

円孔を有する鋼板の疲労強度

上野谷 実* · 中村 雅樹*

The Fatigue Strength of Steel Plates with Circular Holes

Minoru UENOYA and Masaki NAKAMURA

ABSTRACT

Tensile fatigue strength of smooth steel plates with circular holes is investigated. Ratios of the hole diameter to the plate width, D/W , are 0.125, 0.25, 0.5 and 0.75. The fatigue strength in S-N curve is expressed by applied stresses in gross sections and average stresses in minimum sections.

In case of the applied stresses, the fatigue strength of the perforated plates with D/W ratios 0.125, 0.25, 0.5 and 0.75 is 0.54, 0.52, 0.37 and 0.14 times of the unperforated plates at 3×10^6 cycles respectively. For the average stresses, the fatigue strength of the perforated plates preserves 0.66 ~ 0.77 times of the unperforated plates regardless of the hole sizes.

1. まえがき

一般に構造物の疲労破壊は種々の応力集中によって生じ、これらの因子は次のように分類される。⁽¹⁾

- (1)幾何学的因子……切欠き(孔, 溝, ねじ山など) 試片あるいは部品において断面積が急激に変化する箇所
- (2)技術的因子……機械的あるいは化学的加工によって形成される製品の表面の欠陥の存在
- (3)金属学的因子……金属における第二相, 介在物, 内部欠陥(空隙, き裂など)の存在
- (4)使用上の因子……集中力の作用(歯車の歯やベアリングの接触応力など)

応力集中をもたらす因子はすべて金属の疲労強度を低下させる。そして機械や構造物の破壊は切欠き部から起ることが多いので、幾何学的因子の切欠きに着目した。

切欠き部の強度に関してはこれまでも多くの検討がなされている。小松原らは、SS41の鋼材におけるボルト継手およびリベット継手の疲労試験の中で、円孔径 D と試験片幅 W の比 $D/W=0.196$ の円孔板による疲労試験を行っている。また、安宅勝らは、各種鋼材から各種系列の試験片を製作して

いるが、その系列の中に $D/W=0.293$ の円孔切欠き試験片を含めて疲労試験を行っている。また、西川らは、各種鋼材に形状の異なる切欠きを作り疲労試験を行っているが、その中に $D/W=0.286$ の円孔板が入っている。これら一連の研究報告は円孔径が小さくその大きさも1種類か2種類であり、円孔径の大きさが種々変化した場合の疲労強度は明らかでない。

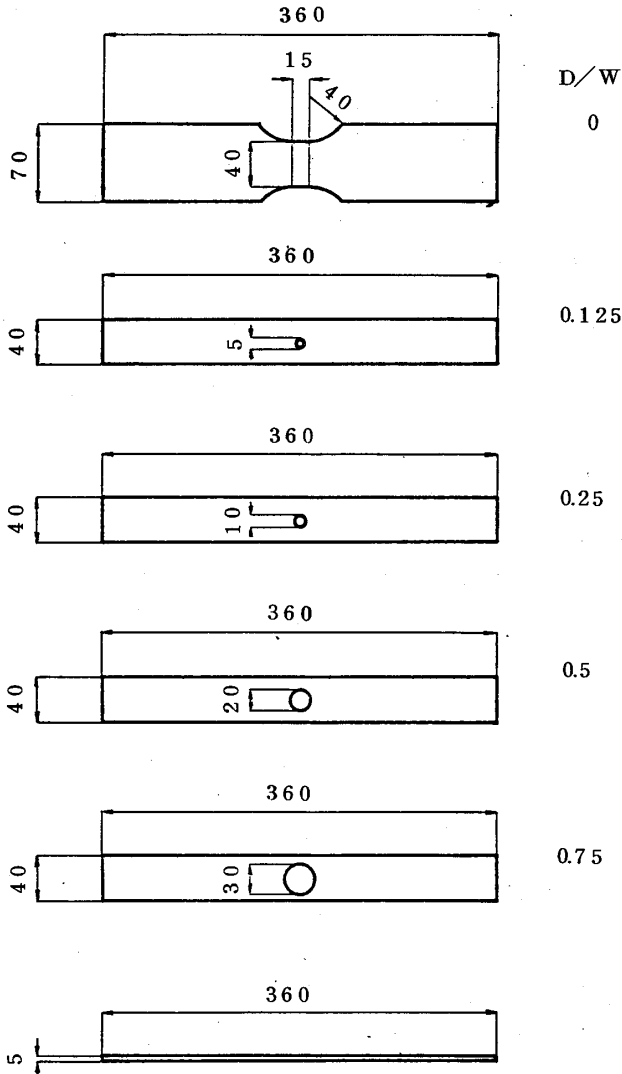
そこで、本論文は実働荷重による疲労強度および疲労領域を知る目的で、一般によく使用されている鋼材SS41に広範囲の円孔径 $D/W=0.125, 0.25, 0.5, 0.75$ を有する平滑平板試験片について、片振応力による引張疲労試験を行ない、切欠きが疲労強度に対して及ぼす影響を実験的に明らかにしようとするものである。

2. 試験片の形状と製作

試験片の形状を図1に示す。使用鋼材の化学成分と機械的性質を表1と表2に示す。試験片はJIS-B-0659準拠の3.2Sでフライス加工を施し、さらに#240で表面仕上げをした平滑材で、無孔板と有孔板は孔径 D と試験片幅 W の比 $D/W=0.125, 0.25, 0.5, 0.75$ の全部で5種類で

* 土木工学科

ある。



D: 孔径
W: 試験片幅

図 1 無孔および有孔試験片

表 1 使用鋼材の化学成分 (%)

| 鋼材 | C | Si | Mn | P | S | 製鉄所 |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| SS 41 | 0.14 | 0.15 | 0.68 | 0.02 | 0.01 | 川崎製鉄 |

表 2 使用鋼材の機械的性質

| 鋼材 | 試験片 | 降伏点 (kg/mm ²) | 引張強さ (kg/mm ²) | 伸び % |
|-------|-------|------------------------------|-------------------------------|---------|
| SS 41 | JIS1号 | 28.7 | 45.3 | 30 |

3. 疲労試験機

使用した疲労試験機は島津製作所製EHF-U10サーボパルス動的10tで試験機に試験片を取付けた状況を写真1に示す。

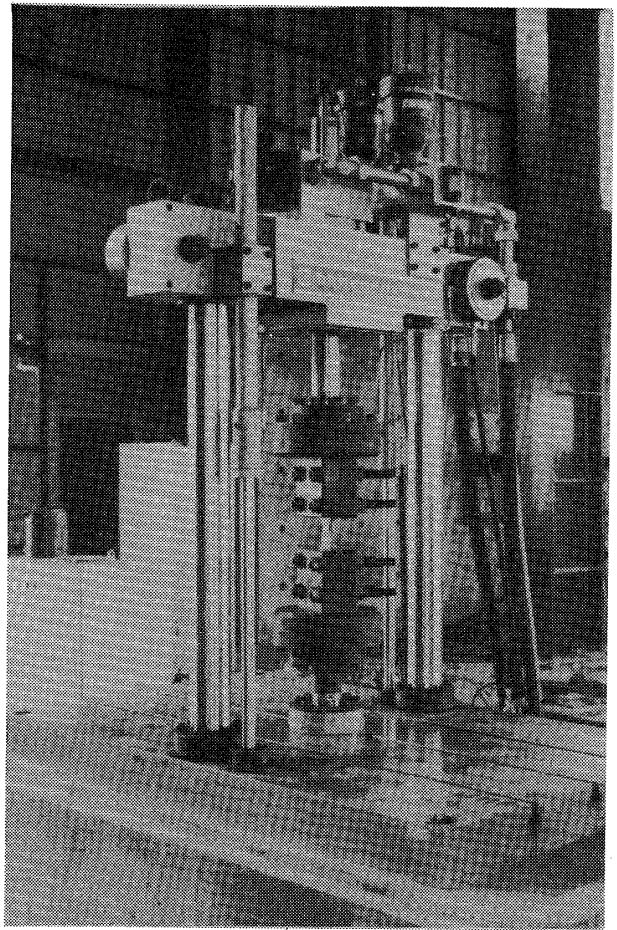


写真 1 疲労試験機

4. 疲労試験方法

繰り返し応力は下限を0とした片振り引張応力とし、正弦波を採用した。繰り返し速度は原則として20Hzで行なった。応力段階はJIS-Z-2273

に準じて行ない疲労限度は 300 万回とした。

5. 実験結果および考察

疲労試験は無孔板と円孔径の異なる 5 種類の有孔板より実施した。図上の平均線は回帰分析により求め線図とした。

5. 1 疲労強度

ここで、S-N 曲線の縦軸の応力の表わし方として図 2 に示すように、実働荷重 P を孔を含まない断面における断面積 A で除したものを総断面に対する片振応力 S_g ，および各有孔板それぞれの最小断面積 A_{min} で除したものを純断面に対する平均片振応力 S_n として次式で表わす。

$$S_g = \frac{P}{A} = \frac{P}{W \cdot t} \tag{1}$$

$$S_n = \frac{P}{A_{min}} = \frac{P}{(W - D)t} \tag{2}$$

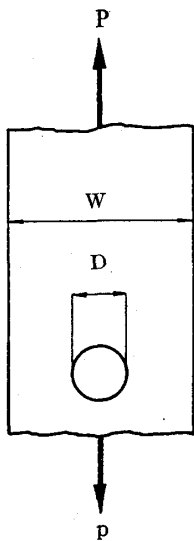


図 2 縦軸の応力の表わし方

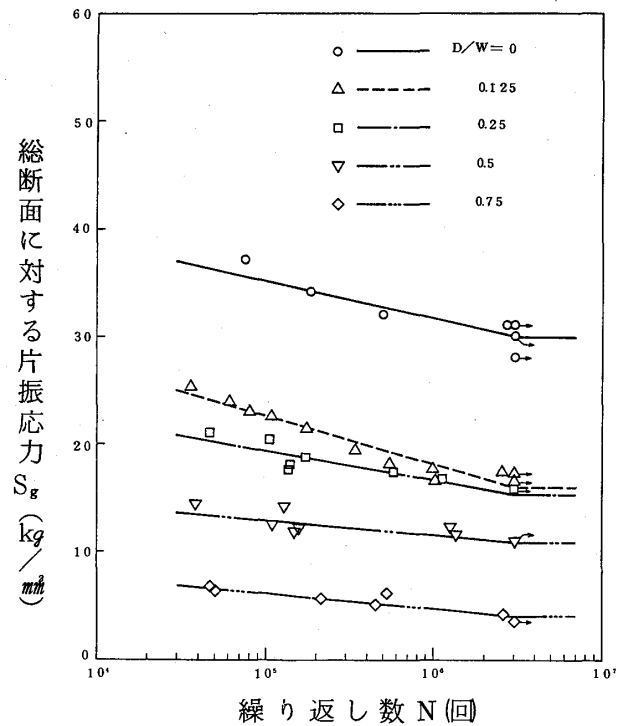


図 3 総断面に対する S-N 曲線

表 3 純断面積と 300 万回における疲労強度

| D / W | 0.125 | 0.25 | 0.5 | 0.75 |
|-------------|-------|------|------|------|
| 無孔板に対する純断面積 | 0.875 | 0.75 | 0.5 | 0.25 |
| 無孔板に対する疲労強度 | 0.54 | 0.52 | 0.37 | 0.14 |

総断面に対する S-N 曲線を片対数グラフにプロットして図 3 に示す。これより各試験片において円孔が大きくなると疲労強度は著しく低下している。ここで表 3 に示しているのは無孔板に対する各有孔板の純断面積と 300 万回疲労強度であるが、純断面積の減少以上に疲労強度が低下していることがわかる。これは円孔切欠きによる応力集中のため疲労強度が低下したと考えられる。また有孔板において S-N 曲線は円孔が小さいほど急峻である。

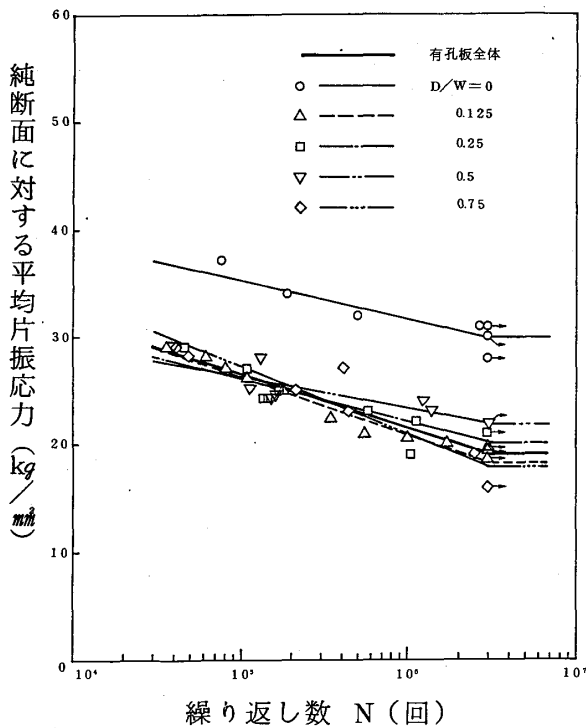


図 4 純断面に対する S-N 曲線

表 4 無孔板に対する有孔板の疲労強度

| D/W N(×10 ⁴) | 0.125 | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 最大最小 の差 |
|-----------------------------|-------|------|------|------|------------|
| 3 | 0.77 | 0.75 | 0.74 | 0.81 | 0.07 |
| 10 | 0.73 | 0.73 | 0.74 | 0.76 | 0.03 |
| 30 | 0.70 | 0.72 | 0.74 | 0.72 | 0.04 |
| 100 | 0.66 | 0.71 | 0.74 | 0.66 | 0.08 |
| 300 | 0.61 | 0.69 | 0.73 | 0.60 | 0.13 |

表 5 無孔板に対する全有孔板の疲労強度

| 回数 N(×10 ⁴) | 3 | 10 | 30 | 100 | 300 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|
| 全有孔板の 疲労強度 | 0.77 | 0.75 | 0.72 | 0.69 | 0.66 |

純断面に対する S-N 曲線を図 4 に示す。これより無孔板の S-N 曲線のみグラフ上側に位置し、有孔板の S-N 曲線はその下に重なり合って位置しているのがわかる。このように分布が明白に違うのは応力集中によるものであると考えられる。表 4 より有孔板の疲労強度の最大と最小の差は 3~13% であり、かなり密集した分布状態になっていることがわかる。これは単位面積に加わる平均応力の差がほとんどなく、多少のひらきがあるのはその差によるものであると考えられる。これらから片振応力を純断面の平均応力 S_n として考えた場合、円孔の大小による疲労強度の変化は小さいことがわかる。表 5 に各有孔板の結果を単一の直線で表わした S-N 曲線と無孔板の S-N 曲線を比較して、有孔板の疲労強度がどれだけ低下したかを示す。これによると純断面の平均応力で考えれば、繰返し回数 3~300 万回に対し有孔板は無孔板より疲労強度が 23~34% 低下している。

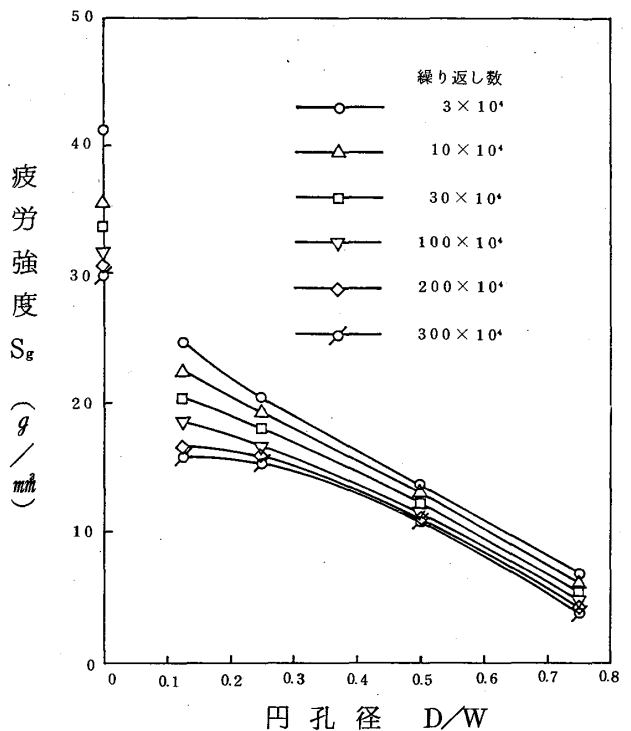


図 5 円孔径と疲労強度

図 5 は総断面の S-N 曲線における疲労強度と円孔径の関係を、繰返し回数 3, 10, 30, 100, 300 万回についてプロットしたものである。この図において無孔板と有孔板は曲線で結んでいない。これはいかに円孔が小さくても応力集中は存在

し、そのため疲労強度は低下し無孔板の疲労強度に収束し得ないからである。この図より円孔が大きくなれば疲労強度が著しく低下しているのがわかる。これは円孔が大きくなれば純断面積が小さくなり、総断面に対する片振応力 S_g は小さくなるため疲労強度が低下すると考えられる。また繰返し回数が増えることによっても疲労強度が低下している。この低下は試験片自体のもつ疲労限度の繰返し回数まで続く。疲労強度と有孔板の大きさにおける繰返し回数推移において、10万回はほぼ直線的であるが3万回では円孔が小さくなるほど上向きの曲線となっており、10万回より多い高サイクルでは下向きの曲線となっている。すなわち繰返し回数による疲労強度は $D/W=0.125$ の場合がもっとも低下している。

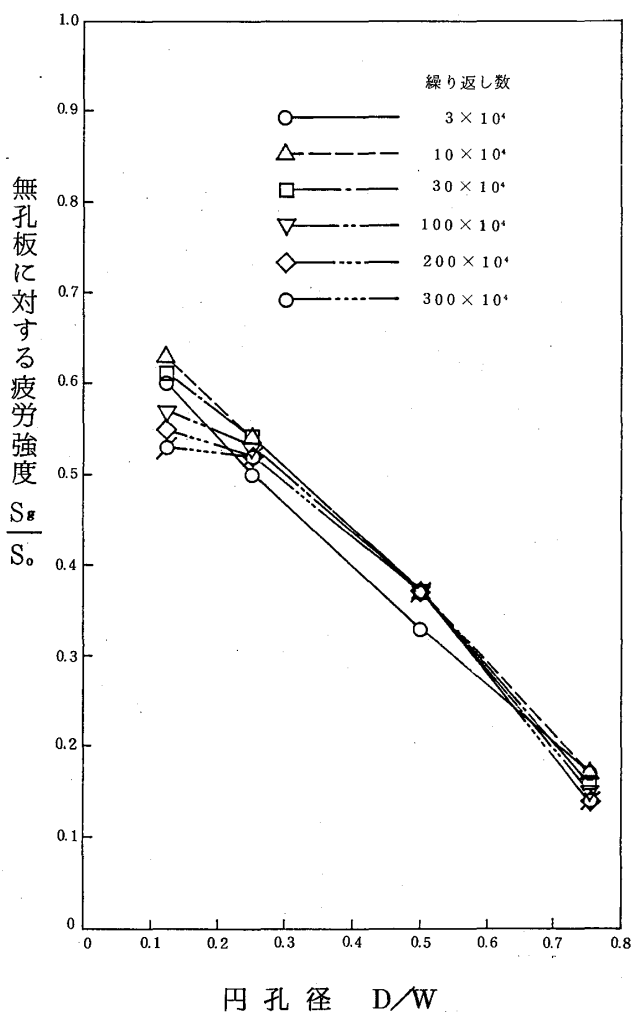


図 6 円孔径と無孔径に対する疲労強度

図 6 は無孔板の疲労強度 S_0 に対する円孔板の総断面に対する疲労強度 S_g の比 S_g / S_0 との関係、各繰返し回数についてプロットしたものである。この図より円孔が大きくなれば疲労強度比 S_g / S_0 が著しく低下していることがわかる。繰返し回数の違いによる疲労強度比 S_g / S_0 の低下は円孔径 $D/W=0.25, 0.5, 0.75$ の場合さほど低下していないし、 $D/W=0.125$ の場合も多少低下している程度である。

5. 2 疲労破壊面

写真 2, 3 は疲労破壊した試験片である。前者は無孔板であり後者は $D/W=0.125$ の有孔板である。この破壊面からは、疲労破壊、脆性破壊、延性破壊の三つの異なる領域が認められる。疲労破壊面はなめらかで絞ぼりをまったくともなわない直線的な部分であり、脆性破壊面は繰晶粒がはっきりと認められる部分で多少絞ぼりをともなっている。延性破壊面は大きな塑性変形と絞ぼりが生じている。

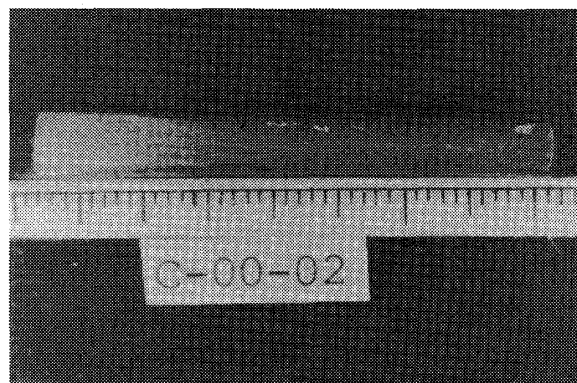


写真 2 疲労破壊面 $D/W=0$

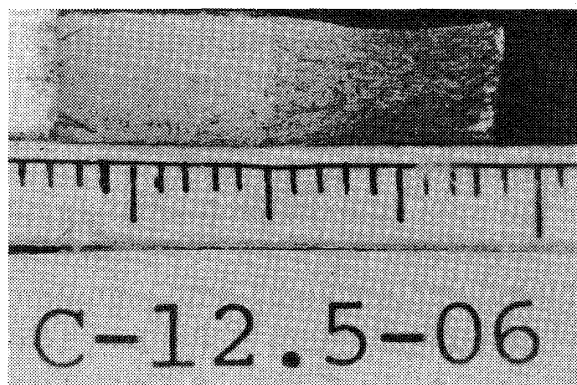
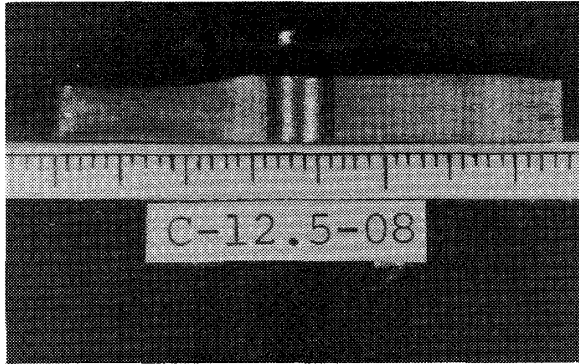
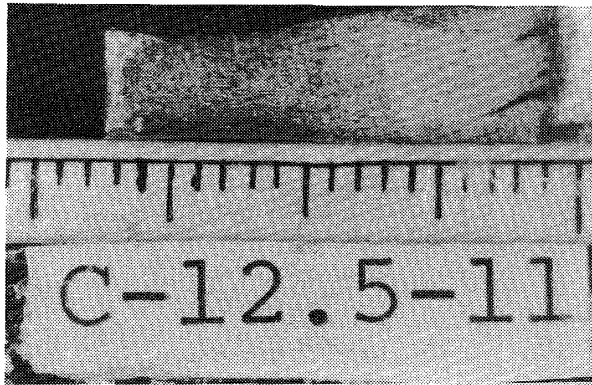


写真 3 疲労破壊面 $D/W=0.125$

写真4 疲労破壊面 $D/W = 0.125$ 写真5 疲労破壊面 $D/W = 0.125$

疲労破壊は通常破壊面の任意の一点より発生する。無孔試験片では、長方形断面の片稜から疲労き裂が発生している。また写真4に示すように有孔試験片では、最小断面近傍の孔縁よりき裂が発生し、成長している。そのき裂の発生状況は大別すると3種類に分けられる。第1は片断面に疲労破壊面のある場合、第2は両断面に疲労破壊面のある場合、第3はき裂の発生源が1箇所か、または写真5のように孔縁の数箇所よりき裂が発生している場合である。写真6は片断面のみ疲労破壊を起こしている破壊直前の写真であり、写真7は両断面に疲労破壊を起こしている破壊直前の写真である。表6にそれらの疲労き裂の発生状況を示す。これを見ると、円孔が小さいと両断面でき裂が発生し、円孔が大きいと片断面でき裂が発生している。また、き裂発生源数は $D/W = 0.25$, 0.5 , 0.75 においてほぼ同数であるが、 $D/W = 0.125$ では極端にき裂発生源が多い。

これは、円孔が小さい場合純断面積は大きくなり一方の断面でき裂が発生し、それが進んでも他方の断面は、なおき裂の発生しうる耐力を有すると考えられ、円孔が大きい場合縦断面積は小さくなり一方の断面でき裂が発生すると、すぐ破断に至るものと考えられる。

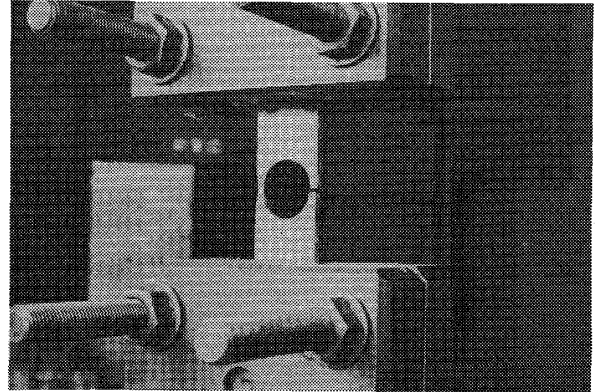
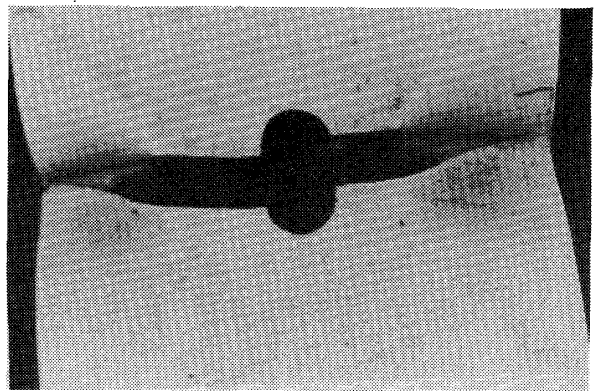
写真6 破壊直前 $D/W = 0.75$ 写真7 破壊直前 $D/W = 0.125$

表6 疲労き裂の発生状況

| 種類 | 疲労破壊面の位置 | | き裂発生源数 | |
|-------|----------|-----|--------|-----|
| | 片断面 | 両断面 | 数箇所 | 1箇所 |
| 0 | | | 1 | 2 |
| 0.125 | 0 | 10 | 10 | 0 |
| 0.25 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| 0.5 | 8 | 0 | 4 | 4 |
| 0.75 | 5 | 1 | 3 | 3 |

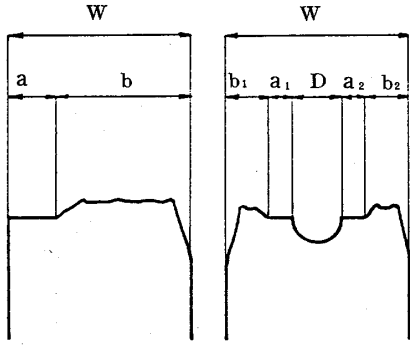


図 7 疲労き裂長さ

5. 3 疲労領域

ここでの疲労き裂長さ λ は図7に示すように断面の幅に対する疲労き裂長さの比である。疲労き裂長さ λ は次式で表わす。

無孔板の場合

$$\lambda_0 = \frac{a}{W} \quad (3)$$

有孔板の場合

$$\lambda_d = \frac{a_1 + a_2}{W - D} \quad (4)$$

ただし,

a, a_1, a_2 : 疲労き裂長さ

b, b_1, b_2 : 脆性および延性破壊長さ

図8には総断面に対する片振応力 S_g と疲労き裂長さ λ の関係を示す。無孔板は試験数が少ないので平均線を引いていない。また有孔板において平均線は300万回疲労強度までとした。各試験片において、低応力破壊のものに疲労き裂の長いことがわかる。これは、円孔による応力集中が低応力でも疲労き裂を発生させるためき裂が長くなると考えられる。また無孔板は極端に疲労き裂が短い、有孔板の疲労き裂長さは無孔板の4倍前後であり、円孔の大小による疲労き裂分布はほぼ同じである。

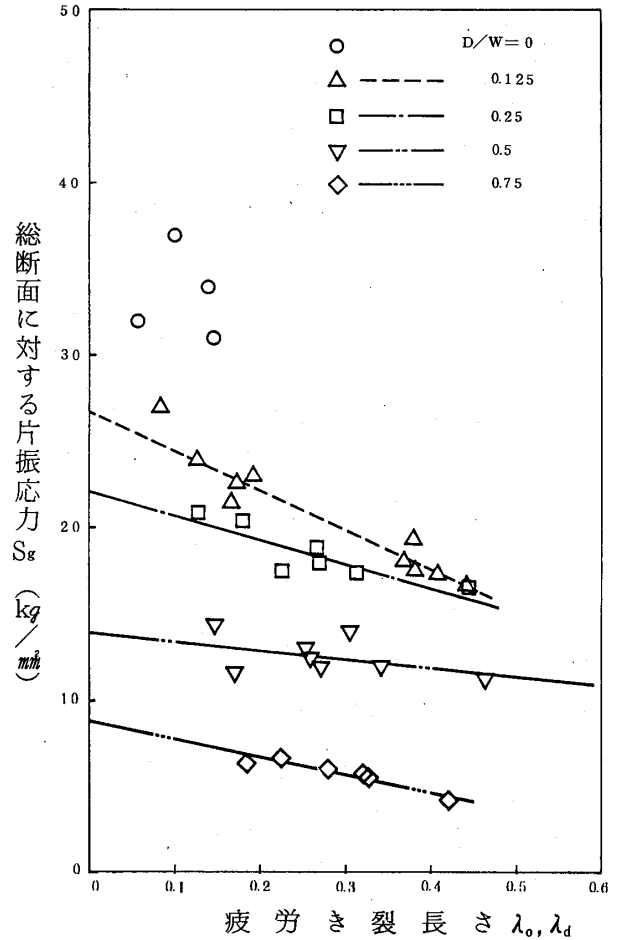


図 8 総断面に対する片振応力と疲労き裂長さの関係

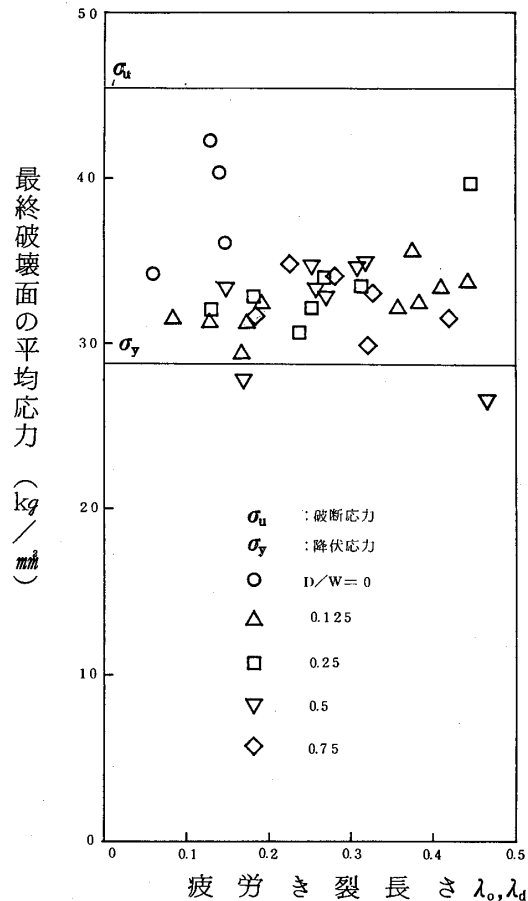


図 9 最終破壊面の平均応力と疲労き裂長さの関係

図9に最終破壊面（脆性破壊面と延性破壊面）の平均応力 σ_f と疲労き裂長さ a の関係を示す。ここで平均応力 σ_f は次式で表わす。

無孔板の場合

$$\sigma_f = \frac{P}{b \cdot t} \quad (5)$$

有孔板の場合

$$\sigma_f = \frac{P}{(b_1 + b_2)t} \quad (6)$$

最終破壊における残存部分の平均応力 σ_f は、降伏応力 σ_y と破断応力 σ_u の間である。また無孔板は有孔板よりわずかに大きい応力で破壊している。

6. まとめ

円孔切欠きを有する平滑平板試験片に片振応力による引張疲労破壊実験を行った結果次のようなことが明らかになった。

- (1) S-N曲線の縦軸の応力の表わし方として孔を含まない断面積で除したものを総断面に対する片振応力としたS-N曲線の場合、300万回疲労強度に限ると円孔径 $D/W = 0.125, 0.25, 0.5, 0.75$ に対して、無孔板に対する疲労強度は $0.54, 0.52, 0.37, 0.14$ と大きく低下する。また円孔径が小さいほど疲労強度の低下する割合が大きい。

- (2) S-N曲線の縦軸の応力の表わし方を各有孔板それぞれの最小断面積で除したものを純断面に対する平均片振応力としたS-N曲線の場合、有孔板の疲労強度は円孔径の大きさに関係なく無孔板の疲労強度の $0.66 \sim 0.77$ にあり疲労強度の変化は小さい。

- (3) 最終破壊における残存部分の平均応力は破断応力と降伏応力の間になる。また有孔板の疲労き裂長さは無孔板の疲労き裂長さの4倍前後である。

7. 参考文献

- (1) 横堀武夫監訳・市川昌弘編集：金属の疲労破壊，丸善株式会社，P.P. 15～20，1970
- (2) 小松原政次・田島二郎・大宮克己：高張力ボルト継手の疲労試験，鉄道技術研究報告，第232号，施設編86号，1961
- (3) 安宅勝・前田幸雄・波田凱夫：高張力鋼の疲労強度に関する実験的研究（第1報），土木学会第22回年次学術講演会講演概要集，第1部，P.P. 109-1～109-4，昭和42年10月
- (4) 西川和広・三木千寿・西村俊夫：低サイクル疲れにおける切欠き効果，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集，第1部，P.P. 619～620，昭和52年10月