第 III 部門　　無機系廃棄物を原料としたシリカ系固化材の強度特性

明石工業高等専門学校　　学生会員　○中瀬悠也
明石工業高等専門学校　　正 会 員　　稲積真哉

1. はじめに

我が国では天然資源が枯渇の一途を辿っている一方で，廃棄物の排出量が年々増加している [1]。一連の研究では廃ガラスや高炉スラグの廃棄物量の低減・有効利用および天然資源の枯渇防止を目的として，ガラス産業で廃棄物として排出された廃ガラスを原料に新しい固化材を開発している。さらに，地盤改良材としての適用の可能性を検討することを目的に室内配合試験を実施している。本論文では強度特性について報告する。

2. 無機系廃棄物由来のシリカ系固化材

シリカ系固化材とは，廃ガラスやフライアッシュ等のシリカ成分を多量に含む無機系廃棄物に pH を高めるため水酸化ナトリウムを加え混合し，熱処理したものを乾燥，粉砕することにより独自に開発した新しい固化材である。当該固化材は結晶質構造であり，酸の浸入を防ぐため，耐酸性に優れる [2]。また，海水での混練および硬化時間の調整が可能である。

シリカ系固化材はセメント系の固化材とは異なり水単体との混合では硬化せず，シリカ系固化材に水と高炉スラグ微粉末を混合することでスラグの潜在水硬性，シリカによる土粒子間の接着効果およびポゾラン反応の進行により硬化する（図-1 参照）。

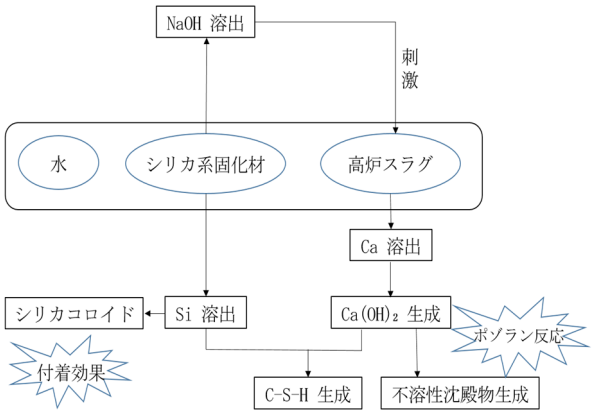

図-1　硬化機構の概要図

表-1　試験ケース一覧

No.	固化材				配合条件			
	SL/H※			C※	地盤材料		S/M※	
	5	10	15		砂質土	粘性土	2.0	1.5
1	○				○		○	
2	○					○	○	
3		○			○		○	
4		○				○	○	
5		○			○			○
6		○				○		○
7			○		○		○	
8			○			○	○	
9				○	○		○	
10				○		○	○	
11				○	○			○
12				○		○		○

※SL：スラグ，H：水硬性固化材，C：セメント，W：水，M=C or (SL+H)，S：地盤材料

3. 試験概要

(1) 試料土と混合条件

試験ケースの一覧を表-1 に示す。固化材は，水硬性固化材とスラグの混合物を使用した。水硬性固化材は，SiO_2 含有量が約 50%の白色粉末状の固化材で，密度が 2.56g/cm^3，粒度が 20～100μm のものである。スラグは，高炉スラグ微粉末である。水硬性固化材(H)とスラグ（SL）の配合比は，重量比として SL/H=5，10 および 15 の 3 種類とした。また，比較として高圧噴射攪拌工法で使用するセメント系固化材（C）を使用した。固化材はスラリー状の状態で使用し，水（W）と固化材（M）の比率は W/M=130%とした。固化材（M）の量は，セメント系固化材の場合はセメント系固化材（C）の量（M = C）とし，シリカ系固化材（H）とスラグ（SL）の混合物については，それぞれの総量（M＝H＋SL）とした。

地盤材料として，砂質土に豊浦硅砂（ρ_s＝2.367 g/cm^3）を使用し，含水比 w=10%に調整して使用した。また，粘性土には栃木県産のトチクレー（ρ_s＝2.724 g/cm^3，w_L＝34.0%，w_P＝17.0%，IP＝17.0）を使用し，含水比 w＝40%に調整した後，12 時間以上静置したものを使用した。地盤材料（S）と固化材（M）の混合比は，体積比として S/M＝2.0 および S/M＝1.5 の 2 種類とした。

(2) 試験方法

改良地盤の強度特性（強度発現性能）を確認するために，圧縮試験を実施した。試験は直径 50 mm，高さ 100 mm のモールドにて供試体を作製し，1 日，3 日，7 日，28 日および 56 日間養生した後，一軸圧縮試験を実施した。

Yuuya Nakase and Shinya Inazumi
inazumi@akashi.ac.jp

4. 結果および考察

(1) 対象土質の違い

図-2 に固化材別の圧縮強度と材齢の関係を示す。セメント系固化材では地盤材料に粘性土を用いたケースに比べて砂質土を用いたケースの方が高強度となった。これは一般的にセメント系固化材を用いた場合の強度特性と同様の傾向であった[3]。一方，シリカ系固化材では材齢約 20 日以降は地盤材料に砂質土を用いたケースより粘性土を用いたケースの方が高強度となった。粘性土地盤材料に用いたトチクレーは砂質土地盤材料に用いた豊浦硅砂に比べ粒径が非常に小さいため比表面積が大きい。さらに，粘土鉱物より溶出する可溶性の SiO_2 および Al_2O_3 を多く含む。そのため，シリカの付着効果が砂質土よりも大きく，また，ポゾラン反応による強度増加も生じるため，砂質土よりも高強度となった。

(2) 長期的な強度

図-3 にシリカ系固化材の配合比別の圧縮強度と材齢の関係を示す。図-3 よりシリカ系固化材では材齢 28 日以降の強度増加が見られる。シリカ系固化材はセメント系固化材に比べ，シリカ，アルミナおよび水酸化カルシウムが多量に存在し，長期強度に起因するポゾラン反応が材齢 28 日以降においても活発に進行するため，強度が増加すると考えられる。また，ポゾラン反応の継続により材齢 56 日以降の強度についても増加傾向にあると考えられる。

(3) 強度発現の遅延性

図-2 より，セメント系固化材では材齢とともに強度が増加し，材齢 28 日以降の強度増加も確認できるが，増加量は小さくなる結果となった。一方，シリカ系固化材はセメント系固化材と比較して強度発現が遅く，7 日後または 14 日後まで供試体が自立しない結果であった。セメント系固化材は硬化機構から明らかなように，直ちに水和反応が起こり，徐々に強度が増加していく。しかしながら，シリカ系固化材は高炉スラグの潜在水硬性の発現およびシリカによる土粒子間の接着効果に時間を要するため，供試体作製後直ちに強度が発現せず，7 日後または 14 日後まで供試体が自立しない結果となった。

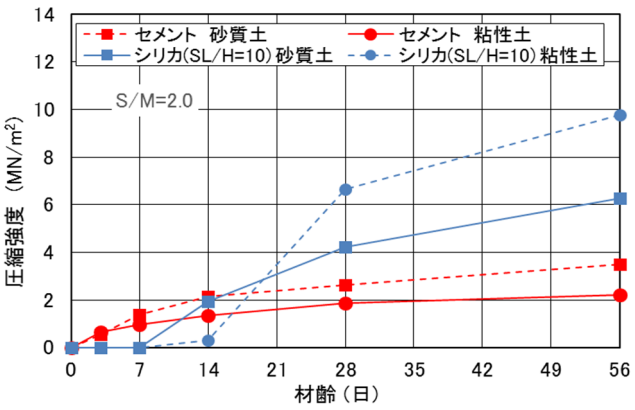

図-2　固化材別の圧縮強度の経時変化

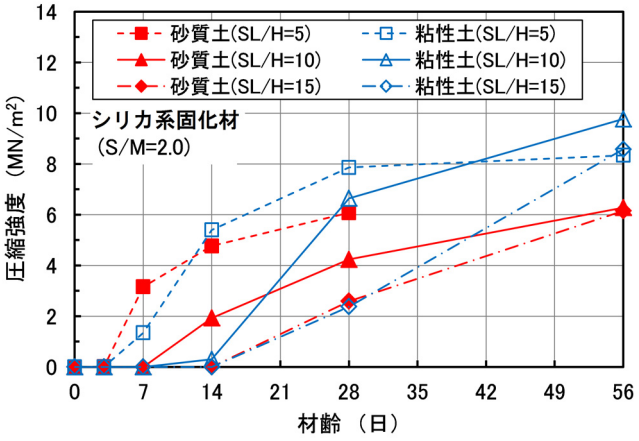

図-3　配合比による比較

5. おわりに

得られた結果を以下に示す。

(1) 砂質土地盤材料に比べシリカによる土粒子間の接着効果およびポゾラン反応による長期強度の発現のため粘性土地盤材料の方が高強度となり，改良効果が高い。

(2) シリカ系固化材はシリカ，アルミナおよび水酸化カルシウムを多量に含むためポゾラン反応が活発に起こり，材齢 28 日以降も強度増加が大きく，材齢 56 日以降も強度が増加する。

(3) セメント系固化材よりも強度発現が遅く，遅延効果があるため，ラップ施工を要する地盤改良工法への適用が可能となる。

本試験結果より，セメント系固化材に比べ遅延性に優れることが明らかとなったが，一般的に強度発現の遅れは問題となる。シリカ系固化材の添加量を増やすことで反応を促進させ，強度発現を早めることが可能であるが，早期強度発現のための正確な配合は未解明であるため，今後の課題となる。

【参考文献】

1) 天野耕二，伊藤昌隆，柳沢幸雄：廃棄・副産物質の再利用を考慮した環境負荷量評価について，環境システム研究，VoL.25，pp.255-259，1997.
2) 松本匡司，米倉亜州夫，伊藤秀敏：混和剤混入による耐酸性モルタルの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.883-885，2005.
3) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル［第二版］，技術堂出版，pp.17-48，1994.