

微粒子セメントを用いたグラウトの細砂地盤への 間隙浸透形態に関する微視的研究

米田俊一*・岡林茂生**・田村昌仁***・
森 麟****

従来セメントミルク等の懸濁系グラウトの注入は困難といわれていた透水係数が 10^{-3} cm/secのオーダーの細砂地盤に対し、セメント粒子径を変えたセメントミルクおよびセメント-水ガラス系グラウトを注入し、掘り出し調査によって浸透状態を比較した。また、室内基礎実験および微視的観察と併せて、グラウト処理土の強度、透水係数等の工学的特性と地盤構成粒子間隙におけるグラウトの浸透形態の関連を検討した。

Key Words : grout, groutability, fine cement, permeation, filling, strength, pore size distribution, micro structure

1. ま え が き

都市土木分野の注入工法は、主として仮設工事段階の一時的止水や補強が注入目的とされ、従来、水ガラスに代表される溶液系グラウトが用いられる場合が多かったが、最近では巨大構造物の建設が増加し、注入工法の確実性が求められるとともに、固結後の強度や耐久性も重視されるようになってきている。

現在使用できる溶液系グラウトは「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針（建設省事務次官通達、昭和49年）」により、強度や耐久性に問題のある水ガラス系に限られている。これらの問題点を改善するために、従来から、ダム基礎分野の注入などで強度、耐久性に信頼性のあるセメント系グラウトを水ガラスと併せた懸濁系グラウトが用いられているが、粒子分散系の宿命で溶液系グラウトに比べて浸透性に関して不利な面もあった。近年では、超微粒子セメントの開発によって両者の差は縮小しつつあるが、浸透挙動および浸透性能については不明な点が多く、注入現象あるいは注入機構の解明に至っていない。また、その結果、配合および施工などの合理的設計施工方法も未だ確立されていない。

本研究は、超微粒子セメントをグラウト材料としてさらに改善・改良することを目的としている。このためには、注入現象の実態を正確に把握し、材料特性と浸透特性あるいは改良効果との関係を明確にし、得られた情報を材料開発に応用することが重要なプロセスとなる。

ところで各種の地盤に対して、セメント懸濁系グラウトの浸透の可否を論じた研究、例えば、グラウタピリティの研究などは従来より多数発表されているが^{1),2)}、注入

機構を明らかにする上で必要な形態調査、すなわち地盤構成粒子間隙におけるグラウトの浸透形態などを微視的に観察研究したものは、非常に少ないようである。そこで、本研究では、グラウトの注入機構あるいは注入改良効果を検討するために、グラウト処理土の工学的諸特性と間隙の微細構造との関連を調べることを研究のねらいとした。すなわち、セメントミルク系（以下、CM系と略す）とセメント-水ガラス懸濁系（以下、LW系と略す）の2種類のグラウトを用いて、砂層に対する室内基礎実験および現場注入・掘り出し実験を行い、グラウト処理土の強度、透水性などの工学的性質と固結体内部の微視的組織との関連について調査研究を行った。

2. 試験地盤、現場実験および室内実験の概要

(1) 試験地盤

本研究は、注入材料特性の影響が現れ易いと考えられるA地区（千葉県九十九里町東北部作田川上流域の小支流が開折した河谷低地）の地盤を試験対象に選び、現場注入・掘り出し調査および室内実験を行った。実験地盤は成田層と考えられる洪積層であり、シルト混じりの細砂が厚く堆積し、地下水位はほぼ地表付近にあった。表-1に現場注入および試料土の採取を行った深度6~9mの土質概要を示す。

(2) 使用材料

室内基礎実験に用いた砂質土は、注入実験を行ったA地区の地盤（前述）から採取したものであり、表-1にその物理的性質を併記した。本実験では、主としてブレン比表面積が $10\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ の超微粒子セメント（記号U）を検討することにし、そのほか比較のために比表面積 $5\,650\text{ cm}^2/\text{g}$ の微粒子セメント（記号F）および普通ポルトランドセメント（記号N）を用いた（表-2）。分散剤はコンクリート用高性能減水剤（ナフタレンスルフォン酸ホルマリン高縮合物系）を用い、セメント重量

*工博 宇部興産（株）セメント事業部 技術部長
（〒140 東京都品川区東品川2-3-11 UBEビル）

** 宇部興産（株）セメント事業部開発部製品G.L.

*** 工博 建設省 建築研究所 第3研究部主任研究員

**** 工博 早稲田大学教授 理工学部 土木工学科

表一 現場注入地盤の土質概要

| 土質区分 | 細 砂 | | |
|----------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| | 6.5 | 6.15~7.15 | 8.15~9.15 |
| 深度 (GL-m) | 6.5 | 6.15~7.15 | 8.15~9.15 |
| N値 | | 27~40 | 40~29 |
| 土粒子密度 (g/cm ³) | 2.650 | 2.680~2.689 | 2.698~2.710 |
| 含水比 (%) | 16.2 | 24.0~23.8 | 27.0~29.4 |
| 乾燥密度 (g/cm ³) | 1.40 | | |
| 間隙比 | 0.89 | | |
| 細粒分含有率 (%) | | 7 | 8~9 |
| 均等係数 | | 2.47~2.67 | 2.58~2.54 |
| 加積通過15%径 (mm) | 0.17 | | |
| 透水係数 (cm/sec) | 2.1×10 ⁻³ | 8.53×10 ⁻³ | —現場透水— |
| | | -JIS A1218 | |

注) 太枠内: 室内実験使用土の性質

表二 セメントの物理的性質

| 記号 | 比重 | ブレン比表 面積 (cm ² /g) | 加積通過重量粒径 (μm) | |
|----|------|----------------------------------|---------------|--------|
| | | | 50%通過径 | 85%通過径 |
| U | 2.94 | 10000 | 3.4 | 6.2 |
| F | 2.96 | 5650 | 11.0 | 22.0 |
| N | 3.13 | 3230 | 15.1 | 35.0 |

注) レーザー回折式粒度分析計による

表三 現場実験に用いたグラウト配合

| 記号 | セメント 種類 | セメント ミルク w/c (%) | セメント ミルク 水ガラス | 単 位 量 (kg/m ³) | | | | 粘 度 (cp) |
|------|------------|------------------------|---------------------|----------------------------|------|--------|-----|-------------|
| | | | | * セメント | | * 水 | | |
| | | | | セメント | 水ガラス | 水 | 分散剤 | |
| CM-N | N | 800 | 1:0 | 120 | | 960 | 2.4 | 1.0 |
| CM-F | F | 800 | | 120 | 0 | 960 | 2.4 | 1.0 |
| CM-4 | U | 400 | | 230 | | 920 | 4.6 | 1.2 |
| CM-8 | U | 800 | | 120 | | 960 | 2.4 | 1.0 |
| LW-4 | U | 400 | 1:1.7 | 85 | 748 | 499 | 1.7 | 7.8 |
| LW-8 | U | 800 | 1:1 | 60 | 594 | 605 | 1.2 | 5.0 |

注) *水ガラス原液 (SiO₂:Na₂O:水=32:1:15.3:52.6、重量%)

の2%添加した。水ガラスは地盤注入材用低モル品 (SiO₂/Na₂O=2.15) を濃度75 vol% に希釈して使用した。

(3) 現場注入・掘出し調査

注入は2重管ダブルパッカー工法を採用し、所定深度6, 7, 8 mでのポイント注入を行った。表一に示すようにこの深度の透水係数は10⁻³cm/secオーダーであり、微粒子セメントを用いたグラウトの浸透限界に近い条件と想定された²⁾。そこで本実験のグラウトは表三に示すように、従来の経験を参考として、水セメント比400, 800%の超微粒子セメントを用いたセメントミルクと水ガラス溶液を、それぞれ、1:1, 1:1.7に併せ、ゲルタイムを同じにした希薄懸濁系のLW系グラウトを実用性の観点で取りあげることとした。また、セメントの粒子径を変えたCM系もこれらLW系と比較のため検討することとした。注入において、CM系グラウトは配管が1本の1ショットで、LW系は別々に調整した2液を配管途中で1本に合流させる1.5ショットで圧送した。CM系の注入速度は6ℓ/分、LW系は10~

表四 現場実験における注入条件

| 記号 | 注入速度 (ℓ/min) | | ゲルタイム 温度 (°C) | ゲルタイム (min.) | 注入深度 (m) | 注入圧 (Mpa) | 注 入 時 間 (min.) |
|------|--------------|------|------------------|-----------------|-------------|--------------|----------------------|
| | セメントミルク | 水ガラス | | | | | |
| CM-N | 6 | - | 20.4 | - | -8 | 1.2 | 17 |
| CM-F | | | 19.7 | | -6 | 0.6 | |
| CM-4 | | | 20.1 | | -6 | 0.5 | |
| CM-8 | | | 19.8 | | -7 | 0.7 | |
| LW-4 | 4 | 7 | 23.0 | 35 | -7 | 1.1 | 9 |
| LW-8 | 5 | 5 | 22.0 | 42 | -8 | 1.2 | 10 |

表五 混合成形供試体および現場注入固結体に関する実験概要

| グラウト記号 | CM-2, CM-4 | CM-6 | CM-8 | LW-4, LW-8 |
|------------------------------|-----------------|------------|---------------|--|
| セメント種類 | U | U | N,F,U | U |
| GcのW/C (%) Gc:Gg (容積比) | 200, 400 1:0 | 600 1:0 | 800 1:0 | 400, 800 1:1.7 (LW-4) 1:1 (LW-8) |
| てん充率 (%) | 100 75 50 - | 100 75 50 | - | 100 75 50 - |
| 圧縮強度 3日 | ○ | ○ | | ○ |
| 7日 | ○○○ | ○○○ | | ○○○ |
| 28日 | ○○○ | ○○○ | | ○○○ |
| 70~90日 | | | ◎ | ◎ |
| 透水係数 7日 | ○ | ○○ | | ○○○ |
| *ロティ 28日 | ○ | ○○ | | ○○○ |
| 70~90日 | | | ◎ | ◎ |
| | | | (*ロティはLW-4のみ) | |
| てん充率測定 | | | ◎ | ◎ |
| 顕微鏡観察 | ◎ (CM-4) | ○ | ◎ | ◎ (LW-4) |

注) 記号 Gc:セメントミルク Gg:水ガラス ◎:現場固結体 ○:混合成形

11ℓ/分の一定に制御し、合計注入量は全てのケースで100ℓとした。表一に注入条件等を示す。注入施工後、約50~70日の間に施工場所周囲に鋼矢板を打込み、G.L. -6mまでは重機によって、それ以上は人力掘削と水洗を併用して掘り下げ、グラウト浸透の状況を調査した。洗い出した固化体は地上に搬出し、詳細な外観観察のほか表五の試験に供した。

(4) 室内実験 (混合成形供試体)

グラウトと試料土 (グラウト未浸透の現場土) を混合し、現場土と同等の間隙比となるように締め固めた供試体の強度、透水係数および微細構造を検討した (表五)。

セメントミルクは、水、分散剤、セメントの順でジュースミキサーに投入し、6000 rpmで15秒間、12000 rpmで30秒間かく拌して調製した。混合成形供試体は直径5 cm、高さ10 cmの円柱体とし、セメント物理試験方法 (JIS R 5201) に準じ、あらかじめ調製したセメントミルク、水ガラス希釈液および試料土を容量2ℓのモルタルミキサーで混合したのち、モールドに2層に分けて詰め、各層に730gのおもし (37 gf/cm²) をのせた状態でモールド側面を軽打することによって締め固めた。供試体は温度20°C恒温室内でビニール密封養生を行った。

本実験でグラウトと土の混合成形試験体を採用した理

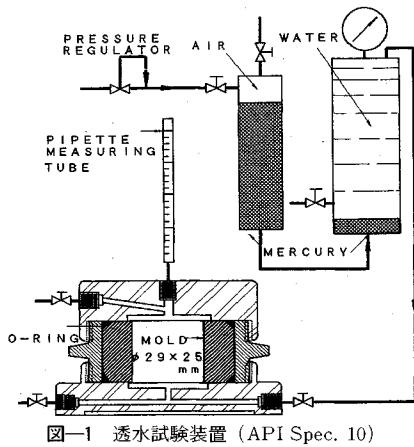


図-1 透水試験装置 (API Spec. 10)

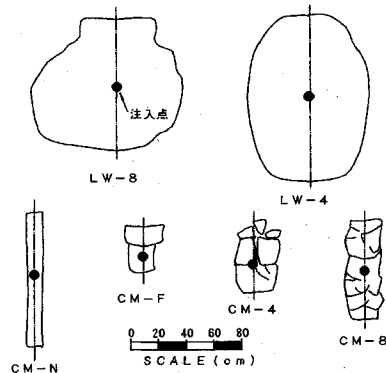


図-2 掘出し固結体の外観スケッチ

由は、a) グラウトが希薄であり、成形締め固め度に影響しないであろうこと、b) 供試体各部でのグラウトてん充率が均一になること、c) 所定濃度のグラウトの間隙内部でてん充率の大きさを任意の大きさにコントロールできることなどからである。

なお、上記 (3)、(4) における CM 系供試体の水セメント比は、LW 系のセメント濃度と同一水準にすると強度が著しく弱くなるため、現場実験では 800、400%、室内実験では 600 から 200% の強度試験が可能な範囲とした。このため、懸濁物質の単位量、すなわち単位セメント量 (グラウト容積 1 m³ 当たりのセメント重量) は LW 系よりも CM 系の方が高くなっている。

(5) 混合成形供試体および現場注入固結体の試験方法

a) 一軸圧縮強さ、透水係数およびてん充率

一軸圧縮試験では、テンシロン万能材料試験機 (オリエンテック製) を使用してひずみ制御 (ひずみ速度 1% / 分) で載荷した。透水性は、コアサンプラーで採取した直径 3 cm、長さ 2.5 cm の供試体を API (American Petroleum Institute) の油井セメント規格の Spec. 10 に準じて試験した。API セメント透水試験装置を図-1 に示す。てん充率は、一軸圧縮試験終了後の供試体中央部から採取した断片を 105°C で 24 時間乾燥したのち粉末試料とし、ポルトランドセメントの化学分析方法 (JIS R 5202) に従って Na および Ca 成分を分析し、分析値を基に土粒子間隙に対するてん充率を算出した。

b) 微細組織の解析

一軸圧縮試験後の供試体中心部、現場注入固結体のボーリングコア中心部から採取した断片、および試料土について、間隙量および間隙径分布 (以下単に、ポロシティと表す) を水銀圧入式ポロシメーター (湯浅アイオニクス製、測定可能細孔半径 100 ~ 0.0018 μm) により測定した。試料土のポロシティは佐藤らの方法³⁾ に準じ、φ 0.8 × 1.0 cm 銅パイプに試料土を封入して試験した。

光学顕微鏡観察用薄片試料の前処理では、試料の急激

な乾燥による微細ひび割れを防ぐために 20°C、20% R. H. の N₂ ガス気流中で乾燥 (2 日間) を行った。また、できるだけ含水状態に保持した試料の微細組織を観察するため、低真空走査型電子顕微鏡観察を行った。この場合、観察の直前に試料の真空処理 (0.4 ~ 0.6 mmHg) を 3 分間行い、全ての観測を 10 分で終了することとした。

3. 現場注入固結体の形状についての検討

図-2 に掘出した固結体の外観スケッチを示す。

固結体の形状寸法は各々のグラウトの浸透性を反映したのものとなった。このうち CM 系では、セメント粒径の大きい CM-N は、グラウトが注入パイプと地盤との隙間に長さ 1 m にわたって拘留され、注入点からの均等浸透がみられない。浸透性はセメント粒子径が小さくなるにつれて良くなる傾向がある。例えば CM-4 の固結体容積および半径 (平均円筒半径) は 42 ℓ、15 cm である。セメント U を用いた CM 系の水セメント比の相違による影響は明瞭でない。注入対象土の間隙率を 0.47、注入グラウト量を 100 ℓ、グラウトの間隙でてん充率を 100% とする時の球状固結体容積は 213 ℓ (半径 37 cm) であるので、CM 系の浸透性はさらに改善が望まれる。一方、LW 系の注入容積は CM 系より大きく、注入孔を軸としてほぼ円筒形の固結体が得られた。LW-8 の固結体容積および円筒換算半径は 574 ℓ、45.1 cm、同様に LW=4 では 524 ℓ、37.3 cm であった。なお、これらの間隙各部でのグラウトてん充状態を一様と仮定したときの平均てん充率は両固結体ともに約 40% となり、この数値は未充てん部がかなり残存していることを示す。グラウト自体の粘性、ゲルタイムあるいは注入速度などの施工条件にも係わると思われるが、LW 系では、結果的に、このように未充てん部分を残しながら浸透が進行することが、固結体のみかけ容積を大きくしている。

懸濁系グラウトの浸透性の違いはグラウタピリティ

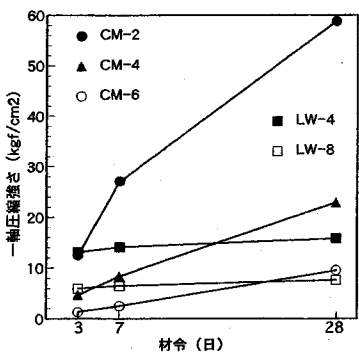


図-3 混合成形供試体の一軸圧縮強さ

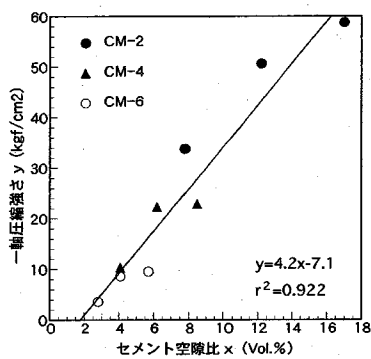


図-4 混合成形供試体 (CM系) のセメント空隙比と一軸圧縮強さ (材令 28日)

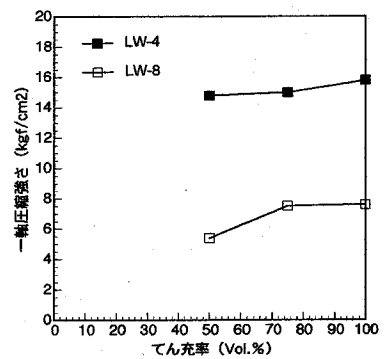


図-5 混合成形供試体 (LW系) のてん充率と一軸圧縮強さ (材令 28日)

(加積通過率15%の地盤粒子径/同85%のセメント粒子径)で説明可能である。今回の試験に用いたセメントのグラウトビリティは、N、F、Uのそれぞれについて、5、8、27であり、グラウトビリティが約10以下では浸透が困難であるという従来の知見とほぼ対応している^{2), 4)}。LW系がCM系より浸透性が優れる原因には、LW系は水ガラスと併用するため媒体の粘度が高いこと、および短時間でゲル化することから懸濁物質の固液分離が少ないことが挙げられる。材料分離は注入中に目詰まり現象を助長し、あるいは注入後の間隙内部での不均一分布を引き起こし、グラウトの浸透性および間隙に充てんされた注入液の形態変化に影響することが推察される。LW系は、このような材料分離が少ないことに加えて、媒体の粘度が高いために媒質であるセメント粒子同士、あるいはセメント粒子と土壌粒子との接近が妨げられてセメントの再凝集や通過メディアへの抑留が少なくなることによって、あるいは水ガラスの潤滑作用などによって、浸透性が良好になったものと推察できる。

なお、本研究のLW系の懸濁物質濃度であるセメント濃度はCM系よりも低いが、これも目詰りの影響度を小さくし、現場グラウト処理土の固結半径を大きくした要因と考えられる。媒体の粘度および懸濁物質濃度の影響は今後の研究課題である。

4. 混合成形供試体および現場注入固結体の諸性質

前章で述べたようにグラウト中の懸濁物質であるセメントの分離沈降特性、目詰りは、間隙内部でのてん充率や充てん形態に影響し、さらにはグラウト処理土の強度および透水係数などの工学的性質を左右すると考えられる。この章では、主として超微粒子セメントUを用いたグラウトの間隙てん充率の大きさが強度および透水係数に及ぼす影響を検討する。

(1) 一軸圧縮強さ

図-3に示すようにCM系混合成形供試体の一軸圧縮強さは一般のコンクリートと同様に水セメント比が小

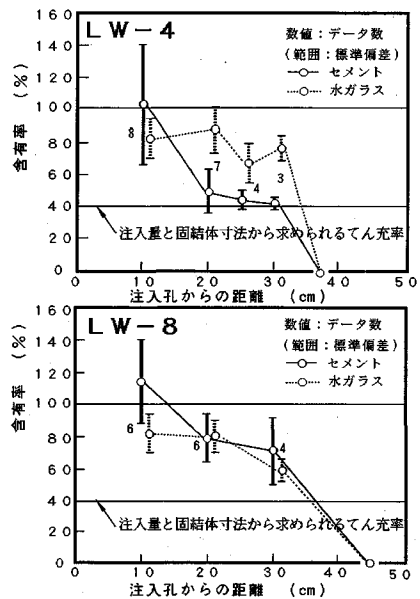


図-6 掘出し固結体の注入孔からの距離と成分含有率

さいほど高く、材令28日までほぼ直線的に強度が増加する傾向がある。LW系は水ガラスのゲル化に伴って初期の強度発現は大きい、材令3日以後の強度は穏やかに増進する。この漸増する強度増加は、懸濁するセメントUの水和の進行によると考えられる。

一般に、セメント硬化体の強度はセメントと空隙(練り混ぜ水量+空隙量)の容積比に支配される。図-4はこの考えに従って、CM系の間隙内部のセメント空隙比、すなわち、セメント水比×てん充率を求め、材令28日の試験値を整理したものである。多少の変動はあるものの、CM系の一軸圧縮強さとセメント空隙比との関係は、全体的にほぼひとつの相関直線で表せられるようである。次に、図-5にLW系グラウトの強度とてん充率の関係を示す。LM-4の方がLW-8より全体的に強度が高いのは、セメントおよび水ガラスの単位量の多いホモゲル(以下、CM系、LW系いずれも、グラウト自体の硬化体をホモゲル称する)の力学的特性が

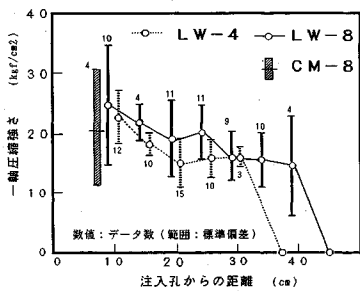


図-7 掘出し固結体の注入孔からの距離と一軸圧縮強さ

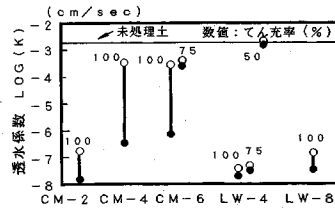


図-8 混合成形供試体の透水係数

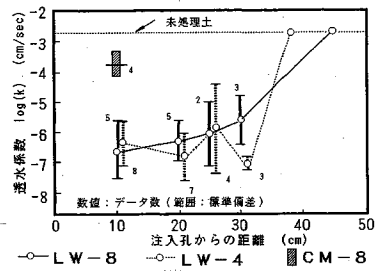


図-9 掘出し固結体の注入孔からの距離と透水係数

強度上有利に作用しているためと考えられる。また、てん充率との相関がみられないことは、セメント空隙比理論が成立しないことおよびホモゲルの強度機構が、空隙量に敏感な脆性材料のそれと異なることを示している。すなわち、今回の実験の範囲では、CM系の強度を左右する要因は空隙比に関係する結合材の絶対量（セメント量）であり、また、LW系ではホモゲルの絶対量よりはそれ自体の強度、変形性などの力学性状が強度の支配因子となっていると考えられる。

現場実験におけるLW系グラウト2種の注入孔からの距離とセメント分および水ガラス分の含有率の関係を図-6にプロットした。ここで、これらの含有率はそれぞれ、Ca成分、Na成分の化学分析によるものであり、設定配合グラウトが空隙を完全に充てる状態の濃度を基準として百分率表示したものである。なお、この値の変動は成分構成比あるいはてん充率の変化を示すことになる。図中、固結体の表面位置（注入孔からの距離を平均円筒半径と仮定）における含有率は、0とみなしている。また、参考のため、前章で求めた平均てん充率（総注入量/固結体の総空隙量）も図中に併記した。図から明らかなように、水ガラスはセメントの場合と比べて、30 cm以内では含有率の変化が少ない。この範囲では含有率が80%程度に低下しているが、原因が未充てん部の存在か地下水の希釈によるものか明かでない。一方、セメントの含有率は注入孔からの距離に応じて急激に減少している。また、注入孔に近いところでは含有率が100%を越えている。このことは、セメントの土粒子間隙への拘留が著しく、注入孔に近いところで目詰まりと濃縮が生じたことを示している。この現象はセメント濃度の高いLW-4の方がLW-8よりも特徴的である。このようなセメント含有率の距離による低減は、図-7に示すごとく、注入孔からの距離と一軸圧縮強さの関係と相似しており、セメント含有率が強度に及ぼす影響が大きいことがわかる。なお、図-7において、含有率の場合と同様に、固結体表面（平均円筒半径位置）での強さは0とみなしている。

ところで、LW系についての混合成形供試体ではセ

メント含有率の影響がみられず、一方、現場注入処理土ではセメント含有率が強度にかなり影響した理由および混合成形よりも現場注入の方が強度が高い理由は、注入による場合、試験材令の違いのほかに後述の間隙内部の形態観察にみられるように、セメントが土粒子の接合部に集中して拘留され、この補強効果が水ガラスの補強効果などよりも卓越したためと考えられる。また、現場注入の水ガラス含有率が強さに及ぼす影響が不明瞭なのは、未充てん部分の存在および地下水の希釈によるホモゲルの力学性状の低下などにより、水ガラスの補強効果が相対的に低下したためと考えられる。

LW-4の単位セメント量はLW-8より若干多いが、このため目詰まりによるセメント含有率の変化が生じ易いようであり、LW-4とLW-8の強度は、図-7にみられるように注入孔付近での強度差は少ないものの、注入孔から離れるにつれてLW-4の方の強度が低くなっている。なお、単位セメント量の多いCM-8の強度がLW系より若干低い理由は明らかでないが、セメントの不均一な浸透が原因の一つと推察される。

(2) 透水係数

図-8に混合成形供試体の材令7日、28日の透水係数を示す。材令28日の透水係数は、CM系では水セメント比が小さいほど、LW系ではセメントおよび水ガラス濃度が高い方が改良されている。全体的にCM系よりもLW系の方が透水係数は低減されるようであるが、CM系では材令の進むことによる改良効果が大い。限られた範囲ではあるが、設定てん充率を、CM系では75%、LW系では50%に低下させると透水性の改良効果は急激に小さくなり、材令が進んでも改善されないようである。図-9は掘出し固結体の透水係数と注入孔からの距離の関係を示すものである。強度の場合と同様に、固結体表面での透水係数は未処理土と変わらないものとみなして図中に示した。このように透水性改良効果についても、強度補強効果の場合と同様に注入孔に近い方が改良されている傾向がみられる。

混合成形供試体よりも現場注入固結体の方が透水係数の改良度は小さいが、この理由は、現場固結体ではグラウトの未充てん部分があることおよび間隙てん充状況が

不均一であることによると考えられる。図-7, 9に示すように、CM-8の強度はLW系と大差がないのに、透水係数はLW系よりもかなり大きい。このことは前章で述べたようにCM-8のセメントが土粒子接合部に集中するため、強度にはあまり影響しないが、内部間隙が不均一で空孔の多い形態となっているため透水性には不利になっていることを意味している。

5. 間隙浸透形態に関する微視的検討

(1) ポロシティ

a) 試料土のポロシティ

A地区の試料土のポロシティを図-10に示す。この試験では乱した試料を用いたので現場土の間隙分布と異なることが想定されるが、写真-2, a)に示すように、粒径が均一であること、および細粒分が少ないこと、などから間隙分布は大略相似すると考えた。ただし、試料の詰め方を現場土に近い乾燥密度 1.40 g/cm^3 とした場合の間隙分布ピーク位置は後述の混合成形体や現場固結体よりもやや粗大側にシフトするようである。さらに密に (1.51 g/cm^3) に詰めの方が実際に近づくようであり、今後の検討が必要であるが、いずれも粗大部の間隙分布のピークのみが目立ち、そのピークは半径約 $10 \sim 60 \mu\text{m}$ の比較的狭い範囲にほぼ含まれた。前章で、グラウトベリシティの判定のために試料土の加積通過 15% 径 (表-1参照, $170 \mu\text{m}$) をグラウトが浸透する空孔の代表径とみなしたが、このポロシティ測定によれば、緩い充てんの場合でも、平均間隙直径は約 $60 \mu\text{m}$ であり、加積通過 15% 径よりもかなり小さい。グラウトベリシティを判定する場合には、グラウト対象土の空孔をこのようなポロシティ測定などによって直接求める方が判定の精度の面で好ましいと考えられる。なお、この平均間隙直径とセメントの加積通過 85% 径との比は、セメント U で 9.7, F で 2.7, N で 1.7 であり、F, N の貧弱な固結体形状から、この比が 3 前後を境として浸透注入が困難になると推察される。また、U を用いた LW 系と CM 系の比較から、浸透性の検討には、この比率だけでなく、水ガラス等を用いることによる潤滑効果、間隙通過性の向上も併せて考慮する必要がある。

b) 混合成形供試体のポロシティ

図-11に水セメント比の異なる CM 系混合成形供試体の間隙径分布を示す。この混合成形供試体や現場注入固結体の場合を含めて、ほとんど全ての間隙径分布は、半径約 $0.5 \mu\text{m}$ を境に 2 つのピークを有するのが観察された。前述の図-10のグラウト未処理土の間隙径分布形との相違から、半径 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の微細な間隙におけるピークはホモゲルに由来するものと考えられる。また、粗大な間隙域のピーク位置およびピーク高さが試料土のそれに近いほど、土粒子間の間隙がグラウトによって十

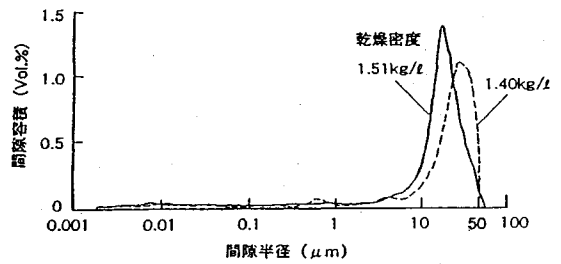


図-10 試料土の間隙径分布

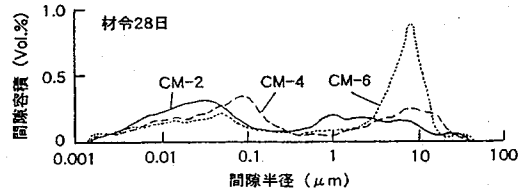


図-11 混合成形供試体(CM系)の水セメント比と間隙径分布

分充てんされずに残存していることを意味している。図-11に示すように、CM系では水セメント比が小さくなるにつれて (CM-6→CM-4), 粗大な間隙径の大幅な減少および微細な間隙の増加がみられた。また、水セメント比をさらに小さくすると (CM-4→CM-2), ふたつのピーク位置がそれぞれ小径側にシフトするのがみられた。CM-2の、間隙半径 $1 \mu\text{m}$ を中心とする穏やかなピークは、後述のグラウト充てん模式図に示すように、セメント粒子間の粗大キャピラリー空隙 (図-19の記号, p.v および c.v) や土粒子間の狭小間隙に相当するものであり、水セメント比が小さい場合、あるいは目詰りでセメント濃度が高まった場合には、この部分の間隙が増加すると想定される。また、間隙半径 $0.5 \mu\text{m}$ 以下のピークはセメント粒子および水和物間の微細キャピラリー空隙 (図-19の記号, c.v) であり、間隙半径 $0.005 \mu\text{m}$ 以下は水和物間のゲル空隙に相当するものであると考えられる⁹⁾。

図-12は濃度の異なる LW 系の間隙径分布を示すものである。これらの粗大間隙部のピーク高さは、LW-4よりも LW-8の方が小さいが、この理由は、現時点では明らかでない。セメント-水ガラス系を含み、各種の水ガラスの硬化反応およびホモゲルの性質は不明な点が多く、その説明は今後の課題である⁹⁾。ところで、微細な間隙部分では、LW-8よりも LW-4の方が、ピーク位置がより微細な方にシフトするとともに、分布幅が狭くなっている。この部分は、先述の微小キャピラリー空隙に相当しており、セメント濃度の高い LW-4の方が緻密な水和物、すなわち密な充てん構造を形成していることを示している。

次に、CM系とLW系の間隙径分布の材令変化の一例 (てん充率 100%) を図-13および図-14に示す。両グラウトともに、材令の経過につれて土粒子間に形成さ

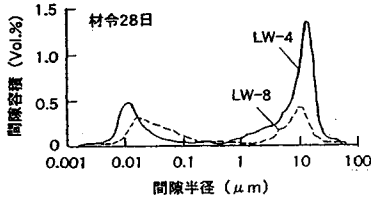


図-12 混合成形供試体 (LW系) の濃度と間隙径分布

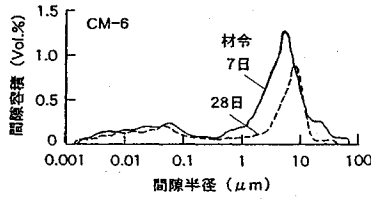


図-13 混合成形供試体 (CM-6) の間隙径分布の材令変化

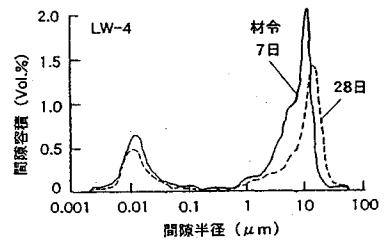


図-14 混合成形供試体 (LW-4) の間隙径分布の材令変化

れる粗大間隙部のピーク高さが減少した。この減少の状況は、粗大間隙の中でも相対的に小さい間隙 (0.5~10 μm) の方が減少量が多い。このことは、模式図 (図-19a) に示すような土粒子接合部近辺および粗大キャピラリー空隙などの間隙の狭い部分が、セメントの水和物 (セメントゲル) の発達に伴って、次第に充てんされてゆくことを意味している。

c) 現場注入固結体のポロシティ

図-15に、グラウト処理後に掘出した固結体 (LW-4) について、注入孔からの距離を変えて採取した試料の間隙径分布を示す。注入孔付近 (注入孔から10 mm) の試料には土粒子間に形成される粗大な間隙がほとんど存在していないことから、大部分はホモゲルの固結体であることが想定される。また、注入孔から30~70 mmの試料は1 μm 前後の間隙半径にもピークがあるが、このような間隙寸法は先述のセメント粒子間の粗大キャピラリー空隙に相当しており、これから土粒子間をかなり高濃度でセメントが充満していることが推察される。なお、注入孔からの距離が大きいくほど、粗大間隙部のピークが目立っており、これはグラウト充てん量が少ないため、土粒子の元の骨格が反映されていることを示している。

d) 間隙容積と一軸圧縮強さの関係

混合成形供試体 (てん充率100%) の間隙容積 (ポロシティ測定で得られる試料単位容積当りの空隙容積) と一軸圧縮強さとの関係を図-16 (CM系) および図-17 (LW系) に示す。これらの図中データは単位セメント量および材令の違いを含むものであるが、CM系については、両者の間に密接な関係が認められ、全間隙量が減少し、逆にセメント水和物に由来する微細な間隙量が増加 (特に、半径0.5 μm 以下) するにつれて固結体の一軸圧縮強さが指数的に高くなっている。この系のグラウトでは、土粒子間隙へのセメント粒子の充てんおよびその後のセメントの水和反応による組織の緻密化が強度発現の支配的要素であると考えられる。一方、LW系では、間隙量と一軸圧縮強さとの間にはCM系ほどの明瞭な関係は認められなかった。このように、水銀圧入ポロシティ測定法で得られる空隙量と一軸圧縮強さとの間に相関が無いことは、前章のてん充率の場合と同様であり、セメント-水ガラス系グラウトで固結させた

処理土の一軸圧縮強さは、脆性材料のように結合材空隙比の因子で説明できないことを重ねて意味している。

e) 間隙容積と透水係数との関係

図-18にCM系混合成形供試体 (てん充率100%) の間隙量と透水係数との関係を示す。一軸圧縮強さの場合と同様に、間隙量と透水係数との間には密接な関係があり、透水係数は全間隙量に比例している。全間隙のほとんどは大きな間隙部の量に等しいので、締め固め処理土の透水係数は1~20 μm 程度の大きな間隙量に比例するとの従来の指摘⁷⁾とも一致している。また、セメント水和物に由来する半径0.5 μm 以下の微細な間隙量が増加するほど、透水係数が減少する傾向が明瞭に認められる。なお、LW系の間隙量と透水係数との間にはCM系のような相関関係は認められなかった。LW系では、ホモゲル中の水ガラス硬化体が不透水性の連続構造であることが透水係数を小さくする要素と考えられる。また、前章でも示したようにてん充率が極端に小さくならない限り、透水係数改良効果の大幅な低下はみられない。このことから、LW系では、後述の電子顕微鏡写真に見られるように多少の未充てん部分が存在しても、それらの間隙がホモゲルの連続体によって独立状態に保持されるため透水性改良効果が損なわれることが少ないと考えられる。

(2) 微細組織の観察

a) 光学顕微鏡観察

写真-1は、混合成形供試体および掘出し固結体から薄片を作製し、その光学顕微鏡写真を示したものである。CM系の混合成形供試体 (写真-1a) ではセメント粒子は土粒子の間隙部分の一方に偏して分布している。これはグラウトが硬化に至るまでのセメント粒子の分離沈降により、鉛直下方にセメントが堆積 (記号A) し、上方に空隙 (記号B) が生じた結果によるものと考えられる (図-19 a-1) 参照)。同じCM系の掘出し固結体 (写真-1c) では、土粒子の接触部などの比較的狭い間隙部にセメント粒子が集中 (記号C) している。このような不均一な懸濁粒子の分布は目詰りが原因と考えられ、注入浸透の場合の特徴とみなされる (図-19 a-2) 参照)。LW系の混合供試体 (写真-1b) については土粒子間に丸みを帯びた水ガラスゲル (記号D) と思

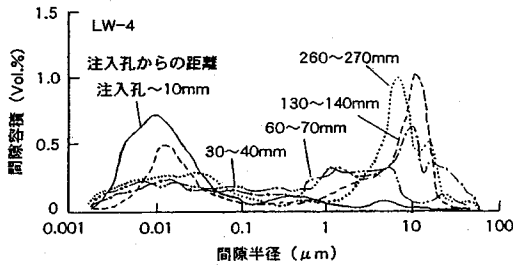


図-15 掘出し固結体 (LW-4) の間隙径分布

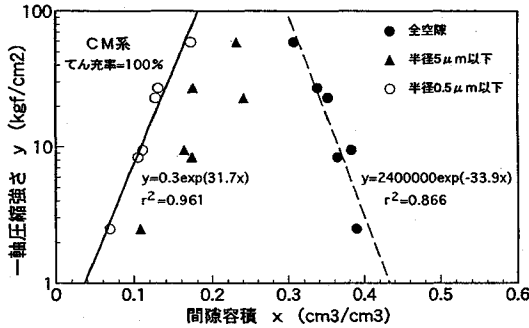


図-16 混合成形供試体 (CM系) の間隙容積と一軸圧縮強さ

われる組織が多数観察された。また、セメント粒子はその濃度が希薄なこともあって容易に識別できないほどに均一に分散している。一方、LW系の掘出し注入固結体(写真-1d)については、前述のような水ガラスゲルの境界が明瞭に識別できず、セメント粒子あるいはその水和物と思われる微細な粒子が土粒子表面付近に集中している様子が観察された。これは、模式図の図-19 b-1)、b-2)に示すように、狭い土粒子間の隙間をグラウトが通過する際に、球状の水ガラスが集合変形・一体化して連続体となり、土粒子表面を濡らすような状態で浸透することによるものと推察される。土粒子周辺部へのセメントの集中は、この挙動に伴ったもの、あるいはCM系の場合と同様に、注入浸透の際の目詰まり拘留によるもの、と想定される。なお、土粒子周辺部へのセメントの集中は土粒子の接触部の強化に結びつき、固結体の強度を向上させることに寄与すると考えられる。

c) 低真空走査型電子顕微鏡観察

ホモゲル、特に水ガラスゲルは乾燥などに敏感であり、ポロシティ試料の前処理および光学顕微鏡薄片試料作成時の乾燥過程、あるいは長期試料の保存時にホモゲルの変質の可能性が存在した。そこで、試料作製から観察実施までの期間をできるだけ短縮するとともに、乾燥の影響を極力防止するために、実験室でグラウトを浸透させた固結体を製作し、観察直前まで湿潤状態に保持した試料破断面を低真空走査型電子顕微鏡観察で観察した。写真-2に観察結果の一例(材令10日)を示す。

浸透したCM系グラウト(CM-4)中のセメント粒子は土粒子間の狭い隙間に局所的に拘留されていること

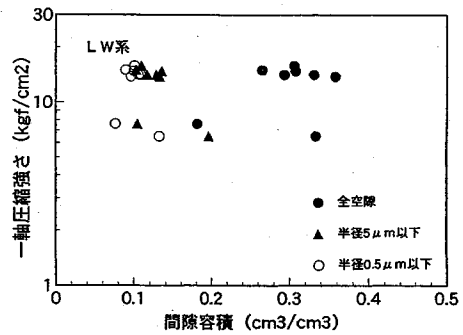


図-17 混合成形供試体 (LW系) の間隙容積と一軸圧縮強さ

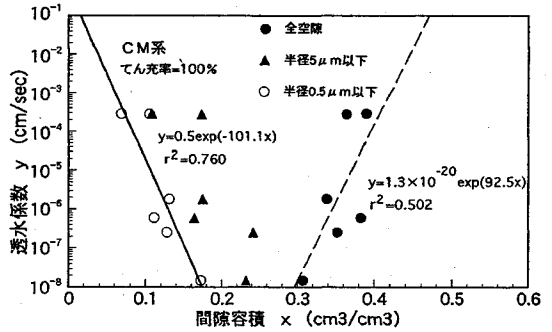


図-18 混合成形供試体 (CM系) の間隙容積と透水係数

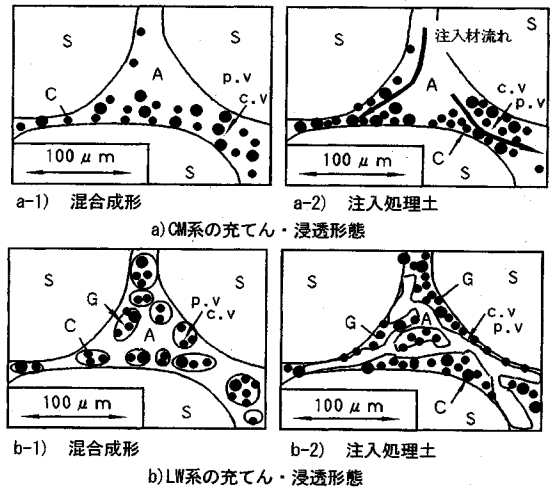
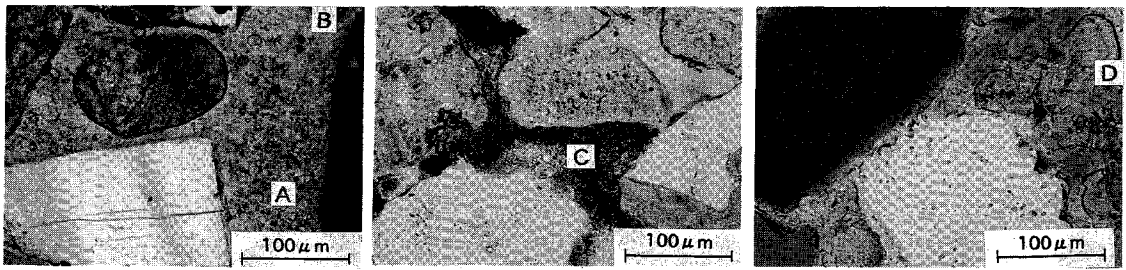


図-19 グラウトの間隙充てん・浸透形態についての模式図
S:土粒子 C:セメント粒子 A:空隙 G:水ガラスゲル
p.v:セメント粒子間隙 c.v:キャピラリー空隙

や液相反応で生成した針状水和物(エトリンサイト)が土粒子の表面に多数生成しているのが観察された(写真-2b)およびc))。また、このCM-4では土粒子間の粗大な連続隙間がかなり残存しており、この部分を通じてグラウトが伝搬されたものと思われる。なお、注入直後にはこの部分にもグラウトが充満していたと考えられるが、その後の懸濁物質の分離沈降などにより、セメント粒子などは土粒子表面に移動し、水分の多い空隙が残



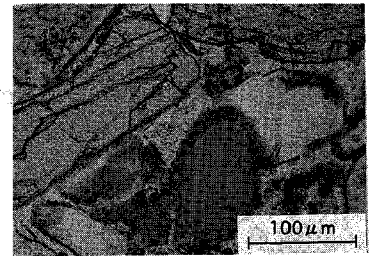
a) 混合成形供試体 (CM-6)

b) 混合成形供試体 (LW-4)

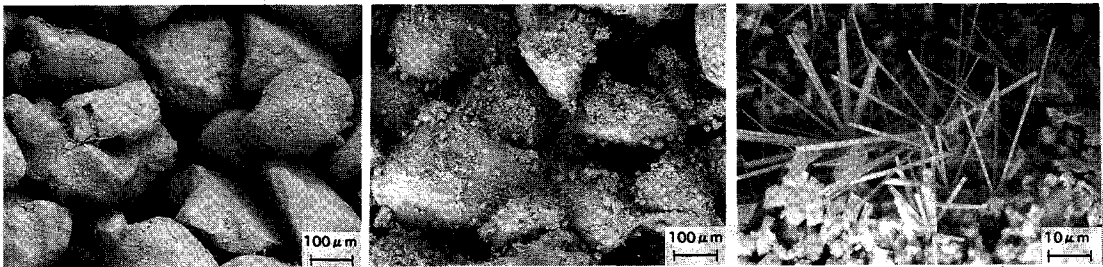
c) 現場掘出し固結体 (CM-8)

A: セメント粒子堆積 B: 空隙
C: セメント粒子の集中 D: 水ガラスゲル

写真—1 混合成形供試体および現場掘出し固結体薄片試料の光学顕微鏡写真



d) 現場掘出し固結体 (LW-8)

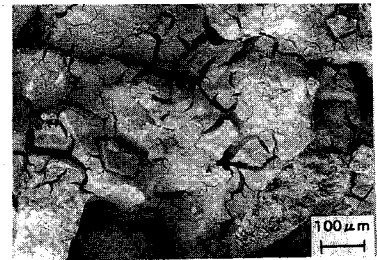


a) 試料土 (グラウト未注入)

b) グラウト浸透供試体 (CM-4)

c) グラウト浸透供試体 (CM-4)

写真—2 試料土およびグラウト浸透供試体破断面(実験室注入, 材令10日)の電子顕微鏡写真



d) グラウト浸透供試体 (LW-4)

されたものと推察される。これに対し、LW系では浸透の後ゲル化したホモゲルが土粒子の形が不明になるほど間隙を埋めている(写真—2 d)。また、土粒子間の大きな間隙も散在するものの、間隙は連続構造ではなく、独立していることなど、CM系とは様相が異なる。LW系では注入したグラウト全体が短時間でホモゲルとなるので、材料分離等による空隙は生じにくいと考えられる。なお、LW系の写真の中のいくつかの亀裂は、湿潤状態のホモゲルには存在しないものであり、電子顕微鏡観察中の極く短時間(約13分間)に試料の真空乾燥によって生じたものである。このように水ガラス系のホモゲル

組織は非常に鋭敏であるので、この組織をあるがままに観察する手法の開発が今後の課題として挙げられる。

6. ま と め

従来、懸濁系グラウトの注入は困難とされていたシルト混じり砂質土を試験地を選び、現場注入実験および室内実験等を実施し、セメントミルクおよびセメントー水ガラス系グラウトの浸透性、固結体の工学的性質についての実験研究および内部浸透形態の微視的観察等を行った。本研究の結果は、以下のようにまとめられる。

(1) 水銀圧入式ポロシメーターで試料土の間隙寸法お

およびその分布の大略を求めることができた。

(2) 上記の間隙寸法とセメントミルクの浸透性の関係から、セメント粒径の加積通過 85% 径に対し、間隙平均直径が 3 倍前後を境として浸透が困難になるとの指標を得た。

(3) セメント-水ガラス系グラウトはセメントミルクよりも浸透性が優れ、大きな固結体を得ることができた。この原因は、懸濁物質の分離沈降が少ないことおよび水ガラスの潤滑作用によるものと想定された。

(4) セメント-水ガラス系グラウト注入固結体中のセメント含有率は、注入孔付近で高く、注入孔から離れるほど低下するのに対し、水ガラス含有率は、ある範囲 (30 cm 程度) まで比較的均一であることがわかった。

(5) 上記の含有率の変化は、一軸圧縮強さおよび透水係数などの工学的性質と対応していた。

(6) グラウト処理固結体の間隙径分布には 2 つのピークが観察され、粗大間隙部のピークは土粒子間の間隙に対応し、微小間隙部のピークはホモゲルの微細構造に由来していると考えられた。

(7) セメントミルク固結体の粗大間隙容積は、水セメント比が小さいほど、材令が進むほど、あるいはてん充率が大きいほど減少する。

(8) セメントミルク固結体の半径 $0.5 \mu\text{m}$ 以下の間隙量と一軸圧縮強さおよび透水係数との間には強い相関が認められた。

(9) セメントミルク固結体のセメント空隙比と一軸圧縮強さとの間には直線的相関関係がみられた。

(10) セメント-水ガラス系グラウト固化体の一軸圧縮強さおよび透水係数は、セメントミルクの場合のように、ポロシテイヤてん充率等との相関が認められない。

(11) グラウト中のセメントは注入浸透の際、土粒子間の砂粒子の接触部に集中して拘留される。このため、補強効果は有効に発揮されるものの、てん充状況が不均一

になるため、本研究のように、単純なセメントと水からなるグラウトの場合には、透水性の改良効果が十分でないこともある。

(12) セメント-水ガラス系グラウトは土粒子間の間隙内部で空隙を埋め尽くすように充てんしており、残存する空隙も不連続構造となっているようである。このため、透水性の改良効果が高いものと考えられる。

(13) 水ガラスのゲル組織は乾燥などに非常に鋭敏であり、この組織をあるがままに観察する手法の開発が望まれる。

最後に、グラウト固結体の現場掘り出し調査に際しては、佐藤工業株式会社および (社) 薬液注入協会の関係者の多大の協力を得た。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 草野一人編：薬液注入工法ハンドブック，pp. 18～20，産業図書（吉井書店刊），平成 4 年第 5 版。
- 2) 森 麟・田村昌仁・青木康司：超微粒子注入材の浸透限界，土木学会論文集，No. 426/V-14（ノート），pp. 237～240，1991. 2.
- 3) 佐藤 健・曾場昭之・桑山 忠・宇野尚雄：水銀圧入式ポロシメーターによる粒状材料の間隙径分布の測定，土木学会論文集，No. 445/Ⅲ-18，pp. 139～142，1992. 3.
- 4) 米田俊一・中川浩二：粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較，土木学会論文集，No. 462/Ⅵ-18，pp. 101～110，1993. 3.
- 5) P.K. Mehta : Concrete ; Structure, Properties, and Materials, Pretice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, 1986.
- 6) 加賀宗彦：注入固結砂強度特性などに関する水ガラス系注入材のゲル構造，土木学会論文集，No. 460/V-18，pp. 93～102，1993. 3.
- 7) Garcia-Bengochea, I., Lovell, C.W. and Altschaeffl, A.G. : Pore Distribution and Permeability of Silty Clays, ASCE, Vol. 105, No. GT. 7, pp. 839～856, 1979.

(1993. 7. 9 受付)

ENGINEERING PROPERTIES AND MICRO STRUCTURES OF FINE SANDS INJECTED WITH SUSPENSION GROUTS OF ULTRA-FINE GRANULAR CEMENT AND SUPPLEMENTARY WATERGLASS

Shunichi YONEDA, Shigeo OKABAYASHI, Masahito TAMURA and Akira MORI

Summary of an in-situ grouting test and a digging survey for cement milk and cement-waterglass suspension with various grain sizes into the natural ground are presented. The fine sand in the ground has been considered as the more difficult grouting, having a coefficient of permeability of the order of 10^{-3}cm/sec . The relationships between the engineering properties as both permeability and strength and the pore size distribution in the hardened sand are examined. The micro structures of these sand are also determined by means of an electron microscope and a mercury intrusion porosimeter.