

鋼橋技術雑感

Aim to New Developments of Steel Bridge

東京工業大学工学部土木工学科教授
Professor, Tokyo Institute of Technology

橋の技術の歴史

数年前、一橋大学と私どもの大学との協定に基づいた交換授業で、一橋大学の学生に橋の話をしたことがある。3週間で、橋の歴史を材料と力学の発展に結びつけて講義をしたのであるが、木、つた、石などの自然の材料を使い、経験に基づいて形を決めていた時代から、鉄が出現し、ナビエ梁理論に代表される力学の発展と合体し、今の橋の形が出来ていく流れの講義の準備をするのは、大変に自分自身の勉強になった。その際勉強した多くの本の著者の前で多くを語る気はないが、それぞれの時代の先端技術の具体として、橋が作られてきていることは確かであり、橋梁を学ぶ者として誇りでもある。では、今の橋梁技術はどうであろうか。

もちろん、浅学の身でそのようなことを語れるとは到底思っていないが、昨年の『橋梁と基礎』8月号の橋梁の新技术開発特集号に、このような時代に技術開発なんてだれがと書き、その後なんとなく気になることが溜まってきたので、この紙面をお借りすることとした。橋梁をとりまく環境は技術開発を促進する状況にないことにはなんら変わりがないと思うが、だからといってこのままではいけないと考えている。このような環境だからこそ技術開発、工夫が必要なのであり、それに対してきっちりとした評価をするような環境こそ必要なのではないだろうか。とくに、それに必要な経費の分担と、それに対する経済面を含む正当な評価は、欧米に比べて信じられないほど悪い状況である。その改善は到底筆者の手の及ぶようなことではないが、どうかその事実だけでも関係機関に認識してもらいたいと考えている。

すこし横道に外れたが、橋の技術の発展に戻そう。今、土木学会で田中賞30周年を記念して橋の写真集を出版するための作業を進めている。田中賞を受賞した橋を中心として、編集を進めているが、その中で田中豊先生のご業績に

三木 千壽
Chitoshi MIKI



も触れたいと考え、土木学会の図書館にお聞きしたところ、田中先生ご自身が作られたアルバムが土木学会図書館に大量に保管されていることを知らされた。30周年出版とは別にこのアルバムについても何らかの形で会員に見ていただけるようにすることについて検討を始めているが、永代橋、清洲橋、といった隅田川の橋梁ごとに、基礎工の着工から竣工までの姿が見事に記録されている。また、その中に仕事を指揮されている田中先生らしきお姿がある。田中先生は当時の欧米の最先端橋梁技術を導入され、隅田川の橋梁群をはじめとした多くの橋梁の建設に携われたと聞かされてきたが、このような工事記録写真が残されている事実は、計画から工事までを通してご指導されていたことを物語っている。

田中賞がスタートした時期は、日本の鋼橋生産の高度成長が始まった時期でもある。鋼橋の生産高は昭和40年前後に数万トンから数十万トンへ急増しており、その時期にはさまざまな新しい技術の発展がなされている。東海道新幹線の鋼橋は、我が国で本格的に溶接構造が採用された最初の事例であり、工期短縮を図って多くの標準化が行われている。私の指導教官は旧国鉄の構造物設計事務所の次長から転身された西村俊夫先生であるが、当時の友永和夫所長の指導のもと、いかにいろいろなことを考えながら新幹線の橋梁の設計を進めたかをよくお聞きした。当時の研究、設計、鋼材、溶接、製作技術などを考えると大変な技術革新であり、それがいまでも東海道新幹線が健全な理由であろう。

同じ時期に道路橋でも多くの新しい技術が展開されている。名神高速には当時新開発の50キロ高張力鋼が使用され、東名高速、首都高速にはSM58(SM570)が使われている。また、それをベースとしてSM50Y(SM490Y)が規格化されたのもこの頃である。SM50Y(SM490Y)は今でも橋梁からの要求で作られた唯一のJIS規格鋼材である。東名高速の後期には3本主桁の橋梁が多数建設され、PC床版つき連続

合成桁も採用されている。キーワードだけを見ていると、いま委員会を設けて検討していることと何ら変わりがない。筆者は1983年より、建設機械化研究所と一緒に東名高速道路の東京第一管理局管内の橋の疲労対策を行っており、その関係でしばしば橋の中に入るが、RC床版と軽微の疲労以外は問題なく、見事なものである。ある方にそのことを話したところ、笹戸松二さんと足立洪さんが中心になり、競い合って良い橋の建設を推進されたそうである。

新しい橋梁技術は、なにも大規模プロジェクトに限ったことではない。たとえば昭和30年代には広島周辺に多くの先進的な橋梁が建設されている。当時新しい技術導入に非常に熱心な建設省の担当者（瀬良さんとお聞きしました）に引っ張られて、全溶接のプレートガーダ、2本主桁橋、アウトターケーブル補強などの橋が建設されている。数年前にそれらを見せていただくことができたが、いずれの橋も健全に使われ続けている。

この30年間、橋梁の世界を引っ張ったのは本州四国連絡橋であることには間違いない。これについて語る必要はないであろう。このプロジェクトを通して世界の先進国のレベルに達し、リードできるまでになったことは事実である。

示方書について

最近、フランス、ドイツの橋がしばしば紹介される。私自身もかなりの橋を見て歩いた。確かにひとつひとつの橋が入念に設計され、その中にさまざまな新しいアイデアが盛り込まれており、勉強になる。しかし、最近の我が国の橋に国産のアイデアが見えないのはなぜだろうか。我が国は世界一の鋼橋生産国であるのに。同僚の教官の間で「大学での教育が一因では」と真剣に議論し、カリキュラムや講義の内容、方法の改善をはかっているところであり、成果がでるにはしばらく待っていただきたい。

ところで、なぜ最近の橋の話題はフランス、ドイツもどきが多く、我が国の橋梁設計の世界で新しいアイデア、新しい技術が生まれ難いのだろうかと聞くと、示方書があるので答える人がかなりいる。ある席で示方書の役割について議論したことがある。道路橋についてはどなたかが、「示方書は絶対に守らなければならない基本事項である」と述べられたのに対して、当時の国鉄構造物設計事務所の稲葉次長は、「鉄道では示方書ではなく設計標準であり、それよりいいものであれば守る必要はない、それが設計標準という名前にこだわり続けている理由だ」と発言されていた。先日、稲葉さんとその話をしたら、それは友永和夫さんの強い意志であるとおっしゃっていた。

いまは道路橋の関係者もそのようなことを言うことはないと考えますが、設計に当たるコンサルタントには“道路橋示方書は決して犯してはならないもの”と考えている設計者がたくさんいることも確かである。示方書がベースにし

ているものよりも優れた技術であることが実証できればどんどん取り入れるべきであり、取り入れられるような制度となっている。いまの設計、製作、といった役割分担と契約制度からいけばコンサルタントの技術者にもっと積極的に新しいことに取り組んでいただくのがすじとは思いますが、私が付き合ってきた欧米のコンサルタントと日本のコンサルタントはどうも違うようである。とにかく、示方書に違反するような事項が出てきたらそれこそ新しい技術開発のチャンスであり、なぜそのような規定ができてきたかを徹底的に勉強し、提案していくべきである。

反対に、最近の“新技術”と呼ばれている流れの中で、示方書に書いてあることを何の検討もなく無視していることもかなり目につく。指摘すると、その事実が気がついていないケースがほとんどである。示方書の各項目にはきちんとした理由と根拠があり、もっと勉強しろよと言いたくることがある。

では、示方書としてどのような形が望ましいのであろうか。いま、性能照査型設計の議論が盛んである。コンセプトについてはさまざまな議論がなされ、共通の認識もかなり出来上がってきた。しかし具体的に設計というアクションにつなげるにはまだまだ具体性に欠けている。具体的な姿にしていくには、たとえば限界状態設計法あるいは荷重係数・抵抗係数設計法的な考え方での限界状態についてつめた議論をする必要がある。アメリカではAASHTOのLRFDの導入と、FHWA（米国連邦道路局）がスポンサーになっているHigh Performance Construction Materialsの研究とがあいまって、いろいろなアイデアが生まれつつある。フランス、ドイツの次はアメリカもどきの橋になるのだろうか。これは避けたい。

橋の寿命

今の設計において欠けているのは設計寿命のコンセプトであろう。数年前、300年橋、200年橋といったコンセプトの議論が土木研究所の西川室長の発言をきっかけに盛り上がったが、今後それをどのように示方書に記述し、内容を合わせていくかが問題であろう。性能照査といったとき、その構造物を物理的、機能的に何年もたせるかを決めないでどうしようというのであろうか。1年でいい仮橋と、100年以上機能し続けなければならない橋とは違うのである。以前、たしか鉄鋼協会のパネルディスカッションであったと思うが、石油公団の方とパネラーをご一緒したことがあり、彼は、「石油掘削用海洋構造物としては、石油の埋蔵量の予測から決まる採掘所要期間が過ぎたら使い物にならなくなるのがベストであり、それは通常10年程度だから、10年になつたらどこもかしこもがたがたになるような設計を考えてほしい」と発言されていた。これこそ設計者にとって大変厳しい注文である。

具体的に寿命設計の対象となるのは疲労と腐食である。現行の示方書では疲労は設計での照査項目に入っていないが、道路橋には疲労の照査は不要などと考えている技術者は、もはやいないと信じている。疲労設計には2レベルあると考えている。一つはディテールの改善により疲労に対しての抵抗をできるだけ高める、もう一つは寿命を設定し、それにあわせてディテールを最適化していく方法である。いままでの道路橋示方書は前者の考え方であり、これは疲労限設計に対応し、考え方によってはこれほど厳しい疲労設計はない。しかし、設計者が示方書をそのまま読み、疲労設計は要らないと考え、疲労に対してのディテールの配慮をしなければ最悪のことになる。たとえばプレートガーダ橋の横桁取り付けのディテールであるとか、下フランジ近傍への添架物の取り付けとか、いま、多くの橋でこのようなことが起きているのが現状であろう。メンテナンスのための点検足場の取り付けが疲労に対して最悪ディテールになっているのは、最近完成した有名な橋で見かけた事実である。

一方、後者のS-N線と活荷重による応力およびその繰り返し数を用いる、いわゆる疲労設計においては設計寿命がそのまま応力繰り返し数になるため、設計寿命を長く取れば取るほどコンサーバティブな設計となる。さらに、疲労の原因となる交通荷重の変化など、設計寿命を長くするほど不確定な要因が高くなるため、疲労設計での想定寿命は100年程度が適切であろう。当然、疲労設計にもある程度の安全率、余裕を含んでおり、100年寿命で設計したら100年後には一斉に疲労亀裂が出るのではなく、想定した安全率に見合った確率で疲労被害の可能性があるということである。また、疲労設計を導入することは、なにも未来永劫疲労に対してフリーにしようというのではなく、適切なメンテナンスが必要であり、それが橋梁に対する交通などの環境変化に対応していける。

現在、多くの橋梁に疲労被害が発生しているが、それらのほとんどがいわゆる2次応力や変位誘起が原因であり、ディテールの改善で対処すべき問題である。いま、疲労設計を導入して、鋼橋の断面が増える、あるいは鋼重が増えるようなことになれば、多分どこかに間違いがあるであろう。疲労というとなぜか身構える人がいるが、そのあたりの誤解の原因についても、十分説明していかなければならない。

橋の設計寿命が設定されると腐食設計も可能となる。適切な塗り替え間隔の設定により、初めて最近のはやり言葉のトータルライフコストを求めることが可能となり、そこではじめてコンクリート構造との合理的な経済比較ができる。いままで我が国で腐食が原因で橋が落ちたことはないと思う。しかし、ウェブの一部が欠落しているような橋もたくさんある。腐食した橋の強度評価についてはほとんど

行われていないのが現状であろう。数年前、横河の名取君と土研の村越君が『橋梁と基礎』に腐食の話を連載していたが、問題提起で終わっているのは残念である。鋼構造物といえば腐食と言われるのは当然である。しかしそれは今の技術で十分に対応できるのであり、鋼橋の良さを理解してもらうにはそれなりの努力が必要であろう。耐候性鋼材の使用についても、普通鋼材の裸使用でも可能であるような場所にしか使えないような指針を早く直すような努力をすべきであろう。待っていても誰もやってくれないことに気が付いてほしい。

安全率について

『川田技報』Vol.16の論説で、宮田先生がケーブルの安全率にふれられている。設計基準類の検討のなかで、安全率はぜひつめなければならない重要な課題であろう。論説では、安易にケーブルの安全率を下げるとケーブルの剛性、重量が減るため、耐風設計上新たな問題を起こすので、総合的に検討しなければならない、と書かれている。筆者はケーブルの安全性は現行よりはるかに小さくできるとの発言をしている。その理由はいくつかあるが、なぜほかの部材より高い安全率を使うのかが説明がつかないからである。吊り橋のケーブルは1万本以上のワイヤーが束ねられた、きわめてリダンダンシーの高い構造体であり、しかもお互いに高い接触圧で接触しているため、もし、応力腐食割れによりどこかで断線しても隣接するワイヤーがすぐにその荷重を分担するようになっている。また、ワイヤーの強度のばらつきは昔に比べて格段に小さくなっている。ケーブルの安全率はかなり下げられます、あるいはもっと強度の高いケーブルが作れますといった提案に対して、構造体にどのような影響を及ぼし、その結果、どのような便益を生み出すか、また、その際どのような課題が生じるかといった議論こそ新しい技術の原点であろう。

ケーブルだけではなく通常の構造用鋼材についても安全率を考え直す時期である。あたかも1.7が絶対的なものであるように受け取られているが、私が大学生のときのSM41（SM400）に対する許容応力は道路橋で 1200kg/cm^2 、鉄道橋で 1100kg/cm^2 であったように思う。鉄道橋については1984年の改訂のときに 1500kg/cm^2 に変えたと記憶している。鉄道橋については引っ張り部材の多くが疲労で決まり、圧縮部材は座屈で決まるので降伏に対する許容応力はあまり機能しないのであるが、さまざまな議論の結果このように収まった。

鋼材については降伏点、引っ張り強さなどのばらつきのほか、板厚のばらつきも重要なファクターである。JISに規定されている公差、ばらつきの幅など、JIS設定以降見直されたことがないのではなかろうか。いまの時代の鋼材が1960年代と同様なばらつきを有して製造されているとは

考えられない。建築を対象としてさまざまな新しいタイプの鋼材が出現しているが、橋梁用鋼材についても、使いやすい鋼材を要求すべき時期と考えている。これについては鋼材倶楽部の中で検討が始められているので大いに期待しているところであるが、橋梁を設計し、製作しているサイドから、もっと積極的にアプローチすべきであろう。

圧縮部材についても同様であろう。初期不整の程度を小さくする、残留応力を下げるなど、いまの耐力力曲線より高い設計線を設定できる可能性はいろいろある。また、今のような設計方法を踏襲していると、FEMで詳細な解析をして局部の応力を求めたあと、それをどのように設計につなげて良いのであろうか。これも大きな課題である。

Load-To-Force Function

あまり議論されたことがないが、もっとも重要な課題は荷重と断面力とをつなげるいわゆる構造解析の部分である。荷重あるいは外力評価をしている人間は実際に生じる荷重をモデルとして設計値を設定する。また、強度の照査は部材単位で行われるため、断面力が強度照査のベースラインとなる。Load-To-Force Function と呼ぶ、いわゆる構造解析モデルについてももっと関心をもつべきと考えている。

とくに橋梁の活荷重の応答特性については、筆者らは実荷重比という用語を用いて問題提起をしている。すなわち、たとえばもっとも数の多いスパン50mクラスの非合成プレートガーダ橋について、あるトラックの載荷により実際に生じる応力はその荷重条件に対して設計で用いている方法で求めた応力のたかだか60%程度ということである。このようにさまざまな解析技術が利用できる時代に、実際の挙動を60%程度にしか表わすことができない道具を使って物を作り続けているのである。まず、このような事実に対して疑問を感じることから出発ではないだろうか。やはり、90%くらいは実際と合うような解析をベースにすべきではないだろうか。

私は学生時代、橋梁設計演習を計算尺と算盤でやった。しかし、カリキュラムから橋梁という言葉が消え、それに変わって私の学生時代の大型計算機をはるかに凌ぐ能力のパソコンが学生の友達になっている。また、研究室のワークステーションには MARC, ABAQUS, COSMOS といった汎用プログラムが入り、学生はまるでゲームをやるごとく、要素数が1万を超えるFEM解析を行っている。いっそのこと先にFEMを教え、その近似解法として梁理論を教えようかと思うほどである。やはり、一度今までの設計の流れを見直す必要があるのではないだろうか。

話がまたまた横道にそれたのでもう一度 Load-To-Force Functionに戻そう。考えてみると、同じ橋梁工学の世界に居ながら、耐風、耐震、自動車荷重といったいわゆる外力評価をする専門家と、座屈、耐力、疲労・破壊といった

強度評価の専門家が、設計について一緒に作業したことはあまりないのではなかろうか。本四架橋プロジェクトでは私は鋼上部構造の委員会で仕事をしているが、耐風、耐震、基礎などの委員会との接触はまったくなかった。もう一つの委員会が情報交換や調整の機能を果たしているのであろうが。土木学会の活動についても同様である。大変な反省項目であろう。

真似とは

さて、本四プロジェクトがほぼ終了し、鋼橋の需要が減ったといっても、我が国は世界最大の鋼橋生産国であることには変わりはない。EUの合計あるいはアメリカの2倍以上の鋼橋を生産している国としては技術についてもリードしなければならない。繰り返しになるが、なんとなくフランスやドイツで見たことのあるような橋を新しいアイデアの橋のごとき扱いをしていくことは避けたいものである。

また横道にそれるが、先日、大学の後輩であり、数値解析の分野では世界のリーダーの一人であるミシガン大学の菊池昇教授に、君の研究がどうしてここまで評価されるようになったのかと聞いたところ、彼曰く、「だれでもまず人の研究をレビューし真似することから入る。私も一生懸命真似をするのだけれど不器用だからどこか違ってしまふ。そこでしかたがないから自分で考えるから新しいアイデアが出たのだらう」とのことである。「頭のよすぎる人はすぐに真似ができてしまうからかえって不幸ですね」とも。また、「人の真似をするには全部理解しなければならず、理解したら真似はしたくなる」とも言っていた。いい話と思う。

世界中の橋梁技術者が日本の橋梁の動向に注目し、真似をしてくれるようになるまで早く到達したいものである。一昨年、FHWA（米国連邦道路局）が組織した鋼橋技術の調査団が来日した。主な調査項目は、高張力鋼、高性能鋼の利用であった。今年はやはりFHWAが鋼橋の製作技術を中心とした調査団を送りたいとの連絡が入っている。日本を見たあと、イタリア、ドイツと回るそうである。四国工場も含めた視察コースを伝えたところであるが、鋼材と製作技術は世界的であることは確かである。

おわりに

思い付くまま、いろいろ書いてきたが、どうも鋼橋の世界も、他分野と同じく、ハードは世界をリードし始めているが、ソフトが課題のようである。『川田技報』Vol.16の論説で宮田先生は『いいものはいいのだと売り込めるよう、当面、いいものを丁寧に考えていくことになるのだろうか』と結ばれている。筆者も同感である。なにがよい橋なのか一緒に考えていきましょう。