

【委員会報告】

建設事業における確率統計的意意思決定

—脱マニュアルの時代を迎えて—

PROBABILITY-BASED DECISION MAKING IN CONSTRUCTION WORKS

—Breakthrough from the age of manuals—

土木学会構造工学委員会・建設事業における確率統計的意意思決定研究小委員会

*Task Committee on Probability-based Decision Making in Construction Works,
Committee on Structural Engineering, JSCE*

1. まえがき

構造工学において、確率・統計的な概念および手法は幅広く用いられるところである。とりわけ構造物の安全性・信頼性と結びつけた研究活動には長い歴史と多くの成果がある。土木学会構造工学委員会においても、1976年に第1次構造物安全性研究小委員会の活動報告書「構造物の安全性・信頼性」¹⁾が出版され、1988年には第2次の同名の委員会の報告書「構造物のライフタイムリスクの評価」²⁾が構造工学シリーズの2としてまとめられている。さらにシミュレーション・逆解析・不規則振動論・振動制御などをはじめとする、幅広い関連分野の発展とも相俟って、なお研究の進展が期待される状況にあるといえる。

一方で確率を指標として構造物の安全性（あるいは破壊時コストを含めたリスク）に定量的な尺度を与えることについては、わが国の技術文化風土の中では、受け入れが容易でない部分もなしとはしない。これは教育面でも、力学を重視する半面で、力学計算に用いる数値等の諸条件に含まれる不確実性であるとか、その数値が導かれるプロセス、もとになるデータ等には必ずしも十分な注意が払われていない、といった問題を生じさせている。

一方眼を転ずれば昨今の建設事業をとりまく諸条件として、規制緩和（他分野との競合）・一般競争入札の導入・建設業評価の導入・国際化（国際競争、設計基準の国際化）・ISO標準の浸透・PL法の施行等、従来とは異なる要因が数多く挙げられ、また低成長下の公共構造物への投資のあり方も問われつつある。

ここ数年土木学会でも、国際化対応の一環として、ISOを中心とした構造設計の基本ルールへの関心が高まっており³⁾、建設省も土木建築に共通した構造設計の基本ルール作りに乗り出しつつある。また、規制緩和の流れの一環として、建築基準法が仕様規定から性能規定に移行

する動きが、土木においても注目されている。

公共投資の費用便益効果に対するアカウンタビリティへの要求も重要な課題だが、これもまた土木構造物が果たしている社会経済的役割の定量化を必要とするものである。

これらの動きは、土木構造物の「重要度」もしくはそれに非常に近い概念を、これまでのように漠然とした形でなく、より定量的に把握し、その使用性と結び付けて考えようという流れである。設計（のみならず計画・施工・維持管理・補修などを含む建設事業の一連の流れ）において付与すべき安全性の水準とも、大いに関係のある問題であり、またひとつの情報開示の行き方ととらえることもできる。

他方建設業をとりまく厳しい環境、競争の激化は日本の生産性の成長を阻んでいる横並び体質からの脱却を否応なく求めている。これらの要因は設計施工の技術力の差異化・安全管理技術の体系化への要求など様々な方向性を含むものである。例えば施工・維持管理の過程で得られる様々な情報、データを有効に活用する技術等も、有効であると考えられる。既成のマニュアルに縛られ、誰がやっても結果の差の出ない状況から、差異化を志向する状況へ、という認識は、上記の性能、品質の定量化という問題と軌を一にするものである。ここに「確率統計的」（＝品質に対応するリスクの定量化、データの直接的利用）「意意思決定」（＝マニュアル脱却、数値決定過程の透明化）というキーワードを当てはめたものが、本研究小委員会の活動の基本方針である。

改めて建設事業の一連の流れを眺めてみると、例えば計画と施工では扱う問題の「大きさ」に著しい違いがあるのがわかる。社会との関係性が強く影響する計画段階では、安全性と経済性のバランスの「落し所」を探るモデル化にウエイトがある。それに対し、建設サイトで直面する不確定要因への対処が問題となる施工段階では、

データをどう収集し、必要な情報をいかに抽出するかにウエイトが移っている。したがって意思決定の合理化の基準も、これらの相違を反映したものでなければならない。

当研究小委員会では、公募によって極めて多様な専門的関心をもったメンバーが集まった。それぞれの専門性を活かし、かつ上記の扱う問題の大きさ・質により、ある程度の分類をし、それによってワーキンググループを組織して、各々活動を進めた。その成果は、本文と同名の報告書（約200頁）にまとめられ、また成果報告会に合わせて論文公募を行い、1998年12月8日に「確率・統計的意思決定に関するシンポジウム－脱マニュアルの時代を迎えて－」を開催するに至った。以下順次各グループの活動を、それぞれ一つずつの章として、報告書の内容を概説することとする。

2. リスクを考慮した建設事業における意思決定

(1) 概要

次の3章が、施工あるいは維持管理といった側面で、現場から実際に上がってくるデータをもとに、確率統計的手法に基づいて意思決定を行う作業を念頭に置いているのに対し、この章では、計画や設計といった建設事業の比較的「川上部分」において、確率的な評価項目であるリスクを、どのように判断の中に組み込んでいるかということを問題にしている。

ここでは、まず「リスク、コスト、ペネフィットを考慮した意思決定」というキーワードに対して、各委員の専門分野についてアンケート調査を行い、「リスクを考慮に入れた意思決定の事例収集」による「問題点の抽出」を行った。

質問項目は次のような点である。

- (1) 各人の専門分野における安全性確保の考え方における特徴的な点を挙げる。
- (2) 各人の専門分野における安全性確保のための諸規定において、費用対効果的な考え方を取り入れられているか。例えば耐震設計で、設計地震の再現期間を定めるのに、構造物の重要度や、耐用（供用）年数を考慮に入れがあるか。
- (3) 初期コスト C_i と、破壊時コスト（損失費用）と破壊確率の積 $C_p \cdot P_p$ を加えたものを最小化するように設計条件を決める（あるいは意思決定を行う）という、期待総費用最小化原則という考え方がある。各人の専門分野でこういう考え方方が成立つかどうか。また成立つとするならば、 C_i や $C_p \cdot P_p$ はどのような概念に対し、具体的にどの

ように与えられるか。

この結果を要約すると、コストの合理化は、一つの努力目標であるが、意思決定のすべてがこれで支配されているかといえばそうではなく、様々な効用関数の持ち主があり、そのすべてと合致することは不可能であると考えられた。

たとえば、施設によっても考え方は異なり、新設構造物の場合と、補修の場合あるいは大規模構造物の場合と中小構造物の場合である一律の水準で安全度を決めるのか、費用対効果を重視するのか異なる。

その中でも、原発問題や労働災害問題など意思決定問題の評価関数に占める（負の）効用としての側面をタブー視せず明確に打ち出していくという方向になったことは、本ワーキングの成果であると考えている。

以下に各分野の概要を述べる。

(2) 原発の設計・維持管理

原発問題では、我が国の原子力発電所の安全性を確保するための基本的考え方を示し、確率論的安全性評価の役割、適用上の限界および技術的課題を述べた上で、各種設備・機器の検査内容、頻度を定めるための手法として、設備各部の持つリスク（損傷確率と損傷による影響度の積）の大きさに根拠をおく方法であるR I Iについて述べている⁴⁾。

(3) 河川事業（計画、設計）

河川事業では、河川分野の特性を述べ、現行計画の安全度確保の考え方について概説した後、意思決定の事例として、施設のリスク分析による評価、耐用年数再現期間に関する費用対効果検討事例を挙げ、事業期間を考慮した段階整備に対する投資効果の検討が重要なと述べている。

他の分野と比較して、破壊時コスト（洪水時の損失費用）の算出方法、費用対効果の分析に基づく意思決定といった概念が、明確に用いられており、ワーキンググループ内の議論では、ひとつのモデルケースとしての意味を有していた。ただし大規模な洪水発生時の人命への影響等については、破壊時コスト算定でも考慮されておらず、他の分野と同様の未解決の課題を残しているともいえる。

(4) 都市インフラ（計画）

都市インフラでは、社会リスクの観点から見た都市インフラの分析をテーマとして、ライフラインに代表される社会基盤施設のリスク分析の研究概略、同時に、一定のリスクを担保する意味で意思決定フレームの立場からインフラのリスク評価・管理の枠組みについて述べて

いる。

さらに、社会基盤施設とそのリスクに関する基本的考え方について、新規構造物の場合、既存の構造物の場合について述べ、都市固有の条件により異なる「災害波及のシナリオライティング」「評価の技術的手法」の重要性を述べている⁹⁾。

(5) 保険

保険分野は、今回のワーキンググループでも最も特異な地位を占め、また関心の集まった分野である。リスクの存在を想定したときに、従来の対応方法（リスクマネジメント）は、構造設計における適切な強度の付与というハード面に偏っていたと考えられる。災害時に適切な保険設定がなされるという選択肢が加えられれば、より幅の広い対応策（リスクファイナンス）が可能であるとみられる。そのための新商品開発が、建設業サイドから、保険業サイドに求められているところだが、これは研究小委員会で公表するには困難も多い部分である。

通常の損害保険業務（料率算定等を含む）は、基本的には大数の法則に従い、データに基づいて行われている。そのため工事保険等の商品開発はこれまで行われてきたものの、ここで考えているような、地震に代表される大災害の発生に伴う社会的の損失を担保する形の保険は、作業を合理的に進めるための前提が成立せず、保険業そのものの存立を危うくしかねない側面もある。しかしながら拱手傍観をしているわけではなく、徐々に情報をを集め、リスク対応のコンサルティング技術等の切り口から、この問題への取り組みをみせているところである。

(6) 労働災害

労働災害リスク低減のための費用対効果の検討は測定の困難さなどもあり、現況では行われていない。これは、測定の困難さ、負の成果を明らかにしにくい等が原因となっている。しかし、労働災害のリスク対応の現状と今後の課題を考えると、建設業の災害強度率はあまり低減していないことも事実であり、単に発生数を減少させる対策ばかりでなく、災害による被害の大きさ、強度を低減させる対策についてもさらに検討することが重要であることを述べ、費用効果分析は今後の重要な課題としている⁹⁾。

(7) 耐震設計

耐震では、土木学会の耐震基準等に関する提言⁷⁾をふまえ、レベル1および2の地震動に対する設計上の考え方を対比した。レベル2地震動では、地震動評価の方法自体がレベル1とは異なり、震源メカニズムの想定が基本となる。ここにおける不確実性のモデル化も、確率統計的な検討の対象としては複雑なものとなる。またレベ

ル2では構造物の損傷過程にまで立ち入って、構造物の耐震性能を照査する。したがって損傷がもたらす波及効果まで含めた形で、設計される構造物の、安全性と経済性を総合的に判断する必要がある。これらの理由からレベル2地震動の設定は、耐震設計における最大の意思決定問題であることを強調している。

耐震設計における費用対効果の概念の適用について、新設構造物の場合、既設構造物の場合について現行の考え方を述べ、既設構造物の補強方針立案の場合に、費用対効果の考え方方が有効に適用されることが多いことを、国内外の例をもとに述べた^{8,9)}。

(8) 土地改良施設

現行設計の安全度確保の考え方を、大ダムの場合・中小規模構造物の場合について述べ、中小構造物の場合は費用対効果の考え方方が適用されている。また、施設の重要度に関しては「直感的方法」から「客観的方法」への移行が必要であると述べ、今後の課題として、施設の重要度の算定、損失関数の定式化を挙げている¹⁰⁾。

河川事業と同様、経済ベースに乗りやすい対象であり、この章の事例収集としては、興味深い例を提供しているといえるだろう。

3. データ解析における確率・統計的意思決定

(1) 概要

土木構造物の計画・設計・施工・維持管理において、何らかの形で意思決定という作業が行われ、土木技術者は得られるデータの情報を最大限に利用しようとする。意思決定のプロセスには、解析に用いる数学モデルの選定、目的の評価指標となる目的関数の設定とその最適化から成立っていると考えられる。しかし、これらが必ずしも明確になっているとは限らず、地形・地震や気象などの環境、観測誤差、材料物性、施工精度などの不確定性を考慮した総合的かつ普遍的な意思決定が要求される。このような情報の不確定性を、本来有するばらつきと知識やデータ不足のために未知であるという概念に分けて定量的に評価するモデルも示されている²⁾。

土木技術における意思決定問題は、これらのバランスを保って評価しようとするものであり、曖昧性や不確定性を有する最適問題の考慮には確率・統計的な考え方が重要な役割を果たしている。観測データからその確率分布を求める統計的推定では、通常パラメトリックモデルを仮定し、モーメント法もしくは最尤法によりパラメータを推定する。これらのモデルは検定や情報量規準を用いてその優劣を評価されるため、評価指標がいくつもあれば、異なったモデルが選択されることは言うまでも

ない。

確率が得られることで行動が決定されるプロセスとしては、降雨確率と傘を持って外出するかどうかの判断が例としてよく説明される。この判断には、傘を持たずに出かけて雨に当たることによる損失の期待値を考えていることもある。期待値とは損失費と発生確率を乗じたものであるが、人は状況により評価規準も変わることが多く、よって判断も状況により変化する。損失の評価もまちまちだし、また出かける場所により降雨確率が変化することもある。いずれにしても、意思決定に対して確率・統計的な考え方方が密接に関係してくる。

一方、土木構造物は構造物ごとに設計法が規定されていることが多いため、意思決定の反映が制限される。そのため観測データからモデルのパラメータを推定する逆解析が意思決定問題の中心的例題となる。

データ解析における意思決定問題においては以下の項目を考慮することが望ましい。

- a) 事象、現象のばらつきや不確定性の理解
- b) 事象を表現する数学モデルの選定
- c) 意思決定のための評価指標
- d) 最適化手法

従来、意思決定はデシジョンメイカー（技術者）の主観的作業とされることが多く、実際いくつかの情報（データ）を並べただけでも意思決定の作業そのものは可能となる。そのため工学的な問題として検討価値がないと考える向きもあったのであるが、現象の不確定性や情報を、できるかぎり客観的かつ定性的に縮約させることを力点と考えると、統計的アプローチは非常に有力な道具である。

(2) 意思決定の統計学的アプローチ

統計学は意思決定を行う際の学問的背景を形成し、客観的・定量的に行うことを目指していると言える。ここでベイズ統計学は人間のもつ予想・確信度などを主観として意思決定に取り入れ、ただの条件付き確率ではなく、事前情報を確率で取り入れた（ベイズの定理）。またベイズの決定理論では損失関数を定義することにより、ばらつく量の意思決定をより客観的に行おうとしたものである。

評価関数は式(3.1)のように状態量（ベイズではパラメータ）の関数で表現される損失関数と確率密度関数の積を状態量で積分した形で表される。

$$\int f(z|\theta) \cdot L(\theta, a(z)) dz \quad (3.1)$$

θ : 母数, a : パラメータ

$L(\cdot)$: 損失関数, $f(\cdot)$: 確率密度関数

ここで判断の正しさという問題が生じ、主観的な意思決定というプロセスができるだけ客観的に解釈できるようにするための工夫が大切であり、加えて状況にふさわしい規準を採用することで適切な判断が得られる場合が多い。しかし、現象が複雑な現実の問題では、完全に予想・確信度などを客観的に求めるのは難しいのが現状である。

(3) データ解析と評価指標

データ解析とは、種々の観測値の情報を縮約して工学的に有効に利用することである。1,000個のデータがあってもこれを眺めているだけでは有用な情報が引き出せない。そこでパラメトリックモデルを仮定し、そのパラメータを推定することにより確率分布を求める。このときに問題となるのが評価指標の設定方法である。

次に一例として多項式回帰分析を考える。多項式はデータの個数から1を引いた次数を用いることで、回帰の残差が0になる。また0にはならなくても次数を多くすれば観測データに対する残差を少なくすることができます。しかし目的が観測データの縮約ではなく、設定モデルによる将来予測の場合には、次数が少なく、かつデータ特性(トレンド)を考慮した評価指標の設定が必要となる。

評価指標の設定は個々の問題に依存し、かつある程度主観的に定められるため、データ解析の目的がデータが有する情報の縮約(同定)にあるのか、将来予測にあるのかを考慮することが必要となる。これらの評価規準として、赤池情報量規準(AIC)は有名である。

(4) 計画・設計・施工・維持管理における意思決定

確率・統計的な観点から、意思決定を行う際の評価指標の定義、またその最適化などを検討したが、評価指標の設定は個々の問題に依存し、かつ主観的に定められるため、必ずしも明確に分けることができない。そこで厳密な区別は行わず計画・設計・施工・維持管理でどのように取り上げられているか適用事例を紹介する。

a) 計画への適用

計画への適用では、震災後の都市ガス供給網の復旧計画に対して時間毎のガス供給率が定量的に示される累積非復旧率を評価関数とした遺伝的アルゴリズム(GA)を用いることで、復旧時間に多大な影響を与える復旧班の配分と復旧工事の優先順位を決定している¹¹⁾。このような組み合わせ最適問題では、評価関数は推定誤差だけではないところが逆解析とは異なる点である。

b) 設計への適用

設計への適用では、まず実際の造成工事における基礎杭の設計としてボーリングデータの情報を用いた基盤深度の推定を、地表面との相関性を考慮した統計手法(Cokriging¹²⁾)により行い、同時に弾性波探査による推

定結果と比較している¹³⁾。この研究では評価規準は推定値の不偏性と最小推定誤差分散である。また、地盤および杭の非線形性を考慮した解析モデルを提案^{14),15)}し、載荷試験データから引抜き変位が構造物に与える影響が大きい杭の鉛直方向の入力定数の推定を試みた研究がある。推定誤差が評価規準となっている例である。さらに、寒冷地トンネルの断熱材設計に影響を与える岩盤・コンクリートの熱定数を拡張カルマンフィルタで推定した研究や、マスコンクリートの温度履歴を AR モデルにより推定と予測を行った研究もある^{16),17)}。

c) 施工管理への適用

施工管理への適用としては、山留の壁変位の実測値と解析値との整合性における意思決定プロセスのモデル化にファジイ理論を適用し、施工管理に応用した事例¹⁸⁾、施工時の意思決定として橋梁架設時の斜張橋のケーブル調整量を前ステップの調整量から推定した事例^{19),20)}、加えてグラウトの施工性の評価として、非抵抗トモグラフィーを用いたダムのグラウトの注入率と地盤の止水性評価を取り上げている^{21),22)}。

(5) 今後の課題と方向性

建設業における意思決定は多岐にわたり、同時に種々のケースにおいて生じるため、ここで紹介した適用例は、計画・設計・施工・維持管理それぞれの過程で確率・統計的な考え方や手法を用いることで、事象のばらつきや不確定性といった問題の客観的・定量的に取り扱ったテーマを中心に選定した。

また、意思決定に着目すると計画では最適化問題、設計では逆解析や推定(予測)問題、施工ではフィードバック問題が中心になった。

すなわち、データ解析による意思決定問題(逆解析)は施工側からのアプローチであり、このようなアプローチでも事象の本質を捉え、有用かつ利便なものは利用価値を有するものと考える。

最後に今後の課題として、このような種々の問題の解決を図るとともに合理的な意思決定のための逆解析や最適化といった手法の展開が望まれるところである。

4. 設計規準における安全性確保の考え方

(1) 概要

先進諸国の経済は低成長の時代を迎えており、公共構造物への投資のあり方が問われている。このような状況下では、効率的な資金配分が重要となる。一方では、阪神・淡路大震災以降、構造物の安全性に対する市民の意識が高まり、安全性について誰もが納得できる説明が必要となることが予想される。この経済性と安全性とはト

レードオフの関係にあり、どれ位の資金を投入して、どれ位の安全性が確保されるかという内容については情報開示の必要性が高まってくると考えられる。また、構造物に要求される機能およびその機能が保証されていることの照査方法についても分かり易い説明が求められる。

構造物に要求される機能性、経済性、安全性は、バランスが取れたものでなければならないし、そのバランスの取り方が合理的で、誰もが納得できるものであることが望ましい。機能性、経済性、安全性のバランスは設計段階で決定される。従って、合理的なバランスを取るために、合理的な考え方に基づいた構造設計規準が必要となるのである。機能性、経済性、安全性のバランスを取るためにには、次の項目が達成されなければならない。

- (1) 要求機能に対応した限界状態の設定
- (2) 限界状態時に予想される被害額の見積もり
- (3) 安全性の定量化(限界状態の発生確率の算定)

これらを実現させるための技術としては、リスク解析、信頼性設計法等が必要となるが、長年の研究活動の成果により(たとえば、文献 1)、2) 参照)、十分対応できるレベルに達している。Eurocodes²³⁾の考え方を規定した Eurocode 1 は、上記のような合理的な構造設計規準の体系を採用していることを見ても、技術的に対応可能であることがわかる。

しかしながら、我が国には、Eurocode 1 のような合理的でバランスの取れた考え方に基づいた構造設計規準が、まだ存在しない。現在までの日本の構造設計規準の改訂の歴史を見ると、地震荷重の取り扱い、耐力算定式、耐震性を考慮した構造細目等に特筆すべき進展が見られる。しかしながら、「どのように安全性を確保しているか」、さらに「どれ位の安全性を保証するか」といった点については、明確な説明ができないのが現状である。阪神・淡路大震災以降、種々の構造設計規準の改訂が進行中であるが、安全性の定量化やリスク解析を取り入れた改訂はなされていない。このような構造設計規準の改訂が実施されている状況下では、機能性、経済性、安全性のバランスに配慮した合理的な規準の考え方を明確にし、種々の規準において統一しておくことが必要である。すなわち、早急に Eurocode 1 に相当するような、いわゆる Code for Code Writers(設計規準作成者のための規準)を提示し、それに基づいて種々の構造設計規準を改訂するような流れを作ることが、経済性、安全性、そして科学の発展のために非常に重要である。

このワーキンググループでは、Code for Code Writers の基本となる考え方と今後の研究、検討課題を明確にすることを活動の一つの柱とした。その活動成果の概要是、中間報告として構造工学論文集に発表した²⁴⁾。

(2) 安全性確保の考え方

図-4.1 に、ワーキンググループで提案した「設計規準における安全性確保の考え方」を示す。その基本的な考え方方は次の通りである。

- (1) 対象とする限界状態の基本許容生起確率を定める。
- (2) ①材料強度算定, ②断面耐力算定, ③荷重算定, ④断面力算定 で見込まれている安全性の余裕が、基本許容生起確率に比べて不足する分を基本安全係数として設定する。
- (3) 限界状態時のコストと構造物の重要度とから、重要度係数を選択する。
- (4) 基本安全係数と重要度係数とから安全係数を算定する。
- (5) 断面耐力と断面力との比が安全係数以上であることを見査する。

このような手順を踏むことで、安全性照査の中の各段階で考慮されている安全性の余裕を関連付けて取り扱うことができ、所要の安全性を確保することができる。この図では、一例として、荷重によって発生する断面力を断面耐力と比較して、安全性を照査する表現になっている。断面力は、(応答値)であり、断面耐力は、(限界値)である。すなわち、性能要求型設計の説明で使われる(応答値) < (限界値)という照査式の一例を表現しているのである。たとえば、コンクリートのひびわれ幅を照査する場合は、発生ひび割れ幅<許容ひび割れ幅、となるし、盛り土の滑りを照査する場合は、滑動モーメント<抵抗モーメント、となる。従って、それぞれの要求性能に応じて、図-4.1 の中の用語は異なるが、安全性確保の方法はコンクリート構造、鋼構造、土構造において基本的に共通とができる。本提案に対応している Eurocode 1 も、これら各種構造に共通の規準となっている。

構造物のある断面の終局耐力検討をする場合は、材料強度に基づいて断面耐力を算定し、他方、荷重の設計値を使って構造解析を行い、断面力を算定し、断面耐力と断面力との比を安全係数と比べることによって照査をする。この照査方法の中では、①材料強度の設計値の算定、②断面耐力の算定、③荷重の設計値の算定、④構造解析による断面力の算定、⑤安全係数の算定という 5 項目各々において、安全性の余裕が見込まれており、これらの安全性の余裕が複合されて、対象とする限界状態に対する安全性が確保される。従って、設計で保証する構造物の安全性について検討するためには、設計の各ステップで見込まれている安全性の余裕を、全て統合して取り扱う方法が必要であるが、そこに信頼性設計法の考え方を用いる。信頼性設計法を採用すれば、各ステップで見込まれている安全性の余裕をどの程度に設定するかとい

う作業は不要となり、より厳密な安全性照査を実現できる。しかし、設計実務者には、まだ、確率計算をベースにする信頼性設計法を受容する状況が整っておらず、現段階では、部分安全係数法的な形式を安全性確保の骨格とするのが妥当と考えられる。

図-4.1 中で、破線で囲んだ内側の部分が、設計者の行う行為である。設計者は、与えられた方法で耐力および断面力を算定し、与えられた方法で限界状態時コストを勘査して重要度係数を選択し、安全係数を算定し、安全性照査を行うことになる。(上記の(3), (4), (5)) 各設計値の設定方法、構造解析手法、耐力算定式、限界状態時コスト算定法、重要度係数選択法、限界状態の基本許容生起確率は、設計規準作成者が設定する。(上記の(1), (2)) 従って、基本安全係数は、設計規準作成者が既に設計規準の中で設定しており、設計者に与えられている自由度は、構造物の重要度係数をどのように選択するかという点に集約される。

本提案では、設計の各段階における安全性の余裕の確保を設計規準作成段階で考慮しているので、設計実務では部分安全係数の設定は不必要となり、安全係数が一つだけの照査式にすることができる。部分安全係数法の考え方を採用しているが、基本安全係数と重要度係数以外の部分安全係数は全て、設計基準の中に盛り込まれているので、陽な形には表れない。このように、設計者にとって使い易い安全性照査式となっているのも特徴である。

(3) 課題

ここに提案する「安全性確保の考え方」を実現するためには、次のような課題がある。

- (1) 基本許容生起確率の設定方法
- (2) 設計用値(荷重、材料定数)の設定方法
- (3) 構造解析手法、耐力算定手法の持つばらつきの把握
- (4) 限界状態時コストの算定方法
- (5) リスク解析に基づく許容生起確率の設定方法
- (6) 重要度係数の設定方法

基本許容生起確率とは、その設計規準が保証する最低限の安全性レベルに対応する。設定方法としては、現在の設計規準との整合性を取って決める方法(コードキャリプレーション)や他のリスクとの比較によって決める方法等がある。コードキャリプレーションを採用するのは、現在の設計規準が保証する安全性水準を容認することが前提となる。しかしながら、現行日本の設計規準の保証する安全性水準は不明確であるので、コードキャリプレーションでは前節で述べた安全性・経済性のバランスを取ることは不可能である。既に、安全性水準の定量化を実現している諸外国の設計規準における安全性水準の設定根拠を検討した上で、日本特有の考え方も加味して設定するのが現実的な方法と考えられる。

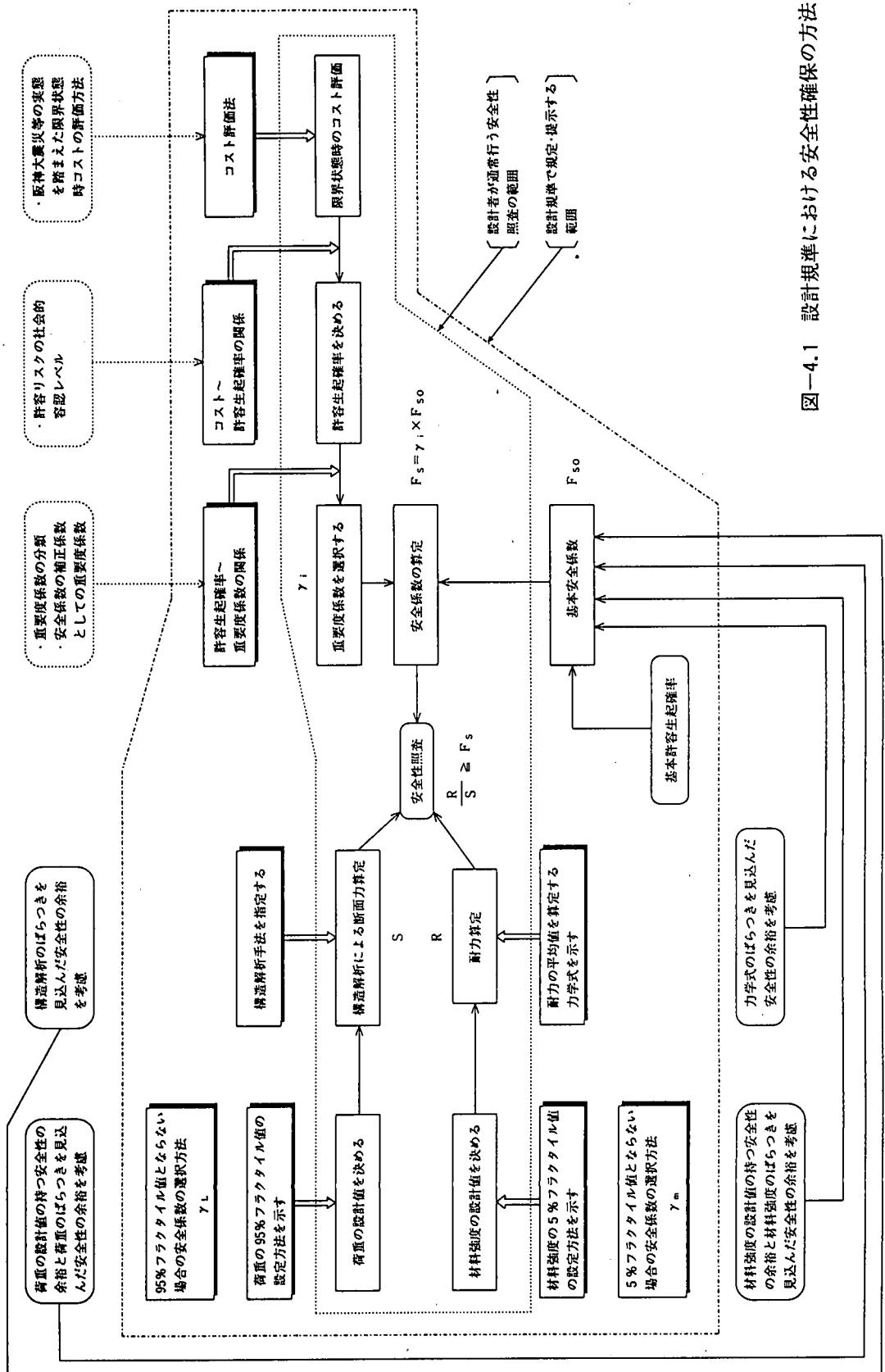


図-4.1 設計規準における安全性確保の方法

許容生起確率は、限界状態が発生した際のリスクによって変化すると考えられる。そのリスクがどの程度なら許容できるか（保険でカバーできる等）という水準に応じて設定すべきものと考えられる。いわゆる社会的容認レベル（social acceptable level）のコンセンサスを得るためにの調査、研究、議論が必要である。ここで提案する方法を実現するためにもっとも難しい課題といえるかもしれない。

本節の最後にあたり、次のことを強調しておきたい。それは、「ここに挙げた課題が十分な状態で解決されていなくても、まず、本提案の安全性確保の方法を取り入れた Code for Code Writers を早急に制定することが重要」ということである。各課題に対して不完全な状態であっても、不完全なりの設定根拠を明確にしておけば、将来の研究によって改善していくことができる。現行の日本の設計規準を見ると、(1)～(6)の項目には全く対応していないことがわかる。従って、これらの項目に対して、正面から一歩一歩取り組んでいくことは、設計規準における安全性確保に関して大きな進歩であり、将来の発展につながる重要な作業であることを認識する必要がある。最近こうした認識が広まりつつあり、徐々に具体的な議論が始まられているのは、好ましい傾向といえる。

5. まとめ

当研究小委員会は、1994年秋「設計法やコストダウンの観点からひとまず離れて」「計画から施工・維持管理に至る幅広い応用を意図」することを目標として発足した。これはそれまでの「構造物の安全性」に関する研究活動が信頼性設計の実用化や、設計基準の問題に関心が集中したこと、発足当時の状況として、それが現実の様々な問題に直面して、若干活力を失してきていたことへの反省が根底にある。

ちなみに直面した「現実の問題」として発足時に挙げていたのは、「従来設計との整合性」「人的過誤・既得権といった論理的説明の困難な要素」といったことである。今日的にいえば、既存の規制、あるいはマニュアル類の根拠の不透明性ということになる。これに対し、努力目標を必ずしも具体的に絞りこまず、視野を広げ、幅広く仕事で直面している問題を持ち寄り、知恵を出し合って、確率統計的手法、信頼性の手法等を、使えるところから使ってみようということを狙っていたのがこの小委員会の出発点であった。

ところが、委員会発足の4か月後にして兵庫県南部地震が発生し、それを受けて平成7年度の土木学会全国大会において研究討論会「構造物の破壊時コストの明確化と設計問題における意思決定－阪神大震災の提起する構

造物のコストと安全性の問題－」を開催することとなつた²⁹⁾。このためにも多くの時間をかけて議論を行い、重要な活動成果を得たと考えてよいであろう。この成果は報告書の付録に収められている。研究討論会の資料と、これに先だって実施したアンケートの結果である。本報告の2章とも関連が深い内容であるが、ワーキンググループ分割前に、臨時の拡大幹事会を設けて、侃々諤々の議論を行って、パネリストの役割分担やアンケートの設問を行った。アンケートについては、日本全国の第一線の構造工学研究者、設計技術者570名にお送りし、短い期間に60%に当たる342名のご回答を得ることができた。あらためてこの場をお借りして、膨大な内容の設問に回答して下さった方々にお礼を申し上げる。紙幅の関係で、ここでは省略しているが、委員会全体で論議した成果という意味でも、アンケート結果については回答者・回答内容の質・量という意味でも、この付録は最も本小委員会のアクティビティが出た貴重な部分といえるであろう。

しかし震災を契機として新しい問題意識に基づく議論が出来たとはいえ、当初の委員会発足の意図から見ると、そこに振り回されてしまった点もまた否めないところがあり、軌道修正をしながら2期4年の活動期間が経過したといえる。

現時点であらためて「今、何故確率統計的意意思決定なのか」を考えてみると、4年前と現在とではかなり著しく状況が変化していることに気がつく。土木技術者がどっぷり浸かってきた「川上から川下への意思決定の流れ」をどうしていくのか、震災に際し、市民から寄せられた構造物の安全性に関する疑問への回答。今後の設計規準が向かうべき方向、公共投資の効率性に対する納税者の疑問への回答と、リスクを極小に抑えて欲しいという市民の期待に、同時に答える責任。これらが強く認識されてきた。

委員会名称のキーワード「確率統計」と「意思決定」の中で、後者に重点を置くべきというのが内部の大勢と理解している。委員会発足当初は、確率統計的な手法の応用の幅を広げることに非常に大きいウエイトがあったわけだが、時間の経過とともに後者に重点が移りつつあることを実感している。

各章は一応独立に作業した成果であるが、当然内容的には相互に関連している。3章は施工の合理化ということにウエイトがある章ではあるが、データ処理技術でこれだけのことが施工で出来る、という前提があるならば、それは設計段階にまでフィードバックされてもおかしくない。2章で扱ったリスクの問題は、図-4.1の枠の外側を規定する問題とつながっている。2・3章は、当小委員会の発足の主旨に沿った活動であるのに対し、4章は、当初「この活動はひとまずおいて」と考えていた内

容である。これは震災における構造物被害の教訓を活かす活動を、何とか安全性・信頼性の専門家の集まりの中で実現したいという強い動機付けて始めた。前述の「震災に振り回された」という部分ともいえるが、前半の章との関連づけを与えることで、むしろ意義の増すレポートになっていると考えている。

今後は、ワーキンググループとした活動を独立させていくことが一つの目標であり、また現在研究が進みつつある性能設計、耐震設計、基準の国際化に関係した安全性確保の基本的議論等と有機的に関連づけを行うことも肝要と考えている。

この他、活動の一環として、土木学会安全問題委員会主催の「安全問題討論会'97」にも協力し、「リスクとのつきあいから眺める未来社会」と題するセッションを企画した。委員の手による論文発表（本文中の重複分を除く）を文献25)～28)として挙げておく。

なお、本研究小委員会の委員構成は以下の通りである。
○佐藤尚次（筑波大学）、相沢順（パシフィックコンサルタンツ）、○赤石沢総光（東京電力）、○五十嵐俊一（イスタンブル工科大学）、磯江暁（川崎重工業）、岩野政浩（大成建設）、○大幡勝利（労働省）、○香月智（防衛大学校）、北原武嗣（竹中工務店）、清水英良（岐阜大学）、白木渡（香川大学）、○杉山俊幸（山梨大学）、○鈴木誠（清水建設）、○須藤敦史（地崎工業）、○砂坂善雄（鹿島建設）、高橋浩（前田建設）、恒国光義（東電設計）、○中村孝明（篠塚研究所）、西村伸一（岡山大学）、野田茂（鳥取大学）、花安繁郎（労働省）、○橋本健（パシフィックコンサルタンツ）、平井一人（日本電子計算）、●藤田宗久（清水建設）、○松島学（東電設計）、○丸山収（武藏工业大学）、湊隆幸（東海大学）、宮崎浩徳（富士総合技術研究所）、○村田清満（鉄道総合技術研究所）、矢代晴実（東京海上火災保険）、安井英二（鴻池組）、安田昭彦（前田建設）、○安田登（東京電力）、山本正明（鹿島建設）。ただし○委員長、●幹事長、○幹事ならびに拡大幹事会構成員、委員の所属は最近のものであり、前委員をも含む。

また、土木学会事務局の河西貴志氏には、担当者として委員会手続き、諸連絡等で大変お世話になった。ここに記して感謝の念を頤わすものである。

小委員会報告書に関するお問い合わせは、土木学会研究事業課（Tel. 03-3355-3559, Fax 03-5379-0125）まで。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の安全性・信頼性。土木学会、1976。
- 2) 土木学会：構造物のライフタイムリスクの評価（構造工学シリーズ2），土木学会、1988。
- 3) 土木学会：土木学会の国際戦略を考える—ISO、国際資格、推進機構一、土木学会平成10年度全国大会研究討論会4資料、1998。
- 4) 日本原子力情報センター：原子力発電所の地震リスクを評価する、1996。
- 5) 平井一人：建設物のリスク解析および費用便益分析の現状と課題、情報処理学会・第12回数理モデル化と問題解決研究会、1997。
- 6) 花安繁郎：我が国の各種リスクの現状と安全工学の今後の役割と方向に関する考察、土木学会安全問題討論会'97研究論文集、pp.111-118、1997。
- 7) 土木学会：土木構造物の耐震設計等に関する提言、1995。
- 8) 水谷守、中村孝明、下野正人、亀村勝美：確率論的アプローチによる地震リスクマネージメント(SRM)手法の提案、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集 I-B, pp.738-739, 1996.
- 9) Federal Emergency Management Agency: A benefit-cost model for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA227, 1992.
- 10) 清水英良、西村伸一：SCP液状化対策工を適用した干拓堤防の信頼性設計、土木学会第52回年次学術講演会概要集 I-A, pp.301-302, 1997.
- 11) 松木健、野田茂：GAを用いた都市ガス供給網の震災復旧最適化、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 I-B, pp.866-867, 1997.
- 12) Journel, A. G. and Huijbregts, Ch. J.: Mining Geostatistics, Academic Press., pp.324-343, 1978.
- 13) 本多眞、鈴木誠、上田実、近藤寛通：地形情報を用いた基礎地盤面のモデル化と推定、土木学会論文集、第561号、III-38, pp.63-74, 1997.
- 14) Branson, D.E.: Variability of Deflections of Simply Supported Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, Proc.69, pp.449-451, 1972.
- 15) 岡原美知夫、中谷昌一、松井謙二、杭の鉛直および水平方向の支持特性に関する研究、構造工学論文集、Vol.37A, pp.1453-1466, 1991.
- 16) 須藤敦史、三上隆、並澤憲吉、齊藤知秀：寒冷地道路トンネルにおける断熱材設計のための地山熱定数の推定、土木学会論文集、第553号、VI-33, pp.201-208, 1996.
- 17) 須藤敦史、藤田寛明：逆解析によるマスコンクリートの温度履歴解析、土木学会北海道支部大会 第51号、V-27, pp.454-457, 1995.
- 18) 杉山俊幸、水谷淳、熊谷紳一郎：ファジイ理論を用いた山留め壁変位の実測値と予測値の整合性判定プロセスのモデル化、土木学会論文集、第480号、VI-21, pp.147-155, 1993.
- 19) 坂井藤一、磯江暁、梅田聰、水上義彦、森本千秋、山田正年：斜張橋架設精度管理システム(COSCOA)の開発、川崎重工技報、第112号、1992。
- 20) 坂井藤一、磯江暁、梅田聰、確率有限要素法/逆解析の橋梁施工精度管理への応用、川崎重工技報、第116号、1993。
- 21) 高橋浩、井上博之、安田登：比抵抗トモグラフィーのグラウト注入状況把握への適用、土木学会第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.21-25, 1995。

- 22)井上博之,高橋浩,小熊登,飯島健:比抵抗トモグラフィーによるダム基盤岩盤でのグラウト効果判定の試み(その2),前田建設技報,Vol.36,pp.211-220,1995.
- 23)IABSE:Structural Eurocodes, IABSE CONFERENCE, DAVOS, IABSE REPORTS, Vol. 65, 1992
- 24)佐藤尚次,藤田宗久,白木渡,香月智,中村孝明:設置規準における安全性確保の考え方,構造工学論文集Vol.43A, pp.493-504, 1997.
- 25)佐藤尚次:安全をお金で買う未来社会のイメージ,土木学会安全問題討論会'97研究論文集, pp. 85-90, 1997.
- 26)五十嵐俊一:安全に基盤をおいた社会基盤の構築を,同上, pp. 91-96, 1997.
- 27)渕幸:建設マネジメントにおけるリスクの考え方について,同上, pp. 97-100, 1997.
- 28)中村孝明:災害に伴う個人の損害価値—江戸の防災と現在を比較して-, 同上, pp. 101-107, 1997.
- 29)佐藤尚次:研究討論会・構造物の破壊時コストの明確化と問題問題における意思決定 土木学会誌1996年1月号・付録, pp. 42-47, 1996.

(1998. 10. 29 受付)