

暑中環境下で施工されるフライアッシュコンクリートの諸物性：実大模擬試験体による検討

徐, 元遇

九州大学大学院人間環境学研究院空間システム専攻：博士後期課程

小山, 智幸

九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

小山田, 英弘

北九州市立大学

白川, 敏夫

九州産業大学

他

<https://doi.org/10.15017/4769754>

出版情報：都市・建築学研究. 39, pp.69-77, 2021-01-15. Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

バージョン：

権利関係：

暑中環境下で施工されるフライアッシュコンクリートの諸物性 - 実大模擬試験体による検討 -

Properties of Fly Ash Concrete Constructed in Hot Weather Environment - Examination on the Full Scale Specimens -

徐 元遇*¹, 小山智幸*², 小山田英弘*³, 白川敏夫*⁴
伊藤是清*⁵, 藤田隆仁*⁶, 倉田慎太郎*⁷

Wonwoo SEO, Tomoyuki KOYAMA, Hidehiro KOYAMADA, Toshio SHIRAKAWA,
Korekiyo ITO, Takahito FUJITA, Shintaro KURATA

This study reviewed the strength development, durability, and structural strength correction values of concrete replaced with fly ash in the hot weather environment. The fly ash used in this experiment is three types of different production areas and each fly ash was used to make a full-scale column and slab test specimens. Results of the review, the column specimens mixed with fly ash (replacement rate of 20%) had a maximum temperature of about 10 °C lower than in the case of cement-only under the hot weather environment. In addition, when fly ash was used, drying was suppressed, and the S value tended to decrease. Furthermore, it was confirmed that there is a correlation between the results of the non-destructive test and the carbonation rate.

*Keywords : Hot weather environment, Fly-ash, Structural strength correction value, Air permeability
Absorption coefficient, Carbonation coefficient*

暑中環境, フライアッシュ, 構造体強度補正值, 通気係数, 吸水速度係数, 中性化速度係数

1. はじめに

フライアッシュをコンクリートにセメント内割混合で使用する場合、セメント単味の調合と比較して初期強度発現の低下が問題となるが、暑中環境下では高温により硬化が促進されるため悪影響が小さいと予想される。さらに、フライアッシュを内割使用したコンクリートは水和熱低減が図れるため、温度ひび割れの防止や長期強度の増進など、暑中環境における種々の不具合の抑制効果が期待できる。ただし、このような暑中コンクリート対策としてのフライアッシュの効果、逆に言うとフライ

アッシュの欠点を暑中期に用いることで改善できるメリットについて、構造体レベルでの検証は十分であるとはいえ、構造体強度補正值 (S 値) についてもいまだ議論がなされているところである。また、フライアッシュを内割使用したコンクリートは、ポゾラン反応によって水酸化カルシウムが減少するため中性化速度が大きくなりやすいなど、耐久性の低下が懸念される。そこで本稿では、産地の異なるフライアッシュを用いて置換率を変化させた実大レベルの試験体を作製し、暑中期と標準期を比較しながら、強度発現性や耐久性状を把握、ならびに適切な構造体強度補正值を提案することを目的とする。

2. 実験概要

本実験では、まず、普通ポルトランドセメント単味 (以下 NPC 単味) のコンクリートに対してフライアッシュ置換率のみを変化させた場合の特性の違い、および実施で使用される調合条件におけるフライアッシュコンクリートの特性を把握するため、2 つの実験を行った。実験 I では強度管理材齢や単位水量を固定して比較を行った。

*1 空間システム専攻 博士後期課程

*2 都市・建築学部門

*3 北九州市立大学

*4 九州産業大学

*5 北九州市立大学

*6 竹中工務店大阪本店

*7 空間システム専攻 修士課程

表1 コンクリートの調合

区分	記号	W/B (%)	s/a (%)	air (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (kg/m ³) 暑中期(標準期)	単位容積質量 (kg/m ³)	
					W	C	FA-A	FA-B	FA-C	S			G
実験 I	①NPC	53	45.0	4.5	185	350	-	-	-	763	985	4.55(8.05)	2283
	②FA20-A		44.4			280	70	-	-	743		4.02(7.52)	2263
	③FA20-B		44.3	280		-	70	-	740	4.02(7.52)		2260	
	④FA20-C		44.4	280		-	-	70	745	4.02(7.52)		2265	
	⑤FA40-A		43.7	210		140	-	-	722	3.50(2.45)		2242	
実験 II	①NPC	47	43.3	4.5	185	394	-	-	-	717	992	4.73(4.73)	2288
	②FA20-A		43.2		306	77	-	-	714	4.60(4.60)		2274	
	③FA20-B		43.2	306	-	77	-	714	4.60(4.60)	2274			
	④FA20-C		43.3	306	-	-	77	720	4.60(4.60)	2280			

※呼び強度：27N/mm² (実験 I)， 33N/mm² (実験 II) 目標スランプ：18±2.5cm 混和剤：AE 減水剤 (暑中期は遅延型)
 ※W/B:水結合材比, s/a:細骨材率, air:空気量, W:単位水量, C:単位セメント量, FA-A~C:単位フライアッシュ量, S:単位細骨材量, G:単位粗骨材量

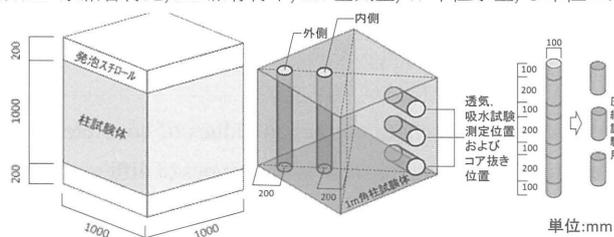


図1 柱試験体

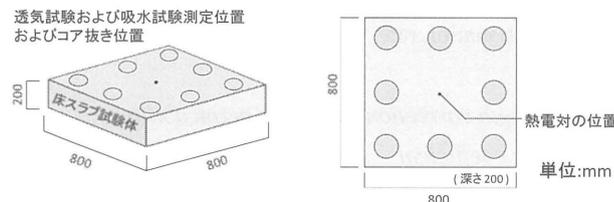


図2 床試験体

実験 II では、フライアッシュを用いる場合の一般的な状況を考慮して、供試体の強度管理材齢を NPC 単味コンクリートでは 4 週、フライアッシュコンクリートでは 8 週とし、単位水量はレディミクストコンクリート工場の標準配合に準拠する形でフライアッシュの置換率が大きくなるにつれて低減させた。また、本実験では、暑中コンクリート工事が適用される期間における構造体強度補正值 S を検討する場合、現場で供試体の脱型するまで温度管理が構造体強度補正值 S に及ぼす影響を検討するために、それぞれ JASS 5 の 1 節で定義されている「標準養生」に従い 20±3℃で管理した場合（設定温度 20℃の養生室に静置）と、同 11 節の表 11.9 注書きの緩和規定を適用して 20±10℃で管理した場合（脱型までの実験棟平均温度は実験 I で 34.7℃、実験 II で 29.4℃）に設定した。ただし、本実験における打ち込みから当日 24 時までの実験棟内の平均温度は、実験 I (2018 年) の場合 40.4℃、実験 II (2019 年) の場合 31.9℃と、前者の温度は同じ暑

中期でも高かった。

表 1 にコンクリートの調合を示す。本実験では国内の産地の異なる三種類のフライアッシュを用いた（それぞれ FA-A, FA-B, FA-C とする）。まず、基準となる NPC 単味の調合を①NPC とし、それに対してフライアッシュを内割で 20%置換したものをそれぞれ②FA20-A, ③FA20-B, ④FA20-C とした。また、FA-A を用いて内割で 40%置換したものを⑤FA40-A (実験 I のみ) とし、計 5 種類の調合で実験を行った。

試験体の概要を図 1, 図 2 に示す。実験では、RC 造建築物の柱および床部材を想定した試験体をそれぞれ作製した。柱試験体は、寸法を幅 1000mm×奥行 1000mm×高さ 1000mm とし、上下面を厚さ 200mm の断熱材で覆った。熱電対により内部温度を測定した後、NPC は材齢 5 日、FA は 7 日で脱型し、それ以降は実験棟内に静置した。床試験体は、寸法を上面の縦横がいずれも約 800mm で高さ 200mm とした。養生方法は、無養生、表面をポリ塩化ビニル製のシートで覆って水分の蒸発を防いだシート養生、常に水分を供給する給水養生の 3 種類を採用した。

測定項目は、フレッシュコンクリートに関しては JIS に準拠し、スランプ、空気量、コンクリート温度、ブリーディング、凝結試験を行った。また、直径 280mm×高さ 250mm の円筒型の型枠に高さ 200mm まで試料を詰め、その質量変化から蒸発量を求めた。供試体の圧縮強度試験は直径 100mm×高さ 200mm の供試体を用い、材齢 7 日、28 日、56 日 (実験 II のみ)、91 日、365 日 (実験 I の暑中期を除く) に行った。

また、柱試験体において材齢 28 日、56 日 (実験 II のみ)、91 日、365 日 (実験 I, II の標準期のみ) に、図 1 に示したように、外側および内側から鉛直方向に高さ 1000mm のコアを各部材に対して 2 カ所ずつ採取し、直径 100mm×高さ 200mm の試験体 3 体を切り出し、圧縮強度を測定した。また、材齢 91 日に各柱試験体から高さ

表 2 スランプおよび空気量

記号	実験 I						実験 II					
	暑中期 (30.0℃) 1)			標準期 (14.3℃) 1)			暑中期 (28.0℃) 1)			標準期 (14.9℃) 1)		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 2) (℃)									
①NPC	19.0	3.9	34.5(33.0)	20.0	4.5	20.0(20.0)	18.5	5.6	32.5(32.0)	20.0	4.6	21.0(21.0)
②FA20-A	19.5	3.5	34.4(34.0)	20.0	3.5	22.0(21.0)	20.0	4.8	33.0(34.0)	20.5	5.3	23.0(25.0)
③FA20-B	19.0	3.5	34.0(32.0)	18.5	3.2	22.0(22.0)	19.0	3.5	33.0(34.0)	20.0	4.5	23.5(24.0)
④FA20-C	20.5	3.6	33.4(32.0)	18.5	4.6	23.5(23.0)	20.0	4.6	33.5(34.0)	19.0	4.7	23.5(25.0)
⑤FA40-A	19.0	3.5	33.0(31.0)	20.0	5.4	22.5(23.5)	-	-	-	-	-	-

※1)打設後1ヶ月の平均気温、2)括弧内は練上がり時のコンクリート温度、括弧外は受入れ時のコンクリート温度

約 200mm, 500mm, 800mm の位置で非破壊試験として透気試験 1)および吸水試験 2)を行った後、水平方向に促進中性化試験用のコアを3本ずつ採取した。床試験体では材齢 91 日に透気試験および吸水試験を行った後、鉛直方向にコアを抜き、強度試験、ならびに柱試験体と同様に促進中性化試験に供した。

3. 実験結果および考察

3.1 スランプ、空気量およびコンクリート温度

表 2 に打込み時のスランプおよび空気量を示す。スランプと空気量の試験結果、それぞれ目標とした 18±2.5cm と 4.5±1.5% を満足し、また、フライアッシュの内割置換により、所定のスランプを得るための化学混和剤の使用量が低減できた。受入れ時のコンクリート温度に関しては、今回の実験では出荷から受入れまでの時間は 30~60

分程度であったが、実験 I、実験 II ともフライアッシュ置換による温度低減効果は確認されなかった。

3.2 柱内部温度

図 3 に暑中期および標準期における柱試験体中心部の温度経時変化を示す。実験 I、実験 II のいずれも暑中期の内部温度が標準期と比べて高くなり、最高温度に到達するまでの時間も短かった。

実験 I の暑中期では NPC, FA20-A, FA20-B, FA20-C, FA40-A 順に最高温度がそれぞれ 75.5, 68.9, 65.1, 66.7, 59.7℃ となった。フライアッシュをセメントに対し 20% 置換した試験体は NPC 単味の試験体よりも最高温度が 6.6~10.4℃ 低くなり、40% 置換した試験体は 16.0℃ 低くなった。実験 I の標準期では NPC, FA20-A, FA20-B, FA20-C, FA40-A 順に最高温度がそれぞれ 55.7, 51.3,

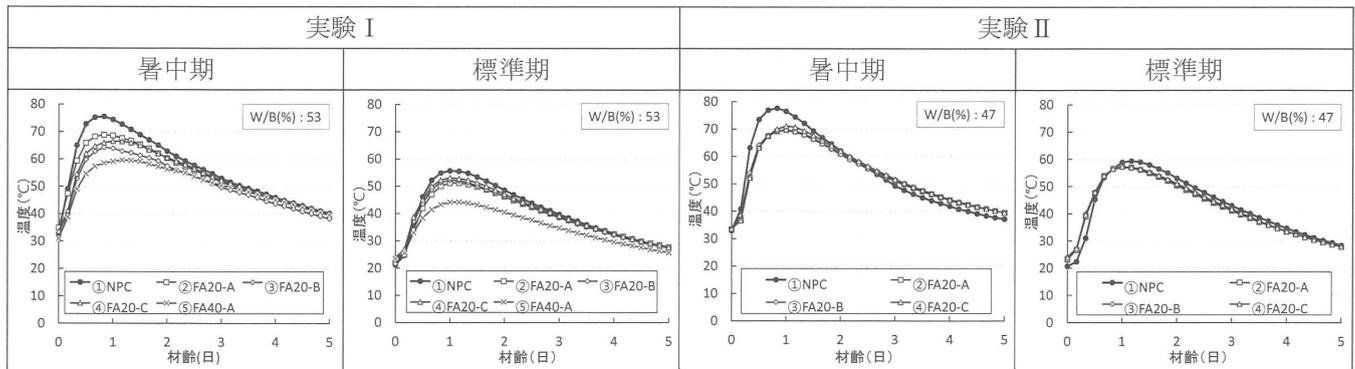


図 3 柱試験体の内部温度履歴 (中心部)

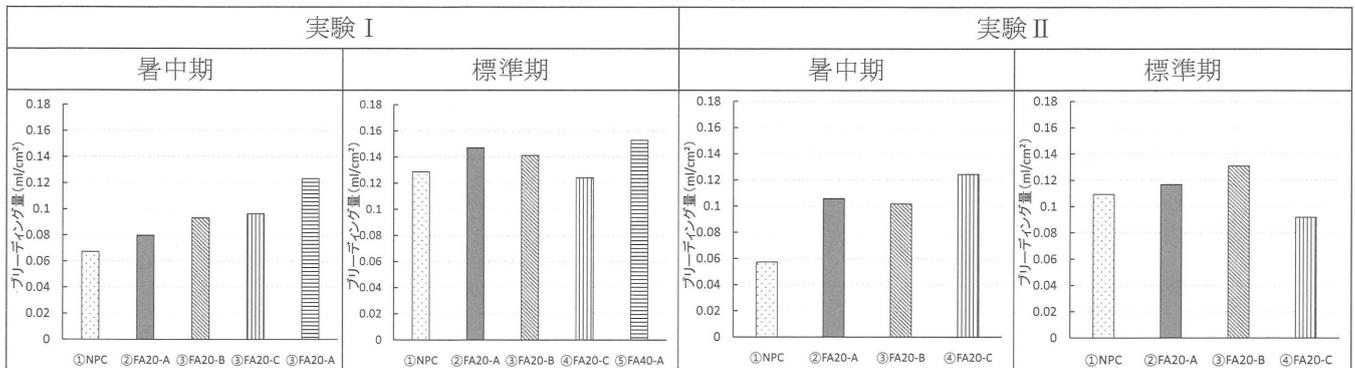


図 4 ブリーディング量

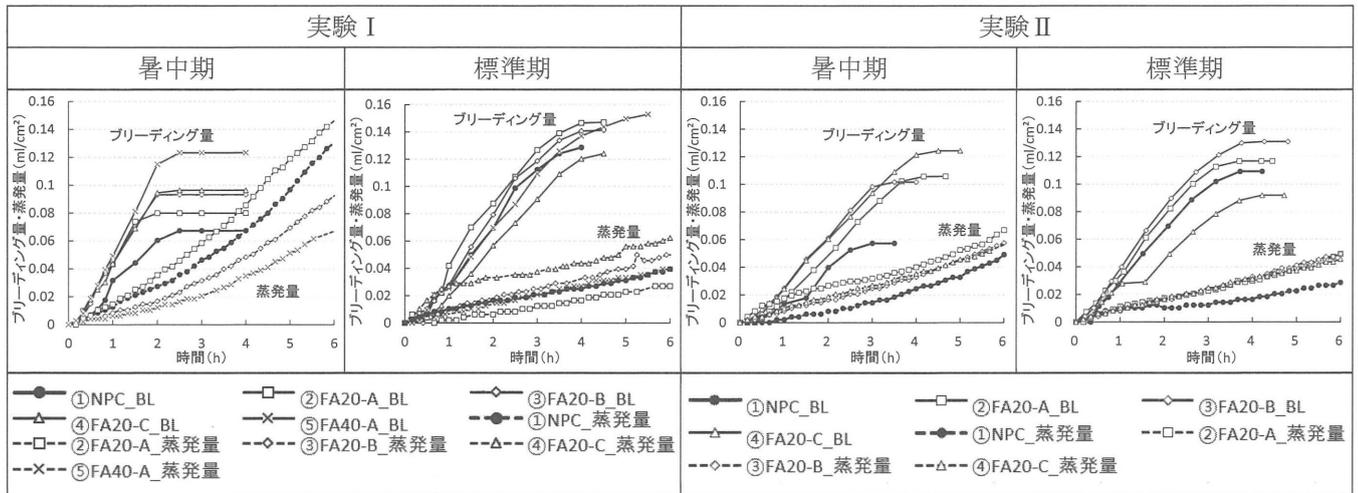


図5 ブリーディング量および蒸発量

52.2, 53.3, 44.3℃となり、暑中期と同様に、フライアッシュを置換することによって最高温度が 20%置換では 2.4~4.4℃、40%置換では 11.4℃低くなった。また、実験 II においてもフライアッシュの置換によって暑中期で 6.6~8.1℃、標準期で 2.1~2.4℃低くなり、フライアッシュの置換により最高温度は低くなる傾向が確認できた。また、フライアッシュの内割置換による温度低減効果は、暑中期の方が標準期よりも大きかった。

3.3 ブリーディングおよび蒸発量

図 4 に実験 I, 実験 II のブリーディング量測定結果を示す。全体として、標準期よりも暑中期のブリーディング量が小さく、NPC 単味と比較してフライアッシュを置換した試験体のブリーディング量が多くなる傾向が見られた。図 5 に実験 I, 実験 II におけるブリーディングと蒸発量の経時変化を示す。暑中期は標準期よりもブリーディング終了時間が短く、試験体表面のブリーディング

表 3 圧縮強度測定結果

試験体 ID			圧縮強度 (N/mm ²)								
			供試体					柱試験体			
			7 日	28 日	56 日	91 日	1 年	28 日	56 日	91 日	1 年
実験 I (W/B 53%)	暑中期	NPC	24.5	30.3 (33.7)	-	32.5	-	26.8	-	28.8	-
		FA20-A	17.3	26.2 (27.8)	-	33.6	-	28.2	-	29.8	-
		FA20-B	18.5	24.2 (28.1)	-	32.5	-	26.2	-	29.3	-
		FA20-C	16.6	24.6 (27.8)	-	32.6	-	27.2	-	29.4	-
		FA40-A	10.5	17.7 (19.7)	-	25.1	-	22.6	-	25.3	-
	標準期	NPC	22.3	28.5 (35.6)	-	33.8	35.3	28.7	-	29.4	35.1
		FA20-A	19.6	28.0 (33.5)	-	38.0	45.7	27.9	-	33.8	34.4
		FA20-B	21.1	29.5 (33.2)	-	39.1	46.1	28.5	-	34.3	30.9
		FA20-C	20.4	29.0 (34.2)	-	39.8	48.1	28.8	-	33.3	32.7
		FA40-A	11.6	18.8 (22.6)	-	28.7	38.1	19.4	-	23.9	30.9
実験 II (W/B 47%)	暑中期	NPC	29.6 (29.2)	35.5 (39.1)	(42.0)	(44.0)	(44.9)	34.6	37.7	35.5	-
		FA20-A	21.5 (22.5)	(33.5)	35.9 (39.4)	(44.0)	(52.2)	34.2	34.8	35.7	-
		FA20-B	25.7 (25.4)	(38.0)	42.7 (43.9)	(48.0)	(56.9)	36.4	35.6	39.6	-
		FA20-C	22.7 (23.9)	(36.9)	40.4 (43.2)	(46.7)	(45.1)	35.6	37.4	36.7	-
	標準期	NPC	28.5 (28.9)	39.9 (39.4)	44.3 (43.1)	(46.0)	50.9	34.1	39.1	39.1	42.9
		FA20-A	19.9 (20.1)	29.2 (28.7)	33.5 (34.2)	(38.4)	44.8	21.7	27.9	27.3	36.5
		FA20-B	22.1 (21.0)	31.1 (29.2)	36.9 (35.3)	(40.3)	47.4	28.5	31.3	33.5	-
		FA20-C	23.0 (21.8)	31.6 (33.6)	41.4 (39.3)	(43.1)	50.9	28.2	33.4	34.1	-

※括弧内の数値は、実験 I は工場、実験 II は実験棟で翌日の脱型まで 20℃±3℃で養生した供試体の強度

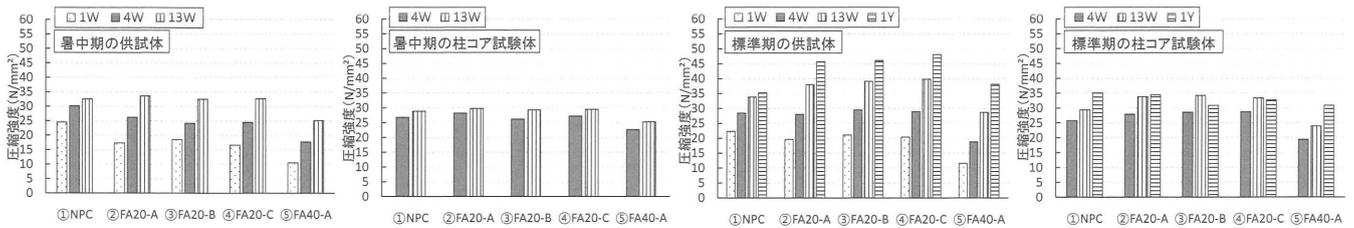


図6 圧縮強度の発現性状（実験Ⅰ）

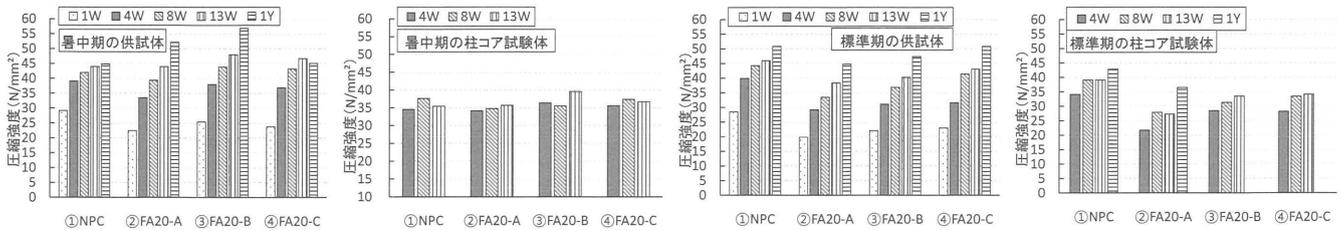


図7 圧縮強度の発現性状（実験Ⅱ）

水が蒸発する速度も大きい傾向が見られる。床コンクリートなどの上面における乾燥は、ブリーディング量に対して蒸発量が大きくなる場合に顕著になると考えられるが、測定結果から暑中期においてこの傾向が強くなるのがわかる。また、ブリーディング終了時におけるブリーディング量と蒸発量の差は、暑中期において NPC 単味の場合は $0.03\text{ml}/\text{cm}^2$ 、FA20-A は $0.04\text{ml}/\text{cm}^2$ 、FA40-A は $0.11\text{ml}/\text{cm}^2$ 、標準期においては NPC 単味の場合、 $0.10\text{ml}/\text{cm}^2$ 、FA20-A は $0.13\text{ml}/\text{cm}^2$ となり（いずれも実験Ⅰ）、フライアッシュを混合した試験体は、NPC 単味の場合と比較して、蒸発量に対するブリーディング量の割合が大きくなった。

3.4 圧縮強度

表3および図6, 7に、それぞれの実験で得られた圧縮強度を示す。柱試験体はそれぞれの試験体から外側と内側の2本ずつコアを採取したが、外側と内側の圧縮強度は内側の方が若干大きくなる程度で、すべての柱試験体

において大差が見られなかった。したがって、柱コア強度は内側および外側の平均値とした。なお、図6では表3に示している実験Ⅰにおける供試体の括弧外の値、および柱試験体の値を、図7は表3に示している実験Ⅱにおける供試体の括弧内の値、および柱試験体の値を例示している。ここで、表3の括弧内の数値は、実験Ⅰでは実験棟に隣接する工場、実験Ⅱでは実験棟で、翌日脱型までを $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ で養生した供試体の強度であり、括弧外は実験棟内で温度制御を行わずに ($\pm 10^\circ\text{C}$ 程度) 静置した場合の値である。標準養生供試体においては、フライアッシュを内割使用した場合は NPC 単味の場合と比較して材齢1週における初期強度の発現は小さいが、その後増進し、置換率20%の調合では材齢13週以降で同等以上の値となり、同じく40%の調合では材齢1年には同等以上となった。柱模擬試験体における長期強度の増進に関して、材齢28日と91日における強度の比は、暑

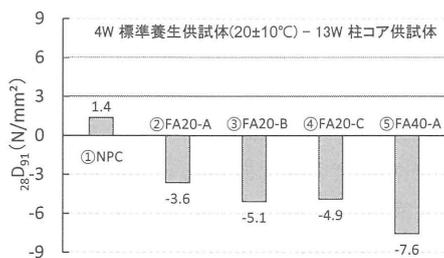


図8 圧縮強度の差 ${}_{28}D_{91}$ （実験Ⅰ）

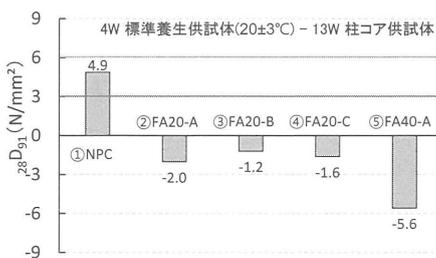


図9 圧縮強度の差 ${}_{28}D_{91}$ （実験Ⅰ）

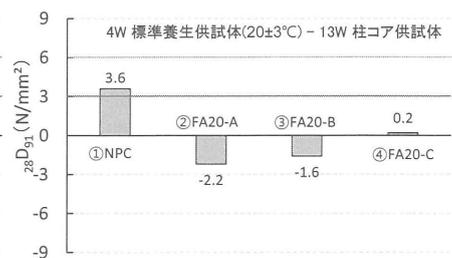


図10 圧縮強度の差 ${}_{28}D_{91}$ （実験Ⅱ）

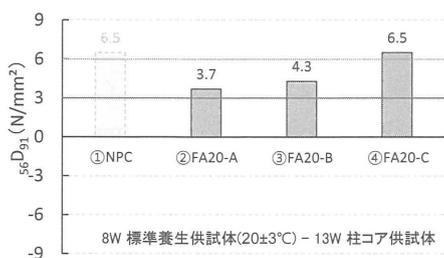


図11 圧縮強度の差 ${}_{56}D_{91}$ （実験Ⅱ）

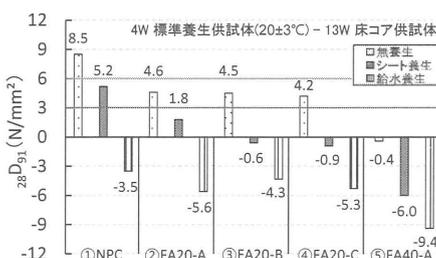


図12 圧縮強度の差 ${}_{28}D_{91}$ （実験Ⅰ）

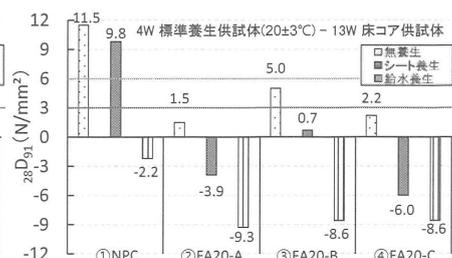


図13 圧縮強度の差 ${}_{28}D_{91}$ （実験Ⅱ）

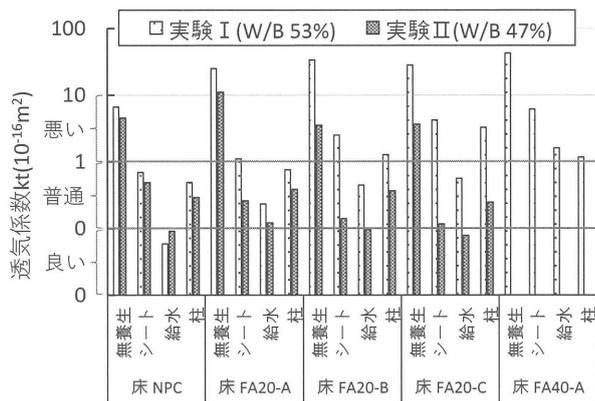


図 14a) 表層透気係数 kt (暑中期)

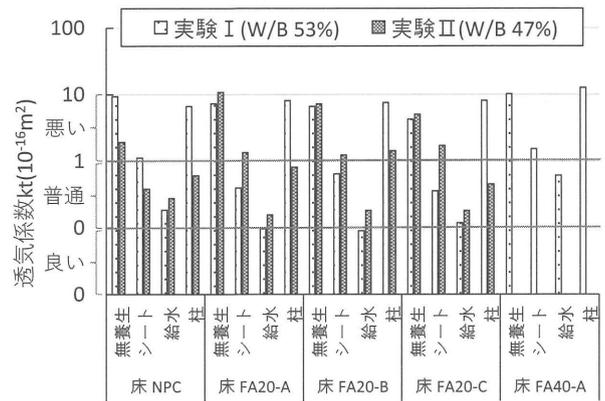


図 14b) 表層透気係数 kt (標準期)

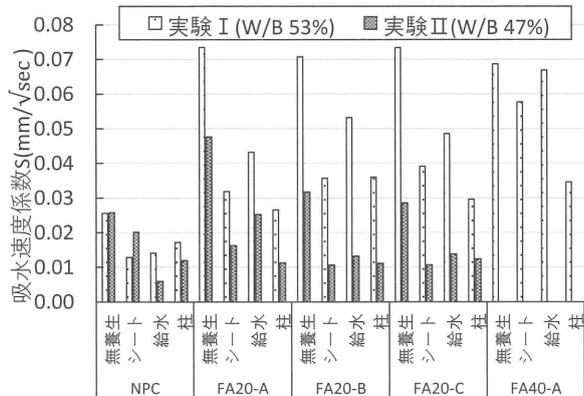


図 15a) 吸水速度係数 S (暑中期)

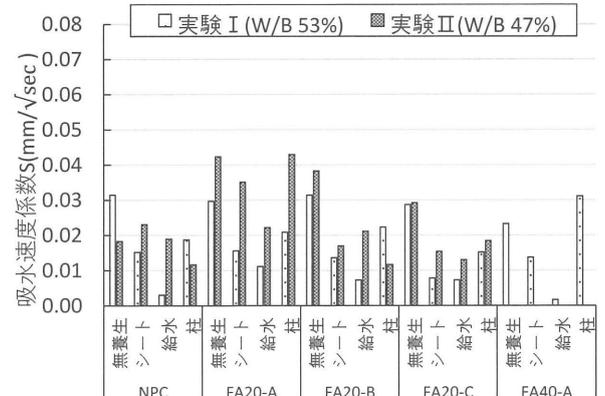


図 15b) 吸水速度係数 S (標準期)

中期では NPC 単味が 1.03~1.07 に対し FA20 で 1.03~1.12 程度、標準期で NPC 単味 1.02~1.15 に対し、FA20 で 1.16~1.26 となった。なお、フライアッシュの産地の違いによる影響に関しては、強度に関して若干の大小があるものの、極端な違いは認められなかった。

3.5 構造体強度補正值 S (S 値)

材齢 28 日における標準養生供試体の圧縮強度と材齢 91 日において柱試験体から採取したコアの圧縮強度の差 (以下、 $_{28}D_{91}$) について、実験 I の暑中期において供試体を脱型まで $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ の実験棟で養生した場合について図 8 に示す。セメント単味の調合では $_{28}D_{91}$ が $1.4\text{N}/\text{mm}^2$ となり、JASS5 における構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は $3\text{N}/\text{mm}^2$ に収まる結果となった。フライアッシュを置換した柱試験体では、すべての調合でコア強度が供試体強度を上回り、 $_{28}D_{91}$ は $0\text{N}/\text{mm}^2$ 未満となった。図 9 に同じ実験 I の暑中期において、 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ で管理した場合の $_{28}D_{91}$ を示す。セメント単味のものでは $_{28}D_{91}$ が $4.9\text{N}/\text{mm}^2$ となり $_{28}S_{91}$ は $6\text{N}/\text{mm}^2$ とするのが適切であるとの結果となった。一方、フライアッシュを置換した柱試験体ではこの場合も $0\text{N}/\text{mm}^2$ を下回る結果となった。この結果と比較をするために、実験 II のフライアッシュを置換した W/B47% 供試体の管理材齢は 56 日であるが、これを 28 日として構造体強度補正值 S を検討した結果を図 10 に示す。実験 I と同様に、セメント単味のものでは $_{28}D_{91}$ が $3.6\text{N}/\text{mm}^2$ となり、 $_{28}S_{91}$ は $3\text{N}/\text{mm}^2$ では不足するの

対し、フライアッシュを置換したものでは $3\text{N}/\text{mm}^2$ より小さい値でよいと判断される。以上のことから、フライアッシュを内割置換した場合には構造体強度補正值 S の検討値は NPC 単味の場合と比べて小さくなる傾向にあることがわかる。また、検討した D 値は管理温度によって異なる値を示すため、暑中コンクリート工事における期間に構造体強度補正值 S を検討する場合には、供試体の脱型までの温度管理が重要であり、温度が高い場合には S 値を小さく設定してしまう危険性があることが明らかとなった。

実験 II においてもともと設定した供試体の管理材齢 56 日における強度と材齢 91 日における構造体強度の差 (以下、 $_{56}D_{91}$) を暑中期について図 11 に示す。セメント単味の供試体とフライアッシュを置換した供試体のすべてにおいて $3\text{N}/\text{mm}^2$ を上回る値を示した。この結果から $_{56}S_{91}$ の値は少なくとも $6\text{N}/\text{mm}^2$ とすべきことがわかる。

図 12、13 に暑中期における床試験体の $_{28}D_{91}$ の検討結果を示す。NPC 単味の場合、無養生とシート養生では $_{28}S_{91}$ が少なくとも $6\text{N}/\text{mm}^2$ 、給水養生では $_{28}D_{91}$ が $0\text{N}/\text{mm}^2$ を下回る結果となった。これに対して、フライアッシュを置換した場合は、多くの場合に $_{28}S_{91}$ が $3\text{N}/\text{mm}^2$ で十分であるという結果となり、床部材においても柱部材同様、フライアッシュ混合による強度の面での利点を確認された。ただし、無養生の場合など一部の供試体においては $3\text{N}/\text{mm}^2$ では不足であり、フライアッシュを用いた場合に

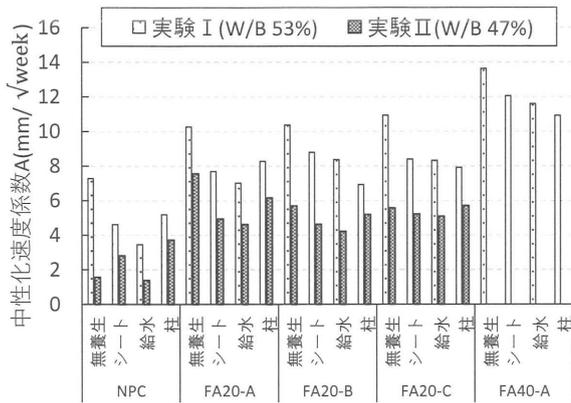


図 16 中性化速度係数 A (暑中期)

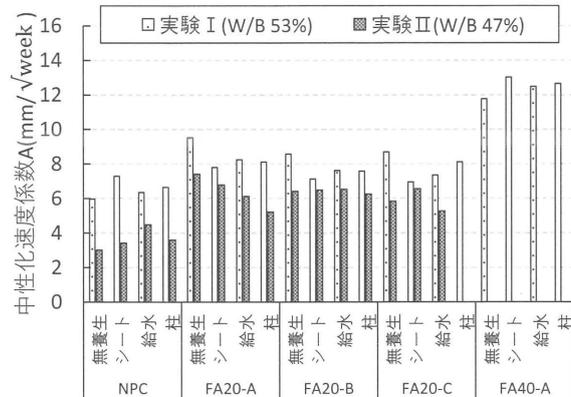


図 17 中性化速度係数 A (標準期)

おいても床部材においては養生が大切であることが示された。

3.6 表層品質の非破壊試験による検討

RC 構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすコンクリート表層部の緻密性を表面透気試験(ダブルチャンバー法)¹⁾と表面吸水試験²⁾により非破壊で検討した。

(a) 透気試験による検討

透気性はダブルチャンバー法により、厚さ 200mm の床試験体表面(縦横約 800mm)と 1000mm 角の柱試験体側面の表層透気係数を材齢 91 日に測定した。図 14a), 図 14b) に、実験 I および実験 II において、暑中期ならびに標準期に打ち込んだ各試験体の材齢 91 日における透気係数をそれぞれ示す。図から明らかなように、透気係数に及ぼす養生の影響は大きい。とくに無養生の場合は、給水養生やシート養生を施した場合と比較して、暑中期、フライアッシュを置換した場合、かつ水結合材比が大きい試験体で大きくなる傾向にあった。既往の研究³⁾に示される透気係数による透気係数のグレーディング(0.01~0.1: 良い, 0.1~1: 普通, 1~10: 悪い)にしたがって評価すると、無養生では暑中期、標準期ともにすべての調合において「悪い」の判定となった。これに対して給水養生を施した場合は、ほとんどの条件で「普通」あるいは「良い」の判定となった。シート養生の場合は、両者の中間的な性状を示した。また柱試験体に関しては、シート養生とほぼ同程度の値を示したものが多いが、無

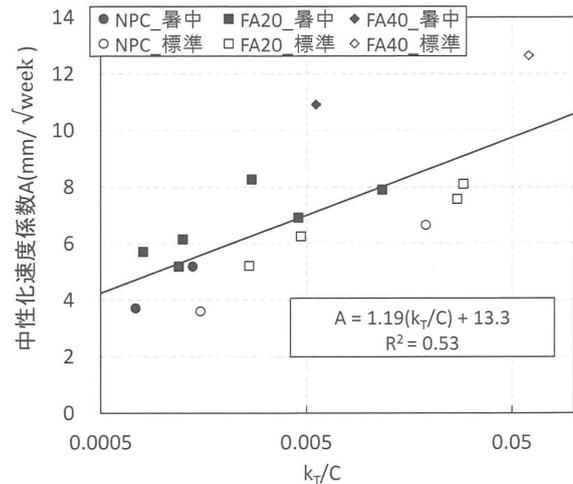


図 18 透気係数 k_t —中性化速度係数 A (柱)

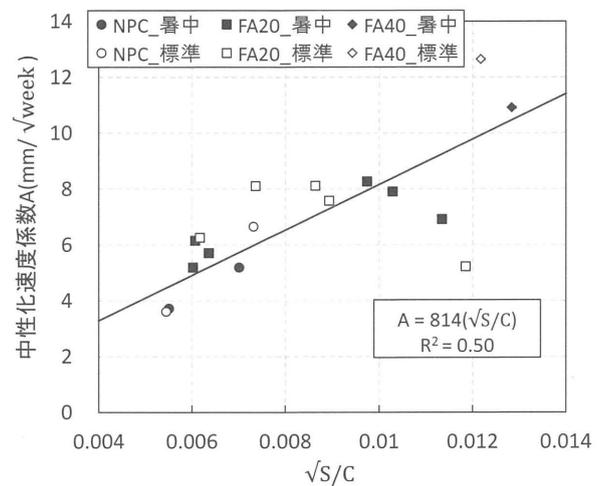


図 19 吸水速度係数 S—中性化速度係数 A (柱)

養生の結果に近いものもあった。柱試験体のせき板存置期間と床試験体の養生継続期間は同じ(NPC: 5 日, FA: 7 日)であったが、ある程度強度が発現するまでせき板を存置検討するとシート養生に近い効果があったものと思われる。以上の結果から、フライアッシュを置換したコンクリートの透気性状の向上を図るためには適切な養生を施すことが重要であることがわかる。

(b) 吸水試験による検討

吸水試験では、既報²⁾に示した装置および方法により水で満たしたチャンバーを試験体に取り付け測定前後のチャンバー内の水位の変化により吸水量を求め、吸水速度係数の測定を行った。図 15a), b) に暑中期と標準期に打ち込んだ床試験体と柱試験体の材齢 91 日における吸水速度係数を示す。全体として透気係数の場合と同様の傾向となっており、養生の影響が、暑中期、フライアッシュを置換した場合、および水結合材比が大きい試験体で大きくなっているが、透気試験と比較して、暑中期と標準期の差が大きい、給水養生の方がシート養生よりも値が大きくなる場合が見られる、などの違いもあった。

両者の位置づけに関しては測定深さの影響も含め、さらに検討が必要である。

3.7 中性化速度の検討

実験Ⅰおよび実験Ⅱにおいて床試験体と柱試験体から材齢 91 日に採取したコアを用いて促進中性化試験を行った結果を図 16, 図 17 に示す。暑中期の中性化速度係数 A は、透気係数や吸水速度係数と同様、フライアッシュ置換率や水結合材比の影響が大きく、置換率が大きい場合や水結合材比が大きい場合に値が大きくなった。また、養生を施した試験体は無養生の試験体に対して中性化速度係数が小さくなった。柱試験体については透気係数と同様、床試験体の結果の中ではシート養生を施したものに最も近い値となった。一方、本実験では、標準期の場合、暑中期の中性化速度係数の測定結果とほぼ同じ値であったが、暑中期と比較して養生方法による中性化速度係数の差は明確ではなかった。

加藤ら⁴⁾や田中ら⁵⁾は Torrent の提案する透気試験により中性化速度係数を推定できるとしている。本研究では、単位セメント量が異なることから加藤らや田中らの式を参考に式 (1) を提案する。

$$A = k_1 \ln\left(\frac{k_T}{C}\right) + k_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、A : 中性化速度係数(mm/√week)
 k_1 , k_2 : 比例係数
 k_T : 透気係数($10^{-16}m^2$)
 C : 単位セメント量(kg/m^3)

一方、白川らは吸水試験により中性化速度係数を推定できるとして、式 (2) を提案している。式 (2) は、炭酸ガスの拡散と炭酸ガスとセメント水和物の反応機構の関係より導き出されている²⁾。

$$A = k_3 \sqrt{\frac{S}{C}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、A : 中性化速度係数(mm/√week), k_3 : 比例係数
 C : 単位セメント量(kg/m^3)
 S : 吸水速度係数(mm/√sec)

式 (1) の両辺に実測値をあてはめたものを図 18 (透気速度係数と中性化速度係数)、式 (2) の両辺に実測値をあてはめたものを図 19 (吸水速度係数と中性化速度係数) に示す。

式 (1)、式 (2) の右辺の値が大きくなるほど中性化速度係数も大きくなる傾向を示した。したがって、この図から中性化速度係数は透気、吸水速度係数と比例関係、セメント量とは反比例関係にあることが分かり、フライ

アッシュ置換率に関係なく単位セメント量によって透気、吸水速度係数と中性化速度係数の関係を説明することができる。

4. まとめ

本研究では、フライアッシュをセメント内割で使用したコンクリートの強度発現性や耐久性状、ならびに適切な構造体強度補正值を把握するため、産地の異なるフライアッシュを用いて置換率を変化させた実大レベルの試験体を作製し、暑中期と標準期を比較しながら検討した。下記に、今回の設定条件下で得られた結果のうち、主なものを示す。

- 1) 柱模擬試験体において、フライアッシュを内割で置換した試験体はセメント単味の場合と比較して、暑中期の最高温度が置換率 20% で最大 10°C 程度低くなった。フライアッシュの置換による温度低減効果は暑中期が標準期より大きかった。このような結果から、フライアッシュの置換による水和熱低減効果を確認した。
- 2) NPC 単味に比べ、フライアッシュを置換した調合のブリーディング終了時間が長くなり、ブリーディング量も増加する傾向が見られた。床部材などでは、暑中期にコンクリート打設面の水分蒸発が早いことを考えると、初期ひび割れの抑止、表面組織の緻密化、均し作業容易性などの効果が期待される。
- 3) フライアッシュを置換した標準養生供試体は、NPC 単味の場合と比較して材齢 4 週までの強度は小さいが、13 週強度は同等以上となり長期における強度増進を示した。柱部材を模擬した試験体では、暑中期に、材齢 4 週で NPC 単味と同等以上の強度を発現したが、以降の増進は NPC 単味と同程度であった。また、標準期の方が 4 週以降の増進は大きかった。一方、構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ は、暑中期で、NPC 単味の場合 $6N/mm^2$ 、フライアッシュを置換した場合、 $3N/mm^2$ 以下とするのが妥当との結果となった。ただし、8 週間管理の場合、構造体強度補正值 $_{56}S_{91}$ は少なくとも $6N/mm^2$ 以上とするのが妥当であると判断された。
- 4) 脱型までの温度管理が供試体強度に及ぼす影響が大きいため、暑中コンクリート工事における構造体強度補正值 S を検討する場合には、供試体の脱型までの温度管理を厳密に行わないと S 値を小さく設定してしまう危険性があることが明らかとなった。
- 5) コンクリート表面の緻密さに関して透気試験と吸水試験を実施した結果、無養生、シート養生、給水養生の順で係数が小さくなっており、特に暑中環境下で養生が重要であることがわかった。
- 6) 中性化速度係数は、水結合材比とフライアッシュの置換率が大きくなり、無養生、シート養生、給水養生の順で係数が小さくなる傾向を確認した。また、透気係数や吸水速度係数が大きくなるほど中性化速度係数

も大きくなる傾向が確認できた。

- 7) ダブルチャンバー法による透気係数や吸水試験による吸水速度係数は、中性化速度係数との間に正の相関が見られた。

《謝辞》本研究は、日本建築学会「フライアッシュコンクリート研究委員会（主査：野口貴文東京大学教授）」の活動で実施したものである。また実験に際しては株式会社麻生および麻生コンクリート工業株式会社、麻生セメント株式会社各位の多大なる協力を得た。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) R.J. Torrent : FA two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site. *Materials and Structures*, vol.25, No.6, pp.358-365, 1992
- 2) 白川敏夫:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの表面吸水試験による吸水機構の検討及び中性化の予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1733-1738, 2019
- 3) 井上翔ほか:現場簡易透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価とその相互比較, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会, Vol.35, No.5, 2008.
- 4) 加藤佳孝, 早川健司:表面透気試験を用いた中性化に伴う鋼材腐食の耐久性設計と検査の連係に関する一考察, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.4, pp.410-421, 2012
- 5) 田中章夫, 今本啓一ほか:表層透気性による既存RC構造物の中性化予測に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.691, pp.1539-1544, 2013.9

(受理：令和2年10月26日)