スポット溶接した冷延鋼板の疲労強度*

青山 威 恒** 藤 本 正 男**

Fatigue Strength of Spot Welded Specimens of Cold Rolled Steel Sheets

by

Shigetsune AOYAMA and Masao FUJIMOTO

(Toyota Central Research & Development Laboratories, Inc., Nagoya)

Pulsating tension fatigue tests were made with spot welded and plain specimens of cold rolled steel sheets 1.0 mm thick. The breadth of spot welded specimens was 25 mm, and the joining types were (a) 1-spot welded single shear splice, (b) 2-spot welded single shear splice and (c) 1-spot welded double shear splice. The fatigue test results of the spot welded specimens were expressed in terms of nominal stress amplitude, which was deduced from the stress distribution of the critical section of each specimen under tension-shear load. Then, the "fatigue strength reduction factor" of a spot welded area, *i.e.* the ratio between the endurance limits of plain and spot welded specimens, was studied. Reference was also made to the previous results of plane bending fatigue tests with 2-spot welded specimens of single shear splice.

The results obtained are as follows:

(1) Fatigue fracture initiated in the base metal area adjacent to the nugget and developed transversely for all three welded specimens.

(2) The nominal stresses, σ_n , of the spot welded specimens (a), (b) and (c) were estimated to be $4P/bt$, $2.5P/bt$ and P/bt , respectively, where P is the tension-shear load, b the specimen breadth and t the sheet thickness. They correspond to the average stresses on the interfaces of the critical sections.

(3) The fatigue test data of the welded specimens, when arranged on the relation between load amplitude P_a and cycles to fracture N , showed that the load amplitude equivalent to the endurance limit increased by the factor of about two in order of (a), (b) and (c).

(4) In terms of nominal stress amplitude σ_{na} , the S - N relations of the spot welded fatigue specimens (a), (b) and (c) converged almost on the same level.

(5) The slopes of S - N relation under pulsating tension load of the spot welded specimens were considerably steeper than that of the plain specimen, owing to the effect of the stress gradient in the critical area. They were nearly parallel to the slope of S - N relation obtained from the previous reversed plane bending tests on the spot welded specimens.

(6) In both present pulsating tension and previous reversed bending tests, the "fatigue strength reduction factor" of the spot welded specimen expressed in terms of the nominal stress, attained to almost the same value (about 1.4), irrespective of the difference in joining type of specimens or loading.

(Received Aug. 21, 1974)

1 緒 言

スポット溶接により接合した鋼板の疲労強度^{1)~4)}については、すでに多くの報告がある。その中には、溶接ビッチとの関連で継手の疲労強度と応力集中の関係を検討した試みもみられるが、大部分の結果は、特定の試験片の荷重と破断繰返し数の関係で整理されており、溶接部周辺の応力状況あるいは母材強度との関係を取

り扱ったものは比較的少ないようである。

筆者らは先に、冷延鋼板の2枚重ね直列2点継手の両振り平面曲げ疲労試験の結果を公称応力で整理し、母材の疲労強度との関連を調査した。本報では、先報に引き続き、2枚重ね1点、2枚重ね直列2点、3枚重ね1点の3種の継手部をもつ冷延鋼板試験片について、部分片振り引張疲労試験を行ない、結果を公称応力で整理した。つぎにこの結果に、先報の平面曲げの場合も含め、スポット溶接継手の疲労強度と母材の疲

* 原稿受理 昭和49年8月21日

** 正 会 員 (株)豊田中央研究所 名古屋市天白区久方

疲労強度との関係を検討した。この場合、引張せん断を受けるスポット溶接継手の公称応力については、前報⁶⁾の応力解析の結果を参照した。

2 試験片

今回疲労試験を行なった3種類のスポット溶接試験片の形状、寸法を Fig. 1 に示す。また、母材強度を調べる目的で Fig. 2 に示す2種類の平滑試験片も準備した。試験片の素材はいずれも冷間圧延鋼板であるが、試験片の種類により母板が異なっている。その化学成分を Table I に、機械的性質を Table II に示す。板厚は両振り引張用の平滑試験片のみが 1.2 mm で、他はすべて 1.0 mm である。また、試験片の採取方向は、2枚重ね1点の溶接試験片と部分片振り用の平滑試験片では圧延に直角方向、それ以外は圧延と同方向である。

スポット溶接の条件を各溶接試験片ごとに Table III に示す。これらの条件は、断面で測定した溶接ナ

Fig. 1. Spot welded fatigue specimens.

Fig. 2. Plain fatigue specimens.

Table I. Specimens and chemical compositions (%) of steel sheets.

Sheet	Kind of specimen						
A	1-spot welded single shear specimen Plain specimen for pulsating tension test						
B	2-spot welded single shear specimen 1-spot welded double shear specimen						
C	Plain specimen for reversed tension and compression test						
Sheet	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
A	0.02	0.02	0.24	0.021	0.019	0.01	0.07
B	0.05	0.01	0.26	0.012	0.013	0.02	0.07
C	0.05	0.01	0.36	0.013	0.022	0.06	0.02

Table II. Mechanical properties of steel sheets.

Sheet	Axial direction of test piece	Yield stress σ_{50} (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation ϕ (%)
A	Rolled	24.1	32.6	45.3
	Transverse	25.3	32.3	45.4
B	Rolled	26.0	35.5	37.2
	Transverse	26.7	35.0	37.7
C	Rolled	26.7	36.6	42.2
	Transverse	28.3	37.1	42.7

Table III. Conditions for spot welding.

Condition	Electrode force (kg)	Weld current (A)	Weld time (sec)	Electrode tip diameter
Specimen				
(a) 1-spot welded single shear	90	7400	23	5 ϕ
(b) 2-spot welded single shear	150	7800	12	5 ϕ
(c) 1-spot welded double shear	200	7500	15	5 ϕ

(Note: 1 sec = 1/60 sec.)

ゲットの直径がいずれも 5 ϕ となるように選んだもので、実際の試験片における測定値は 5 ϕ ±10% の範囲内にあった。幅 25 mm の 2枚重ね1点スポット溶接試験片7本を、Table I, II の鋼板Aから Table III (a)欄の溶接条件で作製し、静的引張せん断試験を行なった結果、破断はいずれも母材部の溶接端から起こり、破断荷重は 490 kg±5% であった。同様に、鋼板Bから Table III (b)欄の溶接条件で作製した3本の2枚重ね1点試験片では、破断状況はさきと同様で、荷重は 524 kg±3% であった。

3 スポット溶接継手の公称応力

ここで取り扱うスポット溶接試験片では、疲労破壊は溶接ナゲット端の母材部で起こるから、継手の公称応力は試験片のナゲット端の断面について考える。ただし、溶接点で力を伝えることによる応力集中の効果

は除くことにする。すなわち、継手の幅方向に平均化された曲げ応力または引張応力、それらの組合せ応力を取り扱う。引張せん断の場合には、板の重なりによる offset の効果も考慮に入れる。これによって応力集中部の実応力は、公称応力に溶接点で力を伝えることによる応力集中率（形状係数）を掛けた形で求めることができる。

Fig. 3 は、今回疲労試験を行なった溶接試験片の継手様式と荷重伝達状況を示す。Fig. 3 (a) の 2 枚重ね 1 点継手について、前報で求めた表裏の応力分布の測定結果を再録すると Fig. 4 のようである。引張せん断荷重 P を受けると、板の重なりによる offset によって偏心曲げを生じ、き裂発生箇所溶接端面には大きな引張応力を生ずる。この偏心曲げを生ずるモーメント M は、

--- : Critical section of fatigue fracture

Fig. 3. Schematic diagrams of lap jointed parts of the spot welded fatigue specimens under tension-shear load.

Fig. 4. Stress distribution and nominal stress in 1-spot welded single shear specimen under tension-shear load.

$$M = P \cdot e$$

で表わされる。ここで e は偏心量であり、荷重初期で変形が無視できる状態では、 $e = t/2$ であるので、偏心曲げによる応力 σ_b は、

$$\sigma_b = P \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{bt^2}{6} = 3P/bt$$

となる。したがって、この継手の溶接端面の公称応力 σ_n としては、断面平均引張応力 σ_t と偏心曲げ応力 σ_b の和として、次のように求めるのが妥当と考えられる。

$$\sigma_n = \sigma_t + \sigma_b = P/bt + 3P/bt = 4P/bt \quad (1)$$

つぎに、2 枚重ね直列 2 点の引張せん断の場合には、力の伝達状況が Fig. 3 (b) のようであるから、溶接端断面における偏心曲げ応力は、

$$\sigma_b = \left(P - \frac{P}{2}\right) \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{bt^2}{6} = 1.5P/bt$$

となる。したがって、溶接端面の公称応力 σ_n は

$$\sigma_n = \sigma_t + \sigma_b = 2.5P/bt \quad (2)$$

として求められる。

Fig. 3 (c) の 3 枚重ね 1 点継手の場合には、形状が対称で、中板には偏心曲げを生じないので、公称応力 σ_n は単純に、

$$\sigma_n = \sigma_t = P/bt \quad (3)$$

として求められる。

4 疲労試験方法

疲労試験には、容量 600 kg の共振型軸荷重疲労試験機を使用した。これは、アンバランスマスによる加振器を用いたもので、機構の概略を Fig. 5 に示す。荷重の計測は、リング状ロードセルに貼付したひずみゲージの出力を振幅計で読み取って行ない、試験中の荷重を一定に保つようにした。荷重制御は、モータの回転数と加振アームの先端部に位置するラバードンパの調節によって行なった。

Fig. 5. Illustration of resonance type fatigue tester for axial loading.

溶接試験片ならびに部分片振り用平滑試験片については、(荷重振幅)/(平均荷重) = 2/3 の部分片振り引張りで試験を行なった。両振り引圧用平滑試験片については、座屈による曲げを生じないように、Fig. 6 に示すようなガイド付チャックを作製して両振り試験を行なった。荷重繰返し速度は 1 200 ~ 1 500 c/min とした。

Fig. 6. Device to prevent unexpected bending of plain specimen during reversed tension and compression fatigue test.

5 疲労試験結果

5.1 溶接試験片

3種の溶接試験片の疲労試験結果を、荷重振幅と破断繰返し数の関係で Fig. 7 に示す。荷重振幅で整理した疲労試験結果には、継手の種別ごとに明確なレベルの差がみられる。すなわち、耐久限相当の荷重振幅は、2枚重ね1点、2枚重ね直列2点、3枚重ね1点の順に ± 42 kg, ± 78 kg, ± 180 kg と約2倍ずつ高くなっている。

Fig. 7. Results of fatigue tests expressed in terms of load amplitude.

試験片の破断繰返し数としては、試験片の伸びが急増し始め、加振アームが傾き、試験機が停止した時の繰返し数をとった。この時、試験片には4 mm～20 mm 程度の長さのき裂が生じていた。破断状況の代表例を Fig. 8 に示す。2枚重ね1点の試験片は外観写真であるが、他のものはX線透過写真であり、重なり部のみを示す。き裂の形は、2枚重ね1点および直列2点の試験片では、ナゲット上端部母材からき裂が発生し、しばらくはナゲットにそって丸く伝ばした後、幅方向へ伸びている。2枚重ね直列2点の試験片では、大部分のものが二つの溶接点いずれにもき裂を生じて

$P_a(\text{kg}): \pm 140$ ± 104 ± 56 ± 44
 $N(\text{cycle}): 3.4 \times 10^4$ 6.8×10^4 1.1×10^5 4.7×10^5

(a) 1-spot welded single shear

$P_a(\text{kg}): \pm 200$ ± 128
 $N(\text{cycle}): 1.5 \times 10^5$ 5.2×10^5

(b) 2-spot welded single shear

$P_a(\text{kg}): \pm 228$ ± 152
 $N(\text{cycle}): 7.6 \times 10^5$ 9.5×10^6

(c) 1-spot welded double shear

Fig. 8. Fracture appearances of spot welded fatigue specimens.

いた。3枚重ね1点の試験片では、ナゲットのわずかな上方の中板母材部に幅方向に伝ばしたき裂がみられる。

2枚重ね直列2点の例について、外面で測定したき裂長さと繰返し数の関係を Fig. 9 に示す。外面

Fig. 9. Crack propagation rate in 2-spot welded specimens of single shear splice.

でのき裂が 4 mm 程度になった後、15 mm 前後に伝ばするまでに要する繰返し数は全繰返し数の 1 割弱である。したがって、試験機の停止時にとった Fig. 7 の実験点に対し、き裂長さの違いによって生ずるばらつきは線図の様子を変えるほど大きくはないと思われる。

また、疲労試験過程における試験片の塑性変形状況を Fig. 10 に示す。縦軸は平均荷重掛けアームの傾きから測定したチャック間における伸びである。2 枚重ね 2 点と 3 枚重ね 1 点の各一例であるが、曲線の第 II 期における傾きは比較的緩やかであり、破断直前までの伸び量は 10^{-3} mm のオーダーであった。

Fig. 10. Elongation of spot welded specimens during fatigue test.

つぎに、各継手の疲労試験結果を前述の公称応力によって整理し、応力振幅-破断繰返し数の関係に書きなおして Fig. 11 に示す。荷重-破断繰返し数関係 (Fig. 7) では、全く別の関係として表示されていた 3 種の継手の疲労試験の結果が、ほぼ同じレベルに集まっている。

5・2 平滑試験片

平滑試験片の疲労試験結果を、応力振幅と繰返し数

Fig. 11. Results of fatigue tests expressed in terms of nominal stress amplitude.

Fig. 12. Results of fatigue tests of plain specimens.

の関係で Fig. 12 に示す。部分片振り試験の場合の耐久限は 10 kg/mm^2 であったが、これを繰返しの上限応力になおすと 25 kg/mm^2 となり、ほぼ降伏点に相当する値になっている。また、破断した試験片にはかなりの伸び (約 30%) がみられ、動クリープを伴う破壊と考えられる。両振り試験の場合には、ガイド板の摩擦によるフレッシング・コロージョンが心配されたので、焼付防止用グリスを塗布して試験した。その結果、大部分の試験片の破断箇所には外観上フレッテ

Fig. 13. Endurance diagram of cold rolled steel sheet evaluated from the test results of plain specimens.

ィング・コロージョンの形跡が認められなかったので、これによる強度低下はあまりないと思われる。

これらの結果より、母材の疲労耐久限度線図をかくと Fig. 13 のようになる。図の実線は、応力振幅軸上の両振り耐久限の点と平均応力軸上の真破断力の点を結んだ線である。真破断力 σ_T は供試材のかたさ $H_V \approx 110$ から推定して 90 kg/mm^2 とした。応力比 $2/3$ の部分片振りの耐久限は、両振りの耐久限と σ_T とから推定すると、 10.5 kg/mm^2 (応力振幅) であり、実験による耐久限よりやや高目であるが、その差は小さい。

6 考 察

Fig. 11 に示したように、3種の継手に対する応力振幅と繰返し数の関係はほぼ同じレベルに集まっている。そこで、これら継手種別ごとの実験点を部分片振りの引張せん断荷重を受ける継手の試験結果という意味で一括し、それらのばらつき幅と中心値をとって表示しなおすと Fig. 14 のようになる。図には比較のため部分片振り引張りを受ける母材平滑試験片の $S-N$ 関係 (Fig. 12) を記入した。また、以前に求めた2枚重ね直列2点継手と平滑試験片の両振り平面曲げ試験結果も併記した。平面曲げの場合の継手の公称応力には曲げ応力を取り、 $\sigma_n = 6M/bt^2$ で結果を整理している。なお、引張せん断の試験片はいずれも板厚 1 mm 、幅 25 mm で、溶接ナゲット径は 5ϕ にそろえてある。平面曲げの試験片は幅が 25 mm で同じであるが、板厚は 1.6 mm 、ナゲット径は 6.3ϕ となっている。

スポット溶接試験片の引張せん断と平面曲げの結果を比較すると、両者の時間強度線がほぼ平行であることがわかる。すなわち、4種類のスポット溶接継手に関して、両 $\log$ 図上での時間強度線の傾きには大差がない。これは、引張せん断の場合でも、スポット溶接点で力を伝えていることによって応力こう配が存在しているためと思われる。

つぎに、引張せん断の場合と平面曲げの場合について、(母材の耐久限)/(溶接試験片の耐久限)の比を求

めると、引張せん断では、平滑試験片の 10.5 ないし 10.0 kg/mm^2 に対しスポット溶接試験片では 7.3 kg/mm^2 (中央値) で、その比は $10.5/7.3=1.44$ ないし $10.0/7.3=1.37$ 、平面曲げでは、 $17/12=1.42$ となる。すなわち、先に述べたような公称応力をとると、スポット溶接部切欠き係数相当値 (溶接点で力を伝えることによる応力集中率、材料組織、残留応力等によって定まる) は、いずれの継手をも通じ約 1.4 になっている。

7 結 論

以上の試験と考察の結果をまとめると次のようになる。

(1) 2枚重ね1点および直列2点の溶接試験片の疲労き裂はナゲット上端の母材部から発生し、ナゲットに沿って伝ばした後、板幅方向へ伸展した。3枚重ね1点の試験片では、ナゲットの少し上方の中板母材部に幅方向に伝ばしたき裂が生じた。

(2) 引張せん断荷重を受ける上記3種類の継手の公称応力 σ_n として、上述の危険断面表面の応力の平均値 (溶接点で力を伝えることによる応力集中は考えない) をとると次のようになる。

2枚重ね1点	$\sigma_n = 4P/bt$,
2枚重ね直列2点	$\sigma_n = 2.5P/bt$,
3枚重ね1点	$\sigma_n = P/bt$.

ここで、 P は荷重、 b は継手の幅、 t は板厚である。

(3) 今回の引張せん断疲労試験結果を、荷重振幅と破断繰返し数の関係で整理すると、耐久限相当の荷重振幅は、2枚重ね1点、2枚重ね直列2点、3枚重ね1点の順に ± 42 , ± 78 , $\pm 180 \text{ kg}$ となり、約2倍ずつの割合で大きくなる。

(4) 疲労試験の結果を上記の公称応力で整理した結果、3種類の継手様式に対する $S-N$ 線図は、ほぼ同じレベルに集まった。

(5) 溶接試験片の引張せん断疲労試験結果における時間強度線は、危険部位に存在する応力こう配のため傾斜が比較的急となり、両振り平面曲げを受ける溶接試験片の時間強度線とほぼ平行の関係を示した。

(6) 引張せん断疲労および平面曲げ疲労において、それぞれの平滑試験片による母材の耐久限を溶接試験片の耐久限 (上記の公称応力値) で割った値は、いずれも約 1.4 となった。この値は、スポット溶接継手の切欠き係数相当値として取り扱うことができる。

本研究にあたり、豊田中央研究所の諸氏には種々ご協力ご助言いただいた。実験に際しては、押村進、浅田敏夫両君が熱心に従事された。記して感謝の意を表する次第である。

Fig. 14. Results of fatigue tests expressed in terms of nominal stress.

(昭和47年5月30日 日本材料学会第21期総会学術講演会：昭和48年5月22日 日本材料学会第22期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Graf, O., Weld. J., **28**, 3, 116-s (1949).
- 2) Welter, G., Weld. J., **28**, 9, 414-s (1949).
- 3) Welter, G., Weld. J., **33**, 3, 134-s (1954).
- 4) 上田輝之, 横堀章一, 笈川武雄, 河高秀年, 溶接学会誌, **36**, 746 (1967).
- 5) 青山咸恒, 藤本正男, 材料, **20**, 1094 (1971).
- 6) 青山咸恒, 藤本正男, 材料, **22**, 572 (1973).