

橋 梁 設 計 論

島 田 静 雄*

1. 空想から技術へ

始めに夢がある。夢は美しさを求め、はるかに見えている光を頼りに曲りくねつた道を進む。忽然、その行手に立ちふさがった高い壁を前にして、人間は何を考え、何を実行したであろうか。長いマントを着て、手に分厚な本を持った学者らしい男が現われて説明してくれたことがあった。「これは神である。そして真理の存するものであり人智のおよぶ所ではない。絶対にして不動のものであり、これを越えることは人間にはできないものだ」と……………。

ところが、このような説明ではあき足りなくて、遠くから望遠鏡で眺めたり、この壁を叩いたりして調べだした。これはとにかく、神とか真理とかのしるものではなく、動いているぜ、と云い出した男が出てきた。レオナルド・ダ・ヴィンチであり、コペルニクスに受けつがれて行つた初期の科学思想の始まりである。

学者らしい男が何といおうとも、人間の空想は自由であり、空想は夢をともない、ある場合には現実を超越し、ある場合には芸術に美を求める。

我にもし、つばさありせば、遙かなる山路を越え海原に波を恐れる事なく、未知なる世界を求めて、ひたすらに飛びゆくものを。
その先にユートピアがあろうとなかろうと……………

だが、もつと地道な考えをいさぐ人間は、いつの世にもいるものである。何とかしてこの壁を越えてやろうとくわだてた。穴をあけてやろうか、上を飛び越す方法を考えてみるか、それとも廻り道を探してみるか……………いかにしてと考え努力することから技術が生まれてくるのであろう。技術は明らかに目的があつて生ずるものである。技術の積み重ねが経験となつて集められ、経験の体系化と法則化が科学の発生を見たのである。そこで、科学と宗教との闘いが中世の過渡期には激烈をきわめた。

なんとか一つの壁を人間が越えたと思うと、その先にまた何かの行き止まりに突き当たる。そして再び同じように眺めてみたり叩いたりをくり返すのである。一つの考えに固執していた学者らしい男は始めは冷笑し、次に壁が越えられたという事実を、いやというほど思い知らされ、最後には恐ろしい世の中になつたものだとし長歎息をすするに違いない。よい意味に取れば、人間は人工衛星を打ち上げるまで空想を追っかけ廻したことになる。

他人ごとではなく、われわれは時として矛盾を気がつかずに過してしまふことがある。目的だけが始めから存

在し、その途中に壁があつたという事実は案外無視されることが多い。この途中の道程だけを調べるのが本質論とか、倫理学とかの言葉になつてくる。もつとも近代的な言葉では operational research または運用研究といわれている。本質にまで立帰つて見る、一見退歩するような研究が、現代の最新の学問分野を形造つているのは興味がある。

そろそろ、この文章の主題に入らなくてはならない。土木工学の本質とは何であるかという漠然として、とらえどころのない命題から始めるのは避けよう。これはサイバネティックスという科学思想と関連するし、紙数の制限もあることから別の機会に述べよう。話の始まりは橋梁の持つ二面性、すなわち設計における実用性の追究と、橋梁構造物として要求されている美的要素との二つをいかに結びつけるかにある。それには、再び科学とか技術という言葉の持つ概念から説明してかからなければならなくなつた。始めに比喩的な表現をしたことの中には、自然科学思想の歴史と技術との関連を述べたのであるが、この点に関してはもつと説明しなければなるまい。この文章の主題はやつと出発点にきたのである。

2. 科学、工学、そして技術

科学は自然現象や事実の正確な観察に始まる。観察から得られた法則を用いた現象なり事実を、さらに広く理解しようとした際に、一つの科学的方法の持つ価値が決定される。一つの現象を説明するために立てられた法則は、それによつて生ずる理想のモデルと、実際の現象との比較のもとに、ある誤差なり仮定の範囲で正しいと評価される。科学的な方法論は、より正確に、より客観的に事実をとらえるということによって満足する。

技術とは何であろう。技術は目的があるから生ずるのだといつたが、例えば橋梁を架設したり、ダムを作つたりする目的のための技術である。いかにすれば、よりよい橋やダムが作れるだろうか、という努力を科学的方法で研究するのが工学である。技術の中から科学が生まれ再び技術と科学と結合したのが工学であり、学問体系を整えてきたのは歴史的に manufacture 期以降である。

技術に目的があるために、工学の持つ研究の方法は科学のそれとは多少越えが異なつている。技術の中に問題を見つけ、それを研究するには科学的な研究方法を適用するが、その研究の価値が再び技術に反映する限度にとどまるのである。コンクリート構造物の解析に、セメ

* 准員 東京大学大学院学生、数物系土木工学科博士課程、修士

ントの分子構造の研究までする必要がないのと同じである。工学とは、まず技術の対象を細かに分割し、その個々に科学的な研究方法を取り、得られた科学知識を再び寄せ集め、技術に反映させなければ意義を失なう。工学は、寄せ集める操作を含むがゆえに主観的である。

設計というものは、より一層主観的である。そこには究極に人間の判断が物をいうからである。設計は、あらゆる科学、自然科学、社会科学、人文科学とを問わず、あらゆる工学、機械、電気、等をも含めた広い工学の応用 (application) である。例えば、われわれが実験ひとつするにしても、電気とか写真とか機械についてはかなり高度の常識が要求されている。そして、これらの知識は究極の設計に応用されてゆくのである。

科学技術の進行のスピードは猛烈に早い。しかしそのスピードも、一度は現在までの進み方をふり返つてみる研究が出てきた上での進歩に、気をつけなければなるまい。われわれは既説の概念にとらわれることなく、はつきりと現在の状態を注視し、これからの進む道を見出さなくてはならない。

3. 橋梁工学の出発点

ある高名な水理の先生に、水理学の出発点とはとお尋ねしたところ、明快な論調のもとに、 $F=m\alpha$ であるとのお答えがあつた。現代橋梁工学の出発点は、と自問してみたが、適当な言葉が見当たらない。 $\sigma=E\epsilon$ と簡単にいい切ることができないからである。ある男が「安全率ででき上がった化物である」といつたこともある。むしろ問題をずつと狭くして構造力学に限定すれば少し具体的に表わすことができよう。さらに狭く考えれば、構造力学で弾性限界以内での力と変形を考えて $\sigma=E\epsilon$ から出発することができる。 $\sigma=E\epsilon$ は、形としてニュートン力学の出発点である $F=m\alpha$ と同じであるから厳密な数学的とり扱いは容易であり、現象そのものの解釈は可逆的である。ところが実際の構造物は力に対して変形は線形ではないし、構造物の究極の破壊現象はあきらかに非可逆的である。この可逆的領域と非可逆的領域との境界は、はなはだ不明確な言葉——安全率——に含ませてしまう。

$\sigma=E\epsilon$ の世界に安住しているかぎり、この世界は楽しいものである。まだ学生時代、工学とか技術とかについて、はつきりとした概念を身につけていなかつた頃は、完成されたように見えた力学大系を学ぶのは興味のつきないものがあつた。幾つかの法則、数学的な表現でまとめ上げられた数式、一つ高次の概念であるエネルギー、与えられた問題の解の一意性……。ところが、いいかげんなれてくると問題を一つ一つ解いてゆくのが面倒になつてきた。構造力学にしろ、鉄筋コンクリートの設計理論にしろ、*Mathematische Spielen* を勞すれば解けるさ、と悟つたような気持になると、いままで興味があつ

た対称がにわかにつまらぬ物に見えてきたものである。その悟りというのは抽象的である。「構造力学の出発点を $\sigma=E\epsilon$ に取れば、弾性体はポテンシャルの場である。この場を空間座標に考えれば、 n 次元の擬似 (Affine) 空間である。あらゆる変形は力に対して線形であり解の一意性は保証される」。

理論は適用を見出さないかぎり、工学においてその存在意義を失なう。構造力学が実際の設計に応用する方向に向う道を見出すことが、理論の確立の次に重要な位置を示してくる。これは橋梁の設計計算に実際に使われるものである。構造力学が設計という技術の問題に立帰つてくるときに材料力学が論議される。材料力学は、非可逆的性質をも含めて材料の性質を知る科学であるから、設計の基準を可逆的な現象以内に収めるのを目的とすれば弾性設計と呼ばれ、究極の破壊現場に着目すれば極限設計と呼ばれてくる。その中間は実際にはなんらかの簡単な置きかえて弾性設計に含める便法が取られている。そして弾性設計に対しては許容応力が定義され極限設計に対しては安全率が論議されるのである。

4. 許容応力と安全率

橋梁に加わる力、これは荷重と呼ばれているが、橋梁のいかなる部分にも破壊を生じないためには考えられる最危険の状態においても、応力がある限界を越えることが許されない。これを許容応力の定義と考えてもよいであろう。あいまいなのは最危険状態の仮定に含まれてくる。そもそも荷重という定義で、一番簡明なものは死荷重 (自重) だけであり、自動車の重さ、地震力、風の力、ときには恐るべき破壊力を持つ群集などに、どれだけの予測を与えるかは不可能なように思える。設計計算に必要なものは、なるべく簡明なものがほしい。道路協会制定の示方書はこの意味で重要である。しかし例えば活荷重を 5 t/m の線荷重と 350 kg/m^2 の等布荷重と定義した瞬間に荷重の実体は失なわれ、机上で数値が論じられ、計算されて最終的に提出された値が、絶対的価値を持つような錯覚を与える危険を含んでいる。

許容応力を決定する根拠も、実のところは不明確である。例えば SS 41 の許容引張応力度は 1300 kg/cm^2 となつている。これはくり返し荷重にもなる材料の疲労限界を基準としているが、静的に加わる力に対しては、降伏点まで約 2、破壊までは約 3 の安全率を持つている。許容圧縮応力度と安全率との関係は、圧縮と不可避の座屈現象が含まれてさらに面倒になる。長柱の座屈実験の結果から見て、圧縮材の許容応力は細長比の広い範囲にわたつて破壊に対する安全率が 3~3.5 程度になるように定まつている。すなわち、許容応力の定義はごく常識的な解釈に従うものとするれば、破壊に対しては作用する力が、何倍かになるときの倍率をいうことになる。

さて現在の橋梁設計では、計算の必要上から許容応力に重点が置かれている。そして死荷重、自動車等の活荷重を主たる荷重量と考えて、この荷重状態での最危険を予想し、応力がある許容の値を越えることは原則として避ける。温度変化とか、地震、風、その他の力は二義的に見て、すべてを含めた最危険の状態を仮定するときには、許容値を何割か増加させた値を越えないことにしているようである。

許容応力のみを与えて構造物を設計することの不合理性は、構造物そのものの究極の破壊に対する安全率に明確さを欠く短所が生じてくる。図-1 に示すグラフを例

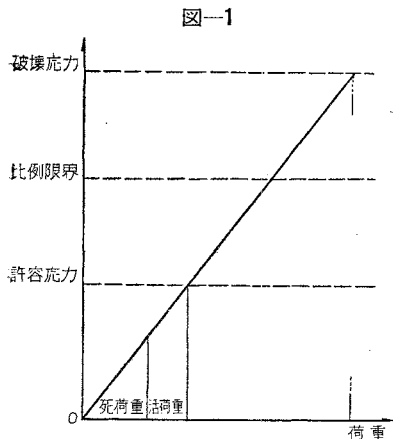


図-1

に説明してみよう。縦軸にはある部材の実応力を与え、横軸に荷重の大きさを取ると直線の傾斜は部材の丈夫さを示す一つの尺度になる。普通の計算では死荷重+活荷重のときに許容応力になるように設計を行ったときが合理的といわれる一つの目安になる。これは死荷重+活荷重の大きさに対しては破壊に3程度の安全率となつている。この場合の安全率は、活荷重の大きさが3倍になつたときに破壊を生ずるという意味は失なわれている。死荷重分が存在するかぎり、活荷重分の増加に対しては3以上の安全率を持つことになる。

一つの矛盾は、死荷重分の小さい小橋梁と、死荷重が大きな大橋梁とでは活荷重に対する許容能力が異なり、軽い橋梁ほど破損しやすいことの原因に気がつけることから解決しなければなるまい。

さらに重要な問題がPS工法に起つてくる。PS工法とは、死荷重応力を軽減させるように付加的な力を加える工法という広い意味に解釈しておこう。よく知られているのがPSコンクリート工法であるが、アーチの応力調整や、Dischingerが提唱している鋼構造物のPS工法までも含まれる。このような施工では、図-2は示すグラフで荷重と応力との関係を説明することができる。死荷重による応力は、応力調整作用でA点からB点まで下げられる。活荷重が最危険の状態に作用したときの応力は、OAの傾斜とほぼ同じ傾きでB点からC点に達する。ABCの3点をどのくらいの応力に保つかで種々の組み合わせが得られるが、一般にはACのいずれかを許容値に押

えている。

鋼構造では、B点が座標軸よりも下にくることも許されるが、コンクリート構造ではある限度の存在するとは判断できるであろう。BCを結ぶ直線の上限を破壊点Dとすると、活荷重の増

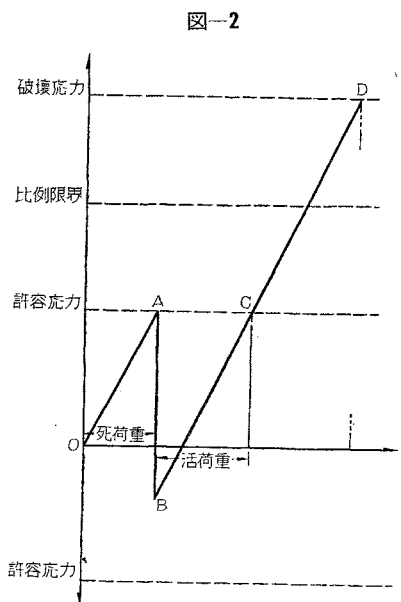


図-2

加で破壊を生ずると定義した安全率は、 $\overline{BD}/\overline{BC}$ で得られるであろう。すなわち、見掛け上の耐荷力は死荷重が減少したのと同じ考えになり、図-1に示した耐荷力の直線と同じようにOCの延長にはならない。このことからすぐに安全率がPS工法では低くなると判断を下すのは早計である。一つの概念の出發を考へて判断を下さないと、ときに言葉だけの遊びになるし、始めの意図が失なわれるという例にあげたにすぎない。探せばこのような矛盾はいくらでもあるであろう。われわれはこのようなことにも、もつと合理的な判断を下すように討論を開くべきではなからうか。

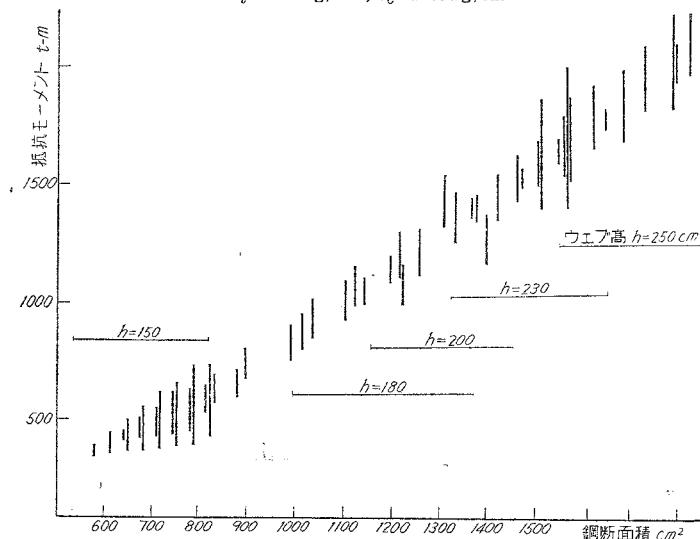
5. 合理性の追究

戦後、橋梁の設計はむづかしくなつた。やたらに難解な数式が並び、設計計算書の中に、大上段に振りかぶつた理論式が展開されたりする。特殊な設計は例外としても、設計そのものに理論を持ち込むのは好ましくない。設計で最後に物をいうのは図面である。設計の理論の結果だけが必要である。理論を数値化、またはグラフに表わすのがどれほど重要であり役に立つかは、身にしみてわれわれは感じている。

われわれは、進歩にばかり夢中になつて大事なことを忘れ去つていっているのではなからうか。技術は積み重ねの上に生まれるし進歩もするというを……。例えば、何百となく設計されたであろう単純な、プレートガードーにしろ、一つの断面が決定される前には、幾つかの無駄な計算が先行していたはずである。無駄な計算と思われたものが、実は貴重な経験であるということに気がつければ、ここに始めて積み重ねの重要性がわかつてくる。

図-3 箱桁断面の相関表

$\sigma_t = 1300 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_c = 1200 \text{ kg/cm}^2$



例を挙げよう。図-3のグラフは、ある設計計算で何度も断面を仮定し直して、断面積と抵抗モーメントを求めたものを、その計算とともに保存し、後にこれらをグラフに書いたものである。許容圧縮応力で決まる抵抗モーメントと、同じく許容引張応力で決まる抵抗モーメントとを同じグラフ上に2点として与え、これを結んだ線分を示してある。設計モーメントは、この線分より下にこなければならぬから、線分の長さが短いほど合理的な断面といえるであろう。合理性はこのような部分からも生まれてくる。この統計的な結果から、さらに支間と鋼重に関する類推を得て、これが実際計算結果と一致するのを確かめることができた。

6. 再び美しさを求めて

設計は技術に属する。ゆえに主観的であると先に述べておいた。同じ条件で合理性と経済性とを目標に三人の人が別個に設計した所で、得られた結果が寸分異ならないものが起れば奇蹟である。合理性を追究しながら三人三様のものができる所に設計というものの生命がある。

橋梁に要求されている要素が大別して二つある。一つは、それを利用する本来の目的にあつて実用性と称することができよう。製作、架設も実用性から判断される。橋は道路橋の場合は道路の一部であつて、ここに橋が存在していると意識させてはならない。もう一つの要素は橋の美的要素である。この要素は橋を意識させなければならない。相反するように見える二つの要素をたくみに一つにまとめるのが橋梁の設計者の持つ夢である。

力学的に不合理がない形は、それ自身美しさを持つて

いる。逆にどこかに無理な設計があれば、何か不完全な、不自然なものを感じさせることがある。アーチの軸線のように、いかなる高等曲線も、死荷重によつて曲げモーメントを生じないように軸線の形を決めるのは近似に過ぎないことを知るであろう。自然の中に含まれた曲線の美に対応するために、ときには、ぼかぼかしく見える空想を楽しむのもよいであろう。始めに夢があるといつた。美しさを求める技術者は、たまには突飛な設計でもしてみたいと思いませんか——例えば Paolo Soleri のデザインのような橋を(口絵写真参照)。

図-4 Palolo Soleri 設計によるロング スパン コンクリート橋

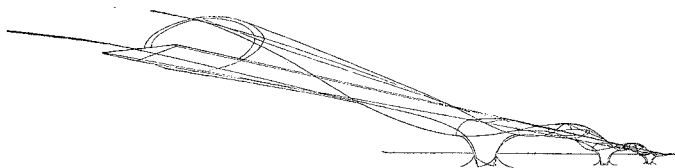


写真-1 同上 側面図



写真-2 同上 上面図

