

ボックス断面角継手の溶接欠陥が 疲労強度に及ぼす影響

INFLUENCE OF WELD DEFECTS ON FATIGUE STRENGTH OF CORNER JOINT
OF BOX SECTION MEMBER

竹名興英*、伊藤文夫**、平野茂***、三木千寿****

By Koei TAKENA, Fumio ITOH, Shigeru HIRANO and Chitoshi MIKI

Box section specimens of various types of corner joints were fatigue-tested under axial loading condition by 4 MN fatigue testing machine. The specimens were fabricated by commonly used and newly developed welding processes. The fatigue strengths of joint and behaviors of fatigue crack propagation from various kinds of weld defects in corner joints are described. Influence of weld defects on the fatigue strengths of joints and permissible blowhole size in actual truss chord members are examined.

1. まえがき

トラス弦材でボックス断面を形成するための角溶接は、一般に隅肉溶接が用いられる。しかし、下弦材の上フランジの上面には雨水が溜まりやすいために、その上フランジとウェブの溶接方法については特別の工夫がなされてきた。その一つは、フランジをその板厚の約半分だけボックス内に落とし込み、フランジの板厚面とウェブの板厚面を隅肉溶接する方法である。もう一つは、ウェブ上面とフランジ上面を同一平面にし、フランジの端部に開先を取り、部分溶け込みグループ溶接をする方法である。前者の方法は、格点部のガセットのフィレット端部で溶接方向を変化させてガセットの内側に溶接を移動させなければならない。このフィレット部は応力集中が大きく、さらにこのような複雑な形状の部分で溶接方向を変化させることは、溶接欠陥が生じやすくなる。したがって、本四併用橋では、切り欠き感受性の高い調質鋼を多量に用いるので、疲労強度の観点から後者の方法が好ましいと判断された。しかし、隅肉溶接に比べて開先角度が小さいために、溶接欠陥が生じやすいと考えられ、また鉄道橋での調質鋼の実績が少なかった。そのため、本州四国連絡橋公団において調質鋼を用いた部分溶け込みグループ溶接の疲労強度を調べる目的で、トラス構造試験体等の疲労試験^{1),2)}を行なった。その疲労強度は、設計基準³⁾におけるこの継手

-
- * 工博 新日本技研 (〒105 東京都港区芝2-1-23)
 - ** 建設機械化研究所 (〒417 静岡県富士市大淵3154)
 - *** 本州四国連絡橋公団 (〒105 東京都港区虎ノ門5-1-5)
 - **** 工博 東京工業大学 助教授 工学部土木学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

の所属するA等級の疲労許容応力よりかなり低い結果となった²⁾。この疲労強度を低下させた原因は、部分溶け込みグループ溶接のルート部に存在した大きなブローホールや溶け落ちによるルート溶け込み線の大きな凹凸等の溶接欠陥であった。そのため、この角溶接に生じる溶接欠陥の原因について調査が行われた。その結果、それらを防止するためのいろいろな新しい溶接方法が提案された。さらに、調質鋼を用いたこの継手の所属等級をB等級に下げた。なお、非調質鋼を使用したこの継手の所属等級はA等級のままに据え置かれた。しかし、非調質鋼について大型の試験体を用いた疲労試験はほとんど行なわれたことがない。

この論文では、調質鋼及び非調質鋼を用いた角溶接の疲労強度について研究した結果を報告する。試験体の角溶接としては、調質鋼を使用したものについては通常の溶接方法及び新しく提案されたいろいろの溶接方法を用いた部分溶け込みグループ溶接と隅肉溶接を、非調質鋼を使用したものについては通常の部分溶け込みグループ溶接を用いた。

2. 試験方法

(1) 試験体

試験体の形状と寸法を図-1に示す。供試鋼材は調質鋼HT80及び非調質鋼SM50Yで、その化学成分と機械的性質を表-1に示す。試験体は、試験対象区間として中央に1mの平行部を有する外形300mm×130mmのボックス断面で、板厚は15mmである。

表-2に溶接要領を示す。調質鋼 (HT80) を用いた試験体は角溶接の溶接方法を変化させた4種類である。すなわち、通常の部分溶け込みグループ溶接を用いたBB試験体、前に述べた溶接欠陥を防げる方法として新たに提案された2種類の溶接方法を用いたBDとBE試験体、及び隅肉溶接を用いたBF試験体である。以降、このBDとBE及びBF試験体を改良溶接方法を用いた試験体と呼ぶ。非調質鋼 (SM50Y) を用いたBG試験体は、角溶接に通常の部分溶け込みグループ溶接を用いた。

BB試験体は製作基準²⁾に基づいて製作した。したがって、ルートギャップは1.0mm以下である。改良溶接方法を用いたBD、BE及びBF試験体の製作には、溶け込み線の凹凸を小さくするためにルートギャップを0.5mm以下とし、仮付け溶接始末端はグラインダーによって仕上げ、開先ルート部の清浄化及び安定化電源の採用等によって、極力溶接欠陥を抑えるように努めた。BD試験体は、開先形状をJ開先とすることによって、溶接棒のルート部のねらい位置を容易にするとともに、溶接金属の先行を防止することによって深い溶け込みを得ようとした。また、MAG溶接を用いることによって溶接入熱と溶接金属の収縮量をできる限り小さくするとともに、フラックスに原因するスラグ巻き込みを防止することによって、継手性状の向上に努めた。BE試験体では、開先角度がBB試験体と同じ50°であるが、2電極サブマージアー

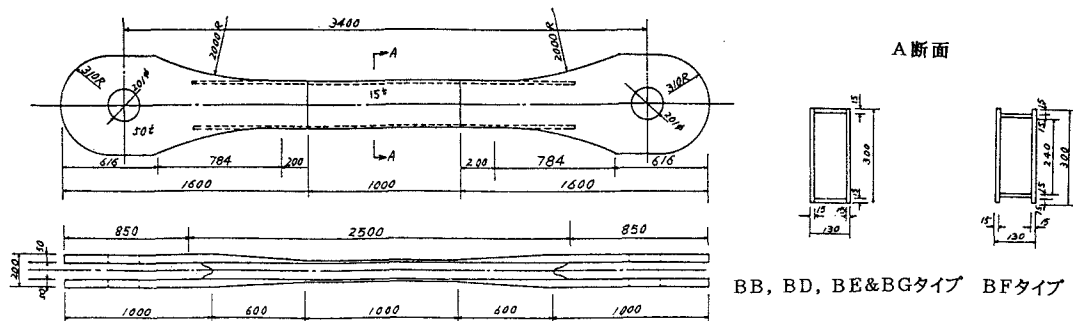


図-1 試験体の形状と寸法

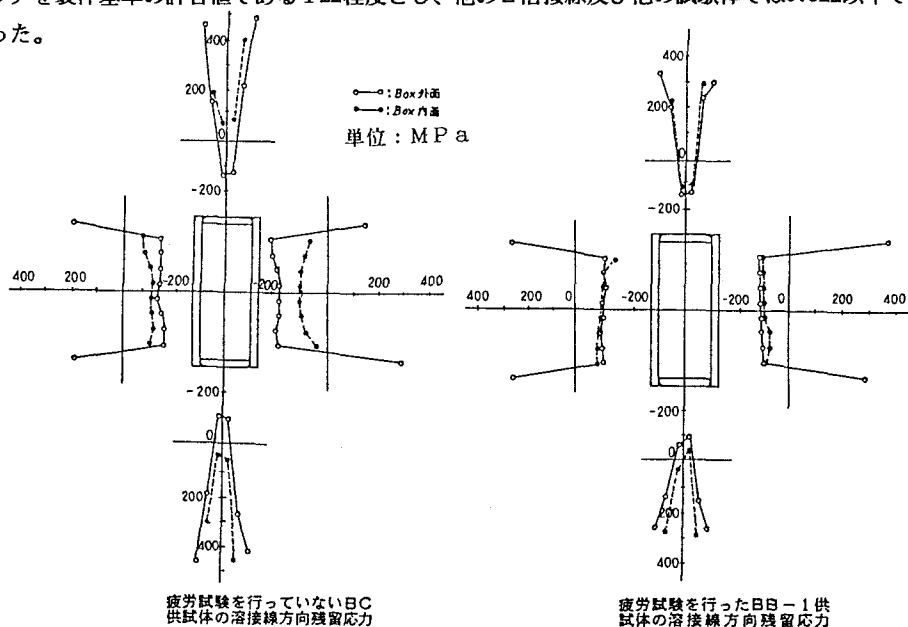
表－1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

材質	機械的性質			化 学 成 分 (%)										試験体
	Y. S. MPa	T. S. MPa	E L. %	C	Si ×100	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	
HT80	833	882	29	11	26	97	18	8	26	8	53	39	44	BB
	744	843	26	12	24	94	12	4	23	94	52	33	40	BD, BE, BF
SM50Y	420	540	28	15	31	142	9	2						BG

表－2 溶接要領

T. P	BB	BD	BE	BF	BG
主 材	HT80	HT80	HT80	HT80	SM50Y
溶 接 法	SAW	MIG	2極SAW	SAW	SAW
材 料	US-49 MF-38	MGS-63B Ar80, CO ₂ 20	KW-103B KB-80c	US-49 MF-63	Y-D YF-15
開 先 形 状					
パ ス 数	1	3	1	1	1
電 流 (A)	730	350	先 900, 560	600	700
電 圧 (V)	31	26	先 28, 31	30	32
速度 (cm/min)	35	30, 40, 35	60	45	35
仮 付 け	CO ₂ MG-60	MAG MGS-50M	TIG MGS-63	MAG MGS-50M	MAG YM-28S

ク溶接を用いることによって、先行の電極のプールが凝固しないうちに後行の電極で再溶融することにより深い溶け込みを得るとともに、溶接割れが発生しないようにした。また、仮付けビード間はシール溶接を行なうことによって、溶け込み深さの凹凸をなくし、ルート部に塵埃などが入るのを防ぎ開先の清浄性を確保するようにした。BF試験体には通常の1電極サブマージーク溶接を用いた。非調質鋼を用いたBG試験体は疲労強度の及ぼすルートギャップの影響を調べるために、BG-1試験体の2溶接線ではルートギャップを製作基準の許容値である1mm程度とし、他の2溶接線及び他の試験体では0.5mm以下で製作を行なった。



図－2 溶接残留応力の測定結果

(2) 溶接残留応力の測定方法

調質鋼を用いた試験体について溶接残留応力を切断法によって測定した。測定した試験体は、疲労試験後のBB-1試験体とそれと同一タイプで疲労試験を行なわないBC試験体の2体である。測定のためにゲージレングスが3mmの防水型3軸ゲージをボックス内面と外面に貼り付け、最終的に約35mm×20mm×15mmの薄片に鋸で切断し、開放歪みを測定した。

(3) 疲労試験方法

疲労試験は動的能力4MNの油圧サーボ制御方式の試験機を用いた。最大荷重は5KNで、繰り返し速度は120～300cpmで試験を行なった。また、この試験で疲労亀裂の発生と進展性状を明らかにする目的で、疲労破面にビーチマークを残すために一定回数ごとに最小応力を上昇させて応力範囲を半減させた。このビーチマークやブローホールの観察には40倍の実体顕微鏡を用いた。

3. 残留応力の測定結果

ボックスの内面と外面の表面の残留応力の測定結果を図-2に示す。ボックスの内面と外面の残留応力はほとんど同じである。BC試験体では、最大引張残留応力はビード上に生じ、その大きさは420～470MPaであった。疲労試験後のBB-1試験体の残留応力は、試験を行なっていないBC試験体より小さく、ビード上とその付近で引張残留応力が大きく、その値は255～360MPaであった。BC試験体から切り出した溶着金属の降伏応力は約540MPaであり、BB-1試験体の疲労試験を行なった応力が167MPaであることから、その残留応力の低下は溶接ビード付近の降伏による応力の再配分によるものと考えられる。

4. 試験結果

(1) 疲労強度

疲労試験結果を表-3に示す。破断寿命 N_f には、ビーチマークを疲労破面に残すために応力範囲を半減した間の繰り返し数は含まれていない。写真-1～8に疲労破面を示す。図-3～5に応力範囲と破断寿命の関係を示す。これらの図には、改良溶接方法を用いたBD、BE及びBF試験体の50%非破壊確率線（ただし、板継ぎタブピースの溶接欠陥によって破断した試験結果は除く）とトラス構造試験体²⁾の5%、50%及び95%非破壊確率線も示す。また、調質鋼及び非調質鋼の設計寿命直線も示す。この継手の所

表-3 疲労試験結果

試験体	応力範囲 MPa	破断寿命 $\times 10^4$ 回	ビーチマーク試験		疲労亀裂の発生原因
			荷重半減回数	ビーチマークの数	
BB-1	171	119.6	9	9	ブローホール、2.5×1.8mm* ブローホール、4.1×3.4mm*
-2	146	199.2	5	5	
-3	124	>300			
BD-1	223	104.3			溶接ビード表面の凹凸 ブローホール、2.6×3.9mm* 表面近くの溶接欠陥、1.2×0.6mm*
-2	194	107.8	5	5	
-3	165	194	8	8	
BE-1	215	100.5	1 9	1 2	ルート部 ブローホール、1.1×0.5mm* ブローホール、1.4×0.7mm*
-2	188	127.9			
-3	160	218.7			
BF-1	198	80.7	1 5	8	タブピース溶接によるスラグ巻き込み 表面の溶接欠陥、1.0×0.3mm* タブピース溶接によるスラグ巻き込み ルート部
-2	194	135	5	5	
-3	194	74			
-4	165	315			
BG-1	172	118.7	3	3	ブローホール、5.5×4.0mm*
-2	178	>300	8	0	
	217	123.6	2	1	
-3	217	156.9	3	1	

*は溶接欠陥の高さと幅

**は再試験

属等級は、調質鋼では調質鋼B等級で、非調質鋼では非調質鋼A等級である。図-3は縦方向溶接継手の大型試験体のすべての試験結果をまとめたものである。調質鋼を用いた試験体の疲労強度は、トラス構造試験体（ボックス断面）、通常の溶接方法を用いたBB試験体（ボックス断面）、改良溶接方法を用いたBD、BE及びBF試験体（ボックス断面）、通常の溶接方法を用いたT試験体（板タイプ）²²の順で高くなっている。トラス構造とBB試験体では、すべてルート付近より発生した疲労亀裂によって破断したが、BD、BE、BF及びT試験体では溶接ビード表面より発生した疲労亀裂によって破断した試験体もある。これは、ルート付近の溶接欠陥（主にブローホール）を小さくすることによって疲労強度は向上するが、つぎに溶接ビード表面の溶接欠陥の影響が顕在化することを表わしている。したがって、この継手の疲労強度は、疲労亀裂がルートを起点とする場合と溶接ビードの表面を起点にする場合と、別々に評価する方が妥当であると考えられる。

図-4は、ルート付近より発生した疲労亀裂によって破断した試験体の試験結果をまとめたものである。調質鋼を用いた試験体に関して、後の5章で示すようにブローホールの大きさは、トラス構造試験体、BB試験体、改良溶接方法を用いた試験体、T試験体の順に小さくなっており、疲労強度もその順で高くなっている。このことはブローホールが小さくなることによって、この継手の疲労強度が向上することを明らかに示している。改良溶接方法を用いたボックス試験体の疲労強度は、調質鋼のA等級設計寿命曲線をぎりぎり満足している。通常の溶接方法を用いたT試験体のブローホールの大きさは、実構造物に近い形状で、できるだけ溶接欠陥を防ぐように改良した溶接方法を用いた試験体に比べて小さく、疲労強度も高い。このことは、T試験体のように単純理想化された板タイプ試験体では、実構造物の溶接状態を再現することができないので、その疲労強度を検証することが難しいと考えられる。非調質鋼を用いたBG試験体は、この継手の所属等級である非調質鋼のA等級をぎりぎり満足している。そのブローホールの大きさは、表-3に示すように調質鋼を使用したBB、BD、BE及びBF試験体のどれよりも大きい。

図-5は、溶接ビードの表面より発生した疲労亀裂によって破断した試験体の試験結果をまとめたものである。なお、手溶接隅肉溶接の棒継ぎによって生じたクレータより疲労亀裂の発生した実物大曲げ試験体⁵²を除き、すべて自動溶接である。自動溶接を用いた試験体の疲労強度は、調質鋼A等級を満足しないものもあるが、調質鋼B等級は十分満足する。すなわち、調質鋼を用いたこの継手は、改良溶接方法を用いた場合でB等級が適当である。ただし、手溶接の場合でクレータを残した場合にはB等級以下となる可能性があることを示している。

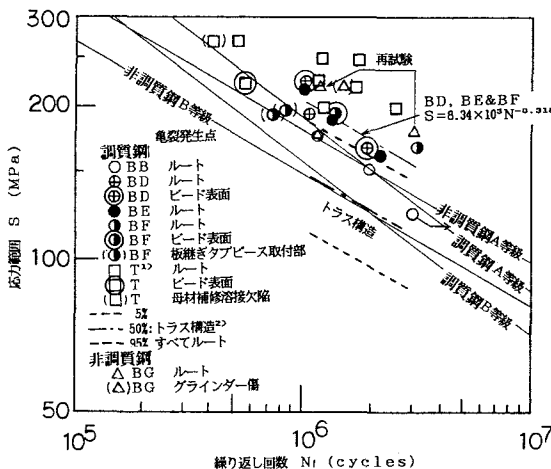


図-3 縦方向溶接継手の大型試験体の試験結果（ボックス断面試験体、トラス構造試験体及び板タイプ試験体）

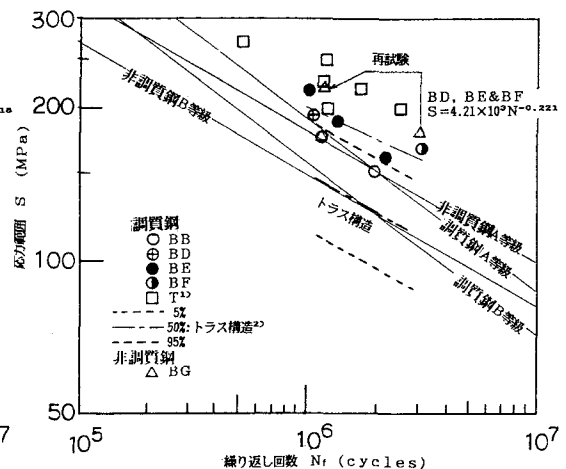


図-4 ルート部より発生した疲労亀裂によって破断した試験体の試験結果

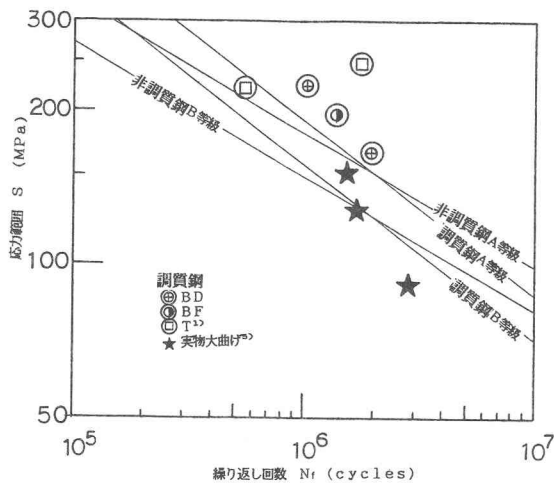


図-5 溶接ビード表面から発生した疲労亀裂によって破断した試験体の試験結果

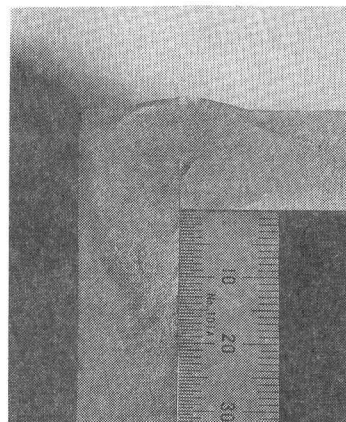


写真-1 BB-1 試験体

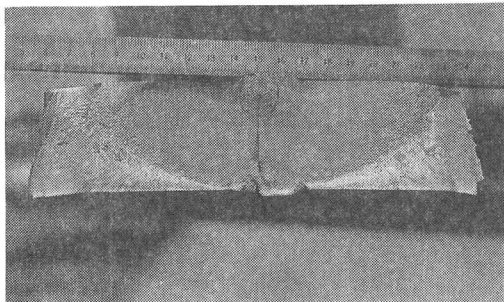


写真-2 T-8 試験体¹⁾ (ブローホール $0.6 \times 0.4 \text{ mm}$, $S=216 \text{ MPa}$, $N_f=1.7 \times 10^6$)

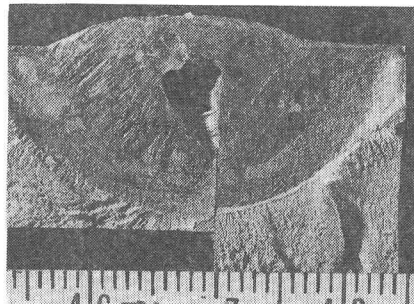


写真-3 F-1 試験体²⁾ ($S=114 \text{ MPa}$, $N_f=2.582 \times 10^6$)

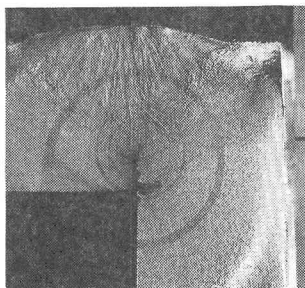


写真-4 BE-1 試験体
(ルートにブローホールがない)

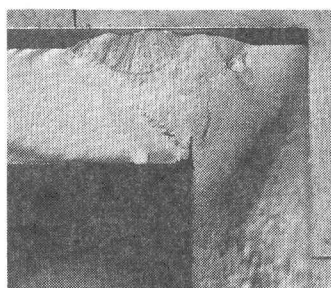


写真-5 BD-1 試験体 (溶接ビード表面の凹凸より亀裂発生)

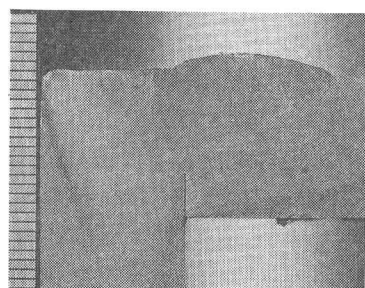


写真-6 BD-3 試験体 (スラグ巻き込みから亀裂発生)

(2) 疲労亀裂の発生状況

図-6に縦方向破断調査(図-7)による、高さ 0.5 mm 以上のブローホールと亀裂の発生したブローホールの頻度分布、及びブローホールの大きさと亀裂発生率の関係を、調質鋼を用いた試験体(BB、BD、BE及びBF試験体)と非調質鋼を用いた試験体(BG試験体)について別々に示す。図に示すようにブローホールの高さが高くなればなるほど、疲労亀裂の発生率が高くなる傾向にある。調質鋼を用いた試験体では、 1 mm 以下のブローホールからも疲労亀裂が発生しているが、非調質鋼を用いた試験体では 3 mm 未満のブローホールからは疲労亀裂が全く発生していない。このことは、調質鋼の方が切り欠き感受性がか

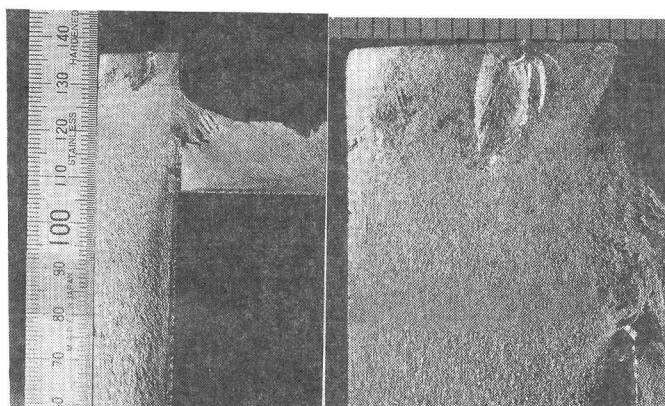


写真-7 BF-1 試験体（タブピースの取り付け溶接の溶接欠陥より亀裂発生）

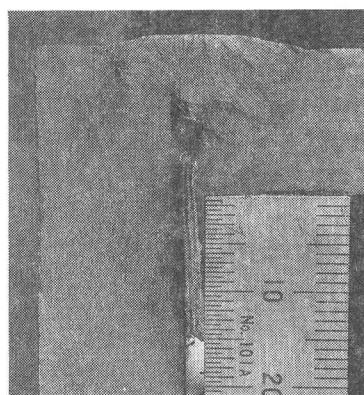


写真-8 BG-1 試験体（軟鋼）

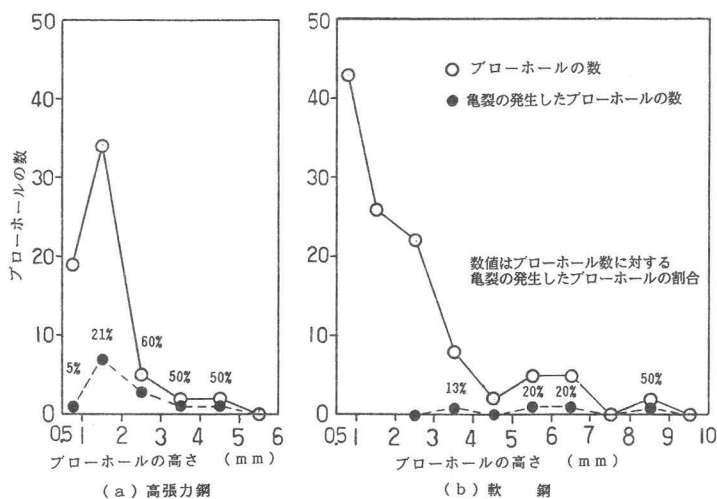


図-6 ブローホールの大きさと疲労亀裂発生の関係

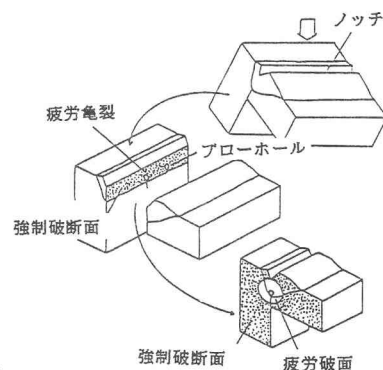


図-7 縦方向破断試験（亀裂はさらに横方向に破断させる）



写真-9 疲労亀裂の発生した小さなブローホール（BD-1 試験体）

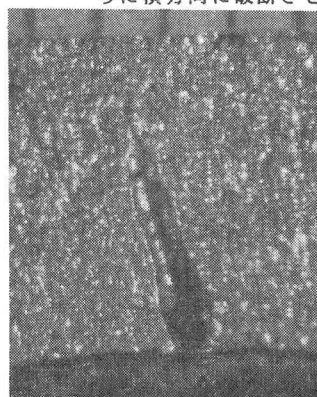


写真-10 亀裂の発生しなかった大きなブローホール（BB-1 試験体）

なり高いことを裏付けている。写真-9と10にブローホールの例を示す。写真-9では高さ約1mmのブローホールの上部の鋭い形状の部分より疲労亀裂が発生しており、写真-10ではブローホールの高さが

約4mmもあるにもかかわらず、形状が滑らかであるために疲労亀裂が発生していない。このことは、縦方向破断面が必ずしもブローホールの疲労亀裂発生起点や最大高さを露呈していないが、ブローホールから疲労亀裂が発生するかどうかは、その大きさだけでなく形状の影響を受けることを示している。BD、BE及びBF試験体は、その製作をかなり慎重に行なったにもかかわらず、ブローホールがかなりの数生じており、これをなくすことは現在の溶接技術では非常に困難であると考えられる。

ルート部のブローホール以外の疲労亀裂の発生原因としては、BD-1試験体では溶接ビード表面の凹凸(写真-5)、BD-3とBF-2試験体では溶接ビード表面のスラグ巻き込み(写真-6)であった。BF-1とBF-3試験体では、写真-7に示すように板継ぎ溶接のためのタブピースを取り付けた溶接の欠陥が母材に残り、そこから疲労亀裂が発生している。SEMによる観察とEPMA元素分析の結果、BF-1試験体ではブローホールとスラグ巻き込みが、BF-3試験体ではスラグ巻き込みが起点となったことが分かった。

5. ルート部の溶接欠陥と疲労強度の関係

(1) 繰返し数200万回疲労強度に換算する方法

表-3に示されているように、ブローホールから発生する疲労亀裂によって破断したほとんどの試験体において、荷重半減回数とビーチマークの本数が一致している。このことは、最初に荷重を半減した時期より前に、すなわち疲労試験を開始したごく初期の段階に疲労亀裂が発生したことを表わしている。ビーチマークを観測することによって、疲労亀裂がブローホール表面から複数発生し進展し、さらにそれらが合体することがわかった。亀裂の進展の初期の段階の性状は複雑で、その応力拡大係数を精度良く計算することは困難である。そこで、半径 a_i の円形の初期亀裂が最終亀裂半径 a_f まで進展する寿命を破壊力学の手法で計算した結果と試験結果の破断寿命とが同じになった場合、この a_i をその試験体の初期亀裂寸法と仮定した。この初期亀裂寸法によって繰返し回数200万回の疲労強度を求めた。また、破断時に亀裂の先端が板表面に達していない疲労亀裂(以降、潜在疲労亀裂)についても、図-8 疲労亀裂のモデル化と同様な仮定で疲労寿命を計算した。その仮定を下記に示す。

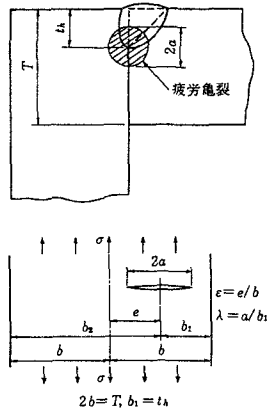


図-8 疲労亀裂のモデル化

① 疲労亀裂は、繰返し数のごく初期にルートより発生し円形に進展する。したがって、応力拡大係数は次式を用いた(図-8参照)。

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sec(\pi \lambda)}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sin(2 \lambda \epsilon)}{2 \lambda \epsilon}}$$

② 最終亀裂半径 a_f はルートから板表面までの距離(のど厚)の90%とした。

③ 応力拡大係数と亀裂進展速度の関係は次式を用いた。これは溶接残留応力のある継手の実験式⁸⁹⁾である。

$$\frac{da}{dN} = 5.47 \times 10^{-9} (\Delta K^3 - 2.5^3)$$

$$\frac{da}{dN} : \text{mm/cycle}, \Delta K : \text{MPa} \sqrt{m}$$

(2) ブローホールの大きさと疲労強度の関係

図-9及び10に、ルート部より発生した疲労亀裂の寿命を上記の方法で繰返し数200万回の疲労強度 S_{200} に換算した値と疲労破面におけるブローホールの面積 A_b 及び内接円の半径 a_{in} の関係をそれぞれ示す。ただし、明らかに溶け落ちが原因となった疲労亀裂は除外した。ブローホールが大きくなるにし

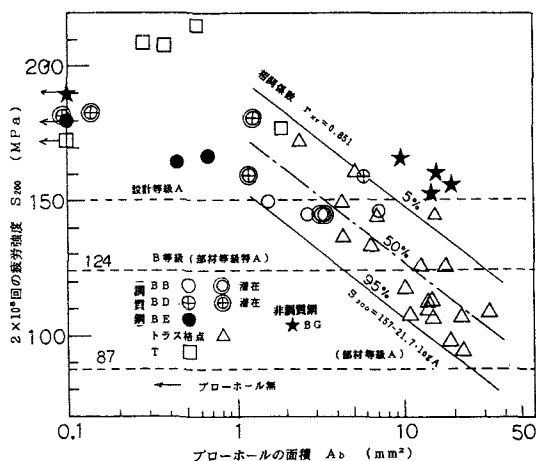
たがって疲労強度が低下することが図からわかる。しかし、ブローホールの面積と半径が、それぞれ 1 mm^2 と 0.4 mm 以下では疲労強度はかなり分散している。写真－4はBE－1試験体の破面である。この試験体はブローホールがないにもかかわらず、疲労強度 S_{200} は 180 MPa であった（図－9と10）。一方、それに比べて単純理想化した板タイプT試験体は、ブローホールが存在したにもかかわらずそれより疲労強度の高いものもある。このことは、ブローホールが小さくなると、溶接ルート部の溶け込み線の凹凸等の影響が顕在化するためと考えられる。

本四併用橋の製作におけるブローホールの大きさの許容値は、下記の根拠に基づいて決定した。

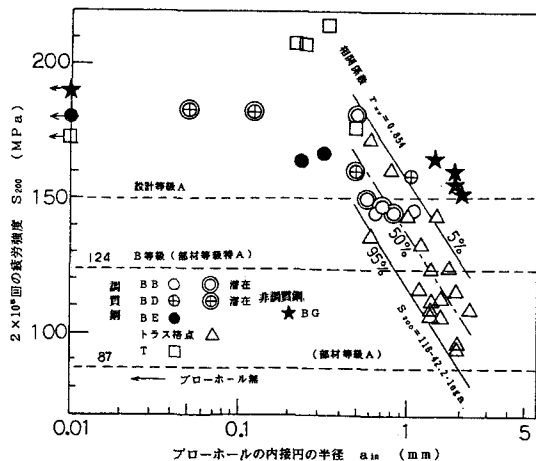
- ① 主にブローホールの大きさが角溶接の疲労強度に影響を及ぼす。
- ② 現在の溶接技術ではブローホールをなくすることは困難である。
- ③ 現在の非破壊検査技術では小さなブローホールを十分な精度で検知することは困難である。

調質鋼について、ブローホールの面積及び半径がそれぞれ 1 mm^2 及び 0.4 mm 以上のものについて、 A_b 及び a_{in} を確率変数として疲労強度 S_{200} が正規分布すると仮定して5%、50%及び95%非破壊確率線を求めた。その結果を図－9と10に示す。図に示すように、ブローホールの大きさを表わすパラメーターである A_b と a_{in} に対する疲労強度 S_{200} の相関係数はほとんどひとしく、また相関性が高い。調質鋼を使用したこの継手の所属等級であるB等級の繰返し回数200万回の許容応力範囲（ 124 MPa ）に対する非破壊確率95%のブローホールの面積及び半径の値は、それぞれ 4.6 mm^2 及び 0.83 mm である。これは、構造物の設計上の耐用年数の間に疲労亀裂が板厚表面に達しないためのブローホールの許容寸法と考えることができる。しかし、設計作用応力範囲が小さいトラス弦材もあるので、すべての弦材にその許容寸法を当て嵌めるのは不経済である。本四併用橋の調質鋼を使用した部材について表－4に示すように設計作用応力範囲と許容応力範囲の比によって3等級、すなわち特A、A及びB等級に分け、それぞれについて許容寸法を設定した。その製作は、従来の製作基準だけでなく、角溶接の継手性能を改善するための追加事項¹⁰⁾に基づいて行なわれた。さらに非破壊検査を行ない、許容寸法より大きなブローホールがあった場合には補修溶接を行なった。

非調質鋼の疲労強度 S_{200} の下限は、調質鋼の疲労強度の上限よりさらに高い。このことは、非調質鋼の方が切り欠き感受性がかなり鈍感であることを裏付けている。非調質鋼を用いたこの継手の所属等級であるA等級に対する疲労強度 S_{200} の下限のブローホールの面積及び半径は、それぞれ 15 mm^2 及び 2 mm である。しかし、非調質鋼は、鉄道橋で十分な実績があること、本四併用橋の非調質鋼を使用する部材は設計作用応力範囲が比較的に低いこと等を考慮して、ブローホールの許容寸法は特に定めなかった。



図－9 ブローホールの面積と疲労強度の関係

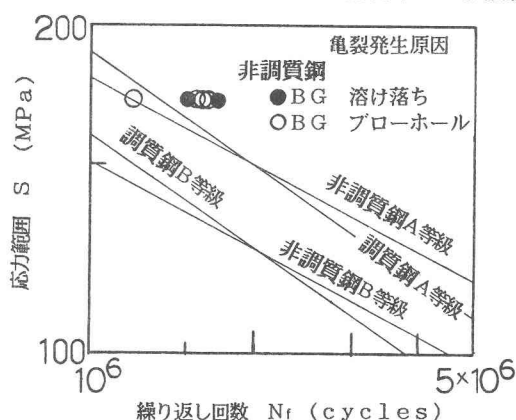


図－10 ブローホールの内接円の半径と疲労強度の関係

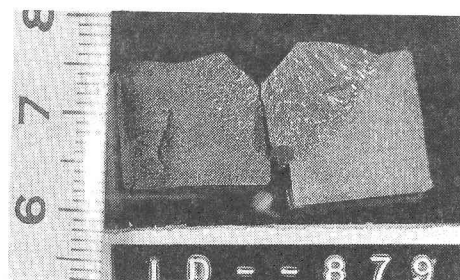
表－４ 本四併用橋の高張力鋼部材の製作におけるブローホールの大きさの許容値

部 材 等 級	ブローホールの大きさに許容値 (内接円の直径)	超音波検査
特 A 部材 ($Sr/Sa \geq 0.7$)	$d \leq 1.5\text{mm}$	すべての角溶接
A 部材 ($0.5 < Sr/Sa \leq 0.7$)	$d \leq 3.0\text{mm}$	すべての角溶接
B 部材 ($Sr/Sa \leq 0.5$)		20%の角溶接

注) Sr は設計作用応力範囲、 Sa は疲労許容応力範囲



図－１１ 溶け落ちと疲労強度の関係



写真－１１ 溶け落ちから発生した疲労亀裂
(BG-1試験体)

(３) 溶け落ちと疲労強度の関係

調質鋼を用いた試験体において、トラス構造試験体ではブローホールだけでなくルートの溶け落ちからも多数の疲労亀裂が発生したが、ルートギャップを0.5mm以下の条件で製作したBD、BE及びBE試験体では、溶け落ちが生じなかった。すなわち、前記の追加事項の一つであるルートギャップ0.5mm以下の条件で製作を行なった場合、疲労強度に影響を及ぼす溶け落ちを防げることを裏付けた。

非調質鋼を用いた試験体においても、ルートギャップを0.5mm以下で溶接した角溶接では溶け落ちが生じなかった。ギャップを製作基準の許容値である約1mmで溶接したBG-1試験体の2本の溶接線では溶け落ちがあり、写真－１１に示すように進展中の疲労亀裂が2箇所から発生した。これらの亀裂がルートから板表面までの距離の90%まで進展する寿命を前記の方法で算定した結果を図－１１に示す。比較のためにブローホールから発生した亀裂についても併記した。図のようにこの継手の所属等級であるA等級の設計寿命曲線に対して余裕がある。このことと前記のブローホールに関する考察から、本四橋で非調質鋼を用いた部材は、従来の製作基準に基づいて製作を行なった。

6. 結論

(１) 通常の溶接方法を用いた部分溶け込みグループ溶接継手では、主にブローホールが疲労亀裂の起点となって破断するが、溶接方法を改善することによってブローホールを小さくすることができる。しかし、それにともなって、他の溶接欠陥(主に溶接ビード表面の欠陥)から疲労亀裂が生じるようになる。調質鋼の場合は、この改良溶接方法を用いればその所属等級であるB等級の許容応力範囲を満足する。非調質鋼の場合は、通常の溶接でもその所属等級であるA等級の許容応力範囲を一般に満足する。

(２) ブローホールが生じないように細心の注意を払って試験体を製作したにもかかわらず、かなりのブローホールが生じた。現在の溶接技術では、実構造物の製作においてブローホールを完全になくすことは困難である。

(3) ブローホールの大きさ、すなわち面積や内接円の半径と疲労強度の相関性は大きい。ブローホールが小さくなるにしたがって、疲労強度は増加する。しかし、それが非常に小さくなるとルートの溶け込み線の凹凸の影響が顕在化し、ブローホールの大きさに対する疲労強度の相関性は非常に小さくなる。

(4) 繰り返し数200万回疲労強度に対する非破壊確率95%のブローホールの面積及び内接半径は、調質鋼の場合はその許容応力範囲124MPa (B等級) に対してそれぞれ4.6mm²及び0.83mmである。非調質鋼の場合はその許容応力範囲150MPa (A等級) に対してそれぞれ15mm²及び2mmである。ブローホールの大きさが同じ場合、非調質鋼の方が疲労強度がかなり高い。

参考文献

- 1) Miki, C., Tajima, J., Asahi, K. and Takenouchi, H. : Fatigue Strength of Large-Sized Longitudinal Butt Welds with Partial Penetration, 土木学会論文集, No.332, 1982-6.
- 2) Tajima, J., Takena, K., Miki, C. and Itoh, F. : Fatigue Strength of Truss Made of High Strength Steels, 土木学会論文集, No.341, 1981-1.
- 3) 国鉄 : 建造物設計標準(鋼とコンクリートとの合成鉄道橋)および解説, 1974-3.
- 4) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会 : 本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書, 1983-3.
- 5) Shimokawa, H., Takena, K., Fukazawa, M. and Miki, C. : A Test on the Full-Size Truss Cord, 土木学会論文集, No.325, 1982-4.
- 6) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Ohga, H. : Fatigue Strength of Longitudinal Welded Joints Containing Blowholes, 土木学会論文集, No.330, 1982-4.
- 7) 石田誠 : 亀裂の弾性解析と応力拡大係数、培風館, 1976-5.
- 8) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y., and Takena, K. : Influence of Residual Welding Stress on Fatigue Crack Growth Rate, 土木学会論文集, No.330, 1983-2.
- 9) 本州四国連絡橋公団 : 鋼橋等製作基準・同解説, 1977-3.
- 10) 例えば、本州四国連絡橋公団 : 岩黒島橋主桁の調質鋼を用いた部材のかど溶接に対する鋼橋等設計基準の特記事項, 1982-2.

(1988年10月12日受付)