

## 土木における安全性の現況

### 2.1 構造の面からの安全性についての諸問題

伯野元彦\*

#### 1. はじめに

土木技術者が、日常取り扱う値でしかも設計のため決定しなければならないものとしては、実にいろいろなものがある。たとえば、ちょっと考えただけでも次のようになる。

河川関係	河川流量, 水位, 雨量
計画関係	未来の人口, 交通量, 人の行先
構造関係	材料の強度, 外力

これらの量の値は、予想して決めなければならないのであるが、普通それらの量は、交通量のように時々刻々と変動するものであったり、雨量のように予想と大きく狂う可能性のあるものもある。

これらの値を個々の設計者が過去の資料から合理的に定めるのは大変であるから、設計仕様書等で定められている。その定められた値は、過去の経験から、エイヤッと定められたものもあるし、過去のデータを種々検討し、大体の目安に安全を見て、ある割増しをして定めたものもある。その割増しをする係数を「安全率」と呼ぶことは、周知のことであるが、われわれはこの「安全率」という係数を学生時代「無知係数」とも呼ぶと講義で習った記憶があるが、たしかに種々の問題点を含んだものである。本稿では、筆者の専門である構造に例をとり、安全性という言葉をどのように考えたらよいのか、あるいはこの「安全率」を槍玉に上げて、設計者ももっと別の観点から設計計画しなければならないということ

\* 正会員 東京大学助教授, 地震研究所

を提案したいと思う。

#### 2. むかし神様, いま電子計算機

構造設計の分野で、表題のような言葉が設計者間でささやかれ出したのは、もう大分以前のことである。最近では高速電子計算機の普及によって、構造物の応力計算から製図にまでも、計算機が使われるようになってきた。おかげで、以前はとても人力では不可能であったような複雑な計算とか、多くの人が長い期間かけてやっていたような面倒な計算がどしどし実行され、大いに成果をあげている。

設計の発注者側でも、コンサルタントが設計計算書を「電子計算機で計算しましたのですが……」と差し出せば一も二もなく通過させるらしい。電子計算機で計算してみると……などといわれると、何となくその結果が確かなような気がしてくるから不思議である。

いま、構造物に限って言えば、構造物には複雑な力が作用しているのが普通であるし、その力がどういう組合せになり、どういう値になったとき破壊が起こるのか、予測することは現在でも大変むずかしいことである。そのうえ、でき上がったときには、たしかに大丈夫であった構造物も、長い使用期間中には、いろいろ突発的な変化を受ける。それが地震とか、台風、洪水等のなかなか予想しにくい外力を受けるわけである。現在でもそのような複雑な因子を電算に組み入れることが困難なので、計算結果も昔と丸っきり変ってはいないわけである。結局、構造物の安全性という問題ひとつをとってみても、次のようにいろいろ複雑な要素を解き明かしていかなければならないことになる。

- ① 外力の性質
- ② 構造物構成材料の力学的性質
- ③ 構造全体としての強度
- ④ ①, ②, ③ がわかった上での安全性の検討

#### 3. 安全性を定めるデータの検討

すでに述べたように電子計算機は、必要なデータさえ入れれば、難かしい計算をしてくれ、結果を出してくれ

るわけであるが、必要なデータの精度が結果に大きい影響を及ぼすことは当然である。計算機のあまり普及していない時期には、土木関係の計算は主として計算センターに依頼されていたようであるが、計算センターの所員に、こんなことを聞いたことがある。

“土木屋さんの計算は苦手です。計算機への入力データは流量とか温度とかのように2桁かせいぜい3桁しか精度がないと思われるのが多いのに、計算結果は8桁とかそれ以上の数字を書いて持って行かないとご機嫌が悪い。8桁の数字でダムの厚さを忠実につくとしたら、コンクリートの表面の砂粒一つが落ちてても不合格になってしまうでしょうね”。

つまり、筆者を土木屋とは知らずに言ったことではあるが、われわれには多少耳の痛い点もある。土木で扱う数字の精度を検討してみると、この例のように何をやっているのかわからないような結果になるほど精度の低いことが多い。安全性を高めるためには、まず、その安全性を正確に評価し得なくては話にならないが、そのためには種々のデータの精度という信頼度を高めなければならないし、そのためには現在よりはるかに精力的に多くの調査、研究を行なっていかなければならない。大気の中の複雑な外力を突破し、困難な燃料の制御までして月へ人間が降り立つ時代であるから、土木の対象は土、コンクリートとか、雨量、将来の経済の動向とか、あまり複雑すぎて正確にとらえるには、困難なものばかりなんだから、安全性の評価といっても難かしく、とても無理だよと言ってすましておられない。

以下、構造物の設計という点に例をとって、各種データの性質を調べてみよう。

### (1) 外力の性質

死荷重については問題ないから、活荷重について考えると、台風、地震、交通荷重等々あるが、地震荷重に例をとって見ると、その強さ、頻度等が構造物にとっては問題となるであろう。しかし、「地震の強さ」という言葉は、構造物が壊れないよう設計するというわれわれの目的からすると非常にあいまいな言葉であって、通常は地震の最大加速度がとられているようであるが、先日、新聞紙上を賑わした松代群発地震では、過去のどれよりも大きい地震加速度が記録として得られてはいるが、被害としては人口の希薄さを考慮に入れてもはるかに少ない。このような例からも知られるように、地震が構造物を壊すという現象には、地震の物理量のどれが主役を演じているのか、加速度なのか、速度なのか、変位か、あるいは継続時間か、地震の持つ振動数か、共振現象か、ということさえまだはっきり解明されているとは言えない状態である。

次に、その地震の強さとして何をとればよいかかわかっても、構造物の建設地点に将来襲ってくる地震の強さと頻度を推定することも容易なことではない。もっとも、地震の強さを推定するのがむずかしいと言っても、地震の大きさには上限があることはもちろんであって、地球がその地震のために真二つに割れてしまうような大きさのものは起り得ないことは証明されている。というのは、地震現象は地殻中に何らかの原因でひずみエネルギーが貯まり、その部分のひずみなり応力なりが大きくなり過ぎて破壊してしまう結果おこるわけであるから、地殻の強度を仮定するならば、貯めうる最大エネルギーは定まってしまい、その値が地震のマグニチュードにして9程度と計算されている。それでは、全国に建設される構造物はすべて、その最大規模の地震に対して安全なようにしておけばよい訳であるが、それは大変不経済な設計となってしまふ。そこで結局、妥協案として通常は、過去の地震に関する記録を整理して、その地点の将来の地震を占うという方法がとられているが、これとても新潟地震の例でもわかるように、過去の資料では、新潟地方にあれだけ規模の大きい地震がくる可能性を示すものはなかったといってよく、地震が起ったのちに初めて、そのような地震が起ったこともあながち無理とばかりは言えないような過去の地震活動を見つけることができたというのが本当のところであろう。

このように外力の性質に関しても、気が遠くなるほどの未解決の点があることは、台風、洪水など何をとっても同様と言える。

### (2) 構造物構成材料の破壊強度

土木で取り扱う構造物材料は多岐にわたり、土、コンクリート、鉄、アスファルト、合成樹脂等々、枚挙にいとまがない。そして、それぞれ特有の力学的性質を持っており、しかもその破壊性状となると、通常のヤング率などに比べれば、はるかに複雑である。そして外力の性質に対応して破壊強度も異なってくるという性質も持っているから現象をますます複雑にしている。たとえば、降伏応力以下の応力が作用している状態であれば、通常の構造物材料が破壊することはあり得ないはずであるが、疲労破壊という曲者もあり、あるいは応力集中によって思わぬ応力が生じていたり、水を含んだ砂質土の場合などでは、振動力には非常に弱くなるという性質があったり、そうかといって、動荷重にはすべて弱くなるのかと思うと、そうでもなく、衝撃力に対しては逆に強くなる場合もあるなど、まさに複雑の一語に尽きる。

余談ではあるが、この破壊という現象が非常に予測が難しいことは、次のようなことを考えれば、想像でき

るであろう。いま鋼供試体を引張って壊す試験をすることにしよう。供試体の表面仕上げは精度よく、その他の点でも最高の供試体だったと仮定しよう。

次の質問を読者に与えたとき、読者は正確にお答えになる自信があるだろうか。

- ① この供試体の破断強度を  $\text{kg}/\text{cm}^2$  の単位まで正確に当てなさい。
- ② 供試体がもうほとんど破壊しかかった時点で、あと  $\bigcirc.\bigcirc$  秒で切れるだろうか。

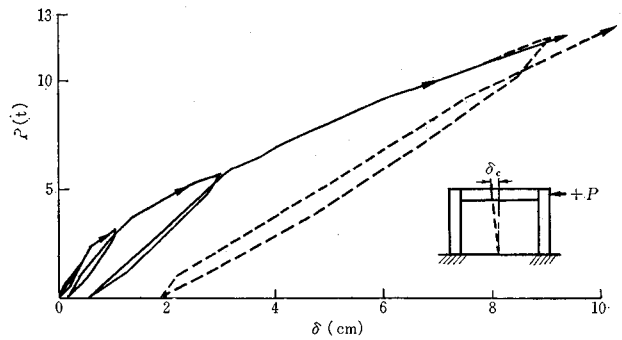
この質問に正確に答える人は、この世に存在しないだろうし、答えが当たった人がいても、それはあくまで偶然に当たりにすぎないだろう。

最近、地震予知ということがジャーナリズムにはなばなく取り上げられているが、地震の原因が地殻中での何らかの破壊現象であるとするならば、地表面に現われた変形その他を観測して、それから地震を予知することは精度を上げるためには、なみなみならぬ努力が必要であることも、以上述べた材料の破壊現象の性質を知れば、納得できるというものである。

同じようなことであるが、筆者は、どこかの研究所にコンクリートの供試体作りの名人がいて、上司が、 $300 \text{ kg}/\text{cm}^2$  の供試体をつくって欲しいというとき、実際に試験した場合、 $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$  とは違わない供試体をつくることを聞いたことがある。その代り、その名人の供試体をつくる時の注意は大変なもので、キャッピングを行なうとき、上下面を平行にするため、 $0$  コンマ数ミリの誤差も許さないと、試験前には、キャッピングの表面をツルツルに磨き上げるとか、いろいろなことを聞いてさすがと感心したものである。しかし、今考えると、「 $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$  とは違わない」という部分は全くの誇張ではないかと思う。というのは、次のような理由からだ。

一般に、鋼、コンクリート、土、何の材料でも破壊させる場合には、材料の寸法、材質、力のかけ方、その他考えられる条件をだきるでけ一定に保っても、破壊強度の測定値は、実験ごとにひどいばらつきを示すものである。測定値が2倍にも3倍にもちがってあらわれることも珍しくない。従って実際の構造物では、材質、施工の面から実験室内におけるより、より以上のばらつきが現われることもあろう。ところで、通常の試験ではそれに影響をおよぼすと考えられる条件を一定に保てば一定の値が得られるのは当然と考えられがちであるが、それにもかかわらず、結果には、あるばらつきが生じる。一般には、これは実験全体に注意が足りないからであると上役に叱られるのがおちであるが、このような破壊強度の

図一 鉄筋コンクリートラーメンの「力～変位」関係  
(武藤 清：“構造物の強度と変形”による)



ばらつきの原因として、次の2種が考えられる。

第一は、材料の中の目に見えないちょっとした割れ目とか不均一さ等によって強度が支配されてしまうため。

第二は、材料の製作、実験誤差等によるものである。

第二の原因はいくらでも減少させることができるが、第一の原因はなかなか取り除くことができない。従って第一の原因による強度のばらつきは、材料に本質的に備わっているものであって、普通どうすることもできないものである。ところが、図一に示すような同一材料の力～変位曲線の微小変形の部分などは、同一材料ならば、注意ぶかく実験しさえすれば大差ない結果が得られ、従ってヤング係数  $E$  の値などは、変動の少ないもののひとつである。

このように、材料の物理的性質ひとつをとってみても、変動の大きいものと、小さいものがあり、残念ながら安全率とか安全性とかに関連のある値は本質的にばらつきのひどいものが多い。

### (3) 構造全体としての強度

構造物を構成している材料(土とかコンクリート)の外力の性質に対応する強度が知られたにしても、それだけから構造物全体としての強度が簡単に推定できるわけではない。構造物の形状による破壊性状の多様性というものがある。構造物の破壊強度の推定はますます困難となる。

現在、比較的簡単な桁橋などについて極限設計的考え方による調査研究が進んでいるようであるが、これとても、材料が鋼のように品質が管理されやすい場合で、しかも構造的にも最も簡単なケースにおいて解析と実際とが実用上十分な範囲で合致するということであろう。より複雑な構造に適用するには、なおいっそうの研究と熱意が必要である。

以上ながながと述べたように、構造物の安全性に問題

をしぼっても、はっきりさせなければならぬ問題はあまりにも多いし、また本質的に構造強度とか、地震力とか確定した値として求め得ない量も多い。そのため、「安全率」という係数が導入されているわけではあるが、この値は、あまりにも経験的な定め方がなされているように思えてならない。もちろん最後には経験的に安全であったという厳然たる事実をより所としなければならないであろうが、現在では、その専門の研究者は別として、設計にたずさわっておられる方々は、以上述べたような複雑な対象を解明する方向に努力を向けられるよりも、従来定められた係数に従っている方が、過去に無事故という実績があるのだから、構造的にも安全であるという考え方に安住しておられるように思えてならない。

しかし現在の方法では「その構造物が安全である」ということは言えても、「どの程度に安全であるか」ということはわからない。適当な例ではないが、現代は戦争というような人間の心理、国の経済、社会体制その他もろもろの因子が影響を及ぼし、それこそ複雑きわまりない現象もある程度数量化し、計算機に計算させて結論らしきものを出す時代である。

航空機を例に取っても、軽量化と安全性という両立し難い至上命令に対して、土木におけると同様な困難な問題を次々に解決し、満足できる水準に到達していることを考えると、土木においても頑張らなければならないと思うのは筆者一人ではないだろう。

もちろん、以上あげた例はいずれも軍事に関連した分野であって、その分野では、国家が総力をあげて取り組み、予算も多く人材も結集するため成し遂げられるのだという反論もあることだろう。しかし、われわれ土木の分野も現在は空前のブームである。予算にしても建設業界において投下される資本は将来とも莫大な額に達するであろうし、人材にしても、多くの優秀な学生が土木工学科を目ざして集っていることをみても意を強くする。土木工学科に優秀な学生と言えば、全く時代も変わったものだと思うにはいられない。筆者などの年代の者が土木工学科に進学するときには、学業成績が大いに物を言うため、物理とか電気などの優秀学生の集まる学科と鉱山、造船、土木など人柄は魅力的だけれど、成績だけはどうもという学生が「こと志と異った」といった顔をして入る学科とがはっきり分かれていたのだが、現在では、土木工学科は、トップクラスの成績の学生が集まるようになったと聞いて驚いているわけである。

いずれにしても、現在の土木は、優秀な人材あり、豊富な資金ありといったアメリカの軍事産業にも劣らない

状態にあるのだから、ここで今までの殻を破って少しでも合理的な設計という方式に大きく足を踏み出すべきときにきていると思う。

#### 4. 少しでも合理的な設計をするために……

前にも述べたように、構造物なり、何なりの安全性を論ずるためには、何か、その安全性なるものを数値的に出さなければ、どの程度安全かはわからないわけであるが、現在その種の数値と一般に思われている安全率は、その値の出してきたものが、ちょっとはっきりしない。

最近、発展を続けている情報理論によれば、人から人へ意志を伝えるということさえも情報量として数値化されている。土木の対象となる種々の量も、精力的な研究の後には、そのすべてが決して数値化し得ないものではない。そしてその数値化するにあたって、構造強度とか、交通量とか、洪水流量とかのように、本質的に確率的数値としてしか求め得ないものもある。そのような値にもとづき設計し、安全性を確かめなければならないのが言わば技術者というものだから、その設計に至る手法を現在の方法から確率変数を取り扱うという方法に移行させていかなければならないのではなからうか。

そのような手法は、構造物の軽量化が極度に要求される航空機について活発であり、信頼性 (Reliability) 工学として一部門をなしている。土木の分野においては、Freudenthal 教授が最初に提案をし、篠塚教授その他がアメリカにおいて盛んな活躍をしておられる。日本においても神戸大学の西村教授などの業績がみられる。しかしこの方法も、結局は、構造強度とか交通量とかの統計的確率的性質を必要とするため、その量について多くのデータを集め、その統計的性質を求めて、初めて効果を発揮するものなのである。

結局、結論的に言えることは、土木の分野における安全性を検討するためには、多くの対象とする変数の安全性に関係する基本的性質・数値を求めなければならないが、現在では、それらについての知識があまりにも貧弱であり、また設計者は、あまりにも設計に追われ忙しかったため、その基本的調査、研究を行なう余裕がなく、研究者は資金的に、また研究者の数が少ないという点で隘路があり、行きづまりを見せているが、土木ブームの今こそ、それらの隘路をのり越えて、問題解決に進むべきときと考える。