

論文 フレッシュ時の経時変化が加熱改質フライアッシュコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

大谷 俊浩*1・秋吉 善忠*2・佐藤 嘉昭*3・日高 幸治*4

要旨: 未燃炭素を1%以下に低減させた加熱改質フライアッシュを混和したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響を検討することを目的に、静置状態でのフレッシュ性状の経時変化試験、圧縮強度試験および凍結融解試験を行い、細孔径分布および気泡間隔係数等の硬化体の空隙組織との関係について検討した。その結果、加熱改質フライアッシュの混和の有無に関わらず、経時に伴い空気量や細孔量は減少するものの気泡間隔係数に大きな変化はなく、フレッシュ時の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響は小さく、経時変化によらず気泡間隔係数が300 μ m以下であれば比較的良好な耐凍害性を有することが分かった。

キーワード: フライアッシュ, 耐凍害性, 空気量ロス, 混和剤, 気泡間隔係数, 細孔径分布

1. はじめに

著者らが開発した加熱改質フライアッシュ (Modified Fly Ash, 以下 MFA) は、加熱改質処理により未燃炭素を強熱減量値で1%以下に低減させたものである¹⁾。そのため、AE 剤の吸着による影響が小さく、MFA を混和したコンクリート (以下 MFA コンクリート) の経時によるスランプの低下量は普通コンクリートと同程度であること、加熱改質前のフライアッシュ原粉と比較して空気量の経時変化が小さいことが明らかとなっている²⁾。

フライアッシュ (以下 FA) を混和したコンクリートは、長期間にわたる FA のポゾラン反応によって組織が緻密化するため、長期的な強度の増進や劣化因子の侵入を抑制することで耐久性の向上が期待できるが、耐凍害性に関して、初期強度が低いことや未燃炭素が AE 剤を吸着することで空気量が低下する問題が存在する。

FA コンクリートの耐凍害性に関する検討がいくつかなされており、強熱減量の大きな FA を用いた場合、フレッシュ時の経時に伴う空気量の低下量が大きく、気泡間隔係数が大きくなる傾向があり、空気量の低下が小さい場合でも耐凍害性が低下する場合があること^{3,4)}、養生期間が材齢2週と短い場合に耐凍害性が低く評価されること³⁾、中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合も硬化体の空気量が少なくなる傾向が強いこと⁵⁾など、初期強度やフレッシュ時の空気量および空隙組織の変化の影響が大きいことが指摘されている。そのため、日本建築学会および土木学会の指針^{6,7)}では、空気量の低下が小さな AE 剤を選定することの必要性が示されている。

上記の MFA はフレッシュ時の空気量の経時変化が小さく、耐凍害性に及ぼす影響も小さいと考えられるが、

表-1 使用材料

種別	記号	使用材料および物性
セメント	PL	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³
フライアッシュ	MFA	加熱改質フライアッシュ (表-2)
水	W	上水道水
細骨材	S	山砂 表乾密度:2.61g/cm ³ 吸水率:2.61% 実積率:56.9% 粗粒率:2.65
粗骨材	G	硬質砂岩碎石 表乾密度:2.63g/cm ³ 吸水率:0.92% 実積率:58.9% 粗粒率:6.81
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩 ポリカルボン酸系化合物(高機能タイプ)
空気量調整剤	AE _A	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	AE _B	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 MFA の物性

SiO ₂ (%)	強熱減量 (%)	比表面積 (cm ² /cm ³)	密度 (g/cm ³)	活性度指数 (%)	
				σ_{28}	σ_{91}
57.8	0.72	4068	2.32	88	96

MFA コンクリートのフレッシュ性状の経時変化が硬化体における空隙組織に及ぼす影響と、さらにそれらが耐凍害性に及ぼす影響は明らかになっていない。

そこで、本研究では MFA コンクリートのフレッシュ性状の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、空隙組織を変化させるために2種類の空気量調整剤を使用して検討を行った。

2 実験

2.1 使用材料および調合

表-1 に使用材料, 表-2 に使用した MFA の物性を示す。AE 減水剤はリグニンスルホン酸塩ポリカルボン酸系の高機能タイプを使用した。空気量調整剤は、普通コンク

*1 大分大学 理工学部創生工学科建築学コース教授 博士(工学)(正会員)

*2 大分大学 理工学部創生工学科建築学コース助教 博士(工学)(正会員)

*3 大分大学 名誉教授 工博(フェロー会員)

*4 テクノスジャパン (株)

リートで一般的に使用されている2種類を使用した。いずれもアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤であり、 AE_A は AE_B に比べて少量で空気を連行できる特徴を有している。

表-3に調査表を示す。調査は材齢28日強度が同等となるようにMFAの強度寄与率 k を考慮した換算水セメント比(W/C')を55%とし、 k は0.3とした。FA置換率は結合材に対する質量比で20%とし、粗骨材量はすべて一定とした。AE減水剤の使用量は一定とし、スランブ値が $20 \pm 1.0\text{cm}$ 、空気量が $5.5 \pm 0.5\%$ および $7.0 \pm 0.5\%$ となるように単位水量および空気量調整剤の量を調整した。

2.2 練混ぜおよび供試体作製

コンクリートの練混ぜは、夏期に室内気温 30°C 程度の実験室内で行った。練混ぜには容量100Lの強制2軸ミキサを使用し、細骨材、セメント、MFA、粗骨材を投入後、空練りを15秒間行い、水および混和剤を投入して60秒間練り混ぜて排出した。

2.3 実験項目および実験方法

(1) 試験項目

表-4に実験項目を示す。フレッシュ性状試験として、スランブ、空気量、コンクリート温度および単位容積質量を測定した。硬化性状として圧縮強度試験、凍結融解試験、細孔径分布および気泡間隔係数の測定を行った。

(2) フレッシュ性状試験

目標空気量7.0%の水準においてフレッシュ性状の経時変化を測定した。練りあがったコンクリートを乾燥しないように練り舟に静置させ、練上がり時、注水後20分、40分および60分の時点で試料をスコップで練り返してスランブおよび空気量を測定した。各測定後、スランブ試験に用いた試料は練り舟に戻し、空気量の測定に用いた試料はその都度廃棄した。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、練上がり時と60分経過後に作製した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用した。脱型は翌日とし、その後28日まで標準養生を行い試験に供した。

(4) 気泡間隔係数測定

気泡間隔係数は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用し、各調査2体ずつとした。供試体の上下面から2.5cmの断面に対して、コンパクトポリシャーで鏡面研磨を行って測定した。測定はASTM C 457のリニアトラバース法に準じた画像解析法により行った。また、同時に測定された気泡の個数および気泡径から気泡間隔係数および硬化後の空気量を算出した。

(5) 細孔径分布測定

細孔径分布測定用試料は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体の中心付近をコンクリート用カッターでスライスしたものをハンマーで破碎して採取した。試料はアセトンに浸

表-3 調査表

No.	記号	MFA/B (%)	W/C' (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AD (B×%)	AE 剤量*1
						W	C	FA	S	G		
1	PL5.5A	0	55.0	55.0	48.6	183	333	0	840	894	0.8	4.5A
2	PL7.0A	0	55.0	55.0	48.6	183	333	0	840	894	0.8	6.5A
3	MFA20-5.5A	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	5.0A
4	MFA20-7.0A	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	7.0A
5	MFA20-5.5B	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	5.0A
6	MFA20-7.0B	20	55.0	47.3	47.2	178	301	75	794	894	0.8	7.0A

*1:空気量調整剤(1A=B×0.001%), $W/C'=(C+k*FA)$

表-4 試験項目

分類	試験項目	試験方法	試験材齢
フレッシュ性状	スランブ	JIS A 1101	-
	空気量	JIS A 1128	
	コンクリート温度	JIS A 1156	
	単位容積質量	JIS A 1116	
	ワーカビリティ	目視	
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1132 JIS A 1108	28日
	凍結融解	JIS A 1148(A法)	
	細孔径	JIS R 1655	
	気泡間隔係数	ASTM C 457	

表-5 フレッシュ性状試験結果

No	記号	経過時間(分)	コンクリート温度(°C)	スランブ(cm)	空気量(%)	単位容積質量(kg/L)
1	PL5.5A	0	30.0	19.5	5.0	2.26
2	PL7.0A	0	31.0	20.8	6.9	2.22
		20	31.0	18.5	6.2	2.23
		40	31.0	13.9	5.8	2.24
		60	30.5	9.3	5.5	2.25
3	MFA20-5.5A	0	30.5	19.8	5.1	2.25
4	MFA20-7.0A	0	32.0	21	7.0	2.21
		20	31.5	17.5	6.3	2.23
		40	32.0	14.1	5.6	2.25
		60	31.0	9.2	4.9	2.28
5	MFA20-5.5B	0	31.0	20.0	5.3	2.24
6	MFA20-7.0B	0	32.0	19.6	6.9	2.23
		20	32.0	16.8	6.6	2.22
		40	31.5	10.8	6.1	2.24
		60	31.5	6.5	5.1	2.27

漬させて水和を停止させた後に 105°C の乾燥炉で絶乾にし、水銀圧入式ポロシメーターによって細孔径分布を測定した。

(6) 凍結融解試験

凍結融解試験は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を使用し、各調査2体ずつとした。試験はJIS A 1148 A法に準じて行い、30サイクル毎に質量および一次共鳴振動数を測定し、質量減少率、相対動弾性係数および耐久性指数を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状の経時変化

表-5にフレッシュ性状試験結果を示す。コンクリート温度は、フレッシュ性状の経時変化試験の間に大きな差はなく、気温による影響はないと考える。

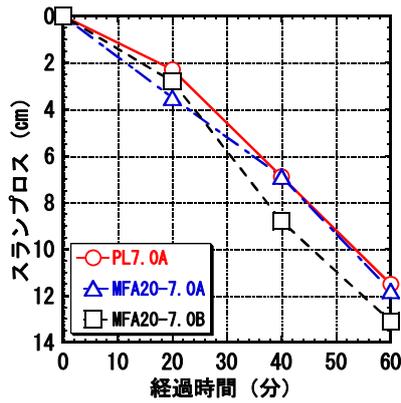


図-1 スランプ値の経時変化

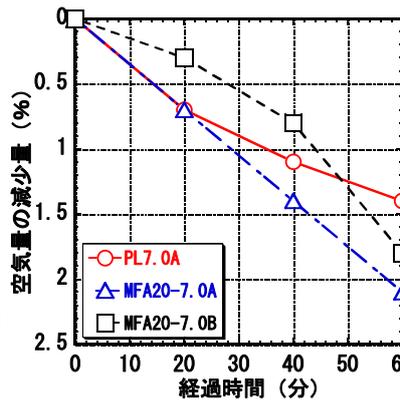


図-2 フレッシュ時空気量の経時変化

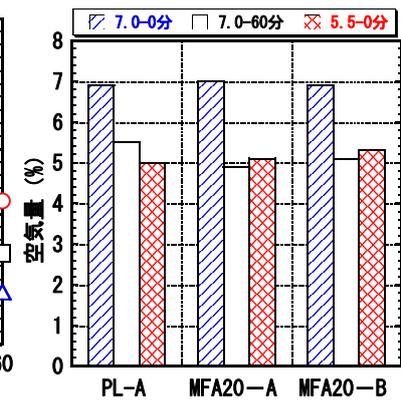


図-3 フレッシュ時空気量の比較

表-6 硬化体コンクリートの試験結果

No	記号	経過時間 (分)	空気量 (%)			気泡間隔係数 (μm)	圧縮強度 (N/mm^2)	単位容積質量 (g/cm^3)	耐久性指数	全細孔量 ($\times 10^{-2} \text{cm}^3/\text{g}$)		
			全範囲	100~ $500 \mu\text{m}$	150 μm 以下					15~300nm	40~200nm	100~200nm
1	PL5.5A	0	3.90	2.08	0.60	362.0	33.1	2.29	67.0	4.42	2.72	1.08
2	PL7.0A	0	4.82	2.70	0.73	297.3	29.5	2.30	58.4	8.19	5.25	2.54
		60	4.04	2.03	0.72	321.8	30.0	2.27	55.8	5.71	4.89	1.89
3	MFA20-5.5A	0	3.60	2.03	0.73	313.5	33.0	2.26	44.8	6.95	4.39	1.89
4	MFA20-7.0A	0	3.20	2.01	0.86	289.8	28.7	2.23	77.4	6.99	5.68	2.35
		60	2.51	1.38	0.84	294.5	31.8	2.28	78.0	6.55	4.80	1.72
5	MFA20-5.5B	0	2.55	1.70	0.74	280.0	30.2	2.25	76.3	5.33	3.30	1.44
6	MFA20-7.0B	0	2.96	1.89	1.01	234.0	28.8	2.24	80.3	8.96	6.49	3.60
		60	1.98	1.06	0.86	237.8	31.7	2.27	70.8	6.40	4.53	2.12

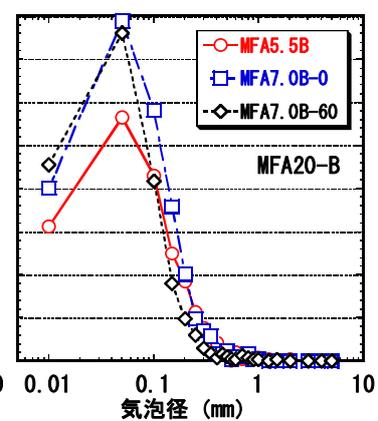
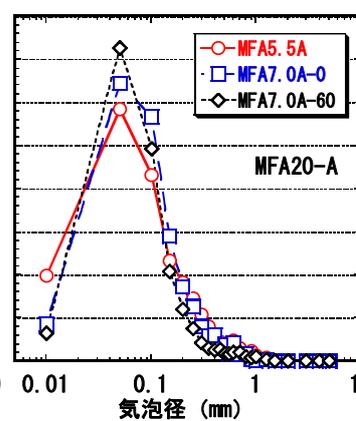
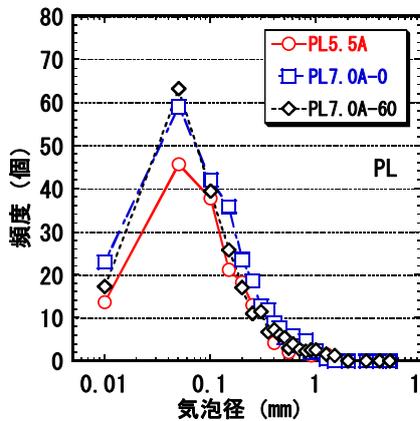


図-4 硬化体の気泡径分布

図-1 にスランプ値の経時変化を示す。スランプ値は時間が経過するにつれて減少したが、調合による大きな差はみられなかった。

図-2 に空気量の経時変化を示す。空気量は時間が経過するにつれて減少しており、MFA コンクリートは、PL に比べて、空気減少量が多かった。

図-3 に目標空気量 7.0% (以下 7.0%) の練上がり時および 60 分経過後と目標空気量 5.5% (以下 5.5%) の練上がり時の空気量の比較を示す。7.0% の 60 分後の空気量は、5.5% の練上がり時と同等の値を示した。

3.2 硬化体の気泡組織

表-6 に硬化コンクリートの各試験結果を示す。

図-4 に硬化体の気泡径分布を示す。いずれの調合にお

いても径が 0.05mm の気泡が最も多くなっていることがわかる。また、5.5% に比べて 7.0% の気泡の数が多いが、練上がり時と 60 分経過後に打ち込んだ供試体の気泡数に大きな差がみられないことがわかる。5.5% の練上がり時と 7.0% の 60 分経過時のフレッシュの空気量はほぼ同一であったことから、経時変化でみられた空気量の減少は、径が 1mm 以上の巻き込み空気の減少によるところが大きいと考えられる。

図-5 に硬化体およびフレッシュ時の空気量の関係を示す。各空気量は各調合で 60 分経過後に減少しているが、フレッシュ時の空気量に対する硬化体の空気量は PL と比較して MFA の方が少ない値を示しており、硬化体としての空気量が減少しやすい傾向にあった。

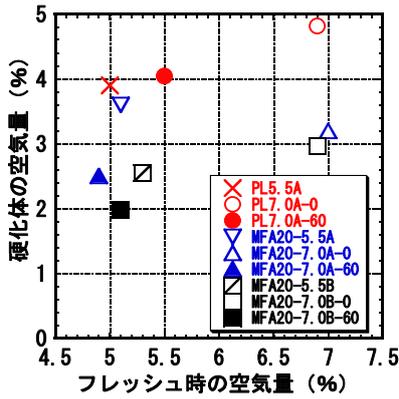


図-5 硬化体およびフレッシュ時の空気量の関係

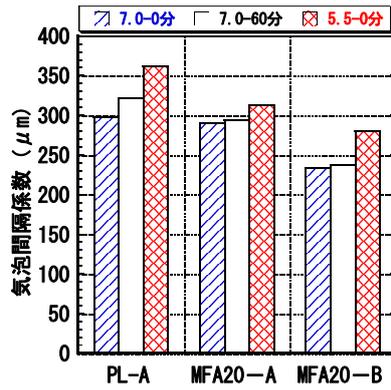


図-6 気泡間隔係数の比較

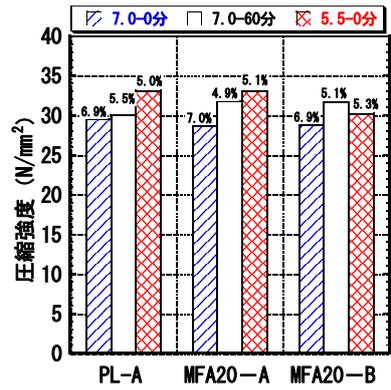


図-7 圧縮強度の比較

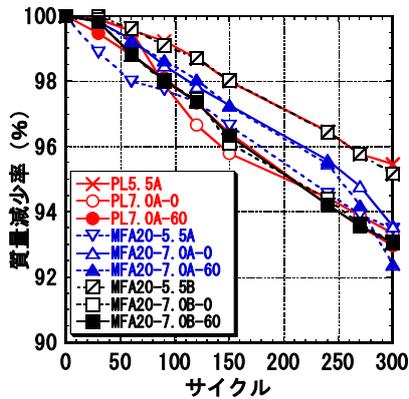


図-8 質量減少率の推移

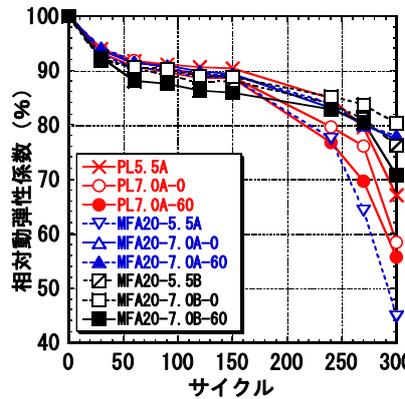


図-9 相対動弾性係数の推移

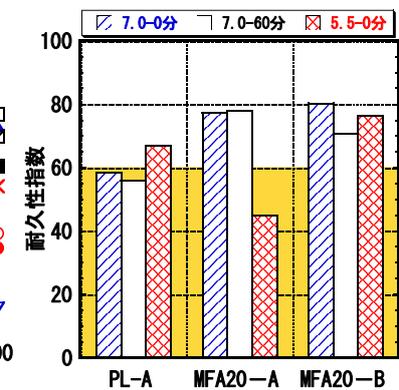


図-10 耐久性指数の比較

図-6 に気泡間隔係数の比較を示す。気泡間隔係数は各調合で 60 分経過後に打ち込んだ供試体の方が若干小さくなったが、5.5%よりは小さい値を示した。AE_Aを使用した PL-A と MFA20-A に比べて、AE_Bを使用した MFA20-B は気泡間隔係数が小さい値を示した。

3.3 圧縮強度試験

図-7 に圧縮強度の比較を示す。なお、図中の数値はフレッシュ時の空気量を示している。各調合で経時変化後に圧縮強度が増加したが、PL は空気量ロスに対する強度増加が小さく、5.5%と比較しても小さな値であった。

3.4 凍結融解試験

図-8 および図-9 に質量減少率および相対動弾性係数の推移を示す。なお、180 および 210 サイクルは、測定装置の不具合で正確な値が得られなかったため、除外した。サイクル数の増加とともに全体的に質量および相対動弾性係数が低下する傾向がみられ、特に MFA20-5.5A と PL7.0A-0 と PL7.0A-60 は 240 サイクル以降に急激な低下がみられた。

図-10 に耐久性指数の比較を示す。AE_Aを使用した PL-A と MFA20-A では 60 分経過後に打ち込んだ供試体も同等の値を示しているが、AE_Bを使用した MFA20-B は低下がみられた。また、MFA20-5.5A を除き、PL に比べて MFA コンクリートは高い耐凍害性を示した。

3.5 細孔径分布試験

図-11 に水銀圧入法によって得られた細孔径分布を示す。いずれの調合においても 70~80nm 付近にピークがみられ、100~2000nm で細孔量の大きな変化がみられる。5.5%のなかで耐久性指数が低かった MFA20-A は、他の調合に比べて 100~2000nm の範囲の細孔が多く、この範囲の細孔が耐凍害性に影響を与えている可能性がある。

図-12 に全細孔量の比較を示す。60 分経過後に打ち込んだ供試体は全細孔量が減少する傾向がみられた。PL-A と MFA-B の 5.5%の全細孔量はさらに低い値を示したが、耐久性指数が低かった MFA20-A は 7.0%と同等の高い値を示した。

3.6 気泡組織が耐凍害性に及ぼす影響

(1) フレッシュ時の空気量

図-13 に耐久性指数とフレッシュ時の空気量の関係を示すが、両者には明確な傾向はみられなかった。

(2) 気泡間隔係数

図-14 に耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。全体的にみて、気泡間隔係数が大きくなると耐久性指数も低くなる負の相関がみられた。また、MFA20-5.5A の耐久性指数が低い値を示したのは、気泡間隔係数が大きいためと考えられる。気泡間隔係数を 300 μm 以下とすることで耐凍害性を確保できると考えられる。

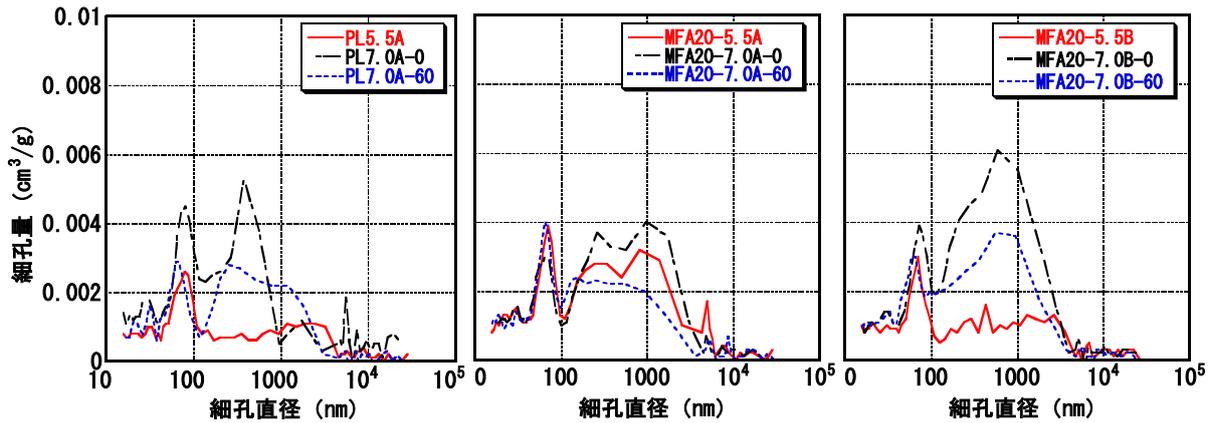


図-11 細孔径分布

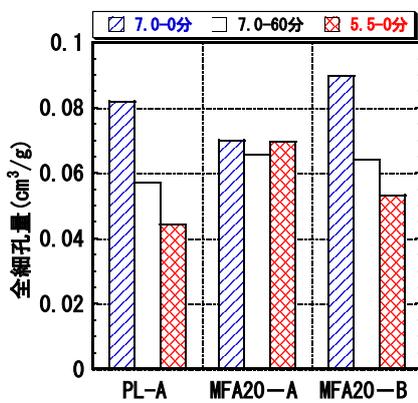


図-12 全細孔量の比較

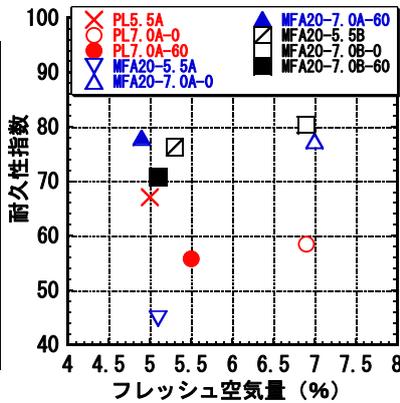


図-13 耐久性指数とフレッシュ時の空気量の関係

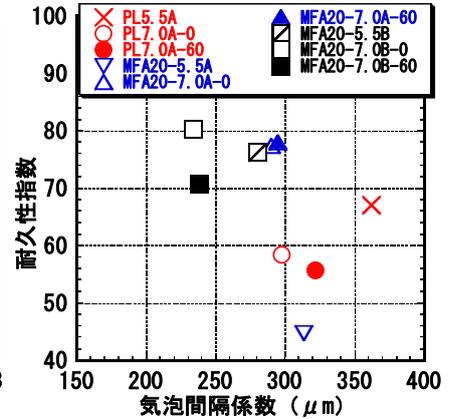


図-14 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

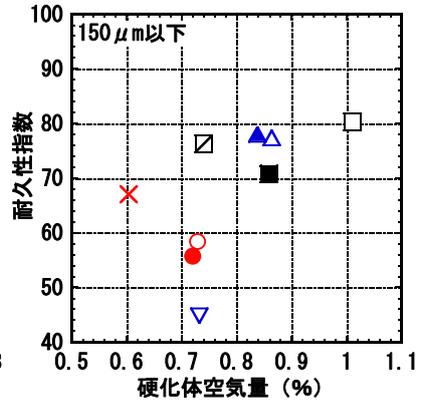
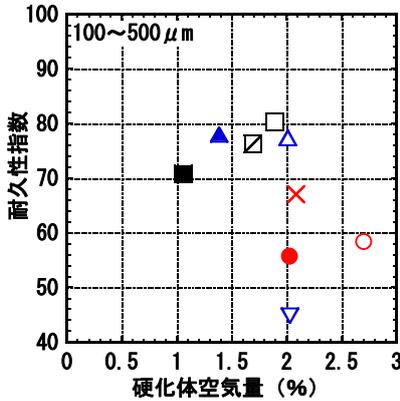
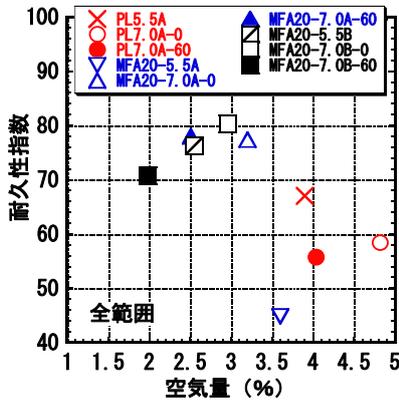


図-15 耐久性指数と硬化体の空気量の関係

(3) 硬化体の空気量

濱らは耐凍害性を確保するには、一般的に推奨されているよりもやや大きめの気泡径の確保が必要であり、特に直径 100~500 μm の空気量が多いほど有効であると指摘している⁸⁾。また、坂田らは 150 μm 未満の空気量が多いほど耐凍害性が高い傾向にあることを示している⁵⁾。そこで、画像解析結果からその範囲の硬化体の空気量を算出した。図-15 に耐久性指数と全範囲および上記範囲の空気量の関係を示す。全範囲および 100~500 μm

の範囲においては、全体的にみて明確な相関は認められなかったが、150 μm 以下の範囲については、空気量の増加とともに耐久性指数が増加する傾向が認められた。

(4) 硬化体の細孔量

鎌田らは耐凍害性に悪影響を与える細孔の範囲として細孔半径で 178~10000 Å を挙げている⁹⁾。そこで、図-16 に全範囲の 15~30000 nm、上記範囲に相当する 40~2000 nm および細孔径分布で変化がみられた 100~2000 nm の範囲の細孔量と耐久性指数との関係を示して

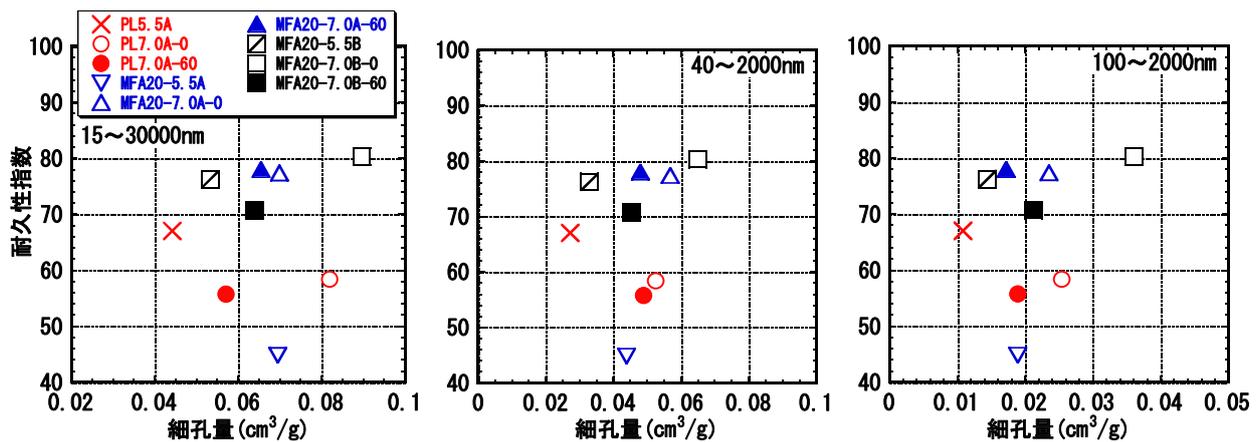


図-16 耐久性指数と細孔量の関係

いる。いずれの区間においても経時変化後に打ち込んだ供試体では細孔量の減少が確認できるが、耐久性指数との明確な相関はみられなかった。

4. まとめ

本研究では MFA を混和したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響について検討することを目的として、フレッシュ性状の経時変化試験、圧縮強度試験および凍結融解試験を行い、細孔径分布および気泡間隔係数等の硬化体の空隙組織との関係について検討した。その結果、本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) MFA の混和の有無に関わらず、フレッシュ時に比べて、経時変化後に打ち込んだ供試体では空気量および細孔量は減少するものの、気泡間隔係数に大きな変化はなく、耐凍害性に対する影響も小さい。
- 2) MFA コンクリートにおいても気泡間隔係数 300 μm 以下となる気泡を確保することで、良好な耐凍害性を有することができる。
- 3) 150 μm 以下の気泡の量が多いほど、耐凍害性が高い傾向にある。
- 4) 耐久性指数とフレッシュ時の空気量および細孔量との相関性は明確でない。

以上、MFA を混和したコンクリートのフレッシュ時の経時変化が耐凍害性に及ぼす影響は小さく、プレーンコンクリートと同様に空気量の調整によって耐凍害性を確保できると考えられるが、一部、気泡間隔係数が大きくなり、耐久性指数が低下した調査がみられた。これが MFA 混和の影響によるものかを明らかにするには、さらなるデータの蓄積を行い検証する必要がある。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費（基盤研究 (C) 平成 29~31 年度、研究代表者：大谷俊浩、課題番号：17K06648）の支

援を受けて実施したものである。また、本研究の実施に際し、本学学生の日高健吾君、北川竜一君、桑原雄大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) 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, 2011.7
- 2) 上田賢司ほか: フライアッシュを混和したフレッシュコンクリートのスランプおよび空気量の経時変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.85-86, 2015.9
- 3) 千歩修, 浜幸雄: フライアッシュコンクリートの空気連行性・気泡組織と耐凍害性, 日本建築学会構造系論文集, 第 67 巻, 第 558 号, 1-6, 2002.8
- 4) 千歩修, 劉宏涛: フライアッシュコンクリートの静置による気泡組織・耐凍害性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.963 - 964, 2004.7
- 5) 坂田昇, 橋本学, 菅保匠, 緒方英彦: 中庸熱フライアッシュコンクリートを用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.895-900, 2013.7
- 6) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007.10
- 7) 土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案), 1999.4
- 8) 濱幸雄, 平野彰彦, 田畑雅幸, 新大軌: コンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 634 号, pp.2061-2067, 2008.12
- 9) 鎌田英治, 千歩修, 田畑雅幸, 田中宏和: コンクリートの耐凍害性におよぼす細孔構造の役割についての統計的解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 487 号, pp.487-495, 1996.9