

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05884

研究課題名（和文）ステンレス製鋼スラグを利用した環境保全型コンクリートであるジオポリマーの開発

研究課題名（英文）Development of geopolimer as an ecological concrete using stainless steel slag

研究代表者

近藤 文義（KONDO, Fumiyoshi）

佐賀大学・全学教育機構・教授

研究者番号：60253811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：環境保全型コンクリートであるジオポリマーの普及を図るための基礎研究として、フライアッシュを含めたフィラー材料の適用性について検討した。養生条件としては初期加熱および恒温養生が必要であることが明らかとなった。次に、自硬性を有するフィラー材料であるステンレス製鋼スラグとフライアッシュを混合したジオポリマーの圧縮強度について実験的に検討した。その結果、フィラー材料としてスラグおよびフライアッシュをそれぞれ単独で使用した場合よりも顕著な強度発現が明らかとなった。さらに、PFBCフライアッシュを単独で地盤改良材として使用した場合、長期的なスレーキング抵抗性向上には有用であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、セメント・コンクリートの代替材料となり得る新しいリサイクル建設材料として盛んに研究が行われ、実用化が期待されているジオポリマーのベースとなるフィラー材料は石炭火力発電所から排出されるフライアッシュ（微細石炭灰）である。これまで、フライアッシュをジオポリマーのフィラー材料とした研究は多数行われている。しかし、一般的なJISフライアッシュはCaOやSO₃の含有量が少ないため自硬性に乏しく、初期強度の発現も遅いという問題がある。本研究は、フライアッシュとは異なり、CaOやSO₃に富み自硬性を有するフィラー材料であるステンレス製鋼スラグを使用してジオポリマーの強度特性を改善するものである。

研究成果の概要（英文）：As a basic research subject to promote the spread of geopolimer as an ecological concrete, the applicability of filler materials including fly ash was examined. It was found that the curing conditions of initial heating and constant temperature were needed. Next, the compression strength of geopolimer was experimentally investigated using stainless steel slag, which is a self-hardening material, and the fly ash are mixed as the filler. As a result, it was found that the strength development was remarkable as compared with the case which the slag and the fly ash were used alone as the filler material. In addition, the PFBC fly ash was useful for improving long-term slaking resistance when used alone as the soil stabilizer.

研究分野：農業農村工学・地盤工学

キーワード：ジオポリマー JISフライアッシュ PFBCフライアッシュ ステンレス製鋼スラグ 地盤改良 圧縮強度 スレーキング

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ジオポリマーは、一般にアルカリシリカ溶液(活性材)とアルミノシリカ粉末(充填材またはフィラー)との反応によって形成された非晶質の縮重合体(ポリマー)の総称である。ジオポリマーという名称は、1970年代にフランスの Joseph Davidovits によって初めて与えられたものである。このジオポリマーは、熱を必要とせず手軽に作製され、しかもセメントや石灰と比較してその作製過程においてCO₂の排出量が少ないという優れた特徴を有している。したがって、近年は特にポルトランドセメントの代替材料としての利用が注目され始めている新しい材料であり、次世代コンクリートまたは環境保全型コンクリートと称されることもある。また、ジオポリマーは産業廃棄物であるフライアッシュ(微細石炭灰)をフィラー材料として有効利用するという点においても期待されている。しかし、このフィラーから溶解した珪素やアルミニウム以外の陽イオンやフィラー材料そのものの物理・化学的性質がジオポリマーの硬化過程に及ぼす影響についてはほとんど明らかにされていない。さらに、ジオポリマーにおいては通常のコンクリートのような練混ぜ時の流動性を確保するための配合設計基準、および硬化後の強度および耐久性増加を確保するための養生基準が何れも定められていないため、実用化への大きな障害となっていた。

2. 研究の目的

ジオポリマーを新しい建設材料として用いる方法としては、硬化体としてコンクリートやモルタルの代わりに用いる場合、骨材のバインダーとしてセメントペーストの代わりに用いる場合、軟弱地盤の改良材として用いる場合の3ケースが想定される。本研究においては、ジオポリマーに関する未解決の課題を学術的に明らかにするために、まずはジオポリマー硬化体としての強度特性を明らかにすることが最重要課題であると考えた。

ジオポリマーの製造過程において通常は、アルカリシリカ溶液として市販の珪酸ナトリウム溶液、アルミノシリカ粉末として火力発電所から排出されるフライアッシュが使用されている。しかし、アルカリシリカ溶液と比較してフライアッシュの化学成分は原産地によって大きく異なり、化学成分の違いがジオポリマーの力学性や流動性に及ぼす影響については未だ十分には明らかにされていない。特に、フライアッシュはセメントのような品質管理がなされた工業製品とは異なりあくまで産業廃棄物であることから、排出口による化学組成の違いが存在し、また、ジオポリマー硬化後の最適な養生条件も定められていない。本研究は、ジオポリマーの次世代コンクリートとしての普及を図るための基礎研究として、フライアッシュを含めたフィラー材料の適用性について化学組成の観点から学術的に明らかにするものである。以上の当初目的を実現するために、研究年度毎に下記(1)~(3)の項目を設定した。

(1)フライアッシュをベースとしたジオポリマー(フライアッシュ・ジオポリマー)とスラグをベースとしたジオポリマー(スラグ・ジオポリマー)の流動性および強度特性の違いを明らかにする。また、最適な養生条件として、水分供給の有無や温度条件、乾燥条件等について検討する。

(2)フライアッシュとスラグの化学組成の違いを考慮し、フィラー材として両者を混合することにより、強度と流動性を併せ持ったジオポリマーの開発について検討する。一般的で入手が容易な微粉炭燃焼方式のボイラーから排出される JIS フライアッシュにおける特性改善に主点を置く。

(3)農業用土水路(クリーク)やため池浚渫土について、フライアッシュ・スラグ混合ジオポリマーを使用した配合試験を行い、セメント系や石灰系の固化材を使用した場合の結果と比較検討する。材齢による改良土の圧縮強度の変化を明らかにすると共に、建設残土にもなり得る改良土を有効利用するための等級改善について検討する。

3. 研究の方法

(1)単一フィラー材料を使用したジオポリマーの強度および流動特性

JISII種フライアッシュをベースとしたジオポリマー硬化体について、初期加熱の有無および硬化後の養生条件の違いが圧縮強度に及ぼす影響を一軸圧縮試験等の力学試験によって検討した。また、ステンレス製鋼スラグを含む化学組成の異なる各種フィラー材料を使用したジオポリマーの硬化前の流動特性および硬化後の収縮特性についてモルタルフロー試験等によって検討した。

(2)フライアッシュ・スラグ混合ジオポリマーの強度および流動特性

フライアッシュとは異なり、自硬性を有するフィラー材料であるステンレス製鋼スラグとフライアッシュを混合したジオポリマーの強度特性について一軸圧縮試験等の力学試験によって検討した。ここでは、スラグの Ca 成分によるセメントと同様の水和反応、および Na 成分によるジオポリマー反応（脱水縮重合反応）の相乗効果による強度発現について考察を行った。

(3)PFBC フライアッシュの地盤改良材としての利用可能性

軟弱地盤の改良に適切な地盤改良材として、ステンレス製鋼スラグと JIS フライアッシュを等量混合した場合に相当する化学組成を有する PFBC フライアッシュについて検討した。比較の対象として、生石灰および普通ポルトランドセメントを使用し、一軸圧縮試験およびスレーキング試験によって検討した。

4. 研究成果

(1)単一フィラー材料を使用したジオポリマーの強度および流動特性

本項目は、ジオポリマーの次世代コンクリートとしての普及を図るための基礎研究として、各種フィラー材料の適用性を化学組成の観点から学術的に明らかにすることを主目的とするものである。まず、JISII種フライアッシュをベースとしたジオポリマー硬化体について、初期加熱の有無および硬化後の養生条件の違いが圧縮強度に及ぼす影響について実験的に検討を行った。初期加熱を行わない場合、僅かでも水分供給がある養生条件では材齢による強度増加は認められなかった。また、強度の発現が遅い欠点はあるが、恒温養生および気中養生が有効であった。初期加熱を行った場合、材齢 7 日の段階では恒温養生と水中養生が有効であった。一方で、この場合、気中養生では長期材齢で圧縮強度の低下がみられた。その理由として、気中養生においては水中養生および土中養生に比べて、温度や湿度変化などの負荷の影響が示唆された。

次に、化学組成の異なる各種フィラー材料を使用したジオポリマーの硬化前の流動特性および硬化後の収縮特性について検討した。流動特性についてはスランプフロー試験による流動幅の直径により評価し、収縮特性については供試体の寸法（高さ）変化により評価した。ジオポリマーのアルカリシリカ溶液として数種類の珪酸ソーダを比較検討した結果、流動性および取り扱いの容易性から珪酸ソーダ 3 号溶液が最も適していることが明らかとなった。一方、ジオポリマーの収縮特性については、通常の JISII種フライアッシュであれば程度の差はあるが、何れも材齢経過により収縮することが明らかとなった。また、JIS 規格外の PFBC フライアッシュおよびステンレス製鋼スラグについても、同様の収縮特性を示した。これらの内、最も収縮量が小さかったのは九州電力松浦フライアッシュ（JISII種）であった。

(2)フライアッシュ・スラグ混合ジオポリマーの強度および流動特性

近年、セメント系材料の代替となり得る新しいリサイクル材料として盛んに研究が行われているジオポリマーのベースとなるフィラー材料は、石炭火力発電所から排出されるフライアッシュである。本項目においては、フライアッシュとは異なり、自硬性を有するフィラー材料であるステンレス製鋼スラグとフライアッシュを混合したジオポリマーの強度特性について実験的に検討した。

フィラー材料として、まずはスラグのみを使用したスラグ・ジオポリマーの場合、材齢（d）14 日で圧縮強度は最大値を示し、それ以降は低下した。また、圧縮強度自体も低く、材齢 14 日での平均値は約 5,500kPa であり、同一条件下でのフライアッシュ・ジオポリマーの圧縮強度（約 14,000kPa）の半分にも及ばなかった。著者らは既往の研究でフライアッシュに Ca 分が多く含まれるジオポリマーの場合、硬化後の供試体表面に白華（エフロレッセンス）が発生する傾向があることを確認しているが、スラグのみをフィラー材料としたジオポリマーの場合も同様の結果が認められた。しかし、ジオポリマーの強度低下と白華との関わりについては未解明の問題であるため、今後検討していきたい。一方、スラグの半量をフライアッシュ置換した混合ジオポリマーの場合、材齢経過と共に圧縮強度は増加し、材齢 28 日で約 36,000kPa を示した。この値は、同一条件下でのフライアッシュ・ジオポリマーの圧縮強度（約 15,000kPa）の約 2 倍以上である。混合ジオポリマーの場合、フィラー材料としてスラグおよびフライアッシュをそれぞれ単独で使用した場合よりも顕著な強度発現が明らかとなった。この理由は、Ca 成分によるセメントと同様の水和反応および Na 成分によるジオポリマー反応（脱水縮重合反応）の相乗効果による強度発現であると推定された。

(3)PFBC フライアッシュの地盤改良材としての利用可能性

軟弱地盤の改良に関する施工および研究事例は古くから国内外に多々あり、原位置での地盤改良においては、石灰またはセメントを主体とした改良材が一般的に使用されている。しかし、適正な改良材の配合量や複数の改良材の配合による施工に関してはほとんど検討されていない問題がある。前年度の研究成果から、ステンレス製鋼スラグと JIS フライアッシュを等量混合したフィラー材料によるジオポリマーが力学的に優れていることが明らかになっている。この結果を踏まえ、適切に地盤改良材として、スラグと JIS フライアッシュを等量混合した場合に相当する化学組成を有する PFBC フライアッシュについて検討した。

産業廃棄物としてのフライアッシュを使用した地盤改良材に関する研究事例は少なく、特に

石炭火力発電所の加圧流動床複合発電方式のボイラーから排出される PFBC フライアッシュ（PFBC 灰）の地盤改良材としての研究事例は皆無のようである。当該年度は、PFBC 灰を併用した浚渫粘土の段階的な地盤改良に関して検討を行った。比較の対象として、生石灰および普通ポルトランドセメントを使用した。その結果、PFBC フライアッシュは石灰とセメントの中間的な性質を有する材料であると推定された。このため、今回の実験に使用した高含水比の浚渫粘土の改良においては、最初に石灰を添加して短時間で含水比を減じた後に、セメントを添加して長期的な硬化の増進を図るための 2 段階施工による地盤改良が有効であると考えられた。また、この 2 段階施工による地盤改良は、一軸圧縮強さだけでなくスレーキング抵抗性にも有効であることが明らかとなった。一方、PFBC フライアッシュを単独で地盤改良材として使用した場合においては、石灰やセメントと比較して力学的に劣る欠点はあるが、長期的なスレーキング抵抗性向上には有用であることが明らかとなった。

最後に、ステンレス製鋼スラグのみをフィラー材料としたジオポリマーの場合は十分な圧縮強度が得られなかったことから、地盤改良材としての開発が未解決の問題として残された。これについては、スラグと PFBC フライアッシュとの化学組成の類似点から検討を行う予定である。また、スラグから供給される Ca 成分によるセメントと同様の水和反応、およびアルカリシリカ溶液から供給される Na 成分によるジオポリマー反応（脱水縮重合反応）の相乗効果に関するメカニズムが十分には解明できなかったことから、今後さらに検討を継続する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 八谷英佑, 近藤文義	4. 巻 308
2. 論文標題 初期加熱および養生条件の違いがジオポリマー硬化体の圧縮強度に及ぼす影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 _39- _45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤文義, 永井勘太, 高木雄史
2. 発表標題 PFBCフライアッシュを併用した浚渫粘土の段階的な地盤改良について
3. 学会等名 第70回農業農村工学会大会講演会（発表受理）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤文義, 溝田浩太郎, 長尾千尋
2. 発表標題 ステンレス製鋼スラグとフライアッシュを混合したジオポリマー硬化体の圧縮強度特性
3. 学会等名 令和元年度農業農村工学会九州沖縄支部大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八谷英佑, 近藤文義
2. 発表標題 初期加熱および養生条件の違いがジオポリマー硬化体の圧縮強度に及ぼす影響
3. 学会等名 佐賀大学肥前セラミック研究センター研究成果報告会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

粉体廃棄物を有効利用して資源（材料）に活かす！
<http://www.ocir.saga-u.ac.jp/houmonki/search/pdf/H28053.pdf>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	米倉 英史 (YONEKURA Hideshi)		
研究協力者	甲本 達也 (KOUMOTO Tatsuya)		
研究協力者	レグランス ロスキー (Legrans Roski Rolans Izack)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------