

論文 分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの品質改善に関する基礎研究

油野 邦弘^{*1}・石井 光裕^{*2}・加地 貴^{*3}

要旨：石炭灰有効活用技術開発の一環として、フライアッシュ原粉から、高度な分級技術により選別抽出した分級フライアッシュ(JIS A 6201-1999 1種)を吹付けコンクリートの混和材として、50, 100, 150kg/m³と各種使用した場合の配合試験と模擬トンネルによる吹付け試験を行った。その結果、吹付けコンクリートに分級フライアッシュを細骨材置換することにより、非混入の場合と比べ、コンクリートの粘性が適度に増加し、吹付け時の粉塵量とリバウンド率の大幅な低減に伴う施工性の改善と初期・中長期材齢の強度増加が図れること、および分級フライアッシュの適正な使用量は 100～150 kg/m³程度であることが明らかとなった。

キーワード：吹付けコンクリート、分級フライアッシュ、混和材、施工性改善、強度増加

1. はじめに

本研究は、石炭灰有効活用技術の開発研究の一環として実施しているものである。フライアッシュ原粉から、高度な分級技術により、20 μm 以下の良質な球形微粒子を選別抽出した分級フライアッシュ (JIS A 6201-1999 1種 適合品) を吹付けコンクリートの混和材として使用し、(1)微粉末効果による適度な粘性増加に基づく施工性の改善 (低粉塵, 低リバウンド化) や、(2)空隙充填効果やポゾラン効果等により、コンクリートの硬化体を緻密化して強度発現や耐久性等の向上を図ることによって、高品質の吹付けコンクリートを開発し、実用化することを研究目的としている。また、これらの改善効果により、吹付け作業環境の改善、経済性の向上等を図ることが可能になるものと考えられる。

今までの研究^{1), 2)}では、単位セメント量を 360kg/m³とし分級フライアッシュを細骨材置換で 100kg/m³混入した吹付けコンクリート(減水剤 C×1.2%使用)について、模擬トンネルによる吹付け試験を実施し、非混入の場合と比べ、吹付け時の粉塵量とリバウンド率が大幅に低減

し、初期・中長期材齢の強度が増加するとともに乾燥収縮や凍結融解、中性化等に対する耐久性が向上することを明らかにした。

本論文では、分級フライアッシュの細骨材置換としての使用量を 50, 100, 150kg/m³と各種変化させて、ベースコンクリートの配合試験と模擬トンネルによる吹付け試験を実施し、分級フライアッシュの使用量の違いによる吹付けコンクリートの品質改善効果について基本検討を行った。配合試験では、各種配合の試験練りを行い、分級フライアッシュによる減水効果と強度発現特性の評価を行った。またフレッシュコンクリートの粘性の増加について定量的な評価を試みるとともにモルタルに急結剤を添加し、急結剤による凝結特性と初期強度の発現特性について評価を行った。また、模擬トンネル(高さ 3.5m, 幅 3.5m, 長さ 7.0m)による各種配合の吹付け試験では、分級フライアッシュの使用量の違いによる施工性の改善度(低粉塵, 低リバウンド化)や初期・中長期材齢の強度発現特性について評価を行い、分級フライアッシュの適切な使用量について考察を行った。

*1 四電産業(株) 環境事業部 石炭灰活用拡大プロジェクトチーム副主査 (正会員)

*2 四国電力(株) 建設部 石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム主査 工博 (正会員)

*3 四国電力(株) 建設部 石炭灰有効活用拡大プロジェクトチーム 工修 (正会員)

表 - 1 吹付けコンクリートの配合試験結果

配合 No.	混和材種類	細骨材置換量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	混和材 F	細骨材 S	粗骨材 G
1	無し	-	12 ± 1	61.7	60	222	360	-	1031	708
2	分級フライアッシュ JIS1種	50		58.3		210	360	50	997	718
3		100		56.4		203	360	100	953	726
4		150		56.4		203	360	150	901	726
5	分級フライアッシュ JIS2種	50		58.6		211	360	50	992	718
6		100		56.4		203	360	100	945	726
7		150		57.2		206	360	150	883	724

注；細骨材率のsは、細骨材置換相当分の混和材を含む。

表 - 2 使用材料

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント，密度3.16g/cm ³
細骨材	陸砂，表乾密度2.59g/cm ³ ，FM=2.73
粗骨材	砕石，表乾密度2.66g/cm ³ ，Gmax=15mm
分級フライアッシュ JIS1種	密度2.40g/cm ³ ，比表面積5570cm ² /g
フライアッシュ JIS2種	密度2.24g/cm ³ ，比表面積3560cm ² /g

2. ベースコンクリートの品質改善評価

2.1 配合試験の概要

本研究では、山岳トンネルの NATM で使用される吹付けコンクリートを対象とし、公的機関の技術基準に基づき、単位セメント量を 360kg/m³ とし、圧縮強度を材齢 24 時間強度で 5N/mm² 以上、材齢 28 日強度で 18N/mm² 以上に設定した。

配合試験では、混和材を使用しないプレーン配合を基準配合とし、分級フライアッシュ(JIS 1種)を混和材として 50、100、150kg/m³ と細骨材置換した各種配合について試験練りを行った。また、当試験では、フライアッシュ JIS 2 種を同量使用した各種配合の試験練りを合わせて実施し、ベースコンクリートの品質改善効果を比較検討するものとした。なお、配合試験では、分級フライアッシュ等の混和材のみの使用による吹付けコンクリートの品質改善効果を把握するものとして、減水剤は使用しないものとした。

分級フライアッシュ(JIS 1種)およびフライアッシュ JIS 2 種を使用した各種配合の配合試験結果を表 - 1 に示す。また、表 - 2 に吹付けコンクリートの使用材料の仕様を示す。

2.2 配合試験結果の考察

試験練り結果から得られた各種配合の減水効果を図 - 1 に示す。

分級フライアッシュの細骨材置換量が増加するに従って、基準のプレーン配合からみた減水率は大きくなる傾向を示し、置換量が 100、

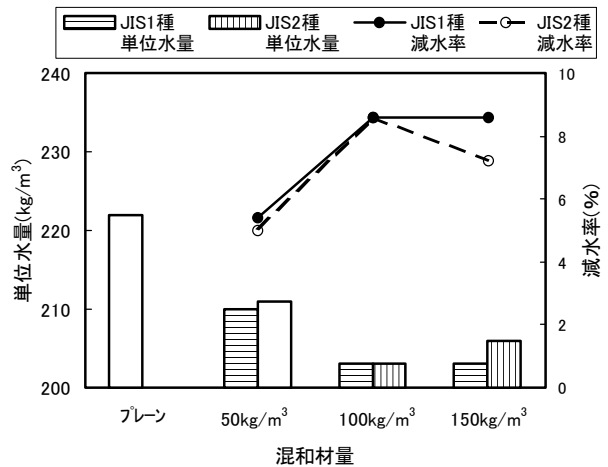


図-1 フライアッシュの細骨材置換による減水効果

150kg/m³ で減水率は 8.5%程度と良好な減水効果が得られている。また、フライアッシュ JIS 2 種を使用した配合の減水効果は分級フライアッシュを使用した配合とほぼ同程度となっており、減水効果の顕著な違いは認められなかった。

次に、後述する模擬トンネルにおいて吹付け試験を実施した各種配合のベースコンクリートの圧縮強度試験結果を図 - 2 に示す。

ベースコンクリートの中長期材齢の圧縮強度は、基準のプレーン配合と比べ、分級フライアッシュの細骨材置換量が増加するに従って順次

増加し、材齢 7 日強度で 25%程度、材齢 28 日強度で 20%～30%程度、材齢 91 日強度で 30%～45%程度の強度増加となっており、良好な強度発現を示している。また、分級フライアッシュを 100, 150kg/m³ 使用した配合の材齢 7 日、28 日の強度発現はほぼ同程度となっている。また、フライアッシュ JIS 2 種を 100kg/m³ 使用した配合の強度発現は、分級フライアッシュを 50kg/m³ 使用した配合と同程度となっている。

これらの試験結果より、減水効果と強度発現特性からみた分級フライアッシュの細骨材置換量は、100～150kg/m³ 程度が適切と考えられる。

2.3 ベースコンクリートの粘性評価

球形微粒子である分級フライアッシュ等の混入によるベースコンクリートの粘性増加について評価を試みた。粘性の評価試験は、DIN 1048 として規格化されている拡がり試験³⁾の試験器具を用いて行うものとした。当試験ではコンクリートを詰めたコーンを引き上げた後、スランプ板にあたる試験台を 4cm 持ち上げて落下させる操作を繰り返し、コンクリートのフローが 60cm に達するまでの落下回数で、コンクリートの粘性の大きさを相対的に評価するものとした。

ベースコンクリートの粘性評価試験結果を図-3 に示す。プレーン配合を基準として、分級フライアッシュの細骨材置換量が増加するに従い、コンクリートフローが 60cm に達するまでの落下回数が順次増加しており、分級フライアッシュの混入による粘性の増加を定量的に評価することが可能と考えられる。

このコンクリートフローが 60cm に達した時の落下回数を粘性指標値とすると、分級フライアッシュを 50, 100, 150kg/m³ 使用した配合は、プレーン配合と比べ、粘性指標値はそれぞれ 1.5 倍, 1.8 倍, 2.0 倍程度となっている。また、フライアッシュ JIS 2 種を 100 kg/m³ 使用した配合の粘性指標値は、分級フライアッシュを 50 kg/m³ 使用した配合と同程度となっており、分級フライアッシュの良好な粘性増加効果が示されている。

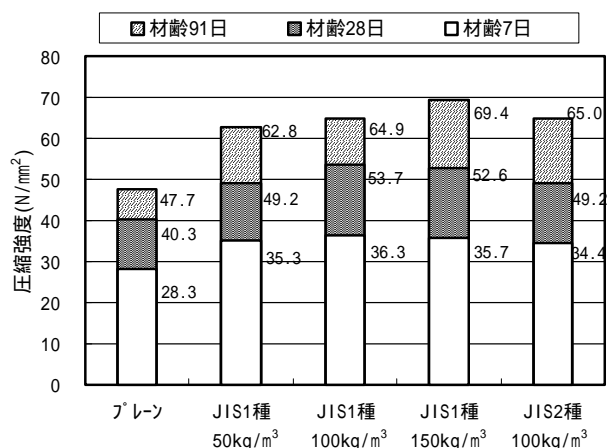


図-2 ベースコンクリートの圧縮強度発現特性

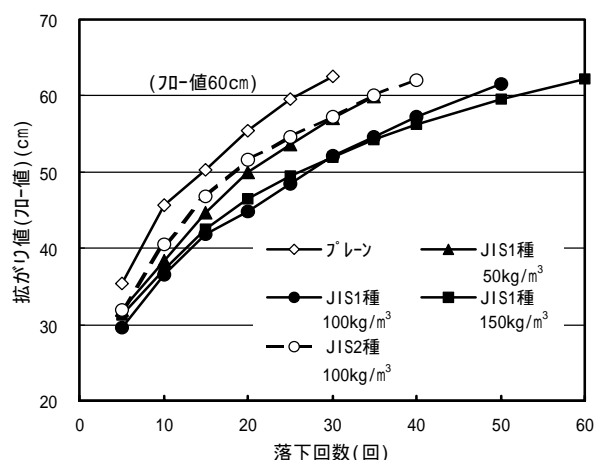


図-3 拡がり試験によるコンクリートの粘性評価

2.4 急結剤を添加したモルタルの凝結特性

配合試験で得られたコンクリート配合と同配合のモルタルに急結剤を添加し、急結剤による凝結特性と初期強度の発現特性について検討した。試験は、モルタルミキサを用いて全材料を投入し低速で 3 分間練り混ぜた後、セメント鋳物系の粉体急結剤を各配合に同量添加 (C × 6%) し高速で 10 秒間練り混ぜた。凝結時間の測定は、JSCE-D 102-1999 吹付けコンクリート用急結剤品質規格 付属書 貫入抵抗によるモルタルの凝結時間測定方法によった。強度試験用供試体は 4 × 4 × 16cm の角柱とし、モルタル試験用テーブルバイブレータを用い、突き棒で突き固めながら表面が平滑に仕上がるまで振動させて締め固め、所定の材齢まで 20, 80%RH の養生室で養生した。

急結剤を添加したモルタルの凝結時間と材齢 24 時間強度の試験結果を図-4 に示す。分級フ

ライアッシュ等を細骨材置換した配合のモルタルの凝結時間は、プレーン配合のモルタルと比べていずれも短縮しており、特に、分級フライアッシュを 100kg/m^3 使用した場合が 45%程度に最も短縮する結果となっている。また、材齢 24 時間の圧縮強度は、分級フライアッシュ等の使用量の増加に従って順次増加しており、50~100%程度の良好な強度増加を示している。

これは、球形微粒子である分級フライアッシュ等が、セメント粒子を分散させ急結剤との水和反応をさらに促進することにより、凝結硬化速度が改善され強度発現が向上するものと考えられる。

3. 模擬トンネルによる吹付け試験

3.1 試験の概要

模擬トンネルによる吹付け試験は、配合試験を行った表 - 1 の各種配合の内、基準配合としてのプレーン配合と、分級フライアッシュを混和材として 50, 100, 150 kg/m^3 細骨材置換した配合およびフライアッシュ 2 種を 100 kg/m^3 細骨材置換した配合の 5 配合について実施した。

吹付け試験は湿式により、屋外に設けた模擬トンネル（高さ 3.5m、幅 3.5m、長さ 7.0m）において実施した。ピストンポンプ圧送式の吹付け機械（最大吐出量 $14\text{m}^3/\text{h}$ ）を使用し、急結剤の添加は粉体急結剤圧送機（最大吐出量 $3.2\text{kg}/\text{min}$ ）を使用した。配管条件は、ポンプ出口配管より 3 インチのフレキシブルホースを取り付け、ノズル先端までの搬送延長は約 30m とし、ノズルより約 2m 手前で Y 分岐管により急結剤配管を取り付け、ノズルより約 7m 手前で Y 分岐管により圧搾空気配管を取り付けた。

吹付け試験の実施に当たっては、所定の配合の吹付けコンクリートを生コン工場で製造し試験現場まで搬送して、フレッシュ性状を測定するとともにベースコンクリートの圧縮強度試験用の供試体（ $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ）を作成した。次に、吹付け機械の吐出量（ $8\text{m}^3/\text{h}$ ）と急結剤圧送機による急結剤添加量（ $C \times 6\%$ ）を調整した。なお、

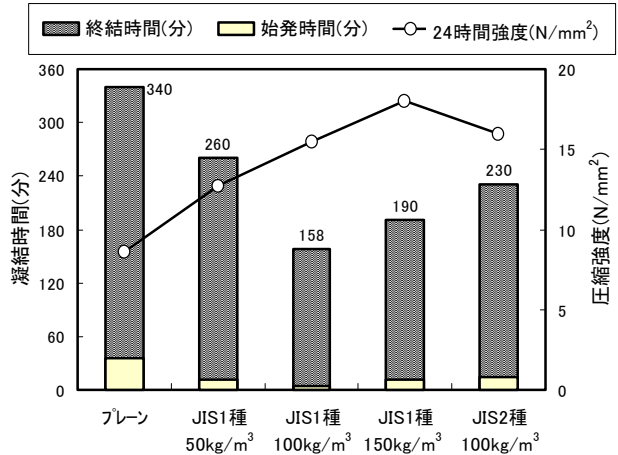


図-4 急結剤を添加したモルタルの凝結時間と圧縮強度

急結剤はセメント鉱物系の粉体を使用し、各配合の添加量を一定とした。

吹付け試験はまず、模擬トンネル内に設置した初期圧縮強度試験（材齢 3, 24 時間）用の円盤容器と中長期材齢の圧縮強度試験供試体作成用の箱型枠（ $50 \times 50 \times 20\text{cm}$ ）に吹付けて供試体を作成した。次に、模擬トンネル内にブルーシートを敷設した後、吹付け角度 45° 前後でアーチ部に周方向 2m 程度、トンネル軸方向に 4m 程度の面積に、ノズル先端から 1.5m 程度の距離を保ち 8 分間にわたって人力による吹付けを行った。吹付け時は、模擬トンネルの両出口をシートで覆い、粉塵とリバウンド材のトンネル外への飛散を防ぎ、吹付け時の粉塵量をデジタル粉塵計で測定した。吹付け終了後は、ブルーシート上に落下したリバウンド材を回収し、その重量を測定してリバウンド率を算定した。

吹付け試験終了後は、JSCE-G561 の引き抜き試験方法に準じて材齢 3, 24 時間の初期圧縮強度を測定するとともに、箱型枠から圧縮強度試験用のコア供試体（ $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ ）を切り出して、所定の材齢まで 20, 80%RH の養生室で養生を行い、圧縮強度を測定した。

3.2 施工性の改善評価

吹付け試験で測定した 5 配合の粉塵量とリバウンド率を図 - 5 に示す。基準のプレーン配合と比べ、分級フライアッシュ(JIS 1 種)の細骨材置換量が増加するに従って、粉塵量は 70%台から 50%台程度に低下し、リバウンド率も同程度

に低下しており、分級フライアッシュを使用することにより吹付けコンクリートの施工性が良好に改善されることが示された。なお、分級フライアッシュを 100, 150 kg/m³ 使用した配合の施工性改善度は、ほぼ同程度となっており、また、フライアッシュ JIS 2 種を 100 kg/m³ 使用した配合の施工性改善度は、分級フライアッシュを 50 kg/m³ 使用した配合と同程度となっている。これらの試験結果より、施工性の改善度からみた分級フライアッシュの使用量は、100 ~ 150 kg/m³ 程度が適切と考えられる。

図 - 6 に、拡がり試験により評価した各種配合の粘性指標値とその施工性改善との関係を示す。粘性指標値の増加に伴って粉塵量とリバウンド率は良好に低下する結果となっており、粘性指標値と吹付けコンクリートの施工性改善度との間には高い相関関係が認められる。

これらの結果は、分級フライアッシュを混入することにより、コンクリートの粘性が適度に増加し、この増加した粘性によって得られる粘着力が、吹付けコンクリートの付着性を改善するとともに、微粒子の分離、飛散を低減させたことによるものと考えられる。

3.3 強度発現特性

吹付け試験での初期圧縮強度試験結果を図 - 7 に示す。基準のプレーン配合と比べ、分級フライアッシュ等の細骨材置換量が増加するに従って、3 時間強度は 20, 60, 70% 程度の強度増加となり、24 時間強度は 20, 40, 50% 程度の強度増加となっている。当吹付け試験では各配合の急結剤添加量を一定量 (C × 6%) としたが、上述した良好な初期強度発現は、急結剤によるセメントの水和反応が分級フライアッシュ等の微粉末効果によりさらに促進されたことと、空隙充填効果によりコンクリートの硬化体が緻密化したことによるものと考えられる。

吹付け試験での中長期材齢の圧縮強度試験結果を図 - 8 に示す。基準のプレーン配合と比べ、分級フライアッシュ等の細骨材置換した配合では、使用量が増加するに従って、材齢 7 日、28

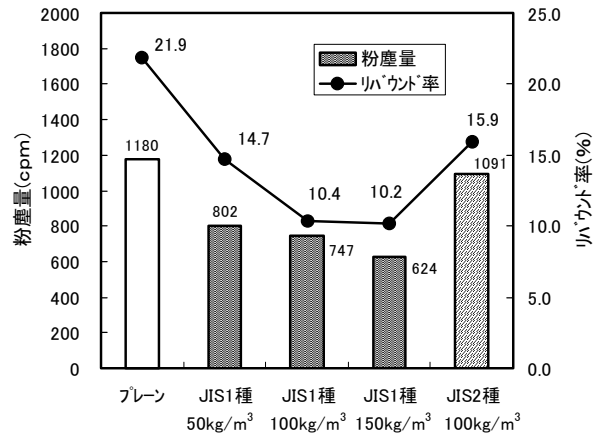


図 - 5 各種配合の粉塵量とリバウンド率の関係

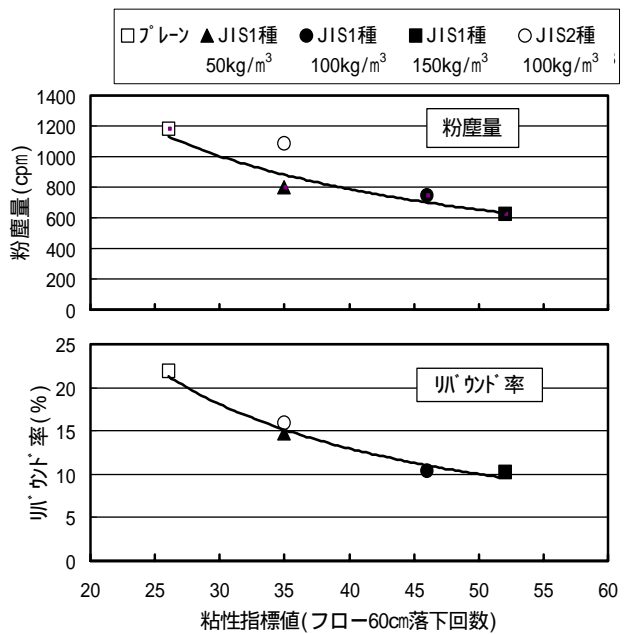


図 - 6 粘性指標値と施工性改善の関係

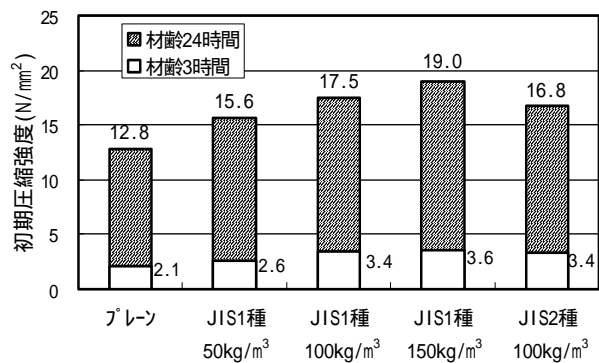


図 - 7 各種配合の初期圧縮強度試験結果

日、91 日強度は順次増加する結果となっている。分級フライアッシュ (JIS 1 種) を 100, 150 kg/m³ 使用した配合では、材齢 7 日強度で 10% 程度、材齢 28 日強度で 20% 程度、材齢 91 日強度で 40% 程度の強度増加となっており、良好な強度

発現を示している。また、フライアッシュ JIS 2 種を 100 kg/m^3 使用した配合の強度発現は分級フライアッシュを 50 kg/m^3 使用した配合と同程度となっている。これらの試験結果より、強度発現特性からみた吹付けコンクリートへの分級フライアッシュの使用量は、 $100 \sim 150 \text{ kg/m}^3$ 程度が適切と考えられる。

分級フライアッシュ等の使用による吹付けコンクリートの中長期材齢の良好な強度発現は、従来から言われているボールベアリング効果による単位水量の減少と、球形微粉末による空隙充填効果やポゾラン反応によるコンクリート硬化体の緻密化等によると考えられる。

4. まとめ

本研究では、吹付けコンクリートの混和材として、分級フライアッシュ (JIS 1 種) を細骨材置換として $50, 100, 150 \text{ kg/m}^3$ 用いた場合の配合試験と模擬トンネルによる吹付け試験を行い、ベースコンクリートの品質改善および吹付けコンクリートの施工性と強度発現の改善等について基本検討を行った。これらの試験結果から、分級フライアッシュを混和材として細骨材置換で $100 \sim 150 \text{ kg/m}^3$ 使用することにより、非混入のプレーン配合と比べ、ベースコンクリートの粘性が適度に増加し、吹付け時の粉塵量とリバウンド率が大幅に低減するとともに初期・中長期材齢の強度増加が図られ、高品質の吹付けコンクリートが得られることが明らかとなった。

本研究の範囲で得られた分級フライアッシュの細骨材置換使用による吹付けコンクリートの品質改善効果について、以下のように明らかとなった。

- (1) 分級フライアッシュを細骨材置換で $100 \sim 150 \text{ kg/m}^3$ 使用すると、微粉末効果等により、非混入の場合と比べ単位水量が 8.5% 程度減少 (スランプ範囲 $12 \pm 1 \text{ cm}$, 減水剤未使用) するとともに、ベースコンクリートの中長期材齢の強度発現が向上する。
- (2) また、拡がり試験により、ベースコンクリ

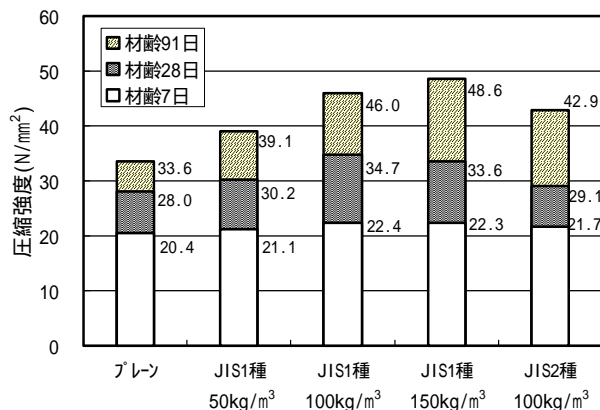


図 - 8 各種配合の圧縮強度試験結果

ートの粘性が適度に増加することを定量的に把握するとともに、急結剤を添加した同配合のモルタル試験により、凝結硬化速度が改善されモルタルの初期強度発現が向上する。

- (3) 模擬トンネルによる吹付け試験では、粉塵量は約 60% 台に低減し、リバウンド率は約 50% 台に低減される。さらに、分級フライアッシュの混入により付与されるコンクリートの粘性と施工性の改善との間に、高い相関性を見出した。
- (4) 吹付け試験で作成した供試体により、初期・中長期材齢の強度試験を行い、材齢 24 時間強度で 40% 程度の強度増加、材齢 7 日、28 日、91 日強度で、それぞれ 10%、20%、40% 程度の強度増加となり、良好な強度発現が得られる。

参考文献

- 1) 油野邦弘, 石井光裕, 国久清司, 富加見徳治: 分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.91-96, 2000.6
- 2) 油野邦弘, 石井光裕, 国久清司, 富加見徳治: 分級フライアッシュを用いた吹付けコンクリートの施工性・強度, 第 54 回セメント技術大会講演要旨 2000, pp.126-127
- 3) 坂本 淳: 高スランプのコンクリートを対象としたコンシステンシー評価方法の現状, コンクリート工学, Vol.37, No.12, pp.38-41, 1999.12