

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 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760430

研究課題名（和文） RCひび割れ離散解析手法の時刻歴応答解析への拡張

研究課題名（英文） Extension of discrete-like crack analysis method for RC to hysteresis response analysis

研究代表者

佐藤 裕一（SATO YUICHI）

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20293889

研究成果の概要（和文）：地震時の鉄筋コンクリート（RC）構造物の損傷状況を視覚的に把握するため、ひび割れ離散解析手法を開発し、これを3次元時刻歴応答解析に拡張した。ひび割れ近傍の応力集中・緩和、ひび割れ交差処理、付着割裂判定、付着応力～滑り関係仮定の改良により、繰返し荷重下のひび割れ状況を高精度で効率よく解析できるプログラムを構築した。

研究成果の概要（英文）：Discrete-like crack analysis method is developed to visualize damage conditions of reinforced concrete structures subjected to seismic loads. The method is extended to three-dimensional hysteresis response analyses. Precise and rapid analyses of crack conditions under repeated cyclic loads are realized by developing a numerical program through improvements on stress concentration/release estimations, crack crossing estimations, bond splitting judgments, and bond stress-slip assumptions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：

1. 研究開始当初の背景

地震によって、鉄筋コンクリート（RC）構造物に生じたひび割れが有害な影響を与えるか否かの推定は必ずしも容易でない。また、既存 RC 構造物にひび割れが発見された場合、その影響の推定も、同様に困難である。

ひび割れ幅を損傷状況に関連付ける手法は、構造物損傷評価に有効である。複雑な構造物を解析するための最も有力な手法として、有限要素法（FEM）が挙げられる。近年

の RC 構造物向け FEM の進歩は目覚しく、3次元解析や時刻歴応答も実施できるようになりつつある。ただし従来の FEM 技術では、ひび割れ分布計算の要素分割依存性が強く、正確なひび割れ位置や、ひび割れ開口幅の算定は満足に実施できない。

2. 研究の目的

従来手法の短所を克服するため、要素分割依存性を大幅に低減したひび割れ解析手法

の開発し、これを3次元の時刻歴応答解析に拡張する。

FEMによるRC構造物解析は、これまで部材レベル解析が主体であったが、近年、膨大な要素数を必要とする構造物の全体解析の試みも、申請者を含む内外の技術者によって始められている。

全体構造物解析では、計算機容量の制約から粗い要素分割を用いざるを得ず、ひび割れ分布予測精度が低下しやすい。提案手法を用いれば、粗い要素分割であっても現実に即したひび割れ状況が再現できる。また提案手法の適用により、「RC構造物にどのようなひび割れが入るのか？」という設計者・管理者の疑問に、視覚的に応えることができる。

3. 研究の方法

- (1) 既往研究の荷重、除荷、再荷重時のひび割れ開口進展データベースを作成する。このデータベースに基づき、ひび割れ進展処理サブルーチンを製作する。
- (2) 既存ひび割れからの進展を判定するため、開口による応力緩和と応力集中を評価する手法を確立する。
- (3) ひび割れの交差処理技術を確立する。正負繰返し時は勿論、荷重過程や除荷過程でも、局所的な応力状態によってはひび割れの交差が発生し得る。ひび割れの交差処理には、特に旧ひび割れ端部との誤った接続を防ぐ必要がある。これは、ひび割れ進展処理時に評価された応力集中が、新ひび割れの方向を変化させるために発生する問題であり、これを解消するための機能を構築する。
- (4) 以上の手順で構築した解析プログラムの性能を検証するための実験と解析を実施する。

4. 研究成果

- (1) 正負繰返し荷重下でのひび割れ判定・応力再配分手順の確立：計算全体の流れにおいて、応力緩和、応力集中、ひび割れ軸入れ替え、交差処理等の順序を試行錯誤の末に確定し、理論的に合理性があり、かつ数値処理効率も最適な手順とした（図1）。

- (2) 要素分割依存性の低減：計算処理手法を構築する過程で、要素分割依存性の低減を一定程度実現した。図2は最も基本的な一軸引張検証解析の結果である。試験体は長さ1,680 mmのコンクリート角柱に異型鉄筋1本を挿入し、鉄筋比を1.32%、0.72%、0.50%の3通りに変化させたものである。これらの試験体に対して、長さ方向の要素分割数を162, 84, 42および21とした4種類のモデルを作成したが、要素分割数に関わらず、ひび割れ分布はほぼ同じとなっている。

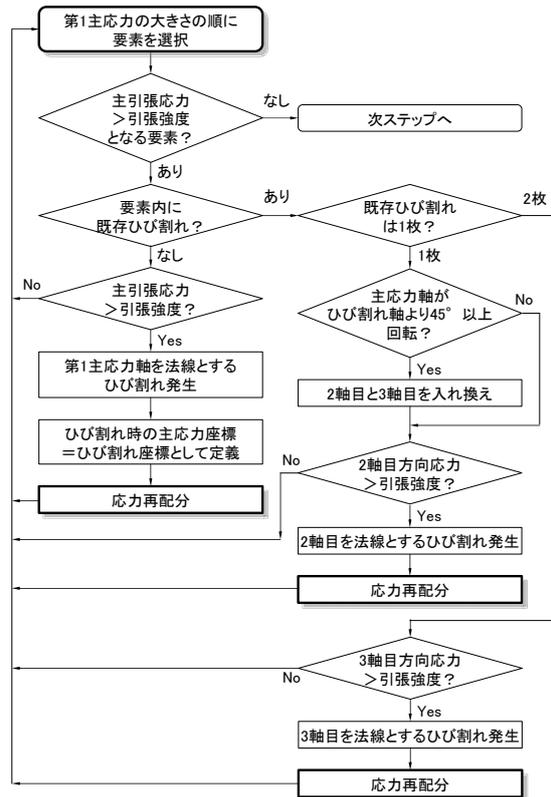


図1 ひび割れ判定と応力再配分の処理手順

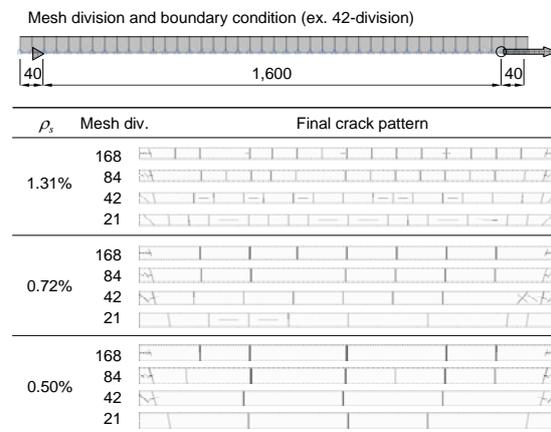
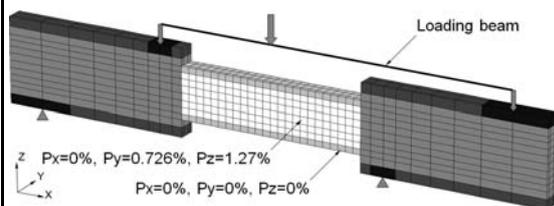


図2 要素分割依存性低減の検証計算

- (3) 付着割裂の判定・処理機能：実構造部材でしばしば発生する付着割裂ひび割れの判定・処理機能を構築した。図3に検証解析の例を示す。この機能により、主筋に沿った（水平）割裂ひび割れが再現できるようになった。



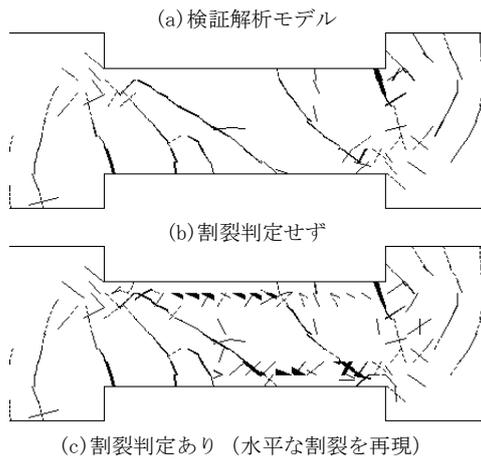
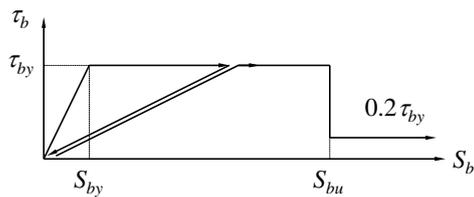
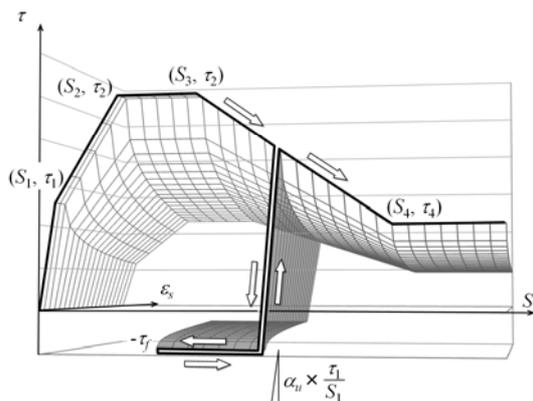


図3 付着割裂用検証解析の例

(4) 付着応力～滑り仮定の改良：解析精度を向上させるため、鉄筋とコンクリート間の付着応力～滑り関係の仮定を改良し、それに対応した解析用サブルーチンを作成した。図4に改良前と改良後の付着応力～滑り関係の仮定を示す。改良後の仮定は、現実的な多点折線包絡線を持つとともに、除荷時残留ひび割れや、鉄筋降伏の影響を考慮できる。解析上の場合分けは著しく増加したが、効率的な分岐処理機能を構築することにより、計算時間をほとんど増加させることなく計算精度の向上を実現した。



(a) 改良前

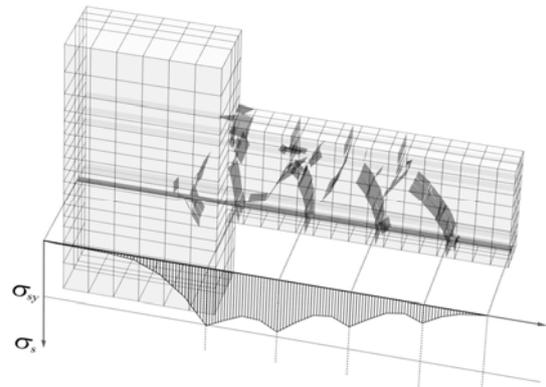


(b) 改良後

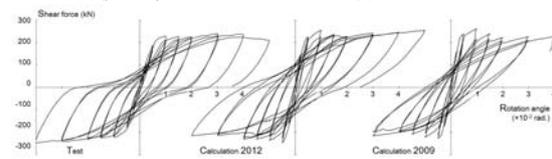
図4 付着応力～滑り関係の仮定

(5) 計算精度と速度の向上：プログラム全般の修正・調整を繰返し、解析精度と速度を向上させた。図5に検証解析の例を示す。全体挙動（せん断応力～回転角関係）、ひび割れ

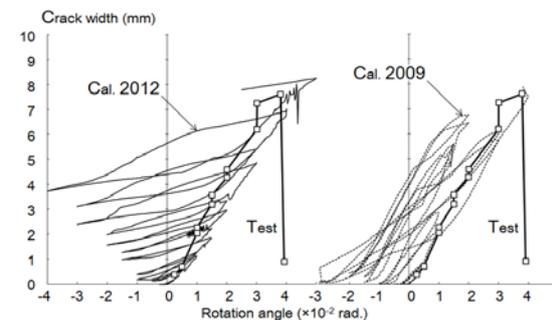
幅挙動のいずれも研究開始時に比べ精度・安定性が大幅に向上している。また計算速度も約50%向上した。



(a) 検証解析モデル（ひび割れ分布を表示）



(b) 部材全体の挙動（せん断応力～回転角関係：09年より12年の計算が実験をより適切に再現している）



(c) ひび割れ幅挙動（09年より12年の計算がより現実的である）

図5 計算精度の向上

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2件）

- ① Yuichi Sato, Shinichi Kajihara and Yoshio Kaneko: Analytical study of performance evaluation for seismic retrofitting of reinforced concrete building using 3D dynamic nonlinear finite element analysis, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 10, No. 2, pp. 291-302, June 2011; DOI: 10.1007/s11803-011-0066-0 査読有
- ② Yuichi Sato, Katsuhiro Nagatomo and Yoshifumi Nakamura: Experimental Study on Bond-Strengthening Hooks for RC Beams, Journal of Advanced Concrete

Technology, Vol. 7, No. 2, pp. 263-271,
2009 査読有

〔学会発表〕(計 10 件)

- ① 金田学, 佐藤裕一, 金子佳生: スチールチップ補強セメント系複合材料による露出柱脚の耐震補強, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 19, pp. 155-162, 2011 年 8 月 23 日早稲田大学にて発表.
- ② 古城拓哉, 金子佳生, 佐藤裕一: HFRCC 構成則のせん断破壊力学モデルへの適用性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) A-1, pp. 243-244, 2011 年 8 月 23 日早稲田大学にて発表.
- ③ 佐藤裕一, 長沼一洋: 分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測(その 8) 付着割裂ひび割れのモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) C-2, pp. 241-242, 2011 年 8 月 23 日早稲田大学にて発表.
- ④ 古城拓哉, 佐藤裕一, 金子佳生: HFRCC の材料構成モデルの構築と一面せん断実験に対する数値解析による検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 2, pp. 1237-1242, 2011 年 7 月 13 日大阪国際会議場にて発表
- ⑤ 古城拓哉, 金子佳生, 佐藤裕一: HFRCC の一面せん断実験と数値解析による材料構成モデルの検証, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系, 第 51 号, pp. 353-356, 2011 年 6 月 18 日大阪工業技術専門学校にて発表.
- ⑥ 佐藤裕一, 長沼一洋: 有限要素法による鉄筋コンクリートのひび割れ幅の評価, 計算工学講演会論文集, Vol. 16, F-8-4, 2011 年 5 月 27 日東京大学柏キャンパスにて発表.
- ⑦ 佐藤裕一, 長沼一洋: 分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測(その 7) 要素分割依存性低減のための修正, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) C-2, pp. 17-18, 2010 年 9 月 9 日富山大学にて発表.
- ⑧ 梶原真一, 金子佳生, 佐藤裕一: RC 建物の 3 次元動的非線形有限要素解析に基づく耐震補強法の性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) C-2, pp. 753-754, 2010 年 9 月 11 日富山大学にて発表.
- ⑨ 佐藤裕一, 長沼一洋: 分散ひび割れ型 FEM によるひび割れ幅の予測(その 6) 正負繰り返し載荷への拡張, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) C-2, pp. 634-635, 2009 年 8 月 29 日東北学院大学にて発表.
- ⑩ 梶原真一, 金子佳生, 佐藤裕一: 1999 年台湾・集集地震において被災した 3 階建 RC 造庁舎の有限要素解析, 日本建築学会

近畿支部研究報告集, 構造系, 第 49 号,
pp. 253-256, 2009 年 8 月 29 日東北学院
大学にて発表.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.kaneko.archi.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 裕一 (SATO YUICHI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20293839

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: