

Fresh Properties and the Development of Strength in High Volume Coal Ash Shotcretes

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/2297/3553 |

石炭灰原粉高含有吹付けコンクリートのフレッシュ特性と強度発現特性

五十嵐心一* 秋田有一** 松井健一*** 石田積****

Fresh Properties and the Development of Strength in High Volume Coal Ash Shotcretes

by

Shin-ichi IGARASHI*, Yuuichi AKITA**, Ken-ichi MATSUI*** and Atsumu ISHIDA****

Several raw coal ashes which were not finely divided, were used as admixtures for high volume coal ash shotcrete. Rheological properties of the concretes before projecting were evaluated by the modified slump cone test. Microstructure of the projected concretes was examined by the quantitative image analysis for backscattered electron images. Differences in the strength development between the shotcretes and conventional cast concretes were discussed in relation with influences of pneumatic projection on the initial packing of binder particles and the subsequent changes in coarse capillary pore structure. The modified slump test was useful for evaluating flow and projection properties of concrete. Plastic viscosity of coal ash concrete depended on types of coal ash even when the same slump value was attained. When a coal ash with a high carbon content was used, the plastic viscosity increased. The increase in viscosity resulted in the increase in pumping pressure for projection. The coarse capillary pore structure in the projected concrete without accelerator is not greatly different from that in the cast concretes. However, when a large amount of coal ash was incorporated, the threshold diameter of coarse capillary pores at early ages was reduced. The development of compressive strength in shotcrete was not notable compared to the conventional compacted concrete. It was suggested from the evolution of capillary pore structures that the accelerator for shotcrete prevented further densification in microstructure at long ages.

Key words: High volume coal ash shotcrete, Modified slump test, Accelerators, Coarse capillary pore structures

1 序論

1973年のオイルショックを契機として、石炭火力発電はわが国のエネルギー安定供給の観点からその重要性を増し、その後石油依存体質からの転換を進めるべく、石炭火力発電所の建設が各地で行われて今日にいたっている。この間、排出される石炭灰を有効に利用することに関して多くの研究実績が蓄積され、JISの改訂や関連技術の整備が行われてきた¹⁾。現在では、発生する石炭灰の80%以上が再利用され、その中でもセメント分野での有効利用は約70%に達している。しかし、近年では、埋め立て処分場の確保の問題とセメント需要の低迷、さらには循環型社会形成に向けての意識の高揚と資源リサイクル法の執行などの状況から、石炭灰の有効利用技術の積極的拡大とさらなる使用量の増大が急務となっている。

そのような積極的有効利用方法として近年注目され、電力会社を中心として技術開発が進められているのが、コンクリート中の細骨材の一部と置換することによって石炭灰を多量に使用した石炭灰大量使用コンクリートである。石炭灰高含有吹付けコンクリートはその中の一つに位置づけられ、粉体として石炭灰を多量に混入することにより吹付けコンクリートのレオロジー特性が

変化し、適切な粘着性の付与により施工性の改善を期待させる吹付けコンクリートである²⁾。

しかし、その一方にて、石炭灰高含有吹付けコンクリートを実際に施工する際に生じる問題も少なくないようである。例えば、石炭灰原粉は産出火力発電所ごとにその物性が異なり、品質変動はかなり大きい。このため、現場施工性と経済性を考慮し、さらには既往の施工実績をもとに使用材料や配合を決定しても、石炭灰原粉の品質変動により、所定のポンプ圧送性や吹付け施工性が得られないような場合も起こりうる。従って、多様な石炭灰の品質変動が吹付けコンクリートのフレッシュ特性に及ぼす影響を明らかにし、それを吹付け施工性の観点から評価することは重要な意義を有するといえる。さらにはそのフレッシュ特性を迅速、かつ簡便に評価できる方法が確立されるならば、品質変動に対応して配合修正や施工管理を行うことが、現場でも可能となる。

さらに、通常の練混ぜ、締固め、打込みを行った石炭灰高含有コンクリートに関しては、これまでも多くの研究が行なわれ、強度発現や耐久性に関しては詳細に検討されている^{3,4)}。しかし、NATM工法を用いて建設される支保工として吹付け施工されたコンクリートに関しては、所要の強度発現性は急結剤によりもたらされ、ま

+ 原稿受理 平成 15 年 5 月 1 日 Received

* 正会員 金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20, Dept. of Civil. Eng., Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa 920-8667

** 同上

*** 西松建設(株)技術研究所 〒242-8520 大和市下鶴間 2570-4, Research Institute of Nishimatsu Construction, Co. Ltd., 2570-4 Shimotsuruma, Yamato 242-8520

**** 電気化学工業(株)青海工場セメント・特混研究所 〒949-0393 青海町青海 2209, Cement & Special Cement Additives Laboratory, Denki Kagaku Kogyo Co. Ltd., 2209 Omi, Nishikubiki 949-0393

Table 1 Physical properties of coal ashes (JIS A-6201)

| Property | ASH-A | ASH-B | ASH-C |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|
| Density(g/cm ³) | 2.30 | 2.25 | 2.20 |
| Blaine Fineness (cm ² /g) | 4000 | 4500 | 4800 |
| Loss on Ignition (%) | 2.32 | 5.20 | 10.59 |
| Flow Value Ratio (%) | 95.8 | 90.5 | 86.3 |
| Activity Index(%) | 28 Days | 80.1 | 76.5 |
| | 91 Days | 89.7 | 92.6 |

Table 2 Chemical compositions of coal ashes (%)

| Oxide Composition | ASH-A | ASH-B | ASH-C |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| SiO ₂ | 57.38 | 56.07 | 45.53 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.96 | 4.66 | 2.87 |
| Al ₂ O ₃ | 29.20 | 27.02 | 27.13 |
| CaO | 2.50 | 3.26 | 7.50 |
| MgO | 0.79 | 0.99 | 1.37 |
| SO ₃ | 0.26 | 0.47 | 1.50 |
| TiO ₂ | 1.19 | 1.07 | 1.40 |
| Na ₂ O | 0.90 | 0.78 | 1.20 |
| K ₂ O | 0.78 | 0.73 | 0.41 |
| total Carbon | 2.49 | 4.62 | 10.85 |

た施工対象によっては仮設構造物とみなされる場合も多いこともあり、初期強度の要求性能が満足される限りにおいては、その後の強度発現性が問題となる場合は少ないようである。その一方において、急結剤の使用は吹付けコンクリートの長期強度の発現に影響を及ぼし、さらには吹付けられたコンクリートを永久構造物とする場合もあり、長期強度の発現性はNATM工法における吹付けコンクリートにおいても重要な要求性能である⁵⁾。しかし、吹付けプロセスや使用材料の相違が内部組織の形成に及ぼす影響を明らかにして、吹付けコンクリートの長期強度発現機構を詳細に検討した例は多くないようである^{6,7)}。

本研究は、NATM工法により建設されるトンネルの吹付けコンクリートに石炭灰原粉を使用することを前提として、石炭灰原粉の品質変動に柔軟に対応できる石炭灰原粉高含有吹付けコンクリート工法の開発を目的とし、材料評価から吹付け施工、硬化後の特性評価を総合的な品質管理・施工管理の観点から理解するために執り行われた実験をまとめたものである。一連の実験は、石炭灰原粉大量含有コンクリートのレオロジー特性の簡

便評価と吹付け施工性の対応、および吹き付けられたコンクリートの強度特性の調査の2つの試験に大別され、それらを総合的に評価することを試みた。材料変動とそれに対応したフレッシュ特性の変化を把握する方法として、本研究においては現場対応も可能と考えられる修正スランプ試験^{8,9)}を用い、それによって評価されたレオロジー特性値の有用性の検討を行うこととした。このために、この簡便なレオロジー試験結果に基づいて決定された配合のコンクリートについて実際に吹付け施工を行い、施工性の観点から評価を行った。さらに、吹付けられたコンクリートの初期および長期における圧縮強度発現を、吹付けプロセスと急結剤の作用が内部組織形成に及ぼす影響から考察し、石炭灰原粉が吹付けコンクリートの性能に及ぼす効果について検討した。

2 実験方法

2.1 使用材料および配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、骨材として石川県手取川産の川砂(密度 2.57g/cm³)、川砂利(密度 2.57g/cm³, 最大骨材寸法 10mm)を使用した。一方、吹付け施工されたコンクリートにおいては新潟県姫川流域産の川砂(密度 2.52g/cm³, FM=2.82)および砕石(6号, 密度 2.64g/cm³, 最大骨材寸法 13mm)を使用した。石炭灰として、排出される石炭火力発電所が異なる未分級の3種類の石炭灰原粉(以後、それらを石炭灰A,BおよびCと称し、それぞれ記号ASH-A,ASH-B,ASH-Cで表す)を使用した。これらの石炭灰の品質をTable 1に、その化学成分をTable 2にそれぞれ示す。これら3種の石炭灰のうち、石炭灰Cの強熱減量および未燃炭素量が他に比べて大きいことが特徴的であるが、その他の特性に関しては大きな相違はない。

コンクリートの配合はNATM工法を用いる場合の既往の一般的な施工実績を参考にして定め、水セメント比を60%、目標スランプを12±2cmとした。また、細骨材率は60%と一定にし、石炭灰の使用量はセメント質量に対して外割で30%および70%(細骨材体積置換率12%程度および30%程度)とした。スランプの調整は高性能AE減水剤の調整のみによって行うものとした。また、一部のコンクリートについては、練混ぜ時にAE剤(ア

Table 3 Mix proportion of high volume coal ash concretes

| Type of Mix | W/C (%) | s/a (%) | Unit Content(kg/m ³) | | | | | Admixtures wt% C | | |
|-------------|---------|---------|----------------------------------|--------|----------|------|--------|------------------|----------|---------|
| | | | Water | Cement | Coal Ash | Sand | Gravel | Superplasticizer | AE agent | add'lAE |
| PC | 60 | 60 | 216 | 360 | 0 | 1002 | 668 | 0.5 | 0 | 0 |
| ASH-A30% | 60 | 60 | 216 | 360 | 108 | 882 | 668 | 0 | 0 | 0 |
| ASH-A70% | 60 | 60 | 216 | 360 | 252 | 720 | 668 | 0.3 | 0 | 0 |
| ASH-B30% | 60 | 60 | 216 | 360 | 108 | 879 | 668 | 0.4 | 0 | 0 |
| ASH-B70% | 60 | 60 | 216 | 360 | 252 | 714 | 669 | 1.2 | 0 | 0 |
| ASH-C30% | 60 | 60 | 216 | 360 | 108 | 876 | 669 | 1.2 | 0 | 0 |
| ASH-C70% | 60 | 60 | 216 | 360 | 252 | 707 | 668 | 2.0 | 0 | 0 |
| ASH-C70%-AE | 60 | 60 | 216 | 360 | 252 | 707 | 668 | 2.0 | 0.5 | 0.08 |

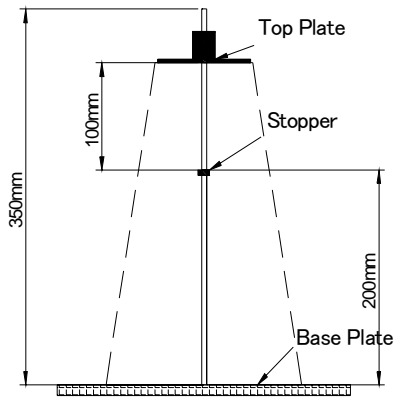


Fig.1 Modified slump cone device ⁸⁾

ルキルアリルスルホン酸化合物系) および AE 助剤 (ポリアルキレングリコール誘導体) を高性能 AE 減水剤使用以前に添加して, レオロジー特性への影響を調べた. コンクリートの吹付け実験においては, カルシウムアルミネート系急結剤を使用した. コンクリートの配合を Table 3 に示す.

2.2 供試体作製および試験方法

(1)レオロジー試験

Fig.1 に示すような装置を用いてフレッシュ特性の評価を行った^{8,9)}. 本試験は, アメリカ合衆国のNIST (国立基準局) にて開発された方法である. 回転粘度計の結果との対応性から半経験式を用いてコンクリートの降伏値および塑性粘度を評価するものであり^{8,9)}, 多くのデータを蓄積した後にASTMへの採用が意図されている方法である¹⁰⁾. 本方法ではASTM C 143-90 に準じたスランブコーンをそのまま使用し, Fig.1 に示すような上載プレートをコンクリート上面に載せ, コーンを抜き取る. このとき上載プレートがコンクリートのスランブにより, 100mm下の止め金に達するまでの時間からスランブ速度を評価し, 次式により降伏値 (τ_0) および塑性粘度 (μ) が求められる^{8,9)}.

$$\tau_0 = \rho (300-S)/270 \quad (1)$$

$$\mu = 25 \times 10^{-3} \rho T \quad (S < 200\text{mmの場合}) \quad (2)$$

ここに, τ_0 は降伏値 (Pa), ρ はコンクリートの密度 (kg/m^3), S はスランブ (mm), μ は塑性粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{sec}$), T はプレートが止め金に達するまでの時間 (sec) である. 一連の評価式から明らかなように, 降伏値はスランブ値によって一意に決まり, また 100mmスランブするまでの時間が長いほど塑性粘度は大きいことになる. なお, 本実験においては, 事前の予備試験により上載プレートを載せても, コンクリートのスランブ値に影響はないことを確認した.

(2) 圧縮強度試験

吹付けコンクリートのベース配合のコンクリートに対して, JIS A 1108 に基づいて直径 100mm, 高さ 200mm の円柱供試体を作製した. 供試体は打込み後 24 時間に

て脱型し, 所定材齢まで 20°C の水中養生を行った. 吹付けコンクリートについては, 施工後 1 日にて JSCE-F 561 に従って直径 55mm のコア供試体を抜き取り, ただちに水中養生 (20°C) を行った. 所定材齢にて, JIS A 1108 にしたがって圧縮強度試験を行った.

(3) 粗大巻き込み空隙量評価

吹付けられたコンクリートの大きな巻き込み空気, 充填不足を評価するために, 画像解析を援用した. (2) と同様にして採取したコア供試体を, 精密切断機を用いて切断し, その断面に赤色の染料を含有したエポキシ樹脂を含浸させた. 樹脂の硬化後, 表面の研磨を行い, デジタルカメラで断面を撮影し, パーソナルコンピュータに画像を取り込んだ. その画像中の赤色に染色された空隙に対して二値化を行い, その不規則形状の空隙のうち, 最長径 1mm 以上の欠陥部の面積率を求め, これを粗大巻き込み空隙量として評価した.

(4) 反射電子像の画像解析

粗大な毛細管空隙構造を定量評価するために, 反射電子像の画像解析法を用いた¹¹⁾. (2) における方法と同様な作製および養生方法によって得られた供試体から試料を切り出し, エタノールに浸漬した. その後, 真空装置を用いて樹脂含浸し, 樹脂の硬化後, 耐水性研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用いて注意深く研磨した. 金-パラジウム蒸着し, 電子顕微鏡観察用試料とした.

4 分割反射電子検出器を備えた走査型電子顕微鏡を用いて, セメント硬化体中の各構成相の変化を再現性よく検出できる倍率として, 観察倍率 500 倍にて研磨面の反射電子像をコンピュータに取り込んだ. また, 一試料に対して取り込む画像の数は, 画像解析結果の統計的な変動を考慮して, セメントペーストマトリックス中から無作為に最低 10 箇所以上の画像を取り込んだ. また, 骨材界面の影響を避けるために, 画像取得は骨材から十分に離れたセメントペーストマトリックス領域にて行った. それぞれの像は 1148×1000 ピクセルからなり, 1 ピクセルは約 0.22×0.22 μm に相当する. 取り込んだ画像に対して, ノイズ除去等の 1 次フィルター処理を行った後, 未水和セメント粒子または毛細管空隙を抽出するように, 動的閾値法 (可変閾値法) を用い, それが目視判断と一致するようにして二値化を行った. 抽出された対象画素領域にラベリングを行った後に, それぞれの面

Table 4 Results of the modified slump test

| Type of Mix | Slump (mm) | Yield Stress (Pa) | Plastic Viscosity ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) |
|-------------|------------|-------------------|--|
| PC | 130 | 1414 | 19.1 |
| ASH-A30% | 110 | 1572 | 19.8 |
| ASH-A70% | 140 | 1313 | 26.9 |
| ASH-B30% | 130 | 1405 | 21.8 |
| ASH-B70% | 110 | 1556 | 27.1 |
| ASH-C30% | 120 | 1486 | 22.9 |
| ASH-C70% | 110 | 1550 | 46.3 |
| ASH-C70%-AE | 185 | 939 | 36.4 |

Table 5 Mix proportion of high volume coal ash shotcretes

| Type of Mix | W/C (%) | s/a (%) | Unit Content (kg/m ³) | | | | | SP (wt% C) |
|-------------|---------|---------|-----------------------------------|--------|----------|------|--------|------------|
| | | | Water | Cement | Coal Ash | Sand | Gravel | |
| PC | 60 | 60 | 216 | 360 | 0 | 1053 | 707 | 0 |
| ASH-A | 60 | 60 | 216 | 360 | 270 | 758 | 707 | 0.9% |
| ASH-B | 60 | 60 | 216 | 360 | 270 | 760 | 707 | 1.3% |

Accelerator: 7% of cement

SP: superplasticizer

Table 6 Results of the modified slump test for shotcretes and their projection properties

| Type of Mix | Slump (mm) | Yield Stress (Pa) | Plastic Viscosity (Pa · s) | Pump Pressure (MPa) | Rebound Ratio (%) | Dust (mg/m ³) |
|-------------|------------|-------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| PC | 105 | 1687 | 15.5 | 5.0 | 10.0 | 5.2 |
| ASH-A | 170 | 1114 | 23.7 | 8.0 | 5.5 | 19.8 |
| ASH-B | 170 | 1116 | 35.3 | 12.0 | 5.4 | 10.3 |

積を求めた。ステレオロジーに基づいて面積率を体積率に変換した。さらに、それらの空隙の円相当径を求め、それを並べ替えてペーストマトリックス単位体積当りの細孔体積として細孔径分布曲線を求めた^{12,13)}

(5)吹付け実験

コンクリートポンプ式吹付け機、吹付けロボットおよび急結剤添加装置を用いて、模擬トンネルの吹付け実験を行った。模擬トンネルの高さは4.5m、幅5.5m、長さ20mであり、トンネルの片側を塞いで風の吹きぬけを防止した。吹付け条件は、コンクリート吐出量10m³/時間、急結剤吐出量4.2kg/分である。吹付け時に、天端下にシートを広げ、落下した重量からリバウンド率を求めた。また、吹付けノズルから5m離れた地点にデジタル粉塵計を設置し、粉塵量を測定した。

(6)引抜き方法による初期強度試験

吹付け時に、JSCE-G561に従って引抜き供試体を作製した。材齢1日において引抜き試験を行い、圧縮強度の推定値を求めた。

3 結果および考察

3.1 石炭灰高含有コンクリートのフレッシュ特性と修正スランブ試験の有用性

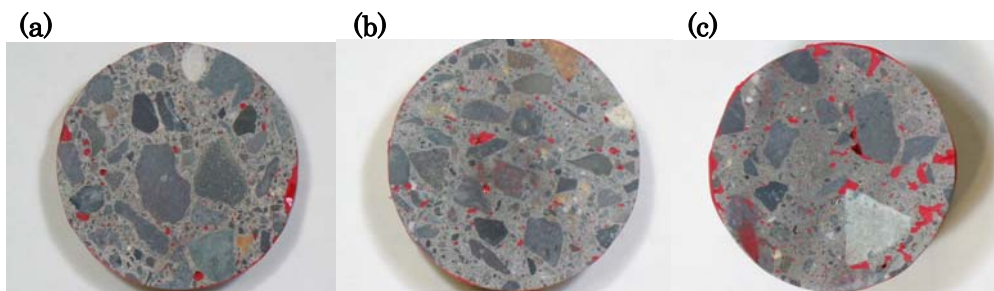
Table 4 はコンクリートの修正スランブ試験の結果を

示したものである。スランブを12±2cmの範囲に定めているため、降伏値はいずれのコンクリートもほぼ一定の値を示している。しかし、高性能AE減水剤量を調整してほぼ一定のスランブ

値を示す配合であっても、塑性粘度の変化の傾向は石炭灰の種類によって若干異なっている。石炭灰混入率30%の場合は、塑性粘度は増大する傾向が認められるが、その増大は大きくはなく、また、石炭灰の種類による相違も比較的小さい。しかし、石炭灰混入率を70%に増大させると、石炭灰AおよびBを用いたコンクリートでは塑性粘度は25-35%程度の増大を示すに過ぎないのに対して、石炭灰Cを用

いたコンクリートでは2倍以上の値を示し、塑性粘度は他のコンクリートよりも著しく大きな値を示すようになる。Table 3 に示したように、石炭灰Cを使用したコンクリートにおいては、他のコンクリートよりも多い高性能AE減水剤を使用することによって所定のスランブを得ており、これ以上の使用量では分離傾向が認められた。これより、高性能AE減水剤を使用してスランブ値を調整することは可能であっても、塑性粘度はそれに依りて低減するとは限らないことがわかる。しかし、この塑性粘度の大きなコンクリートに対して、AE剤およびAE助剤を併用すると、空気量は未使用の2%から4%に増加し、スランブ値が増大する一方で、降伏値および塑性粘度は低下した (Table 4, ASH-C70%-AE)。これらの結果より、石炭灰Cは粉末度が高く、かつ未燃炭素を多量に含むために粉体の比表面積が増大して、高性能AE減水剤の吸着の影響が強く現れるが、他の混和剤を事前に吸着させ¹⁴⁾、さらに空気量も増すことによってペーストの体積を増大させると、流動性が改善されることがわかる。

以上の結果より、本研究にて用いた簡便な試験装置は、同じスランブ値を示す配合であっても、石炭灰の種類や配合の相違を、塑性粘度の変化として表せる試験法であり、現場における吹付け施工性の判定に関して目視判断とも一致する有効な情報を与えるものと判断した。



Air Voids 3.18%

Air Voids 2.97%

Air Voids 5.45%

Fig.2 Cross sections of shotcrete cores (a) PC (b)ASH-A (c)ASH-B

以上のフレッシュ特性に関する結果を基にして、経済性および既往のNATM工法の施工実績を考慮しながら実施工コンクリートの配合決定を行った。事前にフレッシュ特性が把握できたことから、石炭灰A,Bの使用に関しては、石炭灰の使用量を増大させた（細骨材体積置換率30%程度）。石炭灰Cに関しては、適正な高性能減水剤の使用量の範囲内で、所期の目的である石炭灰原粉を大量使用した吹付け施工は困難であると判断した。なお、実施工における、レディーミクストコンクリートプラントにおける練混ぜから吹付け施工までの所要時間とスランプロス considering 高性能AE減水剤の量を増やすものとした。Table 5 に実際に吹付け施工を行ったコンクリートの配合を示す。これらのコンクリートについて実施工を行った（吹付けエア量約10m³/min）。Table 6 にそれらのレオロジー特性と吹付け施工時の状況を一覧にして示す。塑性粘度の高いものほどポンプ圧は大きく、また降伏値が大きくなるとリバウンドが大きくなる傾向が認められる。また、石炭灰原粉を使用して粉体量が増大する場合には粉塵が多くなる傾向が認められた¹⁵⁾。しかし、いずれの配合においても吹付け施工性に問題を生ずることはなかった。Fig.2 に石炭灰原粉使用の吹付けコンクリートコア断面の例を石炭灰を使用していないコンクリートコア断面のそれと比較して示す。塑性粘度が高く判定された配合においては、赤色に染色される断面の巻き込み空気量および充填不良部分が多くなっており、これらのことから修正スランプ試験の有用性が確認できる。

3.2 吹付けプロセスがセメントペースト相の微視的構造に及ぼす影響

Fig.3 は通常の型枠打込みを行ったコンクリートと急結剤を使用せずにこれと同じコンクリートを吹付けたときの粗大な毛細管空隙構造を比較したものである。普通コンクリート(PC)においては、施工方法による粗大空隙量の差はほとんど認められないが、材齢7日における最大細孔径（しきい径：曲線の立ち上がり部に相当する径）は吹付けコンクリートの方が明らかに大きい。一方、石炭灰を混入すると、空隙量に施工方法間で大きな差が認められないのは普通コンクリートと同様であるが、普通コンクリートで認められたような初期材齢における最大細孔径の施工方法による差が認められなくなり、さらに最大細孔径も普通コンクリートよりも小さくなっている。粗大な毛細管空隙に関する細孔径分布において、最大細孔径は粒子充填特性を反映することを考慮すると、吹付け施工されたコンクリートはセメント粒子の充填性が初期において型枠打込みコンクリートよりも劣るが、石炭灰を多量に使用し、粉体量を増大させるとそのような充填性が改善されることを示している。さらに、石炭灰Bを使用した吹付けコンクリートは、Table 6 に示すように、普通コンクリートよりもリバウンドが少なく、吹付け時の急結剤の効果に差はないものと考えられるならば、ベース配合に相当するコンクリートの粘着性が

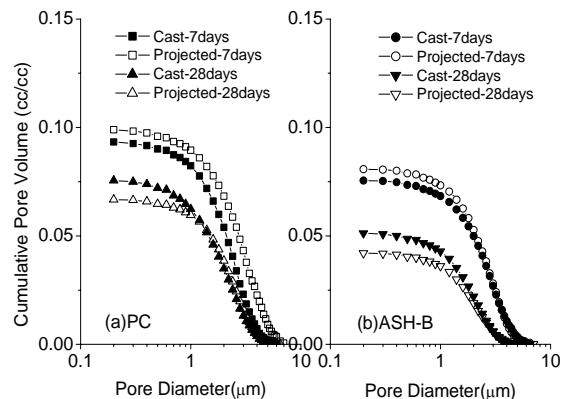


Fig.3 Comparison of coarse capillary pore size distribution curves between different placing methods

大きな配合であったといえる。このため、吹付けられた粗骨材がリバウンドとして撥ね返されずにコンクリート中により多く取り込まれるようになり¹⁶⁾、これによってセメントペーストマトリックス部分がより効果的に衝撃締固めを受け、結果として粗大毛細管空隙径が変化したことが考えられる。

3.3 石炭灰原粉使用コンクリートの強度特性

Fig.4 は、型枠打込みコンクリートおよび急結剤を添加した吹付けコンクリートの圧縮強度の材齢の進行とともになう変化を示したものである。型枠打込みコンクリートに関しては、石炭灰を混入したものの方が高い強度を示しており、普通コンクリートと石炭灰コンクリートの強度差は材齢の進行とともに拡大している。また、石炭灰の種類による強度差も明瞭である。一方、吹付けコンクリートでは、材齢7日まで配合による強度差は認められないが、材齢1日における引抜き試験により評価された圧縮強度はいずれの吹付けコンクリートも11~12N/mm²程度であり、一般的にNATM工法に用いられる吹付けコンクリートの要求性能である5N/mm²を大きく上回る値を示している¹⁷⁾。普通コンクリートと石炭灰

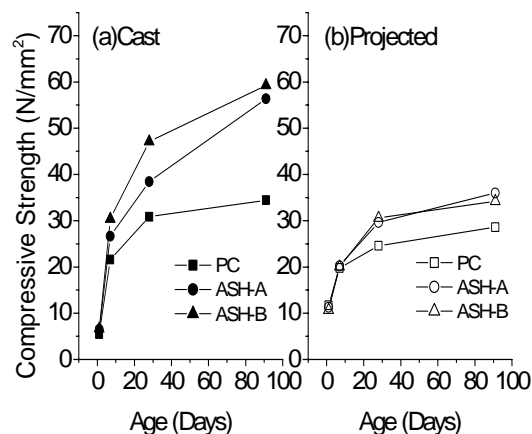


Fig.4 Development of compressive strength in cast and projected concretes

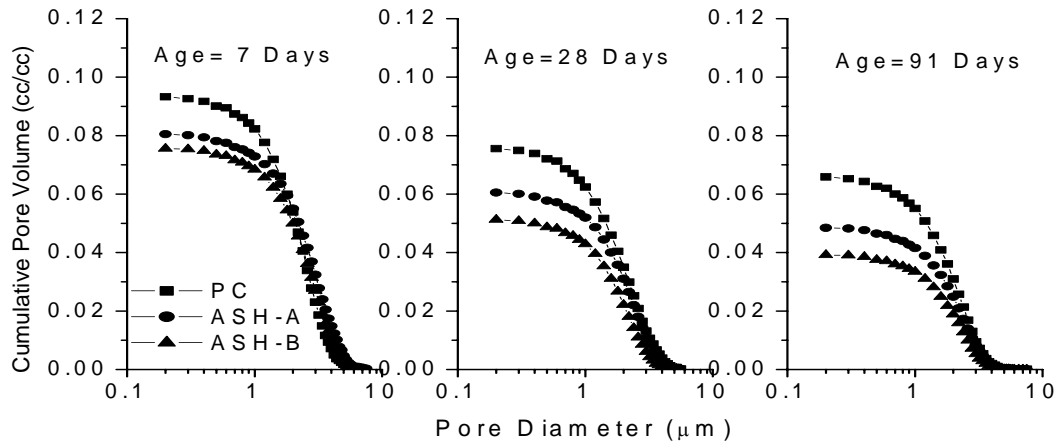


Fig.5 Coarse capillary pore size distribution curves for cast concretes with and without coal ash

原粉AおよびBを使用したコンクリートとの強度差は材齢 28 日以降において現れ、石炭灰混入吹付けコンクリートの方が普通吹付けコンクリートよりも大きな強度を示している。しかし、強度の増大は型枠打込みコンクリートに比べてかなり小さく、特に、石炭灰原粉を使用した型枠打込みコンクリートでは、ポゾラン反応に起因すると考えられる材齢 28 日以降の強度発現が顕著であったのに対して、吹付けコンクリートではそのような傾向はまったく認められない。

3.4 粗大な毛細管空隙構造

Fig.5 は型枠打込みを行ったコンクリートの細孔径分布を示したものである。材齢の進行に伴い空隙量は減少し、強度の高いものほどより小さな粗大空隙量を示す。また、石炭灰原粉の混入の有無および石炭灰の種類による細孔径分布の差が比較的明瞭であるが、細孔径が $1\mu\text{m}$ 程度以下において、細孔径の減少にともなう累積細孔量の変化はいずれのコンクリートにおいても小さく、細孔構造の相違は主に細孔径が $1\mu\text{m}$ 程度以上の空隙量の相違であり、それより小さな径の粗大毛細管空隙構造に大きな差はないことがわかる。

一方、Fig.6 に示すように、吹付け施工されたコンクリートは型枠打込みコンクリートに比べ、いずれの材齢においても粗大な毛細管空隙量が多くなっており、また材

齢の進行に伴う細孔構造の変化は小さい。さらに、Fig.3 に示した急結剤無添加の場合と比較すると、明らかに急結剤を使用したコンクリートの方が大きな粗大空隙量を示している。また、材齢 7 日において、石炭灰の有無や石炭灰種類による差異はほとんど認められず、その後においても配合による粗大毛細管空隙構造の変化は小さい。

3.5 毛細管空隙構造と圧縮強度発現特性の対応

著者らはこれまで種々の配合のコンクリートに画像解析法を適用し、粗大毛細管空隙量と圧縮強度の間には良好な相関性が存在することを報告している^{11,18)}。よって、吹付けコンクリートにおいて粗大な毛細管空隙構造に大きな差異が認められない傾向は、Fig.4 に示した圧縮強度の変化の傾向とも対応しているといえる。しかし、その一方において、吹付けコンクリートでは急結剤を使用しているため、圧縮強度の発現は、急結剤を含む系におけるセメントの水和反応および石炭灰原粉のポゾラン反応の進行にともなう毛細管空隙構造の形成と関連付けられねばならない。Fig.3 に示したように、急結剤を使用せずに吹付けを行った場合、普通コンクリートと石炭灰原粉混入コンクリートでは毛細管空隙量の差は明瞭であり、石炭灰原粉の物理的な空隙充填効果が認められる。また、普通吹付けコンクリートおよび石炭灰原粉

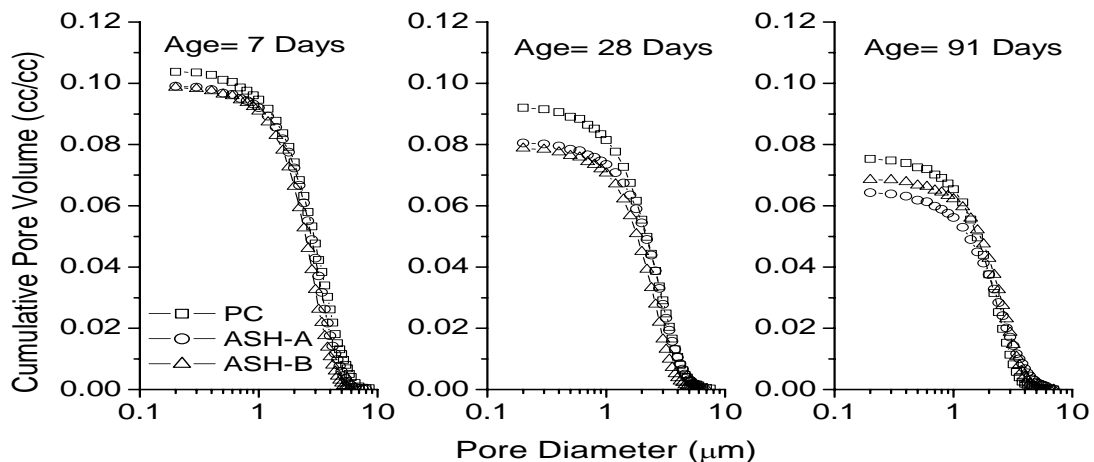


Fig.6 Coarse capillary pore size distribution curves for projected concretes with and without coal ash

混入吹付けコンクリートとも、材齢の進行にともない粗大毛細管空隙量は大きく低下し、型枠打込みコンクリートと同様にセメントの水和反応が活発に進行していると考えられる。これに対して、急結剤を含む系では、材齢7日から28日の早期材齢においても、普通コンクリートの空隙量の変化は小さく、明らかにセメントの水和反応の進行が抑制されている。さらに、石炭灰原粉を使用しても粉体量の増大に対応する充填にともなう空隙低減効果も小さくなっており、材齢7日以前に形成されたより多孔質な細孔構造の影響が強く現れていると考えられる (Fig.6)。すなわち、吹付けコンクリートにおいては、急結剤の使用により、ごく初期における強度の発現を促す内部組織が形成された以後においては、細孔の充填、細分化により組織の緻密化をもたらすようなセメントの水和反応による組織形成が活発には進行していないと考えられる。このため、吹付けコンクリートの強度発現性はかなり低くなるが、石炭灰原粉を使用 (外割) することにより、それらを反応生成物が架橋するようにして組織が形成され、これによって石炭灰原粉高含有吹付けコンクリートは普通吹付けコンクリートよりも若干大きな強度を示したと考えられる。

4 結論

石炭灰原粉を大量使用した吹付けコンクリート工法の開発を目的として、2, 3の物性の異なる石炭灰高含有コンクリートのレオロジー特性を簡便法で評価し、その吹き付け施工性を明らかにした。また、吹付けコンクリートの強度発現機構について、吹付け工程が内部組織に及ぼす影響と、吹付け硬化後の細孔構造の変化から検討を加えた。本研究にて得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 同一スランブのコンクリートであっても、使用する石炭灰原粉の種類によって塑性粘度は相違し、吹付け施工性も異なる。
- (2) 修正スランブ試験により評価されたレオロジー特性値は、現場における吹付け施工性の簡便評価に有用である。
- (3) 型枠打込みを行ったコンクリートと急結剤を使用せずに吹付け施工されたコンクリートでは、粗大な毛細管空隙量に大きな差は認められないが、最大細孔径は吹付けコンクリートの方が大きい。
- (4) 石炭灰を多量に使用すると、塑性粘度が増大し、吹付けコンクリートにおける粉体充填性が改善される。適切なレオロジー特性にて施工することは、微視的な組織形成の観点からも重要である。
- (5) 吹付けコンクリートにおける粗大毛細管空隙構造の材齢の進行にともなう変化は型枠打込みコンクリートのそれよりも小さい。
- (6) 吹付けコンクリートにおいては、急結剤の影響により組織の緻密化の進行が抑制され、これが強度発現に影響を及ぼす。

- (7) 石炭灰原粉を吹付けコンクリートに使用した場合、ポズラン反応による強度への寄与は認められない。しかし、反応生成物の架橋によって石炭灰原粉が固体構造を担うことにより、圧縮強度はある程度増大する。

謝 辞

本研究を行うにあたり、電気化学工業(株)セメント・特混研究所、小林智仁氏より多大なご助力を賜りました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー**94**, (1999) 土木学会.
- 2) Pigeon, M, Lacombe, P, Beaupre, D., and Cloutier, E., *Concrete Intl.*, **22**(10), 51 (2000).
- 3) 小山智幸, 松藤泰典, 仲田康司, 伊藤是清, *コンクリート工学年次論文集*, **22**(2), 97 (2000).
- 4) 中谷誠, 桃山健二, 荒木秀夫, 菅野俊介, *コンクリート工学年次論文集*, **24**(2), 1609 (2002).
- 5) トンネルコンクリート施工指針(案), *コンクリートライブラリー***102**, (2000) 土木学会.
- 6) 油野邦弘, 石井光裕, 国久清司, 富加見徳治, *コンクリート工学年次論文集*, **22**(2), 91 (2000).
- 7) 細川佳史, 魚本健人, *生産研究*, **52**(11), 48 (2000).
- 8) Ferraris, C.F and de Larrard, F., *ASTM, Cement Concrete and Aggregates*, **20**(2), 241 (1998).
- 9) Ferraris, C.F, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, **104**, 461 (1999).
- 10) Ferraris, C., De Larrard, F., and Martys, N., *Materials Science of Concrete VI* (S. Mindess and J. Skalny Editors), *Am. Ceram. Soc., Westerville*, 215 (2001).
- 11) 五十嵐心一, 渡辺暁央, 川村満紀, *コンクリート工学論文集*, **14**(2), 23 (2003).
- 12) Lange, D.A., Jennings, H.M. and Shah, S.P., *Cement and Concrete Research*, **24**(5), 841 (1994).
- 13) Diamond, S. and Leeman, M., S., *Microstructure of Cement-Based Systems / Bonding and Interfaces in Cementitious Materials* (Diamond, S. et al Eds.), *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **MRS, Pittsburgh**, **370**, 217 (1995).
- 14) 濱本浩明, 川上晃, 坂井悦郎, 大門正機, *コンクリート工学年次論文集*, **22**(2), 157 (2000).
- 15) 佐藤幸三, 五十嵐心一, 秋田有一, 小林智仁, *コンクリート工学年次論文集*, **25**(1), 143(2003).
- 16) Kusterle, W. and Pfeuffer, M., *Cem. Concr. Res.*, **31**(11), 1619 (2001).
- 17) トンネル施工管理要領 (本土工編), (1997)日本道路公団.
- 18) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀, *コンクリート工学年次論文集*, **24**(1), 483(2002).

