

国土技術政策総合研究所 研究報告

RESEARCH REPORT of National Institute for Land and Infrastructure Management

No.65

October 2020

防災計画における確率論的リスク評価と信頼性設計
～空港のBCP等を対象として～

中島 由貴・波多 野匠・黒田 優佳・中村 孝明

Probabilistic Risk Assessment and Reliability-Based Design in Disaster Prevention
Planning : Regarding Airport BCP and the Like

NAKASHIMA Yoshitaka, HATANO Takumi, KURODA Yuka, NAKAMURA Takaaki

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

国土技術政策総合研究所研究報告

RESEARCH REPORT of NILIM

No. 65

October 2020

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

防災計画における確率論的リスク評価と信頼性設計 ～空港のBCP等を対象として～

中島 由貴*, 波多野 匠**, 黒田 優佳***, 中村 孝明****

要 旨

空港土木施設の信頼性設計法の導入にあたり、損傷確率や信頼性指標等の目標性能水準（危険性の限界値）に関する議論の深化が求められている。目標性能水準は科学的合理性のみならず、社会的合意事項としての側面を併せ持つと考えられ、その設定には防災計画の実現や瑕疵の責任所在などを明らかにする必要がある。空港を構成する個別の構造物の目標性能水準は、それらが空港全体の機能を担う構成要素であることを踏まえ、全体性能の目標性能水準から一定の合理性の下で評価する必要がある。本論は、防災計画や国家賠償法について検討し、目標性能水準に資する行政的論拠を考察する。BCP等の防災計画が求める空港の全体性能の目標性能水準から、空港土木施設の目標性能水準を評価する方法を提案し、標本空港のコードキャリブレーションを行い提案手法の適用性について検討を行う。

キーワード：信頼性工学，業務継続計画，タイムライン，目標性能水準，行政法

*研究総務官

**空港研究部国際海事政策分析官

***空港研究部主任研究官

****株式会社 篠塚研究所

〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省 国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 E-mail: ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

Probabilistic Risk Assessment and Reliability-Based Design in Disaster Prevention Planning: Regarding Airport BCP and the Like

NAKASHIMA Yoshitaka *
HATANO Takumi **
KURODA Yuka ***
NAKAMURA Takaaki ***

Synopsis

For reliability design to be generally used today, it is necessary to check the earthquake safety assurance of airport civil engineering facilities by means of an index based on probability theory. However, the discussion on the target safety level (limit value) such as damage probability and the reliability index has not been deepened, and this is an issue in introducing reliability design. It is thought that the limit value has aspects of social consensus as well as scientific rationality. Therefore, it is necessary to clarify defects and responsibility for the realization of a disaster prevention plan in the setting process. Since airport civil engineering facilities are elements constituting the functions of an airport, their limit value needs to be evaluated based on a certain rationality from the limit value of the performance requirements of the entire airport. In this paper, we survey Article 2 of the State Tort Liability Law and disaster prevention planning, and consider the administrative rationale for setting the limit value. A method for evaluating the limit value of airport civil engineering facilities from the limit value of the entire airport is proposed. In addition, a code calibration of a sample airport is carried out as verification of the applicability of the proposed method.

Key Words: Reliability engineering, Business continuity plan, Time line, Target safety level, Administrative law

*Executive Director for Research Affairs

**International Maritime Policy Analyst, Airport Department

***Senior Researcher, Airport Department

****SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE

3-1-1 Nagase, Yokosuka City, Kanagawa 239-0826 Japan

Phone: 046-844-5019 Fax: 046-842-9265 E-mail: ysk.nil-pr@gxb.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに.....	1
2. 信頼性工学.....	2
2.1 信頼性工学の始まり.....	2
2.2 構造信頼性とシステム信頼性.....	3
2.3 構造信頼性による信頼性設計.....	4
2.4 システム信頼性による全体性能の信頼度評価.....	5
2.5 構造信頼性とシステム信頼性とを接続する要素技術.....	5
3. リスク評価とマネジメント.....	7
3.1 リスクの視点と定義.....	7
3.2 地震リスクの分類.....	7
3.3 地震リスクの評価.....	8
3.4 地震リスクマネジメント.....	8
4. 防災計画.....	9
4.1 行政計画としての防災計画.....	9
4.2 防災計画が求める全体性能.....	9
4.3 タイムライン/BCP と期限付き全体性能.....	10
5. 防災計画における復旧曲線と健全度曲線.....	12
5.1 復旧曲線による復旧過程の確率論的表現.....	12
5.2 健全度曲線の経緯と概要.....	13
5.3 健全度曲線の評価法.....	14
6. 防災計画における全体性能の照査.....	15
6.1 防災計画の目標性能水準.....	15
6.2 健全度曲線による照査.....	16
6.3 信頼性設計を踏まえた防災計画の信頼度照査.....	17
6.4 全体性能の信頼性を向上させる対策の考え方.....	18
6.5 防災計画と構造物等の両目標性能水準の整合.....	18
6.6 供用期間と災害の発生確率.....	20
7. 空港の構造物・設備の目標性能水準（危険性の限界値）.....	23
7.1 目標性能水準を巡る法的問題等.....	23
7.2 構造物や設備の目標性能水準.....	24
7.3 構造物・設備の信頼性設計.....	26
8. まとめ.....	30
8.1 研究成果の概要.....	30
8.2 今後の展望.....	30
付録.....	33
付録A 建築施設の耐力中央値の評価.....	33
付録B 地盤物性値.....	34
付録C 再現期間早見表.....	35

1. はじめに

(1) 防災計画と全体性能

防災計画は、発災前の準備を促進するとともに、発災後に一定の目標を達成することを定めた行政計画の一つである。具体的には、災害対策基本法の地域防災計画、内閣府の「事業継続ガイドライン」に則した事業継続計画（以下、「BCP」）、空港における「地震に強い空港のあり方（航空局、2007）」や「「A2-BCP」ガイドライン（航空局、2019）」に則した空港別の事業継続計画などがある。

地震災害に対しては、レベル2地震動を擁す想定地震の下、経過時間に応じて実行すべき災害活動が、タイムラインやBCP（業務継続計画）と称して、目標設定されていることが多い。タイムライン等からは、災害活動に必要な空港の全体性能が、経過時間に応じて、どの程度復旧していなければならないか、容易に読み解くことができる。これは、防災計画において、空港の全体性能と期限を定めているともいえる。

空港は滑走路やターミナルビルなど複数の構造物から構成されている。防災計画において、空港を構成する個々の構造物の信頼性は、決定論的設計による耐震化の可否に基づき判断されている。空港のターミナルビルについては、建築基準法の新耐震基準等を満たすことを根拠に無被害と判断し、発災直後から災害活動を目標とする場合が多い。他方、阪神淡路大震災において、新耐震基準を満足する建物であっても2割程度の被害が報告されており¹⁾、発災直後からの災害活動という目標が、必ずしも実現できるわけではない。では、どの程度実現できるのか把握したいが、そのためには、防災計画で、目標とする期限までに、空港の全体性能をどの程度復旧できるのか、評価する必要がある。しかしながら、その具体的な方法は示されていない。

(2) 信頼性工学の普及

信頼性工学は、戦時下の電子機器システムを源流に、航空宇宙分野や原子力分野等で大きく発展した。原子力発電所のように多くの構造物・部品から構成される施設・設備について、個々の構造物・部品の信頼性から全体性能の信頼性を、確率論的に定量評価できる限られた方法である。

そこで、小野ら²⁾は、空港を構成する施設や構造物の損傷確率を、システム信頼性理論を使い統合することで、空港の全体性能がどの程度低下し、その復旧にはどの程度の時間を要するか、これを経過時間に対して記述した復旧曲線、健全度曲線を提案した。これにより、空港の全

体性能の信頼性を、発災からの経過時間に応じて、まさにタイムラインで照査することが可能になった。

さらに中島ら³⁾は、復旧曲線、健全度曲線を活用しつつ、防災計画で定める目標を達成する上で、費用対効果を考慮したリスク・マネジメント手法を提案し、これをガイドラインとして取りまとめた。また、中島ら⁴⁾は、わが国では、人工島方式を含め、臨海部に空港が多数所在することから、震動被害のみならず液状化被害や津波被害も加えた複合被害への対応も必要と判断し、複合被害を考慮した空港の全体性能の信頼性を評価する方法について提案している。

一方、国土交通省が発行した「土木・建築にかかる設計の基本（2002）」において、性能規定ならびにその照査法としての信頼性設計法の考え方が示された。最近では、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会、2011）」において一部信頼性設計法が取り入れられ、また「道路橋示方書・同解説（日本道路協会、2019）」においても信頼性設計法への改定が行なわれた。これらは、レベル1信頼性設計法、いわゆる荷重係数法にとどまっただけのもの、将来的には破壊確率を直接照査するレベル3への移行が期待される。

(3) 目標性能水準

空港においては、「陸上空港施設の性能照査に必要な事項等を定める告示（国土交通省、2008.6）」において、「性能照査は作用及び当該施設の保有する性能の不確定性を考慮できる方法によって行う（同告示第3条第1項）」ものと規定され、また「滑走路はレベル1地震動に対して航空機の運航に支障を与える程度の損傷の生じる危険性が限界値以下であること（同告示第13条）」が定められた。しかしながら、目標性能水準である危険性の限界値を定める方法や論拠は記されていない。そこで、中島ら⁵⁾は、空港の全体性能は、これを構成する構造物や設備がシステムとして連携して成り立っていると捉え、システム信頼性の方法を使い、空港全体としての目標性能とその危険性の限界値と、個々の構造物や設備の目標性能および危険性の限界値とを関係付ける方法を提案し、信頼性設計に必須な限界値設定の考え方を示した。また、中島ら⁶⁾は、空港全体の目標性能水準の設定について、防災計画と国家賠償法の視点から議論を加えるとともに、滑走路、誘導路等の空港土木施設を例として、その危険性の限界値を具体的に評価した。これにより、空港を構成する個別の構造物・設備の設計限界値を定める論拠が示された。

中島ら、小野らの研究成果を要約すると、①地震に対

する空港の安全性確保は、防災計画が求める空港の全体性能が、すなわち防災計画の実現可能性が、一定の信頼性水準以上であることを照査し確認する作業である。②空港の全体性能の信頼性は、信頼性設計で照査された個別構造物の損傷確率を、システム信頼性評価の方法を使い統合することで評価でき、その経過時間の変化の記述には復旧曲線、健全度曲線が有効である。③空港を構成する構造物の危険性の限界値（目標性能水準である許容破壊確率・信頼性指標・荷重係数）は、空港の全体性能の目標性能水準からシステム信頼性評価を逆算することで求められる。④空港の全体性能の目標性能水準は既存空港のコードキャリブレーションの結果を参照しつつ、空港の設置者もしくは管理者が決定する。

一連の研究は、防災計画と構造物・設備の両目標性能水準を直接的に関連付けるもので、自ずと防災におけるハード対策とソフト対策の役割分担を明確にしている。さらに、確率論をベースとした信頼性理論を計画と設計を通底する横断的技術と位置づけ、これを深化・展開することで得られる新しい防災対策の必要性とその課題を取りまとめている。

(4) 本報告の性格

本報告は、これら研究をとりまとめた、土木学会論文集 F6 安全問題に掲載された「空港土木施設の耐震信頼性の限界値に関する研究（2018）⁶⁾」を再編集し、紙面の都合で割愛した部分を加筆するものである。その際に、一連の研究を平易に体系化し、防災における信頼性設計の役割、および必要性を明確にするとともに、空港の安全性確保に関する展望について考察する。

内容は、地震を想定し、防災計画で要求される空港の全体性能とその信頼性水準について、背景を含め、設定のあり方を明確にする。システム信頼性手法の概要と地震時の空港の全体性能を明示的に記述する復旧曲線、健全度曲線の評価方法を概説する。システム信頼性手法を援用し、空港全体の目標性能水準から、個々の施設や構造物の目標性能水準を評価する方法を示す。さらに具体例を示すとともに、信頼性設計の役割と展望をまとめる。なお、本報告は、個々の施設や構造物の信頼性設計法については言及しない。

以下の2論文について、本文中において参照する。

中島ら⁷⁾は空港コンセッションに関する法整備が進む中、地震リスクの国および空港の運営権利者の分担割合、さらに運営権利者の地震時財務影響分析と効率的な地震保険付保範囲について検討した。

小野ら⁸⁾は地震発生直後の救命期において、被災地外

からのDMATの受入れ拠点としての空港の役割と、役割を実現するために必要な耐震化について、DMATの被災地への到達時間を指標に検討した。

参考文献

- 1) 国土交通省住宅局建築指導課・市街地建築課：改正建築基準法・同施行令等の解説，p.40,ぎょうせい,1995
- 2) 小野ら：空港の性能維持・早期復旧に関する地震リスクマネジメント，国土技術政策総合研究所資料 No.830，国土技術政策総合研究所，2015
- 3) 中島ら：空港総体での安全評価の問題点と地震リスクマネジメントに関するガイドラインの試案，国土技術政策総合研究所資料 No.863，国土技術政策総合研究所，2015
- 4) 中島ら：地震時複合被害による空港機能の信頼性評価，日本地震工学会論文集 19 巻 4 号，p. 4_87-4_99，2019
- 5) 中島ら：空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 No.962，国土技術政策総合研究所，2017
- 6) 中島ら：「空港土木施設の耐震信頼性の限界値に関する研究」，土木学会論文集 F6（安全問題），Vol.74，No.1，pp.11-24，2018
- 7) 中島ら：空港の確率論的リスク評価における財務影響分析に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 No.783，国土技術政策総合研究所，2014
- 8) 小野ら：救命期の受援に対応した空港施設の耐震評価（健全性）～被災地外からの DMAT 動線を対象に～，国土技術政策総合研究所資料 No.935，国土技術政策総合研究所，2016

2. 信頼性工学

2.1 信頼性工学の始まり

信頼性工学（Reliability Engineering）とは、不確実性を確率・統計学に基づき客観的に捉える工学である。「信頼性」とは「供用期間」中に所定の性能を維持する「性質」と、抽象的に説明されており、確率論的方法と明示されなかった。そのため、決定論的方法に慣れ親しんだ者には、信頼性工学は必ずしも確率論的方法とは限らないとの誤解を与えている節がある。「信頼性」は性質を表すのに対し、「信頼度」は信頼性の定量的尺度を確率で定義するものである（図-2.1.1）。やはり、確率という用語が見当たらないので、「信頼度」を性質や確率以外の

ものと誤解しないよう注意が必要である。当然、1（或いは 100%）から信頼度を差し引いた残存リスクが、「損傷確率（破壊確率ともいう。）」である。

信頼性	： 供用期間中に所定の性能を維持する性質
信頼度	： 信頼性の定量的尺度で、確率を用いて定義 残存リスクは、損傷（破壊）確率

図-2.1.1 「信頼性」と「信頼度」

その歴史は、第二次世界大戦の太平洋上の海戦に遡る。米海軍は、航空機を広大な洋上で長時間にわたり運用するにあたり、搭載されるレーダーや通信機などの電子機器システムの重要性を認識する一方、同時に、度重なるシステムの故障にも悩まされていた。当時の電子機器システムは、衝撃に弱く、寿命も極短くかつ高価な真空管を多用するため、システムの故障を科学的に管理する必要性が生じ、確率・統計学に基づく信頼性の考え方が始まった。

その後、米国国防省に AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment) が発足し、1957年には、信頼性の概念と信頼性を改善するための方策等が AGREE 報告書として発刊され、信頼性に関する基礎が整備された。1960年代には実務への応用が進み、たとえば、1959年の自動車のマイル保証や1961年にスタートしたアポロ計画などは、信頼性工学の発展を促した。また、1954年と1955年の間に発生した世界で初めてのジェット旅客機コメットの3回の墜落事故は、その原因が信頼性の欠如（機体における疲労破壊）であることが判明し、これを受けて航空工業界は信頼性の研究に注力するようになった。この頃より、信頼性工学は、工学の一分野としての位置づけが明確になり、これまでの機械工学や電子工学分野の領域から、構造工学、航空宇宙工学、原子力工学、さらに土木・建築といった分野に広がっていった。

なお、信頼性工学における和用語については、材料・機械工学分野を中心とした JIS による統一の試みもある。しかし、信頼性工学の適用分野はあまりにも広く、分野ごとに同じ概念であっても異なる用語で表現することも珍しくない。土木・建築分野でも、必ずしも材料・機械分野の用語とは必ずしも同じではなく、かつ変化していることにも注意が必要である。例えば、「危険性の限界値（国土交通省告示）」、「許容損傷（破壊）確率」、「目標安全水準」、「目標性能水準（土木学会）」とあるが、実務におい

てほぼ同義である。

2.2 構造信頼性とシステム信頼性

「信頼性工学」は「構造信頼性」と「システム信頼性」の両輪を持つ²⁾。両者には、「供用期間」という出口戦略を明確にしたうえで、確率・統計学が底通している（図-2.2.1）。

「構造信頼性」は、部品・部材レベルにおいて、材料や荷重の不確実性に着目した確率論的アプローチである。旧来の決定論的設計において、安全余裕は経験的な安全係数（安全率ともいう）によって対処してきたため、安全余裕は多分に主観的であった。例えば、許容応力度設計法にあっては、役割が異なる二つの部材で、両者の安全率が同じ1.2であっても、実際の部材について試験或いは計算し損傷確率を求めた場合、通常は全く異なる確率値となる。すなわち、安全率が同じということは、安全余裕の客観的程度（＝許容損傷確率）も同じというわけではない。これに対し、構造信頼性は、機械や構造物の設計において、使用材料や強度、荷重等の不確実性を、確率論を用いて客観的に扱うことで、安全余裕に明示的意味を持たせることに成功した。

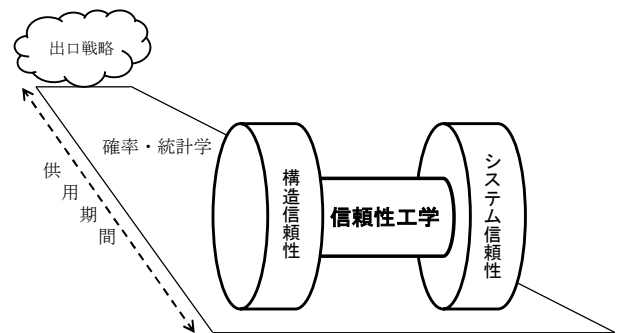


図-2.2.1 信頼性工学を支える構造信頼性とシステム信頼性

一方、「システム信頼性」とは、設備や構造物が、単独の部品・部材で機能しているものは極めて少なく、多数の構成要素（部品・部材）から成り立っているという理解の下、構成要素の集合体の全体レベルで、信頼性工学を適用することである。これは、「全体性能」に着目するもので、システム論的アプローチともいわれる。一つの部品が損傷しても、もう一つの部品がそれを代替するように、システムを冗長化すれば、安全性が高まることは直観的にも推測できる。この冗長化の効果を、確率で客観的に評価するものである。個々の部品や部材の故障や外

力による損傷が、相互にどのように関連しているか、そして、全体系としての機能や信頼性はどうなっているのか。この点を、一定の手順に則って評価・検討する仕組みが、システム信頼性である。

構成要素の単位は、システムの構成から、相対的に設定することができる。すなわち、構造物を構成する部品・部材といったレベルから、施設を構成する機械・設備・構造物などのレベルにも拡張できる。実務においては、エンジン等機械・機体構造・電子機器システムから構成される航空機や、原子炉を中心に、土木・建築構造物を含む、原子力発電所について、全体性能の安全評価に多用されている。

いずれにせよ、両輪共に、信頼性の定量的尺度である信頼度は、確率を用いて定義している。そのことにより、構造信頼性による構成要素の設計と、システム信頼性による全体系の安全評価は、確率で結びつけることができる。したがって、確率・統計学は信頼性工学に不可欠な基本的数理であることを見逃してはならない。

2.3 構造信頼性による信頼性設計

Freudenthal, et al³⁾は、構造物の耐力や外力の不確実性に対し統計学を積極的に取入れた安全性照査の考え方を提唱した。いわゆる信頼性設計法である。この方法を概説すると、まず、図-2.3.1 に示すように、作用と耐力はばらつきをもった確率変数 R, C と置く。そして $R \geq C$ となる確率（これを破壊確率や損傷確率と呼ぶ）が、許容値以下になることを確認し、安全を担保する。このため、安全の概念は「破壊確率や損傷確率が許容できる程、十分小さい」となり、安全に対し絶対を求めないことが前提となる。これは決定論的な設計法と 180 度異なる概念である。一方、図-2.3.1 は様々な不確実性の要因を作用と耐力に集約した簡便モデルであり、不確実性の要因が独立かつ多数の場合、確率変数は相応に多くなることに注意が必要である。

信頼性設計法は合理的な設計理論として 1960 年代に登場したにも関わらず、特に建築・土木分野において、一般化は進まなかった。これは、その理論の煩雑・難解に加え、確率変数の不確実性に関する統計情報、損傷確率の許容値に関する合理的な説明技法などが未整備であることが、その理由と考える。我が国においては、2002 年に国土交通省から「土木・建築にかかる設計の基本」が発刊され、性能規定ならびにその照査法としての信頼性設計法の考え方が示されたが、同設計法に関する指針や基準類は、2011 年の「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会）」や 2019 年の「道路橋示方書（日本

道路協会）」まで待つことになる。さらに、信頼性設計法といっても、使用材料や強度、荷重等の不確実性を係数によって代替する、いわゆる荷重係数法にとどまっており、設計者は不確実性や確率を意識することなく設計が可能となる。

さて、確率変数 R, C を確率密度関数 $f_R(r), f_C(c)$ で表記した場合、 $f_R(r)$ と $f_C(c)$ の重なる部分は、外力が耐力を上回る場合があることを示している。双方の確率分布の積分から損傷確率を求めることができるが、損傷確率が許容値を超える場合には、耐力 $f_C(c)$ を図の右に移動させるか、あるいはばらつきを小さくすることで対処する。前者は耐震性能の向上であり、後者はより確かな材料、工法、情報の精緻化など、確実性を増す行為が必要になる。一方、構造物に作用する地震動が変化する場合、作用地震動 $f_R(r)$ を図の左右に移動させることで対応できる。このとき、予め作用 $f_R(r)$ の中央値を変数に、損傷確率を求める関数を評価することもできる。これをフラジリティカーブと呼び、概念図を図-2.3.2 に示す。フラジリティカーブは、主に原子力分野の地震 PRA (Probability Risk Assessment : 確率論的リスク分析) で整備が進み、1999 年には、フラジリティカーブのパラメータ（耐力の中央値、標準偏差等）を被災事例や実験などから統計的に評価する方法が提案された⁴⁾。その結果、土木施設や建築構造物の地震被災情報が収集され、各種構造物のフラジリティカーブが整備されると共に、不確実性の程度を把握できるようになった。

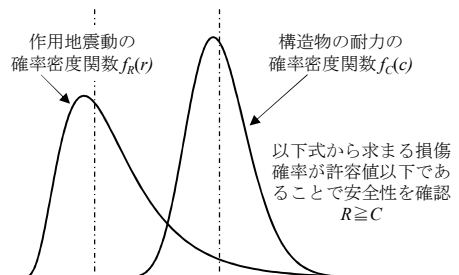


図-2.3.1 信頼性設計の考え方

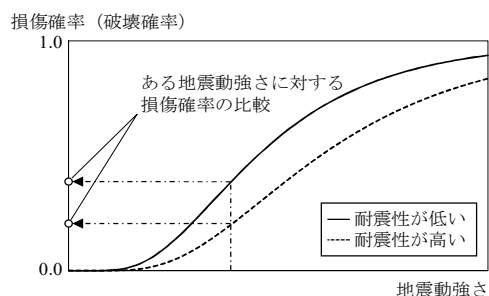


図-2.3.2 フラジリティカーブの概念図

フラジリティカーブが一般に普及するのは概ね 2000 年以降であり、星谷ら⁵⁾をはじめ、かつては性能関数を用いて概念説明されることが多かった。フラジリティカーブと性能関数は、本質的に同じ数理モデルである。フラジリティカーブは、信頼性設計と損害賠償責任の関係説明などにおいて、数学的知識に乏しい者にも、直感的な理解が容易であり、信頼性設計の平易な説明に優れていると考えられる。

図-2.3.3 は、滑走路（土工構造物）について、一つの地震動が作用した場合の大破・中破・小破別の損傷確率の算出イメージを示す。大破・中破・小破別にフラジリティカーブを作成し重ね合わせる。各事象を排反事象の集合と捉えることで、大破・中破・小破の発生確率を得る。また、それぞれの生起確率は地震動によって変化するものの、総和は 1.0 になる。周期性構造物の固有周期と一致する地震動強さ、いわゆる応答加速度等を横軸にとることもできる。

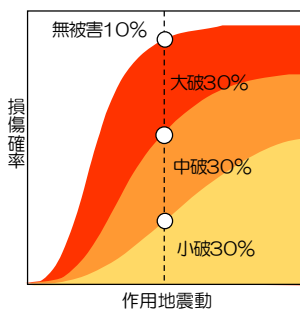


図-2.3.3 フラジリティカーブによる大破・中破・小破別の損傷確率

2.4 システム信頼性による全体性能の信頼度評価

システム信頼性による全体性能の信頼度評価は、システムを構成する要素と、要素の連結性としての直列、並列システム、あるいはネットワークシステムなどの全体系を信頼性工学により評価する方法と定義される。直列とは要素間で代替がないこと、並列とは要素間で代替が可能で冗長化が可能であることを示す。直列では、要素が一つでも壊れれば、全体系が機能不全に至る。要素別の信頼性が同じであれば、要素数（部品数や部材数）の増加に応じて、全体系の信頼性も低下する。並列では冗長化により全体系の信頼性は向上する。ただし、要素の損傷事象に従属性がある場合はこの限りではない。

そして全体系の信頼度を、一定の確率法則に従って評価することが主要な課題となる。利用範囲は、機械や電子機器、船舶や航空機、原子力、さらに産業施設やイン

フラ施設など、広範である。ここでは、空港を対象としたシステム信頼性の利用について掘り下げる。

図-2.4.1 は、空港において、民航機が健全に運航できるように必要な構成要素と、要素を直列、並列に組み立てた全体系を示している。以後、これをシステムモデルと呼ぶ。

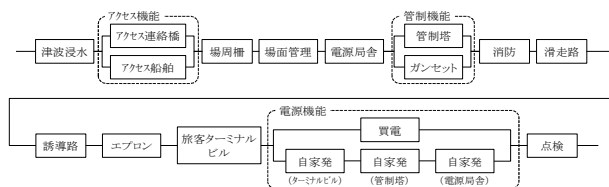


図-2.4.1 空港における民航機の運航に関するシステムモデル

産業施設やインフラ施設の信頼度評価は、地震や風水害などの非常時の外力を要因とするケースが多い。地震を対象とした場合には、民航機運航に関する全体性能の信頼度は、まず、各要素の地震時損傷確率を、前記した構造信頼性の方法やフラジリティカーブを用いて求め、これをシステム信頼性の方法に則って評価することで求められる。現在、信頼性設計法は、荷重係数法にとどまっており、各構成要素の地震時損傷確率を設計図書等から直接引用することはできない。今後、損傷確率を照査するレベル 3 信頼性設計法が一般化すれば、民航機運航に関する全体性能の信頼度と耐震設計はダイレクトに結び付くことになり、BCP（業務継続計画）を含めた防災計画における耐震設計の役割が明確になると考える。また、個々の構造物（構成要素と同義）はどの程度の耐震性能を持つ必要があるか、この点を空港の全体性能の信頼度から評価できるようになる。

一方、2007 年に示された「地震に強い空港のあり方（航空局）」では、空港の防災計画の一環として、空港の全体性能と、その性能確保の期限を、具体的に示した。これは、後の「南海トラフ地震における具体的な応急対策活動に関する計画（中央防災会議幹事会、2015）」に示される災害活動のタイムライン（期限）の先駆けである。これを照査するには、空港の全体性能を発災からの時間軸で示す必要がある。本報告の主要な研究テーマでもあり、後章で詳しく解説する。

2.5 構造信頼性とシステム信頼性とを接続する要素技術

信頼性工学で有名な手法であるイベントツリー分析（Event Tree Analysis, 事象の木分析）と、フォールトツリー分析（Fault Tree Analysis, 故障の木分析）は、構造信頼性とシステム信頼性を接続する要素技術である。両者

の役割分担について、若干、初心者には混乱がみられるので、整理する。

イベントツリー分析は、原因が判っているとき、被害の結果を推測するものである。逆に、フォールトツリー分析は、被害の結果から、それをもたらす原因を推測するものである(図-2.5.1)。

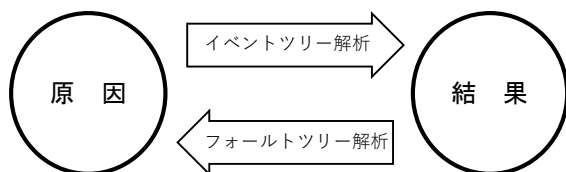


図-2.5.1 イベントツリー解析とフォールトツリー解析との相違

イベントツリー分析では、作用地震動が決まっている場合、その作用地震動により、大破・中破・小破というように、どのような壊れ方をするかわからない場合に、これを整理するものである。図-2.5.2 にイベントツリーの分析のイメージを示す。信頼性設計により、大破・中破・小破といった被害の結果別に、フラジリティカーブをそれぞれ求める。これら大破・中破・小破別の各フラジリティカーブにおいて、構造物の固有周期に相当する地震動強さの損傷確率を読み取る。これにより、大破・中破・小破といった被害の結果別の損傷確率をイベントツリーに整理する。これにより、作用地震動が特定されている場合の被害結果のバラツキを定量的に評価できる。イベントツリー分析は、信頼性設計の結果を全体性能の信頼度の評価につなげる。

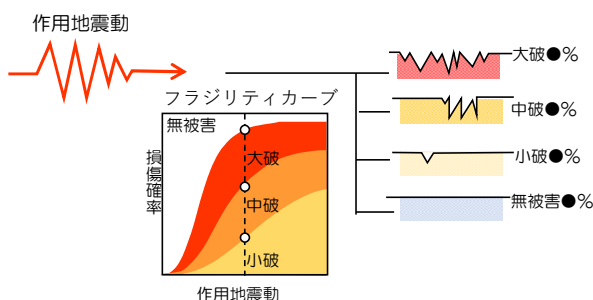


図-2.5.2 フラジリティカーブを踏まえたイベントツリー分析のイメージ

フォールトツリー分析は、例えば電力や消火設備等の機能喪失など、それをもたらす複数の原因別の発生確率を整理するものである。例えば、電源が喪失した場

合、外部電源(買電)の電柱が地震動で倒壊したのか、受電盤設備が地震動により損傷したのか、高潮とか水害で浸水したのか、予備電源の燃料貯蔵庫が浸水して燃料が使えなくなったのか、など多数考えられる。これらを分類整理し、考え得る原因別にその発生確率を整理するものである。図-2.5.3 に消火機能に関するフォールトツリーの例を示す。図中□は分解可能な事象、○はこれ以上分解できない基本事象である。+と・はそれぞれ和事象、積事象を表す。基本事象の生起確率が与えられれば、確率の和積演算により、トップ事象である消火時機能停止確率が得られる。これより、予め原因を特定して分析する場合は、フォールトツリー分析は出番がないことに注意すべきである。

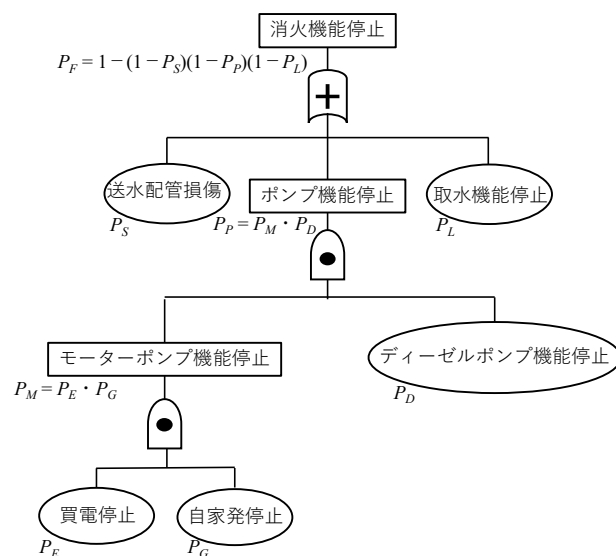


図-2.5.3 フォールトツリー分析の例

参考文献

- 1) 信頼性ハンドブック 新版/日科技連出版社/日本信頼性学会 2014
- 2) 機械・構造系技術者のための実用信頼性工学, 日本材料学会編, 養賢堂, 1987
- 3) Freudenthal, A.M., Garreit, J.M., and Shinozuka, M. (1966): The Analysis of Structural Safety, J. of Stru. Divi., ASCE Vol.92, No. ST1.
- 4) Shinozuka, M., Statistical Analysis of Fragility Curves, Proc. of Asian-Pasific Symp. on Structural and its Applications, (1999), pp.1-18.
- 5) 星谷ら: 構造物の信頼性設計法, p.209, 鹿島出版会, 1986

3. リスク評価とマネジメント

信頼性工学は、工業製品の品質問題への対応から始まり、建築や土木の構造物、原子力施設や化学プラントへと、工作物や営造物までその領域を広げてきた。他方、信頼性工学で用いる方法は、確率・統計学を基礎としているため、社会・経済分野のリスクの評価にも応用されている。これは、工作物・営造物等の管理・運営にもつながっていく。本章では、信頼性工学の社会・経済的リスクへの展開について、概説する。

3.1 リスクの視点と定義

リスクは損失を生じる可能性の大きさと解釈することもある。事故や災害などの危険事象そのものを示す場合もある。人や立場、分野、事象によって捉え方は異なっている。ここでは、分野によるリスクを捉え方や定義について解説する。

社会心理学の分野では、事故や災害などの危険事象そのものを示す言葉として用いられ、特に人の情緒的な反応と危険事象としてのリスクの関係を計量的に論じることで、リスクに対する人々の社会的行動を説明している。厚生経済学あるいは環境経済学などでは、個人レベルでは選択できないような不都合な事態を対象に、それが生じる可能性の大きさをリスクと捉えている。これは確率や頻度などで表現される場合が多く、一人当たり、1万人当たり、あるいは国全体としてなど、リスク事象に応じて換算する単位が異なっている。金融の分野では、当初目論んだ収益から乖離する大きさとして、分散や標準偏差をリスクの尺度として捉えている。工学の分野では、自然災害、事故や火災、環境問題など損害を伴う事象を対象に、事象の発生確率と損害との積と定義している。

$$Risk = \sum P_i \cdot C_i \quad (3.1.1)$$

ここに、 P_i は事象の発生確率で i は事象を表す。 C_i は事象 i が発生した際の損害に相当し、再建費用や修復費用などの金銭価値が用いられる。近年では、人命や社会への影響度合いなどを指標とする場合もある。式からわかる通り、よく起き、損害や影響が大きいほどリスクは大きいと解釈でき、数学的には期待値を表している。また、リスクを減らすためには、事象の発生確率を減らすことに加え、損害や影響の大きさを減らすことも重要になる。

ここで、地震リスクを想起する。このとき、事象の発生確率 P_i については、2通りの解釈ができる。一つは地

震の発生確率を考慮する場合、もう一つは地震の発生を前提とする場合である。前者を全確率と呼び、後者を条件付き確率などと呼ぶ。例えば、原子力の分野では、1年間の地震の発生確率を考慮した炉心損傷確率をリスクと定義している。つまり、リスクは全確率を用いた P_i そのものである。これを評価、あるいはコントロールする枠組みを地震 PRA (Probability Risk Assessment) と称し、原子力施設の安全性照査の一つになっている。

リスクを分野横断的に捉えると、「将来における不確かな損失、あるいは不利益」と説明できる。視点によって損害の種類や大きさ、不利益の度合いは異なり、分野独自の解釈となって進化したもの考えられるが、確率が重要な役割を担っていることは共通している。特に、工学分野で、確率論的リスク評価と呼称する場合もある。

3.2 地震リスクの分類

地震の発生は稀であるが、一度発生すると、甚大な被害となる。また、突然発生するので、直前の備えは全くできない。さらに、財物が損壊するのみならず、これによる人命の喪失、事業活動の停止、地域経済の停滞、さらに風評被害など、被害は派生的に広がる。図-3.2.1 は地震災害による企業の損失と地域経済から見た被害の分類を示している。

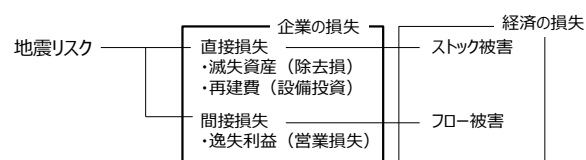


図-3.2.1 地震災害による企業の損失と地域経済の被害

地震による企業の損害は直接損失と間接損失に分かれ、直接損失はさらに減失資産と再建費に分かれる。減失資産は損壊した固定資産を簿価上から除去するものであるが、再建費はこれを修復、あるいは再調達するための費用である。間接損失は事業活動ができない期間、稼げたはずの利益に相当する。一方、地域経済では、ストック被害とフロー被害に分けて、損害の規模や大きさを計っている。それぞれを概念的に示したものを図-3.2.2 に示す。

図-3.2.2 より、ストック被害は、社会資本や生産施設などの生産に寄与する資産額をトータルした、いわゆる資本ストックが毀損した金額である。再調達価格として評価する場合が多く、再建や復興が順調に進めば、概ね元の水準に戻る性質を持つ。一方、資本ストックの毀損

により、生産活動、あるいは経済活動が滞り、これによってGDP（域内総生産）は低下する。フロー被害は、低下したGDPが元の状態に戻るまでの逸失GDPである。また、再建や復興のために要する費用は、復興特需としてGDPを押し上げる効果を持つ。

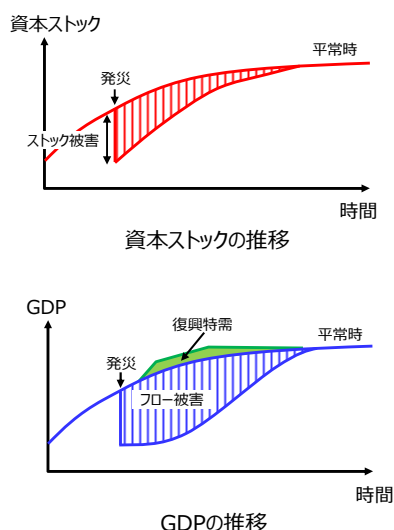


図-3.2.2 ストック被害とフロー被害

3.3 地震リスクの評価

地震リスクは、基本的には「3.2 地震リスクの分類」で説明した直接損失額の再建費と間接損失額である逸失利益を計算することになる。再建費は財物損失と呼ばれることが多く、以降これを使う。財物損失については、「2.3 構造信頼性による信頼性設計」において紹介したフラジリティカーブから、地震動に対応した施設や構造物の損傷確率を評価する。損傷確率を「2.5 構造信頼性とシステム信頼性とを接続する要素技術」で示したイベントツリーに適用し、各帰結に応じた損害額を考慮して、財物損失額の期待値を計算する。ここで重要になるのが、イベントツリーの作りこみである。対象施設の目的や特徴を考慮するとともに、被害に漏れがなく、また重複して評価しないように配慮しなければならない。詳細は参考文献1)、2)を参照されたい。

一方、逸失利益については、先ず、空港であれば民航機の運行ができない期間、生産工場であれば操業停止期間など、いわゆる事業停止期間を評価する必要がある。これは、「2.4 システム信頼性による全体性能の信頼度評価」において紹介したシステム信頼性評価の方法を利用し、事業再開までの経時的推移を表した復旧曲線を評価する。そこから事業停止期間の平均値を求め、これに

一日当たりの営業損失を乗じることでトータルの逸失利益を計算する。営業損失は固定費に相当するもので、一日当たりの粗利を準用することもある。なお、復旧曲線の評価方法については、後章で詳記する。

3.4 地震リスクマネジメント

企業には、株主や債権者、顧客や従業員、さらに周辺住民への配慮や環境への負荷など、様々なステークホルダーが存在する。このため、誰の視点、どのような観点に立つかによって、地震リスクの管理方針や判断も異なってくる。経営者やリスク管理の責任者は、様々なステークホルダーとの利害関係を認識し、どのような立ち位置で、どこまでなら受容できるかを明らかにした上で、リスク管理の方針や目標を明確にしなければならない。そして、どこまでの地震に、どの程度の備えをすればよいか、どのような対策が経済的かなど、このような課題に、合理的な判断基準を示すのが地震リスクマネジメントである。

これまでも、思考的な考察や経験的な知識に基づき、リスク管理は行われてきたが、近年は、これまでの経験則的な判断から、科学的な方法を取り入れたより合理的な判断が時代の要請となっている。つまり、科学的な根拠を前提とした定量的な情報による判断が必要になってきたわけである。その背景には、一つの意味決定が、様々な人々の利害に複雑に影響する組織化された時代にあり、ステークホルダーへの説明責任が極めて重要になってきたからである。

地震リスクマネジメントでは、最初に、対象施設の立地点での地震危険度、津波危険度を分析する。この分析は、立地点にどのような大きさの地震動が、どの程度の頻度で来襲するのか、その時津波は来るのか、などを科学的に推計する作業である。その際、当該施設に被害を与えるであろう複数のシナリオ地震を特定し、その地震による揺れの大きさ（震度、加速度、速度など）、津波の来襲高さなどを計算する。シナリオ地震は、震源位置や規模を特定した、いわゆる想定地震であり、これを全国に配置した地震危険度モデルをマルチイベントモデルと呼んでいる。

次に、シナリオ地震が起きたことを前提に、財物損失額、事業停止期間、逸失利益等、いわゆる施設総体としての地震リスクを計算する。つまり条件付き確率である。この計算の過程で、「どこに問題があるか」、「致命的な被害の種類は」、「事業停止が長期化する原因はどこにあるか」など、いわゆる弱点を特定できる情報を併せて評価する。そして、現実的でリスク低減に効果的な対

策を選定し、対策を施したと仮定してリスクを再計算する。現状のまま何もしないリスクと比較することで、その効果を確認することができる。最終的には、代替案の中から費用効率の高い対策を選択することになる。

一方、財物損失額や逸失利益など、発災後の資金不足が憂慮される場合、運営資金の枯渇、債務の不履行などの可能性を考えなければならない。そこで、発災時の期末に現金あるいは現金同等物がどれほど不足するのか、どの程度の資金調達を考えておかなければならないか、などを把握するために、財務影響分析が必要になる。財務影響分析は、地震保険やこれに替わる金融対策を具体的に実施するには不可欠となり、また、財務影響分析をうまく活用し、防災目標を定める方法もある。財務影響分析については、空港コンセッションを対象とした研究が行われており、詳細は、参考文献3)を参照できる。

参考文献

- 1) 中村ら：地震リスクマネジメント，技報堂出版，2009
- 2) 中村孝明：実務に役立つ 地震リスクマネジメント入門，丸善出版，2013
- 3) 中島ら：公共施設運営権設定下の地震リスクマネジメントに関する研究～空港を例として～，国土技術政策総合研究所研究報告 No.55，国土技術政策総合研究所，2015

4. 防災計画

4.1 行政計画としての防災計画

本報告では、防災に関する行政計画を、「防災計画」という。行政計画は、行政立法と並ぶ行政行為のひとつある。行政立法は、技術基準のように、政省令等の形式で施設管理者に対し法的に拘束するのに対し、行政計画は、一定の目標を設定し、関係者にその達成を促す行政行為である。櫻井・橋本は、「行政計画は、ある種の時間軸のもとに目標を設定し、各種の政策手段を当該目標達成のために動員するという構造を有す。」としている¹⁾。したがって、防災計画に規定される目標は、一定の社会的合意を形成しているといえる。

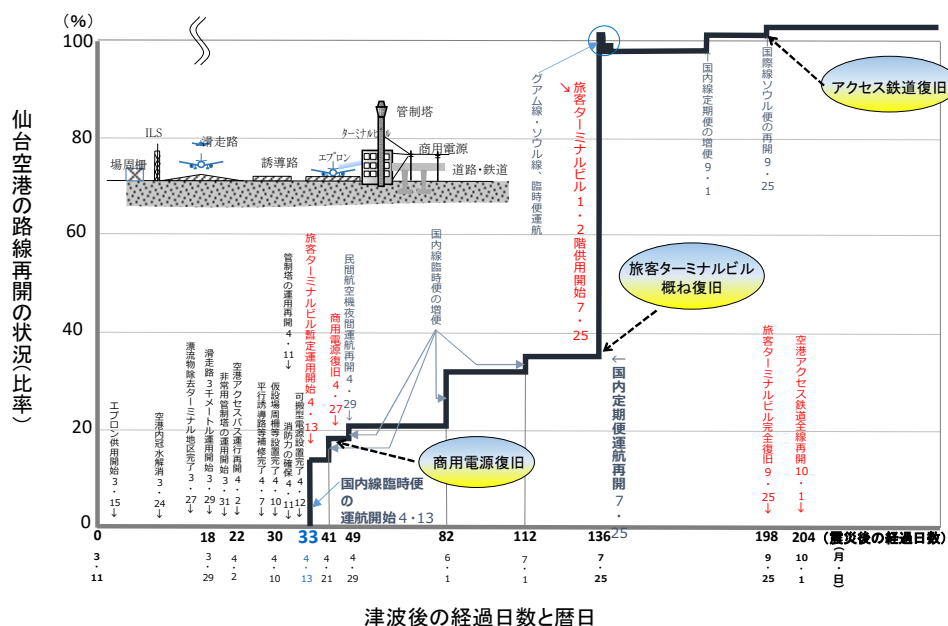
防災に関しては、災害対策基本法に規定される防災基本計画、地域防災計画、その下位にある、例えば、「首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画

(中央防災会議幹事会，2020)」が代表である。内閣府の「事業継続ガイドライン(第三版)(2013)」に基づく計画、国土交通省の「タイムライン(行動防災計画)策定・活用指針(初版)(2016)」に基づく計画、航空局の「地震に強い空港のあり方(2007)」，「「A2-BCP」ガイドライン(2019)」に基づく計画なども防災計画といえる。また、防災計画は、地震や水害など災害事象別に示される。地震災害においては、1995年の兵庫県南部地震以降、レベル2地震動を擁する想定地震の下、立案されている。なお、空港土木施設の設置基準(航空法施行規則第79条第1項第七号イ(1)及び「陸上空港の基準対象施設の性能の照査に必要な事項等を定める告示(国土交通大臣告示，2008)」)においては、信頼性設計の適用は、レベル1地震動としており、レベル2地震動については決定論的設計に留めている。

4.2 防災計画が求める全体性能

「防災上重要な施設(災害対策基本法第7条)」は通常は複数構造物・設備といった要素から構成され、空港は、滑走路、ターミナルビルといった建物、管制システム、電源といった設備から構成され、これら複数の構造物・設備が有機的に連携して、空港全体の性能を発揮している。防災計画では、滑走路だけとか、ターミナルビルだけとか、空港を構成する個々の構造物・設備の使用の可否ではなく、空港全体の使用の可否を前提に目標が設定される。

2004年の中越地震を契機に示された「地震に強い空港のあり方(2007)」において、発災から3日を目途に民間航空機の運航再開、極力早期に通常の運航能力の50%の確保等²⁾など、期限までの復旧すべき空港の全体性能がはじめて具体的に示された。2018年台風21号による関西国際空港の被害を契機に示された、「災害多発時代に備えよ!!～空港における「統括的災害マネジメント」への展開～(航空局，2019)」では、「空港全体としての機能保持・復旧」が明記された。図4.2.1に、全体性能の推移の事例を示す。このように、全体性能に関する統計情報は不足しており、今後の調査・情報蓄積が希求される。



※ 路線の再開状況は、津波の発生した3月11日以前に運航していた便数（国内線80便/日、国際線5.1便/日）を100%として算出。
 （国際線は一部を除きテラー運航でないため、日便数に換算した値を用いた）

図-4.2.1 2011年太平洋東北沖地震後の仙台空港の全体性能（路線再開）の推移

4.3 タイムライン/BCP と期限付き全体性能

「地震に強い空港のあり方(航空局, 2007)」では、タイムラインのように、時系列に期限を切って、全体性能の目標が設定されている。以後、「首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画（中央防災会議幹事会, 2020）」をはじめ、防災計画の作成・更新に際しタイムラインを規定する場合が多い。タイムラインは、「災害時に発生する状況を予め想定し共有した上で、「いつ」、「誰が」、「何をするか」に着目して、防災行動とその実施主体を時系列で整理した計画をいうとされる²⁾。

「A2-BCP」ガイドライン（航空局, 2019）」においては、BCP(業務継続計画)の策定を求めているが、その内容はタイムラインが中心である。タイムライン（図-4.3.1）もBCP（図-4.3.2）も時系列に災害活動を目標設定していることから、期限と全体性能の視点からは、ほぼ同義といえる。

タイムラインからは、災害活動に必要な空港の全体性能が、経過時間に応じて、どの程度復旧していなければならないか、容易に読み解くことができる。これは、防災計画は、期限を定めた復旧されるべき空港等防災上重要な施設の全体性能、すなわち「期限付き全体性能」を示しているともいえる。

「東京都地域防災計画（震災編）」（東京都, 2019）」とも整合が求められる「首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画(中央防災会議幹事会, 2020)」においては、レベル2地震動を擁す首都直下地震を想定地震とし、発災後からの経過時間に応じて実行すべき災害活動を、タイムラインとして目標設定されている。DMAT(Disaster Medical Assistance Team 災害派遣医療チーム)に関しては、12時間以内のSCU(staging care unit 広域医療搬送臨時医療施設)設置、24時間以内の広域医療搬送の開始が記述されている。広域医療搬送はその緊急性から航空輸送が主たる輸送手段である。これらから、羽田空港において、12時間より以前に十分な数量のSCU設置のためのターミナルビルでの安全な空間の確保や、24時間より以前に搬送開始のため滑走路や管制の確保が容易に想定される（当然、空路参集を期待すると、12時間より以前の滑走路・管制等の確保が必要となる。）。

「東京都地域防災計画（震災編）」（東京都, 2019）」が依拠する「首都直下地震等による東京の被害想定報告書（東京都, 2013）」において、羽田空港のターミナルビルについては、「十分に耐震強化されている。」としているが、これは通常、建築基準法の昭和56年度新耐震基準等の決定論的設計に基づく表現であり、耐震強化イコール無被害と判断し、ターミナルビル内でのSCUの設置

が期待される。しかし、阪神淡路大震災において、新耐震基準を満足する建物であっても2割程度の被害が報告されている³⁾。このことから、12時間以内の十分な数量のSCU設置という目標が、必ず100%実現できるわけではないことがわかる。では、タイムラインを含む防災計画が、いつまでに、何パーセントの確率で実現できるのか、事前に予測することが必要になる。これは、発災後の経過する各時間断面において、全体性能を確率論的に評価することである。

参考文献

- 1) 櫻井敬子, 橋本博之: 行政法[2版], p.147, 弘文堂, 2009
- 2) 国土交通省: タイムライン(行動防災計画)策定・活用指針(初版), p.4, 2016
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課・市街地建築課: 改正建築基準法・同施行令等の解説, p.40, ぎょうせい, 1995

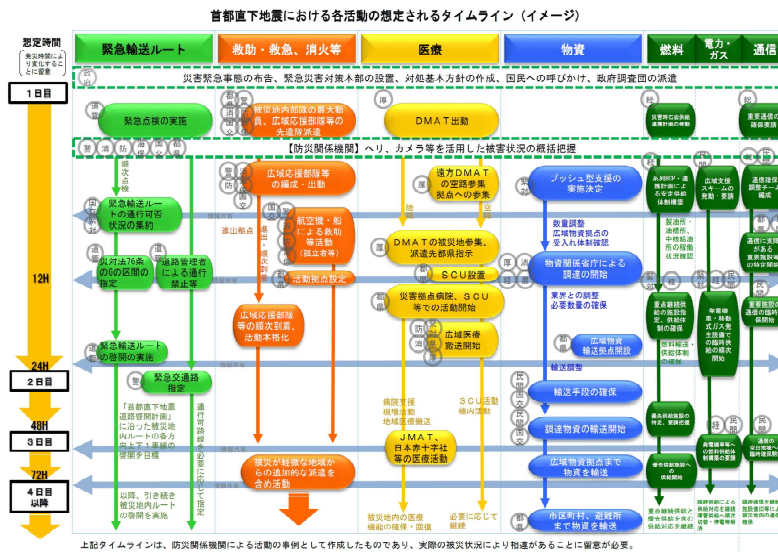


図-4.3.1 タイムラインの事例(首都直下地震における具体的な応急対策活動に関する計画(中央防災会議幹事会, 2020))

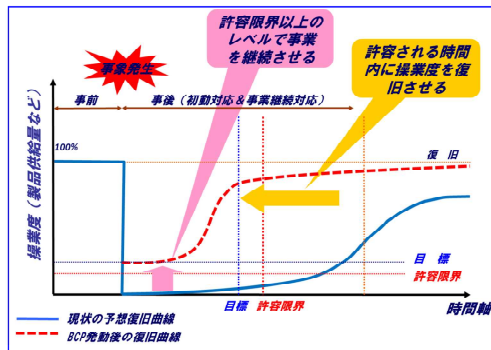


図 1.1-1 事業継続計画 (BCP) の概念¹⁾

図-4.3.2 BCPの事例(事業継続ガイドライン(内閣府, 2013))

5. 防災計画における復旧曲線と健全度曲線

決定論的評価では、「使える／使えない」といった、一ゼロの「二値問題」でしか、個々の構造物・設備の発災後の性能を表現できない。しかし、空港のように複数の構造物や設備から構成される場合、滑走路といった構成要素の一つでも、使えないと、決定論で判断された場合、他の構造物・設備の被害想定を待たずに、全体性能として、空港は全く使えないと判断される。

これに対し、確率論では個別構造物・設備の被害について一とゼロとの間を確率値で表現するので、確率和算により全体性能も確率値で表現することが可能となる。さらに、決定論的評価で全く使えないと想定されても、確率論的評価では被害イコール、ゼロ・パーセントではなく、有意な確率値で表現できるので、耐震未強化の構造物であっても、一定程度は使えると評価できる。つまり、複数の構造物・設備から構成される空港のような施設については、その全体性能を確率論により、はじめて有意な評価が可能となる。このように、防災計画について、システム信頼性による確率論的評価が期待される。

5.1 復旧曲線による復旧過程の確率論的表現

図-5.1.1 は、本来の性能が低下あるいは停止し、その後元の性能に回復するまでの経時的なプロセスを描いたもので、予測される復旧過程を視覚化したものである。

図-5.1.1 (a)において、横軸は復旧に要する時間で発災からの経過時間で示しており、縦軸は性能である。縦軸の性能は一般的に、本来の性能を 1.0 又は 100 とした性能回復率で表すことが多い。点線は、BCP で目標とした復旧過程を示している。

一方、災害による被害の発生規模や復旧時間は不確実性を伴うので、図-5.1.1 (b)の細い実線で示すように、様々な（無数の）復旧過程が予想され、予想に漏れがない限りこの中の一つは必ず実現することになる。また、BCP も予想される復旧過程の一つであるといえる。このように、復旧過程を確定的に設定することはできない。つまり一貫して確率論的アプローチを採る必要がある。

図-5.1.1 (b)の細い実線群は、実際には、図-5.1.1 (c)の鉛直方向の柱体が示すように確率分布する。これは、発災からのある経過時間断面において、復旧した性能の確率分布であり、すなわち、復旧過程は経過時間を条件とした場合の性能の確率関数で表現できることが分かる。ところで、実現するであろう復旧過程を特定することはできないため、例えば、平均的な曲線を復旧曲線（太い実線）として代表することとする。

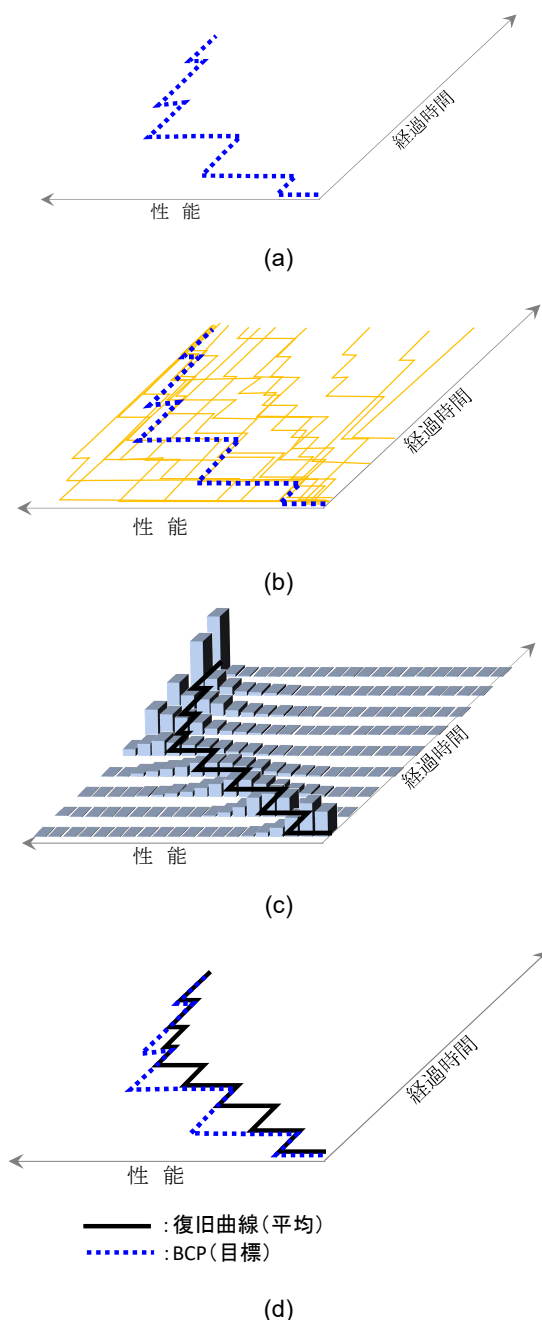


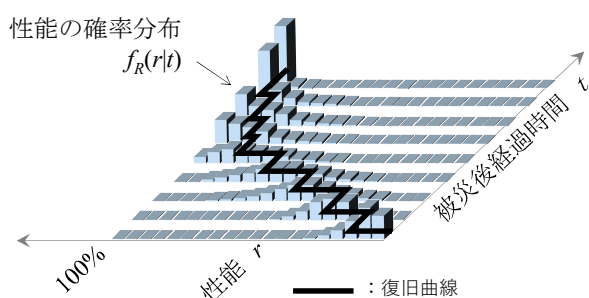
図-5.1.1 性能の経時的プロセス

図-5.1.1 (d)においては、BCP は目標とする復旧過程であるので、太い点線で再掲すると、予想される平均的な復旧過程である復旧曲線との乖離が明確に把握できる。これを分析することにより、対策の弱点などを炙り出すことができる。復旧曲線は、平均だけでなく、超過確率別にも作描することができ、そのうちの 하나가 BCP を表す復旧曲線に近似すれば、BCP の実現可能性を確率で把握することも可能となる。

内閣府から事業継続ガイドライン¹⁾が公開された当初、

復旧曲線は概念として用いられ、定量化の道筋すら示されていなかった。その後、生産工場²⁾、電力供給³⁾、道路施設⁴⁾、水力発電施設⁵⁾などを対象に、復旧曲線の定量評価が進み、最近では、建物機能のレジリエンス評価⁶⁾において、復旧曲線を使いレジリエンス性能を定量化する試みが行われている。また、ライフラインの機能停止による経済損失の評価⁷⁾、石油製品の供給停止による経済損失の評価⁸⁾などにも、復旧期間の予測が必須となる。このように、防災・減災を目指す上で、復旧予測への要請は極めて高いと考えるが、予測値と実際の復旧過程との整合性を含め、利用に耐えうる精度面での検証は課題を残している。

図-5.1.1 (c)を踏まえ、図-5.1.2 に復旧曲線の概念図を示す。縦軸は性能 r であり、本来の性能を 100%としている。横軸は被災後の経過時間 t を表す。柱状は経過時間断面における性能の確率関数を示している。復旧過程は予測なので、復旧する性能 r は時間断面で確率分布となっている。同図では、経過時間と共に性能の確率分布が回復していく様子を示している。そして、性能の確率分布の平均値を求め、経過時間と共に示したものが実線の復旧曲線となる。図の $f_R(r|t)$ は時間 t を条件とした性能 r の確率密度関数である。本来であれば、性能が確率分布で記述されるため、復旧過程は無数に予想できることになるが、実現するであろう復旧過程を特定できないため、平均的な復旧過程を復旧曲線として代表している。式で表すと以下ようになる。なお、復旧曲線の評価の詳細は文献9)を参照されたい。



$$R_D(t) = \int_0^{1.0} r \cdot f_R(r|t) dr \quad (5.1.1)$$

図-5.1.2 性能の確率分布と復旧曲線

図-5.1.3¹⁰⁾は東日本大震災における仙台空港の民間航空機の運航能力の復旧過程を復旧曲線で示した図である。

図より発災から3日目の民間航空機の運航能力は0%であり、また運航能力50%を回復するのに136日要し、完全復旧には200日を越えている。これは無数に予想される復旧曲線の実現値と解釈できる。仮に、被災前に復旧曲線を推計していた場合、予測値と実現値の比較から、推計の妥当性、乖離があればその理由、さらにベイズ的手法による推計情報の更新なども可能となる。推計の実証例として、ロサンゼルス市を対象に、ロマブリエータ地震(1989年)による供給支障電力の復旧過程を評価した研究¹¹⁾がある。そこでは、一部に実際の復旧時間を適用しているものの、実現値との比較から平均的な復旧過程の妥当性を示している。

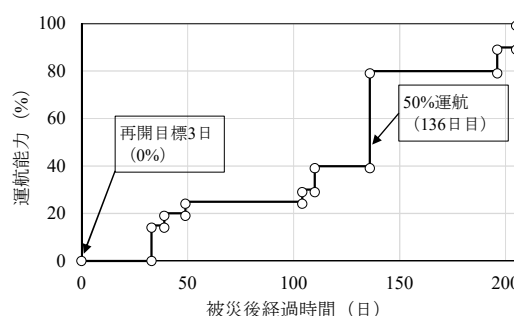


図-5.1.3 東日本大震災における仙台空港の復旧過程 (復旧曲線)

復旧曲線は空港機能のレジリエンス評価、防災対策の検討、あるいはBCP策定支援など、その有用性は極めて高い。しかしながら、実用に供するには、施設の損傷確率を評価する脆弱性カーブや被災した施設の資材調達や修復時間など、復旧曲線の評価に必要な情報の整備が求められる。そのためには、被災事例から、被災の状況と外力の関係、復旧期間や遅延した要因などを調査するとともに、図-5.1.3に示すような復旧曲線の実現値を確定することが必要である。

5.2 健全度曲線の経緯と概要

先述のとおり、事業継続計画 (BCP) への関心の高まり、あるいは防災計画において期限を定めたタイムラインの出現などから、機能喪失した施設や構造物が、どの程度時間をかければ元の機能を回復するのか、つまり、機能が回復する過程を視覚化した復旧曲線に関心が向いている。図-5.1.3の東日本大震災における仙台空港の復旧曲線を、再度確認してみる。縦軸は1日当たり航空機の運航便数を、常時の便数の比で示したもので、いわゆる空港の性能である。横軸は発災からの時間を表してい

図より、50%の運航再開まで136日を要し、完全復旧まで200日を要しているのが分かる。これは、災害後の実際の復旧過程を記録したものであるが、この曲線を事前に予測できれば、防災計画で定めたタイムラインを満たしているか、あるいは妥当であるか、などを確認することができる。

復旧曲線に関するこれまでの研究を概観すると、星谷ら¹²⁾は順次復旧、同時復旧の場合に分けそれぞれの復旧評価の基本的な考え方を示した。具体的には、システムを構成する要素の復旧期間の確率関数を定義し、順次復旧は確率変数の和算、同時復旧はMAX演算で評価できるとした。これを受け、能島ら¹³⁾は復旧曲線の具体的評価手法を提案した。これらの研究は、電力・ガス・上水等のライフラインを対象としたものであるが、最近では、製造業の生産ラインを対象に地震時の性能低下や復旧期間を評価する研究¹⁴⁾、地震による建築物の性能低下を復旧曲線で記述した研究¹⁵⁾など、復旧曲線の利用は多様な分野に広がり、また対象も具体化している。一方で、復旧曲線は性能の復旧過程の平均値を示すもので、空港の全体性能の信頼度を示すものではない。このため、空港の防災計画に定めた期限と性能が、どの程度の信頼度で確保されているかを確認することができない。そこで、小野ら⁹⁾は、復旧曲線の評価過程を工夫することで、発災からの経過時間に応じた信頼度を評価できることを示した。

これを健全度曲線と呼ぶ。同曲線は一定の性能（例えば、常時の50%の運行能力）を条件とした空港の全体性能の信頼度、つまり健全確率を示すもので、この確率が目標とする許容値を超えているか否かで、防災計画で定めたタイムラインを照査しようとするものである。図-5.2.1に復旧曲線と健全度曲線の定義を示す。

復旧曲線	: 復旧過程の期待値を発災からの経過時間に対して描いた曲線
健全度曲線	: 一定の性能を確保できる確率（信頼度）を発災からの経過時間に対して描いた曲線

図-5.2.1 「復旧曲線」及び「健全度曲線」

5.3 健全度曲線の評価法

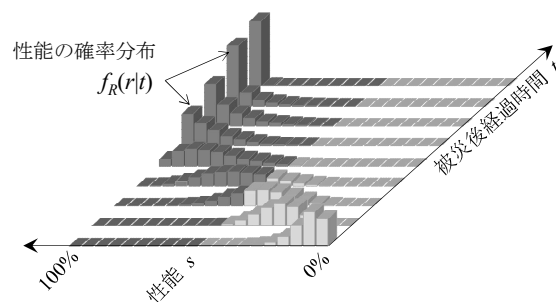
健全度曲線は復旧曲線を評価する過程で求められるもので、その概念図を図-5.3.1に示す。(a)は発災からの経過時間とともに改善される性能の確率分布を示しており、一定の性能（図ではs）を超える確率を経過時間に対して示したものが(b)に示す健全度曲線である。前述した復

旧曲線は、(a)に示すように時間と共に変化する性能の確率分布の平均値を、時間に対して描いたものである。

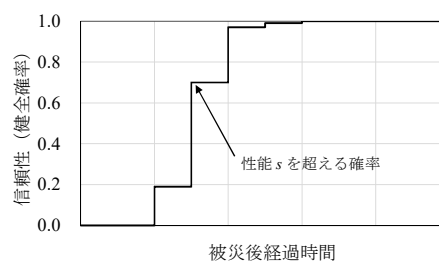
一定の性能をsとした場合、健全度曲線は時間を条件とした性能の確率密度関数 $f_R(r|t)$ から、以下のように求められる。

$$P_{r>s}(t) = G_R(r=s|t) = \int_s^{1.0} f_R(r|t) dr \quad (5.3.1)$$

ここに、rは性能を、tは発災からの時間を表す。GR(r|t)は時間を条件とした性能の超過確率関数である。運航能力の50%を空港の性能sとし、健全度曲線を求めた上で、発災から3日目の健全確率の余事象確率と、後述の危険性の限界値（目標性能水準）の0.2（20%）を比較することでレベル2地震動に対する要求性能（表-6.1.1参照）の照査が可能となる。



(a) 性能の確率分布の経時変化



(b) 健全度曲線

図-5.3.1 性能の確率分布の経時変化と健全度曲線

性能の超過確率関数を求めるには、システムが並列の場合は、要素の性能の超過確率関数 $G_{Ri}(r|t)$ から以下のように求められる。

$$G_R(r|t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - G_{Ri}(r|t)) \quad (5.3.2)$$

ここに、nは要素数である。システムが直列の場合には、以下となる。

$$G_R(r|t) = \prod_{i=1}^n G_{Ri}(r|t) \quad (5.3.3)$$

発災からの経過時間 t については、被災からの復旧は構成要素間で同時並行的に進めるものと仮定することで、発災からの時間断面毎に性能の超過確率関数を求めることができる。詳細は文献 10)を参照されたい。

健全度曲線の評価フローをまとめたのが図-5.3.2 である。フロー図から分るように、空港機能を構成する各種構造物の役割やその範囲を勘案し、システムモデルを作成する必要がある。また、要素である構造物の耐震性能、空港機能に対する貢献度（性能）、損傷した際の復旧日数などの調査も必要になる。

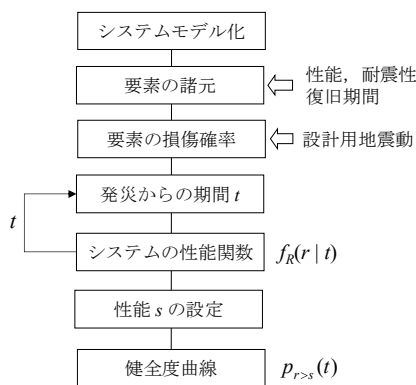


図-5.3.2 健全度曲線の評価フロー

参考文献

- 1) 内閣府：中央省庁業務継続ガイドライン第一版，2007.
- 2) 中村孝明，境茂樹，吉川弘道：損傷相関を考慮した地震時システム性能評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 661 号，pp.713-719,2011.3
- 3) 松本俊明，植竹富一，色摩康弘，中村孝明：分散型電源のある配電網の地震時レジリエンス評価方法に関する研究，日本地震工学会論文集 Vol. 19, No. 7, pp.14-26, 2019.11
- 4) 静間俊郎，中村孝明，吉川弘道：ラダー系システムを用いた高速道路の地震時車両通行機能性評価，土木学会論文集 A1, Vol.67, No.1, pp.86-94, 2011.3
- 5) 土居賢彦，静間俊郎，中村孝明：調整池の Buffer 効果を考慮した水力発電施設の復旧過程に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol.69, No.3, pp.505-515, 2013.11
- 6) 日本建築学会 建物のレジリエンスと BCP レベル指

標検討特別調査委員会 事業継続計画策定のための地震災害等に対する建物の機能維持・回復性能評価指標の提案に向けて 2019.9

- 7) 多々納裕一，土屋哲，梶谷義雄：ライフラインの機能損傷が及ぼす経済被害の計量化に関する研究，京都大学防災研究所年報 第 50 号 B, pp.143-154, 2007.4
- 8) 山崎雅人，小池淳司，曾根好徳：南海トラフ巨大地震による製油所被災の経済被害推計：多地域応用一般均衡モデルによる分析，土木学会論文集 D3 (土木計画額)，Vol.72, No.5 (土木計画研究・論文集第 33 巻)，I_111-I_121, 2016.
- 9) 小野正博・中島由貴・中村孝明・静間俊郎：空港の性能維持・早期復旧に関する地震リスクマネジメント，国土技術政策総合研究所資料，No.830, P.41,2015.3
- 10) 中島由貴，佐藤健宗，羽原敬二，中村孝明：空港土木施設の耐震信頼性の限界値に関する研究，土木学会論文集 F6, Vol.73, No.1, pp.11-24, 2018.8
- 11) Shinozuka, M. and H.H.M. Hwang: Seismic Performance of Electric Power Systems, MCEER Monograph Number2, pp.33-43, 1998.
- 12) 星谷勝，宮崎正敏：上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測，土木学会論文集，第 331 号，pp.45-54, 1983.
- 13) 能島暢呂，亀田弘行：幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム，土木学会論文集, No.450/I-20, pp.171-180, 1992.
- 14) 中村孝明，境茂樹，吉川弘道：損傷相関を考慮した地震時システム性能評価に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 76 巻，第 661 号，pp.713-719, 2011.
- 15) 馬場啓輔，大嶽公康，静間俊郎，吉川弘道：地震システム解析を用いた浄水場配管の最適投資額の算定，第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1724-1729, 2010.

6. 防災計画における全体性能の照査

6.1 防災計画の目標性能水準

空港の防災計画である「地震に強い空港のあり方（航空局，2007）」には、空港全体の目標性能と性能確保の期限が示されている。民航機については、レベル 1 地震動に対しては「運航に支障を来さない」、レベル 2 地震動に対しては「発災から 3 日以内に民間航空機の運航能力の 50%を確保する」と記されている。運航能力は発着回数と解すればよい。

目標性能について、どの程度の信頼度を要求しているのか、あるいはどの程度の不信頼度なら許容できるのか、いわゆる目標性能の許容値については触れていない。このため、「期限までに目標性能を完全に達成しなければならない」と解釈せざるをえない。しかしながら、どのような対策を実施したとしても、不確実性を伴う将来事象である以上、3日以内であっても目標性能を完全に達成することは困難なケースがでてくる。中島ら¹⁾は、不確実性がある事実を前提に考えるならば、性能に対し一定の許容値を設けることが、現実的であり、かつ合理的であると考えた。そこで、これらの目標性能が満たされない危険性の限界値、いわゆる機能喪失確率を表-6.1.1のように仮定した。

表-6.1.1 防災計画の目標性能水準（民航機）

	目標性能	危険性の限界値
レベル1地震動	運航に支障を来さない	1%
レベル2地震動	3日以内に50%の運航	20%

比較的良好に起きる地震、いわゆるレベル1地震動の危険性の限界値1%で、通常時の10割の運行を99%以上の信頼度で確保するよう求めたものである。換言すれば、不信頼度の許容値は0.01未満である。これについて解説すると、国内で稼働している空港はおよそ100である。比較的良好に起きる地震が国内全ての空港に同時に作用した場合、期待値計算から、1つ未満の空港が目標性能を満たさないことになる。これは、平均的には全ての空港が目標性能を満たすことに他ならない。

一方のレベル2地震動に対する危険性の限界値20%で、通常時の5割の運行を80%以上、あるいは0.8以上の信頼度の信頼度で確保するよう求めたものである。不信頼度の許容値は0.2未満である。これは、レベル2地震の発生頻度を1,000年に1回程度、空港の供用期間を50年と仮定すると、約5 ($4.85=0.001 \times 50 \times 97$) つを下回る空港がレベル2地震動に遭遇する可能性がある。その場合、5つのうち目標性能を損なう空港の期待値を1未満に抑えるレベルである。

このように、確率で照査する方法を採用することで、目標性能の達成度合に明示の意味を与えることができ、また広義の議論を前提とした合意形成が可能となる。

6.2 健全度曲線による照査

健全度曲線を使い、防災計画で定める空港の信頼度を

照査する具体的方法を解説する図-6.2.1に健全度曲線の例を示す。照査の基準となるのは、目標性能を満たす信頼度とこれを照査する着目時間、つまり発災からの時間である。「発災から3日で目標性能5割を確保する」といった照査基準の場合、まず、5割の運行が可能となる健全度曲線を描く必要がある。つまり(5.3.1)式の目標性能 s を0.5とする曲線である。そして、着目時間と目標健全確率（許容値）を図のように直線で描き、曲線が第2象限を通ることを確認する。また、第2象限に入らない場合は、対策によって対応する。

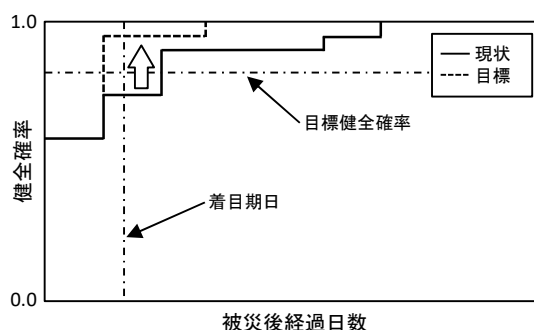


図-6.2.1 性能を条件とした健全度曲線とその照査法

社会的合意を得られるような目標確率（許容値）を求めることは必ずしも容易ではないが、ISO2394(2015)等に示されているLQIを用いた方法（Risk Informed Decision Making）は、一手法として参照することができる。また、コードキャリブレーションの考え方に則れば、現存する多数の空港機能の健全確率を評価することで、現時点での目標健全確率の最低基準を見出すことができると考える。いずれにせよ、私たちは、様々な不確実性の中で、意思決定し、行動しているのが現実である。しかしながら、不確実性が大きい中での意思決定なのか、それとも小さい中での意思決定なのか、重要な論点であるにも関わらず、確定的な判断では同一に扱われ、議論すらできない。信頼性は、不確実性を定量的に捉え、意思決定に反映することを基本としている。システム信頼性を含めた信頼性設計が一般化することで、意思決定に対する様々な矛盾や、安全性のレベルに対する明確な根拠を、合理的に説明することができるようになる。

健全度の算出は数理的に複雑であるので、一般的には、理解に時間を要する。しかしながら、筆者の経験によると、四国の某県の防災航空隊の隊長に対し、「想定地震の発災直後に滑走路が使える確率（健全度）が90%以上です。」と説明したところ、隊長は「90%以上なら滑走路の点検を待たずに飛び立つ。80%なら点検を待って飛び立つ。」と述べた。このように、防災計画を遂行する

現場の意思決定者には、直観的にわかり易い表現である。

また、施設の健全度 60%とすると、残存リスクである非健全度 40%については、施設を復旧するという行為、或いは、施設に依存せずに避難や救助といった災害活動をするという行為が生じる。想定地震が作用するという条件付ではあるが、健全度は施設というハード対策の役割分担を、非健全度は行為というソフト対策の役割分担を示している。このような確率論的評価に対し、決定論的評価では、「使える／使えない」の、二値問題となり、使えないと判断されれば、100%ソフト対策しか方法はなく、そもそもハード対策は一切不要ではないかという極論を招く。これは、非専門家でありながら意思決定権者である国民の合理的な判断を阻害しかねない。

6.3 信頼性設計を踏まえた防災計画の信頼度照査

2章で述べたように、構造信頼性とシステム信頼性は、確率・統計学が底通しているため接続できる。空港を構成する構造物・設備を信頼性設計で照査すると、空港の全体性能の信頼度も照査できる。しかしながら、その実務における手順は、一見、複雑多岐にみえるので、理解を助けるべく整理する。

図-6.3.1 に、その方法の実務のイメージを示す。図の中段の囲みにあるように、まず、全体性能を評価するため、構造物・設備を構成要素とするシステムモデルを作成する。これは 2.4 で述べたシステム信頼性による全体性能の信頼度評価である。図の上段の囲みにあるように構造信頼性による信頼性設計とイベントツリー分析を行う。

想定されるシナリオ地震動の周波数別応答スペクトルなどの情報を用意する。システムモデルの構成要素の一つである構造物・設備それぞれについて、固有周期、大中小の破壊形態別の耐力中央値と復旧期間を与える。復旧期間については、人為的要素の影響が大きいので、図-4.2.1 のような過去の事例が貴重な情報源となる。

ところで、構造の種類により適用される技術基準は異

なる。技術基準別にシナリオ地震動の考え方が異なることも多い。そのため、構造物の種類別に異なるシナリオ地震動でそれぞれ設計照査されることも珍しくない。しかし、ここでは、防災計画で想定するシナリオ地震動を、システムモデルを構成する構造物に等しく作用させる点が重要である。各構成要素に対し同一のシナリオ地震動を作用させることで、作用外力や損傷による要素間の相互作用について、適切に評価することができるからである。

これら地震動情報と構造物の情報から二山モデルを設定し、大中小別のフラジリティカーブを求める。得られたフラジリティカーブから、固有周期の地震動強さの大中小別の損傷確率を読み、イベントツリー分析のモデルにこれら損傷確率を与える。これを、システムモデルを構成する構造物・設備すべてに与える。

これらから、システムモデルを計算する。構造物・設備別にさらに大中小別に復旧期間が与えられているので、発災からの経過時間別に全体性能の復旧の確率（密度）関数を求めることができる。これを期待値で代表すれば復旧曲線が得られる。得られた確率（密度）関数について、目標とする閾値を超える確率（超過確率といい、6.6 で詳説する。）を計算する。閾値は、通常時の性能を目標とする場合 100%であり、通常時の半分であれば 50%とする。こうして得られた目標性能を達成する確率が健全度である。経過時間別に得られるので、これらを結ぶと健全度曲線となる。

得られた健全度曲線と、防災計画の目標性能水準である危険性の限界値と比較する。レベル 1 地震動にあつては、発災時点の非健全度(1-健全度)が、限界値 1%未満であるかどうか、照査する。レベル 2 地震動にあつては、発災後 3 日時点の非健全度が、限界値 20%未満であるかどうか、照査する。

気付かれるかもしれないが、損傷確率の代わりに部分係数で表現するレベル 1 信頼性設計法では、信頼性設計の結果から全体性能の評価はできない。

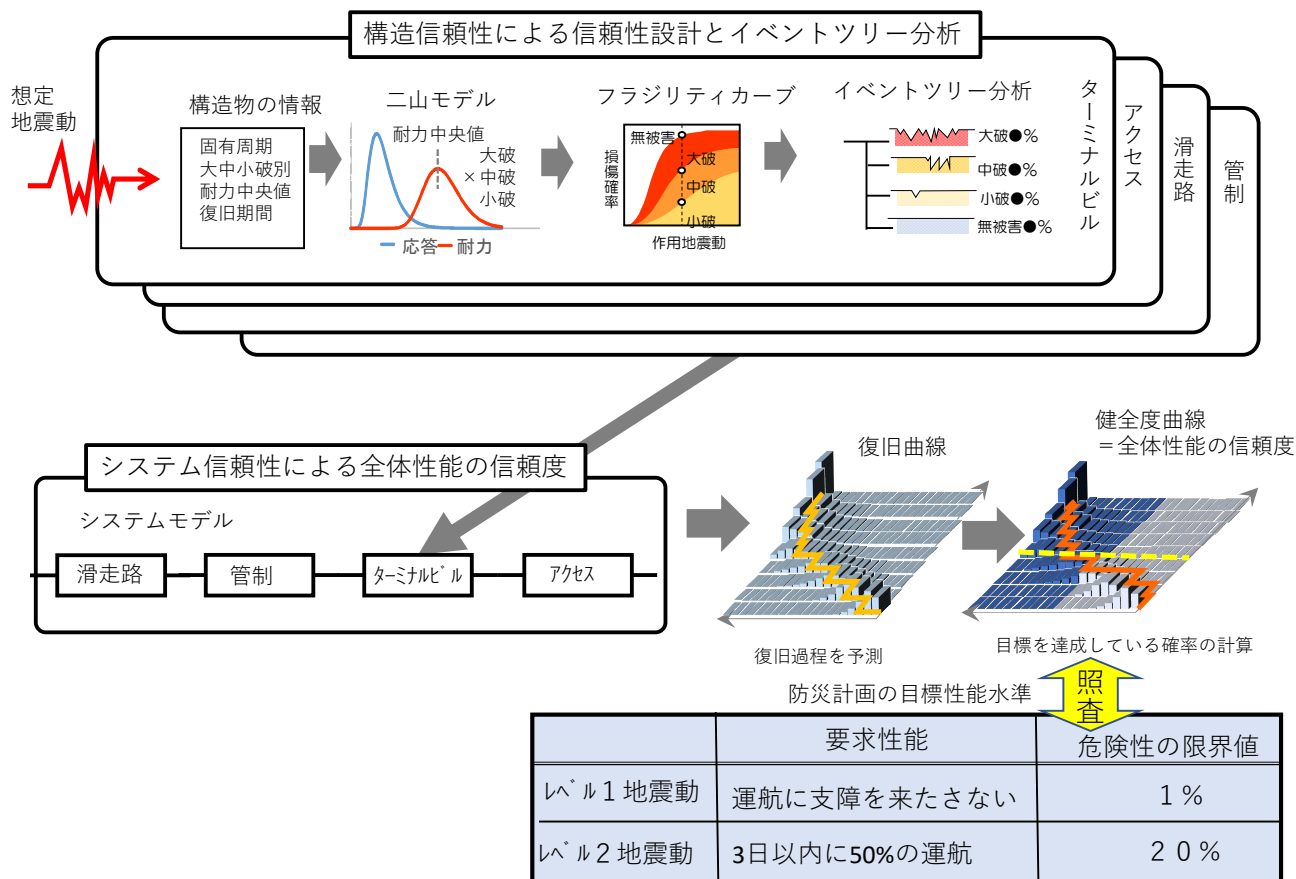


図-6.3.1 信頼性設計を踏まえた防災計画の信頼度照査の実務イメージ

レベル1信頼性設計法の部分係数は、外見上は許容応力度法の安全率と酷似しており、表現上の連続性があるとの印象がある。しかしながら、部分係数は不確実性の大きさを客観的に記述したもので、半ば主観的な安全率とは区別する必要がある。残念ながら、表現の問題から、構造信頼性とシステム信頼性との接続ができないことに注意が必要である。

6.4 全体性能の信頼性を向上させる対策の考え方

対策は、構造信頼性（信頼性設計）の段階、及びシステム信頼性のそれぞれの段階で対策をとることができる。前者においては、図-2.3.1で示した耐力の確率密度関数に着目されたい。耐力中央値といった特性値を引き上げる、または分散を小さくするといった方法が考えられる（図-6.4.1左）。具体には、土工構造物をコンクリート構造物に置き換えるというような、部材強度の向上や材料をばらつきの少ないものにするなどの方法となる。後者においては、システムモデルに冗長化する回路を設定する（図-6.4.1右）、例えば、予備の管制塔や電源の多重化などが相当する。

対策により全体性能の信頼度がどの程度向上したかは、対策を反映した新しいシステムを作成し、再評価すれば判る。全体性能の信頼度の目標性能水準がある場合、それを達成するまで、対策と再評価を繰り返すことになる。

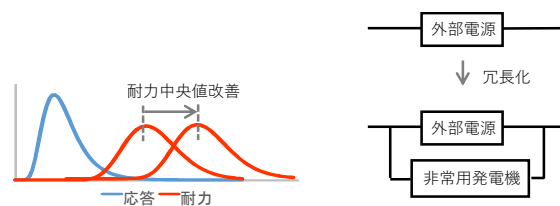


図-6.2.1 耐力中央値改善及び冗長化

6.5 防災計画と構造物等の両目標性能水準の整合

空港の防災計画の目標性能水準と、空港を構成する構造物・設備の目標性能水準（危険性の限界値）とは、当然、整合が図られる必要がある。構造物・設備の目標性能水準を、図-6.3.1で示した防災計画の信頼度の照査の方法を逆算し求めることで、両者の整合を図ることがで

きる。

図-6.5.1 にその実務的方法を示す。図の右下段の危険性の限界値と健全度の照査の部分に着目されたい。健全度が全体性能の危険性の限界値を超え、目標性能水準を不満足に終わる場合がある。その場合、図の上段囲み左にあるように、対象の構造物等の耐力中央値を前節の通り改善してやる。それをシステムモデルに与え、健全度を再計算する。その結果、全体性能の危険性の限界値を満足しない場合、再度、耐力中央値を改善し計算する。これを、全

体性能の危険性の限界値を満足するまで繰り返す。全体性能の危険性の限界値を満足した段階のフラジリティカーブを確認する。そこで得られた損傷確率を対象の構造物の危険性の限界値（目標性能水準）とすることができる。その場合、全体性能の危険性の限界値は、防災計画の目標性能水準を表すので、防災計画の信頼性と、関係する構造物・設備の信頼性との間において、工学上の整合を図ることができる。次章に、照査例を示し、詳述する。

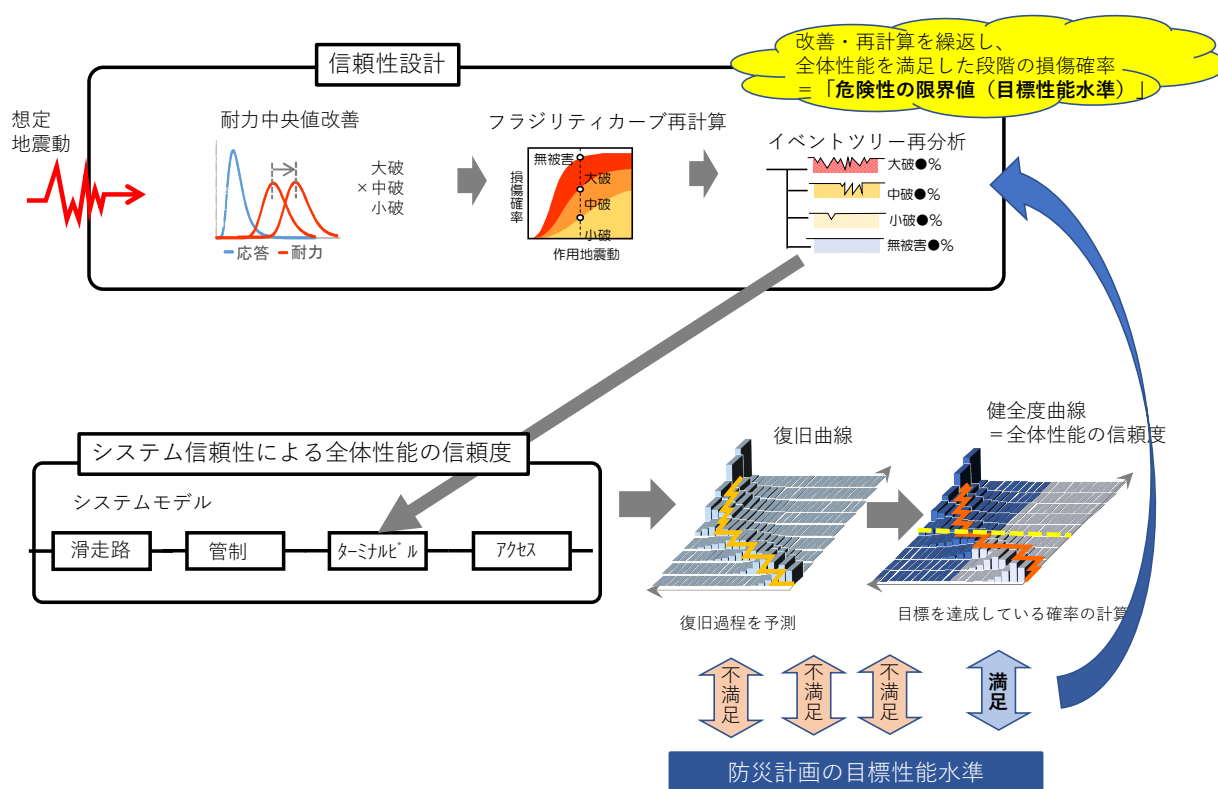


図-6.5.1 防災計画と構造物の目標性能水準の整合方法

6.6 供用期間と災害の発生確率

供用期間を設けずに施設を永遠に使い続ける場合、被災する確率は限りなく 100%に近くなる。したがって、確率論的リスク評価や信頼度の評価には、供用期間という前提条件が不可欠である。しかしながら、関係者が、評価を共有する際に、供用期間について、暗黙裡に 50 年とされ、その開始がいつで、その時点から向こう何年供用するのかといった点について、明示的な確認がなされない場合が多い。そこで、供用期間と災害の発生確率について、整理を試みる。災害イベントの代表として地

震及びそれに伴う地震動を考える。

供用期間を 50 年と設定すると、その期間中に様々な頻度で様々な地震動が作用する。それぞれの地震動と材料等のバラツキにより、相当数の破壊形態がそれぞれの損傷確率を伴い予測される。図-6.6.1 にそのイメージを示す。図-6.6.2 は、図-6.6.1 の地震動を、供用期間の軸に沿って、地震動を大きい順番に並べ変えたイメージの図である。供用期間である向こう 50 年の超過確率を供用期間の軸の上、図の左上に示している。

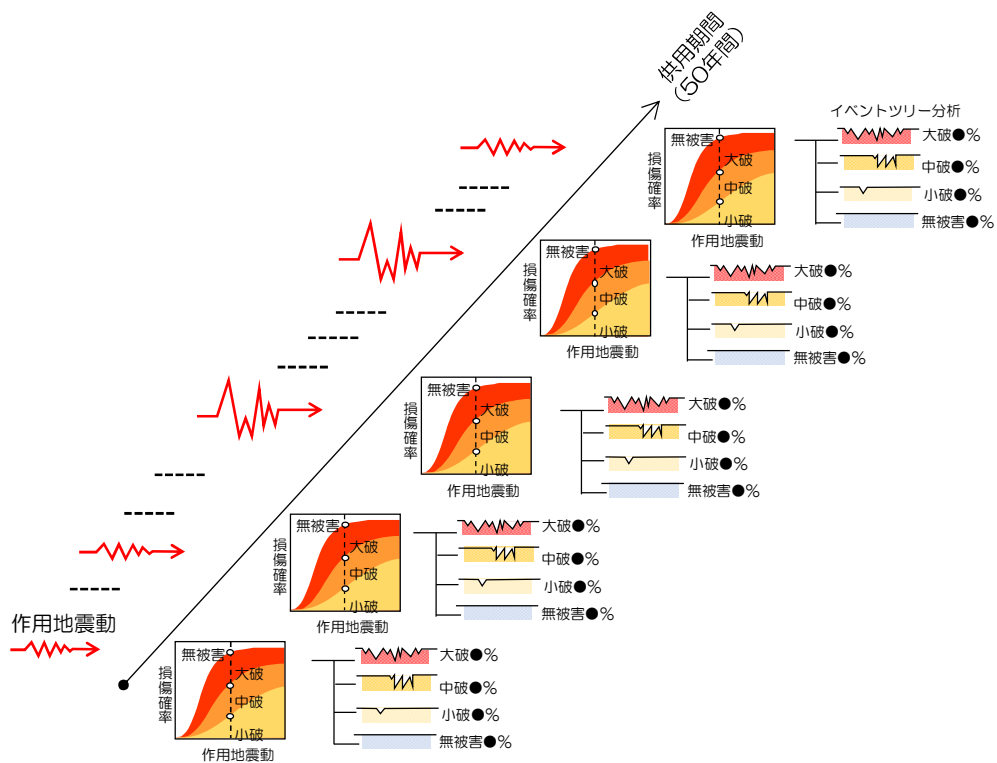


図-6.6.1 供用期間中に作用する地震動と損傷確率を伴う相当数の破壊形態のイメージ

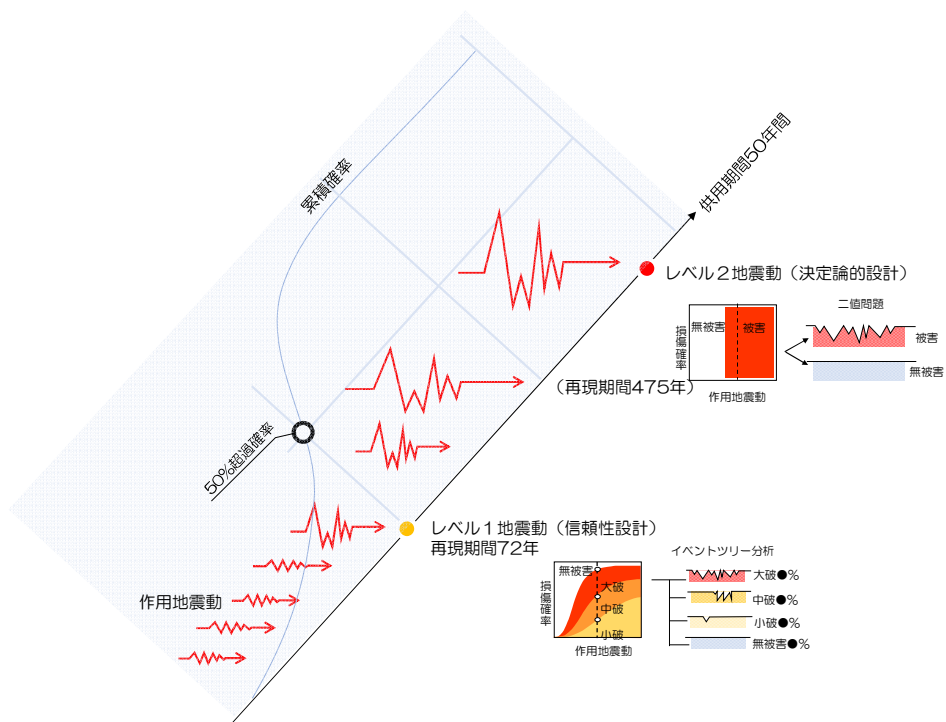


図-6.6.2 供用期間中の想定地震動の強度順と超過確率

「超過確率」とは、図-6.6.3 に示すように、横軸に地震動を、縦軸にその頻度をとった場合、地震動は確率分布し、ある確率（密度）関数で表すことができる。横軸にある閾値を設けた場合、それを超える確率を超過確率という。超過確率は確率（密度）関数の閾値を超えた部分の面積によって求められる。閾値を超過しない確率、非超過確率も、1 から引けば得られる。これらは、累積関数を用いれば容易に得られる。

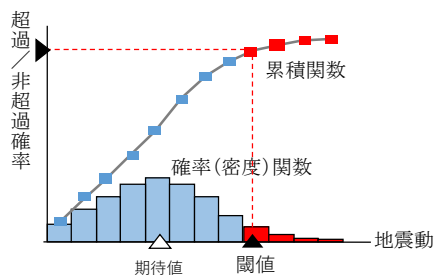


図-6.6.3 超過確率と非超過確率

空港土木の設置基準において、それ以上の地震動が作用する、50%超過確率に相当する地震動をレベル1地震動とし、信頼性設計にはこれを適用することになっている。地震の発生頻度をポアソン過程とすると、供用期間50年の50%超過確率の再現期間は72年となる(付録C表C-2)。再現期間とは、向こう1年の発生頻度(極小な場合は年超過確率と同等)の逆数であるが、供用期間と超過確率が与えられなければ、特段の意味はもたないことに注意が必要である。予め、供用期間30年、50年、100年といったよく議論の俎上にあがる供用期間別に、再現期間と超過確率の一覧を作成しておくことと便利である(付録C表C-1~3)。

レベル1地震動による信頼性設計とは、向こう50年で50%超過確率である地震動(レベル1地震動)が作用するという条件の下、損傷のバラツキを考慮した設計をすることになる。これは、レベル1地震動という、いわゆる「条件付確率事象」による信頼性設計であり、供用期間中に想定されるすべての地震を考慮する「全確率事象」によるものでないことに注意が必要である。「全確率事象」による検討は、いわゆる「想定外をなくす」ことそのものであり、構造物の設計を超える地震動による残存リスクの評価に不可欠である。ハード対策を超える残存リスクへの対策の代表的なものに損害保険の仕組みがあり、全確率による検討は、リスクカーブに代表される指標を用い、損害保険の設計などに多用される。

レベル2地震動については、採用された地震動から、再

現期間が数百年～2千年で、供用期間50年では超過確率が数%以下である場合が多い。レベル2地震動については、空港土木施設の設置基準において、信頼性設計への積極的な適用を求めておらず、その理由は特段に示されていない。これは、レベル1地震動への信頼性設計の適用の位置づけ時点で、レベル2地震動の考え方が導入されて、まだ日が浅かったためと考えられる。

米国では、設計地震動のレベルの分類はみられるが、レベル1地震動には信頼性設計を、レベル2地震動には決定論的設計をと、地震動のレベルに応じて適用する設計法を区分する整理はない。図-6.6.4は、カルフォルニア州建築家協会が示した指標である²⁾。設計地震動のレベルの分類としては、475年とか、970年とかの再現期間による分類が何える。再現期間475年は、供用期間50年で10%超過確率(90%非超過確率(90パーセントイルともいう。))となる。再現期間475年の地震動を用いて設計することは、損害保険の分野からも支持されており、残余のリスクある、10%超過確率を踏まえ保険の免責が検討される³⁾。

我が国の防災計画では、レベル2地震動を擁す地震を想定地震としている。防災計画の確率的リスク評価のメリットを考えれば、信頼性設計においても、レベル2地震動を採用することは有用である。防災計画の運用者は、一般に確率・統計学の深い専門的知見を有していないため、彼らへの簡明な説明と、その理解にも期待できる。

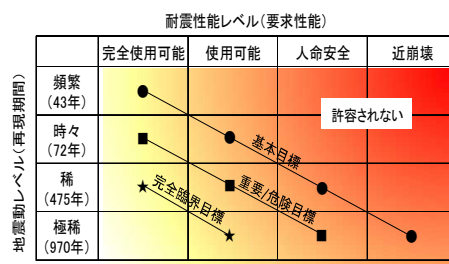


図-6.6.4 Vision2000 (SEAOSC) より作成

ところで、我が国の空港は整備されてから50年を超えるものが多数ある。供用期間を暗黙裡に50年としているが、今後は100年とかの議論も必要である。図-6.6.5にあるように、供用期間50年で50%超過確率のレベル1地震動は、供用期間100年では75%超過確率という頻繁な地震動にしか過ぎない。したがって、設計地震動については、年超過確率の供用期間と想定地震動の超過確率を、漠然としたものでなく、供用期間100年で50%超過確率とか、或いは10%超過確率とかの具体的な数値でもって、関係者間で合意することが重要である。そのうえで、信

頼性工学に基づき全体性能や防災計画の信頼度（確率論的リスク）を評価し、併せて、防災計画に位置付けられる防災上重要な施設（ハード対策）の信頼性設計の目標性能水準を設定することが望まれる。

参考文献

- 1) 中島ら：空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 No.962，国土技術政策総合研究所，2017

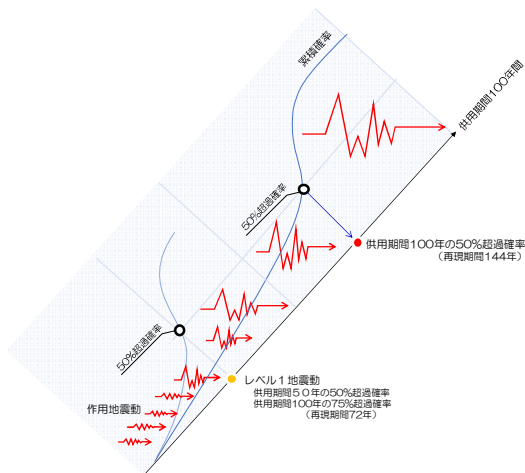


図-6.6.5 供与期間 50 年と 100 年と超過確率の変化

7. 空港の構造物・設備の目標性能水準（危険性の限界値）

7.1 目標性能水準を巡る法的問題等

目標性能水準は、技術基準で示されているにもかかわらず、設計者の判断で保守化することは妨げられていない。その際の法的問題等を整理する。

(1) 技術基準

空港は、ターミナルビル、管制塔、滑走路、アクセス道路高架橋等の多種類の構造物・設備から構成されている。これらは、建築基準法、官庁耐震計画基準、空港土木施設の設置基準、道路橋示方書等の技術基準に基づき設計されている。その結果、多くの空港が新設され、航空ネットワークが概成され、我が国の社会経済の発展に大きく貢献してきた歴史がある。

技術基準は、公物・営造物管理や許認可を目的としている。「空港土木施設の設置基準・同解説(2008)」は、航空法第 39 条に規定される空港の設置許可の審査基準の一部であり、同法以下、閣議決定の政令、大臣決定の省令・告示、局長等決定の通達と、決定段階に順じて詳細化する¹⁾。法的拘束は省令・告示までであり、未遵守は許可取消に至

- 2) Structural Engineers Association of Southern California : ‘Vision2000-A Framework for Performance Based Earthquake Engineering’, Vol.1 (1995)
- 3) 損害保険料率算出機構：地震保険研究 1 地震危険度指標に関する調査研究～地震 PML の現状と将来～，2002，
https://www.giroj.or.jp/publication/earthquake_research/No01_0.pdf (2020 年 8 月 16 日アクセス)

る。通達には法的拘束はなく、指導・助言はできるが、許可取消はできない。因みに、「同解説」部分は通達であり、狭義の技術基準は法的拘束を伴う省令・告示以上とされるが、本報告における「技術基準」は、通達まで含む広義のものを指す。目標性能水準は、一般に通達による例示で法的拘束外であり、法理的には、設計者の裁量で引上げることは可能である。しかし、設計者にとっては、通達も含め、技術基準を遵守すれば、損害賠償責任も足りるという安心感がある²⁾。

そもそも、技術基準は、構造物の倒壊等により被災した被害者の救済を直接の目的としていない。技術基準を遵守した構造物であっても、被害者救済の観点からは、損害賠償責任に関する法律が適用される。その際、裁判所は、技術基準とは異なる安全レベルを判断の尺度として用いることを、妨げられていない。そこで損害賠償責任の観点から、信頼性設計の目標性能水準を検討する必要がある。

(2) 工作物責任（民法 717 条）・営造物責任（国家賠償 2 条）

損害賠償責任のうち、構造物・設備の損壊に伴うものは、工作物責任（民法 717 条）や営造物責任（国家賠償法 2 条）が主に適用される。家、塀、踏切など人工的に土地に設置された「土地の工作物」については、構造物・設備の管理者（所有者・占有者）に設置及び管理（保存）の瑕疵責任が求められる。工作物が道路等の公の営造物である場合は、民法 717 条の特別法である国家賠償法 2 条（営造物責任）が優先適用される。

a) 通常的安全性

工作物責任・営造物責任の判断基準はどのようなものであるか。この損害賠償責任の要件である「設置又は管理（保存）の瑕疵」とは「通常有すべき安全性を欠いていることをいい、その過失の存在を必要としない（高知落石訴訟最高裁判決 1970（昭和 45）・8・20，民集 24 卷 9 号 1268 頁）」とされる（参考文献 3），p.248）。その判断方法は「構造、本来の用法、場所的環境及び利用

状況等諸般の事情を総合考慮して、具体的、個別に判断（神戸防護柵訴訟最高裁判決 1978（昭和 53 年）・7・4，民集 32 卷 5 号 809 頁）」とされる。また、「通常予測される自然現象（外力）に対し安全性を具備していなければならない（飛騨川バス転落訴訟名古屋高裁判決 1974（昭和 49）・11・20，高民集 27 卷 6 号 395 頁）」とされ、通常予測できなかった自然力が生じた場合、不可抗力となる。したがって、耐震設計では、設置時点において、通常予測できる地震動はどの程度であるか、この点に留意する必要がある。

b) 技術基準と営造物責任との関係

技術基準と営造物責任との関係はどうであろうか。警報機等が設置されていなかった踏切の死亡事故において、鉄道会社が、保安設備（警報機）の未設置は、技術基準の「地方鉄道軌道及び専用鉄道の踏切道保安設備設置標準（運輸省鉄道監督局長通達）」に従ったため、技術基準の適合を事由に瑕疵がないと抗弁した。これに対し、裁判所は、同標準は行政指導監督上の一応の標準として必要最低限度を示したものとして、工作物責任を認めた（踏切事故訴訟最高裁判決 1971（昭和 46）・4・23，民集 25 卷 3 号 351 頁）。このように、技術基準は最低限度を示したものとされ、その遵守だけでは必ずしも十分でなく、「通常的安全性」は技術基準以上の配慮が必要な場合があることに注意が必要である。

c) 営造物責任の財政的制約

国又は公共団体が限界値を設定する上で、財政的制約についてどう考えるべきであろうか。大東水害訴訟最高裁判決（1974（昭和 49）・1・2，民集 38 卷 2 号 53 頁）では、「河川は洪水等の自然的原因により災害をもたらす危険性を内包しており、通常は当初から人工的に安全性を備えた物として設置され管理者の公用開始行為によって公共の用に供される道路その他の営造物と性質を異にし」とし、自然公物である河川と、人工公物である道路や空港は異なるものとして扱っている。

高知落石訴訟最高裁判決の判例では、「予算措置に困窮する事は推測できるが、それにより直ちに道路の管理の瑕疵によって生じた損害に対する賠償責任を免れるものとする事はできない。」とされ、道路（人工公物）については、財政的制約は考慮されないと解釈される。学説上も、財政的制約は考慮しないという説が多い⁴⁾。宇賀は、自然公物と人工公物との財政的制約の違いについては、期待可能性の違いとしている。設置自体が人為の所産であり、供用開始行為により、公共の用に供され

る人工公物の場合には、安全対策への期待水準が高いものとなるが、河川のように、自然のままの状態では危険を内包している公物に防災対策を講ずることによって安全度を高めていく場合には、期待される安全水準にも、おのずと相違が生ずるとしている。（参考文献 3），p475）したがって、「通常」予想される地震や風水害等による人工公物の目標性能水準については、財政的理由を依拠とすることは難しい。つまり、経済的合理性を拠り所として目標性能水準を定めることは賠償責任の観点からは避ける必要がある。

(3) 防災計画と技術基準

これまで、技術基準が適用される個別の構造物や設備を単位として目標性能水準を考えてきた。災害対策基本法第 7 条 1 項に、空港をはじめ防災上重要な施設の管理者等は、法令又は地域防災計画の定めるところにより、誠実にその責務を果たさなければならないとされている。地域防災計画は、行政立法の技術基準よりは緩やかではあるが、一定の社会的合意が形成されている。当然、BCP／タイムラインを定めた空港に関する防災計画は、地域防災計画との整合が図られていなければならない。したがって、空港管理者は、BCP 等の空港の防災計画で目標とした空港の期限付きの全体性能の確保に努力しなければならない立場である。

防災計画は、技術基準より後追いであることは勿論、航空ネットワークの概成後に、空港の全体性能に関わる内容が充実してきた。大規模災害の発生に応じ、その教訓を踏まえ、BCP やタイムラインなどが導入されるなど、空港の全体性能とその期限について詳細化が図られてきた。

空港において、新しい防災計画を踏まえて、技術基準の更新も実施されてきた。2007 年の「地震に強い空港のあり方（航空局）」に併せた 2008 年の「空港土木施設の設置基準（航空法施行規則第 79 条）」の改正がそれである。当時は、防災計画と技術基準との客観的な接続方法がなかったため、防災計画の目標を技術基準に経験的に反映せざるを得なかった。しかしながら、防災計画と設計を接続させる意図及び技術基準の信頼性設計法を一部導入などは画期的な試みであり、この試みが防災計画と設計の客観的接続方法の検討の契機となった。

7.2 構造物や設備の目標性能水準

(1) 構造物の目標性能水準の設定方法

中島ら⁵⁾は、信頼性設計法における構造物の目標性能水準の設定方法について、リスクの社会的受容限度に基

づく方法，期待総費用に基づく方法，既往の設計に基づく方法（コードキャリブレーション），PML（予想最大損失）に基づく方法と，4つの方法に区分して整理した。

このうち，既往の設計の基づく方法とは，既存の構造物の耐震性能を評価すれば，それが社会的受容限度と考えるもので，コードキャリブレーションとも呼ぶ。星谷ら⁹⁾は，「信頼性設計が導入される以前のものも含めた既往の構造物は，歴史的経緯からみて社会的に十分許容されているという前提で，その構造物の破壊確率は当時の設計技術の限界も考慮の上，経済性と安全性のバランスが均衡しているはずである」と論じ，破壊確率の下限值として評価している。

長尾ら⁷⁾は，信頼性設計の技術基準へ導入過程において，既往の設計に基づく方法に加え，期待総費用に基づく方法を検討し，その結果，既往の設計に基づく方法より目標性能水準を緩和することを一部において提案した。期待総費用に基づく方法は，期待総費用を最小とする点を目標安全水準とする考え方である。期待総費用は，初期建設費用に被災確率を考慮した復旧費用や経済損失を加えたもので，この方法は，代替施設があれば，経済損失を補うことができ，経済合理性の観点から，目標性能水準をコードキャリブレーションのものよりも緩和もできるという考え方である。

これに対し，中島ら⁸⁾は，営造物責任の判例を分析し，地震動による構造物被害の瑕疵責任において，「通常的安全性」が求められること，人工公物において財政的制約が考慮されないことを明確にした。既往の設計法に基づく方法は「通常的安全性」に通じていることを前提に，期待総費用に基づく方法など経済合理性を理由に，目標性能水準を緩和することは許容されないと結論付けた。そのうえで，防災計画の目標性能水準に整合する，構造物の目標性能水準の設定方法を提案した。

(2) 個別構造物の限界値の評価と照査の考え方

前章で示したとおり，民航機に関する防災計画の目標性能水準は，表-6.1.1のとおりである。

空港は様々な種類の構造物や設備が有機的に連関した大規模システムとして機能している。この点から，空港の全体性能を構成する要素を特定し，これらをシステムとしてモデル化する。例えば，滑走路，誘導路，エプロン，旅客ターミナル及びアクセスの5つの構成要素から成る空港を想起すると，これら要素の内，一つでも機能を失うと空港全体としての機能は失われる。これをシステムモデルとして表すと図-7.2.1なる。なお，各要素の損傷事象は独立を仮定する。ここで，レベル2地震動が

作用したと仮定し，この地震による各要素の損傷確率を同図に併記する。図より，空港が機能しない確率，つまり機能喪失確率は $0.26 (=1-(1-0.03)^3(1-0.1)^2)$ であり前記した限界値 0.2 を超えている。つまり照査としては NG である。0.2 を満たすためには各構造物の損傷確率は $0.04(=1-0.8^{1/5})$ となり，旅客ターミナルビルとアクセスの耐震性能の向上が必要になる。空港の全体の機能を構成する各施設や構造物は，限界値 0.04 以下を目標に耐震設計を行うことになる。

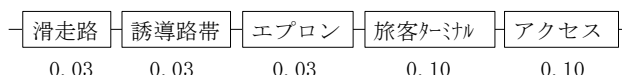


図-7.2.1 システムモデルと構造物等の損傷確率の例

一方，構成要素の性能関数を確率変数 $Z_i : i=1\sim 5$ とし，相関係数 $\rho_{ij} = \text{corr}(Z_i, Z_j) : i \neq j$ を定義する。空港機能の喪失確率は $\rho_{ij}=0.0$ （独立）でない限り相関を考慮した評価が必要になる。以下，添え字 ij は省く。本論では，望月ら⁹⁾が提案した積分による方法を用い，相関を考慮した空港機能の喪失確率を評価する。ここで，相関係数は一律同じとし， $\rho=0.0$ （独立）， 0.7 ， 1.0 （完全相関）の3ケースについて，5要素から成る直列システムの機能喪失確率を計算する。各要素の性能関数は同値とし，横軸に個別要素の損傷確率，縦軸にシステムの機能喪失確率を取ると図-7.2.2に示す右肩上がりの曲線を得る。直列システムでは機能喪失確率は相関係数が高くなると低くなるが，この傾向が表れている。

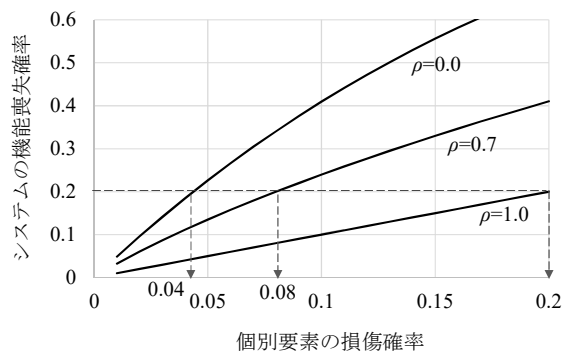


図-7.2.2 個別要素の損傷確率とシステム（直列5要素）の機能喪失確率

図より，空港機能の喪失確率の限界値 0.2（縦軸）から，例えば，相関係数 $\rho=0.7$ の曲線を帰して個別要素の損傷確率を読むと 0.08 となる。つまり，限界値 0.2 を満たす

ためには各要素の損傷確率はそれぞれ0.08以下でなければならない。同様に独立の場合は0.04，完全相関の場合は0.2となる。要素の数ならびに相関によって個別構造物の限界値が異なることに注意しなければならない。

7.3 構造物・設備の信頼性設計

関西地域に所在する空港を標本として取上げ、この空港に対してレベル1及びレベル2地震動による健全度曲線を求める。そして、空港の全体性能の目標市恵能水準の照査，ならびに空港土木施設を含めた個別構造物等の危険性の限界値について評価する。これは既存空港のコードキャリブレーションに相当するが、入手した地盤情報はターミナルビル近傍のみであり、充分な情報に基づくものではないことを付記する。

(1) 標本空港とシステムモデル

システムモデルの作成は、前章の図-6.3.1の中段の四角囲みに相当する部分である。対象空港は人工島に造られ、アクセスは専用の連絡橋で行われる。同橋には道路や鉄道に加え、電力や上中水などのライフラインも併設されている。空港の主な施設は、滑走路、誘導路、エプロン、場周柵、管制塔、場面管理施設、電源局舎、旅客ターミナルビルなどである。空港機能として民航機の運航に着目し、この機能をシステムとしてモデル化したものを図-7.3.1に示す。図の□は空港機能を構成する構造物や施設である。また、図中の滑走路、誘導路、エプロンを空港土木施設として、以下土木サブシステムと定義する。システムは土木サブシステム，ならびに並列部〔1〕,〔4〕,〔8〕を1つの要素とした場合、計8要素〔1〕～〔8〕から成る直列システムである。

システムモデルの特徴は、連絡橋が損傷した場合でも、船舶によるアクセスが可能であること、発災時には買電はほぼ停止するものと予想されるが、電源局舎の自家発電設備がバックアップとしてある。また、通常の管制機能が失われてもガンセット（携帯用航空機無線）の利用によって一定の管制機能を担うことができる。これらは運航機能の冗長性を意味するもので、図の並列部がこれに相当する。なお、航空機燃料はタンカリング（出発空港で復路の燃料を搭載する方法）により対応可能であることから、必ずしも必要としないと判断し、除外した。VOR/DME（超短波全方向式無線標識/距離測定装置）やILS（計器着陸装置）等は、液状化に起因した機能喪失を考慮するが、これは図の滑走路、誘導路などの液状化被害に含むものとする。

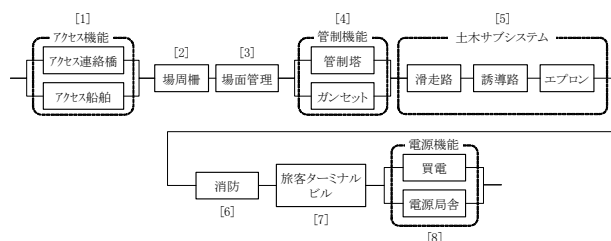


図-7.3.1 民航機運航に関するシステムモデル

(2) 設計用地震動

レベル1地震動は、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁰⁾に示されている再現期間75年の一様ハザードフリーエスペクトルから作成した空港近隣A港地点の模擬波とした。同地震波の生成の詳細は竹信ら¹¹⁾に示されている。レベル1地震動の工学的基盤での加速度応答スペクトルを図-7.3.2に示す。

図示した加速度は、それぞれの地震における最大加速度である。一方、レベル2地震動の設定に当り、内閣府中央防災会議が公開している全国1kmメッシュ毎の強震動波形¹²⁾を利用する。標本空港に最も近い1kmメッシュにおいて、最大の地震動を誘引する震源は上町断層帯であることから、発生確率も考慮し、本論ではレベル2地震動として上町断層帯による強震動波形を用いる。今後30年以内の発生確率は約2%～3%¹³⁾である。また、それぞれの地震波形は $V_s=700\text{m/sec}$ 相当の層での波であり、これを $V_s=400\text{m/sec}$ （工学的基盤面）の層まで増幅させる。その際、深部地盤モデルを地震ハザードステーション（J-SHIS）のデータ¹⁴⁾を用いて作成し、一次元重複反射理論により、 $V_s=400\text{m/sec}$ 相当層での強震動波形を計算した。図-7.3.2にレベル2地震動の加速度応答スペクトルをレベル1地震動のそれに追記して示す。また、等価線形化法に基づく一次元地震応答解析プログラム（DYNEQ）¹⁵⁾を用いて、地表面でのそれぞれの加速度応答スペクトルを計算した。結果を図-7.3.3に示す。空港の施設や構造物の応答は、これらスペクトルを用いて評価した。なお、地盤情報はターミナルビル近傍のそれを用い、地層構成、N値等については付録Bに示す。

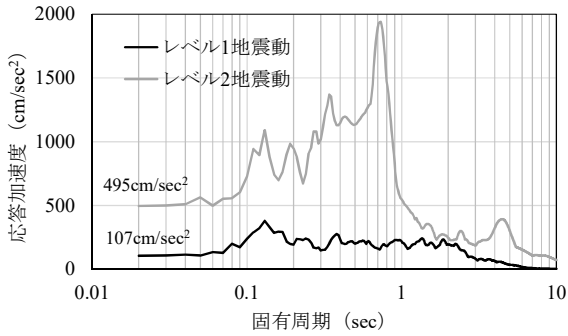


図-7.4.2 設計用地震動の工学的基盤面における加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

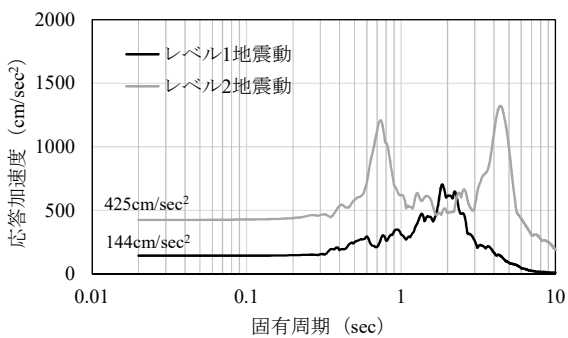


図-7.3.3 設計用地震動の地表面における加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

(3) 信頼性評価における構成要素の諸元

前章の図-6.3.1 の上段の四角囲みに相当する部分である。ここでは、構成要素別にフラジリティカーブを求め、イベントツリー分析を行う。システムを構成する要素の諸元を表-7.3.1 にまとめて示す。表は、左から構成要素の名称、構成要素(構造物・設備)の1次固有周期、被害要因、被害レベル・状態、および被害のレベル・状態(無被害は省略)に応じた、地表面における応答加速度換算の耐力中央値、復旧期間となっている。また、固有周期の(ー)表記の耐力中央値は、買電を除き最大加速度換算の値である。買電についてはレベル1地震動で0.5日、レベル2地震動で3日、それぞれ停止するものとした。管制塔、ならびに旅客ターミナルビルなどの各建屋の耐力は、設計図書より応答スペクトル法を用いて解析的に求めた。具体的な方法は付録 A に示す。その他はShinozuka¹⁶⁾、ならびに石田・水越¹⁷⁾などを参照し、適宜設定した。ガンセットは結束されており、激しい揺れでも破損しない。しかしながら、ガンセット使用時は50%運航に低下するため、被害要因として含めるものの単独での被害はないものとした。なお、ターミナルビルと電源局舎はS造であるため、応答の評価において5%から

3%に減衰補正している。また、ターミナルビルの天井被害については固有周期を評価するに足る情報を得られなかったことから、上階の床応答加速度より評価した。

表-7.3.1 システムモデルの構成要素の被害レベル・状態に応じた耐力中央値

要素No.	システム構成要素	固有周期(sec)	被害要因	被害レベル・状態	耐力中央値(cm/sec ²)	復旧期間
[1]	アクセス連絡橋	0.40	橋脚被害	破損	2500	60日
	アクセス船舶	—	栈橋被害	破損	1500	60日
[2]	場周柵	—	液状化被害	被害あり	400	2日
[3]	場面管理(場面管理棟)	0.40	建屋被害	中破以上	1300	15日
		—	管理設備被害	破損	900	7日
[4]	管制塔	0.80	建屋被害	中破以上	1400	15日
		—	管制塔設備被害	破損	1500	35日
	ガンセット	—	—	—	—	—
[5]	滑走路、誘導路、エプロン	—	液状化被害	被害あり	800	7日
[6]	消防(消防車庫)	0.40	建屋被害	大破	2800	30日
[7]	旅客ターミナルビル	1.00	建屋被害	中破以上	1000	15日
			天井被害	落下	800	2日
			上中水システム被害	破損	1500	7日
[8]	電源局舎	0.40	建屋被害	中破以上	1300	15日
		—	発電機被害	破損	900	7日
		—	燃料タンク被害	破損	1500	7日
	電源	—	送電停止	レベル1地震動	—	0.5日
		—		レベル2地震動	—	3日

一方、滑走路、誘導路、エプロンについては地盤改良等の液状化対策が施されているが、滑走路の縁に位置する場周柵部分は行なわれていない。対策が施されていない地盤については、地表面最大加速度で400cm/sec²の地震動で液状化発生するとの検討結果¹⁸⁾があり、これを参照し400cm/sec²を液状化発生の中央値とした。滑走路、誘導路、エプロンについては地表面最大加速度で800cm/sec²を中央値とした。また、アクセス連絡橋支持部は鋼管パイル、管制塔は杭基礎、旅客ターミナルビルはフラットスラブ形式の基礎で、電源局舎を含め液状化対策が施されている。よって、これら施設は液状化被害を考慮しない。

構成要素の復旧期間については、東北地方太平洋沖地震時の仙台空港、茨城空港の被害事例などを参考にして設定したが、場周柵、天井落下、滑走路等の復旧は応急復旧を想定している。各構成要素の損傷確率はフラジリティカーブに多く用いられる対数正規分布の累積関数により求めた。

$$p_f = \Phi\left(\frac{\ln r_m - \ln c_m}{\zeta_Z}\right) \quad (7.3.1)$$

ここに、 r_m は応答加速度の中央値、 c_m は応答加速度換算の耐力中央値である。 ζ_Z は対数標準偏差であるが、応答と耐力のバラツキを複合した偏差である。この対数標準

偏差は吉川ら¹⁹⁾がまとめた被災事例の統計解析結果を参照し、一律 0.4 とした。この理由は、統計解析結果は地震動の評価において一定の不確実性を見込んだ距離減衰式を用いているが、本論で用いている設計用地震動は基盤面において確定的に与えた地震波である。従って、文献¹⁹⁾の統計解析による対数標準偏差(0.6程度)から、距離減衰式の対数標準偏差(0.45程度)を除去し、0.4(= $0.6^2 - 0.45^2$)^{1/2})とした。また、液状化被害を含め他の被害要因の不確実性について、十分なサンプルの基での統計結果が見当たらないことから 0.4 とした。

また、各要素が損傷した際の運航性能は、基本的には 0% (運航できない) とする。

(4) 健全度曲線による防災計画の信頼度

レベル1地震動による民航機運航機能の健全度曲線を図-7.3.4に示す。図の横軸は発災からの経過時間を表し、縦軸は全体性能の信頼性(健全確率)を示している。各要素間の損傷は独立とし、また、健全度曲線を求める際の性能 s は 100%としている。

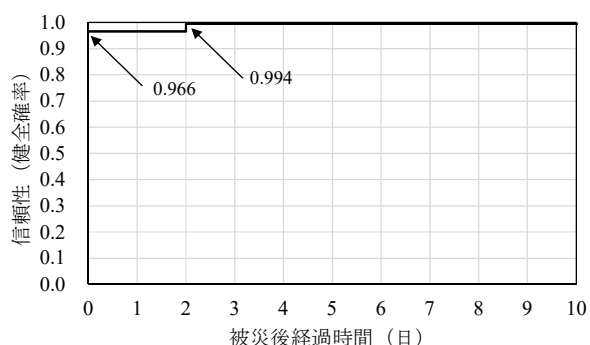


図-7.3.4 レベル1地震動による健全度曲線

図より、発災直後の全体性能の喪失確率は 0.034(= $1 - 0.966$)であり、表-6.1.1の限界値 0.01を満たしていない。図-7.3.1のシステムモデルは8要素から成る直列システムであることから、直列8要素のそれぞれの限界値は独立を前提に 0.0012 (= $1 - 0.99^{1/8}$)となる。この限界値を踏まえ、直列8要素の機能喪失確率を比較したものを図-7.3.5に示す。図-7.3.5より、旅客ターミナルビルの損傷確率0.029が他と比べ突出しており、この内、旅客ターミナルビルの天井落下被害は 0.023と高い。熊本地震では旅客ターミナルビルの天井の崩落等が主な原因で、民航の運航に支障が生じたことは記憶に新しい。また、場周柵の液状化被害確率は 0.005であり、この施設も 0.0012を満たしていない。しかしながら、場周柵が破損した場合、監視員を配置するなどの緊急対応も可能

であり、この点を考慮すると、設計時に過剰な強度を与えるのではなく、事後対応を計画する方が合理的である。一方、滑走路、誘導路、エプロンで構成される土木サブシステムの損傷はほぼ起きない(損傷確率は 2.8×10^{-5})結果となった。レベル1地震動に対し、土木サブシステムは十分な安全性を有しているが、建築物、特に天井については課題が残る結果となった。一方、2014年に特定天井についての国交省告示が示されたが、本建築物はこれ以前の竣工である。

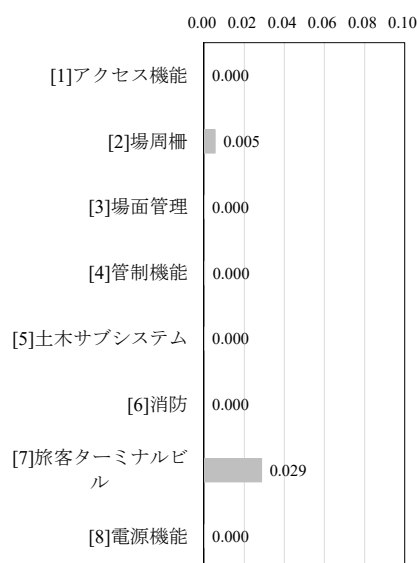


図-7.3.5 レベル1地震動による直列8要素の損傷確率(発災直後)の比較

レベル2地震動(上町断層帯)による健全度曲線を図-7.3.6に示す。健全度曲線を求める際の性能 s は 50%(通常の運航能力の半分)としている。図より、発災から3日目の全体性能の喪失確率は 0.250(= $1 - 0.750$)であり、表-2の限界値 0.2を上回っている。発災から3日目の各構成要素の被害レベルの損傷確率を比較したものを図-7.3.7に示す。図-7.3.7より、場周柵、ならびに電源機能は、損傷しても3日後に復旧するので、この時点では被害なしと同等になる。管制機能についてもガンセットで50%の運航は可能であるので、被害なしとなる。一方、空港機能を構成する直列8要素の性能関数の相関について、相関係数 $\rho = 0.0$ (独立)、0.7、1.0(完全相関)の3ケースを取上げ、全体性能の喪失確率を評価した結果を図-7.3.8に示す。図の相関係数 $\rho = 0.7$ の曲線より、土木サブシステムを含めた直列8要素の限界値は、それぞれ 0.06である。これは復旧に要する時間が3日を越える被害レベルに対する限界値であり、3日以内に復旧するレ

ベルの被害は設計の対象にはならないことになる。

図-7.3.7 より土木サブシステムの機能喪失確率は 0.116 であり、限界値 0.06 を満たしていない。滑走路、誘導路、エプロンそれぞれの液状化被害確率は 0.057 であるが、土木サブシステムの要素は直列に結ばれており、どれか一つでも損傷すれば機能は喪失するため、相関を考慮しているものの高い値となった。一方で、滑走路、誘導路等は面的に広がりを持つもので、これを細かく要素分割すれば、各要素の照査基準はさらに厳しくなることは容易に想像できる。そこで要素間の完全相関を仮定し、最弱要素の損傷確率が限界値 0.06 を満たせば良しとする照査法も、一案として検討する必要がある。また、建築物である場面管理や旅客ターミナルビルは、それぞれ 0.051, 0.201 と高めである。

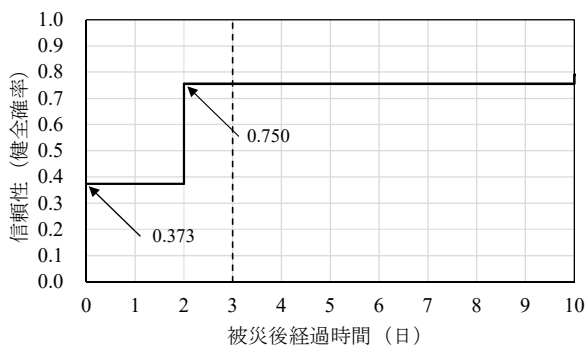


図-7.3.6 レベル 2 地震動による健全度曲線

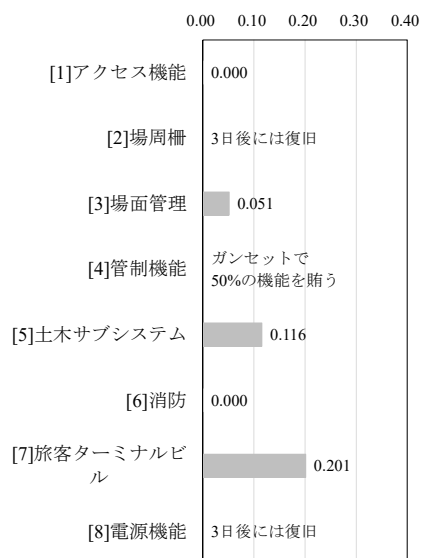


図-7.3.7 レベル 2 地震動による直列 8 要素の損傷確率 (発災から 3 日後) の比較

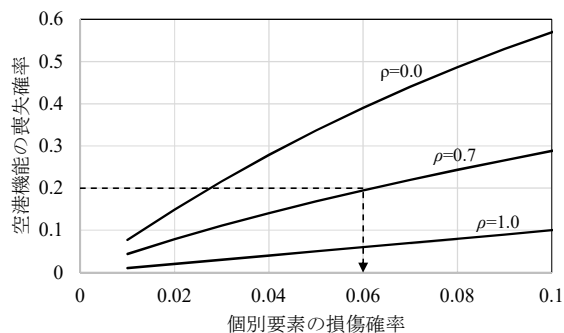


図-7.3.8 個別要素の損傷確率と空港機能の喪失確率 (直列 8 要素)

空港を構成する構造物の設計基準は一律ではなく、また地震荷重も設計思想も相違しているのが現状である。空港のみならず、タイプの異なる構造物の集合体として機能している施設は少なくないことから、今後、基準や指針の異なる構造物の安全性をどのように統一的に捉えるか、根源的な議論が求められよう。

本論では、液状化の確率的評価は PL 値等の地盤物性値を反映した評価法を用いたものではない。また、各構造物の性能関数の相関係数を一律 0.7 としたが、現状で相関係数を決定付けることは難しく、この点を含め検討を要すると考える。整備すべき課題はあるものの、提案手法は空港全体の安全性の照査や、設計で規定すべき個別構造物の限界値設定において、有益な情報を与えるものとする。

参考文献

- 1) 山口真弘：航空法解説，pp.38-39，財団法人航空振興財団，1976
- 2) 辻岡信也，本城勇介，吉田郁政：建設技術者が把握すべき責任概念に関する一考察，土木学会第 61 回年次学術講演会，p.1-519，2006
- 3) 宇賀克也：国家補償法 法律学体系，pp. 253-255，有斐閣，1997.
- 4) 古崎慶長：国家賠償法研究，p. 171，日本評論社，1985.
- 5) 中島由貴，松本英雄，菅野高弘，山崎浩之，中村孝明，望月智也：空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，No. 962，2017.
- 6) 星谷ら：構造物の信頼性設計法，p.208，鹿島出版会，1986
- 7) 長尾ら：経済損失を考慮した期待総費用最小化のための岸壁の常時のレベル 1 信頼性設計法，構造工学論文集，Vol.51A，土木学会，2005
- 8) 中島ら：空港の耐震化における信頼性設計の導入に関

- する研究，国土技術政策研究所資料 No.962，国土技術政策総合研究所，2017
- 9) 望月智也，中村孝明：地震による構造物の損傷相関の評価方法に関する研究，JCROSSAR2015, 2015.10.
 - 10) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上・下），国土交通省港湾局監修，p.1485，2007
 - 11) 竹信正寛，野津厚，宮田正史，佐藤裕司，浅井茂樹：確率論的時刻歴波形として規定される港湾におけるレベル1地震動の設定に関する包括的整理，国土技術政策総合研究所資料，第812号，p.406, 2014.
 - 12) 一般社団法人社会基盤情報流通推進協議会：G 空間情報センター，https://www.geospatial.jp/gp_front/（2017年12月11日アクセス）
 - 13) 地震調査研究推進本部：長期評価結果一覧，活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧，p.28, 2017.3.
 - 14) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：地震ハザードステーション（J-SHIS），<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/JSHIS2/download.html?lang=jp>（2017年12月11日アクセス）
 - 15) Yoshida, N.: Earthquake Geotechnical Engineer, DYNEQ: 等価線形化法に基づく一次元地震応答解析，http://www.kiso.co.jp/yoshida/Japanese_02.html（2018年1月30日アクセス）
 - 16) Shinozuka, M.: Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan, R. O. C., 1999.
 - 17) 石田寛，水越熏：建物フラジリティ関数の評価手法に関する検討，1998年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp. 65-68, 1999.3.
 - 18) 佐藤忠信，竹村恵二，吉井真，香川敬生，高橋嘉樹，南部光広：神戸空港建設プロジェクトにおける護岸と滑走路の耐震安全性の検討，土木学会論文集 F, Vol. 62, No. 3, pp. 502-521, 2006.7.
 - 19) 吉川弘道，大滝健，前田欣昌，中村孝明：地震リスク解析におけるフラジリティ曲線と地震損失関数，コンクリート工学会誌，Vol. 45, No. 10, pp. 26-34, 2007.10.

8. まとめ

8.1 研究成果の概要

防災計画，全体性能の目標性能水準から滑走路や誘導路などの個別構造物の目標市恵能水準（危険性の限界値）を評価する方法を提案し，以下のような結論を得た。

- (1) 空港を構成する個別構造物の危険性の限界値は，システム信頼性手法を用いることで，空港の防災計画（全体性能）の目標性能水準から求めることができる。
- (2) その際，構成要素の数ならびに相関によって，個別構造物の危険性の限界値が異なることに注意しなければならない。
- (3) 発災からの時間と運航能力で空港の全体性能を規定する場合，その目標性能水準の照査は健全度曲線が有用である。これは，防災計画の目標性能水準でもある。提案手法について，標本空港による適用性の検討を行い，空港の全体性能の喪失確率を算定した。しかしながら，喪失確率の評価に当り，仮定が少なからず含まれることから，一般的な結果ではないことに留意する。一方で，空港の全体性能の照査や，設計で規定すべき個別構造物の危険性の限界値の設定において，提案した方法は有益な情報を与えるものと考ええる。

今後の課題として，同様のコードキャリブレーションを，実空港を対象に多数実施し，限界値（目標性能水準）に関する議論に資する標本を得る必要がある。

8.2 今後の展望

- (1) 統計情報の収集・蓄積への不断努力

信頼性設計法は，2007年に「港湾の施設の技術上の基準」に導入されてから，2008年に「空港土木施設の設置基準」に，2019年に「道路橋示方書」に導入されるなど，技術基準に着実に位置付けられてきた。

構造物の損傷確率は，統計情報に大きく依存している。しかしながら，空港の復旧過程に関する統計情報は，東北太平洋沖地震における仙台空港¹⁾及び2018年台風21号における関西国際空港²⁾の事例など極々限られている。

歴史的な大規模災害の後，被災構造物についてのみ，網羅的かつ詳細な調査報告書が作成される。これは，決定論的設計法が念頭にあるためである。確率論的設計である信頼性設計も念頭に置けば，損傷確率を得るために，無被害の構造物についても，情報収集が大切である。その観点から，大規模災害が生じた場合，どの施設が壊れて，どの施設が壊れなかったかという，被害・無被害両方の情報の取集に努めなければならない。残念ながら，情報収集の一助となる災害復旧額の査定に伴う調査では，無被害の情報収集は行われぬ。無被害の情報収集を行う制度的仕組みが必要であると考ええる。

空港用地，海岸保全施設，港湾施設，都市用地などにおいて，護岸のケーソンは全国にゆうに1万個以上は存

在する。これらが過去 50 年間に、原因や諸元は問わずとも、いくつ壊れて、いくつ壊れなかったという、極々基礎的な統計情報でも有用である。大きな社会的問題となっていないのであれば、その被害確率は目標性能水準の検討に有用な情報を与えるからである。

いずれにせよ、信頼性設計を技術基準に導入した限り、コードライターには、被害・無被害の統計情報の取集・蓄積に不断の努力が求められるべきである。

(2) 土工構造物についての信頼性設計法の研究開発の促進

上述のように、信頼性設計法の技術基準への着実な導入にあたり、鋼材やコンクリートが用いられる周期性構造物の信頼性設計は、技術的には完成の域に達したと思われる。他方、液状化や地盤破壊の影響を直接受ける滑走路、誘導路等の土工構造物は、損傷確率を設計レベルで評価する際の不確実性は、大きくなるのが直感的に予想されるが、不明な点も多い。また、損傷のメカニズムを再現する性能関数についても、合理的なモデルが提案されているわけではない。一方で、レベル 2 地震動における土工構造物の信頼度は、他の施設や構造物に対して相対的に大きい(図-7.3.7)。システム信頼性では、構成要素である各構造物の信頼度に差がある場合、全体性能の信頼度は、低い信頼度の構造物のそれに大きく引きずられる。このような点から、より信頼度が低い(より損傷確率が大きい)土工構造物の信頼性設計法の整備は、重要かつ喫緊の課題であり、組織的な研究開発が急がれる。

(3) レベル 2 地震動への信頼性設計の適用の制度の制定

技術基準において、レベル 2 地震動については決定論的設計方法に留まっている。他方、防災計画はレベル 2 地震動を想定地震として作成されている。4 章でも述べたように、防災計画の遂行に必要な防災上重要な施設が、定論的設計に留まる現状では、場合によっては「リスクなし」との誤解から、ハード対策不要との極論を招きかねない。レベル 2 地震動における各種構造物の信頼度の照査法の確率とともに、制度の制定も望まれる。

(4) レベル 3 信頼性設計法への早期移行

現行技術基準の信頼性設計法は、レベル 1 信頼性設計法にとどまっている。レベル 1 信頼性設計法は不確実性に裏打ちされた部分係数によって安全余裕が付与される。部分係数は、外見上は許容応力度法の安全率と酷似して

いるため、表現上の連続性があるとの印象がある。しかしながら、部分係数は不確実性の大きさを客観的に記述したもので、半ば主観的な安全率とは区別する必要がある。一方で、施設の管理者には、全体性能の信頼度に責任があり、その管理が求められている。全体性能の信頼度は、6 章でも述べたように、施設を構成する個々の構造物・設備の信頼度から、システム信頼性の方法に則って評価される。したがって、確率照査を用いるレベル 3 信頼性設計法が実現すれば、全体性能の信頼度は、施設の設計や計画段階で把握でき、防災計画で要求される性能の実現の可否を確認することができる。レベル 3 信頼性設計法への早期実現が望まれるとともに、全体性能の確認作業を、設計段階で行える環境を整備することも重要である。

(5) 地震以外の災害事象への展開

空港にあっては、地震被害に関する研究が先行しているが、2018 年台風 21 号による関西国際空港の被害の事例により、高潮や高波浪等の水害についても、空港施設の全体性能に大きな影響を与える事実を認識した。これら地震以外の災害についても、災害事象に応じた性能関数をモデル化し、検討することにより、信頼性設計法を適用することができる。その結果、高潮・高波浪対策の護岸のかさ上げと、水害に関する防災計画への効果は勿論、護岸のトップヘビー化による耐震性能の低下も、同時に評価することができる。両災害にとって、効果的効率的な対策の検討もできる。

公共施設運営権設定に際し、災害の種類や規模を問わず、設定期間中のすべての災害事象について、確率論的リスク評価が可能となれば、災害事象を含めた運営権の合理的プライシングができるものと考ええる。これは、資金調達の方法、キャッシュの予測、出口戦略の検討などにも役立ち、結果としてコンセッション方式の普及・拡大に繋がるものと考ええる。

(6) 複合被害の想定

太平洋東北沖地震に伴う津波が、北上川河口を遡上し、堤防を越えて石巻市立大川小学校を襲い、児童が多数亡くなった。遺族が提訴した損害賠償裁判の控訴審判決(仙台高裁判決平成 30 年 4 月 16 日、判例時報 2387 号 31 頁)において、学校管理者の市教育委員会は、地震動による堤防の損傷、そのうえでの津波浸水まで考慮すべきであったと、地震動被害による二次被害としての津波被害まで予見する義務が求められた。この判決は最高裁判所で確定した。このように、二次被害まで評価する必要が生じ

てくるものと考えられるが、その方法については、今後の検討課題である。

本稿は、国土技術政策総合研究所と株式会社篠塚研究所との共同研究「空港土木施設の信頼性設計の確立に向けた検討」の成果の公表に代わるものである。

参考文献

- 1) 中島ら：空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究，国土技術政策研究所資料 No.962，国土技術政策総合研究所，2017
- 2) 波多野ら：2018年台風21号被害の関西国際空港の復旧曲線について，国土技術政策研究所資料 No.1104，国土技術政策総合研究所，2020

付録

付録A 建築施設の耐力中央値の評価

(1) 固有値解析と各階の応答変位

固有値解析を行い、建物の固有周期、刺激係数や固有モードを求める。単位の応答加速度に対応する建物各層の応答変位は以下のように求められる。なお、応答は1次周期が支配的なケースとする。

$$y_i = \beta_1 \cdot u_{i1} \cdot \omega_1^2 \quad (A1)$$

ここに、 y_i は i 層の応答変位、 β_1 は1次の刺激係数、 u_{i1} は i 層の1次の固有モード、 ω_1 は1次の角振動数である。応答変位 y_i を層間変位に置き換え、これを δ_i と置く。

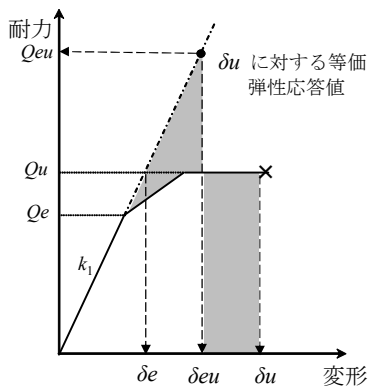
(2) 軽微被害の層間変位と応答加速度

図A-1は、層の復元力特性 (Q - δ 曲線) を理想化したもので、 Q_u は保有水平耐力、 Q_e は弾性限界耐力、 k_1 は初期剛性である。図中 δ_e は軽微被害の発生限界の層間変位とし、初期剛性と Q_u の交点とした。また、層間変位 δ_i は単位の応答加速度による変位であるから、 i 層の軽微被害が生じる応答加速度 α_{ei} は以下のように求められる。

$$\alpha_{ei} = \frac{\delta_{ei}}{\delta_i} \quad (A2)$$

ここに、 i は各層を表す。次に、建物としての軽微被害は最弱の層によって引起されると仮定すれば、建物の軽微被害の応答加速度 α_e は以下になる。

$$\alpha_e = \min_{all i} \alpha_{ei} \quad (A3)$$



図A-1 復元力特性とエネルギー吸収

(3) エネルギー等価による層崩壊時の層間変位

応答スペクトル法は、基本的には弾性変形が前提であり、塑性変形する部材や建物の応答を直接評価することはできない。そこで、エネルギー一定則を利用し、塑性応答を等価な弾性応答に置き換える。この考えに基づき、終局時の応答加速度値を求める。

図A-1に示す層崩壊時の層間変位 δ_u は以下のように得られる。

$$\delta_u = \mu \cdot \delta_e \quad (A4)$$

ここに、 μ は塑性率で以下のように求められる。

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{D_h^2}{D_s^2} + 1 \right) \quad (A5)$$

ここに、 D_s は構造特性係数、 D_h は以下で表される減衰に係る係数である。

$$D_h = \frac{1.5}{1+10h} \quad (A6)$$

ここに、 h は減衰定数である。

(4) 層崩壊時の応答加速度

図A-1に示すように、エネルギー等価 (三角形部と四角形の面積) を利用し、層崩壊時の層間変位 δ_u に対応する層崩壊時の等価弾性応答値 Q_{eu} を計算する。この点から弾性応答による層崩壊時層間変位 δ_{eu} を求める。式(A2)、(A3)と同様に層崩壊時の応答加速度値 α_{eu} が以下のように得られる。なお、 δ_u については、RC造では1/40、S造では1/25を上限とする。

$$\alpha_{eu} = \min_{all i} \left(\frac{\delta_{eui}}{\delta_i} \right) \quad (A7)$$

ここに、 i は各層を表す。

(5) 大破・中破の応答加速度値

大破・中破の層間変位を定めることは難しく、本研究では δ_e と δ_u の間を3等補完して定める。

付録B 地盤物性値

工学的基盤面から地表面の応答スペクトルを評価する際の土質構成、ならびにN値を表B-1に示す。

単位体積重量は土質区分毎に標準的な値を設定し、せん断波速度 V_s は太田後藤式を用いて求めた。また、地盤応答の非線形性に関する諸定数は建設省告示 1457 号（2000 年）に基づいている。

表 B-1 層構成と地盤物性値

No	深度	時代	土質		N値
	H (m)	区分	区分	土質名	
1	2.500	沖積層	砂礫	砂礫	60
2	5.150	沖積層	砂礫	粘土混じり砂礫	13
3	7.800	沖積層	砂礫	粘土混じり砂礫	17
4	11.300	沖積層	砂礫	粘土質砂礫	11
5	14.800	沖積層	砂礫	粘土質砂礫	11
6	18.025	沖積層	細砂	粘土混じり細砂	13
7	21.250	沖積層	細砂	粘土混じり細砂	10
8	24.475	沖積層	細砂	粘土混じり細砂	15
9	27.700	沖積層	細砂	粘土混じり細砂	14
10	28.800	沖積層	細砂	粘土質細砂	33
11	32.540	沖積層	粘土	シルト質粘土	4
12	36.280	沖積層	粘土	シルト質粘土	6
13	40.020	沖積層	粘土	シルト質粘土	6
14	43.760	沖積層	粘土	シルト質粘土	8
15	47.500	沖積層	粘土	シルト質粘土	8
16	50.000	沖積層	粘土	礫混じり粘土	7
17	52.000	沖積層	粘土	粘土	10
18	53.000	沖積層	細砂	粘土質細砂	35
19	54.250	沖積層	細砂	粘土混じり細砂	30
20	55.450	沖積層	細砂	細砂	46
21	58.100	沖積層	細砂	粘土質細砂	34
22	59.900	洪積層	細砂	細砂	60
23	63.267	洪積層	砂礫	砂礫	60

付録 C 再現期間早見表

表 C-1 供用期間 30 年の超過確率と再現期間

超過確率 (%)	再現期間 (年)	超過確率 (%)	再現期間 (年)
1	2,985	51	42
2	1,485	52	41
3	985	53	40
4	735	54	39
5	585	55	38
6	485	56	37
7	413	57	36
8	360	58	35
9	318	59	34
10	285	60	33
11	257	61	32
12	235	62	31
13	215	63	30
14	199	64	29
15	185	65	29
16	172	66	28
17	161	67	27
18	151	68	26
19	142	69	26
20	134	70	25
21	127	71	24
22	121	72	24
23	115	73	23
24	109	74	22
25	104	75	22
26	100	76	21
27	95	77	20
28	91	78	20
29	88	79	19
30	84	80	19
31	81	81	18
32	78	82	17
33	75	83	17
34	72	84	16
35	70	85	16
36	67	86	15
37	65	87	15
38	63	88	14
39	61	89	14
40	59	90	13
41	57	91	12
42	55	92	12
43	53	93	11
44	52	94	11
45	50	95	10
46	49	96	9
47	47	97	9
48	46	98	8
49	45	99	7
50	43	100	-

表 C-2 供用期間 50 年の超過確率と再現期間

超過確率 (%)	再現期間 (年)	超過確率 (%)	再現期間 (年)
1	4,975	51	70
2	2,475	52	68
3	1,642	53	66
4	1,225	54	64
5	975	55	63
6	808	56	61
7	689	57	59
8	600	58	58
9	530	59	56
10	475	60	55
11	429	61	53
12	391	62	52
13	359	63	50
14	332	64	49
15	308	65	48
16	287	66	46
17	268	67	45
18	252	68	44
19	237	69	43
20	224	70	42
21	212	71	40
22	201	72	39
23	191	73	38
24	182	74	37
25	174	75	36
26	166	76	35
27	159	77	34
28	152	78	33
29	146	79	32
30	140	80	31
31	135	81	30
32	130	82	29
33	125	83	28
34	120	84	27
35	116	85	26
36	112	86	25
37	108	87	25
38	105	88	24
39	101	89	23
40	98	90	22
41	95	91	21
42	92	92	20
43	89	93	19
44	86	94	18
45	84	95	17
46	81	96	16
47	79	97	14
48	76	98	13
49	74	99	11
50	72	100	-

表 C-3 供用期間 100 年の超過確率と再現期間

超過確率 (%)	再現期間 (年)	超過確率 (%)	再現期間 (年)
1	9,950	51	140
2	4,950	52	136
3	3,283	53	132
4	2,450	54	129
5	1,950	55	125
6	1,616	56	122
7	1,378	57	118
8	1,199	58	115
9	1,060	59	112
10	949	60	109
11	858	61	106
12	782	62	103
13	718	63	101
14	663	64	98
15	615	65	95
16	574	66	93
17	537	67	90
18	504	68	88
19	475	69	85
20	448	70	83
21	424	71	81
22	402	72	79
23	383	73	76
24	364	74	74
25	348	75	72
26	332	76	70
27	318	77	68
28	304	78	66
29	292	79	64
30	280	80	62
31	269	81	60
32	259	82	58
33	250	83	56
34	241	84	55
35	232	85	53
36	224	86	51
37	216	87	49
38	209	88	47
39	202	89	45
40	196	90	43
41	190	91	42
42	184	92	40
43	178	93	38
44	172	94	36
45	167	95	33
46	162	96	31
47	158	97	29
48	153	98	26
49	149	99	22
50	144	100	-