

招待論文

道路橋の寿命と維持管理

LIFE TIME AND MAINTENANCE OF HIGHWAY BRIDGES

西川和廣

Kazuhiro NISHIKAWA

正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部橋梁研究室長
(〒305 つくば市旭1)

Key Words : highway bridges, maintenance, life time, de-gradation model, life cycle cost

はじめに —なぜ、寿命と維持管理なのか—

橋に限らず、構造物の寿命や耐用年数に言及した記述や論文は少なくない。しかしながら、未だに橋の寿命は？ 耐用年数は何年か？ という質問がしばしばされ、かつ適当な回答が示されずにいる。

筆者は、研究者であると同時に、全国の道路橋に対し、その将来にわたっての整備と維持管理について、道路管理者の立場から考えなければならぬ立場にあり、以前から橋の寿命については興味を持っていたが、最近になっておぼろげながら自分なりの方向が見えてきたような気がしている。

今回、論文集という恵まれた機会を提供され、いわゆるこの分野の研究展望というよりは、実際の構造物を預かる道路管理者としての立場からの考え方をご紹介させていただこうと思う。

橋の寿命と維持管理について、筆者の結論を先に述べてしまうと以下の通りである。

- ① 更新を前提としたライフサイクルコスト最小のマネジメントは、道路橋には馴染まない。
- ② 設計、施工上の配慮に加え、メンテナンスを有効に組み合わせることによって工学的な永久橋を目指すべきである。

実際の橋の維持管理に関わる仕事をしていると、道路橋の寿命に影響する因子の中で、維持管理への依存度が最も高いと思わざるを得ないことが多い。橋の維持管理データベースの整備が進んだ米国においても、分析の結果、同様な結論に達している¹⁾。これが道路橋の寿命と維持管理という表題を選んだ理由である。維持管理の実態を見つめることにより、橋の寿命や耐久性についての疑問の多くが解明されるものと考えている。

本文では、このような結論に至ることになった種々の

考え方を順次列挙した。十分な検討を尽くさずに記述している部分も多いが、今後ますます重要性が高まるとされる維持管理の分野で、研究を進めることが必要な領域を把握するために、いくらかでも参考になれば幸いである。

なお、筆者の本来の専門から、記述が一般に鋼橋の上部構造に片寄る傾向があることについてはご容赦願いたい。

1. 橋の寿命

(1) 既往の考え方

寿命や耐用年数に関する既往の研究は少なからずあるが、筆者が関係している橋、それも道路橋に関する研究は意外に少ない。その中でも、鋼橋については、平成3年に(社)日本鋼構造協会、鋼構造物の寿命検討小委員会[委員長：山寺徳明首都高速道路公団工務部長(当時)]によってまとめられた「鋼構造物の寿命に関する調査」と題する報告書²⁾が、コンクリート橋については、小林らの研究³⁾が興味深い。

文献⁴⁾では、土木構造物の寿命について、「物理的・物質的に、あるいはその機能の陳腐化によって施設の有効性が失われたと認定されるまでの期間」と定義している。表現上の相違は多少あるとしても、このような考え方が受け入れられているようである。

一般に寿命は物理的寿命、機能的寿命、経済的寿命に分類されて論じられることが多い。しかし、文献²⁾では、とりまとめ作業を通じて得られた問題点として、以下の2点をあげている。

- ① 鋼構造物がどこまで使用できるのか、その物理的限界(物理的寿命)があまり明確でないために、これまで取り替えられた鋼構造物の寿命が経済的寿命なのか物理的寿命なのか判断に苦しむものが

多い。実際には、経済的理由により取り替えられているものも多いものと考えられる。

- ② 経済的寿命は鋼構造物の管理者の判断によって大きく左右されるようである。実際には最も経済的となる取り替え時期があると考えられるが、この点について具体的に記述した文献は少ない。

これらの問題点については、筆者は維持管理の要素を十分に加味すれば解決しうるものと考えている。このことについては次節において考察したい。

一方、寿命の長さそのものについては「減価償却資産の耐用年数等に関する大蔵省令」において、鉄道橋の耐用年数がコンクリート造で50年、鉄骨造で40年となっていることに引きずられて、わが国では50年程度と考えることが多い。しかし、いわゆる耐用年数と寿命とが同一のものではないということは議論を待たないと思われるし、これらの年数をはるかに超えた鉄道橋が、現在も数多く使用されていることを見ても、この数字は短すぎるように思う。

さらに、橋の設計に限界状態設計法を導入している欧米諸国では、75年あるいは150年といった年数を用いているが、これらも非超過確率を算出する際の年数を寿命と混同しているように思われる。

(2) 本論文における「寿命」の定義

橋の寿命が尽きるということは、基本的には何らかの理由で使われなくなることだと考える。この点については前述の定義と同じである。使われなくても文化財として残ることはあり、それはそれで筆者は評価したいと思うが、ここでは使用されなくなる（できなくなるのではなく）ことを寿命と考えたい。

橋が使われなくなるケースとしては、以下に述べる三つの場合が考えられる。

① 戦争や災害による破壊

わが国では考えにくいことであるが、世界的に見れば橋を爆撃により破壊することは、補給路や追撃路を断つという意味で、最も効果的な戦略のひとつであり、破壊された橋は少なくないものと推測されるが、ここでは対象外とする。むしろ気象条件の厳しいわが国では、地震、台風などの自然災害による破壊を対象とする方が考えやすい。橋そのものの耐久性とは独立した、外的要因による寿命ということができるとは思えない。

② 機能の陳腐化による架換

道路交通事情の変化により、道路線形、幅員、設計車両の重量など、利用者側の要求レベルが高まったために機能的な陳腐化を招き、架換を余儀なくされる場合がこれまでは多かった。直接利用者とは関係ないが、河川改修や交差する他の交通機関などの都合で架け換えられる場合もこの分類に含まれよう。この場合、橋には何の罪もなく、架換理由は利用者あるいは管理者側の都合で

ある。

③ 維持管理負担の増大による放棄

もうひとつは、いわゆる物理的変状に起因するものである。橋あるいは橋を構成する部材が、荷重あるいは化学的要因によって変状を生じるケースである。従来、この変状によって橋に求められる要求性能を充たすことができなくなる時点をもって、物理的な限界状態としていたが、筆者は、これを維持管理との相対的な関係から位置づけることを考えた。すなわち、変状が進むことによって増大する維持管理負担と道路管理者の維持管理能力の比較において、次式が成り立つ場合にその橋は放棄されると考えるのである。

維持管理負担 ≧ 維持管理能力

ここで、「負担」、「能力」には、資金、人材、技術力などの概念が含まれる。したがって、維持管理に関わる資金力や技術的能力が高められることも、橋の長寿命化に寄与することになる。

以上はすべて前述の定義には当てはまるが、①はいつ起きるかわからない外的な要因が対象であるため、マクロに見れば橋の寿命と相関があるかもしれないが、2.

(1)に述べるように筆者はここで議論すべき寿命とは別のものとする。また、②については、人間の側の都合であるから、橋本来の寿命とは無関係とすべきであろう。

本論文では、いわゆる物理的な寿命の一部を維持管理と一体に考え、経済的な要因も加味した③を議論の中心に据えることにしたい。

本来、維持管理コストと架換に要するコストを比較して、経済的な限界を求めるのが、いわゆる橋梁マネジメントの取るべき道ではあるはずだが、現実には予算の制約もあって、維持管理分野は維持管理分野でベストを尽くし、能力を超えた場合には建設分野に助けを請うということが行われている。

このようなことから橋梁マネジメントシステムの確立が急がれている訳であるが、合理化さえされれば、現在のやり方でもよいのではないかと筆者は思い始めている。その理由は4章に述べる。

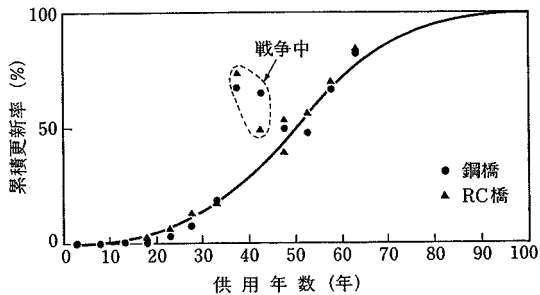
2. 設計で考慮すべき橋の寿命

(1) 設計寿命に関する諸説

道路橋の寿命はどうあるべきかについて、よくいわれる三つの説があるが、筆者はそれらのいずれも道路管理者として受け入れられるものではないと考えている。

① 架換え実績説

図—1は、それぞれの時期に建設された道路橋が、現時点（昭和61年）でどの程度の割合で更新されたかを調査した一例である。戦時中あるいは戦後の物資の不足



図一 供用年数別累積更新率（建設省）

した時期に建設された橋が、早い時期に架け換えられた傾向が見られるが、おおよそ50年ではほぼ半数の橋が架け換えられているのがわかる。従来、漠然と橋の寿命は50年程度といわれたり、人の寿命になぞらえて50年、最近では7、80年などと言われてきた。また、その橋の設計、建設に関わった人々が存命のうちには架け替えるべきでないともいわれるが、それもひとつの見識であろう。

図示された調査結果も、これらの考え方を裏付けているように思えるが、注意すべきことは、この図に含まれる橋梁の中には物理的寿命以外の理由で架け換えられたものが多いこと、また、大半が少なくとも現在よりは未熟な技術によって建設され維持されてきたことである。

したがって、今後、この図の曲線は長寿命側に大幅にシフトしていくことが予想される。

こういった比較的短い有限の寿命を想定する考え方の中には、橋の寿命を人の寿命のように、抗しがたい自然に定められたことのように考えていることが根底にあるのではないだろうか。そのこと自体に反論を唱えるものではないが、何度も述べるように、橋の寿命には維持管理のあり方が非常に大きく影響し、その良し悪しで、いわゆる物理的寿命は2倍にも3倍にも（あるいは無限にも）延ばしうる。どんなに頑張っても150年を超えることは不可能と考えられている人の寿命とは違うのである。

橋の寿命を一種の自然現象ととらえ、経済的な観点からメンテナンスフリーを指向するのは、悪く言えば使い捨ての発想であり、この観点を取り続ける限り、文化財としての橋は永久に生まれてこないことになる。

これらのことを別にしても、為すがまま、自然流、壊れたら架換というのは、道路管理者の責任を果たしたことはないのではないかと筆者には思える。

以上のような理由から、これまでの実績に基づく寿命の設定を筆者は取らない。

② 災害決定説

いわゆる非超過確率あるいは再現期待値という考え方の中に出てくる年数がある。たとえば現在の道路橋示方書における耐風設計に用いる設計基準風速は、50年非

超過確率60%というような形で設定されている。そして、ここで言う50年という数値といわゆる橋の寿命とは整合しなければならず、50年以上もつように橋を設計したところで風や地震で決まってしまうのだから無駄であるという言い方をする人が意外に多い。

このことが明らかに誤りであるということは、少し冷静に考えていただければ気がつくはずである。すなわち、50年非超過確率60%ということは、

- 1) 50年後に大災害が来るわけではない（明日来る確率も等しくある）。
- 2) もし来たとしても、設計外力を超える影響を受ける橋は40%以下である。
- 3) さらに万が一設計外力を超える力を受けたとしても、すべての橋が被害を受けるとは限らない。

ということであり、いわゆる寿命の考え方とは次元が異なるものである。

設計上陰に陽に与えられた余裕や、一種の安全弁やフェイルセーフ機能により、災害に対して橋としての機能を失わずにすむ可能性も少なからずある。近年の米国における大地震においても、極めて大きい加速度が観測されたにもかかわらず、大きな損傷を受けた橋はごく一部であったことも、この考え方を裏付けている。

筆者の表現を述べさせていただくと、 m 年非超過確率 $n\%$ 等というのは、永久橋としてあるいは安全な橋としての保証レベルを意味しているのである。言い換えれば、50年非超過確率95%の橋よりも、150年非超過確率95%の橋の方が永久橋として、災害に対する信頼性がより高いといくことに過ぎない。寿命との関わりで言うと、非常に長い年月を対象としてマクロに見たときに、150年の橋の方が平均的に寿命が長いと言うことがあるかもしれないが、それ以上でも以下でもない。

この保証レベルという概念は、外力の大きさや頻度の予想が難しく、安全側過ぎる設計をすると構造物として成り立たなくなるような場合の設計の目標としては有効である。しかし、非超過確率の年数と橋の寿命はやはり別ものである。

③ 機能寿命説

橋の架換理由の大半が、道路改良などによる機能の陳腐化によるものであることから（図一2参照）、橋の寿命は物理的に決まることは希であり、あまり長期間もつように設計しても無駄であるという考え方がある。「どうせ架け換えるんだから説」といったほうがわかりやすいかもしれない。

昭和30年当時のように社会資本が未整備な状況では、将来における道路の機能を予測することが困難であるということもあったかもしれない。事実、わが国の自動車の保有台数は、昭和30年当時の100万台あまりから現在では6000万台へと、短期間に驚異的な伸びを示し、

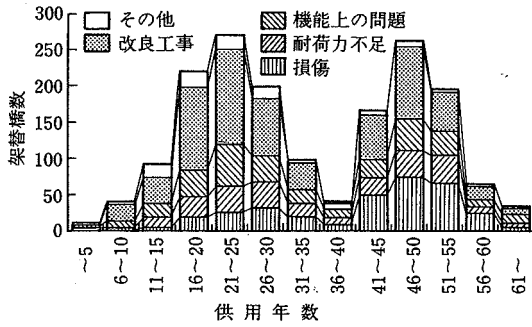


図-2 架替理由別の架替橋数と供用年数 (建設省)

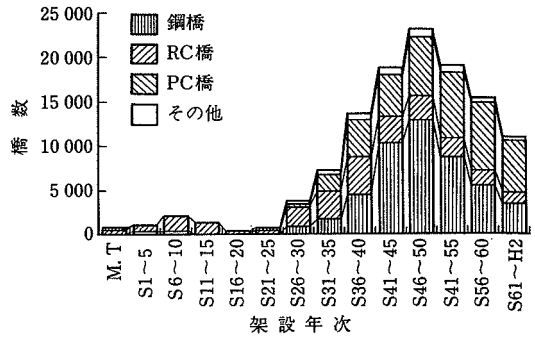
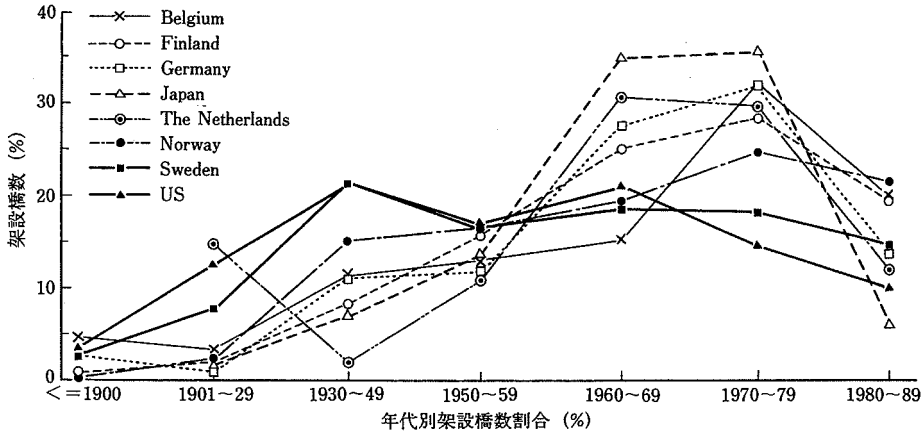


図-3 架設年次別橋数 (H 3.4.1 現在)



(注) 1989年現在供用されている橋梁の架設年次別分布を示す。

図-4 架設年次別橋数の国際比較 (OECD)⁵⁾

自動車の性能の向上も相俟って、多くの橋をはじめとする道路構造物が、機能的陳腐化による改良を余儀なくされている。

しかし、現在のように、かなりの程度社会資本ストックが蓄積された状況にあっては、将来の交通政策の立案に当たって、現存の資本をいかに活用するかということに影響されるはずである。また、欧米先進国における道路交通の推移についても多くの知識を得ている。したがって、現在および将来において整備が行われる橋が、これまでのように短期間のうちに機能的に陳腐化することは考えられないし、もしあるとすれば、道路計画の立案者の能力が疑われることになろう。少なくとも無責任ではある。

以上の理由により、機能寿命から設計寿命を導くことは誤りである。

(3) 必要寿命と工学的永久橋

平成 5 年 4 月 1 日現在、わが国の道路用の総数は支間 2 m を超えるもので 663 652 橋、全長が 15 m を超えるものに限っても 124 604 橋にのぼる。仮に橋の寿命を 50 年とすると、全長 15 m 以上の橋だけに限ってみても年

間約 2 500 橋を更新しなければならないことになる。現在、新たに建設されている道路橋が年間約 2 000～2 500 橋であることを考えれば、将来本格的な高齢化社会を迎えるわが国にとって、単なる更新のために現在と同じペースで橋を架け換え続けることは不可能であろう。更新は新設に比べ、はるかに大きな資金とエネルギーを必要とすることはご存じの通りである。

図-3 は、わが国の道路橋を架設年次別に示したものである。わが国の本格的な道路整備が昭和 29 年の第一次道路整備五ヵ年計画により開始されたのを反映し、昭和 30 年代後半の高度経済成長期から 50 年代前半にその数が集中し、一種の団塊の世代を構成しているのがわかる。これらの橋が 2010 年から 50 歳を超え始めるため、そのころから急激に橋の高齢化が進むことになるのである。

わが国の道路整備の歴史は比較的浅く、橋の供用年数は欧米先進諸国に比べても比較的短く、図-4 に示すように架設年次が近年に偏っていることがわかる。

人間の高齢化を示す指標として 65 歳以上の高齢者の割合を用いることが多いが、仮に供用年数が 50 年を超

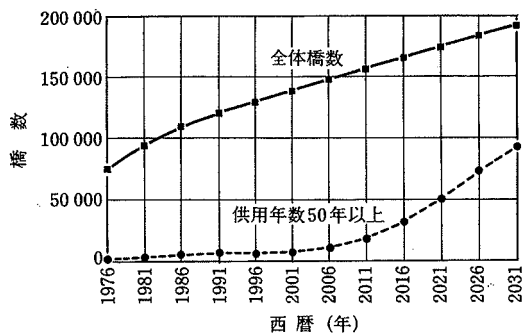


図-5 供用年数50年以上の橋数の将来予測

える橋を高齡橋として、最近の新設橋と撤去された橋の平均的な数（それぞれ2000および200橋）がそのまま推移するとして試算したところ、2001年頃までは大した変化は見られないが、2011年には10%を超え、2021年には30%、2031年には50%に達する。実際に維持管理上の問題となるのは割合ではなく橋数そのものであるが、実数の増加は高齡橋割合の増加よりも急激であり、現在およそ6000橋程度の高齡橋が2021年には50000橋へと増加する（図-5）。

以上のような状況が予想される中で、わが国の社会資本をサービスレベルを落とすことなく維持してゆくには、十分に長い設計寿命を設定する必要があると考えられる。これらのことから、筆者は基本的には永久橋を目指すべきだと考え、現実的に対応可能な方法として工学的永久橋の概念を提案したい。

工学的永久橋とは、現時点で明らかになっている橋の耐久性を阻害するすべての要因について、設計、施工上の配慮に加え、最小限の維持管理を効果的に組み合わせることにより、ほぼ永久的な寿命を達成することのできる橋をいう。したがって、目標は永久橋であるが、未知の原因によって、寿命が短縮されることは当然あり得る。

また、疲労設計などにおいて、どうしても供用期間（ライフタイム）を設定せざるを得ない場合には、200年を設定することを提案したい。疲労設計における寿命の設定は、疲労試験における寿命を推定することと同様、疲労寿命を高い精度で行うことは、ばらつきが大きいためにきわめて難しい。倍半分の精度が出ればよしとしなければならないだろう。200年を目標とすれば、半分でも100年は確保できるし、倍になって400年ということになれば、ほとんど永久といっても差し支えないものと考えられる。

工学的永久といっても、人間が行うことであるから、実際には設計、施工上の不備や、維持管理上の不手際が生じることは避けられないであろう。しかしながら、高齡化社会の将来のわが国であっても、永久橋を目指したにも関わらず損傷を生じた橋の手当をすること位はでき

るのではないかと思うし、国土も荒廃させないためにも是非ともしなければならないと思うのである。

3. 工学的永久橋を実現するための方策

(1) 橋の寿命を決定する三つの要因

どんな現象にも必ず原因がある。橋の寿命を損なう損傷劣化にも、すべて原因があるはずである。それらの原因をすべて特定し、何らかの防止対策が講じられるならば、工学的な永久橋の実現は可能となる。

橋の寿命を決定する要因は、以下に述べるように設計、施工および維持管理に関わる要因に分類するとわかりやすい。

① 設計要因

設計に関わる要因といえば、鋼橋では疲労設計や防錆（食）対策、コンクリート橋では中性化によるコンクリートの劣化対策が思い浮かぶが、これまで寿命を想定した設計は、系統立てて行われてこなかったことに気づく。

これらの中で、構造設計の対象として解析される主部材の疲労設計については、疲労設計活荷重の設定と目標供用年数（ここでは200年を提唱）が設定されれば、ほとんど確立されているといってもよい。しかし、二次応力やたわみ（差）に起因する疲労や腐食については、今後の研究に待つところが多い。

コンクリート橋については、塩害対策についての技術基準は示されているものの、寿命との関連で記述されたものは見られない。

また、間接的には、維持管理への配慮も設計要因に含まれるかもしれない。

さらに、限界状態設計法のように、経験に頼らず、すべての限界状態について漏れなく陽な形で配慮する設計法に移行するには、ここにあげた項目について、慎重に吟味した上で限界値を定める必要がある。

② 施工要因

従来、期待されたより早期に損傷が生じた場合、施工不良が第一に疑われることが多く、実際にその通りであることが少なくなかった。とくに、現場で材料の段階から施工されるコンクリート部材では、その傾向が顕著である。

しかし、近年ではわが国における施工技術も上がり、むしろ施工上の配慮により長寿命化を前向きに追求する時代に入ったのではないかと筆者は考えている。ただし、建設市場の国際化にともない、品質確保の方策を改めて検討してゆくことも大切である。

③ 維持管理要因 —維持管理で救える橋の劣化—

これまで維持管理を、橋の供用年数とともに不可避免的に増大を続けるもので、永久に橋を使おうと思えば、膨大な出費を余儀なくされると考えられてきたような傾向がある。しかし、経験を積んだ管理者ならば、設計、施

工の段階では気がつかなかった問題点が見える。比較的簡単な改良によって、維持管理の負担は、大幅に減らすことができるものなのである。

橋の損傷原因のほとんどは、何らかの形で水が関与している。腐食はもちろん、凍結融解、洗掘、塩害なども水が主因あるいは腐食物質を媒介するし、アルカリ骨材反応やRC床版の損傷も、水が補給されることにより加速する。したがって、排水や防水など、水回りの改良により弱点をカバーすることができる。

(2) 工学的永久橋実現のための具体策

本節では、工学的永久橋を実現するためにどんな手法があり得るか、2, 3の損傷劣化を対象に、個人的なアイデアを含めて述べる。

a) 鋼橋の腐食

鋼橋の腐食原因は、① RC床版のクラック、打ち継ぎ目、施工不良に起因する漏水、② 桁端（伸縮装置）からの漏水、③ 水たまり、土砂の堆積、④ 海からの飛来塩分、凍結防止剤の影響、⑤ 高湿度による結露、⑥ 路面からの水、埃、土砂、⑦ 添接部からの水の浸透などに分類されるが、これらは排水等水回りの改良や床版防水層の設置等により、かなりの部分が対処可能である。また、それぞれの原因による腐食の生じやすい部位やディテールが明らかにされれば、設計、施工段階においても対応が可能となる。たとえば特定の部位の塗装をより厚くすることや、錆代を見込むことなどが考えられる。また、重要な橋であれば、箱桁や主塔の内部は空調により乾燥状態を保つことも選択肢に加えられる。

さらに、使用材料や特殊な被覆によっても対処可能であり、耐候性鋼材の裸使用、溶融亜鉛めっき、ステンレススチールやチタンによるクラッド鋼などの使用も考えられる。

b) コンクリート部材の劣化

コンクリートは圧縮部材として使用している限り耐久性はかなり高いが、ひとたびクラックが生じ、閉閉が繰り返されると、急激に耐久性を失ってしまう。文献³⁾によれば、「大正時代に架設された23のアーチ橋については、62年以上経過した現在（昭和62年）においても、老朽化が原因で撤去された例は一橋もない」。このことは、圧縮部材として使用する限り、コンクリート部材の耐久性はかなり高いことを表しており、耐久性向上のために有効にプレストレス導入にすることにより、コンクリート構造物の寿命は飛躍的に向上することを示唆している。コンクリートの劣化が二酸化炭素による中性化や鉄筋の腐食によるものであることを考えれば当然の結果である。

したがって、工学的永久を実現するためには、活荷重による曲げや引張を受ける部材（床版を含む）にはRC構造を使用するべきではないといえる。プレストレスを

導入することにより、コンクリート床版の耐久性が飛躍的に向上することは、いくつかの実験により確認されている。

また、クラックとは違うが、路面排水等のためのパイプを床版などコンクリート部材の中を通すことも、水や空気の通りやすい不連続部をわざわざつくることになって、部材の耐久性を損なう原因となる。配水管の破損により、周囲のコンクリートが劣化しているのを見かけたことのある人は多いのではないと思う。これに対する対策としては、床版面の防水層をしっかりと施工し、さらに路側に側溝を設けることにより、縦断勾配を利用して排水することや、排水柵を一体成形したプレキャスト床版等の開発が考えられる。橋の側溝についてはフランス等で例があるようである。

c) 支承の機能喪失による支点部の損傷

鋼製支承の水平及び回転機能が、腐食や磨滅により失われ、その結果温度変化や活荷重による移動を拘束することになり、橋本体の支点部に損傷を与えた事例が多く見られる。支承の機能の寿命が橋本体に比べて短いことは当然推測されることであり、本来適切な時期に交換されるべきものと考えられる。

対策としては、支承の交換を容易にする構造を設計の段階で考慮し、かつ交換を適切な時期に行うことが基本であるが、ゴム支承のように機能を失いにくく、たとえ劣化しても、上下部構造を破損させるほど拘束力が大きくならないものを選択することも考えられる。

d) 伸縮装置の破損による衝撃および漏水による損傷

伸縮装置についてはたくさんのタイプが開発されているが、直接輪荷重の影響を受けるため、なかなか耐久性の優れたものは見つからないのが実態である。これについては、設計において極力多径間連続形式を選択して伸縮装置そのものを減らす努力をすることや、既設の橋に対しては、いわゆるノージョイント化（桁や床版の連結や舗装面における埋設ジョイント工法）を施すことにより、既存の伸縮装置を除去することも一方である。

(3) 橋の健康状態と維持管理

維持管理にはタイミングが重要である。筆者が日頃技術指導を行う場合に頭に置いている、橋の健康状態と維持管理の関係を図示したものが図-6である

図は、橋の受ける損傷を腐食などの劣化現象、疲労および地震等の災害に分けて損傷の進行状況と原状復帰の可能性とその労力について表している。ここでは、橋の健康状態は、人の健康状態になぞらえて健康、軽傷、重傷、重体およびご臨終の5段階に分類している。

健康というのは、人間であれば年一回の健康診断を行ってれば、十分に健康が維持できる状態をいい、橋では定期点検以外に手のかからない健全な橋を意味する。大半の橋がこのレベルにあることが、維持管理負担

| 必要な措置 | | 腐食・劣化 | 疲労 | 震災 |
|-------|------------|-------|-------|----|
| 健康 | 健康診断(定期点検) | ○○○ | ○○○ | ○ |
| | | ↓↑↑ | : ↑↑ | : |
| | | ↓↑↑ | : ↑↑ | : |
| | | ↓↑↑ | : ↑↑ | : |
| 軽傷 | 維持管理作業(投薬) | ▽△↑ | △↑ | |
| | 健康体には復帰可能 | ↓ ↑ | : ↑ | : |
| | | ↓ ↑ | : ↓ ↑ | : |
| | | ↓ ↑ | : ↓ ↑ | : |
| 重傷 | 補修工事(外科手術) | ▽ ▲ | ▽ ▲ | |
| | 健康体には復帰可能 | ↓ | : ↓ | : |
| | 補修補強は原因次第 | ↓ | : ↓ | : |
| | | ↓ | : ↓ | : |
| | | ↓ | : ↓ | : |
| | | ↓ | : ↓ | : |
| 重体 | 延命はある程度可能 | ▽ | : | : |
| | 健康体復帰は不可能 | ↓ | : | : |
| | | ↓ | : | : |
| | | ↓ | : ↓ | : |
| ご臨終 | | × | × | × |

図-6 橋の健康状態

を適正なレベルに保ち、破綻を来さないためにも重要な条件である。

軽傷は人間では風邪ひき程度で、簡単な投薬で健康体に復帰できる状態を意味している。橋に置き換えると、塗装の劣化や排水装置の破損が発見された状態に該当する。この程度であれば、比較的簡単な維持管理行為により、もとの状態に復帰させることができる。

重傷というのは、人間では骨折や入院して手術が必要となるような大病を意味する。治療はかなり大変であるが、しっかりした処置を受ければ社会復帰できる。橋においては、腐食が放置されてかなり進行した状態や、疲労亀裂が発見された状態などに対応する。大がかりな補修工事により、健全な状態に復帰させることは可能であるが、補修後しばらくは頻繁に点検を行うことが必要となるなど、維持管理上かなりの負担になる。

重体ともなると、延命はある程度可能であるが、もはや健康体への復帰は不可能になる。かなり良くなるとしても、後遺症が残る可能性が高い。橋の場合も同様で、この段階まで損傷が進んでしまうと、恒久的な補修はほとんど不可能になってしまう。架換までの限られた期間の供用を確保することしかできなくなる。もちろん、財政的にも努力についても維持管理負担は非常に大きいものになる。

ご臨終というのは説明の必要はないと思うが、橋においては落橋事故や長期間の閉鎖に該当し、どうしても避けなければならない状態である。

腐食劣化については、その程度が進むほど回復のための労力が大きくなることを、矢印の太さで示してある。

疲労の場合は、損傷が目に見える形で発見された時点では、既に重傷の領域であること、またその時点で発見

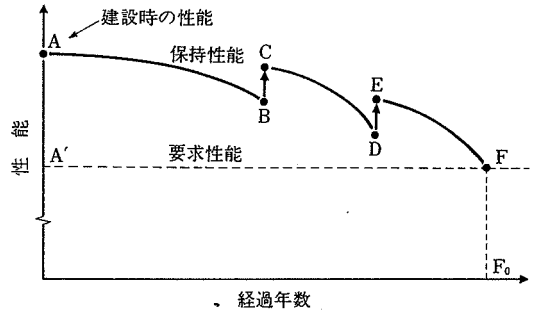


図-7 一般に用いられる構造物の寿命の概念図

できないと、一気に致命的な状態に至る可能性があることを示している。ある種のディテールを有する橋に損傷が生じることが判明したとき、同様な部位に対して健全なうちに対策を施す場合のみ、比較的容易に対処することが可能である。

災害による損傷は、ある日突然に生じるため、維持管理の中で対応できることは少ない。設計において、太い矢印がより高い位置で止まるように努力することが、唯一の対策となろう。

4. 橋の損傷劣化モデル

(1) 従来の劣化モデルの問題点

維持管理を最適化するための検討をするには、橋の劣化損傷と維持管理負担の関係をモデル化する必要がある。

構造物が保持する性能の経時的な変化(劣化)を表すのに図-7のような概念図を用いることが多い。これによれば概念としては理解しやすいが、実際に橋の維持管理に適用しようとすると不都合な点が少ない。

このモデルの問題点は以下の通りであると思われる。

- ① それぞれ異なる性質や機能を有する多くの部材からなる橋梁の劣化損傷をひとつの曲線で表そうというのがそもそも無理である。
- ② このため、縦軸の「性能」が具体的に何を指すのか明確にならない。
- ③ 限界性能(物理的でも機能的でもかまわないが)を一定値と考えている。前節で述べたように、限界値は維持管理能力との相対的な関係で決まる変動値である。

橋の損傷劣化モデルというのであれば、図の縦軸に表される性能というのは、橋としての存続に関わる基本的な性能、たとえば耐荷性能でなければならない。

図示された曲線は塗装が何かの劣化をイメージしたもので、架設直後から徐々に下降を始め、時間の経過とともにそれが加速される。そして維持管理行為によって、C点において性能が回復する。塗装の劣化曲線としてはこれでよいのかもしれないが、橋本体として考え

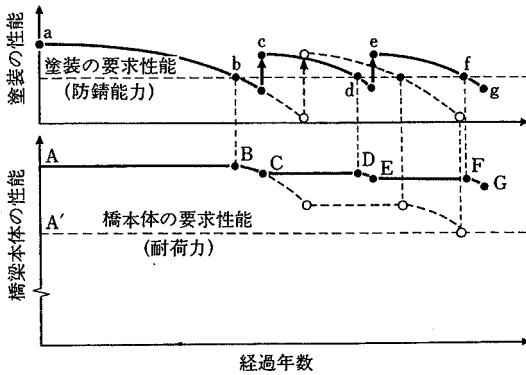


図-8 本体と関連要因の性能を分離表示したモデル

ると、架設後いきなり性能が低下し始めるのは不自然であるし、低下した耐荷性能が簡単に回復するというのも実感とかけ離れている。

そこで、ここでは橋本体と本体の劣化損傷に関わりのある広義の部材を分離して表示するモデルを提案することにした。

図-8は、橋本来の性能である耐荷力と、間接的にそれに影響を及ぼす要素を分け、わかりやすくするために間接影響要素として塗装ひとつだけを取り上げて示した。

図には二つの性能を示す曲線が描かれているが、上側の曲線は塗装の性能、すなわち塗膜の劣化度あるいは防食性能を表しており、図-7と同様の変化を示している。

下側の曲線は、橋本体の耐荷性能を表している。塗膜が劣化しても、防食膜としての一定の性能を確保している限り、橋本体の性能、すなわち耐荷力には何の影響も現れないことは容易に理解されるであろう。しかし、塗膜が塗装としての要求性能を下回るような状態になると(図中b点)、本体の性能にも変化が生じ始める。これは、実際には錆や腐食が発生することに相当する。

図中の破線は、実線の場合よりも塗装の時期を遅らせたことに相当するが、塗装にかかるコストは減らせる代わりに、本体の耐荷性能の低下は加速する。そして、低下した耐荷性能は再塗装を行っても回復することはない。

以上が提案した損傷劣化モデルの説明であるが、塗装以外の要素を描き加えることによって、このモデルがより実態に近いものになることは容易に理解されよう。また、それぞれの要素の経年劣化と本体の耐荷性能に及ぼす影響を注意深く分析することにより、橋の損傷劣化を数式で表すことも可能になるのではないかと予想される。

さらに、このように表現することにより、長寿命化の方法として、橋本体の初期性能を高めることのほかに、塗装など間接的に影響する要素の性能を、適切な維持管

理により確保するという選択肢の存在も明らかになる。

(2) 橋本体への影響から見た部材の分類

前節では、橋本体と本体の耐荷性能に間接的に影響を及ぼす部材に分けてモデル化を行ったが、以下のように三つに分類する方が適当かもしれない。

- ① 劣化が進むことによって、そのまま橋全体の保持性能(耐荷力)の低下につながる部材(主桁、主構)。
- ② そのものの劣化は直接橋の性能低下にはつながらないが、放置することにより①の性能低下を招く部材(塗装、支承、伸縮装置、排水装置 etc.)。
- ③ ①と②の間中間的な存在で、それ自身の劣化も橋の性能(耐荷力)の低下に影響するが、いざとなれば交換可能な部材(RC床版)。

また、場合によっては以下のような分類も有効であるように思える。

- ① 供用期間内に交換する可能性のない部材。あるいは、交換=架換えとなる部材(主桁、主構)。
- ② 必ず交換あるいは再施工が必要となる部材(塗装、支承、伸縮装置、排水装置 etc.)。
- ③ 条件によっては①にも②にもなる部材(RC床版)。

この分類では、新技術により②が③や①に格上げになる可能性などが見やすくなる。

いずれにしても、この点については、今後、さらに検討を進めてみたいと考えている。

5. 道路橋のライフサイクルコスト

(1) 道路橋のライフサイクルコスト

維持管理費を考慮して橋のタイプを選定するということは、不十分ながらも従来から行われてきたが、近年では更新費用も含めたライフサイクルコスト(以下、LCCと言う)という概念の導入が検討されている。すなわち、初期投資や維持管理にお金をかけて長もちさせるよりも、最適な更新時期を設定して初期投資や維持管理費を節約しようとする考え方である。

一般に、LCCを検討する場合には、デフレーターや利子率について考慮する必要があるが、道路橋のような社会資本を考える場合、有限の資本の最適活用の検討が目的でなく、毎年確保される予算を前提とし、その額を最小にしようとするのが目的であるため、それらについては考慮する必要はない。そのかわり、十分に長い期間を想定し、一年当たりの経費を最小とすることを考えればよい。一年当たりのLCCをLCC/Tとすれば、以下のようにI(初期投資)、M(維持管理)およびR(更新費用)の3項の和として表すことができる。

$$LCC/T = (I + \sum M(t) + \sum R) / T$$

ここに、T:十分に長い供用年数(たとえば200年)

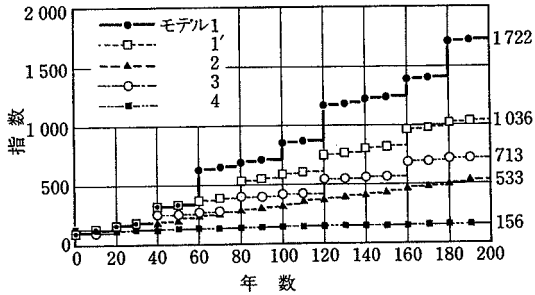


図-9 道路橋のライフサイクルコスト試算例

$\sum M(t)$: 毎年の維持管理費用の総和

$\sum R$: 更新費用の総和

を表す。

(2) LCC 概念適用の条件

道路に関しては、舗装などで LCC の概念が以前から考えられているが、すべての投資対象に LCC 概念が適用できるかどうか、筆者は疑問を持っている。LCC 概念が適用されるには、少なくとも以下の条件を満たす必要があるのではないかと考えられる。

- ① 寿命と初期投資の関係がある程度定量的に把握されていること。
- ② 更新という行為が現実的に可能であり、初期投資に比べてかけ離れた費用とならないこと。

これらの条件は、舗装のように比較的単純な性質を有する対象には適用可能と考えられる。橋については、たとえば、塗装のようなひとつの要素だけに限定し、費用と寿命の関係がある程度把握できれば適用できると考えられる。しかし、3章にも述べたように、橋の存亡に関わる本体構造の耐荷性能については、様々な要因が絡み合っており、初期投資と寿命との関係を明確にすることは非常に難しい。

一方、供用下の橋では、単に床版の打換工事を行うだけでも、そのための交通規制が困難であることからわかるように、長い閉鎖期間を伴う更新は現実にはきわめて難しい。仮橋設置などにより架換が可能であったとしても、その費用は初期投資の何倍もかかることが珍しくない。

また、機械設備や情報機器のように、短期間のうちに機能が陳腐化し、より高性能の機種が比較的安価に入手できるような場合には、LCC 概念は適用しやすいと思われるが、橋の場合には一般的には考えにくい。

以上のことから、筆者としては LCC 概念を道路橋に適用することについては懐疑的であり、最小の維持管理により工学的永久構造物を目指すのがより適切だと考える。

(3) 道路橋における LCC の試算例

図-9 は、道路橋を単純化し、LCC の試算を行った

例である。かなり極端な仮定に基づいているので、算出された数値自体にはほとんど意味はない。

全体の供用期間は 200 年とかなり長く取っており、以下のように 5 つのモデルについて試算している。橋のタイプは支間 30 m の合成桁橋、モデル 1 の初期コストを 100 として比較を行った。

モデル 1 : 60 年ごとに更新することとし、その場合の費用を初期投資の 3 倍と仮定。また、RC 床版は 20 年ごとに部分補修、40 年目に全面打換することとした。さらに、10 年ごとに再塗装を行う。

モデル 1' : モデル 1 と基本的に同じであるが、更新を行わず、維持管理を続けることとした。但し、維持管理費の経年変化は考慮していない。

モデル 2 : モデル 1' に加え、床版を PC 床版として 50 年ごとの部分補修のみと仮定。

モデル 3 : モデル 1' に加え、耐候性鋼材を使用して再塗装を不要とした。

モデル 4 : モデル 2 および 3 を考慮。

この試算においては、本体構造の更新を不要とするための初期投資の増加分は見込んでいない。おそらくこの図中ではほとんど無視しうる程度に小さいのではないかと想像される。

以上のように非常に粗い試算なので多くのことは言えないが、設計、施工および維持管理上の工夫を行うことにより、LCC を大幅に改善させること、更新を回避するために、初期投資をかなり増加させても、その方が結果的に負担が小さくなることなどが推測されよう。LCC については、今後も引き続き検討を進める予定である。

おわりに

最初にも述べたように、未だ十分な検討が為されていない段階であり、まとまりのないものになってしまったが、道路管理者の目で橋の寿命と維持管理を見た場合の問題点について、ある程度伝えることができたのではないかなと思う。自然現象を観察するのと異なり、目的を持って解決策を探るという研究態度の差を理解していただければ、本論文の目的の半分は達成されたものと考えたい。さらに、筆者が主張する工学的永久橋の意味するところを理解していただければこれ以上の幸せはない。

工学的永久橋を実現するために必要な技術が明確になれば、研究開発も効率的に行われることになるだろうし、筆者の最終的な目標である、道路ネットワークが高いサービレベルにおいて無理なく維持され、有効に活用されることによって、21 世紀におけるわが国のさらなる発展の実現に寄与することになる。

未熟な提案だとは思いますが、反論やご批判をいただければ、今後の検討課題として行きたいと考えている。

最後に、LCCの試算のほか、橋の統計データに関する図表の作成を担当してくれた、建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室の山本悟司研究員に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) K.F. Dunker and B.G. Rabbat : 米国の橋はなぜ落ちる, 日経サイエンス, 1993.5 (原題: Why America's Bridges Are Crumbling, Scientific American, March 1993.).

- 2) 鋼構造物の寿命検討小委員会: 鋼構造物の寿命に関する調査, JSSC レポート No.19, 1991.8.
- 3) 小林茂敏・河野広隆・丹野 弘: 耐久性の優れたコンクリート構造物-道路構造物, 土木学会論文集, 第378号/V-6 1987年2月.
- 4) 加藤正晴: メンテナンスにおける今日治課題, 土木学会誌, Vol.68, No.10, 1983.10.
- 5) Bridge Management, Road Transport Research, OECD, 1992.

(1994.9.2 受付)