

せん断破壊型鉄筋コンクリート柱における主筋の残存軸耐力の評価

正会員 ○楊 勇\*<sup>1</sup> 同 松川 和人\*<sup>2</sup>  
同 崔 琥\*<sup>2</sup> 同 中埜 良昭\*<sup>3</sup>

鉄筋コンクリート柱 主筋 せん断破壊型  
残存軸耐力

1. はじめに

新耐震基準が適用される以前に建設された鉄筋コンクリート造建物は、柱にせん断補強筋が十分に配されていない、腰壁や垂れ壁が取り付くことで短柱化した等の理由により、柱にせん断破壊が生じた例が多数報告されてきた。せん断破壊後の柱は、その水平変形が増加すると軸崩壊に至る恐れがあり、せん断破壊後の残存軸耐力を正しく評価することは極めて重要であると考えられる。芳村<sup>[1]</sup>らは、柱の実験結果の回帰分析及び破壊曲面縮小の概念に基づいて、残存軸耐力の評価モデルを提案した。

本研究では、せん断破壊後の柱の残存軸耐力評価法として、力学理論に基づいた理論式を提案することを目的とする。残存軸耐力評価式の構成としては、柱の軸圧縮耐力の構成と同様に、主筋の残存軸耐力とコンクリートの残存軸耐力に分けてそれぞれ求める。

本報では、まず、柱の軸崩壊点における主筋断面の内力と水平変形との関係を導き、次に、柱が軸崩壊点に至る時に、主筋断面が全塑性になると仮定し、全塑性になる主筋断面の  $N$ - $M$  全塑性相関関係を導き、最後に、柱の軸崩壊点における主筋のみの残存軸耐力の評価式を求める。

2. 軸崩壊点における主筋の残存軸耐力の評価式

柱の軸崩壊点については、柱の主筋断面に働く内力と外力の釣り合いを失う直前の状態と定義する。また、軸崩壊点に至るまでに補強筋による補剛やコンクリートによる軸力負担が存在するために柱の主筋の座屈が発生しないと仮定する。

2.1 主筋断面の内力と水平変形との関係

軸崩壊点において、主筋1本の端部の断面の内力を図1に示す。ここで、逆対称の応力状態を仮定し、軸崩壊点の主筋の内力と水平変形との関係を次のように求める。

柱が軸崩壊に至る時の主筋の断面におけるモーメントの釣り合いを式(1)に示す。式(1)を変形すると、主筋1本の断面に働くモーメント  $M_s''$  は、軸力  $N_s''$  によるモーメント  $0.5N_s'' \cdot \delta_{崩壊}$  とせん断力  $Q_s''$  によるモーメント  $0.5Q_s'' \cdot l$  が構成されることが分かる (式(2))。

柱が軸崩壊に至る時の主筋断面に働くモーメントは軸力と  $N$ - $M$  全塑性相関関係 (2.2 節) で決定される。また、柱が軸崩壊に至るまでは、主筋の断面に対してモーメントの釣り合いが常に成立する。

主筋断面に働くモーメントの変化を図2に示す。水平変形が 0 から  $\delta_{崩壊}$  においては、軸力によるモーメント  $0.5N_s'' \cdot \delta$  が水平変形  $\delta$  に対して線形的に増加する一方、

主筋の力の釣り合い状態を維持するためのせん断力によるモーメント  $0.5Q_s'' \cdot l$  がある程度の水平変形を経験した後に徐々に減少する。さらに変形が進んでせん断力  $Q_s''$  が 0 になる時に、力の釣り合いが崩れるため軸崩壊に至り、その時の水平変形は  $\delta_{崩壊}$  となる。つまり、柱の軸崩壊の直前においては、水平外力による水平せん断力  $Q_s''$  が 0 であり、内力と水平変形との関係は式(3)になる。

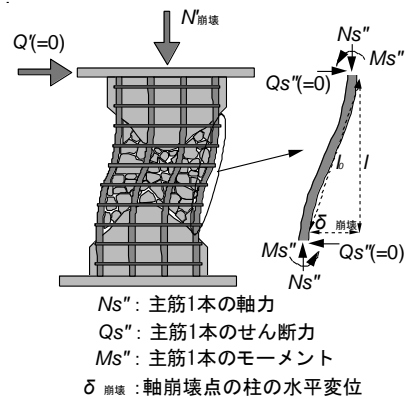


図1 せん断破壊後の柱の主筋1本に生じる内力

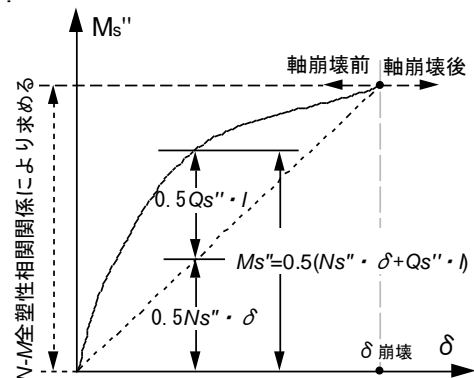


図2 主筋1本の断面のモーメントの変化

$$N_s'' \cdot \delta_{崩壊} + Q_s'' \cdot l = 2M_s'' \tag{1}$$

$$M_s'' = 0.5(N_s'' \cdot \delta_{崩壊} + Q_s'' \cdot l) \tag{2}$$

$$N_s'' \cdot \delta_{崩壊} = 2M_s'' \tag{3}$$

2.2 N-M 全塑性相関関係

柱が軸崩壊に至る時、主筋端部断面の応力状態は、図3に示すように全塑性状態となる。全塑性になる主筋断面に対しては、主筋断面に働く軸力  $N$  とモーメント  $M$  との関係 ( $N$ - $M$  全塑性相関関係と呼ぶ) を次のように求めることができる。

全塑性状態の断面に働くモーメント $M$ と軸力 $N$ はそれぞれ式(4)及び式(5)で表すことができる<sup>[2]</sup>。式(4)と式(5)から導いた $N$ - $M$ 全塑性相関関係が式(6)である。また、引張応力が作用している面積(中立軸より下側)の図心から中心線までの距離 $h$ は式(7)となる。さらに、図3における応力を積分することで求めた軸力 $N$ は、式(8)となる。式(6)~(8)を連立して主筋断面の $N$ - $M$ 全塑性相関関係は式(9)となる。

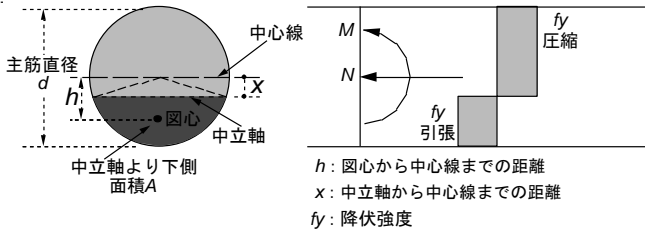


図3 主筋端部断面の全塑性応力状態

$N$ - $M$ 全塑性相関関係の理論式(9)は、軸力 $N$ に関する陽な解を得ることができないため、柱の残存軸耐力評価式への展開が困難である。それに対して、 $N$ - $M$ 全塑性相関関係の理論式を楕円式(10)で近似する。座標の原点( $N=0, M=0$ )を楕円の中心とし、理論式(9)の曲線が横軸、縦軸との交わる点をそれぞれ楕円の長軸、短軸の端点とした(図4)。

$$M = 2A \cdot f_y \cdot h \quad (4)$$

$$N = (0.25\pi d^2 - 2A) \cdot f_y \quad (5)$$

$$M = (0.25\pi d^2 \cdot f_y - N) \cdot h \quad (6)$$

$$h = \frac{\frac{2}{3}(0.25d^2 - x^2)^{\frac{3}{2}}}{0.5(0.25\pi d^2 - \frac{N}{f_y})} \quad (7)$$

$$N = 2 \left( 2 \int_0^x \arcsin\left(\frac{x}{0.5d}\right) \cdot 0.5(0.5d)^2 d\theta + x \sqrt{(0.5d)^2 - x^2} \right) \cdot f_y \quad (8)$$

$$0.25d^2 \times \arcsin\left(\frac{\sqrt{0.25d^2 - (\frac{3M}{4f_y})^{\frac{2}{3}}}}{0.5d}\right) + \sqrt{0.25d^2 - (\frac{3M}{4f_y})^{\frac{2}{3}}} \cdot (\frac{3M}{4f_y})^{\frac{1}{3}} = \frac{N}{2f_y} \quad (9)$$

$$\frac{N^2}{(0.25\pi d^2 \cdot f_y)^2} + \frac{M^2}{(\frac{4}{3}(0.5d)^3 \cdot f_y)^2} = 1 \quad (10)$$

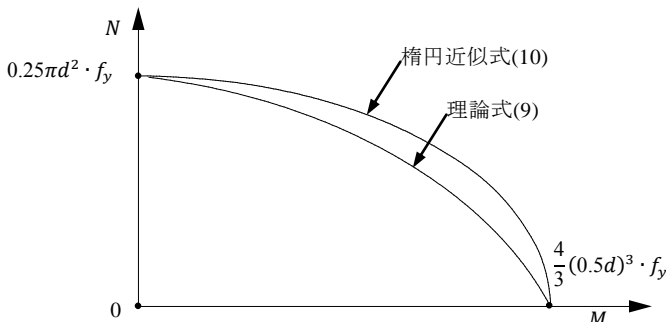


図4  $N$ - $M$ 全塑性相関関係

\*1 東京大学大学院 大学院生  
\*2 東京大学生産技術研究所 助教・博(工)  
\*3 東京大学生産技術研究所 教授・工博

### 2.3 主筋の残存軸耐力の評価式

式(3)を式(9)及び式(10)に代入すると、主筋1本の残存軸耐力 $N_s''$ の理論式及び近似式は式(11)及び式(12)になる。柱の軸崩壊点においては、柱断面内に配された各主筋に作用する内力ならびに軸耐力が等しいと仮定すれば、主筋全体の残存軸耐力 $N_s'$ の近似式は式(13)になる。

$$0.25d^2 \times \arcsin\left(\frac{\sqrt{0.25d^2 - (\frac{3N_s'' \cdot \delta_{崩壊}}{8f_y})^{\frac{2}{3}}}}{0.5d}\right) + \quad (11)$$

$$\sqrt{0.25d^2 - (\frac{3N_s'' \cdot \delta_{崩壊}}{8f_y})^{\frac{2}{3}}} \cdot (\frac{3N_s'' \cdot \delta_{崩壊}}{8f_y})^{\frac{1}{3}} = \frac{N_s''}{2f_y}$$

$$N_s'' = \frac{0.25\pi d^2 \cdot f_y}{\sqrt{1 + \frac{9\pi^2 \delta_{崩壊}^2}{16d^2}}} \quad (12)$$

$$N_s' = n \cdot N_s'' = n \cdot \frac{0.25\pi d^2 \cdot f_y}{\sqrt{1 + \frac{9\pi^2 \delta_{崩壊}^2}{16d^2}}} \quad n: \text{主筋の本数} \quad (13)$$

直径D19, D16, D13及びD10の鉄筋(以下の計算結果は、いずれも降伏強度が $345\text{N/mm}^2$ 、鉄筋直径が呼び名の直径を用い算定した結果である。)を例として、 $N$ - $M$ 全塑性相関関係の理論式及び楕円近似式で得られた残存軸耐力 $N_s''$ の理論式及び近似式の曲線を図5に示す。近似式の値は、水平変形が小さい時に理論式よりやや大きい、変形の増加とともに理論式の値とほぼ等しくなる。水平変形が相対的に大きいせん断破壊後の柱の軸崩壊点の残存軸耐力に対して、近似式は理論式を近似できると考えられる。

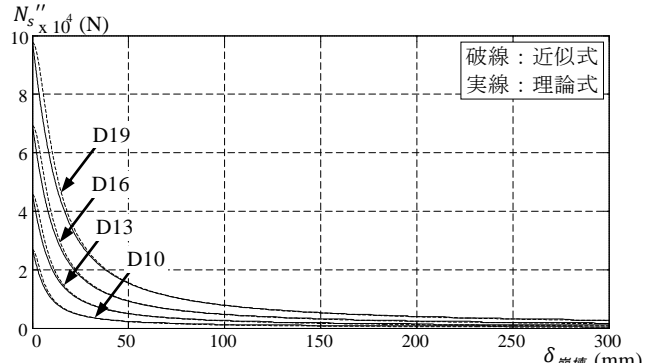


図5 軸崩壊点の主筋1本の残存軸耐力

### 3. まとめ

本報では、力学理論に基づいてせん断破壊型柱の主筋負担分の残存軸耐力の評価式を導いた。今後は、実験で主筋の残存軸耐力の評価式を検証する予定である。

#### 【参考文献】

- [1] 高稲宜和, 芳村学: 破壊曲面縮小の概念に基づくせん断破壊型鉄筋コンクリートの定量的損傷評価, 日本建築学会構造系論文集, 第618号, PP.191-197, 2007.8
- [2] 桑村仁: 建築の力学 塑性論とその応用, 井上書院, 2004

Graduate Student, Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo  
Research Associate, Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Ph.D.  
Professor, Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr.Eng.