

論文 膨張材と加熱改質フライアッシュを併用したコンクリートの特性に関する研究

秋吉 善忠*1・大谷 俊浩*2・佐藤 嘉昭*3・上田 賢司*4

要旨：膨張材と加熱改質フライアッシュを併用したコンクリートについて、フライアッシュの強度寄与率を用いて材齢 28 日強度が同等となるように配（調）合設計を行い、フレッシュ性状、圧縮強度、拘束膨張および乾燥収縮ひずみ、耐凍害性について実験を行った。その結果、圧縮強度は若材齢ではほぼ同等で、材齢 91 日以降では増加する傾向にあること、簡易拘束膨張ひずみは大差なく乾燥収縮ひずみは数十 μ 小さくなることわかった。また、耐凍害性はフライアッシュ原粉を用いた場合には著しく低下するが、加熱改質フライアッシュを用いた場合には同等であることを示した。

キーワード：フライアッシュ、膨張材、圧縮強度、強度寄与率、簡易拘束膨張、乾燥収縮、耐凍害性

1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化を図る方法として、コンクリートの収縮ひび割れを低減することや、コンクリート組織を緻密化し外部からの劣化因子の侵入を抑制することが重要である。これらの性能をコンクリートに付与する方法として、本研究では、収縮ひび割れの低減に有効である膨張材と、ポゾラン反応による組織の緻密化で物質移動抵抗性の向上が図れるフライアッシュ（以下、FA）に着目した。

FA はコンクリートに様々な品質向上効果を付与できる材料であるが、その一方で未燃炭素の影響により普通コンクリートに比べて空気量の経時変化が大きいとされており¹⁾、特に寒冷地においては所要の耐凍害性を確保するために特別な配慮が必要と考えられる。著者らが開発した未燃炭素を 1.0%以下に抑えた FA（加熱改質フライアッシュ Modified Fly Ash, 以下 MFA）²⁾ は、AE 剤を吸着する未燃炭素が少なく、普通コンクリートとほぼ同量の AE 剤で安定した空気量を確保することが可能である。

膨張材と FA の効果については既に多くの研究がなされ膨大な量のデータが蓄積されているが^{例えば 3,4)}、これらの混和材を併用したデータは少なく、特に材齢 28 日強度を同等とした場合においては十分な検討がされていない。そこで本研究では、FA および MFA と膨張材を併用したコンクリートの特性を明らかにすることを目的としてフレッシュ性状の経時変化、圧縮強度、ヤング係数、簡易拘束膨張および乾燥収縮ひずみ、ならびに凍結融解抵抗性に関する実験を行った。

2. 実験

2.1 実験概要

本研究では、2 シリーズの実験を行った。シリーズ 1 では膨張材とフライアッシュを用いたコンクリートの主な特性を調べることを目的として、フレッシュ性状、圧縮強度、拘束膨張ひずみ、乾燥収縮ひずみ、凍結融解抵抗性に関する実験を行った。シリーズ 2 では、空気量の経時変化と、その経時変化が凍結融解抵抗性に与える影響を調べることを目的として、フレッシュ性状の経時変化、圧縮強度および凍結融解抵抗性に関する実験を行った。

2.1 使用材料

表-1 に使用材料、表-2 に混和材の物性を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。FA は、製造工場の異なる MFA2 種類と加熱改質前の原粉 1 種類の計 3 種類を使用した。膨張材は低添加型タイプの石灰系の

表-1 使用材料

種別	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:3.16g/cm ³
混和材	-	表-2 参照
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%
粗骨材	G	硬質砂岩碎石 表乾密度:2.64g/cm ³ 吸水率:0.76%
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(高性能タイプ)

表-2 混和材の物性

種類	記号	SiO ₂ (%)	I _g loss (%)	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	活性度	
						σ_{28}	σ_{91}
膨張材	EX	-	1.2	3610	3.16	-	-
フライアッシュ	FA1	54.45	4.1	4393	2.29	90	101
	MFA1	57.77	0.7	4068	2.32	88	96
	MFA2	61.03	0.4	2873	2.05	80	90

*1 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)

*2 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)

*3 大分大学 名誉教授 工博(フェロー会員)

*4 大分県生コンクリート工業組合 博士(工学)(正会員)

表-3 調合表および試験項目

No.	記号	FA/B (%)	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						シリーズ 1					シリーズ 2			
						W	C	FA	EX	S	G	圧縮	ヤング係数	乾燥収縮	拘束膨張	凍結融解	フレッシュ経時変化	圧縮	ヤング係数	凍結融解
1	N	0	50.0	50.0	46.0	158	316	0	0	831	987	○	○	○	○	○	-	-	-	-
2	MFA1-20	20	53.8	43.0	45.2	150	279	70	0	804	987	○	○	-	-	○	-	-	-	-
3	MFA1-15	15	52.6	44.8	45.3	153	291	51	0	807	987	○	○	-	-	-	-	-	-	-
4	N-EX20	0	53.4	50.0	46.0	158	296	0	20	831	987	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	MFA1-20-EX15	20	56.7	43.0	44.7	153	270	71	15	790	987	○	○	-	○	-	-	-	-	-
6	MFA1-20-EX20	20	57.7	43.0	44.7	153	265	71	20	790	987	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7	FA1-20-EX20	20	57.7	43.0	44.0	158	274	73	20	765	987	○	○	-	-	-	○	○	○	○
8	MFA2-20-EX20	20	57.7	43.0	43.6	158	274	73	20	755	987	○	○	○	○	-	○	○	○	○
9	MFA1-25-EX20	25	59.3	41.3	44.1	153	258	93	20	771	987	○	○	-	-	-	-	-	-	-

ものを使用した。細骨材および粗骨材は、大分県産の山砂および硬質砂岩砕石（2005）を、混和剤は高機能タイプの AE 減水剤を使用した。

2.2 調合

表-3 にコンクリートの調合を示す。基準コンクリートの水セメント比は 50%，単位水量は 158kg/m³，細骨材率は 46.0%とした。FA の強度寄与率は過去の実験結果³⁾に基づき 0.3 に設定し、基準コンクリートと材齢 28 日強度が同等となるよう水セメント比を調整した。FA 置換率は 0%，15%，20%，25%とし、膨張材はセメントの内割りで、0，15，20kg/m³添加した。粗骨材量は基準コンクリートと同一とした。

シリーズ 1 における目標スランブは 12±1.5cm，目標空気量は 5±1%とし、所要のフレッシュ性状が得られるよう、単位水量および混和剤添加率を調整した。シリーズ 2 においては、単位水量はシリーズ 1 と同一で、混和剤添加率は一定とし、所要の空気量が得られるよう AE 剤の使用量を調整した。

2.3 練混ぜおよび供試体作製

コンクリートの打設は、シリーズ 1 は夏期（2017 年 8 月）に、シリーズ 2 は標準期（2017 年 11 月）に屋外に開放された実験室で行った。練混ぜには容量 100L の強制二軸ミキサを使用し、練混ぜ時間は空練り 15 秒，本練り 60 秒とした。練混ぜ後、直ちにスコップでコンクリートを練り返し、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、各種供試体を作製した。また、シリーズ 2 では注水後 64 分においても圧縮強度および凍結融解試験、気泡間隔係数測定用の供試体を作製した。

コンクリートの締固めは突き棒および木槌で各 JIS に準じて行い、ブリーディングが収まってから金鏝でコンクリート上面を平滑にし、その後、濡れウエースとビニールシートで覆った。脱型は翌日行い、所定の材齢まで標準養生を行った。なお、簡易拘束膨張試験用の供試体は封かん養生とした。詳細は後述する。

2.4 試験方法

表-4 に試験項目を示す。

表-4 試験項目

試験項目	試験方法	試験開始材齢	
		シリーズ 1	シリーズ 2
スランブ	JIS A 1101	練上り直後	練上り直後、注水後 20, 40, 64 分
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		
簡易拘束膨張	JCI-S-009-2012	打設後 2 時間	-
圧縮強度	JIS A 1132	1,3,7,28,91 日, 1 年	28 日
	JIS A 1108		
ヤング係数	JIS A 1149	28,91 日,1 年	28 日
乾燥収縮	JIS A 1129-2	7 日から	-
凍結融解	JIS A 1148(A 法)	28 日	28 日
気泡間隔係数	ASTM C 457		

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状に関する各試験は表-4 に示す各 JIS に準じて行った。経時変化について、コンクリートは練り舟に乾燥しないように静置し、練上がり直後、注水から 20 分、40 分および 64 分後に試料をスコップで練り返してスランブおよび空気量の測定を行った。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。

(2) 簡易拘束膨張試験

簡易拘束膨張試験は、JCI-S-009-2012「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法」に準じて行った。型枠にはぶりき製の軽量型枠を用い、コンクリート上面の均しが終わった後、プラスチックフィルムで型枠の上面を密閉し 20℃の恒温室で封かん養生とした。ひずみの測定は打込み後 2 時間以内に開始し、材齢 28 日まで測定を継続した。測定終了後、圧縮強度試験を行った。

(3) 圧縮強度およびヤング係数試験

圧縮強度試験は所定の材齢まで標準養生を行ったφ100×200mm の円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準じて、材齢 1，3，7，28，91 日および 1 年で行った。また、コンプレッソメータを用いてひずみの測定を行い、割線ヤング係数を算出した。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は、100×100×400mm の角柱供試体を用い、JIS A 1148 の A 法に準じて行った。試験は 300 秒

イクルまで行い、30 サイクルごとに質量および一次共鳴振動数を測定し、質量変化率、相対動弾性係数を算出した。気泡間隔係数の測定は、φ100×200mm の円柱供試体を用い、各条件 2 体ずつとした。測定面は供試体の両端部から 2.5cm の箇所を水平に切断した面とし、切断面はコンパクトポリシャーで鏡面研磨を行った。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、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。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

各シリーズにおける練上り直後のフレッシュ性状の試験結果を表-5 に示す。夏期に打設したシリーズ 1 について、MFA1 を用いたコンクリートは無混合のものに比べて単位水量が 5~8kg/m³ 低減したが、原粉である FA1 と、比表面積が比較的小さな MFA2 を用いた場合には単位水量は低減せず、逆に混和剤添加率が 2 割ほど増加した。また、FA1 は未燃炭素量の影響により AE 剤の量が普通コンクリートの 5 倍程度となった。膨張材の有無による影響は見られなかった。

シリーズ 2 におけるフレッシュ性状の試験結果について、スランプロスおよび空気量の減少量を図-1 に示す。図より、スランプロスの低下量は MFA を用いた場合には同等か 1~3cm 小さくなった。空気量の減少量は MFA では平均で 0.3% 程度小さくなったが大きな差は見られなかった。しかしながら、FA では経時に伴い空気量の減少量も大きくなる傾向を示し、64 分経過時では 1.5% 程度差が見られた。これは既往の文献の傾向と同様であり⁵⁾、強熱減量が JIS II 種の範囲内であっても、強熱減量が大きい場合には、たとえ初期の空気量を確保しても空気量のロスが大きくなるため配慮が必要であることがわかる。

3.2 圧縮強度

図-2 にシリーズ 1 における圧縮強度の試験結果を示す。図中の点線は N および N-EX20 について、材齢 28 日における圧縮強度の値を示したものである。膨張材の有無でそれぞれ比較すると、FA 種類や置換率によればらつきはあるものの、ほぼ同等となっている。膨張材を用いた場合でも FA の強度寄与率を考慮することによって配（調）合設計が可能であることがわかる。

図-3 にシリーズ 1 における圧縮強度と MFA1 置換率の関係を示す。図より、材齢 7 日において MFA1 置換率の増加に伴いやや低下する傾向にあるが、材齢 1 日および 3 日では置換率による差は見られず、若材齢でも強度低下はほとんど認められない。また、材齢 91 日以降では膨張材の有無に関わらず置換率の増加に伴い圧縮強度がほぼ直線的に増加しており、材齢 1 年においては MFA 無

表-5 フレッシュ性状

シリーズ	No.	記号	W (kg/m ³)	AD (B×%)	AE 剤量	スランプロス (cm)	空気量 (%)	C.T. (°C)
1	1	N	158	0.70	3.0A	11.5	5.7	28.5
	2	MFA1-20	150	0.70	3.2A	12.0	5.0	29.5
	3	MFA1-15	153	0.70	3.2A	12.8	5.5	29.0
	4	N-EX20	158	0.70	3.0A	13.0	5.1	30.0
	5	MFA1-20-EX15	153	0.70	3.2A	13.0	5.9	31.0
	6	MFA1-20-EX20	153	0.70	2.8A	12.1	5.2	31.5
	7	FA1-20-EX20	158	0.85	15A	11.1	4.6	32.0
	8	MFA2-20-EX20	158	0.85	2.8A	10.5	5.9	33.0
	9	MFA1-25-EX20	153	0.70	2.8A	11.9	5.5	32.5
2	4	N-EX20	158	0.70	1.5A	14.5	5.1	18.5
	6	MFA1-20-EX20	153	0.70	2.5A	15.5	5.5	18.0
	7	FA1-20-EX20	158	0.70	13A	17.5	5.1	19.0
	8	MFA2-20-EX20	158	0.70	2.5A	16.5	5.6	18.0

C.T.:コンクリート温度, 1A:B×0.02%

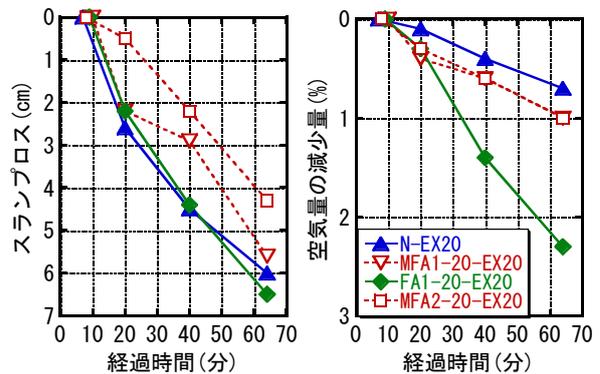


図-1 スランプロスおよび空気量の減少量(シリーズ 2)

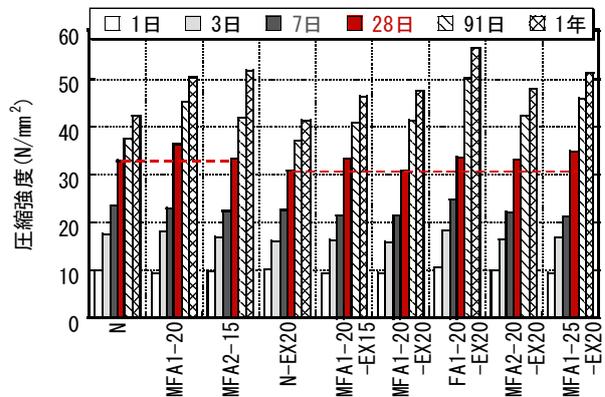


図-2 圧縮強度の試験結果(シリーズ 1)

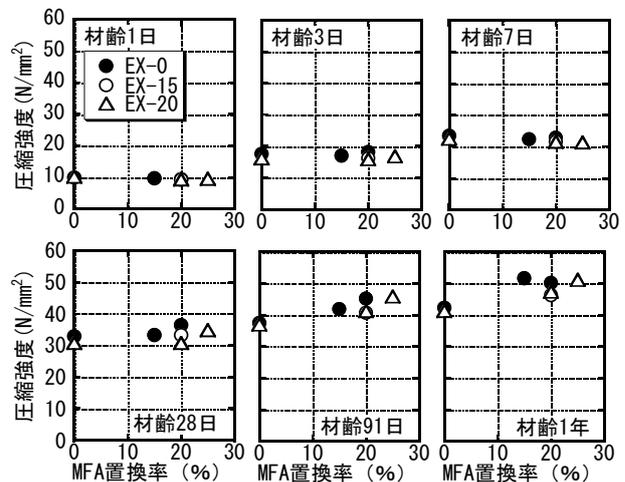


図-3 圧縮強度と MFA1 置換率の関係 (シリーズ 1)

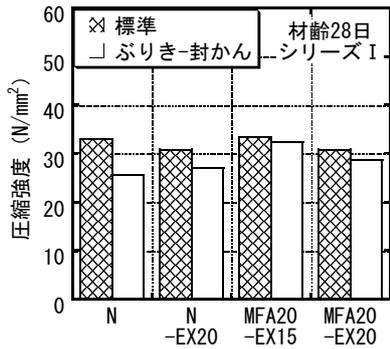


図-4 圧縮強度と養生条件 (シリーズ 1)

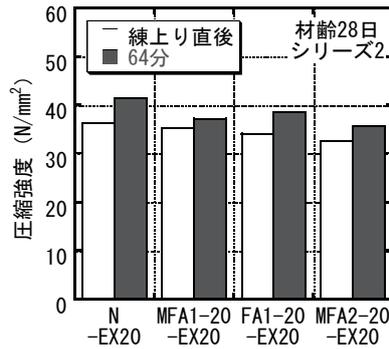


図-5 圧縮強度 (シリーズ 2)

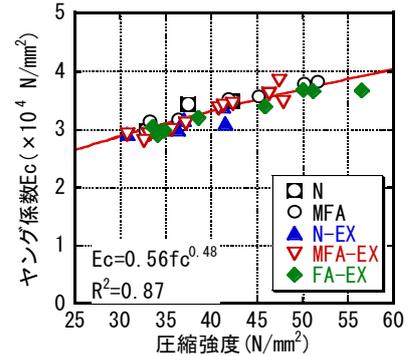


図-6 ヤング係数と圧縮強度の関係

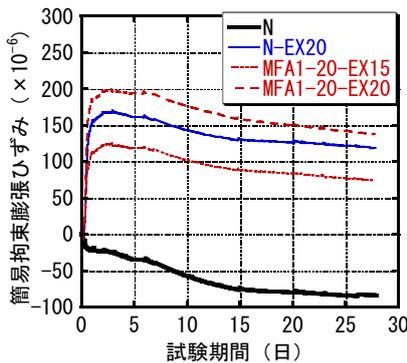


図 7 簡易拘束膨張ひずみの経時変化

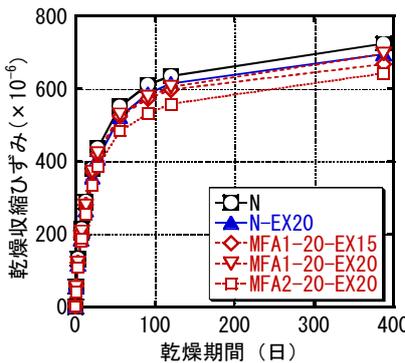
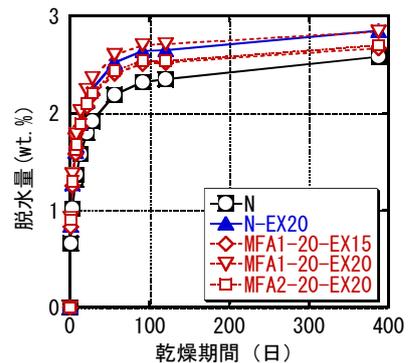


図-8 乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化



混合に比べて 2 割程度大きな値を示した。また図-2 に示すとおり、原粉の FA についても長期強度が増進しており、膨張材を併用した場合でも加熱改質の有無に関わらず FA コンクリートは長期強度発現性を有することがわかった。

図-4 に養生条件が異なる圧縮強度の試験結果を示す。標準養生では、膨張材を用いた場合に圧縮強度は 6%ほど低下したが、N-EX20 と MFA20-EX20 を比較すると同等であり、本実験の調合条件では MFA の併用が悪影響を及ぼしていないことがわかる。ぶりき製型枠で封かん養生を行ったものでは N に比べて強度が高く、MFA20-EX20 では 1 割程度高い強度を示した。

図-5 にシリーズ 2 における圧縮強度の試験結果を示す。いずれの調合についても注水後 64 分の圧縮強度が増加している。これは、一般に空気量 1%の減少で圧縮強度は 4~6%増加すると言われており、空気量の減少による影響と考えられる。ただし、N-EX や FA1-EX では強度の増加率が大きく、今後、硬化体組織の空隙の状況について確認する必要があると思われる。

3.3 ヤング係数

図-6 にヤング係数と圧縮強度の関係を示す。図中の線は両者の関係を累乗近似したものである。ヤング係数は膨張材や MFA の有無に関わらず、圧縮強度の関数として示されることがわかった。

3.4 簡易拘束膨張ひずみ

図-7 に簡易拘束膨張ひずみの経時変化を示す。簡易拘束膨張ひずみは膨張材量が多いほど大きく、膨張材 20kg/m³ では 150~200 μ 程度である。また、MFA と併用した方が 30 μ ほどひずみは大きくなっている。これは低発熱型のセメントを用いた場合に膨張ひずみが增大するとの報告⁶⁾と一致するが、材齢 28 日強度を同等とした MFA コンクリートにおいては、膨張ひずみの差は小さく、前述した通り圧縮強度に対する影響は小さいものと考えられる。

3.5 乾燥収縮ひずみ

図-8 に乾燥収縮ひずみおよび脱水量の経時変化を示す。膨張材を用いた場合に、収縮ひずみは N に比べて全体的に小さくなる傾向にあり、乾燥期間 182 日において 600 μ 前後である。MFA を併用したものを含めると最大で 100 μ 程度小さな値を示した。脱水量は膨張材を用いた場合に N に比べ大きくなる傾向にあり、乾燥期間 1 年において 1 割程度大きな値を示した。また、MFA の混和による大きな差は認められなかった。

3.6 凍結融解

(1) 相対動弾性係数

図-9 に各シリーズにおける相対動弾性係数の推移を示す。図より、シリーズ 1 について、すべての調合について相対動弾性係数は 85%以上であり、膨張材や MFA の混和による大きな差は見られず耐凍害性に優れる結果

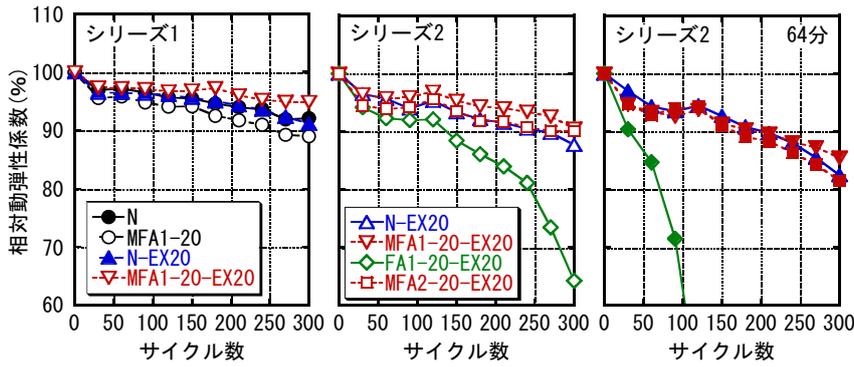


図-9 相対動弾性係数の推移

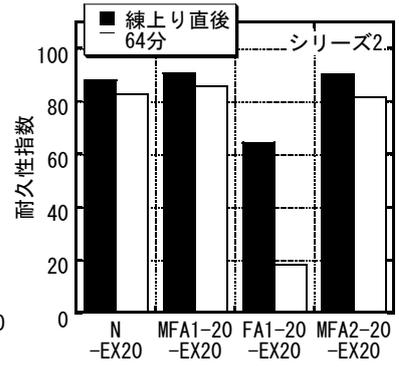


図-10 耐久性指数

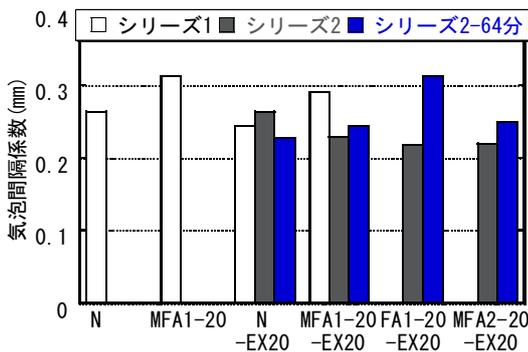


図-11 気泡間隔係数の測定結果

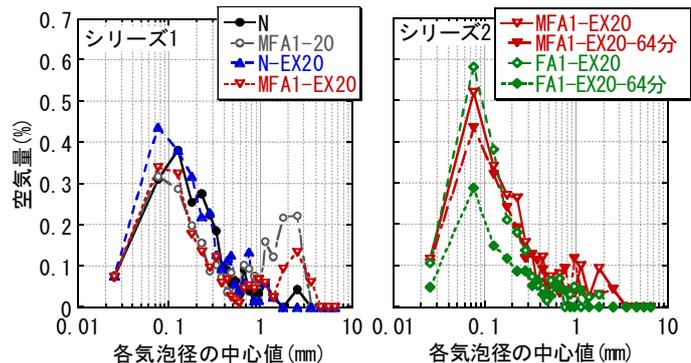


図-12 気泡分布

となった。図示していないが、質量減少率も大差はなかった。膨張材を用いたコンクリートの耐凍害性は、単位膨張材量が多く拘束度が低い場合に低下することが知られているが^{例え7)}、その一方で比較的膨張材量が少ない範囲では、無拘束状態であっても普通コンクリートと同程度の耐凍害性を示すとの報告もある⁸⁾。本実験においては、水セメントが50~60%程度であり膨張材量も20kg/m³と比較的少量であったことから、膨張材の混和が耐凍害性に悪影響を及ぼさなかったものと思われる。

シリーズ2について、原粉であるFA1を用いたコンクリートの相対動弾性係数が著しく低下した。特に、注水後64分経過時のコンクリートでは、試験開始直後から相対動弾性係数が大幅に低下しており、100サイクル程度で60%を下回る結果となった。したがって、未燃炭素量に応じて目標の空気量を適切に設定し品質管理することが肝要である。

(2) 耐久性指数

図-10にシリーズ2における耐久性指数の算出結果を示す。64分経過時のコンクリートで耐久性指数が低下する傾向にあり、特にFA原粉では20%を下回っており低下が著しい。その他の調査では5~10%程度低下した。

(3) 気泡間隔係数および気泡分布

図-11に気泡間隔係数の測定結果を示す。気泡間隔係数は0.2~0.3mm程度の範囲内にあり、シリーズ1ではMFAを用いた場合に膨張材の有無に関わらず0.05mm程

度大きくなっている。また、シリーズ2ではN-EX20を除き64分経過後の方が気泡間隔係数は大きくなる傾向にある。

図-12に気泡分布を示す。坂田らは気泡径0.15mm未満の気泡量が多いほど耐凍害性が高いことを明らかにしている⁹⁾。図より、シリーズ1では0.15mm未満の気泡分布に大きな差は見られないが、シリーズ2では原粉FA1を用いたもので0.15mm未満の気泡量が大幅に低下しているが、MFAでは低下量が小さいことがわかった。

(4) 耐久性指数と各影響因子の関係

図-13に耐久性指数とフレッシュ時および硬化後の空気量ならびに気泡間隔係数との関係を示す。なお、図中の色塗りのマーカーは経時変化後(64分)のコンクリートを示している。また、硬化後の空気量とは、気泡間隔係数の算出時に得られた気泡径分布から算出したものであり、直径が0.01~7mmの気泡を対象としたものである。

図より、空気量と耐久性指数との関係について、フレッシュ時および硬化後の空気量の低下とともに耐久性指数は低下する傾向を示している。

気泡間隔係数は0.2~0.3mm程度の範囲に分布しているが、FA1を除くと同範囲においては気泡間隔係数による明確な影響は認められなかった。より広範囲においてさらにデータを蓄積する必要があると考えられる。また、膨張材およびMFAの有無による影響は認められないが、経時変化後のコンクリートでは気泡間隔係数は同等であ

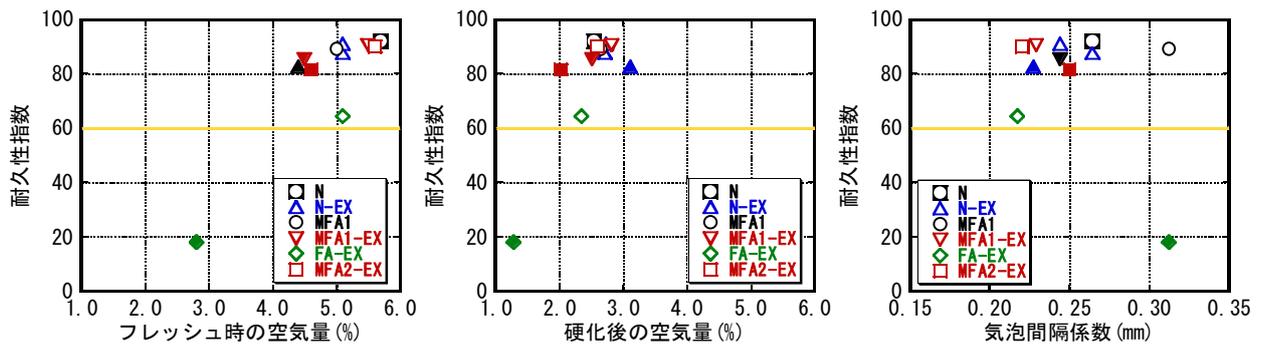


図-13 耐久性指数と各影響因子の関係

っても耐久性指数は5~10%ほど小さな値を示した。FA1については、気泡間隔係数が0.25mm以下であってもMFA1に比べて耐久性指数が小さくなっており、未燃分が含まれるFAを用いたコンクリートは気泡間隔係数が同等の値の場合でも耐久性指数が低くなるという既往の研究¹⁰⁾と同様の傾向を示した。

4. まとめ

本研究では、膨張材とMFAを併用したコンクリートの特性を明らかにすることを目的として、普通コンクリートと材齢28日強度を同等とした調合条件において、フレッシュ性状の経時変化、圧縮強度、簡易拘束膨張および乾燥収縮ひずみ、凍結融解抵抗性に関して実験を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) コンクリートのスランプおよび空気量の経時による減少量はMFAを用いた場合でも大差ない。
- (2) 膨張材とMFAを併用したコンクリートの圧縮強度は、若材齢において普通コンクリートと同等であり、材齢91日以降では膨張材の有無に関わらずMFA置換率の増加に伴い大きくなる。
- (3) 膨張材を用いたコンクリートの簡易拘束膨張ひずみはMFAを併用した場合に若干大きくなるものの大差は無い。また、乾燥収縮ひずみは膨張材とMFAを併用した場合に同等か数十 μ ほど小さくなる。
- (4) 膨張材とMFAを併用したコンクリートの凍結融解抵抗性は普通コンクリートと同等であり、空気量が経時により低下した場合でも耐凍害性を有する。しかしながら、未燃分が4%程度の原粉を用いた場合には、所要の空気量を確保し気泡間隔係数が0.25mm以下でも耐凍害性は低下する傾向にある。また空気量が経時により低下した場合には耐凍害性が著しく低下する。

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、尾崎佑輔君、松尾理菜さんのご助力を得ました。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長瀧重義ほか：フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価，セメント技術年報 41, pp.371-374, 1987 年
- 2) 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査設計に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.167-172, 2011.7
- 3) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状，2013.7
- 4) 土木学会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術，利用拡大に向けた設計施工試案，2010.1
- 5) 千歩修，濱幸雄：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558号，pp.1-6, 2002.8
- 6) 長塩靖祐，杉橋直行，名倉健二，郭度連：低熱ポルトランドセメントとフライアッシュおよび膨張材を使用したコンクリートの特性に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.166-171, 2012.7
- 7) 竹下永造，長塩靖祐：膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.817-822, 2015.7
- 8) 日本建築学会：膨張材を使用するコンクリートの調査設計・施工指針案・同解説，1982
- 9) 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察，コンクリート工学論文集，Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012.1
- 10) 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，日本建築学会学術講演梗概集，pp.963-964, 2004.8