繰返し水平力を受ける RC 柱及び SRC 柱の性能評価

EVALUATION ON PERFORMANCE OF RC COLUMNS AND SRC COLUMNS SUBJECTED TO REPEATED HORIZONTAL FORCE

内田 保博*¹, 古城 康彦*², 坊地 彰人*³, 三谷 勲*⁴, 有馬 冬樹*⁵

Yasuhiro UCHIDA, Yasuhiko KOJO, Akito BOCHI,

Isao MITANI and Fuyuki ARIMA

Since the strong horizontal force occurred in earthquake often causes cumulative damage such as the strength deterioration and the accumulation of deformation in structures and their members, the prediction of cumulative damage is needed in an aseismic design of structures. In this study, the critical axial force for convergence-axial displacement curves of RC and SRC beam-columns are proposed as a characteristic curve for repeated loading in order to predict the cumulative damage. Tests and analyses of RC and SRC beam-columns were carried out and it was found that the cumulative damage could be evaluated by the curves very well.

Keywords: Reinforced concrete, Steel reinforced concrete, Column, Bending failure, Shear failure, Axial force

鉄筋コンクリート、鉄骨鉄筋コンクリート、柱、曲げ破壊、せん断破壊、軸力

1. 序

大地震時における構造物の終局的な耐震安全性を保证するためには、構造部材の繰返し載荷時の挙動を把握するとともに、繰返し力に対する抵抗性能の評価法を確立しておく必要がある。1995年に発生した兵庫県南部地震では多くの構造物に損傷が見られ、耐力低下や変形の累積が生じたと思われる。設計の段階で地震の規模に対応してこれらの被害を想定しておくことが望まれるが、現在のところ累積損傷制御の観点から損傷を予測する方法については、十分に調べられていない。

構造物に繰返し変動荷重が作用して塑性化が生じるとき、その挙動は塑性解析の分野ではシェイクダウン、交番塑性及び漸増崩壊に分類されることが示されている。特に繰返し回数が増加してあるサイクル以降は弾性挙動をするシェイクダウンについては、多くの研究者により調べられてきた^{例えば1)}。一方定鉛直力と繰返し曲げを受ける鋼柱や鋼骨組の変形累積の定式化が、塑性解析とは別のアプローチにより、部材の荷重-変形関係における履歴を追うことにより行われた^{2)~7)}。加藤・秋山は繰返し加力下の構造物や部材の荷重-変形関係を、一方向加力下での荷重-変形から得るためのモデル

を提案している⁸⁾。定軸力及び漸増の定変位振幅繰返し水平力を受ける柱に非対称変形が生じる変位振幅の限界や非対称変形が定常化する限界は上谷ら^{9)、10)}により見い出され、各々対称限界及び定常状態限界と呼ばれている。繰返し加力時には、1方向単調加力時には見られない特有の現象及び挙動が存在する。羽倉¹¹⁾は繰返し曲げや繰返し水平力を受ける柱の解析により、漸増の塑性変形が生じる限界の荷重や変形として各々定義される安定限界荷重や安定限界変形が存在することを示している。また宇田川、高梨ら¹²⁾は、定常限界変位振幅を超えて繰返し載荷されると履歴曲線が非定常になり耐力低下が生じることを報告している。松井ら¹³⁾は定変位振幅や漸増振幅繰返し水平力を受けるSRC柱の解析や実験を行い、変形累積が収束し耐力低下が進行しない限界時の安定限界軸力について調べており、平石ら¹⁴⁾は繰返し載荷を受けるRC柱に、引張り鉄筋の伸びの上限点としての安定限界及び安定した履歴挙動を示す変形の限界が存在することを実験及び解析により明らかにしている。また衣笠ら¹⁵⁾は、RC部材が繰返し曲げを受けるとき、蓄積されるひずみが限界に達すると破壊が生じることや、耐力低下が生じるときに軸ひずみが増加から減少に転じ横方向のひずみが急増することを示して

*概要については、文献20)~27)にて発表している。

*¹ 鹿児島大学工学部建築学科 助教授・工博

*² 西松建設(株) 工修

*³ 安藤建設(株) 工修

*⁴ 神戸大学工学部建設学科 教授・工博

*⁵ 大和ハウス工業(株) 工修

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Kagoshima University, Dr. Eng.
Nishimatsu Construction Co., M. Eng.

Ando Construction Co., M. Eng.

Prof., Dept. of Construction, Faculty of Eng., Kobe University, Dr. Eng.

Daiwa House Industry Co., M. Eng.

いる。

本研究では、繰返し力を受ける構造物の変形累積挙動に鉛直力の大きさに応じて収束・発散挙動が存在し、これが構造物の耐力低下挙動等の累積損傷挙動に関連していることに着目して、繰返し加力時の累積損傷に対する抵抗性能を表わす特性曲線を得る方法を提示する。この特性曲線は、柱が繰返し水平力を受けるとき、各サイクルにおける最大軸変位がある値に収束するときの定軸力と収束時の軸変位の関係を連続的にプロットした曲線であり、本研究ではこれを収束限界軸力曲線と呼んでいる。そしてさらに、鉄筋コンクリート(RC)柱及び鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)柱の収束限界軸力曲線を実験及び解析により求めて、曲線による累積損傷予測の妥当性について検討する。

本研究の特色は、軸力と繰返し水平力を受ける柱に耐力低下や軸変形等の損傷が生じるとき、収束限界軸力曲線と呼んでいる特性曲線により損傷を予測することにある。すなわちこの特性曲線により、定軸力や変動軸力の下で繰返し水平力を受ける柱の損傷の収束・発散挙動や損傷の累積の程度を、作用する軸力と収束限界軸力曲線の関係から定性的に予測できるか否かについて調べることにある。上記の安定限界軸力¹³⁾や安定限界荷重¹¹⁾は、収束限界軸力曲線の極限点に相当すると考えられるが、理論解が得られないために数値計算により安定限界を求めていく一般的なケースでは、安定限界近傍の力学的挙動が示されないために、これらの安定限界荷重を用いて厳密に安定性を論じることは困難と思われる。

2. 収束限界軸力曲線

2.1 収束限界軸力曲線の定義

本研究で損傷の累積を予測するために提案された収束限界軸力曲線は、以下のように定義される。

図1は軸力 P と図2に示す定変位振幅 u_a の繰返し水平力 H を受ける片持ちRC柱及びSRC柱のモデルである。収束限界軸力とは、繰返し水平力を受ける柱の軸変位の初期値が基準点より大きくある値(図3において a で表示)より小さいとき、各サイクルにおいて累積する軸変位の最大値がある値に収束する限界の軸力 P_c であり(図3)、収束限界軸力と収束時の軸変位の最大値との関係を連続的にプロットした曲線を収束限界軸力曲線と呼ぶことにする。ここに基準点(Origin)とは、原点又は収束限界軸力曲線の反転点であり、基準点として原点をとる場合は原点から軸力が載荷されるときであり、原点より上の軸力に対して軸変位は正側に累積する。また反転点とは、軸力が変化して軸変位の累積方向が逆転するときの基準点であり、反転点より小さな軸力の下では軸変位の累積方向は逆転して図3に示すように負側に累積する。変動軸力を受ける柱の累積損傷を予測するために、軸力の変動に応じて反転点後の収束限界軸力曲線を用いることができる。以後、軸力-軸変位関係において、引張軸力および軸変位の伸びの符号を正とする。なお収束限界軸力曲線は、ある定軸力の下で定変位振幅の繰返し水平力を与えて収束限界軸力と軸変位を求めた後、順次軸力を増加させることにより得ることができる。しかしこの軸力を増加させる方法では、曲線の極限点を越えた後曲線を得ることが困難なので、次の2.2で示すように収束時の軸変位を順次増加させる軸変位制御により収束限界軸力曲線を得ることにする。

図1 片持ち柱

図2 水平変位履歴

図3 収束限界軸力曲線

図4 収束限界軸力曲線の導出

(a) RC断面

(b) SRC断面

図5 試験体 (単位: mm)

図6 実験装置

2.2 収束限界軸力曲線の導出方法

次に柱の収束限界軸力を得るための手順を以下に記す。

- 1) 収束して定常化した時の柱頭の軸変位の履歴を仮定して与える。
- 2) 与えられた軸変位の下で繰返し水平力を加える。
- 3) 2)の加力の過程で軸力が変動するが、定常化したときの変動軸力の最大値 $P_{\max}$ と最小軸変位の関係を表す曲線と最小値 $P_{\min}$ と最大軸変位の関係の曲線を図4に示す。変形の累積が正側に生じる P の正側では、変動する軸力の最小値 $P_{\min}$ (図4) が絶対値の最小値となり、これが収束限界軸力となる。一方変形累積が負側に進行する領域では、図4中の変動軸力の最大値 $P_{\max}$ が収束限界軸力となる。従って図4中の太線が収束限界軸力曲線になる。
- 4) 次ステップの収束時軸変位履歴を仮定して2)へ戻る。

なお4)で与える軸変位が増加から減少に転ずれば図4に示すように反転点が表れる。以後順次軸変位を減少させることにより、反転点後の収束限界軸力曲線を得ることができる。

上記の計算手順は、文献16)で提案した定理を図1のモデルに適用することにより得られる次の定理から導かれる。

「図1に示す片持柱が図2の定変位振幅の繰返し水平力と軸変位増分 $\{\Delta \delta_i\}$ を受けて定常化するとき、軸変位 $\{\delta_i\}$ に対応する変動軸力の最小値 $P_{\min}$ (図4) は、収束限界軸力と一致する。 $\{\delta_i\} + \{\Delta \delta_i\}$ の最大値は、収束時軸変位の最大値である。」
ただしこの定理は、与えられた $\{\delta_i\} + \{\Delta \delta_i\}$ の下での荷重－変形関係の履歴経路が、収束限界軸力の下で $\{\delta_i\} + \{\Delta \delta_i\}$ の最大値に変位が収束するときの履歴経路に一致するときのみ厳密に成立する。なお繰返し水平力と軸変位増分 $\{\Delta \delta_i\}$ を与えたとき軸力は一般に一定にならないが、収束限界軸力の下での正しい軸変位増分を与えたときは軸力は一定になる。

3. 軸力と繰返し水平力を受けるRC柱及びSRC柱の実験

3.1 試験体及び材料特性

図5に実験で用いたRC及びSRC柱試験体の形状及び寸法を示す。RC試験体及びSRC試験体の断面寸法は150mm×150mmとし、試験体数は帯筋間隔50mmを5体（せん断補強筋 $\rho_p=0.85\%$ 、RC1～RC3、SRC1、SRC2、曲げ破壊タイプ）、帯筋間隔100mmを3体

表1 実験パラメータ

Spec. No.	B (mm)	D (mm)	ℓ (mm)	h (mm)	F_c (kg/cm ²)	ρ_p (%)	x (mm)
RC1	149.2	151.2	750.1	549.4	412	0.85	50
RC2	149.0	153.1	751.7	550.0	339	0.85	50
RC3	150.1	152.1	751.0	548.7	407	0.85	50
RC4	150.6	150.5	749.7	549.9	446	0.43	100
RC5	150.3	150.6	750.6	549.3	401	0.43	100
RC6	151.7	151.6	749.2	549.1	420	0.43	100
SRC1	148.5	150.5	750.0	550.5	388	0.85	50
SRC2	149.0	149.8	748.3	552.5	378	0.85	50

B=width, D=depth of cross section

ℓ =length to the pin, h=height of column, F_c =compression strength of concrete
 ρ_p =hoop ratio, x=spacing of hoops

表2 鉄筋及び鉄骨の機械的性質

Materials		σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	δ (%)
Re-Bars	D-6	3.96	6.11	18.4
	D-10	3.56	5.22	20.2
	D-13	3.44	5.02	19.4
Steel H-75x75x3.2x3.2		3.73	4.6	20.6

σ_y =yield stress, σ_u =tensile strength, δ =elongation

表3 試験体の破壊形式と加力形式

Specimens	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	SRC1	SRC2
Failure Type	B	B	B	S	S	S	B	B
Loading Type	3	1	2	2	1	3	1	3

B: bending failure, S: shear failure

1: Test1(loaded with constant axial disp.)

2: Test2(loaded with variable axial disp.)

3: Test3 (loaded with constant axial force)

(a) 曲げ破壊タイプ

(b) セン断破壊タイプ

図7 RC柱の軸力-軸変位関係 (加力方法1)

図8 SRC柱の軸力-軸変位関係 (加力方法1)

(a) 曲げ破壊タイプ

(b) セン断破壊タイプ

図9 RC柱の軸力-軸変位関係 (加力方法2)

(a) 曲げ破壊タイプ

(b) セン断破壊タイプ

図10 RC柱の収束限界軸力曲線及び一定軸力下での損傷の累積

図11 RC柱の履歴曲線(曲げ破壊タイプ)

図12 RC柱の履歴曲線(せん断破壊タイプ)

図13 SRC柱の軸力-軸変位関係(加力方法2、3)

図14 SRC柱の履歴曲線

($p=0.43\%$ 、RC4~RC6、せん断破壊タイプ)の計8体とした。試験体RC4~RC6の終局せん断耐力の計算値は曲げ耐力を若干上回るが、帯筋間隔が広いことを考慮してこれらの試験体の破壊形式をせん断破壊とした。実験結果によると、これらの試験体には柱脚部のコンクリートにせん断クラックが入り、水平変位が制御不能となって耐力が急激に低下する等せん断引張破壊の特徴が現われた。主筋及び帯筋は、各々SD295のD10、D6であり、SRC試験体の内蔵鉄骨はSS400のBH-75×75×3.2×3.2mmの組立H形鋼である。表1に各試験体の実測寸法及びコンクリートの圧縮強度、表2に鉄筋及び鉄骨の機械的性質を示す。

3.2 実験方法

収束限界軸力曲線を求めるため、軸力と繰返し水平力を受けるRC柱とSRC柱の実験を行った。実験装置を図6に示す。試験体をロ型フレームに設置し、柱頭に30t油圧ジャッキによりRC柱では±10mm、SRC柱では±20mmの定変位振幅繰返し水平力(鉛直力であるが、表現の都合上軸力に対して水平力と呼ぶ)を加え、さらに軸力を100t油圧ジャッキにより軸力載荷用治具(ピン)を介して柱頭に加力した。水平加力治具の両端はピン支持としており、軸力加力治具は100t油圧ジャッキが移動できるように止端にスライド機構を挿入した。

本実験では、2種類の载荷を行い収束限界軸力を得た。まず試験体RC2、RC5、SRC1では、軸変位を一定に保ちながら繰返し水平力を3サイクル加えた後、さらに逐次軸変位を増加して载荷した(加力方法1:Test1)。このときの3サイクル目の変動軸力の最小値として逐次収束限界軸力を得た。また試験体RC3、RC4では、より厳密な曲線を得るために収束時軸変位 δ_u として一定値ではなく、前ステップの収束限界軸力の下での繰返し载荷の結果得られた軸変位の履歴曲線をもとに、仮定された軸変位を与えながら定変位振幅繰返し水平力を加えた(加力方法2:Test2)。これらによって得られた収束限界軸力の妥当性について検討するため、試験体RC1、RC6、SRC2では一定軸力下で繰返し水平力を加えて(加力方法3:Test3)、軸変形累積の収束・発散挙動を調べた。表3に各試験体の破壊形式及び加力形式をまとめて示す。

柱頭の水平変位はスタンドに設置した変位計により測定され、柱頭の軸変位は、柱頭及び柱脚間に設けられたスライド機構にとりつけられた変位計により測定された。

3.3 実験結果及び考察

実験によって得られた結果を図7~図14に示す。図6(a)、(b)は、加力方法1により得られた試験体RC2、RC5の軸力 p -軸変位 δ の関係である。加力方法1、2いずれにおいても、2サイクル目における変動軸力の最大値($p_{\max}$)かつ軸変位の最小値($\delta_{\min}$)を◇-◇、変動軸力の最小値($p_{\min}$)かつ軸変位の最大値($\delta_{\max}$)を○-○でそれぞれ示す。加力方法1においても、軸変位一定の制御にも拘らず、軸変位の最大・最小に多少の違いは生じる。収束限界軸力曲線(Critical Force for Conv.)は、これらの曲線の内側の実線で得られる。図8は、同じく加力方法1により得られた試験体SRC1の軸力 p -軸変位 δ の関係である。ここにRC柱の p は $F_c \cdot B \cdot D$ で規準化された軸力であり F_c はコンクリートの圧縮強度、 B 、 D は断面のせい及び幅である。SRC柱の軸力 p は(1)式で示される終局圧縮耐力¹⁷⁾で規準化されている。

(c) モデルA (SRC)

(d) モデルB (SRC)

図15 解析モデル

(b) コンクリート
図16 応力度-ひずみ度関係

$$P_u = \gamma_u F_c B D + \gamma_s \sigma_y a_s + \gamma_a \sigma_y a_a \quad (1)$$

$$\gamma_u = 0.85 - 2.5 \cdot (a_c / B D)$$

ここに a_s 及び a_a は各々鉄骨及び鉄筋の断面積、 σ_y 及び σ_y は各々鉄骨及び鉄筋の降伏応力度、 a_c は圧縮側フランジの断面積である。

図9(a)、(b)は加力方法2により得られた試験体RC3、RC4の軸力 p -軸変位 δ の関係である。図10(a)、(b)は加力方法3により得られた一定軸力下でのRC柱の軸力 p -軸変位 δ の関係を図7及び図9の○-○と◇-◇の曲線の内側の曲線(図3の太い曲線に相当)として得られる収束限界軸力曲線にそれぞれ重ね合わせたものである。図10では、軸力を一定に保った箇所を①~⑩、①~⑧にそれぞれ区分しており各区分の○-○、●-●は、各々変形累積が収束、発散したことを表わす。図11(a)、(b)は、各々図10(a)中の③、④で示される $p=0.18$ 、 -0.26 の一定軸力下でのRC柱の水平力 h -水平変位 δ_h 関係及び水平力 h -軸変位 δ の関係である。また図12(a)、(b)は図10(b)中の④、⑤で示される $p=0.33$ 、 -0.41 のときの結果である。ここに h は $\{a_s \sigma_y (D - 2 \cdot d_c) + 0.12 \cdot B \cdot D^2 \cdot F_c\} / \ell$ で規準化された水平力であり、 σ_y は主筋の降伏応力度、 a_s は片側主筋の全断面積、 d_c は主筋の中心からコンクリート外縁までの距離、 ℓ は材長である。図13は加力方法3により得られ

た一定軸力下でのSRC柱の軸力 p －軸変位 δ_v 関係を図7の収束限界軸力曲線にそれぞれ重ね合わせたものである。図14(a)～(f)は各々図13中の③、④、⑥、⑦、⑫、⑬で示される一定軸力 $p=-0.17$ 、 -0.23 、 -0.46 、 -0.35 、 0.08 、 0.05 の下でのSRC柱の水平力 h －水平変位 δ_h 関係及び水平力 h －軸変位 δ_v 関係である。ここに h は(2)式の降伏水平耐力 $H_y^{17)}$ により規準化された水平力である。

$$H_y = \left\{ \frac{e \gamma_e}{8} \cdot BD^2 F_c + Z_p \cdot s \sigma_y + \frac{e a}{2} \cdot r \sigma_y \cdot d \right\} / \ell \quad (2)$$

Z_p ＝鉄骨の塑性断面係数、 d ＝主筋間距離

収束限界軸力曲線の内側の軸力（図10(a)の①～③、⑤）の下では損傷の累積はすぐに停止するが、曲線の外側の軸力（図10(a)の④、⑦、⑨、⑩）の下では、曲げ破壊やせん断破壊による損傷は進行する。図13中の⑥、⑦の履歴挙動を図14(c)、(d)に示しているが、軸力の隔りが大きい⑥では軸変形の累積が大きい。図10(a)の③、④、図10(b)の④、⑤および図13の⑨、④は各々軸変形が収束・発散することを表しており、その収束限界は収束限界軸力曲線の極限点に対応していることから、収束限界軸力曲線の高さが大きくなる程、柱の累積損傷に対する抵抗が大きくなることが分る。また曲線の負勾配が大きい図10(b)のせん断破壊タイプに比べて、負勾配が小さい図10(a)の曲げ破壊タイプの方が損傷の累積が小さいことから、収束限界軸力曲線の負勾配が小さい程柱の累積損傷に対する抵抗が大きくなることが分る。なお図10中の加力方法1 (Test1)と加力方法2 (Test2)の結果が示すように、加力方法の違いによる有意な差異は見られない。

以上の結果から、本実験で得られた収束限界軸力曲線により、RC柱やSRC柱の耐力低下の進行及び軸変位の累積の収束・発散現象が予測できることが分かった。

4. 軸力と繰返し水平力を受けるRC柱及びSRC柱の解析

4.1 解析方法

図15はRC柱及びSRC柱の解析モデルである。柱断面は要素分割されており（図15(a)～(d)）、全断面有効としたモデル（モデルA）及び曲げによる圧縮破壊を想定して被りコンクリートを取り去ったモデル（モデルB）をRC柱及びSRC柱に対して各々仮定した。モデルは図15(e)に示すように剛体と弾塑性体からなり、弾塑性体の長さは $0.2h$ （ $\approx D$ ）とし、弾塑性体内の曲率は一定と仮定した。ここに h ＝材長、 D ＝断面せいである。

仮定した鉄筋、鉄骨及びコンクリートの応力度－ひずみ度関係を各々図16(a)、(b)に示す。鉄骨、鉄筋及びコンクリートの応力度 s 及びひずみ度 e は各々の降伏応力度、圧縮強度及びそれらに対応するひずみで規準化されている。ひずみ硬化係数 μ は鉄筋、鉄骨ともに0.01とした。コンクリートの s - e 関係におけるスケルトン曲線を表わす関数 $f_1(e)$ を(3)式で仮定し^{18)、19)}、最大応力に達したときのひずみ e_u の値は3、 γ_1 、 γ_2 はそれぞれRC柱では0.7、0.5、SRC柱では内蔵鉄骨によるコンクリートの充填性を考慮して0.4、0.2とした。

$$f_1(e) = \frac{e}{1 - (1 + \frac{2}{e_u}) \cdot e + (\frac{e}{e_u})^2} \quad \text{-----} \quad e \geq e_u$$

$$f_1(e) = -1 \quad \text{-----} \quad e < e_u \quad (3)$$

(a) 曲げ破壊タイプ

(b) せん断破壊タイプ

図17 実験及び解析から得られたRC柱の収束限界軸力曲線の比較

図18 実験及び解析から得られたSRC柱の収束限界軸力曲線の比較

$$e_p = e_a \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{1}{3} \left(\frac{e_a}{e_u} \right)^{1.5} \right) \right)$$

$$f_2(e) = \gamma_1 \cdot f_1(e), \quad f_3(e) = \gamma_2 \cdot f_1(e), \quad \exp = 2.7182 \dots$$

ここに e_a ＝Common Pointのひずみ（図16(b)）、 e_p ＝塑性ひずみ

本計算では、加力方法2の実験で収束限界軸力を求めたときと同様に、収束時軸変位 δ_v として一定値ではなく、前ステップの収束限界軸力の下で繰返し水平力を加えたときの δ_v の履歴を基に定められた値を仮定して弾塑性解析により収束限界軸力を求めた。計算では表1、表2に示すパラメータを用い、コンクリートのヤング係数 $E_c=2100/\text{cm}^2$ 、鋼材のヤング係数 $E_s=21000/\text{cm}^2$ とした。ただしRC1～RC3試験体では、本実験に先立ち試験体に弾性範囲において軸方向加力を行

なところ、コンクリート充填不良のため軸方向剛性が理論値の半分しかなかったため、コンクリート強度及びヤング係数を上記の半分とした。RC1~RC3試験体の施工不良は、他の試験体に比べて耐力低下や剛性低下を大きく生じさせ、収束限界軸力曲線の最大値を低くしたが、収束限界軸力曲線による累積損傷の予測に影響を与えるものではないと考えられる。コンクリート断面の分割数を6、鉄骨断面モデルのウェブの分割数を10とし、フランジは分割していない。

RC柱の変位振幅 δ_h は実験と同様10mm、SRC柱では20mmとした。図15のモデルでは(4)式が成立するのでこの式を用いて、柱頭水平変位 δ_h から柱脚曲率 Φ を求め、変位増分法による弾塑性解析により柱脚の曲げモーメント及び柱の水平力を得た。

$$\frac{\Phi}{\Phi_y} = \frac{\delta_h}{\delta_{hy}} \quad (4)$$

ここに Φ_y 、 δ_{hy} は降伏時の Φ 、 δ_h である。

4.2 解析結果

解析により得られたRC柱及びSRC柱のモデルA並びにモデルBの収束限界軸力曲線と実験から得られた収束限界軸力曲線との比較を各々図17、18に示す。せん断破壊するケースに対しては、本来せん断モデルを用いた解析により収束限界軸力曲線を求めなければならないが、繰返し力を受けたときの精度の良いせん断モデルが提案されていないことと、本ケースではせん断破壊タイプのせん断耐力と曲げ耐力が接近しているため曲げせん断破壊を考慮して、曲げ解析を行なった。従って、試験体RC4、RC5のせん断破壊後の挙動に違いが見られるが、解析から得られた収束限界軸力曲線は実験結果と概ね一致している。実験から得られた収束限界軸力曲線は累積損傷を良好に予測することを3.で示したが、解析から得られた収束限界軸力曲線は実験結果と対応しているため、解析から得られた収束限界軸力曲線により柱の損傷予測が可能であると思われる。

5. 結論

地震時の構造物の終局的な耐震性能を確保するためには、構造物が十分な水平耐力を有するように設計しておくことは必要であるが、さらに繰返し力が作用するときの耐力低下や変形累積等の累積損傷に対して必要な抵抗性能を保持していることを保証することが不可欠である。本研究では、構造物の自重を含めた鉛直力と地震力等の水平力を同時に負担する役目を有する重要な構造材である柱が、繰返し水平力を受けるときの性能を評価する方法を提示し、RC柱及びSRC柱の実験を行って、その評価方法の妥当性を検討した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 繰返し水平力を受け曲げ破壊やせん断破壊を生じるRC柱やSRC柱の損傷の累積に対する抵抗性能を評価する際、本研究で提示した収束限界軸力曲線は有用である。
- 2) 収束限界軸力曲線は履歴を描き、曲線の内側の軸力の下では損傷の累積はすぐに停止するが、曲線の外側の軸力の下では曲げ破壊やせん断破壊による損傷は進行する。また曲線からの軸力の隔たりが大きくなる程損傷の累積が増大する。
- 3) 収束限界軸力曲線の極限点の高さが大きくなる程また負勾配の大きさが小さくなる程、RC柱やSRC柱の累積損傷に対する抵抗が大きくなる。
- 4) 解析により得られた収束限界軸力曲線は実験により得られた曲線

と概ね一致していることから、繰返し水平力を受ける柱の累積損傷に対する抵抗性能を解析により評価できる。

謝辞

本研究を行うにあたり、平成7年度、8年度文部省科学研究費（基盤研究(C)、(2)）の補助を受けた。また実験に際し、元技官の飯屋菌一樹氏、元鹿兒島大学生の白山正志氏や多くの研究室諸氏の協力を得た。

参考文献

- 1) 近藤一夫、王学鋒、中倉健介、花井正実：繰返し変動曲げを受ける鋼柱の弾塑性・崩壊挙動、日本建築学会構造系論文報告集、第434号、pp.59-74、1992.4
- 2) 藤本盛久、羽倉弘人：繰返し荷重を受ける鉄骨断面の弾塑性解析に関する研究（第2報）、日本建築学会論文報告集、第121号、pp.14-18、1966.3
- 3) Yamada, M.: Effect of Cyclic Loading on Buildings, Proceedings of the International Conference on the Planning and Design of Tall Buildings, ASCE-IABSE, Lehigh University, 1972.8
- 4) 内田保博、三谷勲、上遠野明夫：角形鋼管柱の軸力比制限に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.139-149、1993.12
- 5) 坂本順：繰返し外乱を受ける架構の局所累積変形に関する考察、日本建築学会論文報告集、第246号、pp.33-41、1976.8
- 6) Igarashi, S., Matui, C., Yoshimura, K. and Matsumura, K.: Inelastic Behaviours of Structural Steel Sections under Alternative Loadings, Transactions of Architectural Institute of Japan, No. 169, pp. 53-62, 1970.3
- 7) 松井千秋、三谷勲：繰返し水平力を受ける高張力鋼骨組の弾塑性性状に関する研究、日本建築学会論文報告集、第250号、pp.31-41、1976.12
- 8) 加藤勉、秋山宏：鋼構造部材の耐力（その4）、日本建築学会論文報告集、第151号、pp.15-20、1968.9
- 9) 中村恒善、上谷宏二：鋼構造柱材に対する対称限界理論（その1：一般的定式化）、日本建築学会構造系論文報告集、第398号、pp.109-119、1989.4
- 10) 上谷宏二、中村恒善：繰返し両振り曲げを受ける片持梁・柱の定常状態限界理論、その1：基礎理論及び離散化モデルを用いた数値解析法、日本建築学会構造系論文報告集、第438号、pp.105-115、1992.8
- 11) 羽倉弘人：繰返し荷重を受ける鉄骨断面の弾塑性解析に関する研究（第3報）（Beam Columnの漸増塑性限界荷重について）、日本建築学会論文報告集、第122号、pp.1-8、1966.4
- 12) 宇田川邦明、高梨晃一、田中尚：繰返し載荷を受けるH形鋼はりの復元力特性その1・定変位振幅繰返し載荷時の塑性変形能力、日本建築学会論文報告集、第264号、pp.51-59、1978.2及びその2・ランダム変位履歴における耐力低下、第265号、pp.45-52、1978.3
- 13) 松井千秋、津田恵吾、江冠華：繰返し曲げを受けるSRC柱材の安定限界軸力に関する解析的研究、コンクリート工学論文集、第3巻1号、pp. 45-55、1992.1
- 14) 平石久広、稲井栄一、栗研地彰：繰返し載荷を受ける鉄筋コンクリート造柱の限界変形、鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の限界変形に関する研究（その3）、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp. 127-138、1993.12
- 15) 衣笠秀行、野村設郎、太田雅昭、本間茂：RC曲げ破壊部材の繰返し疲労損傷特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 253-254、C、1991.9
- 16) 内田保博、小御門匡：繰返し外力を受けるトラス構造の耐力低下及び変形累積挙動に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp.161-170、1993.12
- 17) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1987
- 18) Darwin, D. and Pecknold, D. A. W.: Inelastic Model for Cyclic Biaxial Loading of Reinforced Concrete, Univ. of Illinois, Civ. Eng. Stud., SRS409, 1974.7
- 19) 小坂義夫、谷川恭夫：高圧縮ひずみ領域におけるコンクリートの履歴特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 449-450、1978.9
- 20) 古城康彦、内田保博：繰返し荷重を受けるRC柱及びSRC柱の累積損傷に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C-1、pp. 417-418、1994.9
- 21) 内田保博、古城康彦、古里角栄、三谷勲、有馬冬樹：繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の累積損傷の予測に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C-1、pp.313-314、1995.9
- 22) Uchida, Y.: Estimation of Cumulative Damage of Beam-Columns and Frames Subjected to Repeated Loading, Proceedings of 11WCEE, CD-ROM, 1996.6
- 23) Uchida, Y., Kojo, Y. and Bochi, A.: Prediction of Cumulative Damage in SRC Beam-Columns, International Conference on Composite Construction-Conventional and Innovative, pp.621-626, 1997.9
- 24) 内田保博、古城康彦、白山正志、三谷勲、有馬冬樹：繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の累積損傷の予測に関する実験的研究(その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C-1、pp.217-218、1996.9
- 25) 内田保博、坊地彰人、三谷勲、有馬冬樹：繰返し水平力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の累積損傷の予測に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造C-1、pp.983-984、1997.9
- 26) 内田保博、古城康彦、白山正志、三谷勲、有馬冬樹：繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の累積損傷の予測に関する実験的研究(その2)、日本建築学会大会中国・九州支部研究報告、第10号、pp.493-496、1996.3
- 27) 内田保博、坊地彰人、三谷勲、有馬冬樹：繰返し水平力を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の累積損傷の予測に関する実験的研究、日本建築学会九州支部研究報告、第36号、pp.493-496、1997.3

(1999年4月16日原稿受理、1999年8月16日採用決定)