

論文 フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす環境温度の影響に関する研究

秋吉 善忠*1・吉川 悟史*2・大谷 俊浩*3・佐藤 嘉昭*4

要旨: 環境温度がフライアッシュモルタルの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を調べることを目的として、環境温度 10℃, 20℃ならびに 35℃において、材齢 28 日の強度レベルを同一にした、フライアッシュ置換率 0, 10 および 20% のモルタルを用いて、鉄筋埋設型の収縮ひび割れ試験を行った。その結果、自由収縮ひずみはやや小さくなること、Basic Creep ひずみは大差ないが、Total Creep ひずみは 10℃の場合に置換率の増加に伴いやや大きくなる傾向にあることを示した。また、ひび割れ発生時の応力強度比は、同じひび割れ発生期間で比較すると、20℃より 35℃の方が大きい、調合による明確な差は認められなかった。

キーワード: フライアッシュ, 自由収縮, クリープ, 収縮ひび割れ, 環境温度

1. はじめに

我が国のベースロード電源である火力発電所から排出されるフライアッシュ（以下、FA と示す）は、その大半がセメント原料として利用されている現状にある。しかしながら、CO₂ 排出量の削減やコンクリートの品質向上等の FA の効果を考慮すると、より積極的に混合セメントあるいは混和材としての利用を図ることが望ましい。

FA を用いたコンクリートが、遮塩性や水密性、アルカリシリカ反応の抑制効果等に優れることは明らかにされているが、ひび割れ抵抗性に関しては十分な知見が得られていない¹⁾²⁾³⁾。特に、FA を用いた研究の多くは、セメントあるいは細骨材の代替として用いた場合がほとんどであり、基準コンクリートと同一の強度レベルにおいて、ひび割れ抵抗性を比較検討したものは少ない。また、ひび割れ抵抗性に及ぼす影響因子は様々であり、材料や調合条件のみならず環境条件の影響なども考慮して総合的に検討する必要がある。

収縮ひび割れは、拘束により発生する応力がモルタルの引張強度を超えた際に発生するが、拘束応力の増加は、

拘束度合い、湿度や温度等の環境条件の影響を受ける。異なる環境条件下で実験を行うことで、発生する拘束応力の増加速度が変化し、その増加速度とモルタルの水和による引張強度増進との関係性を検討することによってひび割れ抵抗性を評価できるものと考えられる。著者らは既に湿度が異なる条件下で実験を行っているが⁴⁾、環境温度が異なる環境下では未だ検討できていない。

以上より、本研究では、環境温度が FA 混和モルタルのひび割れ抵抗性に与える影響を明らかにすることを目的として、材齢 28 日強度が同程度となるよう調合したモルタルを用いて、拘束ひび割れ実験を行った。

2. 実験

2.1 実験概要

試験項目および供試体数を表-1 に示す。環境温度は 10℃, 20℃, 35℃の 3 水準とし、湿度はすべて 60±5%R.H. とした。拘束ひび割れの供試体は、10℃および 35℃では各 6 体、20℃では各 9 体とした。

表-1 実験項目および供試体数

試験項目	供試体寸法 (mm)	ひずみ測定ゲージ (形状)	養生方法	試験材齢 (日)	供試体数 (体)	
フレッシュ性状	フロー(0, 15 打) 空気量	—	—	—	—	
硬化性状	圧縮強度	Φ50×100	水中※	7, 14, 28	各 4	
	割裂引張強度試験		気中※		各 4	
圧縮 クリープ	Basic Creep	Φ50×100	各試験温度下にて封かん	7~	各 2	
	Total Creep				小型埋込ゲージ (φ8×50mm)	各 3
	自己収縮					
	自由収縮					
収縮ひび割れ試験	拘束ひび割れ試験	40×40×160	箔ゲージ (2mm) (図-1 参照)		10℃, 35℃: 各 6 20℃: 各 9	

※ 材齢 7 日まで封かん養生

*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 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)

*3 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)

*4 大分大学 名誉教授 工博(フェロー会員)

2.2 使用材料および調合

表-2 に使用材料を、表-3 に用いたモルタルの調合を示す。基準となるモルタル調合（以下、PL）は、水セメント比 55%，スランプ 18cm，空気量 4.5% のコンクリートの調合を基とし、コンクリートの粗骨材を取り除いたものとした。FA の置換率は 10，20%（以下、FA10 および FA20）とし、一般的なコンクリートの強度管理材齢が 28 日であることを考慮して、PL に対して 20℃水中養生を行った場合の材齢 28 日圧縮強度が同等となるよう、既報⁵⁾の結果を参考に FA の強度寄与率を 0.3 として W/B を決定した。混和剤はコンクリートと同一の使用量で添加した。

FA は、加熱処理を行うことによってコンクリートのフレッシュ性状に悪影響を及ぼす未燃炭素を強熱減量値で 1% 以下に低減した加熱改質 FA⁶⁾を使用した。

2.3 モルタルの練混ぜおよび養生方法

モルタルの練混ぜは温度条件ごとに行い、材料の保管、練混ぜ、供試体の作製および養生は全て各温湿度条件に調整した恒温恒湿室内で行った。練混ぜには、容量 50L のモルタルミキサを用い、砂、セメント、FA を投入し 15 秒空練りをした後、水と混和剤を投入して 2 分間練り混ぜた。モルタルを打設後、表面を金鏝で均しポリエチレンシートで覆い、さらに濡れたウエースおよびビニールシートを被せ脱型まで封かん養生とした。

脱型は 35℃および 20℃では材齢 1 日で、10℃では材齢 6 日で行い、材齢 7 日までそれぞれの温度条件下で封かん養生とした。その後、圧縮強度試験用供試体は FA 混和モルタルのポテンシャルを評価するため各温度条件下で水中養生とした。割裂引張強度試験用供試体はひび割れ試験と同様に材齢 7 日以降は気中養生とした。

2.4 試験方法

(1) 圧縮強度および割裂引張強度試験

圧縮強度試験は JIS A 1106 に、割裂引張強度試験は JIS A 1113 に準拠し、材齢 7，14，28 日の 3 材齢で行った。試験体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体とした。なお、ひび割れ試験結果との直接的な比較においては直接引張強度試験が望ましいが、実験の都合上、簡易的に行える割裂引張強度試験を行った。

(2) 圧縮クリープ試験

圧縮クリープ試験は JIS A 1157 に準拠し、材齢 7 日から測定を開始した。荷重応力は材齢 7 日圧縮強度の 30% とした。試験体は $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体とし、試験はスプリング式のモルタル圧縮クリープ試験機を用い、荷重はジャッキ加圧方式とした。無荷供試体のひずみも同 JIS に準じて測定した。Basic Creep ひずみおよび自己収縮ひずみ測定用の供試体は、材齢 6 日において供試体表面にパラフィン塗布し、さらにアルミシートで覆

表-2 使用材料

記号	種類	使用材料
C	セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
FA	加熱改質 フライ アッシュ	フライアッシュ II 種 密度：2.16g/cm ³ ，強熱減量：0.7% 平均粒形：20.3 μm ，比表面積：2760cm ² /g
W	水	上水道水
S	細骨材	山砂 表乾密度：2.61g/cm ³ 吸水率：2.60%，実積率：62.6%
Ad.	混和剤	AE 減水剤 標準タイプ

表-3 モルタルの調合

調合	W/C (%)	W/B (%)	FA/(C+FA) (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad. (B×%)
				C	FA	W	S	
PL	55.0	55.0	0	577	0	317	1305	0.25
FA10	56.8	51.2	10	550	61	312	1267	0.25
FA20	59.1	47.3	20	523	131	309	1212	0.25

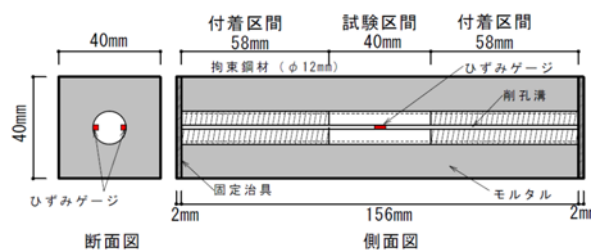


図-1 モルタル供試体詳細図



写真-1 モルタル供試体型枠の外観

い封かん状態とした。各ひずみの測定には小型埋込ゲージを用いた。

(3) 拘束ひび割れ試験

拘束ひび割れ試験用供試体の詳細図を図-1 に、型枠の外観を写真-1 に示す。モルタルの収縮ひび割れ試験方法は、内部拘束型とし、型枠は JIS R 5201 に規定される $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ を使用した。拘束鋼材は $\phi 12\text{mm}$ のみが丸鋼とし、無拘束となる試験区間を 40mm，付着区間（両端 58mm）はねじ加工して、モルタルとの付着を確保している。試験区間について、著者らは既報⁷⁾において、試験区間長さの影響を検討しており、その結果、試験区間長さが 40mm であれば、乾燥後 10 日程度までの期間は、鋼材のひずみとモルタル表面のひずみがある程度一致していることを確認した。ただし、この条件においても鋼材とモルタル表面のひずみにかい離がみられる供試体も存在していたため、若干のすべりの影響を内包している可能性があるが、モルタルのひび割れ特性を

比較する簡易的な試験方法としては十分であると判断し、試験区間長さを40mmとした。

鋼材のひずみの測定には図-1に示すとおり、ひずみゲージ（ゲージ長：2mm）を使用し、拘束鋼材の側面に深さ2mmの溝を切削し、その中にひずみゲージを貼り付けるとともに、リード線は溝に沿わせた。また、試験区間の処理として、熱収縮チューブを巻いた上にグリスを塗りモルタルとの付着を除去するようにした。なお、鋼材のひずみと荷重の関係は前もって検定し、後述するゲージの校正係数を求めている。ひび割れ試験の開始材齢は材齢7日であり、前述した温湿度条件下で乾燥を開始した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-4にフレッシュ性状結果一覧を示す。フロー値は、20℃ではFA置換率の増加に伴い小さくなる傾向が見られた。10℃と35℃ではFA置換率によらず同等であった。

空気量は調合間で差はあるものの、その差は1%未満であり、FA混和による影響はみられなかった。また試験温度35℃で最も大きく、10℃と20℃では同程度であった。

3.2 圧縮強度および割裂引張強度

図-2に圧縮強度の経時変化を示す。圧縮強度は、材齢7日では温度によらず、FA混和モルタルが若干小さかった。10℃では、材齢14日以降も同様の傾向であった。20℃および35℃では、材齢14日もしくは28日でPLと同等以上の強度を発現した。温度で比較すると、材齢によらず温度が高いほど圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。これは、養生温度が高くなるほど、水和反応ならびにポズラン反応が活発になるためであると考えられる。

図-3に割裂引張強度の経時変化を示す。割裂引張強度は、全体的にPLが最も大きく、FA混和モルタルは同等かやや小さくなった。試験温度で比較すると、10℃は他の温度に比べて小さいが、20℃と35℃は同程度であった。これは、材齢7日以降の養生条件が気中養生であり、温度が高いほど乾燥が進行するため、その後の反応が十

表-4 フレッシュ性状結果一覧

試験温度 (°C)	調合	フロー値 (mm)		空気量 (%)
		0打	15打	
10	PL	192	266	2.4
	FA10	186	264	2.7
	FA20	187	247	2.2
20	PL	214	※	2.1
	FA10	173	252	2.2
	FA20	150	244	2.3
35	PL	206	273	3.5
	FA10	208	268	3.2
	FA20	207	272	2.8

※フロー台以上となったため、測定値不明。

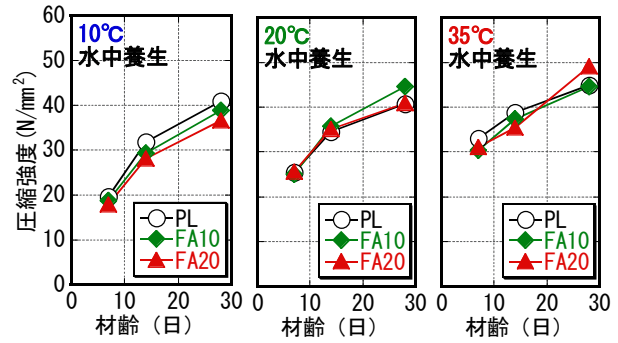


図-2 圧縮強度の経時変化

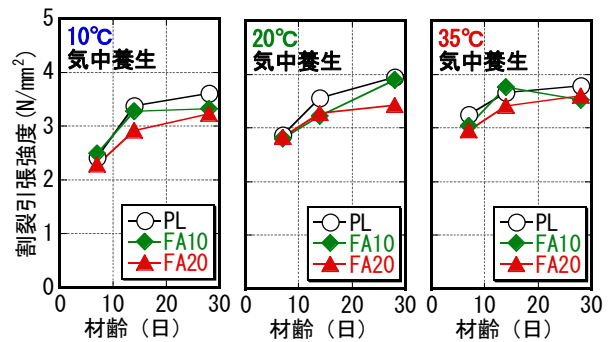


図-3 割裂引張強度の経時変化

分に進行しなかったことが原因として考えられる。

3.3 圧縮クリープ

図-4、図-5および図-6に無載荷時の自由収縮ひずみ、Basic CreepひずみおよびTotal Creepひずみの経時変化を示す。自由収縮ひずみは、10℃では測定開始から小さく、20℃と35℃では測定開始後は同程度であるが、約10日以降は35℃のひずみが収束し始め、20℃の方が大きくな

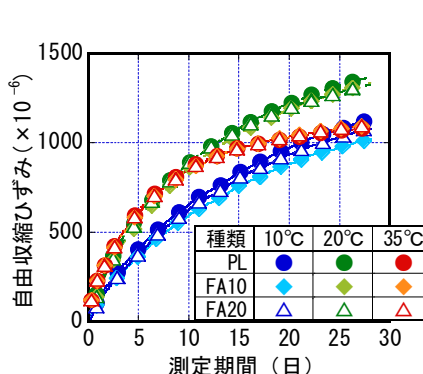


図-4 自由収縮ひずみ

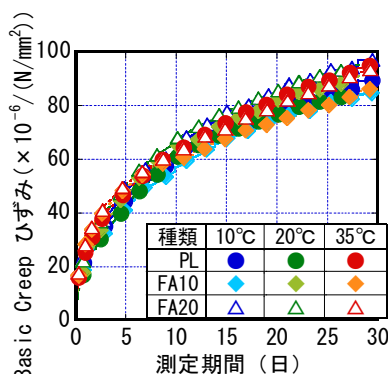


図-5 Basic Creep ひずみ

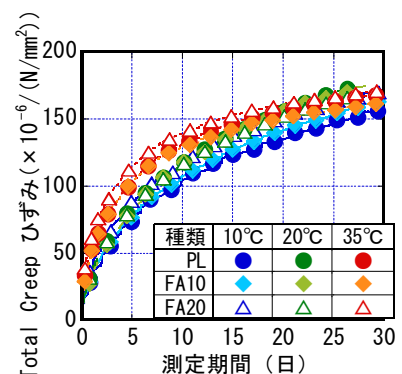


図-6 Total Creep ひずみ

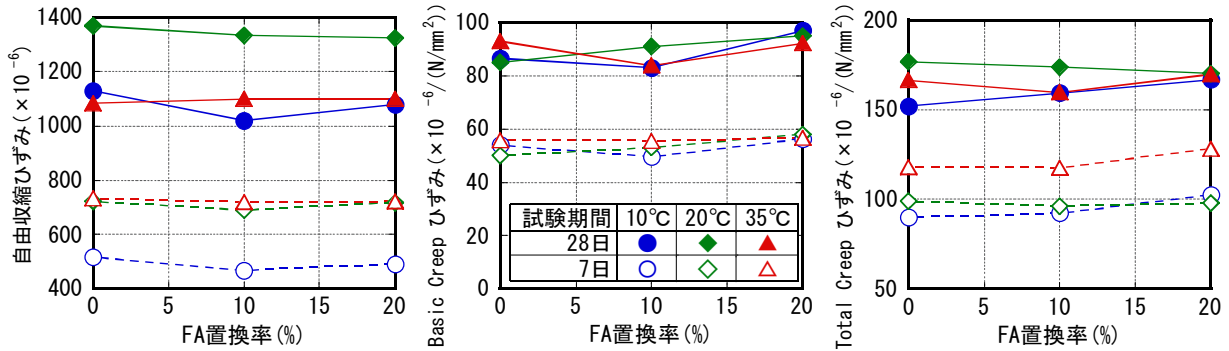


図-7 自由収縮ひずみおよび各クリープとFA置換率の関係

った。自己収縮ひずみは図示していないが、温度によらず同程度であった。Basic Creep ひずみも同様である。Total Creep ひずみは自由収縮ひずみの場合と同様の傾向を示した。

図-7に測定期間7日および28日における自由収縮ひずみおよび圧縮クリープひずみとFA置換率の関係を示す。図より、自由収縮ひずみは測定期間7日では大差ないが、28日では10°Cおよび20°CにおいてFA置換率10%および20%では同等かやや小さくなっており、置換率の増加に伴い、やや低下する傾向が見られた。低減量は最大で100 μ 程度であった。35°CではFA置換率による影響は認められない。

Basic Creep ひずみは、ややばらつきがあるがFA置換率による影響は明確ではない。Total Creep ひずみは、10°CではFA置換率の増加に伴いやや大きくなる傾向にあるが、その他の温度では大差ない。

3.4 拘束ひび割れ

表-5に測定期間28日までの拘束ひび割れ試験結果一覧を、測定期間中にひび割れが発生していない供試体も見られたため、表中の括弧内にはひび割れが発生しなかった供試体の測定期間中の最大値を示している。図-8に各調合の拘束応力および割裂引張強度の経時変化を示す。割裂引張強度近似曲線はCEB-FIP1990モデルコード式を基に最小二乗法により算出した値を示している。モルタルの拘束応力は、拘束鋼材のひずみを測定し、式(1)を用いて算出した⁶⁾。

$$\sigma_m = \frac{\varepsilon_s \times CF_s}{S_m} \quad (1)$$

- ここに、 σ_m : モルタルが受ける拘束応力 (N/mm²)
- ε_s : 拘束鋼材のひずみ (μ)
- CF_s : 鉄筋に埋設したひずみゲージの校正係数 (N/ μ)
- S_m : モルタルの断面積 (mm²)

(1) ひび割れ発生期間

試験温度 10°Cではすべての供試体でひび割れの発生は確認されなかった。20°Cでは、試験期間2~17日でひ

表-5 拘束ひび割れ試験結果一覧

試験温度	10°C			20°C			35°C						
	t	σ	σ/σ_s	t	σ	σ/σ_s	t	σ	σ/σ_s				
PL	①	(28.0)	(3.62)	(1.00)	(13.5)	(3.18)	(0.84)	(14.0)	(3.41)	(0.93)			
	②	(28.0)	(4.20)	(1.11)	(13.5)	(3.12)	(0.82)	2.1	1.89	0.63			
	③	(28.0)	(4.15)	(1.14)	(9.8)	(2.30)	(0.64)	4.7	2.92	0.90			
	④	(28.0)	(3.68)	(1.02)	(13.8)	(3.07)	(0.82)	5.9	3.10	0.90			
	⑤	(28.0)	(3.63)	(1.01)	6.4	2.78	0.79	(10.2)	(3.77)	(1.03)			
	⑥	(28.0)	(3.87)	(1.07)	(13.7)	(2.56)	(0.68)	4.1	2.76	0.88			
	⑦	/			3.8			1.92			0.59		
	⑧				5.3			2.21			0.65		
	⑨				(15.7)			(3.09)			(0.79)		
	平均	—	—	—	5.2	2.30	0.68	4.2	2.67	0.83			
	(28.0)	(3.85)	(1.06)	(13.3)	(3.00)	(0.77)	(12.1)	(3.59)	(0.98)				
FA10	①	(28.0)	(4.10)	(1.18)	9.1	3.38	1.01	6.4	3.22	0.87			
	②	(28.0)	(3.92)	(1.08)	7.3	3.18	0.98	7.2	3.36	0.90			
	③	—*1	—*1	—*1	3.3	2.03	0.68	—*1	—*1	—*1			
	④	(28.0)	(4.04)	(1.19)	(13.6)	(3.16)	(0.93)	2.4	2.07	0.63			
	⑤	(28.0)	(4.09)	(1.21)	17.3	4.05	1.17	4.9	3.03	0.85			
	⑥	(28.0)	(3.85)	(1.16)	14.4	3.74	1.08	2.3	2.40	0.73			
	⑦	/			6.5			2.74			0.85		
	⑧				11.2			3.41			1.00		
	⑨				2.3			1.62			0.55		
	平均	—	—	—	8.9	3.02	0.92	4.4	2.82	0.80			
	(28.0)	(4.00)	(1.16)	(13.6)	(3.16)	(0.93)	—	—	—				
FA20	①	(28.0)	(4.16)	(1.18)	(10.8)	(3.25)	(0.98)	(23.1)	(3.92)	(1.15)			
	②	(28.0)	(4.03)	(1.27)	(14.3)	(3.38)	(1.02)	1.8	1.92	0.63			
	③	(28.0)	(3.97)	(1.13)	6.6	3.16	0.97	12.4	3.41	1.00			
	④	(28.0)	(4.35)	(1.33)	5.1	2.76	0.87	(15.0)	(3.51)	(1.03)			
	⑤	(28.0)	(3.82)	(1.17)	1.8	1.42	0.48	2.1	1.91	0.62			
	⑥	(28.0)	(4.54)	(1.38)	8.6	3.42	1.04	1.9	2.14	0.70			
	⑦	/			4.5			2.21			0.71		
	⑧				3.0			1.91			0.63		
	⑨				2.0			1.19			0.40		
	平均	—	—	—	4.5	2.30	0.73	4.6	2.35	0.74			
	(28.0)	(4.14)	(1.24)	(12.6)	(3.32)	(1.00)	(19.1)	(3.72)	(1.09)				

t: ひび割れ発生期間(日), σ : 最大拘束応力(N/mm²), σ/σ_s : 応力強度比
*1 ゲージの片方が断線していたためデータを除いている。

び割れが発生しており、その供試体本数は各9体中PLで3体、FA10で8体、FA20で7体であり、FA混和モルタルの方が多かった。最大拘束応力に達するまでの期間は、FAの有無に関わらず同程度であった。35°Cでは、2~12日 でひび割れが発生しており、その供試体本数は各6体中PLおよびFA20で4体、FA10で6体すべてであった。最大拘束応力に達する期間はFA20が最も長かった。

(2) ひび割れ発生応力

ひび割れが発生した供試体の最大拘束応力は、平均値で見ると、試験温度20°Cおよび35°CでFA10が3N/mm²

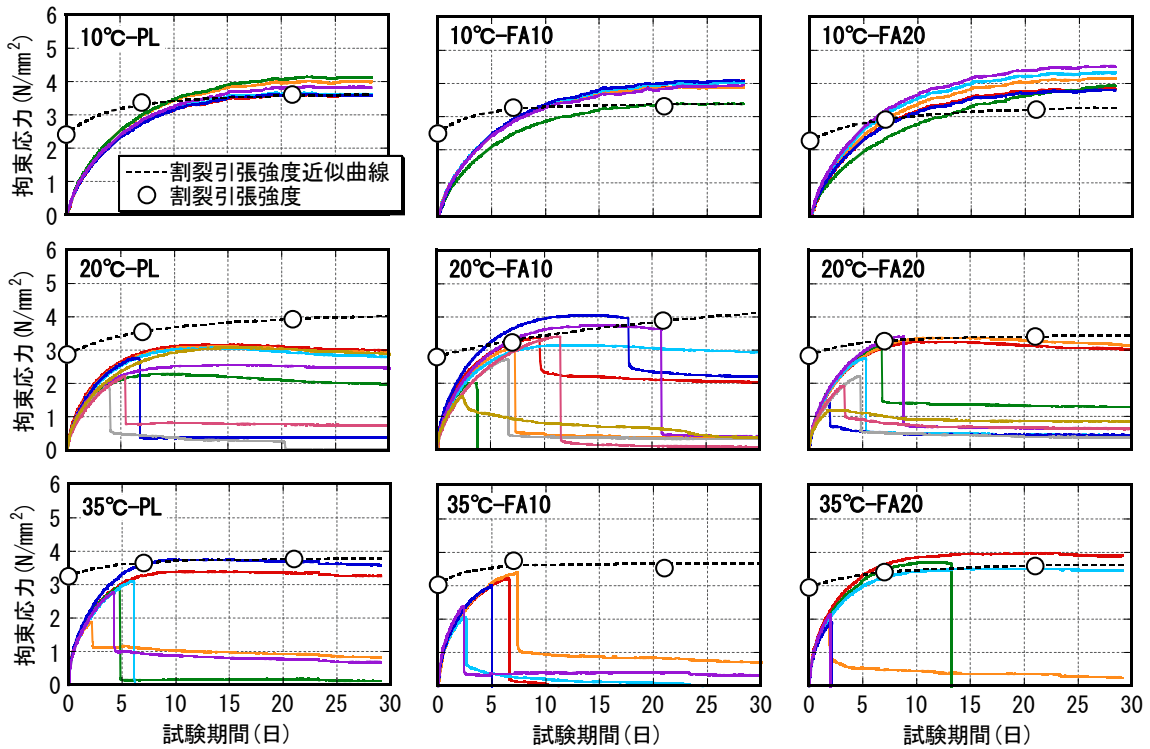


図-8 拘束応力の経時変化

程度となり他の調査より大きいですが、PL および FA20 では温度に関わらず 2.3~2.7N/mm² 程度であった。一方、ひび割れが発生していない供試体と比較すると、20℃と35℃では測定期間 10 日までに拘束応力が停滞しているが、10℃ではそれ以降も上昇し20℃や35℃と比べると最大拘束応力が大きくなった。この点については後述する。

図-9 にひび割れ発生期間と応力強度比の関係を示す。ひび割れ発生期間が長くなるほど応力強度比も大きくなり、同じ温度では調査によらずほぼ同一の曲線で近似でき、調査による明確な差は認められない。また、同じひび割れ発生期間で比較すると、1週間程度までは20℃に比べて35℃の場合の方が応力強度比が大きくなっており、それ以降は同等となっている。

(3) 最大拘束応力

試験温度 10℃では、ひび割れが発生しなかったため、本項では、ひび割れが発生しなかった供試体の試験期間中の最大拘束応力と FA 置換率の関係を調べた。その結果を示したものが図-10 である。図より、最大拘束応力は試験温度 10℃、35℃、20℃の順に大きく、また FA 置換率の増加に伴い大きくなる傾向にある。3.3 節で 10℃では Total Creep ひずみは FA 置換率の増加に伴い大きくなる傾向を示したが、拘束応力は緩和されず、逆に大きくなっている。また、10℃と 20℃の結果に着目すると、乾燥収縮ひずみは 20℃の方が大きく、Total Creep ひずみは同等であることから、ヤング係数が同じであると仮定した場合、最大拘束応力は 20℃の方が大きくなると推察

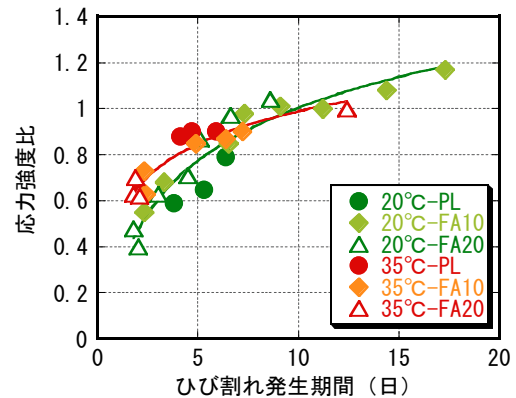


図-9 ひび割れ発生期間と応力強度比

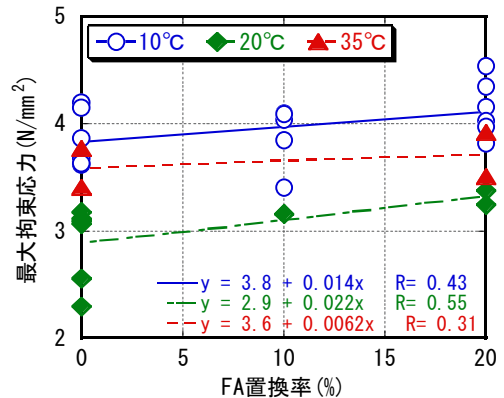


図-10 FA 置換率と最大拘束応力の関係

される。しかしながら、図-10 ではその逆の傾向を示している。これは、鉄筋とモルタルとの間ですべりが生じ

ていたことが原因の1つとして考えられるが、この点については今後さらに詳細な検討が必要である。

(4) 応力強度比増加速度

温度の影響についてさらに詳細に調べるため、乾燥開始後から1時間あたりの応力強度比の増加量を「応力強度比増加速度」として算出し比較することとした。

図-11 に乾燥開始後24時間までの応力強度比増加速度の経時変化を示す。応力強度比増加速度は20℃および35℃では乾燥初期が最も大きく、その後徐々に低下した。また、温度が高いほど初期の応力強度比増加速度は大きい。一方、10℃では試験期間10時間程度までは緩やかに増加し、その後は徐々に低下し、応力強度比の増加速度の最大値は、35℃の場合の3割程度、20℃の場合の4~5割程度であった。このように10℃は20℃や35℃に比べて乾燥開始後6時間までの増加速度が小さくなっており、これが前述した10℃でひび割れが発生し難かった要因の一つと考えられる。つまり、乾燥初期に大きな応力が発生しなかったことによって、モルタル表面へのダメージが少なくなり、ひび割れの発生が抑制されたものと考えられる。

4. まとめ

環境温度がフライアッシュモルタルのひび割れ抵抗性に与える影響を調べることを目的として実験を行った結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 自由収縮ひずみは、FA混和モルタルの方がやや小さくなる傾向を示した。また温度が高いほど初期の自由収縮ひずみは大きくなる傾向を示した。
- (2) BasicクリープひずみはFA置換率および試験温度による影響は小さく、Totalクリープひずみは10℃ではFA置換率が高いほどやや大きくなる傾向にあり、20℃および35℃では大きな差は見られなかった。
- (3) ひび割れが発生した供試体の数は、試験温度20℃ではPLが最も少なく、35℃では割合によらず同等であった。また、10℃ではすべての割合でひび割れは確認されなかった。
- (4) モルタルの拘束応力を割裂引張強度で除した応力強度比は、同じひび割れ発生日で比較すると、試験期間1週間程度までは温度が高い方が大きくなる傾向を示した。また、割合による明確な差は認められなかった。
- (5) 応力強度比の増加速度は、乾燥期間が短いほど、試験温度が高くなるほど、大きくなる傾向を示した。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費（基盤研究（C）平成28~30年度、

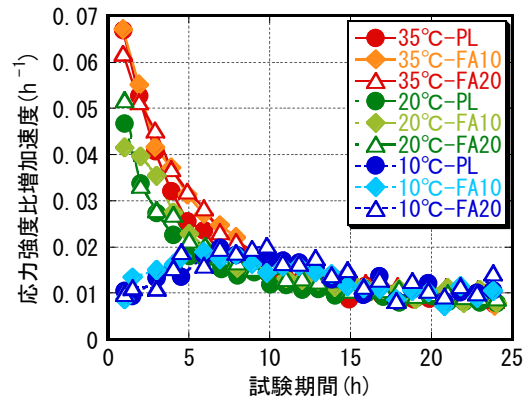


図-11 応力強度比増加速度の経時変化

研究代表者：佐藤嘉昭，課題番号：16K06577) の支援を受けて実施したものである。また実験の実施にあたり大分大学客員研究員・上田賢司氏，同学卒業生・首藤公希君，佐藤祐弥君のご助力を得た。ここに記し謝意を表す。
参考文献

- 1) 松崎裕亮，下村匠，田中泰司，安保知紀：フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状および耐久性の系統的实验，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.1，pp.171-176，2008
- 2) 安田正雪，阿部道彦，飛坂基夫，荒金直樹：フライアッシュコンクリートの収縮性状とひび割れに関する一実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.655-660，1998
- 3) 大谷俊浩，蔣海燕，伊藤七恵，佐藤嘉昭：鉄筋埋設拘束試験によるフライアッシュコンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.34，No.1，pp.221-226，2012
- 4) 濱永康仁ほか：改質フライアッシュモルタルの収縮ひび割れ性状に及ぼす乾燥湿度の影響に関する研究 その2.拘束ひび割れ試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.251-252，2017
- 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割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) 李相培，佐藤嘉昭，岡田秀敏，清原千鶴：焼成工程を備えた風力微粉碎処理システムによる石炭灰の改質，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.183-188，2007
- 7) 吉川悟史，佐藤嘉昭，上田賢司，大谷俊浩：モルタル供試体を用いた収縮ひび割れ試験方法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.38，No.1，pp.515-518，2016