

## 寄稿論説

# 橋梁工学と橋梁設計の問題点と その将来展望

Assessment of Progress in Post-War Bridge Construction

京都大学工学部教授, 工博 白石 成人  
Prof. of KYOTO Univ., Dr. Eng., *Naruhito SHIRAISHI*



## 1. まえがき

わが国においては、本四架橋の計画が、過去30年余の間、橋梁工学の分野では最も注目されてきた課題であった。いま、瀬戸大橋の完成をみ、これまで目標であったものが現実にその姿を具現したことになる。次に直面する技術的目標としては、当面、明石大橋の設計・施工が挙げられるが、その次の時代に対処するための問題としては何を考えるべきであろうか。

このような問題提起に対する答えを考えるために、まず、明石大橋に関連する橋梁技術上の問題点について概観してみたい。明石大橋はそのスケールよりみて、世界最長の吊橋になることは衆目の一致するところである。中央径間は約2 000メートルとなるところから、そのタワー高さは約300メートル以上になろうとしている。このような超長大・超高層構造物はその例を他に見いだすことは不可能である。したがって、その設計・施工はこれまでの技術上の蓄積を十二分に活用すると同時に、なお多くの未知の問題が山積していることを前提としなければならないであろう。例えば、外力の作用や動的特性をどのように評価するかという問題はその典型的なものである。また、その構造信頼性のレベルを従来のそれと同じレベルと考えてよいか否かという問題も今後真剣に検討されなければならないものの一つである。これらは明石大橋を設計する上での基本的拘束条件ともいうべきものであり、このような条件を満たす最も合理的な構造システムを追求することが求められているといえるのではなからうか。さらに、当然のことながら、完成後の維持・管理システムを想定して、必要な施設や装置を当初段階から導入しておくべきである。このように、明石大橋の設計・施工上の諸問題を考究することは取りも直さず橋梁工学のこれからの課題が何であるかを明らかにすること

であるともいえるであろう。

## 2. 最近の橋梁技術の変遷

第二次大戦の傷跡もいまではほとんど見ることはできない。そして、まったく戦争を知らない世代が社会的活動の中心的役割を果たすようになる日もそう遠い先ではなくなっているが、どのような未来がこのような世代によって創造されていくのか、極めて興味あるところである。

第二次世界大戦がわが国の無惨な敗北という形で終結し、当時、貧困と不安と屈辱が渦巻く日々の生活が続いたが、その中で、だれが今日の繁栄した日本を想像したであろうか。しかし、現実には、国際情勢の急激な変化の波に洗われ、わが国の復興は急ピッチで行われていった。このような社会情勢の変化は、当然のことながら直接的にも間接的にも、橋梁技術の分野にも大きな影響を及ぼしている。ここでは、戦後40年の橋梁技術の変遷を、このような社会情勢の変化を考慮しながら、いま一度振り返って見たいと思う。

第二次世界大戦後、わが国の橋梁界で話題になり、ある意味で、技術革新に著しく貢献したものを列挙すれば次のようになる。

- ① 高張力鋼・高力ボルトの開発
- ② 溶接技術の向上
- ③ PSコンクリートの導入
- ④ 合成桁橋の出現
- ⑤ 鋼床版構造の出現
- ⑥ 薄肉箱桁橋梁の出現
- ⑦ 斜張橋の出現
- ⑧ 大ブロック架設方式の導入
- ⑨ 長大吊橋の建設

これ以外にも数多くの新技術が主としてヨーロッパ諸

国から紹介・輸入され、わが国の橋梁界に著しい発展をもたらしてきた。その中で特に注目しなければならないのは、やはり、

⑩ 超大型コンピュータの出現とパーソナル・コンピュータの大大的な利用

⑪ 有限要素法の開発

⑫ 限界状態設計法への移行

であると考えられる。

このようなさまざまな新しい構造形式と新解析手法や新設計法が、戦後のわが国の復興計画の中での橋梁の建設に応用されたが、それらはその後の高速道路の建設や本四架橋計画に象徴されるいわゆる長大橋梁の建設の基礎となったともいえるであろう。一方、わが国で独自に開発された技術も数多い。例えば、わが国が世界でも有数の地震国であり、また、台風常襲地帯であることは周知のことであり、橋梁の耐震設計、耐風設計の分野での研究・開発は世界の注目するところであったといっても過言ではない。わが国の構造物の耐震設計に関する研究成果はいま世界各国のそれに大きな貢献をなしており、この分野で世界の中心的役割を果たすに至っている。また、構造物の耐風設計の分野においても、わが国の研究者の果たさなければならない国際的役割が日々増大しつつあると考えられる。

しかし、総ての技術革新が即座に社会的に歓迎されるものではなかった。自動車社会の出現は大気汚染や振動・騒音という公害問題につながり、その早急な解決が求められたが、その結果、著しく都市景観を損なうことになった例も少なくない。

第二次世界大戦の終結から半世紀になろうとしており、わが国を取り巻く国際情勢も、また、わが国の社会情勢ももはや「戦後ではない」。いま、この半世紀のわが国の足跡を振り返ってみると、その変貌の大きさに感慨無量となるのは私一人ではないと思われる。

### 3. 橋梁の維持・管理

1980年代になって「橋梁の損傷がひどく、これが、近い将来、国の経済的発展に大きな影響を与えるかも知れない」という警告がなされてから、橋梁の機能保全に関する関心が高まり、橋梁構造物の維持・管理問題の重要性が広く認識されるようになった。S.Walter 女史の著した「荒廃するアメリカ」(America in Ruins)は、わが国の橋梁関係者に改めて公共構造物に関する技術的諸問題が国家経済レベルでいかに重要であることを警告したともいえるであろう。

いま一度、ここで指摘された幾つかの項目、とりわけ、なぜ公共構造物が荒廃していったのかという問題を取り上げ、箇条書に整理すれば、次のようになる。

- ① 構造物の設計の導入される合理性・最適性は、設計荷重に対する構造抵抗に要求されている特性で、経年的な損傷プロセスを十分に捉えていない。
- ② 設計荷重以上のオーバーロードに対して、安全率に含まれている余裕を安易に期待している。
- ③ 多くの構造物の設計段階で、メンテナンスフリーの構造形式、構造形態、構造材料の使用を求めているが、保全管理の不要な構造物は存在しない。
- ④ 構造材料の強度、耐久性が向上したため、多数の構造物が同時に損傷を受けた状態を示すことが過去にはなかった。
- ⑤ ある期間を経過した構造物の損傷についても、その原因の究明、要因分析がこれまで十分に実施されてこなかった。

このような公共構造物の実態の認識は、これまでの構造物の設計法になお多くの問題点が包含されていること、過去の損傷事例という教訓が生かされず、また、事故分析が不十分であったこと、などに対する反省を意味しているとも考えられる。

それでは、今後、われわれは何をなすべきであろうか。構造物の設計に対する新しい理念を模索することや損傷の実態の把握とその原因究明などが求められるのは当然であるが、しかし、それ以上に求められていることは、何のために構造物の機能保全をしなければならないのか、そして、それは何によって評価されるべきか、ということを明確化することではなかろうか。換言するならば、機能保全の目的と機能保全の評価尺度を明らかにすることに外ならない。

橋梁構造物の維持・管理問題をこのように捉えた上で、まず、橋梁構造物の機能保全の目的について若干の考察を行ってみたい。この問題は直感的には極めて単純なものであり、構造物はその設計当初の本来機能を保持していかなければならないという答えになりかねない。本来機能を保持していくことは当然であるが、問題は、個々の橋梁構造物の本来機能を保持していくのみならず、交通システムの中の橋梁としての機能を保持していかなければならないということにある。必ずしも適切な例ではないが、建設当初考えられたものより交通量が著しく増大し、また、荷重の大きさも増大した場合、部分的な部材の補強や拡張をしなければならなくなることがある。このような場合、部材の補填や構造システム変更に対する慎重な対応が不可欠であるが、最も重要なことは原構造物の損傷による機能・強度低下を的確に把握した上で必要な処置をとることであろう。そして、このような目的を達成するためには、いろいろな形式の橋梁の力学的諸特性の経年変化を正しく知っておかなければならない。

橋梁構造物の維持管理の目標を上記のような機能保全とすれば、それをどのように表現するかという評価尺度の問題が次に現れてくる。著者はこれを、例えば橋梁の耐震性によって表すことができるのではないかと考えている。まず、構造物のいろいろな経年劣化を考慮して、その構造物がどの程度の地震力で崩壊するかを求める。そして、この限界地震力に対応する再現期間を求めれば、これが当該構造物の余寿命と関係付けられるのではなかろうか。地震の発生確率は、対象とする地域によって異なるものであり、必ずしも定常過程とはならない。したがって、どのような地震履歴があったか、そして、いま構造物はどのような損傷を受けているか、という情報に基づいて個々の構造物の限界地震力とその再現期間(余寿命)を評価する必要がある、こうした情報を収集・解析する業務が機能保全管理の主たるものと考えられる。

橋梁構造物の信頼性評価は構造物固有の特性に従って行われるべきであり、長大橋梁の場合には、この機能保全の評価尺度として、耐震性ととも耐風性が加味されなければならないであろう。

大地震や超大型台風による自然災害の中では、一つの橋梁の崩壊が交通システムの機能をマヒさせてしまう危険性がある。また、洪水により橋梁が流失し、ある地域へのライフラインが遮断されるという例も数多い。現在、われわれはややもすれば自然災害の恐ろしさをないがしろにしがちではなかろうか。ここでは構造物の余寿命を自然外力の再現期間と関係付けることを考えてみた。しかし、材料の疲労やクリープ現象のように強度の時間特性が明確に認識されている事象もあり、今後、これらを考慮していかなければならないのも当然である。橋梁の維持・管理という恒常的業務と考えられるものに対して、いま一度、その目的、その方法について再考する必要があるのではなかろうか。

#### 4. 安全性・信頼性評価の重要性

1970年代、Milfordhaven, Koblenz, West Gate, 第4 Danubeなど、数多くの橋梁が架設中に事故に見舞われた。また、わが国においても、大雲橋側道橋の落橋事故、速川橋の落橋などの事故が記憶に新しいところである。このような事故を経験することによりそれまで予測されていなかった事象が浮き彫りにされ、その重要性が改めて認識され、その後の安全性の向上に寄与するところが大きかった。しかし、事故を経験してからの対応では遅きに過ぎることは論を待たない。事故を未然に防ぐことが重要であり、そのためには、常に、これまでの構造設計の方法(架設計画も含めて)やその基本的考え方に問題点がなかったかどうかを反省する必要があるのではなかろうか。

長大スパンの橋梁、特に斜張橋や吊橋の設計においては、わが国ではいかに耐風設計を行うかが重要になりつつある。ここで注意しなければならないことは、わが国は1961年の第二室戸台風以来いわゆる超大型台風の襲来を経験していないことである。換言すれば、最近建設された長大橋梁は超大型台風の洗礼をまったく経験していないことになる。現存している長大橋梁はそれでは強風に対して十分な安全性をもっているだろうか。未解決の部分が若干残されている場合もあるが、現在までの知識と数値解析や風洞実験を駆使して、幾つかの橋梁については耐風安全性を確保するための処置が講ぜられてきた。しかし、中には処置をとることが先送りされているものもある。耐風対策を将来講ずることができるようしておき、実際に対策をとるか否かはその橋梁が風によってどのような振動するか、その推移をみてから考えようというものである。これに対して、著者は幾つかの疑問をもっている。すなわち、

- このような姿勢が構造物の安全性確保の視点から許されるであろうか。
- もし許されるとするならば、それはどのような条件を満たさなければならないのか。

というものである。まず、後者の条件としては次のようなものが考えられる。

- ① 対象とする安全性に関わる現象に対して、明白な前兆事象があること
- ② その前兆事象が的確に捉えられ得ること
- ③ しかも、その判断を誤る可能性が極めて少ないこと
- ④ 観察データより対策を取るか否かを決定する判断基準が確立していること
- ⑤ 対策を取るのに十分な時間的余裕が期待できること

これらの条件が満たされていれば構造物の耐風安全性は確保されているのかと問われるとすれば、このようなものでも、なお、不十分であろう。しかし、現状はこれさえも満たしているとは考えられない。

構造物の安全性・信頼性の研究は古くから行われてきたが、最近になって、ようやく、設計指針などに研究成果が反映されるようになってきたと考えられる。しかし、指針や設計示方書が整備され、構造解析技術が向上し、材料が進歩し、かつ、施工技術が改良されても、なお、安全性評価の問題には未解決の部分が残される。その一つはHuman Errorであり、いま一つは未知の事象の存在であろう。安全性評価の問題がHuman Errorや未知の事象に関わるとするならば、この問題にはどのように対処すればよいのであろうか。ただ、漠然と危惧の念をもつだけでは本質的な答えにならないのは当然であるが、しかし、この「危惧の念」こそ安全性向上を考える上での

出発点に外ならない。それまで“聞いたこともない、見たこともない、そして、前例のない”この種の問題提起の中にいかに重要な課題が含まれていたかは、歴史の教えるところである。にもかかわらず、形、姿は時代時代で異なっても、同じ過ちが繰り返されているのも事実である。人間は過ちを犯すが、事前に何を考えればそれを防ぐことができるのかを考えるのも人間である。そして、われわれの知らない事象もわれわれ自身の努力によって次第にその輪郭を見せ始めるのではなかろうか。成功と失敗、進歩と犠牲、このような両面をもつ技術開発をわれわれは背負わなければならず、その分岐は正に紙一重である。その明暗を支配するのが安全性評価という重くのしかかる問題であるといえるのではなかろうか。

## 5. むすび

### ——橋梁工学・橋梁技術の展望——

戦後40年余が過ぎたが、その間、橋梁技術は目ざましい発展を遂げたといえる。そして、高速道路、新幹線、本四架橋などの大規模プロジェクトの推進により、橋梁技術の発展はより加速されたと考えられる。いま、直面する最大の技術上の問題が明石大橋の建設に集約されているともいえるであろう。明石大橋は正に世界最長の吊橋であり、その建設は世界の人々が注目している事業である。したがって、これを成功裡に完成することがわが国の橋梁界に課せられている最重要課題であるといっても過言ではあるまい。しかし、この課題を克服するためには、単に、直接的な問題の解決を指向するのみでは不十分であり、多くの間接的な関わりをもつ問題にも注目しなければならないのは当然である。では、どんな問題を具体的に考えなければならないのであろうか。

Murphyの法則の一つに次のようなものがある。「あるプロジェクトで最も重要な(crucial)因子は、プロジェクトが失敗した時、その姿を現す」。

最近のわが国における長大橋建設は、幸いにして、いずれも成功裡に遂行されてきた。これまでに培われてきた技術的成果を今後最大限に発揮しなければならないのは当然であるが、いま一度、その一つ一つを洗い直し、問題点が那邊にあるかを明らかにすべきである。例えば、強風下の超長大吊橋はどのような挙動を示すであろうか。吊橋は静的な風荷重により水平たわみを生ずるが、同時にバフエテング振動も考えなければならない。問題はこのバフエテングが水平たわみをした吊橋でどのようなものになるかという点にあり、水平たわみが構造細部に与える総ての影響を的確に評価するとともに、水平たわみと空力振動との相互干渉を解明しなければならないと考えるものである。以上の外にも、数多くの考究されなければならない問題があるのは当然であるが、その究

極は「構造安全性・信頼性はいかにあるべきか」という命題に帰着されるのではなかろうか。

最後に、橋梁構造物の景観について簡単に考察してみたい。橋梁構造物の景観について最近多くの意見が発表され、より美しい橋を建設しようという傾向にあることは喜ばしいことである。そこでは純技術的評価で云々するだけではなく、心理的效果や芸術性が包含されようとしている。しかし、なお、多くの場合、景観設計とは何か設計公式に相当するようなものがあり、これを当てはめればよいとするかのように見受けられる。適切な例ではないが、例えば、目、鼻、口の形や機能を改善しても、美人にはならない。しかし、美人は必ず美しい目、鼻、口をもっている。換言すれば、美しい橋は要求されたすべての機能的条件を満たしており、その美しさは構造物の全体形状とその機能性が完全に融合した形で具現される独得の構造造形性に由来するものと考えられる。その典型的なものとして、Golden Gate BridgeやMaillartの橋を挙げることができるであろう。

この一文は思いつくままに私見を羅列したものである。多くの誤解や偏見があること、また、論旨がいま一つ明快さを欠いていることを恐れるものであるが、忌憚無いご批判、ご叱正をいただければと念ずるものである。