

主筋とコンクリート強度の影響を考慮した RC 造柱の軸力保持能力の評価法

F04D027J 八塚 卓哉
指導教官 加藤大介教授

1. コンクリート強度による影響の評価実験

1-1 はじめに

1995年1月に起こった兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート造の建築年代の古いものが大きな被害を受けた。特に、ピロティ形式および壁の配置が悪いものに被害が多く、中間層が崩壊するというこれまでにみられないような被害も発生した。これらの被害は柱がせん断破壊という最も危険な破壊を起こしたためである。そのため筆者らは、RC造柱のせん断破壊のメカニズムを把握するための実験を過去4回行った。その過去のパラメータは、帯筋形状、帯筋間隔、主筋径を変え検討し、それぞれ異なる結果が得られた。そして昨年それらの結果を元に評価式を作成した。本研究では新たにコンクリート強度をパラメータにし検討する。そして全ての実験結果と統合させ、柱に対する影響を再び比較検討し、昨年の評価式を見直すとともに、精度の高い評価式を作成することを目的としている。

1-2 試験体パラメータと実験方法

試験体寸法は断面 $180 \times 180 \text{ mm}^2$ 、高さ 1200 mm で、試験部分の中央の 360 mm である。図1に帯筋形状、表1に試験体パラメータを示す。図より試験部分には 135° フック、試験部分には溶接閉鎖型と 90° フック（余長 $4d$ ）の2種類を使用した。そして本研究では前に記したようにコンクリート強度をパラメータとする。

そのため試験体パラメータはコンクリート強度と帯筋形状以外はまったく同じものにした。帯筋形状、コンクリート強度それぞれ2種類のため D10WH、D10SH、D10WL、D10SL の4種類である。この試験体名の W は帯筋が溶接閉鎖型、S は 90° フックを示し、H は高コンクリート強度、L は低コンクリート強度を示している。

これらの試験体を用いて中心軸圧縮実験1体と繰り返し水平載荷実験2体、計12体で実験を行った。中心軸圧縮実

験は軸力のみをかけた単純な軸耐力を計るための実験、繰り返し水平載荷実験は一定軸力を設定し、水平力を±方向交互に漸増載荷する地震時を模倣した実験である。一定軸力はせん断破壊するよう高軸力の試験体には 300 kN 、 500 kN 、低軸力の試験体には 150 kN 、 300 kN に設定した。試験体名の後ろの数字が0は中心軸圧縮実験、数字が1,2は繰り返し水平載荷実験を示し、1は低軸力、2は高軸力を表している。図2に加力装置を示す。上部の軸ジャッキは軸力、右部の水平ジャッキは水平力、試験体の左右のジャッキは試験体にかかる回転力の抑制という役割を果たしており、地震力によるRC造柱への影響を検討する。

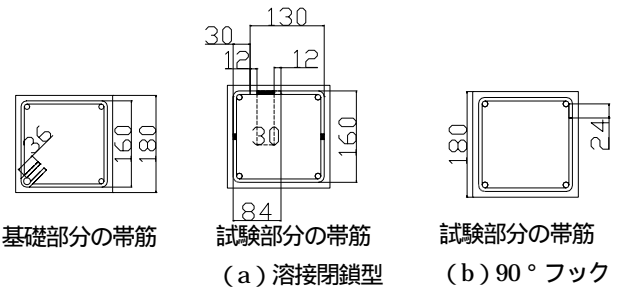


図1 帯筋形状

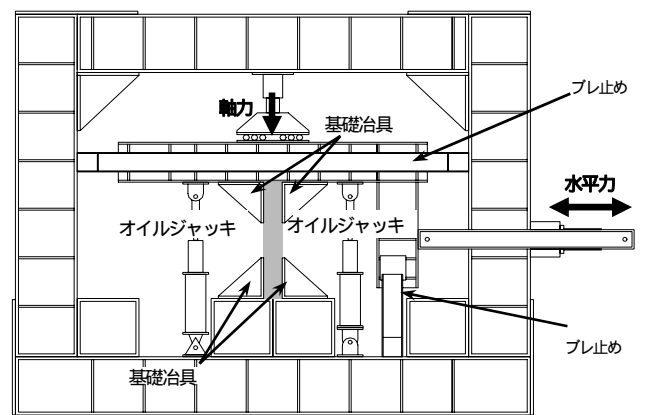


図2 加力装置

表1 試験体パラメータ

試験体名	主筋 (SD345)	主筋比(%)	主筋強度 (N/mm^2)	帯筋(SD295)	帯筋間隔 (mm)	帯筋比 (%)	帯筋強度 (N/mm^2)	コンクリート強度 (N/mm^2)
D10WHシリーズ	D10	0.4414	371	D6(溶接加工)	70	0.0051	316	32.2
D10SHシリーズ				D6(90°フック(4d))				
D10WLシリーズ				D6(溶接加工)				19.1
D10SLシリーズ				D6(90°フック(4d))				

1-3 実験結果と考察

図3に中心軸圧縮実験の結果を示す。点線は90°フックの試験体、実線は溶接閉鎖型、線の太さはコンクリート強度の大小を表している。高軸力の試験体は最大耐力において約1000kN、一方低軸力の試験体は約600kNとなった。このことはコンクリート強度によって違いが生じているといえる。帯筋形状においては最大力においてはほぼ同じ値を示しているが、耐力低下においては高軸力の試験体はゆっくり低下していくのに対し、低軸力の試験体は急激に低下している。耐力低下において軸力差による違いはなく、さらに最大耐力に違いが生じているのにもかかわらず、ほぼ同じ値である。このことから、帯筋形状には耐力低下に対する効果をもつといえる。つまり、帯筋拘束効果が耐力に関わるといえる。

図4に繰り返し水平載荷実験の結果の一例を示す。上の図はコンクリート強度が低い試験体、下の図はコ

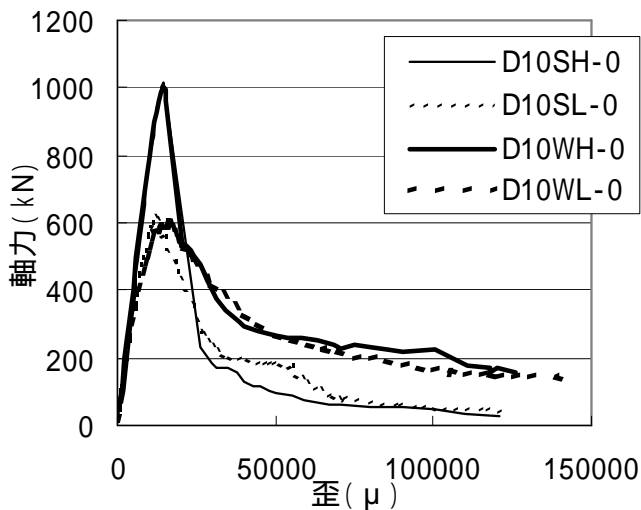


図3 中心軸圧縮実験の結果

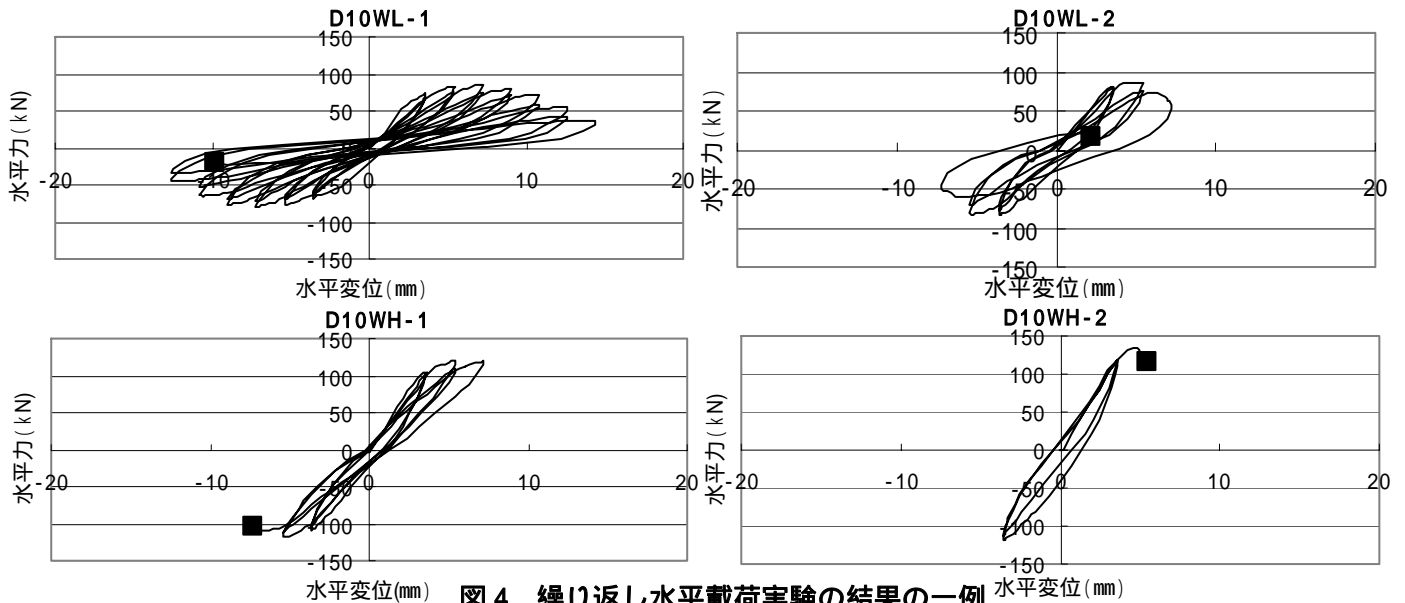


図4 繰り返し水平載荷実験の結果の一例

ンクリート強度が高い試験体である。図中の は軸力保持能力喪失点である。軸力保持能力喪失とは、試験体が一定軸力を保持できなくなったことを示し、軸力保持能力喪失点とはその保持できなくなったはじめの場所を表す。すなわち、この点以降柱は崩壊していくため、RC造柱の限界点を示す。一定軸力は低コンクリート強度の場合は150kNと300kN、高コンクリート強度の場合は300kNと500kNと試験体名の数字の低い順に設定した。

まず同じコンクリート強度で軸力の違いにより考察する。一定軸力の低いD10WH-1の最大水平変位は7.2mmだったが、一定軸力の高いD10WH-2では5.4mmだった。D10WL-1も同様に最大水平変位14.4mmであるのに対し、D10WL-2は7.2mmと一定軸力が低い方が最大水平変位が大きくなった。つまり、同パラメータの試験体であっても一定軸力が異なれば、最大水平変位は変化することがわかった。次に軸力が低い試験体、D10WL-1とD10WH-1(左側)を比較すると、コンクリート強度によって最大水平変位が大きく異なっている。しかし軸力が高い試験体、D10WL-2とD10WH-2(右側)では、コンクリート強度が低い方とコンクリート強度が高い方で水平変位が若干異なっているが、軸力が低い試験体の比較ほど違いが生じなかった。このことから、軸力が低い方がコンクリート強度による試験体耐力差が生じることが示された。同軸力下でコンクリート強度が異なる試験体、D10WL-2とD10WH-1を比較すると、水平変位が同じ値となった。

上記で示したことはほぼ帯筋形状が90°フックの試験体でも同様の結果となった。しかし、コンクリート強度が低い試験体の軸力差による比較では、溶接閉鎖型の比較ほど水平変位に違いは生じなかった。

2. 軸力保持能力喪失点の評価

2-1 試験体データ

上記した実験結果も含め、平成 14、15、16、17 年度に行われたせん断破壊する RC 造柱の繰り返し水平載荷実験の実験結果¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾を対象にして軸力保持能力喪失点の評価する。表 2 に試験体諸元を示す。コンクリート強度順に並べている。試験体は、H、P、W、W52、W90、D13S、4W、D10WH、D10SH、D10WL、D10SL シリーズはそれぞれ 2 体ずつ、S シリーズは 1 体、D13W シリーズは 3 体、全 26 体で検討する。S シリーズ以外の試験体は高軸力と低軸力 2 種類の軸力があり、それぞれせん断破壊するよう設定されている。表 2 からわかるように、断面、高さは同スパンであり、試験体パラメータは主筋径、帯筋形状、帯筋間隔、コンクリート強度である。検討するうえで崩壊部材角を用いる。崩壊部材角とは軸力保持能力喪失点までに記録した最大水平変位(mm)を試験部分の高さ(360 mm)で除した数値であり、百分率であらわしている。この崩壊部材角を R_{AX} とする。 R_{AX} によって試験体耐力を計ることができる。

2-2 帯筋比、主筋比、軸力比による検討

既往の研究⁶⁾⁷⁾では帯筋比、主筋比、軸力比は RC 造柱の変形能力に影響を与える要因であると記されている。本研究でもどのように影響しているかを検討した。図 5 に崩壊部材角-帯筋比、主筋比、軸力関係を示す。

(a)では、帯筋比パラメータが 3 種類のため、帯筋間隔が他と異なる W52、W90 シリーズを基に考察する。W52 シリーズの軸力は 500 kN、350kN で W90 シリーズの軸力は 350 kN、200 kN である。W52 と W90 を含んだ円で囲まれた他の試験体の軸力は、300 kN 前後の試験体であり、円に入っていない試験体は主筋がない試験体(主筋には 4 を配筋)だけである。そのため、帯筋比が 0.005 で軸力が 300 kN の試験体はこの範囲中の部材角で崩壊すると考えられる。しかし帯筋比が 0.005 で軸力 300 kN という限定された結果である。そのため、全試験体を対象に軸力保持能力喪失点の評価することはできない。

(b)では主筋比パラメータは 3 種類あるが、主筋比の違いによる崩壊部材角が一定ではない。そのため主筋比による軸力保持能力喪失点の評価は難しいと考えられる。

(c)は、全試験体において矢印に示されるように、軸力比が高くなると崩壊部材角は小さくなるという傾向がある。この傾向は帯筋比、主筋比の結果よりも明らかである。

以上のことから、軸力比を検討し試験体パラメータごとの軸力比を導き出せれば、崩壊部材角を評価できる。そのため、試験体パラメータを考慮した軸力比を検討し、軸力保持能力喪失点の評価を行う。

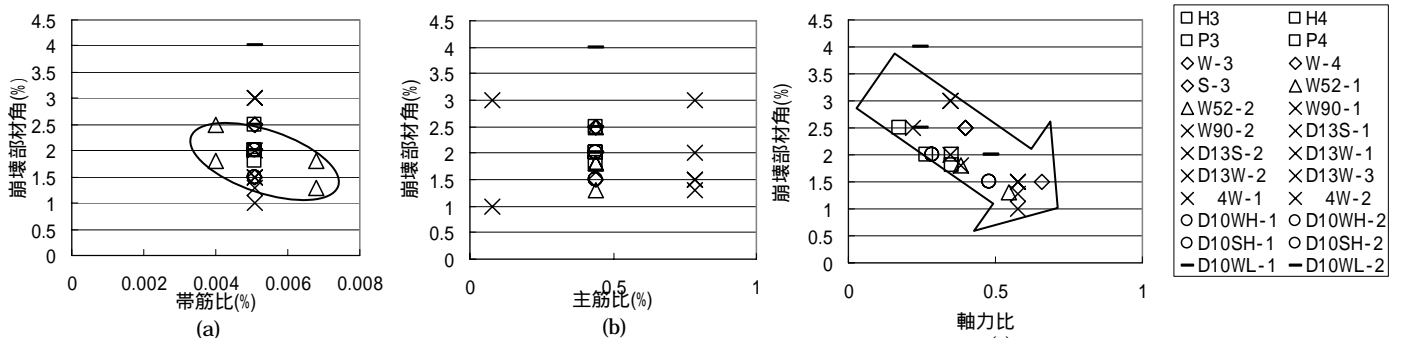


図 5 崩壊部材角-帯筋比、主筋比、軸力比関係^(c)

表 2 試験体諸元

試験体名	断面 (mm ²)	高さ (mm)	主筋 (SD345)	引張鉄 筋比(%)	主筋強度 (N/mm ²)	帯筋(SD295)	帯筋間 隔(mm)	帯筋比 (mm)	帯筋強度 (N/mm ²)	コンクリート 強度(N/mm ²)
D10WLシリーズ	180 × 180	360	D10	0.4414	371	D6(溶接加工)	70	0.0051	316	19.1
D10SLシリーズ						D6(90°フック(4d))				
Wシリーズ						D6(溶接加工)				
Sシリーズ			D13	0.7840	335	D6(90°フック(4d))	70	0.0051	335	26.7
D13Sシリーズ						D6(90°フック(4d))				
D13Wシリーズ						D6(90°フック(4d))				
4Wシリーズ			4	0.0802	502	D6(溶接加工)	52	0.0068	341	28.2
W52シリーズ							90	0.0040		
W90シリーズ							70	0.0051		
D10WHシリーズ			D10	0.4414	371	D6(90°フック(4d))	70	0.0051	316	32.2
D10SHシリーズ						D6(135°フック(6d))				
Hシリーズ						D6(90°フック(8d))				
Pシリーズ			383	D6(90°フック(8d))	303	35.2				

2-3 崩壊部材角の推定式の検討

2-3-1 検討した軸力比について

既存のRC造柱の崩壊部材角は軸力比 β によって推定できる。軸力比 β は式1に示すように、RC造柱断面に作用する軸力を保持できる断面力で除している。しかし、主筋による軸力保持能力を考慮していないため、精度のよい崩壊部材角は推定できなかつた。そのため、過去の研究³⁾では主筋の効果を考慮した軸力比 β_{up} (式2)を用いて、崩壊部材角を検討した。

$$\beta = \frac{N}{B \cdot D \cdot f_c} \quad \dots \text{式1}$$

$$\beta_{up} = \frac{(N - \sigma_s \cdot a_s \cdot y)}{B \cdot D \cdot f_c} \quad \dots \text{式2}$$

$\left[\begin{array}{l} B \text{ 柱幅} \quad D \text{ 柱せい} \quad f_c \text{ コンクリート強度} \\ N \text{ RC造柱の設定軸力} \quad \sigma_s \text{ 鉄筋の有効比} \\ a_s \text{ 主筋断面積} \quad y \text{ 主筋の降伏強度} \end{array} \right]$

しかし、式2の β_{up} から検討しても、詳しい崩壊部材角を推定することはできなかつた。そのため、本研究では鉄筋の効果を考慮する軸力比を提案し、崩壊部材角を推定する。

鉄筋の効果を考慮した軸力比を提案するために、文献⁶⁾に示されている β_{up} (式3)に着目した。

$$\beta_{up} = \frac{a_w \cdot f_{yw}}{B \cdot D \cdot f_c} \times \frac{(c \cdot s + \mu \cdot c \cdot s)}{(c \cdot s - \mu \cdot c \cdot c)} \quad \dots \text{式3}$$

$\left[\begin{array}{l} \beta_{up} \text{ 耐力低下の安定軸力時のコンクリート強度} \\ a_w \text{ 帯筋断面積の2本分} \quad f_{yw} \text{ 横補強筋の降伏応力度} \\ c \cdot \cos(\theta) \quad (\theta = 45^\circ) \quad s \cdot \sin(\theta) \quad (\theta = 45^\circ) \\ \mu \cdot \text{摩擦係数}(0.7 \text{ とする}) \end{array} \right]$

図6に β と β_{up} の違いを示す。図の軸力-歪関係は、例として同コンクリート強度で帯筋形状の異なるD10WH-0とD10SH-0の中心軸圧縮実験の結果を使用した。点線は溶接閉鎖型、実線は90°フック(4d)である。

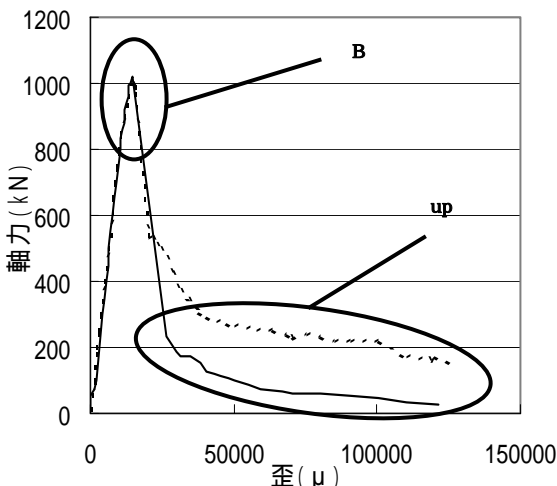


図6 β と β_{up} の違い

図6を参照すると、最大耐力時(β)は帯筋形状による違いは生じていないが、耐力低下の安定軸力時(β_{up})では大きな違いが生じている。このことは、帯筋形状の違いによって生じたと考えられる。そのため、 β_{up} は鉄筋の効果を考慮するコンクリート強度とすることができる。

本研究では、その β_{up} を考慮した軸力比、つまり鉄筋効果を考慮した軸力比 β_{up} を提案する。この鉄筋を考慮した軸力比によって、崩壊部材角 R_{AX} を推定することができる。 β_{up} は式4に示す。

$$\beta_{up} = \frac{(N - \sigma_s \cdot a_s \cdot y)}{D_c \cdot D_c \cdot f_c} \quad \dots \text{式4}$$

$\left[\begin{array}{l} \beta_{up} \text{ 鉄筋効果を考慮した軸力比} \\ D_c \text{ 周辺横補強筋の断面内の中心間距離} \end{array} \right]$

また式2、式3、式4の β_{up} は定数ではないので、 β_{up} を検討するためには β_{up} を定めねばならない。 β_{up} は鉄筋の有効比であるから、帯筋の拘束効果が最も高いとしている溶接閉鎖型の β_{up} を1として、他の帯筋形状の135°フック、90°フック(8d)、90°フック(4d)の β_{up} を検討する。

2-3-2 Wシリーズによる評価式について

表3に全溶接閉鎖型試験体の結果を示す。表3を参照すると、軸力比 β は0~1におさまっているが、 β_{up} は0~1にはおさまっていない。全溶接閉鎖型の崩壊部材角 R_{AX} - β_{up} 関係と近似線を図7に示す。グラフ中の一次方程式は近似線の傾き、切片を示していて、 R^2 は点と線の近似精度を表している。

2-3-3 Sシリーズの検討

溶接閉鎖型以外の帯筋形状の試験体は、図7の近似

表3 全溶接閉鎖型試験体の結果

試験体名	軸力 (kN)	崩壊部材角 (%)	β	β_{up}
D10WL-1	150	4	0.21	0.24
D10WL-2	300	2	0.90	0.48
W-3	300	2.5	0.95	0.40
W-4	500	1.5	1.94	0.66
D13W-1	300	3	0.73	0.35
D13W-2	500	1.5	1.84	0.58
D13W-3	500	1.5	1.84	0.58
4W-1	300	3	1.54	0.35
4W-2	500	1	2.66	0.58
W52-1	500	1.3	1.32	0.55
W52-2	350	1.8	0.81	0.38
W90-1	350	1.8	1.40	0.38
W90-2	200	2.5	0.53	0.22
D10WH-1	300	2	0.90	0.29
D10WH-2	500	1.5	1.83	0.48

線上にあると仮定すれば、 u_p を逆算することができ、そして u_p からそれぞれの R_{Ax} を逆算できる。算出した結果を表 4 に示す。に注目すると全て R_{Ax} は 0.5 以上程度である。このことは、溶接閉鎖型の帯筋拘束効果が半分程度はあるということになる。なお、 S の R_{Ax} の値が 1 を超えている。最も帯筋拘束効果が高いものとしている溶接閉鎖型の試験体よりも大きくなってしまい、帯筋拘束効果が高いということになってしまう。この結果は、帯筋形状だけが異なる W-3 と崩壊部材角が同じ値になってしまい、近似した際 u_p の値が S と W-3 で異なったためである。他の試験体では最も帯筋拘束効果が高い帯筋は溶接閉鎖型であるため、ここでは S の R_{Ax} は 1 とした。

W シリーズ以外の帯筋の R_{Ax} を求めるため、どのパラメータが最も崩壊部材角を評価できるかを検討する。は試験体によって異なる値となった。図 8 は軸力、崩壊部材角、コンクリート強度、鉄筋効果を考慮した軸力比 R_{Ax} 関係である。

その結果、(A)軸力- R_{Ax} 関係では、軸力が低い試験体ほど R_{Ax} が小さくなる傾向があった。(B)崩壊部材角- R_{Ax} 関係では、崩壊部材角が小さくなれば R_{Ax} は大きくなる傾向があった。(C)コンクリート強度- R_{Ax} 関係では、コンクリート強度が低い試験体ほど、ほぼ R_{Ax} が小さくなる傾向があった。(D) R_{Ax} - R_{Ax} 関係全体的にまとまってい、 R_{Ax} が大きくなれば R_{Ax} も大きくなる傾向がある。D10SL シリーズは(B)と(D)の図において、H シリーズと帯筋が S であるシリーズの間に位置する。これは、コンクリート強度が小さい試験体にもかかわらず崩壊部材角が大きいためである。また、全図の S は他の試験体とは異なるところに位置している。それは W-3 と同じ結果になったためと考えられる。

以上の 4 つの試験体パラメータと R_{Ax} の関係を考察した結果、 R_{Ax} - R_{Ax} 関係が検討する結果として、最も R_{Ax} による試験体評価されているといえる。そのため、崩壊部材角の推定式として算出するには複雑である。そのため軸力比 R_{Ax} - R_{Ax} 関係を用いて検討する。さらに本研究では、帯筋形状が 3 種類ある。そのため、H シリーズ(135°フック) P シリーズ(90°フック(8d)) は S シリーズ(90°フック(4d)) の R_{Ax} の比によって算出する。そのためまずは S シリーズの R_{Ax} 算出を行う。

図 9 に S シリーズ(90°フック(4d))のみの R_{Ax} - R_{Ax} 関係の近似線と近似精度を示す。点線は同じシリーズを結ぶ線であり、実線は R_{Ax} 評価式を表している。 S シリーズの R_{Ax} は $R_{Ax} = 0.55 - 0.050 R_{Ax}$ によって求めることができる。そしてその R_{Ax} より u_p を算出し、崩壊部材角 R_{Ax} を推定することができる。

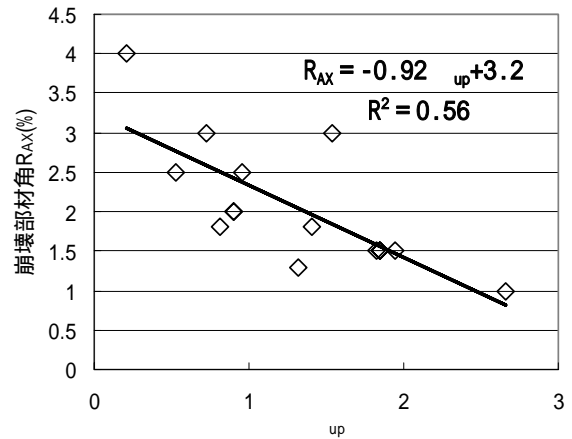


図 7 全溶接閉鎖型試験体の崩壊部材角- u_p 関係

表 4 135°フック、90°フック試験体の算出結果

試験体名	軸力 (kN)	崩壊部材角 (%)	u_p		
D10SL-1	150	2.5	0.81	0.24	0.53
D10SL-2	300	2	1.36	0.48	0.86
S	300	2.5	0.81	0.40	1.10
D13S-1	300	2	1.36	0.35	0.73
D13S-2	500	1.29	2.13	0.58	0.91
D10SH-1	300	2	1.36	0.29	0.75
D10SH-2	500	1.5	1.90	0.48	0.97
H4	200	2.5	0.81	0.18	0.70
H3	400	2	1.36	0.35	0.99
P4	300	2	1.36	0.26	0.75
P3	400	1.8	1.58	0.35	0.89

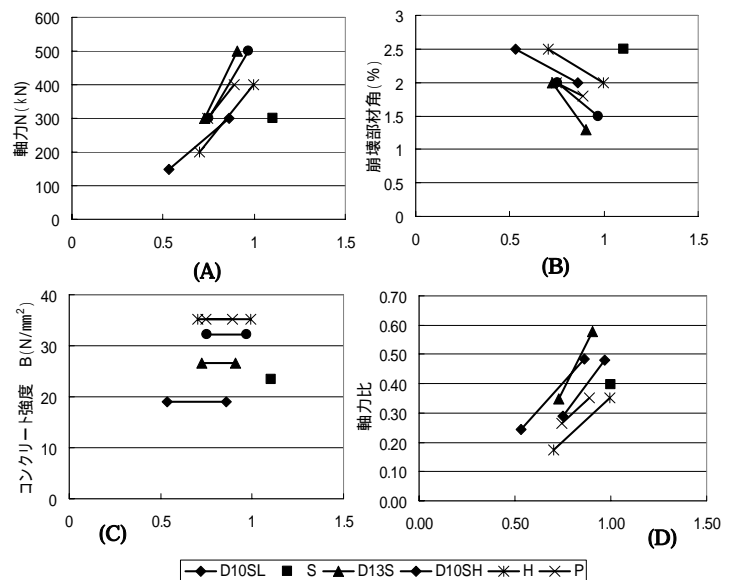


図 8 による検討図

・ 2 - 3 - 4 H, P シリーズの 検討

次に、図 10 に H シリーズ(135°フック)と P シリーズ(90°フック(8d))の R_{Ax} 算出図を示す。実線は S シリーズの評価式である。近似線を平行移動させ、移動させた R_{Ax} の比率を検討した結果、H シリーズは S シリーズの 1.54 倍、P シリーズは 1.27 倍であることがわかった。

そのため S シリーズと同様に求め、得られた R_{AX} にそれぞれの係数をかけることによって H, P シリーズも R_{AX} を算出し、崩壊部材角 R_{AX} を推定できる。

2-3-5 評価式の精度検討

求めた R_{AX} を用いて、図 11 に崩壊部材角推定式の精度検討図を示す。図 7 によって得られた $R_{AX} = -0.92 \times R_{AX} + 3.2$ によって崩壊部材角 R_{AX} を推定することができる。図 11 を参照すると、S, H, P シリーズはほぼ評価式のまわりに位置している。このことは、評価式によって得られる R_{AX} によって崩壊部材角 R_{AX} を推定できることが示された。

3. まとめ

コンクリート強度をパラメータにした実験結果は、高軸力高強度では帯筋形状による違いは生じなかったが、低軸力低強度では崩壊部材角に違いが生じた。崩壊部材角 R_{AX} は、次の 4 式によって推定することができる。式中の記号は前述にて示す。

$$R_{AX} = -0.92 \times R_{AX} + 3.2 \quad (式4)$$

$$R_{AX} = \frac{a_w \cdot s_y}{B \cdot D} \times \frac{(c \cdot s + \mu \cdot c \cdot s)}{(c \cdot s - \mu \cdot c \cdot c)} \quad (式3)$$

$$= \left(\frac{+0.050}{0.55} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} \text{が } 90^\circ \text{ フック (4d) } \cdots \\ \text{が } 90^\circ \text{ フック (8d) } \cdots 1.27 \\ \text{が } 135^\circ \text{ フック } \cdots 1.54 \end{array} \right)$$

S シリーズの評価式を用いるとき、H シリーズは R_{AX} を 1.54 倍、P シリーズは R_{AX} を 1.27 倍すれば、S シリーズ同様に評価することができる。

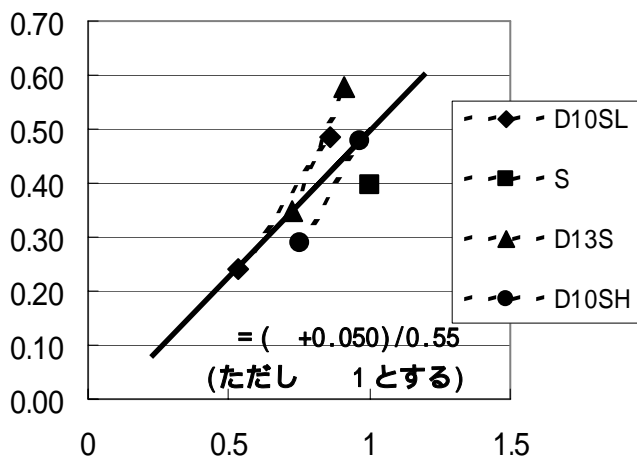


図 9 S シリーズの R_{AX} - R_{AX} 関係の近似線と近似精度

参考文献

- 1) 高田雅之・李柱振・菅勝博・加藤大介・中村友紀子；せん断破壊する RC 造柱の軸力負担能力の評価実験 日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 pp.223~pp.228 2003 年 8 月
- 2) 八塚卓哉・菅勝博・加藤大介；RC 造柱の軸力伝達能力に及ぼす載荷履歴の影響と評価 日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 pp.347~pp.350 2004 年 8 月
- 3) 八塚卓哉・加藤大介；RC 造柱の軸力保持性能に及ぼす主筋の効果 日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 pp.141~pp.142 2005 年 9 月
- 4) 李柱振・加藤大介；異なる配筋詳細を有する RC 造柱のせん断破壊後の軸力負担能力の評価実験 日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 pp.139~pp.140 2005 年 9 月
- 5) 菅勝博・加藤大介；RC 造柱の軸力保持性能の評価式の提案 新潟大学大学院自然科学研究科環境システム科学専攻 平成 16 年度論文梗概集 pp.140~pp.145 2005
- 6) 加藤大介；角形補強筋で拘束されたコンクリート柱の軸方向応力度 - 歪度関係に関する研究 日本建築学会構造系論文報告集、No.422 pp.65~pp.74 1991 年 4 月

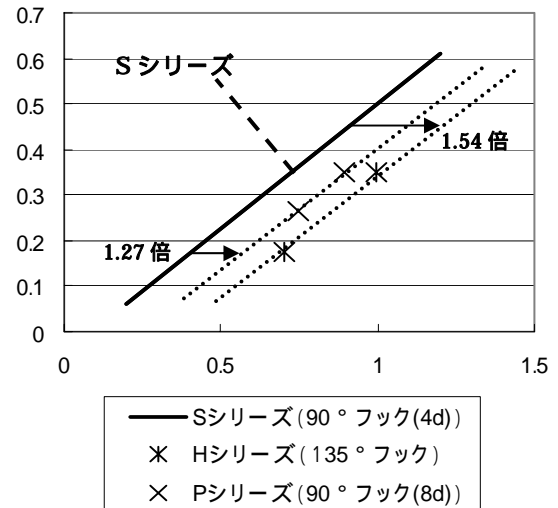


図 10 H シリーズと P シリーズの R_{AX} 算出図

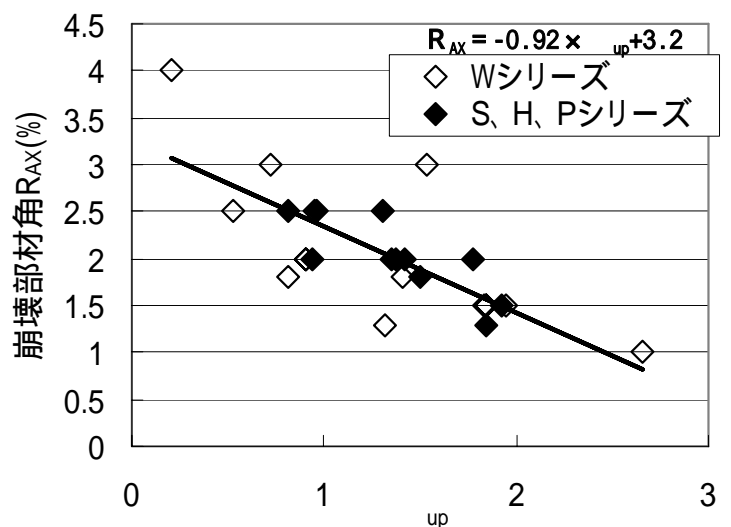


図 11 崩壊部材角推定式の精度検討図