軸方向に任意の載荷履歴を受ける鋼材の塑性変形能力
PLASTIC DEFORMATION CAPACITY OF STRUCTURAL STEEL
UNDER VARIOUS AXIAL STRAIN HISTORIES山田 哲^{*1}, 焦 瑜^{*2}, 吉敷 祥一^{*3}, 柴田 篤宏^{*4}
Satoshi YAMADA, Yu JIAO, Shoichi KISHIKI
and Atsuhiko SHIBATA

In the field of energy based seismic design, the structural performance of steel structures is determined by the energy dissipation capacity, which depends greatly on the plastic deformation capacity of the structural components that form the whole system. The plastic strain capacity of the structural steel is one of the primary factors that determine the components' plastic deformation capacity. Most of the cyclic loadings employed in the structural steel tests are the recommended standard (typically incremental or constant amplitude) loading protocols, which is insufficient to study the deformation capacity under random loadings such as earthquake effects. This paper focuses on the evaluation of the plastic strain capacity of structural steel under various axial strain histories till ductile fracture. A series of element specimens made of SS400 and SN400 steel were tested under diverse cyclic axial strain loadings. The deformation capacity of the structural steel under cyclic axial loading till fracture was evaluated by studying the experimental strain capacity/energy dissipation capacity of the skeleton curve and the Bauschinger part. The error range of this method was proved smaller than that of the Miner's rules.

Keywords: steel, loading pattern, deformation capacity, skeleton curve, Bauschinger effect

鋼材, 載荷履歴, 塑性変形能力, 骨格曲線, パウシンガー効果

1. 序

鋼構造建物の耐震性能は、構成部材の塑性変形能力に基づきエネルギー吸収能力として捉えることができる^{1),2)}。構成部材の塑性変形能力は、局部座屈や横座屈といった圧縮応力下での限界性能によって決まる場合と、引張応力下での限界性能である破断によって決まる場合に大別できる。このうち破断については、材料の靱性が不足しているような場合には脆性的な破断によって決まることがあり、兵庫県南部地震では多くの被害が発生したことで原因究明や脆性破壊回避のための研究が行われてきたが^{3)~5)}など、脆性的な破断が回避できたとしても、延性的な伸び能力や疲労寿命によって決まる塑性変形能力の限界に至れば破断する。

鋼材や鋼部材の塑性変形能力に関する研究はこれまでも数多く行われているが、その多くは鋼材としての変形性能、部材としての変形性能を個々に検討したものであり、鋼材の変形性能から骨組の耐震性能評価までを結びつけた研究は少ない。また、これまで行われてきた鋼材や鋼部材の塑性変形能力に関する実験は定振幅載荷や漸増振幅載荷に代表される標準的な載荷履歴で行われたものがほとんどであり、地震荷重のようなランダムな載荷履歴を受けた場合に破断に至るまでの変形能力がどのように決定づけられるかについては十分解明されているとは言い難い。例えば軸方向に繰り返し載荷を

受ける鋼材の場合、定振幅載荷を受ける場合の疲労寿命の実験式である Manson-Coffin 式^{6),7)}と Miner 則⁸⁾を組み合わせ破断に至るまでの変形性能を評価することが一般的に行われているが⁹⁾など、地震荷重下において破断に至る鋼部材の破断箇所が受ける歪履歴のような最大振幅が極めて大きな場合¹⁰⁾だけでなく風荷重のような低サイクル疲労の領域においても¹¹⁾対応が悪いことが報告されている。

Manson-Coffin 式と Miner 則の組み合わせ以外の方法として、繰り返し載荷を受ける鋼部材や鋼材の履歴曲線を骨格曲線とパウシンガー部に分解したうえで、骨格曲線に着目して塑性変形能力の評価を行う方法がある¹⁾。この手法は、繰り返し載荷を受ける鋼材の応力度-歪度関係に関する経験則¹²⁾に基づくものであり、最近では鋼部材の変形能力の評価法として用いられるようになってきた¹³⁾など。筆者らは既報¹⁴⁾において、一定軸力と繰り返し曲げを受ける鋼部材を対象に、パウシンガー効果を考慮した応力度-歪度関係のモデル¹⁵⁾を適用した解析を行い、部材の荷重-変形関係が骨格曲線上にあるとき、最大耐力を決定づける箇所においても応力度-歪度関係は骨格曲線上にあることを示したが、任意の載荷履歴を受ける鋼材が破断に至る条件については検討できておらず、鋼材の変形性能と鋼部材の塑性変形能力を対応づけるには至っていない。破断に着目した場合、地震荷重下で破断に至る箇所が受ける歪履歴と鋼素材の塑性

^{*1} 東京工業大学建築物理研究センター 准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

^{*2} 東京工業大学大学院 大学院生・修士(工学)

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

^{*3} 東京工業大学建築物理研究センター 助教・博士(工学)

Assist. Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

^{*4} 元 東京工業大学大学院 大学院生・修士(工学)
(中部電力)Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
CHUBU Electric Power

変形能力の関係を把握することは重要な課題であり、様々な载荷履歴のもとでの素材レベルでの実験データは、ランダムな外乱である地震荷重下での部材の塑性変形能力を評価する上で、重要な基礎データとなる。

本研究では、一般構造用鋼材 SS400 と建築構造用鋼材 SN400 を対象に、小型要素試験体を用いて载荷履歴をパラメーターとした軸方向繰り返し载荷実験を行った。実験結果について、履歴曲線から抽出した骨格曲線・バウシング部それぞれの吸収エネルギーに着目して整理・検討し、繰り返し载荷を受ける鋼材が破断に至るまでの変形性能を評価する。

2. 要素試験体の軸方向繰り返し载荷実験

2.1 試験体

本研究では板厚 12mm の鋼板から圧延方向と载荷方向が一致するように切り出した図 1 に示す形状を有する要素試験体を用いて、軸方向繰り返し载荷試験を行った。試験体一覧をパラメーターと併せて表 1 に示す。本実験では鋼材(ロット)と 2.3 節で説明する载荷履歴がパラメーターとなっており、SS400 材について 4 ロット 28 体、SN400 材について 1 ロット 18 体の計 46 体の試験体を用いた。JIS-1A 号試験片による使用鋼材の引張試験結果を図 2 に示す。試験区間は幅 40mm で長さ 100mm(FF01,02,03 のみ長さ 80mm)であり、試験区間両端の接合部には試験区間の軸方向長さの変化を計測するため、変位計接続用のねじ棒が点付け溶接されている。また、試験区間端部は応力集中による早期破断を回避するためコーナー R をとっており、鋼材①～④(SS400)を用いた試験体では $R=10\text{mm}$ 、鋼材⑤(SN400)を用いた試験体では $R=20\text{mm}$ とした。

図1 試験体形状

図2 使用鋼材の公称応力度-公称歪度関係

図3 セットアップ

2.2 実験方法

セットアップを図 3 に示す。载荷には機械式 500kN 試験機を用い、圧縮力下での試験区間における座屈を抑えるため、試験体周囲には図 3 に示す面外変形拘束治具を設置した。この治具は、試験区間において強軸、弱軸ともに面外変形を拘束するものであり、試験体との間には摩擦力の発生を防ぐために一定の隙間を設け、隙間にはテフロンシートを挟んだ。圧縮力下における試験区間での体積増加についても、この隙間とテフロンシートの変形に対応させた。試験体に作用する軸力は試験機クロスヘッドに内蔵されたロードセルで計測し、試験区間の変形については、両端の変位をバネ式変位計で計測した。

2.3 载荷履歴

本実験の主たるパラメーターは、鋼材が受ける軸方向の载荷履歴である。パラメーターの詳細を表 1 に示す。設定した载荷履歴は大きく分けて、①一定の振幅で破断に至るまで繰り返し载荷を行う「定振幅载荷」、②一定の振幅で複数回数繰り返し载荷を行った後引張载荷を行う「定振幅→引張载荷」、③同一の振幅で複数回繰り返し载荷を行う漸増振幅载荷を行った後引張载荷を行う「漸増振幅→引張载荷」、④一定振幅で複数回数繰り返し载荷を行った後、中央値を引張側にオフセットさせ再び同じ振幅で複数回数繰り返し载荷を行うことを繰り返ししていく「オフセット载荷」、⑤ランダムな履歴で繰り返し载荷を行った後引張载荷を行う「ランダム→引張载荷」、そして⑥「単調引張载荷」の 6 つの基本パターンを設定した。基本パターンの概要を図 4 に示す。図 4 中に示すように、本研究では振幅を全振幅 ϵ_t で表し、振幅の中央値 ϵ_0 、繰り返し数 N と併せて表 1 中に示している。

図4 基本的な载荷パターン

2.4 実験結果

実験結果の一覧を表1に示す。本実験では、試験体に作用した軸力を試験区間の原断面積で除して公称応力度 σ を、試験区間軸方向の長さの変化を試験区間元長さで除して公称歪度 ε を得た。符号は引張側を正とした。これを、体積一定の仮定のもとで、式(1),(2)により真応力度-対数歪関係(σ - ε 関係)に置換した。各载荷パターンでの代表的な実験結果を図5に示す。

$$\sigma = (1 + n\varepsilon) \cdot \sigma \quad (1)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + n\varepsilon) \quad (2)$$

一般的な鋼材の変形性能に関する研究では、亀裂発生日や断面が完全に離れる状態までの変形性能を論じることが多いが、本研究では真応力度-対数歪関係において勾配が負に転じた時点をもって最終状態に達したと判断した。これは鋼材の変形性能と部材の変形性能の対応をマクロに捉えるには、一様伸びレベルでの変形性能を把握

することが適切であると考えることによる。これ以降、この最終状態を以て破断したとする。

また本研究では、試験体の真応力度-対数歪関係を図6に示すように骨格曲線、バウシンガー部、弾性除荷部に分解した。骨格曲線は、圧縮、引張それぞれにおいて初めて達した応力レベルにおける真応力度-対数歪関係であり、骨格曲線の増分をつなぎ合わせた骨格曲線は一方荷試験の結果と良い対応を示すことが知られている^{12)など}。破断するまでに正側・負側それぞれの骨格曲線およびバウシンガー部で吸収した塑性歪エネルギー(W_{s^+} , W_s , W_{s^+} , W_{s^-})を、単位塑性歪エネルギー $\sigma_y \cdot \varepsilon_y = \sigma_y^2 / E$ (σ_y は降伏点、 ε_y は降伏歪、 E は縦弾性係数)で除した等価累積塑性歪倍率 $\bar{\eta}_{s^+}$, $\bar{\eta}_s$, $\bar{\eta}_{s^+}$, $\bar{\eta}_{s^-}$ で表し、表1に示す。併せて、破断するまでの正側・負側それぞれの骨格曲線およびバウシンガー部での履歴塑性歪 ε_{s^+} , ε_s , ε_{s^+} , ε_{s^-} を、降伏歪 ε_y で除して累積塑性歪倍率 η_{s^+} , η_s , η_{s^+} , η_{s^-} で表し、表1に示す。

図5 真応力度-対数歪関係の例

表1 試験体ならびに実験結果の一覧

試験体	鋼種	鋼材	降伏点	載荷パターン	載荷履歴 ^{※1}	$\bar{\eta}_s^+$	$\bar{\eta}_s^-$	$\bar{\eta}_B^+$	$\bar{\eta}_B^-$	η_s^+	η_s^-	η_B^+	η_B^-
B01	SS400	①	291.4	定振幅→引張載荷	6%(0%)×10→引張	236.9	58.2	400.6	384.8	163.3	49.1	351.6	328.0
B05				漸増振幅→引張載荷	6%(0%)×5→7%(0.5%)×5→8%(1%)×5→引張	211.7	76.3	774.0	706.3	141.3	61.6	624.1	582.4
B06				定振幅載荷	6%(0%)×57.5	64.0	64.6	2517.0	2464.8	51.4	53.2	2096.9	2057.4
B07				定振幅→引張載荷	6%(0%)×50→引張	161.5	65.4	2155.4	2190.9	114.2	53.5	1848.3	1805.6
B08				定振幅→引張載荷	6%(0%)×40→引張	192.1	57.1	1769.7	1686.3	129.9	48.6	1469.4	1436.6
B09				漸増振幅→引張載荷	6%(0%)×5→7%(0.5%)×5→8%(1%)×5→9%(1.5%)×5→引張	219.6	103.9	1162.6	1084.9	146.0	78.5	903.6	853.8
B10				漸増振幅→引張載荷	6%(0%)×5→7%(0.5%)×5→8%(1%)×5→9%(1.5%)×5→10%(2%)×5→引張	108.4	128.5	1550.2	1465.7	82.7	80.4	1220.3	1148.0
B15				ランダム→引張載荷	ランダム履歴 ^{※2} ×1→引張	221.1	13.1	50.4	21.4	145.1	13.6	47.5	26.4
B18				ランダム→引張載荷	ランダム履歴 ^{※2} ×2→引張	220.5	16.9	117.1	48.8	139.6	16.7	101.1	59.7
B20				定振幅載荷	4.2%(0%)×143.5	52.4	50.3	4253.3	4374.2	43.1	42.0	3762.7	3758.9
B49				単調引張載荷		220.4			143.8	—	—	—	—
D1	SS400	②	304.7	単調引張載荷		199.9				123.4	—	—	—
D20				定振幅→引張載荷	2.5%(1.25%)×1→引張	193.5	15.8	6.8	0.0	128.5	16.0	12.2	0.0
D22				定振幅→引張載荷	5%(2.5%)×1→引張	212.6	38.5	23.2	23.2	136.1	32.6	25.0	0.0
D29				定振幅→引張載荷	7.5%(3.75%)×1→引張	187.4	61.7	43.0	0.0	127.1	46.9	35.9	0.0
D34				定振幅→引張載荷	5%(0%)×3→引張	197.4	52.5	81.5	66.7	132.2	43.0	70.1	54.5
D58				定振幅→引張載荷	10%(0%)×3→引張	140.1	104.6	191.3	145.4	96.8	76.7	133.6	103.8
D62				定振幅→引張載荷	2.4%(0%)×3→引張	195.8	18.4	18.0	15.2	130.9	17.5	17.2	14.9
E01	SS400	③	245.2	単調引張載荷		265.7				143.0	—	—	—
E02				定振幅→引張載荷	6.4%(0%)×10→引張	220.7	75.3	627.8	604.2	126.8	50.5	435.1	402.3
E05				漸増振幅→引張載荷	6.4%(0%)×5→7.4%(0.5%)×5→8.4%(1%)×5→引張	246.6	121.1	1221.7	1204.1	144.9	75.1	801.4	757.7
F01	SS400	④	242.6	単調引張載荷		324.7				183.7	—	—	—
F02				定振幅載荷	4.2%(0%)×180.5	68.1	68.7	7280.5	7619.5	50.4	49.6	5616.1	5615.1
F03				定振幅→引張載荷	6.2%(0%)×41→引張	206.9	80.1	2726.7	2837.3	128.8	55.5	1865.6	1904.6
F04				定振幅載荷	4.2%(0%)×123.5	71.9	54.6	5176.8	5330.9	51.7	40.0	3875.7	3873.8
FF01				単調引張載荷		322.1				183.7	—	—	—
FF02				オフセット載荷	3.9%(9.55%)×141.5	126.0	43.3	5551.8	5636.6	83.1	28.8	4136.0	4095.9
FF03				オフセット載荷	5.7%(9.65%)×41→引張	146.9	73.6	2793.6	2623.7	92.9	45.5	1861.2	1749.5
S20	SN400	⑤	276.1	単調引張載荷		196.9				120.1	—	—	—
S21				定振幅載荷	5.6%(0%)×48.5	97.6	97.8	2421.5	2426.4	67.7	63.3	1703.8	1698.7
S23				定振幅載荷	3.6%(0%)×126.5	52.1	56.6	3690.0	3675.7	39.0	43.5	2851.9	2852.9
S24				定振幅載荷	1.6%(0%)×532.5	25.8	25.6	5032.6	5078.8	20.4	19.2	4479.5	4508.1
S25				定振幅載荷	2.6%(0%)×234.5	37.9	36.6	4440.8	4462.3	30.3	30.0	3765.9	3765.9
S26				オフセット載荷	1.8%(1.9%)×449.5	52.7	51.0	3133.4	3146.0	23.0	19.0	4603.1	4625.7
S27				オフセット載荷	3.8%(1%)×109.5	52.7	51.0	3133.4	3146.0	40.7	39.4	2498.6	2487.2
S28				オフセット載荷	3.5%(4.8%)×97.5	63.6	38.4	2835.8	2833.0	47.3	28.2	2225.0	2198.4
S29				オフセット載荷	3.6%(-1.1%)×106.5	49.3	49.8	3035.2	3016.9	37.5	39.4	2413.6	2401.3
S30				オフセット載荷	3.6%(0%)×10→3.6%(1%)×10→3.6%(2%)×10→3.6%(3%)×10→3.5%(4%)×10→3.5%(5%)×10→3.5%(6%)×10→3.5%(7%)×10→3.5%(8%)×6.5	70.0	51.7	2607.2	2471.1	51.3	40.0	1995.3	1935.5
S31				オフセット載荷	3.5%(7.7%)×92.5	97.4	31.3	2593.9	2542.6	67.4	22.9	2071.6	2056.3
S32				オフセット載荷	3.7%(0%)×6→3.6%(1%)×4→3.6%(2%)×5→3.6%(3%)×5→3.5%(4%)×4→3.5%(5%)×5→3.5%(6%)×6→3.5%(7%)×4→3.5%(8%)×5→3.4%(9%)×5→3.4%(10%)×6→3.4%(11%)×4→4.1%(11.5%)×5→4.7%(12%)×6→4%(14%)×5→4%(15%)×4→4%(16%)×4.5	81.4	61.9	2646.8	2498.4	58.6	46.7	2056.0	1966.4
S33				オフセット載荷	3%(0%)×5→3%(0.3%)×5→3%(0.6%)×5→3%(0.9%)×5→3%(1.2%)×4→3%(1.5%)×5→2.9%(1.8%)×5→2.9%(2.1%)×5→2.9%(2.4%)×5→2.9%(2.7%)×5→2.9%(3%)×6→2.9%(3.3%)×6→2.9%(3.6%)×5→2.9%(3.9%)×5→2.9%(4.2%)×5→2.9%(4.5%)×5→2.9%(4.8%)×5→2.8%(5.1%)×5→2.8%(5.4%)×5→2.8%(5.7%)×5→2.8%(6%)×5→2.8%(6.3%)×5→2.8%(6.6%)×5→2.8%(6.9%)×5→2.8%(7.2%)×5→2.8%(7.5%)×5→2.7%(7.8%)×5→2.7%(8.1%)×5→3%(8.4%)×5→3%(8.6%)×5→3%(8.9%)×5→3%(9.2%)×5→3%(9.5%)×5→2.8%(9.8%)×5→2.7%(10%)×5→2.7%(10.2%)×5→2.7%(10.5%)×5→2.7%(10.8%)×5→2.7%(11.1%)×5→2.7%(11.4%)×5→2.7%(11.7%)×6→2.7%(12%)×5→2.7%(12.3%)×4→2.7%(12.6%)×6→2.7%(12.9%)×5→2.7%(13.2%)×3.5	40.4	39.0	4818.2	4776.0	39.2	29.2	3761.6	3710.8
S34				オフセット載荷	3%(0%)×5→3%(0.28%)×5→3%(0.6%)×5→3%(0.9%)×5→3%(1.2%)×5→3%(1.5%)×5→2.9%(1.8%)×5→2.9%(2.1%)×5→2.9%(2.4%)×5→2.9%(2.7%)×5→2.9%(2.9%)×5→2.9%(3.2%)×5→2.9%(3.5%)×5→2.9%(3.8%)×5→2.9%(4.1%)×5→2.9%(4.4%)×5→2.9%(4.7%)×5→2.8%(5.0%)×5→2.8%(5.2%)×5→2.8%(5.5%)×5→2.8%(5.8%)×5→2.8%(6.1%)×5→2.8%(6.4%)×5→2.8%(6.6%)×5→2.8%(6.9%)×5→2.8%(7.2%)×5→2.8%(7.5%)×5→2.8%(7.8%)×5→2.8%(8.0%)×5→2.8%(8.3%)×5→2.7%(8.6%)×5→2.7%(8.9%)×5→2.7%(9.2%)×5→2.7%(9.4%)×5→2.7%(9.7%)×5→2.7%(10.0%)×5→2.7%(10.3%)×5→2.7%(10.5%)×5→2.7%(10.8%)×5→2.7%(11.0%)×5→2.7%(11.3%)×5→2.7%(11.6%)×5→2.7%(11.8%)×5→2.7%(12.1%)×5→2.7%(12.4%)×5→2.6%(12.6%)×5→2.6%(12.9%)×5→2.6%(13.1%)×5→2.6%(13.4%)×5→2.6%(13.7%)×4.5	46.7	32.7	4756.3	4364.9	36.9	27.4	3867.6	3772.6
S35				オフセット載荷	2.6%(13.5%)×151.5	163.6	18.7	2650.6	2621.3	104.0	13.7	2191.4	2232.3
S36				定振幅載荷	2.6%(0%)×251.5	40.4	39.0	4818.2	4776.0	32.2	31.8	3998.2	3986.3
S37				オフセット載荷	2.3%(15.8%)×143.5	189.6	17.7	2424.6	2336.4	116.6	12.8	1995.0	1993.1
S39				オフセット載荷	3.6%(0%)×5→3.6%(0.5%)×5→3.6%(1%)×5→3.6%(1.5%)×5→3.5%(1.9%)×5→3.5%(2.4%)×5→3.6%(2.9%)×5→3.5%(3.4%)×5→3.5%(3.9%)×5→3.5%(4.4%)×5→3.5%(4.8%)×5→3.4%(5.3%)×5→3.4%(5.8%)×5→3.4%(6.3%)×5→3.4%(6.7%)×5→3.4%(7.2%)×5→3.4%(7.7%)×5→3.3%(8.1%)×5→3.3%(8.6%)×5→3.3%(9%)×5→3.3%(9.5%)×5→3.3%(10%)×5→3.3%(10.4%)×3.5	63.9	48.8	3191.2	3025.6	49.3	39.5	2534.1	2483.7

※1 表記は全振幅 e_c (振幅の中央値 e_0)×繰返し数 N , ※2 弾塑性応答解析結果(応答変位の履歴)を基に作成

3. 骨格曲線に着目した鋼材要素の塑性変形能力評価

鋼材が延性的に破断するまでの塑性変形能力は、履歴に占める骨格曲線とバウシニング部の割合との間に強い関係があることが、載荷履歴をパラメータとした丸棒の曲げ実験によって明らかにされている¹⁶⁾。軸方向に繰り返し荷重を受ける鋼材要素の塑性変形能力が同様に評価できるかを検討する。検討にあたり、まず破断するまでに吸収した歪エネルギーの総量を単位塑性歪エネルギーで除した等価累積塑性歪倍率 $\bar{\eta}_T$ で表す。 $\bar{\eta}_T$ は表 1 中に示した正側と負側それぞれの骨格曲線およびバウシニング部の等価累積塑性歪倍率 $\bar{\eta}_S^+$ 、 $\bar{\eta}_S^-$ 、 $\bar{\eta}_B^+$ 、 $\bar{\eta}_B^-$ の総和である。さらに、異なる鋼材のエネルギー吸収能力を統一的に評価するため、単調引張荷重を行った試験体の等価累積塑性歪倍率 $\bar{\eta}_S^+$ を $\bar{\eta}_0$ とし、これで基準化したうえで検討を行う。

破断するまでに鋼材が吸収できるエネルギー量と、引張側骨格曲線での吸収エネルギーの関係を、 $\bar{\eta}_T/\bar{\eta}_0$ と $\bar{\eta}_S^+/\bar{\eta}_0$ の関係としてプロットし、図 7 に示す。載荷履歴によらず両者の関係は図中に破線で示した式(3)で代表できる。

$$\begin{aligned} \bar{\eta}_T/\bar{\eta}_0 &= 50(1 - \bar{\eta}_S^+/\bar{\eta}_0) + 1 \\ (0.13 \leq \bar{\eta}_S^+/\bar{\eta}_0 \leq 1.0) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)は歪エネルギーによる整理であり、鋼材のエネルギー吸収能力の直接的な表現であるが、部材の限界変形などを検討する上では歪で表した方が扱いやすい。そこで、破断するまでの累積塑性歪倍率である、正側と負側それぞれの骨格曲線およびバウシニング部の累積塑性歪倍率 η_S^+ 、 η_S^- 、 η_B^+ 、 η_B^- の総和 $\eta_T = \eta_S^+ + \eta_S^- + \eta_B^+ + \eta_B^-$ と、引張側骨格曲線での累積塑性歪倍率 η_S^+ の関係を、単調引張荷重を行った試験体の累積塑性歪倍率 η_S^+ を η_0 とし、 η_T/η_0 と η_S^+/η_0 の関係としてプロットし、図 8 に示す。 η_T/η_0 と η_S^+/η_0 で整理した場合についても、載荷履歴によらずほぼ図中に破線で示した式(4)で代表できる関係が見られる。

$$\begin{aligned} \eta_T/\eta_0 &= 70(1 - \eta_S^+/\eta_0) + 1 \\ (0.17 \leq \eta_S^+/\eta_0 \leq 1.0) \end{aligned} \quad (4)$$

4. 鋼材要素の塑性変形能力評価法の検討

4.1 Manson-Coffin式による定歪振幅下での繰返し寿命の評価

定歪振幅下における鋼材の繰返し寿命については、振幅と破断に至るまでの繰返し回数の関係で評価することが一般に行われている。振幅については、疲労の領域である線形範囲のみを扱う場合には応力振幅が用いられるが、比較的振幅が大きい非線形領域まで統一的に扱う場合には歪振幅が用いられる^{9)など}。Manson-Coffin 式^{6),7)}は、S(振幅)-N(繰返し回数)関係を低サイクル疲労の領域に拡張したものであり、構造用鋼材の低サイクル疲労寿命の評価法として一般的に用いられているだけでなく、次節で扱う Miner 則と組み合わせることで変動振幅下における損傷評価の基礎式として用いられている。本研究で行った定歪振幅の実験結果について、Manson-Coffin 式(5)を得た。

$$\Delta \varepsilon_p = 0.6 \cdot N_f^{-0.57} \quad (5)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_p$ は塑性歪振幅(歪で表した全振幅 ε_f から $2\sigma_y/E$ を引いた値)、 N_f は破断までの繰返し数である。

図 9 に式(5)を実験結果のプロットと併せて示す。

図6 履歴の分解

図7 $\bar{\eta}_T/\bar{\eta}_0$ - $\bar{\eta}_S^+/\bar{\eta}_0$ 関係 (歪エネルギーによる整理)

図8 η_T/η_0 - η_S^+/η_0 関係 (歪による整理)

4.2 Miner則による累積損傷の評価

定振幅荷重による疲労寿命に基づき変振幅荷重下で受ける損傷を評価する方法として、一般に Miner 則⁸⁾が用いられている。Miner 則では、変振幅荷重を受ける中で、ある振幅での繰返し数が n_i 、その振幅で定振幅荷重を行った場合に破断に至るまでの繰返し数が N_i であるとき、累積損傷度

$$D=\sum(n_i/N_i) \tag{6}$$

が1になると破断に至るとして累積損傷を評価する。定振幅下での破断に至るまでの繰返し数 N_i を式(5)で評価し、各試験体が破断した時点での累積損傷を図10に示す。図中破線で囲った試験体では、累積損傷をかなり低く評価しているが、これらの試験体はわずかな繰返し荷重の後引張荷重を行ったものであり、繰返しによる累積歪が非常に小さいことが特徴である。また、定振幅荷重の実験結果でも誤差の大きなものがある。なお、半サイクルごとの振幅の評価は Rain Flow 法¹⁰⁾により行ったが、より簡便なレンジ法⁹⁾で評価した場合においても同様の結果であった。

引張荷重に移行する前の繰返し荷重による累積歪が小さい場合に累積損傷を過小評価するのは、累積損傷の評価の基となる定振幅下での破断に至るまでの繰返し数 N_i が、 N_i が非常に小さくなる領域で予測できていないことによる。単調引張荷重は、Rain Flow 法によれば一様伸びを全振幅とする半サイクル($N_f=0.5$)の荷重と評価できる。本実験での単調引張荷重の結果を Manson-Coffin 式(5)ならびに定歪振幅の実験結果と比較し図11に示す。単調引張荷重での一様伸びは式(5)では $N_f=4\sim 8$ 程度に相当し、単調引張荷重に近い領域までは予測できていない。これは、本研究において対数歪における破断伸びで整理していないことも原因であると考えられるが、部材の変形能力との対応をマクロに捉えるには一様伸び相当の変形能力で整理することは有効である。一様伸び相当での整理では Manson-Coffin 式では繰返し数 N_i が非常に小さくなる領域で適用できないことを、ここでの考察とする。なお、歪振幅が非常に大きな領域で Manson-Coffin 式と Miner 側による予測精度が悪くなることについては、極低サイクル疲労寿命に関する既往の研究でも指摘されている^{10),18)}など。

図10 Miner 則による累積損傷の評価

図9 定振幅荷重で行った実験結果と Manson-Coffin 式

図11 単調引張荷重の結果と Manson-Coffin 式(5)の対応

4.3 評価法の比較

本節では、3 章で示した骨格曲線に着目した評価法と、4.2 節で示した Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法の比較を行う。なお、骨格曲線に着目した評価法では誤差が等価累積塑性歪倍率あるいは累積塑性歪倍率で表され、Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法では誤差は累積損傷度で表されることから、両者を直接比較することはできない。そこで本研究では、誤差を塑性歪振幅 2%での繰返し数に換算して比較する。

まず骨格曲線に着目した評価法では、式(4)を用いた場合実験結果との誤差は、累積塑性歪倍率で表した誤差 $err\eta_I$ を単調引張载荷を行った試験体の累積塑性歪倍率 η_0 で除した値 $err\eta_I/\eta_0$ で表される。このうち $err\eta_I$ に降伏歪 ε_y を掛けた値が累積塑性歪で表した誤差である。これを塑性歪振幅(全振幅)の 2 倍で除すことで、繰返し数として誤差が表される。

$$errN_{ski} = err\eta_I \cdot \varepsilon_y / (2 \cdot 0.02) \quad (7)$$

なお、誤差には骨格曲線も含まれると考えた場合には、式(4)において右辺に代入する値にも誤差が含まれることになり誤差が一義的に定まらなくなるが、ある程度塑性歪履歴を与えた後に小さな振幅での定振幅载荷を行った場合には、一般に骨格曲線は現れないことから、誤差には骨格曲線は含まれないものとする。一方、Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法による誤差 $errN_{mcm}$ は、式(6)による誤差に式(5)により求めた塑性歪振幅 2%での破断までの繰返し数を掛けることで求まる。

骨格曲線に着目した評価法による誤差 $errN_{ski}$ と Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法による誤差 $errN_{mcm}$ を比較し、図 12 に示す。正の誤差は評価値が実験結果を上回ったこと、すなわち塑性変形能力を過大評価したことを、負の誤差は過小評価したことを表す。骨格曲線に着目した評価法の方が Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法に比べ誤差が小さいことがわかる。また、Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法では载荷履歴により過大評価あるいは過小評価側に誤差が偏るのに対し、骨格曲線に着目した評価法では载荷履歴の違いによる影響も見られない。

Manson-Coffin 式および Miner 則による累積損傷の評価は、疲労から低サイクル疲労まで幅広い振幅域を統一的に評価できるのに対し、骨格曲線およびバウシinger部における歪での評価は、塑性歪が生じることが前提となっており、疲労の領域には適用できない。その反面、一方向载荷をベースとしていることから、繰返しによる累積歪みが極めて小さく単調载荷に近いような場合にも適用できる点の特徴である。大振幅での繰返し回数が極めて少ないだけでなく、場合によっては繰返し変形を受ける前に破断することもある耐震問題を扱う上では、骨格曲線およびバウシinger部による評価が有効である。

5. 結論

一般構造用鋼材 SS400 と建築構造用鋼材 SN400 を対象に、载荷履歴をパラメーターとした小型要素試験体の軸方向繰返し载荷実験を行い、破断に至るまでの変形性能の評価を行った。あわせて、一般に繰返し载荷を受ける鋼材の変形能力評価法として用いられ

図12 評価法による誤差の比較

ている Manson-Coffin 式および Miner 則による評価も行った。得られた結論を以下にまとめる。

- 1)任意の载荷履歴のもとで軸方向繰返し载荷を受ける鋼材が破断するまでのエネルギー吸収能力と、引張側骨格曲線での吸収エネルギーの間には、式(3)で表される関係がみられる。
- 2)破断するまでの変形能力を累積塑性歪倍率で表すと、鋼材のエネルギー吸収能力の直接的な表現である式(3)同様、式(4)で表すことができる。
- 3)Manson-Coffin 式および Miner 則による累積損傷の評価では、歪振幅が非常に大きい場合、すなわち単調引張载荷に近いような場合には累積損傷をかなり低く評価する。これは、既往の極低サイクル疲労寿命に関する研究でも指摘されている現象であるが、累積損傷の評価の基となる定振幅下での破断に至るまでの繰返し数 N_i について、塑性変形能力の限界を一樣伸び相当で考えた場合には、歪振幅が非常に大きな領域で予測できないことも一因である。
- 4)骨格曲線に着目した評価法と、Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法では、骨格曲線に着目した評価法の方が Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法に比べ誤差が小さい。また、Manson-Coffin 式と Miner 則による評価法では载荷履歴により過大評価あるいは過小評価側に誤差が偏るのに対し、骨格曲線に着目した評価法では载荷履歴の違いによる影響も受けにくい。
- 5)Manson-Coffin 式および Miner 則による累積損傷の評価は、疲労から低サイクル疲労まで幅広い振幅域を統一的に評価できるのに対し、骨格曲線およびバウシinger部における歪での評価は、塑性歪が生じることが前提となっており、疲労の領域には適用できないが、繰返しによる累積歪みが極めて小さく単調载荷に近いような場合にも適用できる。大振幅での繰返し回数が極めて少ないだけでなく、場合によっては繰返し変形を受ける前に破断することもある耐震問題を扱う上では、骨格曲線およびバウシinger部による評価が有効である。

謝辞

本研究における実験の一部は、元東京工業大学大学院生小林亜希さんの修士課程における研究として行ったものである。

参考文献

- 1)秋山 宏: 建築物の耐震極限設計 第2版, 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)中込忠男, 見波 進, 深沢 隆, 新井 聡, 大野京子: 柱梁接合部の脆性破壊に及ぼす柱軸力の影響に関する破壊力学的検討, 日本建築学会構造系論文集 第486号, pp.125-132, 1996.8
- 4)桑村 仁, 松本由香, 武谷政國: 熱間成形および冷間成形角形鋼管の脆性破壊, 日本建築学会構造系論文集 第494号, pp.129-136, 1997.4
- 5)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
- 6) S.S. Manson, Behavior of materials under conditions of thermal stress, NASA TND, 2933, 1954
- 7) L.F. Coffin JR., N.Y. Schenectady, A study of the effect of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Transactions of the ASME, pp.931-950, 1954.8
- 8) Milton A. Miner, Santa Monica, Cumulative Damage in Fatigue, Journal of Applied Mechanics, pp. A159-A164, 1945.9
- 9)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技法堂出版, 1993
- 10)嶋田 勝紀, 小茂島 潤, 清水 真佐男: 極低サイクル疲労における Manson-Coffin 則の適用性と累積損傷, 日本機械学会論文集(A 編), 53 巻 491 号, pp.1178-1185, 1986.7
- 11)中込忠男, 李 建: 繰返し力を受ける SM490A 鋼の疲労性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第469号, pp.127-136, 1995.3
- 12)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, 1970.9
- 13)日本建築学会: 建築物の耐震性能評価手法の現状と課題 -限界耐力計算・エネルギー法・時刻歴応答解析-, 2009.2
- 14)山田 哲, 鄭 景洙, 吉敷祥一: 繰返し荷重を受ける鋼部材と鋼材の損傷の関係, 日本建築学会構造系論文集 第603号, pp.139-146, 2006.5
- 15)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
- 16)秋山 宏, 高橋 誠, 石 軍: 繰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
- 17)遠藤達雄, 松石正典, 光永公一, 小林角市, 高橋清文: 「Rain Flow Method」の提案とその応用, 九州工業大学研究報告(工学), No.28, pp.33-62, 1974.3
- 18)館石和雄, 判治 剛, 南 邦明: 極低サイクル疲労領域における変動振幅ひずみ下の低サイクル疲労寿命予測モデル, 土木学会論文集, No.773, I 69, pp.149-168, 2004.10

(2010年5月7日原稿受理, 2010年7月14日採用決定)