

論文 ゼオライト混入による耐ひび割れ性能の向上に及ぼす高炉スラグの影響に関する検討

中央大学 理工学部土木工学科

学生会員 ○看舎 秀明

中央大学 理工学部都市環境工学科教授

工博 正会員 大下 英吉

1. はじめに

セメント系材料は、各種の要因により必ずひび割れを生じる特性がある。またひび割れの存在は耐久性の観点から言うと致命的な欠陥であるため、材料的見地から膨張材や収縮低減剤を混入することにより、その回避に向けた対策を取っている。しかし現在までのところ確固たる解決策は得られていないのが実情である。このような中、R.W.Burrows¹⁾はセメント中のアルカリ含有量を($R_2O=Na_2O+0.658K_2O$)の式で整理したところ、セメント中のアルカリ含有量が小さいほどひび割れ抵抗性が大きくなることを考察した(図-1)。このような報告を受け、著者らは市販の普通ポルトランドセメントをベースに混和材の添加によるアルカリ含有量の低減を試みた。試行錯誤の末に、Li 或いは Ca 含有型の人工ゼオライトがアルカリ含有量を低減させ、ひび割れ抵抗性を向上させることから本研究に効果的であることを見出した。イオン交換体であるゼオライトを混和材として混入すると、ひび割れ抵抗性は未混入のものに比べておよそ 1.5 倍になることを実験的に明らかとした。同時に、アルカリ含有量は K イオンが優先的に捕集された後に Na イオンが捕集されることにより大幅に低下し、この一連の捕集やアルカリ量の変化は練り混ぜ後の数時間という短時間で生じるとともに、溶液中に放出される Li 或いは Ca イオンは細孔構造の緻密化に大きく関与することも明らかにしている。このように、ゼオライトはひび割れ抵抗性の向上に効果的であることが明らかとなったが、細孔構造の緻密化に伴う自己収縮特性を長期にわたり定性的かつ定量的に評価しなければならないことも課題として残った。

本研究では、高炉スラグ混合セメント(置換率 42%)に人工ゼオライトを混和材として混入した状態における圧縮強度、曲げ強度、ひび割れ抵抗性、乾燥収縮および自己収縮特性の観点から

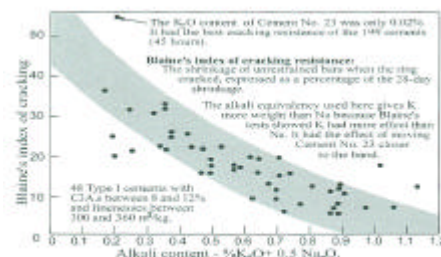


Fig. 29—Blaine's index of cracking resistance showed the effect of alkalis on shrinkage cracking.

図-1 R.W.Burrows の報告

表-1 配合および実験パラメータ

セメントの種類	高炉スラグ混合セメント	
水結合材比W/(C+Z)	50	
混和材の種類	プランク	Ca型
混和材置換率(%)		5
		10

検討した。また昨年度の普通ポルトランドセメントにゼオライトを混入させ得たデータと比較を行いゼオライト混入による耐ひび割れ性能の向上に及ぼす高炉スラグの影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験材料

セメントは、高炉スラグ混合セメント(BB)を使用した。混和材としてゼオライトを使用し、ゼオライトは Ca 型の人工ゼオライトを使用した。

2.2 配合および実験フレッシュ性状

試験はセメントペーストを対象に W/(C+Z)を 50%に統一し、ゼオライトはセメント質量に対して 5%・10%置換することとした。配合および実験パラメータは表-1 に示すように、水結合材比を一定としてセメントは内割りとした。

2.3 実験方法

(1)圧縮強度試験

圧縮強度試験は JIS A1108 に準拠し、Φ50×100mm の試験体を用いて実施した。試験体は打

キーワード ひび割れ抵抗性,自由自己収縮,ゼオライト,圧縮強度,曲げ強度,高炉スラグ

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1892 FAX 03-3817-1803

設後から 28 日まで水中養生を行った。なお、圧縮試験時ひずみゲージを貼り付け、縦ひずみの測定を行い、弾性係数も算出した。

(2) 拘束ひび割れ試験

供試体は図-3 に示すように、外リング F275mm、内リング F165mm、高さ 40mm のリング状の鋼製型枠内に打設した。ひび割れ材齢を測定するために内リングの内側 4 箇所に均等にひずみゲージを設置している。また、打設直後には表面仕上げを行った後に水分の拡散を防ぐため、ポリエステルフィルムとラップで覆った。供試体は乾燥開始材齢 24 時間まで雰囲気温度 20℃、相対湿度 50% の恒温恒湿室に静置し、内リングの収縮ひずみを測定した。乾燥開始材齢 24 時間後、内リング以外の型枠を脱型し、シールせずに静置し、供試体にひび割れが発生するまで内リングの収縮ひずみを測定した。なお、供試体のひび割れ発生時間の判定は、内リングの収縮ひずみが急激に減少する時点とした。

(3) 自由収縮ひずみ試験

供試体は、図-4 に示すように 40×40×160mm のセメントペースト角柱供試体であり、型枠には発泡スチロールで作製したものを使用した。また、供試体両端部にボルトを埋め込み、凝結始発から乾燥開始材齢 24 時間まで雰囲気温度 20℃ の状態で封緘養生した。その後、供試体は乾燥開始材齢 24 時間で脱型し、雰囲気温度 20℃、相対湿度 50% の恒温恒湿室に静置した。変位測定は、供試体端部に埋め込んだボルトに材齢 3 日までは 1/1000mm の精度を有する変位計を設置し、その後はコンタクトゲージを用いて実施した。

(4) 自己収縮ひずみ試験

供試体の形状寸法は、自由収縮試験と同一である。温度ひずみを算出するため、熱電対を図-5 に示すように 3 ヶ所設置し、温度変化を測定した。熱電対の設置個所は、軸方向に直行する 3 つの断面内の 3 ヶ所であり、中心断面ではその中央部、両端の断面では上面および下面から 10mm の位置とした。また、線膨張係数は、温度上昇時では $2.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、温度下降時では $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ に設定した。乾燥開始材齢 24 時間以後は、水分の逸散を防ぐために供試体全面を



図-2 圧縮試験

図-3 拘束ひび割れ試験

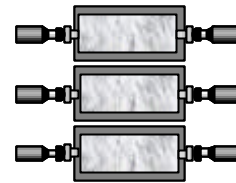


図-4 自由収縮ひずみ試験

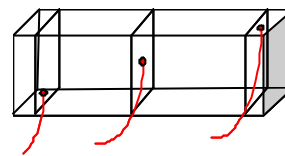


図-5 熱電対

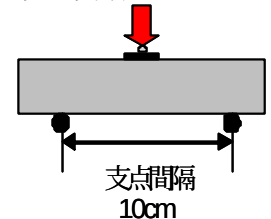


図-6 曲げ試験

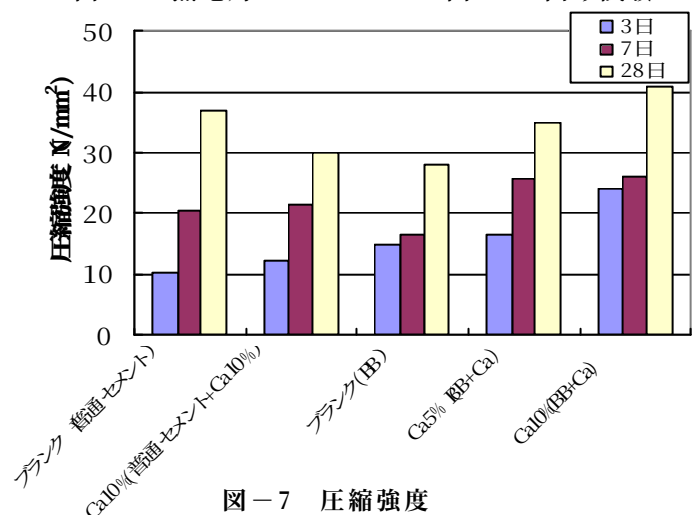


図-7 圧縮強度

アルミ箔テープでシールした。

(5) 曲げ試験

供試体は、図-6 に示すように 40×40×160mm の角柱供試体であり、鋼製の型枠を使用した。供試体は打設後 24 時間の時点で脱型し、その後 28 日間水中養生を行った。曲げ試験は支点間隔を 10cm、載荷速度を 0.5(mm/min) の変位制御方法で実施した。

3. ゼオライトの使用による各種性状に及ぼす影響

3.1 圧縮強度試験

図-7 に材齢ごとの圧縮強度を示す。BB+Ca 型は BB 単体に比べ、全材齢において圧縮強度

が高いことが確認できた。

3.2 拘束ひび割れ

図-8 はひび割れ発生までの内リングにおけるひずみの経時変化をゼオライトの置換率毎に示したものである。図-8より、BB+Ca・BB単体は普通セメント単体・普通セメント+Caに比べて、ひび割れ抵抗性が大きいことが確認できた。一方、ひび割れ発生材齢について検討を行うと、BB+Ca・BB単体は、普通セメント単体・普通セメント+Caに比べてひび割れ発現材齢が遅れる。またBB+Caは、BB単体に比べて、自己収縮などの影響により収縮速度が速くなり、ひび割れ発生応力に早い段階で到達すると考えられる。

3.3 長さ変化

(1) 自由収縮ひずみ

図-9 は、自由収縮試験によって得られた自由収縮ひずみ量で、拘束ひび割れ試験で把握したひび割れ発生材齢までの自由収縮ひずみ量を示している。置換率による比較を行うと、図-9に示す通り、BB+Ca10%の自由収縮ひずみ量は、BB+Ca5%に比べて材齢72hの時点では150 μ ほど大きい。BB+Ca5%とBB単体を、材齢72hで比較すると50 μ の差を生じた。そして図-9よりBB+Ca・BB単体は、普通セメント単体・普通セメント+Caよりも自由収縮が大きく発現し、BB+Caではその結果が顕著である。Caの置換率が増加するとひび割れ発生時の自由収縮ひずみ量が増加する。

(2) ひび割れ発生時における自由収縮ひずみ量

図-10 は、ひび割れ発生時における自由収縮ひずみ量とゼオライトの置換率の関係である。BB+Ca・BB単体のほうが、普通セメント単体・普通セメント+Caよりもひび割れ発生時に生じる自由収縮ひずみ量が多いことが確認できた。BB単体とBB+Caのものを比べると、Ca10%とのひずみ量の差は約100 μ とCa5%のひずみ量の差は約30 μ となった。このことから、BBにおいても、ゼオライトを混入し置換率を増加させるほどひび割れ抵抗性が向上することを確認した。

(3) 自己収縮ひずみ

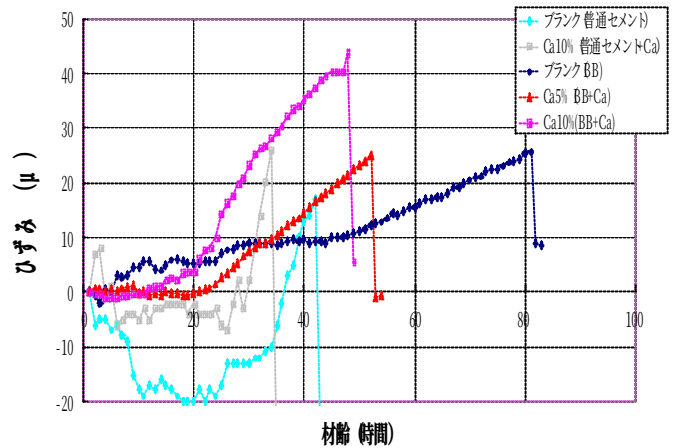


図-8 ひび割れ発生までの内リングひずみ量

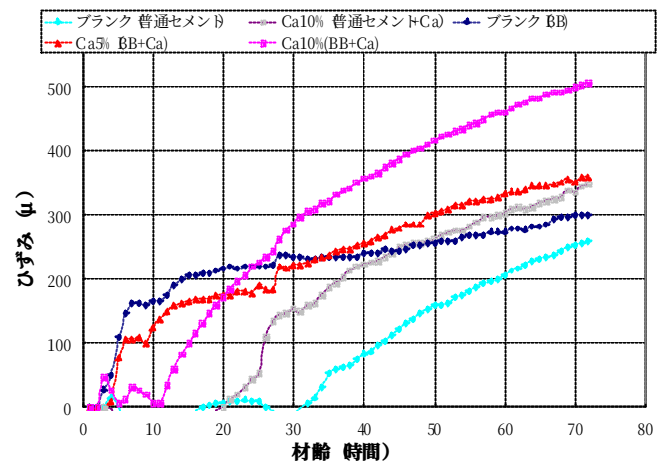


図-9 自由収縮ひずみ量の変化

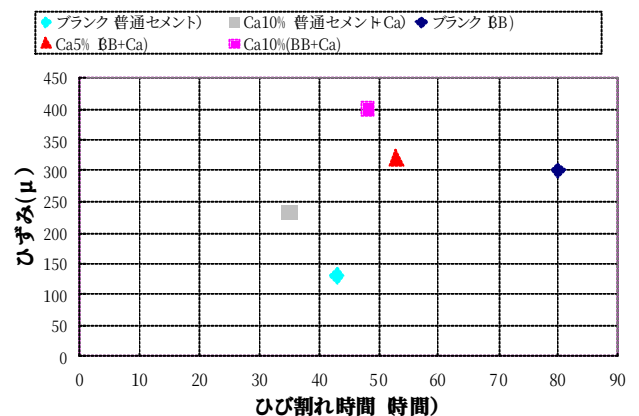


図-10 ひび割れ発生時における自由収縮ひずみ

図-11 は、材齢72時間時点における自己収縮ひずみの経時変化を置換率ごとに示したものである。BB+Ca・BB単体は、普通セメント単体・普通セメント+Caに比べて、自己収縮ひずみ量が多いことを確認した。また、BBにCaを含ませることで、比較的大きな値の自己収縮ひずみ量

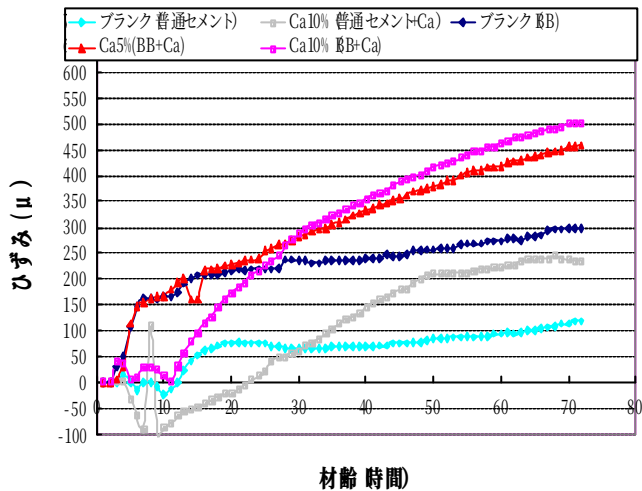


図-11 自己収縮ひずみの変化

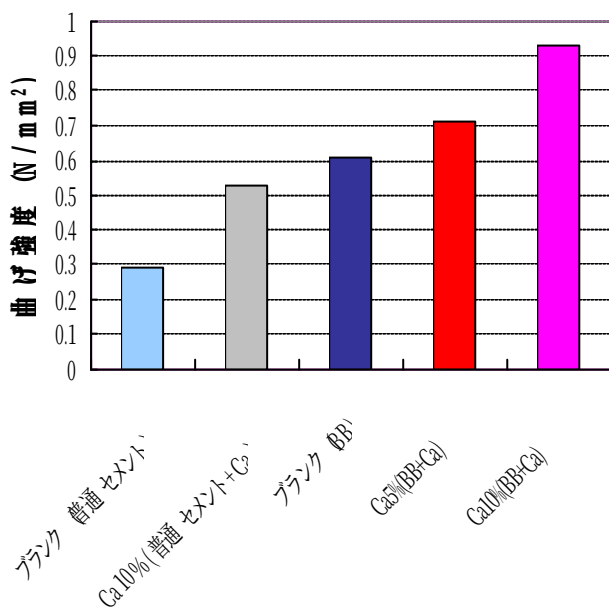


図-12 材齢 28 日における曲げ強度

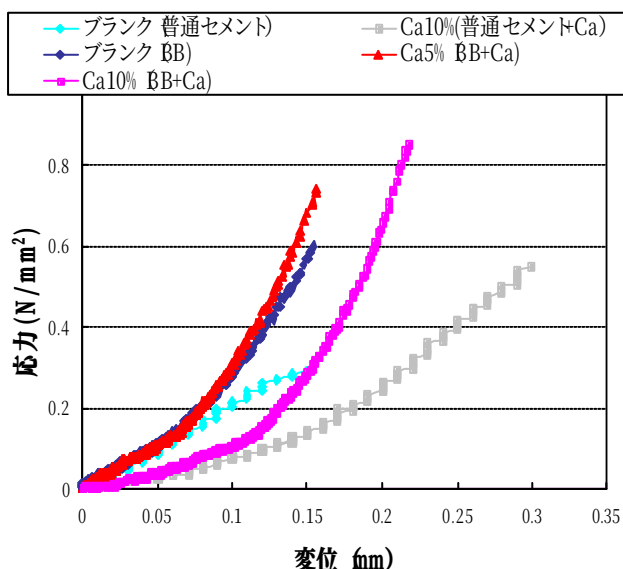


図-13 材齢 28 日の変位と応力の関係

を得られることも確認した。また Ca 型ゼオライトの置換率を増加させることでも自己収縮ひずみは増加した。

3.4 曲げ強度

図-12 は各パラメータの曲げ強度を示している。Ca10%の強度はblankの約 1.5 倍であり、全体的な傾向としてゼオライトの混入率が高いほど曲げ強度が増加している。また高炉セメントにゼオライトを含ませたものは、高炉スラグを含まないものに比べて、1~2 倍の曲げ強度を持つ。図-13 からは、変位も置換率が高いほど大きくなることが分かる。

4. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 高炉スラグ混合セメントにゼオライトを混入することで自由収縮ひずみ量、自己収縮ひずみ量は、普通セメントを使用するよりも大きくなる。
- (2) 置換率増加に伴い、収缩量ひずみ量が大きくなる傾向があり、乾燥の影響を受けやすく、ひび割れが早期である。
- (3) ゼオライトの置換率が高いほど、圧縮・曲げ強度が増加する傾向が確認された。

謝辞

本研究で使用した高炉スラグ混合セメント・Ca 型ゼオライトは、石田積氏・庄司慎氏(電気化学工業株式会社無機材料研究センター)に提供していただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- 1) The Visible and Invisible Cracking of Concrete “Changing cement specifications could increase concrete durability”, ACI, 1998.
- 2) 木下貴史, 大下英吉: ゼオライトのイオン交換能に着目したセメントの耐ひび割れ性能向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.457-462, 2009
- 3) 泉英字, 皆川哲也, 笠井哲郎, 田澤栄一: セメントのアルカリ含有量が硬化体の収縮ひび割れ性状に及ぼす影響, Cement Science and Concrete Technology, No.57, pp.335-341, 2003