

繰り返し大ひずみ下における鋼材の応力-ひずみ挙動

休場 裕子*, 三木 千壽**

* MSc. 東京工業大学大学院 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

鋼材の応力-ひずみ挙動に関しては、古くから様々な研究がなされているが、地震時のような大きなひずみが繰り返す場合については未だ不明な点も多い。本研究では、ハイブリッドテストの結果を含む様々なひずみを与えた低サイクル疲労試験により、二種類の溶接用鋼材(SM490BとSM570Q)の応力-ひずみ挙動を検討した。それぞれ、挙動が変化する境界となるひずみが存在する傾向が見られ、動的応答解析等に用いるための構成則として表現していくには、さらなる実験の積み重ねが必要である。

Keywords : Structural Steel, Stress-strain Curve, Low Cycle Fatigue Test, Earthquake Loading

1. はじめに

先の阪神大震災で見受けられたような鋼製橋脚の損傷挙動に関しては、数多くの数値解析が行われてきている。しかし、その際の材料の振る舞いにおいては、既存の研究で検討されているひずみ領域をはるかに越えた領域であるにも関わらず、さほど検討が行われていない。著者らが被災した円筒形鋼製橋脚の各種材料試験を行った結果、鋼材は脆性破壊の危険性を十分に持つほどにまで劣化していたことが明らかになっている¹⁾。

鋼材における応力-ひずみ関係については、古くから数多くの研究がなされている。近年では、鋼材の一軸引張・圧縮試験結果を用いて、繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚などの数値解析が、非線形領域に渡っても広く行われるようになってきた。

皆川らは多曲面モデルである、Peterson-Popovモデルを基に、引張試験と数種の引張・除荷試験により、繰り返し塑性モデルを提案した²⁾。そこでは、繰り返し載荷のプロセスは、次の応力-ひずみ関係に影響を与えるものと与えないものに分けられ、前サイクルの塑性ひずみを超える塑性ひずみを有効として、解析的検討が進められている。元にしたモデルでのパラメータである、履歴影響のない場合の曲面サイズと履歴影響が定常となったときの曲面サイズに加えて、ひずみ硬化開始点における曲面サイズを導入することにより、より精度の高い結果を得ている。

また、沈らは、降伏曲面と境界曲面を仮定する、二曲面モデルのDafalias-Popovモデルを基に開発したモデルをさらに一般化したモデルを提案した^{3), 4)}。一軸の引張・圧縮試験を元に得た、モデルによる計算値は、降伏棚内での繰り返し挙動の場合にも、多軸応力状態での繰り返し挙動を予測できると示している。

一方、西村らは、単調載荷曲線を基本にした構成式を、3種類の引張・圧縮試験を用いて、材料定数を求めるこ

とにより検討している⁵⁾。鋼材の繰り返し応力-ひずみ曲線は、単調載荷曲線の一部をなす領域、弾性遷移領域、非線形遷移領域の3つに分けて考えることができるとして、構成式を考案している。

しかし、いずれも繰り返し時の降伏棚や加工硬化係数の扱い中心に低サイクル疲労の起きない比較的小さなひずみ範囲を対象にしたもので、阪神大震災において、一部の鋼製橋脚に生じたような破壊現象を説明するにはさらなる検討が必要と考えられる。

一方、鋼材の低サイクル疲労に関しては、航空機や各種圧力容器への使用を踏まえて、機械の分野で広く研究されている。焼き鈍しを行った低炭素鋼を用いて、繰り返しの引張・圧縮ひずみによる、その劣化および損傷挙動が加工硬化と表面き裂の伝播等と関連付けて検討されている。低サイクル疲労寿命は表面の微小き裂の大きさに代表され、高サイクル疲労と同様に微小き裂の伝播が成立することが示されている⁶⁾。しかし、その際に内部に蓄積される損傷の物理的実体は明らかではなく、大谷らは、残留破断延性値を用いて、ひずみ振幅により3通りに分けられると論じている⁷⁾。それらは、ひずみ振幅の小さい順に表面き裂の生成・発達、パーライト割れの介在による表面き裂の成長、パーライト割れを起点とする内部き裂の生成・発達である。

そこで、本研究では、地震時などの大きな繰り返しひずみがかかる場合を想定した際の鋼材の応力-ひずみ関係に注目し、それに対して、構成則の確立の可能性を探る。その第一歩として、二種類の溶接用鋼材に対して、大ひずみ範囲での低サイクル疲労試験を行い、疲労挙動の特性の検討を行う。また、円筒形構成橋脚モデルに対するハイブリッドテストで得られたひずみデータも入力ひずみとして用いた。

2. 低サイクル疲労試験

2.1 供試材料および試験片

橋梁に多用されている SM490B および SM570Q の溶接用鋼材を試験材として用いた。表-1、表-2にそれらの機械的性質および化学成分を示す。

表-1 試験材の機械的性質

材料	板厚 [mm]	σ_Y [MPa]	σ_U [MPa]	伸び [%]	CVN(T) [J]
SM490B	20	356	518	28	299 (-5)
SM570Q	20	560	659	39	191 (0)

但し、 σ_Y 降伏点

σ_U 引張強さ

CVN(T) T℃におけるシャルピー吸収エネルギー

表-2 試験材の化学成分 (重量%)

材料	C	Si	Mn	P	S
SM490B	0.16	0.33	1.24	0.016	0.003
SM570Q	0.14	0.23	1.44	0.012	0.005

試験片は、圧縮応力のかかった時の座屈を極力避け、かつ径方向の伸び計を取り付けるために、13mmの平行部をもった図-1のような丸棒試験片を用いた。l₀/d₀は1.44である。

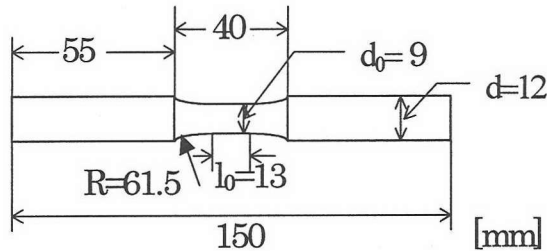


図-1 試験片

2.2 低サイクル疲労試験方法

低サイクル疲労試験には、MTS810 材料試験システム (容量 5 tonf) を使用した。図-2に試験片の設置状況を示す。径方向伸び計を図-1の試験片の平行部に取り付け、ポアソン比を弾性域で 0.3、塑性域で 0.5 として、換算された軸方向のひずみを制御して行った。

試験中のき裂の観察は、随時、顕微鏡を用いて行った。

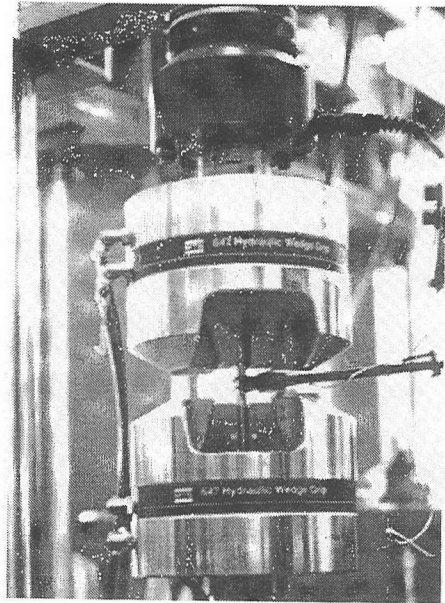


図-2 低サイクル疲労試験状況

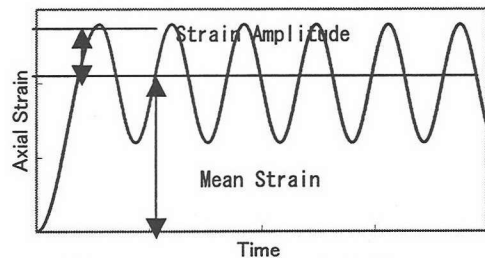
2.3 試験条件

試験条件をまとめて表-3に示す。軸方向のひずみは、定常ひずみ試験においては、ひずみ速度が 0.05%/秒を超えない程度で、正弦波で与えた。ひずみ波形を図-3の(a)に示す。4%から9%のひずみ振幅での完全両振り試験と、4%のひずみ振幅に対して、-4%から+10%の平均ひずみを与えた試験を行った。SM570Qの二体以外は、引張ひずみを与えることから試験を開始した。

ハイブリッドタイプは、先に行った、阪神大震災における神戸海洋気象台の加速度記録を用いた鋼管柱に対するハイブリッド試験での結果⁸⁾を用いた。図-3(b)に示す、最大ひずみの観測された点でのひずみゲージによる記録のピーク値を拾い、ランプ波で与えた。図に示す実験記録を1ブロックとして、破断まで繰り返し与えた。

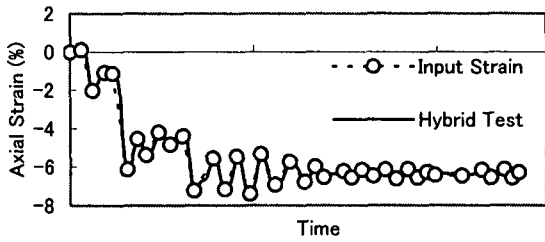
表-3 試験条件

タイプ	材料	試験片数	試験条件
定常ひずみ	SM490B	6	パラメータ： ひずみ振幅， 平均ひずみ
	SM570Q	14	
ハイブリッド	SM490B	2	図-3の 入力ひずみ



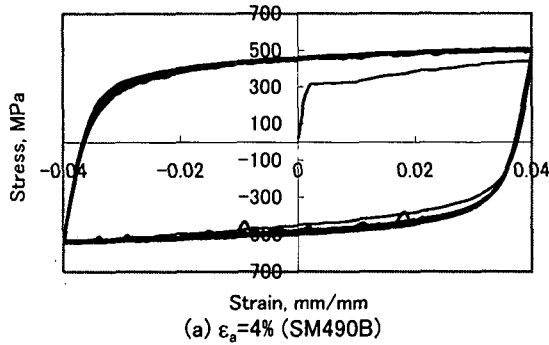
(a) Constant Strain Amplitude Type

図-3 入力ひずみ

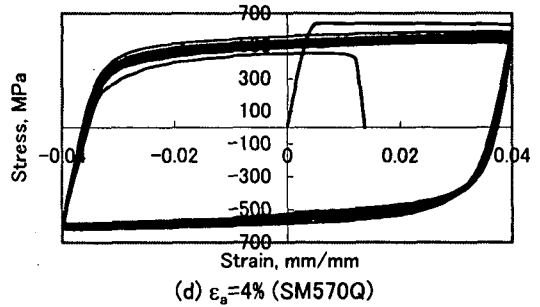


(b) Hybrid Type

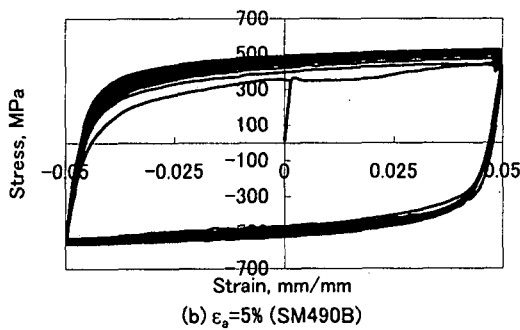
図-3 入力ひずみ(続き)



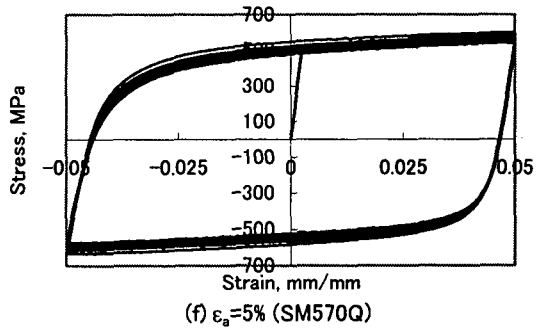
(a) $\epsilon_a=4\%$ (SM490B)



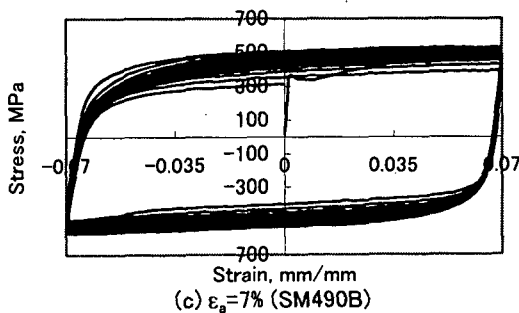
(d) $\epsilon_a=4\%$ (SM570Q)



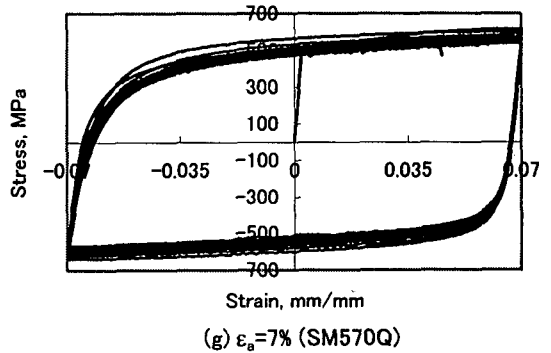
(b) $\epsilon_a=5\%$ (SM490B)



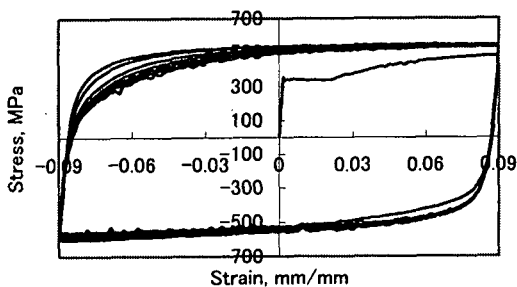
(f) $\epsilon_a=5\%$ (SM570Q)



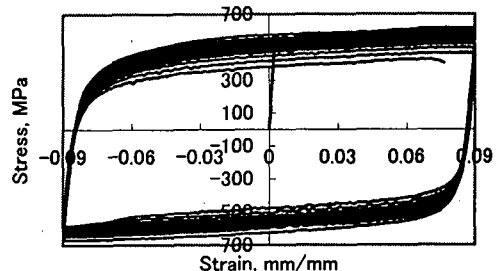
(c) $\epsilon_a=7\%$ (SM490B)



(g) $\epsilon_a=7\%$ (SM570Q)



(e) $\epsilon_a=9\%$ (SM490B)



(h) $\epsilon_a=9\%$ (SM570Q)

図-4 応力-ひずみ曲線

3. 定常ひずみ低サイクル疲労試験結果

3.1 応力-ひずみ関係

各材料の4, 5, 7および9%のひずみ振幅での応力-ひずみ曲線を図-4に示す。

まず, SM490B 材では繰り返し硬化の程度が, SM570Q 材では繰り返し軟化の程度が, ひずみ振幅が増すにつれて小さくなっていることが観測される。特に, 大きなひずみ振幅を与えた SM490B 材では, 次節の応力範囲の変動にも示すように, 繰り返し硬化の性質を持つのは, 最初の数回の繰り返しだけである。

さらに, 応力-ひずみ曲線の変動幅は, いずれの鋼材

においても、ひずみ振幅が大きいほど大きくなっている。図-5の SM490B 材に 4%および10%の平均ひずみと 4%のひずみ振幅を与えた場合の応力-ひずみ曲線と併せて考えると、変動幅は、ほぼひずみ振幅に依存しているといえるのではないだろうか。

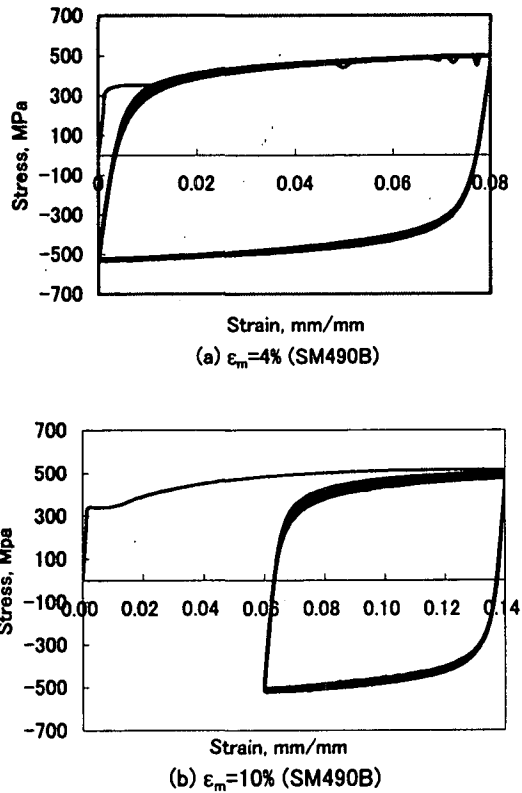
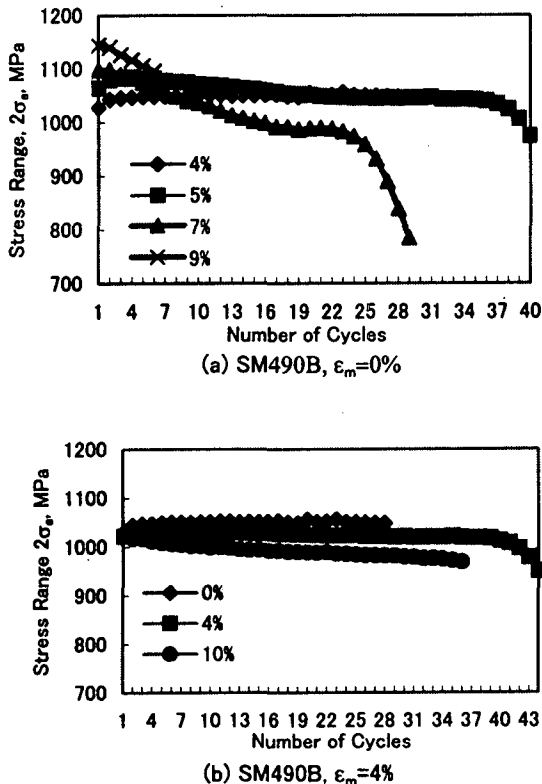


図-5 応力-ひずみ曲線



3. 2 応力範囲の変化

最初の荷重反転後の最大圧縮応力と、それに続く反転での最大引張応力の差を応力範囲として、各ひずみごとに繰り返し回数との関係を図-6のように整理した。

SM490B 材では、ひずみ振幅 9%の試験は途中で止まってしまったが、4, 5%の結果と 7, 9%の結果は大きく傾向が異なることが読み取れる。しかし、平均ひずみの相違による比較では、第 1 回目の応力範囲はほぼ同じであり、その後、いずれも程度は違うが、ゆるやかなカーブを描く。

また、SM570Q 材では、9%のひずみ振幅のもののみ、他の 4, 5, 7%のものとは異なった履歴を示している。平均ひずみの違いは、圧縮側から与えたものも含め、平均ひずみが小さい順に応力の高い側からほぼ同じような形状のカーブを描き、並んでいる。

以上のように、SM490B 材ではひずみ振幅 5%と 7%の間に、SM570Q 材では 7%と 9%の間で、応力-ひずみ挙動の違いが見受けられた。鋼材は、このようなひずみ範囲でも、挙動が遷移する境界があると思われる。

3. 3 繰り返しループ間の弾性係数の変化

前節における応力範囲の変化より、SM490B 材では、ひずみ振幅 5%と 7%の間で、傾向の違いが見受けられた。そこで、各ループでの線形部分から、弾性係数の変化を図-7のように整理した。応力-ひずみ曲線の傾き、すなわち弾性係数は、荷重反転時からのカーブを最小二乗法によって、寄与率 $R^2 = 0.995$ (相関係数 $R = 0.997$) を満足する最大限のひずみ領域から求めた。

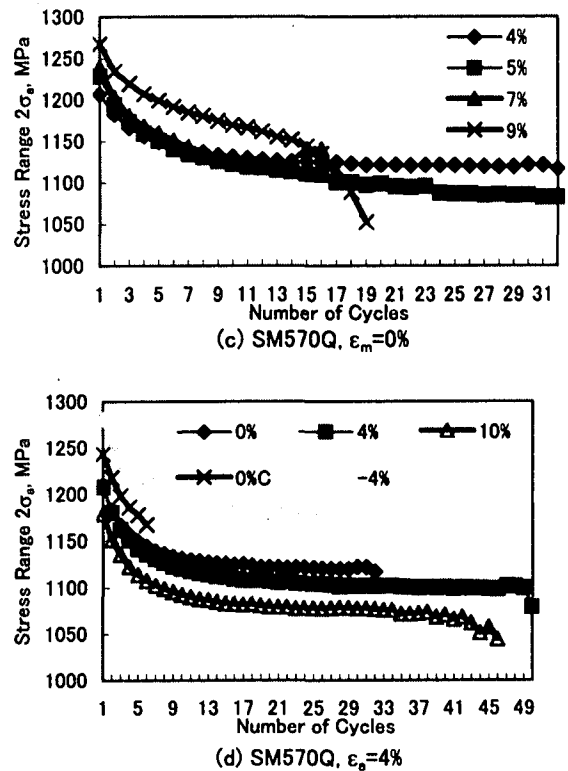


図-6 応力範囲の変動

ここで、引張・圧縮は、それぞれ引張ひずみ域、圧縮ひずみ域のことである。引張ひずみ域では、ほぼ一定した弾性係数を持つにも関わらず、圧縮ひずみ域では、その挙動が大いに異なる。

特に、ひずみ振幅7%のものは、繰り返し回数20回ぐらいいまで、極端な上昇を見せる。ここでは、同時に直線と近似できるひずみ領域も極端に小さくなっていく。図-4で示したとおり、応力-ひずみ曲線は、繰り返し回数が増すにつれて、かなり初期段階から、応力の絶対値が小さくなる方向へと移動していく。応力-ひずみ曲線を見ると、弾性係数は減少していくように思えるが、直線部分の極端な減少のため、数値化するとこのような現象となる。

ひずみ振幅5%のものは、繰り返し回数10-20前後で、多少の上昇が見られ、30回以降で、減少が見られるが、前述のひずみ振幅7%のものとは比べると、その変化は、前節の応力範囲の傾向と同様に、非常にゆるやかである。

さらに、ここには示していないが、ひずみ振幅4、9%のものも大まかに検討したところ、前節と同様、ひずみ振幅5%と7%の間に、応力-ひずみ挙動の変化の境界があるように思われる。

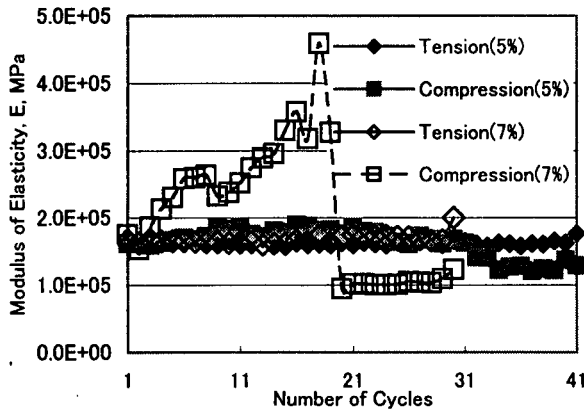


図-7 弾性係数の変動

4. ハイブリッドタイプ試験結果

4.1 応力-ひずみ関係

図-3(b)に示す入力ひずみを用いたSM490B材に対する試験結果を、図-8に1回目とノイズの少ない4回目の応力-ひずみ関係を示す。2回目以降は、ほぼ同じカーブを描いている。

1回目のカーブと比べると、最初の数回の繰り返しにおいてのみ、4回目と差が見られる。そして、その差は鋼材が繰り返し軟化をする傾向で表れている。さらに、鋼材が一度、-6%程度のひずみを経験した後は、ほぼ同様のカーブを描いている。

これより、ひずみの繰り返しにより、鋼材が早期にその特性を失ったことが考えられる。

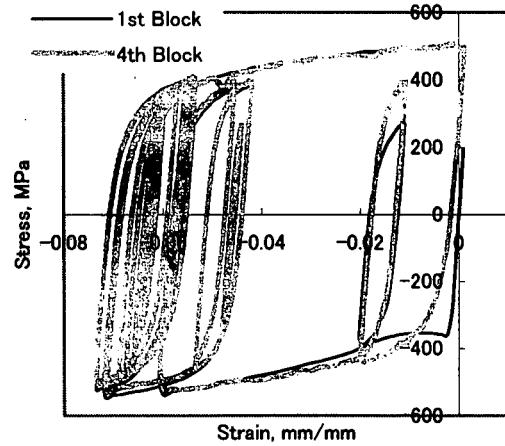


図-8 応力-ひずみ曲線 (H-1)

4.2 各振幅間の応力-ひずみ曲線の比較

前述の応力-ひずみ曲線を各振幅に分けて、応力がゼロとなる場合にひずみがゼロとなるように、曲線をずらして、図-9のように比較した。前節と同様にカーブの推移から、この鋼材が早期にその特性を失ったことが考えられる。

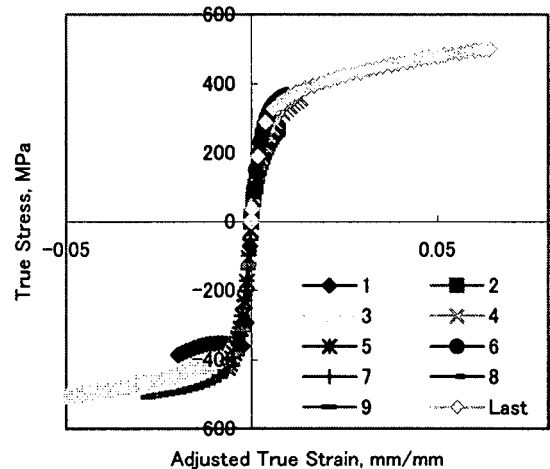


図-9 各振幅の比較 (H-1)

5. 構成則への応用の可能性

これまでの述べたように、大ひずみ領域での鋼材の応力-ひずみ関係は、これまでの考え方では対応できないような傾向が見られる。

第一に、明らかに見受けられた繰り返しの初期における、鋼材の繰り返し特性の損失があげられる。第二に、線形性を持つ部分の判断が難しいと思われる。

6. まとめ

大ひずみ繰り返し時の鋼材の挙動を理解するために、二種類の溶接構造用鋼材に対して、低サイクル疲労試験を行った。得られた知見は以下のようにまとめられる。

1. 大ひずみ領域での応力-ひずみ曲線は、ひずみ振幅が大きくなるにつれ、その繰り返し過程における変動幅が大きくなる。
2. 応力範囲の検討により、いずれの材料にも、繰り返し挙動が遷移する境界があるように見受けられる。
3. 鋼材は、繰り返しの初期段階で、鋼材の挙動に変化が現れるのは、定常ひずみ振幅のものとはハイブリッドテストのものとは共通している。
4. これら大ひずみの繰り返しから構成側を導き出すには、挙動の違いが存在することから、さらなる試験が必要だと思われる。

参考文献

- 1) 三木千壽, 休場裕子, 沖中知雄: 阪神大震災により円形断面構成橋脚に生じた脆性破壊の材料特性からの検討, 土木学会論文集, No.62/I-46, pp.45-53, 1999年1月
- 2) Masaru MINAGAWA, Takeo NISHIWAKI and Nobutoshi MASUDA: Modelling Cyclic Plasticity of Structural Steels, Pros. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.4, No.2, pp.361s-370s, October 1987
- 3) Chi SHEN, Eiji MIZUNO and Tsutomu USAMI: A generalised Two-surface Model for Structural Steels under Cyclic Loading, Pros. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.10, No.2, pp.59s-69s, July 1993
- 4) 田中良仁, 水野英二, 瀧赤, 宇佐美勉: 降伏棚を有する鋼材の繰り返し弾塑性モデル—二曲面塑性モデルの開発—, 構造工学論文集 I, Vol.37A, pp.1-14, 1991年3月
- 5) 西村宣男, 小野潔, 池内智行: 単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.27-38, 1995年4月
- 6) 森野敬博, 西村大志, 西谷弘信: 低サイクル疲労における疲労損傷の検討, 日本機械学会論文集 (A編), 65巻 633号, pp.1087-1092, 1999年5月
- 7) 大谷信雄, 阿部隆, 清水真佐男, 国尾武: 低炭素鋼の低サイクル疲労における残留破断延性変化と微視破壊挙動との関連について, 日本機械学会論文集 (A編), 45巻 399号, pp.1304-1311, 1979年11月
- 8) Jorge MULLER, Chitoshi MIKI and Tetsuya SASAKI: Seismic Resistance of Steel Bridge Pipe Piers with Different Cross Sections, Journal of Earthquake Engineering (Under Revision)

(1999年11月19日受付)

STRESS-STRAIN BEHAVIOUR UNDER HIGH STRAIN REPETITIONS

Hiroko KYUBA and Chitoshi MIKI

In order to evaluate stress-strain behaviour under high strain repetitions, low cycle fatigue tests were carried out on two kinds of structural steels. It was found that materials have lost their characteristics in a first few repetitions and that transition strain was different between these two materials. More experimental data is needed to build constitutive law in such high strain range.