

論文 フライアッシュ原粉を用いたコンクリートの強度, 塩化物イオン浸透および乾燥収縮特性に関する研究

林 亮太^{*1}・崔 林^{*2}・樫原 弘貴^{*3}・添田 政司^{*4}

要旨: 本研究では, FA 原粉の利用拡大を目的として, 普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種への混和方法や養生条件を変化させ, 強度の発現性と積算温度における圧縮強度の評価, ならびに塩化物イオンに対する抵抗性および乾燥収縮特性についての検討を行った。その結果, 積算温度による圧縮強度の評価は可能であり, 強度の発現性および塩化物イオンに対する抵抗性, 乾燥収縮特性において FA JIS II 種灰と同程度の結果が得られた。

キーワード: フライアッシュ原粉, 圧縮強度, 積算温度, 塩化物イオン, 乾燥収縮

1. はじめに

現在, 日本では電力の安定供給するために石炭火力発電が大量に利用されており, 電力需要の拡大に伴い, 石炭灰の発生量も年々増加傾向にある。この発生したフライアッシュ原粉 (以下, FA 原粉と称す) は分級され, その中でも, 一般的に用いられるのが FA JIS II 種灰である。また, 近年の骨材不足が懸念される中で, FA 原粉を代替材として細骨材の一部に用いた場合のコンクリートの特性や吹付けコンクリートとしての利用等, 原粉の有効利用に向けた検討が行われており^{1), 2)}, FA の品質管理についても, これまで多くの研究実績がある^{3), 4)}。しかしながら, FA 原粉はボイラーの形式, 炭種, 発電所の運転状況等の諸条件によって FA 原粉の品質が大きく変動する

ため, コンクリート混和材としての利用は極めて少なく, 再利用されずに最終処分場に埋め立て処分されているのが現状である。

そこで本研究は, FA 原粉の利用拡大を図るため, 一般土木構造物に使用されている高炉セメント B 種および普通ポルトランドセメントに対して FA 原粉の混和方法や養生条件を変化させ, 強度の発現性や積算温度における圧縮強度の評価について検討するとともに, 塩化物イオンに対する抵抗性および乾燥収縮特性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1 に, FA JIS II 種灰と FA 原粉の化学成分を示す。

表-1 FA JIS II 種灰と FA 原粉の化学成分

セメント種類	化学成分(%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO
フライアッシュ JIS II 種	55.4	26.9	3.7	4.1	0.7	0.4
フライアッシュ原粉	58.4	23.2	5.9	3.7	1.0	0.8

表-2 FA 原粉の化学的・物理的物性

試験項目	FA原粉	JIS規格値 (FA II 種)
密度(g/cm ³)	2.29	1.95以上
比表面積(cm ² /g)	4213	2500以上
45μmふるい残分(%)	13.7	40以下
強熱減量(%)	2.2	5.0以下
湿分(%)	0.1	1.0以下

表-3 使用材料

略語	材料	物理的性質
N	普通ポルトランドセメント	密度(3.16g/cm ³)比表面積(3,280cm ² /g)
BB	高炉セメントB種4000プレーン	密度(3.04g/cm ³)比表面積(3,870cm ² /g)
FA	フライアッシュJIS II 種	密度(2.34g/cm ³)比表面積(3,960cm ² /g)
FA原粉	フライアッシュ原粉	密度(2.29g/cm ³)比表面積(4,213cm ² /g)
S	細骨材(海砂)	表乾密度(2.58g/cm ³)吸水率(1.61%)
G	粗骨材(碎石)	表乾密度(2.67g/cm ³)吸水率(1.14%)
AE減水剤	JIS A 6204 AE減水剤標準形 (I 種)	
AE剤	マイクロエア303A,785	

*1 福岡大学大学院 工学研究科 修士課程 (学生会員)

*2 福岡大学大学院 工学研究科 修士課程 (学生会員)

*3 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 工博 (正会員)

*4 福岡大学大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

表-4 コンクリートの配合表

配合名	W/(C+FA) (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									sl (cm)	air (%)
			W	C	BB	FA	FA原粉	S	G	AE減水剤	AE剤		
N	55	45	165	300	-	-	-	807	1017	5.042	0.013	8.5	4.6
N-FA(20)		42	168	244	-	61	-	746	1061	3.060	0.092	8.3	4.0
N-FA原粉(20)		42	157	228	-	-	57	765	1093	2.850	0.067	7.8	3.2
BB		45	162	-	295	-	-	807	1021	5.660	0.012	9.0	3.8
BB-FA(20)		40	161	-	234	59	-	754	1074	2.627	0.094	8.7	3.7
BB-FA10EX		39	166	-	305	62	-	629	1087	2.440	0.244	12.2	4.9
BB-FA原粉(20)		42	153	-	223	-	56	768	1098	2.670	0.089	7.1	3.4
BB-FA原粉10EX		40	156	-	284	-	64	651	1147	3.520	0.096	8.9	3.2

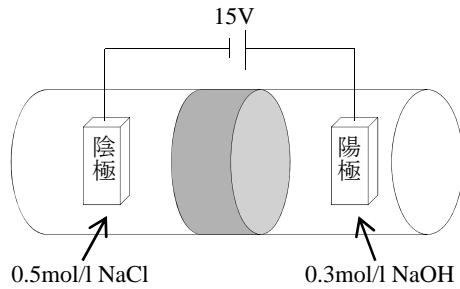


図-1 電気泳動試験装置

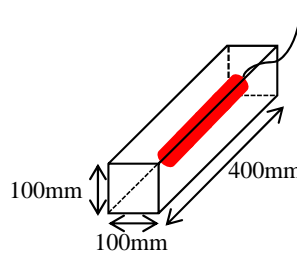


図-2 乾燥収縮試験



表-2 は、FA 原粉の化学的・物理的性質を示す。今回用いた FA 原粉の化学的・物理的物性において JIS 規格値を満足するものとなっているが、品質管理項目であるメチレンブルー吸着試験において、電力会社の社内規格値基準の規格外となっているため、FA 原粉として処理されている。表-3 に、使用材料を示す。配合は、普通ポルトランドセメント単味の N、普通ポルトランドセメントに FAJIS II 種灰および FA 原粉をセメントの重量に対して 20% 置換した N-FA(20)、N-FA 原粉(20)、高炉セメントの単味の BB、高炉セメントに FAJIS II 種灰および FA 原粉をセメントの重量に対して 20% 置換した BB-FA(20)、BB-FA 原粉(20)、細骨材の容積に対して 10% 置換した BB-FA10EX、BB-FA 原粉 10EX の計 8 通りで行った。その配合を表-4 に示す。BB-FA10EX のみスランブ 12cm となっているが、その他の配合は、スランブ 8±1cm、空気量 4.0±1% とした。FA 原粉を混和したものにはマイクロエア-785 を使用した。

2.2 実験方法

(1) 養生方法

圧縮強度試験用いる供試体は、BB および BB-FA 原粉(20)、BB-FA 原粉 10EX の配合のものを水温 10℃、20℃、30℃で水中養生し、N および N-FA 原粉(20)、N-FA 原粉 10EX の配合のものは水温 20℃で水中養生を行った。電気泳動試験および塩水浸漬試験では、材齢 28、91 日まで水温 20℃の水中養生を行った。乾燥収縮試験は、材齢 7 日まで水温 20℃で水中養生を行った。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は φ100×200mm の円柱供試体を使用し、

JIS A 1108 に準じて行った。なお、試験材齢は 7、28、56、91 日で、3 本の平均値を測定値とした。さらに、圧縮強度試験結果を基に、式(1)を用いて積算温度を算出した⁵⁾。強度発現性に対して、式(2)の分数関数を与え回帰させ、係数 a、b を求めた。

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta_z + 10) \times Z \quad (1)$$

$$F'c = aM / (M + b) \quad (2)$$

M：積算温度(℃・日) Z：材齢(日)

θ_z ：材齢におけるコンクリートの温度(℃)

F'c：圧縮強度(N/mm²)

a：終局的な強度を表す係数

b：強度発現速度を表す係数

(3) 電気泳動試験

電気泳動試験の供試体は、φ100×200mm の円柱供試体を打設上面から 50~100mm の部分をカットし、試験面以外の円周面をエポキシ樹脂で被覆したものを使用した。真空飽和処理を行った後に、図-1 に示した電気泳動試験装置にセットし、JSCE-G571 に準じて行い、式(3)から実効拡散係数を算出した。

$$De = \frac{J_{Cl}RTL}{|Z_{Cl}|FC_{Cl}(\Delta E - \Delta E_C)} \times 100 \quad (3)$$

De：実行拡散係数 (cm²/year) L：供試体厚さ (mm)

R：気体定数 (=8.31J/mol/K)

Z_{Cl}：塩化物イオン電化数 (= -1)

F：ファラデー定数 (=96500C/mol)

C_{Cl}：定常時の陰極層の塩化物イオン濃度 (mol/l)

ΔE - ΔE_C：供試体表面間の電位差 (V)

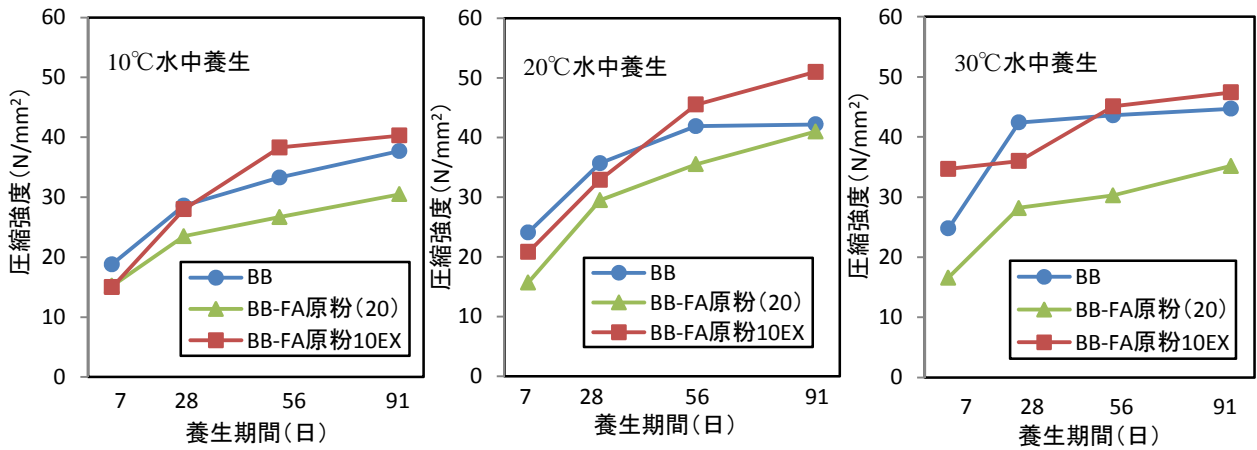


図-3 養生ごとの圧縮強度の経時変化

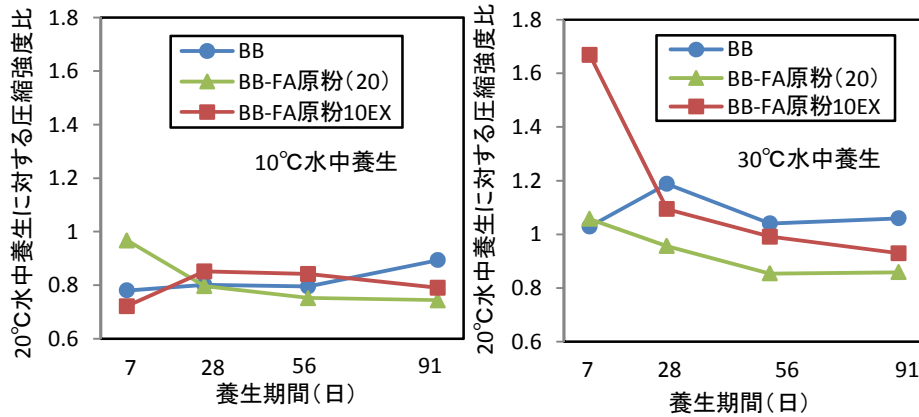


図-4 20°Cに対する圧縮強度比

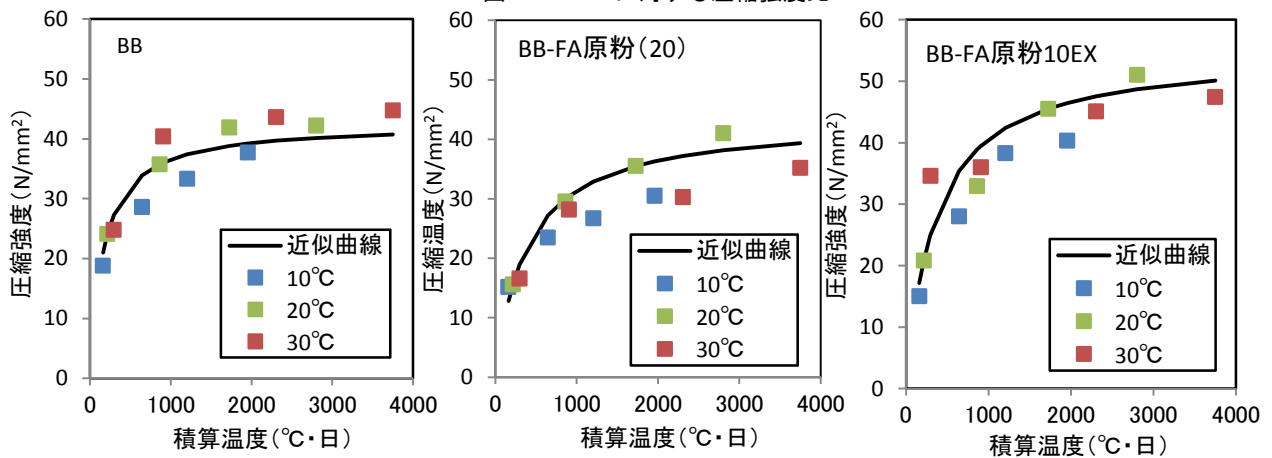


図-5 積算温度と圧縮強度の関係

(4) 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は JSCE-G572 に準じて行った。供試体は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体を高さ 100mm でカットし、切断面以外をエポキシ樹脂で被覆したものを使用した。温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ に保った 10% 濃度の NaCl 溶液に浸漬させ、浸漬期間を 3 ヶ月とした。ドリル法により、0~40mm の深さに対して、5mm 間隔で試料を採取し、硝酸銀滴定法により、全塩化物イオン量測定後、表面から 10mm までの塩化物イオンを除いて見かけの拡散係数を算出した。

(5) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験の供試体は、図-2 に示すように、

100×100×400mm の角柱供試体の中央に $\phi 8 \text{mm}$ の単軸 1 ゲージ 3 線式のモールドゲージを埋設しており、温度 20°C ・湿度 60% の環境下に静置してデータロガーによって、ひずみの測定を行った。なお、測定結果は 3 本の平均で表している。

3. 結果および考察

3.1 FA 原粉の養生温度と圧縮強度の関係

図-3 は、FA 原粉を用いたコンクリートの養生温度ごとに圧縮強度の経時変化を示す。いずれの配合も養生条件に拘らず、材齢に伴って強度が増加しているが、養生

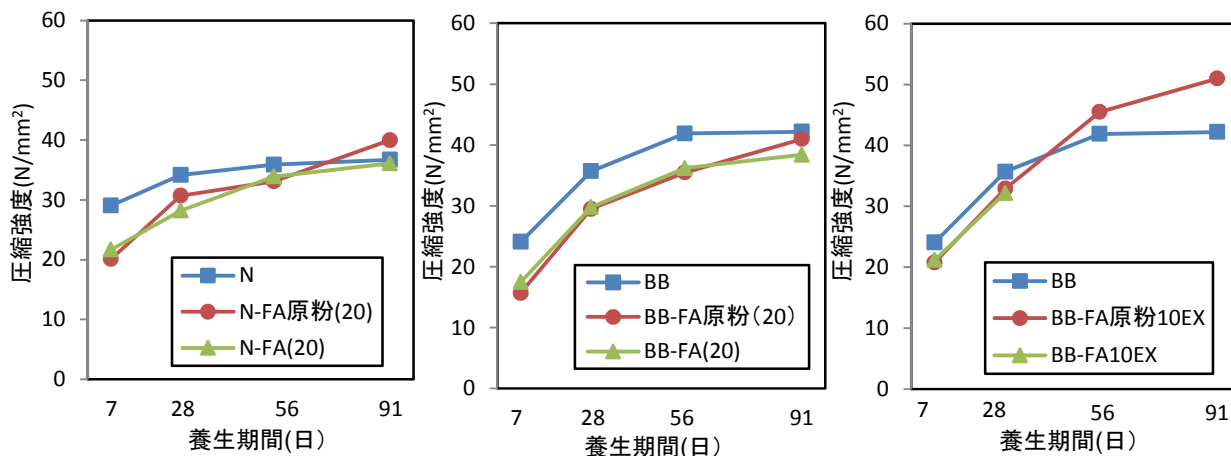


図-6 セメントの種類による圧縮強度

表-5 各配合に対する近似曲線の係数

	BB	FA原粉10EX	FA原粉(20)
a	45.82	50.83	39.06
b	238.66	321.13	349.12

表-7 算出されたFA原粉の養生日数

平均温度	FA原粉10EX	FA原粉(20)
20°C	9日	18日
10°C	13日	24日

表-6 コンクリート標準示方書の養生期間基準

日平均温度	普通ポルトランドセメント	混和セメントB種	早強ポルトランドセメント
15°C以上	5日	7日	3日
10°C以上	7日	9日	4日
5°C以上	9日	12日	6日

温度の違いによって、BBと比較して強度の発現性に違いが見られた。BB-FA原粉(20)の圧縮強度は、材齢7日では、いずれの養生温度でもBBよりも小さい。材齢91日になると、20°C養生を行ったものは同程度となっているが、それ以外の養生温度では小さくなっている。一方、BB-FA原粉10EXの圧縮強度は、10°C、20°C養生において材齢7日では、BBよりも小さいが、材齢91日になると、同程度もしくは、それ以上になる結果を示した。養生温度30°Cの場合には、初期材齢ではBBよりも大きいですが、材齢91日になると同程度となっている。

図-4は、配合ごとに20°C養生に対する圧縮強度比の経時変化を示す。BBにおける20°C養生に対する強度発現性は、10°C養生の場合には初期に小さく徐々に強度が増加する傾向を示した。30°C養生になると、いずれの材齢においても同程度となっており、BBの場合には、低温養生になると強度発現性が遅くなる傾向にあった。

FA原粉(20)においては、10、30°C養生共に初期材齢での強度発現性は20°Cとあまり差はないが、材齢が経つに従って小さくなっている。したがって、養生温度の影響が顕著に現れることが明らかとなった。

FA原粉10EXの場合は、10°C養生では、いずれの材齢でも小さく、30°C養生では、初期材齢で顕著に大きくなっている。以上のことから、いずれの配合においても、

低温養生になると強度発現性が遅延され、FA原粉10EXの場合には、高温養生になると強度発現が顕著に現れることが分かった。

図-5は、積算温度と圧縮強度の関係を示す。各配合とも、概ね分数関数による近似曲線上に現れており、積算温度による圧縮強度を示すことができると考えられる。

表-5は、各配合に対する近似曲線の係数を示す。係数aは、値が大きいものほど終局的な強度は大きくなり、係数bは値が小さいものほど強度発現が速くなる。係数aは、終局的な強度の大きい順に、BB-FA原粉10EX>BB>BB-FA原粉(20)となった。係数bはBBとFA原粉を混和したものとでは著しく異なっており、コンクリートの強度発現速度が速い順に、BB>BB-FA原粉10EX>BB-FA原粉(20)となった。また、コンクリート標準示方書に示されるBBの配合の表-6に示される養生期間の標準日数から強度を求めた。そのBB配合と同等の強度になるために必要なFA原粉配合の養生日数を式(2)と各配合の近似曲線の係数から求めた。その結果を表-7に示す。この結果から、BBおよびBB-原粉10EXは同程度の養生日数になったのに対して、BB-FA原粉(20)においては約2倍の養生日数となった。

3.2 FA JIS II種灰との比較

図-6に、FAJIS II種灰と併せて20°C養生におけるセメントの種類による圧縮強度を示す。いずれの養生温度や材齢に拘らず、FAJIS II種灰とFA原粉の強度は同程度となっており、FAJIS II種灰およびFA原粉の配合の違いにおける強度発現性に差は確認されなかった。

3.3 電気泳動試験および塩水浸漬試験

図-7に、配合ごとの実行拡散係数を示す。いずれの養生期間でもFAを混和した配合は、無混和のNと比較

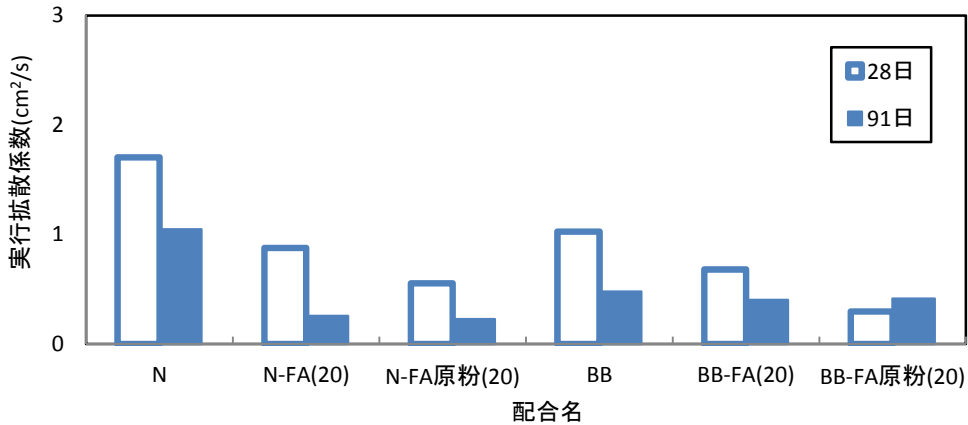


図-7 配合ごとの実行拡散係数

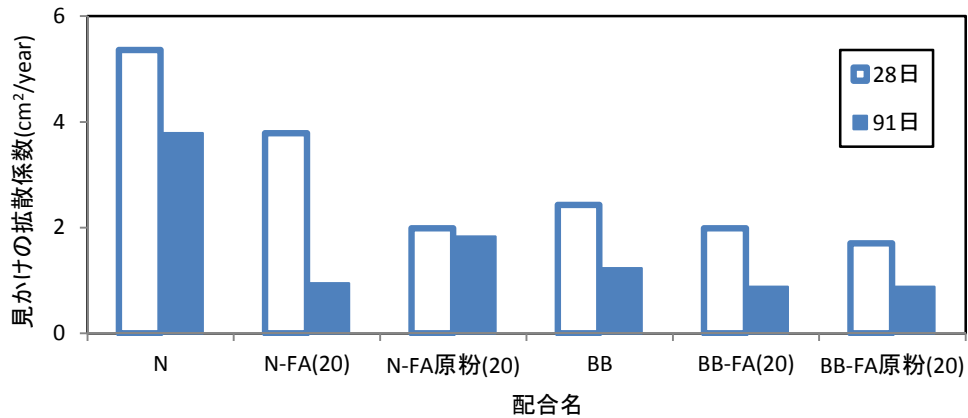


図-8 配合ごとの見かけの拡散係数

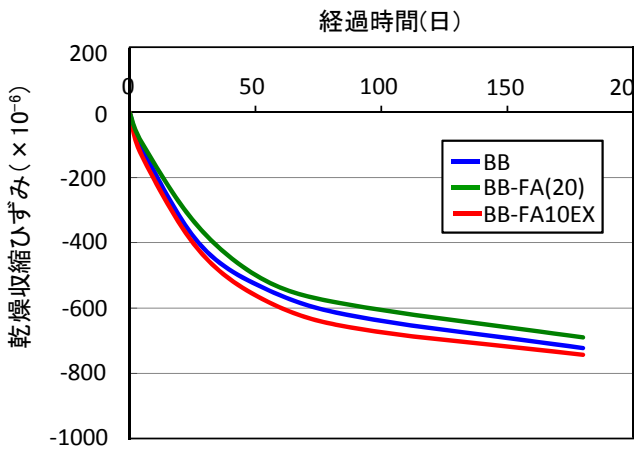


図-9 FA JIS II 種灰の乾燥収縮ひずみ

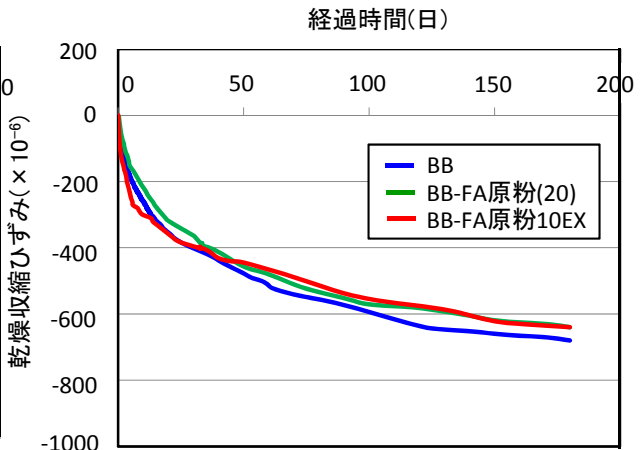


図-10 FA 原粉の乾燥収縮ひずみ

すると、N-FA(20)およびN-FA 原粉(20)のいずれも、実行拡散係数が小さくなっており、塩化物イオンに対する抵抗性の向上が確認された。これは、FA を混和したことで、ポズラン反応によって塩化物イオンの固定量が増加したことや緻密化されて空隙量が減少したなどが影響したと考えられる。また、N-FA 原粉(20)とN-FA(20)の間には、明確な差は確認されなかった。一方、BB においてもNにFAを混和した場合と同様に、いずれも実効拡散係数が低下していることが確認された。

図-8に、配合ごとの見かけの拡散係数を示す。FAJIS

II種灰と原粉ともにセメント種類に拘らず、見かけの拡散係数が低下している。

以上のことから、FA 原粉は、FA JIS II 種灰と同様に塩化物イオン抵抗性が発揮されることが確認された。

3.4 乾燥収縮試験

図-9に、FA JIS II 種灰をBBに混和した場合の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す⁹⁾。BB-FA(20)は初期での収縮ひずみは、無混和のBBよりも低減される結果を示した。一方の、BB-FA10EXは初期に大きく収縮しているが、その後は、BB同程度であった。これは、FAの減水効果

によって単位水量の低減が影響したことが考えられ、特に、内割り配合において、その結果が顕著に現れている。

図-10 に、FA 原粉を BB に混和した場合の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。BB-FA 原粉(20)は、BB に比べて収縮ひずみが低減されている。一方の、BB-FA 原粉 10EX は、初期において急速な収縮が確認されたが、それ以降は BB-FA 原粉(20)と同様の結果を示し、BB よりもむしろ低減する結果となった。これは、FA 原粉も FA JIS II 種灰と同様の減水効果によって、BB-FA 原粉(20)および BB-FA 原粉 10EX ともに収縮ひずみは減少したと考えられる。以上の結果から、FA 原粉は FA JIS II 種灰と同程度の乾燥収縮抑制効果が確認された。

4. まとめ

本試験において、以下のことが明らかとなった。

- (1) 低温養生になると強度発現が遅延するが、FA 原粉を細骨材に置換した場合には、高温養生になると顕著な強度発現性が得られた。
- (2) 分数関数による近似曲線により、FA 原粉の配合に拘らず、圧縮強度は積算温度で示すことができる。
- (3) 養生期間は、FA 原粉をセメントに置換した場合には、長くなるが、細骨材に置換した場合には同程度となる。
- (4) FA 原粉の強度発現性は、FA JIS II 種灰と同様であり、また、塩化物イオンおよび乾燥収縮特性においても差はなかった。

以上の結果から、メチレンブルー吸着試験結果は FA 原粉を混和したコンクリートの物性に影響せず、FA JIS

II 種灰と同程度の圧縮強度、塩化物イオンに対する抵抗性および乾燥収縮特性を得られることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 国土交通省 九州地方整備局：九州地区における土木コンクリート構造物の設計・施工指針試行(案)，pp.89-108，平成 17 年 3 月
- 2) 佐藤幸三，五十嵐心一，秋田有一，小林智仁：原粉石炭灰を大量に使用した吹付けコンクリートの吹付け実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.143-148，2003
- 3) 松藤泰典，磯辺敏幸，小山智幸，重富光人：石炭灰をコンクリートに大量使用するための安定化処理に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.115-120，2000
- 4) 長瀧重義，大賀宏行，増田和機，谷直樹：フライアッシュコンクリートに大量使用するための安定化処理に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.223-228，1987
- 5) 久我龍一朗，千葉裕人，久田真，岩城一郎：高炉セメントコンクリートの強度発現性に及ぼす養生条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.437-442，2006
- 6) 崔林，樋原弘貴，添田政司，大和竹史：フライアッシュと高炉セメントを用いた拘束された円環状コンクリートの乾燥収縮特性，土木学会西部支部研究発表会，V-22，pp.675-676，2011.3