

## ◆ リサイクル特集 ◆

# 石炭灰の土木用材料としての利用

河野広隆\* 三木博史\*\*

## 1. はじめに

わが国は、ほとんどのエネルギー資源を海外に依存している。電力については、オイルショックまでは石油エネルギーへの依存度が増えていた。その後、エネルギー資源の安定化のため、原子力や天然ガス、石炭への分散が図られている。石炭は豊富な賦存量を誇り、世界的に分布しているため、安定なエネルギー源であると考えられている。このため、石炭火力発電は今後とも大幅に伸びていくものと予想されている。

現在、石炭火力発電所では燃焼の効率化のため、石炭を微粉碎し燃やしている。この燃えがらが石炭灰で、燃焼後回収されるが、回収される場所により、ボトムアッシュやシングーアッシュ、フライアッシュ(以下、FAと略称する)となる。この内、最も多いのは粒径の最も小さいFAである。FAは微細なため、そのままでは煙突からプラント外へ飛び出して行くが、その前に電気集塵機でほぼ100%回収される。石炭灰は、現在でも年間500万トン以上が副産され、その半分が有効利用されているが、残りは埋め立て処分等がなされている。現在では、処分地の確保難と処分コスト増等に苦労している。さらに、21世紀初頭には石炭灰の発生量が1000万トンに達するものと予想され、大幅な有効利用の拡大が望まれている。

本報告では、石炭灰の有効利用に関する最近の動向について、コンクリートならびに土工用材料への利用に焦点をあてて紹介する。

## 2. 石炭灰の特徴と利用用途

### 2.1 石炭灰の特徴

石炭灰の主流を占めるFAの特徴は、次のとおりである。

- (1) 粒度は、粘土より大きく細砂より小さいシルト相当で、粒径は比較的均一である。

(2) 粒子の密度は、 $1.9 \sim 2.4\text{g/cm}^3$ 程度と比較的小さく、自然含水比状態(通常0.1%以下)での湿潤密度は $0.9 \sim 1.3\text{g/cm}^3$ 程度とかなり小さい。

(3) 化学組成は、石炭の種類やボイラの燃焼条件等によって異なるが、おおむね  $\text{SiO}_2: 50 \sim 75\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3: 10 \sim 25\%$ で、山土に近い。また、自硬性を左右する  $\text{CaO}$ の量は、 $\text{Ca}$ 分を比較的多く含む流動床燃焼灰を除き、1%以下のものが多く、最大でも3%程度以下が通常である。

(4) 環境安全性に関しては、一部の灰で六価クロム、ヒ素、セレン等の有害物質を含有することがあり、利用用途によっては、これらの溶出に十分注意する必要がある。

### 2.2 石炭灰の有効利用の用途と問題点

石炭灰の有効利用については古くから多くの検討がなされてきている<sup>1)</sup>。その主なものを表-1に示す。しかし、3章に示す用途以外は、なかなか実際への利用が進んでいない。これは、コストの問題が大きいと思われる。

さらに、従来から石炭灰が多量に用いられてきたコンクリート等の用途においても、新たな問題点が出てきている。すなわち、発電所で石炭を燃焼させる際に、高温で安定して石炭を燃焼させると、例えばコンクリート用混和材として良質のFAが得られるが、電力需要の日変動にあわせた燃焼の調整や、廃ガスの環境対策から、低温で燃焼させたり、出力調整を行ったりする。さらに、石炭の安定供給のため、ひとつのプラントでも複数の、場合によっては何十の産地からの石炭を混合して使用している。このため、副産されるFAの品質が変動するようになっている。

有効利用する際には、こうした品質の変動にも配慮する必要が出てきている。

### 3. FAのコンクリートへの利用

FAはコンクリートに種々の方法で活用されている。大きく分けると、粉体のままでコンク

表-1 石炭灰有効利用技術一覧表 (その1)

分野	利 用 技 術	技 術 概 要
セメント分野	セメント製造用原料	原料の内の粘土の代替として使用。
	セメント混合材	FAセメントへの混合率30%以下。 普通ポルトランドセメントへの混合率5%以下。
	コンクリート用混和材	マスコンクリート、水理構造物へセメントの20~40%混和。土木工事が多い。
	セメントミルク(グラウティング)	FAを混合材として用いる場合、セメント/FA=1/1~1/20。 作業性良好。
	新混和材	FAが溶融するような高温で処理し、シリカフュームに匹敵するような超微粉末状の混和材料とするもの。
	新硬化材	石炭灰に硫酸、石灰等を添加、または添加剤のみにより、新セメント物質を作る。非構造用セメントとして利用。
骨材分野	骨材	軽量コンクリートの骨材、またはコンクリートの細骨材(砂)の代用。粒度調整用。
	人工軽量骨材(ALA)	膨張性頁岩の代替として石炭灰利用。 混合→造粒→焼成
	人工骨材	溶融後除冷して結晶質の骨材を製造、または急冷してガラス質の骨材を製造。
土木分野	アスファルトフィラー	アスファルトコンクリートのアスファルト、骨材、石炭石粉の原料の内、石灰石粉の代替として利用する。
	舗装材	セメントコンクリート舗装のセメントへの混和材としてFAを利用。 アスファルト舗装の砂の代わりにクリンカーアッシュを利用。
	路盤材	セメント安定処理路盤における砂、砂利の代替利用。 石灰安定処理路盤における石灰の補完材としてFA併用。
	路床材	寒冷地での凍上抑制層として粗粒灰を用いる。 軟弱路盤での道路建設の土砂の代替利用。
	埋戻材	石炭灰を含水率調整後、埋戻工及び裏込め埋戻工に使用。
	充填材(鉱山用)	安全な作業環境のため、廃石、廃さい、廃泥等に代って、または併用して坑内の充填に使用。
	地盤安定材	土の粒度調整、脱水、締固め等の機械的、物理的方法として、他の材料と配合して土粒予界面の物性を変えたり、生成された結合物質による粒子間固結等の化学的方法がある。
	埋立造成	海面埋立、陸上の低湿地、旧河川跡、日照不足の谷間を埋立て、跡地を利用する。
	常温処理硬化体	石炭灰・石灰原材料・セッコウ系材料の水和硬化性を利用。 (水和反応速度緩慢)
	水蒸気処理硬化体	石炭灰・石灰原材料・SO <sub>4</sub> 源材料の飽和水蒸気下(60~100°C)での水和反応によって、高強度硬化体を製造。(水和反応速度迅速) 高压(180~200°C)の飽和水蒸気下で軽量な高強度硬化体を製造。
	高温処理硬化体	石炭灰に造粒剤や膨張剤等を添加し、造粒後、高温にて焼成(1000~1200°C) 石炭灰に石灰や融点降下剤を添加し、溶融後(1200~1500°C)、急冷又は除冷して適度な粒度に粉碎。

リート混和材等に用いられる場合と、セメント等の原材料として焼成加工されて用いられる場合がある。

### 3.1 粉体としてのコンクリートへの利用

前者は、セメントの混合材やコンクリート用混和材である。JIS R 5213にはFAセメントが規定されていて、その混合量によりA種、B種、

C種がある。FAセメントの全セメント生産量に占める割合は年々低下しており、現在は1%にも満たない。ただし、JIS R 5210のポルトランドセメントの規定には、5%以下の範囲で鉱物質微粉末の混合が許されており、この部分の用途は少くない。

FAのポゾラン反応性を利用して、コンクリー

表-1 石炭灰有効利用技術一覧表(その2)

分野	利 用 技 術	技 術 概 要
建築材料分野	瓦・レンガ及びセラミック製造	粘土の代替として使用。 混練→押出し成型・加圧成型→乾燥→焼成 欧米では主にレンガである。
	断熱材	セノスフェア(中空灰)の特性を利用し、建築材、浮力材、軽量コンクリート、耐火構造材等に利用する。浮灰と乾式分離灰もある。
	アッシュウール	FA 単味あるいは石灰石、ドロマイトを添加。 溶融→繊維化(速心法・圧気蒸気吹付) 品質はグラスウール、ロックウールと同等(耐火度で優る)。
	コンクリート製品	セメント、骨材、石灰、FA でブロック製造または砂、セメント、アルミ粉、FA で気泡コンクリート製造。
	不燃外壁材	軽石、石炭灰、ガラス繊維を転圧して製造。
農業・水産分野	肥料	FA, K, Mg 化合物、微粉灰、バインダーを混合し、 造粒→乾燥→流動焼成→冷却 を行って製品とする。単肥あるいは複合として施肥。
	土壤改良剤	FA 単味、あるいは下水汚泥等と混合、土壤改良剤に利用
	人工漁礁	FA を樹脂、砂利と共に成型、組立式大型魚礁として海底に沈設。 FA、排脱石こう、セメント等により新硬化体を成型。海底に沈設。
その他の分野	マグネタイト	磁選機(乾式および湿式法)によりマグネタイト回収。
	アルミナ	ポーキサイトの代替原料。酸で間接及び焼結後浸出。
	フェロシリコン	石炭灰、石炭、石灰をアーク炉で直接還元
	ゲルマニウム	精鍊溶解後蒸留し、精製 GeCl <sub>4</sub> を得る
	水処理剤	吸着、凝集作用により、リン、有機物除去。
	排煙脱硫剤	排脱装置の吸收液(アルカリ源)として利用。
	消火剤	スラリー化し、火災ボタ山の消化に利用
	固化剤	石灰、石こう等と混合、廃棄物を加えて固化させる。
	酸化防止剤	下铸造塊被覆铸造材の基材として配合。
	铸物砂	铸物砂用砂粒子の代替。
	電柱	回収ガラス屑と共に混練、成型焼成して電柱製造。
	ゴム用充填材	石炭灰を加工してゴムの補強、增量剤として使用

ト混和材としての利用は古く、1958 年にはコンクリート混和材としての JIS A 6201 が規定されている。しかし、FA を用いたコンクリートは長期強度発現性は高いものの、初期強度発現性が低い。このため、その多くはマスコンの低熱化をねらった用途に用いられており、ダムや特殊な大型構造物に限られていた。大型のダムでは、過去には高炉セメントを多量に用いた時代があったが、現在では中庸熱ポルトランドセメント(以下中庸熱 PC)に FA を混和した結合材が主流である。

しかし、ダムに限定した利用では需要が限定される。また、生コンの需要の半分以上を占める建

築分野で、事実上需要が皆無であった。このため、1999 年 2 月に、FA の品質に応じた適材適所の利用を推進する目的で、JIS A 6201 が改訂された。改訂のポイントは以下のものである。

- (1) それまで種類分けのなかった FA を、I 種から IV 種までの 4 段階に分ける。
- (2) I 種は、粉末度が高く初期の強度発現性が高い。流動性付与効果も高い。主に、FA を分級して製造される。建築分野での利用も期待される。
- (3) II 種は従来の JIS A 6201 品にほぼ相当するものである。
- (4) III 種は II 種と同様であるが、強熱減量が多い。つまり、未燃焼炭素が多い。未燃焼炭素は

燃え残りで、エネルギー効率の点からだけでなく、高分子のコンクリート用化学混和剤を吸着しその効果を大幅に低減するため、混和材として使う場合も低い方がよい。しかし、環境対策の燃焼制御のため、従来の JIS A 6201 を満足しないものも出てきている。最近では、こうした FA にも効果の高い FA 用 AE 剤等も開発されており、これらとの併用で、合理的にコンクリートに活用できるものと期待されている。水和熱抑制、長期強度発現、アルカリ骨材反応抑制等の効果はⅡ種と同等である。

(5) IV種は粉末度の低い、粗めの粉である。混和材としての性能は決して良くないが、発熱抑制を主体にしたマスコン用混和材としては十分に使えるものである。

上記の JIS 改訂で、生コンで FA の使用量が増えるかどうかは疑問である。新たなサイロの設置等が必要になるからである。

一方、FA を多量に用いるための検討も少なくない。ダム建設では現在、中庸熱 PC に 30%ほど混和されている FA を、さらに多量に使う検討もなされている。ベースに中庸熱 PC を用い FA 置換率を次第に上げていくと、FA が十分にポゾラン反応を生じるためのカルシウム分が不足してくる。このため、普通ポルトランドセメントとの組み合わせの方が、結果的に低熱化でき、長期強度も高くなるという報告もある。

### 3.2 コンクリート用材料の原料としての利用

セメントの原料は、石灰石と粘土が大部分を占める。粘土は珪酸分を確保するため用いられ、石灰石と混ぜて焼成され、セメントクリンカーとなるが、最近ではアルカリ量の低減等の要求や副産物の有効利用の観点から、多様な材料が代用されている。高炉スラグ微粉末や FA もその代表である。セメント原料として、FA 副産量の 3割程度が用いられている。

コンクリート骨材としての利用も検討されている。以前から、FA を原料とし発泡焼成した人工軽量骨材が造られていた。しかし、土木分野では、最近は耐久性やポンプ圧送性の問題から、ほとんど人工軽量骨材は用いられていない。そこで、従来の人工軽量骨材ほどは軽くはないものの、吸水率が低く、高強度コンクリートにも利用可能な密度が  $2.0\text{g/cm}^3$  程度の人工骨材

の開発が行われている<sup>2)</sup>。ちなみに、FA そのものの密度は  $2.1\sim2.2\text{g/cm}^3$  程度である。通常の骨材 ( $2.5\text{g/cm}^3$  以上) よりかなり軽く、プレストレスコンクリートへの利用が期待されている。

## 4. FA の土工用材料としての利用

### 4.1 概要

土工用材料への適用の分野では、路盤・路床材への利用法がいくつか開発されている。

例えば、FA と脱硫石膏に少量の石灰を添加・混合して固化体を製造し、路盤や路床材として利用する技術が実用化されており、平成 7 年に建設大臣の認定を受けている<sup>3)</sup>。

また、FA にセメントと水を加えて造粒し、自然養生後にこれを破碎した石炭灰固化物として貯蔵し、出荷時に結合材(セメント、二水石膏、石炭灰)を添加する下層路盤用材料も実用化されている<sup>4)</sup>。

このほか、FA、石膏、セメントの三成分を混合し、深層混合処理やトンネル等の充填材として利用する工法の開発も進められつつある<sup>5)</sup>。

しかし、これらの利用法による石炭灰の利用可能量は石炭灰全体からみるとごくわずかで、より利用可能量の大きな用途開発が求められている。

こうした背景から、低品質な建設発生土の土質改良材として FA を多量に利用する工法の開発が、(財) 石炭利用総合センターの委託により(財) 土木研究センターに設置された石炭灰利用検討委員会(委員長: 三木)において進められている。以下には、この検討委員会で現在までに得られた知見の概要を紹介する。

### 4.2 低品質の建設発生土の土質改良材としての利用

#### (1) 工法の特徴

含水比の高い軟弱な建設発生土の土性を改善し、改良土として有効利用する場合、セメント等による固化処理が通常よく用いられる。しかし、新しく検討している工法では、セメント等の固化材は用いず、FA のみを多量(湿潤重量比で 15%程度以上)に土と混合することにより、低品質な建設発生土の含水比を下げ、強度を改善し、圧縮沈下の生じにくい材料とすることをねらっている。言い換えると、軟弱な土をセメント等で固化処理す

るのではなく、FA の添加により軟弱な土の土性そのものを改善して利用しやすい土に変える工法である。

#### (2) 土質改良効果

図-1に、自然含水比がそれぞれ 116%と 137%の関東ロームと浚渫土に FA を添加したときの添加率と含水比の関係を示す。FA を湿润重量比で 20%程度以上添加することにより、土の含水比は大幅に低下する。なお、FA の添加率の増加とともに、改良土の液性限界と塑性限界も低下するが、改良土の含水比は液性限界より低くなり、FA の増加とともに塑性限界に近づく。

図-2と図-3は、この関東ロームと浚渫土における FA の添加率と改良土のコーン指数の関係を示したものである。コーン指数が 4 以上になると第3種建設発生土として各種盛土材に、またコーン指数 8 以上では第2種建設発生土として埋戻し材や路床材にまで適用可能であることから、これらの土の場合は、FA を 20%程度以上添加することにより、良質の改良土として各種用途に利用できることがわかる。

#### (3) 環境安全性

上記のように、本工法ではセメント等による固化を行わずに、FA を生の状態で多量に土と混合する。このため、もし FA に有害物質が含まれており、土壤環境基準を超えて有害物質の溶出のおそれがある場合は、環境安全性の観点から工法として成り立たないという側面がある。

一部の石炭灰には六価クロム、ヒ素、セレン等の有害物質が含まれている場合があるが、本工法では、こうした石炭灰は原則として使用しない。

なお、微量の有害物質を含む場合の土による吸着効果や、硫酸第一鉄等の還元剤やゼオライト等の吸着材による溶出抑制効果についても、現在検討を進めているところである。

#### (4) 今後の課題

本工法は、石炭灰の環境安全性を前提としており、その品質保証体制の整備や、微量の有害物質を含む場合の溶出抑制対策の確立が今後の最重要課題である。

また、本工法で製造する改良土はシルト分が多くなり、含水比の変化に敏感な土になる。このた

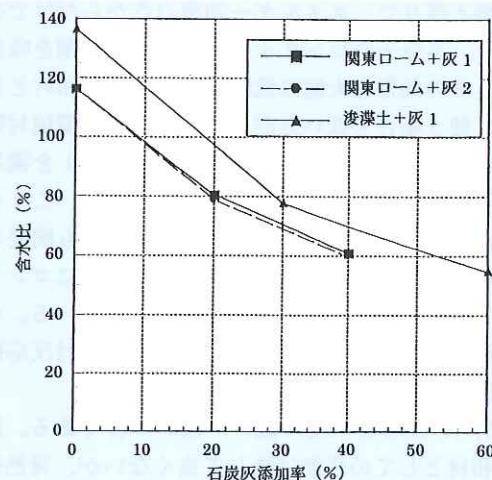


図-1 石炭灰添加率の関係の比と含水率の関係

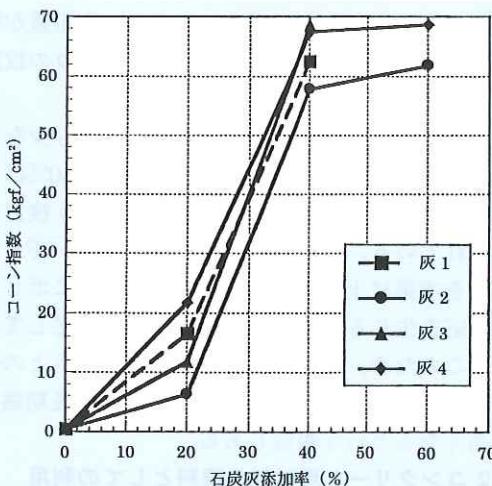


図-2 石炭灰添加率とコーン指数の関係 (関東ローム)

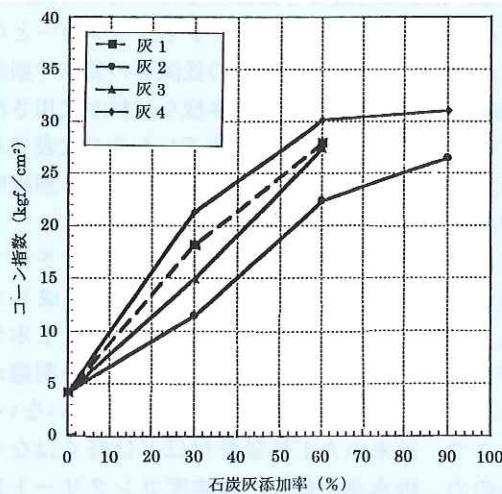


図-3 石炭灰添加率とコーン指数の関係 (浚渫土)

め、水に対する施工上の配慮とともに、施工後の水の作用に対して安定な改良土の製造法の確立が重要である。

## 5. おわりに

石炭灰のコンクリートならびに土工用材料への有効利用に関し、フライアッシュの①セメントの混合材や混和材としての利用、②セメント原料やコンクリート骨材としての利用および③低品質の建設発生土の土質改良材としての利用に関する研究開発の動向を紹介した。

受け入れ側のユーザーの立場から今後強く望みたいのは、用途開発とあわせて、石炭灰の品質の実態を示すデータをオープンにしていただくことである。それが材料としての信頼性を獲得するための第一歩である。

さらに、実用化にあたっては、石炭灰の品質の変動管理、供給体制の整備と受け入れやすいコスト設定、環境安全性の保証体制の整備などが不可欠であり、用途開発とあわせて、今後これらの問題への対応が問われている。

## 参考文献

- 1) 建設省総プロ「建設事業への廃棄物利用技術の開発に関する調査」報告書、土木構造物分科会、国土開発技術研究センター、昭和 59 年 3 月
- 2) 曽根徳明：石炭灰を主原料とした高強度人工骨材、コンクリート工学誌、Vol.36、No.12、p.3-10、1998.
- 3) (財) 土木研究センター：石炭灰を利用した路盤・路床・盛土材「ポゾテック」、土木系材料技術・技術審査証明報告書、第 0609 号、1995.
- 4) 三浦雅彦：石炭灰の有効利用について—石炭灰を利用した道路路盤材の開発、動力、Vol.45、No.231、pp.9-14、1995.
- 5) 高橋邦夫：石炭灰および鉄鋼スラグの活用技術、港湾技研資料、No.886、1997.
- 6) (財) 土木研究センター：建設発生土へのフライアッシュの適用研究調査、平成 9 年度報告書、1998.

河野広隆\*



建設省土木研究所  
材料施工部  
コンクリート研究室長  
Hirotaka KAWANO

三木博史\*\*



同 新材料開発研究官  
工博(前 土質研究室長)  
Dr.Hiroshi MIKI