

V-44

石炭灰を利用したコンクリートの適用法

○北海道大学大学院 学生員 木村和博
 北海道大学工学部 学生員 奥村俊幸
 北海道大学大学院 正会員 堀口敬
 北海道大学大学院 正会員 佐伯昇

1. はじめに

近年、我が国では、石炭は石油代替エネルギーの重要な柱となってきた。それに伴い、石炭灰の発生量も増加しており、1991年の約580万tから2000年には1000万tを越えるといわれている。現在ではその60%が有効利用されているが、残りは埋立処分されており、将来的に埋め立て地の確保が困難となることが予想されている¹⁾。コンクリート工学の分野では、従来からフライアッシュに代表されるようなセメントの混和材としての使用が積極的に実施されてきたが、良質な河川産の細骨材が枯渇しているため、年々骨材の品質低下が見られている。このため、石炭灰の骨材としての利用に関する研究も積極的に行われている^{2,3,4)}。

本研究は、こうした様々な問題を解決する一つの対策として、リサイクルの立場から、フライアッシュやクリンカアッシュを細骨材として有効利用したコンクリートの諸性状を明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本研究で使用したクリンカアッシュは、微粉炭燃焼式ボイラで発生する石炭灰の、ボイラ炉底(ボトム)に落下するもので、その形状は砂状で多孔質のことが多い。比重は1.9~2.3の範囲で、大部分は1~10mm粒径範囲のものであるが、粒度分布はかなり広く、0.1から1mmが50%、1mm以上が50%程度である。また、その発生比率は石炭灰全体の5~15%といわれている¹⁾。セメントは普通ポルトランドセメント(比重3.16、比表面積3180 cm²/g)を用いた。粗骨材には北海道静内川産砂利(比重2.75、吸水率1.35%、最大寸法25mm)、細骨材には北海道勇払産海砂(比重2.69、吸水率1.45%、粗粒率2.87)を用いた。成分の違うクリンカアッシュを4種類(A種、B種、C種、D種)用い、A種は、比重1.90、吸水率7.5%、B種は比重2.10、吸水率6.8%、C種は比重1.72、吸水率30.1%、D種は比重1.88、吸水率14.6%である。また、成分の違うフライアッシュを3種類(A種、B種、C種)用い、A種は比重2.36、B種は比重2.18、C種は比重2.12である。混和剤にAE剤(特殊非イオン界面活性剤)、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系化合物)を使用した。

Table 1は、本研究で使用したクリンカアッシュの主成分をまとめたものである。また、Table 2は、本研究で使用したフライアッシュの主成分をまとめたものである。

2. 2 配合

Table 3は、本研究で用いたコンクリートの配合をまとめたものである。目標スランプ80±20mm、目標空気量5±1%を得るため、配合によって、AE剤量、高性能AE減水剤量を調整した。

2. 3 練混ぜ方法

2軸強制型ミキサーを使用した。はじめに骨材を投入し、30秒間混合し、次にセメントと、混和剤を含む水を加えて、2分間練混ぜを行ったのち排出する方法とした。そして、練上げ後直ちに供試体を作製した。

2. 4 試験方法

(1) ポゾラン活性の評価

クリンカアッシュのポゾラン活性評価には、Luxanの方法を用いた⁵⁾。40℃に管理されたCa(OH)₂飽和溶液

THE APPLICATION METHOD ON CONCRETE INCORPORATING COAL ASH

By Kazuhiro KIMURA, Takashi HORIGUCHI and Noboru SAEKI

200ccを用意し、その電気伝導率を測定し、これを初期値 Δ_1 とする。次に乾燥させたポゾラン材 5g を投入し、攪拌しながら 2 分後の伝導率を測定し Δ_2 とする。伝導率差 $\Delta_0=\Delta_1-\Delta_2$ の値がポゾラン活性の大きさを示す。

(2) 圧縮強度試験および曲げ強度試験

圧縮強度試験用の供試体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体であり、曲げ強度試験には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた。供試体は同配合で 3 本作成し、28 日間の水中養生 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) の後、圧縮強度試験は、“JIS A 1108”、曲げ強度試験は、“JIS A 1106” の試験方法に準じて実施した。

(3) 凍結融解試験

凍結融解試験には、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた。供試体は同配合で 3 本作成し、14 日間の水 中養生 ($20 \pm 3^\circ\text{C}$) の後、“JSCE-G 501” に準じて試験を行い、質量及びたわみ振動の一次共鳴振動数を測定 した。

Table 1 Chemical composition of clinker ash

clinker ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Others
Type-A	51.7%	28.9%	4.8%	4.3%	1.1%	0.0%	0.6%	0.3%	1.3%	0.2%	6.4%
Type-B	57.6%	20.0%	9.8%	2.3%	1.1%	0.1%	1.1%	0.1%	1.5%	0.05%	6.75%
Type-C	67.1%	20.0%	7.5%	0.6%	0.2%	0.1%	0.7%	0.1%	1.1%	0.06%	1.2%
Type-D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Table 2 Chemical composition of fly ash

fly ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Mn ₂ O ₃	Others
Type-A	46.0%	30.5%	7.4%	5.0%	1.8%	0.9%	1.4%	0.7%	1.4%	0.05%	4.8%
Type-B	39.2%	29.8%	5.0%	6.2%	2.1%	0.5%	0.6%	1.1%	1.5%	0.05%	14.0%
Type-C	48.5%	19.08%	4.64%	5.6%	1.07%	0.65%	0.94%	0.74%	0.96%	0.06%	17.76

Table 3 Mix proportion of concrete

Mix. no.	Clinker ash content *CA (%)	Fly ash content **FA (%)	W/C (%)	***b/a (%)	Unit content (kg/m ³)					
					C	W	S	CA	FA	G
PL55-0	0	0	55	42	320	176	763	0	0	1081
PL50	0	0	50	42	320	160	781	0	0	1107
CA50A	50	0	50	42	320	160	391	275	0	1107
CA50B	50	0	50	42	320	160	391	304	0	1107
CA50C	50	0	50	42	320	160	391	249	0	1107
CA50D	50	0	50	42	320	160	391	272	0	1107
CA50D+FA50A	50	50	60	42	320	192	0	259	326	1055
CA50D+FA50B	50	50	60	42	320	192	0	259	301	1055
CA50C+FA50C	50	50	60	42	320	192	0	237	331	1055

*CA: Clinker ash , ** FA: Fly ash , *** b: Natural sand + Clinker ash + Fly ash

3. 試験結果及び考察

3. 1 ポゾラン活性の評価

Table 4 はクリンカアッシュのポゾラン活性を評価した結果である。一般的に $\Delta_0(\text{S/m}) \geq 0.04$ の時ポゾラン 活性があるとされているが、本研究で用いたクリンカアッシュ B 種では $\Delta_0=0.026(\text{S/m})$ 、C 種では $\Delta_0=0.018(\text{S/m})$ という結果が得られた。通常のフライアッシュ等のポゾラン材料は $0.04(\text{S/m})$ であり、これと 比較するとクリンカアッシュは低い値を示した。従って、クリンカアッシュのポゾラン活性度は低いことが 判明した。

3. 2 圧縮強度の比較

Fig.1 は、圧縮強度を比較したグラフである。Fig.1 より、圧縮強度試験においては、クリンカアッシュを砂として 50%程度代替したコンクリートは、クリンカアッシュの種類によらず圧縮強度が低下し、クリンカアッシュの比重が小さいほど圧縮強度が低くなる傾向があるという結果が得られた。この原因は、破壊形態の違いによるところが大きいと考えられる。比較的高い強度のコンクリートの場合は、コンクリートの強度は骨材に依存する。従って、マトリックスの強度に比較してクリンカアッシュ自体の強度が低いため、コンクリートの強度の低下がみられると考えられる。一方、比較的低い強度のコンクリートの場合は、マトリックスの強度と骨材としてのクリンカアッシュの強度が等しくなり、クリンカアッシュ自体が欠陥の原因とはならず、コンクリートの強度は遷移帯近傍の品質に依存することになる。クリンカアッシュの表面は多数の細孔があるため、遷移帯の品質が向上し、あるいはクラックアレスト作用も加わり、コンクリートの強度が増加すると考えられる。同様な結果は、参考文献2、3)においても報告されている。

しかし、クリンカアッシュとフライアッシュを砂の代わりに 50%ずつ代替したコンクリートは、フライアッシュの品質により、強度の低下がそれほど見られないものもあった。この原因は、クリンカアッシュがポーラスな状態のものであるため、フライアッシュのように粒度の細かいものを用いることにより、コンクリートが密になったため、また、フライアッシュのポゾラン反応により強度の低下が少なかったと考えられる。

3. 3 曲げ強度の比較

Fig.2 は、曲げ強度を比較したグラフである。Fig.2 より、曲げ強度試験においては、クリンカアッシュを砂として 50%程度代替したコンクリートは、どのクリンカアッシュを用いた場合でもクリンカアッシュ無混入のコンクリートと同等あるいはそれ以上の強度が望める。これらの結果も、前述した圧縮強度と同様に、破壊形態の違いによるところが大きいものと考えられる。

Table 4 evaluation of pozzolanic activity

Clinker ash	variation of conductivity(S/m)
Type-B	0.026
Type-C	0.018

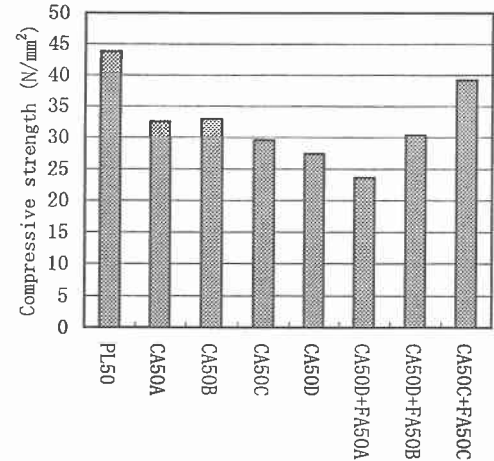


Fig. 1 Results of Compressive strength test

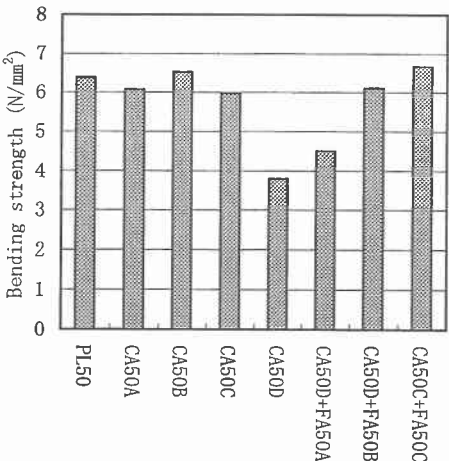


Fig. 2 Results of Bending strength test

3. 3 凍結融解試験結果

Fig. 3およびFig. 4は、凍結融解試験による相対動弾性係数および質量減少率の変化を示したものである²⁾。耐凍結融解抵抗性はクリンカアッシュを代替利用することによって低下する傾向にある。これは、クリンカアッシュの吸水率の高さに原因があるものと思われる。しかし、クリンカアッシュの代替率が 50%で水セメント比が 50%程度のものであれば、使用環境などを考慮することにより十分な耐凍結融解抵抗性があることを示した。また、質量減少率の結果より、同様なことが示された。従って、水セメント比を 50%以下にして、クリンカアッシュの代替率も 50%以下であれば、十分な耐凍結融解抵抗性を示すものと考えられる。

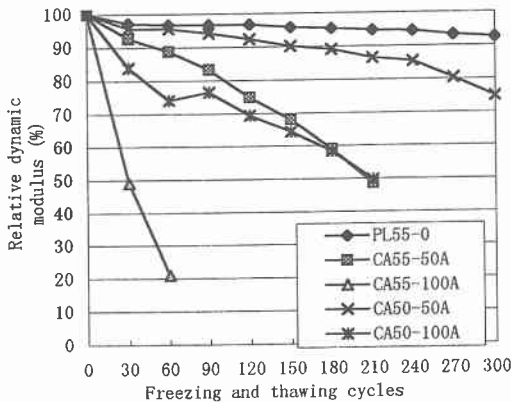


Fig.3 Results of freezing and thawing test(Relative dynamic modulus)

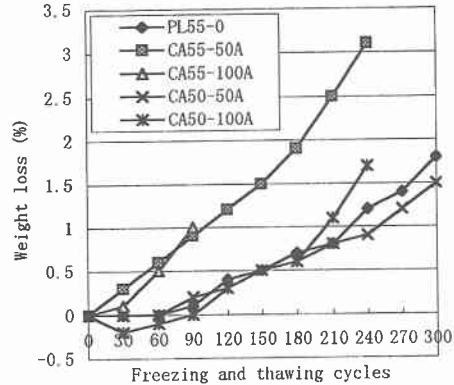


Fig.4 Results of freezing and thawing test (Weight loss)

4. まとめ

- (1) クリンカアッシュのポゾラン活性度はフライアッシュなどのポゾラン材と比較すると低いことが判明した。
- (2) 圧縮強度は、クリンカアッシュを代替利用することにより、低下する傾向にあるが、フライアッシュを同時に用いることにより強度の低下は少なくなることが判明した。
- (3) 曲げ強度は、クリンカアッシュを代替利用してもプレーンコンクリートと同等あるいはそれ以上の性能を示した。
- (4) 耐凍結融解抵抗性は、クリンカアッシュ代替率の増加に伴い、低下する傾向にあるが、適切な配合と使用環境を考慮することにより、十分な耐凍結融解抵抗性を示すことが判明した。
- (5) クリンカアッシュを代替利用したコンクリートは、適切な代替率、水セメント比を選択することにより、普通コンクリートとさほど変わらない性状を示した。従って、リサイクルの立場からクリンカアッシュの有効利用は十分可能と言える。

参考文献：

- 1) 石炭灰ハンドブック、環境技術協会・日本フライアッシュ協会、pp. 17-34 (1995)
- 2) 第 52 回セメント技術大会講演要旨、セメント協会、pp. 412-413 (1998)
- 3) 川崎真治 他：粗粒アッシュを細骨材の一部に代替利用したコンクリートの性質、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 1, pp. 411-416 (1996)
- 4) Nader Ghafoori and Jeffrey Bucholtz: Properties of High-Calcium Dry Bottom Ash Concrete, ACI Materials Journal, pp.90-101 (1997)
- 5) Luxan, M.P. et al :Rapid Evaluation of Pozzolanic Activity of Natural Products by Conductivity Measurement, Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp.63-68 (1989)