

焼却灰の土木資材化に関する研究開発

九州大学大学院環境システム科学研究センター・
福岡県保健環境研究所・電源開発株式会社・三井鉱山株式会社

既に石炭灰において確立された技術「ポゾテック」を応用し、原料である石炭灰を RDF 焼却灰により置換した材料を試験製造し、RDF 焼却灰を利用した土木材料として道路路盤材料への適応可能性を評価するための基礎データ収集した。種々の配合による固化試験、安全性試験、実施工試験を行い、基礎データを収集した。さらに、実際の RDF 燃焼発電事業より発生する焼却灰を使用し、土木資材として応用した際の問題点を摘出し、安全な使用が可能となるような条件を検討した。これらの結果、工業的に RDF 焼却灰により石炭灰の 50 %までの置換が可能であり、安全な材料として福岡県の民間開発技術審査証明（技審証 第 2 号）を取得した。

キーワード：RDF、RDF 焼却灰、石炭灰、ポゾラン反応、土木資材、道路路盤材料、リサイクル

1. 研究の目的

家庭から排出される廃棄物の処理問題解決策のひとつとして、廃棄物の中に含まれている可燃物を圧縮、乾燥、粉碎、成型固化などの加工によって固形化燃料を製造し、熱エネルギーとして有効利用する廃棄物固形化燃料（Refuse Derived Fuel、以下“RDF”という）の製造技術が開発、実用化されており、RDF の安定した利用方法として RDF 燃焼発電事業が注目されている。しかし、RDF 燃焼発電事業から発生する焼却灰については、その有効利用が種々検討されているものの、効果的な方法の確立には至っていない。RDF 燃焼発電事業が本格的に実用化されるまでに焼却灰の有効利用技術が解決されなければ、焼却灰処分場の建設に多大の経費を必要とし、灰処理コストが大きな課題となる。また、循環型社会の早期実現のためにも、RDF 焼却灰の有効利用技術の確立が期待されている。

一方、従来の石炭火力発電事業においても燃焼による副産物である石炭灰の有効利用に関して同様の課題がある。これらの課題を解決し発電事業計画を円滑に推進するため、過去さまざまな石炭灰有効利用技術が検討されてきた。RDF 焼却灰と石炭灰は燃焼温度に差はあるものの、その物理特性あるいは化学特性に共通点が多く見られる。したがって、過去に検討された石炭灰の有効利用技術を RDF 焼却灰の利用技術として検討することは解決の糸口を見出し、早期に課題を解決する方法として有効と考えられる。それらの技術の中で、常温固化技術として建設省（現、国土交通省）の土木材料認定を取得した「ポゾテック」（技審証書第 0609 号）は、石炭火力発電事業から発生する石炭灰と排煙脱硫スラッジを原料とする環境への影響が少ない土木材料として実用化された技術である。「ポゾテック」には、必要とされる支持力を材料自体の水硬性によって発現するためエネルギー消費が少なく、土木材料であるため大量の有効利用が期待されるなどの特徴がある。

本研究の目的は、既に確立された技術「ポゾテック」を応用し、原料である石炭灰を RDF 焼却灰により一部あるいは全量置換する事により、エネルギー消費が少なく、環境への影響が少なく、かつ、大量に使用できる土木材料の開発により、循環型社会に寄与する事である。

2. 採用した石炭灰有効利用技術の概略

RDF 焼却灰の有効利用技術として選択した石炭灰有効利用技術システムの一つであるポゾテックシステムは、前述したような視点に立ち、確実性のある常温処理技術として米国 CSI (Conversion Systems Incorporation) 社により開発されたものであり、1987 年に三井グループにより技術導入された。導入後、日本の状況に適合するように通産省資源エネルギー庁（現、経済産業省）の石炭生産・利用技術補助事業として、ポゾラン系の水和反応を利用する常温高強度固化体（ポゾテック）の製造技術と、これを利用した石炭灰の大規模利用技術の確立をめざして研究が進められた。これらの結果を基に平成 6 年

度には建設省の民間開発技術の認定制度に基づき（財）土木研究センターより道路路盤材料、盛土材料として材料認定を取得した技術である。

3. 結果および考察

福岡県、電源開発および三井鉱山のこれまでの研究により、ポゾテックシステムを応用し、原材料である石炭灰を RDF 焼却灰で一部あるいは全量を置換した道路路盤材料は、全ての試験配合においてポゾラン反応による水和鉱物が確認され、アスファルト舗装要綱に定める下層路盤材料の品質（石灰安定処理）を満足すること、一部の配合からは鉛および砒素の溶出が認められるもののこれら重金属の溶出は固化促進剤として消石灰あるいはセメントを所定量混合することにより環境基準値以下に低減できることが明らかになっている。また、大型試験機による検討でアスファルト舗装要綱に定める路床材としての CBR（26.4%）も満足し、透水係数も 6.62×10^{-7} であり、実質上不透水であることも報告されている。

本研究では、安全性をさらに高めるために種々の RDF 焼却灰を用い RDF の生産地、固化促進剤、および石炭灰置換率が強度、環境特性に与える影響を検討した。さらに、試験運転を開始した RDF 燃焼発電所から得られた実機灰について同様の検討を加えた。また、福岡県道において路床材としての実証試験を実施した。本研究における材料配合率は特に断らない限り、石炭灰と RDF 焼却灰の混合物 3 部に対して、脱硫スラッジを 1 部とし、最適含水比の水を加えたものである。また、固化促進剤添加率は粉末に対しての外割で表記した。全ての実験は、特に明記しない限り JIS 等に準規した。

3-1. RDF 焼却灰置換率と強度の関係

産地が異なる RDF を用いて実証炉から発生した焼却灰 5 種類（H、N、I、K、U）を入手したが、その内の H 産を用いて検討した。通常、最適含水比は繰り返し同一試料に水を加え、測定する（繰り返し法）。本研究ではさらに工業的に製造する場合を考慮し、種々の含水比で試料を作成し、実製造時の出荷にあわせた 24 時間後の最適含水比（非繰り返し法）も測定した。

その結果、非繰り返し法による最適含水比は繰り返し法の最適含水比よりも多く必要ことが判った。繰り返し法で得た最適含水比および、繰り返し法と非繰り返し法の間の中間の含水比では全ての配合においてアスファルト舗装要綱において必要とされる 10 日材齢一軸圧縮強度 7 kg/cm^2 を満足した。繰り返し法と非繰り返し法の間の中間の含水比で実験した石炭灰置換率と強度の関係を図 1 に示す。

一方、非繰り返し法で得た最適含水比で混合したものは置換率が 30 %を超えると必要な強度を満足しないことがわかった。これら 3 種の含水比全てにおいて、石炭灰の置換率の増加と伴に一軸圧縮強度が減少した。これは石炭灰の方がシリカおよびアルミナの含有率が高くセメントとの反応性が RDF 焼却灰より高かったためと推定される。工業的には繰り返し法と非繰り返し法の間の中間の含水比で製造することが、強度特性を満足し、且つ発塵防止対策上から、望ましい含水比と考える。

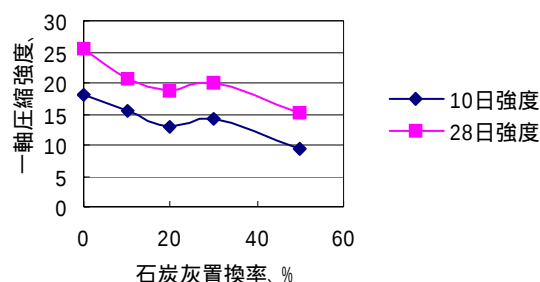


図 1 石炭灰置換率と強度の関係

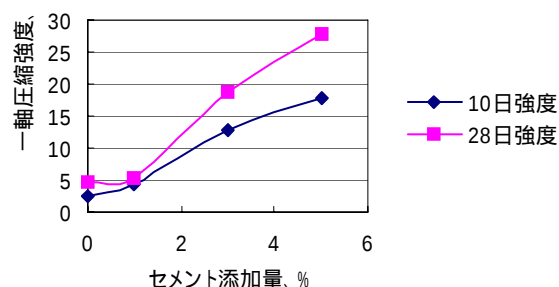


図 2 セメント添加率と強度の関係

3-2. 固化促進剤添加量と強度の関係

H 産の RDF 焼却灰を原料とし石炭灰の 20 %を置換した配合で、反応促進剤としてセメントを用いその効果を確認した。結果を図 2 に示す。セメントの固化促進効果は明らかであり、セメント添加量と

伴にはほぼ直線的に強度が増加する。10 日材齢一軸圧縮強度 7 kg/cm^2 は約 2 %以上のセメント添加により満足されるが、強度のばらつきを考慮すれば、3 %のセメント添加が工業的には好ましいと考えられる。また、その他の強度要求特性にはセメント添加率を変更する事で、用途に応じた品質での製造が可能であることもわかった。

3-3. 種々の RDF 焼却灰と強度、環境特性の関係

産地の異なる RDF から得られた焼却灰 5 種類 (H、N、I、K、U) を用いて供試体を作成し、RDF の違いによる影響を調べた。石炭灰、脱硫スラッジ、全ての配合でこれまでの結果から石炭灰の 20wt% を RDF 焼却灰で置換し、固化促進剤としてセメント 3 %を用いた。繰り返し法で得た最適含水比および、繰り返し法と非繰り返し法の中間の含水比では全ての RDF 焼却灰において必要な強度、10 日材齢一軸圧縮強度 7 kg/cm^2 を満足した。一方、非繰り返し法で得た最適含水比で混合したものは I、K、U の 3 種の RDF 焼却灰で必要な強度を満足しなかった。これは、過剰に含まれる水分が 2 次粒子に内包され、突き固め時に浸出したため、供試体にクラックを発生させたためと考えられる。工業的には繰り返し法と非繰り返し法の中間の含水比で製造することが、強度特性を満足し、且つ発塵防止対策上から、望ましい含水比と考える。中間での含水比による結果を表 1 に示す。今回の試験では全ての灰種において環境基準値を上回る重金属の溶出は観察されず、安全な材料であることがわかった。また、従来材料比較し密度が低く軽い材料で、土圧の低減が可能なため新たな使用範囲があることが示唆される。

表 1 種々の RDF 焼却灰を原料とした土木材料の強度と環境特性

RDF 焼却灰	H	N	I	K	U
10 日強度 (kg/cm^2)	12.83	12.86	11.92	13.89	19.93
28 日強度 (kg/cm^2)	19.50	18.84	18.10	19.87	29.98
28 日湿潤密度 (g/cm^3)	1.597	1.592	1.585	1.605	1.648
T-Hg (mg/l)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
Cd (mg/l)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Pb (mg/l)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Cr (VI) (mg/l)	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04	<0.04
As (mg/l)	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Se (mg/l)	0.006	0.006	0.006	0.007	0.006

3-4. 実機から発生する RDF 焼却灰と強度、弾性率の関係

昨年秋に試運転を開始した大牟田リサイクル発電社より実機から排出される RDF 焼却灰の提供を受け、これまで得られた結果から石炭灰の置換率 20 %、固化促進剤としてセメント 3 %を用い、工業化の検討を行った。一軸圧縮強度の変化を図 3 に、弾性率の変化を図 4 に示す。

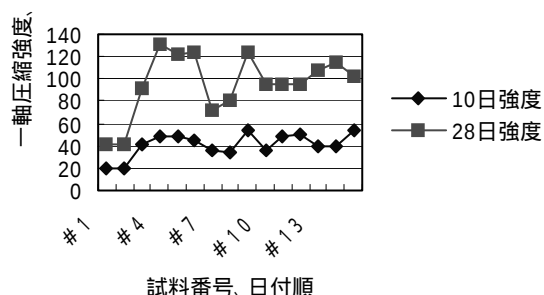


図 3 実機灰による強度の変化

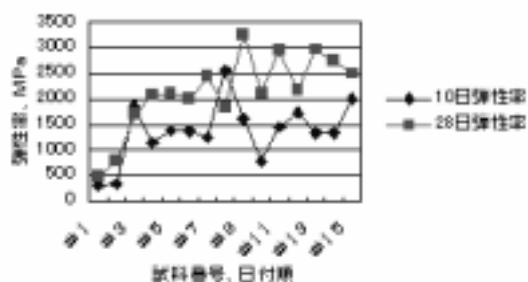


図 4 実機灰による弾性率の変化

今回は試運転中約 2 ヶ月にわたり、15 試料を採取し検討したが、全ての RDF 焼却灰において 10 日材齢一軸圧縮強度 7 kg/cm^2 を満足したのみならず、これまでの強度発現より著しく高強度であった。今回の試料はカルシウム含有量が高く、水和活性の高い RDF 焼却灰であったと考えられる。今後の運転における石灰添加量の推移が、RDF 焼却灰の有効利用において重要な項目である。

一方、弾性率に付いては設計上、28 日材齢で 600 MPa 以上であることが要求されるが、試運転開始直後の 2 試料に付いて要求値を下回るか若干上回ったのみであった。その他の試料については全て、要求値を上回り実際の運転が開始され運転が安定すれば問題の無い値と推定される。

3-5. 道路路盤実証試験

これまでの結果から、石炭灰の 20wt% を RDF 焼却灰で置換し、セメントを 3wt% 添加した配合で、実証炉で得られた RDF 焼却灰を使用してポゾテックプラントにより土木材料を試験製造し、路床置換材として施工した。実証試験箇所は福岡県道を提供していただき、製造時、施工時および供用後の特性を調査した。施工時の写真を写真 1 に示す。なお、今回は施工箇所を二分し、従来か使用されている路床置換材（Fe 石灰）と比較した。



写真 1 福岡県道試験施工

製造時および施工時の粉塵は「大気汚染に係る環境基準」に定められた「浮遊粒子状物質」の規制を満足する値であった。また、1 年間の経過観察により、従来から使用されている路床置換材と比較し、舗装路面の平坦性、わだち掘れ量およびたわみ量とも有意な差異は認められなかった。さらに、施工箇所からコア試料を採取し、所定の強度、弾性率が発現していること、また、重金属の溶出も環境基準値以下であることを確認し、実使用においても問題が無いことが明らかとなった。

4. まとめ

既存のポゾテック製造技術を応用し、石炭灰の一部を RDF 焼却灰で置換した土木材料を試験製造し、RDF 焼却灰の種類と置換率、固化促進剤（セメント）添加率、石炭灰/脱硫スラッジ比率といった強度特性に係る各種パラメータを変更し、実用化時の基礎データを収集し以下の知見を得た。その結果、ポゾテック製造技術を応用すれば柔軟な配合設計が可能であることと実用化時の工程管理が比較的容易であることが明らかになった。これらの結果により安全な材料として福岡県の民間開発技術審査証明（技審証 第 2 号）を取得した。

RDF 焼却灰使用ポゾテックの製造に適した練混水量は、JIS A 1210「土の突き固めによる締固め試験方法」の乾燥法、繰返し法で測定した含水比近傍である。

RDF 焼却灰置換率 20wt% の配合が実用化には適しており、固化促進剤であるセメントを 3wt% 添加すれば、日本道路協会がアスファルト舗装要綱に定める下層路盤として用いる安定処理の品質、強度および弾性率を確実に満足する。

実験に使用した全ての RDF 焼却灰で固化促進剤を使用すると重金属の溶出が環境基準値以下で、安全な材料である。

福岡県道を使用した施工試験で従来材料と比較し差異は無い。