

炭酸塩化 PS 灰を用いたジオポリマー改良土の

地盤工学的利用に関する研究

藤川拓朗

福岡大学工学部社会デザイン工学科

概要：本研究は CO₂ 排出量が少ないとされるジオポリマーを地盤材料へ適用することを目的としている。活性フィラーには石炭灰の代替材として PS 灰に着目し、カーボンニュートラルの観点から、CO₂ を固定化させた PS 灰を用いてジオポリマー改良土を作製した。その結果、ジオポリマー改良土は優れた力学特性及び溶出抑制効果を示すとともに、脱炭素への貢献が期待できることが明らかとなった。

1. はじめに

これまで廃棄物や副産物などのリサイクル材を用いた地盤工学的有効利用に関する研究は、セメントやセメント系固化材等を用いて改良土を作製し、その力学・溶出特性を明らかにする研究が中心であった。しかしながら、昨今の CO₂ 排出量削減の観点からセメントやセメント系固化材を使用しない、あるいは、可能な限り使用量を削減することが求められており、今後はこれらに依存しない新しい有効利用方法を考えなければならない。このような背景の中、本研究では、セメントや石灰と比較して製造過程において CO₂ 排出量が少なく、石炭灰の有効利用の観点から特にコンクリート分野で期待されているジオポリマー^{1),2)}を地盤分野（地盤改良材等）において適用する研究を行っている。本報告では、①ジオポリマーの構成材料として石炭灰に代わる副産物・廃棄物として、製紙工場から排出されるペーパースラッジ灰（以後、PS 灰）の有効利用の可能性、②カーボンニュートラル（CN）の観点から CO₂ を固定化させた PS 灰（以後、炭酸塩化 PS 灰）を用いたジオポリマー改良土の力学・溶出特性、③ジオポリマー改良土の適用性評価について検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2-1 実験に用いた試料及び炭酸塩化 PS 灰の作製方法 実験には、土質材料としてトクレーを使用し、含水比を調整（w=26%）してコーン指数が $q_c=200 \text{ kN/m}^2$ としたものを模擬土（第4種建設発生土に相当）とした。活性フィラーには、石炭灰と PS 灰を用いており、表 1 にこれらの化学組成を示す。なお、ここでは参考情報として、再生石膏及び焼却主灰の化学組成につ

いても示す。石炭灰はジオポリマーの主要な活性フィラーとして位置づけられており、SiO₂、Al₂O₃ を主成分とするアルミノシリケート源として機能する。一方、PS 灰についても石炭灰と同様に SiO₂、Al₂O₃ を含有していることが分かる。さらに PS 灰は CaO 含有量が高いという特徴を有しており、水和反応の進行に加え、CO₂ を吸収し CaCO₃ の生成にも期待が持てる。

炭酸塩化 PS 灰は、予備実験により求めた PS 灰が最も CO₂ を吸収する含水比（w=70%）に調整し、チャック付きビニル袋に入れて市販の高純度 CO₂ ガス（純度 99.9%）を所定量封入・密閉し、室温 20℃で 24 時間静置した。その後、24 時間炉乾燥して粉末にしたものを炭酸塩化 PS 灰とした。

表 1 石炭灰及び PS 灰の化学組成

(%)	石炭灰	PS灰	再生 二水石膏	再生 半水石膏	焼却主灰
SiO ₂	61.9	16.4	1.3	1.5	17.3
Al ₂ O ₃	23.6	10.0	0.6	0.6	16.2
CaO	4.6	64.2	45.2	43.5	42.8
その他	9.9	9.4	53.0	54.3	23.7

2-2 実験方法 表 2 にジオポリマーの配合条件を示す。活性フィラーとして、石炭灰または PS 灰に高炉スラグ微粉末を質量比 9:1 で混合させたもの、PS 灰、炭酸塩化 PS 灰をそれぞれ用いた。アルカリアクティベータには、JIS 2 号珪酸ソーダと 10 mol/L の苛性ソーダを質量比 2:1 で混合したものを用いた。これらの活性フィラーとアルカリアクティベータを質量比 2:1 で混合しジオポリマー材料とした。表 3 に実験に使用した固化材の種類と添加量を示す。ジオポリマーを模擬土の湿潤質量に対して 10%

表2 ジオポリマーの配合条件

	活性フィラー	アルカリアクティベータ
混合比	2	1
種類	石炭灰:スラグ微粉(9:1) PS灰:スラグ微粉(9:1)	珪酸ソーダ(JIS 2号) 苛酸ソーダ(10 mol/L) (2:1)
	PS灰 炭酸塩化PS灰	

表3 固化材の種類と添加量

模擬土	固化材	
	種類	添加量(%)
トチクレー (w=26%)	ジオポリマー	10
	高炉セメントB種	3 5

添加し、ミキサーを用いて十分に混合しジオポリマー改良土を作製した。また、セメント改良土との比較を行うために、高炉セメントB種を模擬土の湿潤質量に対して3,5%添加した条件も作製した。実験試料を直径50mm、高さ100mmの塩ビ製モールドに1Ec(≒550kJ/m³)で突き固め、成型脱型したものを供試体とした。

石炭灰を主体とするジオポリマーモルタルは、常温下では縮重合反応が不十分となり強度発現性が低いことから、強度発現を促進させるために蒸気養生が施される³⁾。本研究では、蒸気養生の有無がジオポリマー改良土の力学・溶出特性に与える影響を把握すべく、蒸気養生ありと蒸気養生なしの2通りの養生を行った。蒸気養生ありは、作製直後の供試体を恒温恒湿機に入れ、温度60℃、湿度90%まで昇温加湿し、その後48時間蒸気養生を行った。蒸気養生後は供試体温度を室温(20℃)まで低下させ、供試体をラップで包み20℃の恒温室で気中養生を行った。蒸気養生なしは、作製直後の供試体をラップで包み20℃の恒温室で気中養生を行った。養生日数は7,28,91日とし、養生後は改良土の力学特性を把握すべく一軸圧縮試験(JIS A 1216)を行った。その後、一軸圧縮試験後の試料片を風乾し、2mm以下に粒度調整した試料を用いて環告46号試験を行い、ふっ素及び六価クロムの溶出濃度を定量した。

炭酸塩化灰および改良土のCO₂含有量の測定には、図1に示すガス圧測定装置を用いて、灰中の炭酸塩と塩酸の反応により発生するCO₂ガス圧を測定した^{4),5)}。具体的には、容量500mLのフラスコ内において、所定量(0.5~5.0g)の炭酸塩化灰または未処理の灰に3mol/Lの塩酸20mlを反応させ、発生するガスを炭酸塩の

分解によるものと考え、図2に示すCaCO₃によるキャリブレーションによって得られた検量線からCaCO₃含有量を算出した。その後、同値を以下に示す式-1⁴⁾に代入し、さらに炭酸塩化前後試料での差分からCO₂固定量を算出した。

$$M_{CO_2} = m_{CaCO_3} \times \frac{MW_{CO_2}}{MW_{CaCO_3}} \times \frac{1}{M_s} \quad (1)$$

ここで、M_{CO₂}:CO₂含有量(kgCO₂/t_s)、M_{CaCO₃}:CaCO₃含有量、MW_{CO₂}:二酸化炭素の分子量、MW_{CaCO₃}:炭酸カルシウムの分子量、M_s:実験試料の質量(kg)である。

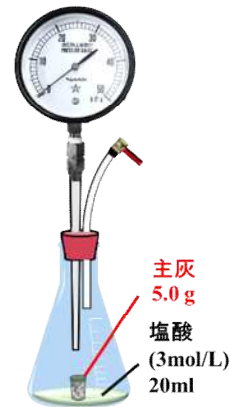


図1 ガス圧測定装置

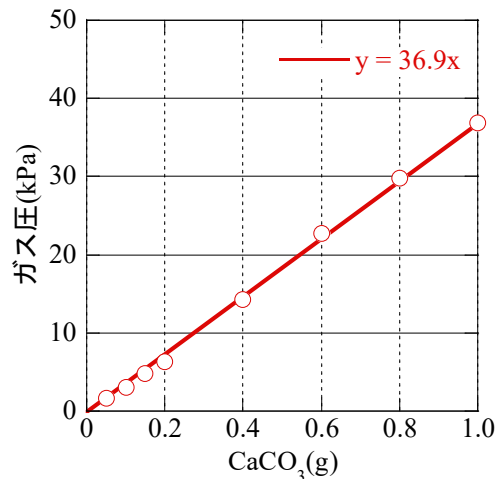


図2 CaCO₃とガス圧の関係(検量線)

3. 実験結果及び考察

3-1 PS灰を用いたジオポリマー改良土の力学特性 図-3に石炭灰及びPS灰を用いて作製したジオポリマー改良土の一軸圧縮強さを示す。なお、図中には比較のためセメント改良土の一軸圧縮強さも示している。石炭灰を用いたジオ

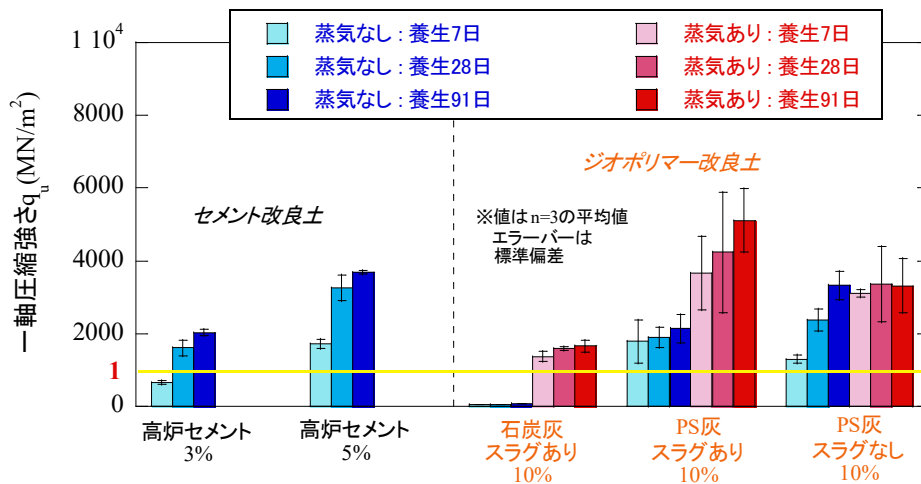


図3 セメント改良土及びジオポリマー改良土の一軸圧縮強さ

ポリマー改良土は、蒸気養生なしではほとんど改良効果が得られていないものの、蒸気養生を施すことで高炉セメントを3%用いた改良土と同程度の強度を有することが分かる。これに対しPS灰を用いたジオポリマー改良土は、養生条件に関係なく高い改良効果が得られており、蒸気養生なしでは高炉セメントを3%用いた改良土と同程度の強度を有し、蒸気養生ありでは、高炉セメントを5%用いた改良土と同等以上の改良効果が得られることが分かる。これは、表1に示すようにPS灰はCaOを主成分とする普通ポルトランドセメントに類似した化学組成を有している。このため、アルミノシリケートゲルの形成に加え、Caの関与によるケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)の生成が進行し、これらの複合作用により強度が向上したものと推察される。

3-2 炭酸塩化PS灰を用いたジオポリマー改良土の力学・溶出特性

図4にPS灰及び他の副産物・廃棄物(石炭灰、再生半水石膏、再生二水石膏、焼却灰)のCO₂固定量を示す。ここで、CO₂固定量とは炭酸化前後のCO₂含有量の差の事を指す。結果より、PS灰と焼却主灰のCO₂固定量が大きく、特にPS灰は178.6 g/kgのCO₂を固定できることが分かる。これは、CaOの含有量が多いことに起因していると考えられる。一方で、再生二水石膏、再生半水石膏はCaOを40%以上含有するが、ほとんどCO₂を固定していないことが分かる。これは、再生石膏のpHが中性域でありCaイオンが間隙水中に溶出しにくい⁹⁾ためであると考えられる。以上の結果を踏まえて、最もCO₂を固定したPS灰を炭酸塩化させたものを使用し

てジオポリマー改良土を作製した。

図5に炭酸塩化PS灰用いたジオポリマー改良土の一軸圧縮強さを示す。図中には比較のため、セメント改良土(高炉セメント:3%)、PS灰を用いたジオポリマー改良土の結果も示している。養生条件に関わらずPS灰に炭酸塩化処理を施すことにより、一軸圧縮強さは減少することが分かる。また、石炭灰を用いた条件と同様に蒸気養生なしでは改良効果を得ることができないものの、蒸気養生を行うことでセメント改良土と同程度の改良効果が得られることが分かる。これは、炭酸塩化処理を施すことによりCaCO₃が生成され、PS灰中のCaOの含有量が低下したためと考えられる。

図6(a),(b)にPS灰及び炭酸塩化PS灰用いたジオポリマー改良土の溶出試験結果を示す。ふっ素、六価クロムともにPS灰を用いたジオポリマー改良土の溶出濃度は高いものの、炭酸塩化PS灰を用いることで溶出濃度は低下していることが分かる。これは、ふっ素については、炭酸塩化PS灰中に含まれるCaCO₃とF⁻の反応

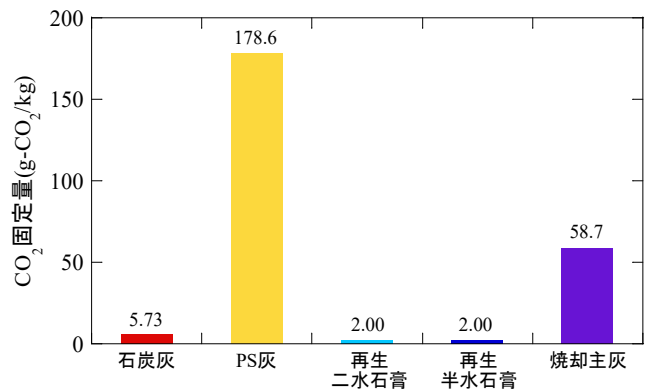


図4 PS灰及び他の副産物・廃棄物のCO₂固定量

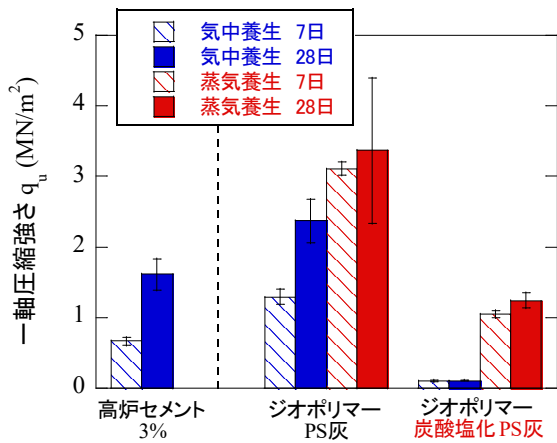
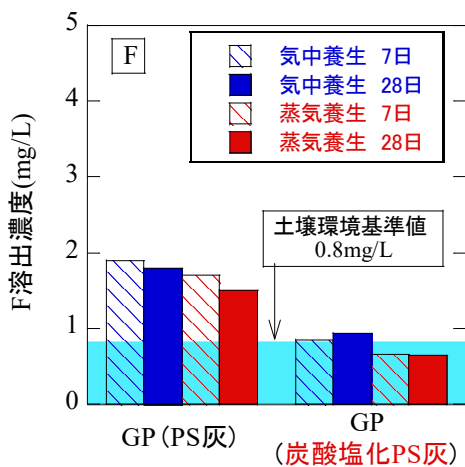
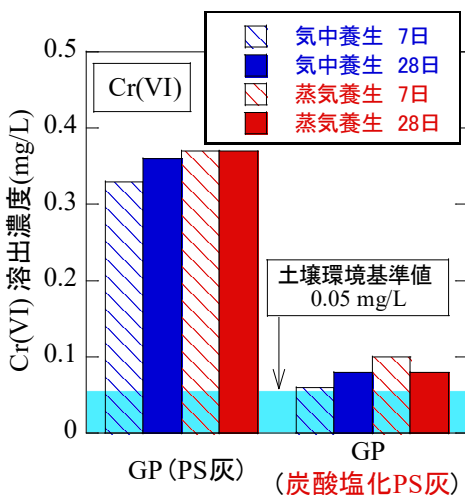


図5 PS灰及び炭酸塩化PS灰を用いたジオポリマー改良土の一軸圧縮強さ



(a) ふっ素(F)溶出濃度



(b) 六価クロム(Cr(VI))溶出濃度

図6 PS灰及び炭酸塩化PS灰を用いたジオポリマー改良土の溶出試験結果

により、 CaF_2 として固定化された可能性が、六価クロムについては、PS灰粒子表面に CaCO_3 が生成されたことにより溶出が抑制されたと考えられる⁶⁾。また、今回の条件においては、養生条件の違いが溶出特性に与える影響については確認されなかった。

3-3 PS灰を用いたジオポリマー改良土の適用性評価と社会実装に向けた課題

1) ジオポリマー改良土のCO₂排出量評価

表4にCO₂排出量原単位⁷⁾、表5に粘土1m³改良時におけるセメントの使用によるCO₂排量、表6に粘土1m³改良時におけるジオポリマー改良土材料の使用によるCO₂排量、図7にCO₂排出量原単位を基に算出した模擬土(原単位は粘土として計算)1m³改良時のセメント改良土およびジオポリマー改良土のCO₂排出量を示す。現在、地盤改良材として広く利用されている高炉セメントおよび普通セメントはCO₂排出量原単位が大きく、それに伴ってセメント改良土のCO₂排出量も大きくなっている。ジオポリマー改良土は普通セメント改良土よりもCO₂排出量は小さいが、その排出量は33.5 kg-CO₂/m³と多量のCO₂を排出する。これは珪酸ソーダのCO₂排出量原単位が759 kg-CO₂/tと普通セメントと同程度であることや、セメント改良土と同程度の改良効果を得るためにはジオポリマー材料をセメントの3倍程度添加する必要があることが影響していると考えられる。ここで、炭酸塩化PS灰を用いて模擬土1m³を改良した際の改良土のCO₂含有量は、図8に示すように蒸気養生で19.4 g/kg、気中養生で23.2 g/kgであることが分かる。これらのCO₂含有量を粘土1m³改良時のCO₂含有量に換算すると、それぞれ蒸気養生で31.0 kg-CO₂/m³、気中養生で42.1 kg-CO₂/m³となる。これらの結果を踏まえて、ジオポリマー改良土のCO₂排出量から改良土のCO₂含有量を差引くことで、炭酸塩化PS灰を用いたジオポリマー改良土のCO₂排出量を算出すると、蒸気養生で2.5 kg-CO₂/m³、気中養生で-8.6 kg-CO₂/m³となり、脱炭素への貢献に期待できると考えられる。

表4 CO₂排出量原単位⁷⁾

CO ₂ 排出量原単位(kg-CO ₂ /t)			
高炉セメント	458	水	1
普通セメント	786	珪酸ソーダ	759
粘土	2.1	苛性ソーダ	144

表 5 模擬土 1 m³ 改良時の普通セメント(添加量 3%)の CO₂ 排出量

材料	外割配合 (kg/m ³)	CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)
粘土	1320	2.1	2.8
水	330	1.0	0.33
普通セメント	49.5	786	38.87
合計			42.0

表 6 模擬土 1m³ 改良時のジオポリマー材料(添加量 10%)の CO₂ 排出量

材料	外割配合 (kg/m ³)	CO ₂ 排出量原単位 (kg-CO ₂ /t)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)
粘土	1320	2.1	2.8
水	330	1.0	0.33
PS灰	110	-	-
珪酸ソーダ	37	759	27.8
苛性ソーダ	18	144	2.6
合計			33.5

2) 炭酸塩化 PS 灰を用いたジオポリマー改良土の適用性評価

本研究で得られた結果を基に力学特性、溶出特性、CO₂ 排出量の観点からジオポリマー改良土の適用性を評価する。力学特性の面から、PS 灰を用いた改良土は、蒸気養生を施さずともセメント改良土と同等以上の改良効果が得られることより、実地盤への施工が可能であると考えられる。炭酸塩化 PS 灰を用いたジオポリマー改良土は、蒸気養生を施すことで一軸圧縮強さは増加し、セメント改良土と同等以上の改良効果が得られることより、固化破碎土としての利用が可能であると考えられる。図 9 に想定されるジオポリマー固化破碎土の施工フローを示す。

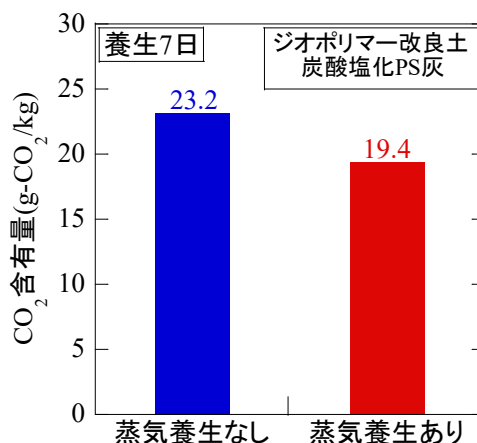


図 8 ジオポリマー改良土 1m³当たりの CO₂ 含有量

ここで固化破碎土とは、粘性土を始めとした軟弱土にセメント等の固化材を添加し十分に固化した改良土を、重機等を用いて破碎したものを指す。固化破碎土は破碎により、その後の固結作用に伴う強度増加が抑制され、通常の土砂と同様の變形性を有し、築堤材や盛土材としての施工事例がある。溶出特性では、ジオポリマー改良土では、活性フィラーとして利用する廃棄物・副産物由来の有害物質溶出が懸念されるが、これまでの研究において、活性フィラーに高炉スラグ微粉末を添加することで抑制することができることが明らかとなっている⁸⁾。CO₂ 固定能では、炭酸塩化 PS 灰を活性フィラーとして用いることで、脱炭素への貢献に期待できると考えられる。以上より、炭酸塩化 PS 灰を用いたジオポリマーは、蒸気養生の施工や高炉スラグ微粉末の併用により地盤改良材として十分な性能を発揮することができ、脱炭素への貢献に期待できると考えられる。

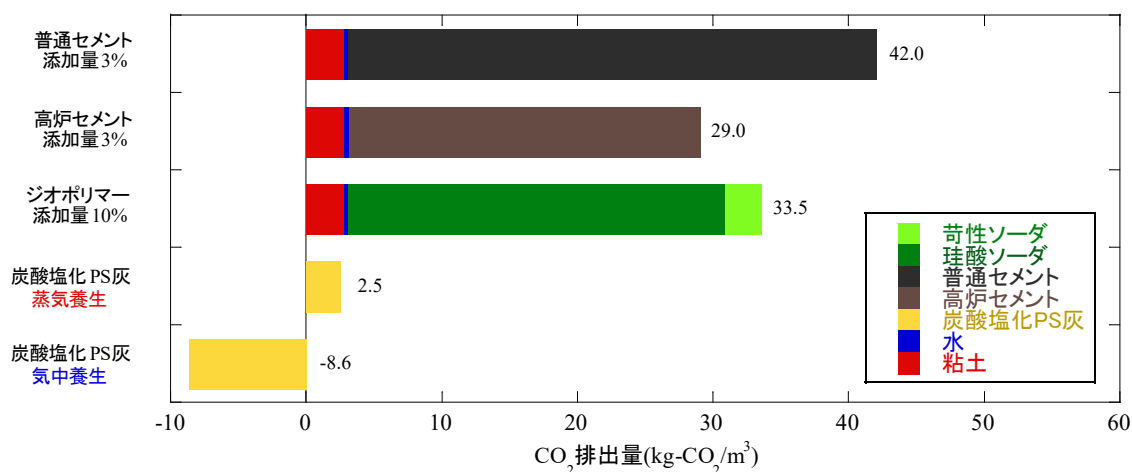


図 7 模擬土 1 m³ 改良時における改良方法別の CO₂ 排出量



図9 ジオポリマー固化破碎土の施工フロー例

3) 炭酸塩化 PS 灰を用いたジオポリマー改良土の実用化に向けた課題

本研究は活性フィラーとして石炭灰の代わりに PS 灰を用いる点に着目し、ジオポリマー改良土の諸特性について検討を行ったが、今後は、アルカリアクティベータに着目した検討を行う必要がある。価格面において、珪酸ソーダや苛性ソーダは300～400円/kgとセメントよりも高額であるため、より使用量の少ない配合設計で価格の抑制を図る必要がある。CO₂ 排出量の観点でも、珪酸ソーダはCO₂ 排出量原単位が大きいため、より原単位の小さい代替材料の使用が求められる。しかしながら、アルカリアクティベータは固化に寄与する材料であるため、固化性能とCO₂ 排出量の双方を考慮した材料選定が必要である。

4. まとめ

- 1) PS 灰を用いたジオポリマー改良土は、石炭灰を用いた条件よりも高い強度発現性を有し、蒸気養生の有無にかかわらずセメント改良土と同等以上の改良効果が得られる。
- 2) PS 灰に炭酸塩化処理を施すことによって、ジオポリマー改良土の一軸圧縮強さは低下するが、蒸気養生を施すことで十分な地盤改良効果が得られる。
- 3) 炭酸塩化 PS 灰を用いたジオポリマー改良土は、炭酸塩化により改良効果は低下するものの、溶出抑制効果が確認され、強度発現と環境負荷低減の両立が示唆された。
- 4) PS 灰に炭酸塩化処理を施すことでジオポリマー改良土作製時のCO₂ 排出量は低下し、脱炭素への貢献に期待できる。

5. 謝辞

研究を遂行するにあたり、(一社)九州建設技術管理協会より令和7年度建設技術研究開発助成を受けました。末筆ながらここに記して謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 一宮一夫, ジオポリマーの研究開発の現状, コンクリート工学, Vol.55, No.2, 2017.
- 2) 一宮一夫, 畑中重光, 新大軌, 国枝稔, 合田寛基, 原田耕司, 建設分野へのジオポリマー技術の適用に関する研究委員会, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, 2017
- 3) 池尾陽作, フライアッシュと高炉スラグ微粉末を使用したジオポリマーの強度発現におよぼす養生条件の影響, 竹中技術研究報告, No.75, 2019.
- 4) 福江正治, 加藤義久, 中村隆昭, 森山 登: 土の炭酸塩含有量試験の測定方法と結果の解釈, 地盤工学会誌, vol.49, 2号, pp. 9-12, No. 2, 2001.
- 5) 藤川拓朗, 肴倉宏史, 本條貴之, 井野場誠治・小川翔平: 同一および異なる測定手法を用いた炭酸塩化灰のCO₂ 固定量の室間比較, 第60回地盤工学研究発表会, 23-9-3-08, 2025.
- 6) 内田周作, 多賀春生, 小峯秀雄, 後藤 茂, 王 海龍, 鈴木清彦, 杉本和聡, 國弘 彩, スラグ系廃棄物および建設廃棄物の遊離Caを活用したCO₂ 固定化特性の調査, 土木学会第74回年次学術講演会, VII-81, 2019.
- 7) 公益社団法人土木学会: 土木分野におけるジオポリマー技術の実用化推進のための研究小委員会(361委員会)成果報告書, コンクリート技術シリーズ, No.132, 2022.
- 8) 藤川拓朗, 佐藤研一, 古賀千佳嗣, PS 灰系ジオポリマー改良土の力学・溶出特性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, 令和8年度土木学会全国大会第81回年次学術講演会, 論文掲載予定, 2026.

受理日: 令和 8年 4月 2日