

フライアッシュを用いた土壌改質材で 改良された土のコーン指数

レストム工法用土壌改質材の理解と今後の活用について

Cone Index of Soil Improved with Solidification Material Including Coal Fly Ash

Understanding and Practical use of Soil improvement material of RESTOM

○山口 晶*
○Akira Yamaguchi

伊藤 純**
Jun ITO

片田 吉孝**
Yoshitaka KATADA

小川孝治**
Koji OGAWAENGLISH

Abstract: In this paper, cone index of soil improved with RESTOM method is studied. The improvement material of the RESTOM method consist of coal fly ash and Blast Furnace Cement. After seven days when the improvement material was mixed with the bentonite which was high water content, cone index tests of specimens were conducted. In the results, the cone index of the soil depends on the mass of Blast Furnace Cement. It is shown that the improved soil with RESTOM method is able to use for ground material for construction.

キーワード: コーン指数, フライアッシュ, 改質土

Keywords: Cone index, coal fly ash and improved soil

1 はじめに

2024年現在、日本国内の多くの原子力発電所が停止しており、電力の供給においては火力発電所の位置付けが大きなものとなっている。火力発電所の最大の特徴は、発電する電気の量を調節しやすく、自然エネルギーを活用した太陽光発電や風力発電よりも自由度が高い点である。ただし、火力発電所では、化石燃料の燃焼により、CO₂や石炭灰が発生する。持続可能な社会を形成する上で、これらの排出ガスや廃棄物をどのように処理するかが課題である。

本研究では、火力発電所から排出された石炭

* 東北学院大学

** レストム工法研究会

○連絡先 yamaguti@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

灰のうち、浮遊成分を回収したフライアッシュと、高炉セメントを主原料として用いた土壌改質材であるレストム工法用土壌改質材(レストム材)に着目した。レストム材は、ため池等の浚渫土や建設汚泥などの高含水比の土を改質処理し、現場で建設資材としてリサイクルするための土壌改質材としてレストム工法研究会によって開発されたものである。ただし、現状では、レストム材に関する系統的・基礎的研究が少ないという課題がある。そこで本研究ではレストム材に関する基礎的研究を実施した。ここでは、レストム材による処理土が、道路、河川堤防、宅地造成等の盛土として利用できる第3種処理土以上(コーン指数 400 以上)^[1]となることを確認するためにコーン指数試験を行った。併せてレストム材の原料として、従来原材料として使用してきた高炉セメント A 種ではなく高炉セメント B 種を用いたものや、

表 1 一般的なフライアッシュの成分^[2]

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)
フライアッシュ	42-79	17-36	1-18	4-26	1-7
クリンカアッシュ	52-64	17-27	4-11	2-9	1-3

従来の原材料とは別の発電所産出のフライアッシュを用いた新たなレストム材開発の可能性について検討した。

本論文では、まず現状の整理のためにフライアッシュについて説明し、次にフライアッシュを含む石炭灰を用いた地盤工学分野での研究の概要を記述する。次に本研究で着目したフライアッシュと高炉セメントを用いた土壌改質材(レストム材)について説明する。

1.1 フライアッシュとは

火力発電所から排出される石炭灰のうち、空中を浮遊する成分を回収したものをフライアッシュという。なお、燃焼炉底部にたまる石炭灰も存在するが、それらは微粉炭燃焼方式ではクリンカアッシュ、流動床燃焼方式ではボトムアッシュに分類されている。一般的なフライアッシュの成分を表 1^[2]に示す。ただし、原料の石炭や発電所の違いにより、成分が異なることに注意が必要である。

1.2 フライアッシュのリサイクル

フライアッシュをセメント等と混合した場合、セメントの水和反応で生成されたCa(OH)₂とフライアッシュ中のSiO₂、Al₂O₃がゆっくりと反応し安定な水和物を生成する。この反応は、セメントと火山灰系の粘土を混合した際に発生する反応と同様であり、ポズラン反応として知られている。このフライアッシュのポズラン反応を利用したものの一つがフライアッシュコンクリートである。フライアッシュコンクリートは、粘土代替物としてフライアッシュを使用したもので、すでに一般に流通している。フライアッシュをセメントに混合することで、以下のような効果が得られることが分かっている。

- 作業性の向上
- 長期強度の増進
- 乾燥収縮の減少
- アルカリシリカ反応の抑制
- 水和熱の減少
- 化学抵抗性の向上
- 中性化への抵抗性増加

● 自己修復性をもつ

なお石炭灰全体としての平成 29 年度のリサイクル実績は全体で 99.0%であり、石炭灰のほとんどが有効利用されている。石炭灰の有効利用のほとんどがセメント産業であるが、その他の建設材料としても利用実績がある^{[2][3]}。また、すでに石炭灰の有効利用のガイドラインが策定されている^[4]。

リサイクルの全体像を考えた場合、セメント産業は、石炭灰のみならず多種多様な廃棄物等の受け入れ先としての可能性を有している。石炭灰のセメント産業以外での活用を考えることは、循環型社会におけるセメント産業の役割をバックアップすることにつながる^[5]。セメント産業以外のフライアッシュの有効利用方法を模索する必要がある。

1.3 本研究で着目したフライアッシュを用いた土壌改質材(レストム材)

現状のレストム工法用土壌改質材(レストム材)は、フライアッシュと高炉セメント A 種を主原料として生産されている。ため池等の浚渫土や建設汚泥などの高含水比の土を改質処理し、現場で建設資材としてリサイクルするための土壌改質材としてレストム材が開発された。レストム材は、フライアッシュの有効利用と、高含水比の不良土の有効利用の 2 つのリサイクルを達成できる循環型社会に寄与する材料と考えられる。しかし、レストム材は系統的・基礎的な研究がされていないという課題があり、現状ではいくつかの公共工事で利用されているに留まっている。

なお、佐藤^[6]らはリサイクル材料が公共工事に利用されるための課題を次の様にまとめている。

- ①品質が明確であること。
- ②コストが新材と同等か安価であること。

そこで本研究では、レストム材による処理土の品質を明らかにすることを念頭に研究を行うこととした。

2 石炭灰に関する既往の研究

現在使用されているレストム材の主要原材料はフライアッシュと高炉セメント A 種である。本章では、既往のフライアッシュを含む石炭灰の地盤分野に関する研究、特に土の改良・改質に用いた研究の概要を述べる。

鳥居ら^[7]は、石炭灰単体を固化して建設材料として利用する目的で研究を行っている。それによると、石灰および石膏が十分に存在すればエトリン

ガイトの生成の後ポゾラン反応により、石炭灰が固化すること、石炭灰にセメントなどの安定材を添加すれば、固化物を道路資材として利用できる可能性を示した。これ以外にも、石炭灰と生石灰や消石灰を混合し土壌改質材として利用できる可能性を調べた研究^{[8][9][10]}や、石炭灰のうちCaO成分に着目して土壌の改質を検討した研究^{[11][12]}、石炭灰とセメントを混合して土壌改質材として用いた研究^{[11][13]}などが行われている。

高橋ら^[14]は、これらの研究を整理するとともに、フライアッシュとボトムアッシュの違いについても言及している。それによると、流動床燃焼灰(ボトムアッシュ)の場合は、燃焼段階で石灰石を併用するため、ボトムアッシュに酸化カルシウムCaOが20~50%以上含まれており、CaOの含有量がフライアッシュより多い。そのため、ボトムアッシュを改質材に用いた方が、比較的改良土の強度が大きくなる傾向にあると述べている。

また、小池ら^[15]は、埋設物の液状化対策としてフライアッシュ系改良材を用いることを検討している。小池らは、フライアッシュ系改良材は再掘削可能な建設資材として泥土を固化できること、再掘削性を考慮した埋め戻し土の地盤改良は添加率2%が適切であることを示した。

これらの結果から、石炭灰・フライアッシュを用いた土壌改質材に関する既往の研究の知見は以下の様にまとめられる。

- CaOを多く含むフライアッシュを添加した土の固化後の強度は、CaOを少量しか含まないフライアッシュの同程度の添加量の固化後の強度より大きくなる。CaOを含まないフライアッシュは、単体ではあまり固化しない^[14]。
- フライアッシュ単体での土壌改質には、フライアッシュの成分に石灰成分と石膏成分の含有が重要である^[7]。
- 石灰成分CaOはポゾラン反応に寄与する^{[6][9][11][13]}。
- 石膏成分はエトリンガイト生成に寄与する^[10]。
- フライアッシュ単体では固化しなくても、少量のセメントや石灰・石こうなどをフライアッシュに混合すると、エトリンガイト生成やポゾラン反応により固化する。その場合、フライアッシュの量の多い方が固化強度が大きい^[13]。
- フライアッシュのポゾラン反応が固化強度に影響を与えるのは、28日以降である。7日強度程度ではエトリンガイト生成による影響が大き

い^{[8][10]}。

- フライアッシュより流動床燃焼方式によるボトムアッシュの方が、処理土は固化しやすい(燃焼時にCaOを混合しているため)^[14]。
- 石こうの適度な混合は、処理土のアルカリ性抑制に効果がある^[10]。
- 原土の含水比が改質後の品質に影響を与える^[10]。
- フライアッシュ系改質土はセメント系改質土に比較して再掘削性がよい^[15]。

現状では、すでにフライアッシュを用いた土壌改質材などは開発されている。また、原料となる石炭の品質や燃焼炉の方式その他によって、フライアッシュの成分は異なることがわかっている。また、処理土の固化時の強度についても、フライアッシュのみの成分だけでなく、フライアッシュに混合する材料の影響を受けることがわかっている。つまり、フライアッシュの産出發電所と混合する材料によって、土壌改質材の性能が大きく異なる可能性がある。

3 レストム工法とレストム材

3.1 レストム工法^[16]とは

レストム工法とは、フライアッシュと高炉セメントを原材料としたレストム材を用い、比較的含水比の高い汚泥等を改質し、建設資材として再利用するための処理工法である。処理方法やレストム材等を含めた工法の名称として「レストム工法」を用いている。なお、汚泥とは、建設処理土利用技術基準^[1]では、「掘削工事に伴って排出されるもののうち、含水比が高く粒子が微細な泥状のもの」、「標準仕様のダンプトラックに山積できず、また、その上を人が歩けない状態」とされている。例えば、建築工事の基礎杭掘削泥土や橋梁の基礎工事等で発生した高含水比の土が該当する。

レストム工法では含水比80%以下の汚泥等は、図1^[16]に示すように自走式の改良機械で処理し、含水比80%以上の汚泥では図2^[16]に示すように鋼製水槽による攪拌処理を行っている。2023年度までに土木工事での施工実績は18件である。

3.2 レストム材

レストム材は、高炉セメントとフライアッシュを主成分とし、無水石膏と少量の添加材を混合した土壌改質材である。



図1 含水比 80%以下の汚泥処理方法^[16]

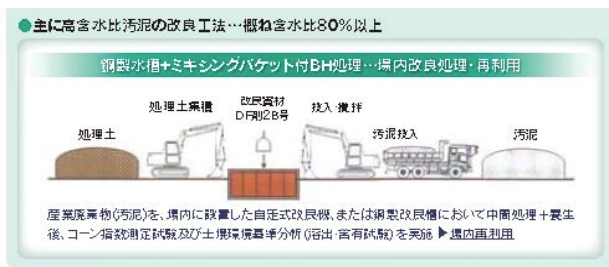


図2 含水比 80%以上の汚泥処理方法^[16]

既往の研究から、硬化のメカニズムは以下の様に推定される。

- 養生期間 0-28 日程度までは、高炉セメントに含まれる高炉スラグとセメント、そして石膏(CaSO_4)成分がエトリンガイトを生成するとともに、水和物を生成し、短期的な強度増加が発現する。
- 養生期間 28 日以降は、水和反応等で生成された $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とフライアッシュに含まれる $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$ 成分がポゾラン反応をするとともに、高炉スラグが潜在水硬性によりケイ酸カルシウム水和物を生成し、長期的な強度増加が発現する^[17]。

また、無水石膏の添加は、フライアッシュや高炉セメントと反応してエトリンガイトを生成するという強度発生の役割とともに、アルカリ性の緩和の役割が期待できる。

上記のように、レストム材の主要な硬化メカニズムはエトリンガイト生成やポゾラン反応であり、石灰系地盤改良材やセメント系改良材の硬化メカニズムとはほぼ同様である。つまり、すでに実績がある硬化メカニズムを活用した土壌改質材であるといえる。なお、レストム材の様に処理土用に用いる土壌改質材は、その処理土が基準に適応した強度を持つことと、建設資材として再利用できるように必要以上に固結しないという相反する性質をもつ必要がある。

3.3 抱えている課題

本レストム材が抱える内的な課題は、

- 主成分の一つとして高炉セメント A 種を用いていること
- レストム材の生産を外部のセメント会社に OEM 生産として委託していること
- 異なる発電所産出のフライアッシュの利用の可能性を確認できていないこと

が挙げられる。高炉セメント A 種は高炉スラグの利用割合が B 種より少なく、あまり一般的とはいえない資材であるとともに再生資材としての社会への貢献度も相対的に小さくなる。広く流通しており価格も低い高炉セメント B 種の使用への変換が望ましい。また、生産を外部委託していることにより、価格や材料の変更、生産量等の観点で自由度が制限されている。さらに、現在のレストム材は一か所の発電所のフライアッシュを用いているが、他の県の発電所のフライアッシュでレストム材を生産し、その県の工事に使用することができれば、建設資材の地産地消に貢献できる。

また、外的な課題としては、

- 現状では短期的・長期的な視点における系統的・基礎的な研究が充分でない点である。そのため公共工事への利用という点で苦戦している。

本研究では、レストム材について系統的・基礎的研究を実施してデータを蓄積させるとともに、原料として高炉セメント B 種を用いたものや従来とは別の発電所産出のフライアッシュを用いたものなど、新たなレストム材の自主生産の可能性も合わせて検討する。

4 実験

4.1 実験テーマの選定

レストム材において定量的に検討が必要な内容は、参考文献^[16]の記述を参考にまとめると以下の通りとなる。

- 第三種処理土として認められるコーン指数 400 以上^[1]が得られるか。
- 改質土の長期的な品質の維持ができていくか。
- 改質土のアルカリ性の抑制がされているか。
- 植物の生育は改質土において可能か。
- 改質土の有害物質溶出の有無。

が挙げられる。

表 2 使用したレストム材の特徴

改質材	2B号	2号	N号
分類	レストム材		
製造	・H社製造 ・常磐共同火力(福島)のフライアッシュ使用	・H社製造 ・常磐共同火力(福島)のフライアッシュ使用	・N建設で試作 ・酒田火力(山形)のフライアッシュ使用
配合	・フライアッシュを54% ・高炉セメントA種36%	・フライアッシュを41% ・高炉セメントA種48%	フライアッシュを42%配合 ・高炉セメントB種50%配合
目的	・比較的含水比が低い(80%以下)場合に有効	・含水比が高く早期に強度発現を求める場合や寒冷期の改良に使用	・自社生産と各地域の火力発電所のフライアッシュの利用を目指すパイロット版

表 3 実験条件

試験名	2B号	2号	N号	ポルトランドセメント	高炉セメントB種
分類	レストム材			セメント	
レストム材	2B号	2号	N号	—	—
土試料	ベントナイト				
含水比	50%・75%・100%			50%・100%	
添加量	50kg/m ³ ・75kg/m ³ ・100kg/m ³				

本年度は改質土のコーン指数に着目した実験を行った。それ以外のテーマについては今後継続して実施する予定である。なお、本工法は、建設汚泥や浚渫土の処理と再利用を目的としていることから、レストム材添加後、速やかに処理土と認められる強度を持つとともに、一定期間で必要以上の強度とまらない必要がある。そこで、処理土の残置期間と再利用の観点から、コーン指数試験実施までの養生期間は7日とした。

4.2 実験概要

レストム材の基本的性質を調べるため、

- 含水比と添加量をパラメータとして、コーン指数を調べる
- 従来品とは別の発電所産出のフライアッシュに高炉セメントB種を混合した試作レストム材と従来品との比較実験を行う

ということをテーマとした。

4.3 実験条件

本実験では、レストム材として従来品である2B号と2号、試作品としてN号を使用した。なお、従来品は福島の火力発電所産出のフライアッシュに高炉セメントA種を混合している。2B号と2号の主な違いは、フライアッシュと高炉セメントA種の混合割合で、対象とする土の含水比で使い分けることとなっている。N号は、山形の火力発電所産出のフライアッシュと高炉セメントB種を用いた試作

品で、自主生産と地産地消の土壌改質材を目指したレストム材である。

また、比較として同様の条件でポルトランドセメント、高炉セメントB種を使用した実験も行った。用いた土壌改質材の特徴を表2に示す。

試料はベントナイトに水を混合し、含水比をそれぞれ50%、75%、100%とした土を用いた。レストム材やセメント等は、添加量を50kg/m³、75kg/m³、100kg/m³とした3条件とした。実験条件を表3に示す。レストム材を用いた実験は含水比3条件のそれぞれについて、添加量を3条件で、各2本のコーン指数試験を行い、その平均値を考えた。ポルトランドセメント、高炉セメントについては、ベントナイト試料の含水比を50%と100%とし、添加量はレストム材と同様の条件とした。養生期間7日後、コーン指数試験を実施した。

4.4 実験手順

実験手順を図3に示す。手順は次のとおりである。

- 1.所定量のベントナイトと精製水をホバートミキサーで2分間混合し、試料土を目標とする含水比に調整する。
- 2.ボールに付着した粘土を手で練り返す。
- 3.所定量のレストム材またはセメントを試料土と混合し、ホバートミキサーで2分間混合する。
- 4.処理土をビニール袋に入れて口を開放したまま

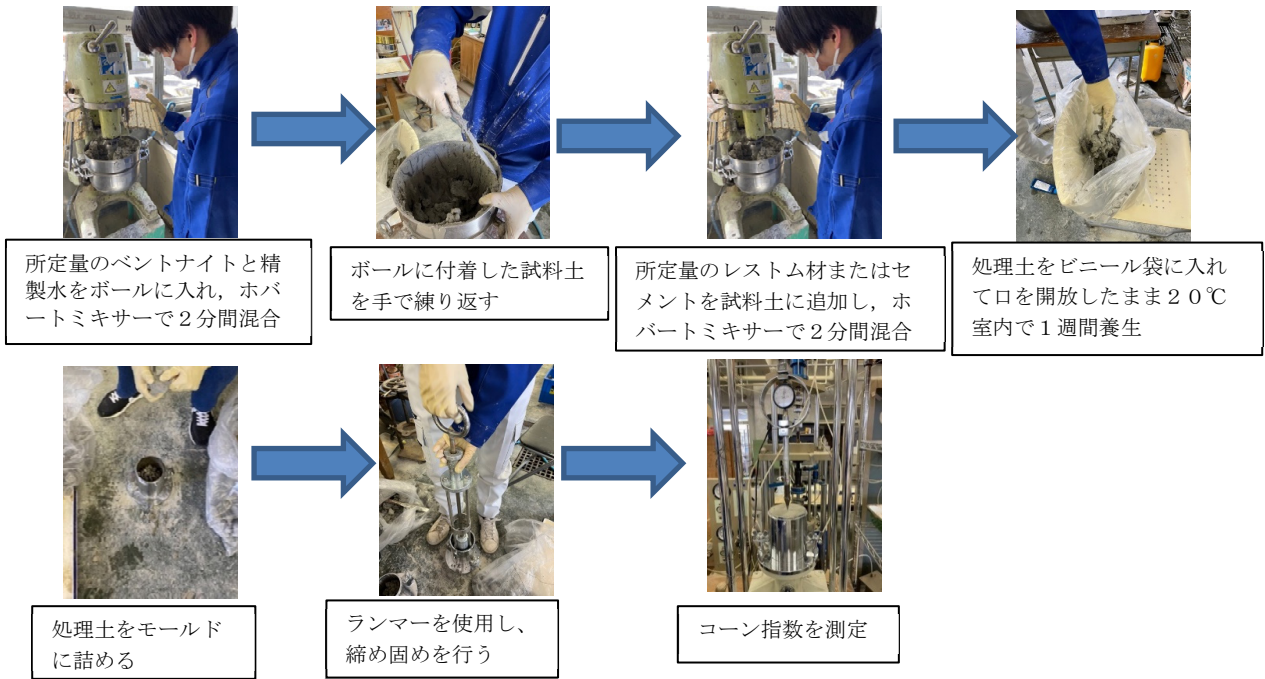


図3 実験手順写真

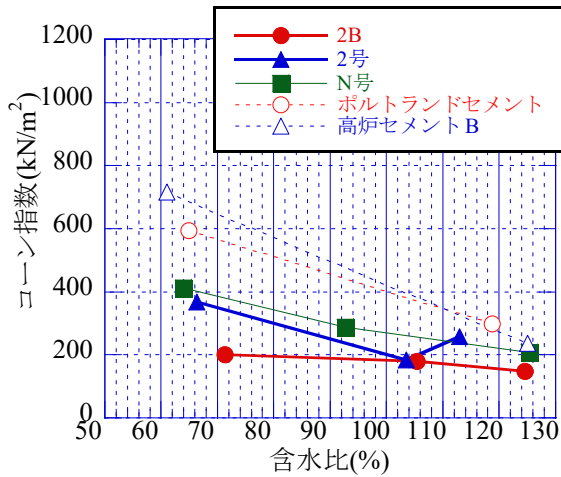


図4 添加量 50kg/m³の含水比-コーン指数

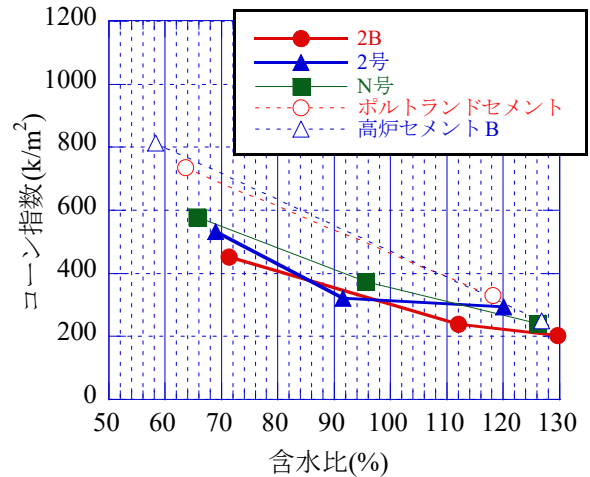


図5 添加量 75kg/m³の含水比-コーン指数

20℃の室内で1週間養生する。

5.養生後、処理土をコーン試験用のモールドに突き固め用ランマーで3層25回で突き固めで詰める。

6.コーン指数試験 (JIS A 1228) を行う。

なお、同条件で供試体は2つ作製し、2つのコーン指数試験の平均値をその条件のコーン指数とした。

5 実験結果と考察

5.1 試料の含水比とコーン指数

図4に添加量 50 kg/m³, 図5に添加量 75 kg/m³, 図6に添加量 100 kg/m³の試料の含水比とコーン指数の関係を、混合した土壌改質材毎

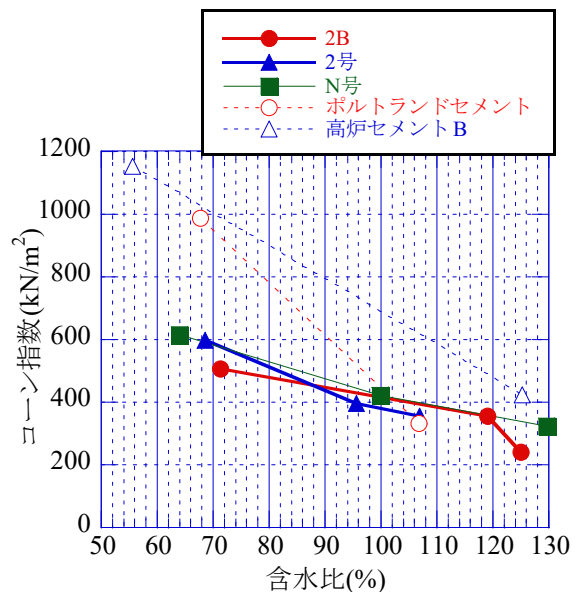


図6 添加量 100kg/m³の含水比-コーン指数

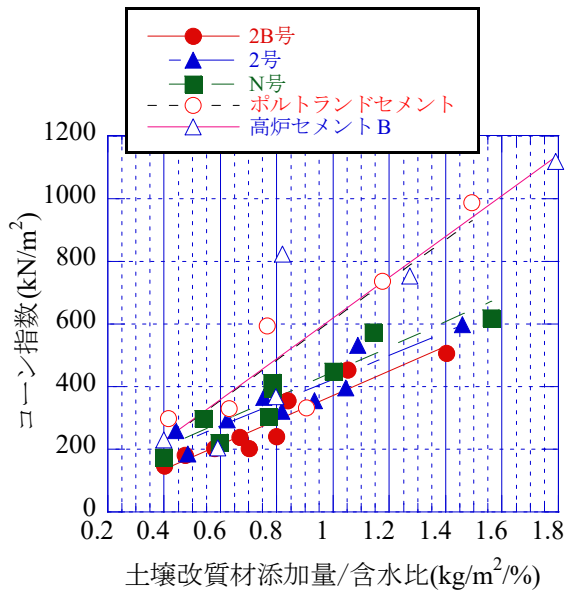


図7 土壌改質材添加量/含水比-コーン指数

に示す。まず、全ての添加量・土壌改質材の条件で、試料土の含水比が大きくなるとコーン指数が低下すること、添加量が増加するとコーン指数が増加する傾向にあることがいえる。特に含水比の増加とコーン指数の低下の傾向はほぼ直線的である。試料の含水比に応じたレストム材の添加量を選択することにより、処理土として利用できる強度(コーン指数 400 以上)となることが分かった。

5.2 試料の含水比と土壌改質材添加量

石炭灰と土壌改質材に関する佐藤ら^[11]の研究によれば、ある石炭灰では、石炭灰量/水分量と非排水圧縮強さ q_u は比例関係になった。また、金城ら^[18]によれば、セメント系改良土の一軸圧縮強さはセメント/総水量比に比例することが分かっている。これらの研究を参考にレストム材の添加量と試料の含水比の関係を検討するために、土壌改質材添加量/試料含水比で整理を試みた。

試料(ベントナイト) 1 m^3 を考えた場合、この試料中の水分の質量を m_w 、固体成分の質量を m_s とすると、

$$\text{含水比 } w = \frac{m_w}{m_s} \times 100 \quad \cdots \text{式 1}$$

となる。また、土壌改質材の添加質量 m_{DF} とすると、

$$\frac{\text{土壌改質材の添加量}}{\text{試料含水比}} = \frac{m_{DF}}{m_w \times 100 / m_s} = \frac{m_{DF}}{m_w} \times \frac{m_s}{100} \quad \cdots \text{式 2}$$

となる。つまり、土壌改質材添加量/試料含水比は、土壌改質材水比に土粒子分質量を重みとして掛けたものと考えることができる。

図7は、土壌改質材添加量/試料含水比で整理したコーン指数である。この図から、土壌改質材添

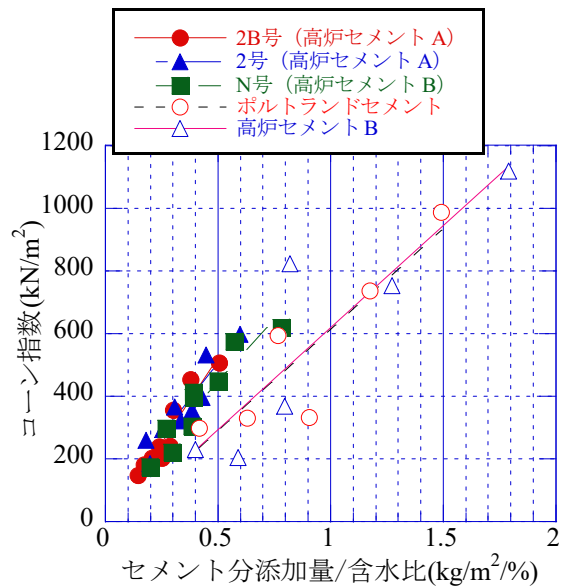


図8 高炉セメント(ポルトランドセメント)添加量/含水比-コーン指数関係

加量/試料含水比で整理すれば、土壌改質材毎にそれぞれ直線関係になり、添加量と含水比、コーン指数を一つのグラフで整理できる。例えば、添加量 100 kgf/m^3 で含水比 100%の場合、横軸を1でみればよい。含水比を一定とした場合、図7横軸の右側に行くほど土壌改質材の添加量を増やした場合のコーン指数である。土壌改質材添加量を一定とした場合、右側に行くほど、含水比が低下した条件のコーン指数となる。

このグラフでは、ポルトランドセメントと高炉セメント B 種はほぼ同一の土壌改質材添加量・含水比・コーン指数関係を示している。レストム材は上から N 号、2 号、2B 号となっている。レストム材 2 号は含水比が高い試料を対象としたものであり、2B 号よりコーン指数が大きいことから、その特徴がグラフで表現できている。N 号は、2B 号、2 号より、若干上側に近似直線が位置している。試作品 N 号は、従来品 2B 号や 2 号と同程度の改質効果が得られる可能性が示された。

ここで、本実験は養生期間を 7 日としているが、既往の研究からまだポゾラン反応は十分でないと考えられるため、土壌改質材の成分がコーン指数に与える影響を考えると、フライアッシュより高炉セメント B 種の方が大きいことが推察される。そこで、レストム材の場合は、各材料の混合比から高炉セメント分の質量を計算したもの、高炉セメント B 種とポルトランドセメントはそのままの添加量を試料の含水比で割ったセメント分添加量/含水比で整理したグラフを図8に示す。なお、レストム材 2 号と 2B

号は高炉セメント A 種, N 号と高炉セメント単体は高炉セメント B 種を用いている。このグラフをみると, レストム材についても種類によらずほぼ同一の直線となっている。7 日養生のコーン指数については, レストム材に含まれる高炉セメントの割合の影響が極めて大きいことが確認できた。また, レストム材に混合する高炉セメントについては A 種も B 種も大きな差が見られなかった。図 8 では, レストム材のプロットの方が高炉セメント B 種単体のものよりも上側に位置している。これは高炉セメント分の添加量で考えた場合, 同じ含水比の試料土を処理するとレストム材の方が大きなコーン指数が得られることを示している。この結果から, レストム材に含まれるフライアッシュが高炉セメントの硬化メカニズムの発揮を邪魔していないことと, コーン指数を増加させる正の影響を与えていることがわかる。なお, その正の影響の原因は, 7 日養生でポゾラン反応は充分でないことを考慮すると, 添加した石膏の影響や乾燥しているフライアッシュが水を吸収したための物理的な含水比低下の影響が考えられる。

6 まとめ

本研究では, レストム工法用の土壌改質材の基礎的・系統的な研究を目的として, ベントナイトを用いた7日養生後のコーン指数試験を実施した。また, その際, 従来高炉セメント A 種と福島のフライアッシュを用いていたレストム材に対して, 高炉セメント B 種と山形のフライアッシュを用いたレストム材の試作品も同時に実験し, 新しいレストム材開発の可能性も合わせて検討した。

その結果, 不純物のないベントナイト試料ではあるが, 含水比の大きい粘土でもレストム材混合により7日養生で処理土として利用できるコーン指数となることが確認できた。また, コーン指数は, 土壌改質材添加量/含水比で整理できることがわかった。さらにレストム材に含まれる高炉セメントの割合から求めた高炉セメント分添加量/含水比で整理した場合, レストム材の種類に関係なく一義的に整理できた。

新たなレストム材の開発の可能性については, 高炉セメント B 種と山形のフライアッシュを用いた試作品 N 号は, 従来品の高炉セメント A 種と福島のフライアッシュを用いた 2B 号・2 号と比較して遜色のないコーン指数が得られた。これは, 入手が容易な高炉セメント B 種を使用できる可能性があ

ること, 各地域にある火力発電所産出のフライアッシュを用いることができる可能性があることを示している。本研究により, それぞれの地域のレストム材を生産できる可能性を確認できたといえる。

参考文献

- [1] 国土交通省 建設汚泥処理土利用技術基準 <https://www.mlit.go.jp/tec/kankyoh/hasseido/pdf/odeisyorikijyun.pdf>
- [2] 土木学会 石炭灰混合材料を地盤・土木構造物に利用するための技術指針(案), (2021)
- [3] 一般財団法人石炭エネルギーセンター 石炭灰全国実態調査報告書(平成29年度実績), (2019)
- [4] 一般財団法人石炭エネルギーセンター 石炭灰混合材料有効利用ガイドライン(統合改訂版), (2018)
- [5] 高橋邦夫, 伊豆津庸雄:建設・産業副産物の地盤工学的有効利用 8.石炭灰, 土と基礎 53-8, 43/51, (2005)
- [6] 佐藤研一:循環型社会の形成に向けた産業廃棄物リサイクルの将来展望, 日本エネルギー学会機関紙えねるみくす, 97, 20/29, (2018)
- [7] 鳥居和之, 川村満紀, 柳場重正, 締め固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 372 号/IV-5, (1986)
- [8] 手島省吾, 上田敬治:埋立土の安定化におよぼす生石灰,フライアッシュ混合物の添加の影響, 54-59, Gypsum & Lime No. 234, (1991)
- [9] 河野一郎, 富田武満, 上村克巳, 田辺和康:石灰とフライアッシュの混合物を用いた粘性土と砂質土の安定処理の相違について, 土木学会論文集 No. 469/III-23, pp. 73~81, (1993)
- [10] 松尾稔, 木村稔, 近藤寛通, 堤博恭:石炭灰の土質改良材への適用に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.603/III-44, 77-88, (1998)
- [11] 佐藤厚子, 西川純一, 山澤文雄:泥炭と石炭灰の混合土を盛土材に利用するための検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, VII-208, (2000)
- [12] 山澤文雄, 西川純一, 佐藤厚子, 小林仁,

榊原敦仁:石炭灰の土木材料への適応性,
地盤工学会北海道支部技術報告集 第40号
275-281, (2000)

- [13]五十嵐由一, 小野寺収:セメントを添加したフ
ライアッシュの不良土改良特性, 土木学会第
57回年次学術講演会, III-036, (2002)
- [14] 高橋邦夫, 伊豆津庸雄:建設・産業副産物
の地盤工学的有効利用 8.石炭灰, 土と基礎
53-8, 43-51, (2005)
- [15] 小池陽平, 清 隆, 藤田哲之, 小長井一
男:フライアッシュ系改良材による液状化対策
効果と掘削性に関する実験的研究, 地盤工
学ジャーナル Vol.11, No.2, 179-191,
(2016)
- [16] レストム工法研究会 レストム工法パンフレッ
ト
- [17]一般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 4 版, 技法堂
出版, (2012)
- [18]金城徳一, 酒卷克之, 田坂行雄, 高倉篤:土
を固める原理と応用 3.改良土の特性, 土と
基礎, 52-11(562), pp59-66, (2004)