

様々な粒度特性を有する砂質土に対する
溶液型薬液注入工法の適用性に関する研究

(論文の内容の要旨)

秋本 哲平

本研究で対象としている溶液型薬液注入工法は、浸透性が高い恒久薬液を地盤内に低圧で注入し、間隙水と置き換えることによって地盤を固化する工法である。土粒子骨格を壊すことなく地盤改良が行えるため、周辺地盤への影響が少ないことから、既設構造物直下の液状化対策として広く適用されている。しかしながら、近年発生した、東北地方太平洋沖地震（2011年）、熊本地震（2016年）、北海道胆振東部地震（2018年）および能登半島地震（2024年）では、震度7が観測されるなど、今後ますます入力レベルが大きくなっていくレベル2地震動に対する適用性は定かでない。また、地震動が大きくなると、均質な砂質地盤だけでなく、礫質砂や細粒分質砂といった不均質な地盤も改良対象となる。礫質砂は、溶液型薬液注入工法では強度が発現しにくいことが課題であり、細粒分質砂は、地盤の透水係数が低いため、浸透注入が困難となることが課題である。

薬液改良土の液状化強度は、繰返し載荷時に発生するひずみの大きさを評価されているため、薬液改良土の特徴である粘り強さを適切に評価できていないと考えられる。したがって、設計時の設計基準強度の設定や地震応答解析時のパラメータ設定にも課題がある。

また、溶液型薬液注入工法は、セメント系固化材を用いた地盤改良に比べて低強度の地盤改良工法であるため、特に礫混じり砂では、施工後の品質確認のための試料採取時に乱れが生じやすく、改良強度を適切に評価できないことも課題である。

本研究では、このような課題を解決するため、薬液改良土の強震動に対する抵抗性、土質条件から発現強度を推定する方法、薬液改良土の適切な強度評価方法、低強度改良土に対する事後調査方法について検討を行った。

第1章の「序論」では、1964年の新潟地震、1995年の兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震、2018年の北海道胆振東部地震、2024年の能登半島地震での液状化による被害状況をまとめるとともに、既存の液状化対策工法を整理した。本研究の対象である溶液型薬液注入工法は、既設構造物直下地盤の液状化対策が可能な数少ない工法であるが、一方で効果を確実に発揮するための解決すべき課題を示した。

第2章の「薬液改良土の強震動に対する抵抗性の確認と設計への反映」では、高いせん断応力比での繰返し中空ねじりせん断試験を実施し、薬液改良土の変形挙動を確認した。また、地震後の支持力を把握するために、繰返し載荷によって上昇した過剰間隙水圧が残留した状態で非排水三軸圧縮試験（CUB試験）を実施し、薬液改良土の非排水せん断強度を確認した。本章によって得られた知見は以下の通りである。

- (1) 薬液改良土は、一軸圧縮強さが大きくなるほど最大過剰間隙水圧比は小さくなり、一軸圧縮強さが100 kN / m²程度を超えると、過剰間隙水圧比は0.95未満となり、有効応力はゼロにならなかった。
- (2) 未改良砂のせん断剛性は、繰返し載荷により、せん断剛性比0.4付近から急激に減少しゼロになる。一方、薬液改良土のせん断剛性は、せん断初期に低下するものの、その後の急激な減少はみられず、初期と比べて10%程度のせん断剛性が残存する。さらに一軸圧縮強さ22kN/m²程度の低強度改良体でもせん断剛性比がゼロにはならなかった。
- (3) 粘り強さの評価指標である正規化累積損失エネルギーは、未改良土に比べて薬液改良土が約100倍大きくなっており、強震動に対しても粘り強い地盤に改良されることがわかった。
- (4) 薬液改良土は、過剰間隙水圧が上昇した状態であっても、繰返し載荷前と概ね同等の非排水せん断強度を有している。
- (5) 繰返し載荷によって発生する過剰間隙水圧比が大きいほど静的載荷初期の剛性が低下し、拘束圧が大きいほどその低下割合は大きくなるものの、繰返し載荷前の10%程度は剛性が残存する。
- (6) 強震後の支持力検討を全応力法で実施する場合、過剰間隙水圧が残留する状態においても本検討条件と同等の載荷条件では、薬液改良土の強度定数を低下させる必要はない。ただし、対象構造物によっては、剛性低下に伴い発生するひずみ量を考慮した変形量の検討が必要である。
- (7) 溶液型薬液注入工法の q_{uck} の設定において、設計液状化強度比が0.6以上となる場合でも q_{uck} を100kN/m²に設定できることを提案した。
- (8) 設計で用いる地震応答解析での薬液改良土のパラメータ設定方法を提案した。改良地盤の強度に応じて、A:非液状化モデル、B:水圧上昇を考慮し、発生するひずみ量を再現できるモデル、C:液状化する未改良地盤モデルの3種類から選定する。

第3章の「薬液改良土の強度発現メカニズムの解明」では、超小型間隙水圧計を埋め込んだ供試体を用いて一軸圧縮試験を実施し、載荷時に発生する供試体内部の負圧を計測した。また、薬液と土粒子の付着力を把握するため、薬液改良土の圧裂引張り試験を実施した。本章によって得られた知見は以下の通りである。

- (1) 薬液改良土の一軸圧縮強さ q_u は、正のダイレイタンス発生前の強度 q_{u1} と正のダイレイタンス発生後の強度 q_{u2} によって構成されている。
- (2) 一軸圧縮強さ q_u のうち、 q_{u1} が占める割合は概ね 20~50%であり、 q_{u2} が占める割合の方が大きい。この割合は薬液濃度によって異なり、濃度が高くなるほど q_{u1} が占める割合が大きくなる。
- (3) q_{u1} は、土粒子と薬液の付着に関係する強度であり、圧裂引張り試験によって得られる圧裂引張り強さ σ_t を用いて、2つの方法で評価することができる。
- (4) q_{u2} は、一軸圧縮試験の載荷時に発生する負圧 σ_u と土の内部摩擦角 ϕ を用いて推定することが可能であり、正のダイレイタンスの発生に伴って生じる負圧と供試体に作用する大気圧との差が有効応力として働く強度である。
- (5) 薬液飽和度が低下し、供試体が不飽和になると、負圧も減少し、 q_{u2} が小さくなる。発生負圧と q_{u2} の関係は、飽和度 60~100%の範囲で概ね同様の傾向を示す。

第4章の「土質試験結果から q_u を事前に推定する方法の提案」では、事前調査で取得できるパラメータを用いて一軸圧縮強さを推定する方法を提案し、多様な現場試験の結果と比較することにより、その推定方法の妥当性を確認した。本章によって得られた知見は以下の通りである。

- (1) 粒子形状が球形であるガラスビーズを用いた薬液改良土の一軸圧縮強さは、平均粒径 D_{50} および比表面積 S_m (cm^2/g) と強い相関関係がある。
- (2) 均等係数が大きく粒度分布範囲が広い現地土に適用するため、細粒分含有率 F_c を考慮し、現地乾燥密度 ρ_d (g/cm^3) を用いて単位体積あたりに換算した土粒子の表面積 S^* (cm^2/cm^3) という新たな指標を提案した。これにより、事前調査で取得できる平均粒径 D_{50} 、細粒分含有率 F_c 、乾燥密度 ρ_d 、土粒子密度 ρ_s 、薬液のホモゲル強度 q_{uh} を用いて q_u を推定することができる。
- (3) 本推定手法は、配合試験前に取得できる少ないパラメータでの推定にも関わらず、多様な現場試験結果の傾向をある幅をもって捉えられていることから、実施工での簡易強度推定手法として有用性が高いと考えられる。推定式の誤差要因は、使用材料の化学的性質、貝殻の混入、薬液の充填率および供試体作製時の材料分離であり、これらの要因を含む供試体の試験結果は推定強度より低くなる可能性がある。

第5章の「事後強度評価において一軸圧縮試験の適用が難しい土質の抽出」では、セメント系の固化改良に比べて低強度改良である薬液改良土の事後強度評価において、一軸圧縮試験の適用が難しい条件を抽出し、一軸圧縮試験が困難な場合の評価手法をまとめた。本章によって得られた知見は以下の通りである。

- (1) 溶液型薬液注入を実施した地盤において、事後調査の試料採取として標準的に行われるトリプルサンプリングによる試料採取率は、対象地盤の礫分含有率や平均粒径と高い相関がある。
- (2) 高品質サンプリングは、トリプルサンプリングに比べて、供試体の品質に大きな差はみられないものの、試料採取率が高くなる。
- (3) 礫分含有率が 15%以上、試料採取率が 75%以下もしくは平均粒径が 1.0mm 以上の地盤では、トリプルサンプリング試料の一軸圧縮強さは、サンプリング等の乱れの影響により過小評価となる可能性がある。
- (4) 乱れの少ない試料が採取できない場合は、シリカ含有量増加分 ΔSiO_2 、動的コーン貫入試験による N_6 値の増加分 ΔN_6 値、孔内載荷試験による降伏圧力 P_y' から q_u を推定する方法がある。シリカ含有量増加分 ΔSiO_2 による q_u の推定は、バラツキの大きな試験結果から算定されたものであるため、使用する際には細心の注意が必要である。動的コーン貫入試験による N_6 値の増加分 ΔN_6 値による q_u の推定は、改良前後において同一箇所調査を実施する必要がある点に注意が必要である。孔内水平載荷試験による降伏圧力 P_y' による q_u の推定は、土質によって P_y' と q_u の関係が異なる可能性があるため、注意が必要である。

第6章の「結論」では、本研究の成果を取りまとめるとともに、今後の課題を示した。今後も発生が予想される強い揺れの地震を受けた改良地盤の挙動を調べ、今回提案した設計法の妥当性を検証していく必要がある。また、薬液改良土の载荷速度依存性を設計に反映させることや、変形量照査の精度を向上させるための実験データの取得も今後実施すべきと考える。さらに、本論文で示した一軸圧縮試験以外の事後調査方法は、それぞれの試験結果から一軸圧縮強さを推定するものであるが、実施工での適用事例が少なく、確立されたものではない。他の方法の開発も含めた精度の高い事後調査方法の確立が必要である。

これまでは、粘性土が液状化対象地盤となることはなかったが、対象地震動が大きくなることで細粒分含有率が高い地盤を改良することも求められるようになってきた。したがって、細粒分含有率が高い地盤に対する注入方法を確立することが施工上の課題として挙げられる。