

鋼のぜい化

(2) メッキ層内に生ずる引張残留応力などが考えられる。しかしこれらが疲れ強さの低下の因子としてどのように影響するか確定的な結論は得られていない。ベーキング処理後の S-N 曲線は疲れ限度がやや上り (33 kg/mm²), 50 kg/mm² の辺で反転してそれより高い荷重では他の S-N 曲線より低い値を示しているが、ベーキング処理の効果は顕著であった。このことからベーキング処理が大切なことがわかる。しかしベーキング処理の効果は水素によるぜい化を弱めるのか、または引張残留応力を弱めるのかは本段階では詳細に理解することはできない。

5. 結 言

以上 AISI-D2 の焼入、焼戻し材で平行部の表面粗さを変えた場合の回転曲げ疲れ強さを求めた。その結果をまとめると次のようになる。

1. 表面粗さを大きくすると AISI-D2 の疲れ強さは炭素鋼などの比較的軟かい材料の場合とは違って、その低下率が著しい。

2. 試験片表面にクロムメッキをほどこすと水素による母材のぜい化、メッキ層内に生ずる引張残留応力のために著しく疲れ強さが低下する。しかしベーキング処理をほどこすと疲れ強さは上がり、疲れ限度はメッキをしない場合よりも高かった。

3. 疲れ試験の研究における試験片の表面は試験片製作上の問題、粗さが小さくなると強さが向上すること、ばらつきが大きくなることなどを考慮に入れて最大表面粗さが 0.3 μ の試験片を使用することが望ましいと考える。

文 献

- 1) 日本機械学会編：金属材料疲れ強さの設計資料，(昭40. 9) p. 29 [日本機械学会]
- 2) 河本：金属の疲労，(昭37. 5)，p. 82 [朝倉書店]
- 3) 横堀：金属の疲労強度と安全設計， p. 41 [日本材料試験協会]

(221) 高張力鋼溶接継手の疲れ強さにおよぼす硬さ分布および入熱の影響

(高張力鋼溶接継手の疲れ強さ低下原因に関する研究—I)

八幡製鉄，技術研究所

○高橋賢司・高島弘教・伊藤昭典

Effect of Hardness Distribution and Heat-input on Fatigue Strength in Butt Welded Joint

(Studies on fatigue strength of welded joint in high tensile strength steels—I)

Kenji TAKAHASHI, Hironori TAKASHIMA and Akinori ITO

1. 緒 言

溶接性高張力鋼母材の疲れ強さは、十分高い値をもつ

にもかかわらず、その溶接継手は溶接まではきわめて低い値を示し、50キロ-100キロ級の鋼種も片振り引張で 20 kg/mm² 前後の低い疲れ限度を示し、軟鋼溶接継手のそれと大差はなく¹⁾、数多くの研究で、繰返し荷重下にある溶接継手においては、高張力鋼の特長がほとんど失なわれると報告²⁾されている。したがって、使用目的によつては、きわめて不利であり、工業的に重要な問題と考えられているが、この低下の原因を分解し、系統的に研究した例は非常に少ない。

この疲れ強さの低下原因としては、(1)溶接部の組織変化に伴う硬さ変化、(2)軟化部、(3)溶接部の切欠き感受性、(4)余盛形状、溶接欠陥、(5)表面状況(酸化、脱炭層ほか)などが、またとくに溶接構造物については残留引張応力が考えられる。本研究は、これらをそれぞれの影響をできるだけ単独にとりだして調べ、その基本的低下原因を明らかにしようとしたもので、本報ではまず冶金切欠きと称せられている上記(1)および(2)についての実験結果を述べる。

2. 硬さ分布と疲れ強さ³⁾

峰久⁴⁾は溶接継手の疲れ強さの低下原因を組織の不均一に伴う硬さ変化に起因すると考え、これを断面積不均一のために生ずる形状の切欠きと同様に扱ひ、いわゆる冶金的切欠きを形状の切欠きに直した等価試験片によつて、溶接継手の疲れ強さが求められると推定した。

溶接継手の疲れ破壊は、実際溶接部熱影響部の硬さ変化が急激な位置で、しかも軟化部で生ずる場合が多い。そこで、われわれは、このような硬さ変化が溶接部の低い疲れ強さの決定的な起因となつているか否かを調べる目的で、残留応力、形状変化その他の影響をできる限り排除して、試験片に組織変化に伴う硬さ変化のみ与えてそれが疲れ強さにおよぼす影響を検討した。

2.1 供試材および実験方法

供試材は 50 キロ級、60 キロ級、80 キロ級高張力鋼で、厚さ 20 mm 鋼板を用いた。その化学成分と機械的性質 (JIS 4号引張試験片) を Table 1 に示す。

熱サイクル再現装置により、Fig. 1 中の形状をもつ第 1 次試験片に同図中 A, B, C の熱サイクルを与えた。熱処理された第 1 次試験片より、平行部長さ 50 mm の回転曲げ平滑疲れ試験片を切削により製作した。平行部

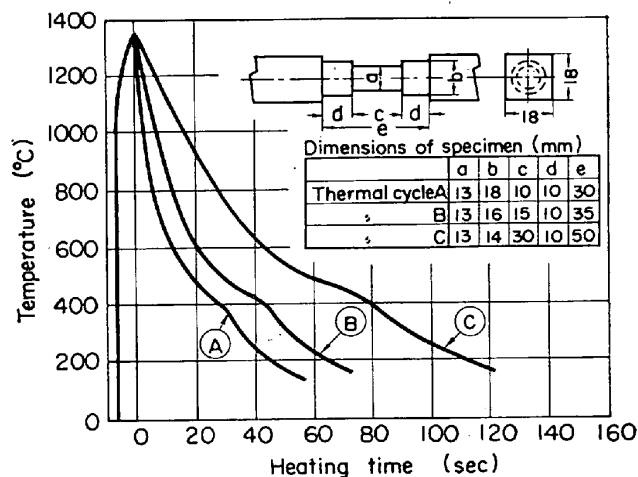


Fig. 1. Thermal cycle diagram of specimens.

Table 1. Chemical compositions and tensile properties of steels tested.

Steel	Heat treatment	Chemical composition (%)									Tensile properties			
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El (%)	R.A. (%)
WEL-TEN60	as rolled	0.16	0.34	1.19	0.032	0.012	—	—	—	—	31.3	50.0	37.2	70.5
WEL-TEN80	Q→T	0.14	0.50	1.25	0.017	0.008	—	0.23	—	0.05	52.7	61.1	27.4	75.1
WEL-TEN50	Q→T	0.14	0.26	0.83	0.012	0.008	1.06	0.61	0.45	0.05	73.8	80.0	25.0	68.2

σ_Y : 0.2% proof strength, σ_B : Tensile strength, El: Elongation, R.A.: Reduction of area

Table 2. Results of rotating bending fatigue test (kg/mm²).

Steel	WEL-TEN 50	WEL-TEN 60	WEL-TEN 80
Base metal	26	31	43
Thermal cycle A	26	31	48
〃 B	24	31	47
〃 C	25	30	47

は #320 のペーパーで仕上げを行ない、容量 10 kg-m のクラウド式回転曲げ疲れ試験機を用い、回転速度 2900 rpm で疲れ試験を行なった。疲れ限度は、応力振巾を 1 kg/mm² おきに変化させ、 1×10^7 回以上の繰返し数で破断しない最大の応力振巾として求めた。

2.2 実験結果および考察

疲れ試験片の縦断面の表面下 1 mm の所で測定した硬さ分布は実際溶接継手の硬さ分布にはほぼ等しいものであった。回転曲げ疲れ破断位置は WEL-TEN 50 では母材、WEL-TEN 60 および WEL-TEN 80 では母材または母材と硬化部の境界であった。これらの疲れ限度を一括して Table 2 に示す。WEL-TEN 50 および WEL-TEN 60 は母材とほとんど同じ疲れ強さを示し、WEL-TEN 80 では Hv 130 程度の硬さの急激な変化がありながら、むしろ 4 kg/mm² 程度も高い値を示した。試料の熱影響部の組織を観察したところ、各組織は実際溶接継手の熱影響部と同じであり、たとえば WEL-TEN 80 では、素材部は焼戻しペーナイト、硬化し初める部分では中間段階組織を示し、硬化部ではマルテンサイト+ペーナイト組織を示した。また峰久は硬さ分布を断面形状の変化におきかえ、硬さ分布による形状係数 α' を求めているが、参考までにこの場合の α' を求めたところ、 α' は 1.24 以下であった。WEL-TEN 80 の実験結果では、硬さ変化のある試料はむしろ高い疲れ強さを示しており、 $\alpha'=1.24$ に対応した疲れ強さの低下は認められなかった。

したがって、このような組織変化に伴う硬さ変化を一種の冶金的切欠きと考えることおよび硬さ変化から溶接部の疲れ強さを推定することは困難であり、溶接継手の疲れ強さの低下の主原因を熱影響部の硬さ分布に求めることはできない。

3. 溶接入熱の影響⁵⁾

高張力鋼横突合せ溶接継手部の余盛を試料表面下 1

mm の位置まで切削除去すると、その疲れ強さは母材と同程度に向上し、しかもその疲れ強さは母材の挙動と同様に引張強さに比例して高くなることはすでに報告した。

本報では、この場合の溶接条件を故意に不適正な条件にまで拡大して、軟化部の巾を変えた場合について検討を加えた。

3.1 供試材および実験方法

供試材は板厚 20 mm の WEL-TEN 60 と板厚 19 mm の WEL-TEN 80 を用いた。その化学成分と機械的性質は Table 1 中の WEL-TEN 60 および WEL-TEN 80 と同様で、引張強さはそれぞれ 65 kg/mm² および 84 kg/mm² のものである。溶接は X 開先突合せ手アーク溶接で、使用溶接棒は $\text{\textcircled{S}}$ L-60 および L-80 であり、開先は 60° の X 型とした。入熱は溶接速度を 18 cm/min より 4.5 cm/min まで変え、パス回数を 4 ないし 15 にとり、15000 Joule/cm より 55000 Joule/cm まで大巾に変化させた。溶接は圧延方向と直角方向に行ない、溶接後試験片を溶接部の板厚中心より、溶接部が中央部になるように、圧延方向に採取した。その形状(平行部径 7.52 mm ϕ)、仕上要領は前項と同様であり、溶接部には試験片フレットによる応力集中がないようにその形状に十分注意し、それぞれ約 10 本を用い、S-N 線図を求めた。

3.2 実験結果および考察

溶接継手の機械的性質は相当大巾に溶接入熱を変えたにもかかわらず、たとえば引張強さは WEL-TEN 60 では 67~70 kg/mm²、WEL-TEN 80 では 83~85 kg/mm² で、機械的性質はほとんど変らなかつた。溶接部の硬さは典型的分布を示すものもあつたが、異状な入熱を与えた試験片あるいは場所によりやや複雑な分布を示すものもあつた。軟化部は WEL-TEN 80 では、母材硬化部の両側にそれぞれ 2 カ所づつ計 4 カ所認められるものが多く、また 55000 Joule/cm の入熱の場合は溶着鋼も相当な硬さ低下を示した。簡単のために、それぞれの最高硬さと最低硬さを Table 3 に示す。F.S および B.S の硬さはほぼそれぞれの疲れ試験片表面の軸方向硬さ分布に相当する。したがって、いまこれらの位置の測定点に注目すると、WEL-TEN 60 では入熱が 55000 Joule/cm の場合に最高硬さおよび最低硬さは、小入熱の場合より低く、また硬さの差はむしろ 55000 Joule/cm では小さく、17500 Joule/cm および 37300 Joule/cm の場合が大きく、ほぼ Hv 70~80 の硬さ変化を示

Table 3. Maximum and minimum micro hardness Hv at weldment of each specimen.

Steel	Measuring position	15,000 Joule/cm		17,500 Joule/cm		37,300 Joule/cm		55,000 Joule/cm	
		Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.
WEL-TEN 60	F.S	252	190	258	199	250	180	234	179
	M.L	251	197	262	197	285	200	227	178
	B.S	243	191	273	192	241	177	219	186
WEL-TEN 80	F.S	371	232	274	229	271	223	273	201
	M.L	261	232	288	214	287	214	266	222
	B.S	283	234	271	209	270	227	270	223

HV: Micro vickers hardness (1000 gr. weight)

F.S, B.S: Front side and back side in weldment 3mm apart from middle line H. L for WEL-TEN 60, 4mm for WEL-TEN80 respectively

Table 4. Results of rotating bending fatigue tests.

WEL-TEN 60	Heatinput	15,000	17,500	37,300	55,000
	σ_w (kg/mm ²)	33	34	35	32
	σ_w/σ_B	0.472	0.500	0.518	0.408
WEL-TEN 80	Heatinput	14,590	17,500	37,300	55,000
	σ_w (kg/mm ²)	41	41	40	37
	σ_B/σ_w	0.480	0.474	0.472	0.444

Remark, heatinput: Joule/cm

している。WEL-TEN 80 では最高硬さは Hv 370 で最も高かったが、これ以外に入熱ではいずれも Hv 270 程度で入熱による差は認められなかった。

Table 4 に $N=10^7$ の繰返し数における回転曲げ疲れ限度 σ_w と疲れ限度比 σ_w/σ_B 比を示す。疲れ破断位置は、母材破断は 75 本中わずか 5 本で、両鋼種とも圧倒的に熱影響部であり、とくに WEL-TEN 80 では軟化部が破断の起点となっていた。したがって、軟化部の硬さとその巾が問題となる。破断は熱影響部の母材よりの軟化部であったので、これに注目して検鏡もあわせて検討した。WEL-TEN 60 では、入熱 15000, 17500 Joule/cm ではともに最低硬さは Hv 190 程度であり、母材の硬さは Hv 200 であるから、軟化の程度はわずかで、入熱がそれ以上増しても Hv 180 程度であるから軟化はそう大きくはなかつた。また同軟化部の巾には入熱による差は認められなく、いずれも 2mm 程度以下であった。WEL-TEN 80 での最低硬さは 17500 Joule/cm で Hv 209 を示したが、55000 Joule/cm では Hv 201 で、母材の硬さ Hv 255 に比し、かなりの軟化が認められ、その巾も数 mm で広がった。

さて、疲れ限度は Table 4 からわかるように、WEL-TEN 60 は 55000 Joule/cm の大入熱の場合でも 32 kg/mm² で、ほぼ適正な溶接条件である 17500 Joule/cm の場合の疲れ限度に比して 2 kg/mm² 低いのみで、疲れ限度比を見るとさらに差は少ない。また WEL-TEN 80 では、37300 Joule/cm までの入熱ではほとんど疲れ限度(あるいは疲れ限度比)に差を示さなく、55000 Joule/cm で約 4 kg/mm² の低下を見せた。これらの結果は破断位置が熱影響部の母材よりの軟化部であることを考慮に入れて検討すると、それぞれの最低硬さとはだいた

い対応している。

さて、これらの母材平滑材の回転曲げ疲れ限度は WEL-TEN 60 では 35 kg/mm² 程度、WEL-TEN 80 では 45 kg/mm² 程度であるから、WEL-TEN 60 の溶接継手平滑材の疲れ強さは 37300 Joule/cm の入熱まではほとんど低下を見せなく、55000 Joule/cm の大入熱の場合に始めて約 10% 低下し、WEL-TEN 80 では 37300 Joule/cm までの入熱では約 10% 低く、55,000 Joule/cm の入熱では約 20% 母材より低下を見せたことになる。

以上により、破断点は熱影響部に圧倒的に多く、軟化部が起点となつていることから、溶接軟化部が疲れ強さの低下の一因をなしていることは明らかであるが、その影響の程度はわずかで、実際継手の場合、溶接入熱を不当に高めても、WEL-TEN 60 ではたかだか母材に比し 10% の低下があるのみで、WEL-TEN 80 での低下は 20% 以下と見てよい。

4. 結 言

高張力鋼溶接継手の疲れ強さの低下原因を究明するため、溶接熱サイクル再現装置により種々の硬さ変化を平滑試験片に与え、また実際横突合せ溶接継手についてその入熱を大巾に変え、ともに回転曲げ試験により、それらが溶接部の疲れ強さにおよぼす影響を検討し、つぎの結果を得た。

(1) 形状変化がなく、残留応力の非常に少ない状態で、最大 Hv 130 程度までの急激な硬さ変化を高張力鋼部材に与えても、疲れ強さは低下しない。

(2) 溶接入熱を 15000 Joule/cm~55000 Joule/cm の範囲に変えた平滑溶接継手の回転曲げ疲れ強さは、WEL-TEN 60 では 32~35 kg/mm² で入熱によつて変化なく、WEL-TEN 80 では 37300 Joule/cm までは 40~41 kg/mm² で、やはり入熱による変化はなく、ただ 55000 Joule/cm では 37 kg/mm² で 3 kg/mm² ほど低下した。

(3) 溶接軟化部はほとんど常に疲れ破壊の起点となり、溶接継手の疲れ強さを低下させると言われているが、WEL-TEN 60 では 37300 Joule/cm の入熱までは低下がなく、55000 Joule/cm の入熱で母材に比し 10%、WEL-TEN 80 では 37300 Joule/cm までは約 10%、55000 Joule/cm の場合で約 20% の低下を示したのみ

で、不適正な溶接入熱においても、その低下はわずかであつた。

(4) 高張力鋼溶接継手の疲れ強さ低下の主原因を、溶接熱影響部の硬さ変化あるいは軟化部の存在に求めることはできない。

文 献

- 1) 高橋, 高島, 伊藤: “材料の強度と疲労” 日本学術振興会ほか共催第10回シンポジウム予稿, (1965) 4, p. 113
- 2) たとえば, 白石: 溶接学会誌, 33 (1964), p. 894
T. R. GURNEY: Brit. Welding J., 9 (1962), p. 614
J. E. STALLMEYER and W. H. MUNSE: Brit. Welding J., 7 (1960), p. 281
- 3) 高橋, 高島, 伊藤: 溶接学会溶接疲労強度研究委員会, FS 資料 71-40, (1965)
- 4) 峰久: 同上, FS 資料 41-39, (1964)
- 5) 高橋, 高島, 伊藤: 同上, FS 資料 86-40, (1965)

(222) 高張力鋼溶接継手部各組織の切欠き疲れ強さ

(高張力鋼溶接継手の疲れ強さ低下原因に関する研究—II)

八幡製鉄, 技術研究所

○高橋賢司・高島弘教・伊藤昭典

Fatigue Properties of Notched Weldments in High Tensile Strength Steels

(Studies on fatigue strength of welded joint in high tensile strength steels—II)

Kenji TAKAHASHI, Hironori TAKASHIMA and Akinori Ito

1. 緒 言

実際の突合せ余盛まま溶接継手の疲れ破断位置は、ほとんどの場合余盛趾端部であり、溶接部には余盛形状あるいは溶接部の欠陥による応力集中が重畳している。したがって、溶接継手の疲れ強さの低下原因を探るためには、溶接部の各組織の切欠き感受性を明らかにしておく必要がある。

高張力鋼溶接部の切欠き疲れ強さについては、たとえば岡田ら¹⁾は SM 50 変質部の回転曲げ切欠き ($\alpha_K=1.31\sim 5.00$) 疲れ強さは母材のそれに比し同等か20~40

%高いことを示し、大内田²⁾は SM51, HT50 について熱影響部の引張圧縮切欠き ($\alpha_K=2$) 疲れ強さは母材のそれと同程度であることを示した。また最近 N. KENYON³⁾らも 60 キロ級低合金高張力鋼の溶接部の切欠き疲れ強さは母材のそれより高いことを示している。

われわれは、高張力鋼溶接継手の疲れ強さ低下原因について系統的研究を行ない、逐次報告してきたが、本報はその一環をなすもので、さらに高い引張強さをもつ高張力鋼も含め、しかも実際の溶接熱影響部に存在する各組織に注目し、それらの切欠き疲れ強さを詳細に検討したものである。

2. 供試材および実験方法

供試材は SM50, WEL-TEN60 および WEL-TEN80 の 3 鋼種で、これらの化学成分ならびに機械的性質を Table 1 に示す。溶接は各母材の板厚そのままの横突合せ、手アーク溶接で、入熱は 17500 Joule/cm 前後、パス回数は 6 ないし 12 で、溶接速度はすべて 150 mm/min で行なつた。試験片は、継手の余盛を平削除去し、母材の黒皮を研磨 (約 0.5 mm) した面に接して採取し、溶接部の代表的な 5 種類の組織に形状係数 $\alpha=2.2$ の半円型切欠き (半径 0.4 mm) をつけた。試験片は中央部に半径 44 mm のフィレットをもつ平面曲げ試験片で、その中央部に切欠き位置するように試験片を製作した。切欠き先端を所定の各組織に一致させるための加工は、あらかじめ試験片掴み巾 (40 mm) の短冊を製作し、これを酸腐食して組織を判別の上切欠きをつけて、所定の試験片に切削した。Photo. 1 に切欠き状況と溶接部の各組織および硬さ分布の 1 例を示す。硬さ分布は切欠き底より 0.5 mm の位置で測定した。疲れ試験は、シェンク式両振り平面曲げ試験機を用い、3000 cpm の繰り返し速度で行なつた。

3. 実験結果および考察

切欠き位置と組織の関係は、破断したものでは破断起点、破断しなかつたものでは試験片巾の中央を通るそれぞれの縦断面を再度検鏡によつて確めた。その際、切欠き加工時の各組織にたいする切欠き位置の判別が間違つていたものは、疲れ試験後詳細に観察して、これを再分類した。その結果、目標の組織に切欠きが入つた試験片の数は十分でないものもあり、またばらつきはやや大きなものもあつたが、各組織の切欠き疲れ強さをほぼ 1 kg/mm² の精度で求めることができた。これらの切欠き疲れ限度 σ_w'' およびそれらの母材切欠き疲れ限度にたいする比を一括して、Table 2 に示す。ここで (Mo) は母材平滑試験片の疲れ限度を、 β は形状係数 $\alpha=2.2$ にたいする母材の切欠き係数を示す。これらより明らかなよ

Table 1. Chemical compositions and tensile properties of steel tested.

Steel	Thick-ness (mm)	Heat treatment	Chemical compositions (%)											Tensile properties			
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	B	σ_Y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	El (%)	σ_Y/σ_B	
SM 50	16	as rolled	0.15	0.33	1.13	0.024	0.014	—	—	—	—	—	34.0	52.0	27.0	0.65	
WEL-TEN60	20	Q → T	0.15	0.48	1.25	0.017	0.014	0.04	0.20	—	0.06	—	58.0	65.0	26.0	0.89	
WEL-TEN80	20	Q → T	0.14	0.27	0.76	0.013	0.008	1.00	0.53	0.45	0.06	0.002	73.8	80.0	25.0	0.92	

σ_Y : 0.2% proof strength σ_B : Tensile strength El: Elongation