論文 損傷と残留変形を抑制する RC 柱の残留変形角の評価

山田 直樹*1・塩屋 晋一*2・佐々木 泉*3

要旨:現場打設の鉄筋コンクリート造建物を対象に大地震時に大変形を経験しても,構造体の損傷を軽微に留め 残留層間変形角を使用上問題にならない程度に抑制する技術とその設計方法の開発を目指している。柱脚を曲げ 降伏させる1階の柱を対象にし,その残留変形角を制御するための残留変形角の簡便的な評価式を誘導すること を目的に,曲げ解析を行って残留変形角が決定する条件を明らかにし,残留変形角を評価する力学モデルと基礎式 および計算手順を提案している。計算結果と実験結果の残留変形角の変化傾向は定性的に一致し,本研究で定義 する復元モーメント比を一定の値以上にすると残留変形角を効果的に抑制できることを明らかにした。 キーワード:鉄筋コンクリート,残留変形角,復元性,損傷抑制,柱

1.はじめに

本研究は、コンクリートを建設現場で一体的に打設する 工法の鉄筋コンクリート造(以後,RC造)建物を対象にし、 大地震時に大変形(層間変形角Rが1/50rad.程度の変形)を 経験しても構造体の損傷程度を軽微に留め、残留する層間 変形角を使用上問題にならない程度(1/400rad.以内)に抑 制する技術と設計方法の開発を目指している。

図 - 1 に想定する大地震時の架構の降伏機構を示す。 本研究では曲げ降伏ヒンジ領域(以後,ヒンジ領域)だけ を塑性化させ,それ以外の領域では部材応力を許容応力 度の範囲に留めさせて,補修を必要とする損傷を生じさせ ないことを想定している。エネルギー吸収は主にヒンジ 領域の主筋の降伏エネルギーに期待する。塑性変形は主 にヒンジ領域の塑性回転角により生じる。残留変形角を 抑制するためには,地震後に残留する塑性回転角を減少 させることが,重要になる。塩屋らは1階の柱を対象にし た加力破壊実験を行い,復元モーメントによる柱の残留 変形角の抑制効果を明らかにしている¹⁾。そこでは,ある 一定の復元モーメントが確保される場合には,柱の残留 変形角の抑制を1/400rad.以内に抑制できることを確認し ている。本論文では,その柱の残留変形角の評価方法につ いて検討した結果を述べる。

2.復元モーメントと柱の残留変形角の抑制メカニズム 図-2にヒンジの塑性回転角の抑制メカニズムを示す。 図-2(a)に示すように,引張鉄筋が降伏して曲げ降伏 するRC柱において,降伏モーメントMyは引張主筋が負 担するモーメント成分sMyと軸力Noが負担するモーメ ント成分Mnからなる。この内,降伏した引張主筋には塑 性の伸び変形が生じ,この変形により除荷後,部材に残留 変形が生じる。この残留変形を戻すためには,引張降伏し た主筋を圧縮降伏させるモーメントが必要になる。この モーメントとしては軸力によるMnが存在する。本研究で はMnを復元モーメントと定義し,またMn/sMyの比を復 元モーメント比 と定義する。 図 - 2 (b)に示すように Mn がsMyより大きくなると残 留変形を減少させることになる。すなわち, が1.0より 大きいほど,残留変形はより減少することになる。

柱の曲げ耐力を確保するために sMy を増大させる場合もあり,長期軸力による Mn では残留変形を許容範囲 (1/400rad.程度以内)に戻すことが不可能な場合がある。 その場合にはアンボンドのPC鋼棒を配してポストテンショ ン方式によるプレストレス力を補助的に導入する¹⁾。

3.既往の柱の水平加力実験¹⁾の概要

文献1)では復元モーメント比 を変化させた柱の水平加 力実験を行っている。図 - 3に試験体の形状・寸法を示す。 試験体は3体で,No.1は一般のRC柱,No.2はNo.1にコン クリートの損傷抑制を行った柱,No.3はNo.2にプレストレス 力を導入した柱である。No.2とNo.3では平石の方法²⁾により 柱脚側で曲げ危険断面から柱せいDの1/2の区間(100mm)



*1 鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学大学院 理工学研究科教授 博士(工学) (正会員)

*3 INA 新建築研究所 元鹿児島大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生



をアンボンドとし,補助筋を配筋してヒンジ領域の損傷 抑制を行っている。No.3ではポストテンションにより軸力 を増加させ,復元モーメントを補っている。

図 - 4に加力状況を示す。加力は軸力を作用させ,層間変 形を漸増させる繰り返し水平加力としている。水平力の加力 高さは柱の反曲点より下側のせん断スパン比が2.0となり, 上側は1.5となる位置としている。加力の各変形角レベルで 軸力比()を0.16として一定軸力の状態で3回繰り返し加力 を行い,つぎに軸力比を0.13,0.10,0.07,0.03と段階的に下げ 各段階で一定軸力の状態で1回の繰り返し加力を行っている。 これにより復元モーメントが変化する。No.3では軸力比0.06 分の軸力を初期プレストレス力として導入して軸力を補い, 他の試験体の軸力比に合わせている。図 - 5にNo.2の 1/100rad.と1/50rad.の荷重 - 変形角関係を示す。が大 きくなると残留変形角が小さくなることが確認できる。

4.残留変形角の決定条件に関する解析的検討

曲げ降伏する柱で残留変形角を生じさせる変形成分は 主にヒンジ領域の残留回転角による成分である。本章で はその残留回転角の決定条件を曲げ解析により検討する。 4.1 曲げ解析

図 - 3の No.2の柱を解析対象にする。平面保持を仮 定して曲げ解析を行った。図 - 6 にコンクリートと鉄筋 の応力 - ひずみ関係を示す。コンクリートはカバー とコアーは同じ特性とした。No.2とNo.3の実験ではヒン ジ領域のコンクリートの損傷抑制を行ってほとんど損傷 が生じなかったため、コンクリートのポストピークの応 力軟化は考慮しなかった。また、コンクリートの引張強 度は無視した。主筋ではひずみ硬化とバウシンガー効果を 考慮した。諸値は材料試験結果¹⁾に基づいた。

復元モーメント比 を解析変数とした。 は軸力

図 - 5 1/100 rad.,1/50 rad.の荷重 - 変形角関係 (%) ん 定 0,05Es 0.9 (a) コンクリート (b)鉄筋 図-6 応力-ひずみ関係 150 Q(kN) 実験 — 解析 100 50 -4 $R(\times 10^{-2} \text{ rad.})$ -150-図 - 7 No.2のせん断力 - 変形角関係(= 1.49

を変化させて調整した。曲げの加力は4つの回転角レベルで1回,繰り返して漸増させた。それら回転角 は 柱の変形角Rで1/100,3/200,1/50,1/30rad.に対応する値 とした。変形角Rと回転角 の対応は5.5節で後述する方 法に従った。ヒンジ区間Lpを柱せいD(=200mm)とし, これと曲率の積を とした。

4.2 解析結果

(a)解析の精度

解析の精度を検証するため,No.2試験体の実験結果と比較した。図-7にせん断力-変形角関係を示す。 が1.49の場合である。

残留変形角については実験値と計算値はほぼ一致している。 除荷時で破線で囲んだ範囲で解析値と実験値に差が生じ ている。図 - 6 (b)中にすように降伏以降で応力が減少し, 加力方向が反転して増加する場合には実際は破線の関係 になる。解析ではこれを無視したためである。 が小さ くなる場合の残留回転角を評価するためには,その範囲の 鉄筋の応力 - ひずみ関係を精度良くモデル化する必要が あるが,今回は残留回転角の決定条件の解明を目的にし ているため,モデルの改良は行わなかった。



図-10 =0.32の場合の解析によるM, Mn,sM- 関係(No.2試験体, Rmax=1/100,1/50,1/30rad.)

(b) 残留回転角の決定条件

図-2(a)の復元モーメントMnと鉄筋の降伏モーメント sMyは,曲げ耐力時の圧縮合力の重心位置まわりに表さ れてる。しかし,除荷時にはその重心位置も変化し,これ に伴いMnと鉄筋の負担モーメントsMも変化する。

図 - 8 に が1.49の場合の解析によるモーメント - 回転 角関係(M - 関係)を実線で示す。図中には Mn と sM の 変化も示す。Mn と sM は曲げ圧縮域のコンクリートと圧縮 鉄筋の重心位置まわりに算出している。全モーメント Mと Mn の差は引張鉄筋と中段筋の負担モーメント sM になる。 図中に図 - 2 (a)の Mn の計算値を水平の一点鎖線で示す。 Mnは回転角の増加に伴い増加し,曲げ耐力が決定した以降 では一定になり, Mn の計算値にほぼ等しくなっている。

sMy については,主筋の降伏強度にひずみ硬化を考慮 していないための増加に伴って差が大きくなっている。 Mnの除荷時の経路は載荷時と差が生じ,最大経験回転角 max が増加するとその差が大きくなっている。max が増 大すると曲げ圧縮域において圧縮ひずみがコンクリートの 比例限界ひずみより大きくなる範囲が増加し,その範囲の コンクリートが除荷時に圧縮抵抗しなくなるためである。 このため,maxの増加に伴い,除荷時のMn-関係の の戻りが小さくなり,残留回転角が増加することになる。

残留回転角が決定した時点を で示す。除荷時のMnと

鉄筋の負担モーメントsMが等しくなった時点の回転角が 残留回転角 resとなる。この時,引張降伏後の鉄筋は圧縮 降伏して圧縮の塑性変形を生じている。図中にsMyの計算 値を破線で示す。sMyには中段筋の圧縮降伏力も考慮し ている。残留回転角時のsMは引張降伏後に圧縮降伏する モーメントsMyより小さくなっている。これは圧縮合力の 重心位置が前述したように移動していることによる。

図 - 9 に を 1.2, 1.1, 1.0 とした M - 関係を示す。 R max が 1/50rad. の場合である。この場合, を 1.2 にして も res を 1/200rad. 程度までしか抑制できていない。

残留回転角を1/400rad.程度に抑制させようとすると少な くとも を1.20以上にする必要があることにある。

図 - 10に が 0.32 の場合の M - 関係を示す。Mn が小 さいため,引張降伏した後の主筋を圧縮降伏させることが できないで,残留の塑性回転角が減少しない。この場合の resは引張降伏した主筋の戻りの弾性変形による回転成分

s tと,復元モーメントと釣り合うために圧縮に転じて生 じる回転角成分s cの和を, maxから差し引いたもの となる。さらに軸力を零にして を零とした場合,s cが 零となり,s tだけが戻りの成分となる。

以上より残留回転角が決定する条件は,除荷時に,復元 モーメントと引張降伏後の鉄筋が圧縮降伏するモーメン トが等しくなると言える。 5.残留変形角の評価モデルと評価式および評価

5.1 評価モデル

図 - 11に想定する除荷時のヒンジの変形と応力の状態 を示す。除荷後は軸力だけが作用している状態とする。 引張鉄筋と中段筋は最大経験回転角時に引張降伏しており, 除荷後は圧縮降伏しているものとする。この状態を保証する

の条件式は後述する(6)式で示される。除荷後の圧縮鉄 筋の抵抗は無視する。また曲げ圧縮域では圧縮縁からの距 離Zdの範囲のコンクリートは除荷後は圧縮抵抗しないも のとする。Zdは5.4節で後述する。Zdの範囲を除く圧縮域 のコンクリートの応力分布はつぎのようにモデル化する。

図 - 7 で示したようにNo.2の残留変形角の実験値と計 算値はほぼ一致する。解析による残留変形角時のコンク リートの応力分布を図 - 12(a)に示す。最大経験角 Rmax が1/100,1/50,1/30rad.で正加力側の分布である。圧縮縁 からZdの距離の範囲では抵抗しないで,これを除く範囲 では を頂点とする三角形に近い応力分布になっている。

ここでは、図 - 12(b)に示すようにXnとk・Xnを定義し、 k・Xnの範囲ではヤング係数Ecとひずみの積で応力が生じ、 残りの(1-k)・Xnの範囲は と を直線で結ぶ分布とする。 図 - 12(c)にNo.2の解析の応力分布を基に得られたkと変 形角の関係を示す。 が1.25と1.49の場合を示す。Rmaxの 増加に伴いkが減少しているが の違いによる変化はあ まり生じていない。ここではkを図中に示す式で表す。 これらの傾向は他の試験体でも同様であった。

5.2 残留回転角の評価式

断面内のコンクリートの圧縮合力 Cc, 引張鉄筋の圧縮 抵抗力 rCt, 中段筋の圧縮抵抗力 rCm は次式で表される。

$$Cc = 1/2 \cdot Ec \cdot k \cdot c \cdot Xn \cdot B$$
(1.1)

$$rCt = a_t \cdot y \tag{1.2}$$

$$rCm = a_m \cdot y \tag{1.3}$$

ここに,Ec:コンクリートのヤング係数

k・c: 図 - 12(b)のk・Xnの位置の圧縮ひずみ

- Xn:中立軸から圧縮縁までの距離
- a_t:引張鉄筋の断面積, a_m:中段鉄筋の断面積 y:主筋の降伏強度

断面内の軸方向の釣り合いは(2.1)式で表され,それに (1.1)式~(1.3)式を代入して整理すると(2.2)式が得られる。

N = Cc + rCt + rCm(2.1)

$$(Ec/c B) \cdot k \cdot c \cdot Xn1 = 2(- pg \cdot y/c B)$$
 (2.2)

断面内のモーメントの釣り合いは(3.1)式で表され, それらに(1.1)式~(1.3)式を代入し,整理すると(3.2)式が



得られる。(3.1)式は中立軸に対して表している。

 $N \leq D/2 - (Xn+Zd) + Cc \cdot g \cdot Xn =$ rCt { d - (Xn+Zd) } rCm { D/2 - (Xn+Zd) } (3.1)

 $(Ec/c_{B}) \cdot k \cdot c \cdot Xnl^{2} + (6/(1+k)) \{ (p_{g} \cdot y/c_{B}) - \}Xnl - (6/(1+k)) \}$ $\{ p_{t} \cdot (d1 - Zd1) + p_{m} \cdot Sl \} (y/c_{B}) + (6/(1+k)) \cdot \cdot Sl = 0$ (3.2)

ここに,g=(1+k)/3,pt=at/(B·D),pm=am/(B·D),d1=d/D, Zd1=Zd/D,S1=(1/2-Zd1), d,Zd: 図-11参照

(3.2)式の第一項に(2.2)式を代入してXn1について整理 すると(4)式が求められる。

$$X_{n1} = \frac{\{6/(1+k)\} \cdot [\cdot S_1 - \{p_t \cdot (d_1 - Z_{d_1}) + p_m \cdot S_1\} \cdot y/c_B]}{[\{6/(1+k)\} - 2] \cdot \{-(p_t + p_m) \cdot y/c_B\}} (4)$$

一方,ヒンジの残留回転角 res は(5.1)式で表される。 (2.2)式を cについて整理して(5.1)式に代入し, res に ついて整理すると(5.2)式が求められる。これに(4)式によ り求まる Xn1を代入して残留回転角 res が求まる。

$$res = c^{*} Lp/Xn = c^{*} (Lp/D)/Xn1$$
 (5.1)

$$\frac{2\{-(p_t+p_m)\cdot y/c_B\}\cdot (Lp/D)}{Ec/c_B\cdot k\cdot Xnl^2}$$
(5.2)

5.3 評価式の適用範囲と主筋が圧縮降伏する条件

res = -

(5.2)式は,引張降伏した引張鉄筋と中段鉄筋が軸力により圧縮降伏することを前提にしている。このためには(4) 式のXn1が存在する必要があり,0<Xn<1-Zdlを満足する必要がある。この条件に(4)式を代入して について整理 すると,(5.2)式の適用できる の範囲は(6)式で表される。



$$\frac{U \cdot y}{S_{1} \cdot c_{B}} < < \frac{3 \cdot (y/c_{B}) \{ U - (p_{g}/3 \cdot c) \}}{3S_{1} \cdot c - 1}$$
(6)

 $\Box \Box | \Box$, U = pt·(d1-Zd1)+pm·S1

5.4 除荷後に曲げ圧縮域で抵抗しない範囲の距離Zd

最大経験回転角時に曲げ圧縮域のコンクリートで圧縮ひず みが一定の値を上回った範囲は,残留回転角が決定する時に は圧縮抵抗しないものとする。その範囲の距離をZdとする。 図 - 13に想定する最大経験回転角時の変形と応力状態を示す。 引張鉄筋と中段筋は引張降伏し,圧縮鉄筋は圧縮降伏して いるとする。その一定のひずみをa・c Bとし,aは1.0以上 とする。c Bはコンクリートの圧縮強度時のひずみである。 図 - 14に仮定するコンクリートの応力 - ひずみ関係を示す。 コンクリート圧縮合力 Cc は(7)式で表される。

$$Cc = 2/3 \cdot c \quad B \cdot B \cdot Xn \cdot c \quad B/c + c \quad B \cdot B \cdot Xn \cdot (c - c \quad B)/c$$
(7)

最大経験回転角 maxとXnの関係は(8.1)式で表され, それをXnについて整理して(7)式に代入するとCcは(8.2) 式で表される。 cは圧縮縁のひずみ cを Bで除した比 である。 cについて整理すると(8.3)式となる。

 $max = c \cdot Lp/Xn = c \cdot (Lp/D)/Xn1$ (8.1)

$$C_c = A \cdot (c - 1/3) / max$$
 (8.2)

$$c = Cc \cdot max/A + 1/3$$
 (8.3)

ここに, A = с в. В. Гр. с в

引張鉄筋の引張合力rTy,中段筋の引張合力rTmy,圧縮鉄筋の圧縮合力rCyは(1.2)式と(1.3)式と同様に表される。 断面内の軸力方向の釣り合いよりCcは(9)式で表され, これを(8.3)式に代入すると。が求まる。

$$Cc = rTy + rTmy + N - rCy$$
(9)

曲げ圧縮域において圧縮ひずみが a・c вを上回った範囲の距離がZdとなり,(10.1)式で表される。この時のXnは(10.2)式で表される。今回の計算では a は 1.0 とした。

$$Zd = X n(c - a)$$
 (10.1)

$$Xn = Lp \cdot c \cdot c \quad B / \max$$
 (10.2)



図 -14 応力 - ひずみ関係 図 -15 想定する変形機構

5.5 柱の変形角Rとヒンジの回転角

図 - 15に想定する変形機構を示す。変形角Rは(11.1)式のようにヒンジの回転角 による変形と非ヒンジ領域の変形 。の 和を柱長さで除したものとする。 について整理すると(11.2) 式になる。 。は(11.3)式のように曲げ変形で近似する。

$$R = /h_0 = \{ (h_0 - L_p/2)^{\bullet} + o \} / h_0$$
(11.1)

$$=(- o)/(ho-Lp/2)$$
 (11.2)

$$\Box \Box I_{z}$$
, $o = Q_{y} (ho - L_{p})^{3} / (12EI_{y})$ (11.3)

ho:柱の内法長さ,Lp:ヒンジ長さ

Qy: 柱のせん断力, EIy: 柱の曲げ降伏時剛性

5.6 残留変形角の計算の手順と計算結果

かったため,材料試験値の90%とした。

まず復元モーメント比 が1.20以上であることまた軸力比 が(6)式を満たすことを確認する。つぎに(11.2)式により最 大経験変形 maxに対応する maxを計算して(10.1)式により Zdを計算する。つぎに(4)式によりXn1を計算して(5.2)式に より resを計算し,これを(11.1)式の に代入して残留変形 角Rresを計算する。今回は(5.2)式のEcを次のように設定した。

実験のNo.1ではヒンジ領域の損傷を抑制していないため 部材角が1/100rad. 以降ではコンクリートの圧縮破壊が顕 著になった。これを考慮して材料試験の実験値の50% とした。これはコンクリートの圧縮強度時の剛性に近い。 一方,No.2とNo.3ではヒンジ領域の損傷を抑制してお りコンクリートの損傷も大変形域までほとんど生じな

実験では復元モーメント比 を 0.32 から 1.49 の間で設 定している。今回の評価の対象は,引張鉄筋が引張降伏後 に復元モーメントにより圧縮降伏し,塑性回転角が減少す る場合である。この場合には を(6)式を満足させる必要 がある。残留変形角を1/400rad.程度に抑制する観点では を少なくとも 1.20 以上にする必要がある。

図 - 16から図 - 18(a)(b)に残留変形角(Rres) - 最大経験 変形角(Rmax)関係の計算結果と実験結果を比較して示す。 それぞれ を1.25,1.49とした場合である。実験値は正加力 と負加力および正加力と負加力の残留変形角の平均値の 3種類である。実験値に正負である程度のバラツキがあるが, No.1とNo.2では計算値は実験値をほぼ推定している。



図 - 16,17,18(c)には を0.32から1.49の間で変化させた 実験の平均値の結果と計算結果(=1.25,1.49)を比較して 示している。実験結果でも が1.2より小さくなると残留 変形角が大きくなる。

図 - 19 に計算による No.2 の残留変形角と の関係を最 大経験回転角ごとに示す。 が 1.2 より小さくなると残留 変形角が急増することが確認できる。

No.3試験体では3章で述べたようにNo.3ではPC鋼棒に よりプレストレス力を導入している。この場合,変形角 に伴ってPC鋼棒の張力が増大して柱の軸力が増大する。 このため,最大経験回転角時の状態で決めるZdと残留回 転角時の res に,その増加量を考慮する必要があるが, 今回の計算では考慮しなかった。No.3では を1.25と1.49 とした場合しか実験を行っていない。計算結果はNo.2と 同じである。実験値は計算値より小さくなるが,残留変形 角を抑制する観点からすると,PC鋼棒の軸力の増加分を 無視して安全側で評価しても良い結果になっている。

6.まとめ

損傷と残留変形角を抑制するRC柱の残留変形角の評価 式を誘導するために曲げ解析を行い,残留変形角を評価す る力学モデルと基礎式および計算手順を提案した。以下 のことが明らかになった。

- (1)柱の残留変形角が決定する条件は、除荷時にヒンジ領域における、軸力による復元モーメント Mn と最大経験角時に引張降伏していた引張鉄筋が圧縮抵抗して負担するモーメント sM が等しくなることである。
- (2)最大経験角時に引張降伏していた引張鉄筋を除荷時に 圧縮降伏させて残留変形角を1/400rad.程度に抑制する ためには少なくとも,最大耐力時で定義される復元 モーメント比を1.2より大きくする必要がある。
- (3)提案した計算方法で最大経験角や復元モーメント比の変化に伴う残留変形角の変化傾向を定性的に表現できた。 今後は,仮定した諸値の妥当性の検証と,残留変形角の簡便的な評価式を誘導する必要がある。

本研究は平成21年度科学研究費補助金(基盤研究C, 代表者:塩屋晋一)によるものである。

参考文献

- 1) 佐々木泉,塩屋晋一,栗野史典,廣田賢史:復元モーメント に着目する RC 柱の地震後の残留変形抑制に関する実験, コンクリート工学年次論文集 Vol.31, No.2, pp.145-150,2009
- 2) 平石久廣:降伏機構分離型鉄筋コンクリート造の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) pp.89-90,2003.9