

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月25日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560580

研究課題名（和文） RC 造構造物の水熱同時移動の体積変化に伴う拘束時の微細ひび割れ局所化制御法の開発

研究課題名（英文） Development of control method about micro crack localization for restrained volume change which occurred by simultaneous movement of moisture and heat in RC structure

研究代表者

中村 成春 (NAKAMURA SHIGEHARU)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：50282380

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンクリートの乾燥における水分蒸発と熱拡散を、水と熱の同時移動より考慮し、その環境に伴う体積変化が及ぼすひび割れパターンを検討した。また、引張クリープ試験と引張リラクセーション試験から、拘束状態下の破壊進行領域に対する微細ひび割れ局所化メカニズムを検討した。さらに、RC 造構造物の耐久性向上に重要な収縮ひび割れ幅に対して、微細ひび割れの累積を考慮した制御技術を検討した。その結果、ひび割れパターン、微細ひび割れ局所化メカニズムおよび収縮ひび割れ幅について、引張クリープひずみと微細ひび割れの累積の関係づけによる解析法が構築できた。

研究成果の概要（英文）：In consideration of the moisture evaporation and thermal diffusion in dryness of concrete, this research examined the crack pattern which the volume change accompanying those environment does from simultaneous movement of water and heat. Moreover, the micro crack localization mechanism to fracture process zone under a restricted state was examined from the tensile creep test and the tensile stress relaxation test. Furthermore, the control method in consideration of accumulation of the micro crack was examined to shrinkage crack width important for the improvement in durability of RC structure. As a result, the analysis method has been built by relating of tensile creep strain and accumulation of micro crack, about crack pattern, micro crack localization mechanism, and shrinkage crack width.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	4,000,000	1,200,000	5,200,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：コンクリート，ひび割れ，クリープ，リラクセーション，引張力学特性

1. 研究開始当初の背景

RC 造構造物のひび割れは耐久性や美観を損なうことから社会的関心が高く、日本建築学会から、2006 年 2 月に収縮ひび割れ制御指針ならびに 2008 年 2 月にマスコンクリート温度ひび割れ制御指針が刊行された。このような RC 造構造物の耐久性向上の社会普及の牽引となる関連指針の中で、収縮ひび割れ制御指針では、ひび割れ制御のための性能設計手法の基本的枠組みを提示し、国内外を通じて画期的となるひび割れ発生確率や収縮ひび割れ幅の定量的な性能設計法が規定された。一方、ユーロコードや ACI など、世界に影響を及ぼす国際規格の指針では、ひび割れ発生確率やひび割れ幅の性能規定化は行われていない。すなわち、世界に先駆けて、収縮ひび割れ幅の性能規定化が実現された。しかし、ひび割れ発生確率や収縮ひび割れ幅を評価する時に重要な拘束応力解析にて、拘束条件とひび割れ発生基準の関係に不明瞭な点がいくつかある。

RC 造構造物のかぶりコンクリートは、雨水や日射によって、水分逸散と熱変化の水熱同時移動により常に体積変化が生じ、構造物として架構した場合、内部拘束や外部拘束を受け、収縮に対して拘束引張応力が作用する。ここで、コンクリートはクリープを生じる材料である。このため、各種拘束時に作用している拘束引張応力をリラクセーションさせる引張クリープひずみが生じ、その収縮と引張クリープ・リラクセーションの作用によって形成される引張力学状態が限界値に達した時にひび割れる。すなわち、引張クリープ・リラクセーション作用は、見かけ上、拘束引張応力を緩和させて、ひび割れ発生を遅延させ、ひび割れしにくくしている。

一方、コンクリートは、拘束収縮の有無に関わらず引張破壊時において、まず微細ひび割れが発生し、それが累積成長して局所化し、巨視ひび割れに至る破壊進行領域を形成する。本研究では、拘束収縮下の破壊進行領域の進展拡大を現す微細ひび割れの累積増加について、引張クリープひずみの増加と対応していると考え、この微細ひび割れによる内部組織の損傷の局所化、すなわち微細ひび割れ局所化の制御手法が、ひび割れ発生基準と関係があると考えた。

2. 研究の目的

(1) コンクリートの乾燥時の水分逸散と温度変化時の熱拡散を水・熱同時移動より捉えて、その環境に伴う体積変化が及ぼすひび割れパターンを検討する。

(2) 引張クリープ試験と引張リラクセーション試験から、拘束状態下の破壊進行領域にあたる微細ひび割れ局所化メカニズムを検

討する。

(3) RC 造構造物の耐久性向上に重要な収縮ひび割れ幅に対して、微細ひび割れの累積を考慮した制御技術を検討する。

3. 研究の方法

(1) 水・熱同時移動による乾燥収縮における網目状ひび割れパターン形成の検討

水化学ポテンシャルを変数とした水・熱同時移動による乾燥解析と、弾性バネの連成で要素構成した立体トラス格子の変形解析と、バネ要素の仮想切断に伴うバネ要素内の作用軸力の再配分繰り返しによるひび割れパターン形成解析を連成させて、微細ひび割れの累積を想定した材料不均一性を考慮した乾燥収縮における網目状ひび割れパターン形成を解析的に検討した。

(2) 引張クリープ・リラクセーション作用における引張力学特性の検討

若材齢における高性能モルタルについて、拘束応力を一定に作用させた引張クリープ試験および自由収縮ひずみ量の変化を一定に制御した引張リラクセーション試験を実施し、微細ひび割れ累積による拘束引張力学特性を実験的に検討した。また、step by step 手法により拘束引張力学特性を解析的に検討した。

(3) RC 造構造物における微細ひび割れの累積をヤング係数の低減で表現したときの収縮ひび割れ幅の影響の検討

RC 造構造物のコンクリートと鉄筋の間の付着特性を考慮した収縮ひび割れ幅の解析法について、日本建築学会収縮ひび割れ指針で取り扱われている収縮ひずみ式と単位クリープひずみ式を組み込んだ解析法を構築した。また、引張クリープひずみは、微細ひび割れが累積した現象との考え方から、引張クリープ作用により弾性体部を損傷させていると考え、弾性体部のヤング係数を低減させて損傷を表現し、引張クリープ作用の発現が収縮ひび割れ幅に与える影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 水・熱同時移動による乾燥収縮における網目状ひび割れパターン形成の検討

図 1 に、変形解析へ受け渡した乾燥時間 1, 12, 24 時間の温湿度解析結果を示す。水・熱同時移動による乾燥解析が評価でき、この乾燥時間 1, 12, 24 時間の温湿度解析値を、変形・ひび割れ解析へ受け渡した。

図 2 に、微細ひび割れが累積して材料不均一性が現れた状況を考慮し、疑似乱数の発生に基づき約 5% のバネ要素のバネ定数を 0 に仮想切断した初期条件によるひび割れパター

ン形成の解析結果を示す。非対称なひび割れパターンによる破壊進行領域の形成が評価できており、破壊進行領域の局所化に伴う網目状ひび割れパターン形成が評価できた。

図3に、バネ要素の作用軸力の解析結果を示す。ひび割れパターン形成の軌跡は、バネ要素の仮想切断に伴う作用軸力の再配分による破壊除荷手続き繰り返しの変形解析が必要であり、そのとき、破壊基準となる引張強度が小さいと、破壊除荷手続き繰り返し計算が多くなり、仮想切断するバネ要素が増加し、結果的にひび割れ密度が高い破壊状況になることが評価できた。

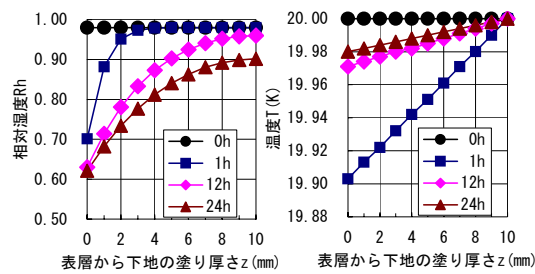
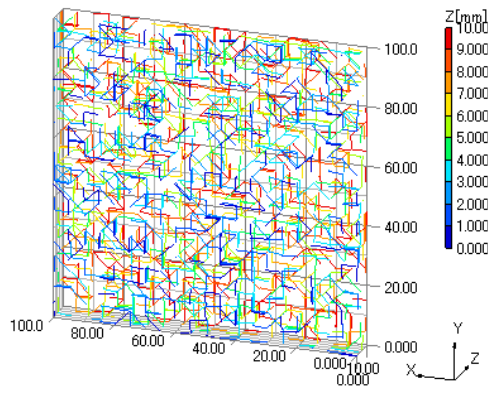
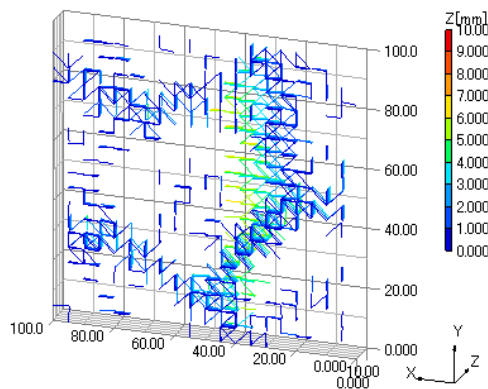


図1 水・熱同時移動の温湿度解析結果



(a) 疑似乱数によるバネ要素の初期仮想切断



(b) 網目状ひび割れパターン結果
図2 材料不均一性を考慮した網目状ひび割れパターン形成の解析結果

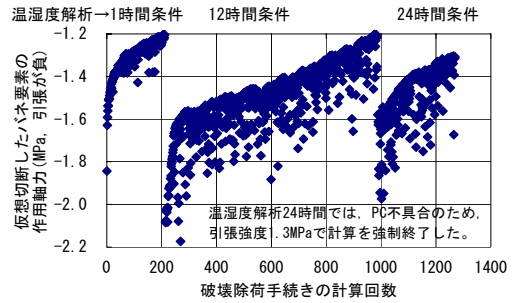


図3 破壊除荷手続き計算ごとに得た仮想切断バネ要素の作用軸力の解析結果

(2) 引張クリープ・リラクセーション作用における引張力学特性の検討

図4および図5に、引張クリープ試験および引張りリラクセーション試験を対象とした実験結果と step by step 手法による拘束引張力学特性の解析結果の比較を示す。

図4の収縮ひずみと载荷開始瞬間弾性ひずみと引張クリープ試験の全ひずみと引張りリラクセーション試験の全ひずみの解析結果は、载荷開始材齢1日と6日とも、実験結果と良く対応している。

図5の引張クリープ試験の载荷開始材齢1日の導入応力は、引張りリラクセーション試験の導入応力に対応させたため、解析結果は実験結果より若干小さくなっているが、引張りリラクセーション試験の緩和応力の解析結果は、実験結果と良い対応を示している。

図6に、引張クリープ試験および引張りリラクセーション試験から得られた拘束緩和応力と拘束緩和ひずみの関係を示す。クリープによるひずみとその緩和による応力の発生状況は、正比例の関係にはないことが解析結果から評価できた。自由ひずみと载荷開始瞬間弾性ひずみと作用応力増分ひずみが適切であれば、step by step 手法の考え方を通して、引張りリラクセーション試験の緩和応力が評価できた。

引張りリラクセーションと引張クリープの特性を比較すると、導入応力強度比が小さい範囲では、拘束開始初期での応力緩和が顕著で、拘束を緩めて収縮ひび割れ発生の危険性が小さくなるが、徐々にクリープの影響が現れて、収縮ひび割れ発生の危険性も高まってくる。そして、導入応力強度比が高い範囲の条件では、引張クリープの影響が、すぐに現れ、ひび割れ発生の危険性を増している状況が評価できた。

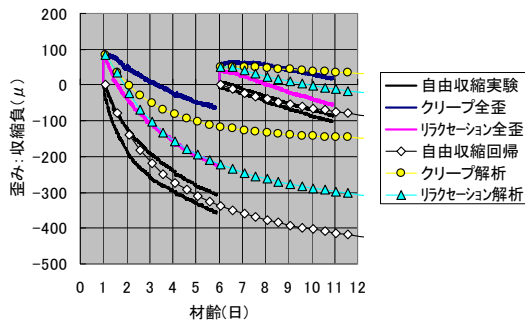


図4 引張クリープ試験および引張りリラクセーション試験によるひずみの経時変化の結果

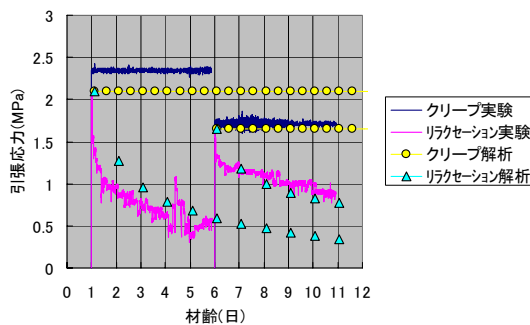


図5 引張クリープ試験および引張りリラクセーション試験による引張応力の経時変化結果

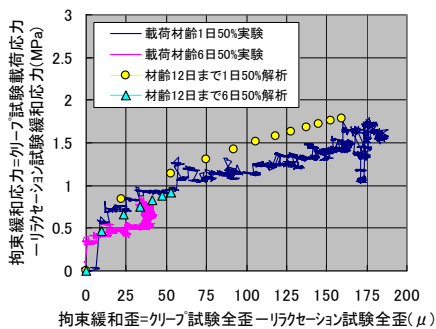


図6 引張クリープ試験および引張りリラクセーション試験による拘束緩和応力と拘束緩和ひずみの関係

(3) RC 造構造物における微細ひび割れの累積をヤング係数の低減で表現したときの収縮ひび割れ幅の影響の検討

RC 造壁部材を対象にして、図7に収縮ひずみと引張クリープひずみの解析結果を示す。材齢が進むと収縮ひずみが徐々に作用し、部材の拘束に伴って引張クリープひずみも増加していくことがわかる。

図8に、引張クリープひずみが作用するとともにヤング係数を低減させていったヤング係数の解析結果を示す。また、その結果より、図7中に、収縮に伴う作用拘束引張応力が変わらないことから、ヤング係数の低減に

伴う弾性ひずみが増加していく結果を示す。

図9に、引張クリープ作用を損傷とみなした時の弾性体部のヤング係数低減が及ぼすひび割れ幅の影響の解析結果を示す。1本目のひび割れ幅の経時変化は、引張クリープひずみが大きくなるにつれて、内部組織損傷の累積により最大ひび割れ幅が小さくなって、次のひび割れ発生に移行することが評価できた。2本目以降のひび割れは、内部組織損傷の影響からひび割れ発生日が早くなって、ひび割れ危険性が高まっていることが評価できた。

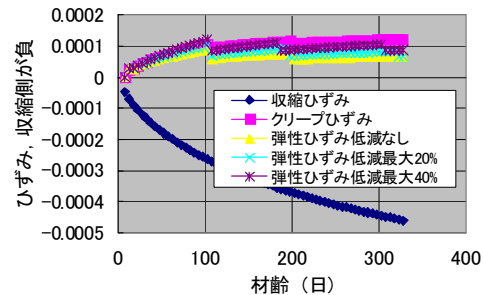


図7 収縮ひずみと引張クリープひずみの解析条件とヤング係数低減に伴う弾性ひずみの解析条件

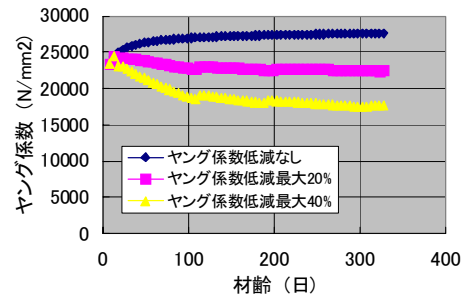


図8 クリープひずみの発現に併せて低減したヤング係数の発現

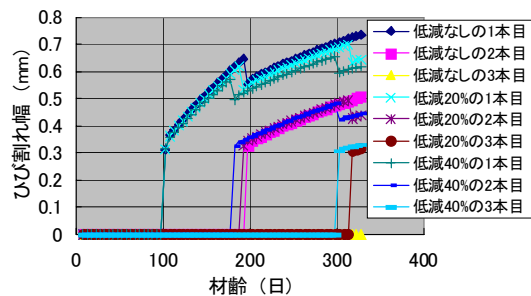


図9 引張クリープひずみの発現に伴いヤング係数を低減させた収縮ひび割れ幅の解析結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ①中村成春, RC造壁の待機冗長系並列モデルによる信頼性評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, 2011, pp. 773~778
DOI:なし
- ②中村成春, ニー ムイ ゲッチ, 中性化及び塩分浸透に対するかぶりコンクリート品質の信頼性評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, 2010, pp. 611~616
DOI:なし
- ③井坂幸俊, 中村成春, 若材齢時の繊維補強高強度モルタルにおける引張リラクセーションおよび引張クリープに関する実験, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.31, 2009, pp. 649~654
DOI:なし
- ④中村成春, 乾燥収縮における網目状ひび割れパターン形成に関する数値解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.31, 2009, pp. 697~702
DOI:なし

〔学会発表〕(計10件)

- ①中村成春, 既存解析法によるRC造壁部材の収縮ひび割れ幅に関する一考察, 日本建築学会2012年度大会(東海)学術講演会, 2012年9月12日, 名古屋大学(愛知県)
- ②中村成春, RC造壁部材の収縮ひび割れ幅における既存解析法に関する一考察, 平成24年度日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校(大阪府)
- ③山下宗時, 中村成春, 各種複合則によるコンクリートの収縮特性に関する一考察, 平成24年度日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012年6月17日, 大阪工業技術専門学校(大阪府)
- ④山根大二, 中村成春, RC造外壁の信頼性における待機冗長性に関する基礎的研究, 日本建築学会2011年度大会(関東)学術講演会, 2011年8月25日, 早稲田大学(東京都)
- ⑤中村成春, 左官塗仕上げ材における網目状ひび割れの発生に関する基礎的研究, 日本建築学会2011年度大会(関東)学術講演会, 2011年8月23日, 早稲田大学(東京都)
- ⑥ニー ムイ ゲッチ, 中村成春, タイルの効果を考慮したかぶりコンクリートの信頼性評価に関する研究, 日本建築仕上学会2010年度大会学術講演会(第21回研究発表会), 2010年10月22日, 東京大学(東京都)
- ⑦ニー ムイ ゲッチ, 中村成春, 中性化及び塩分浸透に対するかぶりコンクリート耐

久性の信頼性評価法に関する研究, 日本建築学会2010年度大会(北陸)学術講演会, 2010年9月11日, 富山大学(富山県)

- ⑧中村成春, 若材齢高性能モルタルの step by step 解析による引張リラクセーションと引張クリープの特性比較, 日本建築学会2010年度大会(北陸)学術講演会, 2010年9月9日, 富山大学(富山県)
- ⑨中村成春, ハイブリッド・ファイバー・コンクリートにおける若材齢時の引張リラクセーションと引張クリープの比較, 日本建築学会2009年度大会(東北)学術講演会, 2009年8月29日, 東北学院大学(宮城県)
- ⑩根本裕規, 中村成春, 乾燥収縮における網目状ひび割れパターン形成に関する基礎的研究, 日本建築学会2009年度大会(東北)学術講演会, 2009年8月29日, 東北学院大学(宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 成春 (NAKAMURA SHIGEHARU)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 50282380

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし