

せん断破壊した鉄筋コンクリート造柱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>

鉄筋コンクリート造柱      せん断破壊型      残存軸耐力  
軸崩壊限界点                  全塑性                  アーチ機構

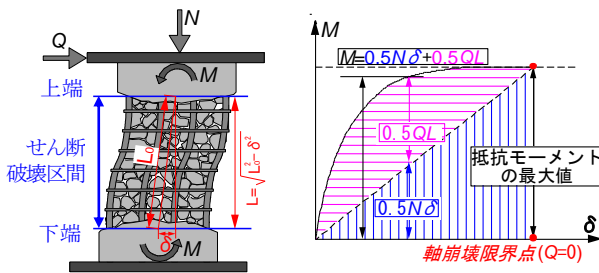
1. はじめに

1981年以前のいわゆる新耐震基準が適用される前に建設された鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）造建物は、柱にせん断補強筋が十分に配されていなかった、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、せん断破壊を生じた例が多数報告されてきた。せん断破壊後のRC造柱は、水平変形が増加すると残存軸耐力が低下し軸崩壊に至る恐れがあり、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。芳村ら<sup>1)</sup>は、RC造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評価モデルを提案した。

本研究では、せん断破壊型RC造柱の残存軸耐力評価法の理論式を提案することを目的とする。まず、せん断破壊後のRC造柱に対して軸崩壊までの柱の変形過程を分析して軸崩壊限界点を定義する。その後、軸崩壊限界点におけるせん断破壊型RC造柱の力学モデルを構築してコンクリートと主筋の残存軸耐力負担分の評価式を誘導し、両者の和をRC造柱の残存軸耐力とする。最後に、既往加力実験のデータベースにより提案したRC造柱の残存軸耐力評価式の精度検証を行う。

2. 軸崩壊限界点の定義

軸力が作用しているせん断破壊後のRC造柱に対して、逆対称のモーメント分布を仮定するとせん断破壊区間の（図1(a)、材軸方向長さ： $L_0$ 、水平変形： $\delta$ ）端部断面の作用モーメントは式(1-1)より求められる。また、端部断面の作用モーメントの変化は図1(b)のようになる。



(a)せん断破壊区間                  (b)モーメントの変化  
図1 せん断破壊後のRC造柱の変形過程

$$N\delta + QL = 2M \tag{1-1}$$

$$N\delta = 2M \quad (\text{軸崩壊限界点}) \tag{1-2}$$

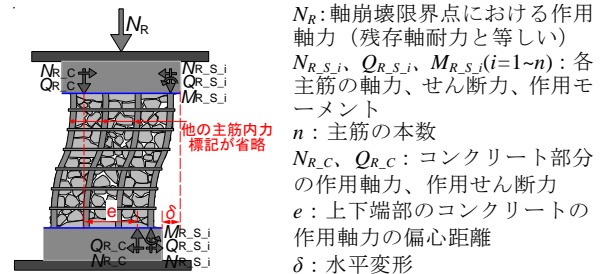
図1(b)に示すように、せん断破壊区間の端部断面においては、軸力によるモーメント  $0.5N\delta$  は水平変形  $\delta$  に対して線形的に増加する一方で、断面に作用する力の釣り合いを維持するためにせん断力によるモーメント  $0.5QL$  はある程度の水平変形を経験した後に徐々に減少する。

水平変形が大きくなるとせん断力によるモーメント  $0.5QL$  が 0 に近づき、0 になると軸力によるモーメント  $0.5N\delta$  はせん断破壊した RC 造柱断面の抵抗できる最大モーメントと等しく、水平変形がさらに進むと力の釣り合いを失い、軸崩壊に至る。ここで、RC 造柱断面に働く内力と外力の釣り合いを失う直前の状態（せん断力が 0 の時）を軸崩壊限界点と定義し、また、その時の断面の力の釣り合い式は、式(1-2)になる。

3. せん断破壊型 RC 造柱の残存軸耐力の評価式

3.1 力学モデル

軸崩壊限界点において、せん断破壊型 RC 造柱を図2のようにモデル化する。ここで、かぶりコンクリート剥落のため鉄筋とコンクリートは一体性を失って両者の間に力の伝達が発生しないこと、コンクリートにひび割れが生じるため端部断面のコンクリートが軸力のみ負担することと仮定する。ただし、上下の端部断面においてコンクリートに作用する軸力  $N_{R-C}$  が偏心距離  $e$  で離れてアーチ機構を形成し、モーメントを負担するとする。



$N_R$ : 軸崩壊限界点における作用軸力（残存軸耐力と等しい）  
 $N_{R-S,i}, Q_{R-S,i}, M_{R-S,i} (i=1 \sim n)$ : 各主筋の軸力、せん断力、作用モーメント  
 $n$ : 主筋の本数  
 $N_{R-C}, Q_{R-C}$ : コンクリート部分の作用軸力、作用せん断力  
 $e$ : 上下端部のコンクリートの作用軸力の偏心距離  
 $\delta$ : 水平変形

図2 せん断破壊型RC造柱の力学モデル

軸崩壊限界点の定義に基づいて、図2のモデルに対してせん断破壊区間のモーメントの釣り合い式は式(2)になる（各主筋の端部内力が等しいと仮定する）。

$$nN_{R-S,i}\delta = 2nM_{R-S,i} + N_{R-C}e \quad (i=1 \sim n) \tag{2}$$

3.2 コンクリートの残存軸耐力負担分

せん断破壊型RC造柱の軸崩壊限界点において、コンクリートの残存軸耐力負担分は、せん断破壊区間にある全てのせん断補強筋の断面が降伏すると想定して図3の赤部分であるコンクリートに作用する力の釣り合いより求める。力の釣り合い方程式（式(3)及び式(4)）を連立してコンクリートの残存軸耐力負担分の評価式は式(5)になる。さらに、モーメントの釣り合い方程式（式(6)）より上下断面のコンクリートの負担軸力の偏心距離  $e$  が式(7)になる。

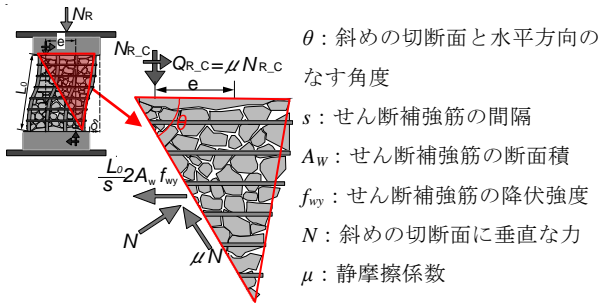


図3 せん断破壊区間のコンクリートのモデル

$$\mu N_{R\_C} + N \sin \theta = \mu N \cos \theta + \frac{L_0}{s} 2A_w f_{wy} \quad (3)$$

$$N_{R\_C} = \mu N \sin \theta + N \cos \theta \quad (4)$$

$$N_{R\_C} = \frac{L_0}{s} 2A_w f_{wy} \frac{\mu \sin \theta + \cos \theta}{\mu^2 \sin \theta + \sin \theta} \quad (5)$$

$$N_{R\_C}(0.5e) = \mu N_{R\_C}(0.5\sqrt{L_0^2 - \delta^2}) \quad (6)$$

$$e = \mu \sqrt{L_0^2 - \delta^2} \quad (7)$$

### 3.3 主筋の残存軸耐力負担分

主筋の残存軸耐力負担分の評価式の構築にあたり、まず、せん断破壊区間の主筋端部断面は全塑性になると想定して、 $N-M$  全塑性相関関係の楕円近似式(式(8)、誘導過程は文献[2]を参照)を求め、次に、それとモーメントの釣り合い式(式(2))を連立して主筋1本あたりの残存軸耐力負担分の評価式を導く(式(9))。

$$\frac{N_{R\_S\_i}^2}{(0.25\pi d^2 f_y)^2} + \frac{M_{R\_S\_i}^2}{\left(\frac{4}{3}(0.5d)^3 f_y\right)^2} = 1 \quad (8)$$

$$N_{R\_S\_i} = \frac{\frac{N_{R\_C} e \delta}{2n\left(\frac{4}{3}(0.5d)^3 f_y\right)^2} + \sqrt{\left[\frac{N_{R\_C} e \delta}{2n\left(\frac{4}{3}(0.5d)^3 f_y\right)^2}\right]^2 - 4\left[\frac{1}{(0.25\pi d^2 f_y)^2} + \frac{\delta^2}{\left(\frac{8}{3}(0.5d)^3 f_y\right)^2}\right]\left[\frac{N_{R\_C}^2 e^2}{\left(\frac{8}{3}(0.5d)^3 f_y n\right)^2} - 1\right]}}{2\left[\frac{1}{(0.25\pi d^2 f_y)^2} + \frac{\delta^2}{\left(\frac{8}{3}(0.5d)^3 f_y\right)^2}\right]} \quad (9)$$

### 3.4 RC 造柱の残存軸耐力の評価式

コンクリートの残存軸耐力負担分  $N_{R\_C}$  と主筋の残存軸耐力負担分  $nN_{R\_S\_i}$  の和をせん断破壊型 RC 造柱の残存軸耐力とする(式(10))。

$$N_R = N_{R\_C} + nN_{R\_S\_i} \quad (10)$$

### 4. RC 造柱の残存軸耐力の評価式の精度検証

提案したせん断破壊型 RC 造柱の残存軸耐力の評価式について、文献<sup>例えは[3]</sup>より既往の柱実験データベースを作成して精度検証を行った。残存軸耐力は、文献に記載の軸崩壊時の水平変形  $\delta$  を用いて式(5)、(9)、(10)により計算した値を算定値、実験値は軸崩壊時の実際に作用させていた軸力とし、両者を比較した。式(5)にあるせん断破壊区間材軸長さ  $L_0$  は、既往の文献[4]よりせん断ひび割れ角度を  $60^\circ$  と仮定した上で算定し、また切断面にお

ける静摩擦係数  $\mu$  は、文献[5]より 0.6 を採用した。算定した RC 造柱の残存軸耐力と実験値の比較を図4に示した。せん断補強筋比が 0.005 以上の試験体の結果(2体)を除いて提案したせん断破壊型 RC 造柱の残存軸耐力の評価式による算定値は実験値と概ね対応していることが分かる。コンクリートの残存軸耐力負担分である式(5)ではせん断破壊区間にある全てのせん断補強筋が降伏していると仮定しており、せん断補強筋比が高い(0.005 以上)試験体では実験値を過大評価した。従って、せん断補強筋がある程度以上多くなればその負担量も一様でなくなると考えられる。今後、提案した残存軸耐力評価式の適用範囲について吟味していく必要があると考えられる。

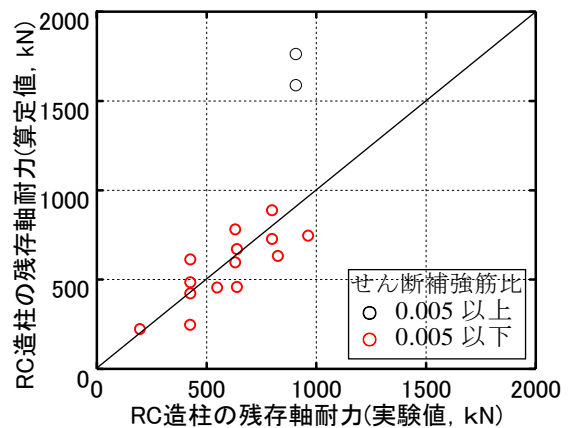


図4 RC 造柱の残存軸耐力評価式の精度検証

### 5. まとめ

本報では、力学理論に基づいてせん断破壊型 RC 造柱のコンクリートと主筋の残存軸耐力負担分の評価式を導き、それらの和を RC 造柱の残存軸耐力として提案した。また、既往研究による柱の加力実験データベースを用いて、提案した RC 造柱の残存軸耐力評価式の精度を検証し、その結果、残存軸耐力の評価式による算定値は実験値と概ね対応した。今後、提案した RC 造柱の残存軸耐力評価式の適用範囲を加力実験で検討する予定である。

### 【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] 楊勇, 松川和人, 崔琥, 中埜良昭: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014 年 9 月, pp.265-266
- [3] 竜泰之, 中村孝也, 芳村学: 鉄筋コンクリート柱の軸力の保持限界に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001 年, pp.217-222
- [4] 加藤大介, 李柱振, 中村友紀子, 本多良政: RC 造柱の残存軸耐力に関する実験と考察, 日本建築学会構造系論文集, No.619, 2007 年 9 月, pp.127-132
- [5] 日本建築学会: 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説, 2002 年

\*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

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.