

フライアッシュの吹付けコンクリートへの適用

中 井 雅 司*
 松 山 俊 明**
 堀 川 直 毅***
 田 辺 大 次 郎****

概 要 石炭火力発電所から産出されるフライアッシュは、リサイクル材として今後更なる有効利用が期待されている。本研究では、フライアッシュの有効利用技術を確認するために、トンネル工事における吹付けコンクリートへの適用性を検討した。その結果、セメントおよび細骨材の10%をフライアッシュで置換した配合が要求される品質を満足し、かつ経済的で作業環境も向上することを確認して、実施工へ適用している。本稿は、実施工への適用性を評価するために実施した試験結果について報告するものである。

キーワード：フライアッシュ、吹付けコンクリート

1. はじめに

近年、トンネルの施工はNATM工法が主流であり、吹付けコンクリートは支保部材として重要な役割を担っている。また、トンネルの大断面化などに伴い、吹付けコンクリートの信頼性向上が求められており、トンネル工事のコスト縮減や作業環境改善のための研究開発が行われている。

こうした背景の中、石炭火力発電所から産出されるフライアッシュは、リサイクル材として有効利用されているが、今後更なる利用の拡大が期待されている。最近では、吹付けコンクリートへの適用も有力な分野として注目されており、数例の研究結果^{1),2)}が報告されている。吹付けコンクリートの構成材料であるセメントや細骨材の一部をフライアッシュで置換することにより、吹付け時のリバウンド率の低減による使用材料の節約や粉塵量の低下が可能と

なり、フライアッシュ使用による吹付けコンクリートの付加価値の向上が期待されている。

しかしながら、フライアッシュコンクリートの欠点とされている初期強度発現の遅延によって、吹付けコンクリートにフライアッシュを大量に添加された事例がないのが現状である。

本稿は、フライアッシュを用いた数種類の吹付けコンクリート配合について性能比較を行い、実施工への適用にあたって最適な配合を選定した事例について報告するものである。

2. トンネル施工への適用性確認試験の概要

(1) 試験の目的

試験は、実施工に適用可能な配合を選定するために実施したもので、実機プラント(製造能力25m³/hr)ならびに一体型吹付けシステムを使用して、フライアッシュを用いた吹付けコンクリートについて、数ケースの配合で性能比較を行った。なお、試験は、北海道電力(株)が建設中の京極発電所新設工事のうち土木本工事(第3工区)の放水路トンネル(延長L=2483m)において実施した。



中井 雅司



松山 俊明



堀川 直毅



田辺大次郎

*北海道電力(株) 京極水力発電所建設所 土木第一課 副長 h1980064@epmail.hepcu.co.jp
 **北海道電力(株) 京極水力発電所建設所 土木第一課 t-matsu@epmail.hepcu.co.jp
 ***(株)熊谷組 北海道支店 京極作業所 副所長 nhorikaw@ku.kumagaiumi.co.jp
 ****(株)熊谷組 土木事業本部 土木技術部 副部長 dtanabe@ku.kumagaiumi.co.jp

(2) 使用材料および配合

使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。フライアッシュを使用した配合は、細骨材容積の一部を置換した配合をFS、セメント質量の一部を置換した配合をFCおよび細骨材容積とセメント質量の一部を置換した配合をFSCと表記し、置換率でケース分けした。

また、比較の対象としては、フライアッシュを使用していない標準的な配合Nとシリカフェームと石灰石粉を用いて高性能減水剤を添加した高品質配合Qを選定した。

配合の基本的な条件は、単位結合材料を360kg/m³、細骨材率(s/a)を60%、空気量を2.0±1.5%とした。スランブは、総粉体量が360kg/m³である配合Nおよび配合FCを12±2.5cmとし、それ以外は総粉体量が増大し、圧送性が低下することが想定されたため15±2.5cmとした。

なお、粗骨材および細骨材は、材料の入手の容易さならびに経済性を考慮して工事場所近傍の購入砕石および購入砕砂を使用することとし、実施工規模の試験を実施する前に予めフレッシュコンクリートの性状(モルタルフロー、スランブ経時変化、モルタル凝結)ならびに硬化コンクリートの性状(圧縮強度)を確認して³⁾、最適な粗骨材最大寸法を13mmと定めた。

表-1 使用材料

使用材料	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
練り混ぜ水	W	地下水
細骨材	S	虻田郡京極町春日産 密度：2.67g/cm ³
粗骨材	G	虻田郡京極町春日産 密度：2.70g/cm ³
フライアッシュ	FA	苫東厚真発電所2号灰 密度：2.32g/cm ³ ブレン比表面積：3540cm ² /g
シリカフェーム	Sif	中国産 密度：2.30g/cm ³
石灰石微粉末	L	尻屋鉱山産 密度：2.69g/cm ³
急結剤	A	カルシウムアルミネート系
高性能減水剤	SP	ポリエチレングリコール系高分子化合物

表-2 コンクリート配合

配合ケース	水結合比(%)	単位量(kg/m ³)						スランブ(cm)	置換率
		W	C	FA		Sif	L		
				C置換	S置換				
N	62	223	360	-	-	-	-	14	-
Q	60	216	342	-	-	18	85	14.5	Si:5% L:15%
FS1	60	216	360	-	86	-	-	13	S:10%
FC1	60	216	324	36	-	-	-	11.5	C:10%
FC2	60	216	288	72	-	-	-	13	C:20%
FSC1	60	216	324	36	85	-	-	15.5	C:10% S:10%
FSC2	60	216	288	72	84	-	-	16	C:20% S:10%

(3) 試験方法

試験方法を表-3に示す。供試体は、空気搬送式吹付け機(湿式AL-285：最大吐出量18m³/h)を用い、長期強度測定用は900×900×400mmのコア箱に、また、初期強度測定用は、別途プルアウト皿に吹付けて作製した。なお、長期強度測定用の供試体作製と同時にリバウンド率および粉塵量を測定した。

表中の円筒貫入計(透明なプラスチック製でφ7mmの孔が4方向に7個空いた円筒容器：長さ275mm、内径30mm)は、コンクリート中に挿入し、内部に流入するモルタルの量を測定するもので、コンクリートのレオロジーを簡易的に評価可能な試験器であり、高流動コンクリートの材料分離抵抗性を測定するために考案されたものである^{4),5)}。

試験に使用した吹付け機を写真-1に、コア箱への吹付け状況を写真-2に示す。

表-3 試験方法

試験項目	試験方法ならびに算出方法
スランブ	JIS A 1101に準拠
空気量	JIS A 1128に準拠
粘性	円筒貫入計
コンクリート温度	アルコール温度計にて測定(外気温)
吐出量	吹付け量を吹付け時間で除して算出
急結剤添加率	吹付け量を急結剤使用量で除して算出
リバウンド率	回収したリバウンド材の質量をコンクリート質量で除して算出
粉塵量	デジタル粉塵計を用いて測定
初期強度	JSCE-G 561に準拠。材齢3, 24h
長期強度	コア採取方法はJSCE-F 561に準拠 圧縮試験はJIS A 1108に準拠



写真-1 試験に使用した吹付け機(AL-285)

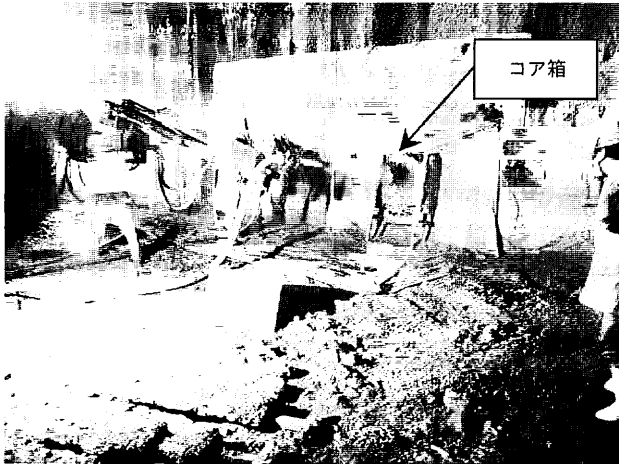


写真-2 コア箱への吹付け状況

3. 試験結果および考察

(1) 吐出量

吹付試験では、各配合とも吹付機の回転数を一定とし、また急結剤は、単位時間当たり一定量を添加した。スランブと吐出量との関係を図-1に、急結剤添加量と吐出量との関係を図-2に示す。

図より、吐出量は、スランブが大きいくほど、急結剤添加量が少ないほど、多くなる傾向を示した。フライアッシュを使用していない配合N(図中の●)を基準とすると、セメントの一部をフライアッシュで置換した配合FC1および配合FC2は吐出量が減少し、それ以外の配合は増加する結果となった。また、吐出量が特に少ない配合FC1では、急結剤添加量が極端に多くなっている。これは、単位時間当たり一定量の急結剤を添加しているためであるが、配合FC1のように吐出量が少なくなる配合は、吹付けに時間を要するため、施工性の観点から他の配合に比べ好ましくないと判断される。

ここで、フライアッシュによる吹付けコンクリートの高粘性化が吐出量に及ぼす影響について考察する。これまでの研究6)によると、円筒貫入計から得られる流入モルタル値は、同一スランブ下では、吹付けコンクリートの粘性を相対評価できる指標であることが確認されている。今回スランブが異なる配合で、流入モルタル値が吐出量に及ぼす影響について検討した(図-3参照)。図から両者の間には、明確な関係は認められず、今回対象とした配合の範囲では、吐出量には、粘性(流入モルタル値)だけでなく、流動性も関与しているものと推察される。

図-4は、ペースト容積比 $(C+W+FA+Sif+L)/(C+W+FA+Sif+L+S+G)$ と吐出量との関係を示したものである。図より、ペースト容積比が大きい、すなわち、総粉

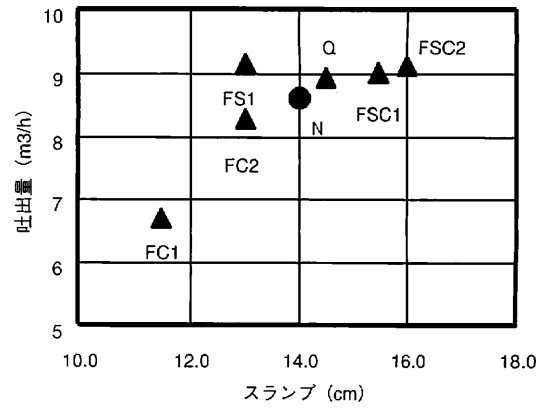


図-1 スランブと吐出量との関係

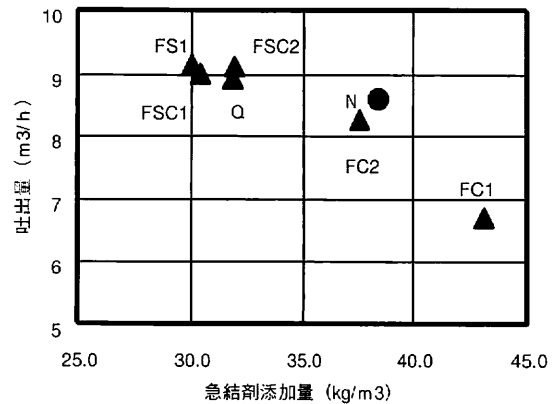


図-2 急結剤添加量と吐出量との関係

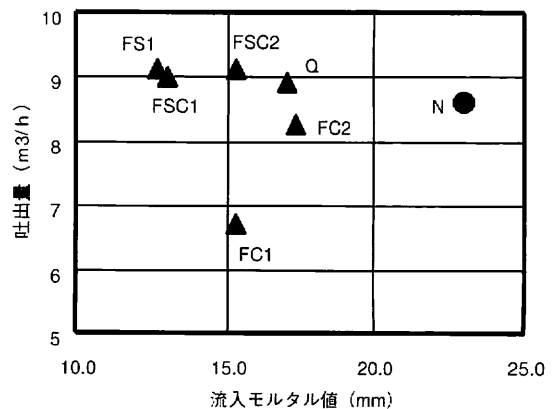


図-3 流入モルタル値と吐出量との関係

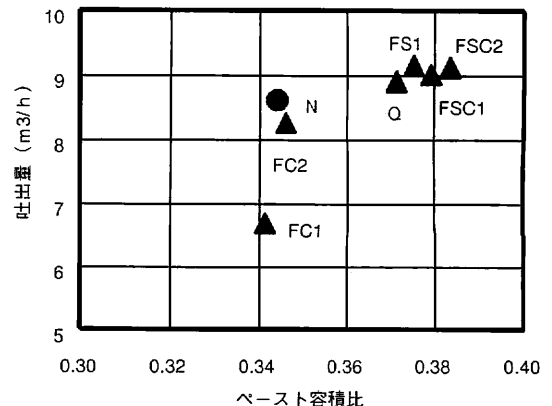


図-4 ペースト容積比と吐出量との関係

体量が多いほど、吐出量が多くなる傾向がうかがえる。

また、図-5は、圧送圧力と吐出量との関係を示したものである。図より、基準配合N(図中の●)よりも総粉体量の多い配合では、既往の研究⁷⁾と同様に圧送圧力が高くなっていることが明らかになった。このような結果が得られたのは、フライアッシュを使用した総粉体量が多いコンクリートほど流動性が向上し、吹付機への投入効率が良好になったため、吐出量が多くなり、その結果として圧送圧力が高くなったものと考えられる。実施工にあたっては、圧送圧力が高すぎる場合には、脈動を起こすことも予想されるので、配合の選定には十分配慮する必要がある。

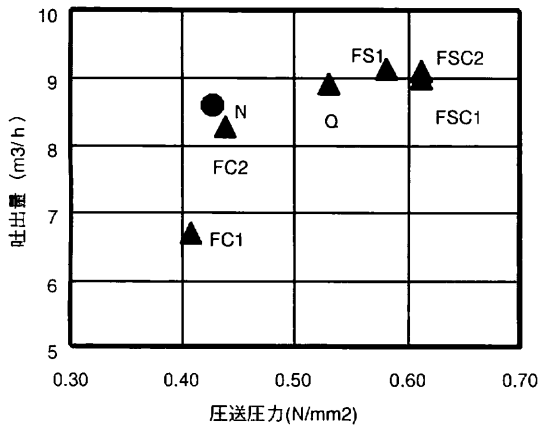


図-5 圧送圧力と吐出量との関係

(2) リバウンド率と粉塵量

リバウンド率の測定結果を図-6に、粉塵量の測定結果を図-7に示す。なお、粉塵量は、吹付け位置から50m離れた位置で測定した値である。

リバウンド率、粉塵量いずれの結果についても多少ばらつきがあるが、ペースト容積比が大きい配合、すなわち総粉体量が多く粘性が高い配合では、リバウンド率ならびに粉塵量とも小さくなる傾向を示している。粉塵量については、配合FC2以外の配合では、ずい道等建設工事における粉塵対策に関するガイドラインに記載されている目標レベル3.0mg/minを満足している。これらの結果より、粉体量を増加することにより、リバウンド率および粉塵量を低減できることが確認された。

今回の結果は、既往の研究と同様の結果を示しており、上記のような傾向を示す理由は、フライアッシュを使用し、総粉体量を多くすることで、コンクリートの粘性が増大し、吹付けコンクリートの付着性が向上したことによるものと考えられる。

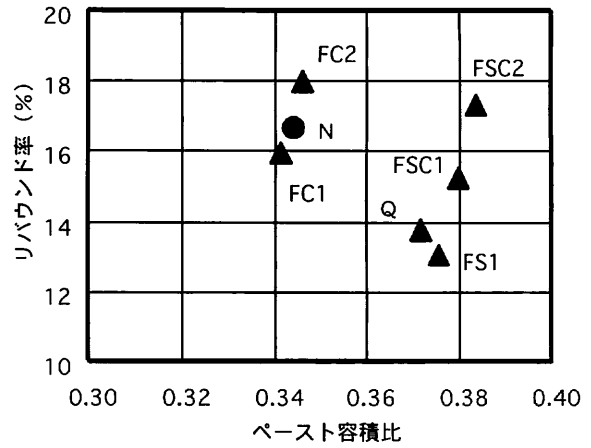


図-6 ペースト容積比とリバウンド率との関係

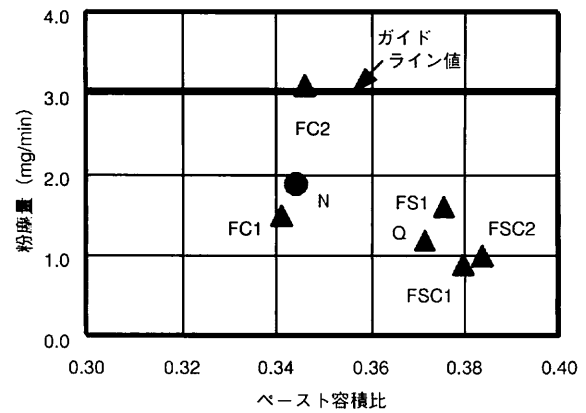


図-7 ペースト容積比と粉塵量との関係

(3) 圧縮強度

図-8にブルアウト試験から得られた推定圧縮強度(材齢24h)を示す。材齢24時間の初期圧縮強度は、配合FC2以外の5配合については、基準配合Nを上回る結果となった。通常、初期強度は急結剤の影響を大きく受けるが、配合FC2は同レベルの急結剤添加量の配合と比較して、著しく強度が低下している。これは、セメントの20%をフライアッシュで置換した場合は、吹付けコンクリートとして重要な性能である初期強度の発現が低下する可能性があることを示唆している。

材齢28日長期圧縮強度を図-9に示す。コア供試体から得られた材齢28日長期圧縮強度については、基準配合Nが24.8N/mm²に対して、フライアッシュを使用したコンクリートは24.1~29.5N/mm²であり、配合Nと同程度以上の結果となった。全ての配合において設計基準強度18N/mm²を大きく上回り、かつ割り増し係数を考慮した配合強度24N/mm²も満足しており、強度的に問題なく、実施工に適用できるレベルであると判断できる。

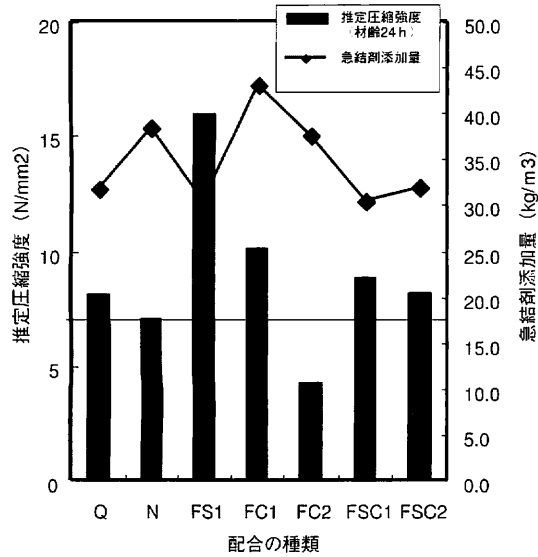


図-8 材齢24時間推奨圧縮強度

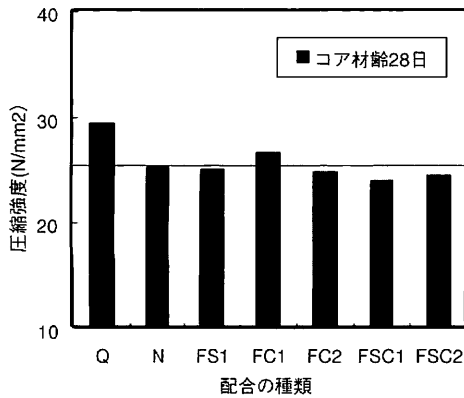


図-9 材齢28日長期圧縮強度

(4) 各配合の評価

表-4に各配合の評価を示す。配合Q, FS1, FSC1はすべての評価項目において、配合Nを上回り、これらは、現場配合として、適当であると判断できる。

セメントの一部をフライアッシュで置換する場合には経済的に有利となり、これらの結果より、実施工には配合FSC1(セメント置換率：10%，細骨材置換率：10%，総粉体量：445kg/m³)を採用している。また、産業副産物であるフライアッシュを有効利用することは、作業環境が向上されることから有益であると考えられる。

表-4 各配合の評価

評価項目	Q	FS1	FC1	FC2	FSC1	FSC2
吐 出 量	○	○	×	×	○	○
リバウンド	○	○	○	×	○	×
粉 塵	○	○	○	×	○	○
材齢24時間 推奨圧縮強度	○	○	○	×	○	○
材齢28日 コア圧縮強度	○	○	○	○	○	○
評 価 点	5	5	4	1	5	4

4. まとめ

石炭火力発電所から産出されるフライアッシュの有効利用にあたっては、できるだけ早期に利用技術の確立を図る必要がある。

本稿では、フライアッシュの有効利用を目的として、吹付けコンクリートへの適用性を検討し、その結果、フライアッシュを使用した吹付けコンクリートには、リバウンドならびに粉塵量の低減効果があり、吹付けコンクリートとしての付加価値の向上に寄与することが確認された。

現在、放水路トンネル工事は、延長約2500mのうち坑口から1500m付近を施工中であるが、フライアッシュを用いた吹付けコンクリートについては、定期的に施工性ならびに品質を確認しており、十分に満足した結果が得られている。

参 考 文 献

- 1) 飯島俊莊；松田敦夫；蛭子清二；澄川 健；齊藤 直；樋野和俊. 石炭灰原粉を用いた吹付けコンクリートのモデル試験施工. 土木学会第55回年次学術講演会, V-213, 2000, p.426-427.
- 2) 富加見徳治；石井光裕；油野邦弘；松野義治. 分級フライアッシュ(JIS I種)のトンネル吹付けコンクリートへの適用. 電力土木, no.288, 2000.7, p.84-88.
- 3) 石関嘉一；堀川直毅；中井雅司；佐藤志将. フライアッシュ吹付けコンクリートの実構造物への適用(室内試験). 土木学会第58回年次学術講演会, V-598, 2003, p.1199-1200.
- 4) 石田良平；佐藤孝一；松田 敏. 円筒貫入計およびミキサー電力値による高流動コンクリートのコンシステンシー評価. 日本建築学会大会学術講演概要集. 1995.4, p.455~456.
- 5) 森 博嗣；谷川恭雄；黒川善幸. 高流動コンクリートのコンシステンシー評価試験方法(その12：総括). 日本建築学会大会学術講演概要集. 1995.4, p.205-206.
- 6) 林 透；小野寺 収；石関嘉一；齋藤敏樹. フライアッシュを使用した吹付けコンクリートの塑性粘度. 土木学会第58回年次学術講演会, V-598, 2003, p.1193-1194.
- 7) 石関嘉一；駒田憲司；西村次男；魚本健人. 使用材料が吹付けコンクリートの施工性に及ぼす影響. コンクリート工学年次論文集. vol.22-2, 2000, p.1387-1392.