

# 論文要旨

2025 年 1 月 7 日

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |     |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-------|
| ※報告番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 第 号 | 氏 名 | 本橋 俊之 |
| 主論文題名<br>低炭素型薬液による地盤改良工法の改良効果と品質評価手法の提案に関する研究                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |     |       |
| 内容の要旨<br>薬液注入工法は、任意に固化時間を調整できる材料（薬液）を、地中に設置した注入管を介して地盤中に圧入し、地盤の止水や強度増加を図る地盤改良工法である。本工法は施工設備が小型であり、作業に必要な空間も小さいので、社会資本の建設や既設構造物の維持管理において不可欠の技術として広く用いられている。しかし一方では、薬液注入工法は注入した薬液の浸透範囲や、その固結状況を把握することが困難な工法である。このため工法としての信頼性の低さが大きな課題となっていた。<br>本論文は、新しく開発した低炭素型薬液を用いた薬液注入工法について、新しい視点から多角的に評価することにより、低炭素型薬液の性能を確認して、低炭素型薬液を用いた薬液注入工法の信頼性を確立することを目的としている。低炭素型薬液は、薬液製造に係る CO <sub>2</sub> 排出量を従来薬液と比較して約 60%低減できるため、現場適用が先行しており薬液としての性能評価が求められている材料である。低炭素型薬液を用いた薬液注入工法を評価する視点は大きく二つに分けている。一つ目は低炭素型薬液の注入によって改良された地盤の改良特性についてであり、室内試験によって評価している。二つ目は低炭素型薬液によって改良された地盤の改良品質についてであり、数値解析による事前の品質評価を提案している。<br>一つ目の評価のうち、まず、地盤の改良特性のうち最も基本的な、改良地盤の強度発現メカニズムについては定説が確立しているとは言い難い。本研究においては、低炭素型薬液によって改良された改良地盤の強度発現メカニズムについて、土粒子の固定効果を新たな視点として取り入れて、改良効果の持続性の確認と合わせて明らかにしている。低炭素型薬液のヒドロゲルは、土粒子間隙において体積収縮は発生しないことから、改良地盤の強度発現は従来言われていた粘着力の付与と増加であり、ヒドロゲルの体積収縮による土粒子の拘束効果は存在しない。一方、土粒子が薬液の固化によって固定される効果として、内部摩擦角の安定と増加が挙げられる。改良地盤の内部摩擦角は、改良体の破壊ひずみまでは未改良地盤と同等の値を維持するが、破壊ひずみを超えて変形が進行すると、ヒドロゲルが分断されて粘着力がゼロとなっても内部摩擦角は増加して未改良地盤よりも大きな値となる。これは、薬液によって土粒子が固定されたインターロッキング効果であると考えられる。これらの強度発現メカニズムは、材令で 300 日以上での改良効果の持続性が確認された。<br>次に、低炭素型薬液による地盤改良の適用として液状化対策が挙げられる。本研究においては、低炭素型薬液の注入による改良地盤の液状化特性について、両振幅ひずみを一定とする繰返し非排水三軸試験による評価を行い、実務設計に使用される液状化強度と関連付ける手法を提案した。液状化強度を評価する手法は、応力を一定とする繰返し非排水三軸試験が一般的であり広く実施されている。しかし、この方法は①比較的均質な供試体が 4 本必要である、②液状化とひずみ軟化の区別ができない、③レベルⅡ地震動に対応できない場合がある、などの課題が指摘されており、このため阪神淡路大震災以降から液状化試験の方法が模索され続けている。その中の一つの方法として両振幅ひずみを一定とする繰返し非排水三軸試験がある。この試験方法は、①1 本の供試体で試験が可能、②剛性低下を評価できるので液状化とひずみ軟化が区別できる、③レベルⅡ地震動に対応したひずみで試験が可能、などの利点がある一方で、 |     |     |       |

※印欄記入不要

# 論 文 要 旨

2025 年 1 月 7 日

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |   |   |     |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|-----|-------|
| ※ 報告番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 第 | 号 | 氏 名 | 本橋 俊之 |
| <p>内容の要旨</p> <p>実務における設計指針との関連がつけられていないので実用化には至っていない。本研究では、低炭素型薬液で改良した改良地盤について、従来の応力一定の繰返し非排水三軸試験の結果と、両振幅ひずみを一定とする繰返し非排水三軸試験の結果を比較して検討・評価した。その結果、両試験の結果は一致しないが、本研究で提案する両振幅ひずみ一定の繰返し非排水三軸試験結果を換算することにより、実務設計における液状化強度比として採用できることを明らかにした。</p> <p>二つ目の改良品質の評価は、従来は改良後の品質確認という形で行われてきた。また、事前の品質評価として、所定の品質を得るための条件を評価する方法が提案されているが、現場試験が必要であること、および均一地盤を前提とする注入理論に基づいていることから、実務と理論の乖離が課題とされてきていた。しかしながら近年では、コンピュータ能力の向上や数値解析技術の進展によって地盤の不均一性を前提としたシミュレーションが行われるようになってきている。このため、薬液注入工法においても不均一地盤を前提とした数値解析によって、実務における現象との整合性を図ることが可能になってきていると考えられる。本研究においては、薬液注入工法による改良地盤の事前品質評価として、不均一地盤を再現した数値解析によって改良効果のリスクを予測・評価する手法を提案している。数値解析手法は、浸透流解析と MPS-DEM 連成解析の二つの方法を採用している。浸透流解析では、薬液の粘性と地盤の透水係数をパラメータとして薬液の浸透挙動を浸透流速で表現して評価した。その結果、薬液の粘性よりも地盤の透水係数が薬液の浸透挙動に対して支配的であることが明らかとなった。また、地盤の透水係数のバラツキを三角形の確率分布により表現した不均一地盤において浸透流解析を行った結果、確率分布の大きい透水係数が支配的であり、均一地盤との浸透挙動の相違が大きくても 10%程度であることが分かった。MPS-DEM 連成解析では、薬液浸透中における薬液の粘性変化が浸透挙動に与える影響を評価した。その結果、薬液浸透中に薬液が固化してしまうと、薬液の浸透範囲が約 13%程度小さくなる可能性があることが分かった。また、MPS-DEM 連成解析では、間隙水と薬液を MPS 粒子で連続体として、土粒子を DEM 粒子の個別要素として表現しているが、これによって薬液の浸透挙動を薬液と地盤との相互作用として再現できる可能性があることが明らかとなった。これらの数値解析結果を、野外における注入実験と比較した結果は、従来から経験的に判断されていた薬液注入に適している地盤の透水係数と概ね一致することから、数値解析による事前品質評価の妥当性が明らかとなった。数値解析による事前品質評価手法は、まず浸透流解析によってその地盤における改良リスク（薬液の浸透範囲）を評価する。次に MPS-DEM 連成解析で浸透挙動を評価して、その地盤に適用できる注入速度を設定する。最後に設定した注入速度で再度浸透流解析をして改良リスクを評価する手順となる。</p> <p>新しく開発した低炭素型薬液は、カーボンニュートラルに貢献できる土木材料である。本研究によって、低炭素型薬液の改良強度発現とその改良効果の持続性、動的特性としての液状化対策における改良効果とその新しい評価方法が明らかとなった。また、低炭素型薬液を用いた薬液注入工法による改良地盤の事前品質評価手法について、数値解析による評価手法を提案した。今後は、実地盤におけるデータを積み重ねて評価方法を確実にするとともに、データサイエンスの方法などを導入して研究を進める必要がある。</p> |   |   |     |       |

※印欄記入不要