

論文 フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性

伊藤智章*1・松永 篤*2・仲松照隆*3・佐久田朝男*4

要旨: フライアッシュを細骨材の一部に用いることでコンクリート強度の向上が認められ、これは長期材齢において顕著であった。また、耐久性として、乾燥収縮、中性化、塩分浸透性、アルカリ骨材反応性および凍結融解抵抗性に及ぼすフライアッシュの種類および置換率の影響を検討した。その結果、フライアッシュの細骨材としての使用が乾燥収縮および中性化に及ぼす影響は認められない。凍結融解作用に対しては強熱減量が大きいフライアッシュを用いた場合や置換率が大きい場合にスケーリングが大きく抵抗性が劣る傾向が認められるが、塩分浸透性およびアルカリ骨材反応性は改善されることを明らかにした。

キーワード: コンクリート, フライアッシュ, 細骨材置換, 強度, 耐久性

1. はじめに

石炭火力発電所の増設に伴いフライアッシュの発生量が年々増加しており、また、海外炭の使用、燃焼温度の低下によりフライアッシュの品質変動や品質低下が大きくなっている。現在、フライアッシュは主にセメント用混合材およびコンクリート用混和材として結合材の一部に用いられており、コンクリート分野での利用割合は全発生量の約6%に過ぎない。こうしたことから、フライアッシュの更なる有効利用の促進を目的に1999年にコンクリート用フライアッシュのJIS改正により規格の適用範囲が広げられ、一方でフライアッシュの使用量の増大のために細骨材代替としての検討が始められている¹⁾。

本研究は、JIS規格のⅡ種およびⅢ種に相当するフライアッシュを対象に、フライアッシュをセメントの外割として細骨材の一部に置換して用いたコンクリートの強度、乾燥収縮、中性化、塩分浸透性、アルカリ骨材反応性および凍結融解抵抗性に及ぼすフライアッシュの種類および置換率の影響を実験的に検討した。

表-1 フライアッシュの品質

記号	SiO ₂ (%)	湿分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	45μm 残分 (%)	ブレン比 表面積 (cm ² /g)	ブレン比 値比 (%)	活性度 指数(%)	
								28d	91d
FⅡ①	60.1	0.3	4.9	2.30	17	4430	96	85	99
FⅡ②	58.7	0.2	3.8	2.27	8	4290	104	82	98
FⅢ	63.0	0.3	8.0	2.25	21	5500	94	85	101
JIS Ⅲ種	≥45.0	≤1.0	≤5.0	≥1.95	≤40	≥2500	≥95	≥80	≥90
			≤8.0					≥85	≥90

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) フライアッシュ

フライアッシュは、表-1に示すJIS規格のⅡ種あるいはⅢ種に相当するものを使用した。

(2) セメント

セメントは、普通ポルトランドセメント(記号:N, 密度:3.15g/cm³, ブレン比表面積:3250cm²/g)および比較用の高炉セメントB種(記号:B, 密度:3.04g/cm³, ブレン比表面積:3830cm²/g)を使用した。

(3) 細骨材

細骨材は、沖縄県東村新川沖産海砂および沖縄県本部半島産石灰岩砕砂の等量混合品(密度:2.65g/cm³, 吸水率:1.64%, 粗粒率:2.76)

*1 (株)宇部三菱セメント研究所 宇部センター (正会員)

*2 (株)宇部三菱セメント研究所 宇部センター 主席研究員 工修 (正会員)

*3 琉球セメント(株) 屋部工場品質管理室 室長

*4 琉球セメント(株) 営業部

を使用した。また、アルカリ骨材反応性の評価を目的としたモルタルバー法試験の細骨材には、台湾産の反応性骨材を含む砕石（密度:2.71 g/cm³、吸水率:0.89%）を粉碎したものを使用した。

(4) 粗骨材

粗骨材は、沖縄県本部半島産石灰岩砕石（最大寸法:20mm、密度:2.71 g/cm³、吸水率:0.25%、粗粒率:6.90）を使用した。

(5) 混和剤

混和剤は、AE 減水剤標準形（主成分:リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体）または高性能 AE 減水剤標準形（主成分:ポリカルボン酸エーテル系の複合体）をフライアッシュ用 AE 剤（主成分:高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤）と併用した。

2.2 試験方法

(1) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2に示す。目標スランプを12±1cm、目標空気量を4.5±0.5%のそれぞれ一定とし、水セメント比を45%、55%および65%の3水準とした。フライアッシュは、細骨材の容積に対して最大30%まで置換した。また、比較用としてセメントの内割で質量置換する場合および高炉セメントB種についても試験を行った。単位水量および混和剤はそれぞれ基本水準を170kg/m³およびAE減水剤添加量0.25%としたが、フライアッシュの使用により流動性が低下する場合には、AE減水剤のメーカーによる標準添加量内(0.2~0.5%)での増量、高性能AE減水剤への変更および単位水量の増加により所定のスランプになるように定めた。

(2) コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、容量50リットルのパン型強制練りミキサーを使用し、1バッチの練り量は30リットルとした。練混ぜは、骨材、セメントおよびフライアッシュを30秒間空練りした後、水（混和剤含む）を投入して90秒間練混ぜてから排出した。なお、フライアッ

表-2 コンクリートの配合

配合記号*	W/C (%)	s/a** (%)	単位量(kg/m ³)					Ad ((C+FA)×%)	AE
			W	C	FA	S	G		
N-65	65	46.0	170	262	0	846	1016	0.25	0.005
N-55	55	44.0	170	309	0	791	1032	0.25	0.005
N-45	45	42.0	170	378	0	731	1034	0.25	0.005
N-F II ①20in-65	65	46.0	170	210	52	838	1008	0.25	0.050
N-F II ①20in-55	55	44.0	170	247	62	783	1021	0.25	0.060
N-F II ①20in-45	45	42.0	170	302	76	723	1018	0.50	0.550
N-F II ①30in-55	55	44.0	170	216	93	778	1016	0.40	0.500
N-F II ②30in-55	55	44.0	163	207	89	791	1032	0.25	0.050
N-F II ①10-65	65	43.0	170	262	69	713	1072	0.40	0.090
N-F II ①10-55	55	41.9	170	309	67	679	1069	0.50	0.500
N-F II ①10-45	45	40.6	170	378	62	637	1059	0.5sp	0.600
N-F II ①20-65	65	40.0	185	285	127	571	1091	0.50	0.700
N-F II ①20-55	55	38.0	185	336	117	529	1099	0.50	0.700
N-F II ①20-45	45	36.0	185	411	106	482	1099	0.5sp	0.700
N-F II ②20-55	55	38.0	185	336	116	529	1099	0.25	0.400
N-F III 20-55	55	38.0	185	336	116	529	1099	0.5sp	0.800
N-F II ①30-65	65	38.0	185	285	179	474	1128	0.4sp	0.800
N-F II ①30-55	55	36.0	185	336	166	438	1136	0.5sp	0.800
N-F II ①30-45	45	34.0	185	411	150	398	1134	0.6sp	0.800
B-65	65	46.0	165	254	0	852	1021	0.25	0.006
B-55	55	44.0	165	300	0	796	1037	0.25	0.006
B-45	45	42.0	165	367	0	736	1037	0.25	0.006

注) * 配合記号

N - F II ① 20 in - 55
セメント フライアッシュ 置換率 内割 W/C

* * s/a=(fa+s)/(fa+s+g)

シュの細骨材置換率が20%以上の場合にはコンクリートの粘性が高く練混ぜが不十分と思われるため水を投入後の練混ぜ時間を120秒とした。

(3) 試験項目および方法

a) 圧縮強度および静弾性係数

JIS A 1108 に準じて行い、供試体寸法をφ10×20cmとした。材齢1日で脱型した後、20℃水中養生を行った。また、静弾性係数はコンプレッソメータを用いて圧縮強度の1/3の応力時の割線弾性係数を求めた。

b) 引張強度

JIS A 1113 に準じて行い、供試体寸法をφ15×15cmとした。

c) 乾燥収縮

供試体寸法を10×10×40cmとし、JIS A 1129 に準じたコンタクトゲージ法により行った。

d) 促進中性化

日本建築学会高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)付録1「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」に準じて行った。試験は、供試体寸法を10×10×40cmとし、温度20℃、湿度60%、CO₂濃度5%の条件で行った。中性化深さは、フェノールフタレイン1%アルコール溶液を用いて平均深さを求めることによった。

e) 塩分浸透性

供試体寸法をφ10×20cmとし、前養生として20℃水中養生7日の後、20℃、湿度60%の恒温恒湿室内で28日間乾燥させた後試験を開始した。試験条件は、①乾湿繰り返し(3日間人工海水に浸漬した後、湿度60%で4日間乾燥を1サイクルとして13サイクルまで繰り返し、および②海水中浸漬(浸漬期間:28日および91日)の2種類とした。人工海水はJIS A 6205 附属書1に準じて調整したものを使用した。塩分浸透深さの測定は、フルオレセインナトリウム水溶液および硝酸銀水溶液の噴霧による供試体の変色からその平均深さを求めることによった。なお、人工海水は毎月1回完全に交換した。

また、試験後の一部の供試体について、表面から深さ方向に1, 3, 7cmの位置の試料を採取し、JCI 基準案「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法」の硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法(硝酸銀滴定法)に準じて硬化コンクリート中の全塩分量を求めた。

f) アルカリ骨材反応性

JIS A 5308 附属書8に準じたモルタルバー法試験を実施した。なお、アルカリ量はモルタル中の全アルカリ量が1.2%の一定となるように調整した。

g) 凍結融解抵抗性

JIS A 6204 附属書2に準じて行い、凍結融解の繰り返し300サイクルまで実施した。

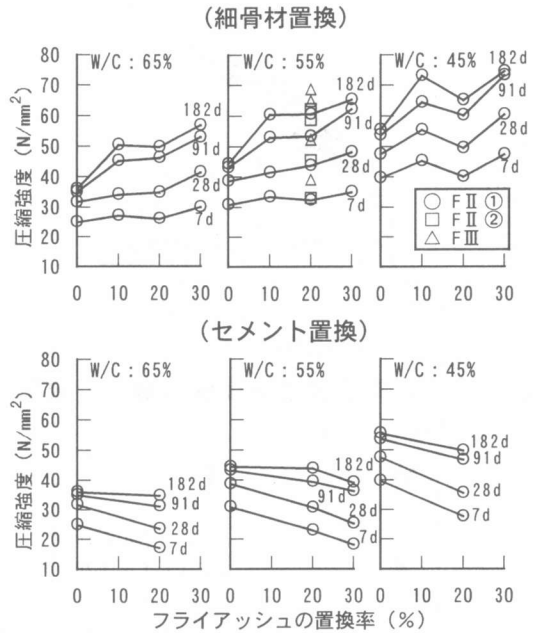


図-1 フライアッシュ置換率と圧縮強度との関係

3. 実験結果および考察

3.1 強度

フライアッシュ置換率と圧縮強度との関係を図-1に示す。フライアッシュを細骨材に置換した場合、置換率20%では置換率10%の場合と圧縮強度が同等か低くなる傾向が認められたが、概ねフライアッシュの細骨材への置換率の増加に伴い圧縮強度が高くなった。置換率20%以上の場合には単位水量を多くしたことおよび混和剤の種類を変えていることが強度発現に影響を及ぼしている可能性があると考えられる。フライアッシュの細骨材置換による強度増加は微粉末効果によりセメントの分散および水和の増大を生じたためと考えられる。また、材齢91日以降のフライアッシュ使用による強度増加が非常に大きくなっており、これはポゾラン反応によるものと考えられる。フライアッシュの種類によっても強度発現が異なり、JIS III 種品が JIS II 種品よりも強度が高くなった。一方、フライアッシュをセメントに置換した場合には、ポゾラン反応による効果が現れる長期材

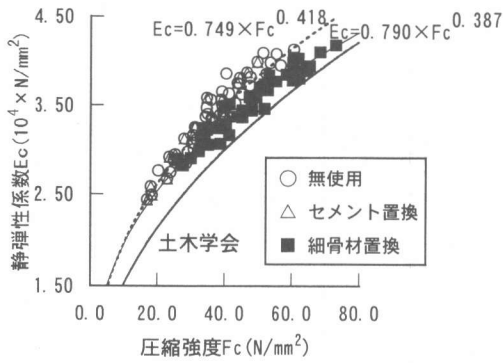


図-2 圧縮強度と静弾性係数との関係

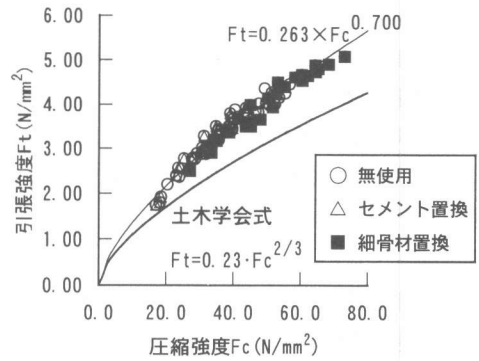


図-3 圧縮強度と引張強度との関係

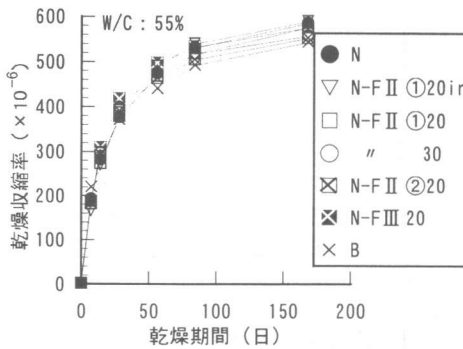


図-4 乾燥期間と乾燥収縮率との関係

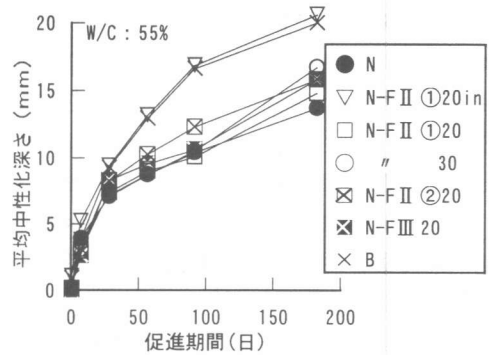


図-5 促進期間と平均中性化深さとの関係

齢を除くと細骨材への置換の場合とは逆に置換率の増加に伴い圧縮強度は低下した。

圧縮強度と静弾性係数との関係および圧縮強度と引張強度との関係を、それぞれ図-2および図-3に示す。フライアッシュを細骨材に置換して用いた場合には、フライアッシュ無使用およびフライアッシュをセメントに置換して用いた場合に比べて同一圧縮強度における静弾性係数が若干小さくなる傾向が認められた。これは、細骨材をフライアッシュで置換したことから骨材量が少なく、粉体量あるいはペースト量が多くなったためと考えられる。また、圧縮強度と引張強度との関係に及ぼすフライアッシュ使用の有無、フライアッシュの置換方法の違いによる影響は認められず同一曲線で表わされる。

3.2 乾燥収縮

乾燥期間と乾燥収縮率との関係を図-4に示す。乾燥収縮に及ぼすフライアッシュの種類および細骨材への置換の影響は認められない。

3.3 中性化

促進期間と平均中性化深さとの関係を図-5に示す。フライアッシュの細骨材への置換が中性化深さに及ぼす影響は認められず、フライアッシュをセメントに置換した場合および高炉セメントB種を用いた場合に比べて中性化の進行が遅くなる傾向が認められた。

3.4 塩分浸透性

水セメント比と平均塩分浸透深さとの関係を図-6に示す。塩分浸透深さは、浸漬条件、浸漬期間、コンクリートの種類にかかわらず水セメント比が低くなるほど小さくなったが、フライアッシュ無置換およびセメント置換の場合

に比べて細骨材置換および高炉セメントB種を用いた場合のほうが塩分浸透深さが小さくなった。また、**図-7**に示すフライアッシュ置換率と平均塩分浸透深さとの関係によれば、フライアッシュを細骨材に置換した場合は試験条件にかかわらず、フライアッシュの置換率の増加に伴い塩分浸透深さは小さくなる傾向を示した。同一水セメント比においてフライアッシュ置換率約20%の場合に高炉セメントB種を用いた場合と同等の塩分浸透抑制効果が得られた。一方セメントに置換した場合は試験期間が13サイクルまたは13週と長い場合を除き塩分浸透の抑制効果が認められなかった。

供試体表面からの深さと塩化物イオン量との関係を**図-8**に示す。供試体表面から同一深さでの塩化物イオン量はフライアッシュ無置換 > フライアッシュ20%細骨材置換 = 高炉セメントB種の順になり、上述の塩分浸透深さの試験結果と同様の傾向を示した。

3.5 アルカリ骨材反応性

保存期間とモルタルの膨張率との関係を**図-9**に示す。フライアッシュを細骨材に置換して用いた場合、保存初期の収縮の後の長さ変化の傾向は、フライアッシュをセメントに置換して用いた場合および高炉セメントB種を用いた場合と同様であり、これらと同等以上のアルカリ骨材反応による膨張の抑制効果があると考えられる。なお、初期の収縮の原因は不明である。

3.6 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果を**図-10**に示す。フライアッシュの細骨材に対する置換率が大きいほど凍結融解に対する抵抗性が小さくなり、また、JISのⅡ種相当品のFⅡ①およびFⅡ②に比べてⅢ種のFⅢのほうが抵抗性が小さくなる傾向が認められた。また、相対動弾性係数の低下が認められない場合でも、質量変化が大きくコンクリート表面のスケーリングが生じる傾向が認められた。しかし、凍結融解に対する抵抗性が低下した配合であっても、前養生期間を材齢14

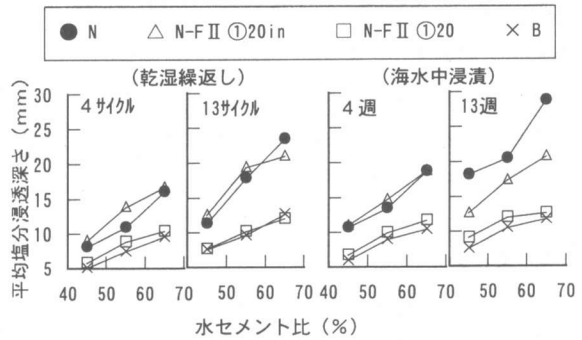


図-6 水セメント比と平均塩分浸透深さとの関係

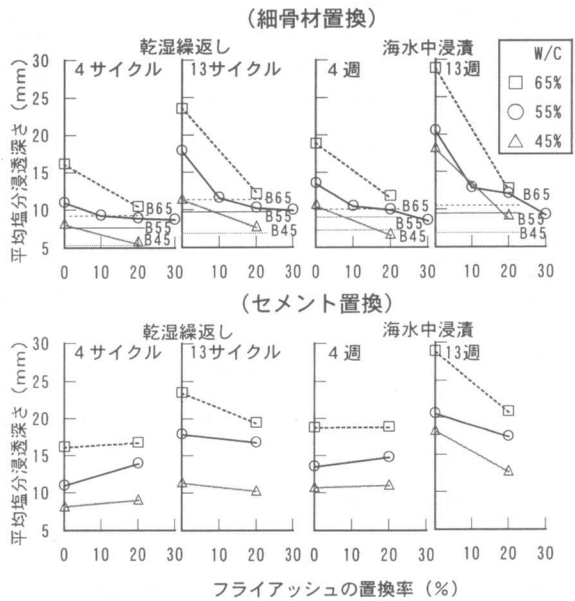


図-7 フライアッシュの置換率と平均塩分浸透深さとの関係

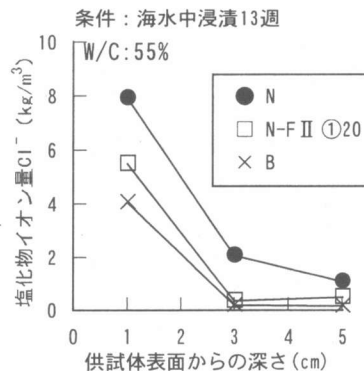


図-8 表面からの深さと塩化物イオン量との関係

日から材齢28日に長くした場合や空気量を8%程度まで増加させた場合には相対動弾性係数の低下や質量変化が小さくなることから、凍結融解抵抗性の改善のためには養生期間の延長および空気量の増加が効果的と考えられる。

4. まとめ

本実験により以下のような結果が得られた。

(1) フライアッシュを細骨材の一部に置換して用いたコンクリートは、フライアッシュの置換率が大きくなるほど圧縮強度が高くなる。また、静弾性係数はフライアッシュ無使用およびフライアッシュをセメントに置換して用いた場合に比べて若干小さくなる。

(2) 乾燥収縮に及ぼすフライアッシュの細骨材への置換の影響はない。

(3) 中性化深さに及ぼすフライアッシュの細骨材への置換の影響は認められず、フライアッシュのセメント置換および高炉セメントB種の場合に比べて中性化の進行が遅い。

(4) フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの塩分浸透深さは、フライアッシュの置換率が大きいほど小さくなり、置換率約20%の場合に高炉セメントB種と同程度となる。

(5) フライアッシュを細骨材の一部に置換して用いることにより、フライアッシュのセメント置換および高炉セメントB種の場合と同等以上のアルカリ骨材反応による膨張の抑制効果が得られる。

(6) フライアッシュを細骨材の一部に置換して用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、その置換率が大きいほど低下する傾向にあり、JIS II種品に比べてJIS III種品のほうが抵抗性が小さい。また、相対動弾性係数が低下しない場合でも、質量変化が大きく表面のスケールが生じることがある。しかし、前養生期間の延長および空気量の増加により凍結融解に対する抵抗性を改善できる。

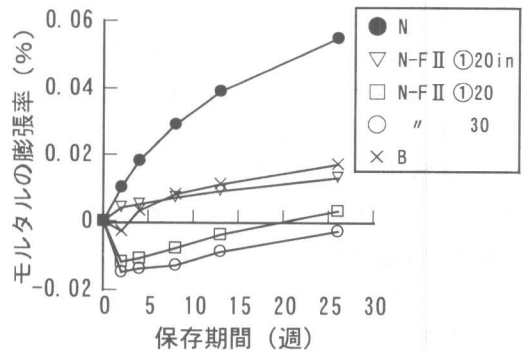


図-9 保存期間と膨張率との関係

記号	配合記号	養生(日)	空気量(%)	記号	配合記号	養生(日)	空気量(%)
●	N	14	4.5	△	N-F II ①30	14	5.6
○	"	"	6.0	▲	"	"	8.0
▽	N-F II ①20 in	14	5.0	⊠	N-F II ②20	14	5.5
□	N-F II ①20	14	4.5	⊗	N-F III 20	14	5.5
■	"	28	4.6	■	"	"	8.0
▲	"	14	5.7	×	B	14	5.0

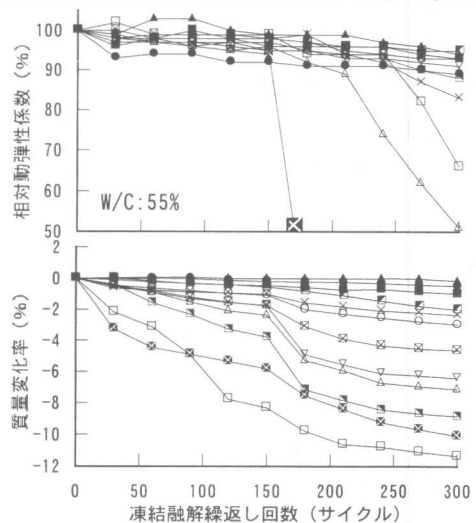


図-10 凍結融解試験結果

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 27 フライアッシュコンクリートシンポジウム論文報告集，1997
- 2) 松永篤，伊藤智章，松嶋信行：石炭灰を細骨材に置換して用いたコンクリートの流動性および空気連行性，セメント・コンクリート論文集，1999