

V-9

ポストピーク挙動に及ぼすひずみ軟化の影響について

北海道大学大学院 ○学生員 田所 敏弥
 北海道大学大学院 正 員 佐藤 靖彦
 北海道大学大学院 正 員 上田 多門
 北海道大学大学院 フェロー 角田 與史雄

1.はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC と略す）部材の終局変形に関する既往の研究は、実験により靱性率を経験的に定量化するものがほとんどである。本研究では部材の耐荷機構を考慮し、実験的に導かれた材料構成則を用いた数値解析により終局変形の予測を行う。このようにマクロレベルの力学的性状を出発点とする有限要素法は、部材の終局変形の定量化を図る上で大変汎用性のある手法といえ、終局変形を精度よく予測する手法を与えるだけでなく、材料的な視点、構造細目的な視点から、構造物の終局変形性能を向上させるための情報を与えてくれるものである。

最新の研究成果において、材料の応力履歴特性の適切なモデル化によりポストピークの挙動を精度よく予測できる可能性が示唆されている。ここで本研究では、ポストピーク領域においても適応可能な RC の引張および圧縮に関する構成則の構築を主眼に行った。コンクリートの引張モデルについては、軟化領域におけるひび割れの局所化およびそれにとまなう要素寸法依存性を考慮できることが重要であり、ここでは、Reinhardt の一軸引張試験結果[1]に破壊エネルギーを導入して定式化を行った。また圧縮モデルについては、ポストピーク挙動の予測には大ひずみレベルも表現可能な軟化モデルの構築が不可欠であるが、ポストピーク領域まで検証されたモデルがほとんどないのが現状である。ここで本研究では圧縮軟化領域の構成則が全体の変形性能に与える影響を検証し、圧縮破壊エネルギーに基づいた応力軟化勾配の定式化を試みた。また、本研究では解析対象としてせん断補強筋のない曲げ破壊形式のはりを用いた。

2.解析概要

2.1.解析手法

本解析では、RC 部材用 2 次元非線形有限解析プログラム「WCOMR」[2]を用い、要素は 8 節点アイソパラメトリック要素を採用した。またポストピークの挙動を検討するため、変位増分法により解析を行い求解法は、修正 Newton-Raphson 法を用い不平衡力がある収束判定基準を満たすまで繰り返し計算を行った。修正 Newton-Raphson 法では、解析モデルによっては、軟化領域において解の収束性が悪くなる傾向があり今後の検討課題である。また、本解析では主引張応力が引張強度に達した時点で主引張ひずみと直交方向にひび割れが発生し、その後は主ひずみ方向が変化してもひび割れ角度が変化せず、ひび割れ面においてせん断応力が伝達される「固定ひび割れモデル」を用いている。

The Effect of Strain-Softening on Post-Peak Behavior .

By Toshiya Tadokoro, Yasuhiko Sato, Tamon Ueda, Yoshio Kakuta

2.2.解析モデル

本解析では、ポストピーク領域の引張と圧縮の構成則の検討を主眼においたため、せん断伝達モデルの影響の少ない鉄筋降伏後の曲げ圧縮破壊となる表 1、図 1 の諸元の要素寸法を変えた a/d=4.0 の2つの解析モデルを用いた。固定ひび割れモデルを用いてせん断破壊形式の部材を解析する場合は、せん断伝達モデルにおいてせん断軟化を考慮する必要がある。しかし、本研究は曲げ破壊形式の解析モデルを対象としているためポストピークにおいてもせん断軟化の影響が小さいと考えられる。尚、解析は対象性を考慮し 1/2 モデルで行った。

表 1 材料諸元

圧縮強度 f_c (MPa)	30.0
引張強度 f_t (MPa)	3.0
鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	295.0
コンクリート・アソ比 ν	0.2
鉄筋比 ρ	0.01

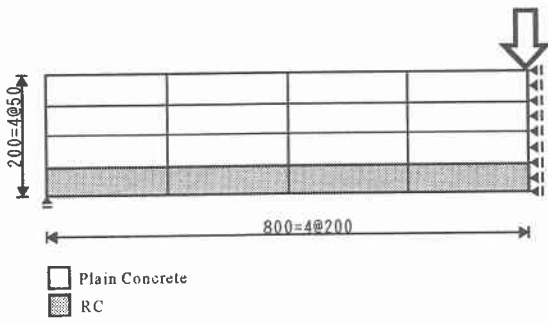


図 1-a 解析モデル 1 (16 要素)

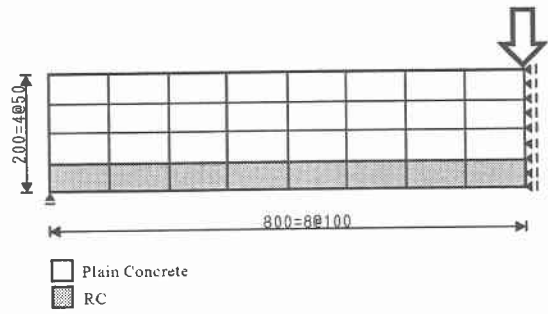


図 1-b 解析モデル 2 (32 要素)

2.3.材料構成則

2.3.1.引張応力を受けるコンクリートの構成則

引張、圧縮ともひび割れ発生までは 2 次元の弾塑性破壊モデル[3]を用いた。ひび割れ発生以降は 1 本のひび割れに着目し、Reinhardt の 1 次元場での実験結果を構成則に導入した。しかしひび割れ発生以降は、ある特定の幅を持った破壊領域にひずみが局所化するため Reinhardt の引張軟化曲線(Eq.1)を直接用いると要素寸法に解が依存してしまう。図2は引張軟化曲線を構成則に直接導入した時のあるガウス積分点の応力-ひずみ関係である。このように要素寸法に関わらず応力-ひずみ関係は同一である。この時の荷重変位関係は図 3 のように要素寸法の違いが降伏荷重の差となって現れる。この要素寸法依存性を軽減するため以下のように破壊エネルギーを用い修正を行った。

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{\delta}{\delta_0} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{\delta}{\delta_0} \right) - \frac{\delta}{\delta_0} \left(1 + c_1^3 \right) \exp(-c_2) \dots \dots (Eq.1)$$

Normalweight Concrete $C_1 = 3.0, C_2 = 6.93$

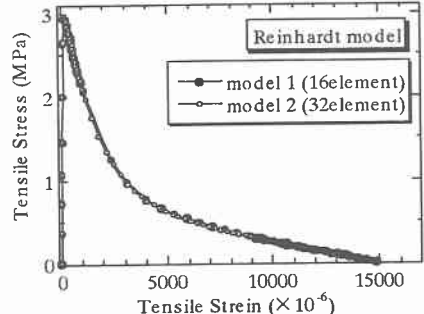


図 2 材料構成則 (Gfr 考慮なし)

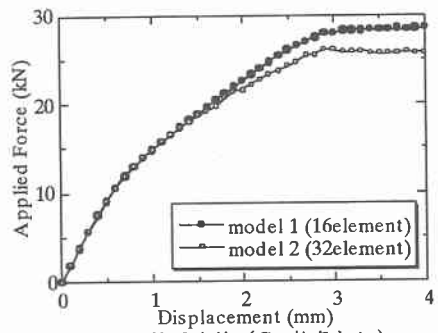


図 3 荷重変位 (Gfr 考慮なし)

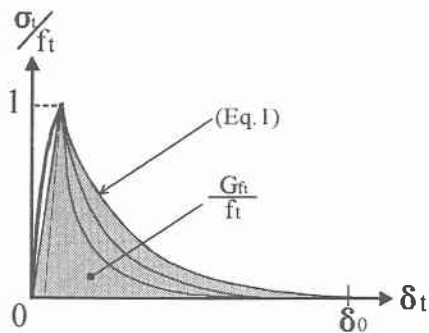


図4 引張破壊エネルギー

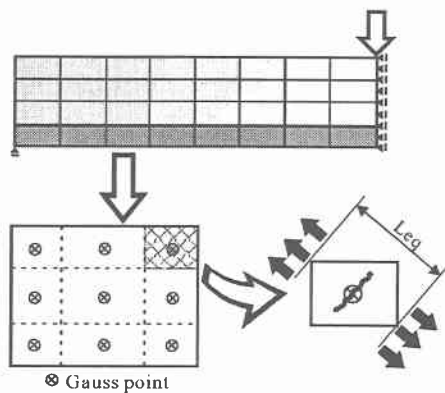


図5 等価長さ(Leq)

コンクリートの引張応力とひび割れ幅の関係は先述の Reinhardt モデルであり、この軟化曲線が囲む面積を引張破壊エネルギー G_f とする(図4)。引張破壊エネルギーの値は、CEB-FIB MODEL CODE 90[4]に規定されている(Eq.2)を用いた。この式では、引張破壊エネルギーが骨材寸法に依存するが、ここでは最大骨材寸法 32(mm)とした。この式の導入により高強度コンクリートの脆性的な挙動を表現することも可能となる。また、応力伝達がなくなる限界変位と引張破壊エネルギーの値は、D.A.Hordijk[5]の提案式(Eq.3)を用いた。実現象としては、ある幅をもった破壊領域にひびき局所化し引張破壊エネルギーが消費されるが、有限要素解析では、1 要素の中で引張破壊エネルギーが消費されることになるので等価長さ(Leq)という概念を用いてひび割れ幅をひびきに換算する。等価長さについては、現在も一般的に認知された考えがない。要素形状が長方形または正方形で辺と平行に主引張ひびきが発生すれば等価長ささと辺長が一致することは自明であるがこのような場合は実際の解析では、ほとんどない。そこで本研究では以下のように等価長さを定義する。まず要素内のガウス積分点の分担領域を考え

CEB-FIB MODEL CODE90

$$G_f = G_{f0} \left(\frac{f_c}{f_{cm0}} \right)^{0.7} \dots\dots\dots (Eq.2)$$

$$f_{cm0} = 10.0$$

$$G_{f0} = 0.058$$

(maximum aggregate size 32 mm)

$$\delta_0 = 5.14 \left(\frac{G_f}{f_t} \right) \dots\dots\dots (Eq.3)$$

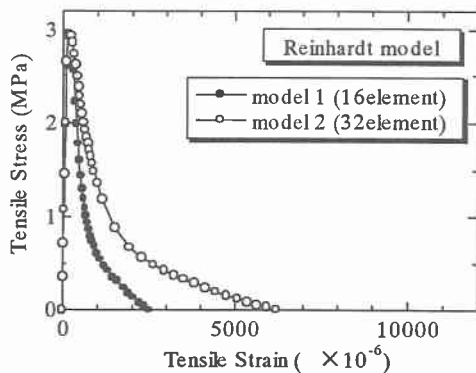


図6 材料構成則 (G_f 考慮)

ガウス積分点の主引張ひずみ軸に投影した投影長さを等価長さとした(図5)。このようにして導いた応力-ひずみ関係は図6のとおりである。要素寸法により引張軟化曲線が異なることが確認できる。この引張軟化の構成則を用いた時の荷重変位曲線は図7のようになり、引張破壊エネルギーの概念を用いたことにより、降伏荷重およびそれ以降の挙動が一致し要素寸法依存性が軽減されたことがわかる。但し要素形状や破壊形式によっては、要素寸法の影響現れる場合があり、等価長さの規定の仕方は今後さらに検討の余地があり今後の課題である。

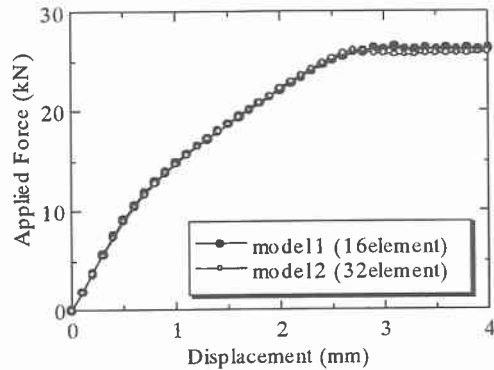


図7 荷重変位 (G_n 考慮)

2.3.2. 圧縮応力を受けるコンクリートの構成則

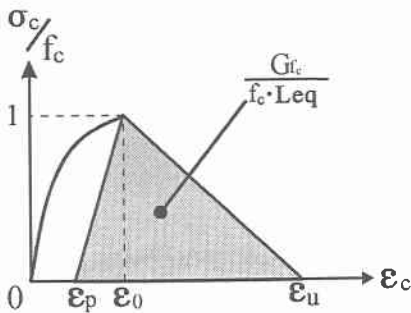


図8 圧縮破壊エネルギー

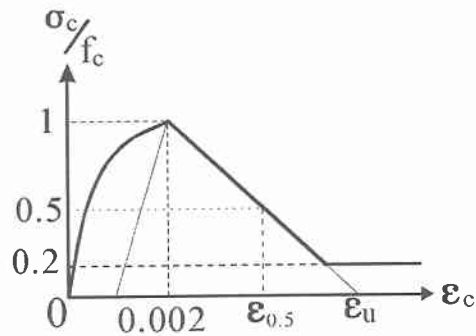


図9 R.Parkの軟化モデル

圧縮応力を受けるコンクリートの材料構成則としてひび割れ発生までは、2次元の弾塑性破壊モデルを用い、ひび割れ発生以降は、引張の構成則と同様に1本のひび割れに着目し、ひび割れ平行方向の1次元の線形軟化モデルを導入した。このモデルは図8に示したようにひび割れ発生以降は、ある限界ひずみ ϵ_u まで線形に軟化するモデルである。圧縮軟化域の研究はほとんどないがR.Park[6]は、図9に示した軟化直線を提案している。この式(Eq.4)による

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_c}{f_c} &= \{1 - z(\epsilon_c - 0.002)\} \dots \dots \dots (Eq.4) \\ \epsilon_{0.5} &= \frac{3 + 0.002 f_c}{f_c - 1000} \\ Z &= \frac{0.5}{\epsilon_{0.5} - 0.002} \\ f_c &= 300(kgf/cm^2) \\ \Rightarrow \epsilon_u &= 0.0083 \end{aligned}$$

と圧縮強度30.0(MPa)のコンクリートでは、限界ひずみが0.008程度となる。また、S.Popovics[7]の研究では圧縮応力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は(Eq.5)によって軟化領域まで表現されてい

る。この式によると圧縮強度 30.0(MPa)のコンクリートがピーク荷重の 20(%)まで軟化した時のひずみは、約 0.01 と計算することができる。更に V.Cervenka[8]の研究によると圧縮軟化領域の応力-ひずみ勾配直線は $-0.125E_c$ (E_c ; コンクリートの初期剛性)により表され限界ひずみは 0.0085 と計算することができる。但しこれらのいずれのモデルにおいても応力伝達がなくなる大ひずみ領域近傍においては検証が不十分である。

ここでまず限界ひずみを①0.004, ②0.006, ③0.008 とした 3 ケースについて、はりの終局変形におよぼす圧縮構成則の影響を感度解析により検討した。尚、解析モデルは 2.2.で示した 16 要素のモデル 1 を用いた。圧縮軟化直線を図 10 に、解析結果を図 11 に示す。図 10 は載荷点近傍のガウス積分点の応力履歴であり同時に圧縮軟化構成則である。図 11 より圧縮軟化勾配が大きいほどはりが脆性的に破壊に至ることが確認できる。そして、この解析により圧縮構成則の軟化勾配が曲げ破壊形式のはりの終局変形に大きく影響を及ぼすこと、換言すれば圧縮軟化の適切なモデル化によって部材の終局変形が予測できるといえる。

更にここで、圧縮破壊エネルギー G_{fc} を用いた軟化勾配の定式化を試みた。実現象では、ひび割れ発生以降、負の軟化勾配がひずみの増加に従って緩やかになるが、本解析では直線で近似した。圧縮軟化においても引張軟化と同様に応力-ひずみ関係の軟化直線が囲む面積が、圧縮破壊エネルギーと等価になるように(Eq.6)に従って限界ひずみを定め軟化直線を規定した。圧縮破壊エネルギーは、側圧、端部拘束など様々な要因に大きく依存し、既往の研究が少なく定式化されたものがほとんどないため、既往の研究[9]から端部拘束がなく普通強度コンクリートの実験結果より推定した平均的な値として 10.0(N/mm)を用いた。また等価長さは要素

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) \left(\frac{n}{n-1 + (\varepsilon_c/\varepsilon_0)^n} \right) \dots \dots \dots (Eq.5)$$

$$n = 0.4 \times 10^{-3} f_c + 1$$

ε_0 : strain at ultimate stress f_c
 $\varepsilon_0 = 0.002$
 $f_c = 4350(\text{psi})(= 30\text{MPa})$
 $\Rightarrow \varepsilon_u = 0.010$

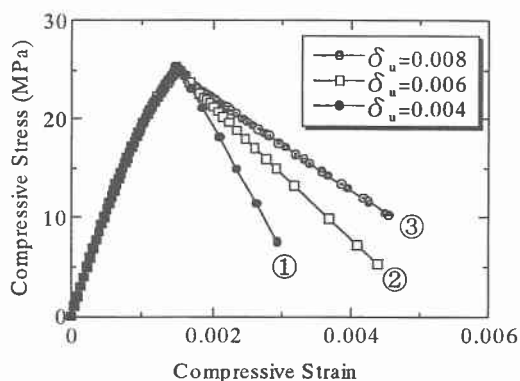


図 10 圧縮軟化構成則

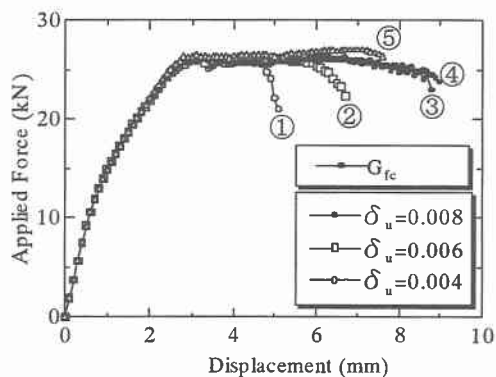


図 11 荷重変位曲線

$$\varepsilon_u = \frac{2G_{fc}}{f_c \cdot l_{eq}} + \varepsilon_p \dots \dots \dots (Eq.6)$$

ε_p : plastic strain

の対角線長さを用いた。このようにして導いた圧縮軟化の構成則を導入した有限要素解析によりモデル 1 のはり解析した結果を先述の感度解析の結果とあわせて図 11 の④に示した。尚、⑤は、ひび割れ発生以降も圧縮の構成則に弾塑性破壊モデルを用いた場合の解析結果である。弾塑性破壊モデルでは、ひび割れ発生後のひずみ軟化が比較的小さいためこのようにポストピークの荷重低下が小さいのは肯ける結果である。圧縮破壊エネルギーに基づいて解析された④は R.Park, S.Popovics, V.Cervenka らの圧縮軟化モデルから導かれた限界ひずみとほぼ等しい③0.008 の場合と近い終局挙動を示している。しかし、圧縮破壊エネルギー、等価長さに解が大きく依存するため今後、圧縮破壊エネルギー、等価長さの規定の方法に更なる検討が必要であり今後の課題である。

3.まとめ

本研究では、ひずみ軟化領域に破壊エネルギーの概念を用いた構成則を導入した有限要素解析を行った結果以下の結論を得た。

- ・引張軟化の構成則に引張破壊エネルギーおよび等価長さを導入することにより解の要素寸法依存性が低減できる。
- ・曲げ圧縮破壊形式のはりにおいては圧縮の構成則が終局変形、靱性に大きく影響を及ぼすことがわかった。つまり、軟化勾配の適切なモデル化によって終局変形が評価可能となる。また、圧縮破壊エネルギーおよび等価長さを定量化することによって圧縮軟化勾配が規定でき、終局変形を精度良く予測することができる。

【参考文献】

- [1]Hans W Reinhardt , Hans A W Cornelissen , and Dirk A Hordijk : Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete ,journal of Structural Engineering,pp2462 -2477,1986
- [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
- [3]前川宏一, 岡村甫：弾塑性破壊モデルに基づくコンクリートの平面応力構成則,コンクリート工学,pp87-99,1983.5
- [4]CEB-FIB MODEL CODE 90,Chapters1-3, pp2-5, 1991.7
- [5]Dirk A Hordijk : Local Approach to Fatigue of Concrete,1991
- [6]R Park , T Paulay : Reinforced Concrete Structure , John Wiley and Sons,1975
- [7]S Popovics : Strength and Related Properties of Concrete ,pp392-407,1997
- [8]V Cervenka : SBETA analysis of Size Effect in Concrete Structure,pp271 -281,1997
- [9]RILEM TECHNICAL COMMITTEES 148-SSC : Test Methods for The Strain-softening Response of Concrete ,Strain-softening of Concrete in uniaxial compression,pp 195-209,1997.5