

論文 非 JIS 灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの耐久性

馬越 唯好^{*1}・河野 清^{*2}・山地 功二^{*3}・川崎 真治^{*4}

要旨：石炭火力発電所から排出される非 J I S 灰を有効利用するため、細骨材の一部に代替使用したコンクリートの長期材齢強度、耐凍害性、耐摩耗性、耐硫酸塩性などの耐久性および水密性について検討した。その結果、圧縮強度は、非 J I S 灰の代替率が増加するほど、また材齢が長期になるにつれて増大する傾向が見られた。非 J I S 灰を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比較して耐凍害性は同程度か多少改善され、耐摩耗性、耐硫酸塩性などは改善された。また、水密性については普通コンクリートより優れており、細骨材代替率が増加するほど高い水密性が得られた。

キーワード：非 J I S 灰、細骨材代替、耐凍害性、耐摩耗性、耐硫酸塩性、水密性

1. はじめに

現在、わが国においては電力需要の堅調な伸びに伴い、供給力確保のために発電所の建設が推進されている。電源別にみると、石油燃料の埋蔵量の問題などにより、石炭火力発電が原子力発電と並ぶ石油代替エネルギーの重要な柱として位置づけられている。今後、わが国において石炭火力発電所が増加し、それに伴い副産物である石炭灰の発生量が増大し、現在の年間約 600 万トンに比べ平成 12 年度には年間約 1000 万トンとなることが予想されている [1]。

また、近年、海外輸入炭の品質や石炭燃焼温度の調節による影響から、J I S A 6201 に適合しないフライアッシュ、すなわち非 J I S 灰が増加しつつある。非 J I S 灰は J I S 灰と異なり、コンクリート用混和材として使用することができないため、増量材として細骨材の一部に代替して使用することが考えられ、今後の重要な研究課題となっている [2]。

そこで本研究では、石炭火力発電所から排出される非 J I S 灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの長期材齢強度、耐凍害性、耐摩耗性、耐硫酸塩性などの耐久性および水密性について実験的に調査研究を行ったので、以下に報告する。

2. 実験概要

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（比重 3.15, 28 日圧縮強さ 42.0MPa）を使用した。

(2) 骨材

粗骨材は、徳島県那賀川産の玉碎石（比重 2.64, 吸水率 1.08%, 最大寸法 25mm）を用い、細骨材は、同じ那賀川産の川砂（比重 2.60, 吸水率 1.72%, 粗粒率 2.78）を使用した。

* 1 (株)四国総合研究所土木技術部 副主席研究員, 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 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻

* 4 四国電力(株), 工修 (正会員)

細骨材の一部に代替使用した非 J I S 灰は、四国電力(株)の石炭火力発電所で副産されるものを使用した。その物理的性質および化学成分をそれぞれ表-1および表-2に示す。非 J I S 灰は未燃カーボンが多いため、物理的性質のうち強熱減量値が J I S に適合していない。

表-1 非 J I S 灰の物理的性質

種 類	比 重	比表面積 (cm^2/g)	平均粒径 (μm)	強熱減量 (%)
非 J I S 灰	2.20	4160	20.1	6.2
J I S	1.95以上	2400以上	—	5以下

表-2 非 J I S 灰の化学成分

種 類	化 学 成 分 (%)							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
非 J I S 灰	55.2	27.2	5.0	3.5	1.1	0.7	0.9	0.5
J I S	45以上	—	—	—	—	—	—	—

(3) 混和剤

混和剤は、アルキルアリルスルホン酸系の高性能減水剤とアルキルカルボン酸系の A E 剤とを使用した。

2. 2 コンクリートの配合と試験方法

(1) コンクリートの配合

試験に使用したコンクリートの配合は、一般土木用を対象に、目標スランプ12cm、目標空気量4%、水セメント比50%、細骨材率42%とした。非 J I S 灰の細骨材の容積に対する代替率は0、10、20%と設定（以下それぞれ N J 0、N J 10、N J 20と略記）した。コンクリートの配合表を表-3に示す。所定のスランプおよび空気量を得るため、高性能減水剤および A E 剤の使用量で調整を行った。非 J I S 灰は未燃カーボンが多いため、所要の空気量を得るための A E 剤量が通常よりも多くなった。

表-3 使用したコンクリートの配合

配合種別	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	高性能 減水剤	A E 剤
								S	N J			
N J 0	25	12±2	4±1	50	42	160	320	763	0	1069	1.92	0.19
N J 1 0								686	65		2.56	0.51
N J 2 0								610	129		6.40	0.58

(2) コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、容積60リットルの強制2軸型ミキサを用い、まず粗骨材、セメント、細骨材および石炭灰を投入して30秒間空練りを行い、その後混和剤を混ぜた水を加えて2分30秒間練混ぜを行った。

(3) 成形および養生方法

コンクリートはそれぞれの試験用供試体型枠に成形した。成形後は恒温室（温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ ）に静置し、打設後24時間で供試体を脱型し、所定の材齢まで $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中にて養生を行った。

(4) 試験項目および試験方法

(a) 圧縮強度

圧縮強度試験は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いて、すべての配合のコンクリートについて材齢7日、28日、91日、182日および365日でJIS A 1108に準拠して行った。

(b) 耐凍害性

コンクリートの耐凍害性を調査するため、凍結融解試験を行った。材齢28日まで20℃標準養生を行った $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱供試体を用いて、JSCE-G501-1986「コンクリートの凍結融解試験方法」の規定に従い、水中急速凍結融解試験法(5℃～-18℃, 1サイクル4時間)で300サイクルまで測定し、所定のサイクルで動弾性係数および質量を測定した。

(c) 耐摩耗性

耐摩耗性試験は、材齢28日まで20℃標準養生を行った $\phi 15 \times 4\text{cm}$ の円盤供試体を用いて、ASTM C 779の規定に従いアブレーション摩耗試験機を用いて行った。実験は84Nの圧力を加えながら、220rpmで回転させて、0、2000、4000、6000、8000、10000回転時の質量減少量を測定し、供試体のすり減り深さを計算により求めた。

(d) 耐硫酸塩性

耐硫酸塩性試験は、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱供試体を用いて、14日間水中養生の後、14日間気中養生を行い、JIS原案「コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法」に基づいて、硫酸マグネシウム溶液に浸漬させて試験を行った。

(e) 透水試験

透水試験は、 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 中空円筒供試体を用いて、21日間水中養生の後、7日間気中養生を行い、アメリカ開拓局のインプット法に従い、水圧0.98MPaを24時間加え、平均浸透深さを測定した。コンクリート中の水の拡散係数は、次式を用いて算定した。

$$\beta^2 = \alpha \cdot \frac{Dm^2}{4t\xi^2}$$

ここに、 β^2 : 拡散係数 (cm^2/s) , Dm : 平均浸透深さ (cm) , t : 水圧を加えた時間 (s)
 α , ξ : 係数

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

材齢7日、28日、91日、182日および365日における圧縮強度を図-1に示す。標準養生下において、非JIS灰を用いたコンクリート(NJ10, NJ20)は、代替率0%の普通コンクリート(NJ0)と比較して材齢7日で同等かそれ以上の強度発現を示し、材齢28日ではより高い強度発現を示しており、非JIS灰を用いたコンクリートは初期の材齢においても強度発現性が改善されることがわかった。

さらに、91日、182日、365日と長

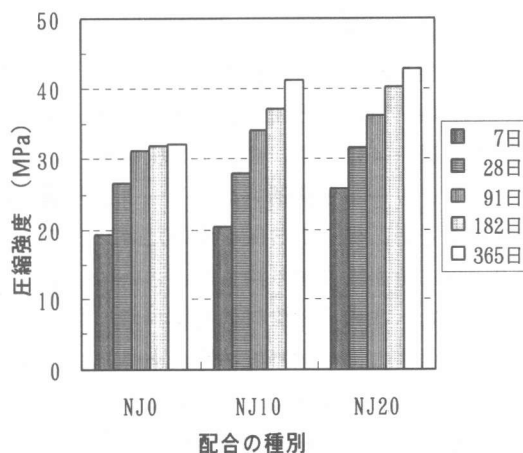


図-1 配合の種別と圧縮強度との関係

期材齢になるほど普通コンクリートよりも大きな強度の伸びが見られた。また、非 J I S 灰を用いたコンクリートは、細骨材代替率が増加するにつれて圧縮強度は増大する傾向が見られた。これは非 J I S 灰が、物理的にはフライアッシュと同一の性質を示す微粒部分がきわめて多いことと、化学的にもフライアッシュと成分がほぼ同じであり、ポズラン反応による影響と思われる。

3. 2 耐凍害性

凍結融解試験を行った結果について、0 サイクル時の動弾性係数に対する各サイクル時の動弾性係数の比を相対動弾性係数として図-2 に示し、質量減少率を図-3 に示す。300 サイクル終了時において、非 J I S 灰で 10%、20% 代替したコンクリートの相対動弾性係数は、それぞれ 91%、83% となり、比較用の普通コンクリート (NJ0) は 81% であった。

一方、質量減少率については、NJ10 で 1.8%、NJ20 で 1.7% となり、普通コンクリートの 2.5% に比較してより低く抑えられた。これより、非 J I S 灰を細骨材の一部に代替することにより、コンクリートの耐凍害性が多少改善されるか同程度となった。

このことから、非 J I S 灰を細骨材の一部に代替として用いても、空気量が 4% 程度連行されておればコンクリートの耐凍害性への影響には問題がないといえる。

3. 3 耐摩耗性

耐摩耗性試験を行った結果について、摩耗試験機の回転数とすり減り深さの関係として図-4 に示す。非 J I S 灰を用いたコンクリートと普通コンクリートとを比較すると、非 J I S 灰を用いたコンクリートの方がすり減り深さが小さい結果となった。また、細骨材代替率が増加するにつれて、すり減り抵抗性が上昇している。28 日圧縮強度とすり減り抵抗性を比較した場合、圧縮強度が大きくなるにつれて、すり減り抵抗性が良くなる

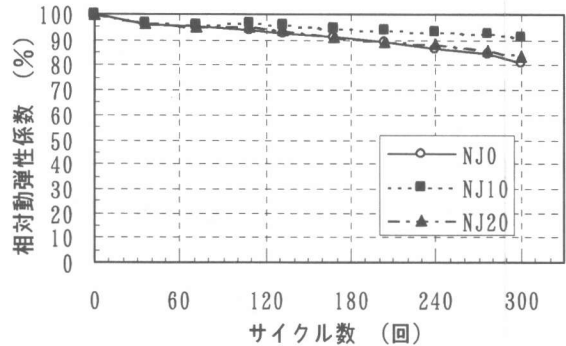


図-2 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

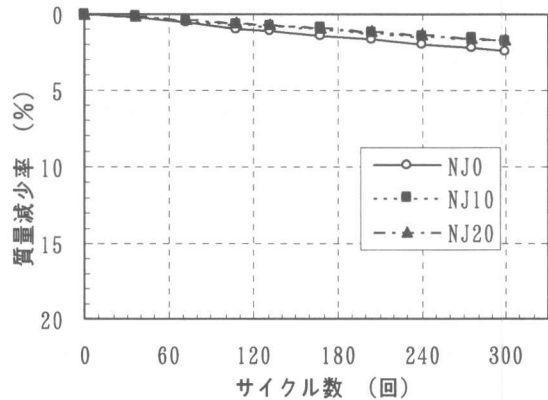


図-3 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

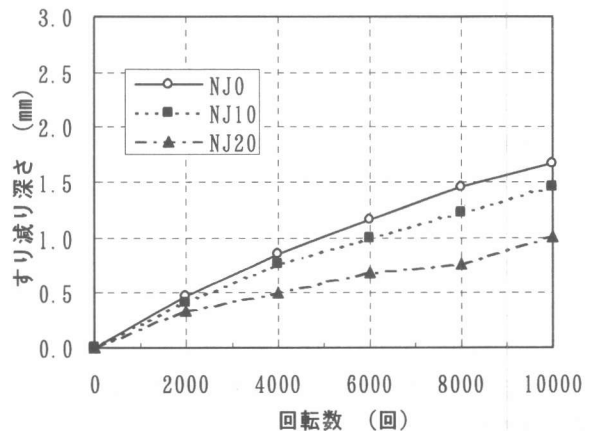


図-4 回転数とすり減り深さの関係

傾向が見られた。これは、非 J I S 灰には微粒部分が多く、組織の緻密化が影響したのではないかと考えられる。

3. 4 耐硫酸塩性

外観観察によれば、硫酸マグネシウム溶液への浸漬材齢の経過とともに、まず円柱供試体の側面部に剥落が見られ、それから供試体の上部・底部の表面に剥落が見られた。浸漬材齢 365 日においては、供試体の側面部にかなりの剥落が見られ、粗骨材が浮き出ている部分もあった。一方、供試体の上部・底部では、端部の剥落は見られたが、中央部は剥落していなかった。終局時における剥落の程度については、非 J I S 灰を用いたコンクリートの方が普通コンクリートよりも少なく、細骨材代替率が増加するにつれて少なくなった。

硫酸マグネシウム溶液に対する浸漬材齢と相対動弾性係数との関係を図-5に示す。

非 J I S 灰を用いたコンクリートと用いない普通コンクリートとを比較すると、初期の浸漬材齢においては前者の方が後者よりも相対動弾性係数は低い値となった。しかし、浸漬材齢 156 日以降は前者の方が後者よりも高い値をとる傾向を示した。また、非 J I S 灰の代替率が増加するにつれて、浸漬材齢 56 日以後の相対動弾性係数が大きくなる結果となった。これらの結果は、非 J I S 灰がフライアッシュと同一の化学成分を多く含んでいるため、ポゾラン反応による長期材齢における品質向上が影響したものと考えられる。

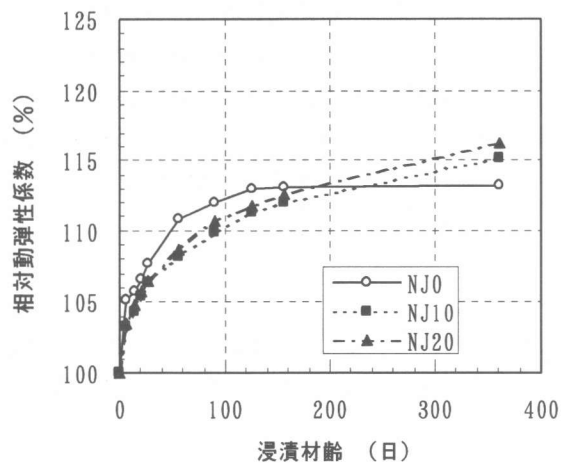


図-5 浸漬材齢と相対動弾性係数の関係

3. 5 水密性

透水試験を行った結果について、コンクリート中の水の拡散係数を求めて配合の種別との関係を図-6に示す。これより、非 J I S 灰を用いたコンクリートと普通コンクリートとを比較すると、非 J I S 灰を用いたコンクリートは普通コンクリートよりも拡散係数が非常に小さく、水密性が高くなることがわかった。また、非 J I S 灰を用いたコンクリートを比較すると、細骨材代替率が増加するにつれて拡散係数が小さくなり、水密性が改善される傾向が見られた。

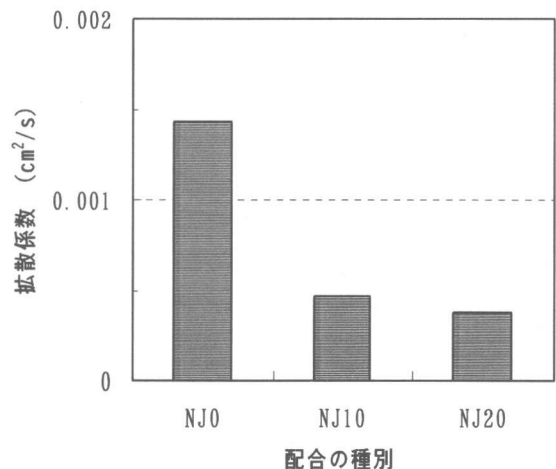


図-6 配合の種別と拡散係数との関係

4. まとめ

石炭火力発電所から大量に排出される非 J I S 灰をコンクリートへ有効利用するために、細骨材に対し、容積で 0, 10 および 20 % 代替したコンクリートの配合の違いが長期材齢強度、耐凍害性、耐摩耗性、耐硫酸塩性などの耐久性および水密性に及ぼす影響を調査した。その結果、本実験の範囲内で、非 J I S 灰を使用したコンクリートについて、次のことがいえる。

- (1) 非 J I S 灰を細骨材の一部に代替使用したコンクリートの圧縮強度は、代替率 0 ~ 20 % の範囲で代替率が増加するほど、また材齢が長期になるにつれて増大する傾向が見られる。
- (2) 耐凍害性については、非 J I S 灰を細骨材の一部に代替することにより、普通コンクリートと比べて多少改善されるか同程度である。
- (3) コンクリートの耐摩耗性については、非 J I S 灰を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比べて、より高いすり減り抵抗性を有している。
- (4) コンクリートの耐硫酸塩性については、非 J I S 灰を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比べて、初期の浸漬材齢ではやや低い硫酸塩抵抗性を示すが、156 日以降の長期の浸漬材齢ではより高い硫酸塩抵抗性を有している。
- (5) コンクリートの水密性については、非 J I S 灰を用いたコンクリートは、普通コンクリートと比べて、より高い水密性を有しており、細骨材代替率が増加するほど水密性が高くなる傾向が見られる。

謝辞

本研究の実施にあたり、徳島大学工学部コンクリート研究室および四国電力株式会社の関係各位には多大なご協力をいただいた。ここに、深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- [1] 環境技術協会, 日本フライアッシュ協会: 石炭灰ハンドブック, pp. II-7, 1995
- [2] 河野 清, 山地功二, 川崎真治, 馬越唯好: 石炭火力発電所から排出される非 J I S 灰を用いたコンクリートの配合と強度, セメント・コンクリート論文集 No. 50, pp. 234~239, 1996