

主桁と対傾構との取合部の疲労損傷に対する補修方法の提案

A REPAIRING METHOD FOR FATIGUE CRACKS IN STEEL GIRDER BRIDGES

三木千寿^{*}, 竹之内博行^{**}, 森 猛^{***}, 大川征治^{****}

By Chitoshi MIKI, Hiroyuki TAKENOUCHI, Takesi MORI, Seiji OHKAWA

Practical repairing methods for fatigue cracks were experimentally studied. Fatigue cracks treated in this study occur at the weld of crossframe-to-girder connection plates, which are welded to webs and flanges of main girders. Considering the result of stress measurement and the size of cracks, site welding was chosen for the repairing method and the welding and finishing procedure were studied. Fatigue strength of the repaired-welding was examined by fatigue tests. Application of TIG-dressing was proposed as one of the most suitable repairing method for these cracks.

1. は じ め に

近年、道路プレートガータ橋において、図-1に示すような対傾構や横桁を取り付けた垂直補剛材と主桁上フランジとの溶接部あるいは、その周辺部に疲労きれつが発見されている。¹⁾ このような部位における疲労きれつ発生は、我国の道路橋で最も典型的な疲労損傷である。この疲労損傷は同程度の荷重条件であれば、橋毎の多少のdetailの差や製作の程度にかかわらず、しかも、1つの橋において、同じディテールを有する多数の箇所に同時期に発生することも特徴である。

この疲労きれつの発生原因は、主桁間のたわみ差や床版のたわみによって図-1に示すような格点部に生じる二次応力とされている。²⁾ すなわち、自動車荷重によって対傾構が取り付けられている垂直補剛材に力が働き、補剛材と上フランジあるいはウェブ間のすみ肉溶接を介して力の伝達が生じていたといえる。このような疲労損傷の防止や補修に対する考え方としては

- (i) その位置に発生する応力を下げる
- (ii) 継手部の疲労強度を高める

の二通りがある。

前者の「応力を下げる」には構造形式やディテールを変える必要があり、今までに格点部の局所的な剛性を高める目的で主桁の両側の対傾構が連続するような構造への変更や、垂直補剛材の板厚を厚くした

* 工博 東京工業大学 工学部 土木工学科 助教授

** (社)日本建設機械化協会 建設機械化研究所 研究第二部 研究課長

*** 工博 東京工業大学 工学部 土木工学科 助手

**** 日本道路公団 東京第一管理局 技術部 補修第二課 課長

り寸法を大きくしたりすることが考えられている。³⁾

これらの方法は損傷原因を少なくするため、新設桁に対しては非常に好ましい対策といえよう。しかし、既存の構造物への適用は、現場での作業性が悪く、想定しているような構造や継手を実現することが困難な場合が多い。たとえば垂直補剛材と上フランジの間の溶接は狭い空間で上向き溶接となり、新たな疲労損傷の原因をつくることになりかねない。

本研究は後者の「継手部の疲労強度をたかめる」といった立場で対傾構取付部に発生した疲労損傷の補修方法を検討している。これは、補修の対象としている東名高速道路の鋼桁における、以下に述べるような実態把握に基づいている。

- (i) 損傷を生じている部分の溶接(上フランジと垂直補剛材の間のすみ肉溶接)に、のど厚不足や極度の不等脚などが見られた。
- (ii) 今まで15年以上の非常に過酷な交通荷重にさらされていたにもかかわらず、発見されているきれつの大部分は垂直補剛材のこば面に発生した非常に小さい寸法のものである。
- (iii) この疲労きれつはたとえ放置してもそれがそのまますぐに落橋につながるものではない。
- (iv) すべての対象としている橋梁で床版補強を目的とした縦桁増設が行なわれている。これは副次的ではあるが、この疲労損傷の位置の応力の軽減に役立っていることが、実橋でのひずみの測定結果および解析から確認されている。⁴⁾⁵⁾
- (v) 補修する箇所が非常に多く、できるだけ容易に、確実に、かつ経済的に実施できる方法であることが望ましい。

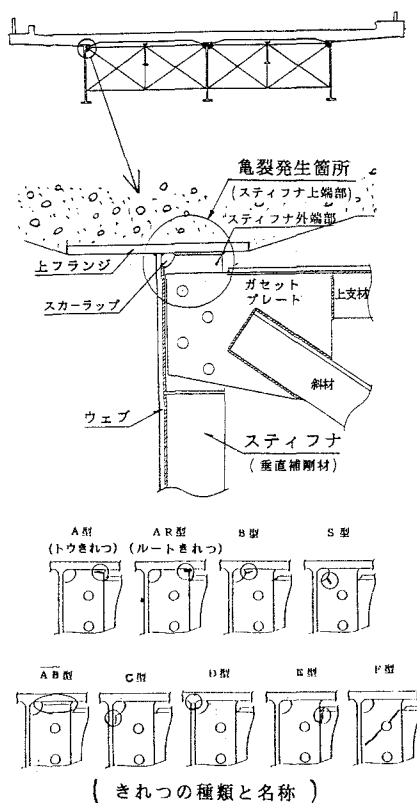


図-1 疲労損傷発生箇所

2. 供 試 体

プレートガータ橋対傾構取付部のうち、最も損傷が多いのは垂直補剛材と上フランジの間のすみ肉溶接である。この部分を取り出すと荷重伝達型のリブ十字すみ肉溶接継手となる。ここでは損傷が生じた実橋での垂直補剛材の板厚および寸法を参考にして図-2のような試験体を用いた。試験体の鋼材はSM41である。表-1にミルシートによる機械的性質と化学的成分を示す。試験体の継手部に各種の補修を行なっている。これらの試験体を高力ボルトを用いて2体ずつ組み合わせ、垂直補剛材に対応する8mmの板に軸力を繰返し加えることにより、疲労試験を行った。

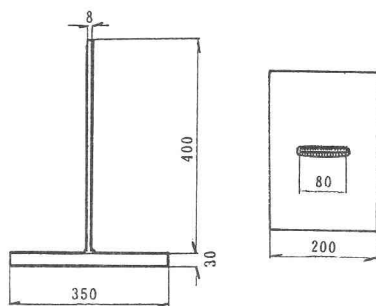


図-2 試験体の形状と寸法 (mm)

図-3に各試験体の継手部のディテールと断面マクロを示す。図-3中の寸法は実測値の平均である。

AS-WELD試験体とは損傷した部分のすみ肉溶接を再現したものである。実橋ですみ肉溶接の形状を測定し、その結果に基づいてこの試験体のすみ肉溶接の形状、寸法を設定している。のど厚が小さくかつ極度に不等脚となっているのが特徴である。

GRINDING試験体は完全溶込み溶接の後、止端部をグラインダーで仕上げている。

TIG-A試験体はAS-WELD試験体と同様な条件ですみ肉溶接を行なった後、補剛材側の止端をTIGにより再溶融している。

TIG-B試験体はAS-WELD試験体と同様なすみ肉溶接を行なった上に、さらに1パスのすみ肉溶接を加え、その止端部をTIGで再溶融している。これは実橋において、すみ肉溶接ののど厚不足によるルートからの疲労きれつ発生がかなり認められたことから、強度向上の方法としてのど厚を増し、さらに止端をなめらかにしてトウきれつに対する疲労強度の向上もはかったものである。追加したすみ肉溶接により、止端に発生していた疲労きれつを溶融することも期待している。

TIG-C試験体はルート部に疲労きれつを残した状態でTIG-B試験体と同様な補修を実施した場合のその後の疲労強度を

表-1 試験体に用いた鋼材の機械的性質および化学的成分

材質	板厚 (mm)	重量 (kg)	引 張 試 験			
			降 伏 点 (kg/mm ²)	引 張 強 さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	曲 げ 試 験
SS41	8	1 8 8	3 6	4 4	3 1	合 格

化 学 成 分 (%)												
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	T.Al	Ceq
×100	×1000				×100						×1000	×100
9	18	89	22	8								

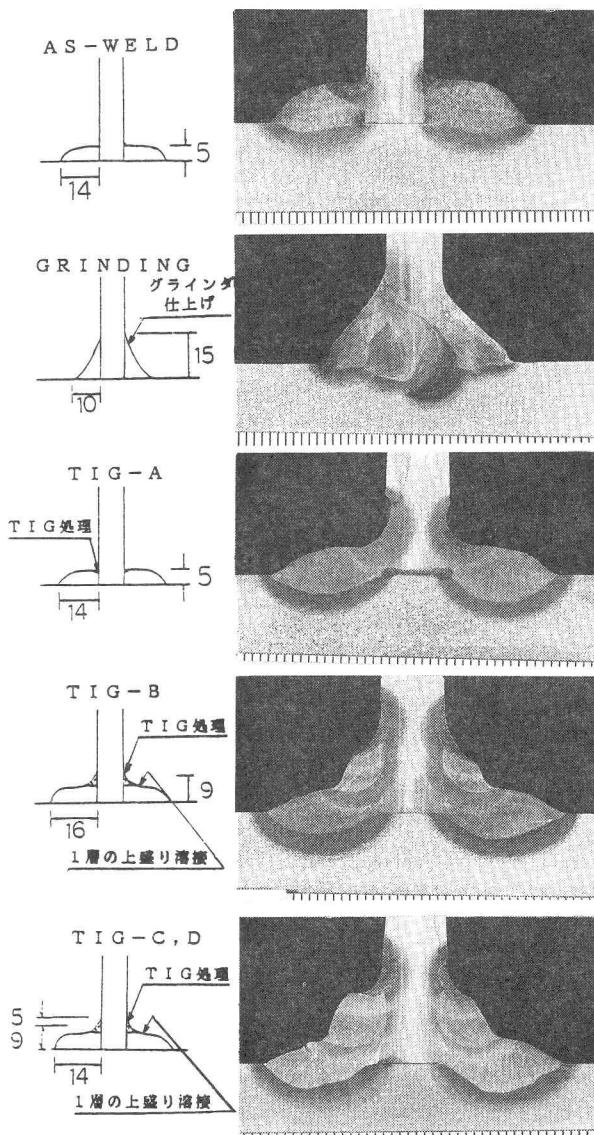


図-3 溶接ビード形状と断面マクロ

確認するものである。AS-WELD試験体の試験結果に基づいて、 8×10^5 回で破断するような荷重範囲によって、 7×10^5 回載荷した後補修している。

TIG-D試験体はTIG-B試験体と同一のディテールであるが、TIGの再溶融を、電流を若干高めにする、あるいはトーチをふるなどして現場で想定される非常に悪い条件を再現して実施したものである。TIG-A, B, C, D試験体の作製は、実橋の損傷部での補修作業性を再現する目的で写真-1に示す模型橋梁内で実施した。

疲労試験は動的載荷能力 ± 50 tonの電気油圧疲労試験機を用い、載荷波形を正弦波として載荷速度 $5 \sim 10$ Hzで行なっている。

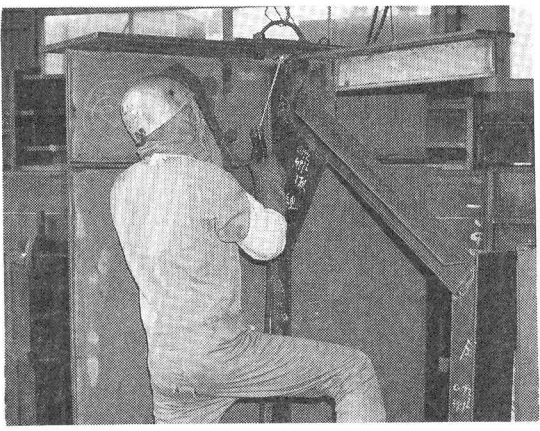


写真-1 試験体製作用模型橋梁

3. 疲労試験の結果

図-4に疲労試験結果および回帰解析から求めた平均線(μ 線)それから 2σ (σ :分散)の線($\mu - 2\sigma$)を示す。図-5に全試験結果と鋼鉄道橋設計標準での設計許容S-N曲線を示す。AS-WELD試験体の約半数は止端から発生した疲労きれつにより、また残りはルートから発生した疲労きれつにより破断している。これはこの試験体ののど厚がルートきれつとトウきれつの発生の限界寸法に近いことを示している。また止端からきれつが発生した試験結果は長寿命域に分布しており、その疲労強度はルートきれつにより破断した試験体に比べて多少高くなっている。このような傾向は過去の研究成果と同様である。⁶⁾ 鉄道橋の設計標準ではこの型式の継手は“十分なすみ肉溶接のサイズを有すること”すなわち止端で破断することを条件にC等級に分類されている。しかしここでの実験結果は、この継用すること手に対してC等級の許容応力を適用することは危険であり、溶接部ののど厚が小さくルートからきれつが発生する場合はD等級以下となる可能性があることを示している。

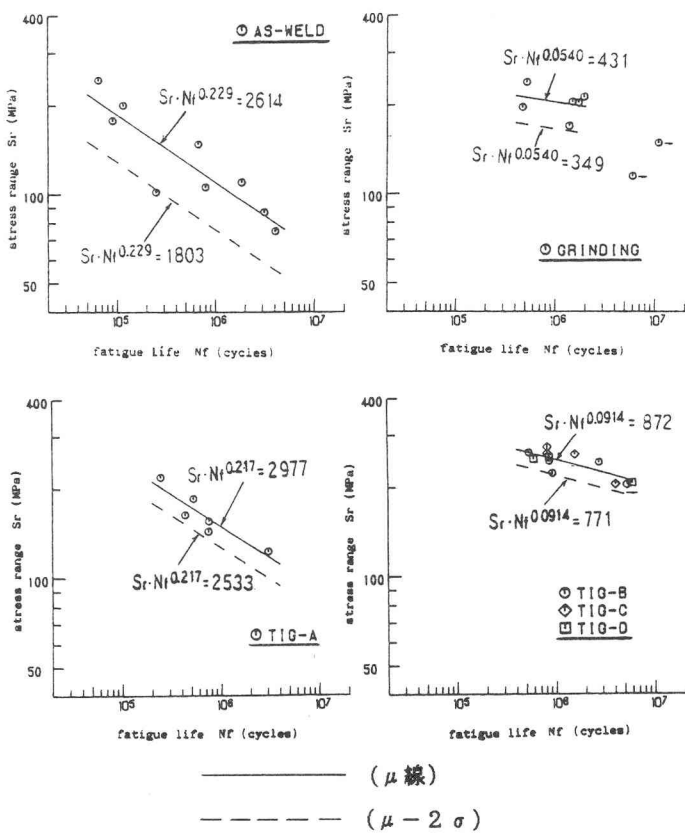


図-4 各試験体の疲労試験結果

GRINDING試験体の疲労強度は1体を除いてA等級の設計曲線を満たしている。すべての試験体で疲労きれつはグラインダー仕上のわずかな表面きずから発生している。グラインダーで溶接止端部を確実に仕上げることはかなり大変な作業であり、またグラインダによって鋭い切り欠きや傷を残してしまうこともある。

TIG-A試験体の疲労試験結果はB等級の設計曲線の周辺にプロットされており、AS-WELD試験体に比べて疲労強度は若干高くなっている。止端部の形状がTIG-dressingによりなめらかになったため、すべての試験体において疲労きれつはルートより発生している。もともとのど厚寸法が十分ではないためTIG-dressingによる疲労強度の改善効果はそれほど高くなかったものと考えられる。しかし、TIG-dressingにより表面から2mm程度の深さまで再溶融することができるため、止端から発生した微小なきれつは単にTIG-dressingを行なうことによって補修可能である。ここでの実験結果は、このようにして補修された継手の強度はAS-WELDの継手よりかなり高いことを示している。

TIG-B試験体の疲労強度は非常に高くA等級の設計寿命曲線をはるかに上回っている。そのうちの1体は板厚30mmの底板(フランジを想定)側のすみ肉溶接止端から疲労きれつが発生しており、1パスのすみ肉溶接とTIG-dressingの組合せによる疲労強度の改善効果の高さを示している。

TIG-D試験体はTIG-dressing部の表面外観が非常に悪いにもかかわらずTIG-B試験体と変わらない疲労強度を有している。

TIG-C試験体の疲労強度も非常に高くTIG-B試験体と同等である。疲労きれつはすべてTIG-dressingを行なった止端から発生している。

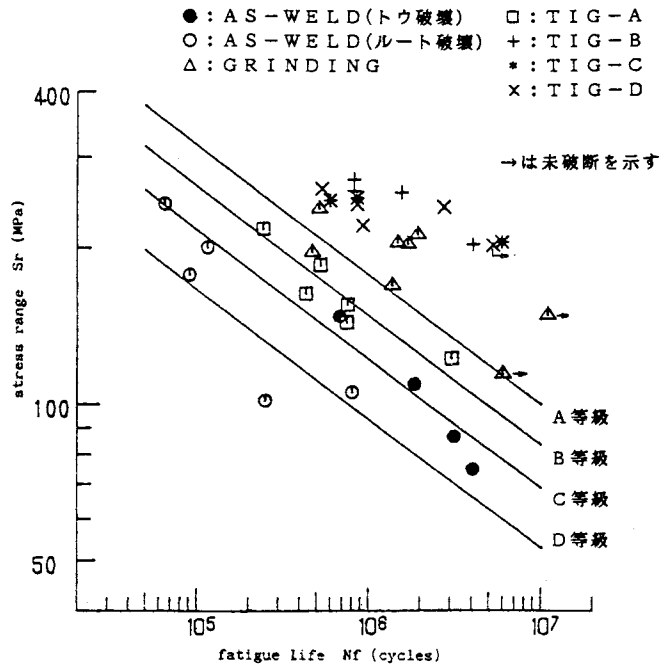


図-5 全試験結果と設計寿命線図

4. 補修効果の検討

道路橋の疲労損傷については大型車の通過台数に密接な関係がある。^{7,8)} 東名高速道路で損傷の発生している区間では、供用を開始した昭和43年度から損傷が発見された昭和58年の16年間で上、下合わせて220,007,494台の自動車が通過している。上、下線の橋は独立であることおよび車種構成率から、この間一方向につき約3,000万台の大型車が通過したと考えられる。また、昭和53年度から58年度の間では、一年間一方向に約250万台の大型車が通過している。これらの大型車の通過が各損傷位置にどの程度の大きさの応力をどれ位の回数生じたかについては今後詳細に調べる必要がある。しかし、ここではこの交通荷重の実態と前章で示した補修した継手部の疲労強度に基づい

て、補修後の余寿命の概略の評価を行なった。

AS-WELD試験体が3,000万台の大型車通過により疲労破壊したと仮定するとそれに対応する応力範囲は、図-4に示すS-N線の回帰直線により

$$S_r = \frac{2614}{(3 \times 10^7)^{0.229}} = 50.7 \text{ MPa}$$

これは変動応力範囲をうける場合の疲労寿命を評価する際の等価応力範囲を求めたことに対応する。

(i) 止端をTIGで仕上げた場合の疲労破壊までの大型車の通行台数は、TIG-A試験体の平均S-N線で評価すると、

$$N = \left(\frac{2977}{50.7} \right)^{\frac{1}{0.217}} = 1.42 \times 10^8 \text{ 回}$$

、毎年250万台の大型車が通過するとすると余寿命は約57年となる。

$\mu - 2\sigma$ 線で考えると、

$$N = \left(\frac{2533}{50.7} \right)^{\frac{1}{0.217}} = 6.73 \times 10^7 \text{ 回}$$

であり、これは約27年となる。

(ii) 損傷部をガウジングし、完全溶込み溶接後グラインダーで仕上げた場合、GINDING試験体の平均S-N線を用いると、疲労破壊までの大型車の通行台数は、

$$N = \left(\frac{431}{50.7} \right)^{\frac{1}{0.0540}} = 1.63 \times 10^{17} \text{ 回}$$

となる。また、 $\mu - 2\sigma$ 線で考えると

$$N = \left(\frac{349}{50.7} \right)^{\frac{1}{0.0540}} = 3.27 \times 10^{15} \text{ 回}$$

となり、余寿命は 1.3×10^9 年となる。

(iii) 損傷部に1パスの補修すみ肉溶接を行ないその止端をTIGで仕上げた場合、疲労破壊までの大型車の通行台数はTIG-B,C,D試験体の平均S-N線を用いると、

$$N = \left(\frac{872}{50.7} \right)^{\frac{1}{0.0914}} = 3.3 \times 10^{13} \text{ 回}$$

となる。また、 $\mu - 2\sigma$ 線を用いると、

$$N = \left(\frac{771}{50.7} \right)^{\frac{1}{0.0914}} = 8.6 \times 10^{12} \text{ 回}$$

となる。したがって余寿命は 3.4×10^6 年となる。

また、図-5を参考に、現状の継手が鉄道橋設計標準D等級とみなし、補修によりA等級にまで改善されたとすると余寿命は、

$$\left(\frac{15.3}{8.05} \right)^4 \times \frac{3 \times 10^7}{2.5 \times 10^6} = 157 \text{ 年}$$

となる。A等級の設計曲線で与えられた疲労強度1パスの補強溶接とTIGで確保できる。

また、B等級にまで改善されたとすると余寿命は、

$$\left(\frac{12.75}{8.05} \right)^4 \times \frac{3 \times 10^7}{2.5 \times 10^6} = 76 \text{ 年}$$

となる。

図-5に示したごとくB等級の設計線で与えられる疲労強度は、グラインディングおよび1パスの補

強溶接とTIG-dressingで十分に確保できる。

5. 提 案 す る 補 修 工 法

以上の検討結果に基づいて、実橋の補修工法として、TIG-B型試験体に施したような方法を基本とすることを提案する。実橋の調査結果によれば、発生している疲労きれつは図-1の、A型のしかも、まわし溶接部こば面の表面長さが10mm以下が最も多い。このようなきれつに対しては特にガウジング等を行わず、そのまま上盛りすみ肉溶接を行ない、その止端部をTIG-dressingにより仕上げることにする。B型およびC型きれつについてもこの補修工法は同様に適用できる。この補修が適用可能なきれつ寸法は表面長さが垂直補剛材の板厚を越えない程度であろう。

A型あるいはB型のきれつがさらに成長した場合は、きれつ部分をガウジングで完全に除去し、その部分を溶接で埋め、さらに全体的に上盛り溶接を行なうものとする。この場合も止端はTIG-dressingで仕上げる。きれつが大きくなると溶接全長にわたりガウジングを施し、全面溶込み溶接を行なうことになる。しかし、入熱の大きい全面溶込み溶接は周辺部材やコンクリート床版に悪影響を及ぼす可能性がある。したがって不必要なところまで全面溶込み溶接を行なうことは避けなければならない。ルートから発生したきれつは、表面での長さが短くてもルート部できれつが大きく成長している可能性が高い。したがってきれつが完全に除去できるまでガウジングをする。その後の処理は止端から発生したきれつの場合と同様である。

溶接止端部の仕上げ方法として、グラインダーがけよりもTIG-dressingを優先した理由は、疲労に対する仕上げの効果の確実性と作業の能率による。TIG-D試験体で示したごとく、TIG-dressingはその表面形状の“見ばえ”がかなり悪い場合でも、疲労強度の改善効果はほとんど低下していない。一方、疲労強度を改善する目的のグラインダーがけは、完全に溶接止端部をけずり取ってしまう必要があるが、現場の作業性の悪いところで、多数の箇所を確実に十分なグラインダー仕上げを行なうことはかなりむづかしい。また、現場作業の所要時間は、グラインダーがけが約15分に対して、TIG-dressingは約3分であった。

写真-2は実橋での試験施工の状況である。溶接部の補修の邪魔となる対傾構の上支材および斜材フランチの一部は、切断している。



写真-2 実橋での試験施工状況

6. お わ り に

この研究では鋼合成桁対傾構を取付けた垂直補剛材端部に発生した疲労きれつの補修方法を、継手部の疲労強度を高めるといった観点から検討した。得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 損傷部のすみ肉溶接の形状・寸法を再現した荷重伝達形リブ十字継手試験体の疲労強度は非常に低く、鋼鉄道橋設計標準でのD等級の許容応力をも満たさない。

- (2) すみ肉溶接の形状を整え、かつ、のど厚を増すことによりルート部からの疲労き裂の発生を防止する目的で1パスのすみ肉溶接を行ない、その止端部をグラインダー仕上げした継手部の疲労強度は非常に高く、鋼鉄道橋設計標準のB等級の許容応力を十分満足している。また、止端部をTIG-dressingした継手部の疲労強度はさらに高く、A等級を満足した。
- (3) 補修の対象としている東名高速道路の荷重履歴とここでの疲労試験に基づいて、補修後の余寿命の評価を行なった結果、ここで提案している補修により十分な余寿命が得られることが明らかとなった。
- (4) 溶接止端部の仕上げ方法としては、疲労強度の改善の効果とその確実性および作業効率からTIG-dressingがグラインダー仕上げより優れているといえる。

参 考 文 献

- 1) 西川和広：道路橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、Vol.17、No.8、pp.19～23(1983)
- 2) Fisher, J. W. : Fatigue and Fracture in Steel Bridges, John Wiley & Sons, (1984)
- 3) 建設省土木研究所：共和高架橋載荷試験報告書、土木研究所資料第2123号(1984)
- 4) 竹之内博行、谷倉泉、高倉敏、三木千寿：実交通荷重による鋼钣桁橋の応力変形挙動、構造工学論文集、Vol.33A、pp.361～371(1987)
- 5) Masuda, N. , Miki, C. , Kashiwagi, H. , and Kaidoh, H. : Analyses of Sway Bracing Members in Composite-Girder Bridges, Proc. of JSCE, No.386、pp.115～124(1987)
- 6) 飯田國廣、宮迫計典、仰木盛綱、岡野伊史：鋼隅肉溶接継手の曲げ疲労強度に及ぼす隅肉形状等の影響、日本造船学会論文集、第143号、pp.434～445(1978)
- 7) AASHTO, Standard Specification for Highway Bridges, 13th edition(1983)
- 8) 三木千寿、後藤裕司、村越潤、館石和雄：シミュレーションによる道路橋設計活荷重の研究、構造工学論文集、Vol.32A、pp.597～608(1986)

(1987年10月16日受付)