

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）構造物の耐震性能を評価する場合、構造物のポストピーク挙動を精度良く予測する必要がある。RC 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。本研究ではひずみ軟化領域まで考慮した構成則を導入した有限要素解析により RC 部材の終局変形の評価を行った。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 RC 部材のポストピーク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構成則の構築を目標に解析を行った。

2.解析概要

2.1 解析手法

本研究では、RC 部材用 2 次元非線形有限解析プログラム「WCOMR」¹⁾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、不釣合力がある収束判定基準を満たすまで反復計算を行った。また、ひび割れに関しては「固定ひび割れモデル」を用いた。

2.2 解析モデル

本研究では、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図 1 の要素寸法を変えた 3 つの解析モデルを用いた。尚、解析はモデルの対象性を考慮し 1/2 モデルで行った。

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

引張応力に関する構成則は、ひび割れの局所化及びそれにともなう要素寸法依存性を考慮できることが重要であり、本研究では、Reinhardt の一軸引張試験結果²⁾に破壊エネルギーを導入して定式化を行った。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後は、ひび割れ直角方向に Reinhardt の 1 次元場での実験結果を導入した。しかし、ひび割れ後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。この要素寸法依存性を低減するため破壊エネルギーを導入した。引張応力とひび割れ幅の関係は 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。引張破壊エネルギーの値は、CEB-Fib Model Code 90 に規定されている(Eq.2)を用いた。また、応力伝達がなくなる限界変位 δ_0 と引張破壊エネルギー G_{fc}

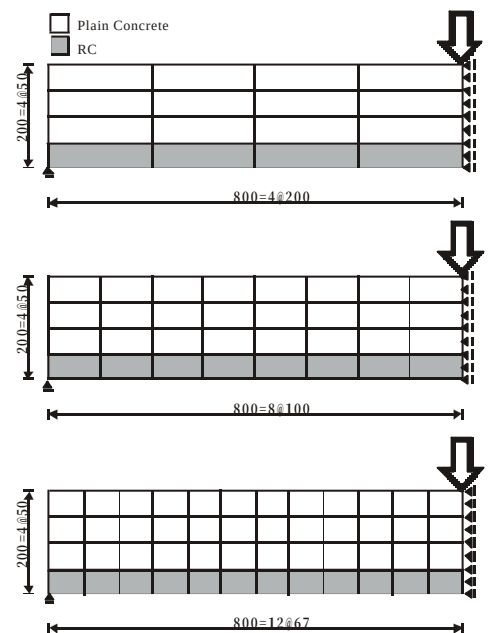


図 1 解析モデル

$$\frac{s_t}{f_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{d}{d_0} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{d}{d_0} \right) - \frac{d}{d_0} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \dots (Eq.1)$$

$$C_1 = 3.0, C_2 = 6.93$$

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

$$f_{cm0} = 10.0 \quad G_{f0} = 0.058$$

$$d_0 = 5.14 \left(\frac{G_{ft}}{f_t} \right) \dots (Eq.3)$$

キーワード 有限要素法, 構成則, ホストピーク, ひずみ軟化, 要素寸法依存性

〒060-0813 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻複合構造分野

TEL : 011(706)6220 FAX : 011(707)6582

は, D.A.Hordijk³⁾ 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ずみが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 要素中で平均的に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 (L_{eq}) を用いてひび割れ幅をひずみに換算した. 本研究では, 要素内のガウス積分点の分担領域を考え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. 引張の構成則による要素寸法依存性は主にはりの耐力に現れる⁴⁾が, 引張破壊エネルギーを導入することにより, これを低減することができた.

2.3.2 圧縮応力を受けるコンクリートの構成則

圧縮応力に関する構成則は, 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. 本研究では圧縮軟化の構成則がはり部材の終局変形性能に与える影響を調べ, 圧縮破壊エネルギーを導入し要素寸法依存性の低減を試みた.

圧縮に関する構成則は, 引張と同様ひび割れ発生までは 2 次元の弾塑性破壊モデルを用い, ひび割れ後は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 2 に示したようにひび割れ後は, ある限界ひずみ ϵ_u まで線形に軟化するモデルである. 但し, 圧縮応力の低下は強度の 10% を下限値とし, ひび割れ発生応力が圧縮強度の 40% 以上の時, つまり圧縮応力が支配的なひび割れを圧壊と定義し, ひび割れ発生直後に圧縮軟化が起こると仮定した. まず図 1 に示した 3 つの解析モデルを用いた感度解析により終局変形に及ぼす要素寸法依存性を調べた. 限界ひずみ ϵ_u を 0.008 とした軟化勾配固定の構成則を用いた場合の荷重変位曲線を図 3 に示す. このように, 圧縮軟化の要素寸法依存性は終局変形の差として現れることが確認できた. 更に圧縮破壊エネルギーを導入した軟化モデルを用い要素寸法依存性の低減を試みた. 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.4)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, 既往の研究⁵⁾より推定した平均的な値として 10.0(N/mm)を用いた. また, 等価長さは引張と同様 1 つのガウス積分点が生担する領域のひび割れ平行軸への投影長さとした. この解析より得られた荷重変位曲線を図 4 に示す. 図 4 より圧縮破壊エネルギーの導入によって要素寸法依存性が低減されたことが確認できた.

3. まとめ

曲げ圧縮破壊形式のはり部材において, 引張軟化は耐力に, 圧縮軟化は終局変形に大きな影響を及ぼすことがわかった. また, 破壊エネルギーを導入した構成則を用いることにより要素寸法依存性が低減できた. 更に, 圧縮軟化の適切なモデル化によって部材の靱性能が精度良く評価できると考えられる.

【参考文献】

- 1)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, 1990
- 2)H.Reinhardt, H.Cornelissen, and D.Hordijk: Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No11, pp2462 -2477, 1986
- 3) Dirk A Hordijk: Local Approach to Fatigue of Concrete, 1991
- 4)田所敏弥,佐藤靖彦,上田多門,角田與史雄:ポストピーク挙動に及ぼすひずみ軟化の影響,土木学会北海道支部論文集,V 部門,第 56 号(A),pp498-503, 2000.2
- 5)RILEM 148-SSC: Test Methods for The Strain-softening Response of Concrete, pp 195-209, 1997

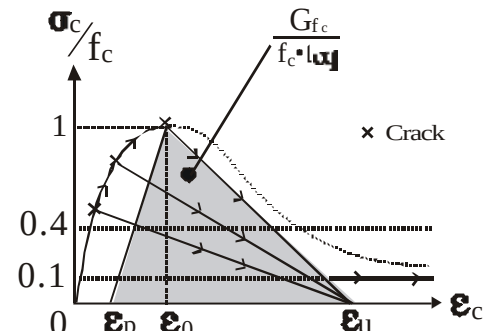


図 2 圧縮軟化モデル

$$e_u = \frac{2G_{fc}}{f_c \cdot l_{eq}} + e_p \dots\dots\dots (Eq.4)$$

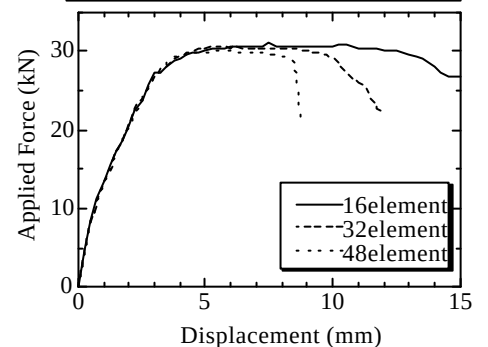


図 3 荷重変位 (G_{fc} 考慮なし)

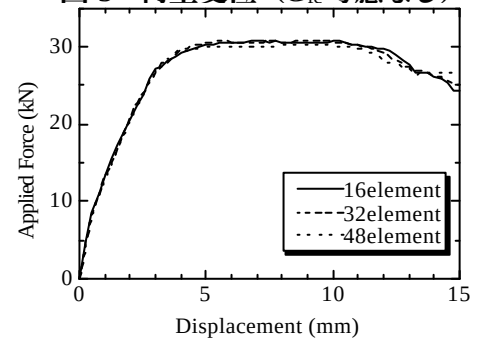


図 4 荷重変位 (G_{fc} 考慮)