

鉄筋コンクリート部材の非線形挙動に与えるひび割れ面のせん断伝達の影響

東京工業大学大学院 学生会員 ○野見山佳彦
 東京工業大学大学院 正会員 三木 朋広
 東京工業大学大学院 フェロー 二羽淳一郎

1. はじめに

本研究では、引張軟化特性、せん断伝達特性、ダイレタンシーなどのひび割れ面における局所的な非線形挙動が、鉄筋コンクリート(RC)部材のせん断伝達機構に与える影響について検討した。用いたコンクリートモデルは、固定ひび割れモデルである。このモデルを構造解析ソフト OpenSees¹⁾に新たに組み込み、RC パネルおよび RC はりを対象とした非線形解析を実施した。ここで、OpenSees¹⁾とは、土木構造物の地震時挙動の予測を目的としてカリフォルニア大学バークレー校で開発された、無償のオープンソースソフトウェアであり、利用者が目的に応じて改良することができる。

2. 解析モデル

用いたひび割れモデルは、分散ひび割れモデルのうち、ひび割れの角度を固定したモデルに分類される(図1)。このモデルは、RC 要素内の平均応力を、コンクリートと鉄筋の平均応力に分離して考えている。鉄筋の平均応力については、ひび割れの方向に依存せず、鉄筋軸方向のひずみに基づいて算定する。一方、コン

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{cx} \\ \sigma_{cy} \\ \tau_{cxy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_c & 0 & 0 \\ 0 & E_t & SG_y \\ 0 & 0 & \frac{G_c G_y}{G_c + G_y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{cx} \\ \varepsilon_{cy} \\ \gamma_{cxy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

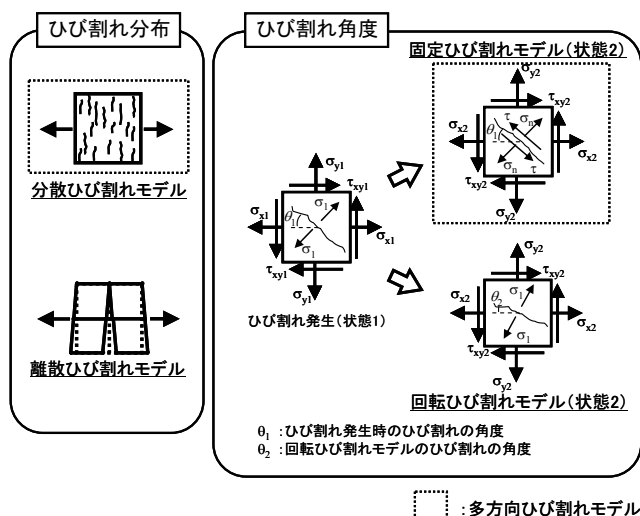
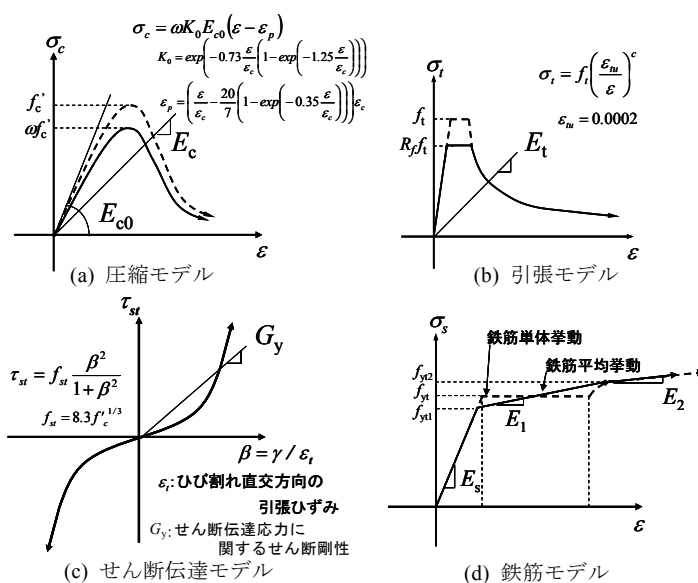


図1 ひび割れたコンクリートのモデル化

クリートの応力については、ひび割れの方向を反映して算定する。ひび割れ面に直交した座標系でのコンクリートの応力-ひずみ関係を、式(1)にマトリクス形式で示す。ここで引張方向の非対角項にある項(SG_y)は、せん断ずれによる直応力への影響(shear-dilatancy)を考慮したものである。式(1)中のそれぞれの割線剛性に対応する材料モデルを図2に示す。圧縮挙動に関するコンクリートモデル(図2(a))には、前川によるコンクリートの弾塑性破壊則²⁾を基本に、ひび割れ面の直角方向の引張ひずみによる破壊パラメータ(K_0)の低下を考慮したモデル³⁾を採用した。引張挙動に関するコンクリートモデル(図2(b))には、ひび割れ発生後も鉄筋の付着伝達により、コンクリートが引張力を負担することを考慮したモデル²⁾を採用した。また、圧縮載荷履歴によるひび割れ強度の低下を、低減係数 R_f として考慮した。せん断挙動に関するコンクリートモデル(図2(c))には、接触面伝達密度関数²⁾に基づくひび割れ面での応力伝達モデルと、ひび割れ間のコンクリートの剛性を組み合わせたものを福浦らが簡略化したモデル³⁾を採用した。鉄筋のモデル(図2(d))には、

図2 材料モデル^{2), 3)}

キーワード：有限要素解析、固定ひび割れモデル、せん断伝達、非線形解析

連絡先：〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 M1-17 TEL03-5734-2584 FAX03-5734-3577

鉄筋が破断するような高ひずみ領域までも良好に挙動が表現できるトリリニア型の鉄筋モデル³⁾を採用した。

3. RC パネルを対象とした検証

Toronto 大学の Vecchio, Collins によって行われた RC パネル実験⁴⁾を対象として、非線形有限要素解析を行い、ひび割れ部でのせん断伝達特性が RC パネルの挙動に与える影響について検証した。試験体を平面要素でモデル化したものを図 3 に示す。ここでは、試験体を 4 個の 4 節点平面要素でモデル化している。荷重は、図 3 に示すように、各節点に $x'-y'$ 座標系で水平、垂直方向に作用させた。つまり、 $X-Y$ 座標系では、直応力、およびせん断応力が作用するようにした。

実験および解析から得られた平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係を図 4 に示す。また、式(1)のせん断剛性の項 $G_c G_y / (G_c + G_y)$ を、ひび割れ前のせん断剛性 G_c に低減係数 $\beta (=0.2)$ をかけて評価した場合の解析結果も合わせて示す。図 4 に示すように、せん断軟化を考慮したモデルは、実験結果を良好に予測できているのに対し、 β で低減しただけのモデルでは、せん断応力を実験値よりも過大評価していることが確認できる。また、ダイレタンシーの項 SG_y が解析結果にどれ程影響を与えるかを検証するために、 SG_y を 3 通りに変化させて解析した結果を図 5 に示す。これより、 G_y にかかる定数が低くければ剛性を高く、定数が高ければ剛性を低く評価することが確認できた。

4. せん断破壊するはりを対象とした検証

RC はりのせん断破壊実験を対象として、非線形解析を行った。対象とした RC はりの破壊モードは、斜め引張破壊である。図 6 に解析対象であるはりの材料特性と、モデル化した平面要素を示す。また、図 7 に実験結果と解析結果の比較を、図 8 にひび割れ図と変形図を示す。図 7 に示すように、解析結果は、実験結果のピーク値をおおむね予測できた。また、図 8 の変形図を見ても、解析での破壊モードがせん断破壊であ

ることを確認できる。

5. 結論

(1) せん断伝達軟化モデルを考慮した固定ひび割れモデルは、RC パネルのような要素レベルでの実験結果を良好に予測できる。

(2) せん断伝達挙動を表現するには、せん断軟化モデルのような、せん断応力の軟化を考慮したモデルを採用することが妥当と考えられる。

(3) 斜め引張破壊をする RC はりを対象とした解析は、ピーク値をおおむね予測できる。

参考文献

- 1) Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), <http://opensees.berkeley.edu/index.html>
- 2) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 3) 前川宏一, 福浦尚之: 疑似直交 2 方向ひび割れを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.157-176, 1991.11
- 4) Vecchio, F. J. and Collins, M.P.: The Response of Reinforced Concrete to In-plane Shear and Normal Stresses, University of Toronto, Publication No.82-03, Mar. 1982

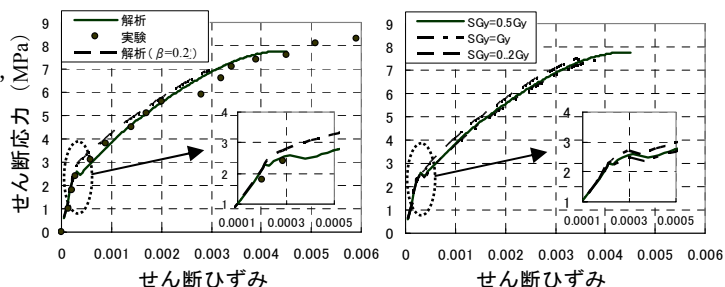


図 4 せん断剛性の影響 図 5 ダイレタンシーの項の影響

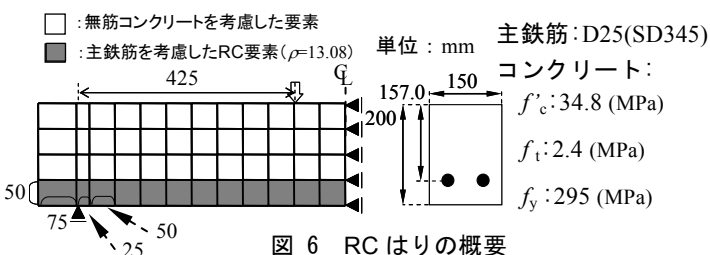


図 6 RC はりの概要

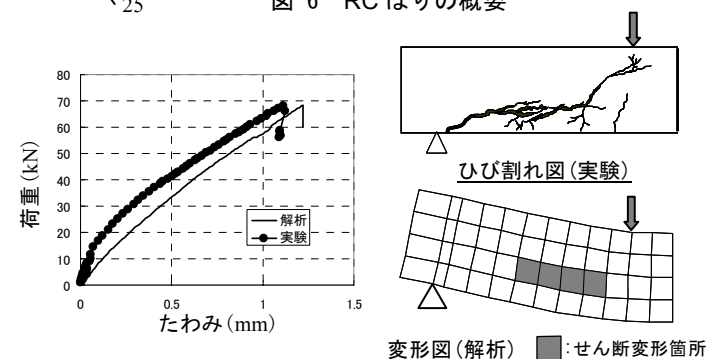


図 7 荷重-たわみ関係 図 8 ひび割れ図および変形図

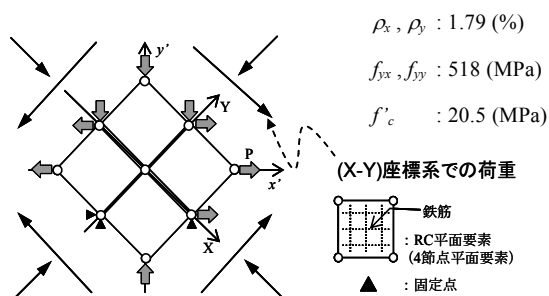


図 3 解析モデル(PV-23⁴⁾)