

土構造物の安全性評価における土質力学の役割

— 研究者の反省 —

松 尾 稔**

1. はじめに

土木構造物の設計や施工において、“安全性”とか“安全率”という言葉を用いて、われわれはしばしば耳にするし、また一般に、いとも簡単な調子でこの用語を用いてきたきらいがあるのではないだろうか。筆者自身、過去に何度か“この設計における安全率はいくぐらいにしておけばよいか”、という質問を受け、筆者の無知から生ずる平気さでもって、実に無責任な応答をしていた。いまふり返り、反省してみると、まことに汗顔のいたりである。残念ながら現在においてもそうであるが、当時、上記の問に対して答える資格は、筆者にはまったくなかった。“安全性”とか“安全率”というのはどのようなものだろうか？ 最近、とくに安全性の問題に対する関心が高まってきているようであるが、ここでは、大学における一研究者が数年来抱き続けてきた反省として、以下の拙文をとりまとめることを許していただき、批判をいただきたいと思う。

“この盛土の安全率はいくぐらいにしておけばよいか？”という問に対して筆者は、習慣的になった平気さと不遜さで、“1.3 か 1.4 ぐらいでいいのではないか”と答えたことが、過去に何度かあった。ほとんどの場合それは議論にもならずそれきりで終わってしまったが、たまたま、若い実務家の方から“何故いいのか？”と聞かれたことが一度あった。これは筆者にとって、ショッキングな質問であったことを告白しなければならない。“大体この程度で、いままで壊れた例も少ないし……”と答えたものの、ほとんど答えらしい答えになっていないことを痛感せざるを得なかった。もしそのとき、“なぜ壊れていないからいいのか？”とさらに突っこんで質問されていたとしたら、筆者には答えるべき確たる考え

はもとより、ごまかすべき言葉すらなかったであろう。この最後の質問を、自分自身に対して向けることが、筆者にとってこの種の問題に足を踏入れた最初のことであった。

古代エジプトにおいても、現在日本の東京周辺においても、もしかりに、同じ盛土が同じ力学条件のもとに構築されたとしたら、その力学的な意味での破壊の可能性（裏返していえば壊れないという信頼度）は同一になるであろう。しかしながら、その信頼度の有する社会的意味がまったく異なるであろうことは、直観に訴えるまでもない。すなわち構造物に対する信頼度とか、現在使われている安全率などは、力学の範疇にだけ関連をもつ“力学の内部問題”ではまったくない、ということである。この点については後に述べるとして、次に答えることのできなかった質問をもう一つ書いておきたい。それは土質調査の規模に関することである。“土質調査とか土質試験というのは泥沼のようなものだ。一体、何を、どれだけやればいいのか？ このような調査や試験をこれだけの規模でやるべきだ、という論理がないのか？ 1億円かけて調査すべきだとする納得のいく論理があるのならそのようにしよう。しかし、1万円ですむものならそれだけにしておきたい”。この問に対して、筆者は一言の返答もできなかったし、従来、“せっかく調査するのだから、もう2、3本ぐらいボーリングをふやしたらどうか”とか、“ついでのことなら、こうこうこういう試験もやっておいたら何かの役にたつかも知れない”などと、臆面もなくいった過去を反省せざるを得なかった。

上述のような問題は、すべて、計画・設計・施工という土俵、すなわち、“力学の問題をその一部に含めたもっと広い土俵の上で取扱われる”、というきわめて当然で、初歩的なことに気づいていなかったためである。公共の福祉、あるいはそのための公共事業の定義はなかなかむずかしい^{*)}。しかしそれにしても、それが壊れることにより、あるいはまた、壊れないまでも著しく機能低下することによって人的・物的な損害を生ぜしめる事

本文は、昭和47年8月25日に行なわれた土木学会中部支部技術講座^{)}の原稿に手を加え、短縮したものである。

**正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部付属土質研究施設

物、とくに公共構造物をつくる場合の、実は最も基本的で重要な命題に対して、自分はあまりにも無頓着に過ぎなかっただろうか？ 無頓着というのが少しいいすぎだとしても、思考の法則性にのっとって、いいかえると、哲学的に十分真剣に考えたことがあっただろうか？ 自分に対するこの問いかけは、工学という分野に席をおく筆者にとって重要な意味をもった。

2. 土質力学の位置づけと設計の立場

過去において、土質力学は土木や建築工事の遂行にあたっての必然に迫られて発展してきたものである。他の多くの工学分野と同様、いわば土臭い、人間生活に密着した地味な分野であり、もともと華やかな、格好の良さを期待できるものではない。土質力学を育て、今日の体系をつくり上げてきたわれわれの先達の多くは、常に現場を直視し、理論と実験とを実際現象との関連の中で位置づけ、かつ設計の有する社会的意味を考究する努力を怠らなかつたと信ずる。ところが、土質力学が応用力学の一分野として発展し、“学問”として体系化されるに伴い、土質力学や土質実験が一種の商品化現象を呈してきたといえいい過ぎだろうか？ 自己の興味と自主的発想からではなく、人から与えられたカリキュラムという名のメニューに従って土質力学を学び、あるいはまた設計指針という名のお墨つきに従って機械的に土質力学を用いる人たちがふえてくればくほど、この傾向が強くなっていくように私には思える。このあたりで、教える方も学ぶ方も、そしてまた用いる方も、偉大であった先達の初心に立ち戻り、土質力学を見直す必要を痛感している人は多いに違いない。

構造物をつくらうとするとき、土質力学はどのようなところに位置づけられ、どのような役割を果すのだろうか？ 多くの土木構造物がそうであるように、公共構造物の場合を例にとって考えてみよう。

“われわれが公共構造物といわれるものをつくるときその目的は一体何だろうか？”いいかえると、“われわれは一体何がしたいのか？”この点について熟考することがまず基本である。すなわち、これは公共構造物をつくらうとする場合、社会の合意のもとに明確な目的意識、具体的な行動目標をもつことが基本であることを示している。そして、その次に、その目標と現状との間のギャップが、どのようなものであるかを調査・分析し、これを把握しなければならない。そのうえで初めて達成しようとする目標のための計画・設計・施工の問題に入るのである。このような認識の中で、技術はどのような位置を占めるのだろうか。いうまでもなく、経済問題を含む社会的ないろいろな願望が上位に位置し、それが技術

の達成目標となるべきである。技術そのものが目標であるわけではなく、全体計画の中で、犠牲を含む社会的要求の下位に技術は位置づけられるべきであろう。そしてこのような連関の中で“技術的な意味での安全性”の問題は考えられなければならない。技術としてのわれわれの土質力学、あるいはその適用も、もちろん例外ではあり得ない。

しからば、土質力学が実際に活躍する“技術的な設計・施工”の立場は、どのようなものであるべきか。一口に公共事業の計画といっても、それには長期的展望にたち、他の種々の計画の目的を自己の計画の手段としてもつような上位の計画から、個々の施設計画にみられるような、いわゆる下位に位置する計画までが、有機的に関連しあっているのである³⁾。土質力学が活躍する場は通常、施設の実施計画といわれる下位の場である。このように下位の技術的設計・施工と呼ぶべき狭い設計分野に限ったとしても、図-1に示すように、そのフィールドは、たとえば土質力学という狭い分野の内部に位置するものではなく、他のもろもろの基礎科学の成果があい関連する集合の場として、一段と高いところに位置するものと考えられる。いいかえると、狭い設計分野に限ったとしても、その場は“土質力学の問題を一部に含めた広い土俵”であり、たとえ舗装のない、小さな小さな道路用盛土であったとしても、設計が土質力学の内部問題たりうることは絶対になのである。その設計が“土質力学の範疇にあり”とするのは、あまりにも不遜であり恐い気さえる。まして一般の土木構造物では何をかいわんやである。その意味では、設計・施工という場は土質力学なら土質力学にとってきびしい現場であり、問題発見の場である。と同時に、このような位置づけに基づいて、目標施設が最善のかたちで達成されるよう、土質力学は活躍しなければならない。ここに、土質力学の工学的な役割がある。これはまた、すべての科学が、必ず“現場”をもっていることを意味している。実践とい

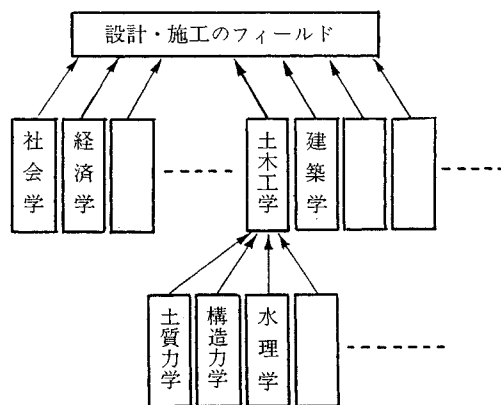


図-1 土質力学の位置

う現場で有効性を発揮したとき、はじめて、その真理性を獲得したことになる⁹⁾ことはいうまでもない。この点 は実用学としての工学の分野では、とくに基本的に重要なこととして、認識されなければならない。

上述のような立場から設計や施工という分野で土質力学をながめるとしても、その中には多くの不確実性を内包していることを認めざるを得ない。しかし、そうであるからといって、設計・施工をしないでおくわけにはいかない。たとえば、トンネル土圧については、まだまだわからない点が多いからといって、トンネルの掘削を回避するわけにはいかないように。多くの不確実性を含みながらも、これらの分野においては、現時点でのベストが尽されなければならない。この観点が、設計・施工の分野における基本的に重要な姿勢である。すなわち、わからない点があるからやらないのではない。最善を尽すのである。しかし、それは現場から遊離した数式だけのものであそびを意味するのではない。数式はあくまで手段であることを銘記すべきである。したがって、不確実性に対処する場合、たとえばわれわれは、それが根本的な解決でないことを認識しつつも、その不確実性の処理に対して、しばしば、確率・統計的手法を用いる方向に向わざるを得ないことになるが、この点についてはのちに述べる。

3. 安全性を規制する諸々の尺度（評価要因）

図-1のような立場で考えるとき、安全性を規制する要因は数多いが、本文の目的である“土質力学における筆者の反省”という立場から土質力学（あるいは土質工学といってもよい）における問題を重点的に考えてみたい。

(1) 力学的な尺度

普通、土に関する設計に際しては、ほとんど機械的に1.5とか3とかの“安全率”が見込まれる。しかし“安全率とは一体何か”と自問してみると、とくに土質工学の場合その内容がはなはだ漠然としており、その数字の根拠や影響因子を明確に指摘できないことが多い。すなわち、土質工学には不明確な点が多いことは事実であるとしても、設計の段階でそれが一つの逃げ口上に使われてこなかったとはいいたい。そのために、もともとあいまいな“安全率”なるものの概念が、さらにわけのわからないものとなり、しかもこのあいまいなものに頼ろうとする結果が生まれてきたものと思える。いいかえると、安全率なるものの内容や意味が十分意識され、それを明らかにするという姿勢のもとに使われてはこなかったようにみえる。この点はすでに数年前に指摘したこと

であるが⁹⁾、これは筆者を含む一部の者の独断であろうか。さらに極言することが許されるなら、いかにも、この“安全率”が“安全性”を量的に評価する一つの尺度であるかのように錯覚されてきたのではないだろうか。従来、決定論的な形で、応力比やモーメント比で定義されてきた安全率が、実は“安全性”を評価する尺度としては不相当である、あるいは不十分であることは、別に実例をあげて示したが⁹⁾、以下に示す実際問題をふり返ってみても見当のつくところである。

ある流域に、ある目的をもってダムをつくり貯水する必要が生じたとする。当初コンクリートの重力式ダムとして計画されたが、その後の地盤調査によって支持岩盤が悪いことがわかり、フィルダムに設計変更になったような場合を想定してみよう。当初のコンクリートダムでは、“安全率”は3~5にとられるのが普通であるが、フィルダムに変更になれば設計者は何の躊躇もなく1.2とか1.3の“安全率”で設計するであろう。このようなことはまったく通常のこと、一見何の変哲もないように思えるが、よく考えてみると実に奇妙なことである。コンクリートダムであろうが、フィルダムであろうが、目的とする同一の機能を果たすためにつくられることには変りはなく、その構造物としての形式が異なるだけにすぎない。たとえ、両者の間に破壊機構の相違や施工中の動態観測による設計変更の可能性の有無などがあることを認めたとしても、同一の機能を果たすべき構造物の安全率が一方では4であり、他方では1.2である実情に、われわれはもう少し真剣に疑いと不満の目を向けるべきではないだろうか。

このような例は他にいくらかでもある。多くのすぐれた先輩たちの苦心と努力と経験の集積の結果であるこれらの値が、非常に価値のあるものであって、その偉大な貢献度を否定するものでももちろんないが、“安全性”を評価する尺度としての“安全率”の不十分さを感じないわけにはいかない。筆者には、同一の機能を目的とするいくつかの異なる代替案を共通の尺度でもって評価できる、なんらかの力学的尺度を見出していくことが必要であり、重要であるように思える。これには、たとえば以下に述べる“信頼度”の概念が考えられるが、いずれにしても、“共通の尺度での表現”と“その適正な具体量の選び方”が基本的な問題であろう。

地盤調査や土質試験を行なった場合、その結果がかなり大幅にばらつくことはよく知られている。ばらつきの原因を一つ一つ解明し、真に偶然誤差のみを残すよう努力することはきわめて重要であるが、研究や技術がすすみ、熟練した技術者が設計上工学的に同一とみなさざるを得ない地盤から慎重にサンプリングを行ない、これを適切な処置のもとに試験した場合であっても、なおかつ

試験の結果はばらついてくるに違いない。相手が土であることを考えれば、そのばらつきは必然であり、しかもかなり大幅であることが予想される。このような認識にたてば、強度や荷重、破壊や変形の問題を決定論的に取扱うのは無理であり、ストカスティック (Stochastic) な立場からなめる姿勢に向わざるを得ない。図-2 (a) は、土質調査の結果、工学的には同一粘土層とみなして取扱わざるを得ない層の一軸圧縮強度 q_u (=非排水強度 c_u の2倍)、単位体積重量 γ 、盛土の単位体積重量 γ_b などの分布を示した一例である。このような事実から、たとえば図-2 (b) に示すような粘土斜面の急速すべり

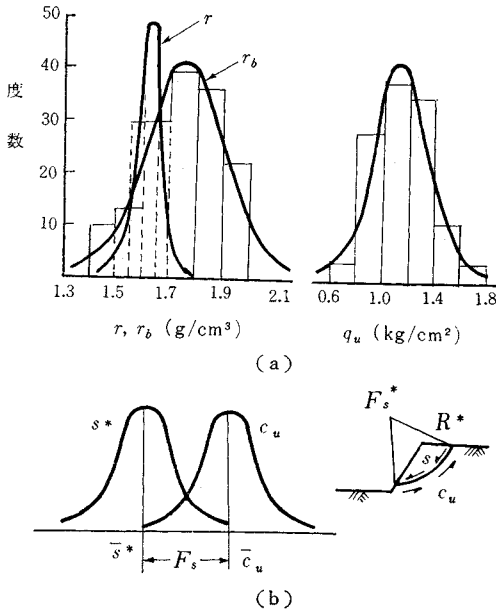


図-2 土の諸性質のばらつき

破壊の問題に関して、抵抗力 c_u とすべりを生じさせようとするせん断応力 s^* は、当然、図のように、あるばらつきをもって分布してくる。ここで、設計に際し破壊に対する信頼度を表わす一つの係数として

$$\bar{F}_S^* = \frac{\bar{c}_u}{\bar{s}^*} = \frac{\bar{c}_u}{f(R^*)\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

なる設計係数 \bar{F}_S^* を定義したとする。これは現在一般に用いられている安全率に類似の係数であるが、この場合、図から明らかなように、たとえ $\bar{F}_S^* > 1$ であっても、すべりを生じさせようとする応力 s^* が抵抗力 c_u を超過してしまう確率、すなわち破壊してしまう確率

$$P_F = P_{rob} [s^* > c_u] \dots\dots\dots (2)$$

が存在する。そして、 c_u と s^* の分布形が決まれば、式 (1), (2) を結びつけることによって、純力学の問題として $\bar{F}_S^* \sim P_F$ の関係が定まってくる。このことから、破壊しないということに対する信頼度、裏返していえば破壊確率 P_F は、力学問題における一つの有力

な共通の尺度であるといえるであろう。なお、この種の P_F と経済性を結びつけようとした信頼性理論の先覚者は Freudenthal⁹⁾ であるが、材料の破壊確率についてはかなりの研究成果が報告されている⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾ のは周知のところであり、また、信頼性理論の土木工学への適用もしだいにふえてきている¹¹⁾。

いうまでもなく、ストカスティックという概念は、非決定論的であることと、それにもかかわらず集団的規則性の存在することの二点によって規定される。したがって、統計や確率に不可欠の性格は、集団的把握と数量的表現である。ここでわれわれは数量化に際して、土に関する種々の性質の中からある限定された性質だけしか取出すことができないこと、さらにそのうえ、本来“性質”であるものを“数”に抽象化していることを十分認識することが重要である。そうでなければ、いつのまにか数の遊戯に陥り、土の工学、あるいは設計そのものから離反していることに気づかなくなってしまうであろう。とくに重要なことは、数量化しようとする土の“性質”である。含水比や間げき比、あるいは単位体積重量のように、状態を表わす量 (物理的性質) は真の地盤内の性質を表わす量として比較的受入れやすい。しかし力学的性質と呼ばれている種々の性質、たとえば、一軸圧縮強度 q_u などは、われわれが便宜的に定めたある特定の手順、方法、拘束条件に従って試験した結果にすぎない。すなわち、あくまでもある特定の条件に従って試験した結果の集合であり、たとえば q_u が実際地盤の強度を表わすのに最適の尺度である、ということとは根本的に異なることに注意しておかなければならない。

ところで、“安全性”という抽象的な概念を具体的に表現するための力学的な尺度として P_F を取上げることにしたとしても、その基礎となるのは、力学における破壊や変形のメカニズムの解明である。ここに、土質力学の明確な位置づけがあり、この認識にたった力学的なメカニズムの解明こそ基礎であり、これなくしては信頼度分析そのものに多くの発展が期待できないことはいうまでもない。さて、地盤や土構造物の破壊に関しては種々のパターンがあるし、また、他の材料とは異なった特殊な事情もある。パターンについていえば、前兆の現われる暇もないような急速な破壊 (たとえば、砂のはさみ層内での急激な間げき水圧上昇による破壊) もあれば、施工主あるいは、施工後の動態観測などにより現われた前兆に対して応急手当てや設計変更が可能な緩速破壊 (広がり破壊など) もある。前者がとくに恐ろしいわけであるが、いずれにしても、この両者によって、当然生ずるであろう被害、すなわち期待損失は異なるであろう。したがって、当初の設計段階で考慮すべき破壊確率 P_F が両者において同じである必要はなく、むしろ同一であるほ

うがおかしいことは直観的に納得されるであろう。このことは、いうまでもなく、設計段階で P_F を決める評価要因が力学の外にあることを示唆している。

(2) 経済的な尺度

筆者の専門外でもあり、また紙数に制限があるので、ごく簡単に述べるにとどめたい。土木計画で主として問題となるのは使用価値で、その基礎を“効用”に求めている。効用は、必ずしも貨幣価格で表わされた価値の関数として示されるものではないが、貨幣価格で表わそうという努力がなされており、費用便益の考え方が多く用いられている。したがって、費用便益を経済問題における一つの重要な尺度とすることができるが、ただ、公共土木計画においては多くの場合、市場性を有しないので現実的で明解な市場価格表示をすることは無理があり、シャドウ・プライス (shadow price) の概念が導入されている。この場合、費用便益の実際測定の面でかなりの困難が生ずるようであるが、少なくとも、代替案の比較や資源の最適配分を行なうに際する価値基準としてはすぐれたものであることが認められている¹²⁾。

安全性の問題が経済的問題と関連することは、例をあげて説明するまでもないであろう。

(3) 社会的な諸問題における尺度

この分野では努力はなされてはいるものの、定量化の問題が非常にむずかしい。たとえば“子供の通学が安全であってほしい”と願う願望を、定量化した尺度で表現していくことはなかなか困難である。それは、その願望を量的に表わすことの困難さに加えて、そのために必要な“陸橋の数”とか“道路の幅”とかの間における変換係数、すなわち、両者間の具体的な関連づけが非常にむずかしいからである。“健康でありたい”ということと“工場排水”の問題、“緑がほしい”ということと“土地開発”の問題など、この種の問題は多い。公共構造物の場合、繰返しやトライアルがきかない点に一つの特徴があるが、とくに、人間の健康や安全などの生活環境の問題ではそうである。しかし、そうであるからといって問題を放置することはできない。そこで、国民の願望にのっとり、政策により絶対的要請を設定し、その達成度を問題にする方向が取られる。ナショナル・ミニマムやシビル・ミニマムの考え方はその具体例である。

(4) 各尺度間の関連

以上に略記してきたように、それぞれの分野における願望や尺度は、それを独立で取扱ってよいものではなく互いに深い関連を有している。したがって、それぞれの尺度間の関係を明らかにしていくことが、基本的事項と

してきわめて重要である。それぞれの分野における願望は、たとえば、“できるだけ壊れる可能性の少ない構造物にする”ということと“それには費用がかさむ”ということのように、一般に、互いにあい矛盾する方向性を有している。この意味で上記の関連づけは、トレード・オフ分析とも呼ばれるが、いずれにしても、多様化する価値観の中で、多様化する尺度間のお互いの関係を地道に分析していく努力が必要であろう。ただ、あまりにも性急に定量化に目をうばわれたとき、とくに 3. (3) に関する分野においては、ある種の偏狭さ、独善の弊害が生ずる危険性があることに注意すべきであり、問題の定性的把握の重要性をも常に確認しておくことが大切であるように思える。

土質工学の過去と現状をふり返ってみるとき、先輩たちの経験的な判断の貢献に甘んじて、たとえば、力学と経済の各尺度間の定量的分析すら志向しなかった姿勢を一研究者として反省せざるを得ない。

4. 評価基準について

工学(技術)は全体の調和の中でどのような位置を占めているのであろうか? 技術の有する“従属性”は宿命的なものであろうか? かつて、技術の革新が、社会構造、政治形態そのものを根底から変換する導火線になった典型的な例に産業革命の時代がある。この意味では技術的評価は、経済的・社会的なそれと同列もしくはそれより上位とも考えられる。しかし、実際に現存し、種々の構造物構築に駆使されている定常化された意味での技術を取上げるならば、社会的・経済的要請が技術の達成目標となるであろう。

さて、評価は価値観に基づく価値基準から派生して行なわれる。価値観は非常に多様化しているが、すべての場合に、あるいはすべての段階において、あらゆる価値の追求を行なうということは不可能であり、また、その必要もない。上位計画になるほど、総合的な価値基準が必要となるが、下位計画になるにつれて、一つもしくは数種の基準の組合せで十分なことがある。2. でもふれたが、上位計画で、人間社会にとって必要な価値基準が設けられ、下位計画では、その枠内である基準に達することが要請される。この意味で、技術価値は最も根底にあり、経済価値、社会価値が順次上位にある¹³⁾。

ところで、本文で筆者が取上げているのは、“地盤や土構造物の設計”という段階での安全性の問題であり、これは実施計画といわれる下位計画の段階である。前章で述べた多くの評価項目、評価要因間の相互の分析がすみ、これらを n 次元の空間に表示できるようになることが理想であるが“設計”の段階を問題にすると、力

学的な信頼度と費用との関連を定量的に究明することは重要な意味があり、また、経済的な評価基準で一応の評価を下すことも、まず第一歩として許されるであろう。このような観点から、筆者は土構造物の破壊に関するいくつかの信頼度分析を行なったが^{14), 15), 16), 17)}、これについては次章で簡単にふれる。また、各種の分野における各評価要因間のトレード・オフ分析に関しては、土木学会土木計画学研究委員会の業績があげられるが¹⁸⁾、この方面の研究は“まだまだ緒についてばかり”というのが実感である。また、ある評価基準をもって代替案の比較は可能になったとしても、最適解を求めることは、数学的手法の困難さも伴って非常にむずかしい問題であるといわなければならない。

さて、いうまでもなく、一般に評価は一側面からではなく、いくつかの側面から検討したうえで、なされなければならない。評価や評価基準が、ある個人や特定のグループの独善に陥ることは、ぜひとも避けなければならない。いいかえれば、偏狭な独善的な価値観を相手に押し付けることであってはならない。筆者は、インド、ネパール、その他のアジアの国々において、日本や欧米から派遣された技術者が、異常な挫折感に悩まされている現実を何度も見聞した。そして、その多くが、その国やその国の人たちの伝統、民族性、モラル、社会・経済的問題などに真剣に取り組もうとせず、何の疑問もなく自分たちの価値基準を相手に押し付け、その結果（それが彼らの気に入るものであるはずがない）を自分たちの評価基準でもって評価し、“この国は駄目だ！この国民は働かない！こんなにいいことを教えてやっているのに覚えようとしない！”などとヒステリックに結論を下して挫折している姿をみて、肌寒い思いがしたものである。“これが挫折だけに終わっている間はまだいいが……”と。

5. 土質工学の問題としての信頼度分析の例

本文は、信頼度分析の詳細を述べることを目的として見るわけではないので、分析の方法と筋道をごく簡単に示すにとどめたい。

まず、土の強度や単位体積重量その他、土の物性がばらつくという事実を事実として認め、その性質を明らかにしたうえで、すでに述べた基本的な認識のもとにこれらを数学モデルで表示する（たとえば図-2に示した正規分布のように）。次に、たとえば、粘性土の急速破壊に対する円弧すべりのように、工学的な意味で有効な破壊のメカニズム（パターン）が明らかにされているならば、これに対して式(1), (2)のような定義に従い設計係数と破壊確率の関係 ($F_S^* \sim P_F$) を求める。いま図-2のように、 c_u と s^* が正規分布する粘性土の急速円弧すべり

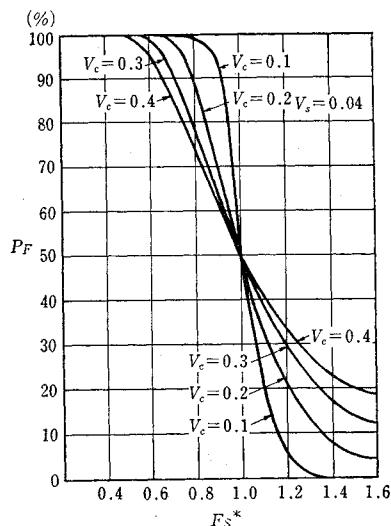


図-3 設計係数と破壊確率の関係

の場合 ($\varphi=0$) を例にとると、この関係は式(3)のようになり、またこれに基づく二、三の計算例は図-3のようになる¹⁴⁾。

$$P_F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_K^{\infty} \exp\left[-\frac{1}{2} t^2\right] dt \quad \dots\dots (3)$$

$$K = (F_S^* - 1) / \sqrt{(V_S)^2 + (F_S^* V_C)^2}$$

ここに、 V_S , V_C はそれぞれ s^* , c_u の分布に関する変動係数である。

一方、以上のような破壊に関与する構造物（たとえば盛土）を建設する場合の期待総費用 C_T と P_F の関係 ($C_T \sim P_F$) が明らかになれば、純力学の問題としての $F_S^* \sim P_F$ 関係と結合でき、好都合である。 C_E を地盤調査費、 C_C を初期建設費、 C_F を破壊損失費とすると、これらはすべて P_F の関数であり

$$C_T = C_E + C_C + P_F C_F \dots\dots (4)$$

多くの便宜のため、上式を無次元化して表わすと、費用と破壊確率の関係は次式のように書ける¹⁶⁾。

$$\eta(\zeta) = \frac{1}{C_{T0}} \{C_E(\zeta) + C_C(\zeta) + \zeta C_F(\zeta)\} \quad \dots\dots (5)$$

$$\zeta = P_F / P_{F0}$$

ここに、 P_{F0} は、切土や盛土をする場合に基準とする設計断面（普通地盤改良などを実施しない無処理状態での最もきびしい条件における断面を設定する）に対して期待される破壊確率であり、 C_{T0} はその場合の期待総費用である。

さて、単なる推測ではなく、土質力学の法則にのって数多くの数値的検討をした結果、現在までに C_E , C_C , C_F と

$$C = a \zeta^b + c \dots\dots (6)$$

という形で与えられることが明らかとなっている^{16), 17)}。詳細な説明は省略するが、図-4は $\eta(\zeta) \sim \zeta$ 関係の一

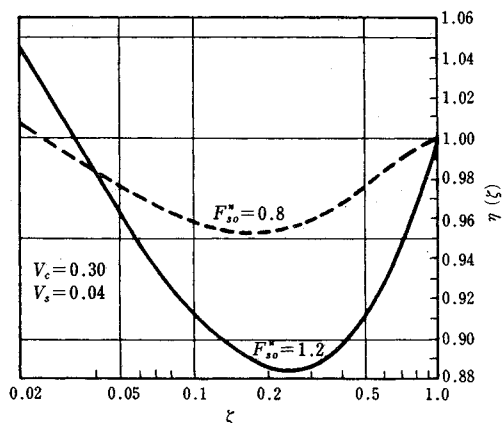


図-4 破壊確率と費用の関係

例である。これは、すでに発表した盛土に関する試算例で、基準断面に対する初期の $F_{S_0}^*$ が 0.8 と 1.2 であった場合の計算結果である¹⁹⁾。すでに述べたように、いかなる評価基準でもって設計値を採用していくかは、きわめてむずかしい問題であるが、下位計画段階という意味で、一応、費用という尺度を優先することが許されるならば、 $\eta(\zeta) \sim \zeta$ 関係に最小点が現われてくることは興味深い。すなわち、少なくとも、この最小点の右側に位置するような設計は非常にまずい設計といえるであろう。いまかりに、費用最小という評価基準を用い、さきに示した力学の $F_{S_0}^* \sim P_F$ 関係を併用するならば、この最小点は、 $F_{S_0}^* = 0.8$ に対して $P_F = 13.5\%$ 、 $F_{S_0}^* = 1.52$ 、また $F_{S_0}^* = 1.2$ に対して $P_F = 7.5\%$ 、 $F_{S_0}^* = 3.68$ となる。なお、 $\zeta = 1.0$ に対応するもの状態の P_{F_0} 値は、 $F_{S_0}^* = 0.8, 1.2$ に対して、それぞれ 79.4, 29.0% であって、きわめて大きな破壊確率を有していたわけである。

6. む す び

土質力学を生み、育ててきたすぐれた先輩たちの古い論文や書物の中から、多くの示唆や提案が生れてきたまでの彼らの苦悩をピリピリと感じとった経験は筆者一人のものではないであろう。たとえば、土質力学の父と呼ばれる Terzaghi は、その多くの著書や論文の中で、実際の設計や施工に対処する場合の困難さについて語りかけているが、“単純な土質力学の計算のとおりにはいかない”，あるいはまた、設計における力学外の諸問題との深い関連を指摘しながらも、“その方法論が明確とならない”という点で、Terzaghi の歯がゆさと苦悩が、随所から、生々しく伝わってくるように感じられる。筆者のような凡人には、すぐれた先達の苦悩をともにするほどの力量はないにしても、せめて、身のまわりの問題

にもう少し疑問の目を向け、考え、悩む努力をしなければ申しわけない気がするのである。

本文では、紙数の都合もあって、土質工学が関与する信頼度分析の具体例はごく簡単に示し、現在の設計段階における安全率の背景に関する疑問と問題点を、一研究者としての筆者の反省を中心にして書いてみた。まとまりがないうえ、いつている割に、実践に対する姿勢が逃げ腰だ、とする批判もあるろう。とくに筆者は、“工学の分野に身をおく研究者は、自己の専門分野を真の意味での計画・設計・施工のフィールドと関連させて認識し、関連諸分野の評価要因間の分析に真剣に取り組む必要があるのではないか”と思っているのであるが、同時に“しかしながら分析結果を提示するまでにとどめるべき、評価そのものを下すべきではない”と考えている。このところがわれながらすっきりとしない点であり、最も批判をまねがれえぬ点であると思っている。種々のご批判をいただければ幸いである。

参 考 文 献

- 1) 松尾 稔：土構造物の安全性，昭和 47 年度技術講座，土質工学講座，土木学会中部支部，pp. II-1~II-12, 1972.
- 2) 長尾義三：土木計画序論，共立出版，pp. 58~60, 1972.
- 3) 前出 2)，pp. 22~34.
- 4) 山崎 謙：哲学とは何か，青木新書，p. 73, 1971.
- 5) 浅田秋江・松尾 稔・湯浅欽史・羅文鶴：土質工学における安全率に対する反省，第 12 回土質工学シンポジウム発表論文集，pp. 51~74, 1967.
- 6) 松尾 稔・黒田勝彦：不飽和土の土質係数と破壊確率に関する一考察，土木学会論文報告集，第 208 号，pp. 63~73, 1972.
- 7) Freudenthal, A.M.: The Safety of Structures, Proc. ASCE, Vol. 71, pp. 1157~1191, 1945.
- 8) 横堀武夫：材料強度学—強度・破壊および疲労，技報堂，1955.
- 9) Gumbel, E.J.: Statistics of Extremes, Columbia University Press, New York, 1958.
- 10) Volkov, S.D.: Statistical Strength Theory, Gordon and Breach, New York, 1962.
- 11) たとえば，星谷 勝：構造物の信頼性，土木学会誌，Vol. 57-7, pp. 58~60, 1971 などにまとめて紹介されている。
- 12) 前出 2)，pp. 90~95.
- 13) 前出 2)，pp. 88~90, pp. 197~200.
- 14) 松尾 稔・黒田勝彦：盛土建設のための土質調査と盛土の安定性に関する研究，土木学会論文報告集，第 196 号，pp. 75~86, 1971.
- 15) 松尾 稔・黒田勝彦：盛土の破壊確率を考慮した土質調査の規模決定法について，土木学会論文報告集，第 198 号，pp. 69~81, 1972.
- 16) 長尾義三・松尾 稔・黒田勝彦：盛土の設計安全率決定に関する研究，土木学会論文報告集，第 203 号，pp. 71~85, 1972.
- 17) 松尾 稔・黒田勝彦：切盛土の安定に関する信頼度分析，土木学会論文報告集に投稿中。
- 18) 土木学会土木計画学研究会：第 6 回土木計画学シンポジウム，1972.
- 19) 松尾 稔・黒田勝彦：分析モデル (4) 力学的側面からの接近，第 6 回土木計画学シンポジウム，pp. 55~61, 1972. (1972. 12. 6・受付)