

## 圧入軸の疲労強度に関する研究

(その1 圧入軸の疲労強度と静的強度との関係)

千葉大学工学部

正 佐藤建吉, 正 藤井 孟

千葉大学大学院(現, 日本鋼管)

正 秋山浩司

東京都立大学工学部

正 児玉昭太郎

## 1. 緒言

圧入, 焼ばめ, 冷しばめ, テーバばめなどのはめ合い部では, 応力集中・フレットニング(微小すべり)が生じて疲労強度が著しく低下する<sup>1,2)</sup>. このため, 実用的には, 高周波焼入れ, タフトライド処理, ショットピーニング, 温間ローラ加工, 低温焼入れなどのほか, はめ合い形状の変更などが対策<sup>3)</sup>としてとられている. ところで, はめ合い軸の疲労強度は引張強さや硬さなどの静的強度にはあまり依存しないことが知られている. このことから, 加工や熱処理による静的強度の向上もはめ合い軸の疲労強度の上昇には結び付かないことが予想される. そこで, 本報告では軸材としては用いられるS45Cに6種類の熱処理を施し, 静的強度や組織を大幅に変え, 平滑軸・圧入軸の回転曲げ疲労試験を行ない, 疲労強度と静的強度との関係を検討した.

## 2. 実験方法

## 2・1 供試材および熱処理

供試材は市販の機械構造用炭素鋼 S45C(直径17 mm)である. ただし実験は3年度(#1, #2, #3)にわたって行なわれたので, ロットは異なる. その化学成分を表Iに示す. 表IIに示すような熱処理を施し, 受入れのままのものも含め全部で6種類の熱処理材とした. これらをA, B, C, D, HおよびR材と呼ぶ. これらの顕微鏡組織を図1に, また機械的性質を表IIIに示す.

## 2・2 疲労試験

疲労試験には小野回転曲げ疲労試験機(容量98N・m, 回転数1500または3000r.p.m.)を用いた. 試験片の形状・寸法を図2に示す. (a)は平滑軸試験片であり, (b)は圧入軸試験片である. これらは熱処理後NC旋盤で加工し, (a)はエメリーペーパーで, (b)は円筒研削盤で仕上げてある. また(b)の圧入継ぎ手はA材で加工し, 最終内面仕上げは年度とともに機械リーマ, プローチリーマ, さらにホーニングと異なっている.

圧入軸の締め代は圧入面圧 $p$ が100 MPaとなるように約10  $\mu$ mとした. これは $p=60$  MPa以上では疲労強度が $p$ にあまり影響されないこと<sup>2)</sup>に基づく.

圧入は圧入治具を, 電気・油圧式疲労試験機のチャック間に組み込み, 三角波形(周波数0.1Hz)での1/4サイクルで圧入した. このとき圧入力・ストローク関係を記録した.

## 3. 実験結果および考察

## 3・1 S-N曲線

平滑軸と圧入軸のS-N曲線には, #1~#3で多少の相違がみられたが, 図3に代表として#2

表I 化学成分(S45C) (wt.%)

|    | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cu   | Ni   | Cr   | Fe   |
|----|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| #1 | 0.46 | 0.20 | 0.72 | 0.020 | 0.014 | 0.14 | 0.06 | 0.11 | Bal. |
| #2 | 0.45 | 0.24 | 0.68 | 0.023 | 0.017 | 0.10 | 0.05 | 0.11 | Bal. |
| #3 | 0.47 | 0.20 | 0.70 | 0.014 | 0.013 | 0.08 | 0.03 | 0.06 | Bal. |

表II 試験片の熱処理

| Materials | Heat treatment conditions             |
|-----------|---------------------------------------|
| A         | 850°C X 1/2 h A.C.                    |
| B         | 850°C X 1/2 h F.C.                    |
| C         | 1000°C X 4 h A.C.                     |
| D         | 1000°C X 4 h F.C.                     |
| H         | 850°C X 1/2 h W.Q. + 800°C X 2 h W.C. |
| R         | As Received                           |

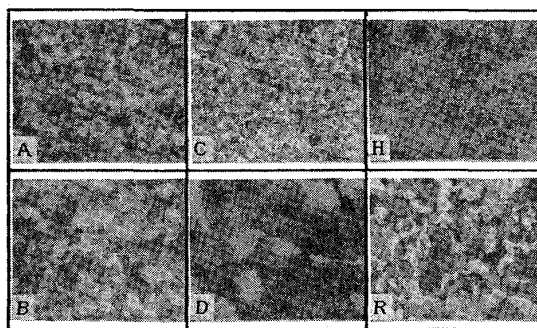
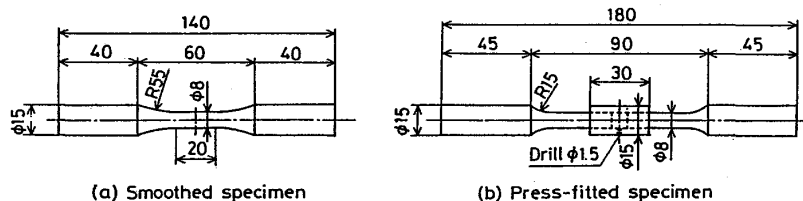


図1 試験片の顕微鏡組織

100  $\mu$ m

表III 熱処理後の機械的性質

|   | $\sigma_{ys}$ (MPa) |     |     | $\sigma_B$ (MPa) |     |     | $\sigma_{ys}/\sigma_B$ |      |      | $\phi$ (%) |    |    | $\delta$ (%) |    |    | Hv  |     |     |
|---|---------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|------------------------|------|------|------------|----|----|--------------|----|----|-----|-----|-----|
|   | #1                  | #2  | #3  | #1               | #2  | #3  | #1                     | #2   | #3   | #1         | #2 | #3 | #1           | #2 | #3 | #1  | #2  | #3  |
| A | 415                 | 375 | 435 | 655              | 650 | 685 | 0.63                   | 0.58 | 0.64 | 23         | 23 | 26 | 35           | 58 | 60 | 181 | 192 | 185 |
| B | —                   | 375 | 355 | —                | 615 | 595 | —                      | 0.61 | 0.60 | —          | 25 | 29 | —            | 54 | 51 | —   | 160 | 168 |
| C | 370                 | 430 | 420 | 700              | 760 | 750 | 0.53                   | 0.57 | 0.56 | 14         | 16 | 20 | 30           | 49 | 45 | 217 | 208 | 219 |
| D | 315                 | 320 | 300 | 625              | 640 | 635 | 0.50                   | 0.50 | 0.47 | 17         | 20 | 21 | 39           | 35 | 31 | 166 | 171 | 166 |
| H | —                   | 700 | 680 | —                | 845 | 820 | —                      | 0.83 | 0.83 | —          | 20 | 21 | —            | 62 | 48 | —   | 266 | 251 |
| R | —                   | 850 | 820 | —                | 895 | 860 | —                      | 0.95 | 0.95 | —          | 5  | 7  | —            | 28 | 30 | —   | 264 | 254 |



(a) Smoothed specimen

(b) Press-fitted specimen

図2 試験片の形状・寸法

表IV 疲労強度および切欠き係数

|   | $\sigma_{ws}(\text{MPa})$ |     |     | $\sigma_{wp}(\text{MPa})$ |     |     | $\beta_p = \sigma_{ws}/\sigma_{wp}$ |      |      | $\sigma_{wc}$<br>(MPa)<br>#3 | $\beta_c =$<br>$\sigma_{ws}/\sigma_{wc}$<br>#3 |
|---|---------------------------|-----|-----|---------------------------|-----|-----|-------------------------------------|------|------|------------------------------|------------------------------------------------|
|   | #1                        | #2  | #3  | #1                        | #2  | #3  | #1                                  | #2   | #3   |                              |                                                |
| A | 290                       | 290 | 280 | 160                       | 160 | 170 | 1.81                                | 1.81 | 1.65 | 120                          | 2.33                                           |
| B | —                         | 245 | 260 | —                         | 175 | 180 | —                                   | 1.40 | 1.44 | 130                          | 2.00                                           |
| C | 280                       | 280 | 300 | 165                       | 165 | 190 | 1.70                                | 1.70 | 1.58 | 170                          | 1.76                                           |
| D | 220                       | 220 | 240 | 170                       | 165 | 150 | 1.29                                | 1.33 | 1.60 | 150                          | 1.60                                           |
| H | —                         | 435 | 400 | —                         | 190 | 190 | —                                   | 2.29 | 2.11 | 160                          | 2.50                                           |
| R | —                         | 355 | 350 | —                         | 165 | 140 | —                                   | 2.15 | 2.50 | 140                          | 2.50                                           |

のS-N曲線を示す。平滑軸の疲労限度はH材の435 MPaからD材の220 MPaまでの範囲であり約2倍の強度差がある。これに対し圧入軸の疲労限度(10<sup>7</sup>回疲労強度)は全熱処理材とも著しく低下し、160~190 MPaであり、強度差も小さい。圧入軸のS-N曲線は疲労限度近くでは差が小さいが、平滑軸の強度差が大きいことを反映して低繰返し数(低Nf)域で差が大きくなっている。

つぎに、各熱処理材での平滑軸と圧入軸のS-N曲線と強度について調べてみる。平滑軸で最も強度の高い調質を施したH材と次に強度の高い受入れのままのR材の、圧入による強度低下が著しい。しかし、H材は圧入軸においても低~高Nf域にわたり最も強度が高い。R材の圧入軸の強度は、低Nf域では高い方であるが高Nf域では低い。焼ならし材のA材、C材では平滑軸の疲労限度はA材の方が高いが、低Nf域ではC材の方が高い。これは、C材の方が高温で長時間加熱され結晶粒も大きい、静的強度が高いためである。圧入軸ではS-N曲線はほぼ等しくなっている。焼なまし材のB材、D材の平滑軸の強度はA、C材よりもさらに低い、圧入軸の疲労強度はこれらと同じかわずかに高いくらいである。しかし、静的強度が最も低いD材は、圧入軸の低Nfでの疲労強度が最も低い。

### 3・2 疲労強度の静的強度との関連性

表IVには平滑軸、圧入軸のそれぞれの疲労限度 $\sigma_{ws}$ 、 $\sigma_{wp}$ 、圧入軸の切欠き係数 $\beta_p = \sigma_{ws}/\sigma_{wp}$ 、および引張強さとの比率 $\sigma_{ws}/\sigma_B$ 、 $\sigma_{wp}/\sigma_B$ を示す。図4~7には、硬さHv、引張強さ $\sigma_B$ 、降伏強さ $\sigma_{ys}$ 、降伏比を $\sigma_{ys}/\sigma_B$ と $\sigma_{ws}$ 、 $\sigma_{wp}$ 、 $\beta_p$ との関係を示す。これらの図には、著者らのデータとともに文献2に収録されている種々の材料(0.1~0.9%C炭素鋼、Ni-Cr鋼)・熱処理(焼鈍し、焼ならし、焼入れ・焼

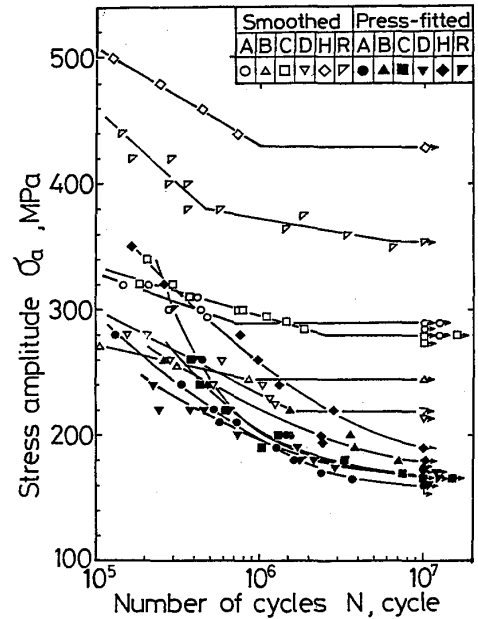


図3 S-N曲線

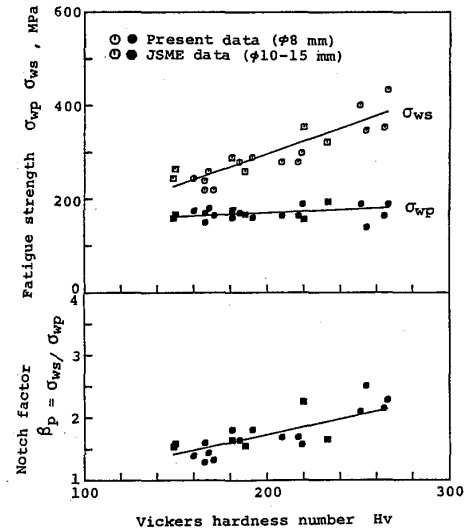


図4 硬さと疲労限度、切欠き係数の関係

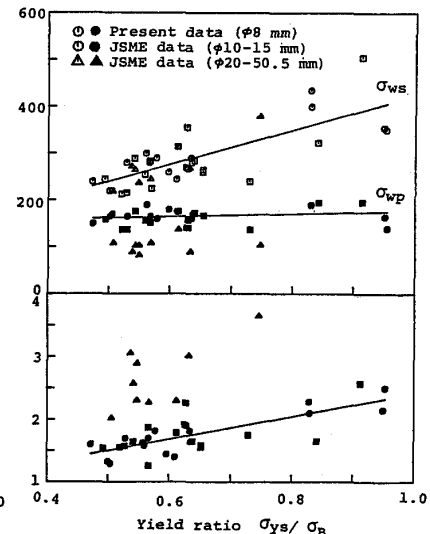
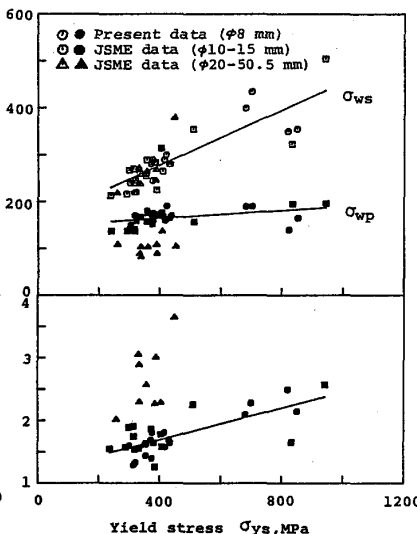
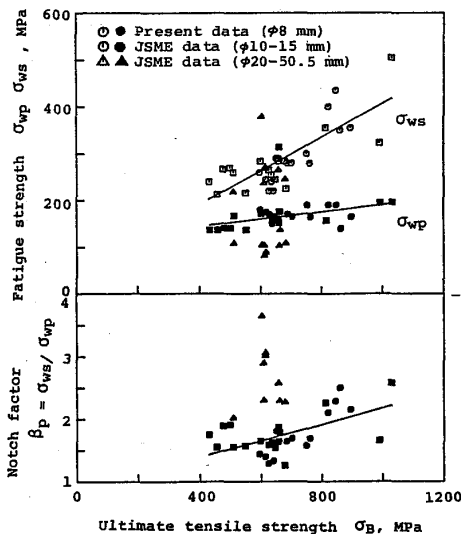


図5 引張強さと疲労限度、切欠き係数の関係 図6 降伏強さと疲労限度、切欠き係数の関係 図7 降伏比と疲労限度、切欠き係数の関係

戻し、供給状態)での圧入・焼ばめなどのはめ合い形式、および直径・締め代も異なる圧入軸と平滑軸のデータもプロットしてある。図中の直線は最小二乗法により定めた近似直線であり、圧入軸では以下に述べる寸法効果を考慮して直径が $\phi 8 \sim 15 \text{ mm}$ のデータについて当てはめてある。

これらの関係をみると、 $\sigma_{ws}$ は静的強度の増加とともに上昇しているが、材料・熱処理が異なるのでどのパラメータで整理してもばらつきが比較的大きい。一方、 $\sigma_{wp}$ はほとんど一定であり、静的強度が増加しても疲労限度の上昇は極めて少ない。ただし、図中の“▲”は試験片直径が $\phi 20 \sim 50.8 \text{ mm}$ の圧入軸のデータであり、これは寸法効果により $\sigma_{wp}$ は低くなっている。圧入軸の切欠き係数 $\beta_p$ についても、 $\phi 20 \sim 50.8$ のデータはバンドの上方にはずれているが、 $\phi 8 \sim 15 \text{ mm}$ ではよく近似直線で整理される。

つぎに整理パラメータの優位性を述べる。Hvで整理した図4は他に比べばらつきが少ないが、これは1点のデータを除いて炭素鋼であり、材料がそろっているためである。 $\sigma_{wp}$ は図5～7からわかるように $\phi 8 \sim 15 \text{ mm}$ では静的強度のどのパラメータによっても比較的よく整理されることがわかる。ただし、 $\beta_p$ は降伏比 $\sigma_{ys}/\sigma_B$ によるとよく整理される。

### 3・3 予き裂入り軸の切欠き係数との相関性

つぎに、平滑軸の中央部に $\phi 0.2$ 、深さ $0.1 \text{ mm}$ の小穴をドリル加工したのち、各熱処理材の $\sigma_{ws}$ 近く繰返し応力を負荷し、 $l=0.5 \text{ mm}$ の予き裂を導入し、その後 $600^\circ \text{C} \times 1 \text{ h}$ のひずみ取り焼鈍しを行ない、予き裂入り軸とした。この試験片に $\sigma_{wp}$ 以下の繰返し応力を $10^\circ$ 回を1ステップとして負荷し、そのときのき裂の進展の有無を調べた。き裂進展が認められないときにはさらに $10 \text{ MPa}$ 上げて $10^\circ$ 回負荷した。これを繰返し、ついにき裂進展が認められたときにはその繰返し応力よりもさらに $10 \text{ MPa}$ 低い応力を、予き裂入り軸の疲労限度 $\sigma_{wc}$ とした。これにより切欠き係数を $\beta_c = \sigma_{ws}/\sigma_{wc}$ として定めた。

その結果は表IVに示した。図8は熱処理間の $\beta_p$ と $\beta_c$ の相関性をみたものであるが、C材を除いてよい相関が示された。C材は6ステップでき裂進展が確認されたのでコーキング効果によって $\sigma_{wc}$ が上昇したものとも考えられ、 $\sigma_{wc}=150 \text{ MPa}$ と仮定したときの $\beta_c$ は破線で示される位置となり、 $\beta_p$ の変化とよく対応する。結果として、圧入軸の疲労限度は予き裂入り軸の疲労限度とよい相関がある。図8の結果を静的強度によって整理し直すと、その増加につれて $\beta_c$ が増大することから、静的強度が増加してもいわゆる切欠き感度が高くなり圧入軸の疲労限度は上昇しないことがわかる。き裂の発生や初期進展段階にはフレッティングの影響が強いことが別報<sup>9)</sup>で示されている。

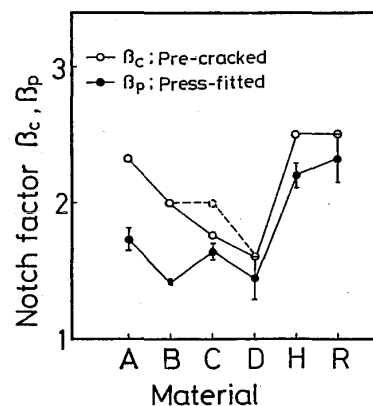


図8 圧入軸と予き裂入り軸の切欠き係数の対応関係

## 4. 結 論

(1) 圧入軸の疲労限度 $\sigma_{wp}$ は静的強度(硬さHv, 引張強さ $\sigma_B$ , 降伏強さ $\sigma_{ys}$ )の高低にはあまり関係なくほぼ一定である。このため、材質・熱処理およびはめ合形式によらず $8 \sim 15 \text{ mm}$ の直径では $\sigma_{wp}=140 \sim 200 \text{ MPa}$ 程度であるとみなされる。

(2)  $\sigma_{wp}$ の評価は、平滑軸の疲労強度 $\sigma_{ws}$ の場合と同じく、材料が同類であればHvによるのが有効である。また、圧入軸の切欠き係数 $\beta_p$ の評価には、材料が広範な場合には降伏比 $\sigma_{ys}/\sigma_B$ によるのが有効である。

(3)  $\beta_p$ は、各熱処理材間において予き裂入り軸の切欠き係数 $\beta_c$ とよい相関を示した。すなわち、圧入軸での疲労強度の低下は材料の切欠き感受性の大小と強い関係がある。

## 文 献

- 1) 川田; 「金属の疲労と設計」, オーム社(1984)。
- 2) 日本機械学会編; 「疲労強度の設計資料I (改訂第2版)」(1982.2)。
- 3) 秋山, 佐藤, 藤井, 児玉; 日本材料学会第34回(昭和60年5月)総会講演会前刷集。