

軸力変動下で繰り返し曲げを受ける 鋼はり一柱の弾塑性有限変位解析

酒造 敏廣¹・増田 雄輔²

¹正会員 神戸市立工業高等専門学校教授 都市工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)
E-mail: tmiki @ kobe-kosen.ac.jp

²学生会員 神戸市立工業高等専門学校 都市工学専攻 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町8-3)
E-mail: r108537@g.kobe-kosen.ac.jp

本研究では、地震時に非弾性応答を呈する鋼ラーメン橋脚の柱部材に着目し、その軸力変動による局部座屈や損傷について検討している。ラーメン柱を片持ちはり一柱としてモデル化し、定軸力下または変動軸力下で繰り返し水平力を受ける補剛された箱形断面柱の弾塑性有限変位解析を行っている。解析結果から、柱基部の曲げモーメント、曲率、軸ひずみの変動性状を分析し、変動軸力下で繰り返し曲げを受ける柱基部断面の塑性変形や局部座屈性状について考察している。

Key Words : beam-column, elasto-plastic finite displacement analysis, variable axial force, cyclic bending

1. まえがき

鋼門形ラーメン橋脚は、都市高速道路の高架橋を支えるために数多く建設されてきた。これらは、1995年に発生した兵庫県南部地震で初めて大きな地震動を経験し、大きな被害を受けた。とくに、柱基部や隅角部の各点部やはり中央で大きな局部座屈や塑性変形が数多く観察された。地震による水平外力が作用すると、ラーメン各部は、常時作用荷重のものに加えて、軸力、曲げモーメント、せん断力等の付加的な断面力を受ける。それらの中で、はり部材に生じるせん断力は柱部材に直接に軸力変動として伝わるので、一、二層ラーメンで塑性変形が発生する箇所の発現パターンによっては、柱に大きな変動軸力が作用することが容易に推測できる¹⁾²⁾。これまでのところ、ラーメン柱の軸力変動に着目した研究は、玉井³⁾、熊木ら⁴⁾、高橋ら⁵⁾、佐藤ら⁶⁾によって行われているが、橋脚の耐震性に及ぼす影響については未だ究明すべき点が多い。

本研究では、地震時に非弾性応答を呈するラーメン橋脚の柱部材に着目し、その軸力変動による局部座屈や損傷について検討するものである。まず、軸力変動が作用するラーメン柱を片持ち柱に置換した解析モデルを示す。柱断面は補剛された薄肉箱形断面とし、縦補剛材は道路橋示方書⁷⁾に基づいて設計する。つぎに、定鉛直荷重に

加えて、片持ち柱に付加する変動軸力の導入方法を提案する。そして、汎用 FEM 解析ソルバーMARC[®]を用いて、定軸力下または変動軸力下で水平強制変位を受ける補剛された箱形断面柱の弾塑性有限変位解析を行う。解析結果より、柱基部断面の曲げモーメント、軸力、曲率、および、軸ひずみの変動性状を分析し、変動軸力のもと繰り返し曲げを受ける柱の塑性変形や局部座屈性状について考察する。

2. 繰り返し曲げを受ける箱形はり一柱の解析モデルと解析方法

(1) 箱形はり一柱の解析モデル

本研究では、地震動を受ける鋼製ラーメンの中で大きな軸力変動が起こる柱基部に着目し、それを繰り返し水平力と変動軸力が作用する片持ちはり一柱として取り出し、汎用FEM解析ソルバーMARC[®]を用いて数値解析を行う。

a) 繰り返し曲げを受ける箱形はり一柱

繰り返し曲げを受ける箱形はり一柱の解析モデルとその断面図を図-1(a)、(b)に示す。また、解析モデルの諸元を表-1に示す。定鉛直荷重 $P=0.15N_y$ の作用下で、柱頭部に水平力(強制変位 δ)と変動軸力 ΔP が作用する柱を

表-1 解析モデルの諸元

板パネル		縦補剛材		無次元幅厚比	
B (mm)	t_f (mm)	h_s (mm)	t_s (mm)	板パネル R	縦補剛材 R_s
2000	23.7	286	25	0.5	0.63

注) ヤング係数 $E=2 \times 10^5 \text{MPa}$, ポアソン比 $\mu=0.3$, 降伏点 $\sigma_y=235 \text{MPa}$

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \sigma_y}{k \pi^2 E}}, \quad R_s = \frac{h_s}{t_s} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2) \sigma_y}{k_s \pi^2 E}}, \quad k=4.0, k_s=0.425$$

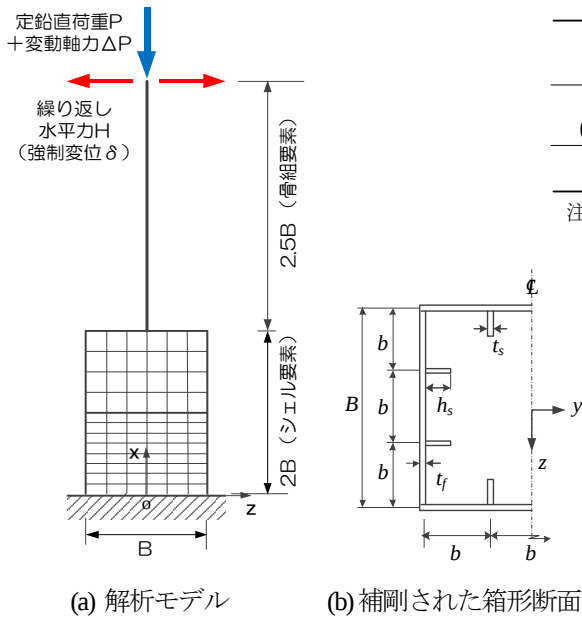


図-1 変動軸力下で繰り返し曲げを受ける鋼はり-柱の解析モデル

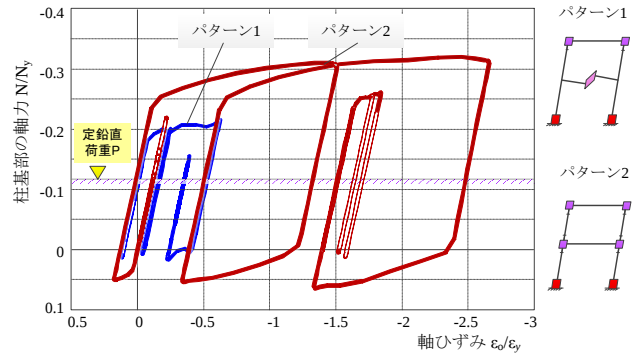
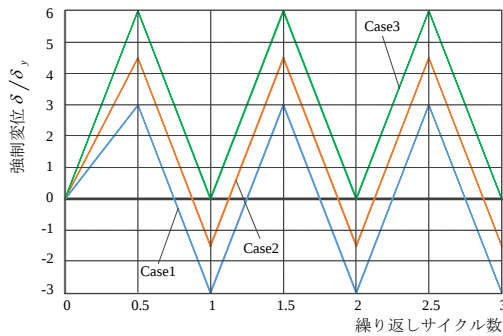
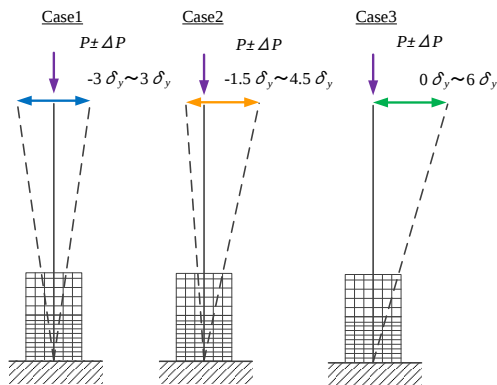


図-3 二層ラーメン柱基部の軸力変動の解析例²⁾



(a) 水平強制変位 δ の仮定



(b) 水平変位の偏り

図-2 柱頭部に与える水平強制変位 δ

解析対象としている。ここに、 N_y : 柱断面の全塑性降伏軸力 (=降伏点 $\sigma_y \times$ 断面積 A) である。

柱は補剛された薄肉正方形の等断面構造とし、柱下部は薄肉シェル要素、柱上部は骨組要素でモデル化した。 $x=B$ の位置にダイヤフラムを仮定した。縦補剛材は道路

橋示方書⁷⁾による必要剛比 γ_{req} の5倍の剛比 $\gamma=5\gamma_{req}$ を持つように設計している。

(2) 箱形はり-柱に作用させる外力

a) 柱頭部に与える水平強制変位 δ

解析では、強制変位を与えることによって水平外力を作用させる。本解析で用いる3種類の水平強制変位 δ を図-2に示す。同図(a)は繰り返しサイクル-変位 δ の関係、同図(b)は各ケースの柱の変形状況を模式的に示している。Case 1は正負対称に交番する水平変位、Case 2, 3は一方方向に水平変位が偏るパターンである。これらは、ラーメンが非弾性地震応答を呈して、一方方向に残留変位が現れる場合を想定している。変位 δ の振幅は降伏水平変位 δ_y の3倍としている。

b) 柱頭部の定鉛直荷重 P と変動軸力 ΔP

柱頭部には、まず上部工死荷重に相当する定鉛直荷重 $P=0.15N_y$ を作用させる。これに付加すべき変動軸力 ΔP は、以下に従って仮定した。

まず、二層ラーメンの地震応答解析より得られた柱基部の軸力変動の解析例²⁾を図-3に示す。門形ラーメンの柱基部に作用する軸力 N -軸ひずみ ϵ_x 関係を例示している。この図からわかるように、二層目隅角部近傍と一層目中央の塑性化が先行する崩壊パターン1では、全塑性軸力 N_y の0.25倍を超える圧縮軸力が柱基部に作用している。また、一、二層目の隅角部近傍が先行して塑性化する崩壊パターン2では、 $0.3N_y$ を超える軸力が作用している。

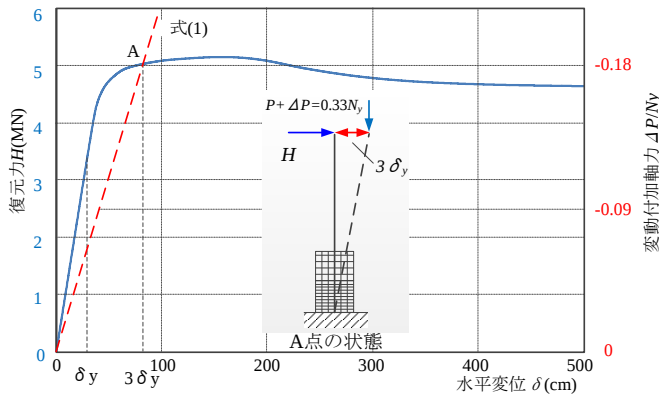


図-4 変動付加軸力 $\Delta P/N_y$ —水平変位 δ の関係

上記の結果を参考にして、単調荷重の水平荷重を受ける片持ちはり一柱の弾塑性解析を行った。その結果から、水平力 H と水平変位 δ の関係を図-4に示す。本研究の数値解析では、この結果を踏まえて、降伏変位 δ_y の3倍の水平変位のときに全塑性軸力 N_y の0.18倍の変動軸力が作用するように設定した。このとき、軸力変動 ΔP は、次式で与えられる。

$$\Delta P = -0.06 N_y \frac{\delta}{\delta_y} \quad (1)$$

(3) 初期不整の影響について

補剛板の初期たわみを考慮した解析も実施したが、表-1に示した無次元幅厚比で $\eta = 5\eta_{req}$ の補剛材を持つ箱形断面柱の塑性変形挙動に及ぼす影響は小さかったので、詳細な検討結果は省略する。また、残留応力については、繰り返しによって累積する塑性ひずみ量に比して小さいので無視している。

3. 繰り返し曲げを受ける箱形はり柱の弾塑性有限変位解析

片持ちはり一柱の解析結果から、シェル要素でモデル化した $x=0 \sim B$ の区間の柱基部の一部を取り出し、それに作用する軸力、曲げモーメント、軸ひずみ、曲率の変動を調べた。ここで、結果を整理するにあたり、以下に示す諸量を用いている。

M_{po} : 柱断面の全塑性モーメント

M_p : 軸力の影響を考慮した塑性モーメント

ϵ_0 : 軸ひずみ ($x=0 \sim B$ の軸方向変位 u /軸方向長さ B)

ϵ_y : 降伏ひずみ (=降伏点 σ_y /ヤング係数 E)

ϕ_y : 降伏曲率 (= $\epsilon_y / 0.5B$)

(1) 定鉛直荷重下で繰り返し曲げを受ける箱形はり柱の解析結果と考察

a) 曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係

まず、定鉛直荷重下で繰り返し曲げを受ける箱形はり

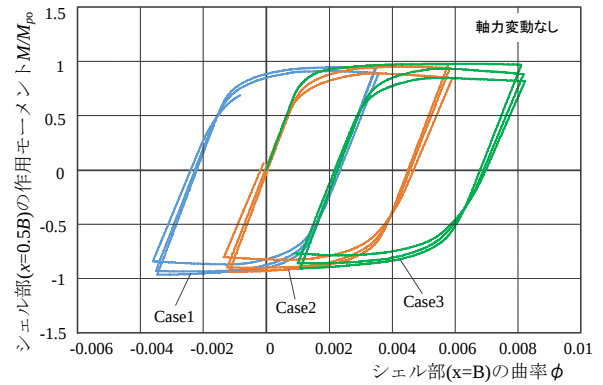


図-5 曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係

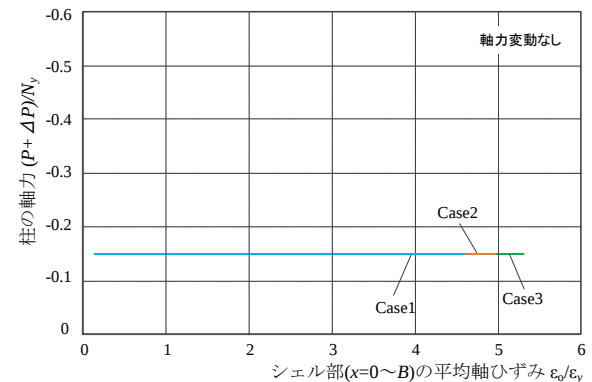


図-6 柱基部の軸力 N —軸ひずみ ϵ_0 関係

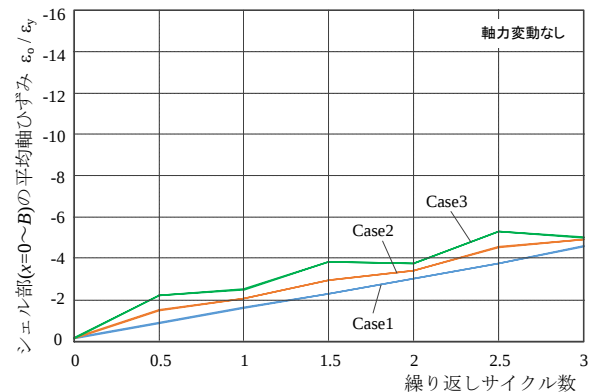


図-7 繰り返しによる柱基部の軸ひずみ ϵ_0 の変動

一柱の柱基部の曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係を図-5に示す。 M は、全塑性モーメント M_{po} で無次元化している。

この図からわかるように、定軸圧縮力下では、水平変位が偏っても軸力が増大しないため、抵抗曲げモーメントの大きな低下は見られない。繰り返しサイクル数が増えると、抵抗曲げモーメントが変位反転点付近で若干低下している。

b) 軸力 N —軸ひずみ ϵ_0 関係

柱基部の軸力 N —軸ひずみ ϵ_0 関係と繰り返しによる柱基部の軸ひずみ ϵ_0 の変動を図-6と図-7に示す。

これらの図から、Case 3 の軸ひずみは、Case 1 の軸ひずみの 1.2 倍程度となっていることがわかる。また、

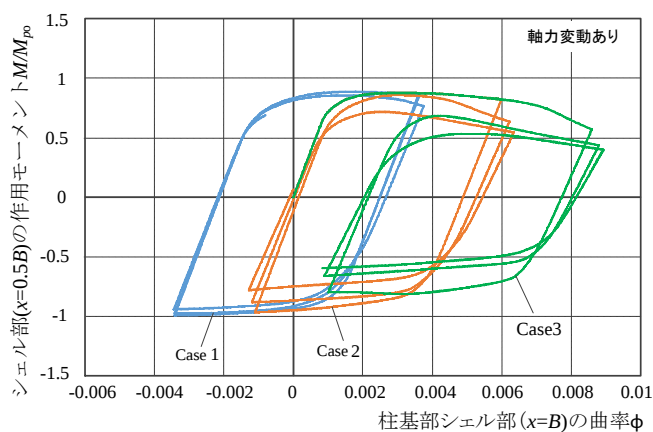


図-8 曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係

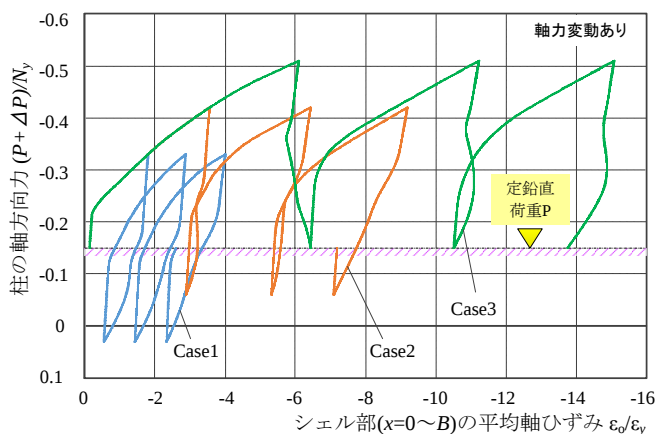


図-9 柱基部の軸力 N —軸ひずみ ϵ_o 関係

Case 1 と Case 3 を比較すると、水平変位 δ の偏りが柱基部の軸ひずみに及ぼす影響は小さいと言える。

(2) 軸力変動下で繰返し曲げを受ける箱形はり-柱の解析結果と考察

a) 曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係

軸力変動下で繰返し曲げを受ける箱形はり-柱の柱基部の曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係を図-8 に示す。

この図からわかるように、正側の曲率反転点前で抵抗曲げモーメントが著しく低下している。これは、水平変位 δ が大きくなるにしたがって増加している。すなわち、変動軸力が増加して抵抗曲げモーメントが低下したということになる。上記(1)の結果と比較すると、変動軸力が抵抗曲げモーメントに大きく影響することがわかる。

b) 軸力 N —軸ひずみ ϵ_o 関係

柱基部の軸力 N —軸ひずみ ϵ_o 関係を図-9 に示す。また、軸ひずみを変位反転点で取り出して、繰返しサイクル数による軸ひずみ ϵ_o との関係を調べたものを図-10 に示す。

これらの図から、変動軸力が作用すると、軸力が増減しながら軸ひずみが進展していくことがわかる。また、

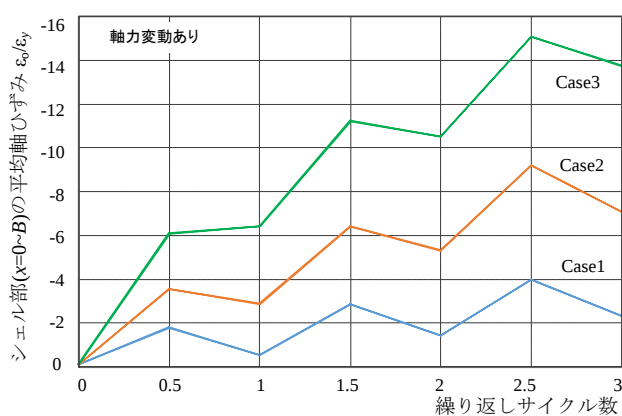


図-10 繰返しによる柱基部の軸ひずみ ϵ_o の変動

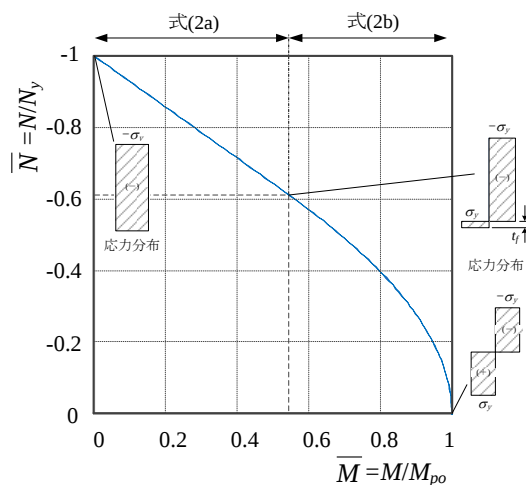


図-11 軸力 N —曲げモーメント M の全塑性相関曲線⁹⁾

水平変位 δ が正負に等しく交番する Case 1 では $-0.33N_y$ の軸力で $-4\epsilon_y$ の圧縮軸ひずみが生じているのに対し、最も大きな変動軸力が作用する Case 3 では $-0.51N_y$ の軸力で約 $-15\epsilon_y$ の軸ひずみが生じている。このことから、軸圧縮力が大きくなるにしたがって圧縮軸ひずみが大きく進展し、柱基部の損傷に影響を及ぼすと考えられる。

c) 軸力と曲げの全塑性相関関係を考慮した曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係

M — ϕ 曲線から、局部座屈の影響を調べるために、軸力と曲げを受ける箱形断面の全塑性相関曲線を検討した。 N — M の全塑性相関曲線⁹⁾を図-11に示す。

文献9)を参考によると、軸力と曲げを受ける補剛された箱形断面の曲げモーメント M と軸力 N に関する全塑性相関曲線は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{M}{M_{po}} &= \left(1 - \frac{N}{N_y}\right) \frac{N_y}{N_{fy}} \frac{M_{fp}}{M_{po}} \quad , \quad \left(\frac{N}{N_y} > \frac{N_{wy}}{N_y}\right) \quad (2a) \\ &= \left\{2\left(1 - \frac{M_{fp}}{M_{po}}\right) - \frac{M_{fp}}{M_{po}} \frac{N_{wy}}{N_{fy}}\right\} \left(\frac{N}{N_{wy}}\right)^3 \end{aligned}$$

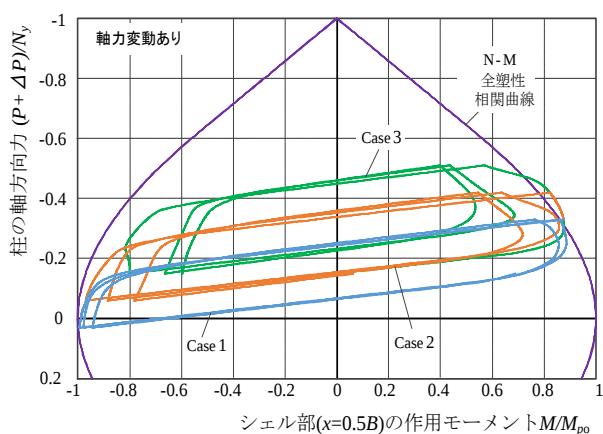


図-12 軸力 N —モーメント M の相関関係

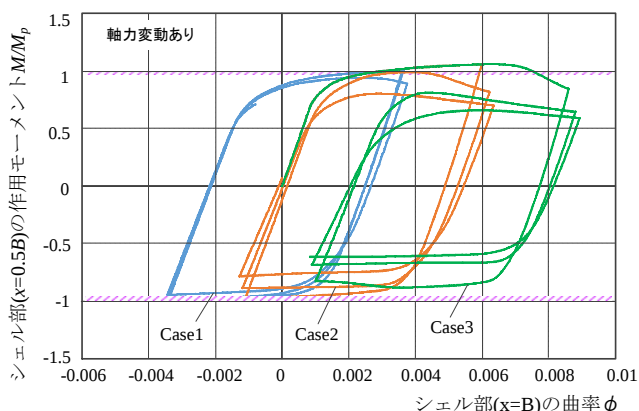


図-13 曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係

$$-\left\{3\left(1-\frac{M_{fp}}{M_{po}}\right)-\frac{M_{fp}}{M_{po}}\frac{N_{wy}}{N_{fy}}\right\}\left(\frac{N}{N_{wy}}\right)^2+1$$

$$, \left(\frac{N}{N_y} \leq \frac{N_{wy}}{N_y}\right) \quad (2b)$$

ここに,

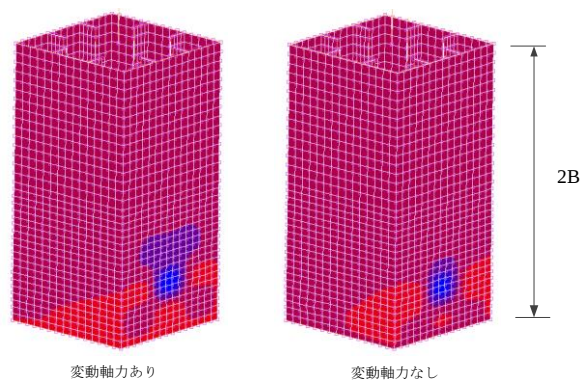
P_{fy} : 縦補剛材を除いたフランジ・プレートの降伏軸力

P_{wy} : フランジと腹板の縦補剛材を含んだ腹板の降伏軸力

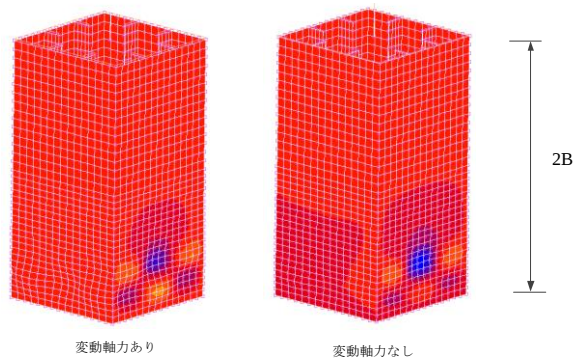
M_{po} : 図心軸まわりの全塑性モーメント

M_p : 縦補剛材を除いたフランジ・プレートが受け持つ全塑性モーメント

上式で求めた軸力 N —モーメント M の相関図上に解析結果の N — M 関係をプロットしたものを図-12 に示す。ここで、軸力 N は全塑性降伏軸力 N_y 、曲げモーメント M は全塑性モーメント M_{po} ($N=0$) で無次元化している。また、この図から作用軸力に対する耐力低減を考慮した塑性モーメント M_p を求め、曲げモーメント M をそれで無次元化した M —曲率 ϕ 関係を図-13 に示す。この図において、 $M/M_p - \phi$ 曲線の最大耐力点～変位反転点間で $|M/M_p| < 1$ となる部分は局部座屈による耐力低下を表



(a) Case 1



(b) Case 3

図-14 柱基部の局部座屈の状況

すことになる。

これらの図からわかるように、曲率 ϕ が正側に偏るときに大きな軸力変動を仮定したため、局部座屈による曲げ耐力の低下が顕著になっている。Case 3 の耐力は最初の変位反転点付近で約20%低下している。繰り返しサイクル数の増加に伴い抵抗曲げモーメントは減少し、最大で40%を超える耐力低下が見られる。これより、軸圧縮力の変動下で、繰り返し回数が局部座屈による耐力低下に及ぼす影響が大きいことがわかる。

(3) 軸力変動が柱基部の局部座屈に及ぼす影響

解析終了時点での柱基部の損傷の様子を図-14に示す。図(a), (b)は、それぞれ水平強制変位が正負に対称交番するCase 1、および、変位が非対称に交番するCase 3に対応している。

この図より、変動軸力下では、柱基部の局部座屈の発生範囲が大きくなっていることがわかる。また、最大軸力が大きくなるCase 3は、Case 1と比較して損傷が大きい。

4. まとめ

本論文では、地震動を受ける鋼門形ラーメン柱をモデ

ル化した片持ちはり一柱の弾塑性有限変位解析を行って、軸力変動下での柱の塑性変形・局部座屈の性状を考察したものである。本文で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) はり部材に生じるせん断力に起因するラーメン柱の軸力変動を考慮できる片持ちはり一柱の解析モデルを示した。
- 2) 軸力と曲げモーメントの全塑性相関曲線を用いて、局部座屈による抵抗曲げモーメントの低下を把握できるようにした。
- 3) 柱基部の曲げモーメント M - 曲率 ϕ 関係は、変動軸力と繰り返し曲げサイクル数によって影響を受ける。
- 4) 変動軸圧縮力下で繰り返し曲げが作用する柱基部では軸ひずみが進展し、局部座屈による耐力低下が大きく現れる。

謝辞：本研究の実施には、平成24～26年度の科学研究費補助金・基盤研究C（課題番号：24560592）の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 酒造敏廣，水澤富作，山田 宰，戸田智規：汎用 FEM コードを利用した鋼一層門形ラーメンの地震応答解析，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.2，pp.440～452，2012 年 7 月。
- 2) 檜原太基，山田 宰，酒造敏廣：はり崩壊型二層門形ラーメンの柱の軸力変動に関する研究，平成 25 年度土木学会関西支部・年次学術講演会，I -41，2013 年 6 月。
- 3) 玉井宏章：変動軸力と繰り返し曲げを受ける露出柱脚の載荷実験－変動軸力下の半剛接特性－，日本建築学会構造系論文集第 567 号，2003 年 5 月。
- 4) 熊本幸，矢部正明：軸力変動を考慮したラーメン式橋脚の動的照査に関する検討，地震工学論文集，土木学会，第 27 巻，No.55，2003 年。
- 5) 林浩二郎，中村聖三，稲吉紘彰，高橋和雄，呉慶雄：軸力変動を受ける鋼製補剛箱形断面部材の弾塑性曲げ挙動，鋼構造年次論文報告集，第 12 巻，pp.115～122，2004 年 11 月。
- 6) 佐藤伸，河野健二，木村至伸：ラーメン構造物の地震応答評価に及ぼす軸力変動の影響，応用力学論文集，Vol.3，pp.1019～1026，2005 年 8 月。
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，平成 14 年 3 月。
- 8) MSC Software：MSC MARC2003，ユーザーマニュアル，2003 年。
- 9) Nakai,H., Kitada, T. and Miki,T.: An Experimental Study on Ultimate Strength of Thin-Walled Box Stub-Columns with Stiffeners subjected to Compression and Bending, Proc. of the Japan Society of Civil Engineers, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, .No.2, pp.333s～343s, Oct. 1985.

ELASTO-PLASTIC FINITE DISPLACEMENT ANALYSIS OF STEEL BEAM-COLUMNS SUBJECTED TO CYCLIC BENDING UNDER ALTERNATING AXIAL FORCE

Toshihiro MIKI and Yusuke MASUDA

This paper presents the elasto-plastic finite displacement analysis of steel beam-columns subjected to cyclic bending under alternating axial force. The numerical model is a cantilever beam-column with thin-walled stiffened box cross-section, which is corresponding to column base parts of rigid frames. This model is subjected to cyclic horizontal load under the variable vertical load as well as constant vertical one. The numerical results discuss the plastic deformation and local buckling behaviour of columns and the compressive variable axial force may give the significant damage to the column base cross-section.