

論文 曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の終局時変形に関する一考察

白石 一郎^{*1}・門倉 利通^{*2}・高木 仁之^{*3}・狩野 芳一^{*4}

要旨：曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の強度については、曲げ終局強度評価式により精度よく評価できるが、終局時変形の評価法は十分には確立されておらず、早急に解決すべき課題である。本研究では、曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の終局時に至る応力とひずみ状態について解析的な検討を行い、このような破壊モードのRC部材の終局時変形の評価法について述べた。

キーワード：RC部材, 曲げ降伏, せん断破壊, 変形性能, FEM, 断面の曲げ解析

1. はじめに

曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材に関する研究は数多く行われ、その靱性評価法についても、せん断余裕度による方法、トラスアーチ理論に基づく方法¹⁾等、種々の提案がなされている。しかしながら、せん断余裕度と靱性の関係の物理的意味づけや、トラスアーチ理論に基づく方法におけるヒンジ回転角とコンクリート有効強度係数の関係の理論的根拠については、なお検討の余地が残されている。

本研究では、まず曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材をFEM解析²⁾により再現し、その上で、終局時近傍の応力とひずみの状態について検討する。さらにこのような破壊モードのRC部材の終局時変形の評価法について述べる。

2. 曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の再現

低せん断補強筋比ではせん断破壊し、せん断補強筋比を増加させると曲げ破壊型に移行するようなRC部材を設定するために、図-1のようにせん断強度と曲げ強度を調整しながら試行錯誤した結果、図-2、表-1のようなRC部材を解析対象とした。解析モデルの詳細やその妥当性については、文献3), 4)を参照されたい。

解析結果の荷重と部材角の関係を図-3に示す

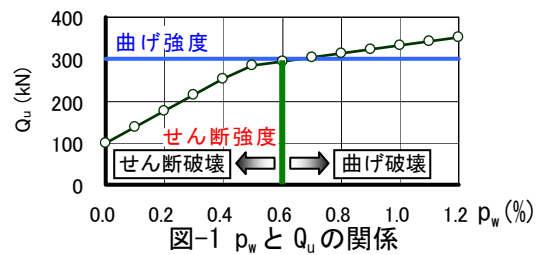


図-1 p_w と Q_u の関係

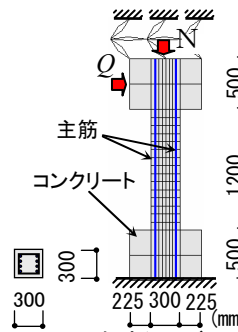
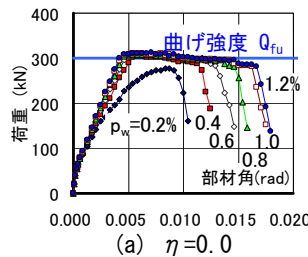


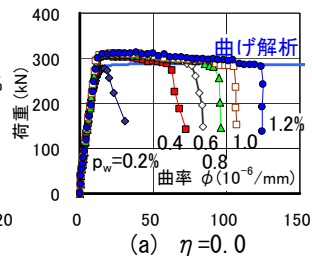
図-2 解析モデル

表-1 解析試験体の概要

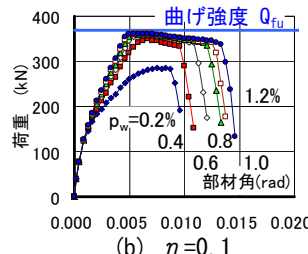
コンクリート	圧縮強度	34.0 N/mm ²
	引張強度	3.5 N/mm ²
	ヤング係数	34030 N/mm ²
主筋 (6-D22)	降伏強度	300 N/mm ²
	ヤング係数	210000 N/mm ²
せん断補強筋 (D6)	降伏強度	400 N/mm ²
	ヤング係数	210000 N/mm ²
	せん断補強筋比	0.2~1.2 %
軸力比 (η)		0.0・0.1



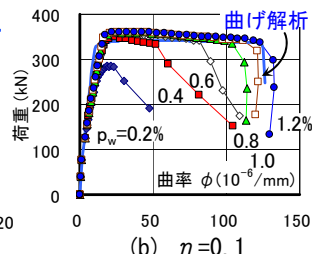
(a) $\eta=0.0$



(a) $\eta=0.0$



(b) $\eta=0.1$



(b) $\eta=0.1$

図-3 荷重-部材角関係

図-4 荷重-底部曲率関係

*1 日本工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 日本工業大学大学院 工学部建築学専攻

*3 明治大学助教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

*4 明治大学名誉教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

が $p_w=0.2\%$ では主筋が未降伏でせん断破壊したのに対し、 $p_w \geq 0.4\%$ では、主筋が降伏し曲げ強度に達していた。また、図より、 p_w が大きいほど耐力低下時の部材角が大きくなっている。

次に荷重と脚部の曲率との関係を図-4 に示すが、 p_w が大きいほど耐力低下時の曲率も大きくなっている。図には、曲げ解析の結果も示されているが、 p_w の小さい FEM 解析結果では、曲げ解析結果より小さな曲率で耐力低下していることがわかる。これは、図-5 のひび割れ状況・主ひずみ分布からもせん断の影響と考えられる。

図-6 に、 $p_w=0.4\%$ と 1.2% の FEM 解析結果での脚部およびその上部のコアコンクリート圧縮縁における主圧縮応力と主圧縮ひずみの関係を示すが、脚部のコンクリートが主に圧壊している。

本報では、 p_w の小さい FEM 解析結果のように、曲げ降伏はするものの、軸方向の応力とひずみのみを考慮する曲げ解析に比べて、せん断の影響により早期に耐力低下が生じるような破壊を曲げ降伏後のせん断破壊と扱うものとする。

3. 曲げ降伏後のせん断破壊のメカニズム

3.1 端部危険断面の応力・ひずみ分布

図-7 に、 $p_w=0.4\%$ と 1.2% の解析結果における、ひずみの中立軸と応力の中立軸の変化を示す。ここで、応力の中立軸とは、ひずみの中立軸と同様に応力が圧縮から引張に変化する位置としている。図より、ひずみの中立軸は、FEM 解析と曲げ解析でおよそ対応しているのに対し、応力の中立軸は大きく異なり、FEM 解析では断面全域で圧縮応力が分布している。ただし、圧縮応力分布のピークが圧縮縁近傍にあるため、図-8(a)のように応力中心間距離で見ると、FEM 解析と曲げ解析は同様の傾向となり、その結果、図-8(b)のように、曲げモーメントも両解析結果でおよそ対応している。

$p_w=0.4\%$ 試験体の耐力低下時曲率における FEM 解析の軸方向ひずみ ϵ_y と軸方向応力 σ_y 分布を図-9 に示す。図には、同一曲率時での曲げ解析の結果も示されている。図より、FEM 解析結果

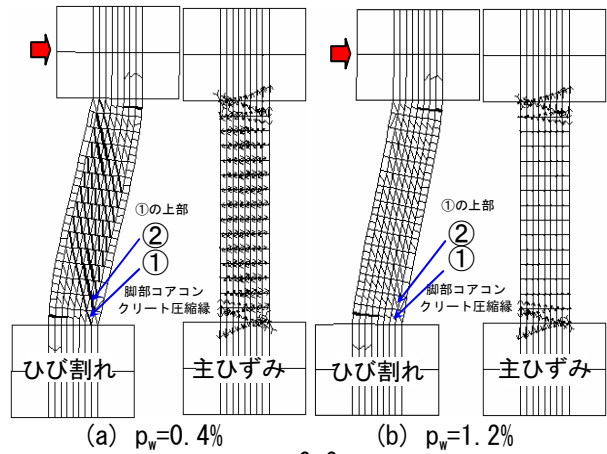


図-5 ひび割れ変形状と主ひずみ分布

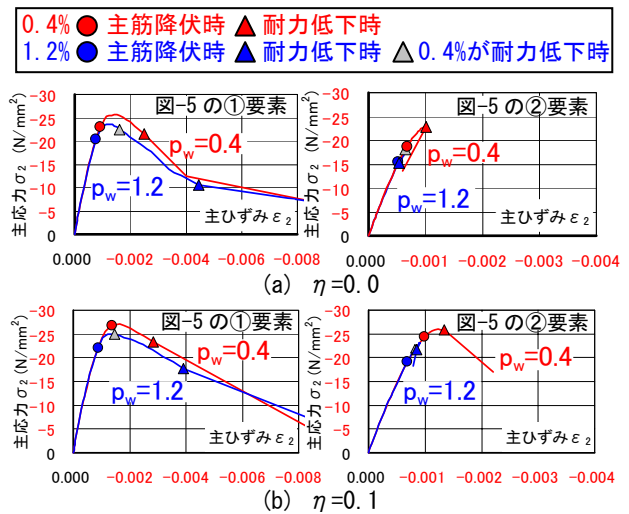


図-6 主応力-主ひずみ関係

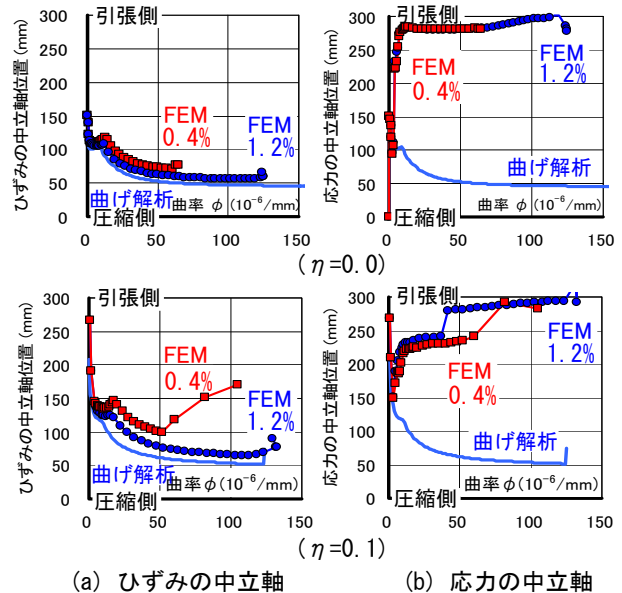


図-7 FEM 解析と曲げ解析の比較

のひずみ ϵ_y 分布は、およそ平面保持の仮定に基づく曲げ解析とよく対応し、中立軸位置もよく一致している。一方、軸方向応力 σ_y の分布につ

いては、曲げ解析ではひずみ分布と対応し、圧縮縁近傍のみに集中しているのに対し、FEM 解析結果では、軸方向ひずみが引張となるゾーンでも圧縮応力が生じており、曲げ解析結果と大きく異なっている。これは、周知のようにせん断の影響によるものである。

3.2 3次元解析と2次元解析の比較

以上の FEM 解析結果は2次元解析によるものであったが、この妥当性を調べるために、2次元解析と同じ解析プログラム²⁾を用いて3次元解析を実施した。解析モデルおよび結果の一例を図-10、図-11に示すが、材料特性等は、表-1と同様である。図-12に、部材脚部の軸方向応力と軸方向ひずみ分布を示すが、平面保持がほぼ成立していること、また、軸方向ひずみ ϵ_y と軸方向応力 σ_y の中立軸位置が大きく異なっていることなど、2次元解析結果とよく対応していることから、以降の考察についても2次元解析を用いるものとする。

3.3 曲げ降伏後のせん断破壊のメカニズム

図-13に、 $p_w=0.4\%$ と 1.2% 試験体脚部のコアコンクリート圧縮部の耐力低下時曲率での、FEM 解析結果によるモールのひずみ円と応力円を示す。図より、 $p_w=0.4\%$ の解析結果は、 $p_w=1.2\%$ に比べてせん断ひずみが大きく、そのため主圧縮ひずみが $p_w=1.2\%$ より大きくなっている。このように、低せん断補強筋比の場合では、高せん断補強筋比に比べて、同一曲率時でのせん断ひずみが大きく、そのため、主圧縮ひずみも大きくなるため、コンクリートの圧壊が早まり、靱性が低下すると解釈できる。

4. 曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の終局時変形の評価法

本報での終局時変形（急激な耐力低下の開始点）の評価法におけるひずみ分布の仮定を図-14に示し、フローチャートを図-15に示す。まず、通常の曲げ解析と同様に、断面せいの方向を図-14のように分割し、各分割要素の軸方向ひずみ ϵ_y は、第3章のFEM解析結果を参考に平面保持

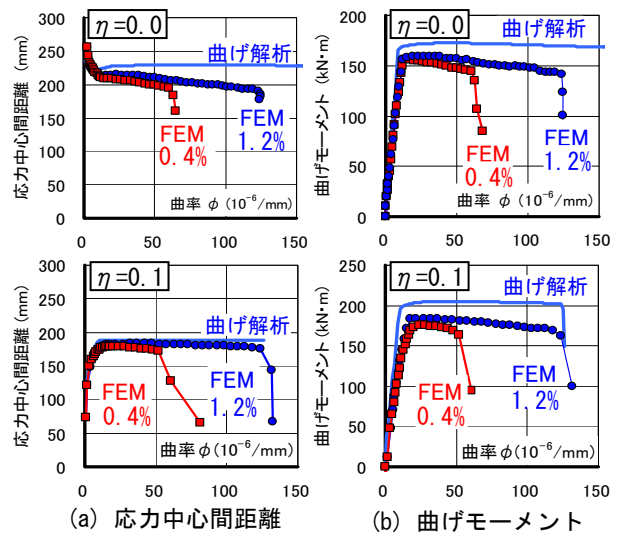


図-8 FEM解析と曲げ解析の比較

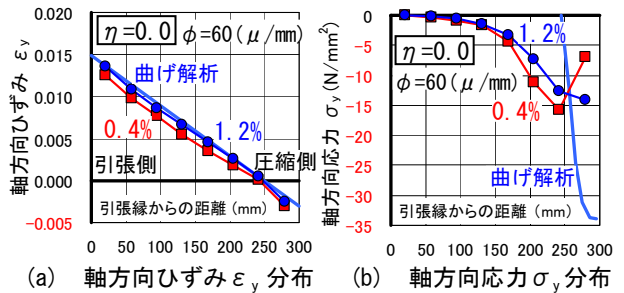


図-9 FEM解析と曲げ解析の比較 (η=0.0)

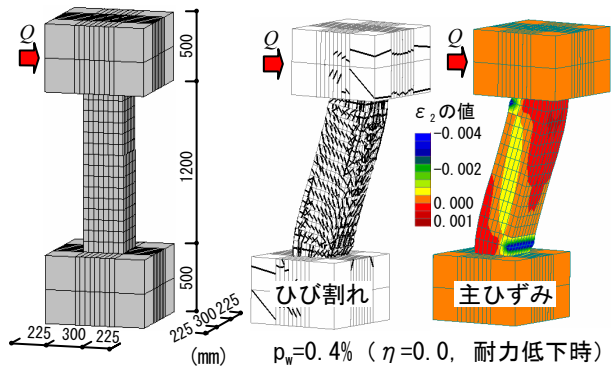


図-10 解析モデル 図-11 変形状と主ひずみ分布

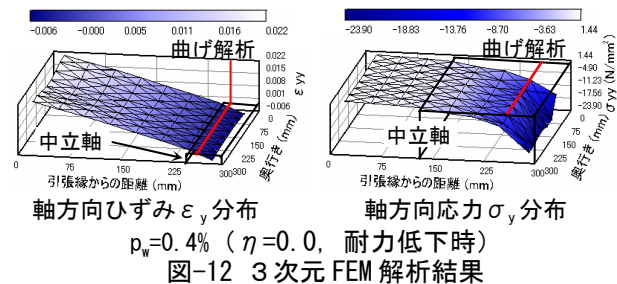


図-12 3次元FEM解析結果

が成立しているものとする。

軸直交方向ひずみ ϵ_x は、トラスアーチ理論によるせん断強度 Q_s が、各計算ステップでの端部曲げモーメント M に対応するせん断力 Q_f

(=2M/L)と一致するようなせん断補強筋応力 σ_w から、次のように求めるものとする。

まず、主筋は剛強でせん断補強筋の降伏を仮定したトラスアーチ理論のせん断強度 Q_s (式(1))は、曲げ強度時せん断力 Q_f より大きくなると考えられる。そこで本報では、 $Q_s = Q_f$ となるように、降伏応力度よりも低減させたせん断補強筋応力 σ_w を求め、曲げ強度時のせん断補強筋応力とし、その応力 σ_w に対応するひずみを、式(2)のように軸直交方向ひずみ ϵ_x とした。

すなわち、低せん断補強筋比ほど、曲げ強度時の補強筋応力や軸直交方向ひずみが大きくなり、その結果図-13のように、力の釣合を満足するせん断ひずみや主圧縮ひずみも大きくなるため、コンクリートの圧壊が早まるということになる。ここで、トラス機構角度 ϕ は 45° で、コンクリート有効係数は1.0とした。式(2)の軸直交ひずみ ϵ_x を圧縮縁要素の値とし、図-14のように引張縁で0となる三角形分布を仮定する。

各分割要素での応力・ひずみ状態は、Collinsの修正圧縮場理論に基づき、図-16のモールの応力円とひずみ円、および、図-17のコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いて、軸方向力の釣合い、および、せん断力の釣合いを満足するように、収れん計算により求めるものとする。

収れん計算の方法は種々考えられるが、本報では、まず軸方向力の釣合いを満足する中立軸距離 x_n を求め、次にせん断力の釣合いを満足するせん断ひずみ γ_{xy} を求めた上で、必要であれば x_n と γ_{xy} の微調整を行ったが、本報で対象としたRC部材では、微調整はほとんど不要であった。ここで、せん断ひずみ分布は、FEM解析結果を参考し、軸直交ひずみ分布と同様の三角形分布としている。

この方法は、中村等の修正圧縮場理論に、断面の応力・ひずみ勾配を考慮した解析手法^{5),6)}と、応力・ひずみ分布の仮定に差異があるものの類似している。ただし、文献5),6)では、軸力とせん断力を与えて、その結果、曲げモーメントの最大値を求めるもので、計算終了までシア

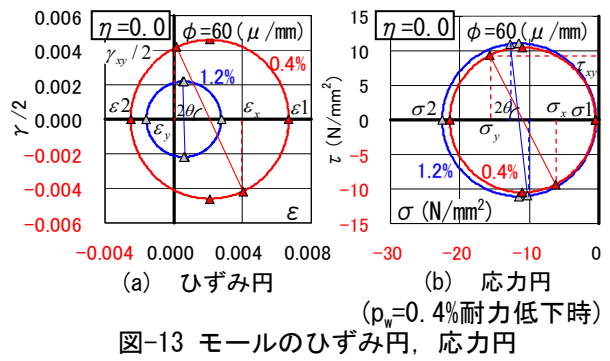


図-13 モールのひずみ円, 応力円 ($p_w=0.4\%$ 耐力低下時)

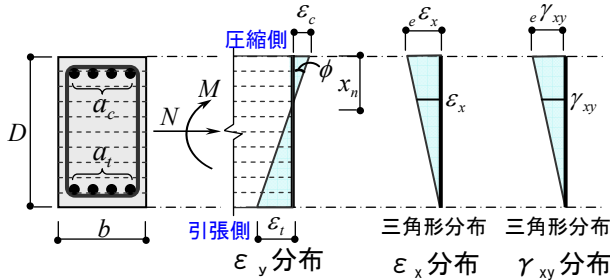


図-14 本評価法のひずみ分布の仮定

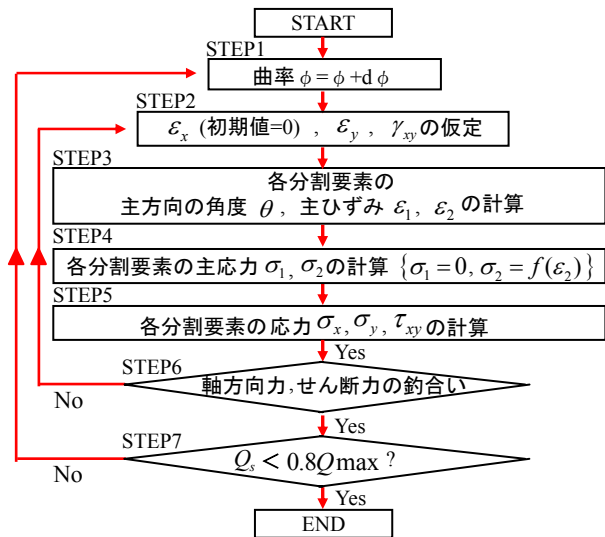


図-15 フローチャート

$$Q_s = b j_t p_w \sigma_w \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2 \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_w}{E_s} = \frac{Q_f - v \sigma_B b D \tan \theta / 2}{p_w b D (j_t / D - \tan \theta) \cdot E_s} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{(1 + \cot^2 \theta) p_w \cdot \sigma_w}{v \cdot \sigma_B} = \frac{2 p_w \cdot \sigma_w}{v \cdot \sigma_B} \quad (3)$$

ここで、 b : 断面幅、 D : 断面せい、 j_t : せん断補強筋の芯々間隔、 p_w : 有効せん断補強筋比、 σ_w : せん断補強筋の信頼強度、 v : 有効強度係数、 σ_B : コンクリート強度、 ϕ : トラス機構の角度、 θ : アーチ機構の角度、 E_s : せん断補強筋の弾性係数

スパン比、すなわち解析対象の形状が決まらないのに対し、本法では、シアスパン比を与えてから計算を行っている点に差異がある。

5. 本評価法による計算結果

5.1 断面の終局時曲率

本評価法によるせん断力と曲率の関係を図-18に示す。図には、FEM解析と曲げ解析の結果も示されているが、断面の曲げ解析にせん断の影響を簡便に考慮した本評価法による計算結果は、FEM解析とおよそ対応しており、せん断補強筋量による靱性への影響が考慮されていると判断される。

図-19、図-20に、 $p_w=0.4\%$ 試験体の耐力低下時の曲率における応力・ひずみ分布に関する曲げ解析およびFEM解析と、本評価法との比較を示す。本評価法は曲げ解析にせん断の影響を簡便に評価したものであり、FEM解析のような精緻な解析法による応力分布とはやや差異がみられるが、せん断補強筋量の影響が考慮されている。

5.2 部材の終局時変形

部材端部のモーメントと曲率の関係から、次のように部材の変形の評価を試みる。図-21のような変形評価モデルを仮定し、引張側のヒンジ高さ y を、部材せい D と等しいとして、部材頂部の鉛直変位 δ_v から、水平変位 δ_h を求める。ここで、 δ_v は、図-22のように主筋の脚部ひずみ ϵ_y と、ヒンジ高さでの主筋降伏ひずみ ϵ_{yy} から計算した。

図-23にFEM解析結果と本評価法との比較を示し、図-24、図-25に、曲げ降伏後にせん断破壊した既往の実験結果^{1),7)}の耐力低下時の部材角と計算結果との比較を示す。本報の計算結果は、せん断変形や主筋の抜け出し変形が考慮されていないことなど単純化したモデルであるため、実験結果とややばらつきもみられるもののおよそ対応している。一方、靱性保証指針の計算結果は設計式であるため、当然のことながら安全側の値となっている。

6. まとめ

本報の解析結果によれば、曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の耐力低下は、主に脚部コンクリートの圧壊に起因していた。その脚部の

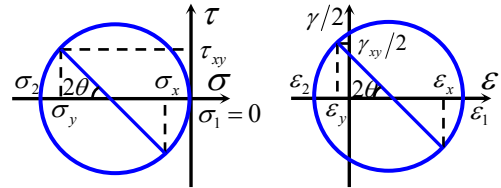


図-16 モールの応力円・ひずみ円

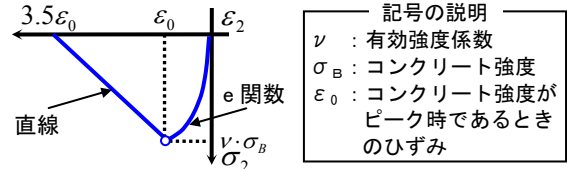


図-17 コンクリートの応力-ひずみ曲線

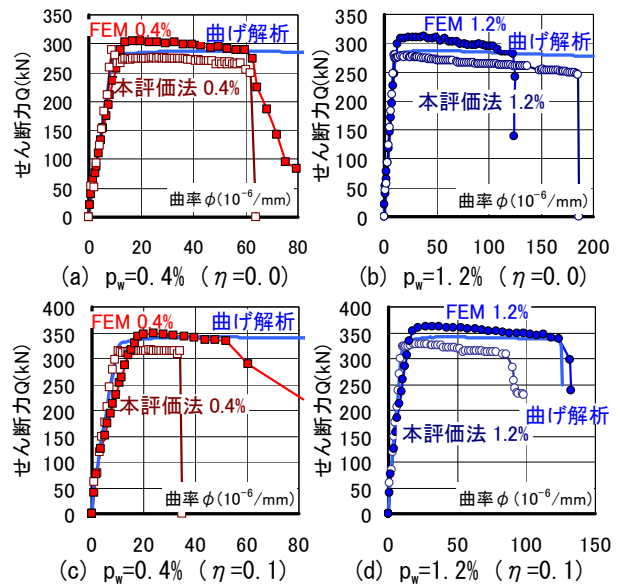


図-18 せん断力-曲率関係

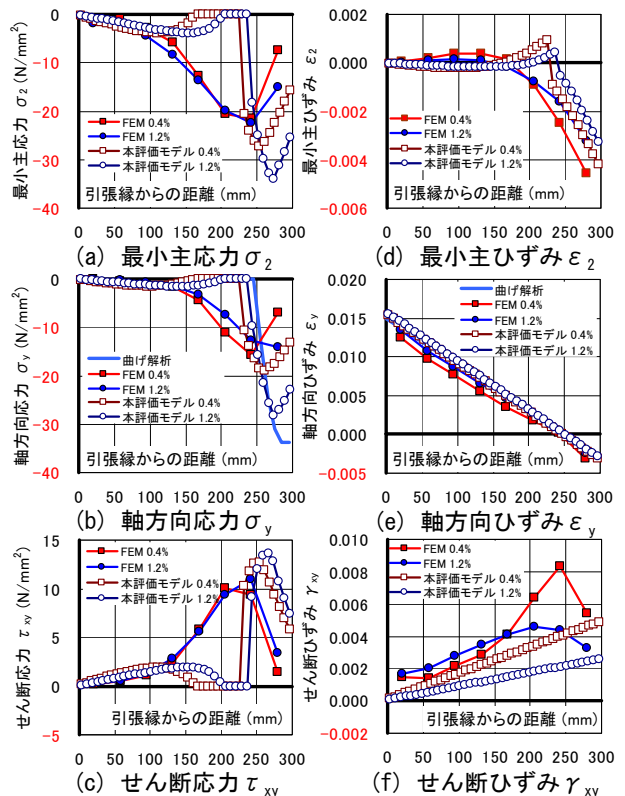


図-19 耐力低下時の応力・ひずみ分布 ($\eta=0.0$)

軸方向ひずみの分布は、曲げ解析とよく一致していたが、軸方向応力の分布は、曲げ解析と大きく異なっていた。また、曲げ降伏後にせん断破壊するRC部材の終局時変形について FEM 解析により考察し、その上で曲げ解析にせん断の影響を簡便に考慮した評価法を示した。本報の評価法は、せん断補強筋量等の影響を考慮して変形限界を直接評価する点に特徴があるが、応力分布については FEM による精緻な解析結果とやや差異があり、評価精度を向上させるためには更なる改善が必要である。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，2001
- 2) SBETE:SBETA Computer program for nonlinear finite element of reinforced concrete structure in plane stress state, Program documentation, Cervenka Consulting Prague, 1997
- 3) 白石一郎，高木仁之ほか：RC 造部材のトラスアーチ理論におけるトラス機構角度に関する一考察，建築学会構造系論文集，第 548 号，pp. 115-122，2001.10
- 4) 白石一郎，宮脇毅ほか：付着の有無が RC 柱のせん断挙動に及ぼす影響，JCI 年次論文集，Vol. 2, No. 2, pp. 871-876，2002
- 5) 中村光，檜貝勇：拡張した修正圧縮場理論による RC はり断面のせん断耐荷力評価，土木学会論文集，No. 490/V-23, pp. 157-166，1994
- 6) 中村光，檜貝勇：せん断補強筋を有する RC はり断面のせん断耐荷力評価に関する解析的研究，JCI 年次論文報告集，Vol. 17, No. 2, pp. 785-790，1995
- 7) 渡辺英義，是永健好ほか：曲げ降伏後にせん断破壊する RC 梁部材の靱性評価に関する実験研究，建築学会構造系論文集，第 560 号，pp. 161-168，2002.10，および，関連論文，同論文集，第 572 号，pp.155-162，2003.10

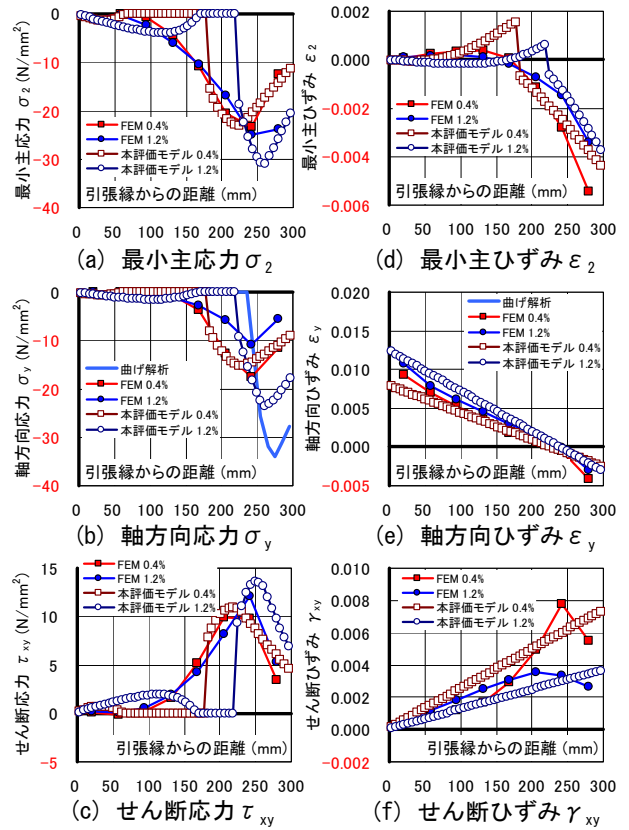


図-20 耐力低下時の応力・ひずみ分布 ($\eta=0.1$)

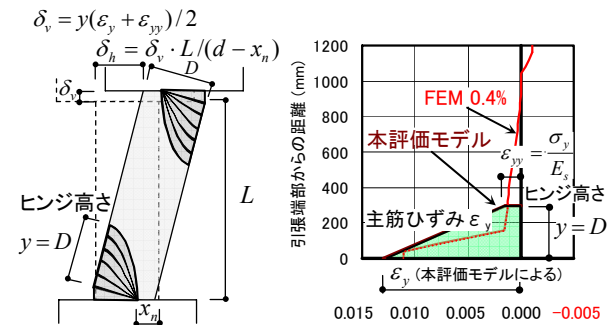


図-21 変形評価モデル

図-22 主筋ひずみ分布

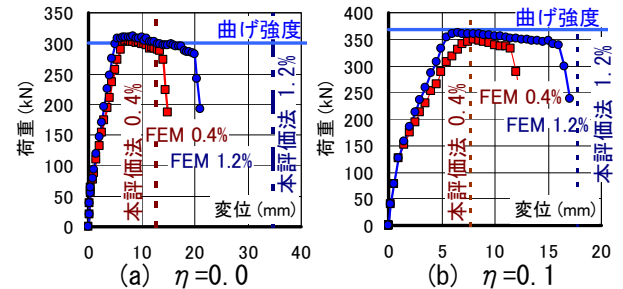


図-23 FEM 解析との比較

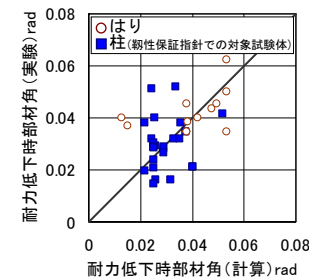


図-24 本評価法の計算結果

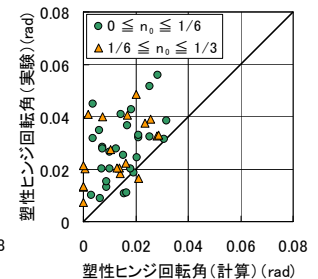


図-25 靱性指針の計算結果