

拡孔による孔明き鋼板の疲労強度の改善

IMPROVEMENT IN FATIGUE STRENGTH OF STEEL PLATE
WITH DRILLED HOLE DUE TO PLASTIC ENLARGEMENT OF HOLE

阿部英彦^{*}、西村豊雄^{**}、大江浩一^{***}

By Hidehiko ABE, Toyoo NISHIMURA and Hirokazu OOE

It was found as the result of a series of fatigue test conducted by the authors that the cycles to failure of specimens with drilled holes were increased by two to three times by enlarging the holes plastically by forcibly passing a drift pin.

In order to examine the possibility of effect of the compressive residual stress around the hole, induced by passing a drift pin, specimens which have been fully stress-relieved by annealing were also tested. Furthermore, FEM-analysis considering plastic deformation was tried.

For improvement of fatigue strength, the effects of smoothening and hardening of the hole edge due to passing a drift pin are conceivable, in addition to the effect of the compressive residual stresses.

This method may be effectively applied to the holes drilled for interrupting or delaying propagation of fatigue cracks, the holes drilled for drainage and so on.

1、はじめに

孔明き鋼板の疲労強度は平滑材のそれに比べて、弾性解析による応力集中係数から推測されるほどではないが、なお、相当低下することが知られている。本報告はドリル孔にドリフトピンを圧入して、塑性的に拡孔し、抜いたものが、疲労強度に対してどの様に影響するか実験的に研究したものである。その結果、ある量までの拡孔により明らかに改善効果が認められ、それ以上では余り効果が増さない事が判った。

水抜きなどのための空孔や疲労亀裂を止めるストップホールなどの疲労強度を向上するために有効な一方法として利用できるものと考えられる。なお、ストップホールから更にクラックが進展する時に拡孔することによりその速度をおくらせる効果があるという報告が西独にある¹⁾。

2、試験体の製作

2-1 拡孔試験体

疲労試験に用いた試験体の鋼材の物理的な性質は表-1のとおりでSM41の規格に合格している。また、その形状は図-1に示すとおりで、引張り方向と圧延方向を一致させた。中央に表-2に示す様な3種類の直径のドリル孔を明け、孔縁に生じた“まくれ”に対して面とりを行った。これにφ24.5mmのドリフトピンを圧入し、抜き通して、程度の異なる塑性加工を施した。板厚は10mmであり、ドリフトピンを垂直に圧入す

* 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科建設工学コース (〒321 宇都宮市石井町2753)
 ** 修士 日本電信電話株式会社 (〒694 鳥根県大田市大屋230)
 *** トピー工業株式会社 (〒328 栃木市万町230)

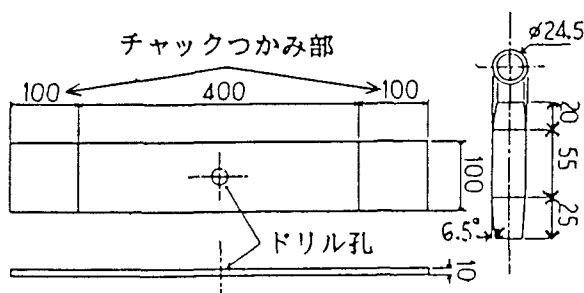


図-1 疲労試験体とドリフトピンの形状

表-1 鋼材の機械的性質

材料	降伏応力 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸び %
非熱処理	28	44	30
熱処理	26.4	39.8	47

表-2 試験体の種類

試験体 TYPE	円孔直径 (mm)	ピン 打ち込み	拡孔量 (mm)
1	24.0	—	0
2	24.0	○	0.5
3	23.5	○	1.0
4	23.0	○	1.5

ることを容易にし、また、孔周辺の落込みを少なくするために、ドリフトピンよりわずかに大きい径の孔を持った強固な治具を用いた。なお、試験体の表面は黒皮のままで、側面はガス切断による残留応力の影響を除去するために10mm切削した。

2-2、応力除去焼鈍

拡孔した試験体の結果と比較するために、これらの試験体を充分、焼鈍し、拡孔による残留応力を除去した試験体を製作した。焼鈍に際し、充分な応力除去を期待する反面、機械的性質の劣化、結晶の粗大化、材料の溶け落ちなどに注意しなければならないので、焼鈍の条件を決めるために温度や保持時間等を種々変えて試行した。その結果、表-1の様に降伏点や引張強さがやや低下し、伸びが増加したが、残留応力はほぼ完全に除去された。

3、試験方法

疲労試験機は島津製作所の電気油圧式、サーボ型疲労試験機、容量30tf (EHF-UB30-70L形)で応力波形は正弦波、繰返し速度は毎分600~720回、下限値1.52tfの片振り引張りとした。また、定期的に毎秒1回程度に速度を落として孔周辺に貼ったゲージの値を記録した。荷重制御で試験し、全断面破壊をもって疲れ寿命とみなした。なお、孔周縁に亀裂が始まってから全断面破壊までの寿命は比較的短い期間であった。

4、疲労試験の結果

すべての試験の結果を一つのS-N線図にまとめたものが図-2である。応力度範囲は原則として公称応力で23kgf/mm²、20kgf/mm²および18kgf/mm²の3種類とし、変動の最小応力度は2kgf/mm²とした。この図から明かな様に、拡孔したものは、ドリル孔明けのままのものよりすべて寿命が相当延びている。0.5mmの拡孔で相当顕著な効果が見られ、今回の拡孔の範囲では拡孔量が多い程、長寿命に移る傾向が認められたが、拡孔量1.0mmのものと1.5mmのもののS-N線図は接近していることから、ある程度以上、拡孔しても余り効果の向上は期待できないものと考えられ、その効果は3倍程度が限度であると思われる。

5、応力分布の計測と解析

5-1、目的

ドリフトピンを貫通し、降伏ひずみを越えて変形させることにより孔周辺に圧縮残留応力が生じるが、試験体に引張荷重が加わった場合、ドリルで孔を開けたままの場合にくらべて孔縁の引張り応力が小さくなり、それが疲労強度を向上させる可能性がある。そこで孔を開けた状態、ドリフトピンを貫通させた状態、試験体に引張荷重を加えた場合、およびこれを除荷した場合等に対して、ひずみ測定や解析を行った。

5-2、測定値の比較

まずドリルで孔をあけたまま（タイプ1）の残留応力を測定した。図-3の様に孔の中心を通る断面に沿って、孔縁面、板表面および板側面等に1ミリゲージを合計32枚貼り、0値を設定し、始め断面方向に切断し、次に縦方向に切込みを入れ、ゲージ近辺の残留応力を解放した状態のゲージの値をもって残留応力と考えた。切断作業はすべて手で丁寧にを行うので、非常に労力を要するが、横に切断した後と縦に刻みを入れた後との値を比べると余り差がなく、横に切断した時、實際上、残留応力の殆どが解放されることがわかった。むしろ縦に刻みを入れる際に鋸の歯が当たって曲げが入り、異常な値を示す例があった。

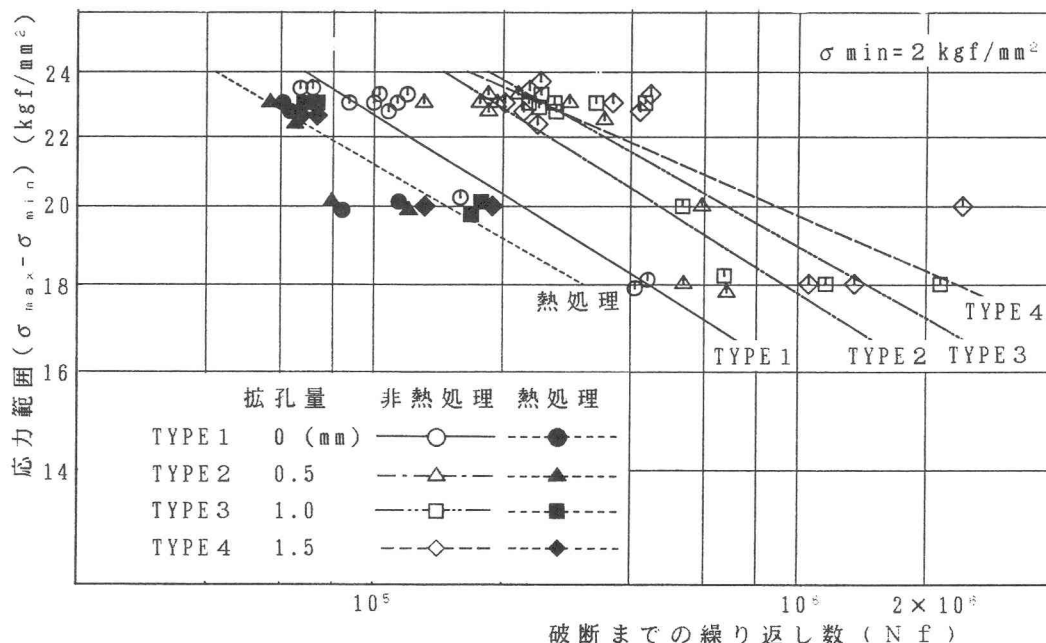


図-2 全試験体の疲労試験結果（S-N線図）

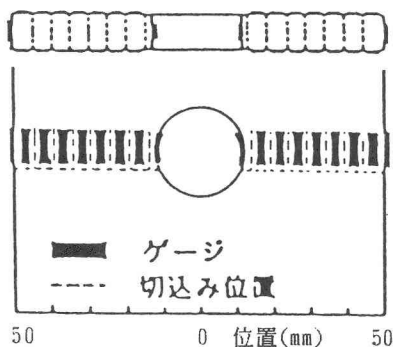


図-3 残留応力測定のための
ゲージ及び切込み位置

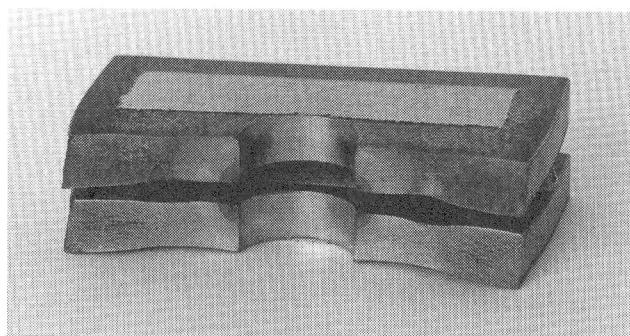


写真-1 疲労破断の例

図-4および図-5にタイプ1～4に対して測定した残留応力の分布およびその基となる応力解放のひずみの分布をそれぞれまとめて示す。ここで注目されるのはタイプ1、すなわちドリル孔明けのままでも意外に大きな残留応力が存在することで、ガス切断時の熱の影響部を除くために10ミリの幅、切断縁を機械切削したにもかかわらず、20kgf/mm²に及ぶ残留応力が残っている。ドリフトピンを貫通したタイプ2、3お

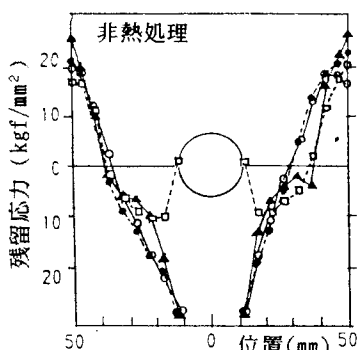


図-4 引張荷重を加える前の各タイプの
の残留応力の分布例
(図-5に基いて求める)

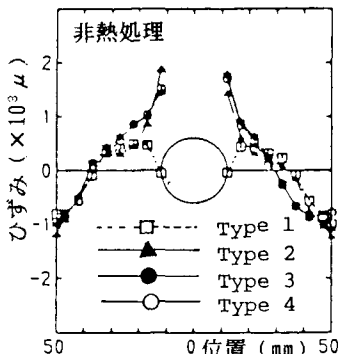


図-5 引張荷重を加える前の
各タイプの応力解放後
のゲージの読みの例

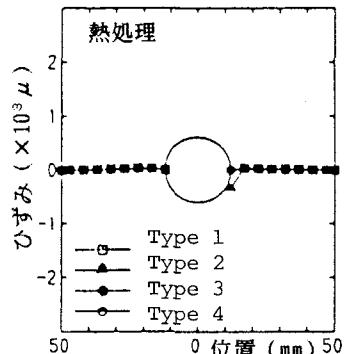


図-6 応力除去焼鈍を施した
各タイプの残留ひずみ
の分布例

よび4ではいずれも孔近辺で降伏点に達する大きさの圧縮応力が残っている。又、拡孔の度合が異なるのに3種類のタイプの間に残留応力の分布の差が余り認められず、しかも孔近辺を除いては、ドリフトピンを貫通しないタイプ1とも同様であり、主にガス切断による影響が残っていることがわかる。

しかしタイプ1の孔縁では応力が極めて小さいことや板の側面から疲労クラックの生じた試験体が無かったことから、ガス切断による残留応力は試験の結果に実質的な影響を与えないと考えられる。焼鈍したものについてはやはり、いずれのタイプもひずみがほとんど0である(図-6)ことから焼鈍処理は適切であったことが証明された。次に各試験体に19.0tfの引張荷重を加えて0に戻した状態の残留応力を同様の方法で求めた。図-7にその例を示すが、3種類のタイプとも類似の分布をしており、孔縁で20kgf/mm²前後の圧縮残留応力が認められた。

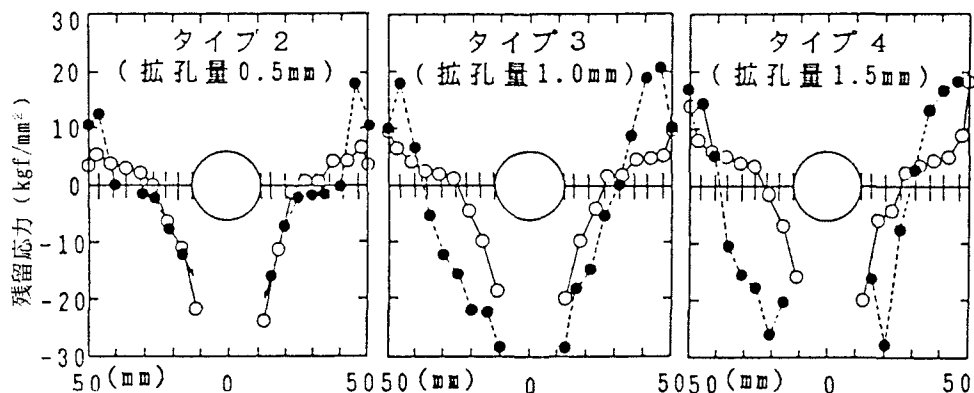


図-7 各タイプの試験体にピンを押し抜いた後(●-●)およびこれに19.0tfの
引張荷重を加えて除去した後(○-○)の残留応力の分布例

5-3、数値解析

試験体の各状態の応力を解析的に検討するために塑性を考慮した2次元FEM解析(文献2を参考)を試みに用いた。孔にピンを打込むと写真-2に示す様に降伏した部分では表面のミルスケールが剥げ落ち、リユースラインが明瞭に現れるが、この現象やゲージによる測定値から判断すると、実際に降伏ひずみを越える領域は2次元解析で求められるものよりもかなり小さい様である。即ちピンを打込むと実際には孔近傍の板厚が増して3次的にひずみが起こり、降伏領域は比較的孔の近くに限られる傾向があるが、これは板の厚み、降伏点、拡孔量等に影響されると思われる。以上の事から、2次元の解析適用の妥当性には少々

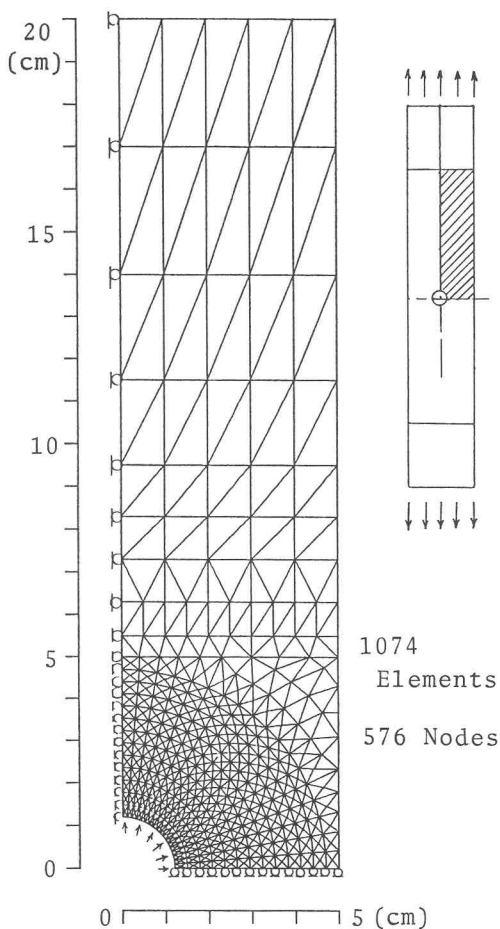


図-8 FEM解析のメッシュの切り方および支持条件

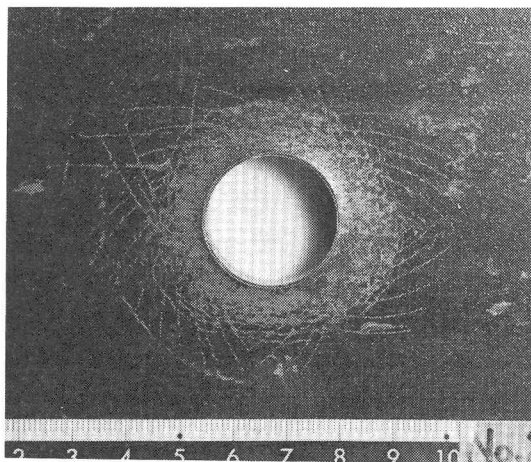


写真-2 ピン押込みで生じた
リュードスラインの例

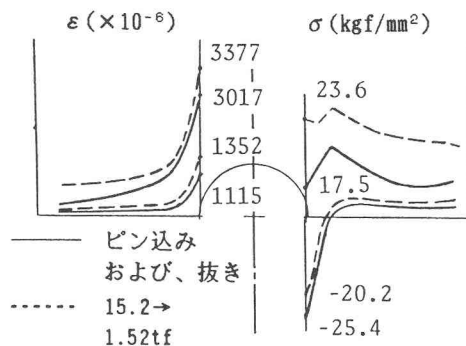


図-9 タイプ2のFEM解析値
($P=15.2 \rightarrow 1.52\text{tf}$)

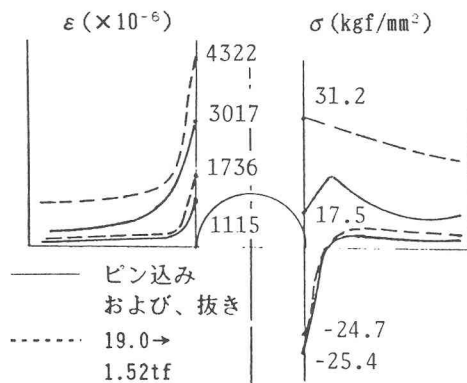


図-10 タイプ2のFEM解析値
($P=19.0 \rightarrow 1.52\text{tf}$)

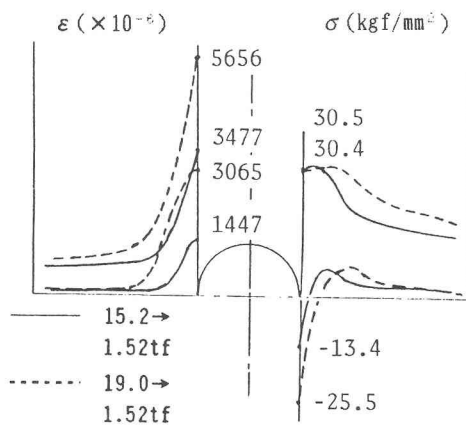


図-11 タイプ1のFEM解析値
($P=15.2 \rightarrow 1.52\text{tf}$ および
 $P=19.0 \rightarrow 1.52\text{tf}$)

疑問の余地はあるが、傾向は掴めると思われるので以下に結果の例を示す。

2次元の解析モデルは試験体の形の対称性から図-8の様に1/4部分に着目し、孔周辺部のメッシュは細かくした。降伏応力を 28kgf/mm^2 、弾性係数を $21,000\text{kgf/mm}^2$ 、ポアソン比を0.3とした。又、応力とひずみの関係は降伏以降は1:105の勾配を持つ直線と仮定し、Von Misesの降伏条件式を適用した。

ピンの押込みの影響が実際には余り遠くに及ばないことへの補正の一つの試みとして、実際の試験体を観察して推測された降伏領域と2次元解析での降伏領域が近似する様に解析時に与える拡孔量を選んだ。

図-9および図-10はタイプ2(0.5mm拡孔)の試験体に引張荷重をそれぞれ15.2tfおよび19.0tfを加えた場合で、最小荷重は共に1.52tfである。孔の左はひずみで右は応力度を示す。なお、ガス切断による残留応力は加味されていない。図-11は同じくドリル孔あけのままのタイプ1に引張荷重を与えた場合である。

5-4、荷重繰り返し中の応力変化

疲労試験中に定期的に低速(1ヘルツ)にしてひずみ変動の状態を調べたが、興味ある現象がみられた。図-12はタイプ1(孔あけのまま)およびタイプ3(1.0mm拡孔)に19tfをくり返したときの例である。孔面(A点)の測定値が大きいのは当然であるが、特にタイプ1では初期にひずみ変動の量が少しずつ増えながら平行的に急上昇し、だんだん安定することである。この原因は主として繰り返し速度が関係する様で、ひずみが大きく、かつ、速度が高いと試験体の塑性延びに対し試験機のポンプの油が充分送られる前に除荷が始まるので、サイクルを追ってだんだん試験体が伸びる様になるのではないかと推測される。タイプ1の孔縁以外の点や、タイプ3のようにドリフトピンにより予ひずみが与えられたものは引っ張り荷重によるひずみの最高値が低いので、この様な現象が顕著でない。J.M.Potterによれば繰り返し荷重により初期に導入された圧縮残留応力が減少する理由で、類似の現象が現れるという報告がある²⁾が、タイプ1の場合、孔縁に圧縮残留応力はなく、又、同様の現象は応力除去焼鈍した平滑板で行った補足的な試験でも確認された。しかし引張荷重が相当低い場合にはピン押し抜きによる圧縮残留応力減少の影響が現れるかも知れない。

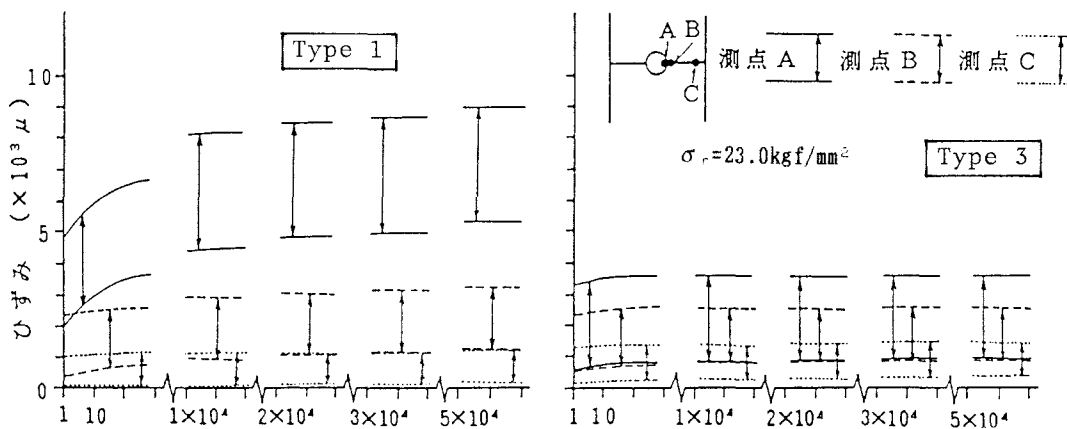


図-12 荷重繰り返し中のひずみの変化の例(タイプ1およびタイプ3)

6、考察

図-2に示すS-N曲線からわかる様にドリフトピンを貫通することにより疲労寿命が3倍近く伸びることは実験的に明らかになったが、その理由について以下、考察する。

影響を与える要素として次の4点等が考えられる。即ち、①孔周辺の塑性変形によりピンを抜いた後、圧縮残留応力が現れるので、試験体に引張荷重が加わった時、孔縁の引張応力が減少する、②ドリル孔の表面は切りこを喰んで必ずしも平滑でないが、硬いドリフトピンを押し込むことにより、孔縁表面が平滑になる、③打込んで孔縁を強力にこすることにより、表面が硬化する、④拡孔することにより、孔縁表面に微細なク

ラックが生じる、などが考えられる。

④のクラックはもし生じれば疲労強度を大きく低下させる可能性があるが、今回の拡孔の程度や試験の結果からはクラックは発生していなかったと推測される。しかし拡孔の程度を決めるために留意すべき重要な点であろう。

①、②および③は量的にはともかく、いずれも疲労強度の改善に役立つ要素であると考えられる。②については、ピンを通した後に焼鈍した試験体がドリル孔で孔明けたままのものと同じ群れの中に入っていることから、余り影響を持たない可能性もある。

③の影響については焼鈍により、残留応力が消失すると共に硬化した表面も軟化するので、焼鈍により疲労強度が下がった理由の中にこれも含まれている可能性がある。

焼鈍したものはS-N線図ですべてのタイプが孔を明けたままのもの（タイプ1）と同じ群れの中にあるが、その中でもどちらかという低い方に属するので、焼鈍により、引張強さや降伏点が若干、低下したことが、更に疲労強度を低下させている可能性がある。

2-1において述べた様に、試験体の製作においてガス切断線を10mmも切削除去したのに、なお、20kgf/mm²に及ぶ引張り残留応力が存在することは予想外であったが、いずれの試験体も孔からクラックが生じたので、疲労試験の結果にこれは影響しなかったと考えられる。

ピン押し抜きによる残留応力について図-4に示す様にタイプ2~4は拡孔の程度が0.5mm~1.5mmと異なるものの、応力分布には余り差がない事、しかも孔縁から10数mm程度から応力分布が拡孔しないタイプ1の分布とほとんど重なっていることから、塑性化の領域も孔縁から20mm程度までと考えられる。拡孔の程度を少し変えても孔周辺の板厚のふくらみでひずみが逃げてしまうものと思われる。これも疲労強度の向上が0.5mmで著しいが、それ以上では効果が余り増さない原因となっているかも知れない。

2次元のFEM解析ではこの厚み方向の変形が考慮されていないので、実態と異なるし、又、板厚の差の影響も現れてこない。3次元で、かつ、塑性を考慮したFEM解析も目下、試みているが、膨大な時間と費用がかかるので、たとえ各点の正確なひずみや応力が計算できたとしてもそれが疲労強度の推定に結びつく方法が確立されない限り、余り意味が無いと思われる。

今回は試験体を観察し、2次元のFEMで塑性域がほぼ等しくなる様に孔を押し拡げるという方法を便宜的にとったが、図-9のピン押し抜き後のプレートの残留ひずみや残留応力の分布は図-4および図-5の例からガスカットの影響を除いたものに近似している。

この試験体を次に19.0tfで引張って1.52tfに戻した場合と、15.2tfで引張って1.52tfに戻した場合についてタイプ1とタイプ2に対して孔縁でのひずみや応力度の変化をまとめると表-3のようになる。タイプ2に19.0tfの引張荷重を加えた後の残留応力（-24.7kgf/mm²）は図-7のタイプ2に示す孔縁の応力と比較的によく合っている（ただし、解析ではPminは0でなく1.52tf）。又、両タイプを比較すると、P=15.2→1.52tfの時、共に差は43.8kgf/mm²であり、P=19.0→1.52tfの時、56.0kgf/mm²および55.9kgf/mm²でほとんど等しく、かつ両荷重ケースの応力変動の比(1.28)は荷重変動量の比と等しくなっている。

又、変動応力の中、引張りの成分を比較

すると、15.2tf→1.52tfの時はそれぞれ30.4kgf/mm²および23.6kgf/mm²で量的にはともかく、ピン押し抜きによる残留圧縮応力の効果が残ってタイプ2はタイプ1より寿命が延びた事が推測される。一方、19.0tf→1.52tfの時はそれぞれ30.5kgf/mm²および31.2kgf/mm²となり、ほとんど等しいが、この場合は19.0tfで引張ることによりピン押し抜きによる残留応力は消失し、1.52tfに戻した時の残留応力は両タイプ共、等しくなったと考えられるので、応

表-3 FEM解析の結果例（ $\epsilon : \times 10^6$ $\sigma : \text{kgf/mm}^2$ ）

	P:tf		加	除	差	平均
タイプ1	P=15.2	ϵ	3477	1447	2030	2462
	→1.52	σ	30.4	-13.4	43.8	8.5
	P=19.2	ϵ	5656	3065	2591	4361
	→1.52	σ	30.5	-25.5	56.0	2.5
タイプ2	ピン挿入	ϵ	3017	1115	1902	
		σ	17.5	-25.4	49.9	
	P=15.2	ϵ	3377	1352	2025	2365
	→1.52	σ	23.6	-20.2	43.8	1.7
	P=19.0	ϵ	4322	1736	2586	3029
	→1.52	σ	31.2	-24.7	55.9	3.3

力的にはタイプ2の寿命の延びに対する証明が付き難い。ただし、ひずみの変動の位置はタイプ2の方が大分、低い所に下りているので、これが効果をもたらしたのであろうか。

しかしながら応力除去焼鈍により、寿命は拡孔しないものと同程度になったことは事実なので、拡孔による残留ひずみや応力の影響をここですっきり否定してしまうことはできない。

7、結論

本実験の範囲で次の事が明らかになった。

- (1) ドリル孔にドリフトピンを押し抜き拡孔することにより、寿命が2～3倍に延びる。又、0.5mmの拡孔で効果が著しく、それ以上では余り効果が見られない。
- (2) 応力除去焼鈍することにより、疲労強度はピンを押し抜かないものと同程度の値に戻る。
- (3) 測定や解析によると、ドリフトピンの押し抜きによる孔周辺の残留応力は或る程度以上の引張荷重ではほとんど消滅する様である。
- (4) 寿命の延伸の原因としてドリフトピンを押し込むことにより、孔縁が硬化したり、平滑化されたことも考えられる。
- (5) ドリフトピンの押し抜きにより孔周辺は厚みが増し、塑性領域が遠くに及ばなくなる傾向があるが、塑性を考慮した2次元FEM解析で、塑性領域が実験のそれと同程度になる様に拡孔の条件を与えることにより、応力分布は実験値と近似する。しかしより正確には塑性を考慮した3次元FEMにより解析するのが良いと考えられる。

8、おわりに

ドリフトピンの押し抜きにより、疲労寿命が延びることが実験的に明かとなったが、その理由として残留応力のみでは説明が充分つかない。しかしこの方法は疲労クラックのストップホールや水抜き孔などドリル孔の疲労強度を向上するために、種々実用に供することができると考えられる。おわりに当たり、本研究の実験に当ってトピー工業の鹿沼工場の関係者および当学科4年生の平野英司君の御協力があつた事を記し、あつく感謝の意を表する。

参考文献

- 1) G.Fischer; “破損しかけた構造物の寿命向上のための処置” Dietrich E.Ledekによる「西独における橋梁の健全度判定・補修技術の現状に関する海外技術導入」に関する報告書、日本道路公団、pp.VII-1～18, 1988年2月
- 2) 山田・横内; 有限要素法による弾塑性解析プログラミング (E P I C IV解説)、培風館、1980
- 3) J.M.Potter; The effect of Load Interaction and Sequence on the Fatigue Behavior of Notched Coupons, ASTM.STP 519, pp.109～132, 1973
- 4) 西村・阿部他; ドリフトピン打ち込み鋼板の疲労強度、土木学会第43回年次学術講演会, 1988年10月
- 5) 大江・阿部他; 拡孔した鋼板の疲労強度に関する研究、土木学会第44回年次学術講演会, 1989年10月
- 6) 川嶋紘一郎、他; 繰り返し引張りを受ける円孔を有する帯板の弾塑性変形、日本機械学会論文集(A), Vol151, No470, pp.2334～2340, 1985年10月

(1989年10月2日受付)