

論文 セン断補強筋を有する RC 梁の有限要素法解析

山谷 敦^{*1}・檜貝 勇^{*2}・足立正信^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：二次元有限要素法解析によって RC 梁におけるスターラップの効果の評価するためには、横拘束効果が考慮されたコンクリートの応力-ひずみ関係を用いる必要があることを示した。また、同時に、コンクリート構造のポストピーク挙動は応力-ひずみ関係の軟化挙動と密接に関連していることから、有限要素法解析によるポストピーク挙動の評価には、エネルギー概念を導入した応力-ひずみ関係が必要であることを示した。

キーワード：スターラップ, 横拘束効果, 破壊エネルギー, 二次元有限要素法, RC 梁

1. はじめに

RC 梁のせん断挙動の解析的評価が可能になりつつあるが、せん断補強筋を有する梁への適用に関しては未解明の部分が多い。著者らは、破壊エネルギーを導入したコンクリートの応力-ひずみ関係と回転ひび割れモデルを用いた非線形有限要素法解析により、スターラップが無い RC 梁のせん断挙動を精度良く捉えられるが、スターラップを有する場合には、その効果が過小評価されることを示している¹⁾。この原因の一つには、スターラップによりコア部コンクリートの強度が増加したりピーク応力後の軟化域が延性的になる等の、三次元的な拘束効果が解析に組み込まれていなかったことが挙げられる。一方で、エネルギー概念が考慮されていない軟化モデルを用いた解析の場合には、要素分割等の影響により必ずしも解の唯一性が保証されないという問題が存在する。

本研究は、スターラップを有する RC 梁のせん断挙動を非線形有限要素法により解析し、せん断耐力に及ぼすスターラップの横拘束効果の影響を、エネルギー概念的な問題も含めて、パラメータ解析的に評価したものである。

2. 横拘束効果を考慮しない解析

横拘束効果を考慮しない解析は、基本的に著者らの論文に従った¹⁾。

2.1 解析モデルおよび解析条件

解析対象は、スターラップ量を帯鉄筋比 γ (体積比 ρ)=0.0(0.0), 0.1(0.26), 0.24(0.63), 0.4(1.03), 0.6(1.55), 0.8(2.06), 1.0(2.58)%と変化させた、せん断スパン比 $a/d=3.85, 1.92$ の2つの RC 梁である。2つの梁の寸法、断面形状および鉄筋の配置を図-1 に、コンクリートおよび鉄筋の材料諸元を表-1, 表-2 にそれぞれ示す。なお、 $\gamma=0.24\%$ のケースについては実験も行われている。解析モデルを図-2 に示す。梁解析は二次元平面応力場問題として扱った。

非線形求解法は、最大荷重点以降の軟化挙動を捉えるため変位制御型の増分解析とし、

表-1 コンクリートの材料諸元

	f'_c (MPa)	f_t (MPa)	G_{fc} (N/mm)	G_{ft} (N/mm)
$a/d=3.85$	23.7	2.14	42.8	0.168
$a/d=1.92$	24.4	2.37	43.4	0.171

表-2 鉄筋の材料諸元

	f_y (MPa)	E_s (GPa)
主鉄筋 (D29, D10)	358	182
スターラップ	356	179

*1 東電設計 (株) 技術開発本部土木技術部課長代理 (正会員)

*2 山梨大学 工学部土木環境工学科教授 工博 (正会員)

*3 東電設計 (株) 技術開発本部土木技術部長 (正会員)

*4 山梨大学 工学部土木環境工学科助教授 工博 (正会員)

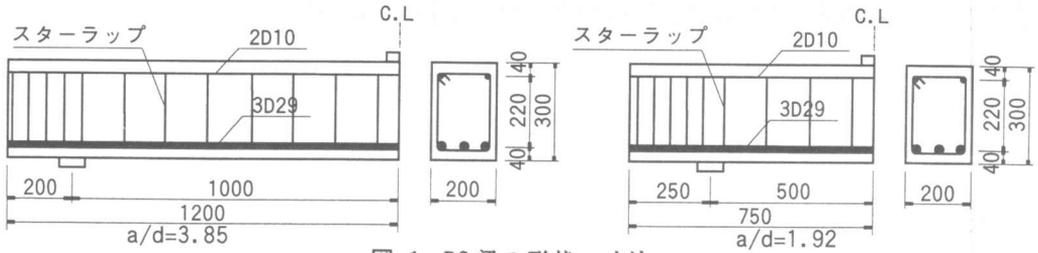


図-1 RC梁の形状・寸法

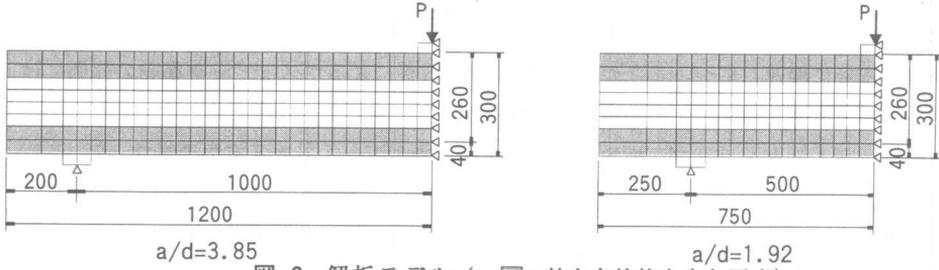


図-2 解析モデル (■:軸方向鉄筋を含む要素)

Newton-Raphson 法により収束計算を行った。コンクリートのひび割れモデルは、RC 梁のせん断挙動解析に対して有効性が確認されている回転ひび割れモデルとした。

2.2 材料モデル

最大応力までの圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係は一般的な2次放物線を用いた。圧縮軟化域は平井ら²⁾, Nakamura and Higai³⁾の研究に準拠して、圧縮側の破壊エネルギー G_{fc} を導入することにより、要素寸法によらずエネルギー吸収量を一定として、要素寸法依存性を軽減した。この G_{fc} は、供試体寸法、供試体形状、骨材寸法を変化させた一軸圧縮試験により、一軸圧縮下のコンクリートにはある特定長さの破壊局所化領域が存在することを確認し、そこで消費されるエネルギーに基づいて定式化されたものである。引張側は、引張強度 f_t までは応力-ひずみ関係を直線とした。ひび割れ発生後は引張軟化特性 (-3 乗モデル) により破壊エネルギー G_{ft} を導入し、テンションスティフニングも引張軟化特性で表現されると仮定した。なお、 G_{fc} および G_{ft} の値は表-1 に示してある。

鉄筋は降伏点以降の勾配を零とした完全弾塑性モデルとし、軸方向鉄筋は鉄筋位置にある要素の中で平均化された鉄筋比として、またスタ

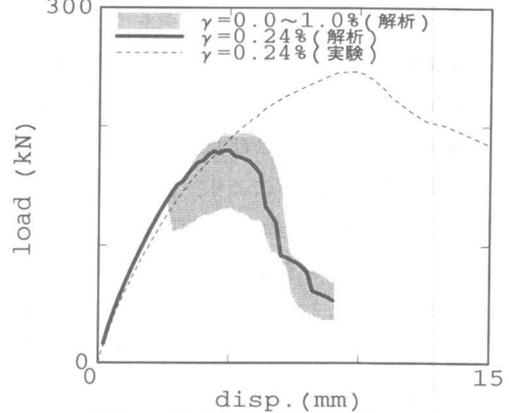


図-3 荷重-変位関係 (a/d=3.85)

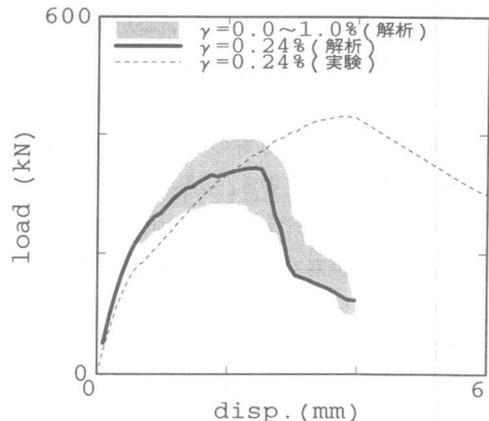


図-4 荷重-変位関係 (a/d=1.92)

ーラップは帯鉄筋比として部材全体で平均的にモデル化した。

2.3 解析結果

荷重-変位関係を図-3、図-4 に示す。a/d=3.85

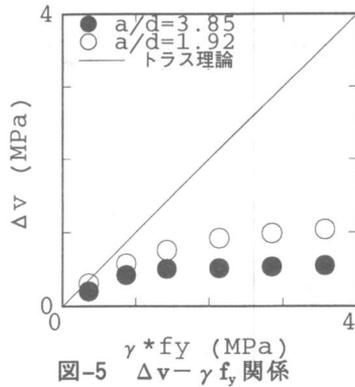


図-5 $\Delta v - \gamma f_y$ 関係

および 1.92 の場合とも、 $\gamma = 0.24\%$ の解析によるせん断耐力は実験値よりもかなり小さく、 γ が大きくなるに従ってせん断耐力の増加の割合も小さくなっている。せん断補強筋量 γf_y (f_y はスターラップの降伏強度) に対するせん断強度の増加 Δv を、トラス理論と併せて図-5 に示す。同図より、横拘束効果を考慮しない解析の場合には、スターラップによる強度増加は極めて小さく、 γf_y が小さい段階からスターラップの効果が頭打ちとなることが分かる。また、解析上は、載荷板下のコンクリートの圧壊によるひずみの局所化に伴って荷重が低下しており、スターラップ量が多い幾つかのケース ($a/d = 3.85$ は $\gamma = 0.6\%$ 以上、 $a/d = 1.92$ は $\gamma = 1.0\%$) では、スターラップの降伏以前にこの局所化が生じていた。

3. 横拘束効果を考慮した解析

3.1 拘束コンクリートのモデル

一般に、二次元平面モデルにおけるスターラップの拘束効果は、圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係の変化により考慮される。本研究では、以下のモデルに対して検討を行った。

(1) Plateau モデル

スターラップの横拘束効果により応力-ひずみ関係の軟化域は延性的になるが、その効果を極限的に考えたモデルであり、最大応力に到達した後もコンクリート応力は軟化することなく最大応力を保つとした。

(2) 星隈モデル⁴⁾

星隈モデルでは、スターラップの拘束効果が

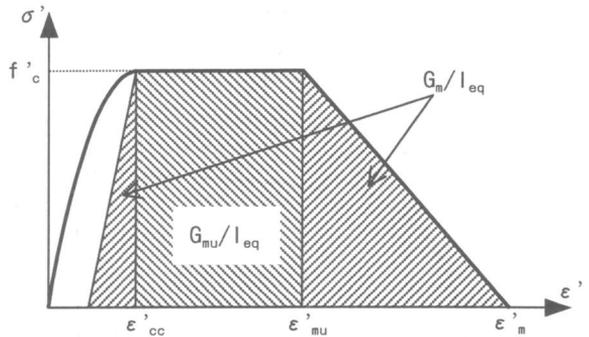


図-6 立松モデルの応力-ひずみ関係

軟化域と圧縮強度に考慮されている。また、応力上昇域が従来の二次曲線とは異なった新しい曲線によりモデル化されている。ただし、軟化域にエネルギー的な概念は含まれていない。現在、道路橋示方書・耐震設計編に採用されている。

(3) 立松モデル⁵⁾

立松は、スターラップを有し曲げ圧縮破壊する RC 梁の実験結果を基に、エネルギー概念を導入した拘束コンクリートの応力-ひずみ関係を定式化している。立松モデルの応力上昇域は従来の二次曲線であり、最大応力後は、最大応力を保持したままひずみが進行した後、直線的に応力が低下する。応力-ひずみ関係の応力平衡区間、および、ひずみ軟化区間をそれぞれ積分した単位面積当たりのエネルギーを G_{mu}/l_{eq} 、 G_m/l_{eq} として次式で表される (図-6 参照)。

$$\frac{G_{mu}}{f'_c} = 8 \left(\frac{\rho \times f_y}{s^2} \right)^{1/3} \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{mu} = \varepsilon'_{cc} + \frac{G_{mu}}{f'_c \times l_{eq}} \quad (2)$$

$$\frac{G_m}{f'_c} = \frac{G_{fc}}{f'_c} + 16 \left(\frac{\rho \times f_y}{s} \right)^{1/3} \times 10^{-2} \quad (3)$$

$$\varepsilon'_m = \varepsilon'_{mu} + \frac{2G_m}{f'_c \times l_{eq}} \quad (4)$$

$$(G_{mu}, G_m, G_{fc}: N/mm, f'_c, f_y: MPa, l_{eq}: mm)$$

ここで、 G_{fc}/f'_c は拘束のないコンクリートの圧縮破壊エネルギー、 l_{eq} は要素寸法を代表する等価長さ (本研究では要素対角線長さとする) 、

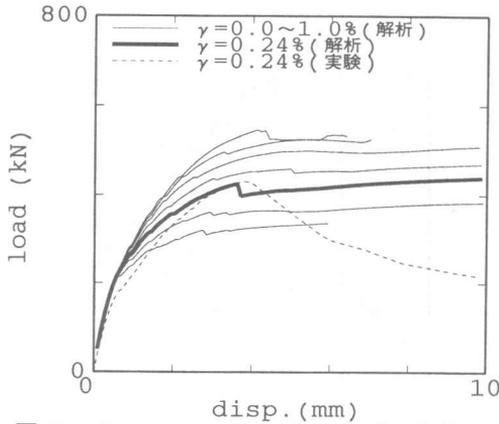


図-7 plateauモデルによる荷重-変位関係

sは帯筋間隔である。立松モデルでは、横拘束による圧縮強度の増加は考慮されていない。

(4) 複合モデル

応力上昇域の曲線および圧縮強度の変化は星隈モデルに従い、最大応力以降は立松モデルの応力平衡区間およびひずみ軟化区間を有するモデルである。最大応力以降の応力-ひずみ関係を規定する ϵ'_{mu} および ϵ'_m は立松モデルから計算される値をそのまま用いた。前述したように、立松モデルは最大応力不変の条件でピーク後の挙動が定式化されていることから、最大応力がスタラップ量によって変化する星隈モデルと組み合わせ、立松モデルの ϵ'_{mu} 、 ϵ'_m をそのまま用いることは本来厳密性に欠ける。しかし、RC梁のせん断挙動解析においては、応力-ひずみ関係の最大応力付近の影響が特に大きいと考えられることから、このモデルにより、最大応力と軟化域の両者にエネルギー概念を考慮したモデルに近い結果が得られるものと考えられる。

3.2 解析結果

(1) 荷重-変位関係および $\Delta v - \gamma f_y$ 関係

上記の4つの応力-ひずみモデルを用いて2.と同様の検討を行った。各モデルとも、 a/d に拘わらず斜めひび割れを捉え、 γ が大きくなるに従ってひび割れが分散する傾向を示した。

各モデルによる $a/d=1.92$ の荷重-変位関係を図-7~図-10に、 $\Delta v - \gamma f_y$ 関係を図-11~図-14にそれぞれ示す。

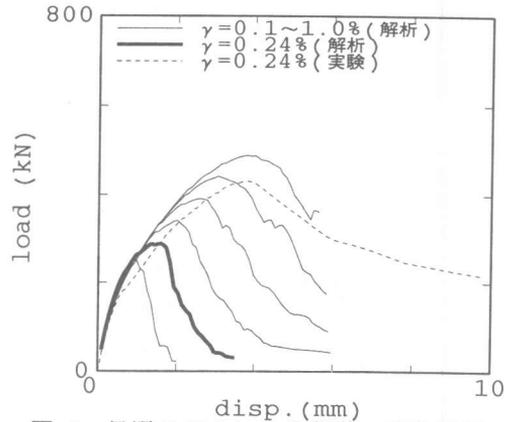


図-8 星隈モデルによる荷重-変位関係

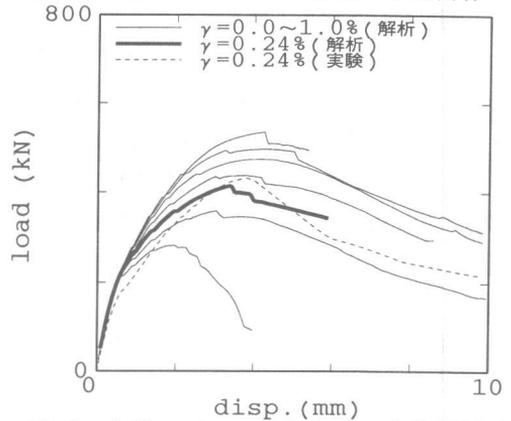


図-9 立松モデルによる荷重-変位関係

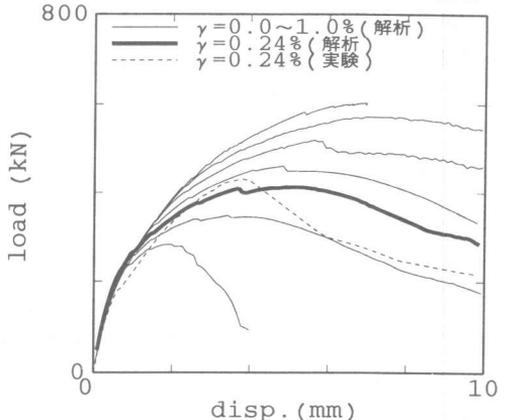


図-10 複合モデルによる荷重-変位関係

Plateauモデルは荷重-変位関係に軟化域が現れないことから、ここでは解析した範囲における最大荷重をせん断耐力とみなした。Plateauモデルは、横拘束効果を考慮しない解析結果に比べてせん断耐力および γ による強度増加が大きくなっており、応力-ひずみ関係における応力平衡区間は横拘束効果を模擬する上で有効であ

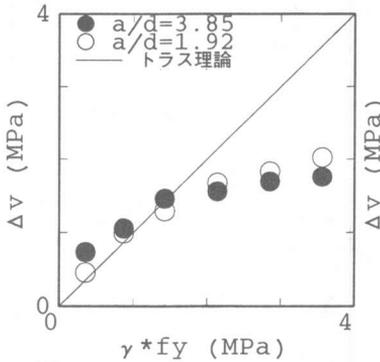


図-11 plateauモデルによる $\Delta v - \gamma f_y$ 関係

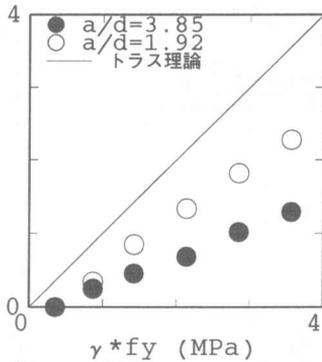


図-12 星隈モデルによる $\Delta v - \gamma f_y$ 関係

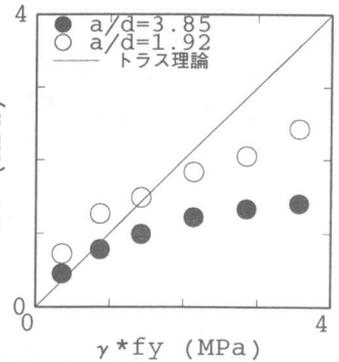


図-13 立松モデルによる $\Delta v - \gamma f_y$ 関係

ることが伺える。

星隈モデルでは、帯鉄筋がない場合に軟化勾配が無限大となり計算不能となることから、 $\gamma = 0.1\% \sim 1.0\%$ の範囲で検討を行い、 $\Delta v - \gamma f_y$ 関係は $\gamma = 0.1\%$ に対する強度増加として表した。 $\gamma = 0.24\%$ の実験結果との対応を考えると解析結果は総じてせん断耐力を小さめに評価しているが、 γ の増加に伴う強度上昇は特に $a/d = 1.92$ の梁で顕著に現れており、しかも他のモデルに比べて直線的である。横拘束効果の評価には圧縮強度の増加も重要な要素であることが分かる。

立松モデルもせん断耐力および γ による強度増加が改善されている。立松モデルと星隈モデルの荷重-変位関係を比べると、立松モデルは星隈モデルよりもせん断耐力が大きい傾向にあり、 $\gamma = 0.24\%$ の解析結果は実験結果と良い対応を示している。また、 γ による強度増加は星隈モデルと同程度であるが、 $a/d = 1.92$ で $\gamma = 0.1, 0.24\%$ のケースでは、トラス理論を上回る補強効果が見られる。

複合モデルは、今回検討したモデルの中で、せん断耐力、せん断強度増加に関して最も整合性のとれた結果を示している。すなわち、 $\gamma = 0.24\%$ のせん断耐力は実験結果とほぼ一致し、 γ の変化に伴うせん断強度の変化が最も明瞭に現れている。複合モデルによる $\gamma = 0.24\%$ のひび割れ状況を図-15、図-16に示す。 $a/d = 3.85$ の斜めひび割れは一般的な発生位置よりも載荷点に近い位置で生じており、ひび割れの再現性とし

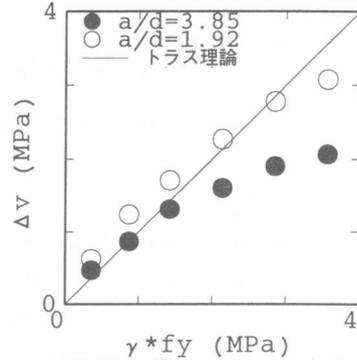


図-14 複合モデルによる $\Delta v - \gamma f_y$ 関係

ては若干問題の残る結果となっている。 $a/d = 1.92$ ではディープビーム特有の shear band が捉えられている。

また、全てのモデルに共通していることでもあるが、 $a/d = 3.85$ では γ によるせん断強度の増加の程度が $a/d = 1.92$ よりも小さい。これは、 a/d が大きくなると、前述したような斜めひび割れの再現性が問題になってくるためと考えられる。さらに、例えば複合モデルでは、 $a/d = 1.92$ の全ケースにおいてスターラップの降伏が認められたのに対し、 $a/d = 3.85$ の $\gamma = 0.8, 1.0\%$ では、2.3で述べた圧壊による局所化がスターラップの降伏に先行していたことも一因と考えられる。

以上の結果から、スターラップが多量に配置された RC 梁の挙動は未だに明確にはなっていないものの、せん断補強筋を有する RC 梁の解析では、ここで検討した複合モデルのように、圧縮側コンクリートの応力-ひずみ関係に横拘束による圧縮強度の増加と軟化勾配の変化を考

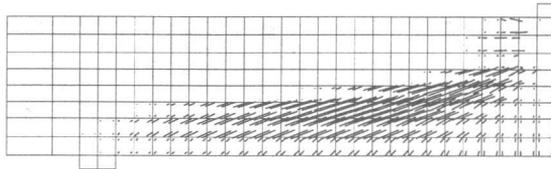


図-15 ひび割れ状況
($a/d=3.85$, $\gamma=0.24\%$)

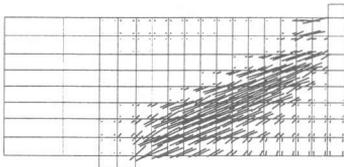


図-16 ひび割れ状況
($a/d=1.92$, $\gamma=0.24\%$)

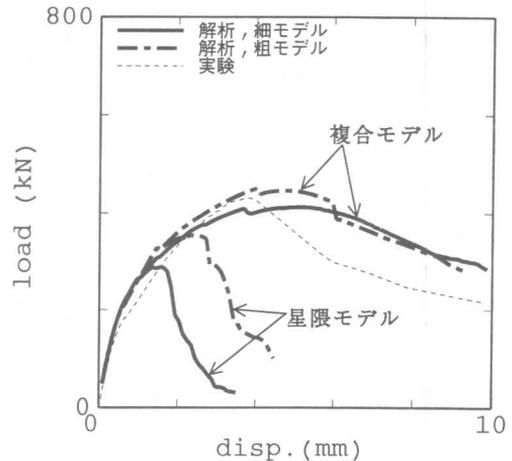


図-17 星隈モデルと複合モデルの要素寸法依存性

慮し、さらに軟化域にエネルギー概念を導入する必要があると言える。

(2) 要素寸法依存性

$a/d=1.92$ で $\gamma=0.24\%$ のケースについて、断面方向および部材軸方向の要素寸法を2倍とした粗いモデルにより同様の解析を行い、解析結果の要素寸法依存性を検討した結果を図-17に示す。星隈モデルでは軟化域にエネルギー概念が入っていないことから、せん断耐力および軟化域で要素寸法依存性が大きい結果となっている。これより、塑性ヒンジ長が規定されている道路橋示方書以外で星隈モデルを用いる場合には、十分な注意が必要であることが分かる。それに対して複合モデルでは要素寸法の影響は小さく、有限要素法により圧縮側コンクリートの影響が支配的な部材のポストピーク挙動を評価するには、解の唯一性を保証するために、圧縮側の応力-ひずみ関係にエネルギー概念を導入することが必須であると言える。

4. まとめ

本研究で得られた結果は以下のとおりである。

- (1) スターラップを有するRC部材の数値解析に、横拘束効果が含まれない応力-ひずみ関係を用いた場合には、その効果を過小評価する。
- (2) スターラップの効果を模擬するためには、スターラップによる圧縮強度の増加と軟化勾配の

変化を考慮する必要がある。

- (3) 有限要素法解析によるコンクリート部材のポストピーク挙動の評価には、引張側だけではなく圧縮側にもエネルギー概念を導入した応力-ひずみ関係が必要である。
- (4) 今後、スターラップの効果を、実験も含めて詳細に検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, 投稿中。
- 2) 平井圭, 中村光, 檜貝勇: コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp. 339-344, 1995.7.
- 3) Nakamura, H. and Higai, T.: Fracture zone and fracture energy of concrete under uni-axial compressive stress, Int. Conf. on Urban Engineering in Asian Cities in 21st Century, pp.d105-d110, Nov. 20-23, 1996, Bangkok, Thailand.
- 4) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, 土木学会論文集, V-28, No.520, pp.1-11, 1995.8.
- 5) 立松博: コンクリート柱の圧縮破壊領域に関する実験的研究, 山梨大学修士論文, 1998.2.