

# 論文 RC造柱の断面形状が損傷過程と終局性能に及ぼす影響

金東範\*1・長江拓也\*2・香取慶一\*3・林静雄\*4

要旨: RC柱の設計では中小地震に対する耐震性能の評価方法が明確でない。今後建物の耐震設計が性能規定型へと移行していくにあたって,耐震性能を明確にする必要がある。また,RC円形柱の靱性評価,損傷評価においてより合理的な性能評価が求められている。本研究では,RC柱の断面形状が損傷過程と終局性能に及ぼす影響を考察しより合理的な断面設計法を明確にすることを目的とする。またひび割れの経過や中小地震時の損傷を考察した。

キーワード: RC柱, 断面形状, せん断終局性能, せん断ひび割れ幅, 損傷評価

## 1. はじめに

RC造柱の設計では中小地震時に対して,その耐震性能が明確に出来ていない。今後,建物の耐震設計が性能規定型へと移行していくにあたって,耐震性能を明確にする必要がある。今後の設計では中小地震時にせん断ひび割れを許容しその幅を制御することにより,より合理的な断面設定が求められる。またRC円形柱の靱性評価,損傷評価においてはより合理的な性能評価が求められている。

既往の研究では円形柱のせん断性能評価を等価断面の正方形に置換して評価するのが妥当な方法として思われてきた。すなわち,現在,設計時にRC円形柱のせん断性能評価を靱性評価しようとするに正方形に置換せざるを得ない。

本研究では円形断面柱,正方形断面柱,および長方形断面柱の耐震性能を比較し,より合理的な断面設計法を明確にすることを目的として実験を行った。なお,せん断ひび割れの経過や中小地震時の損傷を中心に検討した。

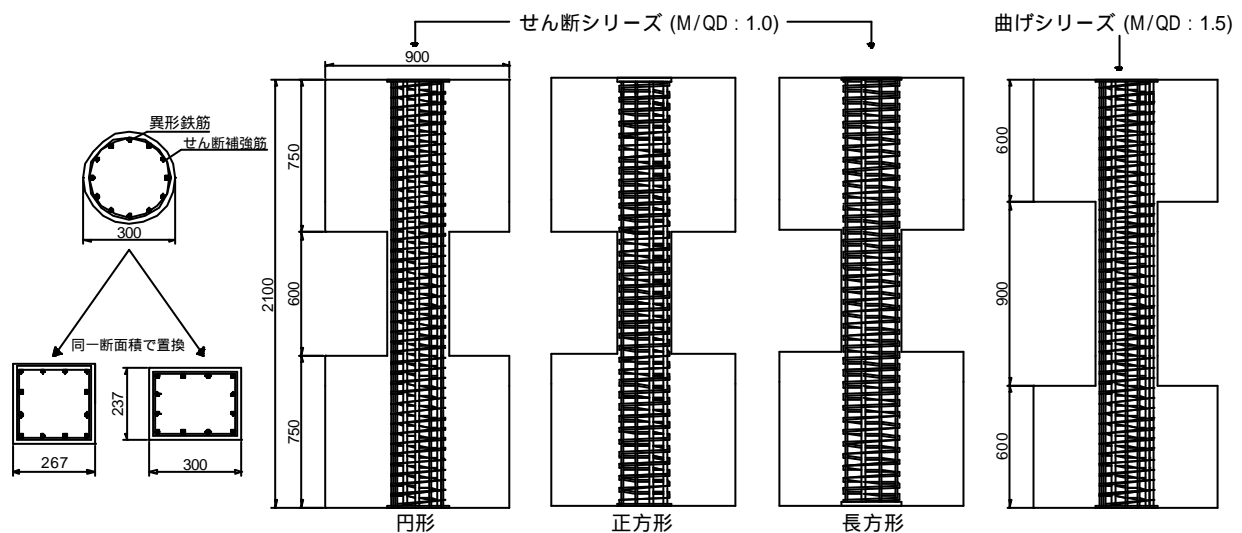


図-1 試験体 Unit: mm

\*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 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 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 博士(工学)(正会員)

表-1 試験体一覧

試験体		D (mm)	B (mm)	M/QD	主筋	P <sub>g</sub> (%)	せん断補強筋	P <sub>w</sub> (%)	w <sub>s</sub> y (MPa)	P <sub>w</sub> w <sub>s</sub> y (MPa)	N (kN)	S <sub>0</sub> (MPa)	S <sub>0</sub> /S <sub>B</sub>
円形	C-N61-S	300	300	1.00	12-D13	2.15	φ8.5@62	0.61	422	2.57	248	3.5	0.1
	C-H21-S						φ4.5@50	0.21	1219	2.58			
	C-N46-S						φ6.5@48	0.46	392	1.81			
	C-H13-S			φ3.5@50	0.13	1392	1.79	226	3.19				
	C-H21-B			1.50	12-D13	2.15	φ4.5@50			0.21	1219	2.58	
正方形	S-N69-S	267	267	1.12	12-D13	2.15	φ8.5@62	0.69	422	2.89	248	3.5	0.1
	S-H24-S						φ4.5@50	0.24	1219	2.90			
	S-H14-S			1.67	12-D13	2.15	φ3.5@50	0.14	1392	2.01			
	S-H24-B						φ4.5@50	0.24	1219	2.90	226	3.19	
長方形	R-N77-S	300	238	1.00	12-D13	2.15	φ8.5@62	0.77	422	3.26	248	3.5	0.1
	R-H27-S						φ4.5@50	0.27	1219	3.27			
	R-H16-S						φ3.5@50	0.16	1392	2.26			
	R-H27-B			1.50	10-D13	1.80	φ4.5@50	0.27	1219	3.27	226	3.19	

D:柱径 B:柱幅 M/QD:せん断スパン比 P<sub>g</sub>:全主筋比(As/Ac) As:主筋全断面積 Ac:柱体全断面積 P<sub>w</sub>:せん断補強筋比 w<sub>s</sub>y:補強筋降伏強度 N:軸力 S<sub>0</sub>:軸応力(N/Ac) S<sub>0</sub>/S<sub>B</sub>:軸力比 S<sub>B</sub>:コンクリート圧縮強度

試験体名 C - N61 - S

(1) (2) (3)

- (1) Cは円形(CIRCLE)せん断破壊型試験体を表す。  
Sは正方形(SQUARE)せん断破壊型試験体を表す。  
Rは長方形(RECTANGLE)せん断破壊型試験体を表す。
- (2) N61:Nは普通強度せん断補強筋を表す。  
Hは高強度せん断補強筋を表す。  
61はP<sub>w</sub>(せん断補強筋比)が0.61%を表す。
- (3) Sはせん断破壊型を表す(主筋S<sub>y</sub>:800MPa)。  
Bは曲げ降伏型を表す(主筋S<sub>y</sub>:400MPa)。

表-2 材料特性

鋼材 (種別)	S <sub>y</sub> (MPa)	S <sub>t</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (GPa)	S <sub>B</sub> :圧縮強度 E <sub>c</sub> :ヤング係数 H:高強度 N:普通強度 S <sub>y</sub> :降伏強度 *0.2%オフセット S <sub>t</sub> :引張強度 E <sub>s</sub> :ヤング係数
D13	424	433	192	
D13(焼入れ)	887	905	190	
H- 4.5*	1212	1236	199	
H- 3.5*	1395	1423	205	
N- 8.5*	423	431	216	
N- 6.5*	400	408	202	
コンクリート	S <sub>B</sub> (MPa)	/		E <sub>c</sub> (GPa)
	32			22.6

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体を図-1,試験体諸元一覧を表-1に示す。本実験ではRC造柱におけるせん断破壊と曲げ破壊を対象としており,試験体は円形断面,正方形断面,および長方形断面をモデル化したものである。各断面の試験体は断面積が等しく,直径300mmの円形,幅×せい=267×267mmの正方形,幅×せい=238×300mmの長方形を模型柱とした。せん断破壊型のせん断スパン比は1.0,曲げ破壊型のせん断スパン比は1.5である。これらの試験体においてせん断補強方法も変動要因とした上で,試験体の断面形状が損傷過程と終局性状に及ぼす影響を考察した。

### 2.2 使用材料

試験体に使用した鋼材およびコンクリートの材料特性を表-2に示す。各断面のせん断シリーズはせん断破壊を先行させるため,主筋を全て焼

入れし,800MPa以上に降伏強度を高めた。せん断補強筋には8.5(普通強度),6.5(普通強度),4.5(高強度),3.5(高強度)の鉄線を使用した。普通強度せん断補強筋は400MPa台におさえて焼きなまし,高強度せん断補強筋は1300MPa程度に焼入れをした鉄線を用いた。補強筋間隔については最終的に普通強度せん断補強筋と高強度せん断補強筋でせん断補強筋量をあわせるため,高強度せん断補強筋間隔50mmを基準として普通強度せん断補強筋の間隔を調節した。

### 2.3 加力方法

加力装置を図-2,図-3に示す。曲げ破壊型,せん断破壊型いずれも試験体中央部が反曲点になる逆対称加力形式である。軸力は,水平加力中一定軸力になるように制御した。

曲げ降伏型の加力サイクルは変位制御とし,

R= ± 1/400 で1回正負交番载荷, その後は ± 1/200, ± 1/100, ± 1/67, ± 1/50, ± 1/33, ± 1/25, ± 1/20 で各2回繰り返すことにした。せん断破壊型は片方向単調加力形式で载荷した。最初は変位制御でせん断ひび割れ発生時(ほぼ部材角 1/200)まで加力し, その後はせん断ひび割れの経過を追うため, 荷重制御で終局時まで10kN ずつ漸増载荷を行った。

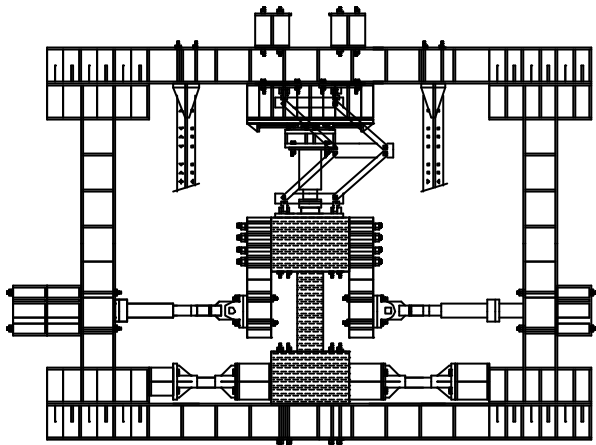


図-2 曲げシリーズ加力装置

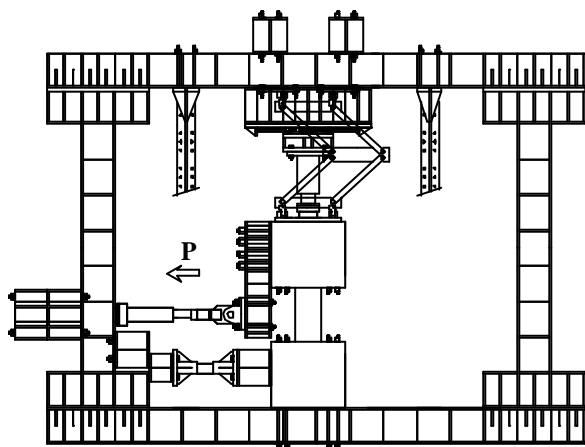


図-3 せん断シリーズ加力装置

## 2.4 せん断ひび割れ幅

せん断破壊型において, せん断ひび割れが入った時点から荷重制御を行い, 10kN 間隔で測定した。曲げひび割れから斜めに進展したひび割れも測定範囲内(図-7)においてはせん断ひび割れとみなして検討の対象とした。各ひび割れは30mm 間隔で測定した。ひび割れ長さ方向に対して直交の幅として扱った。測定には25倍拡大のモニター体型マイクロスコープを使用した。

## 3. 実験結果

実験結果一覧を表-3に示す。

表-3 実験結果

試験体	cQsu1 (kN)	cQsu2 (kN)	cQbu (kN)	eQsc (kN)	Qmax (kN)	eQmax /cQsu1	cQmax /cQbu	
円形	C-N61-S	235	265	426	210	371	1.58	0.87
	C-H21-S	236	266	426	204	330	1.40	0.77
	C-N46-S	221	239	426	197	310	1.40	0.73
	C-H13-S	221	237	426	183	280	1.27	0.66
正方形	C-H21-B	199	244	183	146	230	1.16	1.26
	S-N69-S	235	265	455	200	320	1.36	0.70
	S-H24-S	236	266	455	197	281	1.19	0.62
	S-H14-S	221	237	455	175	280	1.27	0.62
長方形	S-H24-B	199	244	196	145	213	1.07	1.09
	R-N77-S	255	291	510	195	390	1.53	0.76
	R-H27-S	255	292	510	181	323	1.27	0.63
	R-H16-S	240	259	510	180	281	1.17	0.55
R-H27-B	204	268	199	155	225	1.10	1.13	

cQsu1: 修正荒川式を用いたせん断強度計算値, cQsu2: 靱性保証型設計指針より求めたせん断強度計算値<sup>(1)</sup>, cQbu: e関数法を用いた曲げ解析による曲げ耐力計算値, eQsc: せん断ひび割れ荷重実験値, eQmax: 最大耐力実験値

### 3.1 曲げシリーズ

曲げ降伏型のせん断力-部材角の関係を図-4に示す。

まず, 曲げ降伏型の場合, 円形は曲げ降伏後にせん断破壊を, 正方形, 長方形はともに曲げ降伏後に付着割裂破壊した。曲げ変形性能の比較では円形柱で四角柱より優れた変形性能が確認できた。また, 長方形の方が若干, 正方形より履歴性状が安定しており, 耐力的にも長方形がより円形に近づいていることが分かった。

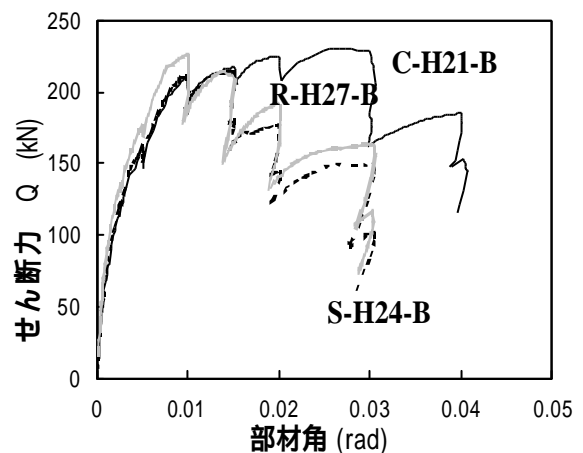


図-4 せん断力-部材角関係(曲げシリーズ)

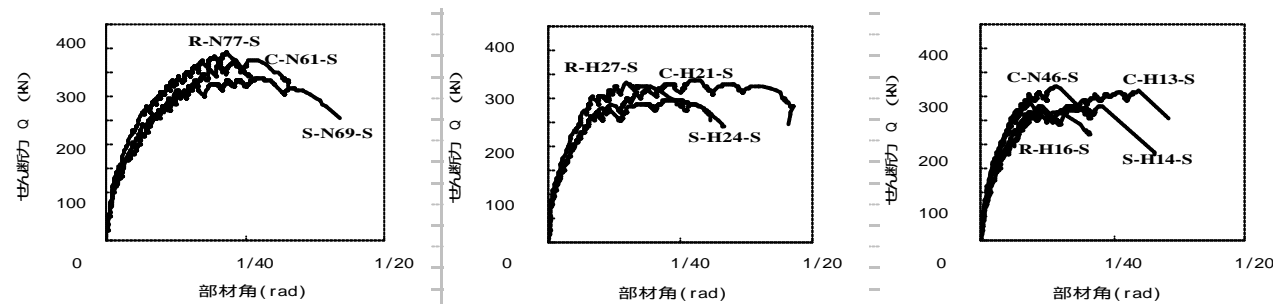


図-5 せん断力 - 部材角関係 (せん断シリーズ)

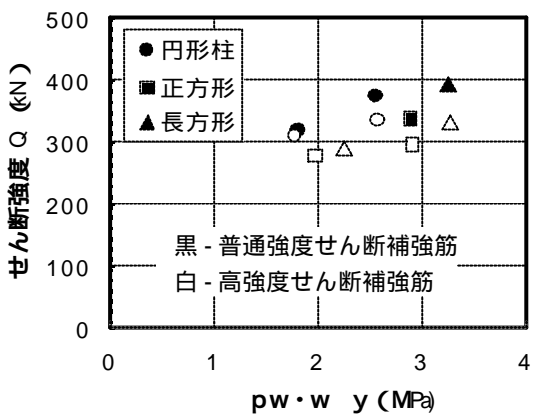


図-6 せん断強度 -  $P_w \cdot w_y$  関係

### 3.2 せん断シリーズ

#### 3.2.1 破壊性状

せん断シリーズのせん断力 - 部材角の関係(試験体を  $P_w \cdot w_y$  が 3MPa と 2MPa で分けて表示)を 図-5 に示す。また, 全試験体のせん断力 -  $P_w \cdot w_y$  関係を 図-6 に示す。図-7 には各断面の部材角 1/50 でのひび割れ状況を示している。

せん断破壊型については  $P_w \cdot w_y$  が 3MPa の場合, 部材角 1/50 で最大耐力に達して 1/33 で急激に耐力が落ちているが, 2MPa の場合, 部材角 1/67 で最大耐力に達し, 1/50 で急激な耐力低下が見られた。但し, 高強度せん断補強筋を用いた円形柱の場合, 1/33 まで徐々に耐力が向上して 1/25 で急激な耐力低下に至った。全ての試験体は腹部に発生したせん断ひび割れが開口してせん断破壊に至った。

#### 3.2.2 各断面の損傷過程の評価および比較

設計時において重要となるせん断補強筋の応力  $s_w$  と最大せん断ひび割れ幅  $W_{max}$  の関係を明確にすることで部材の損傷評価が可能になると思われる。

また, 地震後には最大せん断ひび割れ幅が観察できる。これから, 地震時に負担したせん断力が, せん断強度に対してどの程度か評価できると補修などに対して都合が良い。ここでは, 断面形状およびせん断補強筋強度の異なる試験体に対して, せん断力とせん断力負担時のせん断ひび割れ幅の関係を評価する。すなわち, 1) せん断補強筋の応力  $s_w$  と歪  $e$  の関係を評価する, 2) 歪とひび割れ幅の関係を仮定する。

$$1) t_p = (P_w \cdot s_w)^x + t_{sc}$$

$$2) e = W_p / (D(\text{柱せい}) \cdot \sin(\text{角度}))$$

$t_p$ : せん断応力,  $t_{sc}$ : せん断ひび割れ強度,  
 $W_p$ : 最大せん断ひび割れ幅

式-1 損傷評価仮定式

なお, せん断力負担時(ピーク時)せん断ひび割れ幅と除荷時せん断ひび割れ幅の関係は 2:1 程度といわれている<sup>2)</sup>。まず, 各断面形状の損傷過程を評価するため, 評価の範囲として決めた領域はせん断ひび割れのみを対象にするため, 図-7 のように想定した。

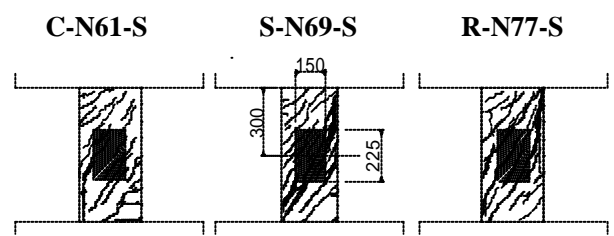


図-7 ひび割れ評価領域 (mm)

本実験の場合, せん断ひび割れ角度の測定結果は,  $55^\circ \sim 60^\circ$  のひび割れが 90% 以上だったため, 評価領域の中で角度が  $55^\circ \sim 60^\circ$  で幅が 0.1mm 以上のひび割れ本数を数えた。図-8 にせん断応力 - ひび割れ本数との関係を示す。

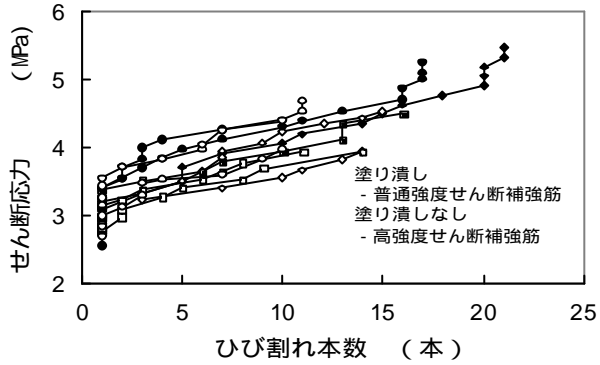
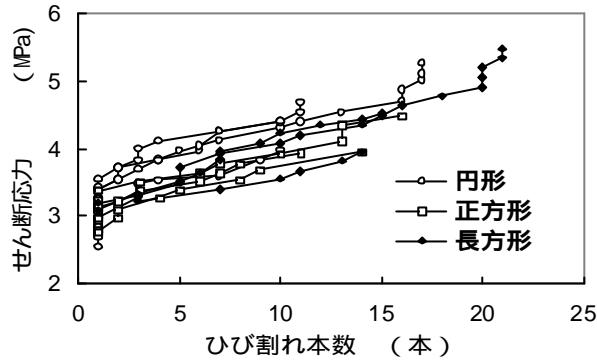


図-8 せん断応力とひび割れ本数の関係

評価領域での最大ひび割れは全ての試験体で領域の中心線(試験体の中心)を通過しており、そのひび割れを損傷評価の対象にした。同じ応力時に円形より四角柱が、長方形より正方形の方でひび割れ分散が激しく、数が多くなっていることが確認できた。また高強度せん断補強筋を使用した試験体の方が普通強度せん断補強筋の試験体より若干、本数が多く見られた。図-7の領域でのせん断補強筋歪と最大せん断ひび割れ幅  $W_{max}$  の関係を図-9に示す。最大ひび割れ幅と歪の関係からは同じ歪の時、円形より四角の方で本数増加と共にひび割れ幅も開いていくのが分かった。また、仮定式  $W_p = D \cdot \sin^2 \cdot e$  の計算値と比べ、円形の方が  $W_{max}$  がかなり小さいことが確認できた。補強筋歪は評価領域の中での最大値を取った。また、評価範囲でのせん断補強筋比とせん断補強筋応力の積  $P_w \cdot S_w$  とせん断応力の関係を図-10に示す。各図では近似曲線を示した。

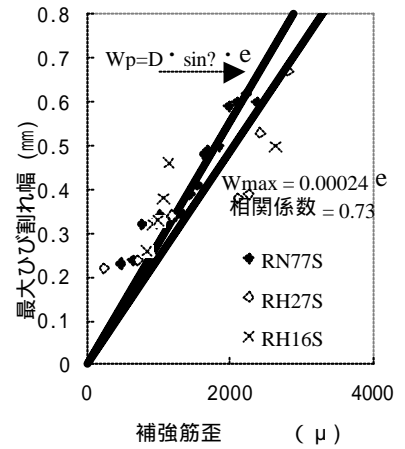
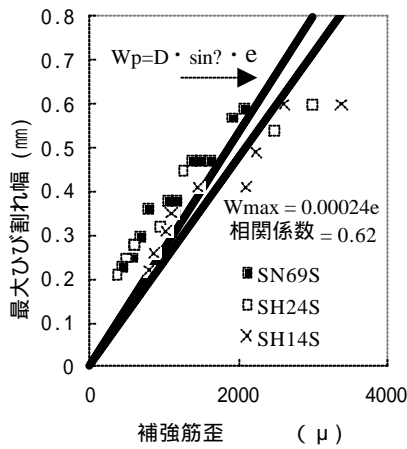
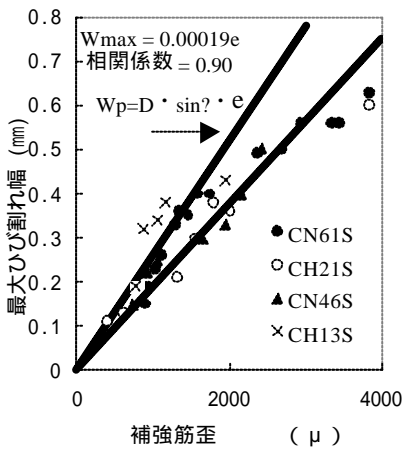


図-9 最大せん断ひび割れ幅と最大せん断補強筋歪の関係

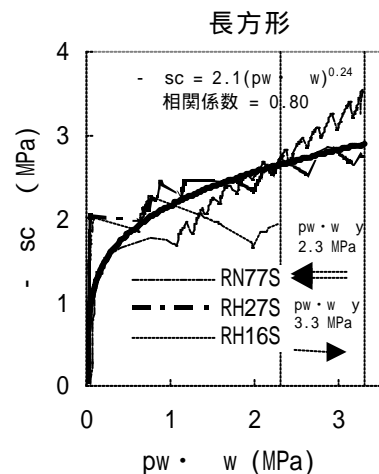
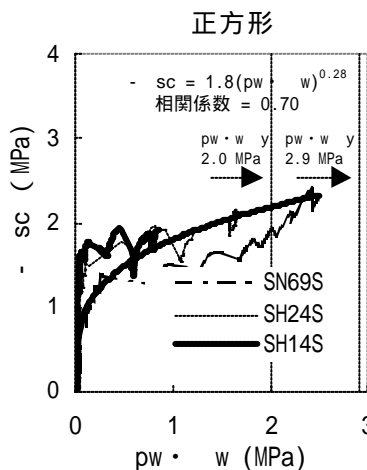
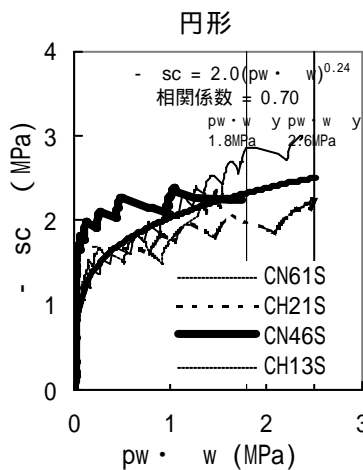


図-10 せん断応力 -  $P_w \cdot w$  関係

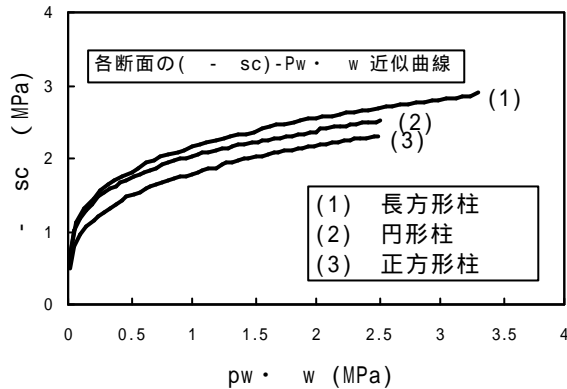


図-11 ( - sc) -  $P_w \cdot w$  近似曲線の比較

図-11の近似曲線の比較から円形と長方形の破壊性状が非常に近づいているのが分かった。

以上のような結果から実験で得られた  $W_p$  と  $t_p$  の値をもとに式-1を利用して実験値  $W_p$  から歪  $e$  を求める。その歪  $e$  から求めた値をせん断応力(設計時限界損傷応力)  $t_p$  の計算値とした。実験値歪  $e$  は降伏歪実験値から求めた。実験値最大ひび割れ幅  $W_p$  と歪  $e$  の関係は計算値  $W_p = D \cdot \sin \cdot e$  より安全側であるため、仮定式で表現可能と思われる。そこで、実験値と計算値との相関関係を見るため、式-1で  $a(P_w \cdot s_w)^x$  は実験値の近似値を適用し、また、 $t_{sc}$  は実験値を代入して計算を行い、図-5にその実験値と計算値の比較を示す。

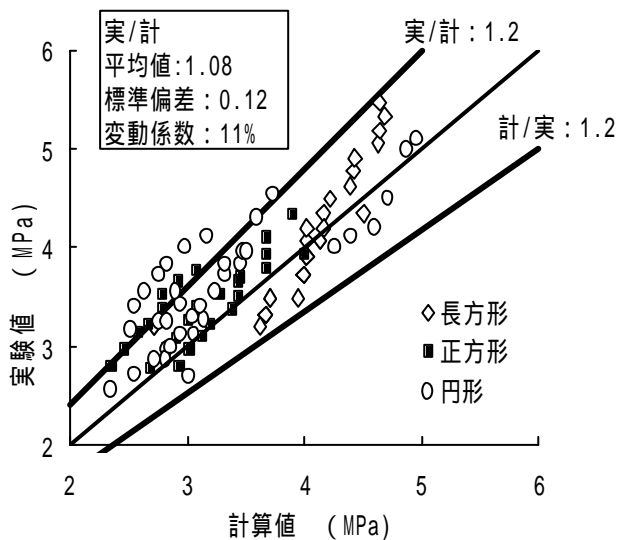


図-12 実験値と計算値の比較

## 4. まとめ

### 4.1 各断面の終局性状

各断面のせん断終局性状の比較で耐力的には円形と長方形が非常に近い値であることが確認できた。また、せん断応力  $-P_w \cdot w$  と  $s_y$  関係からこのような傾向が見られ、円形柱の長方形置換は問題がないと思われる。

### 4.2 各断面の損傷過程

単位面積でのひび割れ形状の比較から四角柱の方がひび割れの分散が非常に激しく、特に正方形柱の方がひび割れ幅の拡大を伴う耐力低下が非常に目立った。長方形の場合、ひび割れ本数と幅では円形に比べて非常に激しい増大を見せたが、正方形と同一の本数と幅でも優れた耐力向上が見られた。

### 4.3 中小地震時の損傷評価

最大ひび割れ幅と補強筋歪の関係は線形性を有し、かなり大きなひび割れ幅まで良い相関があることから、柱部材の損傷をあらわす指標として利用できると思われる。損傷評価の仮定式で中小地震時に損傷を受けたRC柱に対して、損傷後の補強・補修の基準となるひび割れ幅から柱が受けた限界損傷応力を推測することが可能であると考えられる。設計時では柱部材が持っている靱性性能を明確にすることで損傷後の補強費用などを暫定的に決められることが望める。

## 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高周波熱錬株式会社に深謝致します。また、大阪大学の中塚侑先生に多くのご指導を受けました。ここに関係者各位に対して深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会鉄筋コンクリート造建物靱性保証型耐震設計指針・解説, 1999
- 2) 福山 洋・松崎育弘・中野克彦・笠原美幸: RC部材のせん断ひび割れに係わる損傷限界の評価, 2000.9 PP.13~PP.16