論説・随筆

橋梁の寿命評価

Life Evaluation of Bridges

三木 千壽

Chitoshi MIKI

◎1947年1月生まれ

◎1970年東京工業大学工学部土木工学科卒業。東京工業大学助手、東京大学講師、助教授、東京工業大学助教授を経て、東京工業大学工学部教授。研究・専門テーマは橋梁工学、鋼構造

◎東京工業大学工学部（〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1）

1. 橋の寿命はどのくらい

橋の寿命は何年かと言うのはしばしば受ける質問であるが、これについては明確な定義はなく、私自身も質問者の意図によって答え方を変えることにしている。橋の寿命については、疲労とか腐食とかにより決まる物理的寿命、道路などの線形や幅員あるいは、重量などが変わったために、機能が陳腐化することによる機能的寿命、および建設費、料金計算、減価償却などの財産管理上からの経済的寿命にわけて考えられることが多い。

これらのうち、経済的寿命が比較的思考しやすい。これについては、減価償却資産の耐用年数などに関する大蔵省令で、鉄道橋の耐用年数をコンクリート造で50年、鉄骨造で40年としており、土木構造物の多くはだいたい50年前後と考えられている。この50年と言うのが一人歩きし、しばしば言われる“橋の寿命は50年”という、私から見れば“あやまった認識”につながっているのではないだろうか。1993年頃にさかんに報道された“東海道新幹線老朽化”はこのあたりの誤解からきているのではと思う（図1）。

2番目の機能的寿命は、橋のかけかえ理由の大きな割合を占めており、近年の道路の高規格化や、より快適な構造物への要求性能が高まったことによる。若干テーマからはずれるが、歴史的に貴重な数多くの橋が強度的にはまったく問題ないにもかかわらず、単に幅員がせまいなどといった理由でかけ換えられることには疑問を感じるこ

がある。

1番に挙げた物理的寿命で最も分かりやすいのは疲労設計であろう。イギリスの橋梁^{きょうりょう}に対する設計基準であるBS 5400では設計寿命を120年と定め、そのための荷重を定めている。我が国においても東海道新幹線については設計寿命を70年と設定し、設計のための列車の設定、列車数を決め、さらにそれぞれの橋に影響線長の差の影響をとり入れている。昭和30年代にこれだけの疲労設計をやったことはたいへんな見識であろう。しかも縦げたや横げたなどの影響線長の短い部材では、応力の繰返し回数が 10^7 回オーダーとなることおよび当時は疲労限 $=2 \times 10^6$ 回神話で長寿命域のデータがないことに対して、疲労設計に対しては設計荷重の軸重を16tから18tへ増すといったことまでを行っている。

新幹線の経験は本州四国連絡橋の道路鉄道併用橋の設計に引き継がれている。本州四国連絡橋瀬戸大橋では、疲労設計に対しては寿命100年を考

図1 東海道新幹線 富士川橋梁（1964年）

えており、その間の予想旅客数、荷物の通過トン数から列車数を設定し、長大橋であることからその間の橋上での列車の交差まで考えた疲労設計を行っている（図2）。

日本の道路橋では、現行の示方書では直接に交通荷重を受ける鋼床版を除いては、特に疲労の照査をしなくてよいことになっている。これは用いている設計荷重と実際に作用する荷重との関係や設計および製作の実態からの判断であり、したがって疲労からの寿命としては永久と言うことになる。

アメリカの道路橋では疲労設計を応力繰返し数10万回、50万回、200万回および200万回以上の4レベルの疲労許容応力を設定しており、道路の規格に従って選定するようになっている。この回数が設計寿命というわけではなく、使用条件によって、疲労に対する厳しさを変えたことに対応しており、このように設計すれば半永久的に使用できるということをねらったものである。

橋の設計で、しばしば設計寿命と混同されるのが地震や風などの自然荷重の設計荷重へのモデル化の際に用いられる再現期間である。たとえば瀬戸大橋では再現期間150年の風や、100年あたり1から2回生じる地震が設計の基準になっている。これが、100年台風などの表現となり、あまりそのあたりのことについての知識のない人にかかると、いつの間にかそれが設計寿命のように言

われることになる。確率統計の教科書を見れば明らかであるが、再現期間100年の事象が100年間に生じる確率は64%であり、驚くほど高い値である。

2. 橋の宿命

以上のように橋の寿命をはっきりと定義することは極めてむずかしい。それでは目標も設定しないで耐久性設計をしているのかということになるが、そこにメンテナンスが重要な役割を果たすことになる。疲労、腐食などに対してメンテナンスで対処していき、それでも技術的にも経済的にももうダメになった状態というのが臨終であり、すなわち人間と同じである。

日常の社会生活や経済活動に対して橋のはたしている役割は極めて大きい。アメリカニューヨークのマンハッタン島とブルックリンを結ぶウィリアムス橋（1903年建設）（図3）がケーブルの腐食による強度問題のため通行止めされた際、ニューヨーク市民は市長をつるし上げ、市長はフェリー用の仮橋を建設し、無料のフェリーを用意した。いったん橋ができると、橋を中心として街路が整備されるため、その橋がいたみ始めたからといって隣に橋を作って道をつけかえるなどは用地や経費から不可能に近い。ウィリアムス橋については、いかに通行止め期間を短く橋を架け替えるかについての国際コンペが行われ、今の橋をアーチ橋に改造する、すぐ横に新しい橋をつくり平行移動させるなどのさまざまな案が出されたが、結局そのままの形で交通を活かしながらのリハビリテーション工事が続けられている。

図2 本州四国連絡橋 瀬戸大橋
〔道路鉄道併用橋（1988年）〕

図3 ニューヨーク ウィリアムスパーク橋
（1903年）

このようなことを考えると、橋は一度建設されると半永久的に機能しつづけることが要求されるはめになる宿命といえよう。自動車や飛行機あるいはプラントなどは老朽化したら使うのをやめればいいのであるが、橋はそれが極めてやりにくいのである。そのようなことを言っていて万が一落橋でもすると大変な問題となるので、橋も使用をやめるようなシステムを考えるべきかも知れないが、あまりにも現在の日本の交通網はレダグダンシーがなく、このようなことをやりにくい環境にある。東海道新幹線で開業当時のまま使っているのは橋やトンネルなどの土木構造物のみである。もう一つ重要なことは橋は建設からメンテナンスまでのすべてが公共事業として行われ、その経費は基本的に国民が支払っているのである。無駄使いはできないのである。

つけたしであるが、このようなことを話題にするとき、どうも時間のスケールを忘れていたような気がする。たとえば新幹線や東名高速道路の橋梁の疲労損傷を話題にするとき、しばしばなぜそのような構造物を作ったのかといった顔をされることがある。しかしそれぞれの構造物の設計や製作をした時代のレベルを認識した上で議論すべきである。またその時代の経済状態も重要であり、世界銀行からの借金でこれらの整備を進めたことも忘れてはならない。その時代の日本は途上国なのである。

3. 瀬戸大橋の疲労設計、品質管理およびメンテナンス

1988年に完成した本州四国連絡橋の瀬戸大橋の疲労設計は、我が国の橋梁技術の大きな転期であった。世界に類を見ない大規模な長大橋の橋梁群のプロジェクトであり、疲労という観点からは800MPaクラスまでの高強度鋼を大量に使用した溶接構造物はそれまでほとんどなかった。

本州四国連絡橋瀬戸大橋の溶接部材は、所要の疲労強度を確保するといった観点から、その要求品質が決められている。特に箱断面トラス弦材の部分溶け込みあるいはすみ肉溶接による角継手は、そのルート部にブローホールが残りやすく、またブローホールの存在により部材の疲労強度は

著しく低下することが認められている(図4)。そこで瀬戸大橋の補剛トラスの道路・鉄道併用部材は、100年間の使用によってもブローホールから発生した疲労き裂が部材表面に達しないことを目標として、ブローホールの許容寸法などの要求品質が決められている。さらにその溶接部は新たに開発された自動超音波探傷試験により非破壊検査されている。さらに非破壊検査の結果は、橋中の部材名、溶接線名、位置などと共にパーソナルコンピュータのデータベースとして保存されており、メンテナンス検査に利用されることになっている。本州四国連絡橋のみではなく膨大な数の既設の橋についてもメンテナンスのためのいわゆるカルテを整備していこうとしているところである。

4. 橋の健康診断

橋の健全度は人間と同じであり、通常は人間ドックに相当する定期的な点検に依存している。橋を管理する機関によりそのシステムは異なるが、毎日あるいは週レベルで担当者が見て歩く、日常点検と専門家グループにより2~3年といった年レベルでの定期点検、およびそこで異常を発見した際に実施するに対する詳細点検からなっている。ただし、今までは疲労があまり問題となっていなかったため、疲労損傷を対象とした点検システムに変えつつあるのが現状といえよう。

定期点検については、Where, When, Who, How; の3W1Hが重要である。Whereについ

図4 トラス弦材角継手(ブローホールから発生、進展した疲労き裂。板厚15mm, 300mm×300mm断面の試験体)
[実物の1/3スケールモデル]

ては過去の疲労損傷例や疲労強度の低い構造詳細や継手部などを点検シートにまとめることを進めている。When については損傷の進行と橋梁構造としての安全性の観点から、点検周期を決めており、各部材部位について検出できるきれつ寸法と限界きれつ寸法を設定し、通常は点検で1回見落ししても安全性に問題がない程度の点検間隔を決めようとしている。Who については点検員にあたる人間のトレーニングコースを設けて、疲労などの損傷やその検出方法、進行のメカニズム、変位やひずみの簡単な測定などを教えている。How については各部材部位にどのように近づくかと、どのように検査するか2点の課題がある。近づくことについては点検路をつけたり点検作業車を作ったりしている。非破壊検査についてはかなりむずかしく、各種の非破壊検査やモニタリング手法についての研究が進められている。

橋梁の健全度評価を行う際にしばしば行われるのが一日や一週間さらには一年間を単位とした実働応力測定である(図5)。通常用いられている

システムではひずみをレインフロー法で処理し、応力範囲のヒストグラムの形で取り出せる。これをけたの下フランジなどの橋の全体的な挙動が見られる位置と疲労損傷の生じやすい位置とで行う。これにより対象とした橋の使用状況がどの程度の厳しさを判断することができる。

5. 橋の延命化

橋の延命化もこれからの重要な課題である。疲労を対象としては、疲労の原因となる変位を小さくするなどの改善と、継手部の疲労強度を向上させる方法がある。前者については疲労が問題となる局所の応力がどのような橋梁の全体系の中でどのように生じるかをあらかじめする必要があり、筆者らは、実橋測定と構造解析を組合わせて、逆問題として原因を究明するシステムの確立を目指している。具体的な延命化の方法としては新たに部材を取付れたり、ある部材を取外したりすることになる。後者の疲労強度の向上についてはすで

にかなりの実績があり、アタッチメントの端部の形状を変えて応力集中を低減させたり、グラインダー仕上げ、TIG ドレッシング、ピーニング等が用いられる。

6. おわりに

最後にまた橋の寿命という最初の課題にもどろう。ニューヨークのブルックリン橋やエジンバラのフォース鉄道橋など、100 年をすぎても十分な

機能をはたし続けている橋はたくさんある。先に述べた橋の宿命を意識するとき、メンテナンスとの組合せで物理的な寿命は半永久的と考えざるを得ないと考えている。多くの事例が教えることは橋の計画、設計、施工、メンテナンスすべてがきちんとしていることが重要であり、一般の人に橋はだいじょうぶかなどと言わせないようにしていくのが我々の使命であろう。

(原稿受付 1994 年 12 月 2 日)