

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：37102

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04690

研究課題名（和文）有機質土や火山灰質粘性土の覆土や吸着層としての有効利用に関する研究

研究課題名（英文）Research on effective use of organic soil and volcanic ash cohesive soil as soil cover and adsorption layer

研究代表者

林 泰弘（Hayashi, Yasuhiro）

九州産業大学・建築都市工学部・教授

研究者番号：50274692

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：有効利用が進まない有機質土や火山灰質粘性土の物質吸着能に着目し、災害廃棄物などの覆土層、吸着層として利用するための研究を行った。廃棄物としてフライアッシュ、有害物質として六価クロムを選定した。フライアッシュと土を混合した場合に、フライアッシュ単味よりも高い濃度の六価クロムの溶出が確認された。土に含まれる有機物やアロフェン、特に後者によってフライアッシュの六価クロムが溶出しやすい状態になったうえ、陰イオンの六価クロムが土が十分に吸着できないことが原因であると考えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有機質土や火山灰質粘性土は強度レベルが低いいため、土構造体としての利用は厳しいが、物質吸着能に着目することで災害廃棄物などの覆土層、吸着層として利用できれば発生土の有効利用に寄与できると考えた。フライアッシュは石炭火力発電で発生する産業廃棄物であり、有害重金属類を含有するため処分費が高い。そこで、フライアッシュを対象に有機質土や火山灰質粘性土による重金属類不溶化が可能であれば資源の有効活用に着目できると考えた。しかし、これらの材料を混合することによる相互効果が重金属類の溶出に悪影響を及ぼすことが示唆され、今後のさらなる研究が必要であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Focusing on the substance adsorption capacity of organic soil and volcanic ash cohesive soil, which have not been effectively utilized, research was conducted to utilize them as a covering layer and adsorption layer for disaster wastes and the like. Fly ash was selected as the waste material, and hexavalent chromium was selected as the toxic substance. When fly ash was mixed with soil, a higher concentration of hexavalent chromium was eluted than when fly ash was mixed alone. This was considered to be due to the fact that the organic matter and allophene contained in the soil, especially the latter, made the hexavalent chromium in the fly ash more easily leachable, and the soil was unable to sufficiently adsorb the anionic hexavalent chromium.

研究分野：地盤工学

キーワード：重金属類 不要化 六価クロム 有機質土 火山灰質粘性土 フライアッシュ 長期環境安全性

1. 研究開始当初の背景

発生土砂の有効利用において、含水比が高く軟弱なためそのままでは利用できない土砂を再利用するためには、セメント系固化材や石灰などのカルシウム系固化材による土質安定処理が行われるのが主流である。しかし、極めて高い含水状態の細粒土や有機物、非晶質鉱物を含有する土砂に対しては改良効果が低く、処理に必要な費用や環境負荷が大きくなりがちである。そのため、特殊な固化材も開発されているが、高コストであることから積極的な利用にはつながっていない。

改良に伴う環境負荷や費用の低減のために、カルシウム系固化材に加えて高炉スラグやフライアッシュなど固化を助長する産業副産物を混合したり、竹チップや製紙スラッジなど吸水性に富む材料を混合することで含水比を低下させたりする技術の開発が進められている。これらについても、新たな有害物質の溶出の懸念や有機材料の混合による物性の長期的な変動など別の問題が生じるため十分な対策とはいえない。

盛土などの土構造物において、建設工事や災害による発生土や産業副産物、災害廃棄物を用いた再生地盤材料を用いる際には、いわゆるあんこ材といった構造内部の材料とし、表面に覆土、底面に吸着層を設けることで、直接人間が触れるのを避け、浸出水によって周辺環境へ影響を及ぼす可能性が低い状態で使用していることがある。覆土材や吸着材には土としての基本的な力学特性を満足したうえで、pH 緩衝能や物質吸着性が求められ、さらには表層に植生が可能であることが期待される場合もある。吸着層には土砂だけでなくマットやシート状の吸着材が用いられることもある。本研究では有機分や非晶質鉱物を含む土を覆土材や吸着材として適用することを目指した。

有機物を含む土をセメント系固化材などのカルシウム系の固化材での改良する場合には強度や変形特性の改善に悪影響を及ぼすことが知られている。これは有機分に含まれる腐植酸(フミン酸)およびフルボ酸がセメントの水和反応により生成する水酸化カルシウムと反応して腐植酸カルシウムやフルボ酸カルシウムを生成し、それらの水和物が未水和のセメント粒子を覆うことや、フミン酸やフルボ酸がイオン化したカルシウムを捉え、固化のために必要なカルシウムイオンが不足することが原因と考えられている。そのため必要に応じて高価な耐有機性固化材などが用いられる場合もあるが、改良コストの増加を招き、有効利用が進まない要因となっている。

一方で、水に溶けたフミン酸やフルボ酸は極微量でも発芽や発根、根や茎の生育を促進する植物ホルモンに似た作用があることや、間接的な効果(土壌を介して植物体に与える影響)としては、保肥力の向上、微生物の活性化、リン酸固定の軽減が期待できることから植生には適している。また、フミン酸やフルボ酸の持つ高い吸着性能は重金属などの汚染物質の吸着や酸度およびアルカリ度の緩衝作用があるために、pH が高い再生資材や汚染土壌の覆土材としての活用が期待できる。

国内に広く分布する火山灰質粘性土は有機物だけでなくアロフェンも含有している。アロフェンはアモルファスまたは結晶化度の低い水和アルミニウムケイ酸塩でできた粘土準鉱物であり、これもカルシウム系固化材による改良が困難な要因となるが、フミン酸やフルボ酸と同様に物質吸着能や吸湿性が高いとされ、吸着・乾燥剤として工業製品に用いられることもある。

2. 研究の目的

有機質土や火山灰質粘性土など有機酸や非晶質鉱物を含有し、通常行われるカルシウム系の土質安定処理では有効な改良効果が得られない土を対象に、覆土材や吸着材としてふさわしい材料に改質をすることを目的とした。

有機質土や火山灰質粘性土は含水比が高く軟弱で、そのままでは地盤材料としての十分な強度特性が得られない。本研究ではカルシウム系固化材などの化学的安定処理によらずに強度特性を改善することとし、物理的改良による締固め特性の改善を目指した。締固め効果を高めるために対象土の含水比を低下させる材料として、フライアッシュを用いることとした。フライアッシュは土壤環境基準に関わる重金属類を含有する産業副産物であるが、土と混合することで重金属類の溶出を抑制することが可能であると考えた。このフライアッシュ混合土が地盤材料として力学的にも環境的にも問題がない土質材料であることを示すことで、低品質の発生土と産業副産物双方の有効利用につながることを期待した。

3. 研究の方法

主に対象とした土試料は低品質の発生土である火山灰質粘性土とした。物理、力学特性の改善のためにフライアッシュを混合したフライアッシュ混合土を作製した。

火山灰質粘性土の含有成分（有機酸やアロフェン）量の違いを評価するために関東ローム，赤ぼく（2種類），黒ぼくを用いた。さらに，砂質土，粘性土およびこれらに人工的にフミン酸材，フルボ酸材，アロフェン材を添加したものを作製した人工調製試料も用いた。これら土試料にフライアッシュを混合したフライアッシュ混合土を評価対象試料とした。

本研究で用いたフライアッシュは六価クロムのみ土壌環境基準を超えて溶出したため，対象とした重金属類は六価クロムとした。

長期的な六価クロムの溶出特性はバッチ試験とカラム試験で評価した。バッチ試験は平成3年8月23日環境庁告示第46号に基づく試験（環告46号試験）を基本に，液固比を10～100の範囲に変化させた液固比バッチ試験を採用した。液固比バッチ試験では吸脱着関与総量や平衡定数を求めることができる。また，カラム試験では上向流カラム試験を採用した。上向流カラム試験では，短期/長期の溶出挙動に関する情報を得ることができる。以下に各項目について方法を記す。

関東ロームを用いたフライアッシュ混合土からの六価クロム溶出挙動の評価

関東ロームを用いたフライアッシュ混合土を対象に，比較試料として関東ロームに土質改良材（無機系泥土改良材，マグネシウム系固化材）や不溶化材（多硫化カルシウム）を混合したのも準備した。六価クロムの溶出挙動は液固比バッチ試験（L/S = 10～100）と上向流カラム試験（L/S = 10）で評価した。

土中の有機酸とアロフェンが及ぼすフライアッシュからの六価クロム溶出挙動

火山灰質粘性土が特徴的に含有する有機酸とアロフェンに着目し，フライアッシュと混合した場合の六価クロムの溶出挙動を検討した。土試料には火山灰質粘性土として赤ぼくと非火山灰質粘性土として木節粘土を用い，木節粘土には人工的に有機酸（フミン酸材，フルボ酸材），アロフェン材を混合した人工調製土も用いた。溶出挙動の評価には液固比バッチ試験（L/S = 10～100）を用いた。

赤ぼくを用いたフライアッシュ混合土の盛土材，路床材としての強度特性の評価

フライアッシュ混合土を盛土材，路床材として用いることを想定して，一軸圧縮試験とCBR試験により強度特性を評価した。フライアッシュだけでは強度改良効果十分でないことが予想されたためセメント系固化材を併用し，六価クロムの溶出抑制対策として多硫化カルシウムを用いた。フライアッシュ混合土を作製後3日間養生して締固めて供試体を作製した。供試体作製直後と7日間養生後に一軸圧縮試験を実施した。また，CBR供試体は直ちに4日間水浸王朝試験を行い，貫入試験を実施した。併せて環告46号試験で六価クロムの溶出量を測定した。

アロフェン含有量の異なる火山灰質粘性土を用いたフライアッシュ混合土からの六価クロム溶出特性

土の含有するアロフェンがフライアッシュからの六価クロム溶出に大きく影響していると考えられたため，アロフェン含有量の異なる火山灰質粘性土2種類と，これらの混合土をフライアッシュに混合した場合の六価クロムの溶出挙動を検討した。土とフライアッシュの比率を変えたフライアッシュ混合土を作製し，液固比バッチ試験（L/S = 10～80）で溶出試験を実施した。

4. 研究成果

以下に3章で示した各方法に対する結果を述べる。

フライアッシュ混合土からの六価クロム溶出挙動の評価

液固比バッチ試験の結果ではフライアッシュ混合土からの六価クロム溶出濃度は比較的大きく，関東ロームや土質改良材によるフライアッシュからの六価クロム溶出抑制効果はあまり期待できないが不溶化材は効果があることが示唆された。上向流カラム試験の結果では通水初期に六価クロムの溶出濃度が非常に大きくなり，関東ロームを混合することによりフライアッシュ単味よりも溶出濃度が大きくなるケースが見られた。これらの結果より，関東ロームをフライアッシュに混合しても六価クロムの溶出は抑制されないことが示された。

土中の有機酸とアロフェンが及ぼすフライアッシュからの六価クロム溶出挙動

赤ぼくを用いたフライアッシュ混合土からの六価クロム溶出量は，フライアッシュ単味より増加した一方で，木節粘土を用いた場合は最も溶出量が小さくなった。木節粘土に添加したフルボ酸やアロフェンの混合量が多くなると六価クロム溶出量が大きくなる傾向がみられ，特にアロフェンの影響が大きいことが示唆された。

赤ぼくを用いたフライアッシュ混合土の盛土材，路床材としての強度特性の評価

フライアッシュ混合土のセメント系固化材を10%添加すると一軸圧縮強さ，CBRともにある程

度の目標に近い値が得られた。しかし、セメントの併用によって pH の上昇や六価クロムの溶出などの問題が残った。

アロフェン含有量の異なる火山灰質粘性土を用いたフライアッシュ混合土からの六価クロム溶出特性

アロフェン含有率が 10%以下の範囲では、アロフェン含有率の増加に伴って六価クロムの溶出量が増加していた。溶出特性を吸脱着関与総量と平衡定数で評価したところ、平衡定数への影響が大きく、アロフェン含有率が増加するほど平衡定数が増加する、つまり溶出が長い期間にわたって継続する傾向が確認された。

以上の結果より、火山灰質粘性土をフライアッシュで改良したフライアッシュ混合土は六価クロムの溶出に懸念があり、火山灰質粘性土が含有するアロフェン量に注意する必要があることを示した。

その理由として、六価クロムが陰イオンであり火山灰質粘性土の吸着性能が陽イオンに比較して小さいこと、火山灰質粘性土の表面の何らかの特性(物理化学的な電気特性であると推察している)によって、フライアッシュからの六価クロムの溶出が促進されている可能性が示唆された。これらについて今後検討していきたい。

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 0件）

1. 著者名 林泰弘・松尾雄治	4. 巻 -
2. 論文標題 フライアッシュからの六価クロムの溶出に及ぼす有機物やアロフェンの影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第15回環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 156,160
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 砂田幸太郎・林泰弘・松尾雄治
2. 発表標題 フライアッシュからの六価クロム溶出抑制における不溶化剤やセメント混合の影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上雄介・林泰弘・松尾雄治
2. 発表標題 フライアッシュと赤ぼくを地盤材料として活用するための固化処理と不溶化処理
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐渡嶋拓斗・林泰弘・松尾雄治
2. 発表標題 土中の有機物及びアロフェンが及ぼすフライアッシュからの六価クロム溶出特性
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋武重飛・林泰弘・松尾雄治
2. 発表標題 薬品添加によるフライアッシュの六価クロム溶出抑制効果
3. 学会等名 令和3年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村泰輝・林泰弘・松尾雄治
2. 発表標題 パッチ試験とカラム通水試験によるフライアッシュ混合土からの六価クロム溶出抑制効果の検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中克英・林泰弘・松尾雄治
2. 発表標題 フライアッシュ混合土からの六価クロム溶出量とアロフェン含有量の関係性
3. 学会等名 令和5年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------