変動軸力を受ける RC 柱の二軸復元力特性に関する実験研究

EXPERIMENTAL STUDY ON TWO-DIMENSIONAL RESTORING FORCE CHARACTERISTICS
OF R/C COLUMNS UNDER VARYING AXIAL FORCE

瀧口 克己*, 西村 康志郎**, 平井 慶一***

Katsuki TAKIGUCHI, Koshiro NISHIMURA and Keiichi HIRAI

This is an experimental study to understand two-dimensional restoring force characteristics of R/C columns under varying axial force based on consideration of analogy to the theory of plasticity. Four identical specimens were subjected to cyclic lateral load and varying axial force. Based on the test results, analogy to the theory of plasticity, and evaluation of rigidity degradation are studied. As the test results, when deformation increment vectors lie in the direction of loading on the condition that the columns yield, it can be said that plastic deformation increments calculated by experimental data and the plastic theory agree with the flow rule in direction. Elastic rigidity degrading ratio calculated by using the theory of plasticity and experimental data as numerical results agree with test result increases gradually during loading stage as stress decreases along the yield surface. On the other hand, when deformation increment vectors turn to the direction of unloading, stress increment vectors are widely different from vectors of elastic assumption. Rigidity degradation ratio on unloading stage of the column subjected to cyclic lateral loading under constant axial force decreases as cycles are repeated and lateral deformation increase, and shows tendency to be constant as more cycles are repeated.

Keywords : *R/C column, theory of plasticity, analogy, loading and unloading, rigidity degradation*
RC 柱, 塑性論, 類似性, 負荷・除荷, 剛性低下

1. 序

地震等により多軸応力状態にある RC 構造物及び部材の非線形復元力特性を把握するため, 塑性論に基づくアナロジーモデルで解析する研究がこれまで数多くなされてきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。しかし, 塑性論に基づいたアナロジーモデルでの解析の適応性について, 特に軸力に関する軸を含む問題においては, 十分な検討がなされているとはいえない。筆者らは簡単な断面モデルを用いて断面モデルの非線形挙動と塑性論との類似性の検討を行った⁵⁾。断面モデルの材料特性を引張応力を負担しない剛塑性として軸力一定の条件下で解析を行った結果, 単調な変形履歴に対して完璧な一致をみる仮説も, 繰り返し変形履歴を与えれば結果が大きく異なる仮説となりうることを示した。この問題は繰り返し変形履歴において降伏後に負荷や除荷が繰り返されることで生じるため, これを解決するには降伏後の負荷及び除荷における多軸復元力特性を把握する必要がある。降伏後の負荷及び除荷での復元力特性は, 一定軸力だけでなく軸力が変動することも考慮することが望ましい。断面モデルはコンクリートをモデル化したものと言え, RC 構造物・部材でもこの問題を考慮すべきである。また, RC 構造物・部材の多軸復元力特性を塑性論に基づいたアナロジーモデル解析で完全に記述することは非常に困難であるが, 塑性論の利用が可能である範囲や条件を明確にし, 目的に応じて使い分けることができれば, 塑性論によるアナロジーモデルでの

解析は有用な手段となりうる。本論文は, 変動軸力を受ける RC 柱の二軸復元力特性に着目し, 高軸力及び引張軸力を除いた軸力比 0 ~ 0.5 の範囲で, 変動軸力と繰り返し曲げせん断力を受ける RC 柱の実験結果と塑性論との類似性を検討することで, 降伏後の負荷及び除荷における二軸復元力特性を把握することが目的である。

2. 実験概要

2.1 試験体及び加力装置

試験体リスト・コンクリートの力学特性を Table 1 に示す。試験体は計 4 体であり, 試験体名は [CBS: 圧縮曲げせん断] - [V: 変動軸力を含む, C: 一定軸力] - [加力時の軸力変動回数] の形で表している。Fig. 1 に試験体図を示す。各試験体とも柱断面 $b \times D = 150 \times 200\text{mm}$, クリアスパン $L = 800\text{mm}$, せん断スパン比 $L/2D = 2.0$, コンクリート圧縮強度 $\sigma_b = 300\text{kgf/cm}^2$ 級で共通である。コンクリート圧縮強度及び引張強度は, 試験体と同一バッチのコンクリートで作製したシリンダー供試体の圧縮試験及び割裂試験により得られた。試験体およびシリンダーの養生は, 打設後 7 日間は型枠内で湿潤養生し, その後型枠を外して実験工場内で気中養生を行った。Table 1 の材令は打設から載荷日までの日数で, 載荷に 2 日間かかったことを示している。鋼材の力学特性を Table 2 に示す。主筋には異形鉄筋 D13 を使用し, 両端を加力用スタブ内の定着板にアーク

* 東京工業大学 教授・工博
** 東京工業大学 大学院生
*** ㈱竹中工務店

Prof., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology
Takenaka Corporation

Table 1 Dimensions of Specimens and Mechanical Properties of Concrete

Name of Specimen	Section b x D (mm)	Length of Clear span (mm)	Main Reinf. P _g (%)	Shear Reinf. P _w (%)	Concrete		
					Age of Concrete (days)	Compressive Strength σ_B (kgf/cm ²)	Splitting Tensile Strength σ_T (kgf/cm ²)
CBS-V-3	150x200	800	4-D13 1.72	6 ϕ @40 0.94	28-29	293.2	29.0
CBS-V-9					35-36	286.9	28.9
CBS-V-24					28-29	303.8	26.5
CBS-C					35-36	304.6	26.2

Table 2 Mechanical Properties of Reinforcements

	Deformed Bar 13 ϕ	Round Bar 6 ϕ
Nominal Diameter (mm)	12.7	6.0
Actual Diameter (mm)	-	6.0
Yield Strength (kgf/mm ²)	37.7	36.7
Tensile Strength (kgf/mm ²)	56.2	48.0
Young's Modulus (kgf/mm ²)	1.75×10^4	1.96×10^4
Classification of Test Piece (JIS Z2201)	No.2	No.2

Fig. 1 Details of Specimen **Fig. 2** Loading Setup

溶接することで端部との定着を確保した。せん断補強筋には6 ϕ 丸鋼を使用した。本会規準⁶⁾及び指針⁷⁾を適用し、曲げ耐力よりせん断耐力が高くなるように、せん断補強筋間隔を40mmとした。

Fig. 2に加力・変形測定概念図を示す。加力方法は変動軸力を含む繰り返し曲げせん断である。油圧ジャッキで軸力及び試験体両端部の回転を与えた。油圧ジャッキは、油圧シリンダーと油圧ポンプをホースで接続した構造となっている。測定した項目は、ロードセルによる軸力及び左右油圧ジャッキのビームへの加力、変位形による材長変位及び部材端部回転角である。

2.2 加力計画

Fig. 3に各試験体の加力計画を示す。縦軸は部材端部回転角 (R) 及び軸力比 ($N/bD\sigma_B$) であり、横軸は载荷過程の時間的な流れを示している。図中の番号は、軸力変動の始点及び終点、回転角の作用方向が逆転する点を表している。図中の実線は加力あるいは変形を制御していることを、破線は加力あるいは変形を制御していないこ

(a) CBS-V-3

(b) CBS-V-9

(c) CBS-V-24

(d) CBS-C

Fig. 3 Loading Plans of Test

とを示している。いずれの試験体においても、強制回転角を与えていたときは軸力を一定に保ち、軸力変動中は軸力のみを制御して回転角は制御しなかった。ここでの制御とは、ポンプを操作することで、油圧ジャッキによる加力あるいは変形を意図的に変化させる、あるいは一定に保つことを意味している。制御しないということは、ポンプの操作を止め、ポンプによる油圧シリンダーからの油の出入りをなくすことを意味する。この時、油圧の変化がもたらすホースの体積変化による油圧シリンダーからの油の出入りがあるため、ジャッキの変位を完全に止めることはできない。ジャッキの変位とは、油圧シリンダーのピストンの変位である。しかし、後述する実験結果を見れば明らかであるが、軸力変動中(回転角を与えるジャッキを制御しない過程)において、回転角を与えるジャッキに作用する力が零になる、あるいは逆向きになるといった大きな力の変動はないので、ホースの体積変化によるジャッキの変位は許容することにした。したがって、軸力変動中においては、回転角を与えるジャッキの油圧と試験体の復元力が釣り合った時のジャッキの力と試験体の回転角を測定することになる。

CBS-V-3, CBS-V-9においては、初期軸力比($N/bD\sigma_B$)約0.125まで軸力を与えた後、強制回転角を与えた。その後、軸力比約0.0625, 0.375, 0.4375となる軸力へ強制変動させ、それぞれの軸力の下で強制回転角を与えた。軸力の変動は柱に作用させるせん断力がRC柱の部材端部(危険断面)における累加強度に到達した後にいった。累加強度は、コンクリートを $k\sigma_B$ の圧縮強度の剛塑性体、鉄筋を σ_y の圧縮及び引張強度の剛塑性体とし、断面の平面保持を仮定して、累加則を用いて算出した²⁾。 σ_B 及び σ_y は材料実験より得られた値で、 k の値は1.0とした。軸力変動回数は、CBS-V-3では軸力増加が2回と減少が1回、CBS-V-9では軸力増加が5回と減少が4回である。CBS-V-24においては、初期軸力比約0.30まで軸力を与えた後、強制回転角を与えた。その後、軸力比約0.15, 0.45となる軸力へ強制変動させるが、強制回転角は軸力比0.30の軸力下でのみ与えた。軸力の変動は柱に作用させるせん断力が柱の累加強度に到達する前及び到達した後にいった。軸力変動回数は、軸力の増加一減少一増加あるいは減少一増加一減少の3回の変動を1セットとし、柱に作用させるせん断力の累加強度への到達前後にそれぞれ4セットずつ計24回の変動を与えた。CBS-Cでは、初期軸力比約0.30まで軸力を与えた後、一定軸力下で4サイクルの繰り返し強制回転角を与えた。CBS-V-3, CBS-V-9, CBS-V-24において、変動させる軸力の範囲は、通常時に柱に作用する軸力を軸力比0.25~0.30としたとき、500~700galの大きめな上下方向加速度を想定し、上下方向それぞれに500~700galの加速度に相当する軸力とした。

3. 実験結果

実験結果は、実験での装置座標系から Fig. 4(a)に示す直交座標系に変換した力と変位で評価する⁹⁾。力はその成分をせん断力(Q)及び軸力(N)とし、変位はその成分を水平変位(δq)及び軸方向変位(δn)とする。Fig. 5に、各試験体の実験結果を示す。軸方向変位及び軸力は圧縮側を正とする。図中の×印は、部材の耐力が急激に低下して、本実験において変位及び力のデータの測定が不可能となった点を示している。ここでの測定不可能とは、力及び変位の変化の速さに測定がついていけないことを意味している。Q-N図に

Fig. 4 Coordinates

については×印までの実験結果を示している。Fig. 5のQ-N図の破線は、2.2 加力計画で記したRC柱危険断面でのM-N平面上の累加強度曲線をQ-N平面上に変換したものである。コンクリートの圧縮強度には σ_B を用いた。累加強度曲線をM-N平面上からQ-N平面上に変換するとき、モーメント(M)をシアスパン($L/2$)で除した値をせん断力(Q)とした。Q-N図に示すように、CBS-V-3とCBS-V-9では4つの異なる軸力比において軸力を一定に保ちながら繰り返し水平変形を与え、軸力変動は柱に作用する力が累加強度曲線に到達した後にいった。CBS-V-24では、1つの軸力比において軸力を一定に保ちながら繰り返し水平変形を与え、軸力変動は柱に作用する力が累加強度曲線に到達する前後の両方で行った。なお、本論文では、RC柱に作用する力が累加強度に到達することを降伏と定義する。Q-N図の累加強度曲線にはP-Δ効果が考慮されていないため、降伏条件として前述のようにして得た累加強度曲線を用いる場合、Fig. 4(a)の直交座標系よりも(b)の部材座標系でせん断力を評価したほうが適当である。しかし、本論文ではRC柱降伏後の軸力変動に着目しており、降伏条件付近で軸力を変動させるときのせん断力(Q)に対するP-Δ効果、すなわちFig. 4(a)の Q に対する Q とFig. 4(b)の Q_m との差は最大で1.8%程度である。したがって、本論文で着目している範囲でのP-Δ効果の割合は小さいことと、直交座標系のほうが建物全体の変位を考慮する場合に有利であることを理由に、直交座標系の Q と N を評価するための降伏条件に前述のようにして得られた累加強度曲線を用いた。また、累加強度曲線をM-N平面上からQ-N平面上に変換するとき、モーメントをシアスパン($L/2$)で除した値をせん断力としており、軸方向変位を考慮していないが、部材長さ(L)に対する軸方向変位は本実験で最大0.75%程度なので、Q-N平面上の累加強度曲線を求めるときには軸方向変位は無視した。

柱の降伏後の軸力減少と増加を比較すると、水平及び軸方向の変位の変動量は共に軸力減少の過程のほうが大きい結果となった。柱の降伏後の軸力減少で変位が大きく進むのは、柱の降伏状態が持続することで、塑性変位が大きくなるためだと考えられる。CBS-V-3では軸力を減少させた後はせん断力を除荷したが、CBS-V-9では軸力減少後に軸力を増加させ、その後軸力を一定に保ちながらせん断力を与えて水平変位をさらに進ませ、柱が再び降伏した後、軸力を減少させた。そのため、Fig. 5の δq - δn 図に示すように、CBS-V-3よりもCBS-V-9のほうが変位履歴の範囲は広がった。降伏後の軸力減少による塑性変位の増大は残留変位にも影響する。CBS-V-24及びCBS-CのQ- δq 図に示すように、せん断力を完全に除荷した時の残留水平変位は変動軸力を含むCBS-V-24のほうが大きく、 δq - δn 図でCBS-V-24の変位履歴はサイクルを重ねる度に右に移動している。また、CBS-V-24とCBS-Cの

Fig. 5 Test Results

$Q-\delta q$ 図で耐力低下が大きくなる点のせん断力と水平変位について、せん断力はいずれの試験体も 7.5tf 程度で変動軸力による影響はなく、水平変位は CBS-V-24 で 9.7cm, CBS-C で 8.0cm 程度で変動軸力による影響と言えるほどの大きな差ではなかった。

4. 軸力変動中の力及び変位の挙動

軸力減少と軸力増加の過程の力及び変位の挙動について考察する。Fig. 6 は、Fig. 5 の実験結果での軸力変動の過程を拡大したものである。それぞれの試験体について、上側に水平変位—軸方向変位関係、下側にせん断力—軸力関係を示している。図中の破線は累加強度曲線、番号は Fig. 3 の番号と一致している。図中の○と△印については後述する。

4.1 軸力減少の過程

柱の降伏状態で軸力を減少させると、軸方向変位は減少し、力は累加強度曲線に沿って移動した。水平変位は、正の場合は増加、負の場合は減少した。この過程は、図中の CBS-V-3 : ③→④, CBS-V-24 : ③→④, ⑨→⑩, CBS-V-9 : ③→④, ⑥→⑦, ⑨→⑩, ⑭→⑮であり、試験体や軸力の変動時期に関わらず、同様な挙動が見られた。この場合の変位増分方向は負荷方向⁹⁾と考えられ、力が累加強度曲線上を移動することから、試験体は降伏状態を継続していると言える。水平変位、軸方向変位、せん断力、軸力の 4 成分のうち、軸力のみを制御したにも関わらず、比較的安定した変位及び力の挙動を示したのは、柱が降伏状態を継続したためと考えられる。

4.2 軸力増加の過程

柱の降伏状態で軸力を増加させた場合、軸方向変位は増加するが、水平変位とせん断力の応答は次の 3 つのケースに分けられる。せん断力及び水平変位が正の場合に、水平変位が減少してせん断力が増加するケース (case 1), 水平変位が減少してせん断力も減少するケース (case 2), 水平変位が増加してせん断力が減少するケース (case 3) の 3 つである。せん断力及び水平変位が負の場合は case 1, 2, 3 でのせん断力及び水平変位の増加と減少が逆となる。case 1 の過程は Fig. 6 の CBS-V-3 : ①→②, CBS-V-9 : ①→②, ④→⑤, ⑦→⑧, ⑮→⑯で、case 2 は Fig. 6 の CBS-V-24 : ①→②である。case 1 及び case 2 では水平変位が正の場合は減少、負の場合は増加しているが、これは軸力を増加させることで RC 柱の水平方向の剛性が高くなることが原因と考えられる。せん断力の増減に関しては、次のように考えられる。Fig. 7 は平面保持を仮定した部材端部断面の歪分布を示しており、破線が軸力増加前で実線が軸力増加後とする。case 1 では軸方向変位が負の値なので(a)のような状態と仮定でき、コンクリートは引張応力をほとんど負担しないため、増加した軸力は断面の重心 (g) に対して圧縮側に主に負担し、断面のモーメントが増加するので、せん断力も増加する。case 2 では軸方向変位がほぼ零 (CBS-V-24 : ①) なので(b)のような状態と仮定でき、断面の重心に対して引張側における増加した軸力の負担は case 1 よりも明らかに大きいので、断面のモーメントが減少して、せん断力が減少することが考えられる。case 3 の過程は Fig. 6 の CBS-V-3 : ⑤→⑥, CBS-V-24 : ⑥→⑦, CBS-V-9 : ⑫→⑬である。case 3 の過程では、CBS-V-24 : ⑥→⑦では水平変位が増加、CBS-V-9 : ⑫→⑬では水平変位が減少、CBS-V-3 : ⑤→⑥では

Fig. 6 Test Results during Varying Axial Force

Fig. 7 Strain Distribution of Column Section

前半において水平変位が増加した。これらの過程では、 $Q-N$ 図に示すように、力の挙動が不安定である。CBS-V-3: ⑤→⑥と CBS-V-9: ⑫→⑬では、case 1 及び 2 と比べて軸方向変位の増加が大きいので、部材端部のコンクリートの劣化が進んでいるものと思われる。CBS-V-24: ⑥→⑦では、部材端部の劣化の程度は判断し難い。全ての軸力増加の過程に言えることだが、水平変位、軸方向変位、せん断力、軸力の 4 成分のうちの軸力のみを制御したことが力及び変位の挙動を不安定にさせる原因と考えられ、CBS-V-24: ⑥→⑦はそれが顕著に現れた過程の一つと言える。以上により、case 1 及び 2 での変位増分の方向は除荷の方向⁹⁾と考えられ、力は累加強度曲線の内側に移動した。case 3 では、部材端部のコンクリートの劣化や軸力変動の過程における加力制御方法が原因で、力及び変位の挙動が不安定なものとなったので、case 3 のデータは対象から外した。

5. 塑性論との類似性

実験結果と塑性論との類似性について検討する。柱の降伏後の負荷については流れ法則、降伏後の除荷については弾性の仮定に基づいた力の挙動と実験結果を比較する。実験データは、負荷については Fig. 6 に示した降伏後の軸力減少の過程全てを、除荷については case 1, 2 の過程と降伏後に軸力を一定に保ったまません断力を除荷させた過程を対象とする。

5.1 降伏後の負荷

Fig. 8 に降伏後の負荷の力増分 ($\{dP\}_{exp}$) 及び変位増分 ($\{d\delta\}_{exp}$) の実験値、塑性論に基づいて算出した弾性変位増分 ($\{d\delta^e\}_{cal}$) 及び塑性変位増分 ($\{d\delta^p\}$) の計算値をベクトルで示す。 $\{dP\}_{exp}$ と $\{d\delta\}_{exp}$ は Fig. 6 の○印から△印までを直線で結んだものである。 $\{d\delta^e\}_{cal}$ は、塑性論に従い、 $\{dP\}_{exp}$ と柱の初期弾性剛性 ($[E]$) より算出した。Fig. 8 の(b)に示す初期弾性剛性は、コンクリートと鉄筋のヤング係数及び本会規準⁹⁾に従って計算した等価断面面積と等価断面二次モーメントを用いて算出した。水平方向の剛性は、曲げ変形とせん断変形を考慮した、軸力 (N) が作用しない状態でせん断力 (Q) を作用させる時の弾性剛性である。軸力方向の剛性は、せん断力 (Q) が作用しない状態で柱を圧縮する時の弾性剛性である。コンクリートのヤング係数には、シリンダー圧縮試験から得られた応力-歪曲線の 1/3 割線弾性係数である $2.50 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 、鉄筋のヤング係数には材料の引張試験より得られた $1.75 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ を用いた。 $\{d\delta^p\}$ は $\{d\delta\}_{exp}$ から $\{d\delta^e\}_{cal}$ を差し引いて算出し、Fig. 8 に一点鎖線で表した。Fig. 8 は力の座標平面に変形の座標平面を重ねたもので、3 つの変位増分ベクトルの始点は力増分ベクトルの始点に重なっている。流れ法則は塑性論の 1 つの概念であり、これに従うと塑性変位増分の方向は降伏曲線の法線方向となる。ここでは、図中の破線の累加強度曲線を降伏曲線と考える。Fig. 8 に示すように、 $\{d\delta^p\}$ の方向は、降伏曲線とはほぼ垂直であり、Fig. 6 に示した降伏後の軸力減少過程全てにおいて同様な結果が得られた。したがって、降伏曲線に力が到達した後、軸力が減少、変位が負荷の方向となる場合、力と変位の実験データ及び初期弾性剛性の理論値より得られた塑性変位増分の向きはほぼ降伏曲線の法線方向である点で流れ法則と類似する。

Fig. 8 Stress and Deformation Increment Vectors on Loading Stage

Fig. 9 Stress and Deformation Increment Vectors on Unloading Stage

5.2 降伏後の除荷

Fig. 9 に降伏後の除荷の力増分 ($\{dP\}_{exp}$) 及び変位増分 ($\{d\delta\}_{exp}$) の実験値、弾性の仮定に基づいた力増分 ($\{dP^e\}_{cal}$) の計算値をベクトルで示す。 $\{dP^e\}_{cal}$ は、 $\{d\delta\}_{exp}$ が弾性変位増分と等しいと仮定し、 $\{d\delta\}_{exp}$ と柱の初期弾性剛性の理論値より算出した。Fig. 9 の(a)及び(b)図は case 1, (c)図は降伏後に軸力を一定に保ったまません断力を除荷させた過程のものであるが、 $\{dP^e\}_{cal}$ と $\{dP\}_{exp}$ を比較すると、ベクトルの大きさ及び方向ともに大きく異なる。一定軸力下で繰り返し載荷を行った CBS-C の除荷では(c)図と同じ傾向が見られた。case 2 のものを示した(d)図では、 $\{dP^e\}_{cal}$

と $\{dP\}_{\text{exp}}$ を比較すると、ベクトルの大きさは異なるが方向はほぼ一致している。4.2 軸力増加の過程でも述べたように、case 2 では水平変位及びせん断力が共に減少しており、軸方向変位が零から正の方向へ変化した点が Fig. 9 の(a)(b)(c)図の場合と異なる。しかし、一定軸力下で曲げせん断力を与えて柱を降伏させた時の軸方向変位は、高軸力でない限り負（引張）の値であり、除荷での軸方向変位増分は必ずしも増加する方向とは限らないので、case 2 のように弾性を仮定した力増分ベクトルと実験値のベクトルの向きがほぼ一致するのは、軸力比 0～0.5 の範囲では非常に稀なケースである。したがって、RC 柱の降伏後の除荷では変位増分を弾性と仮定できないと言える。この原因は、RC 柱の除荷ではコンクリートに生じたひび割れが閉じる過程が存在し、ひび割れが閉じることで生じる歪に対して応力は発生しないので、除荷での変形には弾性ではない変形も含まれるからである。RC 柱の除荷において、軸方向に関する軸を含む多軸復元力特性を塑性論に基づいて定式化する場合、この弾性でない変形の評価が課題となる。

6. 剛性評価

6.1 負荷における二軸復元力特性の弾性剛性

RC 柱が降伏した後の負荷では、塑性変位増分の方向がほぼ降伏曲線の法線方向である点で流れ法則と類似することを示した。塑性論を用いて多軸復元力特性を定式化する場合、剛性の評価が問題となる。ここでは、力の降伏後の負荷の過程では二軸復元力特性を完全塑性と仮定する場合の弾性剛性について、降伏後の軸力減少過程の実験結果を基に検討する。二軸復元力特性を硬化を含まない完全塑性と仮定したのは、実験結果において、降伏後の軸力減少過程での力は降伏曲線に沿って減少し、降伏曲線の外側には移動しなかったからである。

対象となるデータは、降伏後の軸力減少の過程で、CBS-V-3：③→④、CBS-V-9：③→④、⑥→⑦、⑨→⑩、⑭→⑮、CBS-V-24：③→④、⑨→⑩であり、これらの過程の全てのステップから、力及び変位の挙動が不安定だった軸力減少開始直後のステップを除いたものである。二軸復元力特性の定式化に用いる、塑性論の基本式を以下に示す⁹⁾¹⁰⁾。

$$\{d\delta^p\} = d\lambda \cdot \left\{ \frac{\partial f}{\partial P} \right\}, \quad (d\lambda \geq 0) \quad (\text{流れ法則}) \quad (1)$$

$$\{d\delta\} = \{d\delta^e\} + \{d\delta^p\} \quad (2)$$

$$\{dP\} = [E_e] \cdot \{d\delta^e\}, \quad [E_e] = \gamma_{II} \cdot [E] \quad (3)$$

$$\{dP\} \cdot \{d\delta^p\} = 0 \quad (4)$$

弾性剛性 ($[E_e]$) は初期弾性剛性 ($[E]$) に弾性剛性低下率 (γ_{II}) を乗じたものとした。 $[E]$ は Fig. 8 の(b)に示すものと同じである。降伏曲線 (f) は RC 柱の累加強度曲線とした。累加強度曲線は、2.2 加力計画で記した RC 柱危険断面での $M-N$ 平面上の累加強度曲線を $Q-N$ 平面上に変換したものであるが、コンクリートの降伏強度 $k\sigma_b$ には、降伏後の負荷において対象となる実験データの最初のステップの力点が降伏曲線上にあるように k 値を決定した時の強度を用いた。累加強度曲線を $M-N$ 平面上から $Q-N$ 平面上に変換するとき、モーメント (M) をシアスパン ($L/2$) で除した値をせん断力 (Q) としている。 $\{d\delta\}$, $\{d\delta^e\}$, $\{d\delta^p\}$, $\{dP\}$ はそれぞれ変位増分、弾性変位増分、塑性変位増分、力増分のベクトルである。

Fig. 10 Rigidity Degradation on Loading Stage

Fig. 11 Rigidity Degradation on Unloading Stage

まず、(1)(2)(3)(4)式より $d\lambda$ が次式となる。

$$d\lambda = \frac{\{\partial f / \partial P\}^T \cdot [E] \cdot \{d\delta\}}{\{\partial f / \partial P\}^T \cdot [E] \cdot \{\partial f / \partial P\}} \quad (5)$$

次に、(1)(2)(3)式より次式を得る。

$$\{dP\} = \gamma_{II} \cdot [E] \cdot \{\{d\delta\} - d\lambda \cdot \{\partial f / \partial P\}\} \quad (6)$$

(6)式の $\{d\delta\}$ に実験値 $\{d\delta\}_{\text{exp}}$ を、 $d\lambda$ に(5)式を代入して得られる力増分ベクトルを $\{dP\}_{\text{cal}}$ とし、力増分の実験値 $\{dP\}_{\text{exp}}$ と $\{dP\}_{\text{cal}}$ の大きさが同じになるような γ_{II} を各ステップごとに算出した。各ステップで生じる計算値の誤差は降伏曲線の中心に向かうベクトルによって補正し、力点が常に降伏曲線上にあるようにした。その結果、Fig. 10 の(a)に示すように実験結果と計算値は一致する。Fig. 10 の(b)に算出した γ_{II} と軸力 (N) の関係を示す。 γ_{II} は、力が降伏曲線に沿って軸力が減少する方向へ移動するにつれて増加する傾向がある。軸力が約30tfから5tf、軸力比で約0.35から0.065程度まで減少すると、 γ_{II} は約0.35から0.6程度まで増加した。軸力比 0～0.5 の範囲で塑性論を用いたアナロジーモデルの解析を行う場合、降伏曲線に沿って軸力が減少する方向へ力が移動すると、弾性剛性が変化することを考慮する必要がある。

6.2 一軸復元力特性の除荷剛性

軸力に関する軸を含まない二軸曲げ問題では、一軸復元力特性がモデル化できれば、それを二軸に拡張する方法を採ることができる。繰り返し載荷における一軸復元力特性のモデル化では、降伏後の除

荷における剛性低下の評価が一つの課題である。ここでは、一定軸力下で水平方向の繰り返し載荷を行った CBS-C の実験結果を基に、水平方向の一軸復元力特性について、降伏後の除荷剛性を検討する。除荷剛性の評価は、弾性剛性に対する実験結果から得られる除荷剛性の低下率 γ_1 を用いて行う。弾性剛性は最大せん断力の実験値に対する1/3割線弾性係数で、除荷剛性の実験値は各ステップのせん断力増分を水平変位増分で除したものである。1/3割線弾性係数に低下率 γ_1 を乗じたものが、除荷剛性の実験値と一致するように γ_1 を算出した。Fig. 11 に水平変位 (δq)—除荷剛性低下率 (γ_1) の関係を示す。Fig. 11 には、降伏後の除荷開始から逆方向の再負荷に転じるまでの各ステップの γ_1 を各サイクルごとに示している。このうち、力の挙動が不安定であった除荷開始直後のステップは除いている。Fig. 11 の実線は、せん断力が 7, 5, 3, 1tf のときの γ_1 を実験結果より算出し、それぞれのせん断力における γ_1 値を結んだものである。それぞれサイクルにおいて、 γ_1 は水平変位が減少するについて減少している。せん断力が 7, 5, 3, 1tf のときの γ_1 値を結んだ 4 つの実線は、サイクルを重ねて水平変位が増加するにつれて減少し、次第に一定の値となる傾向を示している。

7. 結

RC 柱に変動軸力と繰り返し曲げせん断力を作用させる実験を、高軸力及び引張軸力を除いた軸力比 0 ~ 0.5 の範囲で行った。実験中、軸力の増加あるいは減少の過程では軸力のみを制御し、せん断力、水平変位及び軸方向変位は制御しなかった。実験結果を基に塑性論との類似性及び剛性評価について検討し、本実験の範囲で以下の結論を得た。なお、力はその成分をせん断力及び軸力とし、変位はその成分を水平変位及び軸方向変位とする。RC 柱の累加強度曲線を降伏曲線と仮定する。

- 1) 降伏曲線に力が到達した後、軸力が減少、変位が負荷の方向となる場合、力が降伏曲線に沿って移動し、力と変位の実験データ及び初期弾性剛性の理論値より得られた塑性変位増分の向きはほぼ降伏曲線の法線方向である点で流れ法則と類似する。
- 2) 降伏曲線に力が到達した後、軸力が増加、変位が除荷の方向となる場合、力は降伏曲線の内側に移動するが、変位増分を弾性と仮定し、変位増分の実験データ及び初期弾性剛性の理論値より得られた力増分は、大きさ及び方向ともに実験結果と大きく異なる。
- 3) 降伏曲線に沿って軸力が減少する方向へ力の点が移動する場合、軸力減少中の復元力特性が完全塑性である仮定及び弾性剛性が初期弾性剛性の理論値に弾性剛性低下率を乗じたものである仮定に基づくと、塑性論を用いて力及び変位の実験データより算出した弾性剛性は変化する。軸力比で約 0.35 から 0.065 程度まで軸力が減少したとき、弾性剛性低下率は約 0.35 から 0.6 程度まで増加した。
- 4) 一定軸力下で繰り返し水平変位を与えた RC 柱の一軸復元力特性において、最大せん断力の実験値に対する 1/3 割線弾性係数に除

荷剛性低下率を乗じた値が除荷剛性の実験値と一致するように除荷剛性低下率を算出した場合、各サイクルにおける同じせん断力での除荷剛性低下率は、サイクルを重ねて水平変位が増加するにつれて減少するが次第に一定となる傾向を示した。

参考文献

- 1) H. Takizawa and H. Aoyama: Biaxial Effects in Modelling Earthquake Response of R/C Structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 4, pp523-552, 1976
- 2) 芳村 学, 青山博之, 川村 満: 2 方向外力を受ける鉄筋コンクリート構造物の解析 その 1 2 軸曲げを受ける RC 柱の解析, 日本建築学会論文報告集, 第298号, pp.31-41, 1980.12
- 3) 福澤栄治, 磯崎 浩, 高橋元美: 柱の変動軸力を考慮した RC 造骨組の弾塑性解析 その 1 解析法と芯筋柱の構造実験解析, 日本建築学会構造系論文報告集, 第372号, pp.31-44, 1987.2
- 4) 磯崎 浩, 福澤栄治, 高橋元美: 柱の変動軸力と 2 軸曲げモーメントを考慮した RC 造立体骨組の弾塑性地震応答解析 その 1 解析法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第441号, pp.73-83, 1992.11
- 5) 瀧口克己, 高 智龍, 西村康志郎: 構造物の二次元非線形復元力特性と塑性論との類似性, 日本建築学会構造系論文集, 第525号, pp85-91, 1999.11
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1998
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, 1990
- 8) 瀧口克己, 市ノ瀬敏勝, 神沢宏明: 丸鋼を用いた鉄筋コンクリート柱の変形挙動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第349号, pp.59-70, 1985.3
- 9) W.F. Chen: Constitutive Equations for Engineering Materials, Vol. 2, Elsevier, 1994
- 10) 日本建築学会: 多次元入力地震動と構造物の応答, 1998

注)

累加強度は、RC 柱のような異種材料による複合断面の曲げ強度を求める場合によく用いられる。その方法は、各材料の応力—歪関係を剛塑性とし、各材料断面ごとに独立に、断面の平面保持の仮定を用いてモーメント (M)—軸力 (N) 平面上に耐力曲線を考え、それぞれの材料断面に関して求めた耐力のあらゆる組み合わせのベクトル和を作り、 $M-N$ 平面上にあらゆる和ベクトルの包絡線を描き、これを耐力曲線 (累加強度曲線) とするものである。また、複合断面が 2 種の材料から構成される場合、各材料の応力—歪関係を剛塑性、複合断面全体で平面保持を仮定し、軸力の釣り合いから中立軸位置を決定して得られる曲げ強度曲線と、累加則を用いて得られる耐力曲線は一致することが文献 A-1) で証明されている。累加則の一般的な表現については文献 A-2) に記されている。

本論文では、RC 柱断面をコンクリート部分と鉄筋部分の 2 種の材料断面から成る複合断面と考えて累加強度曲線を求めている。コンクリートの長方形ストレスブロックの圧縮強度 $k\sigma_B$ を k の値で評価する場合、部材が圧縮曲げせん断力を受けると k 値が 1.0 以上となる^{A-3)}。本論文では、累加強度に達する前に部材の耐力が最大となる事態を避けるため、 k 値を 1.0 とした。

- A-1) 鈴木敏郎, 瀧口克己, 岡本哲美, 加藤征宏: SRC 部材の復元力特性に対するフープ筋の効果に関する実験, 日本建築学会構造系論文報告集, 第348号, pp61-74, 1985.2
- A-2) 瀧口克己, 長嶋俊雄, 伊礼朋次: 高強度材料を用いた小鉄骨 SRC 柱の繰り返し荷重下における耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第466号, pp155-163, 1994.12
- A-3) 瀧口克己, 今井和正, 溝渕知己: 圧縮曲げせん断を受ける R/C 柱端部コンクリートの圧縮強度, 日本建築学会構造系論文集, 第496号, pp83-90, 1997.6

(2000年5月10日原稿受理, 2000年8月30日採用決定)