囲が広がっていく。⑥
- 14) 懸濁液は、注入の進行に伴い土圧が上昇傾向にある。①
- 15) セメント懸濁液に二酸化炭素を混入すると浸透性が向上する。⑧
- 16) 超微粒子セメント懸濁液は、水セメント比により浸透性が変わる。⑨

①浸透距離と一軸圧縮強さの関係

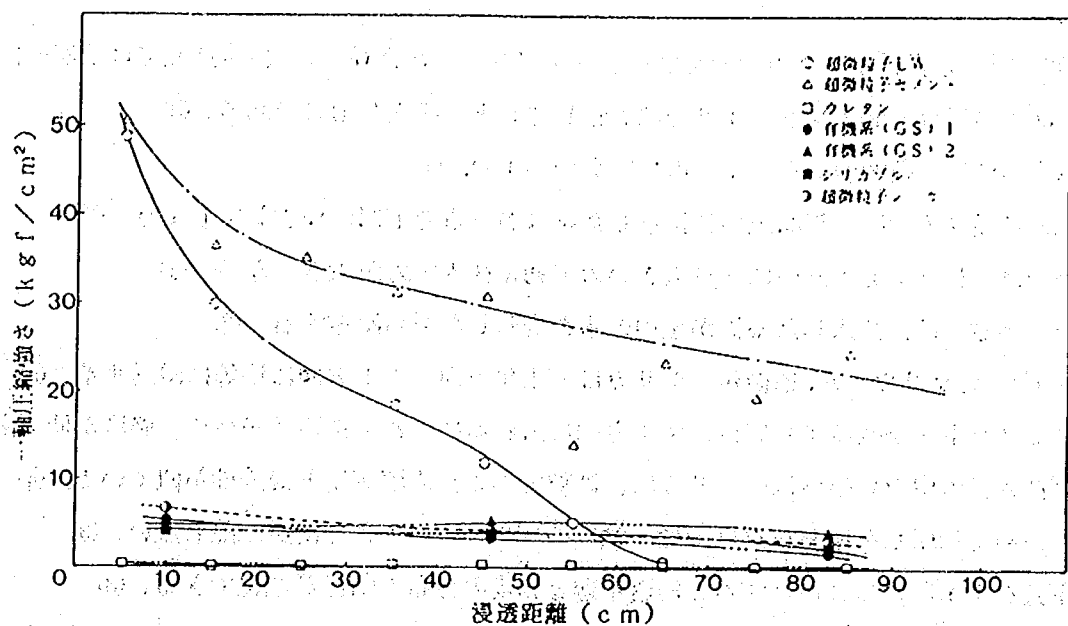


図-2.3.10 浸透距離と一軸圧縮強さの関係⁵⁾

懸濁型液 (超微粒子セメント, 超微粒子LW) の中では、超微粒子以外が他の溶液型と同等な浸透性があることがわかる。

表-2.3.3 砂質土への注入材の浸透性に関する研究 (No. 1)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
①	細かい砂質地盤にたいする超微粒子セメントの浸透性に関する注入試験方 第26回土質工学研究発表会 1991.7	松井 悟 上林 真幸 所 武彦 高橋 則雄	(株)小野田 開発研究所 日本総合防水 研究室	室内試験(模擬地盤) 高強度ビューム管 φ120X180cm 間隙水圧・土圧測定	超微粒子セメント CFパウダー溶液	模擬地盤に超微粒子セメントを注入し間隙水圧及び土圧を測定し、浸透性を見ている。 セメント懸濁液型の場合、間隙中にセメント粒子が滞留または沈着して間隙の大きさを狭め浸透を妨げている。 細かい砂に対しても、間隙水圧や土圧の上昇も起こさず良好に浸透している。
②	超微粒子シリカ系グラウト材による 注入固結砂の諸特性 第27回土質工学研究発表会 1992.6	伊藤 孝男 佐伯 吉勝 吉田 明利	東北工業大学 日産化学工業	室内試験 0.5x0.5x0.5m注入槽 一軸強度圧縮試験 透水試験 乾湿繰返しによる試験 室内注入浸透固結試験 現場試験 現場注入浸透固結試験	シリカゾル	土中(湿潤状態)において固結差の強度劣化は起こりにくい、空気中にさらすことにより強度劣化が徐々に進行する。 乾燥状態の地盤では、地盤内の空気間隙中に薬液が自重で下部に浸透する。 湿潤状態地盤では、注入薬液が土中の水を排除しながら浸透し球状になる。 注入固結地盤の振動試験において、動的過剰間隙水圧係数 $r_{ud}=0.5$ を下回っていることにより液状化が発生しない。
③	液状化対策を目的とした 室内注入試験について 土木学会第41回年次学術講演会 1986.11	善 功企 渡辺 篤	港湾技術研究所	室内試験 一軸圧縮強度試験からの浸透距離測定 (間隙水海水と水道水にする)	超微粒子セメント	湿潤土を締め固めて加圧水を通しただけでは強度のバラツキが大きく、浸透距離も短い。 供試体を1mないし2mとすると浸透距離と強度の分布の関係を把握できる。 セメントミルクは、海水と混合すると凝集することから、間隙水が海水の場合は水道水の場合より注入が難しい。
④	各種注入材を用いた注入実験(その1) —一次元注入供試体の特性— 第27回土質工学研究発表会 1992.6	高橋 朋久 後藤 年芳 国村 省吾 広井 恵二 小野寺誠一	(株)青木建設 大阪セメント(株) 東急建設(株) 建設省 土木研究所	室内実験 供試体(150,930mm) 一軸圧縮強度試験 透水試験 三軸圧縮試験	有機系(GS)-1 有機系(GS)-2 超微粒子LW 超微粒子セメント シリカゾル 超微粒子シリカ ウレタン 珪砂7号	一次元長尺注入実験の一軸圧縮強さより、浸透距離を求めている。 懸濁型は溶液型に比べ浸透距離が伸びるに従い、間隙充填率が低下していく割合が大きい。 超微粒子シリカは、超微粒子セメントより微粒であるため溶液型と同様の結果を得る。

表-2.3.3 砂質土への注入材の浸透性に関する研究 (No. 2)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑤	各種注入材を用いた注入実験(その2) —大型土層注入実験— 第27回土質工学研究発表会 1992.6	高橋 朋久 後藤 年芳 国村 省吾 広井 恵二 小野寺誠一	大阪セメント(株) (株)青木建設 東急建設(株) 建設省 土木研究所	室内試験 モールド($\phi 1000$ $\times 1300\text{mm}$) 一軸強度圧縮試験 透水試験	有機系(GS)-1 有機系(GS)-2 超微粒子LW 超微粒子セメント シリカゾル 超微粒子シリカ ウレタン 珪砂5号・7号	水平方向・上中下方向の一軸強度を調べ浸透距離を検討している。 超微粒子シリカ・GS-1・GS-2は、水平距離・上中下の違いによつての強度さは小さいことより、浸透性にむらがない。 超微粒子セメント・LWは水平方向に離れるに連れ強度が低する。 懸濁液型注入材は溶液型注入材にくらべ浸透性は劣る
⑥	超微粒子シリカ系グラウト材による 砂質土の固結効果について 第26回土質工学研究発表会 1991.7	伊藤 孝男 佐伯 吉勝 吉田 明利	東北工業大学 日産化学工業	室内試験 モールド($\phi 15 \times 15\text{cm}$) 平頭円柱棒を一定の速度で貫入(注入前後の抵抗値の比により固結度合いを等倍率曲線とした)	水ガラス— 重炭酸ソーダ シリカゾル—無機塩	水中と湿潤養生とで比較している。 水ガラス系は、溶脱が激しく28日において範囲が低下している。 シリカゾル系は、28日においても固結が逆に広がっている。
⑦	Injection of dilute microfine cement suspensions into fine sands Proceeding of the twelfth international conference on soil mechanics and foundation engineering, 1989.8	L. Arenzana R. J. Krizek S. F. Pepper	Ingeniero de Caminos Northwestern University	室内試験 透水試験 せん断試験	超微粒子セメント	細砂に対して水セメント比を変えて注入している。 懸濁液の粒子は、非常に小さいので浸透性が優れている。
⑧	二酸化炭素添加によるセメント 注入試験 土木学会第48回年次学術講演会 1993.9	鈴木 健夫 園藤 祐光	広島工業大学 成幸工業	一次元注入	普通ポルトランドセメント 超微粒子セメント	セメントミルクに二酸化炭素を混入すると浸透性、止水性が良くなる。
⑨	超微粒子セメントを用いた細砂地盤での現場注入実験	後藤 年芳 清水 和也 他二名	大阪セメント	現場注入 二重管ダブルバックカー	超微粒子セメント コロイドセメント 普通セメント	普通セメント、コロイドセメントは注入不可能であった。超微粒子セメントW/C=800%のLWがほぼ計画通りの大きさとなった。
						注) ④⑤⑥は、砂質土への注入後の強度特性に関する文献に挙げているものと重複している

表-2.3.3 砂質土への注入材の浸透性に関する研究 (No.3)

番号	文 献 名 ・ 出 典	著 者 名	所 属	実 験 方 法	使用材料 (薬液)	内 容 ・ 結 果
⑩	懸濁型注入材の注入速度と浸透性に関する研究 第27回土質工学研究発表会 1992.6	関口 智之 清水 尚二 他二名	ライト工業(株)	小型モールド注入	懸濁液型注入材 珪砂6, 7号	グラウタビリティー比は一次元定圧注入で考えられているが、これを三次元的に見ている。 GR値が25までは、一次元と三次元に相関関係が見られるが、20では相関関係が小さくなる。 濾過現象のメカニズムを考察している。

2.4 超微粒子セメントに関する既往の研究・施工事例（国内、海外）

グラウト材としての超微粒子セメント（以下MCと略記）については下田他、(1982)⁸⁾ によりはじめて紹介されている。MCの平均粒径は $4\mu\text{m}$ であり、ポルトランドセメント（ $22\mu\text{m}$ ）やコロイドセメント（ $10\mu\text{m}$ ）などに比べて粒径が小さく、浸透性が高いことを特徴としている。用途としては、山岳トンネル、都市土木における地盤、地山への注入、ダムのカーテングラウト、基礎杭の支持力増強、地盤改良、止水に利用されている。

MCを用いた注入工法の国内における施工事例としては、昭和53年以来、細砂、砂礫地盤の止水や補強に適用されたものがある。散見された事例を挙げれば以下のとおりである。

- 1) 上越新幹線のトンネル建設において、地盤の止水および掘削による崩壊防止の目的に凝灰角礫岩、火山灰の地盤に注入を行っている（1978）。注入材は、1ショット方式のMC懸濁液に水ガラス75%水溶液を使用している。⁸⁾
- 2) 柏崎原子力発電所の建設に伴うトンネル工事において、側壁コンクリート下の支持力増加を目的に、N値10～30、 $k=7.2\times 10^{-3}\text{cm/s}$ の細砂地盤に注入を行っている（1978）。注入材は、1ショット方式で $W/C=600\%$ のMC懸濁液を使用し、事後試験に平板載荷試験を行い、極限支持力 160t/m^2 以上が得られている。⁸⁾
- 3) 島根県の山佐ダムの基礎地盤の強化および止水目的に、 $k=4.5\times 10^{-5}\text{cm/s}$ の花崗岩の破碎帯に注入を行っている（1978）。注入材は、1ショット方式で $W/C=1000\%$ のMC懸濁液を使用し、高炉セメントを注入した場合と比較して約3倍の注入量を示し、ピッチを広げて施工することができた。⁸⁾
- 4) 小野田セメントの津久見工場のピット掘削に伴う湧水防止および地盤強化を目的に、 $k=1.4\times 10^{-2}\text{cm/s}$ の地盤に注入を行っている（1978）。注入材は、2ショット方式で $W/C=100\%$ のMC懸濁液と水ガラス水溶液を使用し、事後試験に現場透水試験を行い、 $k=5.8\sim 8.5\times 10^{-4}\text{cm/s}$ に改良されている。⁸⁾

また、1994～1996の文献よりMCの砂への浸透特性および注入固化体の強度特性について室内試験により調べた事例としてはつぎのようなものがある。1993以前の文献については、前節2.3を参照されたい。

- 1) MCによる注入固結体の形状と一軸圧縮強さに関する実験（高橋他、1994）⁹⁾

MC懸濁液（ $W/C=300\sim 700\%$ 、 $D/C=1\%$ ）を用いて耐圧円筒モルタル（ $\phi 50\text{cm}$ 、高さ 60cm ）および一次元長尺（ $\phi 5\text{cm}$ 、 $L=50\text{cm}$ ）注入実験を行い、配合による固結形状や固結比（固結体積/注入量）、強度との関係について調べている。注入による注入圧・間隙水圧は、 W/C が小さくなるほど大きくなる傾向があり、 $W/C=300\%$ では、MCの濾過現象で注入圧が上昇するが間隙水圧は一定であった。固結比は、 W/C が小さいほど高くなる傾向を示し、一軸圧縮強さも同様な傾向を示すとしている。

2) MCグラウトによる注入固結砂の止水性に関する実験(松井他, 1994)¹⁰⁾

MC懸濁液 (W/C=200~1000%, D/C=1%) を用いて一次元短尺 (ϕ 5cm, L=22cm) 注入実験を行い、固結砂の透水係数を調べ、止水性とW/Cの関係を検討している。MC注入固結砂の止水性はグラウトのW/Cが小さいほど高くなり、透水係数はグラウトのW/Cに関係なく材令の進行とともに小さくなるとしている。

3) 薬液注入による液状化対策防止工法に関する研究(林, 藤原, 1995)¹¹⁾

懸濁液型のMC (W/C=500% D/C=4%) と溶液型の超微粒子シリカ (以下MSと略記) (SiO_2 : 5%, 10%) を用いて、室内配合による一軸強度試験、一次元注入実験 (直径 ϕ 85mm, 長さ 4.0m)、液状化強度試験を行い、液状化対策としての有効性を強度特性と浸透特性の面から検討している。MCは細粒分を含まない砂では4mの浸透距離があり、一軸強度も3kgf/cm²程度あること、MSはFc=2% (Dr=50%) の砂 (MCで1.5m) では4mの浸透距離があり、 SiO_2 濃度が10%程度 (q_u =約3kgf/cm²) であれば、液状化強度も未固結砂の2倍程度に改善されるため液状化対策として有効であるとしている。

4) セメント系懸濁液グラウトの砂層注入に関する検討(馬場, 田村他, 1995)¹²⁾

MC懸濁型系, LW系, 溶液型系の注入材を用いて室内注入実験 (ϕ 60x70cm) を行い、珪砂6~7号の砂層へのp-チャートによる浸透状況や固結形状の関係について検討している。注入条件によりp-チャートに浸透注入・割裂浸透注入・割裂注入のパターンがある。固結体容積は、注入速度が大きくW/Cが小さいほど大きくなり、強度はLW系, MC懸濁型系, 溶液型系の順で小さくなるとしている。

5) 各種分散剤を用いたMCグラウトの浸透性に関する基礎実験(松井他, 1995)¹³⁾

分散剤の種類を変えて配合したMC懸濁液 (W/C=467%) を用いて、一次元長尺 (ϕ 5cm, L=50cm) 注入実験を行い、浸透性における分散剤の効果を検討している。MC懸濁液の浸透性を向上させるためにはナフタレン系分散剤の効果が最も優れているとしている。

6) MCグラウトの浸透性に関する実験(所, 高橋他, 1995)¹⁴⁾

耐圧円筒 ϕ 50cm, 高さ60cm) による模擬地盤 (珪砂6号) に吐出口形状の異なる注入管を用いてMC懸濁液 (W/C=500%) 注入を行い、注入圧や間隙水圧の変化および固結形状を検討している。MC注入において、注入速度が一定であれば、注入管からのグラウトの吐出面積が大きいほど有効注入圧 (注入圧-間隙水圧) は低くなるが、吐出面積の大小による間隙水圧の差は小さいとしている。

7) MCの水和反応と浸透性に関する実験的研究(松井他, 1996)¹⁵⁾

練り混ぜ方法や練り置き時間の異なるMCグラウト (W/C=500~1000%, D/C=1%) 注入後、グラウトを電子顕微鏡 (SEM) により観察し、MCの水和反応の進行と浸透性との関係を検討している。電子顕微鏡の観察より、W/C=1000%の1時間練り置きしたグラウトには、MCの粒子表面に水和反応による針状結晶 (エtringait) が生成され、浸透性が悪くなる要因の一つと考えられるとしている。

8) MCによる注入固結体の形状に関する実験(所, 松井他, 1996)¹⁶⁾

耐圧円筒 ϕ 50cm、高さ60cm)による模擬地盤(珪砂7号)にMC懸濁液(W/C=500%)注入を行い、注入圧や間隙水圧の変化および固結形状を検討している。MC注入により浸透限界付近の地盤に対しても球状の固結体が形成され、浸透(割裂浸透)が可能である。MC注入による注入圧と間隙水圧の挙動は必ずしも対応しないとしている。

また、MCと同様な恒久性グラウト材での浸透特性および注入固化体の強度特性について研究も行われているのでここに紹介する。

1) 薬液注入固結砂の動的強度・変形特性(佐伯, 森他, 1994)¹⁷⁾

超微粒子シリカ系および水ガラス系グラウト材による注入固結砂の非排水繰返し三軸試験を行い、強度特性と動的変形特性について検討を行っている。超微粒子シリカ系の固結砂は、長時間の繰返し载荷にも軸ひずみの進行が抑えられているが、最終的にはセメンテーション効果が減少し、引張り破壊(ネッキング破壊)を示し、液状化破壊と異なる現象であったとしている。

2) 薬液注入条件と注入固結砂の形状に関する考察(熊谷, 須藤他, 1994)¹⁸⁾

水ガラス系溶液型薬液(有機固化材使用, アロンSR-Hi)を用いて、直径30cm×高さ30cmのモールド内の砂質土(珪砂6号)に注入を行い、浸透・割裂注入での固結形状および注入固結砂への注入薬液の入り具合を表す填充率をとりあげて薬液注入条件と注入効果の関係について検討している。注入中の注入圧力Pは注入速度qが大きくなるにつれて高くなるが、浸透注入を仮定している計算結果と比べ非線形性が著しく割裂発生を示唆している。固結形状は、浸透注入での球体、割裂浸透注入による長円体、割裂注入での不規則な塊状体の3種類がみられた。固結体内の填充率について、浸透注入によるものは均一であり、割裂浸透注入によるものは塊状に固結しているものの均一さに劣っているとしている。

3) 酸性シリカゾルによる液状化対策防止工法に関する研究(善, 山崎他, 1995)¹⁹⁾

酸性シリカゾルという水ガラス系の二液混合型の固化剤を用いて、室内配合による一軸強度試験、一次元注入実験(直径 ϕ 85mm, ϕ 40mm×長さ5.0m)を行い、液状化対策としての有効性を強度特性と浸透特性の面から検討している。本薬液は、酸の量によってpHを調整し、pHを下げるにより固化時間(ゲルタイム)を伸ばす(SiO_2 濃度4.4%を一定にしpH4で約6時間, pH3.5で約24時間)ことができる特徴があり、段差配合による一次元注入を行い、希釈による浸透先端部での強度低下を防ぎ、5mを浸透固結することができた。 SiO_2 濃度5%程度で q_u =約1kgf/cm²あり液状化対策に有効であるとしている。

4) 酸性シリカゾルによる改良土の動的性質に関する研究(善他, 1995)²⁰⁾

酸性シリカゾルの改良土を用いて、繰返し三軸試験を行っている。改良土は、過剰間隙水圧比が0.9になっても急激なひずみ変化はなく破壊に至っていない。また、動的変形試験により改良土のせん断弾性係数Gは未改良と比べて差はなく、減衰定数hは未改良土の1/2になっている。減衰定数が低減することで地震動が増

幅されることが予想されるため二次元FEM動的応答解析を行っている。その結果、せん断応力は未改良土に比べて1割程度増加しているが、未改良土の2倍程度の液状化強度があり、改良土の地盤剛性が小さいことから液状化に対して効果があるとしている。

5) 大型土槽を用いた恒久薬液の注入実験 (善, 林他, 1996)²¹⁾

超微粒子シリカ (SiO_2 濃度10%, pH8.8%, 7月14日) を用いて大型土槽 (3m×3m×1.5m) 注入実験を行い溶液型薬液の浸透特性について検討している。試料砂は、珪砂6~7号の新潟砂 ($D_{50}=0.31\text{mm}$, $F_c=1.5\%$, $k=3.3 \times 10^{-2}\text{cm/S}$, $D_r=77\%$) を使用している。注入の結果、注入量3,150ℓで直径2.6m高さ1.4mの円筒上の固結体を形成している。注入固結砂の一軸圧縮強さは、注入孔付近で $q_u=80\text{kPa}$ 程度と配合試験結果 ($q_u=100\text{kPa}$) に近い値を示しているが、注入孔から離れるに従い間隙水の影響により希釈をうけ強度が低下し、浸透先端部においては $q_u=20\text{kPa}$ 程度であるとしている。

6) 液状化対策を目的とするスラグ系注入材の研究 (岩佐, 柳沢他, 1996)²²⁾

MCより粒子径が細かく水硬性を持つ超微粒子スラグ系注入材を用いた基礎実験を行っている。注入材は、超微粒子スラグ(SKU)に水硬化性を発揮させる特殊アルカリ液(AC)と水(W)を混ぜたものである。通常配合 (SKU 350kg/m³ (W/S=250%), AC 350ℓ/m³) の標準砂サンドゲルの一軸圧縮強さ30kgf/cm²程度と高強度であるため、液状化対策としての強度を2~10kgf/cm²程度に抑えるために上記注入材に特殊混和剤(SKF)を混ぜた注入材を用いてドラム缶モールド (φ56cm) に注入を行っている。その結果、特殊混和剤(SKF)の添加率を70~80%にすると一軸圧縮強度が5~9kgf/cm²になり目的の改良効果が得られたとしている。

また、『土木技術51巻10号 (1996. 10: 木下他)』²³⁾ の中に二重管ダブルパッカー工法による超微粒子スラグ系注入材を用い、最近の地震によって被災した構造物に対して補修した事例、地震に対して良好な改良効果が得られた事例等を紹介してある。良好な改良効果が得られた事例としては、神戸市の開削トンネル工事に伴う鋼管杭への土圧低減および下部埋立て地盤における液状化対策を目的に注入を行い、兵庫県南部地震に遭ったが良好な改良効果を呈していたとしている。

MCを用いた注入工法の海外施工事例としては、建物基礎の補強に適用された事例が多く見られる。散見された事例を挙げれば以下のとおりである。

1) 米国ヴァージニア州において、スケートリンク屋根を支える支柱基礎の支持地盤であるN値が11~16、細粒分含有率6~18%の細・中砂層の補強のため、水セメント300%の超微粒子セメント懸濁液と水シリカ比150%のシリカ溶液を1:1配合で注入した事例 (Winter, et al., 1986)²⁴⁾。

2) 超微粒子セメントを用いて工場建屋のゲーツ基礎の支持力増強を行った事例 (Bruce, et al., 1990)²⁵⁾。

また、MCの砂への浸透特性および注入固化体の強度特性について室内試験により調べた事例としてはつぎのようなものがある。

1) Arenzana, et al. (1989)²⁶⁾ 及び Zebowitz, et al. (1989)²⁷⁾

超微粒子セメントの砂質土への浸透特性その他について1次元注入試験などの室内試験により調べている。15%粒径が0.15mmのよく締め固めた細粒砂（ただし、細粒分含有率は小さい）供試体に水セメント比200%、注入圧10psiで数フィートの浸透が可能であった、としている。また、グラウタビリティ比は必ずしも浸透可能性の適切な指標ではなく、相対密度や粒度分布が浸透能に影響する、と述べている。

2) Maher, et al. (1994)²⁸⁾

超微粒子セメント、シリカ系、及びアクリルアミドを用いて注入固化したオタワ砂の三軸供試体について排水（CD）・非排水（CU）単調載荷試験、非排水繰返し三軸試験を行った。水セメント比300～500%のMCを注入固化した供試体は応力比1.0でも液状化に至らなかった、と述べている。

また、超微粒子セメントによる改良体の強度特性を調べるのが主目的ではないが、Clough, et al. (1989)²⁹⁾ は、弱くセメンテーションされた砂の液状化抵抗について、ポルトランドセメントにより人工的にセメンテーションされた砂供試体を用いて液状化試験その他を行っている。その結果、密度の増加とセメンテーションは同様に液状化抵抗を高める効果があるが、セメンテーションにより一軸圧縮強度が 60kN/m^2 以上となれば密度の効果は実質的になくなること、一軸圧縮強度が 100kN/m^2 以上の供試体では液状化は実質的には生じないこと、を述べている。

この研究は、改良体の液状化抵抗を推定するのに一軸圧縮強度を利用できる可能性を示すものとして参考になると考えられる。

セメント注入工法により補強した基礎の耐震効果を実証的に示した事例がMitchell, et al. (1991)³⁰⁾ により報告されている。要約すれば次のとおりである。

カリフォルニア州サンタクルズに位置するRiverside Avenue橋は、その橋台周りが洗掘を受け、沈下が見られるようになったため、1986年に洗掘沈下防止を目的として地盤改良が行われた。基礎面から5フィートまでは緩いないしは中密の砂礫、その下11フィートは細粒分含有率が5%以下の密な礫混じり砂層、それ以下はシルトと粘土の互層であった。シリカ（Nグレード）と超微粒子セメントが使用された。約4万ガロンの薬液を注入して上記砂礫および礫混じり砂層が固化改良された。1989年のLoma Prieta地震により当該地域は最大加速度約450gal、継続時間15秒の地震動が作用したと推定されたが、橋に何らの被害も生じなかった。ただし、周辺地盤にも被害は見られなかった。

このほか、Kramer, et al. (1991)³¹⁾ は、液状化対策としての注入工法の可能性について総括的にまとめているので参考になる。なお、A S C E は、1982年に薬液注入工法技術委員会主催の会議を開催しているが、その会議報告³²⁾ は薬注の用途別技術テーマをとりまとめている。また、同委員会は薬液注入工法の出来形確認手法に関する委員会報告³³⁾ を作成している。

2.5 注入効果の確認方法

注入効果の確認方法としては、表-2.5.1に示すような各種の方法がある。これらの方法は注入目的によって適当に使い分けられている。しかし、これらのどの方法にも一長一短があり、複数の方法を組み合わせることにより注入効果の確認を行うことも考えられる。

他方、工事の規模や現地条件等によっては採用の困難な方法もある。これらの方法のうち、現在一般的に行われ、かつ効果確認方法として確立している方法はつぎの2つである。

- 1) 現場透水試験による止水性の効果確認方法。
- 2) N値測定により地盤強度変化を求めることによる効果確認方法。

表-2.5.1 一般的な効果の確認方法^{3,4)}

区分	項目	方法	適用範囲
目による方法	掘削による確認	掘り出した試験体によって確認する	掘削可能な立坑内等
	色素判別法	あらかじめ注入材に色素を混入または試薬を散布する	同上
透水性の確認	現場透水試験	現場透水試験により透水係数を求める	止水を目的とする
強度の確認	標準貫入試験	N値を測定して強度を確認する	強度の増加と傾向を把握する
	室内強度試験	サンプリングを行って一軸、三軸試験を行って強度を確認する。	強度の変化や粘着力の数値を求める

この他、表-2.5.2に示す効果確認方法が考えられているが、特殊なケースで使用されているのみであり、一般的ではない。

表-2.5.2 その他特殊ケースの効果確認方法^{3,4)}

区分	項目	方法	適用範囲
透水性の確認	室内透水試験	サンプリングした試料によって室内透水試験を行う	止水を目的とする
強度の確認	プレシオメーター試験	プレシオメーターを用いて横方向地盤反力係数を測定する。	
	静的貫入試験	コーン貫入、スウェーデン等の静的な方法で貫入試験を行う	軟弱な層に対する強度の変化
薬液の浸透の確認	電気比抵抗	地中に電流を流し、注入前後の比抵抗の差をもとめる	
	γ線密度計	γ線を利用して注入前後の密度を計測する	
	中性子水分計	注入材にほう素を混入し、中性子の吸収力の差により効果を調べる	
	化学分析	サンプリングしたものを定性分析を行う	
	温度変化	地中に埋設した管の周辺温度を測定する	

液状化対策として薬液注入工法を用いる場合の効果確認方法としては、止水および強度の確認よりはむしろ注入範囲（固結範囲）の確認が重要になると考えられる。そのためには、注入範囲がある程度把握できる方法が必要となる。表-2.5.2の中では、「薬液の浸透の確認」に区分される方法が該当するが、いずれも実用的な手法としては未だ確立していない。

〈参考文献〉

- 1) (社) 日本薬液注入協会：薬液注入工法の設計・施工指針, 1989.
- 2) (社) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、土質工学会, 1985.
- 3) 島田俊介, 佐藤 武, 多久 実：最先端技術の薬液注入工法、理工図書（株）, 1991.
- 4) 柴崎光弘, 下田正雄, 野上明雄：薬液注入工法の設計と施工、（株）山海堂, 1977.
- 5) 建設省土木研究所 機械施工部 施工研究室、(財)先端建設技術センター他：地盤補強・止水技術に関する研究、平成3年度共同研究報告書, 1992.
- 6) 米倉亮三, 加賀宗彦, 島田俊介：薬液注入における長期耐久性の研究、土木施工32巻2号, pp49～pp55, 1991.
- 7) 善 功企, 山崎浩之, 長澤啓介：事前混合処理土の動的強度・変形特性、第27回土質工学研究発表会梗概集、pp. 933～pp. 934, 1992.
- 8) 下田正雄, 早川秀雄, 細田初敏：セメント技術年報, Vol. 36, pp505～pp508, 1982.
- 9) 高橋、所、松井他：超微粒子セメントによる注入固結体の形状と一軸圧縮強さに関する実験、第29回土質工学研究発表会梗概集, pp2149～pp2150, 1994.
- 10) 松井, 細田, 所他：超微粒子セメントグラウトによる注入固結砂の止水性に関する実験：土木学会第49回年次学術講演集, pp1596～pp1597, 1994.
- 11) 林 健太郎, 藤原敏光：薬液注入による液状化対策防止工法に関する研究：第29回土質工学研究発表会梗概集, pp2169～pp2170, 1995.
- 12) 馬場, 田村他：セメント系懸濁液グラウトの砂層注入に関する検討：第30回土質工学研究発表会梗概集, pp2105～pp2106, 1995.
- 13) 松井, 所他：各種分散剤を用いた超微粒子セメントグラウトの浸透性に関する基礎実験：第30回土質工学研究発表会梗概集, pp2091～pp2092, 1995.
- 14) 所, 高橋他：超微粒子セメントグラウトの浸透性に関する実験：土木学会第50回年次学術講演集, pp1452～pp1453, 1995.
- 15) 松井, 所他：超微粒子セメントの水和反応と浸透性に関する実験的研究：第31回地盤工学研究発表会梗概集, pp113～pp114, 1996.

- 16) 所, 松井他: 超微粒子セメントによる注入固結体の形状に関する実験: 土木学会第51回年次学術講演集, pp1596~pp1597, 1996.
- 17) 佐伯, 森他: 薬液注入固結砂の動的強度・変形特性: 第29回土質工学研究発表会梗概集, pp2167~pp2168, 1994.
- 18) 熊谷浩二, 須藤良清, 柳沢栄治: 薬液注入条件と注入固結砂の形状に関する考察: 第29回土質工学研究発表会梗概集, pp2173~pp2176, 1994.
- 19) 善, 山崎, 林他: 酸性シリカゾルによる液状化対策防止工法に関する研究: 第30回土質工学研究発表会梗概集, pp2107~pp2108, 1995.
- 20) 善, 山崎, 三好他: 酸性シリカゾルによる改良土の動的性質に関する研究: 土木学会第50回年次学術講演集, pp1456~pp1457, 1995.
- 21) 善, 山崎, 林他: 大型土槽を用いた恒久薬液の注入実験: 第31回地盤工学研究発表会梗概集, pp103~pp104, 1996.
- 22) 岩佐, 柳沢他: 液状化対策を目的とするスラグ系注入材の研究: 第31回地盤工学研究発表会梗概集, pp107~pp108, 1996.
- 23) 木下良友, 荒木 進, 宇梶 伸: 注入工法と高圧噴射攪拌工法の技術動向と液状化対策: 土木技術51巻10号, pp77~pp84, 1996.
- 24) Winter, E., W.J. Clarke, and J.W. Guthrie: Microfine cement grout strengthens foundations, Concrete International, pp.59-61, Oct. 1986.
- 25) Bruce, D.A., P.J. Nufer and R.E. Triplett: Enhancement of caisson capacity by micro-fine cement grouting -A recent case history-, Geotechnical Grouting Verification, Special Geotechnical Publication No.57, pp.142-152, 1995.
- 26) Arenzana, L., R.J. Krizek and S.F. Pepper: Injection of dilute microfine cement suspensions into fine sands, Proc. 12th ICSMFE, pp.1331-1334, Rio de Janeiro, Aug. 1989.
- 27) Zebowitz, S., R.J. Krizek and D.K. Atmatzidis: Injection of fine sands with very fine cement grout, Journal of Geotech. Engrng., ASCE, Vol.115, No.12, pp.1717-1733, Dec. 1989.
- 28) Maher, M.H., K.S. Ro and J.P. Welsh: Cyclic undrained behavior and liquefaction potential of sand treated with chemical grouts and microfine cement (MC-500), Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.17, No.2, June 1994, pp.159-170.
- 29) Clough, G.W., J. Iwabuchi, N.S. Rad and T. Kuppusamy: Influence of cementation on liquefaction of sands, Journal of Geotech. Engrng., Vol.115, No.8, Aug. 1989, pp.1102-1117.
- 30) Mitchell, J.K. and F.J. Wentz: Performance of improved ground during the Loma Prieta earthquake, Report No. UCB/EERC-91/12, EERC, Univ. of California, Berkeley, Oct. 1991.
- 31) Kramer, S.L. and R.D. Holtz: Soil improvement and foundation remediation with emphasis on seismic hazards, A workshop report sponsored by the NSF, and held at Univ. of Washington, Aug. 19-21, 1991.

32) Wallace Hayward Baker (ed.): Proceedings of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, ASCE, 1982.

33) Byle, M. J. and R. H. Borden (ed): Verification of Geotechnical Grouting, Geotechnical Special Publication No. 57, ASCE, 1995.

34) (社) 日本薬液注入協会: 薬液注入工法 設計資料, pp32, 1996.

第3章 液状化対策に適した注入材の選定

3.1 注入材の必要条件

本研究目的である既設の地中構造物の液状化対策に用いる注入材の要件としては、以下が挙げられる。

- ・低注入圧力で広範囲を浸透し得るもの

高圧による注入は地盤変状をもたらし、構造物の変位を起こしやすいので、低圧力で砂の間隙をスムーズに浸透し、広範囲の改良が得られる注入材であること。

- ・ゲル化時間の長いもの

広範囲の浸透を行うには、緩結型の注入材でなければ注入できない。

- ・恒久性に優れているもの

構造物下の改良のため、恒久的な対策効果を得るために、長期強度的に劣化のない安定した注入材であること。

- ・小型機材で注入できるもの

施工用地の制約を受けるので、軽量小型の機械設備で注入が行える工法に適應できる注入材であること。

前章において既往の研究をグラウト特性・強度特性・浸透特性の3つの側面からみてきたが、注入材の特性が固結砂の性質を大きく左右することが分かった。たとえば、溶液型水ガラスのように浸透性は優れているものの耐久性は著しく劣るというように、注入材の性質により極端に片寄った結果を得られるものもある。特に広範囲な浸透性と固結砂の恒久性は必要条件となる。

2.1.3で示した各種注入材を、上記の必要条件を考慮しながら、既往的研究成果を参考にして、強度・耐久性・浸透性・経済性の観点から比較し最適な注入材の選定を行う。ここでは浸透注入を行うことを考慮して緩結型（ゲル化時間の長く調整できるもの）のものに限定して検討した。

3.2 一軸圧縮強度と耐久性の関係

図-3.2.1は縦軸に一軸圧縮強さを、横軸に耐久性をとり、おのこの注入材の定性的な関係を示した図である。

地中構造物や構造物基礎周辺地盤の液状化対策の場合、改良体の一軸圧縮強さは必ずしも高強度である必要はない。しかし、注入材の耐久性は、長期的に強度が安定していることが必要条件である。

図-3.2.1より、一軸圧縮強さはほとんどの注入材が条件を満たしている。耐久性については、やはりセメント系注入材が飛

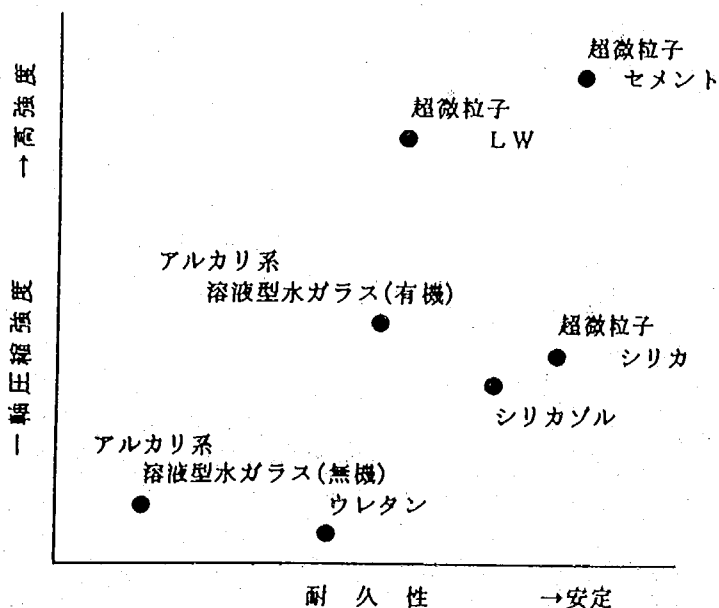


図-3.2.1 一軸圧縮強度と耐久性の関係

び抜けて優れており、溶液型水ガラスは安定性に欠ける。これらを考慮すると、耐久性の面から超微粒子セメントと超微粒子シリカが適当と判断される。

3.3 浸透性と経済性の関係

図-3.3.1は縦軸に注入材料単価を、横軸に浸透性を取り、定性的な関係を示した図である。

実施工においては、注入に用いる注入材使用量は多量なので、注入工法による工事金額に占める注入材費の割合が大きく経済性に影響を与える。また、浸透性も施工効率に影響を与え、施工費全体に作用する。この図より、注入材料単価はウレタン（高分子系）、超微粒子シリカが高価であり、超微粒子セメント、溶液型水ガラス（無機）が安価である。浸透性は、溶液型の注入材が良好で、懸濁液はやや劣っている。したがって注入材料単価と浸透性の関係からはアルカリ系溶液型水ガラスなどが選定される。

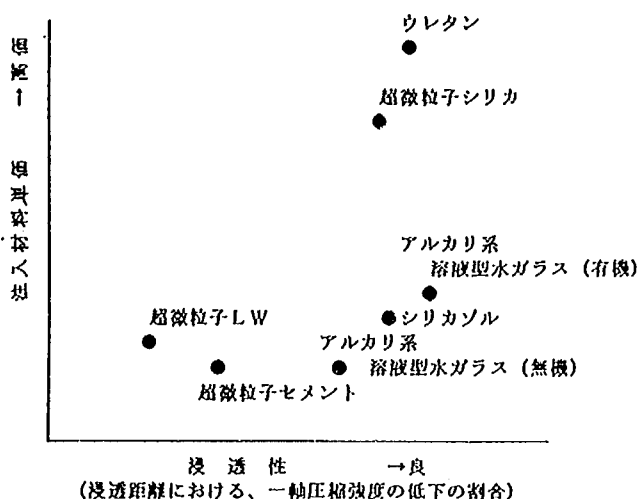


図-3.3.1 注入材単価と浸透性の関係

3.4 注入材の選定結果

表-3.3.1に液状化に適した注入材の選定結果一覧表を示す。

表-3.3.1 注入材の選定結果一覧表

注 入 材		強 度	耐 久 性	材料単価	浸透性
		高 ○ 中 △ 低 ×	良 ○ 中 △ 否 ×	安 ○ 中 △ 高 ×	良 ○ 中 △ 否 ×
1	アルカリ系溶液型水ガラス (無機系)	×	×	○	○
2	アルカリ系溶液型水ガラス (有機系)	△	△	○	○
3	シリカゾル (非アルカリ系溶液型水ガラス)	△	△	○	○
4	超微粒子LW (アルカリ系懸濁型水ガラス)	○	△	○	×
5	超微粒子シリカ (特殊シリカ系)	△	○	×	○
6	超微粒子セメント (非薬液系)	○	○	○	△
7	ウレタン (高分子系)	×	△	×	○

注入材を、既往の研究より定性的にいろいろな方向から検討した結果、今回の研究目的の注入材に要求される性質を満足できる材料として、浸透性にはやや欠けるものの、耐久性・経済性に特に優れている、超微粒子セメントが最適であると思われるのでこれを実験注入材として選定した。

なお、今回の実験においては、性質的にも優れている超微粒子シリカを比較材料として選定した。

— 4 —

材料名	単位	数量	備考
超微粒子セメント	kg	10	
超微粒子シリカ	kg	10	
水	kg	10	
エポキシ樹脂	kg	10	
硬化剤	kg	10	
溶剤	kg	10	
その他	kg	10	
合計	kg	60	

第4章 注入材の基本物性試験

4.1 試験目的

注入による対象構造物への変位等の影響を抑えるために低圧で浸透注入すれば、注入流速は低下する。また、注入時間が長引き、施工中に注入材のゲル化が始まればさらに低下する。ゆえに、注入材の浸透性は注入材自身の基本物性（ゲル化時間・粘度）に依存する所が大きい。今回の目的において注入材は、長いゲル化時間で低粘度でなければならない。これらの特性に及ぼす注入材の配合の影響を調べるために以下の基本物性試験を行った。

4.2 試験方法

4.2.1 注入材料

注入材料としては、超微粒子セメントと超微粒子シリカの2種類を用いた。主たる試験対象は超微粒子セメントであり、超微粒子シリカは比較対象として位置付けた。

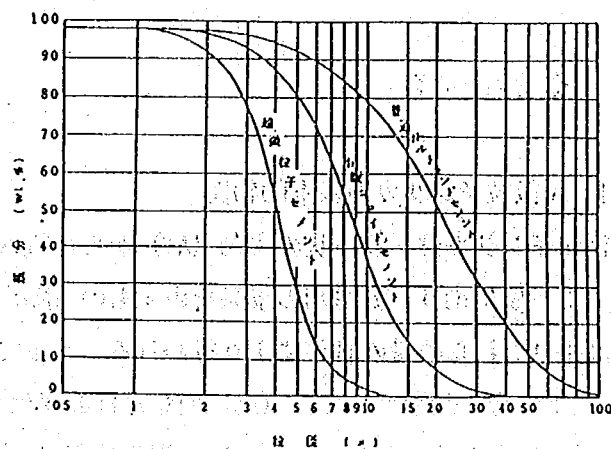
(1) 超微粒子セメント

懸濁液内容は、超微粒子セメント、分散剤、水である。

基本物性を表-4.1に、粒度分布を図-4.1に示す。

表-4.1 超微粒子セメントの基本物性¹⁾

外 観	白灰色超微粒子状
比 重	3.0 ± 0.1
粉末度	約 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ (ブレイク比表面積)



(2) 超微粒子シリカ

図-4.1 超微粒子セメントの粒度分布¹⁾

溶液内容は、主剤(AT)としての液体、硬化剤としての粉末状のゲル促進剤(Ns)の役目をするもの、ゲル抑制剤(As)の役目をするものと水の4種である。

基本物性を表-4.2に、粒子径の比較を図-4.2に示す。

表-4.2 超微粒子シリカの基本物性²⁾

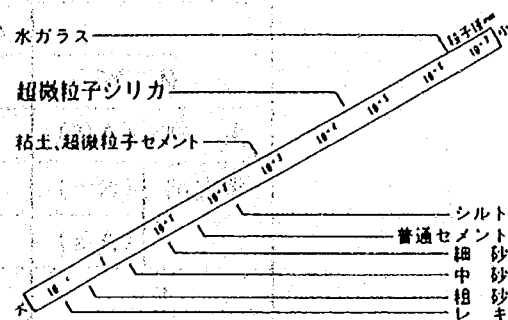


図-4.2 超微粒子シリカの粒径との比較²⁾

4.2.2 試験内容

(1) ゲル化時間測定

ゲル化時間測定は、B型粘度計を用いて行った。粘度計の模式図を図-4.3に示す。

測定開始（注入材を混ぜ合わせた時点）から粘度が100 mPa・S（水の粘性の約70倍）となった時点での経過時刻をゲル化時間（ゲルタイム）として記録した。

(2) 粘度測定

粘度測定は、B型粘度計を用い、上記測定時の時間経過にともなう粘度変化を求めた。ただし、超微粒子セメント懸濁液は、水セメント比（以下W/Cと記す）を変化させて、初期粘度を測定した。注入材料ゲル化時間は温度によりかなり変化するので、常時液温および室温を20℃とした。また、超微粒子シリカに関しては、同時にPH測定も行なった。

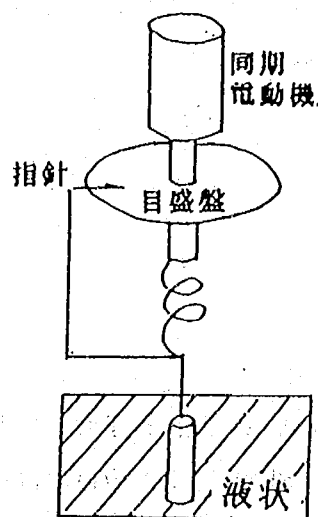


図-4.3 B型粘度計の模型図

4.3 試験結果と考察

4.3.1 超微粒子シリカの基本的物性

超微粒子シリカは、液体状の主剤（AT）からなるA液と、粉末状の硬化剤を水に溶かしたB液を混合して使用する。硬化剤は、促進剤の効果を表すもの（Ns）と抑制剤の効果を表すもの（As）とに分かれ、ゲルタイム調整はこれらの量の調整により行われる。よって以下の調整法を試みた。

- 標準配合を基準として、（As）の量だけを変化させる。
- 標準配合を基準として、（As）を混入せず（Ns）の量だけ変化させる。
- 標準配合を基準として、硬化剤を溶かす水量を変化させる。

これらの組み合わせについてゲルタイム及び粘度を測定した。標準配合を表-4.3に示す。

表-4.3 超微粒子シリカ標準配合

		A液 (ml)	B液 (ml)
総体積		250	250
主剤 (AT)		250	—
硬化剤	(Ns)	—	12.5 g
	(As)	—	3.0 g
水		—	残量

ゲルタイム測定の結果を図-4.4～図-4.6に示す。

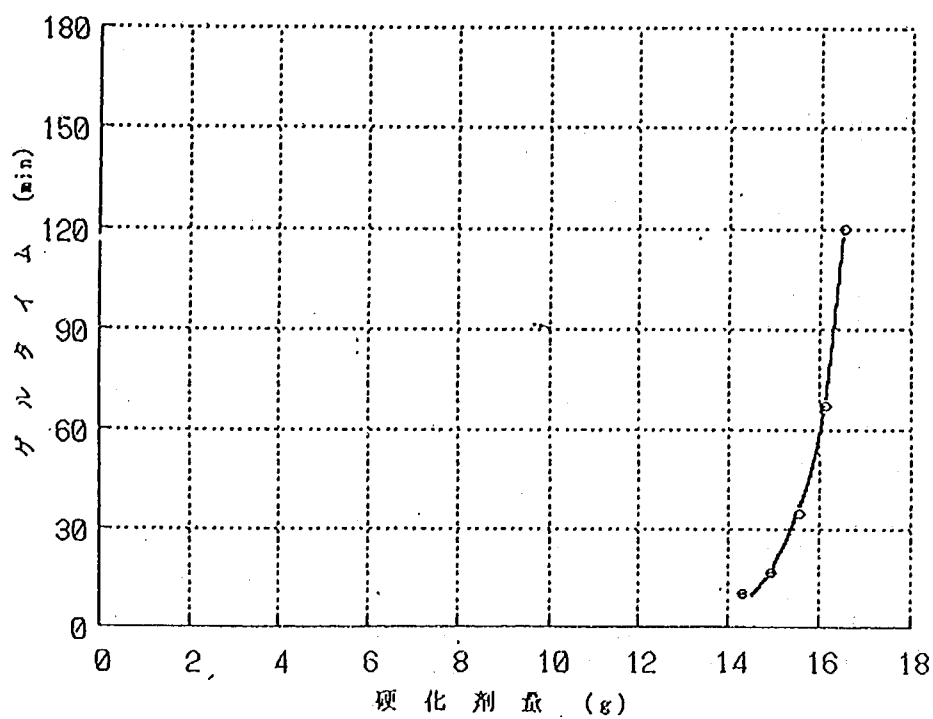


図-4.4 標準配合を基準として

(As) 量だけを変化させたゲルタイム測定

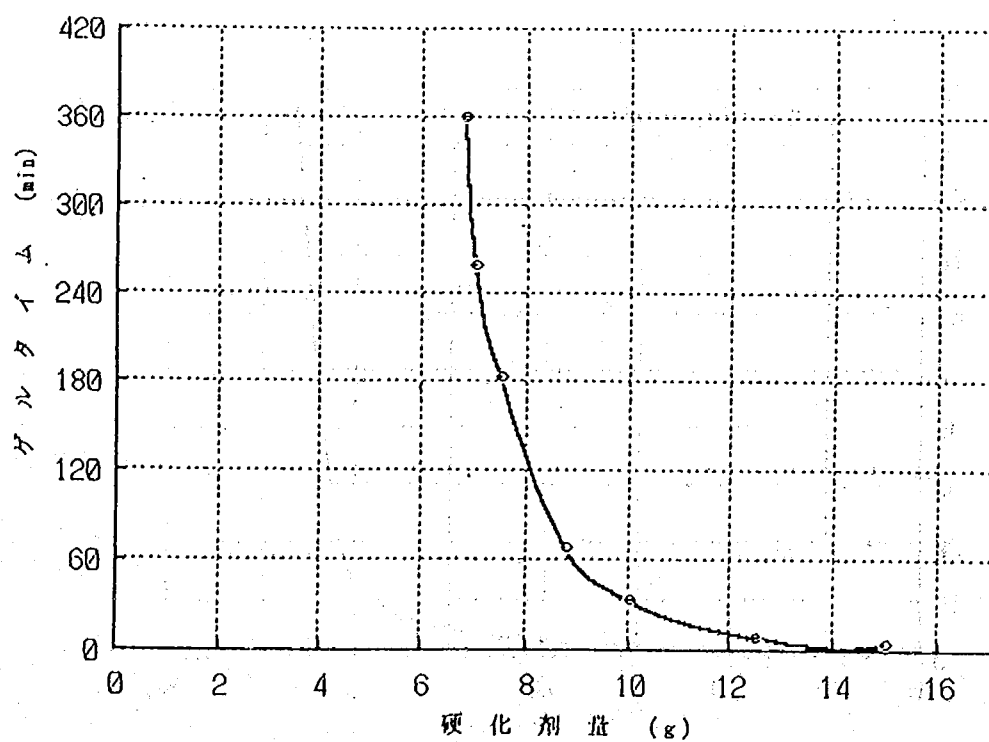


図-4.5 標準配合を基準として、(As) を混入せず

(Ns) 量だけを変化させたゲルタイム測定

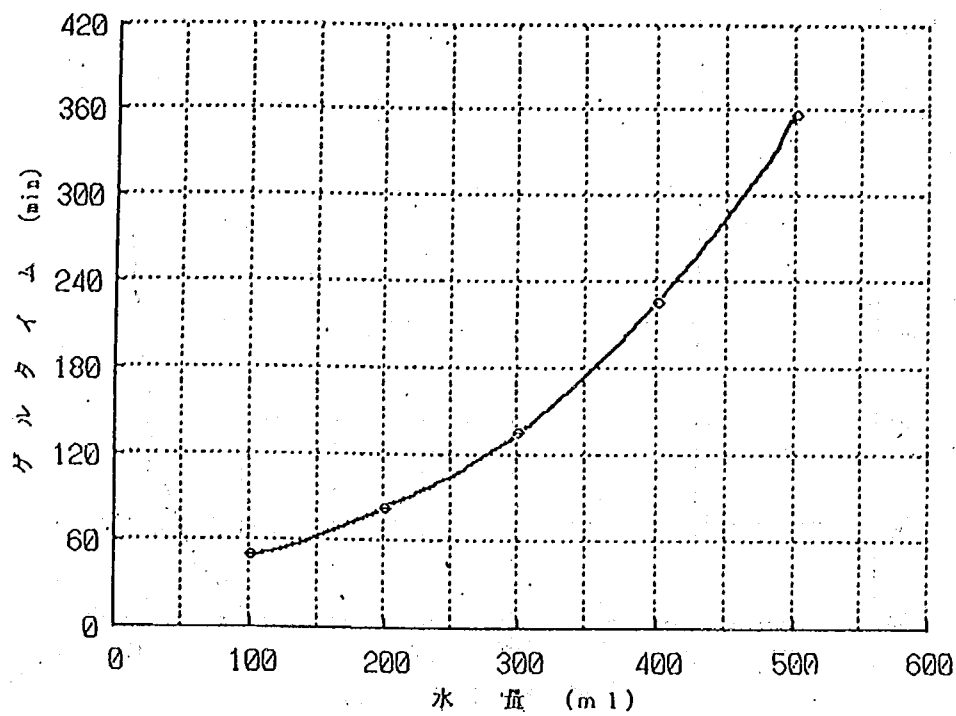


図-4.6 標準配合を基準として

硬化剤を溶かす水量を変化させたゲルタイム測定

次に粘度測定の結果を図-4.7～図-4.9に示す。

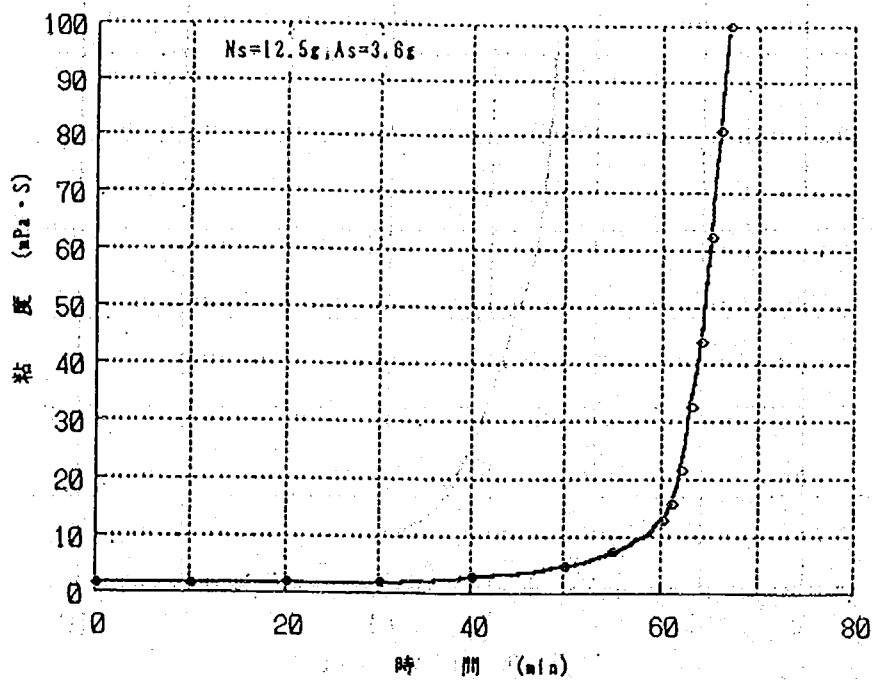


図-4.7 標準配合を基準として

(As) 量だけを変化させた粘度測定結果の例

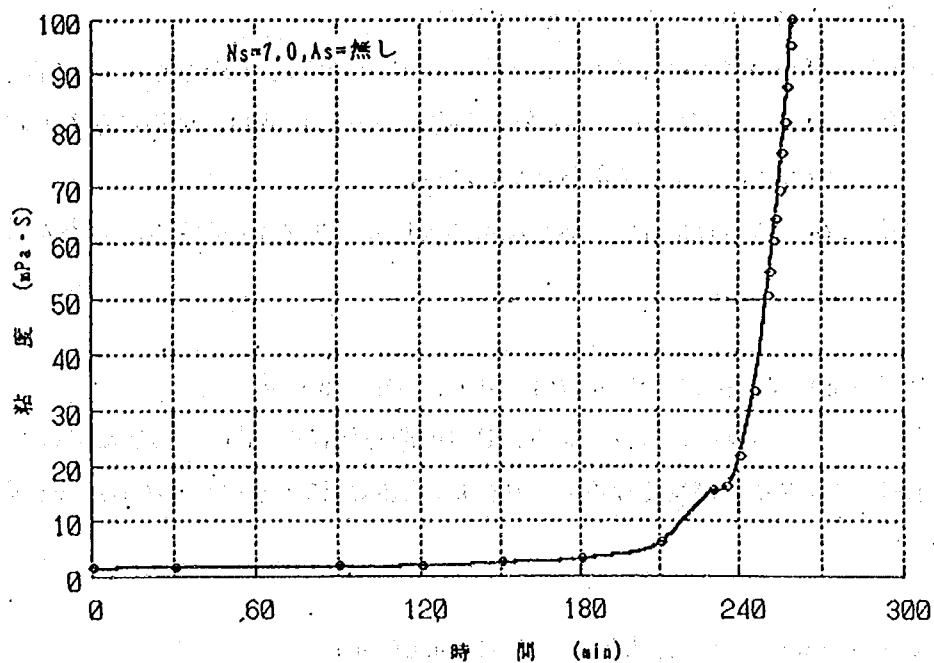


図-4.8 標準配合を基準として、(As) を混入せず
(Ns) 量だけを変化させた粘度測定結果の例

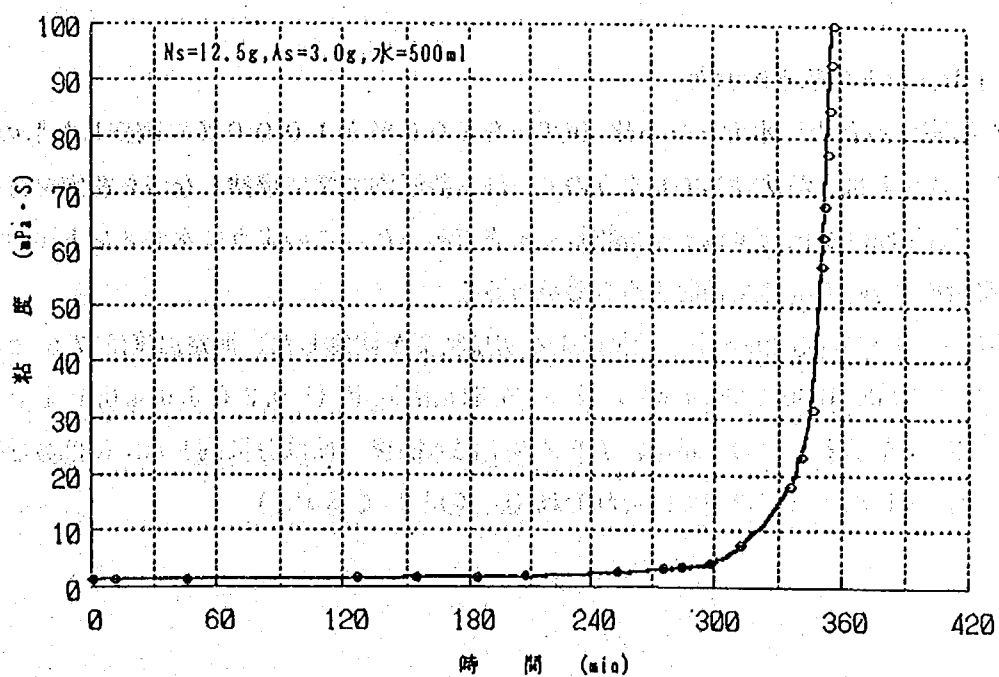


図-4.9 標準配合を基準として
硬化剤を溶かす水量を変化させた粘度測定結果の例

a. (As) 量だけを変化させる方法について (図-4.4参照)

(As) を増加していくとゲルタイムは長くなる。しかし、PHの測定値が酸性側 (標準配合で中性だが、Asを増すと約PH=3と変わる) へ移行していく結果が得られた。注入材が酸性になると耐久性が劣ると言われていることから、この方法は不適當であると考えれる。

また、ゲルタイムが長くなるにつれ微量の (As) により著しくゲルタイムが変化し調整が非常に困難であった。

b. (As) を混入せず (Ns) 量を変化させる方法について (図-4.5参照)

(Ns) を減少させて行くとゲルタイムは長くなる。PHの測定値は8.8前後であり安定していた。

しかし、a. と同様にゲルタイムが長くなるにつれ微量の (Ns) によりゲルタイムが著しく変化して調整が非常に困難であった。

c. 硬化材を溶かす水量を変化させる方法について (図-4.6参照)

硬化材を溶かす水を増加させていくとゲルタイムは長くなる。PHの測定値は7前後と非常に安定していた。さらに、a, bの方法よりもゲルタイムの調整が比較的容易で最大360分まで調整することができた。

また、粘度の時間変化に関しては、図-4.7～図-4.9に示すように、いずれの配合量を変化させても超微粒子シリカはゲル化直前までほぼ一定の低粘度であった。

4.3.2 超微粒子セメントの基本的物性

ゲル化時間を測定するために水セメント比 (W/C) を500%と1000%に調整したものをを用いたが、放置しておくともセメント粒子が沈殿してしまうので、注入装置内で常に攪拌しながら測定を行った。その結果、1日経過しても粘性は変化せず粒子は分離したままであった。このように水セメント比の大きい懸濁液の硬化時間の測定法については今後検討する必要がある。

その他に、W/Cの変化や分散剤混入率の変化による初期粘度を測定した。測定温度は17.5°であった。表-4.3.2はW/C (W/C=250, 500, 1000, 2000, 4000%) 及び、分散剤混入率 (1.0, 2.0, 3.0, 4.0%) を変化させた場合の初期粘度の測定結果を示す。なお、超微粒子セメント混入前後 (前は分散剤と水、後は分散剤と水と超微粒子セメント) を計測した。(同表中ではそれぞれ ①、②として示す。)

表-4.4 超微粒子セメントのW/Cと分散剤混入率の変化による初期粘度

	水セメント比 W/C(%)	測定項目	分散剤混入率 D/C(%) (セメント重量に対する分散剤の混入重量比)			
			1. 0%	2. 0%	3. 0%	4. 0%
初期 粘度 mPa・s	250	①	1.22	1.22	1.24	1.26
		②	2.29	1.93	1.98	2.05
	500	①	1.22	1.22	1.23	1.22
		②	1.62	1.54	1.57	1.57
	1000	①	1.22	1.22	1.23	1.23
		②	1.42	1.34	1.33	1.34
	2000	①	1.21	1.21	1.21	1.21
		②	1.29	1.27	1.27	1.27
	4000	①	1.21	1.21	1.21	1.21
		②	1.25	1.25	1.25	1.25

注) 測定温度
t=17.5℃

水の粘度
1.20mPa・s

①=分散剤+水

②=分散剤+水+超微粒子セメント

この表から、まずセメント混入の有無による初期粘度の比較をする。セメント混入前は各W/Cの分散剤混入率変化を行っても1.21~1.26mPa・sとなり粘度の差はほとんどなかった。セメント混入後は、W/Cが小さい方が粘度は大きくなる。たとえば、分散剤混入率1.0%のとき、W/C=250%での粘度はW/C=4000%での粘度のほぼ2倍となっている。また、分散剤混入率の影響についてみると、W/Cの値が大きい場合には粘度変化は小さく、W/C=250, 500%とやや小さい場合には混入率2.0%の粘度が最小値を示している。

傾向としては、分散剤混入率を大きくすると、超微粒子セメント懸濁液の初期粘度は小さくなる。

4.4 まとめ

今回の試験結果をまとめると以下のようになる。

- 1) 超微粒子シリカでは、硬化剤を増減するよりも水量を増やして溶液を希釈する方が、長時間のゲルタイム調整が容易に行えた。
- 2) 超微粒子セメントでは、従来の方法ではゲルタイムの測定ができなかった。そこで、今後の課題としてサンドゲルによるスランプ試験等を適用する方法が考えられる。
- 3) 超微粒子シリカの初期粘度は1.6mPa・s前後で、ゲル化直前までその粘度を保っていた。
- 4) 超微粒子セメント懸濁液の初期粘度はW/Cが小さい方が大きい。分散剤を混入すれば粘度は小さくなる効果があった。W/Cの大きい方は、分散剤混入による粘度への影響はほとんどなかった。

〈参考文献〉

- 1) 樋口芳朗：注入工法、セメント・コンクリート No. 391, pp59~pp64, 1979.
- 2) 島田俊介, 佐藤 武, 多久 実：最先端技術の薬液注入工法、理工図書（株）, 1991

第5章 一次元条件における浸透特性の検討

5.1 一次元注入実験（その1）

5.1.1 実験目的

実地盤で注入工法を行う場合、注入は三次元的に進行する。したがって、注入材の浸透性や耐久性を把握するためには、実際の注入に近い三次元状態で試験を行うことが本来望ましい。しかしながら、ここでは手始めの試験として、小型の注入装置及び長短尺のモールドを用いた一次元的な注入試験を行うこととした。

この試験では、浸透により得られた固結長や固結体の強度を調べた。

5.1.2 試料及び試験方法

注入材は超微粒子セメント（比重3.0、平均粒径 $4\mu\text{m}$ 、85%粒径 $G_{85}=8\mu\text{m}$ 、ブレン比表面積 $9000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上）を用い、試料砂は、粒径が小さく浸透限界に近い珪砂7号（グラウタビリティ比 $GR=G_{85}/D_{15}=14$, $GR<11$:注入不可¹⁾）を用いた。 G_{85} は、超微粒子セメントの質量通過百分率85%の粒径（ $G_{85}=8\mu\text{m}$ ）である。表-5.1.1に砂の性状を、図-5.1.1に粒度分布を示す。

表-5.1.1 試料砂の性状

砂の種類	土粒子の比重	最大乾燥密度	最小乾燥密度	D_{15}
珪砂7号	2.641	$1.593\text{g}/\text{cm}^3$	$1.230\text{g}/\text{cm}^3$	0.11mm

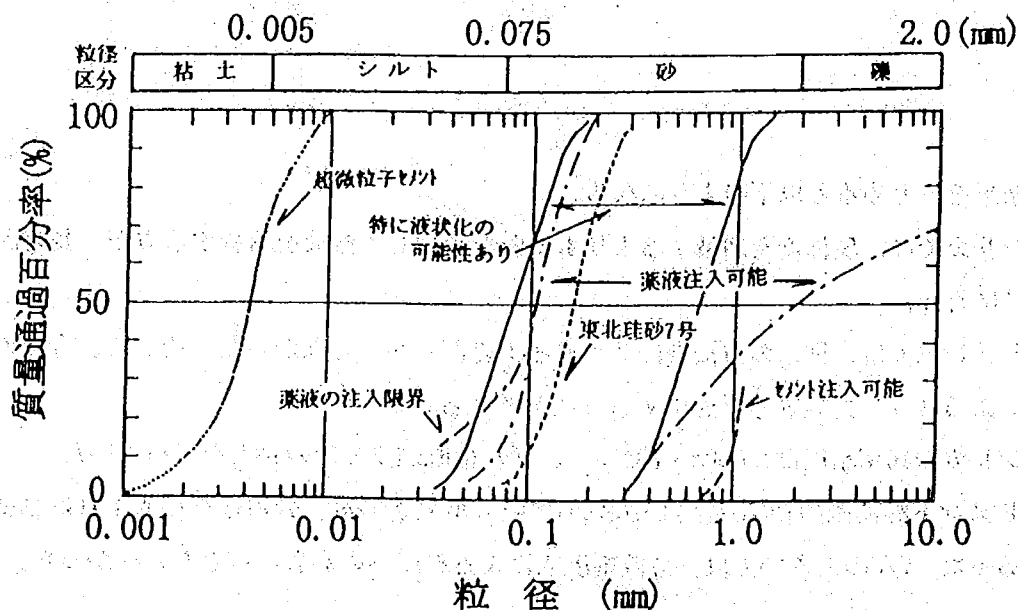


図-5.1.1 試料砂の粒度分布²⁾

一次元注入装置を図-5.1.2に、一次元注入試験状況を写真-5.1.1に示す。注入装置は、一定の圧力により注入出来るようになっている。固結長を測定するための一次元長尺注入と、注入材充填量や一軸強度を測定するための一次元短尺注入の2つの試験を行なった。長尺注入は、モールド長100cmで供試体長は92cmのものと、モールド長200cmで供試体長は192cmのもの二通りを用いた。また、均等に注入するため供試体の両端部にフィルター材（珪砂5号）を4cmずつ設けた。短尺注入は、モールド長25cmで供試体長23cmとし、フィルター材を両端部に1cmずつ設けた。供試体は、内径50mmの亚克力パイプ製モールド内の中に、気乾7号珪砂を数層に分けて投入し、層ごとに水平打撃により相対密度 $D_r=50\%$ になるように均一に締め固めて作成した。これに CO_2 を通した後、脱気水を下から上へと通水させ飽和させた。注入も同様に下から上へと行った。

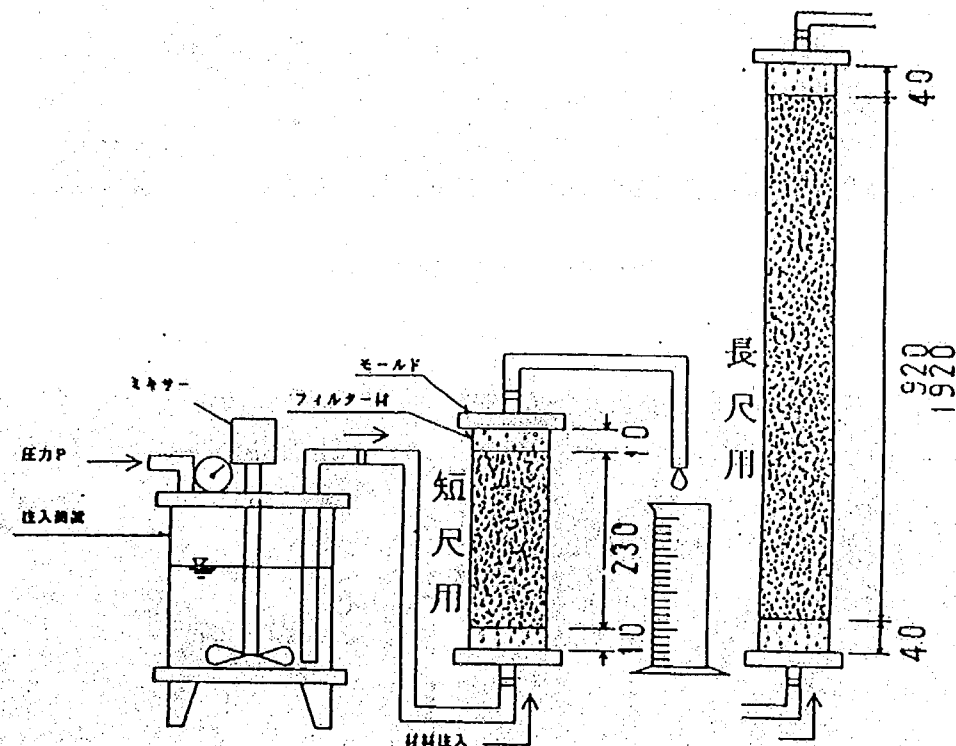
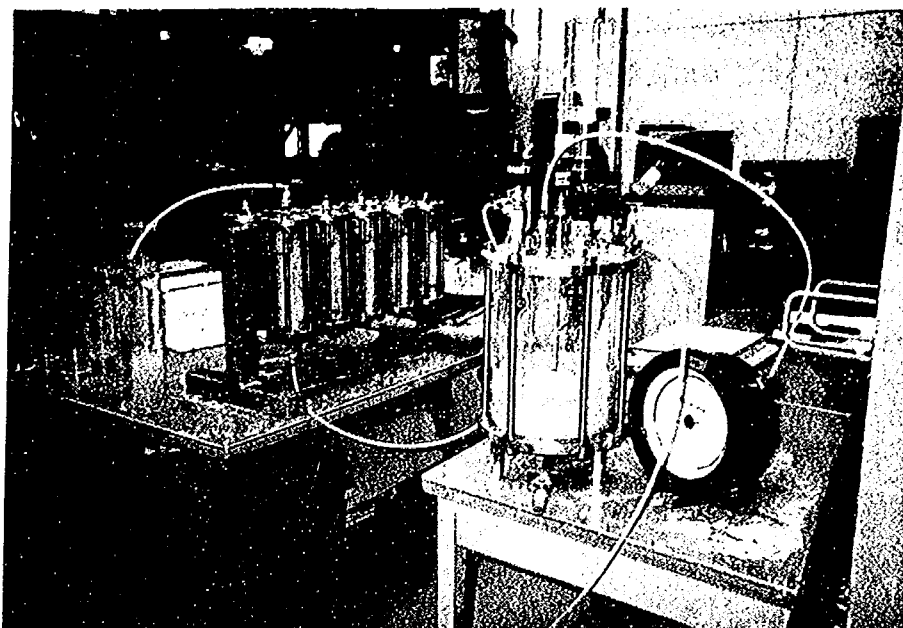
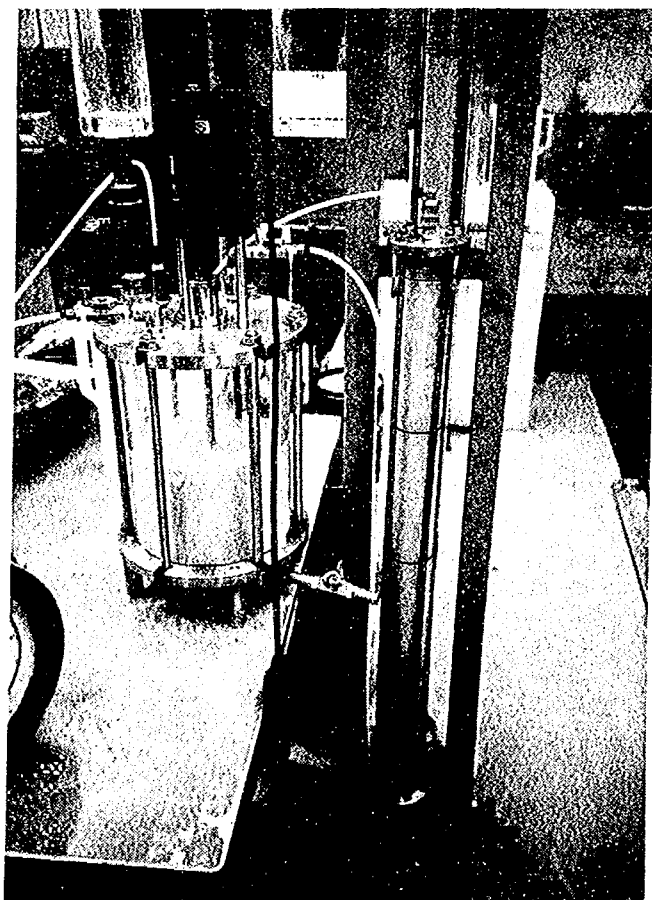


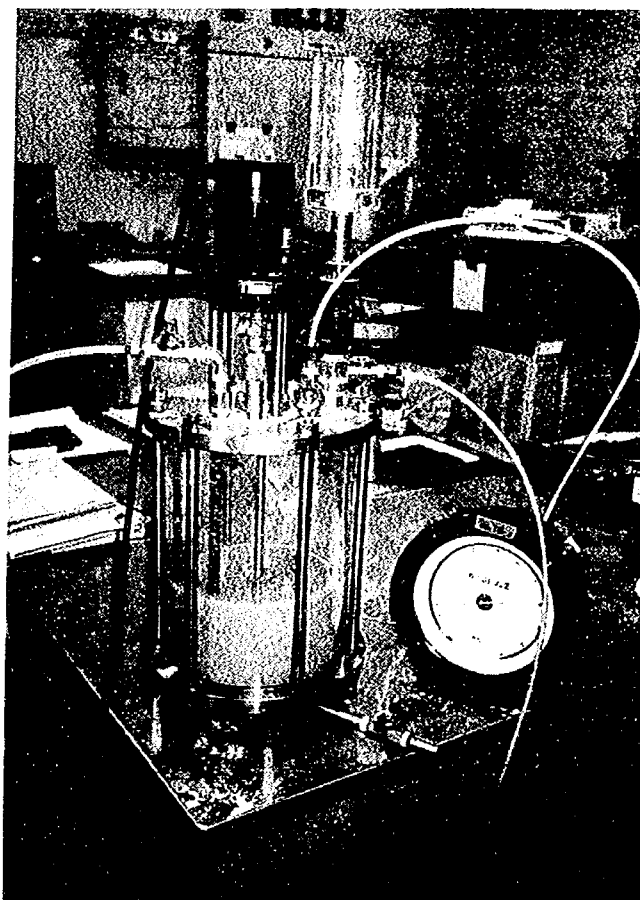
図-5.1.2 注入装置と供試体 (単位mm)



短尺モールドと注入装置



長尺モールド



注入装置

写真-5.1.1 一次元注入試験状況

(1) 定圧による注入限界量までの注入

1) W/Cを変化させた長尺注入条件 1

まず初めに1.0mの長尺モールドを用い、注入圧力が同一でW/Cを変化させた注入試験を行った。表-5.1.2に注入条件を示す。注入は、モールドの注出口からの流量が十分小さくなり、供試体の固結長及び色調に変化が見られなくなる限界注入まで行った。

供試体はモールド内で7日間養生した後、上端部の未固結砂を弱水で洗い出し、残った固結体の長さを計測して固結長とした。

表-5.1.2 W/Cを変化させた長尺注入条件 1

分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)					
		250	500	750	1000	3000	5000
1.0	1.0						

2) 充填量測定 of 短尺注入条件 1

25cmの短尺モールドを用いて超微粒子セメントの充填量を測定するための注入試験を行った。表-5.1.3に注入条件を示す。試験は、W/C及び注入圧力を変えて短尺モールドの注出口から超微粒子セメント懸濁液が出るまで注入を行った。

表-5.1.3 充填量測定 of 短尺注入条件 1

水セメント比 (%)	分散剤混入率 (%)	注 入 圧 力 (kgf/cm ²)
1000 3000 5000	1.0	0.5 , 1.0 , 1.5 , 2.0

3) 分散剤混入率と注入圧力を変化させた長尺注入条件 2

固結長を効率よく伸ばす注入条件を検討するために、2.0mモールドを用いて注入試験を行った。表-5.1.4に注入条件を示す。分散剤混入率(D/C)を1%、注入圧力を1 kgf/cm²にした標準ケースを基準に分散剤混入率(D/C)を変化させたもの(ケース1, ケース2)と、注入圧力を変化させたもの(ケース3, ケース4)である。これらの注入は限界注入を行い、固結長を求めた。

表-5.1.4 分散剤混入率と注入圧力を変化させた長尺注入条件2

注入項目	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)					
			250	500	750	1000	3000	5000
標準 ケース	1.0	1.0	250 [725]	500 [1695]	750 [2425]	1000 [3545]	3000 [4485]	5000 [3645]
ケース1	2.0	1.0	250 [1595]	500 [2340]	750 [2485]	1000 [3720]	3000 [4290]	5000 [3890]
ケース2	3.0	1.0	250 [1730]	500 [2475]	750 [2525]	1000 [3650]	3000 [3828]	5000 [3640]
ケース3	1.0	2.0	250 [1680]	500 [3055]	—	1000 [5710]	3000 [5135]	5000 [4720]
ケース4	1.0	3.0	250 [1715]	500 [2915]	—	1000 [4135]	3000 [5565]	5000 [5650]

[] の数字は、各ケースの注入限界量 (ml)

(2) 定圧による一定量までの注入

前述の限界注入試験に続き、ここでは定量の注入を行った場合の浸透挙動を検討するため、2.0mモールドを用いて注入試験を行った。表-5.1.5に定量注入の注入条件を示す。条件としては、注入量を一定とした場合と注入セメント量を一定とした場合である。固結長は前述の洗い出しの方法で計測した。

表-5.1.5 注入量と注入セメント量を一定とした長尺注入条件3

注 入 項 目	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比(%)における注入量(ml)				
			250%	500%	1000%	2000%	4000%
定注入量注入	1.0	1.0	720	720	720	720	720
定セメント量注入	1.0	1.0	284	534	1034	2034	4034

(3) 定圧による分散剤を先行注入した場合の注入

ここでは分散剤を先行注入した場合の効果を確認するため、2.0mモールドを用いて注入試験を行った。試験方法は前項の一次元長尺注入と同様である。注入は限界注入を行う。

注入条件を表-5.1.6に示す。各W/C (250%, 1000%, 3000%, 5000%)において、分散剤混入率を3.0%とした。超微粒子セメント懸濁液の作成に使用する水量を5000mlと定め、各W/Cで分散剤量の1.0%を2000mlの水と混ぜ、供試体 (2mモールドの供試体の間隙体積は、平均1844ml) に、注入圧力P=1.0kgf/cm²で先行注入 (注入量は2000ml+分散剤量) を行い、その後、残りの分散剤で混入率2.0%の超微粒子セメント懸濁液 (液量は水5000mlと分散剤量と超微粒子セメント量) を作り、注入圧力P=1.0kgf/cm²で限界注入を行った。

表-5.1.6 分散剤を先行注入した場合の長尺注入条件4

注入項目		分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)					
先行 注入	水+分散剤	1.0	1.0						
	水+分散剤+超微粒子セメント	2.0	1.0	250	—	—	1000	3000	5000
標準ケース *		1.0	1.0	250	500	750	1000	3000	5000
ケース1 *		2.0	1.0	250	500	750	1000	3000	5000

(4) 定圧による超微粒子セメント懸濁液の温度を変化させた注入

超微粒子セメント懸濁液の温度を変化させた場合の固結長に与える影響を調べるため、2.0mモールドを用いて注入試験を行った。試験方法は前項の一次元長尺注入と同様である。注入は限界注入を行った。

注入条件を表-5.1.7に示す。超微粒子セメント懸濁液の温度は① 10℃、② 20℃、③ 40℃とした。

表-5.1.7 懸濁液の温度を変化させた長尺注入条件5

水セメント比 W/C (%)	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	超微粒子セメント 懸濁液温度
1000	2.0	1.0	10℃, 20℃, 40℃

5.1.3 実験結果と考察

(1) 定圧による注入限界量までの注入

1) W/Cを変化させた長尺注入条件 1

図-5.1.3に分散剤混入率 (D/C) を 1 %、注入圧力を 0.5 kgf/cm^2 を一定にした固結長と W/C の関係を示す。この図より、固結長は W/C=1000% で最大となり、W/C がこれよりも離れると固結長は短くなっている。また、W/C が大きくなると固結長は極端に小さくなっている。当初、W/C が大きくなる方が浸透性は良いと予想していたが、これを見る限り最適 W/C が存在している。

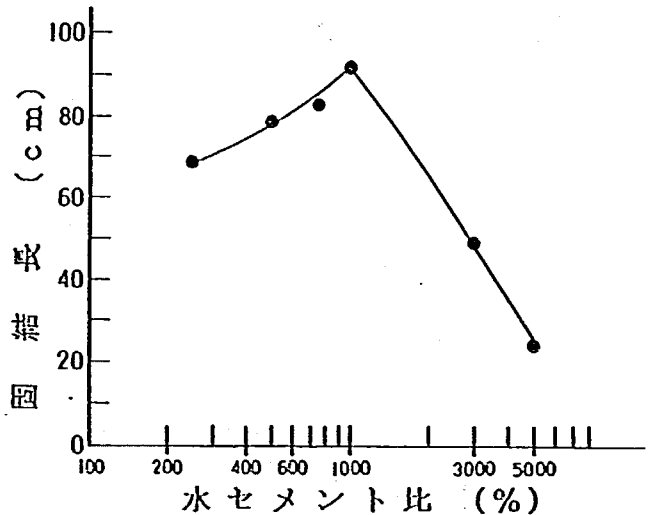


図-5.1.3 固結長と W/C の関係

2) 充填量測定用の短尺注入条件 1

図-5.1.4にセメント充填量比と注入圧力の関係を示す。セメント充填量比は、供試体内の超微粒子セメントの実際の充填量(供試体の乾燥重量から逆算した供試体内のセメント質量)と、計算上の充填量(懸濁液で供試体の間隙を満たされたと仮定したときのセメント質量)の比を表す。したがって、充填量比が 1 より大きければ注入によりセメントが供試体内で濃縮されたことを意味する。

W/C=1000% の場合、注入圧力が変化してもセメント充填量比は一定でほとんど 1.0 であるのに対し、W/C=5000% の場合は、供試体内に留まるセメント量が多く、注入圧力が大きくなるに従いセメント充填量が減少している。また、これらの供試体を上部(注出側)と下部(注入側)とに分け(23cm の供試体を上部 10cm と下部 10cm とに分ける)、一軸圧縮強さを比較したものを図-5.1.5に示す。この 3 図を比較すると、W/C=5000% のとき一軸圧縮強さの上下部の強度差が大きいものに対し、水セメント比が W/C=3000%、1000% と小さくな

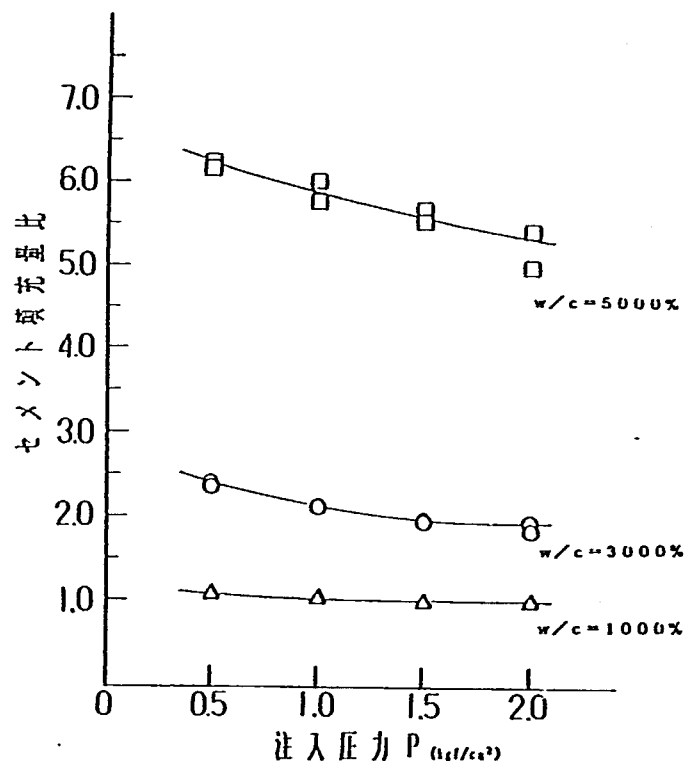


図-5.1.4 セメント充填量比と注入圧力の関係

るに従い強度差は小さくなっている。すなわち、 W/C が大きく、かつ注入圧力が小さくなるとセメント充填量が注入側に片寄っていることが考えられる。これらより、 W/C が著しく大きく、かつ低注入圧力（低注入流量）であると超微粒子セメントの粒子が砂粒子により濾過される現象が顕著に発生し、浸透性が損なわれる（固結長が伸びない）ことが考えられる。

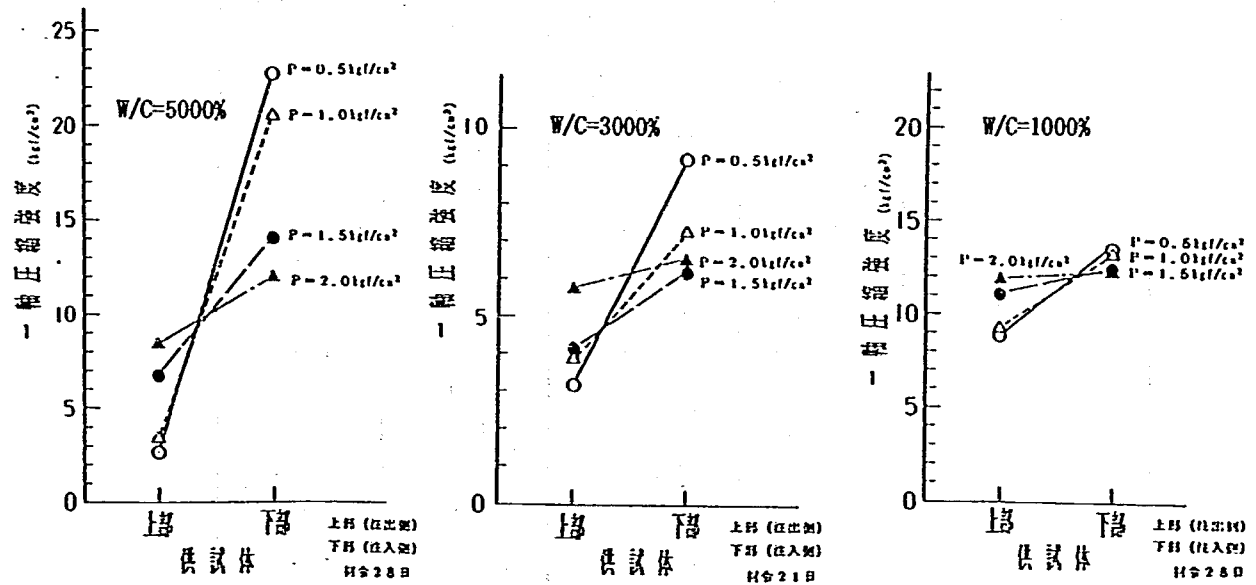


図-5.1.5 供試体の上下部での一軸圧縮強度の差

3) 分散剤混入率と注入圧力を変化させた長尺注入条件 2

表-5.1.4の長尺注入条件 2 の一次元注入試験の測定結果表を表-5.1.8に示す。

表-5.1.8 注入試験測定表 (長尺注入条件 2)

水セメント比 (W/C)	注 入 項 目	注入量 Q (mℓ)	注入時間 (min)	固結長 L (cm)
250%	標準ケース	725	35	69
	ケース1	1595	38	150
	ケース2	1730	39	154
	ケース3	1680	15	149
	ケース4	1715	14	155
500%	標準ケース	1695	55	79
	ケース1	2340	50	161
	ケース2	2475	53	165
	ケース3	3055	27	156
	ケース4	2915	21	179
750%	標準ケース	2425	65	83
	ケース1	2485	34	165
	ケース2	2525	36	169
	ケース3	—	—	—
	ケース4	—	—	—
1000%	標準ケース	3545	94	92
	ケース1	3720	50	167
	ケース2	★3650	★51	★192
	ケース3	5710	47	172
	ケース4	★4135	★22	★192
3000%	標準ケース	4485	122	49
	ケース1	4290	58	79
	ケース2	3828	49	136
	ケース3	5135	77	75
	ケース4	5565	39	106
5000%	標準ケース	3645	81	24
	ケース1	3890	40	48
	ケース2	3640	42	80
	ケース3	4720	65	48
	ケース4	5650	52	69

水セメント比 (W/C)	注 入 項 目	充 填 比	平均セメント量 (g/cm)	固結長形成速度 (cm/min)	注入流量速度 (ml/min)
250%	標準ケース	1.13	3.91	1.97	20.71
	ケース1	1.11	3.75	3.95	41.97
	ケース2	1.17	3.97	3.95	44.36
	ケース3	1.17	3.98	9.93	112.00
	ケース4	1.15	3.91	11.07	122.50
500%	標準ケース	2.32	4.02	1.46	30.82
	ケース1	1.51	2.73	3.22	46.80
	ケース2	1.56	2.81	3.11	46.70
	ケース3	2.04	3.67	5.78	113.15
	ケース4	1.70	3.05	8.52	138.81
750%	標準ケース	3.15	3.70	1.28	37.31
	ケース1	1.57	1.92	4.85	73.09
	ケース2	1.55	1.91	4.69	70.14
	ケース3	—	—	—	—
	ケース4	—	—	—	—
1000%	標準ケース	4.16	3.73	0.98	37.71
	ケース1	2.32	2.16	3.34	74.40
	ケース2	★1.98	★1.84	★3.77	★71.57
	ケース3	3.46	3.21	3.66	121.49
	ケース4	★2.24	★1.74	★8.72	★187.95
3000%	標準ケース	9.88	3.02	0.40	36.76
	ケース1	5.86	1.79	1.36	73.97
	ケース2	2.93	0.93	2.78	78.12
	ケース3	7.39	2.26	0.97	66.69
	ケース4	5.47	1.73	2.72	142.69
5000%	標準ケース	16.42	3.02	0.30	45.00
	ケース1	8.74	1.61	1.20	97.25
	ケース2	4.91	0.90	1.91	86.69
	ケース3	10.61	1.95	0.74	72.62
	ケース4	8.84	1.63	1.33	108.65

注) 標準ケース 分散剤混入率1%、注入圧力1.0kgf/cm²

ケース1 分散剤混入率2%、注入圧力1.0kgf/cm²

ケース2 分散剤混入率3%、注入圧力1.0kgf/cm²

ケース3 分散剤混入率1%、注入圧力2.0kgf/cm²

ケース4 分散剤混入率1%、注入圧力3.0kgf/cm²

★ モールドを通過した時点の測定値

平均セメント量は、単位固結長当りの平均セメント含有量である

図-5.1.6は、固結長とW/Cの関係を、図-5.1.7は、固結長とD/Cの関係を示す。図-5.1.6より、いずれの注入条件においてもW/C=1000%付近で最も固結長が大きく、ケース2、ケース4では長さ2.0mのモールドを通過した。分散剤の影響に関しては、図-5.1.7より、分散剤混入率を2%にするとそれぞれのW/Cで、混入率1%の約2倍の固結長を得ている。しかし、混入率を3%にするとW/C=1000%を境界として、これよりもW/Cが小さい側は固結長の伸びはなく、大きい側は3倍近い伸びを示している。注入圧力の影響に関しては、圧力を2倍と3倍としたケース3、ケース4は、分散剤を2倍、3倍とした場合とそれぞれほぼ同様な傾向を示している。固結長に関しては、分散剤混入率を多くすることにより、注入圧力を大きくした場合と同じ効果があることがわかった。

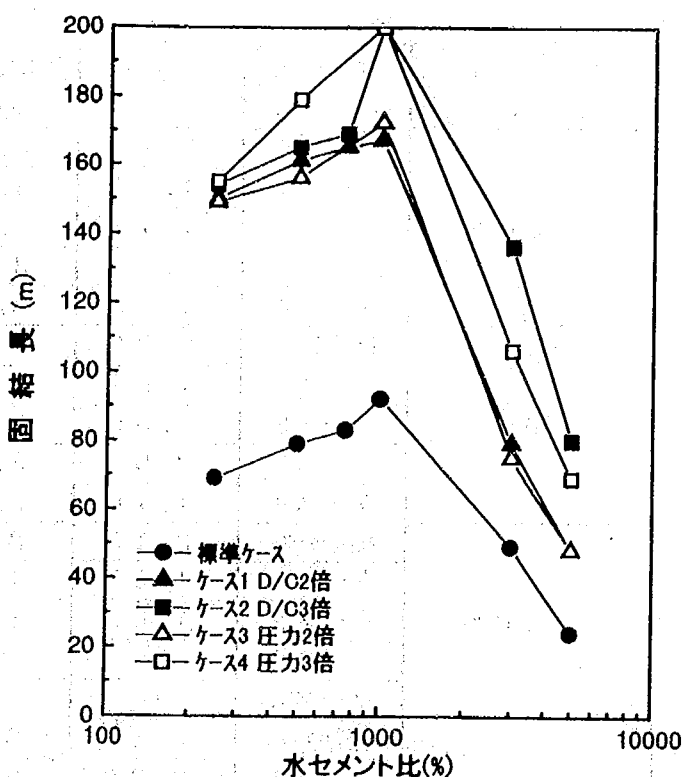


図-5.1.6 固結長とW/Cの関係

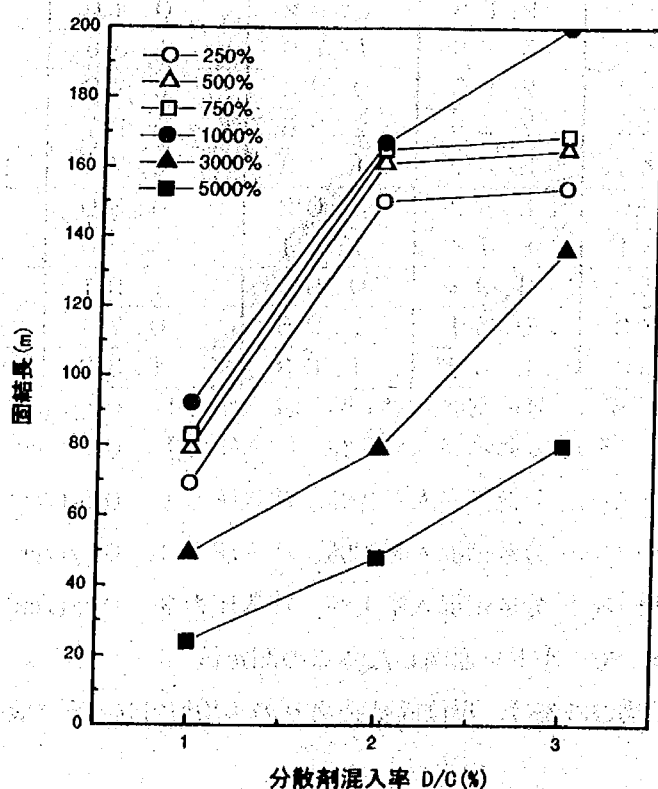


図-5.1.7 固結長とD/Cの関係

超微粒子セメントのような懸濁液は、砂粒子間の隙隙中で濾過されながら浸透するため、懸濁液のW/Cが変化しながら充填されていく。このような濾過現象を把握するために注入効率の検討を充填比（注入量を固結体の注入前隙隙体積で除したもので、1.0に近いほど注入効率は良い）に基づいて行った。図-5.1.8は各注入条件のもとでの、充填比とW/Cの関係を示す。W/C=250%の場合は、注入条件を変えても充填比はほぼ1.0であったが、これよりもW/Cが大きくなるほど充填比は大きくなり、注入効率（注入時間／固結長）が低下している。特にW/C>1000%になると濾過現象が顕著に現れている。注入条件の影響に関しては、分散剤の多いケース2が各W/Cにおいて最も注入効率が良い。これは、分散剤がセメント粒子により多く吸着することにより、砂粒子との潤滑剤のような役割を果たし濾過現象を生じにくくしているためと思われる。

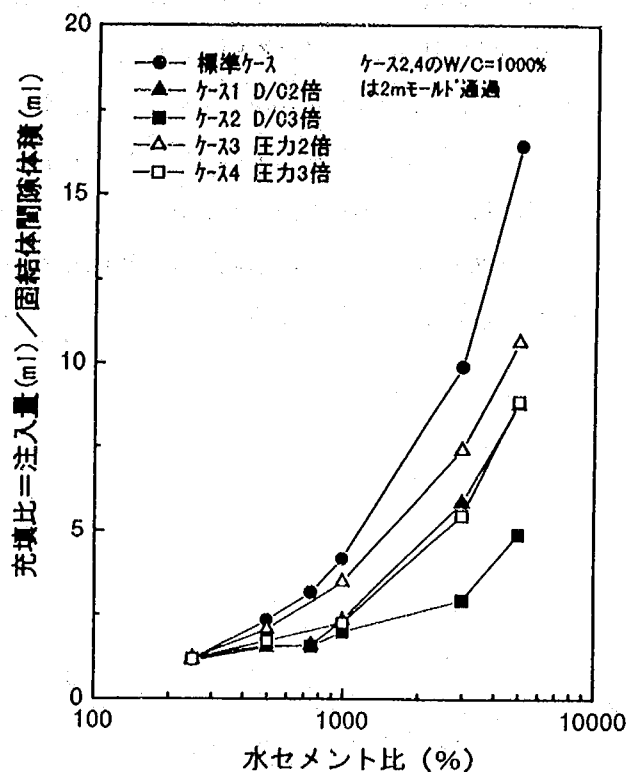


図-5.1.8 充填比とW/Cの関係

次に、注入効率を注入時間の観点から検討する。ここで、単位時間当りの注入量を「注入流量速度」、単位注入時間当りの固結長を「固結体形成速度」とする。図-5.1.9は各注入条件のもとでの、注入流量速度とW/Cの関係を、図-5.1.10は固結体形成速度とW/Cの関係を示す。これを比較すると、全体的には、W/Cが小さい場合には注入流量速度は小さいが、少ない注入量でより長い固結長が得られるので、固結体形成速度は大きくなっている。一方、W/Cの大きい場合には注入流量速度は大きいが、濾過現象が著しく発生するために固結体形成速度は小さくなっている。分散剤の影響に関しては、分散剤の多いケース1，ケース2は、標準注入よりも注入流量速度も固結体形成速度も大きくなっている。注入圧力に関しても、注入圧力の高いケース3，ケース4は標準注入よりも注入流量速度も固結体形成速度も大きくなっている。ただし、W/Cの小さい場合に

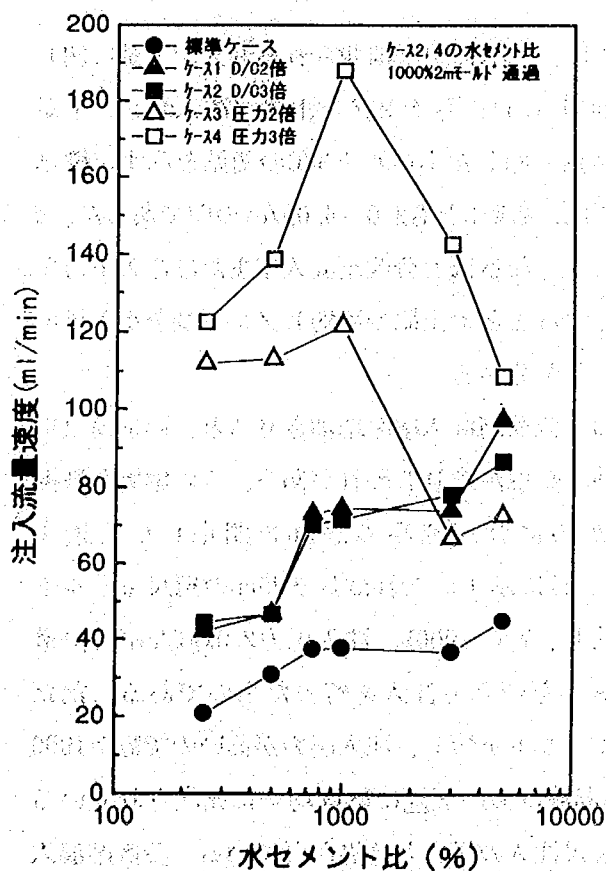


図-5.1.9 注入流量速度とW/Cの関係

はこれらの増加率が著しく高いが、W/Cの大きい場合には強制的に圧入されている傾向が強くなり、これらの増加率は比較的小さくなっている。同図および図-5.1.6～図-5.1.8より、分散剤混入率及び注入圧力を上げると、注入流量速度を大きくすることができる。その結果として濾過現象が生じにくくなり、固結長が増加すると言える。

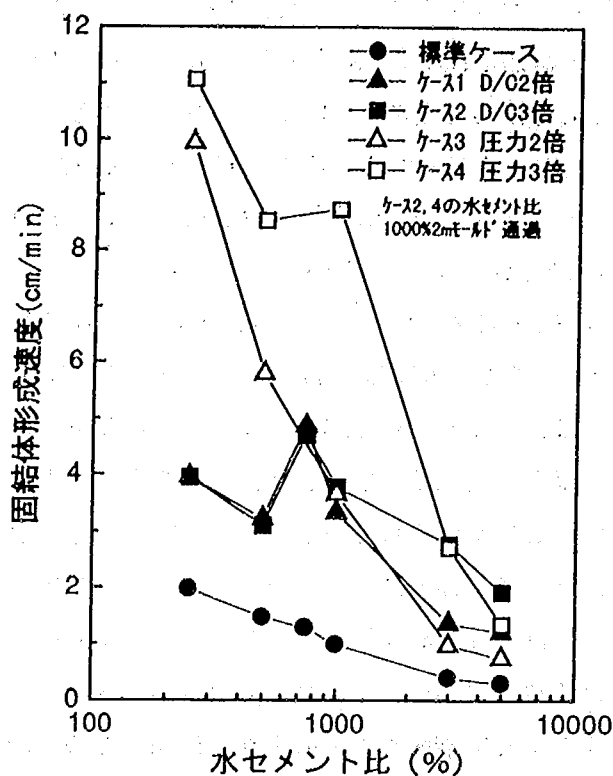


図-5.1.10 固結体形成速度とW/Cの関係

つぎに、注入により消費されるセメント量に関して、図-5.1.11に平均セメント量（注入セメント量を固結長で除したものと）W/Cの関係を示す。標準注入では、各W/Cとも3.0～4.0g/cmの間であるが、W/Cが大きくなるほど分散剤混入率または注入圧力を大きくすることで上記の平均セメント量を小さくできることが分かる。

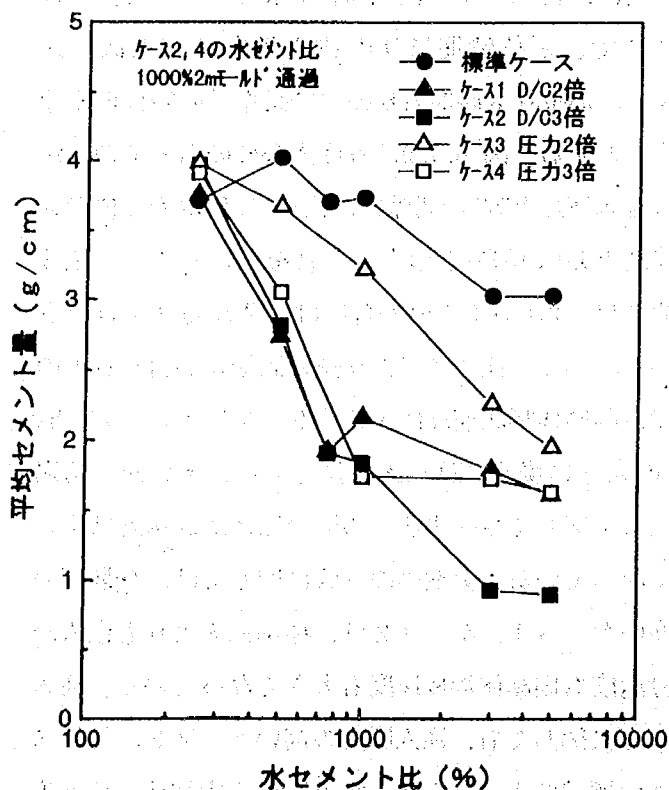


図-5.1.11 平均セメント量とW/Cの関係

強度に大きな差は認められなかった。ただし、長いモールドを用いて限界注入量まで注入した場合には、注入口側のセメント濃度および分散剤濃度が非常に大きくなるため、一週間後も固結していない現象が見られた。

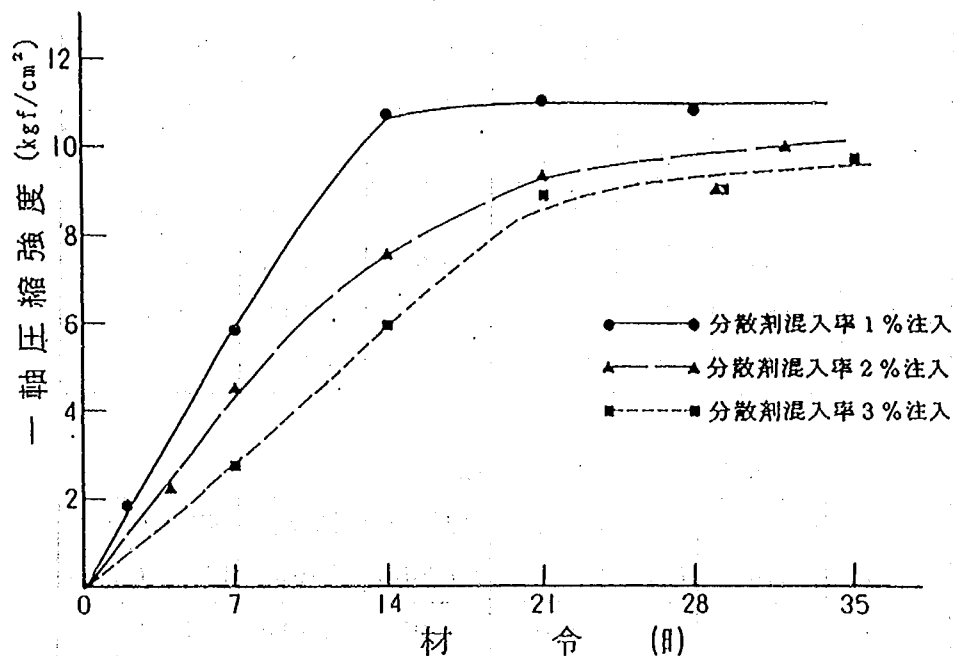


図-5. 1.12 分散剤混入率の変化にともなう
強度発現の差

(2)定圧による一定量までの注入（長尺注入条件3）

表-5.1.5の注入量と注入セメント量を一定とした長尺注入条件3の一次元注入試験の測定結果表を表-5.1.9、表-5.1.10に示す。

表-5.1.9 定セメント注入結果表

水セメント比 (W/C)	注 入 量 (ml)	注 入 時 間 (min)	浸 透 長 (cm)	充 填 比	固結体形成速度 (cm/min)	注入流量速度 (ml/min)	単位固結長当り平均 セメント量 (g/cm)
250%	284	4.42	30	1.02	6.97	64.30	3.33
500%	534	5.60	41	1.41	7.32	95.36	2.44
1000%	1034	11.03	51	2.19	4.62	93.72	1.96
2000%	2034	24.50	48	4.58	1.96	83.02	2.08
4000%	4034	62.12	37	11.77	0.60	64.94	2.70

表-5.1.10 定注入量注入結果表

水セメント比 (W/C)	注入量セメン ト量(ml)	注 入 時 間 (min)	浸 透 長 (cm)	充 填 比	固結体形成速度 (cm/min)	注入流量速度 (ml/min)	単位固結長当り平均 セメント量 (g/cm)
250%	284.1	32.35	65	1.20	2.01	20.96	3.91
500%	135.0	10.15	55	1.41	5.42	70.94	2.46
1000%	69.7	7.75	38	2.04	4.90	92.90	1.83
2000%	35.4	6.82	29	2.68	4.25	105.62	1.22
4000%	17.9	6.83	13	5.98	1.90	105.37	1.38

一定セメント量100gを注入したときの固結長および充填比とW/Cの関係を図-5.1.13に、一定注入量720ml（限界注入量まで注入したときのW/C=250%の最大注入量720mlを基準にした）を注入したときの固結長および充填比とW/Cの関係を図-5.1.14に示す。一定セメント量を注入した場合、固結長や充填比に及ぼすW/Cの影響は限界注入量まで注入した場合の結果と同様で、W/C=1000%で固結長が最も大きく、W/Cが大きくなるほど充填比も大きくなり、注入効率が低下している。一方、一定注入量を注入した場合、充填比は一定セメント量注入と同様な傾向を示すが、固結長はW/C=250%が最も大きくW/Cが大きくなるにつれ小さくなっている。しかし、W/C=250%以外は限界注入量に達していないので注入量を大きくしていくと最終的には限界注入量までの注入の場合と同様に充填比が上がりながら固結長が伸びると思われる。

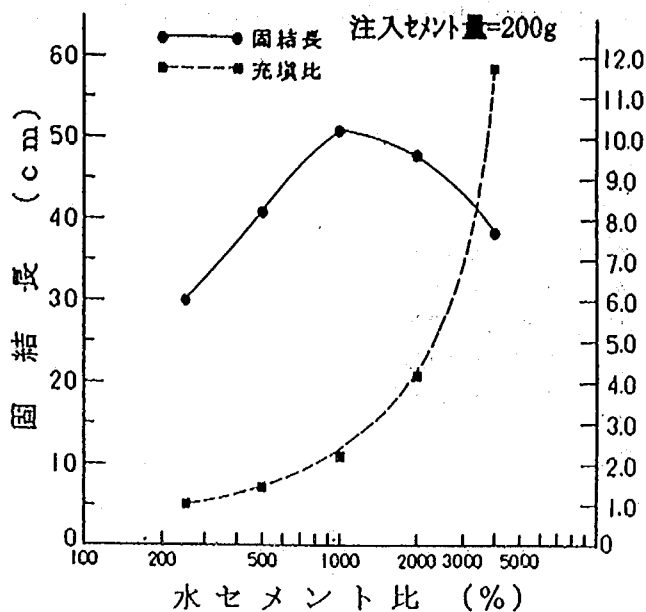


図-5.1.13 定セメント量注入での固結長
および充填比とW/Cの関係

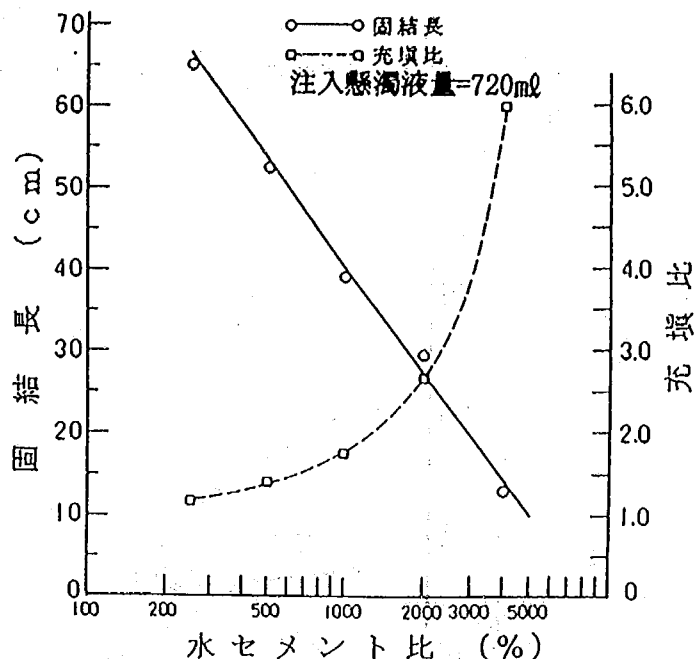


図-5.1.14 定注入量での固結長
および充填比とW/Cの関係

それぞれの場合の固結体形成速度および平均セメント量とW/Cの関係を図-5.1.15、図-5.1.16に示す。固結体形成速度は両注入ともW/C=500%が最も大きく、平均セメント量は一定セメント量注入ではW/C=1000%、一定注入量ではW/C=2000%がそれぞれ最小である。ただし、表-5.1.4、表-5.1.5に示したように、一定セメント量注入の場合は、W/Cが大きくなるほど、一定注入量注入の場合はW/Cが小さくなるほど限界注入量に近くなる。このように注入量が限界注入量に近づくほど固結体形成速度が遅くなり、平均セメント量が大きくなるため、定量注入の場合、固結体形成速度が最大、または平均セメント量が最小となる最適なW/Cは注入量の大小により変わってくるものと思われる。

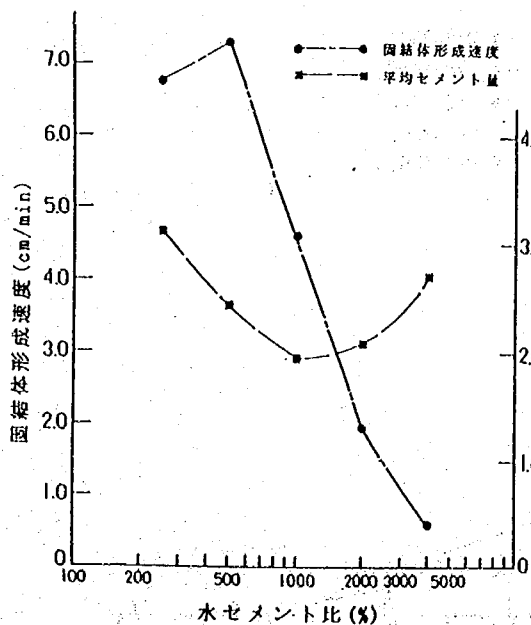


図-5.1.15 定セメント量注入での固結体形成速度
および平均セメント量の関係

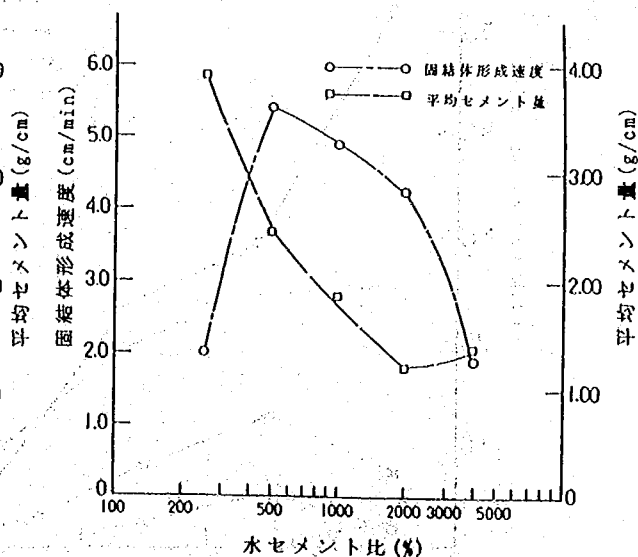


図-5.1.16 定量注入での固結体形成速度
および平均セメント量とW/Cの関係

参考として、一定セメント量注入と一定注入量注入の固結長内の距離と一軸圧縮強さの関係を図-5.1.17、図-5.1.18に示す。

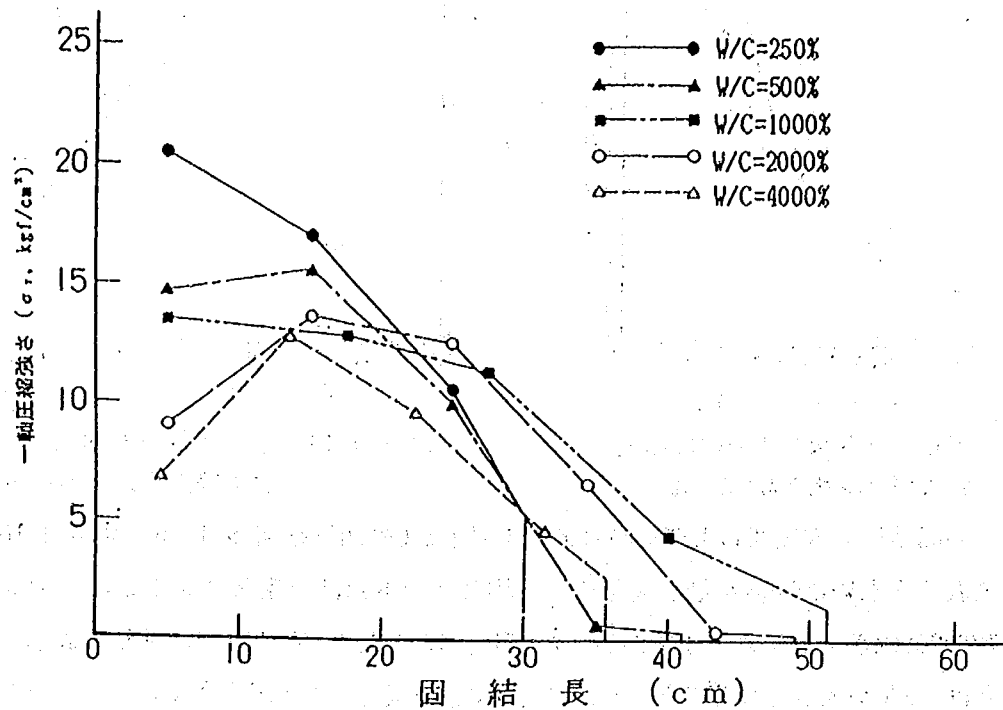


図-5.1.17 一定セメント量注入の固結長内の距離と一軸圧縮強さの関係

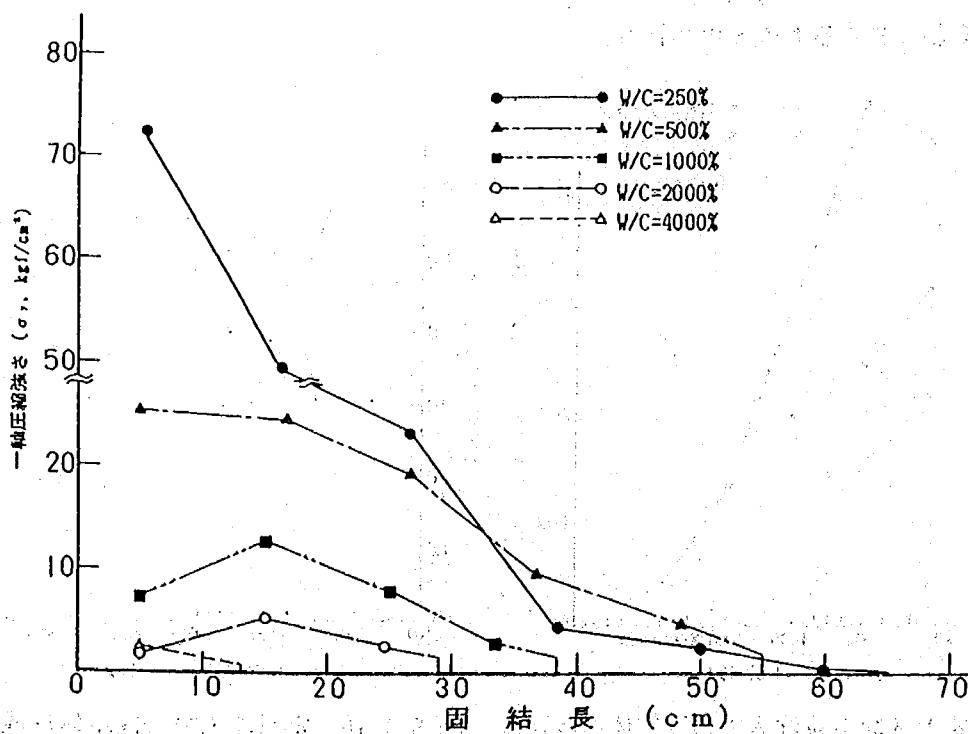


図-5.1.18 一定注入量注入の固結長内の距離と一軸圧縮強さの関係

(3) 定圧による分散剤を先行注入した場合の注入（長尺注入条件4）

図-5.1.19に固結長とW/Cの関係を示す。比較のため、表-5.1.4の注入条件の結果の標準ケースとケース1を記す。

この図より、先行注入を行ったものとケース1はほとんど同じ傾向を示している。よって、先行した分散剤の効果はなく、分散剤は砂の粒子に対して何の働きかけもしないと思われる。

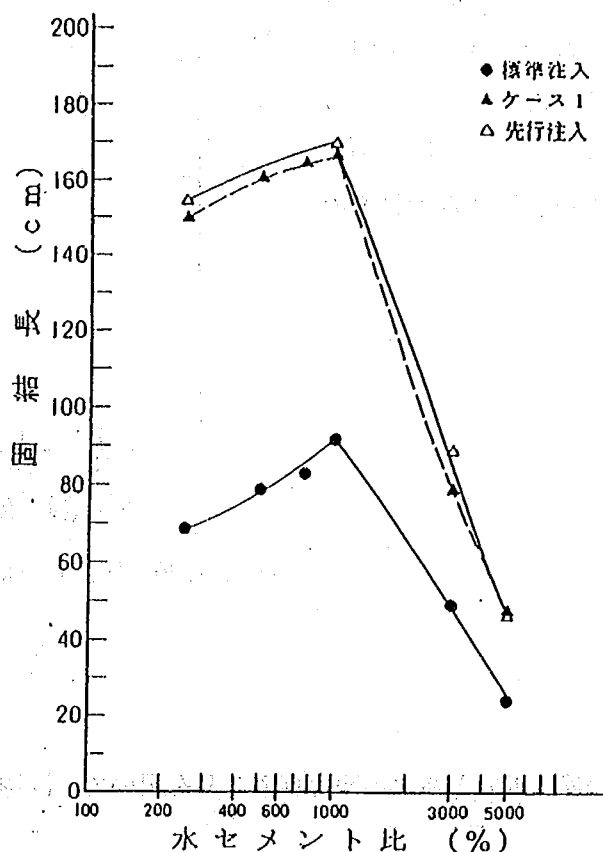


図-5.1.19 分散剤を先行注入した場合の固結長とW/Cの関係

(4) 定圧による超微粒子セメント懸濁液の温度を変えた注入（長尺注入条件5）

実際の懸濁液の温度を表-5.1.11に、図-5.1.20に固結長と温度の関係を示す。

表-5.1.11 懸濁液測定温度

	設定温度	注入初期温度	注入終了温度
①	10°C	7.5°C	9.5°C
②	20°C	18.5°C	18.5°C
③	40°C	37.0°C	33.5°C

注) 18.5°Cの注入は表-5.1.4のケース1の結果を用いた

この図より、固結長は②と③ではほとんど差はなかった。しかし、①は他の二つとは異なり固結長が伸びていなかった。懸濁液の粘度は、温度が低いほど大きくなるためこの影響があったと思われる。懸濁液は、砂の空隙の中にセメント粒子が充填されるため、充填された所は透水性が徐々に悪くなる。これに加え、懸濁液は濾過現象により水だけが先に浸透していくため、低温下での水の粘度が大きくなると浸透性がさらに悪くなることが考えられる。また、間隙水（今回は18°C前後）の温度が懸濁液の温度より小さいか同温の場合は、間隙水の粘度の影響の方が大きいと考えられる。

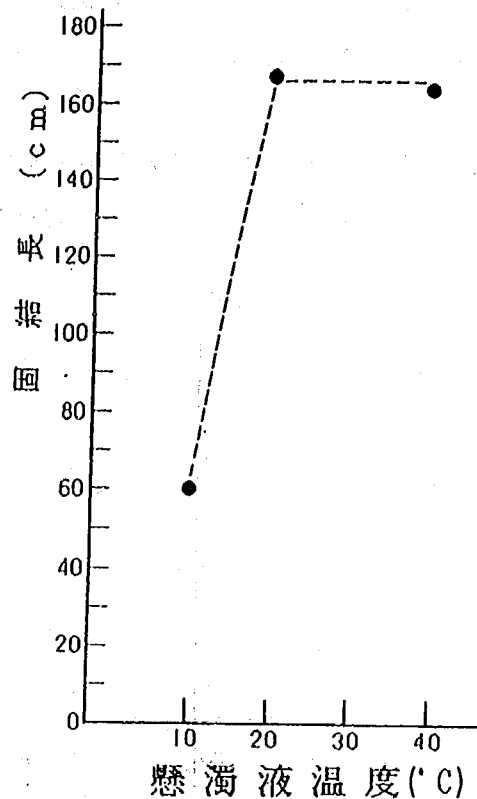


図-5.1.20 固結長と懸濁液温度の関係

5.1.4 まとめ

超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近いとされる東北珪砂7号を用いて、浸透特性に関する実験を行い以下の成果が得られた。

- (1) 限界注入時に固結長が最大になるのは、 $W/C=1000\%$ であった。しかし、定量注入においては、固結体形成速度が最大、または平均セメント量が最小となる最適な W/C は注入量によって変わってくることが予測された。
- (2) 注入圧力、分散剤混入率を大きくすると注入流量速度と固結体形成速度が大きくなり、固結長が伸びる傾向にあった。特に W/C の大きい側は、注入圧力よりも分散剤混入率を増加させた方が少ない注入量で均一に長距離を充填できた。
- (3) W/C が大きくなるとともに濾過現象が大きくなるが、注入圧力や分散剤混入率を大きくすることにより濾過現象が緩和された。特に、分散剤混入率を大きくすると超微粒子セメントの分散性が向上し、最も効果的に濾過の影響を小さくできた。

5.2 一次元注入実験（その2）

5.2.1 実験目的

前節5.1において、超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近い東北珪砂7号を用いて、注入材の浸透特性に及ぼす水セメント比、分散剤の影響を調べた。今回は、超微粒子セメント懸濁液の浸透特性における最適分散剤、注入材の最適水セメント比（W/C）および最適分散剤混入率（D/C）を明らかにするため、一次元注入実験を行った。

5.2.2 試料及び試験方法

注入材と試料砂は(5.1)と同様に超微粒子セメントと東北珪砂7号を用いた。一次元注入実験は、固結長を測定するためにモルタル長2.0mの長尺注入とした。供試体は相対密度 $D_r=50\%$ になるように締め固めた。注入材の供試体の作成方法および実験装置は(5.1)を参照されたい。

注入条件を表-5.2.1、表-5.2.2に示す。表-5.2.1に示す実験は浸透性の面で最適な分散剤の種類を求めることを目的とし、代表的な分散剤を注入材に混入し、一定圧力及び水セメント比のもと、限界注入を行った。

表-5.2.2に示すケース1～10の実験は最適水セメント比を求めるため、一定圧力のもと、水セメント比を250～3000%の範囲で変化させて注入を行った。分散剤混入率をD/C（分散剤と注入材の比）=4～5%の範囲で変化させた。

表-5.2.2に示すケース4, 9, 11～14, 15～19の実験は最適分散剤と目される二つの分散剤（ β -ナフタリン系、ナフタリン系）の浸透特性を求めるため、一定圧力のもと、分散剤混入率をD/C（分散剤と注入材の比）=4～12%の範囲で変化させた。

表-5.2.1 一次元浸透注入の条件1

注入方法	分散剤	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)
限界注入	ホリカルボン酸系	4	1.0	1000
	リグニン系	4		
	芳香族系	4		
	β -ナフタリン系	1, 2, 3		
	ナフタリン系	1, 2, 3		

表-5.2.2 一次元浸透注入の条件2

ケース	注入方法	分散剤	分散剤混入率 (%)	注入圧力 p(kgf/cm ²)	水セメント比 (%)
1～5	限界注入	β -ナフタリン系	4	1.0	250, 500, 750, 1000, 3000
6～10			5		250, 500, 750, 1000, 3000
11～14			6, 8, 10, 12		1000
15～19		ナフタリン系	4, 6, 8, 10, 12		1000

5.2.3 実験結果と考察

(1) 最適分散剤

表-5.2.1の注入条件のもとで行った実験の結果を図-5.2.1に示す。β-ナフタレン系及びナフタレン系分散剤は混入率が少ないにもかかわらず、他の分散剤よりも浸透性が良いことがわかる。特に、β-ナフタレン系分散剤は混入率が1,2%でも浸透性が良く、ナフタレン系分散剤にしても混入率を3%にした場合、β-ナフタレン系と同様に懸濁液が2mモールドを通過した。

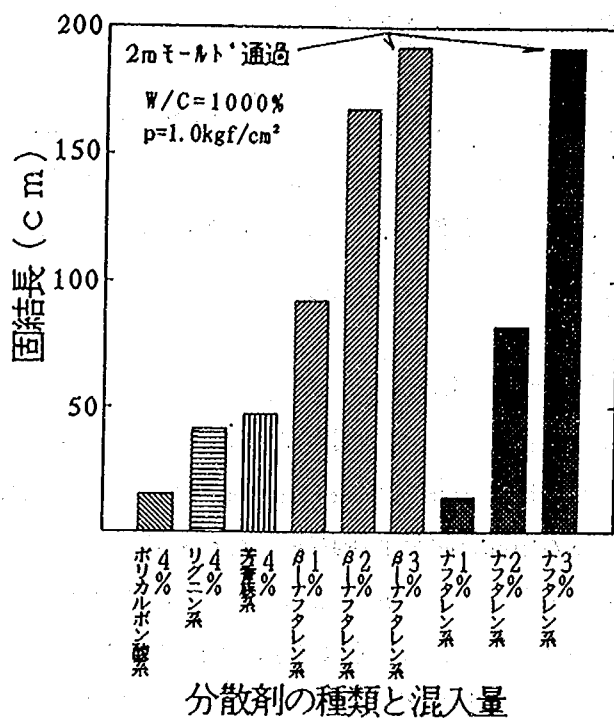


図-5.2.1 分散剤と固結長の関係

(2) 最適水セメント比 (W/C)

表-5.2.2に示すケース1~10の実験結果を図-5.2.2に示す。分散剤混入率1,2,3%については前節の表-5.1.4の結果を引用した。この図から水セメント比が大きくなるとともに固結長は長くなるが、W/C=1000%を越え、W/C=3000%になると固結長は短くなる。また、分散剤混入率を増やすことで固結長は長くなる。

分散剤混入率が4%、5%の場合の2mモールド通過時の注入時間と注入量の関係を図-5.2.3に、注入量と注入速度の関係を図-5.2.4に示す。これらの図から水セメント比が大きくなるほど注入量が多くなり、長時間注入を継続した後も注入速度が低下しないことが判る。また、分散剤の混入率が変わっても、同一水セメント比では同じ注入経路をたどっている。これは注入経路は水セメント比に影響され、定量注入においては水セメント比が大きいほど注入圧が上がらないことを示唆し、近接構造物等の影響を考慮する場合好ましいことであると言える。なお、水セメント比が1000%を越えると固結長が短くなり

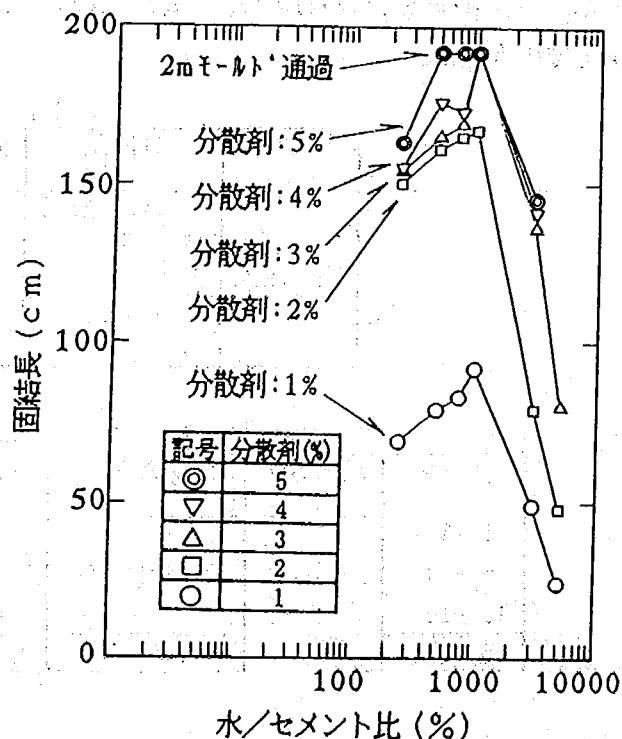


図-5.2.2 W/Cと分散剤の変化に伴う固結長

(図-5.2.2)、他方、注入量は単調に増え続けているが(図-5.2.3)、これは土粒子の濾過現象によりセメント粒子が(おそらく注入孔近傍で)拘束されるためではないかと推測している。

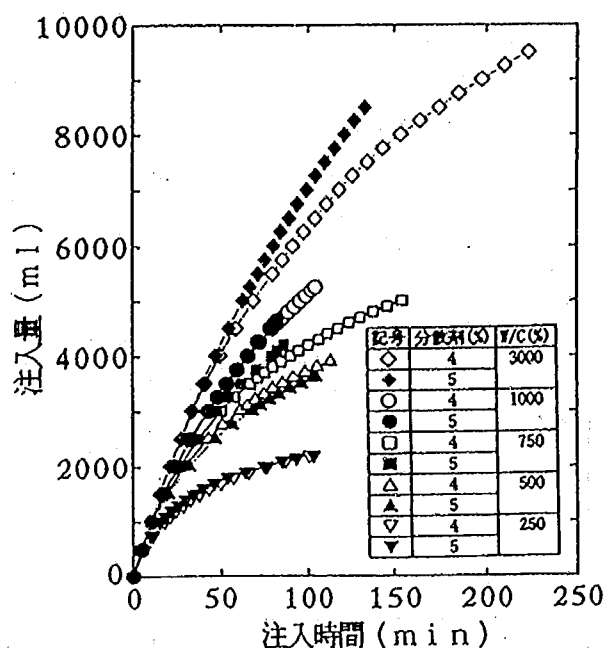


図-5.2.3 2m²- μ 通過時の注入時間と注入量の関係 (分散剤混入率4, 5%)

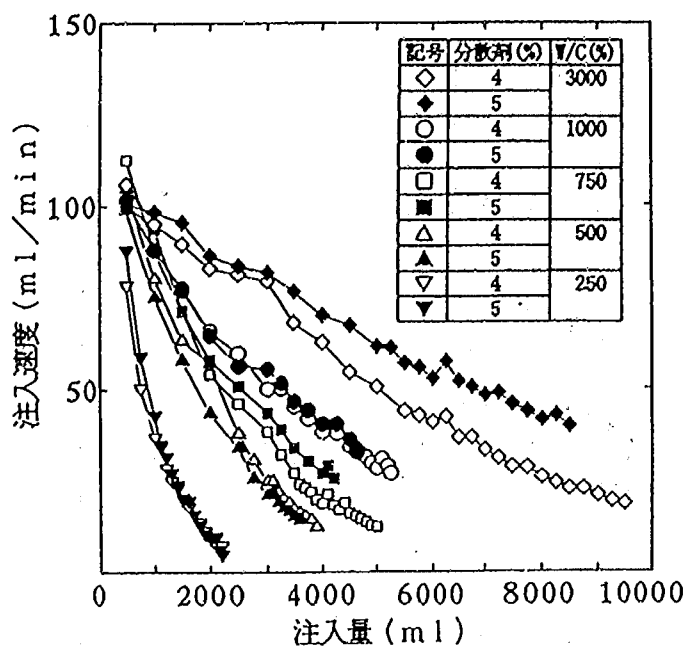


図-5.2.4 2m²- μ 通過時の注入量と注入速度の関係 (分散剤混入率4, 5%)

ここで、分散剤が注入材の粘度に及ぼす影響を調べた。表-5.2.3、表-5.2.4に β -ナフタリ系及びナフタリ系分散剤での配合条件をそれぞれ示す。粘度の経時変化を測定した結果を図-5.2.5、図-5.2.6に示す。この図から超微粒子セメント単体の懸濁液に比べ、分散剤を混入した懸濁液は粘度が5割程度低下し、120分経た後も粘度はほとんど上昇しないことが判る。水セメント比が大きいほど粘度は下がり、水セメント比1000%、 β -ナフタリ系分散剤5%の懸濁液は粘度が約3.5cp、ナフタリ系分散剤8~12%の懸濁液は粘度が3~5cpであり、水ガラス系薬液 (一般的主剤濃度25%) の初期粘度約2.5cpに比べかなり近い値になっており、この懸濁液の浸透性の良い要因の一つであると考えられる。なお、 β -ナフタリ系でW/C=750%の場合、分散剤混入率D/C=3%で粘度に変化が見られない。粘度を低下させる観点からは、3%未満の混入率で頭打ちとなることを示唆している。

以上に述べた固結長および浸透特性、粘度の経時変化から総合的に判断すると、注入材の最適水セメント比はW/C=1000%付近であると言える。

表-5.2.3 粘度測定のための超微粒子セメント懸濁液配合条件1

分散剤	分散剤混入率 (%)	水セメント比 (%)
β -ナフタリ系	0, 5	1000
	0, 3, 5	750
	0, 5	500

表-5.2.4 粘度測定のための超微粒子セメント懸濁液配合条件2

分散剤	分散剤混入率 (%)	水セメント比 (%)
ナフタリ系	8	1000
	10	
	12	

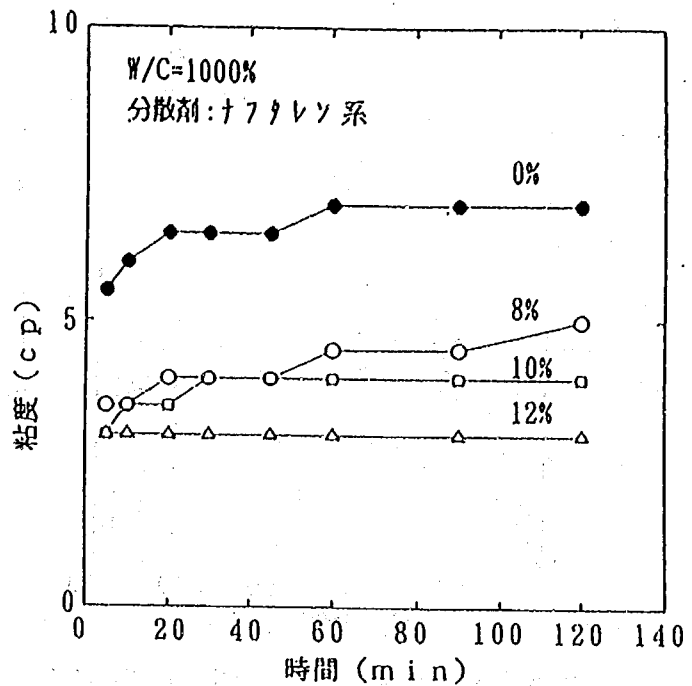
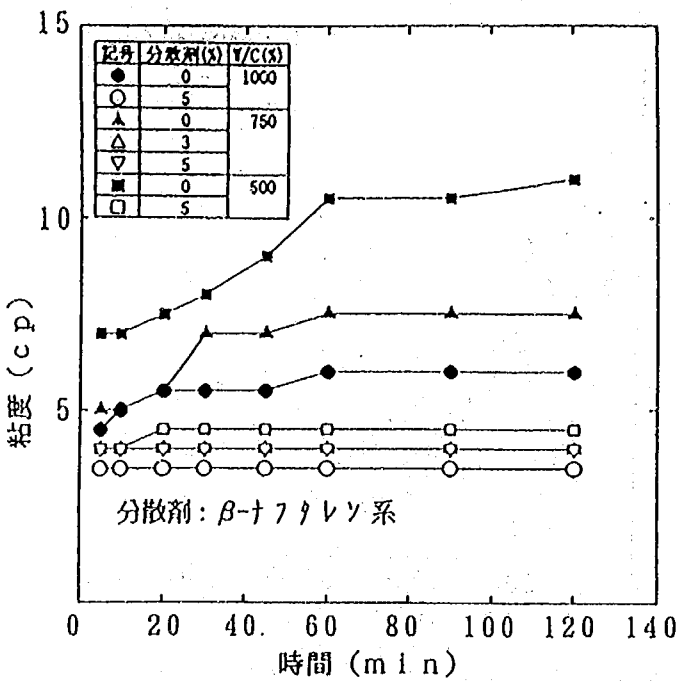


図-5.2.5 超微粒子ミット懸濁液の粘度の経時変化
(分散剤: β -ナフタレン系)

図-5.2.6 超微粒子ミット懸濁液の粘度の経時変化
(分散剤: ナフタレン系)

(3) 最適分散剤混入率 (D/C)

表-5.2.2に示すケース1~10の実験から、W/C=1000%が最適と判断された。そこで、ケース11~19においてはW/C=1000%を一定にして、D/Cを変化させた実験を行った。注入時間と注入量および注入量と注入速度の測定結果を図-5.2.7、図-5.2.8、図-5.2.9、図-5.2.10に示す。分散剤混入率が3%を越えると懸濁液は2mモールドを通過するので、これらの図のデータは注入開始から懸濁液が2mモールドを通過する時点までのものである。

図-5.2.1に示したように β -ナフタレン系分散剤は混入率が1,2%の場合ナフタレン系よりも固結長が伸びているが、混入率が4%以上の場合、二つの分散剤の懸濁液は同じ注入経路をたどり、分散剤を増やすほどより少ない注入量で懸濁液が通過しており、浸透効率が良くなること判る。

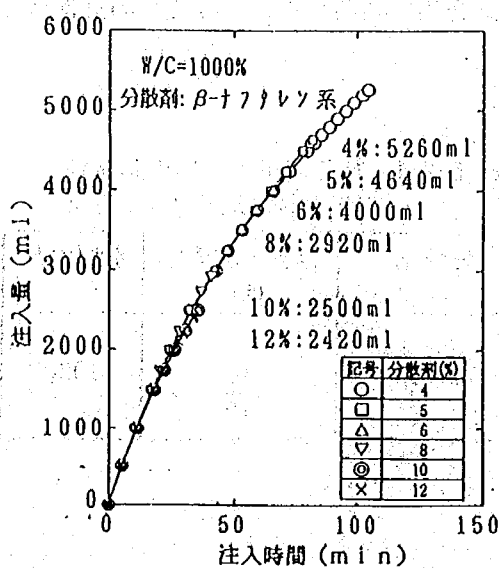


図-5.2.7 2mモールド通過時の注入時間と注入量の関係 (分散剤: β -ナフタレン系)

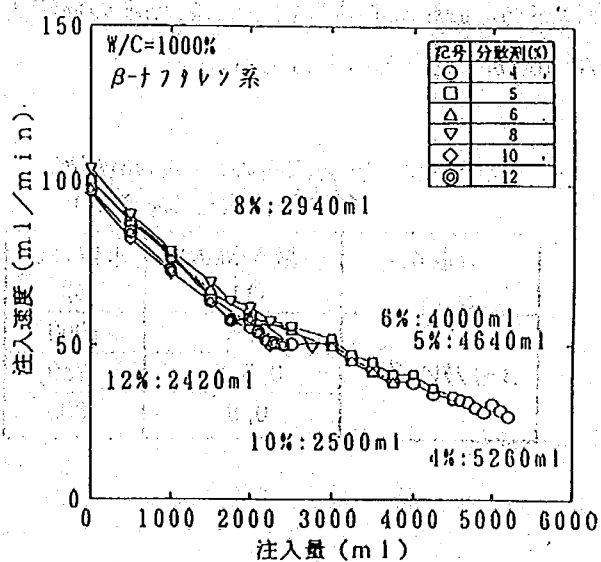


図-5.2.8 2mモールド通過時の注入量と注入速度の関係 (分散剤: β -ナフタレン系)

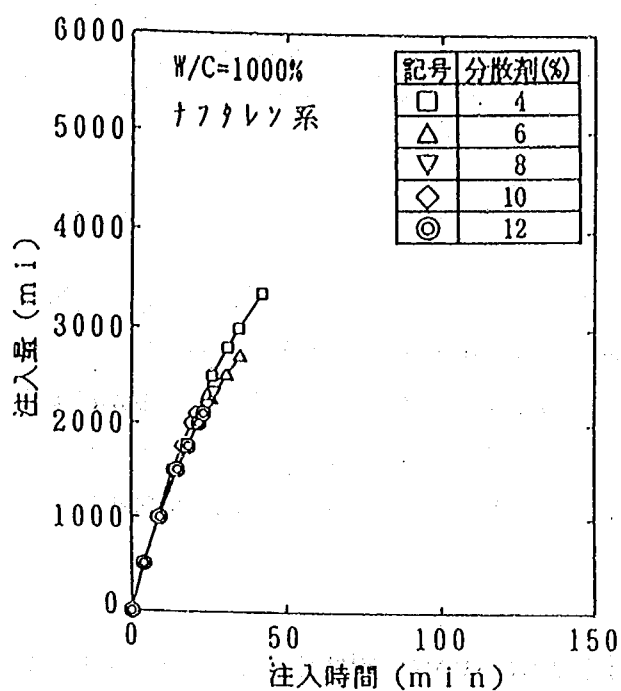


図-5.2.9 2m ϕ - μ 通過時の注入時間と注入量の関係 (分散剤：ナフタレン系)

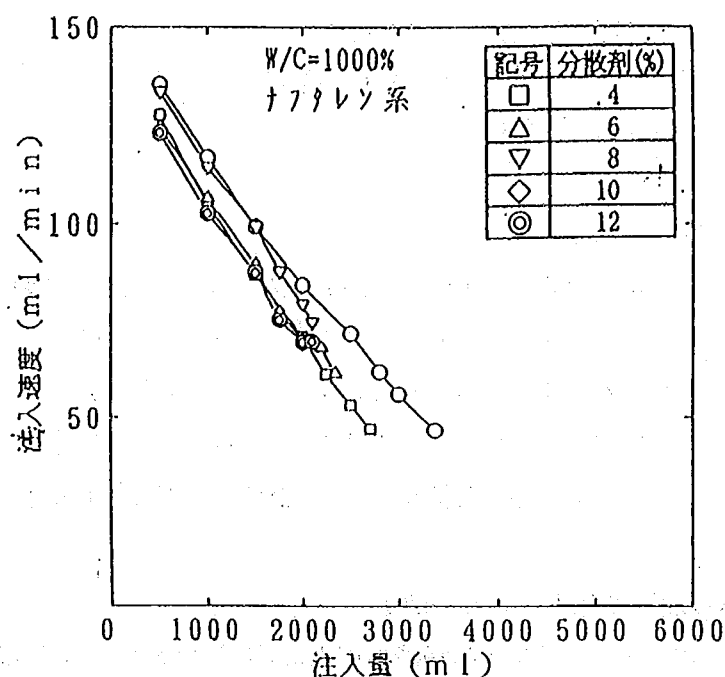


図-5.2.10 2m ϕ - μ 通過時の注入量と注入速度の関係 (分散剤：ナフタレン系)

浸透効率を検討するにあたり充填比（注入量を固結長の注入前空隙体積で除したもので、充填比が1に近いほど浸透効率は良い）を用いた検討結果を図-5.2.11に示す。双方とも同様の充填経路をたどり、分散剤の混入率を増やすほど充填比は下がり、10%付近で頭打ちとなることが判る。

以上より、分散剤混入率が1,2%の場合は、 β -ナフタレン系の方が浸透性が良く、3%以上の場合は、双方とも同等の浸透性を有し、10%付近で最適混入量となることが判る。

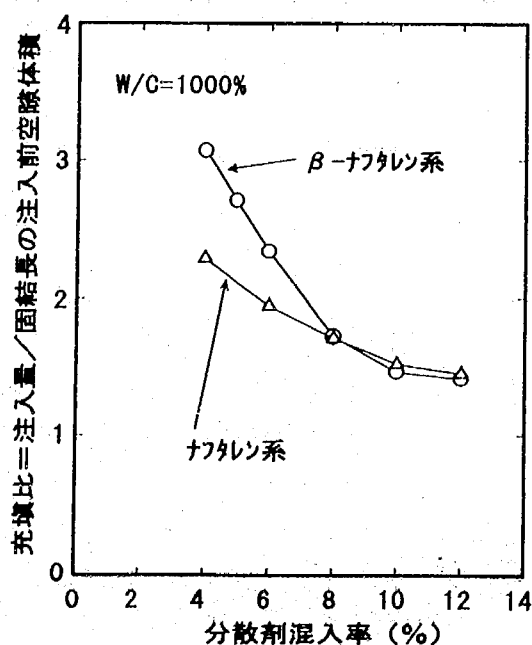


図-5.2.11 分散剤混入率と充填比の関係 (W/C=1000%の場合)

5.2.4 まとめ

超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近いとされる東北珪砂7号を用いて、浸透特性に関する実験を行い以下の成果が得られた。

(1)最適分散剤

5種類の分散剤を用いて、限界注入方式で固結長を比較したところ、 β -ナフタレン系、ナフタレン系の場合に長い固結長を得ることができた。また、いずれも分散剤混入率(D/C)が高いほど長い固結長が得られた。注入対象土の粒径が粗く、分散剤混入率(D/C)が少なくとも浸透性が確保できる場合、分散剤による浸透特性および強度遅延を考慮して、分散剤混入率(D/C)が1~2%の場合はより長い固結長が得られる β -ナフタレン系、分散剤混入率(D/C)が3%以上の場合はナフタレン系を用いることが適切である。

(2)最適水セメント比(W/C)

超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近いとされる東北珪砂7号において、固結長が最大を示す水セメント比W/C=1000%付近が最適水セメント比と考える。

(3)最適分散剤混入率(D/C)

定圧注入条件下では、 β -ナフタレン系及びナフタレン系のいずれにおいても、分散剤混入率を変化させても、注入量と注入時間の関係は一定であった。また、一定の固結長を形成するのに必要な注入量は分散剤混入率(D/C)が高いほど小さくなり、D/C=10%程度ではほぼ頭打ちになった。したがって、できるだけ短い時間で一定の固結長を得るという施工効率の観点からは、D/C=10%程度とするのが良いと考えられる。ただし、固結時間については不明確なため6章で検討を行っているので参照されたい。

5.3 一次元浸透注入実験(その3)

5.3.1 実験目的

超微粒子セメント懸濁液を用いた注入工法により固化体を形成することが可能な砂質土の粒度の限界を把握することを目的として、粒度分布の異なる4種類の砂質土を対象に一次元浸透注入実験を行った。

5.3.2 試料及び試験方法

注入材は、超微粒子セメントとナフタレン系の分散剤を使用した。一次元浸透注入実験は、内径50mm、長さ2m及び1mの亚克力パイプを用いて行った。実験装置および実験方法の詳細は前節5.1を参照されたい。

(1) 浸透限界の確認

浸透限界の確認については、超微粒子セメントはほとんど注入不可能とされる粒度分布を有する東北珪砂8号を用いた。試料砂の性状を表-5.3.1、粒度分布を図-5.3.1に示す。供試体は2m³-m³ (供試体長192cm、71mm²-材4cm+4cm)を用いて作成した。

表-5.3.1 試料砂の性状

	東北珪砂8号	東北珪砂7号※
細粒分含有率	F _c =7~10%	F _c =2~5%
平均粒径	D ₅₀ =0.1~0.15mm	D ₅₀ =0.15~0.2mm
比重	2.604	2.641
透水係数 (相対密度)	2.9×10 ⁻³ cm/sec (Dr=50%)	7.6×10 ⁻³ cm/sec (Dr=50%)
グラビティ比 ¹⁾ GR	GR=11 (GR<11 注入不可)	GR=14

※一次元注入実験
(その1、2)で使用

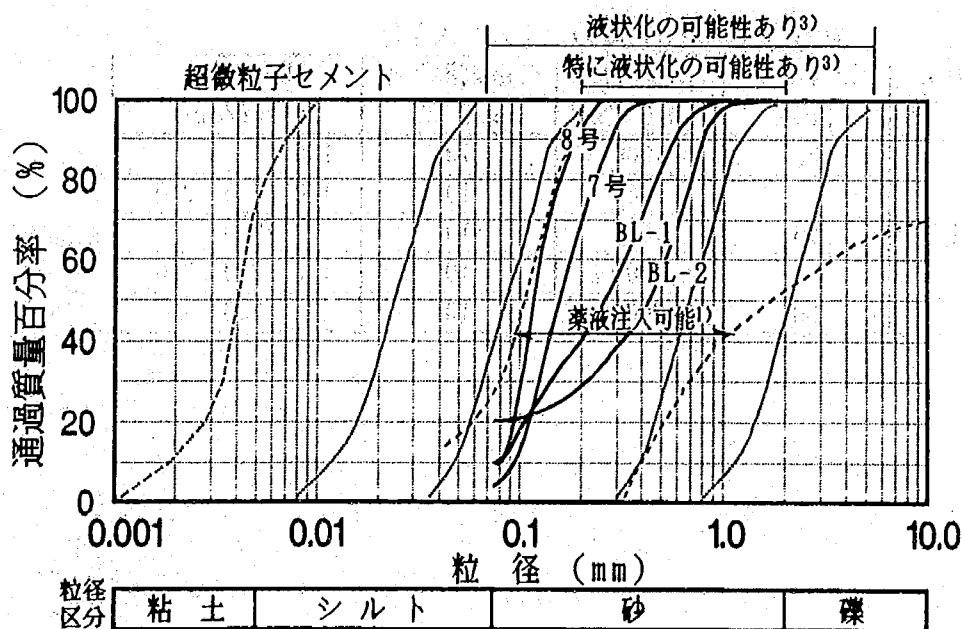


図-5.3.1 試料砂の粒度分布

表-5.3.2に示す注入条件にて、注入流量が十分小さくなり、供試体の色調の変化が見られなくなるまで注入(以後、限界注入と呼ぶ)を行った。注入限界に近いとされる試料砂を使用するため、できるだけ長い固結長を得られるように注入条件を設定した。このため、前節5.1の実験結果を参考に、分散剤混入率(D/C)を10%とし、水セメント比W/C=1000~3000%、注入圧力 $p=1.0\sim 3.0\text{kgf/cm}^2$ とした。また、後述するように、W/C=2000%で最も長い固結長が得られたため、D/C=15%での試験を追加した。

表-5.3.2 浸透限界の注入条件

注入方法	相対密度 Dr (%)	水セメント比 W/C (%)	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 p (kgf/cm ²)
限界注入	50	1000	10	1.0, 2.0, 3.0
		2000	10	1.0, 2.0, 3.0
			15	2.0
		3000	10	2.0, 3.0

(2) 相対密度の変化に対する浸透性

相対密度の変化に対する浸透性の確認については、前節5.2の実験にて浸透が十分可能であった東北珪砂7号を用いて実験を行った。試料砂の性状を表-5.3.1に、粒度分布を図-5.3.1に示す。供試体は2m $\times$ 1m $\times$ 1mを用いて作成した。

注入条件を表-5.3.3に示す。相対密度が大きくなるにつれ浸透が伸びなくなことを予想し、Dr=65%にはW/C=1500%を、Dr=80%にはW/C=2000%のケースを加えて行った。また、注入圧力と浸透の関係を確認するため、ここでも注入圧を変化させて実験を行った。分散剤混入率は一定とした。

表-5.3.3 相対密度の変化の注入条件

注入方法	相対密度 Dr (%)	水セメント比 W/C (%)	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 p (kgf/cm ²)
限界注入	50	1000	10	1.0
		1000	10	1.0, 2.0, 3.0
	65	1500	10	2.0
		1000	10	1.0, 2.0, 3.0
	80	2000	10	2.0

(3) 各種の砂に対する浸透性

図-5.3.1に示す粒度分布を持つ4つの試料砂（東北珪砂8号、東北珪砂7号、ブレット-1、ブレット-2）を用いて、土質の性状が変化した場合の浸透特性を調べるために実験を行った。

ブレット-1・ブレット-2（以降BL-1、BL-2と略記する）は、東北珪砂の4号から8号までを使用して表-5.3.4に示す配合にてブレンドし、あらかじめ別の珪砂8号より抽出しておいた細粒分

（75 μ m以下）を加えて、所定の粒度になるように粒度調整した珪砂の混合試料である。また、各試料砂においても相対密度を変化させ、間隙率や透水係数を変化させ浸透状況を調べた。透水係数は各試料毎に定水位透水試験法により測定した。表-5.3.5に各試料砂の性状を示す。表-5.3.6に示すように、注入材の仕様を一定とし、一定圧力の定量注入（珪砂7号のDr=50%の時のモルタル内間隙体積に対して充填率1.5としたときの注入量：1300ml）として実験を行った。供試体は1mモルタル（供試体長92cm、フィラー材4cm+4cm）を用いて行った。表-5.3.7に試料砂の土質試験結果を表-5.3.8に相対密度と間隙率の関係を示す。

表-5.3.4 珪砂の配合

珪 砂	BL-1	BL-2
4 号	—	40 %
5 号	40 %	30 %
6 号	30 %	20 %
7 号	—	10 %
8 号	30 %	—

表-5.3.5 試料砂の性状

	東北珪砂8号	東北珪砂7号	BL-1	BL-2
細粒分含有率 FC	9.8 %	3.9 %	9.8 %	20.5 %
平均粒径 D_{50}	0.1~0.15mm	0.15~0.2mm	0.25~0.30mm	0.40~0.45mm
比 重	2.604	2.641	2.627	2.621
透水係数 (cm/sec)	Dr=50%	2.7×10^{-3}	7.5×10^{-3}	—
	Dr=65%	2.2×10^{-3}	5.7×10^{-3}	3.6×10^{-3}
	Dr=80%	—	5.0×10^{-3}	3.1×10^{-3}

表-5.3.6 各試料砂に対する注入条件

注入方法	試 料 砂	相 対 密 度 Dr (%)	注入材仕様	注入圧力 p(kgf/cm ²)
定量注入	珪砂8号	50, 65	W/C=1000% D/C=10%	0.5
	珪砂7号	50, 65, 80		
	BL-1	65, 80		
	BL-2	65, 80		

表-5.3.7 試料砂の土質試験結果

	珪砂7号	珪砂8号	BL-1	BL-2
最小乾燥密度(g/cm ³)	1.278	1.010	1.392	1.483
最大乾燥密度(g/cm ³)	1.613	1.400	1.797	1.870
比 重	2.641	2.604	2.627	2.621

表-5.3.8 試料砂の相対密度と間隙率

相対密度 (%)	珪砂7号		珪砂8号		BL-1		BL-2	
	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)
10	1.286	51.3	1.039	60.1	1.424	45.8	1.514	42.2
20	1.316	50.2	1.070	58.9	1.458	44.5	1.547	41.0
30	1.347	49.0	1.102	57.7	1.493	43.2	1.581	39.7
40	1.379	47.8	1.137	56.3	1.530	41.8	1.617	38.3
50	1.414	46.5	1.173	55.0	1.569	40.3	1.654	36.9
60	1.449	45.1	1.213	53.4	1.610	38.7	1.693	35.4
65	1.468	44.4	1.233	52.6	1.631	37.9	1.713	34.6
70	1.487	43.7	1.255	51.8	1.653	37.1	1.734	33.8
80	1.527	42.2	1.300	50.1	1.698	35.4	1.777	32.2
90	1.569	40.6	1.348	48.2	1.746	33.5	1.822	30.5
100	1.613	38.9	1.400	46.2	1.797	31.6	1.870	28.7

5.3.3 実験結果及び考察

(1) 浸透限界の確認

図-5.3.2は各実験ケースの固結長を表したグラフである。最適とされていた $W/C=1000\%$ では浸透がほとんど行われない結果となった。 $W/C=2000\%$ 以上で何とか固結が得られたが、固結長は最大で50~60 cm程度であった。この図より珪砂8号における最適な注入材仕様は $W/C=2000\sim3000\%$ 程度にあると思われる。また、注入圧力を上げることにより、浸透長が伸びているが、 $P=3.0\text{kgf/cm}^2$ の場合は注入圧が高すぎ、注入開始と同時に砂が懸濁液によって下から持ち上げられ、地盤が締まってしまい、浸透が伸びなかったと思われる(割裂になったものもあった)。

従って注入圧力は、地盤を破壊しない程度まで上げること(限界注入圧)により浸透長は伸びることがわかる。また、最も固結を伸ばしたケース($W/C=2000\%$)にて分散剤混入量(D/C)を増やしたが効果はなかった。

図-5.3.3は、注入量と注入時間の関係を表したものである。固結長が伸びていないグループと固結長がある程度伸びたグループが大きく分かれている。固結長が伸びていないグループは、 $W/C=1000\%$ と $W/C=2000\%$ の $P=1.0\text{kgf/cm}^2$ であり、この砂に対しては水セメント比が濃く、また注入圧が低く注入材の流速が確保できないものは浸透が難しく、注入孔付近から早期の内に詰まりだし、注入材が浸透していかない状態を示している。しかし、水セメント比を大きくし、しかも注入圧も高くして注入材の流速を確保することによりある程度の浸透が可能になることがわかる。

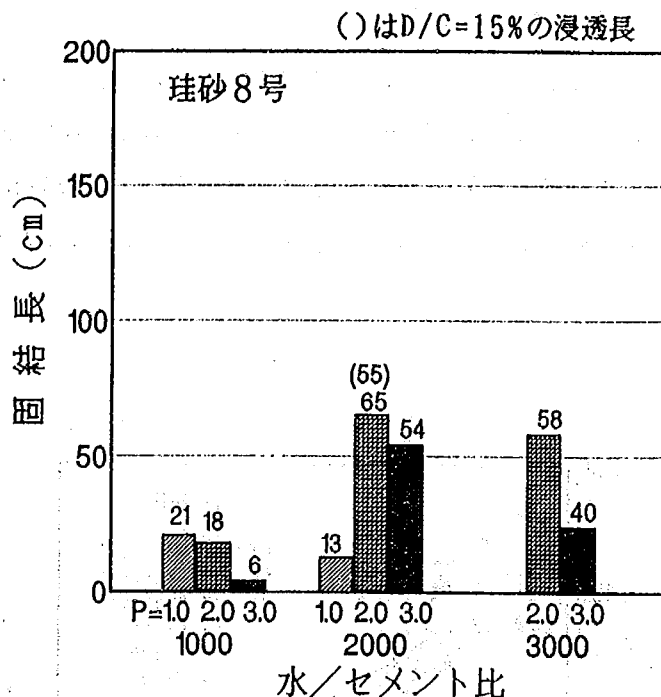


図-5.3.2 珪砂8号の固結長と水セメント比の関係

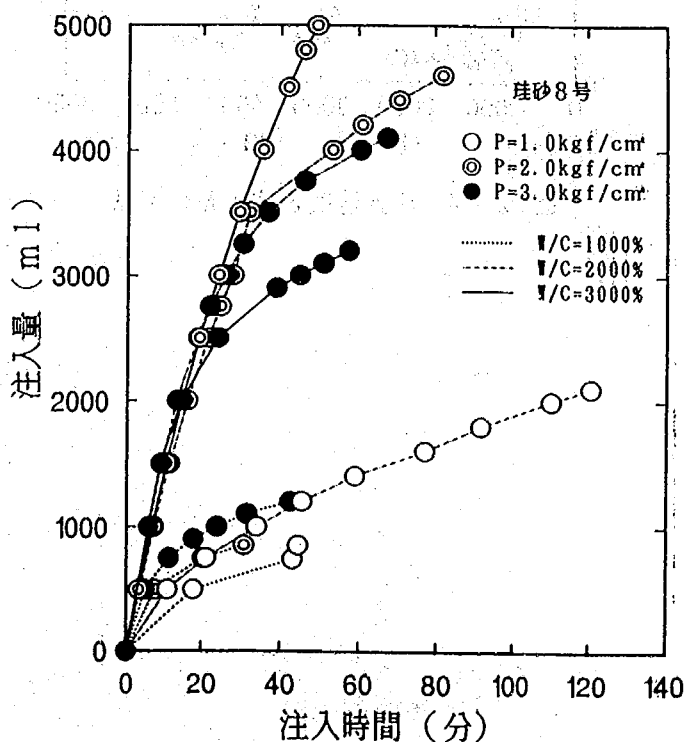


図-5.3.3 注入量と注入時間の関係

図-5.3.4は、注入速度と注入量をグラフにしたものであり、先のグラフと同様の傾向を示している。初期の流速から急速に速度が低下しているグループは浸透も伸びず、その逆に勾配の緩いグループはある程度浸透していることがわかる。

図-5.3.5は、充填比(注入量を固結長の注入前間隙体積で除したもので、1に近いほど浸透効率は良い)と水セメント比の関係を示したものである。前節5.1の実験までの値とは違って、この珪砂8号については非常に大きな値を示しており、浸透効率が悪いことわかる。つまり、珪砂8号に本注入材を適用する場合においては、 $W/C=2000\% \sim 3000\%$ の高い水セメント比になるために、注入効率が非常に悪くなってしまうと考えられる。

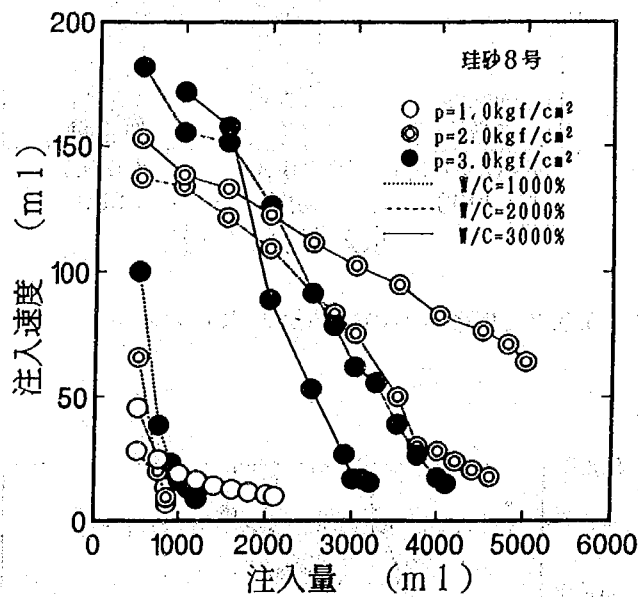


図-5.3.4 注入速度と注入量の関係

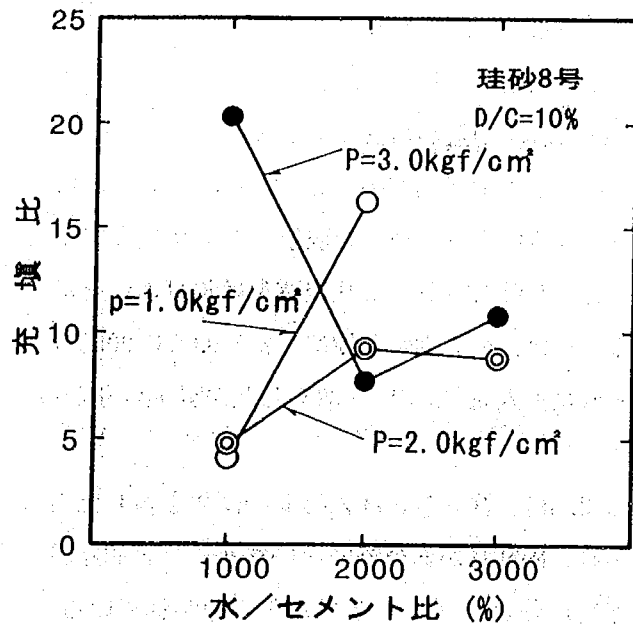


図-5.3.5 充填比と水セメント比の関係

(2) 相対密度の変化に伴う浸透性

図-5.3.6は、各実験ケースの固結長を表したグラフである。固結長は相対密度が大きくなるにつれ短くなっている。しかも相対密度 $Dr=80\%$ においては、 $Dr=50\%$ の半分程度の固結長しか得られていない。砂が締め固まってくれば間隙も少なくなり、浸透しにくくなるのは当然と考えられるが、同じ粒径の砂でこれほど差があるのでということは、この珪砂7号も浸透の限界近くにある、砂の微妙な変化でも変わってくるのではないかとと思われる。注入圧の変化については、今までと同様に注入圧を上げれば固結長は増えている。また、図-5.3.6中に示したように、水セメント比を高くしたものについては固結長が逆に短くなっていた。これより粒度分布が同じ砂であれば、相対密度が変化しても注入材の最適水セメント比は変わらないことがわかる。

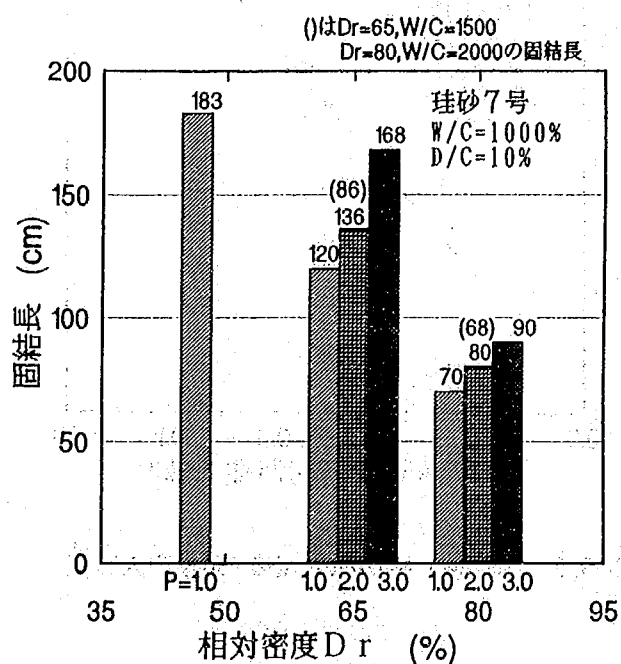


図-5.3.6 各試料の固結長

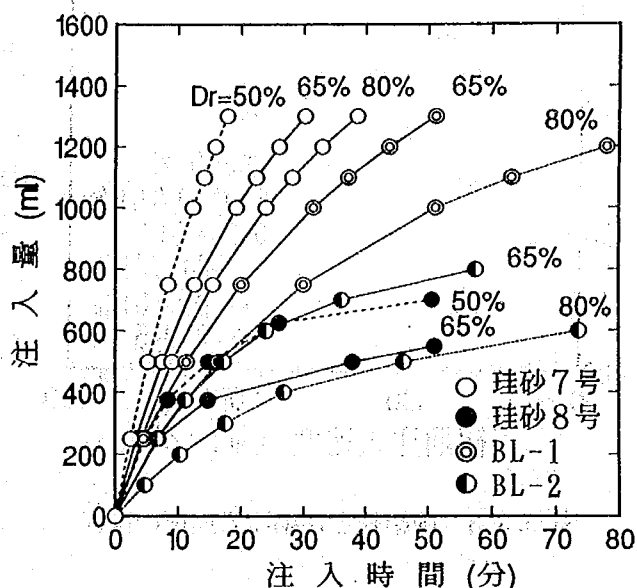


図-5.3.7 注入量と注入時間

図-5.3.7は、注入量と注入時間の関係を示したものである。注入圧の変化に伴って注入経路が変わっている。同じ相対密度でも注入圧を上げることにより、直線的になり、注入効率が良く(短時間にたくさん注入できること)なってくることがわかる。また、相対密度が小さくなくても、同じように注入圧を上げることによって注入効率が良くなっている。そこで、流速が確保されるものについては浸透も伸びてくるのではないかと考え、図-5.3.8に、固結長と注入開始から500mlまでの初期の注入速度との関係を示した。しかし、初期の流速と固結長には全体的な相関は見られなかった。同じ程度の流速が得られていても、最終的な固結長には大きな差が生じていた。しかし同じ相対密度に関しては、流速を確保することで固結長を伸ばすことができる。これは、相対密度の変化に伴って間隙の大きさが変わってくるため、初期の流速はたとえ確保できたとしても、間隙の小さい試料ではセメント粒子の濾過現象が著しく、すぐに詰まってしまうため、固結

長が伸びないのではないかと推測する。そのため、固結長と2500ml ($Dr=50\%$ の時のモルト内空隙体積に対して充填率1.5としたときの注入量)までの平均注入速度を500mlまでの初期注入速度で除したもの(注入速度低減率)との関係を図-5.3.9に示す。この図からわかるように流速が低下しないもの(濾過されにくいもの)は固結長も伸び、逆に流速の低下の著しいもの(濾過されやすい)は固結長も伸びていないことがわかった。したがって、相対密度の変化によって空隙の状態が変化するため、固結長が大きく変わってくるものと思われる。

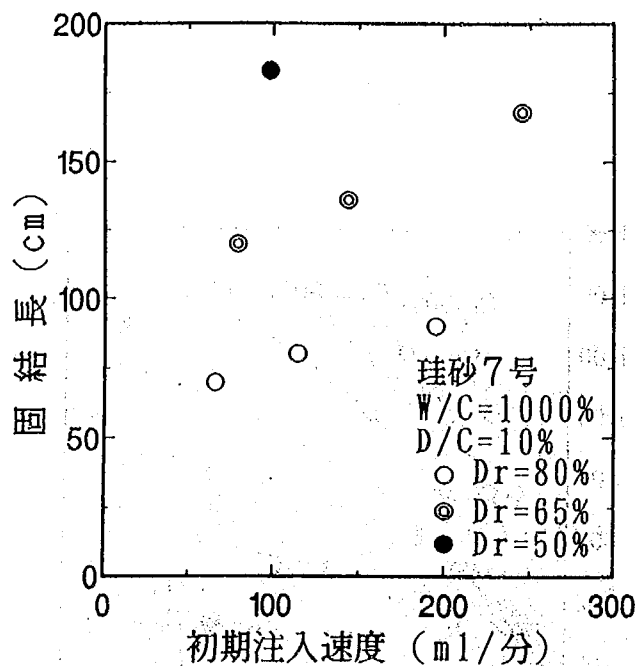


図-5.3.8 固結長と初期注入速度の関係

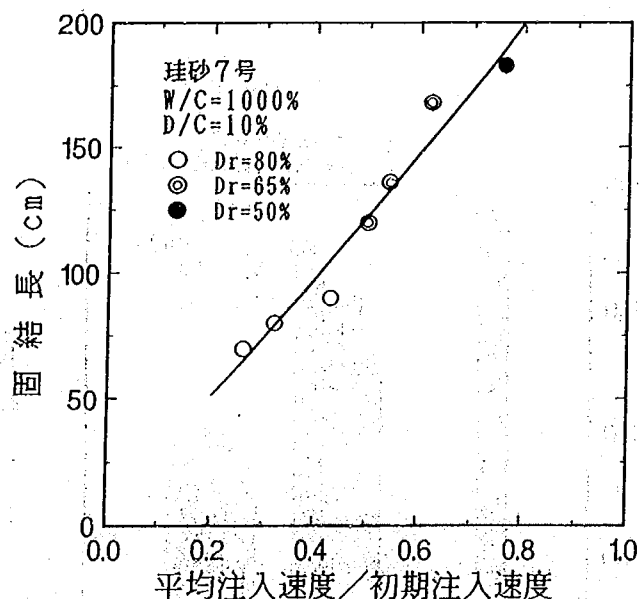


図-5.3.9 固結長と平均注入速度/初期注入速度

(3) 浸透能の支配要因

図-5.3.10に間隙率と相対密度の関係を、図-5.3.11に透水係数と相対密度の関係を示す。また、表-5.3.9に各砂の土質性状の順位を示したが、この順位との相関性がわかれば、浸透に対して影響を及ぼしているものがわかる。

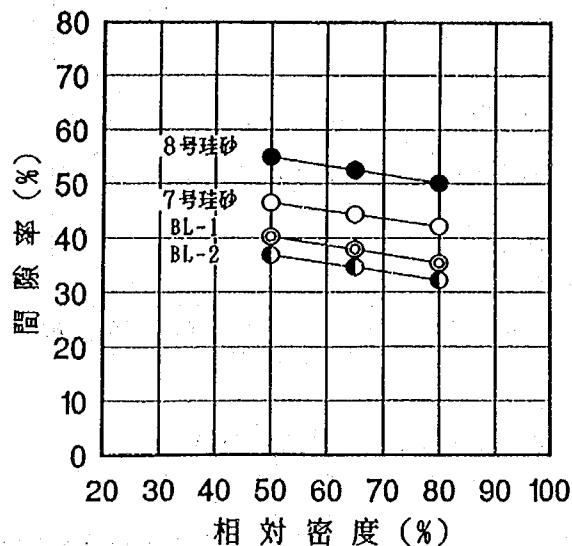


図-5.3.10 間隙率と相対密度の関係

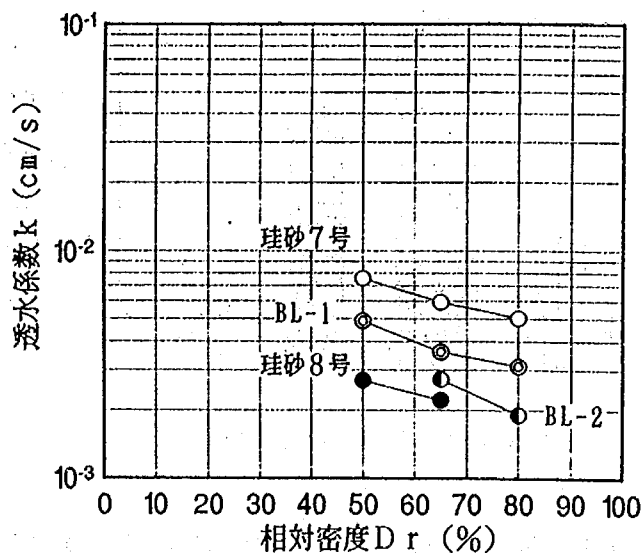


図-5.3.11 透水係数と相対密度の関係

表-5.3.9 土質性状の順位

土質性状	順位
平均粒径	BL-2 > BL-1 > 珪砂7号 > 珪砂8号
細粒分含有率	BL-2 > BL-1 = 珪砂8号 > 珪砂7号
間隙率	珪砂8号 > 珪砂7号 > BL-1 > BL-2
透水係数	珪砂7号 > BL-1 > BL-2 (Dr=50%) > 珪砂8号 > BL-2 (Dr=80%)

図-5.3.12は各試料砂に対する固結長を示したものである。粒度が違う4つの試料では固結長がかなり異なっていた。また、相対密度の変化に対する浸透性の注入実験と同様に各試料砂の相対密度を大きくするにつれ、固結長も小さくなった。固結長は、珪砂7号、BL-1、BL-2 (Dr=65%)、珪砂8号、BL-2 (Dr=80%) の順に伸びており、固結長は表-5.3.9に示した透水係数の順序と一致していることになり、浸透は透水係数に影響されていることがわかる。

図-5.3.13に各試料砂の注入量と注入時間の関係を示す。これは超微粒子セメント懸濁液の注入効率を示したものであり、所定の注入材を短時間に注入できる(注入効率の良い)ものは珪砂7号のDr=50%であった。また、最も注入効率の悪かったものはBL-2のDr=80%であった。この注入効率の順序は、図-5.3.12に示される固結長の伸びの順序と一致し、注入効率の良いものは固結長も伸びることがわかる。また、注入経路は砂の状態によっても左右されることがここでもわかる。

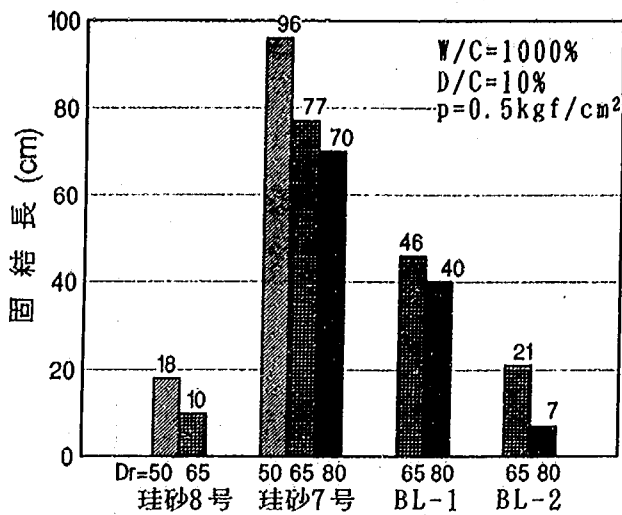


図-5.3.12 各試料砂の固結長

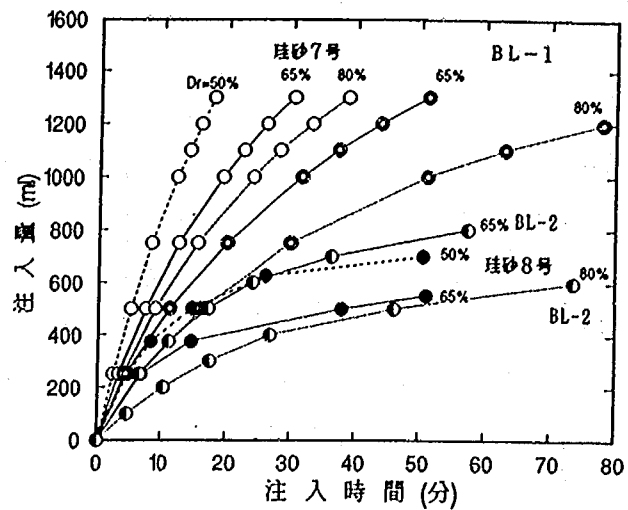


図-5.3.13 注入量と注入時間の関係

図-5.3.14は、超微粒子セメント懸濁液が1m²-m²内の間隙体積に対してどの程度注入できたかを時間の経過とともに表したものである。珪砂7号、BL-1およびBL-2(Dr=65%)は、1m²-m²の間隙体積以上の懸濁液が注入できたことを示しており、懸濁液は1m²-m²を通過していることがわかる。ただし、超微粒子セメントの粒子は、砂の間隙に濾過されながら浸透し、1m²-m²を通過した懸濁液にはセメントの粒子が入っていないこともあるため全長が固結しないのである。珪砂7号のDr=50%のように短時間で注入が終わり、しかも1m²-m²の全長が固結しているものについては、1m²-m²を通過した懸濁液にはセメント粒子が含まれているが、BL-1のように注入時間が長く固結長が40~50cm程度のものについては、1m²-m²を通過した懸濁液にはセメント粒子がほとんど含まれていない。これは、間隙の大きさや形状が違う砂を使用しているため、セメント粒子の濾過のされかたが違ってくるものと思われる。この濾過のされかた(粒子の詰まり方)によって固結長が左右されているものと思われる。珪砂8号およびBL-2(Dr=80%)については早期のうちに間隙がセメント粒子によって詰まってしまい、懸濁液は1m²-m²も通過しないで流速がなくなってしまうものと思われる。

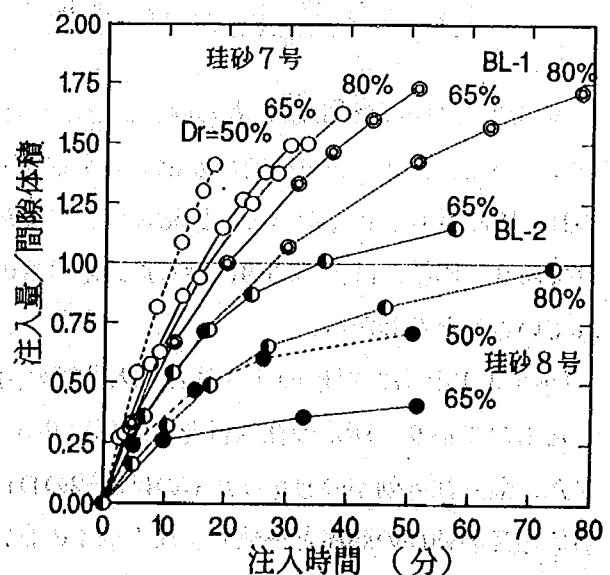


図-5.3.14 注入量/間隙体積と時間の関係

図-5.3.15は、固結長と砂の間隙率を示したグラフである。この関係には相関性は見られなかった。珪砂8号は、間隙率が最も高いにもかかわらず、固結長は短い結果となった。間隙率の値が中間に位置する珪砂7号が最も固結長が伸びている。これは、平均粒径が小さく、細粒分含有率が多い珪砂8号は、1つの間隙の大きさが小さく、超微粒子セメントの粒子がすぐに詰まってしまうのに対し、珪砂7号は平均粒径がそれほど小さくもなく、細粒分含有率も少ないため、他の砂よりも1つの間隙が大きく、セメント粒子が濾過されにくく、浸透が進み、固結長が伸びているものと推測される。

図-5.3.16は、固結長と細粒分含有率の関係を示したものである。全体的に見れば、細粒分含有率が少ないと固結長は伸びている傾向にある。しかし、同じ細粒分含有率を持つ珪砂8号とBL-1は同じ固結長を示しておらず、BL-1の方が固結長が伸びている。これは、単純に細粒分の多さが浸透に影響するのではなく、砂の平均粒径や間隙の大きさ等の要因が含まれているのではないと思われる。

図-5.3.17は、固結長と透水係数の関係を示したものである。図からわかるように固結長と透水係数には明確な相関関係が見られた。透水係数が大きくなるにつれ固結長は直線的に伸びている。透水係数が大きくなれば流速が確保でき、浸透がスムーズに行われることになり、固結長も伸びる結果となる。また、この図からもわかるように、超微粒子セメント懸濁液の浸透限界域もこの 10^{-3} cm/secの透水係数付近であることがわかる。したがって、透水係数の大きい砂地盤に対しては充填率等の注入量によって浸透径は設定できるが、透水係数が 10^{-3} cm/sec付近の浸透限界域では、注入条件が同じであれば、透水係数によって浸透径は決まってくるものと思われる。

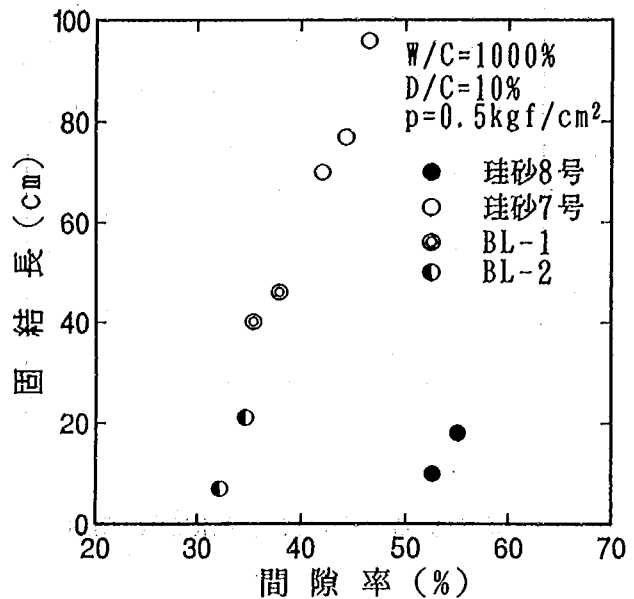


図-5.3.15 固結長と砂の間隙率の関係

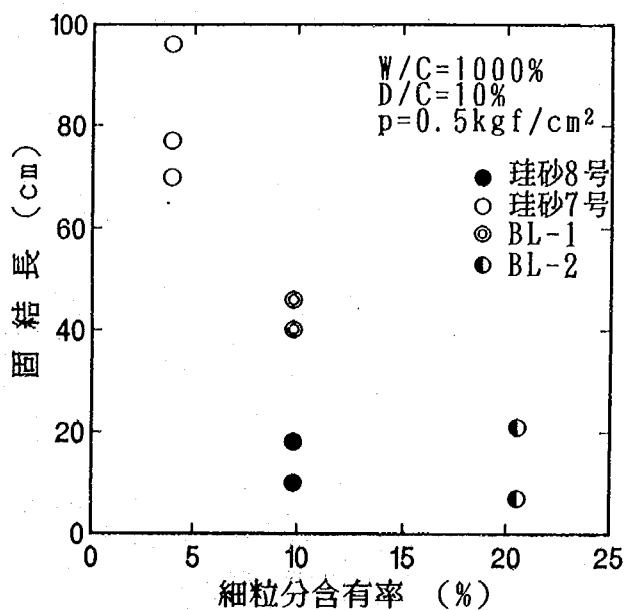


図-5.3.16 固結長と細粒分含有率

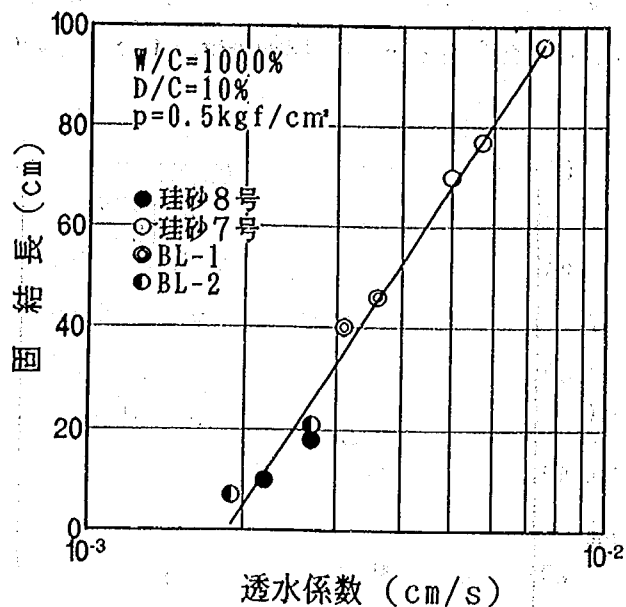


図-5.3.17 固結長と透水係数の関係

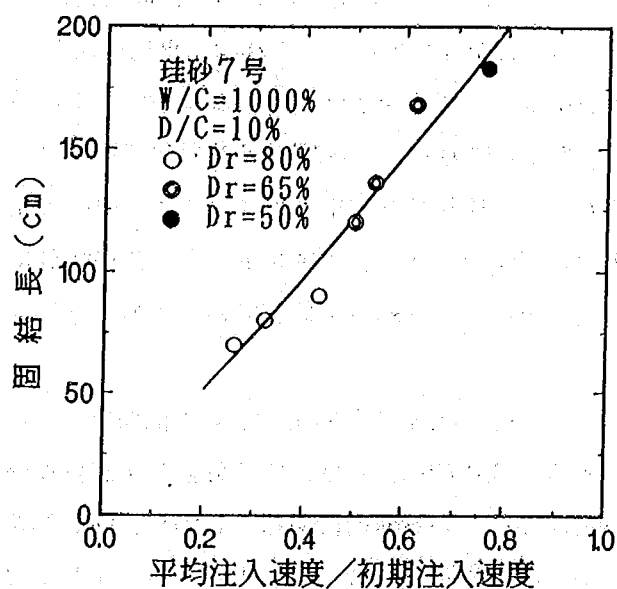


図-5.3.18 透水係数と平均注入速度/初期速度

図-5.3.18は、注入時の平均注入速度と初期注入速度(注入開始から250mlまでの注入速度)の比(注入速度低減率)と透水係数の関係を示したものである。今回の実験は、超微粒子セメント懸濁液を一定圧力で注入しているため、セメント粒子の濾過現象により注入速度は低下する。その注入速度の低下は透水係数に影響されていることがこの図からわかる。固結長が伸びているものは、注入速度も注入終了時点まで速度の低下が少なく、逆に、注入速度の低下の激しいものについては固結長も短いということがわかる。従って、超微粒子セメント懸濁液の濾過現象も透水係数に大きく支配されている事がわかった。

5.3.4 まとめ

超微粒子セメントの浸透性に関する一次元注入実験（その3）で得られた結果は以下の通りである。

- ① 浸透限界に近いとされる粒度分布を有する東北珪砂8号においては、 $W/C=2000\sim3000\%$ 程度まで水セメント比（ W/C ）を上げることにより、浸透がようやく可能となった。しかし、注入効率は非常に悪いことがわかった。
- ② 固結長は、相対密度の変化によって大きく変化した。また、相対密度が同じ砂においては注入圧を上げることにより流速が確保でき、注入効率が向上し、固結長を多少伸ばすことができることがわかった。
- ③ 超微粒子セメントの浸透性（固結長の伸び）は、細粒分含有率にも影響されるが、透水係数との相関が非常に高いことがわかった。また、透水係数で 10^{-3}cm/sec 付近は浸透の限界領域であることがわかり、この浸透の限界領域での固結範囲は、透水係数によって決まってくるものと思われる。

〈参考文献〉

- 1) (社)土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、p128
- 2) (社)土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、p3, 図-1.2加筆
- 3) 日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説、1989、上巻p204

第6章 超微粒子セメント懸濁液の固結体強度に対する長期耐久性の検討

6.1 実験目的

液状化対策工としての要件として強度の長期耐久性がある。このため、長期強度に及ぼす水セメント比 (W/C) 及び分散剤混入率 (D/C) の影響を調べた。

6.2 実験方法

供試体は1次元短尺注入により作成した。

長さ25cm、内径50mmの亚克力パイプ内に、気乾試料砂を投入し、水平打撃により相対密度 $Dr=50\%$ になるように締め固めたのち、 CO_2 を通過させ脱気水で飽和させた試験体 (供試体長25cm、フィルター材1cm+1cm) に超微粒子セメント懸濁液を注入した。試料砂として、水セメント比 (W/C) を変化したものについては、豊浦標準砂を、分散剤混入率 (D/C) を変化したものについては、東北珪砂7号を用いた。供試体作成装置を図-6.1示す。

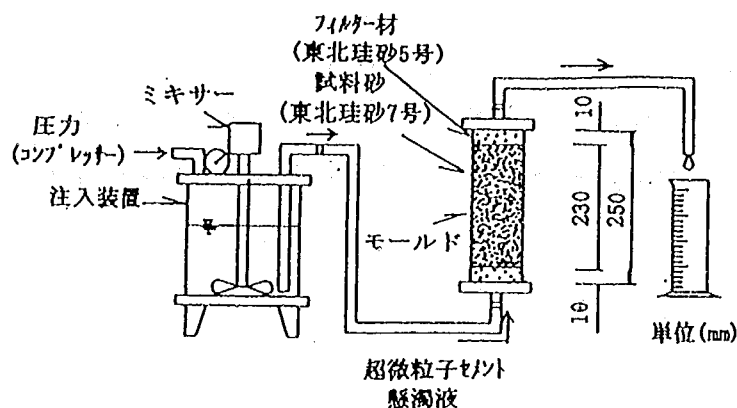


表-6.1に水セメント比の変化に伴う強度確認に

図-6.1 実験装置

用いた供試体の注入条件を、表-6.2に分散剤混入率の変化に伴う強度確認に用いた供試体の注入条件を示す。表-6.1の注入条件での供試体は、注入後4日後に脱型し、供試体の体積の10倍量の水中で静水養生した。なお、地下水の移動等を考慮して、材令1ヶ月までは2週間に1回、その後は材令1ヶ月ごとに養生水の全量の入替えを行った。表-6.2の注入条件での供試体は、分散剤が多く混入しているため、注入後4日後では固結せず脱型できなかった。そこで、固結の判断材料となる色（青緑）を確認後に脱型し、静水養生とした。養生水の入替えは、上記と同様に行った。強度試験は、一軸圧縮試験 (JSF T 511) によりひずみ速度 $1\%/min$ で行った。

表-6.1 水セメント比の変化に伴う注入条件

注入方法	注 入 量 (ml)	分散剤	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)
定量注入	間隙体積×1.2倍	β-ナフレン	1.0	1.0	500, 750, 1000

表-6.2 分散剤混入率の変化に伴う注入条件

注入方法	注 入 量 (ml)	分散剤	分散剤混入率 D/C (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)
定量注入	間隙体積×1.2倍	β-ナフレン	1, 4, 5, 6, 8, 10, 12	2.0	1000
		ナフレン	4, 6, 8, 10, 12, 15		

6.3 実験結果と考察

表-6.1の注入条件で行った実験結果を図-6.2に示す。各供試体とも材令90日程度でピーク強度をむかえ、その後若干の強度低下はあったものの、材令3年にいたっても水セメント比(W/C)の変化に伴う、明確な強度劣化は見られない。各試料とも一軸圧縮強度で10kgf/cm²以上を確保しており、固化改良体としては十分な強度と考えられる。

表-6.2に示す注入条件のβ-ナフレン分散剤での試験結果を図-6.3に、ナフレン分散剤での試験結果を図-6.4に示す。両図とも分散剤混入率を増やすと一軸圧縮強度は下がる傾向にあるが、材令6ヶ月を経過したβ-ナフレン分散剤の供試体および材令2年を経過したナフレン分散剤の各供試体とも強度低下は見られなかった。分散剤混入率と一軸圧縮強度の関係は明確ではないが、分散剤混入率を増やしても $q_u=4\text{kgf/cm}^2$ 程度以上を確保している。

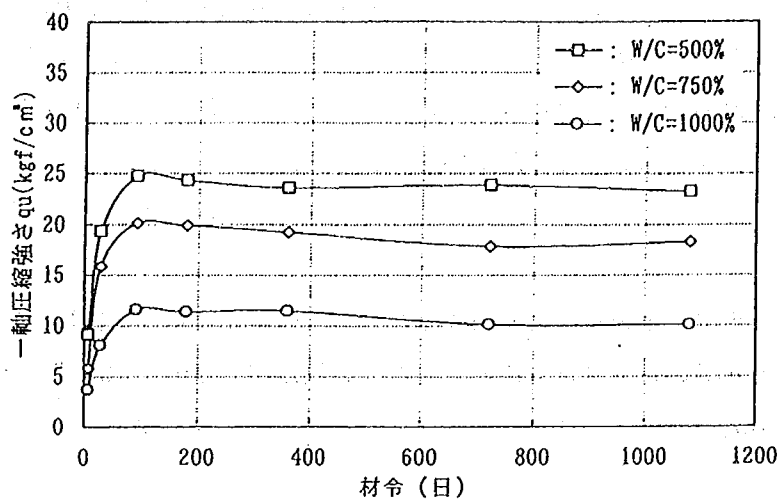


図-6.2 W/Cを変えた場合の長期強度

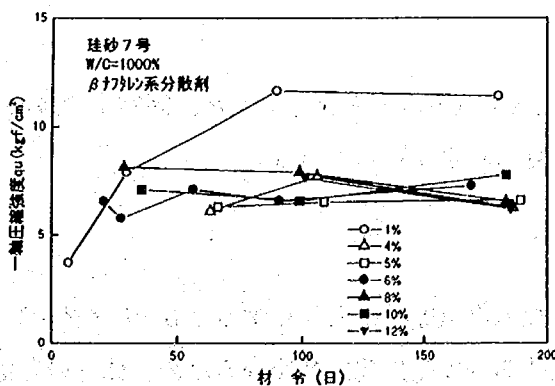


図-6.3 D/Cを変えた場合の長期強度(β-ナフレン分散剤)

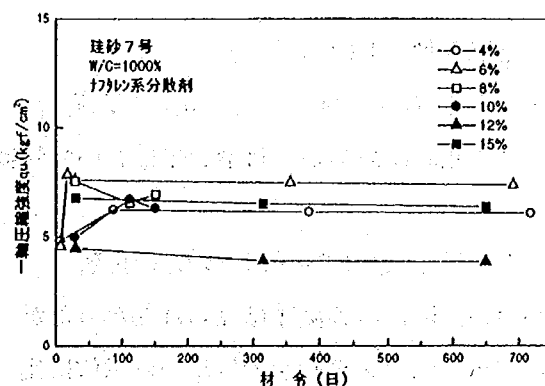


図-6.4 D/Cを変えた場合の長期強度(ナフレン分散剤)

表-6.2に示す注入条件での長期強度確認実験用モールド脱型に必要な養生期間（固化時間）を図-6.5に示す。少ない分散剤混入量（4%）では養生期間に差は無いが、分散剤混入率を増やすほど養生期間が長くなり、 β -ナフタレン分散剤はナフタレン分散剤に比べて約2倍の養生期間が必要であることがわかる。強度発現の遅延による品質管理上の観点からは、分散剤混入量を少なくしたほうがよいが、前章で行った一次元注入実験より、超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近い砂質土に対して、分散剤混入率10%程度にすると施工効率が良くなる。また、分散剤混入量が少ない（1、2%）場合は β -ナフタレン分散剤が浸透性が良く

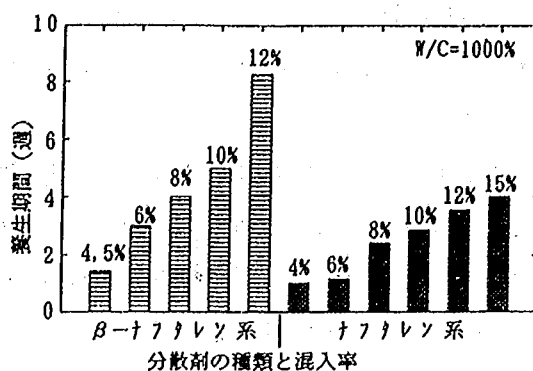


図-6.5 分散剤の種類と混入率の変化に伴う脱型までの養生期間

（図-5.2.1）固化時間に差がないことから、分散剤混入量が2%以下の場合は β -ナフタレン分散剤を、3%以上の場合はナフタレン分散剤を使用したほうが適切であると言える。

6.4 まとめ

液状化対策として超微粒子セメント懸濁液を使用する場合の、強度の長期耐久性については、懸濁液の注入量、注入圧力を一定にした場合の水セメント比の変化及び分散剤混入量の変化に伴う影響について注入実験を行い以下の成果が得られた。

1) 水セメント比 (W/C) の影響

- ・水セメント比を大きくすると、砂に対するセメント量が少なくなるため、固結土の最終強度は低下するが、材令3年において強度劣化は見られず安定している。
- ・分散剤混入率 (D/C=1%) を一定にした場合、水セメント比を変化させた固結土の強度発現のピークは、90日前後であるが、その後ほとんど一定している。

2) 分散剤混入量 (D/C) の影響

- ・水セメント比 (W/C=1000%) を一定にした場合、分散剤混入率 (D/C) を大きくすると、固結土の最終強度は、若干低下する傾向にあるが、材令2年において強度劣化は見られず安定している。

3) 分散剤の種類 (β -ナフタレン系、ナフタレン系) の影響

- ・分散剤の種類による強度差は見られなかったが、分散剤混入率 (D/C) を大きくすると β -ナフタレン分散剤を用いた供試体はナフタレン分散剤の供試体に比べ、固結時間（養生期間）が伸びるため、強度の遅延および浸透効率を考慮した品質管理上の観点から、D/C=2%以下の場合は β -ナフタレン分散剤を、D/C=3%以上の場合はナフタレン分散剤を使用することが適切である。

第7章 動的強度試験

7.1 試験目的

既設の地中構造物や基礎構造物を対象にした液状化対策として注入工法を用いる場合、注入固結土が十分な液状化強度を得ていることが条件の1つである。ここでは、一次元短尺注入による超微粒子セメントおよび超微粒子シリカの供試体を用いて、低強度 ($q_u=1.0\text{kgf/cm}^2$ 前後の強度) の供試体での試験を行うことを目的として非排水繰返し三軸試験を行った。また、同供試体を用いて一軸圧縮強度試験を行い繰返し強度との関係を調べた。

7.2 試験方法

7.2.1 一次元注入による供試体作成

試料砂は珪砂7号を用い、相対密度 $Dr=50\%$ になるように締め固めた後、一次元短尺注入 (内径25mm, モールド長250mm) を行った。養生は、短尺注入後モールド内養生とし、試験を行う際にモールドより押し出し供試体を作成した。

注入材は、超微粒子セメントと超微粒子シリカを用い、超微粒子セメントの配合は、水セメント比 (W/C) を1000%, 2000%、分散剤混入量 (D/C) を2%に調整したものを用いた。超微粒子シリカの配合は、図-4.3.3に示したゲルタイム測定結果より、ゲルタイム360分にあたる配合 (水分量が多くホモゲル強度が小さい) を用いた。注入条件は、注入圧力 $P=2.0\text{kgf/cm}^2$ 、注入量は供試体間隙体積の1.2倍とした。試料砂の物性および一次元短尺注入の試験方法は前章を参照されたい。

7.2.2 予備試験 (一軸圧縮強度)

注入固結土の非排水繰返し三軸試験結果と比較するため、一軸圧縮強度試験 (JSF T 511) を行った。材令は、超微粒子セメントにおいて材令1日と3日、超微粒子シリカ材令3日と7日とした。

7.2.3 非排水繰返し三軸試験

非排水繰返し三軸圧縮試験 (JSF T 541) により、超微粒子セメントおよび超微粒子シリカ注入による固結砂の繰返し強度特性を求める。

供試体養生は、短尺注入の後モールド内養生とし、試験を行う際にモールドより押し出し供試体を作成した。二重負圧法により供試体の飽和を行い、飽和度 B 値 ≥ 0.95 とした。拘束圧 1.0kgf/cm^2 で等方圧密した後非排水条件にして、周波数0.1Hzの正弦波軸荷重を載荷した。

7.3 試験結果

7.3.1 予備試験（一軸圧縮強度）

表-7.3.1、表-7.3.2に超微粒子セメントと超微粒子シリカの一軸圧縮強度試験の結果を示す。

超微粒子セメントの一軸圧縮強さは、材令とともに強度が増加している。超微粒子シリカの一軸圧縮強さは、超微粒子セメントの場合と異なり、材令の変化に伴う強度の上昇は見られなかった。

表-7.3.1 超微粒子セメントの一軸圧縮強度試験結果

	W/C=1000% D/C=2%		W/C=2000% D/C=2%	
材令	0.602	平均	0.389	平均
1日目	0.674	0.65	0.398	0.38
	0.683	kgf/cm ²	0.342	kgf/cm ²
材令	1.158	平均	0.440	平均
2日目	1.092	1.12	0.421	0.44
	1.012	kgf/cm ²	0.448	kgf/cm ²

表-7.3.2 超微粒子シリカの一軸圧縮強度試験結果

材令	1.033	平均
	0.904	1.05
3日目	1.218	kgf/cm ²
材令	1.230	平均
	1.153	1.19
7日目	1.194	kgf/cm ²

7.3.2 超微粒子セメント注入による固結砂の非排水繰返し三軸試験

当初、 $W/C=500\%, 750\%, 1000\%$ （分散剤混入率はそれぞれ 1.0% ）とし一次元短尺注入により供試体を作成し、モールドより押し出して 10cm に成形し、2週間密閉養生したものを試験用にセットし通水（二重負圧法により飽和を行った）して $\sigma_v' = 1.0\text{kgf/cm}^2$ で圧密した後に、非排水繰返し三軸圧縮試験を行った。その結果、繰返しせん断応力比（ $\sigma_d/2\sigma_v'$ ）を 0.6 （未固結砂の両振幅軸ひずみ 5% に至る载荷回数を 20 回に換算したときの繰返しせん断応力比の約 3 倍）として 500 回以上の繰返しせん断を行ってもほとんどひずみを生じなかったため、より低強度（ 1.0kgf/cm^2 前後の強度）の供試体での試験を目的として非排水繰返し三軸圧縮試験を行なった。図-7.3.1に繰返しせん断応力比と両振幅軸ひずみ 5% に至る载荷回数の関係を示す。また、巻末に軸ひずみと過剰間隙水圧の時刻歴を付随する。

図より、改良体の繰返しせん断強度比は未固結砂に比べて明らかに大きくなっている。载荷回数 20 回での強度比で比べれば、 $W/C=2000\%$ の材令 1 日（ $q_u=0.38\text{kgf/cm}^2$ ）でも 1.5 倍、 $W/C=1000\%$ の材令 2 日（ $q_u=1.12\text{kgf/cm}^2$ ）においては 4.5 倍も増加している。

時刻歴（巻末資料）を見ると $W/C=2000\%$ 、材令 1 日の供試体では軸ひずみが引張側と圧縮側の両方に発生するが、 W/C が小さくかつ材令が大きくなるにつれ引張側に卓越するようになっていく。また、 $W/C=2000\%$ の供試体では、液状化であり、 $W/C=1000\%$ の材令 1 日は密な砂の挙動を示し、 $W/C=1000\%$ の材令 2 日は引張破壊的な挙動であった。

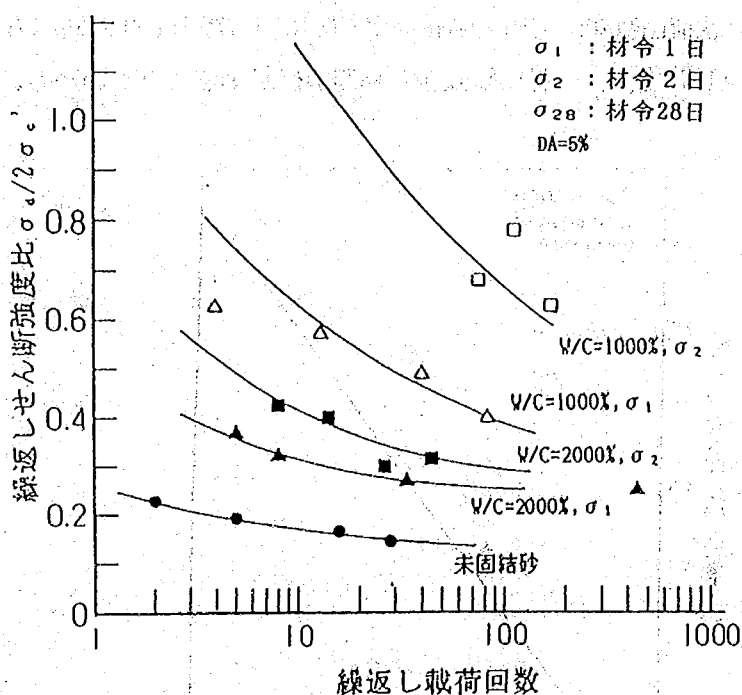


図-7.3.1 繰返しせん断応力比と両振幅軸ひずみ 5% に至る载荷回数の関係

図-7.3.2は繰返しせん断応力比と両振幅軸ひずみ2%および過剰間隙水圧比90%を破壊基準としてプロットしたものである。 W/C が小さくかつ材令が大きくなるにつれ過剰間隙水圧が90%に至った載荷回数に比べ、軸ひずみが2%に至った載荷回数が遅れている。

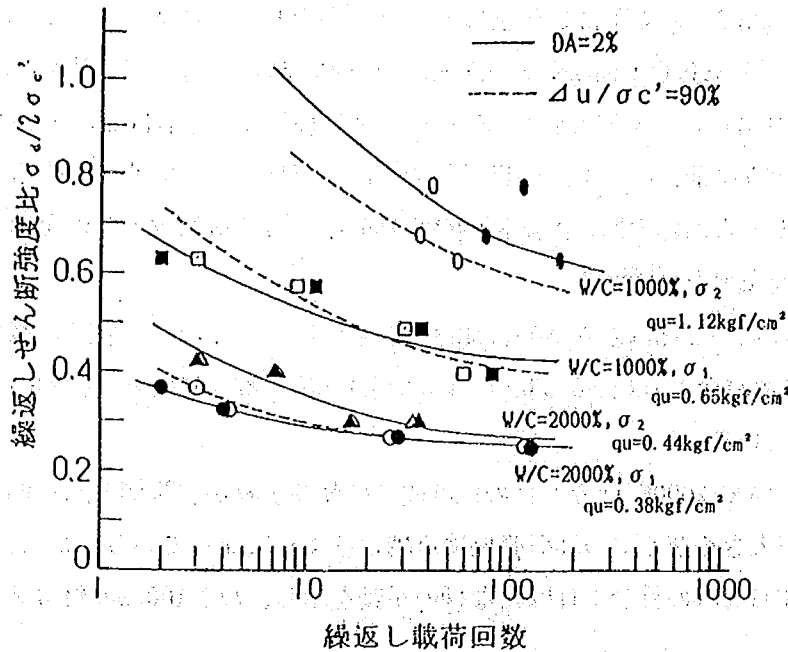


図-7.3.2 繰返しせん断応力比と破壊基準として両振幅軸ひずみ2%および過剰間隙水圧比90%に至る載荷回数の関係

図-7.3.3に一軸圧縮強度と載荷回数20回で両振幅軸ひずみ5%に至る繰返しせん断応力片振幅の関係を示す。これより、注入固結砂の繰返し強度は、一軸圧縮強さと相関関係があることがわかる。

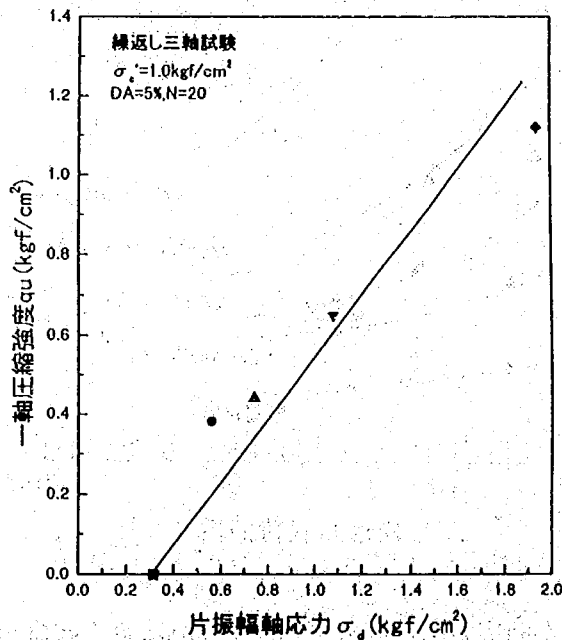


図-7.3.3 一軸圧縮強度と載荷回数20回で両振幅軸ひずみ5%に至る繰返しせん断応力片振幅の関係

7.3.3 超微粒子シリカ注入による固結砂の非排水繰返し三軸試験

比較のために、超微粒子シリカ注入による固結砂の非排水繰返し三軸圧縮試験を実施した。

図-7.3.4に繰返しせん断応力比と両振幅軸ひずみ5%に至る载荷回数関係を示す。また、巻末に軸ひずみと過剰間隙水圧の時刻歴を付随する。

载荷回数20回での繰返しせん断応力比で見ると、改良体は未固結砂に比べ材令3日 ($q_u=1.05\text{kgf/cm}^2$) で2.4倍、材令7日 ($q_u=1.19\text{kgf/cm}^2$) で3.2倍に増加している。ただし、今回の試験で、改良体についてはB値が0.95をクリアできないものが多かった。これは、改良体の透水係数が 10^{-6}cm/sec とかなり低かったためである。ちなみに、超微粒子セメントを用いた改良体の透水係数は $k=7.5\times 10^{-4}\text{cm/sec}$ であった。二重負圧法により供試体の飽和を行ったにも拘わらず、完全な飽和ができなかったものと考えられる。このため今回の試験は参考とした。

巻末の時刻歴を見ると、軸ひずみが繰返し直後から現れて、圧縮、引張側に次第に大きくなるが、引張破壊は起こさず、液状化に至った。

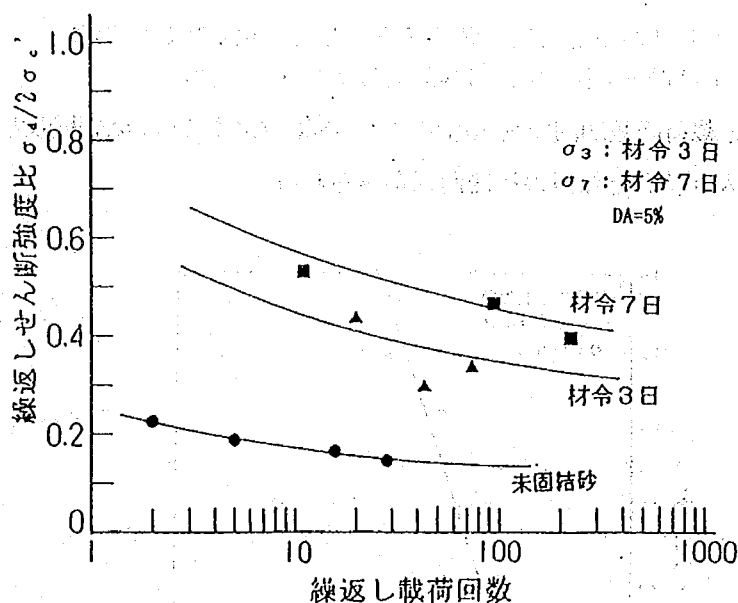


図-7.3.4 繰返しせん断応力比と両振幅軸ひずみ5%に至る载荷回数関係

図-7.3.5は繰返しせん断応力比と両振幅軸ひずみ2%および過剰間隙水圧比90%を破壊基準としてプロットしたものである。繰返し直後から軸ひずみが発生するため両振幅軸ひずみ2%に至る載荷回数は小さくなっている。また、過剰間隙水圧比は一軸圧縮強度が小さい材令3日の $\Delta u/\sigma_c' = 90\%$ に至る載荷回数が両振幅軸ひずみ2%の場合より大きくなる場合が見られた。

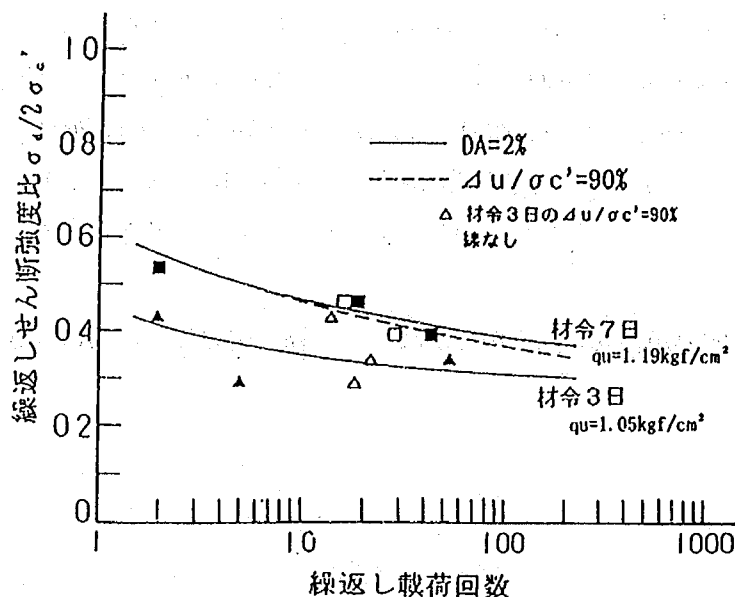


図-7.3.5 繰返しせん断応力比と破壊基準として両振幅軸ひずみ2%および過剰間隙水圧比90%に至る載荷回数の関係

図-7.3.6に一軸圧縮強度と載荷回数20回で両振幅軸ひずみ5%に至る繰返しせん断応力片振幅の関係を示す。

超微粒子セメント懸濁液注入固結砂と類似の相関関係がみられる。

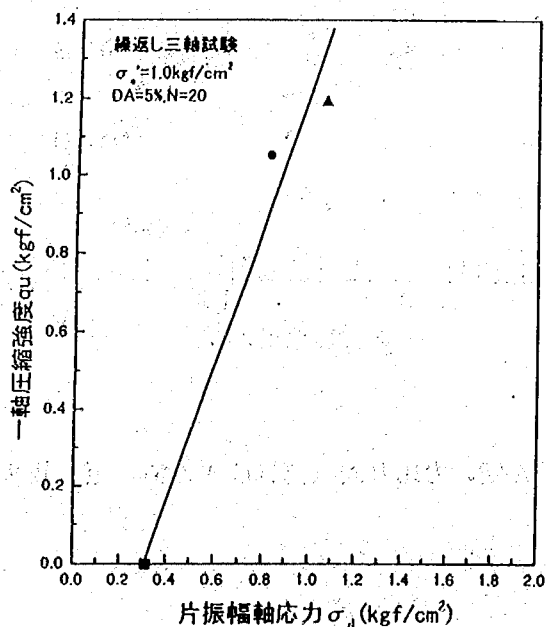


図-7.3.6 一軸圧縮強度と載荷回数20回で両振幅軸ひずみ5%に至る繰返しせん断応力片振幅の関係

7.4 まとめ

注入により形成された固結体の動的強度特性について以下のことがわかった。

- (1) 超微粒子セメント注入固結土は、一軸圧縮強度が 1.0kgf/cm^2 程度あれば載荷回数20回で両振幅軸ひずみ5%に至る繰返しせん断応力比で定義される繰返し強度は、未固結砂に比べ4.5倍の増加があった。
- (2) 一軸圧縮強度の大きい超微粒子セメント注入固結体では、繰返し載荷により引張破壊が生じた。
- (3) 超微粒子シリカ注入固結土は、一軸圧縮強度が 1.0kgf/cm^2 程度あれば載荷回数20回で両振幅軸ひずみ5%に至る繰返しせん断応力比で定義される繰返し強度は、未固結砂に比べ約3倍の増加があった。しかし、改良体の透水係数が 10^{-6}cm/sec と低いため完全な飽和ができなかった。
- (4) 一軸圧縮強度が 1.0kgf/cm^2 程度の超微粒子シリカ注入固結土は、繰返し載荷直後から軸ひずみが現れ徐々に大きくなるが、引張破壊は起こさず液状化に至った。
- (5) 注入材料が同じ場合には、繰返しせん断強さと一軸圧縮強度の間には相関関係がある。

第8章 三次元条件における浸透特性の検討

前章までにおいて、一次元注入条件における超微粒子セメント懸濁液の浸透特性・固結特性を調べ、最適な注入条件について検討した。実地盤での施工においては三次元に近い条件での注入となるため、本章では三次元条件での浸透特性について小型モールドを用いて行った室内試験の結果を報告する。

ここで主眼としたのは、超微粒子セメント注入材の、地盤条件による浸透特性の把握ならびに注入状況（注入速度、注入圧力等）から改良範囲を求め、実際に形成された固結体と比較検討する。

8.1 小型三次元モールド浸透実験（その1）

8.1.1 実験目的

小型三次元モールド（35×35×35cm）で注入試験を行い、モールド側面の排水条件による浸透特性および固結特性とステップ注入による固結体ラップ状況を確認する。

8.1.2 実験方法

供試砂は、一次元注浸透注入実験で用いた超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近いとされる東北産珪砂7号を用いた。6号珪砂および本実験の供試砂の物性比較を表-8.1.1に、図-8.1.1に粒度分布を示す。

表-8.1.1 供試砂の物性

供 試 砂	山形珪砂6号	東北珪砂7号
最大粒径 D_{max} (mm)	0.49	0.42
平均粒径 D_{50} (mm)	0.23	0.16
比 重 G_s	2.63	2.64
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.689	1.598
最小乾燥密度 (g/cm ³)	1.408	1.211
細粒分含有率 FC (%)	1.7	3.9

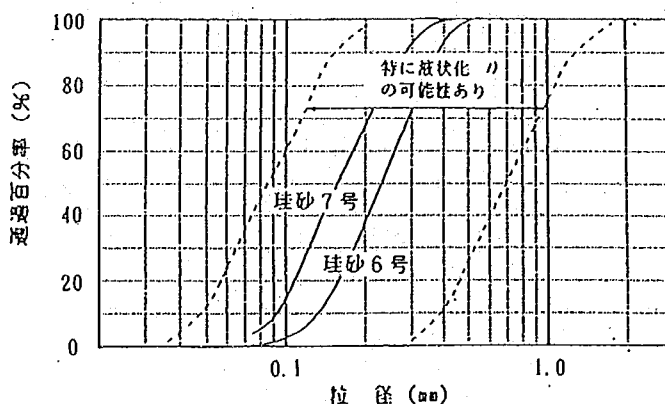


図-8.1.1 粒度分布

実験装置の概要図を図-8.1.2に示す。小型三次元モールド（35×35×35cm）には、側面排水が可能になるようにモールド全側面に排水口を設けてある。図-8.1.3に側面排水口の概要図を示す。

小型三次元モールドに東北産7号珪砂を7層に分けて一定の高さより空中落下させ、相対密度 $Dr=50\%$ にし、底部より水道水で飽和させた。注入材の配合は、超微粒子セメントを用いて、水セメント比 $W/C=1000\%$ 、分散剤混入率 $D/C=2\%$ とした。

図-8.1.4に注入ケース毎の概要図を示す。ケース1はモールド側面排水口を小さく（排水口と砂地盤の間に75 μ mの金網で仕切る）し、ケース2は側面排水口を大きく（排水口のみ）した。注入は、地盤の中央からの定圧力（0.1kgf/cm²）注入とし、注入速度が十分に低下した時点で終了した。また、最大注入量は4,000ml

を限度とした。注入後、材令14日で形成された固結体を供試体とし、注入材の充填状況を確認した。

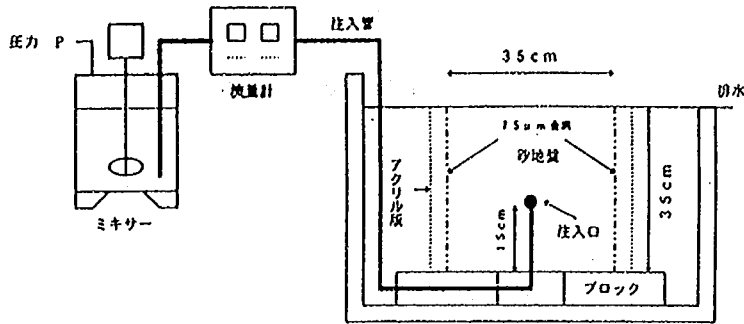


図-8.1.2 小型三次元モールドの概要図

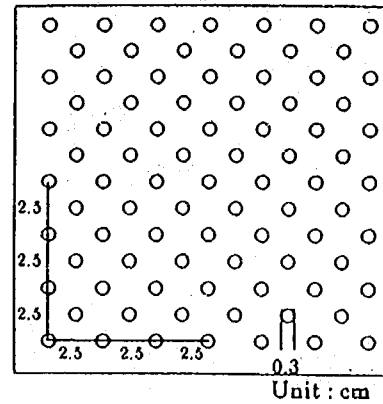


図-8.1.3 側面排水口概要図

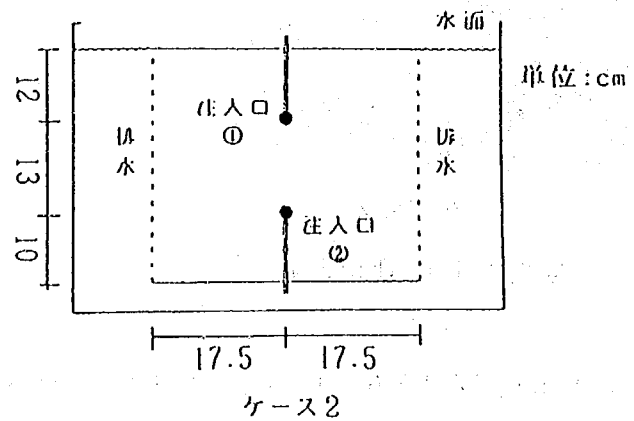
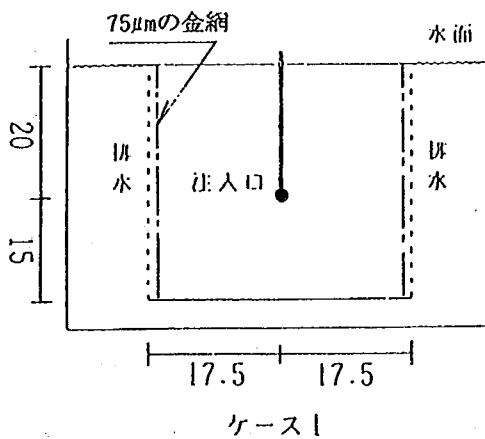


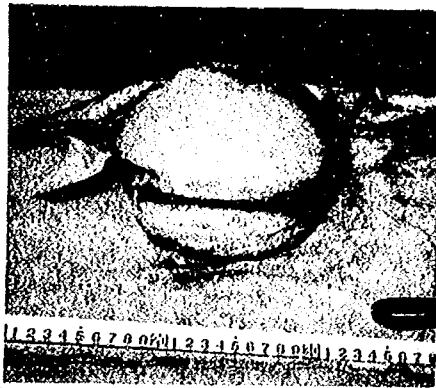
図-8.1.4 注入ケース毎の概要図

8.1.3 実験結果

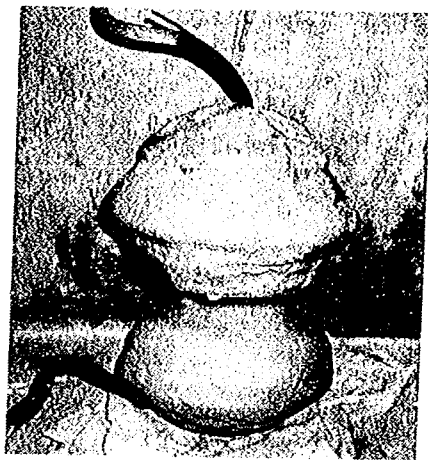
試験結果を表-8.1.2に、固結体状況を写真-8.1.1に示す。また、ケース1及び2における注入速度の経時変化を図-8.1.5、図-8.1.6に示す。

表-8.1.2 注入試験結果

	ケース1	ケース2	
		1ステップ*	2ステップ*
最大注入速度(ml/min)	340	570	340
注入量 (ml)	2,488	4,000	4,011
注入時間	32分09秒	8分34秒	22分30秒
最大径 (cm)	16	23	20
固結体重量 (kg)	3.29	12.97	
固結体体積 (cm ³)	1,636	7,090	



ケース 1



ケース 2

写真-8.1.1 固結状況

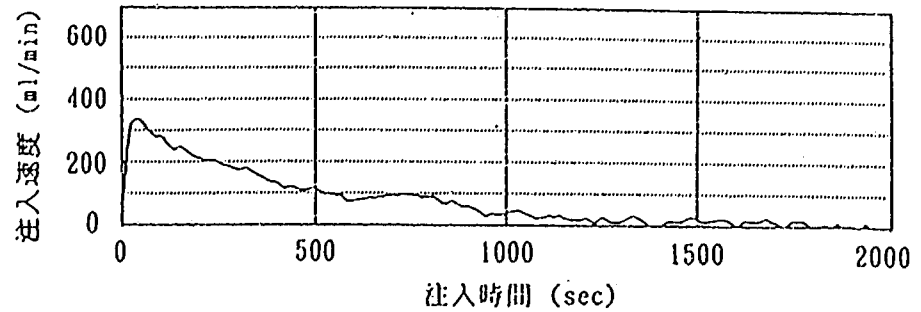


図-8.1.5 ケース 1 注入速度経時変化

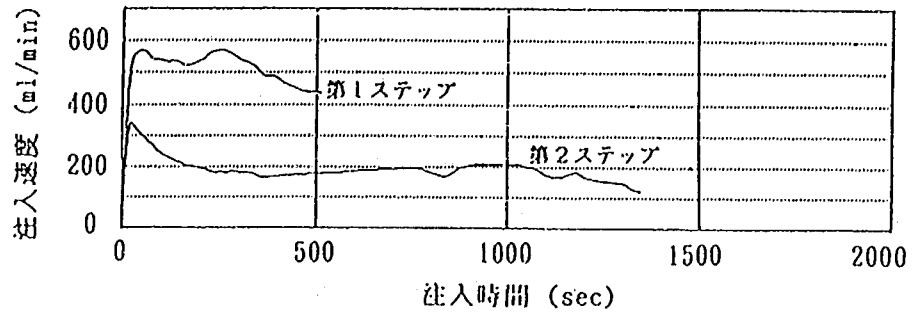


図-8.1.6 ケース 2 注入速度経時変化

図-8.1.5、図-8.1.6より、ケース 2 よりもケース 1 の方が注入速度の低下が著しく、また 2 ステップで注入したケース 2 では、第 1 ステップよりも第 2 ステップの方が注入速度が小さいのがわかる。前者については、側面排水の違いによるものと考えられる。図-8.1.6より、ステップダウンの注入を行うと、上部（第 1 ステップ）注入より下部（第 2 ステップ）の注入の方が最大注入速度は小さくなる。これは、第 1 ステップでの注入により、浸透可能域が狭められたものと考えられる。図-8.1.7 に注入量と固結体積の関係を示す。図中の充填比（注入量／固結体注入前間隙体積）は、ある注入量で形成される固結体の理論値である。図-8.1.7より、注入量が大きくなると固結体積も大きくなっているが、側面排水口と砂

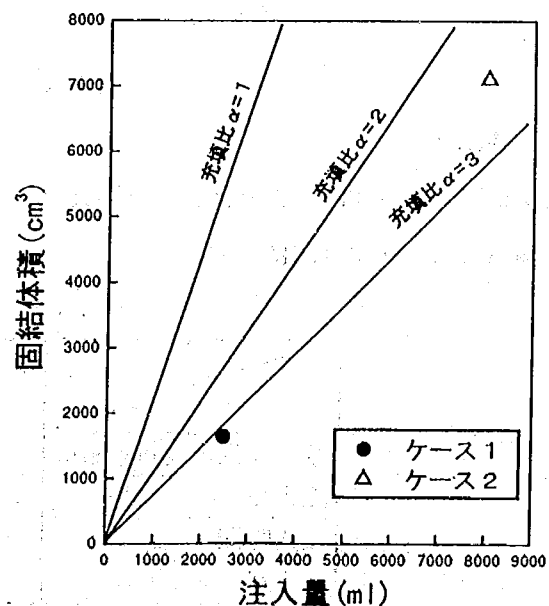


図-8.1.7 注入量と固結体積の関係

地盤の間を75 μ mの金網で仕切ったケース1は側面排水口のためのケース2に比べて、充填比が大きく浸透効率が悪くなっている。

次に、形成された固結体内のセメント量を調べた。ケース1のサンプリング位置を図-8.1.8に、ケース2のサンプリング位置を図-8.1.9に、それぞれの結果を表-8.1.3および表-8.1.4に示す。

注入材と砂の重量比は、つぎの手順で求めた。

- 1) サンプリングした固結体を粉砕し、5gを試料とする。
- 2) 6Nの塩酸で試料中の注入材を白色透明のゲル状に溶解する。
- 3) 炭酸ナトリウム溶液を加えゲルを溶解する。
- 4) 温水で砂を洗浄し、恒量になるまで乾燥する。
- 5) 試料重量と砂の重量差から溶解した注入材重量を求める。

実験結果より、固結体内部の注入材と砂の重量比は、サンプリング位置にかかわらず非常に近似している。しかし、固結体表面部のサンプルと固結体内部からのサンプルを比較すると、注入材と砂の重量比は、表面部の方が小さくなっている。

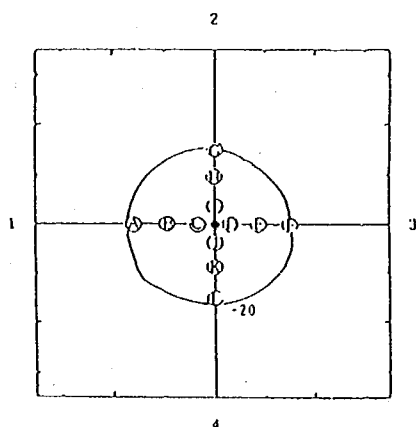


図-8.1.8 ケース1のサンプリング位置

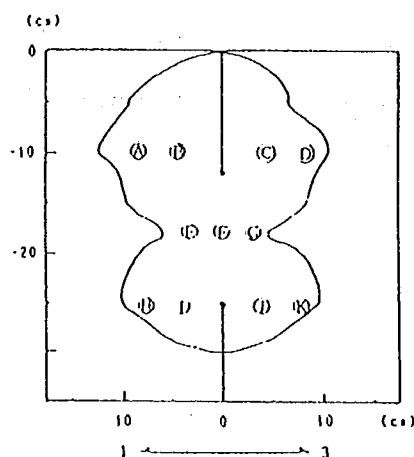


図-8.1.9 ケース2のサンプリング位置

表-8.1.3 ケース1の充填状況

	深度 (cm)	中心からの 距離(cm)	砂重量 (g)	注入材量 (g)	注入材量 : 砂比
A	-20	7.5	1.767	0.150	1:12
B	-20	4.5	2.532	0.324	1:8
C	-20	1.5	2.332	0.209	1:11
D	-20	1.5	1.900	0.236	1:8
E	-20	4.5	2.547	0.358	1:7
F	-20	7.5	1.894	0.121	1:16
G	-20	7.5	1.493	0.069	1:21
H	-20	4.5	2.248	0.323	1:7
I	-20	1.5	2.306	0.268	1:9
J	-20	1.5	1.832	0.219	1:8
K	-20	4.5	2.487	0.316	1:8
L	-20	7.5	1.413	0.175	1:8

表-8.1.4 ケース1の充填状況

	深度 (cm)	中心からの 距離(cm)	砂重量 (g)	注入材量 (g)	注入材量 : 砂比
A	-10	8.5	3.143	0.297	1:10
B	-10	4.5	2.829	0.225	1:12
C	-10	4.5	2.433	0.206	1:12
D	-10	8.5	1.642	0.167	1:10
E	-18	3.0	1.916	0.205	1:9
F	-18	0.0	2.313	0.253	1:9
G	-18	3.0	2.296	0.232	1:10
H	-25	8.0	2.073	0.259	1:8
I	-25	4.0	2.463	0.295	1:8
J	-25	4.0	2.470	0.315	1:8
K	-25	8.0	2.150	0.267	1:8

前述の分析により得られた注入材と砂の重量比の平均値を用いて計算した固結体中のセメント量は、ケース1では注入したセメント量の約90%、ケース2で約130%となった。ケース1は、注入したセメント量のほとんどが固結体中にとどまったと解釈できるが、ケース2は、固結体中のセメント量が注入したセメント量より多い結果となった。これは、測定誤差、サンプリング位置によるセメント濃度の空間的なばらつきによるものと推測される。

8.1.4 まとめ

- ① 側面の排水条件が良いほど、定圧力注入時に流速が低下しにくく、所定注入量を短時間に注入することができた。
- ② ステップダウン方式による注入を行うと、上部（第一ステップ）注入より下部（第三ステップ）の注入の方が最大注入速度は小さくなった。これは、第1ステップでの注入により、浸透可能域が狭められたものと考えられる。
- ③ 固結体内部のセメント濃度に明確な差は見られなかったが、注入口に近い部分よりも表面部の方が小さくなる傾向を示していた。
- ④ 注入材と砂の重量比の平均値を用いて計算した固結体中のセメント量は、サンプリング位置によるセメント濃度のばらつき等があるため確実ではないが、注入したセメント量のほとんどは固結体中にとどまっていると推測される。

8.2 小型三次モールド浸透実験（その2）

8.2.1 実験目的

注入量と固結体積の関係を小型三次元モールド注入実験により確認する。

8.2.2 実験方法

試験装置、試料砂及び供試体作成方法は6.1と同様である。試料砂を相対密度 $D_r=60\%$ にし、注入材の配合は水セメント比 $W/C=1000\%$ 、分散剤混入率 $D/C=10\%$ とした。注入は地盤中央から定圧力（ 0.1kgf/cm^2 ）とし、予め設定した $1.0\sim 3.5\text{ }\ell$ の注入量に達するまで行い、材令14日で形成された固結体を供試体とした。

8.2.3 実験結果

累積流量の経時変化を図-8.2.1に示す。

比較のために実施した水注入試験では注入流量速度は一定である。これに比べ懸濁液注入では初期流速が幾分小さいものの、累積注入量 $1.0\text{ }\ell$ （約2.5分）までは、水注入と同様に直線的に注入量は増加している。その後、注入量が増えるに従い注入速度が減少し、 $3.5\text{ }\ell$ を注入するのに約24分を要した。注入速度の減少は、注入量の増加に伴い、懸濁液中のセメント粒子が注入孔近傍の地盤間隙中に残留し、間隙量が減少していくためと考えられる。

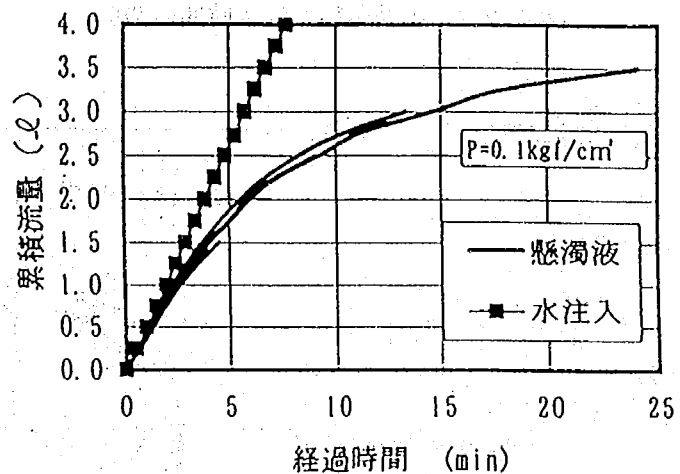


図-8.2.1 累積流量の経時変化

所定の懸濁液量を注入し形成された固結体の諸元を表-8.2.1に、固結体積と注入時間及び注入量の関係を図-8.2.2、図-8.2.3に示す。また、固結体の鉛直断面（水平方向最大径）を図-8.2.4に、注入量 $1\sim 3\text{ }\ell$ の固結状況を写真-8.2.1、写真-8.2.2に示す。注入量 $1.0\text{ }\ell$ の固結形状は球形であり、 $1.5\text{ }\ell$ では鉛直方向に伸びず水平方向に広がりを持つ扁平な球が形成された。注入量 $2.5\text{ }\ell$ 以上で形成された固結体は、 $1.5\text{ }\ell$ で形成された固結体の水平方向の距離が同じであるが、鉛直方向に伸びた。また、注入量 $3.0\sim 3.5\text{ }\ell$ にかけて固結体は大きくなり、充填比が大きくなった。

表-8.2.1 固結体の諸元

注入量 (ℓ)	1.0	1.5	2.5	3.0	3.5
注入時間 (min)	2.6	4.5	9.0	13.3	24.1
水平方向直径 (cm)	15.5	19.3	19.3	19.6	19.2
鉛直方向直径 (cm)	13.5	13.9	16.5	17.4	17.1
水平/鉛直	1.15	1.39	1.17	1.13	1.12
固結体積 (ℓ)	1.79	2.61	2.98	3.12	3.06
充填比*	1.27	1.31	1.91	2.18	2.60

*充填比=注入量/固結体の注入前間隙体積

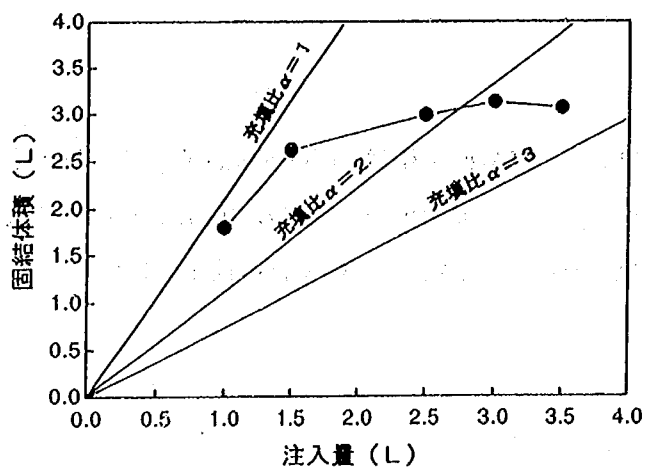


図-8.2.2 固結体積と注入時間の関係

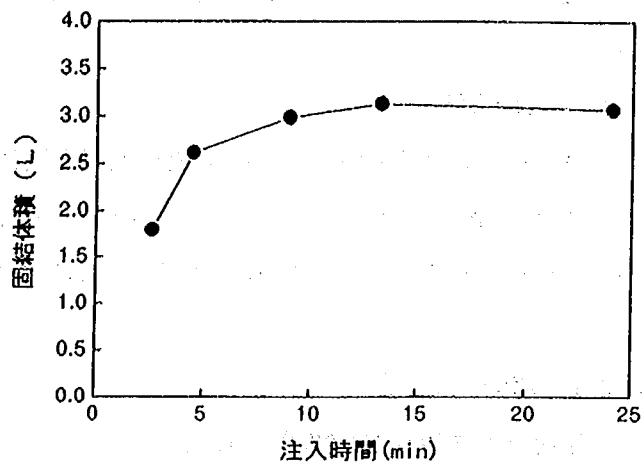


図-8.2.3 固結体積と注入量の関係

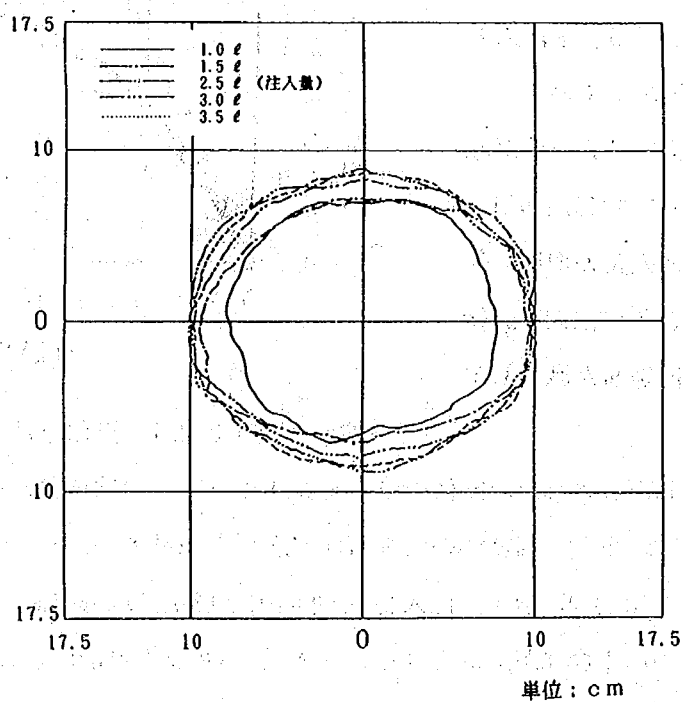


図-8.2.4 固結体の鉛直断面図

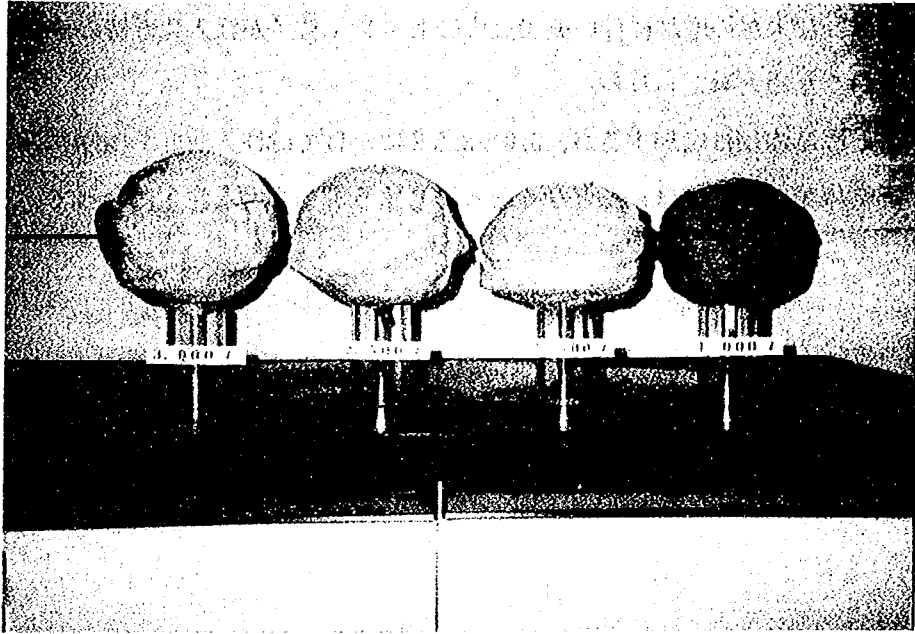


写真-8.2.1 固結状況

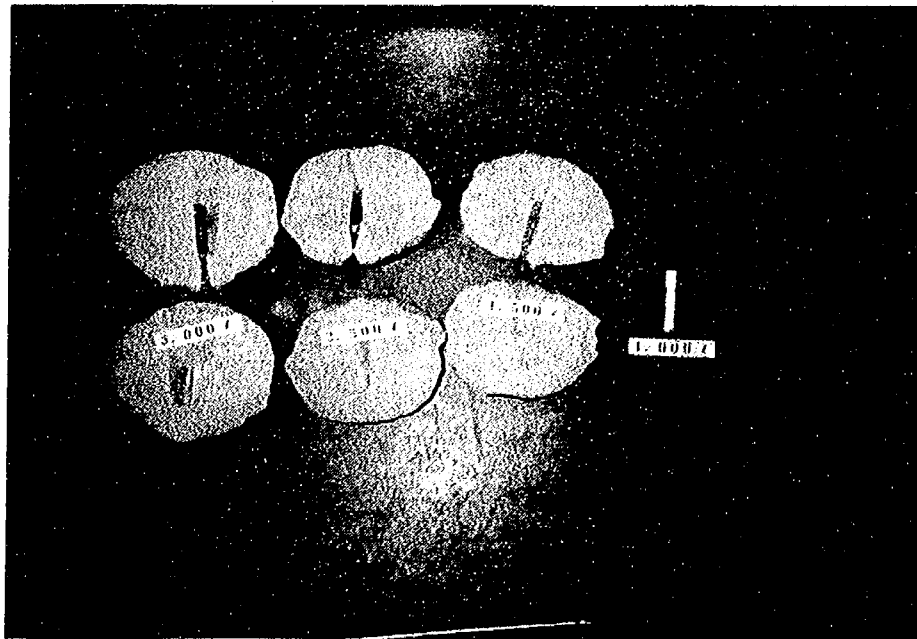


写真-8.2.2 固結状況

8.2.4 まとめ

- (1) 累積注入量の経時変化が直線的に増加している1.0ℓまでは、三次元的に十分浸透しており、注入量に対して効率よく固結体が形成されている。
- (2) 注入速度の減少は、注入量の増加に伴い懸濁液中のセメント粒子が注入孔近傍の地盤間隙中に残留し、間隙量が減少していくためと考えられる。
- (3) 注入量の増やすと固結体積は増加するが、3.0～3.5ℓにかけては注入速度が極端に減少し、充填比だけが大きくなり固結体積の伸びがほとんどなくなってしまう非効率的な注入になっている。

〈参考文献〉

- 1) 日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説、1989、上巻p204

第9章 土槽注入実験（その1）

9.1 実験目的

本実験では、注入材として、浸透性、耐久性に優れている超微粒子セメント注入材の三次元浸透特性（浸透範囲、固結形状）を大型土槽実験により把握し、液状化対策工としての要件である一定の範囲を改良できるかどうかを検討する。

9.2 実験方法・条件

9.2.1 模型地盤

(1) 土 槽

土木研究所構内土工実験棟内の内寸4.00m×3.55m×4.20mの屋内土槽を使用した。

(2) 地盤材料

供試砂は、山形産珪砂6号を用いた。供試砂の物性及び粒度分布は8章を参照されたい。

(3) 地盤作成方法

地盤の相対密度は $Dr=50\%$ を目標に作成した。地盤の作成手順を以下に示す。（写真-9.2.1参照）

- ①土槽底盤部に地盤飽和用の有孔管を設置する。
- ②土槽側面に排水管（有孔パイプ8本）を設置する。
- ③一層50cmとし相対密度 $Dr=50\%$ を目標に所定の高さになるように気乾砂を敷き均し、転圧する
- ④1層目から注入管を建て込みながら②を7層（地盤深さ3.5m）繰り返す。
- ⑤7層目終了後注入管周りをセメントペーストでシールする。
- ⑥地盤底面から水を通し、地盤を飽和する。
- ⑦地盤上部に砂利を排水層として40cm敷く。
- ⑧上盤部の排水口（4箇所）を設置する。
- ⑨排水層の上に注入時の盤ぶくれを防止するための厚さ10cmのコンクリート層を打設する。

図-9.2.1に土槽の平面図、図-9.2.2に土槽の断面図を示す。

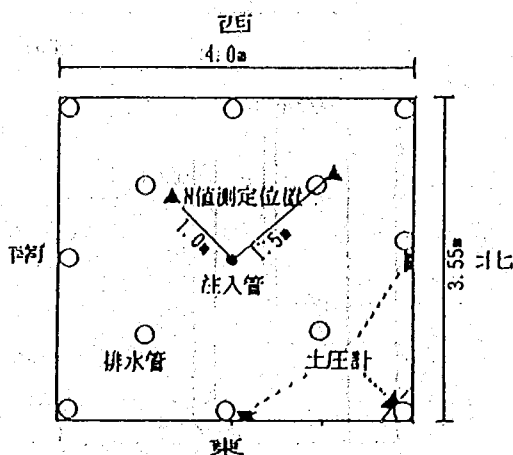


図-9.2.1 土槽の平面図

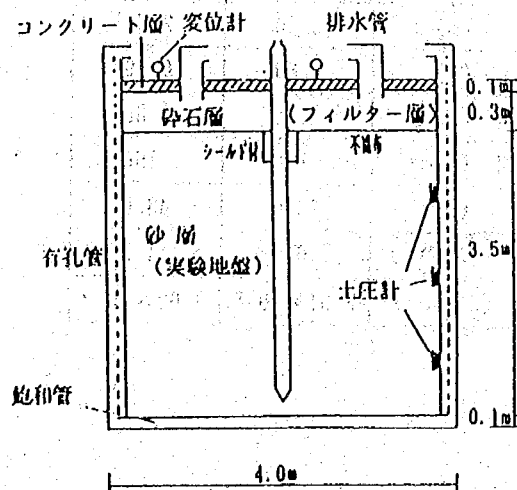


図-9.2.2 土槽の断面図

(4) 地盤性状

① 密度

地盤の密度は、各層毎に砂置換法で測定するとともに、地盤作成時に投入した砂の総重量と地盤の全体の体積より平均的な値を算定した。図-9.2.3に測定位置を、表-9.2.1に砂置換法で求められた密度を示す。また、表-9.2.2に地盤作成時に投入した砂の総重量と地盤全体の体積に基づいた地盤密度を示す。砂置換法による密度は層毎にばらつきが大きく、測定精度に問題があったと思われる。

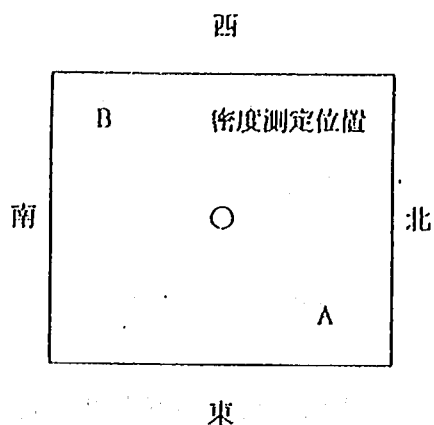


表-9.2.1 砂置換法による密度測定位置

層 No	面からの深 (cm)	乾燥密度 (g/cm ³)			相対密度 Dr (%)
		A	B	平均	
1	350	1.609	1.632	1.620	78.7
2	300	1.649	1.573	1.611	75.7
3	250	1.587	1.396	1.492	33.8
4	200	1.612	1.342	1.477	28.1
5	150	1.603	1.704	1.654	89.4
6	100	1.633	1.453	1.543	52.6
7	50	1.602	1.439	1.520	44.3
平均				1.560	57.5

図-9.2.3 砂置換法による密度測定位置

表-9.2.2 砂の総重量と地盤全体の体積に基づいた密度

乾燥時の現場密度試験による密度の平均	1.560g/cm ³	Dr=59%
乾燥時の土槽体積と砂の総重量からの密度	1.509g/cm ³	Dr=41%
飽和時の土槽体積と砂の総重量からの密度	1.514g/cm ³	Dr=44%

② 透水係数

地盤の透水係数は、注水法と復水法により測定した。

図-9.2.4に試験位置を、表-9.2.3に試験結果を示す。

表-9.2.3 透水試験結果

	復水法	注水法
測定深度 (m)	2.50	2.50
安定水位 (m)	0.89	0.89
観測の最初の時間 (sec)	15	30
観測の最後の時間 (sec)	150	150
最初の水位差 (cm)	42.0	43.6
最後の水位差 (cm)	0.7	1.9
透水係数 (cm/sec)	3.51×10^{-2}	3.02×10^{-2}

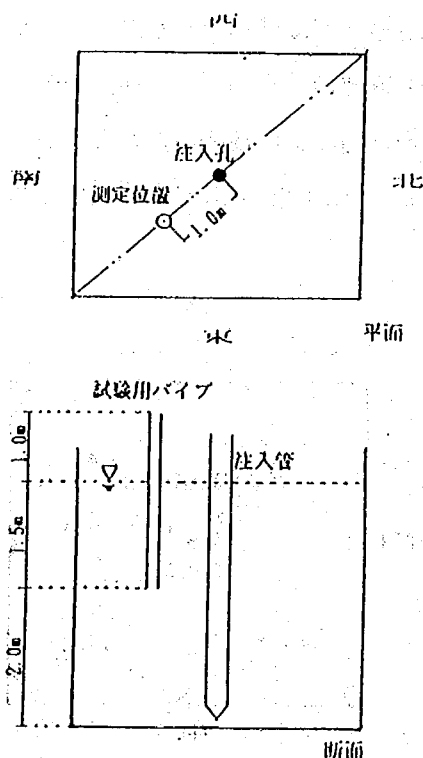


図-9.2.4 透水試験位置

③ N値

図-9.2.5に示した位置で標準貫入試験を実施した。

表-9.2.4に結果を示す。N値は、ほぼ $N=2.0\sim 3.0$ であり、地盤は均一に近い状態である。ただし、注入孔から1.5m、深さ1.20~1.54mの位置では、 $N=0.9$ と著しく小さかった。

表-9.2.4 標準貫入試験結果

注入孔から1.0m			注入孔から1.5m		
深 度 (m)	間隔 (m/cm)	N値	深 度 (m)	間隔 (m/cm)	N値
0.45 ~ 0.77	3/32	2.8	0.45 ~ 0.91	3/46	2.0
1.20 ~ 1.55	3/35	2.6	1.20 ~ 1.54	1/34	0.9
1.95 ~ 2.25	3/30	3.0	1.95 ~ 2.27	3/32	2.8
2.70 ~ 3.01	3/31	2.9	2.70 ~ 3.00	3/30	3.0

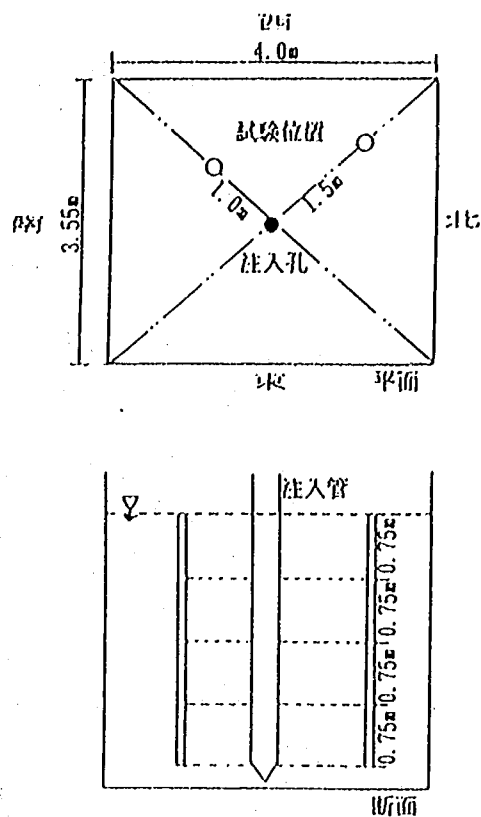
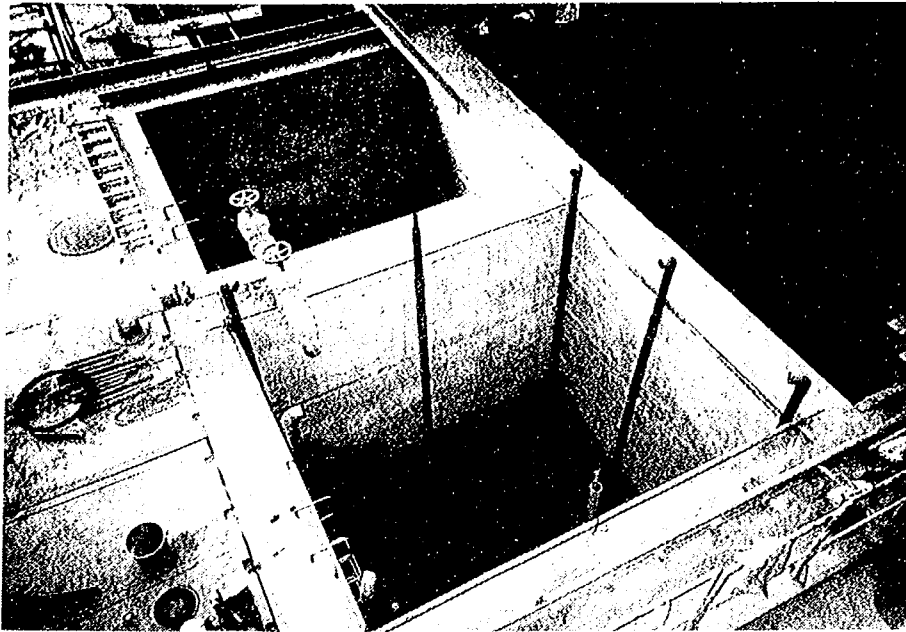


図-9.2.5 標準貫入試験位置

・土槽実験地盤作成状況 (写真－9. 2. 1)

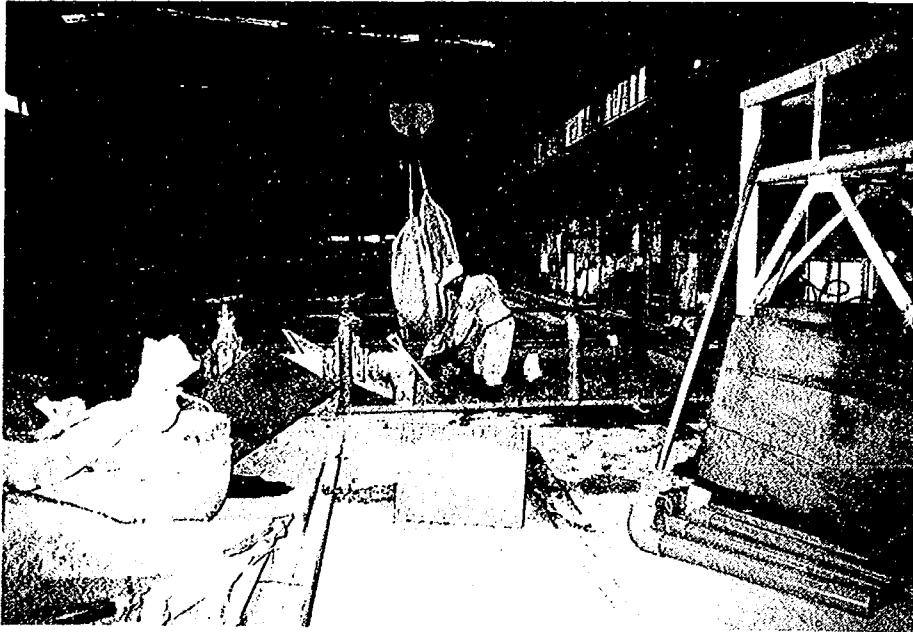
実験土槽 (排水管・飽和管設置完了)



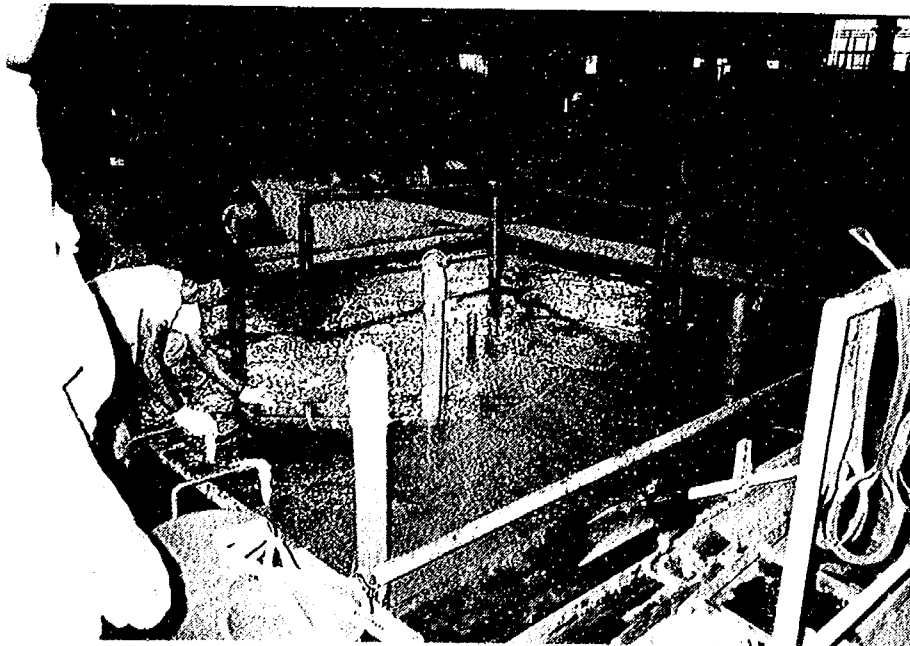
試料砂投入状況



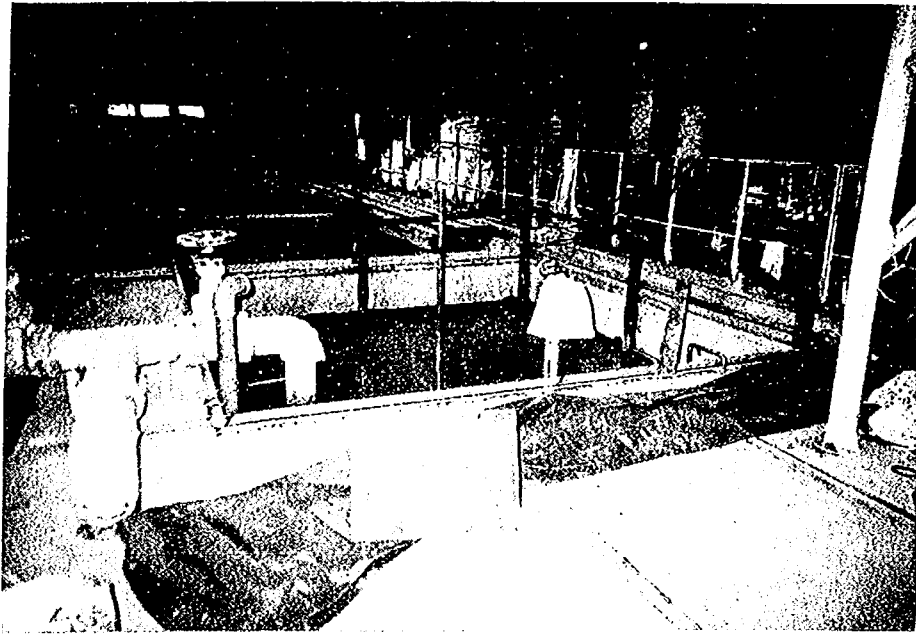
地盤上部砕石敷き均し状況



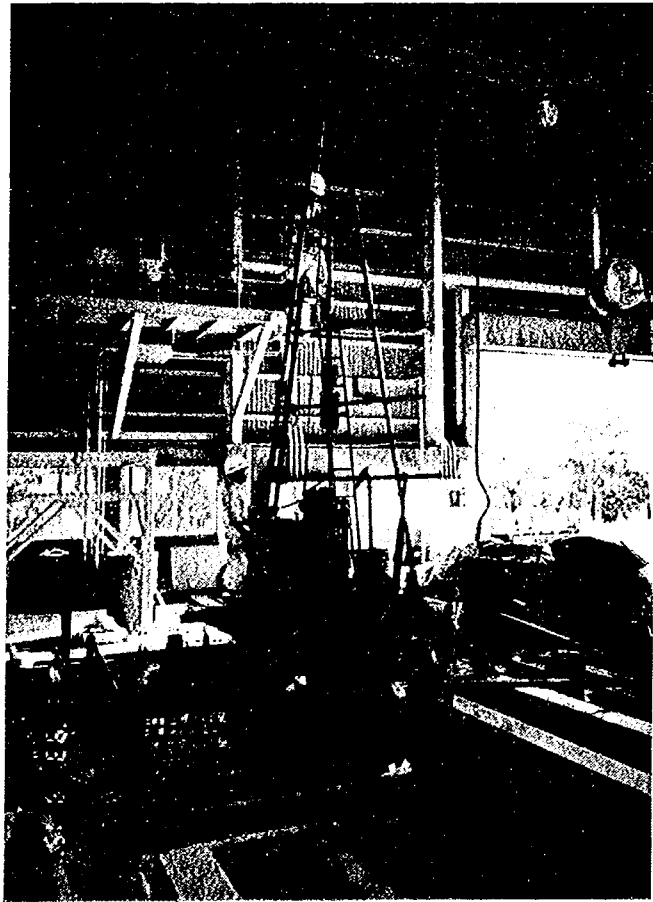
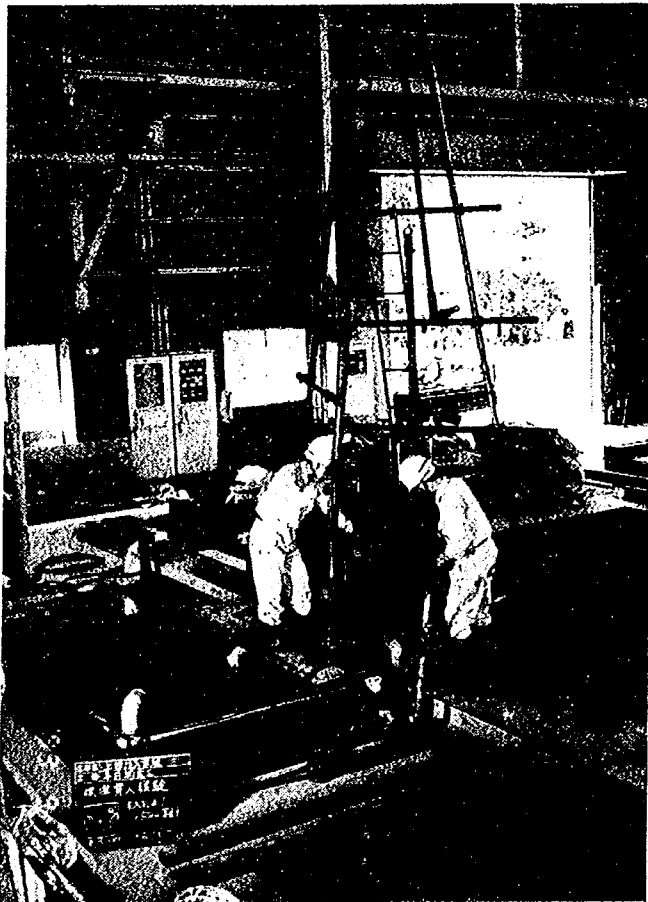
地盤最上部コンクリート敷き均し状況



飽和完了



地盤作成後の標準貫入試験状況



9.2.2 注入試験方法

(1) 注入材料と配合の設定

注入材は、超微粒子セメント注入材を実験に供した。注入材の配合は一次元注入実験の結果に基づいて決定した。このための一次元注入実験の内容を以下に示す。

① 試験方法

試料砂は、土槽実験に用いる珪砂6号を用いた。供試体の作成方法は5章で行ったものと同様である。ただし、注入方法は、土槽実験に近い注入条件にするために定流量注入とした。図-9.2.6に定流量注入装置を示す。本実験条件は、分散剤混入率 $D/C=1\%$ とし、 $W/C=500, 750, 1000, 1500$ とした。注入量は、試料砂の間隙体積（2.0mモールド中の供試体間隙体積）の2.4倍（通過しても定流量まで注入を行う）とし、注入流量は100ml/min、注入圧力上限は5.0kgf/cm²とした。

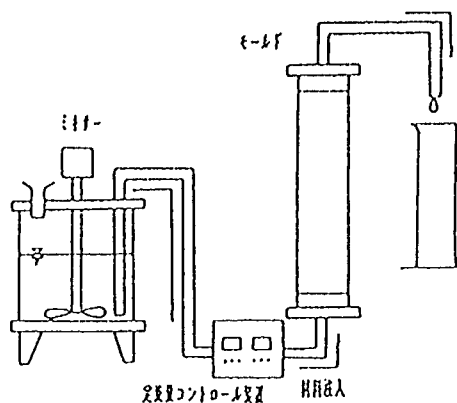


図-9.2.6 定流量注入装置

② 試験結果

図-9.2.7に固結長および充填比と水セメント比の関係を示す。固結長は、 $W/C=750, 1000$ の場合に2.0mモールドを通過している。充填比（注入量／固結体の注入前間隙体積）を見ると $W/C=750, 1000$ が約2.4であり最も1に近く浸透効率が良い。次に図-9.2.8より、 $W/C=500$ の最終注入圧力が4.6kgf/cm²であり、その他の W/C は1.0～1.5kgf/cm²である。これより、 $W/C=500$ は限界注入量に近く、その他の W/C は注入圧力が低いことから注入量に余裕があると考えられる。

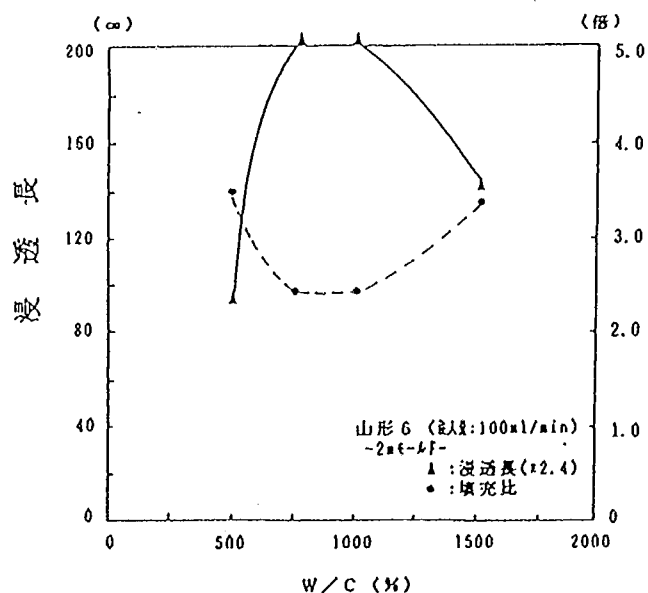


図-9.2.7 固結長および充填比とW/Cの関係

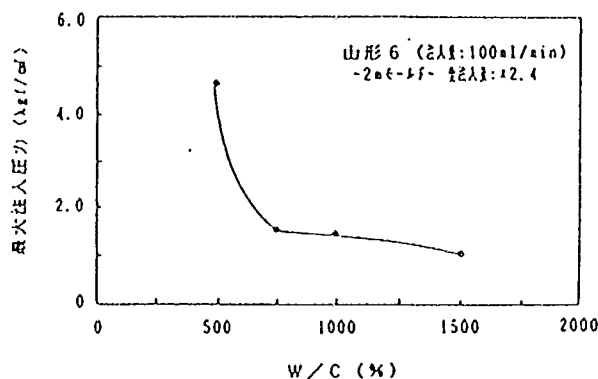


図-9.2.8 各W/Cの最終注入圧力

また、図-9.2.9に2.0mモールドを通過したW/C=750, 1000%の浸透距離ごとの一軸圧縮強度を全体の平均値に対する比として示す。平均強度はW/C=750%が大きく、強度のばらつきが少ないことが分かる。

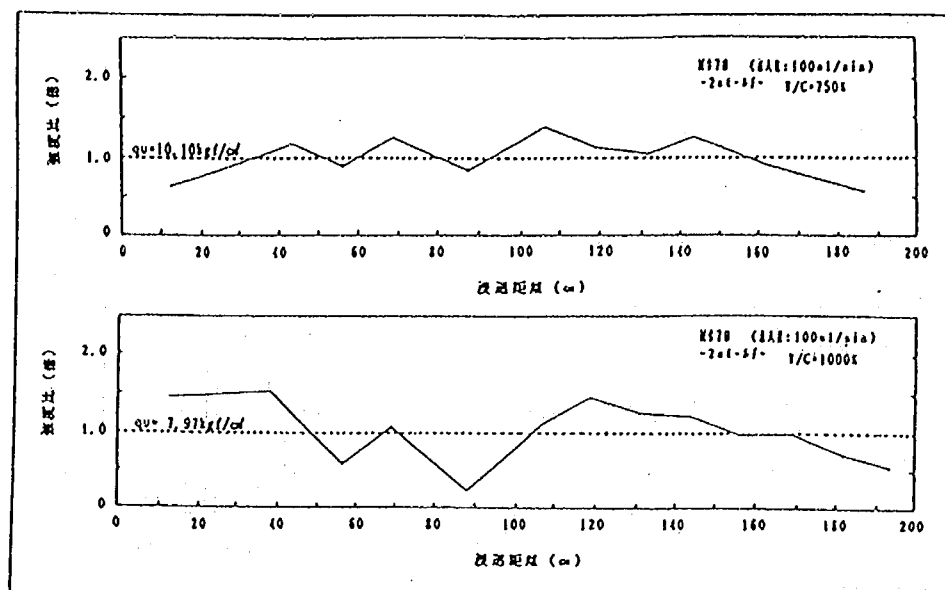


図-9.2.9 W/C=750%, 1000%の浸透長ごとの強度比

③配合の設定

一次元注入実験より、珪砂6号に対してW/C=750%の場合が固結長、最終注入圧力、充填比および強度のばらつきのいずれも良い結果が得られたことより、今回の土槽実験の注入材配合はW/C=750%とした。また、分散剤混入量はD/C=1%とした。表-9.2.5に注入材1㎡当たりの標準配合を示す。

表-9.2.5 注入材1㎡当たりの配合

	重量(kg)	容量(ℓ)
超微粒子セメント	1 2 7.5 0	4 2.5
分散剤	1.28	1.0
水	9 5 6.5 0	9 5 6.5
合 計	1, 0 8 5.2 8	1, 0 0 0.0

(2) 注入方式

注入方法は、注入目的、注入材のゲル化時間、注入装置における注入材の混合方式に応じて決定される。超微粒子セメント注入材は、1ショット方式(1液1系統式)で注入される。これは、セメント系注入材のようなゲル化時間の長い注入に用いられ、全ての材料を同一のミキサーに、予め規定配合で十分に攪拌混合し、1台のポンプで地盤に注入する方式である。本実験では、超微粒子セメント注入材の砂質土への浸透注入を基本としているため信頼性の高い注入方式が要求される。そこで、ゲル化時間の長い注入材による均等浸透注

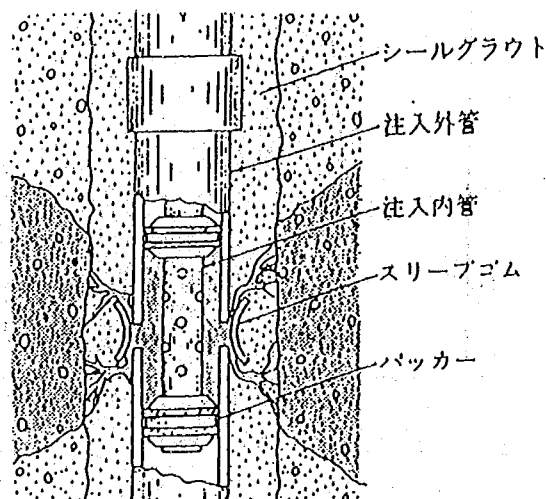


図-9.2.10 注入部構成例¹⁾

入を目的として開発され、細砂地盤への浸透注入に施工実績があり、信頼性の高い二重管ダブルパッカー方式を用いた。図-9.2.10にこの方式の注入部構成例を、図-9.2.11に一般的な施工順序を示す。

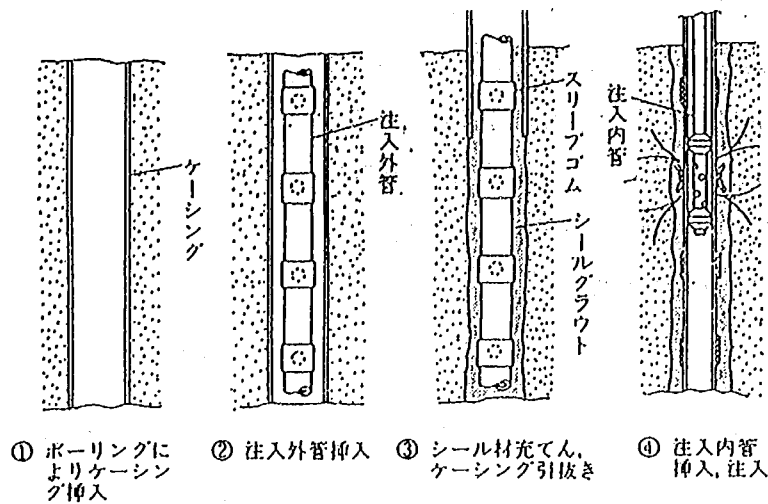


図-9.2.11 二重管ダブルパッカー施工手順¹⁾

注入内管の先端には、図-9.2.10に示すように二段のパッカー（Oリング状で水もしくはエアを送り込むことにより、ゴム風船のように膨らみ液漏れしないように密封する機能を持つもの）が取り付けられており、これを上下に移動することによって33cmピッチで開けられた注入孔から注入を行う。

二重管ダブルパッカーの特徴として、上下どちらからでも注入でき、再注入も可能である点が挙げられる。本実験では、改良範囲を把握するため、土槽地盤中央の一点から注入を行った。しかし、計画注入量に達しなかったため、さらに、99cm下の注入孔より再度注入し、上下のラップ状況を観察した。

(3) 注入条件

注入は、室内試験結果に基づき $W/C=750\%$ 、 $D/C=1\%$ の条件で限界注入を行うこととし、あるいは、つぎのいずれかの状態に至った段階で注入を終了することとした。

- ・地盤上部のコンクリート盤に大きな変位が生じた場合
- ・土槽内に設置した土圧計に大きな変化が生じた場合
- ・注入材懸濁液が排水口から流出した場合

改良目標は、土槽形状最大の直径 $D=3.5\text{m}$ の球形とし、計画注入量は(9.2.1)式を用い22600ℓに設定した。ただし、地盤の間隙率 $n=0.42$ 、充填比は図-9.2.7の結果から、懸濁液の砂粒子による濾過現象を考慮し充填比 $\alpha=2.4$ とした。

$$Q = \frac{1}{6} \alpha \cdot n \cdot \pi \cdot D^3 \quad (9.2.1)$$

つぎに、流量速度の設定は以下のようにして行った。地盤に設置された注入管を用いて注水試験²⁾を行い注入圧力 p と注入流量 q の関係を求めた。図-9.2.12に $p-q$ 曲線を示す。注入圧力は、注入流量速度が 7 l/min になるまでほとんど上昇していない。また、 17 l/min まで注入流量速度を上げたが明確な圧力のピークは見られなかった。懸濁液注入時には、同じ注入流量速度でも注入圧力が大きくなると予想されるので、計画注入流量は 12 l/min とした。

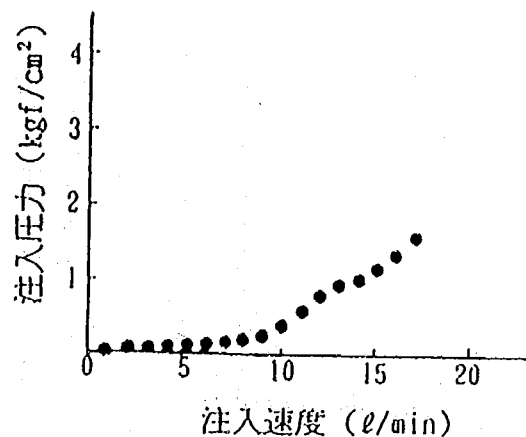


図-9.2.12 注水圧力と流量の関係

(4) 注入機械の仕様

本実験に使用した注入機材の仕様を表-9.2.6に、配置を図-9.2.13に示す。

表-9.2.6 注入機材の仕様

種 類	型 式	能 力	動力容量
注入ポンプ	NPOT-100-02S	$Q=(3\times 2)\sim(15\times 2)\text{ l/min}$ $P_{\text{max}}=100\text{ kg/cm}^2$	3.7kw
バッカー用ポンプ		$Q=12\text{ l/min}$ $P_{\text{max}}=70\text{ kg/cm}^2$	2.2kw
グラウトミキサー	MIX-200	攪拌容量上下各 200 l	2.2kw
認定流量計	DR-120-1HK	流量 $0\sim 60\text{ l/min}$ 圧力 $0\sim 60\text{ kg/cm}$	
水中ポンプ	V-51	積算5Hr 2ペン 揚程 10 m 流量 180 l/min	0.75kw

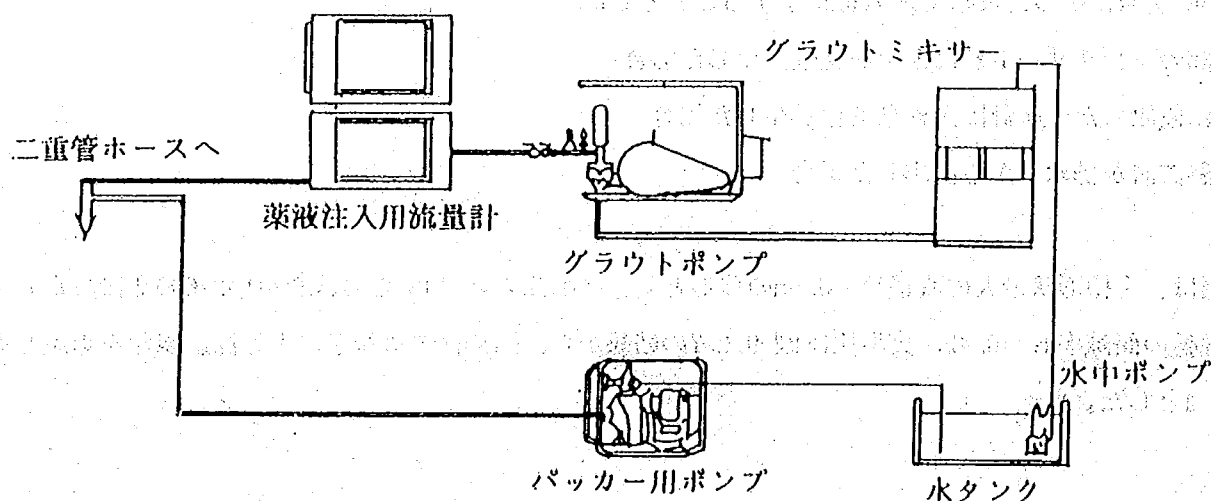


図-9.2.13 注入機材の配置

9.3 実験結果

9.3.1 総注入量

注入計画に基づき土槽中央の第一注入孔より注入を開始し、9時間58分後に排水口からの懸濁液の流出を確認したため注入を終了した。この時点の注入量は7047ℓで計画注入量 $Q=22,600\text{ℓ}$ （改良目標径3.50m）に達しなかったため、注入終了より10時間後に、第一注入孔より99cm下げた位置を第二注入孔として再注入を行った。この際、上部は浸透性が悪くなっているため、第一注入孔における注入流量と同じにすると注入圧力が上昇し割裂の恐れがあった

ので、注入流量 $q=9\text{ℓ/min}$ とした。注入開始10時間50分後に、排水口から懸濁液の流出を確認し終了した。表-9.3.1に注入結果を示す。

表-9.3.1 注入結果

	第一注入*	第二注入*
注入孔位置	土槽中央	第一より99cm下部
注入時間	9hr58min	18hr50min
注入流量速度	10ℓ/min	
実施注入量(ℓ)	7,074	10,964
終了理由	排水管からの注入材流出	排水管からの注入材流出

*第一および第二注入孔からの注入

9.3.2 注入圧力と注入流量の経時変化

(1) 第一注入孔における注入圧力と注入量

第一注入孔における注入時間と注入圧力、注入流量との関係を図-9.3.1に示す。注入開始時の圧力は、 15kgf/cm^2 で注水試験の結果と比べ、かなり高くなっている。一度注水圧力は下がり、その後徐々に 17.5kgf/cm^2 まで上昇する。100分経過後徐々に低下し200分の時点で 5.0kgf/cm^2 となり、200分経過後再び徐々に上昇して500分で2回目のピークに達している。注入流速は、50分までは圧力と同じ傾向を示し、その後は、 12ℓ/min でほぼ安定している。注入開始直後の挙動は、注入ポンプの安定性が悪かったためと考えられる。100分経過後の圧力ピークはその前後に比べ大きく立ち上がっていることから、注入孔周りの地盤を割裂

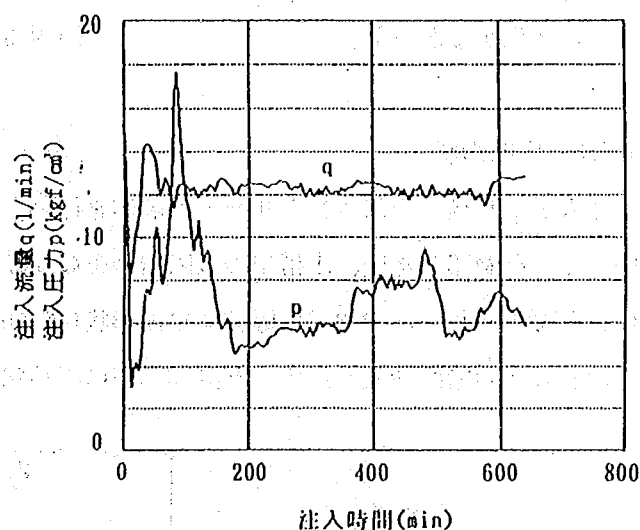


図-9.3.1 第一注入孔から注入流量
および圧力の経時変化

したものである。その後、浸透が始まり500分経過後に圧力が低下し、この時点で地盤上面に懸濁液がブローしたと思われる。（地盤上面にコンクリートを打設していたためブローを目視で確認できなかった）これより、浸透注入に有効な注入量は、 $12\text{ℓ/min} \times 500\text{min} = 6,000\text{ℓ}$ であったと推定される。

(2) 第二注入孔における注入圧力と注入流量

第二注入孔への注入時間と注入圧力、注入流量との関係を図-9.3.2に示す。第一注入孔への注入と異なり、注入流量は注入開始から終了まで9~10 l/minと安定している。注入圧力は注入開始直後の14kgf/cm²から徐々に低下し、600分経過後、急激に下がっている。初期注入圧力が第一注入孔への注入圧より大きいのは、第二注入孔上部が第一注入孔への注入により注入材が充填されていたためと考えられる。また、600分経過後の圧力低下は、地盤上面に懸濁液がブローしたためと思われる。これより、浸透注入に有効な注水量は約5400 lと考えられ、第一注入を含めた総注水量は11,400 lとなる。

なお、注入に際しては、注入圧力に小さな変動が見られる。このことは、小さな割裂が生じているためと考えられる。地盤面上にブローした懸濁液は、碎石層の間隙にも充填されていた。なお、地盤上部の変位および土槽内の土圧には、ほとんど変化がなかった。

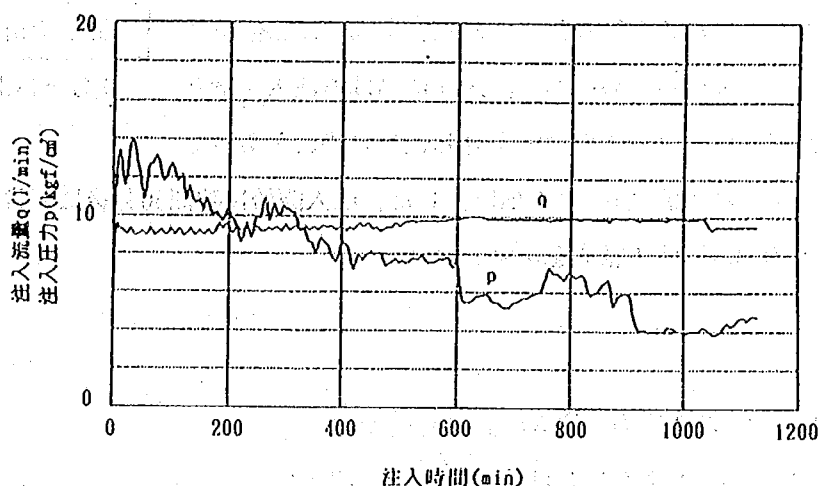


図-9.3.2 第二注入孔からの注入流量および圧力の経時変化

9.3.3 固結形状

注入1ヶ月後、上部コンクリートの解体を行い、下部の碎石層が超微粒子セメント懸濁液により固結していることを確認した後、土槽中の未固結砂を取り除き（写真-9.3.1参照）、形成された固結体の形状および体積を確認した。図-9.3.3に固結体平面形状（深さ60cm間隔）を、図-9.3.4に東西方向の鉛直断面、図-9.3.5に南北方向の鉛直断面を示す。写真-9.3.2に固結状況を示す。

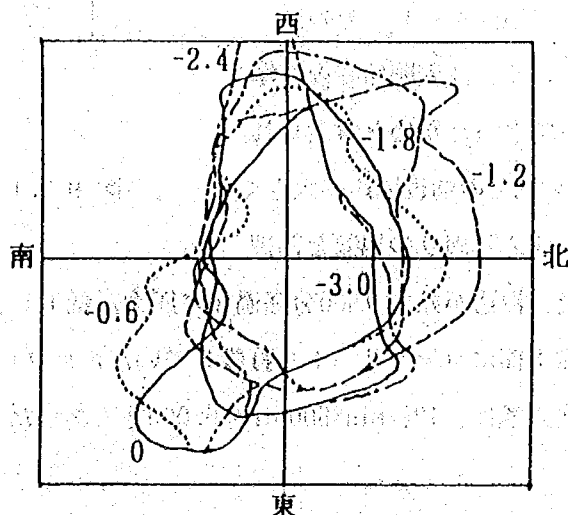


図-9.3.3 固結体平面形状

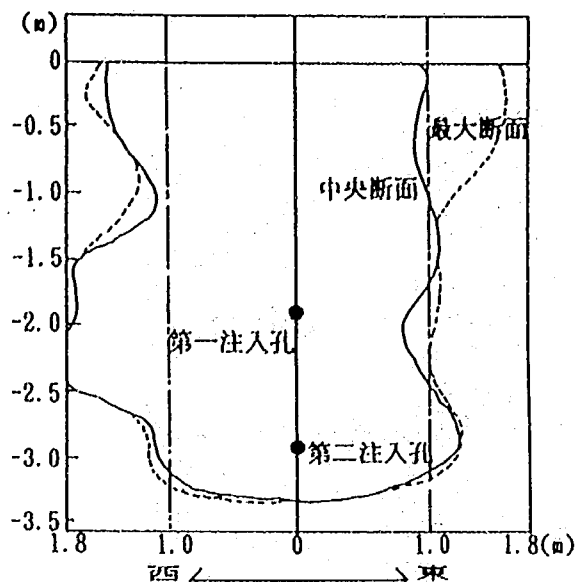


図-9.3.4 東西方向断面形状

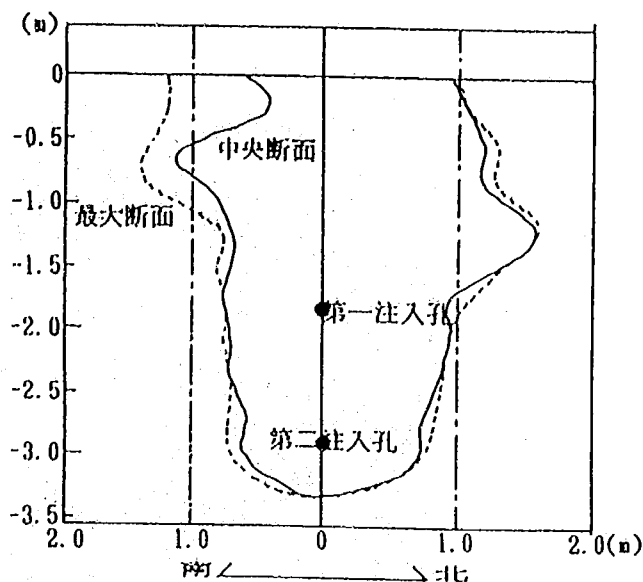


図-9.3.5 南北方向の断面形状

(1) 固結体平面形状

図-9.3.3より北西側1.2～1.8m、東南側0～0.6mの深度で固結体が張り出している。また、南西側は各深度ともほぼ同じ形状となっている。注入前の地盤のN値を比較すると、特に固結体が張り出している深度1.2～1.8mの北西側は $N=0.9$ とかなり小さい部分であり、張り出しのない南西側は各深度とも $N=2.6\sim 3.0$ となっている。このことから、固結形状は、砂地盤の転圧による影響を受けているのではないと思われる。

(2) 固結体断面形状

図-9.3.4、図-9.3.5より、固結形状は球形ではなく円柱に近いことが分かる。注入材の多くは、水平に浸透するよりはむしろ地盤上部方向に浸透している傾向がある。これは土槽側面の排水管が目詰まりしており排水機能を効率よく果たしていなかったためと思われる。第一注入孔と第二注入孔からの注入による固結体のラップ状況は外見からは判断できなかった。第二注入孔の上部は第一注入孔からの注入材が充填されており、第二注入孔からの注入は、それを覆うように浸透したため、水平方向の改良範囲を広げたと考えられる。固結体は東西側0.5m付近で最大径約3.5m、改良下端から上端までの高さ（改良長）は約3.3mである。固結体の解体時に上部から30cm毎に測定した平面積に基づいた固結体積は 12.2m^3 であり、平均径2.2m、高さ3.3mの円柱と同等の固結体である。固結体積 12.2m^3 と前述した注入量 $Q=11,400\text{L}$ より充填比を求めると2.23となり、固結体積に対する充填比は、計画の充填比 $\alpha=2.4$ に近い値となった。



写真-9.3.2 固結状況

9.3.4 注入材の充填状況

東西方向の固結体における間隙率および注入材と砂の重量比より注入材の充填状況を確認した。供試体の採取位置を図-9.3.6に、結果を表-9.3.2に示す。

間隙率は、供試体の飽和重量と乾燥重量の差より測定した。また、注入材と砂の重量比測定の実験手順は、前項8.1.3を参照されたい。

実験結果からは、注入孔からの距離と、間隙率および注入材と砂の重量比の間には、明確な相関関係は認められなかった。なお、固結体の解体時に割裂脈（砂分を含まないセメント成分だけの固結物）を探したが、注入孔周辺に多少あるだけで、固結体途中や先端部には見られなかった。

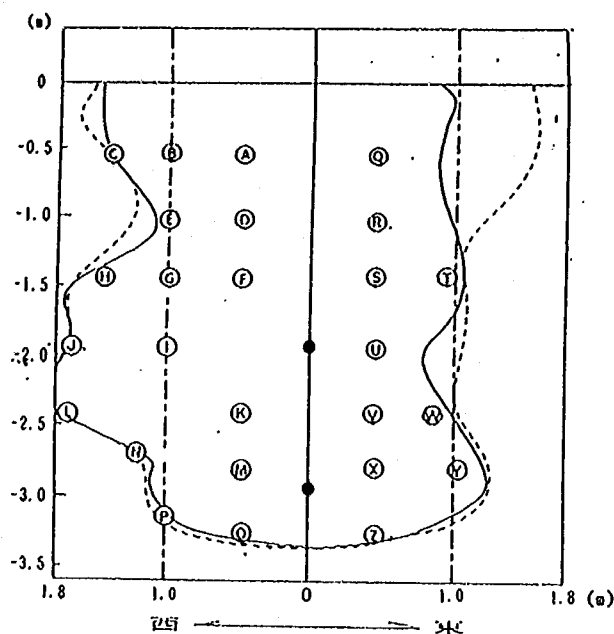


図-9.3.6 供試体サンプリング位置

表-9.3.2 固結体の間隙率

供試体	固結体上面 からの距離 (cm)	注入外管 からの距離 (cm)	間隙率 (%)	注入材：砂 重量比
A	50	50	20.9	1:4.2
B		100	23.7	1:4.6
C		150	25.4	1:5.8
D	100	50	23.6	1:5.5
E		100	22.4	1:4.4
F	150	50	27.6	1:8.7
G		100	16.4	1:3.5
H		150	25.0	1:4.4
I	200	100	26.6	1:4.9
J		180	23.0	1:4.2
K	250	50	19.6	1:3.9
L		180	23.8	1:4.2
M	300	50	21.9	1:4.4
N		150	26.8	1:4.7
O	350	50	26.8	1:5.9
P		100	22.9	1:4.3
Q	50	50	23.8	1:4.4
R	100	50	25.2	1:4.7
S	150	50	24.5	1:4.4
T		90	26.6	1:5.9
U	200	50	22.3	1:4.1
V	250	50	24.6	1:4.4
W		80	23.9	1:4.3
X	300	50	22.9	1:3.9
Y		100	22.0	1:4.1
Z	350	50	25.5	1:4.6
平均			23.8	1:4.7

表-9.3.2の注入材と砂の重量比の平均値を用いて計算した固結体中のセメント量（約4 t）は、注入量18038ℓでの注入セメント量（約2.3 t）の約170%であり、固結体中のセメント量が注入したセメント量より多い結果となった。これは、測定誤差、サンプリング位置によるセメント濃度の空間的なばらつきにより、重量比測定の注入材をゲル上に溶解する時に若干の砂を含んで注入材重量を測定している可能性があることから試験方法に問題があったと推測される。

9.4 まとめ

- ① 珪砂6号 ($k=3 \times 10^{-2}$ cm/sec) に対しては、最大径3.5m、平均径2.2m、高さ3.3mの円柱と同等の固結体を形成することができた。また、土槽側面の排水管を改善することにより、浸透限界はさらに伸びる可能性がある。
- ② 注入材の浸透距離と固結体内セメント濃度の間には明確な相関関係は見られなかった。
- ③ 実際の施工時には、上部からのステップダウン方式で注入を行えば、上部にカバーロックをすることとなり、それより下の注入時には水平方向への浸透距離が伸ばせる可能性がある。

〈参考文献〉

- 1) (社)土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、土質工学会, 1985.
- 2) 土質工学会編：薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム、1993、pp10～20

第10章 土槽注入実験（その2）

10.1 実験目的

土槽実験（その1）では、6号珪砂（細粒分含有率1.7%）における超微粒子セメント注入材の浸透特性および固結形状を検証した。本実験（その2）では、さらに透水係数の小さい7号珪砂を対象に同様の実験を行い、恒久的な液状化対策工としての要件である一定の範囲を改良できるかどうかを調べた。また、注入後の改良範囲確認方法として比抵抗トモグラフィ等の適用性についても検討した。

10.2 実験方法・条件

10.2.1 模型地盤

(1) 土 槽

土木研究所構内土工実験塔内の内寸4.00m×3.55m×4.20mの屋内土槽を使用した。

(2) 地盤材料

供試砂は、東北産珪砂7号を用いた。供試砂の物性及び粒度分布は8章を参照されたい。

(3) 地盤作成方法

地盤の相対密度は $Dr=50\%$ を目標に作成した。地盤の作成手順は9章と同様である。また、本実験では土槽の全側面に排水用の砂利層を設け、砂地盤との間を $75\mu m$ の網で仕切った。また、注入時の地盤内部および上面部の変化を確認するため間隙水圧計、土圧計、変位計を設置した。図-10.2.1に各測定器の位置と実験土槽の概要図を示す。

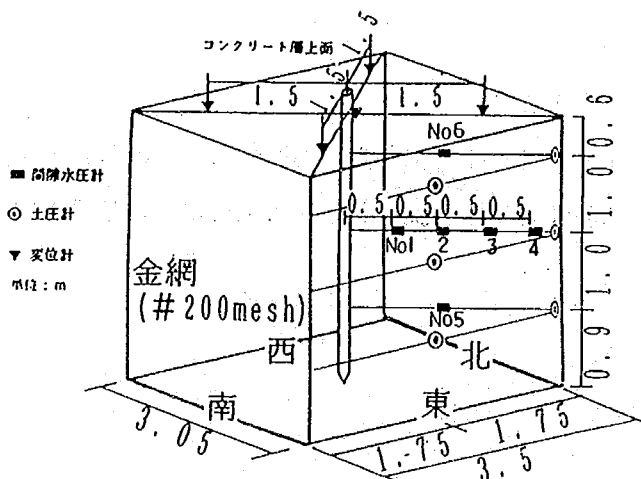


図-10.2.1 実験土槽概要図

(4) 地盤の性状

① 密度

地盤の密度は、約7tの砂を落下させた後、高さを計測して単位体積重量の確認を行った。図-10.2.2に測定位置を、表-10.2.1に結果を示す。

表-10.2.1 実験地盤密度の測定結果

各層 層理	砂重量 (t)	面積 (m^2)	体積 (m^3)	乾燥密度 (g/cm^3)	相対密度 (%)
①	6.8	10.705	4.998	1.360	45.36
②	13.8	10.458	10.041	1.374	49.58
③	20.8	10.412	15.113	1.375	49.34
④	27.8	10.463	20.213	1.375	49.16
⑤	34.8	10.432	25.316	1.373	48.66
⑥	41.8	10.399	30.449	1.370	47.98
⑦	48.8	10.353	35.615	1.369	47.76
⑦'	48.8	10.353	35.637	1.369	47.76

但し、⑦' は上面を平坦にした後の計測値である。

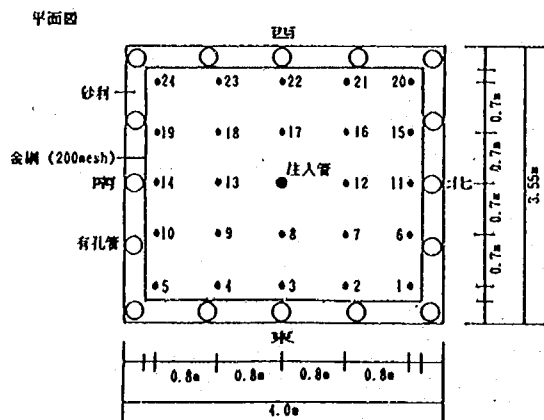


図-10.2.2 地盤密度（高さ）測定位置

② 透水係数

地盤の透水係数は、注水法と復水法により測定した。図-10.2.3に試験位置を、表-10.2.2に試験結果を示す。
透水係数は約 $7 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ となっている。

表-10.2.2 透水試験結果

	復水法	注水法
測定深度 (m)	1.21	1.21
安定水位 (m)	0.05	0.05
観測上の最初の時間(sec)	0	0
観測上の最後の時間(sec)	180	180
最初の水位差 (cm)	39.0	75.0
最後の水位差 (cm)	20.4	36.2
透水係数 (cm/sec)	6.79×10^{-3}	7.63×10^{-3}

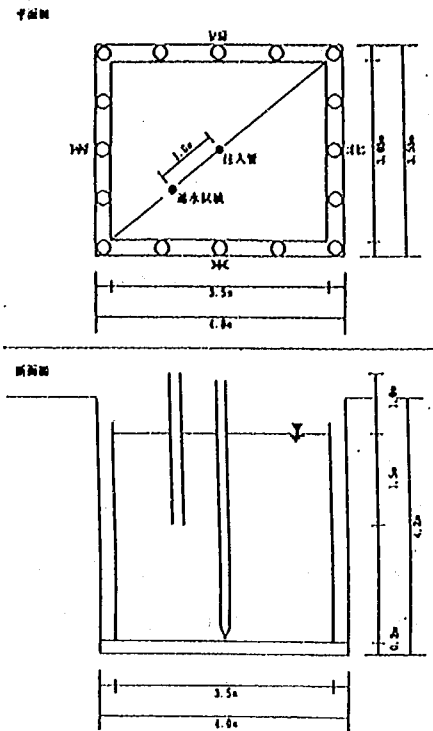


図-10.2.3 透水試験位置

③ N値

図-10.2.4に示した位置で標準貫入試験を実施した。表-10.2.3に結果を示す。N値は0～2となっている。

表-10.2.3 標準貫入試験結果

注入孔から1.0m			注入孔から1.5m		
深度 (m)	H/H ₀ (H/cm)	N値	深度 (m)	H/H ₀ (H/cm)	N値
0.30~0.80	0/50	0.0	0.30~0.80	0/50	0.0
1.05~1.40	4/35	3.4	1.05~1.47	3/42	2.1
1.80~2.18	2/38	1.6	1.80~2.27	3/47	1.9
2.55~2.98	3/43	2.1	2.55~3.05	2/50	1.2

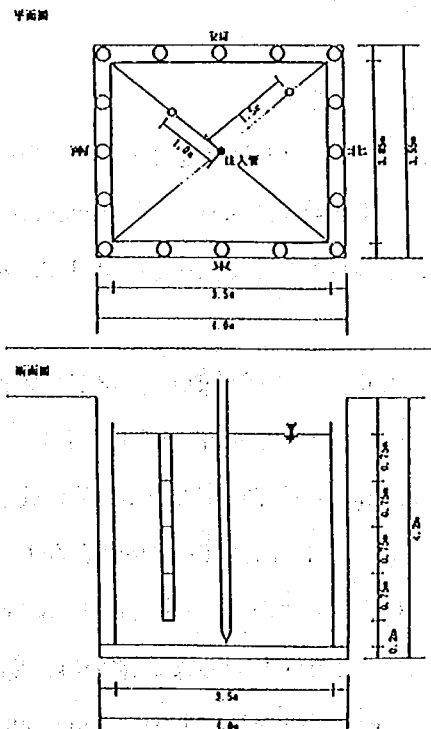


図-10.2.4 標準貫入試験

10.2.2 注入試験方法

注入材（懸濁型）の配合を選定する場合、浸透径を広範囲とするため1ステップの注入が長時間行え、かつ、注入効率が悪くならないことに注意する必要がある。一次元浸透注入試験より、対象地盤に長時間浸透注入させるための材料配合として、水セメント比 $W/C=1000\%$ 、また、懸濁液の均一性および注入効率を考慮し、ナフタレン系分散剤を用いて分散剤混入率 $D/C=10\%$ と設定した。

注入は二重管ダブルパッカー方式により、土槽中央から第一注入、さらに、その1m下部から第二注入とし、浸透注入（低圧力）を考慮し注入流量は 10 l/min で限界注入（急激な圧力変化もしくはブローの発生）まで行うものとした。上部からのステップダウン方式によるラップ状態を検討するため、第二注入でローダミン溶液を用い懸濁液を着色した。

10.3 実験結果

10.3.1 総注入量

注入計画に基づき第一注入口より開始し、8時間55分後に上部側面から懸濁液の流出を確認したため注入を終了した。懸濁液の総注入量は $5,292\text{ l}$ であった。第一注入から8日後に第二注入を開始し、3時間55分後にやはり上部側面から懸濁液の流出を確認したため終了した。

第二注入の総注入量は $2,467\text{ l}$ であった。なお、土槽に設置した土圧計、変位計においては、明確な変動は認められなかった。表-10.3.1に第一、第二注入の総注入量と固結体積を示す。

表-10.3.1 総注入量と固結体積

	第一注入	第二注入
総注入量 (l)	5,292	2,467
固結体積 (m ³)	2.7	1.2

10.3.2 第一注入状況

第一注入の注入圧力と注入速度の経時変化を図-10.3.1に、第一注入口から水平方向50cmに設置した間隙水圧計の経時変化を図-10.3.2に示す。

図-10.3.1より、注入開始直後、設定注入速度を得るため注入圧力が 2.0 kgf/cm^2 まで上昇し、200分までは 2.0 kgf/cm^2 で安定した。その後、300分にかけて徐々に上昇し 3.0 kgf/cm^2 となり、530分のブローによる圧力の低下まで $3.0\sim 3.5\text{ kgf/cm}^2$ で推移した。200分までの安定期では、懸濁液が充分土粒子間を浸透しており、200～300分までにみられる圧力上昇期では、注入口に近い部分

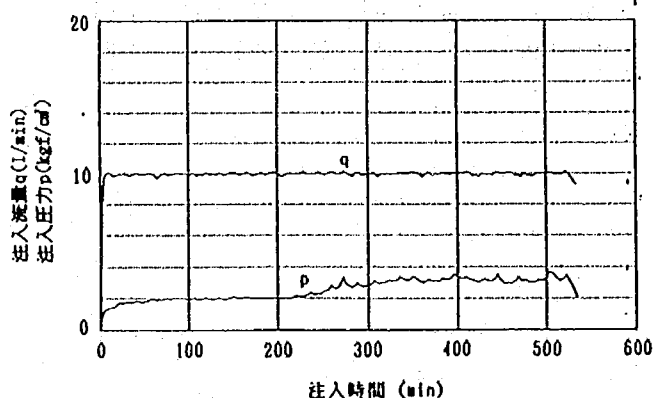


図-10.3.1 注入圧力と注入速度の経時変化

において注入材に対する土粒子の濾過現象によって浸透効率が低下し、その後、530分で三次元浸透の限界に達し、ブローしたと考えられる。

図-10.3.2では、注入口から水平方向50cmで計測した間隙水圧に明確な変動が現れている。50分までの0.02kgf/cm²での安定期を過ぎると180分の0.11kgf/cm²まで上昇し、その後徐々に低下した。50分までの安定期は、半径50cm（間隙水圧計の設置位置）到達時までは懸濁液が効率良く水平方向に浸透したためと考えられる。これは注入速度10ℓ/minにおいて、填充率100%で半径50cmの球間隙を満たすのに必要な時間約50分と一致している。その後、間隙水圧は先に述べた濾過現象の影響により上昇して、180分のピークに達した。また、その他の間隙水圧計には、明確な変動は認められなかった。

図-10.3.3にp-tチャート（図-10.3.1）と間隙水圧の変化より推察される浸透状況を示す。

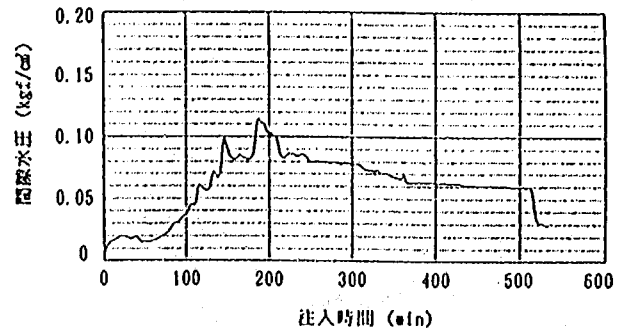


図-10.3.2 間隙水圧の経時変化

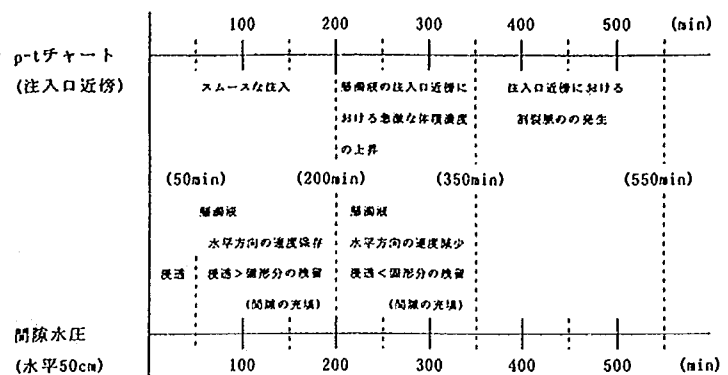


図-10.3.3 注入時間と浸透状況の推察

10.3.3 第一注入固結状況

深度2.2mまでの固結体を写真-10.3.1、写真-10.3.2、写真-10.3.3に示す。注入6ヶ月後、固結特性（形状、体積等）を確認するため、未固結砂を上部から徐々に取除き開削を行った。地盤上面の不織布の下に厚さ約

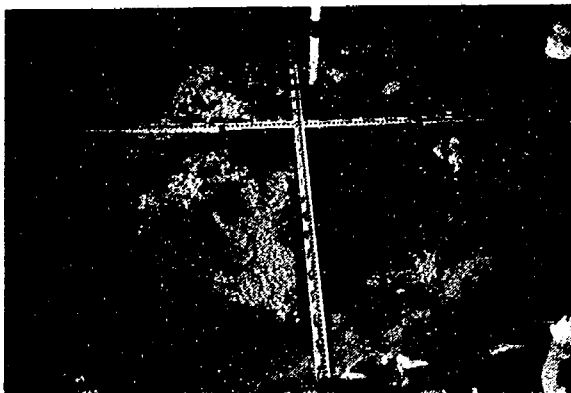


写真-10.3.1 土槽上層部



写真-10.3.2 割裂脈

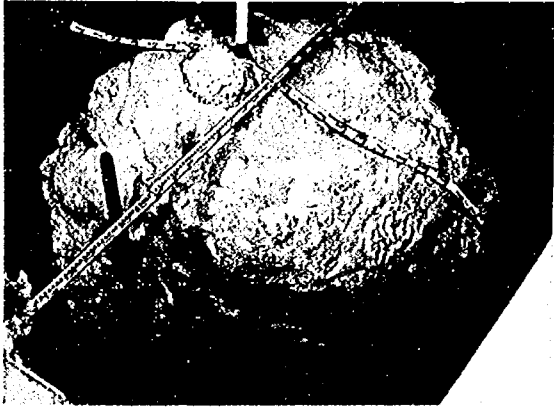


写真-10.3.3 固結体全景

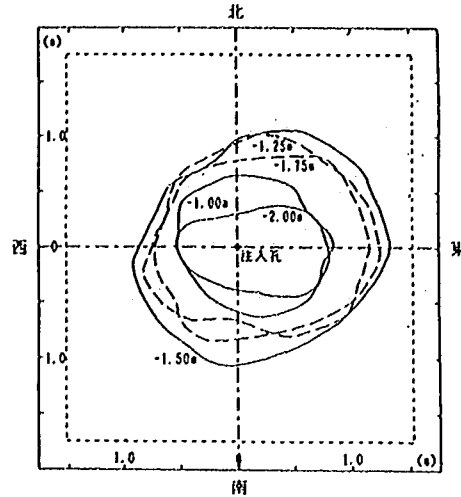


図-10.3.4 水平断面 (第一注入)

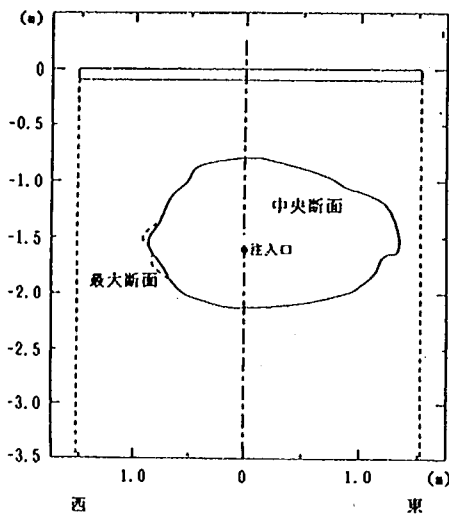


図-10.3.5 東西方向の鉛直断面

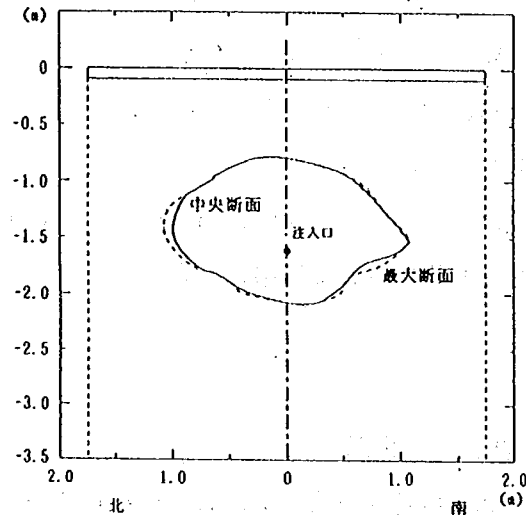


図-10.3.6 南北方向の鉛直断面

5cmの固結体 (写真-10.3.1) ができており、これは深度80cmの注入口付近から割裂脈 (写真-10.3.2) により形成されていた。これはブローにより形成されたと考えられる。また、深度2.2m付近でローダミン溶液で着色された砂および固結体を確認した。これにより、深度2.2mより上部の固結体 (写真-10.3.3) は、第一注入によって形成されたと判断した。

図-10.3.4に土槽上面から深度毎 (25cm間隔) に測定した第一注入固結体の水平断面を、図-10.3.5に東西方向の鉛直断面、図-10.3.6に南北方向の鉛直断面を示す。

図-10.3.4より固結体は、東方向に伸びた楕円形となっており、最大径は2.3mである。また、図-10.3.5、図-10.3.6より、固結体は、鉛直方向よりも水平方向に伸びており、これは側面を排水層にしたことによるものと考えられる。開削時に上部から10cm毎に測定した水平断面積に基づいた固結体積は約 2.7m^3 であった。

10.3.4 第一注入の充填状況

今回の実験では、第一注入の総注入量5,292ℓに対して固結体積2.7m³であった。これより懸濁液の充填率（注入量／固結体積の注入前間隙体積（間隙率 $n=0.48$ ））を求めると以下ようになる。

$$\alpha = \text{注入量} / \text{固結体積の注入前間隙体積} = 5,292 \ell / (2,700 \ell \times 0.48) = 4.08$$

しかし、 $p-t$ チャートと間隙水圧の経時変化において、注入開始後200～300分では注入材に対する土粒子の濾過現象により浸透効率が低下すると考えられるので、200～300分間（充填比1.54～2.34%）でこの固結体積を確保できる可能性がある。

10.3.5 第二注入状況

第二注入の注入圧力と注入速度の経時変化を図-10.3.7に示す。図-10.3.7より注入開始直後から235分までのブローに至るまで、注入速度は7～13ℓ/minと不安定に推移している。材料を混合攪拌するために、攪拌容量上下各200ℓの二段式グラウトミキサーを使用した。第二注入では、ミキサー稼動時に注入速度が低下し、停止させると上昇する傾向にあった。懸濁液に着色するためローダミン溶液を添加したが懸濁液中に空気を巻き込み注入速度に影響を及ぼしたと考えられる。注入圧は（その1）の実験と同様、ほぼ2kgf/cm²で安定している。

第二注入時の間隙水圧の経時変化を図-10.3.8に示す。

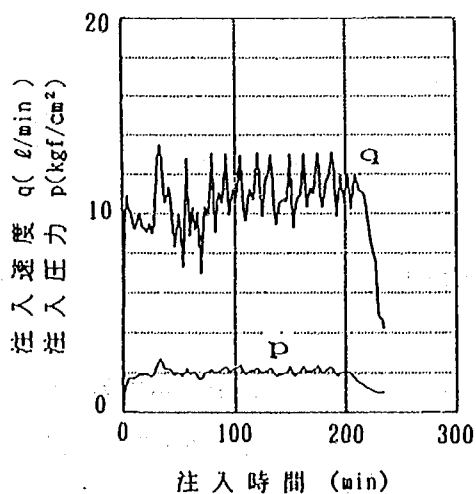


図-10.3.7 注入圧力と注入速度の経時変化

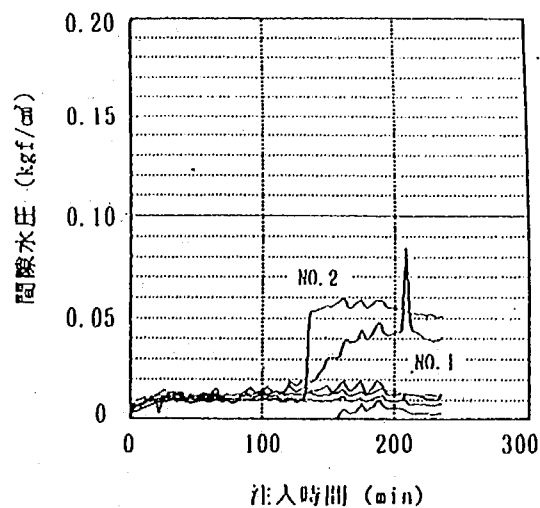


図-10.3.8 間隙水圧の経時変化

図-10.3.8において、第一注入口から水平方向50cmに設置した間隙水圧計（以下NO. 1 水圧計と略記する）および第一注入口から水平方向150cmに設置した間隙水圧計（以下NO. 2 水圧計と略記する）に明確な変動があるのがわかる。NO. 1 水圧計は、第二注入開始後120分まで約0.01kg/cm²で安定し、その後徐々に間隙水圧は上昇している。NO. 2 水圧計は、第二注入開始後0.01kg/cm²で130分まで安定し、その後急激な上昇が起こり0.05kg/cm²に達し、0.05～0.06kg/cm²で注入終了まで推移している。

また、第二注入口から水平方向100cmに設置した間隙水圧計には、明確な変動は認められない。

10.3.6 第二注入固結状況

第二注入は注入時に着色剤を添加し、第二注入と区別できるようにした。

図-10.3.9(第二注入水平断面)、図-10.3.10(南北方向鉛直断面)、図-10.3.11(東西方向鉛直断面)に示す。

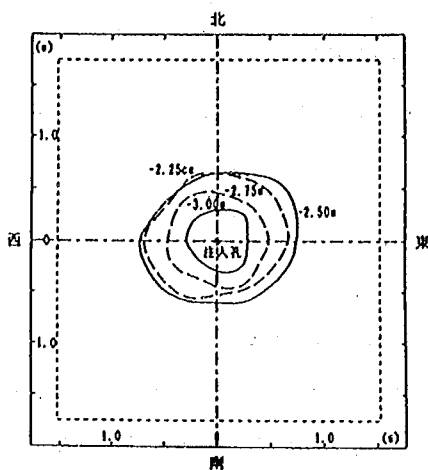


図-10.3.9 第二注入水平断面図

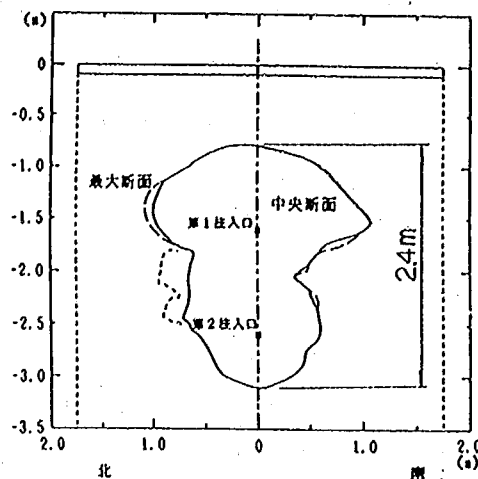


図-10.3.10 南北方向鉛直断面図

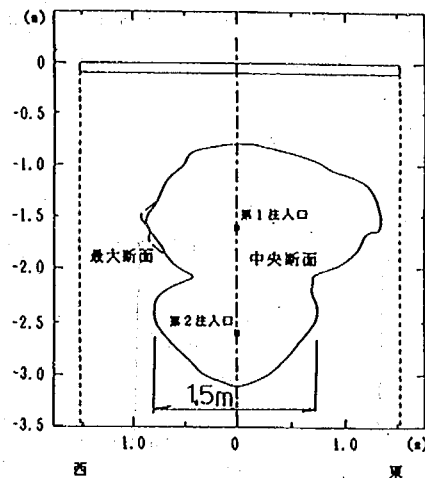


図-10.3.11 東西方向鉛直断面図

図-10.3.9～図-10.3.11より考えられることは次のとおりである。

第二注入の固結体は、第一注入より小さく、最大径は上部より-2.5mの位置で約1.5mであった。これは、小型三次元モールド浸透実験(その2)の実験結果も同様になっており、ステップダウンの注入方式を採用したため、上方への排水状態が悪くなり、浸透が悪化したものと推測する。

10.3.7 まとめ

- ① 7号珪砂を用いた模型地盤において、水セメント比(W/C)=100%、分散剤混入率(D/C)=10%の注入条件で、第一注入で最大径2.3m、第二注入で最大径1.5m、平均径1.4m、高さ2.4mの円柱と同等の偏平球状の固結体を形成することができた。
- ② 懸濁液による浸透注入を行った場合、固結体積の増加に伴い充填率が増加し、注入効率は低下した。
- ③ 懸濁液の浸透注入状況をp-tチャートで管理できる可能性がある。
- ④ ステップダウンの注入方式の場合、第二ステップ注入時に上方への排水状態が悪くなり、浸透性が悪くなる。

10.4 注入後の改良効果確認方法の検討

注入工法では、改良範囲を所定の目標値に固結するすることが必要であり、その改良効果が有効であるかどうかを確認することは、品質管理上重要な項目である。液状化対策として注入工法を用いる場合の改良効果確認とは、改良強度の確認、改良範囲（注入範囲）の確認があげられる。特に、現状において確立された確認手法がない改良範囲（注入範囲）の確認が重要になると考えられる。

土槽注入実験実験（その2）では、深度方向の連続する固結状況を確認するため、原位置試験による確認方法であるロータリーサウンディングを、改良範囲（注入範囲）の確認としては、物理探査による確認方法である比抵抗トモグラフィーを行った。

10.4.1 ロータリーサウンディング

(1) ロータリーサウンディングの特徴

ロータリーサウンディングは、削孔時の先端ピットに生じる削孔抵抗から地盤の強度を簡単に判定することを目的として開発された調査法である。ロータリーサウンディングの特徴は、以下のとおりである。

- ① ピット先端部に取り付けたセンサーから直接削孔抵抗が得られる。
- ② 深度方向の連続的な情報が得られる。
- ③ 調査（削孔）能力が大きく、短時間で地盤情報が得られる。
- ④ 削孔条件（回転数、削孔速度等）が自動制御機構によってコントロールされる。

(2) システムの機構

ロータリーサウンディングのシステム構成を図-10.4.1に、システム全体の概要を図-10.4.2に示す。

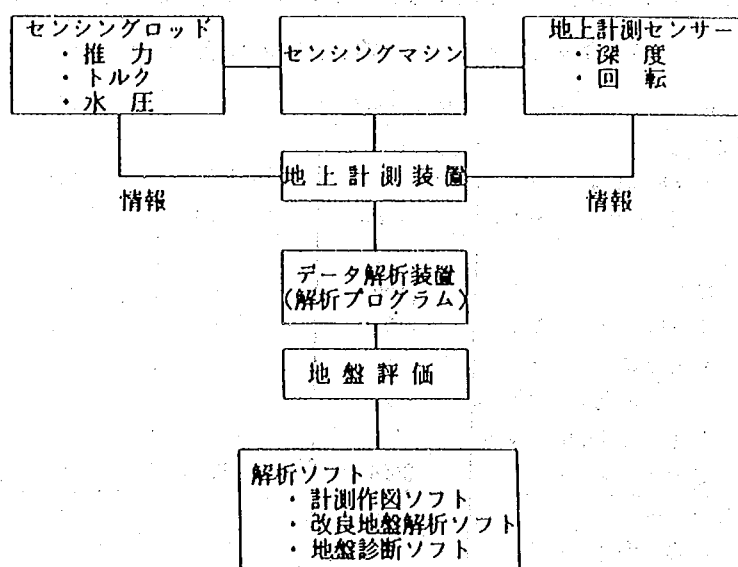


図-10.4.1 ロータリーサウンディングのシステム構成

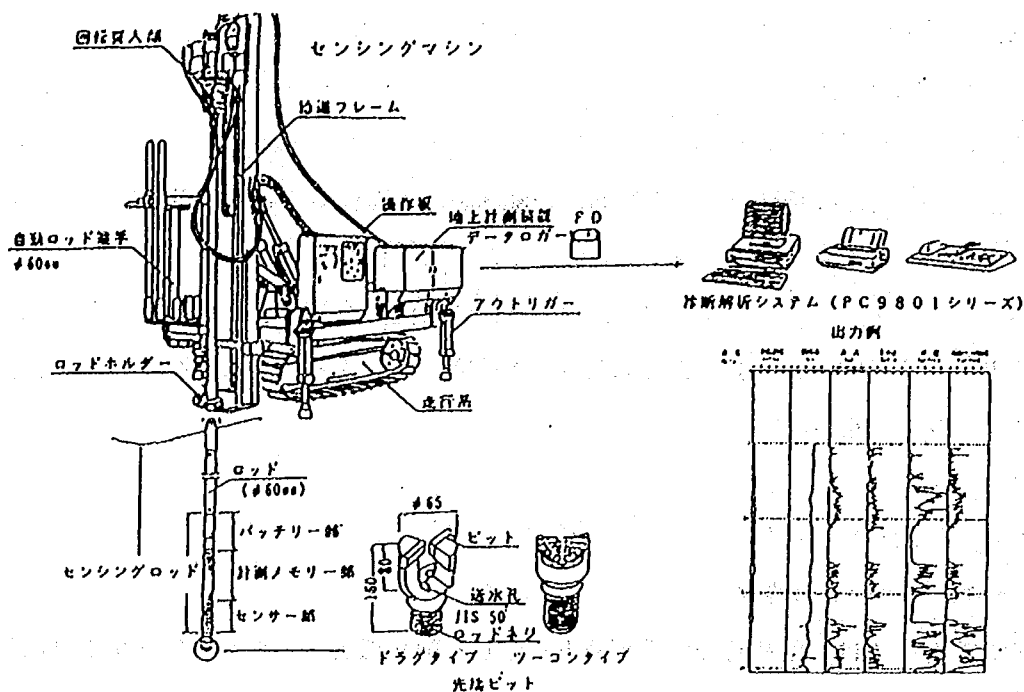


図-10.4.2 システムの概要図

図-10.4.1、図-10.4.2が示すように、センシングマシンを中心に、センシングロッド、地上計測装置、地盤評価解析ソフトより構成されている。

計測装置の構成は、推力（貫入抵抗）、トルクおよび水圧は削孔中にボーリングロッドが孔壁の摩擦抵抗を受けるので、地中においてセンシングロッド内蔵のセンサー部で計測し、その影響の少ない削孔速度と回転数は、地上のセンシングマシンで計測している。削孔時に計測されたデータを解析し、地盤の強度特性を求めるシステムになっている。

表-10.4.1にセンシングマシンの仕様例（本実験では、RS2500型を使用）を、表-10.4.2にセンシングロッドの仕様を示す。

表-10.4.1 センシングマシンの仕様例

項 目	RS2500型	RS2000型	RS1000型
回転性能			
回転数 高/低 rpm	130/65	130/65	125/60
回転トルク kgf-m	101/203	101/203	427
給進性能			
給進力 kgf	9800	6500	5940
引き抜き力 kgf	9800	6500	7900
給進速度 m/min	2	2	5
引き抜き速度 m/min	2	2	4
早送り給進速度 m/min	11	11	—
給進ストローク mm	2600	2400	1100
油圧サーボ			
給進制御	有	無	無
回転制御	有	無	無
掘進・引き抜き操作	完全自動	ボタン制御	ボタン制御
油圧動力源	クローラー	クローラー	電動
走行形式	クローラー式	クローラー式	スキッド式

表-10.4.2 センシングロッドの仕様

項 目	仕 様 内 容
推力荷重測定方式	ロードセル方式
推力荷重測定範囲	0～2,000kgf
トルク測定方式	特別仕様ゲージ式トルクセンサー方式
トルク測定範囲	0～30kgf・m
水圧測定方式	半導体歪ゲージ方式
水圧測定範囲	0～30kgf/cm ²
形 状	φ65mm, L1,800mm
重 量	約 15kg
電 源	NiCd 電池
連続作動時間	20時間
接続可能ビット	ドラッグビット及びツーコーンビット

(3) 調査位置

本調査は、大型土槽で注入を行った5カ月後に、固結体確認のため、削孔深度3.5m×4箇所についてロータリーサウンディングを実施した。図-10.4.3に調査位置を示す。

(4) 調査方法と条件

ロータリーサウンディングは、原則として回転数および削孔速度を一定に制御した時の推力、トルク、水圧（循環水圧）を計測した。なお、一定に制御した回転数および削孔速度についても同時に計測を行っている。

削孔土の排土を容易にするため、ビット先端より清水を循環させながら試験を実施した。

表-10.4.3にサウンディング条件を示す。

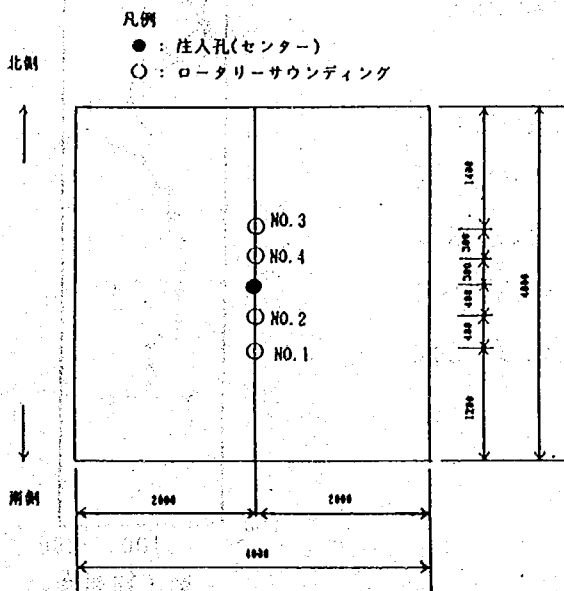


表-10.4.3 サウンディング条件

項 目	条 件
設定回転数	60rpm
設定削孔速度	0.3cm/sec
計測インターバル	4秒
ボーリングポンプの送水量	清水約60l/min
先端ビット	ツーコーンビット

図-10.4.3 ロータリーサウンディング位置

(5) 調査結果

① 固結体深度方向の調査

ロータリーサウンディングによる調査結果を表-10.4.4に示す。調査より得られた固結長は、図-10.3.10、図-10.3.11に示す実測の固結長と一致している。ステップ注入の固結ラップ状況を推定する際に有効な調査法の一つである。

表-10.4.4 ロータリーサウンディング結果

測点No	固結深度 (GL-cm)	固結長 (cm)	備 考
1	1.15~1.49	34	注入孔南側80cm
2	0.85~1.66	81	注入孔南側40cm
	2.40~2.61	21	
3	0.87~1.68	81	注入孔北側60cm
4	0.70~2.95	225	注入孔北側30cm

② 固結強度

ロータリーサウンディングより得られた削孔パラメーター（削孔速度、回転数、推力、トルク、水圧）の深度分布と既存の一軸圧縮強度換算式から算出した一軸圧縮強度（以下換算 q_u と略記する）の深度分布を図-10.4.4、図-10.4.5、図-10.4.6、図-10.4.7に示す。なお、サウンディング終了深度は3.5mとした。

換算 q_u は、以下に示す式-10.4.1¹⁾を用いて算出した。

$$q_u = 1.5 \times 10^{-5} \cdot R^{-1.0} \cdot N^{0.6} \cdot W^{1.5} \quad (10.4.1)$$

q_u : 換算一軸圧縮強度 (kg/cm²)

R : 削 孔 速 度 (cm/s)

N : 回 転 数 (rpm)

W : 推 力 (kgf)

注入孔から北方向30cmのロータリーサウンディングより得られた換算 q_u (図-10.4.4) と注入孔から東方向25cm~50cmより採取した固結体の一軸圧縮強度の結果を図-10.4.8に示す。

ロータリーサウンディングによる換算一軸圧縮強度は、固結体からブロックサンプリングにより採取した供試体の一軸圧縮強度に比べてかなり小さい。ただし、深度方向の強度分布は同じ傾向を示している。強度差の原因として材令の違い（約1ヶ月）とサンプリング位置の違いが考えられる。また、換算式に適切な地盤係数（現場係数）を乗ずれば、強度の推定も可能である。

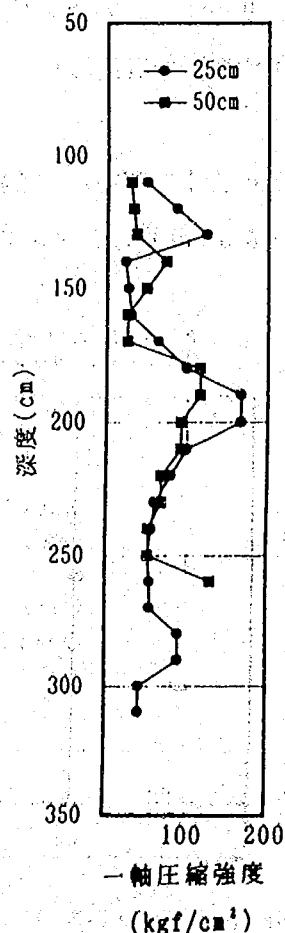


図-10.4.8 深度方向の強度分布図

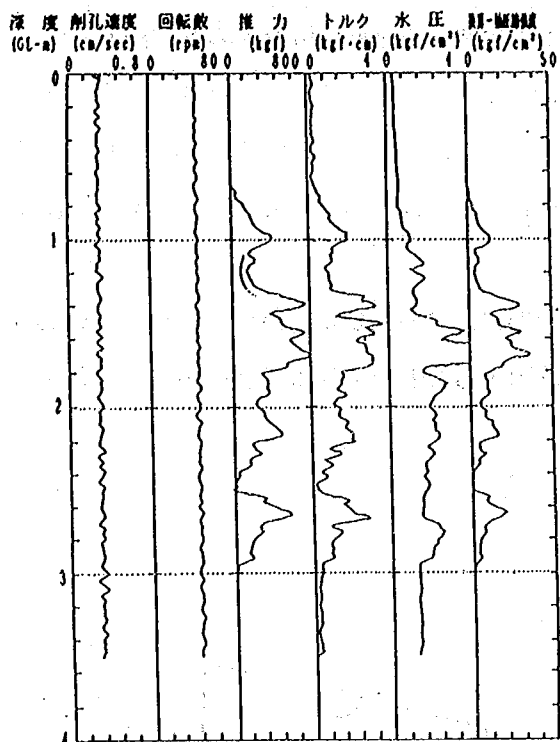


図-10.4.4 ロータリーサウンディング深度分布
(注入孔から北に50cm)

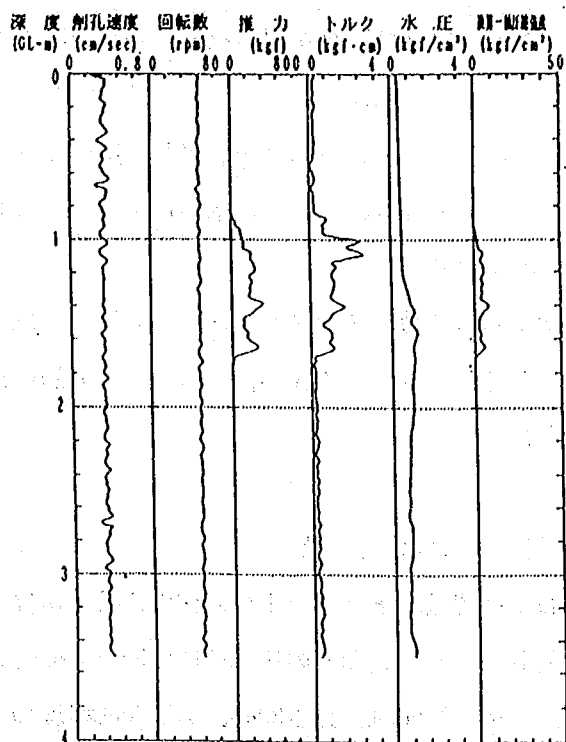


図-10.4.5 ロータリーサウンディング深度分布
(注入孔から北に60cm)

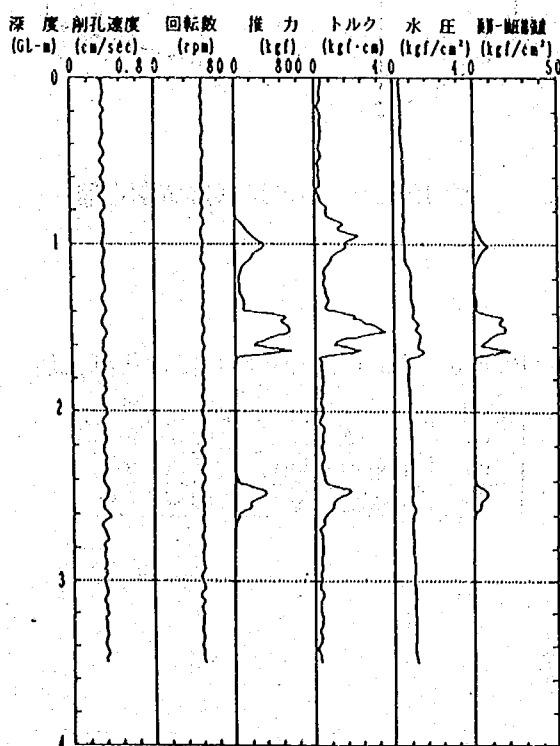


図-10.4.6 ロータリーサウンディング深度分布
(注入孔から南に40cm)

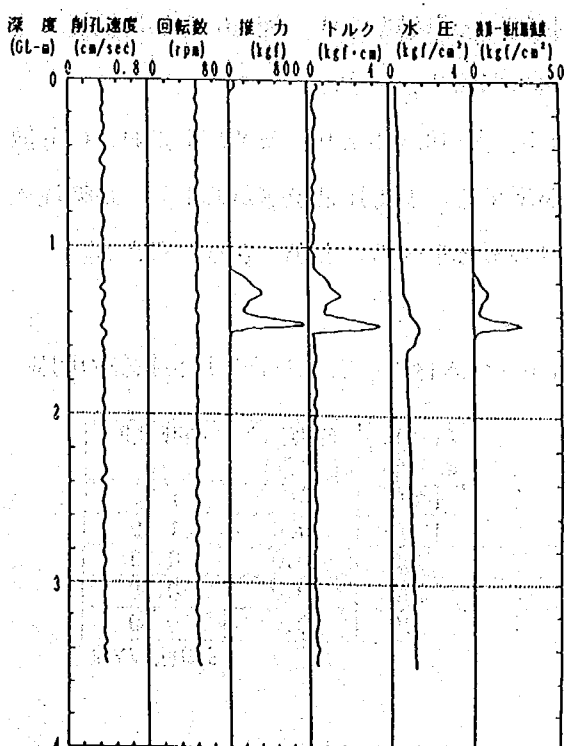


図-10.4.7 ロータリーサウンディング深度分布
(注入孔から南に80cm)

10.4.2 比抵抗トモグラフィ（物理探査）による注入領域探査

比抵抗トモグラフィは、地中に電流を流し電極間の電位差を測定し、比抵抗値を求める方法であり、地質構造が複雑でない場合には、地質境界を容易に把握でき、砂層と粘土層の識別などが可能である。注入工法においては、注入前後の比抵抗値を測定して解析処理し注入材の浸透状況を評価する方法であり、比抵抗値が溶液型水ガラス系注入材のように水の比抵抗値に対して $1/10^{2)}$ 以下程度のものでは、現在適用性について検討が行われている。

懸濁液型である超微粒子セメント注入材の場合には、水和過程において Ca^{++} が放出され、比抵抗値が低下することが考えられ、注入後の浸透範囲（注入範囲）を確認することができる可能性があることから、ここで検討を行った。

(1) 注入材の見掛け比抵抗値

飽和水および超微粒子セメント注入材の比抵抗値は電気伝導度計により、飽和砂の比抵抗値は図-10.4.9に示す容器（寸法：幅20cm、長さ30cm、高さ20cm程度の亚克力容器）を使用してそれぞれ測定した。

① 材料配合と見掛け比抵抗値

表-10.4.5に超微粒子セメント注入材の配合割合と見掛け比抵抗値の関係を、表-10.4.6に分散剤添加量の見掛け比抵抗値への影響を示す。図-10.4.10に地質・土質と比抵抗の関係³⁾を示す。

表-10.4.5、表-10.4.6より、セメント量および分散剤添加量が増えることで比抵抗値が低下し、地盤注入時の注入材の影響を知ることができると思う。

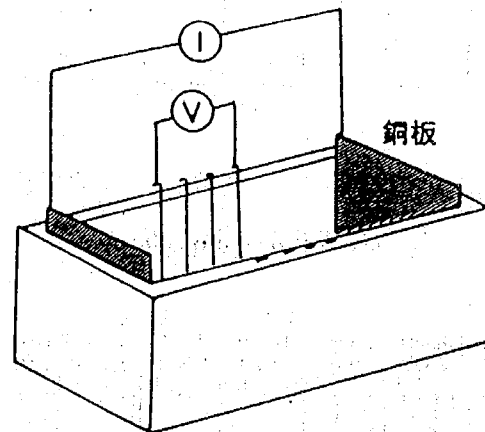


図-10.4.9 砂の比抵抗値測定器

表-10.4.5 注入材の配合と見掛け比抵抗値の関係

	水セメント比 W/C(%)	分散剤添加量 [*] D/C(%)	見掛け比抵抗値 Ω・m
①	1000	0.0	1.36
②	1000	10.0	1.10
③	300	0.0	0.73
④	300	3.0	0.69
⑤	300	10.0	0.59

^{*} 分散剤セメント比

表-10.4.6 分散剤添加量の見掛け比抵抗値

①	水	12.25 Ω・m
②	水+分散剤(10%以下)	1.36 Ω・m
③	水+分散剤(10%以上)	0.73 Ω・m

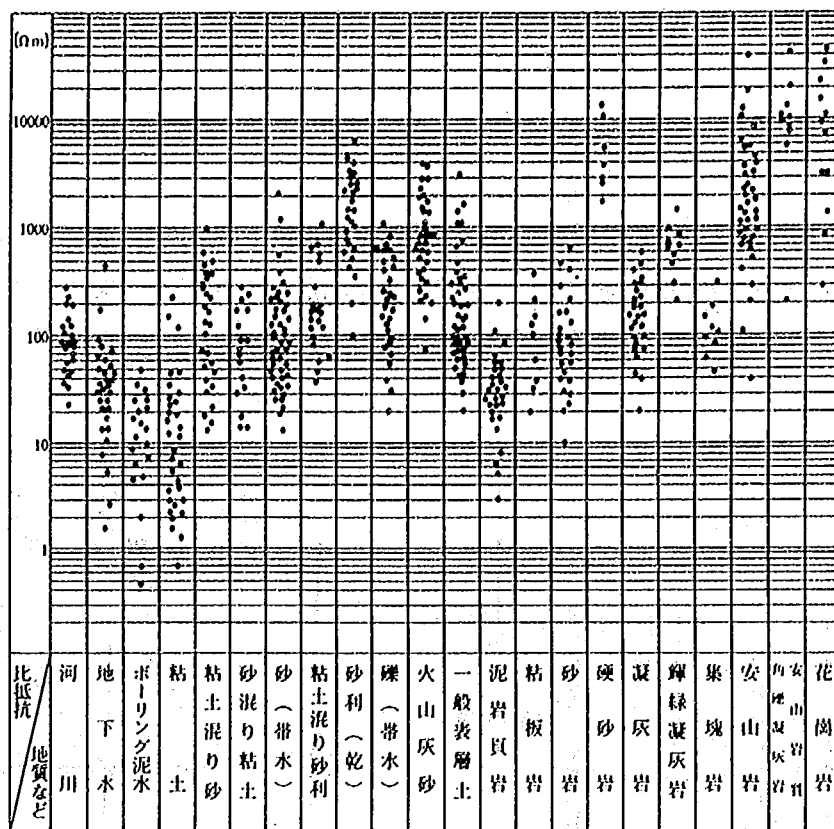


図-10.4.10 地質・土質と比抵抗の関係³⁾

② 注入材混入砂の見掛け比抵抗値の経時変化

表-10.4.7 固結体(≒6ヶ月)と飽和砂の見掛け比抵抗値

表-10.4.7に注入固結体(≒6ヶ月)と飽和砂の見掛け比抵抗値を、図-10.4.11に水セメント比 $W/C=300\%$ 配合の注入材を混入した砂(飽和状態)の見掛け比抵抗値の経時変化を示す。

①	飽和砂	26.25 $\Omega \cdot m$
②	注入固結体(≒6ヶ月)	25.70 $\Omega \cdot m$

図-10.4.11、表-10.4.7より、超微粒子セメント注入材は、初期の水和反応による Ca^{++} の放出により見掛け比抵抗値が低下することが分かる。しかし注入固結体(≒6ヶ月)と飽和砂の見掛け比抵抗値に明確な差はないことから、十分な時間が経過した後の固結後では、比抵抗値を低下させるだけの Ca^{++} の放出が行われていないことが考えられる。

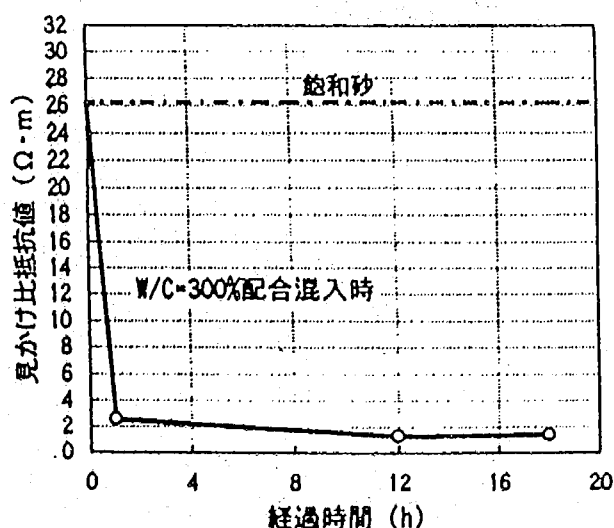


図-10.4.11 見掛け比抵抗値の経時変化

(2) 土槽注入地盤における比抵抗トモグラフィ解析

① 測定方法

土槽注入地盤における見掛け比抵抗値の測定は、注入6ヶ月後に、図-10.4.12に示す2極法により行った。測定した3断面を図-10.4.13の土槽平面図中に示す（No.1：北東－南西断面、No.2：北－南中央断面、No.3：北－南東側断面）。

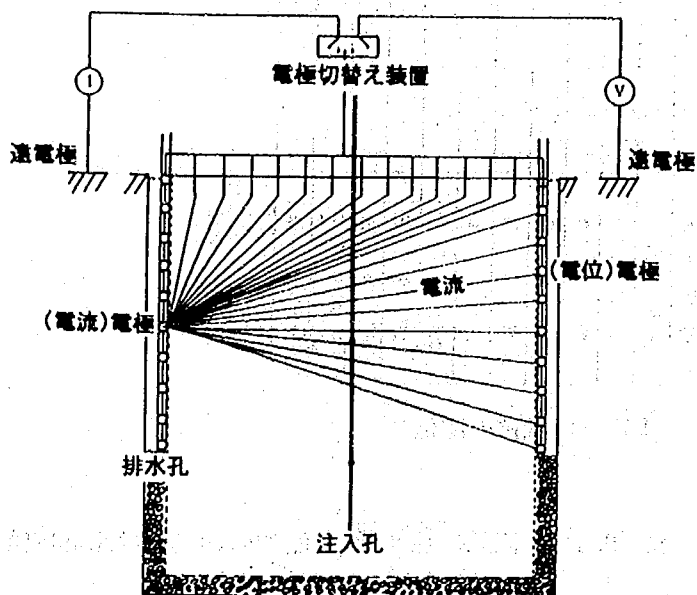


図-10.4.12 電極配置図

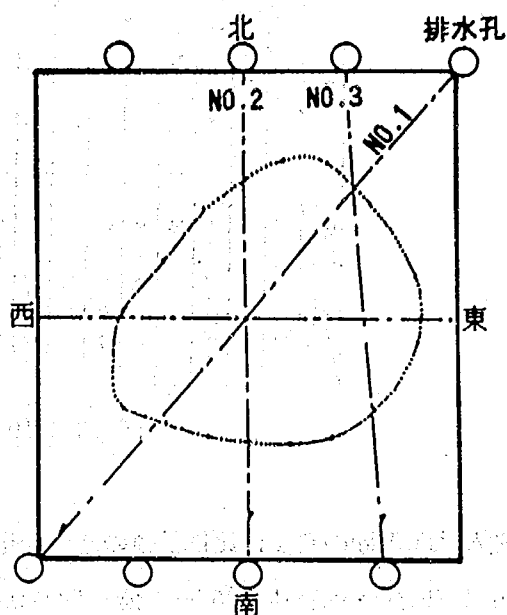


図-10.4.13 土槽平面図

(3) 解析結果と考察

解析結果を図-10.4.14（No.1：北東－南西断面）、図-10.4.15（No.2：北－南中央断面）、図-10.4.16（No.3：北－南東側断面）に示す。

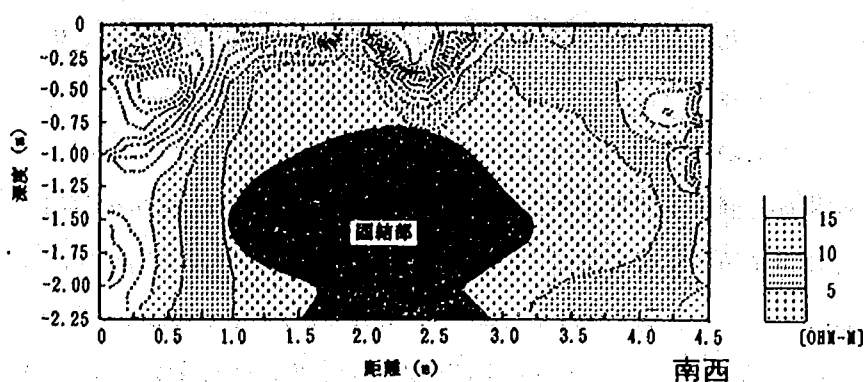


図-10.4.14 比抵抗分布 (No. 1: 北東—南西 断面)

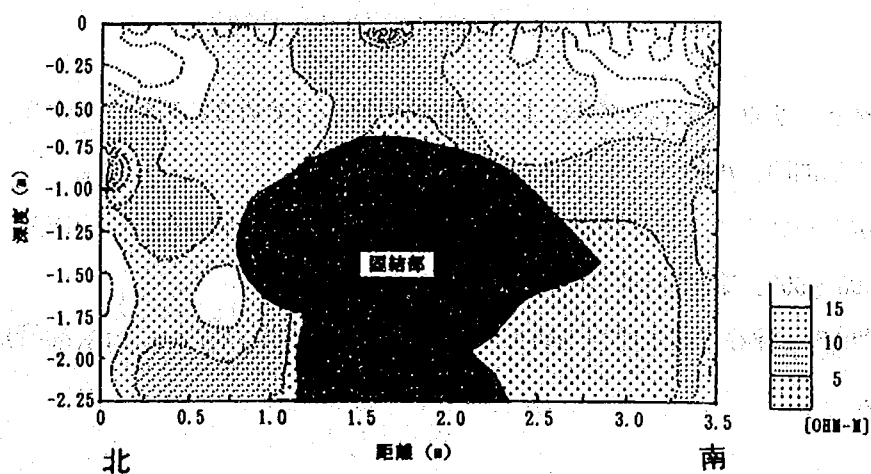


図-10.4.15 比抵抗分布 (No. 2: 北—南 中央断面)

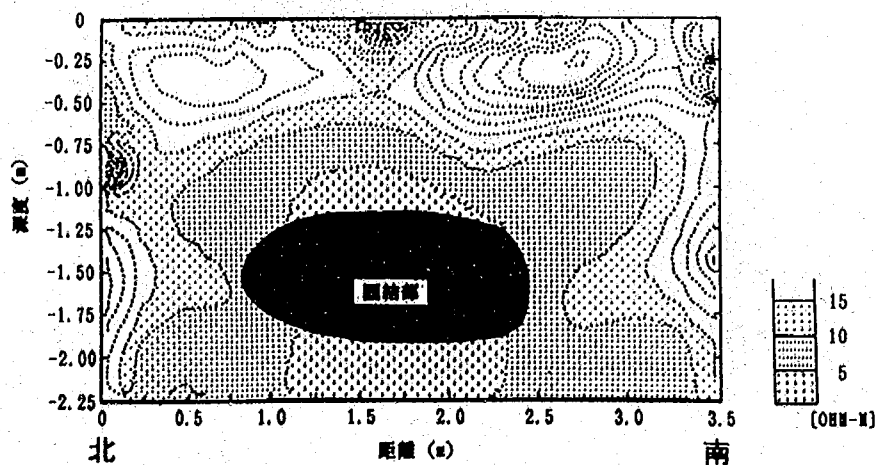


図-10.4.16 比抵抗分布 (No. 3: 北—南 東側断面)

図-10.4.14～図-10.4.16より考えられることは次のとおりである。

①見掛け比抵抗値の分布は、注入孔近傍から徐々に大きくなっている。

表-10.4.7の水(12.25 $\Omega \cdot m$)と飽和砂(26.25 $\Omega \cdot m$)の見掛け比抵抗値を考慮すると、0～15 $\Omega \cdot m$ の範囲は懸濁液の影響を受けていると考えられる。

②本探査では、地盤の注入前は見掛け比抵抗値分布のキャリブレーションを行っていないため、注入前後の比抵抗値変化による確実な評価はできないが、見掛け比抵抗値の分布と注入固結形状は必ずしも一致していない。これは、見掛け比抵抗値に影響を及ぼす超微粒子セメント注入材水和過程の活発な水和反応期間を過ぎた固結体形成後に測定したため、分散剤による影響が比抵抗分布状況に現れたと推察される。

③ 今後、適用性の検討にあたっては、注入前および注入時を含め、経過時間を考慮した見掛け比抵抗値分布の測定が必要と考える。

〈参考文献〉

- 1) 辰井他：ロータリーサウンディング法による地盤強度評価（その2）第45回土木学会年次講演会、pp. 1108～1109、第三部門、1990
- 2) 小峯他：比抵抗トモグラフィーを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の適用限界、第51回土木学会年次講演会、pp598～599、第三部門、1996
- 3) 島 裕雅・梶間和彦・神谷英樹：建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法、p117, (株)古今書院,1995.

第11章 液状化対策工としての効果に関する振動台実験

11.1 実験目的

既設の地中構造物や基礎構造物の幅が広い場合、直下地盤の全面改良が困難な場合を想定し、改良杭体を両側に配置した計4モデルの振動台実験を行い、液状化対策としての適用性を検証することを目的とする。

11.2 実験方法

振動台(4×4m)上の土槽(幅250×高さ50×奥行き68cm)内に共同溝模型(幅30×高さ15×奥行き67.6cm、見かけの単位体積重量 1.3gf/cm^3)を埋設した砂地盤(豊浦砂、液状化層: $Dr=60\%$ 、支持層: $Dr=90\%$)を作成し、 CO_2 を通したのち脱気水で飽和させた。

地盤条件及び改良杭体の配置条件を表-11.1、図-11.1に示す。模型地盤は、改良杭体(固化体)の有無、埋設ピッチ(接円)及び共同溝模型直下と改良杭体の杭頭部(頸部)の結合の有無の条件を変化させ4モデルを作成した。MODEL1は無対策、MODEL2は杭体を接円配置して頭部(頸部)を下部分離した場合、MODEL3は杭体間に15mmの隙間(杭配置ピッチ $=1.1 \times \phi$)を設けて頭部を接合した場合、MODEL4は杭体を接円配置して頭部を接合した場合である。杭体は豊浦砂と超微粒子セメントを重量比で1:0.07に配合し、モルタル($\phi 150\text{mm}$, 300または330mm)に液状化層とほぼ同等の密度となるよう詰めて、水道水を飽和させて作成した。この配合は、振動実験時の養生条件を再現した予備試験結果より、目標強度 $q_u=5\text{kgf/cm}^2$ として設定した。加振は、5Hz20波の正弦波を用いて、加振加速度振幅を100~300galの範囲で約50galずつ大きくしながら計5回行った。

表-11.1 改良杭体の配置条件

	改良杭体条件	改良杭体配置条件
MODEL1	無	無対策
MODEL2	有 本数=10本 円柱体	改良杭体が接円 杭頭接合なし
MODEL3		配置ピッチ: $\phi \times 1.1$ 倍 杭頭接合有り
MODEL4		改良杭体が接円 杭頭接合有り

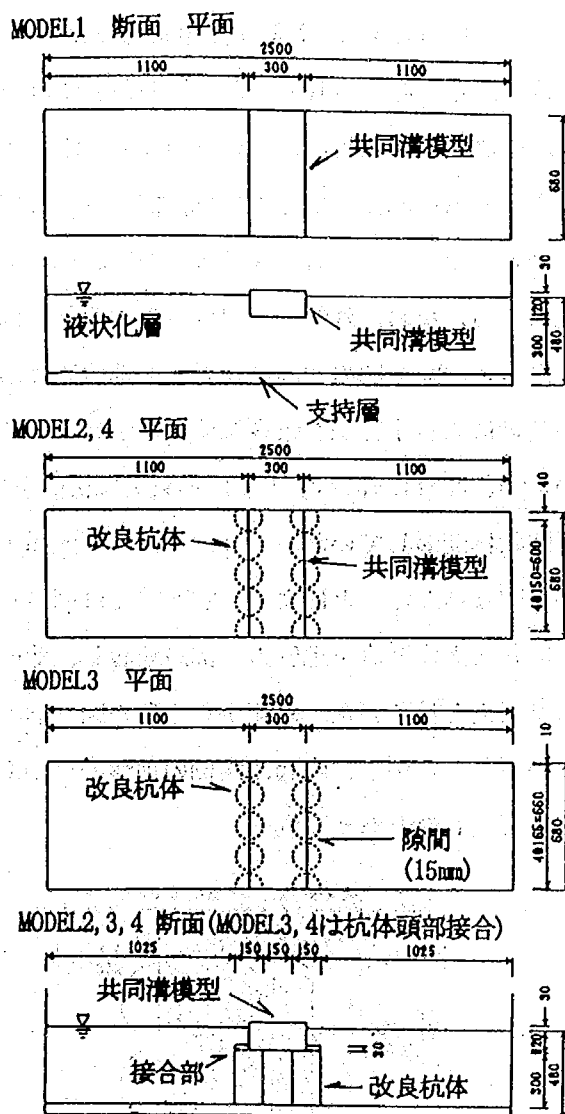


図-11.1 実験模型 単位(mm)

11.3 実験結果と考察

各加振毎の最終浮上がり量と加振加速度の関係を図-11.2に示す。いずれのモデルも加振加速度150galで浮上がり始めたが、浮上がり量はMODEL4（杭体接円、頭部接合）が最も小さかった。また、MODEL1（無対策）とMODEL2（杭体接円、頭部接合なし）に有意な差は見られず、MODEL3（杭体間に隙間、頭部接合）では若干の浮上がり抑止効果が現れた。

加振終了後にMODEL2, 3, 4を解体し、改良杭体と共同溝模型直下地盤を観察した結果を図-11.3、図-11.4、図-11.5に示す。MODEL3, 4の改良杭体は変化が見られなかったが、図-11.3に示すようにMODEL2の改良杭体は内側に倒れ込み、結合されていない杭頭部とずれを生じていた。これは、液状化により外側の地盤の水平土圧が増加するとともに内側の地盤の変形抵抗が低下して、共同溝模型の浮上がりとともに改良杭体が倒れ込んだものと考えられる。なお、外側から内側への砂の移動は生じていなかった。MODEL3の共同溝模型直下地盤にはあらかじめ黒色砂による平行線を改良杭体に接するように引いていたが、図-11.4に示すように加振後は杭間を中心とした円弧状に変形していた。これは、杭間の隙間から外側の砂が回り込んだことによる。MODEL4では図-11.5に示すように共同溝模型直下地盤の一部が隆起し、その部分に模型が支えられていた。外側からの砂の回り込みは見られなかったことから、隆起は内側の地盤のみの変形によって生じたものと考えられる。

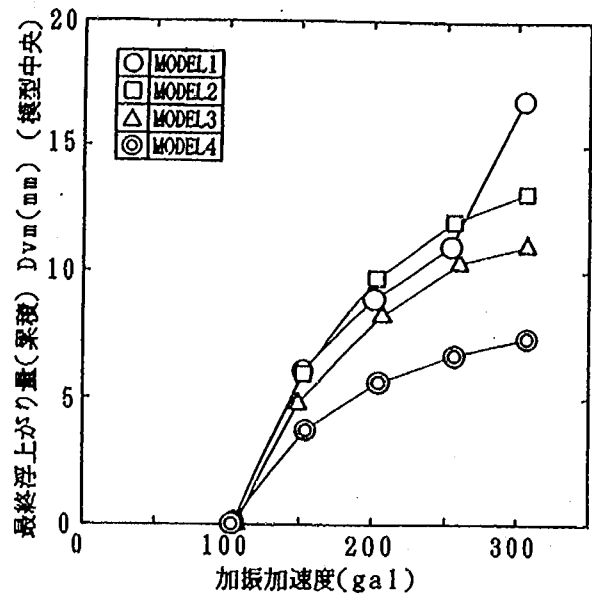


図-11.2 最終浮上がり量（累積）と加振加速度の関係

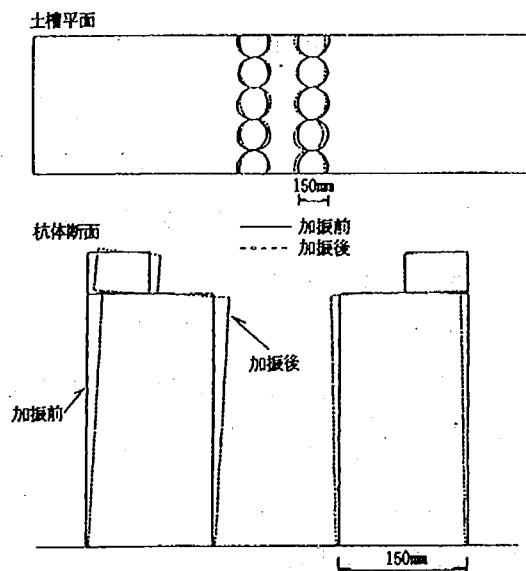


図-11.3 MODEL2の状況

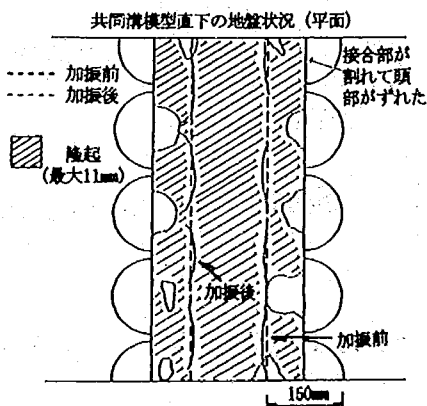


図-11.4 MODEL3の状況

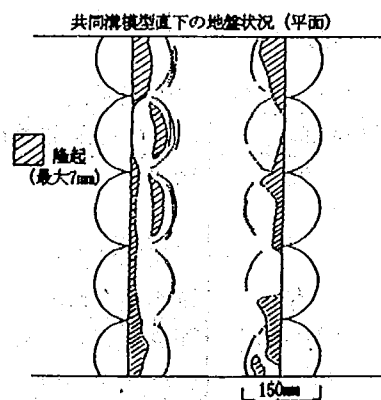


図-11.5 MODEL4の状況

各加振毎の浮上がり安全率¹⁾の最小値と最終浮上がり量の関係を図-11.6に示す。本実験では浮上がり安全率が1.0~1.1の場合に浮上がりが生じ、その後の浮上がり量が増加しても最小浮上がり安全率はほとんど低下しない点が既往の実験結果¹⁾と異なっていた。

以上の実験結果から、既設地中構造物の両側に改良杭体を配置する場合、直下地盤の液状化は避けられないが、浮上りを抑止するためには、杭体頭部（顎部）の接合による杭体の倒れ込み防止と、接円による周辺部からの砂の回り込み防止が必要であることがわかった。

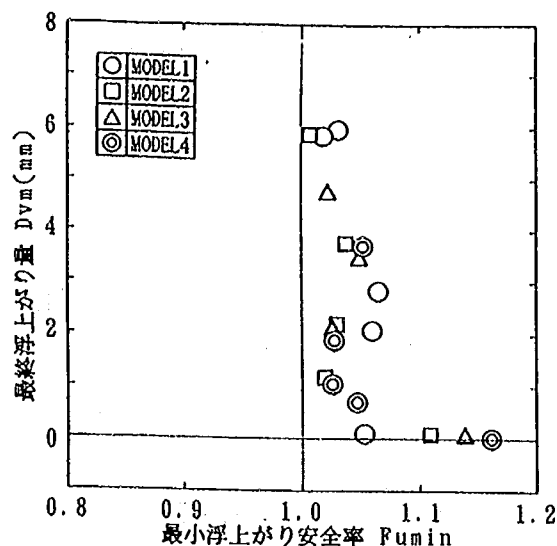


図-11.6 最終浮上がり量と
最小浮上がり安全率の関係

11.4 まとめ

既設の地中構造物や基礎構造物の幅が広いと、直下地盤の全面改良が困難で、既設構造物の両側に改良杭体を配置する場合、直下地盤の液状化は避けられないが、浮き上りを防止するためには、杭体頭部（顎部）接合による杭体の倒れ込み防止と、接円による周辺部からの砂の回り込み防止が必要であることがわかった。

〔参考文献〕

- 1) 古関等ら：共同溝の浮上がりに関する模型振動実験及び有限要素解析、第9回地震工学シンポジウム、pp. 997~1002, 1994

第12章 全体のまとめと今後の課題

超微粒子セメント懸濁液を用いて室内実験を行い、以下の成果が得られた。

1) 注入材としての浸透特性

- ・薬液注入材のうち超微粒子セメントは、液状化対策の条件である長期的な耐久性と低圧下での浸透性を満足できる可能性を有する注入材である。
- ・一次元注入実験において、注入圧力、分散剤混入率を大きくすると注入流量速度と固結体形成速度が大きくなり、固結長が伸びる傾向にあった。特にW/Cの大きい領域では、注入圧力よりも分散剤混入率を増加させた方が少ない注入量でより均一に長距離を充填できた。
- ・W/Cが大きくなるとともにセメント粒子による濾過現象が大きくなるが、注入圧力や分散剤混入率を大きくすることにより濾過現象が緩和された。特に、分散剤混入率を大きくすると超微粒子セメントの分散性が向上し、最も効果的に濾過の影響を小さくできた。
- ・一次元注入実験より、固結長が伸びる最適水セメント比は、W/C=100%付近であり、少ない注入量で固結長が伸びる注入効率の面で最適分散剤混入率は、D/C=8~10%である。
- ・少ない混入量で固結長を伸ばすことができる最適分散剤はβ-ナフタレン系、ナフタレン系である。
- ・固結可能長は、地盤の透水係数と強い相関があり、超微粒子セメント懸濁液の浸透限界域は、透水係数 $k = 1 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)}$ 付近である。
- ・固結長は、地盤の密度の変化によっても大きく変化し、密になるほど短くなる。

2) 動的強度特性

- ・超微粒子セメント注入固結土の動的強度は、一軸圧縮強度が 1.0 kgf/cm^2 程度あれば、未固結砂の4.5倍程度であった。
- ・注入材料が同じ場合には、繰返しせん断強さと一軸圧縮強度の間には相関関係がある。

3) 固結体の強度に対する長期耐久性

- ・水セメント比および分散剤混入量の変化にかかわらず、3年の試験期間内において有意な長期的強度劣化は見られない。

4) 小型三次元モールドによる三次元的浸透特性

- ・周辺地盤の排水条件が良いほど、注入速度が経時的に低下しにくくなる。
- ・ステップダウン方式による注入を行うと、上部（第一ステップ）注入より下部（第二ステップ）の注入の方が最大注入速度は小さくなる。
- ・固結体内部でセメント濃度のばらつきは小さいが、注入口に近い内部よりも外周部の方がやや低い傾向にある。

・累積注入量の経時変化が直線的に増加している間は、三次元的に十分浸透しており、注入量に対して効率よく固結体が形成されている。他方、注入速度が十分に得られない(注入速度の減少)と、注入効率は極端に低下する。

5) 土槽注入実験における三次元的浸透特性および固結試料砂の強度特性

・珪砂6号 ($k=3 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$) に対しては、最大径約3.5m、平均径2.2m、高さ3.3mの円柱と同等の固結体を造成することができた。

・超微粒子セメント懸濁液の注入限界に近いとされる東北珪砂7号 ($k=7 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$) に対しては、第一注入で最大径2.3m、第二注入で最大径1.5mであり、平均径1.4m、高さ2.4mの円柱と同等の偏平球状の固結体を形成することができた。

・固結体の強度は、一軸圧縮強度で 20kgf/cm^2 以上であった。

6) 注入後の改良効果確認方法の検討

・ロータリーサウンディングより得られた固結長は、実測の固結長と一致している。ステップ注入の固結ラップ状況を推定する際に有効な調査法の一つである。

・ロータリーサウンディング試験から推定した一軸圧縮強度は、固結体からブロックサンプリングにより採取した供試体の一軸圧縮強度に比べてかなり小さかった。ただし、深度方向の強度分布は同じ傾向を示した。換算式に適切な地盤係数(現場係数)を乗ずれば、強度の推定も可能かもしれない。

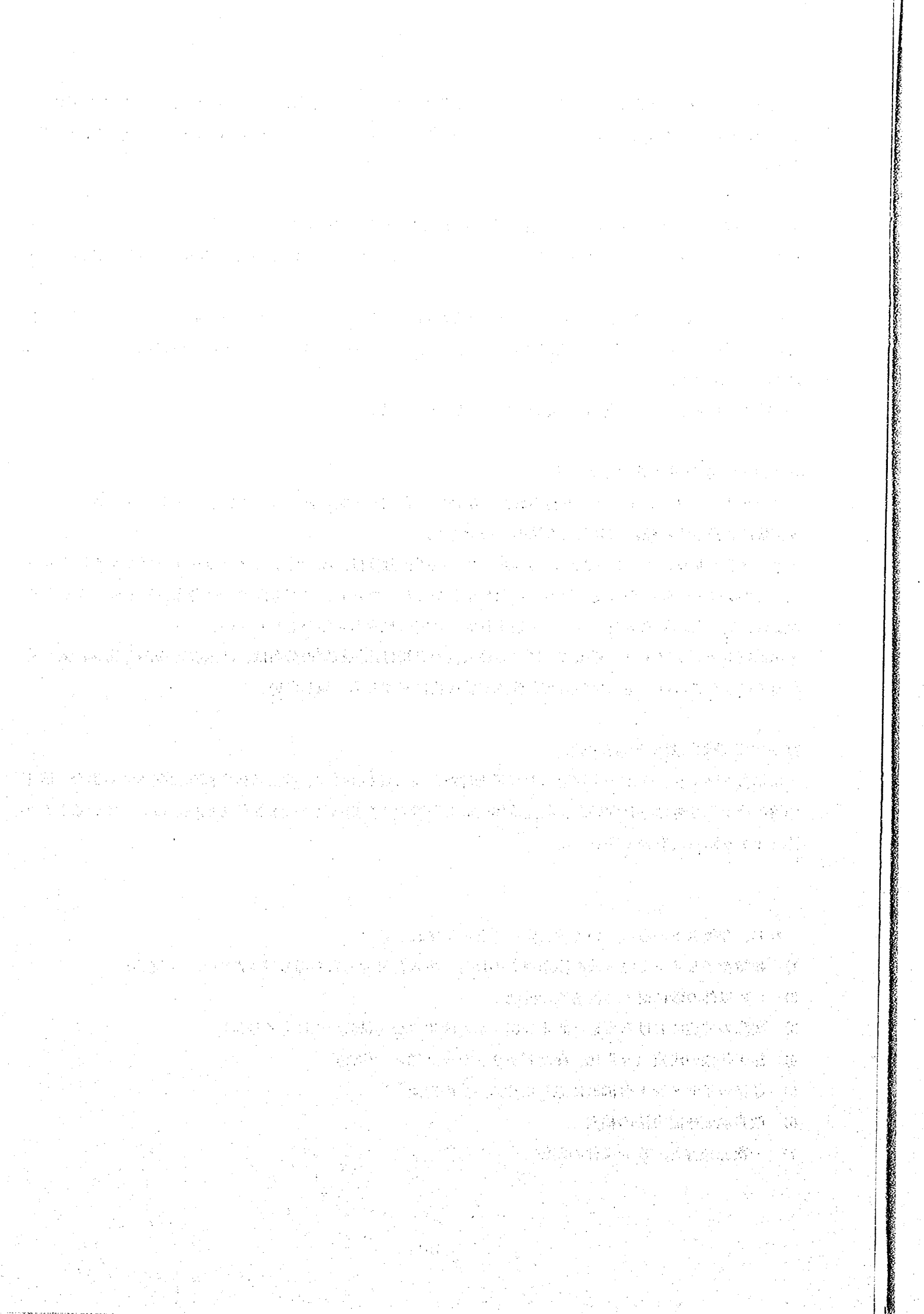
・比抵抗トモグラフィ(物理探査)による注入後の見掛け比抵抗値の分布は、注入孔近傍から徐々に大きくなっているが見掛け比抵抗値の分布と注入固結形状は必ずしも一致しない。

7) 地中構造物に対する対策効果

・振動台実験より、既設地中構造物の直下地盤の全面改良が困難で、改良杭体を両側に配置する場合、直下地盤の液状化は避けられないが、改良杭体の接円配置および構造物と改良杭体の頭部が接合していることが、浮き上がり防止に有効である。

なお、今後以下の点について検討することが望まれる。

- 1) 超微粒子セメント懸濁液の濾過現象の検討(注入孔付近と先端部の浸透性の違いを確認)
- 2) 珪砂以外の砂に対する浸透性の確認
- 3) 実際の地盤における浸透性および出来形の確認(現場試験施工による検証)
- 4) 施工仕様の決定(充填比、深度ピッチ、ラップ部の一体性)
- 5) 超微粒子セメント懸濁液に適した注入方法の確認
- 6) 改良範囲確認方法の検討
- 7) 一次元条件と三次元条件の関係



〈 卷 末 資 料 〉

1、繰返し三軸試験時刻歴

2、超微粒子セメント注入に関する発表論文一覧

1、繰返し三軸試験時刻歴

参考データ

繰返し三軸圧縮試験

軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

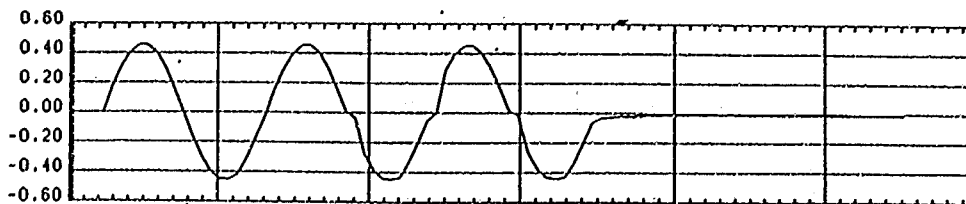
未固結砂 (珪砂7号)

実験ケース名		TEST111	TEST112	TEST110	TEST 8
Dr (%)		48	49	48	51
B値 (%)		96	96	95	95
$\sigma_d / 2 \sigma_c'$		0.227	0.190	0.167	0.144
Nc	DA = 5%	2	5	16	28
	DA = 2%	—	—	—	—
	$\Delta u / \sigma_c'$	—	—	—	—

-- TEST111--

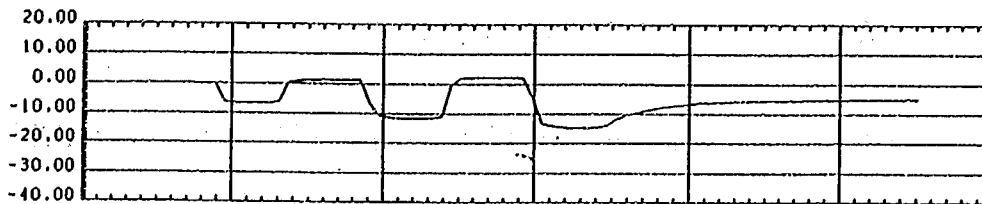
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 0.153
TIME = 9.100
MINIMUM = -0.410
TIME = 10.100
SCALE = 33



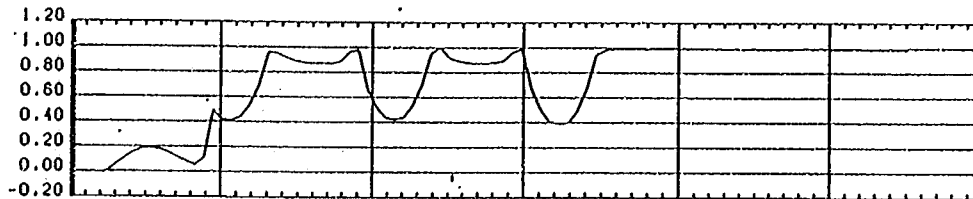
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 2.158
TIME = 26.100
MINIMUM = -11.153
TIME = 31.100
SCALE = 1/2



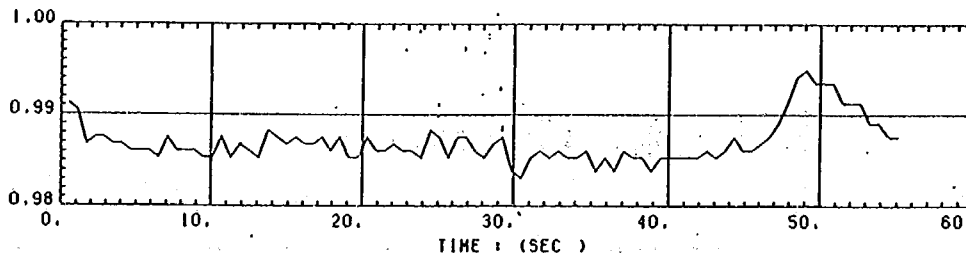
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.988
TIME = 21.100
MINIMUM = 0.000
TIME = 1.100
SCALE = 25



SIGHA 3
(KGF/CH2)

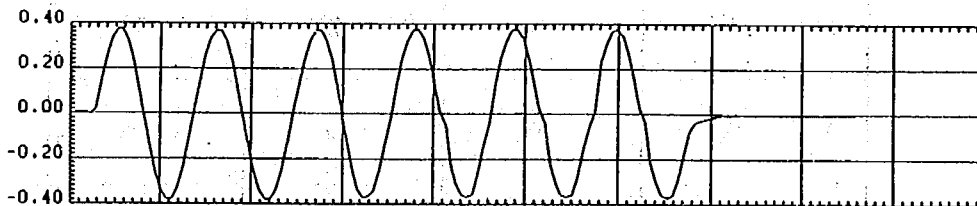
MAXIMUM = 0.995
TIME = 19.100
MINIMUM = 0.983
TIME = 30.100
SCALE = 2000



-- TEST112--

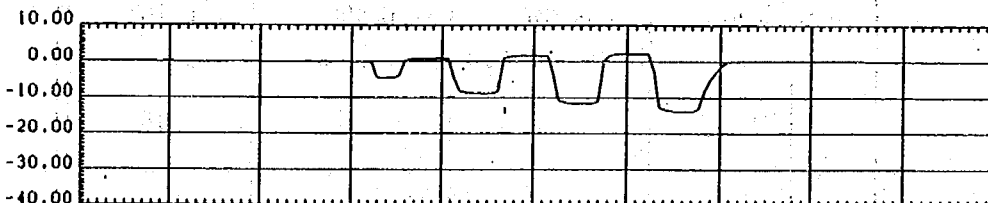
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 0.379
TIME = 19.100
MINIMUM = -0.380
TIME = 22.100
SCALE = 30



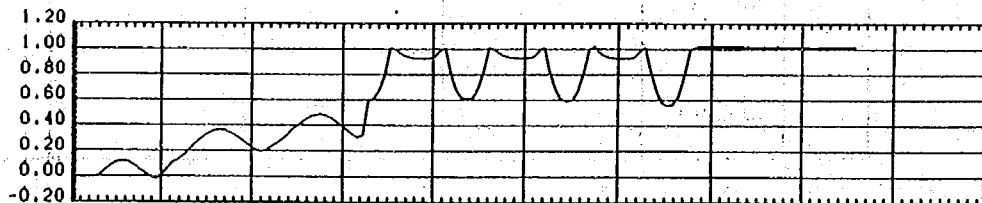
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 2.110
TIME = 33.100
MINIMUM = -12.102
TIME = 43.100
SCALE = 1/1



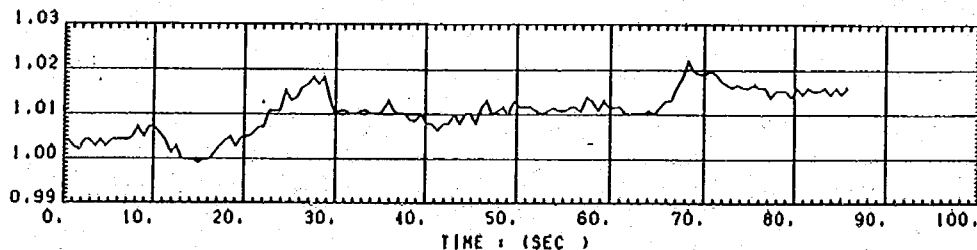
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.021
TIME = 10.100
MINIMUM = -0.018
TIME = 1.100
SCALE = 25



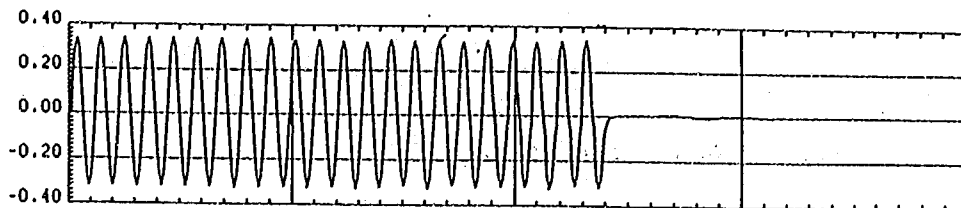
SIGHA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.032
TIME = 40.100
MINIMUM = 0.988
TIME = 14.100
SCALE = 1000



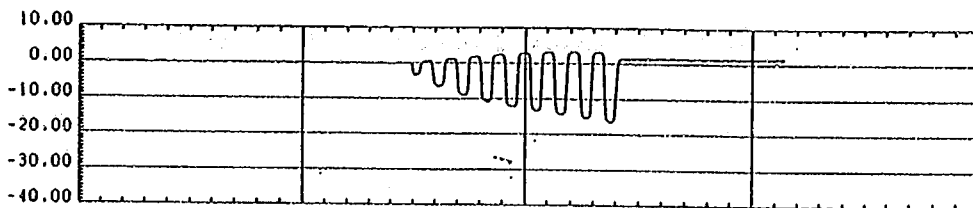
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.332
TIME : 118.300
MINIMUM : -0.332
TIME : 118.300
SCALE : 50



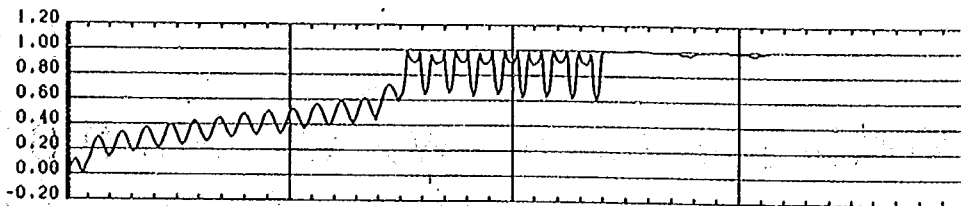
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 3.177
TIME : 210.700
MINIMUM : -15.711
TIME : 118.300
SCALE : 1/1



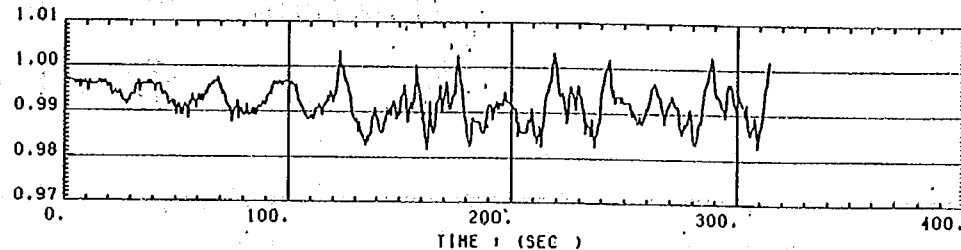
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.008
TIME : 333.300
MINIMUM : 0.00
TIME : 0.000
SCALE : 20



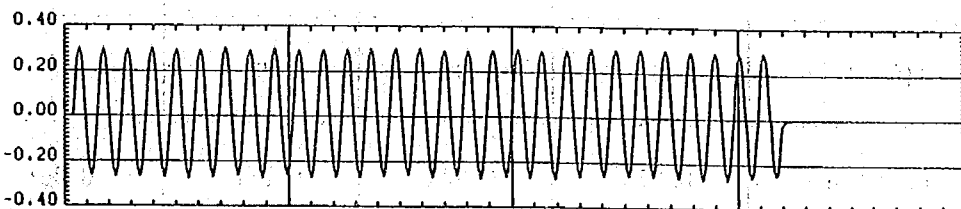
SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.003
TIME : 132.900
MINIMUM : 0.98
TIME : 132.900
SCALE : 1000



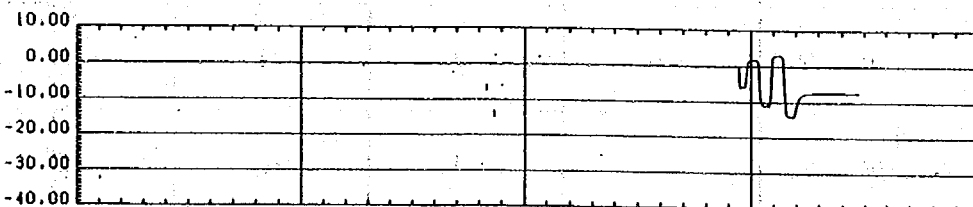
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.207
TIME : 118.100
MINIMUM : -0.273
TIME : 35.700
SCALE : 50



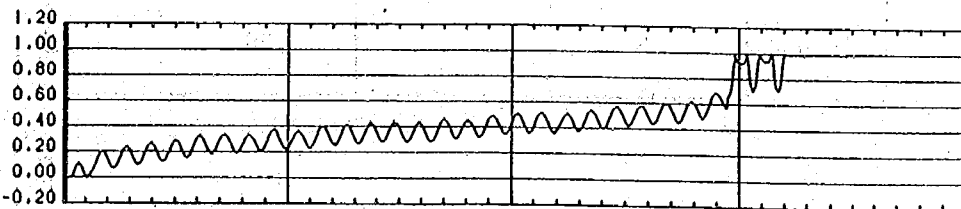
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 3.913
TIME : 311.400
MINIMUM : -15.013
TIME : 311.700
SCALE : 1/1



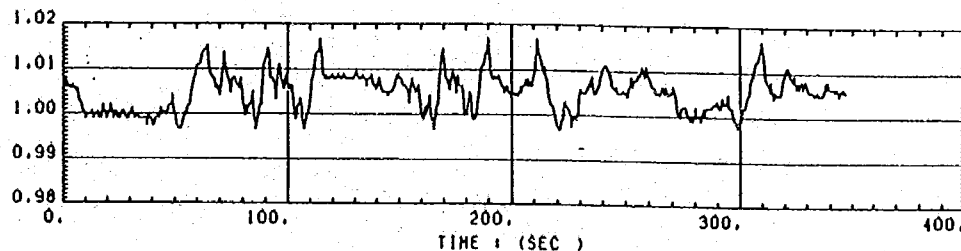
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.008
TIME : 311.300
MINIMUM : -0.001
TIME : 18.700
SCALE : 20



SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.012
TIME : 111.500
MINIMUM : 0.992
TIME : 51.500
SCALE : 1000



参考データ

繰り返し三軸圧縮試験

軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

超微粒子セメント $W/C = 2000\%$

分散剤混入率 2%

材 令 1日

実験ケース名		T5001	T5002	T5003	T5022
Dr (%)		(50)	(50)	(50)	(50)
B値 (%)		93	95	95	95
$\sigma_d / 2\sigma_c'$		0.370	0.324	0.271	0.251
Nc	DA = 5%	5	8	34	135
	DA = 2%	2	4	28	123
	$\Delta u / \sigma_c'$	3	4	26	121

-- T5001--

SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.882
TIME : 00.000
MINIMUM : -0.713
TIME : 00.000
SCALE : 10

$\lambda = 18.735$

EPS. 1
(%)

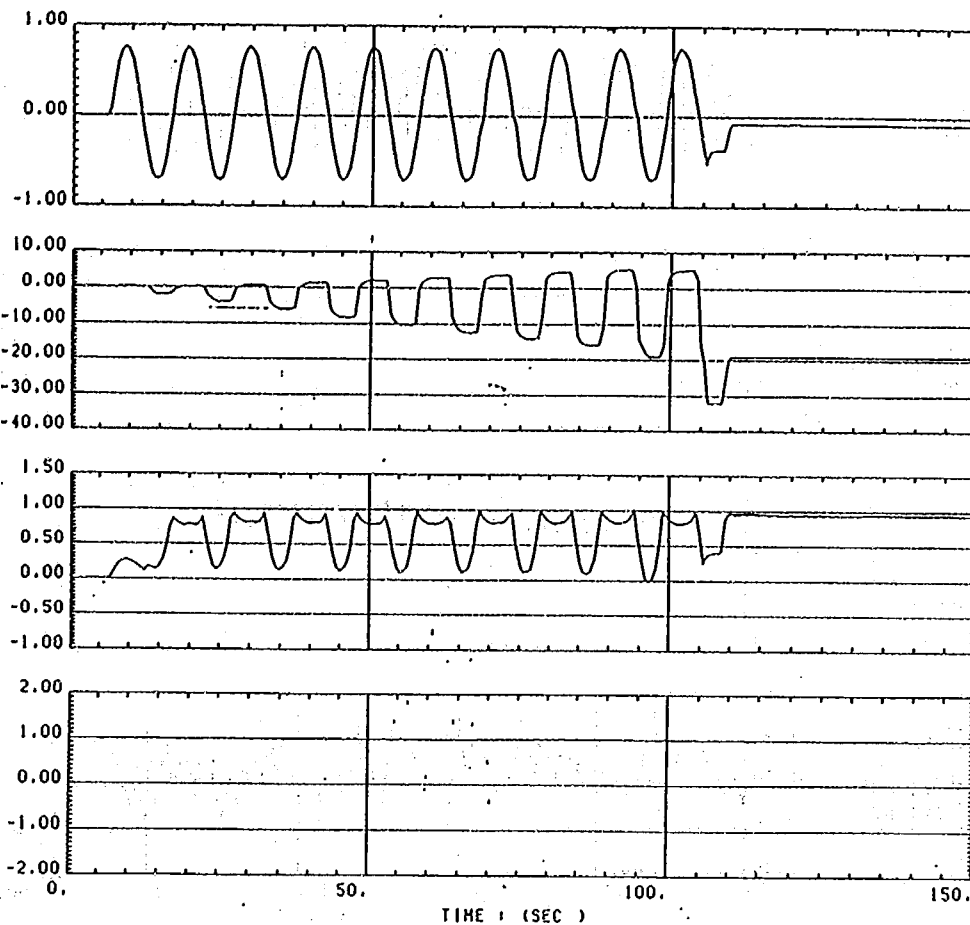
MAXIMUM : 0.882
TIME : 00.000
MINIMUM : -0.713
TIME : 00.000
SCALE : 10

P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.007
TIME : 00.000
MINIMUM : -0.000
TIME : 00.000
SCALE : 10

SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.011
TIME : 00.000
MINIMUM : -1.000
TIME : 00.000
SCALE : 10



-- T5002--

SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.878
TIME : 00.000
MINIMUM : -0.882
TIME : 00.000
SCALE : 20

$\lambda = 18.551$

EPS. 1
(%)

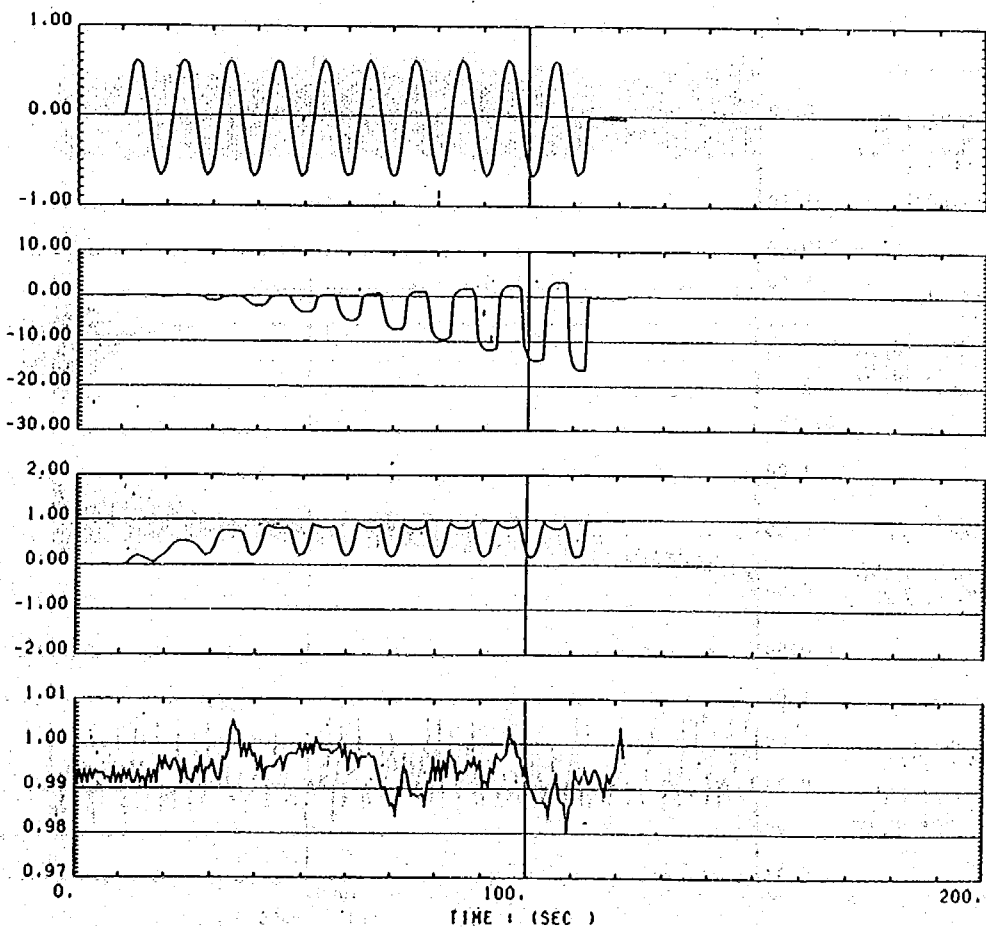
MAXIMUM : 0.878
TIME : 00.000
MINIMUM : -0.882
TIME : 00.000
SCALE : 1

P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.003
TIME : 00.000
MINIMUM : -0.001
TIME : 00.000
SCALE : 10

SIGMA 3
(KGF/CH2)

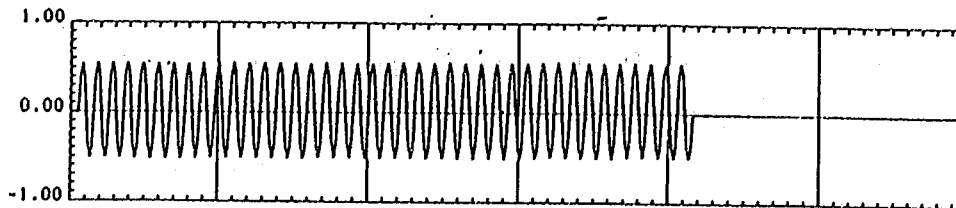
MAXIMUM : 1.005
TIME : 00.000
MINIMUM : 0.990
TIME : 00.000
SCALE : 1000



-- T5003--

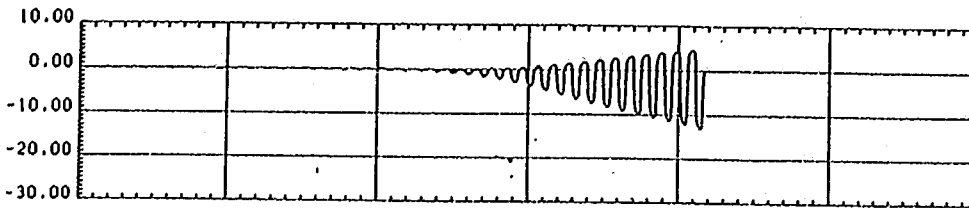
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 0.570
TIME = 338.300
MINIMUM = -0.518
TIME = 331.100
SCALE = 20
A = 18.128



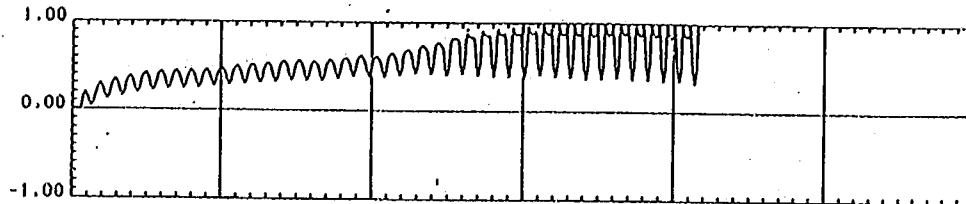
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 1.800
TIME = 103.500
MINIMUM = -13.500
TIME = 133.500
SCALE = 1



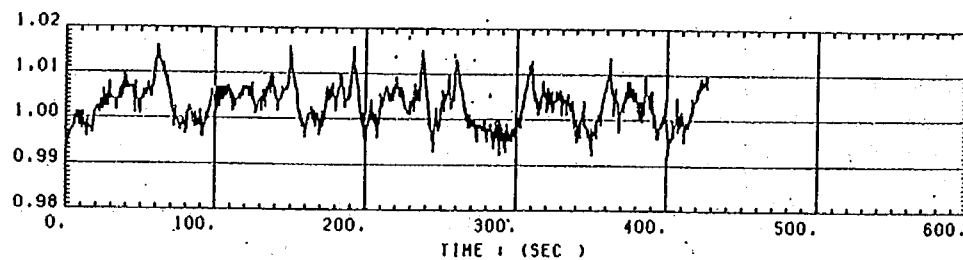
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.897
TIME = 118.900
MINIMUM = -0.008
TIME = 1.100
SCALE = 20



SIGHA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.018
TIME = 10.500
MINIMUM = 0.992
TIME = 388.500
SCALE = 1000

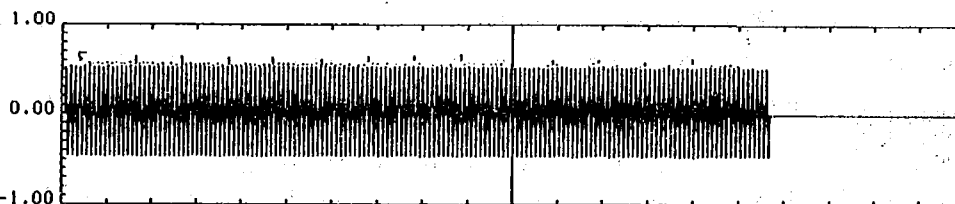


-- T5022--

SIG1-SIG3

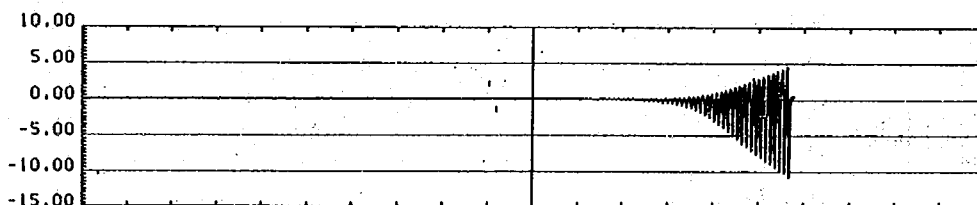
MAXIMUM = 0.359
TIME = 50.300
MINIMUM = -0.470
TIME = 1141.800
SCALE = 10

A = 18.777



EPS. 1
(%)

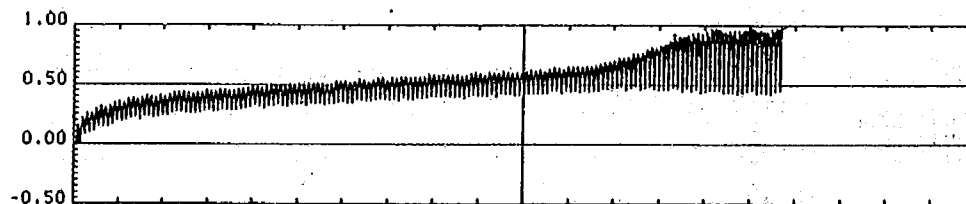
MAXIMUM = 1.559
TIME = 1581.800
MINIMUM = -10.320
TIME = 1580.100
SCALE = 2



P.H.P.
(KGF/CH2)

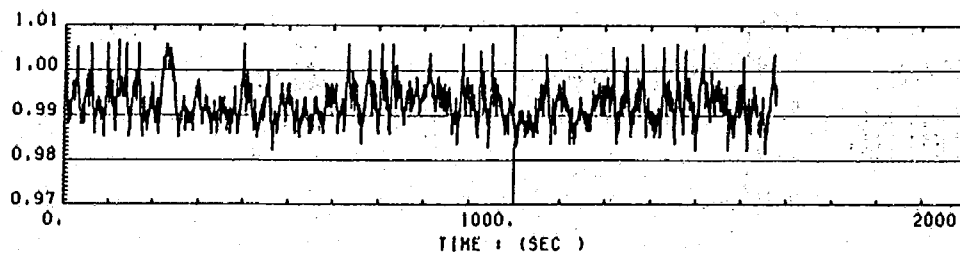
MAXIMUM = 0.887
TIME = 1591.800
MINIMUM = -0.008
TIME = 1.900
SCALE = 20

EP



SIGHA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.008
TIME = 1.100
MINIMUM = 0.992
TIME = 1591.800
SCALE = 1000



参考データ

繰り返し三軸圧縮試験

軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

超微粒子セメント $W/C = 2000\%$

分散剤混入率 2%

材 令 2日

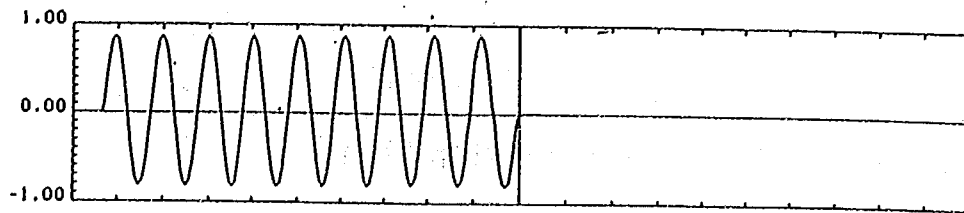
実験ケース名		T5025	T5023	T5021	T5024
Dr (%)		(50)	(50)	(50)	(50)
B値 (%)		95	97	95	95
$\sigma_d / 2 \sigma_c'$		0.426	0.401	0.317	0.296
Nc	DA = 5%	8	14	44	26
	DA = 2%	4	9	38	19
	$\Delta u / \sigma_c'$	3	7	33	16

-- TS025--

SIG1-SIG3

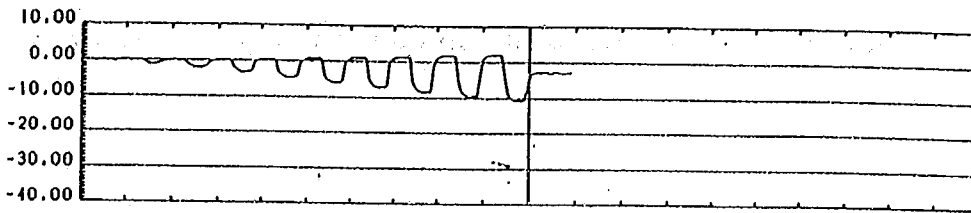
MAXIMUM = 0.898
TIME = 81.500
MINIMUM = -0.911
TIME = 95.100
SCALE = 20

A:18.749



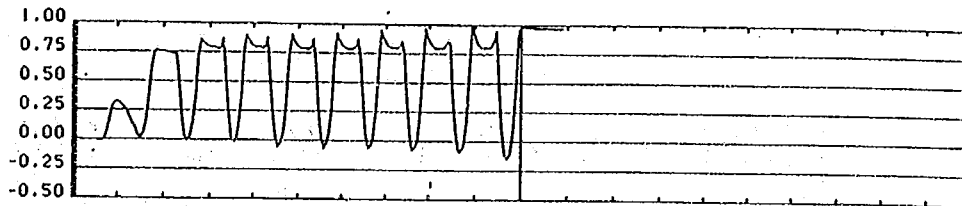
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 3.000
TIME = 81.500
MINIMUM = -18.749
TIME = 95.100
SCALE = 1/1



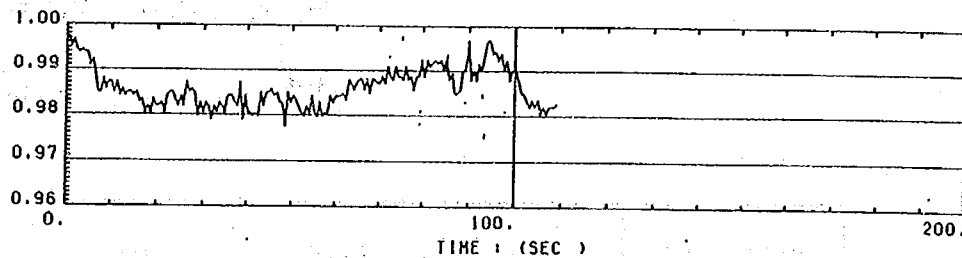
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.998
TIME = 81.500
MINIMUM = -0.911
TIME = 95.100
SCALE = 27



SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.988
TIME = 81.500
MINIMUM = 0.978
TIME = 95.500
SCALE = 1000



TIME : (SEC)

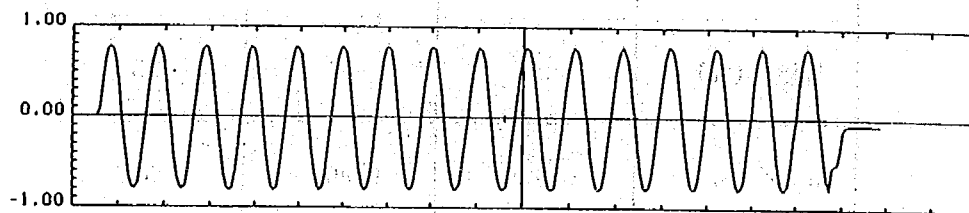
200.

-- TS023--

SIG1-SIG3

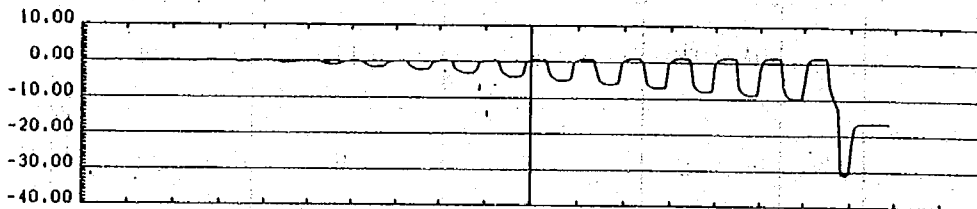
MAXIMUM = 0.798
TIME = 81.500
MINIMUM = -0.952
TIME = 95.500
SCALE = 20

A:19.031



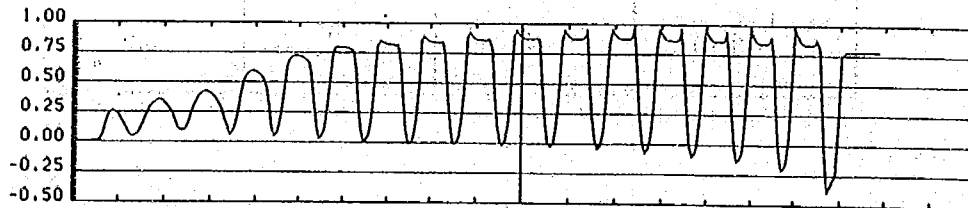
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 1.448
TIME = 81.500
MINIMUM = -29.631
TIME = 95.500
SCALE = 1/1



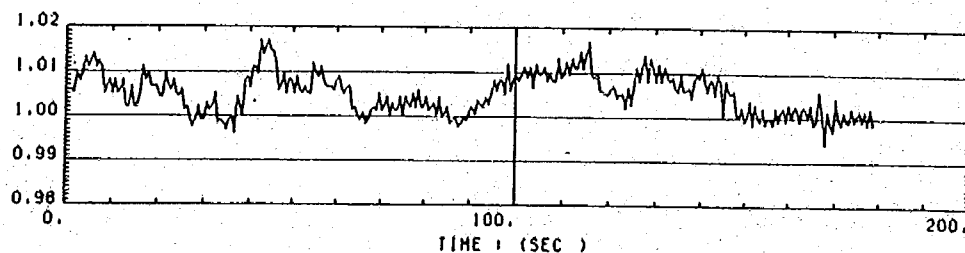
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.981
TIME = 81.500
MINIMUM = -0.952
TIME = 95.500
SCALE = 27



SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.012
TIME = 81.500
MINIMUM = 0.982
TIME = 95.500
SCALE = 1000



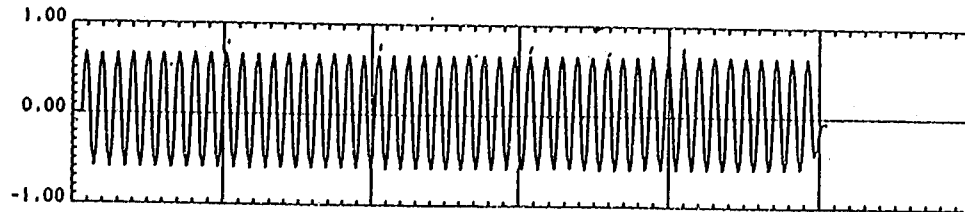
TIME : (SEC)

200.

SIG1-SIG3

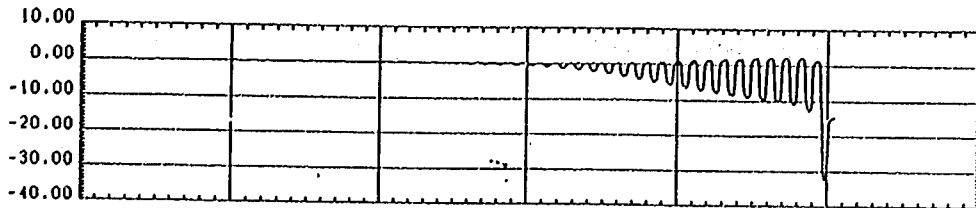
MAXIMUM : 0.875
TIME : 0.00
MINIMUM : -0.875
TIME : 0.00
SCALE : 20

A-18.77J



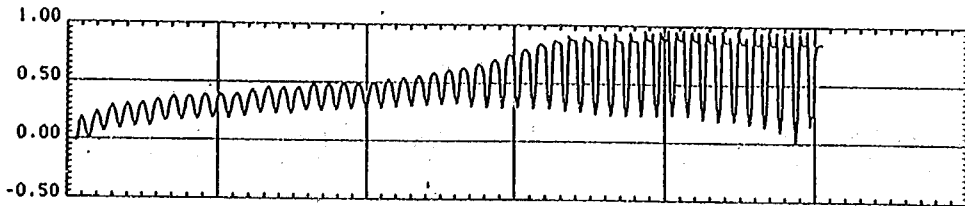
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.031
TIME : 0.00
MINIMUM : -0.031
TIME : 0.00
SCALE : 1/1



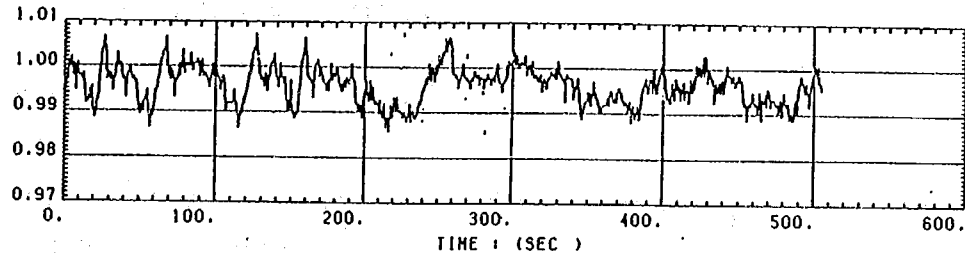
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 0.875
TIME : 0.00
MINIMUM : -0.875
TIME : 0.00
SCALE : 20



SIGMA 3
(KGF/CH2)

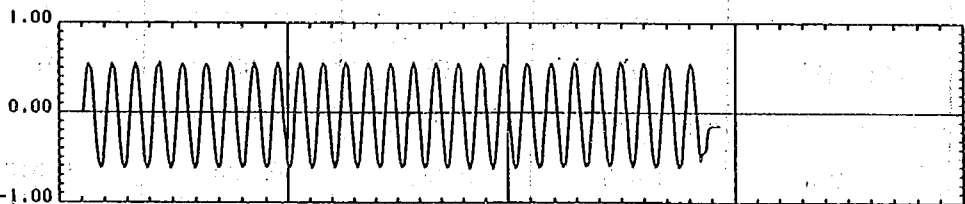
MAXIMUM : 1.007
TIME : 0.00
MINIMUM : 0.989
TIME : 0.00
SCALE : 1000



SIG1-SIG3

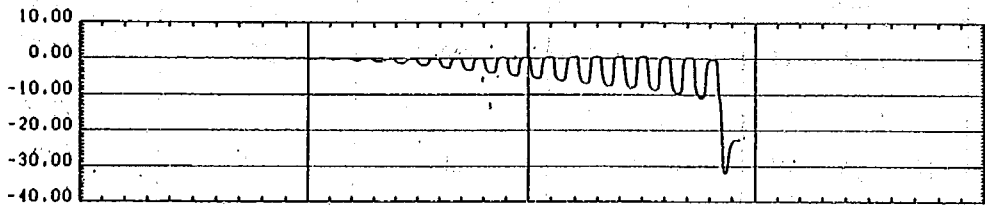
MAXIMUM : 0.875
TIME : 0.00
MINIMUM : -0.875
TIME : 0.00
SCALE : 20

A-17.08J



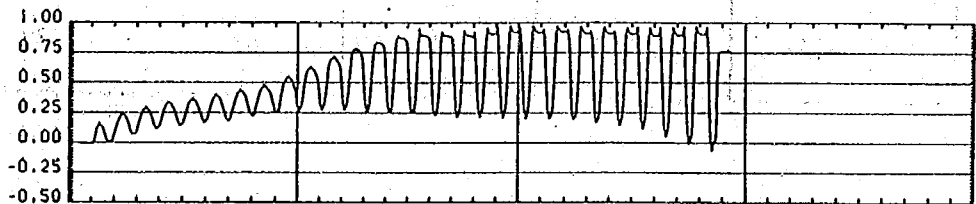
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.031
TIME : 0.00
MINIMUM : -0.031
TIME : 0.00
SCALE : 1/1



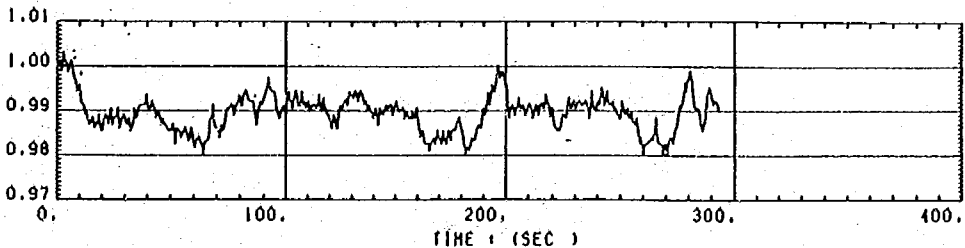
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 0.875
TIME : 0.00
MINIMUM : -0.875
TIME : 0.00
SCALE : 20



SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.007
TIME : 0.00
MINIMUM : 0.989
TIME : 0.00
SCALE : 1000



参考データ

繰り返し三軸圧縮試験

軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

超微粒子セメント W/C = 1000%

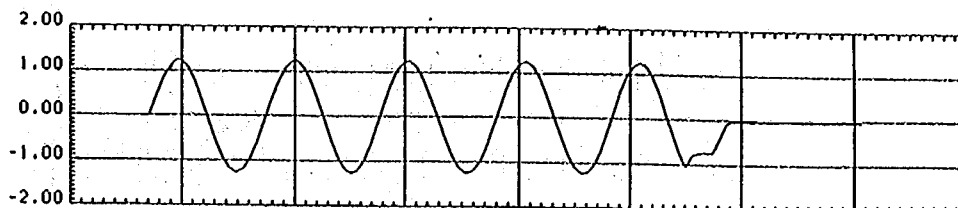
分散剤混入率 2%

材 令 1日

実験ケース名		MC4011	MC3011	MC1016	MC3012
Dr (%)		(50)	(50)	(50)	(50)
B値 (%)		97	97	95	97
$\sigma_d / 2 \sigma_c'$		0.633	0.489	0.390	0.518
Nc	DA = 5%	4	40	82	47
	DA = 2%	2	36	79	43
	$\Delta u / \sigma_c'$	3	30	58	32

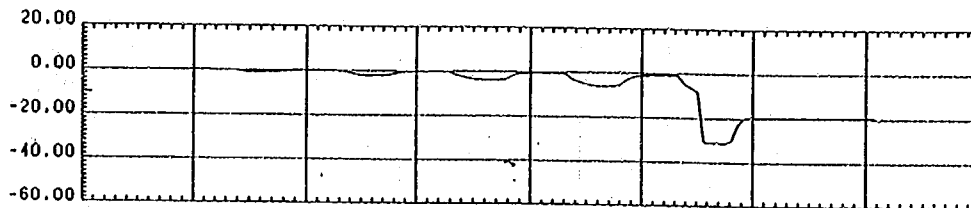
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 1.261
TIME = 30.550
MINIMUM = -1.197
TIME = 35.100
SCALE = 10



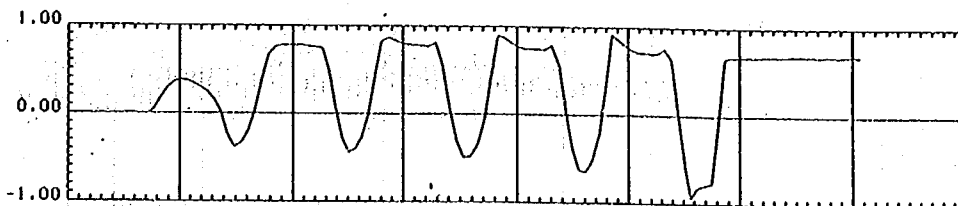
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 0.183
TIME = 11.500
MINIMUM = -33.333
TIME = 33.333
SCALE = 1/2



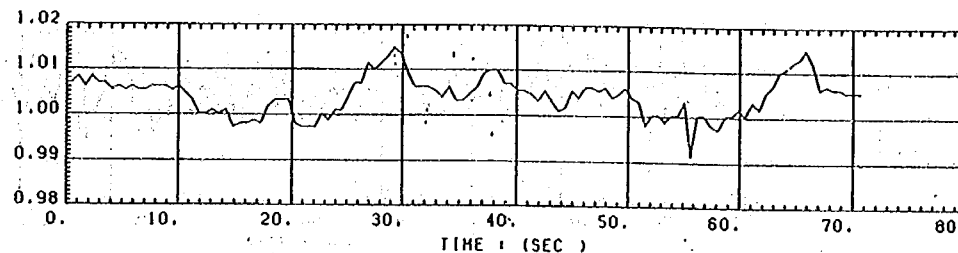
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.918
TIME = 10.500
MINIMUM = -0.911
TIME = 35.700
SCALE = 20



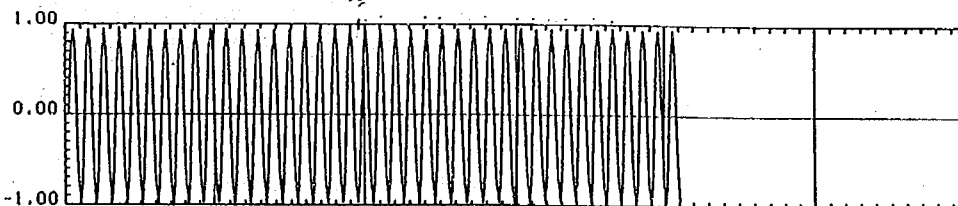
SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.015
TIME = 30.500
MINIMUM = 0.982
TIME = 35.700
SCALE = 1000



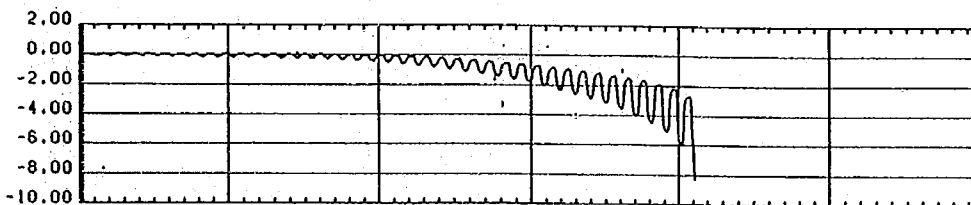
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 0.985
TIME = 100.100
MINIMUM = -0.988
TIME = 81.700
SCALE = 20



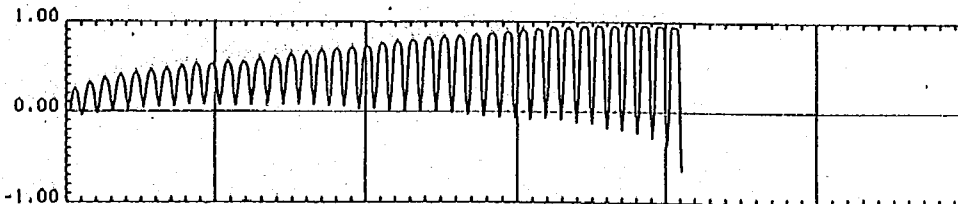
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 0.088
TIME = 23.500
MINIMUM = -8.252
TIME = 111.500
SCALE = 3



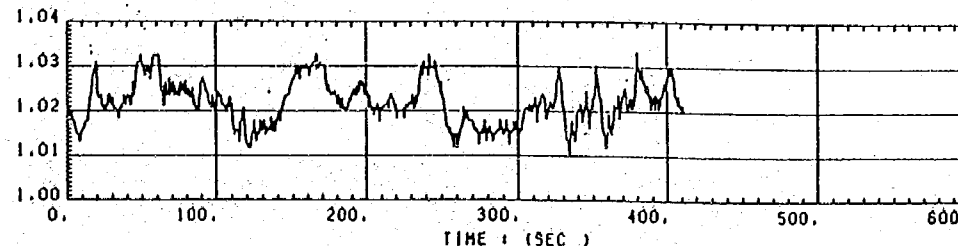
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.944
TIME = 333.700
MINIMUM = -0.812
TIME = 111.500
SCALE = 20



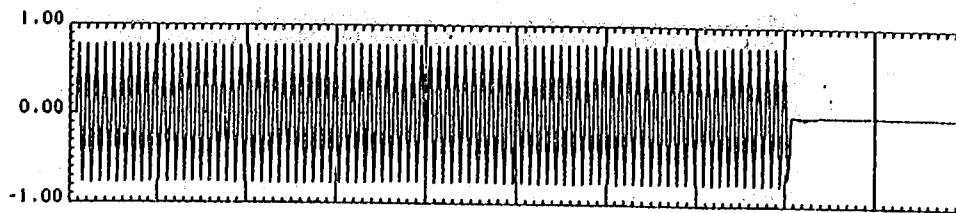
SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.031
TIME = 333.700
MINIMUM = 1.019
TIME = 111.500
SCALE = 1000



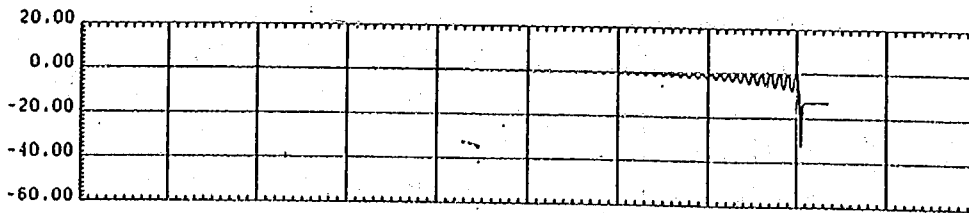
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.303
TIME : 338.300
MINIMUM : -0.332
TIME : 317.300
SCALE : 20



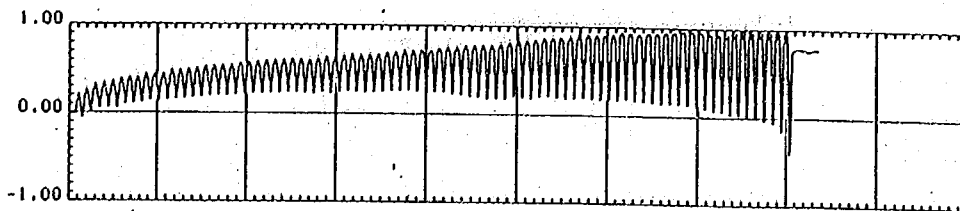
EPS. 1
(Z)

MAXIMUM : 9.101
TIME : 338.300
MINIMUM : -36.132
TIME : 317.300
SCALE : 1/2



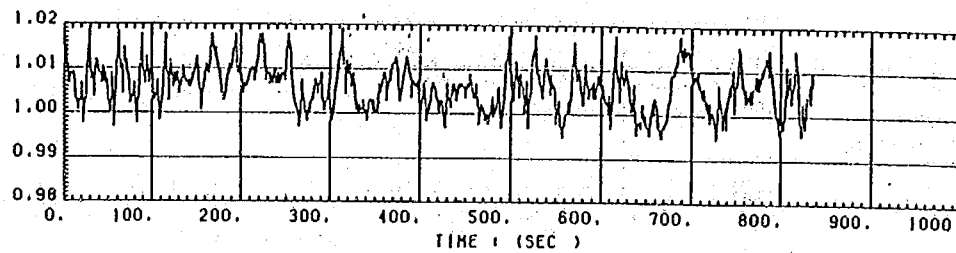
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 9.101
TIME : 338.300
MINIMUM : -0.102
TIME : 317.300
SCALE : 20



SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.011
TIME : 338.300
MINIMUM : 0.989
TIME : 317.300
SCALE : 1000



参考データ

繰り返し三軸圧縮試験

軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

超微粒子セメント W/C = 1000%

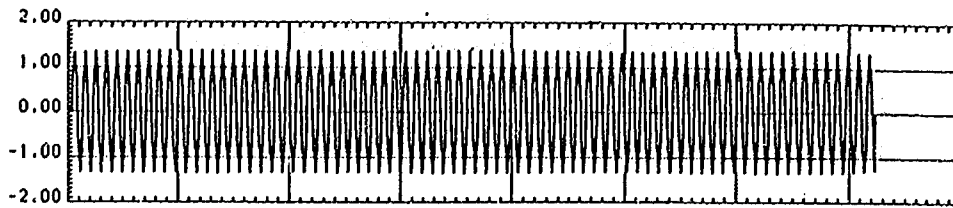
分散剤混入率 2%

材 令 2日

実験ケース名		MC3022	MC1017	MC3021	
Dr (%)		(50)	(50)	(50)	
B値 (%)		95	93	97	
$\sigma_d / 2 \sigma_c'$		0.782	0.681	0.631	
Nc	DA = 5%	112	74	110	
	DA = 2%	111	73	109	
	$\Delta u / \sigma_c'$	41	35	55	

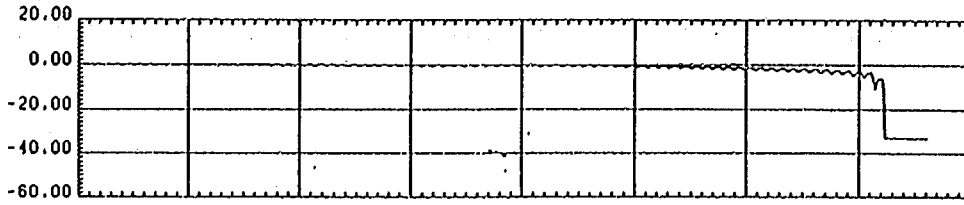
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 1.328
TIME = 361.300
MINIMUM = -1.316
TIME = 878.900
SCALE = 10



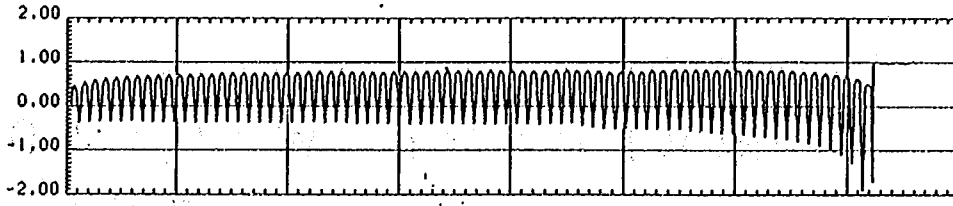
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 0.180
TIME = 33.100
MINIMUM = -33.230
TIME = 331.700
SCALE = 1/2

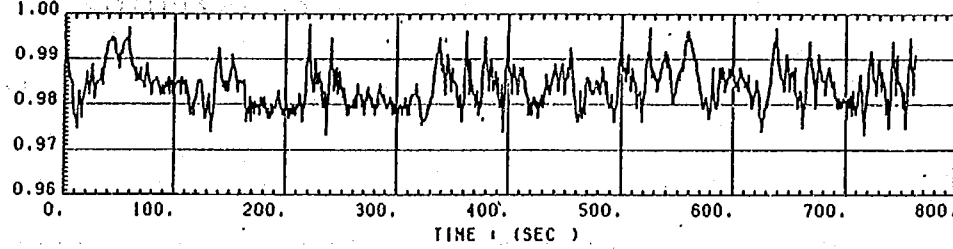


P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.008
TIME = 180.100
MINIMUM = -1.118
TIME = 1.118
SCALE = 10

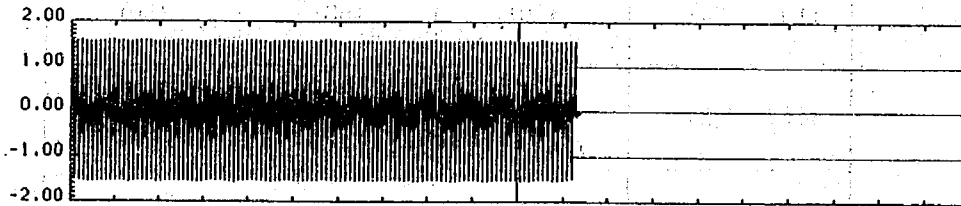


MAXIMUM = 0.999
TIME = 220.700
MINIMUM = 0.977
TIME = 333.700
SCALE = 1000



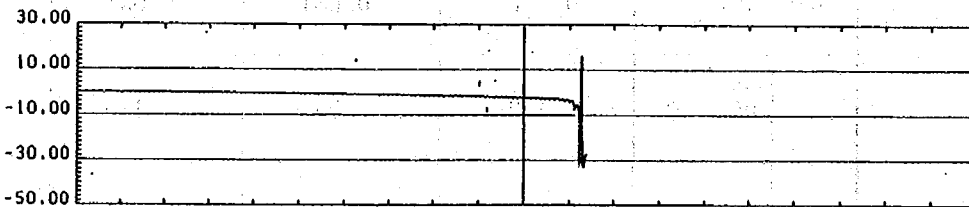
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 1.338
TIME = 348.300
MINIMUM = -1.310
TIME = 132.500
SCALE = 10



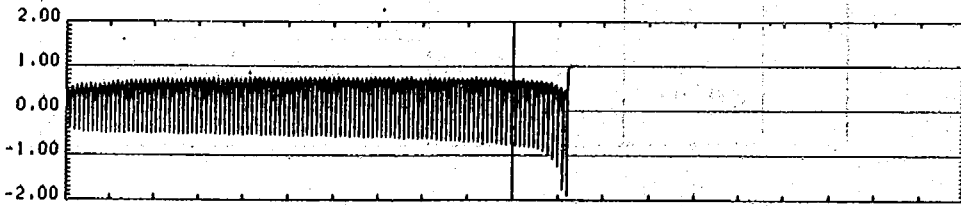
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 12.513
TIME = 113.500
MINIMUM = -32.810
TIME = 1130.889
SCALE = 1/2

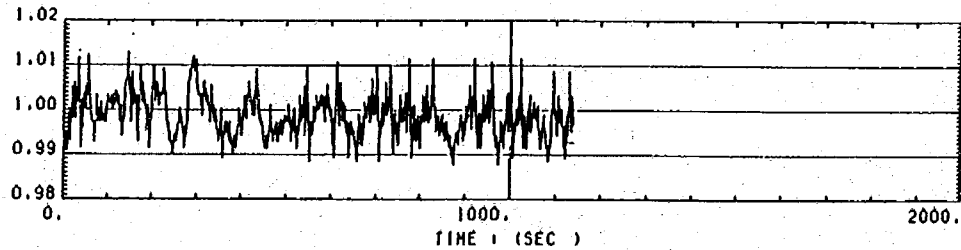


P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 1.020
TIME = 1122.500
MINIMUM = -1.001
TIME = 1119.889
SCALE = 10

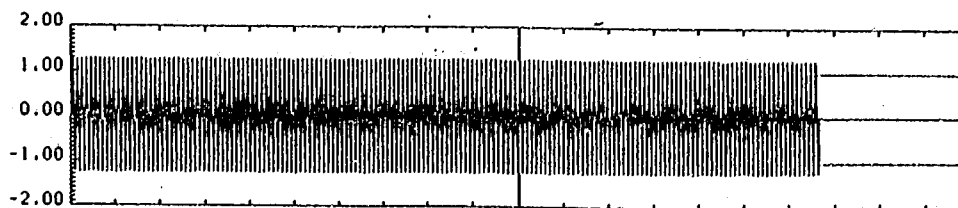


MAXIMUM = 1.013
TIME = 1119.500
MINIMUM = 0.988
TIME = 872.100
SCALE = 1000



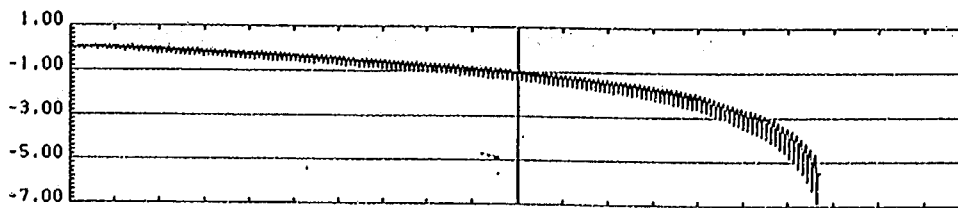
SIG1-SIG3

MAXIMUM = 1.290
TIME = 167.500
MINIMUM = -1.218
TIME = 167.500
SCALE = 10



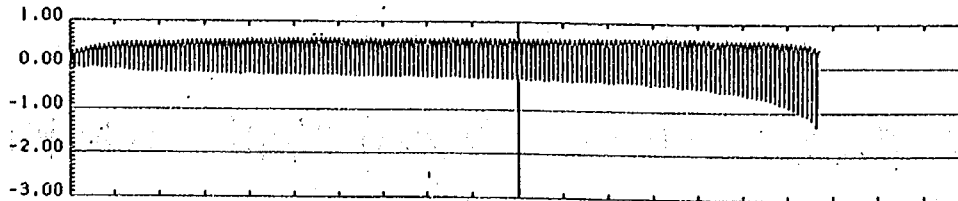
EPS. 1
(%)

MAXIMUM = 0.102
TIME = 167.500
MINIMUM = -1.418
TIME = 167.500
SCALE = 5

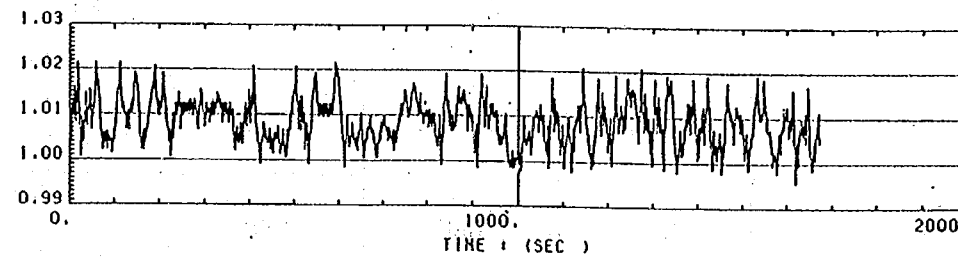


P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM = 0.818
TIME = 1510.888
MINIMUM = -1.218
TIME = 167.500
SCALE = 10



MAXIMUM = 1.021
TIME = 1510.888
MINIMUM = 0.989
TIME = 1670.188
SCALE = 1000



参考データ

繰り返し三軸圧縮試験

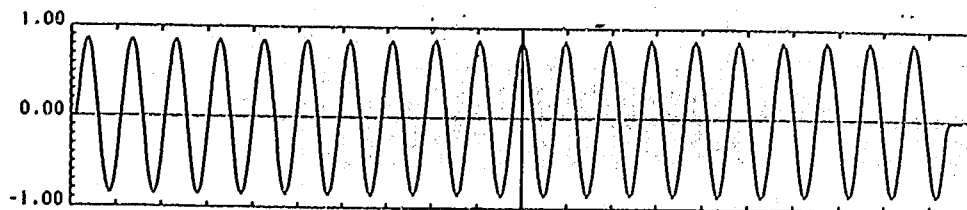
軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

超微粒子シリカ ゲル化時間 6 時間
材 令 3 日

実験ケース名		MS2031	MS2032	MS2033	
D r (%)		(50)	(50)	(50)	
B 値 (%)		95	96	95	
$\sigma_d / 2 \sigma_c'$		0.436	0.342	0.291	
N c	DA = 5%	20	74	44	
	DA = 2%	2	54	5	
	$\Delta u / \sigma_c'$	14	21	17	

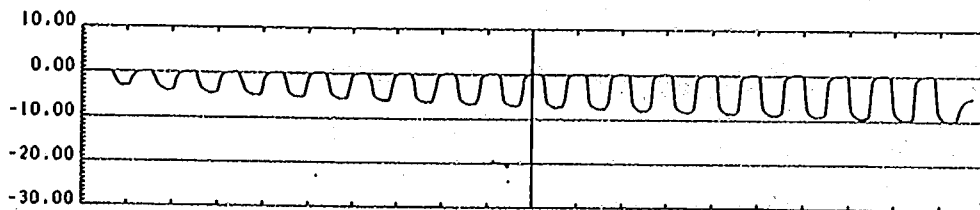
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.873
TIME : 158.900
MINIMUM : -0.868
TIME : 164.900
SCALE : 20



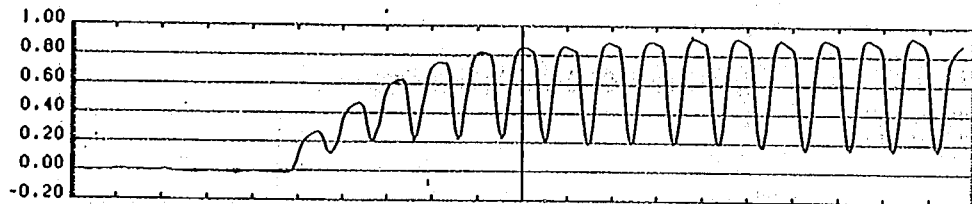
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.171
TIME : 160.100
MINIMUM : -10.081
TIME : 161.900
SCALE : 1



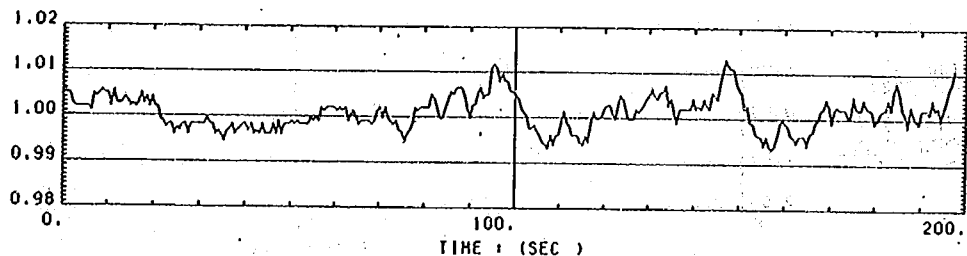
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 0.319
TIME : 164.900
MINIMUM : -0.018
TIME : 161.900
SCALE : 33



SIGMA 3
(KGF/CH2)

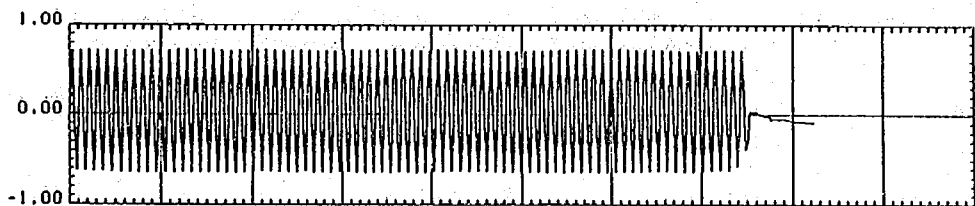
MAXIMUM : 1.013
TIME : 158.900
MINIMUM : 0.983
TIME : 161.900
SCALE : 1000



TIME : (SEC)

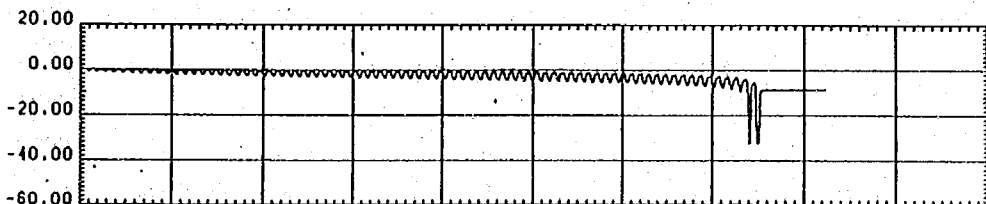
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.328
TIME : 300.900
MINIMUM : -0.838
TIME : 305.100
SCALE : 20



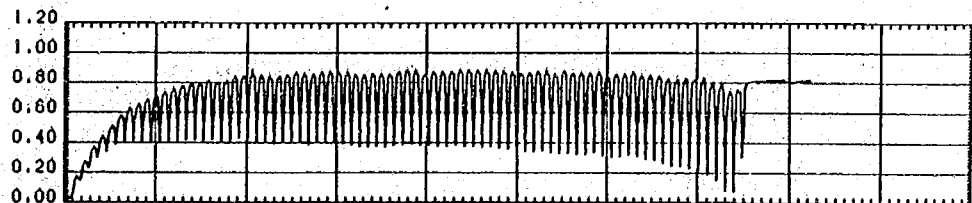
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.031
TIME : 300.900
MINIMUM : -33.373
TIME : 310.900
SCALE : 1/2



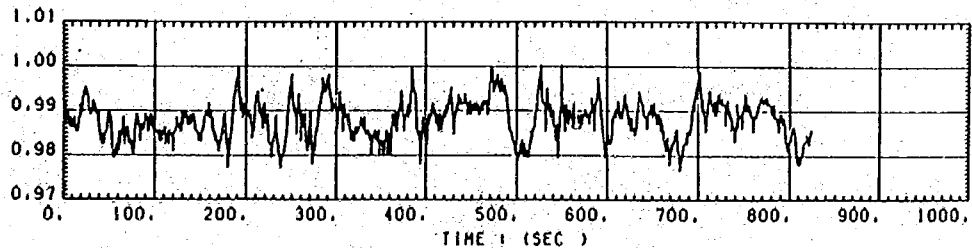
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 0.891
TIME : 305.100
MINIMUM : 0.008
TIME : 300.900
SCALE : 33



SIGMA 3
(KGF/CH2)

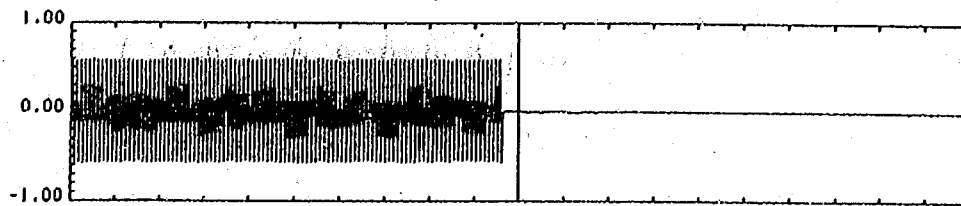
MAXIMUM : 1.009
TIME : 300.900
MINIMUM : 0.977
TIME : 310.900
SCALE : 1000



TIME : (SEC)

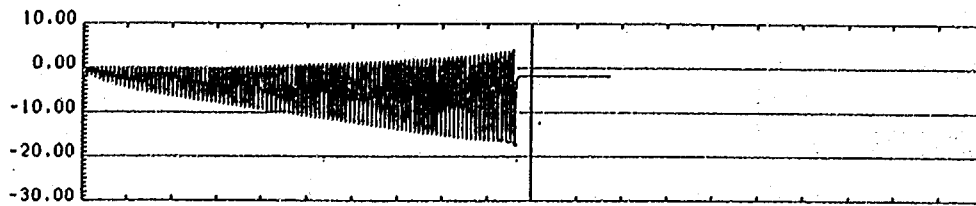
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.581
TIME : 31.100
MINIMUM : -0.578
TIME : 35.500
SCALE : 20



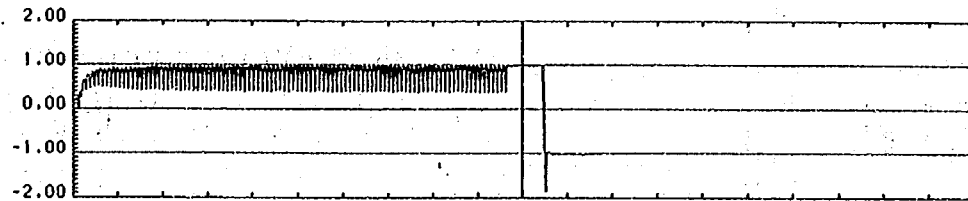
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.002
TIME : 338.000
MINIMUM : -0.023
TIME : 341.000
SCALE : 1



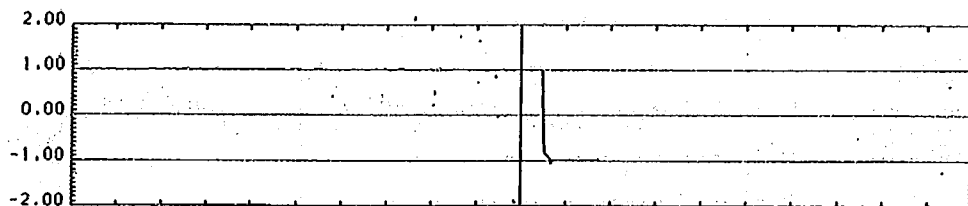
P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.018
TIME : 331.500
MINIMUM : -0.059
TIME : 341.500
SCALE : 10



SIGMA 3
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.017
TIME : 338.100
MINIMUM : -0.059
TIME : 341.100
SCALE : 10



TIME : (SEC)

参考データ

繰り返し三軸圧縮試験

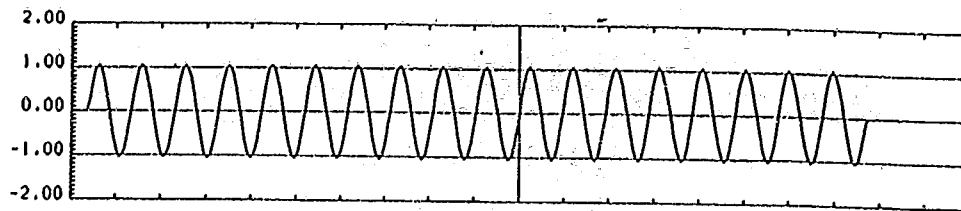
軸ひずみ，過剰間隙水圧比の時刻歴

超微粒子シリカ ゲル化時間 6 時間
材 令 7 日

実験ケース名		MS2072	MS2073	MS2071	
D r (%)		(50)	(50)	(50)	
B 値 (%)		96	98	95	
$\sigma_d / 2 \sigma_c'$		0.533	0.466	0.392	
N c	DA = 5%	11	94	220	
	DA = 2%	2	19	43	
	$\Delta u / \sigma_c'$	2	19	21	

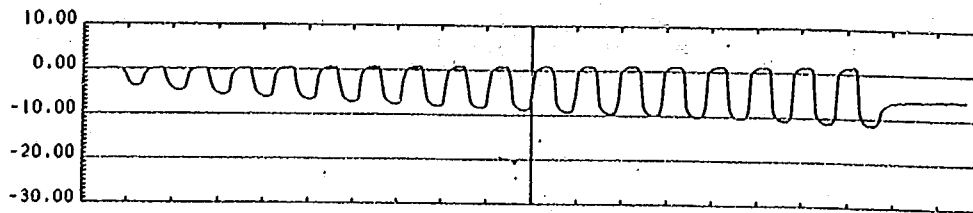
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 1.031
TIME : 10.000
MINIMUM : -1.031
TIME : 10.000
SCALE : 10



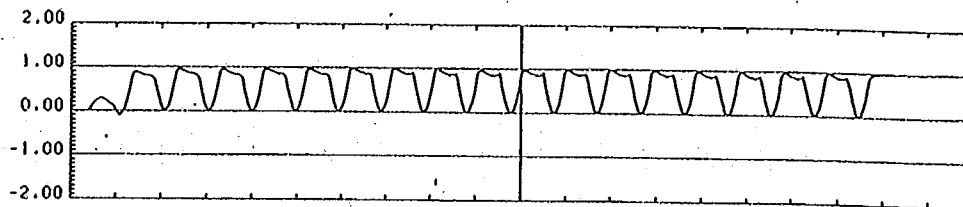
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 1.000
TIME : 10.000
MINIMUM : -1.000
TIME : 10.000
SCALE : 1

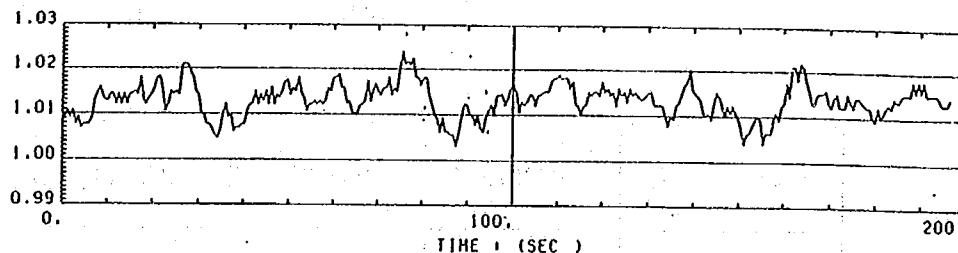


P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 1.000
TIME : 10.000
MINIMUM : -0.000
TIME : 10.000
SCALE : 10



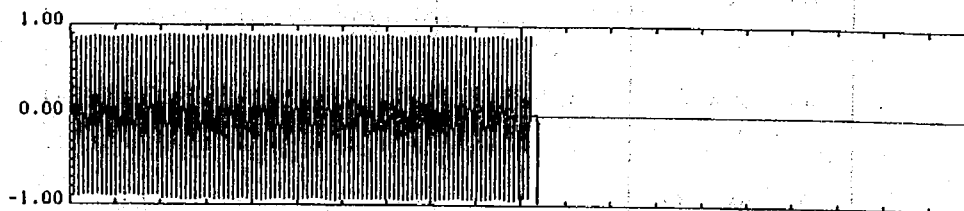
MAXIMUM : 1.026
TIME : 10.000
MINIMUM : 1.000
TIME : 10.000
SCALE : 1000



TIME : (SEC)

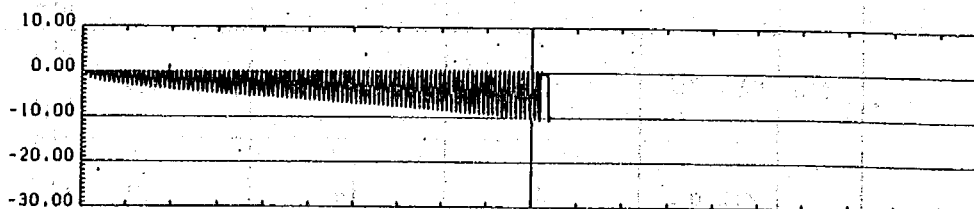
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.801
TIME : 10.000
MINIMUM : -0.801
TIME : 10.000
SCALE : 20



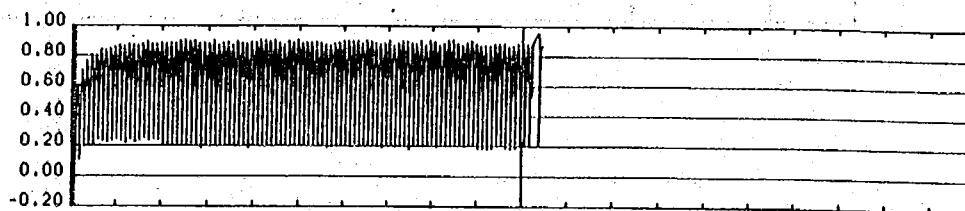
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.112
TIME : 10.000
MINIMUM : -0.112
TIME : 10.000
SCALE : 1

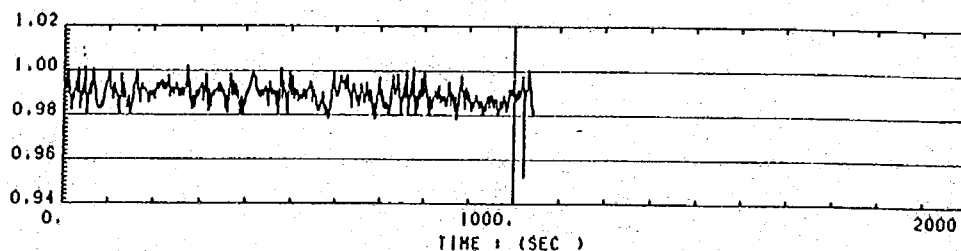


P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 0.801
TIME : 10.000
MINIMUM : -0.801
TIME : 10.000
SCALE : 33



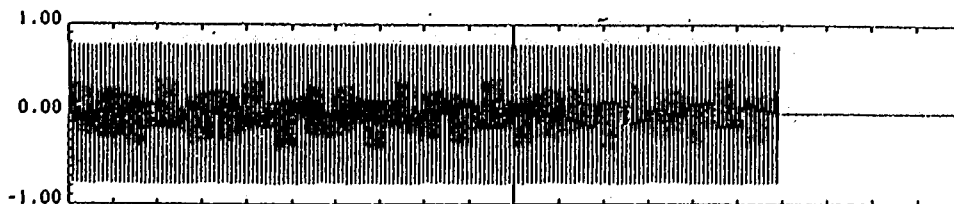
MAXIMUM : 1.000
TIME : 10.000
MINIMUM : 0.980
TIME : 10.000
SCALE : 500



TIME : (SEC)

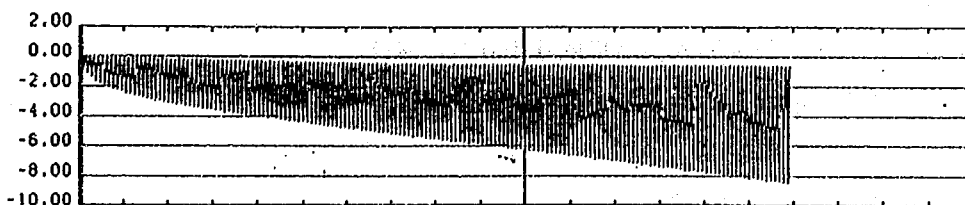
SIG1-SIG3

MAXIMUM : 0.391
TIME : 886.100
MINIMUM : -0.375
TIME : 161.500
SCALE : 20



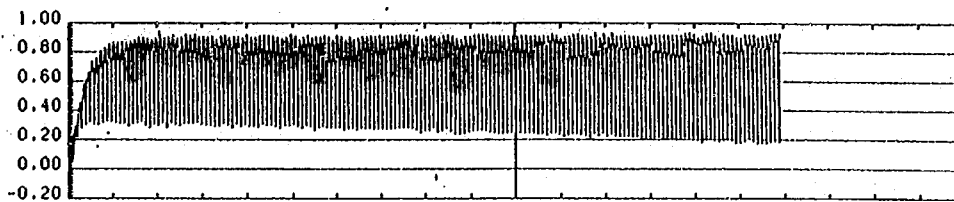
EPS. 1
(%)

MAXIMUM : 0.103
TIME : 7.150
MINIMUM : -1.548.000
TIME : 1548.000
SCALE : 3

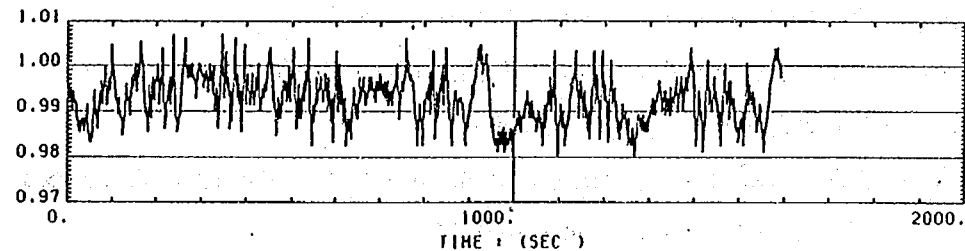


P.H.P.
(KGF/CH2)

MAXIMUM : 0.133
TIME : 1.131.100
MINIMUM : -0.004
TIME : 1.133
SCALE : 33



MAXIMUM : 1.002
TIME : 238.900
MINIMUM : 0.980
TIME : 997.800
SCALE : 1000



2、超微粒子セメントに関する発表論文一覧

- (1) 土木学会第48回学術講演会（平成5年9月，福岡）
 - ・有間, 古関, 鷺田, 古賀：液状化対策を目的とした超微粒子セメント懸濁液注入による浸透性について、p p692～pp693
- (2) 第29回土質工学研究発表会（平成6年6月，盛岡）
 - ・有間, 松尾, 古関：液状化対策を目的とした超微粒子セメント懸濁液注入による浸透性について（その2）、pp2121～pp2124
- (3) 土木学会第49回学術講演会（平成6年9月，福岡）
 - ・有間, 藤井, 新越, 松尾, 古関：超微粒子セメント注入材による土槽注入実験、pp1496～pp1497
- (4) 第30回土質工学研究発表会（平成7年6月，金沢）
 - ・佐野, 松尾, 古関：液状化対策を目的とした超微粒子セメント懸濁液注入による浸透性について（その3）、pp2093～pp2096
- (5) 土木学会第50回学術講演会（平成7年9月，福岡）
 - ・古関, 佐野, 松尾：液状化対策を目的とした注入工法（超微粒子セメント）の施工仕様について－振動台実験における結果と考察－、pp558～pp559
 - ・佐野, 松尾, 古関：液状化対策を目的とした超微粒子セメント懸濁液注入による浸透性について（その4）－浸透性、耐久性、強度発現、pp1454～pp1455
 - ・藤井, 新越, 下田, 松尾, 古関：超微粒子セメント注入材による土槽注入実験（その2）、pp1492～pp1493
- (6) IS-Tokyo '96 第2回地盤改良国際会議－注入と深層混合－（平成8年5月，東京）
 - ・S Fujii, O Matuo, J Koseki：Properties of microfine cement grout and grouting tests using the simulated soil、pp31～pp36
 - ・M Sano, M Simoda, O Matuo, J Koseki：Microfine cement grouting as a countermeasure against liquefaction、pp65～pp70
- (7) 第31回地盤工学研究発表会（平成8年7月，北見）
 - ・市川, 松尾, 古関：液状化対策を目的とした超微粒子セメント懸濁液注入による浸透性について（その5）、pp119～pp120
 - ・新越, 藤井, 佐野, 松尾：超微粒子セメント注入材の浸透限界地盤に関する研究、pp121～pp122
- (8) 土木学会第50回学術講演会（平成8年9月，名古屋）
 - ・藤井, 新越, 佐野, 市川：懸濁液型注入材の注入効率に関する基礎研究、pp556～pp557

Copyright© (1997) 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。