

論文 せん断破壊型 RC 柱の 3 方向加力実験

津村浩三*1・芳村 学*2

要旨：軸力と 2 方向水平力を RC 柱に加え、せん断破壊（曲げ降伏後のせん断破壊を含む）を生じさせる実験を行った。実験結果から、水平 2 方向にわたる力の相関と変形の相関、さらに軸変形と水平変形の相関などについて調べた。これらの結果は、破壊曲面の縮小と塑性流れの考え方をを用いておおむね説明できた。

キーワード：柱、2 方向、軸変形、せん断破壊、破壊曲面、塑性流れ

1. はじめに

本実験は、軸力と 2 方向水平力を受ける RC 柱に関して著者らが行った一連の実験¹⁾の延長上にあるもので、せん断余裕度（既往の略算式によるせん断耐力/曲げ耐力）を一連の実験に比べて低く（7～9割）設定したものである。これまでの実験と同様、一般的でない加力パス（2章に後述）により行った実験から、破壊性状、水平 2 方向にわたる力の相関（破壊曲面）と変形の相関、さらに軸変形と水平変形の相関などについて検討する。なお、主題では一連の実験との関連から対象をせん断破壊型としているが、曲げ降伏後せん断破壊したものも含む。

2. 加力方法と試験体

加力方法を図-1に示す。加力は片持ち柱形式とした。加力順序は、まず一定軸力になるまで軸方向に加力した後、一定水平力になるまで Y 方向に加力し、その後、一定軸力と Y 方向一定水平力を保持したまま X 方向に変形させた。

試験体の配筋を図-2に、実験パラメータを表-1に示す。試験体は S シリーズ、D シリーズの 2 種類で 4 体ずつ、計 8 体である。両者の違いは X 方向せん断補強筋比のみで、D シリーズでは、X 方向のせん断補強筋比を大きくして、方向により性質が異なるようにしてある。もうひとつの実験パラメータは、Y 方向一定水平力（試験体名の数字に対応で、軸力一定下の破壊曲面をおおよそ捕らえられるような値とした。軸力は軸力比 0.4（結果的には 0.366）に相当する 150tf（1470kN）とした。また、試験体の材料は表-2に示すように一般的なものをを用いた。

表-1 試験体一覧

試験体名	Y 方向一定水平力 tf (kN)	X 方向せん断補強筋比 p_{vx} %
S00	0	0.2
S15	15 (147)	
S25	25 (245)	
S35	35 (343)	
D00	0	
D15	15 (147)	1.0
D25	25 (245)	
D35	35 (343)	

共通事項
 Y 方向せん断補強筋比 p_{vy} = 0.2%
 せん断スパン比 M/QD = 2.25

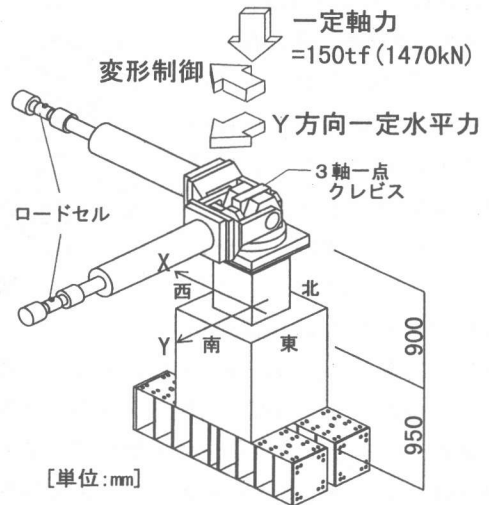


図-1 加力方法

*1 弘前大学助教授 理工学部地球環境学科 博士 (工学) (正会員)

*2 東京都立大学教授 大学院工学研究科建築学専攻 工博(正会員)

表-2 使用材料の性質

鉄筋	降伏応力度 MPa	最大応力度 MPa	降伏時歪 %	ヤング係数 MPa
D10	365	526	0.205	1.78×10^5
D22	392	581	0.202	1.94×10^5

コンクリー	最大応力度 MPa	最大時歪 %	ヤング係数(1/3割線) MPa
	25.1	0.269	2.07×10^4

3. 実験結果

3.1 破壊状況・破壊経過

すべての試験体においてせん断補強筋の降伏、圧縮側(南西側)主筋の圧縮降伏が見られ、S35とDシリーズでは引張側(北東側)主筋の引張降伏が観察された。D00~D25は大変形において、その他の試験体は最大耐力後間もなく、せん断ひび割れ(図-3参照)が大きく開くことで急激な荷重低下を生じた。SシリーズとD35は最大耐力直後から急激にせん断変形成分が増加した(紙面の都合で説明省略)ことから、せん断破壊したと考える。これに対し、D00~D25はせん断変形成分の急増と急激な荷重低下が最大耐力後の大変形で生じたことから、部材として曲げ降伏した後のせん断破壊と考える。

ところで、Sシリーズの北・東面には図-3中に小矢印で示したように、顕著なせん断ひび割れが現れ、これが大きく開いて破壊に至ったのであるが、これらのひび割れを含む平面を破壊面(図中の小矢印の向きから決まる)と考え、その向き(破壊面の法線ベクトルの水平投影として定義)を表す矢印を破線で、最大耐力時の水平力ベクトルを表す矢印を太実線で同図に示した。両者の向きは大局的には一致している。Dシリーズは、Sシリーズに比

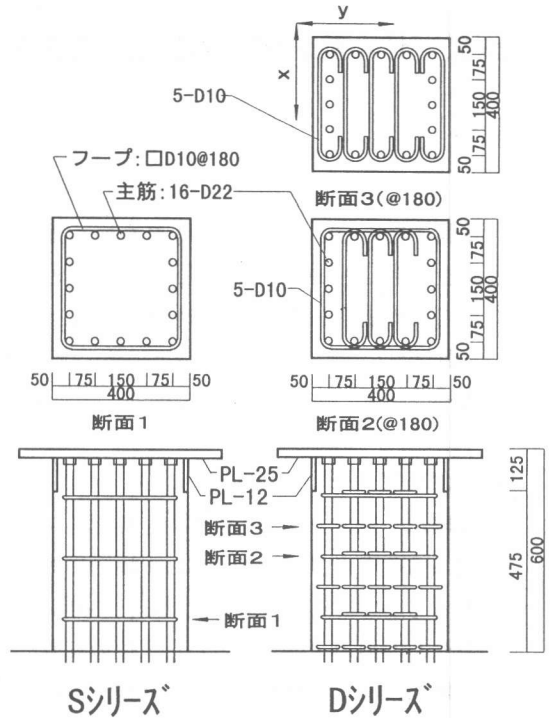


図-2 試験体配筋

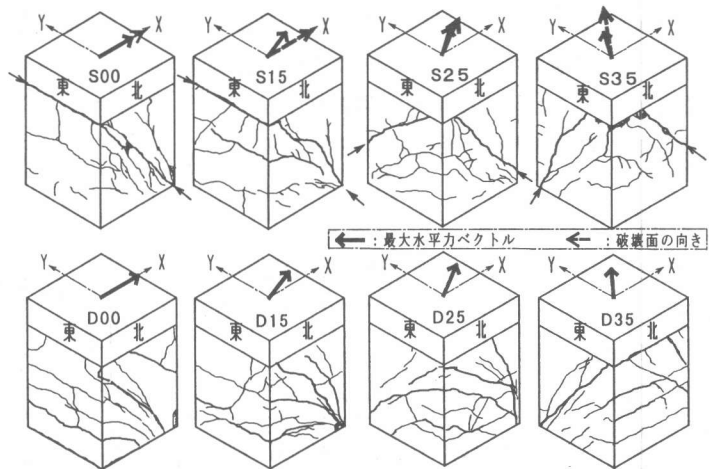


図-3 最終ひび割れ状況(北・東側)

べるとひび割れの形状等やや複雑であり、破壊面を特定するのが難しいので図中には表示していない。なお、文献²⁾のモデルによるとX、Y両方向の性質(基準化せん断補強筋量²⁾)が同じ場合に両者の向きは一致し、性質が異なる場合に破壊面の向きはせん断補強筋

量が少ない方向に偏る。Sシリーズの結果はこのモデルの示す傾向と大局的には一致している。

3.2 水平2方向力の相関 (破壊曲面の形状)

Sシリーズ及びDシリーズのX方向水平力とY方向水平力の関係を、最大耐力時までについて図-4に示す。水平力は、軸力及び他方向水平力の影響(P- Δ 効果)を考慮して補正した値である(以後同様)。図-4 a)にはS00の最大耐力を半径とする円(Sシリーズ用), 図-4 b)にはD00の最大耐力を長径としS00の最大耐力を短径とする楕円(Dシリーズ用)を描いてある。各シリーズの最大耐力は、ほぼこれらの円(Sシリーズ)又は楕円(Dシリーズ)上に乗っている。

3.3 水平2方向・主に変形に関する相関

Sシリーズ及びDシリーズのX方向水平力とX方向変形の関係を図-5に示す。なお、X、Y方向変形は、柱脚から1.125D(D:柱せい)上部で計測したものである。図中の●印はY方向一定水平力または一定軸力が維持不可能になった点(加力限界点)で、図中には加力装置の制限からX方向の除荷を開始した点までのデータを示した(加力限界点以降のデータは参考用である)。両シリーズともY方向水平力が大きいほどX方向最大耐力は小さくなり、2方向水平力の相関を示している。また、Y方向一定水平力が大きいほどX方向変形の小さい所で加力限界点に至っている。

水平2方向の加力を行った試験体について、Y方向変形とX方向変形の関係を図-6に、Y方向水平力とX方向変形の関係を図-7に、各ステップでのX方向変形の増分に対するY方向変形の増分の比(以後、Y方向変形増分比と呼ぶ)とX方向変形の関係を図-8に示

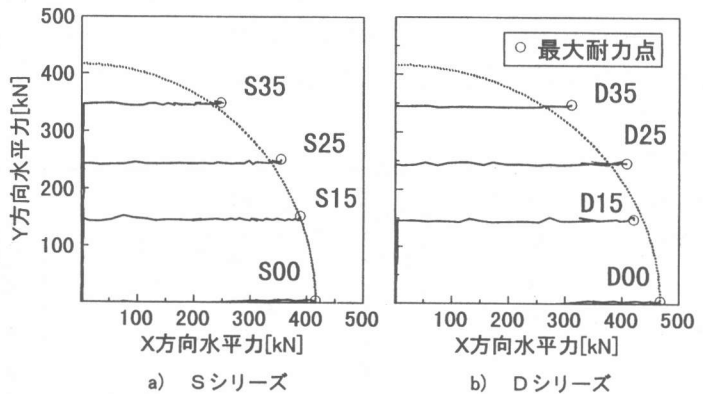


図-4 X方向水平力～Y方向水平力関係

す。ここで、変形増分比はY方向変形-X方向変形関係の傾きに相当する値である。図-7よりS15以外では加力限界点が存在(①)していることがわかる。両シリーズとも、X方向加力にともないY方向変形が増加し、Y方向変形増分比はY方向一定水平力が大きい程大きくなっている(②)。また、同一試験体におけるY方向変形増分比は、最後までY方向一定水平力を維持したS15を除いてX方向加力に伴い増加し(③), S35, D35では最大耐力点から急増している。

3.4 軸方向と水平方向の相関

軸変形(柱脚から1.125D間伸縮を4カ所で測定した平均値)とX方向変形の関係を図-9に、軸力とX方向変形の関係を図-10に、各ステップでのX方向変形の増分に対する軸変形の増分比(以後、軸変形増分比と呼ぶ)とX方向変形の関係を図-11に示す。いずれの試験体も、最初は軸力により縮むが水平方向の加力が始まると軸変形の向きは伸びとなる。最大耐力に達した後の挙動は、破壊モードにより多少異なり、曲げ降伏せずにせん断破壊したSシリーズとD35は最大耐力後伸び縮みがあまりない状態を経て縮みに転じた(④)。ただし、S25, S35の加力限界点以降は不明。曲げ降伏後のせん断破壊となったD00～D25では軸方向への伸びが続いた後(⑤)に軸縮みに転じた。D15～D35では、

加力限界点後に軸力が下がっているにもかかわらず縮んでいるので、仮に一定軸力が保持されたとすれば、より激しく軸方向に縮んだと予想される。

また、DシリーズではY方向水平力が大きい試験体ほど、X方向変形の小さい所で軸変形増分比の向きが伸びから縮みに変化しており、軸方向変形に対する水平力による相関(⑥)が示されている。

4. 考察

ここでは、破壊曲面の縮小と塑性流れの考え方をを用いて、最大耐力以後の実験結果(①～⑥など)を説明してみる。具体的には、破壊曲面の形状と縮小則に文献²⁾のモデルを想定し、このモデルを用いて考察を進める。詳しくは文献²⁾によるが、破壊曲面はせん断破壊に関する極限解析解から、楕円面の赤道部分を縦に引延ばした(引延ばした部分は楕円柱面)形状とする。この破壊曲面が破

壊の進行に伴い、軸引張耐力を表す最下部の点(南極に当たる)は不動として、全体に縮小すると考える。

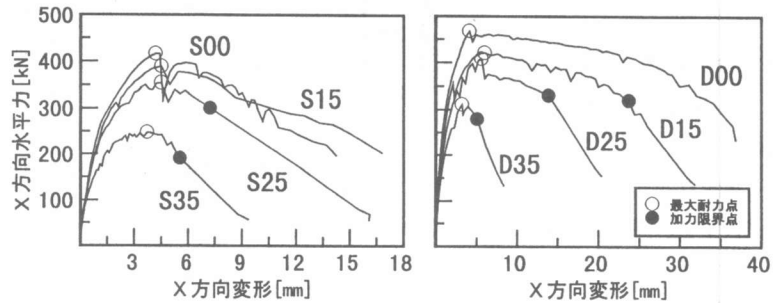


図-5 X方向水平力～X方向変形関係

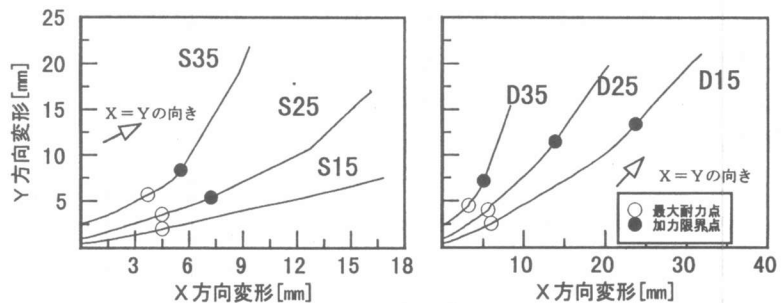


図-6 Y方向変形～X方向変形関係

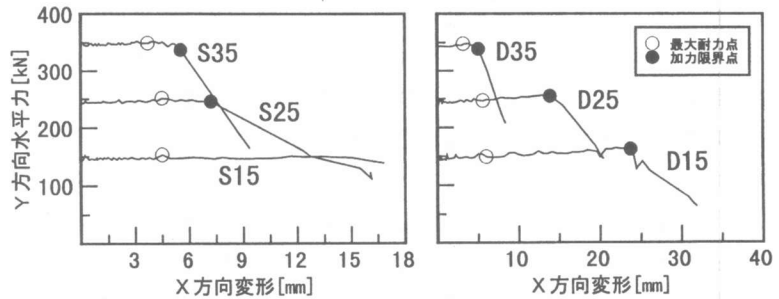


図-7 Y方向水平力～X方向変形関係

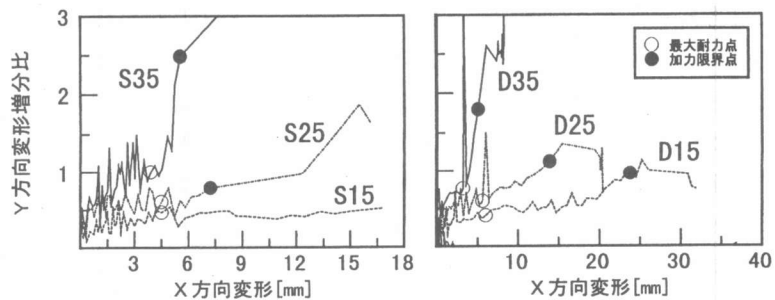


図-8 Y方向変形増分比～X方向変形関係

この破壊曲面の水平断面は楕円であり、3.2節の結果と一致している。

4.1 水平2方向変形相関

破壊曲面を水平に切った断面（図-12）を考える。破壊曲面はSシリーズの場合には円、Dシリーズの場合には楕円になる。Y方向一定水平力のもと、X方向水平力が破壊曲面に達すると（最大耐力点到達）、法線方向に変形（説明を簡単にするために塑性変形のみ考える）が進む。そのため、X方向変形に対するY方向変形の進み方であるY方向変形増分比は、Y方向一定水平力が大きいほど

大きい②。また、その後耐力が劣化し破壊曲面が縮小すると、法線方向がY方向に傾き、いっそうY方向変形増分比が増加する③。さらに、破壊曲面が縮んでY方向一定力に接するところまで行くと、これ以上X方向への加力を続けようとするればY方向の変形が止まらなくなる、つまり（Y方向に関する）加力限界点に達する①。なお、この段階からさらにY方向の加力を続けると、破壊曲面の水平断面は点にまで縮み、応力状態は図-12の（軸方向に関する）加力限界点に達して、軸崩壊を起こすことが予想される。

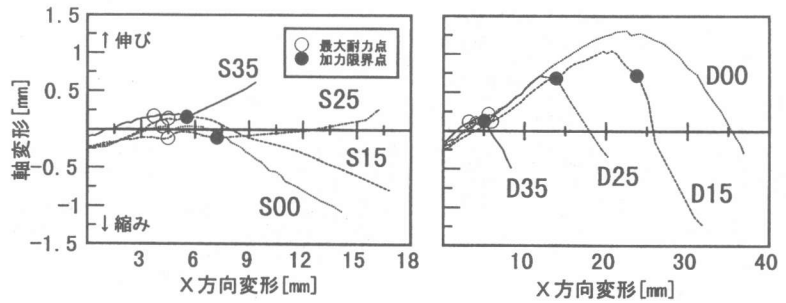


図-9 軸変形～X方向変形関係

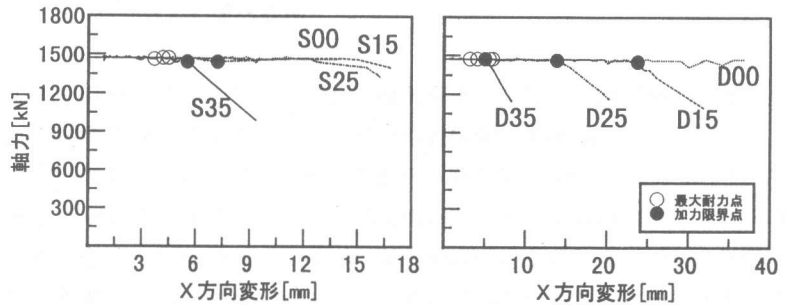


図-10 軸力～X方向変形関係

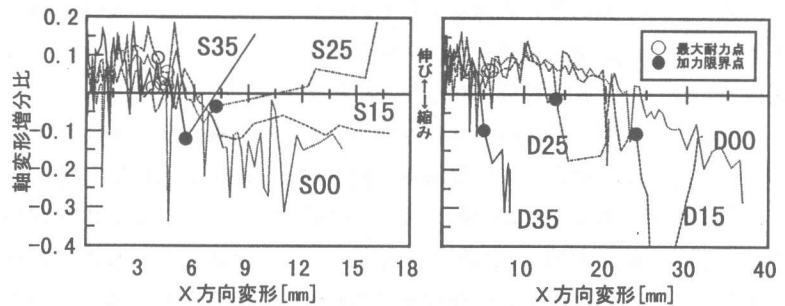


図-11 軸方向変形増分比～X方向変形関係

4.2 軸方向と水平方向の相関

図-13に示すように破壊曲面を縦に切った断面で考える。説明を簡単にするため水平力は1方向のみ考える（あるいは、変形増分ベクトルと軸力の軸を含む平面で切られた断面を見ていても良い）。この破壊曲面（曲線）は直線部分と楕円部分からなっている²⁾。軸力比が0.4程度であれば、一定軸力のもと水平力が増していくと、この直線部分に到達する。さらに水平変形を増すと軸変形を生じないまま破壊曲面が縮小し、楕円部分が一定軸力のところまで降りてくると今度は軸方向へも縮むように

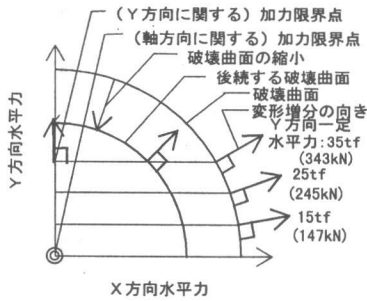


図-12 2方向水平力の破壊曲面

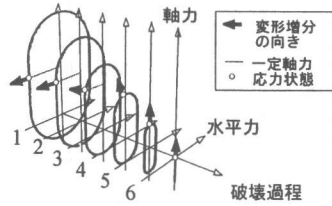


図-13 軸力と水平力の破壊曲面 (文献²⁾)

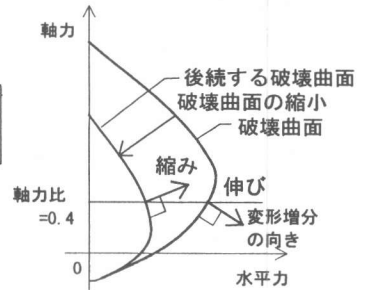


図-14 軸力と水平力の破壊曲面 (曲げ型)

なる(④)。曲げ降伏せずにせん断破壊したSシリーズ(S25とS35の加力限界点以降については不明)とD35についてはほぼこの説明が成り立つ。しかし、曲げ降伏後のせん断破壊となったD00~D25における最大耐力後軸縮みに転ずる前までの伸び(⑤)は説明できない。この現象は曲げ変形に伴って生じている可能性があり、文献²⁾のモデルの適用限界を示しているものと思われる。この現象を表すには、仮定した破壊曲面を修正して直線部分に膨らみを持たせる、あるいは曲げ型の破壊曲面と組み合わせる等の工夫を要する。例えば、破壊曲面が図-14のような曲げ型の形状で、最大耐力後、軸引張耐力は変わらず軸圧縮耐力のみ減少するように生じると考えられることから、曲げ型の場合も図のように最下部を不動として縮小するものとし、最も水平方向の膨らみが大きいところより下で破壊曲面に到達するとすれば、軸方向の伸びから縮みに転じる様子が説明できる。

さらに図-12と13を組み合わせた立体的な破壊曲面を考えると、楕円面に到達した後Y方向に関する加力限界点に達する場合と、楕円柱面上で加力限界点に達する場合のあることが分かる。S00は当然としてS15が前者、S25とS35は後者と考えればS25とS35において加力限界点前に軸の伸び縮みがあまりないことなどが説明できそうである。また、⑥の相関については、Y方向一定水平力が大きいものほど、同じX方向変形増分に対してY

方向変形の割合が大きいことから、結果として破壊曲面法線方向への変形増分が大きくなるため、これに連動して破壊曲面が小さくなり早期に軸縮みを生じる領域に達する、との解釈ができそうである。ただし、これらの事象については条件の設定次第で結果が変わる可能性があるため、解析的検討が必要であろう。今後の検討課題である。

5. まとめ

軸力と2方向水平力を受けるせん断破壊型のRC柱に関して、各軸相互間における力の相関及び変形の相関などについて調べた。曲げ降伏を生じた試験体の軸変形が関わる事象に関して文献²⁾のモデルをそのまま用いると説明できない点があるが、最大耐力以後の実験結果を立体的な破壊曲面の縮小と塑性流れの考えを用いておおむね説明することができた。

参考文献

- 1) 吉田元, 津村浩三, 芳村学: 曲げせん断型鉄筋コンクリート柱の水平2方向加力実験, 日本建築学会学術講演梗概集・構造IV, pp. 205-206, 1996.9 その他関連論文
- 2) 津村浩三, 芳村学: 軸力と任意方向水平力を受けるRC柱のせん断破壊曲面に関する極限解析(その4 実際問題への適用), 日本建築学会学術講演梗概集・構造IV, pp. 27-28, 1997.9 その他関連論文