

論文 せん断破壊するRC造柱の軸力負担能力に及ぼす荷重方法の影響

李 柱振^{*1}・加藤 大介^{*2}・菅 勝博^{*3}・中村 友紀子^{*4}

要旨：本報告では、せん断破壊する RC 造柱の地震時の軸力伝達能力喪失のメカニズムに及ぼす荷重履歴の影響を実験的に検討した結果を報告する。試験体は帯筋間隔を変えた 2 シリーズを作成し、それぞれのシリーズで中心軸圧縮実験を各 1 体、一方向荷重実験、繰り返し荷重実験を作用軸力を変えて各 2 体ずつ、計 10 体の試験体の実験を行った。

キーワード：RC 造柱、軸力伝達能力、荷重履歴、せん断破壊、配筋詳細

1. はじめに

筆者らは、RC 造柱の地震時の軸力伝達能力喪失のメカニズムを検討してきた^{1,2)}。これらの研究では、主に配筋詳細と作用軸力の違いが正負繰り返し水平荷重を受ける RC 柱の軸力伝達能力に及ぼす影響を検討している。特に、中心軸圧縮加力実験の結果との関連に着目しているのが特徴である。

一方、荷重方法が軸力伝達能力の喪失に及ぼす影響も大きく、いまだ未解明である。今後軸力伝達能力を検討していく際には、常に荷重方法の違いにも着目する必要がある。前述の中心軸圧縮加力実験と繰り返し水平荷重実験の関係も広い意味では荷重方法の影響といえ、最終的にはこれらの関連も含めた検討が必要であるが、本報告では、水平方向荷重を一方向とした場合と地震時を想定した一般的な繰り返しとした場合の軸力伝達能力へ及ぼす影響を実験的に検討した結果を中心に報告する。

2. 実験計画・方法

本研究では 3 通りの荷重方法を用いた。すなわち、基本的な荷重である中心軸圧縮実験、水平力を受ける RC 造柱の軸力負担能力を理解する

ための基本的な実験として一方向荷重実験、および、地震時に作用する力を模倣した加力法である繰り返し荷重実験、である。試験体は帯筋間隔を変えた 2 シリーズを作成し、それぞれのシリーズで中心軸圧縮実験を各 1 体、一方向荷重実験、繰り返し荷重実験を作用軸力を変えて各 2 体ずつ、計 10 体の試験体の実験を行った。

表 1 に試験体諸元、表 2 に鉄筋強度、また図 1 に試験体配筋図、図 2 に荷重装置を示す。試験体形状は 180 mm×180 mm×1200 mm の直方体であり、実大の 1/4 程度の縮尺となる。上下端部は荷重用の基礎部分となっているため試験範囲は中央の 360 mm となる。また主筋は D10 を 4 本用いた。これらの試験体形状および主筋の配筋は文献 1)2)と同じであるが、試験体寸法は加力装置の容量によった。また、主筋量は文献 1)で、せん断破壊が曲げ破壊に先行するように決定したが、帯筋以外の実験条件を同一にするためにそのまま D10 とした。コンクリートは普通強度とし、粗骨材の最大粒径は 10mm である。

試験体は帯筋間隔を変えた 2 シリーズであるが、いずれも帯筋には D6 を用い、5d の長さでフレア溶接し溶接閉鎖型帯筋とした。帯筋間隔は 52 mm と 90 mm の 2 種類としたが、これは文献 1)2)

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 大学院生 修士 (工学) (正会員)

*2 新潟大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

*3 新潟大学大学院 自然科学研究科 大学院生

*4 新潟大学 工学部建設学科 講師 博士 (工学) (正会員)

で用いた 70mm を中心に、試験体がせん断破壊する条件内でその範囲を広げた結果である。この帯筋間隔は帯筋比で 0.4%と 0.68%となるが、間隔の絶対値は実際の構造物と対応しない。従って、本実験結果から実際の構造物の挙動を予測するときにはこの点を考慮する必要がある。

試験体は上下部分を三角形の基礎治具で挟み込んで固定し、上下の鉄骨加力装置にとりつけた。荷重は、図-2の試験体上部のL型フレームの上に設置されている軸力ジャッキにより軸方向荷重を行い、水平ジャッキにより水平方向荷重を行った。また、左右の軸方向ジャッキによりL型フレームの平行を保持した。水平変形は上下の基礎治具間の水平変形とし、水平変形角はそれを試験区間 360mm で除した値とした。また、軸変形は図-1に示したように試験区間内の 310mm で表裏計4箇所測定し、その平均とした。軸ひずみ度はそれを 310mm で除した値とした。また、軸ひずみ度は縮みを正としている。なお、本試験体はすべてせん断破壊であるので、試験体試験区間上下の曲げヒンジ領域の変形は僅かであり、本測定法による軸ひずみ度は試験体全体の軸ひずみ度と考えた。

表-3に荷重方法を示す。荷重は主な荷重である主荷重とその後の事後荷重の2段階に分けて行った。試験体 W90-0, W52-0 の2体は中心軸圧縮実験を行った試験体である。他の8体の試験体は、主荷重として一定軸力下で水平荷重を行った。一方向荷重は、一定軸力下で水平力を正方向に荷重した。繰り返し荷重は一定軸力下で水平部材角 $\pm 1/100\text{rad}$, $\pm 1.5/100\text{rad}$, $\pm 2/100\text{rad}$, $\pm 2.5/100\text{rad}$ を2回づつ行った。表-3中に各試験体毎に設定した一定軸力を示したが、繰り返し荷重及び一方向荷重の試験体ともに、試験体がこの軸力を支持できなくなるま

で荷重を行った。

水平荷重によって試験体が軸力伝達能力喪失点に至った後に事後荷重を行った。この事後荷重は、W90 シリーズでは軸力伝達能力喪失時の水

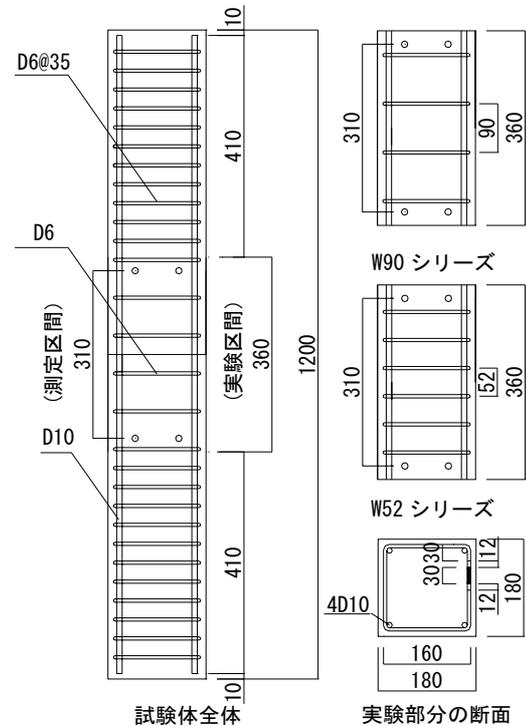


図-1 試験体配筋図(単位 mm)

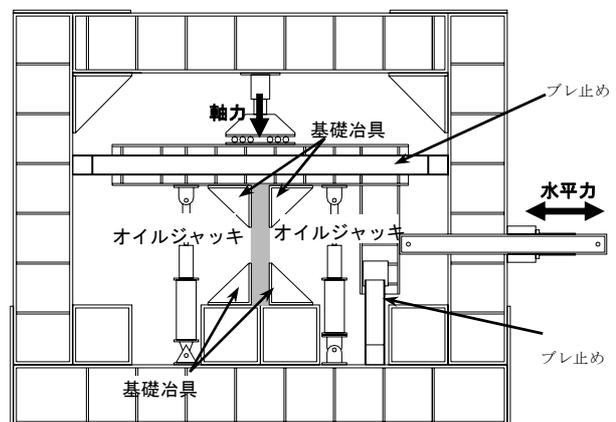


図-2 荷重装置

表-2 鉄筋強度

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)
D10	382	535
D6	337	480

表-1 試験体諸元

試験体名	断面 (mm ²)	高さ (mm)	主筋 (SD345)	引張鉄筋比	帯筋 (SD295)	帯筋間隔 (mm)	帯筋比	コンクリート強度(N/mm ²)
W90シリーズ	180×180	360	4-D10	0.0044	D6	90	0.004	28.2
W52シリーズ						52	0.0068	

平変位を一定に保ち、水平変位を拘束して軸力を漸増载荷した。W52シリーズでは、水平変位を拘束せずに軸力を载荷した。なお、事後载荷の実験結果は稿を改めて報告する予定である。

3. 実験結果

3.1 水平力-水平変位関係

図-3は中心軸圧縮実験を行った試験体W90-0とW52-0の軸力-軸方向変位関係である。最大耐力は、試験体W90-0より拘束効果の高い試験体W52-0の方が大きく、最大耐力後も試験体W52-0の方が高い軸力を保持していた。

図-4(a)~(d)に、水平力-水平変位関係において、同じ軸力を受ける一方向载荷と繰り返し载荷試験体を比較した図を示す。図-4(a)は、帯筋間隔の広い(90mm)試験体で高軸力を受ける方の2体で、グループH90と表記してある。同様に、図-4(b)は、帯筋間隔の狭い(52mm)試験体で高軸力を受ける方の2体でグループH52、図-4(c)(d)はグループL90、L52と表記されている。また、図中の○印は所定の軸力を伝達できなくなったステップであり、従って、事後载荷

(軸加力)を開始したステップを意味する。

図-4(a)から、一方向载荷を行った試験体

表-3 载荷方法

試験体名	主载荷 (繰返水平载荷)	事後载荷 (単調軸载荷)
	軸力 (kN)	载荷時の状態
W52-0	軸方向载荷	
W52-1	500	水平変位無拘束
W52-2	350	水平変位無拘束
W52-3	500	水平変位無拘束
W52-4	350	水平変位無拘束
W90-0	軸方向载荷	
W90-1	350	水平変位拘束
W90-2	200	水平変位拘束
W90-3	350	水平変位拘束
W90-4	200	水平変位拘束

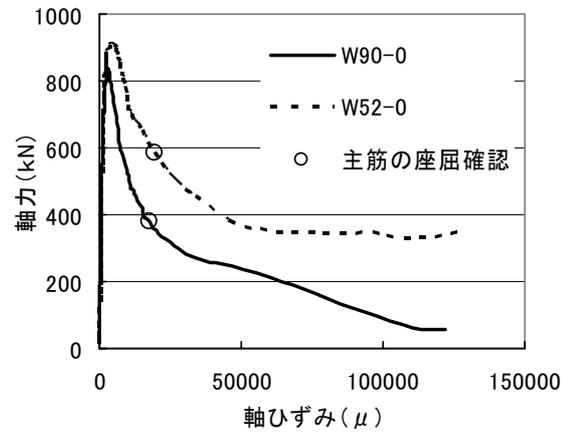


図-3 中心軸圧縮実験の結果

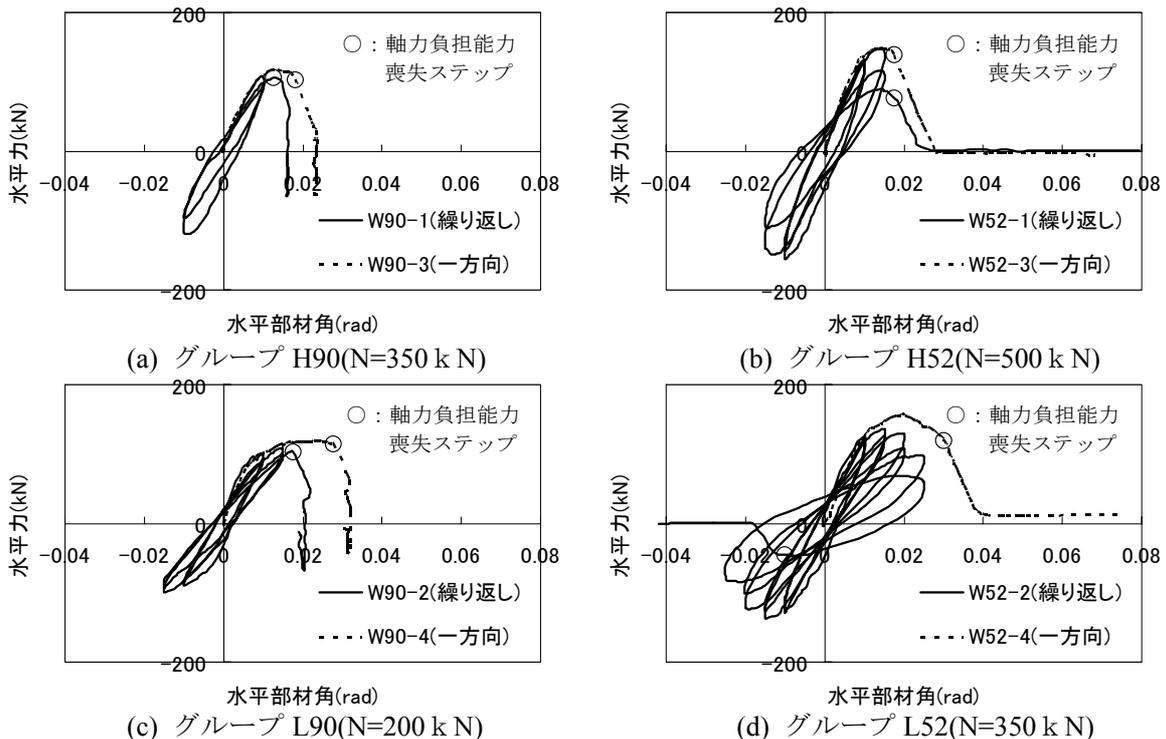


図-4 水平力-水平部材角関係

W90-3 の軸力伝達能力喪失点は繰り返し載荷を行った試験体 W90-1 よりも大きいことがわかる。また、軸力の低い場合(図-4(c))も同様のことがいえる。さらに、両図を比較すると軸力の低い方が軸力伝達能力喪失時の水平部材角が大きくなっていることがわかる。

図-4(b), (d)はグループ H52 と L52, すなわち、帯筋間隔の狭い試験体であるが、帯筋間隔が広い試験体に比べ、全体的に軸力伝達能力喪失点の部材角が大きくなっていることがわかる。しかしながら、一方向載荷と繰り返し載荷の試験体で軸力伝達能力喪失点時における部材角に大きな違いが見られなかった。このことから、拘束効果が小さい場合、載荷履歴の影響が顕著に表れるが、一方、拘束効果が大きくなると、載荷履歴の影響があまり見られなくなることがわかる。

文献 2)で報告したようにせん断破壊後の軸力負担は帯筋の反力により生じる斜めひび割れ面の摩擦力に依存する。従って、拘束効果が大き

くなると繰り返し載荷によりこの帯筋の反力が低下しないことを意味している。今後この観点から定量的な評価を行いたい。

3.2 軸ひずみ度—水平変位関係

図-5(a)~(d)に、水平方向載荷を受けた試験体の軸ひずみ度—水平部材角関係を示す。同軸力下のグループ毎に比較を行い、繰り返し載荷を実線、一方向載荷を点線で示している。図中で軸力伝達能力を喪失したステップを○印で示している。

一方向載荷は、図-5(a)~(d)のいずれも加力初期段階では引っ張り側に進行するが、軸力伝達能力を喪失した後に、軸ひずみが急激に増加している。一方、繰り返し載荷の場合、初期段階では軸ひずみの値は増減を繰り返す。すなわち、加力に従い、引っ張り側に進むが、除荷とともに圧縮側に戻る。帯筋間隔の広い W90 シリーズでは、この状態のまま、ある点で軸力伝達能力喪失点に至るとともに軸ひずみが急激に増加する。一方、帯筋間隔の狭い W52 シリーズ

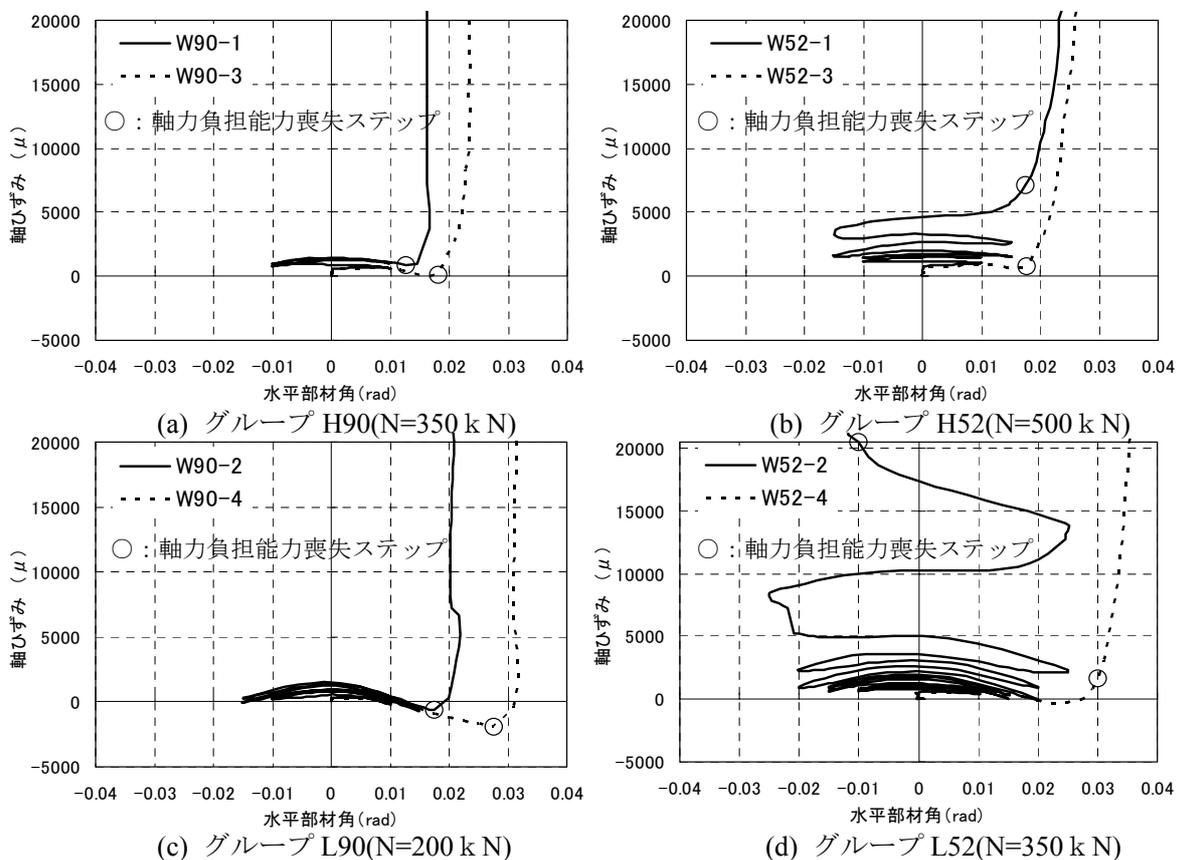


図-5 軸ひずみ度—水平部材角関係

では軸ひずみが圧縮側に蓄積される挙動が見られる。この状態は繰り返しによって水平耐力が低下していく状態に対応する（図-4 (b) (d) 参照）が、前述したように、このとき帯筋は有効に斜めひび割れ面を拘束していることを意味する。その後、W90 シリーズと同様に、ある点で軸力伝達能力喪失点に至るとともに軸ひずみが急激に増加する。その結果、W52 シリーズの方が W90 シリーズに比べ、軸力伝達能力喪失点での軸ひずみが大きくなっている。

4. 軸力比と軸力伝達能力の関係

本節では、断面の軸力比をパラメータとした時の軸力伝達能力喪失時の変形に対する影響を検討する。また、その中で、今回実験を行った試験体のうち、繰り返し載荷を行った試験体について、既往の実験結果 2) との関係をもておく。

表-4 に本報告および文献 2) で報告した繰り返し載荷を行った全試験体の軸力伝達能力喪失部材角と軸力比の一覧を示す。ここで、試験体 P 及び H シリーズは文献 2) で繰り返し載荷を行った試験体の実験結果であり、P が 90° フック、H が通常の 135° フックの帯筋を意味している。他のパラメータは本実験シリーズと同じである。図中の軸力伝達能力喪失部材角とは試験体が軸力伝達能力を喪失した時点までに経験した最大部材角と定義した。軸力比としては、全断面を対象とした軸力比とコンクリートコア断面だけを対象にしたコア断面軸力比の 2 通り示した。いずれの軸力比も主筋は無視し、また、コア断面軸力比は文献 3) のモデルを用い帯筋による拘束を考慮したものである。なお、コア断面の定義は帯筋中心で囲まれた部分とした（本報告はいずれも 154mm×154mm）。

図-6 (a) には繰り返し載荷試験体のコア軸力比と軸力伝達能力喪失部材角の関係を示す。また、図-6 (b) には一方向載荷試験体についても同様の関係を示す。図をみると帯筋間隔と帯筋の詳細が同じ試験体でコア軸力比のみが異なる試験体を比較すると（図中同じ記号で塗りつぶ

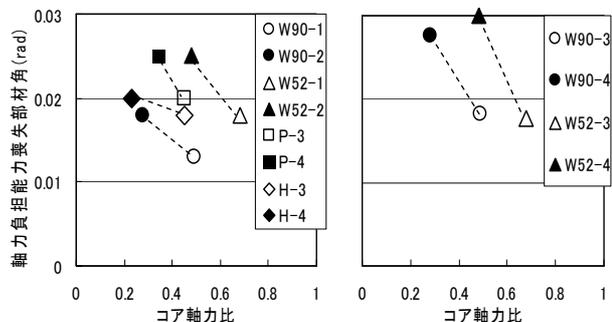
しありなしで破線で結んだ点）、全てのケースで右下がり、すなわち、軸力比が高くなると軸力伝達能力喪失点の水平部材角が小さくなる傾向にあることがわかる。しかしながら、全試験体を総括的に見ると、その傾向は薄れる。帯筋間隔が最も狭い W52 シリーズが平均的に上に、帯筋間隔が最も広い W90 シリーズが平均的に下に、帯筋間隔が中間の P シリーズと H シリーズが平均的などところに位置している。すなわち、コア軸力比だけでは軸力伝達能力喪失点を評価することは難しいといえる。今後の課題である。

5. 載荷履歴の影響

軸力伝達能力喪失時の水平部材角と軸ひずみ度に及ぼす載荷履歴の影響を比較、検討する。表-5 に軸力伝達能力喪失に関する各試験体のデータをまとめて示す。表中の軸力伝達能力喪失時の水平部材角は表-4 と同じく喪失ステップまでに経験した最大の値の絶対値である。また、軸力負担性能を喪失するときの柱の縮み量も重要なデータである。そこで、表-5 には軸

表-4 軸力伝達能力喪失部材角と軸力比の一覧

試験体	Pw (%)	軸力負担能力喪失部材角 (rad)	軸力比	
			全断面	コア断面
W90-1	0.40	0.013	0.40	0.49
W90-2	(溶接)	0.018	0.23	0.28
W52-1	0.68	0.018	0.57	0.68
W52-2	(溶接)	0.025	0.40	0.48
P-3	0.51	0.02	0.36	0.45
P-4	(90度フック)	0.025	0.27	0.34
H-3	0.51	0.018	0.36	0.45
H-4	(135度フック)	0.02	0.18	0.23



(a) 繰り返し載荷試験体 (b) 一方向載荷試験体

図-6 軸力伝達能力喪失部材角とコア軸力比の関係

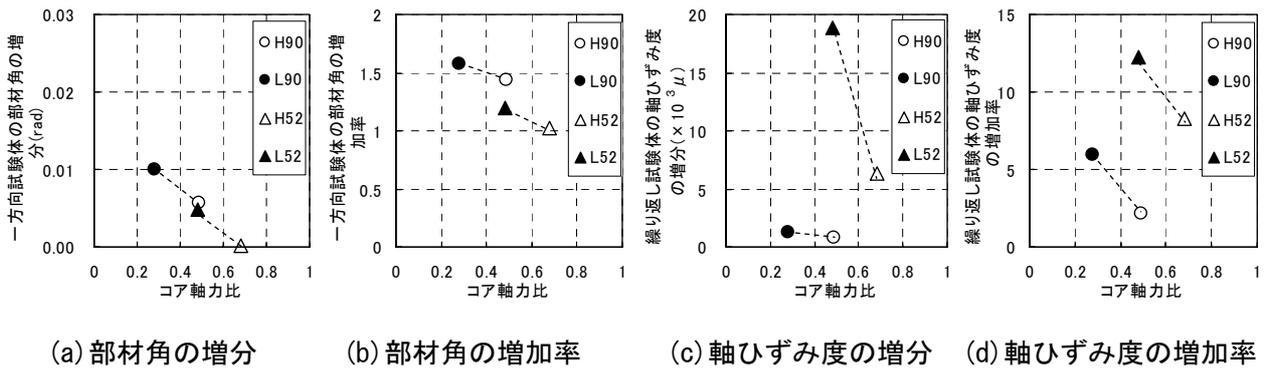


図-7 載荷履歴の影響（軸力伝達能力喪失時の部材角・軸ひずみ度とコア軸力比の関係）

表-5 軸力伝達能力喪失時に関するデータ一覧

グループ	試験体名	軸ひずみ度		部材角	
		最大値 (μ)	一方向に対する繰り返しに対する比	最大値 (rad)	繰り返しに対する一方向の比
H90	W90-1	1431	2.19	0.013	1.44
	W90-3	653		0.018	
L90	W90-2	1495	5.93	0.018	1.57
	W90-4	252		0.028	
H52	W52-1	7161	8.28	0.018	1.02
	W52-3	865		0.018	
L52	W52-2	20481	12.21	0.025	1.20
	W52-4	1677		0.030	

ひずみ度のデータも示した。軸ひずみ度も喪失ステップまでに経験した最大圧縮ひずみ度（正）である。表-5中の増加率は、軸ひずみ度が繰り返し載荷試験体の一方向載荷試験体に対する比、部材角がその逆で、一方向載荷試験体の繰り返し載荷試験体に対する比である。

図-7は表-5に示した各データを横軸にコア軸力比をとって示したものである。図-7(a)を見ると、右下がりの傾向が見て取れる。すなわち、軸力負担性能喪失時の部材角に対する載荷履歴の影響は、コア軸力比が小さいほど大きいことがわかる。さらに、図-7(b)の増加率で見ると、軸力負担性能喪失時の部材角に対する載荷履歴の影響は、コア軸力比が小さいほど大きく、同程度のコア軸力比であれば、帯筋による拘束が小さいほど大きいことがわかる。

一方、図-7(c)(d)の軸力負担性能喪失時の軸ひずみ度に対する載荷履歴の影響をみると、明確な傾向はみられない。ただし、図-7(d)より、同じ帯筋量ならば軸力比が小さい方が、繰り返し載荷時の軸ひずみ度の増加率が大きくなることはわかる。

6. まとめ

- (1) 帯筋の拘束が高く、また、軸力が低い方が軸力伝達能力喪失時の水平変形が大きい。しかしながら、コア軸力比を横軸にとったときの軸力伝達能力喪失時の水平変形はばらつきが大きい。
- (2) 一方向載荷を行った試験体の方が、繰り返し載荷を行った試験体よりも、軸力伝達能力喪失時の水平部材角が大きかったが、その増加率を見ると、コア軸力比が小さいほど大きく、同程度のコア軸力比であれば、帯筋による拘束が小さいほど大きかった。
- (3) 繰り返し載荷試験体の方が、一方向載荷試験体よりも、軸力伝達能力喪失時の軸ひずみ度が大きかったが、その増加率は同じ帯筋量ならば軸力比が小さい方が大きかった。

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造柱の軸力伝達能力の評価実験(その1～3)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造IV、2003、PP.223～PP.228
- 2) 加藤大介、李柱振、菅勝博、中村友紀子：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、第25回コンクリート工学年次論文報告集 26-2、2004年、pp.199-204
- 3) 国土開発技術センター：平成4年度 NewRC 研究開発概要報告書、C-7)コンファイト[®]コンクリートの力学特性に関する資料のとりまとめ、1992