

鋼橋の維持管理技術・研究の展望

CURRENT STATES AND PROSPECTS OF STEEL BRIDGE MAINTENANCE ENGINEERING

東京工業大学* 三木千壽

Chitoshi MIKI

Japan becomes the most advanced country regarding the occurrences of fatigue damage in steel highway bridges, as numbers and variations. There are several reasons of this situation, for example, fatigue design had not performed till 2002, and many over-loaded trucks and very high truck ratio result very severe traffic loads. Current states of steel highway bridges and maintenance system, and new technologies in the field of bridge maintenance are described in this paper.

疲労、点検、診断、補修、補強

fatigue, inspection, evaluation, repair, retrofit

1. 日本の鋼橋の宿命と疲労先進国へ

日本の鋼橋はいくつかの宿命ともいえる事実を抱えている。その第一はインフラの整備が1960年代に集中して行われたことである。当たり前であるが、インフラは社会的要請の高い順に整備されていく。これは技術的経験の低い順であり、建設後の使用状況もこの順に厳しい。鋼橋の製作については、この時期に継手構造がリベット構造から溶接構造に変えられている。構造物の軽量化や製作コストの縮減を目指してのことである。溶接に伴う欠陥の発生、残留応力、一体構造化は疲労にとっては大変厳しく、鋼構造物の疲労はすなわち溶接構造の問題と言っても過言ではない。

その第二は苛酷な交通荷重である。トラックの過積載は世界トップクラスである。国際的な場でこのテーマを取り上げて議論をすることがあるが、法定の3倍を超えるような過積載車が日常的に通っているのは日本くらいである。大型車の混入率が高いのも日本の道路の特徴である。運輸での鉄道と道路の分担の違いから、日本の道路での大型車の混入率の高さは世界でも群を抜いている。過積載率と大型車混入率の高さの結果として起きたことは「疲労先進国日本」の出現である。私は国際溶接協会（IIW）疲労委員会（Com. XIII）の構造物の補修に関するWGの主査を長く務めてきたが、日本の道路橋に生じている疲労損傷の種類、数とも米国をはるかに抜き去り、世界のトップである。

土木構造物については、財産管理上の寿命は50年程度とされている。しかし、その期間が過ぎたからといって橋梁などの構造物を取り替えるなど、使用者であり、オーナーでもある国民はまったく想定していない。また、たとえ老朽化してきたから、あるいは疲労亀裂が見つかったからといっても、社会的、経済的な影響度を考えれば、長期間の通行止めが伴う取り壊しと再建設はほとんど不可能に近い。また、社会的・経済的な損失をコストベネフィット評価に取り込めば、たとえ補修・補強の費用が新設費用をはるかに上回るようなケースでも、既設の構造物をどうにか再生していくシナリオが最良の選択となるケースが多くなる。さらに、膨大な量の建設廃材の処理と新たな建設に伴うエネルギー消費といった環境負荷を考えれば、既設構造物を廃棄し新設する選択はますます難しくなるであろう。既設の社会資本施設は、現時点で評価すれば確かに構造的にも景観的にも満足できるものではないが、それらが整備されてきた歴史と現在の環境からは、それらを時代に合わせながら再生して使い続けること、またそのための技術こそが今必要とされている。

既設構造物の老朽化とそれに対する再生は世界的な課題であり、筆者もさまざまな機会に日本の事例を紹介しているが、経年 40 年程度の構造物が古いなどと発言しようものならヨーロッパ各国のみならず、米国などからも大変なクレームが来る。構造物のメンテナンス問題でしばしば話題にあがるニューヨーク市の橋梁はブルックリンで 125 年、ウィリアムスバーグで 115 年、マンハッタン橋で 105 年といずれも 100 年を越えており、彼らはそれらをさらに 100 年使えるようにしようとしているのである。しかし、ある時期にまとめてインフラを整備し、それらに一斉に疲労が生じ始めたといった状況はどこの国も経験しておらず、まったく未知の世界といえる。

2. 我が国溶接橋梁の疲労設計の歴史的考察

鋼構造物に生じる損傷としては、腐食、疲労、遅れ破壊などが上げられるが、構造物に致命的な状況をもたらすのは疲労である。先に述べたように 1960 年初期にリベットから溶接構造への転換があったが、当時の日本には溶接構造の疲労に関する技術的蓄積がほとんどなかった。東海道新幹線については、リーダーであった友永博士の指導により、ドイツの溶接構造の疲労設計をベースにした溶接橋梁用の疲労設計規定が作られ、さらに設計活荷重に 2 トンをプラスした軸重 18 トンの列車荷重列を疲労の照査荷重としている。そのため、あのように苛酷な使用環境におかれているにも関わらず、疲労損傷は部材の連結部や応力集中部に限られており、疲労設計の対象である主構造部については目立った損傷はない。

道路橋に関しては 1960 年代に当時の建設省土木研究所において疲労の研究が行われ、疲労設計の導入も検討されたことが当時の多くの研究資料に残されている。当時の結論は「設計活荷重はかなり安全側のものであり、設計計算により求まる応力は実際に生じる可能性は小さいこと、疲労に対して安全な構造ディテールを用いることで十分」とされ、陽な形での疲労設計は取り入れられなかった。鋼床版にのみ疲労を考慮して許容応力が設定されているが、現在の疲労設計から見ると非安全な設定となっている。ここでの一連の結論がそれ以降の「疲労は鉄道橋の問題」との認識につながり、多くの橋梁技術者がこの「すりこみ、呪縛」からいまだに離れられないのが現実ではなかろうか。

1980 年ころから道路橋に疲労による損傷が見られるようになり、対症療法的に対策が取られてきた。また、その発生数は急速に増加する傾向にあったため、経験を共有しようとの考えも生まれ始めてきた。全国レベルでの道路橋の疲労に対する調査研究は 1992 年から始まった道路協会の「鋼橋の疲労の検討 WG」が最初であり、その成果は 1997 年 5 月に道路協会から「鋼橋の疲労」として出版されている。そこには 1995 年ころまでにわが国の道路橋に発生した代表的な疲労損傷事例が収録されている。WG の活動は道路橋の疲労設計基準の制定に変わった。

さらに書くならば、WG では 2002 年の道路橋の示方書の改定において疲労設計を導入すべく準備をしていたが、「時期尚早」との強い意見が出され、いろいろとあった結果として本文中では「5.3 疲労設計で、鋼橋の疲労の影響を考慮するものとする」とされ、解説において「鋼道路橋の疲労設計指針（日本道路協会）」が参考にできる、と書かれている。これでも大きな前進ではあるが、疲労設計指針を適用しての疲労設計は本文では規定されてはならず、これが今までの日本での疲労に対する大方の認識といえよう。この指針は出された後に、既設の鋼橋についての疲労安全性を照査する必要性が何度か議論されてきたが、具体的なアクションにまでは到っていないと認識している。今回の「道路の保全に向けた有識者会議」による提言を確実に実行するのが管理者のみならず、大学、橋梁会社、コンサルタントなどで橋梁に関わる技術者、研究者の義務と考えている。

3. 何をすべきか、何から始めるか、まず制度化から

道路橋の保全に向けた有識者会議による提言では早期発見・早期対策の予防保全システムの実現に向けて①点検の制度化、②点検および診断の信頼性確保、③技術開発の推進、④技術拠点の整備、⑤データベースの構築と活用、の 5 方策が示されている。

さて、このような提言の実現に向けて、何から始めるべきかである。「出羽の守」は私の主義に会わ

ないが、メンテナンスの具体的な実施体制についてのお手本は疲労先進国の米国にある。米国では1967年のPoint Pleasant Bridgeの破壊事故を契機に連邦政府道路局（FHWA）とAASHTOの連携により、疲労と破壊制御に関しての様々な取り組みがスタートしている。まず、“Guide Specifications for Fracture Critical Non-Redundant Steel Bridge Members”でFracture Critical Members（FCM）を規定し、その材料の破壊靱性値、溶接および検査について通常の橋梁メンバーとは異なる要求を設定している。疲労設計についても大型の桁試験体に対する疲労実験が行われ、その成果をベースとして1974年にはAASHTOの疲労設計が現在の形に近いものに整備されている。維持管理に関連しては点検プログラムがスタートし、資格を有する点検員による2年に一度以上の構造点検が義務つけられている。橋梁台帳（Bridge Inventory）の整備、Maintenance Manualの整備や橋梁点検技術者の教育と資格認定などが導入され、橋梁の点検や評価の質の向上が図られている。しかし、そのようなさまざまな対策を採っているにもかかわらず、疲労に起因する損傷は増える一方である。1983年のMianus Bridgeのゲルバーヒンジのピンの疲労による落橋、2001年のHoan Bridgeの主桁の破断、今回のMinnesotaの落橋のように、犠牲者が出るような大きな事故も完全には防止できているともいえない。それをどのように捉えるかであるが、「やってもダメではないか」ではなく、「これは難しい」であろう。

では日本の現状はどうであろうか。今、ミネソタのような事故が起きたときに、国民に納得してもらえるような説明が可能であろうか。米国の仕組みについては以前より紹介されておりながらの「日本の現状」であることを認識しなければならない。ただし、まず制度や資格などが整備してから現場をではなく、同時進行であろう。たとえば点検や診断を現状の制度と人材で実施し、その結果を反映しながら5年後にはすべての整備を終えるといったターゲットを明示して、すぐに行動を開始するが正しい選択であろう。そのための体制を一日も早く構築すべきである。

4. 点検と診断：事故・失敗に学ぼう

まず行うべきことは、すべての橋梁についての点検と診断である。人間で言えばどの程度の体力があるのかをきちんと把握しないで「老朽化した、荒廃した」などと言っていないだろうか。確かに鋼橋に疲労や腐食などの損傷が目立ってきたが、まず、それがどの程度のものなのか、すべての橋について現在の体力（耐力）を正確に把握すべきであり、それを実現する方法を考えなければならない。

今までの一般的な構造点検は、疲労と破壊の防止といった観点からは機能しているとはとても言えない。また、後で実例を用いて説明するが、疲労と破壊の防止を目的としての点検においても、たとえば首都高速の鋼製橋脚での経験からは、既存の組織に発注してもまったく役に立たない。それは担当者に疲労や破壊に対する知識が無いからであり、さらにはそれをそのまま従来からの点検部門あるいは点検業者に下請けさせるからであろう。点検業務のスタートはどこに何があるかの予測であり、筆者らが的確に亀裂を見つけられること理由は、どこに何があるか、その結果として何が起こりうるかを知って検査しているからである。

点検において過去の事故の経験はきわめて重要である。設計はすべて完成後のパフォーマンスを想定してのバーチャル世界に対して、事故はすべてリアル世界である。過去の疲労事例をインターネット上のデータベース¹⁾として公開している。世界中から様々な質問や要望が寄せられているが、残念ながら日本ではさほど関心が高くない。このデータベースについては、有識者会議の答申の⑤でのデータベース化に合わせて日本の技術者が使いやすい形に変えるべく準備をしている。

5. 現場でなにが起きているのか

ダメ押しをするようで恐縮であるが、点検が不十分なことから大きな事故につながる可能性があった実例をいくつか紹介しよう。

図-1の鋼製橋脚では横梁のウエブが円形断面の柱に貫通する部分でウエブの上下の端面の菱形ゾーン²⁾³⁾のメタルタッチがそのまま残存し、また、ウエブと柱の開口部との間の自然開先部の極め

て劣悪な溶接から疲労亀裂が表面にまで進展していた。この橋脚の検査と補修については技術的には評価の高いトップランクの会社が受注し、首都高速緊急対策室でのアドバイスを受けながら進められた。時系列的にその流れを述べてみる。

* 平成 13 年 5 月損傷の状況と判定結果の報告：上側コーナー近傍について、亀裂が円柱側溶接最終層に認められる。縦亀裂は溶接金属内、横方向亀裂はクレーター部にありブローを含む。亀裂は開口し、内部に酸化スケールが付着していることから溶接時の割れと思われる。下側コーナー近傍について、亀裂の先端が HAZ に入り開口も少ないことから、溶接割れからの疲労亀裂進展の可能性がある。

——これに対して、菱形ゾーンとスリット部の自然開先の存在を認識しての再調査を依頼。

* 平成 13 年 6 月検査の報告：隅角部のコーナーに亀裂を発見。MT に依れば亀裂は内部では確認できず、非貫通の表面割れと判断する（最大で表面から $t/3$ 程度）。ウェブ全線にわたって UT エコーを検出。硬さ試験から予熱不足による割れではない。溶接による補修を提案。応力測定から溶接施工に不具合が無ければ亀裂進展の危険は無い。

——亀裂はルート部より発生していることの認識が無い。前者の亀裂についてはルート未溶着（菱形ゾーン）からの亀裂のはずと伝え再検査を依頼。

* 平成 13 年 12 月 補修補強案の提案：補強は不要。溶接補修で復旧できる。調査のために削った箇所と隅角のコーナー一部を補修箇所と決定。

——ほとんどの亀裂は溶接のルートを起点としており、表面の亀裂除去では補修不可能。再検討を依頼

数度にわたる現地立会い調査と検討により亀裂の全貌が明らかになり、ジャケット型式の補強を実施した。亀裂の種類、数、サイズとも当初の検査結果とは比較できないほどであり、その結果として補強方法も受注会社からの提案とはまったく異なったものとなった。この事例から学ぶことは①点検業務を非破壊検査技術者に任せるのでは検査にならない。非破壊技術者は溶接の状況や応力状態についてはわからないため、どの位置をどのように検査すべきかがわからず、結果として適切な検査ができていない。②担当者については溶接に関する知識が乏しく、欠陥の原因や疲労の原因について判断できない。③さらにはそのような不十分な点検と評価に基づいた不適切な補修・補強設計とその実施への固執が円滑なる対策の遅れにつながった。

もう 1 例、点検から補強まで大変時間のかかったものを示そう。図-2 に示す鋼製橋脚であるが、設計図と実際の構造物のディテールが異なっていたことや、溶接欠陥とそこからの疲労亀裂が多種多様であったことも影響している。

* 平成 12 年 12 月点検結果報告：S-2 側の隅角に亀裂発見。

——それ以外の箇所の亀裂について確認することを指示。

* 平成 13 年 6 月点検結果の報告：UT や応力測定を含む検査結果。

——写真に意味不明の亀裂を発見。再検査の依頼。

* 平成 13 年 8 月：点検結果の報告：図面に無い板組みとそこでの疲労亀裂の発見。

——当て板補強工事

* 平成 14 年 2 月点検結果の報告：2 番隅角部の詳細点検結果の報告

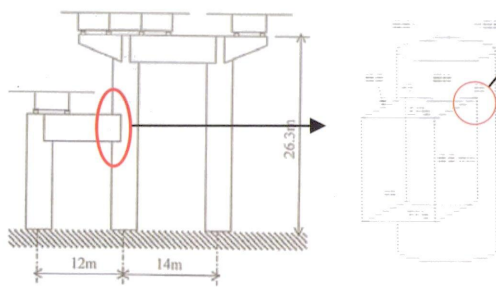
——他の隅角部についても同様な検査をするように依頼。

* 平成 14 年 6 月点検結果の報告：1, 3, 4, 5 番隅角部でも同様な亀裂を発見

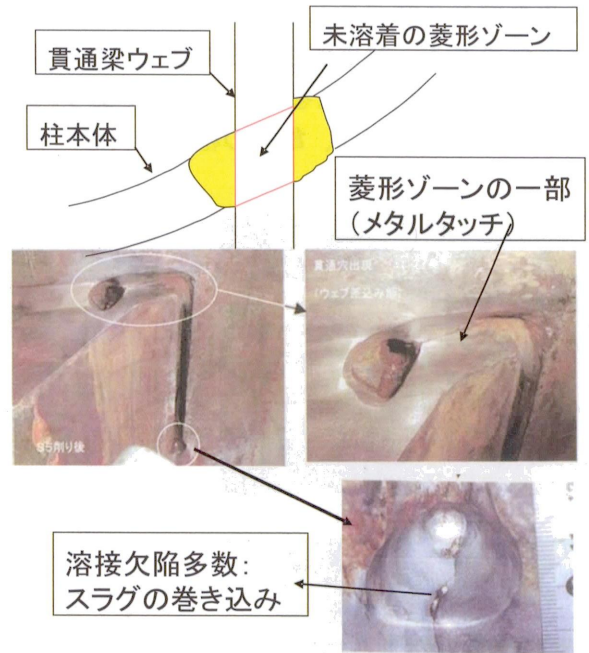
この事例から学ぶことは、①図面だけではなく現場を良く見て点検計画を立てること、②板組み、溶接不良箇所、応力集中箇所から亀裂の点検ポイントを考えること、③点検を細切れにせず、全体像を把握しながら実施すること、④効率的な点検には鋼橋の設計や政策に関する専門的名知識景観が必要、となろう。点検すべき箇所を適切に選べない、結果として亀裂が発見できない、溶接欠陥と疲労亀裂とが区別できないなどは最初の例と共通した問題である。また、新設の構造でも決して許されないようなディテールの溶接による補修や補強を提案することも、ここで示した 2 例含めての共通した傾向である。疲労と溶接の基本的な知識が欠如しているとしか考えられない。



(a) 全景



(b) 着目部位



(c) 固有キズ(菱形ゾーン)詳細

図-1 点検と診断に時間がかかった例(その1) 円柱に梁ウェブが貫通する部位に生じる固有キズからの疲労亀裂発生

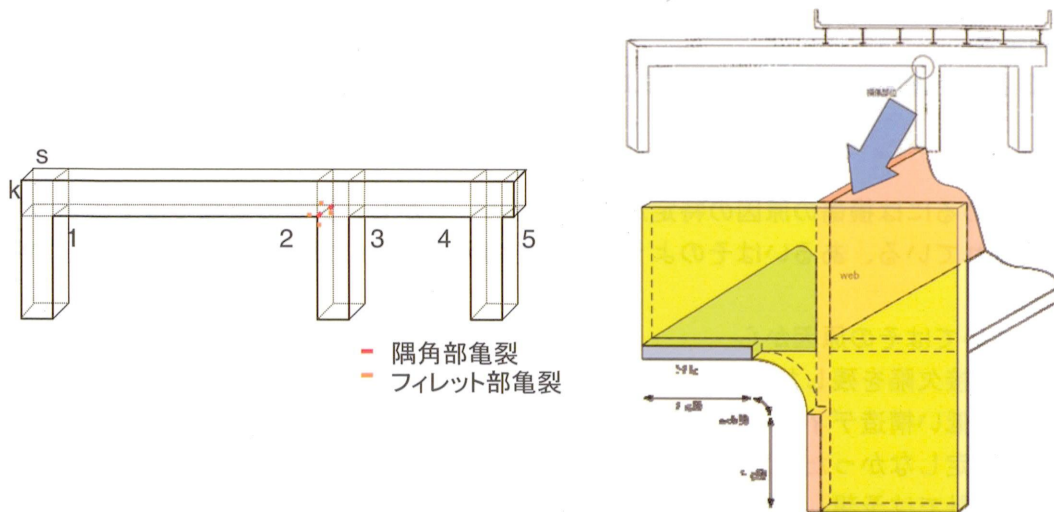


図-2 点検と診断に時間がかかった例(その2) 設計とは異なる構造ディテールの存在

今度は逆の例を示そう。すなわち亀裂に対して誤った判断をし、大規模な補修工事に着手したところを止めたケースである。図-3 に示す 2 層の鋼製橋脚であり、隅角部の横梁上フランジに沿って多くの亀裂が発見された。この亀裂に対する担当会社の診断は

- ・ 亀裂はルートから発生している
- ・ 応力から判断すると疲労亀裂が生じるようなレベルではない
- ・ 設計では完全溶け込み溶接であり、製造者の責任問題になる

との事で、大規模な補修工事の準備に入っていた。報告書を見ると、表面の軽微な溶接割れの可能性が高いと判断し、現場調査を行ったが、筆者らが持参したバーグラインダで表面を切削することにより、ほとんどの亀裂が消えてしまった。その結果、確認はしていないが、大規模補修は中止になったと思う。大変大きな経費縮減になったと考える。

この事例から学ぶことは、十分な知識を有する技術者による現地調査が原則であり、資料のみの判断は厳禁である。非破壊検査技術者は当然ではあるが発見した亀裂をできる限り強調しての写真を撮る傾向にある。実物を見ることが必須であり、実際の亀裂に対して、ルーペの程度の倍率での観察や、湿式磁粉探傷の観察は、亀裂の種別の判定にとってもっとも有効な手段である。



(a) 橋脚全景
 (川口側) 矢印: 亀裂箇所

(b) 切削調査結果

図-3 誤った判断により大規模補修工事が行われそうになった橋脚の例

6. 点検と診断

補修や補強方法を決めるには損傷の原因の特定が必須である。しかし、実際の現場ではそのようなことはまったく無視されている、あるいはそのようなことを考えもしないで進められているとしか考えられない。

鋼橋の疲労亀裂についてはその原因から

- ・ 製作時に溶接欠陥を残した
- ・ 疲労強度の低い構造ディテールを採用した
- ・ 設計では想定しなかった応力が生じた
- ・ 構造体が設計では予想しなかった挙動をした

に分類することができる。提言では点検と診断とを明確に分けているが、点検とは損傷の実態と原因の究明につながる事実を明らかにすることであり、原因の特定なしに診断はありえない。診断に当たる技術者はそのような判断ができることが必須条件であることは言うまでもない。

疲労に対する点検と診断には広い範囲の専門知識の統合が必要と考えている。すなわち、設計、製作、架設、メンテナンスのすべてのツケとして疲労損傷が発生したのであり、その診断には、設計における応力解析、疲労設計、構造ディテール、溶接設計、製作における組み立て精度、溶接施工、品質管理、非破壊検査、架設における精度、キャンパー管理、手直し、さらにはこれまでのメンテナンスでの点検、補修などがすべてかかわっていることを認識して当たらなければならない。すなわち、

そのような分野の専門家の協力体制が必須である。これは医療の分野で、個々の患者に対して、主治医、麻酔医のような専門医、看護師、を含めてのコンフェレンスで診断とその後の措置を決めることに極めて近い。鋼橋については診断に当たる技術者が主治医に相当する。

7. 点検、診断における課題は人材

さて、依頼された原稿の主題は「維持管理技術・研究の展望」である。「これからどのような研究や技術開発が必要か」はしばしば受ける質問であるが、通常のメンテナンスに必要な要素技術はすでに整っていると考えている。今最も必要なことは「人材」である。

点検については、しばしば 3W (where, when, who) 1H (how) と言われるが、疲労亀裂の発見にはプロによる目視がもっとも信頼できる。プロとは where を知っていることであり、亀裂の発生する可能性の高い位置に発生する特徴的な錆を含んだ塗膜の割れを見つけるのである。where の情報なしではそのほかの 2W 1H は成立しない。where については橋梁の疲労についての知識と経験が第一であり、先ほども述べたが、過去の記録を含めてどれくらい勉強しているかにかかってくる。また、あるレベル異常の応力の繰り返しが無ければ疲労亀裂は発生せず、応力状態と構造ディテールの疲労強度に関する知識も where とさらには when, how につながっている。すなわち、既設橋梁の点検と診断には、橋梁設計、製作などの技術、知識、経験を統合することにより始めて実現できると考えている。

8. 必要な技術

さて、点検の精度向上、簡易化、合理化、効率化などを目指した最近の研究を紹介しよう。

8.1. モニタリング

モニタリングシステムはセンサー、データ収録、通信、データ処理から成り立っている。最も重要なことは何を目的としてどのような量をモニタリングするのかであり、それに適したセンサー、データ収録、および通信のシステムを選ぶことになる。疲労亀裂の発生を対象とするならば、表面での疲労亀裂を直接センシングするのか、あるいは亀裂発生に伴うたとえば振動特性の変化などをセンシングするのかの選択になる。後者については、疲労亀裂が板厚を抜けまで脆性破壊を起こさないような破壊靱性値を鋼材に要求する leak before failure のコンセプトがあるように、疲労亀裂が板厚を貫通することはほぼ寿命の末期であり、疲労亀裂の発生や進展に伴ってのコンプライアンスの変化を期待してのモニタリングは期待が薄い。疲労亀裂の発生をモニタリングすることは航空機の分野などではかなりの歴史があり、亀裂発生位置が特定できるのであれば可能なレベルにある。

疲労のモニタリングとしては、その原因となる活荷重をモニタリングすることが現実的であり、橋の部材を秤として走行車両の重量を測定する Weigh in motion (WIM) は全自動化されて実用化の段階にある⁴⁾。2-3 週間程度の短期的な WIM などの橋梁測定には通常の歪ゲージが用いられるが、長期モニタリングには耐久性を高めた溶接型歪ゲージが用いられる。筆者らは歪ゲージの代わりに FBG 光ファイバーセンサーを用いることも試行している。これはシステムの安定性や電気信号系のノイズを防ぐことによる理由によるものである。

取得したデータをどのように処理するかであるが、現地である程度の処理をして必要なデータのみを送るようなシステムと、すべてのデータをそのまま処理系のステーションまで送るシステムとが考えられる。筆者らは最近のデータ通信の容量の大きさと処理の自由度から、後者を採用している。

図-4 は国道 246 号の大坂橋(渋谷)、玉川高架橋(多摩川の近く) および国道 357 号の荒川河口橋での WIM による車両重量のモニタリング結果について、20 トン以上および 50 トン以上について示したものである。いずれの橋も多くの重量車両が通過していること、ここで示した 2003 年 10 月—2003 年 7 月の間では通過車両の重量に変化がないことがわかる。平成 5 年(1993 年)の設計自動車荷重の改定の際には過積載車の取締りを厳しくすることが決められ、しばらくは法定重量の 2 倍を超えるような過積載車は減る傾向にあるといわれていた。しかし、ここでの 3 橋の WIM によるモニタリングを見る限り、過積載車両は減少しているとはいえない。

このモニタリング期間に通過した最大車両重量は大坂橋で 103.7 トン、玉川高架橋で 123.2 トン、荒川河口橋で 99.0 トンであった。図-5 は荒川河口橋での最大重量車両通過時のひずみ記録である。測定された軸間隔と車両のカタログから推定された車両は車両総重量が 98.0 トンのトラッククレーン（台車 49.0 トン、旋回体+ブーム 49.0 トン）で、もちろんであるが公道を走行する場合は旋回体とブームは別送し、台車のみで走行することが法律で決められている。このモニタリングシステムには現在はビデオも組み込めるようになっており、その画像からも車両を特定できる。

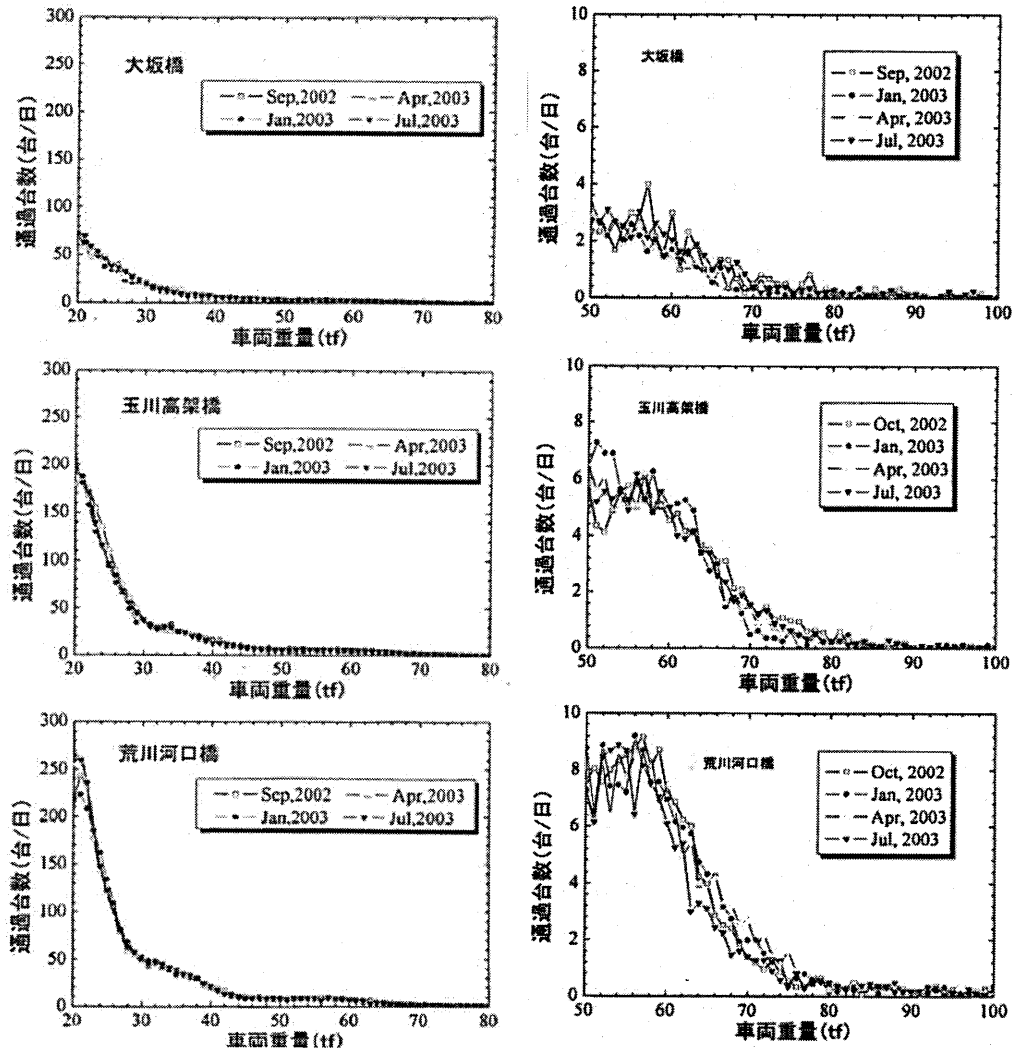


図-4 WIMにより計測された大型車の車両重量

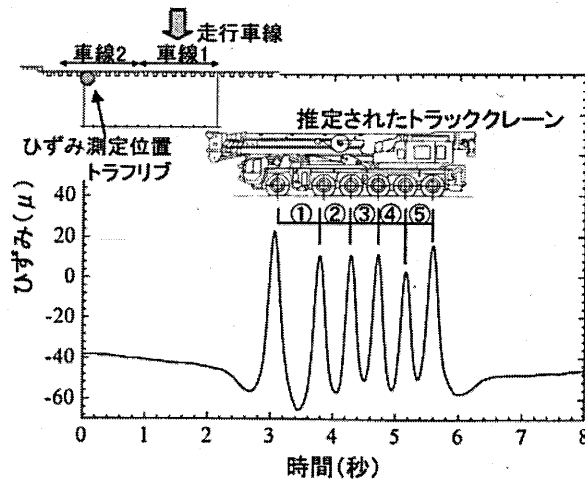


図-5 ひずみ波形による軸間隔検出と車両形式の特定

筆者らの最も新しいモニタリングシステム⁵⁾の概要とそこで使用している各種のセンサーを図-6に示す。このシステムでは常時のWIMとそれを用いた疲労度の判定機能、地震などの異常時に瞬時に構造物の健全度を判定する機能、および徐々に進行する損傷を早期に検知する機能から成り立っており、すべてのセンサーは光通信ネットワークに直結されている。

このようなモニタリングシステムとは異なるアプローチとしてセンサーネットワークシステムがある。これは、ワイアレスの通信機能を有するセンサーノードに配置されたセンサーとインテリゼントロガーからなるネットワークで様々な物理量の変化をモニタリングしようとするものである。これはシステムのリダンダンシーやコスト面を考えると将来性は高い。

モニタリングに何を期待するのが採用に当たっての重要なポイントである。重要な役割は点検の間の損傷発生を検出にある。橋梁の定期点検については5年間をベースとする方向にあり、モニタリングをするならばその間を補完することになる。さらに重要な役割は継続的にある物理量をウオッチすることにより、損傷を早期に発見することや損傷の進行の度合いを知ることにも可能となる。さらには、使用開始後にはアクセス出来ない部分の物理量を遠隔でモニタリングすることも有効な違い方となる。

モニタリングシステムでの大きな課題は耐久性である。橋梁の点検周期が5年間であれば、モニタリングシステムはその間メンテナンスフリーであることが必要条件となる。特にセンサーの取り付けの接着剤を含めての5年間のメンテナンスフリーは結構難しい課題である。筆者らのシステムでは、十分な防塵をしたはずであったが、現地での1次処理系のアンプやコンピュータは比較的早期に故障が発生した。

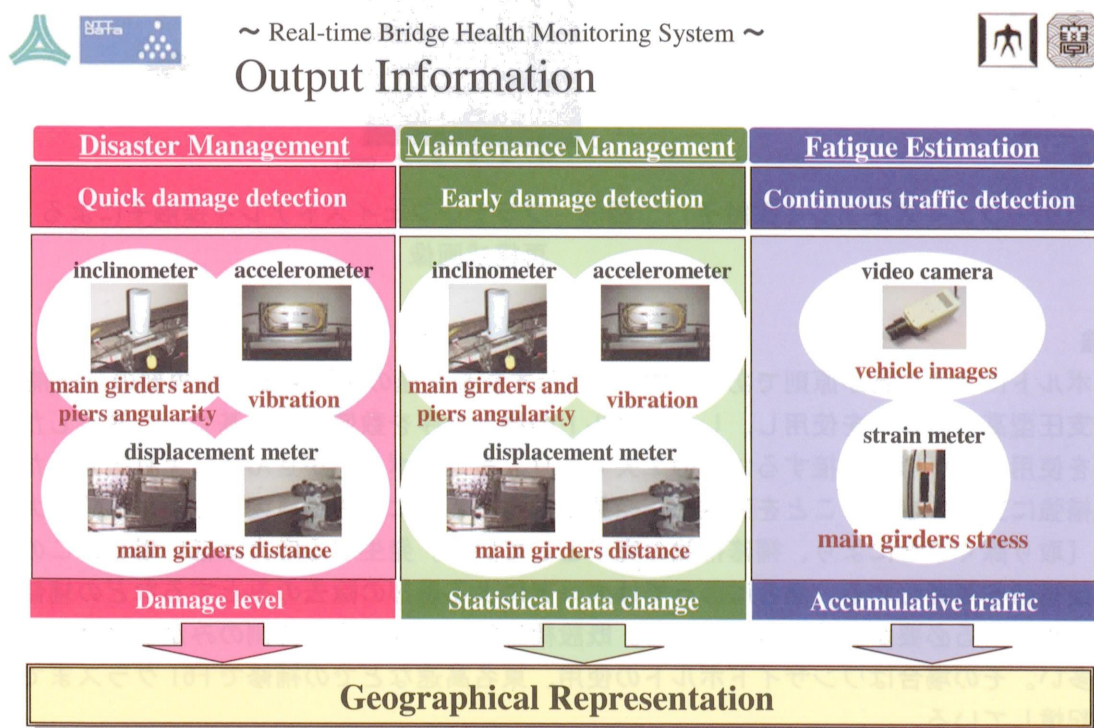


図-6 モニタリングシステムの概要とセンサー

8.2. 非破壊検査

部材表面に発生する疲労亀裂の検出についてはプロの目による目視（ルーペ程度を含む）、湿式の蛍光磁粉探傷がベストは前に述べたとおりであるが、補修などを考えるとその深さを知りたくなる。しかし残念ながら超音波の強い指向性は面状欠陥の探傷に対しての弱点となっており、端部エコー法などの方法を使ってもその測定精度には限界がある。疲労亀裂か溶接われかの判定も非破壊的にやりたいことである。このようなことを実現するには高精度でしかも定量的な評価を可能とする超音波探傷システムの開発が必要となる。筆者らは、様々な素子配置のフェーズドアレイ探傷、さらにその入射と受信を分けたフェーズドアレイタンデムなどの試みをしている。図-7 はフェーズドアレイ探触子であり、図-8 はそれを用いて4面を持つ擬似欠陥を探傷した結果である。超音波探傷での課題である面を有する欠陥が比較的实际に近い形で検出できている。

溶接のルート部から発生する疲労亀裂の検出はかなり困難である。超音波の表面波や極めて浅い斜角（80度あるいはそれ以上）、多くのトランスデューサーを組み合わせたのタンデム探傷、赤外線サーモグラフィ、渦流探傷、フェーズドアレイ渦流探傷など様々な試みがされている。いずれの方法とも、情報処理、信号処理分野の手法を取り入れて、異常検知をするような試みが最近と特徴と言える。where の情報が無いといずれのシステムも必要なレベルの検出には到っていないのが現状であろう。

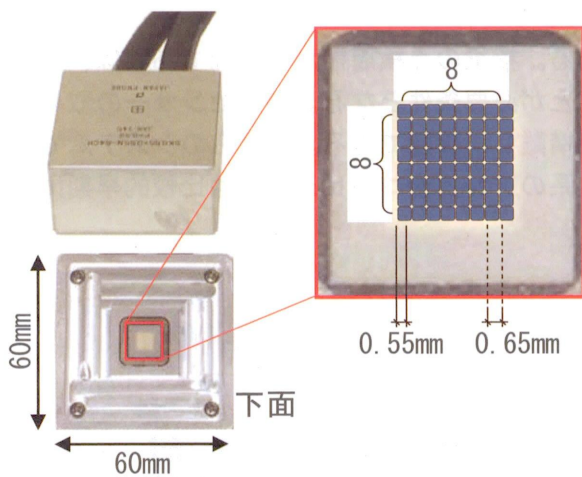


図-7 プラナーフェイズドアレイ探触子

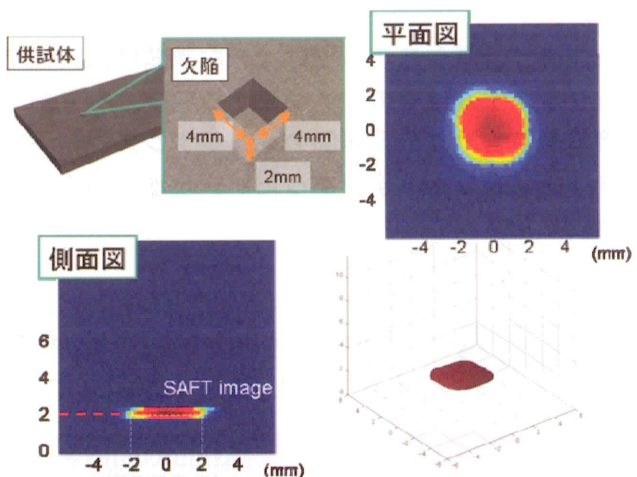


図-8 プラナーフェイズドアレイ探触子による再構成画像

8.3. 補修補強

補修補強はボルトによることが原則である。図-9 に示す首都高速の鋼製橋脚の隅角部の添接補強については、支圧型高力ボルトを使用し、しかもボルトの挿入順序を数値解析に基づいて決定した。これは構造物を使用した状態で添接するための工夫であり、もしもボルトがせん断により破断した場合はその後の補強に支障をきたすことを配慮した結果である。さらに疲労の原因となった欠陥は大コア工法により〔取り除くことにより、補修補強の完了としている。発生する応力は低い場合はこのようなボルト添接補強を簡略化する、場合によっては大コアによる患部の除去のみとするなどの補修補強設計をさらに検討する必要があると考えている。既設構造物では構造物の片側のみからアクセスできないことも多い。その場合はワンサイドボルトの使用、東名高速などでの補修でF6T クラスまで可能となったと記憶している。

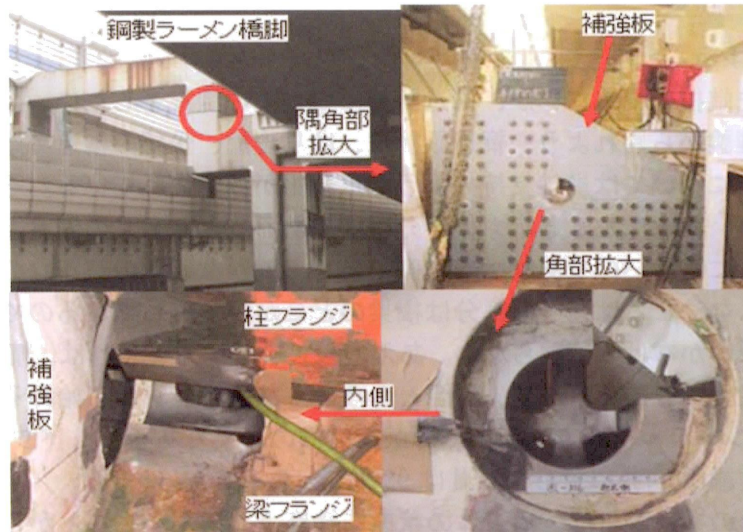


図-9 鋼製橋脚隅角部の補修と補強

8.4. 溶接

補修用の溶接棒はすでに開発されているが、使い勝手はあまりよくない。小さい疲労亀裂に対してボルト添接ではなく、局所的な溶接ができると便利である。そのための溶接方法や溶接材料についての検討を始めているところである。たとえば現状使用が禁止されている栓溶接のような形態の溶接が可能になれば補修方法の幅が広がると考えている。

8.5. 疲労強度改善

IIW（世界溶接協会）の疲労委員会では、疲労強度改善。溶接後処理としては従来からのグラインダー処理、TIG 処理、ピーニング処理に加えて、超音波インパクト処理（UIT）、超音波ピーニング処理（UP）、日本発の低温相変態溶接材料（LTT）などの適用が議論されている。それぞれの改善効果についてはほぼ確認されたところではあるが⁷⁾、いずれも、処理後の保障をどのようにするのが課題となっている。適切な改善効果をミニマムのコストで実現すると言った観点で今後の検討が必要である。しかし、いずれも方法も表面亀裂に対してのみ有効であり、橋梁構造で多発しているルートからの亀裂については適用できる方法は見当たらないのが現状である。

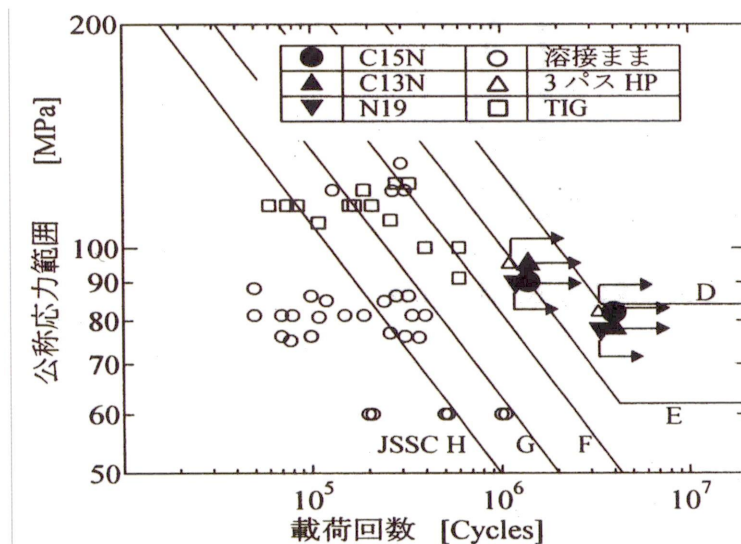
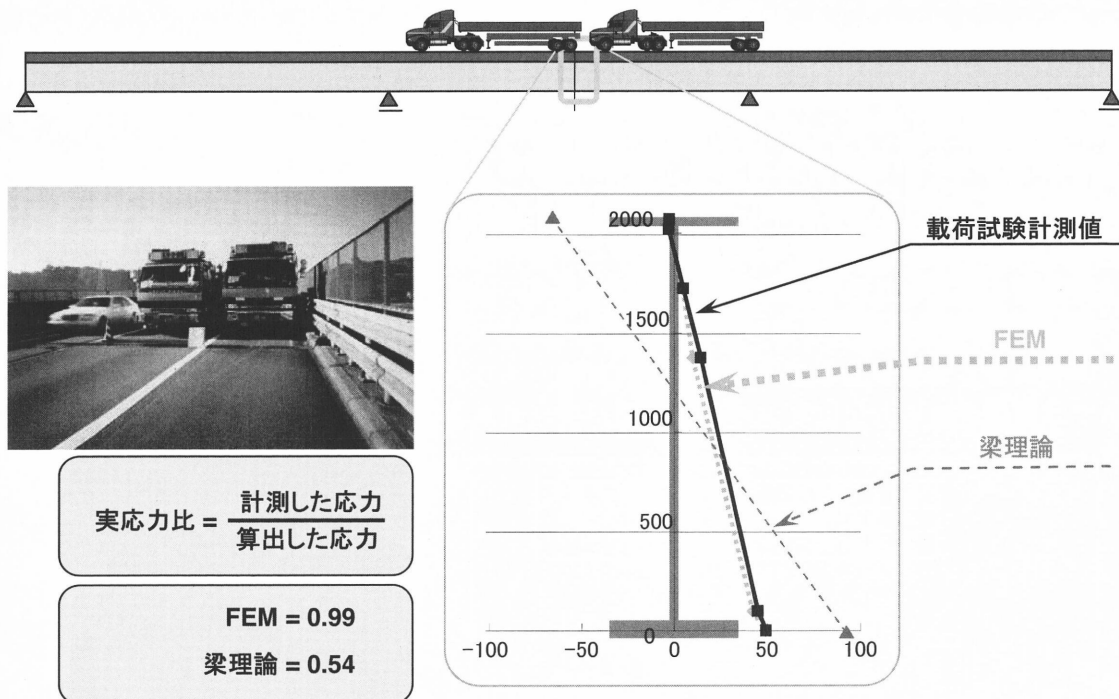


図-10 低温相変態溶接材料の付加溶接による疲労強度改善効果⁷⁾
(中実のマークがLTTによる付加溶接を施した場合)

8.6. 梁理論から別れよう

最後に新技術でも先端技術でもないが、構造計算についての提案をしたい。少なくとも補修補強を検討する場合には梁理論から別れよう。構造設計は、はり理論、骨組み構造の応力計算をベースにしておき、部材間の連結については単純支持のような単純化が仮定されている。そのような設計計算により求められた応力は、実際に生じる応力の半分程度であることは多くの測定結果が示すところである。もしも経済性を気にしないのであれば安全側であり、問題なしとの判断なのであろう。しかし、主桁には半分しか生じないことは残りの部分は橋梁のどこかが負担しているのであり、それが疲労の原因であることに気がつかなければならない。あえて厳しい言い方をすれば、精度 50% の計算でモノを作っているのは橋梁だけである。まず、実際と合うような設計計算から始めるべきである。図-10 は実際の橋梁に 60 トントラック 4 台を用いての載荷実験の結果である⁸⁾。下フランジでの実測応力での比較において梁理論は 54% に対して FEM は 99% の合致率である。

メンテナンスのための構造解析は、構造体の状態を精度よく再現することから始まるべきである。構造技術者としては、床版の一部を取り除いたら、対傾構や横構をはずしたら、主桁に亀裂が入ったら、など、橋梁構造に生じる様々な状況に対して応えていくことは必須である。実はそのようなことは今の解析技術ではいとも簡単に実現できる。図-11 はそのような目的での FEM モデル構築のモデルであり、佐保と大きい規模の計算にはならない。図-12 はそのようなモデルを用いて、様々な部材を取り除いていった場合の主桁応力の変化を求めたものである。



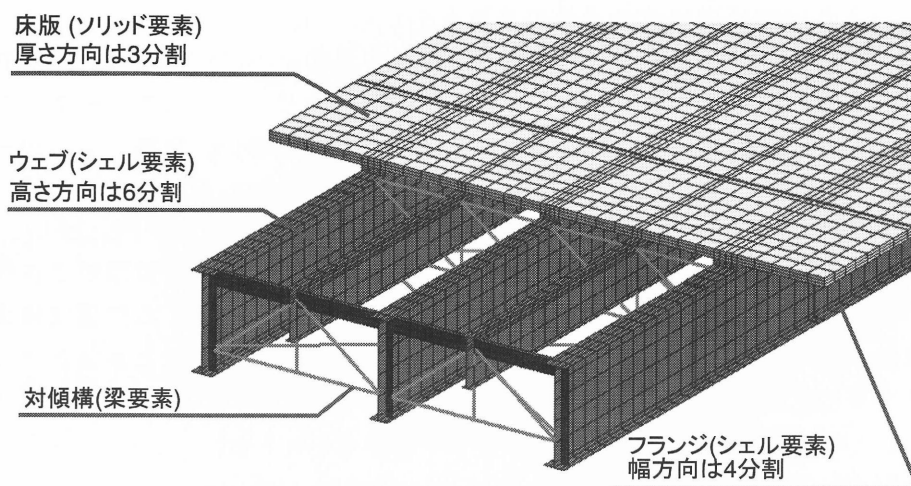


図-12 推奨する FEM モデルの構築方法

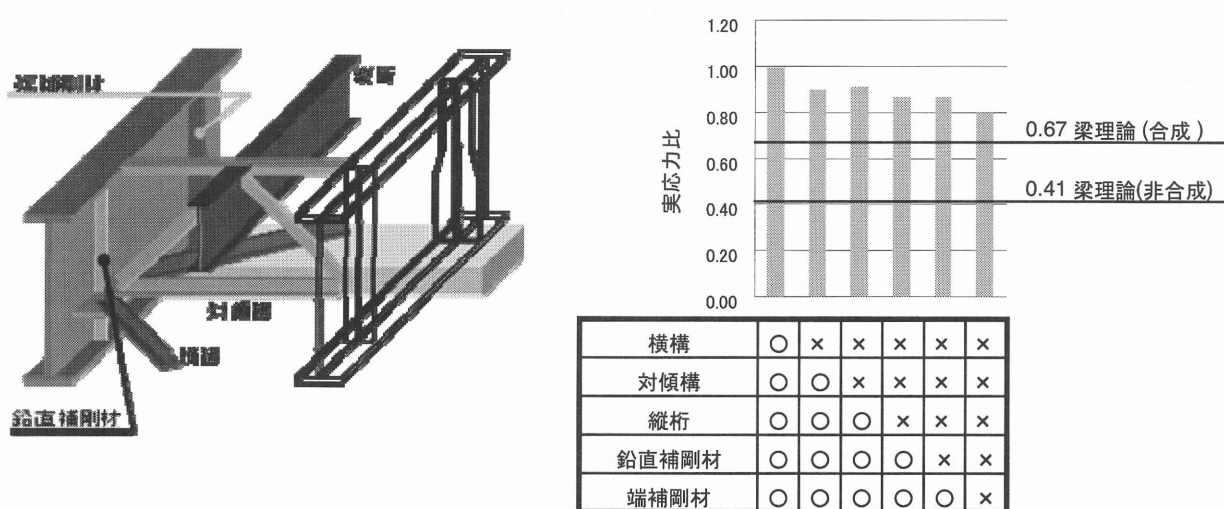


図-13 部材を順次取り除いていった際の実応力比の変化 (下フランジ応力)

9. 3Kビジネスから高度知識集約型ビジネスへ

繰り返しになるが、最も困った問題は、この分野に技術者がいない、特に臨床医的な技術者がいないことである。しかし、今の環境のままでは、いくら待っていてもそのような技術者の出現は期待できない。その理由は簡単である。点検や診断にはほとんど対価が払われず、受注については技術が高いかどうかなどまったく関係ない、発注金額は低く、しかも設計変更の繰り返りで工程は読めない、ビジネスとしてまったく魅力のない分野になっている。技術者個人としても、会社からは評価されるチャンスもない、現場は無茶苦茶きつい、だから行きたくもない、ましてやその分野のプロを目指すなどともない、が本音ではなかろうか。まさに典型的な3Kビジネスの分野であり、急に「メンテナンスの時代」などと言われても信じられない、であろう。

橋梁のメンテナンスの本質は高度知識集約型あるいはノウハウ集約型であり、それをビジネスとして成立するような仕組みにすることは可能であり、そのようにしなければならない。技術について敬意が表され、正当な対価が払われるようになれば、やりがいのある分野になり、意欲的な技術者あるいはその集団がこの分野にどんどん参入するようになる。

高い技術によりメンテナンスのトータルの経費はドラスティックに下がる。疲労については、100

ミリも進展しないうちに脆性破壊する恐れのあるものから、削り取っておしまい、あるいは 1000mm 放置してもそのうちに進展が停止するものもある。それを見極めるのがプロの仕事である。自信がないと、そこから提案される補修や補強はコンサーバティブになり、時として不必要な工事の提案につながる。さらにはチョット削り取っておしまい、孔を空けておしまい、放置するのが一番などと提案したときにはお金にならないなども、点検や診断部分に対価が払われないような仕組みから派生している。このままでは費用的にも破綻することが見えてくる。

このようなことを提案すると、技術力をどのように測るのか、と言った質問が出される。それは簡単である。その結果を公表していくことにより、組織や技術者個人に対する評価は自然と定まる。医療の分野の脳障害や癌などの難病治療についての症例数と術後の生存率などが公表され、患者や健康管理医師は其れを見てどの病院に行くかを判断するのと同じである。この鋼橋のメンテナンス分野に、技術をベースとしての競争的な環境を創出するともいえよう。

参考文献

- 1) 三木千壽、伊藤裕一、後藤清彦：疲労損傷に対する補修事例のインターネット上データベースの構築とその応用、土木学会論文集 No. 668 /I-54, 271-281、2001-1
- 2) 三木千壽、平林泰明、時田英夫、小西拓洋、柳沼安俊：鋼製橋脚隅角部の板組み構成と疲労損傷モード、土木学会論文集、No. 745, I-65, pp. 105-119、2003-10
- 3) 三木千壽、平林泰明：施工の不具合を原因とする疲労損傷、土木学会論文集 A、Vol. 63(2007)、No. 3, pp. 518-532
- 4) 小林裕介、三木千壽、田辺篤史；リアルタイム全自動処理 Weigh-In-Motion による長期交通荷重モニタリング：土木学会論文集 No. 773/I-69, pp99-111, 2004. 10
- 5) Sanae Miyazaki, Yuji Ishikawa, Takahide Okubo, Kimihiko Izumi, Eiichi Sasaki, Chitoshi Miki: Automatic and real-time bridge health monitoring for heavy traffic routes, New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, December 2007
- 6) Narongsak RATTANASUWANNACHART, Kazuya TAKAHASHI, Chitoshi MIKI and Sohichi HIROSE: Development of 3D Flaw Detection System with Multi-Channel Planar Array Probes and 3D SAFT Algorithms, Structural Eng./ Earthquake Eng., JSCE, Vol. 22, No. 1, pp. 27s-39s, Apr. 2005
- 7) 三木千壽、穴見健吾、樋口嘉剛：低温相変態溶接棒を用いた付加溶接による疲労強度向上の試み、土木学会論文集 No. 710/I-60, 311-319、2002-7
- 8) 三木千壽、山田真幸、長江進、西浩嗣：既設非合成連続橋の活荷重応答の実態とその評価、土木学会論文集、No. 647/I-51, pp. 281-294、2000-4