

論文 鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に及ぼす圧縮軟化の影響

田所 敏弥^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}・上田 多門^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート（以下 RC と略す）部材の終局挙動を数値解析によって予測、再現するためにはコンクリートのひずみ軟化特性のモデル化が不可欠である。本研究では、破壊エネルギーの概念に基づいた圧縮・引張場における圧縮軟化モデルを 2 軸圧縮場に拡張し、せん断圧縮破壊する RC 部材の終局挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、せん断圧縮破壊する RC 部材の耐力および終局変形は圧縮軟化特性、つまり圧縮破壊エネルギーに大きく依存すると言え、圧縮強度 20(MPa)のコンクリートを用いた場合、圧縮破壊エネルギーを 40(N/mm) とすると耐力、終局変形、破壊モードおよび圧壊領域を概ね推定できることが確認できた。

キーワード：圧縮軟化、圧縮破壊エネルギー、せん断圧縮破壊、有限要素法

1. はじめに

構造物の設計が性能照査型へ移行しつつある現在、構造物の性能を合理的に評価可能な数値解析の有効性が再確認されている。しかし、せん断補強されていない RC 部材の挙動を数値解析によって精度良く予測することは、未だ困難である。最新の研究¹⁾により材料の応力履歴特性の適切なモデル化により RC 構造物の終局挙動を精度よく予測できる可能性が示唆されている。しかし、コンクリートのひずみ軟化特性がせん断破壊する部材の終局挙動にどのように影響を与えるかという視点での研究は少ない。そこで、コンクリートの圧縮に関する構成則がせん断破壊する RC 部材の変形および耐力へ及ぼす影響を検討し、精度よい予測が可能な圧縮構成則の構築を目的に本研究を行った。

曲げ破壊する RC 部材においては、著者らの研究²⁾により引張・圧縮場における圧縮軟化特性が終局変位に大きく影響を与えることが確認されている。そこで、本研究では既に検証された破壊エネルギーの概念に基づいた引張・圧縮場における圧縮軟化モデルを 2 軸圧縮場に拡張

した。そして、せん断破壊する RC 部材を用いて検証し、終局挙動に及ぼす 2 軸圧縮場における圧縮構成則および圧縮破壊エネルギーに関する考察を行った。

2. 解析概要

既往の圧縮構成則を圧縮破壊エネルギーの概念に基づき圧縮軟化領域へ拡張した。さらに、圧縮破壊エネルギーの影響をせん断破壊する RC 部材において検討した。

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」³⁾を用い構成則の拡張を行った。プログラムの概要を以下に示す。要素は 8 節点アイソパラメトリック要素を用い、修正 Newton-Raphson 法を用い残差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。また、ひび割れの発生および進展を有限要素内で平均的に考慮する分散ひび割れモデルを用いた。コンクリートの引張については Reinhardt の引張軟化曲線⁴⁾に破壊エネルギーを導入してモデル化を行った。圧縮については 3 章において述べる。また、2 軸応力下の破壊基準に関し

*1 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 工修（正会員）

*2 北海道大学大学院助手 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

*3 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

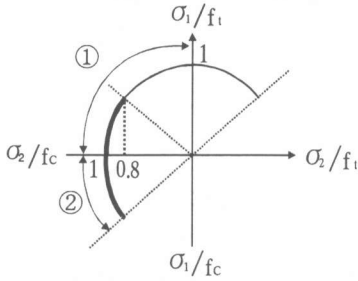


Fig.1 Crack criteria

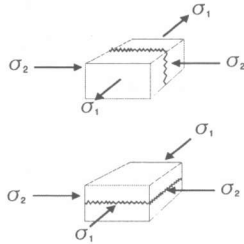


Fig.2 Crack direction

top : tension-compression stress state

bottom : biaxial compression stress state

ては圧縮・引張場における二羽モデル³⁾および2軸引張場における青柳・山田モデル³⁾を用いた (Fig.1①). また, せん断圧縮破壊する部材の载荷点直下は2軸圧縮場となるため, 数値解析を行うにあたって2軸圧縮場における破壊基準が必要となる. 本研究ではKupferの実験結果⁵⁾に基づいた破壊基準を導入した (Fig.1②). Kupferは2軸圧縮場における平板の圧縮試験を行い, 2軸応力場における破壊基準および破壊性状を詳細に調べている. なお, Kupferの実験結果に基づいた2軸圧縮場における破壊基準は弾塑性破壊モデル³⁾において等価ひずみが1となる応力レベルである. 弾塑性破壊モデルでは, 等価応力という不偏量を導入し, 2軸圧縮場では, それが1となったときに圧縮破壊するとしている.

3. 圧縮軟化領域への拡張

Fig.2 に示したひび割れ方向を考慮して引張・圧縮場および2軸圧縮場それぞれの圧縮軟化モデルを規定する.

3.1 引張・圧縮場における圧縮軟化モデル

圧縮応力を受けるコンクリートの構成則とし

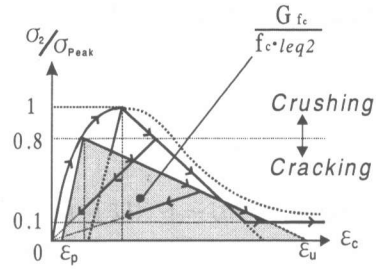


Fig.3 Compression softening (tension-compression)

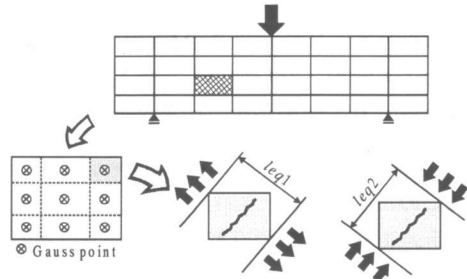


Fig.4 Equivalent length

て, 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, ひび割れ発生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 Fig.3 に示すように, ある限界ひずみ ϵ_u まで線形に軟化するモデルである.

引張・圧縮場における圧縮破壊エネルギーは, ひび割れ平行方向の圧縮応力が伝達できなくなるひずみ, つまり限界ひずみ ϵ_u に達するのに要するエネルギーと定義する. 圧縮破壊エネルギーはひび割れ平行方向の圧縮応力のみによって消費される. 圧縮軟化領域では応力-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式 (1) に従って限界ひずみ ϵ_u を定め軟化直線を規定した. また, 塑性

$$\epsilon_u = \frac{2G_{fc}}{f_c \cdot leq} + \epsilon_p \quad (1)$$

ひずみ ϵ_p は軟化開始のひずみの1/2と仮定した. 但し, 圧縮応力の低下は強度の10%を下限値とした. Kupferの実験結果によると, ひび割れ発生時に等価応力が0.8以上の時, いわゆる圧壊が起きる. よって, ひび割れ発生時の等価応力

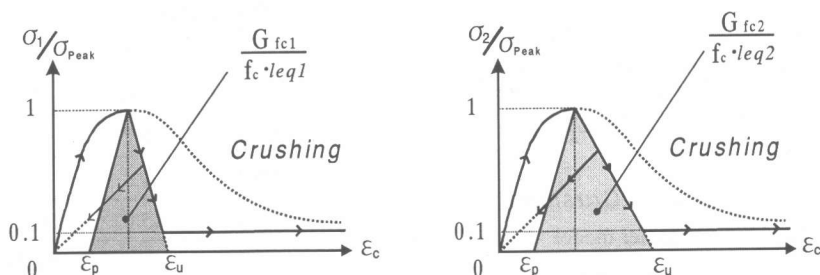


Fig.5 Compression softening (biaxial compression)

が 0.8 以上の圧縮が支配的な応力状態の時のみひび割れ発生直後に圧縮軟化が起ると仮定した。一方、ひび割れ発生時の等価応力が 0.8 より小さい、つまり引張が支配的な応力状態の時は、ひび割れ平行方向のコンクリートはまだ健全であるため圧縮応力はすぐには低下せず、等価応力が 0.8 に達するまで上昇し、その後、ひずみ軟化が起きるものと仮定した。つまり、それぞれの要素の応力状態に応じてそれぞれ異なる軟化勾配を有することになる。

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圧縮破壊エネルギーが消費される。本有限要素解析ではこの点を考慮するため、等価長さ leq を用いて限界ひずみを算出した。等価長さについては、現在も一般的に認知された評価方法がないが、本研究では Fig.4 のように等価長さを定義した。まず要素内のガウス点の分担領域をその重みから与え、ガウス点の主圧縮ひずみ軸に投影した分担領域の長さを等価長さとした。なお、引張軟化曲線に対しても、同様な考えで等価長さを定義した。

3.2.2 軸圧縮場における圧縮軟化モデル

既往の研究²⁾により曲げ圧縮破壊する部材の解析においては、引張・圧縮場の圧縮軟化モデルのみが必要であり 2 軸圧縮場の圧縮軟化モデルは必要ないことが確認されている。しかし、ディーブビームなどのせん断圧縮破壊する部材の解析を行う場合、2 軸圧縮場の圧縮軟化モデルの導入が不可欠となる。せん断圧縮破壊する部材の破壊は、荷荷に従って斜めひび割れが載

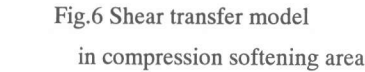
荷点近傍まで進展し、載荷点付近のコンクリートが徐々に圧壊して終局を迎える。このため載荷点近傍における 2 軸圧縮場の圧縮軟化モデルの適切なモデル化は、終局時の破壊モード、圧壊領域、終局変形および耐力を数値解析によって予測、再現する上で大変重要な要因となる。

ここで、2 軸圧縮場の破壊基準を Kupfer の実験結果に従って定義した (Fig.1②)。さらに Kupfer の実験によると 2 軸の圧縮力が作用した平板に最初に発生するひび割れの方向は、平面と平行方向、つまり面内平行方向とされる (Fig.2 下図)。このためこのひび割れの進展時に消費されるエネルギーは、引張・圧縮場ではひび割れ平行方向の 1 方向応力であるのに対し、2 軸圧縮場では 2 軸それぞれの方向において消費されることが出来る。よって 2 軸で消費される圧縮破壊エネルギーの和が引張・圧縮場における圧縮破壊エネルギーと等価であると仮定し、2 軸それぞれで消費される圧縮破壊エネルギーの分担は、式 (2) に示すようにひび割れ発生時の圧縮応力 $\sigma_{1,crack}$ $\sigma_{2,crack}$ に比例

$$G_{fc} = G_{fc1} + G_{fc2} \quad (2)$$

$$\frac{G_{fc1}}{G_{fc2}} = \frac{\sigma_{1,crack}}{\sigma_{2,crack}}$$

するものとした。また、2 軸圧縮場では等価応力が 1 の時ひび割れが発生し、圧縮応力の低下は引張・圧縮場の軟化モデルと同様に強度の 10% を下限値としモデル化した (Fig.5)。



in compression softening area



Fig.7 Specimen

固定ひび割れモデルを用いた有限要素解析によってせん断破壊する RC 部材の挙動を精度良く予測するためには、圧縮軟化モデルだけでなく適切なせん断伝達モデルの導入が不可欠である。

4. 実験概要

鉄筋比の等しいせん断補強されていないせん断破壊を起こす RC はり部材を用い、前述の構成則の検証を行い圧縮破壊エネルギーの影響を検討した。供試体 T1, T3 の形状および材料緒元を Fig.7, Table1 に示す。供試体はせん断スパン比 (a/d) 以外の断面形状、材料等は全て同一である。

(1) 実験結果

Fig.8 Relation between applied force and displacement (T1)

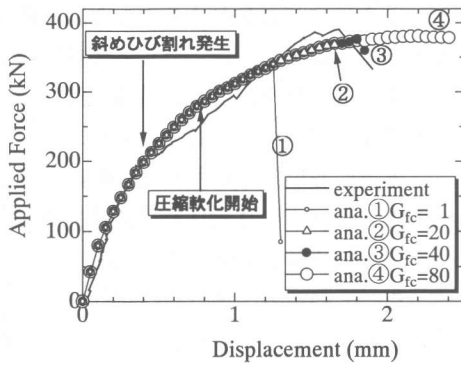


Fig.9 Relation between applied force and displacement (T3)

荷板直下のコンクリートが圧壊し部材の崩壊に至った。このことから荷重 280(kN)から 390(kN)までは載荷板近傍のコンクリートの圧縮破壊が徐々に進行し、あるレベルに達した時、部材の耐力が急速に失われ崩壊に至ることが実験により観察された。

(2) 解析結果および考察

前述の圧縮破壊エネルギーに基づく圧縮軟化モデルを用い、圧縮破壊エネルギーをパラメータとし、荷重変位関係に及ぼす影響について検討した。数値解析を行った結果を Fig.8 (供試体 T1), Fig.9 (供試体 T3) に、解析モデルを Fig.10 に示す。以下、解析結果について詳述する。

まず、せん断圧縮破壊する供試体 T3 について解析を行った。供試体 T3 では、圧縮破壊エネルギーを ① 1(N/mm) ② 20(N/mm) ③ 40(N/mm) ④ 80(N/mm)と 4 段階に変化させ感度解析を行った。解析により得られた荷重変位関係は、実験結果と共に Fig.9 に示されている。このように圧縮破壊エネルギーが大きい程、圧縮軟化勾配が緩やかになるため、終局変位および耐力が大きくなる。解析結果において圧縮軟化の開始は、変位が 0.8(mm)の時であった。①では、変位 1.25(mm)の時、載荷板の外側の要素が 2 軸圧縮状態で圧縮軟化を起こし、その荷重ステップにおいて次々に載荷板近傍のガウス点にひび割れが伝播し部材の崩壊に至った。また②では、変位 1.65(mm)の時、部材の崩壊に至った。この場合、変位 1.65(mm)の時、急速にひび

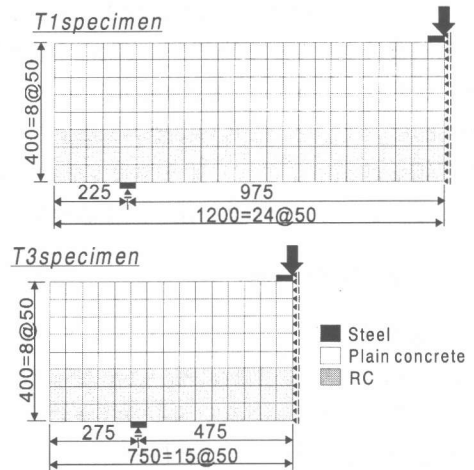
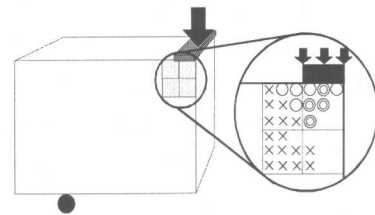


Fig.10 Finite element mesh



- ◎ Crushing (2軸圧縮場)
- Crushing (引張・圧縮場)
- × Cracking (引張・圧縮場)

Fig.11 Fracture behavior

割れが伝播したため解が収束せず、解析により耐力の低下が確認できなかった。但し、ガウス点のひび割れ状況から部材の崩壊に至ったと判断できる。次に③を検証する。この時の載荷板近傍の破壊状況を Fig.11 に示す。Fig.11 より載荷板直下から外側に圧縮軟化領域が分布し、またその一部は 2 軸圧縮状態であることがわかる。この破壊分布は、実験結果とよく一致している。③では、変位 0.8(mm)の時、載荷板直下が圧縮軟化し破壊が始まり、変位 1.34(mm)の時、2 軸の圧縮軟化が生じた。但し、ある程度圧縮破壊エネルギーが大きいため、すぐには部材の崩壊に至らず変位 1.8(mm)の時、部材の崩壊に至った。この時の耐力および終局変位は実験値とほぼ一致した。このことからせん断圧縮破壊する部材の解析において圧縮破壊エネルギーの値として 40(N/mm)が妥当であると考えられる。こ

こで、はり部材と数値解析の比較より推定した圧縮破壊エネルギーの値について既往の研究結果⁶⁾を用いて検討する。H.Nakanuraらは、異なる寸法のシリンダーを用いた要素試験より以下の圧縮破壊エネルギーに関する算定式(3)を提案している。この提案式を用い圧縮破壊エネルギー

$$G_{fc} = 8.8 \sqrt{f_c} (N/mm) \quad (3)$$

を算出すると圧縮破壊エネルギーは、39(N/mm)となり、本解析に用いた値とほぼ一致する。このことは、要素レベルの試験より得られた実験式を部材レベルの数値解析に適用できる可能性を示している。最後に④では、軟化勾配が緩やかなため急激な耐力の低下は見られなかった。このように、2軸圧縮場における圧縮軟化のモデル化を行うことによって斜めひび割れにおけるせん断軟化を考慮しなくてもせん断圧縮破壊するRC部材の挙動を概ね予測、再現することができた。

次に、斜め引張破壊する供試体 T1 の解析を行った。T1 においては①1(N/mm) ②20(N/mm) ③40(N/mm)の3種類の圧縮破壊エネルギーを用いて感度解析を行った。①では、変位 1.8(mm)の時、斜めひび割れが発生しその直後、載荷板の外側のコンクリートが圧縮軟化し、それと同時に部材が崩壊に至った。また②、③では急激な耐力の低下は見られなかった。

これは、破壊モードが供試体 T3 ではせん断圧縮破壊であるのに対し、供試体 T1 では斜め引張破壊であるためである。せん断圧縮破壊するRC部材の崩壊を有限要素解析において再現する場合、2軸圧縮場の圧縮軟化モデルにより荷重低下を表現できるが、斜め引張破壊するRC部材の破壊を再現する場合、圧縮軟化だけでは不十分であり、せん断軟化およびかぶりコンクリートの割裂破壊に関する適切なモデル化が必要と考えられる。

5. 結論

せん断圧縮破壊するRC部材を精度良く予測、

再現するために圧縮軟化を考慮した圧縮構成則を2軸圧縮場に拡張した。そして部材レベルにおいて検証した結果、以下の結論を得た。

- (1) 破壊エネルギーの概念に基づき引張・圧縮場において定義された圧縮軟化モデルを、Kupferの2軸圧縮試験結果⁵⁾に基づいた破壊基準を用い2軸圧縮場に拡張した。その結果、斜めひび割れのせん断軟化を考慮しなくてもディープビームのせん断圧縮破壊を概ね再現することができた。但し、斜め引張破壊する部材の破壊を再現することは、圧縮軟化のモデル化だけでは不十分であることがわかった。
- (2) 圧縮強度 20(MPa)のコンクリートを用いる場合、既往の要素試験レベルで検証された圧縮破壊エネルギー40(N/mm)を用いるとせん断圧縮破壊する部材の耐力及び終局変位を概ね再現できる。

参考文献

- 1) G. Markest : Strain Softening and structural analysis of beams failing in compression, FRAMCOS-3, Vol. II, pp.1183-1194, 1998.
- 2) 田所敏弥・佐藤靖彦・上田多門 : 鉄筋コンクリート部材の終局変形に及ぼす圧縮軟化の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, No.3, pp.1309-1314, 2001.4
- 3) 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.
- 4) H. Reinhardt, H. Cornelissen, D. Hordijk : Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No.11, pp.2462-2477, 1986.
- 5) Helmut Kupfer and Hubert K. Hilsdorf: Behavior of concrete under biaxial stresses, ACI Journal No.65-52, pp.259-272, 1969.
- 6) H. Nakamura, T. Higai : Compressive fracture energy and fracture zone Length of concrete, seminar on Post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10