

論文 多量にフライアッシュを用いた高流動コンクリート用モルタルの硬化促進に関する一検討

河見 真*1・水口 裕之*2・上田 隆雄*3・橋本 親典*4

要旨：近年、高流動コンクリートの結合材あるいは粉体材料として石炭灰、特にフライアッシュを用いた研究が数多く進められている。フライアッシュをセメントの一部として置換する場合、その置換率の最大値は、セメント質量の 30%となっている。これは、これ以上の量を用いるとコンクリートの初期強度の発現が遅くなるなど不適切な面が表われるためである。そこで、多量のフライアッシュをセメントと置換した高流動コンクリートを開発するために、その初期硬化特性を改善する方法として、高流動コンクリート用モルタルを対象とし、硬化促進剤や膨張材の硬化促進効果について調べた。

キーワード：高流動コンクリート用モルタル、フライアッシュ、硬化促進剤、初期強度

1. はじめに

高流動コンクリートの使用は、信頼あるコンクリート構造物およびコンクリート工事の合理化に有効な方法である¹⁾。また、近年、石炭火力発電所から排出される石炭灰は急増することが確実視されている。現在、その有効利用率は約 50%でその他は埋め立て処分され、資源化という面から有効利用の拡大が課題となっており、大量利用に新たな技術開発が求められている²⁾。

しかし、フライアッシュを多量に用いる場合、初期強度の発現が非常に遅くなることが問題点として明らかになっているが³⁾、初期強度増進⁴⁾における研究は、ほとんど行われていない。

そこで、多量のフライアッシュを用いた高流動コンクリートを開発するために、初期硬化特性を改善する方法の一つとして、高流動コンクリート用モルタルを対象とし、硬化促進剤や膨張材を用いることによる硬化促進効果について調べた。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

実験に用いた高流動コンクリート用モルタルの使用材料およびそれらの材料物性を表-1に示す。

2.2 モルタルの配合

モルタルの基本配合は、一般的な高流動コンクリート中のモルタル成分の標準的なものである。表-2に示す一定量とし、水粉体容積比は 1.00 とした。フライアッシュの混入率、硬化促進剤および膨張材の添加率とその組合せは、表-3に示すものとし計 58 種類とした。なお、フライアッシュの混入率は、モルタルの物性に、その容積割合の違いが影響するので、質量比ではなく容積比を用い、硬化促進剤および膨張材の添加率は、結合材量に対して質量比を用いた。

2.3 モルタルの練り混ぜ

モルタルの練り混ぜは、容量 50 l の水平 2 軸強制練りミキサを使用した。練り混

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学助手 工学部建設工学科 工修 (正会員)

*4 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

ぜ方法は、ミキサ始動前にセメント、混和材および細骨材を投入し、30秒間練り混ぜた後、ミキサを回転させながら水および混和剤を投入した。その後、180秒間練り混ぜ、排出した。

表-1 使用材料および物性

種類	記号	材料および物性	
セメント	C	早強ポルトランドセメント;比重 3.14, 比表面積 4,590cm ² /g	
混和材	FA	フライアッシュ; 比重 2.3, 強熱減量 2.5% 比表面積 3,610cm ² /g	
細骨材	S	徳島県吉野川産川砂; 比重 2.63, 吸水率 1.24%, 粗粒率 2.92	
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤; 主成分;ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体	
硬化促進材	硬化促進剤	SK	主成分;硝酸カルシウム;比重 1.43
		TK	主成分;チオ硫酸カルシウム;比重 1.14
	膨張材	CS	CSA;比重 2.92, 比表面積 2,600cm ² /g
		SB	石灰系膨張材; 比重 3.14, 比表面積 3,440cm ² /g

表-2 モルタルの基本配合

単位水量 (1/m ³)	粉体量 (1/m ³)	水粉体容積比	細骨材量 (1/m ³)	高性能 AE 減水剤添加量 (kg/m ³) 粉体質量 × 0.027
253	253	1.00	450	

表-3 フライアッシュ、硬化促進剤および膨張材の混入率とその組合せ

配合番号	フライアッシュ混入率 VFA/ (VC+VFA) (vol%)	硬化促進剤あるいは膨張材の添加率(%)			
		SK/ (C+FA)	TK/ (C+FA)	CS/ (C+FA)	SB/ (C+FA)
FA00~30	0,10,20,30	0			
FA40~70-SK0~5	40,50,60,70	0,1,3,5	0		
FA40~70-TK0~5		0	0,1,3,5	0	
FA40~70-CS0~11		0		0,7,9,11	0
FA40~70-SB0~11		0			0,7,9,11
FA80,FA90	80,90	0			

2.4 実験項目および実験方法

(1) 凝結試験

凝結試験は、JIS A 6204 コンクリート用化学混和剤 付属書 1 の規定に準じて行った。試験は 20±3℃の恒温室で行った。容器寸法は、内径 15×15cm のものを用い、試料モルタルを突固めなどは一切行わず、容器上端から約 1cm 低くなるように水平に仕上げ、水分の蒸発を防ぐようにふたをした。貫入針は 1.29cm², 0.65cm², 0.16cm² の 3 種類を用い、約 10 秒で 25mm の深さまで貫入させ、そのときの時刻と抵抗値を 30 分~1 時間の間隔で測定した。始発および終結時間は、測定結果を図示し、図から 5 分単位まで読み取って求めた。

(2) 圧縮強度試験

モルタル供試体は、4×4×16cm のはり供試体とし、材齢 1 日、3 日、7 日、14 日、28 日、および 91 日用に各 3 体とした。供試体作製時においては、突固めは一切行わず、型枠に一層に流し込み上端をならすのみとした。供試体は、1 日間 20±3℃の恒温室に静置し、材齢 1 日で脱型し、所定の材齢まで 20±3℃の水中養生を行った。

圧縮強度試験は、JIS A 5201 の規定に従って行った。

3 試験結果および考察

3.1 凝結時間

(1) フライアッシュ混入率と凝結時間の関係

水粉体容積比，結合材容積および細骨材容積を一定とし，結合材中のセメントとフライアッシュの混合割合のみを変えた場合の凝結試験の結果を，**図-1**に示す。

図-1に示されているように，始発時間と終結時間との差は，フライアッシュの混入率が90vol%では6時間であるが，0~80vol%においては2~4時間程度となっており，フライアッシュの混入率の差による影響は，凝結時間の違いに比べると比較的小さいと考えられる。しかし，フライアッシュの混入率が増加するに従い，凝結時間が遅くなっている。フライアッシュ混入率50vol%では，混入率0vol%の場合の倍近くの時間となっており，凝結が極端に遅れることがないように日本建築学会の指針（案）⁵⁾の基準より始発時間を20時間以内とすると，フライアッシュの混入率が60vol%以上の場合は，満足していない。したがって，フライアッシュのみを使用する場合には，凝結時間からはフライアッシュの混入率は50vol%程度が限界量であると考えられる。

(2) 硝酸カルシウム混入率と凝結時間の関係

水粉体容積比，結合材容積および細骨材容積を一定とし，硬化促進剤として硝酸カルシウムの添加割合を変えた場合の凝結試験の結果の一例として，フライアッシュの混入率が60vol%の場合を**図-2**に示す。

図-2に見られるように，硝酸カルシウムの添加率の増加にともない凝結時間は，急激に短くなる傾向を示しており，フライアッシュの混入率が60vol%において硝酸カルシウムを1%添加すると，始発時間は13時間となり，20時間以内を満足している。また，フライアッシュの混入率が70vol%の場合に

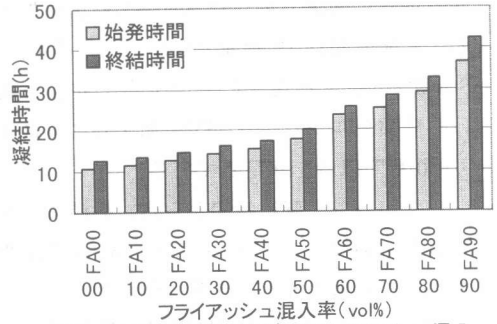


図-1 凝結時間に及ぼすフライアッシュ混入率の影響

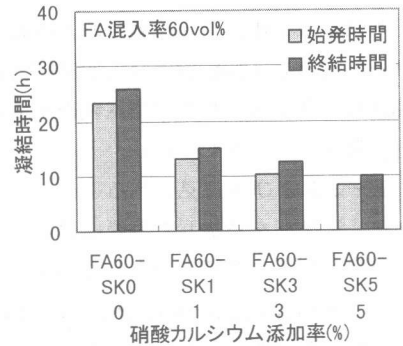


図-2 凝結時間に及ぼす硝酸カルシウム添加率の影響

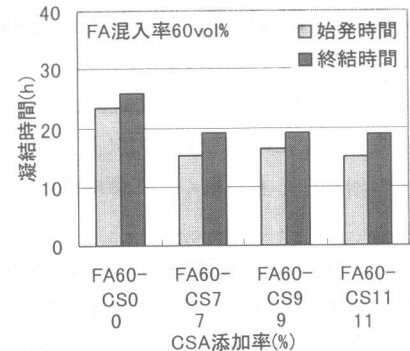


図-3 凝結時間に及ぼすCSA添加率の影響

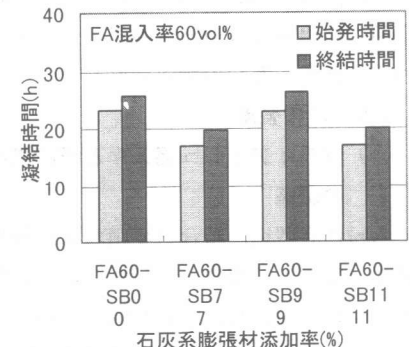


図-4 凝結時間に及ぼす石灰系膨張材添加率の影響

においても、硝酸カルシウムを3%以上添加すると始発時間は19時間となり、混入率が、80vol%を越える場合においても、始発時間は、硝酸カルシウムを5%添加することにより20時間以内を満足している。

したがって、凝結時間からは、硝酸カルシウムを添加すると、フライアッシュを90vol%近くまで多量に混入できる可能性がある。

(3) CSA および石灰系膨張材の混入率と凝結時間との関係

水粉体容積比、結合材容積および細骨材容積を一定とし CSA および石灰系膨張材の添加割合を変えた場合の凝結試験の結果の一例を、図-3 および 4 に示す。

図-3 および 4 に見られるように、CSA、石灰系膨張材を添加した場合においても、凝結時間は短くなる傾向を示しており、フライアッシュの混入率が60vol%において、CSAを7%以上添加することにより、また、石灰系膨張材では7および11%添加量で、始発時間は15時間程度となっており、20時間以内を満足している。また、フライアッシュの混入率が70vol%においては、CSA、石灰系膨張材ともに始発20時間以上となり、添加率の増加とともに短くなる傾向も示していない。

したがって、凝結時間からは、CSA、石灰系膨張材を添加すると、フライアッシュを60vol%程度まで混入することは可能である。

なお、チオ硫酸カルシウムを用いた場合は、今回の使用量では48時間程度では凝結しなかったため、考察の対象とはしなかった。

3.2 圧縮強度

(1) フライアッシュ混入率と圧縮強度との関係

水粉体容積比、結合材容積および細骨材容積を一定とし、結合材中のセメントとフライアッシュの混合割合のみを変えた場合の材齢1日および28日の圧縮強度の結果を図-5 および 6 に示す。

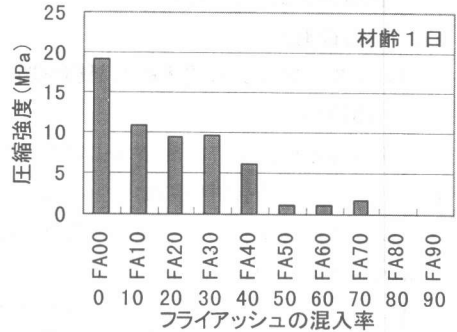


図-5 モルタルの圧縮強度に及ぼすフライアッシュの混入率の影響

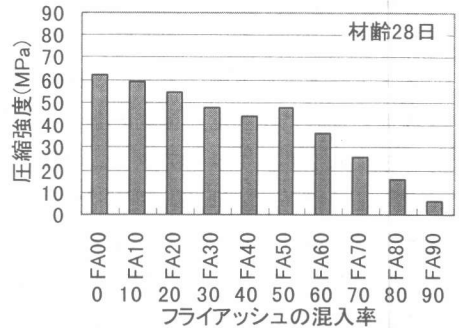


図-6 モルタルの圧縮強度に及ぼすフライアッシュの混入率の影響

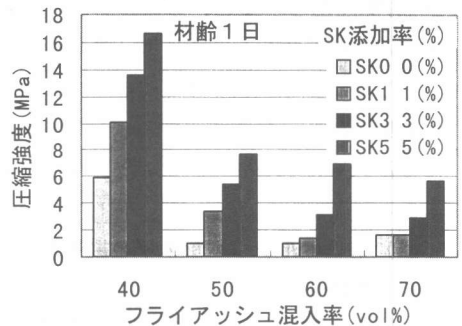


図-7 モルタルの圧縮強度に及ぼす硝酸カルシウムの混入率

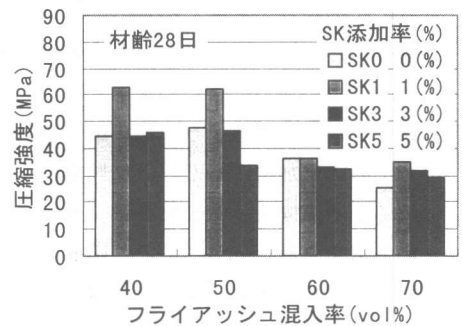


図-8 モルタルの圧縮強度に及ぼす硝酸カルシウムの混入率

図-5に示されているように、材齢1日における圧縮強度は、フライアッシュを混入するに伴い急激に低下しており、混入率50vol%を越えると2MPa以下かほとんど0MPaに近い値となっている。このように初期強度発現が遅れる傾向にあり、極端に遅れることがないよう、日本建築学会の指針(案)⁵⁾より、材齢1日における圧縮強度を5MPa以上とする。なお、本実験はモルタルであり、供試体の形状・寸法も異なるので、直接比較はできないが、材齢1日で5MPa以上を満足するには、フライアッシュの混入率が40vol%までとなる。しかし、材齢28日における圧縮強度は、日本建築学会の指針(案)⁵⁾では、25MPa以上が必要となっており、図-6に見られるように、フライアッシュの混入率が70vol%まで、目標強度を満足しており、初期強度を改善できれば、多量にフライアッシュを混入できる可能性が考えられる。

(2) 硝酸カルシウム混入率と圧縮強度との関係

水粉体容積比、結合材容積および細骨材容積を一定とし、硝酸カルシウムの混入割合を変えた場合の圧縮強度の関係の一例を図-7および8に示す。

図-7に示されているように、材齢1日における圧縮強度は、硝酸カルシウムの添加率の増加に従って、大きくなっている。硝酸カルシウムの添加率を5%とすると、材齢1日の所要強度5MPaを満足しており、硝酸カルシウムの添加により、フライアッシュを70vol%程度まで混入できる可能性が考えられる。

しかし、図-8に示されているように、材齢28日においては、硝酸カルシウムの添加率が1%において最も強度増進が大きく、これより大きな添加率では強度が小さくなっており、材齢1日における強度とは逆の傾向を示している。しかし、フライアッシュの混入率50vol%の場合を除いて、この程度の硝酸

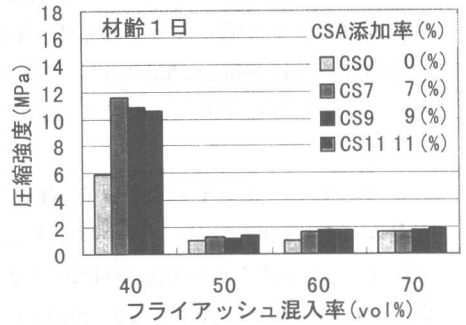


図-9 モルタルの圧縮強度に及ぼすCSAの混入率の影響

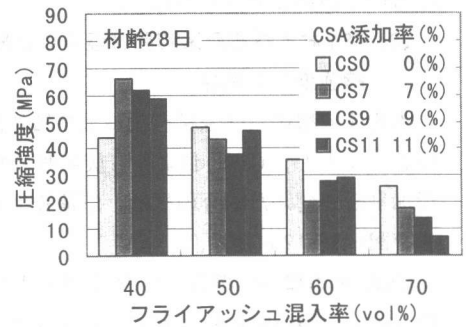


図-10 モルタルの圧縮強度に及ぼすCSAの混入率の影響

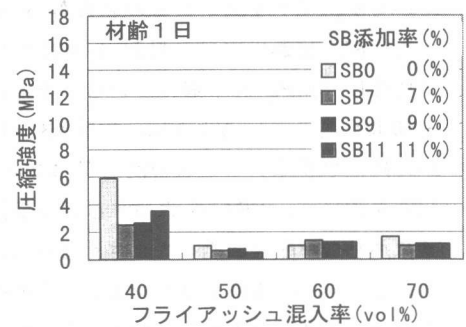


図-11 モルタルの圧縮強度に及ぼす石灰

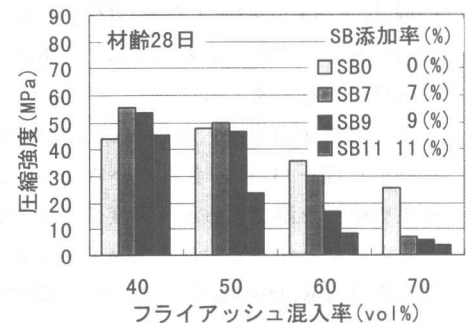


図-12 モルタルの圧縮強度に及ぼす石灰系膨張材の混入

カルシウムを添加しても添加しない場合よりも強度は大きくは低くなっておらず、材齢 28 日における目標強度を 25MPa 以上とすると、添加のいずれの場合も、強度はこの値以上となっている。

したがって、フライアッシュを 40vol% 以上混入しても硝酸カルシウムを添加すると、材齢 1 日における圧縮強度 5MPa 以上を満足し、材齢 28 日の強度も 25Mpa 以上となっており、多量のフライアッシュを混入できる可能性があると考えられる。

(3) CSA および石灰系膨張材混入率と圧縮強度との関係

水粉体容積比、結合材容積および細骨材容積を一定とし、CSA および石灰系膨張材の添加割合を変えた場合の材齢と圧縮強度の関係を図-9~12 に示す。

CSA を添加した場合、材齢 1 日における圧縮強度は図-9 に示されているように、添加率とともに、わずかに、増加の傾向を示しているが、フライアッシュの混入率 50vol% 以上の配合においては、材齢 1 日における所要強度 5MPa を下廻っている。また、図-10 に示されているように、材齢 28 日においては、フライアッシュの混入率 40vol% の配合を除いて、CSA を添加すると圧縮強度は添加しない配合に比べて小さくなっている。これは、自由膨張によりコンクリートの組織が緩み、強度が低下したためと考えられる。

しかし、フライアッシュの混入率が 40vol% の場合、CSA を添加すると、材齢 1 日、材齢 28 日とも強度は増大しており、強度増進に有効であると考えられる。

石灰系膨張材では、材齢 1 日における圧縮強度は図-11 に示されているように、石灰系膨張材を添加すると、強度低下するかほとんど同じとなっており、フライアッシュの混入率が 40vol% の場合においても 5MPa を下廻っている。これは、同じ膨張材として使用した CSA と比べて、膨張性が、小さいた

めに結果として強度増進の効果を示さず、強度が低下する傾向を示したと考えられる。

したがって、石灰系膨張材は、初期強度を逆に低下させ、材齢 28 日においても圧縮強度は低下しており、多量にフライアッシュを混入することによる強度低下を改善することには使用できない。

4. まとめ

(1) フライアッシュを多量に混入する場合、凝結時間の遅延、初期強度の低下が問題とされ、所要の凝結時間および初期強度から判断すると混入率は 40vol% が限界である。

(2) 硝酸カルシウムを添加すると、凝結時間の短縮、初期強度の増進といった効果があり、フライアッシュの混入率を 70vol% までとする可能性がある。

(3) CSA を添加することにより、所要の凝結時間および初期強度を持ったフライアッシュの混入率 50vol% 以上のコンクリートとすることは困難である。若干であるが凝結時間の短縮、初期強度の増進に対する効果がある。

(4) 石灰系膨張材は、多量にフライアッシュを混入した高流動コンクリートの初期強度の改善には有効でない。

参考文献

- 1) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993
- 2) 石炭灰ハンドブック, 日本フライアッシュ協会, pp. I-16, 1995.10
- 3) 田中良仁, 山崎常吉, 吉田勝美, 河村彰男: 石炭灰のコンクリートへの適用に関する検討(その 1: モルタル試験), 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp.260~261, 1996
- 4) 高山俊一, 渡辺明, 梅沢典弘: 高流動コンクリートの早期強度の増進, 第 51 回セメント技術大会講演要旨, pp128-129, 1997
- 5) 日本建築学会・高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, 1997