

# 鉄筋コンクリート部材の荷重-変位関係におけるせん断型内部履歴曲線のモデル化

1190163 安居紗奈子\*1・指導教員:島 弘\*2

**要旨:** 鉄筋コンクリート柱の耐震性能を評価するためには、荷重-変位履歴特性が重要となる。内部履歴曲線はいくつかのモデルが提案されているが、せん断の影響の大きい部材のモデル化はなされていない。そこで本研究は、鉄筋コンクリート柱部材の荷重-変位関係におけるせん断型内部履歴曲線のモデルを過去に行われた実験結果を参照して構築することを目的とした。研究結果から、内部履歴曲線として6直線を用い、降伏荷重と折れ曲がり点の荷重の差（履歴曲線の痩せ）を表す  $\Delta P$  をせん断スパン比  $a/d$  および帯鉄筋比  $p_w$  を用いて定式化し、逆S字形の曲線を算出することが可能となった。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート柱, 耐震性能, 荷重-変位関係, 内部履歴曲線, せん断型, 逆S字形

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐震性能は、構造物を構成する部材が破壊するまでにどれだけの地震エネルギーを吸収できるかが決め手となる。したがって、鉄筋コンクリート部材の耐震性能を評価するためには、その内部履歴曲線を含めた荷重-変位関係が極めて重要である。内部履歴特性についてはいくつかのモデルが提案されている。しかし、曲げに対してせん断力の影響が大きい部材では、履歴曲線もせん断型となるにもかかわらず、モデル化はなされていない。そこで、本研究は、鉄筋コンクリート部材の荷重-変位関係におけるせん断型内部履歴曲線のモデルを過去に行われた実験結果を参照して構築することを目的とした。

## 2. 現状と問題点

曲げが卓越する条件では、荷重-変位関係の内部履歴曲線は紡錘形となるが、せん断力の影響を大きく受ける条件では、図-1 に例を示すように、逆S字形となる。

しかし、R-O モデルや Degrading Stiffness モデルなど

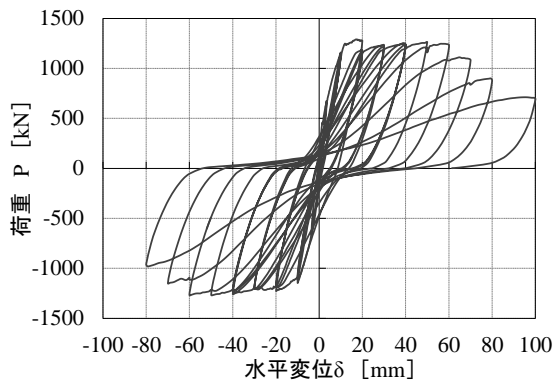


図-1 せん断型の荷重-変位履歴曲線の例<sup>2)</sup>

既存のモデル<sup>1)</sup>は逆S字形を表せるモデルではない。土木学会コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>では、図-2 に示すように、除荷剛性の式が示されており、再載荷時の曲線は図-3 に示すような最大点を直線的に指向するモデルが用いられると記されている。

このように、せん断力の影響を大きく受けた部材は、既存モデルの履歴曲線よりも痩せがあり、ループ面積は小さくなる。この場合、実際のエネルギー吸収量は現在提案されている履歴モデルより少なくなるため、せん断力の影響の大きい部材には既存のモデルを適用すると危険側となる。しかし、せん断型の逆S字形を表すモデルは無いのが現状で問題である。

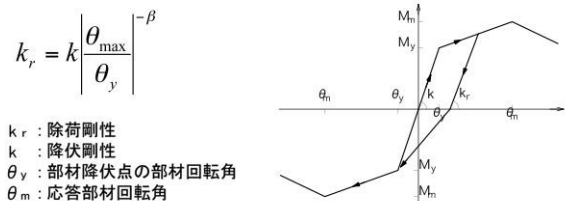


図-2 土木学会コンクリート標準示方書の履歴モデル

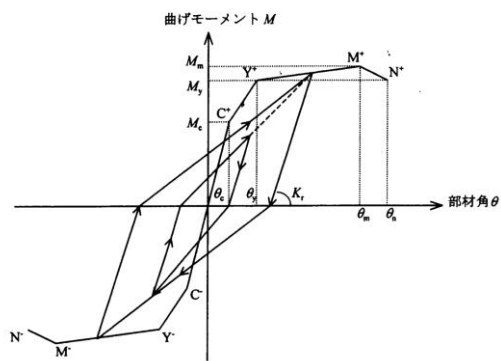


図-3 土木学会の履歴モデル（平行四辺形状）

\*1 高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻

\*2 高知工科大学 システム工学群 教授 工博

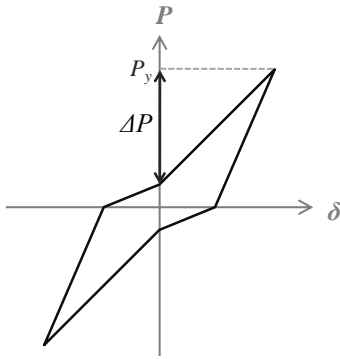


図-4 ΔPの定義

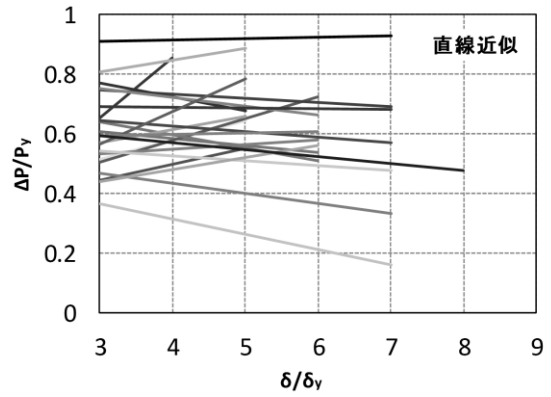


図-6 ΔP/P\_y - δ/δ\_y 関係の近似線

### 3. 研究方法

#### 3.1 対象および範囲

本研究は、柱部材ならびに面外方向壁部材の既存の実験データの中から、軸力を載荷せずに水平載荷試験を行った試験体の荷重-変位曲線の包絡線の耐力が低下するまでの範囲内を対象に行った。

#### 3.2 モデル化の方針

除荷時は既存モデルを踏襲して直線とする。再載荷時については、最初に折れ二直線で最大点を指向するもの考えた。そして、二直線の折れ曲がり点の座標を $(\delta_c, P_c)$ として、この座標を定式化することを検討した。その結果、折れ曲がり点は、変位が0の荷重軸上に近い位置となることが判明した。したがって、モデルを簡単にすることも考えて、図-4に示すように、折れ曲がり点を荷重軸上とすることとした。そして、降伏荷重を $P_y$ として、その荷重から折れ曲がり点までの荷重の差を $\Delta P$ と定義し、 $\Delta P/P_y$ の値を求め、試験体の諸元とどのような関係性があるかの分析を行った。 $\Delta P/P_y$ が大きいほどせん断の影響が著しいという事であり、 $\Delta P/P_y=0$ が曲げ卓越状態に相当し、 $\Delta P/P_y=1$ が完全せん断状態と考えるものである。

### 4. 結果および考察

#### 4.1 ΔP/P\_yとδ/δ\_yとの関係

せん断の影響の程度が同じであっても、 $\Delta P/P_y$ は変位の大きさによって変化し、変位が大きくなるほど $\Delta P$ は

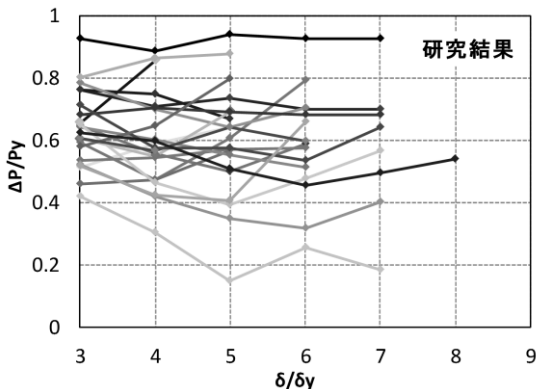


図-5 ΔP/P\_yとδ/δ\_yの関係

小となることも想定される。各試験体の $\delta/\delta_y$ と $\Delta P/P_y$ との関係とそれらを耐力が低下するまでの範囲で直線近似したものをそれぞれ図-5および図-6に示す。

図-6より、耐力が低下するまでの範囲内において、 $\Delta P/P_y$ は $\delta/\delta_y$ に関わらずほぼ一定値となることが分かる。このことから、本研究では、各試験体の $\Delta P/P_y$ の各変位サイクルにおける平均値を求め、これをその試験体の $\Delta P/P_y$ の値と定めた。

#### 4.2 ΔP/P\_yとせん断スパン比 a/dとの関係

せん断の影響の程度に最も影響する外力的な要因は試験体のせん断スパン比 $a/d$ であると思われる。分析から得られた $\Delta P/P_y$ と試験体の $a/d$ との関係を図-7に示す。図-7に示されるように、 $a/d$ の値が同じ程度の場合でも $\Delta P/P_y$ の値は大きな違いが見られ、 $a/d$ のみを用いて定式化するには無理があると考えた。

#### 4.3 ΔP/P\_yとせん断補強鉄筋比 p\_wとの関係

そこで、せん断変形に抵抗する要因としてせん断補強鉄筋比 $p_w$ を考慮することとした。なお、中間帯鉄筋を有する柱部材については、中間帯鉄筋を $p_w$ に含めて算出している。 $a/d$ が大きくなるとせん断の影響が小となるのと同様に、 $p_w$ が大きくなるとせん断変形は小となると考えて、両者を乗じた $a/d \cdot p_w$ を指標とした。 $\Delta P/P_y$ と $a/d \cdot p_w$ との関係を図-8に示す。 $a/d \cdot p_w$ が大きくなるほど $\Delta P/P_y$ は小さくなっていることが分かる。なお、図中の×印は

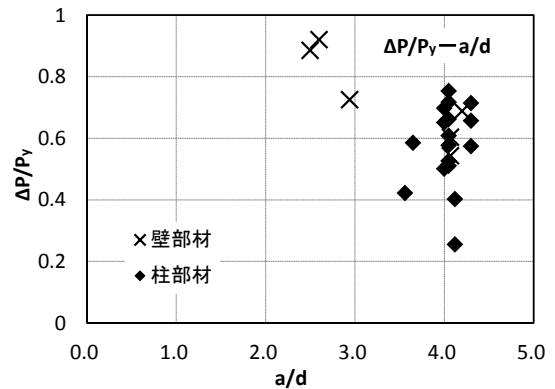


図-7 ΔP/P\_yとa/dの関係

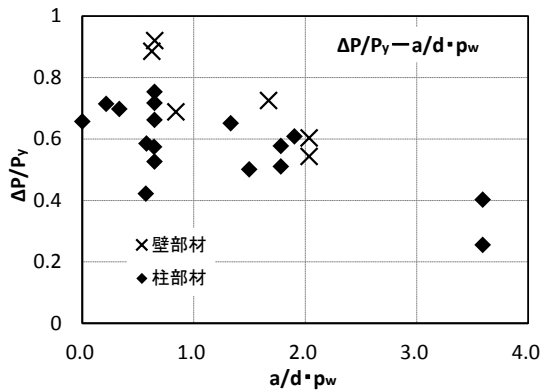


図-8  $\Delta P/P_y$ と  $a/d \cdot p_w$ の関係

壁部材、♦印は柱部材を示しており、柱部材は壁部材に比べて  $\Delta P/P_y$  の値が小さい傾向が見られる。これは側方鉄筋がせん断変形に抵抗している影響と思われる。

#### 4.4 $\Delta P/P_y$ に及ぼす引張強鉄筋比 $p_t$ の影響

一方で、部材のじん性率はせん断余裕度  $V_u a/M_u$  で表すことができるという考えもある。 $V_u a/M_u$  を分解すると、引張鉄筋強度とせん断補強鉄筋強度が同じ場合には、ほぼ式(1)となる。

$$\frac{V_u a}{M_u} = \frac{a}{d} \frac{p_w}{p_t} \quad (1)$$

ここで、 $p_t$ は引張鉄筋比であり、引張鉄筋比  $p_t$ の影響も考慮してみた。

$\Delta P/P_y$  と  $(a/d) \cdot (p_w/p_t)$  の関係を図-9 に示す。 $(a/d) \cdot (p_w/p_t)$  が大きくなるほど  $\Delta P/P_y$  は小さくなる傾向はあるが、図-8 の  $a/d \cdot p_w$  との関係に対して精度が上がっているとは思えない。

そこで、引張鉄筋はダウエル作用でせん断変形抵抗に寄与し、引張鉄筋量が大きくなると  $\Delta P/P_y$  が小となるとして、 $\Delta P/P_y$  と  $a/d \cdot p_w \cdot p_t$  の関係を見たものが図-10 である。図-9 に示される  $(a/d) \cdot (p_w/p_t)$  との関係と同様に  $a/d \cdot p_w \cdot p_t$  が大きくなると  $\Delta P/P_y$  が小さくなっている。すなわち、引張鉄筋比  $p_t$  は  $\Delta P/P_y$  に大きくは影響を及ぼさないということになる。

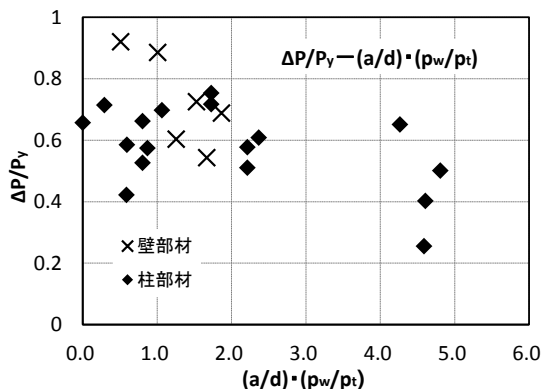


図-9  $\Delta P/P_y$ と  $(a/d) \cdot (p_w/p_t)$ の関係

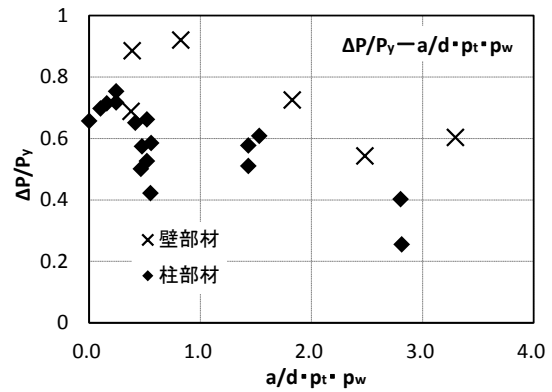


図-10  $\Delta P/P_y$ と  $a/d \cdot p_t \cdot p_w$ の関係

#### 4.5 分析結果を用いた式の考察

以上の分析結果より、本研究では、定式化においてより式を簡略化させるために、変位量に対して変化させず、 $p_t$ は用いずに  $a/d$  と  $p_w$  の値のみを用いることとした。また、壁部材は柱部材に比べて  $\Delta P/P_y$  の値が全体的に大きくなるため、壁部材と柱部材は分けて定式化する。このとき、試験体がせん断の影響のみを受ける時は  $\Delta P/P_y=1$ 、曲げの影響のみを受ける時は  $\Delta P/P_y=0$  となることから、 $\Delta P/P_y - a/d \cdot p_w$  関係は最大が 1 以下の値、0 に漸近する曲線となるように、図-11 に示すような式(2)を提案する。

$$\frac{\Delta P}{P_y} = \alpha e^{-0.30 \cdot \frac{a}{d} \cdot p_w} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta P$  : 降伏荷重と折れ曲がり点の荷重との差

$P_y$  : 降伏荷重

$\alpha$  : 壁部材は 1.0, 柱部材は 0.80

$a$  : せん断スパン

$d$  : 有効高さ

$p_w$  : 帯鉄筋比 (中間帯鉄筋を含める)

#### 4.5 式(2)を用いた履歴曲線モデルの精度検証

式(2)を用いて作成した内部履歴曲線のモデルと実験データとの比較の例を図-12 および図-13 に示す。なお、各ループの最大荷重は実験データと同じ値を用い、除荷剛性の値は土木学会コンクリート標準示方書の計算式 ( $\beta=0.5$ ) を用いて求めている。これらの図が示すように、

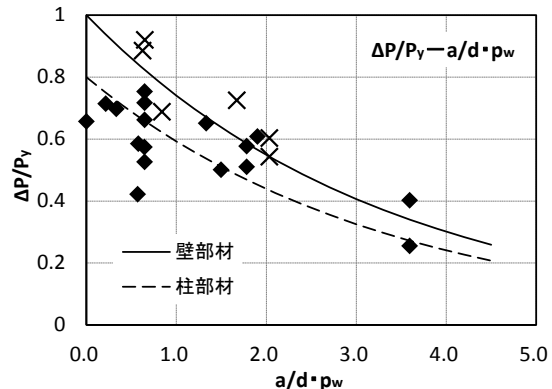


図-11  $\Delta P/P_y - a/d \cdot p_w$ の曲線式

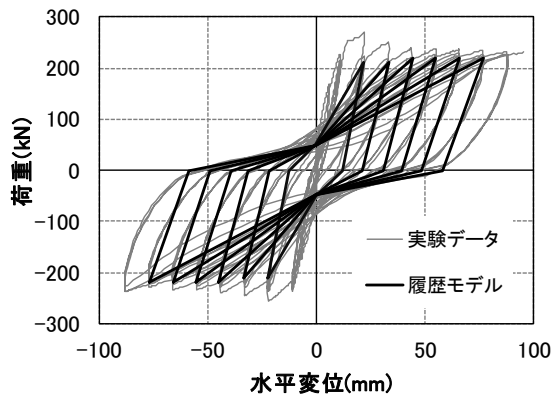


図-12 実験データと履歴モデルの比較①(壁部材)<sup>4)</sup>

式(2)を用いることによって、壁部材および柱部材ともに

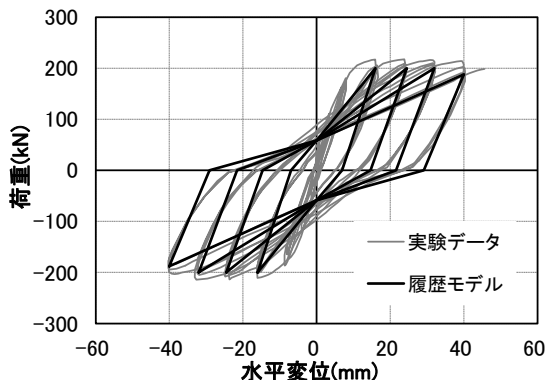


図-13 実験データと履歴モデルの比較②(柱部材)<sup>5)</sup>

荷重-変位関係の内部履歴曲線のせん断の影響による逆S字形( $\Delta P$ )において、実験結果により近い曲線を求めることが可能となった。

## 5. まとめ

本研究で、軸力が作用しない柱部材および壁部材に対して以下の結果が得られた。

- (1) 耐力が低下するまでの範囲内において、折れ曲がり点は荷重軸上を通り、荷重-変位関係の内部履歴曲線の逆S字形を表す $\Delta P$ を降伏荷重で割った値( $\Delta P/P_y$ )は $\delta/\delta_y$ に関わらずほぼ一定値となる。
- (2)  $\Delta P/P_y$ の値は、壁部材は柱部材よりも大きくなり、引張鉄筋比 $p_t$ は大きく影響せず、せん断スパン比 $a/d$ とせん断補強鉄筋比 $p_w$ の影響を受ける。
- (3) 内部履歴曲線モデルについて、逆S字型を表す $\Delta P$ の定式化を行った。この式を用いることによって、実験結果により近い曲線を求めることが可能である。

## 参考文献

- 1) 土木学会 原子力土木委員会：2005年制定原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2005.6
- 2) 後藤 隆臣，小倉 貴裕，島 弘，平野 勝識，笹谷 輝勝，伊藤 勝通：機械式継手を用いた鉄筋の座屈抵抗性と実大壁部材の変形性能との関連性，土木学会論文集 E2，Vol.73，No.2，pp.150-164，2017.

- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]標準5編，2018.3
- 4) 後藤 隆臣，栗原 光司，島 弘，平野 勝識，笹谷 輝勝，小倉 貴裕：機械式継手単体の特性と実大 RC 壁部材の部材性能との関係，土木学会論文集 E2，2019 (投稿中)
- 5) 島中 和樹，島 弘：鉄筋コンクリート柱における荷重変位曲線の軟化勾配に及ぼす荷重履歴の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，2008.
- 6) 佃 有射，横田 弘，二羽 淳一郎，長瀧 重義：水平載荷を受けるステンレス鉄筋を用いた RC 柱部材に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007.
- 7) 松澤 敦行，伊吉 允，梅村 恒，市之瀬 敏勝：載荷履歴と軸力が RC 部材の耐力低下に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.3，2002.
- 8) 星隈 順一，運上 茂樹，長屋 和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究：土木学会論文集 No. 669/V-50，pp.215-232，2001.2
- 9) 岡本 大，佐藤 勉，宮城 敏明，富川 哲：高強度鉄筋を用いた RC 部材の変形性能について，土木学会第 55 回年次学術講演会，2000.9
- 10) 渡辺 耕平，吉川 弘道：曲げ破壊型 RC 柱部材の塑性変形評価と座屈挙動に関する研究，武蔵工業大学工学研究科，修士論文，2002.3.
- 11) 田中 寿志，岡本 大，瀧口 将志，佐藤 勉：RC 柱の変形性能と損傷レベルに関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，1998
- 12) 横川 智裕，濱田 聡，竹中 啓之，和泉 信之：多数回繰返し載荷を受ける高強度鉄筋コンクリート梁の履歴特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，2015
- 13) 瀧口 将志，大塚 久哲，池永 貴史：鉄筋とコンクリートの荷重分担を考慮した RC 部材の履歴モデルの提案，構造工学論文集，Vol.55A，2009.3
- 14) 吉田 幸司，岡本 大，黒岩 俊之，佐藤 勉：高強度材料を用いた RC 部材の変形性能について，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，2001.
- 15) 島 弘，上田 多門：RC 橋脚の躯体変形における曲げ変形とせん断変形との分離，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集，1986.
- 16) 工藤 謙信：鉄筋コンクリート柱の高軸力と曲げによる軸圧縮挙動，高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻，修士論文，2010.3