

構造用鋼材の塑性曲げ疲労に関する実験

京都大学工学部	正員	後藤 尚男	京都大学工学部	正員	亀田 弘行
京都大学大学院の学生員		小池 武	神戸市役所	正員	泉並 隆二
京都大学大学院 学生員		脇田 知誠	京都大学研究生		杉原 豊

1. まえがき 構造物が大変位振幅をくり返し受ける場合の破壊に対処するため、一定変位振幅および変動変位振幅による構造用鋼材のくり返し曲げ破壊試験を行なった。本実験では、載荷開始から破断に至る全破壊過程を反力、1サイクル当りの消費エネルギー、剛性などの材料特性の劣化の面から詳細に追跡し、また変動荷重下での破壊過程を明らかにするために二段変位振幅試験を実施した。これらはいずれも構造物の耐震終局性状に関する基礎研究の一環として実施したものである。

2. 実験の概要

2.1. 実験方法

(1) 供試体 本実験で使用した供試体は圧延されたまものS541鋼材(新日本製鉄製)で、H型断面寸法は、 $100 \times 50 \times 5 \times 7 \text{ mm}$ である。全長 1500 mm の供試体をスパン長 1000 mm の単純ばりとして用い、スパン中央部でくり返し塑性曲げ集中荷重が加えられる。今回は51本の鋼材を用いて実験を行なった。載荷中に載荷点付近のフランジおよびウェブに局部座屈が生じることが予想されるため、載荷点付近に高炭素鋼の補剛材を挿入した。

(2) 載荷方法 載荷は電気油圧式ランダム加振試験機(鷺宮製作所製)を用いて行なった。この試験機の容量は荷重 $\pm 15 \text{ ton}$ 、変位 $\pm 150 \text{ mm}$ および振動数 $DC \sim 60 \text{ Hz}$ であり、本実験の実施に際して十分に余裕のある容量であった。アタッチメントは載荷中に載荷方向に垂直な面内での回転を拘束していないので、載荷点を反曲点とするS字形の模倣座屈の起る可能性は十分にある。

(3) 制御方法 本実験では、加振変位をすべて供試体の降伏変位よりも大きく設定して、変位制御による完全両振り塑性曲げ載荷とした。加振変位波形は正弦波であり、その振動数は 0.5 Hz で変位振幅にかかわらず一定とした。

(4) 計測方法 試験機の計測器盤に組み込まれた変位制御盤、荷重制御盤の変位記録、荷重記録の出力をX-YレコーダーのX軸、Y軸にそれぞれ接続して履歴復元力曲線を記録した。また同時に変位記録、荷重記録をパレレコーダーにも接続し、変位と荷重の時間曲線もそれぞれ記録した。

2.2. 実験結果の解析方法

X-Yレコーダーに記録された履歴復元力曲線より反力 P_n 、1サイクル当りの消費エネルギー W_n 、全消費エネルギー ΣW_n および載荷方向反転時の剛性(弾性剛性) G_n を求めた。鋼材内部の微視的破壊の進行は、塑性曲げ変位試験の開始時から徐々に進行して行くと思われるが、本研究では、むしろ鋼材の機械的性質に明確な変化が現われる点に注目して、反力特性が不連続的に変化する点を測定した。これらの不連続点は、フランジおよびウェブ表面に肉眼で識別可能な大きさの亀裂の入るくり返し回数に対応していたので、以下これらの回数をフランジクラック発生回数 N_f 、ウェブクラック発

生回数 N_c 、破断回数 N と呼ぶ。また入力変位振幅は、降伏変位 X_y で除して無次元化した靱性率振幅 Q で表示することにする。

3. 定変位振幅試験

定変位振幅くり返し試験下での鋼材の反力特性、1サイクル当りの消費エネルギー、弾性剛性等の劣化性状について考察をすすめる。今回の実験において靱性率振幅 Q のある値を境にして鋼材の破壊機構が次のように異なった。つまり靱性率振幅 Q が 2.46 以下の振幅では、フラニジ、ウェブでの局部座屈も非常に小さく、横倒れ座屈も生じることがなく、くり返し載荷によって生じる亀裂はスパン中央の載荷点に生じるとの箇所が破壊した。このような破断性状を示した供試体とここでは塑性曲げ型疲労破壊と呼ぶ。一方、靱性率振幅が 2.46 以上の大振幅のときには横倒れ座屈をまじり、供試体は S 字形に座屈変形した。この場合亀裂は載荷点ではなく S 字形の最も曲率の大きい箇所に生じるとの破断に至った。このような破断性状を示す供試体と座屈型疲労破壊と呼ぶ。同時に実施した一方向載荷曲げ試験（降伏変位 $X_y = 4\text{ mm}$ 、降伏反力 $P_y = 5.4\text{ ton}$ ）において塑性横倒れ座屈が生じたときの靱性率振幅が 11.25 ～ 11.40 であることと比較すると、くり返し載荷試験の場合は、一方向載荷試験の場合の 5 分の 1 程度の変位振幅で塑性横倒れ座屈が発生したことになる。

3.1. 反力特性と載荷回数との関係

Fig. 1 には 10 本の供試体についてそれらの反力 P_n のくり返し回数 n による変化の性状を示した。靱性率振幅 $Q = 1.08, 1.31, 1.65, 2.02, 2.37$ の場合は塑性曲げ型疲労破壊タイプであり、 $Q = 2.46, 3.87, 4.76, 9.77, 14.73$ の場合は、座屈型疲労タイプである。

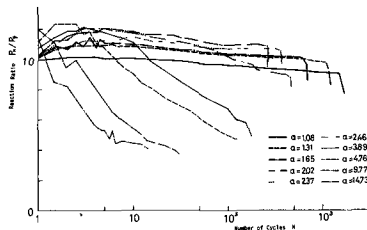


Fig. 1

塑性曲げ疲労タイプでは、反力特性は初期数サイクルの間その値を上昇させ、その後フラニジ表面にクラックが生じるまで、非常に緩慢な劣化性状を示すがクラック発生後は急激にクラックが成長して破断した。最大反力が現われるまでの載荷回数は変位振幅によらず、3 ～ 9 回の範囲でばらついている。反力が数サイクル目まで上昇していったことは、くり返し載荷をかけるごとに逐次歪硬化が進行することを示している。

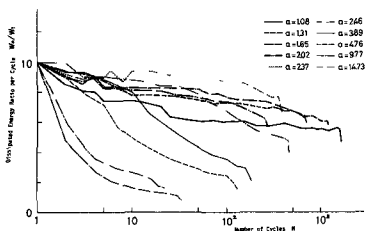


Fig. 2

一方、入力変位振幅が大きいため初期の数サイクル目に横倒れ座屈を生じた座屈型疲労タイプの特性は、数サイクル目に座屈を生じるまでは塑性曲げ疲労タイプと同様に歪硬化による反力特性の増大が見られる。しかし一度横倒れ座屈が生じてしまうと反力特性は果進的に低下してゆくが、降伏反力の 70 % 程度まで低下した時横倒れ座屈の進行は停止し、それ以降はフラニジ表面にクラックが発生するまでややゆるやかに反力が低下していった。

3.2. 1サイクル当りの消費エネルギーと載荷回数との関係

Fig. 2 には、1サイクル当りの消費エネルギー W_n の載荷回数 n による変化の性状を示す。1サイクル当りの消費エネルギーは各振幅とも第 1 サイクルにおいて最大である。そして塑性曲げ型疲労タ

イフ'では初期数サイクルの間にかなりの程度の劣化を生じるが、それ以後は比較的緩慢な劣化性状であるのに対し、座屈型疲労タイプでは急激な劣化が累積的に進行してゆく。

3.3. 反力特性・1サイクル当りの消費エネルギー・弾性剛性の間の相互関係

Fig. 3, 4には、反力特性・1サイクル当りの消費エネルギーおよび弾性剛性の載荷回数による変化の様相を靱性率振幅 $Q=1.65$, 3.87 の場合について示したものである。これらの図における実線・破線・一点鎖線はそれぞれ反力特性・1サイクル当りの消費エネルギー・弾性剛性を表わす。

3.4. S-N曲線

Fig. 5は、靱性率振幅と疲労寿命の関係を両対数軸目盛で示したもので、これは疲労試験におけるいわゆるS-N曲線に相当する。同図中のO点で示した点は塑性曲げ型疲労破壊を表わし、その他は、座屈型疲労破壊におけるいくつかの段階に至る載荷回数を示している。この両タイプの境界は、ほぼ $Q=2.46$ であることがわかる。塑性曲げ型疲労タイプでは、バラツキがなく、直線近似として次の実験式が得られた。

$$N Q^{2.58} = 2.30 \times 10^3 \quad (1)$$

図中の実線は、式(1)を表わす。

座屈型疲労破壊タイプについては、座屈開始回数、100%反力を示す回数、フランジ表面の亀裂発生時の回数をそれぞれ破壊規準として同図中に破線・一点鎖線・二点鎖線で示した。図中の番号1, 2, 3の場合は、塑性曲げ型疲労破壊タイプから座屈型疲労タイプへ移行する境界付近の状況を示している。

Fig. 6には、靱性率振幅と疲労寿命に至るまでの全消費エネルギー $\sum W_n$ を $E_t = \sum W_n / P_0 X_g$ の形で無次元表示したものである。靱性率振幅 $Q=2.46$ 付近で、データが直線から離れているのは、塑性曲げ型疲労破壊と座屈型疲労破壊が同時に生じたため、より多くのエネルギーを消費した結果であると考えられる。また靱性率振幅 $Q=1.0$ 以下で左側にズレているのは、弾性域での疲労に入っていることによる。

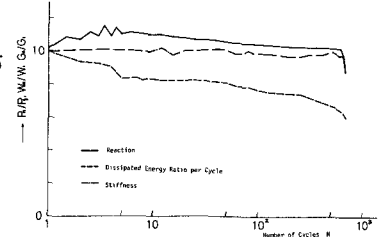


Fig. 3

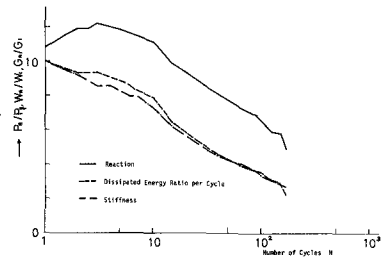


Fig. 4

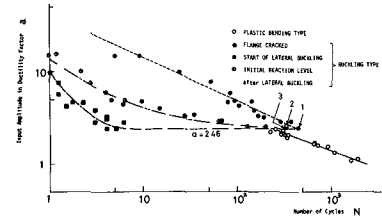


Fig. 5

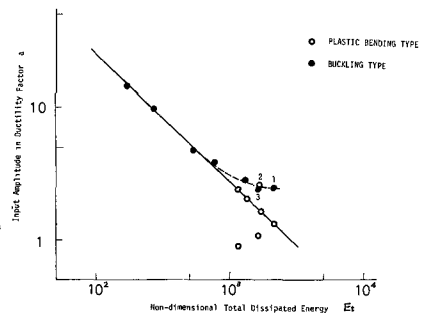


Fig. 6

4. 変動変位振幅試験

変動曲げ荷重下での構造部材の破壊過程を明らかにするために、二段変位振幅試験を行なった。変位振幅の組み合わせは、 $Q=1.50 \rightarrow Q=2.25$ の増加振幅試験と $Q=2.25 \rightarrow Q=1.50$ の減少振幅試験

験である。

二種の試験における疲労寿命を Miner の規準に従う全損傷度 $\Sigma D = D_1 + D_2 = n_1/N_1 + n_2/N_2$ で評価すると、増加振幅試験の 6 本の供試体では、全損傷度の平均値 1.002、標準偏差 0.065 であり、Miner の規準とよく近似する結果となった。これに対し、減少振幅試験の 12 本の供試体では、全損傷度の平均値は 1.178 であり、標準偏差が 0.042 であることから、Miner 規準より大きな値となった。一オ、弾性限以下の荷重レベルにおいては、応力増加試験での全損傷度が応力減少試験での全損傷度より大きくなることが報告されているが、本節の結果は上述のように、それとは逆の傾向を示しており、これは塑性曲げ疲労破壊の一つの特徴をネラするものと考えられる。

Fig. 7, 8, 9, 10 に反力および 1 サイクル当りの消費エネルギーと Miner 規準による損傷度の関係を示した。増加振幅試験では、振幅変化後 $Q=2.25$ の定振幅試験結果まで移行する。振幅変化後数サイクルまで反力の値がわずかに上昇しており、新たに歪硬化が起きていると考えられる。反力の落ち方も破壊直前まで急激に低下し、一定振幅試験と同様の挙動を示す。一オ減少振幅試験では、反力は振幅変化後 $Q=1.50$ の定振幅試験のネラ反力値より若干低い値をとっている。しかもこのことは、先行載荷のくり返し数の多少によらず同様である。また反力の落ち方も一定振幅試験の場合と異なり緩やかなカーブで減少している。振幅変化後増加振幅試験でみられた歪硬化も生じていないようである。そして Miner 規準から予想される寿命より多いくり返し数で破壊に至った。1 サイクル当りの消費エネルギーは反力の値が振幅変化後かなり減少しているにもかかわらず、一定振幅試験の場合とかわらぬ値をとった。以上のように、荷重の載荷順序の変更により異なる結果が得られたことに付し、次のような推論を試みた。この試験では、供試体の中央で塑性ヒンジが形成される。増加振幅の場合は、振幅増加後、歪硬化により、マヒンヒ領域が拡大し、反力もまた増大するが、減少振幅の場合は、振幅減少後も振幅 $Q=2.25$ での塑性ヒンジの影響を残したまま $Q=1.50$ の変位を受けることになる。後者の場合には、相対的に大きな塑性ヒンジのために曲率が小さくなり、曲げモーメントも小さくなり、反力も低下することになる。また、 $Q=1.50$ に対応する塑性域としては相対的に大きな塑性域のため、破壊までより多くのエネルギーを必要とすると考えれば破壊くり返し数の増加も説明できると考えられる。

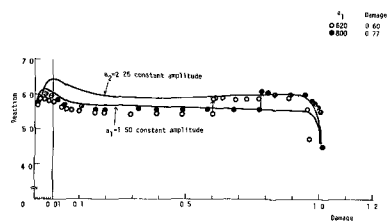


Fig. 7

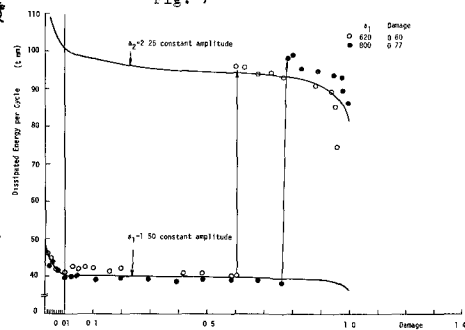


Fig. 8

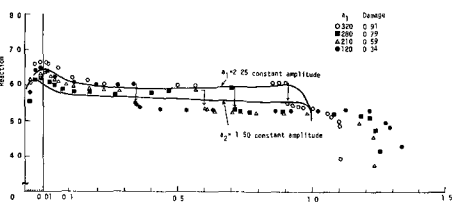


Fig. 9

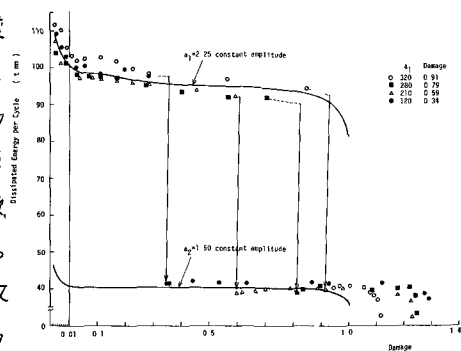


Fig. 10