

構造物の設計はいかにあるべきか

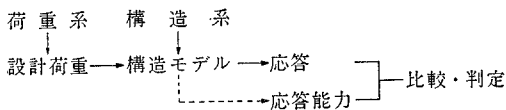
堀 井 健 一 郎*

1. ま え が き

土木構造物の特徴を考えてみると、ただちに思い浮んでくることは、長大なものが多いこと、使用期間の長いこと、破壊すると影響が大きいことなどである。また、それを設計するという立場からみると、荷重として考慮すべきものの中に、天然現象もしくはそれに類する現象が含まれていること、使用材料の中に性質の不明確な、あるいは不確定なものを含まざるを得ないこと、構造物と外界との境界が不明瞭なものがあることなどを特質としてあげることができる。

これらは、いずれも設計を困難にする要因となるものばかりである。そしてこれらの要因こそ、土木構造物の設計は、いかにあるべきかを論ずるための原点となるものであると考えられる。

一般に構造物設計の標準的形式は、次のように示される。



ここに荷重系というのは、構造物の機能にとって不利と考えられるような変化を発生させる原因であって、自重・外力・慣性力などのように力で表現されるものもとより、変位・温度変化・地盤の変状のようなものも対象となる。そして、これらの事象を整理して、実際に構造物の設計に使えるように設定したものを設計荷重と呼ぶことにする。また構造系というのは、構造物の構成材料・形式・規模などを内容とするもので、設計解析にあたっては、系の広がりや組成について、適当なモデル化を必要とするものである。したがって、実際の設計作業を行なうときには、荷重系は設計荷重に、構造系は構造モデルに置き換えられていることになる。

設定された設計荷重を、仮定した構造モデルに作用させて応答を求める。得られた応答を構造モデルに固有の応答能力と比較して、その適否を判定する。そして、不適当ならば構造モデルを修正し、かつそれに伴う荷重の

修正などを施して、再び応答を求める。このような手順を、適当な応答が得られるまで、繰返し行なうことになる。もちろん、応答能力の中には所定の安全度が確保されていることが必要である。

このような方式で行なわれる循環作業は、要求された応答能力をもつ構造物をつくるという目標に向かって取れんずるように行なうことが必要である。荷重を構造に作用させて応答を求める仕事が構造解析と呼ばれるものであり、そして解析されるべき構造モデルを仮定したり、あるいは応答と仮定された応答能力とを比較しながら、構造を修正してゆく仕事が、その前後に存在する。

土木構造物の設計においては、荷重系の評価および設計荷重の設定にあたって問題がある。構造系の仮定および構造モデルの想定に関しては高度の工学的判断を要求される。そして、目標とする構造物の応答能力をどのように決定するかという問題に関しては、複雑な要素がからみあっている。

2. 設計荷重

構造物をそこにつくる動機およびその構造物に要求される機能から荷重系が定まる。その場合、荷重系に取り込まれてくる各種の荷重の内容には、人工的に制御可能なものと、人工的には制御することができないものがある。ただし、実際に表われる荷重は、いろいろな制約があって、かりに制御が可能であるとはいっても、全面的に制御できる場合は少なく、むしろある属性に関してあるいはある程度まで、制御できるという場合が多い。そして、人工的制御が可能である度合いが大きい荷重ほど問題は少ないといえる。

車両・飛行機・船舶・水門・ビルディング・タワー・橋梁・ダム・トンネル・地中埋設管路などの中で、それらについての荷重系を上述のような見方で観察してみると、設計にあたって対象とすべき荷重系を人工的に制御しにくいものは、例外なく土木分野で取扱うことになっていることがわかる。構造解析の手法は、これらに共通であることを考えあわせると、われわれが解決しなければならない問題の一つとして、荷重の評価があることがわかる。土木構造物はその環境に定着しており、そこに

* 正会員 早稲田大学教授 理工学部土木工学科

発生すると予想される荷重を選択することなしに受け入れなければならない。その場合、問題となる荷重の多くは、その構造物をそこにつくる動機から定まる荷重ではなく、その構造物に要求される機能を維持してゆくために考慮すべき荷重である。すなわち、その構造物の耐用期間中に何がおこるかを予測し、必要と認めたものについては設計上なんらかの配慮をしておかなければならない。しかし、土木構造物に要求される耐用年数は、環境条件の変化を確定的に予測しうる期間を上回るのが普通であり、とくに最近は人工による環境条件の変化もはげしくなっている。

土木構造物が受ける荷重の中で、最も典型的なものは天然現象がもたらす荷重である。地震・風・洪水・高潮・地すべり・地盤沈下・河床移動・波浪・なだれ・土砂崩れ・凍上・温度変化・膨張性地山などが荷重系に入ってくる。これらに関しては、まずその構造物の立地条件からみて、どのようなものを荷重として選択するかの判断が必要である。その場合、そこに構造物を築造することに関連して、二次的に誘発されるものもあることを忘れてはならない。次に、これらの現象を設計荷重として評価する問題がある。とくに、これらの量的評価にあたっては予想される最大値をとることが理想である。しかし、現実には土木構造物は社会生活の物理的基盤を形成する役割を負わされており、それ自身が直接利潤を生むという性格のものではないので、建設および維持における経済性が強く要請される。この相反する要求をどこで妥協させるかが問題である。現象の中には、このような妥協の余地のないものもあって、構造物をそこにつくる動機すら否定される場合もある。すなわち、計画の再検討を要する場合である。自然のエネルギーは巨大であってそれにまともに立ち向うのは得策でない場合も多い。現象があるからといって、常にそれを荷重とするのではなく、相手によっては荷重にしない方向で対応することも有効であり、また、それが唯一の解決策である場合もある。

人工的原因に由来する環境変化に対応するためには、構造物の耐用期間をスケールとした長期展望のもとに、関連各方面と密接な情報交換を行ないながら荷重系を想定することが必要である。

結論として、まず、荷重系の実態を正確に把握することが先決問題であることはいままでもない。次に、それを設計に用いる態度であるが、定量化しにくいものを確率論的過程を経て定量化している場合が多いので、その適用にあたっては高度の工学的判断が必要である。天然現象のみならず、道路橋の活荷重などのように、これに準ずるものも含めて、慣習的に定められた設計荷重を絶対視することは、往々にして危険な場合があるから注意

しなければならない。

3. 構造系の想定

土木構造物は地盤上に定置されているため、構造系に地盤が関与してくるのが特徴である。さらにわが国では地震という現象があり、常識的に考えられる構造物の耐用期間と比較して、破壊の影響を及ぼすと予想される地震に見舞われる確率はきわめて高いという事情がある。地盤という、境界が不明瞭なうえ構成材料の性質が多様かつ不明確な領域と、構造物とのかかわり合いを構造系の仮定のうで、どのように考えるかという問題は、土木構造の中心的課題である。

まず、一般論としての構造系の仮定について考えてみる。構造物を計画した動機・目的にそって、最も能率の良い構造系を仮定することは当然である。同時に耐久性ならびに美観に対する配慮もなされる。能率の良い構造系とは、期待される応答能力を最も経済的に得られるような構造系であって、荷重系のあり方と関連して決定されるべきものである。ここで注意を喚起したいのは、構造系を仮定する際に対象として考えるものは設計荷重ではなくて、そのもとになっている荷重系でなければならないことである。本来、設計荷重は構造系が定まらなければ設定し得ないものである。一例をあげれば、道路橋の設計荷重として T 荷重と L 荷重とがある。荷重系に忠実な T 荷重に対し、L 荷重は限定された範囲内の構造系を想定して求めた等価換算荷重であるから、どのような構造系に適用してもよいというものではない。一般に荷重系が構造系に対し、独立しているような場合には問題が少ないが、独立していない場合には注意を要する。また、荷重系と構造系との相関関係は、構造系の想定のみによって変化する。アーチダムとそれを支持する岩盤とを例にとれば、構造系の範囲をダムの堤体だけに限定した場合には、その境界においてダムに作用する反力は荷重系に属し、その反作用として、岩盤に生ずる変形もまたダムに対する荷重系になる。しかし、ダムと岩盤とを一体の構造系と考えれば、境界に存在する応力やひずみは応答であって荷重系ではなくなる。構造系を岩盤から分離しても、岩盤のひずみを考慮する以上、荷重系は構造系と独立でなくなる。分離しないで取扱うことにすれば荷重系が構造系から独立する。そして、いずれが適切かといえば、荷重系を独立させるような構造系を仮定する方向が望ましい。土木構造物では荷重系に不確定要素が多いので、これを分離して取扱えるようにしないと、構造系自身のもっている不確定要素とあいまって、収拾がつかなくなるおそれがある。境界条件を人工的に指定し得ないようなものが土木構造物には多いが

これらに関して共通にいえる事柄である。

なお、地盤と密着しているという土木構造物特有の性格に対し、土質工学・岩盤力学などの進歩が設計上大きな意義をもっていることはいうまでもないが、それとともに有限要素法を代表例とする解析手段の進歩が威力を発揮する。広範囲にわたって材料特性をカバーし、多様な構造系に適用しうる解析法の開発は、結局、構造系の想定自由度を大きくし、それだけ合理性の高い構造物の設計を可能にすることになる。

構造系を解析の対象とすべき構造モデルに置換する際には、本来の構造系の作用を可能なかぎり忠実にモデル化することが必要である。その場合、モデル化に際して設けた主として計算上の仮定事項を、具体的な構造設計上で、どの程度まで実現しうるかの見通しがなければならない。それが期待できないときは、その仮定事項は削除し、構造モデルをつくりかえる必要がある。仮定したモデルに固執することは、設計の合理化にとって支障となる。

4. む す び

荷重には、力によって表現されるものと変位によって表現されるものがある。応答もまた、力として評価されるものと変位あるいは変形として評価されるものがある。これらの応答を仮定した構造モデルの応答能力と比較しながら、最適値に近づけていくのが普通の設計の手法である。いま、荷重が力と与えられる場合を考えると、応答と比較すべき応答能力は、表現はどうかで結局は荷重と同質の力と示される。そして、それらと比較すれば安全度を定量的に表現することが可能である。その場合、変位あるいは変形応答能力が不足であれば、それを目標にモデルを修正すればよく、そのために力に対する応答能力を低下させない方法は常に存在する。これに対し、荷重が変位と与えられる場合には、変位が構造物によって変換されて応答としての力と、変位あるいは変形とを生ずる。この場合、構造物の応答能力を荷重と同質の変位で表現することは無意味である。荷重としての変位は強制変位である場合が多く、それに対しては、変位応答能力よりも変位追随能力のほうが重要であるか

らである。変位追随能力は構造物の剛性が低いほど高いから、その意味では剛性のない構造物が最も強いことになる。石積みや石造アーチが強制変位の代表例である地震に強い理由はここにもある。しかし、構造物であるからには普通の場合、無制限の変位や変形は許容されない。このとき、許容される変位の限界内に入るように設計するという事は不可能である。このような場合には荷重としての変位の影響を減少するか、または、まったく影響を受けないような構造系を考える必要がある。地震に対しては免震構造といわれるものがそれに該当する。あるいは構造系の中に調整可能な部分を入れておいて、常に応答変位を許容限度内におさまるように調整するという方法もある。

荷重系が力と与えられる例としては、自重・活荷重・風の静的影響・水圧・土圧・波圧・氷圧・浮力・揚圧力・管路などの内圧・震度法が適用できる場合の地震による慣性力、物体の衝突力などがある。これらの中には量的評価の困難なものもあるが、その点が解決すれば設計上の問題は少ない。これに対し荷重が変位と与えられるようなもの、すなわち、外的不静定構造の支点の相対変位あるいは不同沈下、地震の影響、温度変化の影響、凍上、地盤の圧密、地山の膨張などに対する設計は、これらがほとんど天然現象であることとあいまって、解決すべき問題を多く残している。これらに対しては構造物の安全度を定量的に定めることがむずかしいので、合理的な設計は困難である場合が多い。幸いにも実際の事例では、構造物の目的から定まる荷重には力と表現しうるものが多く、変位で表現される荷重は、ほとんどすべてが構造物の機能を維持するために考慮すべき荷重である。ここに設計上対応しうる余地が、残されているともいえる。すなわち、逃避するという方法も可能になる。たとえば、計画的に弱点を設けておいて、破壊のしかたを指定し、これによって決定的な破壊を防止するとともに、対策を容易にするなどの処置が考えられる。予期しない破壊は困るが、計画的に構造系が変わるようにすることは設計の一手段であって、たとえ部分的破壊による経済的損失があっても、これにより人命の損失が防げるならば、設計としては成功であると思われる。

土木学会投稿の手引き

●土木学会投稿の手引き特別小委員会・編集●

B5・40 ページ 350 円 (〒 70 円)

1. はじめに
2. 土木学会誌・土木学会論文報告集投稿要項解説
3. 土木学会投稿原稿の書き方
4. 欧文論文のまとめ方
5. オフセット用原稿の書きかた、など。付録つき