

論文 フライアッシュを細骨材の代替材として使用したモルタルのレオロジー・強度特性

黄 光律*¹・友澤史紀*²・野口貴文*³

要旨: フライアッシュの有効利用の道を探ることを目的として、フライアッシュを細骨材の代替材（外割混合）として大量使用したモルタルを作製し、フレッシュ状態のレオロジー特性および硬化後の強度特性について検討を行った。その結果、フライアッシュの代替量が増加するほど目標フロー値を得るための高性能 AE 減水剤添加量は増加するが、圧縮強度についてはフライアッシュの代替量が50%まで増加しても変化しないことが分かった。

キーワード: フライアッシュ、内割混合、外割混合、モルタル、レオロジー、強度

1. はじめに

日本における石炭灰（フライアッシュを含む）の発生量は現状年間約500万トンであり、この中の約5割がセメント分野等で利用されているが、残りの約5割は埋め立て処分されている。今後の見通しでは、2010年に年間1000万トンの石炭灰が発生すると予想[1]されている。環境面の諸情勢から大量の埋め立て処分に対して減量化の努力がなされており、新しい有効利用用途の開拓が必要となっている。

現在、石炭灰は建築分野等に多様な方法で利用されているが、日本建築学会の「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」を参照[2]すると、フライアッシュを混合する場合の考え方としては、コンクリートの単位セメント量の内の一部をフライアッシュで代替する（内割混合）方法と、単位セメント量を変えずに骨材の一部をフライアッシュで代替する（外割混合）方法がある。フライアッシュを内割で混合して使用したコンクリートに対する文献および資料は比較的多いが、外割で混合して使用したものは多くない。

本研究では、大量のフライアッシュを内割で混合した場合、コンクリートの初期強度の低下等を改善すること、現 JIS R 5213（フライアッシュセメント）に規定された混合量よりも大量のフライアッシュが使用できる方法を実用化すること、およびポゾラン反応による長期強度の増進、水和熱の低減などの潜在的な効果の活用することを目的として、フライアッシュを細骨材の代替材（外割混合）として使用したモルタルを作製し、フレッシュ状態のレオロジー特性および硬化後の強度特性を把握するために実験的な検討を行った。また、石炭灰が分級される前段階のサイロから収集した原粉フライアッシュと節炭器・空気予熱器から収集したシンダーアッシュを外割混合したモルタルについても検討を行った。

2. 実験概要

2.1 モルタルの調合

-
- *1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻、工修（正会員）
 - *2 東京大学教授 工学系研究科建築学専攻、工博（正会員）
 - *3 東京大学助手 工学系研究科建築学専攻、博士（工学）（正会員）

図-1 にフライアッシュ及びフライアッシュを細骨材の代替材として使用する際の調合の概念および仮定粗骨材容積 (G) という概念を示す。モルタルの調合は、コンクリート調合を JASS 5 の計画調合に準じて定め、粗骨材を除いたものとした。仮定粗骨材容積は、図-1 に示すように仮定したコンクリート調合における粗骨材の容積と定義する。本調査では単位水量、単位セメント量および空気量の容積を固定し、フライアッシュの代替率を細骨材の容積に対して 0, 25, 50 vol.% と変化させた。また、仮定粗骨材容積を 420, 380, 340 (l/m³) で変化させた。

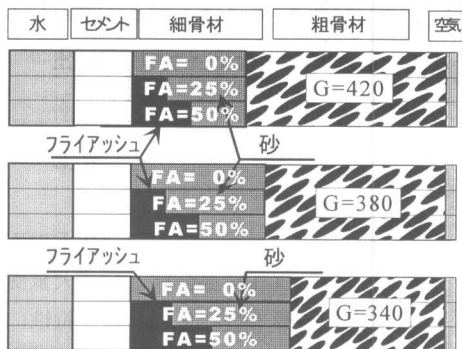


図-1 モルタル調合・仮定粗骨材容積(G)の概念

2.2 使用材料

①セメント：セメントの特性を表-1 に示す。

表-1 セメントの特性

比重	比表一面積 (cm ² /g)	水量(%)	凝結		安定性	フロー値	圧縮強さ(N/mm ²)		
			始発(h-m)	集結(h-m)			3日	7日	28日
3.15	3080	27.2	2-28	3-20	良	240	16	27.5	42.5

②フライアッシュ及びシンダーアッシュ：種類および特性を表-3 に示す。

表-2 フライアッシュ及びシンダーアッシュの特性

種類	比表一面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	比重	備考
HM	5000	1.1	2.32	JIS
OHM	5460	17.1	2.01	JIS 外原粉
SHM	-	-	2.06	シンダーアッシュ

③細骨材：大井川水系陸砂、表乾比重：2.63、吸水率：1.67、実績率：66.2、粗粒率：2.74

④水：水道水

⑤混和剤：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

2.3 調合

モルタルの調合を表-3 に示す。

表-3 調合表

記号	W/C wt.%	s/a %	FA vol.%	容積調合(l/m ³)					重量調合(kg/m ³)				W/P wt.%	F/C wt.%
				W	C	F	S	G	W	C	F	S		
H504225	0.5	41.2	25	175	111	74	221	420	175	350	162	582	34.2	46.2
H503800		46.8	0	175	111	0	334	380	175	350	0	882	50.0	0.0
H503825		46.8	25	175	111	84	251	380	175	350	184	661	32.8	52.5
H503850		46.8	50	175	111	167	167	380	175	350	367	441	24.4	105
H503425		52.4	25	175	111	94	281	340	175	350	206	741	31.5	58.8
H404200	0.4	38.8	0	175	139	0	267	420	175	438	0	704	40.0	0.0
H404225		38.8	25	175	139	67	200	420	175	438	147	528	30.0	33.5
H404250		38.8	50	175	139	133	133	420	175	438	293	352	23.9	67.0
H403800		44.6	0	175	139	0	307	380	175	438	0	809	40.0	0.0
H403825		44.6	25	175	139	77	230	380	175	438	169	607	28.9	38.5
H403850		44.6	50	175	139	153	153	380	175	438	337	405	22.6	77.1
H403400		50.5	0	175	139	0	347	340	175	438	0	915	40.0	0.0
H403425		50.5	25	175	139	87	260	340	175	438	191	686	27.9	43.5
H403450		50.5	50	175	139	173	173	340	175	438	381	458	21.4	87.1
H304225	0.3	34.4	25	175	186	55	165	420	175	583	121	436	24.9	20.8
H303800		40.7	0	175	186	0	260	380	175	583	0	687	30.0	0.0
H303825		40.7	25	175	186	65	195	380	175	583	143	516	24.1	24.6
H303850		40.7	50	175	186	130	130	380	175	583	286	344	20.1	49.1
H303425		46.9	25	175	186	75	225	340	175	583	165	595	23.4	28.3

※W/C：水セメント比、s/a：細骨材率、FA：フライアッシュの細骨材における代替率、W：水、C：セメント、F：フライアッシュ、S：砂、G：砂利、W/P：水粉体比、F/C：フライアッシュ/セメント比、■：OHM,SHMを使用した調合

2.4 実験方法

①モルタルの練り混ぜおよびフロー値の測定

モルタルの練り混ぜは20℃、RH60%の恒温恒湿室で行い、細骨材とセメントをミキサーに投入し、10秒間空練りを行った後、落下運動を与えない場合のフロー値が200±10になるように高性能AE減水剤を添加した水を投入し、低速で30秒間、高速で150秒間練り混ぜた。フレッシュモルタルのフロー値はJIS R 5201に定められたフローコーンのみを用いて測定した。

②レオロジー一定数の測定

フレッシュモルタルのレオロジー一定数の測定は、図-2に示す内円板型回転粘度計を用いて、0.5、2.5、10、20、50 rpmの回転速度についてそれぞれ30秒ずつ、回転速度の上昇過程においてせん断応力を測定し、降伏値および塑性粘度を求めた。

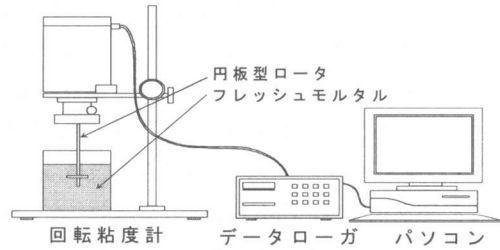


図-2 回転粘度計

③圧縮強度

圧縮強度試験用供試体は、φ5×10cmモールドに試料を積めた後、10回の振動を与えて作製し、1日後に脱型し、標準養生を施した。

3. 実験結果及び考察

3.1 高性能AE減水剤の添加量

フレッシュモルタルがフロー値200±10になった時の高性能AE減水剤の添加量は、図-3および図-4に示すように、フライアッシュの代替率が増加するほど、また、仮定粗骨材容積が増加するほど減少した。また、高性能AE減水剤の添加量は水セメント比(W/C)が減少するほど増加した。フライアッシュの代替率の増加および仮定粗骨材容積の減少に伴い水粉体比(W/P)が低くなって、目標フロー値を得るために必要な高性能AE減水剤の添加量が多くなったと考えられる。

図-5に高性能AE減水剤の添加量に及ぼすフライアッシュの種類の影響を示す。高性能AE減水剤の添加量はJISフライアッシュ(HM) < シンダアッシュ(SHM) < JIS外原粉フライアッシュ(OHM)の順番に増加した。OHMの強熱減量は17.1でありHMの1.1に比べ非常に大きく、未燃カーボンの化学混和剤を吸着する性質が強く示されたと考えられる。

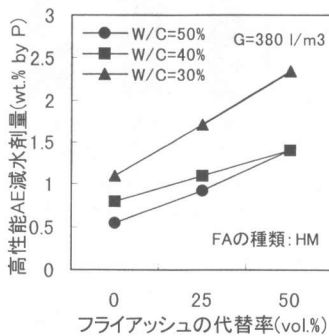


図-3 高性能AE減水剤添加量に及ぼすフライアッシュ代替率の影響

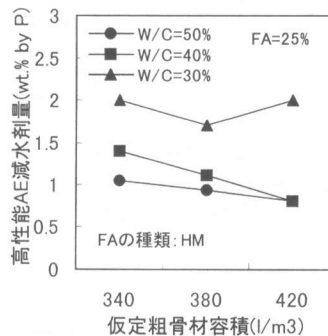


図-4 高性能AE減水剤添加量に及ぼす仮定粗骨材容積の影響

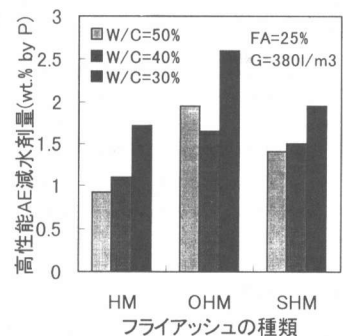


図-5 高性能AE減水剤添加量に及ぼすフライアッシュ種類の影響

3.2 レオロジー特性

本実験では、ひずみ速度が 2.46, 5.28 および 13.2(1/s)の時のせん断応力値を 1 次回帰し、切片を降伏値、傾きを塑性粘度とした。

図-6 および図-7 にフレッシュモルタルの降伏値に及ぼすフライアッシュの代替率および仮定粗骨材容積の影響を示す。フレッシュモルタルの降伏値は、フライアッシュの代替率が増加するほど高くなり、また、仮定粗骨材容積が増加するほど高くなる傾向を示した。一方、降伏値に及ぼすフライアッシュの種類の影響は大きくなかった。

図-9 および図-10 にフレッシュモルタルの塑性粘度に及ぼすフライアッシュの代替率および仮定粗骨材容積の影響を示す。フレッシュモルタルの塑性粘度はフライアッシュの代替率が増加するほど高くなったが、仮定粗骨材容積の影響は大きくなかった。また、塑性粘度は W/C が小さくなるほど高くなった。塑性粘度に及ぼすフライアッシュの種類の影響を図-11 に示すが、SHM の塑性粘度は、HM, OHM より低かった。SHM の低い塑性粘度は、SHM が HM や OHM に比べ粒子が粗く比表面積が小さいためと考えられる[4]。

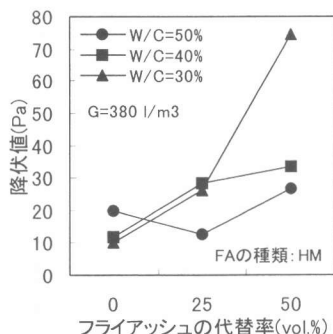


図-6 降伏値に及ぼすフライアッシュ代替率の影響

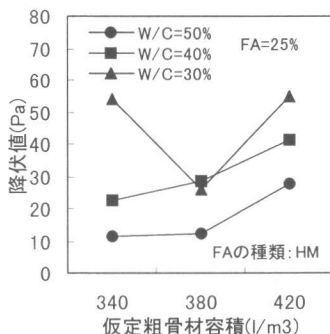


図-7 降伏値に及ぼす仮定粗骨材容積の影響

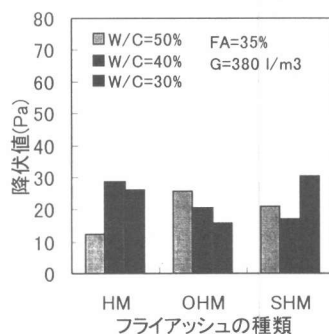


図-8 降伏値に及ぼすフライアッシュ種類の影響

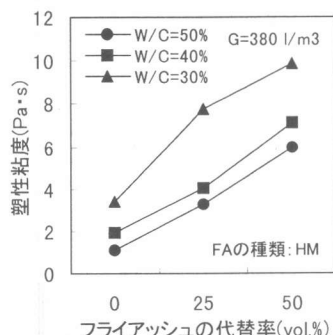


図-9 塑性粘度に及ぼすフライアッシュ代替率の影響

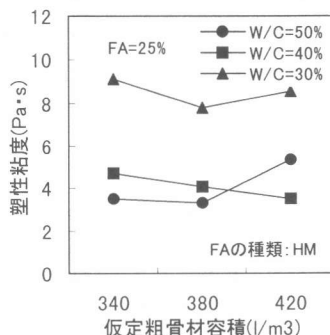


図-10 塑性粘度に及ぼす仮定粗骨材容積の影響

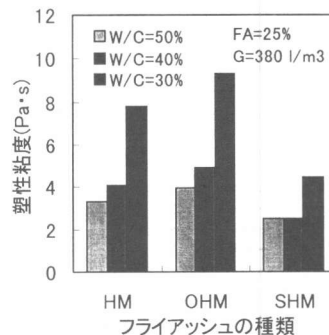


図-11 塑性粘度に及ぼすフライアッシュ種類の影響

3.3 強度特性

図-12 に圧縮強度に及ぼすフライアッシュの代替率の影響を示す。W/C=50%の場合、フライアッシュの代替率が 25%の場合圧縮強度は高くなり、W/C=40%の場合は代替率 25%圧縮強度は 0%

と同等であり、50%代替率では圧縮強度は低下した。W/C=30%の場合は、フライアッシュの代替率が増加するに伴い圧縮強度は減少する結果となった。従って、フライアッシュを砂の代替材として使用する場合、低水セメント比よりは高水セメント比の方が強度発現の観点では有効であると考えられる。

図-1 3 に圧縮強度に及ぼす仮定粗骨材容積の影響を示す。W/C=50%、40%、30%のいずれの場合も、仮定粗骨材率の増加に伴い圧縮強度も増加することが分かった。

図-1 4 に W/C=40%、G=420、380、340(l/m³)の場合の圧縮強度の発現に及ぼすフライアッシュの代替率の影響を示す。いずれの仮定粗骨材容積においてフライアッシュ代替率が 25%の場合に最高強度を示しており、その傾向は材令 7、28、91 日共に同じであった。

図-1 5 にモルタルの圧縮強度に及ぼすフライアッシュの代替率の影響をフライアッシュの種類ごとに示す。図-1 6 には HM、OHM、SHM を使用した場合 W/C 比が圧縮強度に及ぼす影響を示した。圧縮強度は W/C 比が低くなるほど高くなった。図-1 7 には圧縮強度に及ぼす仮定粗骨材容積の影響を示した。圧縮強度は仮定粗骨材容積が増加するほど増加した。

以上より、JIS 品、JIS 規格外の原粉フライアッシュ、シンダーアッシュを細骨材の代替材として使用した場合代替率 25%でフライアッシュ無添加のものより高い圧縮強度が得られた。圧縮強度に及ぼすフライアッシュの種類の影響は大きくなかった。

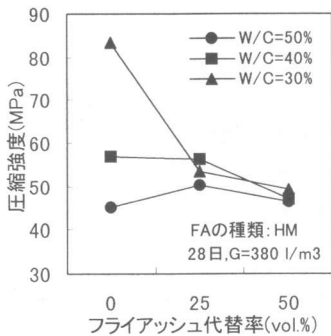


図-1 2 FA と圧縮強度との関係に及ぼす W/C の影響

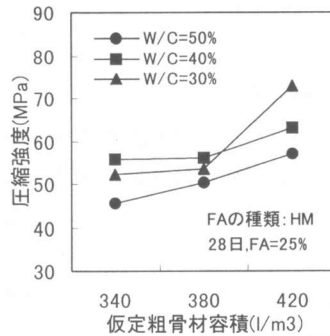


図-1 3 仮定粗骨材容積と圧縮強度に及ぼす W/C の影響

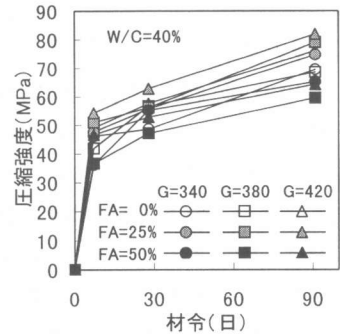


図-1 4 圧縮強度に及ぼすフライアッシュ代替率の影響

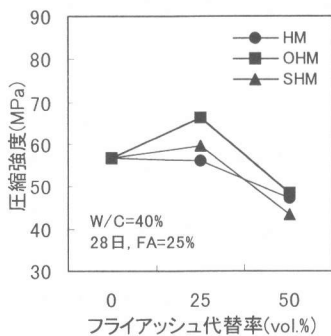


図-1 5 FA と圧縮強度との関係に及ぼす FA の種類の影響

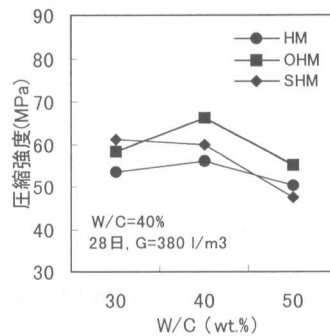


図-1 6 圧縮強度に及ぼす W/C の影響

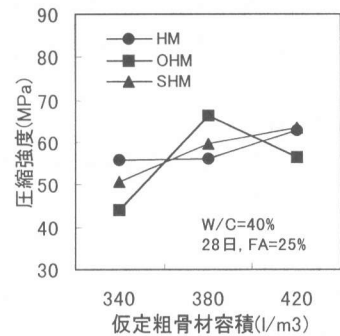


図-1 7 圧縮強度に及ぼす仮定粗骨材容積の影響

図-18にフライアッシュの代替率をセメントの重量を基準に内割混合として換算した場合の内割混合率と圧縮強度との関係を示す。水セメント比が40%および50%の場合、圧縮強度はフライアッシュの内割混合率が50%位まで増加してもフライアッシュ無添加モルタルに比べ落ちていないことが分かった。

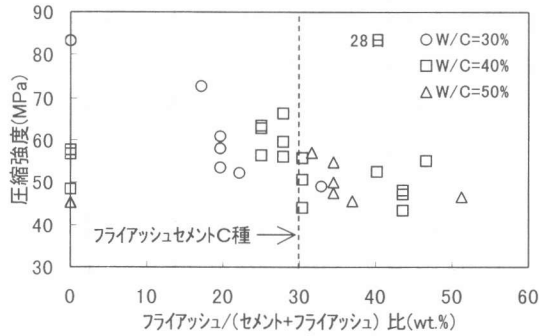


図-18 圧縮強度とフライアッシュ/(セメント+フライアッシュ)比の関係

以上の実験結果より、フライアッシュの細骨材の代替材としての利用は、水セメント比があまり小さくない場合には問題はなく、フライアッシュをコンクリート中に大量に取り込める方法と思われる。

4. まとめ

本実験結果より得られた知見を以下に示す。

- (1)フレッシュモルタルで目標フロー値を得るための高性能 AE 減水剤の添加量は、フライアッシュの代替率が増加するほど、また、仮定粗骨材容積が増加するほど減少した。
- (2)フレッシュモルタルの降伏値は、フライアッシュ代替率が増加するほど高くなり、仮定粗骨材容積が増加するほど高くなる傾向を示した。
- (3)フレッシュモルタルの塑性粘度はフライアッシュの代替率が増加するほど高くなったが、仮定粗骨材容積の塑性粘度に及ぼす影響はあまりなかった。
- (4)JIS 品、JIS 規格外の原粉フライアッシュ、シンダーアッシュを細骨材の代替材として使用した場合代替率 25%でフライアッシュ無混入のものより高い圧縮強度が得られた。
- (5)圧縮強度は W/C=40%および 50%の場合、フライアッシュを外割混合し、その代替率が 50%位まで増加してもフライアッシュ無添加モルタルに比べ落ちていないことが分かった。

参考文献

- [1]平成6年度環境審査等調査、石炭灰有効利用拡大技術調査報告書、財団法人エネルギー総合工学研究所 pp.1~10, 1994. 7
- [2]フライアッシュセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説、日本建築学会 pp.58~61, 1991. 6
- [3]陳庭ほか：ペーストのレオロジー特性に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.455~460, 1994
- [4]呉相均：高流動コンクリートの流動性に及ぼす材料特性および調合の影響、東京大学修士論文、pp.34~59, 1996. 3