切欠を有する溶接継手の疲れ挙動に関する研究 (第3報)*

岡田 実** 森脇 良一***

On the Fatigue Behavior of Weld Joint Containing a Notch (Incomplete Penetration)-Report 3*

By Minoru Okada** and Yoshikazu Moriwaki**

Abstract

In the previous papers (1) (2), fatigue strength was investigated on butt weld joint containing a notch, in case where this notch line was perpendicular or parallel to loading direction.

This paper deals with butt welded specimen containing an oblique notch line in order to study the combined effect of normal and shear stresses on fatigue fracture. As the result, a reasonable stress criterion could be proposed for specimens used.

1. ま え が き

既報の切欠を有する溶接継手の疲れ挙動に関する研究(第1報)、(第2報)^{1,2)}では、不溶着部(以下切欠と呼ぶ)が荷重線に直角にある場合と並行にある場合について実験考察してみた。その結果先ず切欠が荷重線に直角にある場合、この切欠による応力集中のために、溶接継手の疲れ強さが非常に低下するということがわかった。しかもこの場合切欠が鋭くなければなるほど疲れ強さがますます低下すると思われるが、これがある程度以上鋭い切欠になると疲れ強さはほとんど一定となるということをも知った。次に切欠が荷重線に平行な場合、溶接による切欠が機械的切欠のような理想的な形状をしていると理論的には切欠による応力集中は考えられないが、溶接継手における切欠底には小ブローホールなどの材質的欠陥がある。したがって疲れ強さもやや低下するだろうと考えられる。このような原因から理論的には切欠による応力集中が生じないような切欠線と荷重線とが平行にあるような溶接継手の場合の疲れ強さは、母材に比較して最大20%程度低下するということを実験的に実証した。

本報告はこれら第1報、第2報の続報であり荷重線に対して切欠線を60°および45°に斜めにして、切欠部に直応力のほかにせん断応力も同時に作用するような組合せ応力の場合について実験考察して見ることにした。すなわち本報告においては、溶接組立梁の疲れ破壊の応力条

件に関する研究(第1報³⁾)で、曲げを受ける溶接組立梁の隅肉溶接ルート部での切欠(不溶着部)により、せん断応力には応力集中が生ずるが直応力には応力集中が起こらないような特殊な場合ではなく、直応力とせん断応力の組合せ応力の両者に応力集中が生ずるような溶接継手の疲れ強さについて検討して見たのである。

2. 試験片および試験機

使用した鋼材は第1報と全く同一のSS41材, 19mm

(a) Test Specimen for Band TP Series

(b) Test Specimen for J-30 Group

(c) Test Specimen for J-45 Group

Fig. 1 Test specimens employed in fatigue tests

* 原稿受付, 昭和36年10月21日

** 正員, 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

*** 正員, 日本橋梁株式会社 Member, Japan Bridge Co., Ltd.

Table 1 Estimated dimensions of notch

Test specimen group	Test specimen series	Plate thickness 2b, mm	Notch width 2t, mm	Notch height 2ρ, mm	t/ρ
	B & TP	15	0	0	—
J-45	TS	"	10	0.02	500
&	TH	"	5	0.02	250
J-30	MS	"	10	0.50	20
	MH	"	5	0.50	10

のものである。切欠試験片としては第1報、第2報と同じく Fig. 1 のような基本的な突合せ継手試験片を使用した。試験片の加工は第1報、第2報と同じ方法をとった。溶接は手溶接のみで行ない表裏とも1層目は D 4301 の 3.2mmφ、2層目以上は 4mmφ のものを用いて TS および MS シリーズは2層盛で TH および MH シリーズのものは3層盛で行なった。予定の切欠寸法を Table 1 に示す。Table 1 中の Test specimen group の J-45, J-30 とあるのは、溶接による切欠線が荷重線とそれぞれ45°および60°の角度をなす試験片グループを意味する。

3. 実験結果

実験の結果、直応力およびせん断応力の組合せによる疲労破壊で、これまでにその例を見ない特殊な破壊様式を得た。この破壊様式はおそらく、切欠線が荷重線に斜めであることによる独得のものだと考えられる。破壊断面写真を Fig. 2~Fig. 7 に、また破壊線の写真を Fig. 8~Fig. 9 に示す。試験片の破壊までの観察によると一般的に、J-45 全シリーズ、J-30 の MH を除く全シリーズはいずれも試験片の一端縁の切欠底より亀裂が始まり、それが表面に達した後に荷重線に垂直方向に亀裂が伝播し、これがある程度ひろがるとこの亀裂には無関係にはほぼ切欠線上、この亀裂より少々はなれた場所で、やはり荷重線に垂直なむきに一点ないし数点の亀裂が表面に出現する。これがある程度大きくなるとさらに、次々とやはり切欠線上でこれらの亀裂と無関係に荷重方向に垂直なむきに数点の亀裂があらわれ、これらが漸次連な

Fig. 2 Typical fatigue fracture in J-45, TS series

(a)

(b)

Fig. 3 Typical fatigue fracture in J-45, TH series

(a)

(b)

Fig. 4 Typical fatigue fracture in J-45, MH series

(a)

(b)

Fig. 5 Typical fatigue fracture in J-30, TS series

Fig. 6 Typical fatigue fracture in J-30, TH series

Fig. 7 Typical fatigue fracture in J-30, MH series

Fig. 8 Locus of typical fatigue fracture in J-45, TS series

Fig. 9 Locus of typical fatigue fracture in J-45, TH series

りついに破断にいたるという傾向が見受けられた。J-30の MH シリーズのみは試験片のほぼ中央部から亀裂が現われ、これが上述のような過程をへて破断していた (Fig. 8~Fig. 9 参照)。ところで時間的に Crack-in よ

り破断までの過程は、全般的に見て、破断までの繰返し回数の約10%程度であった。

この破断までの過程は、破断面の写真 (Fig. 2~Fig. 7 参照) よりさらに明らかとなる。すなわち J-30 の MH シリーズを除いて試験片の一端面で、切欠底より試験片の表面まで、いわゆる疲れ破面 (一種の脆性破面で伸びは示さない) の様相を呈している。この試験片の端面以外の所では途中までこの疲れ破面 (写真では切欠底に多数の破壊核が認められるが、これから切欠底線に垂直に進んだ範囲までがいわゆる疲れ破面である) が認められるが、それ以上の範囲は相当な変形を示し、したがって破断直前の延性破面であると見受けられる。ただし J-30 の MH シリーズのみは破断面のほぼ中央部が表面まで完全な疲れ破面を示しているが、他の箇所は途中までしかそういう状態ではなく、それ以上は延性破面である。

ここで注意しなければならぬのは、どのシリーズの試験片も疲れ破壊の核が切欠底で無数に見受けられることである。こういう現象は通例の疲れ破面ではあまり生じえないことであり、きわめて興味ある破壊様式であるといえよう。なお鋭い切欠 (Tシリーズ) のほうが鈍い切欠 (Mシリーズ) より亀裂核の数が多かったが、このこともまた注目に価するであろう。

えられた結果を各シリーズごとに S-N 線図に示すと Fig. 10~Fig. 14 のごとくである (ただし繰返し回数は微視的な亀裂がまず発生するいわゆる Crack-in までではなく、破断までのそれをとっている)。この S-N 線図の傾斜は、これまで行なっているように、従来の内外の疲れのデーターを統計的に処理して作製された軟鋼溶接構造についての片振れ疲れ強さの標準 S-N 線図⁴⁾を参考にして求めている。

以上の結果をとりまとめて $N=2 \times 10^6$ 回での疲れ強さを各シリーズごとに応力全振巾 (上限応力一下限応力) で示すと Table 2 のごとくである。

Fig. 10 Fatigue test results for B and TP series

Fig. 11 Fatigue test results for TS and TH series (J-45)

Fig. 13 Fatigue test results for TS and TH series (J-30)

Fig. 12 Fatigue test results for MS and MH series (J-45)

Fig. 14 Fatigue test results for MS and MH series (J-30)

Table 2 Fatigue strength of butt weld joint containing oblique notch ($N=2 \times 10^6$)

Test specimen group	Angle between notch and loading direction (degree)	Test series	Average			Fatigue strength at $N=2 \times 10^6$ cycles (kg/mm^2)			Stress concentration factor	
			2ρ (mm)	$2t$ (mm)	t/ρ	by resultant stress, σ_{1H}	by normal stress, σ_H	by shear stress, τ_H	for $(\alpha)_{\sigma}^{(5)}$	for $(\alpha)_{\tau}^{(6)}$
—	45°	B	—	—	—	24.1	24.1	0	1	1
—	"	TP	—	—	—	24.1	24.1	0	1	1
J-45	"	TS	0.025	9.838	398	10.3	7.3	7.3	40.9	31.0
"	"	TH	0.018	5.475	310	10.0	7.1	7.1	36.2	27.4
"	"	MS	0.721	8.785	12	9.7	6.8	6.8	8.0	6.3
"	"	MH	0.424	5.203	12	13.0	9.2	9.2	8.0	6.3
J-30	60°	TS	0.031	10.100	326	9.7	8.4	4.9	37.1	28.1
"	"	TH	0.015	5.748	388	10.8	9.4	5.4	40.3	30.6
"	"	MS	0.560	9.083	16	11.7	10.1	5.9	9.1	7.1
"	"	MH	0.395	4.440	11	12.2	10.6	6.1	7.7	6.1

上表中, σ_u および τ_u は合成応力をそれぞれ直応力とせん断応力の応力成分に分解した場合の直応力およびせん断応力による $N=2 \times 10^6$ 回での疲れ強さを示し, $(\alpha)_a^{(5)}$, $(\alpha)_c^{(6)}$ は各シリーズの平均 t/ρ に対する直応力およびせん断応力の応力集中度で, 参考までに示すものである. また表中の σ_{1u} は直応力とせん断応力の合成応力による $N=2 \times 10^6$ 回での疲れ強さを示している.

4. 考 察

4.1 疲れ破壊面について

前述のごとく本研究でえられた疲れ破壊面は全く特異な様相を呈しており, したがってまずこの破壊面について検討する必要がある. 疲れ破壊した全破壊面を観察した結果, この場合前述のようにいわゆる疲れ破壊の核が切欠底に無数に見受けられるが, この事柄に対して次のように考えられる. すなわちまず最初に疲れ破壊の核が一点, 切欠底に発生し, そこから疲れ亀裂が切欠の方向に一致しないで, 荷重線に直角な方向に進展して行く. したがってこの亀裂は間もなく直応力とせん断応力の大きな応力集中のある部分より外れてしまうので, その伝播速度が非常におそくなり一種の停留亀裂に近い状態になる. その中にこの亀裂には無関係に第2の破壊核が切欠底に発生し, 同じような経過で亀裂が伝播し, ついにはその速度が非常におそくなって停留に近い状態になる. 上述のような過程の繰返しを行なって, 最終的にはこれら亀裂同志が連なりあって破断するために, 切欠底にはこのように無数の疲れ破壊核が発生したものであろうと思われる. しかしこの問題に対して, 本研究で用いたような複雑な切欠をもつ試験片では正確な結論をうることができないと思われるので, 機会を新たにして単純な切欠をもつ試験片で検討する必要があると考えている.

4.2 疲れ破壊の応力条件について

本研究でえられた $N=2 \times 10^6$ 回での疲れ強さ (Fig. 15 の Ob, Oc, 線上の実験点), 切欠が荷重線に直角にある場合の疲れ強さ (Fig. 15 の Oa, 線上の実験点) および純粋せん断の場合に相当する特殊溶接組立梁のせん断強さ⁶⁾ (Fig. 15 の Od, 線上の実験点で, 本研究に用いたような単純な試験片では純粋せん断の強さが求まらねるので, して溶接組立梁の結果を用いている) をとりまとめて, 切欠を有する溶接継手の応力条件図ともいべきものを求めて見ると Fig. 15 のごとくなる. ただし上述の三つのケースの結果は, その疲れ破壊長さ, 試験片寸法および形状がそれぞれ異なるゆえ, 試験片が全部破断するいわゆる疲れ破断強さを比較の基準とすることは不適當であると考えられる. そこで切欠底に微視的亀裂が入ったとき, あるいは入ったと推定され

Fig. 15 Stress criterion diagram of weld joint containing notch (incomplete penetration), in which both normal (σ_u) and shear (τ_u) fatigue strength are expressed by actual average stress

るとき*を基準としてとりまとめたものである.

したがって, 切欠に直応力とせん断応力が組合さって作用し, この両者がともに応力集中を生ずるような溶接継手の疲れ破壊の応力条件は, Fig. 15 の実験点よりいって言えば, 純粋引張り疲れ強さと純粋せん断疲れ強さの比がほぼ1であり, したがって傾向としては $\sigma_u^2 = \sigma_0(\sigma_0 - \sigma_u)$ の式であらわされる主応力説に非常に近いものであるということがわかる. 上の式で σ_0 は一軸引張の場合の $N=2 \times 10^6$ 回での疲れ強さを示す. なお Fig. 15 で $t/\rho=10 \sim 20$ のものに対する純粋せん断疲れ強さはなお不明であるので Oc と Od の間は推定値として鎖線で引いている. この応力条件は溶着金属の種類, 切欠の形状などによってやや変わるかもしれない. この中溶着金属の性質についてはさらに検討する必要があると考えられるけれども, 切欠効果については, 実際のすみ肉溶接継手では本実験の不溶着部に相当する切欠が存在し, その $t/\rho >$ 数100であると考えられ, このような切欠をもつ溶接継手に動的な直応力あるいはせん断応力が作用しても, 疲れ強さはほとんど変わらないという報告^{1,6,7)}があるから, ここで見出された応力条件は一応実際のすみ肉溶接継手についても正しいであろうと考えられる.

* 純粋引張り引張およびせん断の組合せ応力の場合, 切欠に亀裂が入る繰返し回数は実験の結果検出可能であり, 一般的について純粋引張り場合は切欠底に微視的な亀裂が入るのと破断するのが同時であり, 一方組合せの場合は前述のごとく全般的にみて, 亀裂が入るまでの回数は, 破断までの回数の約90%程度であるということが実験的に確かめられている. ところが梁の場合, 隅肉ルートでの切欠に亀裂が入るのを検出することは不可能であるので, 亀裂が入る繰返し回数をビード上にせん断亀裂が現われるまでの80%と推定している.

5. 結 論

(1) 本研究でえられた疲れ破面は、今までにその例を見ない全く特異な破面を呈しており、特に疲れ破壊の核が切欠底に無数に見受けられた。これはおそらく、切欠線が荷重線に斜めであったためだと思われるが、なおさらに検討する必要があると考えている。

(2) 切欠に直とせん断の組合せ応力が作用し、この両者に応力集中を生ずるような溶接継手の疲れ破壊の応力条件を求めて見たがその結果、しいていえばこの応力条件は主応力説に近いものであるということがわかった。またこのような継手では、切欠の程度が鋭いもの ($t/p > 300$) より鈍なもの ($t/p = 10$) のほうが約10%程度疲れ強さが大きいことがわかった。

(3) このような切欠を有する溶接継手を荷重線に斜めにおいても、荷重線に対して直角な場合とその疲れ強さはほとんど変らず有利な点は見出されなかった。

謝 辞

最後にのぞみ本研究で協力戴いた大阪大学大谷碧教授

に心から謝意を表する。また本研究を行なうにあたり種々便宜をあたえられた日本橋梁株式会社技術部嘉本邦雄部長、試験片の作製および実験にあたって協力戴いた日本橋梁株式会社技術部研究課の諸氏にあわせて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岡田実, 森脇良一, “切欠を有する溶接継手の疲れ挙動に関する研究 (第1報)”, 未印刷, 1961年溶接学会秋季講演会で発表。
- 2) 岡田実, 森脇良一, “切欠を有する溶接継手の疲れ挙動に関する研究 (第2報)”, 未印刷, 1961年溶接学会秋季講演会で発表。
- 3) 岡田実, 森脇良一, “溶接組立梁の疲れ破壊の応力条件に関する研究 (第1報)”, 未印刷, 1961年溶接学会秋季講演会で発表。
- 4) Y. Tada, M. Komatsubara, K. Kamoto, Y. Moriwaki, Y. Tabuchi, “Some Considerations about the Shear Fatigue Strength of Welded Beams”, I.I.W., XIII-220-60, (1960).
- 5) H. Neuber, “Kerbspannungslehre”, Springer-Verlag, (1958)
- 6) 岡田実, 森脇良一, “曲げを受ける溶接組立梁のせん断疲れ強さに関する理論的考察”, 未印刷, 1962年溶接学会春季講演会で発表。
- 7) M. Ros. Rev. Metal, Vol. 48 (1951), No. 10.

＝ 会 告 ＝

昭和37年2月以前の会費未納入の方々え

本年8月末日に必ずご納入下さい。金額につきましては各会員宛に既に御通知済みですが、御不審の点がありましたら、学会に御連絡下さい。御問い合わせは振替用紙裏面通信欄を御利用頂ければご便利です。8月末日迄にお払込みがない節は残念ながら、会員としての一切の権利を停止させて頂く場合もありますから御了承下さい。

正員会費(昭和37年上半年)請求の件

昭和37年上半年分(3～8月)の会費がまだ未払の方は別送又は3月号折込みの振替用紙御利用の上至急ご納入下さい。会社一括扱いの方は世話人を通じて、御請求致して居りますから、世話人の方まで至急お払下さいます。

溶 接 学 会

財 務 理 事