高張力鋼 (HT) 溶接継手における疲れき裂の発生, 伝ばと破面のフラクトグラフィ*

窪堀 俊文**, 木下 秀雄**, 蔭山 幹雄***

Fatigue Crack Initiation, Propagation and Fractography of Fracture Surface on Welded Joints of High Strength Steel (HT)*

by Toshifumi Kubohori**, Hideo Kinoshita** and Mikio Kageyama***

Study of fatigue strength and the crack initiation and propagation on notched specimens and welded joints of high strength steel were carried out. On this experiments, difference of the high strength steel and the mild steel was checked. The main results are summarized as follows: (1) In the notched specimens, the HT specimens have larger notch sensitivity than mild steel specimens. However the fatigue strength of HT specimens has higher than that of mild steel specimens in the case of tip radius of notch is greater than 0.1 mm. (2) In the welded joint specimens, the HT specimens have somewhat higher fatigue strength than mild steel specimens on the following four sections of joints; base metal, heat affected zone, bond and weld metal. The crack propagation rates on the four sections of joints of HT specimens are shown as follows; Bond > Weld metal > HAZ > Base metal. In contrast, the crack propagation rates of mild steel specimens are almost the same on the four sections of joints.

1. 緒 言

近年溶接構造物の大型化が進み, それに伴い経済性及び構造物の重量軽減が要求されるようになり 高張力鋼 (HT) が益々重要視されてきた. しかし高張力鋼は静的強度で設計する場合には相当高い応力値をとることができるが, 繰返し荷重を受ける構造物の溶接部などに鋭い欠陥が存在する場合には, 従来から知られているように疲労における切欠き感受性が大きいいため疲れ強さは相当低下するという危険な一面を有しており^{1,2)}, 高張力鋼の破損原因に対する研究が行われるようになった^{3,4)}.

一方, 近年の走査電子顕微鏡 (SEM) の進歩により構造物の破壊あるいは破壊後の解析手段の一つとしてフラクトグラフィが多く用いられるようになり, 破面形態から負荷応力や破壊の原因などがある程度分かるようになってきた⁵⁾.

しかしながら従来, 高張力鋼 (HT) 及び軟鋼溶接継手において疲れき裂発生の確認並びに伝ばの見地から十分な比較がなされていない. そこで本報では両材について

疲れき裂の発生及び伝ば特性を非破壊検査法 (NDI) により比較検討すると共に, フラクトグラフィの手法により確認した.

2. 実験装置及び試験片

本実験に使用した疲れ試験機は定荷重式万能疲れ試験機 UF-500 型である. 疲れ破面の観察には走査電子顕微鏡 MINI-SEM 6 型を用いた. 疲れ試験中, 疲れき裂の発生と伝ばの確認のため, 超音波検査法と X線検査法を併用した.

試験片材料としては WES 3001 HW70 相当の HT80 及び JIS G 3106 規定の SM41A である. 試験片は Fig. 1 に示す片側切欠き素材試験片及び Fig. 2 に示すレ型開先突合せ溶接継手試験片で, 以下 HT80 を用いて作成した試験片を HT 試験片及び HT 溶接試験片, SM41A を用いて作成した試験片を SM 試験片及び SM 溶接試験片と略す. HT 溶接試験片の溶接棒には JIS Z 3213 規定の 80 kg/mm² 級 高張力鋼用低水素系被覆アーク溶接棒を 350℃ でほぼ 1 時間乾燥した後用いた. また SM 溶接試験片の溶接には JIS Z 3211 規定のイルミナイト系被覆アーク溶接棒を 100℃ でほぼ 1 時間乾燥した後用いた. 母材及び溶接棒の機械的性質及び化学成分を Table 1 に示し, 溶接条件は HT 溶接試験片について Table 2, SM 溶接試験片について Table 3 に示す. 溶

*原稿受付 昭和54年5月22日 (昭和53年度秋季, 昭和54年度 春季両全国大会にて発表)

**正 員 近畿大学理工学部 Member, Faculty of Science and Technology, Kinki University

***学 生 員 近畿大学大学院 Student Member, Graduate School, Kinki University

Fig. 1 Notched specimens

Fig. 2 Welded joint specimens

接後余盛を完全に削除し、X線透過検査を行い、欠陥の無いことを確認した後、所定の形状寸法に加工した。なお切欠きは試験片側面をマクロ腐食して母材部、熱影響部、ボンド部及び溶接金属部（以下 BM 部、HAZ 部、Bond 部及び WM 部と略す）に位置するように加工した。

負荷は片側切欠き素材試験片に対して片振り引張（応力比 $R=0$ ）、溶接継手試験片に対して片振り曲げ（ $R=0$ ）である。

3. 実験方法

3.1 超音波検査法及び X 線検査法

繰返し回数の増加に伴う疲れき裂の発生及び伝ば状況を測定するために超音波検査と X 線検査を繰返し数 1000～10000 回ごとに行った。また破断した試験片は走査電子顕微鏡を用いて破面観察を行った。

3.2 荷重条件

HT 試験片と SM 試験片の相違を検討するため、低

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of materials

Material	Mechanical properties			Chemical compositions (%)												
	Y.TP (kg/mm ²)	T.S. (kg/mm ²)	EL. (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq	
Base metal	HT80	74	86	35	0.12	0.25	0.85	0.014	0.008	0.23	0.81	0.54	0.46	0.04	0.001	0.52
	SK42A	28	45	29	0.19	0.04	0.69	0.021	0.0027	—	—	—	—	—	—	—
Weld metal	06016	70	83	24	0.06	0.63	1.36	0.010	0.005	—	1.73	0.24	0.44	—	—	0.51
	UX301	45	49	30	0.09	0.11	0.47	0.020	0.010	—	—	—	—	—	—	—

Y.P.: Yield point T.S.: Tensile strength EL.: Elongation

Table 2 Welding conditions of HT weld specimens

Layer	1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer	back run
Conditions					
Diameter (mm)	3.2	4.0	4.0	4.0	4.0
Current (A)	100	150	150	140	150
Voltage (V)	26	26	26	24	23
Welding speed (cm/min)	19.0	9.1	18.2	10.2	29.0
Heat input (kJ/cm)	6.6	20.6	10.3	15.8	5.7

Note: Total heat input: 59.0 kJ/cm Efficiency: $\eta=0.8$

Table 3 Welding conditions of SM weld specimens

Layer	1st layer	2nd layer	3rd layer	4th layer	5th layer	back run
Conditions						
Diameter (mm)	3.2	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Current (A)	120	178	188	185	185	160
Voltage (V)	30	30	32	33	33	34
Welding speed (cm/min)	26.7	21.4	21.2	19.1	16.5	25.0
Heat input (kJ/cm)	6.5	12.0	13.6	15.3	17.8	10.4

Note: Total heat input: 75.6 kJ/cm Efficiency: $\eta=0.8$

応力として SM 試験片の降伏点よりも低い応力である $\sigma=20 \text{ kg/mm}^2$ (196 N/mm^2) を負荷し、高応力として SM 試験片の降伏点に相当する応力である $\sigma=28 \text{ kg/mm}^2$ (275 N/mm^2) を負荷した。

3.3 応力拡大係数範囲及び応力集中係数

応力拡大係数範囲 ΔK の算出には、引張に対して平行部が試験片幅の 2 倍程度であるが近似的に (1) 式を用いた⁶⁾。

$$\Delta K = \frac{\Delta P \sqrt{l}}{W t} (1.99 - 0.41 \lambda_1 + 18.70 \lambda_1^2 - 38.48 \lambda_1^3 + 53.85 \lambda_1^4) \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中 ΔK : 応力拡大係数範囲 ($\text{kg/mm}^2 \cdot \text{mm}^{1/2}$)

ΔP : 荷重範囲 (kg)

l : 切欠きを含めたき裂長さ (mm)

W : 板幅 (mm)

t : 板厚 (mm)

λ_1 : $\lambda_1 = l/W$ ($\lambda_1 \leq 0.6$)

また曲げに対して (2) 式を用いた⁶⁾。

$$\Delta K = \frac{6 \Delta M \sqrt{l}}{W t^2} (1.99 - 2.47 \lambda_2 + 12.97 \lambda_2^2 - 23.17 \lambda_2^3 + 24.80 \lambda_2^4) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中 ΔM : 曲げモーメント範囲 ($\text{kg}\cdot\text{mm}$)

$$\lambda_2: \lambda_2 = l/t \quad (\lambda_2 \leq 0.6)$$

応力集中係数 (以下 α と略す) は西田が求めた値⁷⁾を用いた。

4. 実験結果及び考察

4.1 高張力鋼素材の引張疲れ試験

4.1.1 S-N 線図

Fig. 1 に示した片側切欠き素材試験片の S-N 線図を Fig. 3 に示す。Fig. 3 において平滑材 (Plate) の疲れ強さは HT 試験片では 32 kg/mm^2 (314 N/mm^2), SM 試験片では 20 kg/mm^2 (196 N/mm^2) で HT 試験片の方が相当高い値を示している。しかしこれら両平滑試験片に切欠きを入れると両者共疲れ強さは低下するが、特に HT 試験片の場合急激に低下し切欠き先端半径 $\rho=0.1 \text{ mm}$ ($\alpha=4.4$) 程度では SM 試験片と同じ疲れ強さとなり HT 材を使用する意義がなくなる。しかし切欠き先端半径が大きければ、すなわち α が小さければやはり HT 試験片の方が疲れ強さは高い。

この S-N 線図より切欠き先端半径 ρ と応力集中係数 α 及び切欠き係数 (以下 β と略す) との関係を示すと Fig. 4 のようになり、 α の大きくなるほど HT 試験

片の β は SM 試験片に比較して急激に増加している。すなわち HT 試験片の方が SM 試験片よりも疲労における切欠き感受性の大きいことが分かる。

4.1.2 非破壊検査法による疲れき裂の評価

超音波検査法で疲れき裂長さを推定する場合疲れき裂に沿って探触子を左右走査し、得られた探傷図形において最大エコー高さから -6 dB down 法⁸⁾を適用すると Fig. 5 のようになる。この図から試験片表面での読取り顕微鏡によるき裂長さと、超音波検査法による推定き裂長さは HT 試験片, SM 試験片共に十分精度よく推定可能であることが分かる。次に X線検査法で疲れき裂を検出する場合, HT 試験片, SM 試験片共に同一き裂長さの場合には HT 試験片の方が SM 試験片よりき裂の幅が狭い。この結果 SM 試験片では、き裂長さが 0.4 mm 程度になれば X線フィルム上で検出できるのに対し, HT 試験片ではき裂長さが 1.0 mm 程度になれば検出できない。したがって X線検査法により HT 試験片を検査する場合には特に慎重に行うことが必要で、できれば超音波検査法による方が望ましい。

4.1.3 疲れき裂の発生及び伝ばの確認

各種検査法による疲れき裂の発生及び伝ばの確認状態を HT 試験片について代表的なものを Fig. 6 (a) に示し, SM 試験片について代表的なものを Fig. 6 (b) に示す。これらの図において (i) は超音波検査法による推定き裂長さ, (ii) は X線検査法によるき裂長さ及び (iii) は読取り顕微鏡によるき裂長さの変化である。

切欠き先端より発生する疲れき裂を超音波検査により確認 (Fig. 6 参照) できるのは HT 試験片の場合破断繰返し数の 25% 前後であり, SM 試験片の場合 35% 前後である。このことからき裂の発生を破断繰返し数に対する割合で比較すると HT 試験片の方が SM 試験片よりもき裂の発生が早いことが分かる。

(i) の超音波検査法, (ii) の X線検査法及び (iii) の読取り顕微鏡による実測値について疲れき裂の確認状態を比較すると超音波検査法が最も早く検出可能であることが分かる。

次に読取り顕微鏡によるき裂長さ繰返し数との関係よりき裂伝ば速度 dl/dN と、本試験片に対して単純に外力から (1) 式により計算した場合の応力拡大係数範囲 ΔK との関係を HT 試験片については Fig. 7 (a) に, SM 試験片については Fig. 7 (b) に示し、それぞれ次式で表わされ HT 試験片の方が SM 試験片よりき裂伝ば速度が遅い。

HT 試験片について

$$\frac{dl}{dN} = 2.55 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 3 S-N curves for notched specimens

Fig. 4 Stress concentration factor α and fatigue notch factor β

Fig. 5 Relation between estimated crack length and measured crack length

Fig. 6 Estimation for initiation and propagation of fatigue crack by non-destructive inspection and reading microscope

Fig. 7 Relation between range in stress intensity factor ΔK and crack propagation rate dl/dN for notched specimens

SM 試験片について

$$\frac{dl}{dN} = 1.32 \times 10^{-10} (\Delta K)^{2.55} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中 dl/dN : き裂伝ば速度 (mm/cycle)

ΔK : 応力拡大係数範囲 ($\text{kg}/\text{mm}^{3/2} \cdot \text{mm}^{1/2}$)

結局定荷重振幅の場合には HT 試験片の方が SM 試験片に比較して疲れき裂の発生が早いとき裂の伝ば速度が遅く、それらの相乗効果により全体としての寿命が長くなったものと思われる。

4.1.4 走査電子顕微鏡 (SEM) による破面観察

(1) HT 試験片及び SM 試験片の低応力における疲れき裂の初期段階

SM 試験片の降伏点よりも低い応力 ($\sigma = 20 \text{ kg}/\text{mm}^2$, $196 \text{ N}/\text{mm}^2$) を負荷させた場合、切欠きからの疲れき裂発生部近傍の特徴的破面を HT 試験片については Fig. 8 (a) に、SM 試験片については Fig. 8 (b) に示す。

Fig. 8 Scanning electron micrograph of early fatigue crack ($\sigma = 20 \text{ kg}/\text{mm}^2$)

本研究においては引張応力の方向と約 45° の方向のすべり面に沿って形成されたき裂がその方向に伝ばし、せん断の様相を示す段階を第1段階 (Stage 1) と定義し、その後にくる引張方向に垂直に伝ばする第2段階 (Stage 2), 更に微小空洞の合体など静的破壊に類似した最終破壊面を第3段階 (Stage 3) と定義する^{9,10)}。

Fig. 8 に示されるように HT 試験片においても SM 試験片においても明らかに第1段階が確認された。

(2) HT 試験片及び SM 試験片の高応力における疲れき裂の初期段階

SM 試験片の降伏点に相当する応力 ($\sigma = 28 \text{ kg}/\text{mm}^2$, $275 \text{ N}/\text{mm}^2$) を負荷させた場合、HT 試験片における切欠きからの疲れき裂発生部近傍の破面を Fig. 9 (a) に示し、SM 試験片における破面を Fig. 9 (b) に示す。HT 試験片の場合には低応力の場合と同じく第1段階が明確に確認されるがその大きさは小さい。これに対して SM 試験片では、高応力下でき裂先端に生じる塑性変形量が

Fig. 9 Scanning electron micrograph of early fatigue crack ($\sigma=28\text{kg/mm}^2$)

Fig. 10 Scanning electron micrograph of stage 2

大きくなり塑性変形によって生じたと思われる無特徴な新しい破面が認められ, その後すぐに第2段階へと進展している。

(3) ストライエーション間隔と応力拡大係数範囲との関係

HT 試験片及び SM 試験片の第2段階における特徴的破面をそれぞれ Fig. 10 (a) 及び Fig. 10 (b) に示す。この段階に現われる特徴的破面はストライエーションである。

ストライエーション間隔 s と本試験片に対して単純に外力から(1)式により計算した場合の応力拡大係数範囲 ΔK との関係を図 11 に示す。なお巨視的き裂伝ば速度 dl/dN と ΔK との関係(項目 4.1.3 参照)も併せて示した。Fig. 11 から分かるように, 本実験内ではストライエーション間隔 s と ΔK との関係は巨視的き裂伝ば速度 dl/dN と ΔK との関係ほど明確ではないが,

$$s = A (\Delta K)^B \quad \dots\dots\dots (5)$$

(式中 A 及び B : 定数)

で表わされ, 破面からも HT 試験片の方が SM 試験片よりき裂伝ば速度が遅いことが明らかに認められた。

以上のように SEM による破面観察の結果は巨視的なき裂伝ばの様相を実証している。

(4) 第3段階における特徴的破面

HT 試験片及び SM 試験片の第3段階の特徴的破面をそれぞれ Fig. 12 (a) 及び Fig. 12 (b) に示す。この段階に現われる特徴的破面はディンプルで代表され疲労の

Fig. 11 Relation between striation spacing s and range in stress intensity factor ΔK

Fig. 12 Scanning electron micrograph of stage 3

最終破壊面である。HT 試験片のディンプル部の特徴としては Fig. 12 (a) に示すように大きいディンプルと小さいディンプルが混在している¹¹⁾。このようなディンプル形態は SM 試験片には認められず Fig. 12 (b) に示すように一様なディンプルである。

4.2 高張力鋼溶接継手の曲げ疲れ試験

4.2.1 S-N 線図

Fig. 2 に示した溶接試験片の S-N 線図を図 13 に示す。なおこの場合応力集中係数 α は約 2.8 である¹²⁾。Fig. 13 において HT 溶接試験片の疲れ強さは切欠きを入れた場合相当低下することが分かる。また HT 溶接試験片の中でも HAZ 部が最も高い疲れ強さを有しており WM 部, BM 部, Bond 部の順に低下し, Bond 部の疲れ強さは最も低い。また SM 試験片の疲れ強さも同様に低下するが, その差はあまり大きくない。このように HT 溶接試験片 Bond 部では特に疲労における切欠き感受性の大きいことが分かる。

4.2.2 疲れき裂の発生及び伝ば

疲れき裂の発生については片側切欠き素材試験片の場合と同様 HT 溶接試験片の方が SM 溶接試験片よりも早い。また繰返し数 N とき裂長さ l との関係より求め

Fig. 13 S-N curves for welded joint specimens

Fig. 14 Relation between range in stress intensity factor ΔK and crack propagation rate dl/dN for welded joint specimens

Fig. 15 Relation between distance from surface and percentage (area) of striation and dimple for HT weld specimens

Fig. 16 Relation between distance from surface and percentage (area) of striation and dimple for SM weld specimens

たき裂伝ば速度 dl/dN と、本試験片に対して単純に外力から(2)式により計算した場合の応力拡大係数範囲 ΔK との関係を示す。HT 溶接試験片については Fig. 14(a) に、SM

溶接試験片については Fig. 14 (b) に示され、

$$dl/dN = C(\Delta K)^m \quad \dots\dots\dots(6)$$

(式中 C 及び m : 定数)

で表わされる。両図より明らかなように HT 溶接試験片では Bond 部のき裂伝ば速度が最も速く, WM 部, HAZ 部, BM 部の順に遅くなっている。しかし SM 溶接試験片では各部のき裂伝ば速度はほぼ同一の直線で表わされる。

4.2.3 走査電子顕微鏡による破面観察

(1) 各部の破面観察

溶接試験片においても片側切欠き試験片の低応力における疲れき裂の初期段階の場合と同様, HT 溶接試験片の第1段階は SM 溶接試験片の第1段階より大きくかつ明確であり, いずれの場合も半だ円状を呈していた。また第2段階に現われるストライエーションについては全体的に HT 溶接試験片の方が SM 溶接試験片よりも相当不明確で, 特に HT 溶接試験片 Bond 部のストライエーションは極めて不明確であった。次に第3段階の最終的な破断部近くに現われる伸長ディンプルはほとんどすべての溶接試験片に観察されたが, HT 溶接試験片 Bond 部では観察されなかった。これは Bond 部において引裂き形の伸長ディンプル¹³⁾が出現する以前に不安定破壊を起こすためと思われる。

(2) ストライエーション及びディンプルの面積率

ストライエーション及びディンプルの試験片各位置における面積率の変化を HT 溶接試験片について Fig. 15 に, SM 溶接試験片について Fig. 16 に示す。HT 溶接試験片において BM 部ではストライエーションが他の部分より相当早く現われ, しかも相当大きな面積を占めていることが分かる。また Bond 部ではストライエーションの占める面積が相当小さい。次に両試験片のストライエーションについて比較してみると, HT 溶接試験片では全体的にストライエーションは不明確であるが広範囲にわたり検出されている。更に同図から WM 部では他の部分に比較してストライエーション中にディンプルが混在していることも分かる。

5. 結 言

以上得られた結果を要約すると次の通りである。

HT 及び SM 素材の引張疲れ試験の場合:

1. HT 試験片は SM 試験片に比較して疲労における切欠き感受性が大きく, 切欠き先端半径 $\rho=0.1\text{ mm}$

程度では HT 試験片及び SM 試験片共ほぼ同じ疲れ強さに低下する。

2. き裂の発生は HT 試験片の方が SM 試験片より早い, その後のき裂伝ば速度は SM 試験片の方が HT 試験片よりも大きい。

3. 疲れき裂の発生及び伝ばを確認するために超音波検査法, X線検査法並びに取扱い顕微鏡による実測値につき比較検討したが, 超音波検査法による方法が最も早く検出が可能なが実証された。

HT 及び SM 材突合せ溶接継手の曲げ疲れ試験の場合:

1. HT 溶接試験片は SM 溶接試験片に比較して全体的に疲れ強さは高いが, HT 溶接試験片の Bond 部は他の部分に比較して切欠き感受性が特に大きいことが認められた。

2. HT 溶接試験片のき裂伝ば速度は Bond 部が最も速く, WM 部, HAZ 部, BM 部の順に遅くなるが, SM 溶接試験片ではすべての部分のき裂伝ば速度はほぼ同一であることを確かめた。これは両継手の材質の変化に起因するものである。

参 考 文 献

- 1) 太田省三郎; 溶接構造物の割れ防止と安全性に関するシンポジウムテキスト, 溶接学会, (1974), 1-5
- 2) 高木乙磨; 溶接工作法通論, 日本溶接協会, (1976), 105-113
- 3) 川崎 正, 沢木洋三, 新井 徹, 井田充彦, 安藤正彦; 高張力鋼の溶接部の組織と疲労切欠感受性について, 溶接学会誌, 43-8 (1974), 36-43
- 4) 飯田国廣; 軟鋼及び高張力鋼の切欠疲労強度に関する一考察, 日本造船学会論文集, 141 (1977), 257-267
- 5) 北川英夫, 小寺沢良一; フラクトグラフィ, 培風館, (1977), 165-215
- 6) William F. Brown, Jr., and John E. Srawley; Plain Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP-410 (1966)
- 7) 西田正孝; 応力集中, 森北出版, (1973), 570-571
- 8) 石井勇五郎; 非破壊検査工学, 産報出版, (1973), 189
- 9) Metals and Ceramics Information Center; SEM/TEM Fractography Handbook, Battelle Columbus Laboratories, (Dec. 1975), 39-49
- 10) 北川英夫, 小寺沢良一; フラクトグラフィ, 培風館, (1977), 79-80
- 11) 石原 守, 平石茂樹, 杉本威生; 高張力鋼母材および溶接部の疲労き裂伝ば速度, 材料, 27-292 (1978), 42-48
- 12) 西田正孝; 応力集中, 森北出版, (1973), 572-575
- 13) 小林英男; 破壊力学入門 (Ⅶ) 材料の破壊およびフラクトグラフィ, 非破壊検査, 25-1 (1976), 21-35