

論文の要旨

題目 火山灰質粘性土をセメント系固化材で改良した改良体の長期強度発現性と表層の変質
(Long-term strength development and surface deterioration of volcanic cohesive soil treated with cement)

氏名 泉尾 英文

セメントによる地盤改良は、地盤の支持力確保、発生土の有効活用、重金属の不溶化や液状化対策など様々な目的で活用されており、近年では未曾有の災害からの復旧・復興において重要な技術として活用されている。セメント系固化材の使用量は年々増加し、2021年度は780万tに達した。改良土の添加量を考慮すると相当量の改良地盤が年々蓄積されており、それらの長期的な性能への関心が高まっている。セメント系固化材は、従来のソイルセメントでは固め難い土にも十分に改良効果を発揮するように調整された特殊セメントであり、1970年代に開発された。セメント系材料であるため、基本的にはコンクリート分野における知見が活かせるが、セメント系固化材はエトリングaitを積極的に生成させた材料であり、普通ポルトランドセメントとは異なる。また、火山灰質粘性土は、固化材の反応を阻害するアロフェンを多く含む。このような材料による改良土について、長期的な安定性を検討した事例は少ない。

そこで、本研究では、セメント系固化材による改良体の長期強度発現性と周辺土に接する改良体表層の変質を評価し、改良体の長期安定性を検討することを目的とした。具体的には、関東ロームの火山灰質粘性土を一般軟弱土用のセメント系固化材によって改良し、長期原位置試験を実施した。また、長期原位置試験で残された課題について、Caの溶脱に着目した周辺土との接触試験と炭酸化に着目した炭酸化試験によって検討を行った。さらに、これらの現象を熱力学的平衡計算によって解析し、長期強度発現のメカニズムと変質にともなう反応生成物の変化について検討を加えた。

第1章は序論であり、地盤改良技術の変遷とセメント系固化材の変遷を整理して本研究の背景、本研究における目的、論文の構成を述べた。

第2章では、セメント改良土の強度発現性と耐久性を検討した既往研究と、熱力学的平衡計算によってセメントの反応や安定性を検討した既往研究を取りまとめ、研究の課題を明確にした。セメント改良土の強度発現性については、実務への適用にあたり多くの研究が行われており、改良土は長期的に強度が増加することが報告されている。一方で、周辺土に接する改良体の表層では、Caの溶脱によって強度が低下していることが報告されている。これらの現象について、pH、ECや細孔径分布などの変化で評価した事例はあるが、直接的に反応生成物の変化を検討した事例は少ない。特に、長期の原位置試験の結果をもとに、反応生成物の変化と強度変化との関連性を検討した事例は見受けられない。なお、反応に伴う相組成の変化は、熱力学的平衡計算による検討がセメント・コンクリート分野で成果を上げているが、改良土の強度発現性や長期耐久性に適用した事例は少ない。

第3章では、周辺土に接する改良体表層の変質状況を評価するために、針貫入試験を用いることとし、針貫入勾配と一軸圧縮強さとの関係について整理した。両者の関係は、既往の成果と同様に両軸を対数とすることで線形性が認められ、両者の換算式を求めた。ここで求めた換算式を、以降の章における強度分布の考察に用いた。

第4章では、火山灰質粘性土をセメント系固化材で改良した改良柱体を築造し、長期追跡調査を行った結果を取りまとめた。材齢22年までの追跡調査を終えて、改良土は長期的に強度発現し、材齢5年程度で28日強度の3.2倍に達し、材齢22年まで安定的に強度を維持していることが確認された。一方で、周辺土に接する改良体表層では、Caの溶脱と炭酸化の変質によって強度が低下していた。強度低下している範囲は、境界面から30mm程度であり、境界面から10mmにおいては強度が顕著に低下していた。境界面から30mmの表層では、pHが低下しており、これは移設の材齢10年以降に生じていた。境界面から10mmにおいてはCaO濃度が低下しており、Caの溶脱による影響が認められたが、Caの溶脱が生じた時期は特定できなかった。一方で、炭酸化は、材齢10年に低含水比の浅層へ移設したことで生じたものと考えられ、炭酸化によって強度が低下していた領域ではエトリンサイトやストラトリンサイトなどの反応生成物が消失していた。境界面から10mmの表層では、Caの溶脱と炭酸化の両方の変質を受けたため強度が顕著に低下したと推察されるが、それぞれの変質にともなう強度への影響程度を評価することはできなかった。

第5章では、4章で残された課題を検討するために、Caの溶脱に着目して実施した室内試験の結果を取りまとめた。室内試験は、長期原位置試験と同等の改良体を周辺土に接触させた試験を実施した。境界面付近の強度やCa濃度分布などを評価して、Caの溶脱による改良体表層の変質を評価した。材齢28日の比較的早い段階から、改良体の表層ではCaO濃度が低下し、周辺土の境界面付近ではCaO濃度が増加していた。改良体から溶脱したCaが、周辺土へと拡散していることが確認された。ただし、材齢の経過とともにCaの溶脱は緩慢となり、材齢1年程度でCaの溶脱は収束した。材齢1年におけるCaO濃度分布は、長期原位置試験の材齢22年におけるCaO濃度分布と概ね同様であった。つまり、長期原位置試験で認められたCaの溶脱は、若材齢時に生じて材齢1年程度で収束し、その後、材齢22年まで進行していないものと推察された。この室内試験では、長期原位置試験を想定した自然含水比の周辺土に加えて、高含水比および低含水比の周辺土を用いた接触試験も実施した。その結果、Caの溶脱による影響は、周辺土の含水比によって異なり、高含水比、自然含水比、低含水比の順にCaの溶脱による影響範囲が広がった。低含水比の周辺土では、不飽和の周辺土へ硬化前の改良体から水分が移動して固相が再配置され、改良体表層が高密度化されたことで、Caの溶脱による変質の範囲はさらに限定的なものとなった。周辺土の含水比および改良体の強度によって、Caの溶脱による影響範囲は異なることが確認されたが、強度への影響は、健全部を基準としたCaO濃度比および強度比で整理することで、周辺土の含水比および初期強度にかかわらず概ね同程度の関係であることが確認された。この関係性を用いて、長期原位置試験のCa濃度分布から一軸圧縮強さの分布を推定すると、強度低下している範囲が実測値よりも狭く、低下量も限定的であった。つまり、Caの

溶脱以外の要因によっても強度が低下しており、その要因の一つとして炭酸化が想定された。

第6章では、4章で残された課題を検討するために、炭酸化に着目して実施した室内試験の結果を取りまとめた。炭酸化した改良体の表層では、pHの低下と強度の低下が認められた。ただし、乾燥によって含水比が大きく低下したため、長期原位置試験の改良体の状況とは異なる。含水比の低下の影響も含まれるが、非炭酸化領域のpHを基準としたpH比と、封緘養生した供試体の一軸圧縮強さを基準とした強度比で整理すると、両者には線形の関係が認められた。この関係性を用いて、長期原位置試験のpH分布から一軸圧縮強さの分布を推定すると、Caの溶脱では説明できなかった強度低下を示すことができた。長期原位置試験において、顕著に強度が低下していた改良体表層は、材齢1年程度までのCaの溶脱によって強度が低下した後、材齢10年の移設以降に炭酸化したことで大きく強度低下したことが確認された。

第7章では、熱力学的平衡計算を用いて、長期強度発現による相変化とCaの溶脱および炭酸化の変質による相変化を推定した。改良土の初期強度は、固化材による反応によって、主にCSHおよびエトリンガイトが生成することで発現した。エトリンガイトは、固化材中の SO_3 量が普通ポルトランドセメントと比較して多いため、その生成が促進された。長期的な強度は、土とのポゾラン反応によって、主にストラトリンガイトが生成することで発現した。ポゾラン反応は、アルカリ環境下において土が溶解することで生じるが、土が一様に溶解するのではなく、先行して Al_2O_3 が溶解することでストラトリンガイトが生成した。この反応によって、pHの低下はあまり生じない。長期原位置試験における材齢0.5年から5年までの現象が、主に Al_2O_3 の溶解に伴うポゾラン反応による結果であった。 Al_2O_3 の溶解の後、 SiO_2 が溶解することで改良土のpHは低下した。この反応によってCSHが生成するものの、反応生成物量の増加程度は Al_2O_3 の溶解による増加量と比べて少なく、強度発現への寄与は限定的である。長期原位置試験における材齢5年から10年までの現象が、主に SiO_2 の溶解に伴うポゾラン反応による結果であった。改良土がCaの溶脱と炭酸化によって変質すると、ストラトリンガイト、エトリンガイト、CSHの順に消失していき、反応生成物量が低下してpHが低下した。熱力学的平衡計算によって、固化材の水和反応およびポゾラン反応による反応生成物量の増加程度が推定でき、一方で、Caの溶脱と炭酸化の変質にともなう反応生成物量の低下程度が推定できた。これらの反応生成物量の変化と一軸圧縮強さの変化との関係を整理すると、概ね線形の関係が認められた。つまり、固化材の水和反応およびポゾラン反応による強度増加、Caの溶脱と炭酸化による強度低下ともに、反応生成物量の増減によって示され、反応生成物量の変化は熱力学的平衡計算によって推定できることが示された。

第8章では、本研究の結論と今後の課題について述べた。以上の検討により、火山灰質粘性土をセメント系固化材で改良した改良体は、長期にわたり安定的に性能を維持していることが確認された。