繰り返し荷重を受ける鋼部材と鋼材の損傷の関係

RELATIONSHIPS OF DAMAGE BETWEEN STEEL MEMBER AND MATERIAL
SUBJECTED TO CYCLIC LOADING

山田 哲*1, 鄭 景 洙*2, 吉 敷 祥 一*3

Satoshi YAMADA, Kyung-Soo CHUNG and Shoichi KISHIKI

Seismic performance of steel structure is based on the energy absorption capacity of structural members. Energy absorption capacity of steel member is determined by cumulative plastic strain. Therefore, it is important to evaluate how the steel member and material are related respectively on the plastic deformation capacity. In this study, the numerical analysis on beams and beam-columns was carried out. The analytical parameters were the lengths of members, material properties, axial force ratios, and cyclic loading types. The stress-strain relationship on the node of member was evaluated by plastic deformation capacity, accompanied with hysteretic behavior of member. The results showed that the reasonable relation between material and member on plastic deformation capacity under hysteretic behavior could be explained by the energy absorption capacity.

Keywords: Steel Beam Column, Load Deformation Relationship, Stress Strain Relationship

Energy Absorption Capacity, Skeleton Curve, Baushinger Effect

鋼部材, 荷重-変形関係, 応力度-歪度関係, エネルギー吸収能力, 骨格曲線, パウシンガー効果

1. 序

エネルギーの釣り合いに基づく耐震設計¹⁾²⁾では、地震の荷重効果をエネルギー入力として捉え、構造物の耐震性能を構成部材の塑性変形能力に基づき評価されるエネルギー吸収能力として捉える。部材の塑性変形能力は塑性化する部位に生じる歪量に支配されることから、骨組、部材、素材の損傷を関連付け、これらを総合的に評価することは重要な課題である。素材のエネルギー吸収能力を十分に活かした耐震部材を骨組内に適切に配置した設計ができれば、効果的な耐震性能の確保・向上が期待できる。

エネルギーの釣り合いに基づく耐震設計では、部材の塑性変形能力の評価尺度として累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$ が用いられる。これは図-1に示すような完全弾塑性型の復元力特性を仮定した場合、各半サイクル毎の塑性変形量 θ_i の累積値 $\sum \theta_i$ を降伏変形 θ_p で除した値であり、単位塑性仕事($M_p \cdot \theta_p$)の何倍のエネルギーを吸収したかを表す指標である。一般的な鋼部材の復元力特性は完全弾塑性型とはならないが、エネルギー吸収量が等価な完全弾塑性型に換算する。即ち、履歴吸収エネルギーを単位塑性仕事で除した

$$\bar{\eta} = M W_p / (M_p \cdot \theta_p) \quad (1)$$

ここで、 $M W_p$: 部材が吸収した塑性歪エネルギー、 M_p : 全塑性モーメント(軸力の影響を考慮)、 θ_p : 全塑性モーメント

トに対応する弾性変形

を累積塑性変形倍率として扱う。本論文では、 $\bar{\eta}$ を部材の等価累積塑性変形倍率とよぶ。

構造物の耐震性能を評価するには、ランダムな繰り返し荷重を受ける鋼部材が許容し得る $\bar{\eta}$ を正しく評価する必要がある。繰り返し荷重を受ける鋼部材が許容し得る $\bar{\eta}$ の最小値は、図-2に示すように、初めて到達した荷重レベルでの履歴曲線をつなぎ合わせることで得られる骨格曲線が一方向荷重下での荷重-変形関係と良い対応を示す³⁾という経験則に基づき評価する。ここで、骨格曲線についても吸収エネルギー $M W_{ps}$ を単位仕事で除した等価塑性変形倍率

$$\bar{\eta}_s = M W_{ps} / (M_p \cdot \theta_p) \quad (2)$$

で塑性変形能力を表す。地震荷重を受ける多層骨組については、構成部材の骨格曲線での等価塑性変形倍率 $\bar{\eta}_s$ と層の累積塑性変形倍率、そして骨組全体の耐震性能の関係式⁴⁾が導かれており、多層骨組の応答解析を通じて妥当性が検証されている⁵⁾。また、鋼部材が許容しうる骨格曲線での等価塑性変形倍率 $\bar{\eta}_s$ についても、これまで数多く行われてきた実験を通じて、局部座屈により最大耐力が決まる場合^{6)~10)など}や、破断により最大耐力が決まる場合^{11)~13)など}に関する多くの知見が得られている。

*1 東京工業大学統合研究院 助教授・博士(工学)

*2 東京工業大学 大学院生・修士(工学)

*3 東京工業大学建築物理研究センター
日本学術振興会特別研究員・博士(工学)Assoc. Prof., Integrated Research Institute, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

JSPS Research Fellow, Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

一方、繰り返し荷重下における履歴曲線から抽出した骨格曲線が一方荷重下での挙動と良い対応を示すという経験則は、塑性域において比較的大きな振幅で繰り返し載荷を受ける鋼材の応力度-歪度関係においても成り立つことが知られている^{15),16)}。鋼部材の履歴挙動は鋼材の応力度-歪度関係に基づくものであることから、応力度-歪度関係における補エネルギーと部材の塑性変形能力の対応に着目した研究¹⁷⁾や、部材の塑性化の程度と最大応力発生点における歪の進展の関係に着目した研究¹⁸⁾、繰り返し荷重を受ける部材において荷重-変形関係が骨格曲線上にあるときの歪の進展に着目して損傷の指標とした研究^{13),14)}などが行われている。しかしながら、実験では局所的な歪は計測できても応力は計測できないこともあり、地震荷重のようなランダムな繰り返し荷重下において素材レベルでの損傷と鋼部材の損傷とがどの様に対応しているかについては、十分に明らかにされている訳ではない。

本研究では、地震荷重のようなランダムな繰り返し荷重を受ける鋼部材の塑性変形能力を塑性化部位における歪の累積に基づき評価する研究の第一段階として、一定軸力と繰り返し曲げを受ける鋼部材を対象に、部材の最大耐力を決定づける箇所における応力度-歪度関係での骨格曲線と部材の荷重-変形関係での骨格曲線での損傷の関係を、数値解析により検討する。

2. 鋼部材ならびに鋼材における損傷の表現

本研究では、図-3に示す一定軸力と繰り返し曲げを受ける片持梁形式の鋼部材(以後、本論文では部材と表記する)を対象とし、部材の損傷を等価累積塑性変形倍率 $m\bar{\eta}$ と骨格曲線における等価塑性変形倍率 $m\bar{\eta}_s$ で表す。同様に鋼材(以後、本論文では素材と表記する)についても、応力度-歪度関係における等価累積塑性歪倍率を

$$m\bar{\eta} = mW_p / (\sigma_y \cdot \varepsilon_y) \quad (3)$$

ここで、 mW_p ：公称応力度-公称歪度関係において吸収した塑性歪エネルギー、 σ_y ：降伏応力度、 ε_y ：降伏歪

と定義し、骨格曲線についても等価塑性歪倍率を

$$m\bar{\eta}_s = mW_{ps} / (\sigma_y \cdot \varepsilon_y) \quad (4)$$

ここで、 mW_{ps} ：真応力度-真歪度関係における骨格曲線に対応する公称応力度-公称歪度関係において吸収した塑性歪エネルギー

と定義し、素材レベルでの損傷を表す指標として用いる。

ここで、応力度-歪度関係における骨格曲線は、真応力度-真歪度関係において新たに到達した応力レベルでの応力度-歪度関係をつなぎ合わせたものである。一方、塑性歪エネルギーを公称応力度-公称歪度関係において求めるのは、力と変形の積で定義されるエネルギーに対し、それぞれを不変量である原断面積と元長さで除した公称応力度と公称歪度を用いるのが適切であることによる。

なお、本研究では、部材の最大耐力を支配する箇所の歪として、引張応力に起因する破断に関しては材端部引張側フランジの歪に着目する。圧縮応力に起因する局部座屈については、最大耐力規定点^{9),10)}となる点、すなわち H 形断面梁部材は固定端からフランジ幅の半分離れた位置¹⁰⁾の、箱形断面柱部材では固定端からフランジ幅の 0.4 倍離れた位置⁹⁾の圧縮側フランジの歪に着目する。

3. 部材の面内解析方法

繰り返し曲げを受ける部材の解析は、数値積分による面内解析方法^{9),12)}により行う。解析の前提条件を以下に示す。

- ①変形前に材軸に直交していた断面においては、変形後においても断面内の曲率は均一、即ち平面を保つものとする。
- ②材料の非圧縮性および真応力度-真歪度関係における引張と圧縮での対称性を仮定する。
- ③断面内各点における素材の応力度-歪度関係(真応力度-真歪度関係)には、文献 19)の履歴モデルを用いる。
- ④せん断に対しては常に弾性を仮定する。また、せん断変形と曲げ変形は互いに影響しあわないものとする。
- ⑤断面の残留応力は無視する。

以上の条件の下でまず断面を図-4(1)のように分割し、断面内の力の釣り合いを解くことでモーメント-曲率関係を求める。次いで部材を図-4(2)のように分割し、各微小区間で一定と仮定した曲率を材軸方向に積分することで、部材の変形を求める。

本解析は素材の簡潔な履歴モデルを用いたものであるが、載荷履歴をパラメーターとした H 形断面梁部材の繰り返し曲げ実験結果を追跡したところ、荷重-変形関係だけでなく、骨格曲線の変形量や履歴吸収エネルギー量の推移、材端部の断面におけるモーメント-曲率関係や歪の履歴といった局所的な挙動に至るまで良好な対応を示した¹⁹⁾。本研究における解析的検討に十分有効であると考ええる。また、本解析で用いる文献 19)の履歴モデルは真応力度-真歪度関係をモデル化したものであることから、このモデルを用いることで体積変化に伴う圧縮側と引張側での非対称性も考慮することになる。

4. 梁部材における部材と素材の骨格曲線における損傷の対応

4.1 解析パラメーター

解析パラメーターは、部材の形状(断面成と材長)、使用素材および載荷パターンとする。パラメーターの一覧を表-1に、繰り返し載荷のパターンを図-5に示す。使用素材については一般的な構造用鋼材である SS400 材と SM490A 材について図-6に示す 3 種類を設定し、フランジとウェブは同一とする。このうち、SS400 ①材と SM490A 材はそれぞれ文献 19),20)で用いたものであり、本研究で用いる履歴モデルの適用性は確認済である。また、両素材は降伏比が 60%程度であったため、降伏比が 72%と高めの SS400 ②材についても検討を行った。一方載荷パターンについては部材実験における載荷履歴として一般的に用いられている同一振幅で 1 回もしくは 2 回の繰り返しを行う漸増変位振幅(パターン 1 とパターン 2)に加え、地震荷重下ではランダムな履歴を受けることから、規則性の無い恣意的な載荷履歴を与えた場合(パターン 3)についても検討を行った。

4.2 一方荷重を受ける場合の部材と素材の損傷の対応

部材の損傷と素材の損傷の基本的な対応関係を調べるため、繰り返し荷重下における検討に先立ち、一方荷重を受ける梁部材の解析結果について検討を行った。荷重-変形関係から得られた等価塑性変形倍率 $m\bar{\eta}_s$ と、破断ならびに局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^*$ 、 $m\bar{\eta}_s$ の関係を図-7に示す。ここで歪は、フランジの板厚方向の平均値を用いた。

一方向荷重を受ける梁部材において、部材の等価塑性変形倍率 $M\bar{\eta}_s$ と破断ならびに局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^+$ 、 $m\bar{\eta}_s^-$ の関係はほぼ線形である。この関係は、断面成の影響はほとんど受けないが、材長については、最も短い 2000mm のモデルにおいて部材の等価塑性変形倍率 $M\bar{\eta}_s$ に対する破断に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^+$ が他のモデルより 10%以上大きくなっている。これは、材長が短い部材では弾性を仮定したせん断変形の占める割合が大きいことによる。また素材の違いの影響であるが、部材の等価塑性変形倍率 $M\bar{\eta}_s$ が比較的小さな領域では降伏棚の短い SM490A 材では破断に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^+$ が他のモデルより小さくなっており、 $M\bar{\eta}_s$ が比較的大きな領域では、降伏比の高い SS400 ②材で破断に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^+$ が他のモデルより大きくなっている。塑性変形の小さな領域では降伏棚が長いほど、塑性変形の大きな領域では降伏比が高いほど、材端部における損傷レベルが高くなりやすいことがわかる。なお、最大応力点となる材端部からフランジの半幅分離れている局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^-$ には、材長や素材の違いによる影響は顕著に表れなかった。

図-1 累積塑性変形倍率

図-2 骨格曲線

図-3 解析対象（片持ち梁モデル）

(1)断面の分割

(2)材軸方向の分割

図-4 断面および材軸方向の分割

表-1 梁部材の解析パラメーター

鋼材	断面	部材長 (mm)	載荷パターン
SS400①	H-400x300x12x20	2000	一方向
SS400②	H-600x300x12x20	4000	繰り返しパターン1
SM490A	H-800x300x12x20	6000	繰り返しパターン2
			繰り返しパターン3
3 x 3 x 3 x 4 = 108通り

(1)パターン1

(2)パターン2

(3)パターン3

図-5 繰り返しパターン

図-6 解析に用いた素材の材料特性

(1) 材長の違いによる比較(SS400 ①材、断面成 600mm)

(2) 断面成の違いによる比較(SS400 ①材、材長 4000mm)

(3) 素材の違いによる比較(梁成 600mm、材長 4000mm)

図-7 一方向荷重下における $M\bar{\eta}_s$ と $m\bar{\eta}_s^+$ 、 $m\bar{\eta}_s^-$ の関係

図-8 繰り返し曲げを受ける梁の履歴挙動と素材の履歴挙動の対応 (材長 4000mm、梁成 600mm、SS400 ①)

4.3 繰り返し荷重を受ける場合の部材と素材の損傷の対応

まず部材の履歴挙動と、部材中における素材レベルでの履歴挙動の対応について検討する。解析より得られた部材の荷重-変形関係を、材長 4000mm 梁成 600mm で素材を SS400 ①としたモデルで代表し、繰り返しパターン 1 の場合を図-8(1)に、繰り返しパターン 3 の場合を図-8(2)に示す。併せて、破断および局部座屈に着目した点での公称応力度-公称歪度関係も示す。なお、部材と素材の履歴の対応を見やすくするため、局部座屈に着目した点では軸を反転して示している。また、部材の荷重-変形関係において骨格曲線上にあるときを荷重-変形関係、公称応力度-公称歪度関係において太線で表し、素材の真応力度-真歪度関係において骨格曲線の開始点となる点を公称応力度-公称歪度関係上に●でプロットする。図中の +N、-N (N は整数) は、部材の履歴において N 回目の正側もしくは負側の荷重領域における履歴曲線での、骨格曲線の開始点と対応する点であることを表す。載荷履歴によらず、荷重-変形関係における骨格曲線の開始点と、部材中における素材レベルでの骨格曲線の開始点は概ね対応している。繰り返し荷重を受ける梁部材において、荷重-変形関係が骨格曲線となるときの、素材の応力度-歪度関係においてもほぼ骨格曲線となることがわかった。

繰り返し荷重を受ける梁部材の荷重-変形関係から求めた正側の等価塑性変形率 $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ と、破断ならびに局部座屈に着目した点での応力度-歪度関係から求めた骨格曲線における等価塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ の関係を、材長 4000mm 梁成 600mm としたモデルで代表し図-9に示す。図中には一方向荷重下での $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ と $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ の関係を破線

図-9 繰り返し荷重下における $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ と $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ の関係

で示す。骨格曲線の等価塑性変形倍率で表した部材の損傷と骨格曲線の等価歪倍率で表した素材の損傷の関係は、着目した位置、鋼種、繰り返し荷重のパターンによらず、一方向荷重下における部材と素材の損傷の関係とよく対応している。この関係は、負側の骨格曲線についても同様であった。従って、繰り返しに伴う骨格曲線の縮小²⁾が問題にならない範囲において、繰り返し荷重を受ける梁部材の骨格曲線が、最大耐力点も含め一方向荷重下の荷重-変形関係と対応するという経験則を裏付ける結果と言える。

5. 柱部材における部材と素材の骨格曲線における損傷の対応

5.1 解析パラメーター

部材と素材の損傷の対応における軸力の影響を検討するため、一定軸力とせん断曲げを受ける柱部材の解析を行った。解析対象とする部材の断面は□-500x500x25 とし、解析パラメーターは表-2に示す素材、部材長、軸力比(=P/P_y)、荷重パターンとした。解析パラメーターのうち、鋼種と荷重パターンは梁部材と同じである。

5.2 一方向荷重を受ける場合の部材と素材の損傷の対応

柱部材についても部材の損傷と素材の損傷の基本的な対応関係を調べるため、まず一方向荷重下における検討を行った。荷重-変形関係から得られた等価塑性変形倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s$ と、破断ならびに局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ の関係を図-10に示す。

一方向荷重を受ける柱部材においても、梁部材同様部材の等価塑性変形倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s$ と破断ならびに局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ の関係はほぼ線形となったが、軸力が作用しても等価塑性歪倍率の分母(ϵ_y)は変化しないのに対し等価塑性変形倍率の分母(θ_p)は軸力に応じて変化することから、軸力比ごとに異なる勾配となっている。また、せん断変形の影響により材長が短いほど材端部にある破断に着目した点での等価塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ は大きめの値となったが、材端から一定の距離にある局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ には、せん断変形の影響よりも応力勾配の影響が顕著に現れ、材長が長いほど大きめの値となった。そして素材の違いの影響であるが、梁部材ではほとんど違いの見られなかった局部座屈に着目した点において、圧縮軸力下では塑性変形の小さな領域で降伏棚が長いほど損傷レベルが高くなる傾向が見られた。一方、梁部材で素材の違いの影響が見られた破断に着目した点では、引張軸力下では同様に素材による違いが見られたが、圧縮軸力下ではほとんど違いは見られなかった。これは、軸力の影響により圧縮軸力下では圧縮側の、引張軸力下では引張側の塑性歪がより大きく進展し、比較的塑性変形の小さな領域で歪硬化域に達したことで、応力度-歪度関係の違いが顕著に現れたものである。素材の降伏棚が長いほど、また降伏比が高いほど、歪硬化による塑性域の広がりが抑制されることから、等価塑性歪倍率で表される局所的な損傷レベルは高くなる。

5.3 繰り返し荷重を受ける場合の部材と素材の損傷の対応

部材の履歴挙動と、部材中における素材レベルでの履歴挙動の対応について検討する。解析より得られた部材の荷重-変形関係を材長 1600mm で素材を SS400 ①としたモデルで代表し、軸力比+0.4(引張軸力)で繰り返しパターン 1 とした場合を図-11(1)に、軸力比-0.2(圧縮軸力)で繰り返しパターン 3 とした場合を図-11(2)に、軸力比

表-2 柱部材の解析パラメーター

鋼材	部材長 (mm)	軸力比 α_1	荷重パターン α_2
SS400①	1200	0.0	一方向
SS400②	1600	+0.2 -0.2	繰り返しパターン1
SS400②	2000	+0.4 -0.4	繰り返しパターン2
SM490A	2400	+0.6 -0.6	繰り返しパターン3
		+0.8 -0.8	
3 x 4 x 9 x 4 = 4 3 2 通り			

*1: +は引張軸力を表す

*2: 荷重パターンについては梁部材と同じ

(1) 軸力比の違いによる比較(SS400 ①材、材長 1600mm)

(2) 材長の違いによる比較(SS400 ①材、軸力比+0.2_引張)

(3) 材長の違いによる比較(SS400 ①材、軸力比-0.4_圧縮)

(4) 素材の違いによる比較(材長 1600mm、軸力比+0.2_引張)

(5) 素材の違いによる比較(材長 1600mm、軸力比-0.4_圧縮)

図-10 一方向荷重下における $\bar{m}\bar{\eta}_s$ と $\bar{m}\bar{\eta}_s^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}_s^-$ の関係

図-11 繰り返し曲げを受ける柱の履歴挙動と素材の履歴挙動の対応 (材長 1600mm、SS400 ①)

図-12 繰り返し荷重下における $\bar{M}/M_s$ と $\bar{\theta}_s$ の関係 (材長 1600mm、SS400 ①)

-0.4(圧縮軸力)で繰り返しパターン1とした場合を図-11(3)に示す。併せて、破断および局部座屈に着目した点での公称応力度-公称歪度関係も示す。なお部材と素材の履歴の対応を見やすくするため、局部座屈に着目した点では軸を反転して示している。また、部材の荷重-変形関係において骨格曲線上にあるときを荷重-変形関係、公称応力度-公称歪度関係において太線で表し、素材の真応力度-真歪度関係において骨格曲線の開始点となる点を公称応力度-公称歪度関係上に●でプロットする。図中の+N、N(Nは整数)は、部材の履歴においてN回目の正側もしくは負側の荷重領域における履歴曲線での、骨格曲線の開始点と対応する点であることを表す。

軸力比の小さい(±0.2)部材では、梁部材同様荷重-変形関係における骨格曲線の開始点と、部材中における素材レベルでの骨格曲線の開始点は概ね対応している。一方、軸力比が大きくなると、破断に着目した点と局部座屈に着目した点のいずれにおいても、圧縮軸力が作用する場合には圧縮側において、引張軸力が作用するときには引張側において、荷重-変形関係における骨格曲線の開始点と、部材中における素材レベルでの骨格曲線の開始点は概ね対応するが、圧縮軸力が作用する場合の引張側、引張軸力が作用するときの圧縮側では、荷重-変形関係における骨格曲線の開始点と部材中における素材レベルでの骨格曲線の開始点の対応は悪くなる。この傾向は軸力比が大きくなるほど顕著になっている。

また、繰り返し荷重を受ける柱部材の荷重-変形関係から求めた正側の等価塑性変形倍率 $m\bar{\eta}_s^+$ と、破断ならびに局部座屈に着目した

点での応力度-歪度関係から求めた骨格曲線における等価塑性歪倍率 $\bar{\eta}_s^+$ 、 $m\bar{\eta}_s^-$ の関係を、材長1600mm素材をSS400①としたモデルで代表し図-12に示す。図中には一方向荷重下での $m\bar{\eta}_s^+$ と $m\bar{\eta}_s^-$ 、 $m\bar{\eta}_s^-$ の関係を破線で示す。引張軸力下において破断に着目した点での等価塑性歪倍率 $\bar{\eta}_s^+$ 、圧縮軸力下において局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^-$ と部材の骨格曲線での損傷との関係は、梁部材同様一方向荷重下における関係と概ね対応している。この関係は、負側の骨格曲線についても同様であった。一方、圧縮軸力下において破断に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^+$ 、引張軸力下において局部座屈に着目した点での等価塑性歪倍率 $m\bar{\eta}_s^-$ と部材の骨格曲線での損傷との関係は、軸力比が大きくなるほど対応が悪くなった。しかしながら、一般に破断が問題となるのは圧縮軸力がほとんど作用しないような条件下であり、局部座屈が問題となるのは圧縮軸力下である。繰り返し荷重を受ける部材の骨格曲線が、最大耐力点も含め一方向荷重下の荷重-変形関係と対応するという経験則は、繰り返しの伴う骨格曲線の縮小²⁾が問題にならない範囲において、一般的な柱部材においても裏付けられたと言える。

6. 繰り返し荷重を受ける部材と素材の累積損傷の対応

繰り返し荷重を受ける部材の全履歴における損傷と、素材レベルでの損傷の対応を検討する。まず、繰り返し曲げを受ける梁部材の荷重-変形関係から得られた等価累積塑性変形倍率 $m\bar{\eta}$ と、破断なら

(1) SS400 ①材の場合

(2) SS400 ②材の場合

(3) SM490A 材の場合

図-13 繰り返し荷重を受ける梁の $m\bar{\eta}$ と $m\bar{\eta}_s^+$ 、 $m\bar{\eta}_s^-$ の関係
(材長4000mm 梁成600mm)

(1) 軸力比+0.2(引張)の場合

(2) 軸力比-0.2(圧縮)の場合

(3) 軸力比-0.4(圧縮)の場合

図-14 繰り返し荷重を受ける梁の $m\bar{\eta}$ と $m\bar{\eta}_s^+$ 、 $m\bar{\eta}_s^-$ の関係
(材長1600mm、SS400 ①)

びに局部座屈に着目した点での等価累積塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}^-$ の関係を、材長 4000mm 梁成 600mm としたモデルで代表し図-13に示す。繰り返し載荷のパターンによらず、等価累積塑性変形倍率と等価累積塑性歪倍率の間には、ほぼ一本の直線で表せる関係が見られる。次に、一定軸力下で繰り返し曲げを受ける柱部材の荷重-変形関係から得られた等価累積塑性変形倍率 $m\bar{\eta}$ と、破断ならびに局部座屈に着目した点での等価累積塑性歪倍率 $\bar{m}\bar{\eta}^+$ 、 $\bar{m}\bar{\eta}^-$ の関係を、材長 1600mm 素材を SS400 ①としたモデルで代表し図-14に示す。柱部材の場合も、軸力比や繰り返し載荷のパターンによらず、等価累積塑性変形倍率と等価累積塑性歪倍率の間には、ほぼ一本の直線で表せる関係が見られる。部材レベルならびに素材レベルでの損傷の指標として骨格曲線および全履歴での等価累積塑性変形倍率と等価累積塑性歪倍率を用いることで、骨格曲線の縮小²⁰⁾のような繰り返しの効果を含め、部材の損傷が素材レベルの損傷と統一的に評価できることを示している。

7. 結論

一定軸力下でランダムな繰り返し曲げを受ける部材を対象に、荷重-変形関係での履歴吸収エネルギーで表される部材の損傷と素材レベルでの損傷の関係を、数値解析により検討した。素材レベルでの損傷を代表する部材の最大耐力を支配する箇所を歪としては、破断に関しては材端部引張側フランジの歪に、局部座屈に関しては最大耐力規定点^{9),10)}となる点、すなわち H 形断面梁部材は固定端からフランジ幅の半分離れた位置¹⁰⁾の、箱形断面柱部材では固定端からフランジ幅の 0.4 倍離れた位置⁹⁾の圧縮側フランジの歪にそれぞれ着目した。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 繰り返し曲げを受ける梁部材では、部材の荷重-変形関係が骨格曲線となるときには素材の応力度-歪度関係においてもほぼ骨格曲線となる。
- 2) 一定軸力と繰り返し曲げを受ける柱部材の場合、軸力比が小さい(± 0.2)場合には、部材の荷重-変形関係が骨格曲線となるときには素材の応力度-歪度関係においてもほぼ骨格曲線となる。軸力比が大きくなると、圧縮軸力が作用する場合の圧縮側、引張軸力が作用するときの引張側では、荷重-変形関係における骨格曲線と素材の骨格曲線は概ね対応するが、圧縮軸力が作用する場合の引張側、引張軸力が作用するときの圧縮側では両者の対応は悪くなる。
- 3) 繰り返し曲げを受ける梁部材の損傷を荷重-変形関係から抽出した骨格曲線の等価塑性変形倍率で表し、素材の損傷に着目した箇所での応力度-歪度関係から抽出した骨格曲線の等価塑性歪倍率で表すと、両者の関係は着目した位置、鋼種、繰り返し載荷のパターンに関わらず、一方向荷重下における関係と良い対応を示す。これは、繰り返しに伴う骨格曲線の縮小²⁰⁾が問題にならない範囲において、繰り返し荷重を受ける梁部材の骨格曲線が、最大耐力点も含め一方向荷重下の荷重-変形関係と対応するという経験則を裏付ける結果と言える。
- 4) 繰り返し荷重を受ける柱部材の損傷を荷重-変形関係から抽出した骨格曲線の等価塑性変形倍率で表し、素材の損傷に着目した箇所での応力度-歪度関係から抽出した骨格曲線の等価塑性歪倍率で表すと、引張軸力下における部材の等価塑性変形倍率と引張側の等価

塑性歪倍率の関係と、圧縮軸力下における部材の等価塑性変形倍率と圧縮側の等価塑性歪倍率の関係は、梁部材同様一方向荷重下における関係と概ね対応した。一般に破断が問題となるのは圧縮軸力がほとんど作用しないような条件下であり、局部座屈が問題となるのは圧縮軸力下であることから、繰り返し荷重を受ける部材の骨格曲線が、最大耐力点も含め一方向荷重下の荷重-変形関係と対応するという経験則は、繰り返しに伴う骨格曲線の縮小²⁰⁾が問題にならない範囲において、一般的な柱部材においても裏付けられたと言える。

5) 繰り返し荷重を受ける部材の荷重-変形関係から得られた等価累積塑性変形倍率と、破断ならびに局部座屈に着目した点での等価累積塑性歪倍率の関係は、作用軸力、繰り返し載荷のパターンによらず、ほぼ一本の直線で表せる関係が見られた。部材レベルならびに素材レベルでの損傷の指標として骨格曲線および全履歴での等価累積塑性変形倍率と等価累積塑性歪倍率を用いることで、骨格曲線の縮小²⁰⁾のような繰り返しの効果を含め、部材の損傷が素材レベルの損傷と統一的に評価できると考えられる。

参考文献

- 1) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計 第 2 版, pp.166-167, 東京大学出版会, 1987
- 2) 秋山 宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999
- 3) 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
- 4) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990).
- 5) 山田 哲, 秋山 宏: 局部座屈を伴う鋼部材の挙動に立脚した多層骨組の弾塑性応答解析, 日本建築学会構造系論文集 第 463 号, pp.125-133, 1994.9
- 6) 加藤 勉, 秋山 宏, 帯 洋一: 局部座屈を伴う H 形断面部材の変形, 日本建築学会論文報告集 第 257 号, pp.49-57, 1977.7
- 7) 鈴木敏郎, 小野徹郎: 圧縮と曲げを受ける鉄骨 H 形断面柱の塑性変形能力に関する研究 (その 1), 日本建築学会論文報告集, 第 292 号, pp.23-29, 1980.6
- 8) 牧野 稔, 松井千秋, 三谷 勲: H 形鋼柱の局部座屈後の変形性状 その 4 塑性変形能力, 日本建築学会論文報告集 第 290 号, pp.45-55, 1980.4
- 9) 山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う箱形断面鋼部材の劣化域を含む終局挙動, 日本建築学会構造系論文集 第 444 号, pp.135-143, 1993.2
- 10) 山田 哲, 秋山 宏, 桑村 仁: 局部座屈を伴う H 形断面鋼部材の劣化挙動, 日本建築学会構造系論文集 第 454 号, pp.179-186, 1993.12
- 11) 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 大竹章夫, 杉本浩一: 実大柱梁接合部の試験温度による延性破壊-脆性破壊遷移, 日本建築学会構造系論文集 第 522 号, pp.105-112, 1999.8
- 12) 岡田 健, 呉 相勲, 山田 哲, 今枝知子, 山口路夫, 和田 章: 従来型の柱梁接合部を有する合成梁の変形能力に関する実験的研究 合成梁の変形能力を反映した鋼構造骨組の耐震性評価 その 1, 日本建築学会構造系論文集 第 547 号, pp.161-168, 2001.9
- 13) 岡田 健, 呉 相勲, 山田 哲: 合成梁の塑性変形能力に柱梁接合部における継手効率が及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集 第 573 号, pp.185-192, 2003.11
- 14) 吹田啓一郎, 立山英二: 梁長さが異なる溶接柱梁接合部の塑性変形能力, 鋼構造年次論文報告集, pp.601-606, 2003.11
- 15) 加藤 勉, 青木博文, 山内泰之: 引張・圧縮繰返し荷重を受ける鋼素材の挙動に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.803-804, 1970 年 9 月.
- 16) 加藤 勉, 秋山 宏, 山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験則, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.937-938, 1973 年 10 月.
- 17) 伊藤直幸, 小野徹郎, 吉田文久, 岩田 衛: 金属系曲げ材の変形能力と素材特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1105-1106, 1994.9
- 18) 桑村 仁: 降伏比の異なる鋼材を用いた梁-柱の面内弾塑性挙動に関する解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C 分冊, pp.845-846, 1987.10
- 19) 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: パウシンガー効果を考慮した構造用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集 第 559 号, pp.225-232, 2002.9
- 20) 松本由香, 鄭 景洙, 山田 哲: 繰返し複合応力を受ける構造用鋼材の履歴挙動に関する基礎実験, 日本建築学会構造系論文集 第 588 号, pp.181-188, 2005.2
- 21) 秋山 宏, 高橋 誠, 石 軍: 繰り返し曲げを受ける円形断面鋼棒の終局エネルギー吸収能力, 日本建築学会構造系論文集, 第 475 号, pp.145-154, 1995.9

(2005年5月23日原稿受理, 2006年1月16日採用決定)