過大予荷重効果によるばね鋼 SUP9の遅れ破壊の阻止

水上博嗣*, 高橋宏治**, 安藤柱**

Prevention of Delayed Fracture by Overloading Effect in Spring Steel SUP9.

Hiroshi MIZUKAMI*, Koji TAKAHASHI** and Kotoji ANDO**

The effects of overload on the threshold stress intensity factor of delayed fracture (K_{IHE}) for spring steel were studied. Firstly, tensile overload was applied to a wedge engraved SUP9 specimen (Wedge Opening Load; WOL specimen), then delayed fracture tests were carried out to determine the resultant K_{IHE} . It developed that the value of K_{IHE} increased together with the stress intensity factor K_{OV} by applying tensile overload. The effects of tensile overloading on K_{IHE} were evaluated based on the theory of fracture mechanics. The K_{IHE} correlates with the K_{OV} , and the predicting equation has been established.

Key Words: Overload effect, Delayed fracture, Spring steel SUP9, Threshold stress intensity factor

1. 緒 言

水素脆性による遅れ破壊の特徴は低炭素鋼のような低強度鋼では発生せず、高強度鋼で発生することである。しかし、低炭素鋼においても、深絞り加工などの冷間加工による引張残留応力が生じた場合や加工硬化の程度が大きい場合は、遅れ破壊が発生する可能性がある。遅れ破壊の防止対策としては、焼なましによる残留応力除去が効果的である。しかしながら、焼なましに必要なコストや時間の削減および省エネルギーの課題が残されている。

ショットピーニングによって遅れ破壊を防止できることがこれまでの研究によって明らかにされてきている^{1), 2)}。渡邉ら¹⁾はショットピーニングによる圧縮残留応力の積分値が大きいほど高強度鋼SCM435の遅れ破壊特性が向上することを明らかにしている。丹後ら²⁾は、ショットピーニングによりき裂進展が抑制されることで、遅れ破壊寿命が向上することを明らかにしている。

一方、き裂材に対しては過大予荷重効果による疲労き裂の遅延効果が知られている^{3), 4)}。近年、過大予荷重による疲労き裂の進展阻止^{5)~7)}、応力腐食割れの進展阻止に関する研究⁸⁾が実施されている。前報⁷⁾では、高強度鋼の巨視き裂材における下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} に及ぼす過大予荷重効果の理論を明らかとし、その予測式を提案した。また、疲労き裂以外については、過大予荷重効果によりステ

ンレス鋼SUS316の応力腐食割れを阻止できることが明らかにされている⁸⁾。

いずれも引張の過大予荷重を負荷することにより、き裂先端に圧縮残留応力場の塑性域が形成され、その塑性域をき裂が進展する際に、き裂進展は遅延または停留するという機構である。しかしながら、高強度鋼の遅れ破壊に対する過大予荷重効果についてはこれまでに研究されていない。

遅れ破壊に対しても過大予荷重効果を発揮することができれば、信頼性を担保しつつ、前述の焼なましなどによるコストの削減が可能となる。

そこで本研究では、ばね鋼SUP9のWOL (Wedge Opening Loading) 試験片を作製し、引張過大予荷重を負荷した後、遅れ破壊試験を実施し、遅れ破壊特性向上に対する過大予荷重効果を明らかにした。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片形状

本研究では、Table 1に示す化学成分の、ばね鋼材SUP9を用いた。試験片の加工工程の概要をFig. 1に示す。930℃で焼入れ、450℃で焼戻しを実施し、硬さ483HVとした。その後、Fig. 2に示すWOL試験片の形状に加工した。続いて放電加工により、長さ4mm、幅0.1mm、先端曲率半径0.05mmのスリットを導入した。このWOL試験片はボルトの締め込

Table 1 Chemical composition of spring steel SUP9.

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
mass%	0.57	0.26	0.86	0.020	0.003	0.14	0.06	0.85

Fig. 1 Flow chart of the specimens production process.

Fig. 2 Dimension of WOL specimen.

みを調整することによって、任意のき裂端開口変位が与えられる変位付与型試験片である。このボルトの締め込み量を調整することによって過大予荷重および実験荷重を負荷した。

2.2 遅れ破壊試験方法

WOL試験片のM8めねじ部にボルトをねじ込み、任意のき裂端開口変位 δ を与え、その後、ボルトを緩め変位をゼロに戻すことによって、スリット先端部に単一引張過大予荷重の負荷および除荷を行った。その後、再びボルトを締

Fig. 3 Dipping method.

Fig. 4 Applied stress intensity factor pattern.

め付けることによって、実験荷重に相当する任意の δ を与えた後、Fig. 3に示すように、き裂先端が腐食液（5wt%の塩酸、室温）に浸るよう浸漬し、試験片を40h放置した。Fig. 4に一連の応力負荷パターンを示す。

40h経過しても遅れ破壊によるき裂が発生しなかった時の応力拡大係数 K の最大値を下限界応力拡大係数 K_{HE} と定義し、単一過大予荷重を負荷した時の応力拡大係数 K_{OV} と K_{HE} の関係を明らかにした。なお、 δ の測定は、クリップ型変位変換器を用いた。 δ と応力拡大係数 K の関係は式（1）で表される⁹⁾。

$$\delta = \left(\frac{K_{10}}{E} \right) \sqrt{a_0} \left[\frac{c_6(a_0/W)}{c_3(a_0/W)} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$c_3(a_0/W) = 30.96(a_0/W) - 195.8(a_0/W)^2 + 730.6(a_0/W)^3 - 1186.3(a_0/W)^4 + 754.6(a_0/W)^5$$

$$c_6(a_0/W) = \exp[4.495 - 16.130(a_0/W) + 63.838(a_0/W)^2 - 89.125(a_0/W)^3 + 46.815(a_0/W)^4]$$

δ : き裂端開口変位 [m]

K_{10} : 初期応力拡大係数 [MPa・m^{0.5}]

E : 縦弾性係数 [GPa]

a_0 : き裂長さ [m]

W : 試験片板幅 [m]

遅れ破壊によるき裂の発生の有無は、試験開始後40h経過した試験片において、表面観察により確認した。さらに液体窒素中で冷却した後、強制破壊させ、破面を観察した。

3. 実験結果

3.1 破面観察結果

Fig. 5, 6, 7は、それぞれ過大予荷重時の応力拡大係数 $K_{OV}=27.4\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$, $41.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ および $68.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ の場合の表面および破面観察結果である。この時、試験荷重時の応力拡大係数は $K_I=27.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ である。それぞれの図中にはスリット部、および遅れ破壊破面、または強制破面を示している。

過大予荷重による応力拡大係数 K_{OV} が $27.4\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ および $41.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ の場合はき裂の発生が観察されるが、 K_{OV} が $68.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ではき裂の発生は観察されなかった。 K_{OV} が $68.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ の場合、スリット先端部が圧縮残留応力場となり、き裂の進展を阻止していると推定される。

同様にすべての試験片の表面および破面を観察し、き裂

$$K_{OV}=27.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}, K_I=27.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$$

Fig. 5 Surface and fracture surface images after 5wt% hydrochloric acid x40h.

$$K_{OV}=41.0\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}, K_I=27.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$$

Fig. 6 Surface and fracture surface images after 5wt% hydrochloric acid x40h.

の有無を確認した。

き裂が観察された試験片の破面は、いずれもスリット先端からき裂が発生し、外表面部を優先的にき裂が進展したような破面となっている。遅れ破壊試験においては、試験片表面からの水素浸入が著しいためと考えられる。

3.2 遅れ破壊への過大予荷重効果

Table 2およびFig. 8に、過大予荷重による応力拡大係数 K_{OV} と、試験荷重による応力拡大係数 K の関係を示す。40h浸漬後、き裂が発生した試験の K を×印、き裂が発生しなかった K を○印とした。過大予荷重なしの場合、 $K_{IHE}=13.7\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ であったが、過大予荷重 $K_{OV}=68.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ を負荷した場合、 $K_{IHE}=27.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ まで向上した。したがって、本研究においては遅れ破壊限度 K_{IHE} は約2倍まで向上した。実験によって得られた K_{OV} と K_{IHE} の関係は式(2)で示される。なお、 K_{OV} が $80\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ 以上の時、過大予荷重負荷時にき裂が発生したため、 $K_{IC}=80\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ とした。 K_{IC} 以上の K_{OV} を負荷する実験は行わなかった。

$$K_{IHE}=0.27K_{OV}+10 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし ($13.6 \leq K_{OV} \leq 68$)

この比例定数は0.27であり、これまでに報告されている ΔK_{th} と K_{OV} 関係を表す比例定数0.26とほぼ同一である⁽⁷⁾。したがって、遅れ破壊特性への過大予荷重効果の影響は、疲労き裂進展特性や応力腐食割れ特性への過大予荷重効果と同様のメカニズムであることが推定される。すなわち、過大予荷重負荷および除荷により、き裂先端が圧縮の残留応力場となり、遅れ破壊によるき裂の進展を阻止すると考えられる。

したがって、遅れ破壊下限界応力拡大係数 K_{IHE} に及ぼす過大予荷重効果は、これまでに明らかとなっている疲労下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} に対する過大予荷重効果と同様の理論が適用可能と考えられる。

$$K_{OV}=68.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}, K_I=27.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$$

Fig. 7 Surface and fracture surface images after 5wt% hydrochloric acid x40h.

Table 2 Results of delayed fracture test.

K_{OV} [MPa·m ^{0.5}]	K_I [MPa·m ^{0.5}]	Results
0.0	27.3	×
0.0	13.7 *	○
0.0	9.6	○
0.0	0.0	○
13.7	27.3	×
13.7	20.5	×
13.7	13.7 *	○
27.3	27.3	×
27.3	20.5	×
27.3	13.7 *	○
41.0	41.0	×
41.0	34.1	×
41.0	27.3	×
41.0	20.5 *	○
54.6	34.1	×
54.6	27.3 *	○
54.6	13.7	○
68.3	41.0	×
68.3	34.1	×
68.3	27.3 *	○

*: K_{IHE}

SUP9, Dipping in 5wt% hydrochloric acid x40h

ここで、遅れ破壊の下限界応力拡大係数 K_{IHE} に及ぼす過大予荷重効果の予測式を検討する。

Fig. 9は遅れ破壊における、 K_{OV} と K_{IHE} の関係の模式図である。 $K_{OV}=0\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ の場合の下限界応力拡大係数を K_{IHE0} とする。 K_{OV} が K_{IHE0} 以下では過大予荷重は効果を発揮しない。したがって $K_{OV}\geq K_{IHE0}$ で過大予荷重効果は発揮される。過大予荷重効果については、これまでの研究⁷⁾で明らかとなっている K_{OV} と K_R との関係である比例定数0.26が適用されると仮定すると、以上の関係は式 (3) となる。

$$K_{IHE} = K_{IHE0} + 0.26(K_{OV} - K_{IHE0}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式 (3) を展開すると、式 (4) となる。

$$K_{IHE} = 0.26K_{OV} + 0.74K_{IHE0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

本研究での実験結果で式 (4) を検証してみる。Fig. 8の実線は式 (4) による予測結果である。予測結果は実験結果とよく一致している。

以上の結果から、式 (4) を用いることで、遅れ破壊特性へ影響を及ぼす、過大予荷重効果の予測が可能となる。

4. 結 言

ばね鋼SUP9のWOL試験片に、引張過大予荷重を負荷および除荷した後、5wt%塩酸中に40h浸漬する遅れ破壊試験を実施した。これにより過大予荷重効果による遅れ破壊限

Fig. 8 Relationship between K_{OV} and K_I in delayed fracture test.

SUP9, Dipping in 5wt% hydrochloric acid x40h.

Fig. 9 Schematic diagram of relationship between K_{IHE} and K_{OV} .

度特性の改善について研究を行った。

- (1) 過大予荷重効果によりSUP9の遅れ破壊限度 K_{IHE} は $K_{OV}=68.3\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ のときには最大約2倍まで向上した。
- (2) 疲労限度向上と同様、過大予荷重を負荷した後除荷することで、き裂先端は圧縮の残留応力場になり、水素脆性き裂の進展を阻止することで、遅れ破壊限度が向上する。

- (3) 過大予荷重負荷時の応力拡大係数 K_{OV} と遅れ破壊限度 K_{IHE} の関係は線形であり、その比例定数は0.27であった。また、この比例定数は K_{OV} と疲労下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の比例定数と一致する。
- (4) 過大予荷重なし時の K_{IHE0} を実験により求めれば、 K_{IHE} と K_{OV} の関係を次式により予測可能である。

$$K_{IHE} = 0.26K_{OV} + 0.74K_{IHE0}$$

参考文献

- 1) 渡邊吉弘, 長谷川典彦, 井上道夫, 高強度鋼の遅れ破壊に及ぼすショットピーニングの効果, 材料41 (465), (1992-06-15), pp.933-938.
- 2) 丹後公一, 杉山充弘, 鈴木健, 綾田倫彦, コイルばねの遅れ破壊におよぼす残留応力分布の影響, ばね論文集, Vol. 2003 (2003), No. 48, pp.15-19.
- 3) Wheeler, O.E., Trans. ASME, Ser.D, J. Basic Engng, 94, (1972), pp.181-186.
- 4) S.MATSUOKA, K.TANAKA, M.KAWAHARA, Engineering Fracture Mechanics, Vol.8, (1976), pp.507-523.
- 5) 小川武史, 戸梶恵郎, 越智聡, 小林英男, 疲労き裂進展の下限界に及ぼす荷重履歴の影響, 日本機械学会論文集.A編 Vol.53, No.487, (1987), pp.428-435.
- 6) Usami, S, and Kitagawa, H, "Effects of preloading, unloading and stress ratio on the fatigue crack threshold on maraging steel", *Materials, Experimentation and design in fatigue, Proc. Fatigue '81*, (1981), pp.472-485.
- 7) 水上博嗣, 北條恵司, 高橋宏治, 花折和也, 丹下彰, 安藤柱, "鋼の下限界応力拡大係数範囲に及ぼす過大荷重効果", ばね論文集, Vol.55 (2010), pp.1-6.
- 8) 高橋宏治, 宮崎裕司, 橋倉靖明, 安藤柱, "応力腐食割れの下限界応力拡大係数に及ぼす過大予荷重の影響", 圧力技術, Vol.47, No.6 (2009), pp.11-18.
- 9) "STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK", *Pergamon Press*, Vol.1, (1987), pp.27-29.