

論文 主筋量の多いせん断破壊型 RC 柱の変形性能に関する実験的検討

富田 尚輝^{*1}・庄司 優^{*1}・佐藤 航^{*2}・中村 孝也^{*3}

要旨：主筋量の多いせん断破壊型 RC 柱を対象に、静的加力実験により荷重低下後の大変形領域における限界変形（水平力が最大耐力の 80%まで低下したときの水平変形）や鉛直変形と主筋比や軸力比等の実験変数との関係を調べた。柱試験体の主筋比を比較的大きい値とし、1.7%から 8.3%の範囲で検討を行った。その結果、限界変形は主筋比が大きいほど大きくなり、軸力比が大きいほど小さくなった。また、主筋軸力比を定義して検討した結果、それが大きいほど限界変形が小さくなり、また同じ水平変形時の鉛直変形が大きくなる等の知見を得た。これよりせん断破壊型柱であっても構造性能に期待し得る可能性を示した。

キーワード：鉄筋コンクリート柱、せん断破壊、限界変形、主筋比、軸力比、主筋軸力比

1. 研究目的

せん断破壊型の鉄筋コンクリート（RC）柱は脆性破壊する恐れから構造設計において敬遠される。しかし、せん断破壊型 RC 柱の破壊性状は主筋量によって大きく異なり、主筋量が多いほど剛性、耐力、靱性が高くなり¹⁾、設計で許容しやすくなる可能性が考えられる。ここで、曲げ破壊型 RC 部材では終局的な靱性能を限界変形（水平力が最大耐力の 80%まで低下したときの水平変形）で評価することが多い²⁾など。一方、せん断破壊型 RC 柱は設計で用いられることが非常に少なく、用いられたとしても最大耐力以降の大変形領域には期待しないため、限界変形を調べることは過去にほとんど行われていない。しかし、主筋量が多く比較的粘りのある柱では、せん断破壊型 RC 柱でも終局的な変形を考慮した設計に使用できる可能性があり、

限界変形の把握には意味があると考えられる。

そこで本論では、せん断破壊型 RC 柱を対象に、荷重低下後の大変形領域における限界変形等の実験結果と主筋比や軸力比等の実験変数との関係を調べる。その際、主筋量と軸力の影響を加味した主筋軸力比³⁾を定義して検討する。また、主筋量を増やす手段のひとつとして芯鉄筋を用いる方法を考え、芯鉄筋を用いた RC 柱についても実験を行い、芯鉄筋の有無によりどのような影響があるのかを調べる。

2. RC 柱の実験

2.1 対象試験体

主筋比の大きいせん断破壊型 RC 柱の静的加力実験の

表-1 試験体諸元一覧

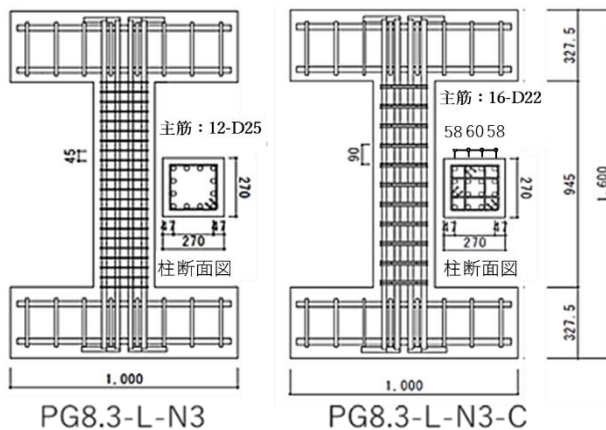
シリーズ名	試験体名	柱内法高さ h_0	断面 $b \times D$	せん断補強筋比 P_w (%)	軸力比 η	主筋比 P_g (%)	せん断耐力 (荒川最小式) V_{su} (kN) ⁶⁾	曲げ耐力 V_f (kN) ⁶⁾	せん断余裕度 V_{su}/V_f	付着割裂耐力 (靱性指針式) V_b (kN) ⁷⁾
シリーズ1	PG1. 7	900mm	450mm $\times$ 450mm	0. 53 (2-D10@60)	0. 18	1. 7 (12-D19)	514	750	0. 69	259
	PG3. 0					3. 0 (12-D25)	549	1038	0. 53	260
シリーズ2	PG4. 7	540mm	270mm $\times$ 270mm	0. 53 (2-D6@45)	0. 19	4. 7 (12-D19)	221	536	0. 41	284
	PG6. 4					6. 4 (12-D22)	228	653	0. 35	284
	PG8. 3					8. 3 (12-D25)	238	806	0. 30	284
シリーズ3	PG4. 7-N3	540mm	270mm $\times$ 270mm	0. 53 (2-D6@45)	0. 3	4. 7 (12-D19)	216	564	0. 38	236
	PG6. 4-N3					6. 4 (12-D22)	222	673	0. 33	236
	PG8. 3-N3					8. 3 (12-D25)	231	859	0. 27	236
シリーズ4	PG3. 2-L	945mm	270mm $\times$ 270mm	0. 53 (2-D6@45)	0. 2	3. 2 (12-D16)	138	213	0. 65	182
	PG6. 4-L					6. 4 (12-D22)	148	355	0. 42	183
	PG8. 3-L					8. 3 (12-D25)	153	415	0. 37	183
シリーズ5	PG6. 4-L-N3	945mm	270mm $\times$ 270mm	0. 53 (4-D6@90)	0. 3	6. 4 (12-D22)	164	389	0. 42	254
	PG8. 3-L-N3					8. 3 (12-D25)	169	473	0. 36	255
	PG8. 3-L-N3-C					8. 3 (16-D22)	170	476	0. 36	299

^{*1} 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻（学生会員）

^{*2} 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻

^{*3} 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻教授 博士（工学）

結果について比較・検討する。試験体諸元を表－1に示す。試験体は主筋比 (P_g) および軸力比 (η) を変数とした 14 体を対象とする。試験体名の PG の後の数字は主筋比(%), -L は比較的大きいクリアスパン比 (柱内法高さ h_o / 柱せい D), N の後の数字は軸力比, -C は芯鉄筋を含むことを意味する。シリーズ 1 から 4 は既往の文献で報告した試験体である (シリーズ 1, 2, 3, 4 がそれぞれ文献 3), 1), 4), 5))。シリーズ 5 は次節から詳しく述べる実験の試験体であり, 例として PG8.3-L-N3 と PG8.3-L-N3-C の配筋を図－1に示す。PG8.3-L-N3-C の芯鉄筋は外周の主筋と同様に上下のスタブ内で折り曲げて定着し, 抜け出しを防止している (芯鉄筋は表－1 の各種耐力に算入している)。なお, PG6.4-L-N3 は PG8.3-L-N3 と主筋の径が異なるのみで主筋やせん断補強筋の配置は PG8.3-L-N3 と同様である。



図－1 試験体配筋図 (単位:mm)

各シリーズの主筋比 P_g (表－1) は 1.7% から 8.3% であり, 実際の設計で使用される値よりも大きいと考えられるが, 新規建物に用いる可能性を探るために設定した。軸力比はシリーズ 1, 2, 4 では約 0.2 と同程度で, シリーズ 3, 5 では 0.3 のやや高軸力とし, 一定軸力下での载荷を行った。また, クリアスパン比はシリーズ 1, 2, 3 で 2.0, シリーズ 4, 5 で 3.5 とした。せん断補強筋比 (P_w) は新規設計の建物を想定して大きめの値とし, すべて 0.53% とした。コンクリート強度はシリーズ 1, 2, 3, 4, 5 でそれぞれ 25.0 N/mm², 31.4 N/mm², 25.9 N/mm², 24.9 N/mm², 29.2 N/mm² である。鉄筋の規格は全て SD345 である。

加力は逆対称変形を保つ形式とし, 試験体に軸力を作用させた状態で水平 1 方向の正負交番载荷を行った。载荷履歴は, 水平変形 (部材角) $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ を各 1 サイクル加えた後, 加力装置の限界まで正方向に押し切る载荷とした。

実験の結果, シリーズ 4 の PG3.2-L のみ曲げ降伏後のせん断破壊が生じ, 他の試験体はすべて曲げ降伏に先行して

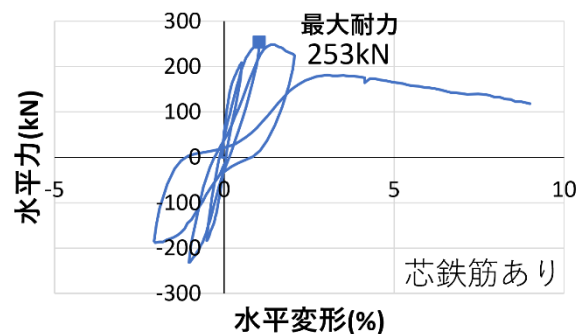
せん断破壊が生じた。全シリーズをまとめた実験結果の検討は 3.2 節で行う。

2.2 破壊性状

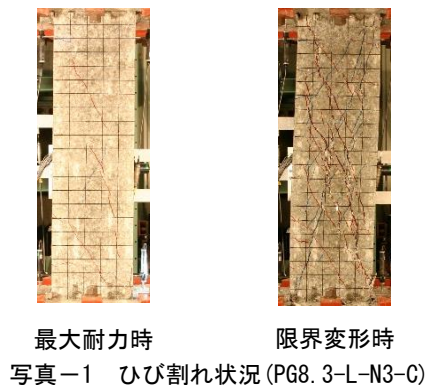
2.2 節から 2.5 節ではシリーズ 5 の実験結果について述べる。シリーズ 5 に用いた材料強度を以下に記す。コンクリート強度は前述の通り 29.2 N/mm² である。鉄筋の降伏強度はせん断補強筋に用いた D6 が 430 N/mm², 主筋に用いた D22 が 378 N/mm², D25 が 382 N/mm² である。

シリーズ 5 では芯鉄筋を有する試験体を用いたが, 芯鉄筋を用いることで, 主筋比をより大きくできる, あるいは外側だけに配筋する場合と同じ主筋比でも主筋径を小さくでき, 柱梁接合部などで配筋しやすくなる, といった効果が見込めるためである。実験結果より, 芯鉄筋の有無によりどのような影響があるのかを調べた。芯鉄筋は通常は靱性的な柱に対して用いられるため, せん断破壊型柱に芯鉄筋を用いた実験結果は少なく^{8)~12)}, 知見を増やすために本論で実験を行った。

実験の結果, いずれの試験体も曲げ降伏に先行してせん断破壊が生じた。芯鉄筋ありの PG8.3-L-N3-C を例として以下に破壊経過を示す。図－2 に PG8.3-L-N3-C の水平力-水平変形関係を示す。水平変形は柱内法高さ (=945 mm) で除し, 百分率で表す。実験の結果, せん断破壊が生じたものの, P_g と P_w が大きいことにより, 最大耐力後に耐力が急激に低下することはなかった。最大耐力は 253kN で

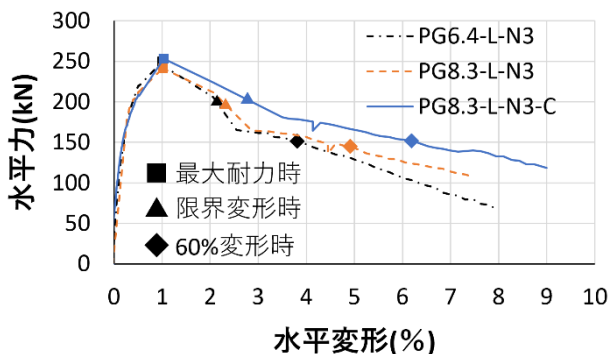


図－2 水平力-水平変形関係 (PG8.3-L-N3-C)

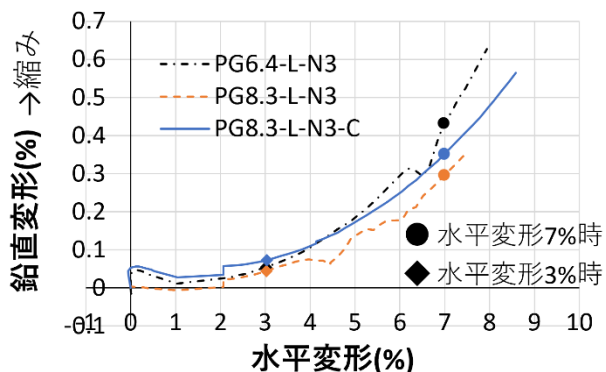


あった。写真－1にはPG8.3-L-N3-Cの最大耐力時と限界変形時のひび割れ状況を示すが、せん断ひび割れが卓越していた。

PG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3, PG8.3-L-N3-Cの3体の試験体について、水平力-水平変形関係について押切载荷を行った方向のみ包絡線にしてまとめたものを図－3に、水平変形-鉛直変形関係について押切载荷を行った方向のみ包絡線にしてまとめたものを図－4に示す。ここで、鉛直変形は柱内法高さで除し、百分率で表す。なお、PG8.3-L-N3については、鉛直変形を計測する変位計の不具合によって、図－4における水平変形3.4%以降の数値は推定値としている(変位計を不必要に動かしてしまい、鉛直変形の値が小さくなってしまったので、ずれた分の値を加えた推定値とした)。大変形領域における変形能を検討するため、図－3に示すように水平力が最大耐力の80%および60%まで低下した時点の水平変形を取り上げる(これらは押切側で考えることとする)。なお、耐力80%時の水平変形が限界変形に該当するが、それよりも破壊が進行した耐力60%時についても併せて検討する。耐力低下時の水平変形はPG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3, PG8.3-L-N3-Cでそれぞれ80%時(限界変形)が2.2%, 2.3%, 2.8%, 60%時が3.8%, 4.9%, 6.2%であった。また、大変形領域における鉛直変形を検討するため、水平変形3%時および7%時の鉛直変形を取り上げる。図－4に示すように、これらは鉛直変形(縮み)



図－3 水平力-水平変形関係の包絡線



図－4 水平変形-鉛直変形関係の包絡線

が急増する領域にある。鉛直変形はPG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3, PG8.3-L-N3-Cでそれぞれ水平変形3%時では0.054%, 0.044%, 0.072%, 7%時では0.43%, 0.29%, 0.35%であった。これらの値については3.2節で検討する。

ひび割れ状況を比較するため、PG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3, PG8.3-L-N3-Cの3体の限界変形時と水平変形6.0%時の破壊状況を写真－2に示す。写真から、限界変形時の破壊状況には顕著な差は見られなかった。一方、限界変形時よりも大変形領域である水平変形6.0%時では、同じ水平変形であってもPG8.3-L-N3-Cのひび割れ幅が最も小さく、PG6.4-L-N3の破壊の程度が最も大きいことが分かる。よって、大変形領域において、主筋比が大きいほど破壊しづらく、主筋比が同じ場合(PG8.3-L-N3とPG8.3-L-N3-C)は芯鉄筋ありの方が破壊しづらくするといえる。

また、PG6.4-L-N3とPG8.3-L-N3は主筋に沿ってコンクリートがひび割れている部分が見られ、せん断破壊とともに付着割裂破壊が生じたと考えられる。これらは主筋径が大きいことに起因して生じた。同じように主筋径の大きい芯鉄筋ありのPG8.3-L-N3-Cで付着割裂破壊が生じなかった理由は不明であるが、付着割裂耐力(表－1)はPG8.3-L-N3-Cが大きいことが影響していると考えられる。



写真－2 破壊状況(上:限界変形時, 下:水平変形6%時)

2.3 主筋歪の比較

本節では図－5に示す位置で計測した主筋歪について述べる。これは主要なせん断ひび割れに近い位置で計測した主筋ひずみである(写真－2参照)。図－6にPG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3, PG8.3-L-N3-Cの水平変形-主筋歪関係を示す。図－6より、限界変形時の主筋歪(圧縮)を比較すると、PG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3, PG8.3-L-N3-Cでそれぞれ0.70%, 0.34%, 0.08%であり、主筋比が大きいほど主筋歪は小さくなり、主筋比が同じ場合には芯鉄筋ありの方が主

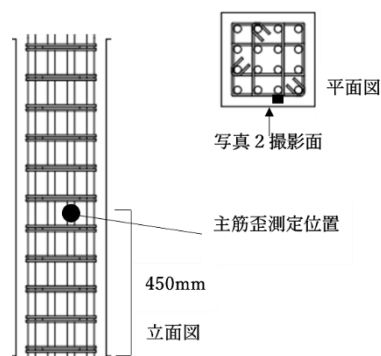


図-5 主筋歪計測位置
(PG8.3-L-N3 の例)

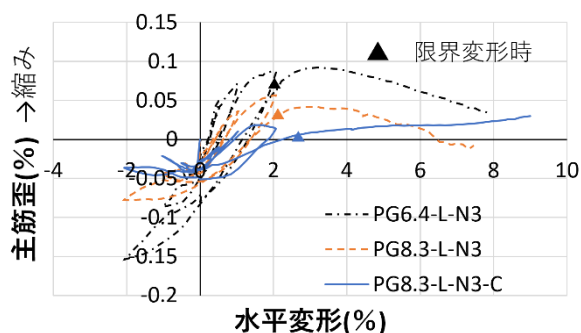


図-6 水平変形-主筋歪関係

筋歪は小さくなった。この理由は、せん断ひび割れ周辺ではコンクリートが破壊した後は主筋が大部分の軸力を負担していると考えられるが、主筋比が大きいほど軸力負担能力が向上するためであり、芯鉄筋ありの場合には同じ並びにある芯鉄筋も軸力を負担することで歪が分散するためであると考えられる。また、PG8.3-L-N3-C は大変形領域で水平変形の増大に伴って主筋の圧縮歪も増大したが、PG6.4-L-N3 と PG8.3-L-N3 は大変形領域で限界変形以降、圧縮歪は減少している。この理由は、前述のように PG6.4-L-N3、PG8.3-L-N3 は付着割裂破壊をしたため、せん断ひび割れをした箇所だけでなく、主筋が全体的にコンクリートと剥離したことでせん断ひび割れが起こった箇所集中していた主筋歪が付着割裂破壊の進展によって主筋全長にわたって分散され、計測を行った位置における主筋歪が小さくなったためと考えられる。

3. 考察

3.1 軸力比および芯鉄筋の有無による比較

本節では、シリーズ 4 とシリーズ 5 の 5 体の試験体について考察する。最大耐力と限界変形の実験結果を表-2 に示す。なお、最大耐力の括弧内の数値は表-1 のせん断耐力計算値（荒川最小式）に対する実験値の比を示す。最大耐力実験値は計算値の 1.43 倍から 1.52 倍となった。

図-7 に主筋比と最大耐力の関係を示す。まず、主筋比

表-2 実験結果(最大耐力と限界変形)

試験体名	主筋比(%)	軸力比 η	最大耐力(kN)	限界変形(%)
PG6.4-L	6.4	0.2	219(1.48)	2.73
PG8.3-L	8.3		219(1.43)	3.07
PG6.4-L-N3	6.4	0.3	250(1.52)	2.17
PG8.3-L-N3	8.3		241(1.43)	2.25
PG8.3-L-N3-C	8.3		253(1.49)	2.76

の大小により比較する。芯鉄筋を用いず、軸力が同じもの同士 (PG6.4-L と PG8.3-L, PG6.4-L-N3 と PG8.3-L-N3) を比較すると、軸力比 0.2 では同程度、軸力比 0.3 では主筋比が大きい方が最大耐力が小さくなり、一定の傾向がみられなかった。ただし、主筋比が 6.5%以上と大きい場合の実験データが少ないため、更なる知見の蓄積が望まれる。次に、軸力比により比較する。芯鉄筋を用いず、主筋比が同じもの同士 (PG6.4-L と PG6.4-L-N3, PG8.3-L と PG8.3-L-N3) を比較すると、いずれも軸力比の大きいもの (PG6.4-L-N3, PG8.3-L-N3) がわずかにではあるが大きくなった。このことから主筋比が同じ場合、軸力比が大きいほど当然ではあるが最大耐力は大きくなると言える。芯鉄筋の有無により比較する。主筋比と軸力比が同じ PG8.3-L-N3 と PG8.3-L-N3-C を比較すると、後者が大きくなったことから、主筋比と軸力比が同じ場合、芯鉄筋ありの方が最大耐力は大きくなると言える。

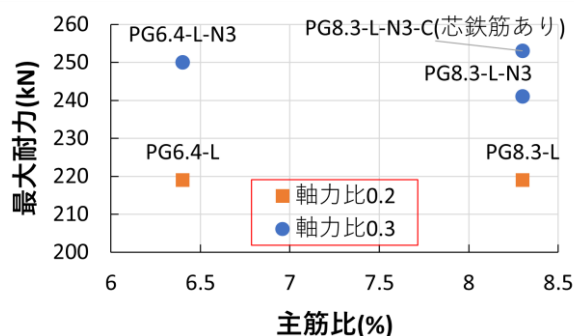
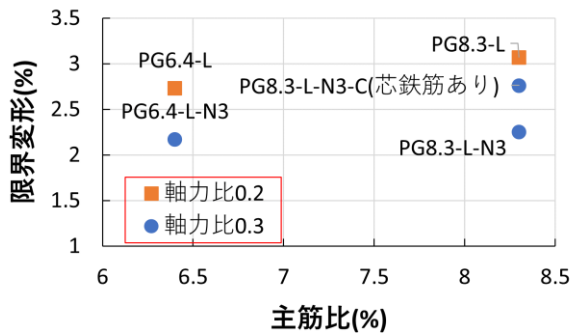


図-7 主筋比と最大耐力の関係

図-8 に主筋比と限界変形の関係を示す。まず、主筋比の大小により比較する。芯鉄筋を用いず、軸力比が同じもの同士 (PG6.4-L と PG8.3-L, PG6.4-L-N3 と PG8.3-L-N3) を比較すると、主筋比が大きいもの (PG8.3-L, PG8.3-L-N3) は限界変形が大きくなった。このことから軸力比が同じ場合、主筋比が大きいほど限界変形は大きくなると言える。次に、軸力比により比較する。芯鉄筋を用いず、主筋比が同じもの同士 (PG6.4-L と PG6.4-L-N3, PG8.3-L と PG8.3-L-N3) を比較すると、いずれも軸力比の小さいもの (PG6.4-L, PG8.3-L) が大きくなった。このことから主筋比が同じ場合、軸力比が小さいほど限界変形は大きくなると言える。芯鉄筋の有無により比較すると、限界変形は PG8.3-L-N3

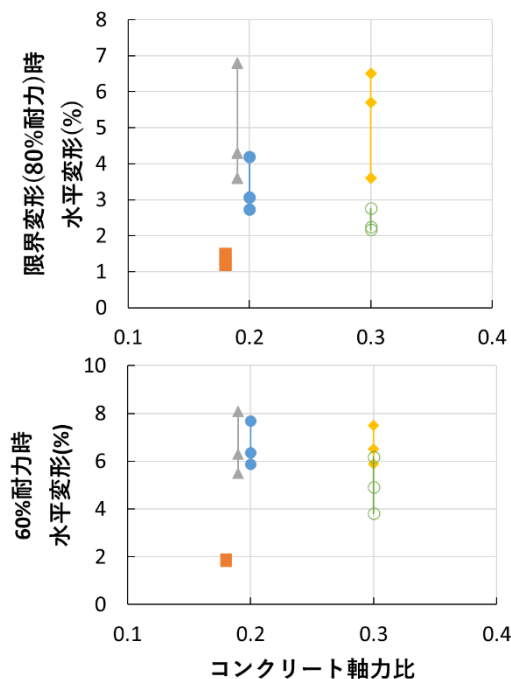
が 2.25%, PG8.3-L-N3-C が 2.76%で、後者が 2 割程度大きくなったことから、主筋比と軸力比が同じ場合、芯鉄筋ありの方が限界変形が大きくなると言える。



図－8 主筋比と限界変形の関係

3.2 主筋軸力比

本節ではシリーズ 1 から 5 の実験結果をまとめて検討する。シリーズの詳細は表－1 に記載している。ここで、通常の軸力比(表－1)はコンクリートのみによる軸圧縮耐力から求めているが(コンクリート軸力比と呼ぶ)、大変形領域では前述の通りせん断破壊面付近のコンクリートの破壊が激しくなりコンクリート軸力比では評価が難しい。一方、この場合にはせん断破壊面で伝達される軸力の大部分を主筋が負担していると考えられるため、主筋のみを考慮した軸圧縮耐力に基づく軸力比を主筋軸力比 $\eta_s = N / (A_g \cdot \sigma_y)$ で評価する³⁾。ここで、 N は軸力、 A_g は主筋総断面積、 σ_y は主筋降伏強度である。



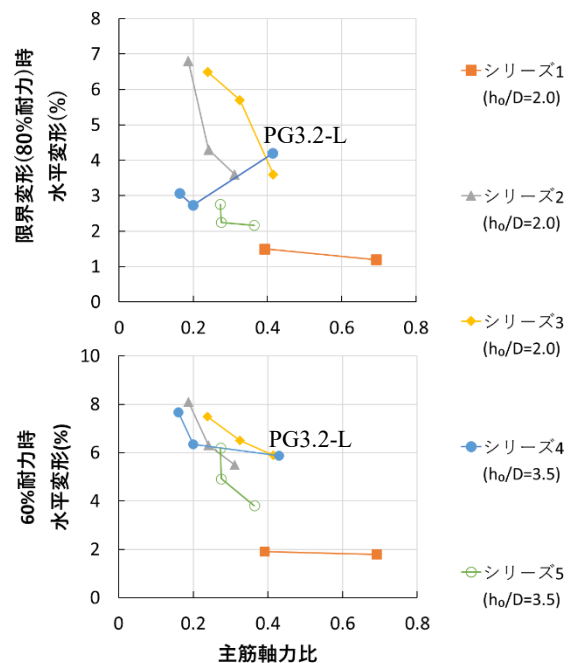
図－9 コンクリート軸力比と耐力 80%, 60%低下時水平変形の関係

図－9 にコンクリート軸力比と最大耐力 80%時および 60%時水平変形の関係を示し、図－10 に主筋軸力比と最大耐力 80%時および 60%時水平変形の関係を示す。図－11 にコンクリート軸力比と鉛直変形(鉛直変形 3%時と 7%時)について示し、図－12 に主筋軸力比と鉛直変形(鉛直変形 3%時と 7%時)について示す。なお、図－11、図－12 において鉛直変形の値が負となっているのは、縮み方向の変形を正としているため伸びた状態であったためである。図－9 から図－12 より、コンクリート軸力比では、同じ横軸の値に対して異なる水平変形または鉛直変形の値となり相関がみられない。一方、主筋軸力比では、図－10 より、それが大きくなるほど耐力低下時水平変形が小さくなり、かつ耐力が低下するほど相関が強まることわかる。また、図－12 より、主筋軸力比が大きくなるほど同じ水平変形時の鉛直変形が大きくなり、かつ水平変形が大きくなるほど相関が強まることわかる。ただし、曲げ降伏後せん断破壊した PG3.2-L はこの傾向から外れた。なお、図－9 から図－12 の凡例にクリアスパン比(h_0/D)の違いを示したが、クリアスパン比の影響は明確には見られなかった。

以上より、主筋比が特に大きいせん断破壊型の RC 柱において、大変形領域では主筋軸力比で検討することが有用と考えられる。

4. まとめ

主筋量が多いせん断破壊型 RC 柱の静的加力実験結果を用いて大変形領域における変形や芯鉄筋の影響等につ



図－10 主筋軸力比と耐力 80%, 60%低下時水平変形の関係

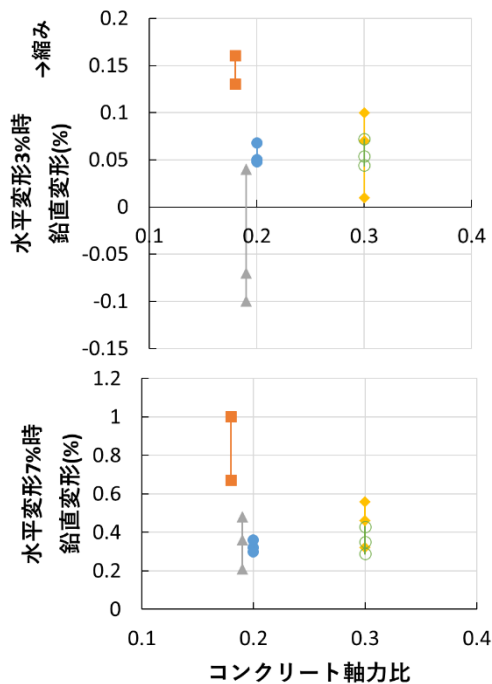


図-11 コンクリート軸力比と水平変形 3%時, 7%時の鉛直変形の関係

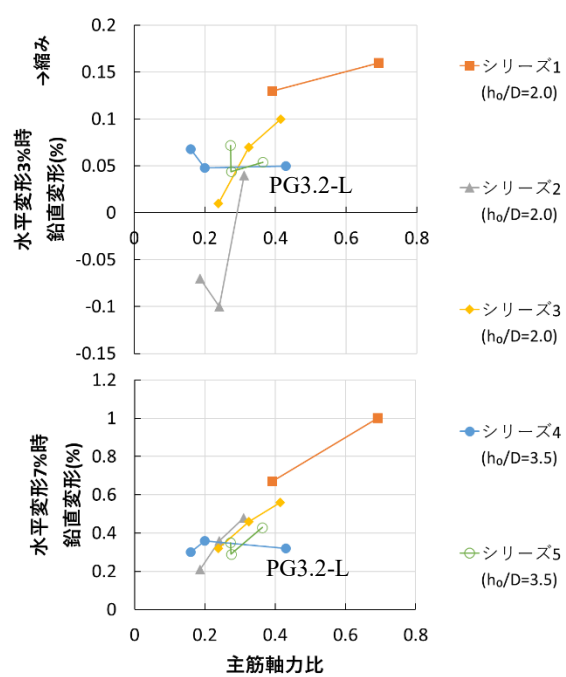


図-12 主筋軸力比と水平変形 3%時, 7%時の鉛直変形の関係

いて検討した。本論の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 軸力比（コンクリートのみによる軸圧縮耐力から求めた軸力比）が同じ場合、主筋比が大きいほど限界変形は大きい、最大耐力は主筋比によってあまり変わらない。
- (2) 主筋比が同じ場合、軸力比が大きいほど最大耐力は大きく、限界変形は小さい。
- (3) 主筋比と軸力比が同じ場合、芯鉄筋ありの方が最大耐力と限界変形が大きい。
- (4) 限界変形時の主筋歪は、主筋比が大きいほど小さく、主筋比が同じ場合には芯鉄筋ありの方が小さい。
- (5) 主筋軸力比（主筋のみを考慮した軸圧縮耐力から求めた軸力比）が大きいほど限界変形が小さい。更に損傷が進んだ耐力 60%時では主筋軸力比と耐力低下時水平変形の相関がより強まる。
- (6) 主筋軸力比が大きいほど同じ水平変形時の鉛直変形が大きく、かつ水平変形が大きいほど両者の相関が強まる。

参考文献

- 1) 山本郁, 中村孝也: 主筋量の多いせん断破壊型鉄筋コンクリート柱の破壊性状評価, コンクリート工学年次論文集, 第 42 巻, 第 2 号, pp.121-126, 2020.7
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021.2
- 3) 中村孝也, 芳村学, 大和征良: せん断破壊型鉄筋コンクリート短柱の軸力保持限界に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.193-199, 2002
- 4) 山本郁, 中村孝也: 主筋量が多いせん断破壊型 RC 柱の

崩壊実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.229-230, 2020.9

- 5) 中村孝也, 佐藤航: せん断破壊型 RC 柱の限界変形 その 1 静的加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.233-234, 2021.9
- 6) 国土交通省ほか: 2020 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2020.11
- 7) 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, 1999.1
- 8) 磯 健一, 柳沢延房: 高軸力下における鉄筋コンクリート短柱に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 11-2, pp.465-470, 1989
- 9) 阿満重幸, 白井伸明, 安達 洋, 小野 新: 高軸力および変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の変形形状, コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, pp.339-344, 1991
- 10) 藤原敏夫, 狩野芳一, 寺岡 勝, 佐々木聡: 高強度コンクリートを用いた RC 短柱の力学性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 13-2, pp.433-438, 1991
- 11) 板倉康久, 安居功二, 張 富明, 益尾 潔: 高強度コンクリートと高強度せん断補強筋を用いた RC 柱のせん断耐力と変形性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.291-296, 1992
- 12) 浅川敏雄, 石丸麟太郎, 吉田 宏, 末永保美: 高層壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造のピロティに用いる鋼管巻き RC 柱の力学的特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 460 号, pp.131-141, 1994