

報告 石炭灰（フライアッシュ）の高強度吹付けコンクリートへの適用性

尾留川 剛^{*1}・小島 亘^{*2}・白戸 伸明^{*3}・齋藤 敏樹^{*4}

要旨：日本原子力研究開発機構が建設する地下研究坑道に、高強度吹付けコンクリート（設計基準強度 36N/mm²）の使用を計画している。そこで、環境保全の観点から石炭火力発電所から発生するフライアッシュを有効利用し、細骨材置換した吹付けコンクリートの配合設計を行うこととした。その結果、フライアッシュの使用により所要の流動性を確保するための高性能減水剤量は若干多くなるものの、単位セメント量および単位急結剤量を減少させることができ、経済性にも優位であることを確認した。また、施工性はフライアッシュを使用しない場合と遜色なく、高強度吹付けコンクリートに適用可能であることが確認された。

キーワード：フライアッシュ、高強度吹付けコンクリート

1. はじめに

日本原子力研究開発機構では、北海道幌延町において、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として地下研究坑道の建設を計画している。地下研究坑道は、深度 500m 程度の立坑 3 本と試験研究用の水平坑道からなり、支保工法は、立坑においてはショートステップ工法を、水平坑道においては NATM を計画している。

近年、トンネル工事では NATM が標準工法として定着している。その中で吹付けコンクリートは主要な支保部材とされており、信頼性向上、高品質化および高強度化が求められている。

一方、石炭火力発電所からの産業副産物であるフライアッシュは、環境保全の観点から有効利用が期待されており、それを吹付けコンクリートの混和材や細骨材の一部と置換することにより施工時の粉塵発生の抑制やリバウンド量の低減効果があることが報告されている¹⁾。しかし、高強度（設計基準強度 36N/mm²）の吹付けコンクリートへの適用事例は少ないのが現状である。

本稿は、幌延地下研究坑道におけるフライアッシュの高強度吹付けコンクリートへの適用性

を検討するために実施した室内試験および現場試験施工結果を報告するものである。

表-1 使用材料

材料種類	記号	諸元
セメント	普通 [※] ポランドセメント C	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3,360cm ² /g
細骨材	陸砂 S	密度:2.67g/cm ³ , 吸水率:0.88%, FM:2.71 単位容積質量:1.87kg/L, 実積率:70.6%
粗骨材	砕石1505 G	密度:2.70g/cm ³ , 吸水率:1.92%, FM:6.41 単位容積質量:1.53kg/L, 実積率:57.9%
混和材	フライアッシュ (JIS II 種灰) FA	密度:2.17g/cm ³ , 比表面積:3,970cm ² /g, SiO ₂ :72.0%, Ig. loss:1.4%, フロー値比:106%, MB吸着量:0.52mg/g, 活性度指数:83%(材齢28日), 96%(材齢91日)
	繊維補強材 FR	ポリビニルアルコール繊維 長さ30mm 密度:1.3g/cm ³
混和剤	高性能減水剤 A	ポリエチレングリコール系高分子化合物
急結剤	SP	カルシウムサルホアルミネート系鉱物
練り混ぜ水	W	上水道水

表-2 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	
フレッシュ性状	練り混ぜ	JIS A 1138に準拠し、2軸強制練りミキサを使用
	スランプ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	経時変化	コンクリート練り混ぜ後静置し、時間経過に伴うスランプおよび空気量を測定 測定時間:0, 30, 60, 90, 120分
初期強度	プロクター 貫入抵抗	JSCE-D 102に準拠
硬化後性状 (ベ-コンクリート)	圧縮強度	JIS A 1132およびJIS A 1108 供試体寸法:φ10cm×h20cm
	静弾性係数	JIS A 1149
	引張強度	JIS A 1132およびJIS A 1113 供試体寸法:φ15×h20cm
	曲げ割れ	JSCE-F 552およびJSCE-G 552 供試体寸法:□10×10×40cm
施工性	吐出量	吹付けた量を吹付け時間で除して算出
	圧送圧力	吹付け機により圧送圧力を測定
吹付け後	リバウンド率	回収したリバウンド材の質量を使用したコンクリート質量を除して算出
	ブルアウト強度	JSCE-G 561に準拠 材齢:3, 24時間
	コア圧縮強度	JSCE-F 561およびJIS A 1107に準拠 材齢:7, 28日

*1 (独)日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (正会員)

*2 (独)日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター

*3 北海道電力(株) 京極水力発電所建設所(前 核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター)

*4 北電総合設計(株) 土木部試験技術室 (正会員)

表-3 試験ケース

シリーズ	配合ケース	設計基準強度 f'_{ok} (N/mm ²)	コンクリートの配合強度 f'_{cr} (N/mm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	スラブの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	混和材		単位セメント量 (kg/m ³)	水セメント比	試験項目					
							種類	使用量								
1	N	36	59	15	21±1.5	2±1.5	なし	—	450	3水準	圧縮強度					
	FA450						フライアッシュ	10%※1	450							
	FA400								400							
	FR						繊維補強材	9.75kg/m ³	450							
2	N											なし	—	450	1水準	経時変化 初期強度 圧縮強度 静弾性係数 引張強度 曲げたね
	FA400						フライアッシュ	10%※1	400							
	FR						繊維補強材	9.75kg/m ³	450							
	FA+FR						フライアッシュ+ 繊維補強材	10%※1 9.75kg/m ³	400							
3	N											なし	—	450	1水準	圧縮強度 静弾性係数 施工性 フルク強度 77圧縮強度
	FA400						フライアッシュ	10%※1	400							
	FR						繊維補強材	9.75kg/m ³	400							
	FA+FR						フライアッシュ+ 繊維補強材	10%※1 9.75kg/m ³	400							

※1：フライアッシュ置換率（容積比）FA/(FA+S)

2. 試験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。なお、フライアッシュは、JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」のⅡ種規格灰を満足している。

2.2 試験項目・方法および試験計画

(1) 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-2に示す。

なお、現場での試験施工は、ポンプ併用空気圧送方式（湿式、吹付け能力 16m³/h）により実施した。

(2) 試験計画

試験フローを図-1に、試験ケースを表-3に示す。配合強度は、設計基準強度確保のため、吹付けによる強度低減および変動係数を考慮のうえ、設計基準強度 36N/mm²に対して 59N/mm²と設定した。

フライアッシュは、細骨材に対して 10%の容積置換とした。また、繊維補強材はコンクリー

ト容積に対して 0.75%を外割添加した。

なお、繊維補強材は、骨材と同時に添加し練混ぜた。

3. 試験結果

3.1 シリーズ 1

セメント水比と圧縮強度の関係は、混和材なしのケース（以下配合 N という）と繊維補強材を使用したケース（以下配合 FR という）とでは、同程度の結果となった（図-2）。

フライアッシュを細骨材置換したケースの同一セメント水比（C/W=2.5）での圧縮強度は、単位セメント量が配合 N と同じ 450kg/m³の場合（以下配合 FA450 という）では、配合 N より 8N/mm²程度高く、単位セメント量が 400kg/m³の場合（以下配合 FA400 という）では、配合 N より 6N/mm²程度高い結果を示した。そこで、フライアッシュを使用したケースは、同一圧縮強

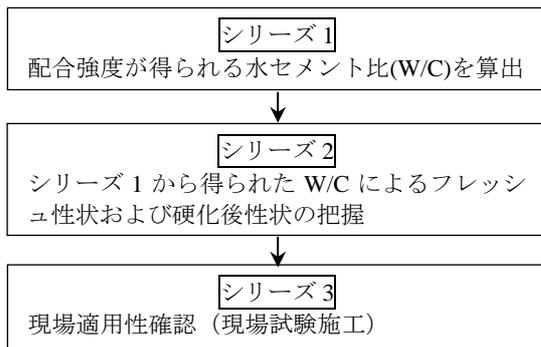


図-1 試験フロー

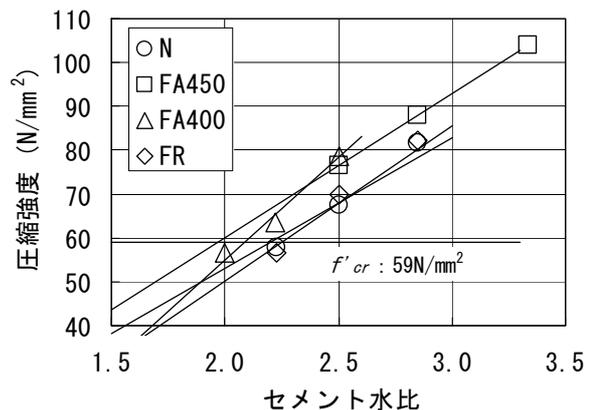


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係

度を得るためにセメント水比を低減し、単位セメント量を 400kg/m^3 として検討することとした。

図-2 から、配合強度 59N/mm^2 が得られる水セメント比を、フライアッシュ未使用のケースでは 42.9% 、使用するケースでは 47.0% とした。

3.2 シリーズ 2

(1) 配合

シリーズ 2 において実施したコンクリート配合を表-4 に示す。なお、(3) 凝結時間以外は急結剤を添加していないコンクリート（以下ベースコンクリートという）により試験を実施した。

フライアッシュを使用するケースは、使用しないケースと比べ、所要のスランブ確保に必要な高性能減水剤添加率が 0.1% 増加する結果を示した。この要因の一つとして、細骨材代替としてフライアッシュを使用することで、水粉体比 ($W/(C+FA)$) が小さくなることが考えられる。

高性能減水剤量は、配合 N よりも配合 FA400 の方が 250g/m^3 増加し、配合 FR よりも単位セメント量 400kg/m^3 でフライアッシュおよび繊維補強材を使用したケース（以下配合 FA+FR という）の方が 150g/m^3 の増加する結果を示した。

また、単位急結剤量は、単位セメント量に対する率による検討の基で添加した結果、フライアッシュ使用により単位セメント量が 50kg/m^3 少ない配合となるため、配合 FA400 および配合 FA+FR は、単位急結剤量が 4kg/m^3 減少可能となる。

(2) 経時変化

ベースコンクリートにおいて、フライアッシュの使用がフレッシュコンクリートの時間的性

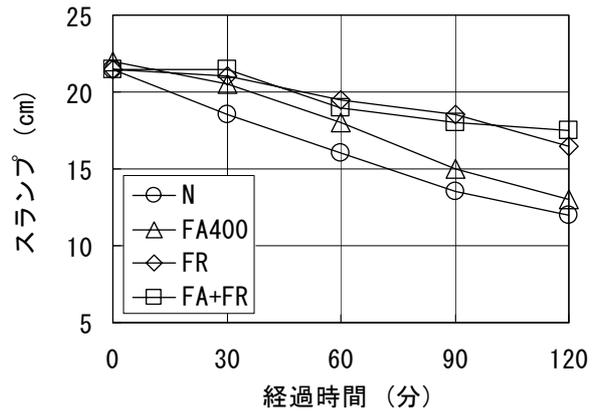


図-3 経過時間とスランブ（ベースコンクリート）

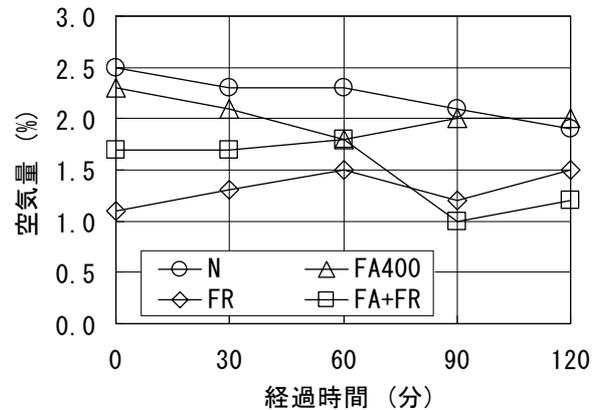


図-4 経過時間と空気量（ベースコンクリート）

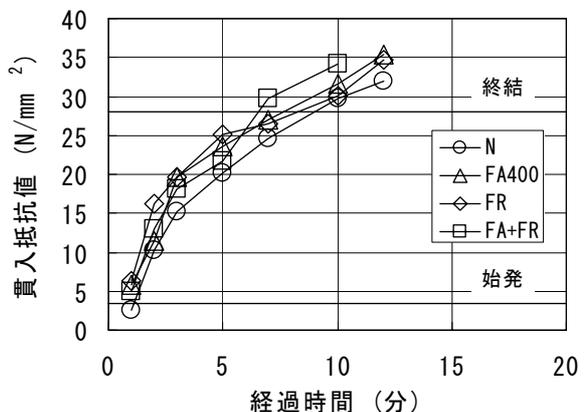


図-5 経過時間と貫入抵抗値（急結剤添加）

表-4 コンクリート配合（シリーズ 2）

配合 ケース	水セメント 比 W/C (%)	水粉体 比 W/(C+FA) (%)	フライアッシュ 置換率 容積比 FA/(FA+S) (vol%)	繊維 補強材 添加率 (vol%)	細骨材 率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m³)							フレッシュ性状		
						水	セメント	混 和 材		細骨材	粗骨材	高性能 減水剤 (g/m³) A	急結剤 S P	スランブ (cm)	空気量 (%)
								フライ アッシュ FA	繊維 補強材 FR						
N	42.9	42.9	0	0	60	193	450	—	—	1,033	696	1,350 (C×0.3%)	36 (C×8%)	21.0	2.2
FA400	47.0	38.6	10	0	60	188	400	87	—	959	719	1,600 (C×0.4%)	32 (C×8%)	21.5	2.1
FR	42.9	42.9	0	0.75	60	193	450	—	9.75	1,033	696	2,250 (C×0.5%)	36 (C×8%)	22.0	2.4
FA+FR	47.0	38.6	10	0.75	60	188	400	87	9.75	959	719	2,400 (C×0.6%)	32 (C×8%)	21.5	2.0

状変化（スランプおよび空気量）へ与える有意な影響は確認されなかった（図-3 および図-4）。

(3) 凝結時間

急結剤を添加した配合において、フライアッシュの使用が凝結時間へ与える有意な影響は確認されなかった（図-5）。

(4) 圧縮強度

ベースコンクリートの圧縮強度は、全てのケースで割増係数を考慮した配合強度（59N/mm²）を満足する結果となった（図-6）。

(5) 引張強度

ベースコンクリートの引張強度は、4～4.5N/mm²程度となり配合による有意な差は確認されなかった（図-7）。

(6) 曲げ強度および曲げタフネス

ベースコンクリートの曲げ強度は、配合による有意な差は確認されなかった。（図-8）。

また、曲げタフネス（曲げじん性係数）は繊維補強材の使用により、それを使用しないケースと比べ大幅な向上が確認され、繊維補強材を使用することによる効果が確認された（図-9）。

3.3 シリーズ 3

シリーズ 2 のうち配合 N、配合 FA400 および配合 FA+FR の 3 ケースについて現場試験施工を実施した。

(1) 施工性

吹付けコンクリートの吐出量は、配合 N と配合 FA400 はほぼ同程度となり、配合 FA+FR は若干少ない結果を示した（図-10）。また、フライアッシュの添加により、圧送圧力が大きくなることが確認された（図-11）。

これは、配合 FA400 の水粉体比が配合 N より約 4% 小さいため、高性能減水剤量を増加して流動性を確保したものの、コンクリートの粘性が若干増加しているためであると考えられる。配合 FA+FR は、水粉体比の低下に加え、繊維補強材の添加によりさらに粘性が増加し、その結果圧送圧力が増大することで、吐出量が少なくなったものと考えられる。

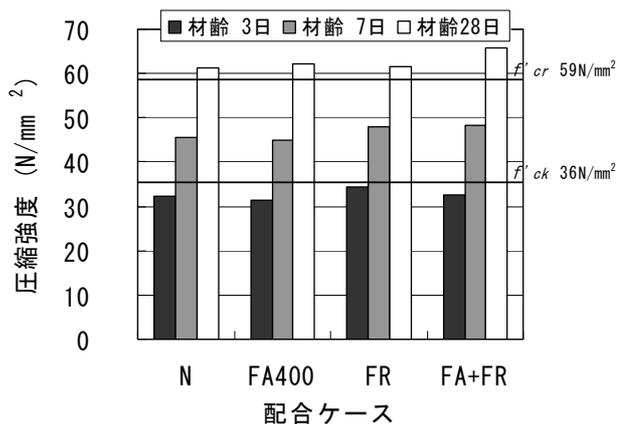


図-6 圧縮強度（ベースコンクリート）

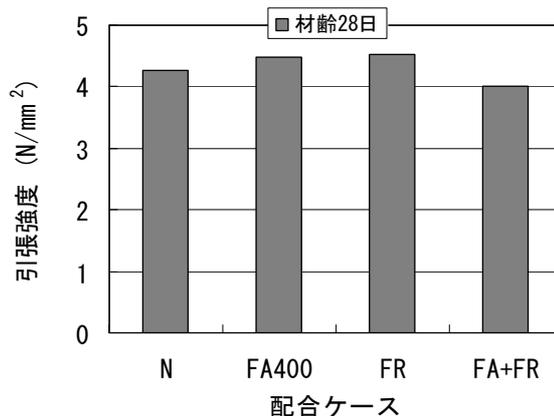


図-7 引張強度（ベースコンクリート）

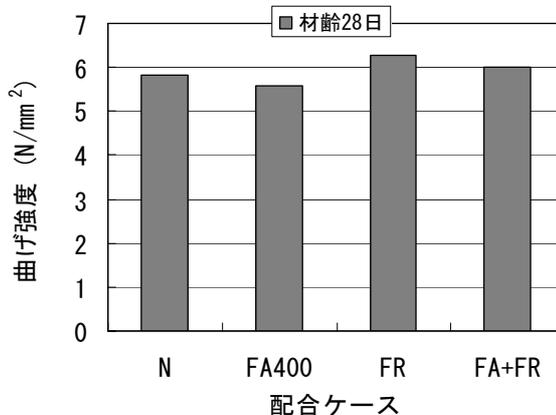


図-8 曲げ強度（ベースコンクリート）

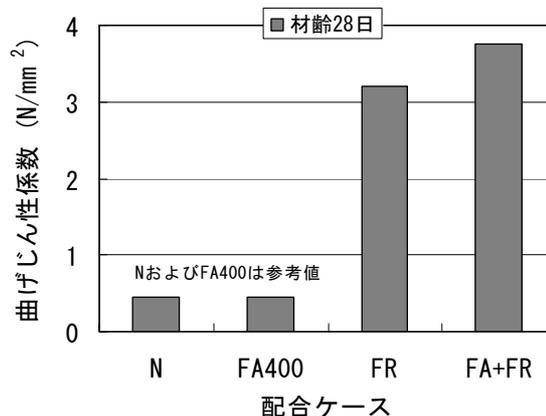


図-9 曲げじん性係数（ベースコンクリート）

また、リバウンド率は、配合 N と配合 FA400 は約 23%と同程度となり、フライアッシュを使用することによるリバウンド低減効果は示されなかった。さらに、配合 FA+FR のリバウンド率は約 30%となり、繊維補強材を使用することによって若干リバウンド率が大きくなる傾向が示された (図-12)。

(2) プルアウト強度

各配合のプルアウトによる推定圧縮強度を図-13 に示す。

各配合とも材齢 3 時間における推定圧縮強度は 2.4~2.7N/mm²、24 時間における推定圧縮強度は 21~25N/mm²であり、高強度吹付けコンクリートの一般的な設定値²⁾である 2N/mm² (3 時間) および 10N/mm² (24 時間) を満足する結果であった。

(3) 圧縮強度

各配合の圧縮強度を図-14 に示す。

ここで、シリーズ 2 の圧縮強度を「室内」、シリーズ 3 の全ての配合のうち急結剤未添加のコンクリートを「ベース」、パネル型枠に吹付けたコンクリート (急結剤添加) からコアリングして採取した供試体を「コア」と表現した。

各配合とも「ベース」の圧縮強度は、配合強度を満足せず、さらには「室内」より低い強度であった。

これは、供試体作製後材齢 7 日まで現場気中養生 (温度約 25℃、相対湿度約 50%) したことにより、供試体が乾燥し初期水和が阻害されたことが要因と考えられる。

「コア」の圧縮強度は、「ベース」および「室内」より高く、材齢 7 日において 50N/mm² 以上の圧縮強度となった。これは、材齢 7 日まで現場養生していたが、パネル型枠の寸法が 60×60×23cm のため水分の逸散が少なく、現場の温度が 25℃程度であったことにより強度発現が促進されたためと考えられる。

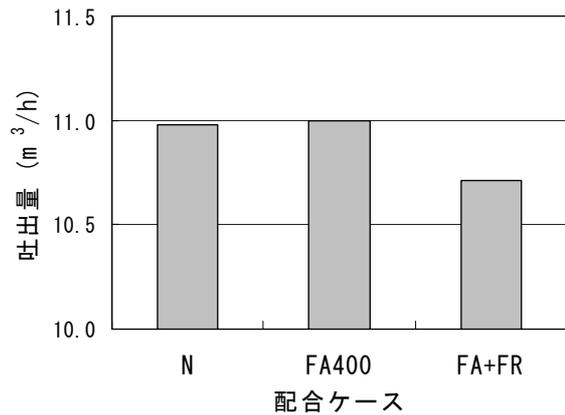


図-10 吐出量

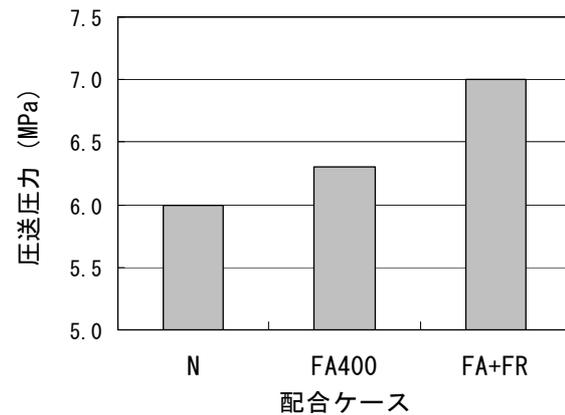


図-11 圧送圧力

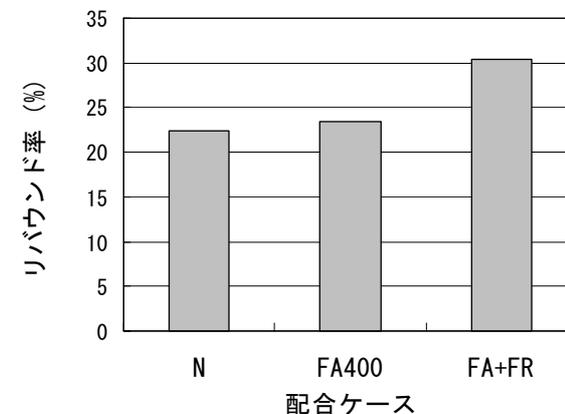


図-12 リバウンド率

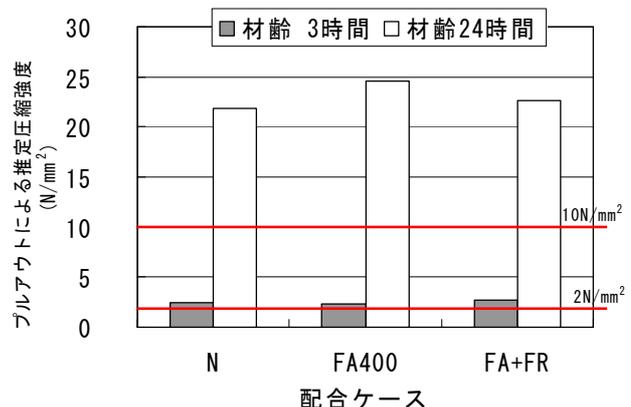


図-13 プルアウトによる推定圧縮強度

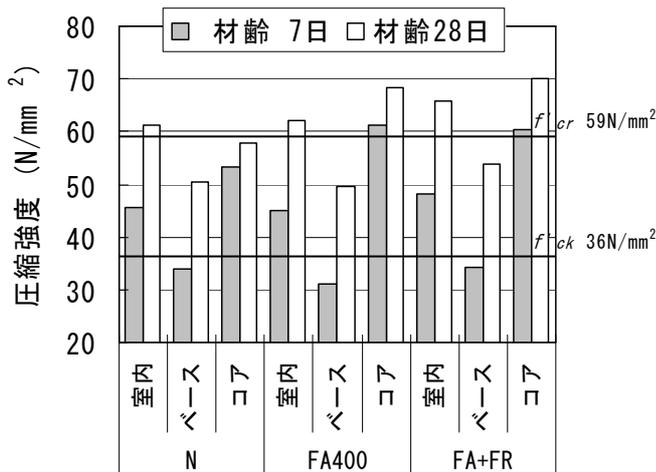


図-14 圧縮強度

4. 経済性に関する検討

シリーズ 2 にて実施した 4 配合について、材料費の経済性比較を行い、その評価を行った(図-15)。図-15 は、配合 N に対する各材料費の比率を示したものである。なお、施工効率を考慮した経済性効果については、吹付け機械の設定等に影響を受けるため、ここでは考慮せず、表-4 の配合表からの比較とした。

フライアッシュを使用することにより高性能減水剤が若干増加するものの、単位セメント量や単位急結剤量を減少することが可能となり、材料費が減少した。

フライアッシュを使用することによるその低減割合は、3~4%程度となった。

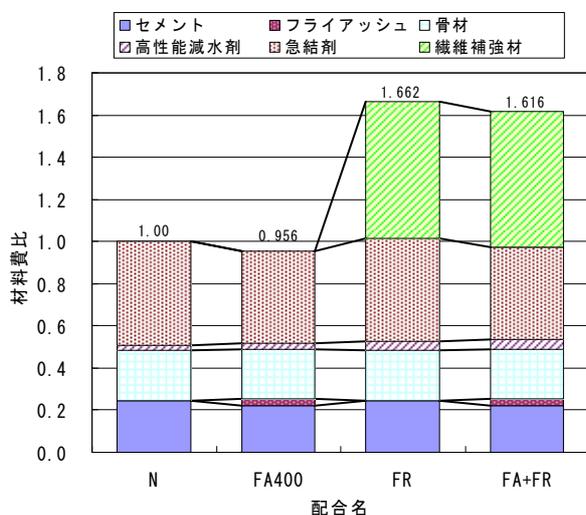


図-15 経済性比較

5. まとめ

フライアッシュを細骨材容積の 10%置換により使用した高強度吹付けコンクリートへの適用性試験から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュの使用により、高性能減水剤添加率は 0.1%増加するものの、単位セメント量を 50kg/m^3 、単位急結剤量を 4kg/m^3 減少させることが可能となった。
- (2) スランプおよび空気量の 120 分までの経時変化は、フライアッシュの使用の有無に依らず同程度であった。
- (3) 急結剤を添加しないコンクリートの材齢 28 日までの強度性状は、フライアッシュの使用の有無に依らず同程度の性状を示した。
- (4) 施工性は、フライアッシュを使用した場合、コンクリートの粘性が増し圧送圧力が若干高くなるものの、フライアッシュを使用しない場合と遜色ないものであった。
- (5) リバウンド率は、フライアッシュの使用の有無に依らず同程度であった。
- (6) 吹付け後のコンクリートは、フライアッシュを使用しても十分な強度発現性が示された。
- (7) フライアッシュの使用は、コスト縮減に効果があることが示された。

幌延では、地下研究坑道の掘削工事が今後本格化する。坑道掘削時に支保工として使用する吹付けコンクリート打設時には、本稿で得られた知見に基づき、示方配合を決定していくこととなるが、その際には石炭種が異なるフライアッシュの品質変動による吹付けコンクリートの品質や施工性への影響を見極め、さらには、地下研究坑道内での粉塵濃度管理を実施していく予定である。

参考文献

- 1) たとえば、林透ほか：フライアッシュの吹付けコンクリートへの適用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.177-182，2004
- 2) 土木学会：吹付けコンクリート指針(案) [トンネル編]，2005