

論文 鉄筋コンクリート柱部材のせん断ひび割れ面における応力伝達メカニズム

大家 史^{*1}・篠原 保二^{*2}

要旨：鉄筋コンクリート部材のひび割れ挙動の把握は、その損傷評価を行なう上で重要である。本研究では、曲げせん断加力を受ける柱部材を対象に、ひび割れ界面にその挙動を詳細に掴むことができる離散ひび割れモデルを設定し、3次元有限要素解析を行った。その結果、離散ひび割れモデルを適用した場合の方が、分散ひび割れモデルを用いた場合より、実験結果との対応性は高く、ひび割れ面における変位および応力状態についても適確に求めることができることを確認した。

キーワード：せん断ひび割れ、離散ひび割れモデル、応力伝達メカニズム、有限要素解析

1. はじめに

耐震設計法の性能規定化が本格化し、建築物及び各部材の安全限界、修復限界、使用限界を明確に評価する必要性が高まっている。鉄筋コンクリート部材においてこれらを把握するためには、ひび割れ挙動、特にせん断ひび割れ面における応力伝達機構を明らかにすることが重要課題の一つであり、実験的または解析的なアプローチがなされている。

鉄筋コンクリート部材に生じるひび割れを解析的に表現する手法として現在用いられているものは、分散ひび割れモデルと離散ひび割れモデルに大別できる。分散ひび割れモデルはひび割れ幅・せん断変位を要素内のひずみに置換し処理することから、ひび割れ発生位置を考慮する必要がなく適用は容易ではあるが、ひび割れ挙動は明確にはならない。それに対し、離散ひび割れモデルはひび割れ箇所をあらかじめ設定し、界面要素を設定することにより、ひび割れ面での挙動をより詳細に把握することができるモデルであるが、実験等によりひび割れ位置を特定する必要がある。

本研究では、せん断ひび割れ面における挙動を把握することを目的とし、柱部材に対して離

散ひび割れモデルを設定し、3次元有限要素解析を行なうこととする。なお、解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA8 を用いた。

2. 解析対象

解析対象としては、半田ら¹⁾による正負交番曲げせん断加力をうける4体の柱部材を設定する(図-1)。解析対象試験体一覧を表-1に、これらの材料特性を表-2および表-3に示す。

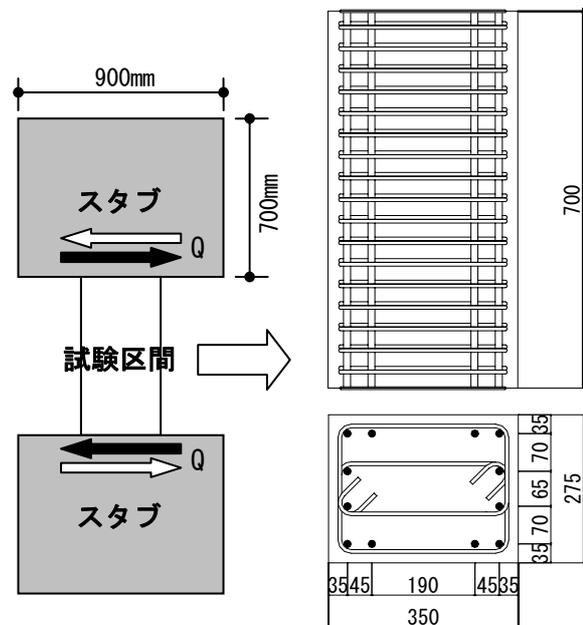


図-1 試験体図

*1 東京工業大学非常勤研究員 建築物理研究センター 工博 (正会員)

*2 東京工業大学大学院助教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

表-1 解析対象試験体一覧

試験体	D (mm)	B (mm)	M/QD	主筋	p_g (%)	せん断補強筋	$w\sigma_y$ (N/mm ²)	p_w (%)	$p_w \cdot w\sigma_y$ (N/mm ²)	σ_B (N/mm ²)	N (kN)
R-N-47	350	275	1	12-D13	1.58	$\phi 4@40$	1277	0.47	6.04	29.7	0
R-N-73						$\phi 5@40$	1280	0.73	9.31		
R-N-138						$\phi 7@40$	1317	1.38	18.2		
R-H-73						$\phi 5@40$	1280	0.73	9.31	57.7	

M/QD : せん断スパン比, p_g : 全主筋比, p_w : せん断補強筋比, $w\sigma_y$: せん断補強筋降伏応力度

σ_B : コンクリート強度, N : 軸力

表-2 コンクリートの材料特性

σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	ν
29.7	2.4	2.54×10^4	0.2
57.7	3.1	3.57×10^4	0.2

3. 解析モデル

3.1 事前検討

離散ひび割れモデルによってせん断ひび割れを表現するために、実験結果及び事前解析結果から、その位置の検討を行った。その一例として、図-2(a)は試験体 R-N-47 と R-H-73 の実験結果を、図-2(b)は分散ひび割れモデルによる解析結果を示したものである。解析結果はひび割れひずみ方向に線が描かれるため、ひび割れ方向はその直角方向になる。これら実験及び解析結果を踏まえ、せん断ひび割れ位置及び角度を定めた。その結果いずれの試験体においても、ひび割れ角度はせん断方向に対しておおむね 51 度程度となった。

3.2 要素分割

要素分割図を図-3 に示す。解析対象は対称性を有することから、x-z 平面に平行な部材中央面に対して 2 分の 1 モデルとした。支持条件は、対称面の面外方向変位を拘束し、スタブは十分な剛性を有するものと考え、柱下端の全方向変位を拘束とした。また、柱主筋は抜け出しを表現するために図のように延長し、スタブ内部の端部で完全定着とし、それ以外の部分では付着すべりを考慮した。加力は柱上部及び主筋上端に強制変位を与えた。なお、ひび割れ面における位置を特定するため、図に示すように記号 CP 及び L を設定する。

表-3 鉄筋の材料特性

鉄筋種	A (mm ²)	$w\sigma_y$ (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)
$\phi 4$	13	1277	1.89×10^5
$\phi 5$	20	1280	1.94×10^5
$\phi 7$	38	1317	2.00×10^5
D13	127	1013	1.72×10^5

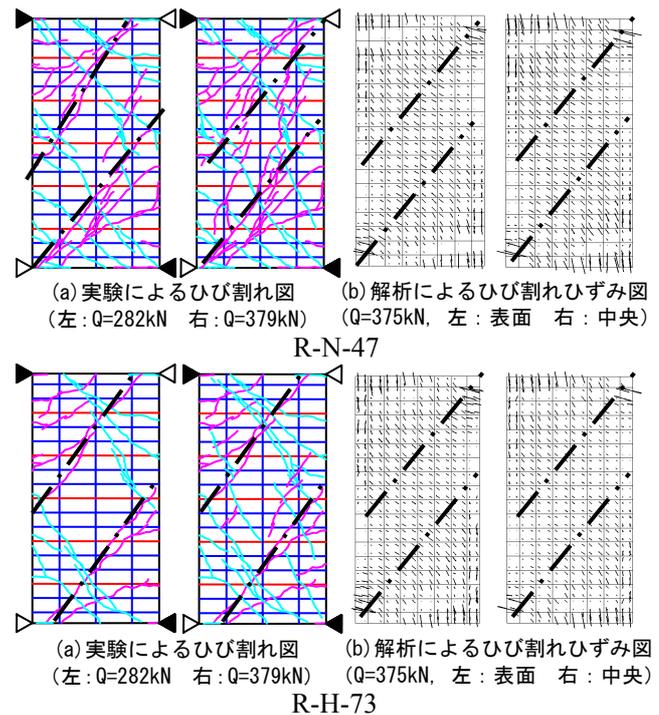


図-2 ひび割れ図およびひび割れひずみ図

3.3 構成要素の材料特性

(1) コンクリート

コンクリート母要素には 8 節点および 6 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用いた。圧縮領域には Drucker-Prager 破壊基準を採用し、内部摩擦角は 20 度に設定した。圧縮領域の応力上昇部分は図-4(a)に示すような土木学会コンクリート標準示方書の式を用い、軟化部分は図に示すように仮定した。引張領域では、Rankine の最大引張応力基準による、tension cutoff を採用した。母要素内のひび割れには、多方向固定ひび割れモデルを採用し、しきい角は 60 度、ひび割れによるせん断剛性低下率は Rots²⁾ の提案式 (1) より定めた。

$$\beta = 1 / (1 + 4447 \varepsilon_{cr}) \quad (1)$$

(2) 鉄筋

鉄筋にはトラス要素を用い、図-4(b)に示すようにひずみ硬化を考慮せずバイリニアモデルとした。

(3) 付着応力-すべり関係

主筋とコンクリートの付着応力-すべり関係は図-4(c)に示す CEB-FIP Model Code 1990 の式を用いた。なお、せん断補強筋については完全付着とした。

(4) ひび割れ界面

ひび割れ面に界面要素を用い、離散ひび割れモデルを設定した。最大引張耐力後にモデルが活性化するようにし、ひび割れ発生後の挙動は式(2)で表現される李・前川モデル³⁾を用いた。なお、最大骨材寸法径は実験に従い 13mm とした。

$$\tau = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Z' \sin \theta d\theta, \sigma = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} Z' \cos \theta d\theta \quad (2)$$

4. 解析結果と考察

4.1 荷重-部材角関係

離散ひび割れモデル及び分散ひび割れモデルを用い解析を行ない、得られた各試験体の荷重-部材角関係を実験結果と比較して図-5に掲げる。

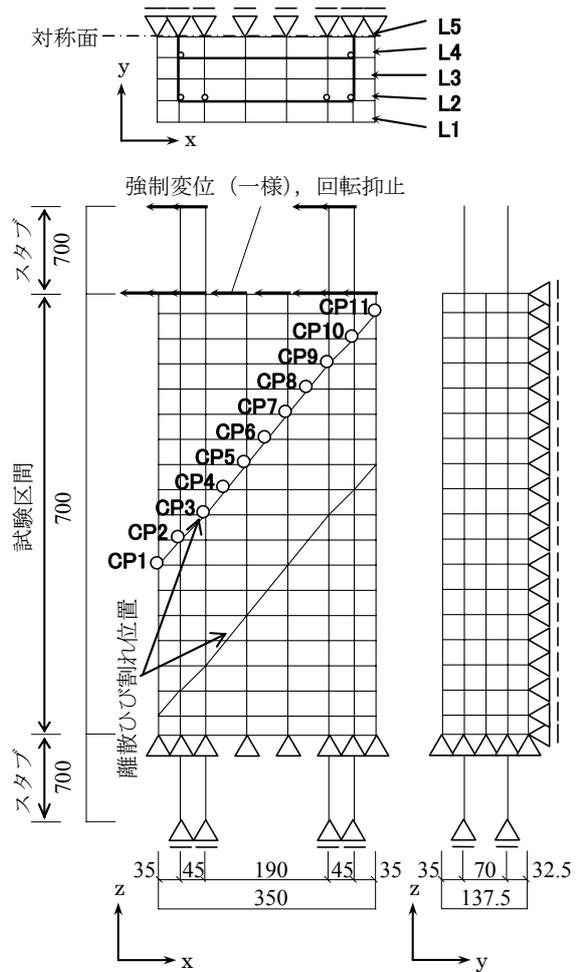
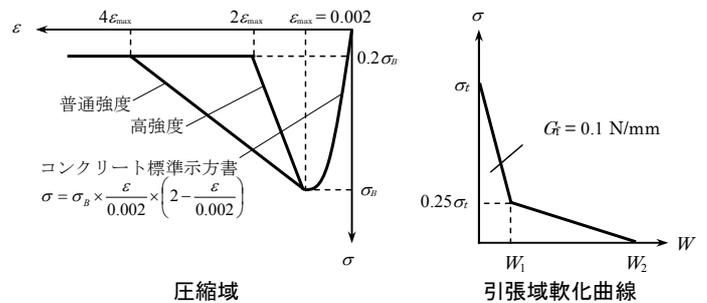
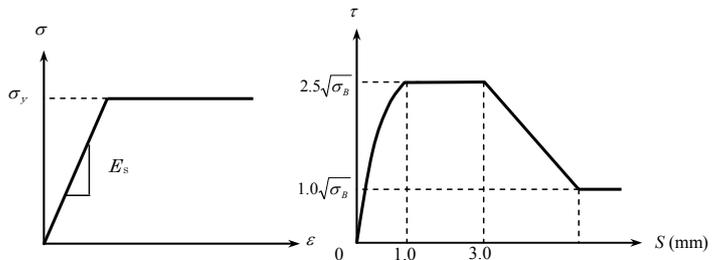


図-3 要素分割図



(a) コンクリートの応力-ひずみ関係



(b) 鉄筋応力-ひずみ関係

(c) 付着応力-すべり関係 (CEB-FIP Model Code 1990)

図-4 構成要素の材料特性

R-N-47 及び R-N-73 については、離散ひび割れモデル及び分散ひび割れモデルともに最大耐力を概ね評価できており、剛性においては離散ひび割れモデルを用いた方が、実験結果との適合性は良かった。R-N-138 においては、分散ひび割れモデルでは最大耐力が実験結果と比べかなり高くなっているのに対し、離散ひび割れモデルでは、最大耐力及び剛性ともに比較的良く対応している。R-H-73 は、

離散ひび割れモデルを用いた場合の方が対応は良いものの、何れのモデルもあまり適合性は高くない結果となった。これは R-H-73 のみ高強度コンクリートによる試験体であり、母要素および界面要素に設定したモデルは、ひび割れ面が骨材の割れにより平滑になるなど異なった特性により、適用範囲外となったことが原因と考えられ、今後の検討が必要である。

いずれの場合においても、離散ひび割れモデルを用いた場合の方が、分散ひび割れモデルの場合に比べ精度が高い結果となった。

4.2 ひび割れ界面変位

次に、ひび割れ面における挙動を見るために、離散ひび割れモデルによる解析のひび割れ界面変位に着目する。図-6 は各試験体のひび割れ位置 (CP3, CP6, CP9 : 位置については図-3 参照) における最大耐力時のひび割れ幅 ω 及びせん断変位 δ を、横軸に表面からの深さ (L1-L5)、縦軸に変位の大きさを取り、表したグラフである。

全体的な傾向として、同一コンクリート強度の場合、R-N-47, 73, 138 と補強筋量が増加するに従い、ひび割れ幅及びせん断変位が減少する傾向が見られ、この結果は実験結果と合致している。各ひび割れに着目すると、位置 CP6 ではいずれの試験体においても、せん断補強筋位置 L2,

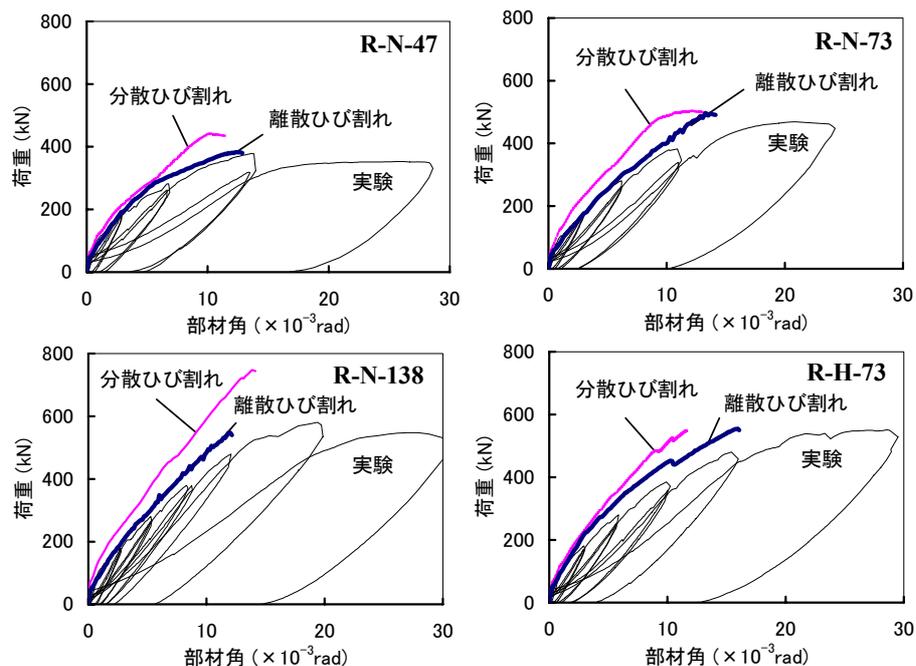


図-5 荷重-部材角関係

L4 でのひび割れ幅が小さくなっている。位置 CP9 においては、表面 (L1) より内部の方がひび割れ幅は大きくなる結果となった。

4.3 せん断補強筋の平均ひずみ分布

せん断ひび割れ進展に伴うせん断補強筋の平均ひずみ分布を確認するために、せん断荷重 $Q=380\text{kN}$ 時の各補強筋位置におけるひずみの高さ方向分布を全試験体について図-7 に示す。グラフでは周囲のせん断補強筋 (補強筋) と中子筋のひずみを併記し、解析結果と実験結果を対比して表示している。

全体の傾向として、R-N-47, 73, 138 と補強筋量が増加するに従い、単位面積あたりの負担せん断力が減少するため、各補強筋ひずみも小さくなると考えられるが、実験・解析結果ともにその傾向と良く対応がとれている。

実験結果と解析結果の比較を行うと、解析結果は、いずれの場合も上下端部では小さく、中央部では大きく評価している。中央部での相違は離散ひび割れモデルの影響が大きいものと考えられるが、普通コンクリート試験体(R-N)シリーズにおいては、比較的良い対応が見られた。高強度コンクリート試験体(R-H-73)では適合性は低く、理由としては、前述したように材料特

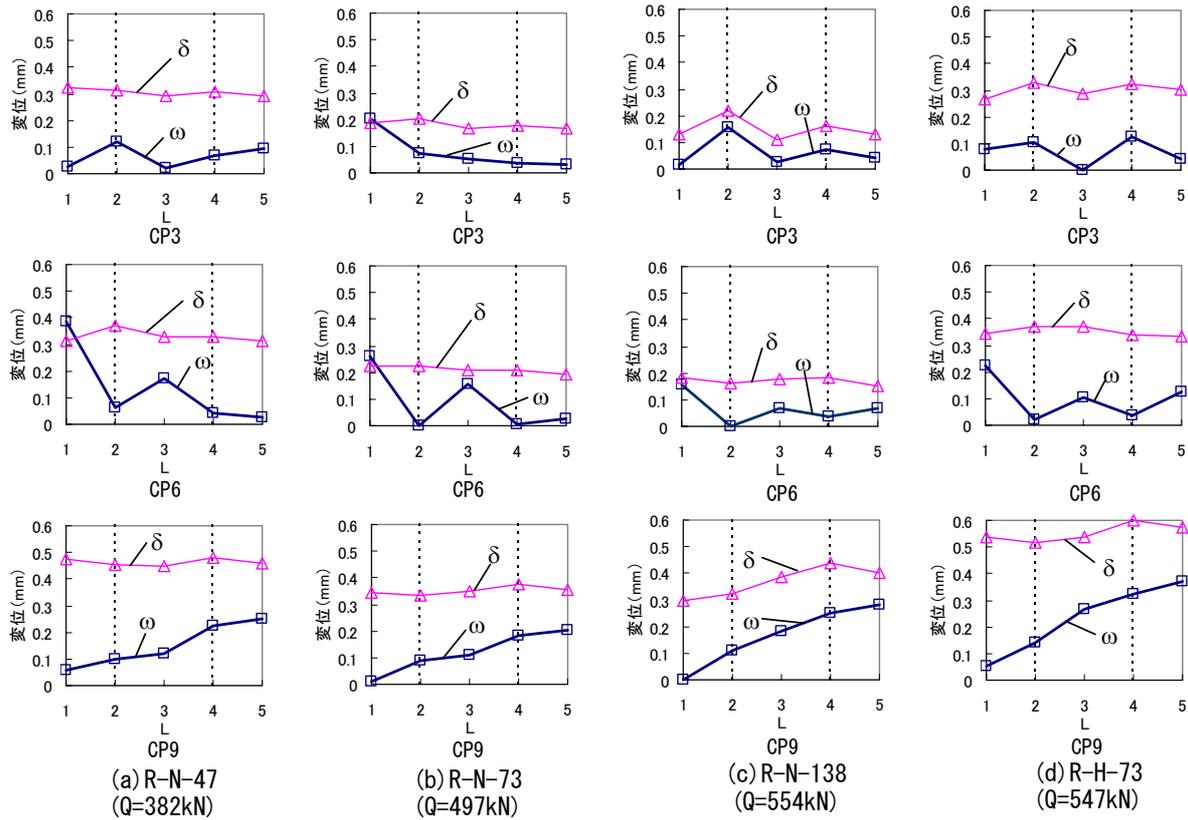


図-6 最大耐力時のひび割れ変位

ひび割れ幅 ω : ひび割れ面垂直方向変位
せん断変位 δ : ひび割れ面方向の変位

性が適用範囲外であったことが考えられる。しかしながら、実験において補強筋と中子筋のひずみ分布が同様の形状を示している点については、解析においてもよく追跡できている。

4.4 負担せん断力

図-8 に変形に伴う各部負担せん断力の変化を実験結果と解析結果を併記して示す。各部負担せん断力の算出法は、補強筋負担分については、主要な破壊面(図-2の2本の線部分)の上方を横断する補強筋の平均ひずみより求め、全せん断力から補強筋分を差し引いたものをコンクリート負担分とした。ひび割れ面負担分は4.2で示したひび割れ幅及びせん断変位より李・前川³⁾の式(2)を用いて算出し、前述のコンクリート負担分からひび割れ面負担分を差し引いたものをコンクリート圧縮域で負担するものとする。なお、実験のひび割れ面負担分は表面のひび割れから算出し、コンクリート圧縮域負担分は解析結果のみを示す。

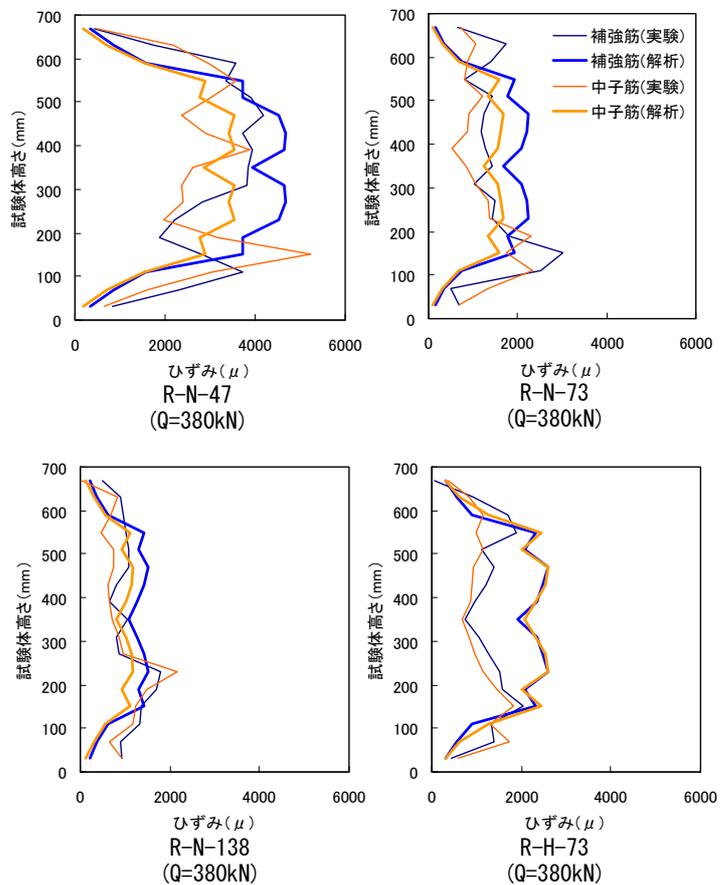


図-7 せん断補強筋の平均ひずみ分布

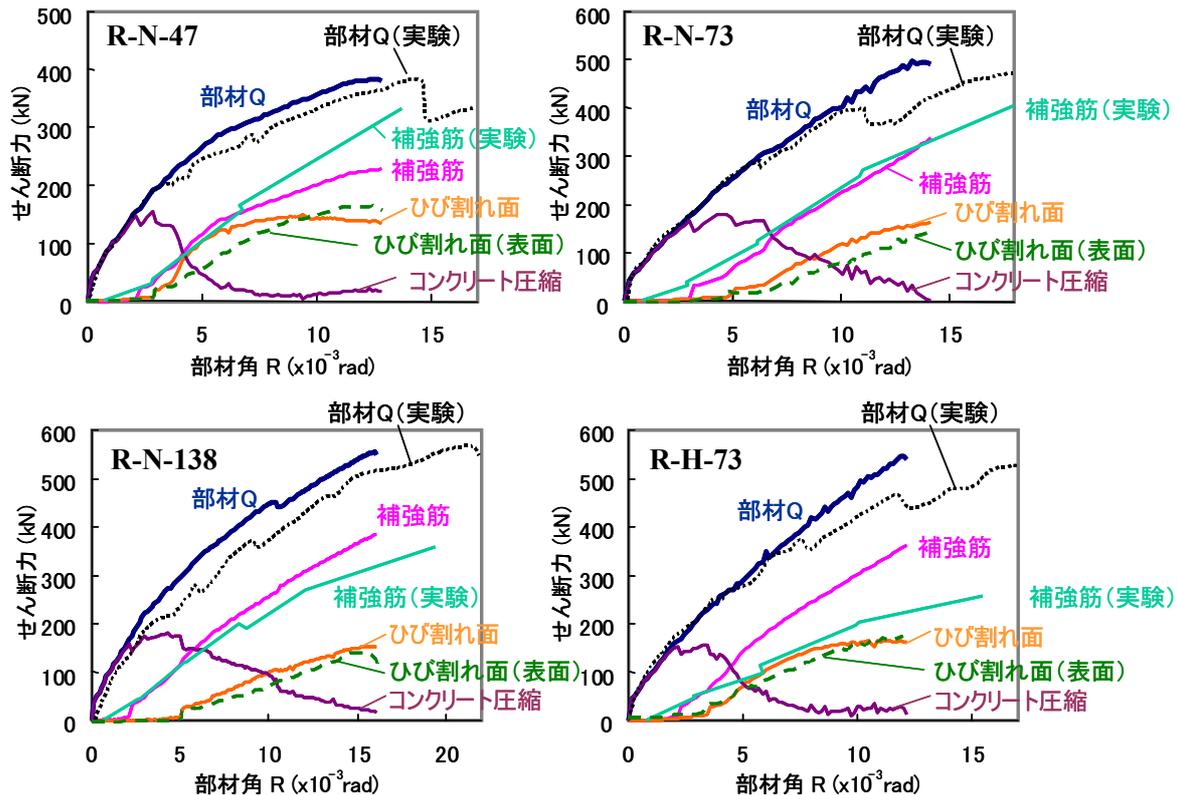


図-8 変形に伴う負担せん断力の推移

負担せん断力の推移に着目すると、全試験体において、せん断補強筋は降伏しなかったことから、いずれもその負担分は最大耐力まで上昇し続けている。ひび割れ面負担分はせん断補強筋量が少なく、ひび割れ幅が拡幅した R-N-47 試験体では、その増加がある点で上限値に達したのに対し、R-N-73, 138 試験体のひび割れ面負担分は単調増加し、R-H-73 はこれらの中間的な傾向を示した。以上の性質は実験・解析結果に共通して見られ、双方は比較的良く符合している。また、いずれの試験体においてもコンクリート圧縮域負担分は最終的にはほぼ 0 となった。

5. まとめ

本研究では、曲げせん断を受ける柱部材のせん断ひび割れ面に対し、離散ひび割れモデルを適用し、3次元有限要素解析を行った。その結果以下の知見を得た。

(1) 主たるせん断ひび割れに離散ひび割れモデルを適用した方が、分散ひび割れモデルを用いた場合より実験結果と良い対応を示した。

(2) 離散ひび割れモデルを用いると、せん断ひび割れ面における変位を把握でき、また、算出した伝達応力は、実験結果と符合した。

(3) 高強度コンクリート試験体においては、本解析で用いた材料特性を再考する必要がある。

参考文献

- 1) 半田士昌ほか：RC 柱の損傷過程におけるせん断ひび割れ挙動評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.2，pp.217-222，2004
- 2) Rots, J. G. et al.: Variable Reduction factor for the Shear Resistance of Cracked Concrete, TNO-Report BI-84-33/68.8.2001, 1984
- 3) Li, B. et al.: Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Vol. XXXX, No.1, pp.9-52, 1989
- 4) 篠原保二：コンクリートの破壊進行領域におけるせん断伝達モデル，第3回 DIANA 国際会議論文集，pp.59-69，2002.10
- 5) 篠原保二：コンクリートのひび割れ面におけるせん断伝達メカニズムに及ぼす垂直方向拘束の影響，日本建築学会構造系論文集，No.597，pp.101-108，2005.11