

論文 フライアッシュを大量に使用したコンクリートの初期強度発現性

本田 悟*1・古賀 一八*2

要旨: 水結合材比が 35 ~ 40% でフライアッシュをセメントの内割りで 50 ~ 60% 混入したコンクリートの低温、標準および高温環境下での初期強度発現性について検討した。その結果、低温環境下では標準環境下に比べて強度低下傾向が認められるが、高温環境下では強度低下傾向は認められず、全般に良好な強度発現を示す。また、養生温度の上昇に伴い 50nm 以上の粗大な毛細管空隙は減少し、フライアッシュの大量使用は高温環境下での強度低下の緩和につながるとともに、低温環境下での型枠存置期間や湿潤養生期間を延長する必要がないことが判明した。

キーワード: フライアッシュ, 圧縮強度, 細孔構造, 低温環境, 高温環境

1. はじめに

フライアッシュをセメントの内割りで混入したコンクリートはワーカビリティの改善, 水和熱の低減, 長期強度の増進, 耐久性の向上などの効果を示す。しかしその反面, 初期強度の低下や中性化の促進などの問題点も多く, 低温環境下やフライアッシュを大量に混入した場合はそれらの問題点が一層懸念される。

また, 高温環境下で打込まれるコンクリートは材齢初期での水和反応が促進され, 初期強度は増大するものの, 長期強度の増進は一般に低下する。しかし, フライアッシュを混入したコンクリートでは, フライアッシュのポゾラン反応は温度が高いほど活発となるため, 高温環境下での強度増進の低下が緩和されると考えられる。

そこで本研究では, 既往の研究¹⁾より水結合材比を 40% 以下にすることでフライアッシュ置換率 60% 程度までは設計基準強度 21N/mm² を満足する強度が得られたため, 水結合材比が 35, 40% でフライアッシュをセメントの内割りで 50, 60% 置換したコンクリートの低温, 標準および高温環境下での初期強度発現性について検討した。また, 比較の対象として, 水結合材比が 55% でフライアッシュをセメントの内割りで 0, 10, 20, 30% 置換したコンクリートについても同様の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調合条件

使用材料は表-1 に示すとおりで, フライアッシュ (表-2) は JIS の区分では II 種に相当するもので, 細骨材は除塩海砂, 粗骨材は花崗岩系砕石を用いた。コンクリートの調合は表-3 に示すとおりで, 所定のスランプ (18 ± 1.5cm) および空気量 (4.5 ± 1%) が得られるように高性能 AE 減水剤および AE 助剤で調整した。また, 細孔空隙試験は骨材の影響を排除するためにコンクリートと同一条件のペーストとし, 混和剤は使用していない。

2.2 練り混ぜおよび養生方法

コンクリートの練り混ぜは強制練りミキサ (容量: 500) を使用し, 30 秒間空練り後, 注水し 2 分間練り混ぜた。その後, コンクリートを鋼製型枠 (φ10 × 20cm) に打込み, 材齢 1 日 (24 時間) で脱型後, 試験材齢まで封かん養生を行った。

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm ³)
フライアッシュ	II 種 (表-2 参照)
細骨材	除塩海砂 (表乾密度: 2.57g/cm ³ , 粗粒率: 2.57)
粗骨材	花崗岩系砕石 (表乾密度: 2.81g/cm ³ , 実積率: 58.2%)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ナフタリン系) AE 助剤 (フライアッシュ用)

表-2 フライアッシュの品質

二酸化けい素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
						28 日	91 日
58.4	0.1	1.2	2.30	4280	107	82	104

表-3 コンクリートの調合

水結合材比 (%)	フライアッシュ置換率 [※] (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位質量 (kg/m ³)			
			セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材
35	50	170	243	243	678	950
	60		194	292	663	
40	50	185	212	213	738	
	60		170	255	725	
55	0	185	336	0	835	
	10		302	34	825	
	20		269	67	817	
	30		235	101	804	

[※] 結合材質量に対して内割り

*1 福岡大学 工学部建築学科講師 (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 (正会員)

また、細孔空隙試験用のペーストはモルタルミキサ（容量：50）で練混ぜ後、蓋で水分の蒸発を防ぎ、1時間ごとに練り返しを行い、ブリーディングが終了した後に各養生温度および試験材齢ごとにポリエチレン容器に100ml程度充填し、試験材齢まで密封し、封かん養生した。

練混ぜから試験材齢までの環境条件は表-4に示すとおりで、練混ぜ時から試験材齢まで同様な温度設定とした。

2.3 試験項目および試験方法

圧縮強度試験はJIS A 1108に準じ、材齢1, 2, 3, 7, 28日で実施した。

細孔空隙試験は全試料を5mm以下に粉砕し、2.5～5mmの試料を24時間アセトンに浸せき後、真空乾燥機で24時間真空乾燥（40℃）した試料の中から任意の1gを用いて、水銀圧入式ポロシメータにより材齢1, 2, 3, 7, 28日での細孔容積分布を測定した。

なお、各試験の試験体数は圧縮強度試験は3個、細孔空隙試験は1個とした。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度

材齢と圧縮強度の関係を図-1に、養生温度と圧縮強度の関係を図-2に示す。

水結合材比55%で置換率0～30%の場合は、養生温度10℃の場合は材齢1日では養生温度20℃の場合の29

要因	練混ぜ・打込み	～脱型(24h)**	～試験材齢
温度(℃)	10, 20, 30(±1)***		
湿度(%)	60(±10)	90(±5)	(封かん)

* コンクリートのみ, ** 練混ぜ・打込み環境は±2℃

～33%程度であり、強度発現の遅延が顕著に認められるが、置換率の影響はほとんど認められない。材齢7日では養生温度20℃の場合の64～76%程度、材齢28日では養生温度20℃の場合の77～84%程度であり、材齢経過とともに強度発現の遅延が緩和されているが、各材齢において置換率の相違による影響は認められない。養生温度30℃の場合は材齢1日では養生温度20℃の場合の131～143%程度であり、強度発現は良好であり、置換率の影響はほとんど認められない。しかし、材齢7日では養生温度20℃の場合の93～110%程度であり、置換率0%の場合は養生温度20℃の場合を7%程度下回っている。材齢28日では養生温度20℃の場合の83～98%程度であり、全般に養生温度20℃の場合を下回るものの、置換率30%の場合は低下の割合は小さい。

水結合材比35, 40%で置換率50, 60%の場合は、養生温度10℃の場合は材齢1日では養生温度20℃の場合の25～31%程度であり、強度発現の遅延が顕著に認められ、強度遅延傾向は水結合材比55%で置換率0～30%の場合より若干大きい。材齢7日では養生温度20℃の場合の

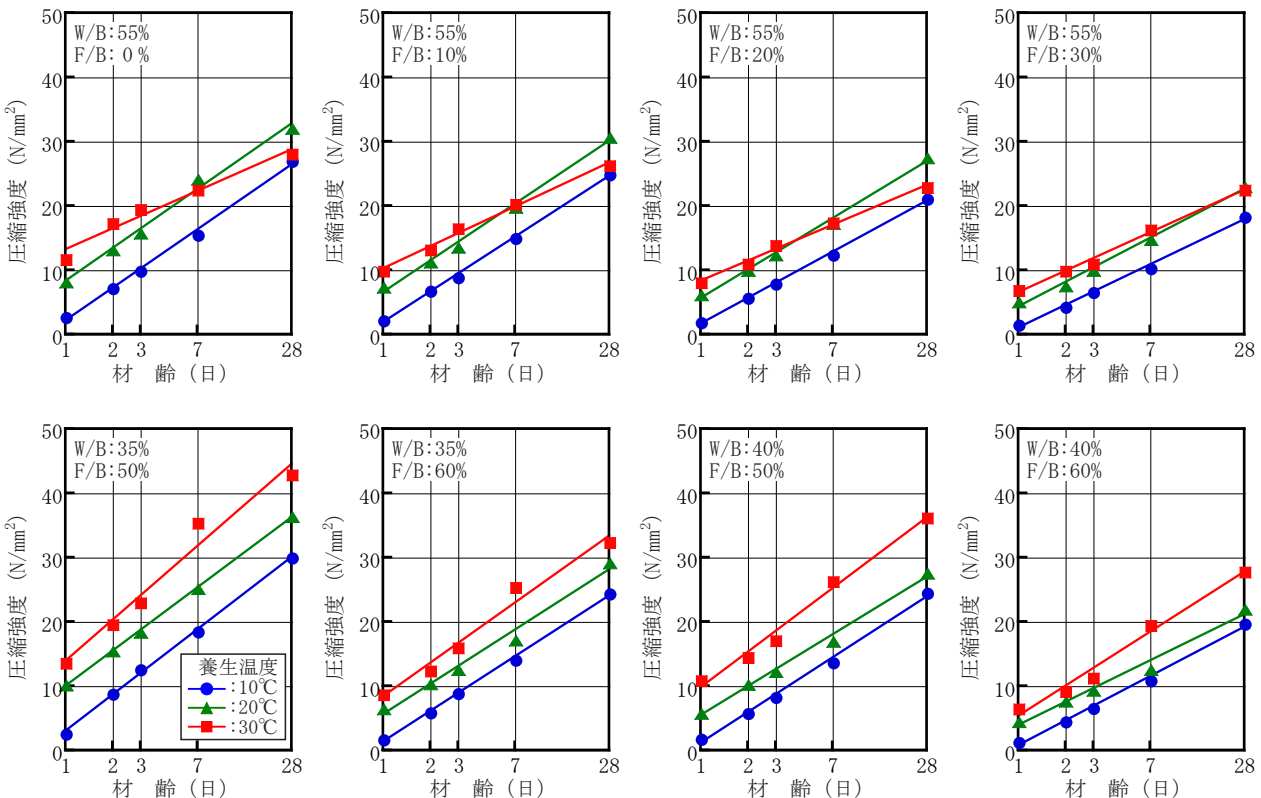


図-1 材齢と圧縮強度の関係

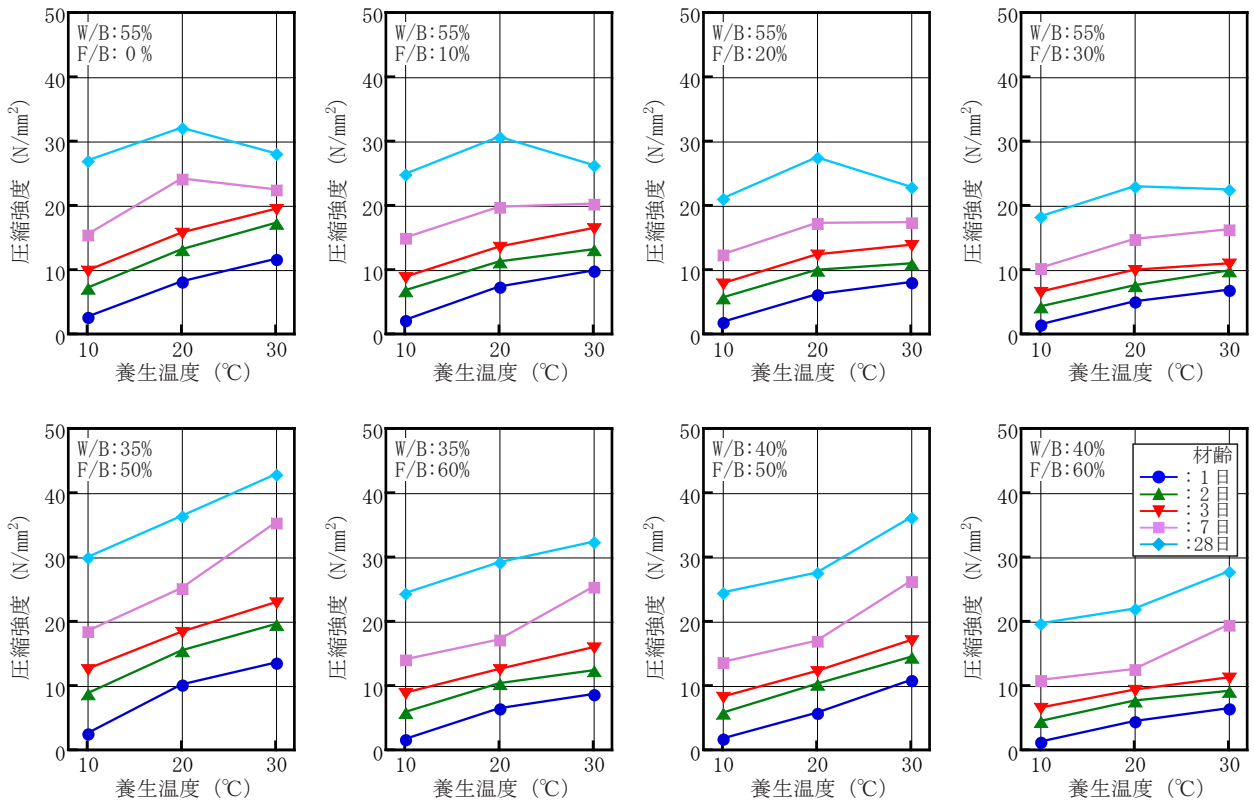


図-2 養生温度と圧縮強度の関係

73～87%程度、材齢28日では養生温度20℃の場合の82～90%程度であり、材齢経過とともに強度発現の遅延が緩和され、強度低下傾向は水結合材比55%で置換率0～30%の場合より若干小さく、置換率および水結合材比の増大に伴い強度低下傾向は緩和されている。養生温度30℃の場合は材齢1日では養生温度20℃の場合の133～188%程度であり、強度発現は良好であり、置換率の影響はほとんど認められない。材齢7日では養生温度20℃の場合の140～155%程度、材齢28日では養生温度20℃の場合の111～131%程度であり、水結合材比55%で置換率0～30%の場合に認められた強度低下傾向は認められず、全般に良好な強度発現を示している。

以上のように、低温環境下においては全調合および全材齢で標準環境下に比べて強度低下傾向が認められた。高温環境下においては水結合材比55%で置換率0～30%の場合は、初期材齢では良好な強度発現傾向を示すものの、材齢28日では標準環境下に比べて強度低下傾向が認められた。一方、水結合材比35、40%で置換率50、60%の場合は、高温環境下では標準環境下に比べて強度低下傾向は認められず、全般に良好な強度発現を示している。大賀らの研究²⁾によると水結合材比50%で置換率25%のモルタルでは養生温度10～30℃の範囲では温度が高くなるほど圧縮強度は増大するという結果が得られているが、本研究では水結合材比55%で置換率0～30%の場合はそのような現象は認められなかったが、

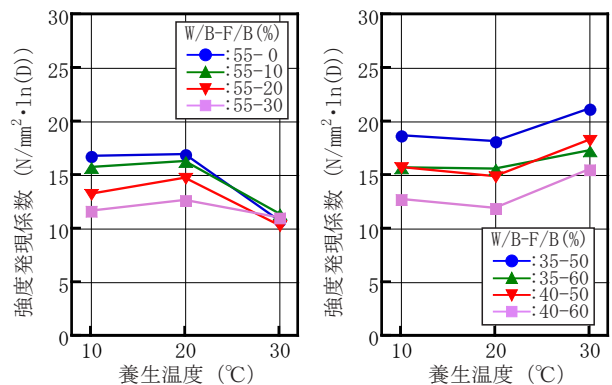


図-3 養生温度と強度発現係数の関係

水結合材比35、40%で置換率50、60%の場合は同様な現象が認められた。

3.2 強度発現係数

図-1に示したとおり、材齢28日の範囲内では材齢の対数と圧縮強度には線形関係が認められたため、その傾きを強度発現係数と定義して養生温度と強度発現係数の関係を図-3に示す。

水結合材比55%で置換率0～30%の場合は、養生温度10℃の場合の強度発現係数は12～17N/mm²・log(D)と養生温度20℃の場合(13～17N/mm²・log(D))と大差なく、低温環境下では初期材齢では強度低下傾向を示すもののそれ以降の強度発現傾向は比較的良好であることを示している。しかし、養生温度30℃の場合の強度発

現係数は $10 \sim 11\text{N/mm}^2 \cdot \log(D)$ と養生温度 20°C の場合に比べて $10 \sim 30\%$ 程度低下しており、高温環境下では材齢初期での強度発現は良好であるが、それ以降の強度増進は緩慢となることを示している。

一方、水結合材比 35, 40% で置換率 50, 60% の場合は、養生温度 10°C の場合の強度発現係数は $13 \sim 19\text{N/mm}^2 \cdot \log(D)$ と養生温度 20°C の場合 ($12 \sim 18\text{N/mm}^2 \cdot \log(D)$) と大差ないが、養生温度 30°C の場合の強度発現係数は $16 \sim 21\text{N/mm}^2 \cdot \log(D)$ と養生温度 20°C の場合に比べて $10 \sim 30\%$ 程度増大しており、高温環境下では強度発現傾向は良好であることを示している。

3.3 細孔構造

細孔容積分布の一例を図-4～図-6に示す。

水結合材比 55% で置換率 0% の場合 (図-4) は、材齢 1 日では $1\mu\text{m}$ 以上の粗大な空隙 (水隙) は養生温度 10°C では $0.29\text{mm}^3/\text{mm}^3$ と多く存在するが、養生温度の上昇に伴い減少傾向を示し、養生温度 30°C では $0.01\text{mm}^3/\text{mm}^3$ となっている。50nm 以上の粗大な毛細管空隙は材齢 1 日では養生温度の上昇に伴い減少傾向を示すが、材齢 7 日および 28 日では、養生温度 30°C の場合は養生温度 20°C の場合より多くなっている。

水結合材比 55% で置換率 30% の場合 (図-5) は、材齢 1 日では $1\mu\text{m}$ 以上の粗大な空隙は養生温度 10°C では

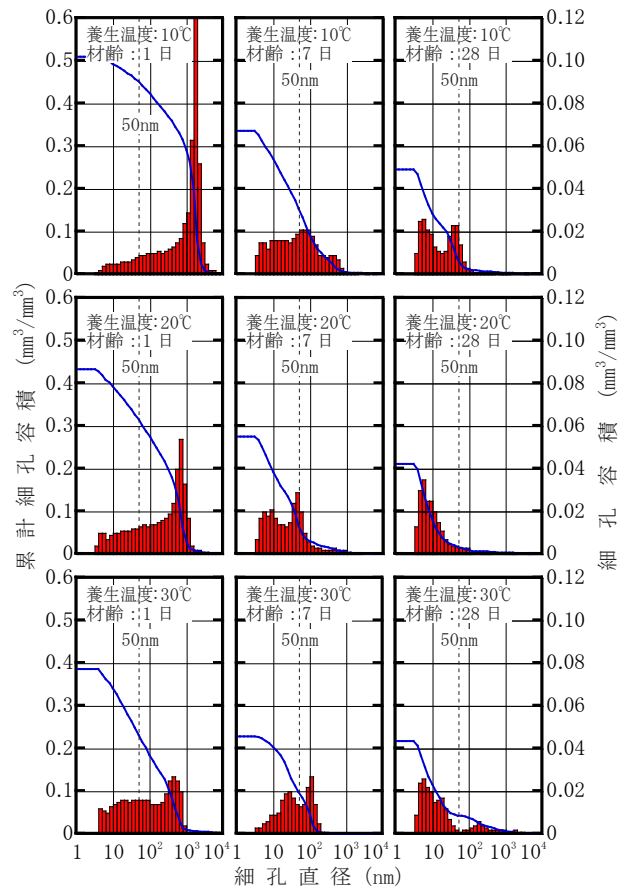


図-4 細孔容積分布 (W/B:55%, F/B:0%)

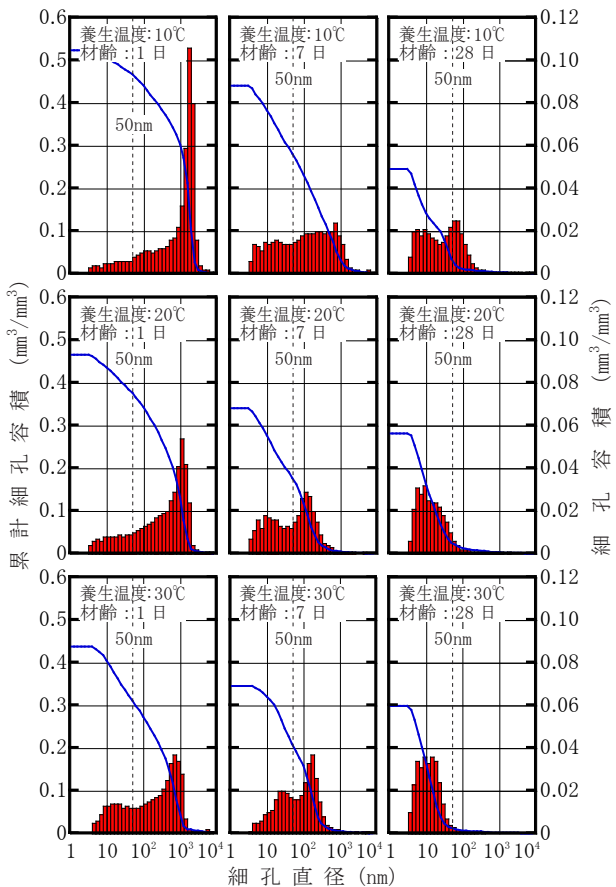


図-5 細孔容積分布 (W/B:55%, F/B:30%)

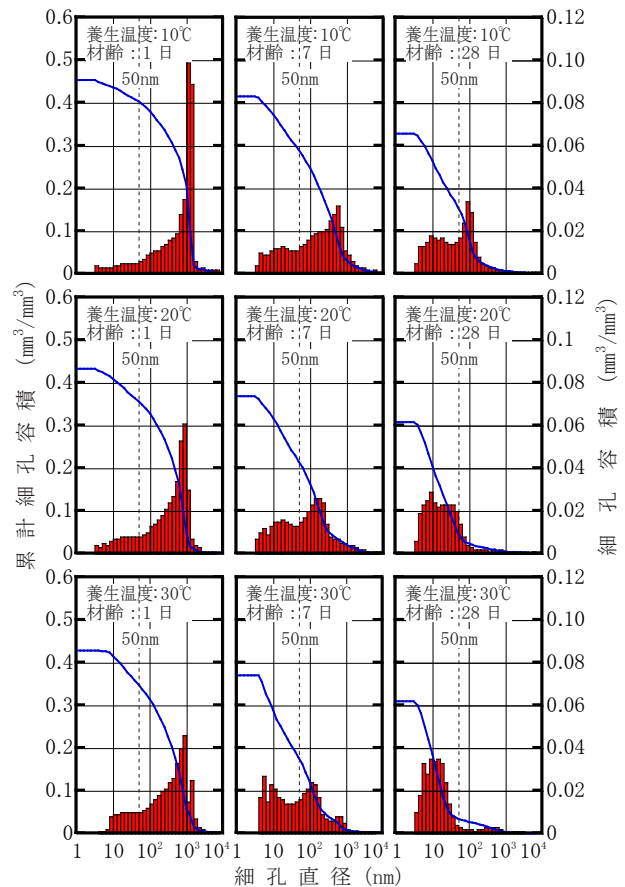


図-6 細孔容積分布 (W/B:35%, F/B:60%)

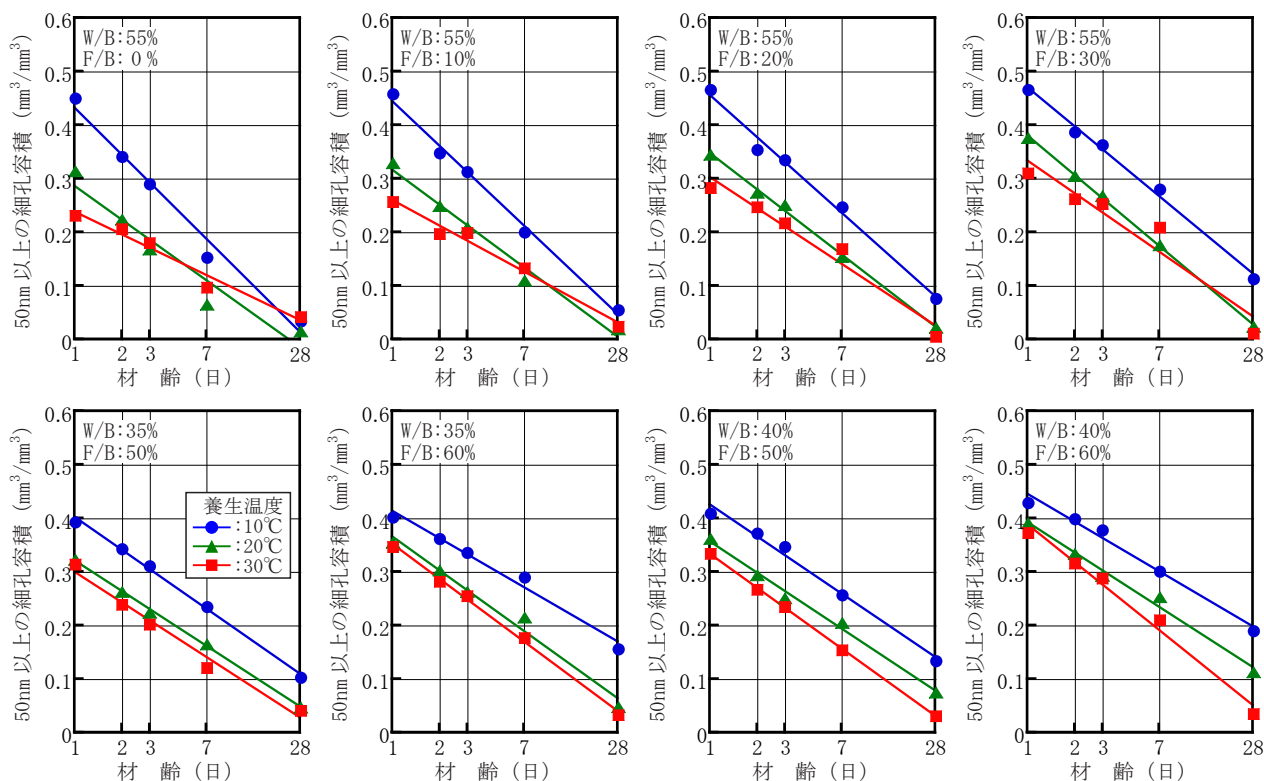


図-7 材齢と50nm以上の細孔容積の関係

0.30mm³/mm³であるが、養生温度30℃で0.05mm³/mm³と養生温度の上昇に伴い減少傾向を示すが、置換率0%の場合より全般に多い。50nm以上の粗大な毛細管空隙は、材齢28日においても養生温度の上昇に伴い減少している。

水結合材比35%で置換率60%の場合(図-6)は、材齢1日では1μm以上の粗大な空隙は養生温度10℃では0.21mm³/mm³であるが、養生温度30℃では0.05mm³/mm³と養生温度の上昇に伴い減少傾向を示す。50nm以上の粗大な毛細管空隙は、材齢28日においても養生温度の上昇に伴い減少している。

次に、材齢と50nm以上の細孔容積の関係を図-7に示す。

水結合材比55%で置換率0～30%の場合は、材齢3日までは50nm以上の粗大な毛細管空隙は養生温度の上昇に伴い減少傾向を示すが、材齢7日以降では養生温度30℃の場合は養生温度20℃の場合を上回っている。このことは、養生温度30℃の場合は材齢初期の急激な水和反応により不均一で貧弱な構造の水和生成物が形成されたためと考えられ、これにより、圧縮強度も養生温度20℃の場合より低下傾向を示したものと考えられる。

一方、水結合材比35、40%で置換率50、60%の場合は、養生温度の上昇に伴い50nm以上の粗大な毛細管空隙は減少し、養生温度30℃の場合も養生温度20℃の場合より全般に50nm以上の粗大な毛細管空隙は減少している。このことは、ポズラン反応は養生温度の上昇に伴い活性化されるものの、材齢28日の時点では数%程度であり、ポズラン反応の影響よりも、置換率の増大により

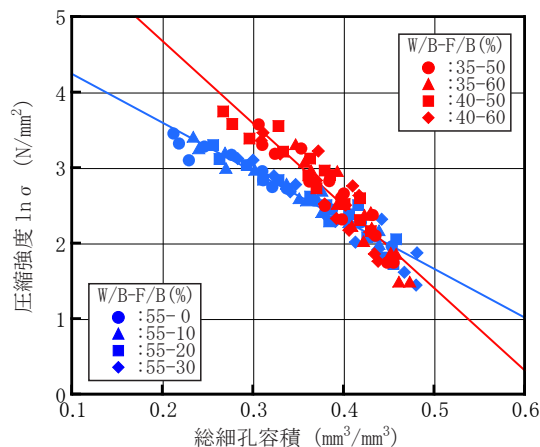


図-8 総細孔容積と圧縮強度の関係

材齢初期の水和反応が遅延し、空隙が少ないより緻密な組織が形成されるためと考えられ、フライアッシュを大量に混入した場合は高温環境下での強度低下の緩和につながると思われる。

次に、総細孔容積と圧縮強度の自然対数の関係を図-8に、50nm以上の細孔容積と圧縮強度の自然対数の関係を図-9に示す。

水結合材比55%で置換率0～30%の場合および水結合材比35、40%で置換率50、60%の場合ともに養生温度および材齢の相違に関わらず両者の間には負の相関関係が認められた。しかし、置換率50、60%の場合は置換率0～30%の場合より細孔容積に体する圧縮強度の値が大きくなる現象が認められた。なお、本結果はペーストの細

孔容積とコンクリートの圧縮強度という異なる試験体による相関であり、同一試験体による検証は行っていない。

3.4 脱型時期および養生期間の検討

フライアッシュを大量に使用した場合は、低温環境下では初期材齢で強度発現の遅延が顕著に認められた。そこで、せき板存置期間および湿潤養生期間の目安となる圧縮強度³⁾に達する時間について検討した。養生温度と所定強度に達する時間の関係を図-10に示す。

せき板存置期間の目安となる圧縮強度が $5\text{N}/\text{mm}^2$ に達する時間は、水結合材比55%で置換率0~30%の場合は、養生温度 10°C では35~52時間（養生温度 20°C の場合の1.9~2.3倍程度）と置換率の増大に伴い延長した。また、水結合材比35~40%で置換率50, 60%の場合は、養生温度 10°C では31~52時間（養生温度 20°C の場合の1.7~2.4倍程度）と水結合材比55%で置換率0~30%の場合と同程度であった。

湿潤養生期間³⁾の目安となる圧縮強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ に達する時間は、水結合材比55%で置換率0~30%の場合は、養生温度 10°C では70~141時間（養生温度 20°C の場合の2.0~2.3倍程度）と置換率の増大に伴い延長した。また、水結合材比35, 40%で置換率50, 60%の場合は、養生温度 10°C では57~127時間（養生温度 20°C の場合の1.6~2.4倍程度）と水結合材比55%で置換率0~30%の場合より短縮される傾向が認められた。

以上より、水結合材比35, 40%で置換率50, 60%の場合は、養生温度 10°C の場合でも圧縮強度が $5\text{N}/\text{mm}^2$ に達する時間は3日以内、 $10\text{N}/\text{mm}^2$ に達する時間は6日以内であり、水結合材比55%で置換率0~30%の場合と比べて型枠存置期間や湿潤養生期間を特に延長する必要はないものと考えられる。

4. まとめ

フライアッシュを大量に使用したコンクリートの初期強度発現性について、本実験範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) 低温環境下では標準環境下と比べて強度低下傾向が認められるが、高温環境下では全般に良好な強度発現を示す。
- 2) 養生温度の上昇に伴い50nm以上の粗大な毛細管空隙は減少し、フライアッシュの大量使用は高温環境下での強度低下の緩和につながると考えられる。
- 3) 総細孔容積および50nm以上の細孔容積と圧縮強度の関係は養生温度および材齢の相違に関わらず負の相関関係が認められた。
- 4) 低温環境下においても水結合材比55%で置換率0~30%の場合と比べて、型枠存置期間や湿潤養生期間を特に延長する必要はないものと考えられる。

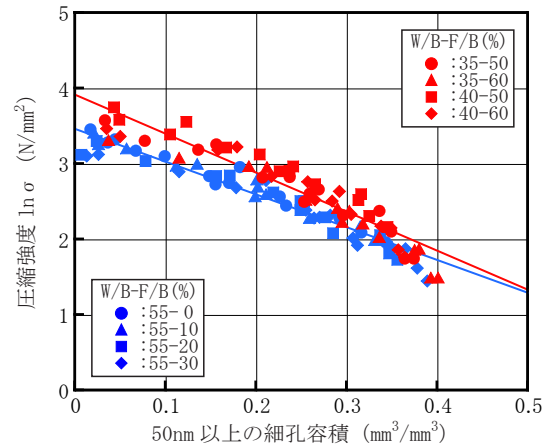


図-9 50nm以上の細孔容積と圧縮強度の関係

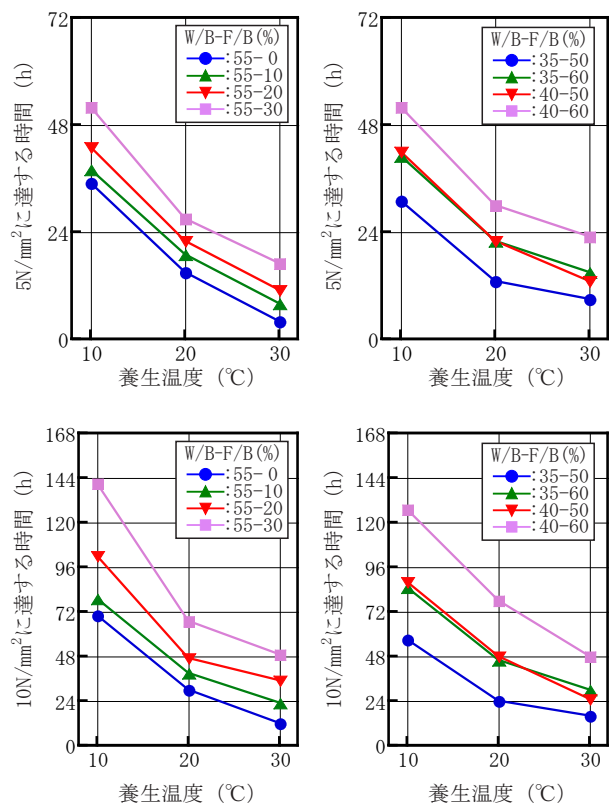


図-10 養生温度と所定強度に達する時間の関係

参考文献

- 1) 本田悟, 椎葉大和: フライアッシュを大量に使用したコンクリートの諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.127~132, 2001.6
- 2) 大賀宏行, 國府勝郎, 坂井悦郎, 大門正機: フライアッシュの潜在的品質とモルタルの諸物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.339~344, 1996.6
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.26~32, 2009.2