

高張力鋼縦継手に含まれるルートブローホールの 疲労強度に及ぼす影響

EFFECT OF ROOT BLOWHOLES ON FATIGUE STRENGTH OF
LONGITUDINAL WELDED JOINTS IN HIGHSTRENGTH STEELS

夏 目 光 尋*・寺 田 博 昌**・深 沢 誠***

By Mitsuhiro NATSUME, Hiromasa TERADA
and Makoto FUKAZAWA

1. ま え が き

田島¹⁾、旭²⁾は 800 N/mm² 級高張力鋼の大型箱断面部材の疲労試験を行っている。その結果、疲労破壊は角の部分溶込み溶接のルートブローホールから生じており、その疲労強度は小型の縦ビード試験片のそれに比べてかなり低い値であることが指摘された。

疲労強度低下の原因としては、ブローホールの存在と残留応力（大型の方が高い）の2つが挙げられている。残留応力の疲労強度への影響はこれまでも論じられているが、角継手のブローホールの有無と疲労強度の関係については明らかでない。

このような考えから、著者らは、小型試験片を用いて、無欠陥のもの、故意にブローホールを発生させたものについて、疲労試験を行い、部分溶込み溶接のブローホールの疲労強度に及ぼす影響を定量的に明らかにしようとした。さらに、試験後に内部のブローホール全数について、精細に調査したが、その結果、破断に至っていないブローホールにも疲労亀裂の発生しているものが認められたので、疲労亀裂発生の有無をそのブローホールの大きさおよび負荷した応力範囲で整理し、3者の関係を明らかにした。これらについて報告する。

2. 試 験 片

箱断面部材の縦継手として、ここではレ形開先溶接と隅肉溶接を対象とした。試験片の形状は図-1に示したとおりである。試験の都合でいずれも突合せ形式としたが、隅肉溶接を想定したものはY形開先とし、トウ部も

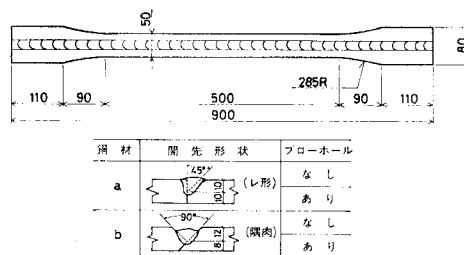


図-1 試験片の寸法形状

隅肉溶接と同じ状態にするため、板表面まで盛らないように配慮した。

また、試験片は小型ではあるが、試験機の許す範囲で平行部を長くしている。これは故意にブローホールを発生させる際、その範囲を長くするためである。

鋼材は 800 N/mm² 級高張力鋼（板厚 20 mm）で、その化学成分と機械的性質は、表-1 に示したとおりである。都合で2種類の材料を用いている（隅肉溶接用の方が若干強度が高い）。

溶接はサブマージアーク溶接による。溶接材料は表-2 に示すように 570 N/mm² 級のものである。溶接条件は 720 A, 32 V, 35 cm/min, 39.5 kJ/cm である。

故意にブローホールを発生させる試験片については、開先にウォッシュプライマを塗布して溶接した。一方、ブローホールを皆無にするには、連続的に仮付溶接してから本溶接する方法³⁾を採用した。

いずれの試験片についても溶接の放射線透過試験および超音波探傷試験（側面から斜角探傷）により、ブローホールの有無を確認してから試験に供した。

3. 試 験 結 果

試験はローゼンハウゼン型疲労試験機（40 tf）による。荷重は部分片振引張で下限応力は約 10 N/mm²、繰

* 正会員（株）横河橋梁製作所研究所

** 正会員（株）横河橋梁製作所研究所

***（株）横河橋梁製作所研究所

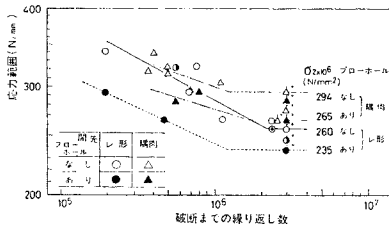
表一 供試鋼材の化学成分および機械的性質

鋼種	使用区分	化 学 成 分 (%)											機 械 的 性 質			
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq	耐 力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸 び (%)
HT 80	a	0.13	0.27	0.87	0.015	0.004	0.18	1.00	0.50	0.44	0.04	0.001	0.52	765	824	28
	b	0.12	0.27	0.87	0.008	0.001	0.18	1.07	0.51	0.41	0.04	0.001	0.51	824	873	31

aはレ形, bは隅肉試験に用いた。

表二 全溶着金属の化学成分および機械的性質

溶接材料	化 学 成 分 (%)							機 械 的 性 質		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	耐 力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸 び (%)
サブマージ溶接 φ4 60キロ用	0.12	0.03	2.02	0.014	0.007	-	0.48	536	630	25
手 溶 接 D5816 φ5	0.07	0.42	0.98	-	-	0.64	0.22	542	633	29



図二 疲労試験結果

返し速度は 500 回/min である。試験の結果を 図-2 に示す。試験データ数は少ないが、破断したものについては最小自乗法, 非破断のものについては、その応力範囲をとって S-N 線を引いた。ただし、隅肉溶接でブローホールあり(▲印)については、ブローホールなし(△印)と平行の線を仮定した。またこの試験データのうち、ブローホールが存在していても無欠陥部から破断したもの(●印)もあり、これは S-N 線を描くうえで無欠陥として扱った。

まず、レ形開先溶接の場合の 200 万回時間強度を S-N 線図から読み取ると、

- 無欠陥 260 N/mm²
- ブローホール 235 N/mm²

でありブローホールが存在すると約 9% 低い値になっている。図中 ● 印は、微小なブローホールが存在していたもので、試験片数が少なく S-N 線は引けないが、200 万回時間強度は無欠陥のものと同等とみなせる。

隅肉溶接の場合は、

- 無欠陥 294 N/mm²
- ブローホール 265 N/mm²

である。ブローホールが存在するものの方が低いが、その差は 10% であり、レ形開先溶接の場合とほぼ同じ程度の低下をしている。

全体に隅肉溶接の方が疲労強度は高くなっているが、この理由としては、母材の強度が高かった(耐力で約 60

N/mm²) ことが考えられる。

写真-1 に破断面の代表例を示す。左の 2 例はブローホールから疲労破断したものである。右の例はブローホールの存在しない場合

のもので、疲労亀裂は溶着金属ではなく、裏面母材部の角から発生している。



写真-1 疲労破面の代表例

4. ブローホールの形状および大きさと疲労亀裂の発生の関係

疲労試験ののち、ブローホールの存在する試験片については、縦に割って内部を精細に調べた。写真-2 はそのうち顕著にブローホールが存在していたものを、放射線透過写真とともに示したものである。

このようにして内部をみると、破断部のブローホールのほかにも、疲労亀裂が発生しているブローホール(矢印で示す)が認められる。図-3 は内部調査で疲労亀裂

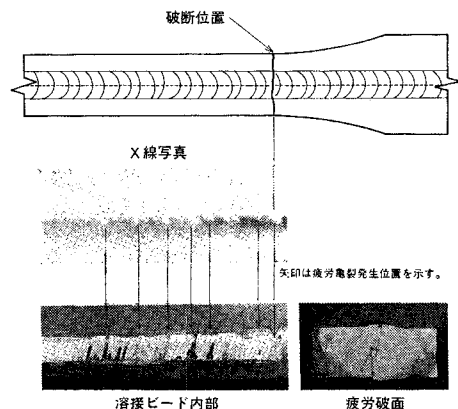


写真-2 ビード内部の状況

の発生していたブローホールをスケッチで示したものである。この図から次のことが導き出される。

- ① 亀裂の発生位置は、細長いパイプ状のブローホールでは側壁であり、太さが高さと同様程度大きさの球状のものでは頂部である。
- ② パイプ状のものには複数の亀裂が発生しているものもある。
- ③ 破断はパイプ状ブローホールから生じている。

この図には疲労亀裂の発生したもののみ示したが、発生していないものも含めた全数のブローホールについて、その形状・大きさ・亀裂発生の有無を試験片に負荷した応力範囲で整理することを試みた。図-4 がそれ

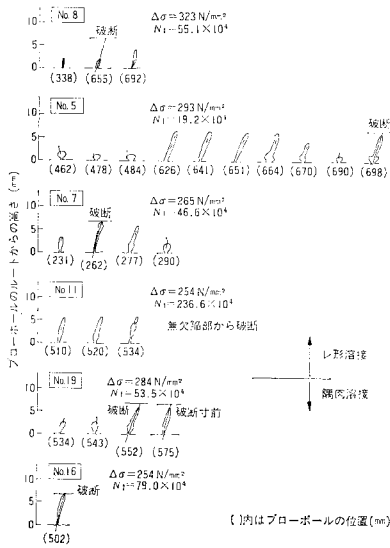


図-3 疲労亀裂の発生したブローホール (スケッチ)

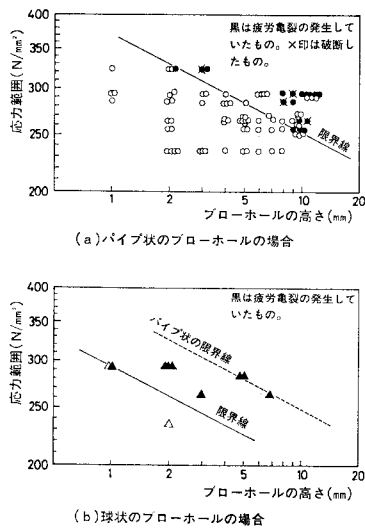


図-4 ブローホールの高さと疲労亀裂発生の限界応力振幅

で、ブローホールの大きさは高さで代表させ、疲労亀裂の発生していたものを黒塗り、していないものを白抜きでプロットしてある。ただし、それぞれの受けた繰返し数は同じではなく、19 万回から 300 万回のもが混在している。

このような整理は、繰返し数別に行うのがよいが、三木の研究⁹⁾によれば疲労亀裂はきわめて早い時期に発生している (たとえば 4 万回と 8 万回の間) ので、区別しなかった。

図-4 (a) はパイプ状のブローホールの場合で、ブローホールが大になるほど疲労亀裂は低い応力範囲で発生することがわかる。すなわち、疲労亀裂発生の有無の限界線は右下りに描くことができる。

図-4 (b) は球状のブローホールの場合を示している。今回の試験では球状のものは数が少なく、信頼できる限界線は描けないが、パイプ状のものよりは低いことがわかる。すなわち、球状のブローホールの方がパイプ状のものより、同じ大きさについて比べると、疲労亀裂が発生しやすいといえる。

しかし、前述のように破断はすべてパイプ状のものから生じている。これは、今回の試験では球状で大きいものがなかったこと、パイプ状では、複数の亀裂が発生しこれが連なりながら成長するので進展寿命が短くなる、などの理由が考えられる。

5. 試験片の残留応力

疲労試験に供しない試験片について残留応力を測定した。図-5 にその結果を示す。これによれば、残留応力はビード表面では 98 N/mm² と低いが、裏面中央 (母材) では 294 N/mm² と高い。裏面の高い原因としてガス炎による開先加工の影響の疑いもあったので、機械加工によるものを追加して測定したが、結果はほぼ同じであった。

著者らは、これとは別に、厚板で製作した箱断面部材

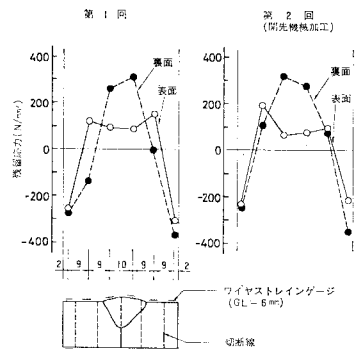


図-5 試験片の残留応力分布

の角継手 (700 N/mm² 級鋼, 板厚 36 mm, 開先深さ 12 mm) の残留応力を測定しているが, その結果では裏面の方が低い値であった. このように溶接部から遠ざかっていると低くなるが, 本試験片のように板厚 20 mm に対し, 10 mm の開先深さでは裏面も高温になるため, 残留応力が高くなり, またビード側が低いのは母材より強度の低い溶接材料を用いているためと解される.

無欠陥試験片の疲労亀裂発生点が裏面中央であることは, 裏面の残留応力が高いことによるためと考えられる.

6. 大型部材の疲労試験との比較

旭ら²⁾の行った大型箱断面供試体のルートのブローホールから疲労破断しているものを, 本試験の結果と比較した. 図-6 がそれで, 破線は 図-2 のレ形開先溶接でブローホールの存在しているものの S-N 線である. 旭らの論文²⁾のブローホールは, 破断面の写真から判断すと, 球状のものであり, 本試験の破断面のブローホールとは形状が異なっており, 同じ形状のもので比較しているわけではないが, 大型の方が 200 万回時間強度で 86 N/mm² も低い値である.

大型の方はビードの残留応力が無負荷のもので 422~471 N/mm², 疲労試験に供した (179 N/mm² 負荷) もので 255~333 N/mm² と報告されている²⁾.

疲労試験中は後者の値とみなせるので, この値を用いて大型と小型の 200 万回時間強度と残留応力を比較した. それを次に示す.

	200 万回時間強度	残留応力
大型箱断面供試体	149 N/mm ²	255~333 N/mm ²
小型試験片	235 N/mm ²	98 N/mm ²

平滑材中の残留応力は平均応力としての効果をもつといわれている³⁾が, 三木ら⁶⁾は溶接部に存在する引張残留応力は, 平均応力の効果以上に疲労強度を低下させている.

大型と小型の疲労強度の違いは主として残留応力の違いによるものと理解される.

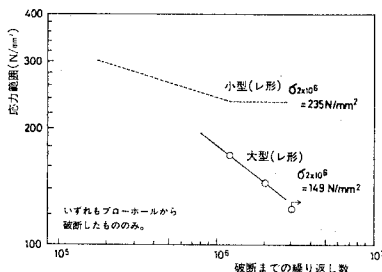


図-6 大型箱断面供試体の疲労試験結果²⁾との比較

7. まとめ

以上のように, 故意にブローホールを発生させた縦ビードの小型試験片を用いた疲労試験を行い, ブローホールの疲労強度に及ぼす影響を調べた. 結果を要約すると次のとおりになる.

(1) 200 万回時間強度は,

レ形開先溶接	無欠陥	260 N/mm ²
	ブローホール	235 N/mm ²
隅肉溶接	無欠陥	294 N/mm ²
	ブローホール	265 N/mm ²

であり, ブローホールが存在すると疲労強度は低下するが, その差は少なく 10% 程度である. また, 隅肉溶接の場合の方が高くなっているが, 母材の強度が異なっていたためと考えられる.

(2) 疲労試験後の内部調査で, 疲労破断部以外のブローホールには亀裂の発生しているものが認められた.

(3) ブローホールは, パイプ状 (高さ>太さ) と球状 (高さ≒太さ) に大別され, 疲労亀裂の発生はいずれの形状のものにも認められるが, 進展して破断に至っているのはパイプ状のもののみみられる.

(4) ブローホールが大きいほど, 疲労亀裂の発生限界応力範囲は低下する. 形状別にみると球状の方がパイプ状より限界値は低い. すなわち, 疲労亀裂は球状の方が発生しやすいが, パイプ状の方が進展しやすい. これは, パイプ状においては複数の亀裂が発生し, これらが連なりながら進展するためと考えられる.

(5) ブローホールが存在するレ形開先溶接について, 大型と比べると, 200 万回時間強度で 88 N/mm² 大型の方が低い. これは残留応力の影響によるものであると考えられる.

参考文献

- 1) 田島二郎・奥川淳志：80 キロ鋼を使用したトラス格点構造の疲労試験, 橋梁と基礎, 78-9, pp. 12~19.
- 2) 旭一穂・岸本良孝・帆足博明：箱断面供試体を用いた大型疲労試験, 橋梁と基礎, 80-6, pp. 18~23.
- 3) 岡久夫・能戸康次：トラス橋箱部材の角溶接の施工法, 溶接技術, 80-2, pp. 62~68.
- 4) Miki, C., F. Nishino, J. Tajima and Y. Kishimoto: Initiation and propagation of fatigue cracks in partially-penetrated longitudinal welds, Proceedings of JSCE, No. 312, pp. 129~140, Aug. 1981.
- 5) 児玉昭太郎：残留応力と疲れ強さ, 日本機械学会誌, Vol. 75, No. 642, pp. 1026~1033, 1972-7.
- 6) 西村俊夫・田島二郎・奥川淳志・三木千寿：レ形溶接縦方向継手を有する鋼部材の疲れ強さ, 土木学会論文報告集, Vol. 291, pp. 27~40, 1979-11.

(1982.6.10・受付)