

論文 鉄筋コンクリート柱の損傷過程におけるせん断ひび割れ挙動および評価法に関する研究

中村 陽介*1・長江 拓也*2・香取 慶一*3・林 静雄*4

要旨: 本研究は、鉄筋コンクリート柱に関して損傷評価及び性能設計法の観点から、せん断ひび割れ幅を指標とした損傷評価法を提案することを目的とした。せん断破壊先行型試験体を対象に、せん断補強筋のひずみを指標として、せん断ひび割れ幅、部材せん断力の関係を導き、せん断ひび割れ発生から最大耐力に至るまでの部材せん断力とせん断ひび割れ幅の関係を予測できる評価法を提案した。曲げ降伏先行型せん断破壊試験体の実験を行い、曲げ降伏後、材端付近に発生したせん断ひび割れは、塑性変形の影響より進展することを示した。

キーワード: RC 柱, せん断ひび割れ幅, 損傷評価法

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC）構造物が中規模の外乱を経験した後の継続使用に対する構造的な性能、耐久性を判断する上で損傷評価は必須である。また、性能設計法においてはひび割れ幅など損傷量の定量的な評価が必要である。本研究では、これら両観点からせん断破壊先行型及び曲げ降伏先行型せん断破壊 RC 造柱のせん断ひび割れの発生から最大耐力に至るまでのせん断ひび割れ挙動を明らかにし、せん断ひび割れ幅を指標とした損傷評価法を提案することを目的とする。

本研究室での損傷評価に関する既往の研究(2003¹⁾, 2004²⁾年)のうち、せん断破壊先行型、軸力 0 を対象試験体とする。試験体図(試験区間)を図-1 に、試験体諸元及び実験結果を表-1 に示す。対象試験体と 2005 年の試験体は同形であり、加力装置は文献^{1) 2)}を参照されたい。

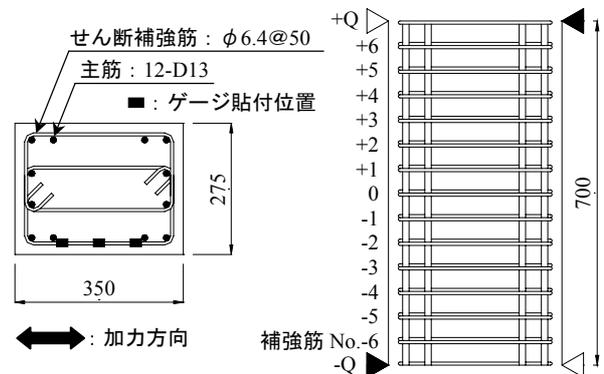


図-1 試験体形状 (R-N-N94-S,R-N-N94-B)

2. 損傷評価法

2.1 せん断破壊先行型試験体

表-1 試験体諸元及び実験結果

試験体 (年)	D [mm]	B [mm]	M/QD	主筋	p_g [%]	σ_y [N/mm ²]	せん断補強筋	p_w [%]	$w\sigma_y$ [N/mm ²]	$P_{ww}\sigma_y$ [N/mm ²]	σ_B [N/mm ²]	N [kN]	exQsc [kN]	exQsu [kN]
(03) R-N-N5-N0	350	275	1	12-D13	1.58	850	$\phi 5@40$	0.73	526	3.84	36.2	0	224	462
(04) R-N-47						1013	$\phi 4@40$	0.47	1277	6.04	137		379	
R-N-73						$\phi 5@40$	0.73	1280	9.31	124	469			
R-N-138						$\phi 7@40$	1.38	1317	18.20	133	551			
R-H-73						$\phi 5@40$	0.73	1280	9.31	57.7	164		581	
(05) R-N-N94-S						1027	$\phi 6.4@50$	0.94	289	2.70	34.8		123	307
R-N-N94-B	427						132	306						

D: 柱せい, B: 柱幅, M/QD: せん断スパン比, p_g : 全主筋比, σ_y : 主筋降伏強度, p_w : せん断補強筋比, $w\sigma_y$: せん断補強筋降伏強度, σ_B : コンクリート圧縮強度, N: 軸力, exQsc: せん断ひび割れ耐力実験値, exQsu: 最大耐力実験値

- *1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 修士(工学) (正会員)
- *2 京都大学防災研究所 COE 研究員 博士(工学) (正会員)
- *3 東京工業大学助手 建築物理研究センター 博士(工学) (正会員)
- *4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

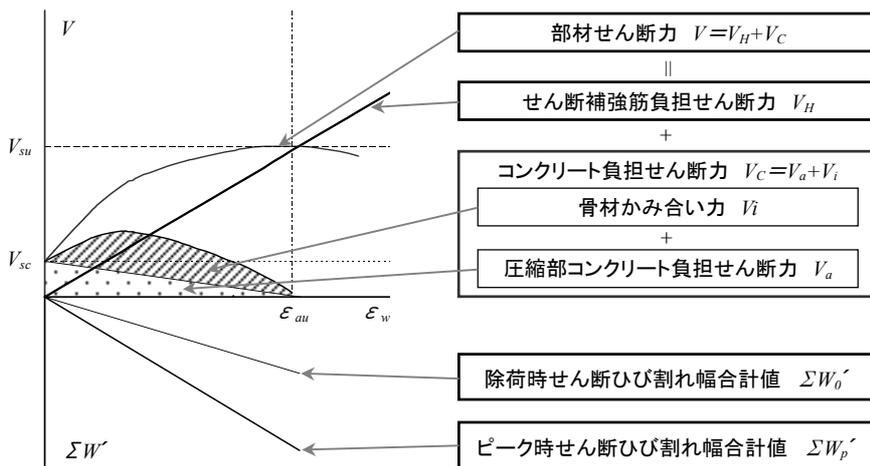


図-2 損傷評価法(概念図)

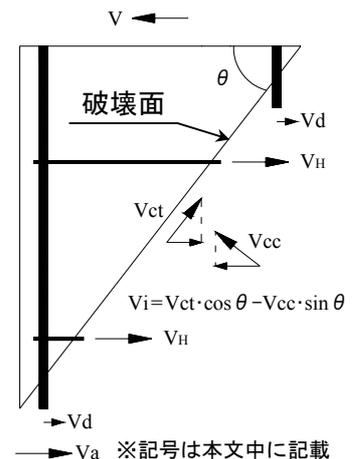


図-3 Shear-Friction Model

2.2 概略

図-2に損傷評価法の概念図を示す。損傷評価法は、せん断補強筋のひずみを指標に①補強筋ひずみ-ひび割れ幅関係、②補強筋ひずみ-部材せん断力関係の2つのプロセスに分けせん断ひび割れ幅とせん断力の関係を導入する。

ひび割れ幅は、コンクリートの引張ひずみを無視すると、ひび割れ幅の合計値が補強筋の伸び量に等しいと考えられるため、ひび割れ幅合計値 $\Sigma W'$ を損傷の指標とする。

部材せん断力は、Moehle ら³⁾が提案したShear-Friction Model(図-3)を基本に圧縮部コンクリートによる負担せん断力 V_a を導入した。RC造柱は①せん断補強筋 V_H 、②圧縮部コンクリート V_a 、③骨材のかみ合い作用 V_{ct} 、 V_{cc} 、④主筋のダウエル作用 V_d によりせん断力に抵抗するとした。なお、ダウエル作用 V_d は対象としない。

2.3 破壊面

Shear-Friction Model(図-3)での破壊面は、各サイクルにおいて最大ひび割れ幅を多数発生した卓越した1本のせん断ひび割れと定義する。各試験体の最大耐力時の破壊面角度 θ が $52 \sim 56^\circ$ (図-4)のため、平均値 53° で定義する。以降、破壊面に関して検討を行う。

2.4 ひび割れ幅-補強筋ひずみ関係

実験におけるひび割れ幅測定は、Digital Micro Scope(分解能 0.01[mm])を用い、ひび割れの長さ方向に対して直交方向のひび割れ幅 W (図-5)を計測した。ひずみゲージは、図-1に示すよう

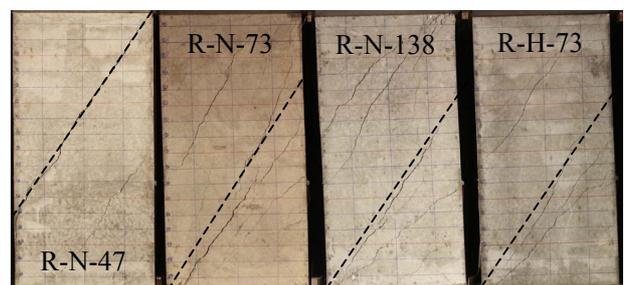
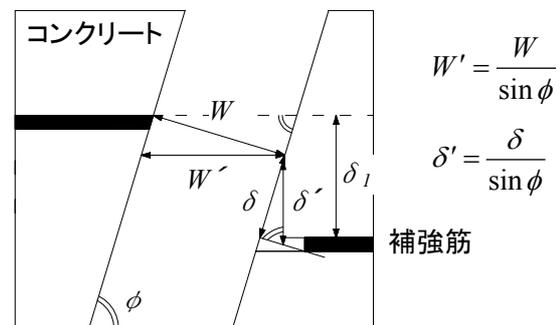


図-4 最大耐力時ひび割れ写真(----:破壊面)



W : ひび割れ幅計測値, W' : 角度補正後ひび割れ幅
 δ : せん断ずれ, δ' : 角度補正後せん断ずれ
 δ_1 : せん断ずれ計測値, ϕ : 補正角度

図-5 せん断ひび割れ幅、せん断ずれ定義

補強筋1本に対し3枚、全補強筋に貼付した。

以下に示すひび割れ性状の傾向は、本研究範囲に限るものである。

1) せん断ひび割れ残留率

各試験体の除荷時ひび割れ幅合計値 $\Sigma W_0'$ をピーク時ひび割れ幅合計値 $\Sigma W_p'$ で除したものの平均値(平均残留率)を図-6に示す。ひび割れ幅合計値 $\Sigma W'$ とは、各測定位置の角度 ϕ で補正したひび割れ幅 W' の合計値である。補強筋比の増大に伴い若干小さくなる傾向が見られた。

2) ひび割れ幅合計値－補強筋ひずみ関係

図-7 に各試験体の破壊面でのひび割れ幅合計値 $\Sigma W'$ と補強筋ひずみ 3 枚(図-1)の平均 ε_{ave} の関係を示す。破壊面における ε_{ave} と $\Sigma W'$ は良い相関を示している。図-8 にひび割れ幅合計値を補強筋平均ひずみで除した係数と補強筋比の関係を示す。ひび割れ幅合計値と補強筋平均ひずみの関係は補強筋比による影響が小さい。

3) ひび割れ幅合計値－最大ひび割れ幅関係

図-9 に各試験体のひび割れ幅合計値 $\Sigma W'$ に対する補正後最大ひび割れ幅 W'_{max} の割合と補強筋比の関係を示す。各試験体それぞれの関係は文献²⁾を参照されたい。補強筋比が高くなるほど、最大ひび割れ幅の占める割合が小さくなり、ひび割れの分散状況が分かる。

2.5 部材せん断力－補強筋ひずみ関係

1) 補強筋負担せん断力 V_H

V_H は、ひび割れ発生後、破壊面を横切るせん断補強筋が負担すると考え(式1)で表わす。

$$V_H = E_s \cdot \varepsilon_{ave} \cdot p_w \cdot \tan \theta \cdot b \cdot D \quad \dots(式1)$$

ここで、 ε_{ave} :補強筋平均ひずみ、 θ :破壊面角度
 E_s :ヤング係数

2) コンクリート負担せん断力 V_C

コンクリート負担せん断力 V_C は、圧縮部コンクリートによる負担せん断力 V_a と骨材のかみ合いによる負担せん断力 V_i より算出する。

2.1) 圧縮部コンクリートによる負担せん断力 V_a

ひび割れ発生以前は曲げ圧縮域コンクリートを斜めに伝わる圧縮力 V_a がせん断力に抵抗する。

V_a が消滅する補強筋ひずみ ε_{au} は、異なる力

学モデルであるが、終局強度指針⁴⁾のトラス・アーチ理論から V_a をアーチ機構に置き換えて導く。補強筋降伏応力を無限大と仮定し、トラス機構より生じるコンクリート圧縮束力 $c \sigma_t$ がコンクリートの有効圧縮強度 $\nu \sigma_B$ に達した時を塑性条件とし、補強筋ひずみ ε_{au} を(式2)で表す。ここで、 $\cot \alpha$ はアーチ機構が生じる余地のある範囲として $\cot \alpha = 2$ とした。ただし、 ε_{au} は補強筋降伏ひずみ $w \varepsilon_y$ 以下とする。

$$\nu \sigma_B - c \sigma_t = 0 \text{ より}$$

$$\varepsilon_{au} = \frac{\nu \sigma_B}{p_w \cdot E_s \cdot (1 + \cot^2 \alpha)} \quad (\varepsilon_{au} \leq w \varepsilon_y) \dots(式2)$$

$$\text{ここで、} \nu = 0.7 - \sigma_B / 200 \quad (\sigma_B : [\text{N/mm}^2])$$

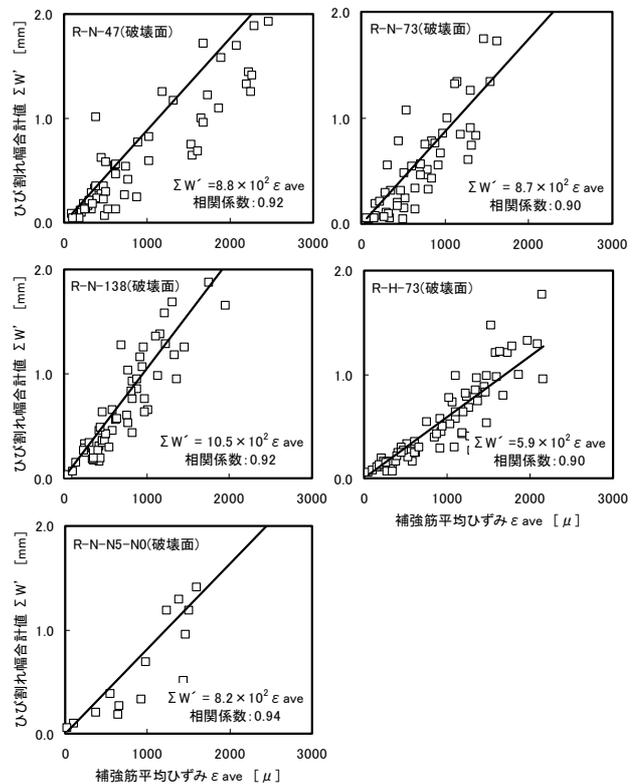


図-7 ひび割れ幅合計値－補強筋ひずみ関係

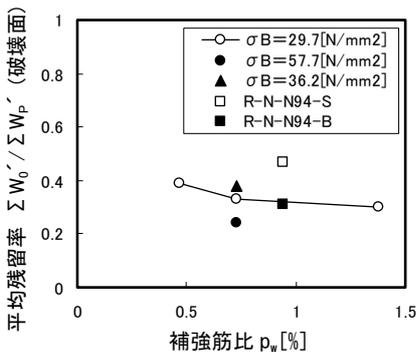


図-6 平均残留率

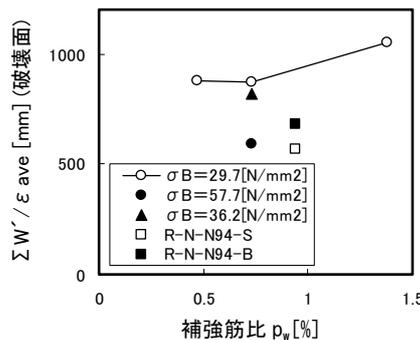


図-8 ひび割れ幅合計値に対する補強筋ひずみ

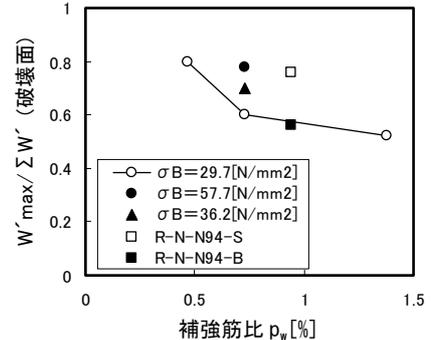


図-9 ひび割れ幅合計値に対する最大ひび割れ幅

V_a の初期値は、ひび割れ発生以前であることから、せん断ひび割れ強度で定義する。図-10に韌性指針⁵⁾のせん断ひび割れ強度計算値 caV_{sc} (式4)と実験値 exQ_{sc} の比較を示す。精度良く安全側で評価している。以上より、 V_a は補強筋ひずみにより線形に低下するとし、(式3)で表す。

$$V_a = V_{sc} \cdot \left(1 - \frac{p_w \cdot E_s \cdot (1 + \cot^2 \alpha)}{v \sigma_B} \cdot \varepsilon_{ave} \right) \quad [\text{N}] \quad \dots(\text{式} 3)$$

$$V_{sc} = \lambda \left(\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0} \right) b \cdot D / \kappa \quad [\text{N}] \quad \dots(\text{式} 4)$$

ここで、 $\sigma_T = 0.33 \sqrt{\sigma_B}$ [N/mm²]、 λ :耐力係数、 σ_0 :作用軸応力、 κ :断面形状係数(韌性指針⁵⁾)

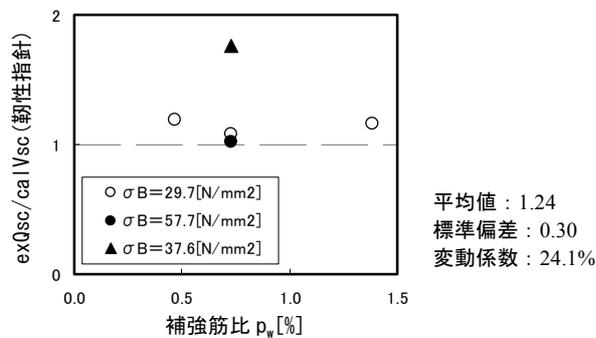


図-10 せん断ひび割れ強度の比較

2.2) 骨材のかみ合いによる負担せん断力 V_i

ひび割れ面に沿ってせん断ずれを生じると、ひび割れ平行方向及び直交方向に応力が伝達される(図-3)。破壊面に働く力 V_{ct} 及び V_{cc} は李・前川のせん断ずれ δ とひび割れ幅 W の比率に支配される応力伝達構成式⁶⁾の簡略解(式5)、(式6)を使用した。 V_{ct} 、 V_{cc} は破壊面上であることから、角度補正後の最大ひび割れ幅 W'_{max} 及び最大せん断ずれ δ'_{max} とする。 V_i はこれら2つのせん断力方向の複合力として(式7)より求める。

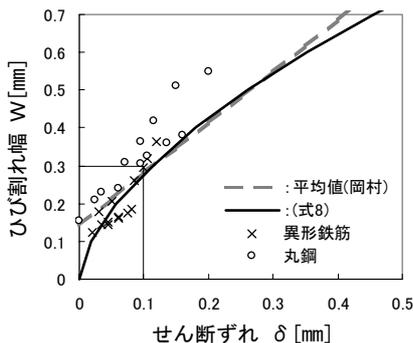


図-11 $W - \delta$ 関係

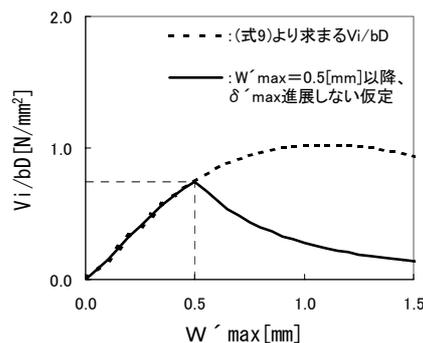


図-12 $V_i/bD - W'_{max}$ 関係

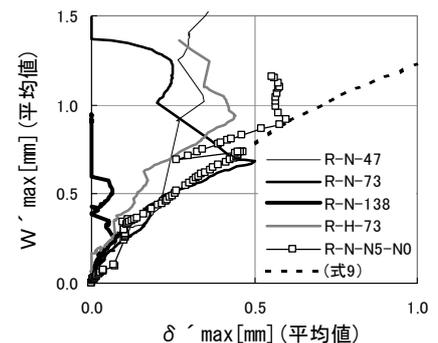


図-13 $W'_{max} - \delta'_{max}$ 関係

$$V_{ct} = \left(\frac{m \psi^2}{1 + \psi^2} \right) \cdot bD \quad [\text{N}] \quad \dots(\text{式} 5)$$

$$V_{cc} = m \left(\frac{\pi}{2} - \cot^{-1} \psi - \frac{\psi}{1 + \psi^2} \right) \cdot bD \quad [\text{N}] \quad \dots(\text{式} 6)$$

ここで、 $m = 3.83 f_c^{1/3}$ [N/mm²]、 $\psi = \delta'_{max} / W'_{max}$

$$V_i = V_{ct} \cdot \cos \theta - V_{cc} \cdot \sin \theta \quad [\text{N}] \quad \dots(\text{式} 7)$$

3) せん断ひび割れ幅 W とせん断ずれ δ 関係

既往の研究¹⁾²⁾では、せん断ずれ δ を計測していない。岡村ら⁷⁾はRC梁の実験からひび割れ幅 W とせん断ずれ δ の関係を線形(図-11)で表している。線形では、 W がある値に達するまで δ が生じず、かみ合い力 V_i が発生しないことから、指数関数として(式8)で提案する。(図-11)

$$\delta = 0.82(W)^{1.65} \quad (\text{角度補正前}) \quad \dots(\text{式} 8)$$

(式8)を $W'_{max} - \delta'_{max}$ 関係にも適用できるとし、また角度補正後を使用することから(式9)で表す。ここで、図-5の補正角度 ϕ は、破壊面角度 $\theta = 53^\circ$ とした。

$$\delta'_{max} = 0.71(W'_{max})^{1.65} \quad (\text{角度補正後}) \quad \dots(\text{式} 9)$$

図-12に(式9)の関係に基づく V_i の応力を示す。

2.6 部材せん断力 V

部材せん断力は(式10)で表される。

$$V = V_H + V_a + V_i \quad [\text{N}] \quad \dots(\text{式} 10)$$

実験値の部材、補強筋、コンクリート負担せん断力をそれぞれ Q 、 Q_H 、 Q_C と、計算値は V 、 V_H 、 V_C と表す。実験では荷重増加に伴い、曲げせん断、せん断ひび割れと破壊面角度 θ の変化を確認しており、実験値 Q_H は(式1)における θ 及び ε_{ave} にサイクル毎の値を用い算出した。 Q_C は部材せん断力 Q より Q_H を引いたものとする。

W'_{max} の値によらず(式 9)を使用した場合、計算値 V_C は補強筋ひずみの増大に伴い実験値 Q_C を上回り、その傾向は補強筋比が高いほど顕著であった。実験結果は補強筋比の高いほど Q_C が減少すること、また補強筋比に関わらず、 W'_{max} と δ'_{max} に同一の式を使用したことが実験値を上回る原因と考える。現状ではせん断ずれのデータが乏しく、今後の課題である。そこで、**図-13** に実験値 Q_C と計算値 V_C が一致するよう W'_{max} に対する δ'_{max} を求めた関係と(式 9)との比較を示す。補強筋比の最も高い R-N-138 試験体以外 W'_{max} が 0.5[mm] 程度まで概ね一致している。 W'_{max} が 0.5[mm] に達した時点で δ'_{max} が進展しないと仮定し、**図-12** に示すよう V_i を低下させることとした。**図-14** に仮定に基づく部材せん断力と補強筋平均ひずみの実験値と計算値の比較を示す。各試験体とも概ね評価できている。

2.7 部材せん断力ーひび割れ幅合計値関係

図-15 に提案した損傷評価法による部材せん断力とひび割れ幅合計値の計算値と実験値の比較を示す。各試験体とも概ね評価できている。

3. 曲げ降伏先行型せん断破壊試験体

破壊形式の異なる RC 造柱に対して提案した評価法の妥当性・可能性を示すため、主筋降伏強度のみを実験変数とした正負交番載荷実験を行った。R-N-N94-S(以下、S 型)はせん断破壊先行型、R-N-N94-B(以下、B 型)は曲げ降伏先行型せん断破壊試験体である。**表-1**(2005 年)に試験体諸元及び実験結果を示す。

3.1 ひび割れ性状

1) ひび割れ幅ー補強筋ひずみ関係

破壊面角度は S 型 56° 、B 型 55° と差はない。**図-6** に平均残留率、**図-16** に $\Sigma W' - \epsilon_{ave}$ 関係、**図-8** に $\Sigma W' / \epsilon_{ave}$ 関係、**図-9** に $W'_{max} / \Sigma W'$ 関係を示す。B 型は材端の補強筋位置 No.-6(**図-1**)の影響より $\Sigma W' - \epsilon_{ave}$ 関係のばらつきが大きい。**図-17** に B 型の破壊面における No.+2, 0, -2, -4, -6 位置(**図-1**)の補強筋平均

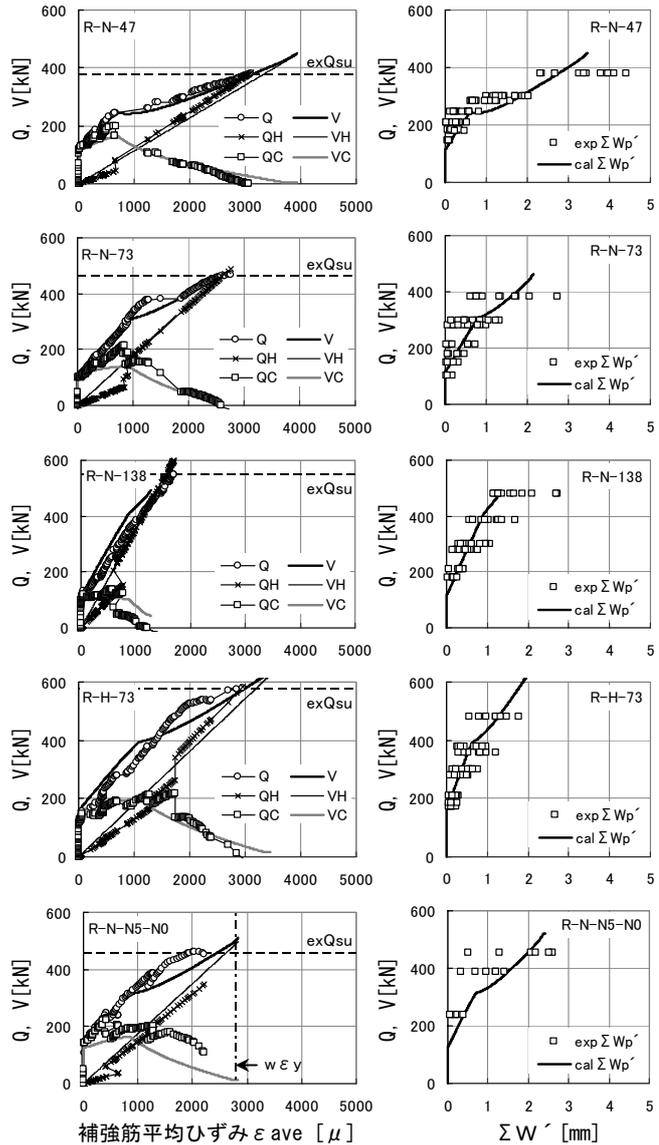


図-14 $Q - \epsilon_{ave}$ 実験値ー計算値比較

図-15 $Q - \Sigma W'$ 実験値ー計算値比較

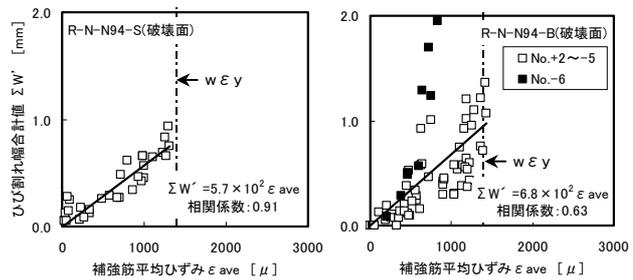


図-16 ひび割れ幅合計値ー補強筋ひずみ関係

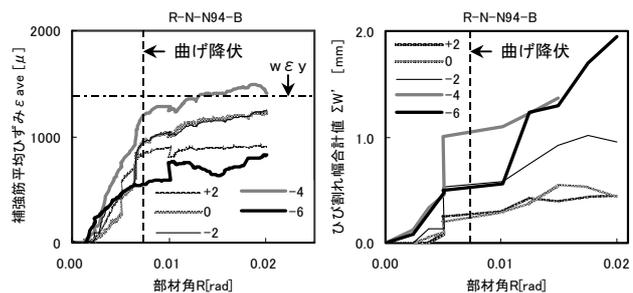


図-17 $\epsilon_{ave} - R$ 関係

図-18 $\Sigma W' - R$ 関係

ひずみと部材角関係, 図-18 に同位置でのひび割れ幅合計値と部材角関係を示す。曲げ降伏前は $\Sigma W'$ と ε_{ave} の相関は良い。曲げ降伏後, 変形の増大に伴い, 各補強筋ひずみはあまり増加しないのに対し, ひび割れ幅合計値は No.-6 位置で大きく増加している。No.+2~5 位置では曲げ降伏後も, ε_{ave} と $\Sigma W'$ に相関があることから(図-16), 材端領域(材端より 50[mm]の範囲)では塑性変形の影響によりひび割れ幅が進展したと考えられる。

2) 補強筋-補強筋中間位置ひび割れ幅関係

補強筋位置のひび割れ幅合計値 $\Sigma W'$ と補強筋中間位置の $\Sigma_m W'$ 関係を図-19 に示す。補強筋の付着力の影響が小さいと思われる中間位置でも差はなく, $\Sigma W'$ は補強筋位置で評価できる。

3) せん断ひび割れ幅-せん断ずれ関係

せん断ずれは, 図-5 に示す補強筋位置の鉛直方向のずれ δ_1 を測定し, 角度補正より算出した。破壊面における角度補正後の $W'_{max} - \delta'_{max}$ 関係(平均値)と式(9)を図-20 に示す。S,B 型とも W'_{max} が 0.5[mm]程度まで概ね(式(9))と良い対応を示した。

3.2 部材せん断力-ひび割れ幅合計値関係

図-21 に損傷評価法による $Q - \varepsilon_{ave}$ 関係, 図-22 に $Q - \Sigma W'$ 関係の計算値と実験値を示す。B 型の曲げ降伏前の部材せん断力は概ね評価できる。曲げ降伏後, 実験値 Q は一定であるのに対し, 計算値 V_H (式(1))は補強筋ひずみの 1 次関数のため実験値を上回る。 $\Sigma W'$ は, 先の検討より曲げ降伏後の材端領域のひび割れが一致しない。今後, 塑性回転角などを損傷評価法に導入し, 曲げ降伏後の補強筋負担せん断力は一定に, 材端領域のひび割れ幅合計値は進展するような発展が必要であろう。

4. 結論

(1) せん断破壊先行型試験体では, ひび割れ幅合計値と補強筋ひずみの関係は相関が良く, 補強筋比の影響が小さいと予想されることから, 損傷を表す指標として適正である。

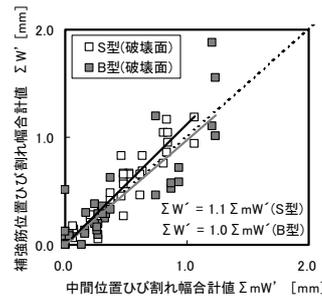


図-19

$\Sigma W' - \Sigma_m W'$ 関係

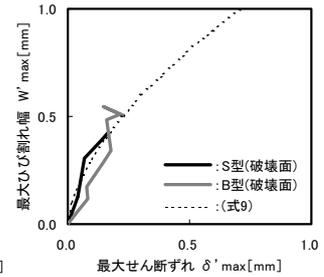


図-20

$W'_{max} - \delta'_{max}$ 関係

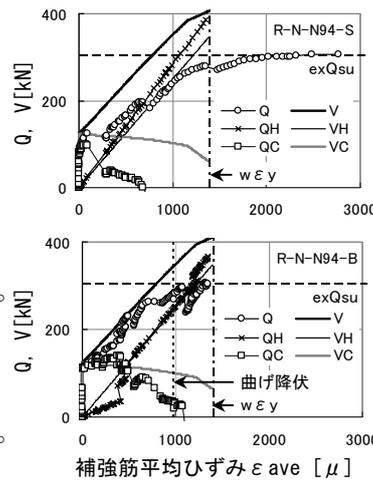


図-21 $Q - \varepsilon_{ave}$
実験値-計算値比較

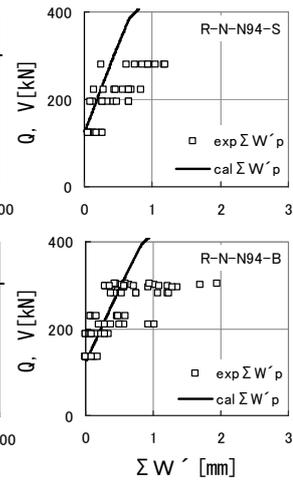


図-22 $Q - \Sigma W'$
実験値-計算値比較

- (2) 曲げ降伏後, 材端より 50[mm]の範囲内でひび割れ幅が塑性変形の影響より進展する。
- (3) 提案した損傷評価法より, せん断破壊先行型及び曲げ降伏前の部材せん断力とひび割れ幅合計値の関係が予測できる。

参考文献

- 河合繁, 林静雄 他: RC 造柱の損傷過程に軸方向力及び断面形状が及ぼす影響, JCI 年次論文集, Vol.25, No.2, pp265-270, 2003
- 半田士昌, 林静雄 他: 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, JCI 年次論文集, Vol.26, No.2, pp217-222, 2004
- K. J. Elwood, J. P. Moehle, H. Sezen: Gravity Load Collapse of Building Frames during Earthquakes, ACI SP-197, Behavior and Design of Concrete Structures for Seismic Performance, ACI, pp215-238, 2002.4
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 李宝禄, 前川宏一: 接触面密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, コンクリート工学, Vol.26, No.1A, 1988.1
- ハッサン, ホイセン・モクタル, 岡村甫 他: せん断補強筋のタイプの異なる鉄筋コンクリートはりの疲労試験, 第7回 JCI 年次講演会論文集, pp529-532, 1985