

石炭灰・赤泥など産業副産物のコンクリートへの利用

(株)四国総合研究所 正会員 馬越唯好

1. はじめに

近年、廃棄物の越境移動などの地球規模での環境問題に対する関心の高まりから、廃棄物処理に伴う環境負荷の削減や資源としての産業副産物を有効利用することの重要性が認識されている。そこで、産業活動上発生する副産物を単に廃棄・埋立処分するのではなく、積極的に有効利用することを目指す研究開発が国内外で行われている。

ここでは、石炭灰・赤泥などを例にとり、産業副産物のコンクリートへの利用について紹介する。

2. 石炭灰のコンクリートへの利用

2. 1 石炭火力発電所と石炭灰の発生量

石炭火力発電所は、わが国のエネルギー政策の中で、原子力と並ぶ石油代替エネルギーの重要な柱として位置づけられている。

電気事業審議会需給部会の中間報告によると、石炭火力は、石炭資源の賦存量が多く、太平洋地域を中心として広く賦存していることから、燃料供給の安定性にも優れており、かつ、LNG等の他の化石燃料に比べ経済性にも優れていることから、原子力に次ぐベース供給力として、さらに長期的にはミドル供給力としての役割も期待されている。石炭火力の開発量としては、平成7年度末1,800万kW、平成12年度末2,300万kW程度の目標を示している。

今後、石炭火力の増加に伴い、石炭灰の発生量の増大が予想されており、平成3年度に約400万トンであったものが、平成12年度には約800万トンと約2倍の発生量が見込まれている。現在、石炭灰発生量の400万トンのうち、産業廃棄物として埋立処分されているものが約200万トンあり、有効利用率は、約50%に過ぎない。

さらに、わが国においては、産業廃棄物の処分用地の確保がますます困難になりつつあり、それに伴い石炭灰の処分コストが今後増大することが懸念される。

石炭灰を有効利用するための技術としては、現時点では、セメント・コンクリート分野が主であるが、この他にも人工軽量骨材、道路路盤材などの建設分野や肥料、魚礁などの農業・水産分野にも適用され、拡大しつつある。

2. 2 石炭灰の種類と性質

石炭火力発電所から発生する石炭灰は、大別して排煙処理システム内の電気集塵機で捕集される細粒のフライアッシュとボイラの炉底に落下した粗粒のボトムアッシュに分類される。

また、フライアッシュはJIS A 6201に適合するか否かでJIS灰または非JIS灰と呼ばれる。四国電力で発生する石炭灰の量を表1に示す。

表-1 四国電力における石炭灰発生量

(単位：千トン)			
年 度	平成3年	平成4年	平成5年
フライアッシュ (JIS灰) (販売できるもの)	25 (18%)	21 (15%)	24 (17%)
非JIS灰 (主にセメントの原材料等)	105 (74%)	108 (78%)	109 (77%)
粗粒アッシュ	11 (8%)	9 (7%)	9 (6%)
合 計	141	138	142

現在、徳島県橋湾において平成12年運転開始を目指して280万kW(電発分210万kW、四電分70万kW)の石炭火力発電所が建設中であり、さらに石炭灰の発生量が増大することになる。

各種の石炭灰の電子顕微鏡写真を写真-1、2、3に示す。

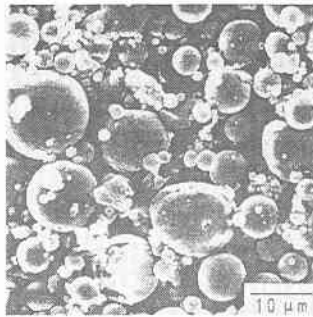


写真-1 フライアッシュのSEM写真

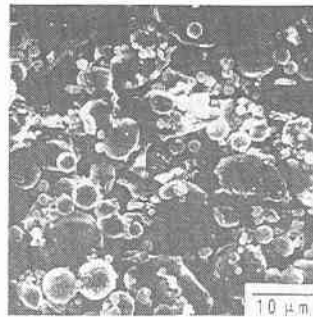


写真-2 細JIS灰のSEM写真

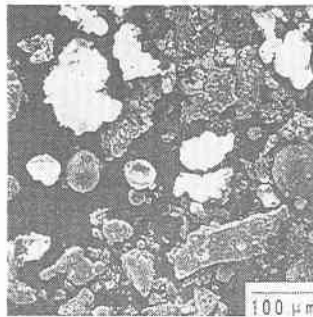


写真-3 粗粒アッシュのSEM写真

また、石炭灰の物理的性質および化学成分を表-2、3に示す。

表-2 石炭灰の物理的性質

種 類	比 重	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)
J I S灰	2.22	3,370	14.3	1.91
非J I S灰	2.20	4,160	20.1	6.24
粗粒アッシュ	1.94	—	1100	10.5

表-3 石炭灰の化学成分

種 類	化学成分(%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
J I S灰	57.8	28.1	3.7	3.4	1.6	0.6	0.8	0.3
非J I S灰	57.8	28.1	3.7	3.4	1.6	0.6	0.8	0.3
粗粒アッシュ	54.5	25.1	5.0	2.5	0.5	0.9	1.5	0.1

2. 3 フライアッシュのコンクリートへの多量使用

フライアッシュのセメントへの代替使用は、従来30%までが常識であった。ここでは、フライアッシュ（J I S灰）を積極的に有効利用するために、従来よりも多量のフライアッシュをセメント量の1.1～1.7倍の量にまで使用したコンクリートについて試験を行った結果について述べる。

圧縮強度試験の結果を図-1に示す。単位セメント量が180kg/m³、240kg/m³の場合、混入率1.3倍で強度発現のピークが見られ、210kg/m³の場合、混入率が増すに従って強度は増加している。また、結合材量(セメント+フライアッシュ)が多いほど、長期材令強度の伸びが大きい傾向が見られる。

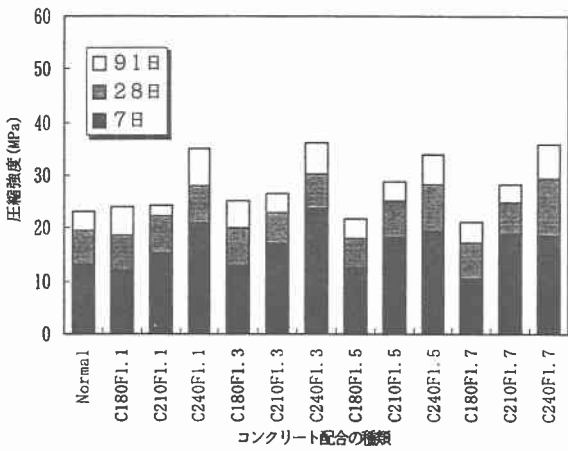


図-1 フライアッシュ多量使用コンクリートの圧縮強度

凍結融解試験の結果を図-2に示す。フライアッシュを多量に使用したコンクリートは、フライアッシュを使用しないコンクリート（プレーン、記号；PL）と比較してほぼ同程度の耐凍害性を有していることがわかる。

また、フライアッシュを多量に使用したコンクリートどうしを比較すると、単位セメント量（結合材量）が多くなるほど耐凍害性が優れていることがわかる。

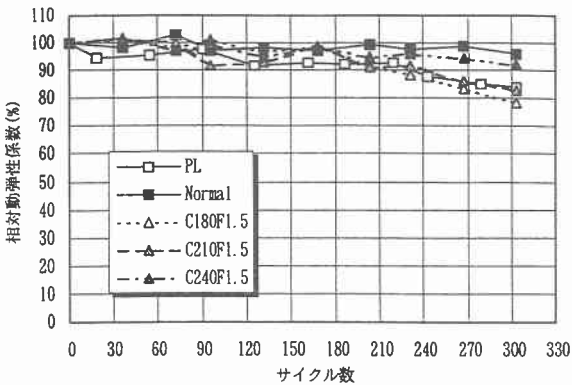


図-2 凍結融解試験結果

透水試験を行い、水の拡散係数を求めて図-3に示す。この図より、フライアッシュを多量に使用したコンクリートと比較すると、結合材量が増加するにつれて拡散係数が小さくなり、水密性が高くなる。これは、結合材量が多いため、ケイ酸カルシウム水和物が多くなり、組織がより緻密になるためと考えられる。

断熱温度上昇試験の結果を図-4に示す。フライアッシュを多量に使用したコンクリートは、プレーンコンクリート（PL）と比較して断熱温度上昇量が低下しており、上昇曲線の傾きも緩やかである。従って、フライアッシュを多量に使用したコンクリートは、ダム等のマスコンクリートへの適用に有利である。

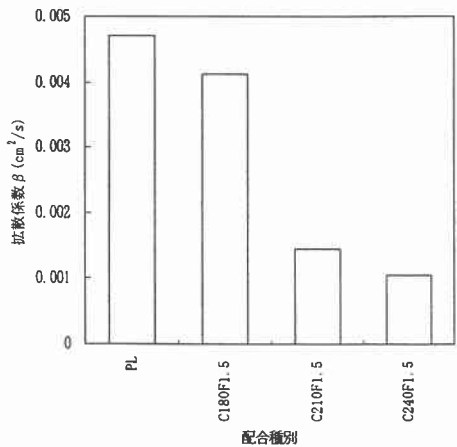


図-3 透水試験結果

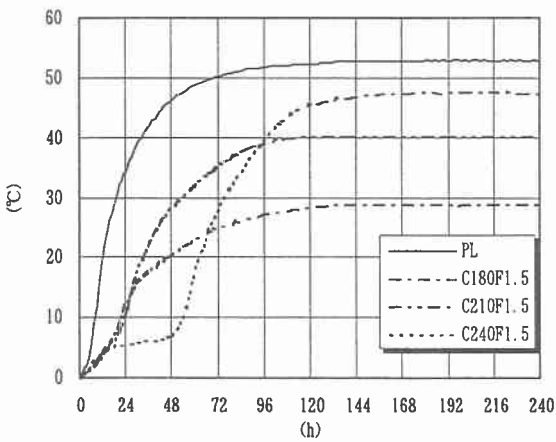


図-4 断熱温度上昇試験結果

フライアッシュを多量に使用することにより、コンクリートの品質を向上することが可能であることがわかった。

2. 4 粗粒アッシュ・非J I S 灰のコンクリート細骨材への代替使用

近年、良質のコンクリート用細骨材の枯渇化が問題になりつつある。また、平成7年度以降10年間の630兆円にのぼる公共投資基本計画の実施などにより、骨材需要は今後増大する傾向があり、コンクリート用細骨材の確保が一層困難な状況になると考えられる。

そこで、粗粒アッシュ・非J I S 灰を細骨材の一部に代替使用したコンクリートについて試験を行った結果について述べる。

圧縮強度試験の結果を図-5に示す。粗粒アッシュコンクリートと普通コンクリートを比較した場合、材令7日においてはほぼ同等かそれ以上の強度発現を示し、材令28日においては代替率の低いものは多少劣るものの、代替率の高い配合はともに普通コンクリートより高い強度発現を示している。また、材令91日においても同様に代替率の高い配合は普通コンクリートよりも高い強度発現を示した。代替率の低い配合は、普通コンクリートとほぼ同程度の強度発現を示しており、粗粒アッシュを細骨材の一部に代替したコンクリートを用いても強度発現の面からは特に問題がないことが確認された。

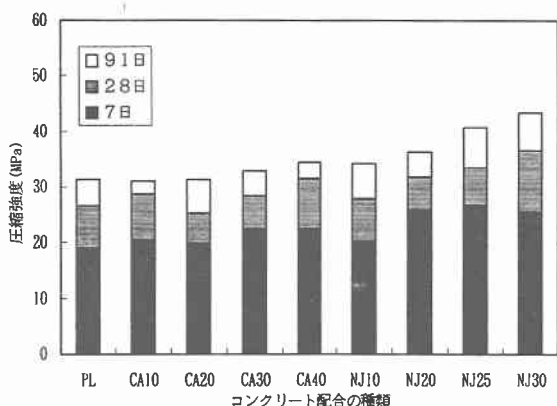


図-5 粗粒灰・非JIS灰を細骨材代替したコンクリートの圧縮強度

乾燥収縮についての試験の結果を図-6に示す。材令91日においては、粗粒アッシュを用いたコンクリートの方が普通コンクリートと比較して乾燥収縮が小さく、また細骨材に対する粗粒アッシュの代替率が高いほどより乾燥収縮が小さいことが確認できた。粗粒アッシュは0.15mm以下の微粒分がかなり多いため、この微粒分がコンクリート中の水分を保持し、乾燥収縮に影響を及ぼしたものと考えられる。

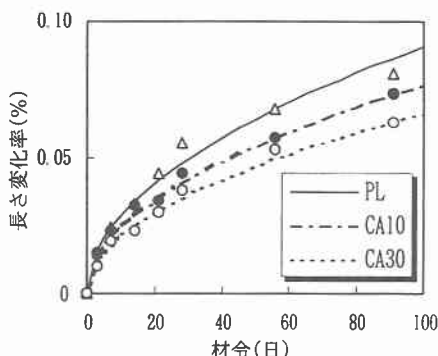


図-6 乾燥収縮試験結果

耐磨耗性試験の結果を図-7に示す。粗粒アッシュを用いたコンクリートの方が普通コンクリートと比較してすり減り深さが小さい結果となった。これは、粗粒アッシュは微粒分が多いことが影響したのではないかと考えられる。

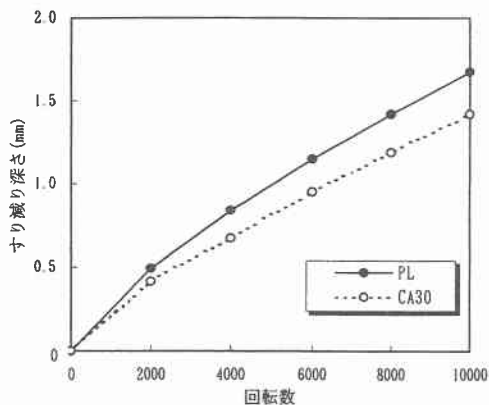


図-7 耐磨耗性試験結果

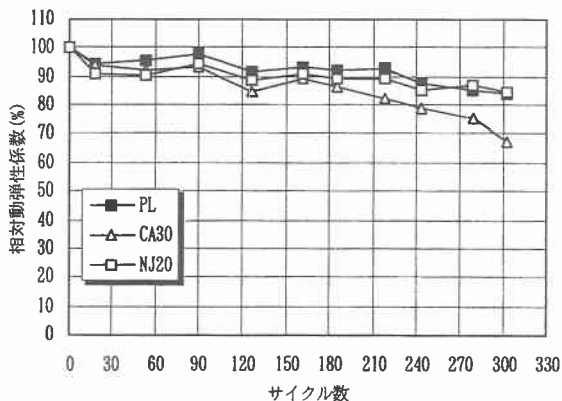


図-8 凍結融解試験結果

3. 赤泥のコンクリートへの利用

赤泥とは、ボーキサイトを水酸化ナトリウムで処理し、アルミナを抽出したあとの水酸化鉄を主とする赤褐色の泥状を呈した残渣をいう。赤泥の化学成分を表-4に示す。また、赤泥の電子顕微鏡写真を写真-4に示す。

赤泥は直径0.1～1.0 μm 程度の非常に小さい粒子であり、水分は35～40%程度含有し、発生量は水分を含めてボーキサイトの約半量である。従来、処理方法としては、有効な利用方法がないため埋立処分や海洋投棄等の手段によって処理されている。

通常のセメント量($C=350\text{kg}/\text{m}^3$)を有するコンクリートについて、赤泥(固体分)をセメント量の5、10、15%代替混入したコンクリートに関する試験の結果、次のようなことがわかった。

- ①フレッシュコンクリートのコンシステンシーについては、混入率によっても異なるが、赤泥の使用により若干悪くなる。ただし、混入率5%程度の場合には問題はない。
- ②圧縮強度については、プレーンコンクリートに比べて、赤泥の使用により初期強度が向上する。
- ③乾燥収縮については、赤泥混入率が10%以上では大きくなる傾向がある。
- ④水密性については、赤泥混入率が5～10%程度では、プレーンコンクリートに比べて拡散係数は非常に小さく、水密性が高い。

セメントに比べ高価なシリカフェームの代替品として、天然ケイ酸白土を高粉末度に微粉砕したシリカ微粉末と赤泥を混合使用したコンクリートについての研究からは、次のような実験結果が得られている。

- ①混和材としてシリカ微粉末と赤泥(固体分)をセメント量の10%代替使用した場合、混和材を用いないプレーンコンクリートに比べて圧縮強度は大きくなる。これはシリカ微粉末と赤泥の混合使用による相乗効果やマイクロフィラー効果によるものと考えられる。
- ②耐薬品性については、シリカ微粉末と赤泥を代替使用することによって改善される傾向がある。
- ③水密性については、これらの混和材の使用がきわめて有効である。これは、シリカ微粉末のポゾラン反応やマイクロフィラー効果のために内部組織が緻密になることと、赤泥を混合することによってさらにマイクロフィラー効果が高められることが考えられる。
- ④これら混和材の使用によりコンクリートの高性能化を図ることが可能である。

このような赤泥の特性、特に水密性が高いことから、上・下水道管等に用いると有効である。他にも、コンクリート製品として、魚礁・藻礁ブロックや赤色を活かした景観ブロック等への適用が考えられる。

表-4 赤泥の化学成分

	化学成分 (%)				
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O
赤泥	15.23	20.27	38.80	0.09	8.94

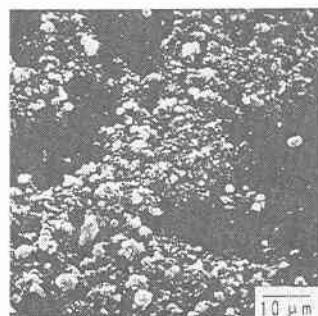


写真-4 赤泥のSEM写真

4. おわりに

石炭灰、赤泥のほかにも、シリカフェームや高炉スラグなどを、コンクリートの品質改善のための混和材として利用する研究がさかんに行われている。

今後、さらに、高性能減水剤、高性能AE減水剤等の化学混和剤の技術革新と相まって、これら産業副産物のコンクリートへの利用が拡大され、資源としての産業副産物の一層の有効利用が期待されるところである。

最後に、本研究の一部は四国電力(株)から委託を受けて、徳島大学と共同で実施したものである。四国電力(株)および徳島大学工学部の関係各位に感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 環境技術協会・日本フライアッシュ協会；石炭灰ハンドブック、1995
- 2) V.M.Malhotra:Investigation of High-Volume Fly Ash Concrete Systems,EPRI TR-103151
Project3176-06 Final Report October,1993
- 3) 川口修宏・黒瀬悦成・古山美宏・馬越唯好；フライアッシュを多量に使用したコンクリートの耐久性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18（投稿中）
- 4) 川崎真治・河野清・山地功二・馬越唯好；粗粒アッシュを細骨材の一部に代替したコンクリートの性質、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18（投稿中）
- 5) 河野清・杉本彰・柏井富雄；シリカ微粉末と赤泥との混合使用による高強度コンクリートの研究、セメント技研年報 No.42、pp136-139、1988
- 6) 河野清・天羽和夫・池添好巨；シリカ微粉末と赤泥を用いたコンクリートの諸性質、土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集 Vol.41、pp444-445、1989