

鋼部材の亀裂補修・補強後の疲れ挙動

FATIGUE BEHAVIOR OF REPAIRED MEMBERS WITH CRACK

山田健太郎*・近藤明雅**

By Kentaro YAMADA and Akimasa KONDO

Recent fatigue cracking on highway and railroad bridges urged the study on appropriate methods to repair and to reinforce the damaged structures. Fatigue tests were carried out on tensile plates : a) with stop-holes as crack arrester, b) with groove-welded repair at the center c) with stop-holes reinforced with high strength bolted splices, and d) with stop-holes reinforced with fillet welded splices.

The stop-holes were appropriate way for a temporary crack arrester, when the cracks were small. The groove welded repair showed wide range of fatigue life depending upon the weld quality. Relatively large weld defects were observed, when the groove welds were made by an unexperienced welder on vertical position. Short fatigue life was observed on the fillet welded splices, while high strength bolted repair showed longest fatigue life after repair.

1. ま え が き

道路橋では、輪荷重の作用を受ける鉄筋コンクリート床版の破損が数多く発生しており、その補修・補強が大きな問題となっている。最近では、鋼部材にも設計計算を行わない箇所から疲れ亀裂が発生した事例が報告され始め^{1)~5)}、疲れ亀裂の発生原因の分析や補修・補強方法が検討されてきている。本研究では、疲れ亀裂が発生したか、今後発生が予想される部材を対象に、a) ストップホールによる補修、b) 突合せ溶接による補修、c) 高力ボルト摩擦接合した添接板による補強、d) 添接板を隅肉溶接した補強、を施し、疲れ試験を実施してその疲れ挙動を検討した。これらは、いずれも疲れ亀裂が発生した部材の補修・補強方法として実際に用いられるものであり⁷⁾、補修・補強の効果を、残存寿命の面から定量的な評価を試みたものである。

2. 疲れ試験の概要

(1) 疲れ試験体の製作

* 正会員 Ph. D. 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
(〒464 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 工博 名城大学講師 理工学部土木工学科
(〒468 名古屋市天白区塩釜1-1-501)

試験体の材質はすべて SM 50 A 材で、200×10×900 mm の主板の中央部に、亀裂を模したスリットを入れ、以下に示す要領で補修・補強を施した。

a) N試験体(ストップホール補修試験体)

Fig.1 に示すように、主板の中央に切欠きをもつ試験体で、疲れ亀裂をストップホールを用いて応急的に補修した場合を想定した。切欠きは、直径5 mm のドリルで製作した。切欠き部の応力集中係数 α は、切欠き先端半径 ρ (2.5 mm) と、3 種類の切欠き長さ $2a$ (5, 10, 20 mm) を用いて、次式で求めた⁹⁾。

$$\alpha = 1 + 2\sqrt{a/\rho} \dots\dots\dots (1)$$

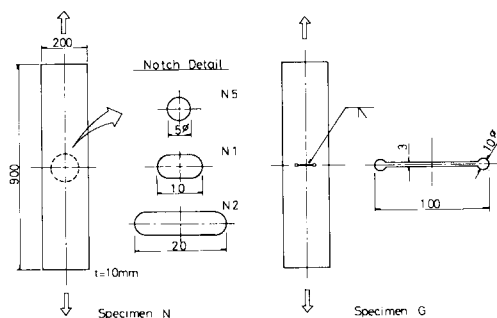


Fig.1 Stop-holed specimen N and groove welded specimen G.

b) G 試験体 (突合せ溶接補修試験体)

Fig.1 に示すように、主板の中央に長さ 90 mm のスリットを入れ、その先端に直径 10 mm のストップホールをあけた。さらに、スリット部に片側 45° の開先とストップホール部に全周 45° の開先を取り、手溶接でグループ溶接した。裏面は、裏はつり後にグループ溶接を行い、余盛をグラインダーで削除した。溶接棒は、棒径 3.2 mm, JIS Z 3212, D 5016 相当を使用した。また、実際の補修溶接を模して、経験年数の異なる 3 名の溶接工が、立ち向き (V) と上向き (O) の溶接姿勢で溶接した。溶接工の経験年数と取得資格を Table 1 に示す。

c) H 試験体 (高力ボルト摩擦接合試験体)

橋梁の主部材などの疲れ亀裂は、添接板を高力ボルトにより添接して補強することが多い。また、疲れ亀裂は、一般にグループ溶接により補修し、原形復帰させてから補強する。本研究では、Fig.2 に示すように、ストップホール補修した後、添接板を高力ボルト摩擦接合してストップホールからの亀裂発生を抑えるように試験体を製作した。添接板によって補強を行うと断面積が増加し、ストップホール先端の応力が減少する。ストップホール先端の応力 σ_r を、式 (1) で計算される応力集中係数 α と、補強後の断面積の補強前のそれとの比 β とから、次式で計算した。

$$\sigma_r = \alpha / \beta \cdot \sigma_r \dots \dots \dots (2)$$

Fig.2 に示すように、補強前のストップホール先端の応力集中係数 $\alpha = 5.5 \sim 10.8$ を、添接板による補強によって補強後の総断面積を補強前の $\beta = 1.5 \sim 1.7$ 倍に

Table 1 Welder, welding position and qualifications of welders.

Welder	Experience	Welding Position	Qualification
S	19 Years	Vertical	N-2P, N-2V, A-2F, A-2V, A-2O, SA-3F
W	9 Years	Overhead	A-2F, A-2V, A-3F, A-3V, SA-2F, SA-2V, SA-2O
Y	4 Years	Vertical	A-2F, A-2V

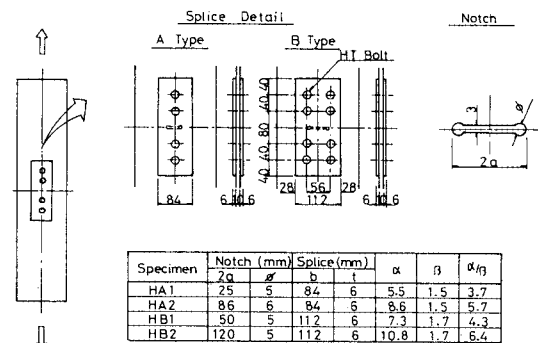


Fig.2 High strength bolted specimen H.

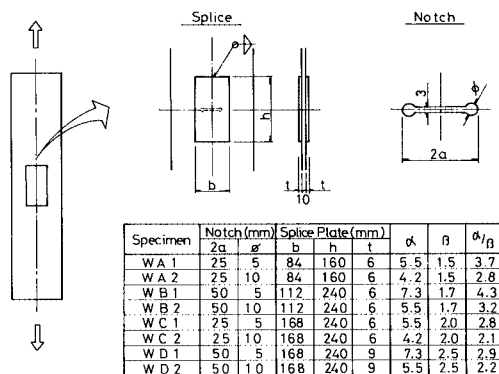


Fig.3 Fillet welded specimen W.

して、補強後の応力集中係数を $\alpha/\beta = 3.7 \sim 6.4$ に低減させた試験体を用いた。高力ボルトは、F 10 T, M 16 を使用した。

d) W 試験体 (添接板の隅肉溶接補強試験体)

この試験体は、疲れ亀裂をストップホールで応急的に補修した後、添接板を隅肉溶接して補強した場合を想定した (Fig.3)。H 試験体と同様に、補強前のストップホール先端の応力集中係数 $\alpha = 4.2 \sim 7.3$ を、補強後の断面積を $\beta = 1.5 \sim 2.5$ 倍にして、 α を低減させる効果をもつとして設計した。隅肉溶接は、G 試験体と同じ溶接棒を用いて下向き溶接で行った。

(2) 疲れ試験

疲れ試験は、アムスラー型疲れ試験機 (容量 980 kN) を用い、応力比 (下限応力/上限応力) を 0.1 とし、毎分 540 回の繰り返し速度で実施した。疲れ亀裂が発生し進展すると予想される位置には、直径 0.1 mm のエナメル銅線を貼り、亀裂が銅線を切断したときに疲れ試験機を止めるようにした。

疲れ試験中の適当な時期に、ピーチマーク試験 (最大荷重をそのままにして荷重振幅を半減させて、疲れ亀裂進展速度を変えて疲れ破面に模様を残す) を行って、亀裂の発生・進展状況を把握することとした。

3. 疲れ試験結果

(1) N 試験体の疲れ挙動

切欠き部の長さ $2a = 5, 10, 20$ mm の試験体各 4 体ずつ、合計 12 体の疲れ試験を行った。所定の繰り返し数で亀裂が発生しなかったものは、応力範囲を変えて再試験した。疲れ亀裂は、すべて切欠き先端の円孔縁に発生し、作用応力に垂直に進展した。また、疲れ亀裂の長さが、約 10 mm になったときの繰り返し数を N_r とし、ハンドドリルで亀裂先端にストップホール (10 mm ϕ) をあけて試験を続行し、ストップホールからの疲れ亀裂の発生と進展状況を観察した。

各試験体の $S-N_f$ 線図を、Fig. 4 に示す。縦軸は、切欠きによる断面減少を考慮しない総断面積に対する応力範囲 σ_r を示す。切欠き部の応力集中係数 α は、式 (1) で計算すると、N5 で 3.0, N1 で 3.8, N2 で 5.0 であり、この順に疲れ強さが低下する。さらに、疲れ試験中にあけたストップホールからも疲れ亀裂が発生したので、切欠き部の応力範囲が、 $\alpha \cdot \sigma_r$ で定義されるとして、この応力範囲でデータを整理して、Fig. 5 に示す。図中○印は、補修の目的でハンドドリルによってあけたストップホールのデータであり、●印は最初のノッチのデータである。3本の直線は、中心の線が 50% 破壊確率線を表わし、その両端に標準偏差の 2 倍に相当する線を、このデータの 95% 信頼区間として表わした。ストップホールの寿命は、切欠き部の応力集中係数がわかれば、作用応力範囲を用いて、Fig. 5 から推定することができる。なお、文献 6) ではガセット端から発生した亀裂に対するストップホールの効果が示されているが、図中に示すように、中央切欠きの場合より寿命が短い。これは、ガセットによる応力集中や、ストップホール位置の偏心による影響によるものと思われる。

(2) G 試験体の疲れ挙動

疲れ試験を行った 8 体のうち、突合せ溶接部から 6 体、

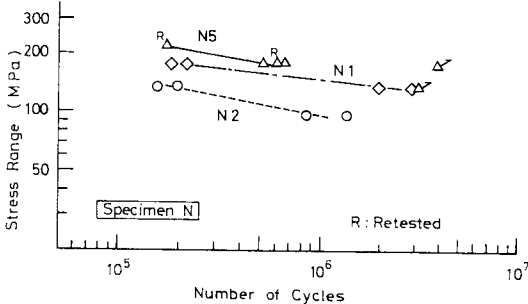


Fig. 4 Fatigue test results of stop-holed specimens. (Specimen N)

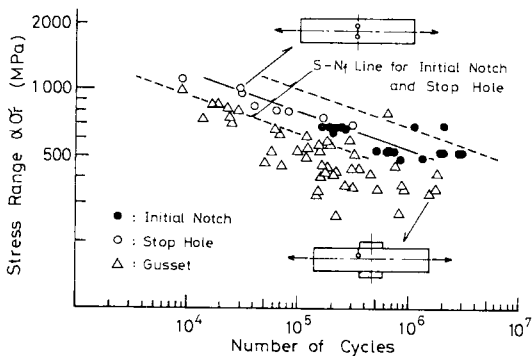


Fig. 5 Fatigue life of stop-holes plotted against the actual stress range near the holes.

高力ボルト摩擦接合したチャック部から 2 体破断した。Fig. 6 に、突合せ溶接部から破断した 6 体の断面のスケッチを示す。図中ビーチマークの数値は、ビーチマーク試験を行ったときの繰返し回数を疲れ寿命 N_f に対するパーセントで表わしたものである。たとえば、最初の破断面では、疲れ寿命 $N_f=123.4$ 万回に対して約 42% のとき、すなわち $N=52.1$ 万回のときに深さ 1 mm の亀裂が発生していたことがわかる。これらのビーチマークから推定すると、ほとんどの試験体は、スリット両端のストップホールの埋戻し溶接部近傍から亀裂が発生した。亀裂形状は、板厚を貫通するまでは半楕円形であった。

Fig. 7 に、G 試験体の $S-N_f$ 線図を示す。実験は、すべて $\sigma_r=137$ MPa で行い、疲れ亀裂の発生しなかった試験体は、荷重を上げて再試験した。2 体の試験体の破断面に溶接欠陥が認められたが、その欠陥の深さ (mm) をプロット点に数字で添えた。チャック部破断の試験体には、CH の記号を添字して示した。

溶接工の技量の違いに起因する疲れ寿命を比較すると $\sigma_r=137$ MPa で、

経験 19 年 (立向き) 300 万回以上

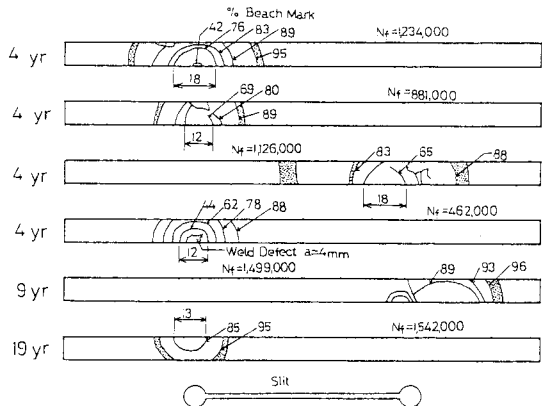


Fig. 6 Fatigue fracture surfaces of groove-welded specimens. (Specimen G)

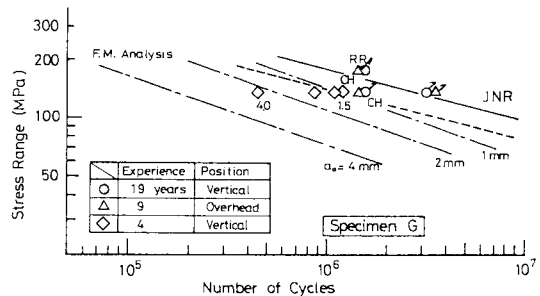


Fig. 7 Fatigue test results of groove-welded specimens. (Specimen G)

経験 9年(上向き) 150~300万回以上

経験 4年(立向き) 46~123万回

となり、データ数は少ないが、溶接工による差がでている。ちなみに、溶接面に溶接欠陥がみられたのは、いずれも経験4年の溶接工によるもので、表面からの深さが約4mmと1.5mmであった。溶接工の技量は、単に経験年数だけでは決まらないが、経験の程度がこの種の溶接の品質を決める一要因となることがわかる。溶接欠陥を有する試験体の疲れ寿命と比較するため、初期亀裂の大きさに応じて破壊力学の手法を用いて解析された疲れ亀裂進展寿命を一点鎖線の $S-N_f$ 線図で示した。ここでは、余盛を削除しているため、溶接欠陥を表面に現われた半楕円形の初期亀裂と仮定した。

また、鉄道橋における仕上げたグループ溶接継手の設計 $S-N$ 線図(実線)と比較すると、経験年数の少ない溶接工のデータは、許容値を下回る。補修溶接ではないが、現場溶接に対して許容応力を20%程度低減させる規定を適用すると、図中の破線のような $S-N$ 線図となる。この場合でも経験年数の少ない溶接工のデータは許容値を下回る。現場での補修グループ溶接では、ブローホール、溶接表面のきず、溶け込み不良など疲れ亀裂発生の原因となる溶接欠陥が生じやすく、その施工性および許容応力について今後さらに検討する必要があると思われる。

(3) H試験体の疲れ挙動

疲れ試験は、切欠きと添接板の形状寸法の異なる4体について $\sigma_r=137$ MPaで実施した。この σ_r は、補強前の総断面積に対する応力振幅であり、疲れ試験結果を、Fig. 8に示す。図中、実線は鉄道橋の高力ボルト摩擦接合部の許容応力度である。 $\alpha/\beta=4.3$ の試験体は314万回で破断せず、 $\alpha/\beta=3.7$ の試験体は275万回でチャック部から破断し、補強された高力ボルト摩擦接合部からの疲れ亀裂はみられなかった。これらはいずれも鉄道橋の許容応力度に近い疲れ寿命を示している。しかしながら、 $\alpha/\beta=5.7$ の場合には71万回、6.4の場合には272万回でいずれもストップホールから発生した疲れ亀裂が

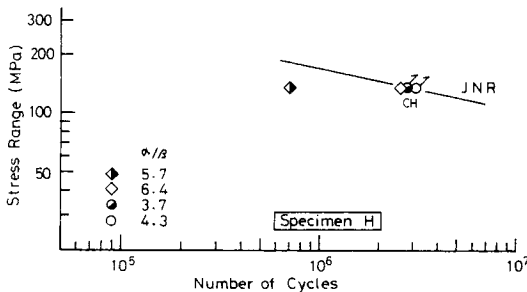


Fig. 8 Fatigue test results of stop-holed specimens with high strength bolted splices. (Specimen H)

材端に達した。特に、 $\alpha/\beta=5.7$ の試験体はボルトが1列であり、亀裂発生後の偏心が大きく寿命が短かったものと思われる。

ストップホール先端の作用応力範囲 σ'_r が $\sigma'_r = \alpha/\beta \cdot \sigma_r$ で定義されるとして、Fig. 3の応力集中を考慮したストップホールの $S-N$ 線図と比較して Fig. 9に○印で示す。○印のデータは、すべてノッチまたはストップホールの寿命より長い。高力ボルト摩擦接合による補強がなければ、図の $S-N_f$ 線図で示されるノッチまたはストップホールの寿命となることから、断面増によるストップホール先端の応力の低減効果が寿命の増大に貢献していることがわかる。その効果を考慮するとストップホールのデータより疲れ寿命を推定できることがわかる。また、●印でW試験体のデータをプロットしてあるが、これについては次項で述べる。

(4) W試験体の疲れ挙動

疲れ亀裂は、すべて添接板の上下の隅肉溶接部に発生し、板厚方向に進展して破断した。試験した8体のうち、7体は隅肉溶接止端部から、1体は隅肉溶接の内部から発生した。添接板の内部に残されたストップホールからは、試験後に検査したが疲れ亀裂は発生していなかった。試験結果を、Fig. 10に示す。縦軸の応力範囲 σ_r は、補強前の添接板を含まない総断面積に対する値を示す。試験は、すべて $\sigma_r=137$ MPaで行い、疲れ寿命は14万回

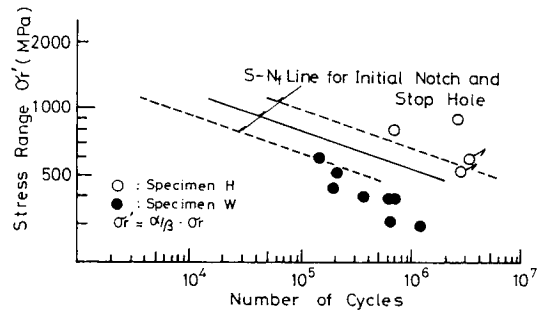


Fig. 9 Fatigue life of Specimens H and W plotted for the actual stresses near the stop-holes.

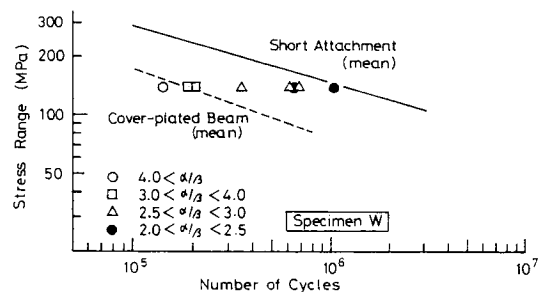


Fig. 10 Fatigue test results of stop-holed specimens with fillet welded splices. (Specimen W)

から104万回程度にばらついた。添接板により補強されたストップホール先端の応力の大きさによってデータを区別して示した。すなわち、補強前のストップホール先端の応力集中係数 α を補強による断面の増加割合 β で除して、図中に示す記号で表わした。この結果、応力集中の大きいものほど低い寿命を示すことがわかる。

この種の試験体の疲れ寿命は、一般に添接板の長さに影響される。そこで、長さ100mm程度の短い付加物を隅肉溶接した引張試験体と、長さ1mのカバープレートを溶接した桁の試験結果を引用して比較する⁹⁾。

Fig. 10に示すように、ノッチが短く、添接された後の断面積が大きい場合には、ノッチの影響を受けず、疲れ寿命は短い付加物の場合に近くなる。また、ノッチが大きいのか、添接板が小さい場合には、カバープレートの場合に近い寿命を示す。すなわち、ノッチが大きいと、添接板が応力を多く負担し、その結果、カバープレート端の隅肉溶接に高い応力が発生しカバープレートの場合に近い疲れ挙動を示したものと思われる。このことから、亀裂が小さい場合は、添接板を隅肉溶接することで補強できるが、亀裂が大きい場合には、添接板だけの補修では強度の低下がみられ、グループ溶接や高力ボルト摩擦接合などの補強が必要になることがわかる。

H試験体と同様に、ストップホール先端の応力範囲を $\sigma_r = \alpha/\beta \cdot \sigma_s$ と定義してS-Nデータを●印でFig. 9に示した。8体試験したうち7体のデータは、N試験体のストップホールの95%信頼下限S-N_r線図より下回っている。これは、添接板の隅肉溶接止端部を仕上げておらず、疲れ亀裂が溶接止端部から発生しやすいため、この部分の疲れ寿命が短く、ストップホールからの亀裂発生に至らなかったためと思われる。隅肉溶接止端部をグラインダーで仕上げることにより、ある程度の疲れ寿命の向上が期待できる。この場合には、内部に残したノッチから疲れ亀裂が発生することも考えられるが、その疲れ寿命は、Fig. 9に示したストップホールのS-N_r線図から推定できると思われる。

4. まとめ

疲れ亀裂が発生した場合に一般に行われている補修・補強方法について、その疲れ寿命の面から補修・補強の効果を検討した。実験データが少ないが、以下のような点が観察された。

(1) 本実験例のように一様引張応力を受ける場合で亀裂が大きい場合には、ストップホールのみによる補修は、比較的短い残存寿命を有するので、応急的な処置と考えた方がよい。残存寿命は、ストップホール先端の応力集中係数を考慮して、S-N線図から推定できる。

(2) 亀裂をガウジングした後にグループ溶接する場

合には、亀裂先端のストップホール部の埋戻し部に欠陥が生じやすく、疲れ亀裂の発生点となった。したがって、この部分の溶接補修に注意する必要がある。また、経験年数の異なる溶接工を比較すると、経験年数の短い溶接工による立向き溶接部に欠陥が生じて、疲れ寿命が低下した。補修溶接には、溶接工の技量もその疲れ強さを確保する要因になると思われるので、現場補修溶接の許容応力も含めて今後検討する必要があると思われる。

(3) 添接板を高力ボルト摩擦接合した場合の補強の効果は、他の補修・補強方法に比べて大きく、安定した疲労強度を与えられる。また、内部に残したストップホールから疲れ亀裂が発生する場合の残存寿命は、ストップホール先端の応力集中と添接板の断面増加による応力減少を考慮することにより、S-N線図から推定できる。

(4) 添接板を隅肉溶接して補強する場合、今回の実験では、疲れ亀裂はすべて隅肉溶接止端部から発生し内部に残したストップホールからは亀裂が発生しなかった。内部のノッチが小さい場合には、添接板の疲れ強さは短い付加物の疲れ強さで評価できると思われる。ノッチが長くなると添接板が短くても疲れ強さが低下するので、注意する必要がある。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、阪神高速道路管理技術センターの高橋正克氏には、貴重な助言と励ましをいただいた。疲れ試験には、名古屋大学土木工学科 岡本裕二氏（現・佐藤工業）、名城大学土木工学科 上田力也氏（現・南海建設）、伊藤千春氏（現・協和設計）の協力を得た。ここに記して感謝します。

参 考 文 献

- 1) 阿部・谷口・阿部：鋼鉄道橋における疲労問題と補修補強、橋梁と基礎、1983年8月。
- 2) 三木：海外の橋梁における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、1983年8月。
- 3) 西川：道路橋における疲労問題と補修補強、橋梁と基礎、1983年8月。
- 4) 鋼桁切欠部の健全度に関する調査研究（報告書）、阪神高速道路公団、昭和58年3月。
- 5) 手塚・池田：鋼I桁支点切欠き部の補修、橋梁と基礎、1983年8月。
- 6) 山田・酒井・菊池：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、土木学会論文集、No. 341、1984年1月。
- 7) Fisher, J.W. : Fatigue and Fracture in Steel Bridges, Case Study, John Wiley & Sons, 1984.
- 8) Fisher, J.W. et al. : Fatigue Strength of Steel Beams with Welded Stiffeners and Attachments, NCHRP Report 147, 1974年。
- 9) 西田：応力集中、森北出版、1967年。

(1985. 2. 18・受付)