

報告 改質フライアッシュコンクリートの実構造物への適用と 8 年経過後の耐久性評価

大谷 俊浩*1・三島 剛*2・佐藤 嘉昭*3・上田 賢司*4

要旨: 本研究では、強熱減量を 1%以下に低減した改質フライアッシュを 30%混和したコンクリートの床固工への利用のための試験練りおよび試験施工を行った。また、それから 8 年経過した時点で、コンクリートの強度、中性化深さおよび表面性状に関する調査を行った。その結果、改質フライアッシュコンクリートの強度は粉体水比で管理可能であることを示した。また、8 年後の調査で改質フライアッシュコンクリートの方が中性化が進行していたが、それはプレーンコンクリートの方が材齢 28 日の強度が 3 割ほど高いためであり、また、文献の曝露試験結果と比較して改質フライアッシュコンクリートの耐久性に問題無いと判断された。

キーワード: 改質フライアッシュ, 実構造物, 圧縮強度, 中性化, 表面性状

1. はじめに

筆者らが開発したフライアッシュ処理システム¹⁾によって製造される改質フライアッシュ (Carbon-free Fly Ash, 以下 CfFA) は, AE 剤や空気量調整剤を吸着する未燃カーボン量を 1%以下に抑えることで, 従来のフライアッシュよりもコンクリートのフレッシュ性状の管理を容易としている。フライアッシュにはコンクリートの水和熱の抑制や組織の緻密化による耐久性の向上などの効果が期待されるが, CfFA コンクリートの施工性や耐久性については十分に明らかになっていないと言えなかった。そこで, これらの確認を目的として, 平成 18 年度の大分県国東土木事務所が管轄する床固工において, CfFA コンクリートの試験施工が実施された。本報告では, 試験施工に対する試験練りで実施した CfFA の配合方法および水粉体比による強度管理の可否について検討を行うとともに, CfFA コンクリートの実構造物の打設後の温度変化について検討を行った。また, それから 8 年経過した時点で, コア採取による強度試験および中性化深さの測定, ならびにコンクリート表面性状に関する各種試験を実施した結果について検討した。

2. 試験練り

2.1 実験方法

表-1 および表-2 に使用材料および配合表を示す。セメントには高炉セメント B 種を用い, 混和材には強熱減量 0.55%の JIS II 種相当の CfFA を用いた。目標スランブ 8±1cm, 目標空気量 4.5±1.0%とし, ここでは CfFA を全粉体量の 30%混和し, 水粉体比を 40, 50, 60, 70%と変化させた 4 配合で実施した。混和剤添加量は粉体質量に対して 1.0%で統一した。

表-1 使用材料

| 種別 | 記号 | 使用材料および物性 |
|------|------|---|
| セメント | C | 高炉セメント B 種 密度 3.04g/cm ³ |
| 細骨材 | S1 | 混合砂 (蒲江・呼子, 質量比 40:60) 表乾密度 2.61g/cm ³ 粗粒率 2.55 |
| | S2 | 砕砂 (津久見) 表乾密度 2.65g/cm ³ 粗粒率 2.80 |
| 粗骨材 | G1 | 碎石 2005 (津久見) 表乾密度 2.70g/cm ³ 実積率 61.0% |
| | G2 | 碎石 4020 (津久見) 表乾密度 2.70g/cm ³ 実積率 62.5% |
| 混和材 | CfFA | 改質フライアッシュ 密度 2.30g/cm ³ 強熱減量 0.55% |
| 混和剤 | Ad | AE 減水剤 (標準型) |
| 練混ぜ水 | W | 上水道 |

表-2 試験練り配合表

| No. | W/C (%) | W/P (%) | CfFA/ (C+CfFA) (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | |
|-----|---------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| | | | | | W | C | CfFA | S1 | S2 | G1 | G2 | Ad |
| 1 | 57.3 | 40.0 | 30 | 29.5 | 169 | 295 | 127 | 295 | 197 | 724 | 483 | 4.22 |
| 2 | 71.6 | 50.0 | 30 | 34.8 | 156 | 218 | 94 | 377 | 252 | 724 | 483 | 3.12 |
| 3 | 86.0 | 60.0 | 30 | 38.8 | 147 | 171 | 74 | 440 | 294 | 715 | 476 | 2.45 |
| 4 | 100.0 | 70.0 | 30 | 40.0 | 145 | 145 | 62 | 464 | 309 | 715 | 476 | 2.07 |

W/C : 水セメント比, W/P : 水粉体比, s/a : 細骨材率, 細骨材混合比率 (質量比) [S1:S2=60:40], 粗骨材混合比率 (質量比) [G1:G2=60:40]

表-3 強度試験結果一覧

| No. | W/C (%) | W/P (%) | P/W | 圧縮強度 (N/mm ²) | | | 静弾性係数 (kN/mm ²) | | |
|-----|---------|---------|-------|---------------------------|------|------|-----------------------------|------|------|
| | | | | 7 日 | 28 日 | 91 日 | 7 日 | 28 日 | 91 日 |
| 1 | 57.3 | 40.0 | 2.500 | 30.5 | 45.2 | 55.6 | — | 38.5 | 37.6 |
| 2 | 71.6 | 50.0 | 2.000 | 21.1 | 35.8 | 44.6 | — | 38.3 | 35.3 |
| 3 | 86.0 | 60.0 | 1.667 | 16.6 | 29.4 | 37.2 | — | 37.9 | 38.0 |
| 4 | 100.0 | 70.0 | 1.429 | 12.0 | 21.3 | 28.2 | — | 34.8 | 33.4 |

P/W:粉体水比

2.2 実験結果および考察

表-3 に圧縮強度試験結果を示し, 図-1 に粉体水比と圧縮強度の関係を示す。図より, CfFA コンクリートの圧

*1 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻 (正会員)

*3 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博 (正会員)

*4 (株)ゼロテクノ 技術部部长 博士 (工学) (正会員)

縮強度は粉体水比と直線関係が認められることが分かる。したがって、CfFA 混和量を全粉体量の 30%とした配合においても、CfFA コンクリートの圧縮強度の強度設計は粉体水比を用いることで管理可能であることが分かった。

3. 試験施工

3.1 施工内容

表-4 に試験施工の配合表を示す。試験施工の配合設計では、強度管理材齢 28 日、呼び強度 18 (配合強度 21.9N/mm²)、とし、通常のコンクリートは生コン工場の配合にならぬ、CfFA コンクリートは試験練りの結果を基に水粉体比によって行い、CfFA を全粉体量の 30%混合して水粉体比を 66.4%とした。目標スランプおよび空気量はそれぞれ 8±1cm および 4.5±1.0%とし、混和剤添加量は粉体質量に対して 1.0%として単位水量でスランプを調整した。

写真-1 に試験施工を行った床固工の外観を示す。床固工の所在地は、大分県国東市光明寺川である。図-2 に床固工の概略図および熱電対設置位置を示す。主堤下部および主堤上部の片方に CfFA コンクリートを打設し、主堤上部のもう片方に基準コンクリートを打設した。熱電対は、主堤上部構造物の中央部に縦軸方向に並ぶように、右岸側に 5 箇所、左岸側に 4 箇所、また、周辺温度測定のために 1 箇所の、計 10 箇所に設置した。測定にはデータロガーを用い、インターバル 15 分で、打設開始時より約 4 日間にわたって測定した。

3.2 実験結果および考察

表-5 にフレッシュ性状および強度試験結果の一覧を示す。表より、スランプおよび空気量はいずれも目標値を満足する結果となった。

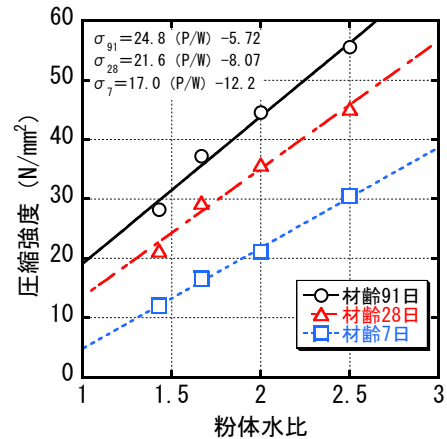


図-1 粉体水比と圧縮強度の関係



写真-1 床固工外観

図-3 に材齢 28 日における圧縮強度を示す。CfFA コンクリートは配合強度を少し下回ったものの、呼び強度は充分満足する結果となった。このことから、実機プラントによる製造においても、CfFA コンクリートは粉体水比を用いた配合設計で問題がないことが分かった。

表-4 試験施工配合表

| 施工部位 | コンクリート種類 | W/C (%) | W/P (%) | CfFA/(C+CfFA) (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | | |
|------|----------|-------------|---------|-------------------|---------|--------------------------|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | | | | | | W | C | CfFA | S1 | S2 | G1 | G2 | Ad | |
| 主堤上部 | 左岸側 | 基準コンクリート | 64.5 | 64.5 | — | 41.1 | 146 | 226 | 0 | 476 | 318 | 701 | 468 | 2.260 |
| | 右岸側 | CfFA コンクリート | 94.8 | 66.4 | 30 | 39.8 | 146 | 154 | 66 | 458 | 305 | 711 | 474 | 2.200 |

W/C: 水セメント, W/P: 水粉体比, s/a: 細骨材率, 細骨材混合比率 (質量比) [S1:S2=60:40], 粗骨材混合比率 (質量比) [G1:G2=60:40]

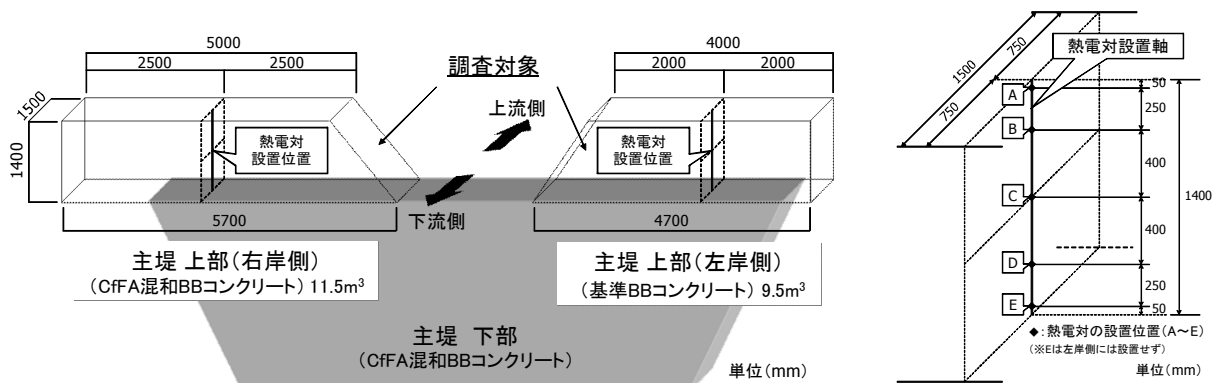


図-2 床固工の概要および熱電対設置位置

表-5 フレッシュ性状および強度試験結果

| コンクリート種類 | 養生条件 | スランブ (cm) | 空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm ²) | | |
|----------|------|-----------|---------|---------------------------|------|------|
| | | | | 7日 | 28日 | 3ヶ月 |
| 基準 | 標準水中 | 8.0 | 4.5 | 20.5 | 28.6 | 29.5 |
| CfFA | | 9.0 | 4.0 | 12.0 | 20.5 | 25.2 |

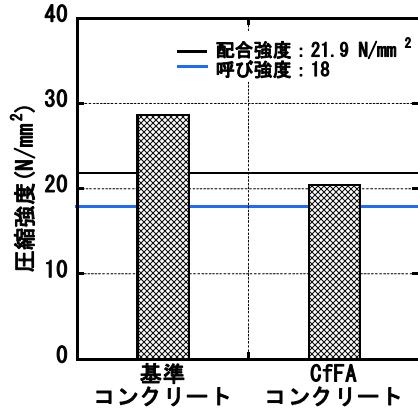


図-3 材齢 28 日の圧縮強度の比較

表-6 にコンクリートの最高温度を示し、図-4 にコンクリート温度の経時変化を示す。いずれのコンクリートも中央部に設置した熱電対 C が最も高い温度を示し、また、基準コンクリートよりも CfFA コンクリートの温度が低くなる結果となった。これは、CfFA コンクリートの単位セメント量が少ないため当然の結果ではあるが、図-3 に示したように基準コンクリートが配合強度を大きく上回っていることからわかるように、基準となるセメント量が異なっていることも含まれている。

4. 材齢 8 年における調査

4.1 調査方法

(1) 調査項目

主堤上部は上流側 (写真-1 の奥側) および外側は土壌等で覆われているが、その他の面は露出している。材齢 8 年が経過した時点で、その露出面に対する詳細調査を実施した。

表-7 に調査概要を示す。調査項目は、現地での非破壊試験として、テストハンマーによる反発度、引っかき傷幅、超音波伝播速度およびトレント透気係数の測定を行い、採取したコアを用いた圧縮強度試験、中性化深さの測定、成分分析、SEM 観察、細孔径分布の測定を行った。

(2) 非破壊試験

反発度試験は、JSCE-G504「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に準拠し、テストハンマーを用いて垂直面 (写真手前) の中段の各 3 箇所 (各 20 点の平均) を測定した。測定した反発度から、次式を用いて推定強度を求めた。

表-6 コンクリートの最高温度

| コンクリート種類 | 熱電対 | 最高温度 (°C) | 記録時の経過時間 (日) | 時間帯 (24h 表記) |
|----------|-----|-----------|--------------|--------------|
| 基準 | C | 54.0 | 1.51~1.68 | 1:24~5:24 |
| CfFA | C | 48.2 | 1.63~1.66 | 4:54~5:39 |

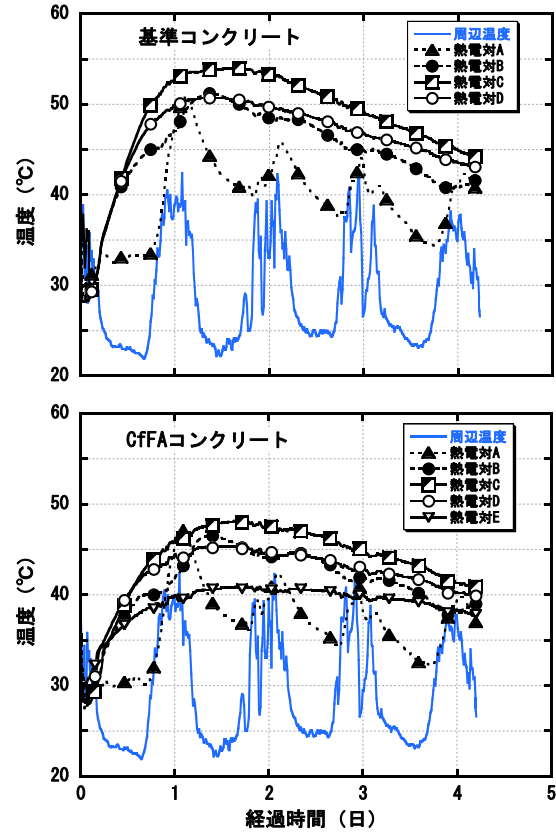


図-4 コンクリート温度の経時変化

表-7 調査項目

| 種別 | 調査項目 |
|------------|---|
| 非破壊試験 (現地) | <ul style="list-style-type: none"> ・反発度 (テストハンマー) ・引っかき ・超音波伝搬速度 ・透気係数 (トレント) |
| 採取コアによる試験 | <ul style="list-style-type: none"> ・コア外観 ・圧縮強度 ・中性化深さ (フェノールフタレイン) ・成分分析 (蛍光 X 線回折) ・SEM ・示差熱・熱重量分析 ・細孔径分布 (水銀圧入法) |

$$F_c = -18.0 + 1.27(R_0 + R_1) \quad (1)$$

ここに、 F_c : 推定強度 (N/mm²), R_0 : 反発度, R_1 : 角度係数 (ここでは 0)

引っかき傷幅試験は、引っかき試験器を用い、コンクリート表面にスケールをあて、荷重 9.8N, 2cm/sec 程度の速さで 10cm ほど引っかき、クラックスケールを用いてその幅を測定した³⁾。測定回数は、上面各 1 箇所および垂直面各 3 箇所に対して 3 回ずつとした。

表-8 非破壊試験結果

| 種類 | 反発度試験 | | 引っかかり傷幅 (mm) | | | | | | | 超音波伝搬速度 (km/s) | | | 透気係数 ($10^{-16}m^2$) |
|------|-------|----------------------|--------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|---------------------------|
| | 反発度 | 推定強度 (N/mm^2) | 上面 | 斜面 上部 | 斜面 中段 | 斜面 下部 | 垂直面 上部 | 垂直面 中段 | 垂直面 下部 | 垂直面 上部 | 垂直面 中段 | 垂直面 下部 | |
| 基準 | 41.1 | 34.2 | 0.7 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 0.7 | 0.6 | 0.6 | 2.31 | 2.30 | 2.77 | 0.13 |
| CfFA | 37.1 | 29.1 | 0.8 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 2.35 | 3.88 | 2.67 | 0.78 |

表-9 採取コアを用いた各種試験結果

| 種類 | 圧縮強度試験 | | | 中性化深さ | | | 示差熱・熱重量 | | | | 細孔径分布 | |
|------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------|---------------------------|-----------------|------------------------------------|-------|------------|------|-----------------|-------|
| | 単位容 積質量 (kg/L) | 圧縮 強度 (N/mm^2) | 静弾性 係数 (kN/mm^2) | 深さ (mm) | 速度係数 ($mm/\sqrt{年}$) | 予測値 (mm) | $Ca(OH)_2$ ($\times 10^3 mol/g$) | | 結合水 (wt.%) | | 総細孔量 (mL/g) | |
| | | | | | | | 中性化 | 未中性化 | 中性化 | 未中性化 | 中性化 | 未中性化 |
| 基準 | 2.38 | 32.0 | 28.0 | 13.5 | 4.70 | 19.6 | 0.276 | 0.298 | 1.90 | 3.24 | 0.097 | 0.088 |
| CfFA | 2.37 | 30.5 | 30.1 | 16.8 | 5.85 | 21.0 | 0.633 | 0.877 | 2.06 | 2.88 | 0.122 | 0.076 |

超音波伝播速度は、引っかかり傷幅に近い場所で、測定間距離 10cm にて 3 回の測定を行った。

透気係数はトレント試験装置を用いて行い、垂直面の中段で 2 回ずつ測定した。

(3) 採取コアを用いた試験

直径 ϕ 125mm で長さ約 350mm のコアを、垂直面の中段からそれぞれ 3 体採取し、その両端約 50mm をカットした中間の 250mm を圧縮強度試験用とした。圧縮強度試験用供試体は、両端のカット後、端面を研磨し、20°C 水中に 2 日間浸漬した後、強度試験に供した。

SEM 画像観察、細孔径分布の測定および成分分析 (蛍光 X 線回折) は各 3 体中 1 体のカットした両端部から、表面の中性化領域および内部の未中性化領域から採取した試料を用いて行った。

中性化深さは残りの各 2 体のカットした表面側を割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して呈色部までの深さをノギスを用いて測定した。

4.2 実験結果および考察

(1) 推定圧縮強度

表-8 に非破壊試験測定結果一覧を示す。反発度より推定した圧縮強度は CfFA の方が 15% 程度小さな値を示した。

(2) 引っかかり傷幅

引っかかり傷幅は全体的に CfFA の方が若干幅が広く、表層部分は若干脆弱であると考えられる。また、部位で比較すると斜面がやや大きな値を示した。

(3) 超音波伝播速度

超音波伝搬速度は CfFA の中段がやや速いが、それ以外では基準コンクリートと明確な差は見られない。

(4) 透気係数

透気係数は CfFA の方が大きな値を示しているが、緻密さを表す Torrent ら⁴⁾ が提案したグレードはともに 3 (一般) であった。

(5) コア外観

写真-2 にコア供試体 (圧縮試験用に成形後) の外観を

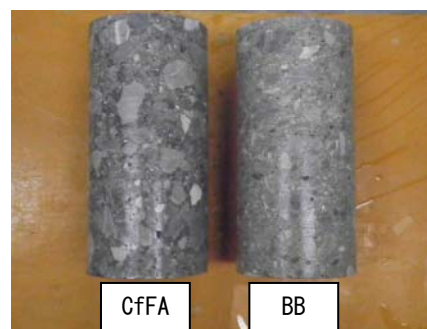


写真-2 コア外観

示す。CfFA を混和した方には高炉スラグ特有の緑色が確認できたが、高炉セメント B 種を単独使用した基準コンクリートには確認できなかった。この原因については現時点で不明であり、今後さらなる検討が必要である。

(6) 圧縮強度

表-9 に採取したコアを用いた圧縮強度試験結果および中性化深さの測定結果を示す。また、図-5 に標準養生材齢 91 日までの圧縮強度の経時変化と今回測定したコア圧縮強度を示す。また、材齢 28 日の強度に対する圧縮強度比の経時変化を示す。

図より、材齢 28 日の時点で基準コンクリートの圧縮強度が $28.6N/mm^2$ に対して CfFA コンクリートは $20.5N/mm^2$ と約 30% 小さな値であったが、8 年経過した時点での実構造物の強度は同程度まで強度が増進していた。また、これらのコア強度はテストハンマーによる推定圧縮強度とほぼ等しい結果であった。

材齢 28 日標準養生に対するコア強度の増進は、基準コンクリートが 10% 程度に対して、CfFA コンクリートは 50% 程度と非常に大きなものであった。普通ポルトランドセメントに FA を混和することで長期強度の発現が高くなることはよく知られているが⁵⁾、高炉セメントに FA を混和したコンクリートの長期強度性状を検討事例は少ない。植木らは、高炉セメントと FA を混合したコンクリートの水中養生を 45 年間行い、その強度増進を比較検討している⁶⁾。そのなかで、本実験と近い条件として、高炉セメント B 種を用いたコンクリート (W/P:65%)

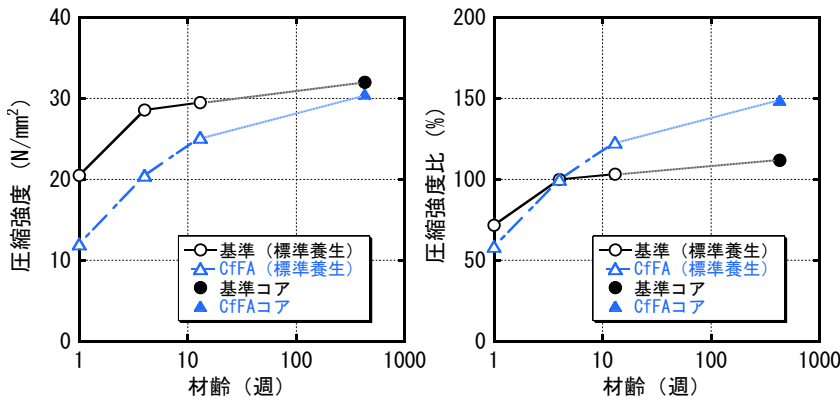


図-5 圧縮強度および圧縮強度比の経時変化

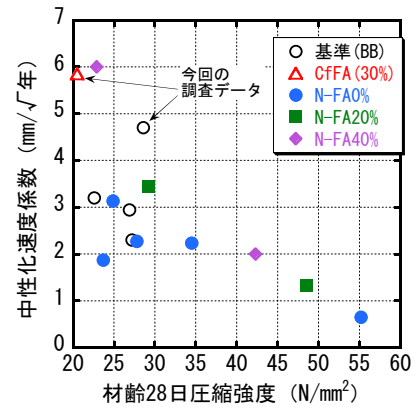


図-6 中性化速度係数と圧縮強度の関係

表-10 蛍光 X 線回折による成分分析結果 (未中性化部)

(単位 : wt. %)

| 種類 | Na ₂ O | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | SO ₃ | K ₂ O | CaO | Fe ₂ O ₃ |
|------|-------------------|------|--------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------|--------------------------------|
| 基準 | 0.58 | 2.82 | 8.31 | 25.75 | 2.00 | 0.97 | 56.29 | 2.39 |
| CfFA | 0.43 | 2.56 | 9.17 | 31.69 | 1.20 | 1.00 | 50.48 | 2.77 |

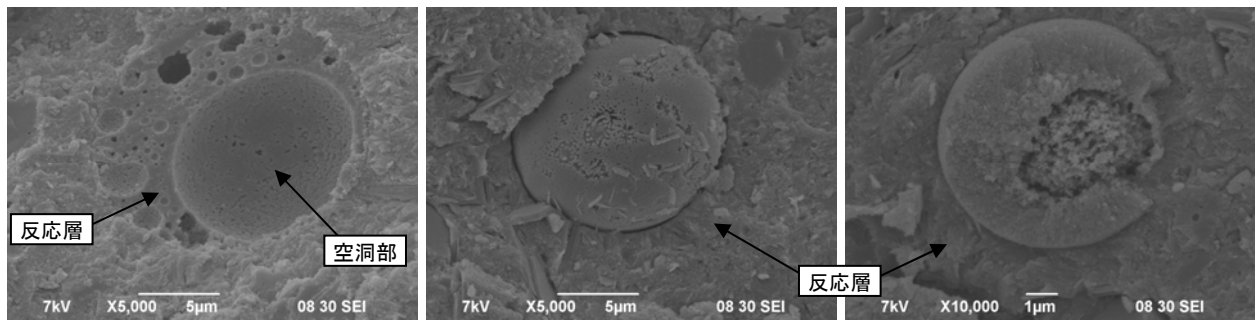


写真-3 SEM (CfFA 未中性化部)

と、それに FA を内割りで 30%置換したコンクリート (W/P:60.7%) について、材齢 28 日に対する材齢 10 年における強度増進の割合は、それぞれ約 190%および約 210%と FA を混和した方が若干大きな値を示しており、本実験ほど明確な差は得られていないが、本実験と同様の傾向を示している。したがって、高炉セメント B 種に FA を混和した場合、高炉セメント単独よりも、長期的な強度の増進は高いと言える。

(7) 中性化深さ

中性化深さは基準コンクリートが 13.5mm に対して、CfFA コンクリートは 16.8mm と 25%程度中性化の進行が速い結果であった。これは CfFA コンクリートの初期の強度が低く、組織が粗かったことによると考えられる。また、次式に示す高炉セメントを使用した実構造物の中性化深さの予測式⁷⁾より予測した中性化深さはそれぞれ 19.6mm および 21.0mm であり、実測値はこれらよりも 2~3 割小さな値である。

$$x = (100 \cdot W / C - 38.4) \sqrt{t / (58.7 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma)} \quad (2)$$

ここに、x : 中性化深さ (mm), W/C : 水セメント比, t : 期間 (年), α : 締固め条件による係数 (ここでは普

通の 0.25), β : 仕上げ材による係数 (ここでは仕上げなしの 1), γ : 環境条件による係数 (ここでは一般の 1)

図-6 に実構造物および曝露試験による中性化速度と材齢 28 日圧縮強度の関係を示す。図中には既往の研究での高炉セメントやフライアッシュを用いた曝露試験結果 (屋外曝露, 構造物 or 脱型材齢 7 日の供試体, W/B:40% 以上) も合わせて示している⁸⁻¹⁰⁾。図より、既往の研究データは両者の関係に相関関係が認められるが、今回の調査データはその関係に比べて、やや高めの数値を示している。この理由は初期養生や曝露環境の違いなどが影響しているものと思われる。

(8) 成分分析

表-10 に未中性化部の成分分析結果 (主な成分) を示す。CfFA を混和した方が若干シリカ分が多く、カルシウム分が少なかった。

(9) SEM

写真-3 に SEM 画像による CfFA の反応状態を示す。CfFA の周囲には周辺の組織と境界が不明瞭になっているものもあるが、反応層¹¹⁾が確認でき、ポゾラン反応が進行していることがわかる。また、左の写真には空洞が見られ、それが CfFA 粒子が試料作製時の破碎によ

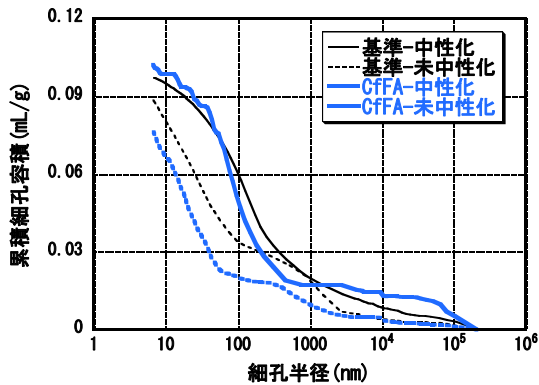


図-7 累積細孔径分布

て外れたものか、それとも中空状の CfFA が反応によって消失したものかは、現時点では不明である。

(10) 細孔径分布

図-7に累積細孔径容積の分布を示す。基準コンクリートおよび CfFA コンクリートともに内部の未中性化部分よりも表層の中性化部分の方が組織が粗いことがわかる。基準と CfFA コンクリートを比較すると、中性化部分では CfFA コンクリートの方がやや細孔量が多いが、未中性化部分では CfFA コンクリートの方が、特に 1000nm 付近の細孔が少なく、緻密であることが分かる。

5. まとめ

高炉セメント B 種に対して CfFA を混和したコンクリートを用いた床固工の試験練りおよび試験施工を行うとともに、建造後 8 年が経過した時点でコンクリートの各種性状について調査した結果、本実験の範囲内で、以下の知見が得られた。

- 1) CfFA コンクリートの強度設計は水粉体比を用いることで管理可能であり、実機プラントで混練りした場合でも同様である。
- 2) CfFA による強度増進が認められ、材齢 28 日時点で 30%程度小さな強度であったものが、8 年経過後に同程度に達していた。
- 3) CfFA を混和したコンクリートの方が、引っかき試験や透気係数試験の結果から表面付近の組織が若干粗い結果が得られたが、細孔径分布の結果では表面付近の中性化部は同程度であり、内部の未中性化部は緻密であった。
- 4) 中性化の進行は既往の文献データより早いものであったが、今回の調査結果の基準よりも CfFA コンクリートの中性化の進行が速かったのは、初期強度に依存していると考えられる。

謝辞

本研究における調査は、(独) 科学技術振興機構 (JST)

の「研究成果最適展開支援プログラム・A-STEP ハイリスク挑戦タイプ(復興促進型)タイプ「II」(課題番号:H25 仙II-557, プロジェクトタイトル:復興の基幹建設材料となるコンクリートの長期耐久性を可能にする改質フライアッシュの技術開発, 参加機関:日本製紙(株), 大分大学, (株)ゼロテクノ, 東北大学, 研究開発期間:2013~2014年)として行われたものである。

参考文献

- 1) 李相培ほか: 石炭灰の品質安定化のための処理方法に関する研究(その 2. 焼成工程を備えた風力微粉砕処理システム), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp.209-210, 2006.9
- 2) 李相培ほか:CfFA コンクリートの実構造物への適用例, 日本建築学会研究報告九州支部, 第 47 号・1, 構造系, pp.33-36, 2008.3
- 3) 湯浅昇ほか: 引っかき傷によるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案, 日本非破壊検査協会, シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集, Vol.1, pp.115-122, 2003.7
- 4) R. J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, No.25, pp.358-365, 1992
- 5) たとえば, Torben C. Hansen, et. Al., Long-Term Strength of High Fly Ash Concrete, CEMENT and CONCRETE RESERCH, Vol.20, pp.193-196, 1990
- 6) 植木康知ほか: 45 年経過した混合セメントコンクリートの長期強度発現性について, コンクリート工学論文集, 第 23 巻, 第 2 号, pp.71-79, 2012.5
- 7) 日本建築学会: 高炉セメントを使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説, 2001.7
- 8) 依田彰彦: 40 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果, セメント・コンクリート論文集, No.56, pp.449-454, 2002
- 9) 船本憲治ほか: フライアッシュを使用したコンクリートの材齢 9 年における中性化曝露試験報告(その 1 フライアッシュを内割混合したコンクリートの試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.373-374, 2007.8
- 10) 小早川真ほか: 強さクラス 32.5 セメントを使用したコンクリート壁供試体の屋外暴露 10 年の評価結果, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.778-783, 2014
- 11) 山本武志ほか: フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織の緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, vol.63, No.1, pp.52-65, 2007