

建設物のリスク解析および費用便益分析の現状と課題

平井 一人
日本電子計算（株）大阪支店

阪神淡路大震災以降、建設物の信頼度を求める社会的要請が高まりを見せている。土木・建築関係者は震災の教訓を生かして設計基準や構造解析手法にリスク解析を含める形で再検討や新しい提案を行なっている。

本稿では、一般的なりスクの捉え方を整理した上で、建造物のリスク解析のあり方を論じ、土木工学で用いられているリスク解析と費用便益分析の手法についていくつかを紹介した。また、耐震設計基準の見直しの動きや、リスク定量化に関するアンケート結果を報告した。そしてリスク定量化を前提とする費用便益分析は社会的合意を取り込む意思決定プロセスが重要である点を強調した。

キーワード：社会基盤施設、リスク解析、設計基準、社会的合意

On the Analysis of Risk and Cost-Benefit in Structures

Kazuto HIRAI
Osaka Branch, Japan Information Processing Service Co.ltd.

After Hanshin-Awaji Great Earthquake at January 17 1995, it is said that social requests for safety and reliability of structures increase. In this paper, how to think the risk generally, and the outline about the analysis of risk and cost-benefit in civil engineering are explained. Next, the movement of new design code and the result of study which made inquiries about the quantitative analysis of risk are reported. And, it is emphasized that cost-benefit analysis based on numerical risk should attach importance to decision making process of social consensus.

Keywords: infra-structure, risk analysis, design code, social consensus

1. はじめに

1995年1月17日の未明に発生した阪神淡路大震災により建設物の信頼性やリスクに注目が集まった。とりわけ、市民生活に関係した建設物の被害が多に及んだため、一般の人々にもリスクについて改めて考えさせることになった。

この地震被害により、行政や被災住民のほか、土木・建築関係者の受けた衝撃は別の意味で大きいものだった。筆者が関係する土木分野で言えば、構造設計や河川分野では従来から信頼性研究は行われていたが、主に個別の建設物や施設に対してである。市民生活に密着している橋梁や道路、鉄道、公共建築物、および電気、ガス、水道などのライフラインを、総合的にシステムとして把握していない傾向があったことは否定できない。

言いかえると社会基盤施設（インフラストラクチャー）としてのリスク分析の研究は意識して行われていなかった。筆者の分野である土木計画でも計画スキームには、防災計画はあったものの社会基盤施設のリスクを正面から取り込んではいなかった。

土木学会、日本建築学会は各々の立場で、大規模地震などによる建設物の計画、設計、施工、管理について社会に向けて積極的な発言、研究を開始した。また、行政においても論議はあるものの構造面では、高架橋の耐震補強工事を開始し、土木・建築構造物の設計基準見直しを検討している。

本稿では、社会基盤施設や建築物に対する信頼性分析あるいはリスク解析とその定量化ないし費用便益分析の議論について、土木工学の事例を中心に解説し、筆者の意見も合わせて述べる。なお本稿の記述は総論ではなく、筆者が関係する土木学会の研究委員会などで話題になっているトピックを中心に取り上げたものである。また、土木工学の対象は広範囲に及んでおり、本稿の内容はその一部に過ぎない点をお断りしておきたい。

2. リスクと生起確率の受け取り方

2-1. 一般的な定義

まず、リスクの反対表現である安全性ないし信頼性に対する定義を整理してみる。

(a) 安全性評価の定義

「機器、構造物や人間などの機能喪失または機能不全」状態（リスク状態）を評価すること、と定義できる。

(b) 信頼性の定義

JISZ8115 信頼性用語によれば、「アイテムが与えられた条件、規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質」とされる。また、そのアイテムとは「信頼性の対象となるシステム、サブシステム、機器、装置、構成品、部品、素子、要素などの総称またはそのいずれかをいう」と定義されている。

そのアイテムとして土木・建築構造物を取り上げた場合が、「構造信頼性」となる。社会的側面や生活・経済活動までを考慮すると「社会基盤信頼性」や「社会リスク」と呼べるかもしれない。

なお、「社会基盤信頼性」についてはこれからの研究分野と言える。もっとも、耐震工学ではハード面でライフラインや橋梁などを従来から研究してきた。しかし、社会システムまで考慮すれば、多次元的で定量化しにくい要素が多く、モデル化が容易ではない。

2-2. 損傷の生起確率と社会一般の認識

一般的なリスクの捉え方に対しては、日本では安全か危険かの二者択一の議論が多い。そしてその境界は、ある基準を越えているかどうかで決定されている。

(1) 損傷確率や死亡確率

事故や災害について、 10^{-5} /年といった生起確率が与えられた場合でも、その意味は、その事故が起こるのは年に 10^5 回に1回というオーダーに過ぎず目安でしかない。たとえば、年度あたりの死亡率では、以下のような数値が時々、引用される場合がある。

＜死亡率＞ 原子力発電所： 10^{-6}
自動車事故： 10^{-4}
癌： 10^{-3}

これは、死亡率の大きさを比べるのに役立つ以上の情報を示していない。

(2) 生起確率とリスクの受け止め方

10^{-5} /年の災害が一度起こったからといって、その年度には各人がその災害に2度と体験（遭遇）しないということにはならない。生起確率と体験（遭遇）確率は同じではない。また、リスクへの一般の人と専門家の受け止め方は異なる。地震を例にとって数学的表現で書いてみる。

ある地震動(f)に対してその構造物が壊れる確率を $p(f)$ とすれば、構造物の安全度について、専門家は関東大震災級（今後は阪神大震災級）という $f=F$ についての壊れる確率 $p(F)$ が極めて低いとき、「安全だ」と判断する。

しかしながら、一般の人の感じ方はこれとは異なる。すなわち、

様々な地震動の生起確率 $q(f)$ を掛け合わせて、地震動 f の考えられるすべての範囲について積分した値、

$$P = \int p(f)q(f)df / \int q(f)df$$

の P が「その構造物が安全かどうか」を判断する確率（リスク）になっている。

なお、この式では大きさ 0 の地震動 f までを入れると $\int q(f)df = 1$ となる。

また、後述するアンケートの箇所でも例を引いているが、「毎年の最大の地震の発生確率を独立と考えればその建物が 100 年間壊れない確率は約 37% になる」という説明がある。この数字のように理論確率的に考えるのは重要ではあるが、一般社会では理解されないのが実情である。したがって、単に生起確率といった確率でリスクを捉えようと本筋を外れる。リスクの定量化が要求される。よく言われるように、

原子力発電所の事故発生確率 << 自動車事故の発生確率
であるが、一旦、事故が起きた場合の被害の量（発生確率×周辺人口）は原子力発電所がずっと大きいことは論を待たない。

3. 土木工学関係者の対応

阪神淡路大震災の影響は、実務に携わる建設会社や設計事務所や行政は無論のこと、特に構造設計の専門家に大きかった。施工不良による損傷を別にしても設計基準の見直しや各構造解析手法の改善など取り組むべきテーマが溢れている状況である。一方、都市計画や交通システムの分野では、従来の計画スキームにリスク概念が乏しかったため、防災の観点を枠組に入れる必要性に迫られている。

土木工学の中では、耐震工学と河川工学方面は反応が異なると思われる。前者は地震によるリスクを構造設計面から研究するのが本筋なためである。ただ多くの場合、耐震工学は構造設計の専門家でもあるため反応はさまざまであった。後者は、基本的に雨量の統計データや気象観測体制の整備、および地形図、河道断面条件などと水理公式の組合せによる流量シミュレーション行なう形で、リスク管理や費用便益算定を行っていた。しかしながら、それは河川計画というソフト面に限ってであり、建造物たる堤防の設計や施工面では構造設計上の問題に帰着する。

土木工学は広範囲に及ぶため、ここでは震災以後の多くのトピックから、耐震設計基準と社会基盤施設のリスクへの取り組みと、リスクに関するアンケート調査結果を報告する。

3-1. 耐震設計基準についての見直し

(1) 新しい耐震設計の考え方

五十嵐 [1995] によると、耐震設計基準は濃尾地震以後、関東大震災の教訓を経て定められたのが始まりで、その後いくつかの震災の教訓を入れて発展してきた。最新は平成 2 年である。阪神淡路大震災では、平成 2 年の最新基準で設計された施設にも機能停止を伴う被害がみられた。これを契機に、従来の耐震設計基準を根本的に見直す必要があるとの指摘がある。

従来の設計は地震に対して「塑性変形能や免震機構を用いて耐える」という考え方 <壊れない、ないし壊れにくい> であった。これに対して、今後は地震に対して「地震荷重は構造物の変形能やエネルギー吸収力を上回り、これにより構造物が破壊することを考慮して構造計画、設計を行なう」という考え方（信頼性設計）が必要との声が強まっている。これまでの構造物の設計・施工は、地震に対して壊れないとの前提であったので、大部分の構造物は一度設置すると、撤去することは考えられていなかった。

（例）橋梁の施工時には、クレーンで架設しても、コンクリートのスラブや付帯施設を付けたりして、クレーンではもはや撤去できない重量になっている場合が多い。壊さないと撤去出来ない。

このため、阪神淡路大震災の被害復旧では、この設計・施工の考え方が障害になったとの指摘も多い。したがって、やや荒い議論ではあるが、個々の建築物、構造物の重要度に応じ、強度や変形能を均等に向上させるより、むしろ壊れることを前提に設計・施工を行なうことが現実的であり、費用便益効果に見合うとの考え方が起きている。

個々の建築物、構造物やシステム(i) に対して、被害D、地震荷重L、設計容量Cとして

$$D_i = L_i - C_i$$

なる関係式で、従来は限りなくD=0であったが、(i)に対する重要度の大きさに応じて

限りなくD=0 (損傷確率がほぼ100%)

ケースにより 限りなくD=0 ~ D > 0

となるように設計、施工していくわけである。

これは設計手法の表現で言えば、従来の「塑性変形能や免震機構を用いて耐える」という設計(許容応力度設計法や終局強度設計法)から、構造要素の破壊を考慮した、破壊解析を取り込んだ限界状態設計法や信頼性設計法へのシフトと呼べる。

(2) 安全係数および信頼性設計の考え方

構造設計での基本タームである安全係数と、注目されている信頼性設計の考え方の概略を示す。

【安全係数】

構造信頼性上の技術指標である安全係数は、各部材の強度と応力を確定値として捉えている。例えば、強度と応力の比が安全率以上であればOKという使い方をする。これらは、諸々の誤差や種類、重要度などの要因を一つの確定値に取り込んでいる面もあり、論議のある問題である。

【信頼性設計の考え方】

構造設計で広まりつつある信頼性設計は信頼性理論に基づく次のモデルである。

R: 構造物の耐力、S: 荷重(荷重効果) の2つの確率変数を考え、

$$R - S \leq 0$$

$$p = P(R - S \leq 0)$$

となる破壊確率をもって安全性(pが小さいほど安全)の評価指標とする。RとSは統計的に独立であり、RとSの確率分布がわかれば破壊確率は計算出来る。実際には正規分布と仮定する場合が多い。

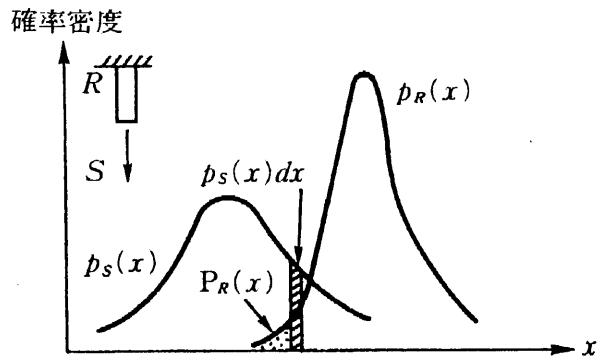


図-1: 信頼性設計の基本モデル(長[1993]による)

3-2. 社会基盤施設のリスク

(1) 考え方

設計基準や施工強度が「新旧混合」になっている現実の社会基盤施設や民間の建築物からなるシステムを対象とするとき、計画や設計では「絶対に壊れない」という目標は、経済性の観点のみを取っても受け入れられない。道路やライフラインのネットワークにしても、被災時に幹線系が機能維持すれば全体の復旧は早まる。実際、防災システムの根幹は「枝を切っても幹を守る」思想であることは否定できない。

また個々の構造物においても、原子力発電所のような施設では単純に限りなくダメージが0というより、機能が重層的に重要度ランク付けがなされた設計になっている(フェールセーフの思想)。

当然ながら、この重要度のランクは理論的な検討と同時に、リスクの許容度への社会的なコンセンサスを得る必要があり、各施設から便益を受けている不特定多数者の意見をまとめて行く作業(意思

決定プロセス)や、補償や保険などの法制度の整備も要求される。また、建造物を含む社会基盤施設システムのリスク解析の技術面では、個別の建設物のリスク解析で用いられていた確率・統計的手法に加えて、計画科学で用いられているネットワーク解析、マルコフ連鎖や動的シミュレーションが効果的と思われる(図-2に例を示す)。

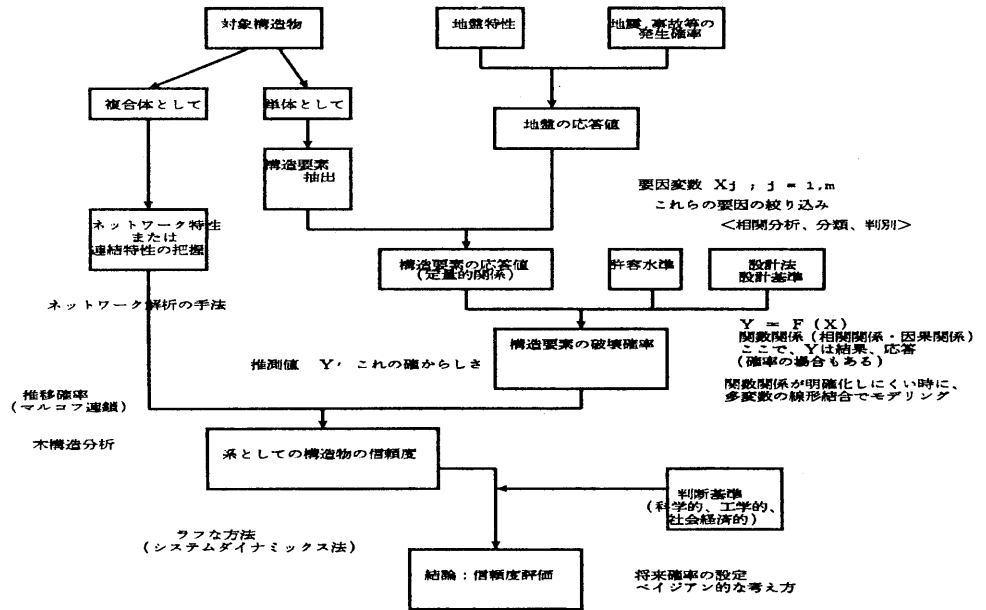


図-2: 構造物(系)の信頼性評価に関する処理フロー(平井[1996]による)

(2) リスク評価とリスク管理の必要性

次にリスク解析と合わせて、今後の社会基盤施設などの公共性の高い建造物についてはリスク評価とリスク管理の必要性が高まろう。これは建造物のリスクは年数経過による劣化(ライフタイムリスク)の観点からも必要になる。

【リスクアセスメントの基本フロー】

- i) 目標設定
- ii) 個別項目
- iii) インパクト評価(分類、特性解析、連関分析)
- iv) 改善評価、代替案の選択

【リスクマネジメント】

これはリスクを一定値以下に低減するための政策的判断を行ない、管理目標の下で何らかの規制、指導等を行なうこと、と定義される。このためには定量的な費用便益分析を行ない、同時に許容リスクに対する社会的合意が要求される。

3-3. アンケート調査と結果

土木学会構造工学委員会「確率・統計的意思決定研究小委員会」(以降、小委員会と略称)では、構造設計だけでなく、都市・交通システムや建設プロジェクト評価などの関連領域に関する確率・統計的手法の研究活動を行なっている。

小委員会では「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—」と題する研究討論会などの資料に役立てるために、震災後に土木・建築関係者に対しアンケートを実施した。

＜アンケートの結果＞

対象：学校・研究機関、官公庁、建設会社、コンサルタント
回答数：342通

① 信頼性設計（破壊確率を入れた設計法）

合計で、60%が賛成、消極的同意が22%。反対は4%のみであったが、反対意見として、「破壊確率の適切なレベルがわからない」が最も多かった。

② 構造設計法として一般的な各方法への理解度

一般的に用いられる許容応力度法、限界状態設計法を知っている人が多かったが、信頼性設計は知らない人が多く、その理解度が不十分なが目立った。

③ 設計基準で定められている安全係数

合理的が40人、適切が38人、不合理を感じるが268人であり、大きいと感じるが37人、小さいと感じるが8人。また、安全係数にケースに応じて幅を持たせる考え方には90%程度が賛成した。

④ 設計荷重の再現期間の概念

地震や風に対する設計荷重は、統計データの分析が基本になっているが、そこで使われる「再現期間」の計算方法への知識が不十分であった。

『例：再現期間100年の地震』

このレベルを超過する地震が実際に100年間に1回以上発生する確率は、

計算上の確率で63.2%（地震の生起確率がポアソン分布に従うとの仮定）である。

しかし、知識が不十分とは言え、これは理論上の問題だからやむを得ない面もある。

⑤ 土木構造物の破壊確率のオーダー

どの程度の破壊確率が適切かは10のマイナス6乗という返答が多かった。

⑥ 破壊時費用

これは、ひとたび事故が生じたときの影響の大きさであるが、これを工学的に考慮すべきかという問いには、65%が「重要度に近い概念であり、定量化の努力をすべき」と答えたのが注目された。

⑦ 期待費用最小化設計

これは、初期建設費用と破壊時費用に破壊確率を乗じて得られるリスクとの和を最小化する考え方に基づく設計法である。ケース次第という場合も含めて、84%が受け入れるとの答えが得られた。

4. リスクに関する費用便益分析の枠組

4-1. その考え方

費用便益分析という用語はかなり漠然とした意味で多方面で用いられ、解釈も異なる。本論ではリスクを低減しつつ、一定水準の機能と安全性を持つ建設物や施設を作る場合を考える。

費用便益や投資効果の関係でみれば、多くの場合、その関係は成長曲線型になると思われる。つまり、一般使用に耐えられるリスク確率を得るために投入される費用に比べ、より低いリスク確率（より高い信頼確率）を得るためには膨大な費用が必要になるということである。正確な議論をするには実証的な研究を待たねばならないが、定性的議論として受け入れられよう。

(a) 個別の建造物の場合

リスク度のある建設物については、その補強や立て替えなどの投資が必要になるが、非常に多くの対象があるため、その費用便益分析の議論を踏まえて、計画、投資、工事や維持運用を考えなくてはならない側面がある。

(b) 社会基盤施設のような系を対象とする場合

もちろん、個別の建設物についての信頼性理論や解析モデルが前提ではあるが、社会基盤施設では、各種の建設物が建設時期も用途も多様に存在して、一体となって都市の基盤を形成している。連関性を扱う点が技術的に難しい。

4-2. 技術的な枠組

費用便益分析の技術的な枠組を考えてみる。便益と投入費用との関数関係が概念モデルでは描けても、実際への適用では設計や計画の構成要素の予測の信頼度が求められる。また多くの代替案からの選択（社会的効用関数の同定）という問題をどのように解くかという技術論にも依存する。費用便益分析の前提となるリスクの定量化では、確率表現ではなく、具体的な被害額などの数量に換算することが必要で、数量化しにくい項目も多く含まれるため解釈に際しては留意すべきである。

大まかな分類をすれば、次のようになる。

統計データがあるとき：

従来の確率・統計的な推定×連関手法（ETA,FTA,マルコフ連鎖 etc.）

統計データがあっても不十分な場合：

主観確率（ベイズ理論、統計的決定理論）を導入する。例：PSAなど

このうち、一般性のあるイベントツリー解析（ETA）と確率論的安全評価（PSA）の概略を示す。

[A] イベントツリー解析（Event Tree Analysis ; ETA）

これは従来からある手法である。対象となる施設について、イベントツリーが判明している仮定の下で、事象(j)の発生確率を P_j 、その想定被害 C_j とすれば、

事象(j)の期待値としてのリスク $R_j = P_j \cdot C_j$

これをイベントツリーの枝の総数だけ考慮すると

トータルリスク（期待値） $R = \sum (P_j \cdot C_j)$

と表せる。この手法適用上の基本問題は「対象となる施設について、イベントツリーを精度よく書き切れ、そしてリスク定量化ができるか」という点である。

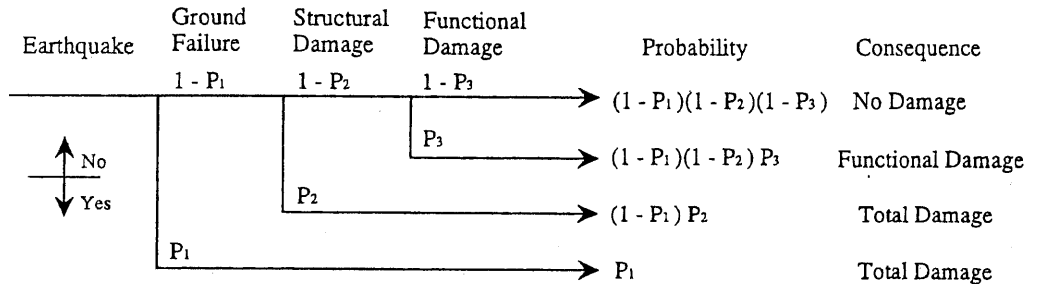


図 - 3 ETAのイメージ（中村・水谷 [1995] による）

[B] 確率論的安全評価（Probabilistic Safety Assessment; PSA）

これは、元来、大規模施設システムである原子力発電建設に適用する手法として発達した。内的事象（故障など）のPSAと外的事象（地震、火災など）のPSAに分類できる。

この方法は、主観確率の適切な設定ができれば、システム解析としては一般的なので、社会基盤信頼性にも条件が揃えば適用可能と思われる。ここでは地震への適用でその確率の表現を示すに留める。

耐震力を表す確率変数を A とすれば、これは次のように分解している。

$$A = A_m \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_u$$

ここで、 A_m ：地震動の中央値の最良推定値

ε_r ：その中央値のばらつき

ε_u ：その中央値の不確かさ

これは、データへの知識不足やデータ不足から来るもので、

ε_r に関する主観確率（ベイズ確率）に対応する変動

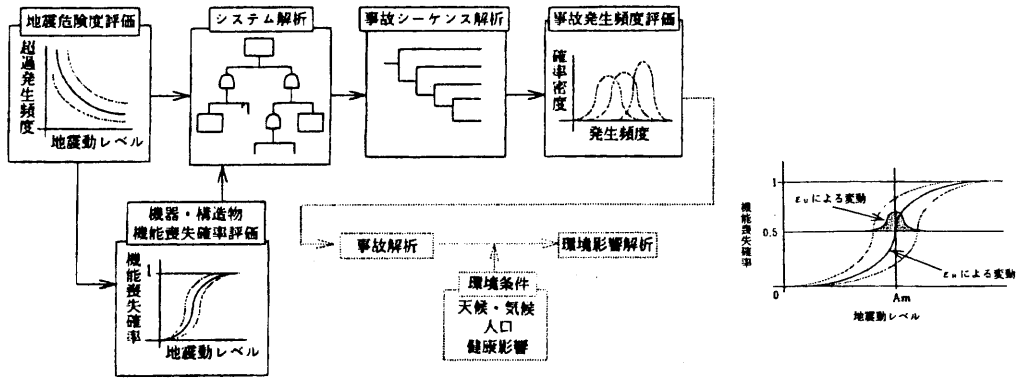


図 - 4 : 地震 P S A の解説図 (福岡 [1994] による)

5. おわりに

本稿では、阪神淡路大震災を契機として高まった土木・建築物の設計見直しやリスク解析の再構築の流れを紹介し、リスクの受け止め方やリスク解析手法と費用便益分析について概要を述べた。また、リスク定量化に関しては様々な制約があることを示し、今後は社会的な合意を含んだリスク評価やリスク管理の必要性を指摘した。この方面の研究が活発になることを期待したい。土木工学や確率・統計的手法は広範囲で技術も高度化している。筆者が全部を把握している訳もなく、専門が土木計画系のため用語や解釈など思わぬ誤りがあるかもしれない。率直な意見をお待ちしたい。

【謝辞】

土木学会構造工学委員会「確率・統計的意思決定研究小委員会」の佐藤尚次委員長（関東学院大学）、および小委員会の委員皆様には貴重な意見や資料を頂き感謝致します。また日頃、御指導頂いている黒田勝彦教授（神戸大学）、古田 均教授（関西大学）に感謝致します。

参考文献

- [1] A. H-S. Ang and W. H. Tang 著、伊藤学他訳、「土木・建築のための確率統計の応用」、丸善、1985
- [2] 氏家久芳他：信頼性理論に基づく栈橋鋼管杭の疲労・腐食評価、海岸工学論文集、第39巻、1992
- [3] 長 尚：基礎知識としての構造信頼性設計、山海堂、1993
- [4] 小林定喜、神田玲子：リスクアセスメントーその歴史と概説、環境科学会誌、Vol.6, No.4、1993
- [5] 盛岡 通（編著）：環境をまもり育てる技術、ぎょうせい、1994
- [6] 奥野哲夫、鈴木 誠：期待損失最小化に基づく掘削工事における最適排水量の設定法、土木学会第49回年次学術講演会、1994年9月
- [7] 福岡 博：安全性評価への新しい設計法：地震 P S A、鉄道総研報告、Vol.8, No7、1994
- [8] 芝原 靖典：社会リスクとマネジメントの考え方、第25回安全工学シンポジウム講演予稿集、1995
- [9] 五十嵐 俊一：被害に耐える社会基盤施設の建設にむけて、土木学会構造工学委員会「確率・統計的意思決定研究小委員会」資料、1995年2月
- [10] 中村孝行、水谷 守：地震リスクマネジメントにおけるイベントツリー解析、土木学会構造工学委員会「確率・統計的意思決定研究小委員会」資料、1995年7月
- [11] 橋本 健、相沢 順：河川計画・設計における確率統計的手法の適用について、土木学会構造工学委員会「確率・統計的意思決定研究小委員会」資料、1996年2月
- [12] 平井 一人：構造物の信頼性評価に使用可能性のある計画系の統計・確率的手法、土木学会構造工学委員会「確率・統計的意思決定研究小委員会」資料、1996年2月
- [13] 佐藤尚次、藤田尚久、白木渡、香月 智、中村孝行：設計基準における安全性確保の考え方、構造工学論文集、Vol.43A、1997年3月