

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.962

March 2017

空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究

中島由貴・松本英雄・菅野高弘・山崎浩之・中村孝明・望月智也

A Study on Adoption of the Reliability-based Design
in the Earthquake Resistance of the Airport

Yoshitaka NAKASHIMA, Hideo MATSUMOTO, Tkahiro SUGAI, Hiroyuki YAMAZAKI,
Takaaki NAKAMURA, Tomoya MOCHIZUKI

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

空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究

中島 由貴*, 松本 英雄**, 菅野 高弘***, 山崎 浩之****, 中村 孝明*****, 望月 智也*****

要 旨

我国の耐震設計は、被害を伴う諸地震による教訓や知見を経て、その都度改変されている。この改変は、主に外力としての地震動や構造物の耐震性評価に関する技術面での高度化を図るものであった。一方で、耐震性能の照査法としての信頼性設計は、従前から必要性が問われ、また空港施設の法定基準においてもこれを前提に編纂されているが、導入は遷延されている。

本稿は、信頼性設計を導入する上での技術的な課題、特に設計用地震動や空港全体としての要求性能の照査基準について調査、整理する。そして信頼性設計の導入を目標に、その骨格を整えるべく、信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案を、現行の設計要領を増補する形式で示す。また、同試案のキャリブレーションとして、標本空港を対象に適用性の検討を行う。

キーワード：信頼性設計、空港施設、耐震設計、要求性能、リスク規範、破壊確率、目標安全水準、防災計画

* 空港研究部 空港新技術研究官

** 港湾研究部 港湾新技術研究官

*** 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 上席専任研究員

**** 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 特別研究主幹

***** 株式会社 篠塚研究所, 東京都市大学 大学院工学研究科 客員教授

***** 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-kikaku@ml.mlit.go.jp

A Study on Adoption of the Reliability-base Design in the Earthquake Resistance of the Airport

Yoshitaka NAKASHIMA*
Hideo MATSUMOTO**
Takahiro SUGANO***
Hiroyuki YAMAZAKI***
Takaaki NAKAMURA*****
Tomoya MOCHIZUKI*****

Synopsis

Japan's earthquake resistant designs are modified on all lessons and knowledge learned from the damage done by earthquakes. These modifications were done to improve the technical aspects of resistance performance evaluation of structures and valuing the eternal force of the earthquake ground motion. On the other hand, reliability-based design, used as a means to check the earthquake resistance performance, has been needed and was a concern from long before. Also, documents about earthquake resistant standards for airport facilities and notifications have complied with having this reliability-based design as a prior condition, but actual adoption has been prolonged. In this paper, we will be looking at the reasons for the procrastination of the reliability-based design and technical problems that need to be solved for adoption. Technical problems especially refer to the checking standards of the required performance for the ground motion for design and requirements of the airport as a whole. Our target of actual adoption of the reliability-based design, we are willing to accomplish this by adding the tentative plan, which is planned to be the framework of the design guideline, to the present design guideline. Also, airports will be subjected to adaptability examinations for the draft plan of the calibration method for the design capacity.

Keywords : reliability-based design, airport facility, earthquake resistant design, required performance, risk management, failure probability, target safety level, disaster management plan

* Research Coordinator for advanced Airport Technology, Airport Department

* * Research Coordinator for advanced Port Technology, Port and Harbor Department

* * * Visiting Principal Researcher, PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

* * * * Senior Director for Research, PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

* * * * * SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE, Tokyo City University Graduate school of engineering visiting professor

* * * * * SHINOZUKA RESEARCH INSTITUTE

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

Tel: 046-844-5019 Fax: 046-842-9265 E-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 構造信頼性理論に基づく設計法	2
2.1 構造信頼性理論	2
2.2 経済性を追及したリスク規範設計	3
3. 設計用地震動	4
3.1 既往の設計用地震動	4
3.2 信頼性設計に適した設計用地震動	5
3.3 信頼性設計と複合被害の評価	8
4. 不確実性と耐力	8
4.1 不確実性の分類	8
4.2 不確実性に関する統計分析	9
4.3 液状化確率と不確実性	9
5. 構造物の目標安全水準に関する調査	10
5.1 リスクの社会的受容限度に基づく方法	10
5.2 期待総費用に基づく方法	10
5.3 既往の設計に基づく方法	11
5.4 PML（予想最大損失）に基づく方法	12
6. 要求性能と限界値	12
6.1 空港全体の総合的な要求性能	12
6.2 空港全体の要求性能の限界値	12
6.3 空港各施設の限界値	13
6.4 損傷相関の扱い	14
7. 設計用地震動による標本空港の信頼度の評価	14
7.1 対象空港とシステムモデル	14
7.2 設計用地震動	14
7.3 対象空港の健全度曲線	15
8. 信頼性設計キャリブレーション要領試案	17
8.1 信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案	17
8.2 信頼性設計導入に向けての課題	17
9. 結語	18
謝辞	19
参考文献	19
付録	22
付録A 空港の信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案	22
付録B 構造信頼性理論と損傷確率	37
付録C フラジリティカーブの評価	39
付録D 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室の公開する地震動	40
付録E P_L 値を指標とした構造物被害のフラジリティカーブの確率モデル	41
付録F 液状化の発生に関するフラジリティカーブの統計的評価	44
付録G 東日本大震災時における仙台空港の復旧過程	47
付録H 損傷相関と相関係数	48
付録I 積分法による損傷相関の評価	50

空港の耐震化における信頼性設計の導入に関する研究
／中島由貴・松本英雄・菅野高弘・山崎浩之・中村孝明・望月智也

付録J 実空港の信頼性評価における構成要素の諸元.....	53
付録K 極値分布としての地震ハザード曲線.....	54
付録L 空港全体の総合的な耐震性能に関する補足.....	56
付録M 信頼性設計に適した地震動モデルに関する補足.....	57

1. はじめに

空港の耐震基準については、航空法施行規則（2008年6月改正）第79条（設置基準）第1項第七号イ(1)において、地震動等による損傷等が当該施設の機能を損なわず、継続して使用することに影響を及ぼさないことと、性能がはじめて規定された。そのうえで、同条第2項において、第七号に規定する滑走路等性能の照査に必要な事項は国土交通大臣が定めるとされ、詳細については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（2008年6月、国土交通大臣告示第八百号）に委任された。同告示第3条（性能照査の基本）第1項において、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（本則）によって行うものと規定され、空港土木施設の設置基準・同解説（航空局・国土技術政策総合研究所監修、2008年7月）の第2章2.2の解説において、その性能照査の方法として、信頼性設計法を挙げている。

同告示第13条では、滑走路について、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と規定されている。危険性の尺度は、信頼性設計法で用いられる破壊確率（損傷確率）、信頼性指標等であり、これら確率的な指標が目標安全水準である限界値以下であることを求めている。着陸帯、誘導路、エプロン、これらの地下の工作物及びショルダーの性能規定の各条文についても、同一の表現である。このように、空港の耐震設計に関して、構造信頼性理論に基づく信頼性設計法及び同法を踏まえた性能規定が法定基準として位置付けられている。ところが、2008年7月に、空港土木施設耐震設計要領及び設計例（航空局・国土技術政策総合研究所監修）が発刊されたものの、信頼性設計法による性能照査例は未記載である。当時、空港土木施設の信頼性設計法が未確立であったことが、その理由と推察されるが、損傷確率や信頼性指標の限界値をどのように決定するか、このようなCode writers が規範とすべき原則、いわゆる code for code writers が未確立であることも、遷延の理由と考える。

一方、2004年の新潟県中越地震を踏まえ2007年に、「地震に強い空港のあり方（航空局）」が示された。同文書は、空港の防災計画ともいえ、地震時の航空機による災害活動等も踏まえ、空港全体の総合的な耐震性能とそ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）と整合があり、先駆的であった。しかしながら、空港全体の総合的な耐震性能を照査する方法は課題として残されていた。その課題として、空港全体は、固有周期（周波数特性）その他の応答特性が異なる構造物の集合体である。一つの地震動の作用により集合した構造物群が同時被災するとともに、それらの被災程度に濃淡が生じる。このことは、空港全体の総合的な耐震性能の評価に際し重要である。そこで小野ら（2015）は、国土技術政策総合研究所資料第830号において、構造信頼性理論を基本とした確率的リスク評価手法に基づき、地震時の空港機能の復旧過程や健全度を経過時間とともに数値・視覚化できる方法（健全度曲線）を提案した。また、中島ら（2015）は、同資料863号において、現行設計法の課題、性能設計や信頼性設計の内外動向、リスク規範による要求性能の照査など、構造物の安全性確保全般について調査するとともに、空港全体の要求性能を照査し、その結果を空港各施設の耐震性能に反映する方法について、その大略を示した。これにより、空港機能を維持するための空港土木施設の損傷確率の限界値を照査する一連の方法が示されたことになる。また、次章で詳記するが、空港施設の耐震性能を規定する上で構造信頼性理論にもとづく信頼性設計法に関する研究は確かな進展が見えており、技術面での環境は整備されつつある。

以上を踏まえ、本稿は、法定基準で想定している信頼性設計法の導入を目標に、内在する技術的課題を整理し、設計用地震動、空港全体として目標安全性水準について調査する。そのうえで空港全体の要求性能の限界値を示すとともに、空港各施設で求められる耐震性能の評価方法について示す。実空港を対象に適用性の検討を行い、信頼性設計の導入に向けて、その骨格となるべき設計要領の試案を示す。

内容は、第2章では構造信頼性理論に基づく耐震設計法、及びリスク規範による設計法を概説する。第3章では現況の設計用地震動の設定根拠や評価方法を調査し、信頼性設計法に適した設計用地震動の在り方について一案を示す。第4章では信頼性設計で特に重要となる不確実性についてその分類と統計分析の実情を示す。第5章では構造物の目標安全水準に関する既往の方法を調査・概説し、第6章で空港全体の総合的な要求性能と空港各施設の耐震性能、照査の限界値について示す。第7章において、実在の標本空港を対象にコードキャリブレーションを含めた適用性の検討を行なう。第2章から第7章の調査検討を踏まえ、第8章で空港の信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案を示す。

2. 構造信頼性理論に基づく設計法

2.1 構造信頼性理論

構造物の耐震設計は、基本的には構造物が持つ耐力が外力（作用地震動あるいは構造物の応答）を上回ることを確認する作業である。これを模式的にして示したのが図-1(a)である。図に示すように耐力 c が作用地震動 r を上回れば ($r \leq c$ となれば) 安全が確保できたと判断する。この場合、 r と c の隔たりは安全余裕となるが、仮に安全率 1.2 と規定した場合には、 $c/r \geq 1.2$ を満たすことが安全確保の閾値となる。安全余裕や安全率が付与される理由は、予定の耐力を下回る可能性や想定以上の地震動が作用する可能性を否定できないからである。これはこれまでの被害地震の事例を鑑みても明らかである。つまり、耐力や外力の統計的な不確実性が存在する実状から、これを見込んだ一定の安全余裕は必要な付加条件となる。

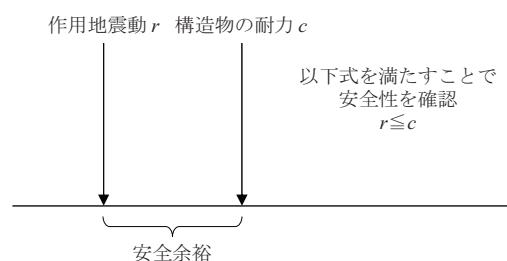
一方、Freudenthal (1947)、ならびに Freudenthal, A.M and Shinozuka, M. (1966) は、耐力や外力の統計的不確実性を積極的に取入れた安全性照査の考え方を提唱した。いわゆる信頼性設計法である。この方法を概説すると、図-1(b)に示すように、作用と耐力はばらつきをもった確率変数 R , C と置く。そして $R \geq C$ となる確率（これを破壊確率や損傷確率と呼ぶ）が、許容値以下になることを照査し、安全を確保することになる。このため、安全の概念は「破壊確率や損傷確率が許容できる程、十分小さい」となり、安全に対し絶対を求めないことが前提となる。

なお、図-1(b)は、様々な不確実性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。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、一般化は遅々として進まなかった。確率変数の不確実性に関する情報、損傷確率の許容値に関する合理的な説明技法が未整備であることが、その理由と考える。

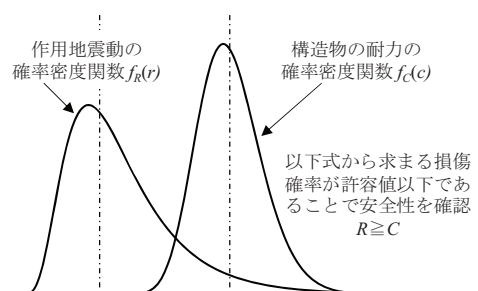
中村 (2013) は、「安全である」「壊れない」といった確定的な認識は、安全を追求する思考を停止させる危険な行為と言及している。安全の程度を定量的に確認できる信頼性設計法は、合理性のみならず、さらなる安全を追求する機会を与える重要な役割を担うものと考ええる。

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 (図-1(b))。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 に示す。(損傷確率、フラジリティカーブの詳細は付録 B, C を参照)。フラジリティカーブは、Shinozuka, M. (1999) の手法を利用することで、被災事例や実験などから統計的に評価でき、同時に内在する作用地震動や耐力の不確実性を定量的に求めることができる。



(a) 確定的な設計の考え方



(b) 信頼性設計の考え方

図-1 確定的な設計と信頼性設計の比較

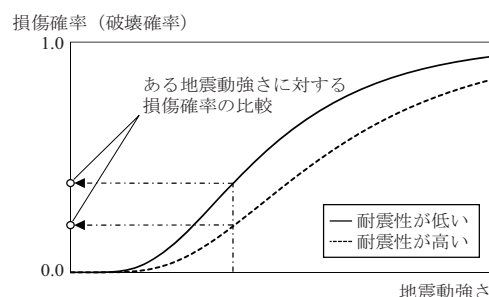


図-2 フラジリティカーブの概念図

港湾施設の信頼性設計法に関する主要な研究例として、長尾らの研究 (2007) や安田らの研究 (2009) などがあ

る。これらの研究は、栈橋や岸壁等の港湾構造物を対象に、1 次近似 2 次モーメント法（FOSM; First-Order Second-Moment Method）を用いて、地震時の破壊確率や信頼性指標を評価する方法を提案している。また、設計の実務では、レベル 1 地震動に対する直杭横栈橋の杭応力の照査にレベル 1 信頼性設計法（部分係数法）がみられる。

しかし、空港分野においては、信頼性設計法は実施されていない。空港は固有周期等の応答特性が異なる構造物の集合体（付録表 J-1 を参照）であり、空港全体の耐震性能を評価するためには、異なる構造物の破壊確率を横断的に照査することができるレベル 3 信頼性設計法の導入が求められる。

このように、信頼性設計法を導入する上での環境は要素技術の整備を含め、確かな進展がみられる一方で、許容できる損傷確率の議論は必ずしも進んでいない。一方、損傷確率に構造物が損傷した際の損失額等を考慮することで、経済的な設計が可能となる。この点について土木学会 耐震設計基準小委員会の例を次節で紹介する。

2.2 経済性を追及したリスク規範設計

土木学会 地震工学委員会 耐震設計基準小委員会は、2003 年に「土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル 1 の考え方」を公開した。まず、レベル 1 地震動等のレベルは設計法のレベルであり、地震動の大きさのレベルでも、頻度のレベルでもないこと、レベル 1 地震動を設定する学問的根拠は皆無であること、また、レベル 1＝弾性設計、レベル 2＝限界状態設計といった固定概念を否定している。その上で、構造物の設計行為は、リスクとコストのバランスを考慮すべきもので、「リスクマネジメントのための特定条件のもとでのシミュレーション」と位置付け、レベル 1 の設計法として、地震による修復費用＋間接被害額と初期コストから成る、いわゆるライフサイクルコスト（以下 LCC）を最小化する経済性照査を推奨している。すなわちリスク規範設計の提案である。その後、同委員会は「経済性照査に基づく新しい耐震設計法の実施に向けての検討」（2008）にて経済性照査の方法の細部をとりまとめ、レベル 1 は最も経済的な設計を行うこと、レベル 2 は人的被害の抑止、緊急時の活動に必要な最低限の機能確保など、経済性に直接関わらない範囲の安全性照査を行うことと、それぞれ定義している。このため、人的被害や緊急時に関わらない構造物は、レベル 2 設計を行う必要はないとしている。このような耐震設計の全体フローの大略を図-3 に示す。レベル 2 設計に用いる地震動は、当該構造物に対

する最大級の地震動と別記されているが、構造物周辺の被災状況を踏まえた検討が可能となるシナリオ地震の設定を前提とするものと推察される。一方のレベル 1 地震動については、供用期間に発生する可能性のある全ての地震を確率的に考慮することを前提に、地震ハザードカーブあるいは「3.2 信頼性設計に適した設計用地震動」で記するイベントハザードカーブ（生起確率付き地震動群）などを使うこととしている。

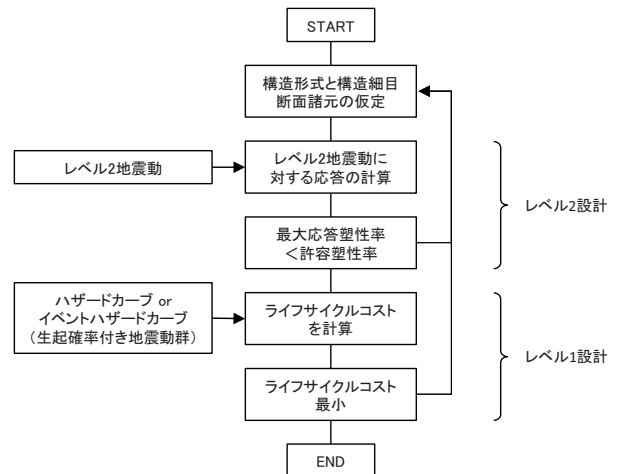


図-3 土木学会 地震工学委員会耐震設計基準小委員会の新たな耐震設計の全体フロー

広域に散在する施設の経済性照査を行うには、各施設の同時被災を考慮する必要がある。この場合には、イベントハザードカーブを用いなければならない。同カーブは単体の構造物にも適用できることを考え合わせると、ハザードカーブではなく、イベントハザードカーブを一貫して用いるのが合理的であると考えられる。

LCC は、耐震性能に的を絞るのであれば、維持管理费用等を除き、次式のように単純化できる。

$$C_T = C_I + \sum_{i=1}^n E(C_i) d_i \quad (1)$$

ここに、 C_T は耐震設計に的を絞った期待総費用、 C_I は初期コスト、 $E(C_i)$ は i 年における地震による損失額の期待値、 d_i は i 年の割引係数である。損失額の期待値は、修復費に加え、当該構造物が機能しないことによる間接的な損失（逸失便益）などが含まれ、地震の発生確率も考慮されている。 C_T を最小化することを照査基準とすることで構造物の耐震性能が決定する。

損失額の期待値の計算では、前述した構造信頼性理論に基づいた損傷確率の評価が必須になる。本稿の目的である信頼性設計法の適用における技術的整備課題は同じ

であり、軌を一にする。一方で、経済性照査については課題もあり、この点は「5.2 期待総費用に基づく方法」にて示す。また、金銭価値によって受容限度を設定する方法の一つに PML があり、「5.4 PML（予想最大損失）に基づく方法」にて詳記する。

一方、海外では、信頼性設計からリスク規範型の設計に移行する道筋はほぼ固まったと言え、最新の ISO2394（2015）においては、数値化したリスク情報に基づく意思決定行為そのものが規格化されており、これは先述した耐震設計基準小委員会の方向性と整合している。

3. 設計用地震動

3.1 既往の設計用地震動

構造物の耐震性能を左右する最大の要因は、設計用地震動である。特に 1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震を契機に、各種構造物の耐震設計は、構造物の重要度や要求性能に応じてレベル 1 地震動とレベル 2 地震動を想定した二段階の設計が行われるようになった。空港土木施設の耐震設計指針（案）（2000）では、レベル 1 地震動は「空港土木施設全体の設計供用期間中に 1～2 度発生する確率を有する地震動で、再現期間は概ね 75 年とする」、レベル 2 地震動は「空港土木施設の設計供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度を有する地震動で、プレート内あるいは陸域近傍のプレート境界で発生するいわゆる再現期間が数 100 年以上の地震動。なお、地域防災計画で定められた想定地震がある場合にはこれを参考として設定する」とある。また、陸上空港の基準対象施設の性能照査に必要な事項等を定める告示によれば、レベル 1 地震動は「当該施設を設置する地点において発生するものとされる地震動のうち、地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間（当該施設の設計にあたって、当該施設に求められる性能を満足し続けるものとして設定される期間をいう）との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いものに限る」、レベル 2 地震動は「当該施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち最大規模の強さを有するもの」とされている。空港土木施設耐震設計要領及び設計例（2008）においては、レベル 1 地震動とレベル 2 地震動に関しては告示と同様な定義を示したうえで、港湾の施設の技術上の基準・同解説を参考とすることができるとされ、同文書では、レベル 1 地震動は「再現期間 75 年の一様ハザードフーリエスペクトルとすることを標準とする」とある。

ところで、上述した設計用地震動の定義は再現期間が

表記されているケースもあるものの、具体的にどのような地震動を用いればよいのかは不明なものが多い。そこで、空港土木施設の耐震設計の実務の既往の方法を示す。既往の方法は、レベル 1 地震動は港湾の施設の技術上の基準・同解説に示されている再現期間 75 年の一様ハザードフーリエスペクトルに対応する確率論的時刻歴波形を標準としている。具体的には、国土技術政策総合研究所のホームページに国内諸港湾の設計用時刻歴波形が示されており、当該空港近傍の港湾を選びその時刻歴波形をダウンロードして、設計用レベル 1 地震動として採用している。また、レベル 2 地震動については、シナリオ地震を選定した上で、その時刻歴波形を用いている。時刻歴波形の評価には、港湾の施設の技術上の基準・同解説にその評価方法の詳細（通称、レシビと呼ばれている）が示されているが、評価方法に適合しない条件のもとでは、有識者等の意見を踏まえて個別に評価しているのが実状である。

図-4 は、国土技術政策総合研究所第 812 号に示されている再現期間 75 年の一様ハザードフーリエスペクトルに対応する確率論的時刻歴波形の評価フローである。図より、各震源モデルからサイトのフーリエ振幅を計算する方法は、極値分布に基づいて（付録 K 参照）いるが、統計的 Green 関数法を使いサイトでの地震波を生成している点に特徴があり、震源特性や伝播過程に内在する不確実性を考慮し少なくとも 100 波以上のサンプル波を作成している。震源特性や伝播過程の不確実性は、「4.1 不確実性の分類」に詳記している。また、モデル化不確実性として、認識論的不確実性（epistemic uncertainty）を、ロジックツリーを使い取り入れている。一方で、地震の発生は一律ポアソン過程を用いており、海溝型地震に多く採用されている BPT（Brownian Passage Time）分布に基づく更新過程は見送られている。このように、確率論的時刻歴波形の評価は、高度かつ精緻な方法が採られているものの、最終的には再現期間 75 年に相当する時刻歴波形 1 波のみで照査が行われる仕組みである。再現期間 75 年に相当する時刻歴波形 1 波から導かれる応答は不確実性を含めない単一直値であり、信頼性設計で求められる応答の確率分布を得ることができない。結果として地震動評価の不確実性（震源特性、伝播特性の不確実性）は考慮されない。つまり、図-1(b)に示した作用地震動の不確実性が含まれず、二山モデルによる破壊確率の評価は困難となる。

ここで、国土技術政策総合研究所のホームページが公開する東京港①～③の地点（付録図 D-1）におけるレベル 1 地震動（再現期間 75 年の工学的基盤面での加速度

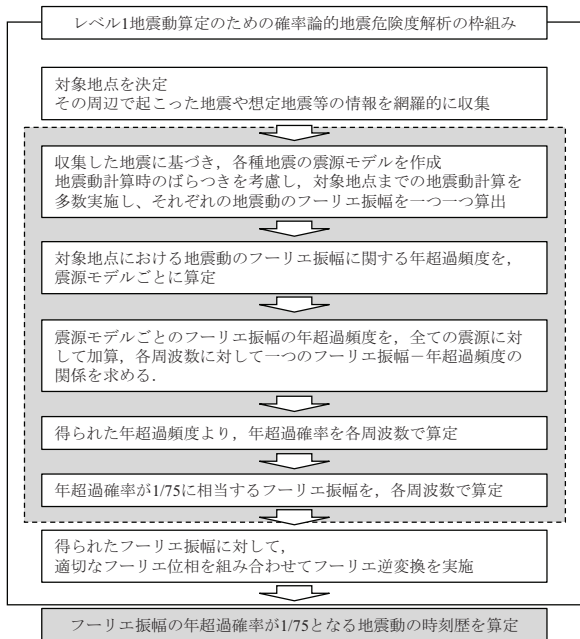


図-4 確率論的時刻歴波形の評価フロー

時刻歴波形)の時刻歴波形から加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を求め、比較したものを図-5 に示す(時刻歴波形については付録図 D-2 に記す)。図より加速度応答スペクトルの差は明瞭である。例えば、周期 0.5sec 以下では、1.5 倍から 2.0 倍程度の差が見られる。特に、東京港③のスペクトル値は周期による応答加速度の差が大きく、固有周期が近接した 2 つの構造物であっても、耐震性能の差異が大きくなる可能性がある。

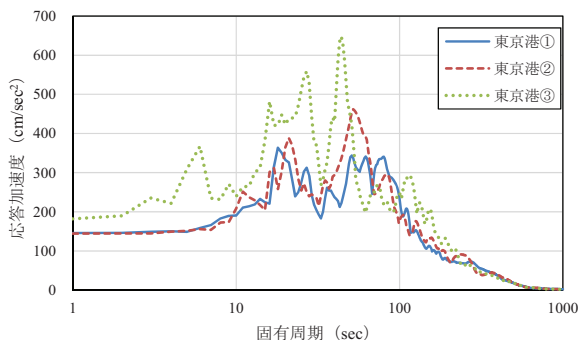


図-5 加速度応答スペクトルの比較

3.2 信頼性設計に適した設計用地震動

(1) レベル 1 地震動

特定地点の施設、または広域散在施設を問わず地震リスクを評価するシナリオ地震群をマルチイベントモデル、または複数震源モデルと呼ぶ。同モデルは、一部の活断層とプレート境界での地震発生確率については更新過程

を適用している。このモデルを使い任意のサイトでの地震危険度を示したものをイベントハザードカーブと呼ぶ。その一例を図-6 に示す。以下、シナリオ地震を地震イベントと記す。イベントハザードカーブの横軸は地震イベントによるサイトの地震動で、地震動を表す指標としては最大加速度/速度、または応答スペクトル値などを用いる。これらはせん断波速度 $V_s=400\text{cm/sec}$ 以上の工学的基盤面での値である。地震動は適当な距離減衰式を用いて求めるのが一般的である。縦軸は地震イベントの年発生確率の累積値 P_i であり以下のように求める。

$$P_i = 1 - (1 - p_i)(1 - p_{i-1}), \quad i \geq 1 \quad (2)$$

ここに、 i は地震イベント、 $p_1, p_2, \dots$ はサイトに作用する地震動の大きい順に並べた地震イベントの年発生確率である。 p_0 は 0 とする。図-6 の●はそれぞれの地震イベントによる地震動の中央値を表し、図のように一定の不確実性を伴う確率分布として記述する。この確率分布は対数正規分布が適切である。例えば、当該サイトにおける地震動を距離減衰式で評価するケースを想定すると、安中ら (1997) 等の研究にもとづけば、そのばらつきは対数標準偏差で 0.45~0.5 程度の範囲となる。

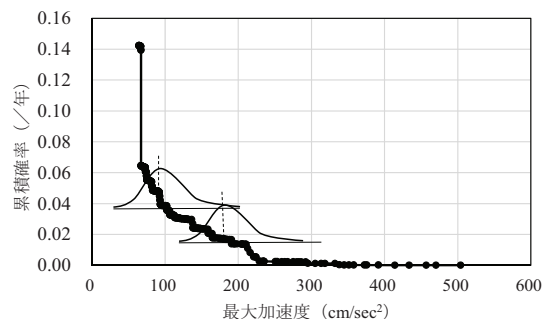


図-6 イベントハザードカーブ

次に、同様の方法で、固有周期毎の応答加速度のイベントハザードカーブを求め、そこから一様ハザードスペクトル、時刻歴波形を求める流れを、概念図とともに図-7 に示す。まず、イベントハザードカーブから再現期間 75 年 (1/75) に対応するそれぞれの応答加速度を読み、周期を横軸に応答値を縦軸に取ると、いわゆる一様ハザードスペクトルが得られる。信頼性設計では、この一様ハザードスペクトルを作用地震動として用いる (図-7 中)。また、一様ハザードスペクトルから時刻歴波形を求めれば、再現期間 75 年の平均的な地震波 (図-7 下) を得ることができる。この方法では、図-7 中の一

様ハザードスペクトルの値は特性値（中央値）となり、図のように縦に確率分布をもつことになる。このため、地震動の不確実性を温存した状態で設計用地震動を与えることが可能となり、図-1(b)に示した信頼性設計の土俵に乗せることができる。周期構造物については再現期間 75 年の地震動による応答を直接評価できる利点も大きい。

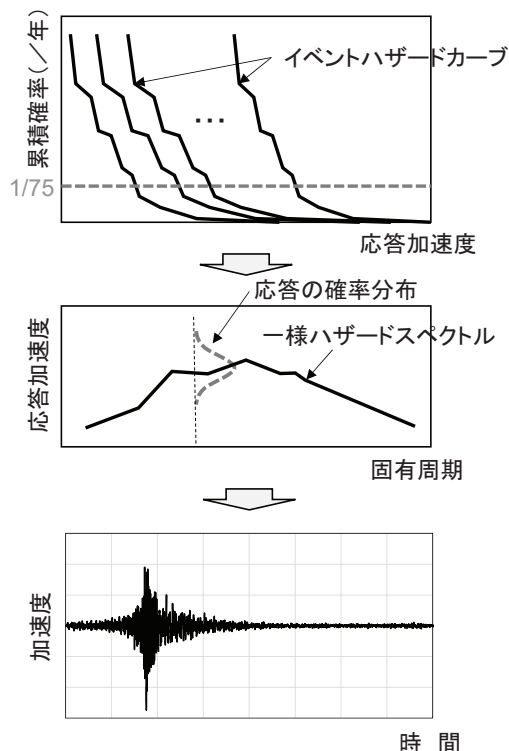


図-7 イベントハザードカーブから設計用地震動を求める流れ

マルチイベントモデルを用い、東京港③の代表評価地点（経度 139.82，緯度 35.62）における、固有周期毎の応答加速度のイベントハザードカーブを評価したものを図-8 に示す。距離減衰式は安中ら（1997）の提案式を採用している。便宜上、図では 9 種の固有周期に対するイベントハザードカーブを示すが、実際は 81 種類の固有周期に対するイベントハザードカーブを算出している。縦軸の 1/75 から、各イベントハザードカーブを読み、一様ハザードスペクトルを求めたものを図-9 に示す。図には比較のため既往の方法による時刻歴波形（東京港③）の加速度応答スペクトルを示す。

また、建築基準法に示されている加速度応答スペクトル、いわゆる告示スペクトルを、最大加速度を合せるよう調整したものを併記する。図より、一様ハザードスペ

クトルによる本方法は、周期に対して滑らかであり、各種のスペクトルを包含した告示スペクトルとも整合的である。周期構造物に対し、均質な強度レベルを実現するのに適したスペクトル形状といえる。一方で、長周期地震動の応答については、若干小さく現れているが、これは距離減衰式の特性によるもので、長周期側の地震動の推計精度を含め、距離減衰式の選定は慎重に検討する必要がある。長周期地震動の距離減衰式については、Morikawa and Fujiwara(2013)、佐藤ら（2011）、片岡ら（2008）、横田ら（2011）などが参考になる。一方の既往の方法は、周期に対して凹凸が激しく（図-9 参照）、周期構造物について、応答加速度、構造物の固有周期の推定精度が構造諸元、耐震性能に大きく影響すると推察される。

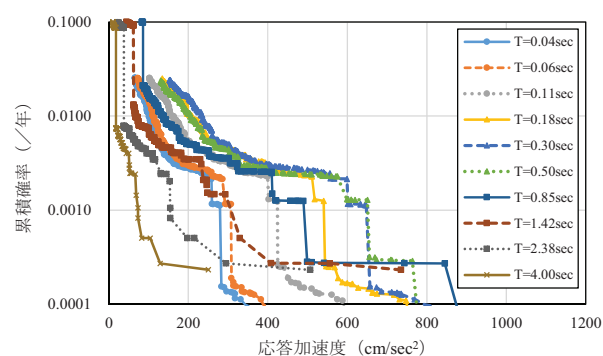
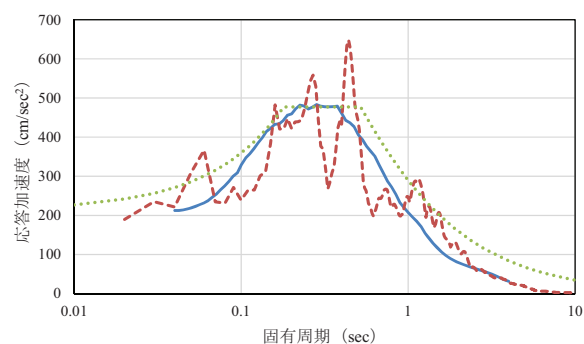


図-8 固有周期毎の応答加速度のイベントハザードカーブ（東京港③）



注：上図の凡例
— 再現期間75年の一様ハザードスペクトル
--- 既往の方法による時刻歴波形（東京港③）
..... 建築基準法 告示スペクトル

図-9 加速度応答スペクトルの比較（東京港③）

(2) レベル 2 地震動

中央防災会議は、南海トラフ地震の向こう 30 年の発生確率を 88%としている。これは、再現期間 75 年のレベル 1 地震動の向こう 30 年の超過確率 33% (50 年超過確率 49%) より、かなり逼迫している。レベル 2 地震動については、確定的設計 (変位が限界値以下とする) が原則であるが、同設計は破壊確率を 50%程度としか説明できない。そのため、レベル 2 地震動を南海トラフ地震の由来とする場合、向こう 30 年で 44%程度運航に支障を生じるとの説明となる。したがって、レベル 2 地震動が十分逼迫する場合、破壊確率をより合理的に説明できる信頼性設計でも照査することが望ましいと考える。

空港土木施設耐震設計要領及び設計例に、地震に対する要求性能として、レベル 1 地震動については「運用に支障を与えない程度の軽微なひび割れ」、レベル 2 地震動については「短期間で復旧可能な程度のひび割れ」などが記されている。これは、空港機能は発災後短期間で回復することを要求しており、地震に強い空港のあり方 (2007) に記されている「大規模地震時でも発災後 3 日を目処」と整合している。一方、一様ハザードスペクトルを用い、設計用地震動を規定する方法は、地震の発生頻度に対して均質な耐震性能を実現する上では一定の合理性がある。しかしながら、実地震の波形や周期特性とは一致しておらず、空港全体としての機能に着目した健全性の検討には必ずしも適さない。空港は、それを構成する施設が有機的に連関することで機能しているため、空港機能の健全性の照査には、実地震を前提としたシナリオ地震による評価がより適しているからである。

レベル 2 地震動は、空港土木施設の設計指針 (案) (2000)、同設置基準・同解説 (2015) などから、定性的ではあるものの、総じて最大級の地震による地震動とある。また、「地域防災計画で定められた想定地震がある場合にはこれを参考として設定する」と付記があり、シナリオ地震を支持している。以上より、レベル 2 地震動については、当該施設に最大級の地震動を誘引するシナリオ地震、あるいは当該地域の被害想定などに使われているシナリオ地震とするのが適切と考える。そこで、マルチイベントモデルを用いたレベル 2 のシナリオ地震の設定方法について例示する。東京港③での最大加速度の大きい順に上位 40 のシナリオ地震を列記したものを表-1 に示す。表は左から震源名、マグニチュード、工学的基盤面での最大加速度 (PBA: Peak Bedrock Acceleration)、年発生確率、累積確率、震源タイプである。震源タイプは、3 は震源を特定することが難しい内陸の背景地震、2 はプレート境界型の地震、表に記載

はないが 1 は活断層地震である。

表-1 マルチイベントモデルによる地震イベント上位 40 のリスト (東京港③地点)

No.	シナリオ地震 (震源名)	マグニ チュード	PBA (cm/s ²)	年発生確 率	累積確率	震源 タイプ
1	(139.85, 35.65)	(M7.0)	507	0.000018	0.000018	3
2	(139.75, 35.65)	(M7.0)	473	0.000018	0.000036	3
3	(139.85, 35.55)	(M7.0)	460	0.000018	0.000054	3
4	(139.75, 35.55)	(M7.0)	436	0.000018	0.000072	3
5	(139.95, 35.65)	(M7.0)	417	0.000018	0.000090	3
6	(139.85, 35.65)	(M6.5)	394	0.000038	0.000128	3
7	(139.95, 35.55)	(M7.0)	378	0.000018	0.000146	3
8	(139.85, 35.75)	(M7.0)	375	0.000018	0.000164	3
9	(139.75, 35.65)	(M6.5)	360	0.000038	0.000203	3
10	(139.75, 35.75)	(M7.0)	354	0.000018	0.000221	3
11	(139.65, 35.65)	(M7.0)	347	0.000018	0.000239	3
12	(139.85, 35.55)	(M6.5)	340	0.000038	0.000277	3
13	相模トラフ (1703元禄型)	(M8.2)	335	0.000881	0.001158	2
14	(139.65, 35.55)	(M7.0)	321	0.000018	0.001176	3
15	(139.95, 35.75)	(M7.0)	315	0.000012	0.001188	3
16	(139.75, 35.55)	(M6.5)	307	0.000038	0.001227	3
17	(139.85, 35.45)	(M7.0)	297	0.000018	0.001245	3
18	相模トラフ (1923大正型)	(M7.9)	294	0.000881	0.002125	2
19	(139.95, 35.65)	(M6.5)	288	0.000038	0.002163	3
20	(139.75, 35.45)	(M7.0)	285	0.000018	0.002181	3
21	(140.05, 35.65)	(M7.0)	282	0.000018	0.002199	3
22	(139.65, 35.75)	(M7.0)	277	0.000018	0.002217	3
24	(140.05, 35.55)	(M7.0)	265	0.000018	0.002316	3
25	(139.95, 35.45)	(M7.0)	261	0.000018	0.002334	3
26	(139.95, 35.55)	(M6.5)	255	0.000038	0.002372	3
27	(139.85, 35.75)	(M6.5)	252	0.000038	0.002411	3
29	(140.05, 35.75)	(M7.0)	237	0.000012	0.002504	3
30	(139.65, 35.45)	(M7.0)	236	0.000018	0.002522	3
31	(139.55, 35.65)	(M7.0)	236	0.000018	0.002540	3
32	(139.75, 35.75)	(M6.5)	235	0.000038	0.002578	3
33	(139.85, 35.85)	(M7.0)	232	0.000012	0.002590	3
34	(139.65, 35.65)	(M6.5)	230	0.000038	0.002629	3
35	関東12 (M7.1)	(M7.1)	226	0.002736	0.005358	2
36	(139.75, 35.85)	(M7.0)	225	0.000018	0.005375	3
37	(139.55, 35.55)	(M7.0)	225	0.000018	0.005393	3
39	関東10 (M7.1)	(M7.1)	218	0.002736	0.008196	2
40	関東11 (M7.1)	(M7.1)	214	0.002736	0.010909	2

道路橋示方書 (2012) では、レベル 2 地震動としてプレート境界型の地震をタイプ I、内陸直下型地震をタイプ IIとしている。道路橋示方書 (2012) に倣う場合、表より、タイプ I は 1703 年に発生した元禄地震 (M8.2) の再来、タイプ II は経度 139.85、緯度 35.65 を中心に発生する M7.0 の直下型地震となり、それぞれがレベル 2 地震動を誘引するシナリオ地震として選ばれる。また、空港土木施設の設置基準・同解説 (2015) に従えば、過去最大級の地震として、1703 年に発生した元禄地震 (M8.2) の再来がレベル 2 のシナリオ地震としてコンセンサスを得ることができよう。地震波形を求める場合は、加速度調整した観測地震波、統計的 Green 関数法など、適宜利用することになる。マルチイベントモデルの利点は、二段階の設計用地震動を

一元的かつ簡易に求めることができること、地震動を誘引する震源情報（位置、断層形状、マグニチュード、発生頻度など）を具体的に把握できること、広域に分散する施設についても利用できること、などを挙げることができる。マルチイベントモデルのベースとなる震源情報は、新たな地震の発生や活断層の発見など、最新の情報や知見を取入れ更新する必要がある。整備には、継続的な更新作業を含めた検討が望まれる。

3.3 信頼性設計と複合被害の評価

シナリオ地震の発生を前提に損傷確率を評価することにより、揺れのみならず、液状化や津波を加えた複合災害による要求性能の照査が可能になる。ここで、滑走路、誘導路、エプロン等の舗装被害を対象とする。

図-10(a)は揺れ（震動）と液状化による複合被害を対象に、これをイベントツリーで表記したもので、複合被害による帰結（地震による結果）の発生確率を評価することができる。例えば、レベル 1 地震動に対しては、危険度は「航空機の運航に支障なし」の結果の確率を 1.0 から差引いた確率が照査の対象になる。レベル 2 地震動に対しては、危険度は「修復には長期を要する」の結果の確率の和を照査することになる。具体的な数値例を図-10(b)に示す。

液状化による舗装被害	揺れによる舗装被害	地震による結果
無被害あるいは運航に支障を与えない状態	無被害あるいは運航に支障を与えない軽微なひび割れ	航空機の運航に支障なし
	短期間で修復可能なひび割れ（3日間で修復）	3日間で修復
	修復に長期を要する凹凸やひび割れ（長期）	修復には長期を要する
舗装の凹凸や勾配が許容値以下（3日間で修復）		3日間で修復
舗装の凹凸や勾配が許容値を超える（長期）		修復には長期を要する

(a) 被害レベルと帰結

液状化による路盤被害	揺れによる舗装被害		
0.89	0.99	0.8811	航空機の運航に支障なし
	0.01	0.0089	3日間で修復
	≒0	≒0	修復には長期を要する
0.1		0.1000	3日間で修復
0.01		0.0100	修復には長期を要する

(b) 生起確率の評価例

図-10 イベントツリーによる震動/液状化複合被害

例では、設計用地震動による液状化による舗装被害の確率を 0.1 と 0.01 とし、揺れによる舗装被害の確率を 0.01 としている。イベントツリーより有被害の確率は 0.12 ($0.1189 = 1 - 0.8811$)、修復に長期を要する確率は 0.01 となる。レベル 1 地震動に対する限界値が損傷確率 0.01 の場合、有被害の確率 0.12 は大きく超えており、その原因は液状化であることが分る。一方、レベル 2 地震動での要求性能が「短期間（3 日）で復旧可能」その限界値が損傷確率 0.2 であった場合、長期を要する確率 0.01 は満たされている。

レベル 2 地震動において機能面での要求性能を照査するには、複合被害や被害の連関性（連鎖/従属）を考慮すると共に、被害による機能への影響を明示的に検討する必要がある。そのためには、小野ら（2015）による空港の健全度の視覚化や中島ら（2015）が示した空港全体の要求性能の照査とその結果を空港各施設の耐震性能に反映するスキームが重要になる。

4. 不確実性と耐力

4.1 不確実性の分類

信頼性設計を適用する上で特に重要となるのが、不確実性の情報である。図-11 はシナリオ地震を設定（確定）した際に考えられる不確実性を類型したものである。①は断層位置やマグニチュードを設定したシナリオ地震が発生した際、震源パラメタ（地震源のアスペリティや応力降下など）のばらつきに起因したもので、その誤差成分は観測点での地震動のばらつきとして明示される。②は波動伝播の評価方法によって異なるが、距離減衰式を対象とした場合には、その評価誤差に相当し、②に①を加えた不確実性として、サイトの工学的基盤、あるいは地震基盤で観測されるであろう地震動のばらつきとして表れる。③は基本的には工学的基盤面、($V_s=300\sim600\text{cm/sec}$) から地表面あるいは対象施設の基礎底面までの地震動の増幅特性の評価誤差である。この誤差はサイト特性の不確実性と呼ぶことができ、地盤情報の精度や量、評価手法に依存する。④は構造物の応答の評価誤差であり、規模別の地震動による時刻歴応答解析を多数実施し、統計処理を行うことで評価できる性質のものである。⑤は施工精度や材料強度のばらつきなどから構成され、いわゆる耐力の個体差である。その他⑥として解析モデルに内在する不確実性が加わると考えられている。

一般的には、①～④のばらつきを統合した応答の確率分布と、⑤の耐力の確率分布から、損傷確率や破壊確率

を求めることになる（図-1(b)参照）。これらの不確実性は、被災事例や実験など（一部解析もある）の統計処理によって求める必要がある。一方、既往の方法によるレベル1地震動の評価方法は、①と②の不確実性は積分により内在化し、この不確実性は実質考慮されない。

なお、原子力の分野では、①～⑤を偶然的不確実性（aleatory uncertainty）、⑥を認識論的不確実性（epistemic uncertainty）などと呼ぶ。

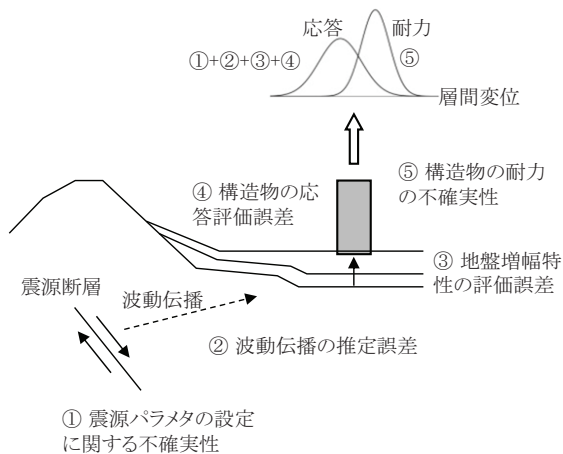


図-11 不確実性の類型

4.2 不確実性に関する統計分析

我が国においては、兵庫県南部地震（1995）以降、林ら（1997）、中村ら（1998）、石田ら（1999）、村尾ら（2000）などにより、類型された構造物の損傷確率や fragility カurve の評価が精力的に進められた。これらは被害事例を統計的に分析したもので、fragility カurve を評価する段階で耐力や標準偏差を求めている。

海外では、Mander, J. B. (1999)、Grossi, P. (2000)、FEMA, HAZUS 99 (1999)、Shinozuka, M. (2001) など、専門家による判断を含め検討され、不確実性に関する統計情報は、内外含め少しずつではあるが整いつつある。

吉川ら（2007）は、前述の不確実性の統計処理結果を取りまとめ、建築物の対数標準偏差は 0.6～0.8 程度、道路橋脚では 0.5～0.7 程度の範囲であることを示した。これらは②～⑥の不確実性を統合した、いわゆる複合偏差に相当する。ここで、②の距離減衰式のばらつきを対数標準偏差で 0.45 と仮定し、③～⑥のばらつきを少なく見積もると、建築物では 0.4 となり、道路橋脚では 0.22 となる。このように、不確実性を分類し、分類された個別の統計解析とともに、被災事例を対象とした複合偏差の統計解析も進めることが求められる。

4.3 液状化確率と不確実性

液状化の発生や液状化に伴う構造物被害を予測することは、空港土木施設の設計において極めて重要である。ここでは、特に確率・統計的観点から、液状化の発生や構造物被害の予測手法について調査し、液状化に関する fragility カurve の評価方法を示す。

液状化危険度の判定には F_L 値や P_L 値等を用いるのが一般的である。西村ら（1997）は P_L 値に閾値を設け、これを超える確率（ $P_L > 5$ ）を液状化発生確率と定義し、地盤改良の範囲の検討に応用している。その際、土質定数の深さ方向の誤差を正規分布に近似している。陳ら（2005）は、液状化発生確率を西村ら（1997）と同様に定義し、土質定数（ N , D_{50} , F_c ）を正規分布と仮定してモンテカルロ・シミュレーションを実施し、液状化発生の fragility カurve を評価している。松岡ら（2011）は、鳥取地震（2000.10）～岩手・宮城内陸地震（2008.6）の 9 地震による液状化発生状況を調査し、微地形区分を土質分類し、全国を概観した液状化発生確率を統計的に評価している。大竹ら（2012）は、液状化に伴う線状構造物（長大水路や河川堤防）の信頼性解析を実施するに当たり、土質調査地点以外の土質定数の空間的バラツキやモデル化不確実性を考慮した P_L 値の誤差成分を定量化している。その際、液状化発生の閾値を P_L 値 15 以上としている。さらに大竹ら（2014）は、東北地方太平洋沖地震（2011）の河川堤防の被災事例を使い、液状化に伴う堤防被災の fragility カurve を 2 項尤度モデルにより評価している。特徴は、SHAKE を使い地表面最大加速度を評価しており、これにより外力の推定誤差を含めた対数標準偏差 0.69 を求めている点にある。海外においては Hannich D et al. (2007) が F_s (Factor of safety, F_L 値に相当) と称される指標を用いて、液状化発生確率の評価を行っている。評価式は 0～1 に漸近する任意の回帰関数を用いている。David Kun Li et al. (2006) は、IL (Liquefaction potential index, P_L 値に相当) を指標に、液状化発生確率を評価しているが、同様に 0～1 に漸近する回帰式を用いている。

なお、 F_s , IL 共に、我が国の F_L 値, P_L 値の定義と若干異なっている。このように、液状化発生確率は、 P_L 値を指標とした評価が支配的である。これは、液状化の発生事例を比較的良く説明できること、液状化の度合いを評価でき、この点構造物被害の予測には適していること、道路橋示方書やその他の設計指針において推奨された方法であること、などが指摘できる。

一方、地盤分野においては、地盤調査の精度や限界も

あり、未知性は他の分野に比べ多い。このため液状化に起因した構造物の損傷を、一定の精度保ちつつ評価することは容易ではない。しかしながら、液状化に伴う地盤変位は、構造物に対し強制変位として作用するため、構造物の被害を抑止あるいは制御することは難しい。被害データに基づく統計的裏付けを整え、構造物が損傷にいたる限界状態や損傷確率の評価に関する研究を促進させる必要がある。その一案として、液状化に伴う構造物被害、特に応答特性を持つ構造物被害の発生確率の評価に当り、 P_L 値を指標としたフラジリティカーブの評価を付録 E に例示する。特徴は、 P_L 値を指標とした二山の確率分布（図-1 (b)）にモデル化したこと、地震動強さは地表面最大加速度とし、各種の地盤応答解析を適用できること、などである。また、不確実性については、大竹ら（2014）による被災事例の統計情報から 0.69 を用いることができるものの、検討を重ねる必要がある。

滑走路、誘導路等の舗装施設は、軽度の液状化によっても航空機の離発着、誘導を阻害する可能性がある。このため、液状化が発生するか否か着目する必要がある。そこで、液状化の発生確率に関するフラジリティカーブを 2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震で得られたデータを用いて統計的に評価した結果を例示する。データは港湾や空港の設計で用いられる等価 N 値と等価加速度に対する液状化の発生の有無を整理したもので、このデータをプロビットモデルに適用してフラジリティカーブの評価を行ったもので、データおよび評価方法の詳細は付録 F に示す。評価された等価 N 値別のフラジリティカーブを図-12 に示す。図より、フラジリティカーブのばらつきは必ずしも大きくない。これは液状化発生を説明する上で等価加速度が適していることを示唆しているが、より多くのデータを取り入れ更新することが望ましい。

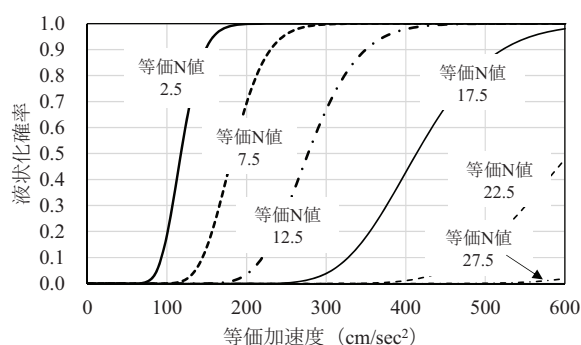


図-12 液状化確率に関するフラジリティカーブ

一方、海上空港は埋め立により粒度分布など地盤物性値の不確実性を一定程度制御できるものと考えられる。これに比べ、陸上空港は自然に形成された原地盤を利用することが多く、地盤物性値の不確実性は相対的に大きいと考えられる。地盤物性値の分布を求めるための母集団の類別化や被災事例の評価に際し、このことを留意する必要がある。

5. 構造物の目標安全水準に関する調査

5.1 リスクの社会的受容限度に基づく方法

リスクによる社会的受容限度の評価方法は、基本的に、事故統計に基づく方法と他の災害危険性との比較による方法がある。前者は、事故、損傷に関する統計資料に基づき年発生確率を求め、これを参考として許容破壊確率（許容安全性指標）を決定する方法である。後者は、構造物の損傷に伴って予測される一人当たりの死亡危険性を、自然災害あるいは他の人為災害と比べて、ある水準以下に設定する方法である。星谷ら（1986）は、事故統計に基づく方法の問題点として、「母数（対象とする構造物の総数）が定めにくいこと、事故の原因はヒューマンエラーなどによる場合が多く、その影響を受け、設計段階での許容破壊確率（許容安全性指標）を直接定めることが難しいこと」をあげている。一方、他の災害危険性との比較による方法については、「一般の土木・建築構造物に適用できる評価式は未だ確立されていないこと、統計データが土木・建築構造物の種別毎に整理されてなく利用できるまで至っていないこと、事故は種々の原因によることから、設計段階での許容破壊確率（許容安全性指標）を定めることが難しいこと」等をあげている。また、Slovic（1987）は、リスク認知の 2 因子として未知性や恐ろしさを挙げ、これらが増大すると事象の危険性を過大に受けとめるとしている。これは、他の災害危険性との比較において、認知にバイアスがあることを示唆しており、事故統計や他の災害危険性と比較する方法は一定の説明力はあるものの、慎重に検討する必要がある。特に空港を含む公共性の高い構造物は、経済活動や国民生活に与える影響が大きいため、他の被災事例との比較から求めた社会的受容限度は、経済性の面から捉えた受容限度と乖離する可能性がある。

5.2 期待総費用に基づく方法

期待総費用に基づく方法は、期待総建設費 C_T を最小とする点を目標安全水準とする考え方である。任意の地震イベントを対象とした場合、期待総費用 C_T は以下の

ようになる。

$$C_T = C_I + p_f C_f \quad (3)$$

ここに、 C_I は初期コスト、 p_f は地震イベントが発生したことを条件とした損傷確率、 C_f は修復費である。 $p_f C_f$ は期待修復費となる。(1)式と比較すると、(3)式は地震イベントが単一であり、発生確率を1.0としていること、修復費のみを考慮していること、などの相違がある。図-13に期待総費用に基づき目標安全水準を決定する概念図を示す。縦軸は費用、横軸は耐震性能である。図より、初期コストを掛ければ掛けるほど損傷確率は低下することになり、期待総費用 C_T は下に凸の曲線を描くことになる。この下に凸の曲線の最小値に該当する耐震性能損が目標安全水準となり、この性能以上になるよう耐震設計が行われる。この方法は、港湾の重力式係船岸、矢板式係船岸の永続状態の照査等に関わる目標安全水準（破壊確率、信頼性指標、及び部分係数）の設定に用いられている例がある。

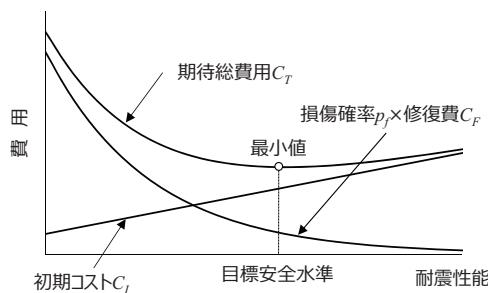


図-13 期待総費用に基づく方法の概念図

しかしながら、期待総費用に基づく方法は、経済的合理性には合致しているものの、往々にして耐震性向上のための付加的な費用に比べ期待修復費が小さく、期待総費用の曲線が図-13に示したように下に凸の曲線とならない。そこで、(1)式のように期待修復費に間接損失額（機能が喪失することによって派生的に生じる損失額等）を加えることになるが、この場合、構造物による耐震性能の差異は大きくなり、ケースによっては過大、あるいは過小となり、社会的に受け入れられる範囲を逸脱することも予想される。空港においては、間接損失額の範囲について、背後経済圏、鉄道代替も含めた国内ネットワークおよび他空港代替も含めた国際ネットワークなど、設定が難しい。また、評価に不可欠な長期の需要予測そのものの不確実性が評価を難しくしている。このよ

うに間接損失額の見積もりは大変難しい。

一方、期待総費用の曲線に社会的受容限度を取り込むことで、耐震性能に一定の歯止めを設けることができる。図-14にその例を示す。①の場合、社会的受容限度より期待総費用の最小値の方が安全性は高く、期待総費用の最小値が目標安全水準として選ばれる。②の場合は、期待総費用の最小値より社会的受容限度の方が安全側となり、社会的受容限度が選ばれる。この方法では、間接損失額が大きい（経済的影響が大きい）構造物については相応の耐震性能を持たせることになるが、間接損失額が低い（経済的影響が小さい）構造物であっても社会的受容限度以下にはならず、一定の歯止めがかけられる。この方法は合理性と共に、社会的合意を得やすい利点がある。しかしながら、社会的受容限度をどのように評価するか、といった難題と対峙することになる。その一案として「既存の構造物の耐震性能は、社会的に受け入れられた強さである」との解釈の下で、社会的受容限度を評価する方法を次節で紹介する。

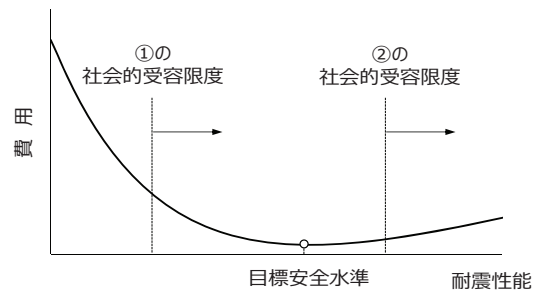


図-14 社会的受容限度と期待総費用を用いて目標安全水準を設定する方法の概念図

5.3 既往の設計に基づく方法

構造物の強さを規定する設計基準や指針などは、様々な災害や事故等を経験し、その都度改善されてきた経緯を持つ。したがって、現行の設計基準や指針により設計された構造物の強さは、社会的に受け入れられていると考えることができる。つまり、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わけである。この方法をコードキャリブレーションと呼ぶ。星谷ら（1986）は、「信頼性設計が導入される以前のもも含めた既往の構造物は、歴史的経緯から見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、信頼性設計の適用を見越して、破壊確率の下限値を評価している。

星谷ら（1986）がまとめた各国のコードキャリブレーションの結果から、例えば、一般の構造物（建物、道路橋）の供用期間を 50 年とすると、その許容破壊確率は $2.27 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-4}$ 程度であること、などを整理している。コードキャリブレーションによる方法は、社会的受容限度の評価のみならず、信頼性設計法の適用においても必要な方法であるが、現状を追認するだけではないか、との意見もある。一方で、これまでのコードキャリブレーションは構造物単体に対して行うこととしており、空港全体、あるいは様々な構造物の集合体として機能している施設に対しては、行われた例はない。

5.4 PML（予想最大損失）に基づく方法

PML は Probable Maximum Loss の略で、日本語に訳すと予想最大損失となる。PML は地震によって建物がどの程度毀損するかを金銭価値として示すもので、不動産の証券化や売買等で行われるデューデリジェンス（不動産の状況、法的な問題、経済的な問題に関する調査）の一環として行われる地震リスク診断の結果情報である。通常、PML は再現期間 475 年（50 年で 10%）相当の地震に対して、再調達価格（現在、同じ建物を新設する際の建設費）に対する損失額の割合として表される。PML 値に明確な閾値はないが、15%を超えると格付けの低下や地震保険加入が必要になるなど、不動産の証券化に不都合が生じる。PML 値 15%は、不動産投資市場での試行錯誤の末に決めたもので科学的根拠はない。しかしながら、近年、建物の構造耐震指標 I_s 値と同様に、その不動産の耐震性を測る指標として認知されている。事例として、日本データセンター協会（2010）では、耐震性能の指標として PML を積極的に活用している。

PML が受入れられた原因として見逃してならないのが建物全体としての評価である。 I_s 値は構造体だけの性能表示であり、非構造部材や各種設備の耐震性能は含まれていない。投資家は、構造体も非構造部材も同じ投資対象であり、これらを含めた全体としての耐震性能を把握したいと考えている。この点、PML は大変都合がよいことになる。

一方、PML は、基本的には収益不動産に対する投資の判断指標であるため、公共性の高い空港施設に対して、PML が適用できるか否かは議論の余地がある。しかしながら、土木学会 地震工学委員会 耐震設計基準小委員会（2003）が推奨する経済性照査による設計方法は、公共施設であっても経済性を重視することを基本としていることから、目標安全水準の評価において、PML の利用を排除すべきではない。ただし、PML を空港に適

用するには、空港の運営形態、資産構成（自己資本比率）や流動比率、公的資金の割合、借入金の調達コスト（金利）など、様々な視点から空港に適した閾値の検討が必要になる。また、再現期間 475 年についても縛られる必要がなく、空港の供用期間や背後経済圏への影響等を踏まえた検討が必要になるだろう。

6. 要求性能と限界値

6.1 空港全体の総合的な要求性能

空港土木施設耐震設計要領及び設計例の第 1 章 1.1 に、「本要領は空港土木施設の設計を行うにあたって、空港全体の総合的な耐震性を確保するために、空港を構成する各施設の標準的な耐震設計の手順を体系的に示し、設計の合理化ならびに効率化を図ることを目的とする。」とある。また、同要領の第 2 章 2.1 の解説に「空港の主な機能としては、公共交通機関として果たす本来の機能の他、大規模地震発生時において緊急物資・人員等の輸送や救急・救命活動の拠点としての機能がある。地震災害時においてどの程度の輸送機能を確保すべきかは、航空ネットワークにおける役割、背後圏経済活動における役割および緊急物資の輸送形態等を踏まえて総合的に検討する必要がある。」とある。これらから、地震に対する要求性能としては、空港全体の総合的な機能に着目しこれを確保すべきことが謳われている。東日本大震災では仙台空港は津波被害により民航の運航再開まで数ヶ月を要し（付録 G を参照）、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。これら事例は、空港土木施設の耐震性能が十分であっても、津波被害や旅客ターミナルの天井被害により、空港全体でみると要求性能は満たされない事実を教訓としたわけである。空港総全体としての要求性能を、どのように評価/確認し、その上で個々の施設や構造物の耐震性能に反映していくか、これを実行する具体的な方法が問われている。

6.2 空港全体の要求性能の限界値

空港全体としての要求性能は、地震に強い空港のあり方（2007）を参照することができ、「レベル 1 地震動に対して、航空機の運航機能に支障を来さない。レベル 2 地震動に対して、人命に重大な影響を与えず、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。」などが示されている。ここで、要求性能の限界値として、例えばレベル 1 地震動の要求性能に対しては 1%、レベル 2 地震動の要求性能に対しては 20%、など

と仮定する。これらは要求性能が満たされた可能性の限界値であり、不健全確率や損傷確率と同義である。

まず、レベル 1 地震動の限界値 1%は、全国に供用されている空港の数は 97 であり、これら空港が供用期間の間に一度は経験するであろう地震動に対して、一つの空港も要求性能を損なわないレベルである ($0.01 \div 1/97$)。一方のレベル 2 地震動に対する限界値 20%は、レベル 2 地震の発生頻度を 1000 年に 1 回程度、空港の供用期間 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 つの内一つの空港も要求性能を損なわないレベルと解釈できる。民航機運航機能（固定翼機による旅客輸送）の要求性能と限界値（不健全確率）を表-2 にまとめて示す。

表-2 民航機運航機能の要求性能と限界値

	民航機運航機能	
	要求性能	限界値 (不健全確率)
L1 地震動	運航に支障を来さない	1%
L2 地震動	3 日以内に 50%の運航	20%

空港に作用する地震動の大きさのみならず、拠点空港や地方管理空港などの重要度の違い、空港周辺や背後経済圏等の地震被害の広域性なども加味して検討する必要がある。さらに、リスクの社会的受容限界、期待総費用、コードキャリブレーションなどの、様々な観点からも検討することが重要である。

次節では、空港全体としての要求性能の目標信頼度を満たすことを目標とした、空港施設や構造物の耐震性能

の評価方法について解説する。

6.3 空港各施設の限界値

空港は様々な種類の施設や構造物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。この点に着目した小野ら（2015）は、様々な施設や構造物を構成要素としたシステムを作成し、システム信頼性手法を適用することで、地震時での空港の健全度曲線を評価した。この方法を簡単な例を用い概説する。

ターミナルビル、アクセス、滑走路、誘導路、及びエプロンの 5 つの構成要素から成る空港を想定する。これをシステムとしてモデル化したものを図-15 に示す。同モデルは民航の運航機能を対象に、レベル 2 地震動が作用したケースとする。図より、5 つの要素は直列に構成されており、一つでも機能を失うと空港としての機能を失うことになる。図のように作用地震動に対する各施設の損傷確率から、運航能力の 50%を確保できる健全確率を計算し、これを直列システムとして統合することで、図の右にある空港全体の健全度曲線を求めることができる。空港全体としての要求性能は「3 日以内に民間航空機の運航能力の 50%を確保する」であり、3 日目の不健全確率は 0.38 ($\div 1 - 0.80 \times 0.90 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95$) と計算でき、限界値 0.2 を超えている。つまり NG である。このため、0.2 を満たすために構成要素の耐震性能を改善し、不健全確率を下げる必要がある。照査結果が OK になれば、空港機能を構成する施設や構造物の耐震性能の限界値が、損傷確率の許容値として求められる。各施設や構造物は、この許容値を目標に耐震設計を行うことになる。

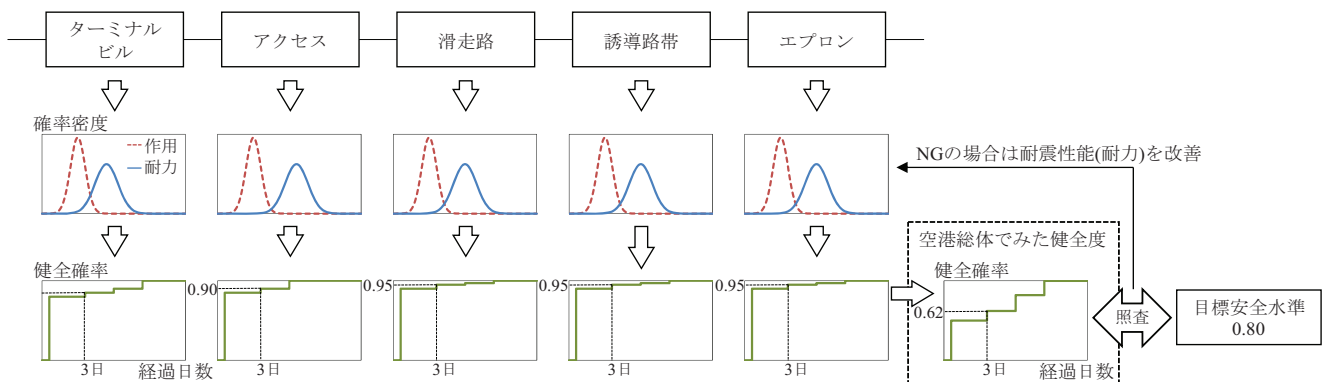


図-15 システムモデルによる空港全体性能での健全度評価と耐震設計の照査イメージ

6.4 損傷相関の扱い

構造物の損傷事象は、図-1(b)に示したとおり構造物の持つ耐力と応答によって定めることができる。耐力はほぼ独立を仮定できるが、応答は一定の相関を有する。例えば、同一敷地に建てられた構造物には同じ地震動が作用するため、作用地震動は完全相関と考えることができる。Wang, and Takada(2005)は、作用地震動は観測点の相対距離に応じた相関があることを地震の実記録から説明している。また、石川ら(2000)、中村ら(2000)、福島ら(2002)などは、相関を考慮した散在施設の地震リスク評価を実施し、その必要性を論じている。これより、様々な施設や構造物で構成される空港では、空港全体の健全度は相関を考慮した評価が求められる。図-15に示した5つの構成要素から成る空港を対象に、相関係数を0から1.0まで変化させた場合の3日目の不健全確率を図-16に比較する。

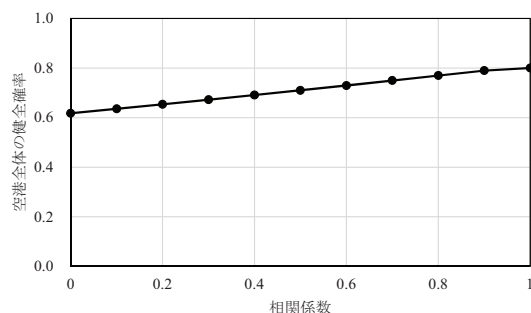


図-16 相関を考慮した空港全体の健全確率

前節で示した不健全確率 0.38 は、相関係数が 0、即ち独立のケースであり、完全相関では最も不健全確率が小さいターミナルビルの 0.2 が、空港全体の不健全確率となる。図は、相関係数に対し直線的に変化しているが、要素の損傷確率の差が大きい場合には、直線とはならない。また、損傷相関の評価方法は付録 H, I を参照されたい。

一方、信頼性設計法の導入においては、損傷相関を厳密に考慮すべきかは一定の思慮が必要である。これは、損傷相関を考慮した不健全確率の評価は必ずしも容易ではなく、設計者の負担が大きいこと、損傷相関は、存在は明らかであるものの、その値は未解明な部分が多いこと、などが理由である。したがって、安全側（保守的）を考慮しつつ、簡易的に取り入れるのが望ましいと考える。

7. 設計用地震動による標本空港の信頼度の評価

7.1 対象空港とシステムモデル

設計用地震動による民航機運航機能の健全度曲線を、標本空港を対象に評価し、表-2 に示した要求性能に対応する目標信頼度（健全確率）と照査する。これは空港全体のコードキャリブレーションに相当する。

対象空港は、小野ら(2015)の研究において用いられた空港を対象とする。同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（灯火、ILS（計測着陸装置）などの電源管理）、旅客ターミナルビルなどである。民航機運航機能に関するシステムモデルを図-17に示す。図の□は空港機能を構成する構造物や施設である。アクセス機能、管制機能、電源機能は代替の設備があり、冗長性を有する施設である。また、図中の滑走路、誘導路、エプロンは土木サブシステムとして定義し、他の施設群の健全性と比較する。

7.2 設計用地震動

レベル1地震動3種とレベル2地震動1種を想定し、空港の健全度曲線を評価する。レベル1については既往の方法によるA港地点における再現期間75年の工学的

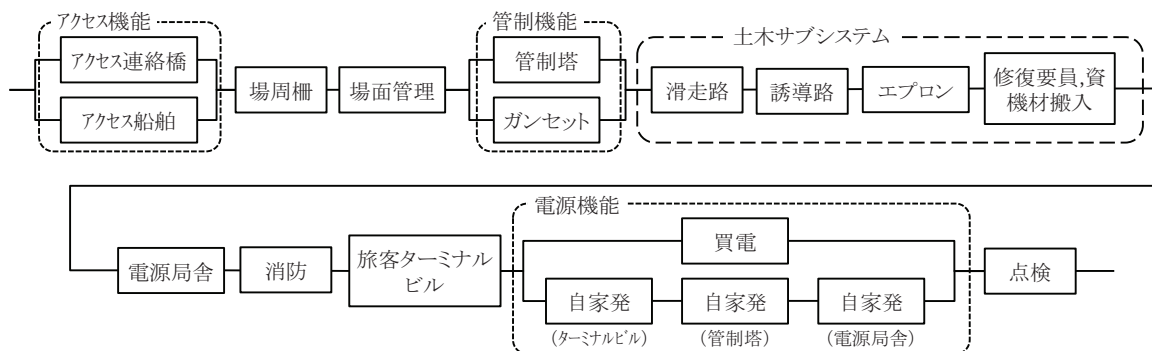


図-17 民航機運航機能に関するシステムモデル

基盤面での加速度応答スペクトル、図-7 の方法を使った再現期間 75 年の一様ハザードスペクトル（応答加速度）、さらに建築基準法の告示スペクトルを、再現期間 75 年の工学的基盤面での一様ハザード加速度応答スペクトルの最大加速度で調整した加速度応答スペクトルの 3 種とする。

それぞれ基盤最大加速度は約 $95\text{cm/sec}^2 \sim 100\text{cm/sec}^2$ である。既往の方法による再現期間 75 年の加速度応答スペクトルは、ばらつき（震源特性と伝播特性のばらつき）が評価プロセスの過程で内在化しているが、他の地震動と同様に、この値を中央値と仮定した。レベル 2 地震動については、ここでは、便宜的に、過去に発生した内陸型地震の最大級である兵庫県南部地震で観測されたポートアイランド波（ 817cm/sec^2 ）を用いることとした。表-3 にそれぞれの地震動の出典と、概説したものを示す。また、3 種のレベル 1 地震動の加速度応答スペクトルを図-18 において比較する。加速度応答スペクトルの減衰定数は全て 0.05 である。既往の方法による応答加速度は、他と比べ長周期側の応答が大きく、 $0.1\text{sec} \sim 0.2\text{sec}$ の応答も大きい。また、レベル 2 地震動として、ポートアイランド波の加速度応答スペクトルを図-19 に示す。

なお、図-19 は佐藤ら（2006）を引用したもので、減衰定数は 0.02～0.2 まで示されているが、実用は 0.05 である。

表-3 設計用地震動の出典と概要

地震動レベル	出典	概説
レベル1地震動	マルチイベントモデル	イベントハザードカーブから読み取った、再現期間75年の一様ハザードスペクトル（加速度応答スペクトル）
	既往の方法（A港）	再現期間75年の一様ハザードフォーエスベクトルから作成した時刻歴波形を用いて求めた加速度応答スペクトル
	告示スペクトル	建築基準法で用いられている告示スペクトルを、マルチイベントモデルから求めた最大加速度で調整した加速度応答スペクトル
レベル2地震動	佐藤ら（2006）によるポートアイランド波	兵庫県南部地震（1995）においてポートアイランド（ $V_s=270\text{cm/sec}$ ）で観測された地震波

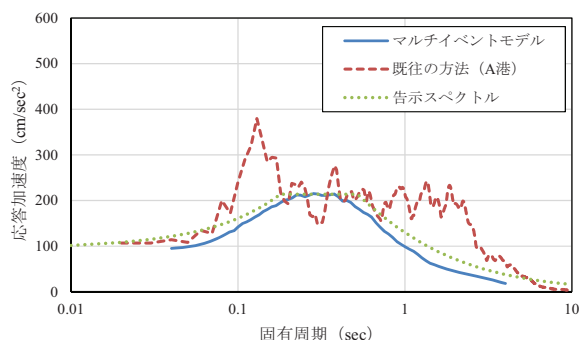


図-18 レベル 1 地震動の加速度応答スペクトルの比較

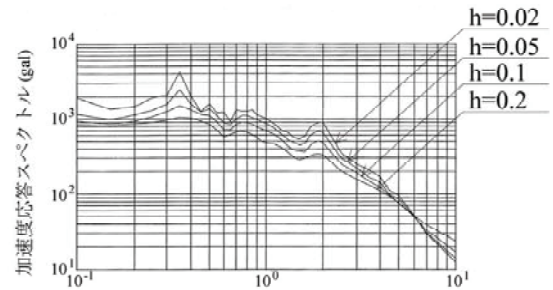


図-19 ポートアイランド波の加速度応答スペクトル
（gal は cm/sec^2 を意味する。）

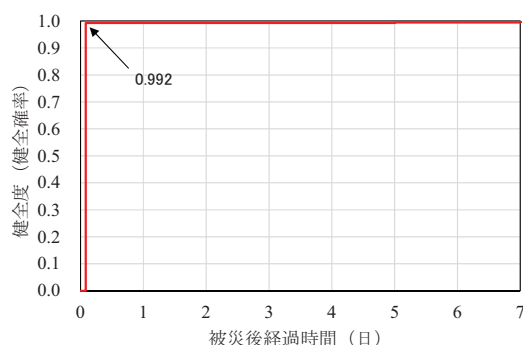
7.3 対象空港の健全度曲線

3 種のレベル 1 地震動（再現期間 75 年）による対象空港の健全度曲線を図-20 に示す。図の横軸は発災からの経過時間を表し、縦軸は空港機能の健全度（信頼度）を示している。(a)はマルチイベントモデル、(b)は既往の方法、(c)は告示スペクトルのそれである。

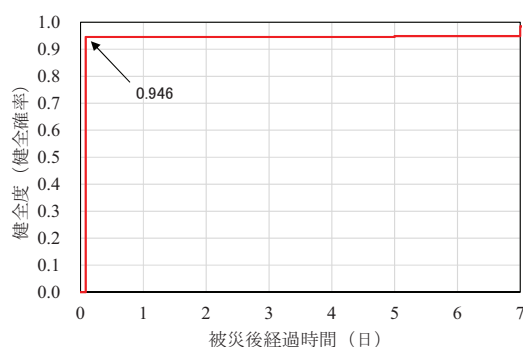
なお、計算の前提となる各構成要素の耐震性能は、付録 J に示している。ここで、付録 J に示している滑走路、誘導路、およびエプロンで想定した液状化被害の発生確率は、標本空港の地盤調査報告書に記載されるレベル 2 地震動に対する液状化判定結果から、等価加速度と等価 N 値の平均値（等価加速度： 238cm/sec^2 ，等価 N 値：15）を求め、これを付録 F で示した脆弱性カーブの推定式に代入して求めている。また、レベル 1 地震動の発生確率についても付録 F に示した推定式を用いたが、この際、等価加速度は、レベル 2 地震動（基盤最大加速度）に対するレベル 1 地震動の比で低減した値（ 28cm/sec^2 ）を用いている。

損傷相関は考慮せず、完全独立と仮定して評価した。図-18 より、レベル 1 地震動の最大加速度は全て 90cm/sec^2 を超えていることから、民航機の運航は 2 時間の点検を経て再開される。そのときの不健全確率は、マルチイベントモデルで 0.008，既往の方法で 0.054，告示スペクトルで 0.009 となった。マルチイベントモデルと告示スペクトルは、表-2 の限界値 0.01 を満たすのに対し、既往の方法は若干低い。この理由を調べるため、各構成要素の被害レベルの損傷確率を比較した。これを図-21 に示す。図-21 より、旅客ターミナルビルの中破被害の確率は 1.0%，天井落下被害の確率は 3.4%と、他と比べ突出して高い。図-18 の既往の方法の加速度応答スペクトルの 1.0sec 前後の応答が大きく、これが旅客ターミナルビルの固有周期と近いことが理由と考えられる。事例として、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

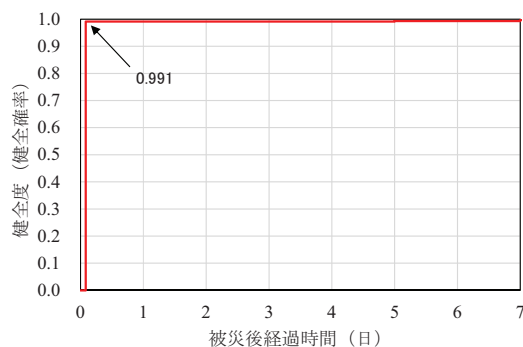
憶に新しい。



(a) マルチイベントモデル



(b) 既往の方法 (A 港)



(c) 建築基準法 告示スペクトル

図-20 レベル 1 地震動 (再現期間 75 年)
による健全度曲線

したがって、既往の方法のレベル 1 地震動に対しては、損傷は免れると予想されるが、空港に課せられる表-2 の限界値 0.01 は満たされないことになる。一方、土木サブシステムを構成する滑走路、誘導路、エプロンの損傷はほぼ起きない (損傷確率は 5.3×10^{-22})。同システムはレベル 1 地震動に対して十分な安全性を確保していると考えられる。



図-21 レベル 1 地震動による構成要素の被害レベルの
損傷確率の比較

図-22 にレベル 2 地震動 (ポートアイランド波) による健全度曲線を示す。図の健全度曲線は、本研究で想定した表-2 の要求性能 (3 日を目処に 50% の性能を確保) を参照し、常時を 100% とした場合の 50% の性能を確保できる確率を示している。ここで、損傷相関は完全相関と仮定して評価した。

図の 0.480 は 3 日目の空港機能の健全確率を示し、この余事象である不健全確率 0.520 は、表-2 の限界値 0.2 を大きく上回っている。ここで、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-23 に示す。図-23 より損傷確率 0.4 を超える構造物が多数見られ、特に、管制塔や消防建屋以外の建築物や発電機冷却設備の損傷確率が高い。これはポートアイランド波の周期特性によるものと考えられ、やはり工学的基盤面における最大加速度が 817 cm/sec^2 と地震動そのものが極めて大きいことが理由である。

一方、土木サブシステムを構成する滑走路、誘導路、エプロンについては、損傷確率は 0.10 (10%) (図-23 参照) と必ずしも低くない。そこで、これら施設の損傷相関を完全相関と仮定した上で、レベル 2 地震動に対する土木サブシステムの健全度曲線を求めたものを図-24 に示す。図より、健全確率は 0.9 であり、その余事象である不健全確率は 0.1 (10%) となる。レベル 2 地震動に対する限界値 0.2 を満たしている。

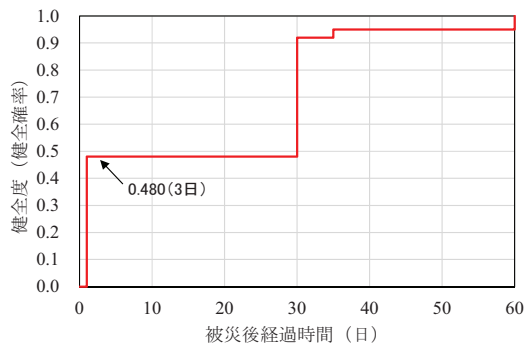


図-22 レベル2地震動（ポートアイランド波）による健全度曲線

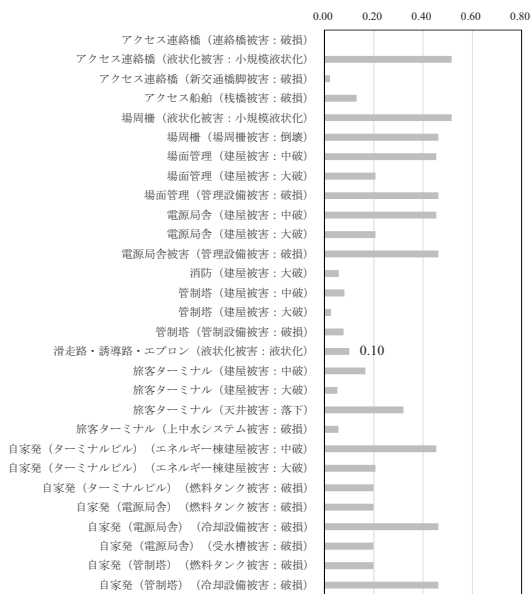


図-23 レベル2地震動（ポートアイランド波）による構成要素の被害レベルの損傷確率の比較

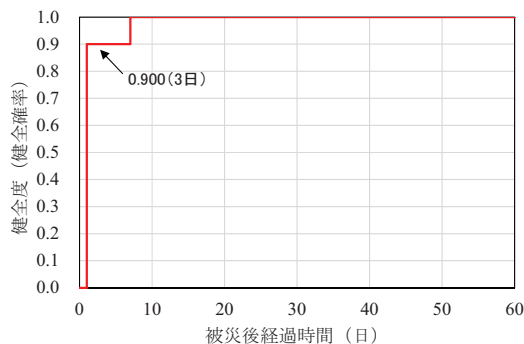


図-24 レベル2地震動（ポートアイランド波）による土木サブシステムに関する健全度曲線

以上により、健全度曲線による空港全体の要求性能の照査は、地震に強い空港のあり方（2007）といった空港の防災計画の実現性を確率値で評価できるとともに、空港の防災計画と各施設の設計とを、構造信頼性理論により体系化することができる。

8. 信頼性設計キャリブレーション要領試案

8.1 信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案

これまでの調査・検討を踏まえ、ここでは、空港土木施設の信頼性設計の導入を目的に、その骨格なるべき信頼性設計の基本的考え方や照査方法について、現行の空港土木施設耐震設計要領及び設計例を補う形式で、空港の信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案を示す。設計の基本的な考え方としては、空港に課せられた要求性能を実現するための耐震性能を明示し、その危険度（破壊確率）が限界値以下であることを照査基準とするものである。特徴としては、空港全体の危険度を規定するものの、空港土木各施設の耐震性能の危険度は、各施設の機能や役割を勘案したシステム信頼性解析あるいはイベントツリーを用いて求めることができることを示している点にある。

また、レベル1地震動に対して、空港に求められる基本的な耐震性能（継続して使用）の危険度の限界値は0.01（1%）、レベル2地震動に対して、地震発生後の輸送形態に応じた耐震性能（回転翼機・固定翼機の緊急輸送および旅客輸送（拠点空港））の危険度の限界値を0.2（20%）とした。限界値の具体的な数値については、十分な標本数の既往空港の照査、災害対策基本法関係の計画が示す目標値を得たうえで、合意形成を経て、設定することが望ましい。しかしながら、具体的な数値を一切示さない場合、信頼性設計の核心が曖昧になり、設計者の理解を著しく妨げることから、当分の間、具体的な数値を示すことにより、理解の促進を優先することとした。

8.2 信頼性設計導入に向けての課題

信頼性設計は合理的な設計法ではあるものの、確率を扱う難解さがあること、不確実性に関する情報が十分整備されていないことから一般化は進んでいない。前者については、設計者の負担を軽減する意味から、可能な限り簡便な方法で評価できるよう配慮する必要がある。後者については、偏りのない被災情報を収集し、統計的評価によって求めるのを基本に、実験や解析等による補完的情報を含め、粛々と整備せざるをえない。空港各施設の設計限界値（超過確率）の評価方法として二山モデルを

提唱しているが、様々な不確実性の要因を作用と耐力、または応答と耐力に集約する方法を開発する必要がある。また、作用地震動から直接超過確率を求める fragility カーブの整備も、併せて進める必要がある。これらは、構造物のタイプや挙動の特性を鑑み、該当する専門分野の研究者や技術者の協力を必要とする。

一方、信頼性設計法を一般化する上で避けて通れない重要な事項として、設計技術者に対し、確率や信頼性評価に関する基礎知識の底上げがある。具体的には、セミナーや講習会等の実施に加え、大学、大学院での授業に、確率・統計学や構造信頼性理論を積極的に取り入れることも必要となろう。

9. 結語

空港施設の耐震設計について、法定基準で想定している信頼性設計法の導入を目標に、内在する技術的課題を整理し、設計用地震動、空港全体の総合的な安全性水準について調査した。また、空港全体の要求性能の確認と、空港を構成する各施設の危険度の照査方法について示した。標本空港を対象に適用性の検討を加え、信頼性設計の導入に向けての議論の骨格となるべき設計要領の試案をまとめた。本稿における主な見解は以下になる。

- ① 信頼性設計の導入例として、港湾の杭基礎栈橋の杭応力の照査がある。しかしながら、構造物の破壊確率を照査するレベル 3 信頼性設計法は、他の分野を含め実施されていない。空港は応答特性（剛体や周期特性など）が異なる構造物の集合体であり、空港全体の信頼性を照査するためには、応答特性の異なる構造物の破壊確率を横断的に評価できるレベル 3 信頼性設計法の導入が求められる。
- ② 土木学会 地震工学委員会 耐震設計基準小委員会（2003 年）は、構造物の設計行為はリスクとコストのバランスを考慮すべきもので、「リスクマネジメントのための特定条件のもとでのシミュレーション」と位置付けている。これは信頼性設計からリスク規範設計を見据えたもので、2015 年の ISO2394 改正と整合しており、先見の見解である。
- ③ 空港土木施設の設計用地震動は、現状、港湾の施設の技術上の基準・同解説（2007）をベースに設定されている。レベル 1 地震動については、再現期間 75 年に相当する確率論的地震動波形を既定の評価方法に基づき算出することが示されている。再現期間 75 年に相当する時刻歴波形 1 波が与えられることから、そこから導かれる応答は単一値であり、信頼性設計に必要な応答の確率分布を得ることができ

ない。結果として地震動評価の不確実性（震源特性、伝播特性の不確実性）は考慮されない。

- ④ マルチイベントモデル（複数震源モデル）に基づくイベントハザードカーブを用いれば、震源特性と伝播特性にサイト特性を加えた不確実性を、設計用地震動に考慮することができる。信頼性設計に適していることから、この整備が必要である。
- ⑤ 信頼性設計において、周期特性が明確な構造物の破壊確率の評価には、周期別の応答の確率分布が与えられる応答スペクトル法が適している。一方、液状化を含めた地盤応答の分野では、破壊確率の評価に動的解析を要することもあり、その場合の研究開発が急がれる。
- ⑥ 空港施設の地震被害は、揺れ、液状化、津波などの被害が複合して発生することから、空港施設の耐震性能の照査は、複合被害の帰結の確率を照査することになる。この場合、信頼性設計に基づく破壊確率をイベントツリーに適用する方法は有効な手段である。
- ⑦ 不確実性については、被災事例、実験、解析等から統計的に評価する必要がある。現状は、国内外含めて整いつつあるが、必ずしも十分ではない。不確実性を分類し、分類された個別の統計解析を進める必要がある。
- ⑧ P_L 値を指標とした fragility カーブは、液状化による構造物の被害確率を評価するのに適している。一方、滑走路、誘導路等の舗装施設は、軽度の液状化によっても航空機の離発着、誘導を阻害する可能性があるため、等価 N 値や等価加速度を指標とした液状化の発生確率を舗装被害の確率として用いることができる。
- ⑨ 海上空港は埋め立により粒度分布など地盤物性値の不確実性を一定程度制御できるものと考えられるが、陸上空港は自然に形成された原地盤を利用することが多く、地盤物性値の不確実性は相対的に大きいと考えられる。地盤物性値の分布を求めるための母集団の種別や被災事例の評価に際し、このことを留意する必要がある。
- ⑩ 構造物の目標安全水準や危険度の限界値は、期待総費用最少化原則に基づいて評価することができる。しかしながら、間接損失額の範囲の設定やその評価が難しく、早期の実用化は困難である。空港における間接損失額は、背後経済圏の規模、鉄道代替も含めた国内ネットワーク、他空港代替を含めた国際ネットワークなど、設定が難しく、また長期の需要予

測の不確実性も評価を困難にする。

- ⑪ 「既存の構造物の耐震性能は、社会的に受け入れられた強さである」との解釈の下で、耐震性能の受容限度を評価する方法は有効である。この一つがコードキャリブレーションであり、空港を対象にこれを実施していく必要がある。
- ⑫ 本稿では、空港全体としての要求性能として、「地震に強い空港のあり方（2007 年）」を踏まえ、レベル 1 地震動に対しては「航空機の運航機能に支障を来たさない」、レベル 2 地震動に対しては「人命に重大な影響を与えず、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」とした。また、本稿では各要求性能の限界値として、レベル 1 地震動の要求性能に対しては 1%、レベル 2 地震動の要求性能に対しては 20%と仮に設定した。具体的な数値を示すことで、信頼性設計への理解と導入促進が図られると考える。
- ⑬ 空港各施設をシステムの要素と捉え、システム信頼性手法を導入することで、空港全体の要求性能の危険度の限界値の照査が可能となる。これは、空港の防災計画の実現性の数値評価ともなる。その際、空港各施設の損傷の相関性が重要になるが、設計者の負担を軽減する目的から、相関性は安全側（保守的）を考慮しつつ簡易的に取り入れるのが望ましい。
- ⑭ 標本空港を対象に、空港全体としての要求性能の限界値と空港各施設の限界値を照査した。このことは、空港の防災計画と空港各施設の設計を体系的な枠組みとして一体化するものである。照査の結果、レベル 1 地震動に対しては、空港土木施設の危険度は限界値を下回るが、レベル 2 地震動に対しては、限界値を満たさないことが分った。これらは一サンプルの結果と位置づけられ、同様のキャリブレーションを多数の空港で実施し、限界値の設定に必要十分な標本を得る必要がある。

①～⑭を踏まえ、空港の信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案を、現行の耐震設計要領を補う形式で示した。この試案は、キャリブレーションを多数の空港で実施し、限界値の設定に必要十分な標本を得るのを助けるものとする。これまでの課題をまとめると、a. 簡便な方法で信頼性照査ができるよう技術面での整備を行なう、b. 統計的裏付けの元で不確実性に関する情報を整備する、c. 設計技術者に対し啓蒙活動を含め確率や信頼性評価に関する基礎知識の底上げをする、などがある。

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。

謝辞

本研究を進めるにあたり、早稲田大学 濱田政則名誉教授、九州大学大学院 工学研究院 海域港湾環境防災共同研究部門 善功企特任教授、京都大学 防災研究所 井合進教授、関西大学 政策創造学部 政策学科 羽原敬二教授、九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 笠間清伸准教授、神戸大学 都市安全研究センター 飯塚敦教授、新関西国際空港株式会社 技術安全部長 水上純一氏、国土交通省航空局 空港安全・保安対策課長 坂克人氏、国土交通省 近畿地方整備局 神戸港湾事務所長 小野正博氏、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長 野津厚氏、大阪市 港湾局 角谷広樹氏の各位には、貴重なご助言をいただきました。また、公益社団法人日本港湾協会、佐野正明氏の関係各位には、貴重な資料の提供を頂きました。ご協力頂きました関係各位に対しここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 阿部勝征（1989）：地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測，地震研究所彙報，Vol.64，pp.51-69.
- 安中正，山崎文雄，片平冬樹（1997） 気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会公演論文集，pp.161-164.
- 石川裕，奥村俊彦，武田正紀（2000）：複数建物の集積地震リスクの評価，JCROSSAR2000 論文集，pp.205-208.
- 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
- 運輸省航空局（2000）：空港土木施設の耐震設計指針（案），P.69.
- 大竹雄，本城勇介，小池健介（2012）：調査地点を考慮した長大水路の液状化危険度解析，地盤工学ジャーナル，Vol.7 No.1，pp283-293.
- 大竹雄，本城勇介，平松祐一，吉田郁政，佐古俊介，中山修，長野拓朗（2014）：震災履歴を有する河川堤防 20km における地盤調査地点を考慮した液状化危険度解析とその有効性検討，地盤工学ジャーナル，

Vol.9 No.2, pp203-217.

小野正博, 中島由貴, 中村孝明, 静間俊郎 (2015): 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, 第 830 号, P.41.

片岡正次郎, 松本俊輔, 日下部毅明, 遠山信彦 (2008): やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正率, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.721-738.

港湾空港総合技術センター (2008): 空港土木施設耐震設計要領及び設計例, 国土交通省航空局 国土交通省国土技術政策総合研究所監修 (平成 25 年 4 月一部改訂), P.18.

港湾空港総合技術センター (2015): 空港土木施設の設置基準・同解説, 国土交通省航空局 国土交通省国土技術政策総合研究所監修 (平成 27 年 4 月一部改訂), P.5-4.

国土交通省航空局 (2007): 地震に強い空港のあり方 (地震に強い空港のあり方検討委員会報告), P.9.

佐藤忠信, 竹村恵二, 吉井真, 香川敬生, 高橋嘉樹, 南部光広 (2006): 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.502-512.

佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明 (2011): 長周期地震動の経験式の改良と 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 日本地震工学学会論文集第 12 巻, 第 4 号 (特集号).

竹信正寛, 野津厚, 宮田正史, 佐藤裕司, 浅井茂樹 (2014): 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.

土木学会 地震工学委員会 耐震設計基準小委員会 (2003): 土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル 1 の考え方, P.112.

土木学会 地震工学委員会 耐震設計基準小委員会 (2008): 経済性照査に基づく新しい耐震設計法の実施に向けての検討, P.46.

中央防災会議 首都直下地震モデル検討会 (2013): 首都の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書 (図表集), http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/shutoc/hokkajishinmodel/pdf/dansoumodel_02.pdf

中央防災会議幹事会 (2015): 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, P.113, 平成 27

年 3 月 20 日

陳光齊, 善功企, 諫山亜依, 笠間清伸 (2005): モンテカルロ・シミュレーションによる液状化リスク分析手法, 土木学会論文集, No.792/III, pp61-73.

長尾毅, 藤森修吾 (2007.3): 1 次近似 2 次モーメント法による栈橋のレベル 1 地震動に対する破壊確率の簡易評価法に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料 第 377 号, P.14.

長尾毅, 藤森修吾, 森下倫明 (2007.3): 岸壁の残留変形量に関する地震時信頼性指標の簡易評価手法に関する一考察, 国土技術政策総合研究所 第 378 号, P.88.

中島由貴, 小野正博, 中村孝明, 望月智也 (2015): 空港全体での安全性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, 第 863 号, P.64.

中村孝明, 長沼敏彦, 静間俊郎, 篠塚正宣 (1998): 統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.3165-3174.

中村孝明, 中村敏治 (2000): ポートフォリオ地震予想最大損失額(PML)評価, 日本リスク研究学会誌, 12(2), pp.69-76.

中村孝明, 川上洋介, 星谷勝 (2008): 永久期間の地震リスクカーブとその割引現在価値, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.513-519.

中村孝明 (2013): 実務に役立つ地震リスクマネジメント, 丸善出版, P.120.

西村伸一, 清水英良, 藤井弘章, 島田清 (1997): 液状化地盤改良に関する信頼性設計, 第 24 回地盤工学研究発表会講演論文集, pp.493-496.

日本建築学会 (1990): 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, P.713.

日本港湾協会 (2007): 港湾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.

日本データセンター協会 (2010): データセンターファシリティスタンダードの概要, <http://www.jdcc.or.jp/>

日本道路協会 (2012): 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, P.318.

林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫 (1997): 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地震動分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 502 号, pp.61-68.

福島誠一郎, 矢代晴美 (2002): 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価,

- 建築学会計画系論文集, 第 552 号, pp.169-176.
- 藤本一雄, 翠川三郎 (2005): 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, No.7, pp.1-6.
- 星谷勝, 石井清 (1986): 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, P.208.
- 松岡昌志, 若松加寿江, 橋本光史 (2011): 地形・地盤分類 250m メッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻 第 2 号, pp.20-39.
- 村尾修, 山崎文雄 (2000): 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, pp.189-195.
- 安田将人, 長尾毅 (2009.3): レベル 1 地震動に対する重力式岸壁の残留変形量に関する信頼性指標の簡易評価法, 国土技術政策総合研究所 第 526 号, P.33.
- 横田崇, 池内幸司, 矢萩智裕, 甲斐田康弘, 鈴木晴彦, 長周期地震動の距離減衰および増幅特性, 日本地震工学会論文集第 11 巻, 第 1 号, 2011
- 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.
- David Kun Li, C. Hsein Juang, and Ronald D. Andrus(2006): Liquefaction Potential Index: A Critical Assessment using Probability Concept, Journal of GeoEngineering, Vol. 1, No. 1, pp.11-24.
- FEMA, HAZUS 99 (1999): Technical Manual Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- Freudenthal, A.M. (1947): The Safety of Structures, ASCE Transactions, Vol.12, pp.125-159.
- Freudenthal, A.M., Garreit, J.M., and Shinozuka, M. (1966): The Analysis of Structural Safety, J. of Stru. Divi., ASCE Vol.92, No. ST1.
- Grossi, P., (2000): Earthquake Damage Assessment, Expert Opinion to Fragility Curves, 8th ASCE Specially Conference on Probabilistic Mechanics and Structure Reliability, PMC2000-123.
- Hannich D, H. Hoetzel, D. Ehret, G. Huber, A. Danchiv, and M. Bretotean (2007): Liquefaction Probability in Bucharest and Influencing Factors, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, pp.205-226.
- ISO (2015): ISO2394 General principles on reliability for structures, Fourth edition, P.111.
- Mander, J., B., (1999): Fragility Curve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges, Research Progress and Accomplishments 1997-1999, MCEER, University at Buffalo, The State University of New York.
- Min Wang, T. Takada (2005): Macrospatial Correlation Model of Seismic Ground Motions, Earthquake Spectra, Vol.21, No.4, pp.1137-1156.
- Nobuyuki Morikawa, and Hiroyuki Fujiwara (2013): A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research Vol.8, No.5.
- Shinozuka M. (1999): Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan, R.O.C.
- Shinozuka, M, Feng, M., q., Kim, H., Uzawa, T. and Ueda, T. (2001); Statistical Analysis of Fragility Curve, Technical Report submitted to MCEER under Federal Highway Administration Agency.
- Slovic, P. (1987): Perception of Risk, Science, 236, pp.280-285.

付録

付録 A 空港の信頼性設計のキャリブレーションの要領の試案

本試案は、空港の耐震設計において信頼性設計を導入する際のキャリブレーションの考え方及び方法について解説したものである。「空港土木施設耐震設計要領及び設計例（2008）」と補完関係があり，文中に（略）とあるのは同文書を参照されたい。

第1章 総則

1.1 目的

本要領は、空港土木施設の設計を行うにあたって、空港全体の総合的な耐震性を確保するために、空港を構成する各施設の標準的な耐震設計の手順を体系的に示し、設計の合理化ならびに効率化を図ることを目的とする。

(略)

(信頼性設計に関する解説)

- (1) 構造物の耐震設計は、構造物が持つ耐力が地震外力（作用地震動あるいは構造物の応答）を上回ることを照査し、安全性を確認する。材料・施工のばらつきにより設計上の耐力を下回る可能性や、想定以上の地震動が作用する可能性を否定できない。そのため、耐力や外力のばらつき（不確実性）を見込んだ一定の安全余裕が必要になる。
- (2) 信頼性設計は、耐力や外力の不確実性を積極的に取入れた設計法であり、構造物の破壊確率（損傷確率と呼ぶこともある）を計算し、破壊確率（危険性）が限界値以下となることを照査し、安全を確認する。このため、安全の概念は、「構造物の破壊確率（損傷確率）は受容できる程、十分小さいこと」となる。
- (3) 空港全体の範囲は、リスクの最終負担者の立場で異なる。例えば、市営空港にあつては、市所有のアクセス道路・鉄道も含めた空港施設および用地全て、空港会社にあつては、会社所有の空港施設・用地全て、空港土木施設の管理者にあつては、空港土木施設群・用地など。空港全体は、固有周期（周波数特性）その他の応答特性が異なる構造物の集合体である（図-1.1）。一つの地震動の作用により集合した構造物群が同時被災するとともに、それらの被害程度に濃淡が生じる。このことは空港全体の総合的な耐震性能の評価に際し重要である。

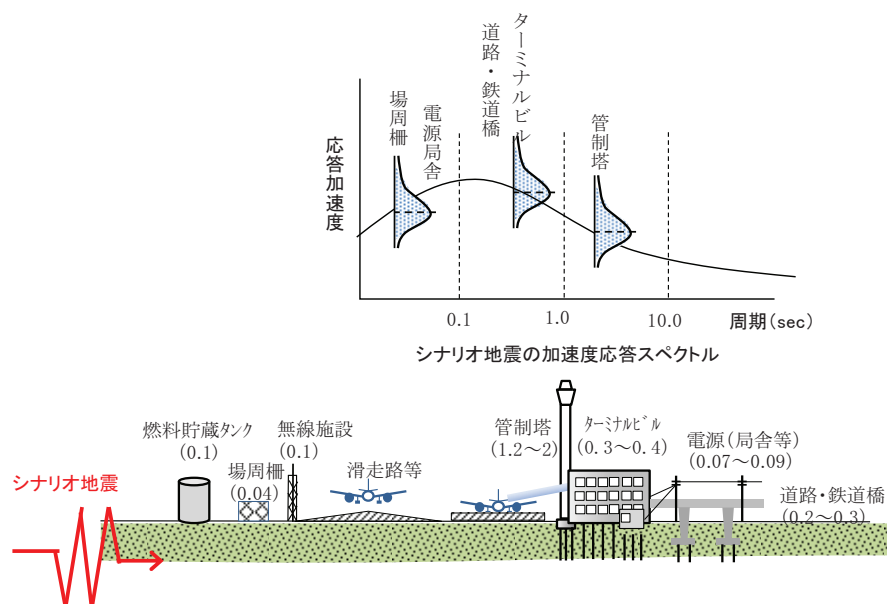


図-1.1 応答特性が異なる構造物群から構成される空港全体のイメージ

- (4) 総合的な耐震性は、航空法および国有財産法はもとより、災害対策基本法および同法関係計画を踏まえて、検討することが必要である。

1.2 適用範囲

本要領は、空港土木施設の設置基準解説¹⁾(以下「基準解説」という.)を適用する施設を対象としている。

(略)

1.3 用語

本要領における主な用語の意味は以下のとおりである。

- ・液状化 : 飽和した砂質地盤において、地震動により間隙水圧が急激に上昇し、地盤のせん断強度が著しく低下する現象をいう。
- ・応答変位法 : 地震時の表層地盤のせん断変形の影響を考慮して地中施設等の変位量や断面力を計算する方法をいう。
- ・動的解析法 : 地震時における構造物および地盤の挙動を動力的に解析して部材の応力・ひずみ等の応答値を算定する方法をいう。
- ・設計供用期間 : 施設の設計にあたって、当該施設の要求性能を満足し続けるものとして設定される期間をいう。50年とする例が多い。しかし、設置から50年を超える空港も多く、また、公設民営といった新規の管理形態に伴う公共施設運営権設定期間の30年など、設定の多様化にも対応する必要がある。
- ・レベル1地震動 : 空港において発生するものと想定される地震動のうち、地震動の再現期間と当該施設の設計供用期間との関係から当該施設の設計供用期間中に発生する可能性の高いものをいう。
- ・レベル2地震動 : 空港において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するものをいう。必ずしも一つの地震動だけではなく、地震動の特性を踏まえ、複数の地震動について、それぞれ評価することを妨げない。
- ・震源特性 : 震源断層の破壊過程が地震動に与える影響をいう。
- ・伝播経路特性 : 震源から当該地点の地盤基盤に至る伝播経路が地震動に与える影響をいう。
- ・サイト特性 : 地震基盤上の堆積層等が地震動に与える影響をいう。
- ・確定的設計 : 耐震性能を規定し、これが満たされることを照査する設計法をいう。
- ・信頼性設計 : 耐震性能が満たされない確率(破壊確率)が限界値以下であることを照査する設計法をいう。
- ・要求性能 : 目的を達成するために施設が保有しなければならない性能を、説明責任の観点から平易に表現したもの。
- ・性能規定 : 要求性能が満たされるために必要な照査に関する規定を技術的観点で表現したもの。
- ・耐震性能 : 構造物が保有する地震動に対する性能をいう。
- ・耐震性能規定 : 耐震性能に課される規定をいう。
- ・空港全体 : その範囲は、リスクの最終負担者の立場で異なる。市営空港の場合、アクセスも含めた空港施設・用地全て、空港会社にあつ

	ては、所有する空港施設・用地全て、空港土木施設の管理者にあつては、空港土木施設群・用地などをいう。
・総合的な耐震性	： 「総合的な耐震性能」と同義
・総合的な耐震性能	： 施設単独ではなく、空港を構成する施設群の耐震性能をいい、その範囲は、空港全体もしくはその一部とする。
・危険度	： 「危険性」と同義。数値での表現にあつては、「破壊確率」と同義
・信頼度	： 「危険度」の対義語として信頼度がある。数値での表現にあつては、「健全確率」と同義。
・限界値	： 二つある。一つは変位等の許容される上限値。もう一つは破壊確率の許容される上限値をいう。
・設計限界値	： 二つある。一つは設計段階で検討する変位等の許容される上限値。もう一つは設計段階で検討する破壊確率の許容される上限値をいう。
・破壊確率	： 危険な状態や不具合が生じる確率、損傷確率ともいう。
・作用の不確実性	： 設計外力（地震動）のばらつき、あるいは設計外力（地震動）による構造物の応答のばらつきをいう。数値では標準偏差で表す。
・耐力（保有する性能）の不確実性	： 構造物や施設が保有する耐力のばらつき、材料、施工性などのばらつきに起因するもので、数値では標準偏差で表す。
・時刻歴波形	： 時刻毎に観測/算出した加速度、速度、変位の変化を表す波形図を表す。
・確率論的時刻歴波形	： 確率論的手法により算出した時刻歴波形をいう。
・震源特性	： 断層においてどのような破壊が起こったかを表す特性をいう。具体的には、アスペリティの配置、地震の規模、破壊メカニズムなどをいう。
・伝播経路特性	： 地震波が震源から敷地地盤に伝播する際、どのように地殻内（岩盤中）を伝わってきたかを表す特性をいう。
・サイト（増幅）特性	： 岩盤より上の表層地盤を地震波がどのように伝わってきたかを表す特性をいう。
・地震ハザード	： 地震が発生する可能性とその可能性で生じるであろう地震動の大きさの関係を表したものをいう。
・一様ハザード	： 周期毎のフーリエ振幅や応答加速度等を、同一の発生確率で算出したスペクトルをいう。
・シナリオ地震	： 今後予想される、または想定する地震をいう。シナリオ地震の種類には、海溝型地震、活断層に代表される内陸型地震、背景地震がある。

※類似語の整理

危険性、破壊確率、損傷確率、不健全確率

安全性（耐震に限る）、信頼度、健全確率、達成確率

第2章 耐震設計の基本

2.1 総説（総合的な耐震性能・基本的な耐震性能）

空港土木施設の設計にあたっては、空港に求められる機能に応じた耐震性能を確保するとともに、この機能に拘わらず、レベル 1 地震動、レベル 2 地震動それぞれに対し、以下の基本的な耐震性能を有するものとする。

- (1) レベル 1 地震動に対して、航空機の運航に必要な機能に影響を与えないこと。
- (2) レベル 2 地震動に対して、人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を与えないこと。

(略)

2.2 輸送形態に応じた空港土木施設（群）の（総合的な）耐震性能

空港土木施設の設計にあたっては、空港を構成する各施設が、地震発生後の想定される輸送形態に対応できる耐震性能を有するものとする。

(略)

(信頼性設計に関する解説)

- (1) 中央防災会議幹事会（災害対策基本法第 12 条第 8 項の規定により設置）が、「南海トラフ巨大地震における具体的な応急対策活動に関する計画（2015 年 3 月 30 日）」を示している。そのなかで「タイムラインに応じた目標行動」が示されており、航空機による救助等活動や DMAT（災害派遣医療チーム）の空路参集などの輸送形態に応じた総合的な空港の機能とその発現の期限について、目標が示されている。したがって、同計画と空港設計との整合を図るためには、空港土木の各施設単位ではなく、施設集合体である空港の総合的な耐震性能について、期限も含め、照査することが必要不可欠である。
- (2) 「地震に強い空港のあり方（2007 年 4 月 27 日）」において、地震発生後に確保すべき複数の輸送機能とそれらの期限が示されている。これらは、同計画を先取りしており、タイムラインとの整合がみられる。
- (3) 内閣府は、南海トラフ地震の向こう 30 年の超過確率を 88%としている。これは、再現期間 75 年のレベル 1 地震動の向こう 30 年の超過確率 33%（50 年超過確率 49%）より、かなり逼迫している。レベル 2 地震動については、確定的設計（変位が限界値以下とする）が原則であるが、同設計は破壊確率を 50%程度としか説明できない。そのため、レベル 2 地震動を南海トラフ地震の由来とする場合、向こう 30 年で 44%程度運航に支障を生じるとの説明となる。したがって、レベル 2 地震動を南海トラフ地震由来とする場合、向こう 30 年の破壊確率をより合理的に説明できる信頼性設計でも照査することが望ましい。

2.2.1 空港土木施設群の総合的な耐震性能規定（信頼性設計）

空港土木施設の設計にあたって、空港に求められる基本的な耐震性能および地震発生後の輸送形態に応じた耐震性能は、危険度（破壊確率）が限界値以下とするものとする。

- (1) 基本的な耐震性能のうち、レベル 1 地震動にあつては、運航に必要な機能に影響を与えず、すなわち機能を損なわず継続して使用できることとしている。基本的な耐震性能のうち、レベル 2 地震動にあつては、人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を与えず、すなわち、施設自体の損傷が人命に直接影響が及ばないこととしている（地下道崩壊・落橋、高盛土崩壊による周辺民家の流失など）。
- (2) 輸送形態に応じた耐震性能にあつては、レベル 2 地震動のみを考慮し、運航できずに人命

等に影響を及ぼさないこと（回転翼機および固定翼機による緊急輸送ならびに固定翼機による旅客輸送（拠点空港等））とし、修復性を確保すること，すなわち機能を若干損なうが，3日間程度で修復することとしている。

- (3) これらをまとめたものを表-2.1 に示す。要求される総合的な耐震性能は，その危険度（破壊確率）が限界値以下であることを照査基準とする。

表-2.1 地震動レベル別の空港土木施設群の総合的な耐震性能と限界値

	地震動レベル	要求される耐震性能	照査基準
基本的な耐震性能 (民航機による旅客輸送)	レベル1 地震動	運航に支障をきたさない	限界値以下
	レベル2 地震動	3日以内に50%の運航	限界値以下
輸送形態に応じた耐震性能 (固定翼機による緊急輸送)	レベル2 地震動	3日以内に運航	限界値以下

- (4) 信頼性設計は，原子力や航空宇宙（スペースシャトルおよび航空機）の分野で歴史がある。同設計は，破壊確率あるいは健全確率を数値で示すこととし，システム信頼性解析やイベントツリーを用いて，部品の破壊確率あるいは健全確率から全体の破壊確率あるいは健全確率を求め，全体としての機能の危険度あるいは安全水準を照査することを原則とするものである。本要領においては，全体については総合的な耐震性能，部品については各施設の耐震性能としている。
- (5) 要求される総合的な耐震性能が，「3日以内に50%の運航」のように，期限（被災後からの経過時間）と性能の二次元で規定される場合，図-2.1 に示す健全度曲線を使い，照査することができる。健全度曲線は発災後からの経過時間に応じた性能（航空機の運航可能容量）を確率分布として表し，性能の閾値（例えば50%）を超える確率を経過時間に対し結んだものである。「3日以内に50%の運航」の限界値が0.2（20%）の場合，図-2.1 より，3日目の信頼度は0.8，すなわち危険度は0.2となる。よって危険度は限界値以下であることから，総合的な耐震性能の安全は確保できたと確認できる。

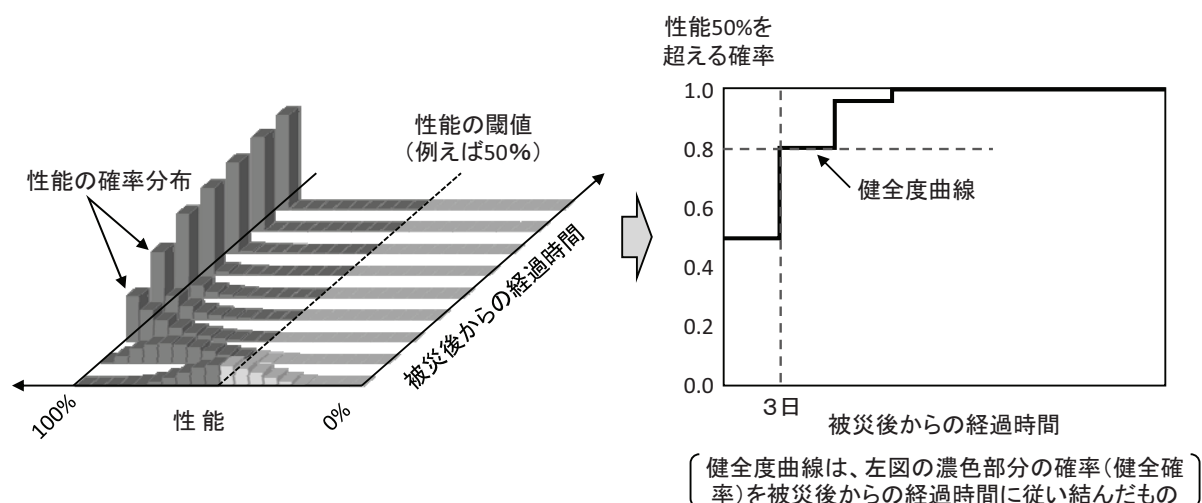


図-2.1 健全度曲線を使った危険度の限界値の照査方法

なお，復旧曲線を用いた照査方法も考えられる。

- (6) 土木・建築分野の信頼性設計法においては、破壊確率（分野によっては「損傷確率」という。）の照査を含め、信頼性指標および部分係数の 3 種の表現がある。空港全体の総合的な耐震性能を踏まえたうえで、各施設の耐震性能を照査するためには、破壊確率で表現することが必要となる。その他の信頼性指標、部分係数による総合的な耐震性能の表現は困難である。
- (7) 既往の設計基準に基づいて設計された施設の耐震性能は、歴史的経緯から社会的に十分許容されており、経済と安全のバランスが均衡していると考えられる。総合的な耐震性能の限界値の具体的な数値の検討にあたって、既往空港の総合的な耐震性能を評価（コードキャリブレーション）し、参考とすることができる。
- (8) 「南海トラフ巨大地震における具体的な応急対策活動に関する計画（2015 年 3 月 30 日）」については、中央防災会議幹事会（災害対策基本法第 12 条第 8 項の規定により設置）申し合わせとして、関係府省間の合意が形成されている。総合的な耐震性能の限界値の具体的な数値の検討にあたって、この合意形成を踏まえ、同計画のタイムラインとどの程度の確率で実現すべきか検討が必要である。

2.3 空港土木（各）施設の耐震性能

空港土木施設の設計にあたっては、地震発生後に空港に求められる基本的な耐震性能および輸送機能に応じた耐震性能を踏まえ、地震規模および施設に応じて求められる性能を設定するものとする。また、これら性能の評価項目は、地震規模や施設の構造特性に応じて適切に設定するものとする。

（略）

2.3.2 空港土木各施設の耐震性能規定（信頼性設計）

空港土木各施設の設計にあたっては、空港に求められる基本的な耐震性能、および地震発生後の輸送形態に応じた耐震性能を確保するため、地震規模および各施設の役割に応じて求められる耐震性能の危険度は、一定の限界値以下とする。

- (1) 陸上空港の基準対象施設の性能照査に必要な事項等を定める告示（平成 20 年 6 月、国土交通省告示第 800 号）第 13 条第 1 号において、滑走路にあっては、レベル 1 地震動に対し、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としており、現行法規に従うものである。
- (2) レベル 2 地震動に対しては、信頼性設計の適用は設計者の任意である。しかし、レベル 2 地震動が南海トラフ地震由来とするなど、信頼性設計を原則とするレベル 1 地震動より逼迫する場合がある。その場合、レベル 2 地震動に対しても信頼性設計を適用し、レベル 1 地震動の破壊確率と比較検討することが望ましいと考える。
- (3) 空港土木各施設の耐震性能の危険度は、各施設の機能や役割を勘案したシステム信頼性解析あるいはイベントツリーを用いて、空港全体の耐震性能の危険度から求めることができる。本要領では、空港土木各施設の耐震性能の危険度の限界値を規定することとし、設計者がシステム信頼性解析等を行なう手間を省いている。

第3章 耐震性能の照査方法

3.1 総説

空港土木施設の耐震性能の照査は、施設の構造特性に応じた地震応答解析法に基づいて行うものとする。また、液状化について考慮が必要な施設については、適切な方法に基づいて液状化判定を行い、必要に応じてその影響を考慮して設計するものとする。

(略)

3.1.2 不確実性の表現（信頼性設計）

地震動の発生頻度および地震動強さならびに耐力（保有する性能）について、不確実な対象であるとし、適切な確率分布を以て表現する。

- (1) 不確実性については、平均（期待）値や中央値といった特性値と、ばらつきを表す分散や標準偏差を有する確率分布（「確率変数」ともいう。）を以て表現する。安全余裕を数値で表せない平均値や極値（最大値等）などを、代表的な変数（確率分布や確率変数ではない）とすることは、信頼性設計から乖離する。
- (2) 確率変数は、平均値や標準偏差等の特性値を持つ確率関数、あるいは確率密度関数で記述される。図-3.2は確率関数を示し、確率変数はそれぞれが実現する確率を伴う。

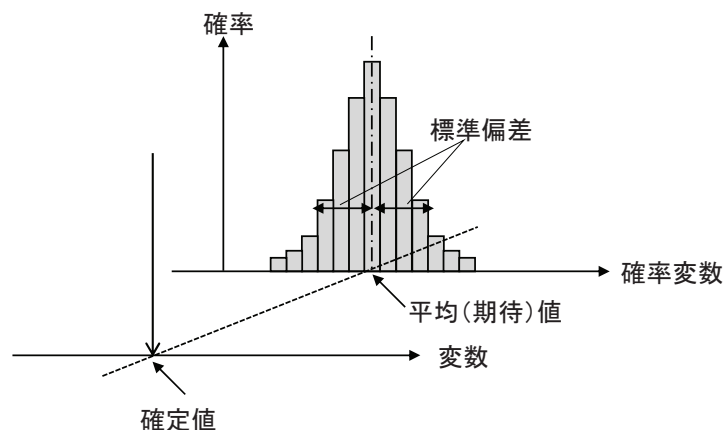


図-3.2 確率分布の説明図

3.1.3 総合的な耐震性能の照査（信頼性設計）

空港土木施設の設計にあたっては、基本的な耐震性能および地震発生後の輸送形態に応じた耐震性能の危険度は、限界値以下であることを照査する。

- (1) 総合的な耐震性能の危険度は、耐震性能が発現できない可能性であり、破壊確率、あるいは損傷確率と同義である。
- (2) レベル 1 地震動に対して要求される耐震性能は「運航に支障きたさない」となるが、これは、発災直後の安全点検や確認を経て、発現することが求められる。
- (3) レベル 2 地震動における民航機の運航に関して要求される耐震性能は「3 日以内に 50%の運航」となるが、これは、発災から 3 日間で修復を経て、発現することが求められる。
- (4) 空港全体は、固有周期（周波数特性）その他の応答特性が異なる構造物の集合体であり、一つの地震動の作用により集合した構造物群が同時被災する。このことを踏まえ、空港全体の総合的な耐震性能の危険度と、空港土木各施設の耐震性能の破壊確率とを、一貫して

確率で表現することにより、両者の耐震性能の整合を図ることが可能となる。したがって、空港土木各施設の耐震性能の照査にあつては、破壊確率で表現するレベル 3 設計法を適用せざるを得ない。レベル 1 設計法若しくはレベル 2 設計法では、総合的な耐震性能の照査が困難となることに留意する必要がある。

3.1.4 総合的な耐震性能の限界値（信頼性設計）

- (1) レベル 1 地震動に対して、空港に求められる基本的な耐震性能（継続して使用）の危険度の限界値は、当分間、0.01（1%）とする。
- (2) レベル 2 地震動に対して、地震発生後の輸送形態に応じた耐震性能（回転翼機・固定翼機の緊急輸送および旅客輸送（拠点空港））の危険度の限界値を、当分の間、0.2（20%）とする。

- (1) 目標信頼度の具体的な数値については、十分な標本数の既往空港の照査、災害対策基本法関係の計画が示す目標値を得たうえで、合意形成を経て、設定することが望ましい。しかしながら、具体的な数値を一切示さない場合、信頼性設計の核心が曖昧になり、設計者の理解を著しく妨げることから、当分の間、具体的な数値を示すことにより、理解の促進を優先する。
- (2) レベル 1 地震動に対する限界値 1%は、全国に供用されている空港は 97 箇所であり、これら空港が設計供用期間の間に一度は経験するであろう地震動に対して、一つの空港も要求性能を損なわないレベルである（ $0.0103 \div 1/97$ 箇所）。また、この限界値は、背後経済圏への影響など、空港の重要度に関わらず確保する。
- (3) レベル 2 地震動に対する限界値 20%は、レベル 2 地震の発生頻度を 1000 年に 1 回程度、空港の供用期間 50 年と仮定すると、約 5 箇所（ $4.85 = 0.001 / \text{年} \times 50 \text{ 年} \times 97 \text{ 箇所}$ ）の空港がレベル 2 地震動に遭遇する可能性がある。その場合、5 つの内一つの空港も要求性能を損なわないレベルである（ $0.207 \div 1/4.85$ 箇所）。また、地震発生後の急性期に期待される輸送形態において、空港ネットワークの観点から捉えた空港機能の代替が難しい空港については、危険度 20%を最低限の目標とする。
- (4) レベル 1 地震動に対する限界値の照査にあつては、期待総費用最小化方法による検討が考えられる。しかしながら、同方法に組み込まれている航空の需要予測そのものの不確実性が大きく、また、需要予測の方法についても、更新が繰り返しされており、確立に時間を要すると考えられる。したがって、現時点において期待総費用最小化方法による検討については、慎重に行うべきと考える。

3.1.5 空港土木各施設の耐震性能の照査（信頼性設計）

空港土木施設の設計にあつては、空港に求められる基本的な耐震性能、および地震発生後の輸送形態に応じた耐震性能を確保するため、空港土木各施設は、地震規模および各施設の役割に応じて求められる危険度を限界値以下とするものとする。

- (1) レベル 1 地震動に対する各施設の限界値目は表-3.1 を参照することができる。
- (2) レベル 1 地震動に対する基本的な要求性能の限界値 1.0%を確保するためには、滑走路、誘導路、エプロン等の主要各施設の限界値はそれぞれ 0.3%（ $0.0033 \div 1 - 0.99^{1/3}$ ）となる。レベル 1 地震動は、再現期間 75 年の一様ハザードスペクトルから得られた擬似地震動であることから、主要各施設の被害は統計的に独立を仮定できることが理由である。

表-3.1 レベル1地震動に対する空港土木各施設の限界値

施設	限界値
滑走路	0.3%
誘導路	
エプロン	
過走帯	
着陸帯	1.0%
滑走路端安全区域	
その他施設	・ ・

- (3) レベル2地震動に対する各施設の目標信頼度は、表-3.2を参照することができる。
- (4) レベル2地震動に対する要求性能は、救急救命活動など地震発生後の急性期の想定される輸送形態に対応した要求性能であり、航空機（回転翼機，固定翼機（主に自衛隊機），民航機）毎の目的や役割によって異なる。また，輸送形態に応じた要求性能の限界値20%を確保するためには，滑走路，誘導路，エプロン等の主要各施設の限界値はそれぞれ20%となる。レベル2地震動は，最大級の強さの地震動をもたらすシナリオ地震を基本とすることから，主要各施設の被害は統計的に相関が高いと仮定できることが理由である。
- (5) 回転翼機については，空地が確保できればよいので，主要各施設の目標信頼度は特に設けない。

表-3.2 レベル2地震動に対する空港土木各施設の限界値

施 設	限界値		
	固定翼機による 旅客輸送	固定翼機による 緊急物資輸送	回転翼機による 緊急輸送 (救急救命活動)
滑走路	20%	20%	—
誘導路			20%
エプロン			
過走帯			—
着陸帯	20%	20%	—
滑走路端安全区域			—
その他施設	・ ・	・ ・	—

3.2 （空港土木各施設の変位等の）設計限界値（確定的設計）

性能照査に用いる設計限界値は，当該施設の要求性能や地震規模，構造特性に応じて適切に設定するものとする。

（略）

（信頼性設計に関する解説）

- (1) 確定的設計における変位等の設計限界値を示しているが，同時に信頼性設計における限界状態も示している。信頼性設計は，限界状態を超える可能性を，破壊確率で示すこととな

る。

3.2.2 空港土木各施設の設計限界値（信頼性設計）

危険度を数値で表す破壊確率（設計限界値を超える確率）は、応答と設計限界値の中央値を適切に評価し、また適切な不確実性を設定し、構造信頼性理論に基づき評価する。

- (1) 設計限界値を超える確率は、図-3.3 に示す二つの確率分布から成るモデル（通称「2 山モデル」）に理想化した上で、設計用地震動による応答が設計限界値を超える確率として求めることができる。応答と設計限界値の確率分布は対数正規分布を基本とするが、知見や実験、被害事例など裏づけが明確な場合は、この限りではない。
- (2) 2 山モデルに理想化する際の応答は、設計用地震動による変形やひび割れ幅、応答加速度や応答変位など空港土木各施設の構造特性や設計限界値に応じて適宜設定することができる。

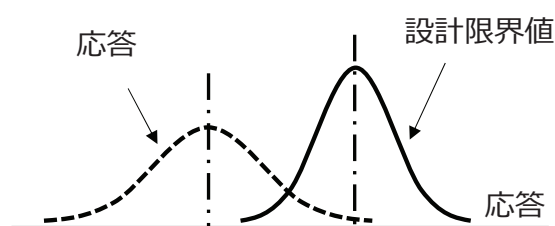


図-3.3 構造信頼性の評価概念（2 山モデル）

3.2.3 空港土木各施設の危険度（信頼性設計）

空港土木各施設の危険度は、液状化、ならびに揺れによる設計限界値を超える確率を適切なイベントツリーに適用して評価する。

- (1) 滑走路、誘導路、エプロン等の信頼度の評価については、図-3.4 のイベントツリーを参照することができる。

液状化による舗装被害	揺れによる舗装被害	地震による結果
無被害あるいは運航に支障を与えない状態	無被害あるいは運航に支障を与えない軽微なひび割れ	航空機の運航に支障なし
	短期間で修復可能なひび割れ（3日間で修復）	3日間で修復
	修復に長期を要する凹凸やひび割れ（長期）	修復には長期を要する
舗装の凹凸や勾配が許容値以下（3日間で修復）		3日間で修復
舗装の凹凸や勾配が許容値を超える（長期）		修復には長期を要する

図-3.4 滑走路、誘導路、エプロンの信頼度評価のイベントツリー

- (2) レベル 1 地震動に対しては、危険度は「航空機の運航に支障なし」の結果の確率を 1.0 から差引いた確率である。レベル 2 地震動に対しては、危険度は「修復には長期を要する」の結果の確率の和で求めることができる。

3.3 地震動

地震動としてレベル 1 およびレベル 2 地震動の 2 段階の地震動を設定するものとする。

(略)

(信頼性設計に関する解説)

- (1) レベル 1 およびレベル 2 地震動ともに、対象空港で観測されるであろう地震動の不確実性を考慮する。不確実性の源泉は、震源特性、地震波の伝播経路特性、サイト特性などが考えられ、地震動強さ（応答加速度）とその発生頻度（発生確率）の不確実性について、これらを適切に考慮する。

3.3.1 レベル 1 地震動（確定的設計）

レベル 1 地震動は、地震動の実測値をもとに、震源特性、伝播経路特性、サイト特性を考慮して、確率論的時刻歴波形を適切に設定するものとする。

(略)

3.3.1.2 レベル 1 地震動（信頼性設計）

レベル 1 地震動は、施設周辺で発生する地震（シナリオ地震）を網羅的に特定し、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性の不確実性を考慮した再現期間 75 年の一様ハザード応答加速度スペクトルを適切に設定するものとする。

- (1) 施設周辺で発生する地震（シナリオ地震）は、①海溝付近で発生する大規模なプレート境界地震、②活断層による大規模な地殻内地震、③地表に断層として現れない地殻内地震（背景地震）の 3 種に大別できる。

① 海溝付近で発生する大規模なプレート境界地震

これは、ユーラシアプレートに太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む付近で発生する大規模地震である。プレートの移動速度と密接に関連しており、一定の周期を伴って発生する地震として評価する。一方、日本海東縁海域で発生する地震は、必ずしもプレート境界地震とは言えないが、周期性（更新過程）を伴う大規模地震として同類として評価する。

② 活断層による大規模な地殻内地震

これは、断層が地表に現れ、その長さや位置が明確なものを対象とする、いわゆる活断層地震である。過去の地震歴や断層の滑り量等から、周期性（更新過程）を伴う地震として評価することもできる。

③ 活断層による大規模な地殻内地震（背景地震）

これは、背景地震とも呼ばれ、空間的、時間的にランダムに起こりうるとの仮定から、G-R（Gutenberg-Richter）式に基づき評価する。このため、地震の経時的な発生はポアソン過程に基づくことになる。その他、大規模な地殻内地震であっても地表面に断層として現れないものもあり、②で選定された活断層とは関連しない震源データを元に評価することができる。

- (2) 施設周辺で発生する地震（シナリオ地震）は、震源位置、地震規模及び発生確率を情報（震源パラメータ）として持つ。対象空港で観測されるであろう地震動は、伝播経路特性

を表した適切な距離減衰式を用いて評価したうえで、これにサイト特性を考慮する。地震動は、地震別に評価し、発生確率とともに図-3.5 に示す周期別の応答加速度のイベントハザードカーブを求める。さらに再現期間 75 年に対応する一様ハザード加速度応答スペクトルを作成する。一様ハザード加速度応答スペクトルに現れる加速度応答の不確実性は、距離減衰式による不確実性を適用できるが、この場合、サイト特性の不確実性は含まれないため、これを適切に考慮する。

- (3) 液状化の予測・判定を含め、構造物の特性に応じて時刻歴応答解析を必要とする場合、一様ハザードスペクトルから時刻歴波形を求めることができる。この場合、平均的な地震波形であることを認識し、その応答に地震動の不確実性を適切に考慮する。

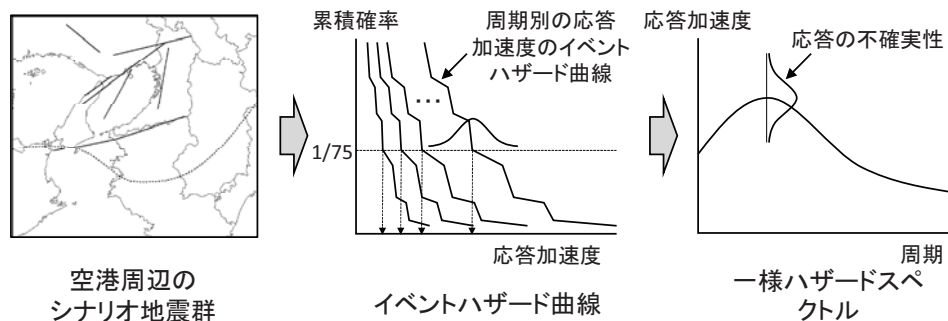


図-3.5 一様ハザードによる地震動評価とその不確実性

- (4) 再現期間 75 年は、設計供用期間 50 年の超過確率が約 50%（ポアソン過程）となるものである。50%を指標として考えるならば、設計供用期間が 100 年の場合、再現期間は 144 年程度、30 年の場合、43 年程度と考えられる。
- (5) なお、確定的設計における確率論的時刻歴波形は、地震動の発生確率（再現期間 75 年）を取り込んだものに留まり、そこから導かれる応答は不確実性を内在した単一値となる。応答加速度等の不確実性について、内在した単一値から分離して確率分布で表現していないことに留意すべきである。結果として、震源特性の不確実性や伝播特性の不確実性など、各地震動評価の不確実性を考慮することができないことに留意する必要がある。

3.3.2 レベル 2 地震動（確定的設計）

レベル 2 地震動は、地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定するものとする。

（略）

3.3.2.2 レベル 2 地震動（信頼性設計）

レベル 2 地震動は、地震動の実測値、シナリオ地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性の不確実性を考慮した複数の時刻歴波形を適切に設定するものとする。

- (1) 上記解説(a)～(f)を勘案し、対象空港に最大級の強さの地震動をもたらす地震を選定し、統計的グリーン（G.Green）関数法等を用いて対象空港での時刻歴波形を推計する。その際、図-3.5 に示すように、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性の不確実性を考慮した複

数の時刻歴波形を作成する。時刻歴波形は少なくとも 100 以上とし、これらをサンプルとして、構造物の特性に応じた時刻歴応答解析を実施する。応答解析結果を統計的に処理し、応答の平均値ならびに不確実性を評価することができる。

- (2) 液状化の予測・判定を行なう場合、サンプルとしての時刻歴波形別に等価加速度を計算し、統計処理を行い等価加速度の平均値ならびに不確実性を評価することができる。等価加速度は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾を参照することができる。
- (3) 周期応答を伴うことが明確な構造物や剛体構造物の場合、図-3.6 に示すようにサンプルとしての時刻歴波形別に加速度応答スペクトルを求め、当該構造物の固有周期に対応した応答値の平均値ならびに不確実性を評価することができる。

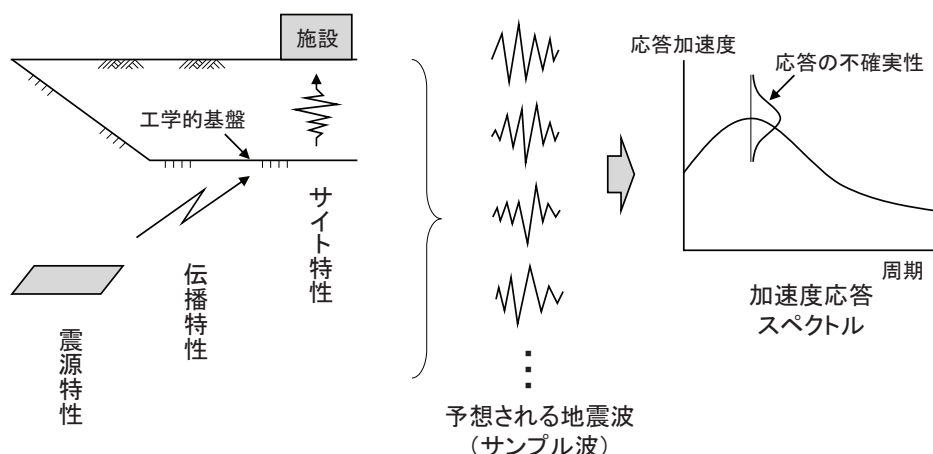


図-3.6 シナリオ地震による地震動評価とその不確実性

3.4 液状化の予測・判定

地盤の液状化の予測および判定は、一般的に以下により行うこととしている。

- (1) 地盤が緩く詰まった飽和砂質土等の場合においては、地盤が液状化するか否かの予測および判定を行うこと。
- (2) 地盤が液状化するか否かの予測および判定は、粒度と標準貫入試験値または繰返し三軸試験を用いる等適切な方法によって行うこと。

(略)

3.4.1 液状化の予測・判定（信頼性設計）

地盤の液状化の予測および判定は、一般的に以下により行うこととしている。

- (1) 地盤が緩く詰まった飽和砂質土等の場合においては、地盤が液状化するか否かの予測および判定は、確率を以って行うこと。
- (2) 地盤が液状化するか否かの確率は、作用する地震動と、粒度、標準貫入試験値または繰返し三軸試験等を用いた適切な方法による液状化抵抗を評価し、一定の不確実性を考慮し、行なうこと。

- (1) 液状化するか否かの確率は、作用を等価加速度、液状化抵抗を等価 N 値として評価することができる。等価加速度、等価 N 値は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」³⁾を参照することができる。
- (2) 等価加速度、等価 N 値の不確実性については、被災事例や液状化実験などから統計的に評

価する。海上空港は埋め立により粒度分布など地盤物性値の不確実性を一定程度制御できるものと考えられる。これに比べ、陸上空港は自然に形成された原地盤を利用することが多く、地盤物性値の不確実性は相対的に大きいと考えられる。地盤物性値の分布を求めるための母集団の類別化や被災事例の評価に際し、このことを留意する必要がある。

- (3) 液状化の度合いによって構造物被害を引起す可能性がある場合、液状化による構造物に及ぼす影響を勘案するとともに、液状化の度合いを考慮した PL 値などを用いて、構造物被害の発生確率を評価することができる。
- (4) 液状化による構造物への直接的被害が起こらない場合でも、周辺の地盤や施設が被災し、構造物の機能が失われる可能性がある。この場合、周辺の地盤や施設が破壊確率を以って構造物の機能喪失の確率とすることができる。

3.5 土圧

地震時に考慮すべき土圧は、地盤特性や構造の種類等を考慮して、適切に設定するものとする。

(略)

3.6 設計応答値

空港土木施設の地震時の設計応答値は、一般に、施設の構造形式、基礎地盤の特性、地震規模等を考慮して、適切な手法を用いて算出することとしている。

(略)

第4章 液状化対策

4.1 総説

液状化対策として地盤改良を行う場合には、基礎地盤の特性、施設の特性、施工性、経済性等を考慮して、適切な方法を選定するものとする。

(略)

4.2 対策範囲

液状化対策範囲は、対象施設の構造形式や地震発生時に求められる性能、基礎地盤の特性、対策工法等を考慮して、適切に設定する必要がある。

(略)

4.3 対策レベル

液状化対策のレベルは、対象施設の構造形式や地震発生時に求められる性能、基礎地盤の特性、対策工法等を考慮して、適切に設定する必要がある。

(略)

4.4 液状化対策の照査

液状化対策の照査は、対象施設の構造形式、基礎地盤の特性、対策工法、地震規模等を考慮して、適切に実施するものとする。

(略)

付録 B 構造信頼性理論と損傷確率

構造信頼性理論では、耐力と外力はばらつきを伴った確率変数と考える（図 B-1）。いま耐力を確率変数 C 、外力（作用地震動）を確率変数 R とおくと、構造物が安全であるという条件式（これを性能関数と呼ぶ）は以下ようになる。

$$R \leq C \quad (B1)$$

構造信頼性理論では、(B1)式で示される性能関数、すなわち R が C 以下である確率を求めることになる。

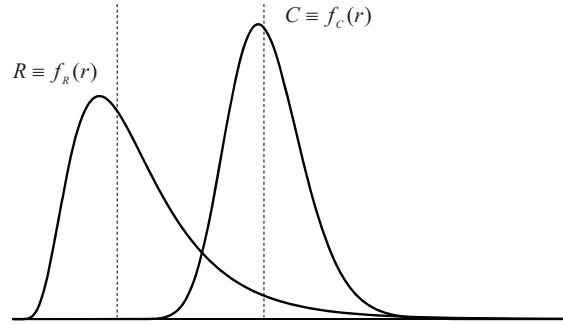


図 B-1 外力と耐力の関係

R が C 以下である確率を求めるために、確率変数 C と R の分布を考える。 C, R はともに正であるから、対数正規分布を仮定すると、 C, R はそれぞれ $LN(\lambda_C, \zeta_C), LN(\lambda_R, \zeta_R)$ に従う確率変数と表すことができる。

なお、 $\lambda_C, \zeta_C, \lambda_R, \zeta_R$ は、 C と R の対数の平均値と対数の標準偏差である。

ここで、(B1)式を以下のように変形する。

$$C/R = Z \geq 1.0 \quad (B2)$$

このとき確率変数 Z の確率密度関数は、 C, R が対数正規分布であることから以下のように表される。

$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_Z Z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_Z}{\zeta_Z}\right)^2\right\} \quad (B3)$$

ここに、

$$\lambda_Z = \lambda_C - \lambda_R \quad (B4)$$

$$\zeta_Z^2 = \zeta_C^2 + \zeta_R^2 \quad (B5)$$

である。

なお、 ζ_Z は耐力と応答の対数標準偏差の二乗和平方根をとったもので、複合偏差である。 Z が 1.0 以上、すなわち構造物が地震時に安全である確率 p_s は以下のように求められる。

$$p_s = \int_0^{\infty} f_Z(z) dz \quad (B6)$$

一方、安全ではない状態を損傷（あるいは破壊）と定義すると、損傷確率（破壊確率） p_f は安全事象の余事象の確率として以下のように求められる。

$$p_f = \int_0^{1.0} f_Z(z) dz \quad (B7)$$

構造信頼性理論に基づく設計法（信頼性設計法）では、(B7)式から算出される損傷確率が許容できる値以下であることを前提に、構造物の安全性のレベルを確保することになる。

なお、信頼性設計法には、3つのレベルがある（星谷・石井, 1986）。レベル3は上述したような信頼性理論にもとづき損傷確率を算定し、これが許容損傷確率 p_{fa} 以下になるように設計案を決定する方法である。また、レベル2は、平均値と分散から安全性指標 β を求めて、これが許容安全性指標 β_a 以下になるように設計案を決定する方法である。一方、レベル1は p_{fa} , β_a にもとづいて、荷重と強度のそれぞれに対して部分安全係数を求めて決定論的手法で設計を行う方法である。

付録Bの参考文献

- 1) 星谷勝, 石井清（1986）：構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, P.208.

付録C フラジリティカーブの評価

フラジリティカーブは、地震動強さ（最大速度、最大加速度など）に応じて算出した損傷確率を、地震動強さを横軸に一価連続な関数として示した曲線である。

(B7)式より、損傷確率 p_f は以下のようになる。

$$p_f = \int_0^{1.0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_Z z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_Z}{\zeta_Z}\right)^2\right\} dz \quad (C1)$$

ここで、(C1)式の積分変数を以下のように変換する。

$$x = r_m z \quad (C2)$$

ここに、 r_m は作用地震動の中央値である。積分変数の変換により、(C1)式は以下となる。

$$F_X(r_m) = \int_0^{r_m} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_Z x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \ln c_m}{\zeta_Z}\right)^2\right\} dx \quad (C3)$$

上記は以下の関係を用いている。

$$\lambda_Z = \ln z_m = \ln c_m - \ln r_m \quad (C4)$$

ここに、 c_m は耐力の中央値である。(C3)式は作用地震動の中央値 r_m を変数とした非超過確率関数となり、これがフラジリティカーブである。フラジリティカーブから求められる損傷確率はイベントツリーやフォールトツリー、システムモデルに用いられる。ここで、作用地震動の中央値は最大速度や最大加速度といった構造物の耐震性を直接説明できる指標を使う。また、耐力の中央値は、被害レベル（軽微、中破、大破、倒壊など）のクライテリア（層間変位や加速度など）を設定した上で、対象構造物の設計図書などから、そのクライテリアに達する耐力値を作用地震動と同じ指標で評価する。

付録 E P_L 値を指標とした構造物被害のフラジリティカーブの確率モデル

一般的に、液状化安全率 F_L は以下のように定義される。

$$F_L = R/L \quad (E1)$$

ここに、 R は液状化抵抗比、 L はせん断応力比であり、 $F_L < 1$ の場合、液状化の発生が高い。また、液状化指数 P_L 値は F_R を深さ方向に重み付き積分を行うことで得られ、以下のようになる。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) \cdot w(z) dz \quad \text{ただし、} F_L = 1.0, F_L \geq 1.0 \quad (E2)$$

ここに、 $w(z) = 10 - 0.5z$ で、 z は深度である。液状化抵抗比 R 標準は貫入試験より得られた N 値と粒度試験結果から推定する手法や土質試験で実際に土を振動させる方法などがあり、目的・精度に応じて適宜選択されている。一方のせん断応力比 L は作用地震動 a_{max} （地表面最大加速度）の関数 $L = f(a_{max})$ として表される。液状化指数 P_L 値は一般に 5 以上で液状化の発生があり、15 以上になると比較的大きな地盤変状を伴うことが被災事例から確認されている。

2 山モデルを前提に、 P_L 値を用いた液状化被害の発生確率の評価モデルを図 E-1 に示す。

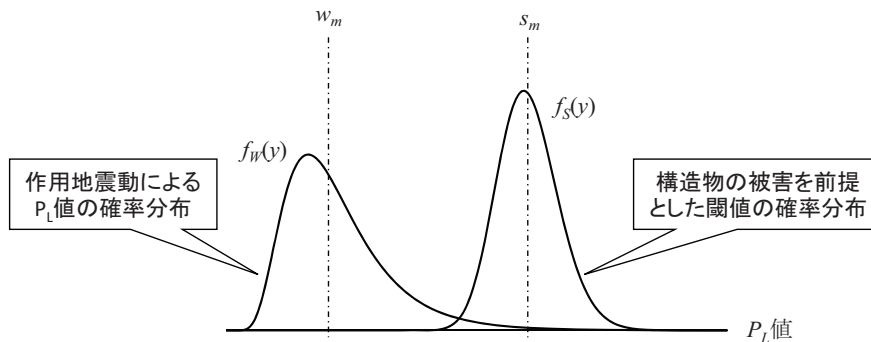


図 E-1 P_L 値を用いた液状化被害の発生確率の評価概念図

図 E-1 を参照し、液状化被害の発生確率 p_l は以下のように表すことができる。

$$p_l = \int_0^{\infty} F_w(y) \cdot f_s(y) dy \quad (E3)$$

ここに、 y は P_L 値の積分変数、 $f_s(y)$ は構造物の被害の発生を前提とした P_L 値の閾値の確率密度関数、 $F_w(y)$ は対象地盤の P_L 値の確率関数で、 $f_w(y)$ の非超過確率関数である。共に対数正規分布を仮定すると、液状化発生確率は対数正規分布の非超過確率関数として以下のように表すことができる。

$$F_X(w_m) = \int_0^{w_m} f_X \left(\ln x | \ln(s_m), \sqrt{\zeta_w^2 + \zeta_s^2} \right) dx \quad (E4)$$

ここに、 w_m は P_L 値の中央値、 s_m は閾値の中央値である。 ζ_w 、 ζ_s はそれぞれの対数標準偏差である。

一方、図 E-2 は地表面最大加速度 x と P_L 値の関係を示した概念図である。(E2)式から知るとおり、 P_L 値は x の関数となるため、図 E-1 の P_L 値の確率分布は、地表面加速度の確率分布から P_L 値の関数を介して変換しなければならない。

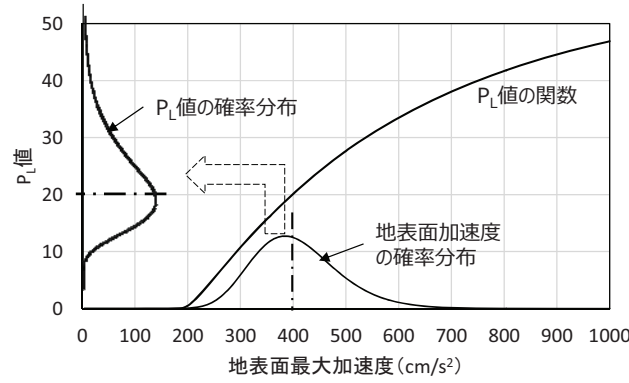


図 E-2 地表面最大加速度と P_L 値の確率分布

ここで、地表面最大加速度 x は、 P_L 値と以下のような関係に近似できると仮定する。

$$y = a \cdot x^b \quad (E5)$$

この近似式は、対数正規分布の確率変数に対し、解析的評価が陽に計算できることから採用した。 a, b は未定係数である。
(E5)式を適用すると、 P_L 値の確率分布は対数正規分布として以下のように記述できる。

$$f_W(y) = f_L(g^{-1}) \left| \frac{dg^{-1}}{dy} \right| = \frac{1}{\sqrt{2\pi} b \zeta_X y} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(y) - \ln(a \cdot x_m^b)}{b \zeta_X} \right)^2 \right] \quad (E6)$$

ここに、 x_m は地表面最大加速度の中央値、 ζ_X は対数標準偏差である。

なお、(E6)式の誘導には以下を用いた。

$$g^{-1}(x) = \left(\frac{y}{a} \right)^{1/b} = \left(\frac{1}{a} \right)^{1/b} \cdot y^{1/b}, \quad \frac{dx}{dy} = \left(\frac{1}{a} \right)^{1/b} \cdot \frac{1}{b} y^{1/b-1} \quad (E7)$$

(E6)式を用いると、(E4)式は最終的に以下ようになる。

$$F_X(x_m) = \int_0^{x_m} f_Z \left(\ln x \mid \ln(s_m / a \cdot x_m^{b-1}), \sqrt{\zeta_W^2 b^2 + \zeta_S^2} \right) dx \quad (E8)$$

(E8)式より、地表面最大加速の中央値 x_m を指標とした、液状化被害の発生フラジリティカーブを求めることができた。同式には、未定係数 a, b が含まれているものの、対数正規分布の非超過確率関数である。また、液状化に伴う構造物の被災の閾値の中央値 s_m と対数標準偏差が必要である。 $\zeta_W b$ については大竹ら（2014）による被災事例の統計情報から 0.69 を用いることができると考えるが、 ζ_S を含め若干の考察が必要である。

なお、(E8)式中の a, b は P_L 値の関数に近似する未定係数として求めなければならない。

付録 J の参考文献

- 1) 大竹雄, 本城勇介, 平松祐一, 吉田郁政, 佐古俊介, 中山修, 長野拓朗: 震災履歴を有する河川堤防 20km における地

盤調査地点を考慮した液状化危険度解析とその有効性検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.9 No.2, pp203-217, 2014.4

付録 F 液状化の発生に関するフラジリティカーブの統計的評価

港湾・空港分野で一般的に用いられている等価 N 値と等価加速度による液状化の判定法を用いて、液状化の発生に関するフラジリティカーブを求める。等価 N 値と等価加速度による液状化の判定方法は、液状化の可能性の大小について定量的な評価はこれまで行われていない。そこでここでは、東北地方太平洋沖地震に基づく検証データにもとづき、プロビットモデルを用いた統計的評価手法と、その手法を用いたフラジリティカーブの評価事例を示す。

(1) 検証データ

フラジリティカーブを評価するために用いるデータは、山崎（2013）が整理した図 F-1 に示す東北地方太平洋沖地震における検証データを用いる。この図 F-1 に示すデータは、液状化 72 地点、非液状化 76 地点の等価加速度と等価 N 値の関係を表すデータである。

なお、図 F-1 中に、液状化地点であるが他の層が液状化した可能性が高い、と記載している 6 地点のデータについては、統計データから除外し、液状化地点 66 地点としてフラジリティカーブの評価を行うこととしている。

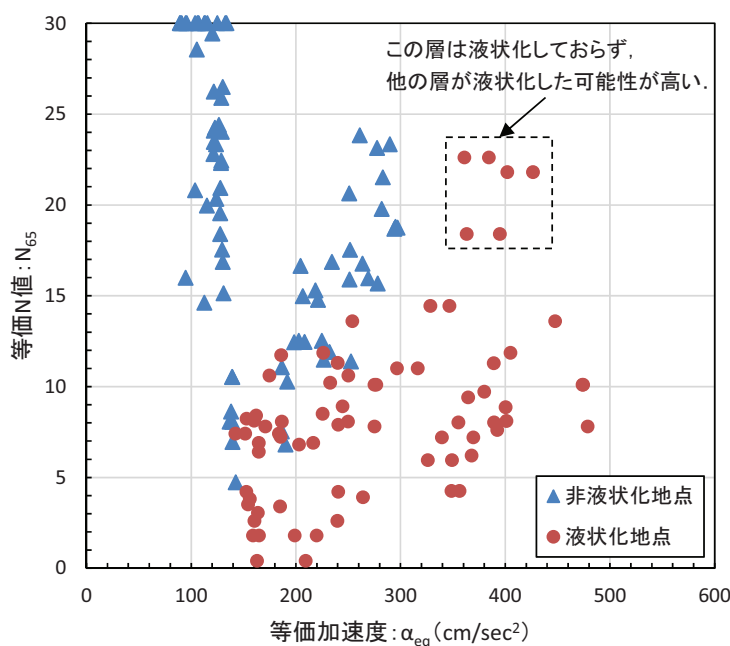


図 F-1 フラジリティカーブの評価に用いた検証データ

また、港湾施設の技術上の基準・同解説（2007）に示されている等価加速度と等価 N 値の算定方法を以下に示す。

（等価加速度）

等価加速度は地盤の地震応答解析より求めた最大せん断応力を用いて次式により算定する。

$$\alpha_{eq} = 0.7 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} \cdot g \quad (F1)$$

α_{eq} : 等価加速度 (cm/sec²)
 τ_{max} : 最大せん断応力 (kN/m²)
 σ'_v : 有効上載圧力 (kN/m²)
 g : 重力加速度 (980cm/sec²)

(等価 N 値)

等価 N 値は以下の式を用いて算定する²⁾。

$$(N)_{65} = \frac{N - 0.019(\sigma'_v - 65)}{0.0041(\sigma'_v - 65) + 1.0} \quad (F2)$$

$(N)_{65}$: 等価 N 値

N : 土層の N 値

σ'_v : 土層の有効上載圧力 (kN/m²)

(2) プロビットモデルによるフラジリティカーブの統計的評価

液状化確率を求めるため、以下のような非線形回帰式を仮定する。ここに、 Y_i^* は予測値で正の連続的な変数、 i は観測データ、 $\beta_0 \sim \beta_2$, γ_1 , γ_2 は未定係数である。また、観測される Y_i は、液状化した場合は 1、液状化しない場合は 0 の 2 値となる。

$$Y_i^* = e^{\beta_0} \cdot (\gamma_1 + x_{1i})^{\beta_1} \cdot (\gamma_2 + x_{2i})^{\beta_2} \cdot \varepsilon_i \quad (F3)$$

上式の両辺の対数を取り線形化する。

$$\ln Y_i^* = \beta_0 + \beta_1 \ln(\gamma_1 + x_1) + \beta_2 \ln(\gamma_2 + x_2) + \ln \varepsilon_i \quad (F4)$$

ここで、 $\ln \varepsilon_i$ は正規分布であるため、 $\ln \varepsilon_i$ の累積分布関数を想定すると、液状化確率 ($Y_i=1$ ($\ln Y_i^* \geq 0$)) となる確率は以下のように表される。

$$P(Y=1; X_{1i}, X_{2i}) = \Phi[\beta_0 + \beta_1 \ln(\gamma_1 + x_1) + \beta_2 \ln(\gamma_2 + x_2)] \quad (F5)$$

ここに、 $\Phi()$ は標準正規確率変数の累積分布関数で、 $()$ 内が与えられれば、液状化確率が求められる。

なお、未定係数 $\beta_0 \sim \beta_2$, γ_1 , γ_2 は最尤法によって求めることができる。

フラジリティカーブは、説明変数を X_1 (等価加速度) とし、 x_2 (等価 N 値) が与えられた場合の条件付き確率として求められる。フラジリティカーブのパラメータ λ_1 (対数の平均値)、 ζ_1 (対数標準偏差) は、

$$\Phi\left(\frac{\ln(\gamma_1 + x_1) - \lambda_1}{\zeta_1}\right) = \Phi[\beta_0 + \beta_1 \ln(\gamma_1 + x_1) + \beta_2 \ln(\gamma_2 + x_2)] \quad (F6)$$

の関係から、次式により求められる。

$$\beta_1 = 1/\zeta_1, \quad \beta_0 + \beta_2 \ln(\gamma_2 + x_2) = -\lambda_1/\zeta_1 \quad (F7)$$

(F7)式によって算出された λ_1 , ζ_1 にもとづく非超過確率関数がフラジリティカーブとなる。

(3) フラジリティカーブの評価事例

前述の(2)に示した方法により、図 F-1 に示した統計データを用いて、液状化の発生に関してフラジリティカーブを評価した。最尤法により推定した未定係数と、これにもとづき算出されたフラジリティカーブのパラメータを表 F-1 に示し、

評価されたフラジリティカーブを図 F-2 に示す。

表 F-1 最尤法により推定された未定係数およびフラジリティカーブのパラメータ

(a) 最尤法により推定された未定係数

未定係数	推定値
β_0	196.9
β_1	5.5
β_2	-48.7
γ_1	32.3
γ_2	95.5

(b) フラジリティカーブのパラメータ

パラメータ	等価 N 値					
	2.5	7.5	12.5	17.5	22.5	27.5
中央値 (cm/sec ²) *	118	182	277	413	606	874
対数標準偏差	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18

* λ は(γ_1+X_1)の中央値であり，中央値= $\exp(\lambda_1)$ で算出される。

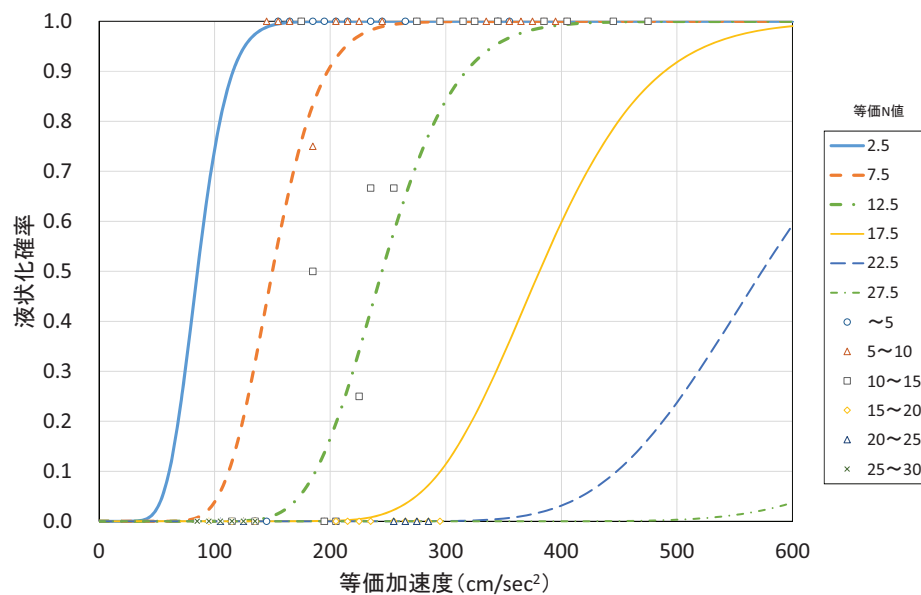


図 F-2 統計的に評価した液状化の発生に関するフラジリティカーブ

付録 F の参考文献

- 1) 山崎浩之 (2013)：東日本大震災に関連した港湾分野の研究活動 東日本大震災での液状化被害について，「港湾」2013.3 特集・東日本大震災から 1 年を振り返って，日本港湾協会, pp.28-29.
- 2) 日本港湾協会 (2007)：港湾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.

付録 G 東日本大震災時における仙台空港の復旧過程

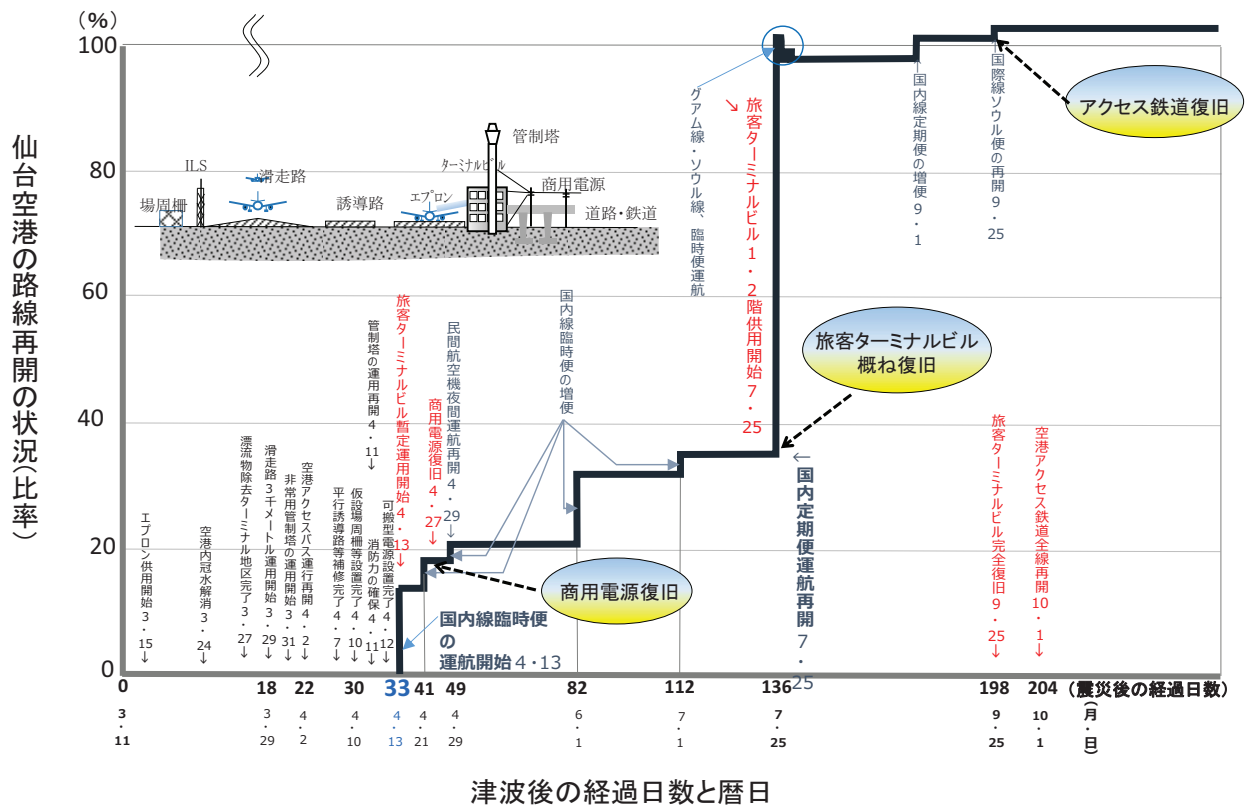
仙台空港では、発災直後から旅客、空港内従事者、近隣住民の避難場所とされた。3月13日夕方に津波注意報が解除され、翌14日から復旧作業が開始された。

3月15日に滑走路500mが使用可能となり、応急復旧後の1号機となる自衛隊の回転翼機2機が着陸した（15日の運用機数は当該2機のみ）。

3月16日には滑走路1,500mが使用可能となり、米軍の輸送機（C-130）2機が着陸（16日の運用機数は当該2機のみ）、18日より米軍による緊急物資輸送が本格化し、4月3日までの間に87機が利用した。

3月29日には滑走路3,000mが運用開始され、滑走路等舗装面の応急復旧、仮設の場周柵の設置、管制・通信、航空灯火及び航空無線施設の復旧、暫定旅客ターミナルビルの復旧を経て、発災後約1ヶ月となる4月13日に民間航空機（臨時便）の運航が再開された。

4月27日には商用電源が復旧し、4月29日には民間航空機の夜間運航が再開した。この時点での運航便数は、震災前と比較して概ね3割程度であった。その後、旅客ターミナルビルの概ね復旧を経て、発災後約3.5ヶ月となる7月25日に国内定期便が再開され、運航便数は震災前と同等程度に回復した。



※ 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デیلیー運航でないため、日便数に換算した値を用いた）

図 G-1 東日本大震災時における仙台空港の復旧過程（復旧曲線）

付録 H 損傷相関と相関係数

損傷相関は、構造物 A が損傷することで構造物 B も損傷する，といった物理的従属関係ではなく，構造物 A と構造物 B の損傷に関わる確率変数の統計的相関を意味する．

建物 1 と 2 の耐力の確率変数を C_1, C_2 と置き，互いに独立とする．作用地震動，あるいは各構造物の応答を R_1, R_2 と置き，一定の相関があると仮定する（図 H-1 参照）．

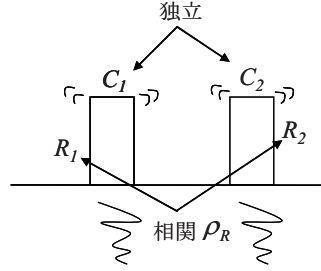


図 H-1 作用地震動，あるいは応答に一定の相関がある場合

性能を記述する関数として以下を定義する．

$$F_i = \frac{C_i}{R_i}, i = 1 \sim 2 \quad (\text{H1})$$

両辺の $\ln$ と取ると，

$$\ln(F_i) = \ln(C_i) - \ln(R_i), i = 1 \sim 2 \quad (\text{H2})$$

となり， F_i の共分散は $\ln$ を省き，以下のようになる．

$$\text{cov}(F_1, F_2) = E(R_1 R_2) - E(R_1)E(R_2) \quad (\text{H3})$$

(H3)式は， R_1 と R_2 の共分散であることが分かる．したがって，

$$\text{cov}(F_1, F_2) = \text{cov}(R_1 R_2) \quad (\text{H4})$$

となる．これより，被害の相関係数は， $\ln$ を復帰し以下のようになる．

$$\rho_F = \frac{\text{cov}(\ln R_1, \ln R_2)}{\sqrt{\text{var}(\ln(F_1))} \sqrt{\text{var}(\ln(F_2))}} \quad (\text{H5})$$

R_1 と R_2 の密度関数を対数正規分布として以下のように定義する．

$$f_{R1}(\ln r; \lambda_{R1}, \varsigma_{R1}), f_{R2}(\ln r; \lambda_{R2}, \varsigma_{R2}) \quad (\text{H6})$$

ここで，応答 R_1, R_2 の相関係数を ρ_R と置くと(H4)式の分子は，

$$\text{cov}(\ln R_1, \ln R_2) = \rho_R \cdot \varsigma_{R1} \varsigma_{R2} \quad (\text{H7})$$

となる。これを(H5)式に代入すると、

$$\rho_F = \frac{\rho_R \cdot \varsigma_{R1} \varsigma_{R2}}{\sqrt{\varsigma_{C1}^2 + \varsigma_{R1}^2} \sqrt{\varsigma_{C2}^2 + \varsigma_{R2}^2}} \quad (\text{H8})$$

となる。また、(H8)式は複合偏差を用い以下のようにも書ける。

$$\rho_F = \frac{\rho_R \cdot \varsigma_{R1} \varsigma_{R2}}{\varsigma_{F1} \varsigma_{F2}} \quad (\text{H9})$$

付録Ⅰ 積分法による損傷相関の評価

相関のある n 個の正規確率変数 $Z_i, i=1\sim n$ を想定し, $-\infty < Z_i \leq h_i, \text{ all } i$ の積事象確率 $p(E_1 E_2 \cdots E_n)$ を求める. この場合, 高次の同時確率密度関数 $f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ の重なり合う部分の積分によって求められることは周知である.

$$p(E_1 E_2 \cdots E_n) = \int_{-\infty}^{h_1} \cdots \int_{-\infty}^{h_n} f(x_1, \cdots, x_n) dx_1 \cdots dx_n \quad (11)$$

ここに, $h_i = \Phi^{-1}\{p(E_i)\}$, Φ は標準正規分布の累積分布関数である. そして, $Z_i, i=1\sim n$ を正規確率変数と仮定し, 独立の標準正規確率変数 $X_i, i=1\sim n$ と標準正規確率変数 Y の関数として, 以下のように表す.

$$Z_i = \sqrt{1-\theta_i^2} \cdot X_i - \theta_i Y, i=1\sim n \quad (12)$$

ここに, X_i と Y は独立であり, θ は助変数である. (12) を確率変数の関数として求めた上で, $Z_i, i=1\sim n$ の多次元同時確率分布を求めると, 積事象確率は以下のように 1 回の積分式に誘導できる(e.g., Curnow, R. N. et al. 1962, Gupta S. 1963)

$$p(E_1 E_2 \cdots E_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{h_i + \theta_i y}{\sqrt{1-\theta_i^2}}\right) \phi(y) dy \quad (13)$$

ここに, ϕ は標準正規分布の確率密度関数である. θ_i は確率変数 $Z_i, i=1\sim n$ の相関係数 ρ_{ij} と以下のような関係にある.

$$\rho_{ij} = \theta_i \theta_j, i \neq j \quad (14)$$

なお, $0 < \theta_i \leq 1$ である.

次に, 図 I-1 に示すように, n 個の構造物があり, それぞれの耐力の確率変数を $C_i, i=1\sim n$, 作用地震動の確率変数を $S_i, i=1\sim n$ と置く.

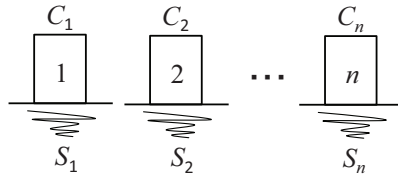


図 I-1 作用地震動と構造物の耐力

各確率変数は対数正規分布に従うものとし, それぞれ以下のように定義する.

$$\begin{aligned} f_{C_i}(\ln c | \lambda_{C_i}, \zeta_{C_i}), i=1\sim n \\ f_{S_i}(\ln r | \lambda_{S_i}, \zeta_{S_i}), i=1\sim n \end{aligned} \quad (15)$$

ここに, λ と ζ は, それぞれ対数の平均値, 対数標準偏差である. 構造物の損傷状態を以下のように定義する.

$$\frac{C_i}{S_i} = F_i \leq 1.0 ; i=1\sim n \quad (16)$$

ここに、 C_i 、 $i=1\sim n$ は互いに独立、 S_i 、 $i=1\sim n$ は完全相関と仮定する。 F_i と F_j の共分散を取り、構造物間の損傷の相関係数を求める。

$$\rho_{ij} = \frac{\zeta_{Si}\zeta_{Sj}}{\zeta_{Fi}\zeta_{Fj}}, i \neq j \quad (17)$$

ここに、 ζ_{Fi} は複合偏差と呼び、以下の関係にある。

$$\zeta_{Ci}^2 + \zeta_{Si}^2 = \zeta_{Fi}^2 \quad (18)$$

ここで、 $\zeta_{Fi} = \zeta_F$ 、 $i=1\sim n$ とし、(17)式を変形する。

$$\rho_{ij} = \frac{\zeta_{Si}\zeta_{Sj}}{\zeta_F^2}, i \neq j \quad (19)$$

(14)と(19)式から以下の関係を得る。

$$\theta_i = \frac{\zeta_{Si}}{\zeta_F}, i=1\sim n \quad (110)$$

また、(16)式より以下を得る。

$$\lambda_{Fi} = \lambda_{Ci} - \lambda_{Si}, i=1\sim n \quad (111)$$

次に、確率変数 F_i 、 $i=1\sim n$ は多次元の同時確率分布（対数正規分布）と捉え、(13)式への適用を考える。このとき、積分範囲は $0 < F_i \leq 1.0$ であり、 $\ln(1.0)=0.0$ に注意すると、

$$h_i = \frac{-\lambda_{Fi}}{\zeta_F}, i=1\sim n \quad (112)$$

となる。(111)式を適用すると、

$$h_i = \frac{-(\lambda_{Ci} - \lambda_{Si})}{\zeta_F}, i=1\sim n \quad (113)$$

となる。(113)式と(110)式を(F3)式に適用すると、

$$p(E_1 E_2 \cdots E_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[\Phi \left(\frac{\zeta_{Si} y + \lambda_{Si} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}} \right) \right] \phi(y) dy \quad (114)$$

となり、相関を考慮した損傷の積事象確率を求める式が誘導できた。様々な組合せ事象の確率も同様に評価できる。(114)式は標準正規累積確率関数の変数に、耐力ならびに作用地震動等の物理量が直接取り込まれていることから、分かりやすく簡便である。

ここで、 n 個の構造物間の損傷の相関係数を同値とする。これを ρ_F と置き、複合偏差 ζ_F と共に所与とする。(19)式は以下のように変形できる。

$$\zeta_S^2 = \rho_F \zeta_F^2 \quad (I15)$$

ζ_S が求められ、さらに(I15)式を使うことで、

$$\zeta_C^2 = \zeta_F^2 - \zeta_S^2 \quad (I16)$$

ζ_C が求められる。 ζ_S と ζ_C 、ならびに λ_S と λ_C を(I14)式に適用することで、損傷相関 ρ_F の下での組合せ事象の確率を得る。

付録 I の参考文献

- 1) Curnow, R. N. and Dunnett, C. W. (1962): The numerical evaluation of certain multivariate normal integrals. *Annals of Math. Stat.*, Vol.33, No.2, Sep., pp.571-579.

付録 J 実空港の信頼性評価における構成要素の諸元

本文の図-16 に示したシステムモデルの構成要素，構成要素の一次固有周期，被害要因，被害レベル，基盤最大加速度（PBA）に換算した耐力中央値，被害レベルに応じた復旧期間を表 J-1 にまとめて示す．表の耐力中央値は，応答加速度での耐力中央値を求め，これを地盤の増幅，周期倍率を踏まえて基盤最大加速度に換算したものである．表中の点検は，90cm/sec²以上の地震動を観測した場合，レベル 1 地震動の場合は 2 時間，レベル 2 地震動の場合は 1 日をかけて安全確認を行うことを示している．またガンセットは，被害はないものとした．

表 J-1 システムモデルの構成要素の被害要因，被害レベル，基盤最大加速度（PBA）に換算した耐力中央値，被害レベルに応じた復旧期間

システム 構成要素	一次固有周期 (sec)	被害要因	被害レベル ・ 状態	耐力中央値：PBA(cm/sec ²)				復旧期間
				レベル1地震動		レベル2地震動		
				マルチイベントモデル	港湾の施設の技術上の 基準・同解説	告示スペクトル	ポートアイランド波	
アクセス 連絡橋	1.5	連絡橋被害	破損	2410	780	1650	5500	60日
	-	液状化被害	小規模 液状化	470	470	470	800	30日
	0.4	新交通 橋脚被害	破損	1150	1140	1200	2410	60日
アクセス船舶	-	栈橋被害	破損	1500	1500	1500	1500	60日
場周柵	-	液状化被害	小規模 液状化	470	470	470	800	5日
		場周柵被害	倒壊	510	510	510	860	5日
場面管理 (場面管理棟)	0.35	建屋被害	中破	550	540	590	870	15日
			大破	810	790	860	1270	30日
		-	管理設備 被害	破損	510	510	510	860
電源局舎	0.35	建屋被害	中破	550	540	590	870	15日
			大破	810	790	860	1270	30日
	-	管理設備 被害	破損	510	510	510	860	7日
消防 (消防車庫)	0.35	建屋被害	大破	1220	1190	1300	1910	30日
管制塔	0.76	建屋被害	中破	900	700	760	1740	15日
			大破	1210	930	1020	2330	60日
	-	管制設備 被害	破損	830	630	700	1760	35日
ガンセット	-	-	-	-	-	-	-	-
滑走路 誘導路 エプロン	-	液状化被害	液状化	確率 5.3×10^{-22} で 液状化が発生	確率 5.3×10^{-22} で 液状化が発生	確率 5.3×10^{-22} で 液状化が発生	確率 1.0×10^{-1} で 液状化が発生	7日
修復要員 資機材搬入	-	空港外被害	遅延	確率0.1で遅延	確率0.1で遅延	確率0.1で遅延	確率0.1で遅延	12時間
旅客 ターミナル	0.89	建屋被害	中破	710	350	560	1380	15日
			大破	1010	490	790	1960	60日
	0.96	天井被害	落下	560	270	460	1050	7日
-	上中水システム 被害	破損	1110	580	860	1920	7日	
買電	-	送電停止	停止	350	350	350	350	12時間
			長期停止	600	600	600	600	3日
自家発 (ターミナルビル)	0.35	エネルギー棟 建屋被害	中破	550	540	590	870	15日
			大破	810	790	860	1270	30日
	-	燃料タンク 被害	破損	760	760	760	1290	7日
自家発 (電源局舎)	-	燃料タンク 被害	破損	760	760	760	1290	7日
		冷却設備 被害	破損	510	510	510	860	7日
		受水槽被害	破損	760	760	760	1290	7日
自家発 (管制塔)	-	燃料タンク 被害	破損	760	760	760	1290	7日
		冷却設備 被害	破損	510	510	510	860	7日
点検	-	-	点検あり	90cm/s ² で点検	90cm/s ² で点検	90cm/s ² で点検	90cm/s ² で点検	レベル1地震動：2時間 レベル2地震動：1日

付録 K 極値分布としての地震ハザード曲線

地震イベントによるサイトの基盤最大加速度 PBA は、震源断層の破壊過程や地震波の伝播特性等によるばらつきを伴う。複数の地震イベントの PBA の最大値が選ばれることを想起する。地震イベント i によるサイトの PBA を確率変数 X_i と置き、 n 個の地震イベントを対象とする。最大値の確率分布 X_N は以下のように表すことができる。

$$X_N = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (K1)$$

そして、極値の確率演算の教えるところにより以下のように表現でき、

$$F_{XN}(x) = P\{X_1 \leq x, X_2 \leq x, \dots, X_n \leq x\} \quad (K2)$$

$X_i, i=1 \sim n$ は互いに独立と仮定すると以下ようになる。

$$F_{XN}(x) = F_{X1}(x) \cdot F_{X2}(x) \cdots F_{Xn}(x) = \prod_{i=1}^n F_{Xi}(x) \quad (K3)$$

上式は非超過確率関数であることから、これを超過確率関数に置き換えると以下となる。

$$G_{XN}(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - G_{Xi}(x)) \quad (K4)$$

(K4)式は、各地震イベントの PBA の最大値の分布、つまり極値の分布を求める式である。

一方、地震イベント i の年発生頻度を v_i と置き、ポアソン過程を仮定すると、地震イベント i が 1 年間に発生する確率 (1 回以上) は指数分布で表される。

$$p_i = 1 - \exp(-v_i) \quad (K5)$$

複数の地震イベントを想定した場合、これらを合せた年発生確率 P_N はそれぞれのイベントの年発生頻度を和すことで求められ、以下ようになる。

$$P_N = 1 - \exp(-(v_1 + v_2 + \dots + v_n)) \quad (K6)$$

ここに、 n は地震イベントの数である。(K6)式は以下のように展開できる。

$$\begin{aligned} P_N &= 1 - \exp(-v_1) \exp(-v_2) \cdots \exp(-v_n) \\ &= 1 - [1 - (1 - \exp(-v_1))] [1 - (1 - \exp(-v_2))] \cdots [1 - (1 - \exp(-v_n))] \\ &= 1 - (1 - p_1)(1 - p_2) \cdots (1 - p_n) \end{aligned} \quad (K7)$$

ここに、 $p_i, i=1 \sim n$ は(K5)式で表される。以上より、複数震源それぞれの年発生頻度の和は、それぞれの発生確率の和事象確率として求められる。ここで、 $v_i, i=1 \sim n$ を地震動 x の年超過頻度 $v_i(x), i=1 \sim n$ と置くと、(K7)式の $p_i, i=1 \sim n$ も地震動 x の超過確率となり、以下ようになる。

$$G_{XN}(x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - G_{Xi}(x)) \quad (K8)$$

ここに、 $G_{XN}(x)$ は複数の地震イベントによるサイト地震動の超過確率関数、同じく $G_{Xi}(x)$, $i=1\sim n$ はそれぞれの地震イベントによるサイト地震動の超過確率関数である。(K8)式と(K4)式は同じである。複数の地震による地震動の年超過頻度 $v_i(x)$, $i=1\sim n$ の算術和は、地震動の極値の分布を与える。

付録 L 空港全体の総合的な耐震性能に関する補足

空港全体は、固有周期（周波数特性）その他の応答特性が異なる構造物の集合体である。一つの地震動の作用により集合した構造物群が同時被災するとともに、それらの被災程度に濃淡が生じる。このことを踏まえ、空港全体の総合的な耐震性能の評価を検討する必要がある。また、レベル2クラスの一つの地震により、広域に散在する複数空港・鉄道網も同時被災し、それら被害程度に濃淡が生じることに留意が必要である。

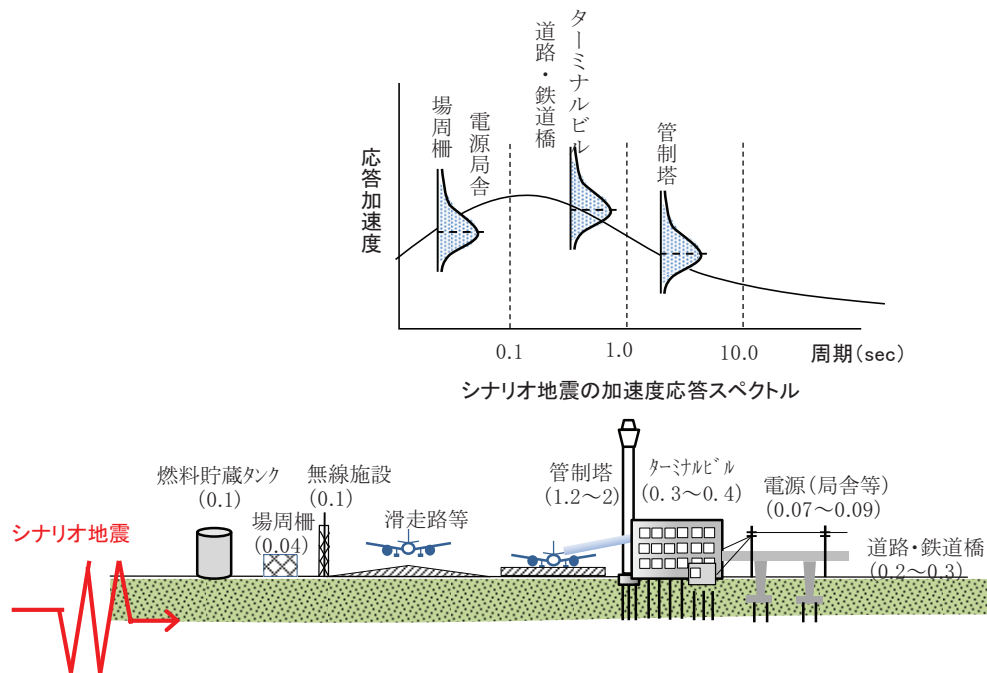


図 L-1 応答特性が異なる構造物群から構成される空港全体のイメージ

付録 M 信頼性設計に適した地震動モデルに関する補足

空港は、固有周期（周波数特性）その他の応答特性が異なる構造物の集合体であり、これらの耐震性能の照査には固有周期別応答加速度が必要である。

空港の確定的設計に多用されてきた地震動モデルでは、図 M-1 上に示すとおり、地震動の不確実性（確率分布）を内在した地震ハザード曲線から、周波数別フーリエハザード曲線、一様ハザードフーリエスペクトルを経て、加速度時刻歴波形を求めてきた。固有周期別応答加速度は加速度時刻歴波形から求めることとなるが、不確実性は内在したままの単一値が得られるが、不確実性を表す確率分布は得られない。

マルチイベントモデルを用いると、図 M-1 下に示すとおり、地震動の不確実性を内在させないことにより、周期別イベントハザード曲線、一様ハザード加速度応答スペクトルを経て、固有周期別応答加速度の確率分布を求めることができる。また、時刻歴波形が必要な場合、固有周期別応答加速度の確率分布から生起確率を付与した時刻歴波形群を求めることができる。

このように不確実性を内在させないことにより、震源特性由来、伝播特性由来、サイト特性由来の各不確実性と応答加速度とのひも付けについて、より平易に議論ができる組上を得る。

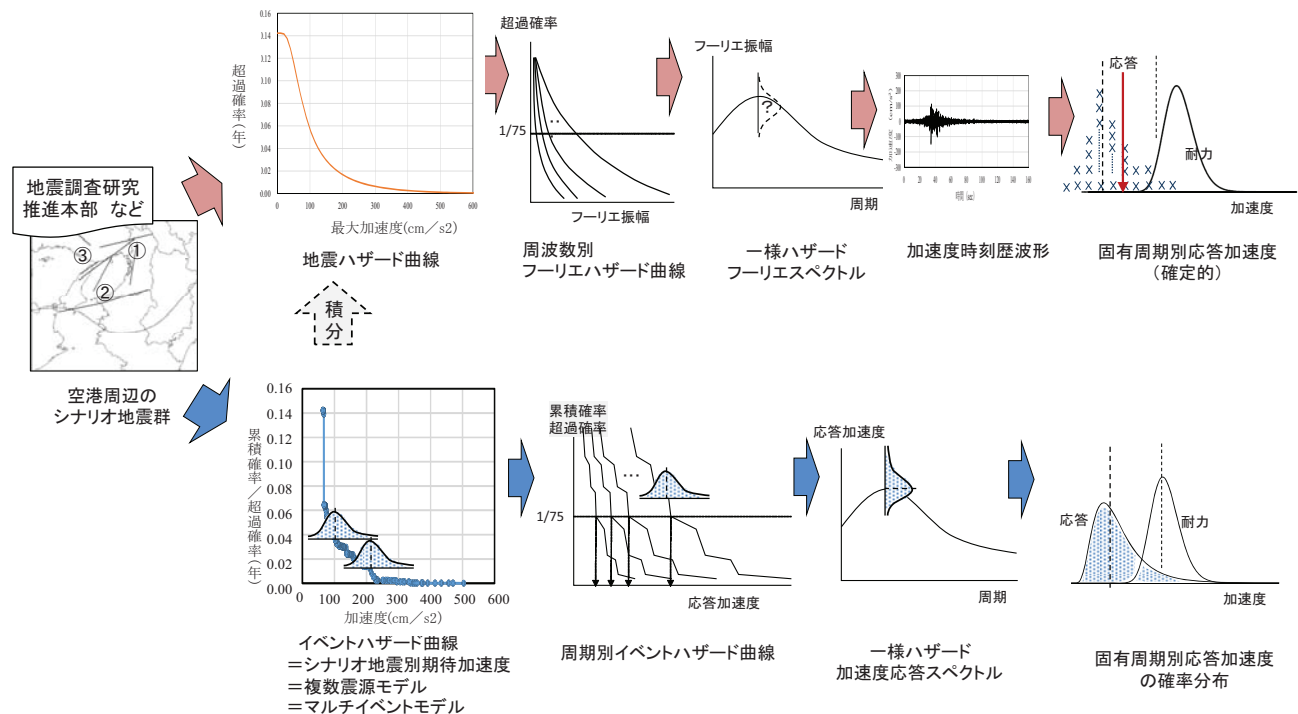


図 M-1 地震動モデルによる固有周期別応答加速度の不確実性の表現

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 962

March 2017

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-kikaku@ml.mlit.go.jp