

明石工業高等専門学校 学生会員 ○岩本遼生
 明石工業高等専門学校 正会員 江口忠臣
 芝浦工業大学 正会員 稲積真哉

1. はじめに

近年、高度に工業化した産業社会を持続的に発展させるためには、廃棄物の削減・循環利用が必要不可欠である。過去の研究では廃ガラスや高炉スラグを原料としたシリカ系固化材が開発され、セメント系固化材と比較して高い強度ならびに硬化時間の遅延効果を発揮する。しかし、現場施工では早強性を求められる場面もあり、計画や施工に応じた固化材の硬化時間の制御が必要とされている。本研究では、硬化時間の制御が可能な新たなシリカ系固化材を開発し、地盤改良材としての適応性を検討する。

2. 廃棄物を原料としたシリカ系固化材

シリカ系固化材とは、廃ガラス等のシリカ成分を多量に含む無機系廃棄物に pH を高めるために水酸化ナトリウム等を加え混合し、熱処理したものを乾燥、粉碎することにより開発された混和材（シリカ系混和材）に高炉スラグを加え混合した固化材である。図-1 より、セメント系固化材よりも高強度かつ強度発現が遅い性能が明らかとなっている。

過去の研究¹⁾において、シリカ系固化材の硬化機構は、反応初期に溶出する Na および Ca がアルカリオンであるナトリウムイオン、カルシウムイオンとなり土粒子表面を活性化させる。また、それらが水酸化物イオンと結合し、水酸化ナトリウムおよび水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を形成し、液相は高い pH を示し、非晶質構造の高炉スラグを刺激し、高炉スラグから生成された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がシリカと水和反応を起こし、ケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) を生成し局所的に強度を向上させる。またシリカ系固化材から溶出した Si はシリカコロイドを形成し、土粒子を凝結、固化する。

3. 試験概要

(1) 試料の条件

使用した対象土は事前に含水比を調整しており、砂質土である豊浦珪砂は含水比 10%、粘性土であるトチクレは含水比 40%である。またシリカ系混和材 (H) と高炉スラグ (SL) と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ または普通セメントの混合物を粉体 (P) とし、水 (W) と粉体の混合物をスラリーとした。

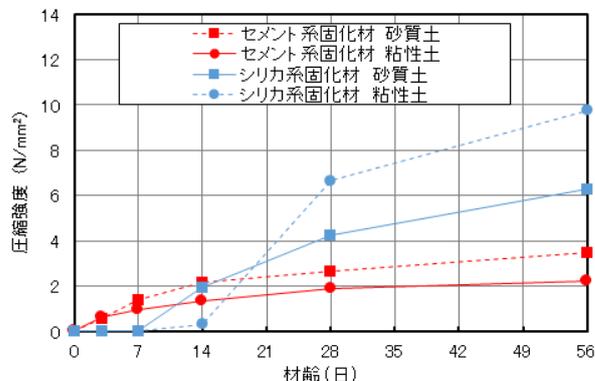


図-1 固化材別の圧縮強度の経時変化¹⁾

攪拌手順は高炉スラグと普通セメントまたは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ をミキサーで 30 秒攪拌し、水を加えてミキサーで 1 分攪拌。シリカ系混和材を入れてミキサーで 3 分攪拌し、対象土にスラリーを入れて再び 3 分攪拌し、湿度 98% の密閉容器に入れて、室温で養生した。また SL/H=10, W/P=130 に統一している。

(2) 流動性試験

スラリー状の固化材の流動性は、土木学会基準 (JSCE-F 521) 「プレパックドコンクリートの注入モルタルの流動性試験方法 (P 漏斗による方法)」に準じた P ロート試験を行った。P 漏斗試験機に混練 3 時間後のスラリー状の固化材を満たし、流出管から指を離して流化させ、固化材流が初めて途切れるまでの流下時間をストップウォッチで計測する。流動性が高くなるほど、流下時間は短くなる。

(3) 強度試験

改良土の強度特性を確認するために、圧縮試験を実施した。試験は $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ のモールドで供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施した。

4. 結果および考察

(1) 硬化時間の制御

高炉スラグは、セメントの水和反応で生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応し、安定な水和物となるとともに固相組織を緻密化する²⁾。また普通セメントは水和反応によりエトリンガイトを生成し初期強度を発現する。材齢 28 日後までの強度試験結果の図-2 および図-3 に示し、

強度試験において、材齢7日後または14日後まで自立しない従来のシリカ系固化材(SL/H=10)を用いた改良土に比べ、Ca(OH)₂および普通セメント一部置換の固化材を用いた改良土は材齢4日後または7日後には供試体が自立し初期強度の発現が確認できた。このことから硬化時間の制御が可能であることが確認できた。

(2) 長期的な強度

材齢28日後の強度を比較すると砂質土において普通セメントを置換した固化材を除き、従来のシリカ系固化材に比べ、大きな強度発現が得られた。

普通セメントの水和反応時にアルカリ性物質であるCa(OH)₂を生成する。つまり、Ca(OH)₂の添加または生成は新たなシリカ系固化材に共通する。不安定なガラス質構造であるシリカ系混和材は、アルカリ性物質を添加すると、刺激によってケイ酸構造が切り離される。これによって内部のアルカリ性物質が溶出され、さらに切り離しが促進されて、シリカ・アルミナが溶出される。溶出した各イオンによってセメントの場合と同じような水和反応が生じ、C-S-Hを生成して硬化現象を生ずる³⁾。Ca(OH)₂により改良土中のCa²⁺濃度が高まることで、C-S-Hの生成量が増加し、長期強度が増加したと考えられる。特に粘性土においてはポズラン反応が活発に起きたことで、より長期強度が発現したと考えられる。

(3) 流動性に関する考察

流動性試験結果を図-4に示す。置換割合と流動性の高さは反比例していることが確認できる。また、Ca(OH)₂を高炉スラグに対し5%置換することで3時間後Pロート流下時間が11s、10%置換すると17sと大きく流動性が低下する。普通セメントは水和反応によりCa(OH)₂を生成するのに対し、直接Ca(OH)₂を置換することで高炉スラグの潜在水硬性によるC-S-Hの生成が早まり、混練後数時間で急速に硬化が進行したと考えられる。このことから現場施工においては置換量を変化させても高い流動性を維持できる普通セメントを一部置換した固化材が有用であると考えられる。

5. おわりに

得られた結果を以下に示す。

- (1) シリカ系固化材の主材料である高炉スラグに対し、普通セメントまたはCa(OH)₂を一部置換したこと初期強度の発現が確認できたことから、材料の添加により硬化時間の制御が可能であるといえる。
- (2) 高炉スラグに対し、Ca(OH)₂または普通セメントを一部置換した場合、従来のシリカ系固化材と同等の長期強度を得られた。上記事項は長期強度を維持し

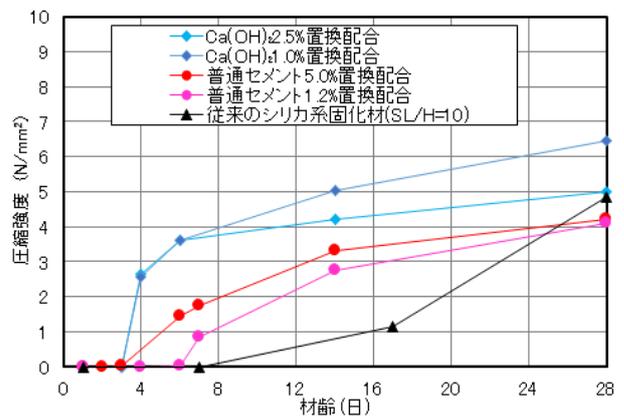


図-2 置換材料・割合別の一軸圧縮試験結果(砂質土)

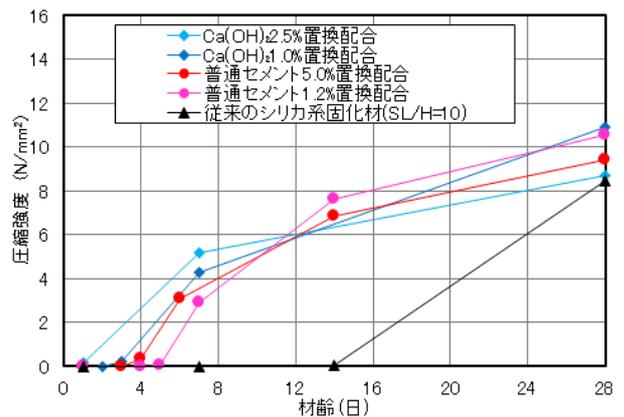


図-3 置換材料・割合別の一軸圧縮試験結果(粘性土)

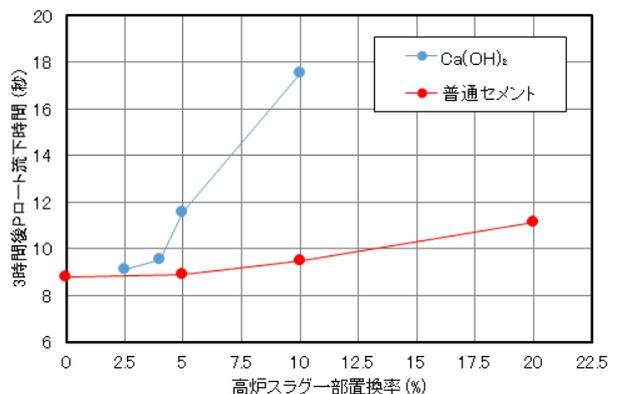


図-4 置換材料別のスラリーのPロート試験結果

た状態で硬化時間の制御が可能であることを示す。

- (3) Ca(OH)₂を高炉スラグに対する置換率が高くなると大きく流動性が低下する。上記事項は施工性の低下に影響することを示す。

【参考文献】

- 1) 中瀬悠也・稲積真哉・新坂孝志・山崎淳一・橋本 亮・納庄一希：無機系廃棄物から製造したシリカ系混和材と高炉スラグ微粉末からなる混合固化材の開発と攪拌系地盤改良工法への適用性，第12回地盤改良シンポジウム論文集，pp.381-386，2016。
- 2) 長尾之彦：高炉スラグ微粉末によるコンクリートのCO₂削減効果について，コンクリート工学論文集，48巻9号，pp.9_62-9_65，2010。
- 3) 小林正凡：特殊な材料を用いたコンクリート（その2），コンクリート工学論文集，23巻9号，1985。