

土木研究所資料

超微粒子セメント懸濁液を用いた
注入工法による砂地盤での現場施工実験

平成9年11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

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。



土木研究所資料

第 3529 号 1997 年 11 月

超微粒子セメント懸濁液を用いた 注入工法による砂地盤での現場施工実験

動土質研究室室長	松 尾 修
研 究 員	島 津 多賀夫
交流研究員	佐 野 昌 明*
〃	市 川 公 彦**
〃	湊 上 憲 児***

要 旨

平成 8 年 3 月～8 月に茨城県筑波郡伊奈町小貝川河川敷において、超微粒子セメント懸濁液を用いた 2 工法（注入工法、高圧噴射攪拌工法）による砂地盤での現場実験を行った結果をとりまとめたものである。注入工法においては、超微粒子セメントの浸透特性、固結形状を確認し、効率的な施工を行うための注入量と固結範囲、施工仕様（施工ピッチ、強度）等について検討した。高圧噴射攪拌工法では、砂地盤への浸透性が高い超微粒子セメント注入材を利用した高圧噴射浸透工法（仮称）とセメント系固化材を用いた従来の高圧噴射攪拌工法との改良効果（固結形状、固結体造成効率）の比較検討を行った。

キーワード：砂地盤、現場実験、注入工法、高圧噴射攪拌工法、超微粒子セメント

* 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

1. まえがき	1
2. 実験概要	2
3. 事前調査	6
3.1 概 要	6
3.2 地盤の土質性状	8
3.3 現場透水試験	10
3.4 乱さない試料採取	11
3.5 室内一次元注入試験による浸透性の確認	11
3.5.1 試験方法	11
3.5.2 試験条件	12
3.5.3 試験結果	12
4. 現場注入実験	13
4.1 実験内容・方法	13
4.1.1 注入工法	13
(1) 主要検討項目	13
(2) 注入方法	13
(3) 実験条件	22
(4) 計測調査	24
4.1.2 高圧噴射浸透工法	26
(1) 主要検討項目	26
(2) 注入方法	26
(3) 実験条件	29
(4) 計測調査	31
4.2 実験結果	34
4.2.1 注入工法	34
(1) 注入量（実績）	34
(2) pq-tチャート	34
(3) 計測機器計測結果	50
1) 間隙水圧計	50
2) 地下水位	52
4.2.2 高圧噴射（浸透, 攪拌）工法	54

(1) 注入結果	54
(2) 計測機器計測結果	55
1) 挿入式傾斜計	55
2) パイプひずみ計	58
3) 挿入式土圧計	68
4) 間隙水圧計、地下水位	71
5. 事後調査	75
5.1 調査項目と方法	75
5.2 調査結果	75
5.2.1 地盤性状	75
5.2.2 固結形状	78
(1) 注 入 工 法	78
(2) 高圧噴射（浸透, 攪拌）工法	83
6. 注入工法の考察	87
6.1 注入量と固結形状（直径・体積）の関係	87
6.2 地盤特性と固結形状の関係	89
6.3 地盤性状と水平方向固結長の関係	90
6.4 注入孔の配置（施工ピッチ, ステップ長の設定）	91
6.4.1 施工ピッチ（水平方向）	91
6.4.2 ステップ長（鉛直方向）	92
6.5 固結体のカルシウム分析	93
6.6 固結強度の品質確認	94
7. 高圧噴射攪拌工法の考察	96
7.1 固結体形状	96
7.2 固結体特性	97
8. 全体のまとめ	99
9. 今後の課題	101
謝 辞	102
巻末資料（固結状況写真）	107

1. まえがき

既設の地中構造物や基礎構造物直下あるいは側方の緩い砂地盤を対象とした新たな液状化対策として、地盤の隙間に注入材を圧入し固結させる注入工法の適用が考えられている。注入を行う場合の条件として、施工中に既設の地中構造物等に変位が生じないように地盤の隙間に浸透させること、および構造物直下の地盤を対象とするため、1つの注入孔からなるべく広範囲に浸透させることが必要となってくる。また、液状化対策としては強度の長期耐久性も必須条件である。しかし、液状化が想定される微細砂地盤に対して、これらの目的を完全に満足させる注入工法は極めて少なく、その1つと考えられる超微粒子セメント懸濁液注入工法についても液状化対策としての適用性の判断基準および注入仕様は明確になっていないのが実状である。

本研究においては、恒久性・浸透性に優れた注入材である超微粒子セメントを用いて、細砂地盤を想定した室内条件による一次元注入実験（固結長、強度）^{1)~5)}、土槽注入実験（固結範囲、固結形状）⁶⁾⁷⁾を行い、広範囲に効率よく注入するための注入条件として水セメント比と分散剤の効果、注入材の浸透特性に及ぼす地盤特性（粒径、密度、透水係数）の影響及び固結体の長期耐久性について検討を行ってきた。その成果は、土木研究所資料第3490号『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』⁸⁾にとりまとめている。

本資料は、上記に引き続き、超微粒子セメント注入材を用いた2工法（注入工法・高圧噴射攪拌工法）による実地盤での試験施工を行った結果をとりまとめたものである。

注入工法においては、これまでの室内実験での研究成果を踏まえ、超微粒子セメント懸濁液注入による実地盤での三次元的浸透特性・固結形状を確認し、効率的な施工を行うための注入量と改良範囲、改良強度、注入孔ピッチの設定等について検討した。

高圧噴射攪拌工法では、砂地盤への浸透性が高い超微粒子セメント注入材を利用した高圧噴射攪拌工法（以下、高圧噴射浸透工法）とセメント系固化材を用いた従来の高圧噴射攪拌工法（以下、従来工法）との改良効果（固結形状、固結体造成効率）の比較検討を行った。

なお、本研究は建設省土木研究所官民共同研究『液状化対策工法の開発に関する共同研究』（平成4～8年度）の一環として実施したものである。

2. 実験概要

本実験は、平成8年3月～8月に茨城県筑波郡伊奈町小貝川河川敷において、超微粒子セメント注入材を用いた2工法（注入工法、高圧噴射浸透工法）による実地盤での注入実験を実施した。

注入工法においては、実地盤における三次元的浸透特性・固結形状を確認し、効率的な施工を行うための注入量と改良範囲、改良強度、注入孔ピッチの設定等について検討した。

高圧噴射浸透工法は、1回の施工でより大きな改良柱体を形成し施工効率を高めることを目的として、超微粒子セメント注入材の浸透性を利用し、従来の高圧噴射攪拌工法（高圧セメントスラリー噴射：以下、従来工法）の地盤攪拌混合とその外周地盤への懸濁粒子の浸透という2つの作用により広い改良範囲を得ようとするものであり、本実験では従来工法との改良効果（浸透特性・固結体特性）の比較を行った。

図-2.1に実験場所を、表-2.1に本実験の作業工程表を、図-2.2に施工フローを示す。

注入実験に先立ち原地盤の性状を把握するため事前調査を行った。実験での注入範囲であるGL-2.0～-5.0m (YP+4.72～1.72)のN値は10以下で、緩い砂質土から構成されており、現場透水試験結果より復水法での透水係数も 10^{-3} cm/secオーダーであることから超微粒子セメント（比重3.0, 平均粒径 $4\mu\text{m}$, $G_{ss}=8\mu\text{m}$, プレーン比表面積 $9000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上）の注入可能地盤と判断した。また、事前サンプリングにより得られた試料砂を用いて室内一次元注入試験を行い、注入材として超微粒子セメントを、分散剤としてナフタレン系（比重1.2）を用いた材料配合をセメント比 $W/C=1000\%$ 、分散剤混入率 $D/C=10\%$ に設定した。

準備工として施工ヤードの整地、計測器の設置、機械搬入組立を行い、超微粒子セメント注入材を用いた2工法（注入工法、高圧噴射浸透工法）による注入実験を実施した。

注入1ヶ月後、事後調査として開削を行い固結形状確認、サンプリング、地盤性状確認を行った。固結形状は、深度方向10cmごとに固結体外側部（8方向）から計測し、平断面に基づき固結体積を算出した。サンプリングは、強度試験用にコアドリルを用いて固結体の鉛直・水平方向のコアを採取した。なお、コア試料はカルシウム選択性電極法¹⁰⁾により固結体内のカルシウム分析用としても用いた。地盤構成はスケッチを行い、層ごとに試料砂を採取しふるい分け試験を行った。

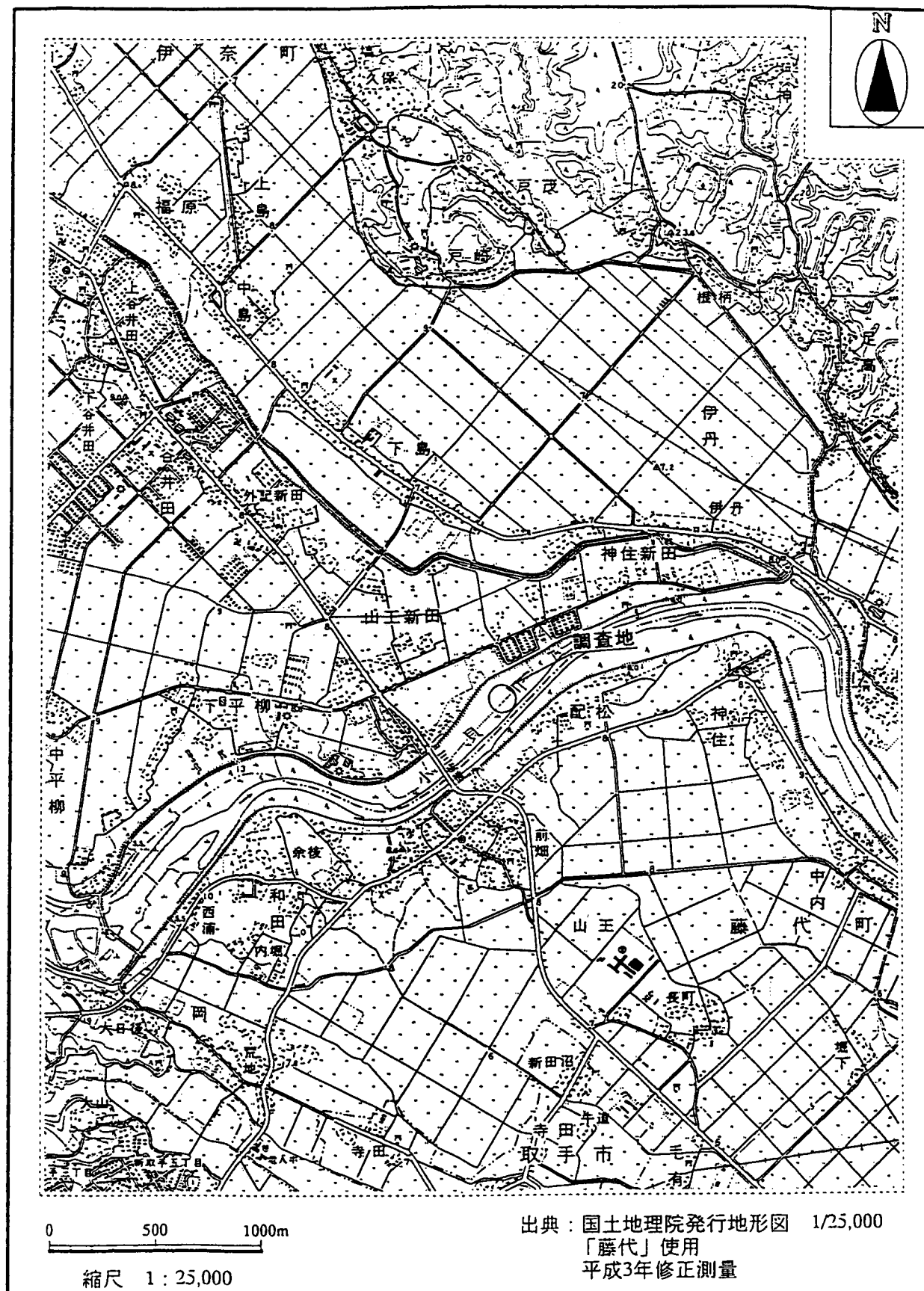


図-2.1 実験場所

表-2.1 現場施工実験 作業工程表

	3月 月日 25 31	4月 10 20 30	5月 10 20 31	6月 10 20 30	7月 10 20 31	8月 10 20 31	9月
事前土質調査	3/26						
土質試験	3/30	—					
室内注入試験	3/30	—					
工事場所の決定	4/3	-					
現場準備工事	4/8	—					
計測器設置・養生・計測 機械搬入・組立 削孔、マシット建込み	10 17 22	— — —	— — —				
施工 注水, 試験注入 注入工法 段取替 高圧噴射	5/9 20 27 28		— — — —				
機 械 解 体 ・ 搬 出	30			-			
シートパイル 打設・引 抜 き	6/21				—		—
ウエルポイント設置・揚水・撤去	6/26				—	—	—
開 削 ・ 事 後 調 査	7/3				—	—	—
埋戻し・復旧工事	8/29						—

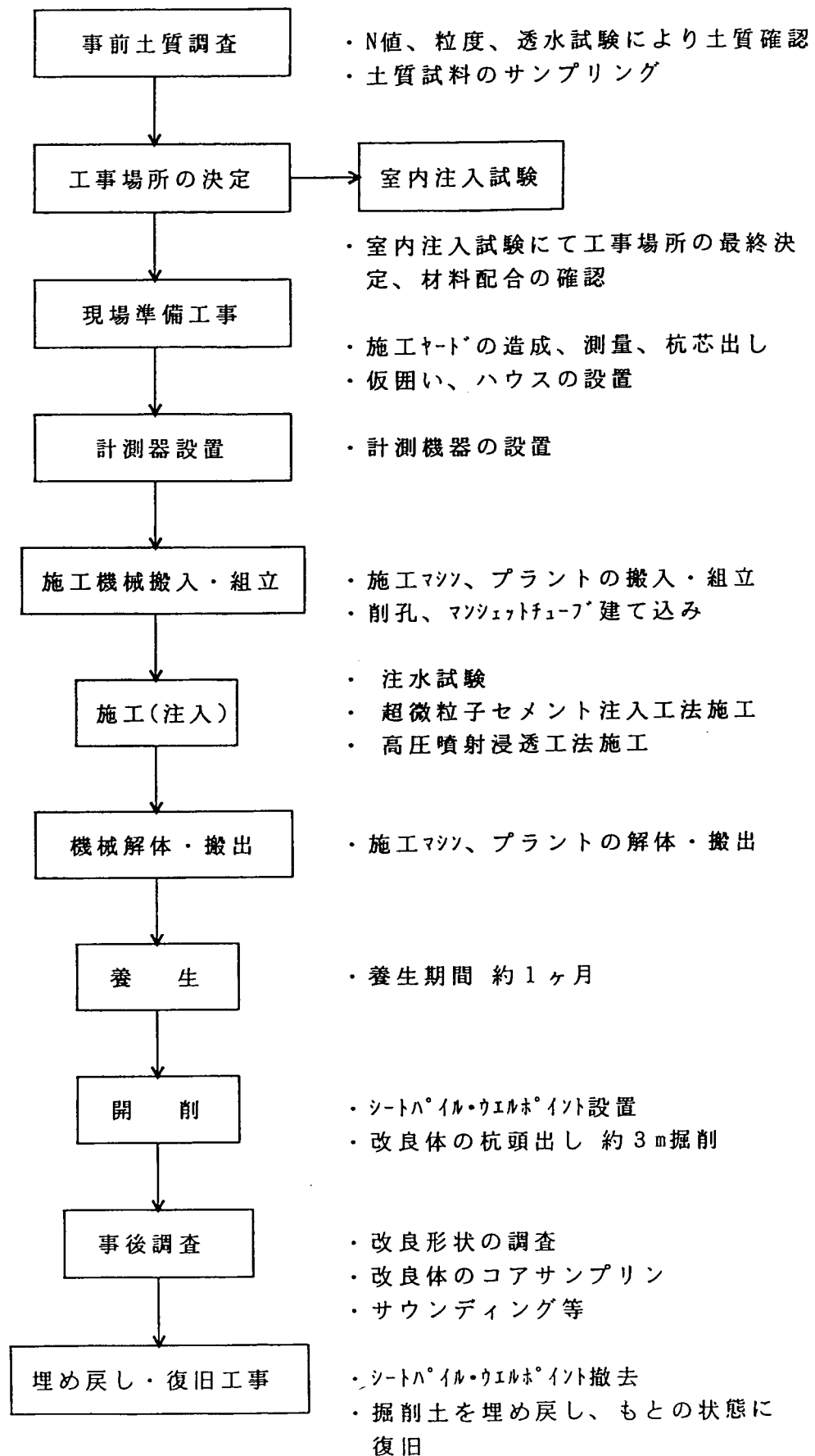


図-2.2 施工フロー

3. 事前調査

試験項目を表-3.1に、土質調査位置図を図-3.1にそれぞれ示す。

3.1 概 要

試験施工に先立ち、試験現場の土質状況を確認するため、標準貫入試験併用の機械ボーリング、現場透水試験、乱さない試料採取および室内土質試験を実施した。

表-3.1 試験項目

	調 査 項 目		調 査 場 所		備 考
			事前-1	事前-2	
1	機械式ボーリング (m)	φ 116mm砂質土	4.0	3.8	ローリー式ハンドフィード式 機械ボーリング
		φ 86mm砂質土	6.0	5.7	
		φ 66mm粘性土	—	0.5	
		合 計(m)	10.0	10.0	
2	標 準 貫 入 試 験 (回)		10	10	JIS A 1219(トンビ法, 1回/m)
3	現 場 透 水 試 験 (点)		1	1	JGS 1314 チューブ法(GL-3.5m/点)
4	乱さない試料採取(試料)		6	5	JGS 1223 トリプルチューブサンプラー
5	室 内 土 質 試 験 (試料)	土粒子の密度試験	6	5	JIS A 1202
		土の含水比試験	6	5	JIS A 1203
		土の粒度試験	6	5	JIS A 1204
		土の湿潤密度試験	2	2	JSF T 191

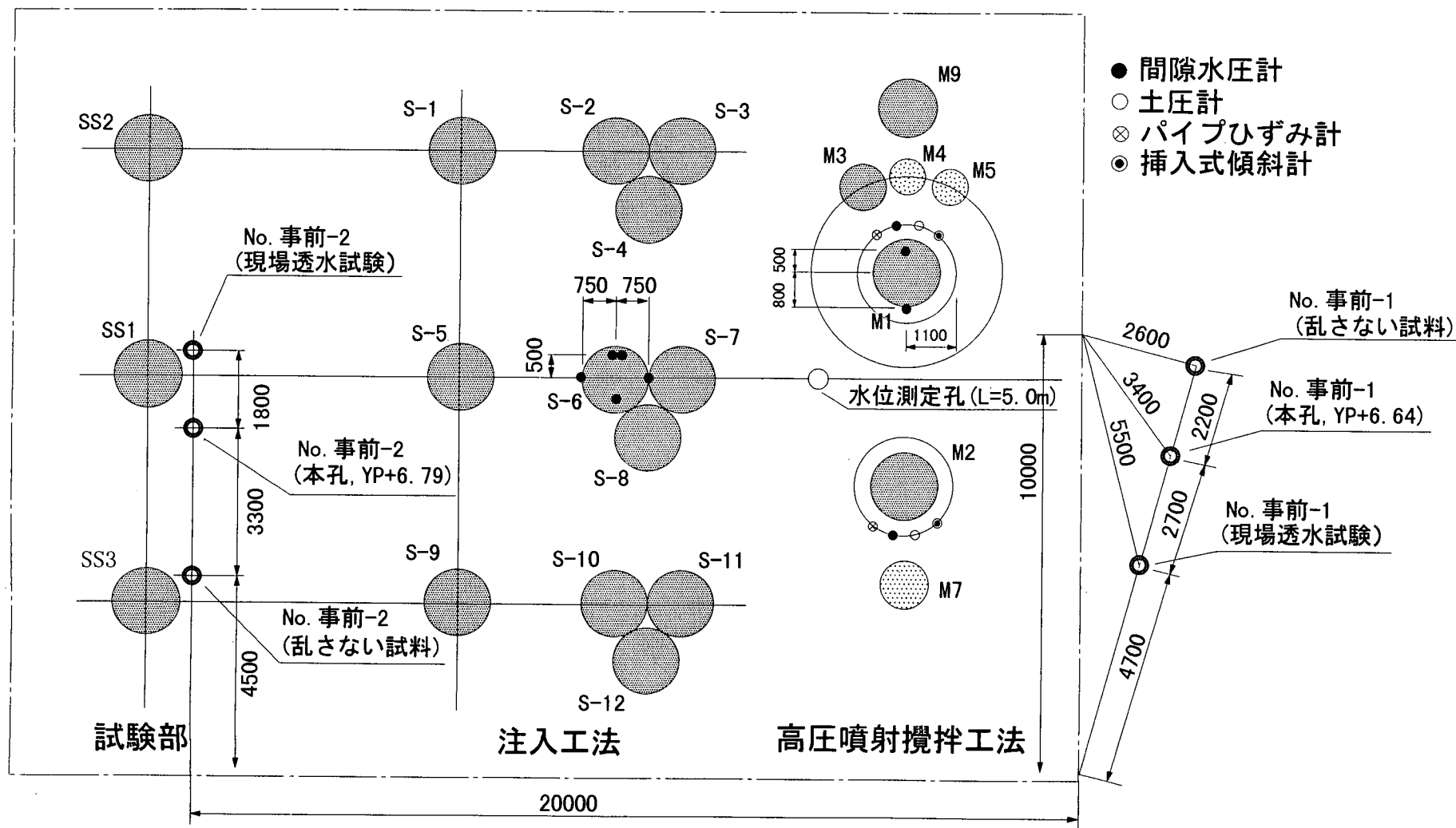


図-3.1 土質調査位置図

3.2 地盤の土質性状

調査ボーリングから得られた想定土層断面図を図-3.3に示す。サンプリング試料の室内土質結果を表-3.2に、粒度分布を図-3.4、図-3.5に示す。なお、試験工事においては、概ねGL-2.0m~-5.0mの範囲で地盤改良を行った。

表-3.2 室内土質結果一覧表

試料番号		事前-1 (高圧噴射浸透工法側)						事前-2 (注入工法側)				
深度 (m)		1.15	2.15	3.15 (U)	3.15 (L)	4.15	5.15	1.70	2.25	3.15	4.15	5.15
一般	土粒子の比重 Gs	2.719	2.732	2.729	2.673	2.704	2.682	2.710	2.742	2.753	2.745	2.764
	自然含水比 Ws %	21.84	25.17	29.75	32.46	23.67	29.29	26.41	21.70	33.30	28.61	27.89
粒度	礫分 2~75mm %	1.0	0.0	0.2	0.0	1.5	0.0	1.7	0.5	0.6	0.1	0.0
	砂分 75μm~2mm %	86.4	91.3	92.2	67.1	87.1	92.9	92.1	96.0	81.4	94.2	92.3
	シルト分 5~75μm %	11.2	6.7	6.2	21.8	9.6	5.2	4.5	2.5	15.0	4.4	6.2
	粘土分 5μm未満 %	1.4	2.0	1.4	11.1	1.8	1.9	1.7	1.0	3.0	1.3	1.5
分類	分類名	シルト混砂	シルト混砂	シルト混砂	シルト質砂	シルト混砂	シルト混砂	シルト混砂	砂	シルト質砂	シルト混砂	シルト混砂
	分類記号	S-M	S-M	S-M	SM	S-M	S-M	S-M	SP	SM	S-M	S-M

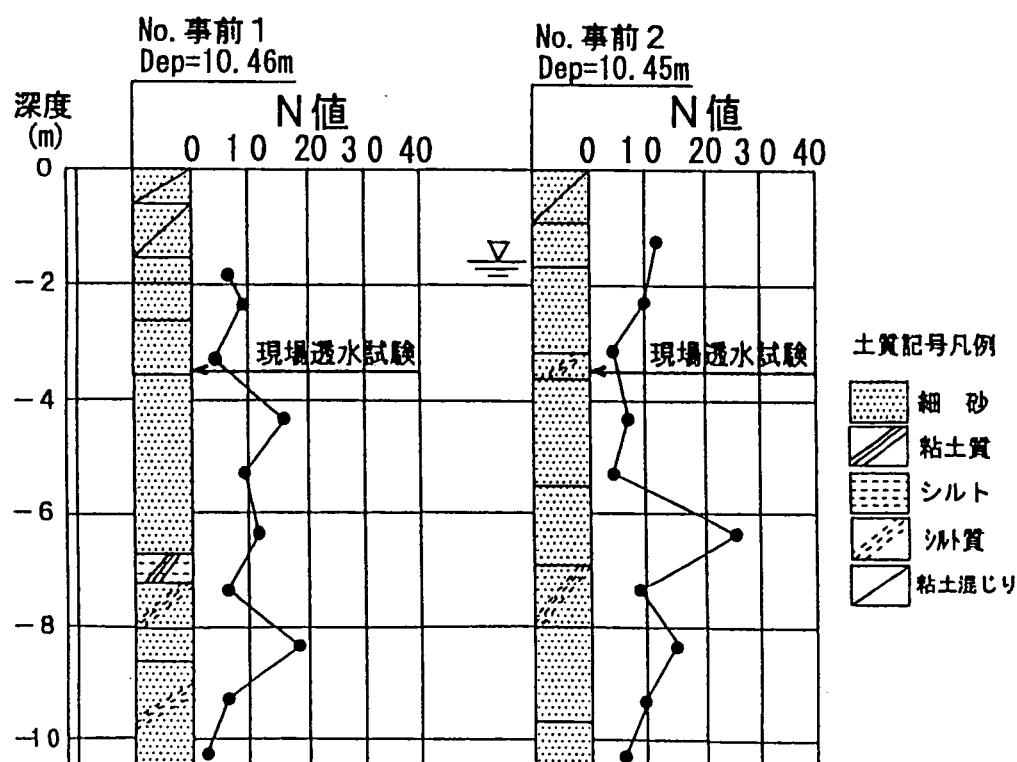


図-3.3 想定土層断面図

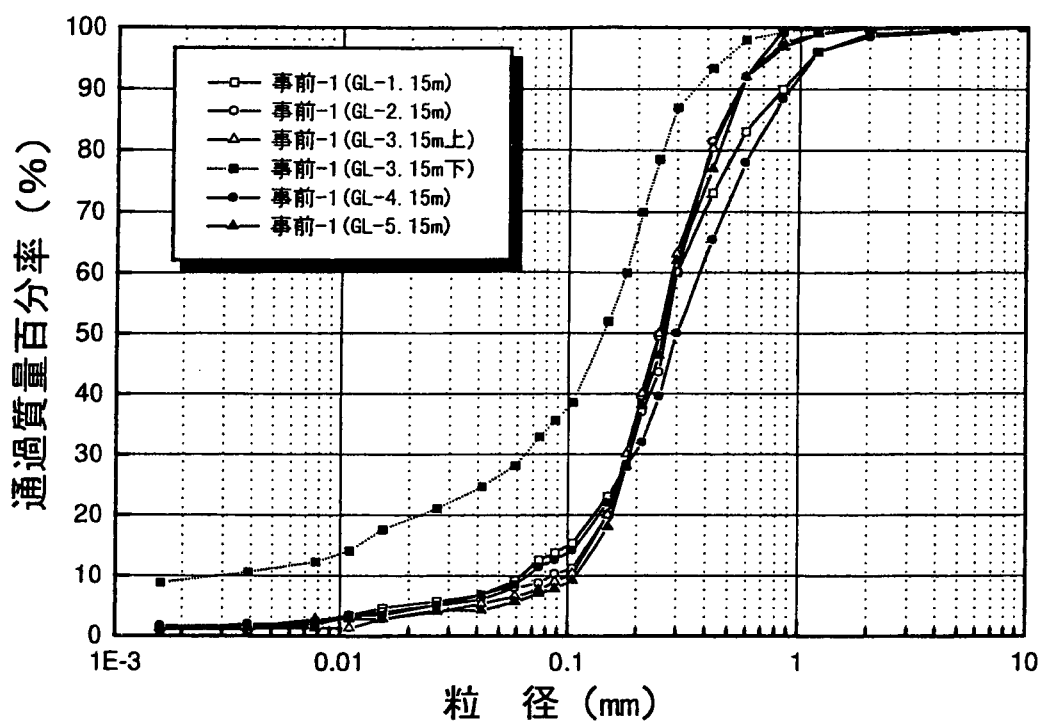


図-3.4 事前-1 (高压喷射浸透工法側) 粒度分布

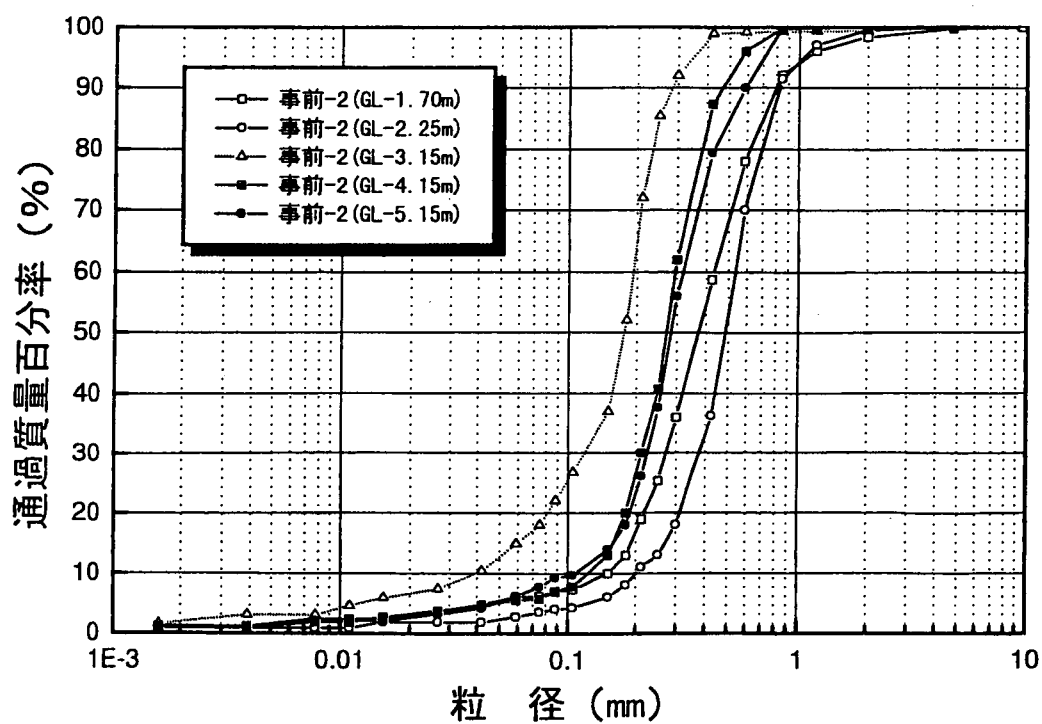


図-3.5 事前-2 (注入工法側) 粒度分布

表-3.2より、土粒子の密度は2.67～2.76g/cm³の間ではほぼ平均的な値を示しており、有機物、金属分の混入はないと判断される。

自然含水比は21.7～33.3%の間に分布しており、極端に突出した値を持つものは認められない。

事前-1（高圧噴射浸透工法側）の粒度分布は、細粒分が7～12%（グラウビリティ比 $GR^0 = D_{15}/G_{85} = 13 \sim 17$ ）のほぼ均一なシルト混じり砂である。GL-3.15mに細粒分が32.9%（シルト分21.8%）と高いシルト質砂（ $GR=1.6 < 11$ 注入不可⁹⁾）が一部挟在している。平均粒径 D_{50} は、GL-3.15m付近を除いて、0.25～0.3mmとほぼ均一である。

事前-2（注入工法側）の粒度分布は、細粒分が3.5～7.7%（ $GR = D_{15}/G_{85} = 19 \sim 33$ ）のほぼ均一なシルト混じり砂である。GL-3.15m付近に細粒分が18.0%（シルト分15.0%）のシルト質砂（ $GR=7.5 < 11$ 注入不可⁹⁾）が一部挟在している。平均粒径 D_{50} は、GL-3.15m付近を除くと、0.27～0.5mmであるが、深度が浅いほどやや粒度が粗くなる傾向がある。

図-3.3より、N値は概ね10前後であり、相対密度は「緩い」～「中くらい」である。

以上の結果より、事前調査の段階では、当該地盤は一部深度-3.0m付近に細粒分含有率が20～30%とやや大きいシルト質砂の層が存在するが、それ以外は細粒分含有率が10%ないしはそれより小さい、緩く締ったシルト混じり砂層であると推定した。

3.3 現場透水試験

No. 事前-1、2の調査ボーリング孔で現場透水試験を行った。表-3.3に試験結果を示す。No. 事前-1、2とも復水法での透水係数は 1×10^{-3} cm/sec以上であり、既往の室内試験の結果⁵⁾から見ても、超微粒子セメント懸濁液の注入可能地盤であると判断された。

表-3.3 現場透水試験結果

ボーリング No.	測定深度 (GL-m)	安定水位 (GL-m)	透水係数 (cm/sec)	
			注水法	復水法
事前-1	3.50	1.43	2.09×10^{-3}	4.32×10^{-3}
事前-2	3.50	1.28	1.42×10^{-2}	8.75×10^{-3}

3.4 乱さない試料採取

湿潤密度測定のため、トリプルチューブサンプラーを使用して乱さない試料（JSF T 191）を採取した。表-3.4に試験結果を示す。測定した湿潤密度を用いて得られた注入対象地盤の間隙率 n (%) は43.1~52.2%である。前述の事前調査より、深度GL-3.0m付近には超微粒子セメント注入材の注入不可能なシルト質砂の層が存在しており、測定結果からもボーリングNo.4 (3.00~3.80m)の間隙率が $n=52.2\%$ と大きいことから、当該地盤の間隙率をNo.1~3の平均値である $n=45\%$ と推定した。

表-3.4 試験結果

ボーリング 測定場所	No	測定深度 (GL-m)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	土粒子の比重 G_s	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	間隙比 e	間隙率 n (%)
事前-1	1	2.00~3.00	1.883	2.732	25.17	1.504	0.816	44.9
	2	3.00~4.00	1.866	2.729	29.75	1.438	0.898	47.3
事前-2	3	2.00~3.00	1.900	2.742	21.70	1.561	0.757	43.1
	4	3.00~3.80	1.756	2.753	33.30	1.317	1.090	52.2

3.5 室内一次元注入試験による浸透性の確認

3.2で採取した原地盤砂を用いて事前に室内一次元注入試験を行い、超微粒子セメント懸濁液の浸透能を予備的に調べた。

3.5.1 試験方法

アクリルモールド ($\phi 5\text{cm} \times 50\text{cm}$) に、乾燥した原地盤砂を水平打撃を加えながら所定の相対密度となるよう締め固め、水道水により飽和させて注入用供試体とした。注入装置を図-3.6に示す。

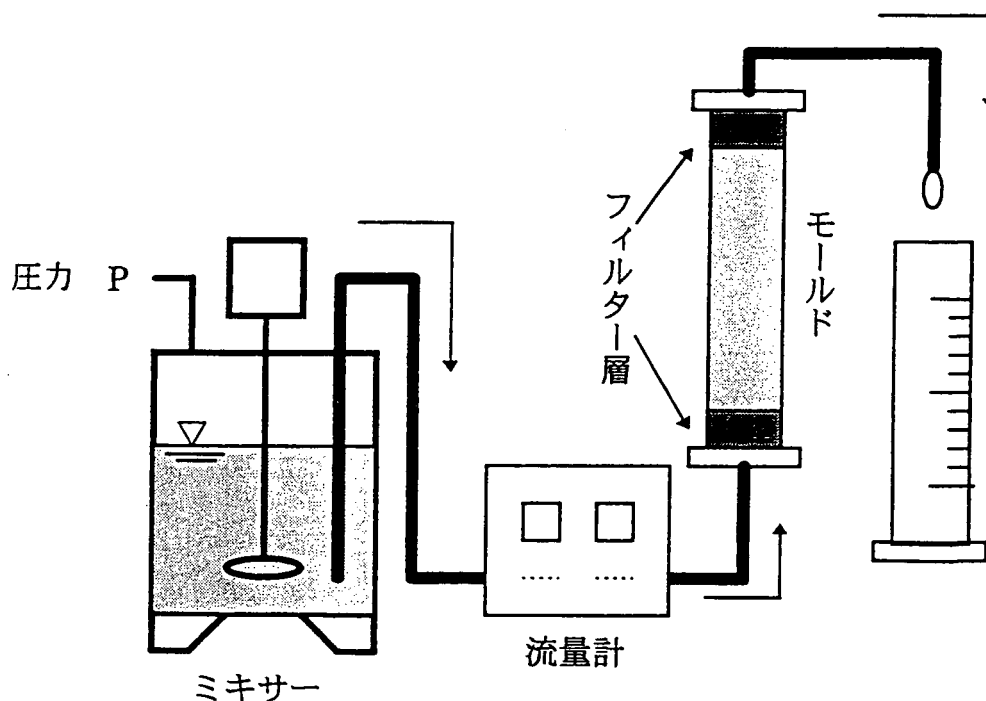


図-3.6 注入装置

3.5.2 試験条件

材料配合、注入圧力等の試験条件を表-3.5に示す。参考のため、珪砂6, 7号で行った注入試験結果を示す。いずれものケースにおいても、総注入量は間隙量の1.3倍とした。

表-3.5 試験条件

試験 ケース	砂の種類	最小乾燥密度 (g/cm ³)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	間隙率 (%)	相対密度 Dr (%)	注入圧力 (kgf/cm ²)	水セメント比 W/C (%)	分散剤混入率 D/C (%) ナフテン系
参考 1 *	珪砂 6 号	1.400	1.725	39.4	65	0.15	500	10
参考 2 *	珪砂 7 号	1.256	1.613	44.4	65	0.30	1,000	
参考 3 *	珪砂 7 号	1.256	1.613	42.2	80	0.40	1,000	
4	GL-2~3m	1.242	1.589	47.7	60	0.30	750	
5	GL-2~3m			47.7	60	0.30	1,000	
6	GL-3~4m	1.286	1.636	45.9	60	0.30	750	
7	GL-3~4m			45.9	60	0.30	1,000	

* 平成7年度の室内試験結果¹⁾

3.5.3 試験結果

各試験ケースの注入速度と累積注入量の関係を図-3.7に示す。

試験ケース4~7ではすべて50cmモデルドを通過した。また、図-3.7より、注入速度の減少も珪砂6, 7号を用いた注入試験結果とほぼ同等の傾向にあることから、超微粒子セメント懸濁液が原地盤砂に十分浸透可能であると判断した。なお、水セメント比(W/C)による注入速度の減少に有意な差が見られないので、平成7年度に実施した珪砂6, 7号による一次元注入実験で最も固結長を伸ばすことができた水セメント比W/C=1000%、分散剤混入率D/C=10%を配合条件に設定した。

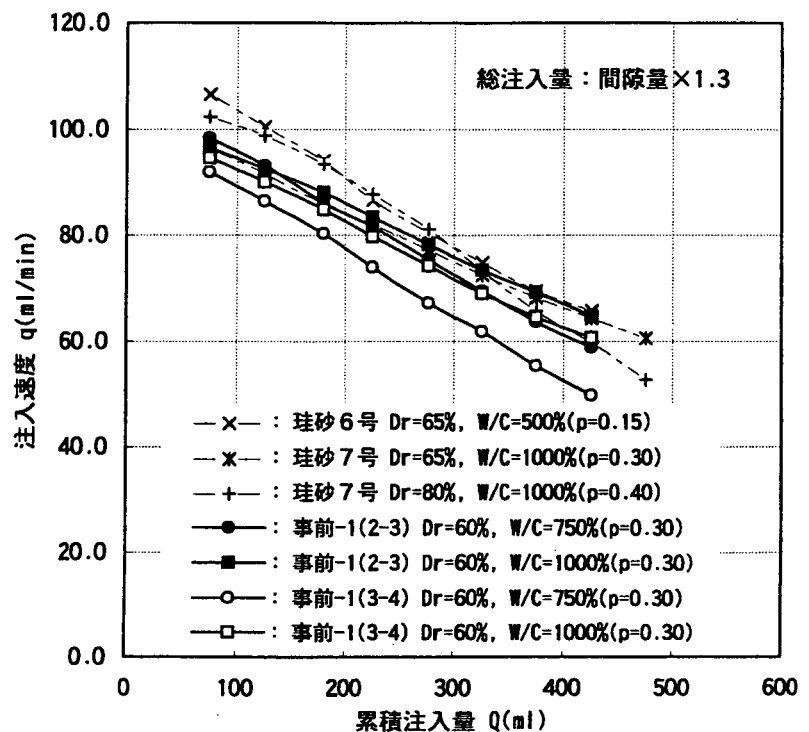


図-3.7 各試験ケースの注入速度と累積注入量の関係

4. 現場試験施工

超微粒子セメント注入材を用いた2工法（注入工法、高圧噴射浸透工法）による実地盤での現場試験施工を行った。注入工法で主眼としたのは、実地盤における三次元的浸透特性・固結形状を確認することであり、効率的な施工を行うための注入量と改良範囲、改良強度、注入孔ピッチの設定等について検討した。

高圧噴射浸透工法では、1回の施工でより大きな改良柱体を形成し施工効率を高めることを目的として、超微粒子セメント注入材の浸透性を利用し、従来の高圧噴射攪拌工法（高圧セメントスラリー噴射：以下、従来工法）の地盤攪拌混合とその外周地盤への懸濁粒子の浸透という2つの作用により広い改良範囲を得ようとするものであり、本実験では従来工法との改良効果（浸透特性・固結体特性）の比較を行った。

4.1 実験内容・方法

4.1.1 注入工法

(1) 主要検討項目

本工法では、以下の項目に着眼した。

① 改良体の出来形確認

注入量、ステップ長による固結形状の違いを観察するとともに、水平および鉛直方向における固結体一体化の様子についても調べる。

② 浸透特性の確認

間隙水圧計を設置し、地上で測定される注入チャート($p, q-t$)と地盤内間隙水圧の変化の関係を調べる。

③ 出来形管理方法の確認

比抵抗トモグラフィーを用いて、注入により形成される固結体の出来形管理が可能であるか検討する。

(2) 注入方法

① 二重管ダブルパッカー注入工法の概要

超微粒子セメントを用いた注入工法による現場施工にあたり、ゲルタイムの長い注入材を小さな注入速度で注入することにより均質な改良を可能とする二重管ダブルパッカー方式を選定した。

当工法は、所定の深度に注入外管を建て込み、地盤との均一化を図り注入材の逸脱を防ぐために外管の周囲にシールグラウト（セメント・ベントナイト：以後 C B 注入）を充填し、注入外管の中に先端部分にダブルパッカーを装置した注入内管をセットして注入改良を行うものである。特徴としては、ダブルパッカーの使用により任意の位置での注入、および異種薬液の繰返し注入が可能である。通常は、一次注入として経済的なセメント系注入材（C B 注入）で空洞充填による地盤の均一化を図った後に、溶液系や懸濁系の2次注入材を土粒子間隙に浸透させ固結化を図る方法である。注入方法としては、上昇式（ステップアップ）と下降式（ステップダウン）があるが、改良効果への影響、地盤隆起等の影響から上昇式の方法が多く採用されている。

施工方法は、削孔と注入の作業が完全に分離されており、施工管理も容易である。また、他工法に比べてゲルタイムの長い注入材による浸透注入の信頼性が高く、地盤隆起等のトラブルが非常に少ないことから、重要地下構造物に近接した箇所への適用例が多い工法である。

② 施工方法

二重管ダブルパッカ方式の施工手順を図-4.1に示す。

〈 削孔工 〉

1. ボーリングマシンによる削孔機にて、ケーシングを所定の深度まで削孔する。
2. ケーシング内にシールグラウト(セメントベントナイト(CB)液)を充填する。
3. 所定のステップに継いだマンシエットチューブと非注入部の塩ビパイプをケーシング内に挿入し、建て込み作業を行う。
4. ケーシングパイプを引き抜く。

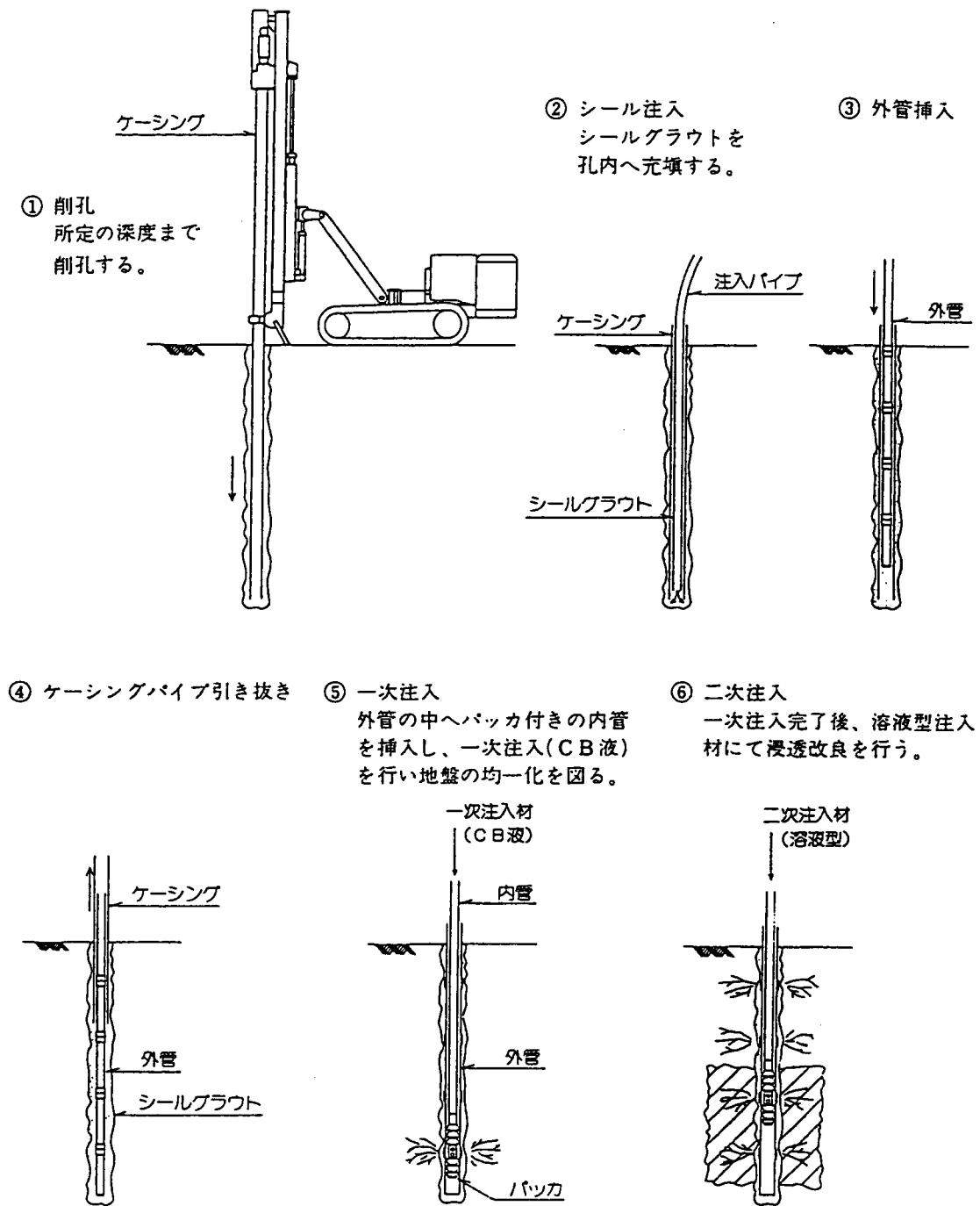
〈 注入工 〉

1. マンシエットチューブ(注入外管)内にダブルパッカーを装着した注入ロッド(注入内管)を建て込み、ステップアップ方式(1ステップ=33.3~100cm)にて注入を行う。
2. 注入順序は、一次注入(粗詰注入)としてCB(セメントベントナイト)液を注入し、硬化時間(24時間)経過後、二次注入(浸透注入)として超微粒子セメント懸濁液を注入する。
3. 注入は、周辺地盤に変状が生じないよう一定注入速度(10ℓ/分)で行う。
4. 注入要領を表-4.1に示す。

表-4.1 注入要領

	CB 液	超微粒子セメント液
注 入 方 式	1ショット	1ショット
注 入 速 度	10 ℓ/分	10 ℓ/分
注 入 圧 力*	3~4kgf/cm ²	3~4kgf/cm ²

*注入圧は、事前の注水試験により決定する。



※一次注入工の前に水でクラッキングを行う場合がある。

図-4.1 二重管ダブルパッカ方式の施工手順¹²⁾

③ 使用機械

削孔に使用する機械の仕様を表-4.2に、1次注入(CB注入)用を表-4.3に示す。また、2次注入(超微粒子セメント注入)に使用する機械の仕様を表-4.4に示す。

表-4.2 削孔機械仕様

機 械 名	仕 様				台数
	機 種	動力・自重	能 力	寸 法 m	
ボーリング マシン	MKD 106	122Ps 9,000kg	打撃数 1,900~2,300bpm 打撃力 50kg 回転数 Max90rpm	高 2.54 巾 2.38 長 4.45	1
水循環ポンプ (送水)	MG-10	7.5kw 210kg	105ℓ/分 30kg/cm ²	高 1.00 巾 0.54 長 0.92	1
スリーブ ミキサー	MS-400 ×2	7.5kw 480kg	420×2槽	高 1.48 巾 1.20 長 1.80	1
スリーブ 循環ポンプ	MG-10	7.5kw 210kg	105ℓ/分 30kg/cm ²	高 1.00 巾 0.54 長 0.92	1
発電機	DCA-150	183ps 2,760kg	1,800rpm	高 1.50 巾 1.20 長 3.35	1
水タンク 泥水タンク ノッチタンク等 タンク類 水中ポンプ サンドポンプ ポンプ類					

表-4.3 1次注入(CB注入) 機械仕様

機 械 名	仕 様				台数
	機 種	動力・自重	能 力	寸 法 m	
注入ポンプ	HFV-4HN	18.0kw 250kg	25 ㍓ /分 200kg/cm ²	高 0.60 巾 0.45 長 4.45	1
CBミキサー (送水)	MS-600B	7.5kw 480kg	600 ㍓ ×2槽 (可変量)	高 1.48 巾 1.20 長 1.80	1
CB循環 ポンプ		7.5kw 210kg	105 ㍓ /分 30kg/cm ²	高 1.00 巾 0.54 長 0.92	1
電磁流量計	DR-120	0.4kw 130kg	吐出量0~60t/分 圧力0~60kg/cm ²	高 0.90 巾 0.50 長 0.75	2
ホースプラー	HP-3	0.5kw 150kg	0.4ton	高 0.55 巾 0.30 長 0.30	2
発電機	DCA-150	183ps 2,760kg	1,800rpm	高 1.50 巾 1.20 長 3.35	1
水タンク 泥水タンク ノッチタンク等 タンク類					
水中ポンプ サンドポンプ ポンプ類					

表-4.4 2次注入(超微粒子セメント注入)機械仕様

機 械 名	仕 様				台数
	機 種	動力・自重	能 力	寸 法 m	
注入ポンプ	HFV-4HN	18.0kw 250kg	25 l /分 200kg/cm ²	高 0.60 巾 0.45 長 4.45	1
C B ミキサー (送水)	MS-600B	7.5kw 480kg	600 l × 2槽 (可変量)	高 1.48 巾 1.20 長 1.80	1
C B 循環 ポンプ		7.5kw 210kg	105 l /分 30kg/cm ²	高 1.00 巾 0.54 長 0.92	1
電磁流量計	DR-120	0.4kw 130kg	吐出量0~60l/分 圧力0~60kg/cm ²	高 0.90 巾 0.50 長 0.75	2
ホースプラー	HP-3	0.5kw 150kg	0.4ton	高 0.55 巾 0.30 長 0.30	2
パッカー 加圧装置	HT-20B	30kg	140kg/cm ²		2
発電機	DCA-150	183ps 2,760kg	1,800rpm	高 1.50 巾 1.20 長 3.35	1
水タンク 泥水タンク ノッチタンク等 タンク類 水中ポンプ サンドポンプ ポンプ類					

④ 機械配置図

削孔機械の配置図を図-4.2に、一次注入（CB注入）機械の配置図を図-4.3に示す。また、二次注入（超微粒子セメント注入）機械の配置図を図-4.4に示す。

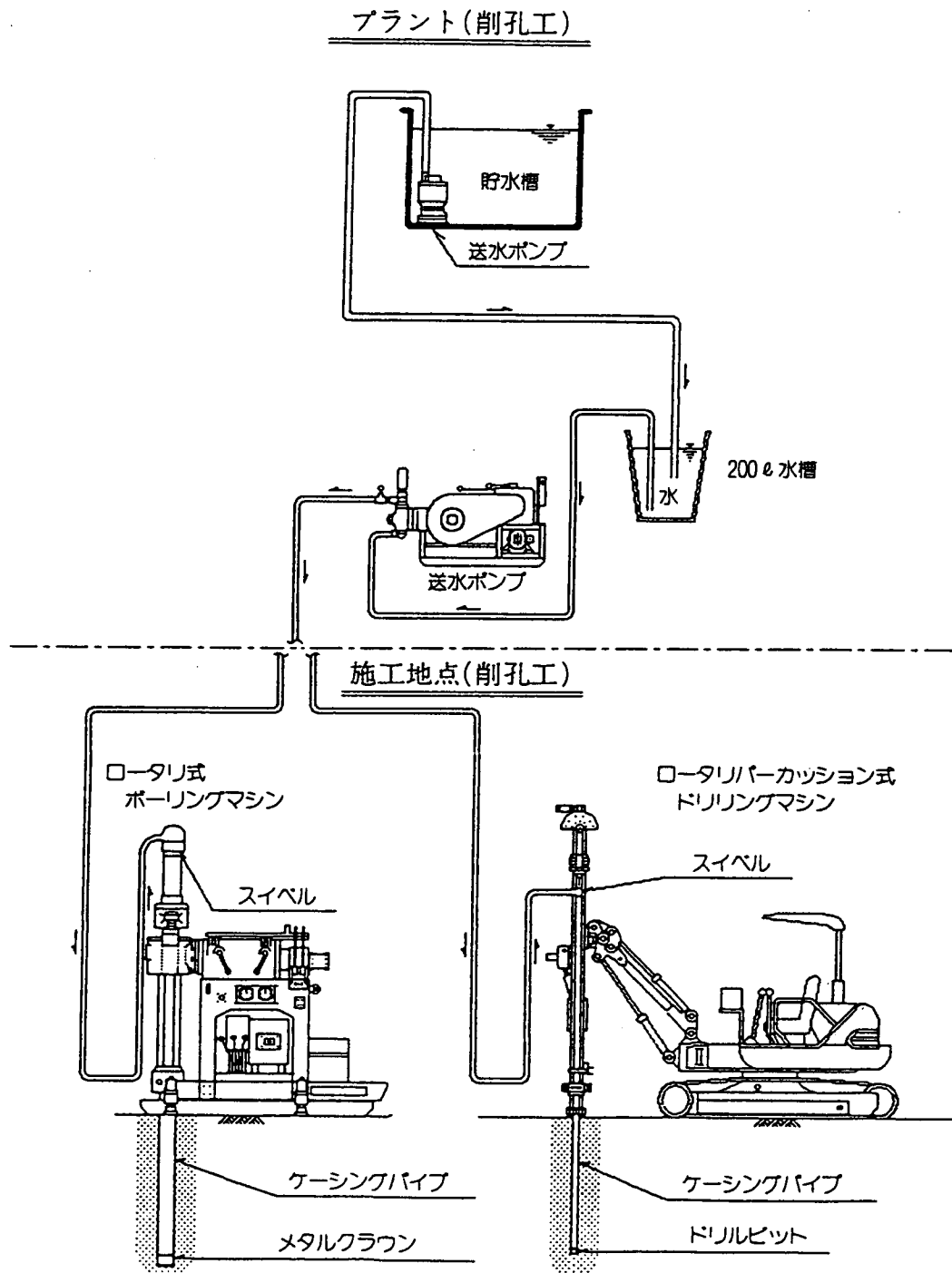


図-4.2 削孔機械の配置図¹²⁾

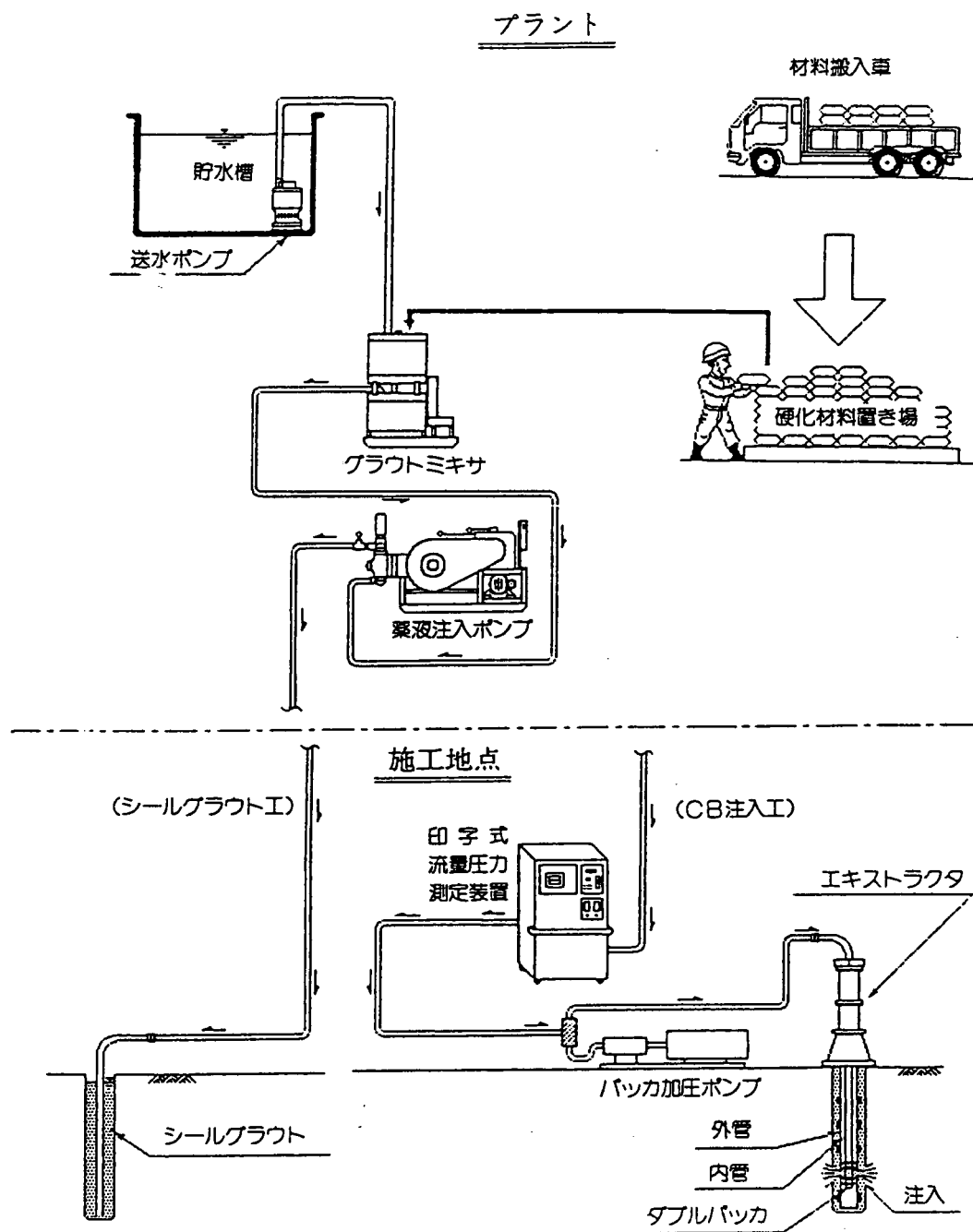
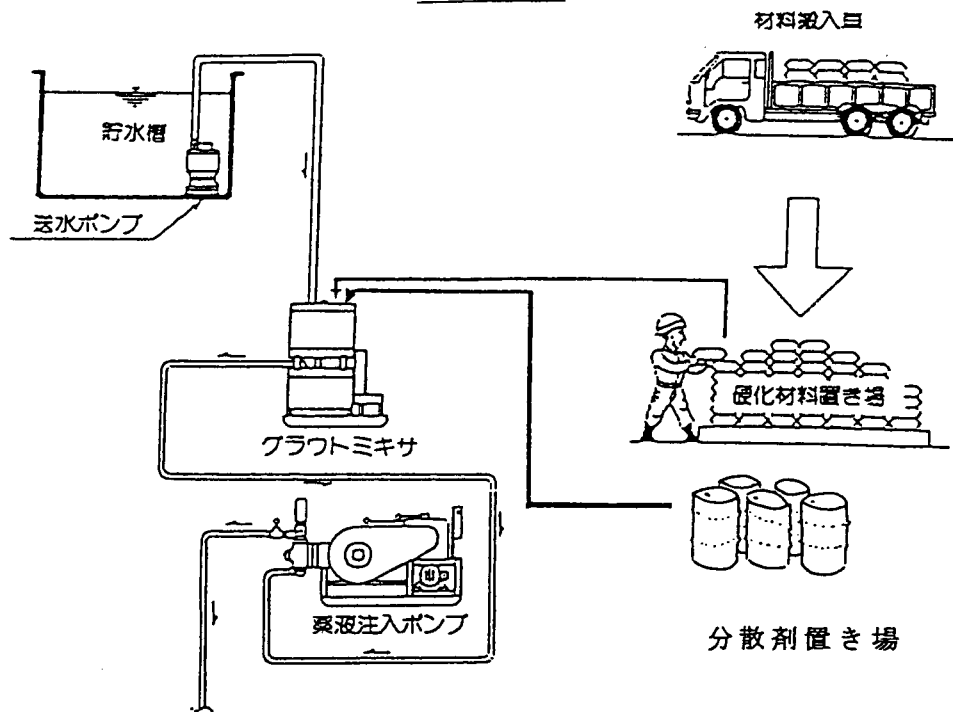


図-4.3 一次注入機械の配置図¹²⁾

プラント



施工地点

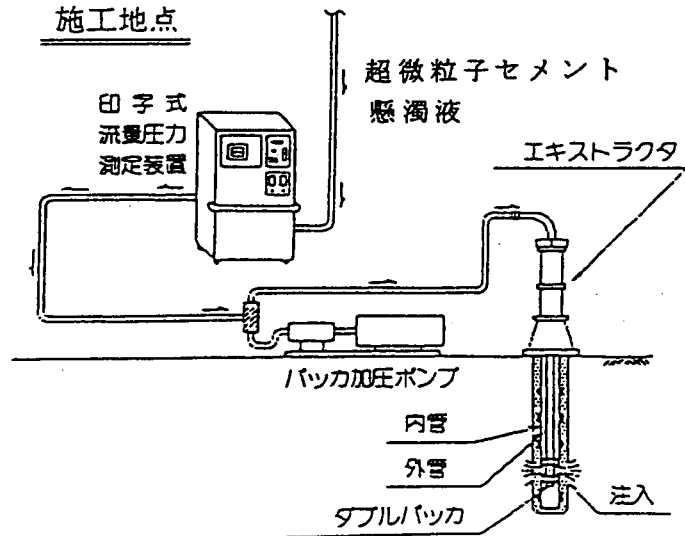


図-4.4 二次注入機械の配置図¹²⁾

(3) 実験条件

実験条件を表-4.5に、図-4.5に施工平面図を示す。注入量と固結体積の関係を確認するために、目標固結体積（改良径 $\phi 1.5\text{m}$ ）の間隙量（間隙率 $n=45\%$ ）に対して注入量を1, 1.5, 2.0倍（充填比 α ）と変化させた。また、深度方向の均一性を確認するためにステップ長を100, 66, 33cmと変化させた。

S-1, 5, 9は一点注入により形成される固結体の出来形を把握することを目的とし、S-2~4、S-6~8、S-10~12ではそれぞれ水平方向及び深度方向に一体化した固結体が形成されるかどうかを確認することを目的とした。

表-4.5 実験条件（設計）

杭No	充填比	1本当り ステップ数	1ステップ (cm)	注入長 L(m)	改良径 ϕ (m)	固結体積 V(m ³)	注入率 $\lambda = \alpha \times n$ (%)	注入量 $Q = V \times \lambda$ (l)	総注入量 ΣQ (l)
S-1	$\alpha = 1.0$	1	—	1.00	1.5	1.766	45.0	795.0	7,685.0
S-2		3	100	3.00		5.299		2,385.0	
S-3		4	66.6	2.66		4.705		2,120.0	
S-4		9	33.3	3.00		5.299		2,385.0	
S-5	$\alpha = 1.5$	1	—	1.00	1.5	1.766	67.5	1,193.0	11,534.0
S-6		3	100	3.00		5.299		3,579.0	
S-7		4	66.6	2.66		4.705		3,180.0	
S-8		9	33.3	3.00		5.299		3,582.0	
S-9	$\alpha = 2.0$	1	—	1.00	1.5	1.766	90.0	1,590.0	15,366.0
S-10		3	100	3.00		5.299		4,770.0	
S-11		4	66.6	2.66		4.705		4,236.0	
S-12		9	33.3	3.00		5.299		4,770.0	

* 充填比 α ：目標固結体積（改良径 $\phi 1.5\text{m}$ ）の間隙量（間隙率 $n=45\%$ ）に対する懸濁液注入量の比

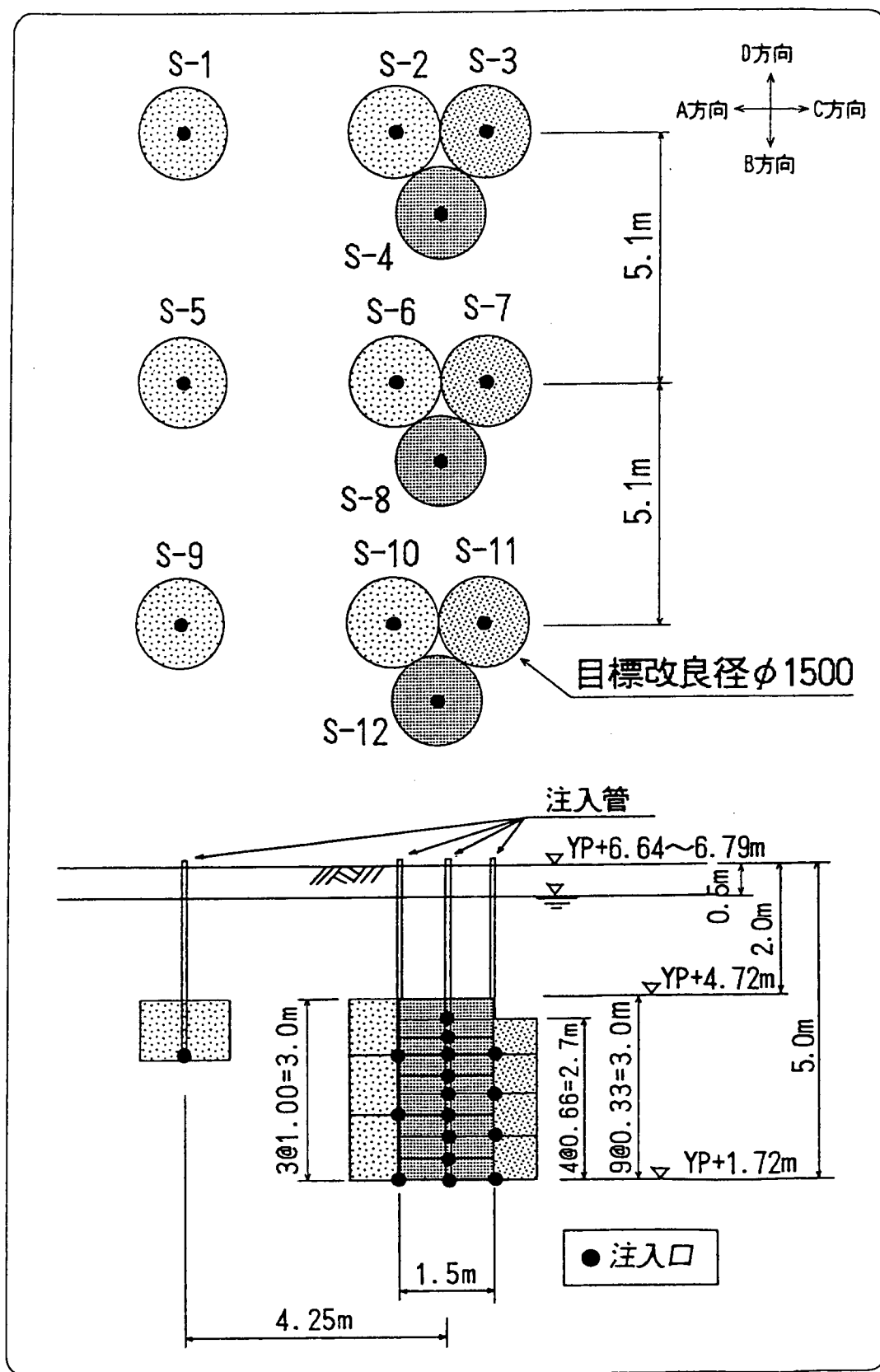


图-4.5 施工平断面图

超微粒子セメント注入工法の試験施工中、施工後の地盤内に発生する間隙水圧、地下水位変化を計測するために計器を設置し計測を行った。

表-4.6 計測器の概要

計 器 名	設置深度 GL-(m)	設置位置	個数 (個)	備 考
間隙水圧計	3.7	浸透域内	4	形式 EPP-5802 容量2kgf/cm ²
	2.7	浸透域内	1	

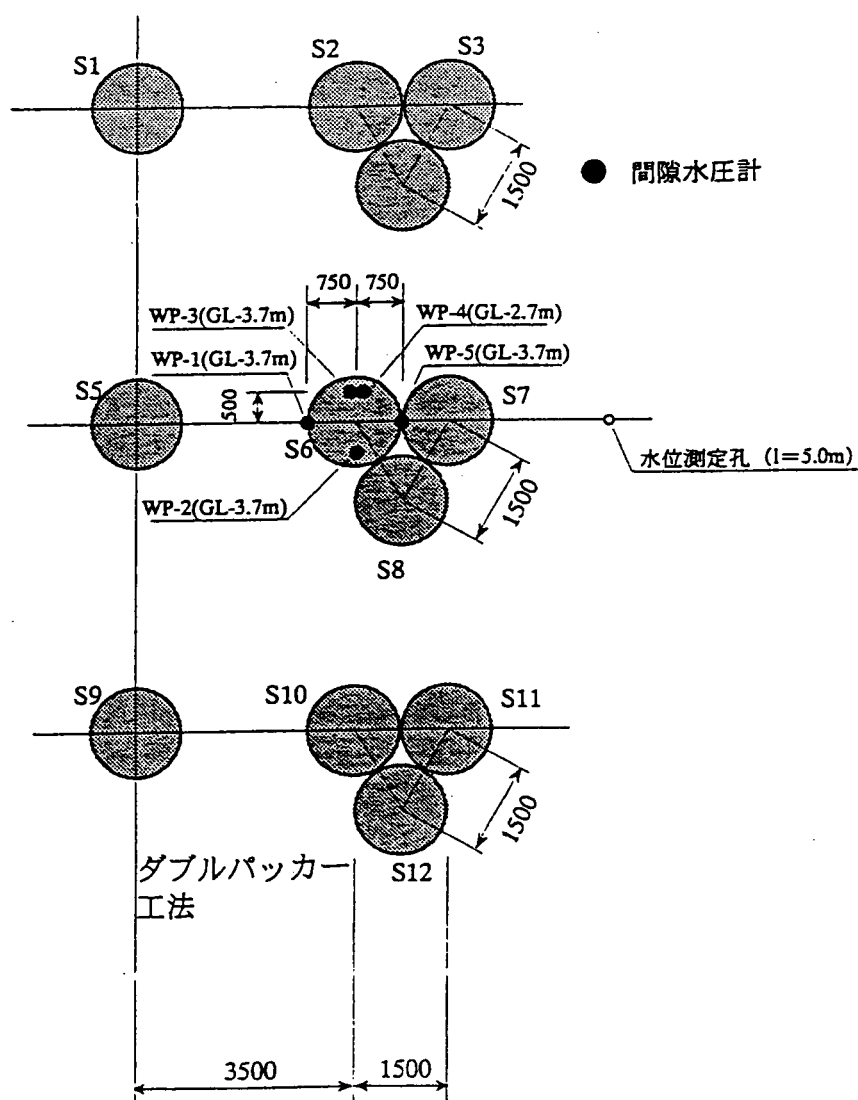


図-4.6 計測機器設置位置図

1) 間隙水圧計

間隙水圧計は超微粒子セメント圧入時の土中間隙水圧の変化を測定することを目的とし、注入時に地盤の間隙水が懸濁液の浸透によって押し出されていく状況および懸濁液の浸透の状況を水圧の変動によって測定し、注入チャートとの比較を行う。また、注入チャートによって浸透の管理(改良径の設定等)が可能であるかを確認する。

間隙水圧計は、5地点(WP-1～5)にGL-2.7～3.7mの深度に設置した。間隙水圧計による水圧変化の計測は、注入中は、3～5分間隔、注入中断時は10分間隔で計測した。

2) 地下水位測定

間隙水圧測定時の初期の静水圧状況を確認するため、水位測定孔を設置する。φ86mmでGL-3.9mまで削孔したボーリング孔にストレーナー加工をした網を取り付けた塩ビパイプと地下水位計を設置した。測定は、「高圧噴射工法(浸透・攪拌タイプ)」の注入開始から注入完了時まで5分間隔で計測を行った。

4.1.2 高圧噴射攪拌工法

高圧噴射攪拌工法は、エアーを伴った高圧のセメントスラリーあるいは水を噴射し地盤を切削・混合攪拌するタイプと単に高圧のセメントスラリーを噴射し地盤を切削・混合攪拌するタイプに大別できる。前者のエアーによる効果は、切削距離の拡大と排泥のエアリフトによる周辺地盤への影響を抑制することができるが、この排泥は産業廃棄物であり、その処理費が工事費に占める割合は高い。後者は排泥は生じないが、セメントスラリーを強制圧入するため周辺地盤に変位を生じさせたり、高圧により近接構造物に損傷を与えるなどの影響を与える可能性（最近の工法で排土式影響抑制工法もある）があることが知られている。そこで、砂質土への浸透性が高い超微粒子セメント注入材を鉛直方向に連続的に高圧噴射させることで、

- ① 地盤切削による混合攪拌と超微粒子セメント粒子の間隙浸透が同時に発生し固結範囲が拡大する、
- ② 鉛直方向に均一な固結形状（円柱体）を造成することができる、および
- ③ 浸透効果により、地盤内にこもる圧力を逃がし、周辺地盤への影響を抑制することができる、

のではないかと予測し、従来のセメント系固化材を用いた高圧噴射攪拌工法（高圧セメントスラリー噴射：以下、従来工法）と超微粒子セメント注入材を用いた高圧噴射攪拌工法（以下：高圧噴射浸透工法）での試験施工を行い、2工法の改良効果の比較検討を行った。

(1) 主要検討項目

本工法では、以下の項目について着眼した。

- ① 改良体の出来形確認
 - ・2工法（高圧噴射浸透工法・従来工法）による出来形（固結形状・改良強度）の違いを確認する。
- ② 周辺に与える影響の調査
 - ・土圧計、傾斜計、ひずみ計等の計測器を設置し、周辺地盤に与える影響を調べる。
- ③ 浸透性の確認
 - ・間隙水圧計にて、噴射終了時に浸透が行われているかを調べる。

(2) 注入方法

① 高圧噴射攪拌工法の概要

従来の高圧噴射攪拌工法は、セメント系固化材注入材を高圧（吐出圧力 200kgf/cm^2 、吐出流量 80 l/分 ）でロッドの先端から水平方向に噴射させながらロッドを回転させ引き抜いてくることにより地盤を切削し、改良対象土とセメント注入材を強制的に混合攪拌し、改良体を円柱状に造成するものである。

一方、今回新たに試みる高圧噴射浸透工法は、砂質土への浸透性が高い超微粒子セメント注入材を用いて高圧噴射（吐出圧力 200kgf/cm^2 、吐出流量 80 l/分 ）による攪拌混合を行い、注入材の体積増加に伴って発生する地中内の増加応力によって、浸透性の高い注入材をさらに浸透させ、改良径を拡大させようとするものである。同時に地中にこもった内部応力を浸透によって逃がすことにより、地盤変位も抑えることを期待した工法である。

② 施工方法・手順

施工フローを図-4.7に、施工手順図を図-4.8に示す。

1. プラントにて超微粒子セメントまたはセメント系固化剤と分散剤および混練水を所定量計量し、ミキサーで十分混合を行う。ミキサーで混合された注入材は、一時アジテータ(調整タンク)に貯えられた後、流量計を経て、吐出圧力 200kgf/cm^2 の超高压ポンプで注入マシンに圧送される。(図-4.7参照)
2. 注入マシンは、特殊先端モニターを装着したロッドを所定の深度(改良下端)まで削孔し、吐出圧力(200kgf/cm^2)を確認後、ロッドを低速回転させながら、ステップ方式で自動的に引き上げ改良を開始する。高压スラリーは、特殊先端モニターのノズルから高压ジェットとして対象土中に噴射され、対象土と強制攪拌しながら円柱状の改良体を造成する。(図-4.8参照)

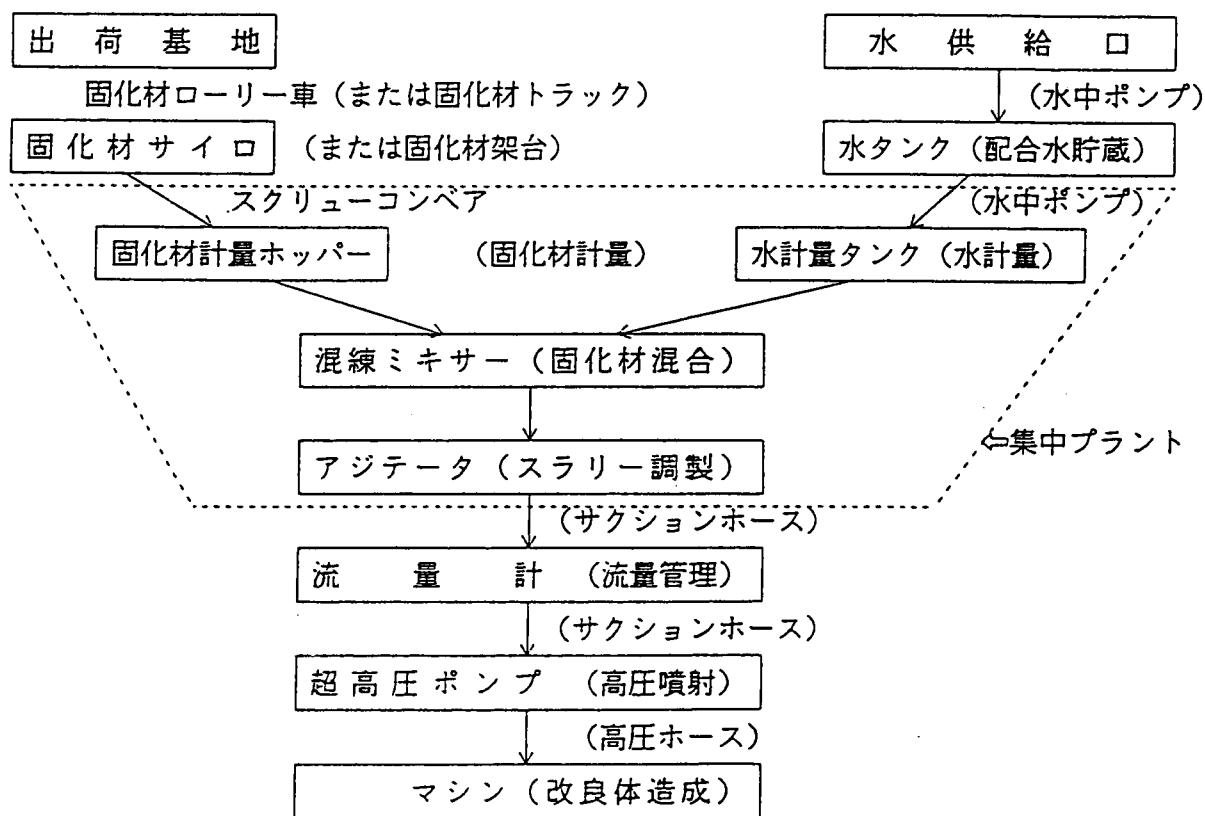


図-4.7 施工フロー

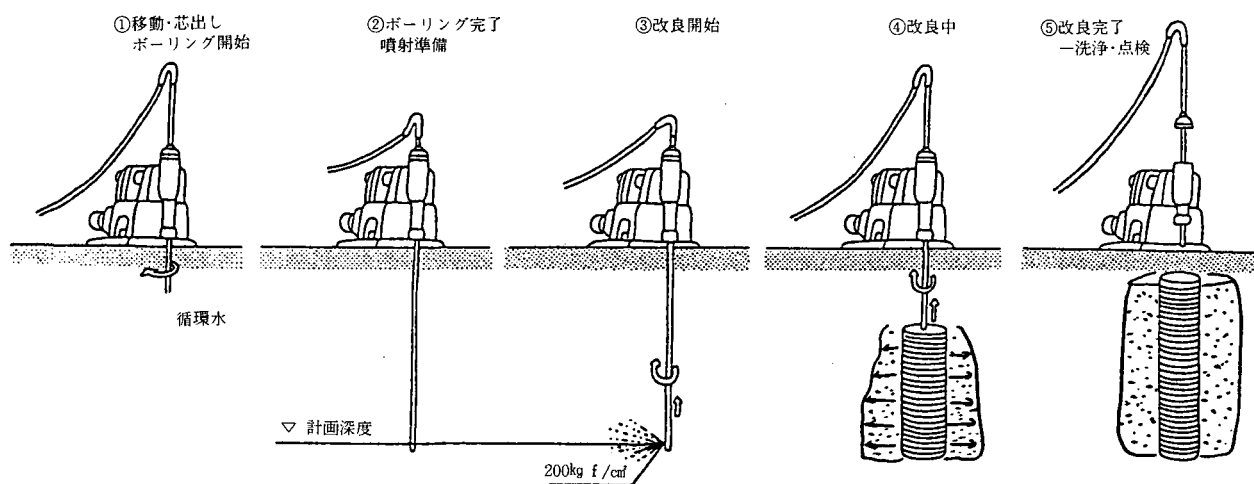


図-4.8 施工手順図

③ 使用機械

高圧噴射浸透工法および従来工法で使用する機械一覧表を表-4.7に示す。

表-4.7 使用機械一覧表

機 械 名	仕 様				台数
	機 種	動力・自重	能 力	寸 法 m	
ボーリング マシン	KT-I	3.7kw 500kg	ストローク 0.5m 回転数 Max90rpm	高 1.13 巾 0.50 長 1.07	1
集中プラント	OP-II	25.0kw 1,500kg	ミキサ 1.5m³ アジテータ 2.5m³ 水計量タンク 1m³	高 2.00 巾 2.00 長 5.50	1
超高圧ポンプ	SG-75	55.0kw 2,300kg	吐出量 20~100 ℓ / 分 圧力300kgf/cm²	高 1.25 巾 1.50 長 2.20	1
流 量 計	AM200	65kg	0~200 ℓ / 分	高 0.70 巾 0.35 長 0.40	1
発 電 器	DCA-150	183ps 2,760kg	1,800rpm	高 1.50 巾 1.20 長 3.35	1
水タンク ボーリングロッド スイベル モニター等 高圧ホース類 水中ポンプ サンドポンプ ポンプ類					

(3) 実験条件

表-4.8に実験条件、表-4.9に施工数量、
図-4.9に注入材（超微粒子セメントとセメント系固化材
剤（C-201））の粒度分布を示す。また、
図-4.10に施工位置平断面図を示す。

高压喷射浸透工法（M1, 2, 3, 9）では超
微粒子セメント（比重3.0, 平均粒径 $D_{50}=4\mu\text{m}$, 85%粒径 $G_{85}=8\mu\text{m}$, プレーン比表面積 $9000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上）を、高压喷射攪
拌工法（M4, 5, 7）ではセメント系固化材
（比重3.1, 平均粒径 $D_{50}=15\mu\text{m}$, 85%粒径 $G_{85}=35\mu\text{m}$, プレーン比
表面積 $3300\text{cm}^2/\text{g}$ 以上）を用いた。実験条件は、高压
喷射浸透工法の浸透特性、固結体特性の把握
および高压喷射攪拌工法との改良効果の比較

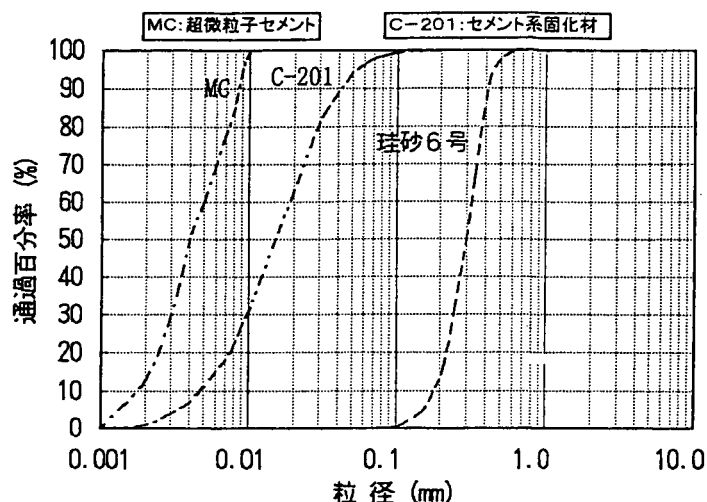


図-4.9 注入材の粒度分布

を行うため、吐出圧力($200\text{kgf}/\text{cm}^2$)、吐出流量($80\text{ l}/\text{分}$)を一定にして、注入材の喷射時間（喷射量）を変
化させた。なお、喷射時間 $2.0\text{分}/\text{m}$ は高压喷射攪拌工法の標準仕様である。注入材の配合は、高压喷射浸透
工法では超微粒子セメントを用いて水セメント比 $W/C=750$, 1000% 、分散剤混入率 $D/C=10\%$ とした。高压喷射攪
拌工法ではセメント系固化材を用いて、標準仕様である水セメント比 $W/C=150\%$ とした。

表-4.8 実験条件

工法名	使用 固化材	杭No	吐出圧力 (kgf/cm^2)	吐出流量 ($\text{l}/\text{分}$)	喷射時間 ($\text{分}/\text{m}$)	喷射量 (l/m)	セメント量 (kg/m)	水セメント比 $W/C(\%)$	分散剤混入率 $D/C(\%)$
高压喷射 浸透工法	超微粒子 セメント	M1	200	80	7.3	584	56.0	1000	10
		M2			5.5	440	55.6	750	10
		M3			2.0	160	15.4	1000	10
		M9			4.0	320	30.7	1000	10
高压喷射 攪拌工法	セメント系 固化材	M4	200	80	2.0	160	87.8	150	-
		M5			7.3	584	320.4	150	-
		M7			2.0	160	87.8	Air150	-

*M7はエア-と注入材を併用して注入を行う

表-4.9 施工数量（設計）

工法名	使用 固化材	杭No	1本当り ステップ数	1ステップ長 cm/step	改良長 $\text{L}(\text{m})$	改良径 $\phi(\text{m})$	喷射時間 $t(\text{分}/\text{m})$	吐出流量 $q(\text{l}/\text{分})$	注入量(l) $Q=L\times t\times q$	総注入量 $\Sigma Q(\text{l})$
高压喷射 浸透工法	超微粒子 セメント	M1	60	5	3.0	1.5	7.3	80	1,752.0	7,224.0
		M2				1.5	5.5	80	1,320.0	
		M3				0.8~1.2	2.0	80	480.0	
		M9				1.0~1.2	4.0	80	960.0	
高压喷射 攪拌工法	セメント系 固化材	M4	60	5	3.0	0.8	2.0	80	480.0	2,712.0
		M5				0.8~1.0	7.3	80	1,752.0	
		M7				1.0~1.2	2.0	80	480.0	

杭の配置は、図-4.10に示すように施工後に固結形状を確認するために互いの杭が接しないように配置した。施工順序は、1日目に杭No. M1→M2→M3→M9（高圧噴射浸透工法：超微粒子セメント）を、2日目にM4→M5→M7（高圧噴射攪拌工法：セメント固化材）の順で施工を行った。高圧噴射（注入）は、削孔終了後に改良下端（GL-4.7m）から改良上端（GL-1.7m）方向へ所定の改良速度で注入を行った。

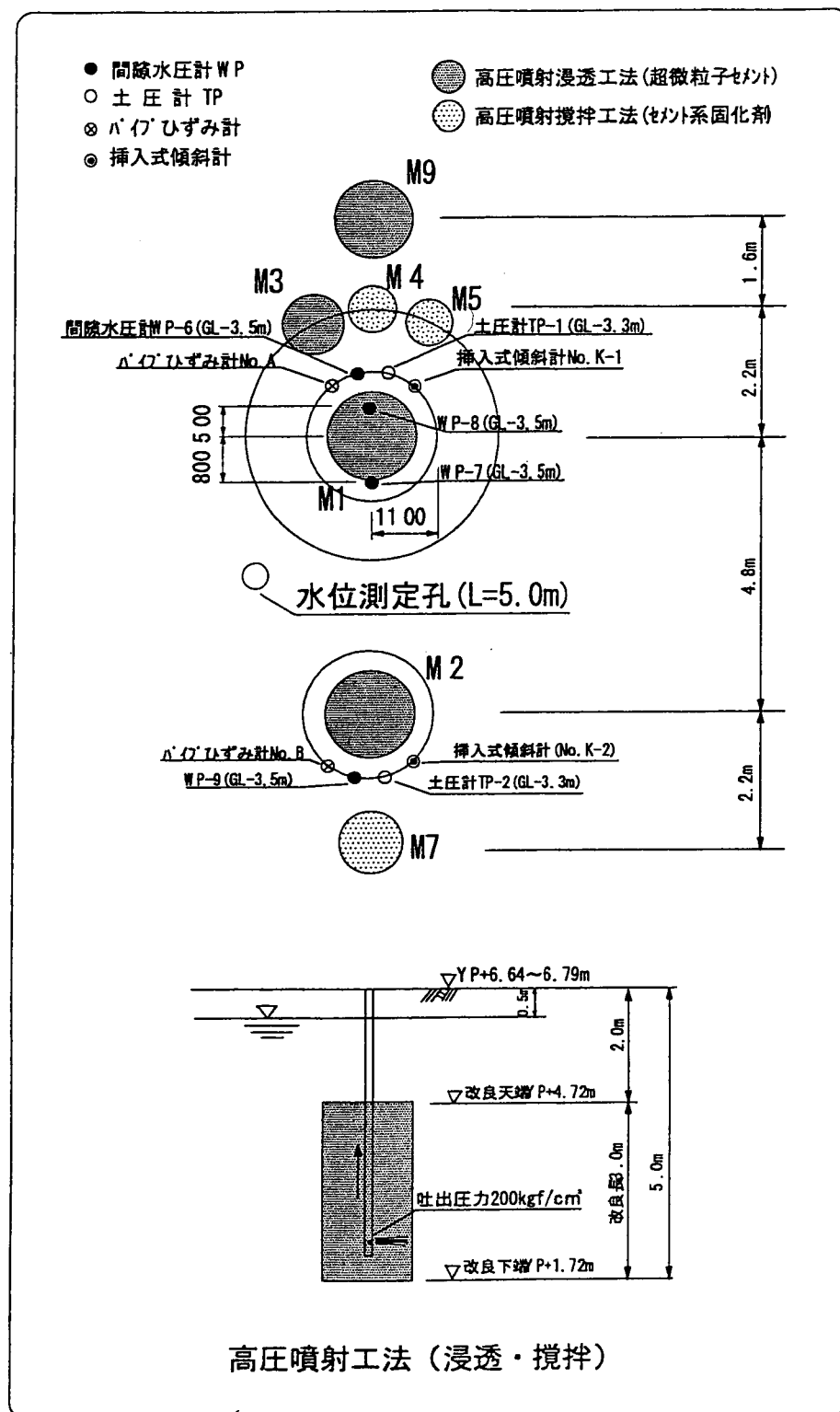


図-4.10 施工位置平断面図

(4) 計測調査

高圧噴射（圧力200kgf/cm²、流量80ℓ/分）の施工が周辺地盤に与える影響を調べるため計測を行う。計測器の概要を表-4.10に、設置位置図を図-4.11に示す。

表-4.10 計測器の概要

計 器 名	設置深度 GL-(m)	設置位置	個数 (個)	備 考
間隙水圧計	3.5	改良域内	2	形 式 EPP-5802 容 量 2kgf/cm ²
	3.5	改良域外	2	
挿入式土圧計	3.3	改良域外	2	形式 EIP-5803 容量3kgf/cm ²
挿入式傾斜計	10.0	改良域外	2	形式 EIN-5030G
パイプひずみ計	10.0	改良域外	2	10深度/本, ゲージ数4個/深度

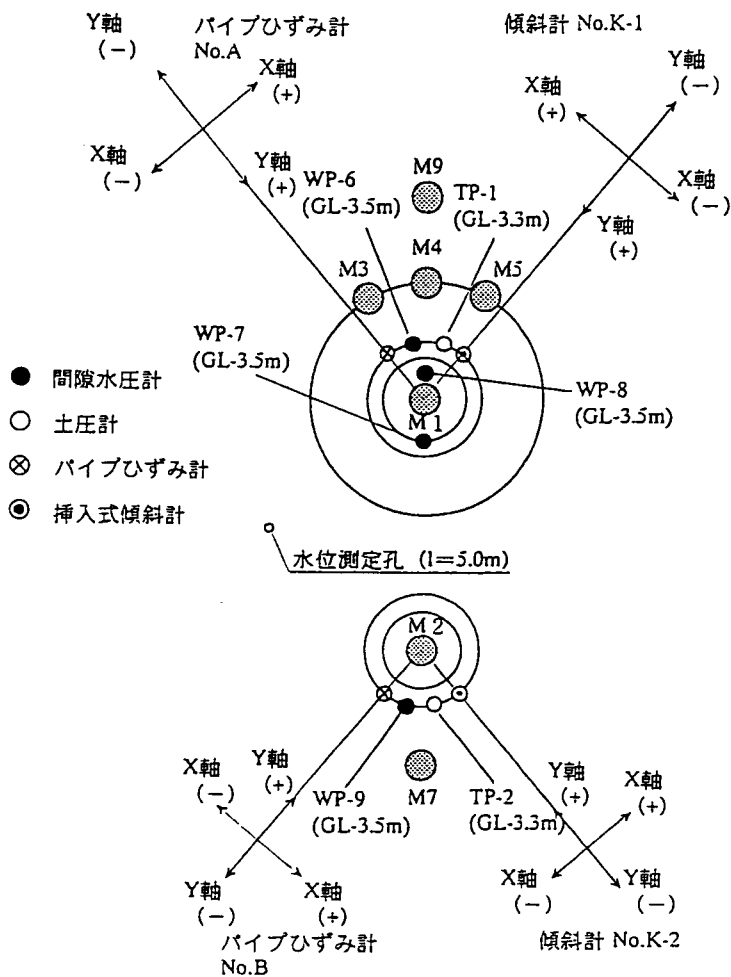


図-4.11 計測機器設置位置図

1) 挿入式傾斜計

一般的な高圧噴射攪拌工法は施工時に地盤変位を与えるといわれているが、浸透によって圧力を消散させることにより変位が少なくなるのではないかと予測している。そのため、施工前後の地盤の水平変位量の測定を行う。挿入式傾斜計は、地盤の動きに追従するケーシングパイプを設置し、地上より傾斜計を挿入して各深度毎の傾斜量と方向を測定し、その結果から地中水平変位量を求めるものである。

今回の調査では超微粒子セメント圧入時の地中水平変位量を計測する目的で図-4.11に示す2地点にそれぞれ2方向（X(+,-), Y(+,-)方向）、計4方向で計測した。計測深度は、GL-0~9mまでの10点である。

挿入式傾斜計による計測は、高圧噴射（吐出圧力 200kgf/cm²、吐出流量 80 l/min）による施工直後に実施した。挿入式傾斜計（No. K1）は、杭No. M1→M3→M9→M4→M5の順で、挿入式傾斜計（No. K2）は、杭No. M2→M7の順で実施した。

2) パイプひずみ計

パイプひずみ計は、挿入式傾斜計と同様に地盤の水平変位をゲージのひずみ量として計測するもので、時刻歴として計測し施工中のどの状態の時に影響を与えるかを計測する。

パイプひずみ計は、図-4.11に示す2地点に設置した。計測深度はGL-1、2、3、4、5、6、8、10mの8深度である。パイプひずみ計はφ48.5mmの塩ビパイプ外周の直交する2方向（X(+,-), Y(+,-)方向）にワイヤストレーンゲージを4点取り付け、φ86mmでGL-10mまで削孔したボーリング孔に順次接続しながら挿入する。

パイプひずみ計による計測は、注入中3~5分間隔、注入中断時は10分間隔で「高圧噴射工法（浸透・攪拌タイプ）」の杭No. M1→M3→M9→M4→M5の順で注入開始から注入完了時まで連続計測を行った。

設置したパイプひずみ計の構造図を図-4.12に、設置概要図を図-4.13に示す。

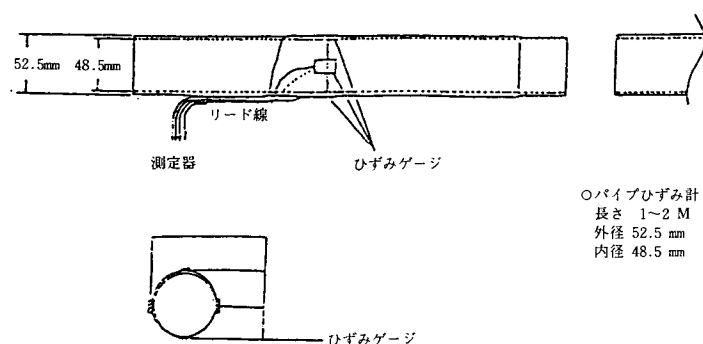


図-4.12 パイプひずみ計の構造図

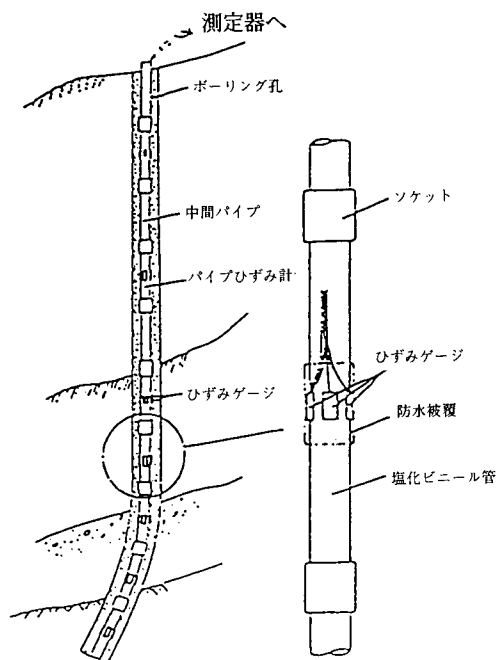


図-4.13 パイプひずみ計の設置概要図

3) 挿入式土圧計

挿入式土圧計(TP-1, TP-2)は、高圧噴射時に地盤内に発生する水平土圧を測定するため、調査位置図に示す2地点に、計測深度はGL-3.3mの位置に設置した。

挿入式土圧計No. TP-1の計測は、注入中3~5分間隔、注入中断時は10分間隔で「高圧噴射工法(浸透・攪拌タイプ)」の杭No. M1→M3→M9→M4→M5の順で注入開始から注入完了時まで連続計測を行った。

挿入式土圧計No. TP-2の計測は、「高圧噴射工法(浸透・攪拌タイプ)」の杭No. M2→M7の順で行った。

4) 間隙水圧計

間隙水圧計は、超微粒子セメント圧入時の土中間隙水圧の変化を計測することを目的とし、図-4.11に示す4地点にGL-3.5mの深度に設置した。間隙水圧計による水圧変化の計測は、注入中は、3~5分間隔、注入中断時は10分間隔で連続計測した。

5) 地下水位測定

間隙水圧測定時の初期の静水圧状況を確認するため、水位測定孔を設置する。φ86mmでGL-3.9mまで削孔したボーリング孔にストレーナー加工をした網を取り付けた塩ビパイプと地下水位計を設置した。測定は、「高圧噴射工法(浸透・攪拌タイプ)」の注入開始から注入完了時まで5分間隔で連続計測を行った。

4.2 実験結果

4.2.1 注入工法

(1) 注入量（実績）

各注入孔の注入実績を表-4.11に示す。各杭の詳細な実験条件は、表-4.5を参照されたい。

充填比（目標固結体積（改良径 $\phi 1.5\text{m}$ ）の間隙量（間隙率 $n=45\%$ ）に対する懸濁液注入量の比）を $\alpha=1.0$ にした杭（S2）、 $\alpha=1.5$ にした杭（S5, 6, 7, 8）、 $\alpha=2.0$ にした杭（S12）は、各杭とも計画注入量に達する以前に注入管付近の地表面から超微粒子セメント懸濁液の流出（ブロー）を確認したため、その時点で注入を終了した。なお、表中には超微粒子セメント懸濁液の流出（ブロー）した時点の注入位置（改良下端からのステップ位置／全ステップ数）を記しておく。

表-4.11 注入結果

充填比 α	杭 NO.	ステップ 数	ステップ長 (cm)	計画注入量 (ℓ)	実注入量 (ℓ)	ブロー位置 (ステップ $^\circ$)
1.0	S1	1	—	795	795	—
	S2	3	100	2,385	2,262	3/3
	S3	4	66.6	2,120	2,120	—
	S4	9	33.3	2,385	2,385	—
1.5	S5	1	—	1,193	931	1/1
	S6	3	100	3,579	3,280	3/3
	S7	4	66.6	3,180	2,650	4/4
	S8	9	33.3	3,582	663	2/9
2.0	S9	1	—	1,590	1,590	—
	S10	3	100	4,770	4,770	—
	S11	4	66.6	4,236	4,237	—
	S12	9	33.3	4,770	3,135	6/9

(2) pq-tチャート

注入時の施工管理として、注入圧力、速度—時間曲線にあたるpq-tチャートにより、注入圧力および注入速度を計測した。各注入孔毎のpq-tチャートを図-4.14～図-4.28に示す。一般的な傾向として以下のことが読み取れる。

- ①注入開始から徐々に注入圧力が上昇する。
- ②注入開始から徐々に注入圧力が下降する。
- ③注入開始から終了まで注入圧力が不規則に変化する。
- ④注入開始から終了まで注入圧力が変化しない。

ただし、いずれのタイプも注入時は小刻みに注入圧力が上下動する。

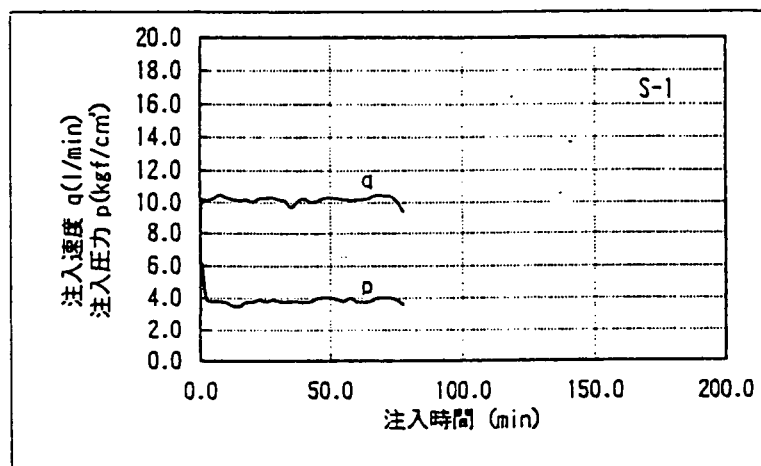


図-4.14 pq-tチャート (杭No. S 1:1 点注入)

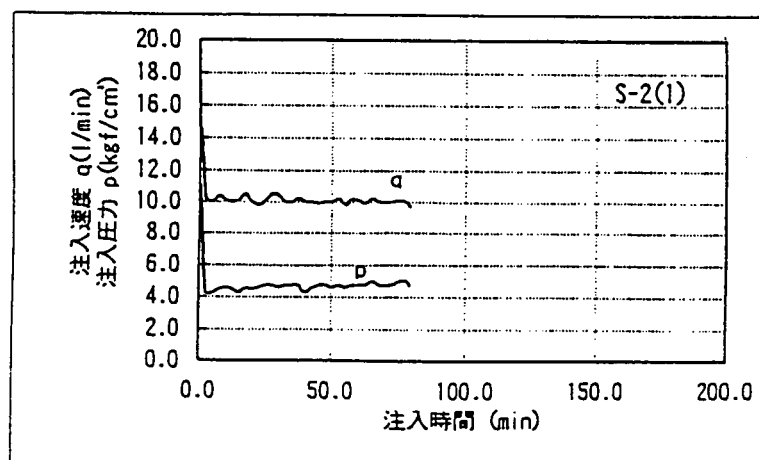
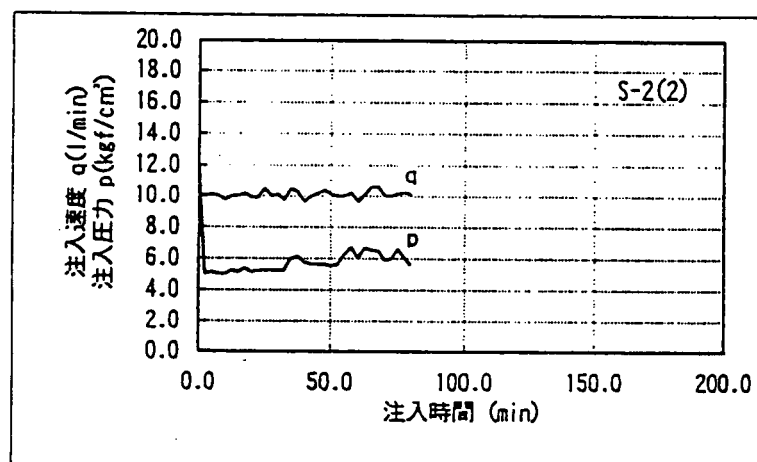
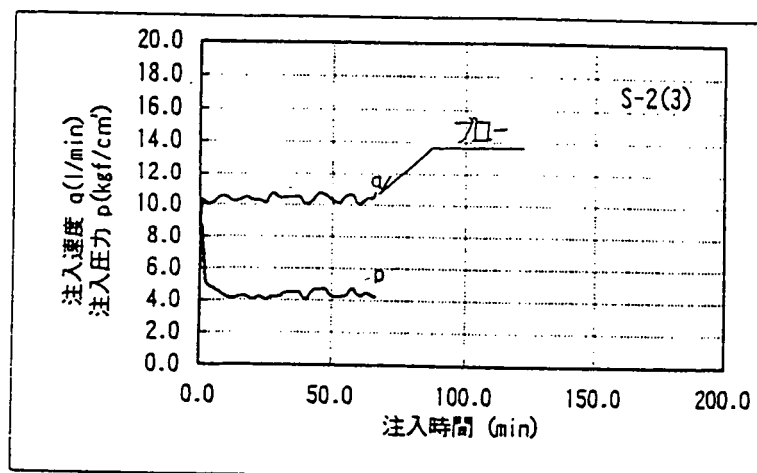


図-4.15 p-q-tチャート (杭No. S 2 : 3 点注入/100cmステップ°/3m:3ステップ°目でブロー)

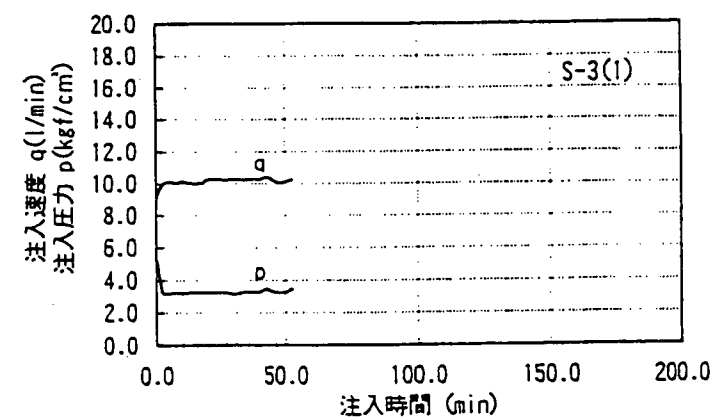
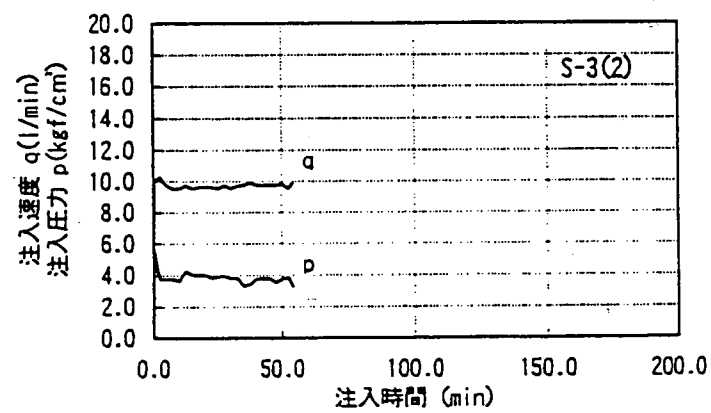
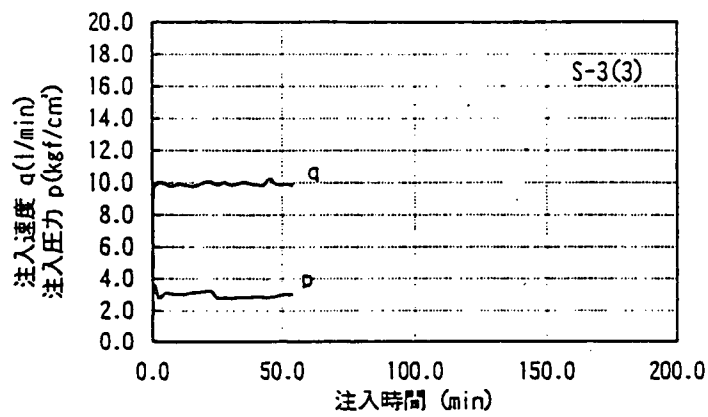
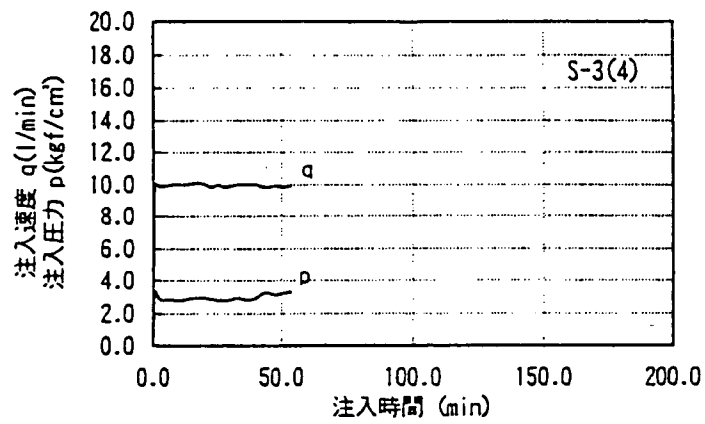


図-4.16 p - q - t チャート (杭No. S 3 : 4点注入/66.6cmステップ°/2.66m)

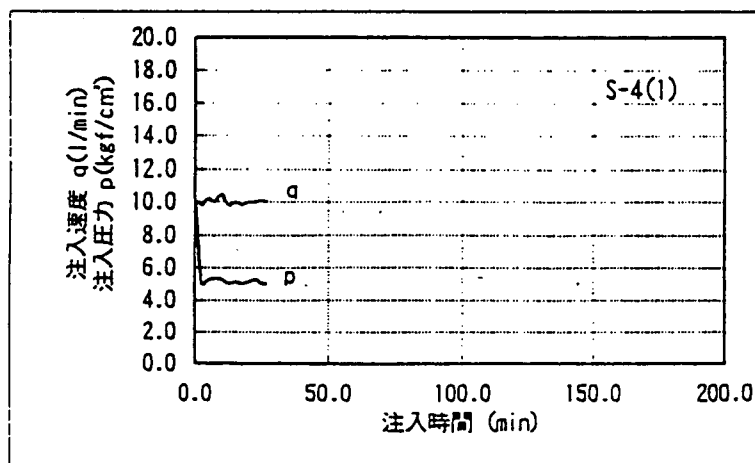
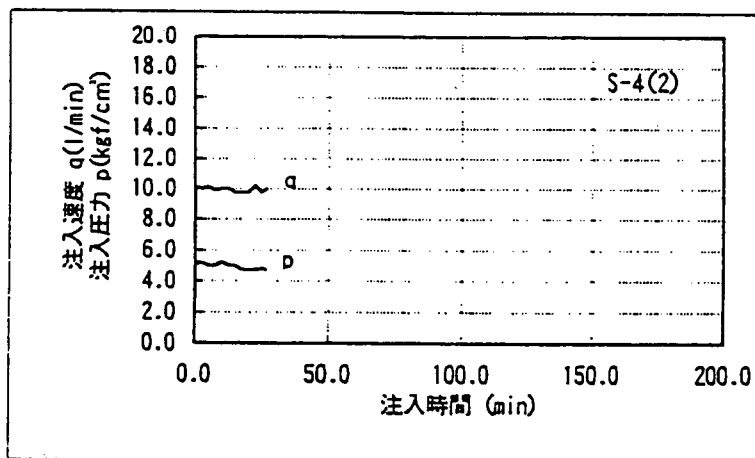
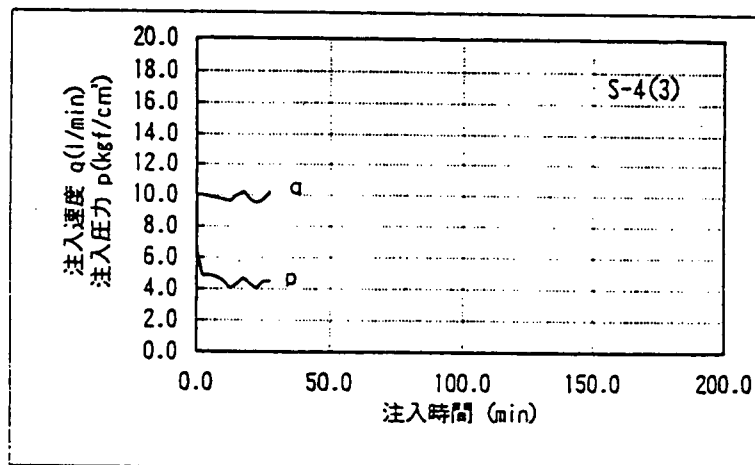


図-4.17 pq-tチャート 1~3ステップ目 (杭No. S 4 : 9点注入/33.3cmステップ°/3m)

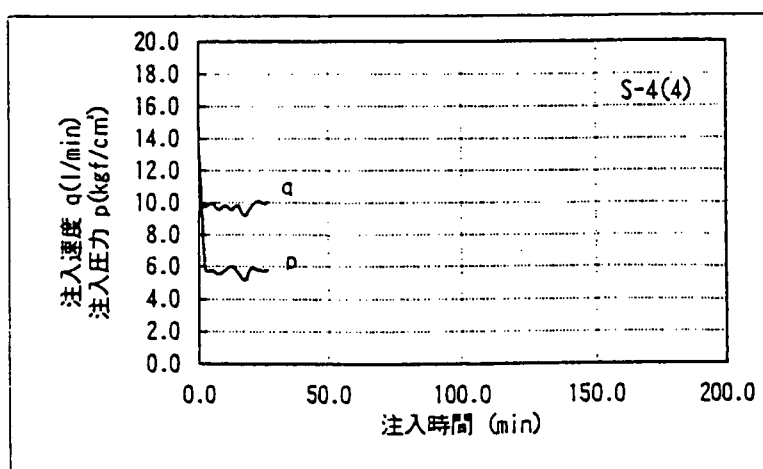
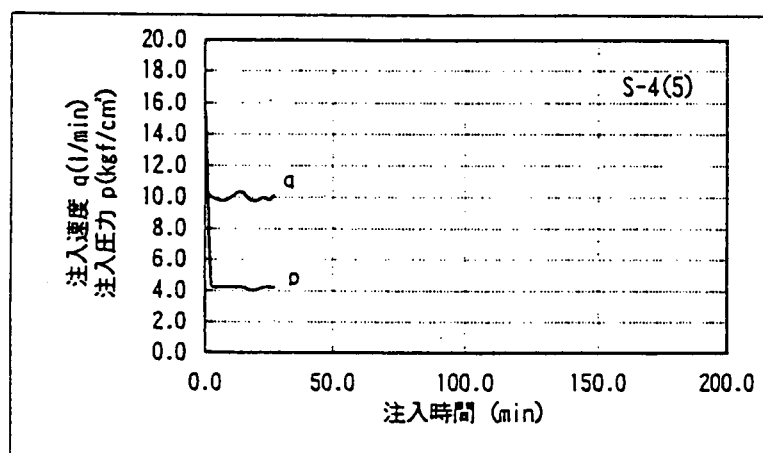
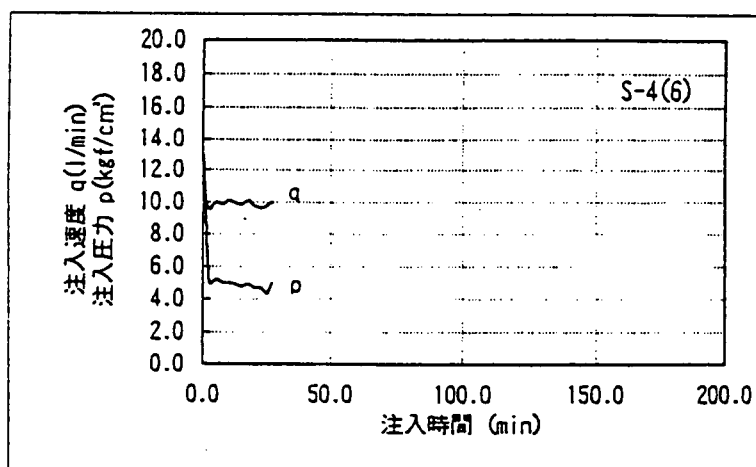


図-4.18 p - q - t チャート 4~6ステップ目 (杭No. S 4 : 9点注入/33.3cmステップ°/3m)

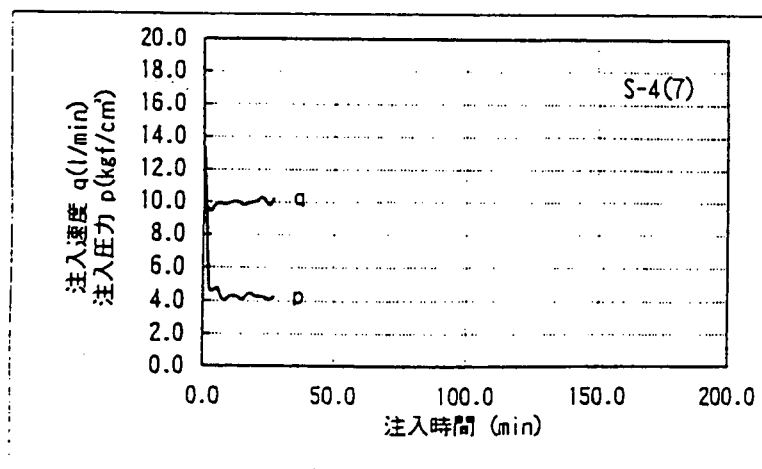
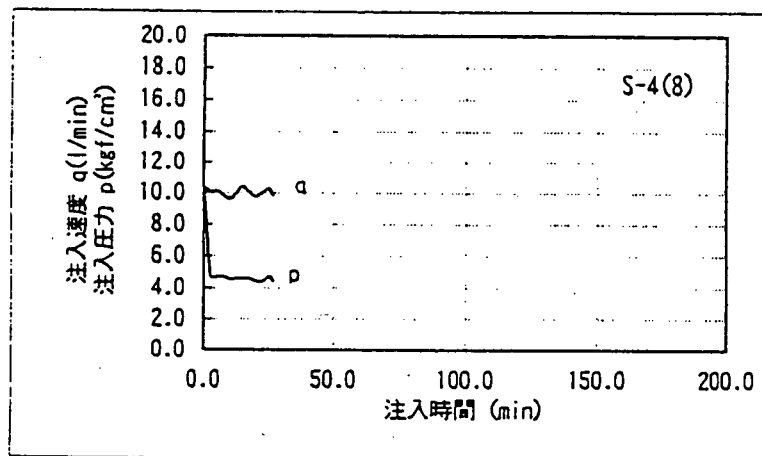
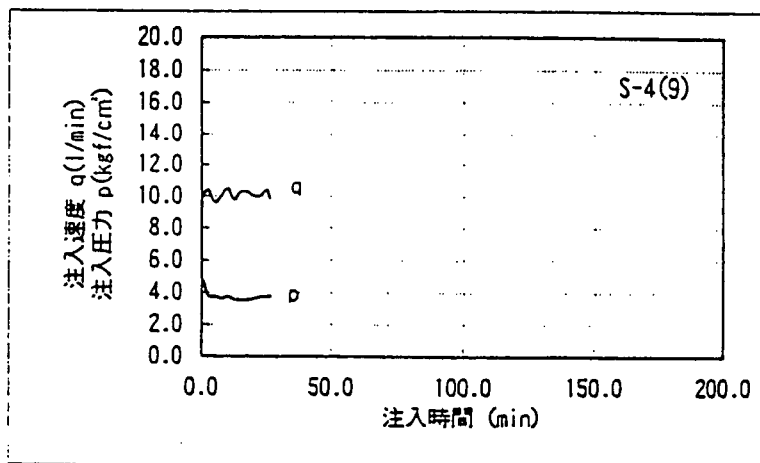


図-4.19 pq-tチャート 7~9ステップ目 (杭No. S 4 : 9点注入/33.3cmステップ/3m)

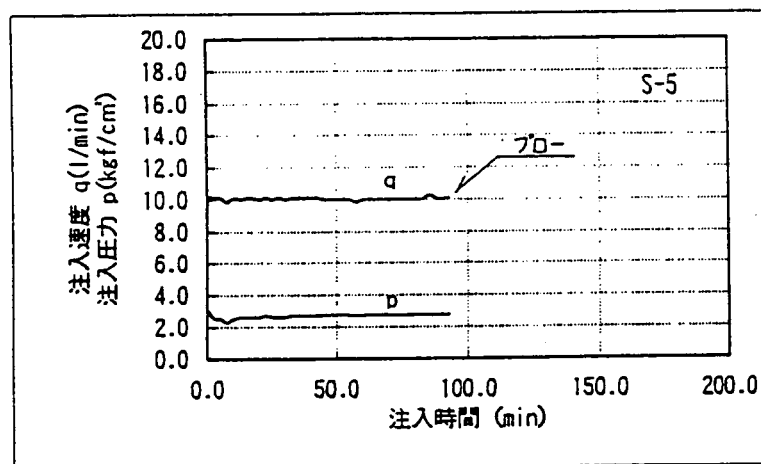


図-4.20 pq-tチャート (杭No. S 5 : 1 点注入:1ステップ目で70%)

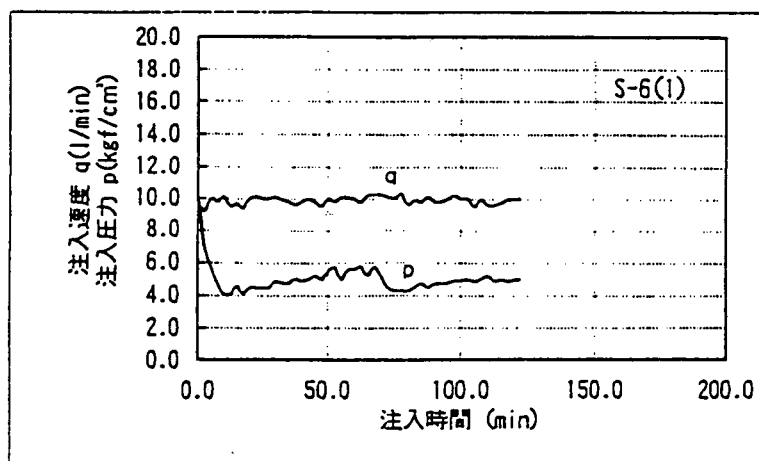
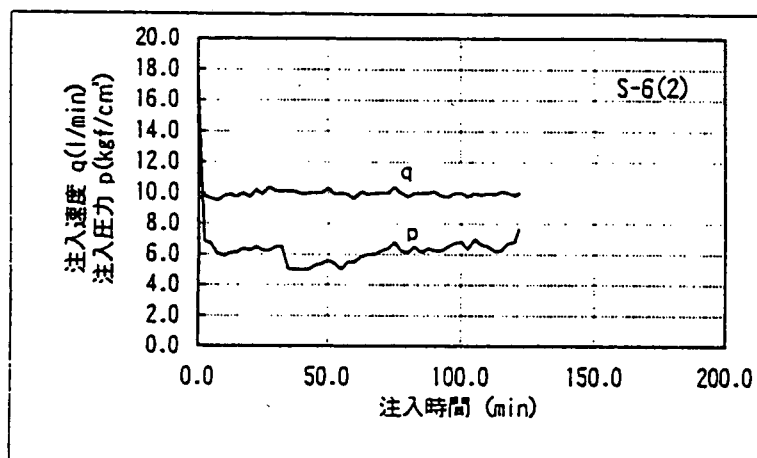
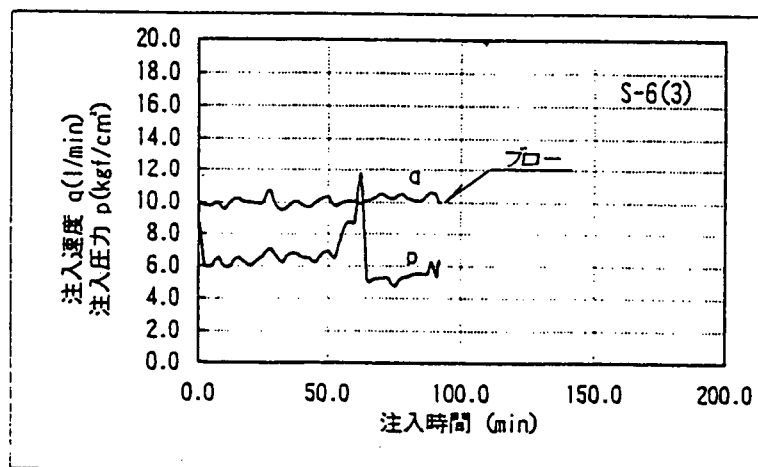


図-4.21 pq-tチャート (杭No. S 6 : 3点注入/100cmステップ°/3m:3ステップ°目でフロー)

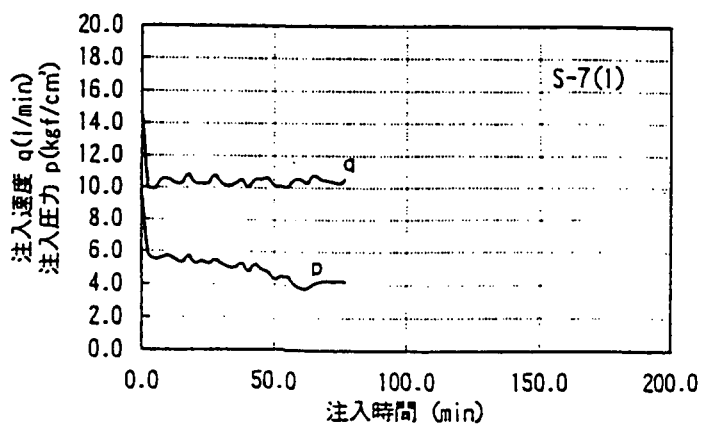
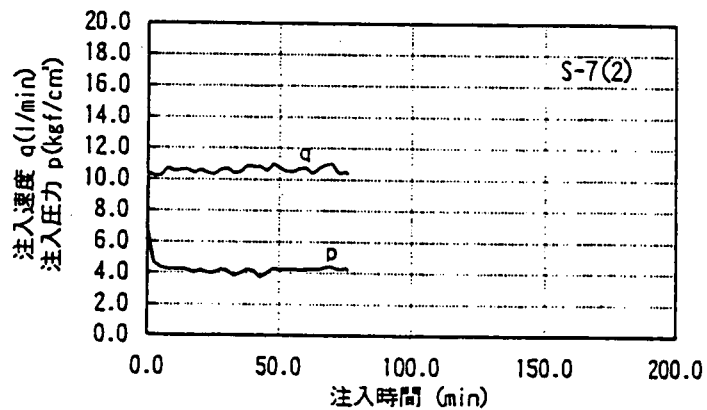
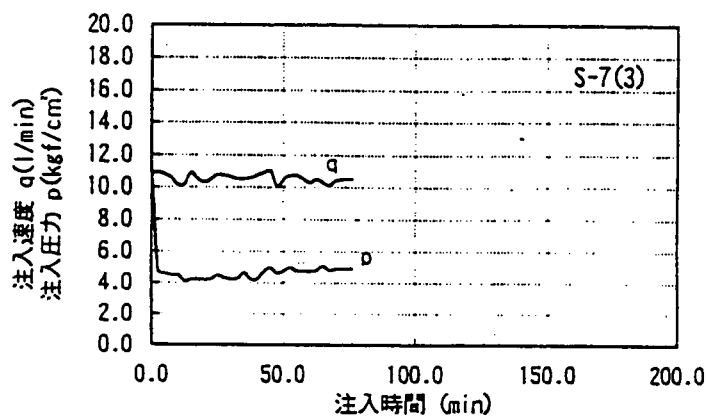
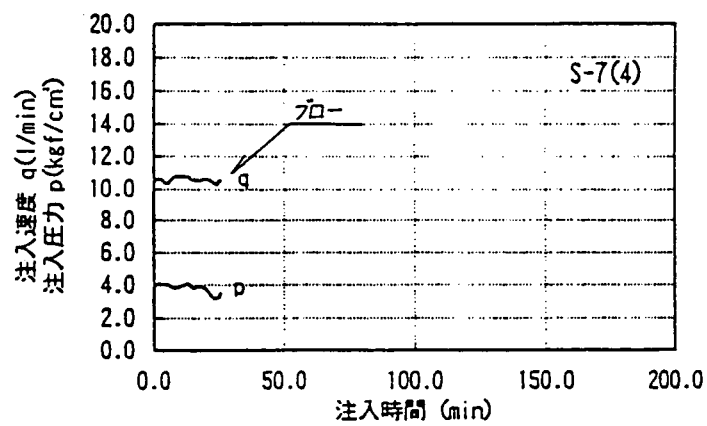


図-4.22 p-q-tチャート (杭No. S 7 : 4点注入/66.6cmステップ°/2.66m:4ステップ°目でフロー)

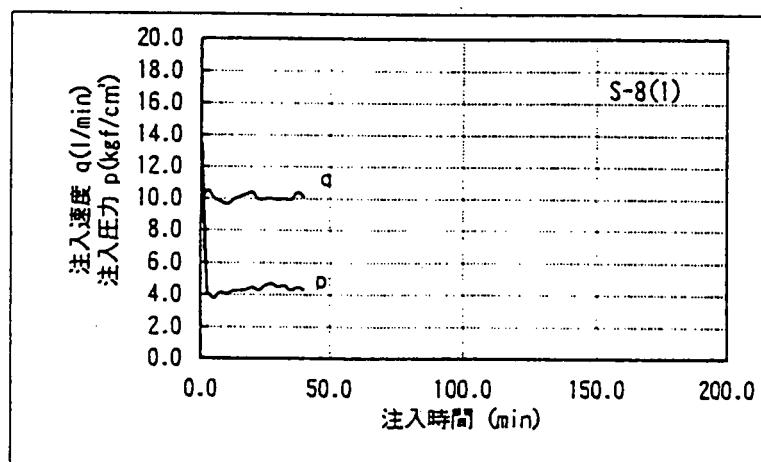
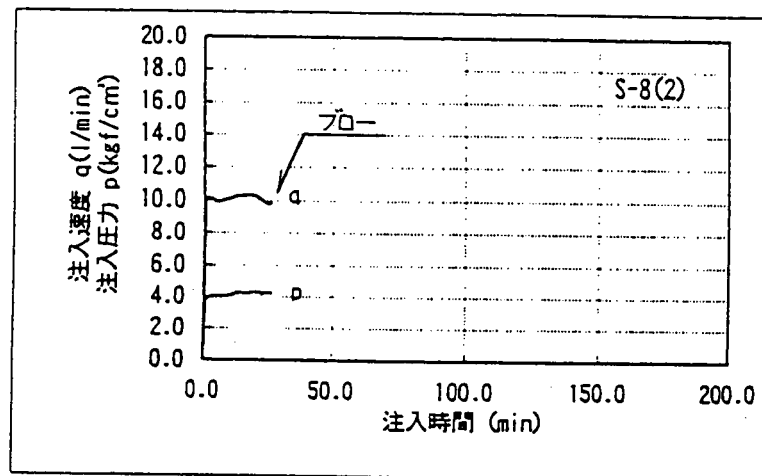


図-4.23 pq-tチャート 1~2ステップ目 (杭No. S 8 : 9点注入/33.3cmステップ°/3m:2ステップ°目でフロー)

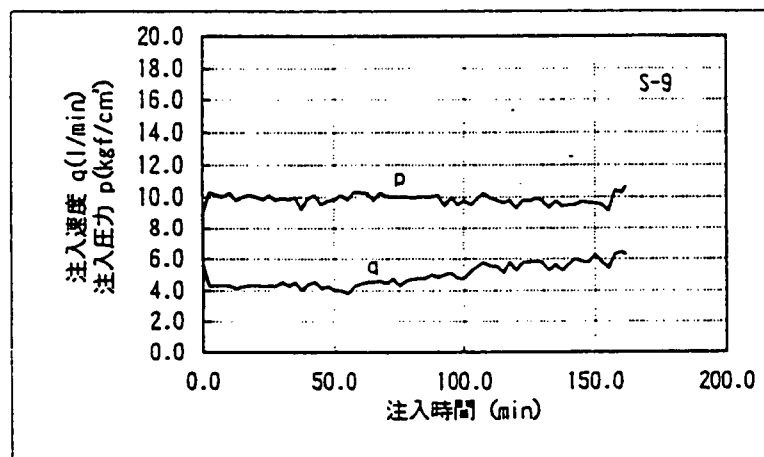


図-4.24 pq-tチャート (杭No. S 9 : 1点注入)

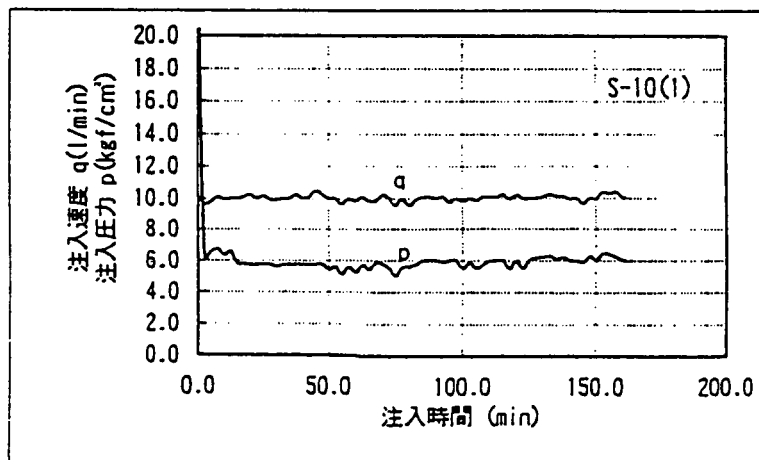
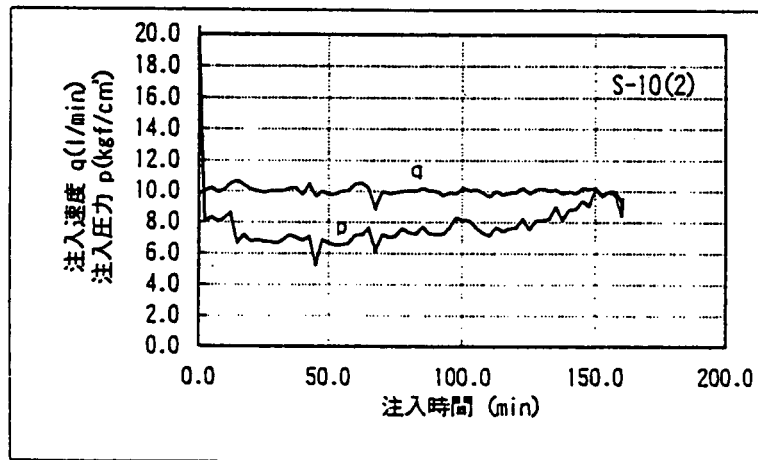
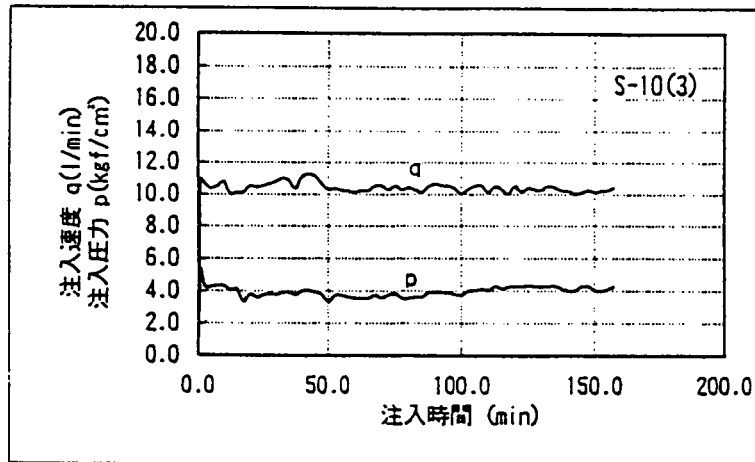


図-4.25 pq-tチャート (杭No. S10: 3点注入/100cmステップ^{*}/3m)

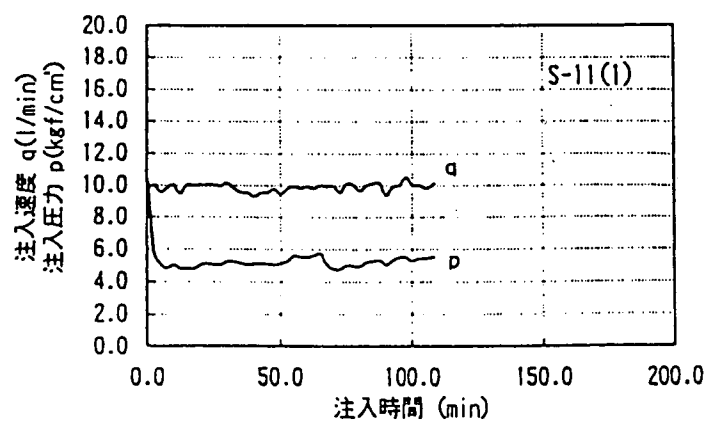
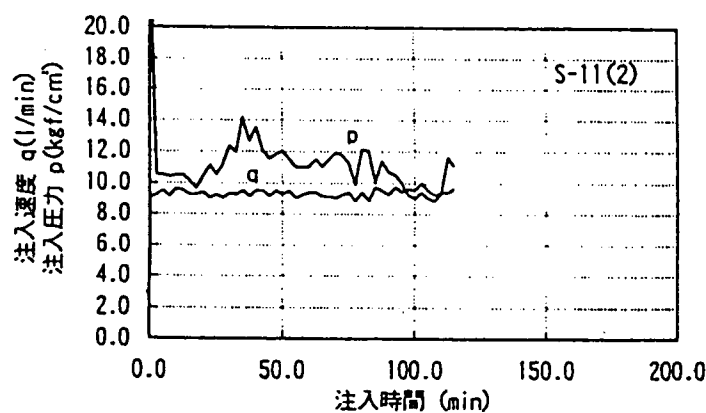
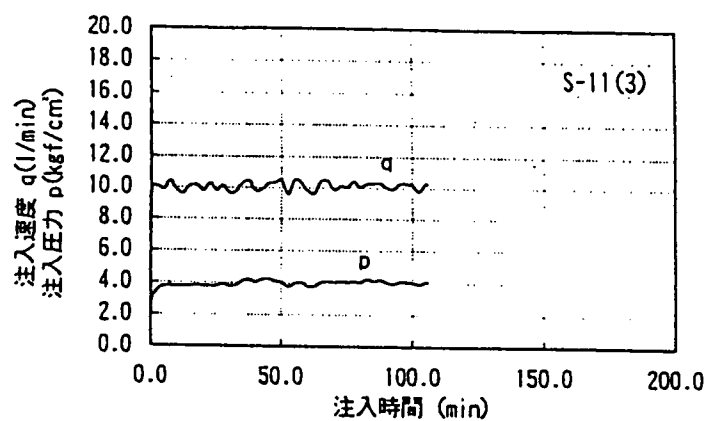
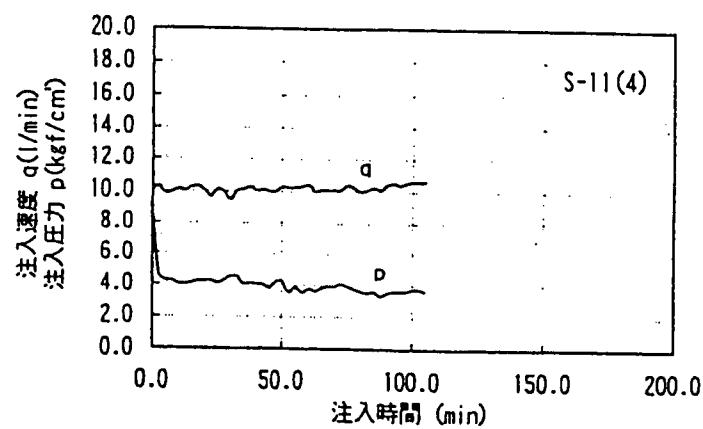


図-4.26 pq-tチャート (杭No. S11: 4点注入/66.6cmステップ°/2.66m)

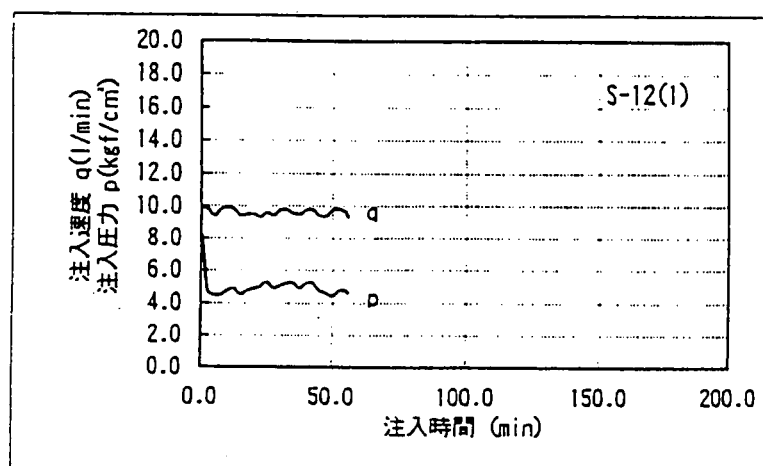
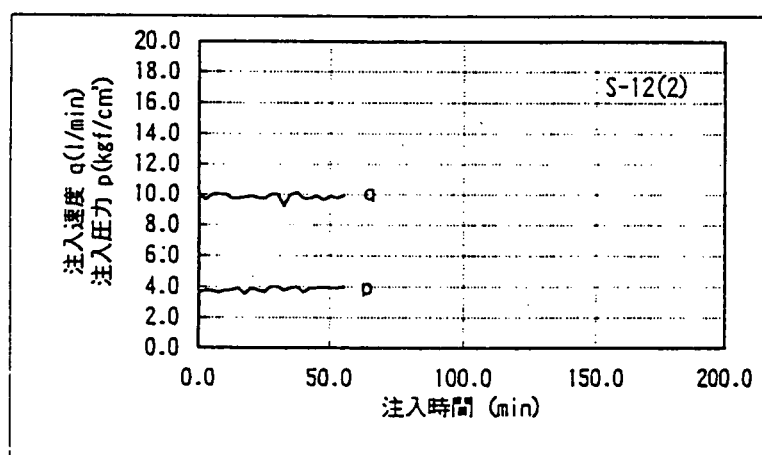
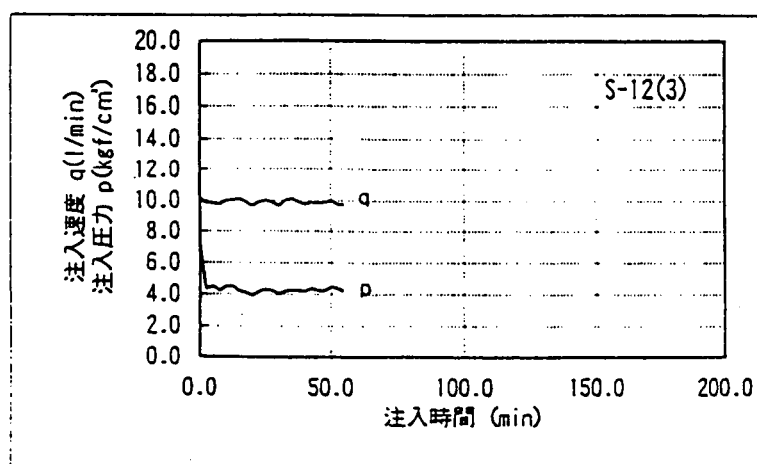


図-4.27 pq-tチャート 1~3ステップ目 (杭No. S12: 9点注入/33.3cmステップ/3m)

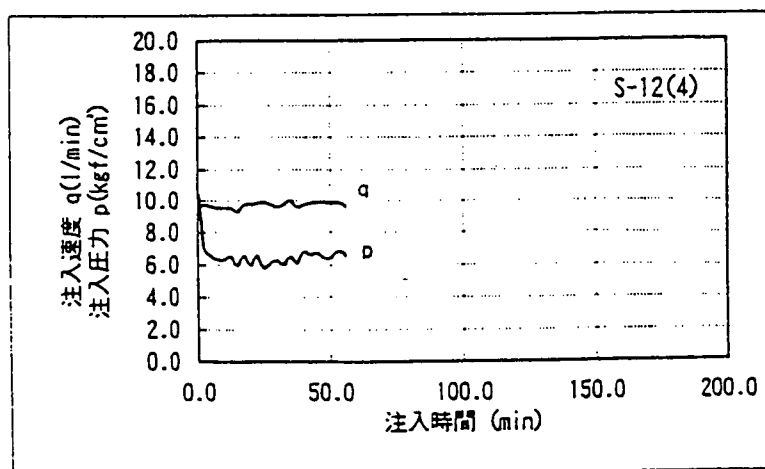
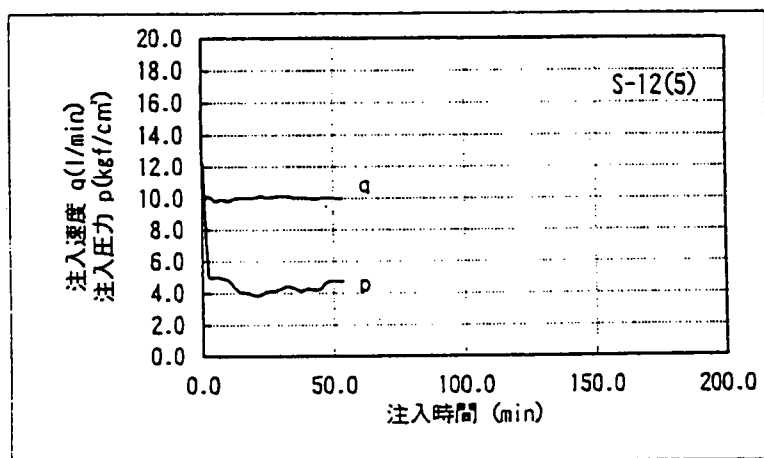
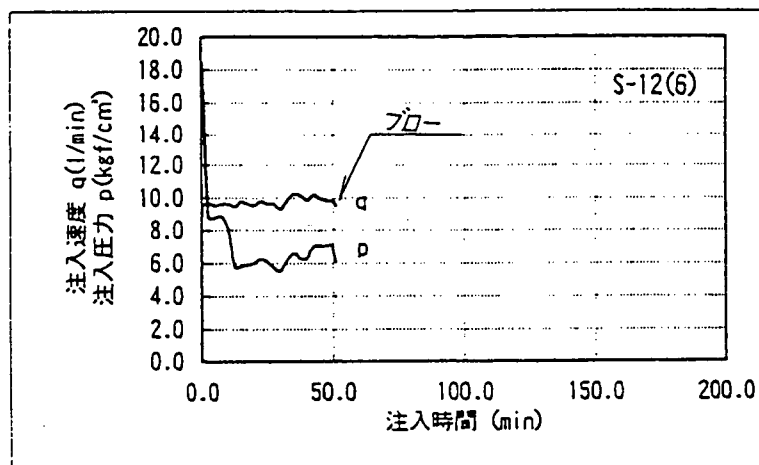


図-4.28 pq-tチャート 4~6ステップ目 (杭No. S12: 9点注入/33.3cmステップ/3m:6ステップ目でフロー)

(3) 計測機器計測結果

1) 間隙水圧計

図-4.29に間隙水圧計(WP)の設置図を示す。間隙水圧計は、図-4.29に示す第2注入孔(GL-3.7m)から水平方向50cmの位置にWP-2,3を、75cmの位置にWP-1,5をそれぞれ設置した。第3注入孔(GL-2.7m)には、水平方向50cmの位置にWP-4を設置した。間隙水圧計の設置位置は、セメント懸濁液の目標浸透域($\phi 1500$)内としたが、後述するように注入固結体の出来形が第2ステップ(GL-3.7m)付近で $\phi 900$ 程度、第3ステップ(GL-2.7m)付近で $\phi 1000$ 程度であり、すべて浸透域外になったためか、懸濁液の浸透状況など大型土槽実験⁷⁾にみられた間隙水圧の変動は認められなかった。

図-4.30, 図-4.31にS-6杭注入時のpq-tチャートと注入孔から50cmの位置に設置した間隙水圧計(WP-2~4)の経時変化を示す。

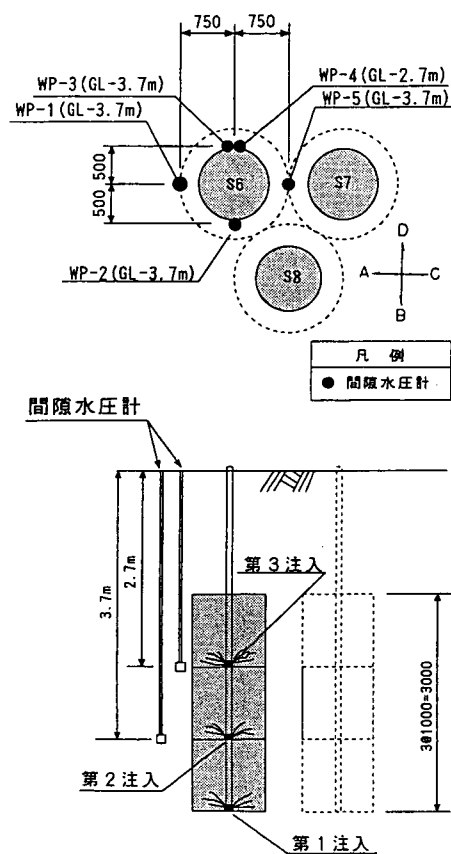


図-4.29 間隙水圧計の設置図

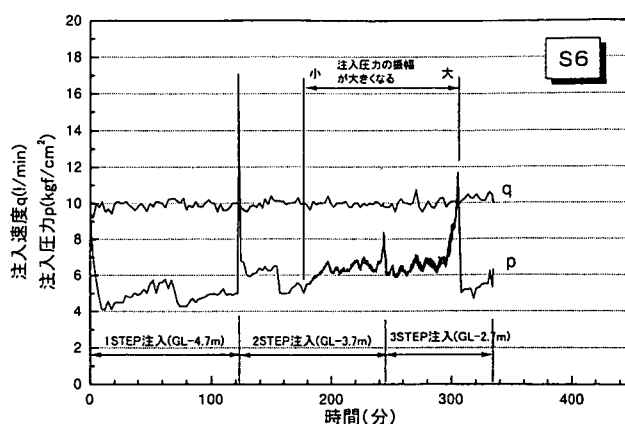


図-4.30 pq-tチャートの経時変化

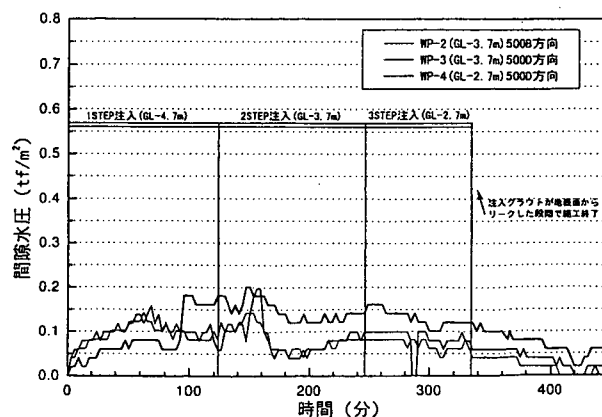


図-4.31 間隙水圧計の経時変化

・第1注入 (GL-4.7m)

図-4.31より、間隙水圧計 WP-2, 3 (GL-3.7m) はほぼ同じ傾向で変動し、注入開始から70分まで 0.15 tf/m^2 上昇し、以後 0.1 tf/m^2 程度減少している。WP-4 (GL-2.7m) の間隙水圧計は、注入開始から100分後に急激な上昇を示している。

図-4.30より、pq-tチャートによる圧力の変動は、60～70分まで $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ 上昇し、すぐに圧力が低下している。120分までは若干上昇傾向にあり、間隙水圧計WP-2, 3 (GL-3.7m) と同じ挙動を示している。ここで、60～100分の間隙水圧計およびpq-tチャートの挙動より、注入開始から60分までは浸透注入が行われていたが、以後、第1注入孔付近への浸透注入が限界になり、上昇浸透もしくはシール沿いに割裂を起こし、懸濁液が上部へ移行したため100分後にWP-4の間隙水圧が上昇したと推測される。

・第2注入 (GL-3.7m)

図-4.31より、WP-4 (GL-2.7m) の間隙水圧が若干高いが、WP-2, 3 (GL-3.7m) とほぼ同様な挙動を示している。間隙水圧が最大 0.2 tf/m^2 となる150分までは上昇傾向を示しているが、以後急激に間隙水圧が低下している。

図-4.30より、pq-tチャートによる圧力の変動は、間隙水圧計と同様に150分まで $1 \sim 2 \text{ kgf/cm}^2$ 上昇し、その後圧力が低下し、170分～243分まで上昇傾向を示している。また、180分からの圧力上昇時、注入圧力の振幅（ブレ）が徐々に大きくなっている。これは、注入孔に近い部分において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したために注入圧力が上昇し、振幅が大きくなったと推測される。

・第3注入 (GL-2.7m)

図-4.31より、間隙水圧計WP-2, 3, 4とも、340分の注入材が地上にリークするまで一定もしくは若干の減少傾向であり、注入後は、間隙水圧が消散している傾向がみられる。

図-4.30より、pq-tチャートによる圧力の変動は、約300分の最大 12 kgf/cm^2 まで上昇した後、 5 kgf/cm^2 に急激に減少し、340分まで若干の上昇傾向を示している。また、注入圧力が最大になる300分までは、第2注入と同じように注入圧力の振幅（ブレ）が徐々に大きくなり、注入圧力の減少後は小さくなった。これは、注入孔に近い部分において約300分で浸透限界になり、上向方向（地表面）に割裂が発生したため注入圧力が急激に低下したと考えられる。間隙水圧計の挙動は、注入圧力の変化と異なり減少傾向を示していることから、注入圧力の上昇は注入孔近傍での影響を受けていることがわかる。

以上のS6杭での計測結果をまとめると、

- 1) 間隙水圧計の位置がすべて懸濁液の浸透域外になったため、懸濁液の浸透状況など大型土槽実験⁷⁾にみられたような間隙水圧計の明確な変動は認められなかった。
- 2) 注入による間隙水圧の上昇は、注入孔から50cm離れた位置で最大で 0.2 tf/m^2 程度である。
- 3) 間隙水圧計と注入チャートの圧力の挙動は、注入初期においては同じ傾向であるが、注入材に対する土粒子の濾過現象がおこる注入後期においては、間隙水圧の上昇は見られず注入圧力のみが上昇していることから、注入圧力の上昇は注入孔近傍での影響を受けていると推測される。

2) 地下水位

注入工法と高圧噴射浸透工法施工部の中間地点付近に設置した水位測定孔の測定結果図（時刻歴図）を図-4.32に示す。ただし、図に示す縦軸は地表からの地下水位を表している。

地下水位は、S-6杭施工時よりS-2,7杭の施工時まで連続的に最大約0.15m孔内水位が上昇している。

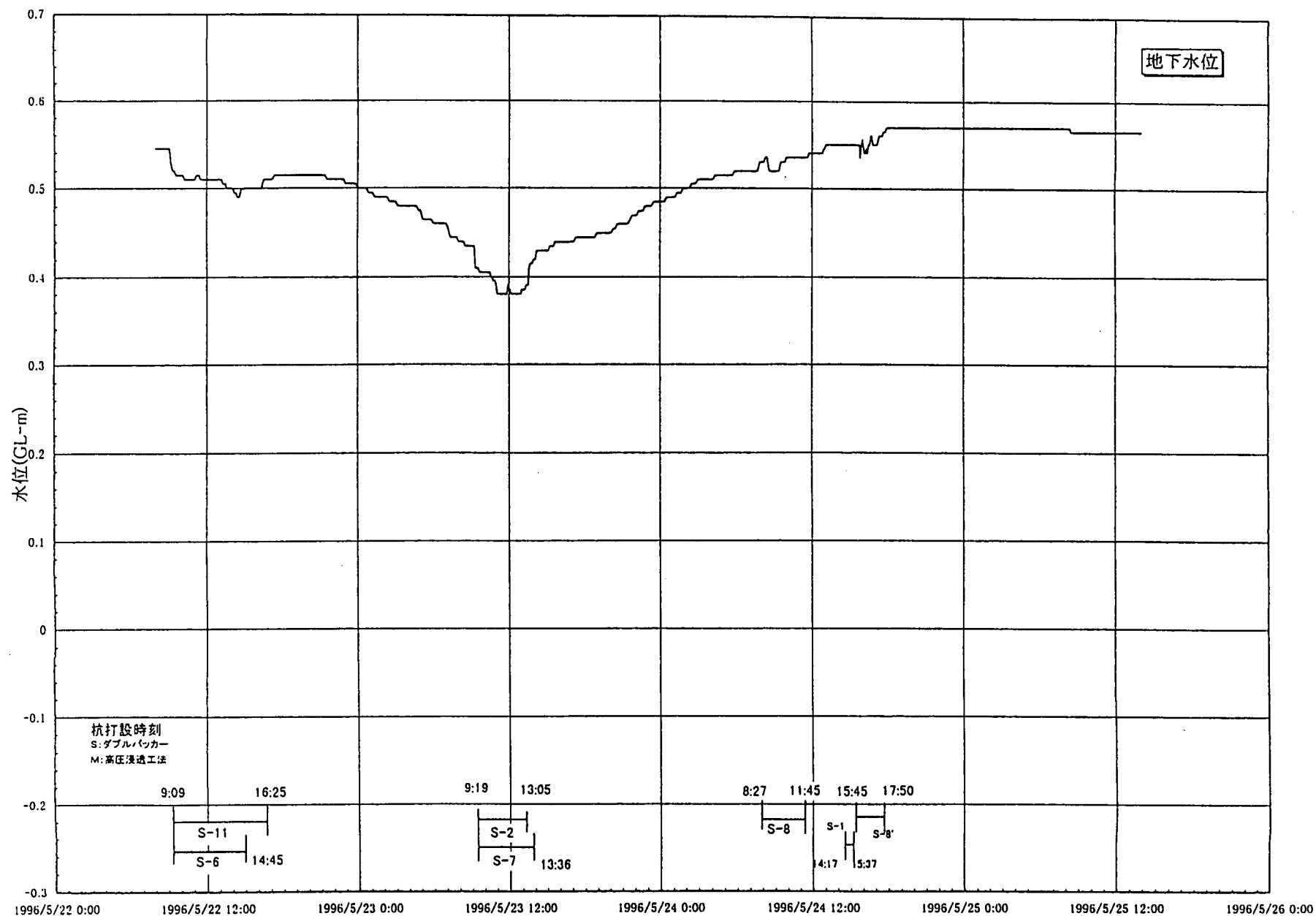


図-4.32 地下水位測定結果図

4.2.2 高圧噴射（浸透, 攪拌）工法

(1) 注入結果

各注入孔の注入結果を表-4.12に示す。ここで、計画注入量に対して実注入量が多くなっているが、これは施工機械のロッド引上げ長が50cm/回なので、3m改良時に5回のロッド持替時間（1分程度/回）を含んでいるためである。（ロッド持替時は噴射中）

表-4.12 注入結果

工法名	使用 固化材	杭No	改良長 L(m)	噴射時間 t(分/m)	吐出流量 q(ℓ/分)	計画注入量(l) $Q=L \times t \times q$	実注入量 (ℓ)
高圧噴射 浸透工法	超微粒子 セメント	M1	3.0	7.3	80	1,752	2,136
		M2	3.0	5.5	80	1,320	1,632
		M3	3.0	2.0	80	480	688
		M9	3.0	4.0	80	960	1,200
高圧噴射 攪拌工法	セメント系 固化材	M4	3.0	2.0	80	480	896
		M5	3.0	7.3	80	1,752	2,064
		M7	3.0	2.0	80	480	880

各杭の詳細な実験条件は、表-4.8を参照されたい。

(2) 計測機器計測結果

1) 挿入式傾斜計

挿入式傾斜計K 1、K 2の2方向の水平変位量の関係を図-4.33, 図-4.34に、深度方向分布図を図-4.35, 図-4.36に、示す。図-4.33, 図-4.34には各杭施工時に測定した最大水平変位量および変位深度と原点（傾斜計設置位置）に対する施工杭の方向を記してある。

・挿入式傾斜計No. K 1（X(+, -)、Y(+, -)方向）（図-4.33, 図-4.35参照）

図-4.33より、各施工杭の位置に対してほぼ相対的に変位していることがわかる。超微粒子セメント（W/C=1000%）を用いたM 1, M 3, M 9施工後の変位量は、ほぼ1mm程度の変位量である。セメント系固化材（W/C=150%）を用いたM 4, M 5施工後の変位量は、噴射時間を2.0分/mに設定したM 4杭では改良下端（GL-4.0m）付近の最大2.9mm、噴射時間を7.3分/mに設定したM 5杭では改良上端（GL-3.0m）付近で最大5.9mmであり、同じ噴射時間のM 1杭（W/C=1000%）の変位量に比べ約5倍の値を示している。

図-4.35より、超微粒子セメント（W/C=1000%）を用いたM 1, M 3, M 9に比べ、セメント系固化材（W/C=150%）を用いたM 4, M 5の変位量が大きくなっている。また、噴射時間を大きくすると変位量も大きくなることがわかる。つまり、水セメント比（W/C）が大きく、噴射時間を小さくするほど地盤に与える影響が少ないと考えられる。

・挿入式傾斜計No. K 2（X(+, -)、Y(+, -)方向）（図-4.34, 図-4.36参照）

図-4.34, 図-4.36より、超微粒子セメント（W/C=750%）を用いたM 2施工後の変位量は、改良下端（GL-4m）付近で最大5.4mmである。セメント系固化材（W/C=150% エアー）を用いたM 7施工後の変位量は、地表面で最大2.7mmである。両者を比較するとNo. K 1傾斜計の測定結果と異なり、超微粒子セメント（W/C=750%）を用いたM 2杭よりセメント系固化材（W/C=150% エアー）を用いたM 7杭の変位量が小さいことがわかる。これは、エアーと注入材を同時に高圧噴射したため、エアーリフト効果により高圧噴射攪拌域にこもった圧力を上方へ逃がしたため変位量が小さくなったと推測される。

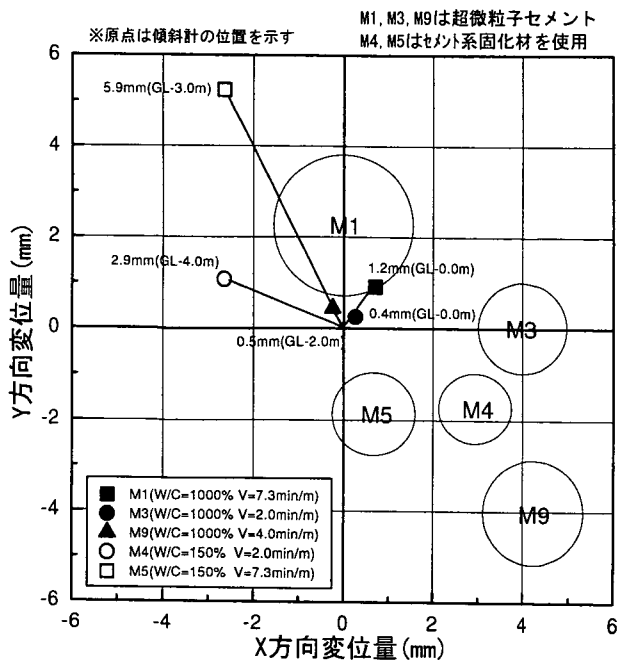


図-4.33 X Y方向の水平変位量の関係
(No. K 1 傾斜計)

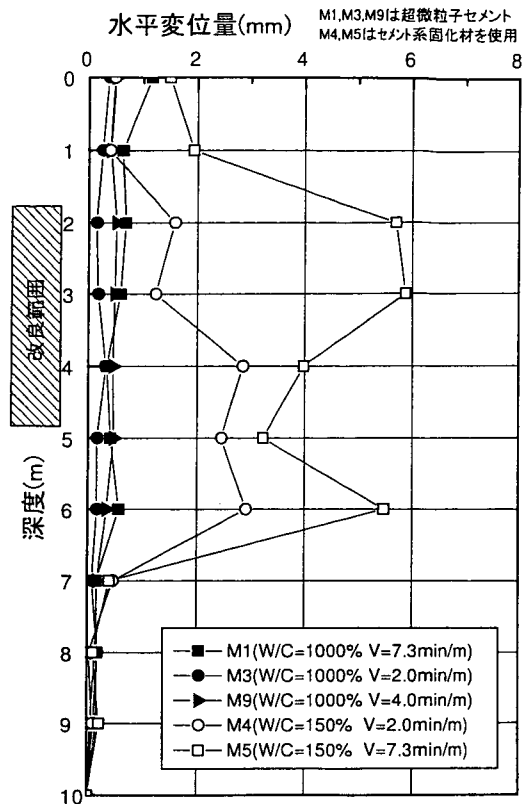


図-4.35 水平変位量の深度方向分布図
(No. K 1 傾斜計)

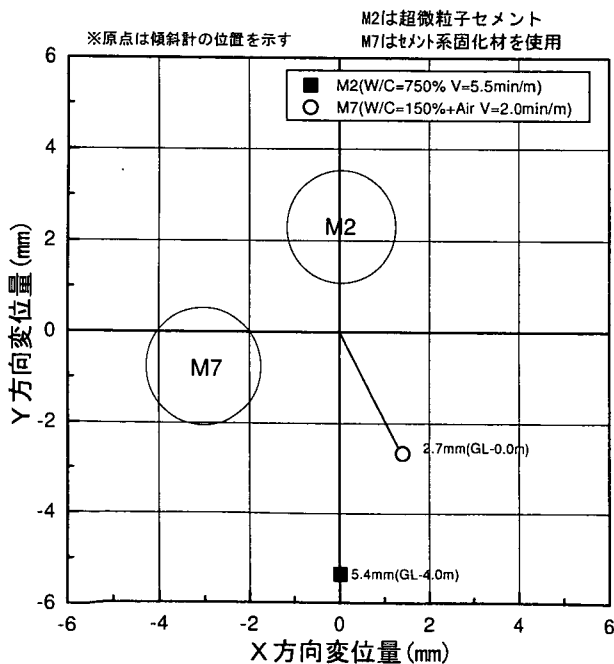


図-4.34 X Y方向の水平変位量の関係
(No. K 2 傾斜計)

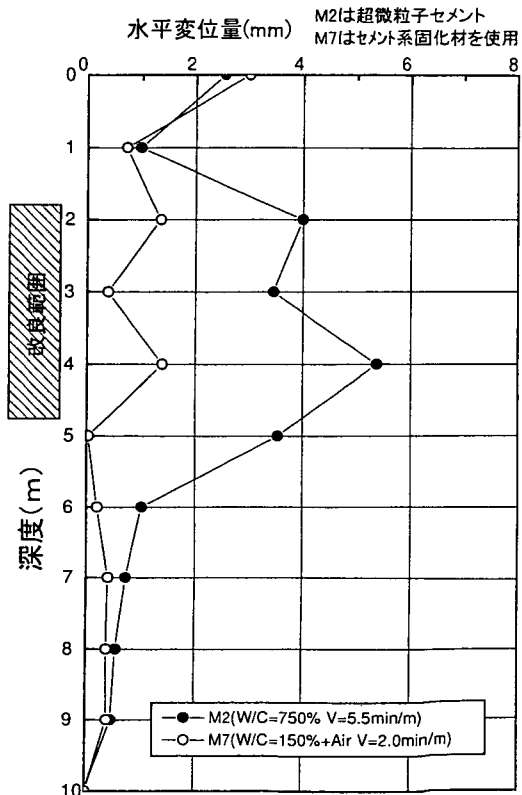


図-4.36 水平変位量の深度方向分布図
(No. K 2 傾斜計)

図-4.37に各杭の傾斜計まで距離と変位量の関係を、図-4.38に各杭の注入セメント量と変位量の関係を示す。図-4.37より、注入孔から傾斜計までの距離が遠くなるほど水平変位量が小さくなる傾向を示している。また、超微粒子セメント(W/C=1000%)とセメント系固化剤(W/C=150%)を用いた杭で比較すると、W/C=1000%で施工したM1,M3,M9の変位量が、W/C=150%で施工したM4,M5の変位量より小さくなっている。

図-4.38に示す注入セメント量は、各杭の注入量から算出した改良長1m当たりのセメント量を示している。図より変位量が大いものは注入セメント量が多いことがわかる。これは、水セメント比を小さくし、改良速度を大きくすることで注入セメント量が増加するので、地盤内の体積変化が生じ地盤変状を起こしていると考えられる。

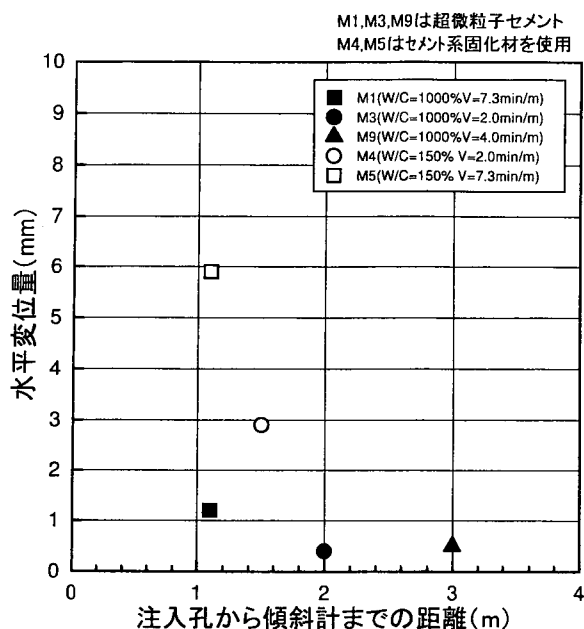


図-4.37 各杭の傾斜計まで距離と変位量の関係

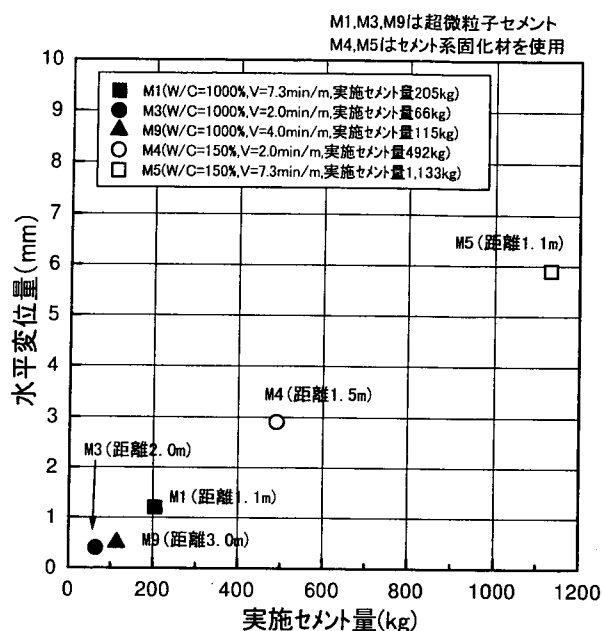


図-4.38 各杭の注入セメント量と変位量の関係

以上、挿入式傾斜計の計測結果をまとめると

- 1) 注入材の水セメント比 (W/C) が大きく注入セメント量が少ないと水平変位量が小さくなる。
- 2) 超微粒子セメントを用いた水セメント比 (W/C=1000%) の施工では、ほぼ 1 mm 程度の水平変位量である。

2) パイプひずみ計

図-4.39～図-4.50にパイプひずみ計 (No. A, B) の各方向の計測結果図(時刻歴図)を、図-4.51～図-4.54にパイプひずみ計 (No. A, B) の各方向の深度方向分布図を示す。

・パイプひずみ計No. A (X、Y方向)

図-4.43, 図-4.44, 図-4.51, 図-4.52より超微粒子セメント (W/C=1000%) を用いたM1杭 (改良速度 $V=7.3$ 分/m) 施工時は、X、Y方向とも削孔中にGL-1.0m～-6.0mのひずみ計に変化が見られ、注入時は注入開始直後にGL-1.0m～-4.0mのひずみ計に変化が見られる。注入中および注入終了直前では、各ひずみ計とも変化はほとんど見られない。

改良範囲 (GL-1.7m～-4.7m) のなかでひずみ量が多いのは、X方向で改良上端付近のGL-2.0mで 1000×10^{-6} (ストレン)、Y方向で改良上端付近のGL-2.0mで 600×10^{-6} (ストレン) のひずみ量を示している。

削孔中のひずみ計の変動は、削孔時にNCV先端モニター (モニター先端より削孔水吐出) を使用せず、通常タイプの先端モニター (吐出は横方向のみ) を使用し、圧力 50kgf/cm^2 程度で削孔水を横方向に吐出したために、ひずみ計に影響を与えたのではないかと考える。なお、M2杭以降についてはNCVモニターを使用し削孔を行った。

図-4.45, 図-4.46, 図-4.51, 図-4.52より、M3杭 (改良速度 $V=2.0$ 分/m) 施工時は、M1杭と異なりNCVモニターを使用し削孔を行ったため削孔中のひずみ計に変化はなく、注入開始直後にGL-1.0～-6.0mでひずみ量に変化がみられる。特にM3杭の半径方向であるY軸方向ひずみ計のGL-4.0～-5.0mで大きく変化している。この位置は、注入開始時の高圧噴射口 (GL-4.7m) 付近であり、高圧噴射圧力による影響を受けていると思われる。しかし、注入終了時の改良上端 (GL-1.7m) 付近であるGL-2.0mのひずみ計にはほとんど変化していない。

改良範囲 (GL-1.7m～-4.7m) のなかでひずみ量が多いのは、X方向でGL-1.0mで 1200×10^{-6} (ストレン)、Y方向は改良下端付近のGL-4.0mで 800×10^{-6} (ストレン) のひずみ量を示している。

超微粒子セメント (W/C=1000%) を用いた、改良速度の異なるM1杭とM3杭を比較すると、M3杭の3.6倍の噴射量に相当するM1杭の注入後のひずみ量は、M3杭とほぼ同じである。また、ひずみ量はM1、M3とも注入開始直後に大きく変化し、注入終了直前には変化が見られないことがわかる。

・パイプひずみ計No. B (X、Y方向)

図-4.47, 図-4.48, 図-4.53, 図-4.54より超微粒子セメント (W/C=750%) を用いたM2杭 (改良速度 $V=5.5$ 分/m) 施工時のひずみ量の変化は、注入開始直後にM2杭の半径方向であるY軸方向の改良下端付近GL-5.0mで 300×10^{-6} (ストレン) 程度ひずみ量が増加している。また、注入終了直前のひずみ量はNo. Aひずみ計と同様にほとんど変化がみられない。

図-4.49, 図-4.50, 図-4.53, 図-4.54よりセメント系固化材 (W/C=150%) を用いたM7杭 (改良速度 $V=2.0$ 分/m Airとスラリー) 施工時は、削孔時にX、Y方向のひずみ計GL-1.0m～-5.0mが変化しているが、特にX方向の

ひずみ計GL-1.0mが 750×10^{-6} (ストレーン) 程度上昇している。注入時は、X, Y方向ともGL-1.0m～-4.0mのひずみ計が増加し、注入終了後はGL-1.0mのひずみ計を除き平衡状態を保っている。

削孔中のひずみ計の変動は、削孔時にエア用ノズルが目詰まりしないように少量のエアを吐出していたため、ひずみ計に影響を与えたのではないかと考えられる。また、注入終了後X方向GL-1.0mのひずみ計が大きく変動しているのは、削孔および注入時のエアが表土（粘性土）と砂層との層境付近（GL-1.0m）沿いに走ったため（排泥スライムが地表面に出てこなかった）GL-1.0mのひずみ計だけが大きく影響を受けていると考えられる。

セメント系固化材（W/C=150%）を用いたM7杭と超微粒子セメント（W/C=750%）を用いたM2杭の注入後のひずみ量を比較すると、若干ではあるが超微粒子セメント（W/C=750%）を用いたM2杭のひずみ量が小さいことがわかる。

以上、パイプひずみ計の計測結果をまとめると、

- 1) 超微粒子セメント（W/C=1000%）を用いた、改良速度の異なるM1杭とM3杭を比較すると、M3杭の3.6倍の噴射量に相当するM1杭の注入後のひずみ量は、M3杭とほぼ同じレベルであり、噴射量の違いによるひずみ量の変化はみられなかった。
- 2) 超微粒子セメントを用いたM1、M2、M3杭のひずみ量は、注入開始直後に大きく変化した後にはほとんど変化がみられない。

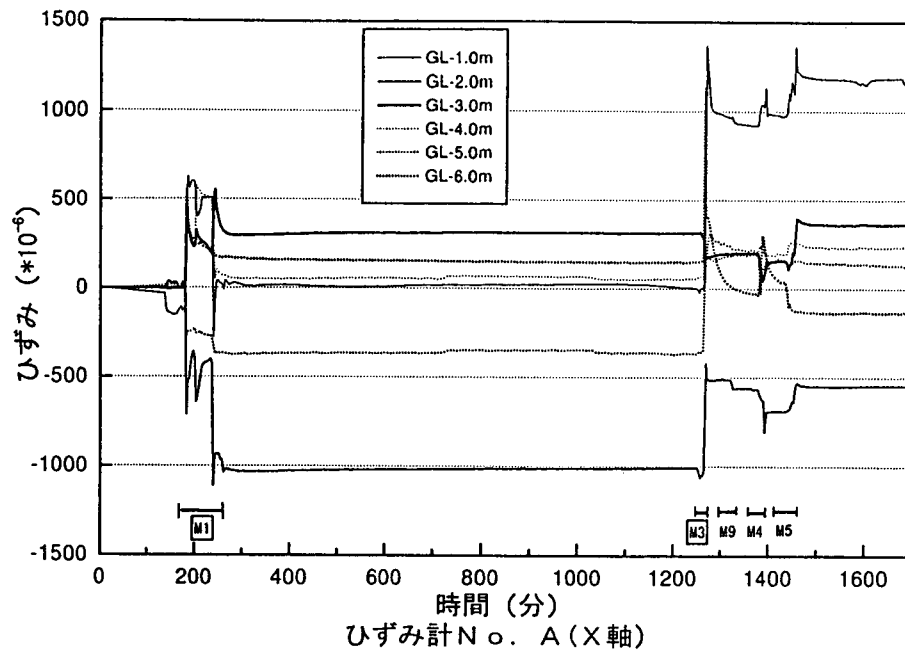


図-4.39 パイプひずみ計 (No. A) の X 方向の計測結果図 (時刻歴図)

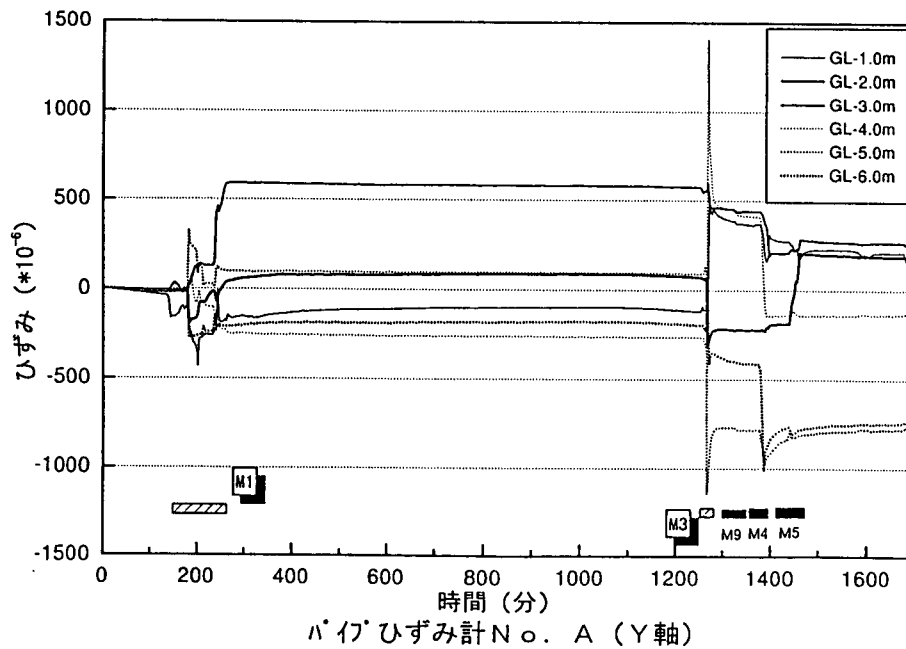


図-4.40 パイプひずみ計 (No. A) の Y 方向の計測結果図 (時刻歴図)

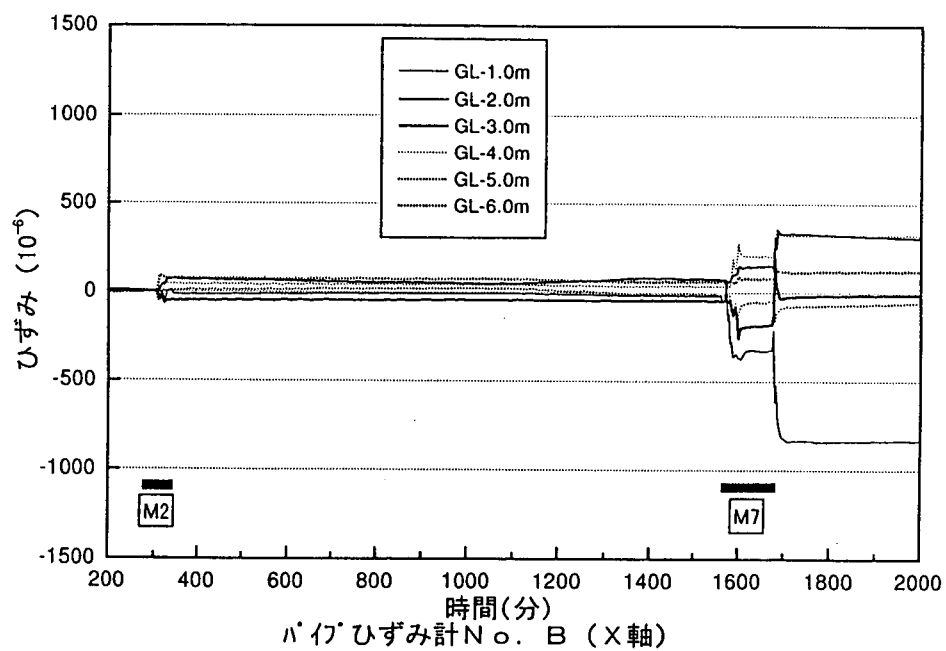


図-4.41 パイプひずみ計 (No. B) のX方向の計測結果図 (時刻歴図).

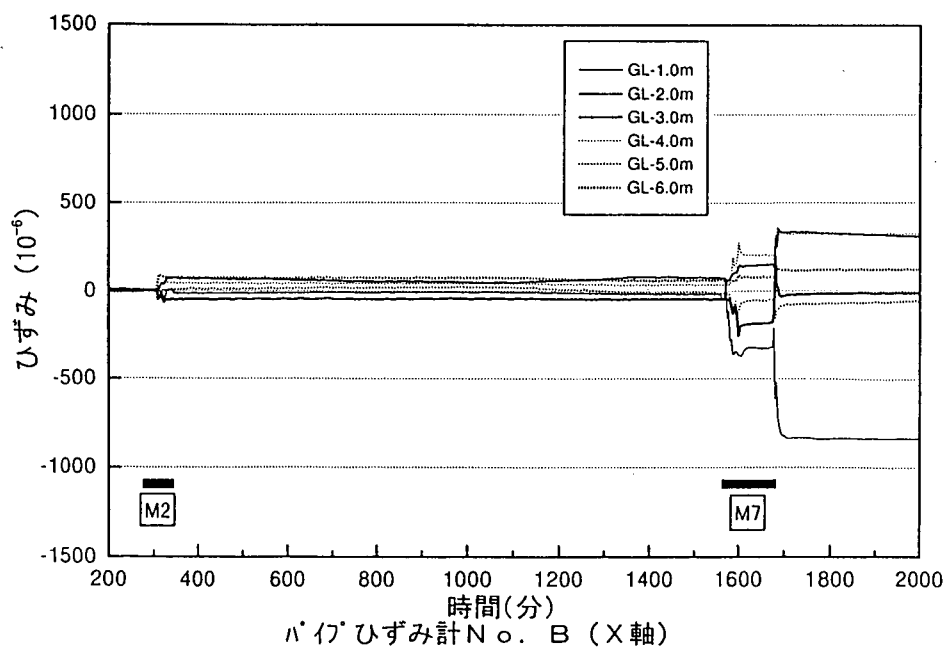


図-4.42 パイプひずみ計 (No. B) のY方向の計測結果図 (時刻歴図)

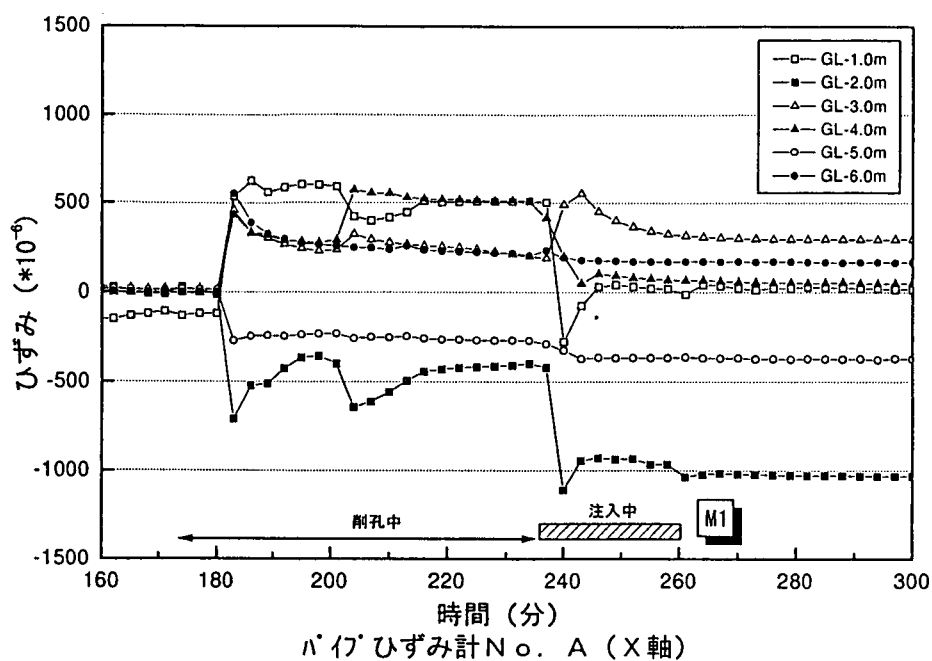


図-4.43 M1施工時のパイプひずみ計 (No. A) のX方向の時刻歴図

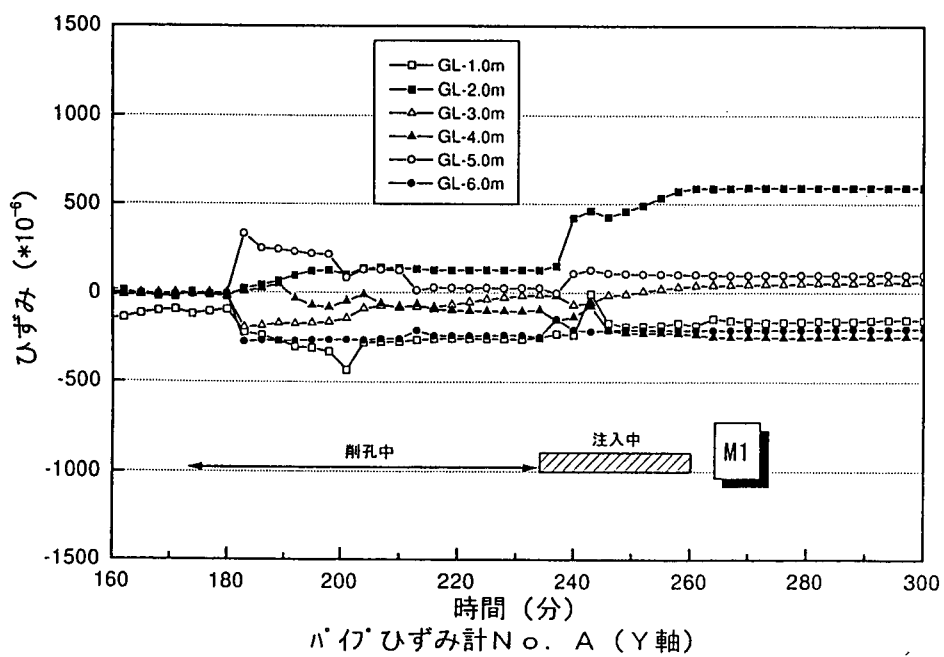


図-4.44 M1施工時のパイプひずみ計 (No. A) のY方向の時刻歴図

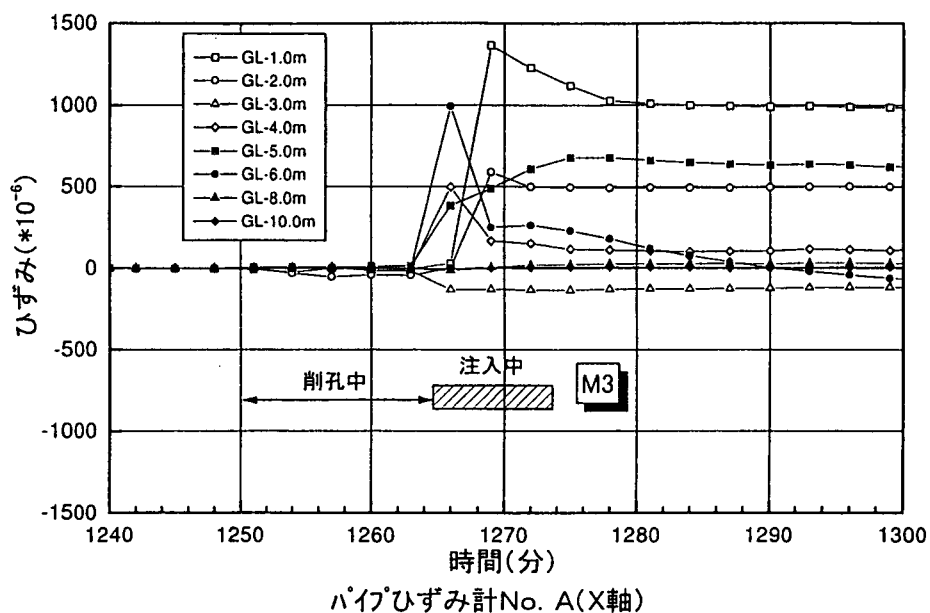


図-4.45 M3施工時のパイプひずみ計 (No. A) のX方向の時刻歴図

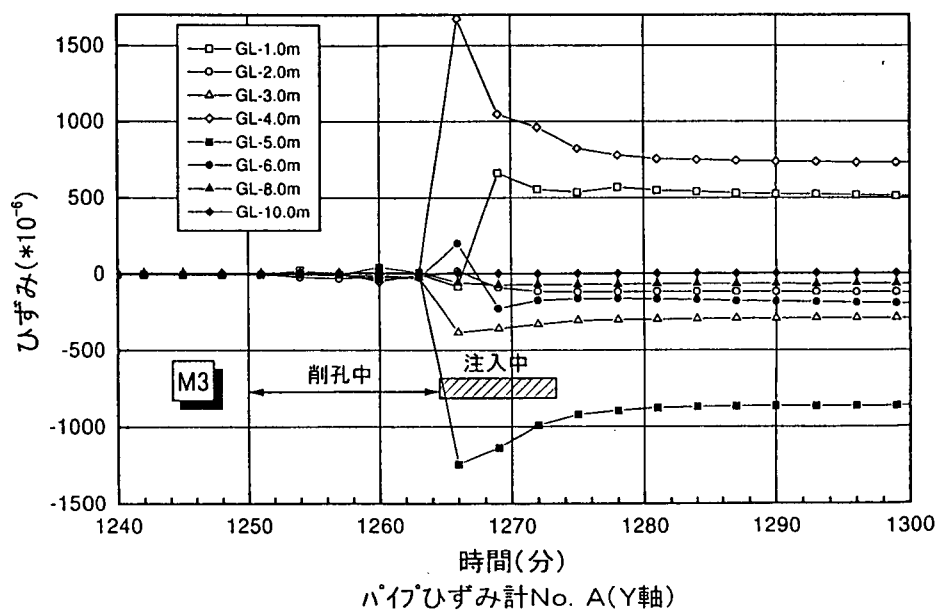


図-4.46 M3施工時のパイプひずみ計 (No. A) のY方向の時刻歴図

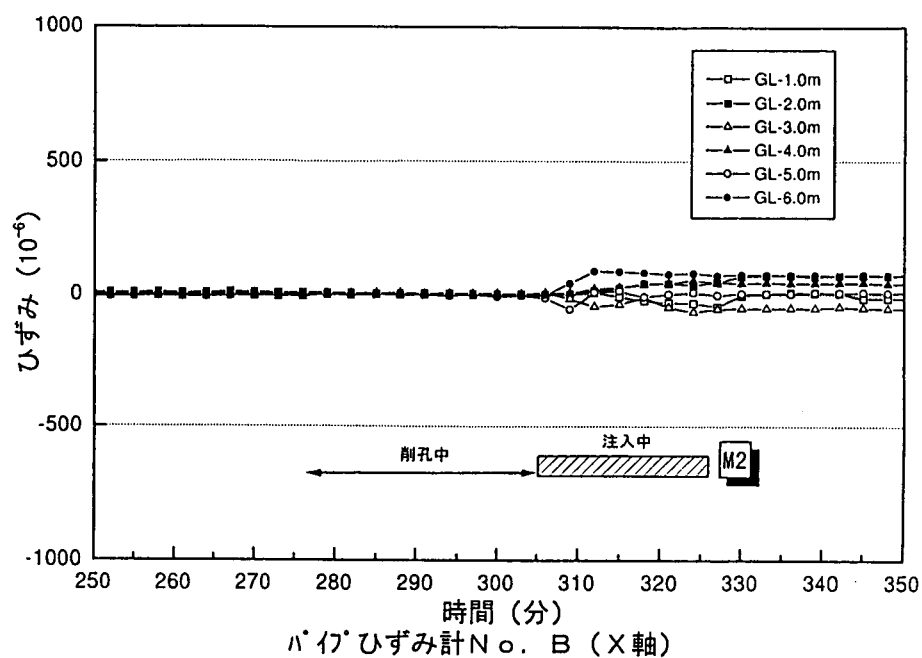


図-4.47 M2施工時のパイプひずみ計 (No. B) のX方向の時刻歴図

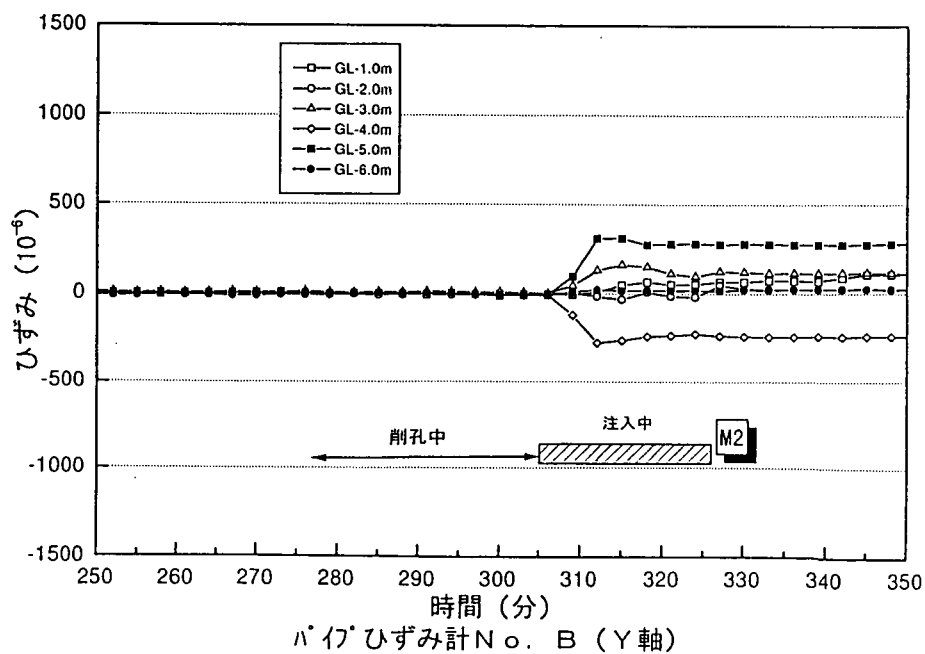


図-4.48 M2施工時のパイプひずみ計 (No. B) のY方向の時刻歴図

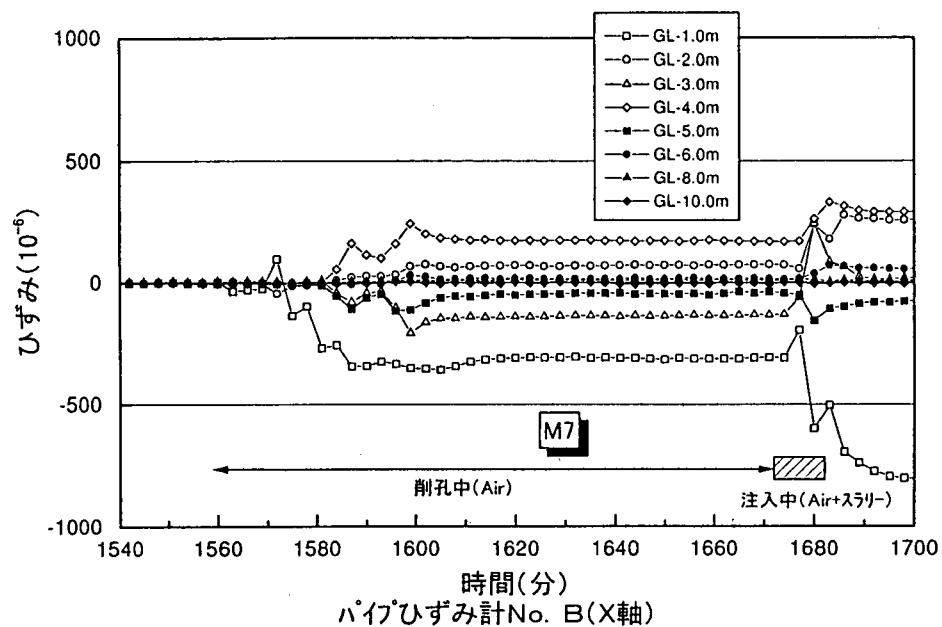


図-4.49 M7施工時のパイプひずみ計 (No. B) のX方向の時刻歴図

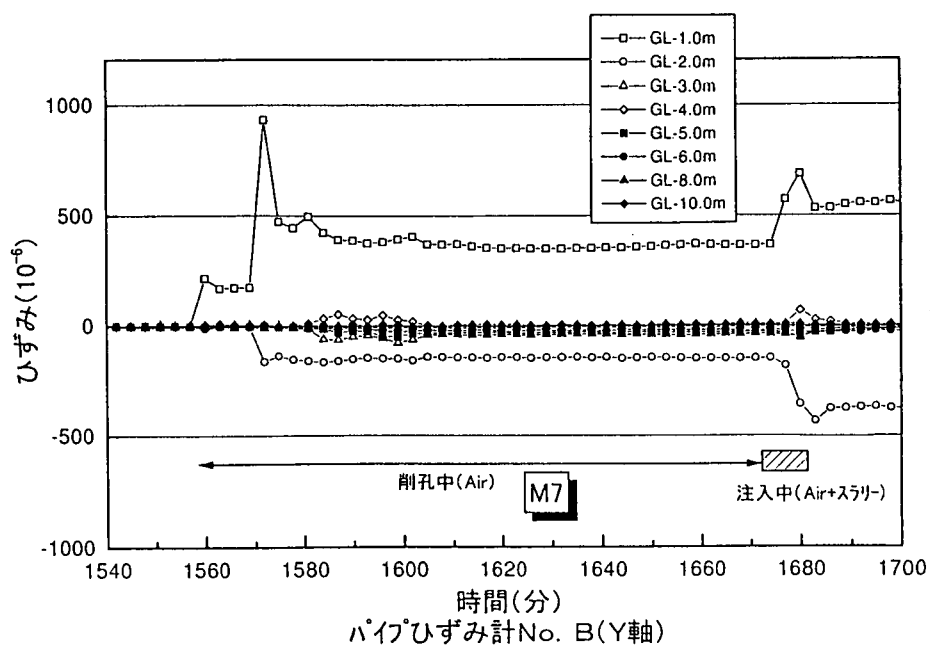


図-4.50 M7施工時のパイプひずみ計 (No. B) のY方向の時刻歴図

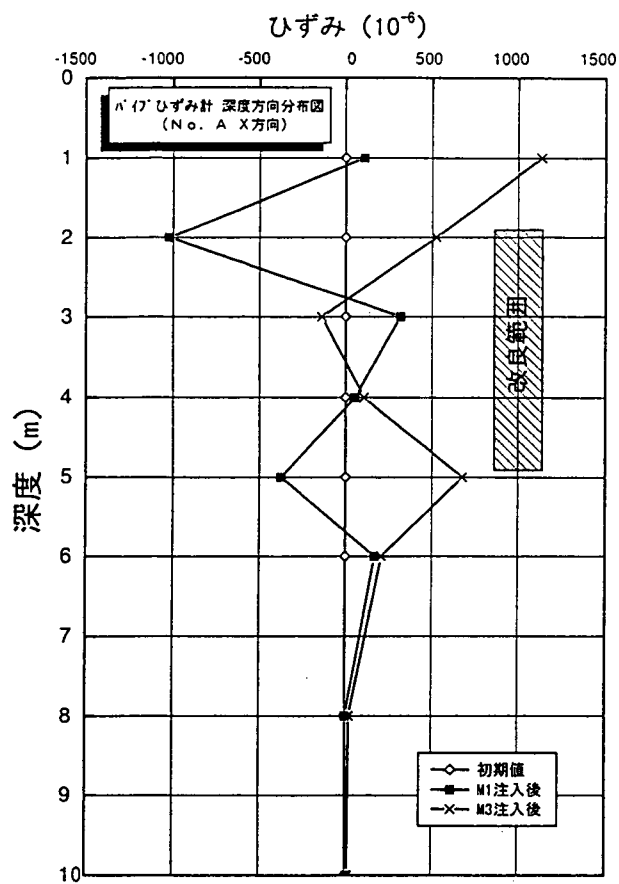


図-4.51 パイプひずみ計 (No. A) のX方向の深度方向分布図

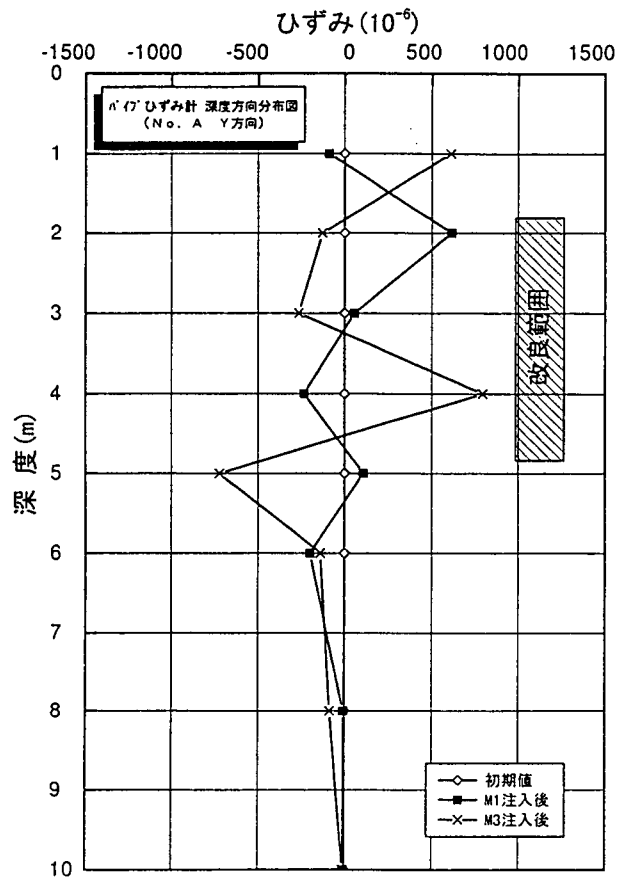


図-4.52 パイプひずみ計 (No. A) のY方向の深度方向分布図

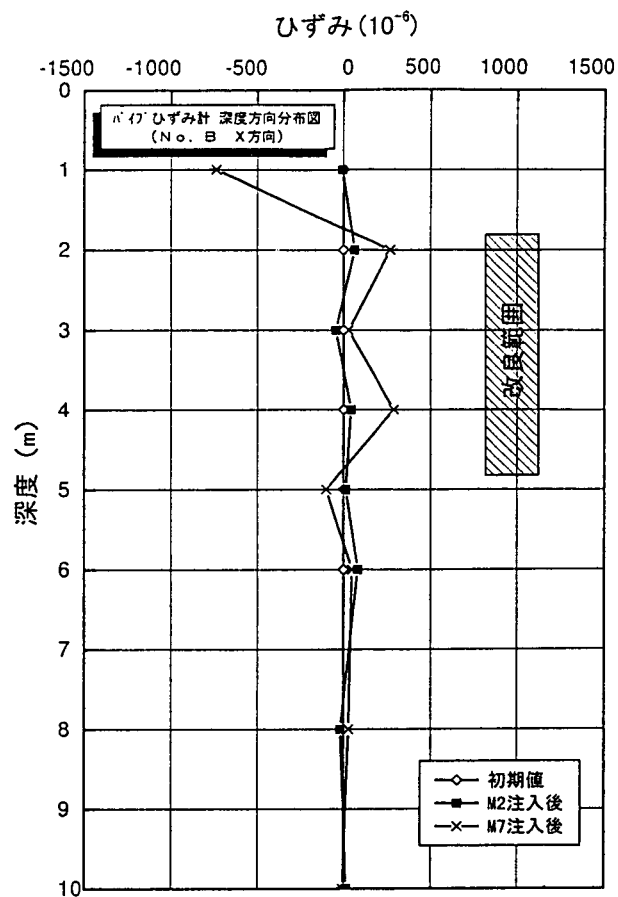


図-4.53 パイプひずみ計 (No. B) のX方向の深度方向分布図

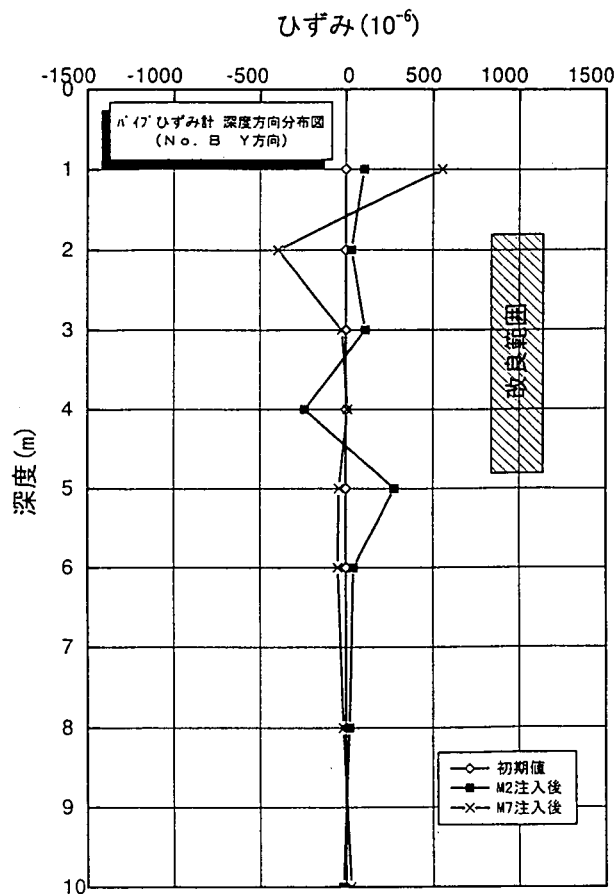


図-4.54 パイプひずみ計 (No. B) のY方向の深度方向分布図

③ 挿入式土圧計

挿入式土圧計 (TP-1) はM1杭 (超微粒子セメント, W/C=1000%, D/C=10%) およびM4, 5 (セメント系固化材, W/C=150%) の計測を、土圧計 (TP-2) はM2杭 (超微粒子セメント, W/C=750% D/C=10%) およびM7杭 (W/C=150% Airとスリを併用して噴射) の計測を実施した。挿入式土圧計による計測は、施工時に3～5分間隔で、施工中断時には10分間隔で計測を連続して実施した。

・TP-1土圧計

M1とM4, M5杭施工時の側圧土圧・間隙水圧・有効土圧の経時変化を図-4.55, 図-4.56に示す。ここで、有効土圧は、挿入式土圧計による側圧土圧から間隙水圧を引いたものである。

図-4.55より超微粒子セメント (W/C=1000%) を用いたM1杭 (改良速度 $V=7.3$ 分/m) 施工時は、注入開始直後に有効土圧が 2.6 tf/m^2 程度上昇し、以後土圧は急激に低下し、ほぼ一定状態で推移している。また、注入後の有効土圧は、注入前と比べると約 1 tf/m^2 低下している。

図-4.56よりセメント系固化材 (W/C=150%) を用いたM4杭 (改良速度 $V=2.0$ 分/m)、M5杭 (改良速度 $V=7.3$ 分/m) 施工時は、注入開始直後に有効土圧が $5 \sim 6 \text{ tf/m}^2$ 程度上昇し、以後M4杭は徐々に低下し一定状態になっているが、M5杭は注入中に上昇下降を繰り返している。注入後の有効土圧は、M4, M5施工前よりM4杭で約 2 tf/m^2 、M5杭で約 4 tf/m^2 上昇し累積傾向を示しており、注入セメント量の増加による体積変化によるものと推測される。

ここで、超微粒子セメント (W/C=1000%) を用いたM1杭とセメント系固化材 (W/C=150%) を用いたM4, M5杭を比較すると、水セメント比 (W/C) が大きいほど土圧の上昇が小さい傾向を示している。

・TP-2土圧計

M2, M7杭施工時の側圧土圧・間隙水圧・有効土圧の経時変化を図-4.57, 図-4.58に示す。

超微粒子セメント (W/C=750%) を用いたM2杭 (改良速度 $V=5.5$ 分/m) 施工時は、注入開始後に有効土圧が 2.7 tf/m^2 程度上昇し、以後土圧は急激に低下し、ほぼ一定状態で推移している。また、注入後の有効土圧は、注入前と比べるとほぼ同じ値を示している。

セメント系固化材 (W/C=150%) を用いたM7杭 (改良速度 $V=2.0$ 分/m Airとスリ-) 施工時は、削孔時に有効土圧が 3 tf/m^2 程度上昇した後、削孔前より 2 tf/m^2 程度減少している。注入時においては、終了直前に 3 tf/m^2 程度の上昇後急激に減少している。特に、注入前の土圧より 5 tf/m^2 程度減少している点で、No. Bパイプひずみ計と同様に、エアが土圧計付近に流入し、地盤を乱した影響を受けたのではないかと考えられる。

以上まとめると挿入式土圧計において

- 1) 高压噴射時 (注入時) の水平土圧の増加は、水セメント比 (W/C) が大きくするほど小さい。
- 2) 超微粒子セメント (W/C=1000%, 750%) を用いた杭は、セメント系固化材 (W/C=150%) を用いたものより注入後の体積増加にともなう水平土圧の上昇が見られない。

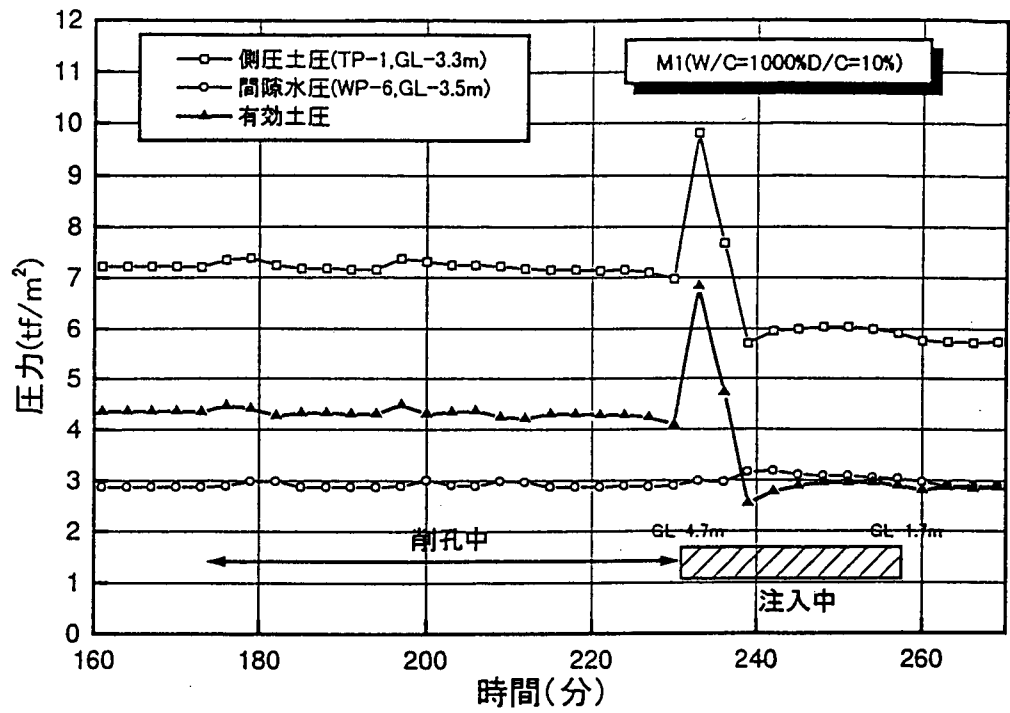


図-4.55 土水圧の経時変化 (M1 杭)

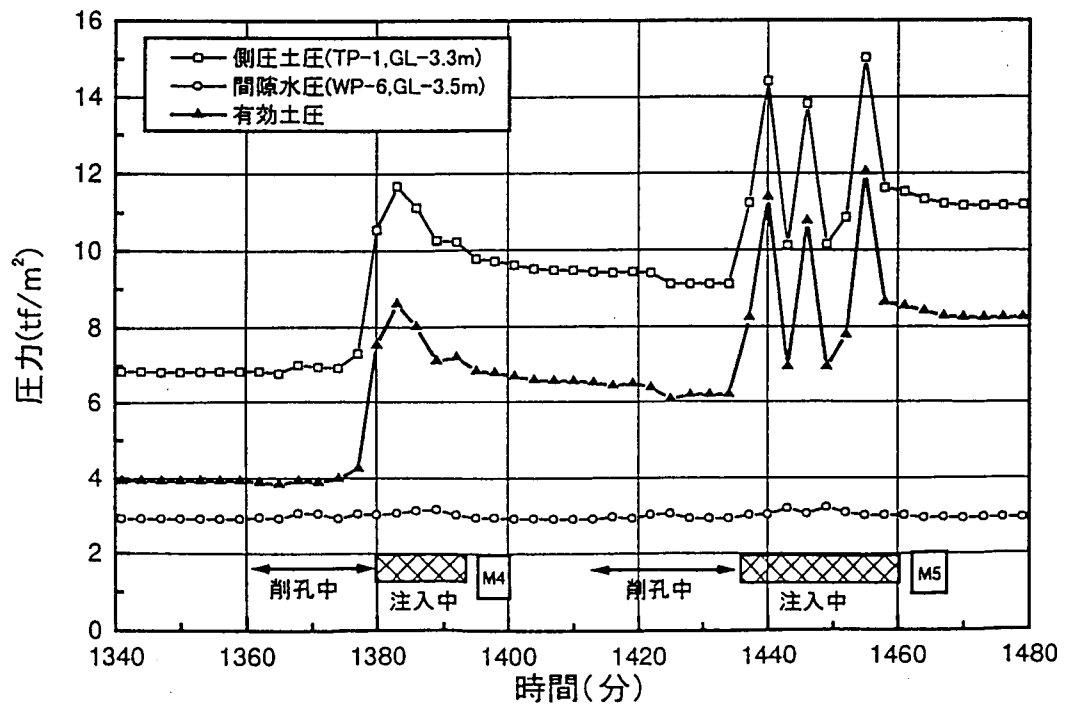


図-4.56 土水圧の経時変化 (M4, M5 杭)

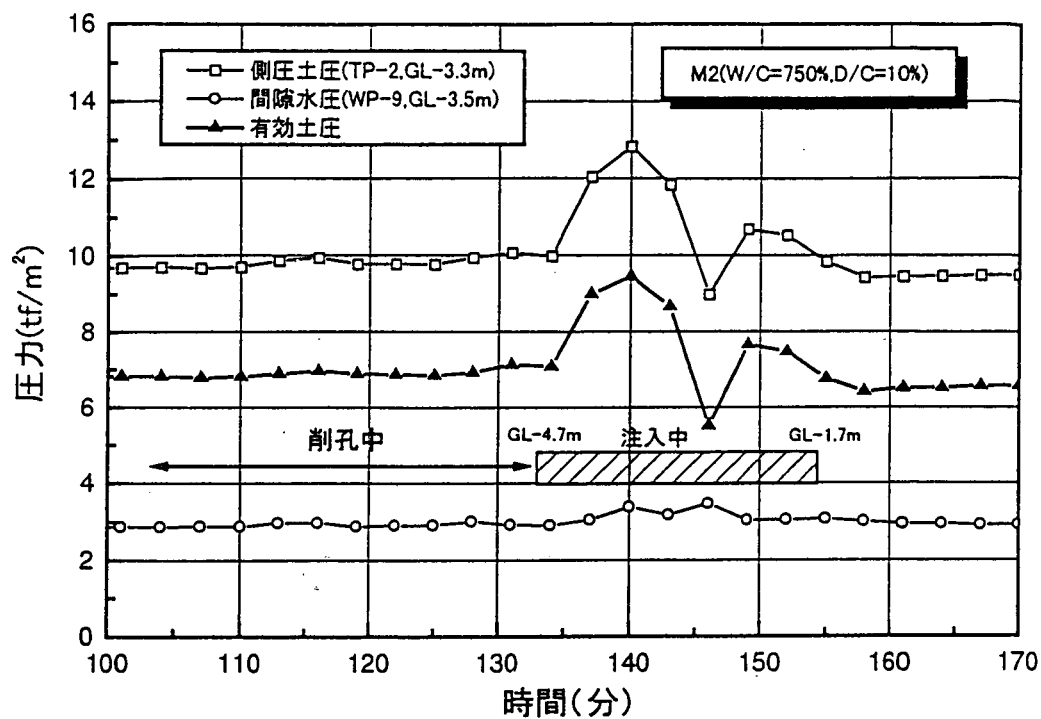


図-4.57 土水圧の経時変化 (M2杭)

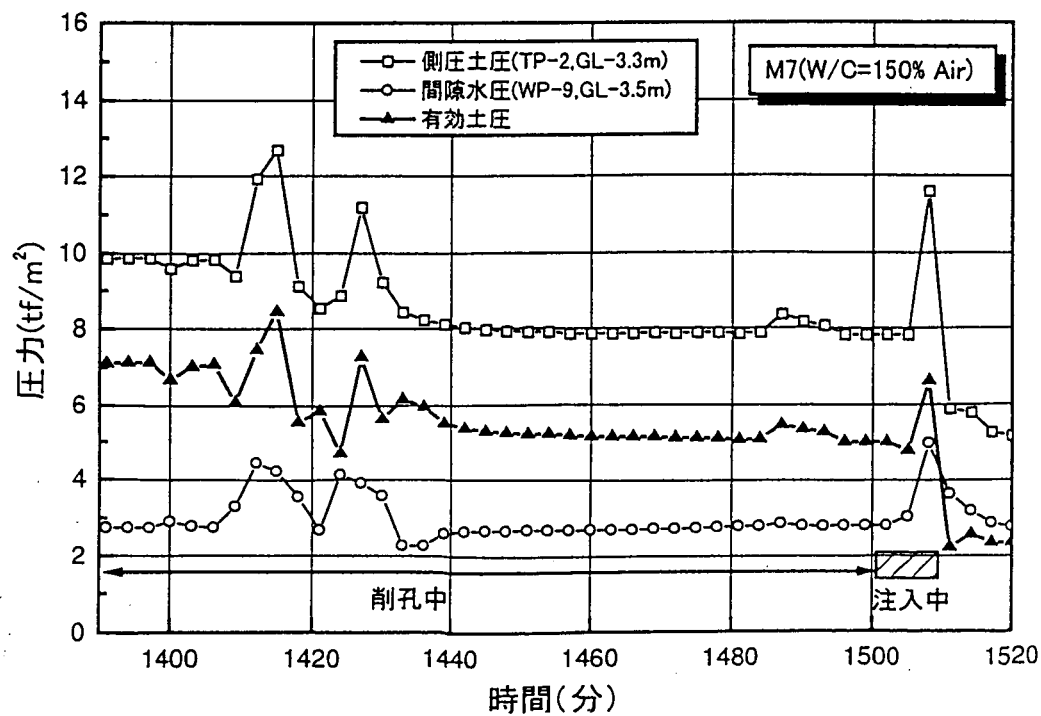


図-4.58 土水圧の経時変化 (M7杭)

4) 間隙水圧計、地下水位

間隙水圧計と地下水位の経時変化を図-4.59, 図-4.60, 図-4.61, 図-4.62に示す。

図-4.59, 図-4.60よりM1杭（超微粒子セメント, W/C=1000, D/C=10%）施工時において間隙水圧計WP-6, 7, 8（GL-3.5m）は、注入開始（GL-4.7m）から間隙水圧計測定位置であるGL-3.5m付近改良時の243分まで0.3～0.4 tf/m²程度上昇しているが、以後、WP-8を除き減少し、注入終了後、初期値に戻っている。間隙水圧計WP-8（GL-3.5m）は、255分（GL-2.3m改良時）まで急激に1.0 tf/m²程度上昇し、以後減少している。

M1杭は、次節の事後調査確認時に改良径約1.6mの改良体が確認されており、M1杭に一番近い間隙水圧計WP-8（M1から50cm離れ）が改良域内にあったことから推測すると、243分（GL-3.5m改良）から255分（GL-2.3m改良）の間に、超微粒子セメント注入材が間隙水圧計WP-8に直接達したため大きく上昇したと考えられる。改良域外にあるWP-6（M1から110cm離れ）、WP-7（M1から80cm離れ）は、間隙水圧計設置位置GL-3.5m付近改良時に最大値を示している。

注入孔から異なる位置にある間隙水圧計WP-6・7・8で間隙水圧の上昇が大きいのは、M1杭に近い間隙水圧計WP-8、WP-7、WP-6の順であり、高圧噴射吐出孔に近いほど間隙水圧の上昇が大きいことがわかる。

M2杭（超微粒子セメント, W/C=750%, D/C=10%）施工時の間隙水圧計WP-9（GL-3.5m）は、注入開始（GL-4.7m）から間隙水圧計測定位置であるGL-3.5m付近改良時の318分まで0.5 tf/m²程度上昇しているが以後減少し、注入終了後、初期値に戻っている。間隙水圧計WP-9のは、M1杭と同様に、間隙水圧計設置位置GL-3.5m付近改良時に最大値を示している。

図-4.61より超微粒子セメント（W/C=1000%, D/C=10%）を用いたM3（改良速度2.0分/m）、M9（改良速度4.0分/m）杭の間隙水圧は、最大で0.3 tf/m²程度上昇している。また、セメント系固化材（W/C=150%）を用いたM4（改良速度2.0分/m）、M5（改良速度7.3分/m）杭の間隙水圧も最大で0.3 tf/m²程度上昇している。セメント系固化材（W/C=150%）を用いたM7（改良速度2.0分/m, エア+注入材）杭の施工時にはWP-9が最大で約2 tf/m²の水圧変化がみられた。図-4.62の地下水位も削孔中に地表付近まで達し、注入時には測定孔から地下水が噴出していることから、高圧噴射時にエアの影響を受けていると考えられる。

図-4.63に注入孔から間隙水圧計までの距離と各杭の高圧噴射による過剰間隙水圧の関係を示す。この図より高圧噴射による過剰間隙水圧は、注入孔から離れるほど小さくなることがわかる。また、水セメント比（W/C）の大小および改良速度による過剰間隙水圧に明確な差はみられない。

以上間隙水圧計の計測結果をまとめると

- 1) 超微粒子セメント圧入時の間隙水圧は、注入孔から50cm離れた固結領域内で最大1 tf/m²、100cm離れた固結領域外で0.3～0.4 tf/m²程度上昇している。
- 2) 高圧噴射による間隙水圧の上昇は、注入孔から離れるほど小さくなる。また、施工仕様（固化材、水セメント比、改良速度）による違いは見られない。

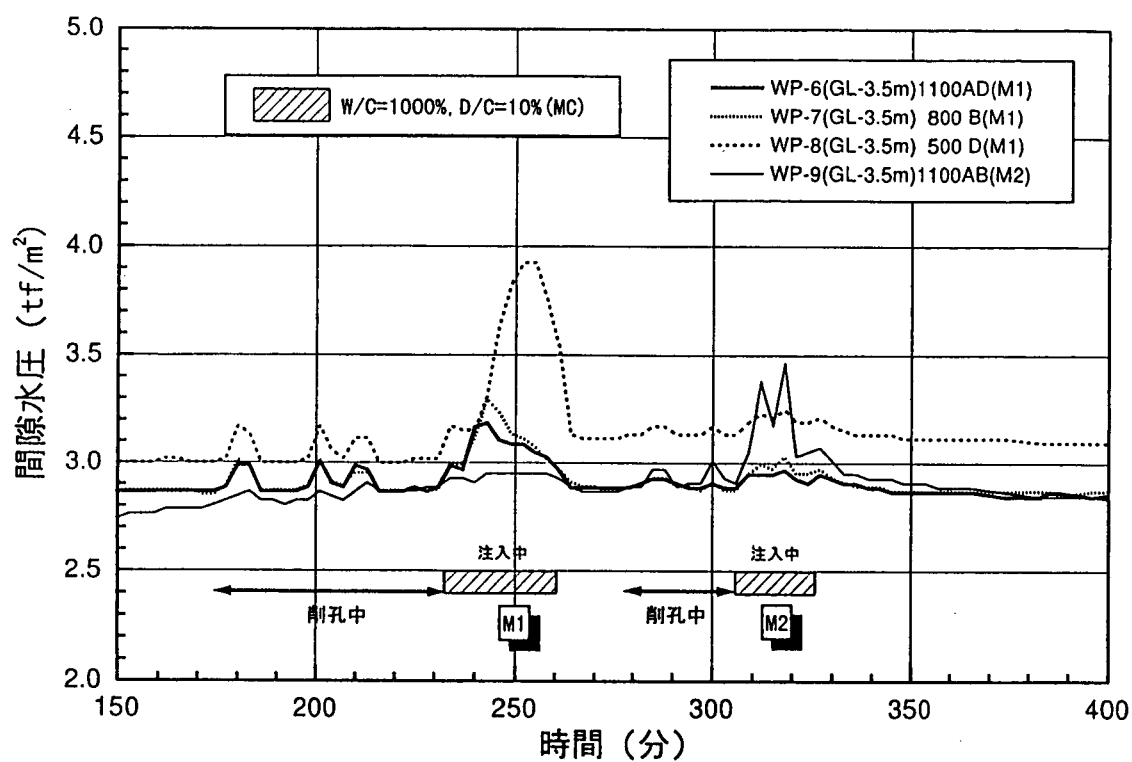


図-4.59 間隙水圧の経時変化 (M1, M2 杭)

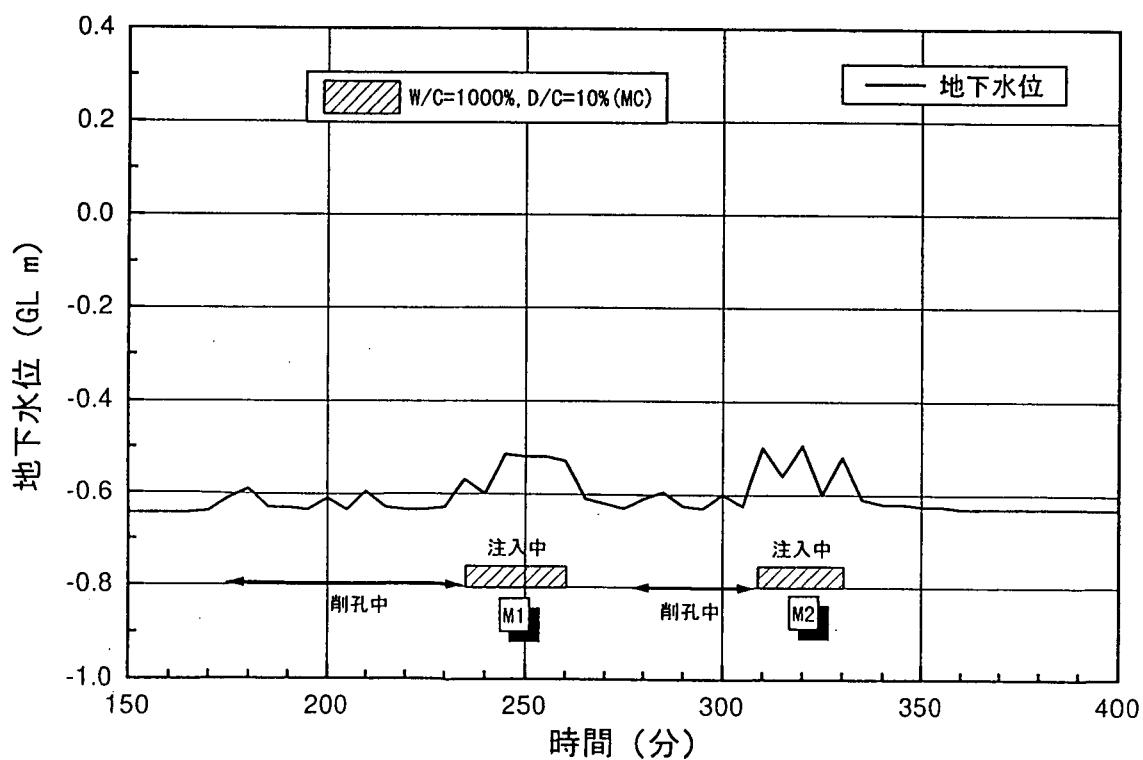


図-4.60 地下水位の経時変化 (M1, M2 杭)

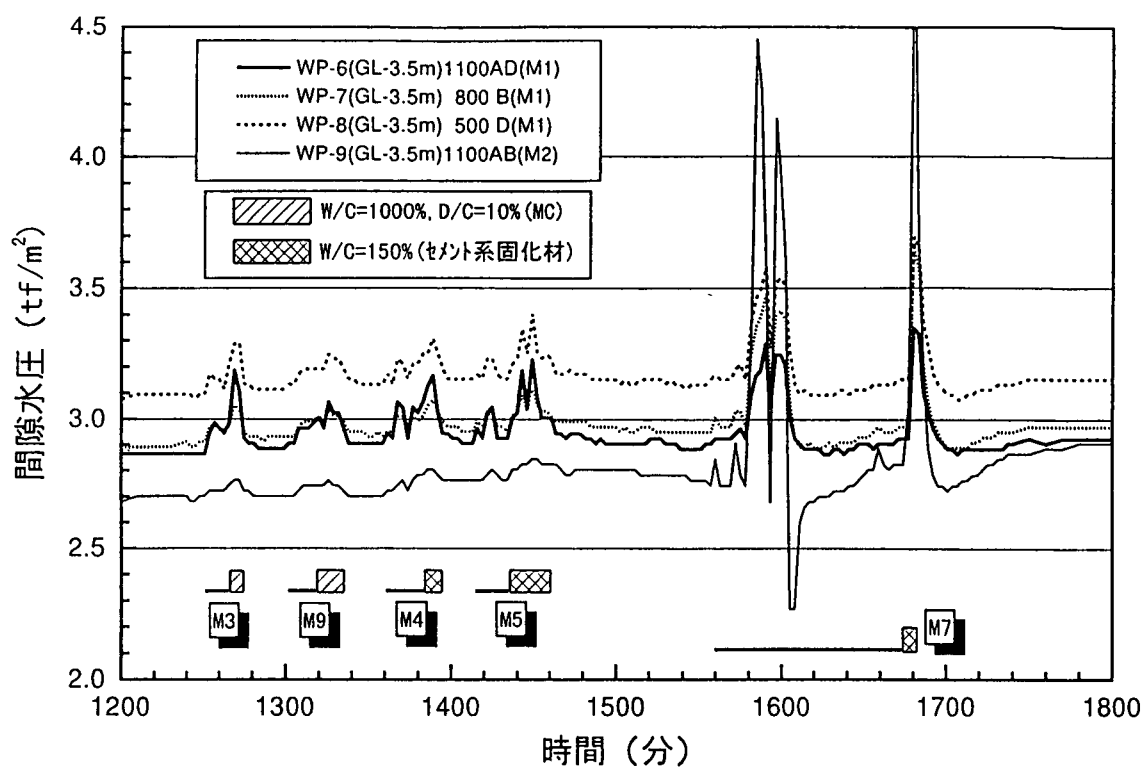


図-4.61 間隙水圧の経時変化 (M3, M4, M5, M7, M9杭)

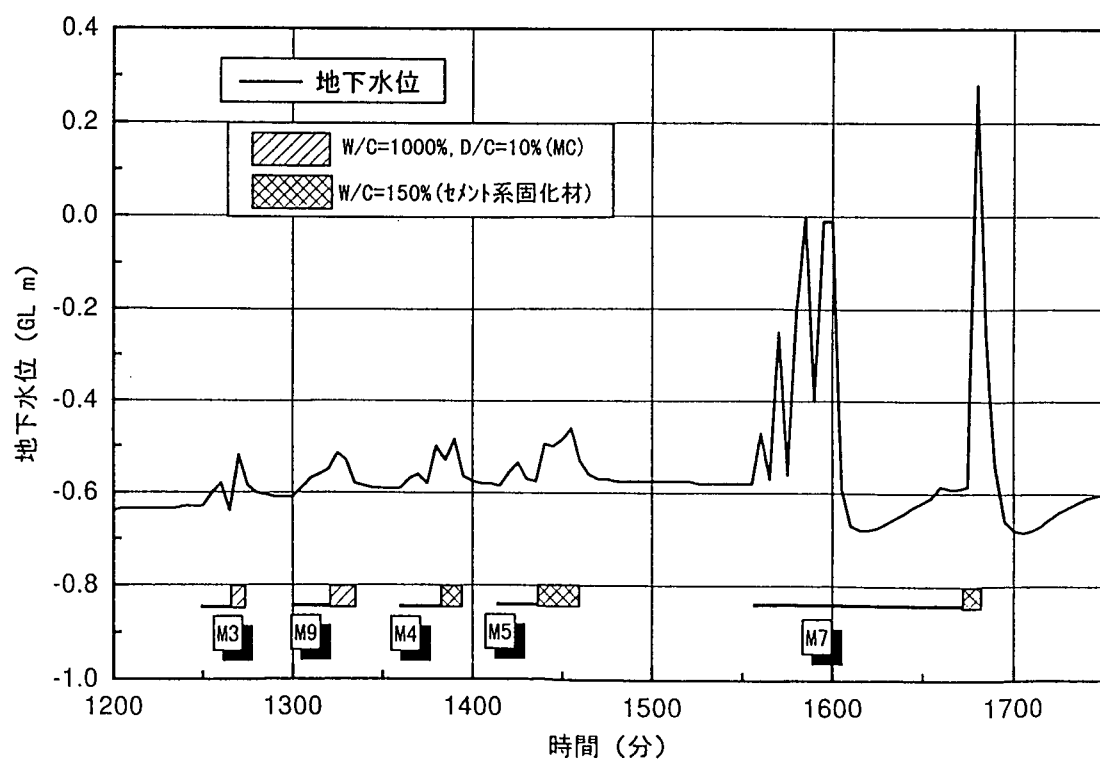


図-4.62 地下水位の経時変化 (M3, M4, M5, M7, M9杭)

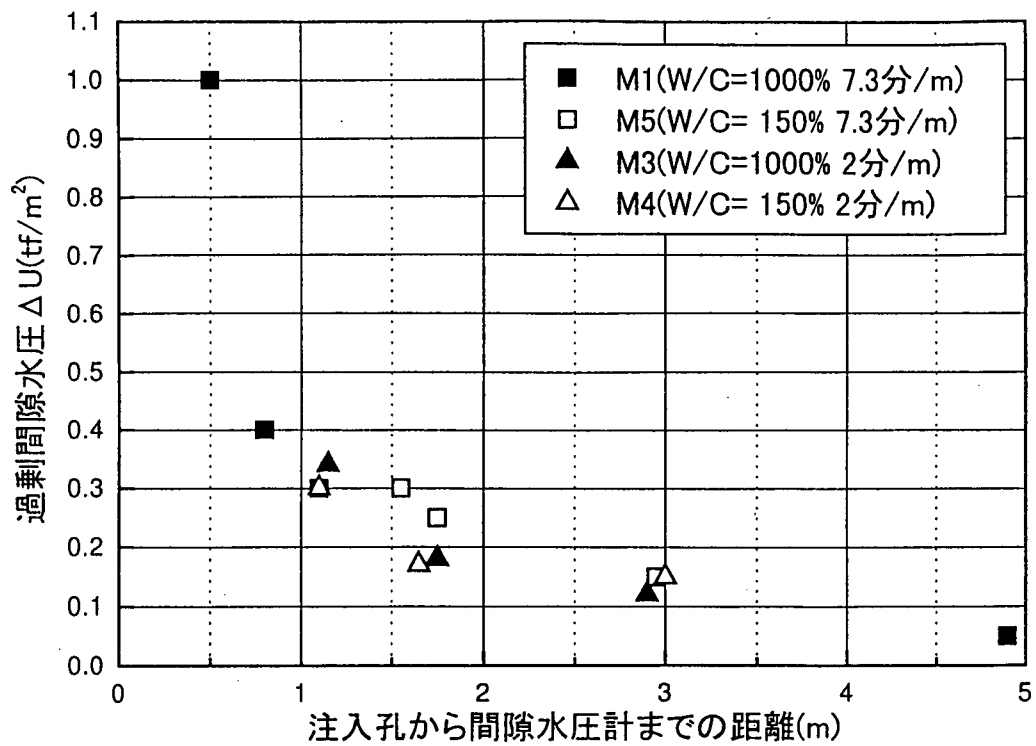


図-4.63 注入孔から間隙水圧計までの距離と各杭の高圧噴射による過剰間隙水圧の関係

5. 事後調査

5.1 調査項目と方法

液状化対策としての超微粒子セメントを用いた注入工法を実用化するためには、効率的な施工とするための注入量と改良範囲、改良強度、注入孔ピッチの設定等の要件を満たさなければならない。施工終了一ヶ月後、施工ヤードの開削を行い固結形状、地盤性状等を調査し上記要件について検討した。また、固結体および地盤性状の調査方法は以下の通りである。

- ① 固結形状は、鉛直方向10cm毎に注入孔から固結体外側部（8方向）の距離を計測した。
- ② 固結体積は、①で計測した平断面に基づき算定した。
- ③ 固結強度は、コアドリルを用いて固結体の鉛直方向、水平方向のコアを採取し、一軸圧縮強さ試験を行った。
- ④ 固結体中のカルシウム分析は、③のコアの上部、下部および一軸圧縮強さ試験後にコアの中部を試料とし、カルシウム選択性電極法⁹⁾により測定した。
- ⑤ 地盤構成は開削時にスケッチを行い、砂の粒度分布は開削時に採取した砂について、ふるい分け試験を行った。

5.2 調査結果

5.2.1 地盤性状

開削時に行ったスケッチに基づく地盤概要図を図-5.1に示す。また、各層から採取した砂の粒度分布を図-5.2~図-5.4に、室内注入実験および土槽注入実験の結果に基づく砂の粒度分布と固結径の関係を図-5.5に示す。地盤は、①注入可能と考えられる砂層($F_c \leq 7$)と、②粘性土を多く含む注入不可能な層($F_c \geq 15$)および③注入が難しいと思われる層を含む砂層($3 \leq F_c \leq 35$)が互層に存在する構成であった。

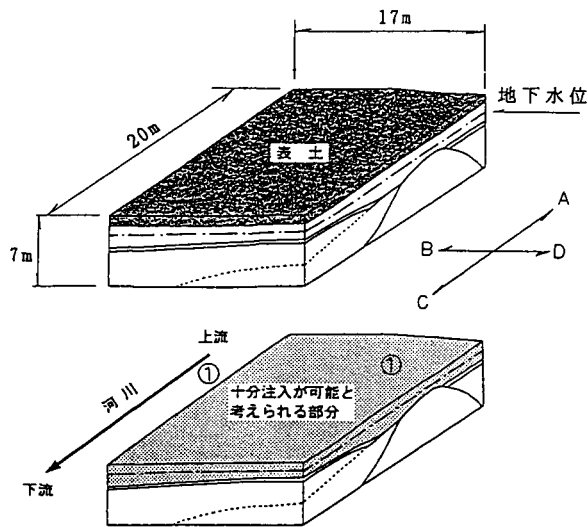


図-5.1 地盤概要図

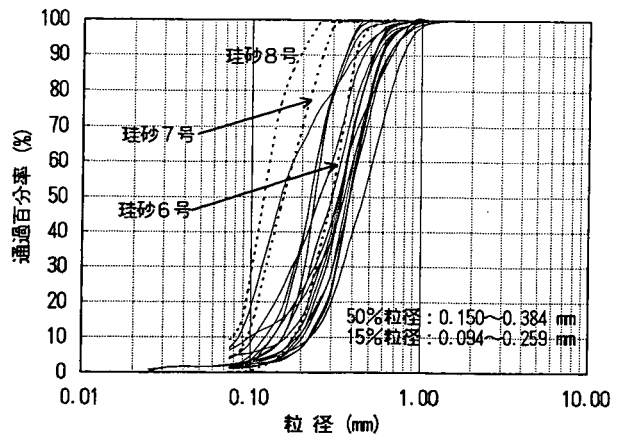


図-5.2 ①層より採取した砂の粒度分布

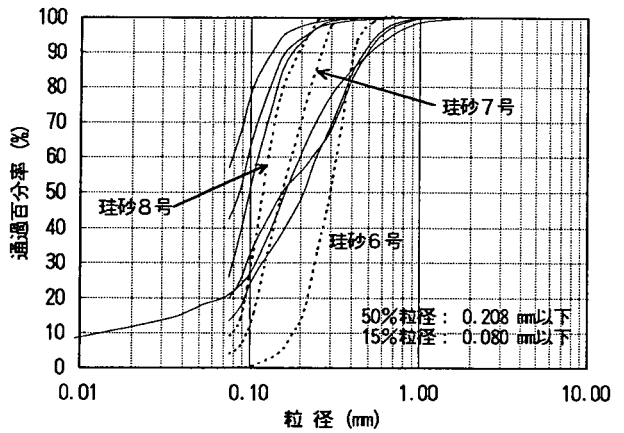
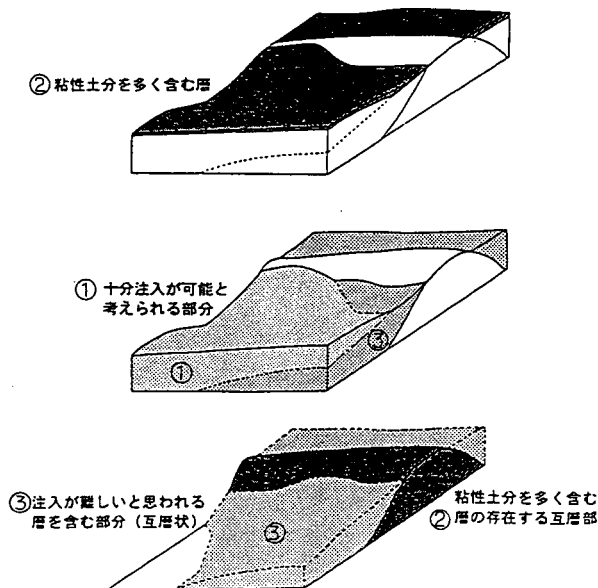


図-5.3 ②層より採取した砂の粒度分布

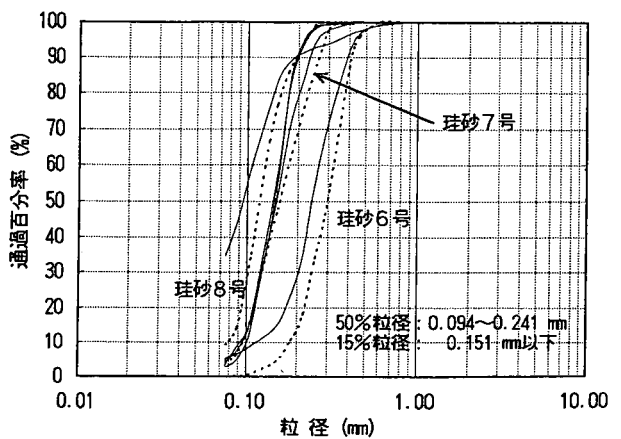


図-5.4 ③層より採取した砂の粒度分布

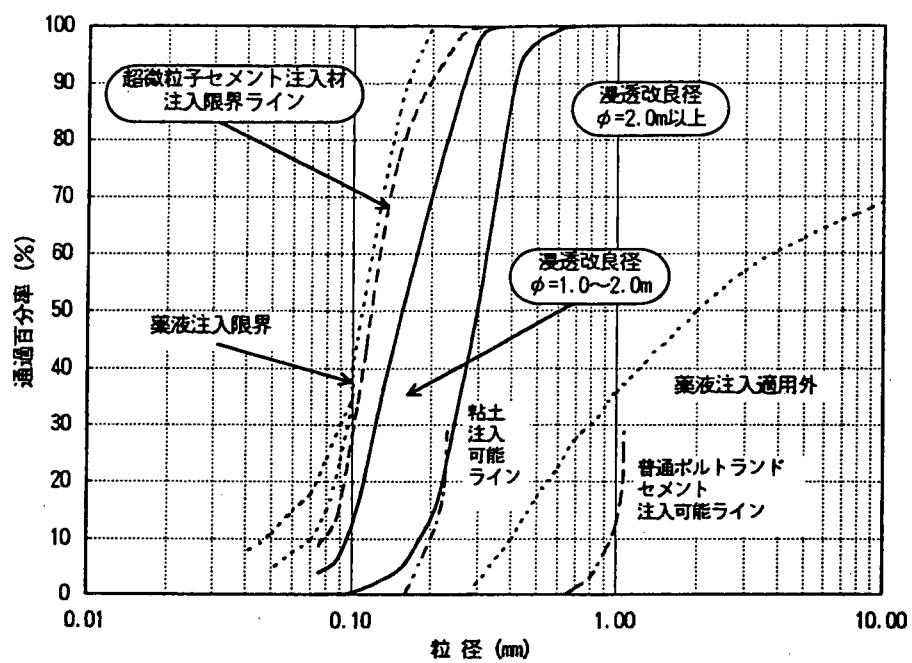


図-5.5 超微粒子セメントの注入限界⁹⁾

5.2.2 固結形状

(1) 注入工法

固結形状確認のため、YP+3.0m付近まで開削を行った。形成された固結体の鉛直断面図を 図-5.1～図-5.14に示す。YP+3.0m以上の砂層(5.2(1)①層)に形成されている固結形状は、直径約0.8～1.2mの円柱状であり、設定した改良天端よりも上部に固結体が形成されていた。

注入口が粘性土(5.2(1)③層)に位置した場合は、粘性土層中に厚さ約0.3～3cmの脈状固結体が形成されていた。また、YP+2.8m付近の砂層(5.2(1)①層)に直径約2mの扁平球状の固結体(図-5.13)が形成されていた。

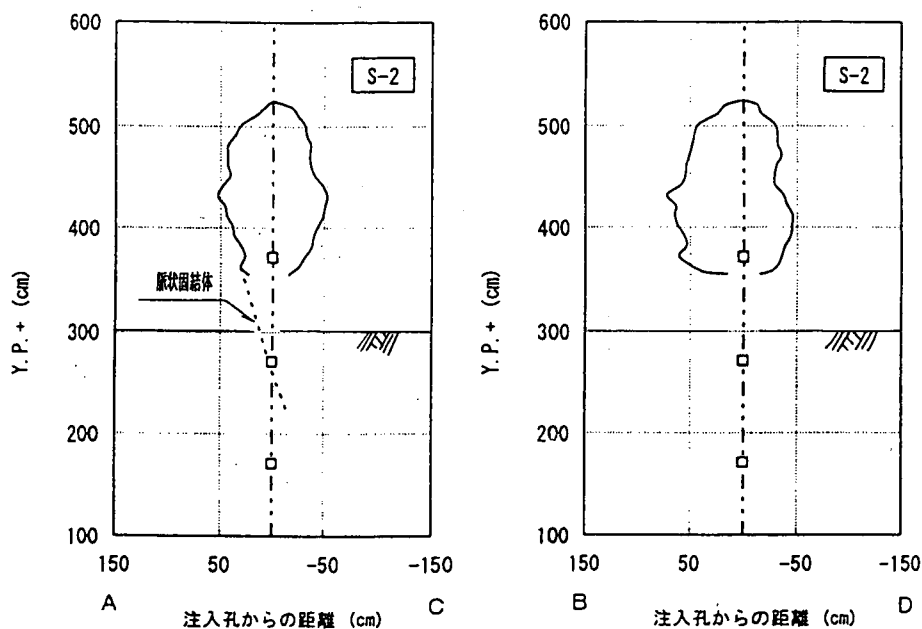


図-5.6 S-2固結体の鉛直断面図

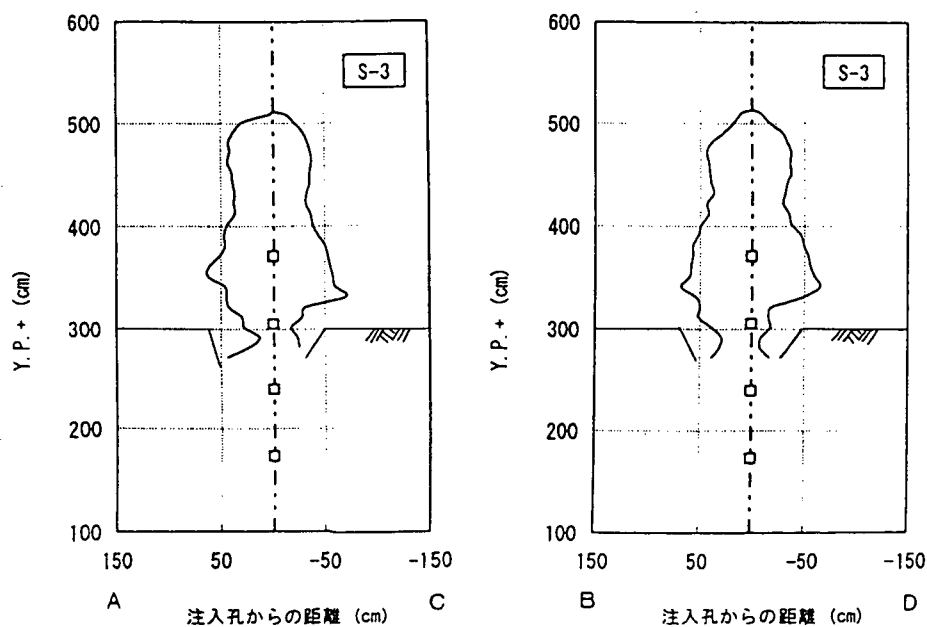


図-5.7 S-3固結体の鉛直断面図

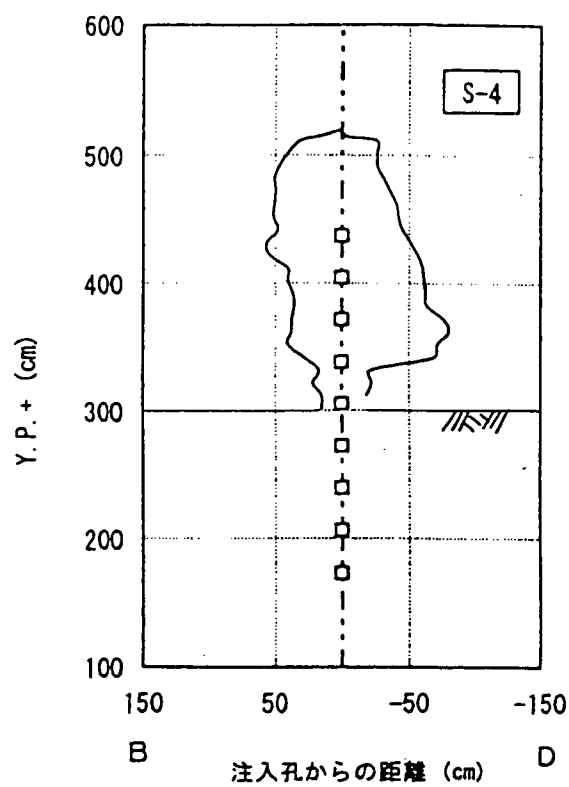
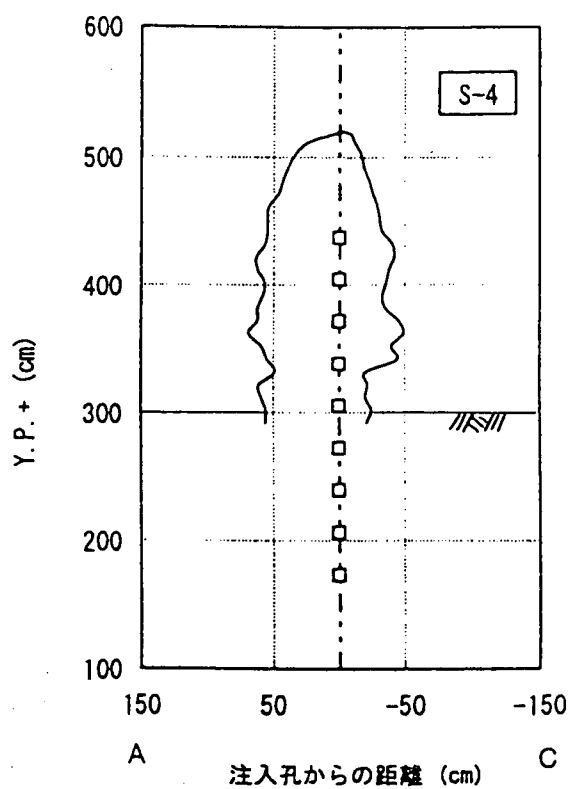


図-5.8 S-4固結体の鉛直断面図

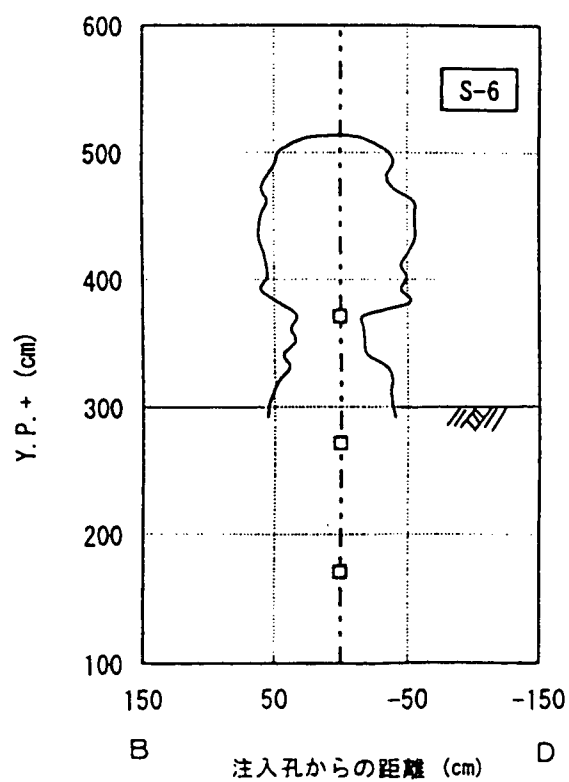
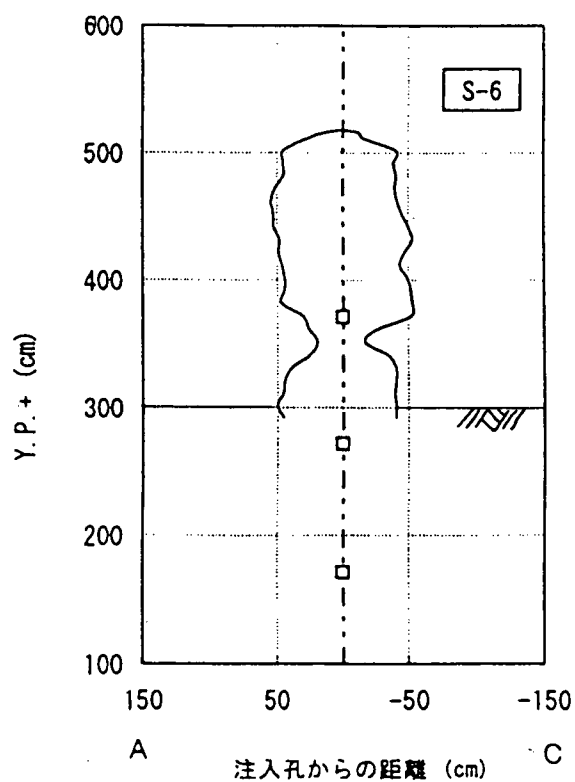


図-5.9 S-6固結体の鉛直断面図

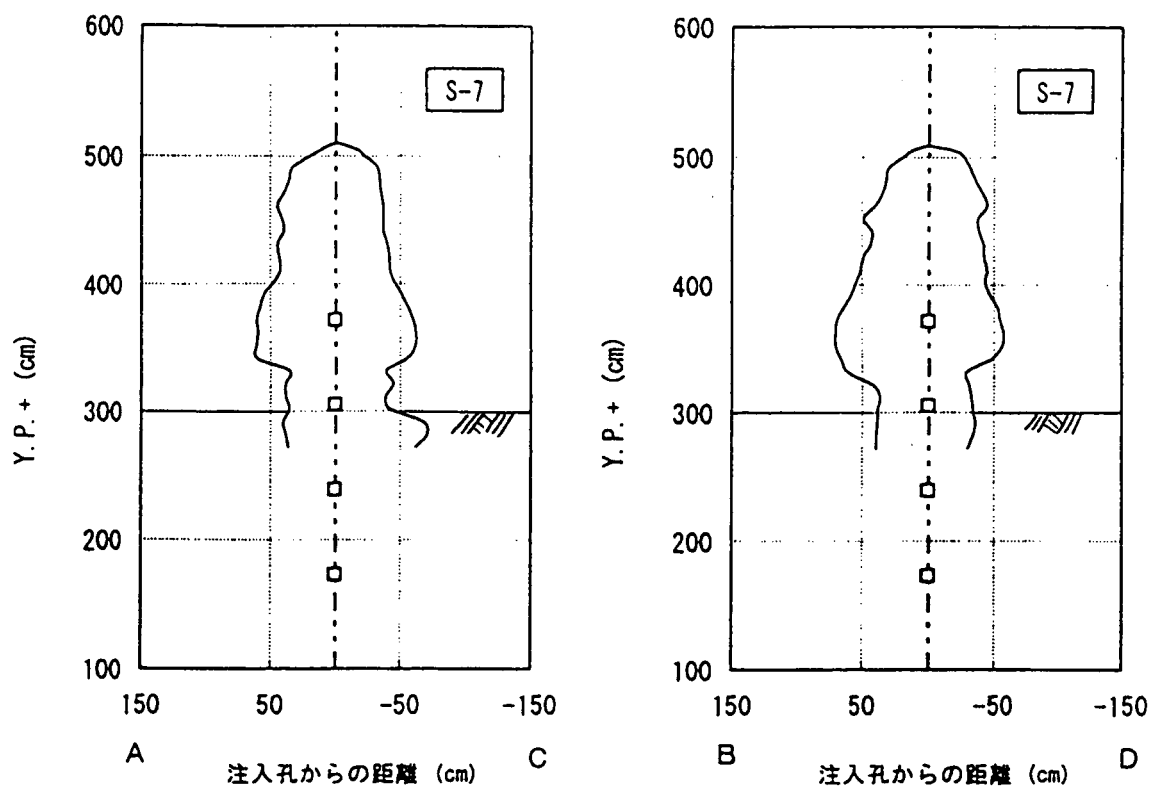


図-5.10 S-7固結体の鉛直断面図

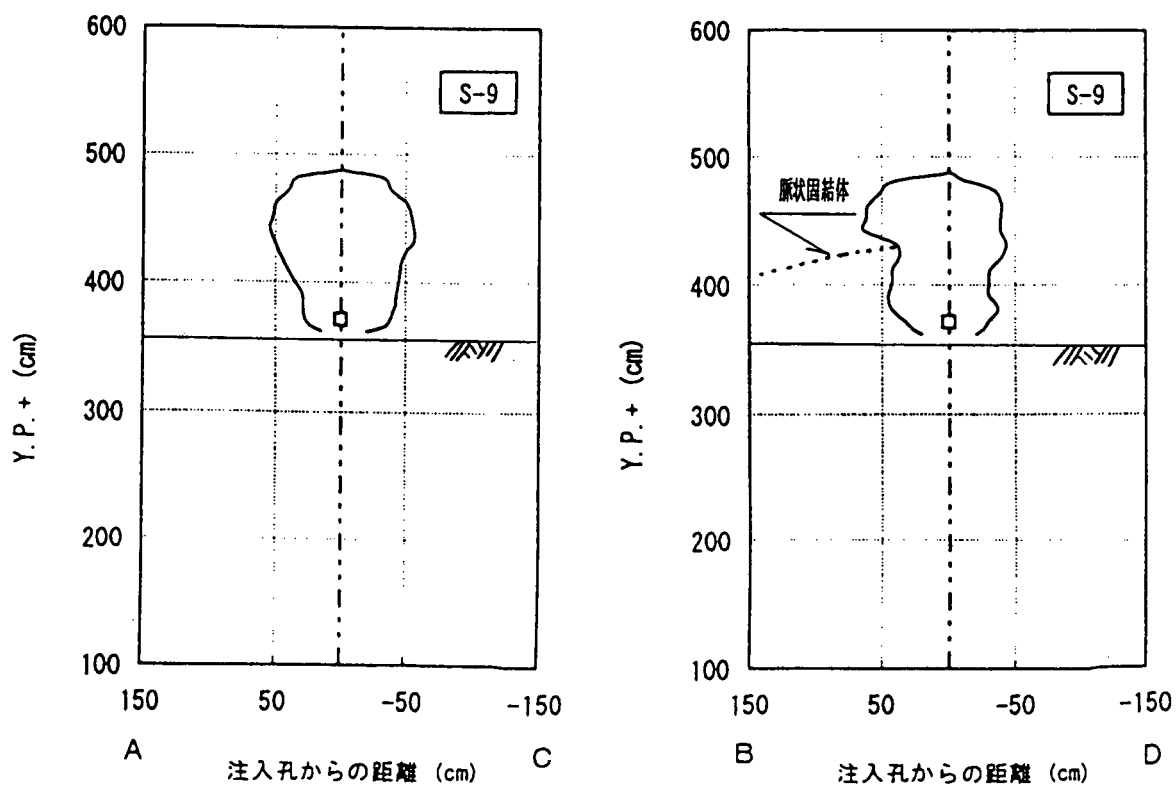


図-5.11 S-9固結体の鉛直断面図

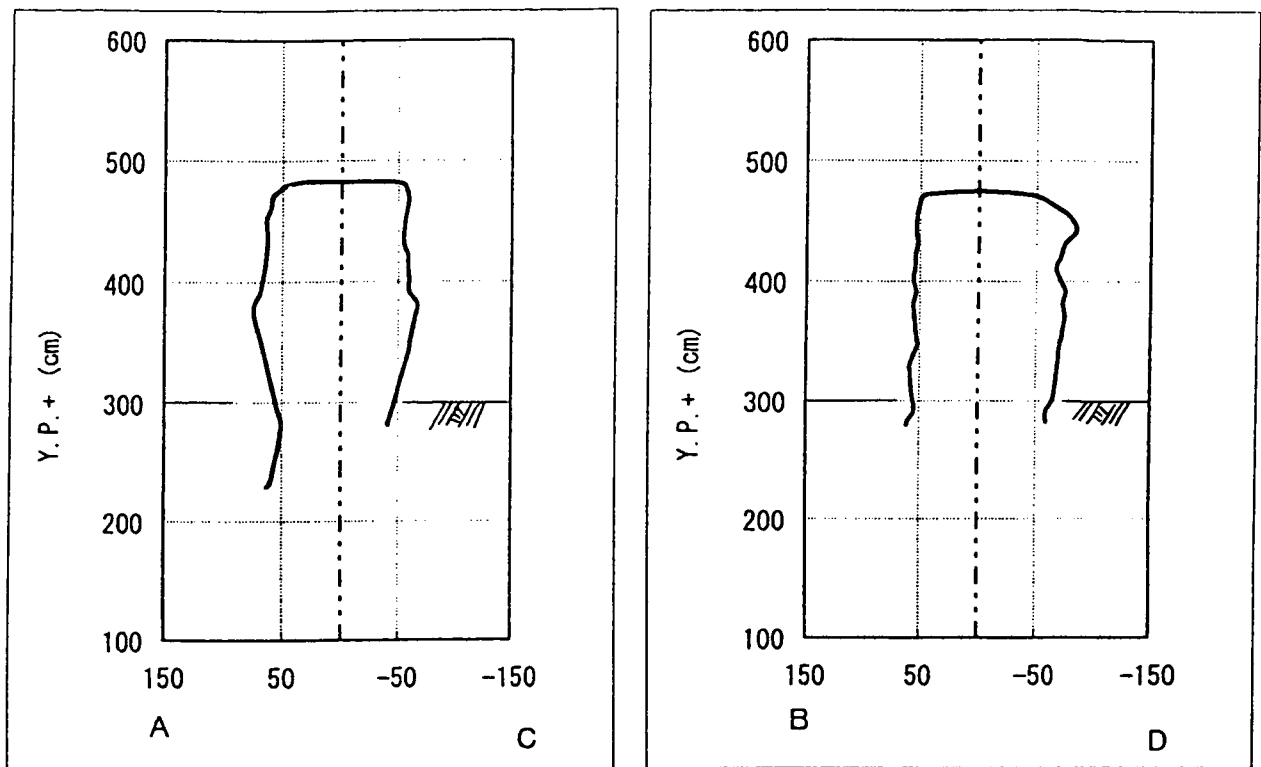


図-5.12 S-10固結体の鉛直断面図

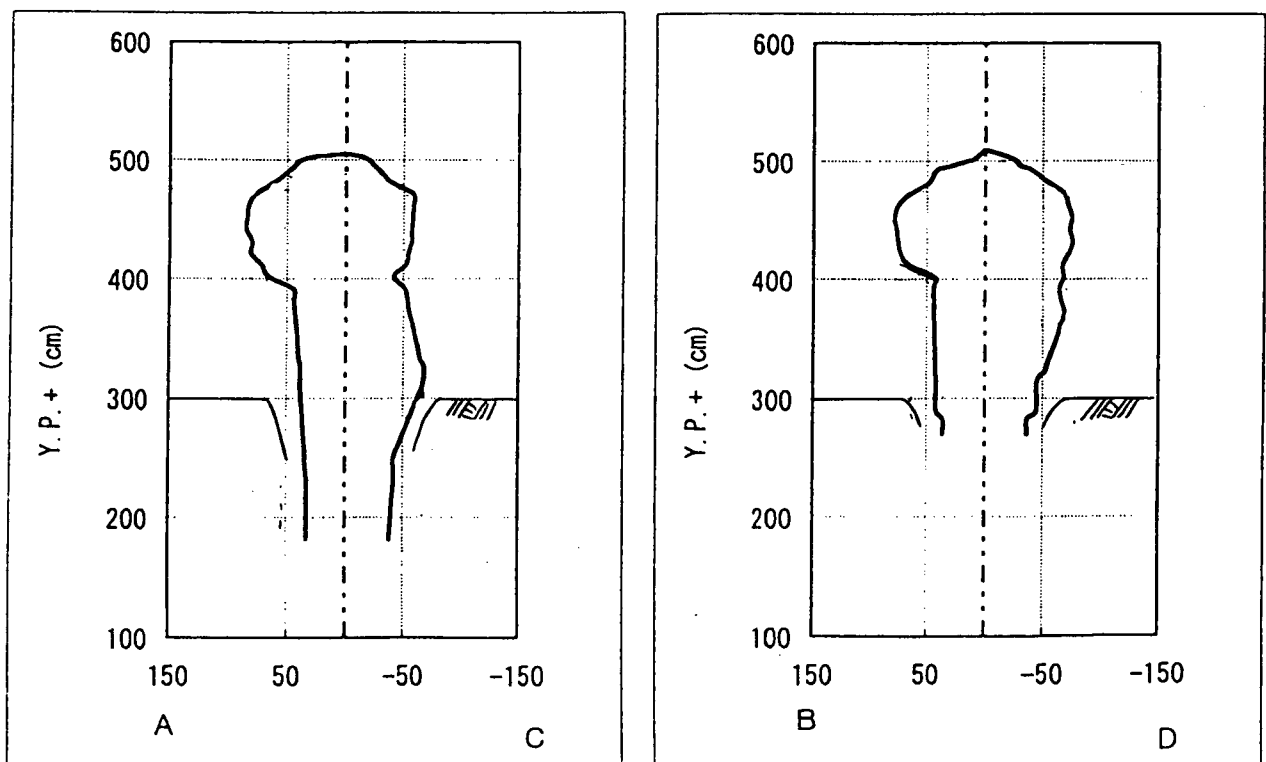


図-5.13 S-11固結体の鉛直断面図

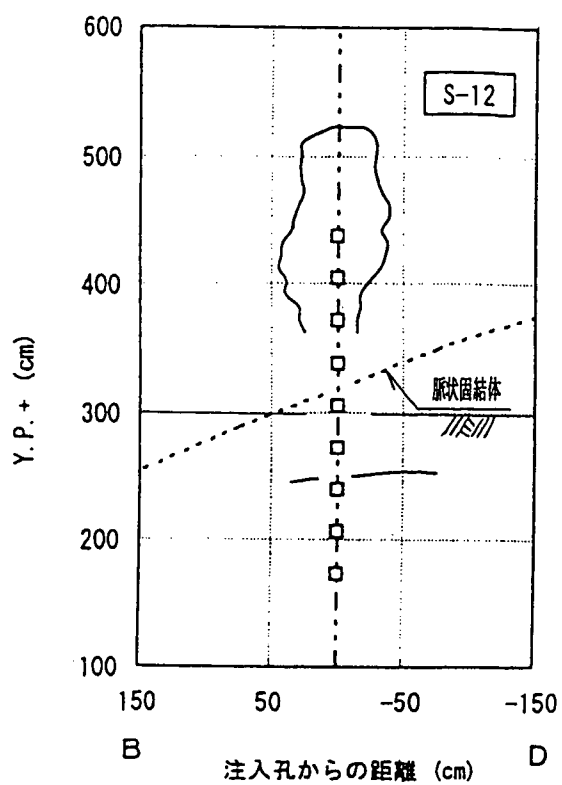
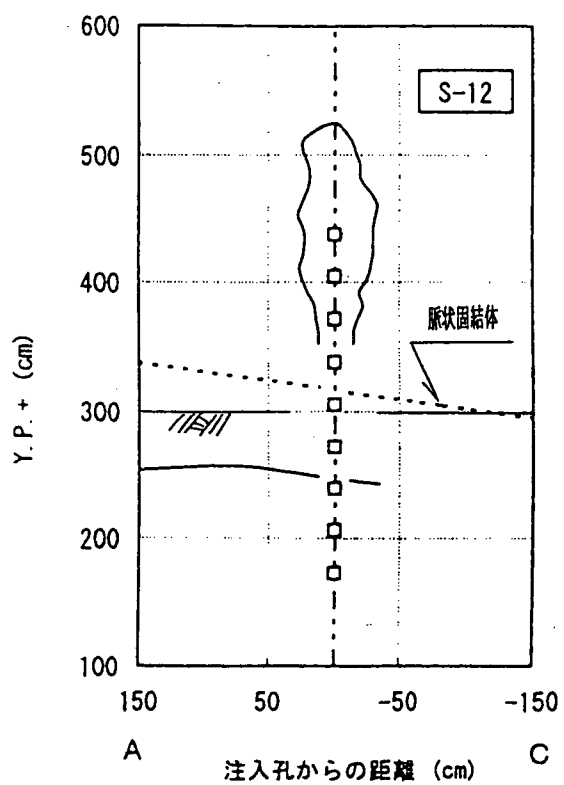


図-5.14 S-12固結体の鉛直断面図

(2) 高圧噴射（浸透、攪拌）工法

超微粒子セメント ($W/C=750, 1000\%$ $D/C=10\%$) を用いた高圧噴射浸透工法により形成された固結体の鉛直断面図を 図-5.15～図-5.18 に、セメント系固化材 ($W/C=150\%$) を用いた高圧噴射攪拌工法により形成された固結体の鉛直断面図を 図-5.19～図-5.21 に示す。

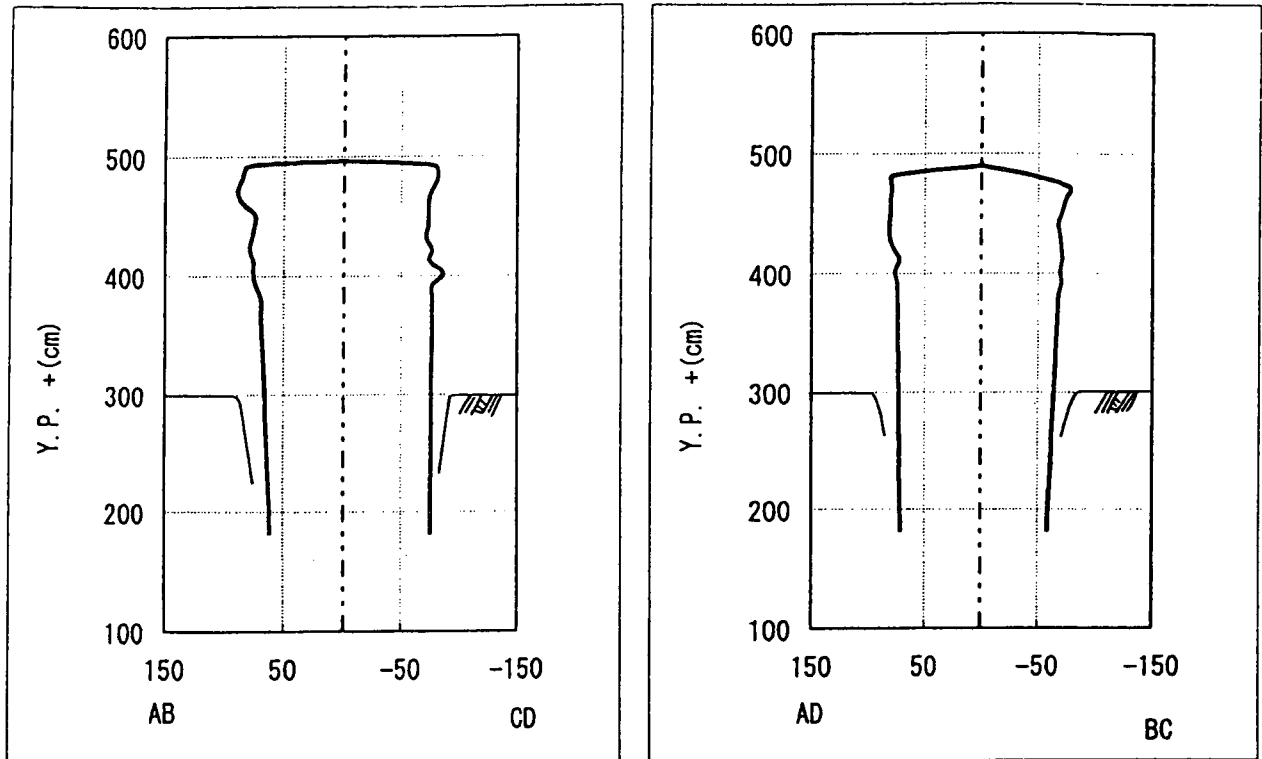


図-5.15 M1 ($W/C=1000\%$, $D/C=10\%$, 改良速度7.3分/m) 固結体の鉛直断面図

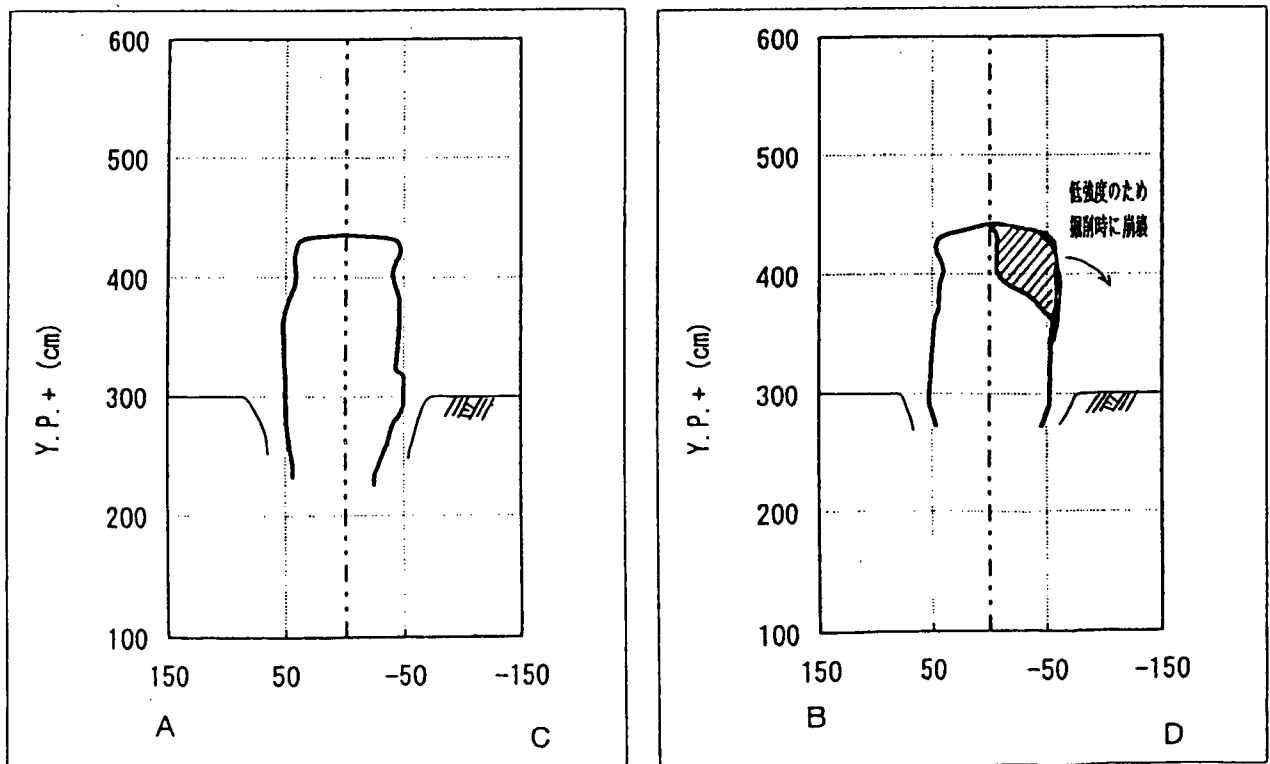


図-5.16 M3 ($W/C=1000\%$, $D/C=10\%$, 改良速度2.0分/m) 固結体の鉛直断面図

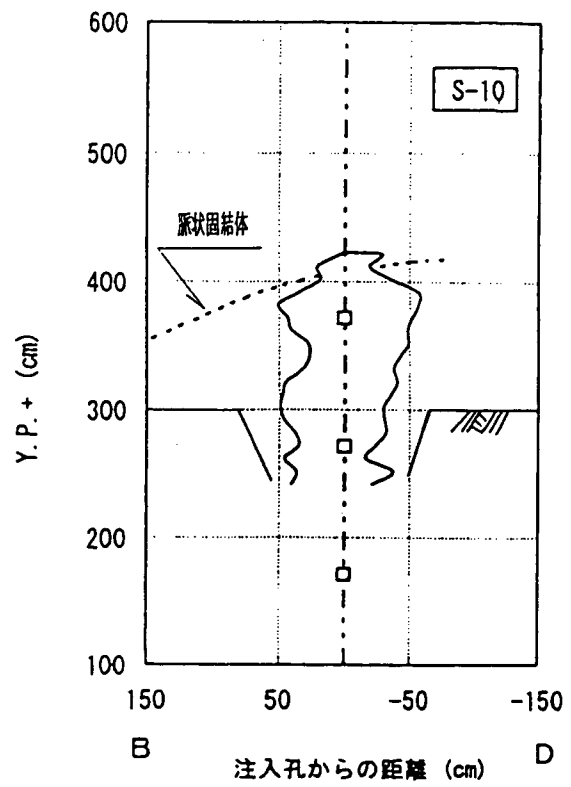
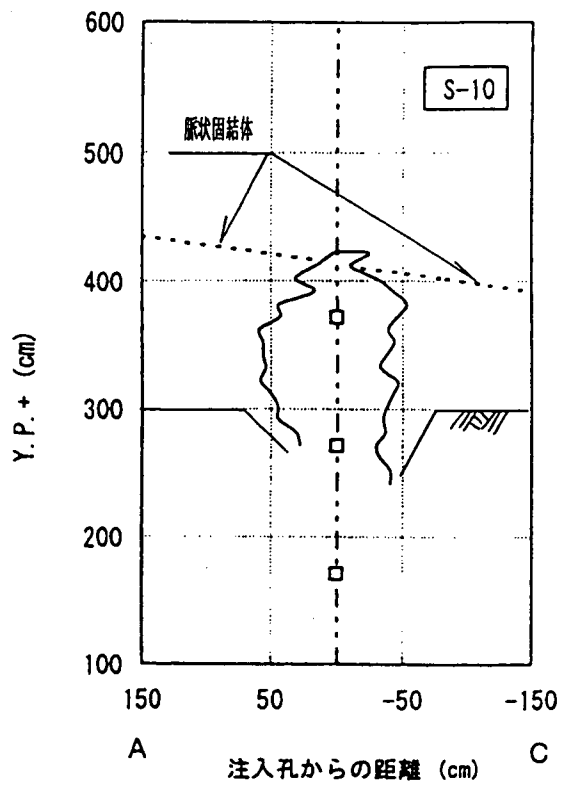


図-5.17 M9 (W/C=1000%, D/C=10%, 改良速度4.0分/m) 固結体の鉛直断面図

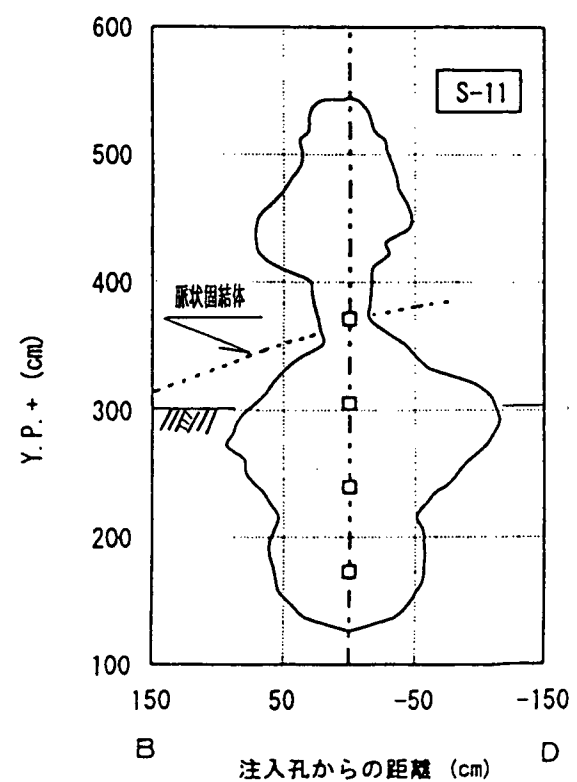
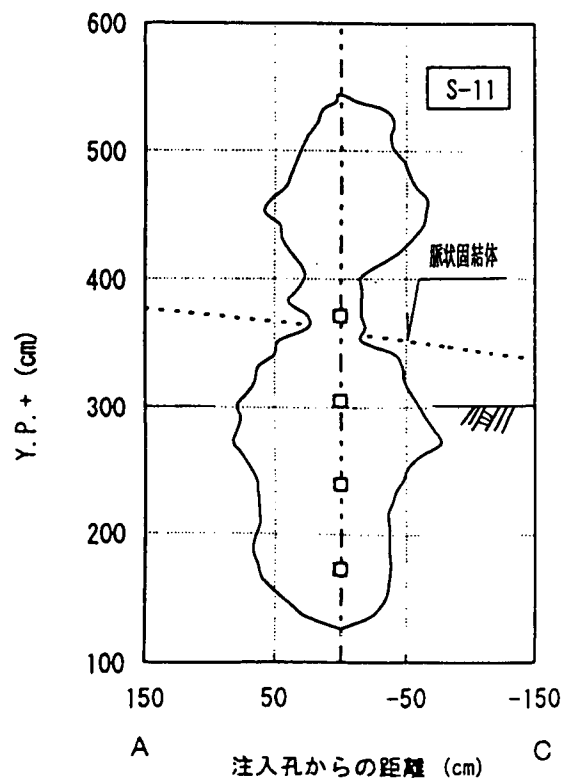


図-5.18 M2 (W/C= 750%, D/C=10%, 改良速度5.5分/m) 固結体の鉛直断面図

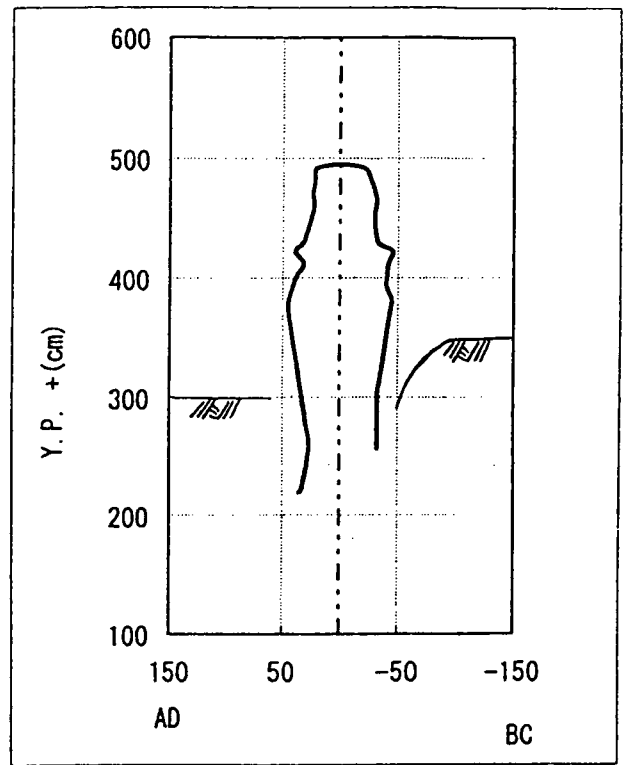
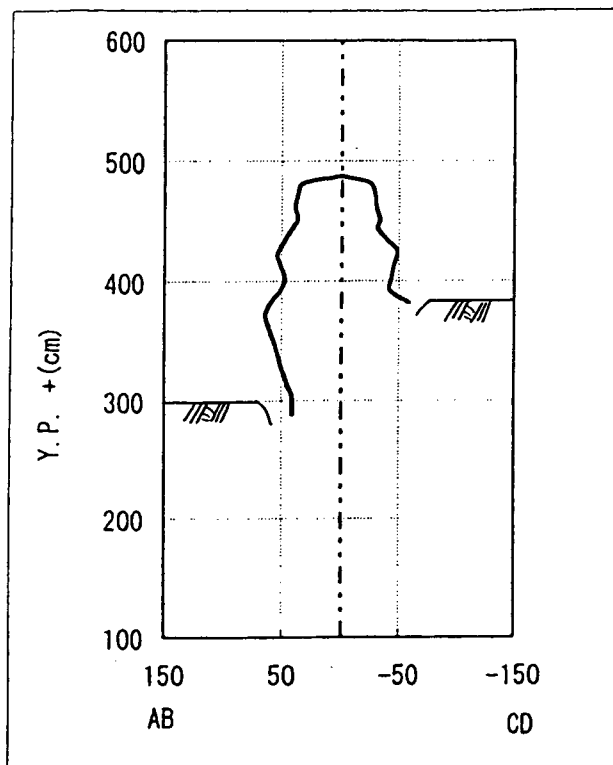


図-5.19 M4 (W/C=150%, 改良速度2.0分/m)固結体の鉛直断面図

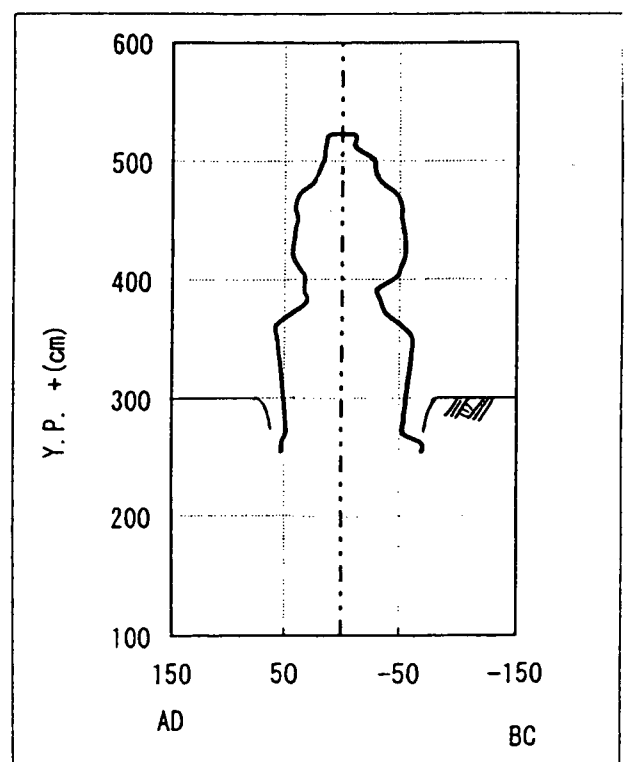
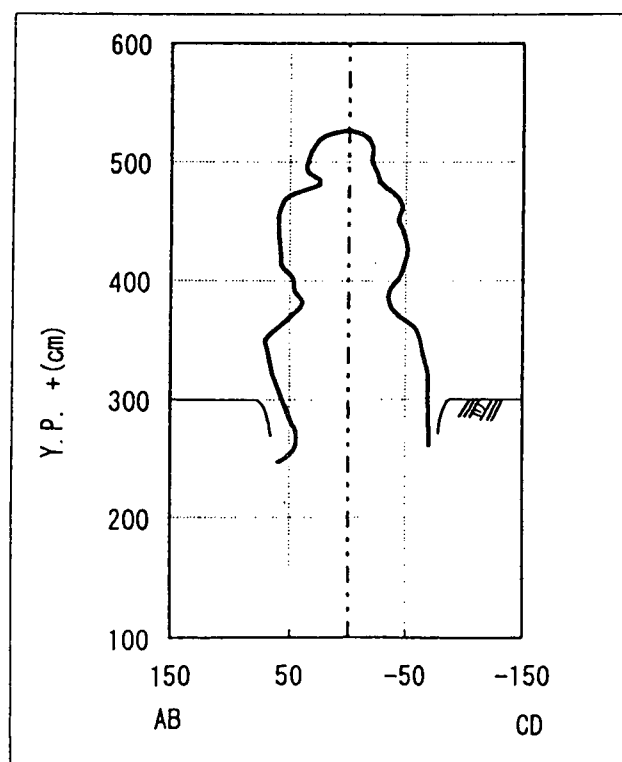


図-5.20 M5 (W/C=150%, 改良速度7.3分/m)固結体の鉛直断面図

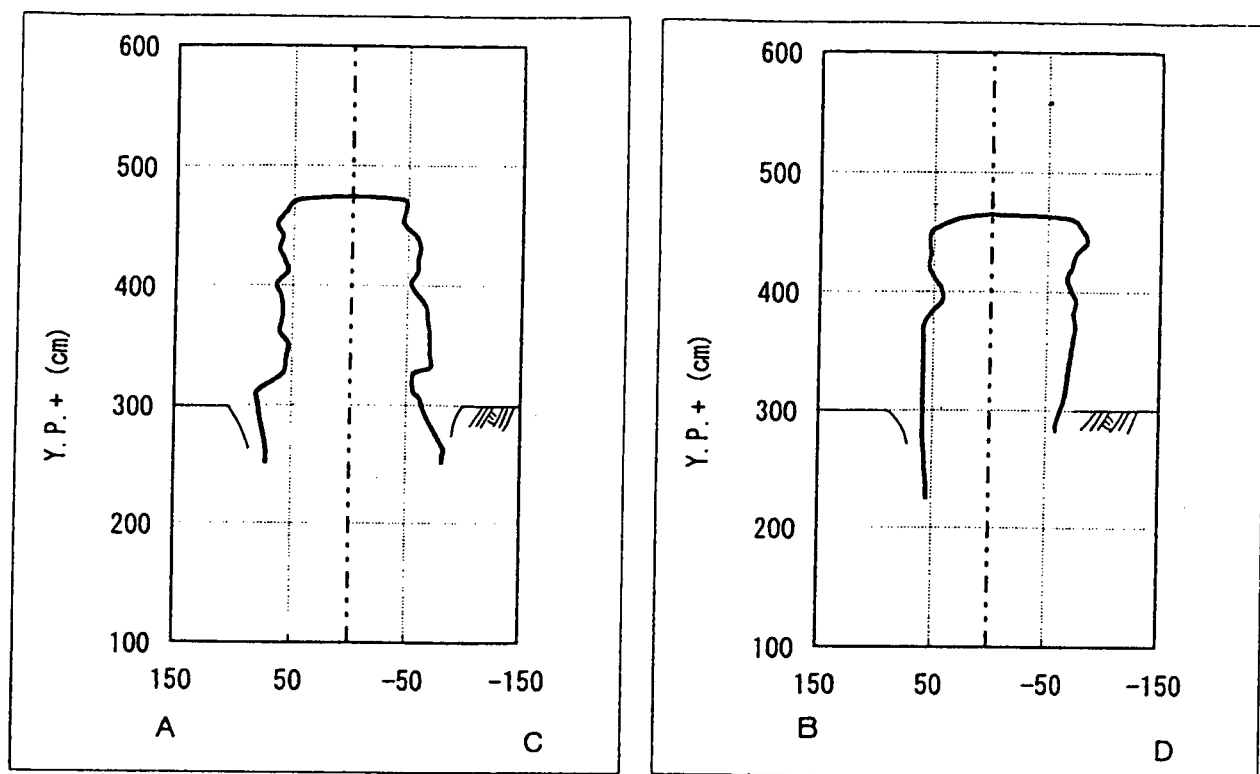


図-5.21 M7 (W/C=150%, エア, 改良速度2.0分/m) 固結体の鉛直断面図

6. 注入工法の考察

6.1 注入量と固結形状（直径・体積）の関係

実験計画では、注入孔No. S-1, S-5, S-9の一点注入より形成される固結体の注入量と形状を比較する予定であったが、S-1, S-5は予想に反して注入口が注入不可能である粘性土層に位置していたため、脈状固結体となっておりデータの収集が困難であった（固結形状は未計測）。

ここでは、開削を行ったYP+3.0m以浅に形成された一点注入（S-1, 5, 9）および固結体積を計測できなかった杭（S-8, 10, 12）以外の固結体について考察する。

表-6.1は、各杭について開削時に計測したステップ長毎の固結体積と懸濁液注入量を示している。ここで、ステップ長毎の固結体積は、注目する注入口とその真上の注入口の間に形成された固結体の体積で定義しており（図-6.1参照）、その高さ間の平均断面積を計測することにより求めている。また、同表で標高YP+4.67m以浅は固結対象領域ではなかったが、上部へ浸透した結果として形成された固結体の体積を示している。これは以後のデータ整理には用いていない。また、深部の注入ステップのデータが示されていないが、これは掘削する事が困難であったこと、および粘性土層の存在のために有効な固結体が形成されなかったことによる。

表-6.1 固結体積と実注入量

杭No. S-2	ステップ [°] 長YP(m)	2.71～3.68		3.68～4.67			4.67以上
充填比 $\alpha=1.0$	注入量(l)	672		672			—
ステップ [°] 1.00m	固結体積(m^3)	未計測		0.653			0.170
杭No. S-3	ステップ [°] 長YP(m)	3.02～3.68		3.68～4.34		4.67以上	
充填比 $\alpha=1.0$	注入量(l)	530		530		—	
ステップ [°] 0.66m	固結体積(m^3)	0.558		0.430		0.281	
杭No. S-4	ステップ [°] 長YP(m)	3.02～3.35	3.35～3.68	3.68～4.01	4.01～4.34	4.34～4.67	4.67以上
充填比 $\alpha=1.0$	注入量(l)	265	265	265	265	265	—
ステップ [°] 0.33m	固結体積(m^3)	0.212	0.366	0.317	0.328	0.241	0.153
杭No. S-6	ステップ [°] 長YP(m)	—		3.68～4.67			4.67以上
充填比 $\alpha=1.5$	注入量(l)	—		894			—
ステップ [°] 1.00m	固結体積(m^3)	—		0.755			0.198
杭No. S-7	ステップ [°] 長YP(m)	3.02～3.68		3.68～4.34		4.67以上	
充填比 $\alpha=1.5$	注入量(l)	795		265		—	
ステップ [°] 0.66m	固結体積(m^3)	0.654		0.532		0.250	
杭No. S-11	ステップ [°] 長YP(m)	3.02～3.68		3.68～4.34		4.67以上	
充填比 $\alpha=2.0$ ステップ [°] 0.66m	注入量(l)	1,059		1,059		—	
	固結体積(m^3)	0.629		0.328		0.554	
	ステップ [°] 長YP(m)	1.72～2.38		2.38～3.02		—	
	注入量(l)	1,059		1,059		—	
	固結体積(m^3)	0.684		1.382		—	

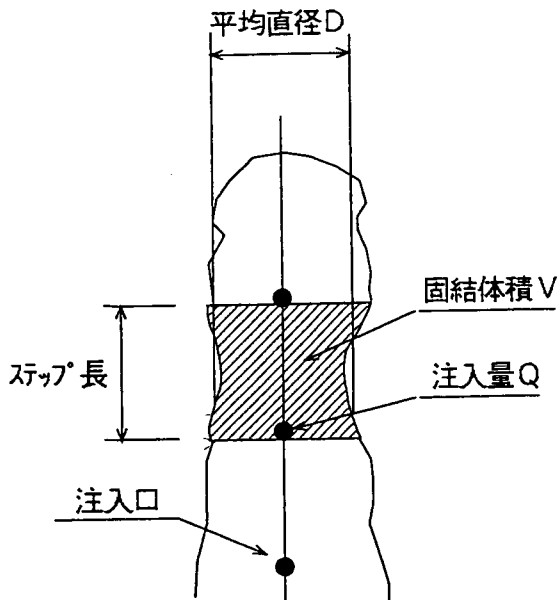


図-6.1 固結体積の分割概要図¹⁴⁾

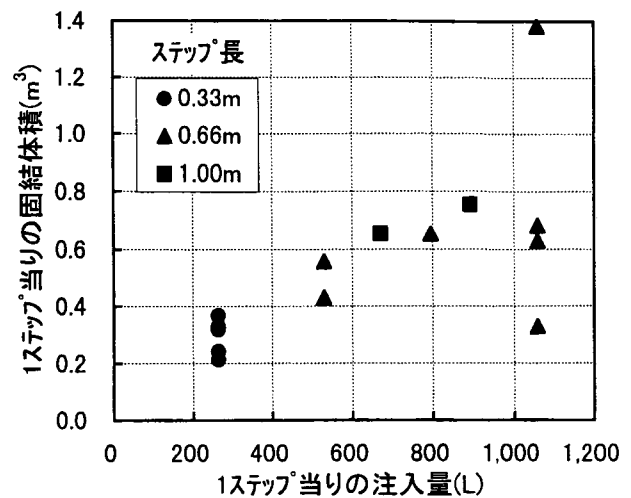


図-6.2 1ステップ当りの注入量と固結体積の関係¹⁴⁾

同表のデータをもとに、1ステップ当りの注入量と同じく1ステップ長当りの固結体積の関係をプロットしたものを図-6.2に示す。同図より以下のことが読みとれる。

- 1) 全体的に注入量が多くなるほど固結体積も伸びる傾向にある。
- 2) 上記の傾向は注入ステップ長によりさほど違いがないようである。
- 3) たとえば、ステップ長が0.66mのデータに注目すれば、注入量が多くなるにつれて効率が悪くなる。すなわち注入量の増加に見合った固結体積の伸びが見られない。

次に、ステップ長と出来高の関係を見るために、単位長さ（深さ）当りの注入量と同じく単位長さ当りの固結体積（すなわち平均断面積）の関係にプロットし直したものを図-6.3に示す。同図の右縦軸には、平均断面積より求められる平均直径を併記している。同図より、以下のことが読みとれる。

- 1) ばらつきはあるが、データの範囲では概ね直径1m程度の固結体が形成されている。
- 2) 単位長さ当り注入量が $0.8\text{m}^3/\text{m}$ で充填比 $\alpha = 2$ 程度であり、それ以上では効率が悪くなるように見える。
- 3) データはないが、単位長さ当り注入量が $0.8\text{m}^3/\text{m}$ よりも小さくなると形成される固結体は小さくなるはずである（充填比 $\alpha = 1$ 未満にはなり得ないため）。したがって、平均直径1mの固結体を形成するためには、充填比 $\alpha = 2$ 程度とするのがよいと思われる。

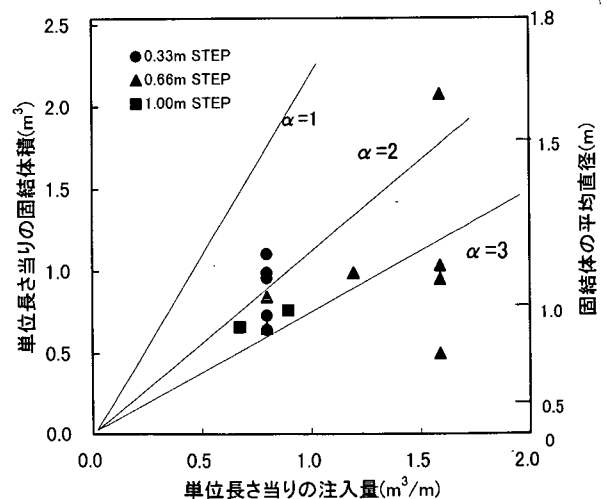


図-6.3 単位長さ当りの注入量と固結体積および固結体の平均直径の関係

一般に、「注入効率」について考えれば、それは目標とする固結体を形成するのに要する費用を少なくすることであり、その費用は施工時間、材料費などに支配される。施工時間を短くするためには、注入量速度が一定であれば、以下の式により、上に述べた充填比を小さくするのがよい。

$$(\text{注入量 ; m}^3) = (\text{固結体体積 ; m}^3) \times (\text{間隙率}) \times (\text{充填比})$$

$$\text{また、} (\text{注 入 量}) = (\text{施工時間}) \times (\text{注入量速度})$$

$$\text{これより、} (\text{施工時間}) = (\text{固結体体積 ; m}^3) \times (\text{間隙率}) \times (\text{充填比}) / (\text{注入量速度})$$

他方、施工時間はステップ長の影響をも受けるが、注入ステップに要する手間（時間）は注入時間に比べれば小さい。このことから、充填比が小さくなるようなステップ長を採用するのがよいと考えられる。

6.2 地盤特性と固結形状の関係

事後調査において、改良下端まで掘り起こし確認ができた杭No. S-11（充填比 $\alpha=2.0$, $66.6\text{cm}/\text{ステップ}$ ）固結体の鉛直断面図を図-6.4に示す。注入量は、 $4,236\text{l}$ （ $4\text{ステップ} \times 1,059\text{l}/\text{ステップ}$ ）である。固結体は大きく分けて上部と下部に形成されている。下部固結体の改良径は1ステップ目（YP+1.7m）付近で 1.2m 、2～3ステップ目（YP+2.7m）で最大 2.0m である。上部固結体の改良径はYP+4.4m付近で 1.2m ある。計測により得られた固結体積は、4ステップ目注入口（YP+3.7m）を境に下部固結体が約 2.7m^3 、上部固結体で約 0.9m^3 で合計 3.6m^3 であった。

図-6.5、図-6.6に固結体付近から採取した砂質土の粒度分布を、表-6.2に地盤性状を示す。土質は、①層（注入可能と考えられる砂層（ $\text{GR}=11.7\sim32.3$ ））との間に②層（シルト分を主体とした砂層（ $\text{GR}\leq 10$ ））がかみ合う互層地盤である。①層に位置する下部固結体の1～3ステップ目注入は、ほぼ均一に浸透固結している。超微粒子セメント懸濁液の注入限界地盤（ $\text{GR}<11$ ）に近い②層に注入口がある4ステップ目は $20\sim30\text{cm}$ 程度の固結径であることから水平方向の浸透が限界に達したため固結径が大きくならなかったと考えられる。また、上部固結体は、4ステップ目が注入量 1059l を注入できたことから、浸透限界に達した後注入管沿いに上部の砂層（①層）へ上昇浸透もしくは割裂注入に移行し、浸透したため形成されたものと予測される。

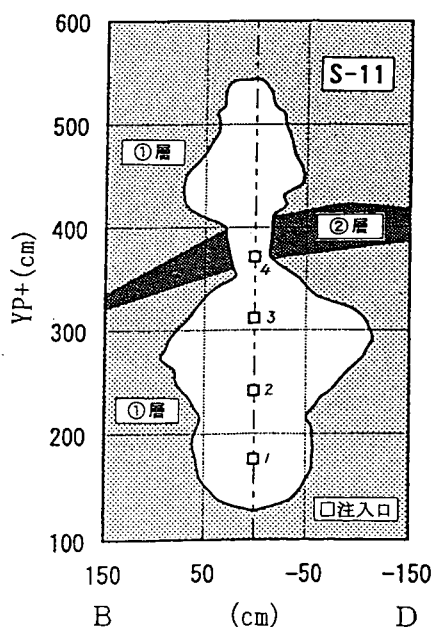


図-6.4 杭No. S-11固結体の鉛直断面図

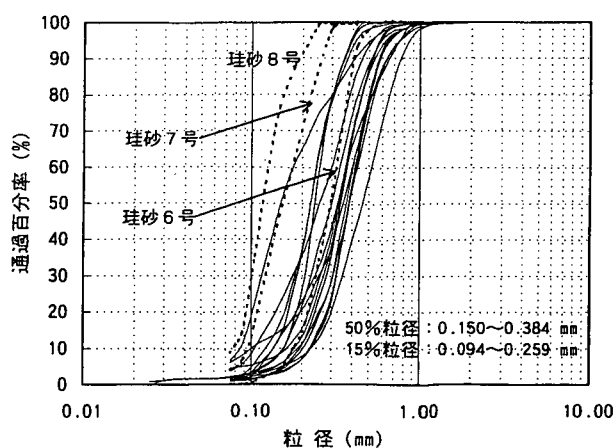


図-6.5 ①層の粒度分布¹³⁾

表-6.2 地盤性状¹³⁾

地層	細粒分含有率 Fc (%)	D50 (mm)	D15 (mm)	グラウタビリティー比 GR=D ₁₅ /G ₈₅
①	1.0≤Fc≤6.6	0.15~0.38	0.094~0.259	11.7~32.3
②	13.4≤Fc≤56.7	0.208以下	0.08以下	10以下

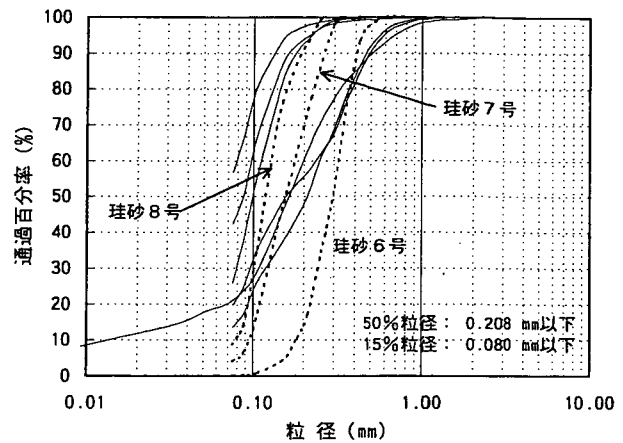


図-6.6 ②層の粒度分布

6.3 地盤性状と水平方向固結長の関係

各固結体の半径とその固結体付近より採取した砂のグラウタビリティー比 GR (D_{15}/G_{85}) との関係を図-6.7に、室内注入試験⁹⁾による透水係数と固結長の関係を図-6.8に示す。

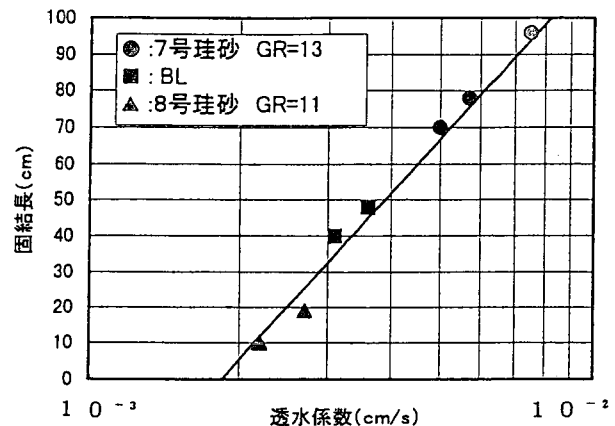
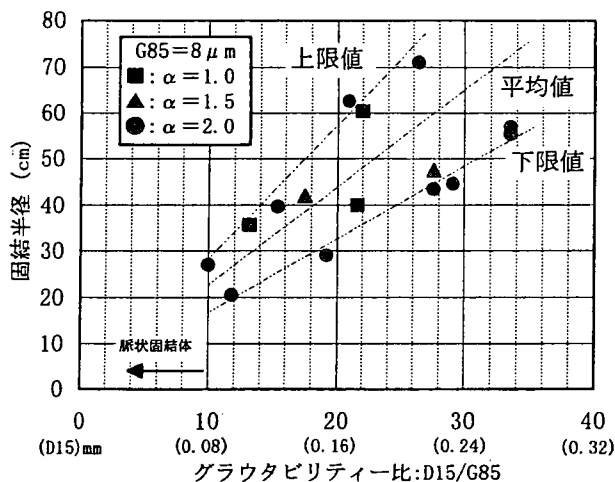


図-6.7 固結半径とグラウタビリティー比の関係¹⁵⁾ 図-6.8 固結長と透水係数の関係⁹⁾

円柱状の固結体が形成されている付近では $GR \geq 10$ である。これは室内注入試験の $GR \geq 11$ ¹¹⁾で注入可能という結果とほぼ一致する。また、GRが大きくなると固結長も伸びる傾向にある。ただし、注入量（充填比）が大きいほど固結半径が大きいという傾向は見られない。図-6.8が示すように室内試験においては、固結範囲は地盤の透水係数との相関が強いことが示されており、図-6.7におけるデータのばらつきは、地盤の密度等による影響と考えられる。

同一のグラウタビリティー比において、室内注入試験より得られた固結長と試験施工の固結半径は一致しない。これは前述した透水性の影響もあると考えられるが、主として、直径5 cmのモールドで側面を拘束された砂に、一方向から超微粒子セメント懸濁液を一次元的に注入する室内試験に対して、実施工ではモールド

ドなどによる強制的な拘束が無く三次元的な注入になるので、透水性の良い方向に超微粒子セメント懸濁液が浸透する傾向にあること、及び三次元注入では地盤中の注入材の単位面積当り通過流量が注入口近傍ほど大きく、目詰まりしやすいことなどが理由として考えられる。

グラウタビリティー比から一義的に固結径を設定することは難しいが、原地盤に対する注入可否および大まかな固結半径推定のための指標としては有効であると考えられる。

6.4 注入孔の配置（施工ピッチ、ステップ長の設定）

開削時に固結体のラップ状況を確認したが、水平方向でラップしている固結体はなかった。ここでは、杭 No. S-2, S-3, S-4 で形成された固結体について考察を行う。

6.4.1 施工ピッチ（水平方向）

図-6.9 に S-2, S-3, S-4 で形成された固結体の水平方向断面図を示す。

事後調査から得られた固結直径は約 0.8～1.2m であり、設定した 1.5m の目標改良径に至らず、固結体は水平方向にラップしなかった。図-6.7 が示すように同一グラウタビリティー比（GR）における固結半径のばらつきが大きく、データ数も少ないことから正確な固結直径（施工ピッチ）を設定することは困難であるが、砂地盤の粒度分布から大まかな固結半径を推定し、施工ピッチを設定する必要がある。ここで、液状化対策として全面改良を基本に考えた場合、液状化層に若干の未改良域があっても対策効果は得られるのではないかと想定される。また、施工ピッチの大小は施工費全体に大きく影響を与えることから、図-6.7 のラップ性を重視した下限値よりは平均値から上限値を用いて施工ピッチを設定した方が、経済的な観点からも有効であると考えられる。

現状では、施工前に得ることができる原地盤の情報から懸濁液型の浸透性がよく固結直径が 1～2m と推定される地盤においても、グラウタビリティー比で注入限界と判定される地盤付近（ $GR=12\sim20$; $D_{15}=0.096\sim0.16\text{mm}$ ）に形成された固結体直径 0.8～1.0m を施工ピッチとすることが望ましいと考えられる。

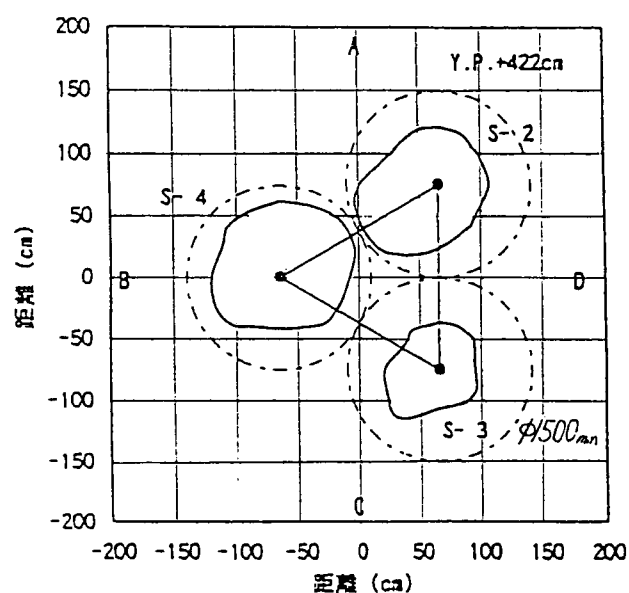


図-6.9 S-2, S-3, S-4 で形成された
固結体の水平方向断面図

6.4.2 ステップ長（鉛直方向）

図-6.10にS-2, S-3, S-4の固結体鉛直断面図を示す。単位長さ当りの注入量は同じであるが、各杭のステップ長が、S-2, S-3, S-4でそれぞれ1m, 0.66m, 0.33mである。図-6.10の固結体鉛直断面図より、ステップ長による固結形状の有意な違いは見られない。これは本地盤に対する水平方向の浸透限界を越えても注入を行ったため、鉛直方向に固結長（体積）が伸び、ステップ長の違いによる固結形状の差が現れなかったと考えられる。ただし、S-2では、YP+2.72mに設けた注入口が注入不可能な粘性土中であつたため、固結体は脈状となり、YP+3.0mから次注入口（YP+3.72m）より下部のYP+3.6m付近の注入可能な砂層に、固結体は形成されなかった。

ステップ長の設定は、①改良対象範囲に対して注入口を増すと効率的な注入となる、

②注入口が注入不可能な粘性土層中であつた場合、次の注入口までの地盤に固結体を形成する可能性は低い、などの点から、ステップ長は密にすることが望ましい。

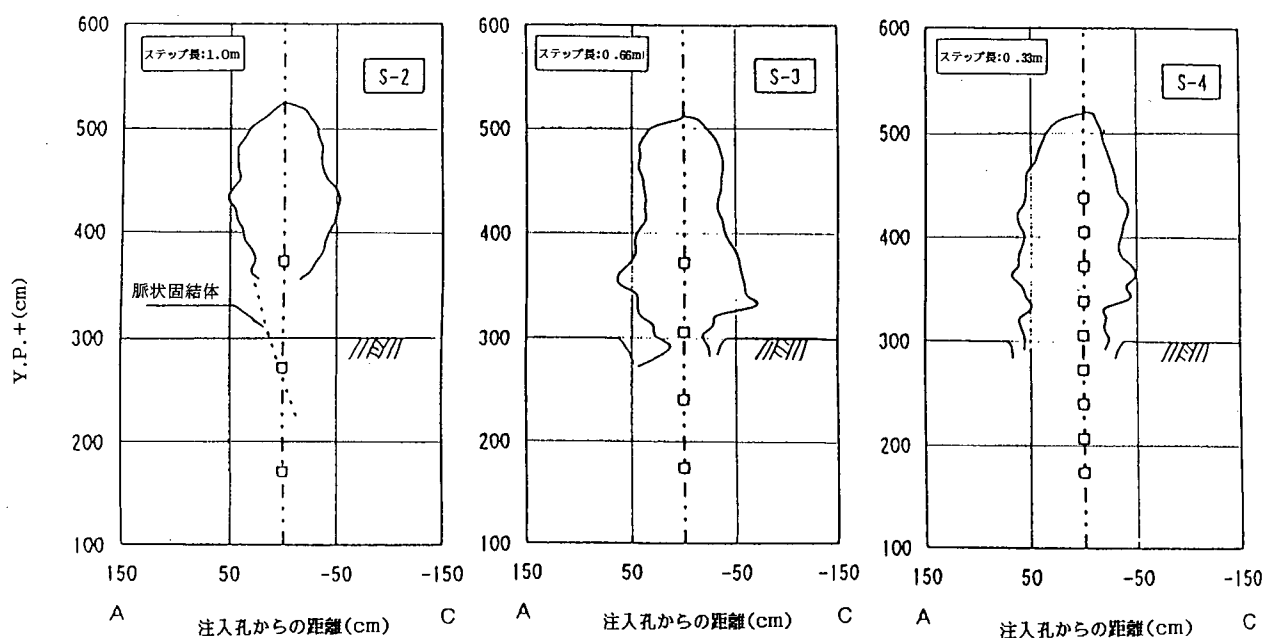


図-6.10 S-2, S-3, S-4の固結体鉛直断面図

6.5 固結体のカルシウム分析

形成された固結体中の超微粒子セメント分布状況および注入したセメント量のうちの程度が固結体中に残存したかを確認するため、固結体より採取したコアについてカルシウム分析を行った。

図-6.11に事前に事後調査より採取した原地盤砂を用いて測定したカルシウム濃度とセメント濃度の関係（検量線）を示す。検量線は、乾燥させた現地盤砂100gに砂の間隙率を $n=45\%$ とした場合の間隙量に対して、各充填比（ $W/C=1000\%$ の超微粒子セメント懸濁液量／試料砂の間隙量（ $n=45\%$ ））に相当するセメント量を添加し十分に混合した後、安定処理土10g中に含まれるカルシウム濃度をカルシウム選択性電極法⁹⁾により測定したものであり、質量比で定義される。

同図より、セメント濃度を大きくするとカルシウム濃度も大きくなることがわかる。また、未改良の原地盤砂に含まれるカルシウム濃度は0.04%と微量であり、測定値（カルシウム濃度）が砂による影響を受けていないことがわかる。

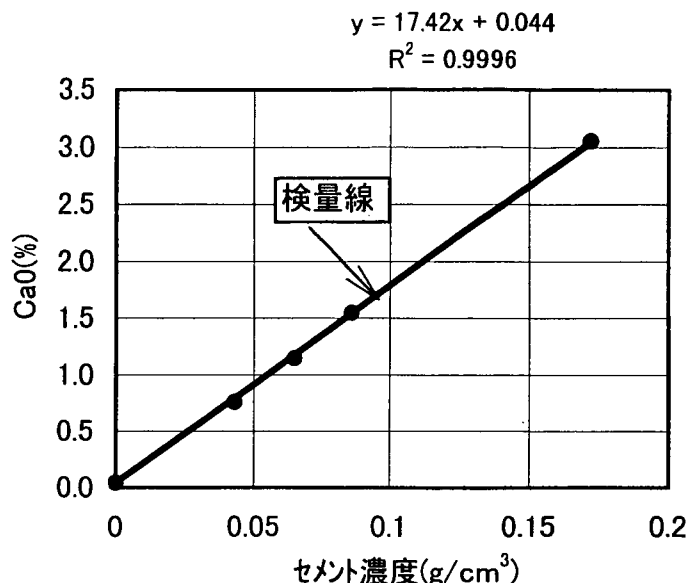


図-6.11 セメント濃度とカルシウム濃度の関係（検量線）

次に現場注入実験により形成された固結体内のカルシウム濃度を測定した。

注入孔からの距離とカルシウム濃度の関係を図-6.12に示す。なお、距離は、同一深度上の（注入孔から試料採取位置までの距離）／（注入孔から固結体外側部までの距離）で示している。これは、距離よりも前記の比（「距離比」）の方が相関がよかったためである。

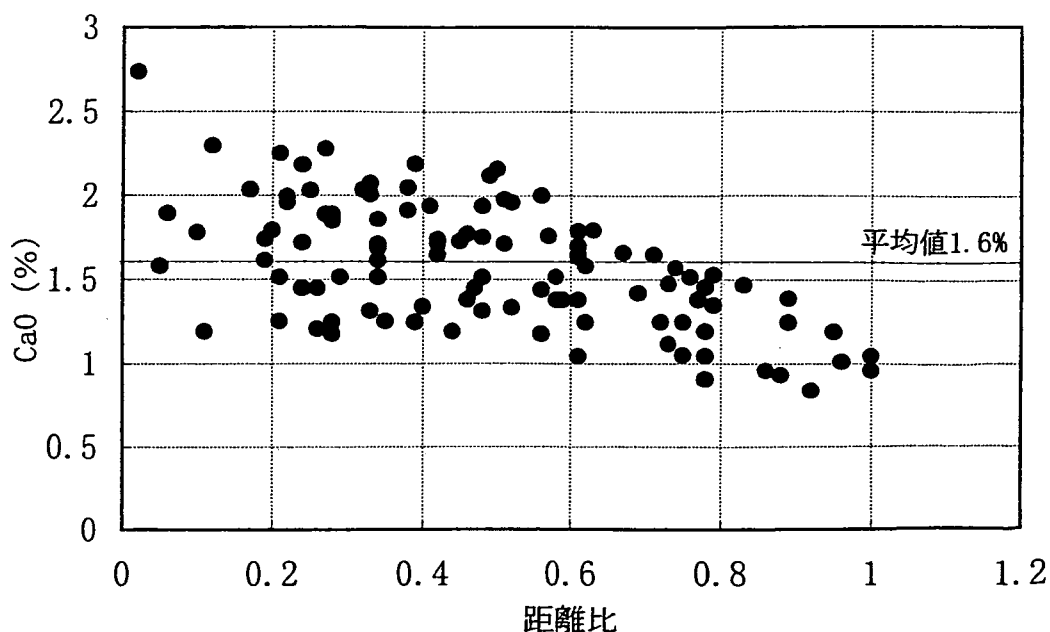


図-6.12 距離比とカルシウム濃度の関係¹⁴⁾

図-6.12より、固結体水平方向のカルシウム濃度は、注入孔に近いほど濃く、注入孔から離れ固結体外側部に近づくほど薄くなる傾向にある。これは、注入量が増えるにしたがい地盤間隙が超微粒子セメント粒子の残留により狭くなることで、その地点を通過していく粒子の割合が減少するためと考えられ、この現象が注入孔近傍ほど顕著である。なお、固結体外側部（固結体と未固結土の境界部分）から採取した未改良砂のCaO濃度は0.1%以下であった。

同図よりカルシウム濃度の平均値はおおよそ1.6%と読み取れる。他方、 $W/C=1,000\%$ の超微粒子セメント懸濁液が濃縮せずに改良範囲（固結体積）の間隙に止まったと仮定したときのセメント濃度は 0.043g/cm^3 、したがってカルシウム濃度は0.8%となる。（図-6.11参照）

なお、固結全体の体積を測定できた杭No. S-11固結体について、図-6.12に示すカルシウム濃度の平均値を用いて計算した固結体中のセメント総量（325kg）は、注入したセメント総量（407kg）の約8割であった。

カルシウム濃度のばらつきが大きいので確実ではないが、注入したセメントの大部分は固結体内にとどまったと解釈できる。

6.6 固結強度の品質確認

固結体より採取したコアを用いて、一軸圧縮強度試験により、原地盤に形成された固結体の強度を調べた。

注入孔からコア採取位置までの距離と一軸圧縮強さの関係を図-6.13に示す。また、注入孔からの距離を注入孔から固結体外側部までの距離で正規化した同様の関係を図-6.14に示す。

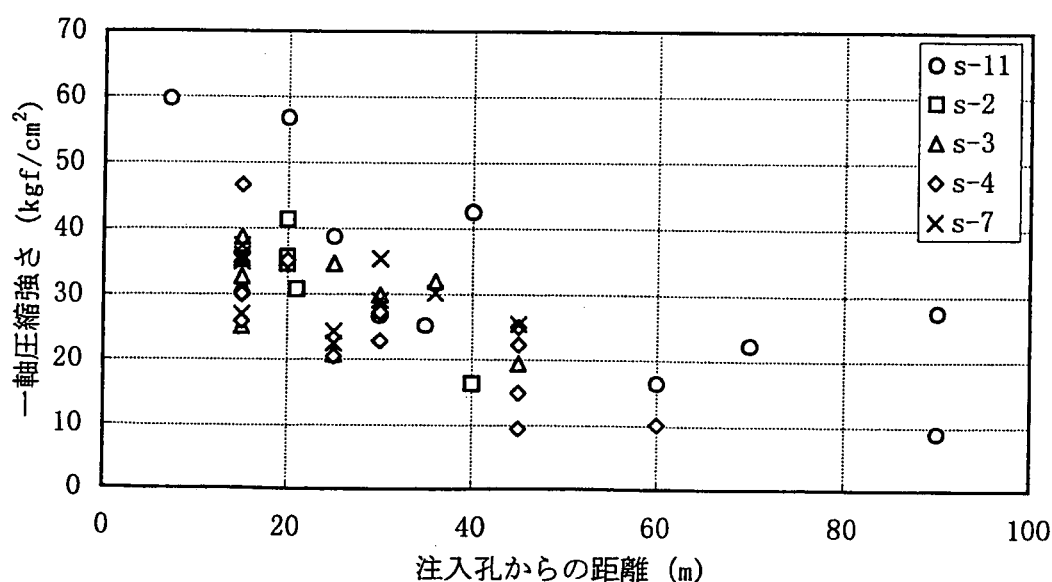


図-6.13 注入孔からの距離と一軸圧縮強さの関係

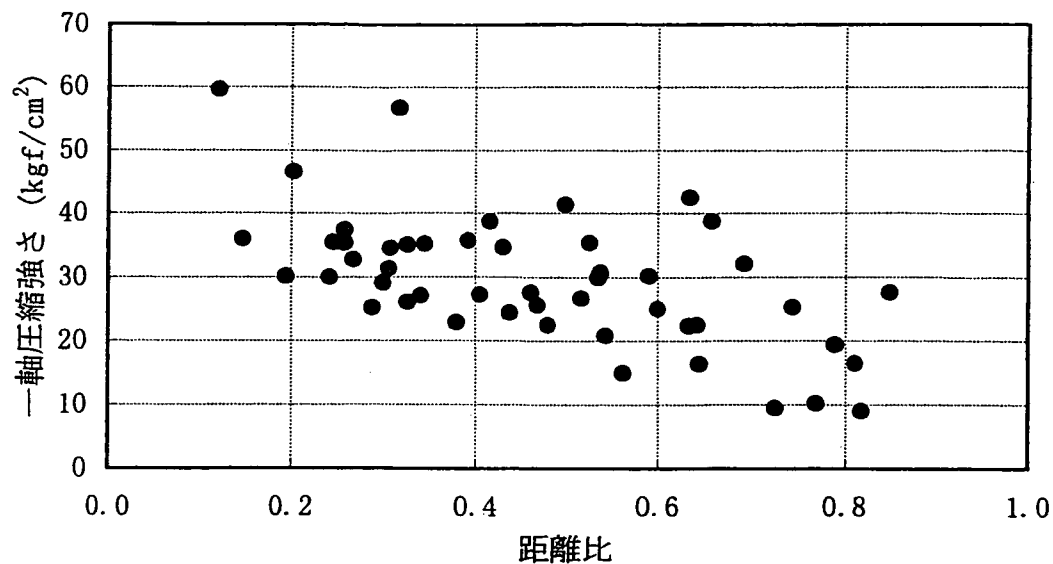


図-6.14 距離比と一軸圧縮強さの関係

図-6.13より、各注入孔で形成された固結体は、一軸圧縮強さで約10～60kgf/cm²の範囲にあり、十分な強度を有している。また、図-6.14より、形成された固結体の外側部に近いほど、一軸圧縮強さは低くなる傾向がある。

一軸圧縮強さ試験終了後、コアのカルシウム分析を行い室内試験の結果と比較した。

カルシウム濃度から求めたセメント濃度と一軸圧縮強さとの関係を図-6.15に示す。同図には、乾燥した珪砂7号と各充填比(W/C=1000%の超微粒子セメント懸濁液量/間隙体積(Dr=60%))に相当するセメント量を添加し、内径50mmの亚克力製モールド(ℓ=25cm)に相対密度Dr=60%に締固めた後、水浸養生した供試体を用いた一軸圧縮試験結果を参考のため併記している。

超微粒子セメント量を増すと一軸圧縮強さは高くなり、その傾向は、室内試験結果(試験条件: 7号珪砂、相対密度Dr=60%)とほぼ一致する。

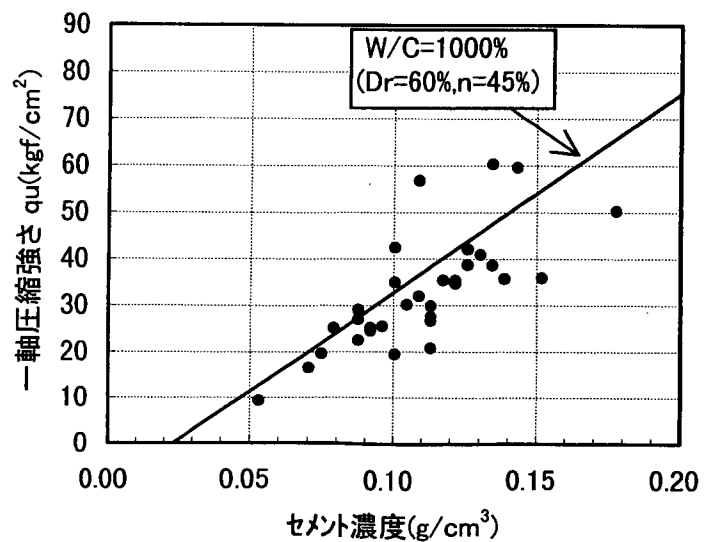


図-6.15 セメント濃度と一軸圧縮強さの関係

7. 高圧噴射浸透工法の考察

7.1 固結体形状

各試験ケースにより造成された固結体の鉛直断面図（図-5.14～図-5.20）で示すように、どの試験ケースでも若干の凹凸はあるがほぼ連続した固結体が造成されていることがわかる。

表-7.1に事後調査より得られた各杭の平均改良径を、図-7.1に噴射時間（改良速度）と平均改良径の関係を示す。この図より、超微粒子セメントを用いた高圧噴射浸透工法とセメント系固化材を用いた高圧噴射攪拌工法のどちらも噴射時間を長く、すなわち改良速度を遅くすることで改良径が大きくなるが、特に高圧噴射浸透工法は高圧噴射攪拌工法に比べて改良径が大きく、改良径造成の効率がよいことがわかる。

また、セメント系固化材を用いた高圧噴射攪拌工法の中では、M7の改良径が大きく、エアーを併用することで地盤を切削するエネルギーが増加するためと推測される。

表-7.1 各杭の平均改良径

工法名	使用 固化材	杭No	噴射時間 (分/m)	セメント比 W/C(%)	分散剤混入率 D/C(%)	平均改良径 ϕ (m)
高圧噴射 浸透工法	超微粒子 セメント	M1	7.3	1000	10	1.60
		M2	5.5	750	10	1.41
		M3	2.0	1000	10	1.00
		M9	4.0	1000	10	1.23
高圧噴射 攪拌工法	セメント系 固化材	M4	2.0	150	-	0.77
		M5	7.3	150	-	0.93
		M7	2.0	Air150	-	1.30

*M7はエアーと注入材を併用して注入

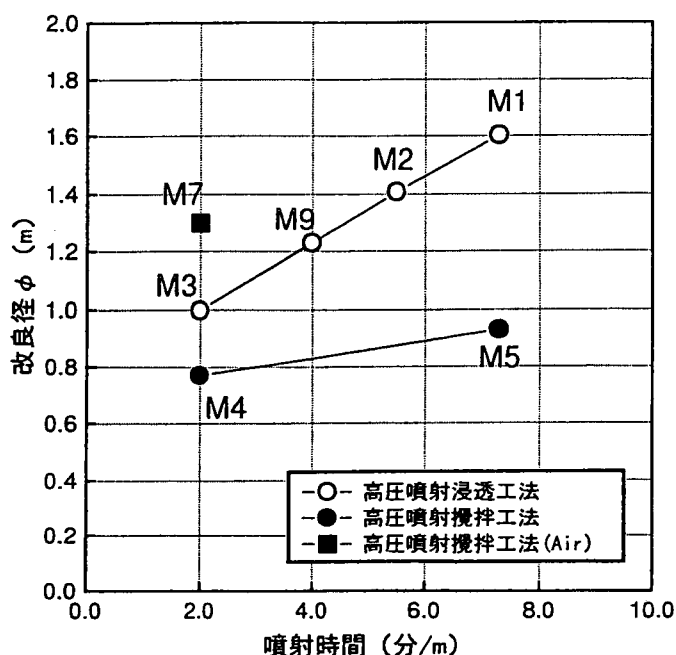


図-7.1 噴射時間（改良速度）と改良径の関係¹⁶⁾

7.2 固結体特性

噴射時間（改良速度）と固結体積およびセメント混入量〔噴射された懸濁液中のセメントの重量(kg)/固結体積(m^3)〕の関係を高圧噴射浸透工法の場合を図-7.2に、高圧噴射攪拌工法の場合を図-7.3に示す。

図-7.2, 図-7.3より、通常の高圧噴射攪拌工法と高圧噴射浸透工法のいずれにおいても、噴射時間を長くすることにより固結体積は増加している。ただし、高圧噴射攪拌工法では、噴射時間を長くすることにより改良体中のセメント混入量（濃度）が比例的に高まっているが、固結体積の伸びは小さい。これに対して、高圧噴射浸透工法では噴射時間を長くすることにより固結体積が比例的に増大し、セメント混入量の伸びは緩やかである。したがって、大きな固結体積を得るためには、高圧噴射浸透工法を用いて噴射時間を長くすることが効果的であることがわかる。

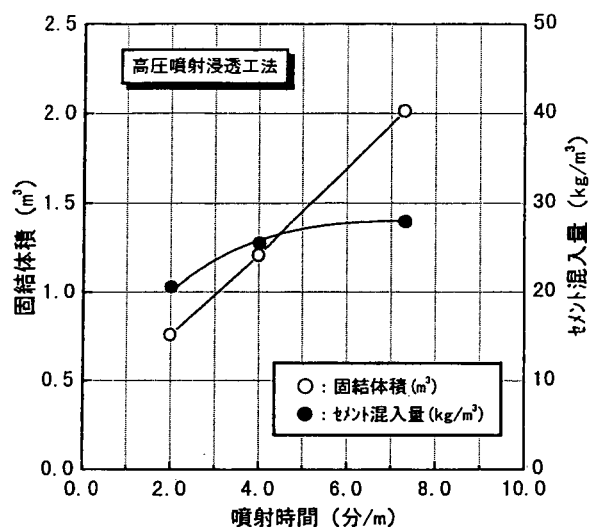


図-7.2 高圧噴射攪拌浸透工法における噴射時間と固結体積,セメント混入量の関係¹⁷⁾

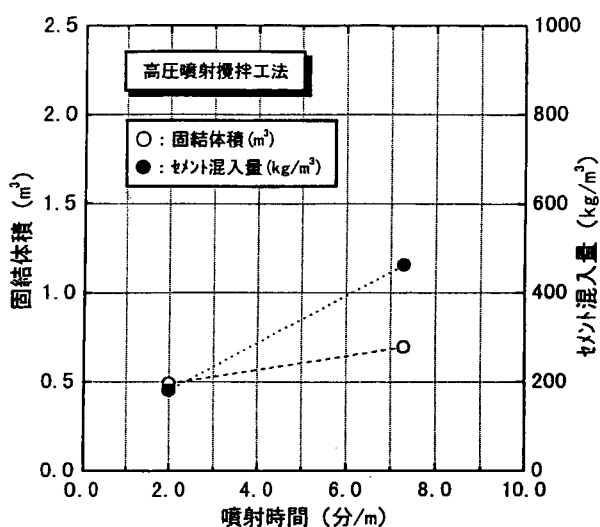


図-7.3 高圧噴射攪拌工法における噴射時間と固結体積,セメント混入量の関係¹⁷⁾

高圧噴射浸透工法（噴射時間4.0分/m, 7.3分/m）のセメントの分布状況を、注入孔からの距離に対するCaO濃度（固結体中のセメント濃度）の関係で図-7.4に示す。なお、CaO濃度は、固結体から採取したコアについてイオン電極法で測定したものである。

図-7.4より、高圧噴射浸透工法では、噴射時間を長くすることによるセメント濃度の伸びは小さいことがわかる。また、注入孔近傍よりも外周の方がセメント濃度が高くなっており、超微粒子セメントを用いた注入工法の場合（図-6.12参照）と異なっている。現在のところその理由はよくわからないが、吐出圧力(200 kg/cm^2)により地盤中で遠方へ運ばれるのは、砂質土粒子よりもセメント粒子である。本工法は、高圧で噴射されたセメント懸濁液により土粒子との強制攪拌を繰り返すものであることから、噴射時間を長くして攪拌時間を増すことで、先の攪拌時に土粒子の間隙中に置かれたセメント粒子が次の攪拌時の高圧噴射の懸濁液とともに遠方へ運ばれる現象が繰り返されるためではないかと推測される。

以上のことから、噴射時間を長くすることによる攪拌部にこもる圧力の増加が、攪拌部内の外側へ通過するセメント量の増加につながり、攪拌部外の土粒子間隙を通過するため、経時的に攪拌範囲を広げることとなり、固結体が効率よく造成されることが考えられる。

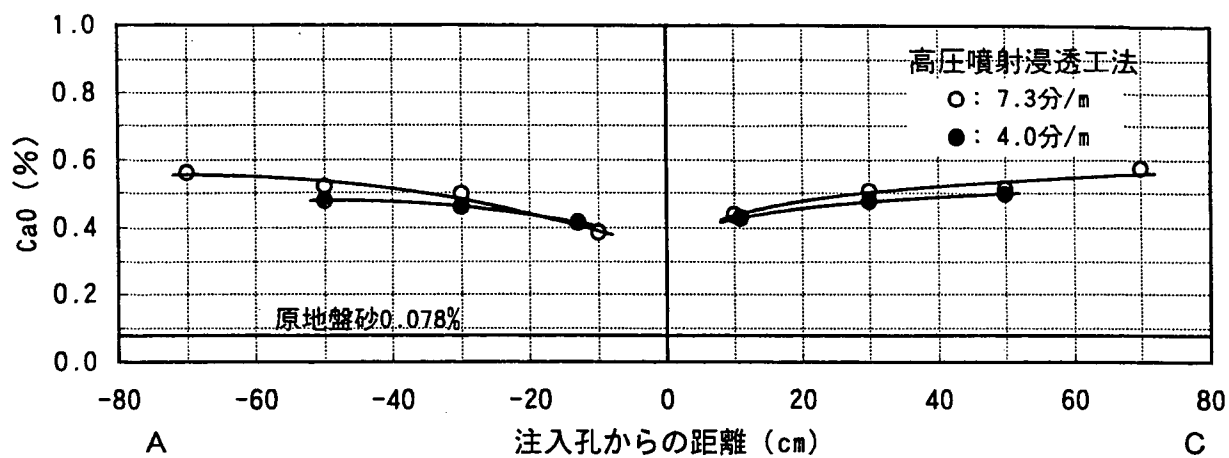


図-7.4 高圧噴射浸透工法における注入孔の距離とカルシウム濃度の関係 (A-C断面) ¹⁷⁾

8. 全体のまとめ

砂質土への浸透性の高い超微粒子セメントを用いた注入工法および高圧噴射工法による現場施工実験を行い、以下の成果が得られた。

1) 注入工法

- ① 超微粒子セメント懸濁液（水セメント比 $W/C=1000\%$ 、分散剤混入率 $D/C=10\%$ ）を用いて、目標固結体積（ $\phi 1.5\text{ m} \times \text{高さ} 3.0\text{ m} = 5.3\text{ m}^3$ ）の間隙量（ $n=45\%$ ）に対して注入量を1.5倍（充填比 $\alpha=1.5$ ）、ステップ長を66.6cmに設定した注入条件で現場実験を行い、グラウトビリティー比 $GR=11.7 \sim 32.3$ の砂質土地盤において最大径約2.0m、注入量4,236lに対して固結体積約3.6 m^3 の固結体を形成することができた。ちなみに、所要時間は約430分であった。
- ② 円柱状の浸透固結体が形成されている付近ではグラウトビリティー比 $GR \geq 10$ である。これは室内注入試験の $GR \geq 11$ で超微粒子セメントの注入可能という結果とほぼ一致する。また、 $GR < 10$ （地盤の15%粒径 $D_{15} < 0.08\text{ mm}$ ）の地盤では、ほとんどが厚さ0.3～3cmの脈状固結体が形成されていた。
- ③ 注入対象地盤のグラウトビリティー比 GR が大きくなると固結長（固結半径）も伸びる傾向にある。ただし、注入量（充填比）が大きいかほど固結半径が大きいう傾向は見られず、地盤間隙の疎密（透水係数）等の影響によるものと考えられる。グラウトビリティー比から一義的に固結径を設定することは難しいが、原地盤に対する注入可否および大まかな固結半径の推定のための判定指標としては有効である。
- ④ 施工前に得ることができる原地盤の情報から、正確な固結直径（注入孔ピッチ）を設定することは困難であるが、グラウトビリティー比 GR と固結半径の関係から現状では、懸濁液型注入材の浸透性がよく固結径が1～2mと推定される地盤においても、グラウトビリティー比で注入限界と判定される地盤付近（ $GR=12 \sim 20$ ）に形成された固結体直径0.8～1.0mを施工ピッチとすることが望ましい。
- ⑤ 施工前に得ることができる原地盤の情報から、固結直径（注入孔ピッチ）を設定することは困難である。現状では、懸濁液型注入材の浸透性がよく固結径が1～2mと推定される地盤においても、グラウトビリティー比で注入限界と判定される地盤付近（ $GR=12 \sim 20$ ； $D_{15}=0.096 \sim 0.16\text{ mm}$ ）に形成された固結体直径0.8～1.0mを施工ピッチとすることが望ましい。
- ⑥ 改良対象範囲に対して注入口が増えると効率的な注入になる。また、注入口が注入不可能な粘性土層中にあった場合、次の注入口までの地盤に固結体を形成することができないことから、ステップ長は密に設定する方が良い。

- ⑦ 固結体内のカルシウム濃度は、注入孔に近いほど濃く、注入孔から離れ固結体外側部に近づくほど薄くなる傾向がある。また、各注入孔で形成された固結体の一軸圧縮強度も、固結体の外側部に近いほど低くなり、カルシウム濃度と同様な傾向を示す。さらに、カルシウム濃度と固結体の一軸圧縮強度には強い相関がある。
- ⑧ 固結全体の体積を測定できた杭No. S-11固結体について、カルシウム濃度の平均値を用いて計算した固結体中のセメント総量（325kg）は、注入したセメント総量（407kg）の約8割であり、カルシウム濃度のばらつきが大きいので確実ではないが、注入したセメントの大部分は固結体内にとどまったと解釈できる。
- ⑨ 固結体の一軸圧縮強度は約10～60kgf/cm²の範囲にあり、十分な強度を有している。
- ⑩ 注入による間隙水圧の上昇は、注入孔50cm離れた位置で最大0.2tf/m²程度であった。
- ⑪ 注入後の地盤の盛り上がり量は0mmであり、地盤変状等は見られなかった。

2) 高圧噴射浸透工法

- ① 従来の高圧噴射攪拌工法に注入材として超微粒子セメントを用いることで、砂質土地盤において攪拌混合と浸透の作用により、従来の高圧噴射攪拌工法（改良径φ0.8～0.96m）に対して、1.2～1.6倍の改良径が得られた。また、噴射時間に対する改良径造成の効率がよいことから、噴射時間及び噴射圧力を大きくすることでさらに改良径が大きくなる可能性がある。
- ② 高圧噴射浸透工法は、噴射時間を長くしても固結体内のセメント濃度の増加はゆるやかである。また、注入近傍よりも外周の方がセメント濃度が高くなっており、超微粒子セメントを用いた注入工法と逆の傾向を示している。
- ③ 注入材の水セメント比(W/C)を大きくし、注入セメント量が少なくなると水平変位量が小さくなる。ちなみに、1.6mの固結径が得られたM1杭は改良杭1m当りの注入セメント量56kgで最大変位量1mm程度である。
- ④ 高圧噴射に伴う水平土圧の増加は、水セメント比W/C=100%のM1杭で2.6tf/m²、水セメント比W/C=150%のM4、M5杭で5～6tf/m²であり、水セメント比(W/C)が大きいほど小さくなる。
- ⑤ 超微粒子セメント圧入時の間隙水圧は、注入孔から50cm離れた固結領域内で最大1tf/m²、100cm離れた固結領域外で0.3～0.4tf/m²程度上昇しており、注入孔から離れるほど小さくなる。

9. 今後の課題

超微粒子セメントを用いた注入工法に関しては、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) 粒径の大きい砂に対する配合条件の確認
- 3) 施工仕様の決定（改良径(ピッチ)・注入量(充填比)の設定、ラップ部の一体性）
- 4) 浸透注入を前提とした超微粒子セメント懸濁液に適した注入方式の検討
- 5) 改良範囲確認手法の検討
- 6) 室内条件と現場条件の整合性の確認

謝 辞

本実験を行うにあたり、建設省関東地方建設局下館工事事務所に現場を提供していただいた。ここに記して謝意を表すものである。

〈参考文献〉

- 1) 有間一浩、古賀泰之、古関潤一：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、土木学会第49回年次学術講演会概要集第3部，pp. 692-693，1993. 6.
- 2) 有間一浩、松尾修、古関潤一：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）、第29回土質工学研究発表会講演集，pp. 2121-2124，1994. 7.
- 3) 佐野昌明、松尾修、古関潤一：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）、第30回土質工学研究発表会講演集，pp. 2093-2096，1995. 7.
- 4) 佐野昌明、松尾修、古関潤一：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－、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，pp. 1454-1455，1995. 9.
- 5) 市川公彦、松尾修、古関潤一：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）、第31回地盤工学研究発表会，pp. 119-120，1996. 7.
- 6) 藤井壮一、有間一浩、新越寿郎、松尾修、古関潤一：超微粒子セメント注入材による土槽注入実験、土木学会第49回年次学術講演会概要集第3部，pp. 1496-1497，1994. 9.
- 7) 藤井壮一、新越寿郎、下田正雄、松尾修、古関潤一：超微粒子セメント注入材による土槽注入実験（その2）、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，pp. 1492-1493，1995. 9.
- 8) 松尾修、古関潤一、近藤浩市、有間一浩、佐野昌明、市川公彦、淵上憲児：超微粒子セメント懸濁液の砂地盤への注入性に関する室内実験、土木研究所資料第3490号、1997. 2.
- 9) (社) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，p3，1985.
- 10) (社) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp216 - 220，1988.
- 11) 新越寿郎、藤井壮一、佐野昌明、松尾修：超微粒子セメント注入材の浸透限界地盤に関する研究、第31回地盤工学研究発表会，pp. 121-122，1996. 7.
- 12) (社) 日本薬液注入協会：薬液注入工 施工資料，pp9 - 34，1994.
- 13) 淵上憲児、下田正雄、松尾修：超微粒子セメント懸濁液注入による砂地盤での現場施工実験（その1）、第32回地盤工学研究発表会，pp. 2263-2264，1997. 7.
- 14) 藤井壮一、新越寿郎、佐野昌明、淵上憲児、市川公彦、池上正芳、松尾修：超微粒子セメント懸濁液注入による砂地盤での現場施工実験（その2）、第32回地盤工学研究発表会，pp. 2265-2266，1997. 7.
- 15) 藤井壮一、新越寿郎、佐野昌明、淵上憲児、松尾修：超微粒子セメント懸濁液注入による砂地盤での現場施工実験（その3）、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第3部，pp. 462-463，1997. 9.
- 16) 佐野昌明、新越寿郎、藤井壮一、松尾修：超微粒子セメントの浸透性を利用した高圧噴射攪拌工法の開発（その1）、第32回地盤工学研究発表会，pp. 2267-2268，1997. 7.
- 17) 新越寿郎、佐野昌明、藤井壮一、佐藤奈緒美、市川公彦、松尾修：超微粒子セメントの浸透性を利用した高圧噴射攪拌工法の開発（その2）～固結体造成について～、第32回地盤工学研究発表会，pp. 1401-1402，1997. 7.

〈その他関連文献〉

- 1) Sano, M., O. Matsuo, J. Koseki and M. Shimoda: Microfine Cement Grouting as a Countermeasure against Liquefaction, Proc. 6th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Technical Memorandum of PWRI, No.3415, pp.45-56, 1995.7.
- 2) 古関潤一、佐野昌明、松尾修：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－、土木学会第50回年次学術講演会概要集、pp. 558-559、1995. 9
- 3) Sano, M., O. Matsuo, J. Koseki & M. Shimoda: Microfine cement grouting as a countermeasure against liquefaction, Proc. IS-Tokyo'96/ 2nd Intl. Conf. on Ground Improvement Geosystems/Tokyo/14-17, May 1996, pp.65-70.
- 4) Fujii, S., O. Matsuo, J. Koseki & M. Shimoda: Properties of microfine cement grout and grouting tests using the simulated soil, Proc. IS-Tokyo'96/ 2nd Intl. Conf. on Ground Improvement Geosystems/Tokyo/14-17, May 1996, pp.31-36.
- 5) Sano, M., O. Matsuo, J. Koseki and M. Shimoda: Microfine Cement Grouting as a Countermeasure against Liquefaction, Proc. 6th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, Technical Memorandum of PWRI, No.3415, pp.45-56, 1995.7.
- 6) 古関潤一、佐野昌明、松尾修：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－、土木学会第50回年次学術講演会概要集、pp. 558-559、1995. 9.
- 7) Sano, M., O. Matsuo, J. Koseki & M. Shimoda: Microfine cement grouting as a countermeasure against liquefaction, Proc. IS-Tokyo'96/ 2nd Intl. Conf. on Ground Improvement Geosystems/Tokyo/14-17, May 1996, pp.65-70.
- 8) Fujii, S., O. Matsuo, J. Koseki & M. Shimoda: Properties of microfine cement grout and grouting tests using the simulated soil, Proc. IS-Tokyo'96/ 2nd Intl. Conf. on Ground Improvement Geosystems/Tokyo/14-17, May 1996, pp.31-36.
- 9) 新越寿郎、藤井壮一、佐野昌明、松尾修：超微粒子セメント注入材の浸透限界地盤に関する研究、第31回地盤工学研究発表会、pp. 121-122、1996. 7.

- 10) 松尾修、古関潤一、近藤浩市、有間一浩、佐野昌明、市川公彦、渕上憲児：超微粒子セメント懸濁液の砂地盤への注入性に関する室内実験、土木研究所資料第3490号、1997. 2.
- 11) 渕上憲児、下田正雄、松尾修：超微粒子セメント懸濁液注入による砂地盤での現場施工実験（その1）、第32回地盤工学研究発表会、pp. 2263-2264、1997. 7.
- 12) 藤井壮一、新越寿郎、佐野昌明、渕上憲児、市川公彦、池上正芳、松尾修：超微粒子セメント懸濁液注入による砂地盤での現場施工実験（その2）、第32回地盤工学研究発表会、pp. 2265-2266、1997. 7.
- 13) 佐野昌明、新越寿郎、藤井壮一、松尾修：超微粒子セメントの浸透性を利用した高圧噴射攪拌工法の開発（その1）、第32回地盤工学研究発表会、pp. 2267-2268、1997. 7.
- 14) 新越寿郎、佐野昌明、藤井壮一、佐藤奈緒美、市川公彦、松尾修：超微粒子セメントの浸透性を利用した高圧噴射攪拌工法の開発（その2）～固結体造成について～、第32回地盤工学研究発表会、pp. 1401-1402、1997. 7.
- 15) 藤井壮一、新越寿郎、佐野昌明、渕上憲児、松尾修：超微粒子セメント懸濁液注入による砂地盤での現場施工実験（その3）、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第3部、pp. 462-463、1997. 9.

《卷 末 資 料》

現場施工実験状況写真



写真-1 全景写真

上：掘削ピット全景を北東側より望む。写真中央右の3本は、杭No. S-2, S-3, S-4
 下：同じく北東側より望む。



S 1 (充填比 $\alpha = 1.0$)

上部の白色部分は固結体，下部の茶色部分は原土（粘性土）



S 5 (充填比 $\alpha = 1.5$)

上部の白色部分は固結体，下部の茶色部分は原土（砂質シルト）



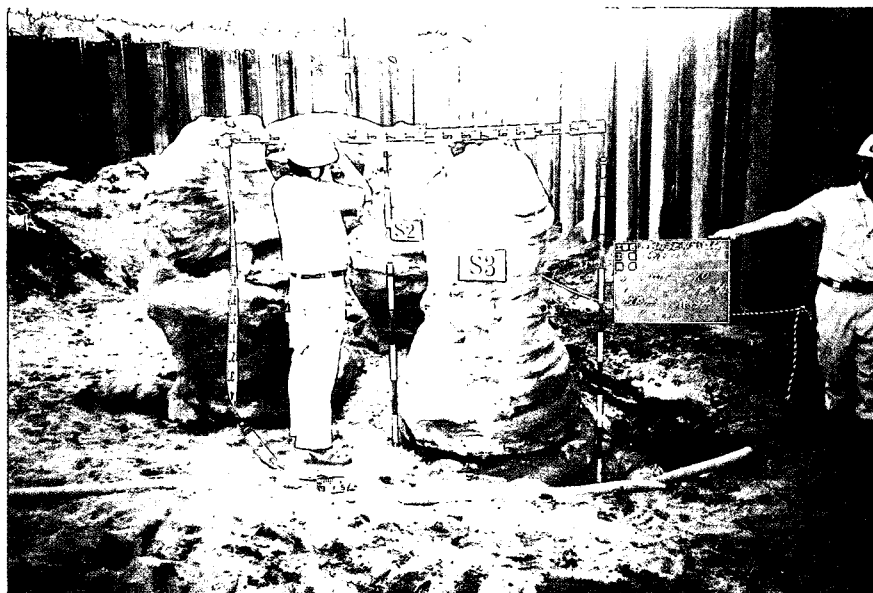
S 9 (充填比 $\alpha = 2.0$)

白色部分は固結体

写真-2 固結状況 (S 1, 5, 9 : 一点注入)



S 2 (ステップ長=100 cm):改良径 ϕ 1.1 m



S 3 (ステップ長=66 cm):改良径 ϕ 1.2 m



S 4 (ステップ長=33 cm):改良径 ϕ 1.1 m
写真-3 固結状況 (S 2, 3, 4: 一点注入)



上部固結体：改良径 $\phi 1.2\text{ m}$ (YP + 3.72 m 以浅)



下部固結体：改良径 $\phi 2.0\text{ m}$ (YP + 3.72 m 以深)

写真-4 固結状況 (S 1 1 : 充填比 $\alpha = 2.0$: ステップ長 = 66 cm)

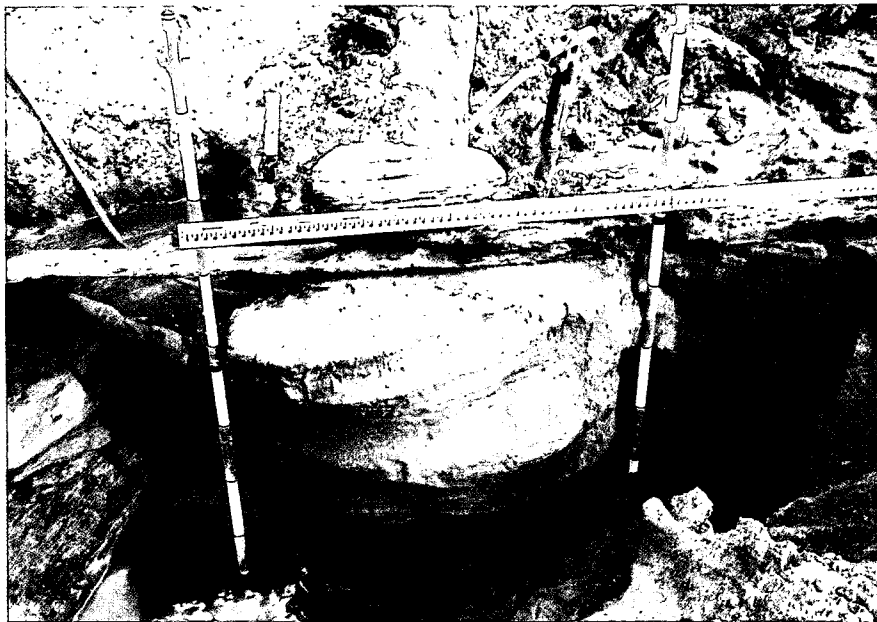


写真-5 脈状注入 (S10 : 充填比 $\alpha = 2.0$: ステップ長 = 100 cm)
 上 : 改良径 $\phi 1.1$ m (YP + 4.00 m 付近)
 下 : 厚さ約 3 cm の脈状注入 (超微粒子セメントのみ)



写真-6 脈状注入（粘性土地盤）

厚さ約2mmの脈状注入：フェノールフタレンを散布し，紫色に変色