

氏 名	おお の やす とし 大 野 康 年
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2694 号
学位授与の日付	平 成 18 年 7 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 土 木 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	特殊シリカ液を用いた浸透注入改良砂の力学特性と地盤改良技術に関する研究
論文調査委員	(主 査) 教 授 岡 二 三 生 教 授 嘉 門 雅 史 教 授 大 津 宏 康

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、特殊シリカ液を用いた浸透注入改良砂の力学的特性を実験により明らかにし、実験結果に基づいて改良砂の繰返し弾塑性構成式を導出するとともに、特殊シリカ液を地盤へ浸透注入する改良技術を用いて岸壁・護岸の裏埋め砂の吸い出し対策法の提案とその有効性を実証した結果をまとめたものであり、序論、結論を含め7章から成る。

第1章は序論であって、研究の背景として都市部および沿岸域において必要とされている災害の対策手段の一つとして考えられる地盤改良技術の制約条件を示し、これらの条件下で適用可能な薬液浸透注入による地盤改良技術の諸問題および従来の研究を述べるとともに、本研究の目的および各章の概要を示している。

第2章では、薬液注入方法や使用材料を含めた薬液注入工法の発展と歴史について述べるとともに、水ガラス系溶液型グラウトの既往の研究について1)改良砂の固結形状、2)改良効果の評価法、3)長期耐久性の三つに分類して整理した。特殊シリカ液を用いた地盤改良技術については、その主な用途と、設計手法、施工管理手法等を含めた地盤改良技術の開発に必要な項目を示した。また、特殊シリカ液を用いた地盤改良技術に関する既往の研究について、1)改良砂の変形・強度特性、2)液状化対策工法、3)吸い出し対策工法、および4)施工技術の四つに分類して整理し、現状における課題について述べている。

第3章では、本研究において使用した溶液型特殊シリカ液の基本特性について整理するとともに、施工時の現地条件が薬液ゲル化時間に与える影響について基礎的な研究を実施し、以下のような新しい知見を得ている。

- 1) 地下水流速下の改良砂形成には動水勾配、薬液ゲル化時間、地盤密度が影響し、動水勾配が大きくなるほど、薬液ゲル化時間が長くなるほど、また地盤の相対密度が小さくなるほど改良砂の形成が困難になるが、ゲル化時間を調整することにより改良砂の形成が可能である。
- 2) 砂と薬液とを混合した場合、砂中に含まれる鉱物が薬液の有する pH 範囲にて溶出する鉱物ではゲル化時間が短くなる。これは薬液の反応剤(酸)と鉱物との化学反応によりゲル化時間調整に必要な反応剤の量が減少することによる。
- 3) 薬液が流動している条件下では薬液ゲル化時間が遅延するが、これは薬液の流動が薬液のゲル化時の重合を阻害しているものと考えられる。また、従来、薬液注入において土中ゲル化時間の測定で使用してきた方法は真の土中ゲル化時間を測定しているとは言えない。

第4章では、拘束圧条件下で作製・養生する新しい薬液浸透改良砂作製手法を示すとともに特殊シリカ液を用いた浸透注入改良砂の特性について明らかにした。さんご混じり砂中に含まれる炭酸カルシウムと酸性反応剤との化学反応により発生する炭酸ガスは拘束圧ゼロの条件下では炭酸ガスの気泡が改良砂中残留し、スポンジ状の改良砂が形成されるが、拘束圧条件下では1)発生する炭酸ガスの気泡が小さく、砂粒子の拘束によって炭酸ガスによる砂粒子の浮き上がりが少ないことから改良砂中には気泡の残留がほとんど見られず、十分な強度を有する。これにより、従来では適用が困難とされてきた炭酸カルシウムを多く含む地盤においても酸性反応剤を用いた特殊シリカ液の適用が可能である。ここで用いた改良砂作製手法に

より、作製・養生時の拘束圧を考慮していない従来の改良砂作製手法では困難であった炭酸カルシウムを多く含有する砂の改良強度を評価することが可能となった。

走査型電子顕微鏡（SEM）を用いた改良砂の微視的構造を観察から、改良砂は砂粒子間に付着する薬液ゲルが砂粒子同士を結合しており、薬液ゲルの充填により改良砂の間隙は狭くなっているが間隙は存在する。これは、従来から言われてきたような改良砂の間隙が全て薬液のゼリーにより置き換わるといった改良原理とは異なり、改良砂の組成は固体相（土粒子骨格）、薬液ゲル相（水、シリカ）および液体相（間隙水）からなる。透水試験より、改良砂の透水係数は未改良砂と比較して $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 倍と小さくなり、改良砂の一軸圧縮強さが大きくなると若干小さくなる傾向を示す。

繰返し中空ねじり試験等の各種室内試験の結果から次のような改良砂の膨潤・圧縮特性および変形・強度特性が明らかになった。

- 1) 改良砂の圧縮指数 λ 、膨潤指数 κ は未改良砂とはほぼ同じ値を示す。これは改良砂の間隙中の薬液ゲルが排水・吸水にそれほど影響しないことを意味している。
- 2) 改良砂は未改良砂と比較して内部摩擦角 ϕ_d はほぼ同じ値を示すが、粘着力 c_d が増加する。これは薬液浸透注入改良土が元来所有している土の強度を低下させることなく、粘着力を増加させていることを示している。
- 3) 改良砂は正のダイレイタンスーを示し、最大圧縮点に達した後、変形が進行するにつれて応力が減少するひずみ軟化現象を示す。また、改良砂はひずみ速度が遅いほど最大圧縮点での軸ひずみは大きい。また、体積収縮量は小さく、体積膨張量は大きい。
- 4) 改良砂の破壊線、変相線は軸差応力軸、せん断応力軸に対して切片を有し、破壊線と変相線とで囲まれる領域が未改良砂よりも拡大している。この破壊線と変相線とで囲まれる領域は正のダイレイタンスーを発揮する領域であり、領域の拡大が改良砂の改良効果を発揮するメカニズムの一つとなっていると考えられる。
- 5) 改良砂は未改良砂と比較して液状化強度比が $0.2 \sim 0.3$ 増加するが、改良砂の繰返し強度曲線は密詰砂より傾きが小さい。繰返しの初期にひずみが発生するが、繰返し回数に応じてひずみの増加量は減少し、最終的に収束傾向にある。また、改良砂と密詰砂のひずみの発生傾向は異なり密詰砂では繰返し回数に応じて一定の割合で徐々にひずみが増大する。
- 6) 改良砂は繰返し載荷により、繰返しの初期に平均有効応力の減少が確認されるが、繰返しとともに、平均有効応力の減少量は小さくなり、最終的に一定の値に収束する。改良砂の等価せん断剛性率比は未改良砂、密詰砂と比較して片振幅せん断ひずみの増加に伴う低下が小さく、ひずみレベルが大きくなっても高い剛性を維持する。また、改良砂の K_0 値は未改良砂、密詰砂と比較して小さい値を示す。
- 7) 改良砂の pH とその周辺への影響について検討するため改良砂の材令毎の pH 変化と改良砂を水中養生した場合の養生水の pH 変化を測定した結果、改良砂の pH は中性域にあり、養生日数による変化がほとんどないことが明らかになった。

第5章では、特殊シリカ液を浸透注入した改良砂に対して、岡らの砂の繰返し弾塑性構成式を拡張して改良砂の繰返し弾塑性構成式を誘導した。構成式の拡張により新たに追加された改良砂の材料パラメータの意味とその決定法について示した。豊浦改良砂の中空繰返しねじりせん断試験の要素シミュレーションを実施した結果、改良砂特有の変形・強度特性を再現している。

第6章では、特殊シリカ液を用いた薬液浸透注入工法による吸い出し防止法について一次元の浸透破壊実験および変動水圧破壊実験を行った。浸透圧および変動水圧作用時の改良砂の破壊形態は浸透圧の作用面が剥離した後、クラックが発生することで破壊に至る。流出流量に着目すると、改良砂では破壊に至るまでは流出流量の変化がほとんど見られず、破壊時に流出流量が急増する。変動水圧試験結果より得られる改良砂の試料長（改良層厚） H と破壊時間 t_{cr} との間には相関性があり、2次の多項式で近似することができる。改良砂の破壊時間は改良強度、試料長の増加に伴い長くなる傾向を示すことが明らかとなった。これらの実験結果より、耐用年数を考慮した新しい改良強度・層厚の設定手法について示した。本手法により決定した改良強度・層厚について現地試験施工と波浪による背面砂地盤の吸い出し解析を実施し、本技術の吸い出し防止技術の有効性について研究を行った。本研究で示した改良強度・層厚決定法を用いて改良強度・層厚手法を設定し、現地試験施工を実施した結果、吸い出しの要因となる潮位や波浪による水位変動の伝搬が埋立て地盤内で著しく抑制され、ケー

ソン前面の水位変動が埋立て地盤に伝わりにくくなり、未対策時には液状化に至っていた裏埋め砂が、対策時には液状化しないことを明らかにした。

第7章は結論として、本研究によって得られた結果をまとめるとともに、今後の課題について述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、特殊シリカ液を用いた地盤の薬液浸透注入工法を確立するために、まず、浸透・固化特性および浸透注入改良土の力学特性を明らかにするとともに、改良砂の構成式を導き、この構成式を用いた数値解析結果とフィールドでの観測結果から地盤改良メカニズムを明示し、これに基づいて新たに地盤劣化防止工法を開発した結果をまとめたものであり、得られた成果は以下のとおりである。

1. 溶液型特殊シリカ液の施工時の条件が薬液ゲル化時間に与える影響について基礎的な研究を実施し、注入時の材料の固化時間や拘束圧下での注入液と砂粒子中に含有されるカルシウムとの反応によって発生する炭酸ガスの固化体に与える影響等を明らかにしている。

2. 特殊シリカ液で改良された砂試料に対する三軸排水および非排水試験から、改良砂は、変相角が減少するダイレイタンスー特性及び粘着力が増加すること、非排水中空ねじりせん断試験から、改良砂は未改良の砂に比較して、2-3 倍の液状化強度であることを明らかにし、改良砂の繰返し弾塑性構成式を導いている。

3. 波浪による土の吸出し防止技術確立のために、改良砂の変動水圧による浸透破壊実験を行い、透水係数の減少と強度の増大に基づいた改良砂の破壊時の動水勾配の増加特性、ならびに改良効果の薬液濃度依存性に関する新たな知見を得ている。また、改良強度と試料長の増加に伴い破壊時間が増加することを明らかにし、地盤の浸透破壊時間の予測を可能にする試料長と破壊時間の間のユニークな関係を見出している。

4. 改良砂の挙動に関する基本的な知見と改良砂のモデルを用いた液状化解析手法とを用いて、岸壁背後の裏込め土の吸出しを防止するための改良強度や改良領域を決定する技術を提案している。さらに、実際に吸出しによって陥没が発生した岸壁背後地盤の改良に本工法を適用し、現地での観測結果から本研究において提案した防止技術の有効性を実証している。

以上、要するに本論文は、特殊シリカ液により改良された地盤の力学的性質を実験的に明らかにするとともに、改良土の提案構成モデルを用いた数値解析に基づく吸出防止や液状化防止技術を提案し、試験改良工事とフィールドでの観測によってその有効性を明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年5月29日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。