

# 溶接材の疲労について

川崎重工KK技研\* 恒 成 利 康

## 1. まえがき

比較的最近まで、変動荷重を受ける構造物の破損例のほとんどが疲労に基づいているにもかかわらず、破損が局部的であるから疲労はあまり重視されなかった。加えて、作用外力に関する資料が不十分であったため、疲労強度を直ちに設計に採用することは甚だ困難な課題とされていた。しかし、経済性の追求或は性能の向上が要求されるに従い、設計応力は増加し、局部的な破損が全体の最終破壊または機能の停止を生じる原因となることもあり、疲労を無視することが出来ない場合が多くなった。それ故、作用荷重の計測が行われ、資料が蓄積されるに至って、疲労試験資料もある意味では設計に適用することが可能となった。特に現在、橋梁、航空機および圧力容器等では不十分ながらも疲労強度基準を定めており、疲労強度を考慮する必要性を認めている。

構造物の疲労が一般の機械要素の疲労と異なる点は、溶接組立てされていることで溶接による影響因子が重畳し、疲労強度を著しく分散させることであろう。たとえば、軟鋼材の突合せ継手の $2 \times 10^6$ 回における疲労強度は、平滑材のそれに対し、30~80%の間に分散する。この著しい分散の原因は、素材の疲労破壊自体が確率的要素を含むことを除いて、溶接による影響因子の把握が十分でないためと考えられる。それ故、これまで疲労強度に影響するのではないかと考えられていた因子の効きについて種々検討が重ねられてきたので、ここにその結果を記し、構造物の溶接材の疲労についての一端を紹介したいと思う。ただし、内容は構造用鋼の溶接材に関するもののみとした。

## 2. 溶接による熱影響部の効き

溶接した近傍では冶金的組織が変化し、かつ硬度差を生じるため溶接近端から破壊する溶接材の疲労強度は、この影響による切欠的作用を受け、低下するのではないだろうかという懸念があり、この効きを解明するため、最近多くの研究がなされてきた。

\* 神戸市生田区東川崎町

岡田らは SS 41 と SM 50A の母材、溶着金属および bond 部に環状切欠或はそれに部分切欠を重ねた試験片の回転曲げ試験を施行し、軟鋼について図 1 に示す結果を得た<sup>1)</sup>。この図によると、bond 部の切欠係数は 1.4 以上とはならないことになり、母材との較差がかなり大

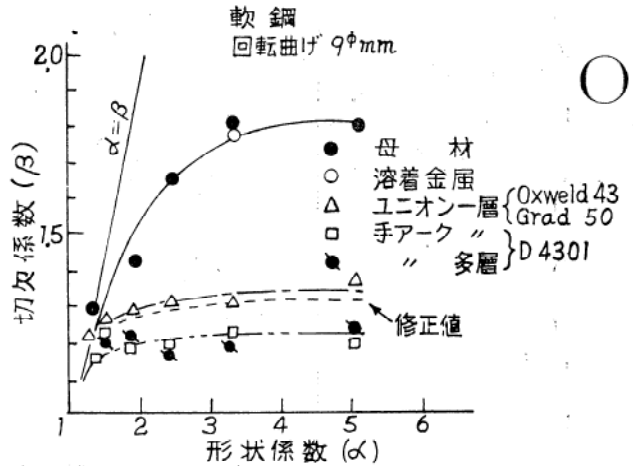


図 1 切欠係数と形状係数の関係<sup>1)</sup>

きい点に疑問があるが bond 部は母材や溶着金属より切欠感受性は鈍感であると云える。図中、Union melt と手アーク溶接の bond 部の切欠係数が異なるのは、後者の平滑材の疲労強度が低くなっているため、これを母材の平滑材の疲労強度 (Union melt の場合は母材と同) で修正すると図の点線のようになり、溶接法による差はなくなる。

永井は軟鋼 HT 80 の母材、bond 部および熱サイクル材 (peak temp, 900°C) に環状切欠を付け、回転曲げ試験を行って軟鋼について図 2 の data を得た<sup>2)</sup>。図中、熱サイクル材の切欠の切欠係数が他のそれに較べ大きいのは平滑材の強度が著しく増加したため、母材の平滑材の強度で修正すると矢印の点となり、母材と同程度の切欠係数になる。この結果は岡田らの研究と定量的に一致しないけれども bond 部の切欠係数が母材のそれに較べ高くはならないということだけは云えるだろう。

その外 bond 部に環状切欠 (応力集中係数=2) を付け、回転曲げ試験を行った大内田の研究<sup>3)</sup>がある。彼は

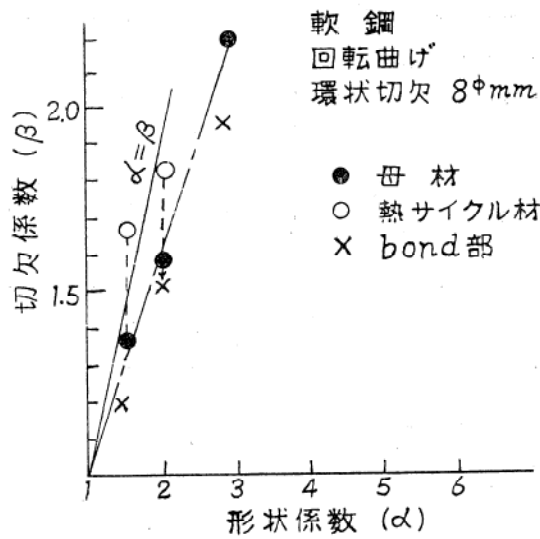


図2 切欠係数と形状係数の関係

41, SM 41, SUS 27 および Welten 50 を供試材としたが、いずれの材料においても bond 部の切欠係数は母材のそれ以下かまたは同等であったと報告している。

しかし、溶接条件が特に不適当であれば熱影響部の効きが現われる。峰久は入熱量を変えた軟鋼の突合せ継手(板厚28mm)から回転曲げ試験片を採取し、図3に示す結

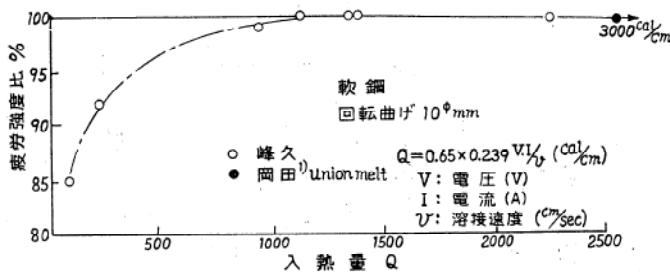


図3 溶接入熱と疲労強度<sup>4)</sup>

果を得ている<sup>4)</sup>。これによると入熱量が低い場合に影響が現われるが、これは実際の溶接条件に較べかなり低い入熱量であるので問題とはならないようである。

更に、高張力鋼については SM 50A を供試材とした岡田らの研究<sup>5)</sup>があり軟鋼の場合と同じ試験がされている。この試験では熱影響部に著しい脆化を生ぜしめるため、供試材を冷却した後、溶接棒 E 7026 を用いて一層および多層盛り溶接をした。bond 部は硬度で分類しているが、その影響はみられない。その他、HT 60 の熱サイクル材 (peak temp, 675°C) の回転曲げ試験に関する応和の報告<sup>6)</sup>、peak temp, を 1350, 1000, 850, および 640°C に変えた HT 60 の熱サイクル材についての回転曲げ疲労強度に関する村本らの研究<sup>7)</sup>があるが、いずれも熱影響部の疲労強度は母材のそれに較べ高いかまたは同等であることを指摘している。

高橋らは溶接条件の影響を調べるため、入熱量を変えた HT 60 および HT 80 の突合せ継手から試験片を採取し、回転曲げ疲労強度を求めたが、入熱の影響は現われなかった<sup>8)</sup>。この試験で入熱量は 3.59, 4.18, 8.9 および 13.3 kcal/cm であった。

更に高橋らは応力集中率 2.2 を有す切欠試験片を溶接部およびその近傍から取出し、両振り平面曲げ試験を行って表 1 の疲労限をえており、高張力鋼の溶接熱影響部の疲労強度は母材のそれより低くないと報告している<sup>9)</sup>。

要するに以上の研究から、熱影響部は疲労強度を低下させる因子とならないことが明らかとなったが、分散への影響を知るには、更に鋼材と溶接棒との組合せを変えた試験片での定量的な疲労強度との相関を求める必要が望まれる。

表1 高張力鋼の熱影響部の疲労限<sup>9)</sup>

	SM 50			Welten 50			Welten 80		
	疲労限 kg/mm <sup>2</sup>	切欠係数 β	(M)に対する比	疲労限 kg/mm <sup>2</sup>	切欠係数 β	(M)に対する比	疲労限 kg/mm <sup>2</sup>	切欠係数 β	(M)に対する比
研磨母材	28	1.00	—	32	1.00	—	42	1.00	—
母材 + 切欠(M)	15	1.87	1.00	19	1.68	1.00	19	2.20	1.00
細粒化部 + 切欠	—	—	—	—	—	—	21	—	1.10
粗粒化部 + 切欠	23	—	1.53	24	—	1.26	29	—	1.26
ボンド部 + 切欠	22	—	1.47	23	—	1.21	18	—	0.95
溶着鋼 + 切欠	23	—	1.53	25	—	1.42	18	—	0.95

軟鋼, 応力集中率 2.2 平面曲げ

### 3. 溶接残留応力の影響

溶接による残留応力の疲労強度におよぼす影響は現段階では定量的に明らかにされていない。なぜなら、試験片加工中残留応力が消失しないためには比較的広巾の試験片を要し、それに必要な試験機が数少ないこと、また、破壊発生点での残留応力の測定が困難なため、厳密な試験が出来ないためであろう。

残留応力の影響があるという確証は試験片の局部を加熱急冷させ、残留応力を誘起させた試験片と残留応力を与えない試験片の比較試験から得られているが、溶接材について試験片形状、残留応力の分布および負荷の種類と大きさ等により如何ように残留応力の効きが変わるかは全く解明されていないようである。もちろんこれまで溶接材の残留応力に関する研究例は若干報告されているが、効きが僅かであること、また、試験方法が適切でないためここに紹介するのは割愛したい。ただし次の2つの試験結果は甚だ興味深いものがあるので記しておく。

図4に示す S-N 線図は途中で不連続になっており、残留応力の影響で寿命が短くなったのではないかと推測されている<sup>10)</sup>。

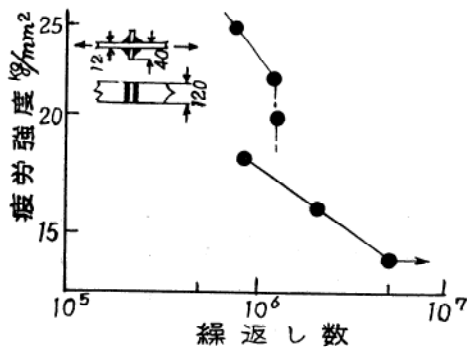


図4 付加物溶接材の S-N線図<sup>10)</sup>

V. I. Trufyakov は試験片の長さ方向および巾方向の溶接順序を変えて同一形状の試験片に異なる残留応力を生ぜしめ、引張り疲労試験を行って、残留応力の効きを確認した。更に残留応力の分布は試験片巾が異なるに従い変化し、ある寸法以上ではほとんど一定となることから、残留応力は寸法効果的な影響をもつと考えてこれを実証した。この試験から彼は板厚 26 mm の突合せ継手の場合、巾 200 mm 以上になると疲労強度はほぼ一定になることを指摘し、残留応力の影響で40%程疲労強度の低下があることを警告した<sup>11)</sup>。

以上述べたように残留応力の影響があることは実証されたが量的にまた、基本的に応力の再分布状態と疲労強度の関係が明らかでなく、今後の研究が待たれる。

なお、高抗張力の鋼材になるに従い、残留応力の再分布に必要な応力が高くなり、かつ、切欠感受性が敏感になることを考えれば、この種の影響が顕著になる恐れがあるので高張力鋼の溶接材に関する検討も興味ある課題であろう。

### 4 溶接欠陥の影響

溶接欠陥を有す試験片の疲労強度は、欠陥の種類と形状、その面積および欠陥の相互干渉の影響を受ける。もちろんこれに溶接による形状の影響が重畳する。しかしこれまでの研究によると、欠陥の相互干渉の効果はほとんど明らかにされておらず破面に現われた欠陥の面積や欠陥率と疲労強度の関連が求められているに過ぎない。また、実用上欠陥材の非破壊検査成績と疲労強度の関連を求めなければ意味がないので、一般に X線検査規格と関連付けている。この関連は1938年に Homés がフィルム濃度から欠陥位置を判定することを提唱<sup>12)</sup>して以来続けられている。

一般に欠陥の影響は突合せ継手の場合、余盛を削除した方が効果的に現われるので、以下に述べる試験は特に記さぬ限り余盛を除去した突合せ継手に関するものを示している。

図5は JIS の X線等級と疲労強度の関係を示したものである<sup>13)</sup>。

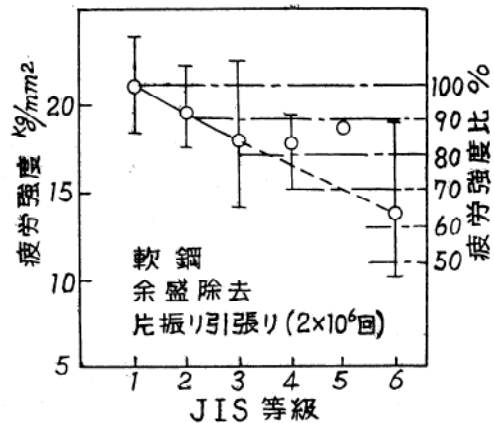


図5 JIS 等級と疲労強度<sup>13)</sup>

大内田、西岡は溶接条件、姿勢、環境および溶接士の級を種々変えて板厚 9 mm の SS 41 材の突合せ継手を製作し、これを JIS の等級に分け、両振り平面曲げ試験を行って統計的処理をし図6をえた<sup>14)</sup>。この図5と図6から明らかなように疲労強度と JIS の等級との相関は非常に悪い。これは検査規格に問題がある。即ち、等級は X線フィルム視野の規程範囲を X線透過方向に対し直角な面で定めており、直接破壊に無関係な欠陥まで対象に入れている。要するに JIS の等級と疲労強度の関連は

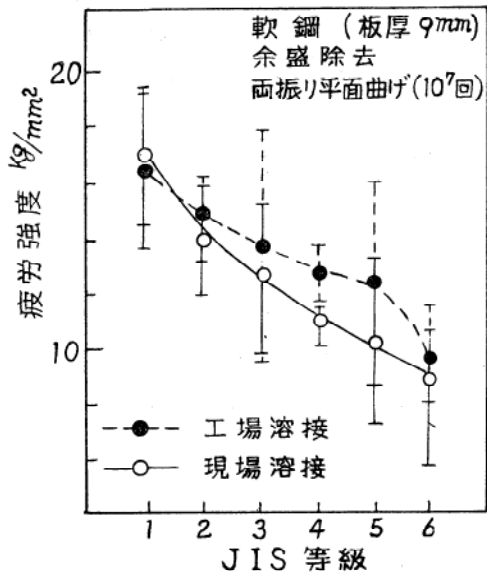


図6 JIS等級と疲労強度<sup>14)</sup>

よく便宜的な表現で、真の相関は疑わしいのである。要は破壊が発生する断面を推定する検査方法を開発すべきであろうが甚だむずかしい課題で今後の研究に頼らねばならない。常識的には応力集中率から推定して、球形よりも楕円形の欠陥がまた、表面近傍にある欠陥（球形であれば、その半径以下表面から離れているもの）から破壊を生じ易いと云えるが、必ずしも定量的な説明はなしえない。たとえば、三木らはブローホールを含む継手の破面を観察し、最初の亀裂はほとんど楕円形のしかも表面近傍の欠陥から発生している場合が多いことを指摘している<sup>15)</sup>。村上はSS 41材の50×50mm断面の試験片の突合せ溶接部に自然気泡を生じさせ、片張り引張り試験を行って破面を観察した結果、欠陥の大きなものから亀裂が発生していることを示した。更に彼は人工的に球形のブローホールを2個含有させた試験片で、同一面内の気泡の相互干渉による影響を調べ、欠陥がその半径の3倍以上離れていれば疲労強度差がないことを見出した。

また、試験中の試験片にX線を透過させ、像をimage intensifierで観察し、可視しうる亀裂発生は全寿命の90%以後であることを報告している。更にスラグ巻込みに関する彼の研究は疲労強度の減少に対しスラグの長さが最も強い相関を与えている<sup>16)</sup>。

以上のような基本的な研究の必要性が痛感されるが、その研究例は少ない。しかし実用上、単に各種欠陥が含有された試験片の疲労強度を求めた例は多い。

ブローホールを含む溶接部の疲労強度に関する試験にMasiとErraのものがある。彼らは軟鋼の突合せ継手に部分片張り引張応力（平均応力 15 kg/mm<sup>2</sup>）を加え、疲労強度と欠陥率の関係を求めて、欠陥率9%の場合40%の疲労限の減少があったと報告した<sup>17)</sup>。Hempelと

MöllerはSt 37の横および縦突合せ継手の片張り引張り疲労試験を行い表2のdataを得ている<sup>18)</sup>。

表2 ブローホールを含む溶接部の疲労強度<sup>18)</sup>

種類	条件	欠陥程度	疲労限 (kg/mm <sup>2</sup> )
母材	機械加工		35.9
	黒皮付		30
横突合せ継手	余盛除去	無	23~30
		孤立した気泡	23.6~28.4
		多くの気泡	10.9~12.6
		非常に "	6.9~9.9
縦突合せ継手	"	無	23.6
		孤立した気泡	"
		多くの気泡	17.9
		非常に "	9

軟鋼 引張り片張り (2×10<sup>6</sup>回)

日本溶接協会原子力委員会 N. D. T. 小委員会では、A302B鋼の突合せ溶接部に各種欠陥をそれぞれ含ませ、これを焼鈍し、表面を機械仕上げした試験片の疲労強度を求めた。その1例を図7に示す。

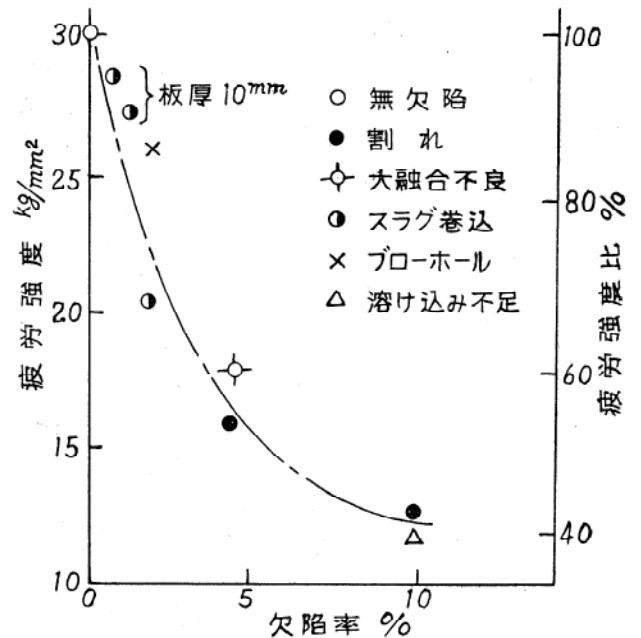


図7 各種欠陥を含む溶接部の疲労強度  
A302B (板厚20<sup>mm</sup>) 余盛除去、片張り引張り (2×10<sup>6</sup>回)

R. P. Newman と T. R. Gurney はクルミナイト系または低水素系の溶接棒を用いて、軟鋼材のスラグ巻込みのある突合せ継手を製作し、試験を行って疲労強度がスラグ長さとの関係のあることを示した<sup>19)</sup>。また、T. R. Gurney はルチール系および低水素系溶接棒を用いて BS 15 (板厚 12.7 mm) の突合せ溶接を行い、溶接部に単独スラグを混入させたものと連続スラグを含有させた試験片 2 種類について応力焼鈍の影響を調べた。それによると、焼鈍すればルチール系の棒で作られたものの強度増加はいずれも 40% もあり、低水素系の棒の場合、単独スラグを含むものは 18% 増、他のものは効果がなかった<sup>20)</sup>。

これまで記述した例は余盛を除去した突合せ継手であったが、余盛付では 2, 3 の研究例から欠陥率が 5% 程度以下なら欠陥の影響はほぼ無視出来そうである。もちろん、欠陥率のみで整理した資料を引用することに問題があるし、また、表面欠陥となり余盛止端の応力集中と重なる場合は再考の余地があるため一概に決めることは無理である。

板厚 12mm の軟鋼突合せ継手で余盛があり、10mm の under cut を有する場合、疲労強度が 50% 程低下することを寺尾は示した<sup>21)</sup>。W. Sanders, Jr. らは 1.6 mm の深さの under cut をもつ突合せ継手の切出し模型を製作し、under cut の先端の半径と余盛角を測定し、一応力条件で試験を行ったが、半径ならびに余盛角の効きは判明しなかった<sup>22)</sup>。

次に付加物を前面隅肉溶接した試験片についての under cut の影響を図 8 に示す<sup>21)</sup>。これによると、under cut が 0.3mm~0.5mm 間では疲労強度への影響は変わらない。この原因は明らかにされていないので検討の余地はあるだろう。

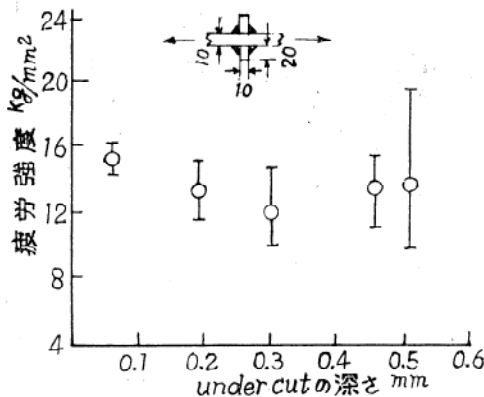


図 8 Under Cut と疲労強度<sup>21)</sup>  
軟鋼 片引張り (2×10<sup>6</sup>回)

尚、under cut の影響は板厚にも関係すると推測され、2, 3 の結果を under cut の深さ/板厚で表すと良く一致

するようである。

この外、多くの研究が見受けられるが紙面の都合上省略したい。

最後に高張力鋼に関するこの種の研究が少ないので、推定性的な論を述べることにする。図 9 は高張力鋼を含む切欠係数と形状係数の関係で、母材についての結果を示す。この図から、溶着金属も同様の傾向を示すものと考えられるので、欠陥による切欠係数は増加するものと思われる。ただし、軟鋼と高張力鋼では切欠係数が約 1.6 までほとんど差がないため、欠陥材の疲労強度が母材のそれに対し約 60% 以下とならなければ差は生じないと云えるだろう。

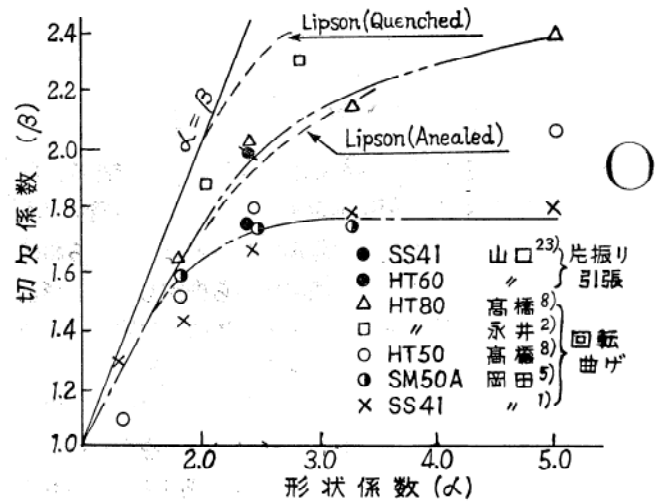


図 9 切欠係数と形状係数の関係

## 5. 溶接形状の影響

### 5.1 余盛形状の影響

突合せ継手の疲労強度の分散の主原因は、余盛の形状効果を見逃していることである。

R. P. Neuman と T. R. Gurney らは軟鋼の突合せ継手の疲労強度を整理して、それが余盛の立上り角と大略の関連があることを指摘した<sup>24)</sup>。その後、W. Sanders Jr. らは A 36 材から突合せ継手をモデル化した図 10 に示すような試験片を切取り、余盛角と止端部の曲率半径をパラメータとし疲労強度との関連を求めた。この一例を図 10 に記す。更に彼らは低合金高張力鋼 A 441 と構造用鋼の突合せ継手について、余盛形状をプラスターで型取りし、試験後破壊発生点の断面について型取りしたプラスターから上記のパラメータを測定し、疲労強度との相関を求め、この 2 つのパラメータが有益なることを実証した。これらの試験から次のような結論がえられている。

a) 余盛による疲労強度の減少率は最大 45~50%、繰

返し応力の形式により異なる。

- b) 同一応力状態で、曲率半径の効きは余盛角が小さくなれば減少し、曲率半径が増加すると余盛角の効きは少なくなる。余盛角の影響は10~15°以下となればほとんど、無視出来、曲率の効きは半径が6.4mm以上になれば微小と見做せる。

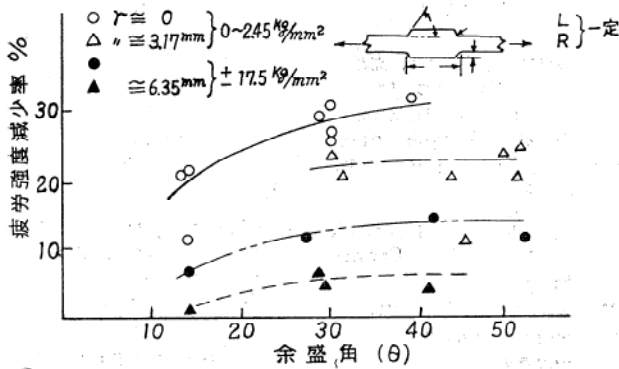


図10 余盛形状の影響<sup>22)</sup>  
A36鋼 切出し模型

更に、山口は軟鋼材から余盛を円弧状に模型化した突合せ継手部を採取し、余盛巾を一定とし高さを変えたもの、余盛巾と高さの比を一定としたものについて試験を行い、前者の試験で最大40%程度の疲労強度の減少のあることを、また、後者の試験では比が一定であれば強度差のないことを明らかにした<sup>23)</sup>。

上田らは隅肉溶接止端の形状の効きを調べた<sup>25)</sup>。彼らは隅肉溶接部の立上り角と止端の曲率半径  $r$  の分散を調査し、それぞれ28°~130° (最大頻度となるのは55°), 0~8 mm (最大頻度は0 mm に現われる)であったことから、 $r=0.2\sim 7.5$  mm,  $\theta=30\sim 150^\circ$  の回転曲げ試験片をSS 41 材から切出し、図11の結果を得た。

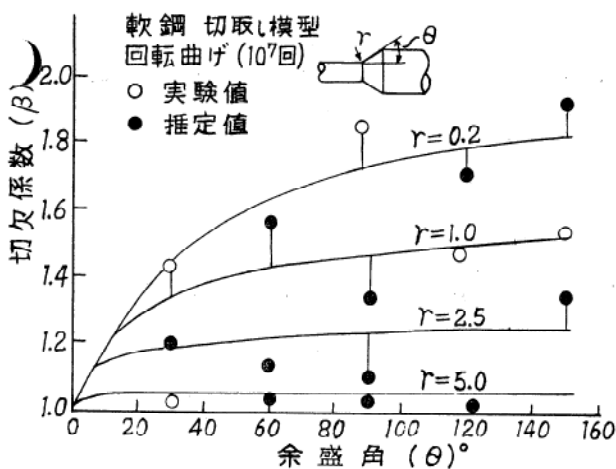


図11 余盛形状の影響<sup>25)</sup>

このような結果の傾向は段付帯板或は段付丸棒の応力集中率から推察することが出来るので、板厚の影響も考慮する必要があるのではなからうか。尚、既述したような形状係数と切欠係数の関係から、余盛形状の著しく悪い高張力鋼の溶接部は軟鋼について示された data より、更に疲労強度の減少率は大きい。

## 5.2 前面隅肉溶接継手における脚長と板厚の影響

この種の継手で破壊は溶接止端か或は溶接ルート部で生じ、前者から破壊する最小脚長は引張り疲労の場合、 $2S/t=1.7$  ( $S$ : 脚長,  $t$ : 主板の板厚)となることを W. Soete は示し<sup>26)</sup>、曲げ疲労の場合、A. Thum らは  $2S/t=1.1\sim 1.4$  となるのを見出した<sup>27)</sup>。更に大内田は溶け込み量を変え、引張りならびに曲げ疲労試験を行って、破壊位置の遷移する臨界脚長と溶け込み量 (ここでは開先量で表す) の関係を図12の如く求めた<sup>28)</sup>。図中、Thum と Soete の条件を併記した。

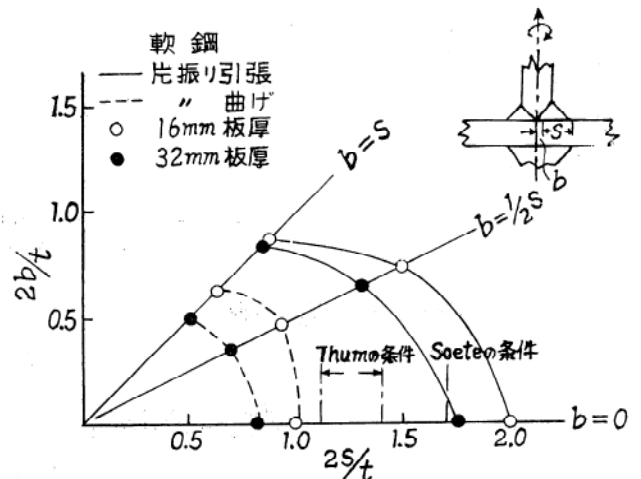


図12 前面隅肉継手の臨界脚長<sup>28)</sup>

山口は板厚 16 mm の軟鋼の前面隅肉溶接継手の隅肉部を機械仕上げして、脚長を4, 5, 6, および 7 mm とし、脚長寸法による強度差を調べた<sup>29)</sup>。(2S/t=0.5~0.88)これによると脚長 7 mm の継手の片振り引張り疲労強度は4mmの場合のそれに対し、 $10^6$ 回の寿命で約40%程低い値を示した。

## 6. む す び

以上溶接材の疲労について、比較的最近明らかにされた事項を含めて紹介した。この外溶接方法の種類によって生じる強度差、或は溶着金属自体の疲労に関して記す必要もあると思うが紙面の都合上省略せざるを得ない。

溶接材の疲労が研究され始めてから現在まで、かなりの年月を経てきているが、単に材料試験に終わっているものが多いのは遺憾である。もちろん、このような試験も

必要ではあるが、現在のように材料が日進月歩であれば、基礎的な面から系統的に検討し、供試材の変遷はあっても、簡単な試験からより精度良く、全ての溶接の疲労強度を推定するようにしたいものである。そのためには本文中に記した課題を含めて、多々研究すべきところがあるので、今後、これらの問題点が解明され、溶接材の疲労がより簡明にされるのを望みたい。

文 献

- |   |                          |        |        |
|---|--------------------------|--------|--------|
| 1) 岡田実, 大谷碧, 森脇良一                                 | 溶接学会誌 昭 38-4             |        |        |
| 2) 永井   | 溶接学会 FS 資料               | 102-41 |        |
| 3) 大内田久   | " "                      | 69-39  |        |
| 4) 峰久節治   | " "                      | 41-39  |        |
| 5) 岡田実, 大谷碧, 森脇良一                                 | 溶接学会誌 昭 38-4             |        |        |
| 6) 応和俊雄   | 溶接学会 FS 資料               | 75-40  |        |
| 7) 村本潤次郎, 石黒隆義                                    | " "                      | 63-39  |        |
| 8) 高橋賢司, 高島弘教, 矢崎揚一                               | " "                      |        |        |
| 9) 高橋賢司, 高島弘教, 伊藤昭典                               | " "                      | 111-41 |        |
| 10) 金属学会強度委員会編                                    | 金属材料の強度と破壊               |        |        |
| 11) V. I. Trufyakov                               | Brit, Weld, Jour, No. 11 |        | 1958   |
| 12) M. Homes                                      | Arcos Vol. 15 No. 89     |        | 1938   |
| 13) 日本造船研究協会報告                                    | 21, 1958                 |        |        |
| 14) 大内田久, 西岡章夫                                    | 日立評論 Vol. 43, 7,         |        | 1961   |
| 15) 三木三省, 恒成利康                                    | 溶接学会 FS 資料               |        | 87-40  |
| 16) 村上徳重 (未発表)                                    |                          |        |        |
| 17) O. Masi, A. Erra                              | Metallurgia Vol. 45      |        | 1953   |
| 18) M. Hempel H. Moller                           | Arch, Eisenhutt Vol. 28  |        | 1957   |
| 19) R. P. Newman, T. R. Gurney                    | Brit, Weld, Jour, No. 7  |        | 1964   |
| 20) T. R. Gurney                                  | Brit, Weld, Jour, No. 11 |        | 1964   |
| 21) 寺尾貞一, 多田美朝, 立花一郎                              | 溶接学会誌 Vol. 29,           |        | 1960   |
| 22) W. W. Sanders, Jr, A. T. Derecho, W. H. Munse | Weld. Jour, No. 2        |        | 1965   |
| 23) 山口勇男, 寺田泰治, 新田顕                               | 造船協会論文集 115号             |        |        |
| 24) R. P. Newman, T. R. Gurney                    | Brit, Weld, Jour, No. 12 |        | 1959   |
| 25) 上田四郎, 松本正, 宮入宮人                               | 溶接学会 FS 資料               |        | 118-41 |
| 26) W. Soete, R.V. Crombrugge                     | Weld, Jour, No. 2        |        | 1952   |
| 27) A. Thum, A. Erker                             | Z. V. D. I. 83 51        |        | 1939   |
| 28) 大内田久, 西岡章夫                                    | 日立評論                     |        | 1964-4 |
| 29) 山口勇男  | 船体脚長研究委員会資料 FL53         |        |        |