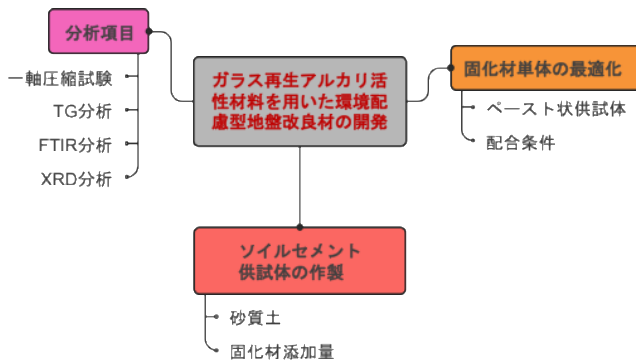


## 令和7年度 研究成果の概要(1/2)

<b>研究テーマ:</b> 「高炉スラグおよびサイディング切削粉を活用したジオポリマー系固化材による山間部砂防技術の開発」						
<b>研究代表者</b> ・氏名(ふりがな): 稲積 真哉 (いなづみ しんや) ・所属、役職: 芝浦工業大学、教授						
<b>研究期間:</b> 令和7年4月～令和10年3月						
<b>研究参加メンバー(所属団体名のみ)</b>						
<b>研究の背景・目的</b> 近年、気候変動の影響により土砂災害の頻発化が進み、砂防事業における効果的な土砂管理技術の開発が急務となっている。従来のセメント系固化材は CO <sub>2</sub> 排出量が多く、環境負荷が高いため、代替材料としてジオポリマー系固化材が注目されている。 本研究では、高炉スラグ微粉末(BFS)および廃ガラス微粉末を活用したガラス再生アルカリ活性材料(AAMs)を用い、セメント不使用の環境配慮型地盤改良材を開発する。具体的には、配合条件の最適化を図り、土砂の塊状化性能を評価し、山間部砂防技術への適用可能性を検証することを目的とする。これにより、CO <sub>2</sub> 排出削減と資源循環を促進し、持続可能なインフラ整備に貢献する。						
<b>研究内容(研究の方法・項目等)</b> 本研究では、高炉スラグ微粉末(BFS)および廃ガラス微粉末を活用したガラス再生アルカリ活性材料(AAMs)を用いたセメント不使用の環境配慮型地盤改良材の開発を実施した。 研究方法(図-1 参照)として、まず固化材単体のペースト状供試体を作製し、一軸圧縮強度試験、フーリエ変換赤外分光法(FTIR)、X線回折法(XRD)、熱重量分析(TG分析)により配合条件の最適化と反応機構の解析を行った。 次に、最適配合を基に砂質土(珪砂1号)を用いたソイルセメント供試体を作成し、一軸圧縮強度試験により強度特性を評価した。養生は常温湿潤養生とし、材齢7日および28日で測定を実施した。 使用材料は、BFS、無水メタケイ酸ソーダ粉末、廃ガラス微粉末とし、これらをシリカ刺激材として組み合わせた。Na <sub>2</sub> O量を主要変数とし、水固化材比40%で固定した配合条件(Case-1～8、表-1 参照)を設定して固化材単体の最適化を行った。 続いて、砂質条件下では固化材添加量200～500 kg/m <sup>3</sup> 、水固化材比120%(一部60%)の条件(Case-9～14、表-2 参照)でソイルセメント試験を実施した。 分析項目は以下のとおりである。	 <p style="text-align: center;">図-1 研究フローと評価項目</p>					
表-1 ペースト供試体の配合条件一覧 (水固化材比=40%、各材料量の単位:g)						
Case	Na <sub>2</sub> O量	BFS	普通セメント	シリカ刺激材	NaOH	水ガラス1号
1	3.21	100	0	9.80	0	0
2	6.49			19.4		
3	10.1			31.0		
4	13.7			42.0		
5	6.49	100	0	0	0	18.0
6	10.1				4.76	
7	13.7				9.26	
8	-	0	100	0	0	0
表-2 砂質土混合試験体の配合と強度特性						
Case	配合分類	固化材添加量(kg/m <sup>3</sup> )	水固化材比(%)	一軸圧縮強さ(N/mm <sup>2</sup> )		
9	ガラス再生AAMs	200	120	7日	28日	
10		300		5.31	6.45	
11		400	60	4.14	5.32	
12		500		12.0	21.5	
13	普通セメント	200	120	14.0	23.5	
14		500	60	5.88	7.33	
				10.2	23.8	

これらの方法により、ガラス再生 AAMs の配合最適化と砂防堤体材料への基礎的適用性を検討した。

## 令和7年度 研究成果の概要(2/2)

### 研究成果の概要

本研究では、高炉スラグ微粉末(BFS)および廃ガラス微粉末を活用したガラス再生アルカリ活性材料(AAMs)を用いたセメント不使用の環境配慮型地盤改良材の開発を実施している。研究の主眼は、ジオポリマー系固化材の最適配合条件を特定し、現地発生土砂の塊状化性能を評価することにより、山間部砂防事業への適用可能性を明らかにすることにある。

固化材単体のペースト状供試体を用いた一軸圧縮試験の結果、ガラス再生 AAMs 配合 (Case-1~4) において  $\text{Na}_2\text{O} = 6.49 \text{ g}$  (Case-2) が材齢 7 日で  $37.1 \text{ N/mm}^2$ 、材齢 28 日で  $48.2 \text{ N/mm}^2$  の最大強度を示した (図-2 参照)。これは普通セメント配合 (Case-8) と同等の水準に達し、セメント代替材としての高いポテンシャルが確認された。TG 分析では、Case-2 の質量減少率が 5.34% と最大値を示し、C-(A)-S-H 生成量の多さを定量的に裏付けた (表-3 参照)。これにより、拘束水量の増加が強度発現に直結することが明らかとなった。

FTIR 分析の結果、 $950 \sim 1100 \text{ cm}^{-1}$  の Si-O-T 振動ピークが  $\text{Na}_2\text{O}$  量の増加に伴い低波数側へシフトした (図-3 参照)。このシフトはシリケート鎖の低重合化を反映しており、反応生成物の構造変化が強度に影響を与える重要な要因であることが示された。XRD 分析では、 $5 \sim 10^\circ$  の低角域ハンブが高角側へシフトし、C-(A)-S-H の層間距離 ( $d_{001}$ ) の減少が観察された (図-4 参照)。これらの結果から、Case-2 では適度な低重合化により  $\text{Ca}^{2+}$  の層間架橋が促進され、安定した層状構造が形成されたと結論づけられる。

研究の全体像を模式的に示した図-5 において、研究は二つの主要な段階に分けられている。第 1 段階は  $\text{Na}_2\text{O} = 6.49 \text{ g}$  の最適配合条件の確立であり、固化材単体での強度発現メカニズムの解明に焦点を当てた。第 2 段階は砂質条件下での評価であり、砂防堤体材料としての実用性を検証した。この図は、左側 (黄色領域) の「セメント未使用」ガラス再生 AAMs が  $\text{Na}_2\text{O} = 6.49 \text{ g}$  の最適配合により優れた強度を発現することを示し、右側 (オレンジ領域) の「砂質条件下での評価」では基準強度を上回る性能が得られたことを強調している。これにより、セメント使用従来材に対するガラス再生 AAMs の優位性を視覚的に明確にし、研究が基礎評価から実際の砂防適用評価へと段階的に進展した流れを表現している。

砂質条件下でのソイルセメント試験では、珪砂 1 号を用い、固化材添加量  $200 \sim 500 \text{ kg/m}^3$  の範囲で評価を実施した。ガラス再生 AAMs 配合 (Case-9~12) において、全ケースで材齢 28 日の強度が砂防ソイルセメント施工便覧の基準値  $4.5 \text{ N/mm}^2$  を上回った (表-3 参照)。特に Case-9 (添加量  $200 \text{ kg/m}^3$ 、 $6.45 \text{ N/mm}^2$ ) と Case-12 (添加量  $500 \text{ kg/m}^3$ 、 $23.5 \text{ N/mm}^2$ ) は、対応する普通セメント配合 (Case-13,14) と同程度の強度を発現し、現地土砂の粒径が小さい場合でも有効な塊状化が可能であることが実証された。これにより、固化材単体で得られた優れた性能が、実際の砂質材料条件下でも維持されることが確認された。

これらの成果は、セメント使用を排除した低炭素型固化材の開発において画期的なものである。 $\text{CO}_2$  排出量の大幅削減 (セメント代替により約 70-80% 低減の見込み) と、副産物 (高炉スラグ、廃ガラス) の有効活用により、資源循環の推進が実現可能となった。また、日光砂防事務所管内のような山間部における土砂災害対策として、現地材料を活用した砂防堰堤構築の基盤技術を提供する点で実用的価値が高い。

今後の課題として、実土 (粒度組成や有機物含有土) への適用性、耐久性 (凍結融解・化学侵食)、環境安全性 (六価クロム等溶出試験) の詳細評価を挙げられる。さらに、縮尺モデル試験や現場試験施工を通じて施工性・経済性を検証し、早期の実用化を目指す。これにより、気候変動に伴う豪雨・土砂災害の増加に対応した、持続可能な砂防技術の確立に貢献することが期待される。

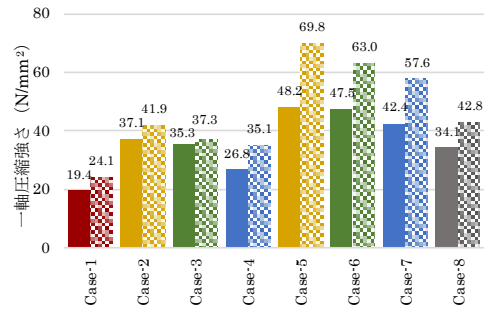


図-2 固化材単体の強度発現特性

表-3 水和生成物の質量減少率

Case	1	2	3	4	5	6	7
配合分類	ガラス再生 AAMs				基礎的 AAMs		
質量減少率 (%)	3.67	5.34	4.09	3.72	5.87	4.32	5.10

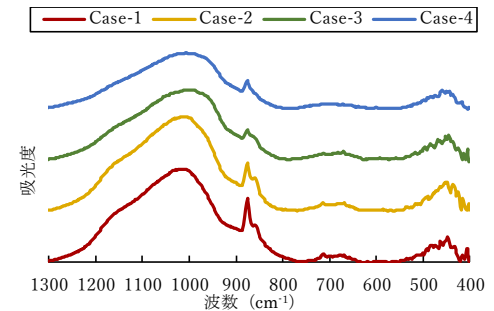


図-3 シリケート構造の FTIR スペクトル

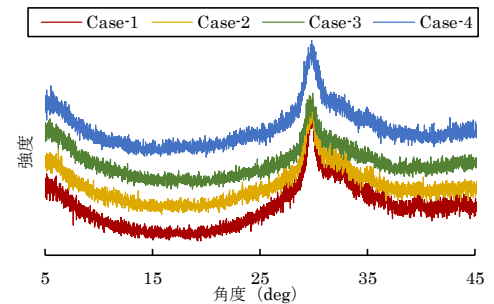


図-4 C-(A)-S-H 層間構造の XRD パターン

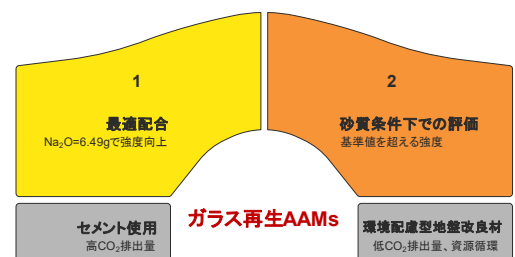


図-5 研究の 2 段階アプローチと環境優位性