

予防保全を目的とした鋼Ⅰ桁橋の疲労損傷に対する補修・補強に関する検討

A STUDY OF RETROFITTING METHODS OF FATIGUE CRACKINGS ON HIGHWAY STEEL BRIDGES FOR THE PURPOSE OF INTENTIONAL MAINTENANCE

富沢 修次* 木暮 深** 山田 実*** 岩崎 雅紀**** 新井 弘****

By Shuji TOMIZAWA, Fukashi KOGURE, Minoru YAMADA, Masanori IWASAKI and Hiroshi ARAI

ABSTRACT

In recent years, many types of fatigue crackings such as cracks in rib plate with crossing beam members on the composite I-section girder bridges have been reported frequently. Those fatigue crackings have been retrofitted in case of individual. Therefore intentional maintenance of fatigue crackings in steel bridges are proceeded. This report shows inspection results in steel highway bridges on 8.5km length and the effective retrofitting methods which are the addition of 2 stringers and strengthening of details.

1. まえがき

首都高速道路は、1962年の供用開始以来供用延長を伸ばし、1990年度中には供用総延長約220kmに達し、首都圏の重要な交通施設となっている。1日平均利用交通量は約105万台であり、供用延長のうち、鋼構造部は、全延長の約70%であり、残りがコンクリート構造部、トンネル、その他である。経過年数で見ると、総延長の約55%が供用開始以来15年以上経過しており、大量交通及び重交通の走行を履歴している。

ところで、近年道路橋において各種の構造形式に疲労損傷事例が数多く報告され始めている。¹⁾²⁾これらの損傷事例は設計技術の向上に伴う軽量化、車両走行数の増加および走行車両重量の増加などの原因によって、通常の設計計算では考慮されない構造局部に発生している。発見された疲労損傷に対しては、通常、個々の事例に応じて発生原因を究明し、種々の検討、実験がなされた後、補修・補強が実施されている。

しかし、維持管理面からはこれらと並行して、各部の疲労健全性評価を行い、計画的に点検および補修・補強を行っていくことが必要である。このような考えから疲労損傷に対する計画的な予防保全を実施するため、首都高速道路において標準的構造を有する鋼Ⅰ桁橋の点検、交通実態調査および実働応力測定を行って各部の疲労健全性評価を試み、損傷発生時期予測を行ってきた。³⁾

本研究は上記に引続いて、内主桁・分配横桁取合い部のリブプレートに発生した疲労損傷を対象に経済性を考慮した補修・補強方法について検討を加え、予防保全実施のための基礎資料の作成を意図したものである。

- | | | |
|------|---------------------|---------------------|
| * | 首都高速道路公団 工務部 | (〒100 千代田区霞ヶ関1-4-1) |
| ** | 首都高速道路公団 東京保全部 | (〒104 中央区新富1-1-3) |
| *** | (財)首都高速道路技術センター 技術部 | (〒105 港区虎ノ門1-1-21) |
| **** | (株)横河橋梁製作所 研究所 | (〒260 千葉市新港8-8番地) |

2. 検討目的と対象部の概要

R C床版の縦桁増設による補強工事、塗装塗替え工事は主に経済上の理由から路線単位に実施されている。疲労損傷の調査、補強工事もこれらと同様、路線単位で実施することが経済的である。特に、疲労損傷の調査は補強工事量を決定するために工事に先立って実施する必要があるが、調査のためのみに点検足場を設置することは経済的ではなく、また、点検実施後ただちに全ての補強を実施できるとも限らない。すなわち、点検から補強までに時間を要する場合もある。このような場合、重要な疲労損傷については追跡調査を必要とするのはいうまでもないが、損傷の進展性状を予測すると共に、経済的な補強方法と補強時期を検討することが重要である。

そこで、首都高速道路において標準的構造を有する表-1に示す単純鋼 I 桁橋の内主桁・分配横桁取合い部のリブプレートに発生した疲労損傷を例に経済性を考慮した補修・補強方法と実施時期について検討を行った。この部位の疲労損傷については事例が数多く報告^{1)~3)}されており、発生原因究明が行われ、補修・補強方法も提案されている。^{4)~6)}しかし、路線全体(路線全延長:約8.5km、橋梁径間数:244)に渡る点検(供用開始13年経過時点)の結果、(1)主桁間隔が約2.9mと狭い場合に発生している事例が多い、(2)リブプレートと分配横桁上フランジとの溶接部(以下、リブプレート下側という)における発生頻度が高いなどの特徴を有することが明らかとなったので、検討対象例として取上げた。

表-1. 検討対象橋梁概要 (mm)

橋梁型式	単純合成鋼 I 桁橋 (6主桁)
主桁支間 L	$25,000 \leq L < 40,000$
主桁間隔 s	$2,760 \leq s \leq 2,950$
R C床版 床版厚 T	軽量鉄筋コンクリート $200 \leq T \leq 210$

3. 疲労損傷の補修・補強方法の検討

内主桁・分配横桁取合い部のリブプレートの疲労損傷発生原因は、R C床版のたわみ変形の拘束が主原因であり、主桁間のたわみ差も影響を及ぼすことがすでに報告されている。^{4)~6)}しかし、前記の亀裂発生傾向及び実橋における実働応力測定結果⁷⁾を考慮した場合、その影響程度が異なることが予想された。そこで、モデル供試体の疲労試験、実橋の載荷試験及びFEM解析を実施して疲労損傷発生原因を推定すると共に以下の補強方法について検討を加えた。

- (1) 縦桁増設工法：R C床版の補強工法として実施されている各主桁間に縦桁を2本増設する工事
- (2) 局部補強工法：増厚取替、T I G処理などリブプレート近傍のみの補強

3. 1 疲労損傷発生原因の推定

実橋の載荷試験および全体モデルのFEM解析を実施して亀裂発生原因を調べた。図-1および図-2に載荷試験対象橋梁の一般図と載荷位置を示す。FEM解析手法は参考文献8)に従って行った。載荷試験は夜間に走行車線を規制して追越車線に重車両が走行しない場合を狙って行った。図-3に載荷試験結果およびFEM解析結果を示す。車両載荷側のリブプレート上側(G1上側)に最も高い応力が発生しているが、載荷反対側のリブプレート下側(G3下側)にも同程度の応力(G1上側に対する比率、載荷試験結果:90%, FEM解析結果:約70%)が発生している。

リブプレート上側は車両載荷に伴うR C床版のたわみ変形の拘束に伴う拘束モーメントに

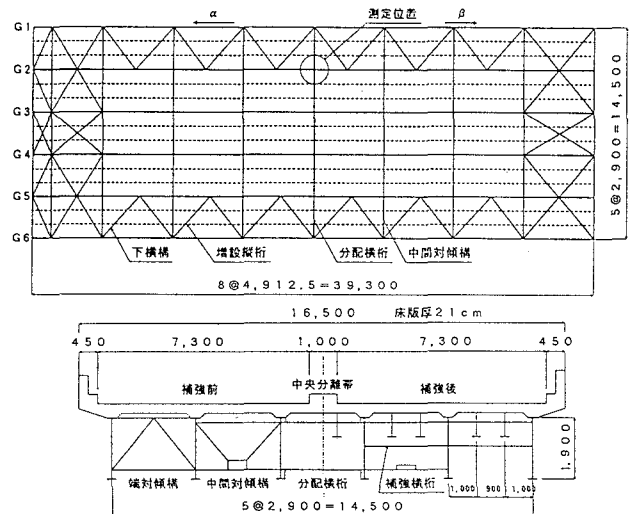


図-1 載荷試験対象橋梁一般図

より、リブプレート下側は拘束モーメントによる作用応力以上に主桁間のたわみ変形差によって大きな応力集中を起こしたものと推定される。

3. 2 縦桁増設が局部的応力性状に及ぼす影響

縦桁増設（主桁間中央に1本）がRC床版のたわみ変形を軽減するために対傾構取合い部の作用応力を低減することはすでに報告されている。しかし、(1)リブプレート下側の亀裂が多い、(2)主桁間隔が約2.9mと狭いなどの諸条件を考えると縦桁増設がリブプレートの応力性状に及ぼす影響を明らかにすることが必要であると考えられた。

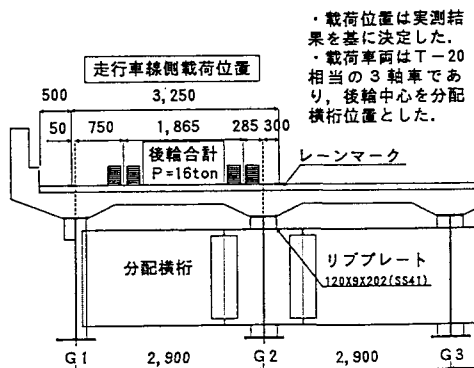


図-2 載荷位置

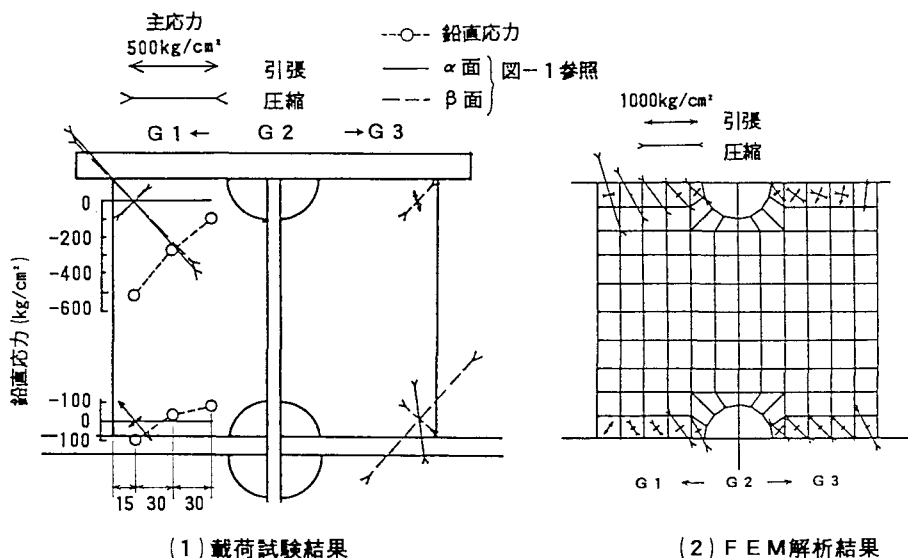


図-3 リブプレートの応力分布

そこで、縦桁増設後についても同様の手法で実橋の載荷試験およびFEM解析を実施して縦桁増設の効果を調べた。増設縦桁配置は先の図-1中に示すとおりである。図-4に示すようにリブプレート局部的応力はG1上側で約17%（実測値，FEM解析結果：70%），G3下側で約57%（実測値，FEM解析結果：80%）に低下した。これは図-5に示すたわみ分布から明らかのようにRC床版のたわみ変形が低下したためであると考えられる。

さらに、縦桁増設前後に実働応力測定を行って疲労寿命を比較したところ、表-2に示すようにG1上側は26.5倍の寿命延長効果があるのに対し、その他の部位は約2～2.5倍であった。リブプレート下側については縦桁増設によるリブプレートの応力低減効果は小さいと判断される。G3上側が小さいのは、追越車線の車両走行位置がG3主桁側によっているためであると推定される。

3. 3 局部補強工法の検討

主桁・分配横桁取合い部の標準詳細構造は、(A)リブプレート先端が主桁上フランジ縁に一致してまわし溶接ができない構造と(A')リブプレート先端が主桁上フランジ縁に一致しない構造や横桁上フランジとの取合い部のようにまわし溶接が可能な構造の2種類があげられ、局部補強工法は、(B)施工が経済的なTIG処理¹⁰⁾、またはグラインダー仕上げ、(C)添接板溶接取付け、(D)添接板ボルト補強¹¹⁾、(F)リブ取替補

強¹⁾などが実用化されている。特に、リブ取替補強は主桁・分配横桁取合い部を対象とした詳細な検討が加えられて実用化されている。これら以外にも (E) 溶接残留応力の低減効果が期待できる添接板ボルト、溶接併用取付けも考えられる。表-3 に実橋の標準構造および想定される局部補強工法を一覧にして示す。

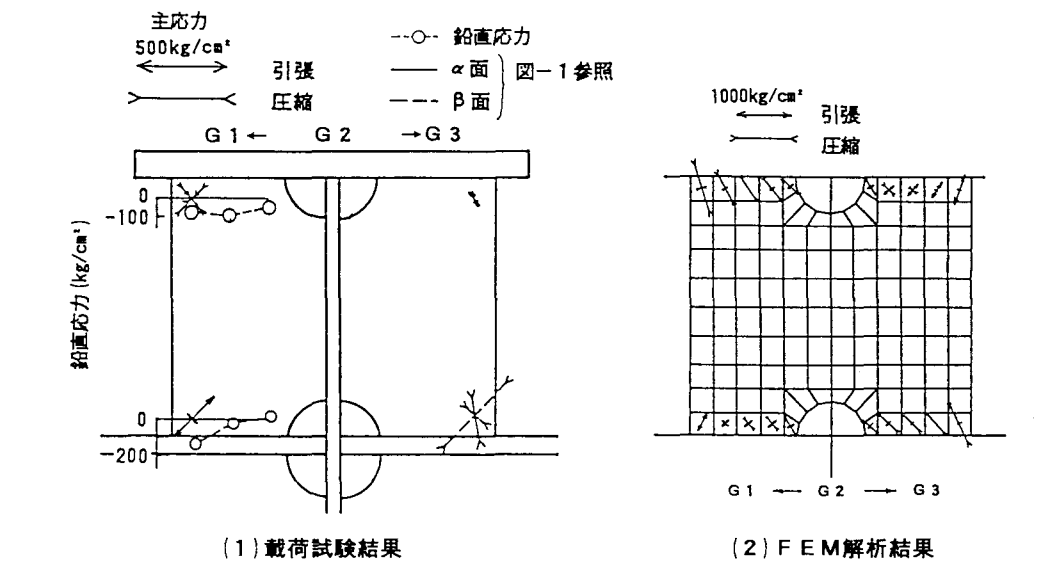


図-4 縦桁増設後のリブプレートの応力分布

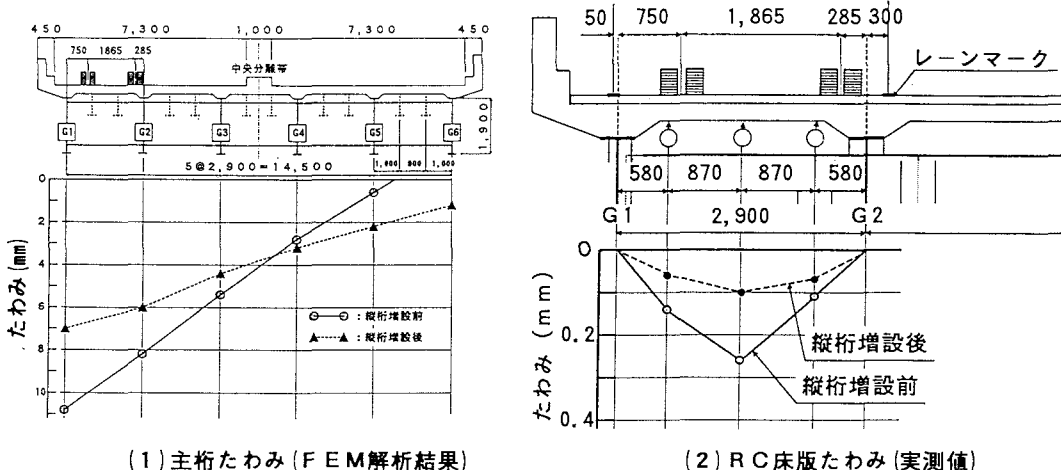


図-5 縦桁増設に伴うたわみの変化

リブ取替補強を除く他の補強工法について疲労亀裂発生位置であるまわし溶接先端の疲労強度について検討するため、図-6 に示す試験体を用いて曲げ疲労試験を実施した。(D) 添接板ボルト補強は高張力ブラインドボルト¹⁾を用いて上フランジと一体で添接する工法であるが、疲労試験では所要締付け厚さのブラインドボルトが開発途中であるために、摩擦接合用高力ボルト (F8T, M22) を代用した。疲労試験結果を図

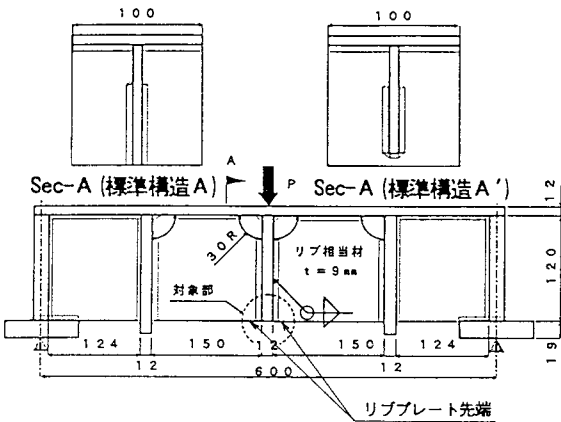
表-2 実働応力測定結果

	G1上側	G1下側	G3上側	G3下側
等価応力振幅 (kg/mm ²)	4.79 / 2.26	4.19 / 3.47	2.90 / 2.38	5.12 / 3.88
最大応力振幅 (kg/mm ²)	20.5 / 6.1	22.4 / 14.5	12.6 / 7.0	25.2 / 15.9
測定繰返し数	15545 / 4046	11829 / 9337	5445 / 4182	14100 / 10867
疲労寿命比率	26.5	2.3	2.49	2.04

縦桁増設前／縦桁増設後における3日間の実測平均値を表わす。

ー7に示す。図ー7(1)は試験荷重範囲で整理したもの、図ー7(2)は実測応力分布から推定したリブプレート先端の鉛直応力で整理したものである。また、破壊繰返し数は疲労試験続行不可能となったリブプレート破断時の繰返し数を示す。図から以下のことがわかる。

- (1) 2種類の標準構造(A, A')はばらつきが大きいものの、疲労強度にあまり差がない。
- (2) TIG処理(B)による疲労強度の向上は疲労設計線図¹⁴⁾で1ランク程度であり、溶接ビード仕上げと同程度の効果が期待できる。
- (3) リブプレートの応力低減を図った工法(C, D, E)はいずれも、疲労荷重(破断寿命200万回における荷重範囲)が標準構造(A, A')に比べて約1.7倍に向上している。リブプレート取替補強(F)が取替板厚に反比例して応力低下すること¹¹⁾に比べると効果が小さい。板厚12mmの添接板を用いた場合について追加して静的載荷試験を行ったところ、応力低下は約1/3であった。
- (4) 添接板ボルト、溶接併用工法(E)は高い疲労荷重を有するものもあるが、ばらつきが大きい。



図ー6 疲労試験体

4. 補強効果と補強時期の検討

疲労損傷の補強は早期に行う程経済的であるが、補強工事に伴う交通規制が交通停滞を誘発することや経済上の問題などから早期に補強を実施することが難しい場合が多い。そこで、補強時期が遅くなる場合を想定し、亀裂進展性状および各種補強工法の効果について検討した。

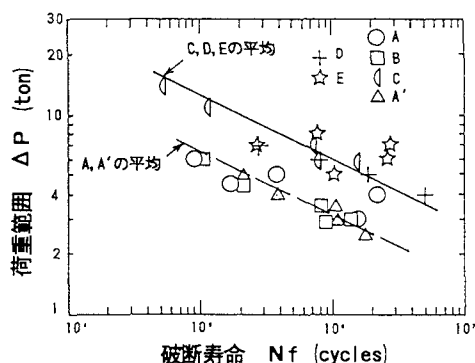
4. 1 亀裂進展性状の検討

初めに、累積被害則に基づいて対象路線のほぼ全橋に渡る点検時点(供用開始13年後)において累積被害が1となる確率(超過確率)とその時点における亀裂長を求めた。累積被害の計算における条件および仮定を以下に記す。

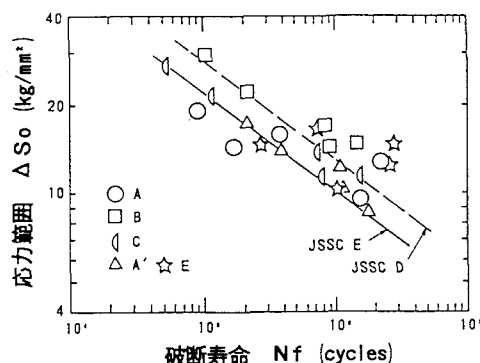
- (1) 累積被害の計算に用いる実働応力は点検対象路線での1週間実測値¹⁾(等価応力範囲:3.86kg/mm²、繰

表ー3 対象部標準構造と局部補強工法一覧

対象部標準構造、または局部補強工法	特徴および疲労試験条件
(A)標準構造(その1) 	(1)リブプレート上端が主桁上フランジ線に一致した構造
(A')標準構造(その2) 	(1)リブプレート上端が主桁上フランジ線に一致しない構造
(B)TIG処理工法 	(1)主桁上フランジ側のみ切欠き後、先端近傍のみ処理(TIG処理長:30mm)
(C)添接板溶接取付け 	(1)添接板(9mm)を全周すみ肉溶接で取付ける。(脚長:8mm)
(D)添接板ボルト取付け 	(1)コ型添接板をブラインドボルトを用いて主桁上フランジと、高力ボルトを用いて横桁上フランジと取付ける。 (2)疲労試験では全てF8T M22を使用した。
(E)添接板ボルト、溶接併用取付け 	(1)コ型添接板をすみ肉溶接により主桁上フランジと、高力ボルトを用いて横桁上フランジと取付ける。 (2)疲労試験ではF8T M22を使用した。
(F)リブ取替補強 	(1)添接板を撤去し、厚い添接板を部分溶込み溶接により取付ける。



(1) 試験荷重で整理



(2) リブプレート先端の応力で整理

図-7 疲労試験結果

返し数:88,145cycles/1週間)を用いる。

(2) 設計S N線図は、日本鋼構造協会の疲労設計指針(案,1989)『4』を参考に、

$\sigma^m \cdot N = \text{const}$ σ :等価応力範囲, N :繰返し数

$\sigma_a = 126\text{MPa}$ (50%超過確率 2×10^4 回疲労強度)

$\sigma_a = 82\text{MPa}$ (2.3%超過確率 2×10^4 回疲労強度)

とした。

(3) 交通量は対象路線における供用開始後の交通量調査結果⁹⁾を基に図-8のように仮定した。

図-9に解析結果を示す。点検時点において累積被害が1となる超過確率は20%であることがわかる。

一方、点検結果から亀裂発生確率20%となる亀裂長を求めたところ、6.4mmとなった。

したがって、累積被害が1となる亀裂長は約6mmであると仮定でき、以下では亀裂長6mmまでは累積被害則により、6mm以上については線形破壊力学手法を用いて亀裂進展解析を行った。

解析は以下の条件のもとに行った。

(1) 亀裂はリブプレート溶接止端部に沿って進展するものと考えた。また、リブプレートの応力分布は図-10に示す実測結果、FEM解析結果および別途行った大型モデルの載荷試験結果から判断して、応力の大きい大型モデルの応力分布を用いた。

(2) 亀裂進展則は参考文献15)を参考に次式を用いた。

$$da/dn = C (\Delta K)^m \quad C = 1.49 \times 10^{-10}, m = 3$$

図-11に実橋点検結果に基づく損傷検出確率分布と共に解析結果を示す。解析結果は実橋点検結果に等しいことがわかる。図-12は上記解析手法に従って算出した予想損傷率、すなわち、累積被害が1となる率(以下、亀裂発生率という)および亀裂がリブプレートを貫通する率(以下、リブ破断率という)の推移を示したものである。点検時期から5年後には亀裂発生率が約30%、10年後には約50%(リブ破断率:約10%)に達する解析結果である。

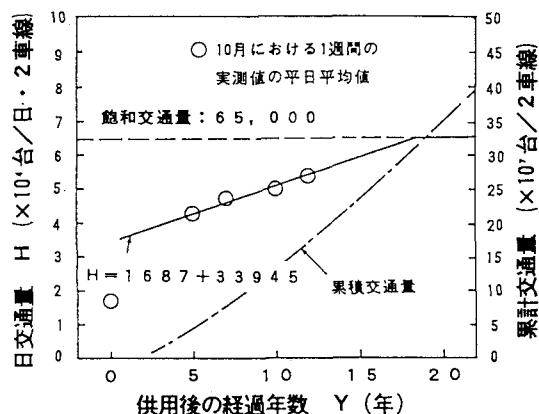


図-8 交通量の推移

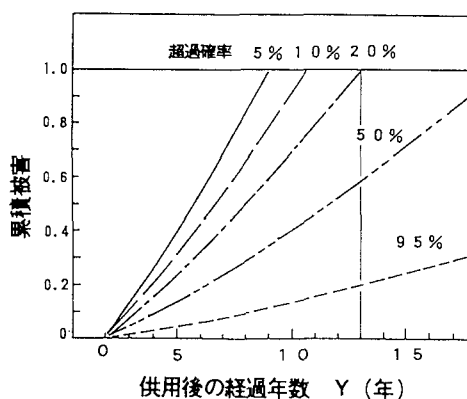


図-9 累積被害に及ぼす超過確率

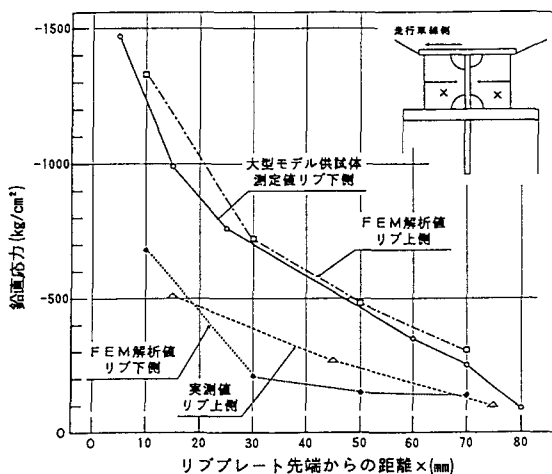


図-10 リブプレートの応力分布比較

4. 2 補強効果の検討

第1に、RC床版補強工事が実施される橋梁における局部補強の必要性について検討を加えた。局部補強工法は最も経済的であるTIG処理を対象とした。図-13は点検5年後に補強を行った場合についての解析結果を示す。縦桁増設が行われずTIG処理のみの場合約20年後に、また、縦桁増設のみの場合約35年後にリブ破断率が5%に達することがわかる。両者の併用の場合、約60年である。したがって、RC床版補強工事が実施される場合は、TIG処理を併用することが望ましいと考えられる。

第2に、RC床版補強工事が実施されない橋梁に対する局部補強の経済性について実大モデルの溶接施工試験を行い、施工所要時間を比較した。補強工法は先の疲労試験結果からリブ添接補強とリブ増厚補強を対象とした。なお、補強板厚の選定により応力を1/3に低減することができれば、補強後の亀裂発生寿命は約100年以上となる。

表-4は施工時間測定結果の一覧を示す。亀裂が主桁ウェブに進展した場合、亀裂の埋め戻しのためにリブプレートを撤去しなければならないことからリブ添接補強の適用は難しいことが明らかとなった。また、亀裂が発生していない箇所については亀裂の埋め戻し作業がないためにリブ添接補強が約20%経済的であることがわかる。

図-14は対象路線の該当部位100箇所を補強する場合についてのべ所要時間を求めたものである。点検5年以内に補強する場合、リブ添接補強の方が約18%施工時間を短縮できることがわかる。

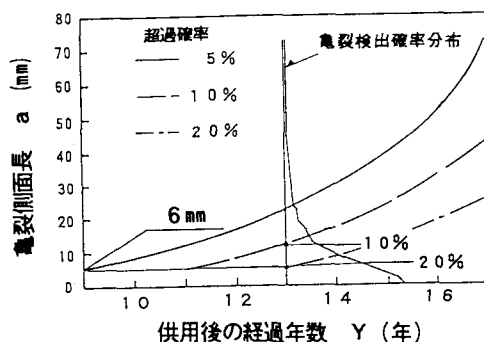


図-11 亀裂進展解析結果

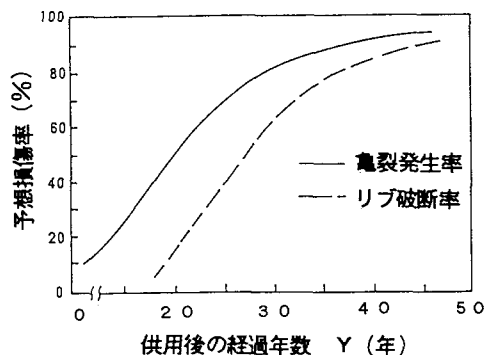


図-12 損傷率の推移解析結果

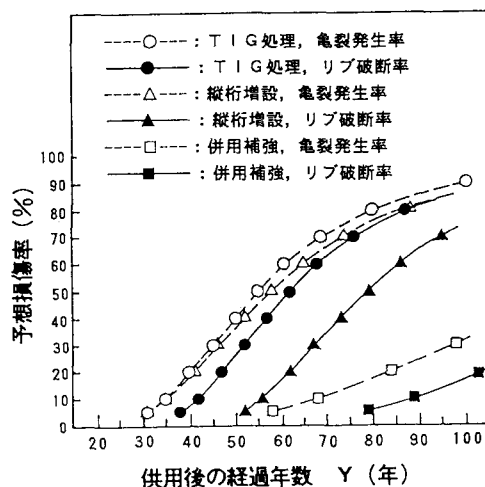


図-13 補強工法別損傷率の推移解析結果

5. まとめ

以上、主桁・分配横桁取合い部の疲労損傷に対する補強方法の検討を中心に行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) リブプレート上側の応力集中はRC床版のたわみ変形の拘束が、リブプレート下側の応力集中は主桁間のたわみ差が主原因で発生していることが明らかとなった。

(2) RC床版の補強に際して増設される縦桁(各主桁間に2本)がリブプレートの応力に及ぼす影響を調査したところ、リブプレート上側の応力低減には効果が大きい、リブプレート下側には小さいことが明らかとなった。

(3) 効果的な局部補強工法としてリブ取替補強以外に、TIG処理は疲労強度を1ランク程度¹⁾高める効果が期待でき、リブ添接補強も補強板の板厚を選択することにより疲労寿命を延長できることが明らかとなった。

(4) 累積被害が1となる亀裂長は約6mmと考えることができ、亀裂を放置した場合、点検10年後には亀裂発生率約50%、リブ破断率約10%に達することが予想された。

(5) RC床版の補強工事が実施される橋梁ではTIG処理を併用することにより補強後の寿命を60年以上とすることができる。

(6) 局部補強のみが実施される場合、点検5年後に補強すればリブ取替補強に比べてリブ添接補強の方が約15%施工時間を短縮できる。ただし、亀裂が主桁ウェブに進展している箇所はリブ添接補強が適用できない。

今後、交通実態の異なる路線への適用や他の損傷タイプに対する補強方法の検討を進め、計画的な予防保全実施を進めたいと考えている。

謝 辞

本研究を行うに当たり、首都高速道路公団 保全施設部 保全技術課、横河メンテック株式会社の関係各位には多大な御協力を頂いた。ここに付記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

1) 岩崎, 名取, 深沢, 寺田: 鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策, 横河橋梁技報, 第18号, 1989.1, pp 36-pp52
2) 中井: 都市高速道路の疲労損傷事例, 橋梁と基礎, Vol. 24, No. 2, 1990.2
3) 飯野, 山田, 岩崎: 鋼橋の疲労損傷に対する予防保全の検討, 構造工学論文集, Vol. 36A, 1990.3, pp985-pp994
4) 松本, 堀川, 北沢: 合成I桁橋の主桁と横桁の取合い部の疲労, 土木学会論文集, 第386号, 1986.10, pp247-pp255
5) 林, 中村, 中矢: 鋼I桁橋の疲労損傷の補修と補強, 阪神高速道路公団技報, 第7号, 1987, pp191-pp

表-4 補強工法別単位施工時間比較 (hr)

補強方法 亀裂発生区分	リブ添接補強	増厚補強
亀裂なし	4 (80%)	5
リブプレートに 亀裂あり	4.5 (90%)	5
リブプレート破断 ウェブに亀裂進展	適用不可	6.5

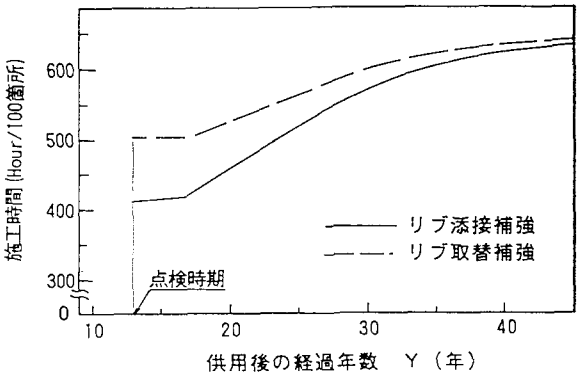


図-14 総施工時間に及ぼす施工時期の影響

- 6) OKURA, YUBISUI, HIRANO and FUKUMOTO: Local Stress at Cross Beam Connections of Plate Girder Bridges, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.5, No.1, 1988.4, pp89-pp97
- 7) 深沢, 大畦, 加藤, 三木: 非破壊試験による表面疲労亀裂検出に及ぼす塗膜の影響, 土木学会論文集, 第398号, 1988.10, pp396-pp404
- 8) 中井, 黒山, 栄羽, 丹生, 明橋: 疲労に着目したプレートガーダー橋二次部材取合部の応力測定結果について, 構造工学論文集, Vol.35A, 1989.3, pp899-pp909
- 9) 増田, 三木, 西脇, 皆川: 合成 I 桁橋の対傾構部材力に及ぼす床版損傷補修対策の影響, 構造工学論文集, Vol.34A, 1988.3, pp375-pp383
- 10) 三木, 竹之内, 森, 大川: 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, 構造工学論文集, Vol.34A, 1988.3, pp543-pp550
- 11) 北沢, 大西, 川北, 林: 鋼 I 桁橋主桁と横桁あるいは対傾構との取合部の疲労損傷とその対策, 阪神高速道路公団技報, 第6号, 1986, pp122-pp134
- 12) 阪神高速道路公団: 道路構造物の補修要領 第1部 鋼構造物 第6編 平成2年6月
- 13) 寺田, 名取, 村山: 高張力ブラインドボルトの基礎試験報告, 土木学会第44回年次講演会概要集, 1989.10, pp476-pp477
- 14) 日本鋼構造協会: 疲労設計指針(案), 1989.11, JSSCレポートNo.14
- 15) OKUMURA, NISHIMURA, MIKI, HASEGAWA: Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steel, PROC OF JSCE, No.322, 1982.6, pp175-pp178

(1990年10月12日受付)