

# 最近の橋梁設計の動向を考える

## —設計計算はどのようにあるべきか—

島 田 静 雄\*

### 1. はじめに

構造物の設計計算は、最近特にむずかしくなったといわれる。筆者は橋に関連した研究が多いので話題の例証には橋の設計に関するものを持ち出すが、橋に限らず、土木構造物全般の設計にもいえることであろう。問題点は、構造物の設計計算において、どの程度の作業をもって必要にして十分であると判断したら良いかである。

たとえば、具体的には、3径間連続プレート ガーダーの設計計算は、支間を何等分し、有効数字何ケタで計算をまとめれば必要にして十分であると判断し得るであろうか。精密過ぎる検討は労力ばかりかかり、簡単に過ぎることも思わしくないであろう。設計理論の選択と、実際の数値計算の手法は、したがってある節度とつりあいを持っているべきであろう。この判断を、われわれは何によって決めるべきであろうか。このような疑問を問題点として追及してみることにしよう。

### 2. 設計図と計算書の意味

構造物の設計においては、最終的に意味を持つものは設計図である。計算書は、その構造物が与えられた設計条件を十分に満たすということを保証する根拠を示すものであり、もし設計者が十分な経験と道義的責任とがあれば、設計の根拠を公表する必要はなく、最終的にでき上がる実物で信頼に答えることになるであろう。激烈な生存競争の場である企業間においては、自己の設計上の根拠を何で公表するほどの愚を犯すであろうか。

橋梁において、設計計算書が重要な意味を持つのは、これが公共の構造物であるという性格からくるものである。公共の安全性を保証する建前上、その構造物が安全に設計されているという根拠は、いかなる場合にも見られるようにという大義がある。また、その内容は、中程

度の土木教育を受けた技術者にでもわかる程度の明瞭さをもっていなければならない。この理由は、橋の架設される場所には、常に高度の教育を受けた技術者がいるとは限らないことを考え合わせればよい。

やたらにむずかしい理論を持ちだして計算理論を開陳するのは、その計算書を見る立場の技術者に対するこけおどしや軽べつの意味に感じられるものであるし、電子計算機にかけて計算された数値は、そろばんと計算尺で確認ができないから、これまた何となく瞞着されたようにも思える。内容は非常に高級な事柄を扱いかいながら、表現としては簡単かつ明瞭で、必要にして十分なものをもとめるのが、土木構造物の計算書に要求される使命である。

そろばんと計算尺とで、すべての計算の内容が理解できる、ということが実は非常に大切なことである。もし、このようにできていなければ、後進国への技術輸出というような問題にたずさわる、第一線の技術者にとってこれほど不親切なものはないであろう。

### 3. 示方書の意義

橋梁の設計示方書が目的としている事柄は、大体三つあるように思われる。

第一は、安全に対する判断の根拠を示す基準であって、外力もしくは荷重と、許容応力とを示すことである。現行の設計示方書は弾性設計法を基調にしているから、構造物全体もしくは一部部材の最終的な耐荷力から安全率を定めて設計することは、一般的には行なわれていない。この理由は種々あるが、弾性理論にもとづく計算においては互いに関連のない技術者が同じ設計条件で設計したときに非常に似たものができる、いいかえれば、統一の取れたものができる、という点にある。

第二の点は、設計において、考えればきりのない多くの細かい事項を整理して、共通の出発点を与えようという約束事項である。たとえば、鋼の重量を  $7.85 \text{ t/m}^3$  と

\* 正会員 工博 名古屋大学助教授 土木工学科

決めたり、ヤング率を  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  と定めるようなものである。現行の線荷重 ( $L$  荷重) は、複雑な道路上の車両重量を計算の便になるように簡略化したことに価値があるが、これが実際とはなはだしく異なるものであるとして、眼に角を立てる必要はない。鋼のヤング率がただの2ケタの数値であるから、橋の解析は精密にした所で意味がない、ということをよく聞かすが、これも群言の類の発言ではないだろうか。

いったん決められた約束事項を忠実に履行するのは、技術における道義であるが、この経験が積み重なると、統計的に共通した傾向があらわれるようになるものである。たとえば、支間と鋼重量の関係とか、経済的な桁高とか、鉄筋コンクリート床板のスラブ厚などである。もしこの性質が整理されれば、最初の約束事項の矛盾は訂正されるであろうし、新しく約束事項が追加されることになるであろう。線荷重が規定された過程は、このようなものである。

第三の点として、示方書が目的としているものは、設計上の細かい習慣や取り決め事項の集積である。説明すれば長くなるものや、または別段根拠もないが経験的な習慣などである。たとえば、最少鋼板厚の規定、板幅に対する板厚の制限、補剛材の間隔、リベットの最小本数や最小間隔、縁端距離などがある。場合によっては計算式が提示されていることもある。

このような項目が増えると、設計は次第に標準化されるようになり、規格化された設計に取って代わることになるであろう。現在、簡単な単純橋は標準設計が各方面で開発され、ある種のものはいくつか商品化している。このようになった場合を想定するとき、示方書として意味を持つのは、最初の第一の点だけになるのである。

一般に道路橋は鉄道橋に比べて標準設計がむずかしいといわれている。この理由は種々あるであろうが、条件が非常に複雑であるからこそ、経験的知識の集積で設計の合理化を計るのが技術の進歩には不可欠であることの例証にもなるのである。

#### 4. 数値計算の限度、精度の約束

現行の示方書では、構造物各部の応力が許容応力を越えないことを確認するように指示してはいるが、具体的に有効数字何ケタという指定や、支間を何等分して求めよ、という所までは立ち入って指示していない。精度に対する解釈は、その計算を行なう技術者の経験的な判断に任せられるのが常であり、それゆえに誤解もまねきやすい。

工学的な数値の有効性は、常識として有効数字3ケタ誤差にして約1%以内とするのが普通である。もちろん

この判断は対象によって異なり、幾何学的な寸法に関するものは高精度が要求されるし、傾向だけを知る必要のために、符号と1ケタ程度の数値で良いこともある。最終的に要求される数値の精度いかんによって、実は計算の仕方、また理論式の表現も全く変わってしまうのである。たとえば、2つの数値の積を計算したいとき、 $a \cdot b = c$  という計算式が与えられるが、10ケタの有効数字が必要であれば、 $a$  も  $b$  も 10ケタの数値が必要であり、使用する計算機の演算ケタ数も 10ケタのものが必要となる。しかし、同じ計算機を使うとして、有効数字12ケタの結果が必要であれば、最初の計算式そのものは不適当であり、12ケタ同志の演算を、たとえば有効数字6ケタずつの計算の和として表現しなくてはならなくなる。すなわち、計算式は  $(a+a') \times (b+b') = ab + ab' + a'b + a'b'$  である。

すなわち、ものによっては、たった2ケタの精度の向上を目論んだために、計算式の変更とともに、計算の労力は数倍に増えるのである。計算結果を要求する橋の発注者側が、ほんの思いつきで精度の向上を命じたために、せっかく計算したばかりの大計算をやり直すのに非常に労力を強いられるということはまれではない。

精度について誤りやすい概念は相対的なものと、絶対的なものとの区別であろう。たとえばヤング率の値であるが、常識的に使われる鋼のヤング率  $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  という数値は、多くの材料実験のデータから見て、ほぼ平均的な値として得られるものであるという暗黙の了解がある。実際の鋼のヤング率は非常に複雑で、この値を実測すること自体が計測的にも大問題であることも知っている。この場合のヤング率の判断は絶対的な精度を問題にしているから、有効数字は2ケタと考えてよい。

一方、構造物の弾性変形を計算するとき、ヤング率はあたかも1個の定数のように扱われる。合成桁の計算において、鋼とコンクリートのヤング率の比も一種の定数化された数値である。同じガーダーの異なる2点でのたわみの比較は、これが不静定力の計算に使われるときにはヤング率の精度は別問題であり、単に数値計算上の相対誤差のみが判断される。このときは、使用される計算機の演算ケタ数いっぱいまで0のついた有効数字をもつとして扱われる。

誤差の概念がしっかりと身についた判断を下せるとき、技術者同志の相互の話し合いは非常に円滑に進むものである。われわれ理工学畑に関連するものが、法文経畑に関連する人達と意志の流通を計りたいとき、どうしても理解し得ない場合の原因は、誤差と精度の概念もしくは正誤の判断があいまいであることに原因があるように思われる。

## 5. 応力の検証は、支間の何等分点で求めるか

たとえば、連続プレート ガーダーの応力度の検証をするのは、どの格点で求めておけば良いか、である。

応力の最大になる格点が既知である場合は別として、応力の最大値がどこになるかが不明である側径間などでは、支間を何等分かした有限個の格点で曲げモーメントの最大になる箇所を探す。間隔が広過ぎればちょうど最大になる箇所を逃す危険があるし、密過ぎるのは労力の増加をきたす。この間隔の選定は、求めようとする最終結果の精度によって判断するべきであって、たとえば、相対誤差1%であるならば、求める格点でちょうど最大値を探しあてなかつたとしても、隣接する格点が1%の誤差範囲で最大値をはさんでいれば良いことになる。

もし、曲げモーメントの分布が放物線であるならば、この格間の最大間隔は支間の1/10である。また、誤差を0.1%にしたいならば、1/32である。分割されたおのおの点で、曲げモーメントを計算する必要はないかも知れないが、支間を10等分したときの計算精度を1ケタ上げるのに3倍の分割を要し、2ケタ増加するのに10倍の労力が必要であることがわかる。

## 6. 影響線の数値は支間を何等分して求めればよいか

応力の検証は必ずしも全部の格点で求める必要はないが、応力の影響線は全支間にわたるから、その縦距はある一定間隔ごとに求めておく必要がある。この場合の支間の分割は前の場合とは別の基準に立つ必要がある。

影響線の縦距は、荷重の直下点で求める必要があるが多くの場合、ちょうど作用直下の値が算出できないことが多いので、隣接する格点の縦距から、内挿または外挿で計算することになる。真値と推定値との差は、求めようとする最終結果の精度で妥協することになるが、この判断は影響線の実面積と、格点ごとの縦距から計算する多角形面積を比較することで与えられよう。

誤差1%を保証するには、たとえば影響線が放物線であるとき、支間の10等分は、ちょうどこれを満足するものであることがわかるのである。すなわち、応力の検証格点と、影響線縦距を計算する格点の分割数は、いずれも10等分というのがつりあいのとれた数であることがわかる。

## 7. 影響線縦距の有効数字

橋の設計において、影響線を必ず求めなければなら

ない、というものではないが、影響線縦距を計算するならば、その有効数字を何ケタ取ればよいであろうか。最終的な応力の検証が有効数字3ケタであるとする、影響値は荷重との積をつくって和を求めるから誤差の累加が起り得るから、少なくとも1~2ケタの有効数字の増加を考えなければならない。連続プレート ガーダーの場合には、各支間を10等分するということは最終結果の精度から考えた必然的なものとする、3径間連続では約30の影響値の積和が必要になる。すなわち、四捨五入による誤差の相殺を考えれば、影響値は4ケタ、累加を考えれば5ケタである。

## 8. 理論の選択と、数値計算法の吟味

プレート ガーダーの設計計算で支間を何等分するのがよいかは、実際構造物の特徴によって変わるものではあるが、支間の分割数は10ないし20、多くても30を越えることはないと考えてよいであろう。有効数字5ケタの計算をこれらの分割個数だけ定めなければならない、という労力も大変なものである。

一般に不静定構造物の影響線は、その構造物の変形状態に関係するので、たわみの計算を不可欠にしている。静定基本形と、不静定力の選び方は種々あるが、連続橋では中間支点を取り除いた状態で中間支点の反力を不静定力にする、いわゆるたわみ法と、中間支点での支点モーメントを不静定力にする三連モーメント法とがある。

この2種は、理論的には全く同一の結果を保証するが、数値計算においては両者に相当の差があることを例示してみよう。

たわみ法では、3支間分を1支間とするはりにおいて中間支点到相当する位置に作用する単位力についてたわみを計算し、2つの中間支点のうちの1つの支点反力の影響線を求め、これから各点の曲げモーメントの影響線を合成する。

最初のとわみの計算を弾性荷重法で計算するとすれば、3支間分の積和を行なうから、有効数字をこの時に2ケタ増しておく必要がある。支点反力の影響線を合成するときには、2つのにかよったたわみ曲線の差を計算する破目になるから、計算数値の頭の部分2ケタが飛んでしまう危険を考えなければならない。また、反力の影響線からモーメントの影響線を合成するとき、同じく頭から1ケタのケタ落ちが起り得る。すなわち、全部で5ケタの精度の低下があるから、影響値の有効数字5ケタを保証するには、最初は10ケタの計算から始めなくてはならないのである。

一方、三連モーメント法においては、たわみの計算は各支間ごとでよいから、たわみの計算における精度の低

下は1ケタで良いであろう。また、いきなり中間支点の支点モーメントの影響線が計算できるから、各点の影響線を合成するときのケタ落ち1ケタを考えても、精度の低下を2ケタにおさえられる。すなわち、最初は7ケタの計算から出発できるのである。

この例に示したように、同じ結果を理論的に保証するものであっても、実際計算に適さないものがあるのである。理論がいかに正しくても、その実際計算において精度の低下が計算機の演算ケタ数を上まわるものは全くナンセンスである。この意味において、設計理論を提唱する場合には、その実際計算の精度について責任を持つべきであろう。

## 9. 正当性の保証は何によって得られるか

たとえば、変断面の連続橋の影響線と嘗々と努力して計算したとき、その結果が大間違いをしていない、という判断は何によって得たら良いであろうか。理論が正しいと保証されていても、何の気休めにもならないことはいま説明したとおりでである。数値計算でも誤差が累加するからである。

複雑な条件を盛り込山導入し、厳密に条件を設定して変断面の連続桁の影響線を定める解析理論があったとする。しかし、これは単に数値計算に役立てる手段と解すべきであって、その結果が大間違いをしていない、という安心感は別の根拠に頼っている。

真値であるか、近似値であるかの論議は、正確な値が知られているとき、もしくは推定できるときに意味があるが、実際構造物のように千差万別の条件のときに、単発的に計算された数値の正当性はなかなか保証できないものである。したがって、われわれは、ある条件の整った場合の理論的推定値と比較してみて、得られた結果が傾向的に誤りでないことを判断して安心しているのである。

連続桁においては、等断面の連続桁の数表などがこの基準になっている。変断面の影響は、これだけを独立に研究した結果をつき合わせることで確かめられるのである。

構造物の解析理論は、構造力学的に理論的に発展させる場合と、設計に応用させる場合の処理とは決して同じではない。設計に応用する場合の理論の整理は、できるだけ普遍性のある、応用範囲の広い条件の整ったもので行なうべきであり、特殊な条件は、それだけを独立させるように扱おうのが最善である。

わが国においては、正当性の保証の例には海外文献の引用とか、権威ある上役や大学教授を引っ張り出す風習がある。自からの手でつくった設計上のバックデータは

対外的には認められがたいので、勢い自分の所での経験の蓄積や整理をおろそかにしがちである。

## 10. 正しさの基準のつくられる過程

ある構造物の設計計算が誤りを犯していない、という判断の基準は一般に二つの区分がある。

一つは、非常に条件の整った状態で解析した理論的な性質を使う場合と、他の一つは、経験の蓄積による判断である。誰も、一見して結果の誤りを指摘できる根拠は神がかり的なひらめきではなく、合理的な類推によることは知っている。

理論的な類推は、大学などにおける専門教育が役に立つのでなければならない。構造力学的な知識は、扱われる理論をたどってその理論が誤りでないことを確かめるのには役に立つが、実際にはその理論と全く別の根拠による簡単な計算で数値の傾向を確かめるということが良く行なわれる。たとえば、連続橋の曲げモーメントは、単純に支持された支間と、両端で固定支持された支間との中間の性質を持つから、簡単な筆算程度で大ざっぱな見当がつけられる。これで極端に違うものであれば論外である。しかしながら、理論をたどることは可能ではあるとしても、そもそもの曲げの基本式から出発するよりは、すでに解かれた計算式を使うのが便利であるし、計算式に数値を代入する苦労よりは、ある程度数値化された数表が便利であることは疑いの余地がない。連続桁の影響線としての数表があれば、解析理論など何であっても良いではないか。

構造物の設計においては、理論式よりは、うまくつくられた数値のほうがよります。このように数値化された資料が多いほど、計算書の内容は簡単に、かつ誤りを少なくすることができるのである。

経験的な資料の蓄積は、形のあるものとして残すには非常な努力が必要である。これは千差万別の構造物から共通する性質を選びだし、これを系統的に整理することで得られるのである。経験的な資料は、わが国においては個々の技術者の実力として蓄わえられる傾向があり、企業自身が積極的に形として残すという努力は払っていないように思われる。そのため、ある程度有能な技術者を揃えれば、コンサルタンツが務まり、設計が個人プレーにおちいって企業の実力がともなわないことが起こり得るものである。

## 11. 構造力学の今後の課題

構造力学は、常に実際構造物の解析と密接に関連を持って研究が開発される。問題点は常に実際の構造物から

与えられ、理論の帰すは再び実際構造物の設計などにフィードバックされる。

ところで、弾性理論に準ずるならば、解析の出発となる仮定が同じであれば、その結果が常に同じであることが保証されるから、解法そのものについての研究はどうでも良く、仮定と結果のみが重要になるはずである。連続桁の解析で例証したように、精密という限度は構造物を細かく観察すれば良いというものではなく、つりあいの取れた観察がある。したがって、ある形式の構造物を徹底的に研究した所で、無限に条件が多くなることはない。たかが簡単な橋の設計に、いちいち電子計算機にかけるまでもなく標準化が進むであろう。

橋において、でき上った形においての力学的挙動、たとえば影響線のようなものは、単に設計上の一つの段階に過ぎないものである。実のところ橋がどのように架設

されてゆくか、その刻々の力学的性質は完成後の橋の力学的挙動よりはるかに複雑であり、構造力学的問題の宝庫の観すらするのである。現在各方面で長大橋梁の計画があり、試算設計が多く行なわれているが、このようなものは絵に描いた餅であって、構造物の設計に対する本質的な考えを見失なう危険があるのではなからうか。

## 12. あとがき

この論説は昨年5月号の筆者の論説の続きである。前回は理論的観点から構造物の微視化が必ずしも正しくはないことを説明したので、今回は数値計算の観点から、構造物を細分して考える限度を述べてみた。

(1965.9.22・受付)

日本の土木技術 —100年の発展のあゆみ—

体裁：A5判488ページ 定価：1200円 送料：150円  
申込先：東京351-5130 土木学会へ 振替東京16828番

# 土質工学ハンドブック

土質工学会編

編集委員長 東京大学教授 工博 星 埜 和

B5判・豪華装幀 1,340頁 定価 7,000円

## ■ 本書の特色 ■

- 最高の執筆陣を動員  
土質工学会の総力を結集し、最高の執筆陣を動員した。
- 最新のデータを網羅  
建設技術の進歩に則し、広汎な内外文献、最新のデータを網羅した。
- 豊富な内容と図表  
重要な図表、図版を余すところなく集録、設計施工に役立つ実用的な解説
- 土質工学の決定版  
土質工学の全般に亘り、その理論と実際を一大集成した決定版

好評発売中！

技 報 堂

東京都港区赤坂溜池5 振替東京10