

## 【委員会報告】

## 鋼橋の劣化現象と損傷の評価

## STUDY ON DETERIORATION AND DAMAGE ASSESSMENT OF EXISTING STEEL BRIDGES

鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会

Subcommittee on Assessment of Residual Service Life of Steel Bridges

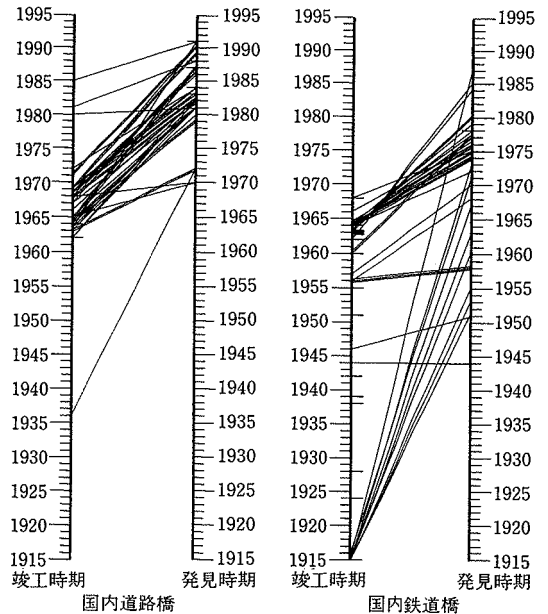
## 1. はじめに

鋼橋は自然環境下に設置され、それが数十年あるいは数百年という非常に長い期間供用され続ける。その供用期間中、構造部材はトラックや列車の通過によって生じる変動荷重を繰返し受ける。また、野外で風雨にさらされており、防錆塗装を施してあるものの多湿な我が国では常時乾湿状態を繰返し受け、塗膜の劣化とともに腐食作用を受けることとなる。このような繰返し荷重および腐食によって生じる損傷は時間とともに進行していく性質のものであり、鋼橋の寿命を支配する重要な要因と言える。

供用中の橋梁がその劣化現象により破壊した場合の危険性や社会生活に及ぼす影響を考えた場合、あるいは今後建設される新設橋をも含めた膨大な数の橋梁を健全な状態に維持していくためには、劣化による破壊を防止するための設計および維持管理の重要性は益々増大していくものと考えられる。

鋼橋の維持管理計画や補修・補強あるいは架け替え計画を考える際には、現時点での損傷度や現有する耐荷力、余寿命を的確に評価することが必要である。その際、種々の劣化現象を正確に検出し、それらによる損傷の程度を定量的に把握するとともに、交通状況の実態やそれによって橋梁各部に発生する応力や変形の性状を知ることが重要となってくる。また、損傷の進行状況を把握するためのモニタリング技術も重要である。従来、維持管理の分野はあまり陽のあたらない地味な分野との印象を与えてきたが、最近はその重要性が認識されはじめ、維持管理技術に関する研究や開発が行われるようになってきた。元来、維持管理業務に関しては、材料、構造、荷重、環境などといった広い知識が必要な分野であり、今後益々この分野における技術開発、技術向上が必要と考えられる。

このような観点から、鋼構造委員会では活動の一つとして「鋼橋の余寿命評価小委員会」を設置し、維持管理分野での既存の研究・開発の成果を集成することにより、この分野における技術の現状と将来への展望を調査



図一 疲労変状橋梁の竣工時期と発見時期との関係

検討することとなった。本文はその成果の概要について述べるものである。

## 2. 鋼橋の劣化現象と損傷事例

## (1) 鋼橋の劣化現象

鋼材は比較的高強度な材料であることから、構造物の軽量化が可能であるが、逆にそのために荷重全体に占める変動荷重の割合が大きくなり、疲労の影響を受けやすくなる。また、延性に富み優れた加工性・変形能を示す一方で、塗装や被膜が劣化した場合には腐食の影響を受けやすいという弱点がある。このような疲労と腐食による被害は時間の経過とともに蓄積される性格のものであり、鋼橋の物理的寿命を支配する重要な劣化要因である。

## (2) 疲労損傷事例

## a) 鋼橋における疲労損傷の特徴

近年における高張力鋼の使用や溶接構造の主流化は、残留応力や溶接欠陥といった疲労に対する影響の大きい

新しい要因の導入をもたらした。また、道路橋においては、設計荷重を大幅に上回る過積載車の頻繁な走行下にさらされており、従来、鉄道橋に固有な現象として考えられてきた疲労損傷が道路橋においても発生するようになってきた<sup>1)~7)</sup>。

鉄道橋と道路橋について疲労損傷の発生時期とその橋梁の竣工時期の関係を示したものが図-1である<sup>8)</sup>。鉄道橋において、1950年以降断続的に発見されている事例は、主に1915年以前に建設されたリベット構造の橋が40年以上の長期間使用された結果、縦桁端部の切欠きやアイバー、リベット孔、溶接補強部などに亀裂を生じたものである。また、1970年代中頃に集中的に発見された損傷は、溶接構造が本格的に採用された1964年頃に竣工した橋梁に生じたものである。道路橋において交通荷重による疲労損傷が本格的に現れ始めるのは1980年頃からである。損傷が発見された橋梁の竣工時期には1960年代の中頃と終頃に二つの集中箇所が認められるが、これらは高速道路の建設ラッシュ時期と関連したものととなっている。なお、1964年の鋼道路橋設計・製作示方書ではプレートガーダーの活荷重たわみ値をスパンの1/500と、それ以前の示方書と比較し緩和している。その結果、高張力鋼の導入や溶接構造の採用とあいまって、相対的に活荷重応力度の割合が高くなり、また、橋全体の剛性が小さく、たわみやすい傾向の構造であったといえる。橋全体の剛性が局部の応力性状にどのような影響を及ぼすかについては明確ではないが、部材間において相対的な変位差を生じさせ、その取付部に過度な二次応力の発生を誘起したとも考えられる。

#### b) 疲労損傷事例

鋼橋において確認されている疲労損傷の多くは、二次部材の接合部に発生している。一般的な設計手順では計算対象外である部位に、応力集中、面外変形、二次応力などの影響が重複して作用することが損傷発生の主要原因となっている。このような部位における損傷の発生に関しては、鋼橋の安全性に直ちに重大な影響を及ぼすものではないが、設計上の配慮不足、製作時の初期欠陥の存在によって、主要部材に早期に損傷の発生する場合や、上述した二次部材の接合部における損傷でも亀裂が進展し主要部材の応力直角方向に向かう場合には重大事故につながる恐れがある。

道路橋において損傷の発生が多く確認されている部位を列挙すると以下のようなものである。

① プレートガーダー橋では対傾構、横桁、横構などの横継材と主桁との接合部に損傷が発生している。損傷の多くは、横継材の取り付け用ガセットプレート、コネクションプレートの溶接部に発生したものであるが、主桁と対傾構の接合部では主桁上フランジや腹板に進展する亀裂も確認されている。また、主桁と横桁の接合部で



写真-1 アーチ橋側径間との連結切欠き部の疲労損傷事例

は横桁上端側だけでなく、下端側の主桁腹板上に主桁引張応力と直交する方向の亀裂が確認されている<sup>9)</sup>。下端側の腹板に関しては、荷重分配作用に伴う面外方向の応力と主桁の曲げ作用による面内応力とが二軸応力状態として作用している部位である。また、亀裂が下フランジ側に進展した場合には主桁の安全性に重大な影響を及ぼす損傷である。

② 桁端切欠き構造の切欠きコーナー部における腹板と下フランジとの溶接部に発生した損傷も多い。この損傷は道路橋における疲労損傷の中でも比較的早期に確認された損傷であるが、点検が十分になされていなかったり、点検時には損傷が確認されなかったが、その後の荷重履歴により新たに発生したものもあり、現在もお損傷事例が報告されている。損傷の原因としては、桁を切り欠いたことにより構造的な応力集中が生じることや製作上ルートギャップが大きくなりやすいなど製作精度上の確保が難しいディテールであることなどが考えられる。このような切欠き構造に関しては、鋸桁、箱桁の桁端部のみならず、ゲルバー桁の架け違い部やアーチ橋の側径間部との連結部においても見られ、類似の損傷事例が報告されている(写真-1参照)<sup>10)</sup>。なお、現在は、この部位のディテールに関しては改良がなされ標準化されている。

③ 鋸桁橋、箱桁橋の支承ソールプレート接合部において亀裂の発生が確認されている(写真-2参照)<sup>11)</sup>。この亀裂については、主桁下フランジを貫通した後に、腹板に進展することから、桁端切欠き部における亀裂と同様に重要な損傷といえる。損傷の原因は、支承の移動、回転機能の低下に伴う二次応力の発生、下フランジ部の断面変化による構造的な応力集中の発生などであるが、発生部位のディテールは極く一般的に採用されているものであり、また、支承の機能劣化については現状ではある程度避けられないことから、今後、供用年数の増加に伴い事例が増加するものと考えられる。損傷部位が狭あいであることから補修補強に苦慮することが多く、効率



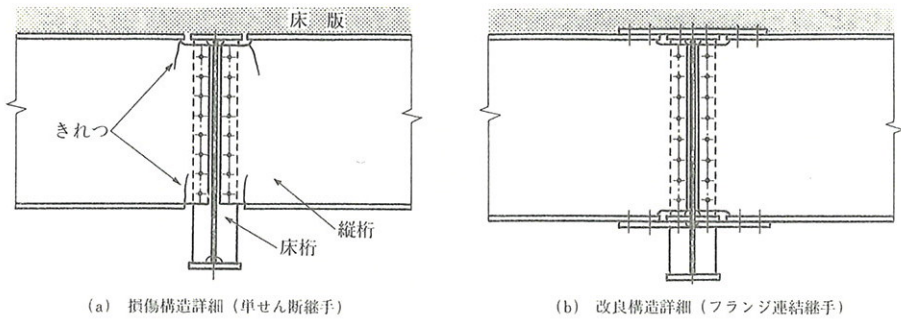


図-2 単せん断継手構造における疲労損傷

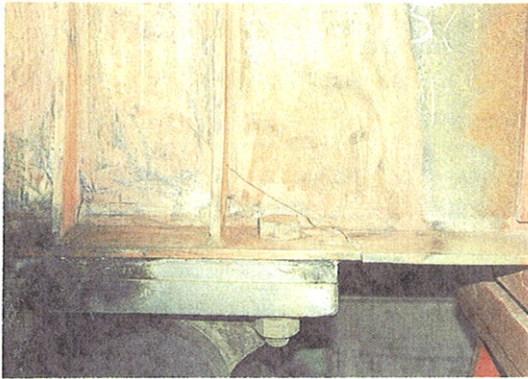


写真-2 箱桁支承ソールプレート接合部の疲労損傷事例

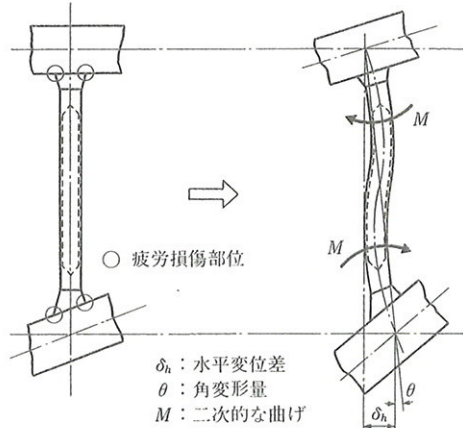


図-3 水平方向変位差の発生に伴う垂直材の変形

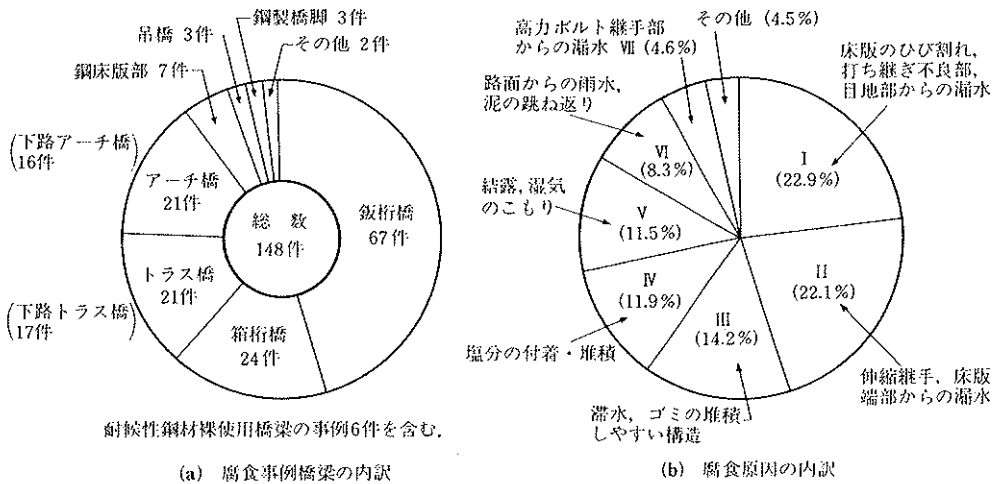
的な補修補強対策の確立が望まれる。また、新設橋の設計においては、ソールプレートの取付けを高力ボルト接合に変更する、下フランジ厚をある程度に確保する、局部応力の発生に配慮したディテールとするなどが必要であり、また、供用後において機能劣化の生じにくい支承の開発も今後は必要である。

④ アーチ橋、トラス橋の床組においては、横桁と縦桁との接合部における縦桁腹板切欠き部に損傷が発生している。また、桁端部近傍の主構と横桁との接合部には、主構と床組との橋軸方向変位差に起因する損傷が従来より報告されていたが、最近、支間中央の一般部での主構と横桁との接合部にも亀裂の発生が報告されている<sup>12)</sup>。横桁と縦桁あるいは主構も横桁との接合構造については、リベットや高力ボルトを用いた単せん断継手構造を採用していることが多い。設計上はせん断力のみを伝えたと仮定し、I断面の腹板のみを片側の払い込み構造により連結する構造である(図-2参照)。しかし、実際には単せん断継手構造においても曲げモーメントの伝達性能を有するので、設計仮定とは異なりせん断力以外にも曲げモーメントが作用する。この曲げモーメントの作用により継手の上下端部に疲労亀裂が発生する。この種の損傷の対策に関しては、上下フランジを連結した曲げ伝達型の構造に改良する方法が一般的に取られる。

⑤ 上路アーチ橋における垂直材と補剛桁あるいは

アーチリブとの接合部に損傷が発生している<sup>10), 13), 14)</sup>。接合部の結合条件に関する設計仮定(ピン結合)と実構造(曲げモーメントを伝達する結合)との相違が主原因と考えられる。車両の通過に伴いアーチ橋の補剛桁とアーチリブ間には橋軸方向の水平変位差が生じるが、垂直材と補剛桁、あるいはアーチリブとの接合が実際には比較的に剛な結合となっており、この変位差に伴い接合部には設計上考慮されない曲げモーメントが作用することとなる(図-3参照)。接合部の構造を設計仮定に合致したピン結合とすればよいが、施工性や維持管理性を考慮した場合、ピン構造とするには無理があり、曲げモーメントの作用に対し十分な疲労強度を有するディテールに改良したり、また、力の集中を分散させるようなディテールに改良することが多い。また、構造上の制約からディテールの改良が困難な場合には、アーチ構造全体を改造し、上述した橋軸方向の水平変位差を低減させる対策を行うことも必要となってくる。

⑥ 鋼床版における縦リブの溶接継手部、横リブと縦リブの交差部および垂直補剛材とデッキプレートとの溶接部などに損傷が発生している。これら損傷事例の中には、鋼床版構造の初期のころの橋梁において確認されたものも多い。それ以後、鋼床版構造自体や細部構造に関



図一4 鋼道路橋における腐食原因

しての変更や改良が加えられてきているが、鋼床版については、活荷重の影響を受けやすい部材であることや、本格的な普及時期が1940年代後半頃からであり、供用年数がまだ比較的に短いことなどが考えられ、今後とも注意して行くことが必要である。

鉄道橋は比較的設計荷重に近い荷重が繰返し載荷されるため、部材の疲労損傷を重要な限界状態と考へて設計が行われている<sup>15)</sup>。つまり、各種継手について分類を行い、それぞれについて疲労許容応力度を定めている。このような疲労検算を行っている主要部材については、現在まで疲労損傷が発生した事例はほとんどない。鉄道橋における疲労損傷の特徴点としては、列車通過時の衝撃・振動により部材の構成板に面外振動が発生し、トラス橋の縦桁、鉸桁や箱桁の垂直補剛材下端部あるいは箱桁ダイヤフラムと縦リブとの交差部に疲労亀裂が発生する事例が多いことである。また、ソールプレート接合部の疲労損傷および主桁桁端切欠きコーナー部については道路橋と同様に損傷が発生している。

### (3) 腐食事例

#### a) 鋼橋における腐食の特徴

鋼橋において“どのような環境において”、“どのような部位に”、“どのようなことが原因で”腐食が発生するのかを理解することは、既設橋の維持管理を行う上で重要なことである。また、新橋の防錆防食を考える上でも有用なことである。図一4は鋼道路橋の腐食事例からその原因を整理したものである<sup>16)</sup>。全数で150橋程度の事例が収集されており、その内、鉸桁橋における事例が最も多く全体の半数程度を占めている。また、箱桁橋、トラス橋、アーチ橋についても20橋程度の事例が収集されている。橋梁形式を問わず、床版ひびわれ損傷部や打継ぎ不良部等からの漏水（I）、伸縮継手部や床版端部からの雨水の落下・漏水（II）が腐食原因全体の半数程

度を占めている。箱桁橋においては、高力ボルト継手部からの漏水（VII）により桁内部に滞水（III）が生じ腐食が発生した事例が多い。下路のアーチ橋やトラス橋においては、路面からの雨水や泥の跳ね返り（VI）により主構や弦材あるいは格点部に滞水、ゴミの堆積（III）が生じ腐食している事例が多い結果となっている。これらの腐食事例はいずれも構造的な要因に起因する局所的なものであり、このことは鋼橋における腐食の特徴として第一にあげることができる。橋梁の全体的な腐食としては、海塩粒子の付着（IV）が原因で発生する腐食があげられる。海岸に面した位置あるいは河口部に設けられた橋梁においては海塩粒子の付着が腐食を促進し、全体的に腐食が進行する事例がある。しかし、この場合においても、腐食の程度は橋梁の各部位で異なり、付着塩分が雨水で洗い流されにくく堆積するような部位、例えば桁の内側、床組部材、部材の格点部において腐食の程度が著しい場合が多い。

#### b) 腐食事例

鋼橋の周辺環境や構成する各部材の形状や位置によっては、比較的長時間にわたり湿潤状態に置かれる場合がある。また、雨水の漏水により局所的な滞水が生じるような場合もある。以下に橋梁の各部位毎の代表的な腐食事例を示す<sup>17)</sup>。

なお、ここで取り上げた事例の多くについては、設計時における塗装系の選定ミスや構造的な配慮不足、塗装の塗り替えを含めた維持管理の不十分が原因で生じたものである。

① 海岸地域における海塩粒子の付着による腐食事例は多い。特に、降雨により付着した海塩粒子が洗浄されないような部位では、塩分が水分を吸収し塗膜の劣化を助長する。そのため、使用した塗装系が適切でない場合には、設計時に想定していた以上に塗膜の劣化が進行





写真-3 塩害による鈹桁橋の腐食事例  
(桁内側面の腐食事例)

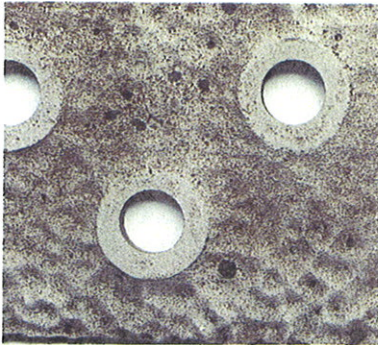


写真-4 プラスト処理後(1日放置)の発錆状況

し腐食が生じる場合がある。一般的には床版下の床組部材やその格点部、主桁・主構の内面側などに腐食が生じやすい。写真-3に鈹桁橋における腐食事例を示す。また、写真-4には実橋より撤去した部材のサンドブラスト後の表面状況を示す。孔食の底部にはブラスト処理により除去しきれない塩分が残留し、ブラスト処理後、直ちに水分を吸収し錆が再発生しているのが判る。このように、錆層内に塩分が侵入するとその完全な除去はかなり困難であり、再塗装に際しては十分な素地調整を行うことが必要である。

② 桁端部には、桁の変形を吸収するとともに路面の連続性を確保するために伸縮装置が設けられる。この伸縮装置の排水機能が不十分な場合には、この部位から雨水が漏水し腐食が発生する。この種の腐食は、一般環境下での腐食としては最も一般的な腐食である。腐食部位としては、主桁の下フランジやその近傍のウェブ、端補剛材の下端部、支承部などである。桁端部は死荷重あるいは活荷重を支える重要な部位であり、腐食の発生は橋

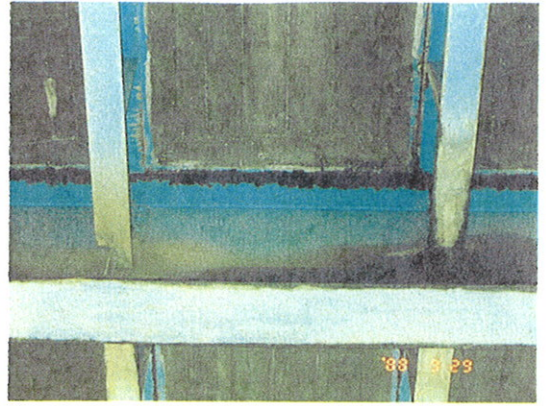


写真-5 下路アーチ橋の床組部材の腐食事例 (床版からの漏水による腐食)

梁の耐荷性能、使用性能に大きな影響を及ぼす。最近では、鋼製フィンガープレートの直下にシール材を充填し、雨水を路面排水する非排水形式の伸縮装置が用いられるようになってきている。

③ 床版コンクリートのひびわれ損傷部や打継ぎ不良部からの漏水が鋼桁の腐食を起こすことも多くある。床版内を伝わった雨水にはアルカリ成分が含まれており、このアルカリ成分に弱い塗装系を使用している場合には、塗膜が早期に劣化し腐食が発生する。写真-5は下路アーチ橋における腐食事例を示したものである。アーチ橋、トラス橋の床組に死荷重、活荷重が載荷されると主構と縦桁とのたわみ差によって床版に橋軸方向の引張力が作用する。この引張力が顕著な場合には床版に幅員方向のひびわれが生じやすいことから、比較的長スパンの橋梁では、縦桁に伸縮継手や床版に目地を設けたりすることがある。写真に示した事例は、このような床版ひびわれ部からの漏水により発生した腐食である。腐食の発生を防止するためには、床版のひびわれ発生を防止することが第一に必要であるが、ひびわれが発生しても雨水が下面に浸透しないように床版と舗装との間に防水層を設けることも必要である。なお、鋼床版橋梁において舗装のひび割れ部から雨水が侵入しデッキプレート上面が腐食した事例も報告されている<sup>18)</sup>。

④ 構造的に雨水が集水および滞水しやすい部位での腐食事例も多い。写真-6は下路トラス橋における主構と横桁・横構接合部のガセットプレートの腐食を示したものである。格点部は雨水、結露水が集る部位であり、また、車両の通過に伴う雨水や泥の跳ねかえりを受ける部位でもある。特に水平面は水はけが悪いことから腐食が生じ易い。箱桁内部も一旦雨水が侵入した場合には滞水が生じる構造と言える。湿気のこもりや結露などが補助的な原因として考えられるが、その主原因は、高力ボルト継手部における隙間からや桁端ダイヤフラムの開口





写真-6 下路トラス橋の格点部の腐食事例



写真-7 高力ボルトの腐食事例(箱桁内部の下フランジ添接部)

部からの雨水の侵入，あるいは開断面箱桁では床版からの漏水などである。部材に適切な勾配や排水孔を設けるなどの配慮によりこのような腐食の発生を防止することが可能である。

⑤ 塗装の品質，特に塗膜厚についての一定品質が確保できない部位として，現場継手部や部材の角部などが挙げられる。現場継手部はボルト頭やナット，リベット頭などの突出により形状が複雑であり，一定品質の塗装が行いにくい部位である。また，部材の角部がガス切断や切削仕上げにより鋭いエッジになっていると，塗料が十分に付着せず塗膜が薄くなる傾向にある<sup>19)</sup>。そのため，これらの部位は一般部に比べ塗膜の劣化が生じやすい傾向にある。下塗り塗装を1層先行塗りし防錆性能を高める，あるいは部材の角部については道路橋示方書に示されているような面取り(1mm程度)や曲面仕上げを行うなどして塗膜厚さを確保することが必要である。写真-7は高力ボルトの腐食例を示したものである。座金間のボルト軸部については，座金による孔内の密閉が保たれている間は腐食が発生しないが，ボルト頭やナット部に関しては写真に示したような腐食が生じることもある。ボルト頭やナットの極度の減肉は締付け軸力の減少を招くことが報告されており<sup>20)</sup>，継手の安全性に影響を

及ぼすことになる。

⑥ 吊橋，斜張橋，ニールセン橋などではケーブルが主部材であり，その損傷は橋梁の安全性を左右する重要な損傷である。近年，国外においてケーブル素線の腐食事例が報告されている<sup>21)</sup>。ケーブルにおける防食加工上の弱点部は，ケーブルバンド部，サドル部，ソケット部およびラッピング継手部であって，これらの部位からしみ込んだ水蒸気，水分や凍結防止材により腐食することが多い。防水に対する構造上の配慮とともに，防錆処理されたケーブルの非破壊検査手法の確立や維持管理を考慮したケーブル構造の検討が今後は必要である。

### 3. 点検・検査

#### (1) 点検・検査の重要性

橋梁の長期にわたる安全性や耐久性を確保するためには，定期的な点検・検査が必要不可欠である。点検・検査により，損傷をできるだけ早期に発見し，適切な補修や補強を行うことは，落橋や通行止めなどの最悪な事態を回避するとともに，供用後の維持管理にかかるランニングコストを考慮した場合，経済性の面でも有利となる。橋梁の点検，検査および補修補強がトータルコストにおいていかに重要であるかは，ニューヨークの橋梁技術者レポート“Spanning the 21st Century”において報告されている<sup>22)</sup>。図-5に示すように点検・検査および補修・補強を適切に行うことは，その時に一時的に費用がかかっても，それを怠り新設橋に架け換えるよりは長い目でみるとトータルコストは安くなるということである。現在，道路橋と鉄道橋を合せて約65万橋が供用されており，今後，これらの橋梁を健全な状態に維持していくかは，いかに効率的な点検，検査を行うかにかかっているとと言える。

#### (2) 点検・検査の現状と課題点

点検・検査においては，どのような能力を有する者が(Who)，どのような劣化，損傷を対象に(What)，どの部位を(Where)，どのような時期あるいは間隔で(When)，どのような方法(How)により実施するかと言った点検検査体制を確立することが重要である。ここでは，橋梁上部構造本体を対象とした場合の点検・検査における今後の課題点について2，3述べることとする。

##### a) 点検・検査者の資格および教育

点検・検査は橋梁構造や材料について十分な知識と経験を持った者が行うことで信頼性の高い結果を得ることができる。AASHTOの点検マニュアル<sup>23)</sup>では，橋の検査は次のような資格を有する者が責任技術者として行わなければならないとしている。

- 登録されている Professional Engineer
- 州の法律に従って Professional Engineer として資格認定されること

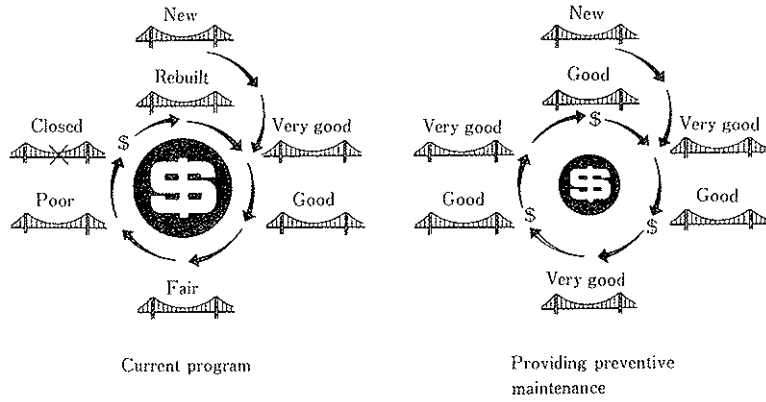


図-5 トータルコストを考慮した場合の維持管理の重要性

表-1 トレーニングプログラムの一例 (抜粋)

BRIDGE SAFETY INSPECTOR TRAINING PROGRAM	
Conducted by Michael Baker, Jr., Inc.	
for	
The Pennsylvania Department of Transportation	
COURSE #9 SCHEDULE	
February 23, 1987 through March 11, 1987	
MONDAY, FEBRUARY 23, 1987	MONDAY, MARCH 2, 1987
1:00~1:15 Call to Order, Opening Remarks by the Department, Introduction and Orientation	1:00~2:15 Review First Week's Work
1:15~1:45 Purpose and Objectives of Bridge inspection	2:15~2:30 Coffee Break
BRIDGE TYPES AND COMPONENTS	2:30~3:15 General, Reinforced & Prestressed Concrete Structures Inspection Data and Recording Procedures
1:45~2:30 Bridge Types Identification & Behavior	3:15~4:30 Characteristic Problems and Evaluations of Reinforced Concrete Bridges (Case Study Part I)
2:30~2:45 Coffee Break	TUESDAY, MARCH 3, 1987
2:45~3:30 Superstructure Types & Components, Part I	8:00~9:00 Concrete Case Study, Part II
3:30~4:30 Superstructure Types & Components, Part II	9:00~9:15 Coffee Break
TUESDAY, FEBRUARY 24, 1987	9:15~10:45 Characteristic Problems and Evaluations of Prestressed Concrete Bridge (Video Tape)
8:00~8:30 Substructure Types & Components	10:45~11:45 BMS, Part IV
8:30~9:30 Review Bridge Types & Components	11:45~12:45 Lunch
9:30~9:45 Coffee Break	INSPECTION AND RATING OF STEEL BRIDGES
MATERIALS OF CONSTRUCTION	12:45~1:15 I-Beam Stringer Bridges
9:45~10:15 Introduction to Material Properties	1:15~2:00 Multi-Girder Bridges, Welded & Riveted
10:15~10:45 Physical & Mechanical Properties of Steel and Wrought iron	2:00~2:15 Coffee Break
10:45~11:45 Physical & Mechanical Properties of Reinforced & Prestressed Concrete (Part I)	2:15~3:00 BMS, Part V
	3:00~3:30 Girder & Floorbeam Systems

・橋の検査について10年以上の経験があり、かつ“Bridge Inspector's Training Manual”に基づいたトレーニングコースを終了していること  
 また、検査担当者を対象とした教育課程として、トレーニングコースが定期的に開かれている<sup>2)</sup>。トレーニングにおけるプログラムの一例を表-1に示す。橋梁構造に関する基礎知識、材料とその劣化および劣化に関する検査方法、検査結果の評価および報告の方法、ケーススタディをも含んだ広範囲に渡る知識を約2週間の日程で習

得することを目的としたプログラムとなっている。点検の成果は、点検員の判断によるところが大であり、よりの確な判断を得るためには、今後我が国においても資格制度や教育システムの導入を検討して行くことが必要と思われる。

b) 点検・検査の種類と頻度

点検・検査の種類と頻度の設定は、損傷を出来るだけ早期に発見し、かつ損傷が軽微な内に補修・補強を実施する上で重要である。また、たとえ損傷の発生を見逃し

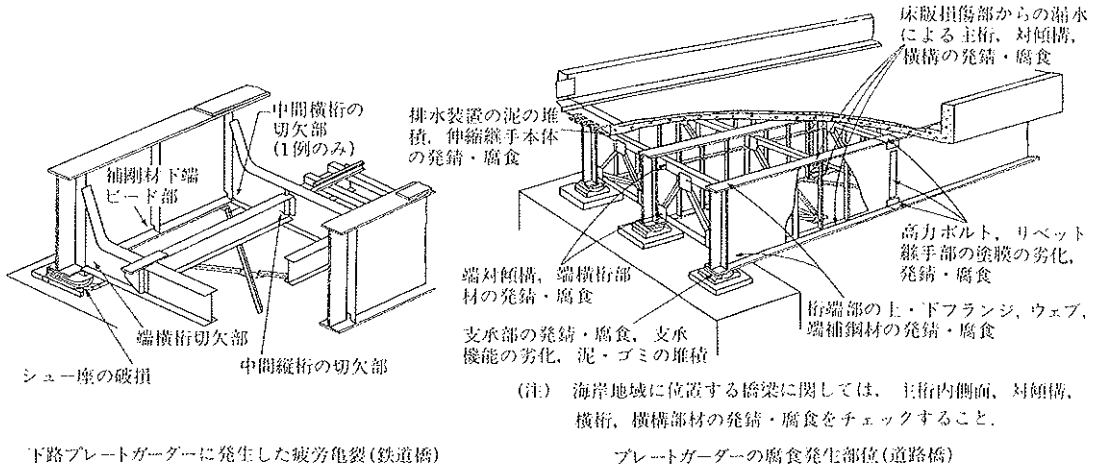


図-6 点検・検査における重点着目部位

たとしても次の点検・検査までには重大事故につながらないと言ふような点検・検査周期に関する考え方も必要である。

疲労亀裂のようにその初期段階においては、亀裂の発生を確認することが難しく、かつ亀裂の成長に伴い進行速度が加速されるような損傷に関しては、比較的短い間隔での検査が必要となる。破壊力学の手法を用い、検知可能な亀裂寸法（通常数 mm オーダーの亀裂長さ）から限界寸法に達するまでの寿命（時間）を推定することにより、最終破壊を生じる前に亀裂を発見し得る検査周期を設定することも考えられる。腐食のようにその進行が緩慢であり、かつ外観上、比較的容易に確認が可能であるような損傷に対しては、必ずしも疲労亀裂に対するような点検の程度と頻度は必要としないが、塗装の塗り替え時には腐食の発生の有無とその程度に関して的確に把握することが重要である。

c) 点検・検査における対象部位

橋梁のどの部位にどのような損傷が発生するのかを想定して、それぞれの損傷に対する点検・検査部位を設定しておくことは効率的な点検・検査を行う上で重要なことである。図-6 は疲労損傷と腐食を対象として点検・検査における着目部位をまとめた事例である。それぞれの損傷の形態は発生部位と密接な関連があることから、既存の損傷事例を分類整理することにより各損傷に対する着目部位を設定することが可能である。また、損傷の種類、あるいは損傷の発生する部位によっては定期的な検査とは別に抜き取り的な検査を行い損傷を早期発見することも有効である。

d) 点検・検査記録のデータベース化

点検・検査や補修補強を実施した場合、その記録を残しておくことは重要なことである。これは、損傷に適合した補修補強工法の選択や施工時における問題点の把握

を行うに際して有用な情報を提供するばかりか、新設橋の設計にフィードバックすることにより、より良い設計やディテールの採用が可能となる。さらに、橋梁データベース（データベース）として損傷や構造諸元、その他交通量や橋梁関連情報を収集することにより、管理業務の効率化、迅速化が可能となる。その際、各橋梁管理者がそれぞれ独自の様式をつくるのではなく、同一の情報の形態と処理手順とし、同じデータベース上でそのデータを構築することが望ましく、そのためには、点検・検査要領を統一したものとし、その記録に互換性を持たせた様式とすることが有効である。

4. 疲労亀裂の検出とその評価

(1) 疲労亀裂の検出手法

疲労損傷に対する効果的な維持管理、補修コストの低減を考えると、亀裂を早期に発見して適切な補修を行うことが重要である。また、破壊力学の手法を適用し、補修の良否や補修期間の設定のための寿命予測を定量的に行うためには疲労亀裂を精度良く計測することが必要である。

鋼橋部材における疲労亀裂については、遠望からの目視点検では、双眼鏡を用いたとしても相当大きく進展した亀裂を除きその発見は困難である。そのため、定期的な点検の他に、塗装塗り替え時や補強工事の際に設置される作業足場を利用して詳細な点検を実施することが多い。また、路上の点検車を利用して、あるいは桁下からの高所作業車により部材に接近することもある。

材料の欠陥を検査する目的で種々の非破壊試験方法が開発され、実用化されているが、供用下の橋梁現場で、かつすみ肉溶接の回し溶接部のような狭あいな部位に対する検査に関しては、適用できる非破壊試験方法は少ない。現状において、最良と考えられるすみ肉溶接止端部



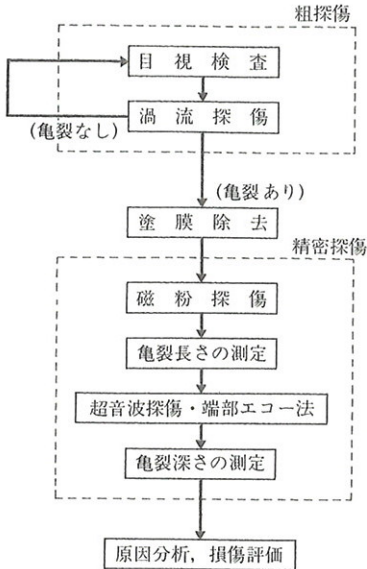


図-7 表面疲労亀裂検出システム

表-2 各種非破壊試験の亀裂検出限界寸法および精度<sup>25)</sup>  
(亀裂表面長さの検出)

	亀裂検出限界寸法, mm		寸法推定精度
	塗膜上	塗膜除去後	
目視検査	4.0	8.0	ばらつき大
磁粉探傷試験	(4.0)	2.0	適正 (±1 mm)
浸透探傷試験	(4.0)	8.0	過小評価
超音波探傷試験	5.0	5.0	過大評価
渦流探傷試験	5.0	5.0	不可

から発生する表面亀裂の検出システムを図-7に示す。現在最も多く用いられ、また信頼のおける方法は熟練者による目視検査である。多くの亀裂は、まず目視により発見され、その後他の非破壊検査が適用される。表-2は参考までに各種非破壊試験の亀裂検出の限界寸法およびその精度を示したものである<sup>25), 26)</sup>。この結果は探傷条件の良い実験室内でのものであり、実橋においては、限界寸法、精度とも劣ることに注意することが必要である。

塗装部材の表面に亀裂が発生するとその部分の塗膜が切れ、さらに長期間暴露された場合には錆汁が発生することが多い(写真-8参照)。目視検査は直接に、あるいはルーペなどを使ってこの塗膜切れ、錆汁の発生を観察するものである。ただし、応力集中の生じる部位や塗膜の異常部位では亀裂の発生を伴わない塗膜割れも起こり得るので、目視検査には、亀裂発生箇所や亀裂の進展性状、亀裂の発生原因と言った鋼橋における疲労現象に十分に精通した検査員が従事すべきである。

渦流探傷は亀裂検出に対する塗膜の影響が少ないこと

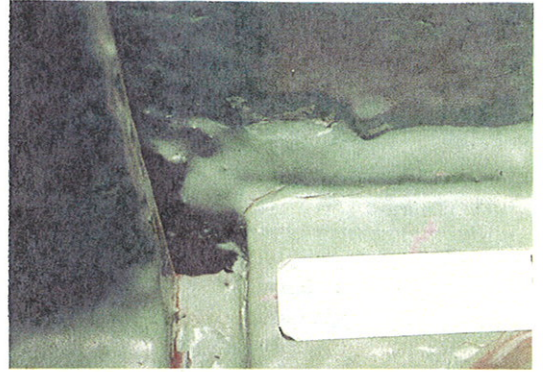


写真-8 塗膜割れおよび錆汁の発生状況(垂直補剛材上端部)

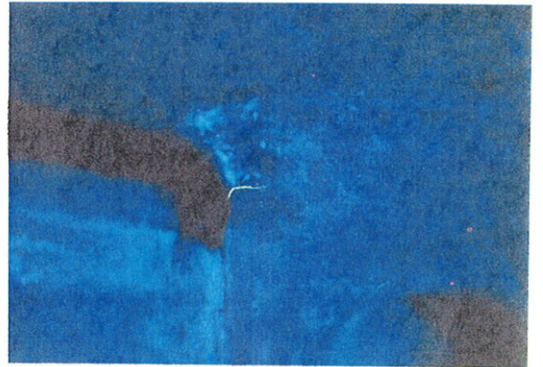
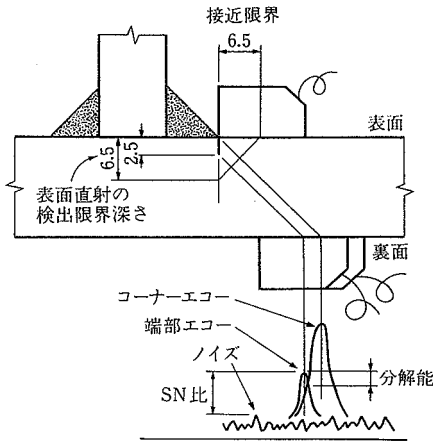


写真-9 湿式蛍光磁粉探傷による亀裂の検出(垂直補剛材上端部)

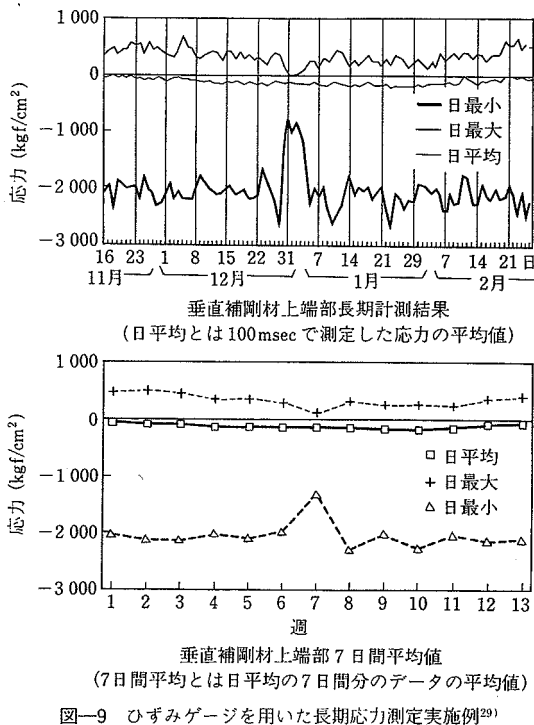
から、塗膜上からの探傷に適した方法である。この方法では正確な亀裂寸法を評価することが困難であることから、粗探傷として目視検査と併用して用い、渦流探傷において何等かの亀裂指示が現れた箇所に関しては次に述べる精密探傷を行うのが良い。

表面亀裂の精密探傷としては、塗膜を除去した後の磁粉探傷が優れており(写真-9参照)、表面長さの定量的な計測が可能である。従来、表面亀裂の検出に対して浸透探傷を行うことが多いが、亀裂深さが浅い場合には亀裂面内への浸透液の浸み込みが十分になされず、表面長さが長い亀裂でも検出できない場合がある。また、寸法推定精度も過小評価の傾向にあることから、精密探傷としては用いない方が良い。表面亀裂の深さを非破壊的に測定することは難しい。ある程度の深さになれば超音波の端部エコー法により測定ができるが(図-8参照)、その場合でも適用可能な条件は限定される。

部材内部、あるいは溶接部内部における亀裂の検出も容易ではない<sup>27), 28)</sup>。亀裂の発生位置が特定できれば超音波探傷で検査することができるが、亀裂の形状や寸法に関して精度の高い検出は困難である。また、欠陥が検出された場合でも、それが疲労亀裂なのか、あるいは施工



図—8 超音波探傷による亀裂深さの測定<sup>25)</sup>



図—9 ひずみゲージを用いた長期応力測定実施例<sup>29)</sup>

時の溶接欠陥がそのまま残っているのかの判別は現状の非破壊検査技術では極めて困難であり、寸法検出精度の向上とともに今後の検討課題である。

## (2) 疲労損傷のモニタリング

補修補強の必要性を判定する、適切な補修補強時期を設定する、あるいは亀裂の発見から補修補強までに期間が必要な場合にその安全性を保証するためには、疲労亀裂の進展性を長期的に監視するシステムが必要となる。モニタリングシステムとしては、ひずみゲージによる方法、超音波による方法、AE法、電位差法などが現在考えられている<sup>29)~31)</sup>。

ひずみゲージによる方法は、疲労亀裂が進展する際に残留応力の開放や内部応力の変化により亀裂近傍でのひずみに変化が生じることを利用した方法である。長期的な観測が可能な防水タイプのひずみゲージやカプセル型のひずみゲージが用いられる。ひずみの指標としては活荷重による影響が小さく、かつ亀裂の進展に対する応力変化に対しては敏感な値であることが必要である。図—9はプレートガーダー橋の垂直補剛材上端部の疲労を対象に、実橋において長期応力測定を実施した結果である。ある時間内での最大あるいは最小応力については、その時間内における通過車両の特殊性によりかなりのばらつきを示す。これに対し、ある時間内での平均値については長期にわたりほぼ一定の値となっており、疲労亀裂の監視のための指標として用いることができる。なお、特殊ゲージとして、断線ゲージやK値ゲージ(応力拡大係数K値を推定するゲージ)を用いて、亀裂の進展性を監視する方法についても検討がなされている。

AE(アコースティック・エミッション)検査法とは物体内で塑性変形や疲労亀裂が発生、進展する際にそれまで蓄積された弾性エネルギーが開放され、それに伴い弾性波動が生じる現象を利用した方法である。疲労亀裂を対象としたAE検査では、亀裂進展による弾性波動をセンサにより受信し、AEの数を促えることにより亀裂の進展を監視する。実橋では様々なノイズ信号が発生するため、亀裂進展による信号とこのノイズ信号とを分離することが必要であり、その方法としてクラックモニター法が検討されている。

なお、これらの方法は既に発生が確認されている亀裂、あるいは発生位置が特定できる亀裂に対するモニタリング技術である。損傷の早期発見と効率的な点検・検査を実施していくためには、不特定の部位における亀裂発生の検知とその進行をモニタリングする技術の開発が望まれる。

## (3) 損傷の原因分析調査

疲労損傷対策を立案するに際して最も重要なことは損傷の原因を明らかにすることである。図—10は一般的な原因分析の手順とその内容を示したものである。実挙動の把握を主な目的とした2次調査の項目は数多くあるが、疲労損傷の状態や1次調査の結果を鑑み、必要に応じて調査項目を選定することが必要である。

### a) 交通実態調査

疲労損傷を考える場合、定常的な走行状態で生じる変動荷重とその頻度を把握することが必要であり、そのための交通実態調査は重要である。とりわけ道路橋の自動車荷重に関しては、車両重量、車両のタイプ、交通流特性などの変数にばらつきが大きく、かつ複雑であることから、その実態を把握するための調査方法が重要となる。

道路橋における交通実態を把握するためには、車両重

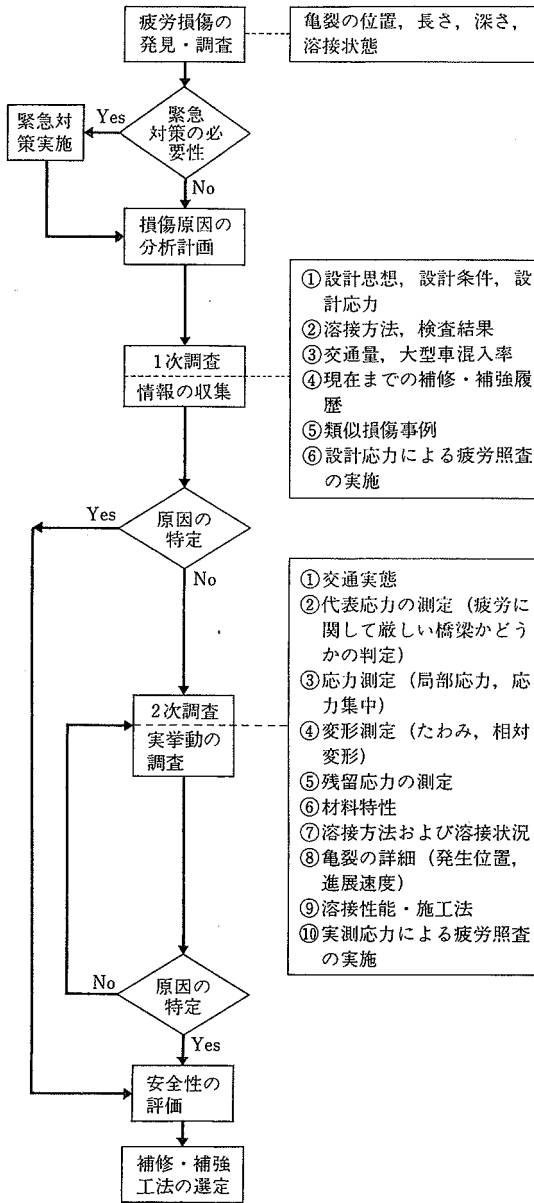


図-10 疲労損傷の原因分析手順

量分布、車種混入率、車頭間隔、走行速度、走行位置等に関する情報を得ることが必要である。車両重量とその頻度を測定する方法としては、板状の車両重量計測装置を用い直接的に重量を測定する方法<sup>32)</sup>と部材に発生する曲げひずみやせん断ひずみの測定データから解析的に重量を求める方法<sup>33), 34)</sup>とがある。前者の方法では路面上に可搬型計測装置を一次的に設置することが必要であり、設置・撤去時の交通規制および路面上の段差の発生により交通の流れが乱されるなどの問題が生じる。後者は実橋においてしばしば行われるひずみゲージによる応力測定を若干工夫することにより交通流を乱すことなく車両

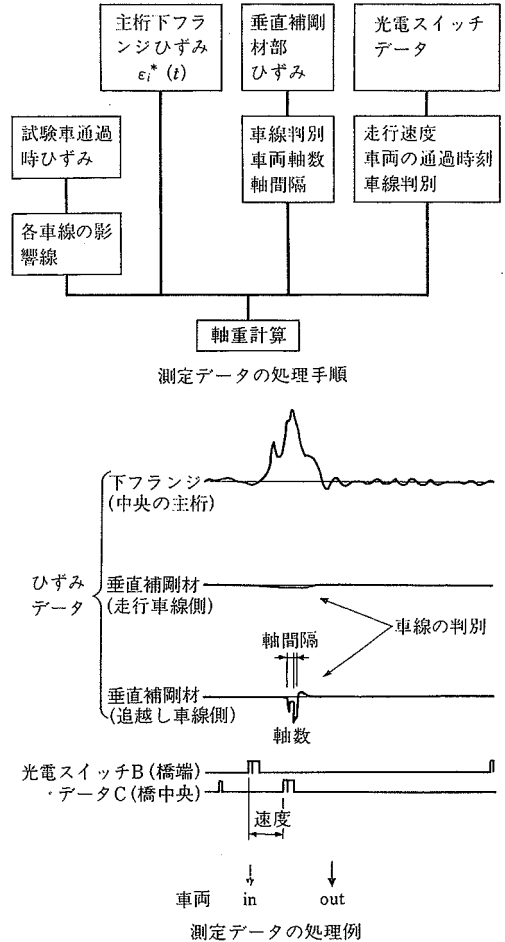


図-11 鋼桁のひずみデータより車両重量を推定する解析例<sup>34)</sup>

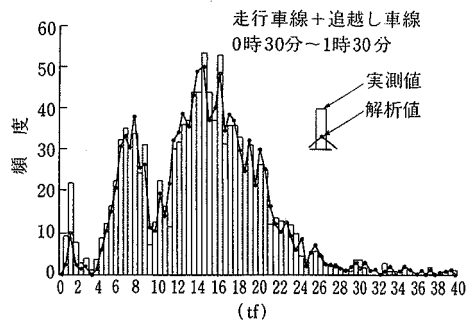


図-12 高速道路における車両重量の解析結果<sup>34)</sup>

重量やその頻度を得ようとするものである。図-11に鋼桁のひずみデータから車両重量を推定する手順と計算例を示す。また、図-12に高速道路で実施された車両重量測定結果例を示す<sup>34)</sup>。解析値は実測値(車両重量計測装置による値)をよく再現しており、このような方法によっても実用上十分な精度をもって交通の実態を把握することが可能である。なお、最近では、個々の車両の軸



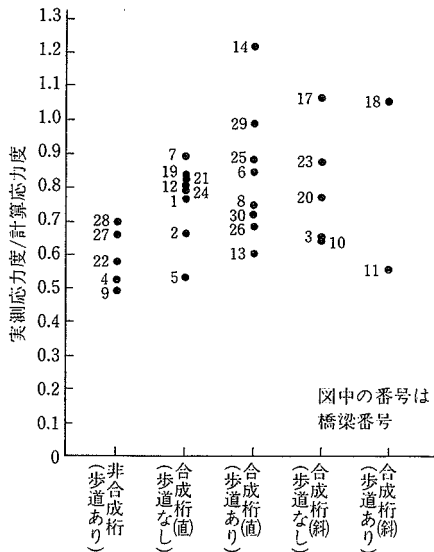


図-13 実橋での応力測定結果 (道路橋)<sup>38)</sup>

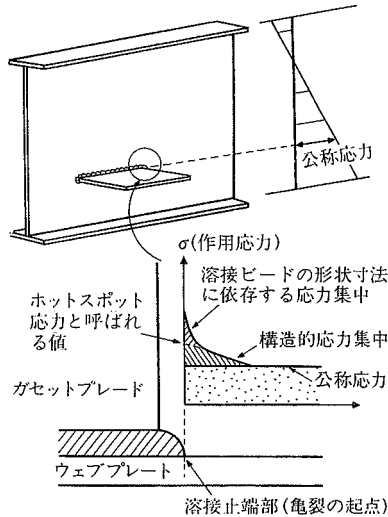


図-14 ガセットプレート端における応力性状

重を推定するための方法についても検討がなされている<sup>35), 36)</sup>。

b) 応力・変形の実挙動に関する調査

実部材に作用する応力は、通常的设计計算で行われるような平面モデルや棒モデルを用いた解析により得られる応力とは異なる。また、疲労損傷の発生原因となる2次応力や応力の集中については、設計計算的な解析手法では把握が困難である。さらに、交通荷重による実働応力は、車両の通過に伴い時間的に変化し、その変動性状は複雑である。そのため、部材やその細部に生じる応力レベル、変形挙動などを載荷試験や応力頻度計測などにより定量的に把握することが行われている。

① 公称応力の測定

非合成桁として設計されているにもかかわらず、実際にその応力や中立軸の位置を測定してみると合成桁に近い挙動を示すことがある<sup>37)~39)</sup>。図-13はプレートガード橋における主桁の公称応力について実測応力度と同一荷重条件下での計算応力度との比(実応力比と呼ばれる)を示したものである<sup>38)</sup>。実応力比は構造形式あるいは計算応力度の大小によりばらつきを示しているものの、非合成桁の場合で上限0.7程度となっている。このような設計計算上の仮定と実挙動との差異を明らかにし、橋梁の全体挙動の面から損傷の発生要因を検討することが重要であり、主要部材における最大発生応力や応力の頻度分布などを把握することにより、その橋梁が疲労に関して厳しい状態に置かれているかどうかの評価が可能となる。

② 局部応力の測定

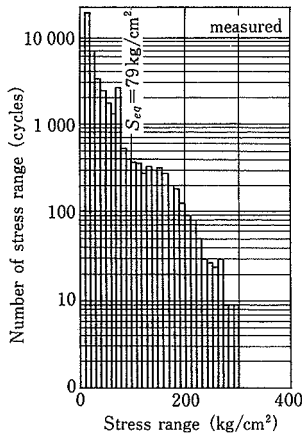
疲労亀裂の発生や進展性状は、発生局部の応力性状に大きく左右されるため、局部応力性状に関する情報は、

原因の究明や損傷の評価、あるいは対策の立案に際して欠くことのできないものである。

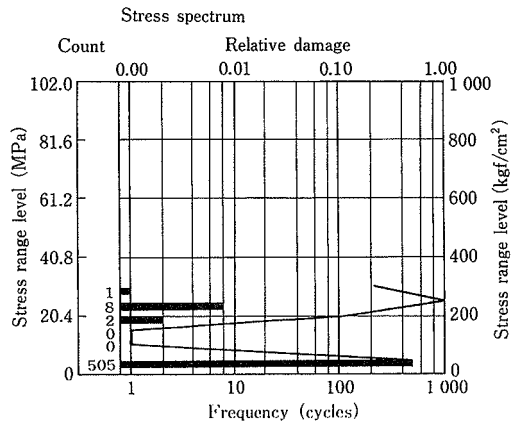
局部応力の測定は、損傷部位と同一で亀裂の未発生部位を対象にひずみゲージを用いて実施される。部材の接合部や断面変化部においては応力状態が複雑に変化していることから、局部応力の測定目的に応じて貼付位置や使用ゲージを選定することが重要である。図-14はガセットプレート端における局部的な応力性状を模式的に示したものである。溶接止端部近傍では、部材に作用する公称応力に継手全体の力の流れの不連続性に依存する構造的な応力集中と溶接部のごく近傍の溶接ビード寸法・形状に依存する局部的な応力集中が重複しており急激な応力勾配が生じている。

③ 応力頻度解析と頻度計測

実橋部材には一定振幅の応力ではなく、時間的に変動する応力が繰返し作用する(図-11参照)。このような変動応力を一定応力振幅の集合の形で整理する手法を応力頻度解析と呼んでいる。応力振幅の頻度分布形状や最大応力振幅について、類似部位での解析結果と比較したり、補修補強前後において比較することにより、疲労に対する厳しきや補修補強効果を推定することができ、さらに疲労寿命の評価も可能となる<sup>40)</sup>。代表的な解析手法としてレインフロー法とレンジペア法とがある<sup>41)</sup>。この二つの方法に関してはその基本的な原理に違いはなく、橋梁での実働応力の解析を対象とした場合にはほぼ同じ結果が得られる。図-15はひずみゲージにより実測された実働応力について応力振幅の頻度分布を解析した例である。最近では、応力頻度の計測を比較的簡易に行える計測機器が普及し、応力頻度測定が行われる機会が増加しているが、道路橋の場合、交通の流れを考慮すると基本的には1週間連続測定することが望ましく、それが



(a) 鋼道路橋 (レインフロー法)



(b) 鋼鉄道橋 (レンジペア法)

図-15 応力頻度分布の解析例

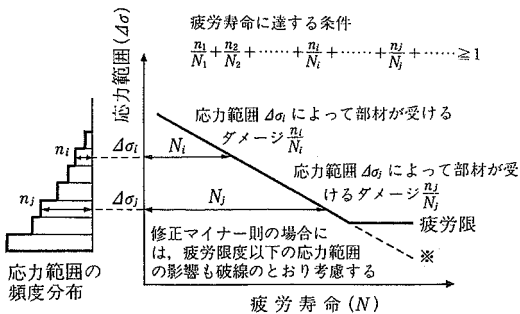


図-16 線形累積被害則の考え方

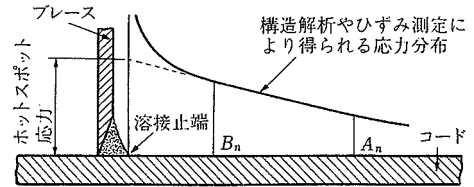


図-17 ホットスポット応力の定義の一例

不可能な場合には交通の流れとして平均的な状態を示すと思われる火曜日から木曜日にかけて最低 24 時間の測定を行うことが必要である。

(4) 損傷の評価

疲労亀裂が確認された場合には、緊急対策の必要性、対策方法、あるいは類似箇所における損傷発生の可能性などに関する検討が必要である。その際、対策時期の設定や効率的な維持管理計画を策定するために、損傷部の余寿命や類似部位における損傷度を定量的に評価することは有用である。

a) 線形累積被害則

変動応力下での疲労寿命を推定する方法として、マイナーの線形累積被害則を用いる方法がある。この方法は、部材に作用する応力範囲  $\Delta\sigma_i$  の一定振幅での疲労寿命を  $N_i$  とした場合に、応力範囲  $\Delta\sigma_i$  の 1 回の繰返しによる疲労損傷の程度 (疲労損傷度) を  $1/N_i$  とし、変動応力下では  $\sum(n_i/N_i) = 1$  が成立するとき疲労破壊が生じると考えるものである (図-16 参照)。あらかじめ実験によって一定応力振幅疲労の  $\Delta\sigma-N$  曲線が求められており、対象とする箇所作用する応力範囲の頻度分布が得られれば、この被害則を適用することにより疲労寿命

の推定が可能となる。損傷部位と類似部位における疲労損傷の発生時期の推定や重点的に点検を行うべき部位の選定および検査の周期などを設定する際の判断材料として活用ができ、さらに、補修補強後の寿命評価を行うのにも有効である。ただし、変動応力下では疲労亀裂の進展に伴い  $\Delta\sigma-N$  曲線における疲労限界以下の応力範囲が損傷に寄与してくるため、その影響を考慮することが必要である<sup>40)</sup>。

また、応力測定データに基づき疲労寿命の評価を行う場合には、測定データが局所的な応力集中や二次応力の影響を含んだものか否かに留意することが必要である (図-14 参照)。

応力分布が複雑で公称応力が定義できないような部位については、構造的な応力集中の影響を含んだ応力を測定し、このような応力に対応した疲労強度の等級を用いて寿命を評価することが必要となる。このような構造的な応力集中の影響を含んだ応力のことをホットスポット応力<sup>42), 43)</sup>と呼んでいるが、その定義に統一されたものはなく、現時点では、ホットスポット応力による寿命評価はおおよその目安を得るためのものと考えべきである。図-17 にホットスポット応力の定義例<sup>42)</sup>を示す。

b) 疲労亀裂進展寿命解析

すでに亀裂の発生が確認された場合、あるいは亀裂状の欠陥が確認された場合などについては、疲労亀裂進展解析により直接余寿命を推定することができる。

表-3 構造物台帳および評価シート（抜粋）（FHWA）

状態	材料	状態の分析	評点	
58	床版 床版表面の状況、収縮継手等	ここでの○および△を除く○から△までの評点は次の11段階で示される N: Not applicable, 9: New Condition, 8: Good Condition, 7: Generally good Condition, 6: Fair Condition, 5: Generally fair Condition, 4: Marginal Condition, 3: Poor Condition, 2: Critical Condition, 修理するまで使用不可, 1: Critical Condition, 修理するかどうか検討する, 0: Critical Condition, 修理不可能		
59	上部構造 すべての部材、支点、排水設備を含む			
60	下部構造 橋台、橋脚、パイル、フェンダー、フーチング等			
61	水路と水路の防護工 流れの安定性、護岸工事、堤防等			
62	暗渠および擁壁 線形や沈下問題、擁壁の安定			
63	残存寿命の評価 大幅な改修なしでの寿命、材料、交通量等より評価			
64	運用上の評点 許しうる最大荷重（最大軸重、総重量）			
65	アプローチ道路の線形 橋の使用効果に関する			
66	発録上の評点 現在のままで安全に使用できる荷重レベル			
査定	欠陥		評点	
67	構造物の状態 構造物の全体的な評価、構造的欠陥+機能的欠陥		ここでの○から△までの評点は次の11段階で示される N: Not applicable, 9: 現行基準より上, 8: 現行基準と同等, 7: 現行の最低基準より上, 6: 現行最低基準と同等, 5: 耐えられる最低レベルより若干上, 4: 耐えられる最低レベル, 3: 耐えられないレベル, 修理が必要, 2: 耐えられないレベル, かけがえが必要, 1: 使用をやめてすぐ修理, 0: 使用をやめてすぐかけかえ	
68	床版の幾何学的形状 床版の幅、高欄、地覆等			
69	橋下のクリアランス、高さ及び横方向 下を通過する道路から上部構造まで			
70	安全載荷能力 荷重制限			
71	水路の妥当性 洗掘、斜面の防護、流れの容量			
72	アプローチ道路の線形 アプローチ道路の線形と橋の安全性、機能的			

疲労寿命の計算は、疲労亀裂進展速度の表示式を、確認された亀裂寸法から限界亀裂寸法まで積分することにより求めることができる。ここで、限界亀裂寸法については、繰返し荷重により疲労亀裂が進展し、他の破壊モードに移行するときの亀裂寸法と考えることができる。他の破壊モードとして考慮すべきものには、脆性破壊、延性破壊、部材の全断面降伏などがある。疲労亀裂進展速度の表示式にはいくつかの考え方があり、安全側の寿命を求めるか、平均的な寿命を求めるかによって適切な表示式を選定することが必要である<sup>41)</sup>。

### 5. 構造物全体の損傷度評価

構造物の維持管理を合理的な形で行うには、構造物全体の損傷度評価を的確に行う必要がある。現在、橋梁構造物全体の損傷度評価は、各部材・要素単位に損傷度を点数で評価し、それぞれに重み（各部材・要素の重要度）をつけて総合化して全体としての評価を行っているものが多い<sup>45), 46)</sup>。図-18は“Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program”での構造物の健全度判定法の要約である<sup>47)</sup>。表-3中の各項目の評点を用いて計算するようになっており、図中のS1-S4については詳細にその計算方法が示されている。このような点検法では、構造物の損傷度を評価するために多数の要因を取上げる必要があるが、それらの要因の寄与度を定量的に確定することは難しい。この問題に関しては、数量化理論を用いることにより、従来経験的に決められていた重み係数に理論的根拠を与えることができる<sup>48)</sup>。さらに、総合的な損傷度評価を得るために、協和分析（concor-

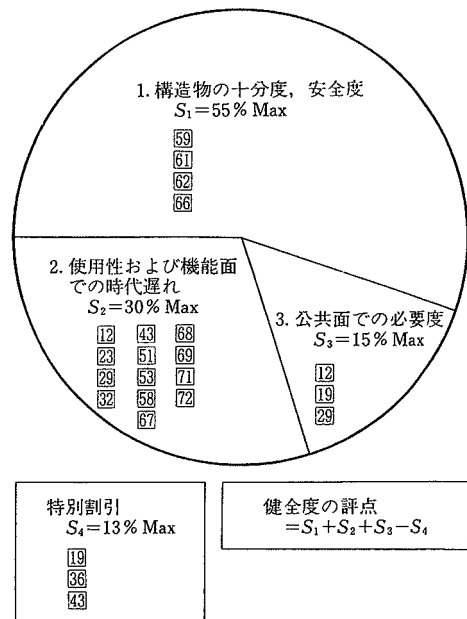


図-18 構造物の健全度評価（FHWA）

dance analysis) を用いることができる<sup>49)</sup>。なお、損傷状態やその重要性の判定に関しては、言語的なあいまいさを含むことが避けられないが、この問題に対してはファジィ理論が有効であり、橋梁の健全度評価に適用あるいは利用された例がある<sup>50)~52)</sup>。また、情報不足やモデルの不備を補うためのIF...THEN...型のプロダクションルールを用いた損傷度評価エキスパートシステム<sup>53)</sup>、さらには、専門家からの知識獲得の困難さを避け



るためにニューラルネットワークを用いた補修方法選定エキスパートシステムなどが開発されている<sup>54), 55)</sup>。

ここに紹介した新しい手法に関しては、その実態が明確に定義されているわけではないが、現在の社会情勢を考えると、簡便でかつ理論性を持った実用的な損傷度評価方法の開発は急務であり、ここで示したような考え方を参考により有効な損傷度解析の確立が望まれる。さらに、一橋梁としての全体の損傷度評価だけでなく、将来はいくつかの橋梁群を橋梁ネットワークとしてとらえ、道路網との関連から災害時などの重要性を考慮していくことが必要である。

## 6. おわりに

本小委員会の活動を通じて得られた成果の一部について概説した。今後、鋼橋を効率的に維持管理していく上での参照となれば幸いである。なお、本文では記述できなかったが、小委員会においては、腐食や高力ボルトの遅れ破壊などと言った劣化現象に関しても種々の検討がなされた。これらについては、今後、報告書の内容を整理して行く中で成果に含めていく予定である。

なお、本文は委員会報告書(案)をもとに幹事(町田、安波、杉山、坂野、名取)により執筆されたものである。

最後に、本小委員会の名簿を掲げる(順不同、所属は現時点)。

委員長：三木千寿(東京工業大学)

幹事：町田文孝(川田工業(株))、安波博道(新日鐵)、杉山俊幸(山梨大学)、坂野昌弘(関西大学)、名取暢((株)横河ブリッジ)

委員：三木秀樹((株)ウェスコ)、矢野勲(構造計画コンサルタント)、矢吹哲哉(琉球大学)、山田健太郎(名古屋大学)、三上市蔵(関西大学)、村越潤(建設省土木研究所)、阪本謙二(鉄道総合研究所)、Hyo-Nam CHO(Korea Hanyang Univ.)、佐藤恒明(木更津高専)、鈴木博之(福井工業大学)、田中洋(日立造船(株))、新延泰生(東洋大学)、古田均(関西大学)、星尾司((株)栗本鐵工所)、増田幸宏(東海旅客鉄道(株))、石塚喬康(建設技術研究所)、市原久義(東日本旅客鉄道(株))、植田幸男((株)ヒロコン)、大島俊之(北見工業大学)、大塚久哲(建設省土木研究所)、加藤昌彦((株)橋梁検査センター)、川口昌弘(故人)、左合玄一(滝上工業(株))、高木千太郎(東京都建設局)、山崎和夫(首都高速道路公団)、大橋治一(本州四国連絡橋公団)、大江慎一(本州四国連絡橋公団)、山本美博(東海旅客鉄道(株))、鶴巻栄光(東日本旅客鉄道(株))、小笠原照夫(川田工業(株))、鹿野頭一(三井造船(株))、遠藤和男(本州四国連絡橋公団)

委員会活動にあたり、多くの人々から話題や資料の提供など、種々の協力を頂いた。また、土木学会事務局の

黛巖氏には、委員会の事務手続き等色々お世話になった。記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：鋼構造物の補修・補強・改造の手引き、(財)研友社、1992。
- 2) 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・補強、橋梁と基礎、Vol. 83, No. 8, pp. 24~29, 1983。
- 3) 西川和廣：道路橋における疲労問題と補修・補強、橋梁と基礎、Vol. 83, No. 8, pp. 19~23, 1983。
- 4) 土木学会鋼構造委員会鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労、土木学会、1990. 9。
- 5) 土木学会鋼構造委員会疲労変状調査小委員会：鋼橋の疲労変状調査、土木学会論文集、No. 368 / I-5, pp. 1~12, 1986. 4。
- 6) 三木千寿・坂野昌弘・釜石和雄・福岡良典：鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析、土木学会論文集、No. 392 / I-9, pp. 403~410, 1988。
- 7) 岩崎雅紀・名取暢・深沢誠・寺田博昌：鋼橋の疲労損傷事例と補修・補強対策、横河橋梁技報、No. 18, 1989。
- 8) 坂野昌弘・三上市蔵・柴田洋：鋼橋の変状事例に関する一考察、土木学会第47回年次学術講演会概要集、I-PS5, 1992。
- 9) 米倉徹・長沼敏彦・丸山悟・羽子岡爾郎：鋼桁の横桁下フランジ損傷部調査報告、土木学会第49回年次学術講演会概要集、I-215, 1994。
- 10) (財)道路保全技術センター：既設橋梁の破損と対策、1994. 3。
- 11) 名取暢・浅岡敏郎・稲田育郎：鋼橋の補修・補強、横河ブリッジ技報、No. 21, 1992。
- 12) 大谷祥三・谷倉泉・国原博司・庄中憲：トラス橋横桁取り付け部の疲労損傷対策、土木学会第49回年次学術講演会概要集、I-254, 1994。
- 13) 水木彰・中野政信・前田研一・作田孝行・町田文孝・富沢光一郎：疲労亀裂を生じた鋼アーチ道路橋の実橋調査と補修、川田技報、Vol. 4, 1985。
- 14) 西星匡博・岡隆延・山田健太郎・寺田博昌・杉本正信：疲労損傷を受けたアーチ橋に対する補強効果について、構造工学論文集、Vol. 37A, pp. 1097~1106, 1991. 3。
- 15) 運輸省鉄道局、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物設計標準(鋼・合成構造)、丸善、1992. 10。
- 16) 名取暢・照山修・橋本和夫・奥嶋猛・西川和廣・村越潤：鋼橋の腐食事例とその分析、土木学会第48回年次学術講演会概要集、I-213, 1993。
- 17) 村越潤・名取暢：鋼橋の腐食とその原因、橋梁と基礎、Vol. 27, No. 6, 1993。
- 18) 結城正洋・新田興吉・松本好生・名取暢：鋼床版デッキプレートの腐食減厚に対する補修方法の検討、構造工学論文集、Vol. 39A, pp. 971~980, 1993. 3。
- 19) 日本橋梁建設協会：橋梁技術者のための塗装ガイドブック、1993. 4。
- 20) 大野崇・名取暢・村越潤：腐食減肉した高力ボルトの残存軸力測定、土木学会第49回年次学術講演会概要集、I-260, 1994。
- 21) 保田雅彦・鈴木周一・木村一也：吊橋ケーブルの防食方

- 法の検討, 本四技報, Vol. 16, No. 61, 1992. 1.
- 22) New York City Department of Transportation : SPANNING THE 21ST CENTURY, 1988.
- 23) AASHTO : Manual for Maintenance Inspection of Bridges, 1983.
- 24) U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Bridge Inspector's Training Manual, U.S. Government Printing Office, 1971.
- 25) 三木千寿・深沢誠・加藤昌彦・大畦久雄: 表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, No. 386/ I -8, pp. 329~337, 1987. 10.
- 26) 深沢誠・大畦久雄・加藤昌彦・三木千寿: 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, No. 398/ I -10, pp. 395~404, 1988. 10.
- 27) 飯島武明・深沢誠・三木千寿・田島二郎: 補剛トラス部材溶接継手の疲労亀裂検出に関する実験, 土木学会論文集, No. 410/ I -12, pp. 445~454, 1989. 10.
- 28) 田島二郎・福井崇博・三木千寿・深沢誠: かど溶接ルート部に発生する疲労亀裂検出に対する非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, No. 386/ I -8, 427~434, 1987. 10.
- 29) 建設省: 既設構造物の点検・補修システムの開発(橋梁の長期監視システムの開発) 概要報告書, 1990. 10.
- 30) Johnson, H. H. : Calibrating the Electric Potential Drop Method for Studying Slow ow Crack Growth, Materials Research & Standards, Vol.5, 1965.9.
- 31) 富士岳: AEによる構造物の監視, 金属材料, 第17巻, 第2号, 1980.
- 32) 金上侑・野尻芳郎: 板状可搬型車両重量計測装置の開発, 非破壊検査, 第39巻, 第12号, 1990.
- 33) 城戸隆良・近田康夫・小堀為雄: 鋼桁のせん断ひずみ成分の測定による輪荷重効果の推定法, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 1057~1064, 1990. 3.
- 34) 三木千寿・村越潤・米田利博・吉村洋司: 走行車両の重量測定, 橋梁と基礎, Vol. 21, No. 4, 1987.
- 35) 松井繁之・エル・ハエム・アームド: RC床版のひびわれ開閉域による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 407~418, 1989. 3.
- 36) 村越潤・後藤和満・天野孝則・小林綾子: 輪重算出のためのひずみデータ処理方法の検討, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, I -182, 1994.
- 37) Miki, C, Toyofuku, T, Yosimura, Y, and Murakoshi, J : Stress Reduction Factor for Fatigue Assessment of Highway Bridges, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. No.386/ I -8, pp.125~134, 1987.10.
- 38) 藤原稔・村越潤・鹿嶋久義: 鋼プレートガーダー橋における応力測定結果に関する報告, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1181~1188, 1991. 3.
- 39) 土木学会: 土木構造物の保守標準(案), 鋼構造物・同解説, 1987. 3.
- 40) Fujiwara, M., Nishikawa, K, Murakoshi, J, and Hirose, T. : Stress Histogramms and Fatigue Life Evaluation of Highway Bridges, IABSE COLLOQUIUM COPENHAGEN 1993 REPORT
- 41) (社)日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, pp. 216~274, 技報堂, 1993. 4.
- 42) (社)日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, pp. 283~291, 技報堂, 1993. 4.
- 43) 三木千寿・館石和雄・山本美博・宮内正信: 局部応力を基準とした疲労評価手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 38A, pp. 1055~1062, 1992. 3.
- 44) (社)日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, pp. 51~57, 技報堂, 1993. 4.
- 45) U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration : Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges, 1979.
- 46) 東京都建設局: 橋梁点検要領, 昭和63年3月.
- 47) 三木千寿: 米国における道路橋の破損と保守, 道路, No. 11, pp. 26~30, 1982.
- 48) 白石成人・古田均・杉本雅一: 数量化理論の構造物の健全度評価への応用, 第29回構造工学シンポジウム, 1983.
- 49) Nijkamp, P. : Studies in Regional Science and Urban Economics, North-Holland, 1977.
- 50) 白石成人・古田均: ファジ集合論の構造工学への応用, 土木学会誌, Vol. 31, 63~67, 1984.
- 51) 白石成人・古田均・橋本: ファジ多基準分析に基づく構造物の健全度評価, システムと制御, Vol. 28, No. 7, pp. 474~482, 1984.
- 52) 三上市蔵・三木千寿・土田貴敬・風間徹: ファジ真理値を用いた知識獲得手法~鋼橋損傷に関するアンケートの整理), 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 629~642, 1991. 3.
- 53) 白石成人・古田均・馬場元秀・川上宏一朗: RC床版の耐用性評価システムに関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第386号/ I -8, pp. 285~291, 1987.
- 54) 古田均・大谷裕生・白石成人: ニューラルネットワークの補修工法選定への応用, 構造工学における数値解析シンポジウム講演会論文集, 第14集, pp. 339~344, 1990.
- 55) 三上市蔵・田中正典・倉地晶: 鋼橋疲労損傷の補修方法選定のための学習機能のあるニューラルネットワークシステム, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 655~668, 1991. 3.  
(1994. 9. 5 受付)