

論文の要旨

題目：コンクリートの収縮ひび割れに起因する RC 建築物劣化の制御技術に関する研究 (Study on Controlling Techniques for Deterioration of RC Building Caused by Shrinkage Cracks of Concrete)

氏名 張 玉露

本研究は、RC 建築物の長寿命化という目標に対して、コンクリートの収縮ひび割れに起因する建築物の劣化を制御・補修することを目的として実施した。

本論文は、第 1 章から第 6 章で構成され、各章の研究内容は以下のとおりである。

第 1 章では、序論として本研究の背景である RC 建築物の耐久性を向上する方策について、調査設計段階におけるコンクリート材料の高強度・高耐久性化技術および、供用段階におけるコンクリート部材に生じたひび割れの補修技術の現状を記したうえで、本研究の目的と概要を述べた。

第 2 章では、既往の研究を示している。まず、高強度・超高強度コンクリート材料の活用において、膨張材による「自己収縮ひび割れ」を制御する技術に関して、調査設計方法を確立されていない課題を示した。また、既存建築物のひび割れの補修技術について、補修工法・補修材を選定する際にひび割れの開閉挙動に及ぼす影響要因を明らかにする必要があるという課題を説明した。

第 3 章では、膨張材の自己収縮低減機構に関する検討結果を示している。

まず、実務で一般的に使用されている CSA 系膨張材と石灰系膨張材の二種類を使用した超高強度セメントペースト試験体を対象とし、膨張材の添加により自己収縮量を制御することを試みた。得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 超高強度セメントペーストにおいて、材齢約 24 時間以降の段階で観察される膨張ひずみ成分は、膨張材の水和反応により生成された水酸化カルシウム量と高い相関性を示し、この期間における水酸化カルシウムの生成が自己収縮の低減に寄与することを明らかにした。
- (2) 従来、膨張材の膨張効果における主要因とされていたエトリングサイトの生成は、自己収縮低減効果と明確な関連性が認められなかった。しかしながら、本実験で実施した XRD/リートベルト解析で検知できない寸法・形状のエトリングサイトが膨張に寄与している可能性は否定できないため、本実験の結論を検証するためには SEM 観察の詳細的検討を要することを示した。

次に、上記のセメントペーストを対象として得られた知見をコンクリートへ適用するために、骨材の拘束効果を「複合則理論」に基づく評価する必要があると考えて実験検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 膨張材を添加した超高強度モルタルの自己収縮において、膨張・収縮成分のいずれに対しても、骨材は概ね同程度の拘束効果を与えることが明らかにされた。複合則理論による体積変化の推定精度を確保するためには骨材の物性（弾性係数、ポアソン比など）を適切に取得する必要がある。
- (2) 線膨張係数に及ぼす骨材の拘束効果の影響に関しては、Hobbs モデルのように骨材そのもの体積変化量を考慮できる複合則理論でなければ十分な精度が確保できないことを確認した。

第 4 章では、膨張材の最適使用量に関する検討結果を示している。

本章では遅れ膨張の発生条件を特定することで、遅れ膨張のメカニズムを理解し、遅れ膨張が生じない張材の最適膨添加量を見出すため実験的検討を実施した。ここで得られた成果を以下に示す。

- (1) 材齢 7 日まで、膨張材添加率が大きい程、超高強度モルタルの自己収縮ひずみ低減効果が大きくなり、加えてこの間に生成された水酸化カルシウム量も自己収縮ひずみ低減量と相関がみられることを確認した。この時、膨張材を結合材の内割 7%置換した場合に、初期 40°C で養生すると、材齢 7 日時点でのモルタルの自己収縮ひずみをほぼ 0 まで抑制可能であった。

- (2) 材齢 7 日以降においては、材齢 7 日まで 20℃で養生した試験体について、膨張材添加率が 5%以上の試験体には遅れ膨張が発生した。湿度条件のいずれにも、遅れ膨張が発生したため、膨張材による遅れ膨張の発生には外部からの水分供給が不要との知見が得られた。
- (3) 材齢 7 日まで 40℃と 90℃に養生した場合、湿度条件に関わらず、遅れ膨張が発生しなかった結果は、材齢初期に高温養生した場合、材齢 7 日時点で未反応の膨張材量が少ないためと解釈され、膨張材の過量添加による遅れ膨張の原因は、未反応膨張材の継続的な水和が原因と考えられた。
- (4) 膨張材の未反応率を定量化することを試みた結果は、膨張材添加率を 10%まで上昇させても、XRD/リートベルト解析によって未反応率を検知することは不可能であった。
- (5) 同様な膨張劣化現象である DEF 膨張と比較して検討し、本研究の範囲では初期に 90℃養生した試験体に DEF と思しき膨張劣化は一切確認できなかったため、膨張材の遅れ膨張のメカニズムは DEF による膨張機構とは異なるものと考えた。

第 5 章では、RC 建築物外壁に生じた乾燥収縮ひび割れの制御・補修に関する検討を実施している。

まず、日中の施工時刻に応じる壁面温度の日変動が左官モルタルの乾燥収縮ひび割れリスクに及ぼす影響に着目し、外壁温度日変動（上昇，下降）を模擬した温度条件で養生した左官モルタルひずみの経時変化を計測する上で検討を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 施工時刻を想定した条件（施工直後に温度上昇あるいは下降）においては、温度変動時に大きな膨張あるいは収縮ひずみが発生し、そのひずみがその後も残留する結果が得られた。ひずみの計測結果に加えて、左官モルタルのクリープの影響も含めて考慮し、下地コンクリートと左官モルタルを想定した簡易な FEM による左官モルタル内部の応力分布の解析結果は、施工直後に温度下降する場合は温度上昇する場合より、約 0.2MPa 程度大きいであった。
- (2) 左官モルタルに収縮低減剤の使用は、温度変動履歴に伴うひずみの発現を助長する可能性があるものの、長期的には、乾燥収縮ひずみを低減させることによって、下地コンクリートの拘束効果に起因する拘束応力を減じ、ひび割れリスクを低減させる。

次に、RC 壁躯体コンクリートに生じた乾燥収縮ひび割れを補修する際の重要情報として、乾燥収縮ひび割れの開閉挙動の長期間モニタリング並びに数値解析を用いた検証を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) RC 造壁に発生した乾燥収縮ひび割れの開閉挙動は、年変動のように壁面温度が比較的緩やかに変化する場合は、部材断面方向に温度分布がほとんど生じず、ひび割れはどの断面においても一様に挙動する。これに対して、日変動のように、壁部材断面に温度勾配が生じている場合には、壁全体がそり変形を引き起こし、温度上昇時により急激に閉じ、反対側のひび割れは逆に開く方向に挙動する結果が得られた。
- (2) ひび割れ開閉挙動は、周辺部材の拘束条件の影響を受け、同一のひび割れであっても測定する場所（拘束度）によって異なる開閉挙動を示す。

第 6 章では、本論文で得られた成果を取りまとめ、今後の課題も併せて示している。