

乾燥と载荷を受けるコンクリートの時間依存性応力解析法の高度化と検証

コンクリート研究室 名古屋 翼
主指導教員 下村 匠

1. はじめに

コンクリート構造物を設計する上で、コンクリートの収縮が拘束されることによるひび割れの発生を予測することは重要であるが、実構造物の設計段階での収縮ひび割れの予測技術はまだ確立されていないのが現状である。この理由として、コンクリート内部拘束と外部拘束の影響、乾燥中の水和反応に伴うコンクリート物性の経時変化や自己収縮の影響、乾燥と外力を受ける際に生じるクリープの影響などが複合的に進行するといった、乾燥収縮特有の事由が原因である。また、近年では骨材自身が大きく収縮する場合があると指摘されており、セメントペーストの収縮のみならず骨材の収縮をも考慮した収縮ひび割れ予測が求められる。

そこで本研究では、水和反応によるセメントペーストの自己収縮や物性変化、水分逸散によるセメントペーストの乾燥収縮や骨材の乾燥収縮などの影響を正確に抽出する実験を行うとともに、それらの影響を再現できる数値解析プログラムの構築を目指した。また、高度化した解析プログラムを用いて本研究室で行った既往の研究結果を再現解析し、応力解析法の適用性を統一的に検証するとともに、大断面を有する部材レベルでの試験体における適用性も検討した。

2. 時間依存性応力解析法の高度化

2.1 持続依存性応力解析法の概要

まず、本研究で用いる数値解析プログラムについて解説する。コンクリートを連続体として扱い、コンクリート内部の水分移動解析と各時間における応力解析を行う。

水分移動解析では、供試体の軸方向の水分移動

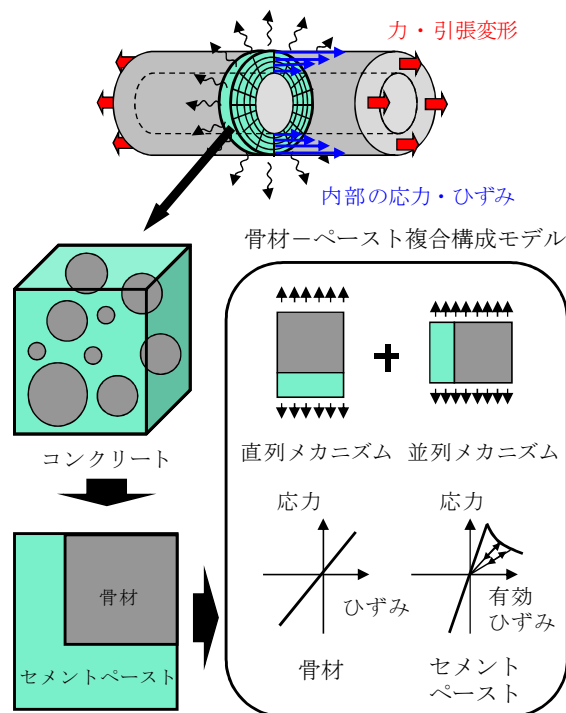


図-1 骨材-ペースト複合構成モデル

は無視し、軸方向と垂直な半径方向の移動のみ考慮する。数値解法は差分陰解法を用いる。

供試体の応力解析では、軸方向の応力、ひずみ成分のみを考慮し、平面保持を仮定する。

計算に用いる材料モデルは、本研究室で開発したセメントペースト中の細孔組織中における水分の微視的挙動に基づく水分移動と乾燥収縮モデル¹⁾、コンクリート中の骨材とセメントペーストの複合関係を直並列にモデル化した複合構成モデル²⁾である。複合構成モデルでは、収縮におけるコンクリート中の骨材の役割を、骨材がセメントペーストの体積を希釈する効果(直列効果)と骨材が近傍のセメントペーストの収縮を力学的に拘束する効果(並列効果)との組み合わせにより表現している(図-1)。この複合構成モデルは、骨

材自身の収縮が無視できるコンクリートを念頭に開発したものであり、従来その範囲で検証を行ってきた。今回は、骨材自身が収縮する場合への拡張を検討する。

さらに、従来の乾燥に伴うコンクリート中の各位置におけるセメントペーストの乾燥収縮のみならず、セメントペーストの水和反応による強度発現、自己収縮が生じた場合の検討も行う。

2.2 乾燥期間中の水和に伴うコンクリート物性変化の影響

乾燥の影響が収縮特性、変形特性、ひび割れ発生にどのような影響を及ぼすか検討するため、試験パラメータを養生日数(1,14,28日)とした一軸拘束収縮試験体を行った。その結果、早期で乾燥を受けるコンクリート(NC1)は、十分に養生を行ったコンクリートに比べひび割れ応力、有効弾性係数が小さくなった。また、乾燥中の強度発現の影響によりひび割れ付近での剛性低下があまり見られず直線的な挙動となった(図-3の実験結果を参照)。その現象を解析で表現するため、図-2のように、解析内で強度発現を考慮した。コンクリート中のセメントペーストの引張応力-有効ひずみ曲線を、その材齢における引張強度に応じて応力軸方向に等倍することで、強度発現を考慮することとした。図-3の実験結果と強度発現を考慮した解析結果の応力-有効ひずみ関係を比較すると、養生1日、養生28日ともに実験結果を良好に再現できることが確認された。

2.3 自己収縮がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響

自己収縮の割合が大きいと考えられる低水セメント比の供試体を作製し持続荷重試験を行った。養生期間中の自己収縮が拘束される影響を検討するため、養生期間中の拘束の有無を試験水準とした。その結果、養生期間中の自己収縮が拘束された供試体(HC28-R)では、養生期間中に自己収縮応力が導入されることや、養生期間中に拘束されない供試体(HC28)よりもひび割れ応力が低下する傾向が見られた(図-5の実験結果を参照)。

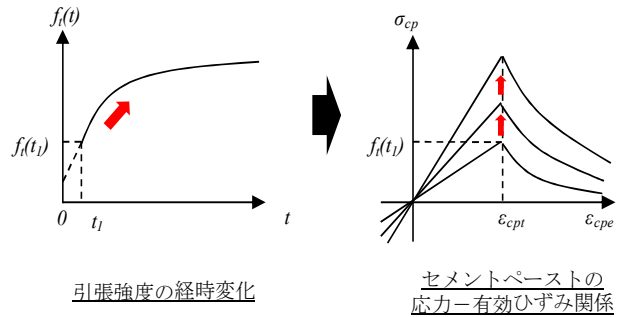


図-2 強度発現方法

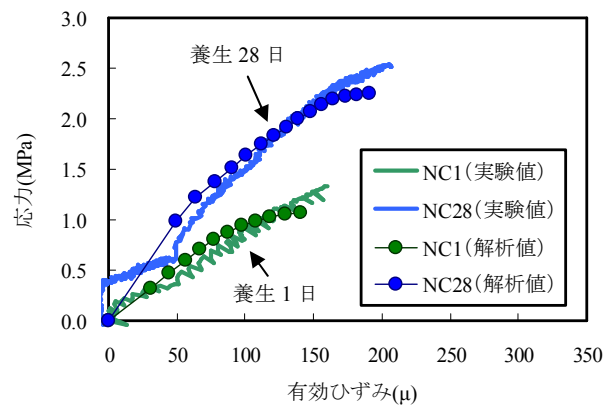


図-3 応力-有効ひずみ関係
(強度発現シリーズ)

そこで、数値解析において自己収縮の影響を考慮するため、解析プログラムの改良を行った。コンクリート要素内のセメントペーストの収縮ひずみを自己収縮と乾燥収縮の和として表現し、乾燥収縮は従来のモデルによりセメントペーストの水分量より求め、自己収縮は宮澤らの予測式³⁾を修正して算出した。したがって、乾燥収縮は各位置の水分量に応じた空間分布が考慮され、自己収縮は時間の関数として各位置のコンクリート中のセメントペーストに一樣に与えることとなる(図-4 参照)。

図-5に示す自己収縮を考慮した解析結果と実験結果を比較すると、養生期間中の自己収縮応力の導入経路およびひび割れ応力の低下が表現できている。これは、自己収縮により各要素のセメントペーストが一樣に引張られた状態にあるため、乾燥開始後のセメントペーストが早期に引張軟化域に入るためである。

2.4 骨材の収縮がコンクリートの収縮挙動に及ぼす影響

収縮性骨材を用いた供試体を作製し、持続引張試験を行った。試験パラメータは、骨材の種類と乾燥の有無であるが、ここでは骨材の種類の影響のみ検討する。骨材の種類は、収縮性骨材と普通骨材(収縮を見せない骨材)の2種類を使用し、セメントペースト量は同一としたコンクリート供試体を作製した。試験結果より、収縮性骨材によりコンクリートの収縮量が増大することが確認された。(図-7の実験結果を参照)。

そこで、解析内で骨材の収縮を表現するため、骨材単体の乾燥収縮試験結果を用いて定式化を行った。コンクリート中での骨材の収縮は、骨材単体で乾燥させるよりも乾燥の進行が遅いため、同じ乾燥時間における収縮量が小さいことが予想される。また、コンクリート供試体の表面付近と内部とは同じ時間における乾燥の程度が異なるため、骨材の収縮量は位置により異なると考えられる。よって、水分移動解析の結果より求まるコンクリート中の各位置のセメントペーストの相対湿度から骨材の収縮を計算することとした(以後、相対湿度の関数という)。骨材単体の収縮試験結果をもとに定式化した相対湿度と骨材の収縮の関係を図-6に示す。

上記のモデル化の妥当性を検証するために、本研究では、コンクリート中の各位置の骨材に、骨材単体の乾燥収縮試験結果と同じ収縮量を一樣に与えた場合(以後、時間の関数という)についても解析を行い、比較する。

図-7の比較より、時間の関数で一樣に骨材の収縮を考慮するよりも、各位置で骨材の収縮を考慮した相対湿度の関数の方が実験結果に近づくことが確認できた。しかし、乾燥が進むにつれて実験結果と解析結果は徐々に乖離していくことがわかる。したがって、今回考慮した影響の他にもコンクリート内で骨材の収縮が小さくなる要因があることが推察された。この要因についての検討は、今後の課題である。

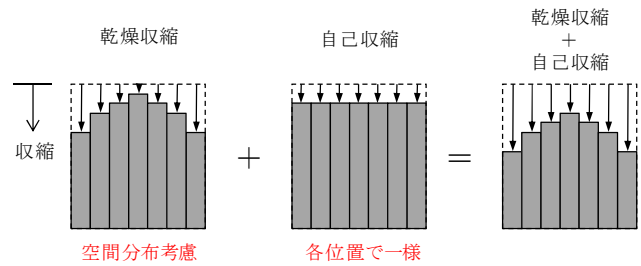


図-4 セメントペーストの非拘束収縮ひずみ分布の概念図

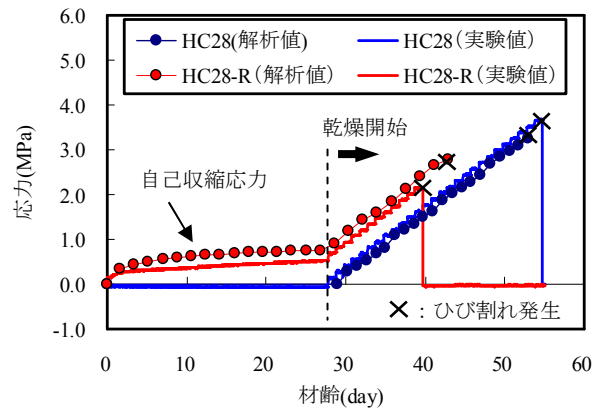


図-5 応力の経時変化(自己収縮シリーズ)

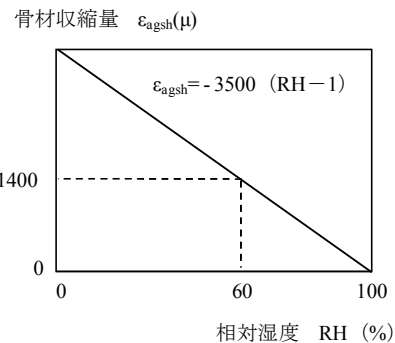


図-6 相対湿度による骨材収縮の表現方法

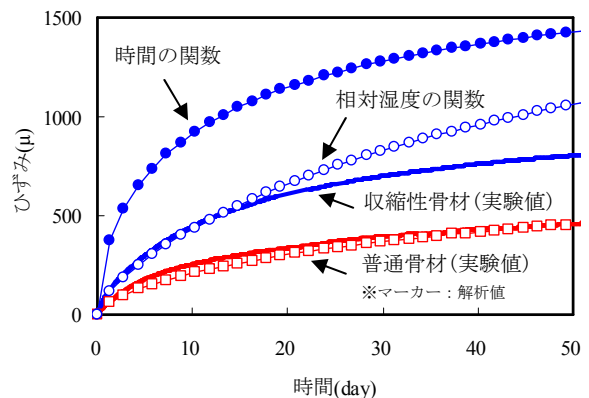


図-7 ひずみの経時変化(収縮性骨材シリーズ)

3. 既往の実験結果を用いた解析モデルの総合的検証

実構造物のコンクリートのひび割れ・変形挙動予測を行うためには、まず様々な条件下での引張変形挙動を表現できる解析モデルが必要である。そこで、過去に行われた様々な条件下での持続引張試験結果(計16シリーズ)を上述で改良した解析プログラムにより再現解析し、解析モデルの総合的な検証を行った。ここでは、その中のひとつを紹介する。

このシリーズは、乾燥収縮が拘束されることによる応力を瞬間的、あるいは吸湿により徐々に除荷するシリーズである。図-8,9は、瞬間除荷と吸湿除荷の応力-有効ひずみ関係の実験結果(実線)と解析結果(マーカー)の比較であるが、両者の除荷経路の違いを良好に再現できていることがわかる。また、解析において両者の違い表現できた理由を、コンクリートの内部挙動から考察しており、コンクリート中心部の挙動が原因であることを明らかにした(図-8,9の応力分布を参照)。瞬間的な除荷では、コンクリート中のすべての位置で引張応力が急激に低下する。しかし、吸湿による除荷では、表面付近は吸湿膨張により引張応力が低下するが、中心付近ではまだ吸湿状態に至っておらず引張応力の低下は見られない。この内部挙動の違いが、両者の除荷経路の違いとなって表れたといえる。その他にも総合的な検証より、遅れ弾性ひずみの発生、応力一定下での引張変形挙動(引張クリープ挙動)、繰り返し载荷における引張変形挙動などの発生原因を明らかにした。

4. 部材レベルでの収縮ひび割れ予測の検証

小柳らによって過去に報告されている一軸拘束ひび割れ試験⁴⁾の再現解析を行った。

壁厚150mm、幅300mm、試験長2500mmといった実部材と同等の断面を有する試験体における収縮ひび割れ予測を行い、貫通ひび割れ発生日数を良好に予測できることが確認された。また、配合や壁厚などを変化させたパラメータスタデ

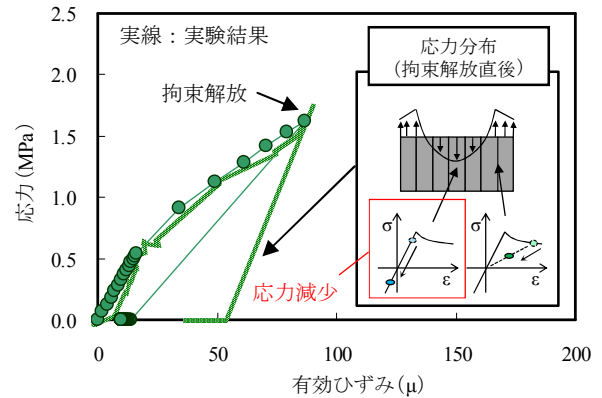


図-8 応力-有効ひずみ関係
(瞬間除荷シリーズ)

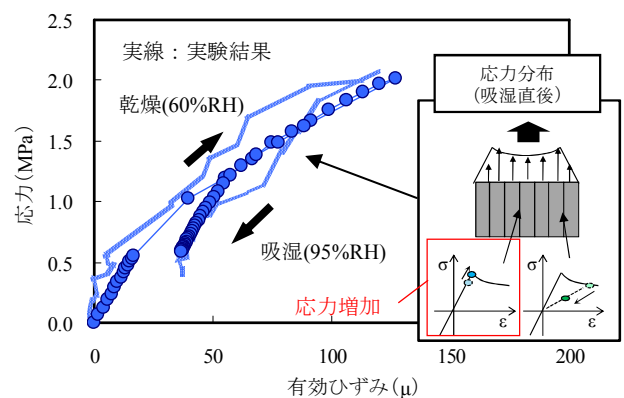


図-9 応力-有効ひずみ関係
(吸湿除荷シリーズ)

ィを行い、単位水量が小さいほど、また壁厚が大きいほど収縮ひび割れが生じ難い傾向を解析より明らかにした。

参考文献

- 1) 下村匠：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル,東京大学学位論文,1993.9
- 2) 小幡浩之,下村匠：骨材-ペースト複合モデルによるコンクリート部材の乾燥収縮応力解析,コンクリート工学年次論文集,Vol.21,No.2,pp.781-786,1996.6
- 3) 宮澤伸吾ほか：コンクリートの自己収縮に及ぼすセメントの種類の影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No.1,pp.429-434,2002.6
- 4) 小柳光生ほか：乾燥収縮による外壁のひび割れ幅予測に関する研究,コンクリート工学論文集,Vol.2,No.2, p59-69,1991.7