論文　断面形状の異なる鉄筋コンクリート部材の曲げ・せん断挙動

山田 和夫[*1]・山本 俊彦[*2]・岡田　亨[*3]

要旨：本研究では，せん断補強量を変化させた円形断面および等価な正方形断面を有するRC部材のせん断耐力および変形特性について一連の実験的検討を行った。その結果，せん断補強量（p_w・$_w\sigma_y$）の少ない範囲では，一般的にRC部材の最大せん断耐力は円形断面よりも正方形断面部材の方が大きくなるが，その耐力差はせん断補強量が多くなるに従って徐々に小さくなり，p_w・$_w\sigma_y$が2MPa程度になるとせん断耐力に及ぼす断面形状の影響は殆ど認められなくなること，RC部材の限界変形に及ぼす断面形状の影響についてもほぼ同様の傾向が認められること，などが明らかとなった。

キーワード：RC部材，せん断挙動，変形限界，円形断面，正方形断面，せん断補強量

１．はじめに

筆者らは，これまでに直径が300～600mmの円形断面鉄筋コンクリート（以下，RCと略記する）部材の耐震性能に及ぼす各種要因の影響について一連の検討を行い[1)～4)]，円形断面RC部材のせん断耐力は，円形断面を等価な正方形断面に置換する簡便法を使用して評価した計算結果と実験結果とが良く一致することを示したが，その妥当性，適用性および汎用性を明らかにするためには，RC部材のせん断挙動に及ぼす断面形状の影響についての詳細な検討が必要である。金ら[5)]は，せん断補強量（p_w・$_w\sigma_y$）が1.79～3.27MPaの範囲に設定されたRC部材を用いて曲げ・せん断挙動に及ぼす断面形状の影響について検討を行い，円形断面RC部材のせん断挙動は，断面せいを円形断面の直径に一致させた等価な長方形断面RC部材と良く一致し，正方形断面RC部材は，円形断面RC部材に比べてせん断耐力が小さくなることを報告しているが，せん断補強量が少なくRC部材のせん断挙動に及ぼす圧縮部コンクリートの影響が大きくなる範囲では，断面形状に関連する中立軸深さと圧縮部断面積との関係の違いがRC部材のせん断挙動に影響を及ぼすと考えられるため，RC部材のせん断挙動と断面形状との関係は，せん断補強量に応じて変化する可能性がある。

そのため，本研究では，せん断補強量（p_w・$_w\sigma_y$）を金ら[5)]が実施した実験よりも小さく設定（p_w・$_w\sigma_y$=0～2MPa）した試験体を用いて，RC部材の曲げ・せん断挙動に及ぼす断面形状の影

表－１　実験の概要

試験体記号	せん断スパン比 (M/QD)	寸　法 (mm)	曲げ主筋			せん断補強筋			軸　力 σ_N (MPa)
			配　筋	P_g(%)	種　類	配　筋	P_w(%)	種　類	
C-000	1.50	φ300×450	12-D16	3.40	SD390	－	0.00	SWM-B	7.5
C-100						φ4-@100	0.08		
C-050						φ4-@ 50	0.17		
C-033						φ4-@ 33	0.25		
S-000	1.69	□266×450	12-D16	3.40	SD390	－	0.00	SWM-B	7.5
S-100						φ4-@100	0.09		
S-050						φ4-@ 50	0.19		
S-033						φ4-@ 33	0.29		

＊１　愛知工業大学教授　　工学部建築学科　　工博（正会員）
＊２　大同工業大学教授　　工学部建築学科　　工博（正会員）
＊３　ヨーコン(株) 技術本部生産技術部課長（正会員）

響について一連の検討を行うこととした。

２．実験方法

２．１ 試験体

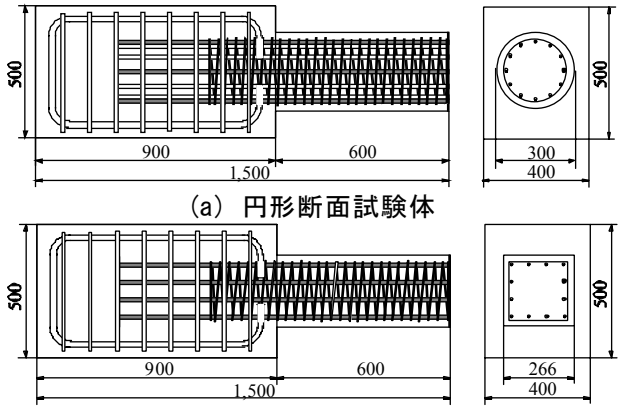
本実験では，**表－１**および**図－１**に示すように，部材断面の形状が円形（直径：D=φ300 mm）と正方形（一辺の長さ：D=□266mm）の2種類で，せん断スパンが450mm（せん断スパン比（M/QD）は，円形断面部材が1.5，正方形断面部材が1.69）の片持ちばり形式の鉄筋コンクリート製スタブ（寸法：400×500×900mm）付試験体を各4体製作し，断面形状の異なるRC部材の曲げ・せん断挙動に及ぼすせん断補強量（補補強筋無し，φ4mmの磨き鋼棒の補強筋間隔が100，50および33mmの4種類。ただし，せん断補強筋は，断面形状に関わらず全てスパイラル筋とした）の影響について調査を行った。なお，円形および正方形断面部の主筋には，12-D16（P_g=3.40%）を使用し，一端をスタブ内部において長さ$l=40d$（ここに，d：主筋径）で定着し，他端はプレートに溶接して定着した（**図－１**参照）。

２．２ 試験体の製作および養生方法

円形および正方形断面部コンクリートの製作に際しては，**表－２**に示すように呼び強度をN24に設定し，普通ポルトランドセメント，大畑・猿投産の混合山砂（最大寸法：5 mm，表乾密度：2.55g/cm^3）および山砂利（最大寸法：25mm，表乾密度：2.60 g/cm^3），AE減水剤を使用した。RC試験体は，まず円形および正方形断面部を製作し，1週間後にスタブ部コンクリートの打設を行った。試験体はスタブ部コンクリート打設後約3週間で脱型した後，試験直前まで実験室内でシート養生を行った。試験材齢（円形および正方形断面部）は，6～8週であった。円形および正方形断面部のコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を**表－３**に示す。

２．３ 加力および測定方法

加力要領を**図－２**に示す。軸力およびせん断力の加力には，反力支柱に設置した容量1,000 kNアクチュエータ（ストローク：600mm）を



(a) 円形断面試験体

(b) 正方形断面試験体

図－１　試験体の形状・寸法（単位：mm）

表－２　コンクリートの調合表

ｺﾝｸﾘｰﾄ 呼び強度	W/C (%)	単位量(kg/m^3)				
		ｾﾒﾝﾄ	水	細骨材	粗骨材	混和剤
N24	61	282	172	849	939	0.564

表－３　材料試験結果（円形・正方形断面部）

（ａ）コンクリート

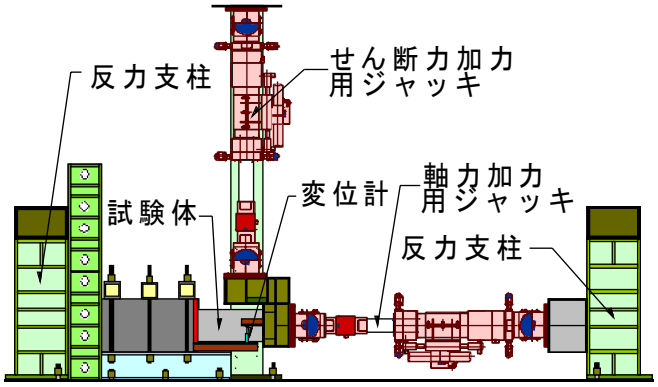
試験材齢	引張強度試験		圧縮強度試験		ヤング係数 (MPa)
	密度 (g/cm^3)	強度 (MPa)	密度 (g/cm^3)	強度 (MPa)	
7日	2.30	1.77	2.29	16.7	―――
28日	2.33	2.27	2.32	23.1	―――
41日*1	2.31	2.35	2.32	25.6	2.59×10^4
56日*2	2.29	2.38	2.31	25.9	2.65×10^4

［注］材齢7および28日は標準水中養生試験体、材齢41および56日は封緘養生試験体、*1および*2：それぞれ杭の実験直前および直後。

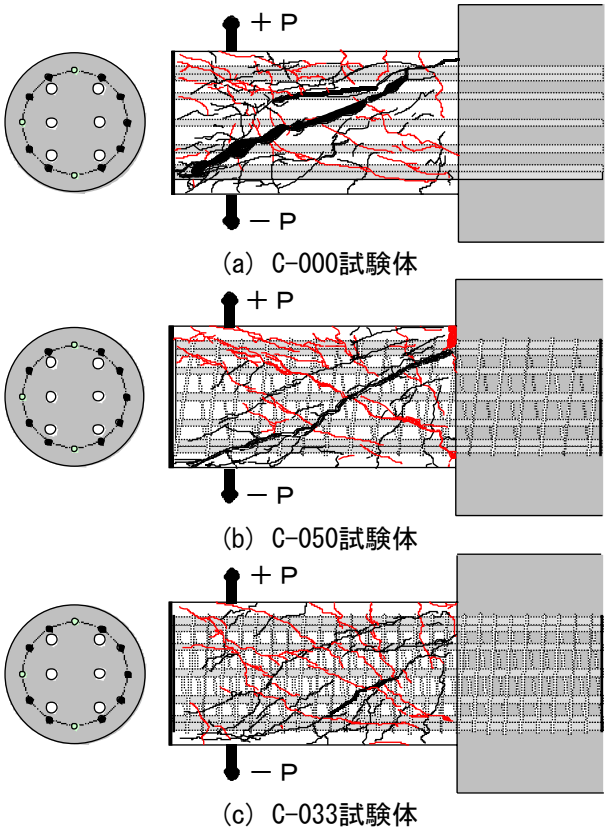
（ｂ）鉄　　筋

種類	呼び名	伸び (%)	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	ヤング係数 (MPa)
主筋	D16	24.6	436	628	1.96×10^5
帯筋	φ4	11.8	714*	765	2.00×10^5

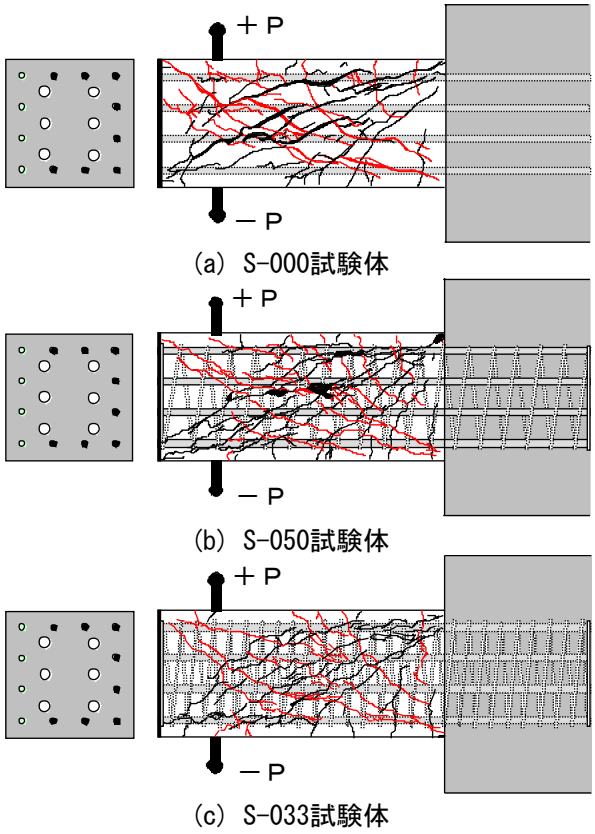
［注］*：0.2%オフセットポイント。



図－２　加力要領



図－３　円形断面RC部材の破壊状況



図－４　正方形断面RC部材の破壊状況

使用し，所定の軸力を載荷した後にせん断力の静的繰返し載荷を行った。載荷は変位制御とし，部材角R=1/1,000，1/500を正負各1回，R=1/250，1/100，1/50，1/25を各2回繰り返し，その後1方向でR=1/15となるまで単調漸増載荷を行った。また，RC部材のたわみおよび材軸変位の計測には，それぞれストローク100および50mmのひずみゲージ式変位計を使用し，せん断荷重－たわみ関係を測定するとともに，各繰返しサイクル毎にひび割れ状況の観察を行った。

３．実験結果とその考察

３．１　破壊状況

図－３および**図－４**は，それぞれ円形および正方形断面RC部材の実験によって得られた各試験体のR=+1/25（1回目）時点における破壊状況の例を試験体別に示したものである。これらの図によれば，断面形状に関わらず，せん断補強筋を配筋していない試験体（各図の(a)参照）の場合には，数本の主せん断ひび割れが部材両端にまで拡大・進展して破壊に至っているが，せん断補強量が多くなると，せん断補強筋の拘束効果により曲げひび割れおよび破壊とは直接関係しない微細なせん断ひび割れが試験体全域で数多く発生・進展し，ひび割れが分散化する傾向を示しているのが認められる。また，ひび割れの発生・進展状況に及ぼす断面形状の影響について注目してみると，一般的に正方形断面RC部材に比べて円形断面RC部材の方がひび割れ幅が大きく，破壊が特定の領域に集中する傾向を示しているが，せん断補強量が多くなるとともに断面形状の影響は小さくなり，せん断補強筋間隔が33mm（各図の(c)参照）の場合になると，円形断面と正方形断面RC部材のひび割れの発生・進展状況は比較的類似している。

３．２　せん断耐力

表－４は，最大せん断耐力に関する実験結果と各種の計算結果との比較を一覧表にして示したものである。ただし，表中の終局曲げ耐力の計算値（Q_{mc}[*1]）は，RC断面の平面保持を仮定し，圧縮側コンクリートおよび主筋の応力度－ひずみ度関係を，それぞれe関数式および完全

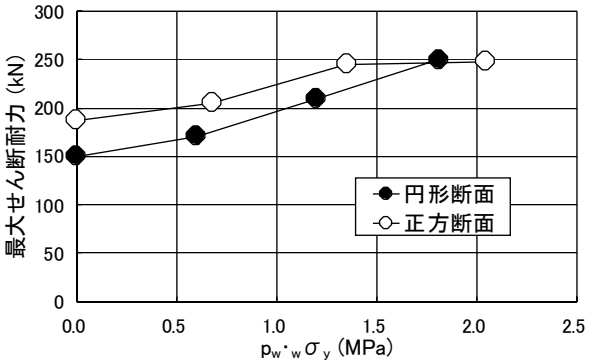
表－４　実験結果および計算結果一覧

試験体記号	実験値					計算値					
	最大耐力時			限界変形		終局曲げ耐力		せん断耐力			
	Q_u (kN)	δ_u (mm)	変形角 δ_u/L	δ_l (mm)	変形角 δ_l/L	Q_{mc}*1 (kN)	耐力比 Q_u/Q_{mc}	Q_{uc}*2 (kN)	耐力比 Q_u/Q_{uc}	Q_{uc}*3 (kN)	耐力比 Q_u/Q_{uc}
C-000	150	1.30	1/345	2.16	1/208	258	0.58	132	1.13	164	0.91
C-100	171	3.62	1/124	5.08	1/ 89	258	0.66	164	1.04	203	0.84
C-050	209	3.98	1/113	6.30	1/ 71	258	0.81	196	1.07	219	0.95
C-033	250	7.98	1/ 56	16.10	1/ 28	258	0.97	229	1.09	232	1.08
S-000	187	1.48	1/304	4.06	1/111	278	0.67	132	1.42	164	1.14
S-100	205	1.68	1/268	6.74	1/ 67	278	0.74	164	1.25	203	1.01
S-050	245	4.08	1/110	8.18	1/ 55	278	0.88	196	1.25	219	1.12
S-033	248	4.54	1/ 99	10.67	1/ 42	278	0.89	229	1.08	232	1.07

［注］ δ：たわみ，L：せん断スパン、*1～*3：それぞれe関数法，B法および荒川mean式による結果。

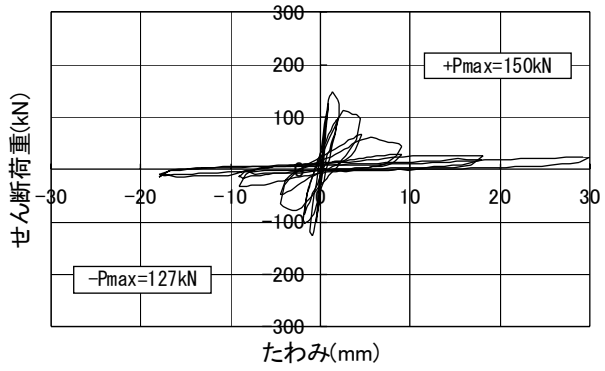
弾塑性式で近似した断面分割法（円形RC断面を50層に分割し，引張側コンクリートの応力度ーひずみ度関係は線形とした）によって算定した結果である。また，せん断耐力の計算値（Q_{uc}*2およびQ_{uc}*3）は，それぞれ日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」[6]で示されているＢ法（本研究では，せん断耐力の算定に際して，便宜上降伏ヒンジおよび潜在ヒンジを計画しない場合の式を用いた），並びに荒川mean式[7]による結果である。なお，円形断面RC部材への各せん断耐力算定式の使用に際しては，円形RC断面を断面積が等価な正方形断面に置換（一辺の長さD'=0.89×D=266mm）した。

表－４および**図－５**に示した最大せん断耐力とせん断補強量（$p_w \cdot_w \sigma_y$）との関係から明らかなように，せん断補強量が約2MPaの場合には，円形断面RC部材のせん断耐力は，正方形断面RC部材と同等もしくは若干大き目の値を示しているが，せん断補強量が減少するとともに正方形断面RC部材のせん断耐力に比べて徐々に小さくなり，せん断補強筋が配筋されていない場合になると20%程度小さい値を示している。これは，せん断補強量が少なくなると，RC部材のせん断挙動はせん断補強筋よりも圧縮部コンクリートの影響が相対的に著しくなり，矩形断面に比べて中立軸位置の上昇に伴う圧縮部断面積減少の著しい円形断面を有するRC部材では，せん断耐力の低下がより顕著になるためと考えられる。以上ことから，円形断面RC部材のせん断挙動を精度良く推定するためには，矩形断面への置換に際して，せん断補強量の影響を考慮する必要があるといえる。

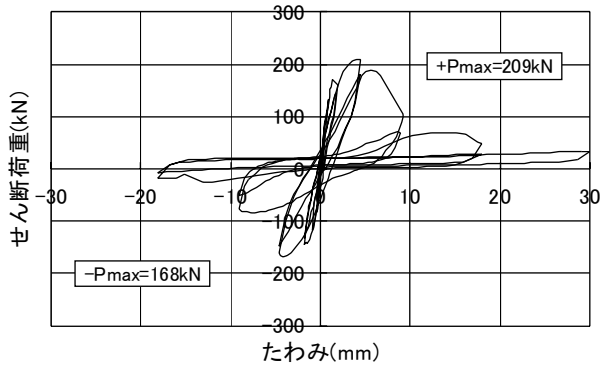


図－５　最大せん断耐力ーせん断補強量関係

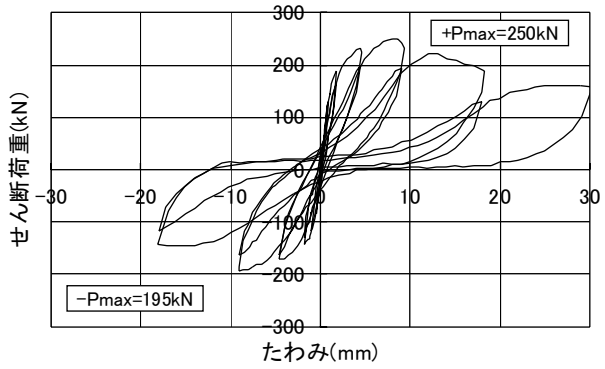
ところで，**表－４**中には各種耐力に関する計算結果も併示されている。各試験体の最大せん断耐力の実験値とe関数法による曲げ耐力の計算値との比（Q_u/Q_{mc}*1）は，せん断補強量の増加とともに0.58→0.97（円形断面RC部材）および0.67→0.89（正方形断面RC部材）へ増大しているが，いずれも1.0を下回り全てせん断破壊したと解釈できる。また，最大せん断耐力の実験値とB法による計算値との比（Q_u/Q_{uc}*2）は，円形および正方形断面RC部がそれぞれ1.04～1.13（平均：1.08）および1.08～1.42（平均：1.25）となったが，最大せん断耐力の実験値と荒川mean式による計算値との比（Q_u/Q_{uc}*3）は，それぞれ0.84～1.08（平均：0.95）および



(a) C-000試験体

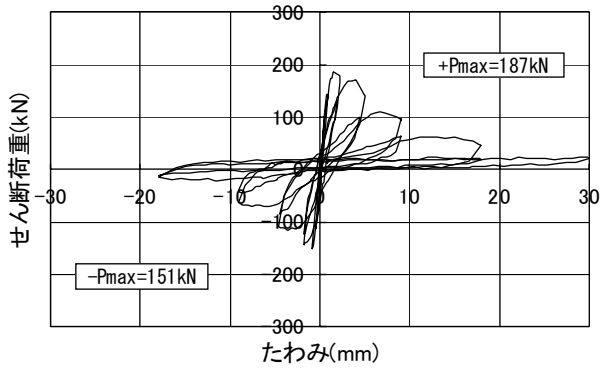


(b) C-050試験体

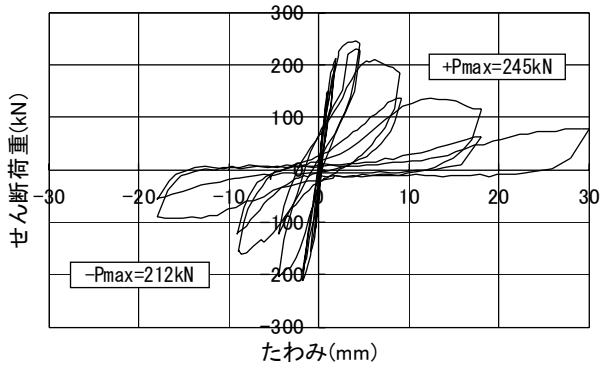


(c) C-033試験体

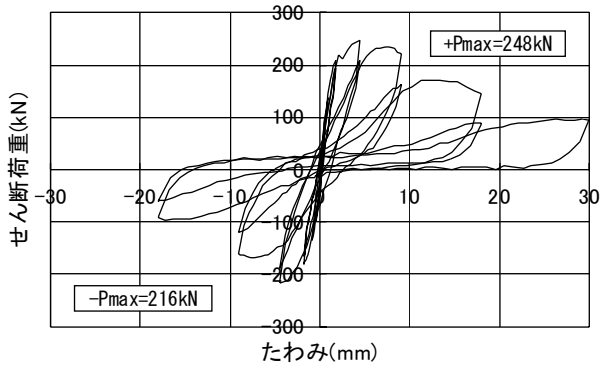
図－６　せん断荷重－たわみ関係(円形断面)



(a) S-000試験体



(b) S-050試験体



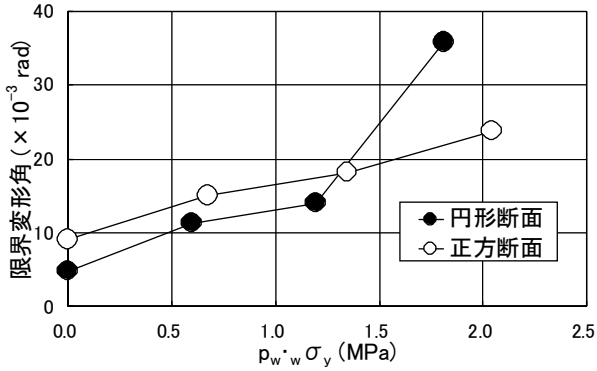
(c) S-033試験体

図－７　せん断荷重－たわみ関係(正方形断面)

1.01～1.14（平均：1.09）となり，一般的にB法による計算値は安全側，荒川mean式による場合は，ほぼ実験値と同等の結果を示している。なお，表には示していないが，最大せん断耐力の実験値とA法による計算値との比は，それぞれ1.29～2.17（平均：1.58）および1.29～2.71（平均：1.85）となり，B法に比べてさらに安全側の結果を示した。これは，A法では軸力の影響が考慮されていないためと思われる。

３．３ 荷重－変位関係

図－６および**図－７**は，それぞれ円形および正方形断面RC部材によって得られたせん断荷重－たわみ関係の例を試験体別に示したものである。また，**図－８**は，限界変形を最大耐力の80%まで耐力が低下した時点の変形と定義した



図－８　限界変形角－せん断補強量関係

場合の限界変形角（R_l）とせん断補強量との関係を断面形状別に示したものである。これらの図によれば，RC部材の耐荷性能は，断面形状に関わらずせん断補強量の増加とともに向上する傾向を示すことがわかる。すわわち，円形断面RC部材の限界変形角（R_l）は，せん断補強筋比がp_w=0%→0.25%の増大に対してR_l=1/208→1/28に，正方形断面RC部材の場合は，p_w=0%→0.29%の増大に対してR_l=1/111→1/42に増大している。また，**図－８**から明らかなように，正方形断面RC部材の限界変形角R_lは，せん断補強量（$p_w \cdot {}_w\sigma_y$）の増加とともにほぼ直線的に増大しているが，円形断面RC部材の場合は，$p_w \cdot {}_w\sigma_y$>1.2MPa（せん断補強筋間隔：50mm）の範囲で急増する傾向を示しており，RC部材の靭性向上に及ぼすせん断補強筋の効果が断面形状によって相違していることがわかる。

以上のことから，円形断面RC部材におけるせん断補強筋の効果は，せん断補強量が少ない範囲では正方形断面RC部材ほどには期待できないが，せん断補強量がある特定の値以上となるようにせん断補強筋が密に配筋されると，円形スパイラル筋によるコンファインド効果[8)]と相まって著しい靭性改善が期待できるといえる。

４．結　論

本研究によって得られた結果を要約すると，およそ次のようにまとめられる。

１）せん断補筋量の少ない場合，RC部材のせん断耐力は円形断面よりも正方形断面部材の方が大きいが，その耐力差はせん断補強量が多くなるに従って小さくなり，さらにせん断補強量が多くなると逆転する。

２）円形断面RC部材におけるせん断補強筋の効果は，せん断補強量が少ない場合には正方形断面RC部材ほどには期待できないが，せん断補強量がある値以上になると，円形スパイラル筋によるコンファインド効果と相まって著しい靭性改善が期待できる。

３）円形断面RC部材のせん断挙動を精度良く推定するためには，矩形断面への置換に際して，せん断補強量の影響について考慮する必要がある。

謝　辞

本実験とデータ整理に際してご助力を得た愛知工業大学大学院生の伊藤　環さん，並びに同4年生の白川　功君，鶴阪和哉君，道面充雄君，服部ひろみさん，藤木善久君，船坂知代さん，水野敬浩君に対して謝意を表します。また，本研究費の一部として，愛知工業大学耐震実験センターの研究費を使用したことを付記する。

参考文献

１）酒向靖二，山田和夫，山本俊彦：場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21, No. 3，pp. 493-498，1999

２）酒向靖二，山田和夫，山本俊彦，矢野伸司：場所打ち鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に及ぼすせん断スパン比の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 22，No. 3，pp. 673-678，2000

３）酒向靖二，山田和夫，山本俊彦，矢野伸司：円形断面を有する鉄筋コンクリート杭のせん断挙動に及ぼす構成素材の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23，No. 3，pp. 181-186，2001

４）矢野伸司，山田和夫，山本俊彦：円形断面を有する鉄筋コンクリート部材の曲げ・せん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24, No. 2，pp. 865-870，2002

５）金　東範，長江拓也，香取慶一，林　静雄：RC造柱の断面形状が損傷過程と終局性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 24，No. 2，pp. 205-210，2002

６）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

７）日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1991

８）B. D. Scott，R. Park，and M. J. N. Priestley: Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and Hight Strain Rates, Jour. of ACI，Vol. 79，No. 1，pp. 13-27，1982