

論文 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

河合 繁^{*1}・中村 陽介^{*2}・香取 慶一^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート造柱に関して、損傷を許容した設計法の確立及び中小地震を経験した後の損傷度合の定量化の確立のための基礎的な資料を得るために、軸方向力及び断面形状を変動要因として実験を行い、せん断ひび割れ性状が損傷過程に及ぼす影響に関して検討を行った。その結果、一定軸力下と変動軸力下ではひび割れの開閉率が異なる傾向を示した。高軸力の柱に関して、損傷過程を評価する際には軸方向の圧縮力により予めせん断補強筋が歪む影響を考慮する必要があることを示した。軸方向力及び断面形状が部材のせん断応力とせん断補強筋応力の関係に大きく影響を及ぼすことを示した。

キーワード：RC 柱，軸方向力，断面形状，せん断ひび割れ，損傷評価

1. はじめに

兵庫県南部沖地震において、新耐震設計法による RC 構造物は、人命の保障という設計目標は達成できたが、残留変形や残留ひび割れ幅などの損傷量が大きく解体されたものもある。

建築基準法の性能規定型への移行に伴い、RC 造におけるひび割れなどの損傷量が性能設計を行う上で重要な因子の 1 つであり、それらを考慮した設計法の確立が求められている。

また建築物が中小地震を経験した場合には、その後の継続使用に対する安全性、使用性、補修の要否などを判断する上で建築物の損傷評価は必須であり、その評価指標としてひび割れ幅が考えられるが、基礎的なデータの不足によりその制御方は未だ確立されるまでには至っていないのが現状である。¹⁾

以上より、本研究では RC 造柱について、損傷評価方法を確立するための基礎的な資料を得るために、軸方向力及び断面形状を変動要因とし、ひび割れ幅を制御するという観点からそれらの変動要因がせん断ひび割れ性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体諸元一覧を表-1 に、試験体を図-1 に示す。断面形状は円形及び長方形とし、断面積、せん断補強筋の強度、間隔、せん断補強筋比を等しくした。またせん断スパン比をそろえるため円形の直径と同値のせいの長方形とし、せん断破壊先行型の試験体を計画した。

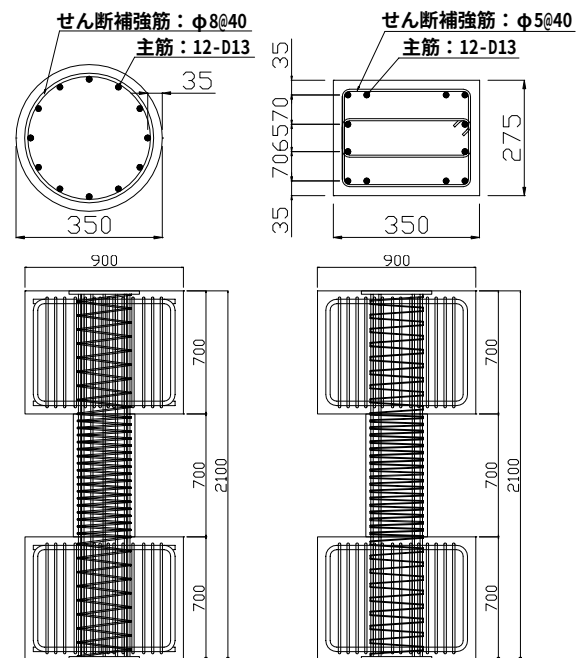


図-1 試験体

*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 工修 (正会員)

*2 神奈川大学 工学部建築学科

*3 東京工業大学助手 建築物理研究センター 工博 (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)

2.2 使用材料

使用したコンクリートの材料特性を表-2 に、鋼材の機械的性質を表-3 に示す。コンクリートは全試験体とも同様の配合としたが、軸力のない試験体2体とその他の試験体6体とは、バッチが異なる。主筋はSD390のD13を焼入れし降伏強度を800[N/mm²]以上となるように高強度化させ、せん断補強筋は降伏強度400[N/mm²]程度の鉄筋を使用し、円形柱試験体はφ8、長方形柱試験体はφ5の鉄筋を使用した。

2.3 加力方法

加力装置を図-2 に、軸力の载荷履歴を図-3 に示す。水平方向の加力方法は変位制御による逆対称正負交番繰返し载荷とし、 $R=\pm 1/400$ で1回、 $R=\pm 1/200$ 、 $\pm 1/100$ 、 $\pm 1/67$ 、 $\pm 1/50$ 、 $\pm 1/33$ 、 $\pm 1/25$ 、 $\pm 1/20$ 、は各2回ずつ繰返して载荷した。変動軸力の载荷履歴は水平荷重による荷重制御とし、軸力の最大値、最小値及び水平力载荷時の各軸力に相当する水平荷重の値は、軸力のない場合及び一定軸力を载荷した各試験体の実験結果の値を採用して決定した。

2.4 測定方法

ひび割れ幅の測定位置及び損傷評価領域を図-4 に示す。歪測定用ゲージを貼付した内、試験体中央部の①～⑤のせん断補強筋上を横切るせん断ひび割れを対象とし、デジタルマイクロスコプを用いて各部材角のピーク時及び除荷時にひび割れの長さ方向に対して直行方向のひび割れ幅を測定した。また本実験ではせん断破壊による損傷を対象とし断面形状の相違を考慮し試験体中央部に限定した領域(以下損傷評価領域)を定めて各試験体の損傷過程を評価した。

表-2 コンクリートの材料特性

バッチ	割裂強度 [N/mm ²]	圧縮強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [$\times 10^4$ N/mm ²]
①	2.6	36.2	2.36
②	2.7	33.8	2.17

表-3 鋼材の機械的性質

種類	降伏強度*1 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	降伏歪 [μ]	ヤング係数 [$\times 10^5$ N/mm ²]
D13	850	888	4796	1.77
φ8	422	696	2225	1.91
φ5	526	602	2794	1.88

*1: 0.2[%] オフセット

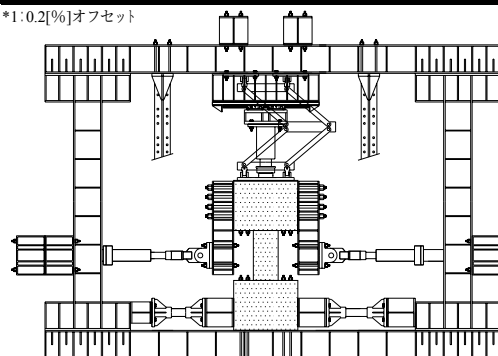


図-2 加力装置

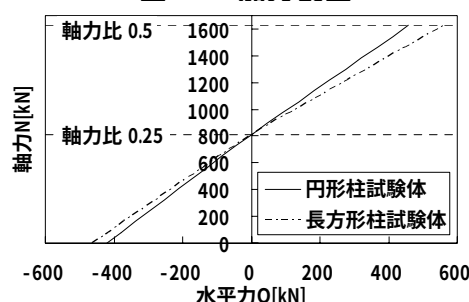


図-3 軸力载荷履歴

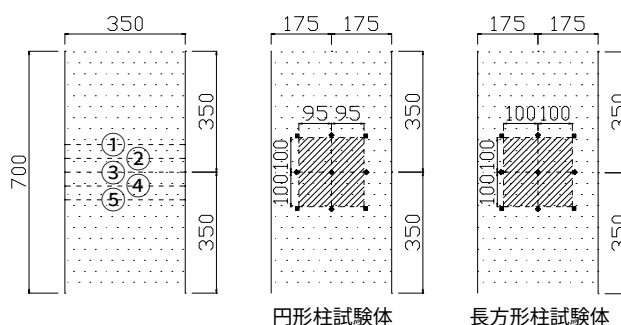


図-4 ひび割れ幅測定位置及び損傷評価領域

表-1 試験体諸元一覧

試験体	D [mm]	B [mm]	M/QD	主筋	Pg [%]	せん断補強筋	Pw [%]	w _{sy} [N/mm ²]	Pw _{w_{sy}} [N/mm ²]	σ _B [N/mm ²]	N [kN]	σ ₀ /σ _B
円形	350	350	1.0	12-D13	1.58	φ8@40	0.71*2	422	3.01	36.2	0	0
										33.8	813	0.25
										33.8	1627	0.5
										33.8	135～1670	0.04～0.51
長方形	350	275	1.0	12-D13	1.58	φ5@40 (中子筋)	0.73	526	3.83	36.2	0	0
										33.8	813	0.25
										33.8	1627	0.5
										33.8	144～1600	0.04～0.49

D: 柱成, B: 柱幅, M/QD: せん断スパン比, Pg: 全主筋比, Pw: せん断補強筋比, w_{sy}: 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, σ₀: 軸応力, σ₀/σ_B: 軸力比, *2: 幅の値として円の直径を用いている

3. 実験結果

各試験体の実験結果及び諸強度計算値を表-4に示す。

3.1 破壊性状

各試験体の最終破壊状況を図-5に示す。円形柱試験体は、試験体全域に顕著なせん断ひび割れが入り、最終的には試験体端部が圧壊した。C-N-N8-N00の破壊状況に比べ軸力を導入した試験体はせん断ひび割れと試験体の水平方向軸のなす角度(以後ひび割れ角度)が次第に大きくなった。その影響はC-N-N8-N050で顕著に見られ、試験体の水平方向軸と直交するような形でせん断ひび割れが生じた。C-N-N8-NMでは正負においてひび割れの発生状況が異なり、正側のせん断ひび割れ角度が大きくなった。

長方形柱試験体は、試験体全域にせん断ひび割れが入り、最終的にはせん断ひび割れが開いて行くことにより著しい破壊を示した。軸力の増加に伴うひび割れ性状への影響は、円形柱試験体と同様の傾向を示したが、長方形柱試験体の方が早期にせん断ひび割れが発生した。

3.2 包絡線

各試験体の包絡線を図-6に示す。円形柱試験体は、軸力の増加に伴いせん断ひび割れの発生及び最大耐力時部材角が小さくなり、耐力の低下割合が大きくなった。C-N-N8-NMでは、正側と負側では、最大耐力や残留変形などが異なる性状を示した。いずれの試験体も顕著なせん断ひび割れが生じたものの、大変形まで急激な耐力低下は示さなかった。

長方形柱試験体は、軸力の増加に伴いせん断ひび割れの発生及び最大耐力時部材角が小さくなり、特に耐力の低下割合が円形柱試験体よりかなり大きく最大耐力以降急激に耐力低下した。R-N-N5-NMでは、正側と負側では、最大耐力及び耐力低下の割合が異なる性状を示した。

円形及び長方形の両柱試験体において、軸力が増加するにつれ、せん断ひび割れを発生した後早期に最大耐力に至る性状を示した。



図-5 最終破壊状況

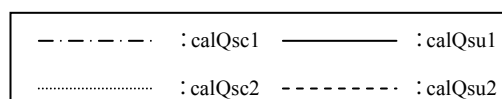
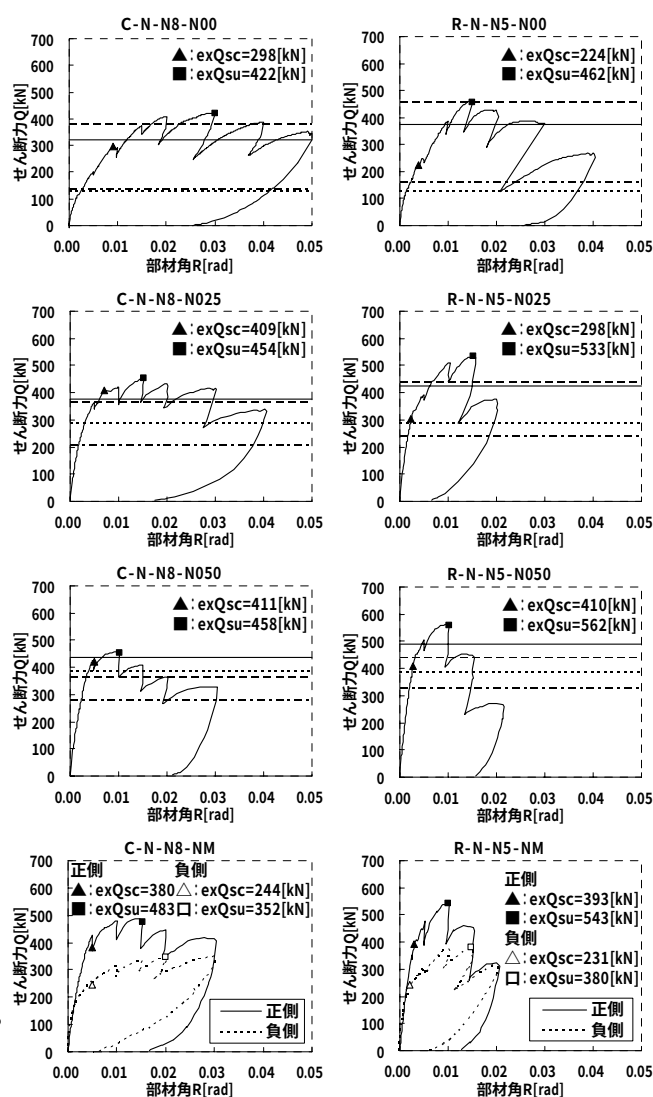


図-6 包絡線

表-4 実験結果及び諸強度計算値

試験体		exQsc [kN]	exQsu [kN]	calQsc1 [kN]	calQsc2 [kN]	calQsu1 [kN]	calQsu2 [kN]	calQbu [kN]	exQsc /calQsc1	exQsc /calQsc2	exQsu /calQsu1	exQsu /calQsu2	exQsu /calQbu
円形	C-N-N8-N00	298	422	135	127	321	379	431	2.21	2.35	1.32	1.11	0.98
	C-N-N8-N025	409	454	206	286	375	366	566	1.99	1.43	1.21	1.24	0.80
	C-N-N8-N050	411	458	280	385	438		533	1.47	1.07	1.05	1.25	0.86
	C-N-N8-NM (正側)	380	483	—	—	—		—	—	—	—	—	—
	C-N-N8-NM (負側)	-244	-352	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
長方形	R-N-N5-N00	224	462	158	127	373	454	504	1.42	1.76	1.24	1.02	0.92
	R-N-N5-N025	298	533	240	286	426	438	715	1.24	1.04	1.25	1.22	0.75
	R-N-N5-N050	410	562	327	386	490		672	1.25	1.06	1.15	1.28	0.84
	R-N-N5-NM (正側)	393	543	—	—	—		—	—	—	—	—	—
	R-N-N5-NM (負側)	-231	-380	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

exQsc：実験値せん断ひび割れ発生荷重，exQsu：実験値最大耐力，calQsc1：実験式²⁾より求めた柱せん断ひび割れ強度
calQsc2：靱性保証型耐震設計指針³⁾より求めた柱せん断ひび割れ強度，calQsu1：修正荒川式より求めた柱せん断終局強度
calQsu2：靱性保証型耐震設計指針³⁾より求めた柱せん断終局強度，calQbu：曲げ解析より求めた最大曲げ耐力時せん断力

3.3 せん断ひび割れ性状

(1) せん断ひび割れ角度

各試験体のせん断ひび割れ角度の平均を図-7に示す。軸力が増加するにつれ、ひび割れ角度が次第に大きくなった。変動軸力の試験体では、円形柱試験体は正負においてひび割れ角度が異なり正側が大きくなったが、長方形柱試験体は正負ともに同程度であった。

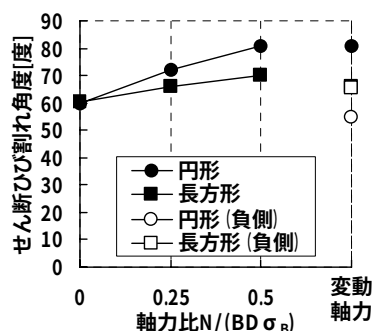


図-7 せん断ひび割れ角度

(2) せん断ひび割れ幅

損傷評価領域で測定したひび割れ幅の合計を平均した値(以後せん断ひび割れ幅合計値)とせん断応力の関係を図-8に、部材角との関係を図-9に示す。せん断ひび割れ発生荷重は軸力0及び軸力比0.25の試験体は円形柱試験体の方が大きく、軸力比0.5及び変動軸力の試験体は同程度であった。最大耐力時付近のせん断ひび割れ幅合計値は円形柱試験体は0.5~1.0[mm]、長方形柱試験体は1.0~1.5[mm]程度であった。部材角1/100程度までの同一部材角でのせん断ひび割れ幅合計値は円形柱試験体が小さくなった。

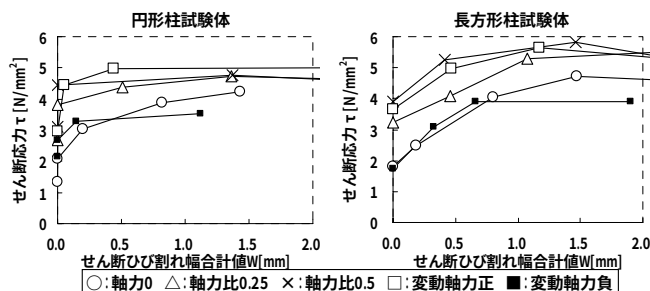


図-8 せん断応力-せん断ひび割れ幅

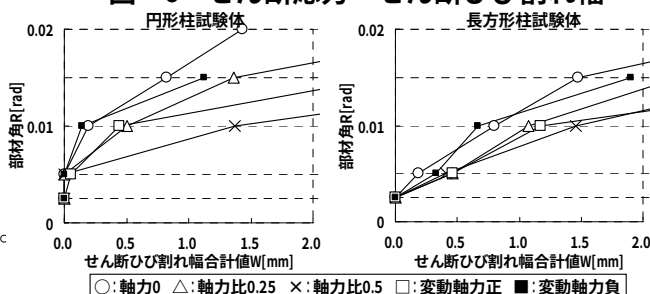


図-9 部材角-せん断ひび割れ幅

(3) 円形柱のせん断ひび割れ幅実験値と計算値の比較

せん断ひび割れ幅合計値をひび割れ角度で水平方向に補正した実験値と、せん断補強筋の歪にせん断補強筋の直径の値を乗じて算出した計算値との比較を図-10に示す。また計算値の算出の際にはせん断補強筋の直径の値を用いたが、逆に計算値が実験値と適合するせん断補強筋の長さを求めると約254[mm]で、直径の約85[%]程度であった。

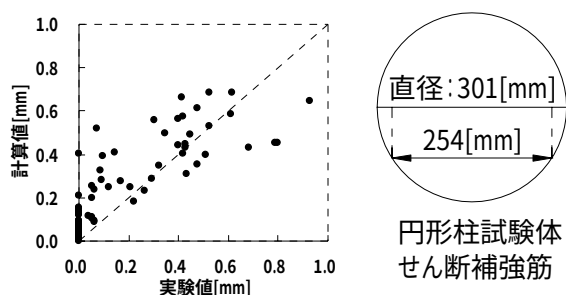


図-10 せん断ひび割れ幅の実験値と計算値

4. 損傷評価

せん断ひび割れ発生以降の部材平均せん断応力度の増分($\tau - \tau_{sc}$)と、せん断ひび割れを横切るせん断補強筋平均応力とせん断補強筋比との積($P_w \cdot w \cdot \sigma_y$)との関係として実験結果と適合の良い式が提案されている。⁴⁾

損傷した部材のひび割れ幅から部材が経験した応力を求めるにあたり、以下に示す手順により損傷を評価する算定式が求まる。

①除荷時のひび割れ幅からピーク時のひび割れ幅を推定する。

②ひび割れ幅からピーク時のせん断補強筋歪を推定し、せん断補強筋歪が弾性範囲内であると仮定してせん断補強筋応力を求める。

③せん断補強筋応力からピーク時に部材が経験したせん断応力を推定する。

そこで、ひび割れ幅と部材応力の関係を定式化するための資料として、本実験における断面形状と軸方向力を変動要因とした場合の実験結果の傾向を以降に示す。

4.1 せん断ひび割れ残留率

各試験体のせん断ひび割れの平均残留率を図-11に示す。平均残留率とは、最大耐力までの各部材角における除荷時せん断ひび割れ幅をピーク時せん断ひび割れ幅で除したものの平均値である。軸力0及び一定軸力の試験体では、軸力が増加するにつれ平均残留率が大きくなったことから、軸力の増加によりひび割れが閉じにくくなった。変動軸力の試験体では、軸力を減少させた負側の平均残留率が大きくなったことから、軸力0及び一定軸力の試験体とは逆の性状を示した。

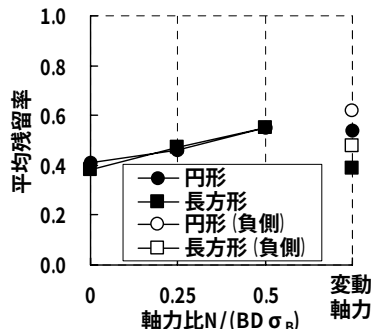


図-11 平均残留率

4.2 せん断ひび割れ幅とせん断補強筋歪の関係

せん断ひび割れ幅とせん断補強筋歪の関係を図-12に示す。なお、せん断補強筋歪とせん断ひび割れ幅の関係を示すため、せん断ひび割れ幅合計値を3.3(1)で求めたせん断ひび割れ角度により水平方向に補正した値を用いる。軸力の増加により近似式の傾きが小さくなり、円形柱試験体の方が小さいことから、長方形柱試験体のせん断補強筋と比較してせん断破壊の影響を受ける部分が小さいと推察される。また近似式の原点が右側へ移行し、これは軸方向圧縮力によるポアソン効果によりせん断補強筋が予め歪む影響で特に高軸力の柱ではせん断補強筋が降伏歪の5~10[%]程度歪んだことから、損傷を評価する際にはその影響を考慮する必要がある。

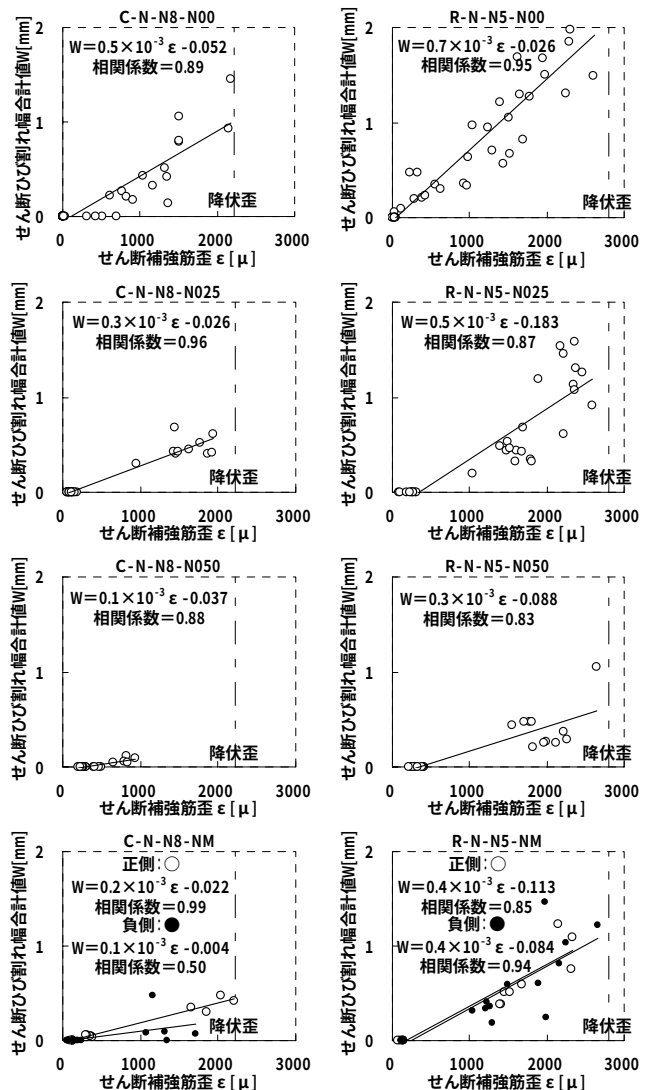


図-12 せん断ひび割れ幅—せん断補強筋歪

4.3 セン断応力とせん断補強筋応力の関係

損傷評価領域内の各せん断補強筋(5 本)より求めた部材せん断応力とせん断補強筋応力の関係を図-13 に示す。縦軸は部材せん断応力からせん断ひび割れ発生荷重を引いた値、横軸は弾性範囲内のせん断補強筋歪から算出した応力とせん断補強筋比の積である。せん断ひび割れ発生以降、長方形柱試験体は部材せん断応力の増加によりせん断補強筋応力も増加するが、円形柱試験体は部材せん断応力があまり増加せず降伏に至った。また、軸力の増加により部材せん断応力の増分に対してせん断補強筋応力の増分割合が増加した。なお、既往の研究⁴⁾⁵⁾より求められた関係式と実験値を比較する。ただし、繰返し載荷による本実験結果に対し、関係式はいずれも単調載荷実験により得られたものである。計算値はいずれも危険側に評価し、軸力が増加するとその傾向は顕著になった。

5. まとめ

本実験より以下の知見が得られた。

(1)最大耐力時付近のせん断ひび割れ幅に関しては、断面形状により異なる性状を示した。また、軸力の増加によりせん断ひび割れ発生以降の同一部材角におけるせん断ひび割れ幅は増加し、円形柱試験体で顕著であった。

(2)せん断ひび割れ残留率に関しては、軸力 0 及び一定軸力を載荷した試験体と変動軸力を載荷した試験体とでは逆の性状を示した。

(3)損傷評価の際は、軸方向圧縮力によりせん断補強筋が予め歪む影響を考慮する必要がある。

(4)円形柱試験体は部材せん断応力があまり増加せず降伏に至った。軸力の増加により部材せん断応力の増分に対してせん断補強筋応力の増分割合が増加した。計算値は危険側に評価し、軸力が増加するとその傾向は顕著になった。

(5)損傷した部材のひび割れ幅から部材が経験した応力を求めるにあたり、軸方向力、断面形状及び繰返し載荷が部材せん断応力とせん断補強筋応力の関係に影響を及ぼすことを示した。

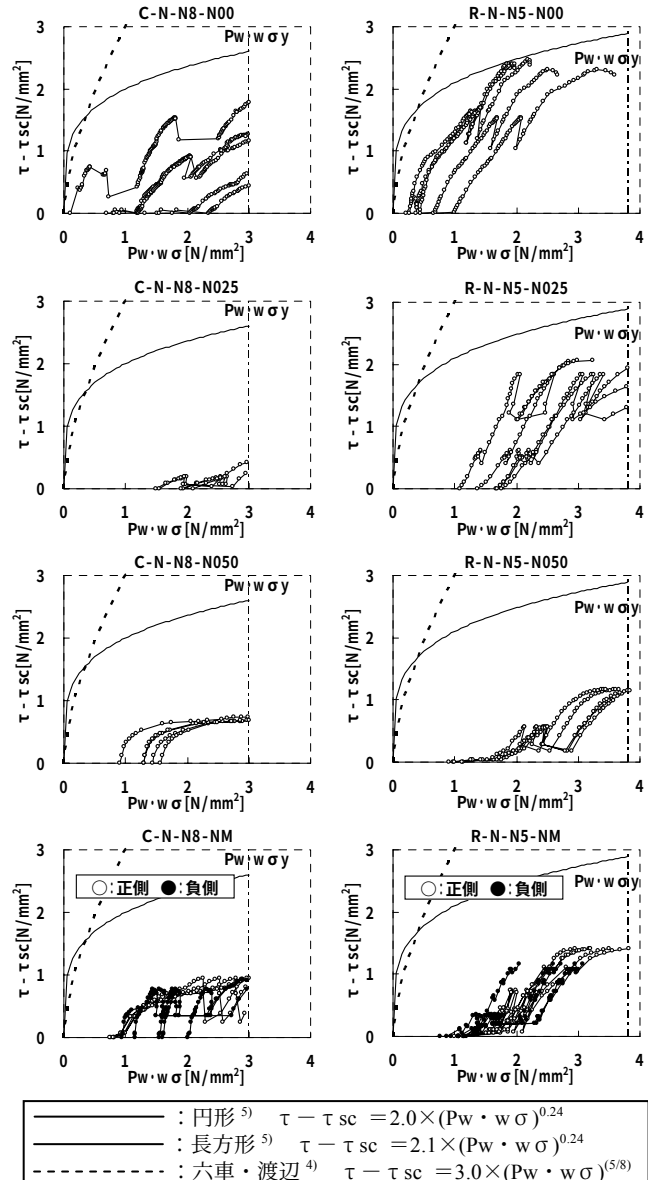


図-13 部材せん断応力-せん断補強筋応力

謝辞

本研究は、東京工業大学建築物理研究センター共同研究の一貫として行われたものであります。本研究に際して多大なご協力を賜った佐藤工業株式会社、高周波熱錬株式会社及び関係者各位に対して深く感謝致します。

参考文献 1)日本建築防災学会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編)、1991 2)大野、柴田他：日本建築学会北海道支部研報 pp91-94、1978.3 3)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999 4)六車熙、渡辺史夫：鉄筋コンクリート柱のせん断耐力評価に関する研究、第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集、pp541-544、1985.3 5)金東範、林静雄他：RC 柱の断面形状が損傷過程に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp341-342、2002