



## 橋の“臨床医学者”の役割とは

—— 三木研究室～土木工学科 ——



三木 千壽 教授

橋は現代社会に必要不可欠である、と力んで述べるまでもなく、我々の生活にすっかり溶け込んでいる。日常の社会生活や経済活動に対して橋の果たしている役割は極めて大きい。橋がもし使えなくなったら…。橋はそこを通る物体の重量と、そこを通る人間の生活を背負い続けている。

橋は人々が何げなく、だが毎日欠かさず利用している公共建造物である。どんな状況であれ、通行中に落ちるようなことがあってはならない。これは兵庫県南部地震により635mにわたって高架橋が倒壊した、阪神高速道路3号神戸線の様子を思い出していただければ説明するまでもない。落橋すれば死傷者が出るのはもちろん、橋が壊れている間、我々は満足な活動ができないのだ。丈夫であること、これが橋に求められる第一条件だ。また、橋は例外なく交通の要所となっているため、建設期間中の代替りの交通経路を確保できなければ同じ場所に橋を造り直すことは難しい。では、もし別の場所に新しい橋を造るとどうなるだろうか。橋を架けるからには、そのための新たなスペースやその周辺の道路整備が必要になる。だが狭い日本、用地の確保も難しいし、既に開発されてしまった地域で道路整備をするにはお金も

かかる。よって、定期的な点検と補修工事だけで、極端に言えば半永久的に使い続けることができる橋が要求されるのだ。この点が一般の建物と大きく異なり、橋の建設を難しくしていると言えるだろう。

さて、いざ寿命の長い橋を造ろうとする際に技術力が必要なのは言うまでもないが、それが予算を上回るものであれば造れないのである。限られた公共投資の中で必要な強度と寿命を満足する橋を造る。それを可能にするのが技術者の役割ということになるわけだ。

三木先生と橋とは切っても切れない関係にある。先生は長大橋や新幹線、高速道路の高架橋など大規模な橋梁建設のプロジェクトに多数関わっている。また、緑が丘地区にある、“緑道ふれあい橋”(写真1)を設計した人でもある。緑が丘地区へ行ったことがある人なら、一度は目にしたことがあるだろう。

三木先生の研究室では、橋の計画、デザイン、設計から橋の補修、メンテナンス方法に至るまで橋に関わるあらゆる研究がなされている。橋の誕生から老後まで扱っており、いわば“橋の医学”とも呼べるだろう。これから、その一端を垣間見てゆくことにしよう。



写真1 緑道ふれあい橋



## 長大橋の一生の世話をする

近年、日本の橋梁建設技術の水準は格段に進歩している。1988年、本州四国連絡橋の瀬戸大橋が完成した。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、日本初のスパン（橋脚間の距離のこと）1000m以上の長大橋の誕生だった。このようなスパン1000m以上の長大橋に電車を営業運転させたのは世界初である。三木先生はこの橋の建設プロジェクトに関わった一人だ。

三木先生は橋梁工学、それも主に鋼構造の橋のスペシャリストである。先生自身は橋の疲労設計・品質管理を中心に研究をしている。「基本的な橋の造り方」に沿って、その内容を見てゆくことにしよう。

### 基本的な橋のつくりかた・その1～計画

まず橋をつくる計画が立てられる。ここで言う「計画」とは、橋の周辺の地域性を反映した、地域の景観や環境を損なわないような橋のデザインや構造の青写真を作成することである。

三木研究室で行われているデザインに関する研究はウエイトが低いのだが、学生論文のテーマとしては毎年挙がるそうだ。最近では、コンピュータを使うことで、色々な角度から眺めた建設予定の橋の鳥瞰図（ちょうかんず）を描いたり、橋の設計図を鳥瞰図に重ねてみたりと様々なことができるようになった。

橋は我々の想像以上にデザインのセンスが要求される構造物なのだそうだ。橋そのものの見た目が美しく構造的に優れていても、それが周辺の景観にふさわしいものでなければその橋の評価は

低くなってしまう。このような意匠設計を専門にやっていくことは大変難しいのが現状だが、土木の専門家ならば誰もが興味を持つものだと思三木先生はおっしゃっている。先生は意匠設計が専門ではないが、趣味に近いかたちで、幾つかの橋のデザインをしている。中央線の東京駅付近の高架橋（写真2）は、橋脚の片側がコンクリート、もう片側が円柱形の鋼の内部に詰め物をしたものという変わった構造になっている。また高架橋の下からの橋桁の眺めは丸みを帯びた形になっており、表面は光沢を帯びている。この凝った橋のデザインの案を作ったのは何を隠そう三木先生なのだ。このほか、羽田空港のスカイアーチ、江戸川区の辰巳新橋なども三木先生のデザインである。趣味でやっている橋のデザインが実物の橋になってしまふとは、私には何ともうらやましく思えたのであった。

### 基本的な橋のつくりかた・その2

#### ～設計から製作まで

次の設計から製作の段階では、力学的な応用解析などの実験・調査を繰り返しつつ、橋の構造や材料などを決めて、現場で実際に構造物の形に組み上げていく。初めに述べた、寿命が長くいつても安心して渡ることができる橋を作る上で、最も重要な段階である。長大橋を造るにあたっては、主に2つの視点から設計・製作してゆくことが重要である。1つは、橋の使われ方に応じた強度設計をする「合目的設計」の視点である。

瀬戸大橋は、合目的設計を取り入れた長大橋である。上層を道路、下層を鉄道（在来線）が走っているが、下層部は将来的には新幹線も含め合計4本の線路が敷けるように造ってある。現在は採算性の問題で見送られているが、もし四国新幹線の営業が決まれば、すぐにでも瀬戸大橋の上を走れるようになっているそうだ。さて、4本の線路を敷くことを考えた場合、ダイヤ次第では列車が4本同時に橋の上に乗る可能性があるわけで、すれ違いの瞬間には、車両の重さで橋に大きな応力（材料に力を加えたときに材料内部に働く力）がかかる。各部材にそれぞれいろいろな応力がかか



写真2 中央線東京駅付近の高架橋

り、いろいろな変形をする。それは、列車がすれ違う場所によっても変わってくる。このように橋上での車両の交通量、あるいは通過列車数、列車のすれ違いなど、橋の使われ方を予想して橋に必要な強度を決定してゆく。また地震や強風にも十分に耐えられるように設計しておく必要がある。このように橋の使用目的や環境に合わせて強度設計することを「合目的設計」と呼ぶわけだ。

長大橋の合目的設計において特に重要なのは、橋の疲労について考えることである。長大橋の材料に要求される必要条件は、高強度かつ軽量であることだ。強い材料であることはもちろん、軽くなければ長大橋が橋そのものの重みに耐えられない。このような新材料がメーカーで開発されることによって初めて瀬戸大橋のような長大橋が実現できたのである。新材料を使うにあたっては一つの問題を克服する必要がある。高強度で破壊はしないものの、大きな荷重を受けることにより従来の材料と比較して大きくしなる。すると鋼材の溶接部分に大きな負担が掛かり疲労しやすい状況が生まれる。橋が壊れるのは、簡単に言えば橋の限界を超える大きな力が加わった時であるが、材料が疲労すれば橋はそれより小さな力で簡単に壊れてしまう。

疲労設計をするに当たっては、まず初めに建設する橋の寿命を決める。50年使う橋と100年使う橋とでは材料に求められる性能も異なってくるからだ。そして橋の使われ方を想定して、溶接部分がどの程度の品質ならば疲労に耐えられるのかという観点から、橋の構造や材料を決定する。

鋼の溶接部分の疲労や破壊の問題は研究の宝庫



写真3 実験装置例

だと三木先生は言う。溶接の際、溶接部材は熱膨張することから、それが冷えたときに収縮して内部に無理な力が働いたり（残留応力）割れ目や空洞のような欠陥が入ったりする。この残留応力や欠陥がどの程度までなら実際の長大橋に許されるものなのかを調べてゆく。例えば、欠陥が全く入っていないければある応力を繰り返し十数万回加えるまでは耐えられるものが、欠陥がどの程度入るとどれくらい耐久力が落ちるのか、さまざまな場合を想定して試験する。

また三木研究室では、縮小モデルの橋上を実際に列車が通ったのと同じ様な荷重パターンを加えることができる実験装置を作った（写真3）。3本のジャッキをうまくコントロールすると、橋の上を列車が通った様な荷重パターンを再現できる。いろいろな橋のモデルの特徴的な橋の壊れ方が分かり、それは実際の橋の壊れ方にとても近いそうだ。

このような様々な試験で得られたデータは実際の橋の設計や製作にフィードバックされる。研究室レベルの研究が、実際に構造物の形に組み上げていく現場に繋がっているのである。

もう一つの視点として、「品質管理」が重要である。実際に作った材料が本当に必要な強度を満たしているものであるかどうか非破壊検査をするのである。検査方法はまだ完全には確立されておらず、三木先生はそれを確立しようとしている。溶接部分の鋼の中にどんな欠陥があるのか、超音波を使って数値解析的に見ることに挑んでいるところだ。

瀬戸大橋は100年間の使用によっても、欠陥から発生した疲労亀裂が部材表面に達しないことを目標として、欠陥の許容寸法が決められた。そして、そのとおりに出来上がっているかどうか、自動超音波探傷試験により、当時のベストの方法で検査して橋を完成させた。だが、結果が疲労強度と完全に対応しているとは若干言い切れない部分が残る検査だった。そのため、橋が完成して以来、新しい検査機器を開発しては瀬戸大橋を検査するというのを繰り返しているそうだ。こんなことを聞くと、一見いいかげんなことをやっているように思われるかもしれない。だが、諸事情により、その当時のベストを尽くして完成してしまわざるをえない現実もある。だから、完成後にさらに

パワーアップできることはやっていく。決していいかげんに橋を造っているわけではないと三木先生は言う。

この非破壊検査の結果は、橋中の部材名、溶接線名、位置などととも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なく膨大な数の既存の橋についても、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だそう。

長期にわたる慎重な作業を経て、ついに橋は完成に至る。

### 基本的な橋のつくりかた・その3

#### ～メンテナンス

橋は完成。これにて一件落着。めでたしめでたし...といきたいところだが、技術者の仕事はまだ終わらない。その後、長期にわたって橋の性能を維持してゆく「メンテナンス」も、橋の製作と同じくらい重要な仕事だ。

あまり考えたくない話だが、人間は中年にもなると、それまで少しずつ蓄積された疲労が体にたまって成人病にかかりやすくなる。発病してからでは手遅れになることも少なくない。日頃から健康診断などを受け、病気と分かったら、すぐに医者者に適切な治療をしてもらわなければならない。橋も人間と同じで事故が発生してから修理したのでは遅い。日頃から点検を行い、欠陥が見つかったらすぐに補修するという作業が必要なのだ。

しかし“橋の医学”は人間の医学のように体系



瀬戸大橋

化されておらず、三木先生は橋の点検技術や診断方法などを整備することにも力を注がれている。例えば次の1～5のような研究が行われている。

- 1.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いつでも使えるようにデータベースにまとめることを進めている。
- 2.各部材部位について検出できる亀裂寸法と限界亀裂寸法を設定し、通常は点検で1回程度見落としで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。
- 3.さらに点検員を養成するために、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。
- 4.点検しやすくするため、点検路を橋につけたり点検作業車を作ったりしている。
- 5.点検技術として必要な非破壊検査については、「品質管理」のところでも述べたとおり、なかなか難しく各種の非破壊検査やモニタリングの手法についての研究が進められている。

このように三木研究室では橋の誕生から老後まで幅広く面倒を見ているのだ。まさに橋の医学と呼ぶにふさわしいだろう。



## 時代の要請に応じた橋をめざして

新幹線、首都高速が開通して30数年。近年、1960年代に造られた新幹線や首都高の高架橋の強度に問題があるのではないかとマスコミに騒がれるようになってきた。1993年には“東海道新幹線老朽化”とNHKスペシャル等で報道され、1995年の阪神大震災の阪神高速の橋脚倒壊で、首都高速の安全性についても疑問視されるようになった。実際のところはどうか、先生にお話を伺った。

結論を先に述べてしまうと、現在のままでは若干不安があるようだ。「今でこそ『日本の橋は世

界一』などと謳(うた)われるようになったが、1960年代の日本の橋の水準は現在とは比較にならないほど劣っていた。」と三木先生は語る。その原因は二点挙げられる。

一つ目は、当時の日本がまだまだ途上国だったことだ。その頃、国には交通を整備するだけの資金がなかった。東海道新幹線や首都高などは実は世界銀行から借金をして建設したものなのだ。経済力がその程度だったから、橋の建設に関する技術力もやはり世界と比べて劣っていた。瀬戸大橋はスパン1000m以上の橋に世界で初めて電車を営

業運転させたことで騒がれた。だが、世界に目を向ければ1932年に完成したアメリカのジョージワシントン橋（ニューヨーク ニュージャージー間）はスパン1000mを越え、実際に営業こそしていないものの列車の走行も可能な構造をしている。瀬戸大橋よりさかのぼること、実に五十年以上も前の話である。極言すれば、日本の橋の建設技術は最近になってようやく世界に追いつくことができたとも言えるのだ。とはいえ、首都高速や新幹線の高架橋は、当時の最新の技術、材料、そして海外で建設された橋に関するデータを結集させ、可能な限りのお金をつぎ込んで完成させたものである。当時としては最高の橋なのだそうだ。

もう一つの原因は、社会の橋に対する要求レベルが昔に比べて上がったことである。東海道新幹線は、開業当初は定員乗車で、12両編成、1時間に4本しか走らせておらず、時速180km/hで営業運転していた。ところが、今では立ち乗りの乗客までフルに詰め込み、16両編成で一日300本、最高時速270km/hで、将来さらにスピードアップする計画がある。37年前に比べて、橋にかかる荷重はとてつもなく大きくなっているのだ。

また、1968年に全線開通した東名高速道路を考えてみよう。高速道路の法定上のトラックの重量は最大18tだが、実際は法律を無視した過積載のトラックが数多く走っているのが現状である。あるトラック会社の話によれば、大型トラックは100tまでは十分運べる能力があるそうだ。20tのトラックが7m間隔で走っているのを想定して造られている道路橋の上を100tのトラックが連なっている状態は橋にとって極めて過酷な環境であることは間違いない。さらに最近では耐震基準が厳しくなり、兵庫県南部地震クラスの大地震にも耐

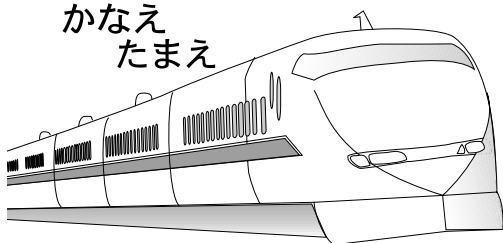
えられるような橋であることが求められている。

橋の補修作業はなかなか難しい。新幹線は止めるわけにいかないし、首都高速も長期にわたって通行止めにしておくことはできない。また首都高速の高架橋の下は一般道路になっており、限られたスペースを使って補強しなければならない。単純に橋脚を太くすれば強度は上がるが、それでは一般道をふさいでしまうことになるし見た目も良くない。また強くすることで重量が大きくなりすぎると基礎の部分まで影響が及んでしまう。

そこで三木研究室では老朽化した橋を改善する方法の研究もしている。橋の直し方を知るためには、まず橋の壊し方を知る必要がある。そこで、いろいろな構造の橋の壊し方の研究を行い、そのノウハウをつかんだところだという。「橋って意外にもろいんだな。今では橋をどうやって壊すかについてはプロになってきたね（笑）」あまり笑えない話ではあるが、これが三木先生が橋に抱いた印象である。現在は、これをもとに橋が壊れないようにする方法を研究している。材料、構造系の両面からアプローチしているところで、まだまだ分からないことは多いそうだ。

一般の人に『橋は大丈夫なのか』などと言わせないようにする。これが三木先生の目標である。

のぞみ  
かなえ  
たまえ



最後に、三木先生に伺った面白い話をしておしまいにしよう。先生はもともと鋼の疲労や破壊を専門としていた。当時はあまり重要視されていなかった分野だけに、専攻する人も少なく人気のないテーマだったそうだ。やがて本州四国連絡橋の計画が動き出し、鋼の疲労が脚光を浴びることになったが、いざその方面の研究をしようと思っても先生の他に研究している人がいない。そこで、助手になりたての先生が長大橋の建設プロジェク

トに大抜擢（ばってき）されたのだ。それ以降、先生は数々の橋の建設プロジェクトに関わり、毎日多忙な生活を送っている。三木先生自身、本当に運が良かったとおっしゃっていた。最後に、三木先生より東工大生に一言「今注目を浴びている分野より、他人があまりやっていない分野の研究をすることを薦めるよ。もっともそれが将来注目されるかどうかは誰にも分からないけどね。（笑）」

（早川 知宏）