

氏名（本籍）	て つか ひろ あき 手 塚 広 明（神奈川県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	乙第 873 号
学位授与の日付	平成 27 年 3 月 20 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	任意形状・大型径地盤改良が可能な高圧噴射 攪拌工法の開発と改良地盤の品質評価手法の 提案

論文審査委員	（主査）教授 塚本 良道
	教授 菊池 喜昭 准教授 加藤 佳孝
	教授 永野 正行 教授 荻原 慎二

論文内容の要旨

深層混合処理工法の一種である高圧噴射攪拌工法は、小型のボーリングマシンを用いてセメントミルクとエアの混合体を超高圧で地中に噴射して原地盤と混合攪拌することでセメント改良地盤を造成する。セメントミルクの噴射量や噴射圧力等の異なる各種の高圧噴射攪拌工法が実用化され、これまで主に土留め壁の欠損防護・先行地中梁・底盤改良、シールド工事の発進・到達防護等の仮設利用として広く用いられてきた。一方、近い将来発生することが懸念されている巨大地震に対して、既設構造物の地盤の液状化対策・耐震補強法としての地盤改良の必要性が高まっている。狭隘な箇所での施工や施設を供用しながらの施工を求められることが多いため、小型機械を用いた高圧噴射攪拌工法を施工する事例が増加している。このような状況の中、コスト低減・工期短縮等の面から、改良径増大に対する要求は高い。さらに、従来工法では円柱状の改良体が主流であるが、目的によって壁状・扇形・格子状などの任意形状を容易に施工できる改良技術の開発も必要とされている。

大型径化のためにジェット噴流の高エネルギー化による地盤の切削効率の向上が必要となる。本研究にて、配管構造がジェット噴流に及ぼす影響、エア量等の噴射機構の検討を行なうことで高エネルギー化を図り、従来の改良径が最大直径 5.0m 程度であるの対して、最大直径 8.0m を可能とする工法を開発した。また、従来工法のように一方向にロッドを回転させるのではなく、高精度で揺動制御する専用の管理装置の開発とセメントミルクを多方向に高圧で圧送できる多孔管方式とすることで任意形状（円形および扇形、壁状、

格子状)の施工が可能となった。

高圧噴射攪拌工法は、従来、仮設目的で適用されていた工法であるが、液状化対策・耐震補強といった永久構造物としての工事では、構造物の沈下や地盤の変形を動的有効応力解析などの高度な解析で適切な変形・変形特性を評価することが求められる場合が多くなっている。ただし、高圧噴射攪拌工法は、機械攪拌工法と異なり、地中で超高压ジェットによりセメントミルクを噴射して地盤と攪拌混合するため、改良体の非一様性が相対的に高いことが報告されている。そのため、現状では改良地盤の変形・強度特性の設計値および施工後の品質管理方法は、ある設定された管理値（許容下限値）を用いる安全側な方法がとられており、合理的な評価をしているとはいえない。そこで、本研究では、①局所変位計（LED）を用いた微小～小ひずみレベルでの剛性の正確な評価方法、②剛性のひずみレベル依存性、③強度・剛性の拘束圧・長期材齢依存性の考慮をすることで、改良地盤の変形・強度の合理的な評価が可能になることを検証した。

また、非一様性の高い改良地盤に対して、従来の1か月後のチェックボーリングで得た不攪乱コア試料のコアを用いた一軸圧縮試験を行なうことよりも、ボーリング孔を利用した迅速性かつ連続的評価という特徴を持つ原位置 PS 検層による弾性波速度を用いることで、連続的に改良体の力学的挙動を適切に評価できることを検証した。

機械攪拌工法では改良径は地盤によらず機械攪拌翼で決定されるが、高圧噴射攪拌工法の改良径は改良対象地盤の強度等に大きく作用され、この改良径に応じて強度も異なってしまう。従来の高圧噴射攪拌工法では、施工実績に基づいて改良径や強度を設定して施工を行ない1ヶ月後のチェックボーリングで得た不攪乱コア試料の一軸圧縮試験を行なうことによって改良径や連続性や強度に関する品質管理を行っていた。しかし、非一様性の高い改良地盤において、1か月後に所定の品質を満足しない結果が出た場合、致命的な手戻りになりかねない。従って、一ヶ月後に初めて品質不良を見つけ出すと言う事態を防止するために、造成中や造成後早期に改良体の強度や改良径確認ができる総合的な品質管理手法を提案した。この新しい品質管理手法を適用すれば、必要に応じて配合や噴射仕様など、施工にフィードバックすることができる。このような確実で合理的な地盤改良の品質管理手法を提案する。

本論文は、全6章より構成され、以下に各章の要旨を示す。

「第1章 序論」では、本研究の背景と目的を示すとともに、本論文の構成と内容を示した。さらに、深層混合処理工法（機械攪拌工法を主体）に関する基準及び指針類とその他の既往の研究を整理することと、高圧噴射攪拌工法に関する既往の研究を整理した。その結果を踏まえて、高圧噴射攪拌工法の現状と課題について整理し、問題点を抽出した。

「第2章 任意形状・大型径が可能な高圧噴射攪拌工法の開発」では、気中、水中によるロードセルを用いた水ジェット噴射試験によって、大型径の改良体の造成が可能となる噴射機構の検討を行なった。①従来工法のエルボ型からベント型に配管構造を変えること、②セメントミルク噴射量に応じた最適なエア量で噴射すること、③同じ噴射量でも吐出

口を従来工法の 1 ノズルから 2 ノズルに分けて噴射することで地盤の切削効率が向上し、大型径が可能となることを原位置の各種性能確認試験で検証した。

また、 0.1° 単位の高精度で揺動制御する専用のリアルタイム管理装置とセメントミルクを多方向に高圧で圧送できる多孔管方式により任意形状円形および扇形、壁状、格子状が可能となること、地盤に応じた噴射エネルギーと改良径の相関より噴射流量と噴射時間を調整することで任意の改良径を造成できることを現位置の性能確認試験にて検証した。

「第 3 章 改良地盤の変形・強度特性の研究」では、従来の外部変位計を用いた一軸、三軸圧縮試験から局所変形測定装置 (LDT) を用いた試験を用いることで、以下の①～③に示す合理的な改良地盤の変形・強度特性の評価が可能となることを検証した。

- ①LDT を用いた場合の変形係数 E50 は外部変位計に比して 3 倍程度大きいこと、
- ②LDT を用いると微小ひずみ ($1.0 \times 10^{-4}\%$) での計測も可能になるため、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験によって初期剛性の測定ができること
- ③LDT を用いた一軸圧縮強度試験の結果から、繰返し三軸試験で得られる等価せん断剛性～せん断ひずみ関係を近似的に推定できること。

また、改良土の強度には、明確な拘束圧依存性があり、特に砂礫土でセメントミルクの注入率が高い場合にその依存性が高い。さらに 28 日から 180 日までで強度、初期剛性が顕著に増加する傾向が確認できた。

「第 4 章 原位置弾性波速度に基づく品質評価の研究」では、高圧噴射攪拌工法によるセメント改良地盤の一軸圧縮強度 q_u を、原位置 PS 検層によるせん断弾性波速度 V_s に基づいて推定する方法を検討した。その結果、それぞれのサイトで異なる土質に対して室内配合試験によって事前に得た「超音波パルス法による V_s と q_u の関係」に、改良地盤で測定した原位置 PS 検層による V_s を代入することによって、原地盤の一軸圧縮強度の近似値を安全側に推定する方法を提案できる。なお、この方法は、従来の現場コア試料の一軸圧縮試験による品質確認する手法に対して、遥かに迅速であることに加えて、非一様性が相対的に高い改良地盤の強度を深度に対して連続的に推定できるという利点がある。

「第 5 章 改良地盤の原位置における品質管理手法の提案」では、強度および出来形 (改良形状) に関するいくつかの品質確認手法を検証、提案した。

強度確認方法については材齢に応じて確認方法を提案した。造成直後～造成後 7 日程度で、28 日強度を予測する手法として、未固結改良体を任意箇所直接サンプリングするサンプリングコーンを開発して、その改良体を用いた 2 つの予測手法 (塩酸溶解熱法と材齢強度予測法) を現場で検証した。

28 日強度および改良体の連続性は、第 4 章で評価した原位置 PS 検層による方法によるせん断弾性波速度 V_s に基づいて、深度方向連続的に一軸圧縮強度を推定する方法を現場で適応して検証を行なった。

出来形 (改良形状) に関する品質確認手法として以下の 3 つの手法 (ビデオコーンの開

発、光ファイバ温度計による計測、音波計測）を検討して、現場にて検証を行った。

以上の新しい品質確認手法を適用すれば、材齢に応じて（造成中や造成後早期、材齢 28 日以降）に強度や出来形について確実に合理的な地盤改良の品質確認を行なうことができる。その結果、必要に応じて配合や噴射仕様など、施工仕様にフィードバックできるようになる。

「第 6 章 結論」では、前章までに得られた結果を総括して結論を記述するとともに、今後の課題を示した。

論文審査の結果の要旨

近年の地震による地盤の液状化被害を受け、既設構造物の地盤の液状化対策・耐震補強法としての地盤改良の必要性が高まっている。本論文では、深層混合処理工法のひとつである高圧噴射攪拌工法に着目し、より高度な地盤改良とその品質管理を可能にする技術開発を行なっている。

具体的には、まず、従来工法では最大改良径は 5m 程度であったが、ジェット噴流の高エネルギー化を図ることにより、最大直径が 8m に至る地盤改良を可能にしている。また、従来工法では円柱状の地盤改良体であったが、壁状・扇形・格子状などの任意形状の地盤改良を可能にする技術開発を行なっている。

液状化対策工法の効果の評価に利用される、構造物の沈下や地盤の変形に関する動的有効応力解析などの高度な解析においては、適切な改良体の変形・強度特性を評価することが必要となる。一方、地盤改良体の非一様性は著しく、現状では、改良体の変形・強度の設計値は、許容下限値をとるという安全側の方法がとられており、合理的な評価とはなっていないのが現状である。本論文では、微小ひずみ域の改良体の剛性の正確な評価、剛性のひずみレベル依存性、強度・剛性の拘束圧・長期材齢依存性を適切に評価することにより、合理的な改良体の変形・強度特性の評価を可能にしている。

また、従来の地盤改良体の品質管理手法では、1 か月後に採取する不攪乱コア試料の強度試験から得られる地盤改良体の局所的な強度の計測に依存していたが、より迅速で、改良体内を連続的に計測する弾性波速度計測試験を利用した品質管理手法を提案している。また、それに加えて、造成中や造成後早期に、改良体の強度や改良径の確認を可能にする、総合的な品質管理手法を提案している。

本論文は、地盤の液状化対策に利用される高圧噴射攪拌工法の施工技術開発と品質管理手法に関する技術開発を行っており、独創性に富む研究内容となっている。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分に価値があるものと認める。