

## V-36

## 石炭灰を細骨材として利用したコンクリートの基礎的性状

○北海道大学大学院 学生員 木村和博  
 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50%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<sup>1)</sup>。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の枯渇のため、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<sup>2,3,4)</sup>。

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、フライアッシュより粗粒で有効利用率の低い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<sup>1)</sup>。普通ポルトランドセメント(比重3.16、比表面積3180 cm<sup>2</sup>/g)、粗骨材に北海道静内川産砂利(比重2.75、吸水率1.35%、最大寸法25mm)、細骨材に北海道勇払産海砂(比重2.69、吸水率1.45%、粗粒率2.87)、成分の違うクリンカアッシュを2種類(A種、B種)、A種は、比重1.90、吸水率7.5%、強熱減量0.93%、B種は比重2.10、吸水率6.8%、強熱減量0.46%、混和剤にAE剤(特殊非イオン界面活性剤)、高性能A/E減水剤(ポリカルボン酸系化合物)を使用した。

クリンカアッシュA種の電子顕微鏡写真をFig.1に示す。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。

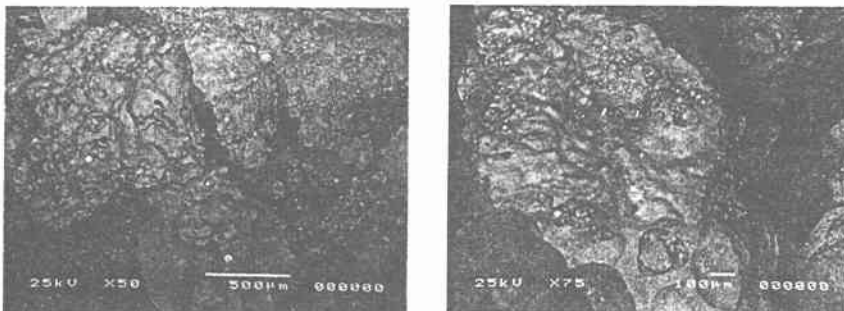


Fig.1 S.E.M. photographs of clinker ash

FUNDAMENTAL STUDY ON CONCRETE INCORPORATING CLINKER ASH AS FINE AGGREGATE

By Kazuhiro KIMURA, Takashi HORIGUCHI and Noboru SAEKI

## 2. 2 配合

Table 2 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。A種、B種のいずれのクリンカアッシュを用いた場合にも、単位セメント量、細骨材率を一定とし、水セメント比を 45、50、55%、クリンカアッシュの代替率を 0、50、100%とした。目標スランプ  $8\pm 2\text{cm}$ 、目標空気量  $5\pm 1\%$ 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) 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。

### (2) 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。

## 3. 試験結果及び考察

### 3. 1 クリンカアッシュの代替率と圧縮強度の関係

Fig. 2 および Fig. 3 は、クリンカアッシュの代替率と圧縮強度の関係である。Fig. 2 より、水セメント比

Table 1 Chemical composition of clinker ash

| clinker ash | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | MnO   | 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%  |

Table 2 Mix proportion of concrete

| series | Mix. no.  | Clinker ash<br>content<br>CA (%) | W/C<br>(%) | *s/a<br>(%) | Unit (kg/m <sup>3</sup> )<br>content |       |                 |                |                     | Air entraining<br>agent<br>(%/C) | High range<br>water-reducing<br>agent(%/C) |
|--------|-----------|----------------------------------|------------|-------------|--------------------------------------|-------|-----------------|----------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|
|        |           |                                  |            |             | Cement                               | Water | Natural<br>sand | Clinker<br>ash | Coarse<br>aggregate |                                  |                                            |
| I      | CA45-0    | 0                                |            |             |                                      |       | 796             | 0              |                     | 0.05                             | 0.30                                       |
|        | CA45-50A  | 50                               | 45         | 42          | 320                                  | 144   | 398             | 281            | 1124                | 0.30                             | 0.80                                       |
|        | CA45-100A | 100                              |            |             |                                      |       | 0               | 562            |                     | 0.30                             | 1.20                                       |
|        | CA50-0    | 0                                |            |             |                                      |       | 778             | 0              |                     | 0.15                             | 0.00                                       |
|        | CA50-50A  | 50                               | 50         | 42          | 320                                  | 160   | 389             | 275            | 1099                | 0.30                             | 0.20                                       |
|        | CA50-100A | 100                              |            |             |                                      |       | 0               | 550            |                     | 0.30                             | 0.40                                       |
|        | CA55-0    | 0                                |            |             |                                      |       | 760             | 0              |                     | 0.15                             | 0.00                                       |
|        | CA55-50A  | 50                               | 55         | 42          | 320                                  | 176   | 380             | 268            | 1073                | 0.30                             | 0.10                                       |
|        | CA55-100A | 100                              |            |             |                                      |       | 0               | 537            |                     | 0.30                             | 0.20                                       |
| II     | CA50-0    | 0                                |            |             |                                      |       | 778             | 0              |                     | 0.15                             | 0.00                                       |
|        | CA50-50B  | 50                               | 50         | 42          | 320                                  | 160   | 389             | 304            | 1099                | 0.30                             | 0.20                                       |
|        | CA50-100B | 100                              |            |             |                                      |       | 0               | 607            |                     | 0.30                             | 0.40                                       |
|        | CA55-0    | 0                                |            |             |                                      |       | 760             | 0              |                     | 0.15                             | 0.00                                       |
|        | CA55-50B  | 50                               | 55         | 42          | 320                                  | 176   | 380             | 297            | 1073                | 0.30                             | 0.10                                       |
|        | CA55-100B | 100                              |            |             |                                      |       | 0               | 593            |                     | 0.30                             | 0.20                                       |

\*s: Natural sand + Clinker ash

が 45%、50%においては、クリンカアッシュの代替率の増加に伴い、圧縮強度の低下が見られ、クリンカアッシュの代替率が 100%のものでは、0%のものに比べ、強度が半分程度の値を示した。しかし、水セメント比が 55%になるとクリンカアッシュの代替率が 50%までなら、逆に圧縮強度が増加する傾向を示し、クリンカアッシュの代替率が 100%になっても強度の低下は少ない傾向を示した。この傾向は、クリンカアッシュ A 種、B 種とも同様である。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、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、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。同様な傾向は、参考文献 3)、4) においても報告されている。

### 3. 2 クリンカアッシュの代替率と曲げ強度の関係

Fig. 4 および Fig. 5 は、クリンカアッシュの代替率と曲げ強度の関係である。Fig. 4 より、曲げ強度試験においても圧縮強度と同様な傾向が見られるが、圧縮強度ほどクリンカアッシュの代替による強度の低下は見られない。

また、B 種を使用した Fig. 5 では、Fig. 4 と比較して、全体的に強度が多少増加しており、水セメント比が 50%と 55%のものは、クリンカアッシュを代替利用しても、普通コンクリートに対して遜色のない強度特性を示した。この原因は、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。

### 3. 3 凍結融解試験結果

Fig. 6 および Fig. 7 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。水セメント比が 55%では、耐凍結融解低抗性はクリンカアッシュを代替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

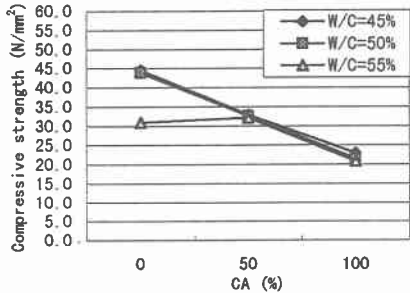


Fig. 2 Compressive strength vs. W/C in series-I

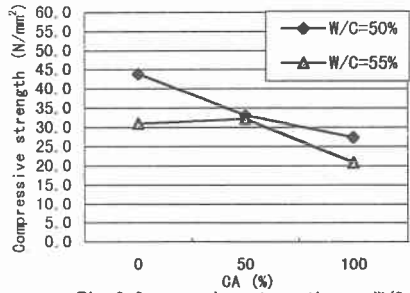


Fig. 3 Compressive strength vs. W/C in series-II

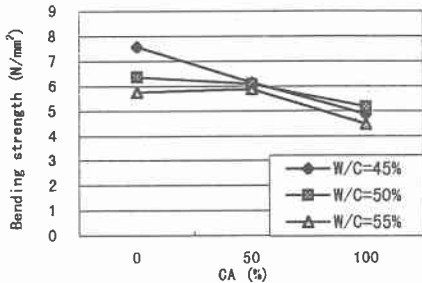


Fig. 4 Bending strength vs. W/C in series-I

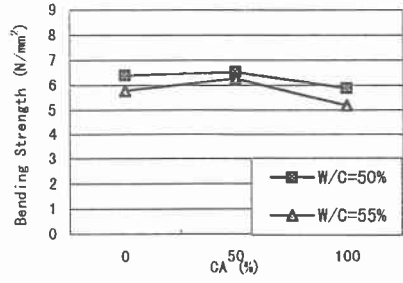


Fig. 5 Bending strength vs. W/C in series-II

の代替率が 50%で水セメント比が 50%程度のもものでは、十分な耐凍結融解抵抗性を示していた。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。

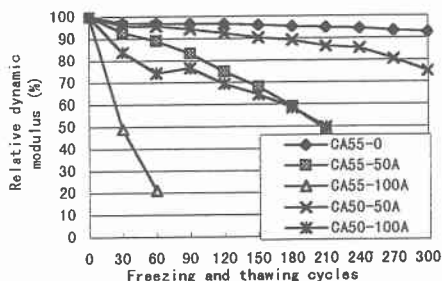


Fig. 6 Results of freezing and thawing test (Relative dynamic modulus)

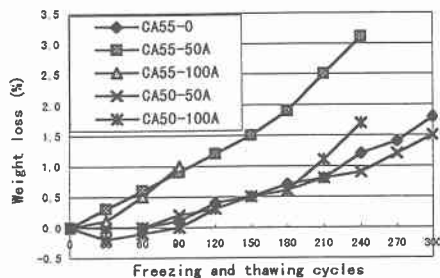


Fig. 7 Results of freezing and thawing test (Weight loss)

### 3. 4 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<sup>5)</sup>。40℃に管理された  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  飽和溶液 200cc を用意し、その電気伝導率を測定し、これを初期値  $\Delta_1$  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  $\Delta_2$  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。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  $\Delta_0 = 0.026 (\text{S/m})$  と通常のフライアッシュ等のポゾラン材料に比較して低い値を示した。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わかる。

### 4. まとめ

- (1) 圧縮強度は、クリンカアッシュの代替率の増加により低下する傾向にある。しかし、水セメント比が高くなると、普通コンクリートと同程度、あるいはそれ以上の結果を示した。
- (2) 曲げ強度は、全体的に圧縮強度と同様の傾向を示すが、圧縮強度ほどの低下は認められなく、むしろ適切な配合を考慮することによって、普通コンクリート以上の強度が得られることが明らかになった。
- (3) 耐凍結融解抵抗性は、クリンカアッシュ代替率の増加及び水セメント比の増加に伴い、低下する傾向にあるが、適切な配合によっては十分な耐凍結融解抵抗性を示すことが判明した。
- (4) クリンカアッシュのポゾラン活性度はフライアッシュ等に比較すると低いことが判明した。
- (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同等の性能を示すことが判明した。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 Bucholt: 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)