論文 RC はりのせん断挙動解析におけるひび割れモデルに関する検討

高橋 良輔*1·檜貝 勇*2·斉藤 成彦*3

要旨: せん断補強筋を多く有する RC はりのせん断破壊解析では圧縮ひずみの局所化によりせん断耐力を過小 評価し, せん断補強筋の効果を表現できないことが圧縮破壊エネルギーと回転ひび割れモデルを用いた研究 により指摘されている。ひずみの局所化を低減する破壊エネルギーを適用してもこの問題が発生しているこ とから, せん断破壊挙動におけるひび割れモデルの影響について調べた。その結果ひび割れモデルによる影 響はほとんどなく, せん断耐力の過小評価は圧縮破壊エネルギーによってひずみの局所化が十分低減されな いためであることがわかった。また非局所理論を適用した解析によるせん断補強筋の効果の評価も検討した。 キーワード: せん断補強筋, 回転ひび割れ, 固定ひび割れ, 破壊エネルギー, 積分型非局所理論

1. はじめに

有限要素法などによる RC はりのせん断破壊の評価に 関しては、これまでの多数の研究で問題点や適切な解析 方法などが示され、これら知見の積み重ねから評価可能 になりつつある。しかし一方で、まだ十分な評価ができ ない問題も指摘されている。

井上らは、せん断補強筋量とせん断スパン比をパラメ ータとした RC はりのせん断破壊実験と有限要素解析の 比較を行い、せん断破壊がコンクリート圧壊によって決 定されるようなせん断補強筋比の大きい RC はりの解析 において、圧縮ひずみの局所化によりせん断耐力が過小 評価され、せん断補強筋の効果を表現できない問題を指 摘している¹⁾。コンクリートのようにひずみ軟化する力 学モデルを適用した有限要素解析では、ひずみの局所化 についてはこれまでにもよく知られた問題であり、コン クリートの力学モデルに破壊エネルギーを考慮するこ とで低減できることがわかっている²⁾。井上らの研究に おいては、コンクリートの力学モデルに破壊エネルギー を用いていることから、この圧縮ひずみの局所化が井上 らの用いている回転ひび割れモデル固有のものである 可能性も考えられる。しかしながら他のひび割れモデル によるこの問題の検討は必ずしも十分ではない。

そこで本研究においては、回転ひび割れと多方向固定 ひび割れモデルを用いてせん断補強筋比とせん断スパ ンをパラメータとする RC はりのせん断挙動解析を行い, せん断破壊挙動におけるひび割れモデルの影響を調べ るとともに,せん断補強筋比が大きい場合にせん断補強 筋の効果を解析で評価できない問題について検討した。

2. 実験および解析概要

2.1 実験および解析条件

本研究では井上らの静的載荷実験¹⁾を解析対象とした。 供試体の諸元,鉄筋の性質,形状・寸法を表-1,表-2, 図-1に示す。解析では,構造部材中のコンクリートの 圧縮強度と端部拘束の影響を受けるシリンダ強度の違 いを考慮し,圧縮強度を実験値の0.85倍とした³⁾。コン クリートの弾性係数は圧縮強度より求めた⁴⁾。

図-2 に本研究に用いた有限要素メッシュを示す。解 析には 3 次元非線形有限要素解析プログラムを用いた。 メッシュは幅方向のみ対称性を考慮した 1/2 モデルであ

a/d	1	コンクリート		せん断補強筋		
	(mm)	$f_c'(N/mm^2)$	$f_t (N/mm^2)$	呼び名	s (mm)	p _w (%)
3.85	920	23.1	2.31	_	_	0.0
		27.7	2.60	D6	80	0.4
		282	2.73	D10	65	1.1
1.92	420	23.4	2.44		—	0.0
		26.6	2.42	D6	80	0.4
		26.8	2.63	D10	65	1.1

表一1 供試体諸元

表-2 鉄筋の性質

呼び名	f _y ,	E _s ,	
	N/mm ²	kN/mm ²	
D29	369	187	
D10	355	183	
D6	357	179	

* f_v: 降伏強度, E_s: 弾性係数

*a/d:せん断スパン比, l:スパン, fc': 圧縮強度, f:: 引張強度, s:鉄筋間隔, pw:鉄筋比

*1 山梨大学 工学部土木環境工学科助教 博士(工学) (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 山梨大学 工学部土木環境工学科准教授 工博 (正会員)



図-2 有限要素メッシュ

る。コンクリートと鋼板は 8 積分点を有する 20 節点ア イソパラメトリック 2 次要素でモデル化し,鉄筋はトラ ス要素とし,ばね要素でコンクリート要素に結合した。 2.2 材料モデル

非線形計算は修正 Newton-Raphson 法で,その剛性に 弾性剛性を用いた。収束判定は各節点の不平衡力による 弾性変位増分の2乗和と全変位の2乗和の比で行い,そ れが10⁻⁵以下に達することで収束とした。

(1) ひび割れモデル

コンクリートのひび割れモデルには回転ひび割れモ デルと多方向固定ひび割れモデルを適用した。いずれも ひび割れを分散的に考慮したモデルである。回転ひび割 れモデルは、ひび割れ面を常に最大主ひずみ直行方向に 一致させる方法であり、固定ひび割れモデルはひび割れ 発生時の最大主応力直交方向にひび割れ面座標系を固 定する方法である。固定ひび割れモデルではひび割れを 含むコンクリートのせん断挙動を考慮する必要がある が、回転ひび割れモデルではこれを必要としない。

固定ひび割れモデルで多方向ひび割れを考慮する方 法は多数存在するが、本研究では3次元のひび割れ面座 標系を考え、ひび割れ面直交方向、コンクリート連続方 向に応力ひずみ関係を適用するTakahashiらの方法⁵⁾を用 いた。なお本モデルで考慮するひび割れ数は一積分点に つき最大2つとした。

(2) コンクリート構成則

圧縮と引張の応力ひずみ関係は、ひび割れ発生前は主 方向に、ひび割れ発生後はひび割れ直交方向とひび割れ 面内の主方向に、2 つめのひび割れ発生後はひび割れ直 交方向、ひび割れ面の交線方向とその直交方向に適用し た。圧縮の応力ひずみ関係を図-3 に示す。本研究では 最大応力時の圧縮ひずみを 0.002 とし、それまでは圧縮 ひずみ直交方向の引張ひずみ ει による圧縮強度の低下





を考慮した Collins and Vecchio のモデル⁶を用いた。軟化 域は直線とし,軟化勾配と終局ひずみは Nakamura and Higai の研究²⁾から圧縮破壊エネルギーにより決定した。 圧縮破壊エネルギーをコンクリートの応力ひずみ関係 に適用するためには,要素寸法・形状に応じた等価長さ l_{eq}が必要となる。本研究ではこれを要素体積の3 乗根と した。引張側の応力ひずみ関係は,ひび割れ発生前を弾 性とし,ひび割れ発生後には引張軟化域に引張破壊エネ ルギーを考慮した-3 乗モデル¹⁾を用いた。

ひび割れの発生は、実験に基づく2次元ひび割れ発生 基準⁷⁾を3次元に拡張したもの⁵⁾により判定した。

固定ひび割れモデルにおける,ひび割れを含む面内の せん断剛性は,ひび割れによるせん断伝達とひび割れ間 のコンクリートによる平均せん断剛性⁷とし,せん断伝 達モデルには李・前川のせん断伝達モデル⁷を用いた。

主筋, せん断補強筋はいずれも完全弾塑性バイリニア 型の応力ひずみ関係で, それらとコンクリート間の付着 に島らの付着応力-ずれ関係^のを用いた。

これ以降,本方法による解析を Energy 解析と呼び,解 析結果を Energy と標記する。本研究では破壊エネルギー 導入によるひずみ局所化の低減効果を確かめるため,破 壊エネルギーを用いない構成則による解析(以下, Local 解析)もあわせて行った。Local 解析に用いる構成則は, Energy 解析において圧縮側の応力ひずみ関係における



図-4 a/d = 3.85のはりの荷重変位関係

終局ひずみ $\varepsilon_m \delta 2 \times 10^2 \delta L$, 引張側の応力ひずみ関係 に Reinhardt の引張軟化モデル ⁸⁾を適用したものである。

3. 実験結果と解析結果の比較

3.1 荷重変位関係

(1) a/d = 3.85 のはり

a/d = 3.85 のはりの実験と解析での荷重変位関係の比 較を図-4 に示す。図中の実線,破線が本解析の結果で ある。実験においては無補強のはりが斜め引張破壊であ り,他の2体は曲げ破壊であった。解析では,いずれも 載荷板脇から支承付近に至る斜めひび割れと,急激な荷 重低下を示した。載荷板脇で極めて大きい主圧縮ひずみ が局所化しており,ここでのひび割れ発生と同時に圧縮 ひずみが終局に至ったことが荷重低下の原因である。主 圧縮ひずみ分布は明確な圧縮ストラットを示さず,主引 張ひずみが大きい領域が斜めひび割れ方向に広範囲に 分布しており,解析は実験での斜め引張破壊の性状を概 ね満足している。

無補強のはりの Energy 解析では、ひび割れモデルによ る最大荷重の差は 20%程度であった。回転ひび割れモデ ルがより実験値に高い適合性を示すが、固定ひび割れモ デルも実験値との差が 20%に収まり比較的良く一致して いる。剛性は、どの結果も最大荷重に至る前で実験に比 べて大きく低下し、最大荷重時変位も大きい。このこと は特に多方向固定ひび割れモデルで顕著であった。また、 Energy 解析は、Local 解析に比べて最大荷重が 10~20% 程度高く、最大荷重時の変位も大きい。このことは、ひ ずみ局所化の低減効果によるものといえる。

一方, せん断補強筋を有するはりでは, いずれにおい ても耐力を過小評価し, 特に Energy 解析では実験値の 60%~70%とかなり低い。また, 回転ひび割れモデルが 多方向固定ひび割れモデルよりも 10~20%程度耐力を 過小評価する傾向が見られた。Energy 解析の最大荷重は, 無補強同様,10%~20%程度 Local 解析よりも高くなった。

せん断補強筋の増加による曲げ破壊への移行は、荷重 変位関係上からは再現できていない。ただし最大荷重に 至る前の剛性は、無補強のようにある荷重レベルで低下 する事はなく、実験に対して良い一致を示す。なお、せ ん断補強筋は実験で $p_w = 0.4\%$ のみ降伏したが解析では 降伏しなかった。

(2) a/d = 1.9 のはり

a/d = 1.9のはりの実験と解析の荷重変位関係を2-5に示す。実験では $p_w = 1.1$ %のはりが曲げ破壊で,他の2 体はせん断圧縮破壊であった。解析はいずれもせん断破 壊で,a/d = 3.85のはり同様に斜めひび割れの発生と急 激な荷重低下を示し,荷重低下は主圧縮ひずみの局所化 域での圧縮軟化によるものであった。主引張ひずみが大 きい領域の幅が狭く,主圧縮ひずみ分布は圧縮ストラッ トの存在を明確に示しており,解析は実験でのせん断圧 縮破壊の性状を概ね満足している。

無補強の Energy 解析では、固定ひび割れモデルを用い た場合、実験値の 90%の耐力となり良い一致を見せる。 しかし、回転ひび割れモデルは実験値の 70%の耐力とな り、ひび割れモデル間の差が大きい。また、回転ひび割 れモデルは Local 解析と Energy 解析の結果があまり変わ らず、破壊エネルギーの効果がひび割れモデルにより異 なる結果となった。一方、最大荷重に至るまでの剛性の 変化はひび割れモデルによらず実験に良く一致してい る。せん断補強筋を有するはりでは、a/d = 3.85のはりと 同様な傾向を示した。なお、せん断補強筋は実験と解析 で $p_w = 0.4\%$ のみ降伏し、解析は実験より降伏が早かった。



3.2 せん断補強筋の効果

図-6 にせん断補強筋比と最大荷重の関係を示す。図 中, Energy, Local と示されているのが本解析結果である。 無補強の場合は、せん断耐力を概ね評価できているが、 せん断補強筋を有する場合は、耐力が実験値の 60% ~ 70%と低く、せん断補強筋による耐力上昇の傾向も一致 しない。特に pw = 0.4%以降では、せん断補強筋の増加 による耐力上昇がほとんど見られず、せん断補強筋の効 果を評価できていない。これは前述のように、圧縮ひず みの局所化による早期の圧縮軟化に起因し、過去の研究 結果¹⁾と一致する。また、回転ひび割れモデルと多方向 固定ひび割れモデルの傾向がほぼ一致するため、この問 題が回転ひび割れモデルに固有ではないことがわかる。

圧縮破壊エネルギーによる圧縮ひずみ局所化の低減 効果は、荷重変位関係で確認されたが、図-6では Energy 解析, Local 解析でのせん断補強筋による耐力上昇の傾 向がほぼ等しく、せん断補強筋効果の評価に対する圧縮 破壊エネルギーの効果はほとんど見られなかった。

4. 積分型非局所理論の適用

4.1 積分型非局所理論

松井らは、せん断圧縮破壊するはりの有限要素解析に

積分型非局所理論⁹⁾に基づく構成則を適用することで, ひずみの局所化が低減され,実験値を概ね妥当に評価で きることを示している¹⁰⁾。また,破壊エネルギーを適用 しても局所化傾向は見られ,非局所理論を用いた場合に, より実験値に近い主ひずみの拡がりを表現できるとし ている。そこで,圧縮ひずみの局所化を低減し,せん断 補強筋効果を正しく評価するため,積分型非局所理論を 適用した解析(以下, Non-local 解析)を行った。

積分型非局所理論は空間積分領域内のコンクリート のひずみ(局所ひずみ)を平均化して非局所ひずみとし, 非局所応力ひずみ関係での割線剛性を,局所ひずみに適 用して応力を得る方法である。すなわち局所の損傷状態 は空間積分領域内の平均損傷状態によって決定される。

本研究では全体座標系でのひずみ6成分に対して平均 化を行った。Non-local 応力ひずみ関係にはLocal 解析と 同じ構成則を用い,ひび割れモデルにも回転ひび割れモ デルと多方向固定ひび割れモデルを用いた。そのため本 研究における非局所剛性は,主方向あるいはひび割れ座 標系の各座標軸方向において計算される。空間積分領域 の値は材料の固有値として与える方法が提案されてい る¹⁰⁾。しかし,これらは圧縮や引張ひずみに対するもの であり,本研究で平均化の対象とするせん断ひずみの非



局所領域については十分に検討されていない。そこで、 本研究では積分型非局所理論を物理現象に依存しない 一つの計算手法として捉え、空間積分領域を材料固有の 値と考えず、予備解析で適切な値を決定した。この方法 により、空間積分領域を直径が150 mmの球と決定した。 4.2 荷重変位関係およびせん断補強筋の効果

図-4, 図-5 に、Non-local 解析の荷重変位関係を示 す。いずれの解析においても解析結果は Energy 解析と同 様の傾向となり、a/d = 3.85 の無補強のはり以外、せん断 耐力を過小評価する。耐力は、特にせん断補補強筋を有 するはりにおいて差が現れた。Non-local 解析による耐力 が最も高くてより実験値に近く、以下, Energy 解析, Local 解析と耐力は低くなる。

図-6に、Non-local 解析のせん断補強筋比と最大荷重 の関係を示す。Non-local 解析の結果は、Energy 解析など 他の解析に比べ実験結果を良く表現しており、特に $p_w =$ 0.4 %以下で固定ひび割れモデルを用いた場合に良い一 致を示す。ただし、 $p_w = 0.4$ %を超える場合は、結果は改 善されているが、十分に評価できているとは言い難い。

4.3 ひずみ分布

pw = 1.1 %のはりにおける最大荷重時の最小主ひずみ 分布を図-7に示す。Local 解析では、せん断スパン比や ひび割れモデルによらず載荷板端部に圧縮ひずみが局 所化しているのがわかる。Non-local 解析のひずみ分布は 載荷板周辺のひずみの拡がりなどから、明らかに局所化 が低減されている。Energy 解析では Local 解析に比べ全 体的にひずみが分散傾向にあると言えるが、Non-local 解析と比較すれば分布は Local 解析とほぼ変わらないレ ベルである。すなわち、有限要素解析においてせん断補 強筋の効果を評価できないのは、載荷板周辺の圧縮ひず みが局所化することで、早い段階において圧縮破壊する ためである。破壊エネルギーを適用してもせん断補強筋 の効果を評価できないのは、圧縮ひずみの局所化がほと んど改善されないためであり、非局所理論を適用すれば せん断補強筋の効果をある程度表現可能であるのは、局 所化が大きく低減されるためである。

回転ひび割れモデルでは、ひび割れに沿った、圧縮ひ ずみが大きい領域が、固定ひび割れモデルに比べて広く 現れている。これは、回転ひび割れモデルにはひび割れ 面でのせん断伝達作用がないため、せん断力に対してひ び割れ平行方向のコンクリート圧縮のみで抵抗するた めと考えられる。この現象が固定ひび割れモデルに比べ 最大荷重を過小評価する原因であるかについては今後 の検討課題と言える。この他に、ひび割れモデルの違い がひずみ分布へ与える顕著な影響は見られなかった。

4.4 ひび割れ性状

せん断圧縮破壊をする a/d =1.9%のはりの実験でのひ び割れ性状は、載荷点から支点に至る斜めひび割れを示 すが、解析結果はこれを概ね評価できていた。そこでこ こでは、図-8に示す a/d = 3.85, p_w = 1.1 %のはりの、 Non-local 解析における最大荷重時のひび割れ性状につ いて検討する。本供試体では破壊機構が曲げ破壊へ移行 していることから、実験では鉛直ひび割れと部材高さ中 央から下縁へ至る斜めひび割れが混在する性状を示す。 一方,回転ひび割れモデルでは、無補強時のせん断ひび 割れ分布がそのままスパン方向に広がった分布形状に なっている。手法上,初期に発生した部材軸直交方向の 曲げひび割れは表現できていないが、斜めひび割れの進 展や拡がりは良く表現できている。多方向固定ひび割れ モデルにおいては、部材軸直交方向のひび割れと斜めひ び割れが混在しており、斜めひび割れが圧縮域まで進展 していない状況など,実験のひび割れ性状を表現できて いるといえる。圧縮域においては部材軸方向に多数のひ び割れが形成されており、解析での荷重低下はこのひび



図-8 a/d = 3.85 のはりのひび割れ性状

割れ平行方向のコンクリートの圧縮軟化によるもので ある.従って、多方向固定ひび割れモデルは、せん断補 強筋比が大きい場合の破壊機構は表現できているもの の、鉄筋降伏に至らず、曲げ圧縮破壊したものと考えら れる。Local 解析においてはこの破壊領域が鋼板付近に のみ現れており、ひずみの局所化の影響が見られた。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

(1) 本研究において用いた解析手法は、圧縮ひずみの局 所化により、圧縮が支配的なせん断破壊をするはりのせ ん断耐力を過小評価する。またこの問題は多方向固定ひ び割れモデルにおいても同様に発生し、回転ひび割れモ デル固有の問題ではない。

(2) 本解析手法においては、コンクリートの圧縮応力ひ ずみ関係に破壊エネルギーを考慮しても、圧縮ひずみの 局所化を十分に低減できず、せん断補強筋の効果を評価 することは困難である。

(3) 積分型非局所理論を適用した場合, 圧縮ひずみの局 所化が大きく低減され, せん断補強筋の効果を概ね評価 可能になる。ただし, せん断補強筋比が 0.4%を超える場 合では, まだ十分に評価可能であるとは言えず, 今後の 検討を要する。

(4) 回転ひび割れモデルは、固定ひび割れモデルに比べ、 せん断耐力を過小評価する傾向がある。回転ひび割れモ デルでは、斜めひび割れに沿った、主圧縮ひずみが大き い領域が固定ひび割れモデルに比べてより広範囲に見 られるが、これが過小評価の原因であるかについては今 後の検討課題である。

参考文献

- 井上寛規,檜貝 勇,中村 光: RC 部材における せん断補強筋の効果,コンクリート工学年次論文報 告集, Vol.21, No.3, pp.463-468, 1999.
- 2) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture

Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastec Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, 2001

- 3) コンクリート構造物の非線形解析技術小委員会 編:非線形解析によるコンクリート構造物の性能照 査-手順と検証例・照査例-,土木学会,2005
- 4) 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示 方書 構造性能照査編,土木学会,2002
- Ryosuke Takahashi, Yasuhiko Sato, Katsuyuki Konno and Tamon Ueda : 3D nonlinear Punching Shear Simulation of Steel-Concrete Composite Slab, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.2, pp.297-307, June 2005
- Collins, M. P and Vecchio F. J.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI Journal , pp.219-231, Mar./Apr. 1986
- 7) 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,技法堂出版 1991
- H.W.Reinhardt ,H.A.Cornelissen and D.A.Hordijk : Tensile Tests and Failure Analysis of Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112 No.11, pp.2462-pp.2477, November 1986
- Bazant, Z. P. and Planas, J. : Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, CRC Press, pp.489-526, 1998
- 松井義雄,権 庸吉,上田尚史,中村光:せん断圧 縮破壊するはりの局所ひずみ分布と積分型局所構 成則の適用,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.2, pp.775-780, 2006