

アッシュクリート技術の開発と展開

坂本 守^{*1}

石炭火力への依存度の高まりとともに副産される石炭灰の発生量も増加の一途をたどり、今後も増加が予想されている。石炭灰は豊富な発生量がありながら、その炭種や燃焼条件によって品質のばらつきが大きいことが障壁となり、確実な品質管理技術を有する有効利用技術が求められていた。そこで当社では、その有効利用技術として最適含水比を基にした配合設計技術によるアッシュクリートを開発し、展開を図ってきた。

本報では、アッシュクリートおよびその応用技術の開発の契機から、技術の詳細、その展開の状況について報告するものである。

キーワード：石炭灰、最適水粉体比、有効利用、人工海底山脈、盛土材、破碎材

1. はじめに

1984年に当社は人工海底山脈構想をプレス発表し、水産庁の外郭団体である（一社）マリノフォーラム21（以後MF21）において1988年から「大規模人工湧昇流の開発研究」が開始された。人工海底山脈構想とは、海底に人工海底山脈を築造し、それにより発生する湧昇流（底層から表層に向かう上向きの流れや渦）により底層の栄養塩類を太陽光の届く海の表層に供給することによって、海の世界連鎖の底辺にある植物プランクトンを増やすことができ、結果として、人工海底山脈周辺に新たに大規模な漁場を形成するというものである。この人工海底山脈の造成材料として、豊富に存在する未利用資源として石炭火力発電所から副産される石炭灰（以下、石炭灰はJIS規格外のフライアッシュ原粉を指す）を利用することとした。

石炭灰はそれ以前にも「石炭灰コンクリート」として有効利用されていた事例もあるものの、取扱い性や品質管理にも課題があった。一方で、MF21において「マウンド漁場造成システムの開発」への取組みが決まったことを契機に、新たな石炭灰有効利用技術として開発したものがアッシュクリートである。

本論文では、アッシュクリート開発の経緯と現在までの応用技術について報告する。

2. アッシュクリートの開発

2.1 開発のコンセプト

(1) 石炭灰大量使用時の課題

それまでの石炭灰コンクリートでは、石炭灰の使用量が数百 kg/m³ 程度のものが多い。その主な原因は、石炭

灰のような品質のばらつきが大きい粉体材料を多量に使用すると、スランプ、空気量等のコンクリートのフレッシュ性も変動し、安定した品質で製造管理することが困難になること、また粘性が高くなり、製造時にミキサ内の付着残量が多くなることなどが挙げられた。

(2) 石炭灰の硬化促進剤 HASLE の開発

石炭灰は、それ自体には水硬性（水と反応し、硬化する性質）はないが、セメントの水和反応によって生成される水酸化カルシウムと徐々に反応し、不溶性の安定した生成物を作る性質、いわゆるポゾラン反応性を有している材料である。この性質を利用して、石炭灰は、フライアッシュとしてコンクリート用混和材に用いられている。この場合、セメントに対する置換率を高くすると、強度発現性が低下するため、一般のコンクリートへ利用する場合、セメントに対して30%が上限とされている。

しかし、石炭灰の硬化反応を促進する混和剤（特殊混和剤 HASLE：硬化促進剤）を用いることで、石炭灰の持つ反応性を最大限に発揮させ、石炭灰の混入率を高くすることを可能とした。図-1に特殊混和剤（HASLE）添加率と圧縮

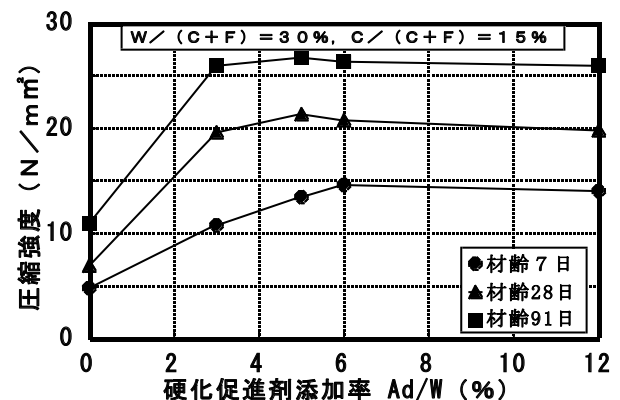


図-1 硬化促進剤の効果

*1 土木研究部

強度の関係を示すが、初期強度、長期強度とも特殊混和剤の添加によって大幅に改善される。なお、海水中の塩化物が硬化促進剤としての効果を有しているため、実用上は、海水（塩化物濃度 3.3%程度）を練りませ水として用いることで所要の強度発現性を確保することが可能である。

(3) 開発時の品質目標

前述の課題を踏まえ、開発時の品質目標は次のように設定した。

- ① 石炭灰をより大量に使用するため、骨材を使用しないペースト配合とする。
- ② スランプによる品質管理ではなく、振動締固め可能な範囲での固練り配合とする。

2.2 開発までの検討

(1) 目標達成のための課題

骨材を使用せず、石炭灰使用量が増加することによって、練上りの性状は石炭灰の品質特性が顕著に表れることになる。これは、石炭灰が炭種、燃焼条件等によって品質が大きく変動するため、例えば同一配合で製造した場合、ある石炭灰では締固めできない程水分が不足し、ある石炭灰では流動性の高い性能となる場合がある。そのため、フライアッシュの JIS 規格におけるフロー値比のような、石炭灰のロットごとの単位水量に関わる特性指標を選定する必要があった。

また、石炭灰は初期の反応性が低く強度寄与率が小さいため、またセメントの添加率に頼るとコストが掛かることになる。そのため、固練りとする際に最も効率的に強度が得られる配合比率を選定する必要があった。

(2) 課題の解決

まず、石炭灰の強度寄与率が低い若材齢期間においては、使用材料の粒子が最密充填するような配合比率にすることで、特に初期の強度発現に有利になると考えた。

そこで、土質試験における最適含水比を石炭灰混合材料について求め、同様の手法で作製した供試体の圧縮強度を測定したところ、最適含水比付近で効率的に高い強度が得られることを確認した（図-2, 3）。また、同時に水粉体比が低くなるほど、強度が高くなることも確認できた。

このように最適含水比付近で練り混ぜた混合材料は、湿った粉体状であるが、型枠内で加振することによって水分が徐々に連続性を持ち、プリン状に締め固まる。これを超流体工法と称することにした（写真-1）。

このアッシュクリート（以下 AC）の適用対象は二次製品ブロックであったため、パイプレータを使用せず型枠ごと強振動を与えることが可能な状況であった。そのため振動台上で締固めを行って試験体を作製し、水粉体比と得られた圧縮強度の関係を調べると、図-2 のように突き固め

による締固め曲線に類似した関係が得られた。よって、各石炭灰において最も圧縮強度が高くなる水粉体比を、振動締固めによる最適水粉体比（以下 W_{opt} ）と設定した。¹⁾

しかしながら、この W_{opt} を突き固めや振動締固めによって求める方法では試験に労力と時間を要し、実事業への展開の大きな障壁となることが想定された。そのため、モルタル等の分野で汎用的な試験方法であるフロー試験（JIS A 5201-1992：当時）によって測定される流動特性、すなわち水粉体比とフロー値の関係から W_{opt} を予測できないかを検討した。その結果、フロー値 140mm となる水粉体比（ W_{f140} ）と最適水粉体比の間に非常に高い相関があることが確認できたことから、石炭灰入手後 1 時間以内に配合設計に必要な石炭灰の品質を判断することが可能となった。

その他、AC はセメント添加率によって強度の調整が可能であること、また硬化促進剤の添加によって石炭灰の初期強度が大幅に向上させることも利用し、AC の配合設計手法を確立した。また併せて、その環境安全性についても確認した。

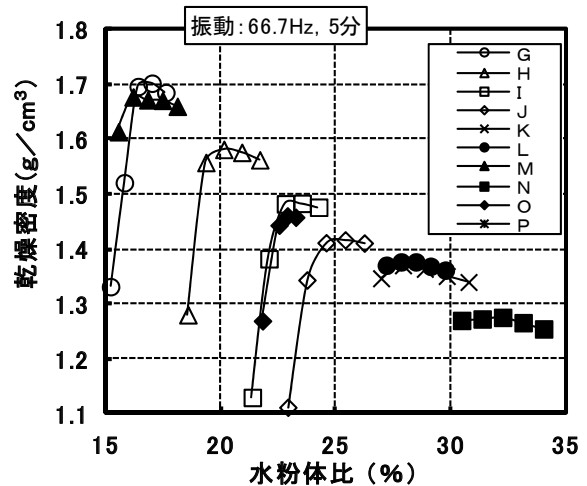


図-2 突き固め試験結果の一例

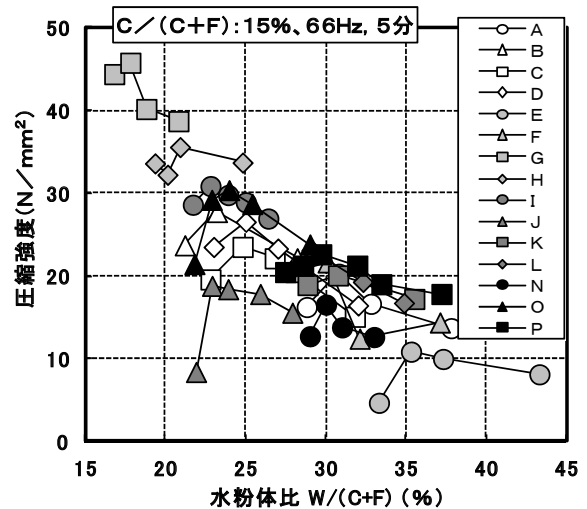


図-3 石炭灰ごとの水粉体比と圧縮強度の関係



写真-1 締めによる流体化前後の状況

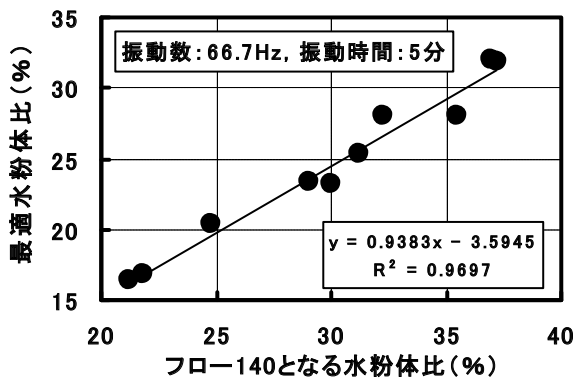


図-4 Wf140 と最適水粉体比の関係



図-5 人工海底山脈のイメージ図

2.2 ACの展開

ACの開発は、図-5に示すような人工海底山脈の造成材料であるブロック製造用が主目的であり、平成7年から始まったMF21における「マウンド漁場造成システムの開発」において実施したものである。その実証工事において4,860個のブロックを製造、適用した。その成果が水産庁に認められ、平成15年から長崎県水産部発注の広域漁場整備工事である対馬東工区と宇久北工区の2地点に採用され、その他小規模な漁礁や藻場礁を含め計約6万³m³の適用実績がある。

3. 陸域への展開

3.1 アッシュクリート Type IIの開発

(1) 目的

ACは海域での適用実績はできたものの、水産事業である人工海底山脈や漁礁では限定的な適用地点となり、石炭灰の継続的な有効利用には限界がある。そのため、大量かつ継続的な有効利用を図るため、土木資材である盛土材や路盤材への展開可能なアッシュクリート Type II (以下AC II) を検討した。

(2) 原位置での流体化工法

盛土材として大量施工するためには、ACで実施していた型枠ごと加振する手法を原位置で施工可能になるよう改良する必要があった。

そこで、同様にAC技術をベースに盛土材への展開を目指す(株)エコアッシュの協力の下、専用の振動盤の開発とともに施工方法の検討を行った。

この振動盤は、振動モータを取り付けた鉄板をバックホウのアタッチメントとして製作・装備し、練り混ぜた材料の天端から振動を加えるものである(写真-2)。最終的な実用機としては、動力源となる発電機をバックホウに背負わせ、施工箇所を自走できるようにしている。



写真-2 締め専用機



写真－3 宅地造成工事



写真－4 津波対策避難所設置工事



写真－5 防災緑地盛土工事

この専用機を使用して試験施工を行い、天端から材料の下端まで確実に締固め可能な深度を選定した結果、バックホウによる敷き均し厚 90cm、振動締固め後の仕上り厚 80cm を施工標準とした。

(3) ACⅡの品質

盛土材には明確な品質基準が無いことから、品質は土壌環境基準を満足するよう環境安全性を確保することとした。ACは海域に使用していたが、陸上ではふっ素やほう素の項目が加わることから、室内試験での検討の結果、溶出抑制の目的で二水石膏を添加することとした。実際には石炭火力で副産する脱硫石膏を使用するため、この点でもリサイクル推進となる。

また、陸域に適用するため、硬化促進剤は使用せず、水道水での練り混ぜとした。この条件で、環境安全性を満足する条件を検討したところ、材齢 28 日の圧縮強度 5N/mm² 以上で重金属の抑制がほぼ可能であることが確認できた。

これを満足する配合としては、石炭灰の特性により変化するが、1m³あたり、石炭灰 1,250kg、普通ポルトランドセメント 50～100kg、石膏 25kg、水 350kg が基本的な単体量となる。ここで、セメント量の設定は、主に炭種による石炭灰単体での溶出量に応じて変化させるものであり、そのために、事前に炭種と溶出量のデータベースを作成しておき、入荷灰の種類によって対応するものである。その他、試験施工等によって得られたACⅡの品質を表－1に示す。

表－1 ACⅡの品質特性

項目	特性
圧縮強度	5N/mm ² 以上
静弾性係数	4～6GPa程度
現場CBR	200%程度
透水係数	1～9×10 ⁻⁶ cm/s

(4) ACⅡの用途事例

これまで当社は、熊本県苓北町において、地元の廃棄物中間処理会社と技術使用契約を締結し、九州電力苓北発電所産の石炭灰を使用したACⅡ事業を推進してきた。ここでは、苓北発電所、立地自治体である苓北町、およびリサイクル会社が石炭灰リサイクルの推進を目的とした協定を結び、積極的にACⅡを採用してきた。また、福島県の相馬共同火力発電株式会社新地発電所においても、復興事業で不足する盛土材料²⁾³⁾として、平成 26 年 11 月より製造、出荷を開始した。

主な用途には、写真－3～5に示すように、

- ・道路や駐車場の路盤、農地の基盤材
- ・宅地、工場用地、緑地公園等の盛土造成
- ・護岸工事の裏込め

等がある。

3.2 ACⅡ事業のスキーム

(1) 廃棄物中間処理業許可取得によるケース

火力発電所等から産出する石炭灰は、管理型の産業廃棄物であるため、廃掃法（廃棄物の処理及び清掃に関する法律）の適用対象となる。そのため、一般工事に供給する場合、ACⅡの製造会社は廃棄物中間処理の業許可を取得する必要がある。しかし、その場合、石炭灰処理に伴う排出者からの処分費を活用することができ、ACⅡ製品を一般の盛土資材よりも安価に供給販売することができる。また、石炭灰排出者は、従来のセメント原料などへ処理委託するよりも処理費を低減でき、さらにACⅡを採用する発注者は一般の盛土資材を利用するよりも、工事費を低減することができる（図－5）。このため、表－2のように、排出者、製造者、発注者の3者にとってメリットがある事業となる。

(2) 発電所構内で製品化するケース

上記メリットを活かすもうひとつの方法として、発電所構内に専用プラントを設置し、石炭灰を製品化した後に出荷するスキームがある。この場合、製品化は排出者自身であることが必要であり、地元自治体の確認を得おくことも必要である。ただし、敷地内にプラント設置や作業に必要な用地が確保できることが必須条件となり、可能であれば同様の事業メリットが得られる。

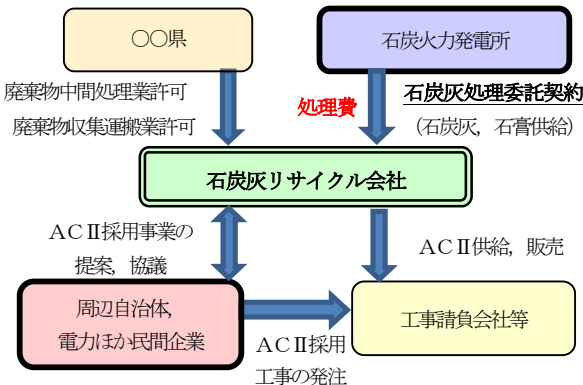


図-5 AC II 事業のスキーム

表-2 AC II 事業関係者のメリット

	メリット
立地自治体	工事費低減, 新規雇用, 地域活性化
火力発電所	石炭灰処理費の低減 処理方法選択肢の確保
リサイクル会社	安定した事業運営

3.3 アッシュクリート Type S の開発

(1) 開発背景

AC II は石炭灰使用量やコストメリットも大きな製品ではあるが、製品の環境安全性を確認できるのが材齢 28 日を経過した後に実施する溶出試験結果を確認することになるため、自治体あるいは発注者によっては AC II 施工後の覆土作業を待たされる場合がある。また、施工時でも締固め作業でヤードを占有するため、他の一般資材での盛土作業とはエリア区分が必要であったり、プラントの出荷能力で日施工数量が限定されるため、大規模盛土では要求数量に対応できないケースがある。

そのため、盛土材への適用拡大を目指し、通常の盛土作業（敷き均し、転圧）と同じ取扱いが可能となるよう、一旦固化させた材料を破碎した製品として供給する材料アッシュクリート Type S（以下 AC-S）の開発に、福島県の相馬共道火力発電株式会社と取り組んだ。

(2) 破碎機種を選定

破碎機種は機器メーカーへのヒアリングにより、表-3 に示す 3 機種を候補とした。それぞれの特徴を考慮した上で、微粉量の抑制を主眼に 2 機種を採用し、試験破碎す

ることとした。この時、再生クラッシャー (RC40) を想定した全体の粒度に調整するため、歯の開き間隔をそれぞれ 3 段階変更して破碎した。検討の結果、最も適正粒度分布に近いと判断されたジョークラッシャーを選定した。また、圧縮強度やクリンカアッシュの添加等、配合による差はほとんどなく粒度分布が機種によってほぼ同一であることを確認することができた。

粒度試験に採用した破碎機の歯の外観と試験体を写真-6 に、ジョークラッシャーにより製造した破碎材の粒度分布を図-6 に示す。

表-3 検討した破碎機種の特徴

機種	特徴	採否
ロールブレイカー	処理能力が高く、粉分が少ない	○
ジョークラッシャー	最も適していると考えられるが、処理能力が比較的小さい	○
ハンマクラッシャー	粉砕能力はあるが、粉分が多い	×



写真-6 破碎機の歯の外観

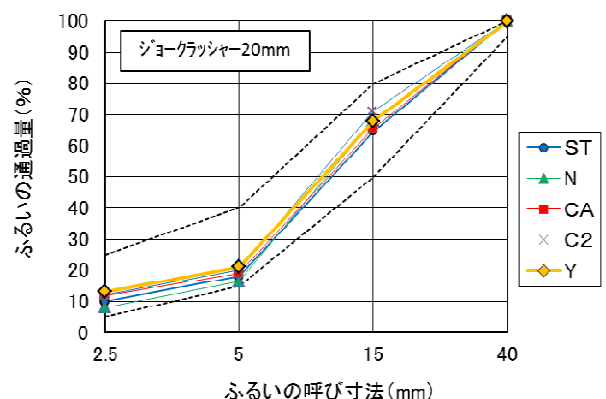


図-6 破碎材の粒度分布 (ジョークラッシャー)

(3) 破砕材の品質確認試験結果

破砕した材料を使用して、盛土材あるいはRC40を想定した路盤材として適用性を評価する各種品質試験を以下のとおり実施した。

①すり減り抵抗性

すり減り抵抗性は、JIS A 1121:2007「ロサンゼルス試験機による粗骨材のすりへり試験方法」に従い実施した。

AC-Sは粉体材料により製造した材料であるため、すり減り抵抗性が低いことが予想されたため、母材の配合強度を向上させることでその抵抗性を確保する目的で、試験時の圧縮強度とすり減り減量の関係を調査した。この試験では4種類の石炭灰で各3種類の配合強度の母材を作製して実施した。その結果を図-7に示す。すり減り減量と圧縮強度には明確な相関関係が認められ、圧縮強度が高くなるほどすり減り減量は小さくなっている。この結果より、破砕材料のすり減り減量は母材の圧縮強度によって管理することができ、その圧縮強度を20N/mm²以上とすることで、RC40の規格値であるすり減り減量の目標値50%以下を確保することができることが確認できた。

②修正CBR試験

所定の密度で締固めた材料の路盤材などへの適用性を判断するため、修正CBR試験を実施した。

表-4に示す試験結果より、修正CBR値はいずれも規格値の20%以上を十分に満足する値となり、AC-Sは、路盤等に適した材料であると判断される。

③大型三軸試験

締固め後材料の土質の設計値を求めるため、大型三軸試験(UU)を実施し、せん断強さCuと内部摩擦角φuを求めたところ、表-5のような結果となった。

表-4 修正CBR試験結果

灰種	最大乾燥密度 (g/cm ³)	締固め度 95%		締固め度 90%	
		乾燥密度 (g/cm ³)	修正CBR (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	修正CBR (%)
A	1.210	1.150	146.5	1.089	67.8
B	1.303	1.238	138.7	1.173	57.2
C	1.374	1.305	167.9	1.236	81.8
D	1.303	1.238	108.1	1.172	56.7

表-5 大型三軸試験結果

項目	試験結果
せん断強さCu	64.3 (kN/m ²)
内部摩擦角φu	40.2 (°)

(4) 破砕材設計基準強度の設定

①破砕材ストック時の重金属溶出抵抗性

AC-Sのように破砕材の製品として供給する場合、

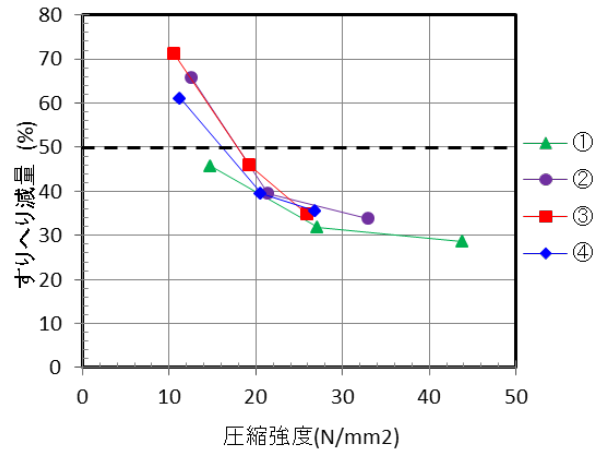


図-7 すり減り減量と圧縮強度

出荷までの間のストック期間には気中曝露状態となる。一般にセメント系材料は気中曝露によって中性化の傾向があるが、AC-Sも同様に中性化が進行すれば固定した重金属を再放出する可能性がある。そのため、材齢28日から91日までの曝露後の溶出特性を圧縮強度との関係として調査、整理した結果、配合強度を10 N/mm²程度確保する必要があると判断したため、破砕材製造時にはAC IIのようにセメント量固定ではなく、設計基準強度を10 N/mm²で設定する配合選定を行うこととした。

②強度予測式

配合強度を一定にする配合設計手法はACで既に開発済みであるが、練り混ぜ水に硬化促進剤としてNaClを添加し石炭灰の反応を促進させた場合の配合予測式を使用している。そのため、NaClを使用しない場合の強度予測式が必要であるため、AC IIおよび試験施工委託時等のデータから回帰分析を行い、下記のような配合予測式を選定した。なお、この予測式は相馬共同火力新地発電所産の石炭灰において適用するものである。

$$f = 29.0 \times (C + 0.0365 \times F) \div W - 2.92$$

ここで、

f : 配合強度 (N/mm²)

C, F, W : 各単位量 (kg/m³)

(5) 単位容積質量試験

①試験概要

破砕材の製造着手後、資材販売時の破砕材の単位容積質量(破砕によるふかし率)を把握することを目的として実施した。

一般的な単位容積質量を測定する試験としては、「JIS A 1104 骨材の単位容積質量及び実績率試験方法」があるが、この試験はコンクリートに用いる骨材の試験であり、適用範囲が骨材の最大寸法が80mmまでとなっているため、今回の福島県の使用である200mm以下の大粒径には適用

することはできない。そのため、JIS A 1104の測定原理である既知の容積の容器に試料を詰め、その重量を容積で除することに従い、十分な容積で測定することを目的として、10t ダンプ荷台（荷台容積5,947L）を利用し、積み込み前後の車両重量を測定する方法で実施することとした。試験は6回実施し、その平均値で評価した。

②試験結果

試験結果から算出した単位容積質量を表-6に示す。また、本試験実施日前日に降雨があったことを考慮し、含水率を実測値の15.2～17.8%から若干低めの15%に仮定した場合の単位容積質量も試算した。

単位容積質量試験結果は1,238～1,327 kg/m³、6回の平均で1,274kg/m³であった。また、前日の降雨で平常時よりも若干含水率が高いことを考慮し、含水率を15%と仮定した場合でも平均で1,258 kg/m³であった。このことから、通常の含水率では単位容積質量を1,250 kg/m³程度で設定することが適切と考えられる。

なお、参考までにAC-Sの破碎によるふかし率も表-6に示したが、本試験では30～40%程度の値であった。

表-6 単位容積質量試験結果

試験回	単位容積質量 (kg/m ³)	平均 (kg/m ³)	ふかし率% (参考) ※
1	1,276	1,274 →1,258 (含水率15%時)	32.1
2	1,295		30.1
3	1,327		26.8
4	1,270		32.5
5	1,238		40.5
6	1,239		40.4

3.4 AC-Sの製造・供給

(1) 破碎材の製造

製品の製造は、平成27年5月から製造に着手した。破碎材の母材は、相馬共火内のプラント近隣の用地を使用し、概ね250m³/日打ち込む。28日養生後、打込みブロックをブレーカで一次破碎した後、自走式破碎機で二次破碎する。破碎材の製造状況と材料の外観を写真-7, 8に示す。

(2) 破碎材の販売供給

破碎材は、福島県からの了承を得た上で、相馬共火が地元砕石業組合を通じて福島県の指定する工事に同年7月22日から供給販売することとなり、現在相馬-亘理線の道路盛土工事等に90,000m³程度を供給中である。AC IIに比べ製造工程も増加し製造原価も増加したが、最終的な販売単価も一般の盛土材よりも若干安価に供給できることとなった。

なお、製品名のAC-Sの「S」は、地元の新地町(Shinchi)、相馬市(Soma)、安全(Safety)の頭文字を



写真-7 自走式破碎機による破碎状況



写真-8 AC-S外観



写真-9 AC-Sを使用した施工状況

採ったものであり、地元の早期復興への願いと安全で良質な材料という意味が込められている。

4. AC技術のその他の展開

4.1 消波ブロックへの適用

AC技術は、要求品質に応じて石炭灰以外の材料も混合利用することが可能である。

北陸電力では、石炭灰の有効利用を図るため、福井県が福井港に仮置きしている大量の浚渫砂を混合した新たなコンクリートの開発を目指しており、その適用用途の検討を平成 25 年度から実施している。

このコンクリートに AC の配合技術を活用しており、浚渫砂とともに石炭灰の有効利用量をより多く設定し、消波ブロックを試作し、曝露試験による性能評価も行っている。今後、公共工事等への採用も促進すれば両者へのメリットとなる。当社は最適配合の選定等に関して北陸電力に技術的な協力を行っている。



写真-10 浚渫砂混合アッシュコンクリート

4.2 深掘跡の埋立による海洋環境改善

大阪湾で過去に海砂を採取した深掘跡が 3,200 万 m³ 存在しており、窪地内では海水交換の悪化と有機物の分解等により貧酸素水塊や青潮の発生原因となっており生物の生育環境に悪影響を与えている。

この窪地の解消を目的に、CIFER (大阪湾環境再生研究・

国際人材育成コンソーシアム) が主体となり、石炭灰の大量有効利用の一環として、リン酸や硫化物イオンの吸着など底質、水質の環境修復効果も期待できる AC を破砕した材料での適用を検討しており、関西電力と連携して対応している。

5. まとめ

東日本大震災後に石炭火力の依存度が急増し、今後もベースロード電源として新たな石炭火力が増加する予定であることから、石炭灰排出者にとってはその有効利用が急務となっている。

その有効利用を進めるためには、JIS 規格外の様々な品質の石炭灰を有効利用するための技術開発と用途開発が必須である。また、実際に利用するためには、石炭灰排出者の積極的な取組みのみならず、利用者の立場にある発注者、設計者、施工者および学識の各位の理解と支援が重要となってくる。

AC は、これまで関係者のご協力の下、様々な工事で適用実績を積み上げていくことができた。しかしながら、未だに適用時のハードルは高い。今後、業界を挙げて石炭灰利用に向けた社会の理解を高める活動も必要であると考える。

参 考 文 献

- 1) 「フライアッシュを多量に用いた硬化体の基本特性」、コンクリート工学年次論文報告集, vol. 20, No. 2, 1998
- 2) 「石炭灰を大量にリサイクルする盛土材料の寒冷地への適用」、土木学会年次学術講演会講演概要集 2013, V -304
- 3) 「原位置に打設する石炭灰硬化体の若材齢における溶出抑制効果」、土木学会年次学術講演会講演概要集 2014, V -306

Development and Application of Ashcrete

Mamoru SAKAMOTO

Generated amounts of a coal ash created as a by-product with the increase in dependence on coal-fired thermal power is expected to increase in the future with continuing proliferation. Effective use techniques having reliable quality management techniques have been required because of problems whereby the quality varies widely depending on the coal class and burning conditions although there is an abundant amount of coal ash generated. Ashcrete by using mixing proportion techniques based on the optimum moisture content is developed as an effective use technique. In this paper, the momentum of the development of applied techniques, details of techniques, and deployment status of Ashcrete are reported.