

論文 III種およびIV種フライアッシュの性状がコンクリートの諸性質に及ぼす影響

山地功二*1・橋本親典*2・水口裕之*2・石丸啓輔*3

要旨: JIS A 6201 ‘コンクリート用フライアッシュ’の規格改正に伴い、III種およびIV種フライアッシュが新たに規定されたが、それらを使用したコンクリートの諸性質に関する報告例は少ない。本研究では、生コン工場で最も需要の多い普通コンクリートの配合にIII種およびIV種フライアッシュを細骨材に代替使用したコンクリートの諸性質について、普通コンクリート、III種およびIV種フライアッシュの品質と比較・検討を行った。その結果、IV種フライアッシュは高性能A E減水剤の使用量を大幅に低減でき、III種およびIV種フライアッシュ混入コンクリートは強度特性、耐久性および水密性もほぼ同程度改善された。
キーワード: III種フライアッシュ、IV種フライアッシュ、強度特性、耐久性、水密性

1. はじめに

近年、エネルギーの安定確保の観点から大容量の石炭火力発電所が多く建設されるようになり、それに伴い、副産物である石炭灰の発生量が飛躍的に増大することが予想されている。また供給される石炭は海外輸入炭へと移行し、石炭灰の品質状況も変化しつつある。そこで、石炭灰のコンクリートへの有効利用が急務の課題となっている。

一方、石炭灰のうち、新たに JIS A 6201 ‘コンクリート用フライアッシュ’に規格化されたIII種およびIV種フライアッシュの発生状況については、III種のは既存の燃焼効率の劣る石炭火力発電サイロにて強熱減量の大きいフライアッシュ(強熱減量5~8%)として発生する。IV種のはI種フライアッシュ製造時に約1:1の割合で発生している。しかし、これらのIII種およびIV種フライアッシュを使用したコンクリートの強度特性、耐久性および水密性の研究例は少ない。したがって今後も多くのフライアッシュの発生に伴い、コンクリートへの利用技術を確立していく必要がある。なお、III種およびIV種フライアッシュの主な品質を表-1

に示す。

筆者らは、III種フライアッシュについては細骨材の一部に代替使用したコンクリートについて普通コンクリートとほぼ同等のフレッシュ性状、初期強度の確保、長期材齢に対する強度の増進、耐久性の向上等の優れたコンクリートの品質改善効果を確認している¹⁾。また、現場施工への適用性についても実例をもとに検討を行っている²⁾。

本研究は、III種およびIV種フライアッシュのコンクリートへの有効利用および多量使用を目的に生コンクリート工場で最も需要の多い普通コンクリートの配合(18-8-40, 21-8-25)をベースにしてIII種およびIV種フライアッシュを細骨材に代替使用したコンクリートを製造し、硬化コンクリートの強度特性、耐久性および水密性について実験的に比較・検討したものである。

表-1 III種・IV種フライアッシュの品質

	強熱減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
III種 F A	8.0 以下	1.95 以上	2500 以上
IV種 F A	5.0 以下		1500 以上

*1 日本興業(株)開発部 工修 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学技官 工学部建設工学科 (正会員)

2. 試験概要

2.1 使用材料

(1)セメント

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.15 g/cm³, 28 日圧縮強さ 57.6N/mm²）を使用した。

(2)フライアッシュおよび骨材

Ⅲ種フライアッシュ（密度 2.19g/cm³, 比表面積 4490cm²/g, 強熱減量 6.45%）は、四国の火力発電所から副産されたものを用い、Ⅳ種フライアッシュ（密度 2.17g/cm³, 比表面積 2030cm²/g, 強熱減量 1.3%）は、Ⅰ種フライアッシュ製造時に副産されたものを使用した。

骨材としては、粗骨材は徳島県阿南市下大野町産玉砕石(最大寸法 40mm, 密度 2.63g/cm³, 吸水率 0.75%, 実積率 59%, 最大寸法 25mm, 密度 2.63g/cm³, 吸水率 0.83%, 実積率 60%), 細骨材は徳島県阿南市下大野町産川砂(密度 2.63g/cm³, 吸水率 1.73%, F.M.3.11)および愛媛県越智郡伯方町産海砂(密度 2.58g/cm³, 吸水率 2.20%, F.M.1.93)を 7:3 の割合で混合したものを用いた。なお、海砂は粒度調整用として使用した。

(3)混和剤

混和剤は、普通コンクリートにリグニンスル

ホン酸系の A E 減水剤および A E 剤を用い、Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュ混入コンクリートにはポリカルボン酸系の高性能 A E 減水剤およびアルキルカルボン酸系の A E 剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合は、擁壁工事等を対象に生コンクリート工場でも出荷実績の多い普通コンクリートの配合をベースに呼び強度 18 および 21N/mm², 粗骨材の最大寸法 40 および 25mm とし、目標スランブ 8 ± 2.5cm, 目標空気量 4.5 ± 1.5% とした。Ⅲ種フライアッシュは全細骨材容積に対し、0, 10 および 20%, Ⅳ種フライアッシュは 0, 10, 20 および 30% 代替使用し、練り上がり後のコンクリートのワーカビリティを考慮しながら最適細骨材率を選定し、配合修正を行った。以下、‘呼び強度－スランブ－粗骨材の最大寸法（フライアッシュの種類－フライアッシュの代替率）’と略記する。使用したコンクリートの配合を表－2 に示す。

2.3 試験方法項目試験方法

(1)スランブおよび空気量試験

フレッシュコンクリートにおいてスランブ試験 (JIS A 1101) および空気量試験 (JIS A 1128)

表－2 コンクリートの配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							高性能 A E 減水剤	A E 剤
			水 W	セメント C	細骨材			粗骨材			
					Ⅲ・Ⅳ種 FA	川砂	海砂	(25-5) mm	(40-20) mm		
18-8-40(0)	62.0	42.7	146	235	0	573	246	775	332	C×1.0%*	4.5A
18-8-40(Ⅲ-10)	66.4	40.7	154	232	65	487	209	794	340	C×1.6%	13A
18-8-40(Ⅲ-20)	66.5	38.7	151	227	124	414	177	826	354	C×2.1%	15A
18-8-40(Ⅳ-10)	66.4	40.7	154	232	64	487	209	794	340	C×0.4%	13A
18-8-40(Ⅳ-20)	66.5	38.7	151	227	123	414	177	826	354	C×0.8%	15A
18-8-40(Ⅳ-30)	66.5	38.0	150	225	182	357	153	838	359	C×1.0%	16A
21-8-25(0)	56.0	43.2	153	273	0	565	242	1069	0	C×1.0%*	3.5A
21-8-25(Ⅲ-10)	59.8	40.2	158	264	63	473	203	1122	0	C×1.5%	15A
21-8-25(Ⅲ-20)	59.7	40.2	160	268	125	419	179	1117	0	C×2.0%	15A
21-8-25(Ⅳ-10)	59.8	40.2	158	264	62	473	203	1122	0	C×0.5%	15A
21-8-25(Ⅳ-20)	59.7	40.2	160	268	124	419	179	1117	0	C×0.7%	15A
21-8-25(Ⅳ-30)	60.0	39.2	163	271	180	355	152	1130	0	C×0.8%	15A

注) *印は、A E 減水剤

を行い、混和剤の使用量によって、スランブおよび空気量を目標値になるよう調整した。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 12.5 \times 25\text{cm}$ および $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を水中および屋外養生し、すべての配合のコンクリートについて材齢 7, 28 および 91 日で JIS A 1108 に準拠して行った。

(3) 耐摩耗性試験

耐摩耗性試験の調査におけるすりへり抵抗性試験は、 $\phi 15 \times 5\text{cm}$ の円盤供試体を用いて、材齢 28 日まで 20°C 標準養生後、ASTM C 779 の B 法を参考にして耐摩耗性試験を行った。

(4) 凍結融解抵抗性試験

凍結融解抵抗性試験は、材齢 28 日まで標準養生を行った $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体を用いて、JSCE-G501-1986 に準拠して、水中急速凍結融解試験法により行った。300 サイクルまで所定のサイクルで動ヤング係数を測定し、耐凍害性を調査した。

(5) 透水試験

材齢 21 日まで標準養生を行った後、7 日間気中養生した $\phi 15 \times 30\text{cm}$ の中空円柱供試体を用い、アメリカ開拓局のインプット法に準じて透水試験を行った。供試体に水圧を 24 時間加えて水の平均浸透深さを測定し、水密性の指標となる拡散係数を求めた。

(6) 硫酸塩抵抗性試験

材齢 14 日まで標準養生を行い、さらに 14 日間気中養生した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて、耐薬品試験方法 (JIS 原案) に準じて硫酸マグネシウム溶液 (濃度 10%) に浸漬させて所定の浸漬材齢で動ヤング係数を測定し、耐硫酸塩性を調査した。

3. 試験結果および考察

3.1 高性能 A E 減水剤の使用量

フライアッシュの代替率と高性能 A E 減水剤との関係を図-1 に示す。微粉末である III 種および IV 種フライアッシュを細骨材に代替使用すると代替率の増加とともに高性能 A E 減水剤の

使用量が増加する。III 種フライアッシュを使用したコンクリートは、フライアッシュの強熱減量が 6.45% と大きく、所定のスランブおよび空気量を得るのに高性能 A E 減水剤の使用量を増加する必要がある。一方、IV 種フライアッシュ混入コンクリートについては、図-1 にみられるように III 種フライアッシュのものと比較すると同一条件の配合であれば高性能 A E 減水剤の使用量を大幅に低減できる。これは、フライアッシュの強熱減量、および比表面積等が影響を及ぼしていると思われる。したがって、IV 種フライアッシュをコンクリートに有効利用することにより、フライアッシュ微粉末特有の吸着による混和剤使用量の増加を緩和し、より経済的なコンクリートを製造することが可能である。

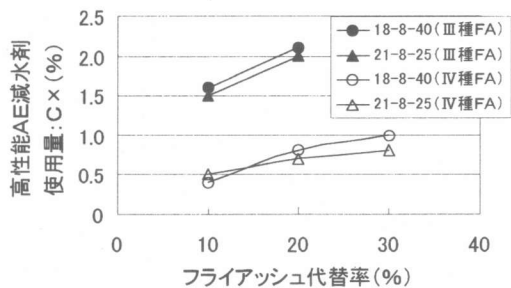


図-1 フライアッシュ代替率と高性能 A E 減水剤との関係

3.2 圧縮強度試験結果

20°C 標準養生下での材齢 7, 28 および 91 日における圧縮強度を図-2 および図-3 に、屋外曝露における圧縮強度を図-4 および図-5 に示す。III 種および IV 種フライアッシュ混入コンクリートの圧縮強度は、フライアッシュを含まない普通コンクリート (18-8-40(0), 21-8-25(0)) と比較して、フライアッシュ代替率および材齢が増加するにつれて高い強度発現性を有している。フライアッシュの微粉末効果とポゾラン反応による強度増進と考えられ、材齢が長期になるにつれて一層の強度増加が見込まれる。

III 種および IV 種フライアッシュによる圧縮強度比較は、水中および屋外曝露ともに III 種フラ

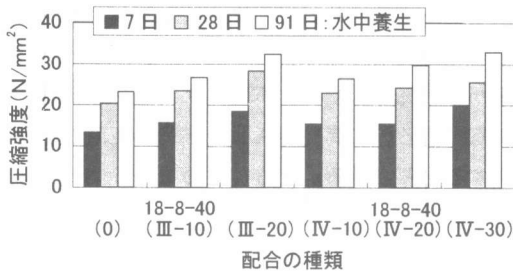


図-2 18-8-40 の圧縮強度 (水中養生)

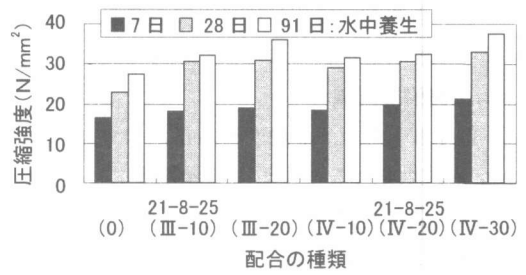


図-3 21-8-25 の圧縮強度 (水中養生)

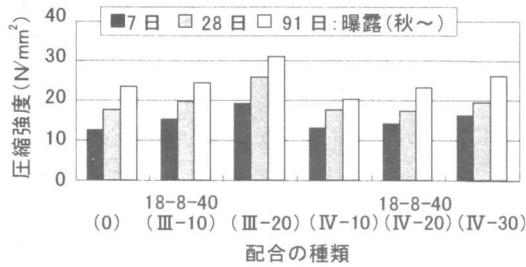


図-4 18-8-40 の圧縮強度 (曝露(秋～))

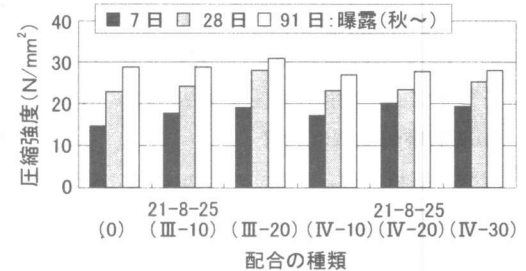


図-5 21-8-25 の圧縮強度 (曝露(秋～))

イアッシュを用いたコンクリートの方がIV種フライアッシュのものより強度発現が良好な結果となっている。IV種フライアッシュ混入コンクリートは、材齢91日における圧縮強度の発現がやや低く、また屋外曝露においては、18-8-40シリーズの圧縮強度がすべての材齢において呼び強度をほぼ満足しているが、全体的に低い傾向にあり、初期における低気温が影響を及ぼしていると考えられる。一般にIV種フライアッシュ混入コンクリートは養生について注意を要する³⁾が、海洋構造物に利用および陸上構造物に対しては養生を充分に行う、あるいは配合強度を幾分高めに設定するなど留意する必要がある。

3.3 耐摩耗性試験結果

材齢28日における耐摩耗性試験について、摩耗回転数0～10000回転時におけるすりへり深さを図-6および図-7に示す。III種およびIV種フライアッシュの代替率を増加することにより、10000回転時におけるすりへり深さが減少し、耐摩耗性を改善する効果が確認できる。また呼び強度の大きい配合(21-8-25シリーズ)ほどその効果が顕著であり、コンクリートの強度改善、組織の密実化および品質向上が要因と考えられる。フライアッシュの代替率が20および30%の範囲内、材齢28日圧縮強度(水中養生)が20～30N/mm²であれば、耐摩耗性と圧縮強

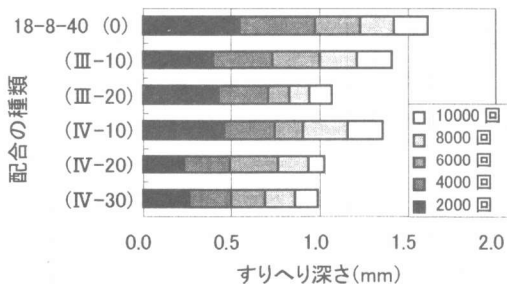


図-6 18-8-40 の耐摩耗性試験

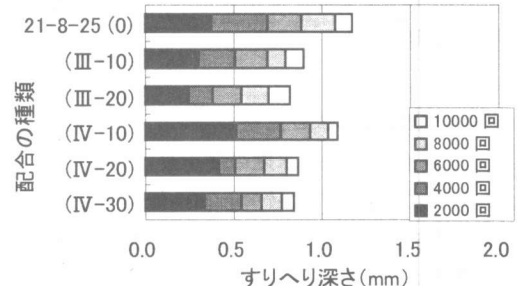


図-7 21-8-25 の耐摩耗性試験

度との関係はある程度の比例関係が存在するものと推測できる。

フライアッシュの種類が耐摩耗性に及ぼす影響としては、Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュともそれぞれ同程度の耐摩耗性を改善する効果があり、代替率の増加に伴いその効果も増大する傾向にある。

3.4 凍結融解抵抗性試験結果

耐凍害性の調査における凍結融解抵抗性試験の結果について、各サイクル時の相対動ヤング係数を図-8および図-9に示す。300 サイクル終了時における相対動ヤング係数値から、Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュを混入したコンクリートの耐凍害性は、18-8-40 シリーズで70%以上、21-8-25 シリーズで80%以上となっており、その値は普通コンクリートより高く、耐凍害性を改善する傾向があると考えられる。A E 剤の使用量調整により、所定の空気量(4.5%)を連行することによって凍結融解に対する耐凍害性が向上する。しかし、フライアッシュの代替率の増加による効果はあまり見られず、また300 サイクル終了時において目視による供試体観察状況は、代替率の多いコンクリートいわゆる粉体の多いものほど表面モルタルの剥離、内部粗骨材の表面への突出がみられた。

Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュ混入コンクリートの品質の差異はなく、今回-18°Cから5°Cを1サイクルとする水中急速凍結融解の厳しい条件下の試験にも関わらず、ほぼ同様の耐凍害性を有する結果となった。またⅢ種およびⅣ種フライアッシュを細骨材の一部に代替使用することにより、初期凍害に対する影響を緩和することができ、外観のスケーリングを考慮すれば耐凍害性の向上が可能であると思われる。

3.5 透水試験結果

水密性の調査における透水試験を行った結果をとして拡散係数を求めて図-10 および図-11に示す。Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュ混入コンクリートは、普通コンクリートと比較して拡散係数が小さく水密性が向上する。またフラ

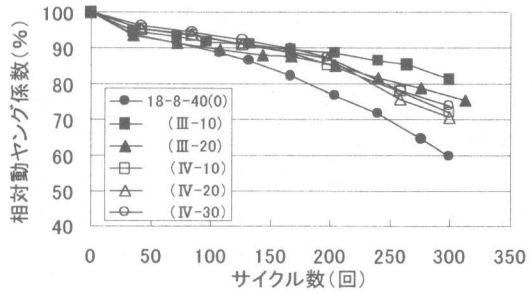


図-8 18-8-40の凍結融解サイクル数と相対動ヤング係数との関係

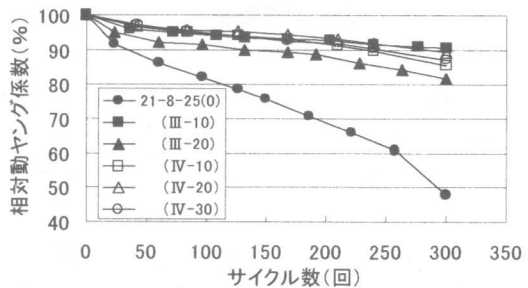


図-9 21-8-25の凍結融解サイクル数と相対動ヤング係数との関係

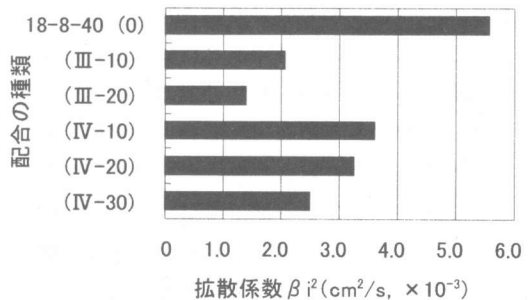


図-10 18-8-40の透水性試験

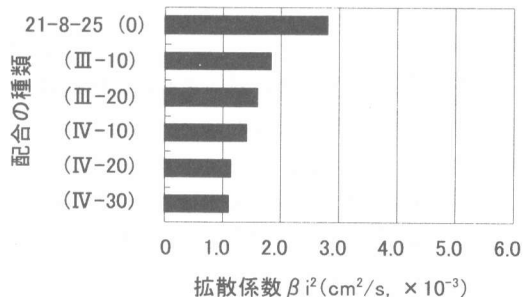


図-11 21-8-25の透水性試験

イアッシュの代替率の増加するに従い、コンク

リートの透水性能が増す傾向にある。これは、フライアッシュの微粉末効果による内部組織の密実化が影響を及ぼしているものと考えられる。

Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュの品質がコンクリートの水密性に及ぼす影響については、本実験では実験値のばらつきにより、規則的な差異は確認できず、全体を通じて実構造物レベルで考慮すると需要の多い普通コンクリートの配合ベースより水密性に優れているので擁壁等の構造物施工は可能であるといえる。

3.6 硫酸塩抵抗性試験結果

Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュ混入コンクリートの硫酸マグネシウム溶液への浸漬材齢と相対動ヤング係数との関係を図-12 および図-13 に示す。普通コンクリートと比較するとⅢ種フライアッシュを用いたコンクリートの相対動ヤング係数は概ね高く、耐硫酸塩性に対し改善する効果があると思われる。一方、Ⅳ種フライアッシュ混入コンクリートは、測定結果にばらつきがあるもののほぼすべての配合においてⅢ種フライアッシュのものより劣る結果となっている。また普通コンクリートと比較しても同様の傾向を示しているが、それほどコンクリート硬化体に影響がある範囲ではないものと思われる。また現時点での浸漬材齢においては相対動ヤング係数が初期値より減少段階になく、硫酸塩に対する抵抗性を発揮していないとは言い難い。そこで今後長期における検討が必要であると思われる。

4. まとめ

本実験で得られた結果を要約すると、Ⅲ種およびⅣ種フライアッシュ混入コンクリートについて次のことがいえる。

(1)Ⅲ種フライアッシュを使用する場合、高性能A E減水剤を多量に使用するが、Ⅳ種フライアッシュ使用時には高性能A E減水剤の使用量を大幅に低減でき、経済的である。

(2)Ⅲ種フライアッシュを用いた場合、強度特性、耐久性および水密性は普通コンクリートよ

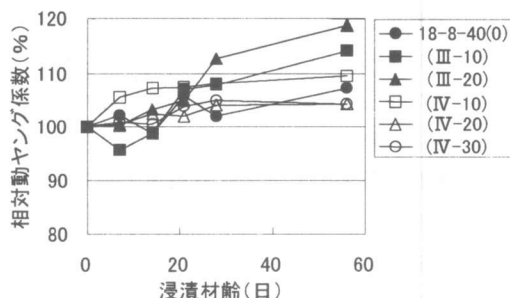


図-12 18-8-40の浸漬材齢と相対動ヤング係数との関係

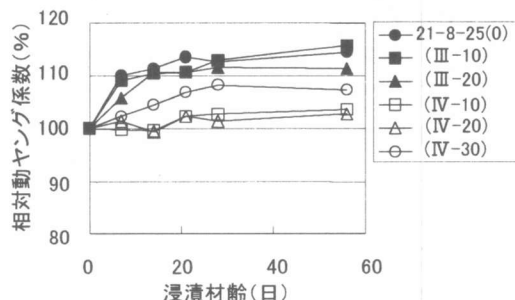


図-13 21-8-25の浸漬材齢と相対動ヤング係数との関係

り改善される。

(3)Ⅳ種フライアッシュ混入コンクリートは、養生に注意を行えば、Ⅲ種F Aとほぼ同様の諸性質を示し、レディーミクストコンクリートとして製造が可能で利用価値がある。

参考文献

- 1)馬越唯好, 河野清, 山地功二, 川崎真治: 非JIS 灰を細骨材の一部に代替使用したコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.349~354, 1997.6
- 2)馬越唯好, 橋本親典, 山地功二: Ⅲ種フライアッシュを多量に用いたコンクリートの実構造物施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.139~144, 1999.6
- 3)土木学会: フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー-94, 1999.4