

構造物の維持管理，その難しさとおもしろさ

Maintenance of structures, its interest and difficulty

広島大学大学院工学研究院 社会環境空間部門
工学博士 技術士（建設部門）
Dr. Eng. & P.E.
Professor
Dept. of Civil and Environmental Eng.
Graduate school of Eng., Hiroshima Univ.

教授
藤井 堅
Katashi Fujii



今回の川田技報はVol.30とのことで、初刊以来30年の長きにわたり営々と刊行を続けてこられたことは、御社が着々とご発展された歴史の記録であり、心よりお慶び申し上げます。実は、筆者は昭和52年から2年間川田工業にお世話になり、縁あって大学に戻りましたが、技報の初刊に際して表紙のデザインを仰せつかり、吊橋のスケッチを描かせてもらいました。技報は、大学に戻った後も毎年送っていただいておりますが、表紙のデザインはずっと変わることなく、気恥ずかしくもありませんが大変うれしく思っております。加えてVol.30の節目に執筆機会を賜り、深く感謝している次第です。

思い出話

もう半世紀も前のことで恐縮ですが、筆者が小学校に通っていた頃の事です。学校の授業では、「アメリカの人はパンや肉を食べており、日本人は米と野菜しか食べていないから弱い。もっと脂肪を取らなくてはダメだ」と教わりました。昭和30年代は、水島工業地帯の建設が進み、煤煙が山裾を流れて人々が喘息などの症状が現れだした頃で、「スモッグこそ日本の発展の証である」と誰もが信じて疑わなかった時代です。こんなことを言う人は、いまでは誰一人いないでしょう。しかし当時は、東京タワーが開業され、東京オリンピックも開催され、我が国の社会基盤整備が急速に進み、経済的にも技術的にも大きく発展しつつありました。

しかし、その後急速な成長もたらした3大公害に代表される負の社会問題が顕在化するまでには、あまり時間はかからず、昭和50年代に入ると居住環境の整備が重要視されるようになりました。ちょうどその頃、本州四国連絡橋の架設が始まり、土木学会全国大会では吊橋をテーマとした論文が多数発表されておりました。筆者は、このとき、発表内容は全くわかりませんでした。時計係の学生アルバイトをして「橋梁は面白そうだ」と感じたのを憶えています。因みに、冒頭述べた技報の表紙の吊橋は、当時は吊橋として計画されていた多々羅大橋をイメージしたものです。いうまでもなく、多々羅大橋はその後斜張橋に変更され、つい最近まで世界最長斜張橋として君臨したのは周知の通り

です。

さて、当時建設された多数の社会基盤構造物が40年以上経過して劣化し、大きな社会問題になるとは当時は思いもよりませんでした。1990年代に入って筆者が思ったことは、「21世紀は維持管理がとくに重要になる。したがって、耐荷力の観点から維持管理を扱い、劣化損傷した構造物を複合化技術により性能回復するのが面白いのでは・・・」。そこで、腐食が原因で撤去されたフェリー渡橋の部材からJIS1号試験片程度の大きさを切りだして、その板厚をダイヤルゲージにより5mm間隔で計測し、座屈強度試験を行って当時の学会に発表しました。そのとき、座長から「そんなことをして何に役立つのか？」と質問されたのをいまでも鮮明に記憶しています。質問の真意がどこにあったのかはいまでもわかりませんが、少なくとも現在では維持管理に対する重要性が高く認識されるようになっていきます。残念なことに、維持管理は、ビジネスとしてはまだ成り立っておらず、そのためにはもう少し時間がかかりそうです。まもなく社会の仕組みも変わるものと期待しています。

さて、個人的回想はこれくらいにして、鋼構造物の維持管理について、20年程度携わってきましたので、それについて筆者の思いと期待を述べたいと思います。

町医者としての維持管理

ここ数十年の間に、維持管理の重要性認識が急速に広まってきたのは、たとえば最近の土木学会全国大会の発表をみれば明白です。社会基盤構造物の維持管理は、よく医療分野に例えられ、これに携わる技術者を、山口大学宮本教授は「インフラドクター」と呼んでおられます。

維持管理には、医療と同様、2つの立場があるように思います。すなわち、政府や自治体等（施主というより政策を打ち出す機関）、もう一つは、町医者です。政府機関では、国民全体の平均年齢や年齢別人口分布などから、国民全体の医療制度、福利厚生を考え、政策として種々の対策を考えます。維持管理では、社会基盤施設の平均年齢や傷み具合を総合的に判断し、予算

や基準等に反映することに対応します。機関が保有する施設全体を一つの財産とみなしてどのように管理・運営していくかという「アセットマネジメント」です。この場合、個々の構造物の状態はあまり問題にされず、全体としての統計値が重要となります。

これに対して 実際に患者を診る町医者は、個々の患者を相手にします。したがって、生まれつき頑丈な人や病弱な人、誕生後に特殊な環境で育ったことによって発病した人等々、様々な人が対象となるので、その原因や環境の特性を推測し、状況を的確に判断して、原因を取り除いて適切な治療を施す必要があります。この点に、難しさ故の、智慧と工夫のおもしろさがあるのではないのでしょうか？構造物は、人と異なって、人が設計、製作、施工・架設して生まれてきますから、「初期の設計概念や施工法、施工状態とその後の環境状態を理解・把握した上での維持管理」ということとなります。したがって、新設構造物を作るよりも難しく、維持管理に携わる技術者には、それゆえ一層高度な知識や技術が要求されます。その意味では、筆者はまだまだヤブ医者かもしれません・・・

まだまだわからないことだらけの維持管理

さて、すでにご承知と思いますが、鋼橋の維持管理で重要となるのは「疲労」と「腐食」といって過言ではありません。疲労については、いままでに多数の研究成果があり、疲労設計も確立された観がありますが¹⁻²⁾、腐食については解明しなくてはならない問題が多数残されています³⁾。実務に携わる技術者から、「腐食してウェブに穴があいた橋があるが、放っておいて大丈夫だろうか？あるいは補修が必要だろうか？」「もし放置した場合、何年くらい大丈夫なのか？補修すると、それは何年くらいもつのか？」といった質問をよく受けます。この質問は管理者にとって大変重要な疑問ですが、これに的確にしかも定量的に回答できるかという、恐らく返答に困るのが現状と思います。現状では、

実際に発生している損傷の不気味さに負けて、「とにかく直す」ことになっていないでしょうか？あるいは、場合によっては「とにかく直した」橋梁が補修前の状態に比べて必ずしも良くなっていない場合もあるのではないのでしょうか？

最初の質問に対しては、それが橋梁として機能するために必要な要求性能（たとえば強度）に対して、現在の残存性能が上回っているかどうかを判断する必要があります。これには、初期の設計における部材設計とは異なり、橋梁全体としての強度を推定・把握することが要求されます。そのためには、まず損傷を計測してその状態を把握し、次に種々の解析等により残存強度を推定して、大丈夫かどうかを評価・判断することになります。

・計測上の問題

このとき、損傷状態を把握するための「何を、どれくらいの範囲でどの程度の精度で計測すれば良いのか」については、まだはっきりとはわかっていません。板厚を計測するだけで十分なのか、それとも腐食表面の凹凸形状まで要るのでしょうか？これに対しては、筆者は、作用外力とそれによる破壊あるいは崩壊形式によって測るべき内容が異なってくると考えています⁴⁾。たとえば、圧縮が作用し座屈崩壊につながる危険性のある部材では、座屈を支配する要因は部材の剛性ですから、ある領域の剛性を評価するための板厚や断面形状および腐食減肉にともなう中立軸の変化（偏心量）が必要です。一方、引張の場合には、部材の最小断面積が支配的となります。これらの場合、腐食表面の細かな凹凸形状は、いままでの研究から、あまり影響しないように思います。ところが、繰り返し荷重が作用する疲労問題では、応力集中が問題となるので、腐食表面の凹凸状態の把握が必要になります⁴⁾。このように、作用荷重（部材が担うべき応力）状態によって、損傷に対して把握すべきことは異なってきますし、対応し

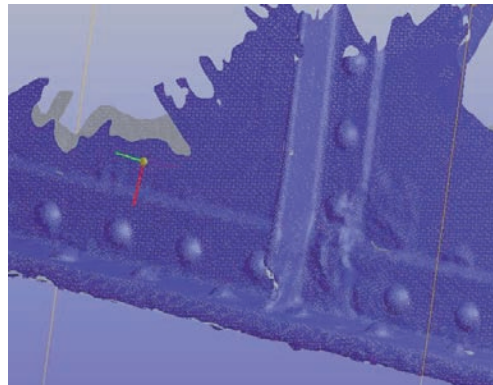
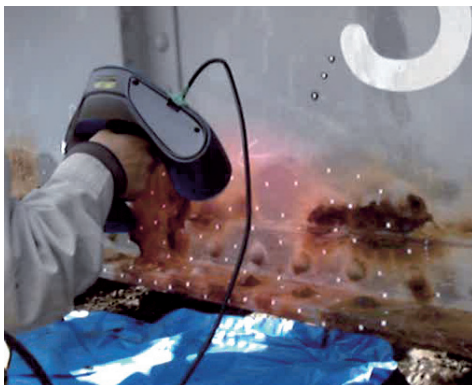


図-1 3次元レーザー計測機による計測結果から求めた表面形状
左の写真は計測風景、右は計測結果を基に作成した立体映像を示す。(計測リサーチコンサルタント(株)提供)

て測定範囲や測定間隔も異なります。筆者らは、1mm間隔で腐食表面座標を計測し、それを基に板や部材の座屈耐力を有限要素解析してみました。その結果、20mm間隔で計測すれば、一応信頼できる残存強度解析ができそうです。さらに大きな間隔でよいかもしれません⁶⁾。これらの評価結果の精度については、まだ基礎資料が少なく、十分な検討はできていません。

ところで、昨今の計測技術には目覚ましいものがあります。たとえば、1mm以下の間隔で密に表面座標を計測でき、しかも現場に適用可能なレーザー計測機(図-1)なども開発され、実用化されつつあります。現状では、実務に使用している機器は、超音波板厚計などに限られていますが、このような最新技術を活用すれば、いままでと異なった信頼性の高い新しい維持管理手法が可能になると期待しています。

また、腐食表面形状を測るには、塗膜や錆を除去する必要があります。これが意外にやっかいで、錆の種類や錆の位置によっては除錆が難しい場合が多々あります。今後、容易に塗膜上から板厚を計測する技術(これはすでにいくつかあります)や錆の除去技術も要求されます。

・残存強度評価の問題

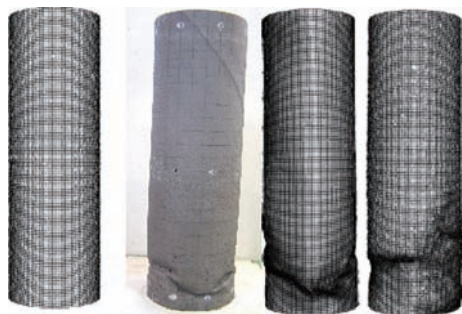
計測結果に基づく残存強度解析についても解決すべき様々な問題があります。昨今、計算機環境は著しく発達し、有限要素法により高度な非線形解析がパソコンレベルで容易にできるようになりました。しかし、たとえば2m程度の長さの腐食した鋼管部材の残存圧縮強度を求めるために、要素幅1cm程度のシェル要素で分割すると、要素数や節点数はすぐに数千程度になってしまいます。計算時間は10分ほどですが、板厚などの

入力データの作成や結果の整理を勘案するとかなりの労力と費用を要します。さらにこれくらいの要素分割で、構造物全体を解こうとすると莫大な費用が必要となり、実務レベルで行うには現実的でなくなります。

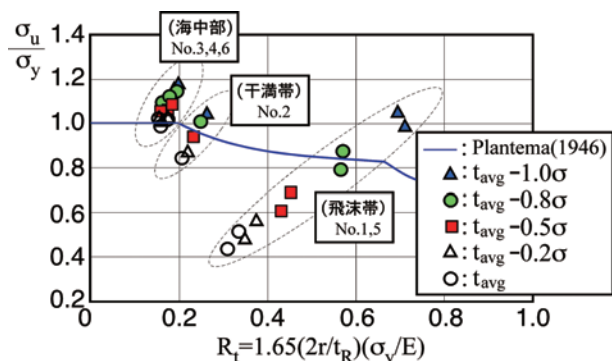
したがって、簡易な強度評価式などを開発するのも一つの解決策といえます。図-2は、腐食した円形鋼管杭の残存強度評価を試みたもので、既存の腐食していない鋼管杭の強度評価式を用い、腐食した板厚の平均値および標準偏差から評価板厚を決め、幅厚比パラメータ R を求めて、残存強度 σ_u を求めたものです。このように、崩壊形式を支配する主要因(ここでは評価板厚)をうまく選ぶことによって、残存強度を評価することができそうです。ただし、有限要素解析では、測定結果を入力データとして用いれば全ての座屈形式を考慮した残存強度評価が可能ですが、簡易評価式を用いる場合には、特定された座屈変形様式に対する残存強度のみを評価していることに注意を払うべきです。起こり得る全ての座屈様式に対する評価値のうち、最小値を求める必要があります。すなわち、図-2では、鋼管杭が局部座屈により崩壊する時の強度を推定しているだけで、杭全体の曲げ座屈崩壊も危惧される場合には、別途全体座屈の検討をおこなって、これらのうちの小さい方を用いて残存強度を評価する必要があります。

・評価結果の判断の問題

現在、多くの研究者が精力的に残存強度の把握を目指していますが、多くは部材の強度を対象としています。この種の研究は、構造物全体の残存強度は部材の強度に依存するので、大変重要であるのはいうまでもありません。しかし、実際の橋梁で発生するフランジ



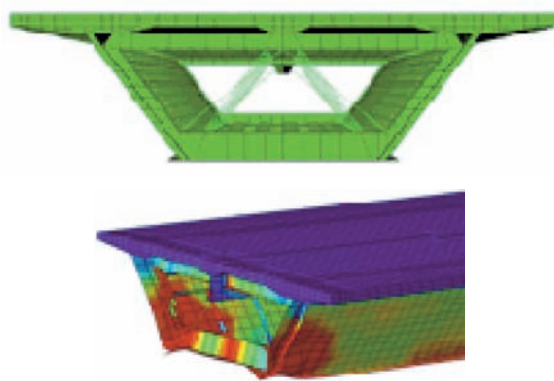
要素分割 実験結果 FEM解析 予測モデルFEM



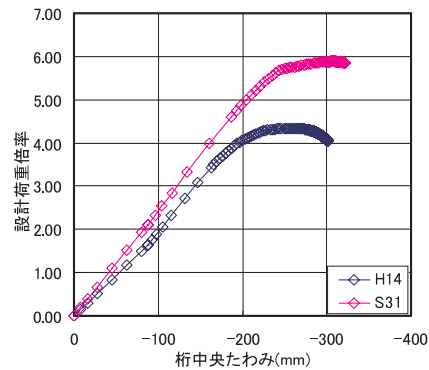
残存耐力の簡易評価

図-2 圧縮を受ける鋼管杭の残存強度評価⁷⁾

左図のFEM解析は実測板厚結果を用いたFEM解析の終局状態。予測モデルFEMは人工的に腐食表面を作成してFEM解析を行った崩壊状態。FEM解析は実験の崩壊状態とよく一致している。予測モデルFEMは、崩壊状態は異なるものの耐荷力は実験結果とほぼ同じとなった。右図の簡易評価は、鋼管杭の評価板厚をどのように設定するかを検討したもので、長手方向に局部座屈が起こる範囲(= $3\sqrt{rt}$, r :鋼管杭半径, t :鋼管杭の元板厚)の板厚計測結果の平均板厚 t_{avg} とその標準偏差 σ を用いて $t_R = t_{avg} - 0.8\sigma$ とすると、無腐食の場合のPlantemaの強度評価式を用いて残存圧縮強度が推定できる。



a) 断面形状と崩壊状態



b) 荷重-たわみ曲線

図-3 開断面合成箱桁橋の耐荷力解析

図a)は断面形状と終局状態、図b)は支承部座屈崩壊（せん断崩壊）を対象とした活荷重倍率と橋梁中央のたわみの関係を示す。ここで活荷重倍率とは、死荷重を載荷した後、TL-20あるいはB活荷重を増加させて活荷重の何倍になるかを示す係数である。

の応力は、設計計算で求めた応力よりもかなり小さいことが知られているように、「構造物全体の残存強度がどれくらいの安全率を持っているか」に着目して維持管理を行うのが合理的と考えられます。しかしながら、部材強度と構造物全体の強度との関係は簡単ではありません。

現実には、ウェブに穴が開いていても、橋として荷重に耐えている例があります。これは、荷重に対する安全率（実際には、設計荷重が作用することは希であることも含みます）のほかに、橋梁が構造物全体として耐荷力に余裕を持っていることも大きな要因と思います。昨今、どの部材の損傷が構造物の破壊に対して致命的になるかを調べるFCM (Fracture Critical Member)の研究⁹⁾がなされていますが、多数の部材からなる橋梁から致命的部材を確定するのはまだ難しいようにみえます。とくにプレートガーダー橋の局部的減肉などを対象にする場合には、トラス橋とは異なって部材の特定そのものが困難になります。部材の残存強度と構造全体の残存強度の関係の解明は、今後の研究に期待しますが、現状では、構造全体の耐荷力を把握するためには、有限要素解析が有力と思います。

約40年間供用され、河川改修のために撤去された複合断面箱桁橋の全体強度を有限要素解析してみました⁹⁾。この橋梁は、昨今架設例が増えてきた開断面合成箱桁で、スパン約50mの単純桁橋です。撤去時には特に大きな損傷や腐食減肉はありませんでした。RC床版は立体要素、鋼主桁および縦桁部分はシェル要素、対傾構にははり要素を用い、約4万要素、節点数約5万の複合非線形解析です。荷重条件は、先ず死荷重を載荷し、その後活荷重を漸増させて耐荷力を求めてみました。図-3に、解析結果を示します。図での活荷重は、橋の支承付近がせん断力によって崩壊する載荷条件にして

います。図からわかるように、単純桁構造であるにも関わらず、TL-20に対して5.9倍、B活荷重に対して4.3倍の活荷重に耐え得る結果となりました。因みに、曲げ崩壊の場合については、TL-20に対して6.1倍、B活荷重に対して4.5倍でした。このように、橋梁全体の強度は、部材を対象とした初期設計での強度に比べて、かなり大きな余裕があることがわかります。一般の橋梁では、このことが、大きな腐食損傷があっても落橋していない原因の一つと考えて間違いのないと思います。

ただし、15年位前にフェリー渡橋の現場載荷試験を行いました。このときの渡橋主桁の応力は、設計計算書の値とほとんど同じでした。この橋は2本の主桁と鋼床版、横リブだけで構成されており、支承の1端はジャッキで吊り下げられている単純桁構造です。さらに床版は主桁の中立軸に近い位置に配置されていたので、主桁は設計通りの応力状態となったと判断できます。このような橋梁では、一般の橋梁に比べて強度的余裕はかなり小さいと予想されます。

このように、橋梁が有する強度余裕は、個々の橋梁によって異なります。一般の橋梁についても、まだ大丈夫と考えて放置すると、いずれ落橋に繋がるのは明らかです。個々の橋梁の腐食がどこまで減肉してよいかを決めるのは大変難しい課題です。

・性能回復の問題

腐食の進行にともない大きな減肉が発現したときには、架け替えか補修かを判断し、補修が適切と判断されれば補修（性能回復）して要求性能を上回るような対策をします。このとき、性能回復対策における補修設計の基本方針、設計概念等ははまだ確立されていません。というよりも確立できるようなものではないかもしれませんが・・・。

性能回復には、いくつかのレベルがあります。腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル³⁾では、a)維持、b)回復、c)増強、の3つの性能回復の目的レベルを挙げています。a)維持は、腐食の進展を止めることによって現状の保有性能を維持すること、b)回復は、損傷に対して、現状から初期の保有性能までの範囲で、性能を回復させること、c)増強は、初期の性能以上に性能を向上させること、としています。

実際には、これらの性能回復の目的レベルの他に、時間軸と予算計画を加えた判断が必要と考えています。たとえば、「この橋は、長期にわたって供用しなくてはならないけれども、大がかりな補修は予算的に難しい。10年位先には、補修予算が確保できそうだからとりあえず15年間は安心できるような補修対策を行いたい」などの要求がありそうです。これに応えるためには、まず1)現状の正確な評価（これができれば補修の要否が判断できます）を行い、2)どこまで性能を回復させるかを決め、対策法を選出する。そして、3)対策施工後の補修効果を定量的に把握するとともに、その効果の将来予測を行う、といった対応が必要です。この一連の流れは、理想的な維持管理のフロー（図-4）となら変わりありません¹⁰⁾。図-4は、筆者が勝手に理想的と考えているだけで、一般に認められているものではありませんが、多くの維持管理マニュアルでは、「将来予測」はまだ組み込まれていないようです。

さて、上記2)および3)の性能回復において、選択した性能回復対策の効果を定量的に把握する技術は、まだ確立されていませんし、さらに、その効果の将来予測については、全く手がつけられていないのが現状といつてよいでしょう。

いま、プレートガーダーのウェブに腐食孔が開き、これに添接板を当ててHTボルトで補修する場合を考えてみます。設計で決めるべき事項は、添接板の板厚

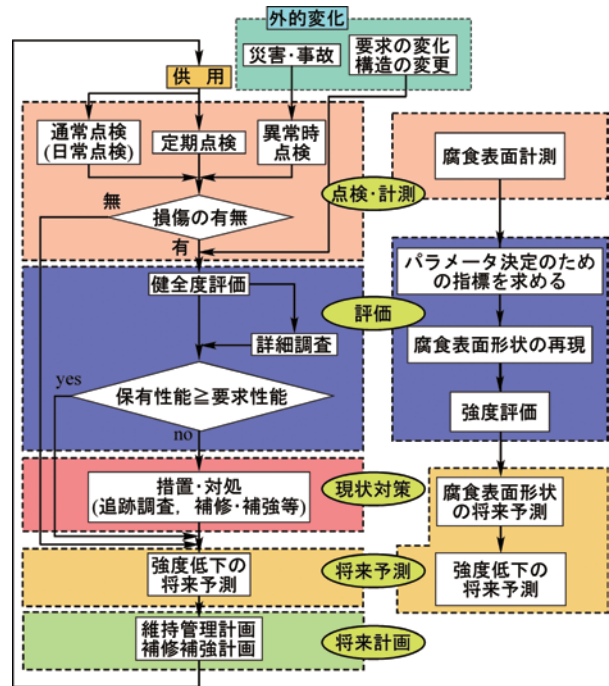


図-4 維持管理の流れ

鋼構造物維持管理は、図の左側のように、点検、評価、判断、現状対策、将来予測、将来の維持管理計画という流れとなる。右側は、腐食表面の進展予測解析に基づく構造物の強度低下予測シミュレーションの流れを示す。

およびその大きさ、HTボルトの本数とその配置位置です。この場合、ウェブの全強を保証するのがあるいは設計荷重に耐えればよいのか、によって添接板厚は異なるでしょうし、当初のウェブが受け持つべき応力状態に対して、添接板にどのように荷重伝達させるかによってHTボルトの配置も変わってくると思います。このとき、HTボルトとウェブ間の摩擦係数はどれくらいに見積もればよいのか、また、補修時にはベントを設置して開口部の応力を無応力状態にして施工する

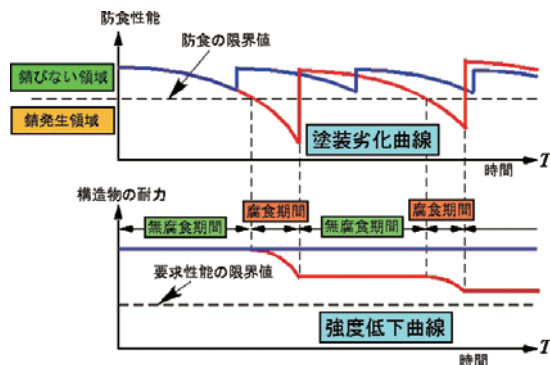


図-5 塗膜劣化と残存強度低下のイメージ

塗膜が劣化して鋼材が腐食すると強度は低下する。青線で示すように塗装塗替を頻繁に行えば、理想上は腐食による強度低下はない。一方、赤線のように、塗替間隔が長い場合、腐食減肉が発生した後に塗替えても、一旦低下した強度は低下したままで、元には復らない。

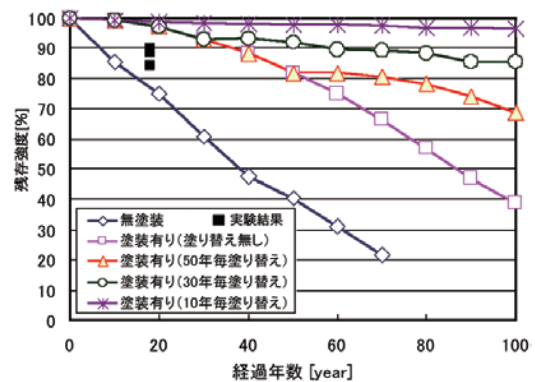


図-6 塗装の塗替期間と強度低下の予測結果
腐食進展と塗膜劣化の進展モデルを用いることにより、塗装塗替を短期間で行えば強度低下は小さい、という現象を表現できる。

のか供用下で施工するのか、など細かな配慮が必要です。そして、施工後の添接板が設計通りの効果を発揮しているかどうかを定量的に把握することも必要です。

このようにいって簡単にみえる補修でも、今後解明すべきことは多々あります。

・将来予測の問題

すでに述べたように、橋梁の残存耐力が将来的にどのように低下するか、また、性能回復対策を施した後に、保有性能がどのように変化していくのか、といった予測は、ほとんど手付かずの状態です。アセットマネジメントでは、将来の劣化曲線を描いて将来計画を立案しますが、的を射た劣化曲線を与えるのは大変難しい。しかし、正確な予測は不可能とはいうものの、少なくとも説明力が高く、説得力を持った予測法は必要と思います。

図-5は、塗装の防食効果を考慮した腐食進展のイメージを示しています¹¹⁾。塗膜が健全なうちは地金の腐食はありません。しかし、塗膜の劣化にともなって、あるときから地金の腐食が始まり、対応して強度が低下すると考えられます。塗装塗り替え後しばらくは地金の腐食は止まりますが、地金の減肉は回復していませんので強度は元には戻りません。これが繰り返されることによって、経年とともに強度は低下していきます。図-6に、防食能力と腐食進展をモデル化して、鋼管杭の強度低下解析を行った例を示しますが、このような手法により耐荷力低下のイメージを表現することは一応可能のように思えます¹²⁾。

現在の道路橋示方書では、LCCの予測が求められていますが、この予測は、設計時が最も精度が悪いといえます。供用後に定期点検を重ね、そのデータを基に予測法の支配パラメータを修正して、強度劣化曲線を修正していけば、そこから先の予測精度を向上させることができる。筆者は、このように考えています。そして、その時点で補修が必要なら最善の補修を施すことによって、最終的にLCCミニマムが実現できると思います。

むすび

構造物の維持管理について、筆者の勝手な思いを書かせていただきました。「わからない」「未解決」ばかり申しましたが、少しずつ前進していることはいうまでもありません。いままでに蓄えてきた社会基盤構造物を、適切に維持管理して長寿命化を図り、安全かつ安心して使用できるようにすることは、我々土木技術者の大きな責務です。大阪工業大学 松井繁之教授は、維持管理を「観る」、「診る」、「看る」と唱えられています。筆者の研究室では、学生諸君にいつも「現場100

回」と言っています。現地を観察してよく理解・把握し、その結果を誤らないよう診断し、適切なケアをしていくことが、維持管理の基本ととらえています。なお、いうまでもありませんが、「維持管理を行っていけば社会基盤構造物が未来永劫安全である」と考えるのは明らかに誤りです。また、先にも述べたように、適切な維持管理を行うには、新設橋梁を理解したうえで、それ以上の智恵や技術が要求されることもあります。したがって、現在の技術をスムーズに次世代に継承するためには、維持管理技術のみならず新設橋梁の技術の継承も重要です。その意味では、真に競争力をつけて海外展開することも、現状に鑑みると一つの選択肢のようにみえます。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会編：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技法堂，1993.
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.
- 3) 土木学会鋼構造委員会鋼構造の残存耐荷性能評価と耐久性向上方策研究小委員会：腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル，土木学会，2009.
- 4) 日本鋼構造協会：既設鋼橋部材の耐力・耐久性診断と補修・補強に関する資料集（鋼橋の維持管理とそれを支える要素技術），2002.
- 5) 村中昭典，皆田理，藤井堅：腐食鋼板の表面形状と残存耐荷力，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1063-1071，土木学会，1998.
- 6) 海田辰将，藤井堅，勇秀憲，長瀬竜一：腐食鋼板の圧縮強度解析における板厚取得間隔と要素サイズの影響，JCOS-SAR2007論文集，Vol.1，89-96，2007.
- 7) 藤井堅，近藤恒樹，田村功，渡辺英一，伊藤義人，杉浦邦征，野上邦栄，永田和寿：海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力，構造工学論文集，Vol.52A，pp.721-730，土木学会，2006.
- 8) 石井博典，安田昌宏，永谷秀樹，奥井義昭他：鋼トラス橋のリダンダンシー評価手法の検討（その1～その3），第63回年次学術講演会，土木学会，2008.
- 9) 山口詩織，藤井堅，藤井真人，山本正司，上野谷実：約40年経過した複合箱桁橋の力学的挙動，構造工学論文集，Vol.57A，土木学会，2006（投稿中）.
- 10) 藤井堅，山本治，原考志，中村秀治：鋼表面の腐食進展に基づく鋼板圧縮強度低下の経時予測，構造工学論文集，Vol.52A，pp.689-700，土木学会，2006.
- 11) 藤井堅，橋本和朗，渡辺英一，伊藤義人，杉浦邦征，野上邦栄，永田和寿，中村秀治：海洋環境における鋼管杭の圧縮強度の経年変化予測法，土木学会論文集，Vol.66，No.1，pp.92-105，2010.

