

## 論文の内容の要旨

論文題目 膨張材によるコンクリートの収縮低減挙動の  
マクロ予測に関する研究

氏名 崔 亨吉

コンクリートを構造物に使用する際に収縮によるひび割れが発生する現象は、セメントを結合材として使用する限り避けられないものである。コンクリートの収縮現象は、コンクリートが拘束されることにより引張応力を生じさせるため、構造物にひび割れを発生させる原因となる。このようなコンクリートのひび割れは、構造物の安全性、使用性、耐久性や美観に影響を及ぼすため、構造物において有害なひび割れを防止することは、コンクリート構造物の長寿命化や高耐久性および高性能化の観点から重要である。

このような状況のもと、日本土木学会のコンクリート標準示方書や日本建築学会の JASS 5 において、設計時に考慮するコンクリートの収縮率に対する見直しおよび乾燥収縮ひずみに関する規定が銘記しているなど、コンクリートの収縮ひび割れ抑制に対する要求が高まっている。

コンクリートの収縮によるひび割れを低減する方法として、一般的に石灰石骨材、収縮低減剤および膨張材などを適用することが多い。この中で膨張材とは、コンクリートを初期に膨張させることで、コンクリート部材に圧縮応力を導入し、ひび割れ抵抗性能を高めるものであり、体積変化に伴う収縮によるひび割れ抵抗性に対するすぐれた効果がある。しかし、膨張材の収縮低減およびひび割れ抑制効果について、物理・化学的に定量的な観点から検討し、膨張材の効果について明らかにした研究は少ないのが現状である。一方、膨張コンクリートの挙動は、配合、温度、養生や環境条件、さらに、構造物の拘束度などによって大きく影響されるため、それを十分に認識しない状態で構造物に適用し、膨張材の効果を十分に得られなかった事例も報告されている。すなわち、膨張コンクリートを使用する場合には、膨張コンクリートに関する知識や、そこに基づく的確な技術および判断が要求される。最近では、膨張材の水和反応および水和に伴う体積膨張や収縮低減などについて様々な研究および論議がなされているが、膨張コンクリートの適用においては、まだ解決しなければならない問題が多く、膨張コンクリートの普及に対して大きい課題になっている。

コンクリートの体積変化現象は、初期材齢でコンクリートにひび割れなどを発生させるだけでなく、コンクリートの耐久性にも大きい影響を及ぼし、さらに、これはコンクリートの強度発現、弾性係数およびクリープ変形などの性質とも複雑に組み合ってコンクリートに影響を与える。したがって、コンクリートに発生するひび割れを予測するためには、材齢の進行に伴って逐次変化するコンクリートの諸現象を正確に把握し、評価した上で、

各現象に対する相互依存性を考慮した予測手法が必要である。

本研究では、ひび割れの低減方案として膨張材を適用する場合、収縮低減効果やひび割れ抑制効果を定量的に評価するため、膨張材を混和したコンクリートに対して微視的な観点から検討し、膨張材を混和したコンクリートの圧縮強度、弾性係数などの力学的特性モデル、収縮、膨張などの体積変化モデルおよびクリープ現象モデルなどの理論的なモデルを構築する。一方、膨張材を混和したコンクリートの初期物性発現と、それに基づく応力の予測および予測した応力と引張強度の大小関係から、膨張材によるコンクリートの収縮低減およびひび割れ抑制効果に対するマクロ予測手法を提案することを目標とする。

上記の目標を達成するため、以下の3つの問題について詳しく検討する。

### 1. 膨張材の収縮低減効果およびひび割れ抑制効果に対する実験的検討

膨張材を混和したモルタルの非拘束実験および内・外部拘束条件が異なるリング型拘束収縮実験により、膨張モルタルの拘束膨張収縮特性、応力挙動、拘束度、応力弛緩およびひび割れ抵抗性に対して検討を行う。併せて、膨張コンクリートを対象として VRTM (Variable Restraint Testing Machine) による擬似完全拘束条件下における若材齢コンクリートの膨張収縮挙動や発生応力の評価および直接引張強度をベースとしたひび割れの発生可能性の検討を行ない、膨張材の効果について定量的に評価する。

### 2. 膨張材を混和したコンクリートのモデル化および検証

膨張材を混和したセメント硬化体の圧縮強度および弾性係数発現などの力学的特性のモデル化、体積変化モデル化およびクリープ現象に対する理論的なモデル化を試み、各モデルにおける適合性を実験によって検証する。一方、クリープ現象を拘束状態での応力変化の計算に用いて、膨張収縮ひずみが拘束された状態での発生応力の予測を行う。応力に予測において、先立って行ったリングテストおよび VRTM の結果を拘束条件下のデータとして用いて、モデルによって予測した応力の結果と比較、検討することでモデルの適合性を評価する。

### 3. 膨張コンクリートの実構造物への適用およびひび割れ抑制効果

実構造物レベルにおける膨張材の効果の定量評価を目的として検討を行う。膨張コンクリートおよび普通コンクリートを適用した実構造物の外壁およびスラブの膨張収縮挙動を測定し、実部材に発生する応力の評価および長期材齢におけるひび割れ調査を複合的に行ない、実構造物レベルでの膨張材の収縮低減効果やひび割れ低減効果を明らかにする。さらに、本研究のモデルの適用を実部材に拡張し、実部材に発生するひずみを予測する一方、実部材に発生する応力の予測において、既往の応力評価方法として、橋田らが提案している拘束圧による自由膨張ひずみ増分を低減する方法を採用し、実部材測定ひずみに基づく応力の算定結果と本研究のモデルによって算定した応力の結果と比較・検討することで、実構造物におけるモデルの適用性および有効性を評価する。最後に、本研究の結果をまとめ、膨張材を適用したコンクリートの収縮低減およびひび割れ制御効果に対するマクロ予測手法を提案する。

本論文では、全7章で構成され、各章の概要及び主な内容を下記のようにまとめる。

**第一章**では、本研究の背景、目的、研究の位置づけおよび範囲、論文の構成を論じた。

**第二章**では、既往文献に関する文献調査として、膨張材の開発の歴史と変遷について調べた上で膨張コンクリートに関する既往研究の調査とともに膨張材によるコンクリートの収縮低減効果およびひび割れ抑制効果について調査した。一方、拘束状態下での膨張材の効果と膨張コンクリートにおける膨張ひずみおよび膨張応力の推定手法について既往の文献から整理を行い、最終では、今後の膨張コンクリートの研究課題について述べた。

**第三章**では、膨張材の収縮低減効果およびひび割れ抑制効果など膨張材の効果について、実験的に検証することを目的として検討を行なった。非拘束収縮実験および内・外部拘束条件が異なるリング型拘束実験による膨張モルタルの膨張収縮挙動やひび割れ評価、拘束度、応力弛緩および発生応力の解析を行ない、膨張材の効果について検討した。さらに、可変拘束応力試験機（VRTM）による擬似完全拘束条件下における膨張コンクリートの若材齢の応力評価および直接引張強度をベースとしたひび割れ発生可能性の検討を行い、膨張材による収縮ひび割れの抑制効果を検証した。

**第四章**では、3章から検討した膨張材の効果について、微視的な観点から検討し、膨張材を混和したコンクリートのモデル化を試みた。膨張材を混和したセメント硬化体の圧縮強度および弾性係数発現などの力学的特性、収縮および膨張などの体積変化現象、クリープ現象などについて、理論的なモデルを構築した。そのために、各モデルの構築において、いくつかの側面に焦点を絞って考察し、膨張材の収縮低減およびひび割れ抑制効果に対する定量的な検討とその挙動の予測が可能なモデルを提案した。

**第五章**では、4章のモデルにおいて、各モデルの適合性について検証を行った。一方、モデル化したクリープ解析によって膨張収縮ひずみが拘束された状態での発生応力の予測を行った。応力の予測は、3章で行ったリングテストおよびVRTMの結果を拘束条件下のデータとして用いて、モデルによって予測した応力の結果と比較、検討することでモデルの適合性を検証した。

**第六章**では、実構造物レベルにおける膨張材の効果の定量評価を目的として検討を行った。膨張コンクリートおよび普通コンクリートを適用した実構造物の外壁およびスラブの膨張収縮挙動を測定し、発生応力の評価および長期材齢におけるひび割れ調査などを複合的に行ない、実構造物レベルでの膨張材の収縮低減効果やひび割れ低減効果を明らかにした。一方、本研究のモデルの適用を実部材へ拡張し、実部材に発生するひずみを予測する一方、実部材に発生する応力の予測において、既往の方法による応力の算定結果と本研究で提案したモデルによって算定した応力の結果を比較することで実部材におけるモデルの適用性を検討し、最後には、膨張を適用したコンクリートの収縮低減およびひび割れ抑制効果に対するマクロ予測手法を提案した（図1）。

**第七章**では、本研究の成果および今後の課題について総括して述べた。

# 膨張材を混和したコンクリートの収縮低減およびひび割れ抑制効果のマクロ予測

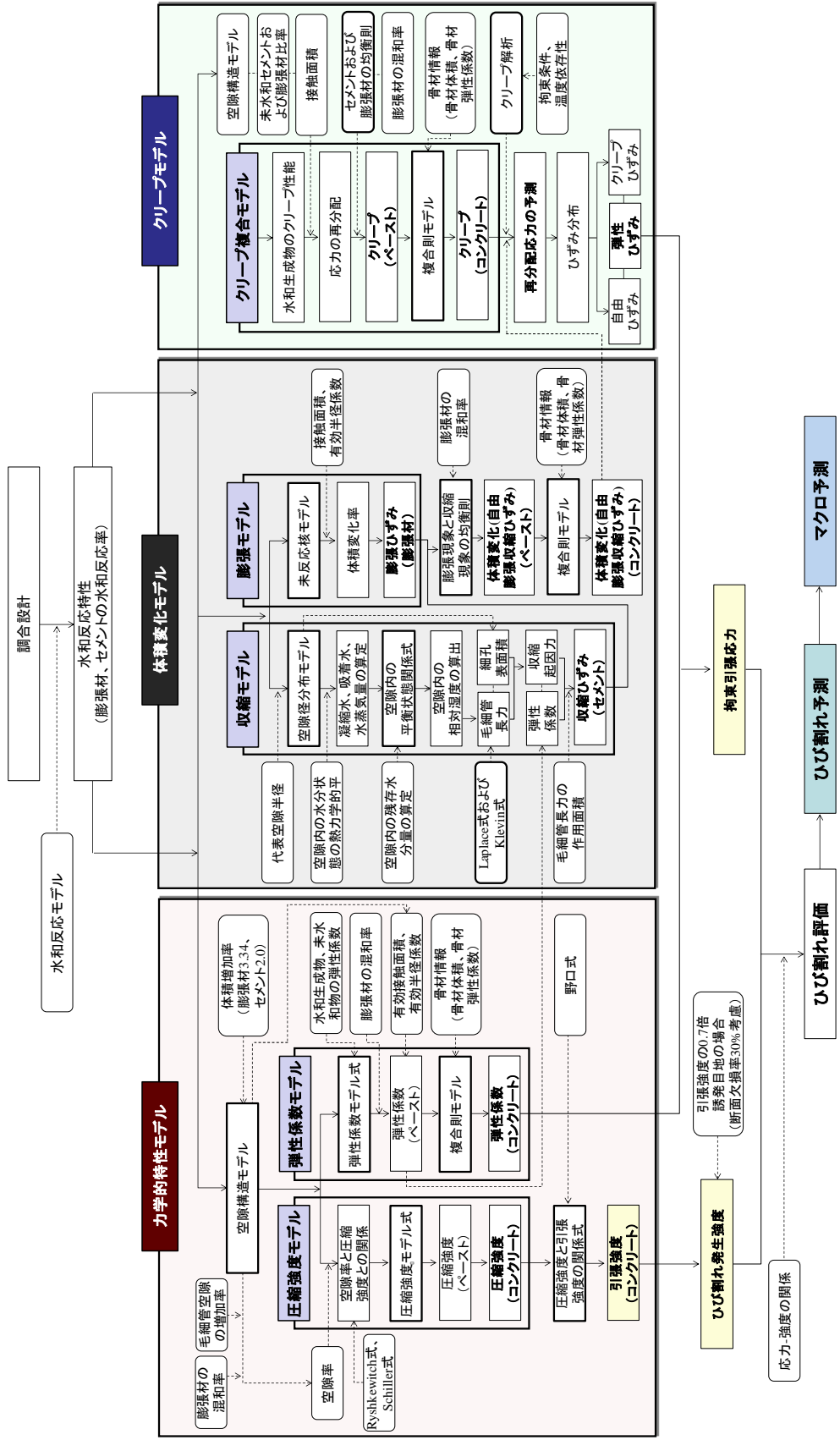


図1 マクロ予測フロー

