

高速道路における橋梁の応力測定と延命対策

建設機械化研究所 竹之内博行

1. はじめに

東名高速道路は日本の高速道路網において、産業経済の中心地帯を結ぶ最重要路線の一つである。この道路は、日本で最初の本格的な高速道路として建設され、1965年から1968年にかけて供用が開始された。東名高速道路の交通量は、供用開始後の30年間に著しく増加した。大型車の混入率が高いのが特徴である。

1980年頃から、これらの橋梁に各種の疲労損傷が見られるようになった。それ以来、これらの疲労損傷を補修あるいは防止するためのいろいろな調査や研究が行われてきた。この論文はこれらの調査研究の一環として行われた橋梁の応力測定と、損傷した橋梁の延命対策として現在実施されている各種の補修補強工法の概要を紹介するものである。

東名高速道路の鋼橋には、トラス橋やアーチ橋もあるが、大半はプレートガーダー橋である。したがってここでは、プレートガーダー橋を中心に話を進めることとするが、基本的な考え方や工法は他の橋梁形式でも同様である。

東名高速道路の約85%を管理する東京第一管理局の管内には、合成および非合成を合わせて112橋の鋼プレートガーダー橋がある。図-1に東名高速道路のプレートガーダー橋の代表的な構造を示す。全プレートガーダー橋のうち、58%が4主桁橋であり、37%が3主桁橋である。コンクリート床版の厚さは、4主桁橋で170～190mm、3主桁橋で180～200mmである。

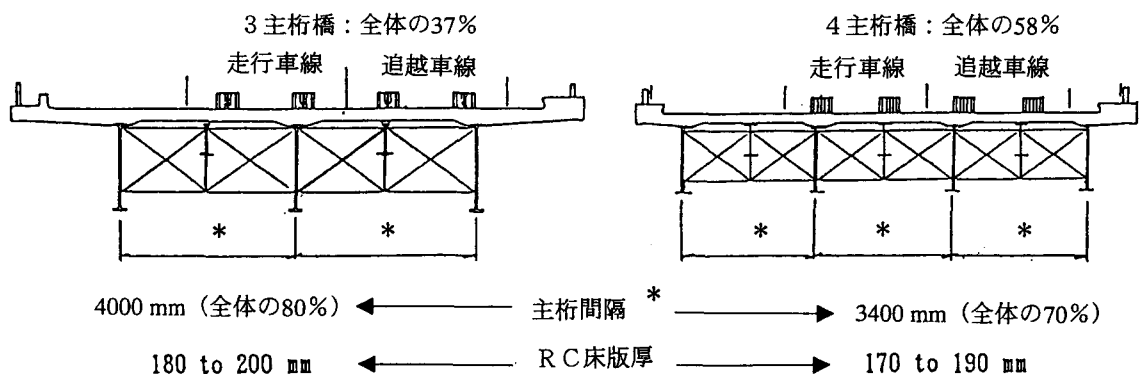


図-1 東名高速道路プレートガーダー橋の構造

2. 疲労損傷

高速道路のプレートガーダー橋においては、図-2 に示すように、対傾構や横桁を取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。このような部位における疲労きれつの発生は、我国の道路橋で最も典型的な疲労損傷である¹⁾。この疲労きれつは同程度の荷重条件であれば、橋ごとの多少のディテール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と同時に発生することが特徴である。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格点部に生じる二次応力とされている²⁾。すなわち、対傾構が取り付けられている垂直補剛材に自動車荷重による力が働き、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るためと考えられる。

また、他の橋梁形式においてもよく見られる疲労損傷には図-3 に示すようなものがある^{3), 4)}。

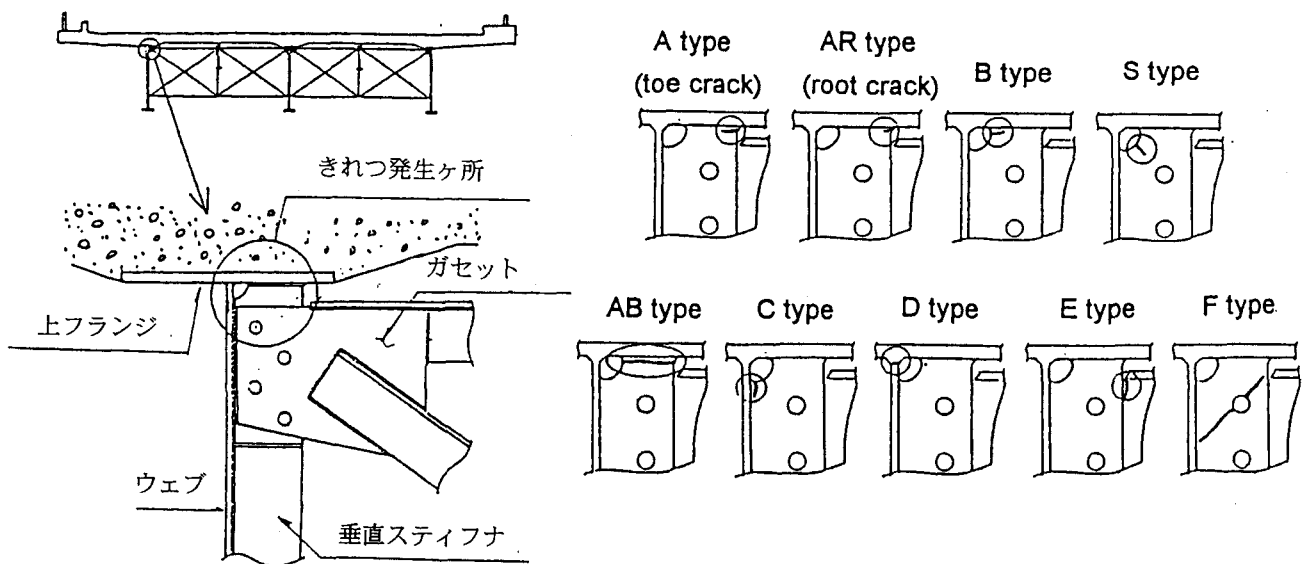


図-2 対傾構取り付け部の疲労きれつの種類と発生位置

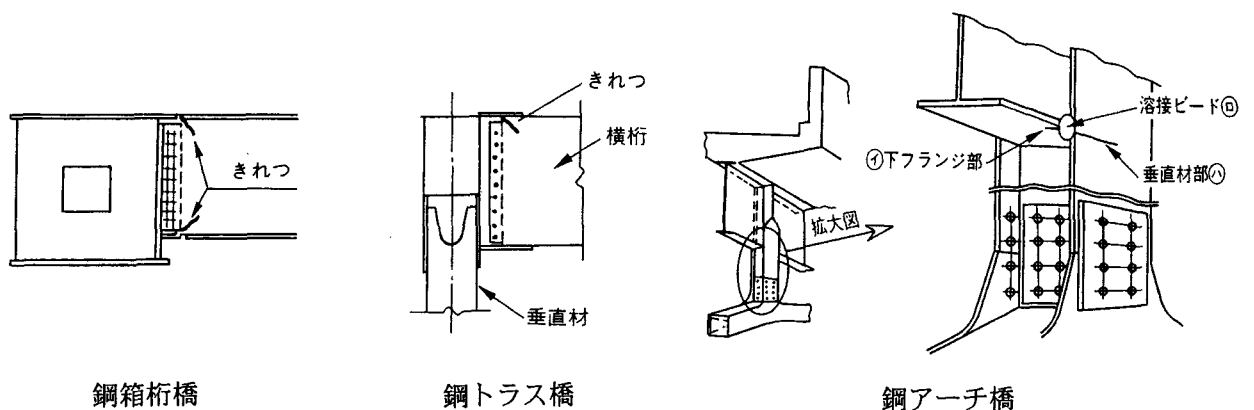


図-3 他の橋梁形式での疲労きれつの発生例

3. 応力測定

3. 1 測定の種類と目的

き裂の発生原因を解明して適切な補修対策を見出すためには、対象とする橋梁が実際の交通荷重下でどのような応力変形挙動を示しているのかを把握することが第一であり、実橋での測定が必要となる。

実橋で行われる測定は、図-4に示すようにその目的から次の2種類に分けることができる。まず第一は、橋梁の構造特性を把握するための測定で、車両の载荷位置やその大きさと、それによって生じる橋梁各部の応力や変形との関係を促えるものである。第二は、疲労寿命の推定などの疲労解析に必要な実交通荷重による応力変動状況を把握するための測定で、着目点の応力変化を通常の供用状態で一定期間連続的に測定し、応力頻度分析などを行うものである。この測定では、通常の交通状態での応力変形性状を得ることが重要であり、測定により交通に乱れを生じさせることは絶対に避けなければならない。

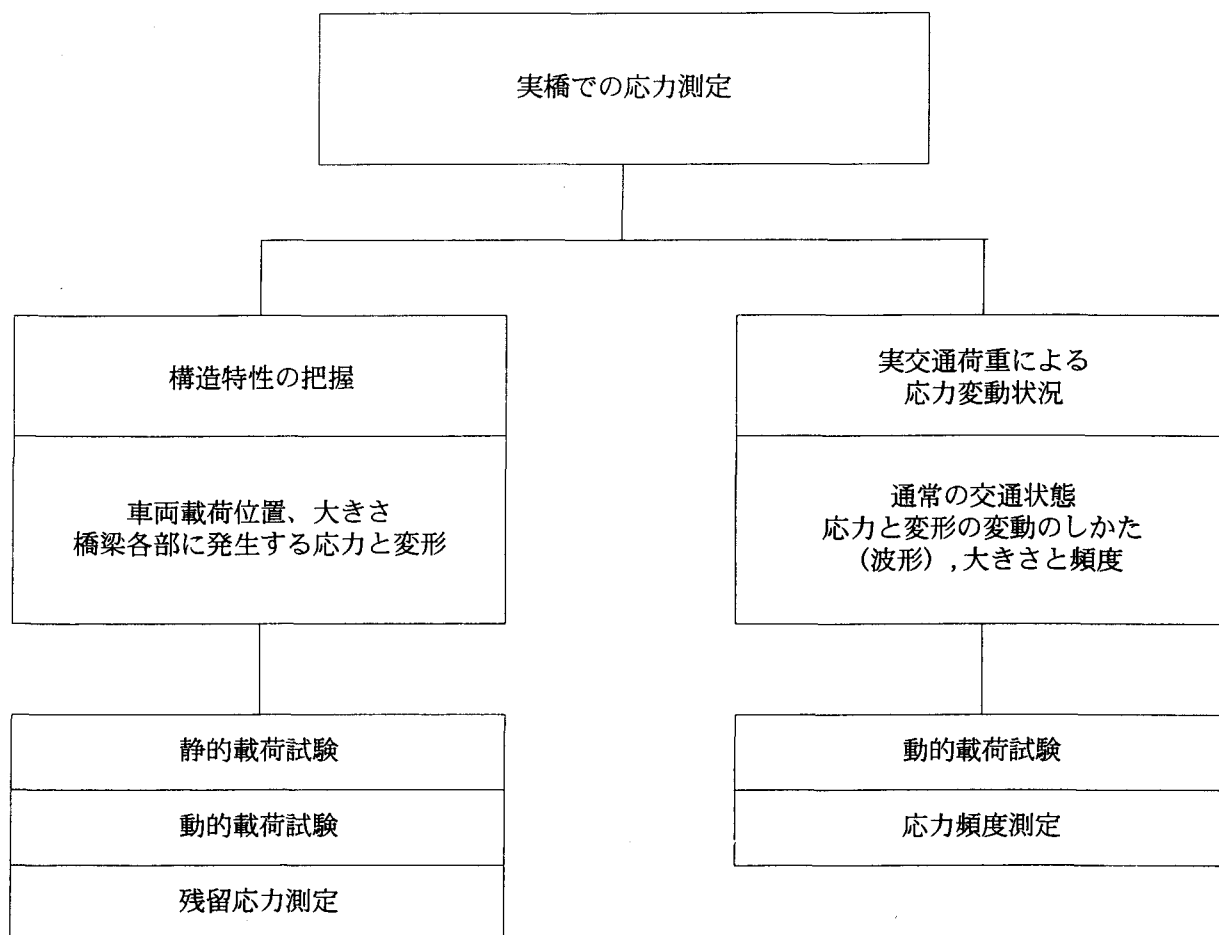


図-4 実橋での応力測定

3. 2 供用状態での測定

(1) 走行車判別装置を用いた測定方法

構造特性把握のための測定は、これまで一般には交通を一時遮断して、所定位置に所定荷重を載荷する静的荷重試験が実施されてきた。しかし高速道路のように、極力通常の交通を阻害することなく測定することが要求されている場合には、通常の交通状態のままで、静的荷重試験と同等もしくはそれ以上の測定が可能なシステムが必要となる。その場合、通常車両を載荷荷重として、車両通過時の橋梁各部の応力や変形を動的に測定するとともに、通過車両の走行車線、車両の大きさ、他の車両との間隔など、載荷荷重とした通過車両の走行状態を的確に判別することが要求される。

この目的のために開発された現場測定用の走行車判別装置の一例を図-5に示す⁵⁾。ここで開発した走行車判別装置は、複数車線をまたいで3組の光電スイッチを配置し、それらの受光遮断順序などを識別する

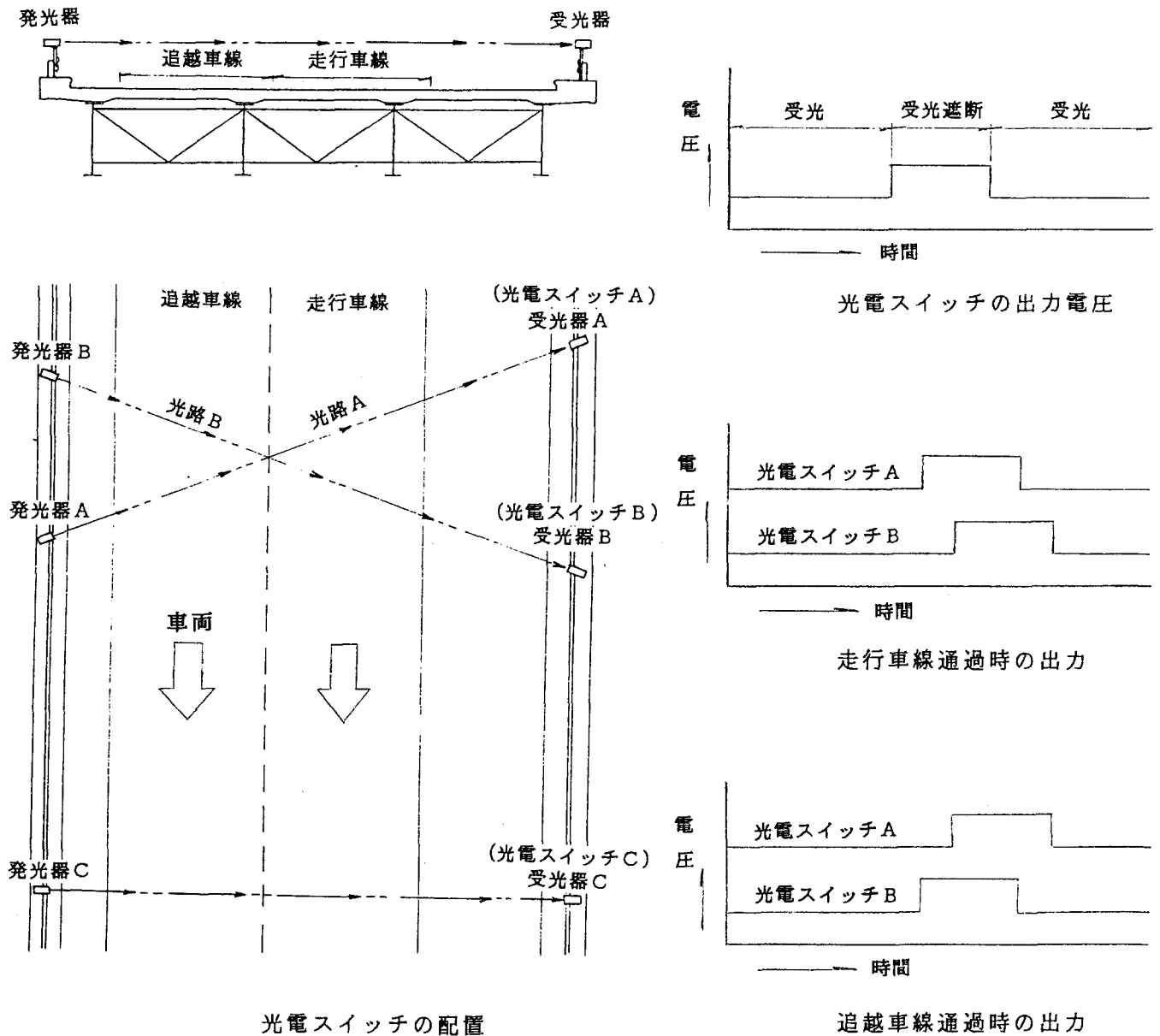


図-5 光電スイッチを用いた走行車判別装置

ことにより走行車の判別を行うものである。使用している光電スイッチは市販の透過型光電スイッチ（検出距離30m）で特に新しいものではないが、その配置により、走行車の判別を可能にしたことがこの装置の特徴である。

図-5において、光電スイッチAおよび光電スイッチBにより測定開始位置を車両が通過するのを検出すると同時に、A、B2つの光路を遮断する順序を判別すれば、その車両が何れの車線を通じたかを容易に判定することができる。すなわちA→Bの順で遮断した時は走行車線、B→Aの順で遮断した時は追越車線と判定される。

また光電スイッチCは、車両が測定位置直上を通過するのを検出するとともに、車両の走行速度が一定という条件のもとで、光電スイッチAあるいはBとの組合せで走行速度を、さらには、光路Cの遮断時間と走行速度から車両の長さを検出することができる。

走行状態の判定は、デジタル信号に変換された各光電スイッチの出力をコンピュータにより逐時比較して行う。

(2) 走行車判別装置を用いた動的測定例

測定の対象は図-6に示すような2車線の連続鋼プレートガーダー橋である。この橋梁の鋼材溶接部に生じた疲労き裂の発生原因解明と適切な補修対策を見出すための基礎資料を得ることを目的として、図中に示した位置で応力および変形を測定した。この測定においては、通常交通を阻害しないで行うことが前提となっている。

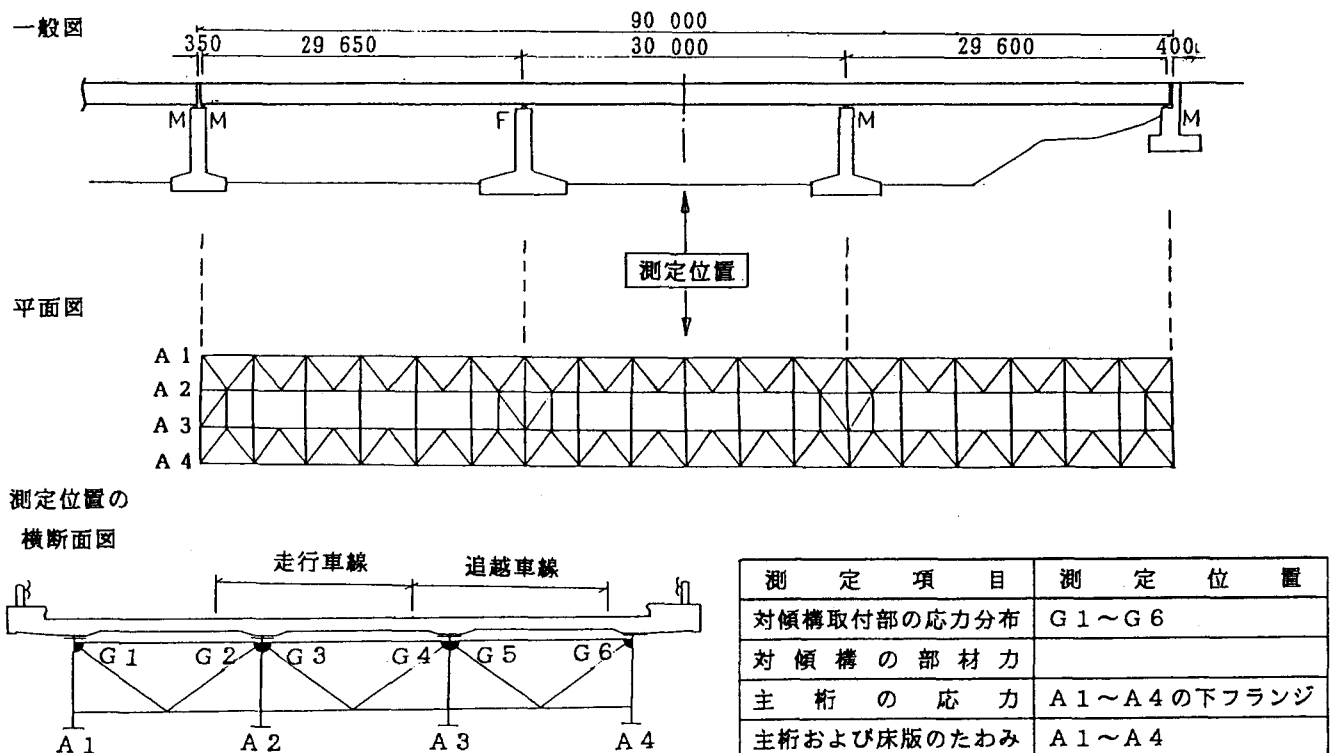


図-6 測定対象の橋梁と測定内容

図-7は、図-6に示した測定内容のうち、G5およびG6の対傾構取付け部の応力を測定した場合で、大型車が単独で追越車線を通じた時の測定例である。光電スイッチの波形から、測定開始位置の追越車線に車両が進入した瞬間から測定が開始され、その車両の前後近傍には他の車両がないことが確認できる。測定応力の波形を光電スイッチCの波形と対比させると、どの応力も車両が測定位置直上を通過する時に大きな変化を示し、その中でも前後輪それぞれの通過時にピークが生じているのがわかる。図中※印で示したのは最大値が生じている時点で、後輪通過時と一致している。また、主桁の応力のように前後輪それぞれの影響は明確に現れないものもある。

これらのデータから、たとえば図中※印で示したようなある一時点でのデータを抽出して整理すれば、その時点、あるいはその載荷状態での応力分布状態などが把握できる。

また、図-8に総重量20tの荷重車を走行させた時の橋梁各部の応力変形挙動の測定例を示す。

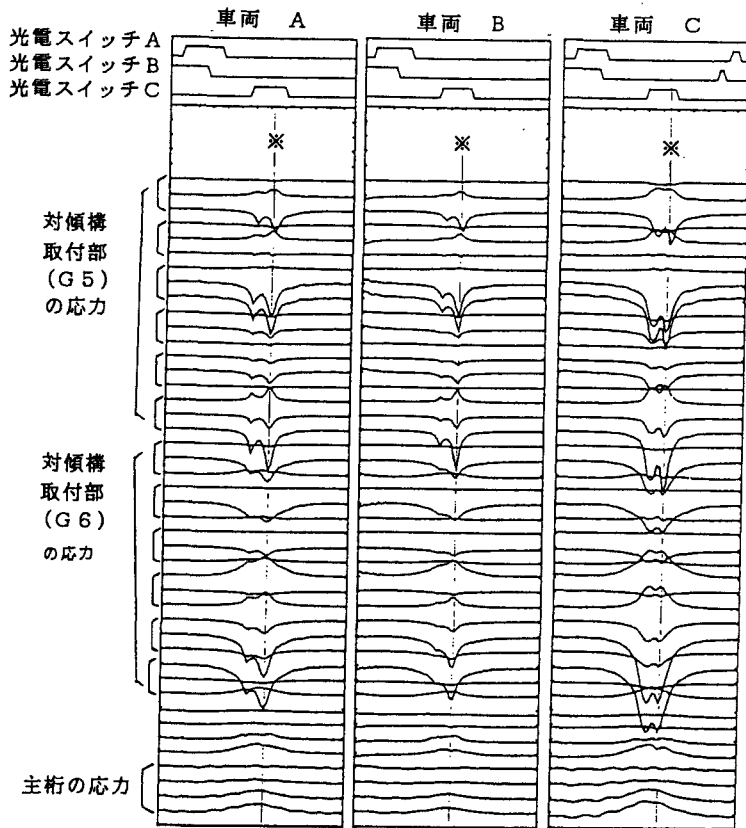


図-7 大型車通過時の測定例

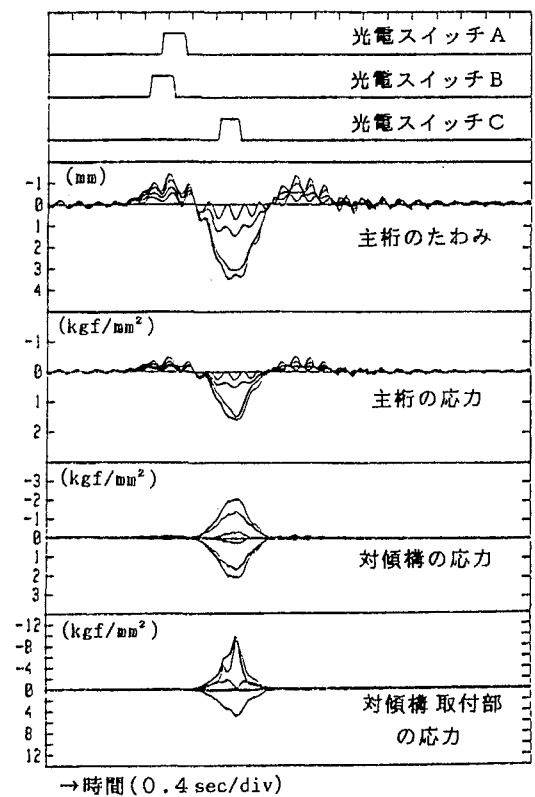


図-8 20t 荷重車通過時の測定例

(3) 垂直補剛材上端部の応力状態

疲労きれつが多発している垂直補剛材上端部について、前述の測定方法により測定された結果の一例を図-9に示す。これにより、

①主応力は、対傾構の斜材方向に引張、これと直角方向には圧縮の2軸応力状態である。

②外端部では面外曲げによる応力が発生しており、応力の値も大きい。

ことがわかる。

また、これらの部位の応力頻度分析により、きれつが生じている箇所の垂直補剛材と主桁フランジ間のすみ肉溶接（仕上げなし）の疲労寿命を推定すると十年程度となり、きれつ発生の可能性が大きい応力状態となっている。

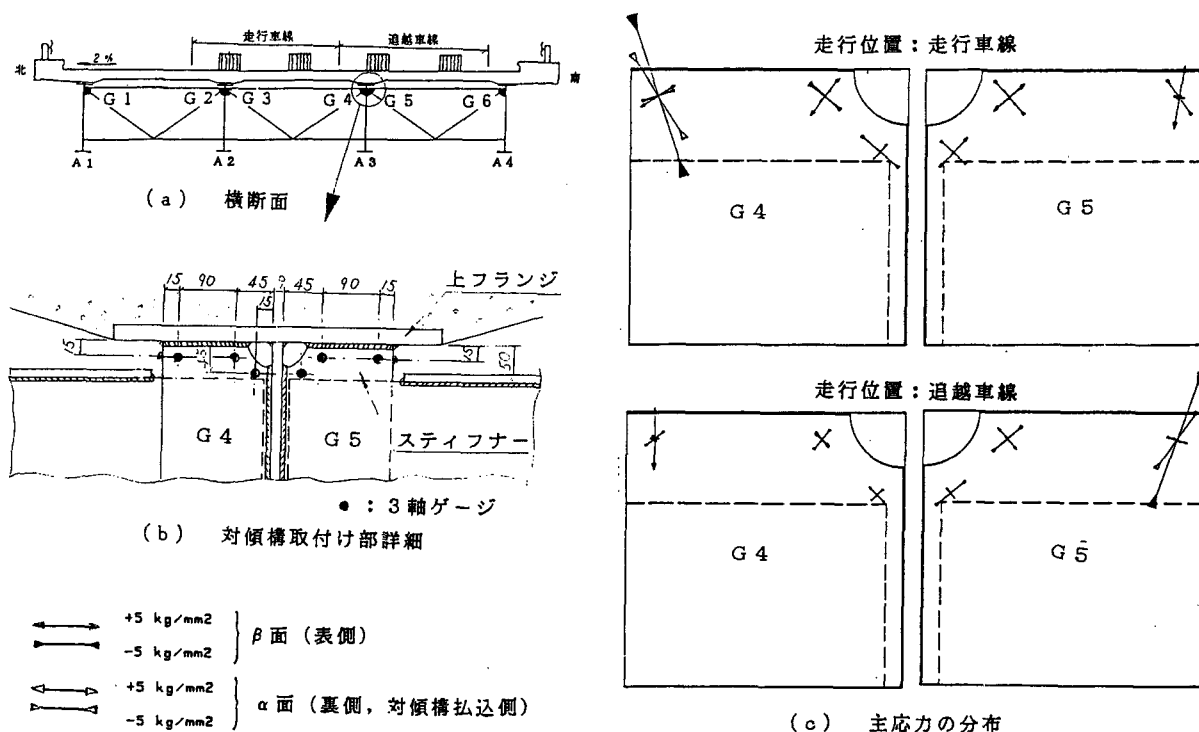


図-9 垂直ステイフナ上端部の応力分布

3. 3 実橋耐荷性能試験

既設橋梁が有する耐荷性能を検討する方法として、海外では「Proof Loading Test」「Swiss Test」と呼ばれる試験が行われている。これは、既設橋梁に法律で定められた荷重よりも大きい荷重を載荷し、この載荷による損傷が橋梁に認められなければ、載荷した荷重までの耐荷力を保証するものである。日本国内においては、このような載荷試験は行われておらず、一般に車両総重量20トン（法定上の最大重量）程度の車両を荷重車として載荷試験が実施されている。すなわち、20トンを越えた荷重を載荷した場合の橋梁各部の挙動については、ほとんど明らかにされていないのが実状と言える。

近年、東名高速道路の橋梁については、縦桁増設や上面増厚工法などによる床版の補強、対傾構増設工事、床版張出し部のガードレールの壁高欄化、および遮音壁の設置などが進められており、これらの改良工事に伴う死荷重の増加や、近年改訂された設計活荷重の増加が、既設の構造系に対して大きな負担となって

いる。このような死荷重や活荷重の増加は、設計計算上、そのまま主桁の応力負担を増すことになるので、橋梁の耐荷性能の確認手段が重要な課題とされている⁶⁾。

ここでは、このようなことから最近実施された実橋耐荷性能試験の一例を紹介しておく。図-10に試験状況を示す。この試験では、50tfトレーラー4台を用いて合計200tfの荷重を載荷した。この荷重は事前の立体FEM解析により中間支点部の主桁応力で道路橋示方書に示されるB活荷重載荷相当、中央径間支間中央ではB活荷重載荷の約8割の応力が生じるものと予測された。載荷試験の目的は、この立体FEM解析モデルの妥当性検証と、実橋の耐荷性能の保証にある。つまり本載荷試験では、総重量200tfの

荷重を載荷して実橋に異常が認められなければ、対象橋梁はそれまでの荷重に対しての耐荷性能を有することが保証され、この結果を立体FEM解析と比較することで解析的な面からの検証も可能となる。さらに、24時間の頻度測定から一般的実交通下で生じる応力の最大値を把握することにより、実橋は持つ耐荷性能と実交通荷重との関係をとらえることも可能となる。

4. 溶接による補修対策

4.1 補修方針

疲労損傷の防止や補修に対する考え方としては、

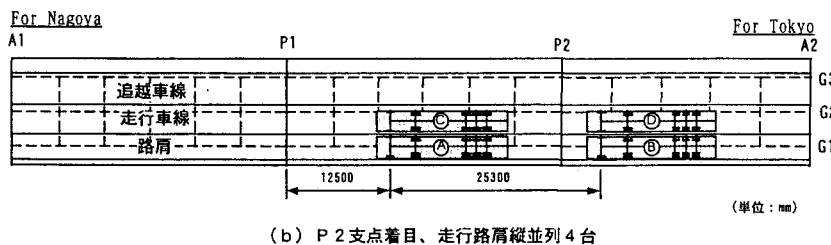
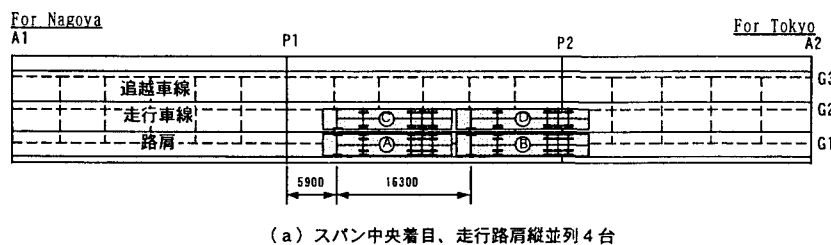
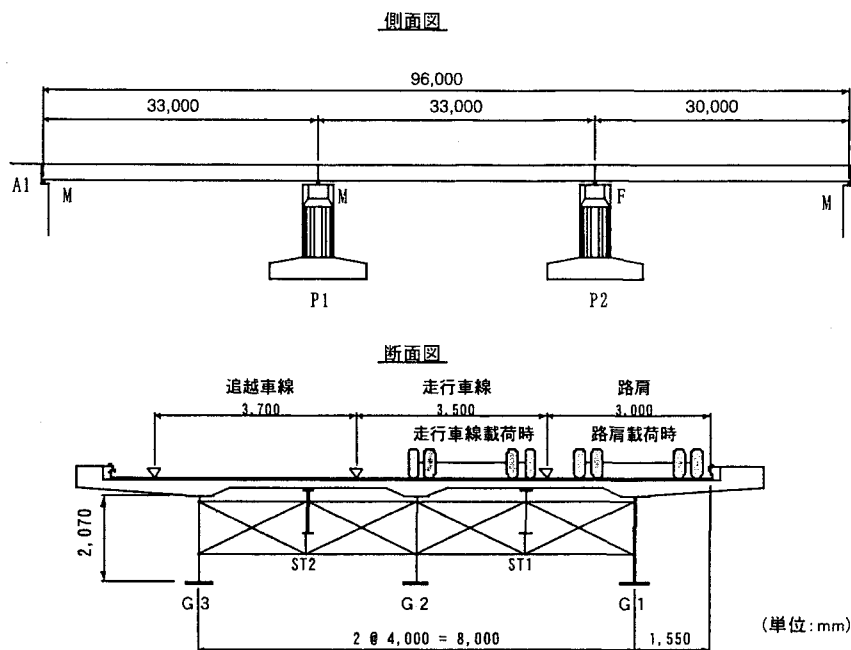


図-10 50tfトレーラーを用いた実橋載荷試験概要

(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2通りがある。

損傷状況の実態が、(i) 損傷を生じている部位の溶接に、のど厚不足や極度の不等脚などが見られること、および(ii) 20年近くも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、発見されている大部分は垂直補剛材のこぼ面に発生した非常に小さい寸法のものであること、などを考慮して、まず「溶接継手の疲労強度を高める」立場からの対策を検討した⁷⁾。この補修では、きれつの除去、再溶接による溶接サイズの確保、およびビード止端の仕上げが基本となる作業である。

4. 2 補修溶接の疲労試験

補修溶接として提案された具体的な方法は、きれつの除去、再溶接による溶接サイズの確保、およびTIG処理によるビード止端の仕上げである。このような補修溶接の疲労強度を確認するため、実橋の溶接ビードを再現した試験体による疲労試験を行った。

疲労きれつが生じている垂直補剛材と上フランジ間のすみ肉溶接を取出すと荷重伝達型のリブ十字すみ肉溶接継手となる。実橋での板厚および溶接ビード形状を参考にして、図-11中の写真に示すような試験体を製作し、それに各種の補修溶接を行ったものについて疲労試験を実施した。

図-11に試験結果を鋼構造物の疲労設計指針(日本鋼構造協会)の疲労設計曲線と対比させて示す⁸⁾。AS-WELD試験体は実橋のすみ肉溶接を再現したものである。GRINDING試験体は、完全溶込み溶接の後、上端部をグラインダで仕上げている。TIG試験体はAS-WELDと同様なすみ肉溶接を行った上に、さらに1パスのすみ肉溶接を加え、その上端部をTIG-dressingにより滑らかに仕上げている。試験結果ではE~F等級のAS-WELD試験体の疲労強度が、GRINDINGあるいはTIGによりB等級にまで向上している。

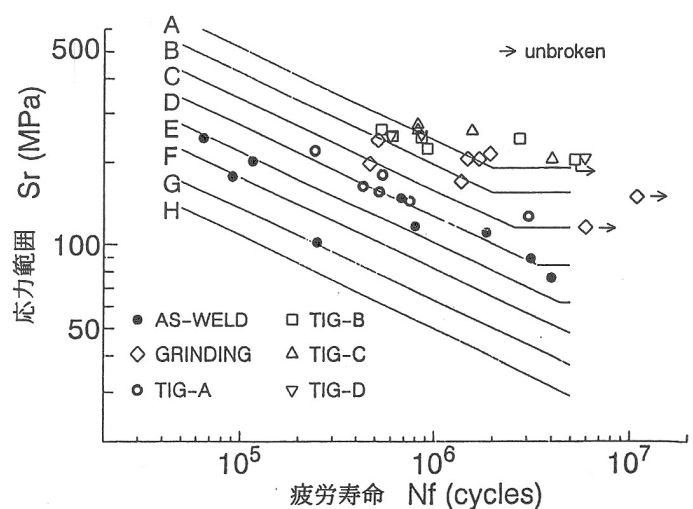
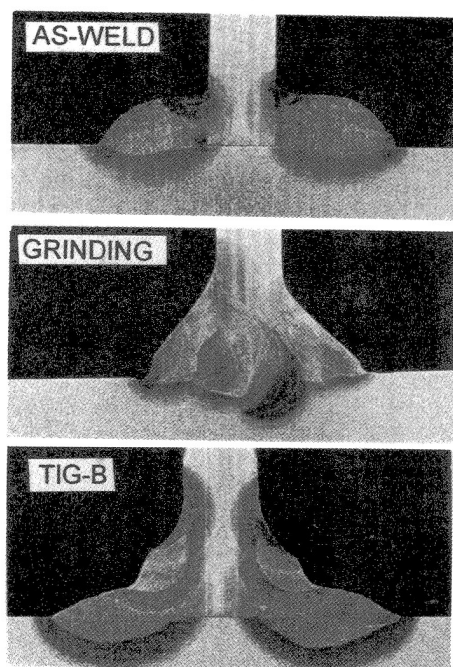


図-11 補修溶接の疲労試験結果

4. 3 標準的な補修工法

以上の検討結果に基づいて、実橋の補修工法としてはTIG試験体に施したような方法を標準工法とした。実橋の調査結果によれば、発生している疲労きれつは図-2に示すA型の、しかも回し溶接部こぼ面の表面長さが10mm以下のものが最も多い。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い、その上端部をTIG-dressingにより仕上げることにした。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(8~11mm程度)を越えない範囲とした。

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うものとした。この場合も上端は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うことにした。

溶接上端部の仕上げ方法として、グラインダがけよりも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。疲労強度を改善する目的のグラインダがけは、完全に溶接止端部を削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仕上げを行うことはかなり難しい。

また、現場作業の所要時間は、グラインダがけが約15分に対して、TIG-dressingは約3分であった。

4. 4 実橋での補修工事の結果

溶接による補修対策は1988年より要領化され、現在この要領に従った補修工事が実施されている。補修された30橋について追跡調査を行ったところ、ほとんどの橋梁ではきれつの再発などは生じていない。よい結果を得ているが、中には効果が十分でない橋梁も見られる。このような橋梁では構造的補強による対策が必要となる。

5. 構造的補強による対策

「発生する応力を下げる」立場からは、橋梁の骨組みおよび床版に対する各種の構造的補強による対策を試み、その効果をFEM解析により予測するとともに、実橋測定により確認した。実施した各工法の概要と効果の実測結果を以下に述べる。なお、床版に対する補強は、床版自体の疲労損傷、たとえば2方向のひびわれや貫通ひびわれに対する対策として実施するケースが多く、鋼桁部の応力低減はその副次的効果として得られるものである。

5. 1 縦桁増設

旧基準で建設された主要高速道路の床版は、現行示方書の規定に比べて床版厚が薄いこと、主桁間隔が広いことなどから、床版を補強する目的で縦桁を主桁間の中央に配置する対策が既にほとんどの橋梁で実施

されている。これにより、図-12に示すように床版のたわみが減少し、きれつ発生部位の応力も減少することが確認されている⁹⁾。

5.2 対傾構増設

既設の対傾構の間に、さらに対傾構を追加し、主桁間の荷重分配機能を高めるとともに、1箇所当たりの荷重負担を軽減する。追加する対傾構の詳細構造は、疲労強度を考慮して改良された構造とする。これにより、主桁間の不等沈下が軽減され、きれつ発生部に生じる応力が2割減少した¹⁰⁾。

また、荷重分配機能は増設した対傾構に受けもたせ、既設の対傾構の上支材と斜材を取外す。これにより、骨組み系の原因を除去することができ、実測ではきれつ発生部の応力がさらに30%減少した¹¹⁾。

5.3 床版上面増厚

床版厚を増すことによって床版剛性を高める。工事の概要を図-13に示す。旧床版表面を切削処理した後、スチールファイバを混入したコンクリートにより約5cmの増厚を行う。これにより桁および床版のたわみが減少するとともに、きれつ発生部の応力も減少した¹²⁾。

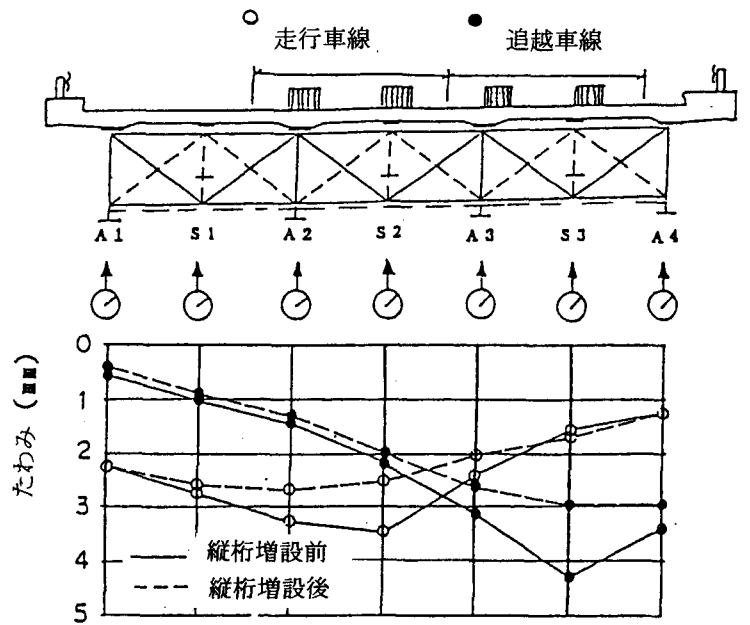


図-12 縦桁増設の効果

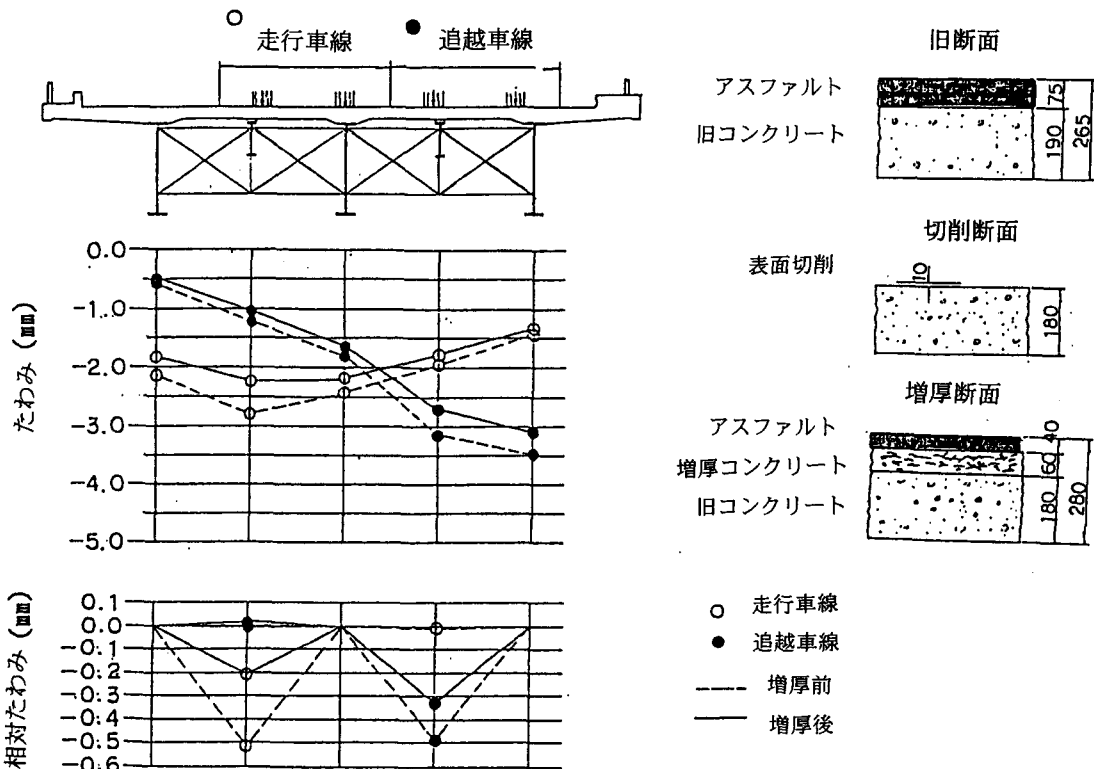


図-13 床版上面増厚の効果

5. 4 床版全面打替え

損傷が著しい床版を全面的に撤去し、新床版を設置する。試験工事では、急速かつ確実な施工を目指して、I型鋼格子床版、プレキャストコンクリート床版、鋼床版の3種類の新床版による打替えを実施した。各工法とも、主桁の合成作用で橋桁全体の剛性を高めることができ、き裂発生部位の応力状態も改善された¹³⁾。

6. おわりに

疲労損傷を受けた高速道路の鋼道路橋に対するさまざまな研究や補修補強対策について述べた。実橋測定と疲労試験などの結果に基づいて補修溶接の標準工法が要領化されており、現在、それに従った補修工事が多くの損傷橋梁で実施されている。また、各種の構造的改良による疲労損傷の防止対策も進められている。

さらに最近では、既設の橋梁に補強を行う場合の設計方法について、既設橋梁が有する耐荷性能を正しく評価することにより、合理的・経済的な補強設計を可能にするための研究が進められている。

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, 19-23, 1983
- 2) Fisher, J.W. : Fatigue and Fracture in Steel Bridges, Wiley&Sons, 1984
- 3) 竹之内博行, 谷倉泉, 大谷祥三, 三木千寿：鋼トラス橋横桁取付け部の疲労損傷と対策, 土木学会論文集, No.570/I-40, 141-151, 1997.7
- 4) 松本正徳, 谷倉泉, 大川征治, 七崎洋悦：実橋におけるアーチ橋垂直取合い部の疲労対策とその効果, 第51回土木学会年次学術講演会, I-A410, 820-821, 1996.9
- 5) 竹之内博行, 谷倉泉, 古川正巳, 三木千寿：実交通荷重による橋梁の応力および変形の測定方法, 構造工学論文集, vol. 32A, 631-639, 1986.3
- 6) 窪田賢司, 西浩嗣, 谷倉泉, 上野淳人：プレートガーダー橋の実橋載荷試験及び立体FEM解析による検証, 第53回土木学会年次学術講演会, I-A309, 618-619, 1998.10
- 7) 三木千寿, 竹之内博行, 森猛, 大川征治：主桁と対傾構との取り合い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, 543-550, 1988.3
- 8) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1993.4
- 9) 竹之内博行, 谷倉泉, 高倉敏, 三木千寿：実交通荷重による鋼桁橋の応力変形挙動, 構造工学論文集, vol. 33A, 361-371, 1987.3
- 10) 竹之内博行, 谷倉泉, 西田巖, 大橋健二：対傾構増設による鋼桁橋の補強効果に関する調査・研究, 第45回土木学会年次学術講演会, I-419, 868-869, 1990.9

- 11) 国原博司, 石井孝男, 谷倉泉, 竹之内博行, 増田陳紀: 既設対傾構の一部取外しによる対傾構取付け部の疲労損傷対策, 第48回土木学会年次学術講演会, I-210, 568-569, 1993.9
- 12) 谷倉泉, 竹之内博行, 西田巖, 大橋健二: 上面増厚によるRC床版の補強効果に関する調査・研究, 第45回土木学会年次学術講演会, V-355, 736-737, 1990.9
- 13) 石井孝男, 井口忠司, 竹之内博行, 谷倉泉: 鋼橋RC床版の全面打替えによる改良効果, 構造工学論文集, vol.39A, 1011-1024, 1993.3