

論文

[2116] 主筋の拔出しを考慮した鉄筋コンクリート柱の降伏変形の評価

申 範昊^{*1} ・ 壁谷澤 寿海^{*2}

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 柱部材の荷重変形関係を表わす点 (ひび割れ点、降伏点、最大強度点、限界変形点) を適切に評価することは、構造物の非線形解析を前提とした設計法においては極めて重要になる。従来より、RC 部材の限界変形の評価法に関する理論的研究はなされつつある[3]。また、RC 柱部材において、引張側主筋の基礎からの拔出し変形が部材の変形に与える影響が大きいことが指摘されており、この種の研究もなされつつある[2]。しかし、RC 柱部材の降伏変形を理論的に評価する方法は確立されていない。

そこで、筆者らは、高強度 RC 柱部材の曲げ降伏時における降伏変形の評価法に関して、理論的なアプローチを試み、柱部材の降伏変形の一般的な定式化の方法を示した[1]。

本研究は、RC 柱部材の引張側主筋の基礎への定着部分を模擬した試験体より主筋の拔出し変形量を明らかにする実験を行ない、文献 [1] における引張側主筋の拔出しによる変形成分 R_p の評価の適合性を検証したものである。

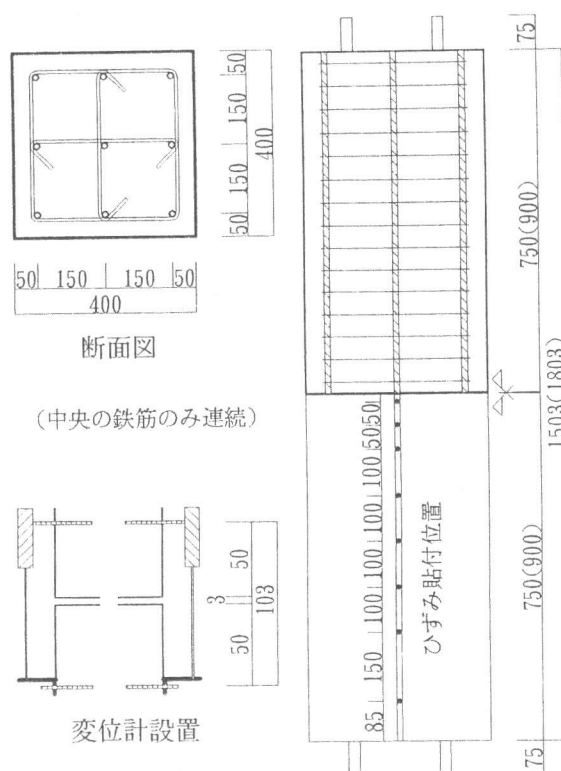


図1. 実験供試体 (単位: mm)

2. 実験の概要

表1 試験体一覧表

番号	試験体名称	B×D (mm)	Lo (mm)	主筋			補強筋		定着長	載荷方法
				試験	補助	Pg (%)	配筋	Pw (%)		
1	SLIP_1	400×400	1803	1-D22	8-D13	0.8754	D6@50	0.4751	41D	繰返載荷
2	SLIP_2	400×400	1803	1-D19	8-D13	0.8126	D6@50	0.4751	47D	繰返載荷
3	SLIP_3	400×400	1803	1-D16	8-D13	0.7576	D6@50	0.4751	56D	繰返載荷
4	SLIP_4	400×400	1803	1-D13	8-D13	0.7126	D6@50	0.4751	69D	繰返載荷
5	SLIP_5	400×400	1503	1-D13	8-D13	0.7126	D6@50	0.4751	58D	繰返載荷
6	SLIP_6	400×400	1503	1-D13	8-D13	0.7126	D6@50	0.4751	58D	単調載荷

*¹ 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻・工修 (正会員)*² 横浜国立大学助教授 工学部建設学科・工博 (正会員)

表2 材料特性（強度および弾性係数：kgf/cm²、ひずみ：μ）

使用対象	公称直径	規格	降伏強度	最大強度	降伏点歪	弾性係数	σ_B
SLIP_1	D22	SD35	3551.8	5302.0	1930.2	1841206	572.95
SLIP_2	D19	SD35	3598.4	5343.1	1916.0	1878562	572.95
SLIP_3	D16	SD35	3681.4	5387.7	1881.2	1957274	506.77
SLIP_4	D13	SD35	3513.8	5150.0	1815.8	1936756	590.36
SLIP_5・6	D13	SD70	7319.2	9414.4	3843.0	1904558	548.97

2. 1 試験体

実験供試体は、RC柱部材における引張側主筋の基礎への定着部分を想定し、計6体を計画した。試験体の形状寸法および配筋詳細を図1および表1に示す。試験体の断面は40×40cmの正方形とし、長さは1803および1503mmの2種類である。また、試験鉄筋は断面の中央に垂直に配置した。すなわち、中央の主筋1本のみを連続とし、他の主筋は試験体中央高さに設けたコンクリートの不連続面（幅3mm）では連続していない。なお、試験鉄筋は試験体中央部コンクリートの不連続面によって、900mmまたは750mmの長さでコンクリートと定着している。すなわち、定着長さは41D～69Dで、十分大きい定着長さを確保している。鉄筋径と降伏強度および載荷方法を実験変数とした。

2. 2 材料の力学特性

試験鉄筋には、D22、D19、D16およびD13の降伏強度3500kgf/cm²級の鉄筋およびD13の降伏強度7000kgf/cm²級の鉄筋を用いた。使用した鉄筋およびコンクリートの材料特性を表2に示す。表2中の σ_B は、コンクリートの最大応力度(kgf/cm²)を表す。

2. 3 実験方法

鉄筋の付着性能の試験法における数多い試験法のうち、最も一般的に使用されているものは引抜試験法である。この種の試験法は、耐圧板を使用しているため、実際の構造物中での応力状態とは異なる。その相違として鉄筋周囲のコンクリートが構造物中では引張応力を受けるにもかかわらず実験では圧縮応力を受けること、また、断面の平面外変形を耐圧板が拘束する効果も無視できないなどが挙げられる。したがって、本研究では実際の構造物中で柱部材が受ける応力状態を実験に反映させるため、両引試験法を改良した試験法を採用した。また、試験体の断面になるべく均等な応力を与えるため、試験体の両端にそれぞれ埋込み長さ450mmのアンカーボルト4本を配置した。

載荷装置を図2に示す。本実験では、鉛直油圧ジャッキ1台を用い、鉄骨治具を介して試験体に鉛直方向の応力を与えた。また、試験体は上下両端のアンカーボルトに鉄骨治具を取り付け、上下両端の鉄骨治具をそれぞれ鉛直油圧ジャッキおよび加力フレームに固定している。なお、載荷装置および試験体の設置においては、鉛直油圧ジャッキの加力中心と試験体の軸方向中心が一致するように細心の注意を払った。

載荷方法においては、鉄筋の応力度によって荷重の制御を行なった。ロードセルによる鉄筋の応力度が降伏強度以下の場合は、降伏強度の1/3、2/3および降伏強度に達するように荷重を制御

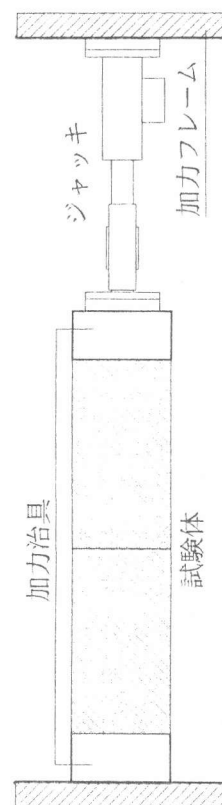


図2. 載荷装置

し、載荷・除荷それぞれを1回ずつ繰返した。鉄筋の応力度が降伏強度以上の場合は、降伏棚が完了した時点で1回繰返し、以後は試験鉄筋が破断するまで載荷を継続した。

拔出し変形の測定方法においては、図1に示したように、試験体中央部に設置した2本の電気式変位計により上下2本の柱（測定間隔 103mm、図1参照）の相対変形を計測し、その平均値を用いた。変位計による計測値には、試験体中央部の3mm長さの鉄筋の伸びが含まれている。拔出し変形量の実験値の評価においては、鉄筋に貼り付けた2枚のストレインゲージより鉄筋のひずみを計測し、3mm区間の鉄筋の変形を控除しているが、この影響はわずかである。コンクリートに埋め込まれた鉄筋のひずみは、図1に示したように、試験体中央部の近い部分では15mm～50mm間隔で、それ以外は100mm～200mm間隔で鉄筋に貼付したストレインゲージにより計測した。

3. 実験結果および検討

3. 1 応力と拔出し変形の関係

試験体SLIP_1、4、5および6における鉄筋の応力度と拔出し変形との関係を図3に示す。図3における応力度とは、ロードセルによる軸方向荷重を鉄筋の断面積で除したものである。

鉄筋径を実験変数とした各試験体SLIP_1～4において、鉄筋の降伏点における拔出し変形は、鉄筋径の大きいものほど大きいことが認められた。また、鉄筋の降伏強度を実験変数とした試験体SLIP_4と5の両試験体においては、当然のことながら降伏点の高いものの拔出し変形量が多いことも確認された。なお、載荷方法を実験変数とした試験体5と6において、載荷方法の相違の拔出し変形に及ぼす影響はほとんど見られなかった。

3. 2 鉄筋のひずみ分布

試験体2および5の高さ方向における鉄筋のひずみ分布を一例として図4に示す。各試験体において、降伏ひずみは素材実験における降伏ひずみとほぼ一致している。また、上下2本の柱の鉄筋

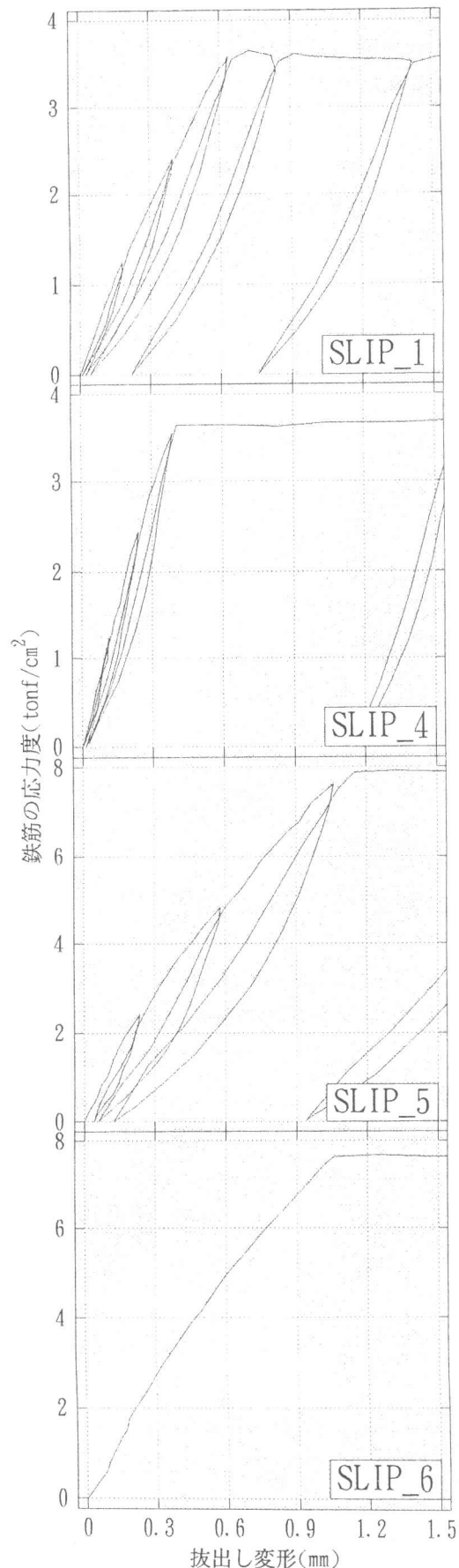


図3. 応力と拔出し変形の関係

のひずみ分布も若干の差異は見られたものの、概ね一致している。なお、図4にも示したように各試験体において、試験鉄筋のひずみは主に試験体の中央付近部分に集中的に分布している。各試験体における鉄筋のひずみの集中分布範囲に関しては、径の大きい鉄筋ほど、降伏強度の大きいもののほど集中分布範囲も大きいことが確認された。

3. 3 実験値と計算値との比較

本研究では、鉄筋コンクリート柱部材の降伏変形の評価を研究の目的としている。以下では、各試験体における試験鉄筋の応力度が各々の降伏強度に達した時点の拔出し変形を各々の拔出し変形の実験値とする。拔出し変形の計算値は、試験体の上下2本の柱の拔出し変形は等しいものと仮定し、式(1)によって求める。式(1)における L_E は、図4に示したように、鉄筋のひずみ分布形状を三角形分布と仮定した時の試験体中央部のコンクリート表面から上下2本の柱それぞれの高さ方向における等価ひずみ分布長さで、松本[2]らが提案した弾性域における相対引き抜け量の算定方法(式(2))によって与えられるものとした。

なお、式(1)および(2)において、 ϵ_s は素材実験結果による試験鉄筋の降伏ひずみで、 d_b は試験鉄筋の公称直径である。

$$\delta = 2 \cdot L_E \cdot \epsilon_s / 2 = L_E \cdot \epsilon_s \quad (1)$$

$$L_E = 59 \cdot d_b \cdot \sqrt{E_s \cdot \epsilon_s^2 / F_c} \quad (2)$$

拔出し変形の実験結果と計算結果を表3に示す。表3に示したように、計算結果は、SD35の試験鉄筋に対して、鉄筋径の小さいもののほど実験結果をやや過小評価する傾向がある。それに対して、SD70の試験鉄筋に対しては、やや過大評価している。式(2)は、SD40の鉄筋による実験結果を用いて検討した提案式であることが、上記の実験結果と計算結果のずれの一つの原因

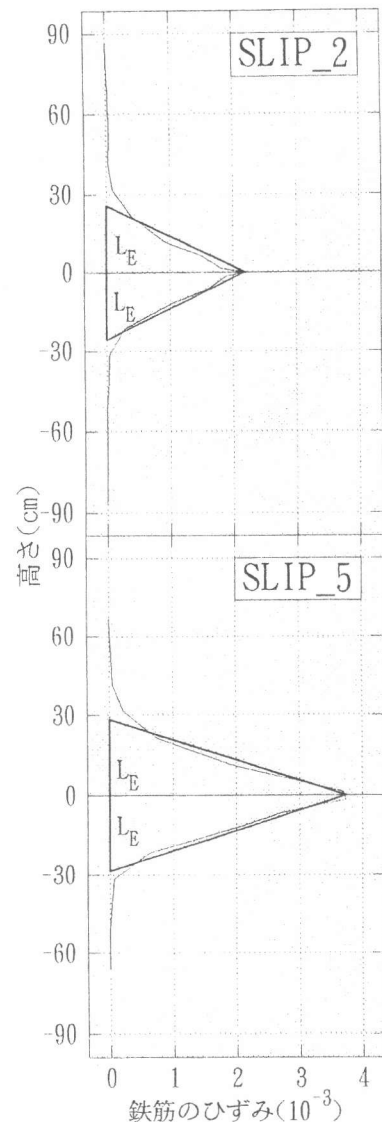


図4. 鉄筋のひずみ分布

表3 拔出し変形の実験結果と計算結果との比較

番号	試験体 名称	d_b mm	実験結果 $e\delta$ (mm)	計算結果		
				L_E (mm)	$c\delta$ (mm)	$c\delta / e\delta$
1	SLIP_1	22	0.6312	296.942	0.5732	0.9081
2	SLIP_2	19	0.5321	256.905	0.4922	0.9250
3	SLIP_3	16	0.4835	225.706	0.4246	0.8782
4	SLIP_4	13	0.3837	169.626	0.3080	0.8027
5	SLIP_5	13	0.9942	284.877	1.0948	1.1012
6	SLIP_6	13	0.9955	284.877	1.0948	1.0998
平均値						0.9525

であると考えられる。しかし、計算値と実験値との比の平均値は0.9525で、さらにすべてのデータが $\pm 20\%$ の範囲に入っており、両者は全般的に良い対応を示していることから、式(1)、(2)は、柱部材の主筋の拔出し変形量の評価に適用可能であると考えられるが、理論的な定式化を含めて、さらに検討する必要がある。

4. 柱部材の降伏変形の評価

本研究では、柱部材の降伏変形 R_y は、曲げ変形 R_f 、せん断変形 R_s および主筋の拔出し変形 R_p によって構成されるものと仮定し、降伏変形の評価方法を検討した。

4. 1 曲げ変形

柱部材の降伏点における曲げ変形 R_f は、弾性理論式に引張側のひび割れによる断面欠損および配筋量を考慮した等価有効断面二次モーメント I_e を用いて算定する。なお、次式における Q_y は降伏耐力であり、 H_o は試験体の内のり長さである。

$$R_f = Q_y \cdot H_o^2 / (12 \cdot E_c \cdot I_e) \quad (3)$$

4. 2 せん断変形

柱部材の降伏点におけるせん断変形 R_s は、文献[1]においてトラスモデルとアーチモデルを用いて検討した評価式(式(4))によるものとした。なお、以下の各式において、 P_t はトラス機構の負担せん断力、 B および J_S はそれぞれ柱部材の断面幅および引張主筋と圧縮主筋の間隔、 n は鉄筋とコンクリートのヤング係数比、 P_w はせん断補強筋比である。また、 X_y は中立軸から圧縮縁までの距離、 θ はアーチと材軸がなす角度、 D は柱部材の断面せいである。

$$R_s = P_t / (E_c \cdot B \cdot J_S) \cdot [4 + 1 / (n \cdot P_w)] \quad (4)$$

$$P_t = \xi / (X_y / J_S \cdot \mu + \xi) \cdot Q_y$$

$$\mu = 4 + 1 / (n \cdot P_w)$$

$$\xi = 1 + \cot^2 \theta$$

$$\tan \theta = [\sqrt{L^2 + 4X_y \cdot (D - X_y)} - L] / (2X_y)$$

4. 3 引張主筋の拔出し変形

曲げ降伏点における引張主筋の拔出し変形 R_p は、式(5)によって求めるものとする。危険断面からスタブ高さ方向におけるひずみ分布長さ L_e は、式(2)によって与えられるものとした。また、引張主筋のひずみを ϵ_s 、ひずみ分布は三角形分布とした。ただし、引張主筋のひずみ度がコンクリートのひび割れ点ひずみ度以下であれば、拔出し変形 R_p は考慮しないものとした。

$$R_p = \epsilon_s \cdot L_e / [2 \cdot (d - X_y)] \quad (5)$$

ここで、 d は圧縮縁から引張鉄筋重心までの距離(有効せい)である。

4. 4 降伏変形の計算値と実験値の比較検討

文献[1]において引用した既往の実験データに対して、本研究で検討した柱部材の降伏変形計算式を用いて評価し、計算結果と実験結果との比較検討を行なった。

降伏変形の実験値と計算値との関係を図5に示す。図に示した実験値は、各研究者より論文中に報告されたもの、あるいは、降伏変形の実験値が報告されていない場合は、降伏耐力の実験値に対応する変形を、文献中の履歴曲線から読み取ったものである。図に示したように、降伏変形の実験値と計算値の比の平均値は0.973で、80%のデータが $\pm 20\%$ の範囲に入っており、全般的に計算値は良い精度で実験値を反映していると言える。

本論における降伏変形の評価方法は、概ね良い精度で実験結果を反映することのみならず、各変形成分の評価においても、実験時の各パラメータの実験結果に及ぼす影響を比較的合理的に評価していると考えられる。例えば、せん断スパン比をパラメータとする試験体の計算結果において、比較的せん断スパン比の大きい試験体の曲げ変形成分が大きく評価され、軸力比をパラメータとする試験体の計算結果においては、軸力比が小さいものの曲げ変形成分が大きく、軸力比の大きいもののせん断変形が大きいことが確認された。

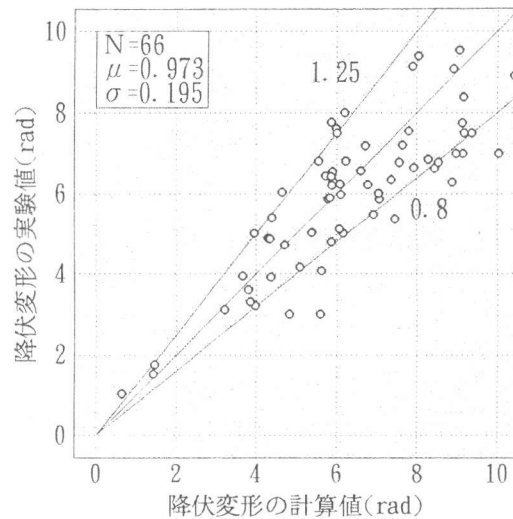


図5. 実験値と計算値の比較

5. 結論

本研究では、RC柱部材における引張側主筋の基礎への定着部分を模擬した実験を行ない、鉄筋の拔出し変形量を明らかにするとともに、本論の降伏変形の計算式による計算結果と既往の実験結果との比較検討より、以下の結論を得た。

- ① 鉄筋径が太いほど、鉄筋の降伏強度が大きいほど引張主筋とコンクリートとの相対拔出し変形量が大きい。
- ② 拔出し変形の計算結果において、計算値は全般的に実験値を過小評価する傾向にあり、鉄筋径の小さいものほど、降伏強度の低いものほどその度合いが大きい。しかし、実験値と計算値は概ね対応しており、拔出し変形の評価式は降伏変形の評価に適用可能であると考えられる。
- ③ 降伏変形の算定式を、曲げ変形、せん断変形、拔出し変形の和として、理論的に定式化する方法を示した。算定式は全般的に実験結果を概ね良い精度で評価している。

【謝辞】 本研究の試験体製作および加力などの実験全般にわたって、研究生李里氏および卒論生竹並達也氏をはじめ、当研究室の諸氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

《参考文献》

- [1] 申範昊、壁谷澤寿海：「高強度RC柱部材の耐力および変形性能の評価法に関する研究」日本建築学会構造工学論文集、Vol. 40B、1994年3月、pp. 315-322
- [2] 松本進、出口秀史：「鉄筋とコンクリートの相対引抜け量の算定方法について」コンクリート工学Vol. 24, No. 8, Aug. 1986, pp. 115-125
- [3] 平石久廣、稲井栄一：「鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の靱性に関する解析的研究」日本建築学会構造系論文報告集、第408号、1990年2月、pp. 21-30