

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

REPAIR OF FATIGUE CRACKED MEMBERS BY DRILLING AND BOLTING HOLES

森 猛*

By Takeshi Mori

This study deals with the repairing effect for fatigue cracks in steel members. There are two types of repairing methods used, one is giving circular holes at the tips of cracks, the other is tightening the holes by high strength bolts. These effects are verified through measuring strain at inner-side of hole, applying fatigue tests to modeled specimens and analysing fatigue crack growth.

1. はじめに

近年、鋼橋において疲労が原因と考えられる亀裂の発生事例が数多く報告されている^{1, 2)}。疲労亀裂が見された場合には、亀裂の発生原因を明らかにし、それに対応した適切な補修・補強が必要である。補修方法の一つとして疲労亀裂の先端に円孔(ストップホール)を明ける方法がある。これは鋭い疲労亀裂先端での応力集中を円孔で軽減することにより疲労強度の改善を計る方法であり、簡便であることから用いられることも多い。その使用例を大別すると次の二つとなる。(1) 局所的な変形が原因で生じた亀裂であり、亀裂が長くなるにしたがって亀裂先端での応力が軽減される場合の恒久的な処置。例えば、板桁橋の垂直スチーフナーとフランジのすきまのウェブに面外変形が原因で生じる亀裂¹⁾など。(2) 疲労亀裂を溶接で埋め戻し、さらに板を当てるなどの大掛かりな補修、あるいは部材の交換が必要と判断された場合の応急処置。例えば、横桁切欠き部に生じた亀裂³⁾など。特に(2)についてはそれが応急的な処置であることから、根本的な補修を行なう前に部材破断等の事故に至らないようにストップホールを明けた部材の適切な疲労強度評価が必要である^{4, 5)}。また、簡便な方法でさらに効果の高い補修方法が望まれる。

高力ボルト摩擦接合はボルトの締め付け力に起因する母板と添接板間の摩擦で力を伝達することにより、ボルト孔周辺の応力集中を緩和し、継手強度の増大を計っている。摩擦による力の伝達は母板と添接板の接合面だけではなく、ワッシャーとの接合面においても生じると考えられる。したがって、ストップホールをボルト締めすれば疲労強度は向上するものと期待される。事実、小松原ら⁶⁾がボルト継手の疲労強度を調べる目的で行なった一連の実験においても、円孔のみの試験体に比べそこをボルト締めした試験体の疲労強度は高くなるという結果が得られている。

* 工博 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

本研究では、簡便でしかも効果の高い疲労亀裂の補修方法としてストップホールをボルト締めする方法を取り上げ、その補修効果についてストップホール壁でのひずみ測定、疲労試験および疲労亀裂進展解析に基づき検討する。

2. 試験方法

供試鋼材は板厚 12mm の溶接構造用圧延鋼材 SM50A である。その機械的性質および化学成分を表 1 に示す。試験体は幅 120mm、長さ 600mm の帯板であり、その長手方向は圧延方向と一致させている。試験体中央には、図 1 に示すようにストップホールを想定して直径 23mm の円孔を明けている。疲労試験には円孔を明けたままのもの（H 試験体）と円孔をボルト締めしたもの（B 試験体）の二種類の試験体を用いた。ボルトは F10T M20（トルク係数 0.135）であり、トルクレンチによりほぼ標準締めつけ力である 181kN の軸力をボルトに導入した。試験体の表面は黒皮付きのままである。

疲労試験は、動的能力 500kN の電気油圧サーボ式の試験機を用い、軸方向載荷で行なった。荷重波形は正弦波、繰返し速度は 5~10Hz である。応力比はすべての疲労試験でほぼ 0 とした。一部の試験体については、疲労亀裂の発生・進展性状を調べる目的で、二段多重試験（ビーチマーク試験）を行なった。

H 試験体、B 試験体とも疲労試験に先立ち、円孔壁でのひずみ測定を行なった。ひずみゲージのゲージ長は 1mm であり、その貼付位置は、最も高い応力集中が生じると予想される板厚の中心とした（図 1 参照）。B 試験体については、ゲージリードを取り出すために、ワッシャーの一部を切欠き、さらにボルトの頭に直径 1.5mm の円孔を明けている。また、円孔壁でのひずみに及ぼすボルト締めつけ力の影響を調べる目的で、締めつけ力を 36, 73, 109, 146, 218, 254kN とした状態でもひずみ測定を行なった。

3. 試験結果

図 2 に疲労試験により得られた総断面での公称応力範囲と疲労寿命の関係を示す。図中の実線は最小二乗法により求めた疲労寿命に対する応力範囲の回帰直線である。円孔のみの試験体（H 試験体）での 100 万回疲労強度は 164MPa であるのに対し、ボルト締めした試験体（B 試験体）では 224MPa となっており、ボルト締めによる疲労強度の改善効果が顕著に現われている。図中の黒く塗り潰した小さい印は西村ら⁷⁾により行なわれた SM50 を母材とする高力ボルト摩擦接合継手の疲労試験結果であるが、H 試験体の疲労強度は摩

表 1 供試鋼材の機械的性質・化学成分

Mechanical Properties			Chemical Compositions				
yield point (MPa)	tensile strength (MPa)	elongation (%)	C x100	Si x100	Mn x100	P x1000	S x1000
340	520	27	16	36	137	13	12

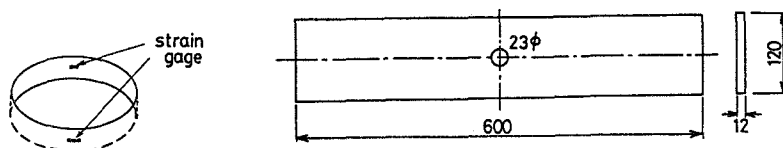


図 1 試験体の形状・寸法およびひずみゲージの貼付位置

擦接合継手と同程度となっている。

円孔壁でのひずみ測定結果を図3に示す。図の横軸は総断面での公称応力範囲であり、縦軸はそれに対応するひずみ範囲である。その際の最小応力はほぼ0としており、所定の荷重で数回の繰返し載荷を行なった後の結果を示している。図中の破線はヤング率を $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$ として素材の降伏点 (340MPa) に対応するひずみレベルを示している。このレベル以下では、H試験体、B試験体とも公称応力とひずみの関係は直線であり、総断面公称応力に対する応力集中係数はH試験体で3.13、B試験体で2.33である。このような応力集中の緩和は、前述のようにボルトにより力が伝達される結果生じるものであり、このことは後述の円孔前面でのひずみ測定結果 (図9) によっても明らかである。また、この応力集中の緩和が疲労強度向上の原因と考えられる。

図4は各試験体の円孔壁で測定されたひずみ範囲にヤング率 ($2.05 \times 10^5 \text{MPa}$) を乗ずることにより求めた応力範囲で疲労寿命を整理したものである。この場合、H試験体、B試験体の疲労強度に差はない。このことからボルト締めによる疲労強度の改善効果は円孔壁での応力集中の軽減に原因のあることが明らかである。

ビーチマーク試験を行なった試験体の疲労破面を図5に示す。H試験体では、ストップホール側の側壁に沿って疲労亀裂が発生し、半楕円形で進展している。一方、B試験体では試験体表面と円孔の境界部から疲労亀裂が発生し、1/4楕円形で進展している。しかし、他の試験体での疲労亀裂の起点を調べた結果 (表2) H試験体とB試験体で特に疲労亀裂の起点が異なるという傾向は認められなかった。

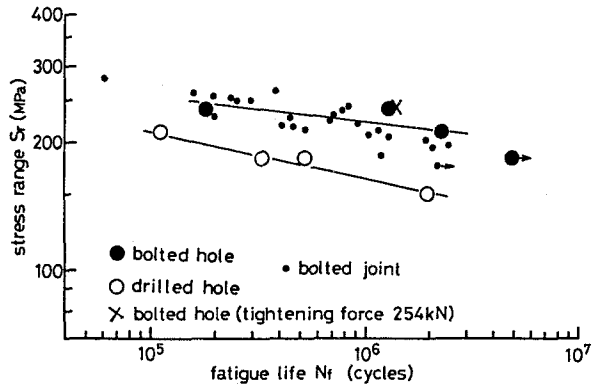


図2 疲労試験結果

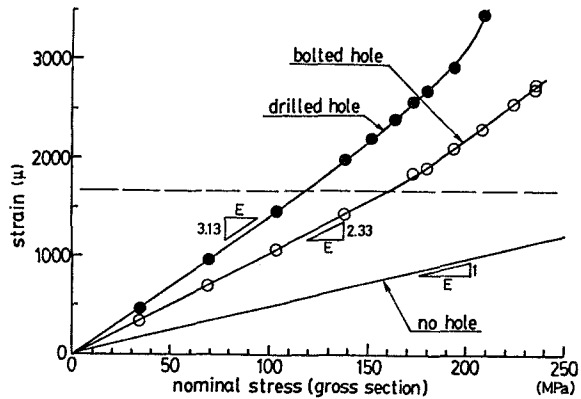


図3 円孔壁でのひずみ測定結果

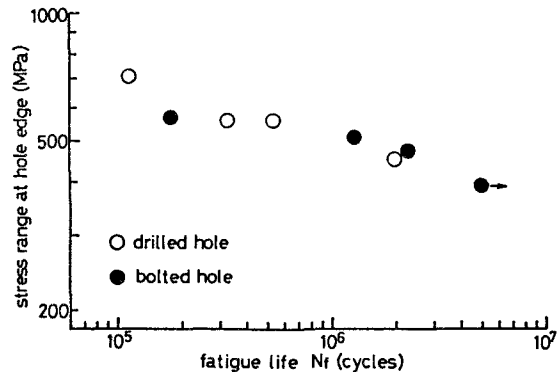


図4 円孔壁での応力範囲と疲労寿命の関係

表2 疲労亀裂の起点

T.P.	type	origin of fatigue cracks
1	drilled hole	edge of hole
2	drilled hole	inner-side of hole
3	drilled hole	edge and inner-side of hole
4	drilled hole	inner-side of hole
5	bolted hole	edge of hole
6	bolted hole	edge and inner-side of hole
7	bolted hole	edge and inner-side of hole
8	bolted hole	no crack

4. 疲労亀裂進展解析による検討

本章では、破壊力学の手法を用いて疲労亀裂進展解析を行ない、ボルト締めによる疲労強度の改善効果について検討する。疲労亀裂進展解析を行なう際に必要な亀裂が進展する断面での応力分布 (σ_x) は、簡単のため、以下のように仮定した。すなわち、無限板内に円孔がある場合の応力分布 (σ_{xh}) を参考に、H 試験体、B 試験体の円孔壁での応力集中係数 (SCF) を考慮し、それぞれの応力分布を次式より求めた (図 6 参照)。

$$\sigma_x / \sigma_0 = \frac{(SCF - 1)}{(SCF_{ih} - 1)} (\sigma_{xh} / \sigma_0 - 1) + 1 \quad (1)$$

$$\sigma_{xh} / \sigma_0$$

$$= 1 + 0.5 \{R/(R+X)\}^2 + 1.5 \{R/(R+X)\}^4$$

R : 円孔の半径 X : 円孔壁からの距離

SCF_{ih} : 無限板内にある円孔壁での応力集中係数
(= 3)

σ_0 : 公称応力

なお、無限板とした場合の円孔壁での集中係数 3.00 に対し、板幅を考慮した場合には 3.13²³⁾、H 試験体のひずみ測定より得られた応力集中係数は 3.13、B 試験体での応力集中係数は 2.33 である。

疲労亀裂進展の解析方法は既報^{9, 10)}と同じである。初期亀裂は、実験結果を参考に、円孔壁中央部に配置した。また、その形状は半円、半径は 0.1mm とした。限界亀裂寸法は円孔壁より 20mm とした (図 7 参照)。疲労亀裂進展速度 (da/dN) と応力拡大係数範囲 (ΔK) の関係式としては次式を用いた^{11, 12)}。

$$da/dN = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2)$$

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

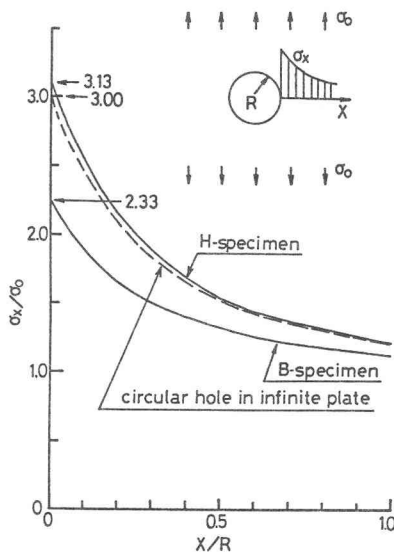


図 6 応力分布

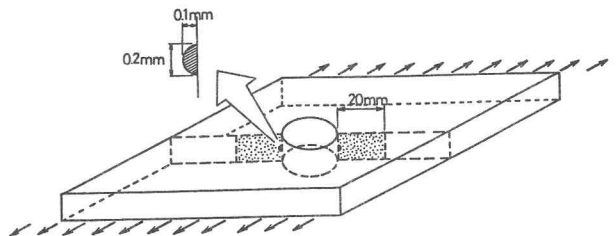


図 7 初期亀裂および限界亀裂

ここでC、mは定数であり、それぞれ 1.9×10^{-10} 、4 とした¹¹⁾。 ΔK_{th} は下限界応力拡大係数範囲である。素材の応力比 0 での ΔK_{th} は $8\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度である¹²⁾。しかし、これは比較的長い亀裂に対して調べられたものであり、短い亀裂での ΔK_{th} は長い亀裂での ΔK_{th} よりも小さいと言われている。そのため、ここでは数多くの円孔付試験体の疲労試験結果¹³⁾より、その疲労限度（純断面応力）を140MPaと判断し、これと初期亀裂に対する応力拡大係数から、 ΔK_{th} を $4.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ と仮定した。なお、短い亀裂と長い亀裂の ΔK_{th} の相違は、亀裂の開閉口現象の相違に原因があると言われている¹⁴⁾。 ΔK の算出においては応力集中の他に亀裂形状、表面亀裂、有限板厚・板幅に対する補正を行なっている^{9, 10)}。

図8に疲労亀裂進展解析より求めた応力範囲と亀裂進展寿命の関係を試験結果とともに示す。解析結果は実験結果とよく一致しており、ここで設定した解析条件および解析法は妥当であったと考えられる。

5. ボルトの締め付け力が疲労強度に及ぼす影響

既に述べたように、円孔をボルト締めすると素材とワッシャー間の摩擦により力が伝達されるため、円孔壁での応力集中は軽減される。円孔壁での応力集中の軽減に対しては種々の因子が影響するものと考えられるが、こ

こではボルトの締め付け力の影響について検討する。図9はボルトの締め付け力を 0～254kN（ボルト軸の応力 0～808MPa）としたときのひずみ測定により求めた円孔壁での応力集中係数を示している。図中にはワッシャー前面での応力も示している（ひずみゲージの位置は図9においてX印で示している）。締め付け力が高くなるにしたがって、円孔壁での応力が小さく（ボルト締め付け力 0 → 254kN、応力集中係数 3.13 → 2.20）、ワッシャー前面での応力が大きくなっており（ボルト締め付け力 0 → 254kN、無次元化応力 0.48 → 0.71）、応力の伝達機能が高くなっていることがわかる。したがって、円孔壁から疲労亀裂が生じ

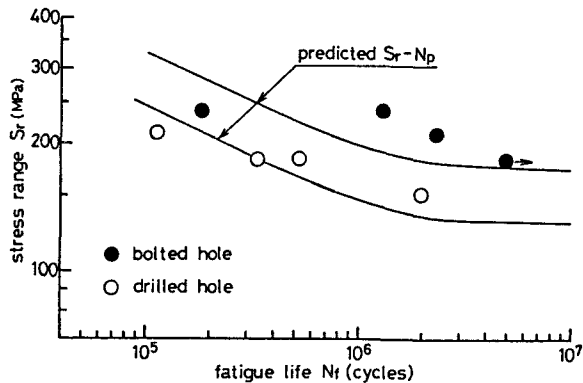


図8 疲労亀裂進展解析結果

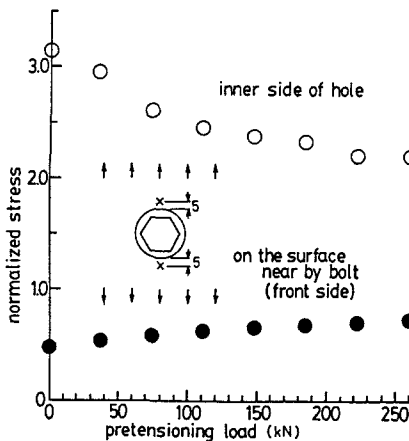


図9 円孔壁での応力集中に対する
ボルト締め付け力の影響

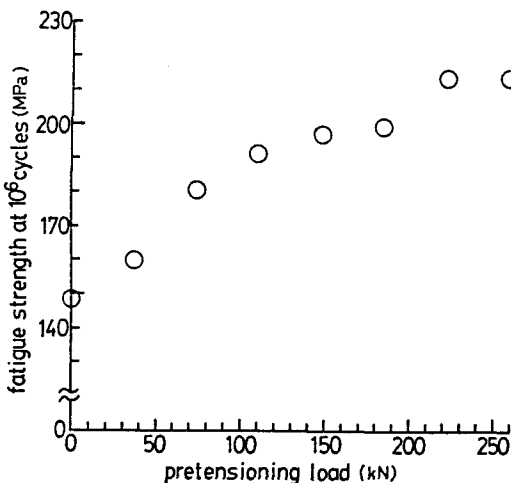


図10 疲労強度に及ぼすボルト締め付け力の影響

る場合の疲労強度はボルトの締め付け力を大きくするほど高くなると言える。

前章と同様の条件および手法で疲労亀裂進展解析を行ない、100万回疲労強度とボルト締め付け力の関係を求めた結果を図10に示す。ボルトの締め付け力を 0から254kNとすることにより、疲労強度は約45%改善されている。

図2中のx印は、ボルトの締め付け力を 254kN として疲労試験を行なった結果を示している。締め付け力 181kN の場合と比べて疲労強度は高くなっているものの、その程度は小さい。この試験体での疲労亀裂の発生状況を図11に示す。疲労亀裂の発生位置は円孔壁ではなく、ワッシャーと母材の境界部である。これは、ボルトの締め付け力が大きくなるにしたがってワッシャー前面での応力が大きくなる（図9参照）、また母材とワッシャー間の摩擦力が高められそれらの境界で応力集中が著しくなるため、円孔壁に比べてワッシャーと母材の境界部が疲労に対して厳しくなったためと考えられる。したがって、過度にボルトを締め付けても疲労強度の著しい向上は期待できず、場合によっては低下するとも考えられる。

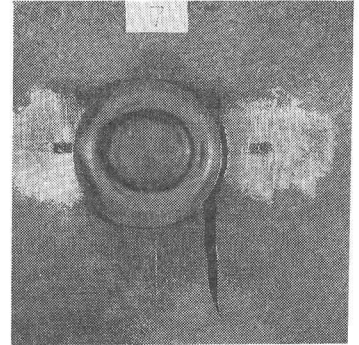


図11 ボルト締め付け力を高めた試験体での疲労亀裂

6. 溶接橋梁部材に生じる疲労亀裂の補修に対する解析例

図12に示すように、ウェブガセットに生じた疲労亀裂に対してその先端にストップホールを明ける、さらにストップホールをボルト締めした場合の補修効果について疲労亀裂進展解析から検討する。その際、亀裂およびストップホールは図12中に示すように両側に丸みをもつ細長い切欠きにモデル化した。この場合の応力集中係数（SCF）は、

$$SCF = 1 + 2 \sqrt{(a+R)/R} \quad (3)$$

で与えられる。これを(1)式に代入することにより疲労亀裂進展解析に必要な応力分布を求めた。このような応力分布の求め方の妥当性は、この応力分布を基に求めた応力拡大係数を西谷ら^{1,5)}によって求められている楕円孔から生じた亀裂に対する応力拡大係数の解

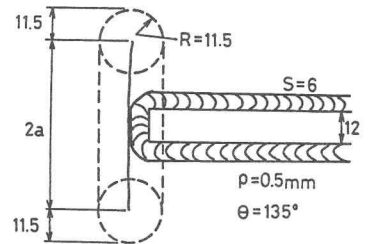


図12 ウェブガセット継手部に生じた疲労亀裂の補修

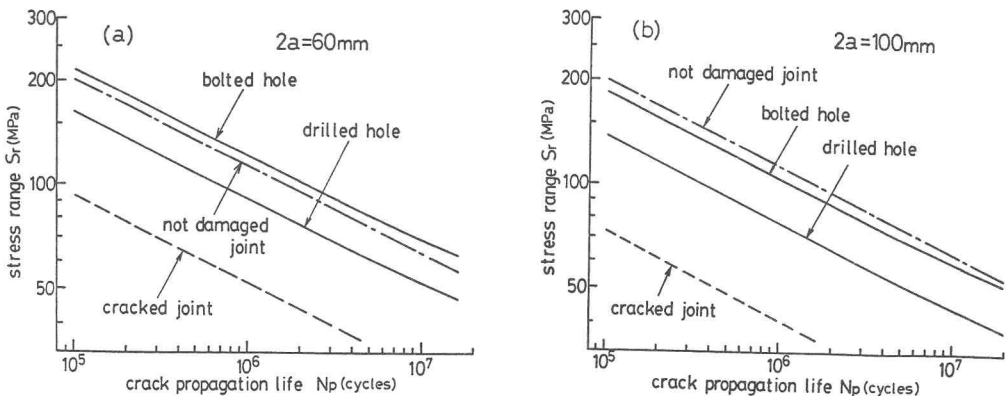


図13 疲労亀裂の補修効果（ウェブガセット継手部）

と比較することにより確かめている。ボルト締めによる応力集中の軽減の程度は、円孔の場合と同じと仮定した。解析条件は4章と同じである。ただし、疲労亀裂が高い引張り残留応力場である溶接部から生じることおよび残留応力の再配分を考慮し、 ΔK_{th} を $2\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ とした¹²⁾。

疲労亀裂進展解析により求めた応力範囲 S_r と亀裂進展寿命 N_p の関係を図13(a)、(b)に示す。図中には補修しなかった場合および溶接部材が処女の状態で S_r-N_p 関係も示している。疲労損傷を受けていない溶接部材に対する初期亀裂は、これまでの研究^{9, 10)}を参考に、ストップホールを有する部材と同様に、半径 0.1mm の半円形の表面亀裂とした。

図13(a)は亀裂長さを 60mm 、(b)は 100mm とした場合の S_r-N_p 関係である。亀裂長さ 60mm のとき、補修しなかった場合に比べ、ストップホールを明けた場合には約 10 倍、ストップホールを明けボルト締めした場合には約 30 倍の余寿命が期待できることがわかる。亀裂長さ 100mm では、さらに補修効果が顕著となっている。また、長さ 60mm の疲労亀裂が生じていても先端にストップホールを明けボルト締めすることにより、処女材と同程度以上の疲労寿命が期待できる。

7. まとめ

橋梁部材に生じる疲労亀裂の簡便な補修方法としてストップホールを明けその部分をボルト締めする方法を取り上げ、その効果について検討し、以下の結果を得た。

- (1) ストップホールをボルト締めすることにより、孔壁での応力集中が軽減されるため、疲労強度は向上する。
- (2) ボルトの締め付け力を増すにしたがって孔壁での応力集中の軽減効果は増大する。しかし、ボルトの締め付け力を極度に大きくした場合には、母板とワッシャーの境界部から疲労亀裂が生じ、その場合の疲労強度は低くなる可能性もある。
- (3) ストップホールおよび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効果を疲労亀裂進展解析に基づき評価した。

ボルト締めによる応力集中の軽減効果およびそれにとまなう疲労強度の改善効果に対しては、種々の因子の影響が考えられる。ここではボルトの締め付け力について検討したが、この他に母板表面の仕上げの程度、母板の厚さ、円孔径とボルト径、ワッシャーの径と厚さなどによっても影響を受けるものと考えられる。今後、このような諸因子の影響についても検討が必要と思われる。

本研究をまとめるにあたり、東京工業大学土木工学科 三木千寿助教授に有益な助言を受けた。また、東京工業大学土木工学科 河野雅技官には試験体の作成および疲労試験の協力を得た。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) Fisher, J.W : Fatigue and Fracture in Steel Bridges, JOHN WILEY & SONS, 1984.
- 2) 西川和広：道路橋における疲労問題と補修、橋梁と基礎、Vol.17, No.8, pp.19-23, 1983.
- 3) 阿部英彦、谷口紀久、阿部允：鋼鉄道橋における疲労問題と補修、橋梁と基礎、Vol.17, No.8, pp.24-29, 1983.

- 4) 山田健太郎、酒井吉永、菊池洋一：ガセットを溶接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果、土木学会論文報告集、No.341, pp.129-136, 1984.
- 5) 山田健太郎、近藤明雅：鋼部材の亀裂補修・補修後の疲れ挙動、土木学会論文集、No.368, pp.411-415, 1986.
- 6) 小松原正次、田島二郎、大宮克巳：高張力ボルト継手の疲労試験、鉄道技術研究所報告、No.232, 1961.
- 7) 西村昭、山野繁行、石沢成夫：過大穴を有する摩擦接合の力学性状について、土木学会第27回年次学術講演会講演概要集Ⅰ、1971.
- 8) 西田正孝：応力集中、森北出版、pp.258-264, 1967.
- 9) 三木千寿、森猛、坂本謙二、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.32A, 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.
- 12) Miki,C., Mori,T. and Tajima,J. : Effect of Stress Ratio and Tensile Residual Stress on Near Threshold Fatigue Crack Growth, 土木学会論文集、No.368, pp.187-194, 1986.
- 13) 神戸製鋼所資料
- 14) 田中啓司：微小疲労き裂の伝播、材料、Vol.33, No.371, pp.961-972, 1984.
- 15) 西谷弘信、石田誠：主軸端にき裂をもつた円孔の引張りにおける応力拡大係数、機械学会論文集、Vol.39, No.317, pp.7-14 (1973)

(1988年10月12日受付)