

論文 高強度せん断補強筋を用いた RC 部材のせん断ひび割れ性状に関する実験的研究

藤井 稔己*1・田中 圭介*2・中澤 淳*3・南 宏一*4

要旨：本研究は、高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート部材に関して、地震等の外乱を受けた後に生じるひび割れ等の損傷評価の定量化およびさまざまなパラメータによる損傷度の違いについて基礎的な資料を得るため鉄筋コンクリート部材の実験を行った。試験体の変動要因は、部材長さ比、軸力比およびせん断補強筋比とし各パラメータによる鉄筋コンクリート部材の損傷過程におけるせん断ひび割れ性状を調べた。実験の結果、せん断ひび割れ幅およびせん断補強筋ひずみはピーク時の値に比べ除荷時には1/2~1/3の値になっていることが確認された。

キーワード：RC 部材, 高強度せん断補強筋, せん断破壊, ひび割れ性状

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物(以下 RC 構造物と呼ぶ)の設計において、長期荷重に対しては使用限界以下、中規模の地震動などの短期荷重に対しては損傷限界以下、大規模の地震動に対しては安全限界以下である事を保証することが部材のせん断設計の目標である。

地震を受けた後の RC 構造物において損傷限界および安全限界の基準が設定され、継続使用できるかまたは修復して使用可能か、もしくは取り壊さなければならないかの判断が必要となっている。それらの限界状態を判断し、RC 部材の損傷度を評価する際の指標として最大残留ひび割れ幅があり、RC 規準^[1]では、建築物外面は 0.2~0.25mm、内面は 0.3~0.4mm 程度の数値が示されることが多いとされている。しかしながら、高強度せん断補強筋を用いた RC 部材においてひび割れ幅を指標とした損傷評価式および損傷評価法はまだ定式化されておらず地震等の外乱を受けた後の損傷評価について不明な点が多い。

本研究では、高強度のせん断補強筋を用いた RC 部材の実験によりせん断補強筋のひずみ、部材のせん断ひび割れ幅および変位部材角における関係性に対し、せん断補強筋比、部材長さ比および軸力比がおよぼす影響について実験的に検討を行うことを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表-1 に実験計画を示す。実験変数は、せん断補強筋比 (p_w ; 0.42, 0.84, 1.21), 軸力比 ($n=N/bD \sigma_B$; 0, 0.15, 0.3), および部材長さ比 (L/D ; 2, 3, 4) とした。共通因子は柱断面 $b \times D=300\text{mm} \times 300\text{mm}$, コンクリート強度 $F_c=40\text{N/mm}^2$ とした。図-1 に試験体の形状寸法および断面構成を示す。ひずみゲージは、せん断ひび割れの測定面においてせん断補強筋 1 本に対し 3 枚のゲージを貼付した。せん断補強筋のひずみは 3 枚のゲージの平均値を用いて解析を行った。

2.2 材料特性

主筋は、16-D16(SD685 相当)を、せん断補強筋は、785N/mm²級の $\phi 6.4$ (KW785)を溶接閉鎖したものを使用した。表-2 に鋼材の力学的性質を、表-3 にコンクリート強度をそれぞれ示す。

表-2 鋼材の力学的性質

鉄筋の種類	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (N/mm ²)
主筋(D16)	SD685相当 687	873	13.5	2.05×10^5
補強筋($\phi 6.4$)	KW785 896	955	13.0	2.13×10^5

※補強筋 $\phi 6.4$ の降伏応力度は0.2%オフセット値

表-3 コンクリートの材料強度

コンクリート	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
目標強度 40N/mm ²	37.2	2.9	2.80×10^4

表-1 実験計画

No.	試験体名	断面形状 b × D	コンクリート強度 F _c (σ_B)[N/mm ²]	部材長さ比 L/D	軸力比n (N/ σ_B BD)	せん断補強筋		主筋	
						p_w [%]	配筋量	p_t [%]	配筋量
CA1	CA308-0-8W-2	300 × 300	40(37.2)	2	0	0.84	4- $\phi 6.4@50$	2.21	16-D16
CA2	CA308-0-4W-3					0.42	2- $\phi 6.4@50$		
CA3	CA308-0-8W-3					0.84	4- $\phi 6.4@50$		
CA4	CA308-0-12W-3			3		1.21	4- $\phi 6.4@35$		
CA5	CA308-1-8W-3					0.15	4- $\phi 6.4@50$		
CA6	CA308-3-8W-3					0.3			
CA7	CA308-0-8W-4					0			

*1 福山大学大学院 工学研究科地域空間工学専攻博士課程 修士(工学) (学生会員)

*2 JFE テクノワイヤ株式会社 修士(工学)

*3 JFE テクノワイヤ株式会社 博士(工学) (正会員)

*4 福山大学教授 工学部建築学科 工学博士 (正会員)

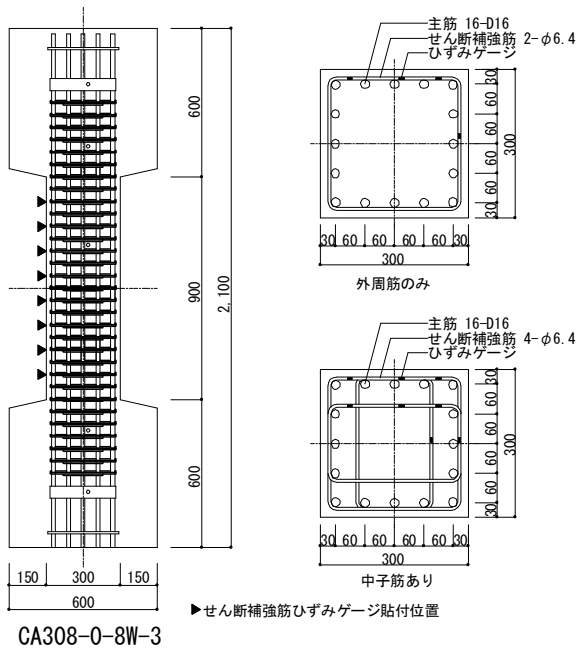


図-1 試験体の形状寸法および断面構成(単位:mm)

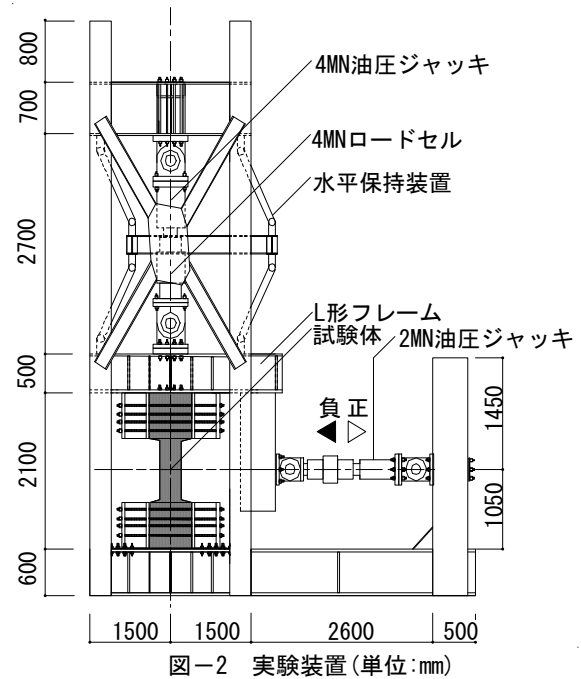


図-2 実験装置(単位:mm)

2.3 実験方法

実験装置は図-2 に示す建研式荷重装置を用いた。実験は、各試験体に決められた軸力比によって一定軸力を負荷させ、L形フレームを介して部材長さの1/2の位置に水平荷重を作用させ柱頭の水平変位を計測し変位部材角 $R(=\delta/H)$ による変位制御とした。作用軸力および作用せん断力の測定は、それぞれの油圧ジャッキの先端に取付けたロードセルにより行った。全試験体とも所定の軸力を作用させた状態で、変位部材角 $R=0.25 \times 10^{-2} \text{rad.}$ で正負繰り返し載荷を1回行った後、 $1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ までは $0.25 \times 10^{-2} \text{rad.}$ 毎に、 $3.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ までは $0.5 \times 10^{-2} \text{rad.}$ 毎に、以後 $1.0 \times 10^{-2} \text{rad.}$ 毎に正負漸増繰り返し載荷を2回ずつ繰り返し行う。水平荷重が最大耐力の80%を下回るか、所定軸力を維持できなくなった時点で実験を終了とした。

2.4 ひび割れ幅測定方法

ひび割れ幅の測定位置は、ひずみゲージを貼付した各段のせん断補強筋上に入るせん断ひび割れに対し発生順に番地を付け各番地について載荷ピーク時と除荷時のひび割れ幅を測定する。

ひび割れ幅の測定方法について、デジタルマイクロスコープを用いた。また従来使用されているクラックスケールも比較のために測定した。ひび割れ幅の測定器具を写真-1にそれぞれ示す。

3. 実験結果

図-3(a)～(g)に各試験体の履歴性状を示す。縦軸に水平荷重 Q (kN)、横軸に変位部材角 $R(10^{-2} \text{rad.})$ を示す。●印は正負の最大耐力実験値を示し▲印は部材の中で最初に発生した正負のせん断ひび割れ耐力実験値を示す。



(a) デジタルマイクロスコープ



(b) クラックスケール

写真-1 ひび割れ幅測定器具

また図中の点線は、せん断ひび割れ耐力式^[2] Q_{SC} 、指針式^[3] Q_{Su} および一般化累加の曲げ耐力式^[4] Q_{Fu} の計算値を示す。各試験体とも計算値を上回る結果となった。ほとんどの試験体はせん断破壊したのに対して、せん断補強筋比の大きい CA308-0-12W-3 試験体と柱長さ比の大きい CA308-0-8W-4 試験体においては曲げ降伏後のせん断破壊性状を示した。図-4 に各実験変数の影響で比較した履歴包絡線を示す。縦軸は水平荷重 Q (kN)、横軸は変位部材角 $R(10^{-2} \text{rad.})$ を示す。軸力比の影響について、軸力比が大きいほど最大耐力までの初期剛性および最大耐力は高くなるが、最大耐力以後の履歴包絡線の差は小さかった。補強筋比の影響について、初期剛性については大きな差は見られなかったが、補強筋比の大きいものほど最大耐力は高くなり変形性能は向上している。部材長さ比の影響について、部材長さ比が小さいと初期剛性および最大耐力が高くなるが、最大耐力以降急激に耐力低下を生じた。

終局せん断耐力の検討は文献[5]に示される A 法(Q_{su1})

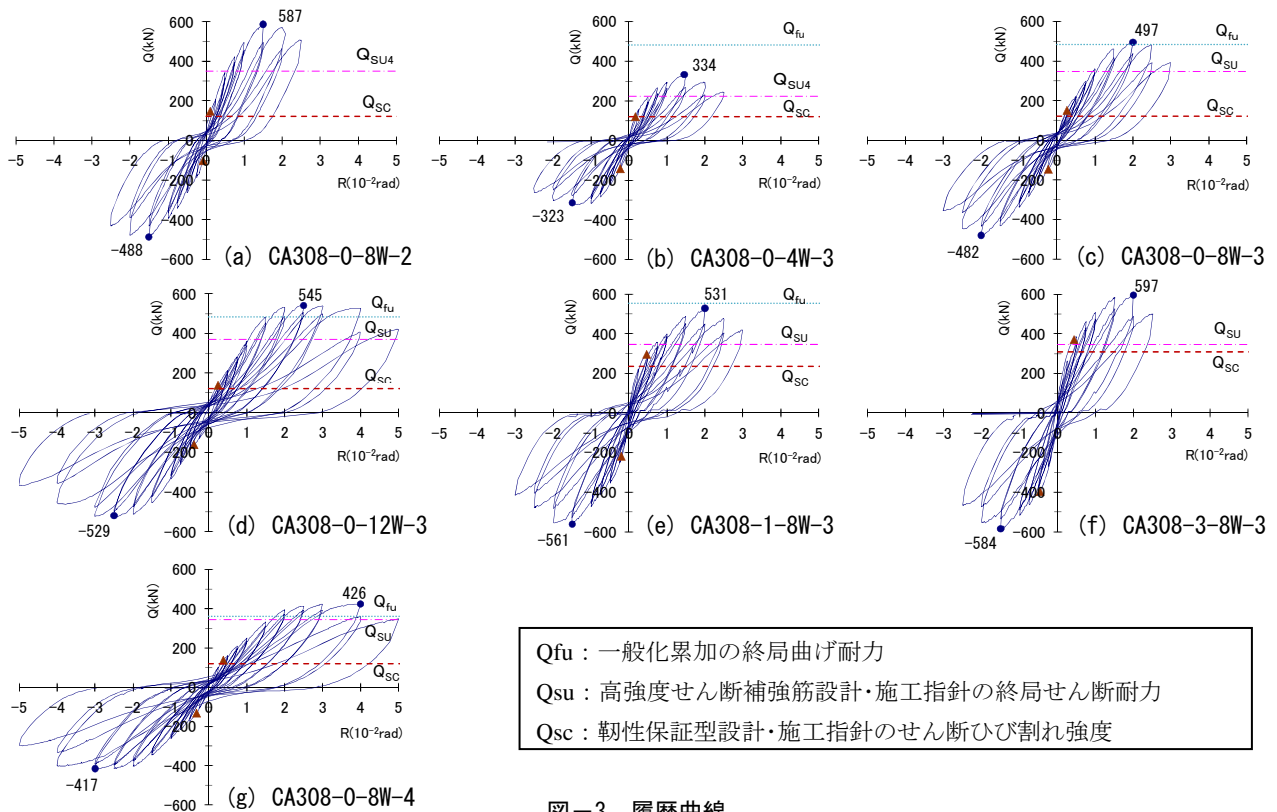


図-3 履歴曲線

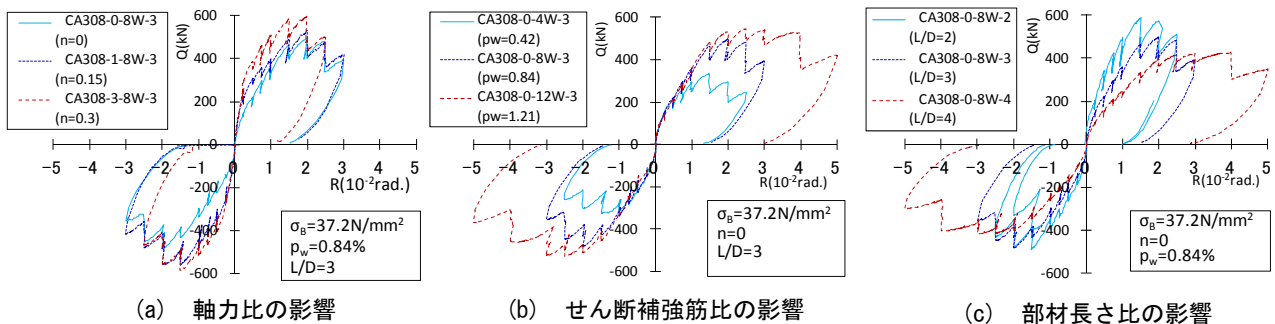


図-4 履歴包絡線

および B 法 (Q_{su2}), 文献[6]に示される荒川 min 式 (Q_{su3}) および文献[3]に示される指針式 (Q_{su4}) で行った。図-5 に実験値と各せん断評価式による検証結果をそれぞれ示す。なお○●印は実験値を示している。A 法および B 法では補強筋比が小さい CA308-0-4W-3 試験体で実験値に対して過大評価しているが、概ね評価できている。荒川 min 式および指針式ではすべての試験体で安全側を与える式になっており、指針式はバラツキが少ない結果を与えることが示された。

4. せん断ひび割れ耐力の検討

せん断ひび割れ耐力式について検討を行う。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 [2] (以後、靱性指針式と呼ぶ)における、せん断ひび割れ強度 (1) 式 (Q_{sc}), 鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料 [7] における式 (以後、広沢式と呼ぶ) より部材端部に発生するせん断ひび割れにおけるせん断ひび割れ耐力 (2) 式 (Q_{sc2}), の各式の検討を行う。コンクリート強度

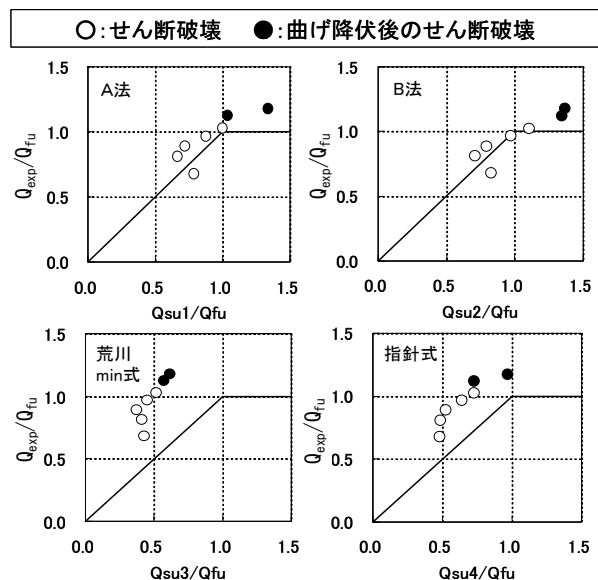


図-5 実験値と各終局せん断耐力計算値の比較

$\sigma_B = 37.2 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ の試験体における、水平荷重と軸力比の関係について、せん断ひび割れ耐力式(1), (2)式の精度を検討した結果を図-6に示す。(1), (2)式におけるコンクリートの引張強度および圧縮強度は実験値を用いる。縦軸にせん断荷重 $Q \text{ (kN)}$, 横軸に軸力比 ($n = N/bD\sigma_B$) を示す。図中の○印は $p_w = 0.42\%$, △印は $p_w = 0.84\%$, □印は $p_w = 1.21\%$ の試験体の実験値を示す。軸力比 $n = 0$ では(2)式の計算値が若干大きい、軸力比が 0.1 の手前で交差し、(1)式の計算値が大きくなる。軸力比が大きくなると(2)式はより安全側に評価している。実験値と計算値の比較について図-7に実験値と(1)式のせん断ひび割れ強度計算値の予測精度の関係を示す。概ね精度よく評価できており、安全側の評価となっていることが確認された。

【靱性指針式(Q_{sc})】

$$Q_{sc} = \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T \cdot \sigma_0 \cdot b \cdot D} \quad \dots (1)$$

ここに、 $\sigma_T = 0.33 \sqrt{\sigma_B} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
 σ_B : コンクリート圧縮強度 $\text{(N/mm}^2\text{)}$
 σ_0 : 柱における作用軸応力度 $\text{(N/mm}^2\text{)}$
 b : 断面の幅 (mm) D : 断面のせい (mm)
 κ : 断面形状係数 (1.5)

【広沢式(Q_{sc2})】

$$Q_{sc2} = k_1 \sqrt{F_c} \cdot b \cdot D \left(1 + \frac{\sigma_0}{F_t} \right)^{k_2} \cdot \left(\frac{M}{Q \cdot D} \right)^{k_3} \quad \dots (2)$$

ここに、 F_t : コンクリートの引張強度
 F_c : コンクリートの圧縮強度
 σ_0 : 軸方向応力度
 b : 断面の幅 (mm) D : 断面のせい (mm)
 $k_1 = 0.97$ $k_2 = 0.41$ $k_3 = -0.63$

5. せん断ひび割れ幅の検討

各試験体においてせん断ひび割れが発生し、最大耐力前における、変位部材角 $R = 0.5 \times 10^{-2} \text{ rad}$. 時のピーク時および除荷時のひび割れ幅の関係を図-8に示す。ひずみゲージを貼付したせん断補強筋上に発生したすべてのせん断ひび割れを対象とした。縦軸に除荷時のひび割れ幅 $W_r \text{ (mm)}$, 横軸にピーク時のひび割れ幅 $W_p \text{ (mm)}$ を示す。図中の点線は、ピーク時のひび割れが 1/3 に閉じた値の線である。図-8(a)のせん断補強筋比の影響について、 $p_w = 0.42\%$ と 0.84% には差が見られず、 $p_w = 1.21\%$ の場合ひび割れ幅は小さく閉じる傾向が確認された。図-8(b)の軸力比の影響について、軸力 $n = 0.15, 0.3$ では、ひび割れ幅が小さく、軸力 $n = 0$ の試験体ではピーク時ひび割れ幅は大きい除荷時には概ね 1/3 に閉じている事が確認された。図-8(c)の柱長さ比の影響について、柱長さ比が小さいほどピーク時、除荷時ともひび割れ幅は大きい傾向が確認された。

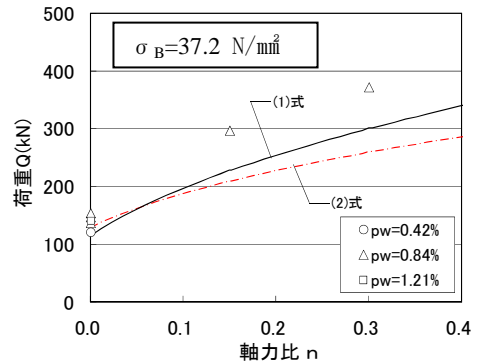


図-6 せん断ひび割れ強度式と実験値の関係

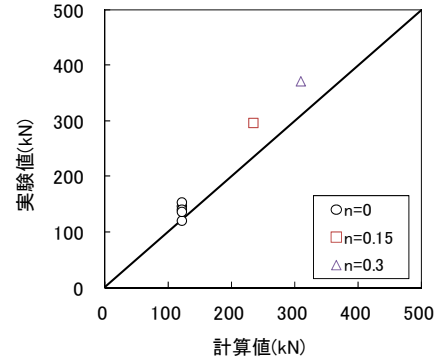


図-7 せん断ひび割れ強度の予測精度

既往の研究で中村^[8]らは、せん断補強筋強度が 1275 N/mm^2 クラスの実験を行っている。ひび割れ発生から最大耐力に至るまでのせん断ひび割れ挙動の研究において、除荷時ひび割れ幅をピーク時ひび割れ幅で除した値の平均値(平均残留率)は、0.3~0.4程度となっており補強筋比の増大に伴い小さくなる傾向があると報告されている。せん断補強筋強度 785 N/mm^2 を用いた本実験では、平均残留率は 0.3~0.4程度となっておりせん断補強筋比が大きくなるにつれて小さくなる傾向が確認され既往の研究^[8]とほぼ同じ傾向である事が確認された。

6. せん断補強筋ひずみの検討

実験により測定した試験体の変位部材角 $R = 0.5 \times 10^{-2} \text{ rad}$. 時における、ピーク時および除荷時のせん断補強筋ひずみの関係を図-9に示す。縦軸に除荷時のせん断補強筋ひずみ (μ), 横軸にピーク時のせん断補強筋ひずみ (μ) を示す。図中の点線は除荷時のせん断補強筋比ひずみがピーク時の 1/3 になった値を示す。図-9(a)のせん断補強筋量の影響について、補強筋比が小さいとピーク時のせん断補強筋ひずみの値は大きい、除荷時には概ね 1/2~1/3 になっている。図-9(b)の軸力比の影響について、軸力比が大きくなると、ピーク時、除荷時ともせん断補強筋ひずみは大きくなる傾向がある。図-9(c)の部材長さ比の影響について、部材長さ比が小さいほどピーク時、除荷時ともせん断補強筋ひずみは大きくなる傾向がある。本研究において高強度せん断補強筋を用いた場合でも除荷時残留ひずみはピーク時の概ね 1/2~1/3 になっている事が確認された。

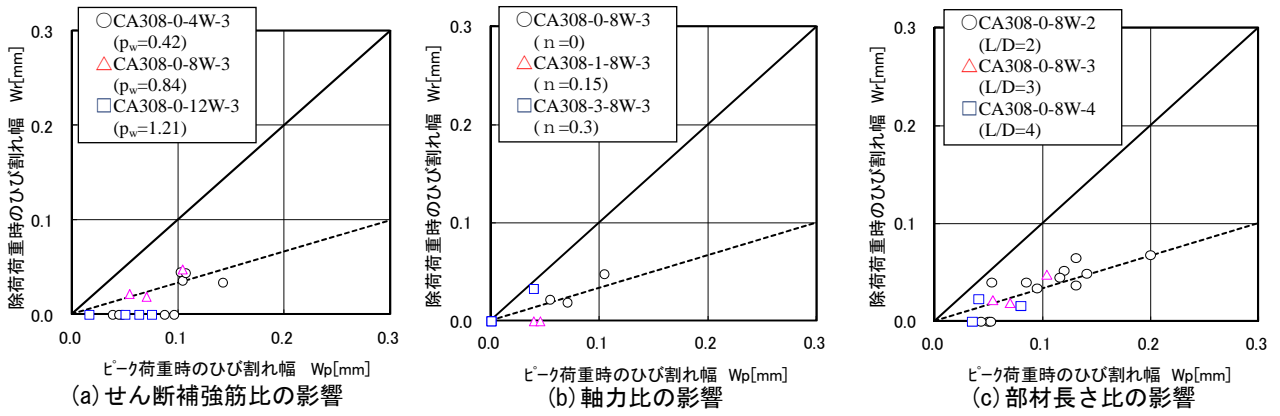


図-8 ピーク時と除荷時のせん断ひび割れ関係

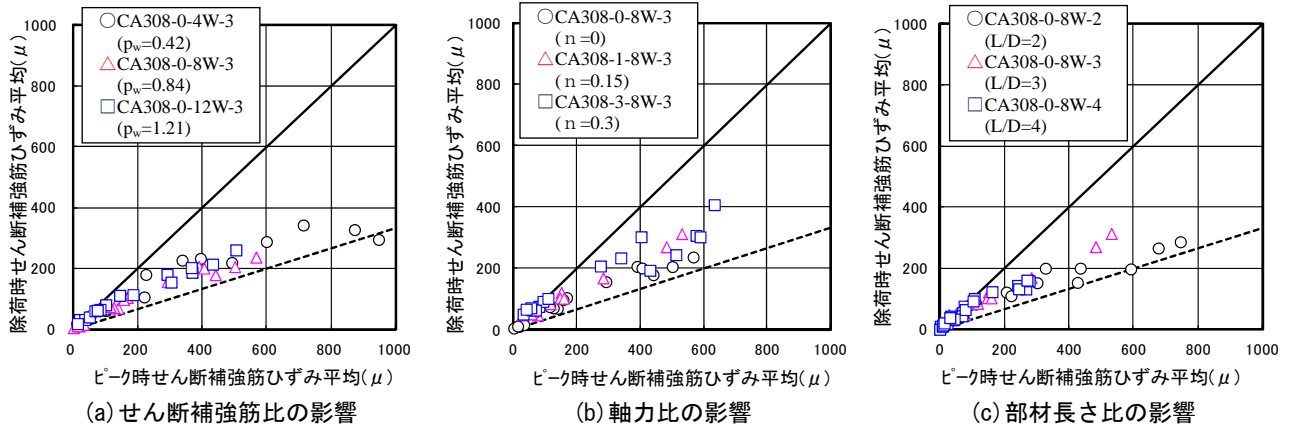


図-9 ピーク時と除荷時のせん断補強筋ひずみ関係

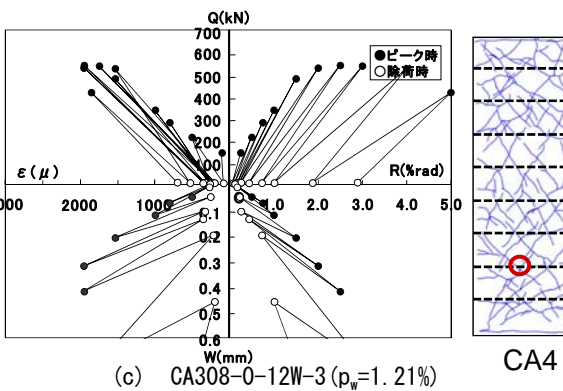
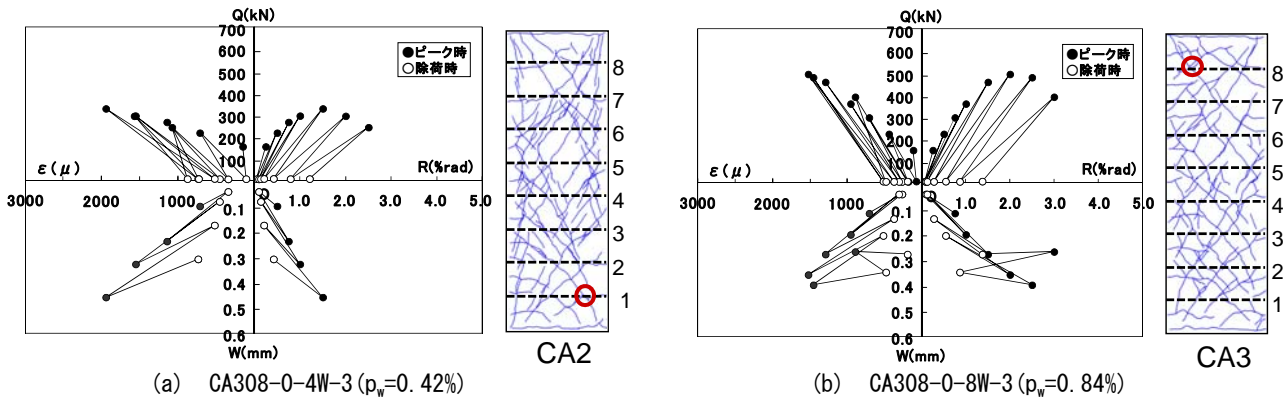


図-10 荷重, 変位部材角, せん断補強筋ひずみおよびせん断ひび割れ幅の関係

7. 各項目測定結果

図-10 にせん断補強筋比の異なる3体の試験体について、各測定項目の推移をそれぞれ示す。ひび割れ図中の○で印を付けたせん断ひび割れ幅測定箇所は、各試験体で最大せん断ひび割れ幅を記録した測定位置である。その測定位置における各測定項目の推移をそれぞれ示す。第1象限に荷重 Q - 変位部材角 R 関係, 第2象限に荷重 Q - せん断補強筋ひずみ ϵ 関係, 第3象限にせん断ひび割れ幅 W - 補強筋ひずみ ϵ 関係, 第4象限にせん断ひび割れ幅 W - 変位部材角 R 関係を4象限グラフとしてそれぞれ示す。図中の●は各変位部材角のピーク時の値, ○は除荷時の値を示す。せん断補強筋比が大きくなると最大耐力および最大耐力時の変位部材角が大きくなりピーク時ではせん断補強筋ひずみも同程度生じるが、最大耐力に至るまでのサイクルにおける除荷時のせん断補強筋

の残留ひずみおよび残留せん断ひび割れ幅はピーク時の値に比べて1/2~1/3となっている。

その理由として、せん断補強筋比が大きな試験体では、せん断ひび割れ幅は分散して数が増え、個々のひび割れ幅は大きくならないと思われる。また、最大耐力以後では、残留せん断ひび割れ幅は閉じにくい事が示され、せん断補強筋比が小さい試験体ほど顕著であった。

8. せん断ひび割れ幅とせん断補強筋ひずみの検討

文献[9]の考えを用いると、RC 部材のせん断ひび割れ幅 $W_{s,cr}$ は、せん断補強筋の長さ L (本実験は $L=270\text{mm}$ としている) とせん断ひび割れを横切るせん断補強筋の平均ひずみ ϵ_w ϵ_s の積の $1/\sqrt{2}$ とし (ひび割れ角度を部材軸に対し 45 度と仮定する) せん断補強筋の長さ L と仮定すると、 $W_{s,cr}$ は (3) 式で得られる。

$$W_{s,cr} = \epsilon_w \epsilon_s \cdot L / \sqrt{2} \quad \dots (3)$$

一本のせん断補強筋上を通る全てのせん断ひび割れ幅の総和 $\Sigma W_{s,cr}$ をそのせん断ひび割れ本数で除したものを平均ひび割れ幅 W_{ave} (mm) とし、1本のせん断補強筋に貼付した3枚のひずみゲージの平均を平均ひずみ ϵ_{ave} (μ) とした。図-11 に示したひずみゲージを貼付したせん断補強筋の各段目における (3) 式と実験結果との比較を図-11 にそれぞれ示す。縦軸に平均ひび割れ幅 W_{ave} (mm)、横軸にせん断補強筋の平均ひずみ ϵ_{ave} (μ) を示す。図中の点線は (3) 式を示す。図-11 (a) の軸力比 $n=0$ の試験体では、ピーク時および除荷時において (3) 式に近い性状を示している。図-11 (b) の軸力比 $n=0.15$ の試験体では、ピーク時および除荷時もせん断補強筋の平均ひずみは載荷とともに大きくなっているが、平均ひび割れ幅は (3) 式より非常に小さい値になっている。図-11 (c) の軸力比 $n=0.3$ の試験体ではせん断補強筋ひずみが小さなところでは平均せん断ひび割れ幅は小さいが、あるところから平均せん断ひび割れ幅は (3) 式に近い性状を示す。以上より、軸力比 $n=0$ の場合においては比較的 (3) 式で評価できるが、軸力が入ると評価は難しいと思われるが全試験体に対して計算式は、安全側の評価となった。

9. まとめ

高強度せん断補強筋を用いた RC 部材において以下の知見が得られた。

- (1) せん断ひび割れ耐力において靱性指針式による計算値と実験値の関係は整合性の良い事が確認された。
- (2) ピーク時せん断ひび割れ幅に対して、除荷時のせん断ひび割れ幅は、概ね $1/3$ に閉じる事が確認された。
- (3) せん断補強筋比が大きくなるとせん断ひび割れを分散させ個々のせん断ひび割れ幅は小さくなる傾向が見られた
- (4) せん断ひび割れ幅とせん断ひずみの関係は、(3) 式の考えを用いると安全側に評価できる事が確認された。

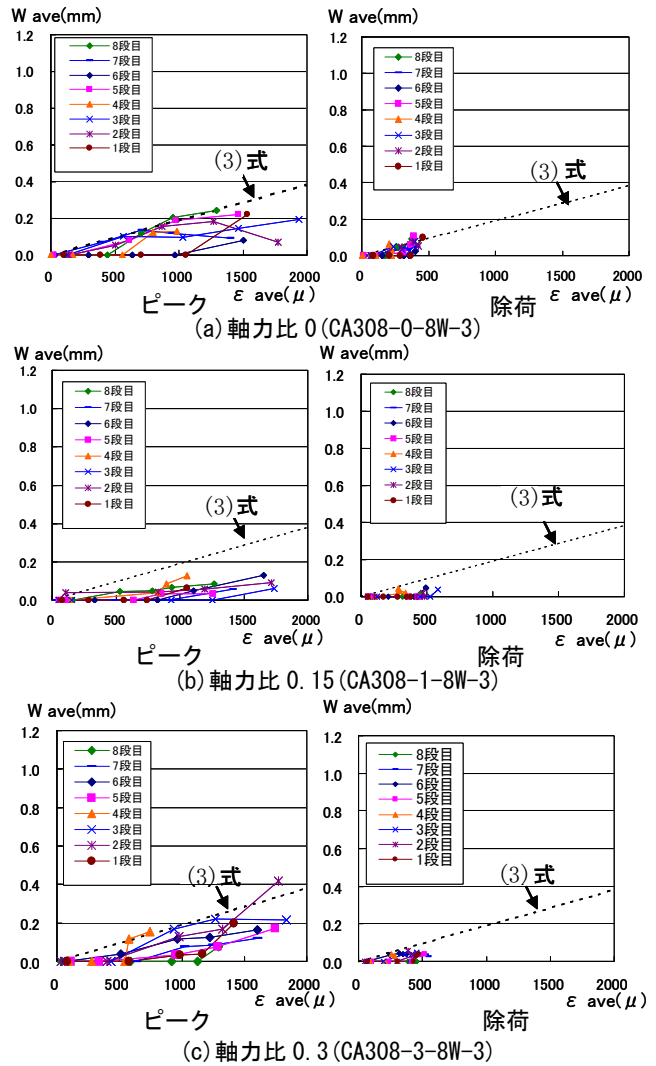


図-11 せん断ひび割れ強度の予測精度

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，2010年
- 2) 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年8月
- 3) 中澤淳，山下祐司，桑田裕次，南宏一：高強度材料を用いた RC 柱のせん断破壊性状，コンクリート工学年次論文集 Vol.21, No.3, pp.397-402, 1999
- 4) 倉本洋：鉄筋コンクリート部材のせん断耐力と変形能力の評価法に関する研究，東京大学学位請求論文，1991年9月
- 5) 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年11月
- 6) 荒川卓：鉄筋コンクリートはりの許容せん断応力とせん断補強について，日本建築学会大会学術講演梗概集 (昭 44.4) コンクリートジャーナル Vol.8, No.7 (1970)
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料 1987年
- 8) 中村陽介，長江拓也，香取慶一，林静雄：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，コンクリート工学年次論文集 Vol.27, No.2, pp.211-215, 2005.6
- 9) 福山洋，諏訪田晴彦，磯雅人，松崎育弘，中野克彦，笠原美幸：RC 部材のせん断ひび割れに関わる損傷限界の評価 (その1 柱，梁部材の場合)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造IV，2000.