

博士論文

極超微粒子セメントの
地盤工学への応用

平成 24 年 3 月

金沢 智彦

岡山大学大学院

環境学研究科

要 旨

我が国は諸外国に比べ、地震、台風、集中豪雨、火山噴火など様々な自然災害が数多く発生し、時として巨大災害に見舞われる。近年では、台風の上陸数および降水量の増加や集中豪雨の発生件数が増加し、各地で斜面崩壊や堤防の決壊が頻繁に発生している。また、地震が頻発する我が国においては、地盤の液状化が毎年のごとく発生している。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の広範囲に亘って液状化による被害が確認された。さらに、津波の発生によって、土構造物や構造物基礎が洗掘され被害が拡大している。これらの地盤災害がひとたび発生すると、その復旧と復興には多額の費用と多大な時間を要することから、水の浸食に弱い斜面や堤防、既設構造物直下の地盤を如何に補強するかが課題であり、我が国の様な極めて複雑な地盤や狭隘な土地でも施工できる地盤改良技術の開発が期待されている。

地盤改良技術の中でもセメント系注入材を用いた注入工法は、このような施工条件下にも適用でき止水、強度や耐久性が必要な工事での施工実績も多いが、適用地盤が限定されることから地盤への浸透性が課題となる。

そこで、本研究では適用地盤の拡大を目的にセメント粒子を粒径 1~2 μm 程度まで微粉砕して浸透性を改善した極超微粒子セメントを開発し、地盤災害対策をはじめ、ダム基礎地盤の漏水対策・トンネル掘削時の湧水対策・処分場の有害物質漏洩対策など地盤工学上の様々な課題を対象に、不飽和しらす地盤、飽和砂質土地盤、亀裂性岩盤への注入実験を実施し、その適用性について検討した。以下に本論文の主な成果を列挙する。

- 1) 水和反応の制御には $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A) 含有量を低減したセメントと高炉スラグを使用した極超微粒子セメントを用いて、その凝集性を制御するためのポリカルボン酸系分散剤をセメントに対して 2%混合し、高速回転ミキサー（攪拌羽根の先端周速 377m/min）で高速攪拌することにより、見掛け粒子の粗大化を低減でき、セメント粉体と同程度の粒径のセメントスラリーを作成する方法を示した。
- 2) 豪雨時に斜面崩壊しやすい不飽和しらす地盤に低圧で 1m 浸透注入することができ、しらす斜面や堤防への水の浸入を抑制できる地盤へ改良できることがわかった。
- 3) 液状化を引き起こしやすい沖積層の飽和砂質土地盤に設計改良径と同等の 2m の球状改良体が得られることがわかった。そして、液状化対策や耐震補強に十分な強度発現性が得られることがわかった。
- 4) 極めて微少な割れ目幅 20 μm の模擬亀裂性岩盤への注入可能性を示した。

最後に、ここで開発した新しい注入材料の今後の有効な利活用について論述した。

目 次

	頁
第 1 章 序論.....	1
1.1 緒言	1
1.2 本研究の目的と概要	2
1.3 本論文の構成.....	3
第 2 章 セメント系注入材の既往の研究.....	5
2.1 注入工法の概要	5
2.2 注入工法の特徴	5
2.3 注入工法の変遷	6
2.4 注入材の種類.....	6
2.5 各種セメントの粒径	7
2.6 セメント系注入材の製造方法.....	9
2.6.1 汎用セメント（ポルトランドセメント・混合セメント）の製造方法	9
2.6.2 超微粒子セメントの製造方法.....	10
2.7 セメント注入工法.....	11
2.7.1 注入工法の分類	12
2.8 注入材の浸透形態.....	17
2.9 改良機構.....	17
2.10 セメント系注入材の浸透限界	18
2.11 注入による改良効果の確認.....	20
2.12 セメント系注入材に関する既往の研究.....	20
2.12.1 セメントの粒径と浸透性の関係.....	20
2.12.2 超微粒子セメントの浸透限界	21
2.12.3 市販の超微粒子セメントの浸透性比較.....	21
2.12.4 亀裂性岩盤への浸透性.....	22
2.12.5 超微粒子セメントの懸濁液の特性が浸透性に及ぼす影響	22
2.12.6 分散剤の種類と添加量が浸透性に及ぼす影響	23
2.12.7 現場注入実験による改良効果	23
2.12.8 実施工の長期的な改良効果.....	24
2.13 本研究の位置付け	25

第3章	高浸透性セメント系注入材の開発（極超微粒子セメント）	29
3.1	概説	29
3.2	従来のセメント系注入材の粒子径と浸透性	29
3.3	浸透性の低下要因	30
3.4	従来の超微粒子セメントよりも粒径を小さくしたセメントの浸透性改善手法	31
3.4.1	セメントの初期水和の制御	31
3.4.2	高性能分散剤による分散と分散保持	31
3.4.3	機械的なせん断作用による分散（高速ミキサーの使用）	32
3.5	極超微粒子セメントの開発	32
3.5.1	極超微粒子セメントの組成	32
3.5.2	分散剤の種類と攪拌速度が分散性に及ぼす影響	33
3.5.3	極超微粒子セメントの分散性	34
3.5.4	極超微粒子セメントの材料特性	35
3.5.5	各種注入材との浸透性および強度特性の比較	38
3.6	まとめ	39
第4章	地盤工学分野への応用	41
4.1	概説	41
4.2	豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止	41
4.2.1	注入材	41
4.2.2	模擬しらす地盤	41
4.2.3	注入試験方法	42
4.2.4	試験結果および考察（水平一次注入試験）	44
4.2.5	試験結果および考察（軸対称注入）	50
4.2.6	豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止対策への適用性	57
4.3	地震時の液状化対策	58
4.3.1	都市部に分布する砂質土への一次注入試験	58
4.3.2	現場注入試験	61
4.3.3	地震時の液状化対策への適用性	64
4.4	亀裂性岩盤からの湧水対策・有害物質漏洩防止対策	65
4.4.1	注入試験方法	65
4.4.2	試験結果および考察	66
4.4.3	亀裂性岩盤からの湧水対策・有害物質漏洩防止対策への適用性	68
4.5	まとめと今後の課題	68
4.5.1	まとめ	68

4.5.2	今後の課題	69
第 5 章	結論	72
5.1	結論	72
5.2	今後の展望	74

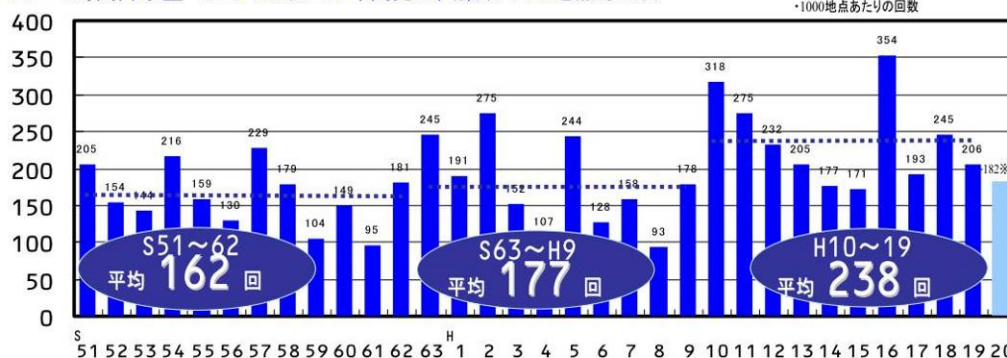
第1章 序論

1.1 緒言

我が国は諸外国に比べ、地震、台風、集中豪雨、火山噴火など様々な自然災害が数多く発生¹⁾し、時として巨大災害に見舞われる²⁾。近年では、地球温暖化が主要因とされる集中豪雨、干ばつなどの異常気象が世界各地で多発し、世界的規模の深刻な問題の一つとなっている³⁾。このような異常気象は我が国においても散見され、台風の上陸数および降水量の増加や集中豪雨の発生件数が増加し、各地で斜面崩壊や堤防の決壊が発生している。2004年は観測史上最多の10個もの台風が上陸したのに加え、新潟・福島豪雨、福井豪雨や新潟中越地震などによって土砂災害発生件数は2500件を超えた⁴⁾。最近では2008年8月末に中国、四国、東海、関東および東北地方など各地で記録的な集中豪雨が発生し、甚大な被害をもたらした⁵⁾。2011年に入ってから、7月に新潟、福島地方で、台風12・15号の襲来で広い範囲で記録的な豪雨が観測^{6),7),8)}され、短時間の間に大量の雨が降る豪雨の発生件数は近年増加する傾向にある(図1.1参照)。また、地震が頻発する我が国においては、地盤の液状化が毎年のごとく発生している。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の広範囲に亘って液状化による被害が確認された。さらに、津波の発生によって、土構造物や構造物基礎が洗掘され被害が拡大している。これらの地盤災害がひとたび発生すると、その復旧と復興には多額の費用と多大な時間を要することから、水の浸食に弱い斜面や堤防、既設構造物直下の地盤を如何に補強するかが課題である。

災害から人々を守る対策として、ソフト対策とハード対策が講じられている。ソフト対策は、ハザードマップの作成・公表、災害予知や災害に関する教育・避難訓練などが行われている^{9),10),11)}。ソフト対策はハード対策に比べ、災害による人的被害を減災するという観点からは低コストで広域にわたって適用することができる。ソフト対策で重要なのは、安全な場所に迅速に避難することであるが、ゼロメートル地帯では近くに安全な場所がない場合や豪雨の中避難を躊躇するような場合¹¹⁾がある。さらに、災害弱者である高齢者が逃げ遅れ犠牲となる事例¹²⁾も発生していることから、これから高齢化が急速に進行することが確実視される中、ソフト対策の整備だけでは、十分な災害対策とは言い難い。加えて、被災した場合は、その規模によっては命からがら避難したとしても家などの財産を失った上、長期間仮設住宅での生活を余儀なくされ、普段通りの暮らしを取り戻すのは容易ではない。したがって、人々の安全・安心はソフト対策による減災とハード対策による防災を並行して整備することによって初めて成し遂げられる。しかしながら、公共事業費の削減が続く中、限られた予算で効果的にハード対策による災害防止を行うためには、災害による社会的影響の大きい優先的対策箇所の抽出を進め、対策を講じるとともに、我が国の様な極めて複雑な地盤や狭隘な土地でも施工できる地盤改良技術の開発が期待されている。

1. 1時間降水量 50 mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)



2. 1時間降水量 100 mm以上の年間発生回数(1000地点あたり)



図 1.1 近年の降雨の傾向¹³⁾

1.2 本研究の目的と概要

地盤改良技術の中でもセメント系注入材を用いた注入工法は、上述のような施工条件下にも適用できる工法であり、長期的な補強や止水が必要となるダムやトンネル建設での使用実績が多い。しかしながら、セメント系注入材は粒子であるが故に地盤への浸透性は自ずとその大きさで決まり、市販のセメント系注入材の中で最も浸透性に優れる粒径 $4\mu\text{m}$ の超微粒子セメントでも、適用可能な地盤は透水係数が 10^{-4}m/s 以上に限定される。セメント系注入材を用いて地盤改良を行う場合は、この適用地盤の狭さが課題となる。

そこで、本研究では適用地盤の拡大を目的にセメント粒子を粒径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 程度まで微粉砕して浸透性を改善した極超微粒子セメントを用いて、地盤災害対策をはじめ、図 1.2に示すようなダム基礎地盤の漏水対策・トンネル掘削時の湧水対策・処分場の有害物質漏洩対策など地盤工学上の様々な課題を対象に、地盤内にセメントを注入する対策工法を提案する。この注入工法は従来のセメント系注入材よりも透水係数の低い砂質地盤や岩盤の微小亀裂に浸透して改良できることから、施工上の制約から従来の対策工法では適用が困難な地盤の長期的な補強と止水対策に有効である。

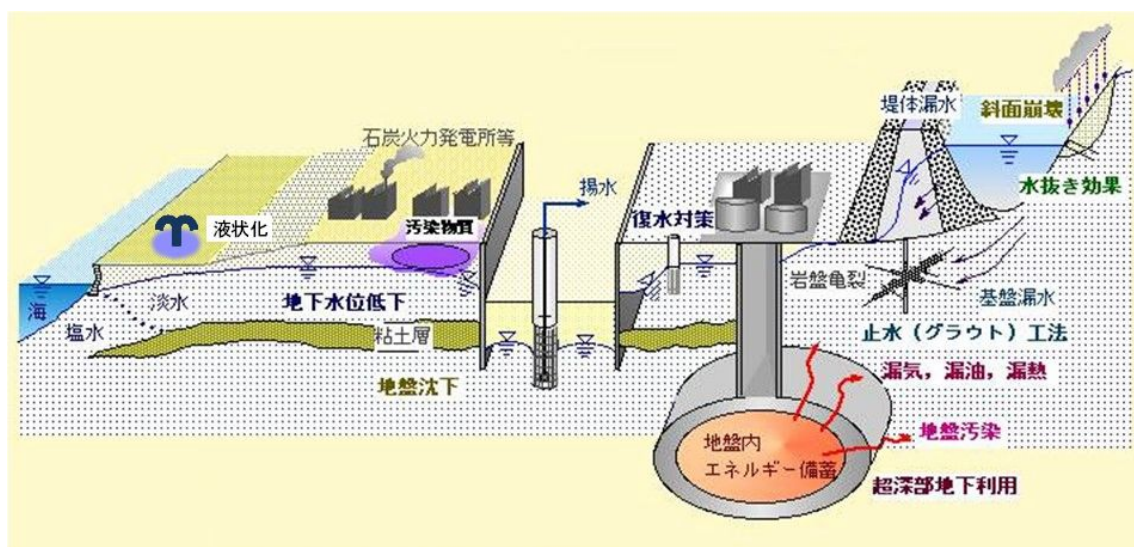


図 1.2 地盤工学上の課題

1.3 本論文の構成

本論文では、第 1 章で豪雨や地震時に、斜面崩壊・河川堤防の決壊・地盤の液状化といった地盤災害が頻繁に発生している現状から早急に対策が必要であることを述べた。また、地盤工学上の様々な課題に対して、極超微粒子セメントを地盤内に注入する工法を提案した。

第 2 章では、セメント系注入材による地盤改良に関する従来の研究についてまとめ、本研究の位置付けについて論述する。

第 3 章では、セメント系注入材の浸透性を改善した極超微粒子セメントについて論述する。

第 4 章では、模擬砂質地盤と岩盤亀裂モデルへの注入を行い、その改良効果から適用性について検証する。

第 5 章では、本研究の結論と今後の展望を示す。

参考文献

- 1) 杉浦信男：自然災害をめぐる最近の状況，土木技術資料，Vol.45, No.12, pp.20-21,2003
- 2) 内閣府：平成 23 年版防災白書，2011
- 3) 文部科学省・気象庁・環境省・経済産業省訳：IPCC 第 4 次評価報告書統合報告書 政策決定者向け要約，2007.
- 4) 内閣府：平成 17 年版防災白書，2005
- 5) 内閣府：平成 21 年版防災白書，2009
- 6) 気象庁：平成 23 年 7 月新潟・福島豪雨（速報），2011
- 7) 気象庁：台風 12 号による大雨（速報），2011
- 8) 気象庁：台風 15 号による暴風・大雨（速報），2011
- 9) 大沼史佳：東京都における河川事業と豪雨対策，基礎工，Vol.39, No.7, pp.70-73,2011
- 10) 鷲尾洋一：土壌雨量指数を用いた防災気象情報の発表，基礎工，Vol.39, No.7, pp.28-32,2011
- 11) 辻本哲朗ら：豪雨・洪水災害の減災に向けて ソフト対策とハード整備の一体化，技報堂出版，2006, 357pp
- 12) 日経コンストラクション 2009 年 10 月 23 日号：ソフトの限界 山口県防府市の土砂災害，pp.66-68，2009
- 13) 国土交通省河川局治水課：水害レポート，2008

第2章 セメント系注入材の既往の研究

2.1 注入工法の概要

我が国は世界でも比べようもないくらい地盤は複雑であり、国土が狭いため土地を多層に利用する必要がある。このような状況の中で地下水位の高い地盤を掘削する場合は、地盤改良のために注入材を地盤に注入する工法が一般的に用いられている。このような岩盤および土砂地盤への薬液やセメント系材料の注入工法は「地盤注入工法」として、土木や建築分野では、科学の進歩とともに日進月歩の状況である。

注入工法は初めて施工されてから 200 年以上が経過し、注入工法で使用する注入材は、これまでに様々な特徴を持つ材料が開発・実用化され、地盤改良工事などに使用されてきた。セメント系材料であるポルトランドセメントは安価であり、強度特性や耐久性に優れるなどの特徴から、現在でも建設工事における基礎地盤の補強や地下水の止水などに広く用いられている。

また、注入工法には注入材の注入形態により、以下のように細分化される場合がある。

- a) 地盤の土粒子間隙や岩盤の亀裂へ低圧力で注入材を浸透させる浸透注入工法
 - b) 流動性の低い注入材を地盤に注入し、割裂注入により地盤を隆起させ不動沈下した構造物を修正する復元注入工法
 - c) 砂質地盤に流動性の低い注入材を高圧力で圧入し、地盤を圧密するコンパクショングラウト
 - d) 注入材を地盤内に高圧で注入・攪拌し、柱状改良体を形成するジェットグラウト
- ここでは、セメント系注入材を地盤に浸透させる注入工法について論述する。

2.2 注入工法の特徴

注入工法は地盤の止水や補強を目的とした地盤改良工法の一つであり、地盤間隙内に注入材を浸透させる工法で重機を必要としないことから、以下の様な利点がある。

- a) 施工時の作業スペースは小規模（狭隘な場所の施工に有効）
- b) 施工時の騒音・振動が小さい
- c) 廃泥の発生が少ない
- d) 地盤を乱すことなく低圧で注入できる（変位が少ない）
- e) 地表・地中（トンネル内）問わず施工可能
- f) 既設構造物直下の地盤を供用した状態で施工可能

この様に、注入工法は他の地盤改良工法ではなし得ない効果が得られ、さらに、我が国の様な狭小な土地に構造物が数多く立ち並ぶ施工条件下にも適用できることから、今日の建築・土木の基礎工事には欠かすことの出来ない工法の一つとなっている。

2.3 注入工法の変遷^{1)~7)}

注入工法の世界最初の工事は1802年にBerignyがセメント火山灰を用いた石積護岸の修理とされている。我々が今日使用しているポルトランドセメントを使用したのは、1824年にAspdinがポルトランドセメントを開発してから半世紀以上経過した1885年であり、Tietiensが亀裂性岩盤からの湧水を止水する目的でセメントミルクを注入した。我が国でセメントミルクを使用した最初の注入は1915年の炭坑縦坑の注入工事である。以降国内外の地盤改良工事にセメントが用いられるようになった。セメントは微少な間隙や亀裂へ注入した場合、目詰まりしやすく浸透しづらいため、化学溶液型注入材（高分子系）の開発が進められた。化学溶液型注入材は硬化するまで水のような低粘性で、浸透性が優れていることからセメントに代わり使用されるようになった。しかしながら、高分子系については、1974年に福岡県でアクリルアミド系を使用した注入工事において、注入材が飲用の井戸水に混入する環境汚染が発生したのを契機に、薬液注入工法に関する暫定指針が通達され、事実上使用禁止となった。これ以降、水ガラスは耐久性の改良が進められ、セメントはより細かい粒子の注入材の開発が進められた。青函トンネル建設時の湧水対策では、高圧湧水が発生する海底下100m以上の多湿な海底トンネル内からの注入工事であることから、注入材の性能としては、耐海水性・高強度・耐久性・耐風化性・浸透性が必要であり、原料に高炉スラグを使用し、粉砕時に液体粉砕助剤を用いることで、この要求性能を満たす粒径8 μ m程度の微粒子セメントが開発された。このセメントは、1973年から高圧湧水の止水工事で大量に使用され、青函トンネルの完成に大いに貢献した。その後、さらに分級技術の向上によって、粒径4 μ m程度の超微粒子セメントが開発され、1978年に実用化されている。

2.4 注入材の種類

注入材の種類を分類すると図2.1のようになる。注入材は粒子を含まない溶液系と粒子を含む懸濁系に大別される。現在、地盤改良工事に使用されている注入材は、懸濁系であるセメント系、粘土系および溶液系の水ガラス系と水ガラスを改良した特殊シリカ系である。

溶液系とセメント系注入材のそれぞれの特徴として、溶液系は注入性に優れ、地盤改良可能な適用地盤は幅広いが、注入による改良後の地盤強度は小さい上に、水ガラス系は成分が溶脱するため長期的な耐久性に劣り、仮設工事に使用される場合が多い。近年では耐久性を改良した製品も市販されているものの、10年程度の耐久性が確認されているだけである。また、硫酸を使用する製品は、改良地盤に近接するコンクリート構造物の硫酸塩劣化を招くことが指摘されている⁸⁾。

一方、セメント系である普通ポルトランドセメント、早強セメント、高炉セメントなどの汎用セメントは、溶液型に比べ、安価かつ安全であり、さらに改良後の地盤強度、長期的な耐久性に優れているものの、粒子であるが故に粒径の大きさで、自ずと注入可能な地

盤が限定される。注入性を改良するために汎用セメントの粒径を小さくした微粒子セメントや超微粒子セメントなどが開発・実用化されている。超微粒子セメントの材料価格は汎用セメントに比べ 10 倍以上するものの、汎用セメントの注入では改良が困難な地盤に適用することで注入次数を低減できることから、総工費は削孔数の低減や施工期間の短縮により縮減できることが報告されている^{9),10)}。

また、これら注入材の使い分けは、改良対象地盤の透水係数や改良後の設計強度・透水係数・耐久性などの要求性能に応じて、材料の種類や配合などが選定されている。

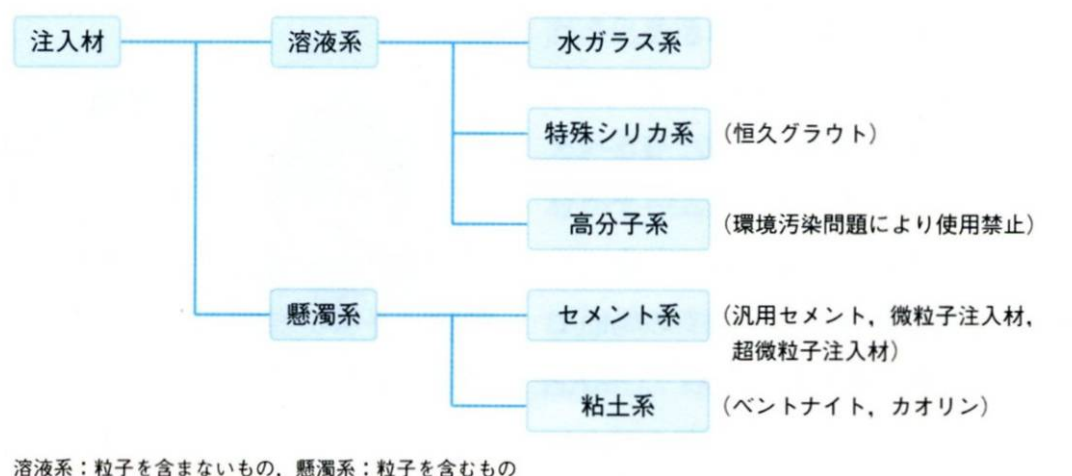


図 2.1 注入材の種類¹¹⁾

2.5 各種セメントの粒径

各種セメントの粒度分布の測定例を図 2.2～図 2.3に示す。一般的に汎用セメントの最大粒径は 100 μm （50%粒径 20 μm ）であり、注入材用の微粒子セメントと超微粒子セメントの最大粒径は、それぞれ 40 μm （50%粒径 8 μm ）、10 μm （50%粒径 4 μm ）程度である。国内では、粒径によるセメントの分類は特に定められていないが、50%粒径が 8 μm 程度のセメントを微粒子セメント、4 μm 程度あるいはそれ以下のセメントを超微粒子セメントとする場合が多い。また、米国American Concrete Institute (ACI)の 552 委員会では粒径が 15 μm 未満のセメントを超微粒子セメントと定めている。

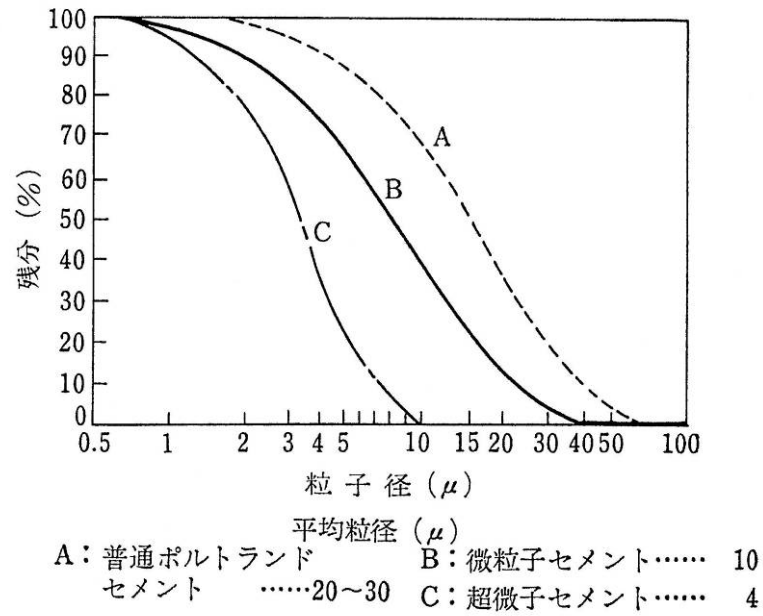


図 2.2 各種セメントの粒度分布 (国内) ¹²⁾

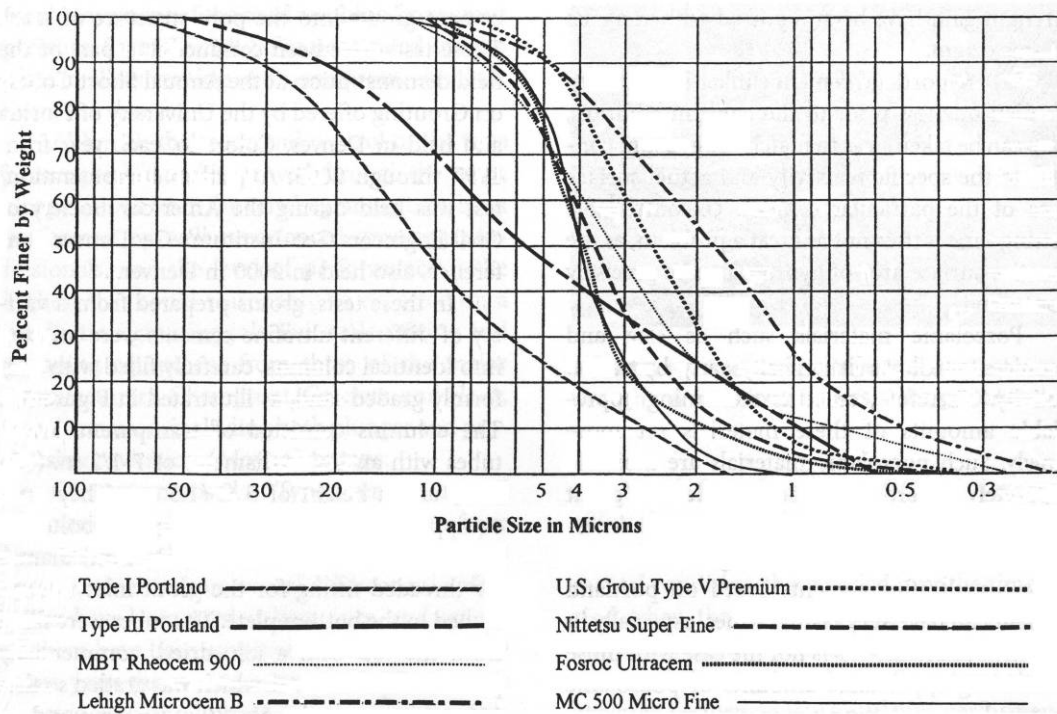


図 2.3 各種セメントの粒度分布 (海外) ¹³⁾

2.6.2 超微粒子セメントの製造方法

超微粒子セメントの製造方法は図 2.5 のようになる。超微粒子セメントの製造方法は、基本的にはポルトランドセメント同様に、原料工程・焼成工程・仕上工程の3工程を経て、ポルトランドセメントやポルトランドセメントと高炉スラグあるいはポゾラン物質を混合した原料を微粉砕して製造される。材料メーカーによって異なる場合もあるが、ポルトランドセメントとの製造方法の違いは、仕上工程でポルトランドセメントよりも微粉砕し、エアセパレータで粉体を分級した後に、さらに高性能なエアセパレータで再度分級し、粒度を整粒する点である。仕上工程で使用する粉砕機は超微粒子セメントの粒径まで粉砕する場合、粉砕効率が低下することから、微粉末の製造に適した他方式の粉砕機で粉砕する方式もある。注入用セメントにおいて、粗粉は粒径の大きさから物理的に地盤への浸透性を阻害し、過剰に粉砕された微粉は、凝集しやすく、さらに水和反応速度が飛躍的に高まり粗大な水和生成物をつくることから浸透性を阻害する。したがって、これらの粒度の粉体を如何にして取り除き、整粒するかが浸透性を決める重要なファクターの一つとなる。

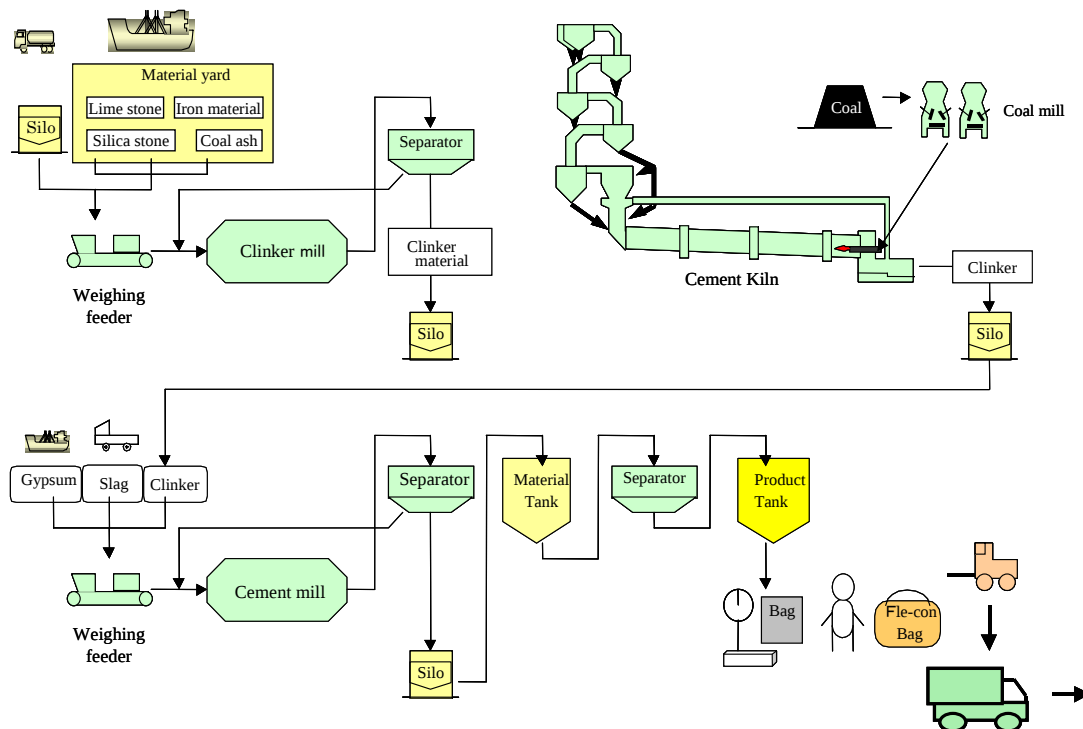


図 2.5 超微粒子セメントの製造方法¹⁵⁾

2.7 セメント注入工法

注入用のセメントスラリーは、セメント・分散剤および多量の水を混合した懸濁液で、水セメント比(W/C)が数十%のモルタル・コンクリートに比べ、200～1000%程度の高水セメント比で地盤内に注入される。セメント注入工法は、このセメントスラリーをミキサーで混合攪拌してつくり、グラウトポンプで圧送し、注入管を通じて地盤の土粒子間隙や岩盤亀裂に浸透させる工法（図 2.6参照）である。また、混合方式や注入管の形態などによって、図 2.7に示すように分類される。以下に工法の概要を説明する。

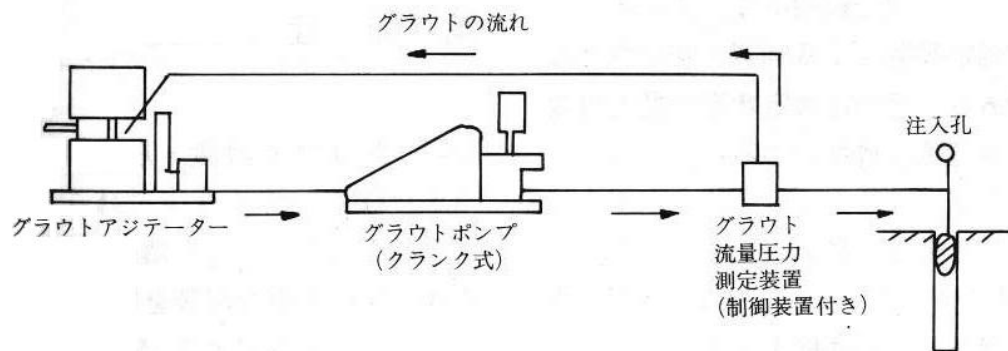


図 2.6 注入工法概要図¹⁶⁾

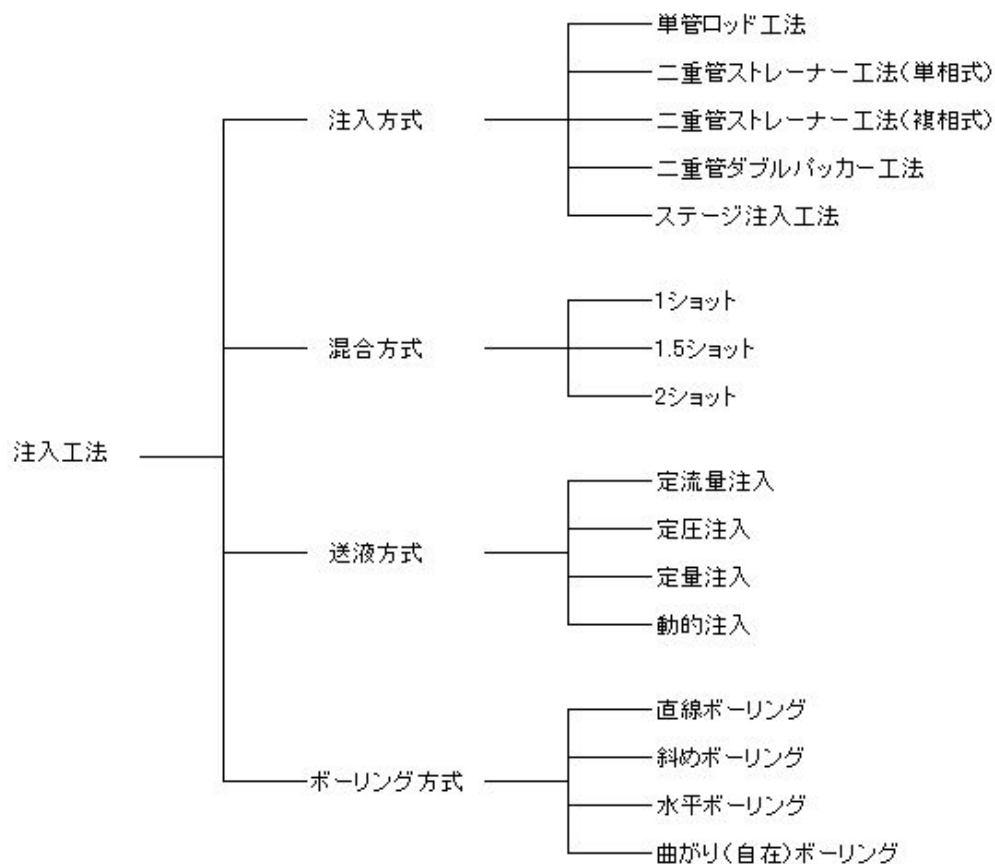


図 2.7 注入工法の分類

2.7.1 注入工法の分類

(1) 注入方式

a) 単管ロッド工法

単管ロッド工法は、ボーリングマシンで所定の深さまで削孔し、削孔時のロッドを引き抜かずにそのまま注入管として使用し、先端から地盤内に注入する工法である。使用する薬液はロッド内に送液する直前で2液を混合した後、ロッド内を通過して注入されることから、薬液のゲル化時間は作業時間を確保するため数分以上である。このため、注入材が地盤とロッドの境界に逸走しやすく確実性に課題があることから、現在では浸透注入を目的とした工法にはほとんど用いられていない。

b) 二重管ストレーナー工法（単相・複相）

二重管ストレーナー工法は、単管ロッド工法と同様にロッドを利用して、注入する工法であり、ロッドが二重管になっている点が異なる。単相式は二重管とすることで、2液の薬液を地盤に注入する直前まで別々に送液することができる。これにより、数秒～数十秒でゲル化する瞬結の薬液を使用できることから、単管ロッドのように逸走する問題は解決されている。瞬結の薬液であることから、注入形態は割裂注入になりやすく、地盤の改良効果が不十分となる。複相式（図 2.8参照）はポピュラーな工法の一つであり、ゲル化時間が瞬結と緩結の2種類の薬液を使い分けることができ、逸走防止のために瞬結の薬液を一次注入し、つぎに緩結の薬液を地盤内に浸透させる二次注入を行うことで確実性を向上させている。

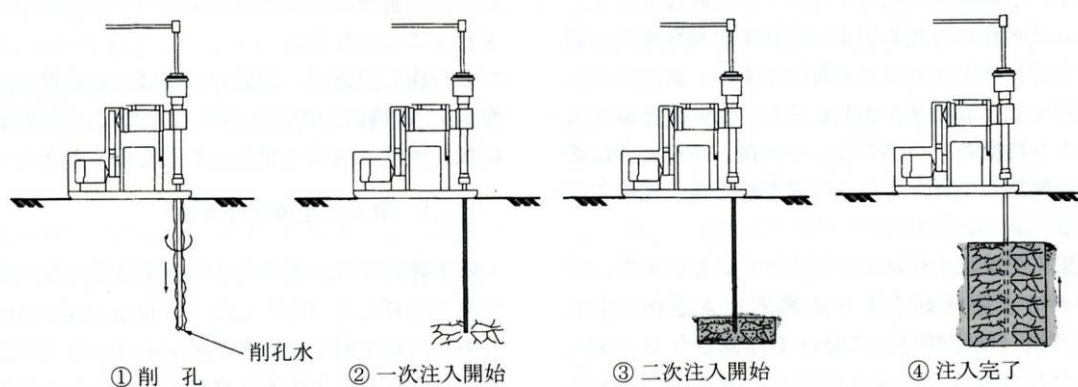


図 2.8 二重管ストレーナー工法（複相式）¹⁷⁾

c)二重管ダブルパッカー工法

二重管ダブルパッカー工法（図 2.9参照）は、掘削と注入の工程が独立した注入工法である。逸走防止対策は掘削後の注入孔にセメントベントナイト（CB）のスラリーを充填し、CBが固まる前に注入外管を埋設することで防止している。注入は注入外管内に注入材のリーク防止を目的に上下に設置されたダブルパッカー型の注入内管を挿入し、荒詰めを目的とした一次注入を行い、次にゲル化時間の長い薬液を地盤内に浸透させる。近年では、浸透注入に適した施工ができ、改良効果が高いことから、この工法が採用されるケースが増加している。

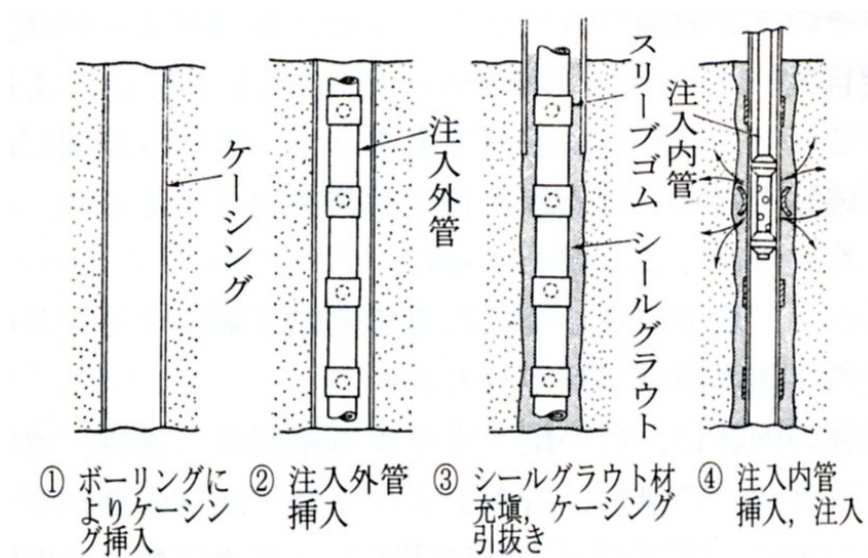


図 2.9 二重管ダブルパッカー工法¹⁸⁾

d)ステージ注入工法

ステージ注入工法は主に岩盤の止水や補強を目的としたダムグラウチングで用いられ、セメント系注入材を注入する工法である。施工方法は、通常 1 ステージ 5m 単位で掘削と注入を交互に繰り返して行われる。また、改良深度まで先に掘削し、1 ステージ毎に深部から注入し、順次ステップアップする方式をパッカー方式として区別する場合もある。

(2)混合方式

混合方式は1ショット方式・1.5ショット方式・2ショット方式の3形態がある。1ショット方式はゲル化時間の長い1液の注入材を注入する方式である。1.5ショット方式はゲル化時間が数分から十数分の2液からなる薬液を2台の注入ポンプでそれぞれ送液し、注入管の手前で混合させる方式である。2ショット方式はゲル化時間が数秒程度の2液からなる薬液を2台の注入ポンプでそれぞれ吐出口まで送液し、地盤に注入される直前や地盤内で2液を混合させる方式である。

(3)送液方式

a)定流量注入・定圧注入

注入工法において、過剰に流量や圧力を上昇させると十分な改良効果が得られないばかりか地盤が隆起するなどの不具合を生じることから、実際の注入では、流量と圧力が過剰とならないよう制御し、一定の流量や圧力で施工される。一般的に注入流量および圧力は事前に図 2.10に示す注入圧力と注入速度の関係（p-q曲線）を求め、効果的な改良ができる限界注入速度を把握し、この限界注入速度の範囲内で注入できるよう決定される。実施工での一般的な注入速度は5～20l/minである¹⁹⁾。

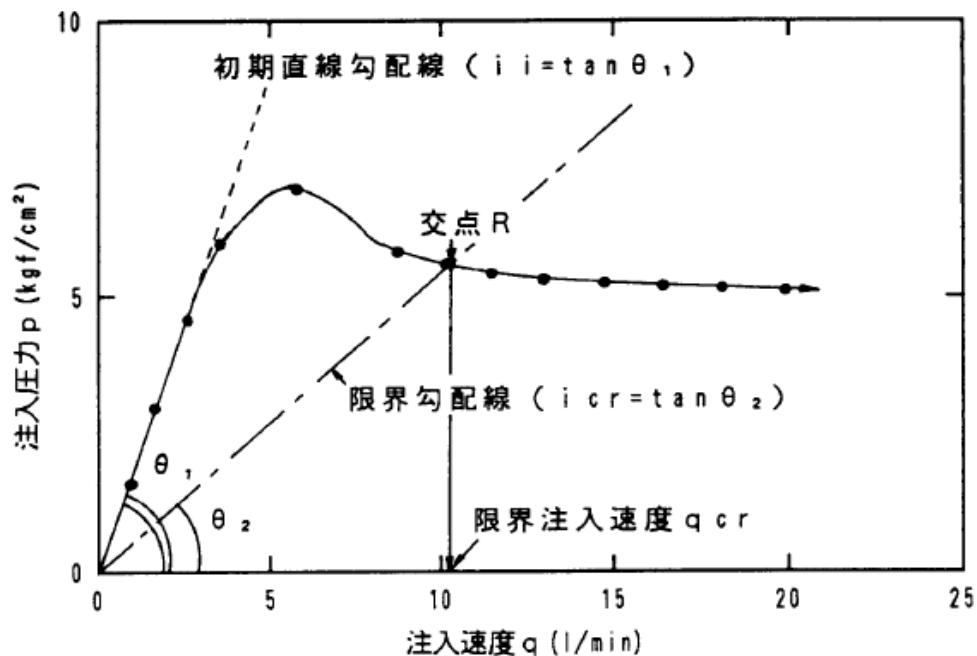


図 2.10 p-q曲線²⁰⁾

b) 定量注入

砂質地盤の注入は、式 (2.1) ²¹⁾ に示す注入量を算出し、改良対象土量の間隙率に対して 100% 以上となる量を注入する定量注入が基本である。また、間隙率を容易に求めることができない場合があることから、実際の施工では改良対象土量に対する注入率を 35% 以上としている¹⁷⁾。一方、岩盤注入やダムグラウチングなどセメント系注入材を用いる場合の注入は、上記のような定量注入ではなく、水セメント比 (W/C) が大きくセメント量が少ない貧配合 (例えば W/C=1000%) で注入し、順次水セメント比が小さい富配合に切り替えて注入し、セメントが十分に地盤内に充填されて注入流量が小さい値で一定となるまでの量が注入される^{12),16),22)}。

$$Q = V \cdot n \cdot \alpha = V \cdot \lambda \quad (2.1)$$

ここに、 Q : 注入量 (m^3),

V : 改良対象土量 (m^3),

n : 間隙率 (%),

α : 充填率 (%),

λ : 注入率 (%) .

c) 動的注入

一般的に注入圧力は定圧である場合が多く、グラウトを静的に注入するが、これに対して近年では、注入性を向上させることを目的に注入圧力を周期的に変化させてグラウトを脈動させる動的注入 (図 2.11 参照) が実用化されている。

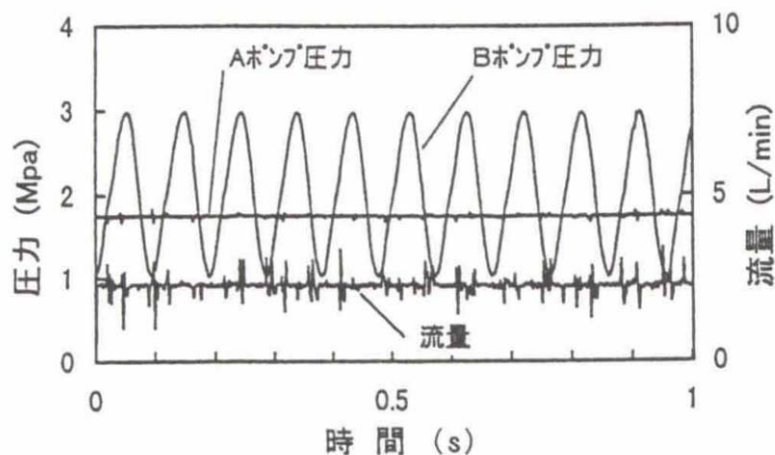


図 2.11 動的注入の注入圧力²³⁾

(4)ボーリング方式

注入管を設置するための掘削は直線的なボーリングで行われ、既設構造物下の地盤を改良する場合、地面に対して垂直に掘削する方式を直線ボーリング、同様に斜め方向に掘削する方式が斜めボーリングである。これらのボーリング方式で未改良部が発生する場合は、立坑を建設し、地面に対して水平方向に掘削する水平ボーリングを行い、既設構造物下の地盤を改良する工法が用いられる。この工法は、立坑を建設する土地が必要であることから、最近では狭隘部でも既設構造物直下の地盤が改良できる曲がりボーリング（図 2.12参照）が実用化されている。

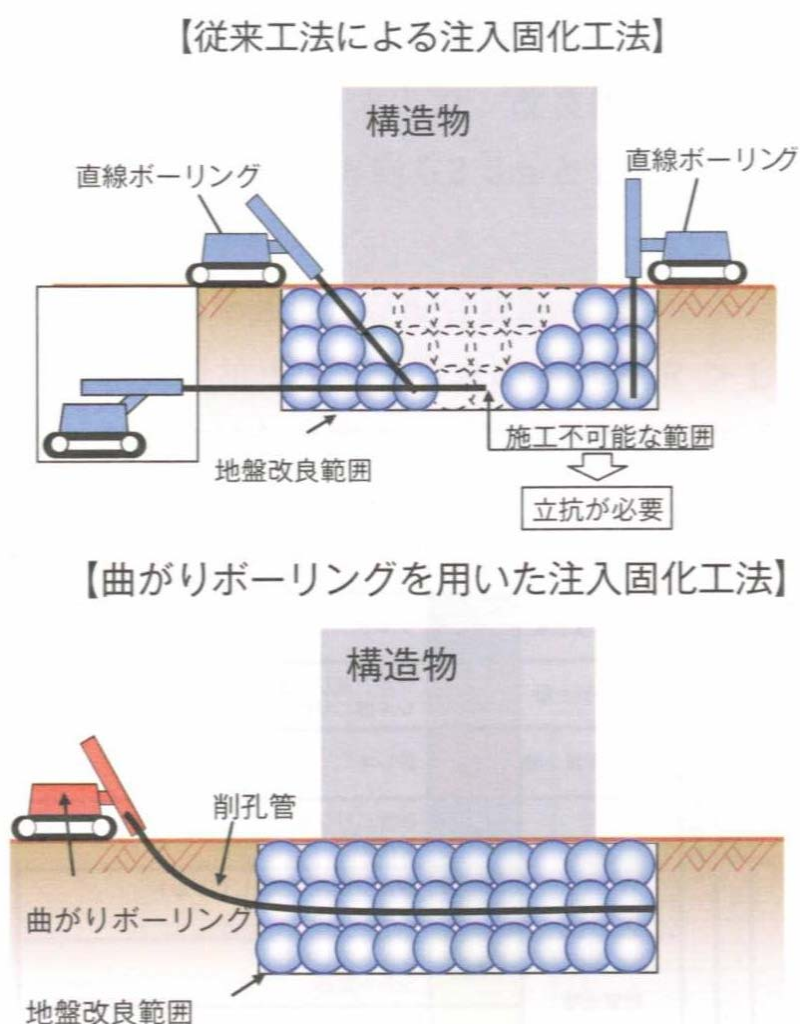


図 2.12 従来の直線ボーリングと曲がりボーリング²⁴⁾

2.8 注入材の浸透形態

注入材の浸透形態は浸透注入と割裂注入に大別される。注入形態の概念図を図 2.13に示す。地盤は土粒子と間隙で構成され、間隙内には水や空気で満たされている。注入工法で最も効果を発揮する注入形態は、この間隙に注入材が浸透して水や空気と置換充填する浸透注入である。一方、割裂注入は間隙に浸透せずに、土粒子を押し退けて裂くように注入材が脈状に注入される形態である。N値の低い地盤、注入流量や注入圧力が過剰な場合は、注入形態が割裂注入になりやすいことから、留意が必要である。また、注入孔近傍では圧力が高いことから割裂脈が発生し、距離が離れるのに従い圧力が低下して割裂脈から浸透注入の形態に変移する割裂浸透注入がある。これらの注入形態の他に、注入材が設計した範囲に注入されずに地層境界や注入管と地盤との境界に逸走して、選択的に透水係数の大きい地層に注入される境界注入がある。硬化時間が遅く浸透性の良い注入材を単独で使用するるとこのような注入形態となる場合があることから、セメントベントナイトやゲルタイムの短い注入材を事前に注入するなどして、境界部を充填することが必要である。

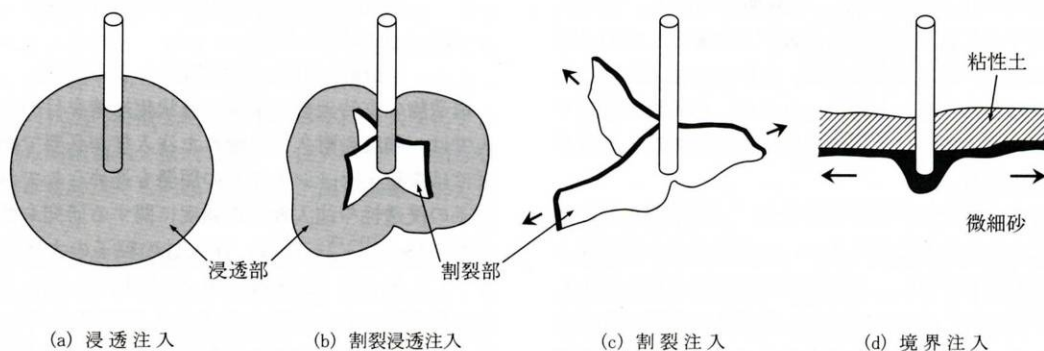


図 2.13 注入形態の概念図¹⁸⁾

2.9 改良機構

注入による地盤の改良機構は上述したように、間隙内の水や空気と注入材が置換充填されることによる。この機構は、図 2.14に示すように使用する注入材によって異なる。溶液系は間隙内をゼリー状物質で満たすことによって、効果を発揮する。これに対して、セメント系注入材は、土粒子同士を結合することで効果を発揮する。結合に至るまでの過程（図 2.15参照）は以下ようになる。

- ① セメントスラリー中の水がセメント粒子のキャリアーとして機能し、間隙内にセメント粒子を浸透させる。
- ② セメント粒子は吸着、沈降などにより土粒子周囲に付着する。
- ③ セメントは水和反応により水和物を生成して土粒子を結合する。

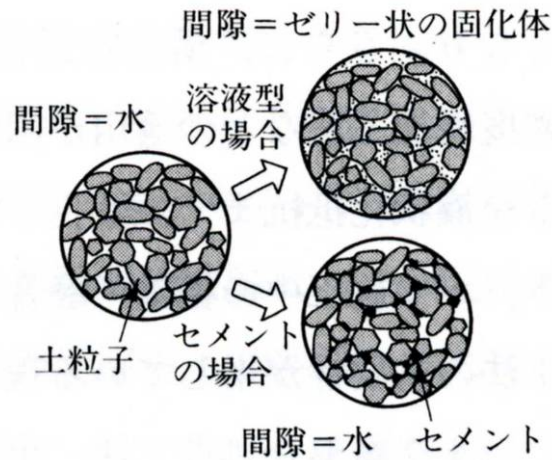


図 2.14 改良機構概念図²⁵⁾

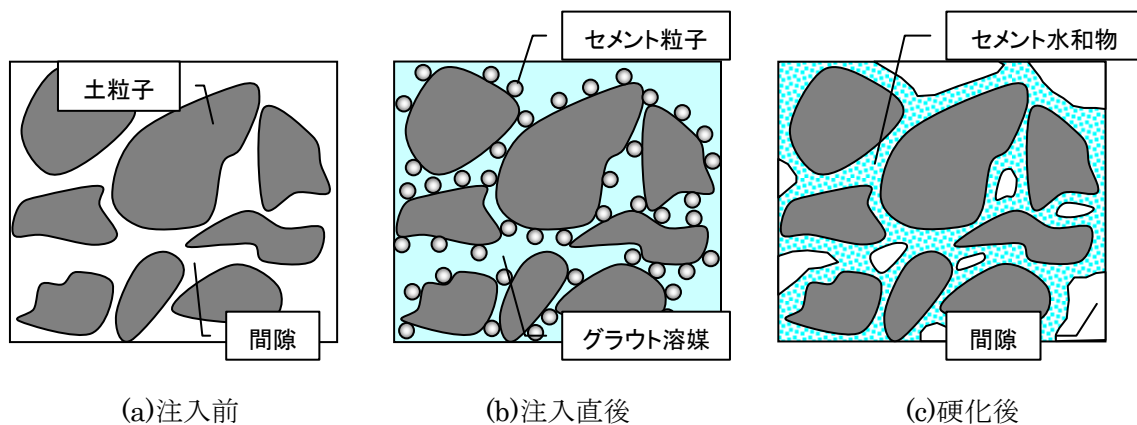


図 2.15 セメント系注入材の硬化概念図

2.10 セメント系注入材の浸透限界

セメント系注入材は粒子であるため、粒径の大きさから注入可能な地盤が定まる。すなわち、図 2.16に示すように、セメント粒子が小さいほど土粒子間隙や岩盤亀裂をスムーズに通過できる。また、セメント粒子を完全な一次粒子まで分散することは困難で、数個の集合体からなる凝集粒子も存在することから、セメント粒子がスムーズに通過できる大きさは粒子数個分になる。この注入対象地盤の土粒子径から浸透可否を評価する指標としてグラウタビリティ比(GR)があり、式(2.2)の実験式が知られている。

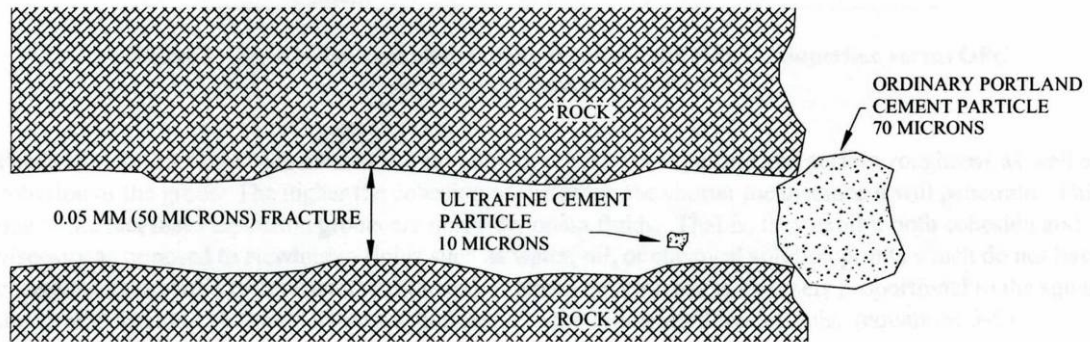


図 2.16 セメント系注入材の粒径と浸透性の関係

$$GR = \frac{D_{15}}{G_{85}} \quad (2.2)$$

ここに、 D_{15} ：土の粒径加積曲線の 15%径、

G_{85} ：注入材の粒径加積曲線の 85%径。

この式で求めたGRの値が 15～25 以上であれば、セメント粒子は土粒子間隙に浸透可能とされている^{26),27)}。

一方、亀裂性岩盤への浸透可否に関しては割れ目幅と注入材の粒径の比で評価する式(2.3)の実験式が提案されている。

$$\frac{w}{G_{85}} > 3 \sim 10, \frac{w}{G_{95}} > 5 \quad (2.3)$$

ここに、 w ：割れ目幅、

G_{85} ：注入材の粒径加積曲線の 85%径、

G_{95} ：注入材の粒径加積曲線の 95%径。

実際には、岩盤の割れ目幅は一樣ではなく、事前に注入対象の割れ目幅を測定することは困難であるが、注入材の最大粒径の 3～10 倍程度の割れ目幅であれば浸透可能とされている^{27),28),29)}。

2.11 注入による改良効果の確認

上述したように、注入工法は他の地盤改良工法では成し得ない効果が得られ、さらに、我が国の様な狭隘な土地に構造物が数多く立ち並ぶ施工条件下にも適用できることから、今日の建築・土木の基礎工事には欠かすことの出来ない工法の一つとなっている。しかしながら、目に見えない地盤の中に注入材を注入することから他工法に比べ確実性に課題が残る。したがって、注入後の改良効果を如何に確認するかが重要となる。

現在行われている注入による改良効果の確認方法²⁰⁾は次のとおりである。

- ① ボーリング孔を利用した現場透水試験による注入前後の透水係数の確認。
- ② 注入前後の N 値測定による強度の確認。
- ③ サンプリングによる室内試験による透水係数・強度の確認。

また、上記のように直接的に改良効果を確認する方法の他、注入前後に比抵抗・弾性波・電磁波測定などの原位置試験を実施して、セメント系注入材の浸透範囲を判定する試みがなされている^{30),31),32)}。

2.12 セメント系注入材に関する既往の研究

2.12.1 セメントの粒径と浸透性の関係²⁹⁾

汎用セメント 3 種類（平均粒径 10.5～15.3 μm ）および粒径の異なる高炉スラグ系微粉碎セメント 3 種類（平均粒径 3.5～5.5 μm ）を用いて、 $\phi 10 \times h20\text{cm}$ の砂層に注入し浸透性の比較検討が行われている。表 2.1に使用セメントを、表 2.2に砂層を、図 2.17に注入結果を示す。図 2.17から、浸透性は粒径の大きさが支配的であり、粒子径が小さいほど浸透性が向上し、超微粒子セメントでは $1 \times 10^{-4}\text{m/s}$ の砂層に注入できることが確認されている。

表 2.1 使用セメント²⁹⁾

記号	比重	ブレン・比表 面積(cm^2/g)	粒径 (μm)	
			平均径 G50	粗粒径 G85
U1	2.94	10300	3.5	7.8
U2	2.92	9370	3.8	10.0
U3	2.92	6200	5.5	11.5
H	3.14	4480	10.5	23.7
BB	3.02	3840	13.9	33.0
N	3.13	3380	15.3	35.0

表 2.2 砂層²⁹⁾

		荒 砂	細 砂	けい砂 (6号A)
比 重		2.64	2.63	2.63
乾燥密度 (kg/ℓ)		1510	1402	1465
間隙比		0.75	0.88	0.80
粒径 (mm)	細粒径 D15	0.46	0.26	0.12
	平均径 D50	0.55	0.34	0.18
透水係数 (cm/sec)		7.72×10^{-2}	2.68×10^{-2}	1.24×10^{-2}
-----JIS-A1218-----				
透水量 ²⁾ (ℓ/min)		7.5	6.8	4.8

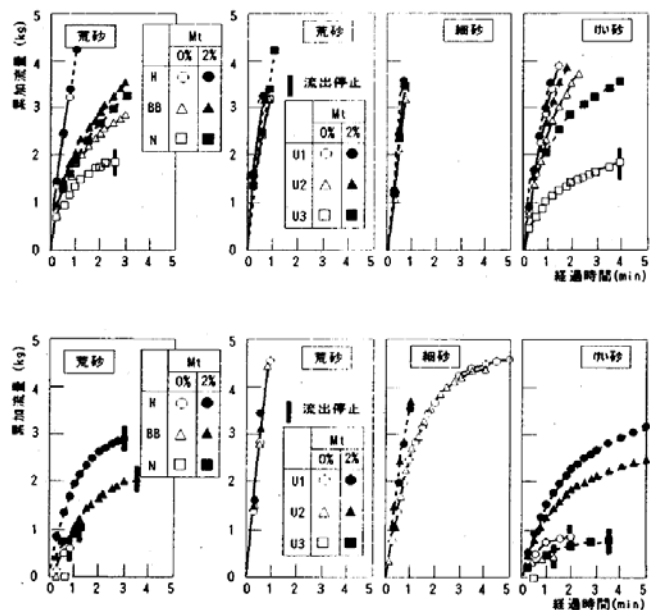


図 2.17 砂層注入結果²⁹⁾ (上段：W/C=6, 下段：W/C=2)

2.12.2 超微粒子セメントの浸透限界³³⁾

市販の超微粒子セメント、普通セメント、粒度調整したセメントおよび市販粘土を用いて、 $\phi 4 \times h 30 \text{ cm}$ の砂層に注入して、注入材の浸透限界についての検討が行われている。注入結果から、超微粒子セメントであっても透水係数 $k=1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ オーダーの地盤や細粒分含有率が 10% を超える地盤への浸透は困難であることが確認されている。また、市販の超微粒子セメントよりも粒径を小さくしても浸透性が向上しないことが確認されている。

2.12.3 市販の超微粒子セメントの浸透性比較³⁴⁾

ポルトランドセメントおよびポルトランドセメント、スラグ、あるいはポルトランドセメントとボゾラン物質との混合物から製造した様々な市販の超微粒子セメントを用いて、 $\phi 18.8 \text{ cm} \times h 150 \text{ cm}$ のモールドに #30 の珪砂を充填した砂層に注入して、浸透性の比較検討が行われている。図 2.18 に市販の様々な超微粒子セメントの浸透性比較を示す。浸透性比較から、市販の超微粒子セメントであっても組成の違いによって浸透性が異なることが確認されている。

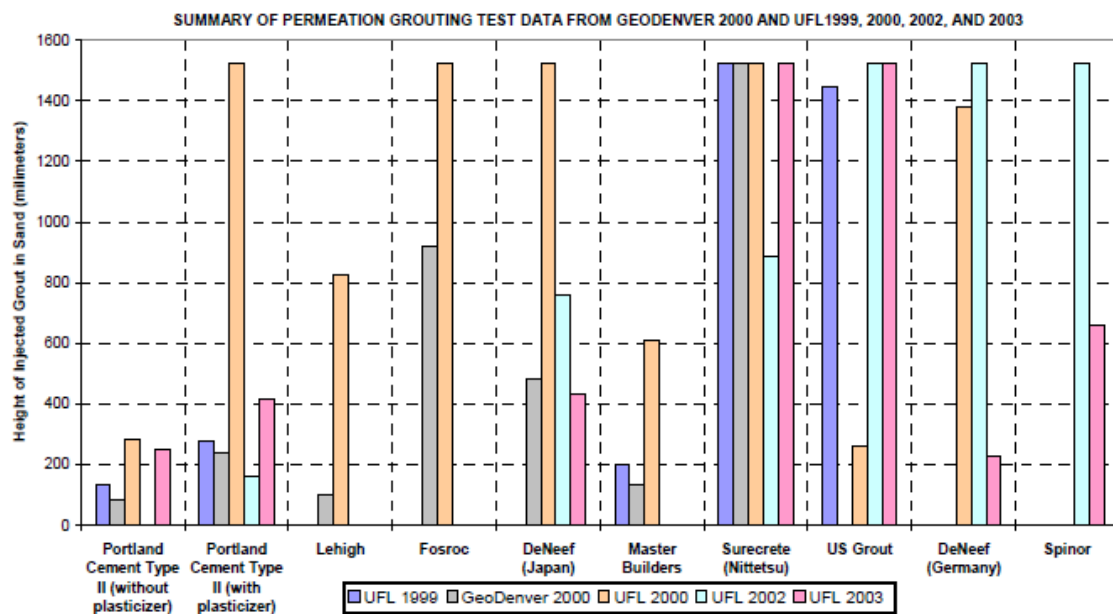


図 2.18 市販の様々な超微粒子セメントの浸透性比較³⁴⁾

2.12.4 亀裂性岩盤への浸透性³⁵⁾

普通ポルランドセメント，超微粒子セメントおよび超微粒子セメントに分散剤を添加した系の3材料を用いて，流路幅 16cm，流路長 46.5cm，亀裂幅 0.005～0.05cm (50～500 μ m) の亀裂モデルに注入して，注入可能となる限界の亀裂開口幅と水セメント比の関係について検討が行われている。注入結果から，普通ポルランドセメント，超微粒子セメントおよび超微粒子セメントに分散剤を添加した系の注入可能な亀裂開口幅はそれぞれ，100，100，50 μ m であることが確認されている。

2.12.5 超微粒子セメントの懸濁液の特性が浸透性に及ぼす影響³⁶⁾

化学成分，密度および粒度分布が同様に浸透性だけが異なる2種類の超微粒子セメントを用いて，懸濁液の特性が浸透性に及ぼす影響について検討が行われている。図 2.19にグラウトの粒度分布の経時変化を示す。図 2.19から，分散性や初期水和性状に差異があり，水和物の生成と凝集による見掛け粒子の増大が浸透性に大きな影響を及ぼすことが確認されている。

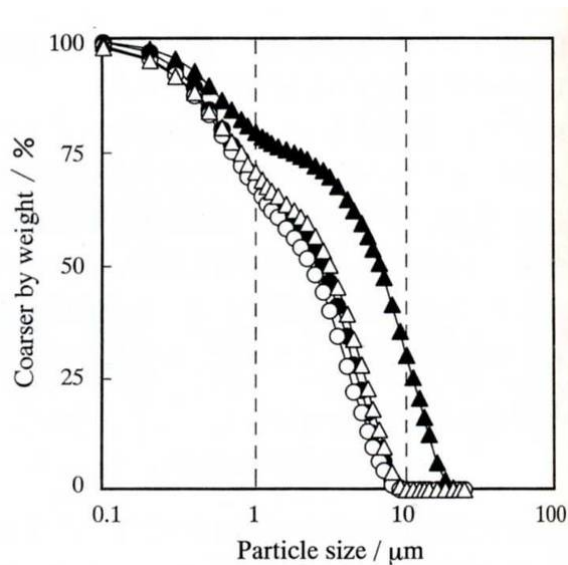


図 2.19 グラウトの粒度分布の経時変化³⁶⁾

(○:Sample A(0h), ●:Sample A(1h), △:Sample B(0h), ▲:Sample B(1h))

2.12.6 分散剤の種類と添加量が浸透性に及ぼす影響³⁷⁾

超微粒子セメントにセメント・コンクリート分野で一般的に用いられている各種分散剤を添加したグラウトを用いて、 $\phi 5\text{cm} \times h200\text{cm}$ の砂層に注入して、分散剤の種類と添加量が浸透性に及ぼす影響について検討が行われている。図 2.20に分散剤と浸透性の関係を示す。図 2.20から、ポリカルボン酸系、リグニン系、芳香族系、 β -ナフタレン系およびナフタレン系の分散剤を添加した系において、分散剤の種類で浸透性が異なり、超微粒子セメントに最適な分散剤は β -ナフタレン系およびナフタレン系であることが確認されている。また、 β -ナフタレン系およびナフタレン系は少添加量でも他の分散剤より浸透性が良いことが確認されている。

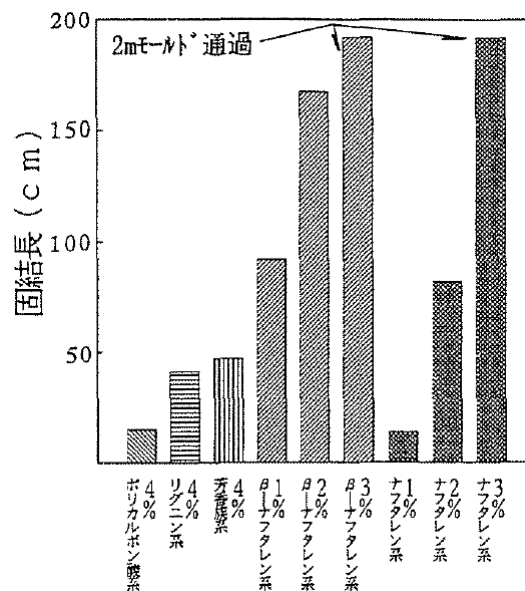


図 2.20 分散剤と浸透性の関係³⁷⁾

2.12.7 現場注入実験による改良効果

(1)成田層を対象とした改良効果³⁸⁾

千葉県 of 透水係数 $k=8.53 \times 10^{-5}\text{m/s}$ のシルト混じり細砂飽和地盤を対象に超微粒子セメントを二重管ダブルパッカー工法で注入し、掘削による改良体の確認、圧縮強度、透水係数について検討が行われている。注入結果から注入量から求めた改良半径 37cm に対して、掘削により測定した改良半径は 15cm であり、十分な改良径が得られていない。セメントが浸透した領域の改良効果について、圧縮強度は 1000~3000kN/m²に達し、透水係数は 1 オーダー程度の低減が確認されている。

(2) しらす地盤を対象とした改良効果³⁹⁾

鹿児島県の透水係数 $k=1.21 \times 10^{-6} \text{m/s}$ のしらす地盤を対象に微粒子セメント、超微粒子セメントおよび溶液系の 3 材料をパッカー工法で注入し、掘削による改良体の確認、圧縮強度、透水係数について検討が行われている。超微粒子セメントの浸透形態は脈状に注入され、さらに脈状注入部から浸透する割裂浸透注入であることが確認されている。しらす地盤への注入は脈状に注入されやすく、地上にもリークが生じやすいことから困難であると結論づけている。セメントが浸透した領域の改良効果について、圧縮強度は約 2000kN/m^2 であり、透水係数は 1 オーダー程度の低減が確認されている。また、微粒子セメントは浸透形態が太い脈状の割裂注入であり、溶液系は強度と耐久性に問題があり効果的な改良効果が認められていない。

(3) 互層地盤を対象とした改良効果⁴⁰⁾

茨城県の N 値 ≤ 10 、透水係数が 10^{-5}m/s オーダーの砂質土地盤に超微粒子セメントを二重管ダブルパッカー工法で注入し、注入後の改良径について検討が行われている。改良径は細粒分含有率が $1.0 \sim 6.6\%$ の地盤では目標改良径 $\phi 1.5 \text{m}$ に対して、最大径約 2.0m であったものの、地盤性状に大きく左右されやすく細粒分含有率が多い地盤に対しては $0.2 \sim 0.3 \text{m}$ であることが確認されている。

(4) 岩盤を対象とした改良効果²⁹⁾

風化花崗岩の割れ目および断層破砕部を対象に高炉セメントと超微粒子セメントを二重管ダブルパッカー工法で注入し、注入量、止水性および浸透状況について検討が行われている。注入の結果、超微粒子セメントの方が高炉セメントよりもセメント量が多く注入され、ルジオン値の低減効果も良好であることが確認されている。採取コアで観察した浸透状況は高炉セメントでは $150 \mu\text{m}$ 以下の割れ目にセメントの痕跡がないのに対し、超微粒子セメントは、割れ目幅 $65 \mu\text{m}$ まで注入されていることが確認されている。

2.12.8 実施工の長期的な改良効果

青函トンネル建設時に止水と補強を目的に注入した高炉コロイドセメント（微粒子セメント）と水ガラスを併用したセメント水ガラス注入材について長期的な改良効果に関する検討が行われている。トンネルの供用開始から 20 年経過後までのトンネル内の湧水量は継続的な減少傾向を示していることが確認されている。施工から 30 年経過した採取コアの圧縮強度は建設時の要求性能である 4.0N/mm^2 を上回る強度が確認されている。以上の結果から、施工から最長約 30 年に亘って安定した性状を維持していると結論づけている。

2.13 本研究の位置付け

上述してきたように、注入工法は他工法では成し得ない効果が得られるものの、地盤条件に左右されやすく確実性に課題がある。この注入工法の確実性は、現在では様々な施工方法や浸透範囲の評価技術が開発され、今後数多くの研究、データの蓄積を行うことで向上するものと考えられる。また、注入材に関しては、地盤への浸透性、強度および耐久性を兼ね備えた材料の開発が課題となる。セメント系注入材はこれまでに地盤の止水や補強工事での実績は多いものの、我が国のような複雑な地盤を改良する上では浸透性の向上が不可欠となる。

そこで本研究では、はじめにセメント系注入材の浸透性を向上させたセメントを開発する。必要以上に粒子径を小さくしたセメントは凝集や粗大な水和物の生成により浸透性は向上しないことから、水和物の生成抑制と粒子の分散について検討する。次にこのセメントを用いて、地盤災害対策や地盤工学上の課題の解決を目的に、飽和地盤・不飽和地盤および亀裂性岩盤に注入し、その注入性や改良効果から適用性について検討する。

これらの結果が、地盤工学分野において、セメント系注入材を用いた地盤改良の確立に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 大西弘：新編図解グラウト便覧，丸善，pp. 1-2, 1982.
- 2) 斉藤二郎：最近の薬液注入工法に関する研究動向，最近の薬液注入工法⑤，総合土木研究所，pp. 1-10, 1979.
- 3) 三木五三郎：海外における地盤注入，土と基礎，Vol.24, No.5, pp. 1-6, 1976.
- 4) 岩淵俊次：青函トンネルの止水工事用セメント，粉体と工業，Vol.19, No.3, pp. 53-68, 1987.
- 5) 日鐵セメント：「水硬性注入材超微粒子注入材 NITTETSU SUPERFINE」主要納入実績表，2011.
- 6) 樋口芳郎：注入工法，セメント・コンクリート，No.391, pp. 59-64, 1979.
- 7) 下田正雄：MC 工法とその実施例，最近の薬液注入工法⑤，総合土木研究所，pp. 58-67, 1979.
- 8) 館野哲，渡辺龍一：薬液注入材に含まれる硫酸塩による歩床コンクリートの劣化調査，第 66 回年次学術講演会講演概要集，V-261, 2011.
- 9) 有馬誠：田代八重ダムの超微粒子セメントを使用したカーテングラウチングの施工について，ダム技術，No.152, pp. 71-79, 1999.
- 10) 水資源機構 HP：
http://www.water.go.jp/honsya/honsya/torikumi/gijyutu/kenkyuhappyou/pdf/h18_tokuyama.pdf
- 11) 西垣誠ら：セメント系極超微粒子注入材による地盤改良，未来材料，Vol.8, No.9, 2008.
- 12) 櫻井聖，生形健司：道平川ダムのコンソリデーショングラウチングについて，ダム技術，No.42, pp. 58-64, 1990.
- 13) James Warner, P.E.：Practical Handbook of GROUTING, Wiley & Sons, 2004, 700pp.
- 14) セメント協会 HP：<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jd3.html>
- 15) SURECRETE INC.：Ultrafine Cement Technical Report, 2007, 30pp.
- 16) 米倉亮三：最新地盤注入工法技術総覧，産業技術サービスセンター，1997, 935pp.
- 17) 日本グラウト協会：新訂 正しい薬液注入工法，日刊建設工業新聞社，2007, 385pp.
- 18) (社)地盤工学会：薬液注入工法の理論・設計・施工，丸善，2009, 162pp.
- 19) 福井義弘：薬液の限界注入速度決定の問題点とその改善に関する研究，土木学会論文集，No.658, VI-48, pp. 81-92, 2000.
- 20) 薬液注入工法における注入効果の予測・確認手法に関する研究委員会：薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 4-20, 1993.
- 21) 島田俊介，兼松陽：改訂版 最新の地盤注入工法，理工図書，1979, 267pp.

- 22) 山内秀博:上ノ国ダム コンソリデーショングラウチングについて, ダム技術, No.180, pp. 46-53, 2001.
- 23) 平治ら: 動的グラウチング工法の開発, ダム工学, Vol.9, No.3, pp. 164-174, 1993.
- 24) 河村昌洋ら: 曲がりボーリング工法を適用した注入固化工法による供用中の旧法タンク地盤の液状化対策の施工について, Safety & Tomorrow, No.140, pp. 50-55, 2011.
- 25) (社)地盤工学会: 液状化対策工法, 丸善, 2004, 510pp.
- 26) King, J. C. and Edward, G. W. : SYMPOSIUM ON GROUTING:GROUTING OF GRANULAR MATERIALS, ASCE TRANSACTIONS, Part I, Vol.128, No.7, pp. 1279-1317, 1963.
- 27) Mitchell, J. K. : Soil Improvement-State-of-the-Art Report, Proceeding on the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.4, pp. 509-565, 1981.
- 28) Kennedy, T.B. : Pressure Grouting Fine Fissures, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 84(SM3), 1731-1-1731-6, 1958.
- 29) 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.
- 30) 蓮井昭則ら: 孔間弾性波・電磁波測定によるグラウチング効果の判定, ダム工学, Vol.2, No.8, pp.35-44, 1992.
- 31) 鈴木英世ら: 電磁波と弾性波を利用した物理探査方法の開発 (ダム基礎岩盤グラウチングの評価への利用), ダム工学, Vol.6, No.21, pp.24-34, 1996.
- 32) 山口嘉一ら: 比抵抗によるセメントグラウチングの効果判定に関する基礎的研究, ダム工学, Vol.9, No.2, pp.125-136, 1999.
- 33) 森麟ら: 超微粒子注入材の浸透限界, 土木学会論文集, No.426, V-14, pp.237-240, 1991.
- 34) Raymond Henn et al. : Additional Test Results for Comparison of Penetration of Grout Made with Various Ultrafine Cement Products, Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings 2005, pp.1039-1050, 2005.
- 35) 西垣誠ら: 亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透挙動と目詰まり特性に関する研究, 土木学会論文集, No.715, III-60, pp.311-321, 2002.
- 36) 磯田英典ら: 超微粒子セメントの浸透性, 無機マテリアル, Vol.6, pp.296-300, 1999.
- 37) 佐野昌明ら: 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, pp.2093-2096, 1995.
- 38) 米田俊一ら: 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, 土木学会論文集, No.493, III-27, pp.109-118, 1994.
- 39) 小牧勇蔵ら: 一次シラス地盤への現場注入試験, 第17回土質工学研究発表会, pp.2525-2528, 1982.

- 40) 湊上憲児ら：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回土質工学研究発表会，pp.2263-2264, 1997.

第3章 高浸透性セメント系注入材の開発（極超微粒子セメント）

3.1 概説

セメント系注入材の浸透性向上を図る上では，粒子径を小さくすることが不可欠となる。しかしながら，第2章でも述べたように単純に粒径を超微粒子セメント（平均粒径 $4\mu\text{m}$ ）よりも小さくしたセメントの浸透性は改善されていない。そこで本章では，粒子径を小さくするとともに粒子の分散性を高めた高浸透性の極超微粒子セメント（平均粒径 $1\sim 2\mu\text{m}$ ）の開発とその基礎物性について論述する。

3.2 従来のセメント系注入材の粒子径と浸透性¹⁾

従来のセメント系注入材の適用地盤は図3.1に示すように，汎用セメントはレキ，微粒子セメントは粗砂，超微粒子セメントは細砂まで改良可能であるが，細粒分を含む砂質土や透水係数が 10^{-4}m/s より小さい地盤は適用が難しい。

粒子径と浸透性の関係概念図を図3.2に示す。これまでに注入性を向上させる目的で超微粒子注入材より粒子径の小さいセメントの浸透性についての検討もなされているが，粒子径を必要以上に小さくすることでむしろ，浸透性の低下を招くことが知られている²⁾。

土粒子径 (mm)	2 0.42 0.074 0.005				
土質名	レキ	砂		シルト	粘土
		粗砂	細砂		
透水係数 (cm/s)	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-5}
超微粒子注入材					
微粒子注入材					
汎用セメント					

図 3.1 セメント系注入材の適用地盤

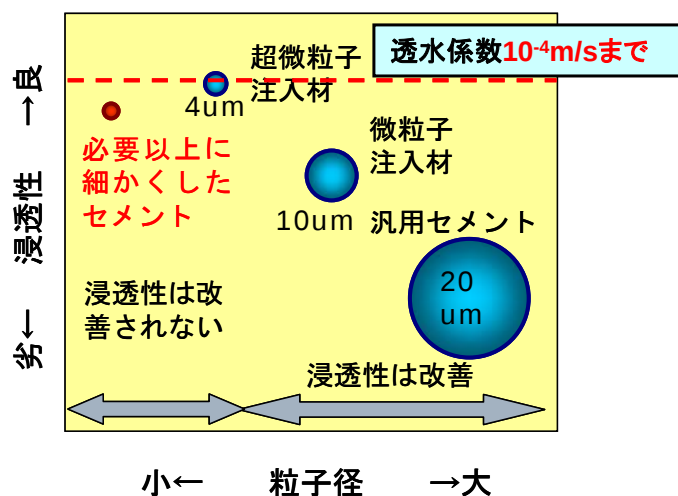


図 3.2 粒子径と浸透性の関係概念図

3.3 浸透性の低下要因

浸透性の低下要因概念図を図 3.3に示す。セメント系注入材の浸透性は、第 2 章で述べたように、粒径が同程度であっても混和材添加の有無，材料組成の違いによる水和活性度や分散の程度によって異なることが知られている^{3),4),5)}。平均粒径 $4\mu\text{m}$ の超微粒子セメントよりも小さくした系のセメントにおいて，浸透性の低下要因は粒子径を小さくすることで凝集力が強まり粒子が一次粒子まで分散されないことに加えて，セメント系では水和活性が飛躍的に高まることで粒子間凝集や水と接触後直ちに粗大な水和物を生成し，見掛け粒子径が大きくなることに起因している。すなわち，ドライな状態（粉体）で粒子径をいくら小さくしても実際に注入するセメント，水，分散剤で構成されるスラリー状態の粒子径は粗大化し，浸透性は超微粒子セメントより低下することとなる。

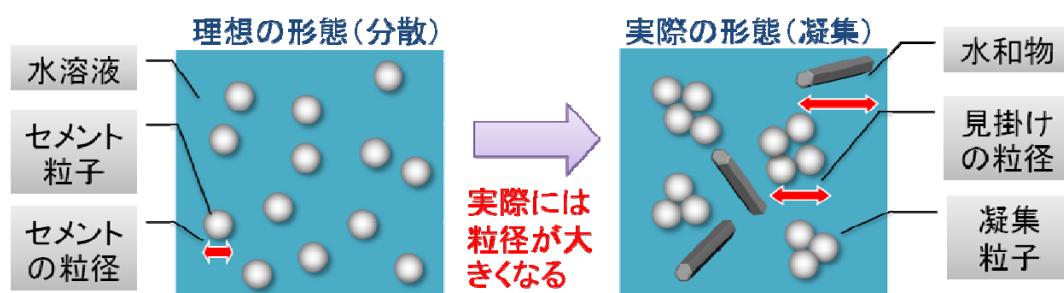


図 3.3 浸透性の低下要因概念図

3.4 従来の超微粒子セメントよりも粒径を小さくしたセメントの浸透性改善手法

超微粒子セメントよりも粒子径が小さいセメントの浸透性を向上させるためには、上述のような粗大粒子を低減し、セメントスラリー中の粒径をいかに小さくするかということが重要となる。したがって、粒径を小さくするとともに以下の要素を改良する必要がある。

- a)セメントの初期水和の制御。
- b)高性能分散剤による分散と分散保持。
- c)機械的なせん断作用による分散（高速ミキサーの使用）。

これらの課題に対して、本研究では以下のように解決した。

3.4.1 セメントの初期水和の制御

セメントの主要鉱物は $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C3S})$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2(\text{C2S})$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C3A})$ および $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C4AF})$ であり、各々のセメント鉱物は水和反応速度が異なる⁶⁾。これらのセメント鉱物の中でC3Aは水と接触すると直ちに発熱とともに水和反応が開始され、石膏存在下では粗大な水和物であるエトリンガイト ($\text{C3A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) を生成する^{4),5)}。したがって、水和反応を制御する上では、水和反応速度の速いセメント鉱物を極力低減したセメントクリンカーを使用するとともに、高炉スラグなど水和活性の低い材料を利用することで、粒子間凝集や粗大な水和物の生成を抑制できる。

3.4.2 高性能分散剤による分散と分散保持

コンクリート分野でも高強度化、施工性の改善、耐久性の向上などの観点から分散剤を使用している。近年では、従来の分散剤に比べ分散性、分散保持性に優れたポリカルボン酸系分散剤が開発され一般コンクリート、高流動コンクリート、超高強度コンクリートなど広範なコンクリートの製造に実用化されている⁷⁾。このポリカルボン酸系分散剤の最大の特徴は図 3.4に示すように従来の分散剤は静電反発力で分散するのに対して、側鎖を有するポリマー構造で物理的な立体障害反発力で高度な分散と分散保持性を発揮する。しかしながら、コンクリート用途として市販されているポリカルボン酸系分散剤を超微粒子セメントのような粒径の小さいセメントに適用した事例では、分散が不十分となり従来の分散剤よりも浸透性が劣るとの報告がある。ポリカルボン酸系分散剤の性能は側鎖の長さ、側鎖の間隔、主鎖の長さなどポリマーの構造で変わることが知られており⁸⁾、注入材用にポリマー構造を最適化したポリカルボン酸系分散剤を使用することで粒径を小さくしたセメントであっても高分散と高分散保持性が得られる。

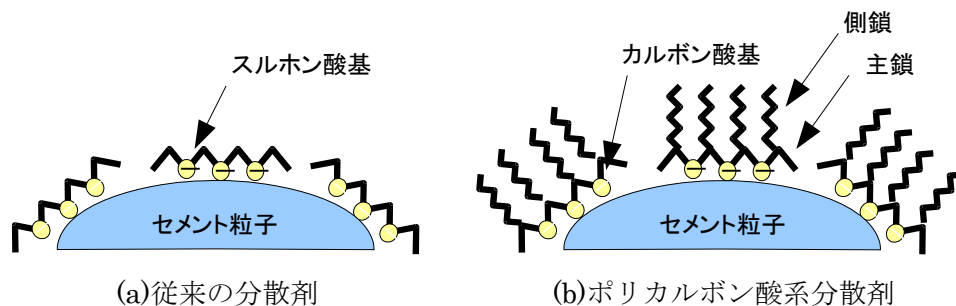


図 3.4 分散剤の構造¹⁾

3.4.3 機械的なせん断作用による分散（高速ミキサーの使用）

従来の超微粒子セメントより必要以上に粒径を小さくした粉体は強い凝集作用があり、ドライ状態であっても粒子間の凝集が散見され、スラリー中の凝集速度も極めて速いという現象が認められる。このような強凝集系のセメントは高性能分散剤を使用しても粒子の凝集速度が分散剤の吸着速度を凌駕し、分散が不十分となる場合がある。したがって、ミキサーの高速回転によるせん断作用により凝集一次、二次粒子を解きほぐし、新たに現れた粒子表面に分散剤が迅速に吸着することで高分散と高分散保持性が得られる。

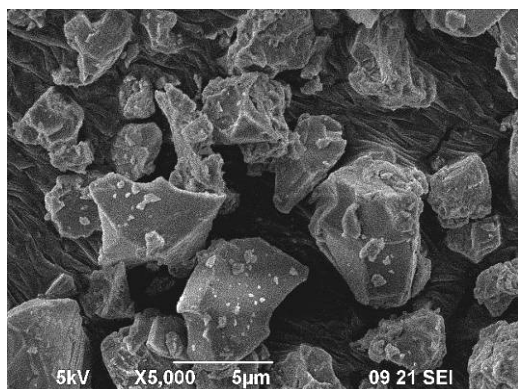
3.5 極超微粒子セメントの開発^{1),9)~12)}

3.5.1 極超微粒子セメントの組成

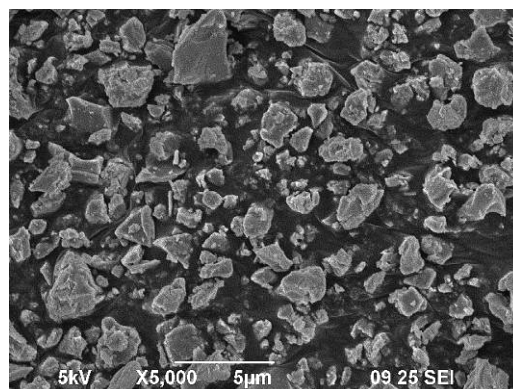
極超微粒子セメントの密度と化学成分を表 3.1に、セメント粒子の電子顕微鏡像を図に示す。図中には、比較用に市販の超微粒子セメントを併記した。上述のように凝集粒子および粗大な水和物の生成を抑制するという観点から、極超微粒子セメントは粒径を小さくするとともに、主原料に高炉スラグを使用し、セメント部に水和反応速度の速いC3Aの含有量を低減したセメントクリンカーを用いた。

表 3.1 極超微粒子セメントの密度と化学成分

	極超微粒子 セメント
密度(g/cm ³)	2.94
SiO ₂ (%)	32.1
Al ₂ O ₃ (%)	15.0
Fe ₂ O ₃ (%)	0.9
CaO(%)	44.9
MgO(%)	5.6



(a)超微粒子セメント



(b)極超微粒子セメント

図 3.5 セメント粒子の電子顕微鏡像

3.5.2 分散剤の種類と攪拌速度が分散性に及ぼす影響

分散剤の種類と攪拌速度が分散性に及ぼす影響を図 3.6に示す。分散性は、粒径 $90\mu\text{m}$ のガラスビーズを間隙率 40%, 長さ 15cm となるよう締め固めた飽和ガラスビーズ層にセメントスラリーを注ぎ、その自然浸透距離を測定して評価した。分散剤は従来のナフタレン系とポリカルボン酸系の 2 種類を使用し、添加量はセメントに対して固形分換算で 2% 添加した。作液は水セメント比 1000% のセメントスラリーを所定の攪拌羽根の先端周速で 3 分間攪拌して行った。図中には、市販の超微粒子セメントを併記比較した。なお、先端周速は $\text{周速(m/s)} = \text{攪拌羽根の直径(m)} \times \pi \times \text{軸回転速度(rpm)}$ から求められる。

図 3.6より、従来の分散剤や超微粒子セメントではほとんど浸透することができないガラスビーズ層に対して、分散剤にポリカルボン酸を使用し、先端周速を 377m/min 以上とすることで、目詰まりをすることなくガラスビーズ層に浸透することがわかる。

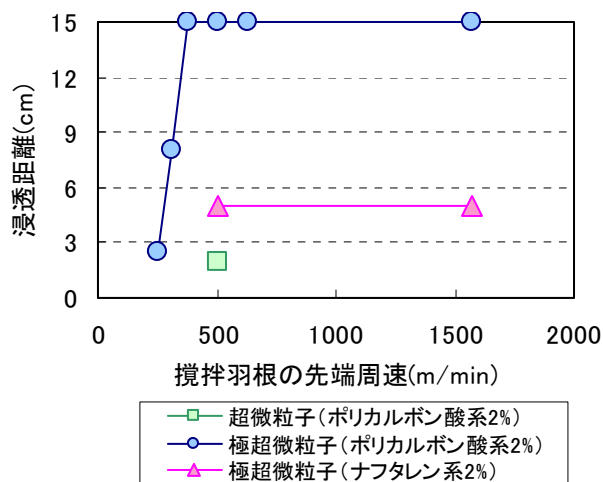


図 3.6 分散剤の種類と攪拌速度が分散性に及ぼす影響

3.5.3 極超微粒子セメントの分散性

レーザー散乱・回折法により測定した極超微粒子注入材のドライ状態（粉体）とスラリー状態の粒径加積曲線を図 3.7に示す。図中には、市販の超微粒子セメントを併記比較した。スラリーの配合はW/C=1000%，ポリカルボン酸系分散剤の添加量がセメントに対して 3%とし、作液は水にポリカルボン酸系分散剤を入れた水溶液にセメントを投入し、攪拌羽根の先端周速 707m/min（軸回転速度 1500rpm）で 3 分間混合攪拌して行った。ドライ状態の測定は、セメントの水和反応と凝集による影響を無くするため、溶媒にエタノールを使用し、出力 40Wの超音波で 3 分間分散して行った。また、スラリー状態の測定は、スラリーを測定可能な濃度まで水で希釈して行った。

図 3.7より、ドライ状態の極超微粒子セメントの平均粒径（D50）は 1.5 μm であり、超微粒子セメント（4 μm ）に比べて約 1/3 である。また、本研究で開発した手法により、極超微粒子セメントは、スラリー状態の粒子径をドライな状態の粒子径まで分散することが可能となり、従来の超微粒子系セメントを凌ぐ高注入性が得られた。

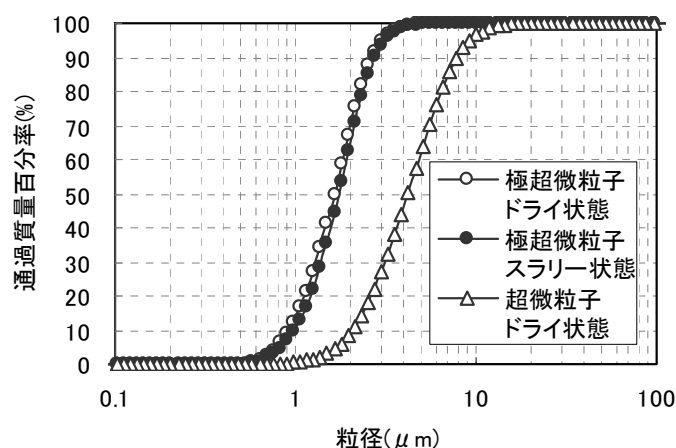


図 3.7 セメントの粒径加積曲線

3.5.4 極超微粒子セメントの材料特性

(1)実験概要

セメント系注入材に求められる性能として、浸透性はさることながら、粘性が低く圧送性に優れること、材料分離が少ないこと、注入完了後は速やかに硬化することが挙げられる。そこで、極超微粒子セメントの材料特性の把握を目的として、粘度測定試験、ブリーディング試験、凝結時間測定試験および圧縮強度試験を行った。注入材の配合を表 3.2に、試験方法を表 3.3に示す。

表 3.2 注入材の配合

注入材	水 注入材比 (%)	配合(L)		分散剤	
		水 (g)	注入材 (g)	種類	添加量
極超微粒子	40	546	1364	ポリカルボン 酸系	3%
	400	924	231		
超微粒子	40	546	1364	ナフタレン系	1%
	400	924	231		

表 3.3 試験方法

試験項目	試験方法
粘度測定試験	B 型粘度計 (M1 ローター, 60rpm)
ブリーディング試験	「JSCE-F 532」ポリエチレン袋法に準拠
凝結時間測定試験	「JIS R 5201」ピガー針法に準拠
圧縮強度試験	水注入材比 40%, $\phi 50 \times 100\text{mm}$

(2)実験結果と考察

a) 粘性

粘度測定結果を図 3.8に示す。極超微粒子セメントの混合攪拌直後の粘度は約 $4\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、混合攪拌から 6 時間経過後の粘度は $3\text{mPa}\cdot\text{s}$ であり、低い値を維持した。なお、時間の経過に伴う極僅かな粘性の低下は高速攪拌した際に生じた気泡が消失したことによる。超微粒子セメントと比較すると、ほぼ同程度の粘性が得られており、同様の圧送性が得られると考えられる。

b) ブリーディング率

ブリーディング率測定結果を図 3.9に示す。超微粒子注入材の 24 時間経過後におけるブリーディング率は 83%と大きい値を示しているのに対し、極超微粒子セメントは極めて小さい 4%であり、高い分離抵抗性が確認された。この分離抵抗性は、スラリー中において、極超微粒子セメントの極微小な粒子が分散状態を保持することによって、粒子の沈降が抑制されたものと考えられる。

c) 凝結時間

凝結時間測定結果を図 3.10に示す。極超微粒子セメントの終結時間は、超微粒子セメントの約 30 時間に対して、約 20 時間であり、10 時間程度短縮できることが確認された。

d) 圧縮強度

圧縮強度測定結果を図 3.11に示す。極超微粒子セメントの圧縮強度は材齢 3 日で $50\text{N}/\text{mm}^2$ であり、超微粒子セメントに比べて凝結完了後は速やかに硬化が進行し、早期に強度が発現することが確認された。なお、超微粒子セメントは、使用した分散剤が遅延性を有している影響により強度発現性が低下していると考えられる。

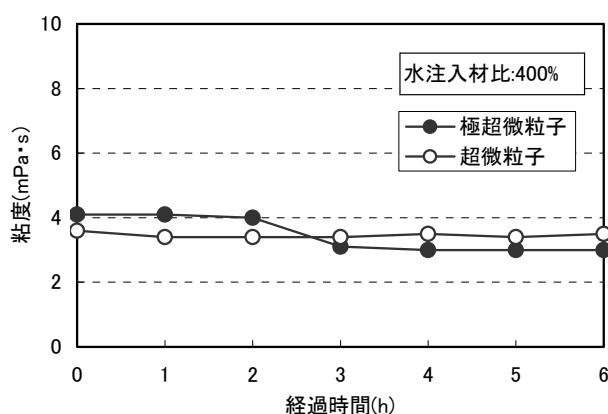


図 3.8 粘度測定結果

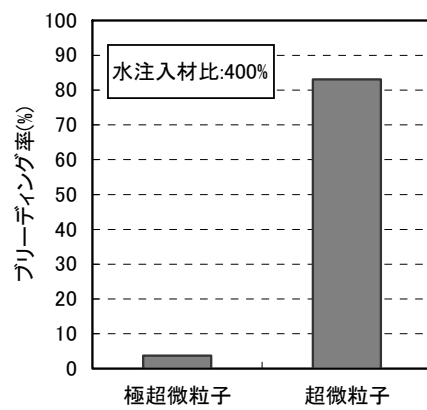


図 3.9 ブリーディング率測定結果

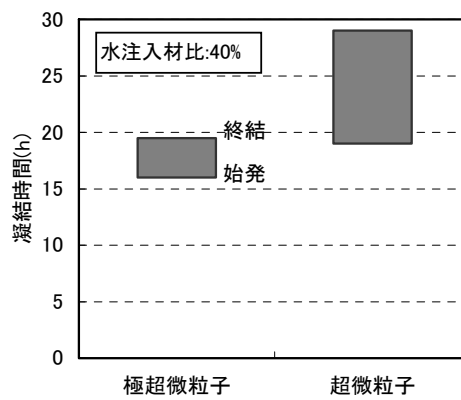


図 3.10 凝結時間測定結果

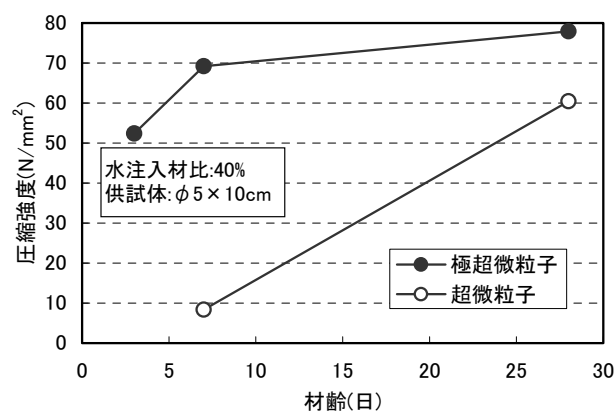


図 3.11 圧縮強度測定結果

3.5.5 各種注入材との浸透性および強度特性の比較

(1)実験概要

市販の各種注入材との浸透性および強度特性の比較を目的に、注入材の評価方法として一般的な砂層への一次元注入を行い、浸透長と一軸圧縮強さを比較検討した。

一次元注入試験装置の概要図を図 3.12に示す。試験砂層の作成は東北珪砂 7号と 8号を 1:1 の割合で混合した細粒分約 21%の混合珪砂を $\phi 5\text{cm} \times 97.5\text{cm}$ 、間隙率 43%となるよう締め固めた。また、砂層の両端は 2.5cmずつフィルター層を設けた。なお、試験砂層の透水係数は $1 \sim 2 \times 10^{-5} \text{m/s}$ であった。注入試験は砂層に予め水を注水して飽和し、限界注入圧力である 0.5MPaで各種注入材を試験砂層の間隙相当量 (833ml) 注入した。注入後は浸透長の測定と 10cm毎に切断して材齢 28 日の一軸圧縮強さを測定した。

(2)試験結果

各種注入材との浸透性および強度特性比較を図 3.13に示す。図 3.12 より、懸濁型注入材は砂層への浸透が認められず、従来の超微粒子セメントは浸透したもの、設計改良長 (97.5cm) に対して、約 50%の浸透長であった。一方、極超微粒子セメントの浸透長は溶液型と同等である設計改良長どおりの 97.5 cmであり、一軸圧縮強さは溶液型に比べ 10 倍の約 3N/mm^2 であった。

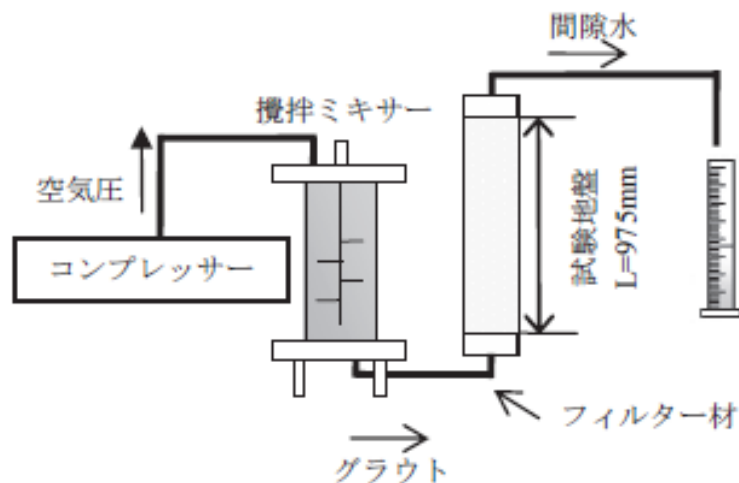


図 3.12 一次元注入試験装置の概要

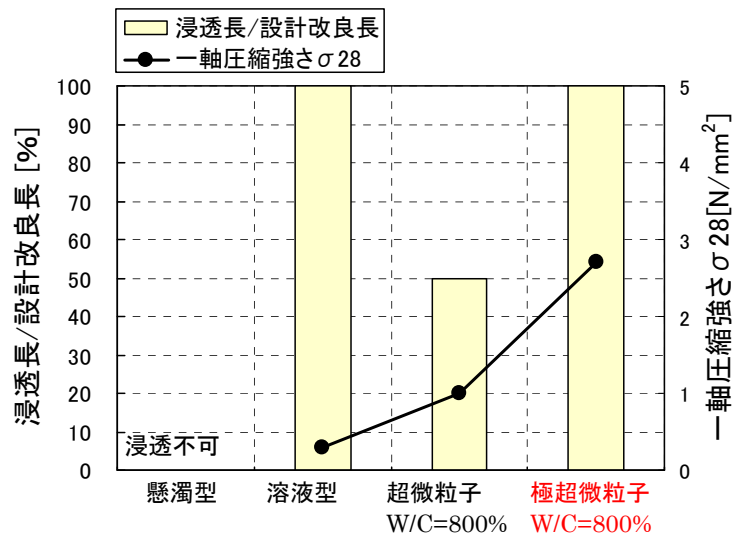


図 3.13 各種注入材との浸透性および強度特性比較

3.6 まとめ

必要以上に粒子径を小さくしたセメントは以下の2つの要因で実際に使用する形態であるセメントスラリー中に見掛け粒子が粗大化し、浸透性が低下することを明らかにした。

- 1)凝集力が強まり分散が不十分となっている。
- 2)水和反応が飛躍的に高まり水と接触後直ちに粗大な水和物を生成している。

以上のことから、セメント系注入材の浸透性改善を目的に、平均粒径を1～2 μm まで小さくしたセメントの凝集と水和物の生成による粗大粒子の低減手法について検討を行った。凝集粒子の分散は分散剤の種類と分散方法に着目して検討した。水和物の生成は水和反応速度に着目して水和反応の制御について検討した。また、その手法による効果の検証を行った。平均粒径4 μm の超微粒子セメントより粒子径を平均粒径1～2 μm まで小さくした極超微粒子セメントについて得られた成果を以下に列挙する。

- 1) 水和反応の制御にはC3A含有量を低減したセメントと高炉スラグを使用した極超微粒子セメントを用いて、その凝集性を制御するためのポリカルボン酸系分散剤を混合し、高速回転ミキサーで高速攪拌することにより、見掛け粒子の粗大化を低減でき、セメント粉体と同程度の粒径のセメントスラリーを作成する方法を示した。
- 2) 極超微粒子セメントの材料特性について従来の超微粒子セメントと比較し、同等以上の性能が得られ、施工上は従来の材料と同様に使用できることがわかった。
- 3) 各種注入材について一次元注入による室内実験を実施し、極超微粒子セメントは溶液型と同等の浸透性を示し、強度は約3N/mm²であり溶液型に比べ10倍高い強度であることがわかった。

参考文献

- 1) 西垣誠ら：セメント系極超微粒子注入材による地盤改良，未来材料，Vol.8, No.9, 2008.
- 2) 森麟ら：超微粒子注入材の浸透限界，土木学会論文集，No.426, V-14, pp.237-240, 1991.
- 3) Raymond Henn et al. : Additional Test Results for Comparison of Penetration of Grout Made with Various Ultrafine Cement Products, Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings 2005, pp.1039-1050, 2005.
- 4) 磯田英典ら：超微粒子セメントの浸透性，無機マテリアル，Vol.6, pp.296-300, 1999.
- 5) 佐野昌明ら：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，pp.2093-2096, 1995.
- 6) 荒井康夫：セメントの材料化学，大日本図書，1984, 258pp.
- 7) 木下光男，牧保峯：さらなる高性能化のための化学混和材の役割，セメント・コンクリート，No.680, pp.90-96, 2003.
- 8) 菅俣匠ら：セメント粒子の分散性に及ぼすポリカルボン酸ポリマーの分子構造の影響，土木学会論文集，No.662, V-49, pp.17-27, 2000.
- 9) 金沢智彦ら：高浸透性セメント系注入材による地盤改良，第54回地盤工学シンポジウム，pp.527-532, 2009.
- 10) 金沢智彦ら：極超微粒子注入材による地盤注入工法の開発－材料特性－，第65回土木学会学術講演会，pp.957-958, 2010.
- 11) 小泉悠ら：極超微粒子注入材による地盤改良工法の開発，第9回地盤改良シンポジウム論文集，pp.237-242, 2010.
- 12) 田中俊行ら：処分坑道掘削に伴うゆるみ域への高浸透性セメント系注入材の適用性，第65回土木学会学術講演会，pp.81-82, 2010.

第4章 地盤工学分野への応用

4.1 概説

第 3 章で述べたように本研究では従来の超微粒子セメントより浸透性を改善し、溶液型注入材と同等の浸透性と高い強度発現性を有する極超微粒子セメントを開発した。本章では、豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止、地震時の液状化防止、トンネル掘削時の湧水対策および地盤への有害物質の漏洩防止を目的に、このセメントを用いて不飽和地盤、飽和地盤および亀裂性岩盤への注入実験を実施し、適用性について検討する。

4.2 豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止¹⁾

近年、集中豪雨が著しく増加し、毎年のごとく斜面崩壊や土石流などの土砂災害や堤防の決壊が日本各地で多発し甚大な被害をもたらしている²⁾。特に南九州地方に多く分布するしらすは、水の浸透や浸食に極めて脆弱であり、雨水が浸透し、粘着力の低下による表層すべりが多い^{3),4),5),6)}。このため、有効な対策工法の確立が急務な課題となっている。地盤災害が発生しやすいしらす地盤を対象に、極超微粒子セメント(USFC)を使用して注入実験を行い、斜面崩壊および堤防の決壊防止対策への適用可能性と有効性について検討を行った。

4.2.1 注入材

注入材の配合と攪拌方法を表 4.1に示す。注入材は第 3 章で示した極超微粒子セメントを用いた。スラリーは、表 4.1に示す配合で、予め水、分散剤および消泡剤を含む水溶液にセメントを投入し、3 分間高速攪拌して作液した。

表 4.1 注入材の配合と攪拌方法

W/C (%)	配合(kg/m ³)		分散剤 (%)	消泡剤 (%)	攪拌方法
	W	C			
1000	96.8	968	C×3	分散剤 ×0.1	攪拌羽根径 150mm,攪拌速度 1500rpm のハンドミキサーで 3 分間攪拌

4.2.2 模擬しらす地盤

しらすは、鹿児島県のしらすを 4.75mmふるいでふるい分けし、4.75mm以下のしらすを用いた。図 4.1にしらすの粒径加積曲線を示す。模擬しらす地盤は、しらす斜面の不飽和地盤を想定し、間隙率 54%、含水比 15%の条件とした。なお、この地盤条件で測定した模擬しらす地盤の定水位透水試験により求めた飽和透水係数は $2.9 \times 10^{-5} \text{m/s}$ である。透水係数は飽和度が低いほど小さい値を示すことから、本研究における不飽和しらす地盤への注入は、

ここで示した飽和透水係数より浸透し難い地盤に対する評価となる。

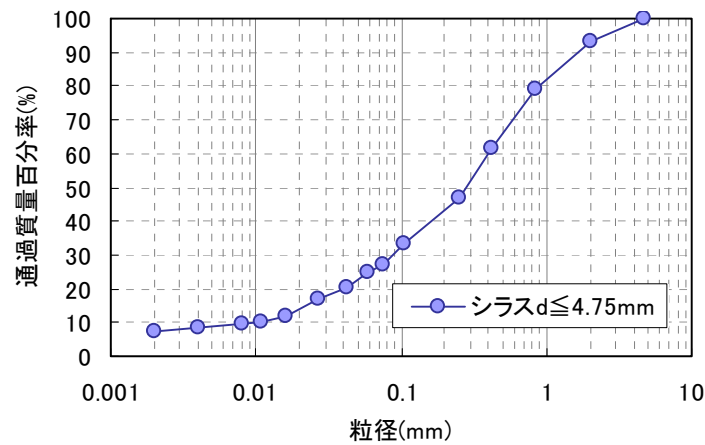


図 4.1 しらすの粒径加積曲線

4.2.3 注入試験方法

注入試験は注入材の模擬地盤への注入性評価などで一般的に行われている一次元注入と実際の現場での注入を想定した大型土槽への軸対称注入とした。

(1) 水平一次元注入試験

図 4.2に水平一次元注入試験装置概念図を示す。実際の現場注入において、注入材は地盤内に設置した注入管から地盤内へ注入される。この注入時の注入方向は注入管と直交方向（地盤に対しては水平方向）となることから、現場注入により近い条件を再現する目的で水平一次元注入とした。

図 4.3に水平一次元注入試験装置概要図を示す。一次元注入試験装置は、ピストン定速載荷式定流量フローポンプを使用して、注入材を直径 5cm、長さ 100cmの模擬しらす地盤に一次元注入する仕様とし、注入時の注入圧力と模擬しらす地盤を通過したセメントミルクの排出量を測定できるよう間隙水圧計と電子天秤を設置した。

注入条件は、過剰な注入流量は地盤のかく乱を招くことから、セメントミルクが模擬地盤内に 10sで 1cm浸透する流量を最大流量に設定し、注入流量 1.04, 0.61 および 0.24cm³/s の 3 水準とした。注入時はセメントミルクの浸透距離と注入圧力の経時変化および排出水のpHを測定した。注入後の模擬しらす地盤の改良体については、10cm毎に切断し、一軸圧縮強さ試験および透水試験を行い、改良効果を評価した。一軸圧縮強さ試験および透水試験方法は、それぞれJIS A 1216「土の一軸圧縮試験方法」および「三軸圧縮試験装置を用いる透水試験方法」に準じた⁷⁾。

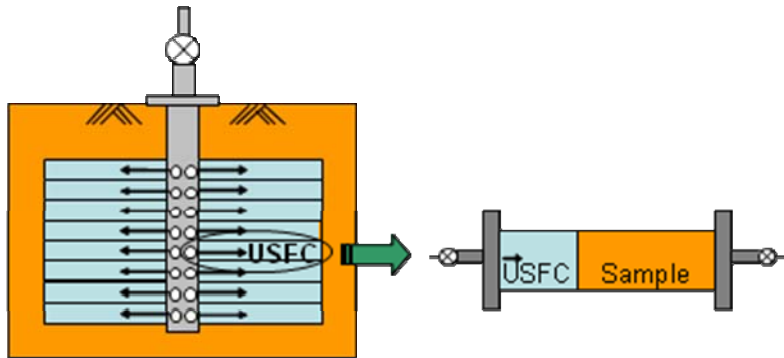


図 4.2 水平一次元注入試験装置概念図

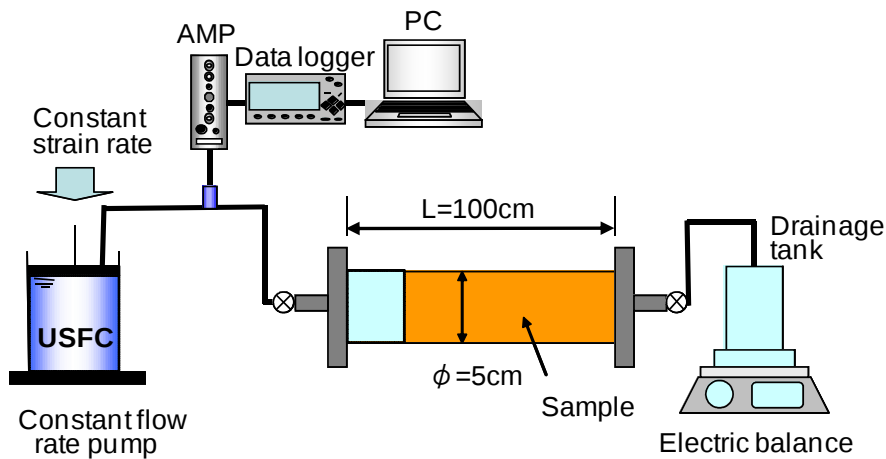


図 4.3 水平一次元注入試験装置概要図

(2)軸対称注入試験

図 4.4に軸対称試験装置概要図を示す。軸対称注入試験装置の基本的な仕様は、水平一次元注入試験装置と同様であり、ピストン定速載荷式定流量フローポンプを使用して、注入材を大型土槽内に充填した模擬しらす地盤に軸対称で注入し、注入時の注入圧力と模擬しらす地盤を通過した注入材の排水量を測定できるように圧力計と電子天秤を設置した。大型土槽は直径 58cm、高さ 50cmの円柱形で、中央に直径 3.6cmの注入管を配置した。この内部には直径 40cm、高さ 30cmの模擬しらす地盤とその周囲にはフィルター材として碎石を、上下端部には止水層としてまさ土をそれぞれ充填した。

注入試験は、注入流量 $10.7\text{cm}^3/\text{s}$ 、注入時間 27～28 分間（設計注入量約 17.7L）の条件で注入し、注入時の注入圧力を測定した。注入から 3 日経過後に脱型し、模擬しらす地盤を水で洗浄後、改良体の直径から浸透距離を測定した。洗浄後の模擬しらす地盤の改良体については、注入孔からの浸透距離 5cm 毎に直径 5cm で長さ 5cm と 10cm の長さが異なる 2

種類の供試体を採取し、長さ 5cm の供試体は透水試験に、長さ 10cm の供試体は一軸圧縮試験に用いて試験を行い、改良効果を評価した。一軸圧縮強さ試験および透水試験方法は、水平一次元注入と同様に、それぞれ JIS A 1216「土の一軸圧縮試験方法」および「三軸圧縮試験装置を用いる透水試験方法」に準じた。また、得られた一軸圧縮強さから簡易 Janbu 法を用いて安全率を求め、改良後のしらす斜面の安定性を評価した。

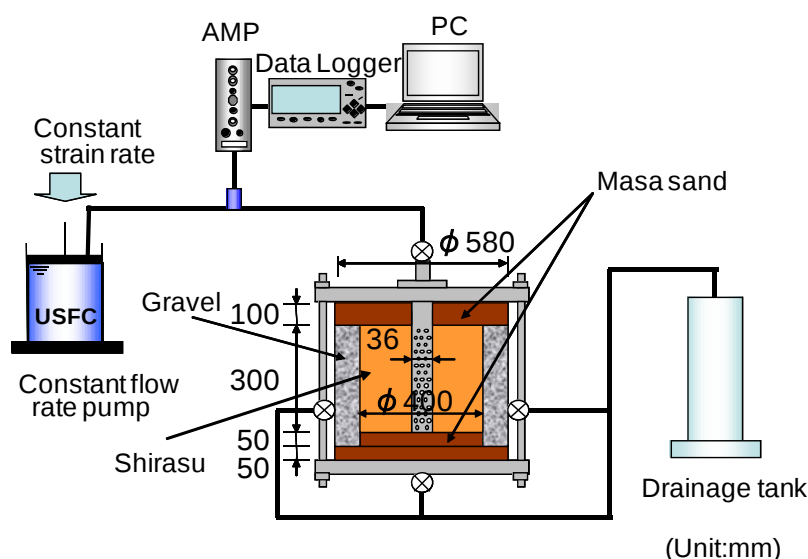


図 4.4 軸対称注入試験装置概要図

4.2.4 試験結果および考察（水平一次元注入試験）

(1) 注入性

図 4.5 に浸透距離の経時変化を示す。注入流量 1.04 および $0.61\text{cm}^3/\text{s}$ の浸透距離は、それぞれ注入開始から 20 および 45 分経過後に 100cm まで到達し、排出口からはセメントミルクの排出が認められた。一方、注入流量 $0.24\text{cm}^3/\text{s}$ の浸透距離は、注入開始から 180 分経過後においても 80cm に留まった。

ここで、直径 5cm、長さ 100cm、間隙率 54% の模擬しらす地盤の間隙量は 1060cm^3 である。この間隙量に対して全量をセメントミルクで充填するのに要した注入量を求めると、注入流量 $1.04\text{cm}^3/\text{s}$ は 1248cm^3 、 $0.61\text{cm}^3/\text{s}$ では 1647cm^3 であり、注入流量 $0.24\text{cm}^3/\text{s}$ に至っては、注入量 2592cm^3 においても間隙全量の充填には達していない。この結果から、注入流量が多いほど少ないセメント量で多くの間隙量に充填でき、地盤への浸透性が改善されていることがわかる。セメントの様な懸濁型注入材は、注入材粒子が地盤間隙で目詰まりし、分離した水だけが浸透する「ろ過現象」を生じることが知られている。注入流量が小さい場合、セメント粒子は奥へ浸透せずに滞留あるいは土粒子へ付着する量が注入時間の経過とともに徐々に増加する。この結果、間隙中のセメント粒子濃度が高まることで、

ろ過現象を生じ、浸透距離が低下したと考えられる。一方、注入流量が多い場合、間隙内での滞留量や付着量は低減され、水とともに奥へ浸透することによって、浸透性が改善されたと考えられる。

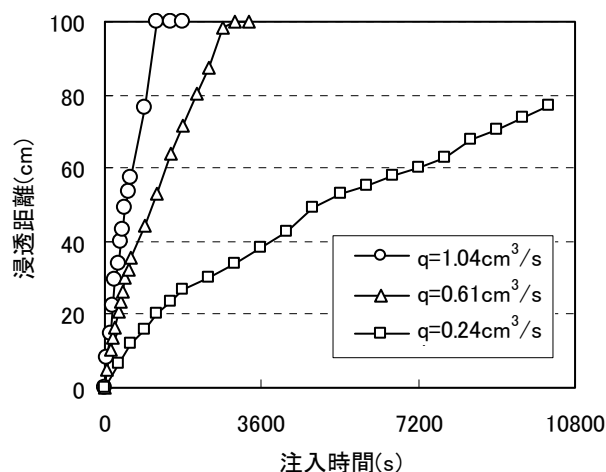


図 4.5 浸透距離の経時変化

(2)注入圧力

図 4.6に注入圧力の経時変化を示す。注入圧力はいずれの注入流量においても、注入時間の経過に伴い増加し、注入流量が多くなるほど高くなった。また、セメントミルクの浸透距離が 100cmに達した時点の注入流量 1.04, 0.61 cm^3/s における注入圧力は、それぞれ 270, 200kPaであった。

図 4.7に注入による模擬しらす地盤のかく乱状況を示す。注入流量 1.04 cm^3/s での注入において、注入圧力が 300～400kPaに達した時点で、模擬しらす地盤がかく乱され、セメントミルク溜まりが発生する状況が確認された。これは、注入圧力が地盤の限界注入速度を凌駕し、セメント粒子が地盤間隙に均一に浸透する浸透注入から、地盤を割裂して注入する割裂注入へ、注入形態が変化したことによるものと考えられる。実際の注入による施工において、しらす地盤は水の浸食に極めて弱いことから、注入前に限界注入速度を求め、その速度を超過しないよう管理することが重要と考えられる。

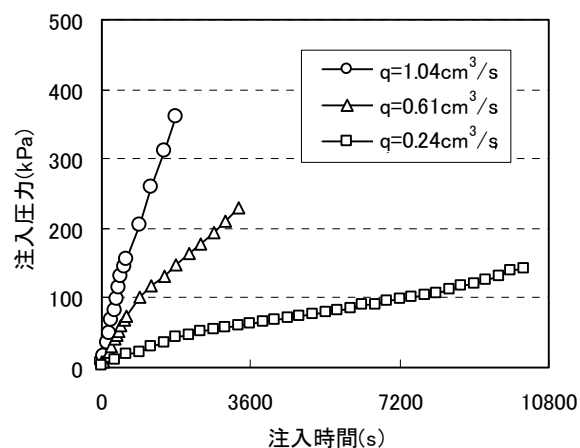


図 4.6 注入圧力の経時変化

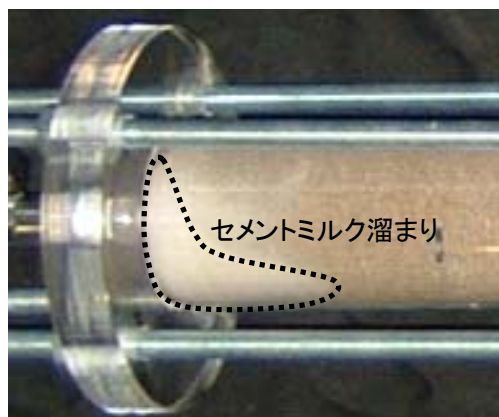


図 4.7 注入による模擬しらす地盤のかく乱状況

(3)有効間隙率

図 4.8に注入量から求めた模擬しらす地盤の有効間隙率を示す。有効間隙率は、セメントミルクを注入する注入流量と、排出側から排出される排出速度が等速度となった時点が有効間隙を満たした注入量であることから、式(4.1)により算出した。

$$n_e = \frac{Q}{V} = \frac{\int (q - q'(t)) dt}{V} \quad (4.1)$$

ここに、 n_e ：有効間隙率，

Q ：セメントミルク総注入量(cm^3)，

V ：モールドの容積(cm^3)，

q ：注入流量 (cm^3/s)，

$q'(t)$ ：排出流量 (cm^3/s)，

t ：注入時間(s)．

注入量から求めた有効間隙率は、注入流量が多くなるに従い大きくなり、模擬しらす地盤の間隙率 54%に対して約 50~70%であった。不飽和地盤は一般に、土粒子間で凝集力として作用するサクションが生じている。不飽和状態のしらすのサクションは普通砂より高く、測定条件にもよるが、実験に用いたしらす地盤のように含水比 15%程度では 50kPa程度の値を示す⁸⁾。このサクションよりも、注入圧力が上回ることにより、土粒子間を押し広げ、セメントミルクが浸透可能な浸透経路が増加する。したがって、図 4.6で示したとおり、注入流量が多いほど注入圧力が高くなっていたことから、注入流量に比例して有効間隙率が大きくなったと考えられる。また、注入流量 1.04, 0.61cm³/sにおいては、注入後数分で注入圧力が 50kPaに達しているのに対して、注入流量 0.24 cm³/sでは注入圧力の上昇が遅く、注入圧力 50kPa到達まで 40 分要していることから、この間は他の注入流量のケースより浸透経路が少なく目詰まりが多く生じていたと考えられる。

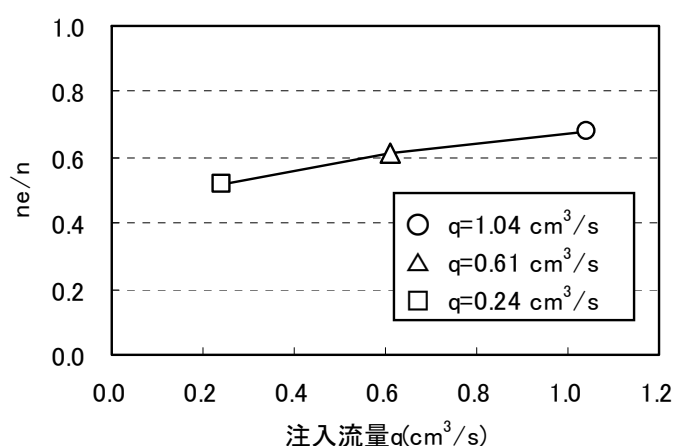


図 4.8 注入量から求めた模擬しらす地盤の有効間隙率

(4)注入による周辺地盤への pH の影響

図 4.9に排水のpHの経時変化を示す。いずれの注入流量においても、初めにろ過現象により、セメントミルクから脱水した水が排出され、続いて注入流量 1.04 および 0.61cm³/sはセメントミルクが排出された。これらのpHは前者が中性の 7 程度、後者がアルカリ性の 12 程度を示した。一般に、セメントは水和反応により水酸化カルシウムを生成することによって、水溶液中でCa²⁺を溶出し、アルカリ性を示す。しかしながら、脱水した水はほぼ中性を示していたことから、しらす粒子はCa²⁺などを表面に吸着あるいはイオン交換することにより中和していると考えられる。このしらす粒子の中和について検証する目的で、模擬しらす地盤にセメントミルクの注入と同様に水酸化カルシウム飽和溶液(pH=12.4)を注入流量 0.61cm³/sで注入し、排水のpHを測定した。図 4.10に水酸化カルシウム飽和溶液注入時の排水のpHを示す。

強アルカリ性を示す水酸化カルシウム飽和溶液を模擬しらす地盤に注入し、排出口から排出した排出水の pH は、セメントミルクの結果と同様に、pH7～8 程度まで低下した。したがって、しらす粒子は Ca^{2+} などを表面に吸着あるいはイオン交換などによる中和能力を有することが明らかとなった。

この結果から、実際のしらす地盤への注入において、セメント粒子が充填された改良領域はアルカリ性を示すが、注入の際にろ過現象により脱水した水が周辺地盤の地下水の pH や表層の植生に対する悪影響は極めて小さいと考えられる。

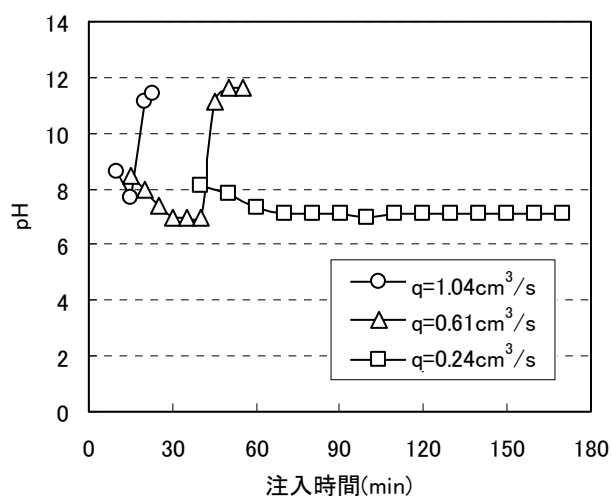


図 4.9 排水の pH の経時変化

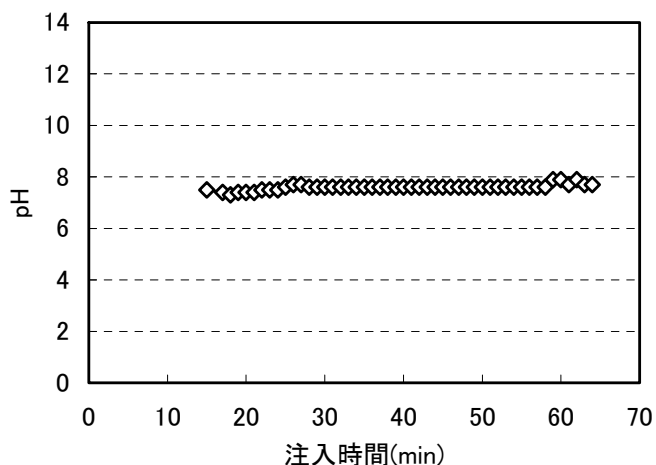


図 4.10 水酸化カルシウム飽和溶液注入時の排出水の pH (注入流量 $q=0.61 \text{ cm}^3/\text{s}$)

(5)地盤補強性（一軸圧縮強さ）

図 4.11に注入流量 $0.61\text{cm}^3/\text{s}$ で注入後の一軸圧縮強さを示す。一軸圧縮強さは養生期間の経過に伴い増加し、養生期間 28 日では注入孔からの距離が 90～100cm区間の圧縮強さがやや低い値を示しているものの、この区間以外は概ね 2000kPa 以上であり、十分な改良効果が得られた。また、注入孔からの距離と一軸圧縮強さの関係は、注入孔からの距離が 60cm までは一軸圧縮強さが増加する傾向を示し、60cm以降は逆に低下する傾向を示した。この要因は、注入孔からの距離が離れるほど、水とセメント粒子の分離が促進され、注入孔からの距離 60cm付近では、間隙中のセメント粒子濃度が高まり、徐々に目詰まりが発生し、この目詰まりがセメント粒子の距離 60cmより奥への浸透を阻害したためと考えられる。

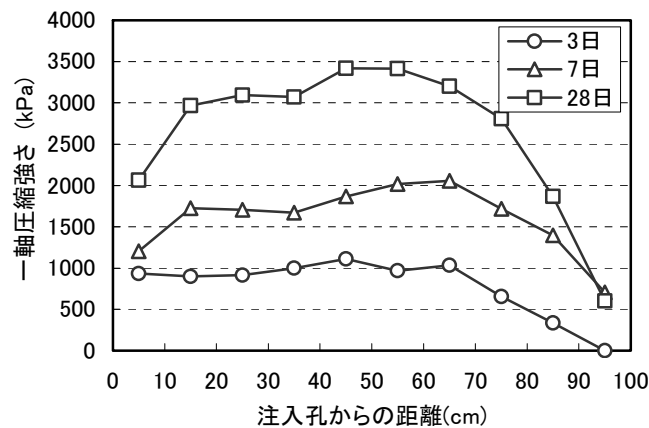


図 4.11 注入後の一軸圧縮強さ($q=0.61\text{cm}^3/\text{s}$)

(6)止水性（透水係数）

図 4.12に三軸圧縮試験装置を用いた変水位透水試験により求めた注入後の透水係数 ($q=0.61\text{cm}^3/\text{s}$)を示す。注入後の飽和透水係数は、模擬しらす地盤の初期飽和透水係数 $k=2.9 \times 10^{-5}\text{m/s}$ に対して、いずれの区間においても $10^{-6} \sim 10^{-7}\text{m/s}$ オーダーまで改良され、養生期間 7 日以降では、注入孔からの距離が 10～90cmの区間で透水性が非常に低いとされる 10^{-7}m/s オーダーまで改良された。浸透距離と透水係数の関係は、一軸圧縮強さの傾向と同様に両端の透水係数が大きく、内部の透水係数が小さい値を示した。これは、前述のとおり、セメント粒子濃度の不均一さに起因しているものと考えられる。

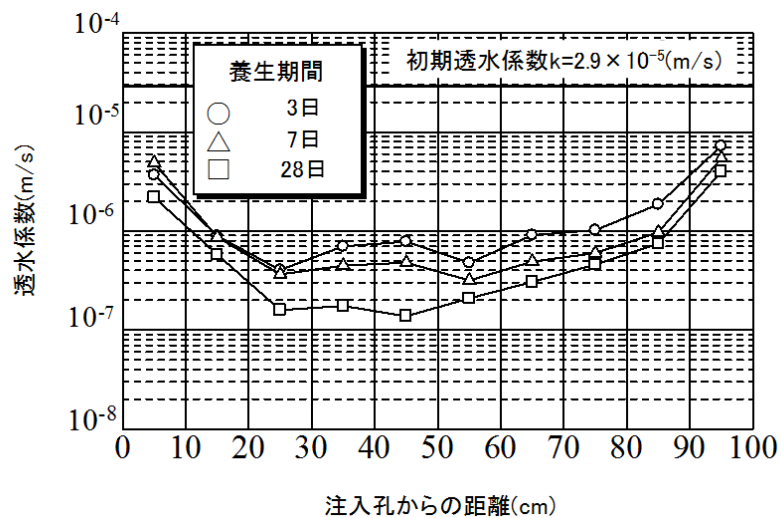


図 4.12 注入後の透水係数($q=0.61\text{cm}^3/\text{s}$)

4.2.5 試験結果および考察（軸対称注入）

(1) 注入圧力

図 4.13に注入流量 $10.7\text{cm}^3/\text{s}$ で注入時の注入圧力の経時変化を示す。なお、図中の凡例No.1, No.2 は同一試験を 2 回行ったそれぞれの結果を示す。軸対称注入時の注入圧力は、一次元注入時の最高注入圧 $100\sim 400\text{kPa}$ に比べ、極めて小さい 5kPa であった。この注入圧力が極めて小さい要因は、軸対称注入ではセメント粒子が 3 次元を縦横無尽に浸透することで目詰まりの発生が低減したことに加えて、注入流量が小さかったことによるものと考えられる。

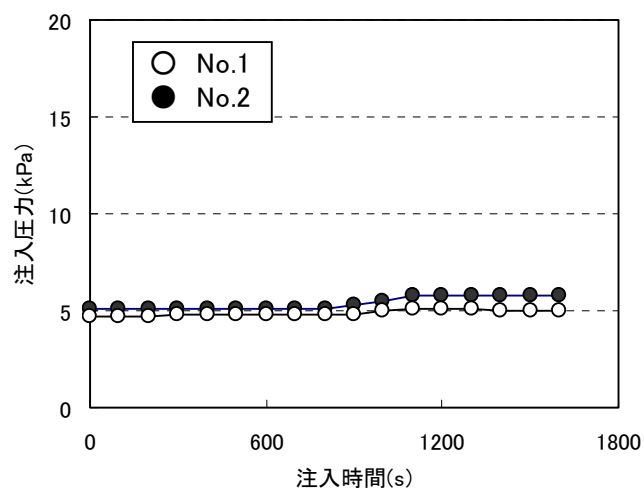


図 4.13 注入圧力の経時変化

(2)注入後の改良体

図 4.14に注入後の改良体を示す。注入から 3 日経過後の改良体において、注入孔からの改良半径は注入区間（高さ）で異なるものの、いずれも平均で約 15cmとなった。ここで、理論改良半径は注入量（注入流量×注入時間）から求めることができ、式(4.2)から式(4.3)を導出して算定した。

$$q \cdot t = \pi \cdot (R(t)^2 - r_o^2) \cdot L \cdot n_e \quad (4.2)$$

$$R(t) = \sqrt{\frac{q \cdot t}{\pi \cdot L \cdot n_e} + r_o^2} \quad (4.3)$$

ここに、 $R(t)$ ：改良半径(cm),

q ：注入流量(cm^3/s),

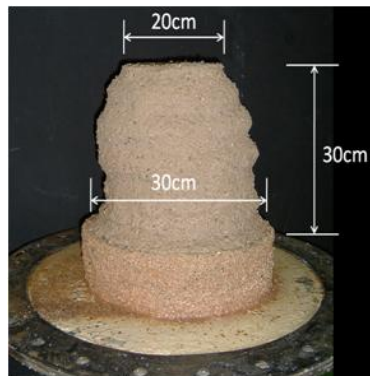
t ：注入時間(s),

L ：注入区間(cm),

n_e ：有効間隙率,

r_o ：注入管半径(cm).

改良体の改良半径と算定した理論改良半径を比較すると、改良半径はそれぞれ 15cm, 18.7cmであり、改良体の改良半径は理論改良半径の約 80%に留まった。実際の注入において、設計注入量(Q)は、改良対象土量に対して所定の注入率（35～40%程度）とする $Q=V \cdot \lambda \cdot j$ （対象土量×注入率×重要率）⁹⁾や、対象地盤の間隙率に対して所定の充填率とする $Q=V \cdot n_e \cdot \alpha \cdot (1+\beta)$ （対象土量×有効間隙率×充填率×損失ロス係数）¹⁰⁾から求められる。しらす地盤のような細粒分が多い地盤に対する注入において、セメント粒子はろ過現象により水だけが先行して奥へ浸透するため、実際の設計改良範囲よりも小さくなる。したがって、このような地盤に対してセメント系注入材を注入する場合、注入量を設計する際は、安全率を設定するなどの対策を講じる必要があると考えられる。



(a)改良体(No.1)



(b) 改良体(No.2)

図 4.14 注入後の改良体

(3)地盤補強性（一軸圧縮強さ）

図 4.15に供試体の一軸圧縮強さを示す。なお、図中の凡例No.1, No.2 は同一試験を 2 回行ったそれぞれの結果を示す。供試体の一軸圧縮強さは、注入から 7 日経過後において、注入孔からの距離に関係なく、いずれも 300kPa程度であった。また、養生期間の経過に伴い増加する傾向を示し、注入から 28 日経過後は 300～600kPa程度であった。一次元注入の一軸圧縮強さと比較すると、軸対称注入の一軸圧縮強さは一次元注入の 1/3～1/4 程度となった。一次元注入と軸対称注入の注入方法によって一軸圧縮強さが異なる点に関して、一次元注入は改良半径が 1mに達するまで注入を継続して地盤の間隙率以上の量（間隙量×1.55 倍）を注入したのに対して、軸対称注入では地盤の間隙率に相当する量（間隙量×1.00 倍）だけ注入しているため、注入量（単位セメント量）の違いにより結果が異なると考えられる。さらに、セメント系注入材の強度は、セメントミルクから水がろ過脱水し、初期配合の水セメント比よりも低い水セメント比のセメントミルクが硬化することにより発現し、脱水状態（水セメント比）によっても初期の強度が異なる。軸対称注入では、一次元注入に比べて、注入圧力が極めて低く、目詰まりによる脱水量が少なかったことも異なる結果を示した要因の一つと考えられる。

このように考えると、斜面等の補強のための設計は、軸対称の結果を用いる方が安全側の設計になる。

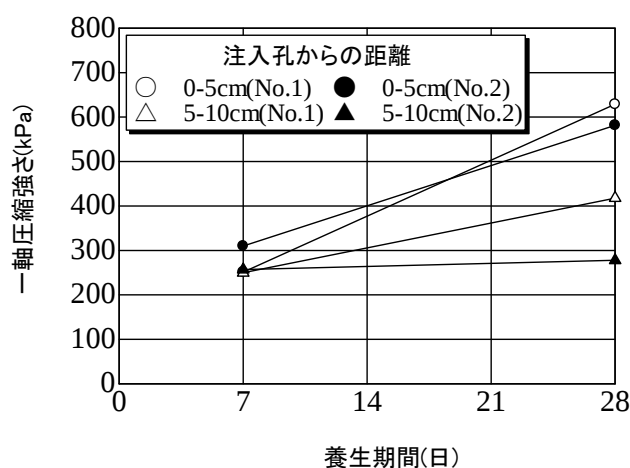


図 4.15 供試体の一軸圧縮強さ

(4) 止水性（透水係数）

図 4.16 に三軸圧縮試験装置を用いた変水位透水試験により求めた供試体の飽和透水係数を示す。養生期間 7 日の透水係数は注入孔からの距離に依らず、いずれも $5.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 程度となり、養生期間 28 日の透水係数は注入孔からの距離 0-5cm(No.1)を除き、いずれも $3.0 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 程度となった。初期飽和透水係数 $k=2.9 \times 10^{-5} \text{m/s}$ に対して、注入後は養生期間 7 および 28 日経過後において 10^{-6} オーダーまで低下した。地下水位以上の不飽和地盤への注入において、地盤の間隙に充填されたセメントミルク中の余剰な水は、注入後には次第に排出され、地盤の飽和度は飽和状態から不飽和状態へ推移する。したがって、注入後のしらす地盤は不飽和となることから、実際の透水係数は、ここで示した飽和透水係数よりも小さい値を示すと考えられる。

一次元注入の透水係数と比較すると、同区間（注入孔からの距離 0～10cm）の改良効果と同程度の 10^{-6} オーダーであったが、一次元注入の注入孔からの距離が 10cm 以降の透水係数と比較すると 1 オーダー大きい値を示した。この注入方法の違いによる透水係数の差は、前述したとおり一次元注入と軸対称注入では注入量が異なり、この影響が大きい。セメント系注入材においては、セメント粒子が土粒子への付着や間隙内での目詰まりにより、間隙量を減少させ、次にセメントが水和して水和物を生成することでさらに間隙量を減少させることによって透水性の低減に至る。したがって、注入後の透水係数は、間隙に対するセメント粒子の濃度が支配的要因であることから、注入量の異なる一次元注入と軸対称注入で透水係数の値に差が生じたと考えられる。

一次元注入後の透水係数は、末端部を除いて注入孔近傍より距離が離れた地点の方が小さくなっていることから、軸対称注入においても、改良範囲を大きくした場合、注入孔を中心に外側ほど透水係数が小さい改良体が得られと考えられる。一般的に実際の注入工事において、注入孔のピッチは 1m 程度で¹⁰⁾、未注入部分が極力発生しないように配置するような施工が重要である。

また、セメント粒子の充填率が多くなるほど透水係数は小さくなる。したがって、豪雨時の斜面崩壊は雨水が浸透し、飽和度が上昇することに起因していることから、セメントミルクの充填率を上げることや本研究で注入した水セメント比(W/C=1000%)より低い配合を注入することでさらに斜面安定性を高めることができると考えられる。

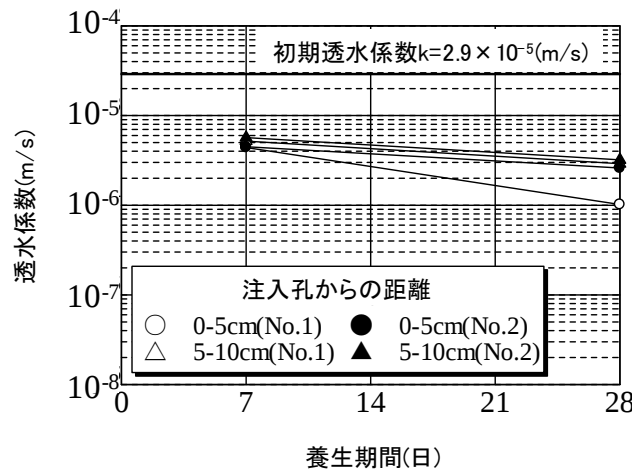


図 4.16 供試体の透水係数

(5) 斜面の安定性

豪雨時の斜面崩壊の多くは、すべり面が浅く、非円弧すべり面であり、このような非円弧すべり面の安全率の計算には、簡便法および簡易Janbu法が用いられている¹¹⁾。ここでは、式(4.4)に示す簡易Janbu法で安全率を算定した。

$$F = \frac{c' + (\gamma h \cos^2 \alpha' - u) \tan \phi'}{\gamma h \sin \alpha' \cos \alpha'} \quad (4.4)$$

ここに、F：安全率、

c' ：粘着力(kN/m²),

γ ：土の単位体積重量(kN/m³),

h ：すべり層の高さ(m),

α' ：斜面勾配(°),

u ：すべり面での間隙水圧(kN/m²),

ϕ' ：有効内部摩擦角(°).

すべり層の高さおよび斜面勾配は、過去に崩壊を起こしたしらす斜面の報告事例¹²⁾において、高さ 30～60m、斜面勾配 40～49° の斜面で崩壊が多いことから、この値を元に決定し、4 パターンの斜面について安定解析を行った。表 4.2に斜面安定解析に用いたしらす斜面のすべり層高さ h と斜面勾配 α' を示す。改良前の各パラメータはしらすの土質定数¹³⁾を用いた。また、改良後においては、改良体から採取した不飽和状態の供試体を用いて、土の湿潤単位体積重量 γ_t は、注入後の実測値を用い、粘着力 c' および有効内部摩擦角 ϕ'

は一軸圧縮強さおよび一軸圧縮強さ試験後の供試体破壊面角（図 4.17参照）を用いて，式 (4.5)，(4.6)より求めた。なお，雨水が浸透して粘着力の低下によって起こる表層すべりを想定していることから，すべり面での間隙水圧は考慮しないこととした。

表 4.2 想定したしらす斜面

	すべり層の高さ $h(\text{m})$	斜面勾配 $\alpha'(^{\circ})$
Case1	30	40
Case2	30	49
Case3	60	40
Case4	60	49

$$\phi' = 2\beta - 90^{\circ} \quad (4.5)$$

$$c' = \frac{q_u}{2} \tan\left(45^{\circ} - \frac{\phi'}{2}\right) \quad (4.6)$$

ここに， β ：破壊面角（ $^{\circ}$ ），

q_u ：一軸圧縮強さ(kPa)。

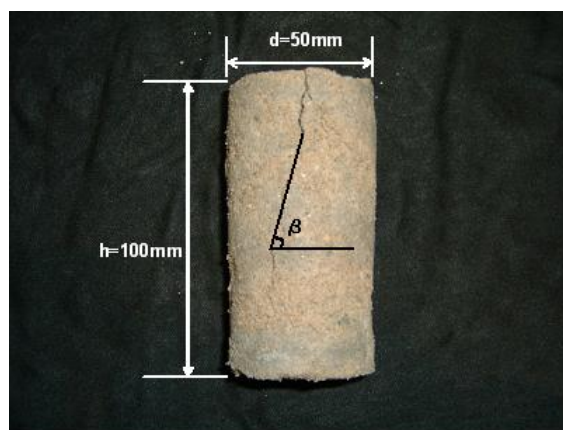


図 4.17 供試体破壊面角

表 4.3に安全率算定結果を示す。過去に崩壊を起こしたしらす斜面の安全率 F は、改良前はいずれにおいても斜面崩壊が懸念される $F=1.0$ 以下であるのに対して、注入から 28 日経過後の安全率 F は 1.33～2.35 となった。斜面における安全率 F は経験的に 1.2 以上であれば十分であるとされていることから、注入により斜面は、設計時の計画安全率が 1.2 以上となる場合が多くなることがわかった。この様に、水セメント比が 1000%という、極めて少ないセメント量の注入であっても、注入による改良後の安全率は、この計画安全率を上回る値を示し、斜面安定性が向上している。したがって、極超微粒子セメントの注入は、斜面崩壊防止対策に有効な工法と考えられる。

注入による斜面の安定化において、すべり面が深く改良対象土量が多くなる場合は、改良後の強度によっては、自重の増加による安定性の低下が懸念される。したがって、実際のしらす斜面の安定化を図る際は、改良範囲をすべり面となりうる深さの部分に限定し、自重の増加が最小限となるよう設計することや自重の増加に耐えうる強度に設計するなどして、自重の増加や改良強度を考慮する必要がある。

また、ここで用いた粘着力 c' と有効内部摩擦角 ϕ' は、通常飽和粘性土のせん断強さを求める簡易的な方法である一軸圧縮試験で得られた結果から算出した非排水条件の値を用いた。注入した改良体の安定解析の精度向上には、三軸圧縮試験などから改良体のせん断特性について検討することが必要である。

表 4.3 安定率算定結果

	養生 期間 (日)	注入孔 からの 距離 $R(\text{cm})$	すべり層 高さ $h(\text{m})$	斜面 勾配 $\alpha'(^{\circ})$	湿潤単位体 積重量 $\gamma_t (\text{kN/m}^3)$	破壊 面角 $\beta'(^{\circ})$	有効内部 摩擦角 ϕ'	一軸圧縮 強さ $q_u(\text{kPa})$	粘着力 $c'(\text{kN/m}^2)$	安全率 F
改良前	—	—	30	40	12.7	—	38	—	0	0.93
				49						0.68
			60	40						0.93
				49						0.68
				49						0.68
改良後	7	0-5	30	40	15.0	70	50	300	54.6	1.67
				49						1.28
			60	40						1.54
				49						1.16
		5-10	30	40	14.5	65	40	296	69.0	1.32
				49						1.05
			60	40						1.16
				49						0.89
	28	0-5	30	40	14.7	70	50	696	126.6	2.00
				49						1.61
			60	40						1.71
				49						1.33
		5-10	30	40	14.5	75	60	457	61.2	2.35
				49						1.79
			60	40						2.21
				49						1.65

4.2.6 豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止対策への適用性

豪雨時に斜面崩壊しやすい鹿児島県のしらす材料に対して、極超微粒子セメントを注入することで、上述したようにしらす斜面や堤防への水の浸入と浸食を防止できる地盤へと改良できる。

斜面崩壊や堤防の決壊防止対策の基本は地盤への雨水の浸透を極力抑制し、地盤中に浸透した雨水は速やかに排水することが重要とされている。図 4.18～4.19 に示すように、極超微粒子セメントを地盤内部の隙間に注入することによって、雨水の浸透抑制と粘着力を改善するとともに、浸透した雨水を排水するドレーンを設けた対策工法である。また、この表層への注入による対策工法は、地盤をかく乱することなく改良できることから、植生や生態系への悪影響を小さくできる。このような工法とすることで豪雨時の斜面崩壊や堤防の決壊防止対策に適用できると考えられる。

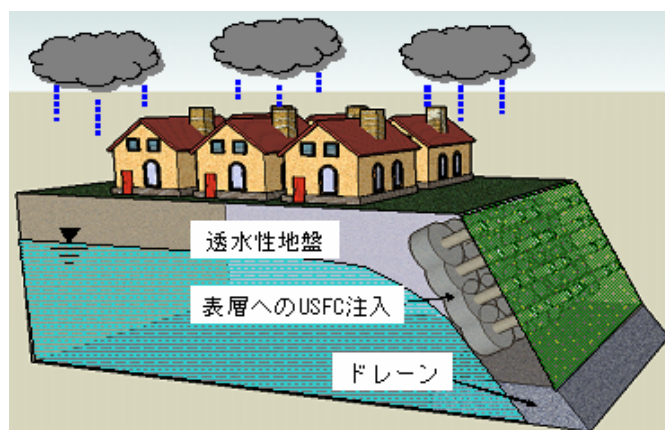


図 4.18 斜面崩壊対策工法概念図

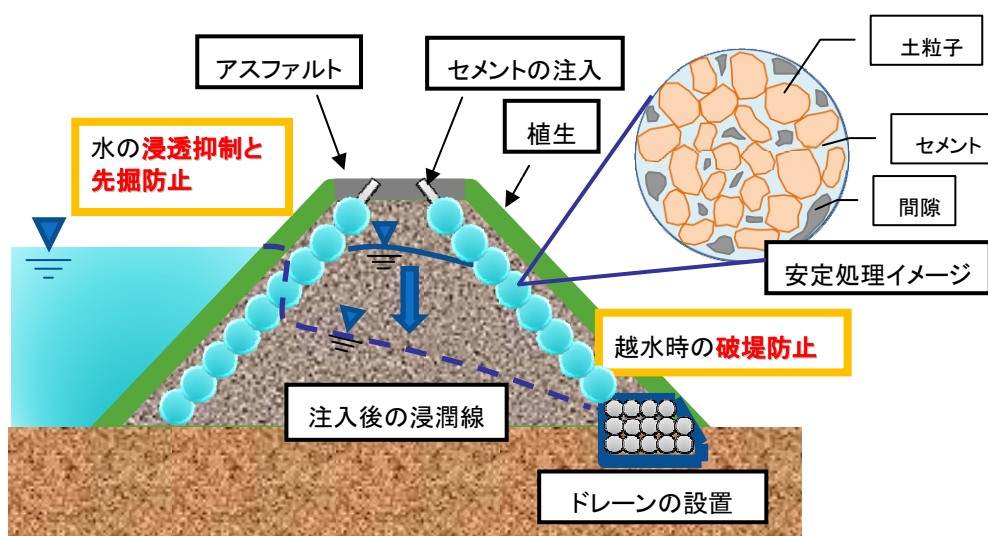


図 4.19 注入による堤防の強化対策工法概念図

4.3 地震時の液状化対策^{14),15),16)}

我が国の国土は急峻かつ狭小であることから、人口は軟弱地盤の平野部や埋め立て造成地に密集している。また、地形・気候条件から地下水位は常に高い状態にある。このような条件下では、地震発生時に地盤が液状化し、構造物の沈下・倒壊やライフラインの途絶など甚大な被害に至る。地震が頻発する中、構造物直下の液状化対策が急務な課題となっている。都市部に分布する砂質材料と実地盤を対象に、極超微粒子セメント(USFC)を使用して注入実験を行い、液状化対策への適用可能性と有効性について検討を行った。

4.3.1 都市部に分布する砂質土への一次注入試験

(1)室内一次注入試験方法

図 4.20に東京都内の地下から採取した砂質土の粒径加積曲線を示す。また、使用するセメントも併記する。表 4.4にグラウタビリティ比^{17),18)}による浸透可否検討を示す。表 4.4より、砂質土CおよびDは従来の超微粒子セメントでも浸透可能と判断できることから、実験に用いる砂質土は細粒分含有率 17.2%の砂質土Aおよび 9.3%の砂質土Bとした。表 4.5に試験砂層の物性を示す。試験砂層はφ5.5×25cmの亚克力モールドにそれぞれの砂質土を最適含水比で締め固めて作成した。図 4.21に一次元注入試験装置概要図を示す。注入材は極超微粒子セメントと比較用に超微粒子セメントを用いた。注入試験は作成した砂層に注水して飽和した後、W/C=1000%および 400%のセメントスラリーを注入圧 0.2MPaで注入した。注入後は浸透距離、圧縮強さおよび透水係数を測定した。

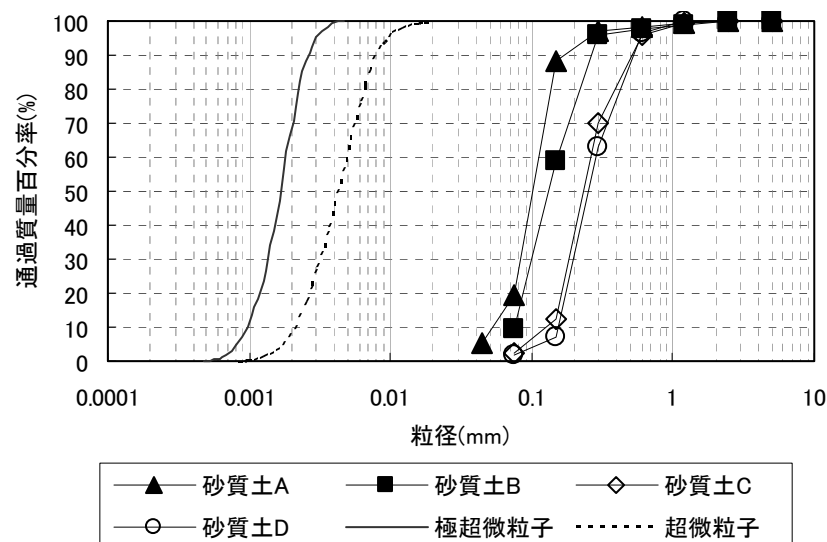


図 4.20 砂質土の粒径加積曲線

表 4.4 グラウタビリティー比による浸透可否検討

	砂質土の D_{15} (mm)	超微粒子(SFC) の G_{85} (mm)	極超微粒子(USFC) の G_{85} (mm)	GR= D_{15}/G_{85}	
				SFC	USFC
砂質土 A	0.065	0.0084	0.0024	8	27
砂質土 B	0.084			10	35
砂質土 C	0.156			19	65
砂質土 D	0.170			20	71

表 4.5 試験砂層の物性

砂質材料	細粒分 含有率 (%)	最適含水比		間隙率 (%)	透水係数 (m/s)
		含水比(%)	乾燥密度 (g/cm ³)		
砂質土 A	17.2	23.6	1.29	52	$2 \sim 4 \times 10^{-6}$
砂質土 B	9.3	10.6	1.27	55	$3 \sim 5 \times 10^{-5}$

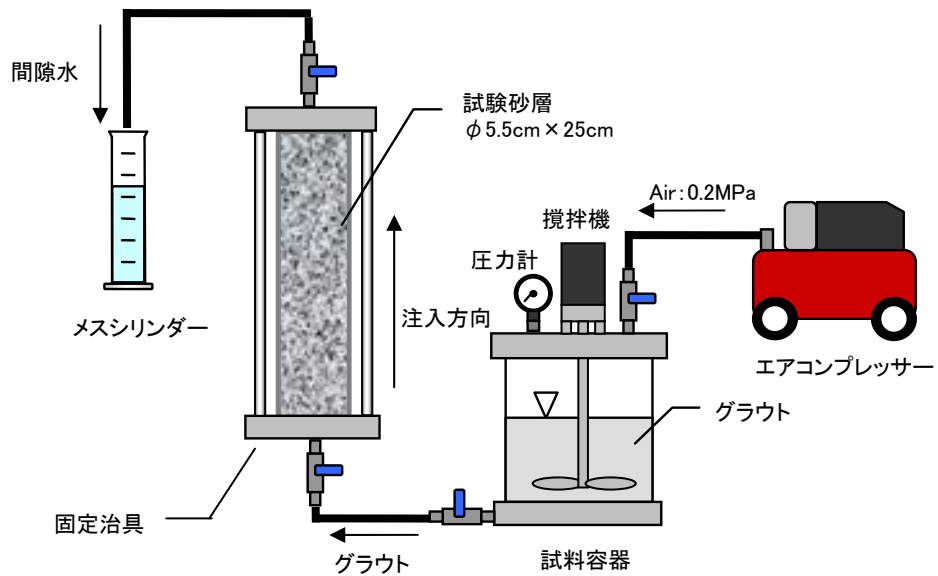


図 4.21 一次元注入試験装置概要図

(2)試験結果および考察（室内一次注入試験）

図 4.22にセメントの浸透距離を示す。透水係数が 10^{-6}m/s オーダーの砂質土Aへの注入において、極超微粒子セメントの浸透距離はW/C=1000%が 25cmに達しセメントスラリーが排出されたものの、W/C=400%では 15cmであった。W/C=400%の浸透距離の低下は、水セメント比が小さいほどセメント濃度が高まる配合であり、このような透水係数が小さく間隙径も小さい地盤ではろ過現象を生じやすく、セメント粒子の目詰まりが要因と考えられる。

透水係数が 10^{-5}m/s オーダーの砂質土 B への注入において、極超微粒子セメントの浸透距離は、いずれの水セメント比においても 25cm に達し、セメントスラリーの排出が認められた。

一方、従来の超微粒子セメントは注入開始から直ぐに注入量が低下し、その浸透距離は 6cmに留まった。従来の超微粒子セメントのグラウタビリティー比による浸透可否判定において、砂質土Bは浸透不可となる。また、透水係数が 10^{-5}m/s オーダー、細粒分含有率が多く含まれる地盤への浸透は困難とされていることから、既往の実験結果¹⁹⁾と同様に透水係数が $3\sim 5\times 10^{-5}\text{m/s}$ 、細粒分含有率が 9.3%である砂質土Bは従来の超微粒子セメントでは浸透が困難であることが確認された。

表 4.6に注入後の改良効果を示す。表 4.6より極超微粒子セメントを砂質土Bに注入した結果、圧縮強さは材齢の経過に伴い増加し、注入から 7 日経過後は 3000kN/m^2 であった。透水係数は注入前が 10^{-5}m/s オーダーであったのに対して、注入後は $9.8\times 10^{-9}\text{m/s}$ となり、実用上不透水として扱われる程度まで改良された。

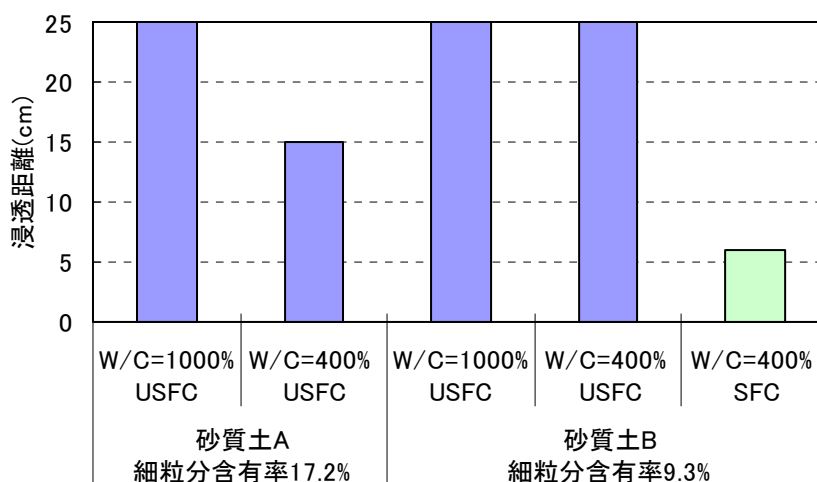


図 4.22 セメントの浸透距離

表 4.6 注入後の改良効果（砂質土 B）

	圧縮強さ (kN/m ²)		透水係数 (m/s)
	3 日	7 日	
注入前	—	—	$3 \sim 5 \times 10^{-5}$
注入後	1000	3000	9.8×10^{-9}

4.3.2 現場注入試験

(1)現場注入試験方法

図 4.23に現場地盤の粒径加積曲線を示す。また、各種セメントの粒径加積曲線も併記する。現場注入試験の対象地盤は千葉県の下水位GL-1.5m以下の図 4.23に示す細粒分含有率 2～3%の礫まじり中砂～細砂の砂質土とした。対象地盤の物性はN値 17～27, 間隙率 36%, 透水係数 4.7×10^{-5} m/sであった。表 4.7に注入試験条件を示す。注入試験条件は表 4.7に示すようにW/C=400, 800, 1200%の 3 配合とし、注入速度qは 15L/minを基本とし、W/C=800のみ 20L/minの注入速度も実施した。設計改良径はφ 2mとし、注入量は式(4.7)から算出した。図 4.24に注入方法の概略図を示す。注入試験は注入区間長L=1.0 とし、φ 4cmの塩化ビニル製注入管からセメントスラリーを所定の注入速度で地盤内に注入した。なお、注入管には地表へのリーク防止を目的に長さ 1mの布パッカーを設置した。注入後は注入孔からの距離 0.25,0.50 および 0.75mでコアを採取し、一軸圧縮強さと透水試験を実施した。また、原位置での掘削から注入後の改良径を測定した。

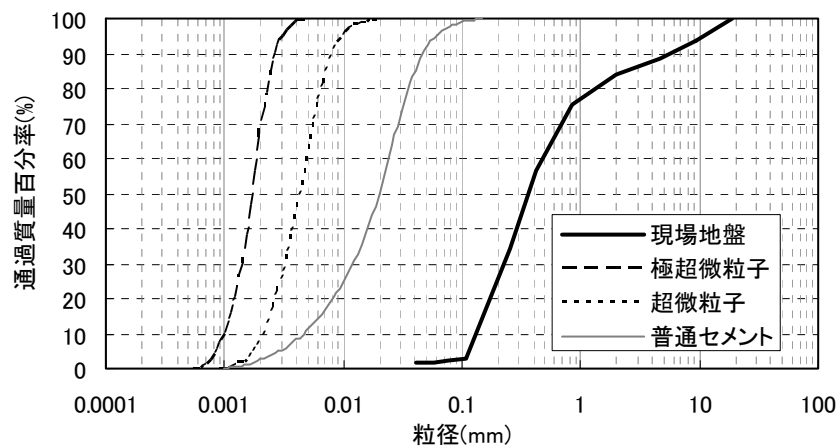


図 4.23 現場地盤の粒径加積曲線

表 4.7 注入試験条件

実験ケース	W/C (%)	注入速度 (L/min)	充填率 α (%)
Case1	400	15	125
Case2	800	15	
Case3	800	20	
Case4	1200	15	

$$Q = V \times n \times \alpha = \left(\frac{4 \times \pi \times 1.0^3}{3} \right) \times 0.36 \times 1.25 = 1.88 \quad (4.7)$$

ここに、 Q ：設計注入量(m^3),

V ：改良対象土量(m^3),

n ：間隙率(%),

α ：充填率(%).

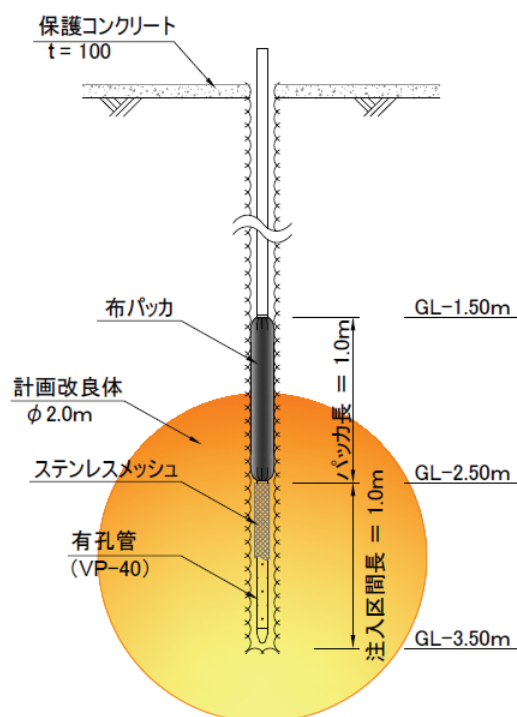


図 4.24 注入方法の概略図

(2)試験結果と考察（現場注入試験）

図 4.25に改良体の一軸圧縮強さを示す。図 4.25に示すように、いずれの水セメント比においても注入孔からの距離による顕著な強度差が無く、セメント粒子が均質に浸透していると考えられる。Case1 (W/C=400%) の圧縮強さは注入孔からの距離 0.75mの位置で約 7000kN/m²、Case2～4(W/C=800～1200%)では約 3000～4000 kN/m² の高い強度発現性が確認された。また、透水係数は改良前の 4.7×10^{-5} m/s に対して、注入後はCase1 で 1×10^{-10} ～ 1×10^{-8} m/s, Case2 で 10^{-8} ～ 1×10^{-7} m/s であり、2～5 オーダーの低減効果が認められた。図 4.26にCase1 の注入後の改良体を例示する。設計改良径 $\phi 2.0$ m に対して、注入後の改良径はCase1(W/C=400%)およびCase3(W/C=800, 20L/min)で $\phi 1.9 \sim 2.0$ m, Case2 で $\phi 1.8 \sim 1.9$ m, Case4(W/C=1200)で $\phi 1.5 \sim 1.6$ m であり、水セメント比が大きくなるほど改良径は小さくなるものの、概ね設計改良径どおりの改良体が得られた。水セメント比の増加に伴い改良径が小さくなる要因として、セメント粒子は浸透時に土粒子への付着や間隙に拘束されることにより粒子量が徐々に減少していくことから、セメント粒子量の少ない配合ではこれらのセメント量の減少により、注入孔からの到達距離が短くなったものと考えられる。

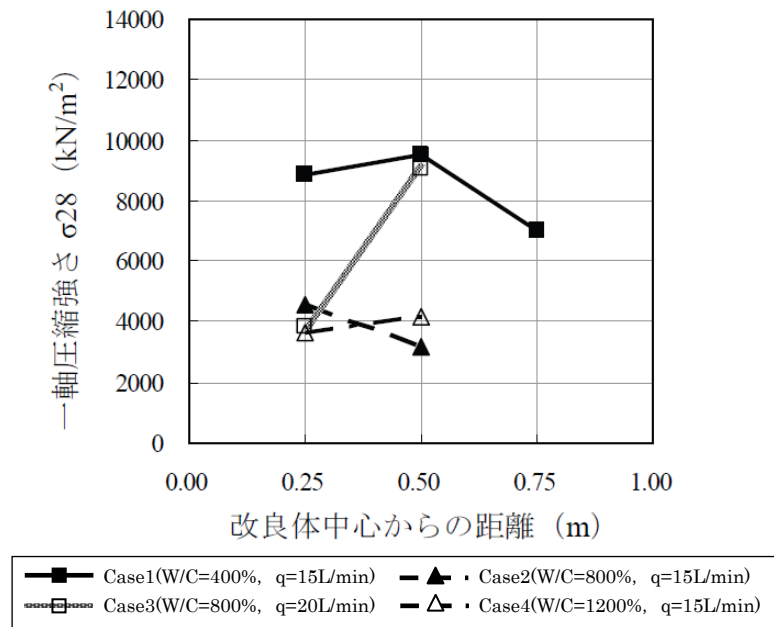


図 4.25 改良体の一軸圧縮強さ

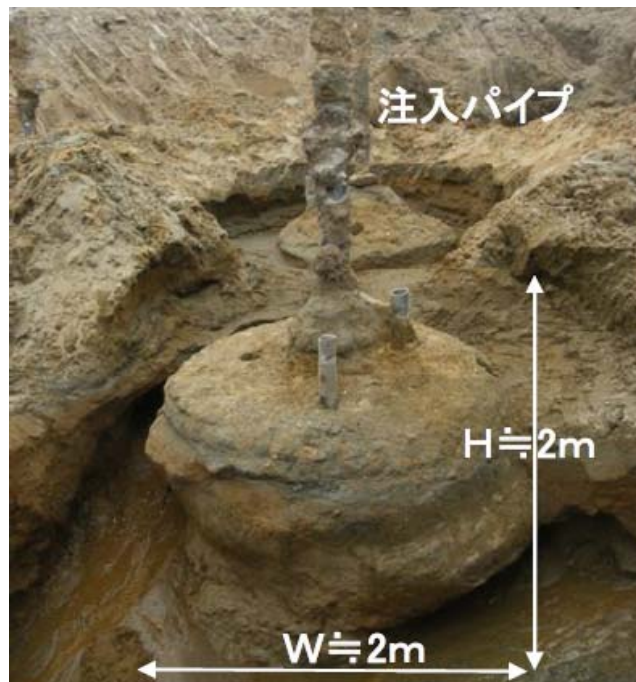


図 4.26 注入後の改良体 (Case1 : W/C=400%)

4.3.3 地震時の液状化対策への適用性

都市部に分布する砂質土地盤に極超微粒子セメントを注入することで、既設構造物直下の液状化しやすい地盤を液状化対策や耐震補強に十分な強度と変形し難い地盤に改良することができる。また、セメント系であることから、構造物の供用期間中は劣化することなく十分な改良効果が得られる。

図 4.27に液状化対策工法の概念図を示す。液状化が発生すると交通やライフラインの途絶、建物の傾斜などの被害が発生する²⁰⁾。極超微粒子セメントを使用した注入工法は、避難経路や救援物資の輸送経路や避難所となる重要構造物の基礎地盤補強やライフラインである地下埋設物の浮き上がり防止などに適用できると考えられる。

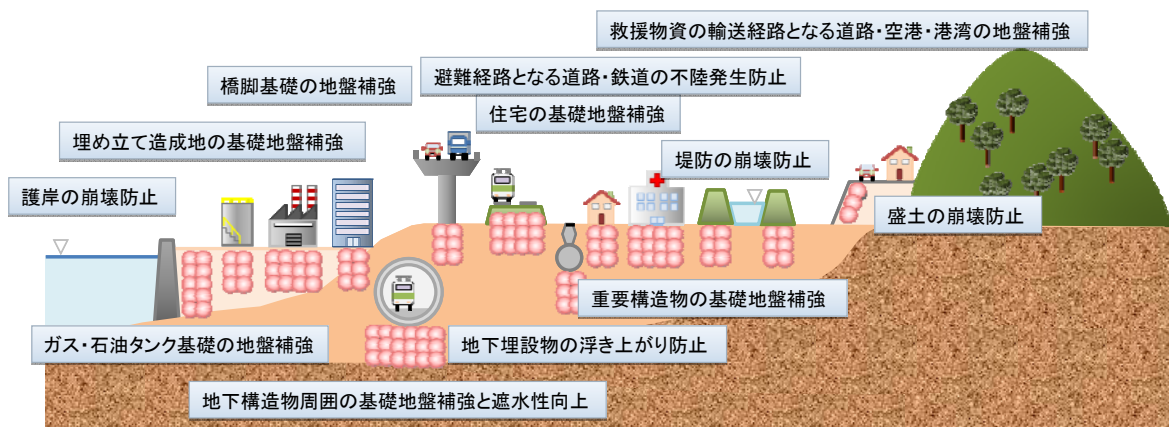


図 4.27 液状化対策工法概念図

4.4 亀裂性岩盤からの湧水対策・有害物質漏洩防止対策¹⁴⁾

エネルギー関連の岩盤トンネル内への地下貯層分野において、大量の湧水はトンネルの掘削工事に支障を来すほか、排水処理コストの増加、周辺地盤の地下水の低下による地盤沈下が発生する。また、この亀裂は有害物質の漏洩経路となり地下水への拡散を招く。したがって、亀裂にセメントを充填して遮水することが重要となる。模擬亀裂性岩盤を対象に極超微粒子セメントを注入し、亀裂への浸透性について評価した。

4.4.1 注入試験方法

図 4.28に円柱スリット概要図を、図 4.29 に模擬亀裂性岩盤注入試験装置を示す。注入試験装置は図 4.28に示す亀裂幅が 20,30 および 50 μm の 3 水準で流路幅 38mm, 流路長 50mm の円柱スリットを図 4.29 に示すスリット外管に挿入した装置に、セメントスラリーが試料容器からスリット内に注入される仕様とした。スリット上部には亚克力モールドを設置し、スリットを通過したセメントスラリー量と等しい量の水が排出されるよう亚克力モールドに予め水を充填し、排出口には計測用にメスシリンダーと電子天秤を設置した。セメントスラリーの配合はW/C=400,600,800 および 1000%とし、セメントは極超微粒子セメントと比較用に従来の超微粒子セメントを用いた。注入試験は注入圧 0.3MPa, 設計注入量 500mlの条件で亀裂幅が 20,30 および 50 μm のスリットにセメントスラリーを注入し、排出される水の量を計測して通過量を求めた。

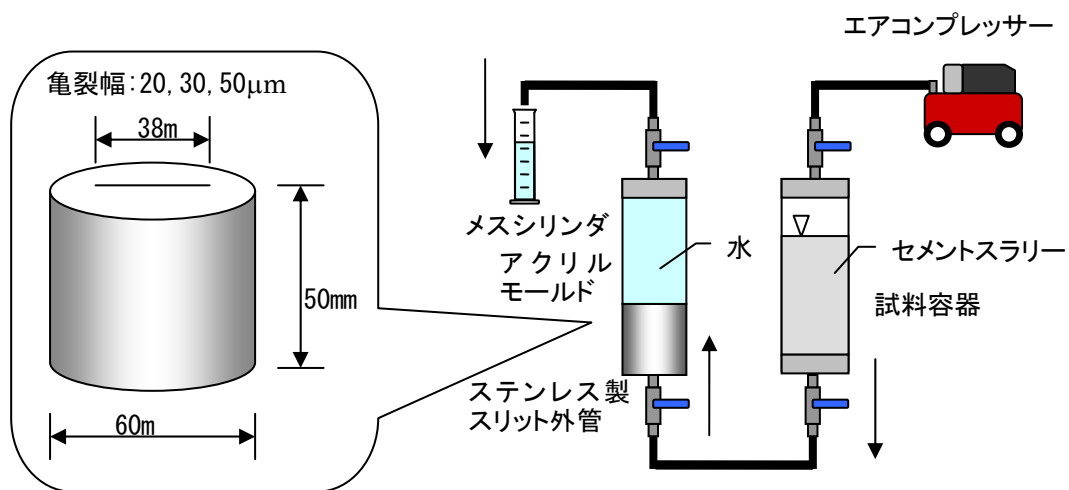


図 4.28 円柱スリット概要図

図 4.29 模擬亀裂性岩盤注入試験装置概要図

4.4.2 試験結果および考察

図 4.30にセメントスラリーの亀裂通過量を, 図 4.31に注入状況を示す。図 4.30および図 4.31より亀裂幅 $20\mu\text{m}$ において, 極超微粒子セメントは他の亀裂幅と比較し, セメントスラリーの通過速度は顕著に遅くなっているものの, 経過時間に比例して通過量が増加していることから, セメント粒子は亀裂開口部で目詰まりすることなく, 通過していると考えられる。一方, 従来の超微粒子セメントはステンレス製スリット上部のアクリルモールド内に亀裂を通過したセメントミルクはほとんど認められず, 通過量も注入から 10 分経過時点から増加していないことから, 亀裂をほとんど通過することなく, 亀裂開口部で目詰まりし, ろ過されているものと考えられる。

図 4.32に水セメント比が浸透性に及ぼす影響を示す。図 4.32より $W/C=1000\%$ のセメントスラリーは亀裂幅 $20\mu\text{m}$ を通過するものの, 水セメント比が小さくなるほど通過量が減少した。この通過量の減少は図 4.33に示すように多量のセメント粒子が微少亀裂に一斉に流入することによって, 亀裂開口部で粒子が架橋し目詰まりを発生したものと考えられる。このような微少亀裂への注入においては, 水セメント比を大きくし, 十分な粒子間距離を確保することで目詰まりすることなく亀裂に充填できる。

亀裂性岩盤への浸透可否に関しては割れ目幅(w)と注入材の粒径加積曲線における 85% 粒径(G_{85})との比が $w/G_{85}>3\sim 10$ であれば浸透可能とされている^{21),22),23)}。この式から, 85% 粒径が $2.4\mu\text{m}$ の極超微粒子セメントが浸透可能な割れ目幅は $7.2\sim 24\mu\text{m}$ となる。同様に 85%粒径が $8.4\mu\text{m}$ の従来の超微粒子セメントは $25.2\sim 84\mu\text{m}$ となる。亀裂幅 $20\mu\text{m}$ への注入結果では, 極超微粒子セメントは亀裂を通過し, 従来の超微粒子セメントは通過しなかったことから, 既往の実験結果と比較すると概ね一致していることが確認された。

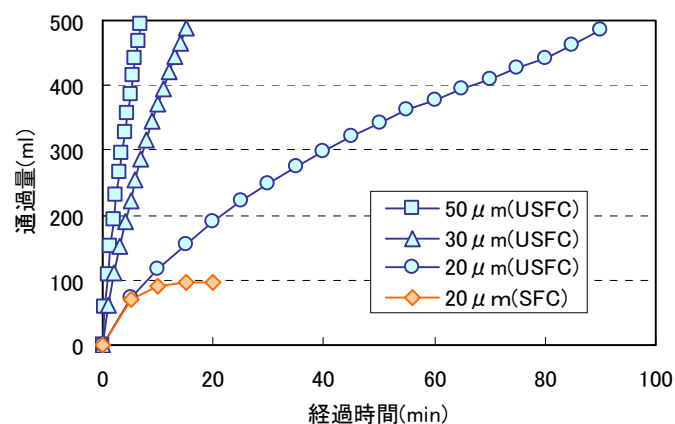
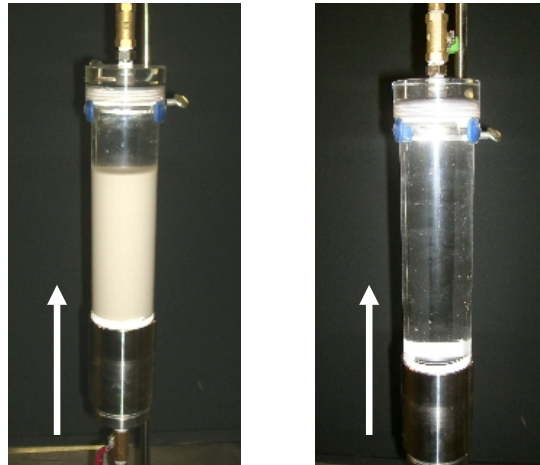


図 4.30 セメントスラリーの亀裂通過量 ($W/C=1000\%$)



(a)極超微粒子セメント (b)超微粒子セメント

図 4.31 注入状況 (W/C=1000%,亀裂幅 20 μ m)

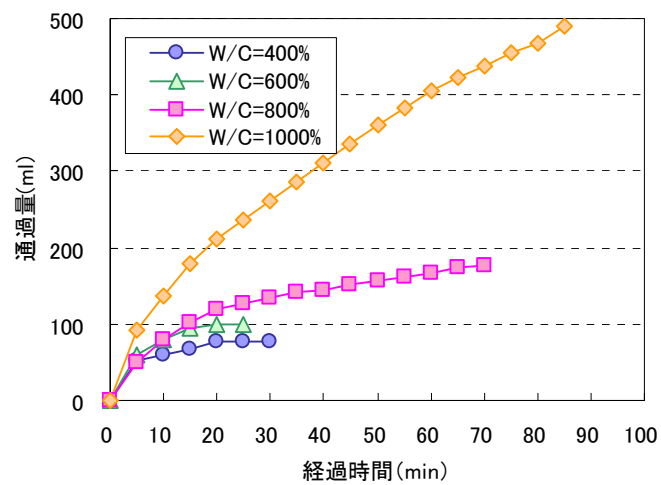


図 4.32 水セメント比が浸透性に及ぼす影響 (亀裂幅 20 μ m)

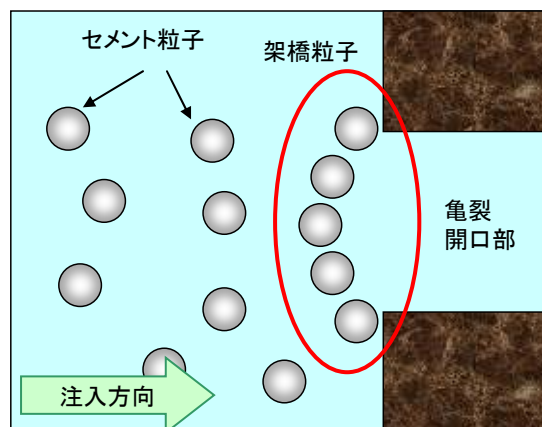


図 4.33 亀裂開口部での目詰まり概念図

4.4.3 亀裂性岩盤からの湧水対策・有害物質漏洩防止対策への適用性

従来の超微粒子セメントでは注入不可能な亀裂幅 $20\mu\text{m}$ の模擬亀裂性岩盤に対して極超微粒子セメントは注入可能である。また、超微粒子セメントの粒径では浸透不可能な微少な割れ目が多数ある亀裂面からの湧水に遭遇することがある。極超微粒子セメントは、このような亀裂面からの湧水対策および漏洩防止対策に適用できると考えられる。

4.5 まとめと今後の課題

4.5.1 まとめ

豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止，地震時の液状化防止，トンネル掘削時の湧水対策および地盤への有害物質の漏洩防止を目的に，極超微粒子セメントを不飽和地盤，飽和地盤，亀裂岩盤に注入してその適用性について検討した。本研究で得られた成果を以下に列挙する。

- 1)豪雨時に斜面崩壊しやすい不飽和しらす地盤に，ここで開発した極超微粒子セメントを注入して低い注入圧力で 1m 浸透注入できることがわかった。また，その注入試験により一軸圧縮強さは 2000kPa となり，初期の透水係数が $1.0\times 10^{-5}\text{m/s}$ のしらす地盤が $1.0\times 10^{-7}\text{m/s}$ にその値が低下し，しらす斜面や堤防への水の浸入や浸食を防止できる地盤へと改良できることがわかった。
- 2)都市部に分布する砂質材料を対象として，注入特性を室内実験で実施し，従来の超微粒子セメントでも注入が不可能であった地盤に対しても極超微粒子セメントは容易に注入でき，その一軸圧縮強さは 3000kN/m^2 となり，この強度は溶液系の薬液注入では得られない強度であることがわかった。
- 3)液状化を引き起こしやすい沖積層の飽和砂質土地盤に設計改良径と同等の 2m の球状改良体が得られることがわかった。そして，液状化対策や耐震補強に十分な強度発現性が得られることがわかった。
- 4)極めて微少な割れ目幅 $20\mu\text{m}$ の模擬亀裂性岩盤への注入可能性を示した。

以上のことから，極超微粒子セメントによる注入工法は豪雨時の斜面崩壊防止，地震時の液状化防止，トンネル掘削時の湧水対策および地盤への有害物質の漏洩防止を目的とした対策工法に有効であると考えられる。

4.5.2 今後の課題

今後の課題として以下の4項目を実施する予定である。

- (1) 砂質地盤への注入により、その一軸圧縮強さを増加するが、せん断や引っ張り強度に対しては期待できない。したがって、砂質地盤に予め鉄筋などを挿入した後に、注入することによる改良地盤の強度特性についての研究を実施する予定である。
- (2) 地震時に液状化する軟弱なシルト地盤は、従来の溶液系を用いた薬液注入では割裂注入となることから、構造物直下のこのような地盤の改良方法が確立されていない。したがって、軟弱なシルト地盤の改良特性についての研究も実施する予定である。
- (3) 注入工法は新しい材料や施工法が開発され、改良技術は向上しているものの、注入範囲の確認手法が課題であることから、確認手法に関する研究についても今後実施する予定である。
- (4) 施工中は注入圧力や注入流量などがモニタリングできる程度であり、実際に注入材が地盤内にどのように浸透しているかなどの挙動については、経験と勘に頼る面が多く確実性に欠くことから、注入範囲に対しての正確な評価手法についても今後研究する予定である。

参考文献

- 1) 西垣誠ら：セメント系注入材の注入によるしらす斜面崩壊防止対策に関する検討，地盤工学ジャーナル，Vol.6，No.2，pp.213-224，2011.
- 2) （社）地盤工学会：地震と豪雨・洪水による地盤災害を防ぐために―地盤工学からの提言―，2009，377pp.
- 3) 春山元寿：南九州しらす地帯の豪雨による斜面災害（特に宅地造成地の災害を中心として），土と基礎，Vol.31，No.1，pp. 105-110，1983.
- 4) （社）土質工学会：1993年鹿児島豪雨災害―繰り返される災害―，pp.45-53，1995
- 5) 北村良介ら：降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験，地盤工学ジャーナル，Vol.2，No.3，pp.149-168，2007.
- 6) 国土交通省九州地方整備局：川内川水系河川整備計画，2009，118pp.
- 7) （社）地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 525，2009.
- 8) （社）地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 994，2009.
- 9) （社）日本グラウト協会：新訂正しい薬液注入工法，pp. 7-100，2007.
- 10) 米倉亮三：最新地盤注入工法技術総覧，産業技術サービスセンター，pp. 56-64，1997.
- 11) （社）地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，pp. 49-61，2006.
- 12) 矢澤昭夫，木村秀雄，武村朝邦：昭和61年7月10日鹿児島市集中豪雨によるしらす斜面崩壊の要因について，第23回土質工学研究発表会論文集，pp. 1811-1812，1988.
- 13) 青山元寿：C と ϕ を考える，土と基礎，Vol.23，No.6，pp.67-74，1975.
- 14) 金沢智彦ら：高浸透性セメント系注入材による地盤改良，地盤工学会，第54回地盤工学シンポジウム，pp.527-532，2009.
- 15) 竹内仁哉ら：極超微粒子注入材による地盤注入工法の開発 ―現場注入特性―，第65回土木学会学術講演会，pp.961-962，2010.
- 16) 小泉悠ら：極超微粒子注入材による地盤改良工法の開発，第9回地盤改良シンポジウム論文集，pp.237-242，2010.
- 17) King, J. C. and Edward, G. W. : SYMPOSIUM ON GROUTING:GROUTING OF GRANULAR MATERIALS, ASCE TRANSACTIONS, Part I, Vol.128, No.7, pp. 1279-1317, 1963.
- 18) Mitchell, J. K. : Soil Improvement-State-of-the-Art Report, Proceeding on the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.4, pp. 509-565, 1981.
- 19) 森麟ら：超微粒子注入材の浸透限界，土木学会論文集，No.426，V-14，pp.237-240，1991.
- 20) （社）地盤工学会：液状化対策工法，丸善，2004，510pp.
- 21) Mitchell, J. K. : Soil Improvement-State-of-the-Art Report, Proceeding on the 10th International

Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.4, pp. 509-565, 1981.

- 22) Kennedy, T.B. : Pressure Grouting Fine Fissures, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 84(SM3), 1731-1-1731-6, 1958.
- 23) 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.

第5章 結論

5.1 結論

近年多発する豪雨や地震による斜面崩壊・堤防の決壊・液状化といった地盤災害や、トンネル掘削時の湧水発生、地下水への有害物質の漏洩など地盤工学上の課題に対し、その対策工法として、地盤改良工法の一つである注入工法に着目した。従来の注入材は、セメント系を用いた場合では高強度や耐久性が得られるが適用地盤が限定的であり、溶液系においては強度・耐久性の面で課題があり、十分な改良効果が期待できないケースもある。

本研究では上述のような地盤の改良を目的に従来のセメント系材料の浸透性を改善した極超微粒子セメントの開発を行った。さらに、このセメントを用いた注入工法による対策工法を提案し、災害が発生しやすいしらす地盤、液状化を引き起こす砂質土地盤や亀裂性岩盤に対する浸透挙動や改良効果から適用性について検討を行った。本論文はその研究成果を取りまとめている。以下に各章毎の概要と得られた結論を述べる。

第2章では、セメント系注入材を用いた地盤改良に関する従来の研究について整理し、課題を抽出した。

- 1)注入工法は他の地盤改良工法に比べ、狭隘な土地、構造物直下の地盤や岩盤を改良できるなど他工法では成し得ない効果が得られることから、都市土木では欠かすことのできない工法であることを述べた。
- 2)また一方で、注入工法に用いられている注入材には様々な地盤に浸透し、かつ長期的に安定した改良効果が得られる材料がなく、このような性能を有する材料の開発が必要であることを述べた。
- 3)注入材の一つであるセメント系注入材は浸透性に課題があり、我が国のような複雑な地盤を改良する上では浸透性の改善が不可欠であることを述べた。また、浸透性の改善を目的に単純に粒子径を小さくしてもむしろ浸透性の低下を招くことを述べた。必要以上に粒子径を小さくしたセメントは凝集や粗大な水和物の生成により浸透性は向上しないことから、水和物の生成抑制と粒子の分散が重要であることを論じた。

第3章では、必要以上に粒子径を小さくしたセメントは以下の2つの要因で実際に使用する形態であるセメントスラリー中に見掛け粒子が粗大化し、浸透性が低下することを明らかにした。

- a)凝集力が強まり分散が不十分となっている。
- b)水和反応が飛躍的に高まり水と接触後直ちに粗大な水和物を生成している。

以上のことから、セメント系注入材の浸透性改善を目的に、平均粒径を $1\sim 2\mu\text{m}$ まで小さくしたセメントの凝集と水和物の生成による粗大粒子の低減手法について検討を行った。

凝集粒子の分散は分散剤の種類と分散方法に着目して検討した。水和物の生成は水和反応速度に着目して水和反応の制御について検討した。また、その手法による効果の検証を行った。

平均粒径 $4\mu\text{m}$ の超微粒子セメントより粒子径を平均粒径 $1\sim 2\mu\text{m}$ まで小さくした極超微粒子セメントについて得られた成果を以下に列挙する。

- 1) 水和反応の制御には C3A 含有量を低減したセメントと高炉スラグを使用した極超微粒子セメントを用いて、その凝集性を制御するためのポリカルボン酸系分散剤を混合し、高速回転ミキサーで高速攪拌することにより、見掛け粒子の粗大化を低減でき、セメント粉体と同程度の粒径のセメントスラリーを作成する方法を示した。
- 2) 極超微粒子セメントの材料特性について従来の超微粒子セメントと比較し、同等以上の性能が得られ、施工上は従来の材料と同様に使用できることがわかった。
- 3) 各種注入材について一次元注入による室内実験を実施し、極超微粒子セメントは溶液型と同等の浸透性を示し、強度は約 3N/mm^2 であり溶液型に比べ 10 倍高い強度であることがわかった。

第 4 章では、豪雨時の斜面崩壊防止・堤防の決壊防止、地震時の液状化防止、トンネル掘削時の湧水対策および地盤への有害物質の漏洩防止を目的に、極超微粒子セメントを不飽和地盤、飽和地盤、亀裂岩盤に注入してその適用性について検討した。本章で得られた成果を以下に列挙する。

- 1) 豪雨時に斜面崩壊しやすい不飽和しらす地盤に、ここで開発した極超微粒子セメントを注入して低い注入圧力で 1m 浸透注入できることがわかった。また、その注入試験により一軸圧縮強さは 2000kPa となり、初期の透水係数が $1.0\times 10^{-5}\text{m/s}$ のしらす地盤が $1.0\times 10^{-7}\text{m/s}$ にその値が低下し、しらす斜面や堤防への水の浸入や浸食を防止できる地盤へと改良できることがわかった。
- 2) 都市部に分布する砂質材料を対象として、注入特性を室内実験で実施し、従来の超微粒子セメントでも注入が不可能であった地盤に対しても極超微粒子セメントは容易に注入でき、その一軸圧縮強さは 3000kN/m^2 となり、この強度は溶液系の薬液注入では得られない強度であることがわかった。
- 3) 液状化を引き起こしやすい沖積層の飽和砂質土地盤に設計改良径と同等の 2m の球状改良体を得られることがわかった。そして、液状化対策や耐震補強に十分な強度発現性が得られることがわかった。
- 4) 極めて微少な割れ目幅 $20\mu\text{m}$ の模擬亀裂性岩盤への注入可能性を示した。

以上のことから、極超微粒子セメントによる注入工法は豪雨時の斜面崩壊防止、地震時

の液状化防止，トンネル掘削時の湧水対策および地盤への有害物質の漏洩防止を目的とした対策工法に有効であると考えられる。

5.2 今後の展望

本論文では，従来のセメント系注入材の注入では改良が困難な地盤に対して，新たに開発した極超微粒子セメントを注入することで地盤補強と止水性の改善ができることを示した。この注入材は従来のセメント系注入材より適用可能な地盤が多く，溶液系注入材より改良強度が大きいといった特徴がある。さらに注入工法は，施工機材が小規模であることから狭隘部でも施工することができ，地盤をかく乱することなく既設構造物直下の地盤を改良することができる。

我が国は世界屈指の災害大国であり，豪雨時の斜面崩壊・堤防の決壊，地震時の液状化といった地盤災害が数多く発生している。また，2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では，津波と地震の複合的な地盤災害も発生し，新たな課題をつきつけられた。

このような，豪雨時の雨水の浸透や越水に対して弱い斜面・土堤や液状化を招く砂質地盤に上述した極超微粒子セメントを注入することで，斜面崩壊防止，堤防の決壊防止や住宅などの基礎地盤の耐震補強ができ，人々を災害から守り，安心・安全を提供することができるものと考えられる。

ここでは，主に均一な地盤を対象に注入実験を実施し，その改良効果の一例について論じてきた。しかしながら，実際の地盤は非常に複雑であり，このような地盤への浸透性や改良効果については，未解明な部分が課題として残る。また，注入工法の最大の課題は，他の地盤改良工法に比べ確実性に欠くことである。今後，この工法を普及させるためにはこれらの課題を克服するとともに，コストを含めたさらなる材料の性能向上が必要である。具体的な課題とその対策方法を以下に挙げる。

- 1) 互層地盤や様々な自然地盤などを改良する上で，どのような地盤に適用できるのか，そして注入量や配合をどのように設計するのか，その設計手法が確立されていない。設計手法は，互層地盤や様々な自然地盤を対象に室内実験や現場実験を実施して，その浸透性と改良効果を明らかにし，データの蓄積を行うことで確立することができる。
- 2) 処分場における有害物質の漏洩防止対策では超長期的な改良効果が必要であるが，このような長期的な改良効果については未解明である。超長期的な改良効果は，注入改良体について促進試験を実施し，時間の経過に伴う強度特性と止水性の変化を明らかにすることでその耐久性を推定することが可能となる。
- 3) セメント系材料であることから，斜面に注入することによって，地下水がアルカリ性になることが懸念される。低アルカリ化については，今後材料の組成や配合を最適化し，アルカリ性鉱物自体を低減させることや溶出したアルカリ成分をセ

メント水和物生成時に消費させることによって、低アルカリ性注入材を開発することができる。

- 4) 粘性が低く硬化するまでの時間が長いことから、地下水の作用によって逸走し、十分な改良効果が得られないことが懸念される。この注入材の逸走については、改良対象地盤の周囲に予め瞬結性の薬液を注入して遮水壁を設ける工法とすることやセメントの硬化時間短縮によって防止することができる。
- 5) 確実に設計通りに地盤内に注入されているかリアルタイムで注入状況を把握し、その改良効果を確認する手法が確立されていない。注入材の挙動や改良効果については、連続波レーダなど地盤深部まで調査することができる非破壊による物理探査手法が実用化されつつあり、このような物理探査を用いることで地盤内の状況を可視化できるようになり、さらに注入前後の地盤性状の変化を把握することで改良効果を推定することが可能となる。
- 6) 極超微粒子セメントを使用した工法のコストは溶液系と同程度であるが、このコストは他工法に比べ高価であり、費用対効果に優れた工法にするためにはコストの縮減が必要となる。コストについては地盤を格子状や浮き型に改良し、材料の使用量を低減した注入設計とすることや注入管から吐出される浸透源を拡大(点注入から面注入へ)し、施工を迅速化して工期を短縮することで縮減できる。
- 7) 液状化を引き起こす地盤のなかには、現状の注入工法では割裂注入になりやすく改良が困難なシルト層があり、この地盤を補強する手法が確立されていない。割裂注入時の割裂脈はセメント粒子が小さいほど微細になり割裂浸透形態に近づく。今後、粒径をさらに小さくしたサブミクロンやナノオーダーのセメントを開発することで液状化を招く地盤全てを改良することができる。

今後、上述した研究に邁進し、この工法を国内で災害防止を目的とした地盤改良技術として確立させ、さらにこの技術を世界に発信することによって、世界中で発生している地盤災害の防止に貢献できる材料になると考えられる。

この研究が災害による犠牲者を根絶する対策の一助となることを切に願う。

謝 辞

本論文は、日鐵セメント(株)において開発してきた材料の研究の成果と岡山大学・鹿島建設(株)・日特建設(株)・日鐵セメント(株)が行った研究成果の一部を取りまとめたものです。本研究を遂行するにあたって、沢山の方にご指導、ご協力を賜りました。皆様に心から感謝いたします。

岡山大学大学院教授 西垣誠先生には、研究の全般にわたり、終始多大なご指導、ご鞭撻を賜りました。西垣先生には、思い返せば五年前、開発中のセメントを担いで西垣研究室の門をたたいてから、研究のみならず様々な面でご助言・ご助力賜りました。ここに、深甚の謝意を表します。

副指導教員の岡山大学大学院教授 河原長美先生、同大学院准教授 鈴木茂之先生には、課程でのご指導をはじめ、研究遂行に際して終始ご指導とご鞭撻をいただくとともに温かい励ましのお言葉をいただきました。

鹿島建設(株) 山本拓治氏、田中俊行氏、斉藤潤氏、小泉悠氏、三上大道氏、日特建設(株) 辰尾利明氏、阿部義宏氏、故浜子正氏、横井一秀氏、竹内仁哉氏には、極超微粒子セメントを用いた注入工法の研究において貴重なご意見とご助力をいただきました。また、多大な実験の準備や実施をしていただきました。ここに深謝の意を表します。

鹿島建設(株) 伊達健介氏には、注入工法の実施工での問題点やその対策について、数多くの貴重なアドバイスとご助力を頂きました。ここに深謝の意を表します。

ケミカルグラウト(株) 多田信一朗氏には、岩盤グラウチングの施工や材料の課題について数多くの貴重なご意見とご助力を頂きました。ここに深謝の意を表します。

日本触媒(株) 枚田健氏、田中宏道氏、川上宏克氏、正長眞理氏には、分散剤に関わる数多くの貴重なご意見とご助力を頂きました。また、材料の開発にあたり数多くのポリマーを試製していただきました。ここに深謝の意を表します。

今野乃光氏(元日鐵セメント(株))には、技術者としてのあるべき姿や技術論など数多くのご教授を賜り、さらに今の私の研究姿勢を決定づける貴重なご助言を頂きました。また、時には場所を変えて深夜までご指導を賜りました。ここに深謝の意を表します。

阿部哲也氏(元日鐵セメント(株))には、私が博士課程に進むべきか迷っていたときに貴重なご助言を頂き、一歩前と進むことができました。ここに深謝の意を表します。

下林清一氏(元日鐵セメント(株))、高見晃氏(元日鐵セメント(株))には、注入材に関する理論をはじめ数多くのご教授とご助力を頂きました。ここに深謝の意を表します。

日鐵セメント(株) 蒲原均氏、有賀美樹雄氏には、研究の機会を与えてくださり、ご鞭撻を賜りました。ここに深謝の意を表します。

日鐵セメント(株) 星俊彦氏, 若杉伸一氏には, 社業と学業の両立ができるよう業務上で便宜を図って頂きました。また, 論文を執筆する上で数多くの貴重なアドバイスを頂きました。ここに深謝の意を表します。

日鐵セメント(株) 山口健介氏には, 実験の準備や実験の実施に当たり, 多大なご協力を頂きました。ここに深謝の意を表します。

元西垣研究室 田邊泰子氏, Larry Pax Chebeleh 氏, John Apambilla Akudago 氏, 井上勇志氏, 上島啓司氏をはじめ, 西垣研究室の皆様には多大な実験を実施していただきました。また, 研究の実施に際し, 多大なお力添えを頂きました。ここに深謝の意を表します。

最後に, 健康面と精神面で支えてくれた妻と子供たちに深く感謝の意を表します。