

IV-7 高張力鋼の疲勞強度によぼす溶接熱量または 殘留応力の影響について

東京大学工学部 正員 工博 奥村敏恵

序言 近時塑性設計(局限設計)の発達にともなつて、構造物の耐力を明確にする必要にせまられている。このことは従来漠然と考へていた事象について、もつと嚴密に考へねばならないことを意味している。このような実より溶接構造を眺めると、仲々複雑な要素がいりくんでいることを感ずる。また脆性破壊 疲勞破壊など、従来のリベット構造ではそれほどきびしくなかつたものも溶接構造では色々な問題を提示している。さて構造物の破壊は、その起源となる亀裂の発生と、その亀裂の傳播の二つの現象に分析される。

溶接部に与えられる缺陷または構造上の切欠の存在のまはりには応力集中を生じ、それによつて生ずるエネルギーが材料として貯えられるエネルギー、たとえば表面張力によるエネルギーまたは塑性加工のエネルギーに打ちあつたときは、これらの缺陷および切欠は拡がろうとする欲である。これが亀裂の発生である。このように切欠が拡がると、より鋭い切欠となり、より高いエネルギーをより低い外力によつて発生し、その拡がりはより容易になる。このようにして亀裂の傳播が促進される。通常切欠がするどいほどより低い平均応力で亀裂の発生を生じ、若し使用材料の亀裂傳播に対する抵抗が低い場合には容易にその亀裂は傳播し、平均応力が高くなりないうちに破壊に到るわけである。このことは使用材料が有効につかはれていないことを意味する。この現象は脆性破壊、疲勞破壊に見られる。

従つて溶接構造では、この亀裂の発生の原因を除去するように努めると同時に、亀裂の傳播に対する抵抗の高い材料を選ぶようにつとむべきである。一々溶接施工によつてもその特性が左右されるから、如何なる條件を選んだまうにばより安全であるかを求めねばならない。なお溶接構造に不可避な殘留応力の^橋舞についてより嚴密に考察する必要がある。

筆者は最近特にその需要が増し、冶金学的にはH₂ガスの影響がきびくまる低合金高張力鋼を使用して、溶接施工の影響に関する実験をなした。以下これについて述べてみよう。

溶接熱量と Mn-Si 高張力鋼の延性の関係。 溶接熱によつて生ずる板の温度分布に關しては従来多くの理論的、実験的研究がなされてゐる。いま板の温度常数を温度に關し一定と假定すると、板の面上の一つの直線(x軸にとる)に沿つて同じ溶接速度でアーク(熱源)が移動する場合板に生ずる温度分布^①は次式で与えられる。

$$\textcircled{1} = \frac{q}{2\pi k h} e^{-\lambda v x} \left[K_0(\lambda v t) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos \frac{n\pi z}{h} \cdot K_0 \left\{ \lambda v t \sqrt{1 + \left(\frac{n\pi}{\lambda v h} \right)^2} \right\} \right]$$

ただし q は熱源の強さ cal/sec, v は溶接速度 mm/sec, h は板厚, k は熱傳導率 cal/mm°C sec, λ は熱拡散率 mm²/sec, $t = \sqrt{x^2 + y^2}$, K_0 は第一種の modified Bessel function である。

いま現在の熱源の後方 $x(>0)$ の位置の温度上昇を考えると、第一項は

$\frac{q}{2\pi k h} e^{\lambda v x} K_0(\lambda v x) = \frac{1}{2\sqrt{\pi k \lambda v x}} \frac{q}{\sqrt{v}}$ となり、 q は I (溶接電流) に比例するから、 $I/\sqrt{v}$ に比例することになる。すなわち板に生ずる温度上昇、すなわち効果的溶接熱量は状態に

よるものを除けば $I/\sqrt{v}$ に比例するといえる。この見地に立つて溶接施行の条件によって材料の性質が如何に変わるかを調べてみた。使用材料の性質は表-1に示す。なお実験の目的として溶接部、溶接熱影響部を含め材料の延性熱影響部われの発生と溶接条件により如何に影響されるかを知る点にあった。われの目安として熱影響部の最高硬度(ビッカース)を選んだ。 $200 \times 400 \times 30$ mmの板の表面にLB55(低水素系溶接棒)を用いてビードをいき、アーク開始点より30 mmの箇所をビードに直角に切断し、よく研磨したのち、顕微鏡組織を見ながら硬度を測定した。図-1は硬度分布の一例、図-2は最高硬度と溶接条件による変化を示したものである。明らかに $I/\sqrt{v}$ が小になると急に最高硬度は上昇する。 $I/\sqrt{v} = 12$ がその限界と考えられる。なお最高硬度の箇所は、とけ込み部に完全に接した箇所とその幅も約0.2 mmといったごくせまい所に集中している。なお以下の疲労試験においてもこのせまい所に亀裂の発生を見ていることは注目すべきであろう。次に溶接部の延性をしる目安として、オーストリヤビード曲げ試験を選んだ。この試験は材料の溶接性を吟味するために使用されており、その試験片の形状および試験の方法は図-3。図に示された通りである。なおオーストリヤの規格によると、何等の亀裂なしに曲げ得る最大の曲げ角度として、板厚2.5 mmに対しては 90° (延性破断) 或は 50° (脆性破断) を合格の基準にしている。2つの基準を持つことは矛盾である。

表-1 (a) 化学分析値

C	Mn	Si	P	S	Cu	sol Al	C+Mg%
0.15	1.20	0.44	0.014	0.019	0.18	0.05	0.35

(c) 機械的性質

降伏点 (kg/mm^2)	引張強さ (kg/mm^2)	伸び (%)	曲げ (180°)
37.2	55.5	23.5	可

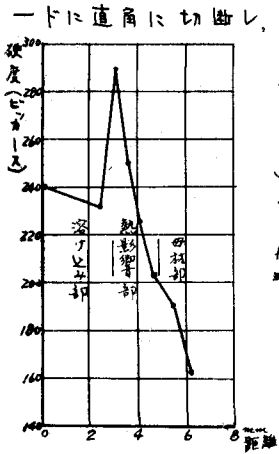


図-1 熱影響部の硬度分布

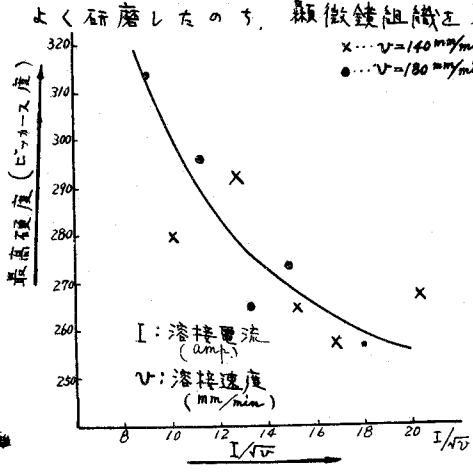


図-2 熱影響部の最高硬度におよぼす溶接条件の影響

この試験はビードの形状にも関係するが、主として熱影響部の所謂延性とアークビード亀裂の有無に関係するものと筆者は考え、溶接条件のよぼす影響を材料的に調べる一つの試験方法と考えた。そこでLB55を用い、溶接工は同一人で出来るだけ同じ条件で溶接させた。溶接後2週間たつてから、曲げ試験を行つた。この試験結果を図-3に示す。縦軸の値は亀裂なしに曲げ得る最大の曲げ角度、横軸の値はその試験片の溶接に用いた溶接条件を $I/\sqrt{v}$ の形に計算して示したものである。溶接後十分時間おとって水素の拡散を期したのにも拘らず、同じ材料に対し、溶接条

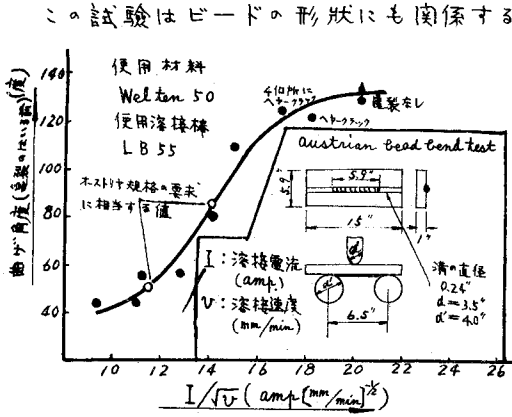


図-3 オーストリヤ曲げ試験と溶接熱量との関係

件により曲げ角度が異なり、その限界は図-2 に示す最高硬度の特性と相似の関係を示す。
 第3の実験はこのような溶接熱量による高張力鋼の延性が溶接後の時間の経過によつて

如何に変わるかを調べたものである。図-4 にその結果を示す。試験片は添図に示すように両面に長さ約8"9"のビード溶接した扁平には上げた。溶接条件としては低水素系溶接棒を使用し、高電流(180amp)と低電流(140amp)のもの、およびイルキイト系溶接棒を使用したものについて、溶接直後、1, 2, 3, 4, 6, 7, 10, 11 日後に試験をおこまい、標尺距離4.8"の伸びの値の差を測定した。この結果は明かに、溶接直後は著しい延性の低下を示すが、時間の経過と共にその延性を回復する。低水素系溶接棒を用いたとき、全体として高い延性を示し2週間後には母材の値に回復するが、他の溶接棒は低い延性を示し、伸びを回復しない。またその破断状態もビードに直角な無数のひびわれを示す。水素の存在が延性に著しい影響を与えることが言える。なお使用電流の低いほど延性(溶接直後)が大であり、水素の与える方も少ないといえる。

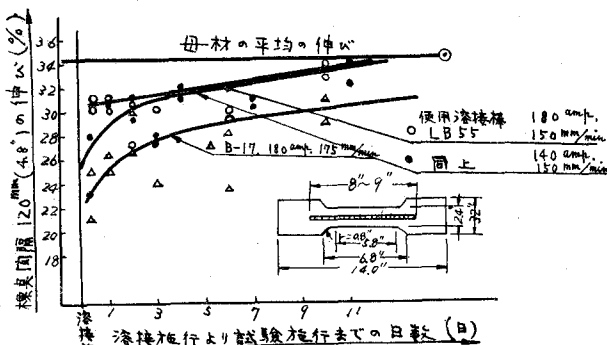


図-4 溶接ビードおせた引張試験片の時間効果

の低下を示すが、時間の経過と共にその延性を回復する。低水素系溶接棒を用いたとき、全体として高い延性を示し2週間後には母材の値に回復するが、他の溶接棒は低い延性を示し、伸びを回復しない。またその破断状態もビードに直角な無数のひびわれを示す。水素の存在が延性に著しい影響を与えることが言える。なお使用電流の低いほど延性(溶接直後)が大であり、水素の与える方も少ないといえる。

図-5 はカバープレートをつけた材の疲労強度に及ぼす溶接熱量の影響を示したものである。試験片としては最も疲労荷重に敏感なカバープレートをつけた材を用いた。なお溶接条件、 $I/\sqrt{v}$ として 15, 11.2 を採用したが、これは図-3 の実験より得た2つのオーストリア規格の規準値の上と下に相当する溶接条件である。試験機は鉄道技術研究所の Loosen-Rausen を使用した。結果はその差は大きくはないが、明かに $I/\sqrt{v}$ の大なるほど高い疲労強度を示した。なお参考のため SS 41 の値を示す。一般に溶接熱量の大なる溶接条件で施行した方が、亀裂の発生には有利な条件を与えることが言える。

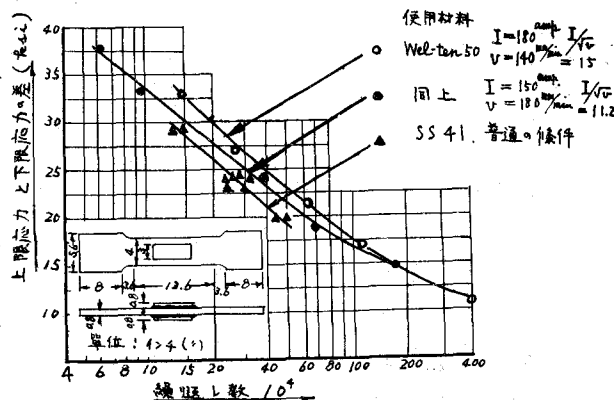


図-5 カバープレートをつけた材の疲労強度に及ぼす溶接熱量の影響

残留応力の影響に関する実験。筆者はこの実験を行うため図-6 に示すような試験片を採用した。すなわち試験片に2すじの長手方向の溝をつくり板を3つの部分にわけた。中央の部分は溶接を行う部分であり、側面の2つの部分は溶接中拘束する部材である。両者の断面積を同じとした。溶接後の被溶接部分の収縮は拘束部材によつて抵抗を受け、この結果被溶接部分には引張の locked-in stress, 拘束部材には圧縮の locked-in stress が生ずる。一々溶接部分には2倍所の弱點を持つ。すなわち本体の隅肉溶接前面(図-6 a a)と添接材の隅肉溶接前面(図-6 c c)である。次に前述の硬度の高い境界層を持ち、そこをとおつて応力が流れている。なお使用した試験片すべてを通じ、溶接順序を一定にレ、a-a 部分に

には引張の残留応力を、中心部分には圧縮の残留応力を生ずるようにした。使用材料は U.

S. steel Co. でつくった A 242 Tri-Ten (表-2) でより、表-1 の国産のものとは幾分異にし、Ni 成分を含有し、C+Mn% は幾分高目の値を示した。

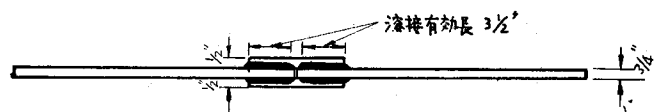
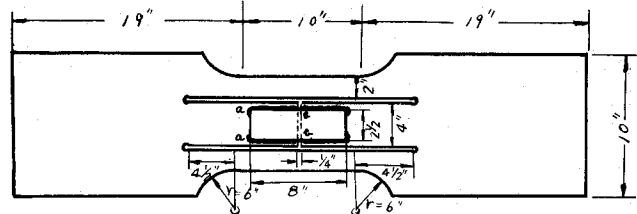
表-2(a) 化学分析値

C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	C+Mn%
0.20	1.08	0.010	0.025	0.10	0.38	0.60	0.38

表-2(b) 機械的性質

降伏点 ($R_{0.2}/\text{mm}^2$)	引張強度 ($R_{0.2}/\text{mm}^2$)	伸び (%)	10^5 疲労強度 ($R_{0.2}/\text{mm}^2$)	2×10^6 疲労強度 ($R_{0.2}/\text{mm}^2$)
33.5	51.5	27	40.5	29.8

また試験機はイリノイ大学タルボット研究室のウィルソン型試験機(毎分 200



使用材料

A 242 Tri-Ten

図-6 使用試験片の形状

回、200,000 lb) を使用した。溶接前拘束材の 4 つの面に共軸無縫製のベークライトベースのワイヤストレーンゲージを張りつけ、溶接中は石棉で保護し、溶接後の locked-in stress を測定した。ほぼ溶接熱量に比例する値を示した。溶接後の a-a および c-c 10 所にもゲージを張りつけた。このような準備をなした後にゲージの零点を

調節し、疲労試験を開始した。 10^3 , 5×10^3 , 1.5×10^4 , 3×10^4 , 5×10^4 , 7.5×10^4 , 10^5 ... とくりかえした後、試験機をとめて、そのときのゲージの零点の動き、一定荷重に対する歪を測定した。特に 10^5 以上破壊に近づくにつれてできるだけ細かくこのように測定をくりかえした。すべての試験片を通じ、その測定値の繰返し数による変化は全く同じであり、図-7 に示す性質で代

表されるものであった。すなわち a-a, c-c といずれも繰返し数の比較的初期に於ては零点は十側に移動し、これに対応し拘束材では一側に移動する。これは a, c 10 所に残留歪が累積さ

れたことを示し、疲労枝の発生を示す。この開始の時期 A はこの実験では (B 約 10^6 回に対し) 10^5 位を示した。比較的初期に疲労枝の発生をみる。疲労枝が幾分拡大すると、残留応力の関係が破れ、その符号と反対方向に零点移動し、圧縮残留応力の中心部はますます十側に移動し、それとともに、一定荷重に対する歪の量も増大し、破壊に到る。このことは枝の発生はともかくとして、その拡大傳播には残留応力が加擔するといえる。これは破壊までの繰返し数を早めることを意味し、図-8 に示す性質を持つといえる。

歪と残留応力の符号の組合に注目すべきである。

(i) 拘束材の歪

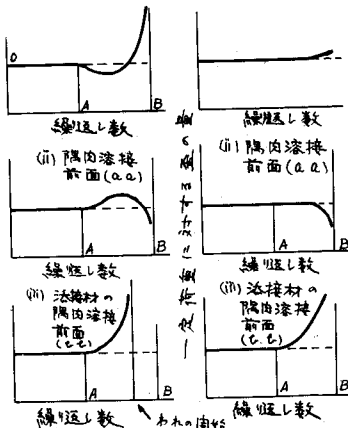


図-7 ストレンゲージの読み

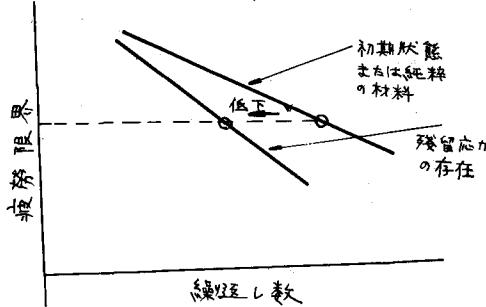


図-8 残留応力の存在による疲労限界の低下