低合金鋼切欠き材における繰返し過大応力と 水素侵入による疲労強度の低下*

山之内 隆志^{*1}, 近 藤 良 之^{*2}

Effects to Multiple Overloads and Absorbed Hydrogen on the Fatigue Strength Reduction of Notched Component

Takashi YAMANOUCHI^{*3} and Yoshiyuki KONDO

^{*3} Department of Architectural Engineering, Kyushu Polytechnic College,
1665-1 Shii, Kokuraminami-ku, Kitakyushu-shi, Fukuoka, 802-0985 Japan

Safety is one of the most important issues in hydrogen economy. Earthquake sometimes gives damages to steel structures and machineries. The components which had not been seriously damaged would still be used after the earthquake. The residual fatigue strength of those components, however, might have been decreased. The objective of this work is to clarify the effect of relatively small number of overloads and hydrogen on the residual fatigue strength of a notched component. As a result of the experiment, it was made clear that the formation of small crack and the tensile residual stress introduced by overloads caused substantial decrease of residual fatigue limit. The test results showed that the crack depth formed by overloads was about four times deeper in hydrogen charged material. The acceleration of low cycle fatigue crack growth by overloads played a major role. The reduction of ΔK_{th} also occurred. It gave secondary contribution for the reduction of residual fatigue limit.

Key Words: Earthquake, Fatigue Strength, Overloads, Notch, Hydrogen, Fatigue Crack Propagation

1. 緒 言

水素利用機器の安全運用において部材の疲労強度評価は重要な要素の1つである。地震により繰返し過大応力を受けた機械部品のうち、壊滅的破壊に至らなかったものはその後も継続使用されることが多いが、地震時に受けた繰返し過大応力により微小き裂が発生し、疲労強度が低下している場合がある^{(1),(2)}。そのため過大応力を受けた金属材料の健全性を定量的に評価する必要がある。また、水素利用機器では水素環境で使用する部材の疲労強度が金属に侵入した水素により低下することが懸念される。本研究では低合金鋼の切欠き材を用いて少数回の繰返し過大応力を負荷した後に高サイクル疲労試験を行い、繰返し過大応力がその後の疲労強度に及ぼす影響と水素の影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片 供試材として低合金鋼 SCM435H 焼入れ・焼もどし材を用いた。供試材の化学成分を表1に、機械的性質を表2に示す。試験片は図1(a)に示す板状試験片を用いた。試験片には図1(b)に示すように板厚全体にわたり、深さ0.5mm、角

度60度、先端半径0.2mmの2次元切欠きを機械加工により導入した。この切欠きは部品に設ける切欠きとしては鋭い部類であるが、例えばねじ底等を想定し

Table 1 Chemical composition of material (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.38	0.18	0.78	0.15	0.19	0.08	1.04	0.15	0.12

Table 2 Mechanical properties of material

0.2% proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	HV
955	1048	19	344

(a) Configuration

(b) Detail of notch

Fig. 1 Test specimen (Dimensions are in mm)

* 原稿受付 2009 年 4 月 17 日.

^{*1} 正員, 九州職業能力開発大学校建築科(☎ 802-0985 北九州市小倉南区志井 1665-1).

^{*2} 正員, フェロー, 九州大学大学院工学研究院(☎ 819-0395 福岡市西区元岡 744).

E-mail: yamanouchi@kyushu-pc.ac.jp

たものである。切欠きは加工のままで、加工後熱処理は行っていない。負荷方式は面内曲げであり、図 1(a)に示す試験片の幅広部に貼付けたひずみゲージにより曲げモーメントを測定し、弾性計算により曲げ応力を算出した。応力は切欠きを考慮しない公称応力で表示した。

2.2 過大応力負荷 図 2 に応力波形を示す。繰返し過大応力は周波数 1Hz により両振りりで負荷した。過大応力の繰返し数 n_1 は 0, 1, 10, 20, 50, 100, 200, 600 とした。過大応力を負荷する際は切欠き底に発生する残留応力の方向性を考慮して圧縮側から除荷することにより切欠き底に引張残留応力が発生するように設定し、安全側の結果が得られるようにした。疲労試験は室温大気中で実施した。

2.3 高サイクル疲労試験 繰返し過大応力負荷後の試験片に対して、繰返し速度 28Hz で高サイクル疲労試験を実施した。地震荷重を受けた部材は、部材の拘束状況によっては、無負荷状態に戻るものや、拘束変位が残留するものなどさまざまな状況が想定されるので、これを模擬するために図 2 に示すように外部から負荷する平均応力(以後外部平均応力)を $\sigma_m=0, 70, 150, 510\text{MPa}$ の 4 通りについて検討した。疲労限度は 10^7 回の繰返し後の非破断をもって定義した。

Fig.2 High cycle fatigue test after multiple overload cycling

3. 繰返し過大応力試験結果と考察

3.1 一定振幅疲労試験結果 まず種々の平均応力下で一定振幅疲労試験を行った。S-N 曲線は省略し、図 3 に疲労限度線図を示す。

3.2 過大応力疲労試験

3.2.1 過大応力振幅の影響 過大応力の振幅 σ_{OL} が疲労強度低下に及ぼす影響を調べるために、種々の過大応力振幅に対する疲労強度データを得ることとし、 $\sigma_{OL}=510, 400, 300, 250\text{MPa}$ の試験を実施した。この試験においては過大応力負荷後の平均応力 σ_m は地震後

に部材に発生する最も厳しい状態として、変位が荷重の最大値の状態と拘束される状況を想定した $\sigma_m=\sigma_{OL}$ とした。図 4 に $\sigma_1=510\text{MPa}$ の場合の過大応力負荷後の高サイクル疲労の S-N 線図の例を示す。 n_1 に依存して、疲労強度の低下が生じる。図 5 に疲労限度線図を示す。

Fig.3 Fatigue limit diagram of constant stress amplitude test

Fig.4 Fatigue strength after overload at external mean stress $\sigma_m=510\text{MPa}$

Fig.5 Effect of overload level on the reduction of fatigue strength

過大応力を負荷していない一定振幅疲労限度を●印で示す。過大応力を負荷した後の疲労限度を各種の白抜き記号で示す。過大応力負荷後の供試材の疲労限度は大幅に低下することが示された。過大応力の振幅 σ_1 が大きくかつ繰返し回数 n_1 の多い条件ほど大きく低下した。

過大応力が振幅 250MPa 以下で繰返し数が 400 回以下の場合には疲労限度の低下は認められなかった。地震による過大応力の繰返し数を何回と想定するかについては別の評価が必要であるが、大きく見積もって数百回程度と仮定すると、その後の高サイクル疲労強度に悪影響を与えない過大応力振幅の下限値が存在することが示されている。以下にこの下限値について検討を行った。同じ切欠き試験片を用いて実施した低サイクル領域の疲労破断試験（破断条件は 3mm のき裂発生）を行った結果を図 6 に示す。この試験結果に基づき過大応力に対する累積疲労損傷値と破断・非破断の関係を評価したものを図 7 に示す。損傷値 D は線形累積損傷則により過大応力のみに対する値を求めたものである。

Fig.6 S-N curve in low cycle fatigue region

Fig.7 Linear accumulation fatigue damage that caused Reduction of fatigue limit

●印は過大応力負荷後の疲労限度が一定振幅の場合より低下が生じた条件を示し、○印は過大応力の影響がなかった条件を示す。過小応力を含む実働応力の場合に、マイナー則による損傷値の総和が最小で 0.003 程度で生じた例が報告されている⁽³⁾。本報の結果は過大応力のみによる疲労損傷値が 0.002 といった小さな値でも疲労限度の低下を引起す効果が十分にあり、地震による少数回の過大応力負荷は S-N 線図に基づくマイナー則の損傷値が小さいからといって軽視できない事例のひとつである。一方、過大応力 σ_1 が低くなると境界線は立上がり、過大応力による影響が急速に減少する限界値が存在することが示されている。この限界値は本報の材料と試験片では 250MPa であり、他の材料や切欠き形状に対しては異なるので個々に検討評価が必要であるが、この条件は後述する様に想定する繰返し過大応力によって数十ミクロン程度のき裂が発生する限界応力で、両振り疲労限度より若干高い応力である。数百回程度の繰返し過大応力の場合には線形累積損傷値がおおむね 0.005 が目安となる。これにより、地震後の機器の健全性評価において地震による応力が限界値以下の部材については評価を除外できる可能性を示唆する結果が得られた。

疲労限度低下の原因を検討するために、過大応力負荷後の高サイクル疲労試験で疲労限度となった試験片を破面解放し、き裂の発生状況を観察した。観察された微小き裂の例を図 8 に示す。ほぼ 2 次元の微小き裂が観察された。SEM による高倍率観察の結果、破面は低サイクル疲労的であり、高サイクル疲労き裂進展した痕跡は認められなかった。このことから、過大応力の繰返しにより微小き裂が発生し、これがトリガーとなって高サイクル疲労強度を低下させる機構であることが示された。また、疲労限度の試験片にき裂が存在したことから、繰返し過大応力によって発生した微小き裂の進展限界条件が疲労限度を与えることになる。

Fig. 8 Short crack formed by overload cycling ($\sigma_1=510\text{MPa}$)

3.2.2 過大応力負荷後の疲労限度低下に及ぼす平均応力の影響 前項ではもっとも過酷な条件として、地震後に部材の変位が最大応力位置で拘束される

ケースを想定して、高サイクル疲労の平均応力を $\sigma_m = \sigma_1$ と設定した。しかし、現実的には変位が開放されたり、若干の変位が残留した状態で拘束されるなどのケースが想定される。そこで、そのような状況を模擬するために外部平均応力 σ_m が低い領域で、0, 70MPa, 150MPa の 3 種類について高サイクル疲労試験を実施し、地震後の部材の拘束による平均応力効果を検討した。その際の過大応力は振幅 $\sigma_1 = 510\text{MPa}$ とし、繰返し数 n_1 は 1, 10, 20, 50, 100, 200 とした。

図 9, 10 に S-N 曲線の例を示す。これらの結果に基づいて作成した疲労限度線図を図 11 に示す。過大応力がない一定振幅の結果を●印で、過大応力試験の結果を白抜き記号で示す。一定振幅の結果と比較すると過大応力の結果は大幅に低下した。特徴として、まず過大応力の繰返し数 n_1 がわずか 1 回でも強度低下が生じた。1 回の過大応力では有意なき裂は発生しないので、この低下は過大応力負荷によって発生した引張残留応力の影響によるものと判断される⁽⁴⁾。第二の特徴は、わ

Fig.9 Fatigue strength after overload at external mean stress $\sigma_m = 0\text{MPa}$

Fig.10 Fatigue strength after overload at external mean stress $\sigma_m = 70\text{MPa}$

Fig.11 Reduction of residual fatigue strength after overloads shown in fatigue limit diagram

ずかな外部平均応力負荷により顕著な平均応力効果が生じることである。過大応力負荷後の疲労限度線図は一定振幅の場合に比べて低平均応力域で急峻に低下する。これは過大応力により既にある程度の引張残留応力が切欠き底に発生した上に、外部平均応力が重畳するためである。外部平均応力効果としては、70MPa 程度を境にしてそれ以上ではほぼ飽和する傾向が見られた。本試験での最大の強度低下量は平均応力が約 70MPa の場合であり、一定振幅に比べて約 1/4 にまで低下した。大きな過大応力を経験した部材にとって、外部平均応力は一定振幅の場合よりも顕著な影響を有することに注意を要する。

4. 過大応力負荷後の疲労限度低下に及ぼす水素の影響

前章で過大応力負荷後の高サイクル疲労強度低下は過大応力によって生成した微小き裂が主要因であることが示された。水素が侵入した低合金鋼はき裂進展が加速されることが明らかになっているので⁽⁵⁾、本研究の事象に対しても水素の影響があるものと推察される。そこで以下ではカソードチャージ法により材料内に連続的に水素を侵入させながら疲労試験を行い、金属中に侵入した水素が繰返し過大応力負荷後の高サイクル疲労強度に及ぼす影響について検討した。

4.1 連続水素チャージ法 本研究の疲労試験では 10^7 回疲労限度に到達するのに約 100 時間を要する。しかし低合金鋼は材料中の水素の拡散速度が大きいために⁽⁶⁾、あらかじめ水素侵入させた材料を用いて室温大気中で疲労試験する方法では、10 時間程度で大半の水素が放散して水素濃度が低下してしまうという不都合がある。長時間にわたって水素濃度の低下を防ぐためには、疲労試験中にも連続的に水素チャージを行うことが望ましい。電解質溶液中に試験片を浸漬して連

統的に陰分極しながら試験する方法があるが、この方法ではき裂が電解質溶液に接触することが避けられない。そこで、き裂を電解質溶液に接触させないようにしつつ、かつ連続的に陰分極により水素チャージする方法として著者の一人が先に考案した以下の方法⁽⁷⁾を採用した。

陰分極による連続水素チャージ法の概略図を図 12 に示す。試験片の切欠き部は耐水性の接着剤を用いて切欠きから 2mm 下までの範囲をコーティングし、電解質とき裂の接触を防止した。電解質溶液を保持する容器を供試材に取り付け、対極として白金板を用いてガルバノスタットにより陰分極を行った。き裂から少し離れた場所で水素を発生させ、侵入した水素が試験片内部を拡散してき裂部分に到達するという方法である。溶液は室温の pH=2.0 の希硫酸を使用し、電流密度は 130A/m^2 とした。疲労試験を開始する前にあらかじめ 48 時間水素チャージを施して水素濃度を高めた後、連続チャージしながら繰返し過大応力を負荷し、その後高サイクル疲労試験に移行した。

Fig.12 Continuous cathodic polarization method

4.2 水素チャージ下の過大応力疲労試験結果
過大応力は両振り振幅 $\sigma_1=510\text{MPa}$ とし、外部から負荷する高サイクル疲労の平均応力を $\sigma_m=70\text{MPa}$ と 510MPa の 2 種類について試験を行った。過大応力繰返し数 n_1 は 10, 20, 50, 100, 200 回とした。試験結果の $S-N$ 線図を図 13, 14 に示す。白抜き印は未チャージを示し、黒印は水素チャージの試験結果を示す。図 13 は平均応力 $\sigma_m=70\text{MPa}$ 、図 14 は平均応力 $\sigma_m=510\text{MPa}$ の $S-N$ 曲線である。図 15 に疲労限度線図を示す。過大応力のない一定振幅の疲労限度線図と比較すると、過大応力負荷を経験した部材の疲労強度は著しく低下し、本来の強度とは大きく異なる強度特性になっていることに注意が必要である。たとえば、両振り条件で設計された部材は本来 180MPa の両振り疲労限度を有するが、水素環境下で 510MPa の過大応力が 100 回負荷さ

れた上にわずか 70MPa の外部引張平均応力が残留すると、疲労限度は約 $1/5$ の 40MPa にまで低下することになる。

平均応力 $\sigma_m=70\text{MPa}$ の過大応力の繰返し数と疲労限

Fig.13 Effect of absorbed hydrogen on the reduction of fatigue strength after overloads ($\sigma_m=70\text{MPa}$)

Fig.14 Effect of absorbed hydrogen on the reduction of fatigue strength after overloads ($\sigma_m=510\text{MPa}$)

Fig.15 Effect of absorbed hydrogen on the reduction of fatigue limit diagram after overloads ($\sigma_1=510\text{MPa}$)

度の関係を図 16 に示す。過大応力の繰返し回数の増加とともに疲労限度の低下量が增大する。平均応力 $\sigma_m=510\text{MPa}$ 時の過大応力の繰返し数と疲労限度の関係を図 17 に示す。500MPa 程度の過大応力が 10 回程度以上負荷されると、高サイクル疲労強度低下が生じ始めることが示されている。

Fig. 16 Effect of overload cycle and hydrogen on the reduction of fatigue limit ($\sigma_m=70\text{MPa}$)

Fig. 17 Effect of overload cycle and hydrogen on the reduction of fatigue limit ($\sigma_m=510\text{MPa}$)

4.3 水素の影響の原因についての検討結果 水素侵入による疲労限度の低下の原因については仮説として次の二点があげられる。一点目は水素により繰返し過大応力で発生するき裂が深いことであり、二点目は高サイクル疲労き裂進展の下限界条件が低下することである。これらのうちいずれが優勢な因子であるのかを確認するために、一点目に対する検証として、未チャージ材と水素チャージ材の双方に対して疲労限度の試験片を破面解放してき裂長さを測定した。き裂長さの測定結果を図 18 に示す。○印で示す未チャージ材に対して、●で示す水素チャージ材の場合は約 4 倍と

Fig. 18 Depth of non-propagating crack in fatigue limit specimen after overload

Fig. 19 Effect of crack depth on the reduction of residual fatigue limit

格段にき裂が深く、大きな要因であることが確認された。

次に二点目に対する検証として、繰返し過大応力によって発生したき裂深さと高サイクル疲労限度の関係を図 19 に示す。○印が未チャージ材、●印が水素チャージ材の結果を示す。水素チャージ材の疲労限度は未チャージ材の疲労限度より約 20% 低い。この低下量は先の研究⁽⁸⁾で微小き裂材の疲労き裂進展下限界条件 ΔK_{th} に及ぼす侵入水素の影響を調べた結果とほぼ一致している。侵入水素による ΔK_{th} の低下は生じるが、その寄与は比較的軽微である。なお、同図の曲線の勾配が Kitagawa-Takahashi ダイアグラム⁽⁹⁾の 0.5 とは異なるが、これは過大応力によって発生した引張残留応力がき裂が深くなるにつれて徐々に解放され、き裂が深いほど有効な応力比が低下することによると推定される。

以上の検討から、繰返し過大応力後の高サイクル疲労強度低下に及ぼす水素の影響としては、二つの要素

とも寄与するが、前者の過大応力によるき裂成長が加速される効果の方が優勢な因子であると結論される。

5. 結 言

低合金鋼 SCM435H の切欠き試験片を用いて、繰返し過大応力負荷によるその後の高サイクル疲労強度低下およびそれに及ぼす水素侵入の影響を検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ある限界値以上の繰返し過大応力が負荷されると、その後の高サイクル疲労強度は低下する。その主要原因は、切欠き底に発生する引張残留応力と、繰返し過大応力により発生した微小き裂が高サイクル疲労き裂成長のトリガーになることである。
- (2) 過大応力を経験した部材の疲労強度は著しく低下し、本来の強度とは異なる強度特性になっており、わずかな外部引張応力の存在で、著しい疲労強度低下を生じる。
- (3) 過大応力振幅がある限界値以下では過大応力の影響がないので、これらの部材では地震後の健全性評価で評価を除外できる可能性が示唆された。
- (4) 水素により過大応力負荷後の疲労強度低下はさらに助長される。その要因は繰返し過大応力により未チャージ材と比較して格段に深いき裂が生成されるためである。また、疲労き裂進展下限界特性の低下も生じるが、これは二次的な寄与である。

文 献

- (1) K.Okuya and Y.Kondo, The Effect of Large Strain Cycling on the Fatigue Strength of Welded Joint, *Journal of ASTM International*, Vol.3, No.4, Paper ID. JAI 13232 (2006), pp.1-11.
- (2) Y.Kondo and K.Okuya, The Effect of Seismic Loading on the Fatigue Strength of Welded Joint, *Materials Science and Engineering A*, 468-470 (2007), pp.223-229.
- (3) H.Nakamura, Summary of fatigue experiments under service loading, *Journal of JSME*, Vol. 73 (1970), pp.1350-1358.
- (4) R.I.Stephens, A.Fatemi, R.R.Stephens, H.O.Fuchs, *Metal Fatigue in Engineering* 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc., (2001), p.277.
- (5) K.Yanagihara, S.Ohyanagi, M.Kubota, C.Sakae and Y.Kondo, Effects of Crack Size, Stress Ratio and Hydrogen on the Near Threshold Fatigue Crack Propagation of High Strength Steel, *Journal of Materials Science, Japan*, Vol.54 (2005), pp.1237-1243.
- (6) Y.Fukai, et al., Suiso to kinzoku, Uchida-roukakuho, (2002).
- (7) Y.Kondo, M.Kubota and K.Shimada, Crack Propagation Behavior of SCM440H Low Alloy Steel Enhanced by Hydrogen under Long-term Varying Load and Static Load, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.75, No.754 (2009), pp.752-760.
- (8) Y.Kondo, M. Kubota, K.Shishime and J.Yamaguchi, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.74, No.746 (2008), pp.1366-1372.
- (9) H.Kitagawa and S.Takahashi, Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage, *Proc. of 2nd ICM*, Cleveland (1976), pp.627-631.