

溶接 I ビームの疲れ強さに及ぼすフィレット形状の影響

The Effect of Fillet Shapes on the Fatigue Strength of Welded I-Beams

牧野 亘 作*
Kōsaku Makino

内 容 梗 概

数種の継手形式および溶接方式によってフランジとウェブとの接合部をすみ肉溶接した I ビームについて片振り曲げ疲れ試験を行った結果、ユニオンメルト溶接法で深く溶込ませたものと、手アーク法で溶接したものとほぼ同等の疲れ強さを有すること、手アーク法の場合、フランジとウェブとの接合部に間げきがあると疲れ強さは低下すること、破断面において疲れ破壊とみられる面積の全破断面積との比を、疲れ破面率と名づけて応力との関係を調べてみると、応力が高いほどその値は小さいことなどがわかった。

1. 緒 言

最近、クレーンのけたに溶接組立はりが多く用いられるが、稼動中このけたには繰返し応力がひん繁に作用するので設計に当ってはもちろんのこと、フランジとウェブとの溶接施工に当たってもその疲れ強さについて十分注意する必要がある。従来、溶接継手の疲れ強さについては、かなり活発に実験が行われているが^{(1)~(7)}、溶接 I ビームのフランジとウェブとの垂直接合部の施工法と繰返し曲げ疲れ強さとの関連を研究したものは少なく、資料に乏しいので実際に当面した下記のごとき諸項目について実験を行った。すなわち、

1.1 溶接 I ビームにおけるフランジとウェブとの垂直接合部を手アーク溶接法で溶接したものと、ユニオンメルト溶接法で溶接したものととの繰返し曲げ応力に対する疲れ強さの比較。

ユニオンメルト溶接法の特長の一つは溶接部の溶込みが手アーク法によるよりもかなり深く、フランジとウェブとを完全に一体化することができるので強度が高いといわれている。しかし、クレーンけたにあっては、すみ肉溶接部近傍のせん断応力は曲げ応力よりかなり小さいので、ある程度以上の溶接のど厚があればその溶込量はあまり曲げ疲れ強さには影響しないとも考えられる。

1.2 手アーク溶接 I ビームの場合、フランジとウェブとの垂直接合部を密着させて溶接したものと、接合部に間げきがあるまま溶接したものととの繰返し曲げ応力に対する疲れ強さの比較。

種々な原因によりフランジとウェブとの接合部に多少の間げきがあるまま溶接された場合には、溶接ビードの表面および底部が長さ方向に対して不整となりやすく、その切欠きによって曲げ疲れ強さは低下することが考えられるので実験を行ってみる。

以上の実験結果はさきに断片的に発表してあるが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、今回、その結果を総合して取まとめたのでここに報告する次第である。

2. 供試ビームについて

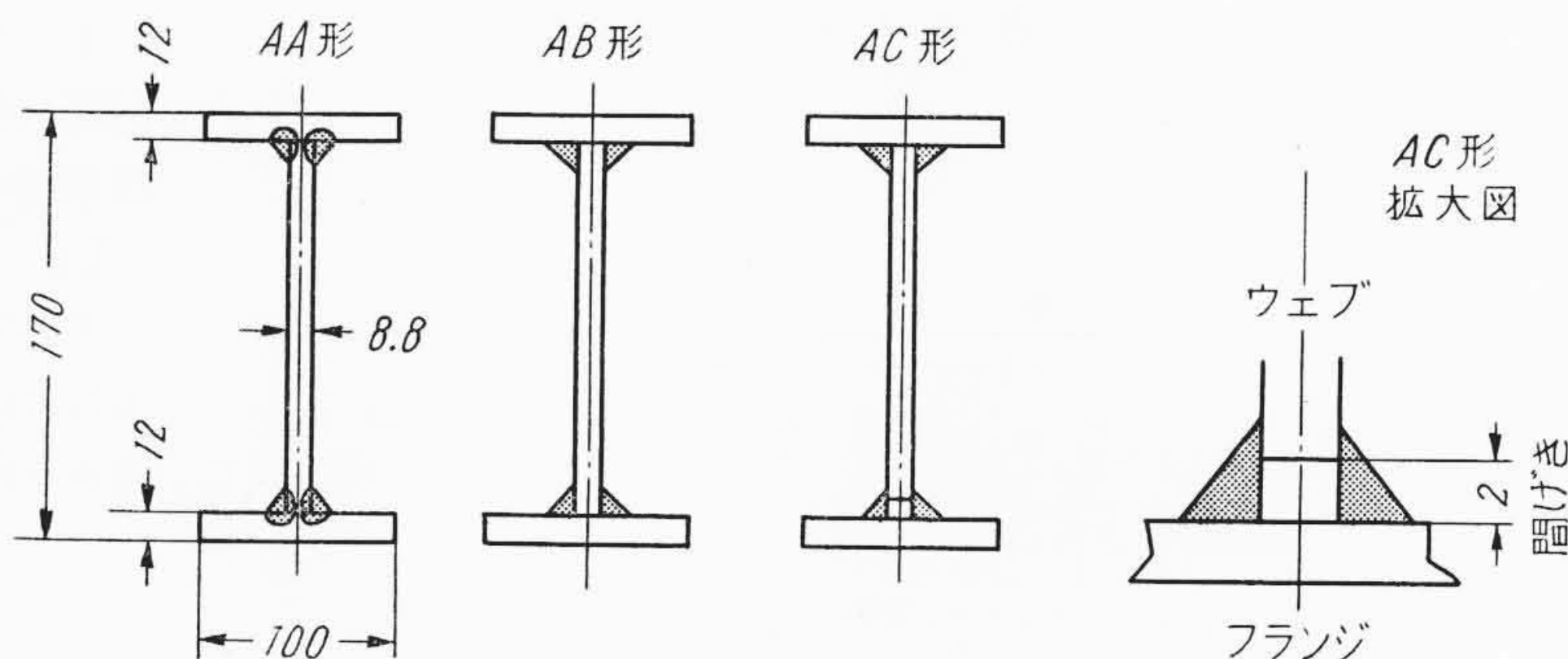
2.1 供試ビームの継手形式

供試ビームのフランジとウェブとの継手形式の要目は第1表、また、その断面形状は第1図に示すとおりであるが、ここにその概要を述べる。

AA形ビーム：継手部をユニオンメルト溶接法により両すみ肉を深く溶込ませて、フランジとウェブとを全く一体化したもの。

AB形ビーム：継手部を手アーク溶接法によりすみ肉溶接したもので溶込みが浅いため多少の不溶着部があるもの。

AC形ビーム：フランジとウェブとを2mmの間げきを設けて手アーク溶接法によりすみ肉溶接したものであり、かなり大きな不



第1図 供試ビームの継手形式

第1表 供試ビームのフランジとウェブとの継手形式要目

符 号	フランジとウェブとの継手			裏当金の溶接		
	溶接法	ビード	開 先	溶接法	ビード	開 先
AA	ユ・メ	連 続	な し	—	—	—
AB	手アーク	連 続	な し	—	—	—
AC	手アーク	連 続	間 隔 2mm	—	—	—

ユ・メとはユニオンメルト溶接の略

第2表 供試ビーム材料の化学分析結果

名 称	C	Si	Mn	P	S
ウ ェ ブ 材	0.20	0.04	0.42	0.029	0.011
フ ラ ン ジ 材	0.18	0.03	0.46	0.018	0.013

第3表 供試ビーム材の機械的性質
(JIS-1号試験片による)

名 称	降 伏 点	引 張 強 さ	真 破 断 力	伸 率	絞 り	縦 弾 性 係 数	片 振 引 張 疲 れ 強 さ	応 力 振 幅 N=2×10 ⁶
	(kg/mm ²)			(%)		(kg/mm ²)	σ _{up}	
ウ ェ ブ 材	25.3	42.3	75.1	26.5	57.5	21,400	21.5	
フ ラ ン ジ 材	25.8	38.4	73.8	29.0	59.6	21,400		

溶着部があるもので、第1図の右方にその接合部の拡大図を示してある。

2.2 供試ビームの寸法および材料

供試ビームに用いた材料は JIS-SS 41 規格鋼板であって、5'×20' 鋼板から切取って用いたが、板取りには注意を払い、ビームの長さ方向と板の圧延方向とは一致するようにした。そのビーム材の化学分析結果は第2表、機械試験結果は第3表に掲げるとおりである。その結果によれば、フランジ材の引張強さはやや低い値を示したが、降伏点は十分に高く炭素量もほぼ適量であると考えられるので、そのまま使用することとした。なお、後述するように本材については片振り引張疲れ試験を行ったので第3表にその疲れ強さも記入した。

* 日立製作所亀有工場

実験用供試ビームの寸法は第2図Aに示すように高さ170mm、フランジ幅100mm、長さ1,550mmであって、板厚はフランジが12mm、ウェブが8.8mmである。

これら供試ビームの断面積、断面2次モーメントなどの諸数値は第4表に掲げるとおりである。

2.3 供試ビームの製作

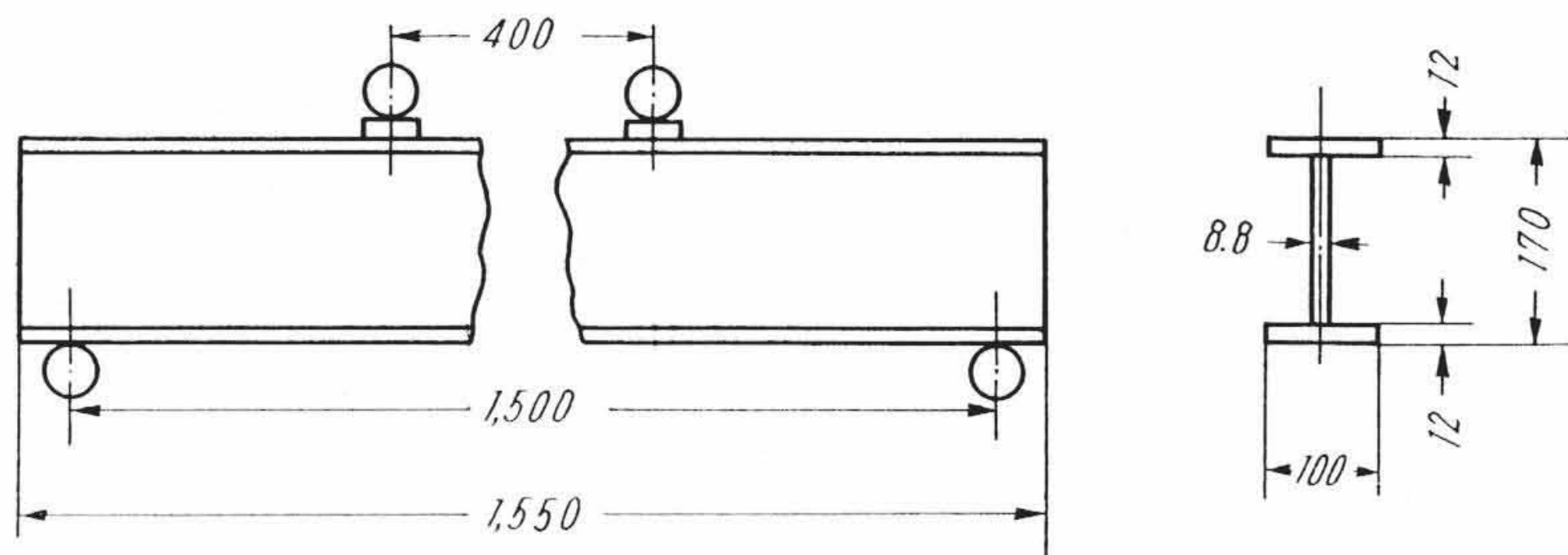
ビームに使用した材料は鋼板の圧延方向とビームの長さ方向とが一致するように、まず、ガス切断したのち、機械切削によって所定の寸法に合わせた。この切削面に油脂が付着していると溶接の際に欠陥を生じやすいのでよく脱脂して用いた。つづいて、それぞれの継手形式に合わせるため第3図に示すように、フランジとウェブと

第4表 供試ビームの諸数値

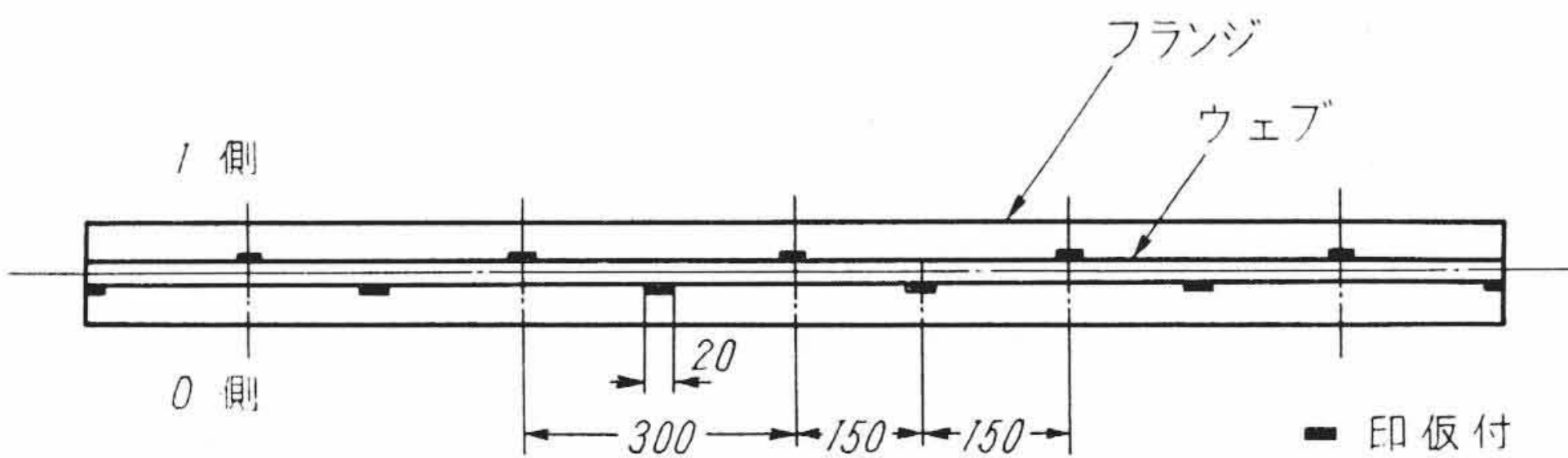
形 式	横 断 面 積 mm ²	断面2次モーメント mm ⁴
AA, AB, AC	3,770	1,734×10 ⁷

第5表 溶 接 条 件

形 式	フランジとウェブとの継手					
	溶接法	棒 フラックス名	棒 径	溶接電流 アンペア	溶接速度 mm/min	脚 長 mm
AB, AC	手アーク	神鋼 B-2	5 mm	220	225	6
AA	ユ・メ	# 20	オックス, WD 5/32	550~600	500~600	9



第2図 供試ビームの寸法



第3図 供試ビームの仮付位置

を300mm間隔で仮付溶接を施したのち本溶接を行った。なお便宜上、同図に示すように両端において仮付けされた側を0側、その反対側を1側と名づけることとした。

本溶接の条件は一括して第5表に掲げてあるが、その要点を述べれば、溶接ビードはすべて1層とする。手アークの場合は中央より左右に振分けて交互に溶接を施す。ユニオンメルト法は一端から他端へ1回で溶接を完了することなどである。

2.4 熔 着 状 況

以上の供試ビームの二、三について溶接部の熔着状況を調べるためにビームを横断してマクロ腐食を行ってみた。第4図はAA, AB, AC, 各形式ビームのマクロ腐食面の写真であるが、これによりAA形の熔込みは十分であり、フランジとウェブとはまったく一体化していることがわかる。AB形は手アークであるためAA形に比して熔込みは浅く、かなり不熔着部がある。AC形の写真は仮付部を示したものであるが、仮付側とその反対側とでは間げきへの熔着鋼の熔込量がかかなり相違していることがわかる。

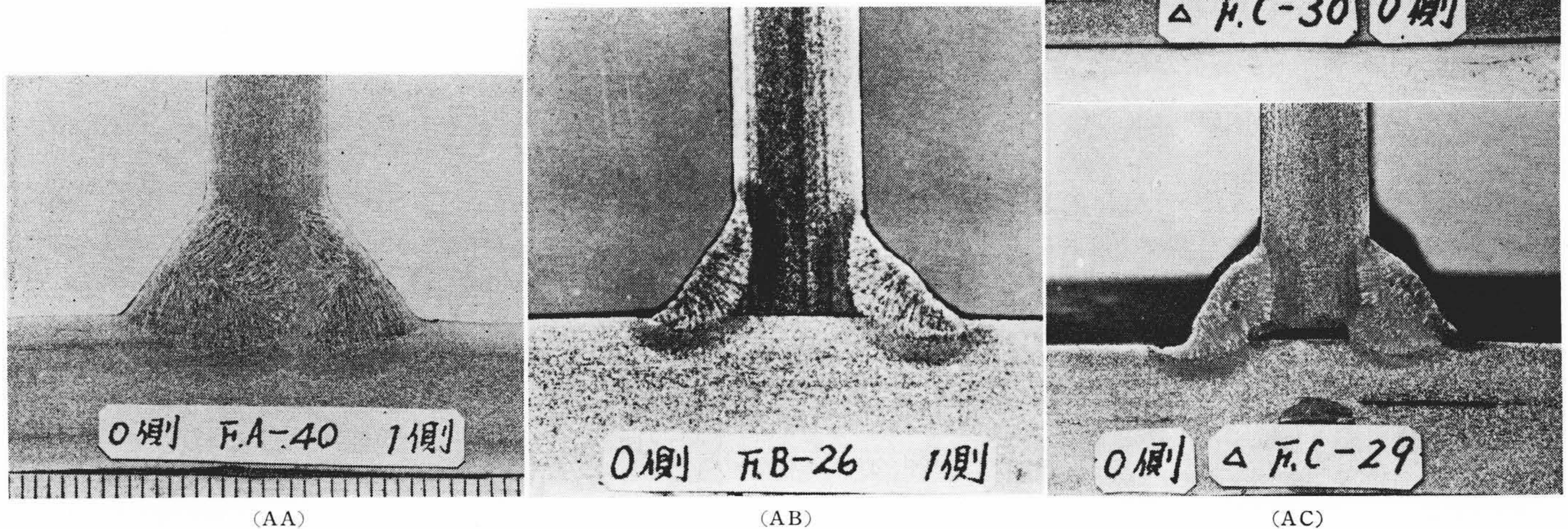
2.5 X線透過試験

すべての供試ビームは疲れ試験に先だてて溶接部の内部欠陥の有無およびその程度を調べたが、その結果、ブローホール、スラグの巻込みなどの欠陥は皆無もしくはきわめて少ないことがわかった。

3. 供試ビームの応力について

1.1 で述べたようにクレーンけたでは最大モーメントとなるスパンの中央では上記のすみ肉溶接部近傍のウェブ板に生ずる応力は、せん断応力 τ より曲げ応力 σ の方がはるかに高いのが普通であるから、本実験の供試ビームについてもその両応力の比を調べてせん断応力で破壊しない条件であるか否かを調べてみる。

- いま、 σ_u : 使用鋼板の片振り引張疲れ強さ
 - σ_w : 使用鋼板の両振り引張圧縮疲れ強さ
 - τ_u : 使用鋼板の片振りせん断疲れ強さ
 - τ_w : 使用鋼板の両振りせん断疲れ強さ
- とすれば、普通の鋼材においては σ_w と τ_w とは、ほぼ次



(AA)

(AB)

(AC)

第4図 供試ビームの熔着状況

のような関係にある⁽¹⁰⁾。

$$k_w = \frac{\sigma_w}{\tau_w} \doteq 1.6 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、
 $\sigma_u \propto \sigma_w, \tau_u \propto \tau_w$
 とみなして、

$$k_u = \frac{\sigma_u}{\tau_u} \doteq 1.6 \dots\dots\dots (2)$$

とする。すなわち $k_u \gg 1.6$ であればせん断応力では破壊しないこととなる。それで供試ビームの溶接趾端部の応力を比較してみる⁽¹¹⁾(第5図参照)。

$$\sigma = \frac{M}{I} y = 0.00270W \text{ kg/mm}^2$$

$$\tau = \frac{3W}{2(b_2 h_2^3 - b_1 h_1^3)} \left(\frac{b_2 h_2^2 - b_1 h_1^2}{b_2 - b_1} - 4y_1^2 \right)$$

$$= 0.000616W \text{ kg/mm}^2$$

$$\therefore \frac{\sigma}{\tau} = 4.38 \dots\dots\dots (3)$$

- b_1 : 91.2 mm
- b_2 : 100 mm
- h_1 : 146 mm
- h_2 : 170 mm
- y_1 : 73 mm

すなわち供試ビームの σ/τ の値が(2)式の k_u 値よりかなり大であるからせん断応力で破壊するようなことはないと考えられる。

つぎに、供試ビームのフランジとウェブについて、おもな部分の静的荷重および繰返し荷重の下で応力測定を行ってみた。測定は抵抗線ひずみ計を用いたが、繰返し荷重のときは電磁オンロググラフを併用した。多くの測定結果のうち第6図に示す0.5および11の位置の値を掲げれば第6表のとおりである。これらの測定値と同表に併記した弾性計算値とを比較してみると、その差は小さく5%程度であるので、ほかのビームについては測定を省略した。

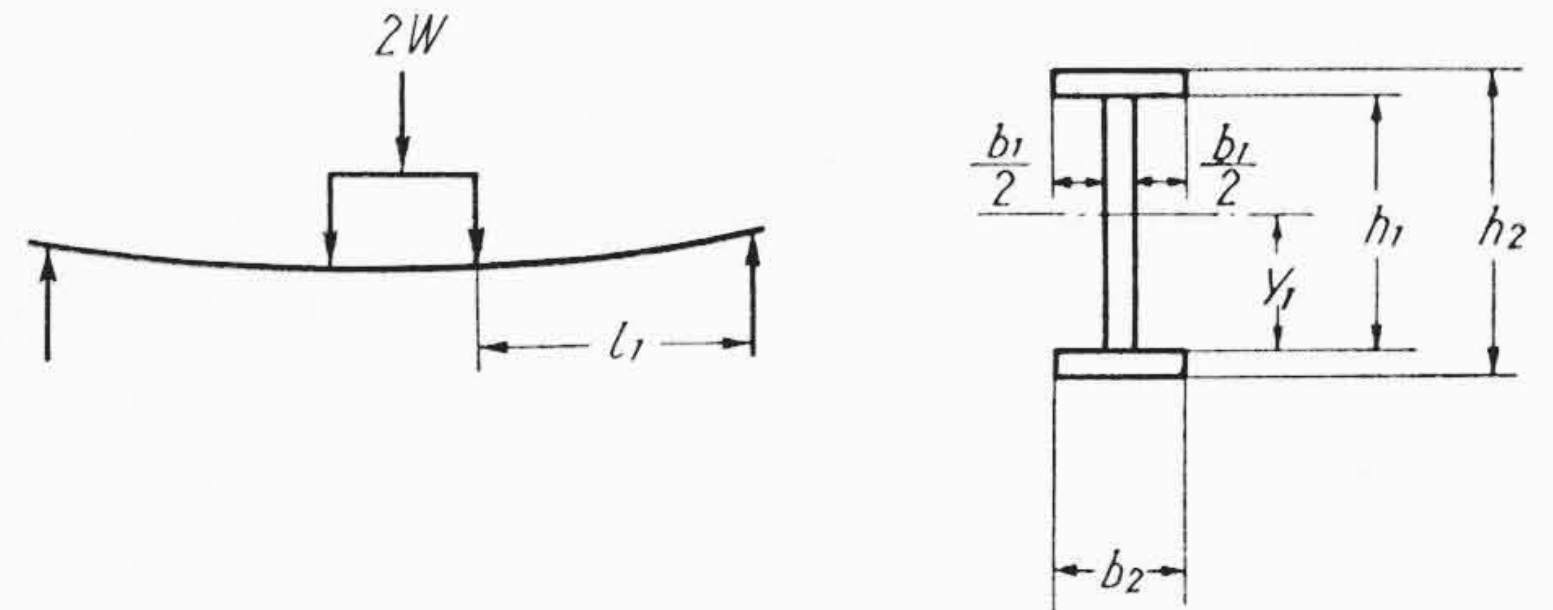
4. 疲れ試験

4.1 試験方法

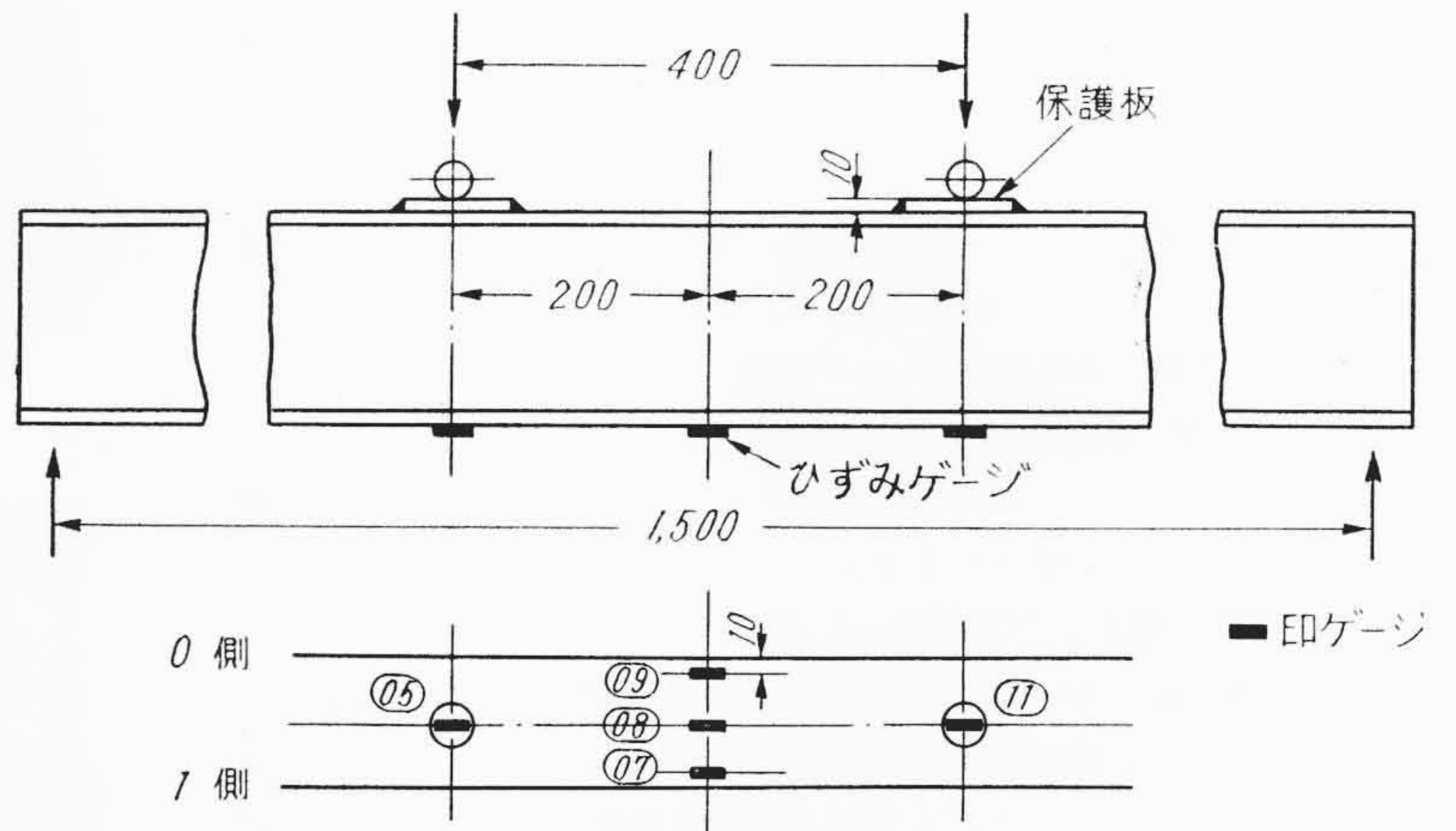
供試ビームの荷重方法は実際に考慮して2点荷重としたが、その荷重間の距離、支点間の距離などは第2図に示すとおりである。用いた試験機はローゼンハウゼン万能疲れ試験機 UHS-60 であって、荷重の繰返し速度は毎分330回とした。なお、試験に当り荷重振幅の最小値を零にすると試験中にビームが移動するなど不都合なことが起るので、本試験では最小値を2トン一定とした。したがって、所要の応力振幅を得るためには最大値を変化させることとなる。通常、構造物の疲れ強さは、応力繰返し数 $N = 2 \times 10^6$ における値を求めることが多く行われているので、本実験でも同様にした。なお、寸法効果の考案に資するためフランジ材について片振り引張疲れ試験を行いその疲れ強さも求めることにした。

ここで荷重および応力に用いた符号を記せばつぎのとおりである。

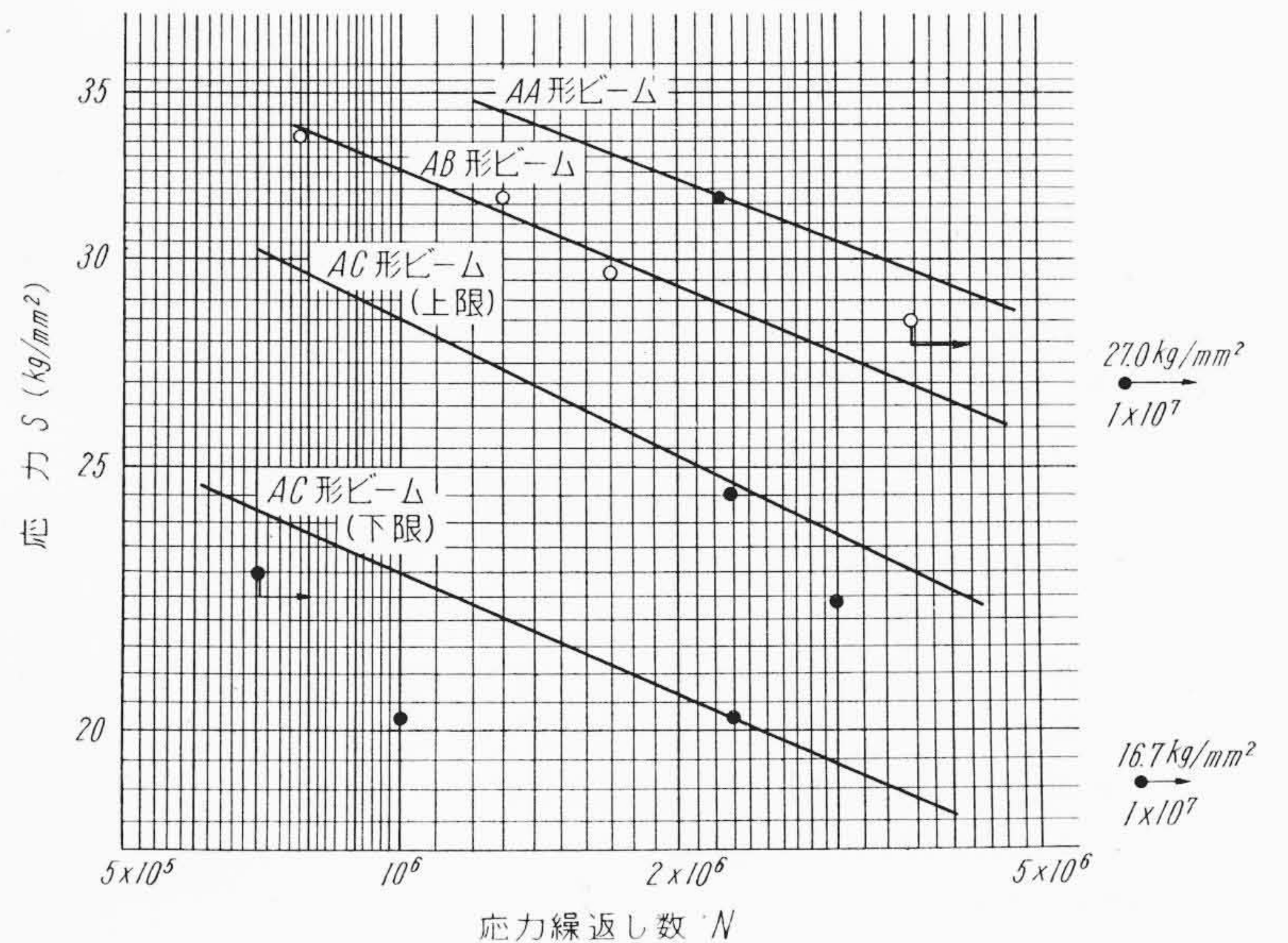
- W_1 : 繰返し荷重における最大値 kg
- W_2 : 繰返し荷重における最小値 kg
- σ_1 : 繰返し応力の最大値 kg/mm^2
- σ_2 : 繰返し応力の最小値 kg/mm^2
- σ_a : 繰返し応力の振幅 $(\sigma_1 - \sigma_2) \text{ kg/mm}^2$



第5図 符号の説明図



第6図 抵抗線ひずみ計による応力測定位置



第7図 AA, AB, AC形ビームの S-N 線図

第6表 供試ビームのフランジ外面の応力(AC形ビーム)

測定位置	静荷重状態の測定応力 kg/mm^2	繰返し荷重状態の測定応力 kg/mm^2	計算応力 kg/mm^2
* 0.5	11.2	11.5	12.0
11	11.6	11.8	12.0

* 測定位置を第5図に示す。

第7表 供試ビームの称呼疲れ強さおよびき裂発生点称呼応力

形式	称呼疲れ強さ $\sigma_u \times 10^6$			き裂発生点称呼応力		
	最大応力 $\sigma_1 \text{ kg/mm}^2$	最小応力 $\sigma_2 \text{ kg/mm}^2$	応力振幅 $\sigma_a \text{ kg/mm}^2$	最大応力 $\sigma_1 \text{ kg/mm}^2$	最小応力 $\sigma_2 \text{ kg/mm}^2$	応力振幅 $\sigma_a \text{ kg/mm}^2$
AA	32.0	2.8	29.2	32.0	2.8	29.2
AB	29.0	2.8	26.2	29.0	2.8	26.2
AC	20.5	2.8	17.7			

4.2 疲れ試験の結果

以上の疲れ試験結果を応力(S)—繰返し数(N)線図にプロットして供試ビーム別にS-N曲線を描けば第7図に示すようになるが、これらのうち実験点の不足により線の引き難いものは他の曲線を参考にして描いてある。その曲線から疲れ強さ $\sigma_u 2 \times 10^6$ を求めると第7表に掲げるような値となる。同表にはモーメントを断面係数で除した、いわゆる称呼应力で示した疲れ強さとともに、そのき裂発生点の応力も併記してある。

以上の結果をみるとAA形およびAB形ビームの疲れ強さは、その材料の降伏点に近いかあるいはそれをこえていて、繰返し曲げ応力に対して十分強いが、AC形はかなり低い値であることがわかった。

これらの結果のうち、AB形ビームの値を W. M. Wilson 氏が求めたロール製Iビームの疲れ強さ⁽⁴⁾と比較してみると、

$$\begin{array}{ll} \text{本実験 AB形(手アーク熔接)} & \sigma_u 2 \times 10^6 = 26.2 \text{ kg/mm}^2 \\ \text{W. M. Wilson 44 A(ロール製)} & = 22.0 \end{array}$$

上記のように、むしろ当方の熔接Iビームの方が Wilson 氏が得たロール製ビームの値より上まわっている。

4.3 破断位置および破面について

さて、第2図において荷重点から支点までの間にはせん断応力が作用するため、熔接部近傍の主応力は曲げ応力より多少、大であるから供試ビームについてウェブ板のすみ肉熔接ビード趾端部の主応力 $\sigma_{\max}(W)$ とフランジ外面の曲げ応力(フランジ外面では主応力 $\sigma_{\max}(F)$ に等しい)とを比較してみると、

$$\frac{\sigma_{\max}(W)}{\sigma_{\max}(F)} \doteq 0.9$$

となる。

したがって、供試ビームに応力集中を伴うような欠陥がなく、残留応力の影響もないものとすれば、疲れき裂はフランジ外面に生起するはずである。しかし、供試ビームは黒皮付の材料を用いており、熔接部に多少の欠陥を伴ったものもあるので、必ずしも予測した2点荷重範囲内のフランジ外面にき裂が発生するとは限らなかった。次にその破断位置および破面の観察結果を述べてみたい。

AA形：き裂の発生位置は2点荷重範囲のフランジ外縁である。その破面の一例を第8図に示したが、白く、「きめ」の細かい部分が疲れ破壊の部分であるが、そのき裂発生点であると推測される箇所には矢印を付してある。うす黒い部分は破壊が急速に進んだ部分であって、前者より、「きめ」は粗で静的引張破断面に似ている。

AB形：き裂発生点はAA形と同様に2点荷重内のフランジ外縁である(第9図参照)。

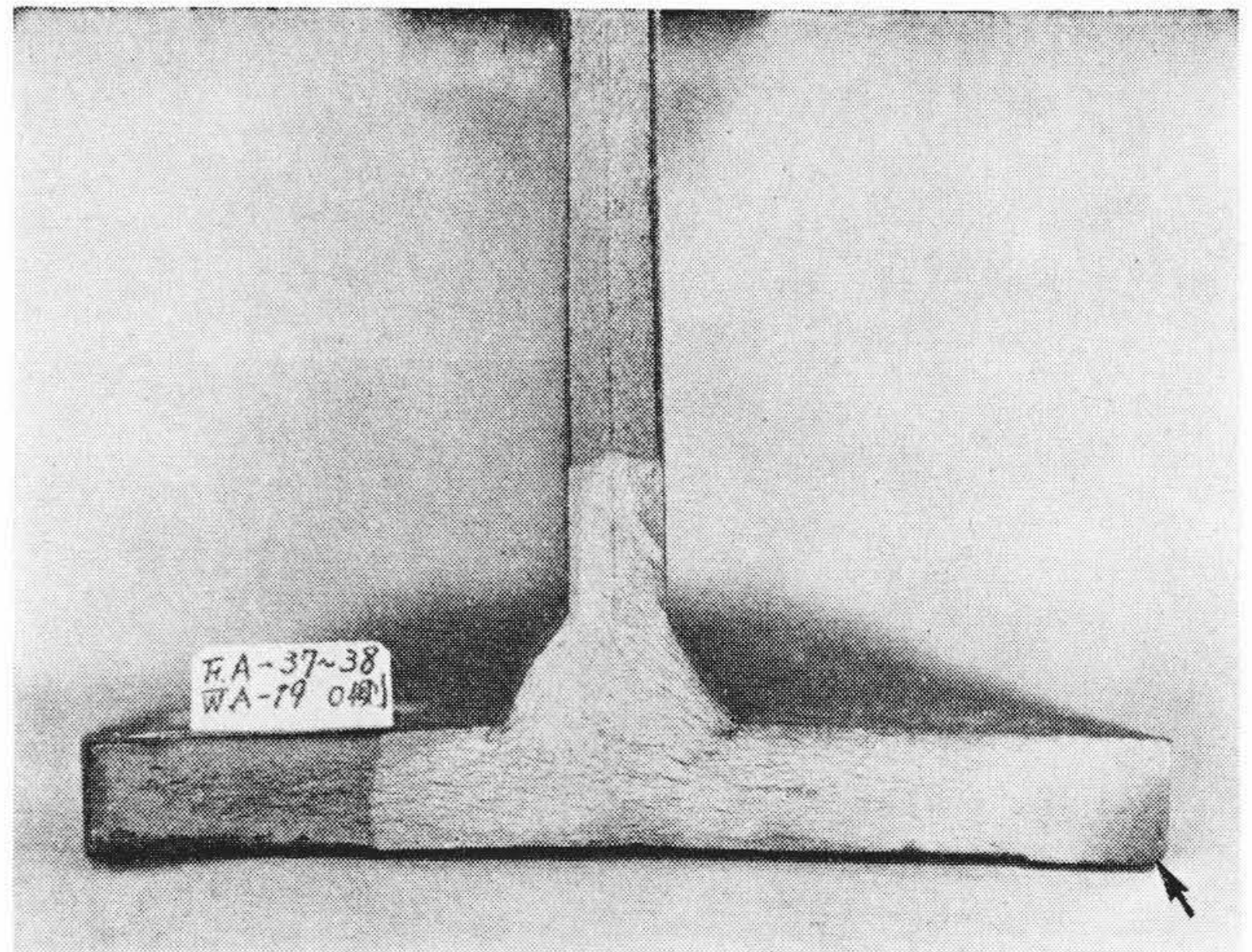
AC形：き裂発生位置は2点荷重内のものと、外のものとがあったが、いずれも仮付ビードと本熔接において熔接棒交換のためのビード継ぎ目とが重なった部分が破壊の起点になっている(第10図)。

4.4 疲れ破面率

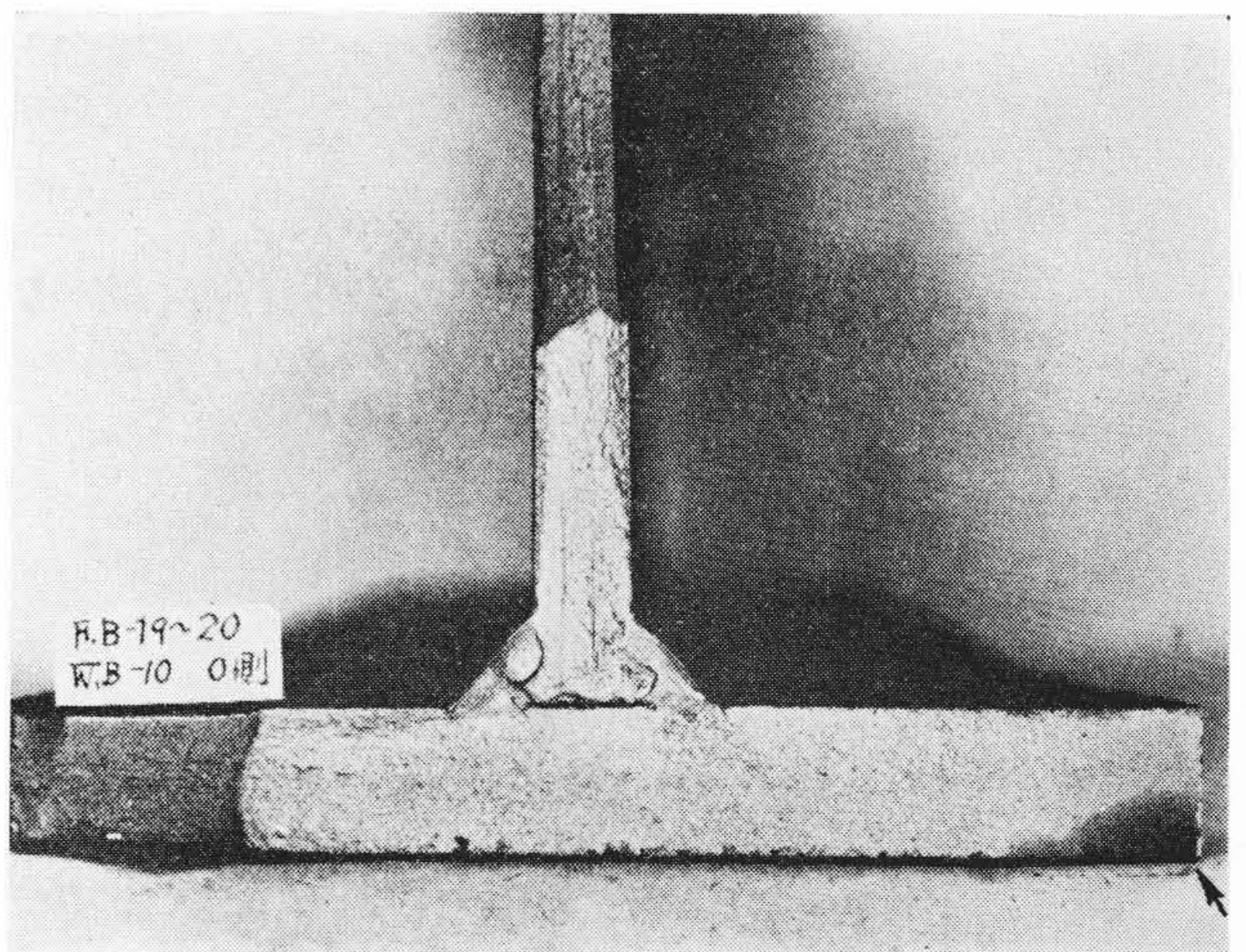
破面写真第8~10図をみると破面は疲れき裂の発生点を中心とした「きめ」の細かい部分と粗い部分とからなっていることがわかるが、これは疲れ破壊の特有な破面であって、前者は繰返し応力によってき裂が徐々に進んだ部分である(かりに疲れ破壊面と名づける)。後者は断面積の減少により荷重に耐えられなくなり急速に破壊が進行した部分である。したがって応力が高いほど前者の面積は狭いはずであるが、この事実は実物の疲れ破壊を診断する際の有力な手掛りになるので参考のためその傾向を調べてみる。

$$\text{いま、} \frac{\text{疲れ破壊面積}}{\text{全横断面積}} \times 100 = \text{疲れ破面率} \%$$

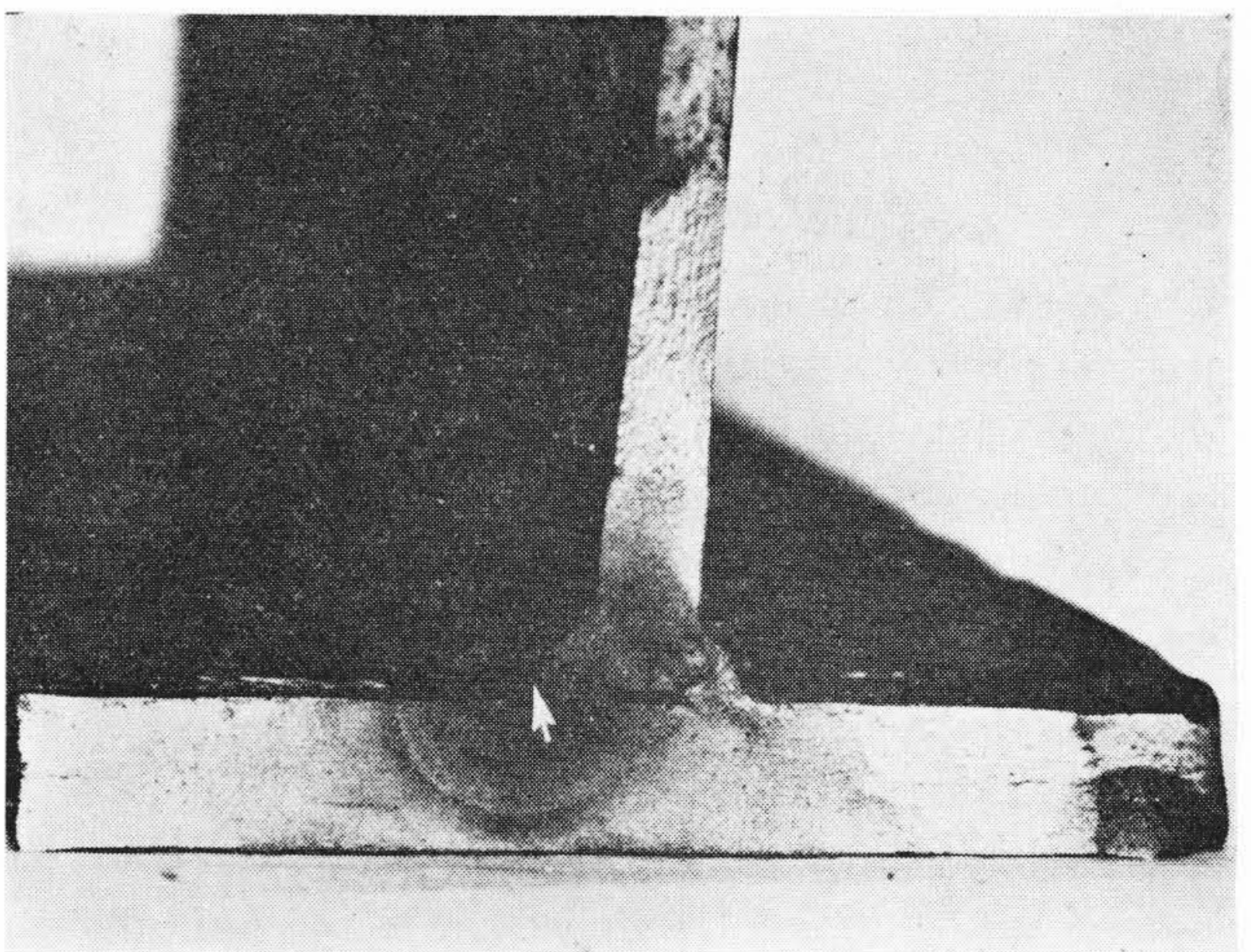
と名づけて、横軸に応力、縦軸に疲れ破面率をとって図示すれば第11図のごとくであって、応力が高いほど疲れ破面率は低下する傾向



第8図 AA形ビームの破面



第9図 AB形ビームの破面



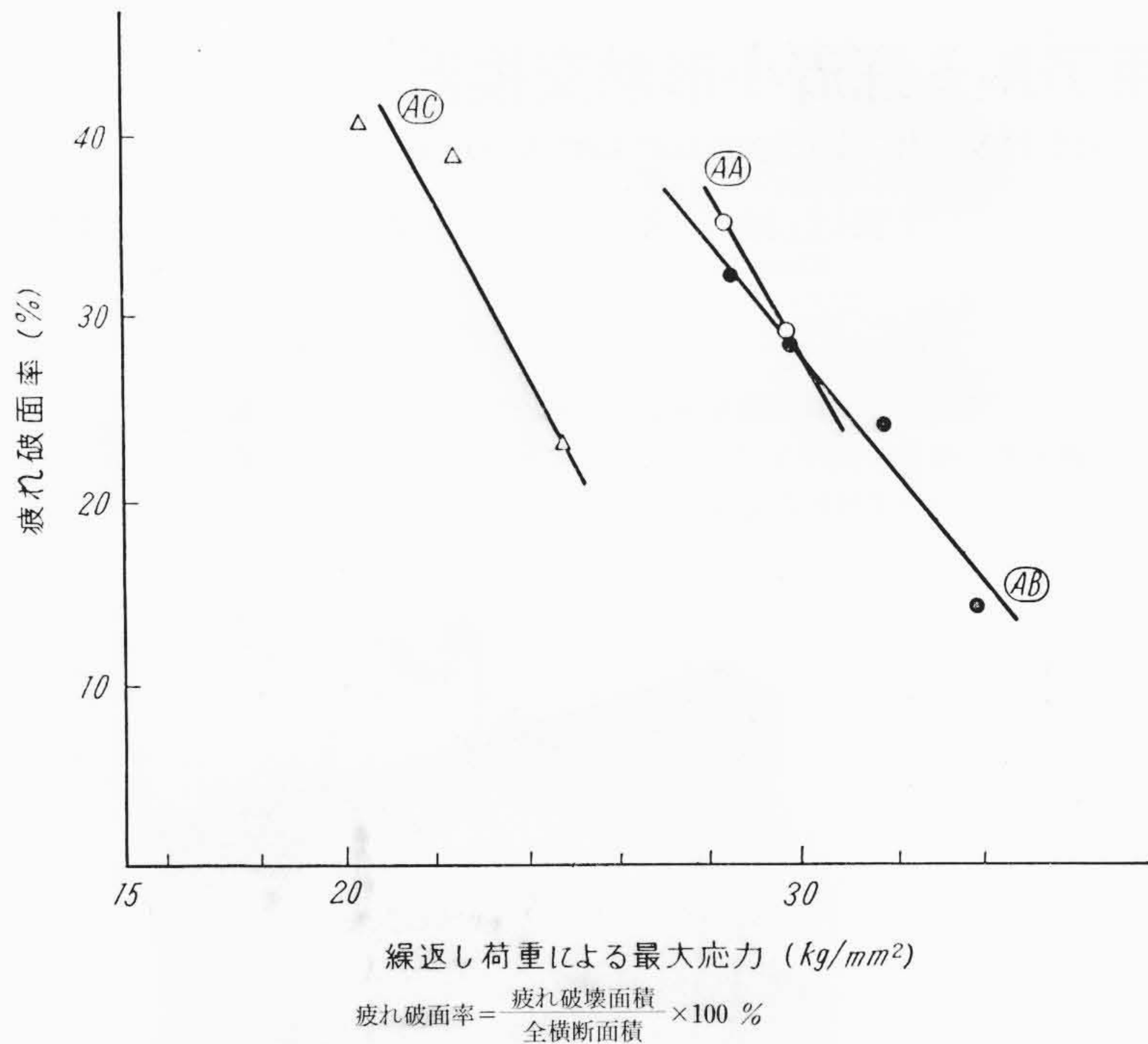
第10図 AC形ビームの破面

が明らかに認められる。

5. 疲れ強さの比較

5.1 手アーク熔接したものとユニオンメルト熔接したものの疲れ強さの比較

疲れ試験によって求めた手アーク法によるものとユニオンメルト法によるものの疲れ強さを比較してみる。いま、ここにその疲れ強さを再記すれば



第 11 図 応力と疲労破面率との関係 (溶接部に欠陥のないもの)

AA 形: $29.2 kg/mm^2$

AB 形: $26.2 kg/mm^2$

である。

この結果からユニオンメルト溶接の AA 形の方が手アーク溶接のものより値はわずかに上まわっていることがわかる。しかし、第 8 図および第 9 図の写真でわかるように両者ともフランジの外縁がき裂の発生点になっているので、その疲れ強さの差はフランジ材の黒皮の程度、外縁の粗さの相違、組立寸法誤差などに基づくものであって、溶接方法の相違によるものではないと考えている。よって、溶接趾端部の $\sigma/\tau \approx 4.4$ 程度の溶接 I ビームでは、フランジとウェブとの垂直接合部をユニオンメルト法あるいは手アーク法のいずれの溶接法を利用して製作しても、溶接ビードの内外に欠陥がなければ両者の疲れ強さには大差がないものと考えてよいであろう。

5.2 手アーク溶接の場合、フランジとウェブとの間げきの有無が疲れ強さにおよぼす影響

フランジとウェブとを強く押付けて溶接した AB 形と 2 mm の間げきを設けた AC 形との疲れ強さを比較してみると、

AB 形ビーム: $26.2 kg/mm^2$

AC 形ビーム: $17.7 kg/mm^2$

であって、後者は前者より 32% 程度低い値である。その破面を調べてみたところ、疲れき裂発生点は仮付溶接ビードと本溶接におけるビードの継ぎ目とが重なった部分であることが確かめられたので、その部分の溶着状況を調べるため、AC 形ビームの 1 個についてビードのどの厚方向に縦断してマクロ腐食を行い観察を試みた。その結果、該当部分のビード底部および表面にはほかの部分より明瞭な切欠きが存在しており、これが原因となって疲れき裂が生じ易く強さが低かったものと考えられる。

5.3 フランジ材の片振り引張疲れ強さと供試ビームの片振り曲げ疲れ強さとの比較

いま、フランジ材の片振り引張疲れ強さ ($\sigma_{up}2 \times 10^6$) は無限大の高さのビームの疲れ強さに一致すると考えて、その値 $\sigma_{up}2 \times 10^6$ と AA 形ビームの曲げ疲れ強さ $\sigma_{ub}2 \times 10^6$ との比を求めてみると、

つぎのようにほぼ 0.26 であった。

$$\xi = \frac{\sigma_{ub}2 \times 10^6 - \sigma_{up}2 \times 10^6}{\sigma_{ub}2 \times 10^6} \approx 0.26$$

$\sigma_{up}2 \times 10^6$: フランジ材の片振り引張疲れ強さ
= $21.5 kg/mm^2$

$\sigma_{ub}2 \times 10^6$: 供試ビームの片振り曲げ疲れ強さ
= $29.2 kg/mm^2$

したがって、供試ビームよりはるかに大形の溶接 I ビームにあつては本実験結果より多少疲れ強さは低いことが推定される。なお、実際には高さが増すほど溶接部の曲げ応力は高くなり、破壊の起点は溶接部に移行することも考えられるから、大形ビームの疲れ強さについての今後の研究が望まれる。

6. 結 言

数種の継手形式および溶接方式とによって、フランジとウェブとの接合部をすみ肉溶接した I ビームについて疲れ試験を行い取まとめた結果、つぎのような結論を得た。

フランジとウェブとの接合部をユニオンメルト溶接法で深く溶込ませて、両部材を完全に一体化したものと、手アーク法ですみ肉溶接した I ビームとは、ほぼ同等の片振り曲げ疲れ強さを有することがわかった。

手アーク溶接の場合、フランジとウェブとの接合部に 2 mm の間げきがあるまま溶接を施したものは、仮付け溶接およびビード継ぎ目において断面の急変を生じやすく、疲れ強さは多少低いことがわかった。

疲れ破面における「きめ」の細かい部分を疲れ破壊面と名づけ (疲れ破壊面積/全横断面積) $\times 100 =$ 疲労破面率 % として繰返し応力の大小との関係を調べた結果、応力が高いほど疲労破面率は低下することが確かめられた。

寸法効果を推定するため、フランジ材について片振り引張疲れ強さを求めた結果、供試ビームの片振り曲げ疲れ強さより 26% 程度低い値を得た。

以上、実験結果を取りまとめて報告したが、少しでも諸賢のご参考になれば幸いである。終りに臨み当社亀有工場の関係各位には終始ご指導ご激励を賜ったので深甚なる謝意を表するものである。また、実験の大部分を担当していただいた小野寺清一氏に対して厚くお礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 中根, 大谷: 溶接接手の強度, (昭31)日溶協
- (2) 電気溶接研究委員会: 溶接接手の疲労強度, 鋼材の切欠脆性, (昭26)造船協
- (3) 機械学会: 溶接部の疲労に関する講演および座談会資料(昭29)
- (4) W. M. Wilson: Weld, J. 1951-March, 105 s~115 s
- (5) J. E. Stallmeyer and W. H. Munse: Brit, Weld, J. 1960-April, 281~287
- (6) A. Neumann: Brit, Weld, J. 1960-March, 162~187
- (7) W. H. Munse and J. E. Stallmeyer: Brit, Weld, J. 1960-March, 188~200
- (8) 藤井, 牧野: 機械学会第 33 期総会講演会 昭 31-4
- (9) 牧野, 藤井: 機械学会第 34 期総会講演会 昭 32-4
- (10) 石橋: 金属の疲労と破壊の防止(昭29)養賢堂 104
- (11) 機械工学便覧第 4 版 (昭35) 4-35~4-44