

シリカ微粒子の土粒子間注入に関する研究

学生氏名 上村健太郎
指導教員 末政直晃

1964年に発生した新潟地震を契機に液状化現象が注目されるようになった。これ以降、数多くの液状化対策工法が開発され、実用化された。しかし、既存の液状化対策工法の多くは施工機械が大きく、既設構造物直下では適用することが困難である。一般的にこのような構造物に対しては浸透固化工法が採用される。浸透固化工法には、長期耐久性を有する薬液や砂質土盤に対して十分な浸透性を有する懸濁系グラウトが用いられる。しかし、これらの注入材は高価である。このような背景から、本研究では比較的安価なシリカ微粒子の浸透注入による液状化対策工法を提案する。本論文では、微粒子の浸透性を解明するために次元注入実験および実験の再現解析を行い、浸透メカニズムを明らかにするとともに、微粒子により改良された砂に対する液状化試験を行い、改良効果を把握した。その結果、実験により微粒子の目詰まり現象を把握するとともに、提案したモデルによって目詰まり現象をシミュレートすることができた。また、液状化試験により微粒子の注入による骨格の強化に伴う液状化強度の増加が確認された。

Key Words: white carbon, density increasing, penetration characteristics, liquefaction strength

1. はじめに

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、浦安などの埋立地や河川堤防における液状化被害が重大な問題となった。液状化の発生を抑制する工法は過去の液状化被害の経験から数多く開発¹⁾されており、十分な改良効果を得られることが過去の調査事例から明らかになっている²⁾。しかし、既存の液状化対策工法の多くは大規模な施工機械を用いることに加え、施工コストが高い³⁾。そのため、既設構造物直下や狭隘な土地における施工には適さない。特に、このような地盤においては、浸透注入などの地盤注入工法が採用される。地盤注入工法は小型の施工機械を用いることにより既設構造物直下における液状化対策工法の施工が可能である。また近年では、長期耐久性を有する薬液⁴⁾や極超微粒子セメント⁵⁾などの浸透性が良好な懸濁系グラウトを用いた液状化対策に関する研究が行われ、室内試験や現場実験から耐久性や施工性が確認されている^{6),7)}。しかし、これらの注入材は高価であり、重要構造物以外には用いられていないのが現状である。

そのため、本研究ではこれらの注入材よりも比較的安価なシリカ(SiO₂)微粒子を用いた微粒子系注入材の開発を行っている。本研究において用いる微粒子はSiO₂を主成分としたホワイトカーボン(White-carbon:以下WC)である。WCの改良効果は地盤の密度増大により土骨格の強化を行うものであり、マイクロバブル水混入工法のような単体では固化工法と比して高い改良効果を発揮しない工法の補助材としての利用にも期待されている。しかしながら、WCは

通常、数十 μm 以上の粗大な粒子を形成している。そのため、平均粒径100 μm ~200 μm の砂粒子の間隙に対する浸透性が課題となる。

そこで、本論文では渦崩壊⁸⁾の原理を利用してWCを細粒化し、粉碎後のWCの粒径を確認するとともに、微粒子の浸透注入時における浸透特性および密度増大効果を次元注入実験により検討した。また、これらの実験結果をもとに簡単な浸透モデルを作成し、次元注入実験の再現解析を行った。それに加え、微粒子を注入した改良体を用いて液状化試験を行い、改良体の液状化強度を検討するとともに、解析コードLIQCA⁹⁾に用いる弾塑性モデルパラメータを決定するために要素シミュレーションを行った。

2. WCの粉碎実験

(1) 実験方法

WCは通常、平均粒径数十 μm 以上の粗大な粒子を形成しており、砂地盤に対して浸透注入することが困難である。そのため、本実験ではWCの浸透性を確保するために粉碎装置を用いてWCを粉碎した。また、粉碎前後のWCの粒径を比較することによって、装置による粉碎効果を確認した。

図-1と表-1のそれぞれに粉碎装置、実験条件を示す。WCの粉碎は旋回流が圧力開放される際に発生する渦崩壊の原理を利用したものである。粒度測定にはレーザー回折式粒度分布測定装置(株式会社島津製作所製:SALD-3100)を用いた。なお、Case1は粉碎前のWCの粒径を確認するため攪拌せず測定し、Case3~Case7は7.5%のWC水を粉碎装置に投入し粉

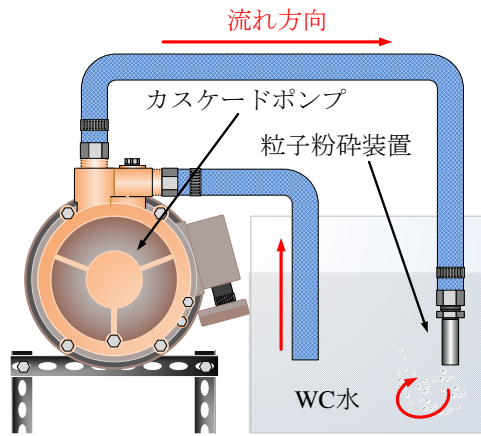


図-1 WC 粉碎装置の概略

砕時間ごとに採取して分析した結果である。ここで、WC 水の濃度は溶質と溶媒の百分率で表し、以降の文中では注入材濃度と呼称する。また、Case8, Case9 においては粉碎後の WC 微粒子の再凝集の傾向を検討するために攪拌後、所定時間静置してから測定を行った。

(2). 実験結果

Case1~Case7 までの測定結果を図-2 に示す。図から、粉碎装置によって WC が細粒化されていることがわかる。特に Case2~Case7 までの結果から、攪拌時間が長く、注入材濃度が低いほど、粉碎後の WC 微粒子の粒径が小さくなることを確認できる。図-3 には再凝集の傾向を示している。図-3 に示されるすべてのケースにおいて粒径の変化はほとんどないことから、粉碎後の再凝集の傾向はないと考えられる。また、図-4 に注入材濃度 7.5% における粉碎時間と粒径の変化率の関係を示す。ここで、粒径の変化率とは粉碎後の WC における D_{10} , D_{50} , D_{90} 粒径を粉碎前の D_{10} , D_{50} , D_{90} で除した値であり、その値が小さいほど粉碎前と比べて細粒化されていることを示している。図から粉碎時間 0min から 15min にかけての粒径の変化率がもっとも大きい。また、最終的な変化率は D_{90} が最も大きく、 D_{10} が最も小さいという結果となった。これらのことから、渦崩壊現象を用いた WC の粉碎においては見かけの粒径が大きい凝集した WC の粒子を短時間で粉碎することが分かる。

3. 一次元注入実験

粒状体に対する微粒子の浸透性特性は、微粒子の流路における捕捉や目詰まりによる閉塞を伴うため非常に複雑である¹⁰⁾。そのため、本章では短尺および長尺供試体を用いた浸透実験を行うことによって微粒子の浸透特性を検討した。それぞれの実験に用いた砂の物性を表-2 及び図-5 に示す。実験に用いる供試体は、所定の高さ、相対密度となるように円型アクリルモールド内に作製した。また、供試体作製後に CO_2 、脱気水を用いて完全に飽和させた後、注入材を注入することで微粒子の浸透特性を検討した。

表-1 実験条件

	注入材濃度 (%)	粉碎時間 (min)	静置時間 (h)
Case1	7.5	0	0
Case2	4.0	30	0
Case3	7.5	15	0
Case4	7.5	30	0
Case5	7.5	45	0
Case6	7.5	60	0
Case7	7.5	75	0
Case8	7.5	30	1
Case9	7.5	30	24

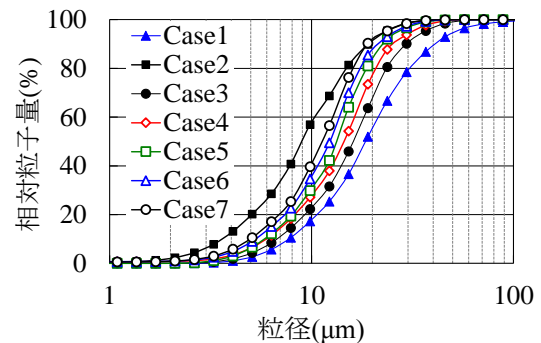


図-2 Case1~Case7 の測定結果

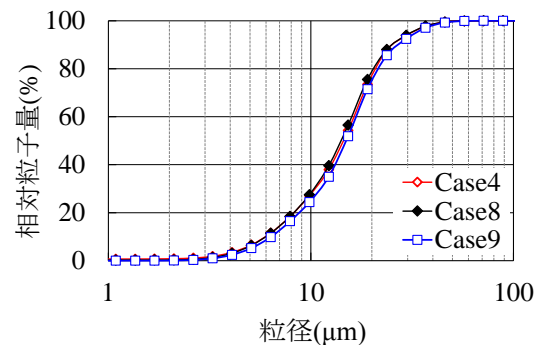


図-3 再凝集の傾向

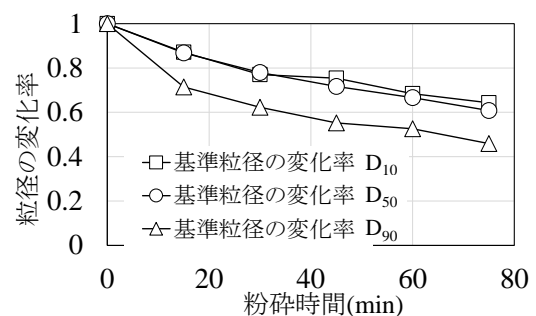


図-4 粉碎時間と粒径の変化率の関係

(1) 短尺供試体を用いた実験

a) 実験概要

本実験は異なる試料から作製した短尺供試体を用いることで、試料の粒度特性によって変化する微粒子の浸透特性を検討するために行った。供試体に用いた試料は硅砂 5 号、硅砂 4 号であり、物性値は表-2、図-5 に示すとおりである。実験に用いたのは相対密度が 60.0%、高さ 15.0cm、直径 5.0cm となるように作製された飽和砂の供試体である。また、供試体

表-2 試料の物性値

試料名	硅砂 4 号	硅砂 5 号
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.638	2.640
最大密度 ρ_{smax} (g/cm ³)	1.530	1.555
最小密度 ρ_{smin} (g/cm ³)	1.305	1.300

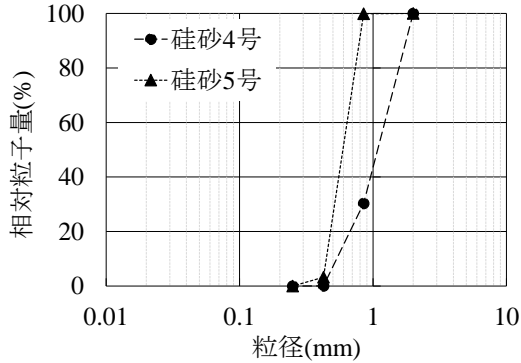


図-5 粒径加積曲線

表-3 実験条件

硅砂	間隙体積 V_v (cm ³)	注入材濃度 (%)	注入圧力 (kPa)
硅砂 4 号	134.7	4.0	10・30・60
硅砂 5 号	133.7	4.0	10・30・60
硅砂 5 号	133.7	6.0	10・30・60

作製後に定水位透水試験を行い、透水係数を計測した。作製した飽和砂に対して注入材濃度 4.0%および 6.0%の WC 水を注入することによって WC を供試体内に充填させ、浸透注入量を計測した。実験条件を表-3 に示す。本実験では注入圧力を 60kPa, 30kPa, 10kPa と設定することによって擬似的に注入速度を変化させて実験を行った。経時的に変化する排液の注入材濃度を採取した排液を乾燥炉で乾燥させることで求めた。

b) 実験結果

実験結果を図-6 から図-9 に示す。なお、図-6、図-7、図-8 における破線は注入初期におけるプロットの近似直線を示す。図-6 に硅砂 4 号、注入材濃度 4.0% における実験結果を示す。図から注入量が線形的に増加していることが確認でき、注入量が間隙体積を大きく超えた場合においても注入量が減少しない。

図-7 に硅砂 5 号、注入材濃度 4.0% における実験結果を示す。図から注入速度の高い 60kPa, 30kPa のケースにおいては供試体の間隙を 10 回以上置換する量の注入材を注入した場合においても注入量の増加割合は減少しないが、注入速度の低い 10kPa のケースにおいては注入量の増加割合が徐々に減少している。このことから、注入速度によって目詰まり量に差が生じることが示唆された。また、図-6 と図-7 のケースにおける近似線を比較すると、硅砂 4 号の近似線における傾きが大きいことから、試料の粒子特性や間隙構造などが微粒子の目詰まりに影響するものと考えられる。

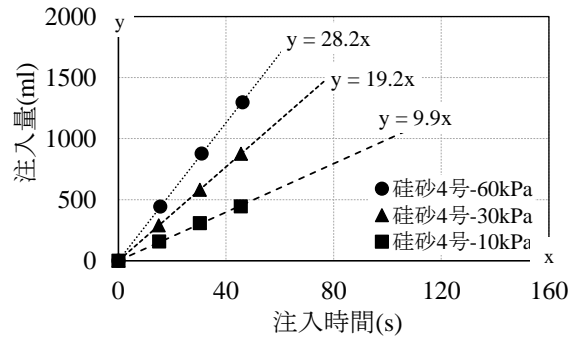


図-6 硅砂 4 号、濃度 4.0%の実験結果

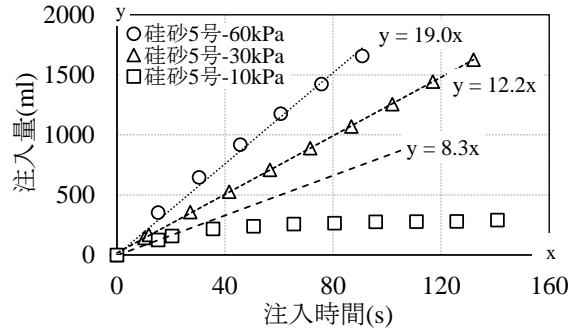


図-7 硅砂 5 号、濃度 4.0%の実験結果

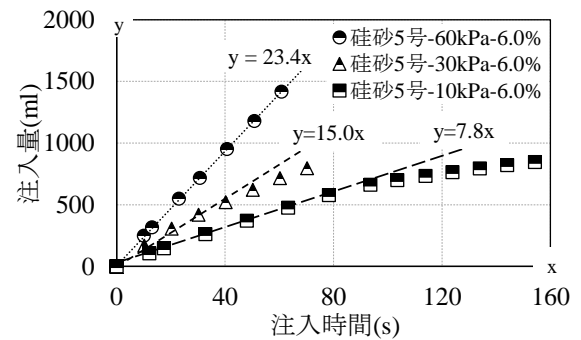


図-8 硅砂 5 号、濃度 6.0%の実験結果

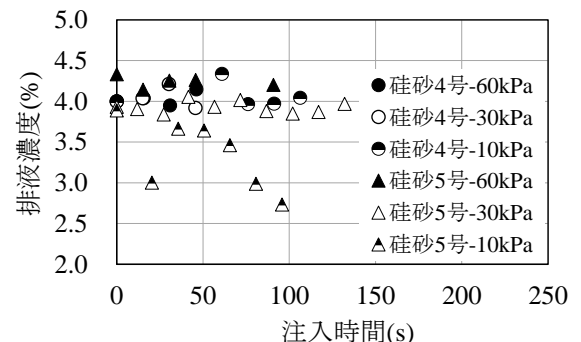


図-9 注入時間と排液濃度

図-8 は注入材濃度 6.0% における注入時間と注入量の関係を示している。硅砂 5 号、注入材濃度 4.0% と 6.0% における結果を比べると初期注入速度にほとんど差がないことが分かる。しかしながら、注入材濃度 6.0%、注入圧力 30kPa のケースでは注入量の増加割合が徐々に減少していることが確認できる。これは、目詰まり現象が注入材の濃度にも影響される

ことを示している。

図-9 は注入時間と排液濃度の関係を示しており、注入速度が高いケースにおいては排液濃度が一定であった。このことから、供試体内においても均一な改良が行われていると考えられる。一方で、注入速度が小さいケースにおいては排液濃度が注入時間とともに低下することが確認できる。

一連の実験結果から、微粒子系注入材の目詰まりは注入速度、注入量、注入材濃度および注入対象試料の粒子直径などの条件に影響されると言える。特に、注入速度が低く、注入対象試料の粒径が小さい場合、供試体間隙内に微粒子の目詰まりが発生させ、良好な注入性が得られないと考えられる。また、これらの目詰まりが具体的に供試体のどの部分で発生しているのかは不明確である。

(2) 分割可能なカラムを用いた一次元注入実験

a) 実験概要

短尺供試体の実験から供試体内のどの部分に目詰まりが発生するかが不明確であった。そのため目詰まり現象の解明には供試体全体の濃度分布を調べる必要があった。そのため、本実験では分割可能なカラムを用いた一次元注入実験を行い、供試体内の注入材の濃度分布を確認した。実験に用いたカラムは高さ 10.0cm ごとに分割することができ、組み合わせることで長尺の供試体を模擬することができる。実験に用いた装置の概略図を図-10 に示す。実験に用いた試料は一連の注入実験において注入材の浸透性が比較的良好であった珪砂 5 号を用いた。試料の物性は表-2、図-5 に示したとおりである。実験に用いる供試体は相対密度 60.0%、高さ 50.0cm、直径 5.0cm になるように作製した。供試体作製後、完全に飽和させ、定水位透水試験を行うことによって透水係数を計測した。注入する注入材の濃度は 4.0% および 6.0% に調整された WC 水の混合物であり、ケースごとに注入圧力を変化させることによって注入速度を変化させた。また、注入時に排出される排液量および排液中の微粒子量を計測することによって、浸透注入量、排液濃度を算出した。実験条件を表 4 に示す。さらに、本実験では注入量を調整し、間隙体積を複数回置換したケースと一回分置換したケースを実施し、それぞれを比較することによって微粒子の充填の傾向を確認した。注入完了後、図-10 に示されたカラムを分解し間隙水を採取し、炉乾燥させることによって間隙水の WC 濃度を測定した。また、測定した濃度は分割したそれぞれのカラムの中央点における濃度としてグラフにプロットした。

b) 実験結果

図-11、図-12、図-13 にそれぞれの実験から得られた注入時間と注入量の関係、注入距離と間隙水濃度の関係を示す。なお、注入距離が 0 のときの間隙水濃度は注入する注入材の濃度と等しいものとした。図-11(a)、図-11(b) から、注入速度の高い 40kPa においては供試体全体において注入材が均一に広がっている。これは、供試体内の微粒子が間隙水の流れ

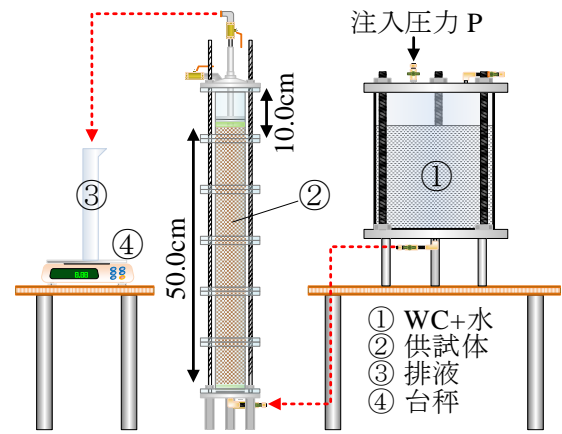


図-10 実験装置

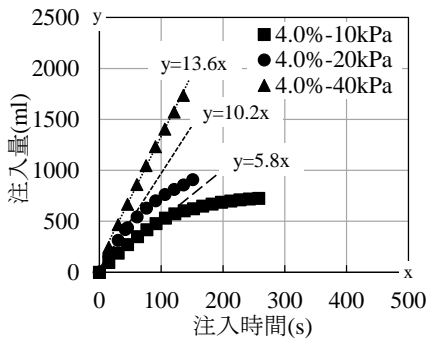
表-4 実験条件

珪砂	間隙体積 V_v (cm ³)	注入材濃度 (%)	注入圧力 (kPa)	置換量
珪砂 5 号	449.0	4.0	60・30・10	複数回
珪砂 5 号	449.0	6.0	60・30・10	複数回
珪砂 5 号	449.0	4.0	60・30・10	一回分

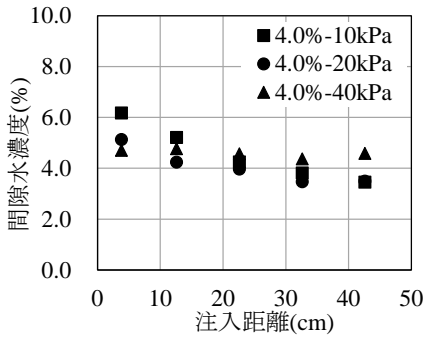
に運ばれ、明確な目詰まりが発生しなかったことが原因であると考えられる。それに対して、注入速度が低い注入圧力 20kPa および 10kPa のケースにおいては注入距離が短い点ほど間隙の注入材濃度が高いことが確認できる。このことから、注入速度が低い場合、注入口付近において微粒子の目詰まりが発達し、多くの微粒子が間隙に貯留されるものと予測され、これが流量低下の一因となっていると考えられる。また、間隙の一部分における目詰まりの発達は、注入する微粒子および試料の粒径の不均一性や間隙構造の複雑さが原因の一つであると考えられる。

注入材濃度の高い注入材を注入した際の実験結果を図-12(a)、図-12(b) に示す。濃度の高い注入材を注入した場合においても、注入速度が減少すると供試体内の濃度に偏りが発生する傾向が見られた。また、短尺の供試体における結果と同様に注入材の濃度が高い場合、高い注入圧力で注入した場合においても目詰まりによる注入速度の低下が発生する。ここで、4.0% と 6.0% の注入材を 10kPa で注入したケースを比較すると、間隙水濃度はそれぞれ 6.2%、6.7% であり、近い値をとっている。これは、間隙水に流れがある場合、供試体の間隙中に貯留される WC の量に限界があることを示唆している。

供試体の間隙を一回分置換するだけの注入材を注入した際の結果を図-13(a)、図-13(b) に示す。一連の実験結果と同様に注入速度が高くなるほど注入材が均一に広がる傾向があるが、注入口付近では WC 濃度が増加し、排出口付近においては濃度が減少していることが確認できる。この際の注入口付近の濃度は図-11(b) の注入圧力 40kPa の結果とほぼ一致している。このことから、一定の注入速度以上では、間隙

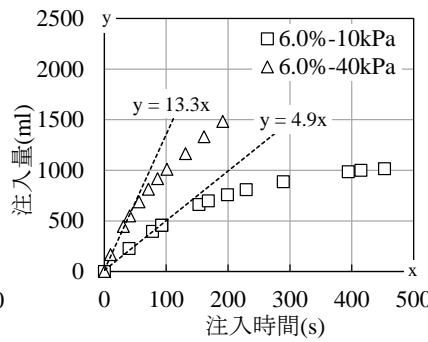


(a) 注入時間と注入量の関係

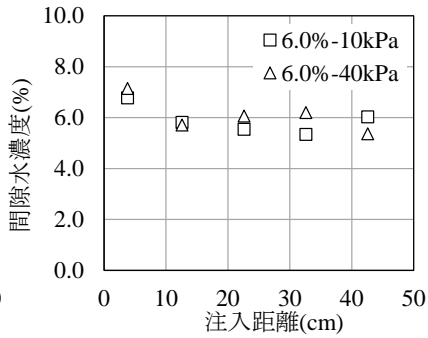


(b) 注入距離と濃度の関係

図-11 注入材濃度 4.0%

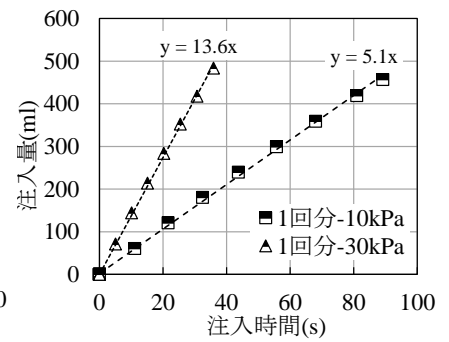


(a) 注入時間と注入量の関係

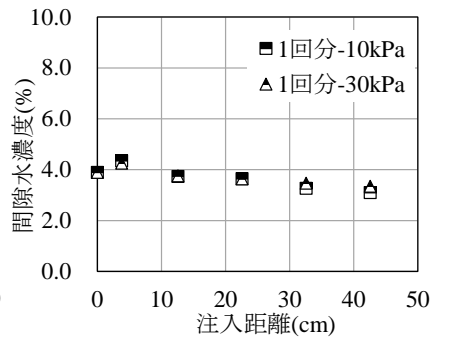


(b) 注入距離と濃度の関係

図-12 注入材濃度 6.0%



(a) 注入時間と注入量の関係



(b) 注入距離と濃度の関係

図-13 間隙を1回分置換

の一部に存在する微粒子を貯留しやすい部分に優先的に粒子が捕捉され、それ以上の粒子の貯留は発生しにくいものと考えられる。一方で、注入速度が低い場合、間隙内の微粒子の捕捉によって間隙開口幅が変化し、微粒子の貯留量が増加しやすいと考えられる。また、注入口付近でこの傾向が顕著になるため、注入距離が長くなるに伴って間隙を通過する注入材濃度が低くなると考えられる。

これらの一連の実験から、注入材の注入速度が高い場合、注入材が供試体の間隙内をほぼ均一に広がる。一方で注入速度が低い場合、注入口付近に多くの微粒子が捕捉されることにより微粒子の濃度に偏りが生じることが確認された。この変化の傾向は注入初期からも観察することができるが、注入初期においては間隙内の濃度増加が見られるものの注入速度の低下はほとんど見られていない。これは、微粒子の目詰まりと注入量の低下が、非線形的な関係にあることを示唆している。

4. グラウタビリティー比と微粒子の浸透特性

(1) 実験概要

微粒子の浸透性の指標としてグラウタビリティー比が挙げられる。グラウタビリティー比は式(1)で表される¹¹⁾。

$$N = \frac{D_{15}}{G_{85}} \quad (1)$$

ここで、 N はグラウタビリティー比、 D_{15} は注入対象試料の15%粒径、 G_{85} は微粒子の85%粒径であり、 $N > 24$ であれば注入可能であり、 $N < 11$ であれば注入

表-5 混合砂の物性値

試料名	混合砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.639
最大密度 ρ_{smax} (g/cm ³)	1.603
最小密度 ρ_{smin} (g/cm ³)	1.309

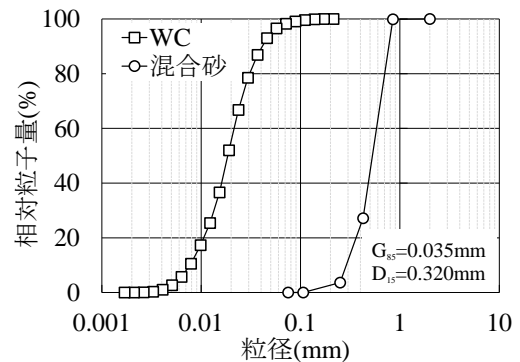


図-14 混合砂の粒径加積曲線

不可能とされている。しかし、グラウタビリティー比は単に試料の粒径と微粒子系注入材の粒径分布のみを考慮した指標であり、地盤の粗密といった間隙の状況を加味していない。3章における実験では、粒度の変化とともに注入材濃度や注入速度の変化に伴い、注入材の浸透特性が変化することが指摘された。そのため、実際の微粒子の浸透特性を評価するには不十分であると考えられる。そこで、本実験では相対密度を変えた供試体を用いて次元注入実験を行い、グラウタビリティー比と注入材の浸透性の関係を検討した。供試体に用いる試料は珪砂5号と珪砂6号を質量比7:3で混合した砂であり、物性値は表

表-6 実験条件

硅砂	間隙体積 V_v (cm ³)	相対密度 D_r (%)	注入材濃度 (%)	注入圧力 (kPa)
混合砂	130.4	60.0	4.0	20
混合砂	136.9	40.0	4.0	20

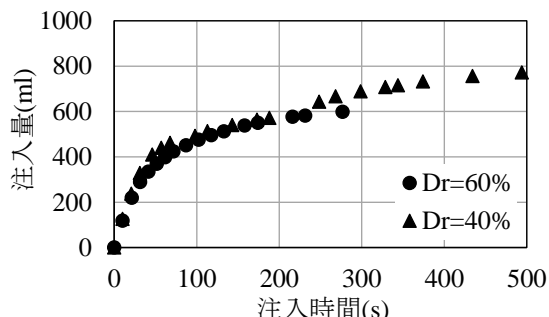


図-15 注入時間と注入量の関係

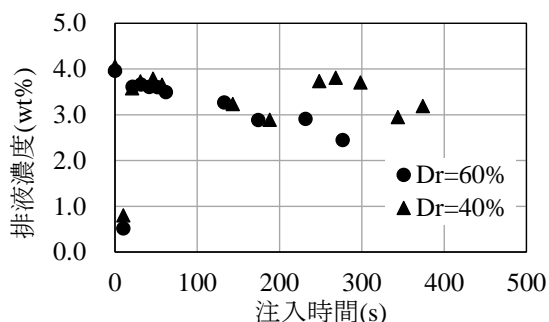


図-16 注入時間と排液濃度の関係

-5, 図-14 に示すとおりである. この時のグラウタビリティー比は 9.1 と算定できる. このことから, 実験に用いる注入材の注入が不可能な試料に分類される. 実験に用いる供試体の寸法は高さ 15.0cm, 直径 5.0cm であり, 相対密度が 40.0% また 60.0% になるように作製された. 砂詰め後, 完全に飽和させ, 定水位透水試験を行うことによって透水係数を計測した. 測定された透水係数は相対密度 60.0%, 40.0% の供試体それぞれにおいて 0.0970cm/s, 0.0882cm/s である. 注入する注入材は注入材濃度 4.0% に調整した WC 水であり, 注入圧力は 20kPa に設定した. 実験中は注入材を注入することによって排出された排液を採取し, 経時的に変化する排液の濃度変化を検討した. 実験条件を表-6 に示す.

(2) 実験結果

図-15 に注入時間と注入量の関係を示す. 図から, 注入量が 400 ml を越えたあたりから単位時間あたりの注入量が減少していることが確認できる. また, 図-16 に示す注入時間と排液濃度の関係から排液濃度が経時的に減少していることがわかる. これらのことから, 両ケースにおいて目詰まりが発生していることが確認できる. しかしながら, 図-15 においては注入時間を経るごとに注入量に違いが生じている. これは, 供試体の間隙開口幅が大きいと考えられる相対密度 40.0% のケースにおいては目詰まりするも

表-7 豊浦砂と飯豊硅砂 6 号の物性値

試料名	豊浦砂	飯豊硅砂 6 号
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.638	2.640
最大密度 ρ_{smax} (g/cm ³)	1.530	1.555
最小密度 ρ_{smin} (g/cm ³)	1.305	1.300

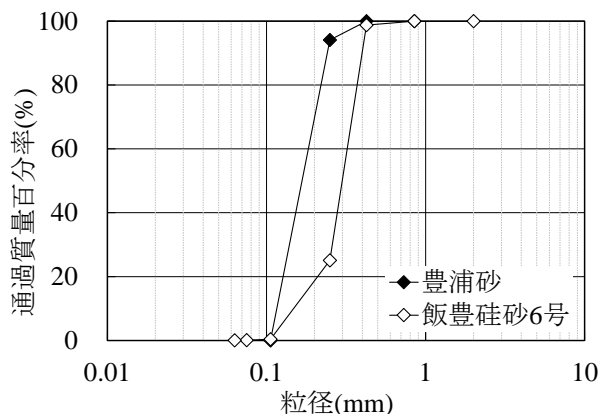


図-17 豊浦砂と飯豊硅砂 6 号の粒径加積曲線

表-8 実験条件

硅砂	間隙体積 V_v (cm ³)	注入材濃度 (%)	注入圧力 (kPa)
豊浦砂	775.0	4.0	10
豊浦砂	775.0	7.5	10
豊浦砂	775.0	10.0	10
飯豊硅砂 6 号	705.0	7.5	10

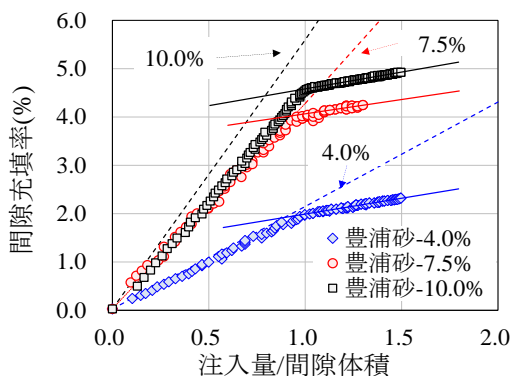
の完全な閉塞が発生しにくいことに起因すると考えられる. つまり, 粒径の大きな試料は微粒子の貯留が発生したとしても間隙の開口幅が大きいこと注入量が落ちにくいことを示唆している. このような結果から, グラウタビリティー比が同じであっても供試体の間隙状態の違いにより, 注入挙動に差異が生じることが確認された. そのため, 微粒子の注入にはグラウタビリティー比による評価だけでなく, 透水係数などの間隙の開口幅や粒度に影響される指標を取り入れる必要がある.

5. 長尺供試体を用いた密度増大効果の確認

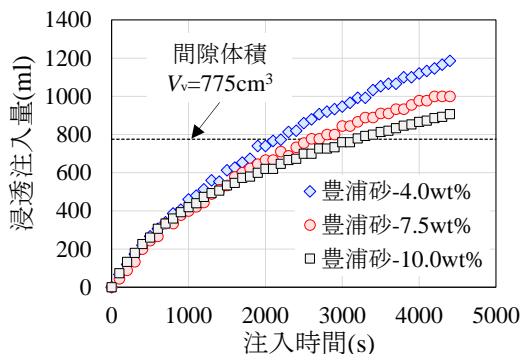
(1) 実験概要

一連の一次元注入実験によって微粒子の浸透特性が確認された. しかし, 供試体全体における微粒子の貯留量が不明確である. そこで, 本実験では供試体の重量変化を測定することによって供試体内における注入材の充填量を検討した. また, 充填量の変化から, 試料の粒径による微粒子の貯留傾向の違いを検討するために豊浦砂および飯豊硅砂 6 号を用いた.

飯豊硅砂 6 号および豊浦砂の物性は表-7, 図-17 に示すとおりである. 実験に用いるのは高さ 90.0cm, 直径 5.0cm, 相対密度が 60.0% になるように空中落下法で砂詰めされた供試体である. 相対密度が 60.0% の

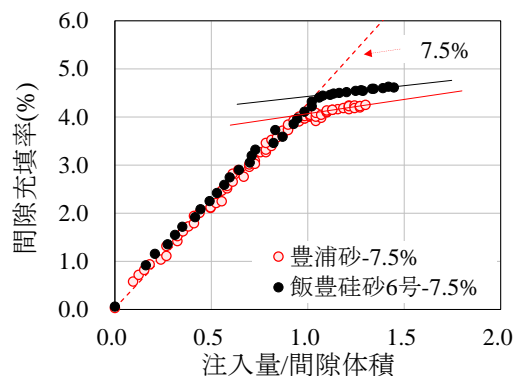


(a) 注入量/間隙体積と間隙充填率の関係

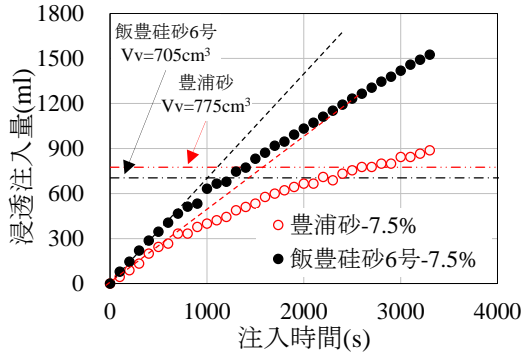


(b) 注入時間と注入量の関係

図-18 豊浦砂における実験結果



(a) 注入量/間隙体積と間隙充填率の関係



(b) 注入時間と注入量の関係

図-19 豊浦砂と飯豊硅砂6号における実験結果

時の豊浦砂および飯豊硅砂6号の間隙比は、それぞれ0.781、0.686である。砂詰め後、供試体を飽和させ所定の濃度の注入材を10kPaで注入した。また、注入するWCは粉碎装置にて粉碎したものであり、濃度の高い注入材ほど粉碎時間を長く設定した。実験条件を表-8に示す。また、供試体に捕捉されるWCの粒径を確認するため、豊浦砂の注入材濃度7.5%のケースにおいて排液を採取しWCの粒径分析を行った。なお、粒径分析にはレーザー回折式粒子径測定装置を用いた。

(2) 実験結果

一連の一次元注入実験から得られた各注入材濃度における注入量を間隙体積で正規化した値と間隙充填率の関係を図-18、図-19に示す。図における間隙充填率とは、間隙に内に存在する微粒子の体積を初期間隙体積 V_v で除した値である。なお、図-18は豊浦砂における結果のみを示しており、図-19は7.5%の注入材を注入した際の飯豊硅砂6号と豊浦砂における実験結果の比較を示している。また、図-18(a)、図-19(a)中の破線は、それぞれ各注入材濃度の注入材を供試体に注入した際に注入された微粒子がすべて間隙内に蓄積された場合の間隙充填率の増加傾向を示している。また、実線部は折れ点から注入終了時までのプロットの近似直線を示している。これらの図から粉碎したWCを供試体に注入することにより、豊浦砂のような細砂においても注入可能であることがわかった。

図-18(a)から注入材の注入によって間隙水が注入

材で置換され間隙充填率が徐々に上昇していることが確認できる。また、間隙を一回分置換した後も上昇する傾向にある。この部分における間隙充填率の増加は間隙中に貯留されたWCの量を示していると考えられる。ただし、排液においても注入材中の微粒子が存在することが確認されているため、注入されたすべての微粒子が土粒子骨格に付着し骨格の強化に寄与するわけではないことが示唆される。また、最終的な間隙充填率の値から、注入材濃度の高い注入材を注入した方が改良の効率が良いことがわかる。ただし、注入材濃度7.5%と4.0%のケースにおいては、注入材が間隙水を置換することにより破線上を推移する挙動を示しているが、注入材濃度10.0%のケースにおいては間隙充填率の上昇傾向が破線とは異なった。これは、注入材濃度が高かったため、注入材を貯めておくタンク内もしくは注入経路内においてWCが沈殿することによって発生する注入材濃度の偏りに起因すると考えられる。図-18(b)は、各濃度のWC水を注入した際の注入時間と浸透注入量の関係である。すべてのケースにおいてグラフの最大曲率点が間隙体積を置換する前に表れていることが確認できる。このことは、注入材が間隙を完全に置換する前に目詰まりが発生していることを示している。

豊浦砂および飯豊硅砂6号における実験結果の比較を図-19(a)、(b)に示す。図-19(a)から最終的な間隙充填率は飯豊硅砂6号のケースの方が若干大きいことがわかる。これは、間隙体積が小さく、試料の粒径が大きいため間隙水を置換する効率が良かったも

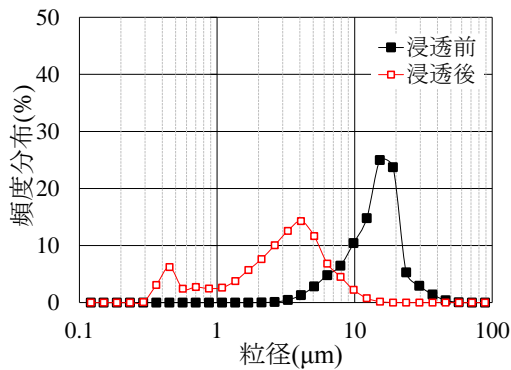


図-20 浸透前後における粒径の変化

のと推察される。一方で、間隙を置換した後の間隙充填率の増加割合は豊浦砂のほうが若干大きい。これは粒子の粒径が小さいため多くの微粒子が間隙に捕捉されることによって貯留量が多くなったことが原因と考えられる。図-19(b)に示されるのは注入時間と注入量の関係である。最終的な浸透注入量は飯豊砂 6 号のケースが豊浦砂のケースを上回っていることに加えて、注入量の減少割合は豊浦砂のケースよりも小さいことがわかる。これは、粒径の大きな砂においては土粒子間の開口部が大きいことが予想され、これによって目詰まり量が減少したこと起因すると考えられる。つまり、間隙の大きな粒状体は微粒子の貯留量が少なくなる、もしくは注入速度が高いほど供試体間隙内に目詰まりが発生しにくくなると考えられる。

図-20 は豊浦砂に濃度 7.5%の注入材を注入したケースにおける浸透前および浸透後の WC の粒径の頻度分布を示したグラフである。図から浸透前の注入材に含まれる微粒子の粒径は 15 μm が最も多いのに対して、浸透後の微粒子の粒径は 4 μm が最も多いことがわかる。このことから、豊浦砂供試体の間隙に捕捉されやすい粒子が 10 μm 以上であるといえる。

一連の実験から、供試体の重量変化から間隙充填率を算出することによって、供試体の密度が増大していることを確認した。しかし、排液中に微粒子が存在するため、注入材中のすべての微粒子が土骨格に付着し、骨格の強化に寄与するわけではないと考えられる。また、同量の注入材を注入した場合の密度増大効果は、注入材濃度が高いケースにおいて顕著であった。また、粒径の小さな試料ほど多くの微粒子を捕捉していることが示された。これらの結果から、試料の粒径に合った配合の注入材を選定する必要があると考えられる。

6. 浸透実験の再現解析

(1) 解析モデル

微粒子系注入材を飽和した供試体に注入する場合、その注入量に伴い微粒子の貯留量が増加すると考えられる。図-11(b)、図-12(b)に示されるような一次元注入実験における浸透距離と濃度比の関係では、供試体内の微粒子量が注入口ほど多く、排出口に近づ

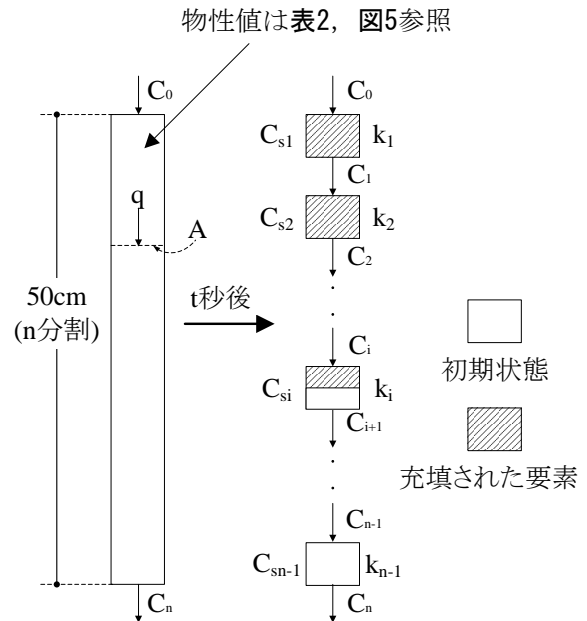


図-21 解析モデル

くほど少なくなるような距離依存性を示している。それに加えて、単位時間あたりの注入量が多い場合、間隙に微粒子が捕捉されにくいという結果も得られている。このような観点から、微粒子の目詰まりおよび貯留量の変化の要因を分析するとともに一次元モデルを作成しすることによって供試体内の微粒子の貯留を検討した。解析に用いるモデルの概念図を図-21に示す。解析対象領域は高さ 50.0cm とし、解析対象領域を 100 分割して、それぞれの要素において注入量に応じて貯留量と透水係数を与えることによって解析を行った。また、本解析において、注入材濃度は体積濃度 C で表すこととし、モデル地盤の注入口における境界では体積濃度 C は注入材の初期の体積濃度 C_0 と等しい。

一連の一次元注入実験の結果から、砂骨格の間隙内における微粒子量は、注入された微粒子の移流および補足によって増加することがわかった。そのため、間隙内において変化する微粒子量は以下の移流と吸着の方程式によって表すこととした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial C}{\partial x} = - \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 C は注入材の体積濃度、 C_s は要素に微粒子の貯留体積を間隙体積で除した値、 x は注入点からの距離、 t は時間、 v は注入速度を示す。また、注入材の移流速度がダルシー則に従うとし、微粒子の貯留による各要素の透水係数 k_e の変化を以下の式(3)により表現した。

$$k_e = k_0 e^{-a \cdot I} \quad (3)$$

ここで、 k_e は目詰まりを考慮した要素ごとの透水係数、 k_0 は初期透水係数、 e はネイピア数、 a は目詰まりパラメータ、 I は微粒子通過長であり、微小要素を通過した微粒子の総体積を要素の全断面積で除した値である。すなわち、式(3)では要素を通過した微粒子の量が多いほど透水係数が低減する。ただし、実

験では注入量が供試体の間隙体積を超えたとしても、供試体内の微粒子の濃度がそれほど大きくならないことから、間隙水の流れがある場合、間隙に貯留される微粒子の量に限界があると考えられる。それに加えて、一連の実験の結果から、注入速度が高い場合は目詰まりが発生しにくく、注入速度が低い場合、目詰まりが発生しやすいことが示されている。式(3)を各要素において適用し、ステップごとに各要素の透水係数の平均値を再定義することにより目詰まりによる注入量の低下を再現した。

一方、注入材を注入することによって供試体間隙内における微粒子の貯留量が増加する。微粒子の貯留を表す式を式(4)に示す。

$$C_s = C_{smax} \times \tanh(b \cdot I) \quad (4)$$

ここで、 C_s は要素に貯留された微粒子の体積を微小要素の間隙体積で除した値、 I は微粒子通過長、 C_{smax} は微粒子の限界貯留体積を微小要素の間隙体積で除した値、 b は貯留パラメータである。式(4)では、要素を通過した微粒子の量が多くなるほど貯留量が増加することを示している。また、貯留パラメータは各要素から流出する注入材の体積濃度 C と初期の注入材の濃度 C_0 の比によって変化させた。これにより、微粒子の貯留による間隙の閉塞に伴う貯留傾向の変化をモデル化した。

再現解析の対象とする実験は3章の図-11に示した分割可能なカラムを用いた実験である。解析に用いる物性値などは表-2、図-5、表-4に記載してあるものを用いた。解析条件を表-9に示す。

(2) 解析結果

提案したモデルを用いて注入時間と注入量の実験結果にマッチングした結果を図-22(a)、(b)に示す。図内のプロットが実験結果であり、破線が解析結果を示している。すべての解析ケースにおいて、実験結果と解析結果がほぼ合致していることが確認できる。また、注入距離と濃度比の関係においても解析結果が実験結果を追従していることが確認できる。特に、10kPa、20kPaにおける解析結果では濃度比が非線形的な挙動を示し、注入側で値が大きくなるような解析結果を得ることができた。

提案したモデルによって、実験結果をより正確に再現できたといえる。しかし、各パラメータの持つ物理的な意義は不明であり、各パラメータの物理的な意義を検討することが課題として挙げられる。

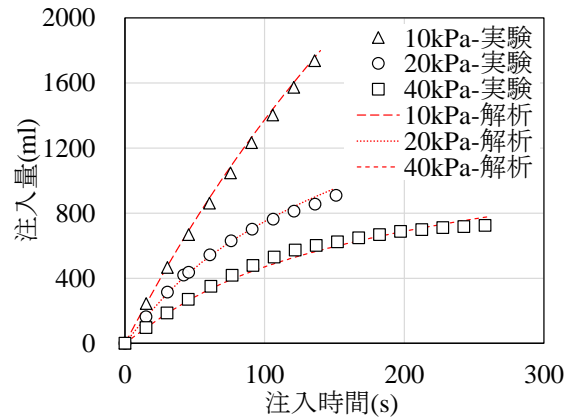
7. 改良砂の液状化強度特性

(2) 試験概要

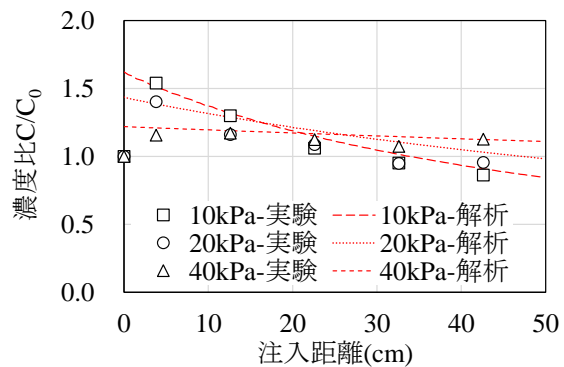
一般的に細粒分を含む砂は液状化しにくいとされており、その知見が F_L 法などの簡易的な液状化判定法に用いられている¹²⁾。一方で非塑性シルトと呼ばれる細粒分を含む砂の液状化強度は、同密度の砂よりも減少するという逆の試験結果^{13),14),15)}も得られている。そのため、細粒分を砂に注入することによ

表-9 解析条件

試料	注入圧力 (kPa)	パラメータ	
		a	b
硅砂5号	10	4.00	0.07
	20	2.20	0.04
	40	0.40	0.01



(a) 注入時間と注入量の関係



(b) 注入距離と濃度比の関係

図-22 解析結果

表-10 試験条件

Case	相対密度 D_r (%)	注入材濃度 (%)	$P/(2Ac/\sigma'_0)$	B 値
Case1	60.0	-	0.133	0.97
Case2			0.144	0.96
Case3			0.150	0.97
Case4			0.170	0.95
Case5			0.187	0.97
Case6			0.206	0.97
Case7	70.0	-	0.211	0.99
Case8			0.227	0.95
Case9			0.247	0.99
Case10			0.270	0.95
Case11	60.0	6.0	0.144	0.97
Case12	60.0	12.0	0.144	0.99
Case13			0.159	0.99
Case14			0.179	0.96
Case15			0.200	0.97

て必ずしも液状化強度が上昇すると言えない。過去の細粒分が混合された砂の液状化試験^{16,17)}においては細粒分が砂同士の接点に入り込むなど、砂とともに土骨格を形成する場合を想定していることを考えると、既に形成されている砂骨格に対して、細粒分を後から浸透注入した際の液状化強度特性は把握されていないと言える。また、本研究においては微粒子単体での使用とともに、先に述べたようにマイクロバブル水混入工法の補助材としての効果にも期待している。その際の強度発現メカニズムを理解するために、まずは微粒子単体の液状化強度を把握する必要がある。これらの理由から微粒子を未改良砂に注入した際の液状化強度特性を検討した。

試験条件を表-10に示す。本試験において用いる供試体の寸法は直径5.0cm、高さ10.0cmである。Case1からCase10については未改良砂の液状化強度を求めた。Case11からCase15については、改良体を作製するために飽和供試体作製後に注入材を注入する工程を設けて供試体を作製した。その後、有効拘束圧98kPaで圧密し、所定の応力比で試験を行った。また、細粒分を注入したため、载荷中の間隙水圧が供試体内部で均一にならない可能性が考えられた。そのため、载荷周波数を0.01Hzに設定し、試験を実施した。

(2) 試験結果

図-23に一連の結果から得た液状化強度曲線を示す。図から、WCを砂骨格中に浸透注入させることによって、液状化強度が増加していることを確認できる。しかし、相対密度60.0%の砂にWC濃度12.0%の注入材を注入し、間隙を一回分置換した場合の相対密度は78%程度まで上昇すると算定されるが、実際の液状化強度は相対密度70.0%の供試体よりも低い。これは、注入したWCのすべてが供試体内において骨格を形成するのではなく、間隙水を浮遊する粒子や土粒子同士の接点近傍以外の部分に粒子が付着する可能性があるためと考えられる。

図-24にCase1とCase12の試験結果を示す。図-24(a)からCase12は未改良のCase1よりも軸ひずみが卓越するまでの繰返し回数が多く、軸ひずみが伸び始めた後の繰返し回数も若干多い。図-24(b)に示される繰返し回数と過剰間隙水圧比を見ると、未改良砂は繰返し载荷に伴う過剰間隙水圧の増加が早期に発生している。一方で改良砂においては、過剰間隙水圧の上昇が未改良砂に比べて緩慢であり、完全液状化状態直前における過剰間隙水圧の急激な上昇も同様の挙動を示している。また、軸ひずみが発達する直前の過剰間隙水圧比は未改良砂で0.6程度、改良砂で0.8程度である。それに加え、図-24(c)における有効応力経路を見ると、改良砂においてはサイクリックモビリティに至るまでの繰返し回数が多い。これは、注入したWCが土粒子の接点近傍に付着することにより骨格の変形を妨げ、間隙水圧の上昇を抑制したためと考えられる。しかしながら、Case12はCase1と同様に過剰間隙水圧比が1に達するなど未改良砂と同様の挙動を示している。これは、土骨格に付着していた粒子が主として骨格を形成す

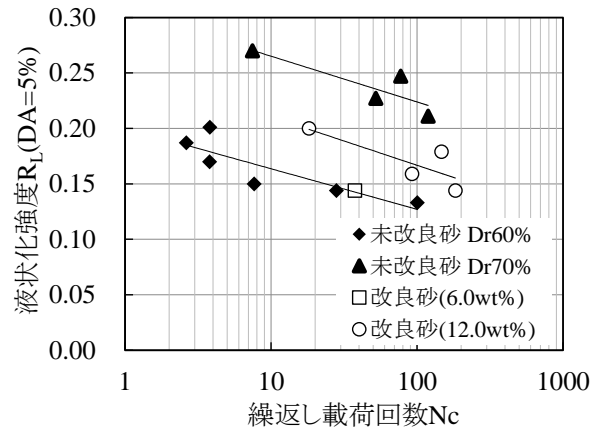
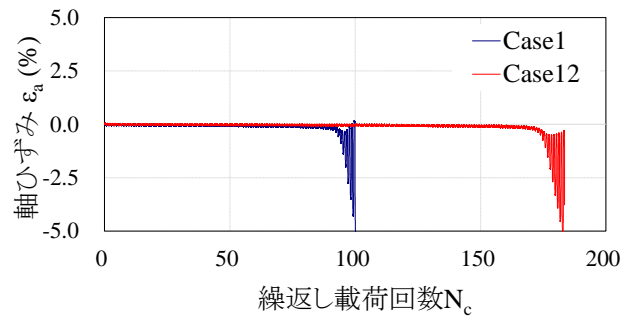
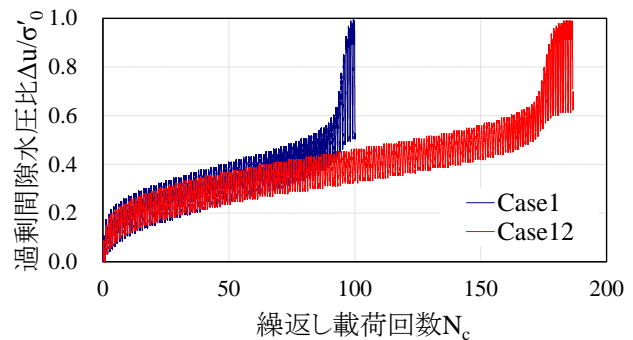


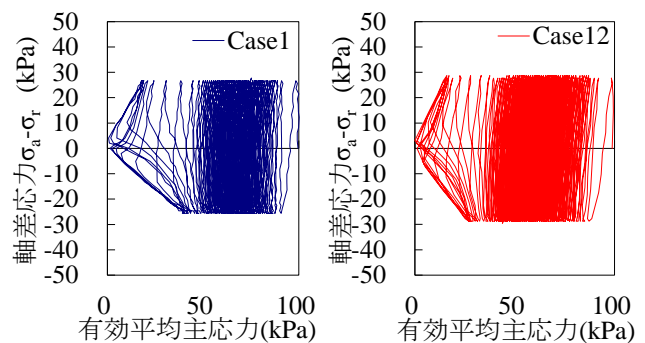
図-23 液状化強度曲線



(a) 繰返し回数と軸ひずみの関係



(b) 繰返し回数と過剰間隙水圧比の関係



(c) 有効応力経路

図-24 Case2とCase12の試験結果の比較

る砂粒子に比べて非常に小さいため、改良砂の骨格構造が破壊されると同時に間隙水中を移動もしくは浮遊し、骨格構造の強化に寄与しなくなるためと考えられる。

8. LIQCAによる要素シミュレーション

(1) パラメータの決定

前章において得られた繰返し非排水三軸圧縮試験の結果から、有効応力解析に用いる弾塑性モデルパラメータを決定するために要素シミュレーションを行った。解析に用いるソフトはLIQCA2015⁹⁾であり、液状化解析用に設定された構成則のみを用いて要素シミュレーションを行うことができる。硅砂5号のパラメータは前章において行った液状化試験の結果を参考に設定した。表-11に解析に用いたパラメータセットを示す。なお、表-11中の破壊応力比 M_f 、変相応力比 M_m は既往の研究¹⁸⁾において設定されていた値を用いた。改良砂におけるパラメータは未改良砂と同様に液状化試験の結果を参考に設定し、変更するパラメータは、ダイレイタンシー係数 n 、硬化関数中のパラメータ B_0 、規準ひずみ γ_r^p 、規準ひずみ γ_r^E の4つとした。

(2) シミュレーション結果

要素シミュレーションの結果を図-25(a), (b)に示す。図-25(a)から、未改良砂における解析では繰返し回数が多いプロットにおいては実験結果をよく再現できているが、少ない繰返し回数のプロットにおいては一致しない箇所がある。一方で、図-25(b)に示す改良砂における結果では解析結果が実験結果を精度よく追従していることが分かる。また、未改良砂、改良砂ともに液状化強度比 R_{L20} における液状化強度は解析値、実験値ともに一致しているため、比較的良好に実験を再現できていると考えられる。

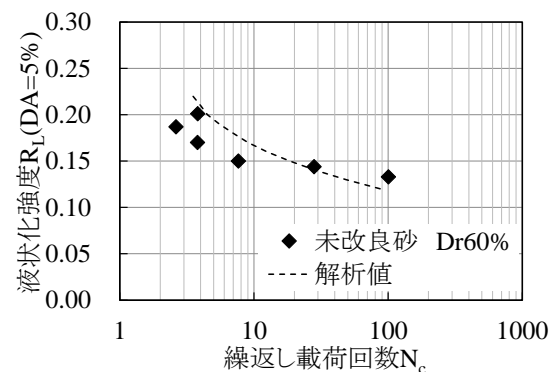
本解析により、LIQCAの要素シミュレーションを用いて、改良砂の弾塑性モデルパラメータを設定することができた。ただし、擬似過圧密比OCRなどは一般的な値を当てはめているため、より正確な解析結果を得るには、種々の要素試験が必要であると考えられる。

9. まとめ

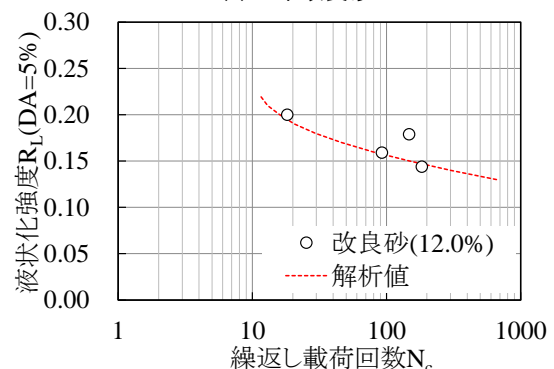
- 粗大な粒径を有するWCは粉砕することによって、 $10\mu\text{m}$ 程度に粉砕することが可能であり、一連の注入実験から豊浦砂などの細砂にも注入することができる。
- WCを用いた一次元注入実験から、注入速度が高い場合、土粒子間隙中を流れる微粒子は供試体全体に浸透し、濃度分布がほぼ一定となる。一方、注入速度が低い場合、注入口付近における微粒子濃度が上昇する。
- 一次元注入実験結果から解析モデルを作成し、再現解析を行った。しかし、パラメータの物理的意味が不明確であるため、検討が必要である。
- 粉砕したWCを細砂に注入することによって供試体の間隙が微粒子で充填されていることを確認した。また、間隙を置換後における間隙充填率の増加は微粒子の貯留によるものと考えられる。そのためこの部分が微粒子による骨格の強化の一因で

表-11 パラメータセット

繰返し弾塑性モデル		未改良	改良
無次元化初期せん断弾性係数	G_0/σ'_m	372	372
初期間隙比	e_0	0.780	0.780
圧縮指数	λ	0.0091	0.0091
膨潤指数	κ	0.0052	0.00052
擬似過圧密比	OCR	1.0	1.0
ダイレイタンシー係数	D_0	3.00	3.00
ダイレイタンシー係数	N	6.00	9.00
破壊応力比	M_f	1.150	1.150
変相応力比	M_m	0.945	0.645
硬化関数中のパラメータ	B_0	3150	8000
硬化関数中のパラメータ	B_1	20.0	20.0
硬化関数中のパラメータ	C_f	0	0
規準ひずみ(塑性剛性)	γ_r^p	0.010	0.008
規準ひずみ(弾性剛性)	γ_r^E	0.003	0.010
異方性消失のパラメータ	C_d	2000	2000



(a) 未改良砂



(b) 改良砂

図-25 実験結果と解析結果の比較

あることが推察される。

- 繰返し三軸試験の結果から、濃度の高いWC水を注入することによって液状化強度が増大した。しかしながら、注入材の注入によって増加する相対密度に相当する液状化強度増加は見られなかった。これにより、注入した微粒子のすべてが骨格の補強に寄与していないことが予測された。

謝辞: 本研究を行うにあたり、一般社団法人先端建設技術センター永尾浩一氏、強化土エンジニアリング株式会社佐々木隆光氏に実験・論文執筆の指導など様々なご指導ご鞭撻をいただきました。また、佐藤工業株式会社須佐見朱加女史には実験の補助をしていただきました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学会関東支部造成宅地の耐震対策に関する委員会：宅地造成地の耐震対策に関する研究委員会報告会－液状化から戸建て住宅を守るための手引き－, pp.84-85, 地盤工学会関東支部, 2014
- 2) 柴田 徹：液状化対策の効果, 土質工学会・阪神大震災報告会-地盤被害とその教訓-講演概要集, pp.29-30, 1995
- 3) 安田 進：東日本大震災後における住宅地の液状化対策工法の開発, 地盤工学会誌 Vol.62 No.6, pp.1-5, 2014
- 4) 川井 俊介, 鈴木 毅彦, 小泉 亮之佑, 島田 俊介：既設地盤直下の薬液注入工法の開発(その 2) 誘導式ボーリングを用いた注入システムの開発, 土木学会年次講演会講演概要集, Vol.60, pp.513-514, 2005
- 5) 斎藤 潤, 田中 俊行, 北本 幸義, 竹内 仁, 金沢 智彦, 西垣 誠：超大型地震に対する極超微粒子注入材に液状化対策, 土木学会年次講演会講演概要集, Vol.66, pp.487-488, 2011
- 6) 小山 忠雄, 島田 俊介, 佐々木 隆光, 米倉 亮三：恒久グラウト野外試験における 12 年後液状化強度の確認, 土木学会年次講演会講演概要集, Vol.67, pp.75-76, 2012
- 7) 金沢 智彦, 若林 伸一, 西垣 誠, 山本 拓治, 阿部 義宏：極超微粒子注入材による地盤注入工法の開発-材料特性-, 土木学会年次講演会講演概要集, Vol.65, pp.957-958, 2010
- 8) 京藤 敏達, 塩田 祐介：コアング効果による渦崩壊が誘起する音波および流れの解析, RIMS 研究会報告集, No.1946, 2p., 2014
- 9) 液状化解析手法 LIQCA 開発グループ：LIQCA2D15・LIQCA3D15(2015年公開版)資料, 一般社団法人 LIQCA 液状化地盤研究所, 2015
- 10) 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
- 11) Mitchell J.K : Soil Improvement-State-of-the-Art Report, *The international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Vol.4, pp.528-532, 1981
- 12) 安田 進：液状化の調査から対策工まで, pp.103-121, 鹿島出版会, 1997
- 13) Polito, C.P., Martin, J.R : "Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, 127(5), pp.408-415, 2001
- 14) Zlatovic, S., Ishihara, K : "Normalized behavior of very loose nonplastic soil: Effects of fabric", *Soils and Found*, vol.37(4), pp.47-56, 1997
- 15) 原 忠, 國生 剛治：砂および非排水強度特性に及ぼす非塑性細粒分の影響, 土木学会地震工学論文集, Vol.28/No.93, pp.1-8, 2000
- 16) 桑野 二郎, Sapkota, Binod K., 橋爪 秀夫, 高橋 健吾：細粒分を含む砂の液状化特性, 土と基礎, Vol.41, No.7, pp.23-28, 1993
- 17) 佐藤 正行, 小田 匡 寛, 風間 秀彦, 小瀬木 克己：細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.271-282, 1997
- 18) 安楽 宗一郎, 風間 基樹, 渦岡 良介, 仙頭 紀明, 三藤 正明, 熊谷 隆宏, 吉田 誠：浸透処理固化改良土における盛土構造物の地震時シミュレーション, 土木学会年次講演会講演概要集, Vol.63/III-029, pp.57-58, 2009

A Study on Infusion of Silica Microparticles into Soil Particles

Kentaro UEMURA, Naoaki SUEMASA

A liquefaction has been drawn an attention since the Niigata earthquake occurred in 1964. Since then, many technical methods for liquefaction countermeasure have been developed and are practically used at present. However, it is difficult for the most of countermeasures to apply for the ground under existing buildings because they need large equipment. Generally, a permeable grouting method is adopted for the ground under this condition. In this method, however, a costly injection material such as suspension grout is used, which is durable enough to maintain the effectiveness permanently and permeable in sandy ground. For that reason, silica microparticle is proposed as a relatively affordable injection material in this study. In this paper, in order to confirm the penetration characteristics of microparticles and the liquefaction strength of improved sand, experimentation and analysis of one-dimensional injection and a triaxial test were carried out. As a result, clogging by microparticles was confirmed through the experiment. In addition, the analysis result which was very similar to the clogging tendency in experiment result was obtained. Moreover, increase of liquefaction strength was confirmed by injecting silica microparticles and accordingly reinforcing the sand skeleton.