

コンクリートの自己収縮低減に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、高性能 AE 減水剤の開発により高流動・高強度コンクリートなどの高性能コンクリートが一般建築物にも広く使用されているが、水結合材比が小さく単位結合材量が多いこれらの高性能コンクリートでは、自己収縮が顕在化しひび割れが発生する危険性が増大することが指摘されている。コンクリートの自己収縮は水和反応が活発に進展する材齢 1 日程度で最も大きな値を示すため、自己収縮の発生メカニズムを解明するためにはこの初期の水和反応と対応させた検討が不可欠であるが、練り混ぜ直後から自己収縮を測定できる手法や内部の含水状態を測定する方法に関して統一的な手法の確立には至っていない。

自己収縮の発生機構については、毛細管張力理論をはじめ多くの理論が提案されているが、極初期のひずみおよび内部相対湿度と極めて重要な測定データが不十分なまま議論が展開されているのが現状であり、未だ統一された見解は得るには至っていない。

このような背景の下、本研究では、練混ぜ直後からの自己収縮ひずみおよび内部相対湿度測定方法を提案し、自己収縮に及ぼす影響要因を明らかにすると共に自己収縮ひずみ推定式を構築するものである。更に、内部乾燥や自己収縮に及ぼす材料調合の影響から自己収縮の作用機構および増減機構を明らかにし、高流動・高強度コンクリートの自己収縮低減方法を提案するものである。

第 1 章では、本研究の背景と目的、関連する従来の研究と当面の課題および本論文の構成について述べた。

第 2 章では、まず、低弾性ひずみゲージを用いた練り混ぜ直後からの自己収縮ひずみの測定方法を提案した。提案した測定方法に関して、ひずみゲージの前処理方法、ひずみゲージの被覆厚さの影響、ひずみゲージの熱特性と温度補正および供試体設置方向等の測定条件の影響について検討し、標準的な試験方法を設定した。得られたデータに関して、他の試験方法との比較により検証を行った結果、本試験法により最も早い材齢からひずみの計測が可能であることを確認すると共に、材齢 1 日以降の測定値は他の試験方法と同程度であることを確認した。

次に、セラミックセンサの電気抵抗を利用した供試体内部相対湿度の測定方法について提案し、セラミックセンサの電気抵抗と供試体内部湿度の間の良好な関係から、抵抗-相対湿度の換算式を得た。

第 3 章では、まず、セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの供試体を用い、水セメント比、混和材種類および置換率、骨材量が自己収縮ひずみに及ぼす影響を明らかにした。次に、得られた収縮ひずみに対し、材料・調合の影響をパラメタとする推定式を構築した。構築した自己収縮ひずみの推定式について、実測値および先行研究値との比較検証を行った結果、推定式は± 30% 程度の推定精度を有することが確認された。

第 4 章では、前章で確認した自己収縮ひずみに及ぼす材料および調合の影響に関し、その作用機

構および増減機構の観点から考察を加え、自己収縮低減に向けた材料および調合の対策案を示した。相対湿度の実測値と毛細管張力理論から推定した自己収縮ひずみの値は実測値と大きく異なった傾向を示し、自己収縮ひずみの挙動を毛細管張力理論のみで説明することが困難であることを確認した。一方、吸着水の化学ポテンシャルの増分と自己収縮ひずみの増分の関係について整理した結果、両者の関係は、水セメント比の差異やフライアッシュ、高炉スラグ微粉末の置換率に拘わらず一義的に表現できる事を示した。フライアッシュの自己収縮低減機構は、未反応フライアッシュ粒子によるマイクロフィラー効果と相対湿度低下抑制による収縮力低減効果であることを示した。更に、強度発現性や水和熱の低減など実施工での調合条件を考慮した高流動・高強度コンクリートの自己収縮低減策として、セメント容積の 30～60% をフライアッシュで置換する事を提案した。

第 5 章では、前章で提案したフライアッシュを用いた高流動コンクリートの自己収縮低減効果をマスコンクリートにて確認すると共に、フライアッシュの初期強度遅延対策として膨張材を併用した収縮ひび割れ制御手法の有効性について検討した。その結果、フライアッシュのみ混入した調合およびフライアッシュと膨張材を併用した調合において自己収縮ひずみの抑制効果が顕著に認められ、高温履歴を受けるマスコンクリートにおいてもフライアッシュの自己収縮ひずみ低減効果が確認された。

鉄筋の拘束影響範囲を 50mm と仮定し応力釣合から算定したコンクリートの平均応力と、マスコンクリート内の温度履歴を用い、CEB-FIP Model Code 90 から推定した引張強度により、応力強度比を算出した結果、混和材無混入で 1.0 であった応力強度比がフライアッシュの混入により 0.9 程度に改善され、フライアッシュと膨張材を併用した調合では、応力強度比が 0.6 と大きく改善された。

第 6 章は結論であり、本研究で得られた成果について総括した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 名 和 豊 春
副 査 教 授 恒 川 昌 美
副 査 教 授 三 上 隆
副 査 准教授 胡桃澤 清 文

学 位 論 文 題 名

コンクリートの自己収縮低減に関する研究

1990年代に入って社会基盤の長寿命化を可能とする耐久性に優れた高流動・高強度コンクリートなどの高性能コンクリートが開発され、広く普及しつつある。一方で、高性能コンクリートは、水結合材比が小さく単位結合材量が多いため、水和硬化過程における自己収縮が顕在化するため、ひび割れの原因となり、所要の構造性能や耐久性能を損なう危険性が指摘されている。

コンクリートの自己収縮は水和反応が活発に進展する材齢 0.5 日程度から発生するため、その発生メカニズムを解明するためには、練混ぜ直後から自己収縮を測定できる手法や 90% 以上の高い内部相対湿度での湿度変化を測定する方法が必要であるが、このような測定方法は確立されていなかった。このため、自己収縮の発生機構についても、未だ統一された見解を得るには至っていない。本研究は、練混ぜ直後からの自己収縮ひずみおよび内部相対湿度測定方法を提案し、自己収縮に及ぼす影響要因および作用機構を明らかにし、高流動・高強度コンクリートの自己収縮低減方法を提案したものである。

第 1 章は序論であり、本研究の背景、目的について述べるとともに、既往の研究動向ならびに本論文の構成について概説している。

第 2 章では、セメント硬化体の練混ぜ直後からの自己収縮ひずみを定量的に評価する手法として、低弾性ひずみゲージを用いた方法を提案している。そこでは、前処理方法、ゲージの諸元や測定値の解析に関して検討し、試験の標準的な方法や手順を示すとともに、有効性についても既存の他の測定方法との比較により検証を行い確認している。また、自己収縮が、基本的には水和反応過程での自己乾燥に起因することから、セラミックセンサーによるセメント硬化体中の内部相対湿度の変化を直接測定する方法についても提案している。これは、多孔体中の細孔中への水分凝縮が湿度変化に対応することに着目したものであり、自己収縮を生じさせる相対湿度 90% 以上での測定を可能としている。また、湿度測定の有効性は細孔空隙中の含水比の変動との対応から検証し確認している。

第 3 章では、自己収縮に及ぼす影響要因の確認と影響度の定量化を行っている。ここでは先ず、水セメント比、混和材種類、置換率および骨材量が自己収縮ひずみに影響を及ぼすことを明らかにしている。次に、得られた各材料・調合の影響要因を変数とする自己収縮ひずみの推定式を構築することを試み、2 つの変数で自己収縮ひずみの経時変化を推定できることを示している。なお、この 2 つの変数は、水セメント比、混和材種類、置換率および骨材量の関数で表され、構築した自己収

縮ひずみの推定精度は、従来の推定式の精度を上回ることを確認している。

第4章では、前章で確認した自己収縮ひずみに及ぼす材料および調合の影響要因の作用機構を解明し、前章で得た結果の一般化を試みている。そこでは、従来の毛細管張力理論による推定値は実測値と相反する傾向を示すことを明らかにする一方で、吸着水の化学ポテンシャル変分と自己収縮ひずみの増分との間に一義的な関係が認められることを明らかにし、自己収縮は水和物ゲルに吸着した水分の分離圧に起因することを示している。また、この分離圧説に立脚して、フライアッシュによる自己収縮の低減効果は未反応フライアッシュ粒子による拘束と相対湿度低下の抑制による分離圧低減に起因することを示し、自己収縮の防止対策を明らかにしている。

第5章では、前章の結果に基づいたセメント容積の30~60%をフライアッシュで置換する方法による高性能コンクリートの一種である高流動・高強度コンクリートの自己収縮低減策が性能改善のみならず環境負荷低減、経済性の面から有力であることを明らかにしている。また、フライアッシュを使用した自己収縮低減策について実物大の模擬試験体での実証試験を行い、フライアッシュおよびフライアッシュと膨張材を併用した調合において自己収縮ひずみの抑制効果が顕著に認められ、さらにコンクリート部材内に発生した引張応力/引張強度比がフライアッシュの混入により低減され高温履歴を受ける高流動・高強度マスコンクリートにおいてもフライアッシュの使用により自己収縮によるひび割れの危険性が低減されることを確認している。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果について総括している。

これを要するに、著者は、これまで挙動や作用機構が十分に解明されていなかった高性能コンクリートの自己収縮について、試作したひずみゲージやセラミックセンサーを用いて検討を行い、火力発電所から排出される産業廃棄物であるフライアッシュを用いた高性能コンクリートの自己収縮によるひび割れ防止対策を提案したものであり、コンクリート工学および資源リサイクル工学の発展に寄与するところ大である。よって、著者は、北海道大学(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。