

(第6号様式)

学位論文審査の結果の要旨

氏名	MINSON SIMATUPANG
審査委員	主査 岡村 未対 副査 安原 英明 副査 森 伸一郎

論文名 Liquefaction Resistance of Sand Lightly Treated with Enzymatically Induced Calcite Precipitation

審査結果の要旨

地震による地盤の液状化は社会インフラに甚大な被害を及ぼす。液状化の危険性が高いと判定された地盤に対する液状化対策工事は一部の先進国を除きほとんど行われておらず、その理由は液状化対策工法の施工に莫大な費用を要することである。また、代表的な液状化対策工法の幾つかは、セメントをはじめとする化学物質を地盤中に注入し固結させるものであるが、六価クロム等が溶出し地盤環境を悪化させることがあり、より環境負荷の小さな工法が望まれている。

近年耳目を集めている新たな地盤改良工法として炭酸カルシウムを地盤内で析出させ、地盤を固結させて強度を増加させる工法が研究開発されている。この工法は、自然状態で地盤中に存在するか、或いは新たに地盤に注入する Ca^{2+} イオンと CO_3^{2-} イオンを反応させて地盤中で CaCO_3 結晶を析出させる。これまでにはこの工法に関して、一般的な地盤改良工法として求められる土の強度を数百 kPa 程度以上にするための研究が主に行われてきた。一方で、液状化を防止するための対策工法としては、求められる土の強度は格段に小さいため、地盤に注入する薬剤の量も少なく済むはずであるが、この工法を用いて低強度に改良した土の力学特性に関する研究はほとんど行われていない。そこで本研究は、比較的低い CaCO_3 析出率で改良した砂の液状化強度特性を室内試験によって明らかにした。

また、上述のように地盤改良工法の費用低下が重要な問題である。本研究では、地盤に空気を注入するなどして不飽和化しながら本工法を実施することによる新たなコスト削減方法を考案し、その効果についても検討した。

本論文の第3章では、所定量の CaCO_3 を供試体内に所定の時間で均一に析出させるための検討を行い、次章以降に述べる多くの供試体を用いた三軸試験条件の設計を行った。使用する材料は、 Ca^{2+} イオンの供給源としての塩化カルシウムと、 CO_3^{2-} イオンを供給するために尿素とそれを分解するための触媒であるウレアーゼを用いることし、砂供試体中に重量比で 0.2%~0.8%の CaCO_3 を飽和度 30%~100%の条件で、実験の効率を考慮して4時間以内に析出させる配合を決定した。

第4章では粒径の異なる砂試料を用い、 CaCO_3 を析出させた改良供試体の非排水繰返し三軸試

験を実施し、液状化強度特性を調べた。その結果、砂粒子間に析出し砂粒子を結合する CaCO_3 の剛性は高いが強度は小さいため脆性的な挙動を示し、繰返し载荷中の比較的ひずみが小さい前半では供試体の強度増加に大きく寄与するが、軸ひずみがおよそ 0.5%を越えると結晶が破壊され改良効果は殆ど消滅することがわかった。

土の液状化後の変形特性は構造物の変位量や被害の大きさに直接影響する重要な要因である。改良土の液状化後の変形特性は砂粒子表面粗に影響され、凸凹の大きな粒子ほど変形量が小さい。本工法により砂粒子表面に析出した CaCO_3 は表面の粗さを増加させるが、粒子径と析出する結晶の大きさの比によりその効果が変わり、粗砂や中砂ではその影響は小さく、細砂では大きな影響があることを明らかにした。

また、析出中の飽和度を制御しながら作成した改良供試体の液状化試験より、飽和度が低いほど液状化強度が増加することを明らかにした。これは、飽和度を低下することにより土中の水が少なく、その水は土粒子の接点に形成されるメニスカスに集中するため、強度増加に寄与する土粒子接点付近に集中的に CaCO_3 結晶が析出するためであることを SEM により明らかにした。

最後に、有効拘束圧、 CaCO_3 析出量、飽和度、砂を種々変えた試験を行い、液状化強度評価式を提案した。

第5章と6章では、この工法で改良した地盤の液状化判定法を検討した。一般的に実務に用いられる方法の一つとして、土に微小ひずみ領域の剛性やせん断波速度を指標として原位置の液状化強度を評価する方法がある。そこで、本工法で改良した土のせん断波速度と液状化強度の関係を検討した。その結果、 CaCO_3 の析出によりせん断弾性波速度は大幅に増加することがわかった。そのため、自然状態の地盤で用いられている液状化強度評価法を本工法の改良土に用いると過度に危険側の評価となることを明らかにした。

第7章では、2章から6章までの総括をしている

以上のように、本論文は CaCO_3 を地盤中に析出させる環境負荷の小さな地盤改良工法により改良した砂の液状化強度変形特性、およびその発現メカニズムを明らかにすると共に、実務に適用できる液状化強度評価法を提案した。また工費を大幅に削減し得る新たな方法として、 CaCO_3 析出時の飽和度を低下させる方法についてその有効性を検証した。さらに実務に用いられる液状化判定法の、本工法による改良土への適用性についても明らかにした。学術的・実務的に優れ、新規性と実用性・有用性のある内容であり、審査委員全員一致して合格であると判断した。