

論文 加熱改質フライアッシュコンクリートの促進中性化速度に及ぼす養生材齢の影響

大谷 俊浩*1・伊藤 七恵*2・佐藤 嘉昭*3・吉川 悟史*4

要旨: 本研究では、加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートの促進試験による中性化の進行速度に及ぼす組織構造の影響を検討するために、前養生期間を変化させ、圧縮強度試験、細孔径分布の測定および促進中性化試験を実施した。その結果、フライアッシュの有無および前養生期間に関わらず圧縮強度と全細孔量の関係は相関性が高いが、中性化速度係数と圧縮強度および全細孔量との関係は前養生期間ごとに異なること、促進試験ではポゾラン反応による抑制効果は確認できないことを明らかにした。また、同一条件のモルタルと比較し、前養生期間が長いほどコンクリートの方が中性化速度係数が大きくなることを示した。

キーワード: 加熱改質フライアッシュ, 促進試験, 前養生期間, 圧縮強度, 中性化速度係数, 細孔量

1. はじめに

筆者らは、フライアッシュのコンクリート用混和材としての有効利用拡大を目的に、未燃カーボンを強熱減量値で 1%以下に低減させた加熱改質フライアッシュ (Carbon-free Fly Ash, 以下 CfFA) を開発し、CfFA を混和したコンクリートの各種性状について検討してきた。コンクリートの耐久性として重要な中性化特性については、一般に、JIS A 1153 に規定される促進中性化試験によって評価される。しかしながら、この試験方法では材齢 28 日まで水中養生を行った供試体を材齢 56 日まで乾燥したのち促進試験が行われ、ポゾラン反応の進行の影響を適切に評価できない可能性がある。促進中性化試験における前養生の影響については、いくつか検討されているが^{1), 2)}、前養生期間が半年までの検討であり、その影響が十分に明らかになっているとはいえない。そこで筆者らは、上記試験方法に則って材齢 28 日まで養生したコンクリート供試体と、材齢 1 年まで養生した供試体の中性化速度係数の比較実験を行った³⁾。その結果、CfFA の混和の有無に関わらず、前養生期間を 1 年とすることで強度は増進するものの、中性化速度係数に明確な変化がみられない結果が得られた。次いでその原因を明らかにするために、前養生期間を 3 日から 1 年の間で変化したモルタル供試体を用いて促進中性化試験を行うとともに、細孔径分布を測定し、中性化速度係数と組織の関係について検討した⁴⁾。その結果、基準コンクリートと同等の材齢 28 日の圧縮強度を確保することで CfFA 混和モルタルの中性化抵抗性は無混和と同程度であること、CfFA 混和の有無に関わらず、中性化速度係数は前養生期間 14 日程度までは前養生期間を長くすることで急激に

低下するが、その後緩やかになり、その低下割合は強度の増進や全細孔量の低下割合に比べて小さく、単純に細孔径や圧縮強度から中性化速度係数を判断できないことが明らかとなった。

このように、CfFA の混和の有無に関わらず、養生によって強度が増進し、組織の緻密化が進行しているものの、それに応じて中性化速度係数が減少しないことの原因が明らかになっていない。また、上記のコンクリート実験では一水準の水セメント比のみで実験が実施され、若材齢の検討および細孔径分布の測定を行っていなかった。

そこで本研究では、コンクリートによる前養生期間の影響をより詳細に検討するために、調合条件を増やして養生期間が短い場合も含めて検討することとした。さらに、それらの結果と既報の同一条件で実施したモルタルの結果との比較を行った。

2. 実験

2.1 実験計画

表-1 に試験項目を示す。本実験では、促進中性化試験における CfFA 混和コンクリートの中性化抵抗性に及ぼす養生期間の影響を明らかにするために、20°C 水中による前養生期間を 7 日、28 日および 1 年とした供試体に対して促進中性化試験を実施した。ただし、前養生期間 1 年の一部の水準において、養生方法影響を検討する目的で 20°C 封緘養生を行った供試体についても同様に促進中性化試験を実施した。また、圧縮強度試験および細孔径分布の測定を行い、それらとの関係について検討した。

2.2 使用材料および調合

表-2 に使用材料、表-3 に調合を示す。調合は、基準コ

*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 (株)ゼロテクノ 技術部 博士 (工学)

*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 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻 修士 (工学) (日本国土開発 (株)) (正会員)

表-1 試験項目

試験項目	内容
圧縮強度	JIS A 1108 供試体寸法：Φ100×200mm 養生方法：20℃水中、 20℃封緘 (W/C' 55%のみ)
促進中性化	JIS A 1153 参照 供試体寸法：100×100×400mm 前養生方法：20℃水中 前養生期間：7日、28日、1年 乾燥期間：前養生期間終了後28日 促進環境：20℃、60%RH、CO ₂ 濃度5%
細孔径分布	水銀圧入法 試料：圧縮強度試験用供試体から採取

表-2 使用材料

種類	記号	使用材料および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ 、 ブレン比表面積：3470cm ² /g
フライアッシュ	CfFA	加熱改質フライアッシュ 強熱減量：0.95%、密度：2.16g/cm ³ 、 ブレン比表面積：3800cm ² /g、 活性度指数：(28日)81%、(91日)91%
細骨材	S	山砂 表乾密度：2.64g/cm ³ 、吸水率：2.61%
粗骨材	G	碎石 表乾密度：2.61g/cm ³ 、実積率：61.2%、 吸水率：0.77%
混和剤	AD	W/C' 45%：AE減水剤（高機能タイプ） その他：AE減水剤
	AE	空気量調整剤

表-3 調合およびフレッシュ性状

調合記号	W/C (%)	W/C' (%)	CfFA/B (%)	単位量 (kg/m ³)					AD (B×%)	AE (A)	SL (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
				C	CfFA	W	S	G					
45-0	45.0	45.0	0	404	0	182	796	898	0.90	4.0	20.0	4.2	27.5
45-20	48.5	45.0	20	375	94	182	707	898	0.90	7.0	19.5	3.9	27.5
55-0	55.0	55.0	0	333	0	183	851	898	0.25	1.5	19.5	5.0	27.0
55-10	57.0	55.0	10	316	35	180	830	898	0.25	1.5	19.5	4.5	27.0
55-20	59.2	55.0	20	301	75	178	801	898	0.25	2.5	19.0	4.4	27.0
65-0	65.0	65.0	0	285	0	185	887	898	0.25	1.0	18.5	5.1	27.5
65-20	70.0	65.0	20	256	64	179	848	898	0.25	2.0	20.5	4.9	27.0

※B=C+CfFA, C'=C+k×CfFA, A: B×0.001%, SL: スランプ値, CT: コンクリート温度

ンクリートの水セメント比（以下、W/C）を45、55、65%の3水準とし、CfFA置換率10%（W/C55%の水準のみ）および20%とした。CfFAを混和した調合は、材齢28日における強度が基準コンクリートと同一となるように、CfFAの寄与率kを0.3とし⁵⁾、それを考慮した見かけの水セメント比（以下、W/C'（C'=C+k×CfFA））を同一となるようにした。

また、すべての調合における単位粗骨材量を一定とし、目標スランプ18±2.5cm、目標空気量4.5±1.5%となるように、スランプは単位水量で、空気量は空気量調整剤で調整した。

2.3 試験方法

圧縮強度試験用供試体はφ100×200mmの円柱供試体を用いた。細孔径分布は水銀圧入法で測定し、試料は圧縮強度試験終了後の供試体中心部から採取した0.5g程度のモルタル部の小片を、アセトンに24時間浸漬して水和の進行を停止させ、105℃の乾燥炉で24時間乾燥させたものとした。促進中性化試験用供試体は100×100×400mmの角柱供試体を用いた。

コンクリートの練混ぜには2軸ミキサを使用し、空練りを15秒行った後、水および混和剤を投入し、120秒間練り混ぜた。各供試体は材齢1日で脱型後、所定の材齢（7日、28日および1年）まで20℃水中養生を行った。また、W/C'55%の前養生期間1年のみ20℃封緘養生も実

施した。

促進中性化試験条件は温度20℃、湿度60%RH、CO₂濃度5%とし、所定の養生期間終了後、28日間20℃・60%RHの恒温恒湿室内で乾燥した後に実施した。なお、供試体数は各水準で2体とし、両側面からの中性化の進行を測定するように、その他の全ての面をアルミテープでシールした。中性化深さの測定は、定期的に供試体を割裂し、その切断面にフェノールフタレイン1%溶液を吹きかけ、表面から呈色領域までの深さをノギスで測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状試験結果

表-3にフレッシュ性状試験結果を示す。CfFA混和による単位水量低減効果はW/C'45%では認められなかったが、W/C'55%および65%ではCfFA20%置換において、それぞれ基準から5kg/m³および6kg/m³低減された。

3.2 圧縮強度試験結果

図-1に圧縮強度の経時変化を示す。材齢28日において、各W/C'ごとの圧縮強度は同程度であったが、材齢1年において、いずれもCfFAを混和した調合の強度の増進が大きく、CfFAのポズラン反応による強度増進効果が認められる。

図-2に材齢1年におけるW/C'55%の圧縮強度とCfFA

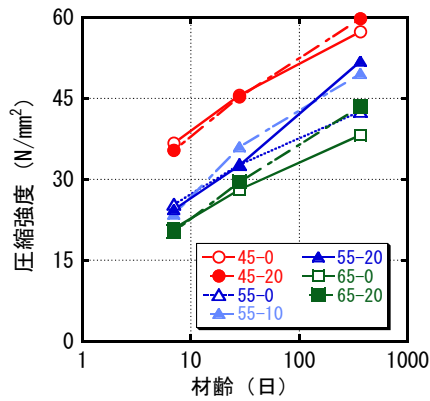


図-1 圧縮強度の経時変化

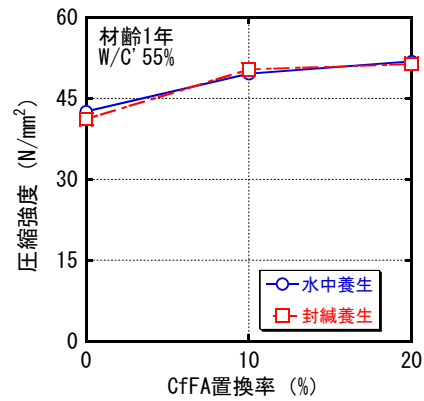


図-2 圧縮強度と CfFA 置換率の関係

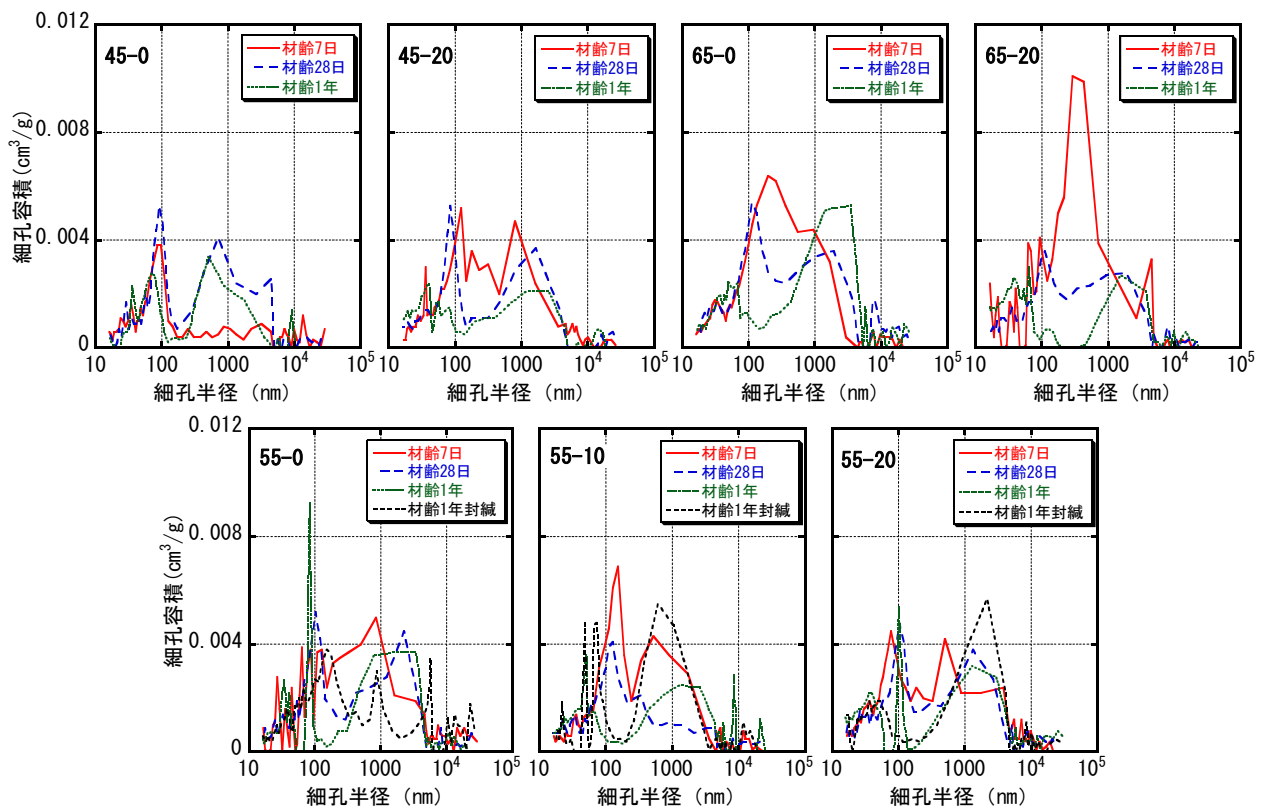


図-3 細孔径分布

置換率の関係を示す。材齢1年における水中養生と封緘養生供試体の圧縮強度を比較すると、両者にほとんど差はみられなかった。

3.3 細孔径分布測定結果

図-3 に細孔径分布の結果を示す。全体的に見て水中養生における材齢の進行に伴う細孔径の分布状態に明確な差は見られないが、封緘養生のものは比較的粗大な空隙が残存していることがわかる。

図-4 に細孔径半径 15nm～30000nm の範囲における全細孔量の経時変化を示す。調合 45-0 の前養生期間 7 日および調合 65-20 の前養生期間 28 日のデータは値が小さく、適切に測定できていないと考えられるが、全体的に見て前養生期間の増加とともに全細孔量は減少し、組織が緻

密化していることがわかる。また、CfFA 混和による影響については、W/C'65%で基準よりも全細孔量が小さな値を示しているが、その他の水準では基準コンクリートと明確な差はみられない。

図-5 に材齢1年における W/C'55%の全細孔量と CfFA 置換率の関係を示す。材齢1年における水中養生と封緘養生で比較すると、CfFA 無混和の封緘養生が大きな値を示しているが、CfFA を混和した調合に明確な差は見られなかった。

図-6 に圧縮強度と全細孔量の関係を示す。図より、前養生期間および CfFA 置換率の違いに関わらず、圧縮強度と全細孔量の関係は非常に相関性が高いことがわかる。

3.4 促進中性化試験結果

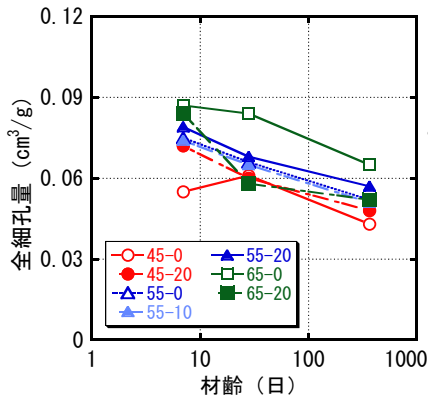


図-4 全細孔量の経時変化

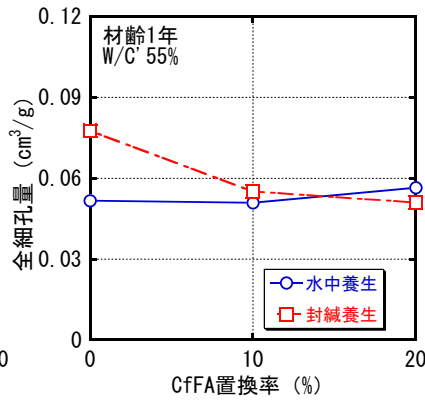


図-5 全細孔量とCfFA置換率の関係

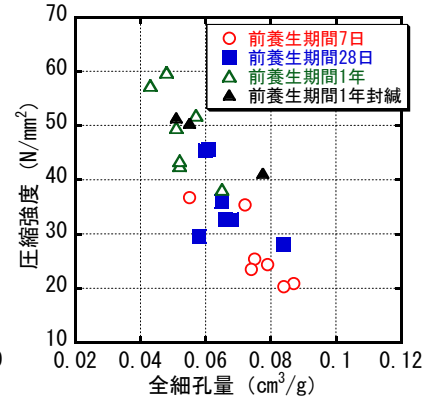


図-6 圧縮強度と全細孔量の関係

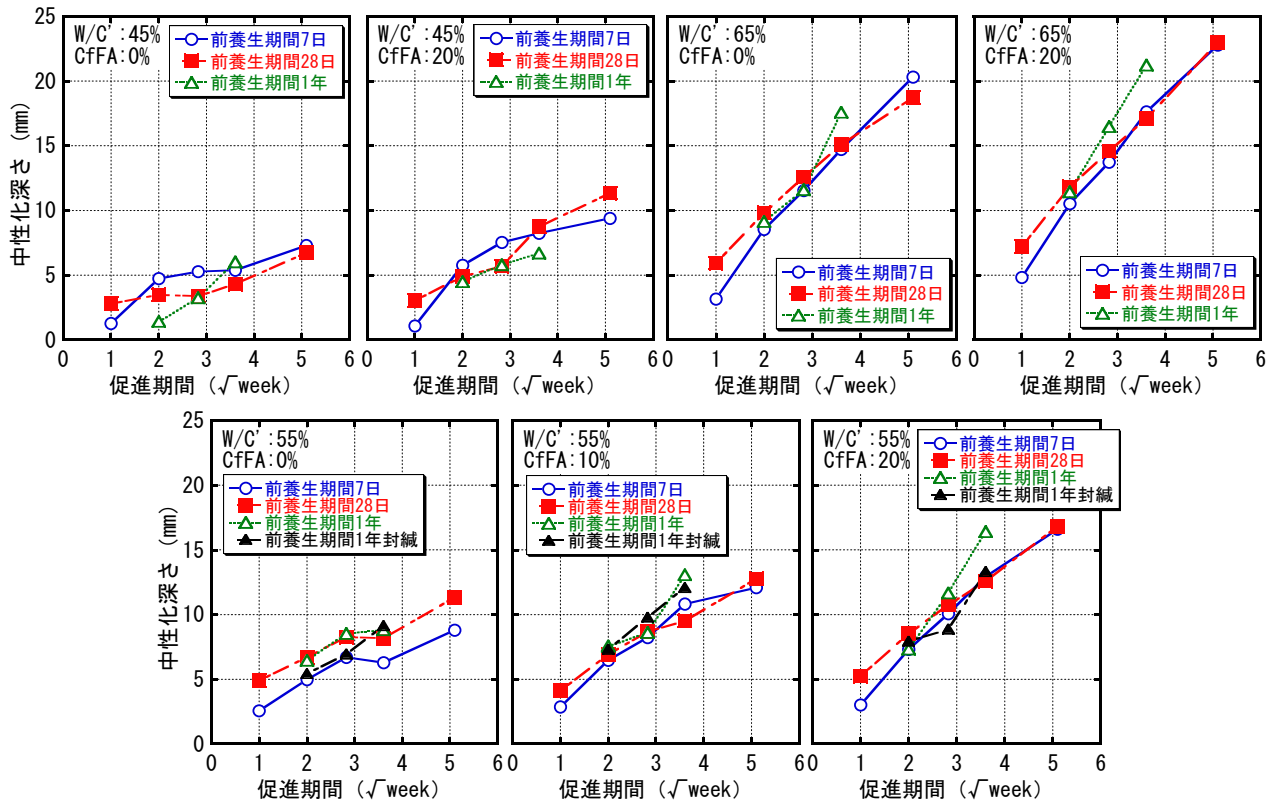


図-7 中性化深さの経時変化

図-7に中性化深さの経時変化を示す。ただし、前養生期間1年については、現時点で結果が得られている促進期間13週までの結果を示している。なお、前養生期間1年の促進期間7日については、実験の都合により、中性化深さの測定を行っていない。図より、W/C45%の前養生期間7日のデータが若干曲線的になっているが、その他は前養生期間、W/CおよびCfFA置換率に関わらず、中性化深さと促進期間の平方根の関係には、直線関係が認められ、前養生期間が変化しても一般的なルートtが成り立つことがわかる。

これらのデータを原点を通る直線で近似して得られた中性化速度係数と前養生期間の関係を図-8に示す。図より、W/C45%では前養生期間を長くすることで中性化

速度係数が若干減少しているが、その他の調査では材齢1年ではむしろ増加し、手島ら¹⁾や黄ら²⁾の研究結果とは異なる結果となった。前養生期間が28日以降は中性化速度係数が明確に減少しないことは既報のコンクリートの結果³⁾と同様の傾向であるが、前養生期間1年に低下がみられた既報のモルタルの結果⁴⁾とは異なるものであった。この原因は、粗骨材界面が影響していると推察されるが、現時点では不明である。

図-9に前養生期間1年におけるW/C55%の中性化速度係数とCfFA置換率の関係を示す。材齢1年における水中養生と封緘養生供試体の比較では、圧縮強度と同様に、両者に明確な差はみられなかったが、CfFAを混和したものの中性化速度係数は、材齢1年まで養生を行って

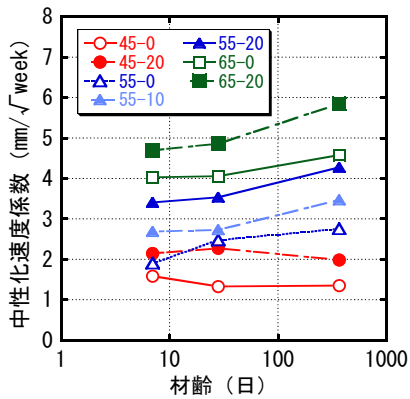


図-8 中性化速度係数の推移

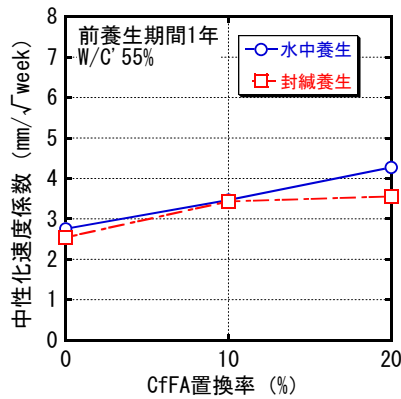


図-9 中性化速度係数と CffA 置換率の関係

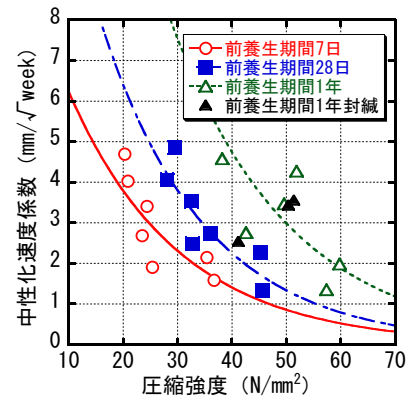


図-10 中性化速度係数と圧縮強度の関係

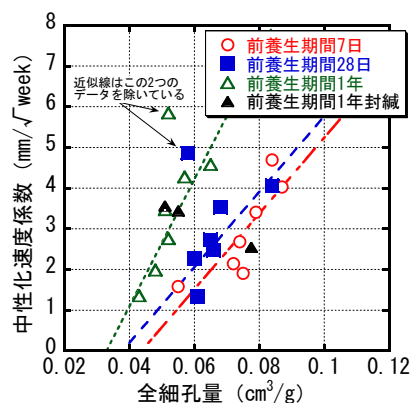


図-11 中性化速度係数と全細孔量の関係

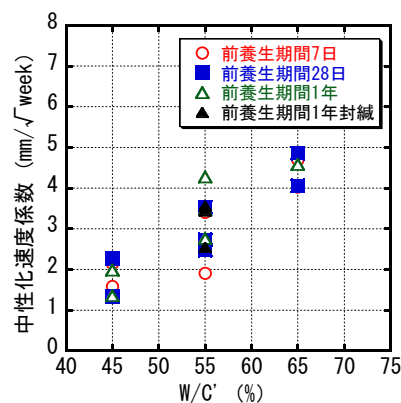


図-12 中性化速度係数と W/C' の関係

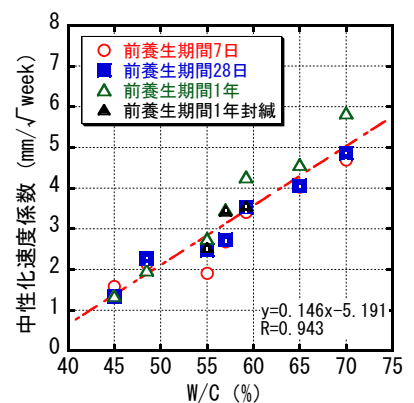


図-13 中性化速度係数と W/C の関係

も無混和よりも若干大きな値であった。

図-10 および図-11 に中性化速度係数と圧縮強度および全細孔径量の関係を示す。図より、いずれも CffA 置換率の影響はみられず、前養生期間ごとに相関性が異なることがわかる。この関係は長滝らの報告と同様の傾向を示すもので、長滝らはフライアッシュコンクリートの中性化速度係数は、前養生期間ごとに促進試験開始時の圧縮強度およびフライアッシュ置換率で予測できることを示している⁶⁾。これは、コンクリートの中性化速度係数は、CffA 混和の有無に関わらず、圧縮強度や細孔量で一義的に決定されるものではないことを意味している。つまり、中性化の進行には細孔組織としての炭酸ガスの浸透のしやすさだけでなく、反応物の量や反応後の組織構造の変化などの別の要因が関与しているものと推察される。

図-12 および図-13 に中性化速度係数と W/C' および W/C との関係を示す。中性化速度係数は、W/C' との関係では CffA 置換率が増加するほど高い値を示すため両者の関係にばらつきがみられるが、W/C との関係では CffA 置換率に関わらず一つの直線で表わすことができることがわかる。これは、CffA に中性化抵抗性に対しては抑制

効果がないことを意味している。今回の実験では CffA の材齢 28 日における強度寄与率を 0.3、つまりセメントの 3 割の効果があるとして調合設計を行い、強度面ではその効果がみられたが、中性化に対する効果はみられなかった。フライアッシュの混和の有無に関わらず中性化抵抗性については、圧縮強度と相関が高いことが報告され⁷⁾、日本建築学会鉄筋工事標準仕様書・同解説鉄筋コンクリート工事 (JASS 5) では圧縮強度を基に耐久設計基準強度を算出している。しかしながら、フライアッシュを混和したコンクリートの中性化抵抗性については、安全側に考えれば、フライアッシュの強度寄与効果を考慮せず、単純に W/C によって検討する方が望ましいと言える。

4. モルタルとの比較

以上のように、前養生期間と中性化速度係数の関係は本実験と既報⁴⁾のモルタルの結果で傾向が異なるものであったが、コンクリートとモルタルの中性化速度係数の大きさについて比較することにした。図-14 に中性化速度係数の比較を示す。比較に使用したものは同一の水セメント比および CffA 置換率の調合のもので、同一の前

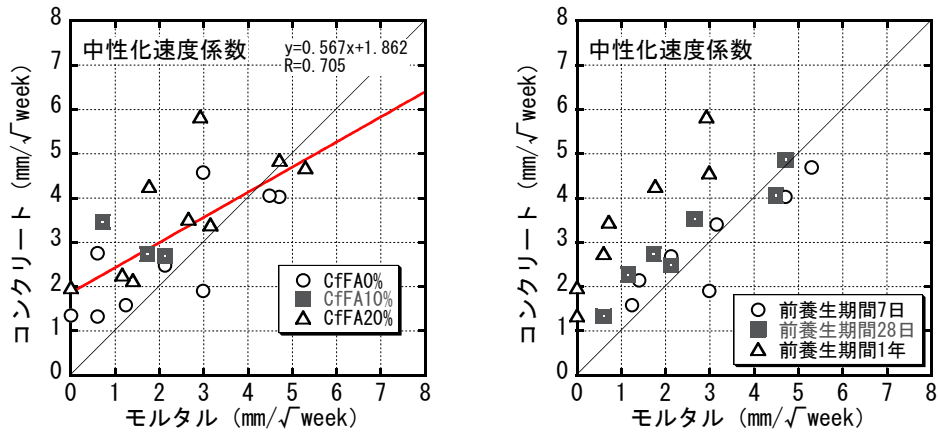


図-14 中性化速度係数の比較⁴⁾

養生期間として実施した7日、28日および1年の結果である。左図はCfFA置換率ごとに、右図は前養生期間ごとに示したものである。中性化速度係数については、ばらつきがあるがCfFAを混和した場合でも、全体的にコンクリートの方が大きな値を示し、特に傾向が異なっていた長期において、その差は大きくなった。

5. まとめ

本研究では、CfFAを混和したコンクリートの中性化特性に及ぼす前養生の影響を明らかにするために、前養生方法および養生期間を変化させ、圧縮強度試験、細孔径分布の測定および促進中性化試験を行った。また、それらの結果と既報の同一条件で実施したモルタルの結果と比較検討を行った。本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) CfFAによる長期の強度増進効果が認められる。
- 2) 材齢およびCfFA混和の有無に関わらず、全細孔量と圧縮強度の関係は相関性が高い。
- 3) 促進中性化試験による中性化速度は、前養生期間の進行に伴って、W/C'45%では若干低下するが、W/C'55%および65%では若干増加する。
- 4) 中性化速度係数と圧縮強度および全細孔量の関係は、前養生期間ごとに異なる。
- 5) 材齢1年まで20°Cで水中および封緘養生を行った両者の圧縮強度、細孔径分布および中性化抵抗性を比較すると、CfFA置換率に関わらず、明確な差は見られない。
- 6) 促進中性化試験の結果からCfFAコンクリートの中性化速度係数は基準コンクリートと比較して大差がない。
- 7) モルタルとコンクリートの中性化速度係数を比較すると、コンクリートの方が高い値を示し、前養生期間が長くなるほど、その差は増加する。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金（基盤研究（C）平成26～28年度、研究代表者：大谷俊浩、課題番号：26420555）の支援を受けて実施したものである。また、本実験の実施にあたり、本学修論生山中優貴君のご助力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 手島則夫, 榎田佳寛, 中村成春: 高粉末度フライアッシュを使用した高強度コンクリートの長期強度・中性化及び耐火性, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.115-120, 1998
- 2) 黄光律, 野口貴文, 友澤史紀: フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすポズラン反応の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.531, pp.7-14, 2000
- 3) 伊藤七恵ほか: 改質フライアッシュを用いたコンクリートの炭酸化に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.406-413, 2012
- 4) 三島剛ほか: 養生期間が混和材混入モルタルの中性化抵抗性に及ぼす影響に関する研究(その3.水中養生期間1年の実験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.103-104, 2015
- 5) 伊藤七恵, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 大谷俊浩: 高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.167-172, 2011
- 6) 長滝重義, 大賀宏行, 佐伯竜彦: コンクリートの中性化深さの予測, セメント技術年報, No.41, pp.343-346, 1987
- 7) たとえば和泉意登志, 嵩英雄, 押田文雄, 西原邦明: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調合および養生条件の影響について, 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.117-120, 1985