【土木学会論文集　第410号／I-12　1989年10月】

押し抜きせん断加工孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度

FATIGUE STRENGTHS OF FRICTION-TYPE BOLTED JOINT WITH PUNCHING HOLES

三木千寿*・森　猛**・稲沢秀行***・中村賢造****
By Chitoshi MIKI, Takeshi MORI, Hideyuki INAZAWA and Kenzoh NAKAMURA

In order to evaluate the fatigue strengths of friction-type bolted joint with punching holes, fatigue tests are performed. The surface of the hole, micro-structure and hardness of the steel near the hole are also observed. The test results indicate that the fatigue strengths of joint with punching holes are fairly lower than that with drilling holes, because the surface of punching hole is rough and contains small cracks due to shear deformation.

Keywords : *punching hole, bolted joint, fatigue strength*

1. はじめに

高力ボルト摩擦接合継手の孔明け加工には，ドリルによる方法と押し抜きせん断による方法が用いられている．押し抜きせん断孔加工はポンチとダイスで材料をはさみ加圧することにより材料をせん断破壊させ，孔を明ける方法であり，ドリルによる方法に比べ，加工速度および経済性において優れている．道路橋示方書[1)]では『押し抜きによる孔あけはもっとも能率的であるが，孔の周辺の材質をいためるので，厚さ12 mm以下の二次部材に限って認めることとした』と記述され，押し抜きせん断孔加工の使用が制限されている．また，押し抜きせん断加工では孔周辺にまくれが生じるが，『材片の密着を阻害するため，グラインダーなどでまくれを削りとらなければならない』とされている．しかし，押し抜きせん断加工が孔周辺の材質をどのようにいためるのか，また材質の劣化がボルト継手の性能にどのような影響を及ぼすのかについては十分に明らかとはされていない．

* 正会員　工博　東京工業大学工学部助教授　土木工学科
（〒152　目黒区大岡山 2-12-1）
** 正会員　工博　東京工業大学工学部助手（同上）
*** 正会員　東京鉄骨橋梁製作所取締役
（〒108　港区芝浦 4-18-32）
**** 正会員　東京鉄骨橋梁製作所生産技術課課長

Fig. 1 に押し抜きせん断加工による孔の断面の一般的な形状を示す．孔壁面はせん断面（slip plane）と破断面（tear plane）とに分けられ，ポンチ側に肩落ち（flaged deformation），ダイス側にまくれ（turned up deformation）が生じ，またダイスと材料の接触面に押込み変形（thrusted deformation）が生じる．孔径はポンチ側に比べ，ダイス側で若干大きくなるが，これは作業性をよくするためにポンチの径よりもダイスの内径を若干大きくするためである．このポンチとダイスの隙間によりまくれは大きな影響を受ける．通常，この隙間は0.06～0.12 t（t：材料の板厚）程度とされており，日本鋼構造協会・孔加工小委員会の調査によれば，この状態での

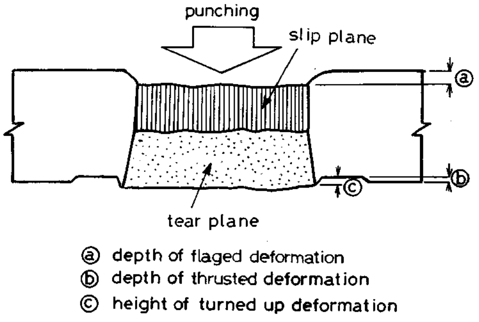

Fig. 1　General figure of punching hole.

まくれ量はおよそ 0.1 mm という結果が得られている[2]. しかし，ポンチとダイスの位置関係あるいはそれらの消耗度によってはさらに大きいまくれが生じると考えられる．したがって，高力ボルト摩擦接合継手に押し抜きせん断孔を用いるには，すべり耐力および疲労強度を明らかにするとともに，それらに対するまくれの影響を明らかにすることが重要と考えられる．すべり耐力についてはすでに実験的に検討しており，まくれが 0.1～0.8 mm 程度では，まくれの大きさの影響はなく，またドリル孔を用いた継手と同程度という結果を得ている[3]．これらの実験結果をもとに，日本鋼構造協会・工作委員会では『まくれを 0.4 mm 以下とすれば，ドリル孔と同じ許容応力を用いてもよい』と提案している[2]．しかし，疲労強度については，押し抜きせん断加工による材質の劣化あるいは孔内部・近傍の形状の乱れがどのような影響を及ぼすか，またドリル孔を用いた継手に比べどの程度異なるかなど，明らかとはされていない．

本研究では，押し抜きせん断孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度およびそれに対する支配因子を明らかにすることを目的とし，孔壁面および孔周辺の表面の観察，疲労試験および疲労亀裂の発生位置の観察を行うとともに，組織観察および硬さ試験を行うことにより材質の劣化を調べた．

2. 押し抜きせん断孔加工による材質の変化

供試鋼材は板厚 16 mm の SS 41 であり，その機械的性質および化学成分は Table 1 に示すとおりである．なお，孔明けに用いたポンチの径は 24.5 mm，ダイスの内径は 26.1 mm である．ただし，ここではまくれ量を調整するために（目標 0.8 mm），ダイスの内面端部を面取り加工している．

孔を含む断面をエメリー紙で鏡面に仕上げ，ナイタール（硝酸＋アルコール）でエッチングした後，金属顕微鏡により孔近傍の組織を観察した．Fig. 2 (a), (b), (c) に孔周辺での断面の組織写真を示す．(a) は孔壁近傍のマクロ組織，(b) は板厚中央で孔壁近傍，(c) は板厚中央で孔壁より 20 mm 程度離れた位置でのミクロ組織を示している．孔壁から離れた位置においては，通常みられるようなフェライト・パーライト組織が観察される．一方，孔壁近傍の組織はせん断変形の影響を強く受け，結晶組織がせん断方向に引き伸ばされた様相を呈している．また，せん断により組織が影響を受けている領域は孔壁より約 4 mm であった．

Table 1 Properties of test steel (JIS SS 41).

mechanical properties

thickness	yield point	tensile strength	elongation
9mm	300MPa	470MPa	29%
16mm	300MPa	450MPa	30%

chemical composition (%)

thickness	C x100	Si x1000	Mn x1000	P x100	S x1000
9mm	22	10	36	15	6
16mm	22	10	41	14	8

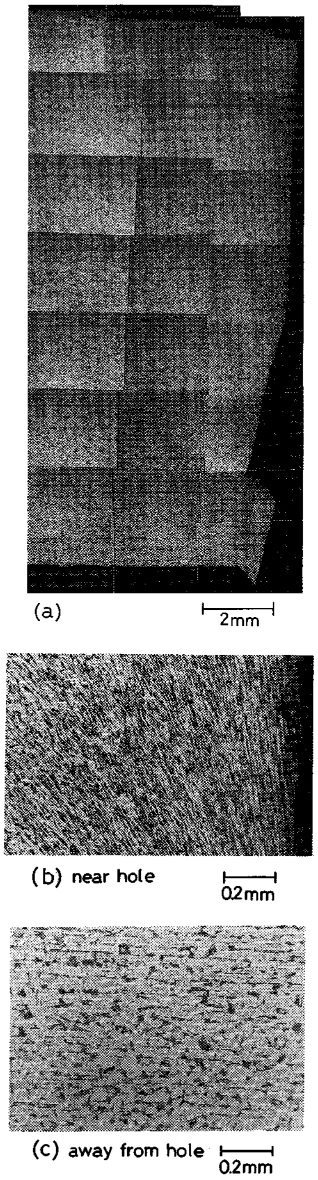

Fig. 2 Change of microstructure due to punching.

孔周辺断面での硬さ分布および一般部での硬さをFig. 3に示す．測定はビッカース硬度計を用い，荷重10 kgf，荷重保持時間30秒で行った．測定位置は同図に示すように，ポンチ入側1 mm，板厚中央，ポンチ出側1 mmである．いずれの位置においてもせん断変形の影響を強く受けている孔壁に近づくに従って硬度が高くなっている．また，硬化は板厚中央およびポンチの出側で特に顕著であり，せん断の影響を受けていない部分に比べて110〜160 Hv程度高いビッカース硬さとなっている．これはFig. 2 (a) に示すようにポンチ入り側に比べ板厚中央およびポンチ出側において変形が大きく（組織の向きより判断できる），加工硬化の影響を強く受けているためと考えられる．しかし，いずれの測定位置においても，ビッカース硬さは道路橋示方書での溶接部の最高硬さの規格値370 Hvよりも十分に低い値となっている．

孔壁の様相をFig. 4に示す．孔壁上部のせん断面は比較的滑らかであるが，板厚方向にポンチによる浅い条痕が生じている．条痕の深さは0.02〜0.05 mm程度，また先端の曲率半径は0.01〜0.02 mm程度であった．孔壁下部の破断面はせん断面に比べて粗いが，傷のようなものはない．Fig. 5はせん断面と破断面の境界近傍の断面組織である．境界部付近のせん断面に長さ0.15 mm程度の微小な割れが生じていることがわかる．また，せん断面においても同様の割れが観察された．

3. 高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度

(1) 試験方法

試験に供した材料は前章と同じ板厚16 mmのSS 41である．押し抜きせん断による孔加工は主板に対してのみ行っており，添接板の孔明けにはドリルを用いている．孔径はいずれも24.5 mmである．試験体の形状・寸法はFig. 6に示すとおりである．添接板には板厚9 mmのSS 41を用いた（Table 1参照）．試験体はまくれ量を0.1，0.5，0.8 mmとした3種類であり，ここではこれらの試験体をB 1，B 5，B 8型試験体とよぶ．まくれ量0.1 mmは通常の条件および精度の加工，0.8 mmは最も悪い条件および精度の加工により生じるまくれを想定したものである．なお，まくれの量はポンチやダイスの消耗度を判断する目安とされており，通常これにより加工の程度が判断される．ここでのまくれの量はダイスの孔上部の隅部の形状を工夫することにより調整した．ボルトはF 10 T，M 22を用いた．その締め付けにはトルク法を用い，導入軸力は標準の221 kNとした．疲労試験は動的能力500 kNの電気油圧サーボ式疲労試験機を用い，下限荷重を10 kNとした片振り引張り荷重下で行った．荷重波形は正弦波，繰返し速度は10 Hzである．なお，疲労試験を行った荷重（最大荷重300 kN）

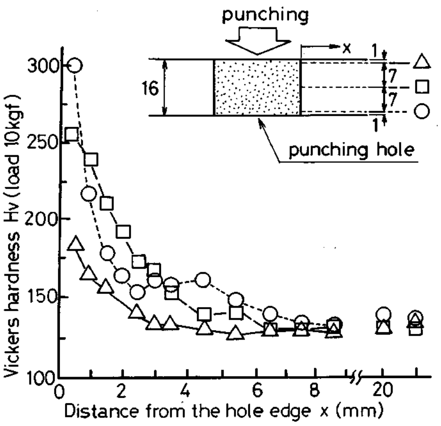

Fig. 3 Increase in hardness caused by punching.

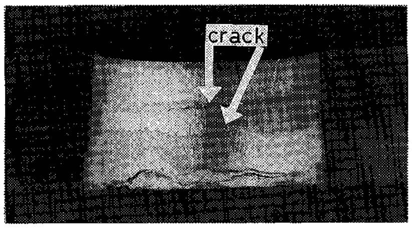

Fig. 4 Surface of punching hole.

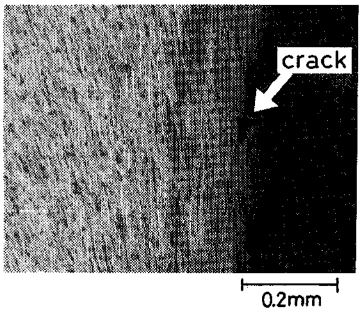

Fig. 5 Small crack at vicinity of the boundary between the slip and tear plane.

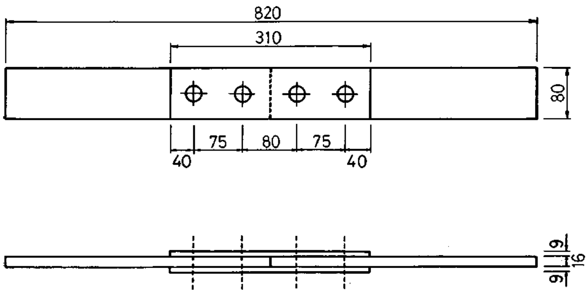

Fig. 6 Geometry of bolted joint specimen for fatigue tests.

では，すべりは生じなかった．

（2） 疲労強度

疲労試験結果を **Fig. 7** および **Fig. 8** に示す．これらの図の縦軸はそれぞれ総断面および純断面に対する公称応力範囲であり，横軸は破断に至るまでの応力繰返し数(疲労寿命）である．**Fig. 7** および **Fig. 8** 中の実線群はそれぞれの型式の試験体に対する応力範囲-疲労寿命関係の回帰直線である．まくれ量を0.1 mmとしたB1型試験体，0.5 mmとしたB5型試験体，0.8 mmとしたB8型試験体の疲労強度に有意な差はなく，したがってまくれ量は疲労強度に影響を及ぼしていないといえる．

Fig. 7 に示す小さい黒丸印は，本試験体と同じ鋼種でドリル孔を用いた継手の疲労試験結果[4),5)]であり，国鉄建造物設計標準の疲労許容応力範囲を設定する際に参考とされたものである．このドリル孔を用いた継手に比べ，押し抜きせん断孔を用いた継手の疲労強度は低く，寿命100万回での疲労強度の違いは約15％である．また，せん断孔を用いた継手の S_r-N_f 関係の傾きが急となっている．

国鉄建造物設計標準[5)]での高力ボルト摩擦接合継手の疲労照査においては総断面に対する公称応力範囲を用いることとされており，またその許容応力範囲はA等級（2×10⁶ 疲労強度150 MPa）とされている．**Fig. 7** に示す破線群はA等級およびB等級（2×10⁶ 疲労強度125 MPa）に対する設計疲労寿命線であるが，ここでの結果は，押し抜きせん断孔を用いた継手の疲労照査に対して従来どおり総断面での公称応力範囲を用いるとすれば，許容応力範囲としてA等級を用いることは危険であることを示唆している．また，実験結果より判断して，この継手に対してはB等級を適用するのが妥当といえよう．ただし，**Fig. 8** に示すように，純断面に対する応力範囲を用いる場合には，A等級に対する許容応力範囲を用いても十分に安全である．

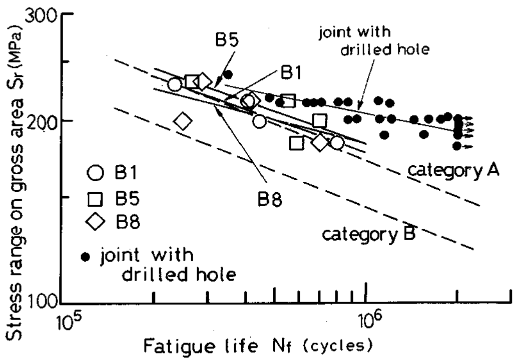

Fig. 7 Fatigue test results plotted by means of gross section stress.

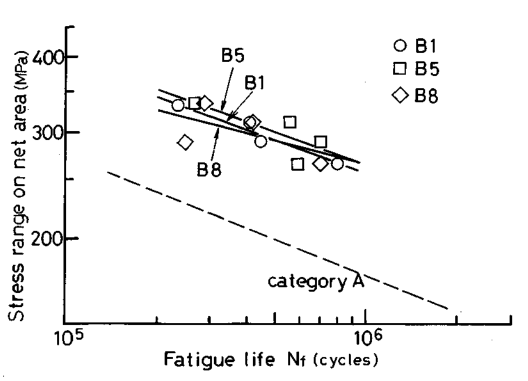

Fig. 8 Fatigue test results plotted by means of net section stress.

（3） 疲労亀裂の発生・進展性状

Fig. 9 に試験体の破断位置および疲労破面の例を示す．また，疲労試験後，継手を解体することにより観察した各形式試験体の主板のボルト孔周辺の表面状況を **Fig. 10** に示す．同図で示しているボルト孔は破断部と反対側の外側のものであり，いずれの場合もボルト孔より発生した疲労亀裂が認められる．しかし，内側のボルト孔に疲労亀裂は認められなかった．**Fig. 10** には，このような潜在疲労亀裂の亀裂面も示している．この写真では，ポンチの出側（写真では孔の上側）で孔壁面の形状が乱れているが，これはまくれによるものである．

破断位置はいずれの形式の試験体においても外側のボルト孔の内部であり，疲労亀裂はボルト孔の中央から生じており，応力の作用方向に対してはほぼ直角に進展している．すなわち，疲労亀裂は主板の最小断面部で発生・進展している．破断面および潜在疲労亀裂の亀裂面より判断した疲労亀裂の発生位置を **Fig. 11** に示す．疲労亀

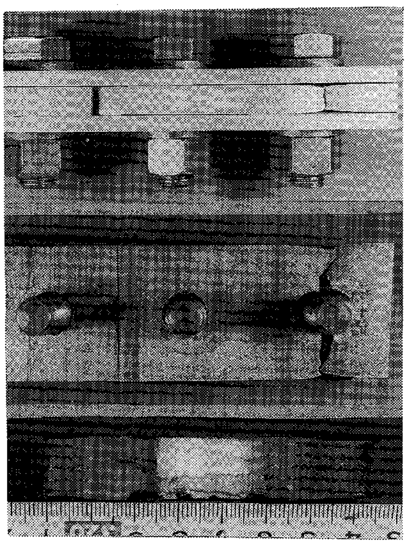

Fig. 9 Location of fatigue failure and failure surface.

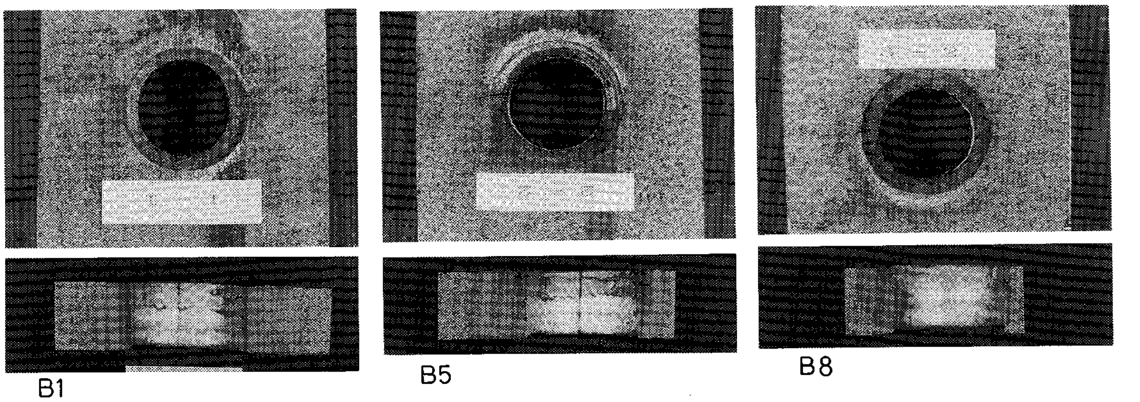

Fig. 10 Main plates surface after fatigue test and fatigue cracks propagated from the wall of hole.

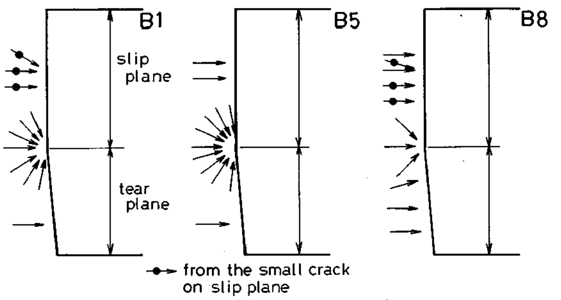

Fig. 11 Fatigue crack initiation points on the wall of punching hole.

裂は，孔壁面のせん断面に生じたポンチの条痕の凹部，特に微小な割れが生じていたせん断面と破断面の境界近傍から発生することが多い．図中で黒丸を付した矢印は，せん断面に生じた微小な割れを起点とした疲労亀裂の発生位置を示しているが，これとせん断面と破断面の境界付近から発生した疲労亀裂を合わせると，24となり，これは全疲労亀裂発生数の約75％にあたる．以上のような位置を起点として発生した疲労亀裂は，ボルト孔を表面とする半楕円形の表面亀裂として進展し，その後板を貫通している．このような疲労亀裂の発生位置および発生・進展性状はどの形式の試験体でも同じであり，まくれにより形状が乱れている孔の縁部から疲労亀裂が生じることはなかった．これが，まくれが異なっても疲労強度が変化しなかった主たる原因と考えられる．

ドリル孔を用いた継手においては，疲労亀裂は通常フィレッチングの著しい孔周辺の主板表面から発生・進展することが多い[6]．押し抜きせん断孔を用いた継手のすべり係数がドリル孔を用いた継手とほぼ同じである[2),3)]ことを考慮すると，フィレッチングの程度はせん断孔とドリル孔で同程度と予想される．したがって，押し抜きせん断孔による継手の疲労強度がドリル孔による継手よりも低くなるのは，押し抜きせん断孔の壁面にポンチの条痕が生じること，特に割れが生じることが主たる原因と考えられる．

Fig. 10 に示すボルト孔の周りに環状の変形部分が観察されるが，これは押し抜きせん断時に生じたダイスによる押し込み変形域である．さらにその外側にフィレッチングにより生じた白い部分が観察される．これら表面状態は，まくれ量の異なるＢ1，Ｂ5，Ｂ8型試験体で特に差はなく，またフィレッチングの生じていた部分に疲労亀裂はなかった．このことも疲労強度がまくれの大きさに影響を受けなかったことの一因と考えられる．

（4） 疲労亀裂進展解析

押し抜きせん断加工による孔壁面には鋭い微小な割れが存在し，疲労亀裂はこれを起点として発生・進展することが多いことから，押し抜きせん断加工によるボルト孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度を予測するには，割れを初期亀裂として破壊力学の手法により疲労亀裂進展寿命を計算することが有効と考えられる．

疲労亀裂進展解析において必要となる亀裂が進展する断面での応力分布は以下のように仮定した．すなわち，無限板に１つの円孔が存在する場合の応力分布[7)]（σ_{xh}）に対して有限板幅による応力集中係数の増加およびボルトの締め付けによる応力集中係数の低下を考慮し，ボルト孔を含む断面での応力分布（σ_x）を次式で与えることとした．

$$\sigma_x/\sigma_n=\frac{(\alpha\cdot\beta\cdot SCF_h-1)}{(SCF_h-1)}(\sigma_{xh}/\sigma_n-1)+1 \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

$$\sigma_{xh}/\sigma_n=1+0.5\{R/(R+x)\}^2+1.5\{R/(R+x)\}^4$$

R：円孔の半径（24.5 mm）

x：円孔壁からの距離

σ_n：公称応力

ここで SCF_h は無限板中に１つの円孔がある場合の応力集中係数（＝3），α は板幅に対する応力集中係数の補正係数であり，本試験体では1.12となる[7)]．また，β は

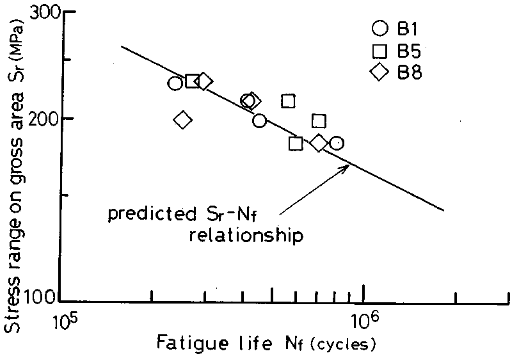

Fig. 12 Comparison of predicted S_r-N_f curve with test results.

添接板で応力が分担されることに対する円孔壁での応力集中係数の補正係数である．円孔を単にボルトで締めた場合の β の値は 0.75 程度となるという実験結果[8]が示されているが，添接板を介した場合にはさらに応力集中が軽減されると考えられるため，ここでは $\beta=0.7$ とおいた．

疲労亀裂進展解析方法は既報[9),10)]と同じである．初期亀裂は，孔壁に生じている微小な割れの位置および寸法を考慮し，板厚中央に深さ 0.15 mm の半円形の表面亀裂とした．限界亀裂寸法は円孔壁から 20 mm とした．疲労亀裂進展速度表示式としては軟鋼に対して求められている平均的な関係[11)]を用いた．

$$da/dN=1.9\times10^{-10}\ (\Delta K)^4 \cdots\cdots(2)$$

da/dN：疲労亀裂進展速度（mm/cycle）

ΔK：応力拡大係数範囲（MPa$\sqrt{\mathrm{m}}$）

以上の条件で推定した応力範囲-疲労寿命関係と実験結果との比較を Fig. 12 に示す．解析結果は実験結果とよく一致している．

4. 結　　論

本研究では，板厚 16 mm の SS 41 を対象とし，押し抜きせん断加工による孔の形状およびそれを用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度について検討し，以下の結果を得た．

（1） 孔加工面はせん断面と破断面に分けられるが，せん断面には板厚方向に浅いポンチの条痕が生じる．また，せん断面およびせん断面と破断面の境界付近に微小な割れが生じる．

（2） 孔壁近傍の金属組織はせん断変形の影響を強く受け，せん断方向に引き伸ばされた組織となり，硬化する．

（3） 押し抜きせん断加工によるボルト孔を用いた高力ボルト摩擦接合継手の疲労強度はドリル孔を用いたものよりも低い．国鉄建造物設計標準の継手等級をこの継手に対して適用するとすれば，B 等級が妥当である．また，照査応力として純断面応力を用いる場合には，A 等級としても十分に安全である．

（4） 疲労亀裂は孔壁面より発生する．特に，せん断面あるいはせん断面と破断面の境界近傍に生じた微小な割れを起点として発生・進展することが多い．

（5） 疲労強度はまくれの大きさ（0.1～0.8 mm）に影響を受けない．

（6） せん断面の割れを初期亀裂として疲労亀裂進展解析により応力範囲と疲労寿命の関係を推定した結果は実験結果とよく一致する．

本研究を進めるにあたり，東京鉄骨橋梁㈱城島保成氏，柳沼安俊氏および東京工業大学 河野　雅技官には多大なるご協力を頂いた．ここに記して，感謝致します．

参　考　文　献

1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（鋼橋編），丸善，1980.

2) 日本鋼構造協会・工作委員会・孔加工小委員会：鋼構造物における孔加工法の現状と各種関連規定類の見直しについて，JSSC レポート，No. 2，1987.

3) 稲沢秀行・三木千寿：押し抜きせん断孔を用いた高力ボルト摩擦接合部のすべり耐力，土木学会第 42 回年次学術講演会講演概要集，I-242，1987.

4) 西村俊夫・三木千寿：高力ボルト摩擦接合のボルト締付力が継手の疲労強度に及ぼす影響，東京工業大学土木工学科研究報告，1972.

5) 土木学会：国鉄建造物設計標準・解説，技報堂，1983.

6) 日本鋼構造協会：鋼構造接合資料集成，第 7 章繰返し荷重を受ける接合部，技報堂出版，1977.

7) 西田正孝：応力集中，森北出版，1967.

8) 森　　猛：ストップホールをボルト締めすることによる疲労亀裂の補修，構造工学論文集，Vol. 35 A，pp. 969～976，1989.

9) 三木千寿・森　　猛・阪本謙二・柏木洋之：前面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する継手寸法の影響，構造工学論文集，Vol. 32 A，pp. 393～402，1987.

10) Miki, C., Mori, T., Sakamoto, K. and Sasaki, T.：An Analysis of Fatigue Crack Growth from Blowholes in Longitudinal Welded Joint，土木学会論文集，No. 386，pp. 73～81，1987.

11) Okumura, T., Nishimura, T., Miki, C. and Hasegawa, K.：Fatigue Crack Growth in Structural Steels，土木学会論文報告集，No. 322，pp. 175～178，1982.

（1989. 4. 18・受付）