ISSN 1346-7328
国総研資料 第８６３号
平 成 27 年 9 月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.863 September 2015

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試案

中島 由貴・小野 正博・中村 孝明・望月 智也

Seismic Risk Management Tentative Guidelines on Airport Safety Assessment

Yoshitaka NAKASHIMA, Masahiro ONO, 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

国土技術政策総合研究所資料
No.863　2015年9月
（NSK-N-319）

空港総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

中島 由貴*，小野 正博，中村 孝明***，望月 智也****

要　旨

空港は，様々な施設や構造物で構成された巨大システムとして機能し，背後圏の経済活動を支えると共に，地震発生時には救急/救命，緊急物資/人員輸送等の拠点機能を期待されている．一方で，地震に対する空港機能の安全目標が示されているものの，これを確認/照査する方法は未整備であり，また空港機能を維持するために必要とされる個別施設や構造物の耐震性能の目標値を把握する方法も未整備である．そこで，定量化された地震リスク情報を用いたリスクマネジメント手法が有効であるとの観点から，本報では，空港施設の現行の設計法，性能設計や信頼性設計の動向，リスク情報に基づく目標性能の評価など，構造物の安全性確保全般について調査した．また我国における地震リスク情報の利用実態について整理し，リスク指標を用いた要求性能の照査，ならびに個別施設の耐震性能の評価について，その大略を示した．そして，リスク評価の精度や方法の統一化の必要性を論じた上で，空港施設を対象とした地震リスクマネジメントのガイドラインを試案として作成した．

キーワード：設計体系，要求性能，性能設計，信頼性設計，地震リスク評価，地震リスクマネジメント，ガイドライン

＊空港研究部　空港新技術研究官
＊＊空港研究部　空港計画研究室長
＊＊＊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：046-844-5031　Fax：046-844-5080　E-mail: nakashima-y2im@mlit.go.jp

Technical Note of NILIM
No.863　September 2015
（NSK-N-319）

Seismic Risk Management Tentative Guidelines on Airport Safety Assessment

Yoshitaka NAKASHIMA*
Masahiro ONO**
Takaaki NAKAMURA***
Tomoya MOCHIZUKI****

Synopsis

Airports are giant systems consisting of various facilities and structures that sustain the land-based economic activities. In the event of an earthquake, airports are expected to have base functions for paramedics and emergency transportation for supplies and the workforce. Despite earthquake-response measures are indicated, means to verify it is undeveloped and means to comprehend the seismic resistance capacity of the airport's individual facilities and structures are also undeveloped. In this study, quantified earthquake risk information are used to effectively investigate the overall safety of the airport's structures, from the perspective of risk management. The present design of the airport facilities, the performance-based design, the system's reliability design, and the risk management's target performance evaluation are examined. In addition, the national earthquake risk data is fully utilized, to develop an outline of a risk model and to evaluate the earthquake performance of individual facilities. Finally, we introduce an idea of unifying the risk evaluation measures, and we provide guidelines for earthquake risk management aimed at airport facilities.

Key Words：design system, target performance, performance based design, reliability system design, seismic risk assessment, seismic risk management, guideline

---

＊Research Coordinator for advanced Airport Technology, Airport Department
＊＊Head of Airpot Planning Division, Airport Department
＊＊＊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: 046-844-5032　Fax: 046-844-5080　E-mail: nakashima-y2im@mlit.go.jp

目　　次

1. はじめに 1
2. 空港総体としての安全性評価の問題 2
　2.1 耐震設計基準等に関する問題点 2
　2.2 設計外力に関する問題点 2
　2.3 安全余裕に関する問題点 4
　2.4 ユーロコード，ISO2394による統一規格 4
3. 信頼性設計と地震リスク評価 5
　3.1 性能設計と信頼性設計 5
　3.2 コードキャリブレーションによる目標破壊確率 6
　3.3 リスクを用いた目標破壊確率 7
4. 我が国の地震リスク評価，リスクマネジメントの現況 8
　4.1 建築資産の地震リスク診断 8
　4.2 地震保険と地震リスク評価 8
　4.3 産業施設の地震リスクマネジメント 9
5. 運営形態や施設の管理主体等の多様性の問題と情報共有 9
　5.1 異なる管理主体等に求められる情報共有 9
　5.2 異なる管理主体等への説明責任 10
6. 地震リスクを用いた空港機能の要求性能と個別施設の耐震性能 10
　6.1 空港機能の要求性能の照査 10
　6.2 システムの安全性と個別施設の耐震性能 11
　6.3 ハード対策から金融対策までの一貫した評価 12
7. 地震リスク情報の発展的利用性 12
　7.1 緊急時対応拠点としての空港間連携 12
　7.2 航空ネットワーク障害への応用 12
　7.3 社会基盤への応用と国際展開 12
8. 地震リスクマネジメントに関するガイドライン 13
　8.1 地震リスクマネジメントの概要と必要性 13
　8.2 地震リスクマネジメントのガイドラインの試案 13
9. まとめ 14
謝辞 14
参考文献 15
付録 17
　付録A 空港の地震リスクマネジメントガイドライン（試案） 17
　付録B 技術資料 56

1. はじめに

空港は様々な種類の施設（それを構成する構造物を含む.）及び設備の集合体である（以下,「空港総体」という.）が，これら構造物は種類別に規定された設計（技術）基準に従い設計（整備）がなされてきた. そのため空港総体の安全性に関する要求性能（「復旧期限」を含む. 以下同じ.）という考え方は当初なかった.しかし，近年多発した大地震の影響を背景に，平成 19 年 4 月に「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）(2007，国土交通省航空局)」(以下,「地震に強いあり方」という.）が示され，その中で近年の大地震時における空港活用実績等を踏まえ，緊急輸送の拠点となる空港では，発災後極めて早期の段階において，救急・救命活動等の拠点機能が求められた. また，発災後 3 日以内には，緊急物資・人員等輸送受け入れ機能が求められるとしている. 特に航空上重要な空港にはこれらの機能に加え，発災後 3 日を目途に定期民間輸送機の運航が可能となる機能が求められ，地震災害による経済被害の半減を目指し，再開後の運航規模は，極力早期の段階で通常時の 50%に相当する輸送能力を確保することが示されている. これら復旧期限と目標性能から成る要求事項は，空港の役割や機能面から捉えた空港総体の要求性能に他ならない. しかしながら，**図-1** に示すように、その要求性能の照査は困難である. なお，空港総体の要求性能は，既往の設計基準に従い空港群及び空港間の航空ネットワークが概成したため創出されたことに留意する必要がある.

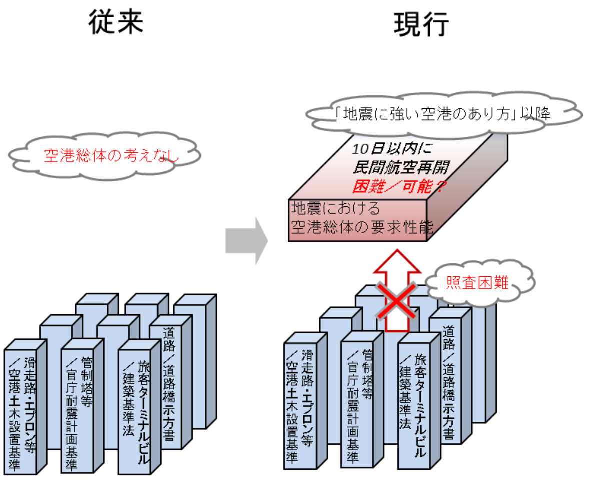


図-1　照査・確認方法の不明

空港総体は，構成する施設及び設備の群が組織的に連関し，大規模システムとして機能している. ところが，施設及び設備（以下,「施設等」という.）の安全確保は，これら施設等別に造られた設計基準・指針により，個々の施設等に対して規定されるもので，空港総体そのものの機能性，安全性を照査することはできない.

また，各種設計基準や指針等の安全確保の方法や要求性能は統一されていないため，基準や指針の異なる施設等の耐震性能を比較することが難しく，弱点となる施設や設備の特定，対策の優先順位等を把握することができない. 空港のみならず，大規模システムとして機能している社会基盤や生産施設に共通した課題である.

一方，我が国の空港は，拠点空港（会社管理空港，国管理空港，特定地方管理空港），地方管理空港，共用管理空港等運用形態は多様である. さらに，公共施設の運営権を民間事業者に譲渡するコンセッション方式も導入されつつある. また，空港機能を担う各施設は，国管理空港であっても実態は自治体や民間企業の管理施設が混在している状況にある. このように空港の運営形態や施設の管理主体は多様であるため，防災/減災対策の事業化においては，効果の確認や費用対効果が高いなど，科学的根拠を前提とした一定の合理性と共に，関係者間での情報の共有化が求められている. 大規模システムとしての空港機能の安全性評価，ならびに対策の事業化における合理性などへの要求に対し，地震リスクの定量化技術を基本とした地震リスクマネジメントが有効であることを，これまでの研究「国土技術政策総合研究所資料 No.718(2013). No.756(2013)，No.783(2014)，No830(2015)，同報告 No.55(2015)」において整理し，立証した. しかしながら，社会インフラを対象とした地震リスク評価ならびに地震リスクマネジメント手法は，必ずしも一般化しているわけではない. そこで，リスク評価の精度や方法の統一化，さらには地震リスクマネジメントの必要性や有用性などへの共通の理解を深めるためにも，空港施設を対象とした地震リスクマネジメントのガイドラインの整備が必要である. また，空港関係者間でのリスク情報の共有化，各空港のリスク情報を統合した航空ネットワークの健全性評価なども，今後の課題として視野に入れる必要がある.

本稿では，①設計基準・指針の不統一の問題に言及し，②性能設計と信頼性設計の動向，対策・復旧に関する意思決定問題へのリスク情報の利用について整理する. ③我が国における地震リスク評価及びリスクマネジメントの利用実態，④空港の運営形態や施設の管理主体の多様性について掘り下げると共に，⑤地震リスク情報による空港総体の安全性の評価/照査について提示する. そして⑥地震リスク情報の今後の利活用について整理し，⑦

空港施設を対象とした地震リスク評価及び地震リスクマネジメントの標準化を目標に，ガイドラインの試案を取り纏める．

2. 空港総体としての安全性評価の問題

2.1 耐震設計基準等に関する問題点

一般に構造物は，地震等の外乱あるいは劣化に対して十分な安全性や機能性を持つことが必要とされ，その最低基準が設計基準や指針等によって定められている．空港の各種の施設等の設計基準や指針等は，建築物や空港土木施設，港湾施設等，それぞれ出所が異なる．例えば，建築構造物の場合，管制塔等については，「官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説(1996)」と「官庁施設の総合耐震診断基準・改修基準及び同解説(1996)」に従い設計され，旅客ターミナルや電源局舎，消防局舎及びその他の貨物ビル等の民間所有ビルは建築基準法に基づき設計されている．一方，土木構造物は，「空港土木施設耐震設計要領及び設計例(2008)」等に従い，護岸や桟橋等の港湾構造物については，「港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)」に従い設計されている．

空港を構成する主要な施設等とそれらの耐震設計基準等を**図-2** に示す．また**表-1** には，空港を構成する施設別に該当する基準や法規さらには管理者を分類したものを示す．このように空港を構成する施設等は多種多様な設計基準に基づき設計されており，管理者も施設等によって様々である．設計指針や基準は，構造物の種類の数だけあると言われており，想像以上に細分化されている．この背景には，施設やそれを構成する構造物が多様化し，また巨大化したことが，理由の一つとしてあるが，それとともに専門とする分野が細分化し，その細分化された中で技術が研鑽されてきた経緯がある．このため，空港総体として安全性について，積極的に議論されたことはなく，仕組み上の弱点や優先的に対処すべき対策を把握できない，という盲点をつくりあげてきた．また，現行の設計基準の多くは，施設等の機能確保や早期復旧を優先目標としていないため，「地震に強いあり方」において示された機能面での要求性能との整合が必ずしも図れていない．つまり，地震発生時に，空港総体に求められる要求性能が満たされているか否かを明示的に確認する方法はなく，さらに機能上障害となる，いわゆるボトルネックとなる施設の特定やその影響の度合いを把握できない．これらは，早急に対処しなければならない重要な課題である．

2.2 設計外力に関する問題点

平成 7 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震を契機に，各種構造物の耐震性能の照査は，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てきた．しかしながら，レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動の一連の定義は**表-2** に示すように必ずしも明確ではない．例えば，建築物については，建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)によれば，レベル 1 地震動は「設計対象構造物が，その敷地でその耐用年数中に経験する可能性が高い地震動」，レベル 2 地震動は「当該敷地の過去の最強地震動や将来予想される最強地震動」とされている．

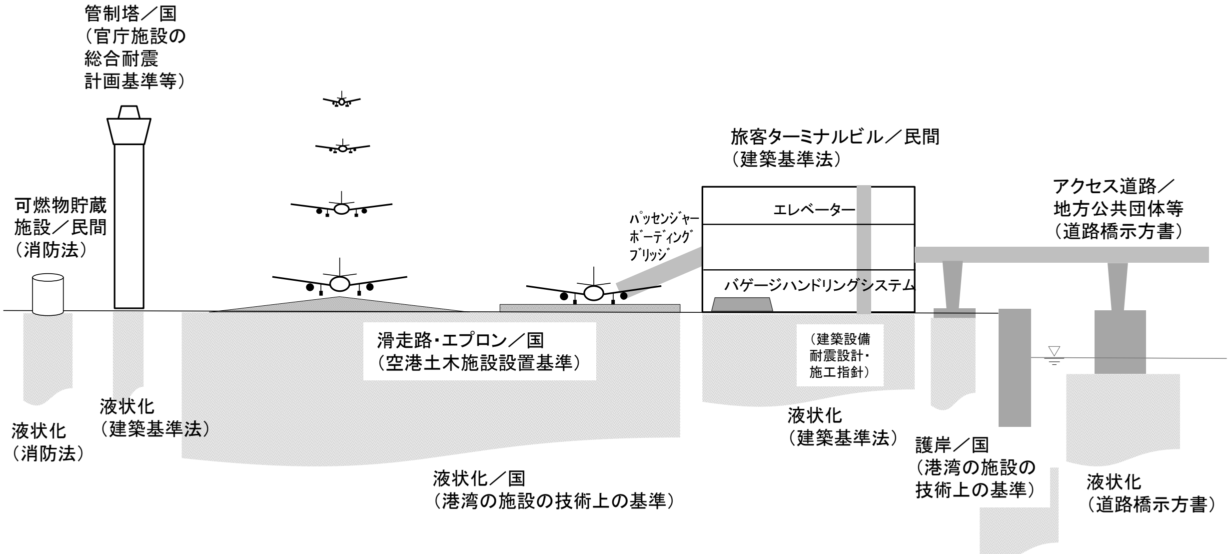


図-2　空港を構成する主要な施設等とそれらの耐震設計基準等

また，道路橋示方書・同解説(2012)においては，レベル 1 地震動は「橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動」，レベル 2 は「供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動（タイプⅠ：プレート境界型の大規模な地震，タイプⅡ：内陸直下型地震)」とされている．土木学会の第三次提言では，レベル 1 地震動は

表-1　空港を構成する主要な施設等とそれらの耐震設計基準と主な管理者

構造物		耐震設計基準等	管理者
管制塔	建屋	官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説、官庁施設の総合耐震診断・改修基準及び同解説	国
	設備	同上	
	液状化判定	建築基準法	
旅客ターミナル	建屋	建築基準法	民間
	設備	建築設備耐震設計・施工指針	
	液状化判定	建築基準法	
電源管理施設(電源局舎)、消防所(消防局舎)	建屋	建築基準法	国、地方
	設備	建築設備耐震設計・施工指針	
	液状化判定	建築基準法	
場面管理棟	建屋	官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説、官庁施設の総合耐震診断・改修基準及び同解説(国管理空港の場合)、建築基準法(地方管理空港の場合)	国、地方
	設備	同上	
	液状化判定	官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説、官庁施設の総合耐震診断・改修基準及び同解説	
滑走路、過走帯、着陸帯、滑走路端安全区域、誘導路、誘導路帯、エプロン、GSE通行帯、道路・駐車場、排水施設、共同溝、消防水利施設、場周柵、ブラストフェンス、侵入灯橋梁	構造物	空港土木施設設置基準 空港土木施設耐震設計要領及び設計例	国、地方
	液状化判定	港湾の施設の技術上の基準・同解説	
護岸	構造物	空港土木施設耐震設計要領及び設計例	国、地方
	液状化判定	港湾の施設の技術上の基準・同解説	
桟橋	構造物	空港土木施設耐震設計要領及び設計例	国、地方、民間
	液状化判定	港湾の施設の技術上の基準・同解説	
航空燃料の給油タンク(可燃物貯蔵施設)	構造物	消防法(可燃物貯蔵施設)	民間
	液状化判定	同上	
アクセス	道路橋	道路橋示方書・同解説	国、地方
	液状化判定	道路橋示方書・同解説	
	鉄道橋	鉄道構造物等設計標準・同解説	民間
	液状化判定	道路橋示方書・同解説	
	トンネル	トンネル標準示方書	国、地方
	液状化判定	道路橋示方書・同解説	

表-2　レベル 1 地震動及びレベル 2 地震動に関する定義の例

基準・指針等	レベル1地震動	レベル2地震動
建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)	設計対象構造物が，その敷地でその耐用年数中に経験する可能性が高い地震動	当該敷地の過去の最強地震動や将来予想される最強地震動
道路橋示方書・同解説(2012)	橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動	供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動(タイプⅠ：プレート境界型の大規模な地震，タイプⅡ：内陸直下型地震)
土木学会 第三次提言(2000)	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が高いもの	現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動
港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)	再現期間75年の一様ハザードスペクトルとすることを標準とする	想定地震によりもたらされる地震動の最大振幅，周期，継続時間，構造物に与える影響の大きさ等を考慮して，レベル2地震動を設定するための地震を選定する．なお，想定地震の選定に当たっては，国の機関における調査結果，又は地域防災計画等を踏まえて総合的に判断する．
空港土木施設の耐震設計指針(案)(2000)	空港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	空港土木施設の設計供用期間中に発生する確率は低いが，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

「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が高いもの」となり，レベル 2 地震動は「現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」と表現され，共に再現期間での表記はなされていない．

港湾の施設の技術上の基準・同解説(2007)では，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とすることを標準とする」とあるが，レベル 2 地震動については土木学会の第三次提言と，定義が整合的である．また，それぞれのレベルにおいて，時刻歴波形を設定するよう求めており，この点が，他の基準や指針と異なる特徴である．

一方，これまで空港施設の耐震設計に用いられてきた実績の多い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が，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」とあり，ある程度具体的ではあるものの，再現期間等の（リスク評価に不可欠な）発生頻度の明記はなく，また設計者の裁量に委ねられる部分もあり，解釈によっては差異が生じ得る懸念がある．このように，多様な設計基準，設計者の解釈の違いにより，設計外力は施設毎に隔たりがあると言える．また，地震記録の更新や新たな知見の導入など，設計時期によっても外力に隔たりが生じる．

2.3 安全余裕に関する問題点

設計地震動や予測される地震動の推計誤差，設計に必要な各種物性値と実際の物性値との差，解析手法による誤差，施工性の良否など，設計段階で様々な不確実性が存在する．この不確実性は，構造物のタイプや種類，設計のレベルによって異なることから，各種の設計基準や指針では，不確実性の違いを見込んだ上で，それぞれ安全余裕を持たせるように規定しているものと考えられる．また，施設が損傷した際の人命への影響，復旧難易度，間接的な影響など，影響の重篤性を加味した安全余裕が付与されるケースもある．そして，これら不確実性や影響の曖昧さゆえ，各種設計基準・指針にその安全余裕の根拠を示すことに困難が伴う．

一方，営利を目的としたオフィスビルや商用ビルなどは，経済設計と称し，照査の基準に対してぎりぎりの設計をする場合がある．逆に，安全性への配慮から，かなり余裕を持たせた設計をする場合もある．これは施工主や設計者の裁量によるものである．

平成 12 年 4 月 1 日に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」および国土交通省が定める「耐震診断による耐震等級（構造躯体の倒壊等防止）の評価指針」の中では，3 段階の耐震性能（耐震等級）が規定されている．耐震等級については，建築基準法レベルの強さを持つ建物が等級 1，建築基準法の 1.25 倍の強さを持つ建物が等級 2，建築基準法の 1.5 倍の強さを持つ建物が等級 3 となる．また，耐震等級に対して，地震保険料の割引が行われている．等級 1 の場合は 10%，等級 2 の場合は 30%，等級 3 の場合 50%が割引される（損害保険料率算出機構(2015)）．このように施主の希望により耐震性能が設定される場合もあり，この点からも構造物の安全余裕は様々となる．

2.4 ユーロコード，ISO2394 による統一規格

ユーロ圏の経済統合と並行して，建築，土木を問わず，構造物の設計/施工に関する統一的な規格（ユーロコード；Eurocodes）が欧州標準化委員会（CEN；Comité Européen de Normalisation）にて検討された．この規格は，構造物に共通する基本的な要求事項については統一的に定め，構造物の種類や特性に依存するような事柄は個別の技術基準を設ける，といった考え方である．この共通する基本的な要求事項については，欧州標準化委員会と国際標準化機構（ISO；International Organization for Standardization）が 1997 年に発行された ISO2394「構造物の信頼性に関する一般原則」(1998，Third Edition)において定められている．具体的には，「建造物は建設中および使用中に作用する荷重作用に対して，次のいずれの限界状態にもならないように設計し，施工しなければならない」というもので，限界状態としては，例えば，①構造物の全部あるいは一部の崩壊，②許容できない量の変位，等である．また，安全照査の方法として「限界状態に至ることが許容される確率以下であること」と謳っており，いわゆる信頼性設計を支持している．限界状態や確率による照査は，後述する性能規定型設計や「建築学会：建築物の限界状態設計指針(2002)」等の基礎となっている．

また，ISO2394 は 2015 年に改訂版(Fourth Edition)が公開され，持続可能性（Sustainability），リスク情報による意思決定（Risk-Informed Decision Making），頑強性（Robustness）等が追記された．特に，数値化したリス

クの概念の定義，リスクに基づく意思決定行為そのものが，構造物の安全性や信頼性に関する規制や標準化に際し，根幹的・基本的な考えとして，明確に規格化されている．

このような，統一規格の背景には，設計や施工面での自由度を増すことによって，建設技術や材料の国際流通を促進し，生産性の効率化を図る狙いがある．また，構造物の安全性に関するプロセスを透明化し，安全に対する共通の認識と，技術に対する信頼性を醸成することも，目的の一つになっている．設計理念の特徴をまとめると，構造物の細部にわたる仕様を規定する仕様設計から，構造物に要求される性能のみを規定する性能設計（Performance Based Design）への移行を明確にしたこと，また，要求性能を満たしているか否かの照査では，確率論を基本とした信頼性設計の考え方を全面的に取り入れたことを挙げることができる．

一方，米国の動きとしては，カリフォルニア構造技術者協会が 1995 年に発表した Vision2000（性能に基づいた建築物の耐震工学）(1995)において，欧州と同様に性能規定型の設計手法が取りまとめられ，これが米国の統一の耐震規定として採用されている．

また，ユーロコードは EU 域外にも積極的に展開し，この手法をそのまま受け入れる国，自国の基準をユーロコードに準拠させる国等，国によって違いはあるものの，性能規定，これを照査する信頼性設計の道筋はほぼ固まったといえる．

我が国の動きとしては，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，統一規格としての性能規定型の設計手法の基本的な考え方を策定した．これに準拠する形で，土木，建築施設，その他の施設についても設計手法の方向転換が期待されたが，進んでいる分野もあれば，従来の設計の域にとどまっている分野も一部あり，足並みは必ずしもそろっていない状況にある．

3. 信頼性設計と地震リスク評価

3.1 性能設計と信頼性設計

山本(2002)は，性能設計と信頼性設計について，導入当初において若干の混乱が見られると指摘のうえ，**図-3** のように整理した．

耐震設計における性能規定は，構造物に定められる耐震性能レベルを具体的な要求性能として明示し，これを照査することを規定した設計法である．

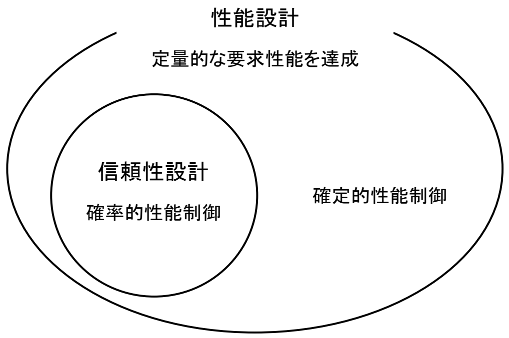
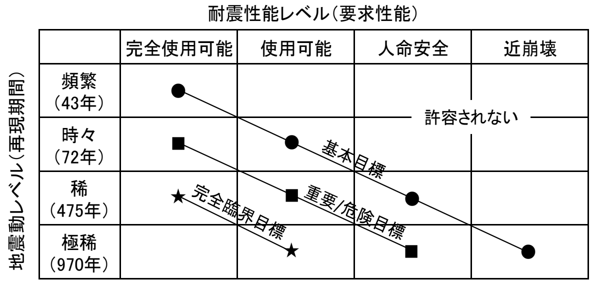


図-3　性能設計と信頼性設計（山本(2002)より）

照査に用いる地震動レベルはその発生頻度（再現期間）に応じて，変わることになり，これをマトリクスの形式で示した例が，**表-3** に示す性能マトリスクである．性能マトリクスに示される耐震性能レベル（要求性能）は，構造物の限界状態（修復限界，終局限界等）とリンクしており，被害の様相を実感した照査が可能となる．例えば，「使用可能（修復限界）」は軽微な被害に相当し，若干の修理を行えば使用できるような状態である．「人命安全（終局限界）」は大破被害に相当し，被害はあっても人命には影響しない程度の被害を意味する．一方の地震動レベルは，「2.2 設計外力に関する問題点」で示した，空港土木施設に関するレベル 1 地震動及びレベル 2 地震動と関係付けることができる．レベル 1 地震動は再現期間 72 年にほぼ相当するものの，レベル 2 地震動については再現期間と整合していない．

表-3　Vision 2000 の性能マトリクス（本城(2001)より）



信頼性設計では，各限界状態を超える可能性を確率で表現し，これらに閾値を設け要求性能が満たされているか否かの照査を行う．具体的には「建築学会：建築物の限界状態設計指針(2002)」に詳記されている．**図-4** は同文献から抜粋した信頼性設計の手順である．図より，計算された建築物の破壊確率 P_f が目標破壊確率 P_{fa} 以下であることが要求される．一方，確率を厳密に計算することが困難な場合には，より簡便な信頼性指標 β を用い

ることができる.

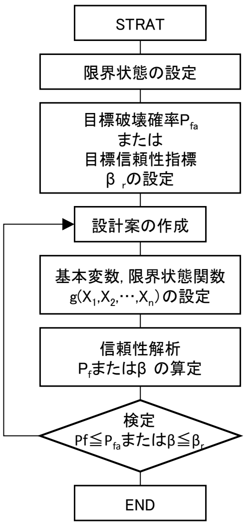


図-4 確率に基づく設計手順
（建築物の限界状態設計指針(2002)より）

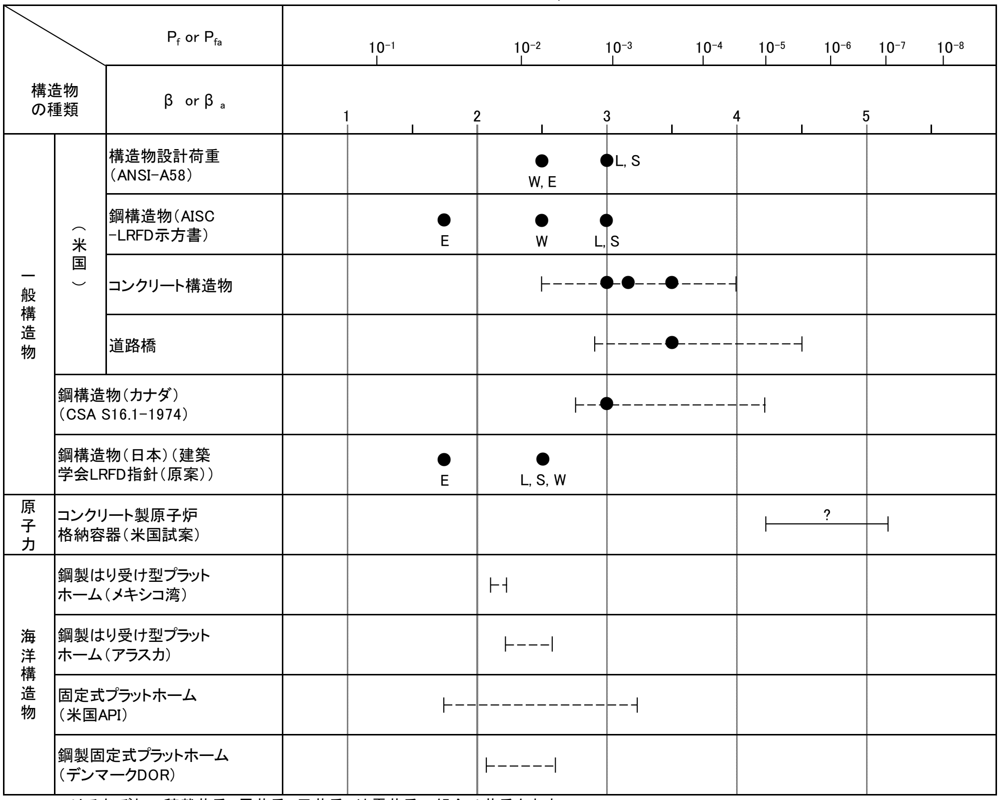
3.2 コードキャリブレーションによる目標破壊確率

星谷ら(1986)は，米国を中心とした設計示方書（試案等を含む）に対する目標破壊確率 P_{fa} と目標信頼性指標 β_a を**表-4** のように，また，ノルウェーの建築構造物設計示方書の目標破壊確率と目標信頼性指標を**表-5** のように調査してまとめている．**表-4** は各国の既往の設計示方書/指針（許容応力度法を含む.）によって設計された構造部の破壊確率を計算し，集計したもので，これをコードキャリブレーションと呼ぶ.

つまり，信頼性設計導入以前のものも含め既往の基準/指針に則って設計された構造物は，歴史的経緯からみて社会的に十分許容されており，当時の設計技術の限界も考慮のうえ，経済性と安全性のバランスが均衡しているはずである．このため，コードキャリブレーションによる破壊確率を目標破壊確率とすることは，信頼性設計の性能（確率的性能規定）として社会的にも受入れ易い，との考え方である.

そして，**表-4** より，目標破壊確率は，一般構造物（建物，道路橋等）では 2.27×10^{-2}～2.23×10^{-4} 程度であることが分かるとしている．ただし，構造物の供用期間を 50 年としその間の目標破壊確率であること，破壊確率の評価は作用/耐力等を対数正規分布と仮定していること，などに注意する．表中の原子力の「？」は凡例にないが，原子力保安対策に基づく非公開のためと推察される．一方の**表-5** はノルウェーの建築物に対する目

表-4 米国を中心とした設計示方書に対する許容確率 P_{fa} と許容信頼性指標 β_a （星谷ら(1986)より）



L, S, W, Eはそれぞれの積載荷重，雪荷重，風荷重，地震荷重の組合せ荷重を表す.
また，●印は許容値を表し，破線はキャリブレーションによる値である.
図中の値は耐用期間を考慮した値である（一般には50年）.

標破壊確率であり，破壊モードとそれによる結果の重大さのマトリクス形式になっているところが特徴である．表の中央値（破壊モードⅡ・破壊の結果重大）などにより，米国に比べ全体的に安全側に表れている．

コードキャリブレーションの評価結果を将来にわたって蓄積し，総体の要求性能へフィードバックすることが望ましい．また，議論を経て，総体の要求性能を下方修正することもあり得るものと考える．

表-5　ノルウェーの建築構造物設計示方書の許容確率 P_{fa} と許容信頼性指標 β_a（星谷ら(1986)より）

破壊の結果（重大さ）	破壊モード		
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
重大でない	$P_{fa}=10^{-3}$ ($\beta_a=3.09$)	$P_{fa}=10^{-4}$ ($\beta_a=3.71$)	$P_{fa}=10^{-5}$ ($\beta_a=4.26$)
重大	$P_{fa}=10^{-4}$ ($\beta_a=3.71$)	$P_{fa}=10^{-5}$ ($\beta_a=4.26$)	$P_{fa}=10^{-6}$ ($\beta_a=4.75$)
大変に重大	$P_{fa}=10^{-5}$ ($\beta_a=4.26$)	$P_{fa}=10^{-6}$ ($\beta_a=4.75$)	$P_{fa}=10^{-7}$ ($\beta_a=5.20$)

Ⅰ：ひずみ硬化により耐力を保つ破壊モード，Ⅱ：耐力を保たない破壊モード
Ⅲ：ぜい性破壊および不安定

3.3 リスクを用いた目標破壊確率

軽微，あるいは大破など，構造物の被害状況が明示されると，修復費用や修復にかかる日数などを設定することができる．さらに，被害によって生じる間接的な損失なども推測できる．これら被害の結果の重大性を C（Consequence）と置き，軽微や大破などの被害の発生確率を P と置くと，リスクは Risk = P×C，いわゆる損失額の期待値として定量化される．この表記は，被害の可能性（発生頻度）が高く，結果の影響が重大なほどリスクは大きいと解釈できる．

JCSS (Joint Committee on Structural Safety) (2008), Risk Assessment in Engineering ならびに同文献を広く引用している ISO2394(2015)は，リスク情報（大小）に基づき限界状態別の目標破壊確率を提案しており，信頼性理論を踏まえたリスク評価を設計段階から取り入れることを推奨している．以下，その概要を示す．

構造物の初期コスト，あるいは耐震対策に要する費用について，地震による損失期待値を総和した期待総費用をリスク情報に使い，構造物の耐震グレードや対策の意思決定に用いる方法がある．これを概念的に示したものを**図-5** に示す．図の縦軸は損失期待値を含めた期待総費用（リスク情報），横軸は耐震グレード，あるいは耐震対策に対応した，限界状態別の発現確率である．図の P_{ACC}（受容破壊確率）は，前述のコードキャリブレーションによる許容される破壊確率や受容できる人命喪失確率などで，社会的に受容できる最低限の破壊確率を示している．最適な耐震グレード，あるいは耐震対策は，P_{ACC} 以下の確率で，かつ期待総費用が最小となる点として求められる．

一方，JCSS(2008)では，暫定値ではあるものの，経済的な観点から限界状態毎の目標破壊確率と同信頼性指標を**表-6** のように示している．これらの評価方法は，基本的には費用便益分析の考え方に則っており，特に，構造物が破壊した際の人命への支払意思額（Willingness to Pay）や，その人命を救うのに要する付加的な対策の費用などを考慮し，評価される．支払意思額の評価には GDP，平均寿命，余暇時間などから求められる生活の質指標（LQI ; Life Quality Index）が用いられている．このように限界状態の発現が照査される．

ISO2394(2015)には LQI から求められる人命の価値が国毎に示されている．各国の価値は購買力平価（PPP ; Purchasing Power Parity）によって相互比較でき，我が国では円換算で概ね 1.5 億円～2.0 億円となる．この値が，我が国の国情に適応しているかは議論の余地はあるが，一方で金銭対価への換算を可能にするリスク情報は，耐震グレードや既存施設の耐震対策の判断に用いられる有効な指標として，認知と共に冷静な議論が求められる．

また，土木学会 技術推進機構 ISO 対応特別委員会(2015)では，ISO2394(2015)の我が国への影響として，「構造物の性能確保において，リスク概念を取り入れた考え方や方法などを設計段階において考慮することが重要になる」と述べている．

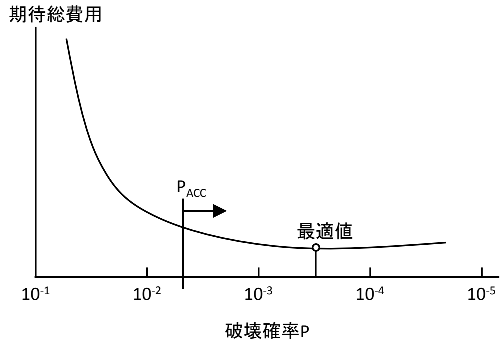


図-5　期待総費用と受容破壊確率 P_{ACC} の概念図

表-6　経済的な観点から評価された年間当りの目標破壊確率 P_{fa} と目標信頼性指標 β_a（JCSS(2008)より）

Relative cost of safety measure	Consequences of failure		
	Class2	Class3	Class4
Large	$P_{fa}=10^{-3}$ ($\beta_a=3.1$)	$P_{fa}=5\times10^{-4}$ ($\beta_a=3.3$)	$P_{fa}=10^{-4}$ ($\beta_a=3.7$)
Medium	$P_{fa}=10^{-4}$ ($\beta_a=3.7$)	$P_{fa}=10^{-5}$ ($\beta_a=4.2$)	$P_{fa}=5\times10^{-6}$ ($\beta_a=4.4$)
Small	$P_{fa}=10^{-5}$ ($\beta_a=4.2$)	$P_{fa}=5\times10^{-6}$ ($\beta_a=4.4$)	$P_{fa}=10^{-6}$ ($\beta_a=4.7$)

Class2: Smaller buildings and industrial facilities, Major wind turbine, etc
Class3: Most residential buildings, Typical bridges and tunnels, etc
Class4: High-rise buildings, Grandstands, Major bridges and tunnels, etc

4. 我が国の地震リスク評価，リスクマネジメントの現況

4.1 建築資産の地震リスク診断

不動産投資に係る諸法（不動産特定共同事業法 1995年，資産の流動化に関する法律 2000 年，投資信託法の改正 2000 年）の整備を受け，2000 年頃より不動産の証券化が急速に普及した．証券化では，投資対象としての妥当性を投資家に説明するため，不動産の状況，法的な問題，経済的な問題などの調査（Due Delligence）が必要になる．不動産の状況調査は，エンジニアリングレポート（以下 ER）と呼ばれ，技術者が主体的に行う調査になる．ロングライフビル推進協会,日本ビルチング協会連合会(2011)は ER のガイドラインを公開しており，その中に地震リスクを診断する項目を設けている．これは，建物の価値が地震によってどの程度毀損するかを金銭価値として示すもので，これを予想最大損失（PML；Probable Maximum Loss）と呼び，不動産証券化のみならず，売買や融資の判断など広く利用されている．PML は，構造信頼性理論に基づいた確率論的手法により評価され，建物の構造体のみならず，空調や衛生，電気設備，さらに内外装など，建物総体の損失額を示している．PML が受け入れられた背景には，建物総体としての耐震性能の評価と，建物価値の毀損を直接把握できる利便性にあったと考えられる．一方，PML 値に法規制や基準値などは存在しないが，一般的には PML 値15%（建物価値の 15%）を閾値と見ている．この値を超えると不動産を原資とした証券の格付低下に繋がるのが主な理由である．このため，閾値を超える建物への融資や証券化を行う場合には，構造体の耐震化，設備機器の更新，地震保険付保など，PML を下げる対策を実施しなければならない．これは投資家の意思を反映した耐震面での要求性能に他ならない．非専門家であっても，便利な仕組みや利用性の高い情報を提供すれば市場は適切に対応する好例と言える．

一方，地震リスク情報の利活用として，「業務継続のための官庁施設の機能確保に関する指針(2008)」では，官庁施設の地震時復旧期間の定量的評価方法が示され，併せて対策の優先順位の確定方法などが記されている．また，坂本(2007)や中村ら(2009)は，建物に要求される機能を取上げ，その機能の復旧曲線を確率論的に評価する方法を提案している．このように，地震リスク評価は建築物を対象に利活用が進んでおり，一定の支持を得ている．

4.2 地震保険と地震リスク評価

1996 年の保険業法の改正に伴い，保険会社は本格的な自由競争時代に入った．その一環として 1998 年 7 月には保険料の料率が自由化された．このため損害保険各社は，生産施設や建築資産等，コマーシャルベースの顧客資産の地震リスクを精緻に評価し，料率に反映するようになった．主なリスク情報は，再現期間 475 年（向こう 50 年で超過確率 10%）相当の地震による物的損害額，あるいは首都直下地震や東海地震等の切迫性の高い地震による物的損害額などである．また，リスクカーブを積分して求める年損失期待値（ALE；Annual Loss Expectancy）も保険料率に直結する値として使われている．

一方，保険の自由化が先行している米国では，Steinbrugge (1982)により支払保険金に関するリスク情報として PML を定義している．この定義は「再現期間475 年の地震による物的損害額の 90%非超過損失」となり，前述した不動産証券化の PML の源流となっている．また地震リスクの評価方法においては，FEMA（Federal Emergency Management Agency）(1985)が取りまとめた諸施設の地震被害統計により定量化のベースが整備された．この方法は実被害のデータを統計的に分析し，損害額と地震動の関数を導き，これを使いリスクを求める方法であり，作用地震動を与えれば損害額を直接求めることができる便利な被害関数（Damage Function）として広く普及した．

ところが，これらの関数は統計的に求めるため，広く一般の被災者の生活の安定を目的とし，政府がその大半を再保険でカバーする地震保険法（昭和 41 年法律第 73号）のような地震保険制度には有用であるが，コマーシャルベースの施設や特定の建物，といった施設固有の耐震性能を反映したリスク評価が求められる場合には適用に支障が生じる．また，新たに造られた構造形式の建物，大地震を経験したことのない特殊な施設のリスクも求められないことになる．

上記の方法と並行して，信頼性設計をベースとした確率論的リスク評価手法が，特に学術分野において整備された．この方法は建物や各種構造物の耐震性能を解析的に評価し，これに一定のバラツキを考慮した Fragility Curve を求め，被害が発生する確率を求める方法である．確率の評価方法は Vision2000(1995)，ISO2394(1998，2015)，建築学会(2002)「建築物の限界状態設計指針」，日本港湾協会(2007)「港湾の施設の技術上の基準・同解説」等に記されており，Fragility Curve については，FEMA(1999)，中村ら(1998)，Shinozuka (1999)によって，

統計的裏付けに基づいた評価手法が提案されている．

地震保険に関する地震リスク評価は，多数の保険資産全体（数千～数万件）としての，いわゆる保険ポートフォリオの損害額の評価においては被害関数（Damage Function）による方法が使われているものの，個別資産や生産工場，特殊な施設については，科学的根拠が明確な Fragility Curve による方法が主流となっている．不動産証券化の PML 評価についても Fragility Curve による方法がロングライフビル推進協会（2011）により推奨されている．

4.3 産業施設の地震リスクマネジメント

生産工場を対象とした地震リスク評価は，原子力関連施設を対象とした安全性評価技術（PRA）を基本に，篠塚研究所(1995)や Mizutani(1997)によって考え方が示され，星谷ら(2002)によって事例を含めた具体的な方法が整備された．その後，物的損害額の評価を中心に，石油精製，石油化学，電子機器，家電製品工場などの地震リスクマネジメントが実務として行われ，効率的な地震対策の判断に有用されている．

一方，事業継続ガイドラインが内閣府(2007)から公開されたのを機に，我が国においても事業継続計画（BCP ; Business Continuity Plan）を策定する企業が増加した．ところが，工場，あるいは企業総体としての事業停止期間は何日になるのか．対策によってどの程度短縮されるのか，このような切実な要望に対して，英国規格協会（BSI）の BS25999(2006)，内閣府(2007)，ISO 22301(2012)等に具体的な評価方法の記述はない．つまり，概念としての復旧曲線は記されているものの，復旧期間や復旧曲線の定量化については記されていない．一方で，中村(2007)，Shizuma et.al(2009)は，復旧曲線の定量評価が BCP 策定に有用であることを示すと共に，目標復旧時間（RTO : Rcovery Time Objective）を満たす効率的な対策の抽出を地震リスクマネジメントの枠組みの中に取り入れた．その他の研究事例として，静間ら(2011)は高速道路を対象に，土居ら(2013)は水力発電施設を対象に，復旧曲線を定量化すると共に，効率的な対策を提示している．

BCP 策定という社会的要請において，定量化された復旧曲線は必要不可欠なリスク情報として，産業施設を対象にその利用性が高まっている．特に，地震に対する工場の目標性能として，RTO を提示する生産工場が増加している．これは効率的な対策事業を実現する地震リスクマネジメントを一般化する上で，要求性能の明確化と合意形成など，その環境が整いつつあることを示唆している．

5. 運営形態や施設の管理主体等の多様性の問題と情報共有

5.1 異なる管理主体等に求められる情報共有

空港の種類と運用形態を表-7 に示すが，この他に，コンセッション方式による運用形態もある．コンセッション方式は，土地や土木施設の所有権を国に残したまま，一定期間（30～50 年程度）の施設の運営，維持及び整備等を民間企業に任せる仕組みである．仙台空港特定運営事業等公共施設等運営権実施契約書（案）(平成 26 年 6 月，国土交通省航空局)では，国所有施設（主に土木施設）を対象に保険（うち地震特約 10 億円）の加入を求めると共に，保険カバーを超える損失が発生した場合は，国が負担する旨が記されている．コンセッション方式は，その管理・運用は運営権者の裁量に帰するものと考えられるが，地震損失については国と運営権者の責任の範囲が区分されて存在することになる．

表-7　空港の種類と運用形態
（地域経済ラボラトリのホームページ(2015)より）

空港の種類		空港の定義と運用形態
拠点空港	会社管理空港	国際航空輸送網または国内航空輸送網の拠点となる空港のうち、会社が管理する空港（空港法4条1項） 国が指定した会社が設置・運営を行っている。
	国管理空港	国際航空輸送網または国内航空輸送網の拠点となる空港のうち、国が管理する空港（空港法4条1項） 国が設置・運営を行っている。
	特定地方管理空港	国際航空輸送網または国内航空輸送網の拠点となる空港のうち、地方が管理する空港（空港法4条1項） 国が設置を行ったが、地方公共団体が運営を行っている。
地方管理空港		国際航空輸送網または国内航空輸送網を形成する上で重要な役割を果たす空港（空港法5条1項） 地方公共団体が設置・運営を行っている。
共用空港		空港法附則2条1項に規定する空港 自衛隊が設置・運営を行っているが、一般の人も利用している。
その他の空港		上記以外の空港（空港法2条1項）

一方，福岡空港は，国管理空港ではあるものの，旅客ターミナルや貨物ビル等の管理・運営は，福岡空港ビルディング株式会社が行っている．また，地方管理空港である神戸空港の場合，旅客ターミナルビルの管理・運営は神戸空港ターミナル株式会社が行っている．このように，空港によっては本来主体となるべき運営/管理者が一つの空港に複数存在する．それぞれの責任が及ぶ空間的範囲は分化限定されているものの，機能面での連関及び各自が行う対策効果の相互把握について，主体間で意思疎通が十分に図られているか留意が必要である．

また，空港総体の要求性能の設定にあたり，航空会社，自衛隊など，地震災害時の利用者の意見も反映できることが重要である．利用者が災害対策基本法に規定される指定公共機関に指定されていれば，自ずと意見反映の仕組みが整う土壌もあるが，海外・中小航空会社，グランドサービス会社など，空港の一定の部分を支配的に使用していても，指定公共機関に指定されていない利用者も多数ある．

このような意思疎通の制約について，空港の利害関係者が，共通に理解でき，議論できる情報が示されていないことを指摘することができる．地震リスクマネジメントの実施にあたって，非専門家が理解できる情報を，科学的根拠を前提に評価し，共有することで，合意形成を促進する，という考え方を基本とする必要がある．安全に関する建設的な議論ができる環境を整える意味でも，地震リスク情報の共有化は目指すべき重要なステップである．

5.2 異なる管理主体等への説明責任

リスクマネジメントを円滑かつ確実に進めるには，トップダウン方式が効果的である．社会インフラとしての空港の役割を考慮すると，トップマネジメントは国，あるいは自治体が担うことになろう．一方で，一つの意思決定が様々な関係者の利害に複雑に影響する時代であることから，これら利害関係者間での一定の合意形成が求められている．そのためには，通常時からの円滑な意思疎通に加え，分かりやすい説明技法も重要である．しかしながら，地震の発生メカニズムや地震動の伝搬，力学的釣り合いの計算等の技術情報は専門性が高い上に複雑である．このため非専門家への説明は容易ではない．事実，「耐震安全分野における技術説明技法の高度化に関する検討(東京大学，2012)」では，「技術説明の不備が場合によっては意思疎通の欠如を招き，不安や不信を醸成する結果となっている」と指摘し，リスクコミュニケーションの重要性と共に，説明材料としての定量的なリスク情報の有効性を論じている．対策事業の科学的，経済的合理性を利害関係者に正確に伝え，一定の合意を得るには，地震リスク情報の利用は欠くことができない．

6. 地震リスクを用いた空港機能の要求性能と個別施設の耐震性能

6.1 空港機能の要求性能の照査

空港の各種施設には種々の設計基準や指針等が設けられているものの，設計外力や要求される耐震性能，安全余裕は様々であり，空港施設全体を捉えた安全性や機能性に関する統一的な評価は難しい．しかしながら，「地震に強いあり方」においては，例えば，発災後 3 日以内に緊急物資・人員等輸送受け入れ機能が求められる等，空港施設全体を捉えた機能面での要求性能が掲げられている．また，「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，内閣府中央防災会議幹事会 (2015)」では，発災からの経過時間に応じた応急対応活動の内容や目標が示されている．これらにより，空港の役割や要求性能も経過時間に応じて変化することになる．このような総体としての要求性能は，耐震診断を含めたこれまでの設計にはない考え方である．

一方，ISO2394 をはじめ性能を照査する信頼性設計の標準化やリスク情報を用いた目標破壊確率の設定など，リスクの考えを規範とする方法は，海外主要国では確かな潮流となっている．また，我が国においても，建築資産の地震リスク診断，産業施設を対象とした地震リスクマネジメントなど，リスクを活用した意思決定は，社会的要請として醸成されつつある．

地震リスクは，総体の保有性能と経済的合理性に基づいた要求性能を対比できる有効な指標である．これを踏まえ，空港を構成する施設等の設計基準群と空港総体としての要求性能を概念的に示したものを**図-6** に示す．図の左側は，現行の設計体系では総体としての要求性能を照査することは困難であることを示している．右側は，導入による照査の結果，空港総体の要求性能の一部（内側の小立方体）しか満足しない場合もあることも示している．これに空港総体の地震リスク評価を加えたのが図の右側である．これにより，空港総体としての要求性能の照査（性能の限界も確認），各施設の耐震性能の過不足にフィードバックできることを示している．

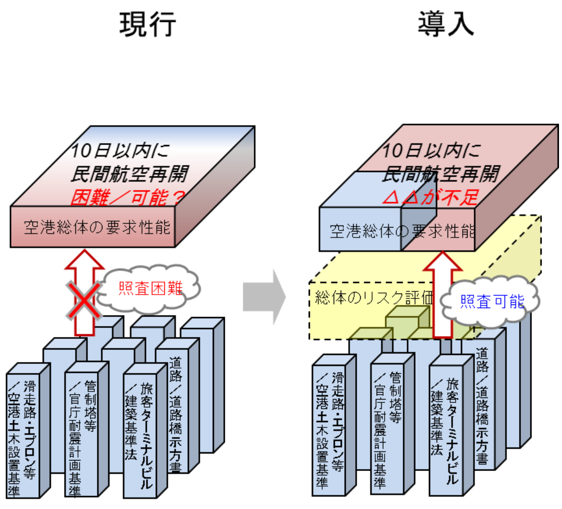


図-6 リスク評価の導入による効果

総体の要求性能が，発災時の空港機能に対し復旧期間（目標復旧期間）として提示されいることから，復旧曲線で比較するのが効果的である．このような観点から，小野ら(2015)は，空港を構成する施設等の群をシステムとしてモデル化し，システムの復旧期間を確率論的に評価することにより，空港機能の復旧曲線を評価する方法を示した．一方で，定期民間輸送機の運航機能の照査については，復旧曲線は有効と考えられるが，緊急時に課せられる空港機能（救命救急，物資輸送等）を照査する手段としては，むしろ発災からの経過時間に応じた空港機能の健全確率（信頼度）を照査するほうが，より有効であると論じた．

図-7 は空港機能の復旧曲線と照査基準を示した図である．照査基準は目標性能と目標復旧期間の2軸から成り，復旧曲線が第2象限を通るように対策事業，あるいは諸施設の耐震性能を規定すればよい．一方，健全確率を照査するため，小野ら(2015)は健全度曲線を提案している．これを**図-8** に示す．照査基準は目標健全確率と着目期日（発災からの期間）から成り，曲線が第2象限を通ることが目標となる．目標健全確率と着目期日は，経過時間と伴に，数段階設定してもよい．

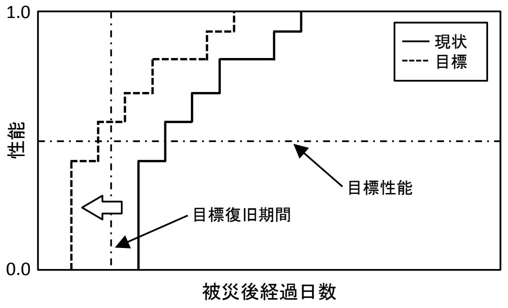


図-7　復旧曲線による性能照査の例

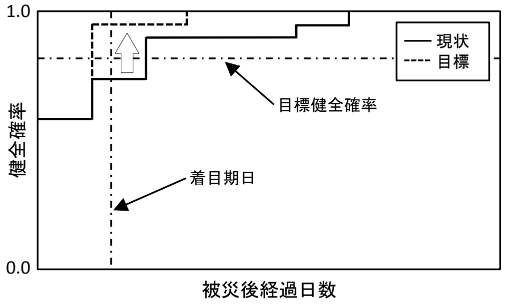


図-8　健全度曲線による性能照査の例

健全確率を照査基準とするには，空港総体としての要求性能を目標確率として示さなければならない．例えば，「救急・救命活動等の拠点機能は発災後 0.95 の健全確率を保持する，また，緊急物資・人員等輸送受け入れ機能は発災後 3 日までに 0.95 の健全確率を保持する」などである．社会的合意を得られる目標確率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，前述し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．

6.2 システムの安全性と個別施設の耐震性能

空港は様々な種類の施設や構造物で構成された大規模システムとして機能している．一方で，空港総体としての機能面での要求性能が示されている現実では，この要求性能を上位の概念として捉え，これを満たすために，構造物や施設個々の耐震性能が定められる，と考えるのが健全である．**図-9** は空港総体の機能を 6 つの構成要素でモデル化した例である．図より 1 つの要素でも損傷し機能を失うと，空港機能は失われる．例えば，空港機能の目標健全確率 0.95 と与えられた場合，個々の要素に課せられる目標性能は，大凡 0.99（0.95 の 1/6 乗）となる．言い換えれば，個々の要素の耐震性能は，破壊確率で 0.01 以下でなければないことが判明する．この確率は，シナリオ地震の発生，あるいは地震動を条件とすることもでき，また向こう 1 年間，あるいは空港の供用期間とすることもできる．

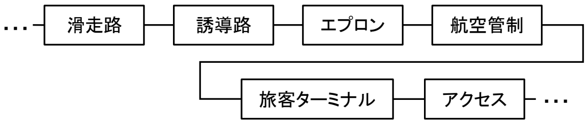


図-9　空港機能のシステムモデルの簡略例

現行の設計法の大半は，安全か否かの二値問題としてとらえる確定的方法である．このためシステムの規模に関わらず，各要素が安全であれば全体の安全は保障されると考えるので，そもそもシステム全体を診ることがない．しかしながら，確率論を用いた方法では，大規模システムになればなるほど個の安全と総体の安全は乖離する．この乖離の淵源は耐震性能や設計外力の評価に関する不確実性（確率で記述）にある．このように，現行の設計方法と，確率論を用いて総体の安全性から個の耐震性能を規定する方法を比較すると，前者は個々の施設について最適化を図る部分最適といえ，後者は総体の最適化を図る全体最適といえる．したがって，空港機能への

要求性能（健全確率）が，一定の合理性の下で与えられるならば，空港総体としての機能の照査，そして構造物個々の耐震性能の規定，といったプロセスは，全体最適の視点から明解であり，社会一般に受容され易いものと考えられる．このことは合理的な対策方法やその規模を選定する地震リスクマネジメントの実践そのものといえる．

6.3 ハード対策から金融対策までの一貫した評価

これまでに枠組みが示された空港のコンセッションでは，国所有施設（主に土木施設）であっても耐震性向上などの維持管理，原状回復のための地震保険の加入など，運営権者の財務的負担を求めている．このことを踏まえ，中島ら(2014)は金融対策を含めた空港のリスク管理を目的に，地震による諸損失を推計し，これを財務諸表に取り入れる財務影響分析を提案した．財務影響分析は運営資金の枯渇，債務の不履行など発災後の資金不足が憂慮される場合，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行う，いわゆる管理会計の一つである．さらに，中島ら(2015)は流動比率や自己資本比率などの業績指標の変動を診ることで，地震保険の必要性や保険設計の最適化等が可能であることを，運営権者の立場から示した．

地震リスクマネジメントに財務影響分析を含めることで，耐震補強等のハード対策のみならず，地震保険を含めた様々な金融対策まで，一貫して，対策事業の合理性，最適性を判断できる．例えば，補強策で一定の性能を保持するものの，それ以上の損害については保険でカバーする，といったハイブリットな対策の効果や経済性なども評価できる．また，地震による各種業績指標への影響を可視化することで，発災後の財務上の不具合について，利害関係者の間で共通の理解が促進し，対策実施への環境が整備される．

7. 地震リスク情報の発展的利用性

7.1 緊急時対応拠点としての空港間連携

発災時の空港には，救急・救命活動等の拠点機能，あるいは緊急物資・人員等輸送受け入れ機能など，孤立した被災者の救援や支援物資の輸送拠点としての機能が期待されている．これは，一空港の機能のみならず，広域に散在する空港群の連携によって，実効されるものである．一方で，南海トラフ地震などの巨大シナリオ地震では，複数の空港が同時に被災する可能性が高いことから，被災地域内外を問わず，空港群としての同時被災リスクを評価し，効果的な連携の在り方を事前に検討しておく必要がある．この点について，奈良岡ら(2010)は，広域に散在する倉庫や工場群の物流サプライチェーンの機能性評価を行うなど，各種の研究や実績が散見される．

シナリオ地震による個別空港の地震リスク評価を行い，これを統合することで，被災地域内外を含めた空港群としての連携を分析することが可能となり，また空港群としての弱点や対策の優先性などを把握することができる．空港群を対象とした地震リスクマネジメントは有効かつ重要な研究対象と考えている．

7.2 航空ネットワーク障害への応用

首都直下や南海トラフなどの地震が切迫している今日，空港群の同時被災による旅客輸送量の大幅な低下と，これによる社会的影響が懸念されている．この場合，各空港の被害推計額を単純集積し，これに基づいて対策を検討すると，経済的に過大となり得る．そこで，定期民間航空網そのものを，空港をノードとするネットワークとして捉え，地震によるネットワーク障害を，旅客輸送総量の低下として評価することが適切である．これにより，総輸送量低下への影響が大きい空港，あるいは空港施設を特定し，対策事業を集中的に行うことで経済的負担を軽減できる．

ネットワークシステムの障害（不信頼度）を扱う問題は，インフラ施設を対象に，例えば幹線網の OD 間導通性評価（中山ら(2006)），旅客遅延問題（内田(2010)），最大フロー問題（能島(2009)）等がある．これらはシステムの信頼性評価をベースとした手法として広く活用されている．また，これらを航空ネットワークの障害問題として扱うには，ノードとしての各空港の信頼度を，一定の品質/精度を確保した上で，同一基準で評価することが求められる．空港の信頼度を示す具体的な指標は，シナリオ地震による各空港の健全度曲線や復旧曲線であり，これらをネットワークのノード信頼度としてシステム結合することで，シナリオ地震による旅客輸送総量の低下を評価できる．航空ネットワークシステムの障害問題は，地震リスク情報の有効な利用方法の一つであり，今後の研究が期待される．

7.3 社会基盤への応用と国際展開

現行の耐震設計の問題として，空港施設の設計基準の多様性，これに伴う設計外力，安全余裕の不統一などを指摘し，現行の設計体系では「地震に強いあり方」において示された機能面での要求性能の照査と整合が図れな

いないことを解説した．これは空港に限った問題ではなく，社会基盤全般に共通した課題である．

港湾や道路ネットワーク，鉄道や情報通信，各種エネルギーの供給網などの社会基盤は，多種多様の構造物で構成され，それぞれが高度に組織化され，また機能的に連関している．仕組み総体としての安全性を評価し，そこから問題となる個を探り出し，そこを改善するという発想は，システムとして機能する社会基盤に求められる共通の理念である．そして技術的，財政的，社会的制約の中で，災害の可能性が国民にとって受容できるレベル以下に収めることが，社会基盤整備の新しい安全目標となる．

一方，新興国を中心とした世界の社会基盤整備の需要は膨大であり，急速な都市化と経済成長により，更なる市場の拡大が見込まれている．我が国は，これを成長戦略・国際展開戦略の一環として取り込むと共に，持続的な経済成長へとつなげる技巧的手腕が問われている．特に，度重なる地震災害の経験で培った防災関連技術は，基盤整備事業の獲得に強みを発揮するものと考える．しかしながら，耐震/免震等のハード技術は付加的な費用を要することから，価格競争下での劣勢を招くことが懸念される．そこで，地震リスクマネジメントに代表されるソフト技術を当初から組入れ，長期的には付加的費用を便益が勝ることを定量的かつ視覚的に示し，付加的費用の正当性を明言すべきと考える．我が国は，「もの造り大国」と尊称されているものの，「もの」の価値を正しく伝え，共有できるソフト技術の整備は遅れている．ソフト技術の有用性を理解し，戦略的に取り入れているのが欧州標準化委員会（CEN）や国際標準化機構（ISO）などの標準化組織である．彼らは，無形のソフト技術は標準化することで価値が生まれるという事実を，経験的に学習し，実践している．地震リスクマネジメントは，我が国で創造された数少ない意思決定支援ツールである．その標準化を進めると共に，ハード技術を国際展開する際の方策の一つに組入れることも検討すべきと考える．

8. 地震リスクマネジメントに関するガイドライン

8.1 地震リスクマネジメントの概要と必要性

本稿では，空港総体の性能評価と， 空港の構成要素である施設群の設計とを繋ぐ合理的な方法として，地震リスクマネジメントの必要性について検討を始めた．空港への適用の以前に，そもそも地震リスクマネジメントは主に産業施設を対象に整備が進められ，その要旨は「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，このような問題に対し，合理的な判断基準を示すと共に，効率的な対策を提供する体系化された意思決定支援の枠組み」となる．また，同マネジメントは事前対策（耐震化策，冗長性確保等）に重点を置いた原因事象型の意思決定手法と定義できるが，これに対して BCP は被害が生じた後の行動や事後対応の適正化を目指した結果事象型の危機管理手法である．地震リスクマネジメントとは住み分けられていることに注意する．

地震リスク評価では，個別に設計あるいは耐震診断された各種構築物の役割を，空港の機能という面から統合し，施設全体の損失額，機能性，健全性といった指標で評価するのが特徴であり，致命的な被害要因や問題の発見を容易にする．また，確率論的手法を使うことで，社会の変容による新たな被害の発生や最悪の被害を含め，網羅的に評価することができる．つまり発現被害の見逃しを最小限にするところも特徴である．

一方，日本建築学会（2011）「地震リスク評価とリスクコミュニケーション」では，建築物を対象とした地震リスク評価手法のガイドラインが示され，またロングライフビル推進協会（2011）「不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン」では，証券化不動産を対象に地震リスク評価の標準化手法が示されている．地震リスクマネジメントについては，産業施設を対象に多数の実績があるものの，標準化は必ずしも進んでいない．また社会基盤施設についても地震リスク評価手法を含め，体系化された指針等は未整備である．そこで，リスク評価の精度や方法の統一化，さらにはリスクマネジメントの必要性や有用性などへの共通の理解を得るため，空港施設を対象とした地震リスクマネジメントのガイドラインを整える必要がある．

8.2 地震リスクマネジメントのガイドラインの試案

本報では，空港施設を対象とした地震リスク評価及び地震リスクマネジメントの標準化を目標に，ガイドラインの試案を取り纏める．詳細は巻末の付録 A に記すが．地震リスクマネジメントのガイドライン（試案）の構成は**表-8** のとおりである．

第 1 章は序説として，ガイドラインの位置付けや適用範囲等を示している．第 2 章では，空港の概要として，地震時の要求性能や空港のリスクマネジメントの主体者について示している．第 3 章では地震リスクマネジメントの基本的な考え方ついて示し，第 4 章の地震リスク評価では，評価に必要な要素技術について評価の流れに順

じて示している．そして，第 5 章では地震リスク評価の結果を用いた地震リスクマネジメントの実施方法を示し，さらに第 6 章では地震リスクマネジメントの運用面について示している．なお，付録 B には，地震リスクマネジメントに関するガイドライン（試案）の技術資料として，地震危険度の表記方法，耐力中央値の評価方法，及び財務影響分析と金融対策について記している．

表-8 地震リスクマネジメントのガイドライン（試案）の構成

1．序説
1.1　ガイドラインの位置付け
1.2　ガイドラインの適用範囲
1.3　用語の定義
2．空港の概要
2.1　空港の地震時の要求性能
2.2　空港のリスクマネジメントの主体者
3．地震リスクマネジメントの基本的考え方
3.1　地震リスクマネジメントの考え方と特徴
3.2　地震リスクの定義
3.3　地震リスク評価の要件
4．地震リスク評価
4.1　地震リスク評価の概要と流れ
4.2　施設の情報収集と分析方法
4.3　ハザードの設定
4.4　地盤増幅特性と液状化危険度の設定
4.5　地震リスク評価モデルの作成
4.6　フラジリティカーブの評価
4.7　地震リスク評価
5．地震リスクマネジメントの実施
5.1　対策の優先順位の考え方
5.2　目標の照査
5.3　対策と効果の検討
6．地震リスクマネジメントの運用
6.1　運用体制の整備
6.2　評価の見直しや改善

9. まとめ

「地震に強いあり方」に示されている空港機能の要求性能に対しては，地震リスクを用いた空港の安全性評価技術が有用であるとの観点から，先ず，現行の設計法の課題，性能設計や信頼性設計の動向，リスク規範による目標性能の評価など，構造物の安全性確保全般について調査した．また我が国における地震リスクの利用実態について整理し，リスクを用いた要求性能の照査，ならびに個別施設の耐震規定について，その大略を示した．そして，リスク評価の精度や方法の統一化の必要性を論じた上で，空港施設を対象とした地震リスクマネジメントのガイドラインを整えた．

主な結論を以下のようにまとめることができる．

①空港を構成する施設の設計基準/指針は多様であり，設計外力，安全余裕等も不統一である．このため現行の設計体系では，空港を構成する施設の脆弱性の比較は難しく，また「地震に強いあり方」に示されている機能面での要求性能の照査に支障がある．

②構造物の限界状態を規定する性能規定型設計，これを照査する信頼性設計の道筋はほぼ固まったと言え，この考え方に則り，設計コードの統一化が進んでいる．最新の ISO2394(2015)において，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いる．

③限界状態の発現は目標破壊確率（あるいは目標信頼性指標）によって照査される．目標破壊確率はコードキャリブレーションや金銭対価したリスク情報から評価できる可能性がある．

④我が国での地震リスク情報の実利用は，証券化不動産を対象とした融資判断や地震保険を含めた地震対策の判断に利用されている．コマーシャルベースの顧客資産を対象に，地震保険料率の評価に使われている．また，産業施設の BCP 策定支援として復旧曲線が使われている．

⑤空港施設の管理主体は多様であることから，地震対策等の実施には，関係者間での円滑な意思疎通が必要である．その際の説明材料として定量的なリスク情報は有効である．

⑥地震リスク情報としての復旧曲線，健全度曲線は空港総体の機能の要求性能を照査する上で有効な指標である．また，空港を構成する施設や構造物の耐震性の過不足にフィードバックすることで，空港施設個々の耐震性能を合理的に規定できる．

⑦地震リスク情報の今後の利用性として，緊急時における空港間連携の在り方や実行性のある連携を判断するための支援情報，定期民航のネットワーク障害による旅客輸送総量の評価などへの応用が期待できる．

⑧地震リスクマネジメントは，空港施設以外の社会基盤施設にも共通して有用である．同マネジメントの標準化を進めると共に，社会基盤施設を国際展開する際の戦術の一つに組入れることが望まれる．

本資料は，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「空港の地震リスクマネジメントに関する研究」の成果の公表に代わるものである．

謝辞

本研究を進めるに当たり，早稲田大学濱田政則名誉教授，同大学清宮理教授，日本大学轟朝幸教授，関西大学

羽原敬二教授，法政大学道奥康治教授，国立研究開発法人港湾空港技術研究所菅野高弘特別研究官，四国地方整備局菅沼史典次長，佐野正明，角谷広樹，株式会社日本空港コンサルタンツ，株式会社シオ政策経営研究所の関係各位には，貴重な資料の提供とご助言をいただきました．ご協力いただ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

FEMA (1985), Earthquake Damage Evolution Data for California, ATC-13, p.492.

FEMA (1999) : HAZUS 99 Technical Manual, Washington DC.

ISO (1998): ISO2394 General principles on reliability for structures, Third edition , P.73.

ISO (2012): ISO22301 Societal security - Business continuity management systems - Requirements, P.24.

ISO (2015): ISO2394 General principles on reliability for structures, Fourth edition, P.111.

Joint Committee on Structural Safety (2008): Risk Assessment in Engineering – Principles System Representation & Risk Criteria, Edited by M.H. Faber, ISBN 978-3-909396-78-9.

Mizutani M. (1997): Basic Methodology of a Seismic Risk Management (SRM) Procedures, ICOSSAR'97 Kyoto, pp.1581-1588.

SEAOC Vision2000 Committee (1995): Vision2000-Performance based seismic engineering of buildings.

Shinozuka, M. (1999) : Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan,R.O.C.

Shizuma T., T. Nakamura, and H. Yoshikawa (2009): Evaluation of outage time for a system consisting of distributed facilities considering seismic damage correlation. ICOSSAR'2009, Oosaka, pp.1203-1209.

Steinbrugge, Karl V. (1982), Earthquakes, Volcanoes, and Thunamies, An Anatomy of Hazards, Skandia America Group, pp.201-216.

内田賢悦（2006）：交通容量の確率変動が道路ネットワークの移動時間に与える影響に関する研究，土木学会論文集 D, Vol.32, No.4, pp.431-441.

運輸省港湾局（2000）：空港土木施設の耐震設計指針（案）．

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.

建築保全センター（1996）建設大臣官房官庁営繕部監修官庁施設の総合耐震計画基準及び同解説（平成 8 年版）, P.240.

建築保全センター（1996）建設大臣官房官庁営繕部監修官庁施設の総合耐震診断・改修基準及び同解説（平成 8 年版）, P.266.

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.

国土交通省（2002）：土木・建築にかかる設計の基本, P.31.

国土交通省 航空局（2014）：仙台空港特定運営事業等実施方針, P.53.

国土交通省 航空局（2014）：仙台空港特定運営事業等公共施設等運営権実施契約書（案）, P.99.

国土交通省鉄道局，鉄道総合技術研究所（2012）：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善出版, P.418.

国土交通省大臣官房官庁営繕部（2008）：業務継続のための官庁施設の機能確保に関する指針，業務継続計画を踏まえた官庁施設の機能確保に関する研究会, pp.145-149.

坂本成弘（2007）：事務所ビルの地震後復旧曲線， 建築学会大会，B-1，pp.65-66.

静間俊郎，中村孝明，吉川弘道（2011）：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.

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.

篠塚研究所，東京海上火災株式会社（1995）：Seismic Risk Management 方法論及び適用例, P.48.

損害保険料率算出機構（2015）：基準料率の適用（割引）, http://www.giroj.or.jp/service/ryoritsu/quake/tekiyou2.html

地域経済ラボラトリ（2015）：空港の種類, http://www.region-labo.com/archives/term/term-281/

土居賢彦，静間俊郎，中村孝明（2013）：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.

東京大学（2012）：耐震安全分野における技術説明技法の高度化に関する検討，P.214.

土木学会 技術推進機構 ISO 対応特別委員会（2015）：土木 ISO ジャーナル，第 24 号, pp.11-18.

土木学会 トンネル工学委員会（2006）：トンネル標準示方書 シールド工法・同解説, P.303.

土木学会 トンネル工学委員会（2006）：トンネル標準示方書 開削工法・同解説, P.317.

土木学会 トンネル工学委員会（2006）：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説, P.322.

内閣府（2007）：事業継続ガイドライン第一版, P.50.

内閣府 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.

中島由貴，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013）：津波災害の初期段階における代替空港に関する検討，国土技術政策総合研究所資料第 718 号, P.23.

中島由貴，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013）：空港の災害リスクの定量的評価手法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第 756 号, P.50.

中島由貴，中村孝明，中神啓介，西崎英治（2014）：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第 783 号, P.37.

中島由貴，中村孝明，望月智也（2015）：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，第 55 号, P.34.

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, Vol.3,pp.3165-3170.

中村孝明，境茂樹，吉川弘道（2011）：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.

中村孝明，宇賀田健（2009）：地震リスクマネジメント，技報堂出版, P.290.

中村孝明，遠藤透（2009）：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究，建築学会総合論文誌, No.7 都市・建築に関わる安全・安心のフロンティア, pp.87-92.

中村孝明，吉川弘道（2008）：リスク規範型設計は始まっている－PML で測る耐震性能－，土木学会誌 CE リポート, PP.35-37.

中山昌一郎（2006）：交通需要経路選択の確率変動を考慮した確率的交通ネットワーク均衡モデル，土木学会論文集 D, Vol.62, No.4, pp.537-547.

奈良岡浩二，石川裕，奥村俊彦（2010）：サプライチェーンを考慮した簡易地震リスク評価，清水建設研究報告第 87 号, pp.11-18.

日本規格化協会（2003）：JIS Q 2001: 2001 リスクマネジメントシステム構築のための指針, P.108.

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.

日本建築学会（2002）：建築物の限界状態設計指針, P.533.

日本建築学会（2011）：地震リスク評価とリスクコミュニケーション，丸善出版, P.156.

日本建築センター（2005）：建築設備耐震設計・施工指針 2005 年版, P.342.

日本港湾協会（2007）：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.

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

能島暢呂（2009）：要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション，土木学会論文集 A1, Vol.65, No.1, pp.776-788.

本城勇介（2001）：基礎構造物の性能設計と耐震設計，地質と調査，第 4 号(通巻第 90 号) , pp.2-8.

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

星谷勝，中村孝明（2002）：構想物の地震リスクマネジメント，山海堂, P.180.

山本修司（2002）：平成 14 年度国土技術政策総合研究所講演会講演集，港湾基準国際化対応について－信頼性設計による性能規定型基準を目指して－，国土技術政策総合研究所資料第 58 号, P.101.

ロングライフビル推進協会，日本ビルチング協会連合会（2011）：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン, pp.169-194.

付録

付録A 空港の地震リスクマネジメントガイドライン（試案）

目　次

付録 A：空港の地震リスクマネジメントガイドライン（試案）

１．序説 20
１.１　ガイドラインの位置付け 20
１.２　ガイドラインの適用範囲 20
１.３　用語の定義 21
２．空港の概要 26
２.１　空港の地震時の要求性能 26
２.２　空港のリスクマネジメントの主体者 26
３．地震リスクマネジメントの基本的な考え方 28
３.１　地震リスクマネジメントの考え方と特徴 28
３.２　地震リスクの定義 28
３.３　地震リスク評価の要件 28
４．地震リスク評価 30
４.１　地震リスク評価の概要と流れ 30
４.２　施設の情報収集と分析方法 30
４.２.１　情報収集と分析 30
４.２.２　ウォークダウンの実施 31
４.３　ハザードの設定 31
４.３.１　ハザードの基本的考え方 31
４.３.２　地震危険度の設定 32
４.３.３　津波危険度の設定 33
４.４　地盤増幅特性と液状化危険度の評価 35
４.４.１　地盤増幅特性の評価 35
４.４.２　液状化危険度の評価 37
４.５　地震リスク評価モデルの作成 38
４.５.１　物理的被害要因の抽出と機能復旧期間 38
４.５.２　外生的要因の抽出 39
４.５.３　ユニットの分類 39
４.５.４　コンポーネントの分類 40
４.５.５　システムモデルの作成 40
４.６　フラジリティカーブの評価 41
４.６.１　フラジリティカーブの評価 41
４.６.２　不確実性の設定 42
４.６.３　耐震性の評価 45
４.７　地震リスク評価 46
４.７.１　財物損失額の評価 46
４.７.２　逸失利益の評価 47
４.７.３　復旧曲線の評価 47
４.７.４　健全度曲線の評価 49
４.７.５　システムの復旧期間と復旧期間の超過確率関数 49
４.７.６　逸失死者数の推計 50
５．地震リスクマネジメントの実施 52
５.１　対策の優先順位の考え方 52
５.２　目標の照査 53

５.３　対策と効果の検討 53
５.３.１　対策の実施方針 53
５.３.２　効果の検討 53
５.３.３　対策事業の費用の算出 54
５.３.４　費用対効果の検討 54
６．地震リスクマネジメントの運用 55
６.１　運用体制の整備 55
６.２　評価の見直しや改善 55
付録 B：技術資料 56
技術資料－１　地震危険度の表記方法 57
技術資料－２　耐力中央値の評価方法 59
技術資料－３　財務影響分析と金融対策 60

１．序説

１．１　ガイドラインの位置付け

本ガイドラインは，主体となる空港関係者が，地震リスクマネジメントを行う際に利用することを目的に，空港を対象とした地震リスク評価の基本的考え方，方法を示す．また，地震時に空港に求められる機能や役割を確保するために実施するリスクマネジメントにおいて考慮すべき点や運用について取りまとめている．

【解説】

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震において，仙台空港では津波による甚大な被害を受けた．文献 1)によれば「被災から 4 日後には緊急ヘリの離発着が，5 日後には米軍機による緊急物資輸送が開始され，民間航空機の就航も約 1 ヶ月後には再開する等，早期復旧が被災地の支援に貢献した．一方，比較的被害の小さかった花巻，山形，福島等の空港では，地震直後から救急・救命活動，捜索・救助活動，緊急物資・人員輸送の拠点として，また，途絶した交通機関の代替として活用された」とある．このように平時のみならず，緊急時対応拠点としての空港の役割は大きく，空港関係者は，事前に効果的と考えられる地震対策を実施し，大地震の際であっても，甚大な被害を生じさせず，空港に求められる機能を確保しなければならない．そのためには，事前に空港の地震リスクを定量化し，その評価結果に基づき，効率的なリスクマネジメントを実施することが望まれる．本ガイドラインは，このための地震リスク評価手法及びリスクマネジメントの考え方等についてまとめたものである．

参考文献

1) 佐藤清二: 東日本大震災と空港の研究課題, 平成 23 年度 国土技術政策総合研究所講演会講演集, 国土技術政策総合研究所資料 No.655, pp.161-178, 2011.

１．２　ガイドラインの適用範囲

本ガイドラインに示す地震リスク評価の対象は，基本的には「救急救命活動」，「緊急物資・人員等輸送」及び「定期民間航空機の運航」に関わる全ての施設，あるいは機能である．但し，リスクマネジメントの範囲は，地震リスク評価の対象とは必ずしも一致しないことから，予めリスクマネジメントの適用範囲を明確にし，適用範囲外については，国や自治体，関係事業者等と連携を図りながら対応をとる．

【解説】

空港施設は，一般的に，管制塔や旅客ターミナル等の建築構造物，滑走路やエプロン等の土木構造物，護岸や桟橋等の港湾構造物，燃料タンク等の各種設備等から構成される．さらに空港外部のライフライン機能や道路・鉄道等のアクセス等も空港の機能に関わる．地震リスク評価は，基本的には空港外部を含めた全ての施設，機能を対象とする．しかしながら，対象事業の実施範囲は，空港事業者が所有あるいは管理する施設に限られることから，外部の施設や機能については，リスク評価の対象であるものの，一組織や一事業者の範疇でリスクマネジメントを実施することは困難である．地震リスクマネジメントを実施するにあたり，事業者は責任の範囲と裁量の及ばない範囲を把握すると共に，施設あるいは機能面で明確に分けておく必要がある．なお，空港事業者にとって適用外の部分については，リスク評価の結果を国や自治体，あるいはライフライン事業者等に公開し，情報を共有化した上で，協同でリスクマネジメントを実施することが望ましい．

１．３　用語の定義

本ガイドラインで用いる用語の定義は次のとおりとする.

【対象施設に関する用語 [1等)]】

（基本施設）

・滑走路

航空機の着陸あるいは離陸のために設けられた空港内の限定された矩形の区域を滑走路という.

・過走帯（オーバーラン）

航空機が滑走路内で停止できなかった場合等に備えて，滑走路の両側に設けられている施設を過走帯という.

・着陸帯

航空機の離着陸の際の滑走路からの逸脱，あるいは着陸復行（ゴーアラウンド）の場合の航空機の安全確保と被害軽減のために設けられた矩形の区域を着陸帯という.

・誘導路

滑走路とエプロン等を結ぶ航空機の地上走行路を誘導路という.

・誘導路帯

誘導路を含み，誘導路周辺の固定障害物を設置してはならない区域を誘導路帯という.

・エプロン

航空機が常駐し，旅客の乗降，貨物の積み卸しや燃料の補給を行う場所をエプロンという.

・GSE（Ground Support Equipment）

貨物の積み卸し，航空機の点検整備，給油等の地上作業を行う特殊車両（空港地上支援車両）を GSE という.

（付帯施設）

・PBB（Passenger Boarding Bridge）

旅客ターミナルから旅客機に乗客や乗員を乗降させるための旅客搭乗橋を PBB という.

・場周柵

制限区域への立入禁止柵と空港用地を明確にする境界柵を場周柵という.

・ブラストフェンス

航空機から噴出する高温・高速のガス（ブラスト）から空港敷地内外の人や車両を保護するために設けられるフェンスをブラストフェンスという.

・侵入灯

着陸しようとする航空機に最終侵入の経路を示すため，侵入区域内と着陸帯内に設置する灯火を侵入灯という.

・VOR（VHF Omnidirerectional Radio Range）

有効到達範囲内の民間航空機に対して方位信号を示す信号を発射している施設を VOR（超短波全方向式無線

標識施設）という．

・DME（Distance Measuring Equipment）

機上の DME 装置（インタロゲーター）から，距離を測定する相手側の地上 DME 局（トランスポンダー）に向けて質問パルスを送信し，地上 DME 局から応答パルスが戻るまでの時間を測定することにより航空機と地上DME局との距離を測定するシステムをDME（距離測定装置）という．

・ILS（Instrument Landing System）

着陸する航空機に対し，①侵入コースである滑走路中心線の延長線を示す電波，②通常は 3 度の侵入角度を示す電波，③滑走路末端からの位置を示す電波，をそれぞれ送信し，ILS 機上装置ではそれぞれの電波が示す中心線から偏移を把握・表示することにより航空機を適切な着陸コースと降下角度を誘導する装置を ISL（計器着陸装置）という．

・ガンセット

緊急時に管制通信を行う携帯型航空無線局（ポータブル無線機）のことをガンセットという．

（建築構造物）

・管制塔

航空管制官が目視により空港と周辺の航空機を管制している施設を管制塔という．その内容は，離着陸に関する許可や指示を与える飛行場管制業務，誘導路から駐機スポットへ至る航空機とその周辺の車両の管制を行う地上管制席における業務，レーダー管制所との調整や運航情報官との調整を行う飛行場調整席における業務，さらに離着陸の多い空港に見られる目的空港までの経路や飛行高度の承認を伝える管制承認伝達席における業務に大別される．

・旅客ターミナル

旅行者が地上交通と航空機相互を乗り継ぐ間を快適に過ごし，必要な航空会社や関係する機関の手続きを誰にも分かりやすく，安全かつ円滑に行われることを支援する機能を有する施設を旅客ターミナルビルという．

【地震リスク評価に関する用語】

・地震リスクマネジメントの主体者

地震リスクをハードやソフト対策により直接コントロールする立場の者を主体者という．なお，空港には，拠点空港（会社管理空港，国管理空港，特定地方管理空港），地方管理空港，共用空港，その他の空港，あるいはコンセッション方式が導入される空港があり，それぞれで主体者は異なる．

・地震危険度

対象地点において，将来発生が予測されている地震動の強さと，それが発生する頻度（確率）を表したものを地震危険度（地震ハザード）という．地震危険度の表記方法として，地震動強さ（加速度や加速度応答スペクトル等）とその年超過確率を表した地震ハザード曲線や，マルチイベントモデルによるイベントハザード曲線等がある．

・マルチイベントモデル

複数かつ多数のシナリオ地震で表現される地震ハザードモデルをマルチイベントモデルという．マルチイベントモデルに基づき，シナリオ地震別の地震動強さ（加速度，速度等）とその年超過確率（各シナリオ地震の発生確率の累積）を表した曲線をマルチイベントモデルによるイベントハザード曲線という．また，地震

動強さの順にシナリオ地震の名称，マグニチュード，年発生確率，年超過確率を一覧表にしたものをイベントリストという．

・シナリオ地震

活断層や海溝型の地震等，特定の名称でその発生が予想されている地震，あるいは震源が特定できないものの，周辺地域で発生が予想される背景地震等をシナリオ地震という．

・閾値（しきいち）

境目となる値．地震動強さや損失などについて，意思決定の指標となる境目の値をいう場合が多い．

・超過確率

確率変数がある値（閾値）を超える確率を超過確率といい，年間当たりの超過確率を年超過確率とするなど，期間を定めて使われることにより，意思決定者は閾値を超える危険側の確率を把握できる．

・非超過確率

１から超過確率を引いたもので，意思決定者は閾値を超えない安全側の確率を把握できる．

・再現期間

対象とする事象の単位時間当たりの平均発生回数の逆数として求められる．また，年単位で表現し，かつ年超過確率が微小な場合，その逆数となる．シナリオ地震といった対象事象の発生頻度を表現するための代表（特性）値に多用されるが，再現期間内に必ず1回は対象事象が発生するわけではない．

・供用期間

構造物を使用する予定の期間（年数）を供用期間という．供用期間は，リスク評価の対象期間を限定することにより超過確率/非超過確率をより有意なものとする．公共施設運営権を設定する場合，当該期間を指す場合もある．

・地震動に関する距離減衰式

地震動強さと震源からの距離との関係を示したもので，地震が発生した場所から遠くなればなるほど，地震動強さが減衰する現象のことを距離減衰という．距離減衰式は，地震動強さ（加速度，速度等）と震源からの距離や深さ等との関係を式に表したものである．

・津波に関する距離減衰式（津波距離減衰式）

津波高さを地震の規模と津波の伝播距離との関係式で表したものを津波距離減衰式という．

・工学的基盤/工学的解放基盤

表層地盤による影響を受けないものとして，工学的基盤（十分な層厚と剛性を有し，せん断波速度が約 350～400m/s 以上の地盤）が露頭した状態の地盤を工学的解放基盤という．

・加速度応答スペクトル

1 自由度系の固有周期を横軸にとり，その各固有周期に対して求めた最大加速度を縦軸にプロットして，そのプロットを結んだ曲線を加速度応答スペクトルという．

・液状化指数（P_L 値）

各土層の液状化強度を深さ方向に重みをつけて足し合わせた値を P_L 値といい，その値が大きい程，ある地点

の液状化の可能性が高いことを意味する．

・液状化危険度関数

地震動強さに従い，P_L 値をプロットして，そのプロットを結んだ曲線を液状化危険度関数という．

・被害要因

地震による被害は，津波による被害，液状化による地盤被害，構造物の損傷，設備機器の損傷といった様々な事象が複合的に発生して生じるものである．このような施設に生じる個々の被害を被害要因という．

・ユニット

地震リスクの評価単位の一つであり，離間や機能面等で区画化された範囲をユニットという．

・コンポーネント

地震リスクの評価単位の一つでり，ユニットの構成要素（構造物）をコンポーネントという．

・システムモデル

空港や生産施設は，種々のユニットやコンポーネントが連なりシステムとして構成されている．一般的にシステムは，直列型，並列型，あるいはそれらの混合型のモデルに分類される．ユニットやコンポーネントを直列型や並列型等のブロック図として示したものをシステムモデルという．

・フラジリティカーブ

地震動強さに従い被害要因の損傷確率を表した曲線をフラジリティカーブという．フラジリティカーブは，構造信頼性理論に基づき，解析的もしくは統計的に求められる．地震動強さの確率分布と抵抗力の確率分布を重積分することにより，求めることができる．

・複合偏差

種々の不確実性から求められる標準偏差を複合偏差といい，一般的には不確実性をもつ複数の要因の標準偏差の二乗和平方根として算出される．

・イベントツリー

被害の進展や連鎖的発生，組合せなどを分析/評価するために，地震の発生を発端事象として被害の発生過程を樹形図で表した図をイベントツリーという．イベントツリーに現れる被害要因別の分岐については，フラジリティカーブで示される被害要因別の損傷確率を用いる．

・復旧曲線

発災からの経過時間に従い，対象施設の性能回復率を示した曲線を復旧曲線という．復旧曲線は，システムモデルに損傷確率や復旧期間を与えることで求められる．性能回復率が確率関数で表現される場合，復旧曲線が無数となることから，期待値などで代表した値で描画される．

・健全度曲線

発災からの経過時間に従い，対象施設の健全確率を示した曲線を健全度曲線という．健全度曲線は，復旧曲線と同様に，システムモデルに損傷確率や復旧期間を与えることで求められる．

・復旧期間の期待値（RTE; Recovery Time Expectancy）

復旧曲線から求められる復旧期間の期待値（平均値）を RTE という．

・ボトルネック指標（BI; Bottleneck Index）

施設を構成するユニットやコンポーネント毎に求めた復旧期間の期待値に，ユニットやコンポーネントの重要度を乗じて求めた指標をボトルネック指標という．ボトルネック指標は地震対策の優先度が高い程，大きな値となる．

・地震損失関数（地震ロス関数）

地震時に構造物に生じる損失の期待値や 90%非超過値を地震動強さに応じて示した関数を地震損失関数，または地震ロス関数という．なお，期待値とは確率を重みとして算出した確率変数の平均値，すなわち加重平均である．一方，90%非超過値は，その値以下の確率が 90%になる値である．

・リスクカーブ及びイベントリスクカーブ

地震による損失とその年超過確率の関係を表した曲線をリスクカーブという．一方，損失とその損失を生じさせるシナリオ地震の年超過確率との関係を表した曲線をイベントリスクカーブという．

・年間損失期待値（ALE; Annual Loss Expectancy）

地震により予想される損失の年間当りの期待値（加重平均）を年間損失期待値（ALE）という．なお，年間損失期待値は AAL（Average Annual Loss）と呼ばれる場合もある．

・予想最大損失（PML; Probable Maximum Loss）

地震により予想される最大損失で，国内では一般的にリスクカーブやイベントリスクカーブの年超過確率 1/475 に相当する損失を予想最大損失（PML）という．

・財務ストレス関数

各シナリオ地震による地震動強さを横軸，縦軸に業績指標（流動比率，当座比率，自己資本比率等）を示した関数を財務ストレス関数という．財務ストレス関数は，地震リスク（除去損，逸失利益，再建費）を考慮した財務影響分析により算出される．

参考文献

1) 財団法人 港湾空港建設技術サービスセンター: 空港工学, P.500, 平成 22 年 10 月 20 日.

２．空港の概要

２．１　空港の地震時の要求性能

地震時に空港に求められる性能としては，救急・救命活動等の拠点機能，緊急物資・人員等輸送受け入れ機能がある．また，民間航空ネットワークを維持し，国内及び空港背後圏経済活動の持続的発展を確保することも求められる．なお，空港総体に求められる要求性能は，空港の種類や発災からの経過時間（期限）に応じて異なることにも留意する．

【解説】

平成 19 年 4 月に公開された「平成 18 年度 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），国土交通省航空局」[1]（以下，地震に強いあり方）によれば，緊急輸送の拠点となる空港では，①救急・救命活動等の拠点機能（発災後極めて早期の段階），②緊急物資・人員等輸送受け入れ機能（発災後 3 日以内）が求められている．また，航空輸送上重要な空港（緊急輸送の拠点となる空港のうち，特に，航空ネットワークの維持，背後圏経済活動の継続性確保において重要と考えられる空港）では，③発災後 3 日を目途に定期民間航空機の運航が可能となる機能，④地震災害による経済損失の半減を目指し，再開後の運航規模は，極力早期の段階で通常の 50％に相当する輸送能力を確保，⑤航空ネットワークの維持及び背後圏経済活動の継続性確保と首都機能維持が求められている．ここで，航空輸送上重要な空港とは，地震に強い空港のあり方によれば，東京国際空港，成田国際空港，中部国際空港，大阪国際空港，関西国際空港，新千歳空港，福岡空港，那覇空港，仙台空港，新潟空港，広島空港，高松空港，鹿児島空港の 13 空港とある．

以上のことから，本ガイドラインで考える地震時の空港の要求性能とは，救急・救命活動等の拠点機能，緊急物資・人員等輸送受け入れ機能，定期民間航空機の運航が可能となる機能，航空ネットワークの維持及び背後圏経済活動の継続性確保と首都機能維持となる．

なお，上述からも分かるように，空港総体に求められる要求性能は，航空輸送上重要な空港とそれ以外の空港では異なる．また，「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，内閣府中央防災会議幹事会」[2]では，発災からの経過時間に応じた応急対応活動の内容や目標が示されている．これにより，空港の役割や要求性能も経過時間（期限）に応じて変化することになる．

参考文献

1) 国土交通省航空局 地震に強い空港のあり方検討委員会: 平成 18 年度 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），平成 19 年 4 月 27 日．
2) 内閣府 中央防災会議幹事会: 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, 2015

２．２　空港のリスクマネジメントの主体者

本ガイドラインにおいては，地震リスクマネジメントを実施する主体者を空港の運営・管理者とする．なお，空港には，拠点空港（会社管理空港，国管理空港，特定地方管理空港），地方管理空港，共用空港，その他の空港がある．この他，公共施設等の運営権を民間事業者に与える，コンセッション方式が導入される運用形態もあり，空港の運営・管理者は様々である．

【解説】

空港に関わりをもつ利害関係者は空港の利用者を含めて多様であり，それぞれの立場で被るリスクの内容や重篤性が異なる．このため，誰の視点に立つかによってリスクマネジメントの目標や対策が変わってくる．したがって，誰の視点でリスクマネジメントを実施するかを明確にしなければならない．本ガイドラインでは，地震リスクマネジメントの視点はあくまでも地震リスクをハードやソフト対策により直接コントロールできる立場にある空港の運営者や管理者が主体者となる．例えば，空港の種類と運用形態を表-2.2-1[1]に示すが，同表に基づけば，地震リスクマネジメントの主体者としては，国，地方公共団体，あるいは国が指定した会社が該当する．この他に，公共施設等の運営権を民間事業者に与える，いわゆるコンセッション方式が導入される運用形態もある．なお，コンセッション方式は，土地や施設の所有権を国に残したまま，一定期間（30～50 年程度）の施設の運営，維持及び整備等を民間企業に任せ，民間企業は利用料の徴収権を得る仕組みであり，この場合，主体者は運営権等を任された民間企業となる．

表-2.2-1　空港の種類と運用形態 [1)]

<table>
<tr><th colspan="2">空港の種類</th><th>空港の定義と運用形態</th></tr>
<tr><td rowspan="3">拠点空港</td><td>会社管理空港</td><td>国際航空輸送網または国内航空輸送網の拠点となる空港のうち，会社が管理する空港（空港法 4 条 1 項）
国が指定した会社が設置・運営を行っている．</td></tr>
<tr><td>国管理空港</td><td>国際航空輸送網または国内航空輸送網の拠点となる空港のうち，国が管理する空港（空港法 4 条 1 項）
国が設置・運営を行っている．</td></tr>
<tr><td>特定地方管理空港</td><td>国際航空輸送網または国内航空輸送網の拠点となる空港のうち，地方が管理する空港（空港法 4 条 1 項）
国が設置を行ったが，地方公共団体が運営を行っている．</td></tr>
<tr><td colspan="2">地方管理空港</td><td>国際航空輸送網または国内航空輸送網を形成する上で重要な役割を果たす空港（空港法 5 条 1 項）
地方公共団体が設置・運営を行っている．</td></tr>
<tr><td colspan="2">共用空港</td><td>空港法附則 2 条 1 項に規定する空港
自衛隊が設置・運営を行っているが，一般の人も利用している．</td></tr>
<tr><td colspan="2">その他の空港</td><td>上記以外の空港（空港法 2 条 1 項）</td></tr>
</table>

一つの空港，一つのシナリオ地震にあって，複数の主体者が同時に存在するが，主体者の立場により，リスク評価の対象が異なる．空港総体の要求性能の設定に際し，主体者間の合意形成に留意する必要がある．

参考文献

1) 地域経済ラボラトリ: 空港の種類, http://www.region-labo.com/archives/term/term-281/, 2015.

３．地震リスクマネジメントの基本的な考え方

３．１　地震リスクマネジメントの考え方と特徴

本ガイドラインで示す地震リスクマネジメントとは，対象施設総体の地震リスクを確率論的手法により評価し，その結果から空港の機能発現の妨げとなる要因を抽出すると共に，具体的かつ効率的な対策を検討・実施するための意思決定手法である．

【解説】

地震リスクマネジメントは，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，このような問題に対し，合理的な判断基準を示すと共に，効率的な対策を提供する体系化された意思決定支援の枠組みである．地震リスク評価では，個別に設計あるいは耐震診断された各種構造物の役割を，空港の機能という面から統合し，施設全体の損失額，機能性・健全性といった指標で評価するのが特徴であり，致命的な被害要因や問題の発見を容易にする．また，確率論的手法を使うことで最悪を含めた様々な被害を網羅的に評価するため，発現被害の見逃しを最小限にするところも特徴である．

なお，内閣府から事業継続ガイドライン[1]が公開されたことを機に，事業継続計画（BCP; Business Continuity Plan）を導入する企業等が増えつつある．BCP は経営資源が失われたことを前提に，事業中断による影響を効率的に軽減するための事後対応策に主眼を置いた結果事象型の考え方である．一方，本ガイドラインで示す地震リスクマネジメントは，定量的に評価した地震リスク情報に基づき，リスクを如何に効率的にコントロールするかを支援する手法であり，その対策の中には，耐震補強に代表される事前対策から金融対策等のソフト対策，あるいは BCP で実施するような要員参集や復旧資材の調達等の事後対応策までが含まれる．したがって，図-3.1-1 に示すように，本ガイドラインに示す地震リスクマネジメントは，地震に対する BCP を包含していると言える．

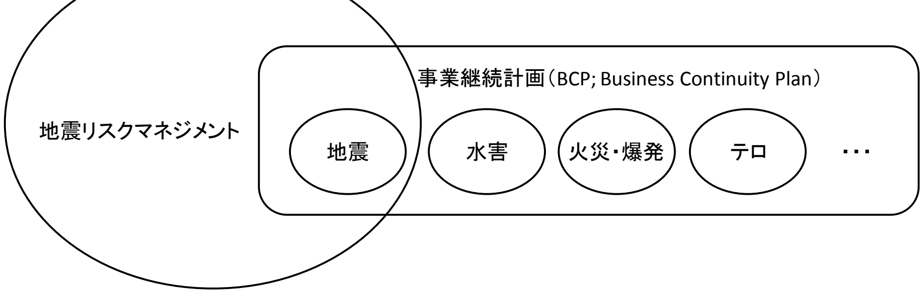


図-3.1-1　地震リスクマネジメントと BCP の関係

参考文献

1) 内閣府: 事業継続ガイドライン第一版, P.50, 2007.

３．２　地震リスクの定義

本ガイドラインにおいては，地震リスクを財物損失額，逸失利益，復旧曲線，健全度曲線及び逸失死者数で表すものとする．

【解説】

地震リスク情報は，一般的には，人命損失，財物損失額，復旧期間等からなる．本ガイドラインにおいては，地震リスクは財物損失額，逸失利益，復旧曲線，健全度曲線及び逸失死者数で表すものとする．

３．３　地震リスク評価の要件

地震リスク評価手法に必要な要件は，一般化している既存の解析技術を利用する，解析手法の誤差を明らかにする，現行の耐震設計手法と整合性を持たせる，解析手法の精粗のバランスを考慮する，の 4 点が考えられる．

【解説】

（1）一般化している既存の解析技術を利用する

リスク評価手法は，現行の設計手法や既存技術と隔絶したものではなく，身近な技術の融合によって具現化する必要がある．その理由は，既存の解析技術は様々な研究や実験，シミュレーション等を通じて検証あるいは高度化されており，技術に内在する未知性は少なからず淘汰されている．また，適用範囲が明確で，不確実性についてもある程度把握することができる．リスク評価においては，この不確実性（推計誤差）が把握できることは非常に重要である．さらに，一般化している既存技術は説明が容易で，被説明者が理解し易い利点もある．

開発途上の技術やリスク評価のための新たな開発技術は，その不確実性について不明な点が多く，確率論的リスク評価には好ましくない．

（2）解析手法の誤差を明らかにする

リスク評価手法は，例えば地震危険度評価，地盤増幅，耐力評価など様々な解析手法によって構成される．そして，個々の解析手法の誤差，あるいはリスク評価手法全体として不確実性（実際との乖離）を明らかにする必要がある．具体的には，被害事例や実験結果，観測記録などを収集し，個々の解析手法の誤差を統計的に評価する．また，実際の損害額とリスク解析結果とを直接比較し，その差を評価する方法もある．確率・統計的アプローチを採る以上，評価手法の誤差を明らかにしなければ蓋然性を担保できないからである．蓋然性が前提でないと確率論的アプローチそのものが利用できないことになる．

（3）現行の耐震設計手法と整合性を持たせる

構造物の設計図書，特に構造計算書の諸数値をリスク評価にそのまま利用できるように配慮する必要がある．理由は，リスク評価の作業量を削減できること，設計技術者と設計時に付与される耐震裕度や具体的な耐震性能レベルについての情報を共有でき，地震対策について建設的な議論ができること，である．また設計に使われる耐震性能指標とリスク値との整合を示すことができ，被説明者やステークホルダーがリスク情報を理解する上でより効果的となるからである．

（4）解析手法の精粗のバランスを考慮する

リスク評価手法には，要素技術となる種々の解析手法があるが，個々の精度にあまり拘らず，むしろそれぞれの精度のバランスを考える必要がある．理由は，一つの解析手法の精度が良くても，他の手法の精度が悪ければ全体の精度は悪くなる．一つの要素技術をいたずらに細密化しても，全体の結果に反映されるのは僅かである．このことを認識し，全体としての精度を考えることがリスク評価の実務において重要である．

４．地震リスク評価

４．１　地震リスク評価の概要と流れ

本ガイドラインにおいては，リスクマネジメントの目標と評価範囲を設定し，施設の情報収集と分析を行った上で，ハザードの設定，地盤増幅特性と液状化危険度の評価，地震リスク評価モデルの作成及びフラジリティカーブの評価を行い，地震リスクの評価を行うものとする．

【解説】

地震リスク評価のフローを**図-4.1-1** に示す．地震リスクマネジメントを実施する際には，事前に明確な目標ならびに地震リスクの評価範囲を設定しなければならない．目標については，例えば，復旧期間 10 日以内とする，発災から 3 日以内に緊急物資・人員輸送を行う，等の具体的な数値目標である．空港事業者は，現状の地震リスクと目標を比較することで，対策の必要性を当該空港の関係者間で共有することができる．一方，評価範囲については，1.2 の解説で述べたように，基本的には空港外部を含めた全ての施設/機能とするが，目的や責任の範囲/裁量に応じて適宜設定する．以降，各節で**図-4.1-1** のフローの各項目について詳しく解説する．

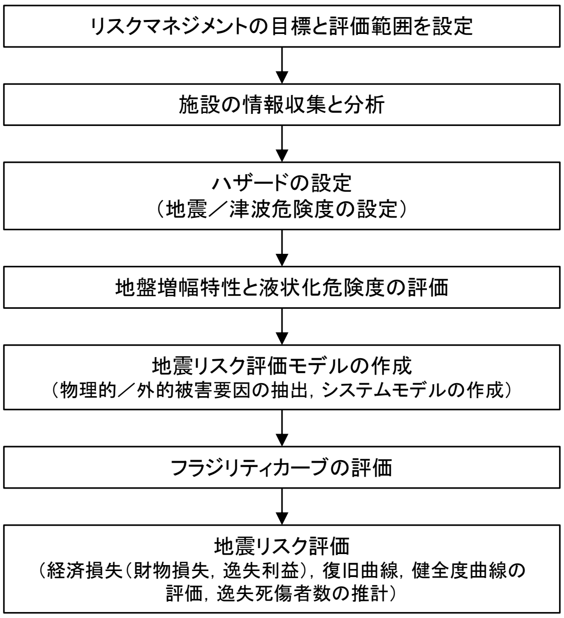


図-4.1-1　地震リスク評価のフロー

４．２　施設の情報収集と分析方法

４．２．１　情報収集と分析

空港の施設等に関連する情報の収集を行う．情報は，空港施設の構成や配置が分かる情報（配置図），各種構造物の設計図書（耐震診断書を含む），ボーリングデータ等の地盤情報，非常用電源を含む電力系統の構成が分かる情報，空港管制に係る設備（VOR/DME（超短波全方向式無線標識/距離測定装置），ILS（計器着陸装置），ガンセット（携帯用航空機無線）等）の配置，運用に関する情報等である．さらに航空機燃料の貯蔵，運搬，供給方法，空港へのアクセス方法等の情報も収集する必要がある．

【解説】

（１）各種構造物の設計図書について

設計図書は，基本的には構造物の耐震性能を評価するために用いるが，例えば，ターミナルビルの設計図書などは，衛生，空調，電力の各種設備や手荷物搬送システム，PBB（Passenger Boarding Bridge）等の配置や構成を把握するためにも用いる．

（２）地盤情報について

地盤関連の情報として，土質柱状図や土質試験結果等が記載されている地盤調査報告書を複数個所収集する．その際，

土質柱状図の深部が洪積層まで到達しているか，成層性の仮定は妥当か，を確認する．また N 値，PS 検層や密度試験，3 軸振じり試験等，土質試験の精粗を確認する．

（3）非常用電源を含む電力系統について

買電は，最長で 3 日程度は停止するとの前提で，利用可能な空港敷地内の自家発電機を調べる．その際，発電機は空港管制や照明器具等の負荷を擁しているか，あるいは簡単な配線作業で送電可能か，燃料供給，冷却水の継続性などから発電機の稼動時間はどの程度か，などを確認する．

（4）空港へのアクセスに関する情報について

地震リスク評価では，空港へのアクセスも空港機能を担う重要な施設として考慮する．空港へのアクセス方法は，一般的に鉄道（モノレールを含む），道路，海上航路の 3 種であり，またアクセス経路もそれぞれ複数存在する場合がある．アクセス情報の収集では，鉄道や道路の広域性から，考慮すべき範囲，ならびに経路の冗長性を確認することが重要である．また，落橋や駅舎等の損傷など，アクセスが機能不全となる被害要因を確認する．

４．２．２　ウォークダウンの実施

空港の各施設の運営/管理者随行の下，ウォークダウン（現地踏査）を実施する．同時に各施設の運営/管理者からのヒアリングを実施する．

【解説】

ウォークダウンは実効性の観点から以下の点に注意し，実施する．

（1）事前に収集した情報との整合性の確認

空港施設の構成や配置が分かる情報（配置図）や各種構造物の設計図書（耐震診断書を含む）等の情報と，現場との整合性を確認する．

（2）老朽化，劣化等の確認

各種構造物について，耐震性能に影響を与えるような著しい老朽化や劣化があるかどうかを確認する．著しい老朽化や劣化が認められる場合は，耐震性能評価において，これを考慮する．

（3）従属被害や相互干渉の確認

諸設備の地震損傷による変形，脱落，移動等に起因して生じる干渉や衝突等，相互干渉や被害が従属して発生する可能性を調べ，物理的被害要因になり得るか否かを確認する．

（4）二次災害の確認

構造物等による津波浸水の遮水効果や漂流物の衝突被害，液状化による地盤変状による影響，出火による延焼・爆発被害，可燃物等の漏洩に起因する二次災害等の可能性を確認する．

（5）ヒアリング

ウォークダウンでは，施設の運営/管理者に対して，緊急時の行動や手続きについてのヒアリングを行う．ヒアリングの内容は，どの程度の揺れを以って緊急時とするか，その場合の施設点検の内容や範囲，点検に必要な時間，さらに具体的な被害状況を問いかけ，その状況下での対応や作業について聞き取る．

その他，施設の管理主体が異なる場合の連絡や連携，指揮命令系統などについても確認する．

４．３　ハザードの設定

４．３．１　ハザードの基本的考え方

自然災害に関するハザードは，その立地で自然災害が発生する潜在的な危険度を表し，一般的にはその発生を対策により抑制できない事象である．本ガイドラインにおける地震リスク評価では，ハザードとして，地震危険度及び津波危険度を考慮する必要がある．

【解説】

自然災害に関するハザードは，例えば，地震，津波，豪雨，高潮，火山の噴火等の潜在的な危険度や外力を表し，一般的にはその発生を人為的な対策により抑制できない事象である．このため人為的に選択できる能動的リスクと対比して，受動的リスクとなる．地震危険度と津波危険度は，その評価方法に違いはあるものの，地震リスク評価では，地震と津波，双方の被害を考慮する．

４．３．２　地震危険度の設定

空港の地震リスク評価における地震危険度は，特定の地点に所在する施設，広域に散在する施設の区別なく評価できる複数震源モデル（マルチイベントモデル）を用いる．

【解説】

地震危険度（地震ハザード）とは，ある対象とする地点で，将来発生する可能性のある地震動強さ（加速度，速度等）と，それが発生する頻度または確率を表したものである．したがって，地震ハザードの評価では，地震の発生時期，場所及び規模を予測すると共に，地震が発生した場合に対象地点で生じる可能性のある地震動強さを評価することになる．

地震ハザードに関する情報としては，2005 年に地震動予測地図 [1)]が公表され，防災科学技術研究所の Web サイト [2)]にて，日本全国の各地点で地震ハザード曲線（**図-4.3.2-1**）が取得できるようになっている．ここで，地震動予測地図等でも公開されている地震ハザード曲線は，Cornell の方法 [3)]に従ったものが一般的である．これは特定の地点における地震動強さの最大値の確率分布となっているため，広域に散在する空港施設の同時被災を評価できない．そこで，本ガイドラインではシナリオ地震をベースとした複数震源モデル（マルチイベントモデル）による方法を用いる．

マルチイベントモデルで考慮するシナリオ地震は，地震の発生メカニズムやタイプ，さらに地震危険度評価用の地震モデルの違いも考慮しつつ，以下の 5 種類に分類する．

① 地表面に断層として表れない中規模な地殻内地震
② 活断層による大規模な地殻内地震
③ 活断層と関連しない大規模な地殻内地震
④ 大規模な海溝付近の地震
⑤ 日本海東縁海域の大規模な地震

このうち，①の地表面に断層として表れない中規模な地殻内地震は，位置や規模を特定できない地震に相当する．このような地震は，対象地点の直下のごく浅いところで発生する場合があり，規模が比較的小さくても被害を及ぼす可能性があるため，マグニチュード 5.0 程度以上の中規模な地震も対象とする．①の地震を背景地震と呼び，地震の活動度が一定と見做せる地震域を設定した上で，同域内で発生した過去の地震の平均的な震源深さを断層中心とし，地震規模に応じた断層長さを有する走向ランダムな鉛直断層を想定することができる [4 等)]．

地震規模がある程度大きくなると，地震断層として痕跡を残すと考えられることから，マグニチュード 7.0 程度を超える大規模な地震は②の活断層による大規模な地震として取り扱う．但し，2000 年鳥取県西部地震（M7.3）や 2008 年岩手・宮城内陸地震（M7.2）のように，マグニチュード 7.0 程度でありながら，陸域で活断層が知られていないところで発生する大規模な地震もあるので，それを③の活断層と関連しない大規模な地殻内地震として取り扱う．以上の①～③は，いずれも地殻内地震に分類される．

一方，④の大規模な海溝付近の地震は，プレート境界の沈み込みによって発生するプレート間地震と，プレート内部で発生するプレート内地震を含む．また，プレート境界付近でも中規模な地震が頻繁に発生しているが，いずれも陸域から離れたところで発生し，建物や施設に被害を与えることは稀なので，海溝付近で発生する地震としては大規模なもののみを対象とする．

⑤の日本海東縁海域の大規模な地震は，日本海東縁海域でしばしば大規模な地震が発生しているため，被害を及ぼす可能性のあるシナリオ地震として設定する必要がある．この海域は，巨視的にはプレート境界の一種と考えられているが，太平洋側で見られるように，海洋プレートが大陸プレートに沈み込むのとは異なるメカニズムで発生していると考えられている．

一方，マルチイベントモデルによる特定の地点での地震危険度は，**図-4.3.2-2** に示すイベントハザード曲線を用いて記述できる．同図はシナリオ地震の深さや距離，マグニチュード等をパラメータとした距離減衰式を使い，シナリオ地震毎に対象地点での地震動強さを求め，これを各シナリオ地震の年発生確率を累積して求めた超過確率に対してプロットすることで求められる．また，イベントハザード曲線の特徴は，地震動強さの不確実性を考慮していない点にある．つまり距離減衰式から得られる平均的な値をプロットしているに過ぎない．この理由は，不確実性は後述するフラジリティカーブに含める方が，リスク評価が簡便になるからである．なお，**図-4.3.2-3** に示すように，シナリオ地震の発生確率に距離減衰式の不確実性（ばらつき）を，超過確率として乗じ，シナリオ地震毎に積分すると**図-4.3.2-1** に示す地震ハザード曲線を求めることができる．このように得られた地震ハザード曲線は，マルチイベントモデルを構成するシナリオ地震

に漏れがなければ，Cornell の地震ハザード曲線と一致する．

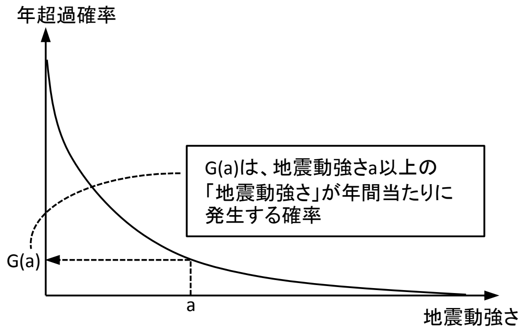


図-4.3.2-1　Cornell の方法により求めた地震ハザード曲線

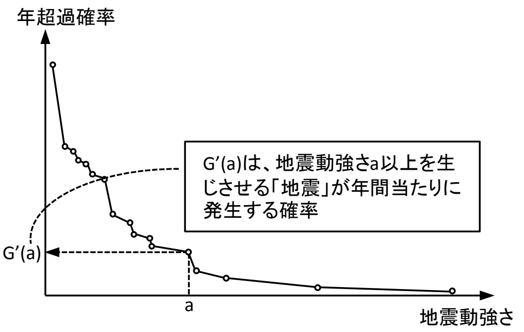


図-4.3.2-2　マルチイベントモデルを用いたイベントハザード曲線

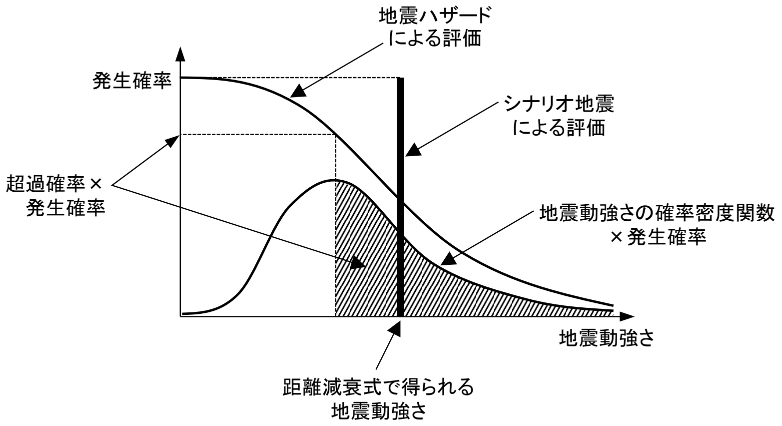


図-4.3.2-3　地震ハザード曲線とイベントハザード曲線の関係 5)

参考文献

1) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会（2005）：「全国を概観した地震動予測地図」報告書，平成 17 年 3 月 23 日，http://jishin.go.jp/main/chousa/05mar_yosokuchizu/index.htm

2) 防災科学技術研究所: J-SHIS 地震ハザードステーション, http://www.j-shis.bosai.go.jp/

3) Cornell, C. Allin：Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1698.

4) 宇賀田健: シナリオ地震による日本全国の地震危険度評価，日本建築学会構造系論文集，第 541 号, pp.95-104, 2001.

5) 中村孝明，宇賀田健: 地震リスクマネジメント，技報堂出版, P.290, 2009.

４．３．３　津波危険度の設定

津波危険度については，マルチイベントモデルで抽出された各シナリオ地震に対して，対象施設周辺における沿岸部での津波高さを推定して，対象施設が位置する敷地での浸水確率を算出する．

【解説】

津波被害の発生確率は，予測される津波高さが評価対象サイトの防潮堤や護岸等の高さを越波する確率として算出する．また，越波した津波の浸水範囲は，対象施設の標高を考慮した評価を行うと共に，津波浸水の範囲や高さなどから，適宜津波被害を想定する．

一般的に，海岸での津波高さの予測は，津波距離減衰式による方法，非線形長波理論による平面 2 次元解析，3 次元 VOF（Volume of Fluid）法などがある．VOF 法は，自由水面を有する複雑な流れを再現する方法として利用され，構造物

周辺に回り込む流れを精緻に分析したり，建物への津波流体力を計算するなど，3 次元の効果を細かく再現する場合に威力を発揮するが，計算時間がかかるため，リスク評価においては不向きである．従って，海岸での津波高さの予測は，津波距離減衰式による方法，あるいは非線形長波理論による平面 2 次元解析を用いる．

一方，陸域への津波の浸水範囲や浸水高さを知る場合には，レベル湛水法，ならびに前記した非線形長波理論に基づいた平面 2 次元解析などが妥当である．レベル湛水法は，来襲する津波高さを海岸で設定し，その水位がそのまま静的に，陸域に浸水するものとして浸水範囲を計算する方法である．陸域の標高のみによって決定するため，浸水範囲は安全側（より高い地域まで浸水範囲は広がる）の評価となる．但し，狭小域（谷間など）への遡上効果は考慮出来ないため，注意を要する．

津波距離減衰式による海岸での津波高さの予測は，阿部の津波距離減衰式[1)]を用いることができる．津波高さは以下の式で算出される．

$$\log H_t = M_w - \log \Delta - 5.55 \qquad (4.3.3\text{-}1)$$

ここに，H_t は津波高さ（全振幅），M_w は地震のモーメントマグニチュード，Δ は津波の伝搬距離である．なお，Δ が距離 r_0 以下の場合は，H_t は伝搬距離によらず，以下の式で算出される．

$$\log H_t = 0.5 M_w - 3.30 \qquad (4.3.3\text{-}2)$$

ここで，r_0 は以下の式である．

$$\log r_0 = 0.5 M_w - 2.25 \qquad (4.3.3\text{-}3)$$

津波距離減衰式のばらつきは，文献 1)を参照すると，常用対数の標準偏差で 0.19（自然対数の標準偏差に換算すると約 0.44）とされている．なお，(4.3.3-1), (4.3.3-2)式は，太平洋側（外洋）の津波を想定したものである．このため，例えば，内海の東京湾岸域の沿岸における想定津波高さと実際の津波高さには乖離があると推察される．そこで，過去の地震による津波高さの観測値や非線形長波理論によるシミュレーションによる既往の推定値を用いて津波高さを補正する必要がある．

津波被害の発生確率の評価フローを**図-4.3.3-1** に示す．同図は津波距離減衰式，ならびにレベル湛水法を用いたフローである．津波は，海域で発生する横ずれ断層以外の地震によって発生し，また，マグニチュード 7.0 以下の地震では被害を伴う大津波は発生しないと考えられている．したがって，まずマルチイベントモデルで抽出したシナリオ地震の中から，津波被害を生じさせる地震か否かを選別する必要がある．次にサイトから震源までの津波伝搬距離を計算し，津波距離減衰式を用いて評価対象サイトにおける津波高さを算出する．その際，適宜，津波高さの補正を行う．

一方，評価対象サイト周辺の防潮堤や護岸等の高さ等の防御物の高さを調査し，これと津波高さの確率分布を比較することで，津波が越波し陸域に浸水する確率が分かる（**図-4.3.3-2**）．ここで，津波高さは対数正規分布に従うものとし，ばらつきは文献 1)に基づき，対数標準偏差 0.44 を設定する．対象施設の標高調査から，越波した津波の浸水範囲を求め，津波浸水の範囲や水深（浸水高さ）などから，適宜津波被害の状況を想定する．津波被害の発生確率は津波の越波確率を用いる．

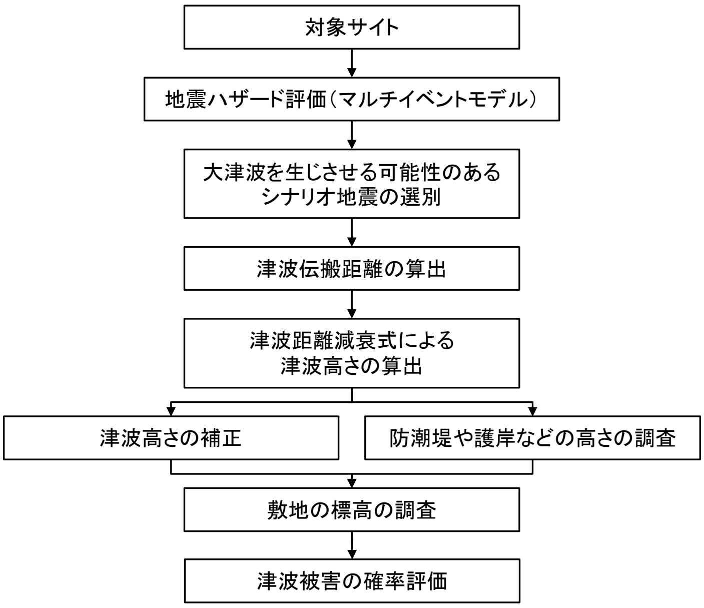


図-4.3.3-1　津波被害の発生確率の評価フロー

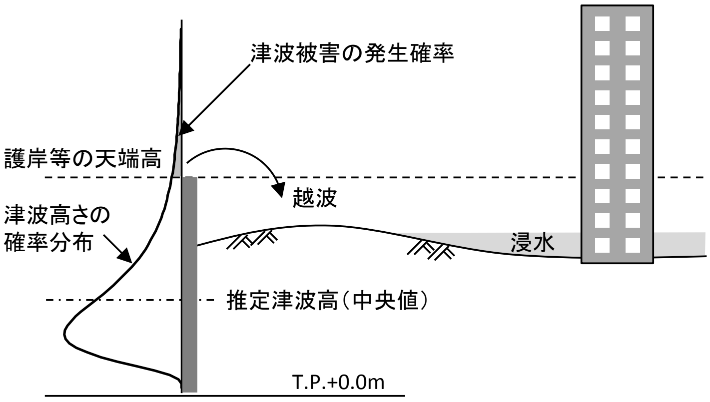


図-4.3.3-2　津波被害の発生確率の評価の説明図

参考文献
1) 阿部勝征: 地震と津波マグニチュードに基づく津波高さの予測，地震研究所彙報，第 64 冊第 1 号, pp.51-69, 1989.

４．４　地盤増幅特性と液状化危険度の評価

４．４．１　地盤増幅特性の評価

構造物の地震時の応答は，表層の軟らかい地盤の影響を受けることから，空港の敷地における地盤の周期増幅特性の評価を行う．

【解説】

構造物の応答は，表層の軟らかい地盤の影響を受けるため，表層地盤の周期増幅特性を明らかにする．周期増幅特性は，伝達関数（周波数応答関数），あるいは応答スペクトル比で表記する．空港施設は様々な周期特性を持った構造物が多数混在していることから，それぞれの地震応答を一定の精度を確保しつつ，簡便に評価する必要がある．そこで，構造物の応答の評価は，応答スペクトルをベースとした方法を使うことを前提に，本ガイドラインでは表層地盤の周期増幅特性は応答スペクトル比を推奨する．図-4.4.1-1 は表層地盤の応答スペクトル比の評価フローを示す．先ず，工学的解放基盤面における加速度時刻歴波形を用意する．加速度時刻歴波形は周期特性や最大加速度の異なる様々な波形を用意し，少なくとも 20 波以上は必要である．一方で，ターゲットとなるシナリオ地震が予め設定されている場合は，シナリオ地震固

有の地震波形を利用してもよい．そして，重複反射理論や非線形の逐次時刻歴解析などの手法を使い，地表面あるいは構造物の基礎底面での加速度時刻歴波形を計算する．工学的解放基盤面における加速度時刻歴波形の応答スペクトル $S_a^B(T)$ と，地表面あるいは構造物の基礎底面での応答スペクトル $S_a(T)$を求めた上で，それぞれの比を計算する．これが応答スペクトル比 $R_a(T)$である．求められた $R_a(T)$の平均を取ったものが，当該地盤の応答スペクトル比としてリスク評価に用いる．

ここで，地盤は歪に依存した剛性低下と減衰の上昇など，非線形の挙動を示すため，地震波の加速度レベルに応じて応答スペクトル比は異なる．このため，結果に与える影響が顕著と判断される場合，あるいはリスク評価の精度を求める場合には，加速度レベルに応じた複数のスペクトル比を用意する必要がある．これを示したのが**図 4.4.1-2** である．

重複反射理論や非線形の逐次時刻歴解析に用いる地盤物性は，当該敷地の土質や N 値，PS 検層や密度試験，3 軸振じり試験等の情報を基に地盤モデルを作成するが，多くは土質と N 値までの情報しかなく，PS 検層以上の物性情報は少ないのが実状である．このため，非線形の逐次時刻歴解析は望ましいものの，同解析を実施するに足りる情報は，限られることに注意する．

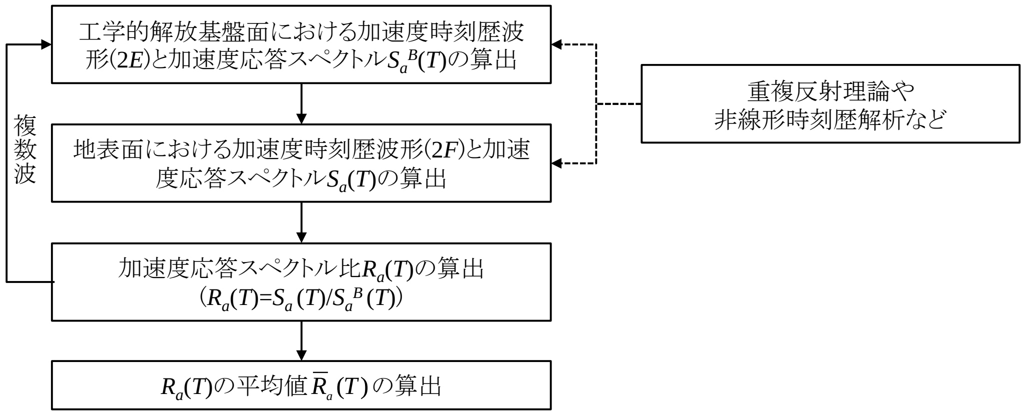


図-4.4.1-1　表層地盤の加速度応答スペクトル比の評価フロー

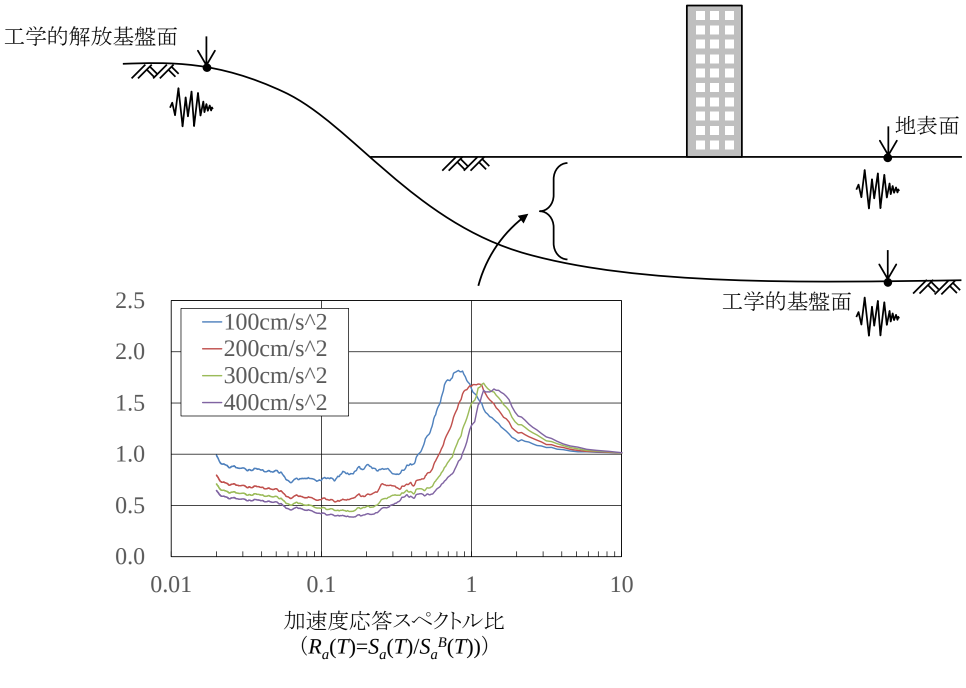


図-4.4.1-2　加速度レベルに応じた複数の加速度応答スペクトル比の概念図

４．４．２　液状化危険度の評価

地震リスク評価では，液状化による地盤被害が物理的被害要因の一つとなるため，液状化危険度の評価と共に，液状化被害の発生確率を評価する必要がある．

【解説】

地盤の液状化危険度の判定方法には，①地形地質や液状化履歴を基にした概略の判定法，②一般の土質調査，試験結果を基にした簡易な判定方法，③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な判定法，④模型振動台実験や原位置液状化試験を行う方法がある [1)]．このうち，②，③は設計時にもよく用いられており，地震リスク評価に適用できる判定手法といえる．例えば，②に関する代表的な手法としては，F_L 値法がある．F_L 値法は地盤内のある深さの液状化強度比と，その土に地震時に加わる繰り返しせん断応力比の比（F_L）をとって液状化に対する安全率をとり，$F_L \leqq 1.0$ であれば，液状化の可能性があると判定される．F_L 値は任意の深度における液状化の可能性を示す値であるが，その地点の地盤の液状化の可能性を示す P_L 値は，F_L 値から求められる．また，③には，室内液状化試験により液状化強度を求め，地震応答解析を行って地盤内に発生する繰り返しせん断応力を求めて，液状化判定を行う全応力解析と，地震時の土中の過剰間隙水圧の上昇，消散による有効応力の変化に応じて，土の応力－ひずみ関係を次々刻々変化させる有効応力解析がある．地震リスク評価では，②，③のような判定を適宜選択して行い（もしくは既往の判定結果を参照し），液状化危険度を把握する．

液状化危険度が高くても，液状化の程度や構造物の基礎形式によっては必ずしも被害を伴わない場合もあるため，液状化による被害の発生を判断するには，液状化時の基礎の沈下量や杭基礎の耐力等を算定する必要がある．一方，液状化被害の発生確率は，例えば P_L 値を用いて評価することもできる．評価フローを**図-4.4.2-1** に示す．図より，地震動の距離減衰式を使い，対象サイトでの地表面最大加速度（PGA; Peak Ground Acceleration）を求める．次に，対象サイトの地盤情報から様々な PGA の大きさに対応した P_L 値を計算する．これを“液状化危険度関数”と呼ぶこととし，例を**図-4.4.2-2** に示す．当該構造物に対して液状化に伴う構造物被害が発生する P_L 値を設定する．**図-4.4.2-2** の例では，P_L 値の閾値を 20 とすると，対応する PGA は 400cm/s^2 程度である．この PGA の評価には誤差があると考え，その誤差の分布は**図-4.4.2-2** のように対数正規分布とする．この時，400cm/s^2 が対数正規分布の中央値となり，この中央値を越える確率が液状化被害の発生確率になる．ここで，閾値については，過去の被害事例等から適宜設定することを推奨する．但し，被害事例がない場合や事例から閾値を設定できない場合は，平成 14 年 3 月発行の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 [2)] に記載される**図-4.4.2-3** を参照し，P_L 値＝20 を閾値としてよいものとする．**図-4.4.2-3** は，液状化時の流動化による地盤変位と P_L 値の関係を示したものであるが，概ね P_L 値が 20 を超えると大きな地盤変位が認められる [2)]．また，PGA に関する対数正規分布のばらつきは，構造物のフラジリティカーブで設定したものの最大値，もしくはそれよりも大きな値を設定する．なお，港湾の技術上の基準・同解説 [3)] においては，粒径に基づいて液状化の可能性を判定する方法と，地震応答解析により求めた等価加速度と等価 N 値の関係から液状化の可能性を判定する方法がある．例えば，地震応答解析を用いた液状化の判定結果と地震動強さの関係より，液状化被害の発生確率を評価するための中央値を設定することができる．

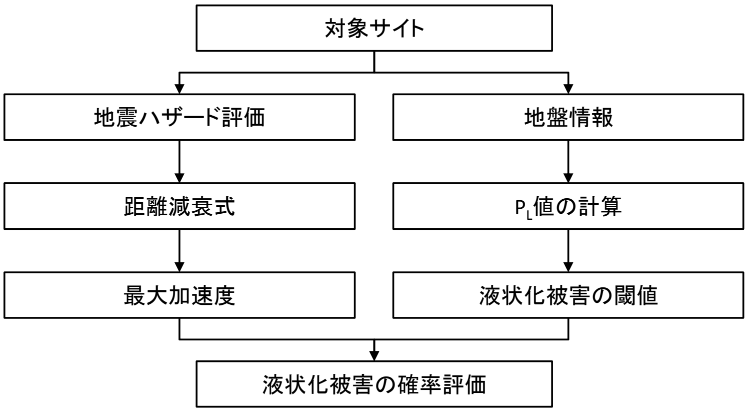


図-4.4.2-1　液状化被害の発生確率の評価フロー

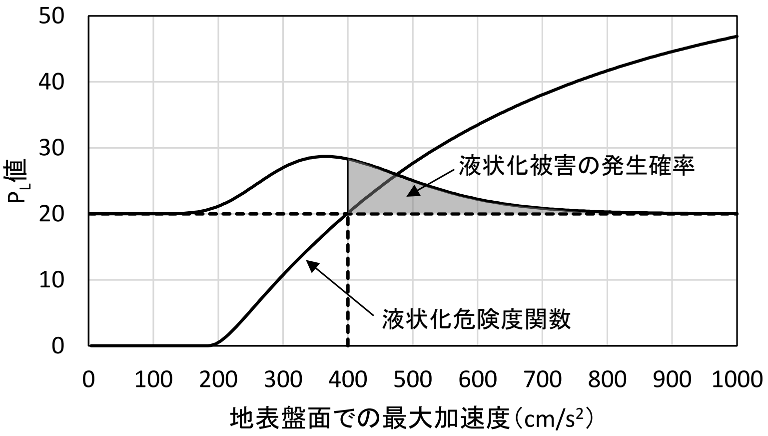


図-4.4.2-2　地表面最大加速度と P_L 値（液状化危険度関数）の例

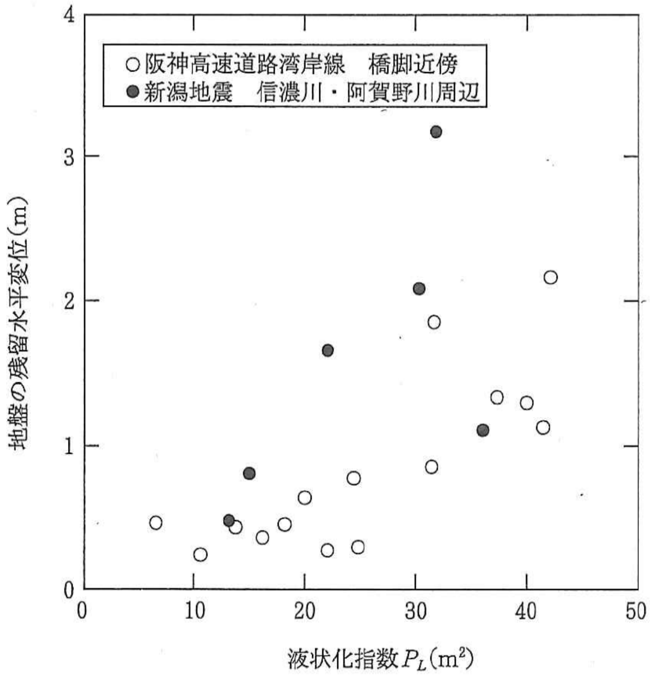


図-4.4.2-3　地盤の流動変位と液状化指数の関係 [2)]

参考文献

1) 鹿島建設　土木設計本部: 新・土木設計の要点⑩　耐震設計/性能設計　鹿島建設　土木設計本部編, 鹿島出版会, P.197, 2003.

2) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説　V 耐震設計編, P.406, 平成 14 年 3 月.

3) 社団法人日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説（上・下）, P.1485, 国土交通省港湾局監修, 平成 19 年 9 月.

４．５　地震リスク評価モデルの作成

４．５．１　物理的被害要因の抽出と機能復旧期間

地震リスク評価にあたっては，収集した情報やウォークダウン，施設の運営/管理者へのヒアリングに基づき，物理的被害要因を抽出し，併せて機能復旧期間を調査する．

【解説】
物理的被害要因は，揺れによる震動被害，液状化被害，津波被害，火災や危険物漏洩等の 2 次被害に類型化できる．液状化被害ならびに津波被害は，標高や地盤状況などから，発生しないことが自明な場合はこれを省く．火災についても，明らかに可燃物や着火源がない場合は，火災被害を省くことができる．また，被害要因や被害レベルに応じた機能復旧期間をヒアリングや復旧作業に要する期間等から調査する．その際，必ずしも恒久的な修復に拘るものではなく，応急復旧等により機能が回復する期間を優先的に考える．

表-4.5.1-1　物理的被害要因の例

空港施設等	被害要因	被害程度	復旧期間
旅客ターミナル	建屋被害	中破	15 日
		大破	60 日
	天井被害	落下	7 日
	上中水システム被害	破損	7 日

空港施設等	被害要因	被害程度	復旧期間
場周柵	液状化被害	液状化発生	5 日
	場周柵被害	破損	5 日
消防（消防車庫）	建屋被害	大破	30 日

表-4.5.1-1 は，旅客ターミナルビル，場周柵，消防車庫を取上げ，物理的被害要因の例を示したものである．例えば，旅客ターミナルビルは，構造体被害として中破と大破の 2 レベル考慮している．軽微被害は発生しても機能喪失に至らないから省き，また倒壊被害は耐震構造上ほぼ発生しないとの判断による．上中水システム被害は，洗面所等の水使用ができない場合は旅客ビルとして機能しないとの判断による．またそれぞれの被害の復旧期間を付記している．場周柵については液状化の発生，ならびに地震動による破損を考えている．場周柵の復旧は，完全復旧ではなく簡易的（仮設）な柵の作製期間として 5 日を設定している．作消防車庫については，大破した場合は消防車が出庫できないことを考慮し，大破のみを被害要因としている．

４．５．２　外生的要因の抽出

救急・救命活動等の拠点機能，ならびに緊急物資・人員等の輸送等，緊急時機能のリスク評価にあたっては，物理的要因に加え，外生的要因を抽出する．外生的要因による遅延期間も併せて調査する．

【解説】
大地震時における空港活用として，救急・救命活動等の拠点機能，ならびに緊急物資・人員等の輸送拠点としての機能等，いわゆる緊急時機能が求められている．しかしながら，地震被害は広域的に発生するため，緊急時に必要な資機材や要員の速やかな調達，参集は出来ない可能性が高い．外生的要因とは，主に空港外からの資機材の調達，指揮命令主事者や関連する作業員の参集等が遅延することで生じる緊急時機能の喪失要因である．また，施設の運営/管理者へのヒアリング等に基づき，緊急時機能に影響を与える要因があれば，これを抽出すると共に，遅延期間も調査する．

４．５．３　ユニットの分類

机上やウォークダウンにより収集した情報の分析結果に基づき，離間や機能面，地盤増幅特性や液状化危険度，構造物の種類等を鑑みて，空港の地震リスクの評価範囲について，離間や機能面等で区画化された範囲をユニットとして分類する．

【解説】
机上やウォークダウンにより収集した情報の分析結果に基づき，地震リスクの評価単位として，ユニット分類を行う．ユニットは**図-4.5.3-1** に示すように，機能面で独立している場合や離間等で区画化された範囲，さらにはそれら区画化された範囲において，同種の地盤増幅特性や液状化危険度でグルーピングできる範囲とする．また，**図-4.5.3-1** の下図にあるように，「買電と自家発電のどちらか一方が健全な場合は，電源機能は健全である」，といった機能の冗長性を表現する場合にも，図のようにユニットを配置する．買電と自家発電が機能的に独立していることが理由である．

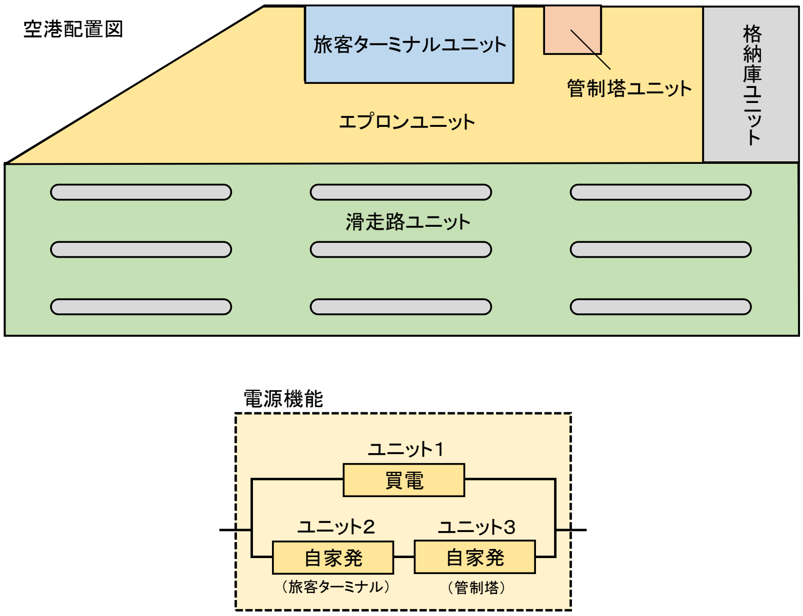


図-4.5.3-1　ユニットの分類例

４．５．４　コンポーネントの分類

ユニットと同様に，机上やウォークダウンにより収集した情報の分析結果に基づき，ユニットの構成要素（構造物）をコンポーネントとして分類する．

【解説】

一般的に，ユニットは種々の構造物で構成され，一つの機能，あるいは役割を持っていると考える．そして，ユニットを構成する構造物をコンポーネントと呼び，どれか一つでも地震時によって損傷すると，ユニットとしての機能が失われると考える．従って，システム上では，コンポーネントは必ず直列に構成されることを原則とする（図-4.5.4-1）．

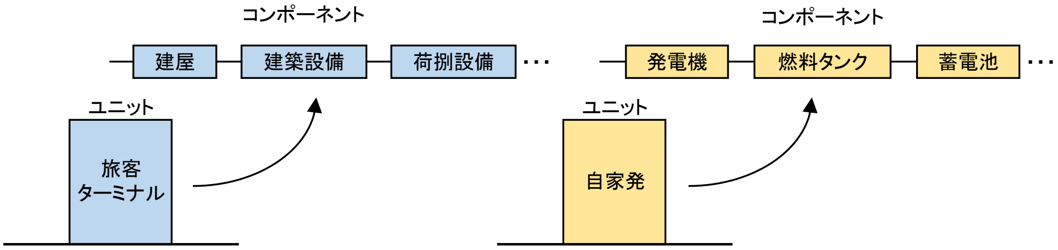


図-4.5.4-1　コンポーネントの分類例

４．５．５　システムモデルの作成

地震リスク（機能喪失）を評価するためのシステムモデルを作成する．システムの構成は，直列，並列，あるいはそれらの混合型のモデルとして記述する．構成要素は，分類したユニットやコンポーネント，また抽出した物理的被害要因及び外生的要因に基づき，設定する．

【解説】

復旧曲線と健全度曲線を評価するためには，ユニットやコンポーネント，あるいは物理的被害要因及び外生的要因に基づいた構成要素を，システムとしてモデル化する．システムモデルの例[1)]を図 4.5.5-1～図 4.5.5-3 に示す．図の網掛けは，外生的要因によるもので，機能停止に至る要因として，システム上では物理的被害要因と同義である．なお，システムモデルに要員参集等の外生的要員を取り入れることは，BCP で行われる事後対応策に該当し，これは本ガイドライン

に示す地震リスク評価における大きな特徴と言える．

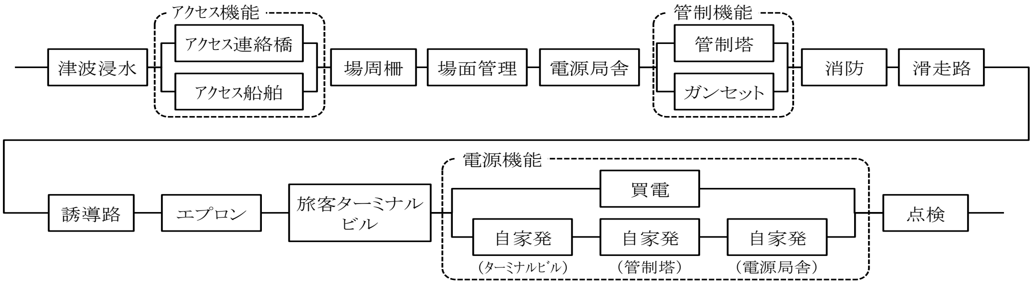


図-4.5.5-1　民航運航性能に関するシステムモデル [1)]

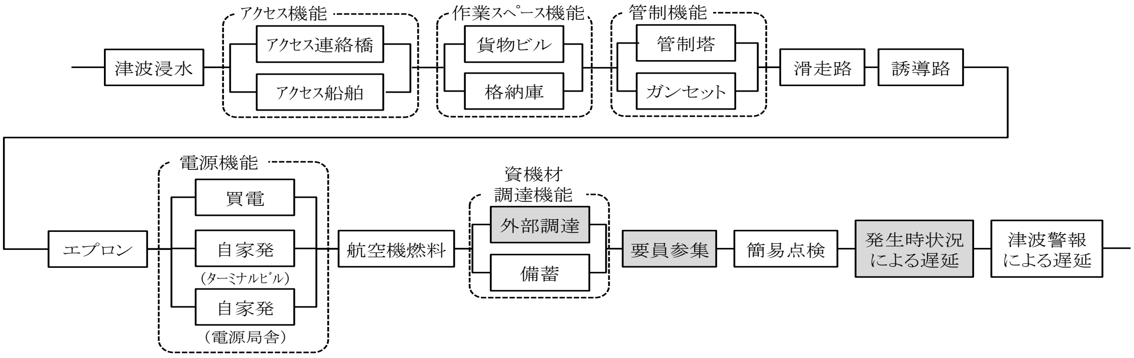


図-4.5.5-2　固定翼機の運航性能に関するシステムモデル [1)]

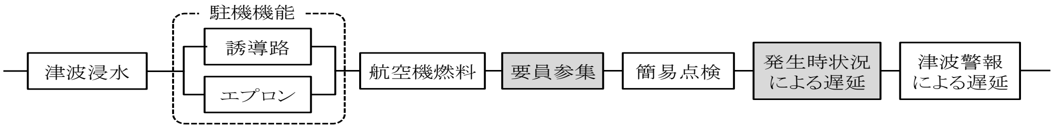


図-4.5.5-3　回転翼機の運航性能に関するシステムモデル [1)]

システムモデル作成の注意点として，津波浸水が発生した場合，浸水範囲に位置する構造物は一律に利用できなくなる．その他，例えば大規模液状化による被害等，この種の被害は統計的には完全相関と解釈できることから，機能喪失の構成要素として別途設け，システムモデルの最前列に配置する．

参考文献

1) 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，国土技術政策総合研究所第830号, P.41, 2015.

４．６　フラジリティカーブの評価

４．６．１　フラジリティカーブの評価

地震リスクを評価するためには，マルチイベントモデルで抽出したシナリオ地震毎に損傷確率を評価する必要がある．損傷確率は各ユニットの各コンポーネントにおける被害要因や被害レベル毎のフラジリティカーブから読み取るため，フラジリティカーブを評価する必要がある．

【解説】

フラジリティカーブは，地震動強さに従い損傷確率を示した曲線（図-4.6.1-1）であり，構造物の地震応答，耐力，複合偏差から次式により求められる．

$$F_X(r_m)=\int_0^{r_m}\frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_X x}\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\ln c_m}{\zeta_Z}\right)^2\right\}dx \quad (4.6.1\text{-}1)$$

但し，$\zeta_Z^2=\zeta_C^2+\zeta_R^2$

ここに，$F_x(r_m)$は，応答の中央値 r_m を変数とした損傷確率（対数正規分布の非超過確率），c_m は耐力の中央値，ζ_C, ζ_R は応答と耐力の対数標準偏差，ζ_Z は応答と耐力のばらつきを組み合わせた複合偏差である．なお，応答の中央値と耐力の中央値と加速度や速度等で評価する．

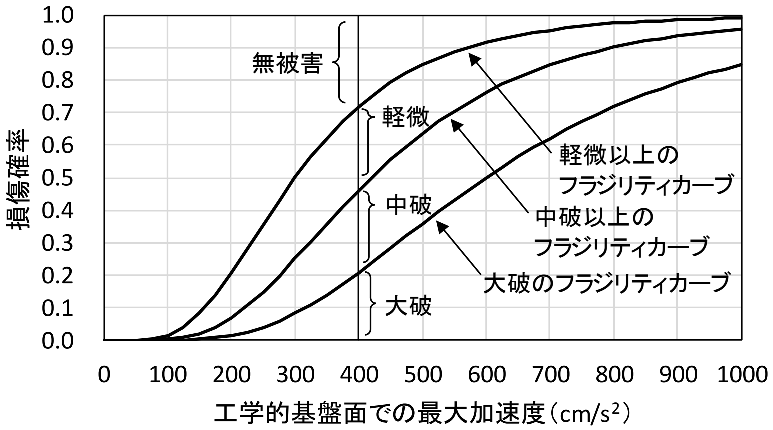


図-4.6.1-1　フラジリティカーブの例

４．６．２　不確実性の設定

フラジリティカーブに含まれる不確実性は，地震危険度の設定に関する不確実性，サイトの地震動評価に関する推定誤差，地盤増幅特性の評価誤差，地震動強さによる建物の応答評価誤差，建物の耐力のばらつき，モデル化不確定性の6つに分けられ，これらは複合偏差として表される．

【解説】

（１）複合偏差の要因

フラジリティカーブに含まれる不確実性は，①地震危険度の設定に関する不確実性，②サイトの地震動評価に関する推定誤差，③地盤増幅特性の評価誤差，④地震動強さによる建物の応答評価誤差，⑤建物の耐力のばらつき，⑥モデル化不確定性の6つに分けられる．

①は使用した地震カタログや地震領域の設定，危険度解析の方法等よって異なるものの，基本的には，長期間の地震活動の調査ならびに統計処理によって評価されるものである．統計データの取得期間が短い現状では，この種の不確実性を改善する余地は少ない．②は基本的には距離減衰式の誤差によるものであるが，不均一かつ不整合の自然地盤を通しての地震動の伝播という波動学的に困難な問題に起因しており，早急の改善は期待できない．③は工学的基盤面から，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，地盤情報の精度や量，評価手法によって異なる．④は地震動強さ（最大加速度，最大速度，最大変位，加速度応答スペクトル，計測震度等）によって異なるものの，規模別の地震動による時刻歴応答解析を種々行い，一定のクライテリアを超えるか超えないかを被害発生基準とし，統計処理を行うことで，リスク評価に必要な精度で解析的に評価できる性質のものである．⑤は使

われた設計基準や設計者個々の安全への配慮，施工精度や材料強度のばらつき等から構成される耐力の個体差である．統計的なばらつきであることから基本的には改善の対象とはならないが，今後の設計コードや設計法の改善，ユニット施工，新材料の登場によっては改善の余地はある．⑥は解析モデルに内在する不確定性であり，改善の対象となるものの，被害事例や実験等の情報が必要である．

①と②は，地震ハザード解析に係るばらつき，③～⑥はフラジリティカーブの評価に係るばらつきである．被害事例に基づく統計解析によるばらつきは，②～⑥が複合されたものである．①が除外される理由は，既に発生した地震を対象としているからである．それぞれを独立と仮定すると，統計解析によって求められるばらつき（複合偏差）ς_Z は，以下のように分解できる．

$$\varsigma_Z = \sqrt{\varsigma_{②}^2 + \varsigma_{③}^2 + \varsigma_{④}^2 + \varsigma_{⑤}^2 + \varsigma_{⑥}^2} \qquad (4.6.2\text{-}1)$$

一方，シナリオ地震に基づく地震リスク評価においては，①のばらつきは含めないのが一般的である．図-4.6.2-1は，建物の層間変位を被害の判断基準とした場合の不確実性の要因を概念的に示したものである．なお，⑥の解析モデルに内在する不確定性は，②～⑤の各所に関わる．

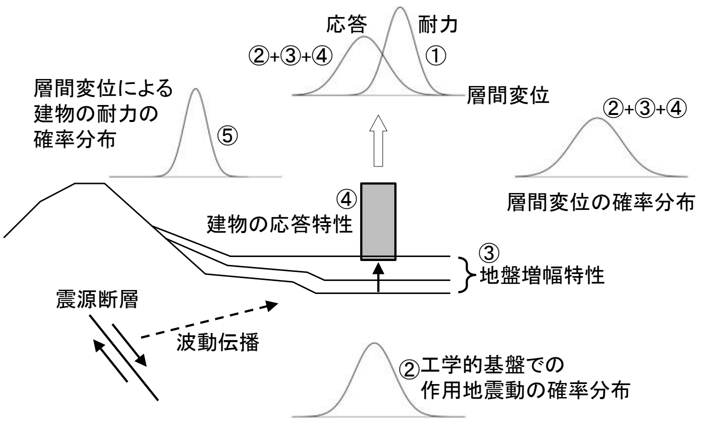


図-4.6.2-1　不確実性の要因

（2）統計解析による複合偏差

フラジリティカーブに関する統計評価は兵庫県南部地震以降活発になり，建築物，道路橋脚及び日本と米国の道路橋のフラジリティカーブを比較した研究[1)~8)]等がある．エキスパートジャッジにより求めた事例も含め，統計解析により評価したフラジリティカーブのばらつき（対数標準偏差）の比較例を吉川ら[9)]が整理しており，これを表-4.6.2-1 に示す．表-4.6.2-1 より，フラジリティカーブの複合偏差 ς_Z は，建築物では 0.5～0.8 程度，道路橋脚では，0.4～0.7 程度の範囲と考えられる．

なお，安中ら[10)]等の研究によると，距離減衰式の誤差のばらつきは，対数標準偏差で 0.45～0.50 程度である．

表-4.6.2-1　対数標準偏差の報告例（吉川ら[9]）

構造物	損傷形態	対数標準偏差	参考文献
高速道路橋	C	0.59	中村他(1998)
	B	0.45	
	AS or A	0.43	
Highway Bridges	minor	0.84	Shinozuka et al. (2001)
	moderate	0.72	
	major	0.65	
	collapse	0.67	
Highway Bridges	slight	0.6 (recommended)	Mander(1999)
	moderate		
	extensive		
	complete		
Railway Bridges	slight	0.45	HAZUS99(1999)
	moderate	0.55	
	extensive	0.60	
	complete	0.70	
Buildings (low-rise reinforced concrete)	slight	0.75	
	moderate	0.76	
	extensive	0.81	
低層戸建住宅	小破	0.538	望月他(2000)
	中破	0.445	
	大破	0.467	
中高層住宅	小破	0.672	
	中破	0.679	
	大破	0.677	
Buildings (low-rise wood frame)	slight	0.84	Grossi(2000)
	moderate	0.90	
	extensive	1.00	
	complete	0.97	

参考文献

1) 中村孝明，水谷守: 地震時損傷確率の統計的評価手法に関する一提案，土木学会第 51 回年次学術講演会 1-A, p.938, 1996.

2) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫: 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, 1997.

3) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄: 高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.3, pp.3491-3496, 1998.

4) Shinozuka, M.: Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan, R.O.C., 1999.

5) 村尾修，山崎文雄: 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, 2000.

6) 望月智也，中村孝明: 多項反応モデルによる地震時損傷度曲線の統計的推定，土木学会，第 2 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.45-50, 2000.

7) Grossi, P.: Earthquake Damage Assessment, Expert Opinion to Fragility Curves, 8th ASCE Specially Conference on Probabilistic Mechanics and Structure Reliability, PMC2000-123, 2000.

8) Shinozuka, M, Feng, M., q., Kim, H., Uzawa, T. and Ueda, T.: Statistical Analysis of Fragility Curve, Technical Report submitted to MCEER under Federal Highway Administration Agency, 2001.

9) 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) 安中正，山崎文雄，片平冬樹: 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, 1997

４．６．３　耐震性の評価

フラジリティカーブの評価にあたっては，各種構造物の耐震性能を評価する必要がある．耐震性能については，構造物の振動特性と表層地盤の増幅特性を考慮した応答値を算定し，この算定結果と収集した情報の分析結果（耐震設計上の特徴等）に基づき耐力の中央値を算定して評価する．

【解説】

フラジリティカーブの評価にあたっては，時刻歴地震波形（実地震波を用いる方法，模擬地震波を用いる方法）を用いて統計的に評価する方法，距離減衰式から応答スペクトルを得て，この応答スペクトルから評価する方法等，様々である．どの手法を用いるかは，目的や得られる情報の精度，あるいは労力を勘案して適宜選定するべきであるが，本ガイドラインでは加速度応答スペクトルを用いて評価する方法を解説する．

工学的基盤面での耐力中央値 c_m (cm/s^2)の算出の流れを示したのが**図-4.6.3-1** である．まず，工学的基盤面における基準化加速度応答スペクトル $S_a^{NB}(T)$を設定する．ここに，T は周期，添え字 a は加速度，N は基準化，B は基盤の意味を持つ．前述の 4.4.1 に示した方法に則り，地盤の加速度応答スペクトル比の平均値 $\bar{R}_a(T)$ を求めた上で，地表面の基準化加速度応答スペクトル $Sa^N(T)$を以下のように求める．

$$S_a^N(T) = \bar{R}_a(T) \cdot S_a^{NB}(T) \qquad (4.6.3\text{-}1)$$

次に，対象構造物の１次固有周期 T_1，応答加速度換算の耐力 a を求め，これを工学的基盤面での耐力中央値 c_m に換算する．換算式は次式となる．

$$c_m = \frac{a}{S_a^N(T_1)} \qquad (4.6.3\text{-}2)$$

(4.6.3-2)式は(4.6.3-1)式を用いて，次式のように書き換えられる．

$$c_m = \frac{a}{\bar{R}_a(T_1) \cdot S_a^{NB}(T_1)} \qquad (4.6.3\text{-}3)$$

一般的に，シナリオ地震による作用地震動は，工学的基盤面で規定する場合が多い．ここで示した方法は，構造物の耐力を工学的基盤面に換算しているので，構造信頼性理論に基づき，フラジリティカーブを直接求めることができる．

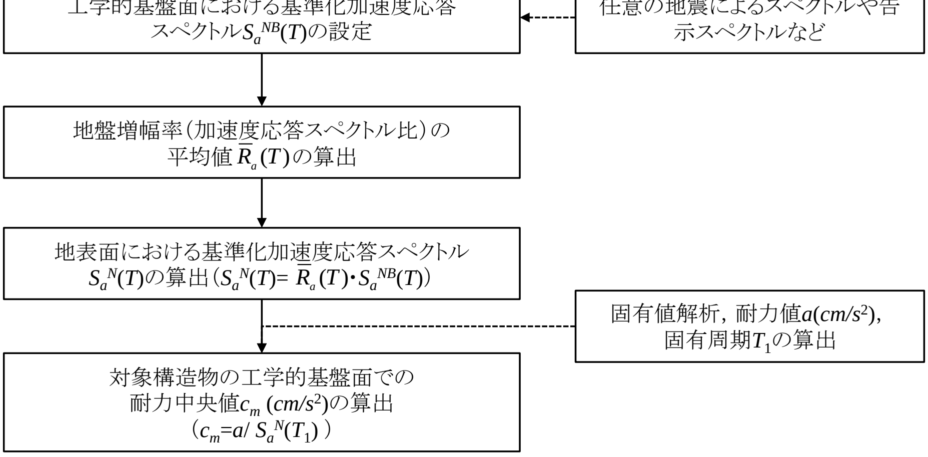


図-4.6.3-1　工学的基盤面での耐力中央値の算出フロー

なお，上記の方法は，地震動に対する構造物の応答が線形と見做せる範囲であり，特に構造物の非線形応答を考慮した c_m の評価方法は，付録 B：技術資料-2 に一例を示す．

４．７　地震リスクの評価

４．７．１　財物損失額の評価

> 地震リスクとして評価する財物損失額にあたっては，抽出した被害要因毎に想定される損失額の総和をとり，これに各被害形態の発生確率を乗じて足し合わせることで損失期待値を算出する．

【解説】

財物損失額の評価手法はイベントツリー解析を用いて解説する．イベントツリーは，被害の進展や連鎖的発生，組合せなどを分析/評価するのに適した方法である．基本的には，様々な被害や被害レベルの組合せ事象の確率を評価する方法として利用するが，被害の関連性を視覚的に把握できることから，第三者への説明の際にも有用する．イベントツリーの例を**図-4.7.1-1**，**図-4.7.1-2** に示す．

図-4.7.1-1 では，被害要因として，津波浸水被害，建屋の震動被害，設備の震動被害の 3 つを考えている．津波浸水被害は，無被害と津波による浸水の 2 モード，建屋の震動被害は，無被害，軽微，倒壊の 3 モード，設備の震動被害は，無被害と損傷の 2 モードとしている．それぞれの被害要因は排反事象の集合として全てをつくすと，被害形態の総数は 2×3×2＝12 となる．但し，津波による浸水や建屋の倒壊が生じると全損になるため，**図-4.7.1-1** に示すように末端の分岐数は 6，つまり被害形態は 6 に集約できる．一方，**図-4.7.1-2** は，イベントツリーによる財物損失額の期待値（損失期待値）の計算例である．各分岐には各被害モードの発生確率，また（ ）に各被害モードによる財物損失額を示している．被害形態の発生確率は，各被害モードの発生確率の積，財物損失額は，各被害モードの損失額の和をとり，損失期待値は各被害形態の発生確率とその財物損失額の積和で求められる．

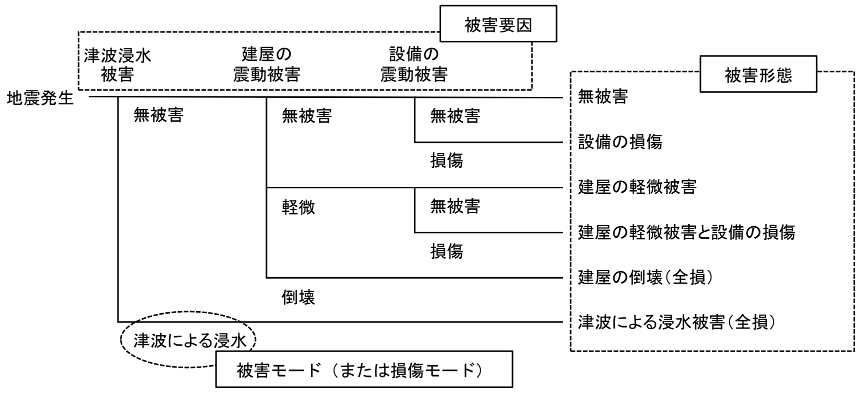


図-4.7.1-1　イベントツリーの例

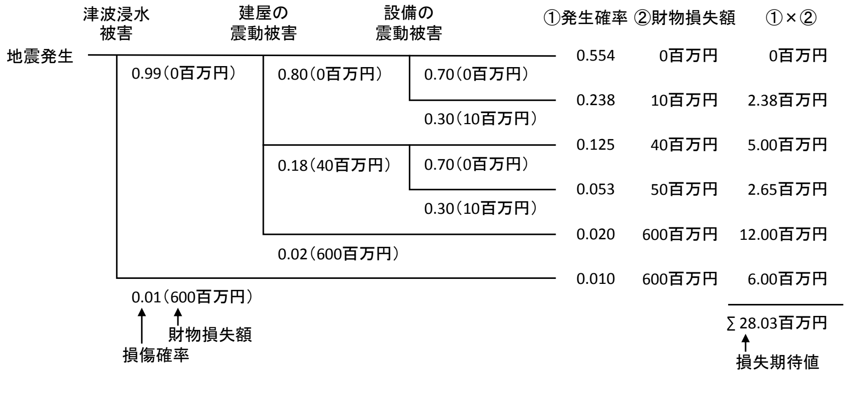


図-4.7.1-2　イベントツリーによる損失期待値の計算

４．７．２　逸失利益の評価

地震リスクとして評価する逸失利益にあたっては，システムモデルを用いて評価された空港全体の復旧期間の期待値に固定費等を乗じて算出する．

【解説】

逸失利益は，復旧曲線から求まる復旧期間の期待値に，その復旧期間中に得られたはずの売上高等を乗じて求める．なお，4.7.3 に記すように，復旧曲線は D 曲線と T 曲線の 2 種類が求められるが，復旧期間の期待値は，T 曲線から求めても D 曲線から求めても同じ値となる．

なお，逸失利益の留意点として，事業活動が行えない期間は売り上げの減少と共に，原材料費や光熱費，外注費等も減ることになる．つまり製造減価は下がることになる．但し，従業員への給料や公租公課などの固定費に加え，事業を継続していなくても支払わなくてはならない経費はある．このため費用の仕分けには留意が必要である．一般的には，粗利益や売上総利益が近いといえる．

４．７．３　復旧曲線の評価

地震リスクとして評価する復旧曲線にあたっては，本来の機能が低下あるいは停止し，その後，機能が回復するまでの経時的なプロセスを，システムモデルを用いて評価する必要がある．なお，復旧曲線には，性能を確率変数として求めた期待値を示す D 曲線と，被災後経過時間を確率変数として求めた期待値を示す T 曲線があり，それらを適宜選択して評価する．

【解説】

復旧曲線は，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，復旧過程を視覚化した曲線である．横軸は被災後経過時間，縦軸は復旧率（性能回復率）である．縦軸の性能は一般的に，本来の性能を 1.0 とした性能回復率で表すことが多い．一方，地震被害の発生や被災後経過時間は不確実性を伴い，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が，この場合，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．しかしながら，実現するであろう復旧曲線を特定することはできないため，平均的な曲線を求め，これを復旧曲線として代表する．**図-4.7.3-1** と**図-4.7.3-2** に示す太線の D 曲線と T 曲線がこれに相当する．D 曲線は，復旧率（性能回復率）を確率変数に縦軸に分布する曲線群の期待値を被災後経過時間に対して結んだ曲線であり，一方の T 曲線は，被災後経過時間を確率変数に，横軸に分布する曲線群の期待値を復旧率に対して結んだ曲線である．

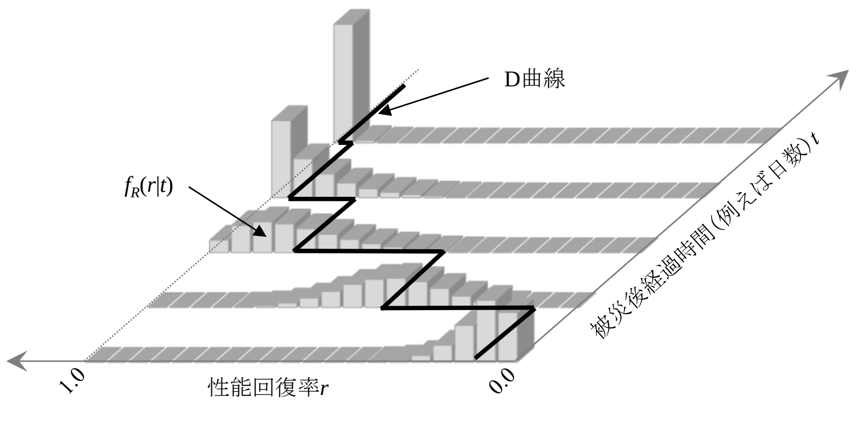


図-4.7.3-1　復旧曲線（D 曲線）の概念図

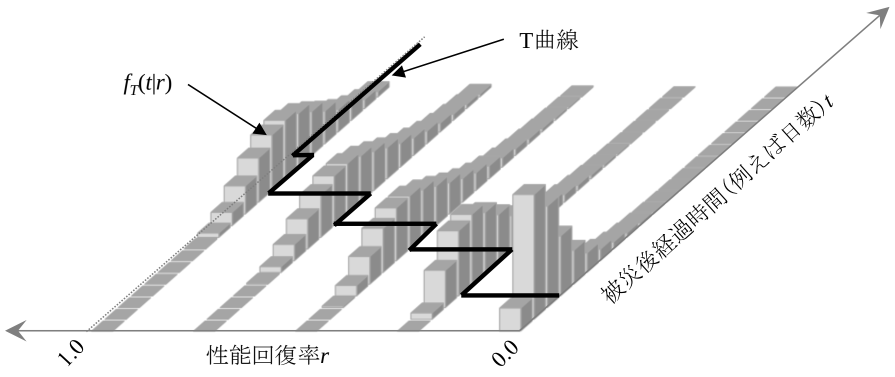


図-4.7.3-2 復旧曲線（T 曲線）の概念図

D 曲線と T 曲線の左上の面積を復旧期間の期待値（RTE; Recovery Time Expectancy）と呼び，D 曲線と T 曲線の双方の RTE は一致する．また，D 曲線と T 曲線は相互補完的であり，一方が求まれば，他方を求めることができる．どちらの復旧曲線を用いるかは，地震リスク評価やリスクマネジメントの目的や方針によって，適宜判断する．

D 曲線 $R_D(t)$及び T 曲線 $R_T(r)$は以下のように求めることができる．

$$R_D(t) = \int_0^{1.0} r \cdot f_R(r|t)dr = \int_0^{1.0} G_R(r|t)dr \quad (4.7.3\text{-}1)$$

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} t \cdot f_T(t|r)dt = \int_0^{\infty} G_T(t|r)dt \quad (4.7.3\text{-}2)$$

ここに，t は時間（被災後経過時間），r は復旧率（性能回復率）を表す．また，$f_R(r|t)$は時間 t を条件とした復旧率 r の確率密度関数であり，$f_T(t|r)$は復旧率 r を条件とした時間 t の確率密度関数である．一方，$G_R(r|t)$は時間 t を条件とした復旧率 r の超過確率関数であり，$G_T(t|r)$は復旧率 r を条件とした時間 t の超過確率関数である．$G_R(r|t)$と $G_T(t|r)$には以下の関係がある．

$$1 - G_R(r|t) = G_T(t|r) \quad (4.7.3\text{-}3)$$

(4.7.3-3)式より，復旧曲線を求める場合は，$G_R(r|t)$，もしくは $G_T(t|r)$のどちらか一方を求めればよい．なお，システム全体の復旧期間の期待値（RTE）を求めると，D 曲線から求められる期待値 $E(D)$は以下のようになる．

$$E(D) = \int_0^{\infty} [1 - R_D(t)]dt = \int_0^{\infty}\int_0^{1.0} G_R(r|t)dr\,dt \quad (4.7.3\text{-}4)$$

また，T 曲線から求められる期待値 $E(T)$は以下のようになる．

$$E(T) = \int_0^{1.0} R_T(r)dr = \int_0^{1.0}\int_0^{\infty} G_T(t|r)dt\,dr \quad (4.7.3\text{-}5)$$

一方，要求性能に関して安全側の評価をする場合には，危険側の復旧曲線を評価すればよい．例えば，90%非超過値に対する D 曲線 $r(t)$及び T 曲線 $t(r)$は以下のように求めることができる．

$$0.9 = \int_0^{r(t)} G_R(r \mid t)dr \qquad (4.7.3\text{-}6)$$

$$0.9 = \int_0^{t(r)} G_T(t \mid r)dt \qquad (4.7.3\text{-}7)$$

４．７．４　健全度曲線の評価

地震リスクとして評価する健全度曲線にあたっては，空港が地震時に健全で機能的に使用できる確率を，システムモデルを用いて評価したある性能の超過確率関数を用いて経時的に評価する．

【解説】

地震発生後，空港は救急・救命活動や緊急物資・人員等輸送等の緊急対応の拠点としての役割を担う．このとき，緊急対応の拠点としては，発災後必要とされる時間断面で必要な性能の健全度を維持することが求められる．そこで，発災からの経過時間に対応した性能の健全度，いわゆる健全確率を評価する．健全確率が小さく，許容範囲を下回るのであれば何らかのハード対策が必要になる．時間依存の健全確率を $p(t)$ とすると，復旧率（性能回復率）r の超過確率関数 $G_R(r|\,t)$ から以下のように求めることができる．

$$p_{r>s}(t) = G_R(r = s \mid t) = \int_s^{1.0} f_R(r \mid t)dr \qquad (4.7.4\text{-}1)$$

ここに，s は緊急時に必要となる最小限の性能であり，$f_R(r|t)$は時間 t を条件とした復旧率（性能回復率）r の確率密度関数である．(4.7.4-1)式にて求められる関数を，本ガイドラインでは健全度曲線と呼び，概念図を図-4.7.4-1 に示す．図の奥の軸は健全度（健全確率）の確率を示している．

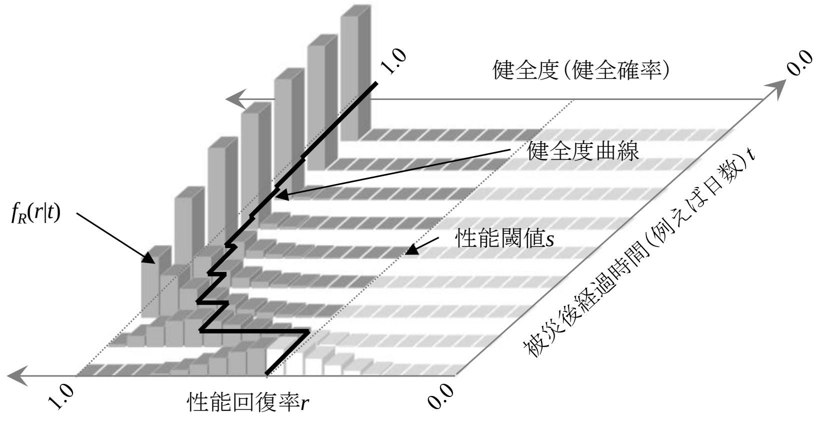


図-4.7.4-1　健全度曲線の概念図

４．７．５　システムの復旧期間と復旧期間の超過確率関数

システムモデル全体の復旧期間は，システムモデルの構成（直列型，並列型）を考慮して求める．これは，システムの復旧率 r を条件とした復旧期間 t の超過確率関数 $G_T(t|r)$を求めることと同義である．

【解説】

システムの機能停止は，構成要素であるユニットやコンポーネントの物理的被害要因及び外生的要因によって引き起こ

され，構成要素の被害は同時に復旧できるものとする．同時復旧下では，直列システムの復旧期間は次式のように求められる．

$$T = \max(T_1, T_2, \cdots, T_n) \tag{4.7.5-1}$$

ここに，T_i, i=1～n はユニットやコンポーネントの復旧期間の確率変数，n はその総数である．T はシステムの復旧期間の確率変数である．一方，並列システムの復旧期間は次式のように求められる．

$$T = \min(T_1, T_2, \cdots, T_n) \tag{4.7.5-2}$$

なお，(4.7.5-1)式中の max( )は，それぞれの確率変数（復旧期間）の組合せの最大値が選択され，min( )は最小値が選択される．復旧期間の超過確率関数 $G_T(t|r)$は，ユニットやコンポーネントの損傷事象の独立を前提に，直列システムは以下となる．

$$G_T(t\,|\,r) = 1 - \prod_{i=1}^{n}\left\{1 - G_{T_i}(t\,|\,r)\right\} \tag{4.7.5-3}$$

ここに，$G_{Ti}(t|r)$, i=1～n は，ユニットやコンポーネントの復旧率（性能回復率）r を条件とした復旧期間の確率関数である．一方，並列システムの場合は以下のようになる．

$$G_T(t\,|\,r) = \prod_{i=1}^{n} G_{T_i}(t\,|\,r) \tag{4.7.5-4}$$

したがって，(4.7.5-3), (4.7.5-4)式を使い，システムの復旧期間の超過確率関数を求めることができる．

４．７．６　逸失死者数の推計

逸失死者数にあたっては，空港に滞在する生存者数から発災後に救出された人数を差し引いて推計する．生存者の救出率については，兵庫県南部地震等の諸地震における過去の事例の調査結果を参照する方法がある．

【解説】

生存者の救出率については．**図-4.7.6-1** に示すようなデータ [1)]があるため，このような事例を参照して逸失死者数を推計する．例えば，**図-4.7.6-1** の生存率を健全度曲線に乗じれば，発災後からの経過日数に応じた生存率の期待値が求められる．さらに，生存率の期待値に被災空港における滞在人数を乗じることで生存者数が推定される．

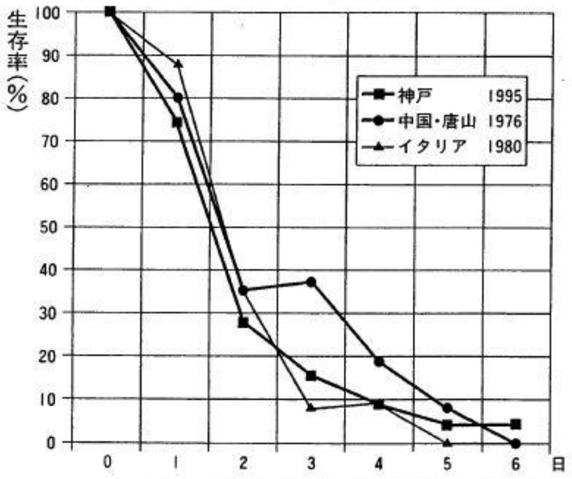


図-4.7.6-1　発災からの救出時間による生存救出率[1)]

参考文献

1) 鵜飼卓: 阪神・淡路大震災の経験から新たな災害医療システムの構築へ, 救急医療ジャーナル No.14, 1995.

５．地震リスクマネジメントの実施

５．１　対策の優先順位の考え方

対策については，ボトルネック指標の大きい順から優先的に実施することが望ましい．ボトルネック指標は，システムの構成要素であるユニットやコンポーネント，その他の被害要因毎に求めた復旧期間の期待値に，被害要因の重要度を乗じて算出する．

【解説】

多数の要素で構成された複雑なシステムになると，ボトルネックとなるユニットやコンポーネントを見出すことが難しく，このため，優先的に対策をすべきユニットやコンポーネントの選定や対策優先順位を把握することが困難となる．システム内の脆弱性を見出す幾つかの指標 [1,2]が提案されているため，これらの指標を用いることが考えられるが，ここでは，ボトルネック指標（Bottleneck Index）（以下，BI）を評価する方法を解説する．BI はユニットやコンポーネント毎に評価され，システムの構成要素であるユニットやコンポーネント，その他の被害要因毎に求めた復旧期間の期待値に，被害要因の重要度を乗じて算出される指標である．式で表すと次のようになる．

$$BI_i = e_i \cdot E(T_i), \quad i = 1 \sim n \qquad (5.1\text{-}1)$$

ここに，i は各ユニットやコンポーネント，n はその総数，e_i は全機能への影響度である．$E(T_i)$はシナリオ地震の発生を条件とした各ユニットもしくはコンポーネントの復旧期間の期待値を表し，次式のようになる．

$$E(T_i) = \sum_{all\ j} p_j \cdot t_j \qquad (5.1\text{-}2)$$

ここに，j は被害形態，p_j と t_j は被害形態の発生確率ならびに復旧期間である．(5.1-1)式より BI_i は時間の単位を持つ．BI_i の算出例を表-5.1-1 に示す．同表は，ユニットとコンポーネントの被害要因，重要度，復旧期間の期待値の順で示している．重要度は，当該ユニットおよびコンポーネントが被害を受けた際に，運航が停止する場合を 1.0 としている．0.6 は，被害が発生しても 40%運航できること，0.4 は被害が発生したとしても 60%運航できることを示している．同表より，旅客ターミナル A の非構造部材の震動被害が最も弱いため，この部分から耐震対策を実施すべきことがわかる．

表-5.1-1　ボトルネック指標（BI）の算出例

ユニット，コンポーネントの被害要因	重要度	復旧期間の期待値（日）	BI
旅客ターミナルAの非構造部材の震動被害	0.60	20.30	12.18
旅客ターミナルBの非構造部材の震動被害	0.40	22.50	9.00
滑走路の大規模液状化被害	1.00	7.60	7.60
エプロンの大規模液状化被害	1.00	7.10	7.10
誘導路の大規模液状化被害	1.00	7.00	7.00
電源局舎の震動被害	1.00	5.30	5.30
旅客ターミナルAの設備被害	0.60	8.50	5.10
旅客ターミナルBの設備被害	0.40	12.60	5.04
場面管理の震動被害	1.00	5.00	5.00
管制塔の設備の震動被害	1.00	4.90	4.90
自家発の燃料タンクの震動被害	1.00	2.00	2.00

参考文献

1) 能島暢呂: 要素破壊の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション，土木学会論文集 A1，Vol.65, No.1, pp.776-788, 2009.
2) Henley, E. J. and Kumamoto, H.: Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall, 1981.

５．２　目標の照査

地震リスクの評価結果（復旧曲線や健全度曲線）と目標とする要求性能を比較し，対策の必要性を検討する．

【解説】

地震リスクとして算出した復旧曲線や健全度曲線と目標とする要求性能を比較し，ハードやソフト対策の必要性を検討する．復旧曲線ならびに健全度曲線でみた目標の照査例を**図-5.2-1** 及び**図-5.2-2** に示す．なお，**図-5.2-1** は復旧曲線と照査基準を示した図であるが，照査基準は目標性能と目標復旧期間の 2 軸から成る．一方，**図-5.2-2** は健全度曲線と照査基準を示した図であるが，照査基準は目標健全確率と着目期日の 2 軸から成る．復旧曲線も健全度曲線も第 2 象限を通るように対策事業，あるいは諸施設の耐震性能を規定すればよい．なお，目標健全確率と着目期日は，被災後経過時間と伴に，数段階設定してもよい．

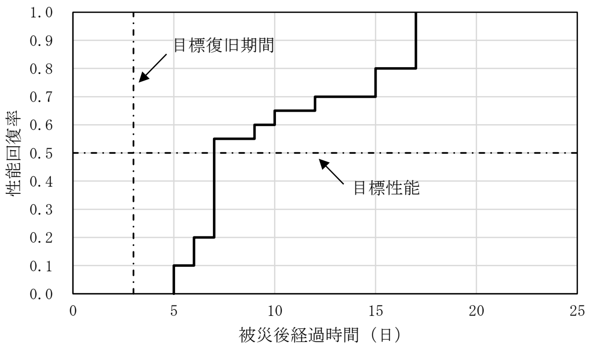


図-5.2-1　復旧曲線で見た目標性能の照査例

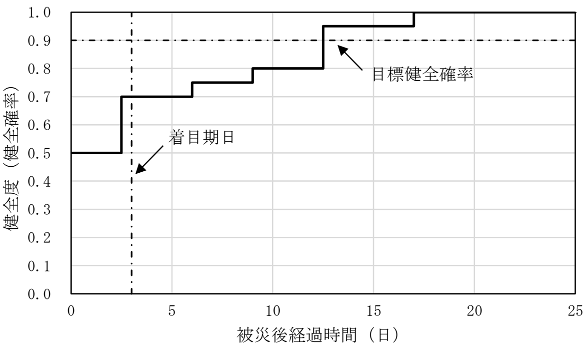


図-5.2-2　健全度曲線で見た目標性能の照査例

５．３　対策と効果の検討

５．３．１　対策の実施方針

対策の費用対効果や対策の優先順位を検討するため，5.1 で求めた対策の優先順位に基づき，対策優先箇所についてハード的な側面，もしくはソフト的な側面から対策事業を計画する．

【解説】

地震対策は，5.1 に示したボトルネック指標の大きな順に実施することが，地震リスクを軽減するために効率的である．したがって，ボトルネック指標の大きさに基づき，耐震補強等のハード対策を計画する必要がある．

５．３．２　効果の検討

対策の効果を検討するため，種々の対策を想定して各種対策事業に対して地震リスクの再評価を行い，対策を講じた場合の地震リスクの軽減量を算出する．

【解説】

対策の効果を検討するためには，5.3.3 で述べる対策費用と共に，地震リスクの軽減量を算出し，それらを鑑みる必要がある．具体的には検討した種々の対策事業に基づき，フラジリティカーブや被害が生じた場合の復旧期間を改善して，地震リスクの再評価と目標性能との再比較を行うことになる．復旧曲線ならびに健全度曲線で見た対策前後の地震リスク評価の比較例を**図-5.3.2-1** 及び**図-5.3.2-2** に示す．

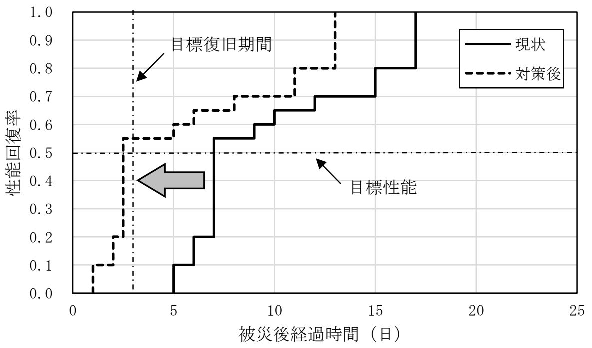


図-5.3.2-1　復旧曲線で見た対策の効果の比較例

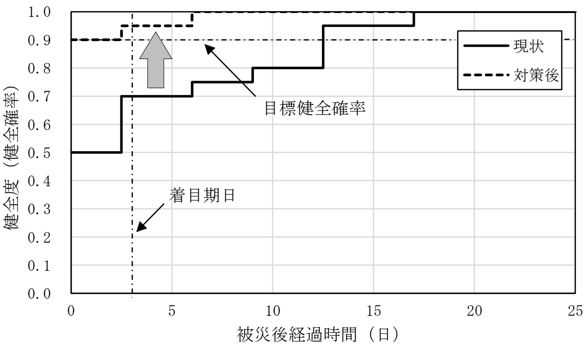


図-5.3.2-2　健全度曲線で見た対策の効果の比較例

５．３．３　対策事業の費用の算出

費用対効果の検討するため，5.3.1 で計画した各対策事業に対して，その費用を算出する．

【解説】

5.3.2 で述べたように，費用対効果を検討するために，対策事業を実施した場合の地震リスク軽減量と共に，検討した対策事業に掛かる費用を算出する必要がある．その際，費用は，対策事業計画の詳細性に応じて，概算費用もしくは詳細費用を適宜算出する．

５．３．４　費用対効果の検討

費用対効果の検討方法は，対策を講じた場合の地震リスクの軽減量と対策事業に掛かる費用を比較して行う．

【解説】

対策を講じた場合の地震リスクの軽減量は，想定した対策に対して地震リスクを再評価することにより求められる．この軽減量と対策事業に掛かる費用を比較することで，費用対効果の検討が可能となる．

６．地震リスクマネジメントの運用

６．１　運用体制の整備

地震リスクマネジメントを効果的に行うため，組織内等に運用体制を整備する必要がある．また，他空港とも情報を共有化し，連携体制を構築する．

【解説】

地震リスクマネジメントを実施し，システムとして運用するためには，まずそのための運用体制を整備する必要がある．運用体制の整備では，一般的には空港を運営する組織の中から CRO（Chief Risk Officer）を選任し，CRO を委員長とするリスクマネジメント委員会を設置する．当該委員会は組織のリスクマネジメントに関する承認，諮問機関として各部門や部署のリスクマネジメントを統括する [1)]．また，空港の地震時の目標性能を確保するため，他空港ともリスク情報を共有化し，連携体制を構築することが望ましい．

参考文献

1) 経済産業省: 事業リスク評価・管理人材育成システム開発事業 先進企業から学ぶ事業リスクマネジメント実践テキストー企業価値の向上を目指してー, P.301, 平成 17 年 3 月．

６．２　評価の見直しや改善

地震リスクマネジメントの有効性の低下や陳腐化を防ぐため，定期的に点検を行う必要がある．また，問題点が確認された場合には評価の見直し等，改善を行う．

【解説】

空港に限らず建築物や土木構造物等の施設は，施設の拡充や補修・補強により，その様相は年数の経過に伴い変化していく．したがって，地震リスクマネジメントの有効性低下や陳腐化を防ぐため，地震リスクマネジメントの内容や実施状況等について，定期的に見直しを行う必要がある．特に構造物が増築された場合や補強によりシステム構成が変化したり，構造物の耐震性が向上した場合，あるいは地震リスク評価の実施後に新たな耐震的な不具合が確認された場合においては，リスクの再評価を実施し，地震リスクマネジメントの見直し等，積極的に改善を行う必要がある．

付録Ｂ 技術資料

技術資料－１　地震危険度の表記方法

マルチイベントモデルでは，地震危険度を評価する対象施設が存在する地点について，被害をもたらす可能性があるシナリオ地震を全国規模で特定する．具体的なマルチイベントによる地震危険度の表記例を**表技-1-1**，**表技-1-2** に示す．各表は工学的基盤での最大加速度（PBA；Peak Engineering Bedrock Acceleration）の大きい順にシナリオ地震を 1 位～100 位までを示したもので，右から No.，震源名，M（マグニチュード），PBA，年発生確率，年超過確率を表している．これをイベントリストと呼び，マルチイベントモデルによる地震危険度はこのようなリストで表されることになる．なお，震源名が緯度/経度で表示されている地震は，背景地震（地表面に断層として表れない中規模な地殻内地震）である．

表技-1-1　地震危険度の表記例

（PBA の大きい上位 1～50 位のイベントリスト）

No.	震源名	M	PBA(cm/s^2)	年発生確率	年超過確率（累積確率）
1	(139.65 , 35.95)	M7.0	521	0.0000094	0.0000094
2	(139.55 , 35.95)	M7.0	486	0.0000177	0.0000271
3	関東平野北西縁断層帯主部	M8.0	478	0.0000000	0.0000271
4	(139.65 , 35.85)	M7.0	472	0.0000177	0.0000448
5	(139.55 , 35.85)	M7.0	448	0.0000177	0.0000625
6	(139.75 , 35.95)	M7.0	428	0.0000094	0.0000719
7	(139.65 , 35.95)	M6.5	423	0.0000257	0.0000976
8	(139.55 , 35.95)	M6.5	397	0.0000382	0.0001358
9	(139.75 , 35.85)	M7.0	388	0.0000094	0.0001452
10	(139.65 , 36.05)	M7.0	384	0.0000093	0.0001545
11	(139.65 , 35.85)	M6.5	367	0.0000383	0.0001928
12	(139.55 , 36.05)	M7.0	362	0.0000093	0.0002021
13	(139.45 , 35.95)	M7.0	356	0.0000177	0.0002198
14	(139.45 , 35.85)	M7.0	328	0.0000177	0.0002375
15	(139.55 , 35.85)	M6.5	324	0.0000383	0.0002758
16	(139.75 , 36.05)	M7.0	322	0.0000093	0.0002851
17	(139.65 , 35.75)	M7.0	303	0.0000178	0.0003029
18	(139.75 , 35.95)	M6.5	297	0.0000257	0.0003286
19	(139.65 , 35.95)	M6.0	291	0.0000706	0.0003992
20	(139.55 , 35.75)	M7.0	290	0.0000178	0.0004169
21	(139.85 , 35.95)	M7.0	288	0.0000094	0.0004263
22	(139.45 , 36.05)	M7.0	283	0.0000093	0.0004356
23	(139.55 , 35.95)	M6.0	274	0.0000825	0.0005180
24	(139.85 , 35.85)	M7.0	271	0.0000094	0.0005274
25	(139.75 , 35.75)	M7.0	266	0.0000178	0.0005451
26	(139.75 , 35.85)	M6.5	260	0.0000257	0.0005708
27	(139.65 , 36.05)	M6.5	257	0.0000257	0.0005965
28	(139.65 , 35.85)	M6.0	251	0.0000825	0.0006790
29	(139.85 , 36.05)	M7.0	241	0.0000093	0.0006883
30	(139.35 , 35.95)	M7.0	240	0.0000177	0.0007060
31	(139.45 , 35.75)	M7.0	240	0.0000178	0.0007238
32	(139.55 , 36.05)	M6.5	239	0.0000257	0.0007494
33	(139.65 , 36.15)	M7.0	236	0.0000093	0.0007587
34	(139.45 , 35.95)	M6.5	234	0.0000382	0.0007969
35	(139.35 , 35.85)	M7.0	229	0.0000177	0.0008146
36	(139.55 , 36.15)	M7.0	229	0.0000093	0.0008240
37	(139.55 , 35.85)	M6.0	218	0.0000825	0.0009064
38	(139.75 , 36.15)	M7.0	215	0.0000093	0.0009158
39	(139.45 , 35.85)	M6.5	212	0.0000383	0.0009540
40	(139.85 , 35.75)	M7.0	211	0.0000178	0.0009717
41	(139.35 , 36.05)	M7.0	208	0.0000177	0.0009894
42	(139.75 , 36.05)	M6.5	208	0.0000257	0.0010150
43	関東05 (M7.1)	M7.1	207	0.0027205	0.0037328
44	(139.95 , 35.95)	M7.0	199	0.0000094	0.0037421
45	(139.45 , 36.15)	M7.0	198	0.0000093	0.0037514
46	関東04 (M7.1)	M7.1	198	0.0027205	0.0064617
47	(139.65 , 35.95)	M5.5	197	0.0001941	0.0066545
48	1703,1923 関東	M8.0	195	0.0016587	0.0083022
49	立川断層帯	M7.4	194	0.0004305	0.0087291
50	(139.65 , 35.75)	M6.5	192	0.0000383	0.0087670

表技-1-2　地震危険度の表記例

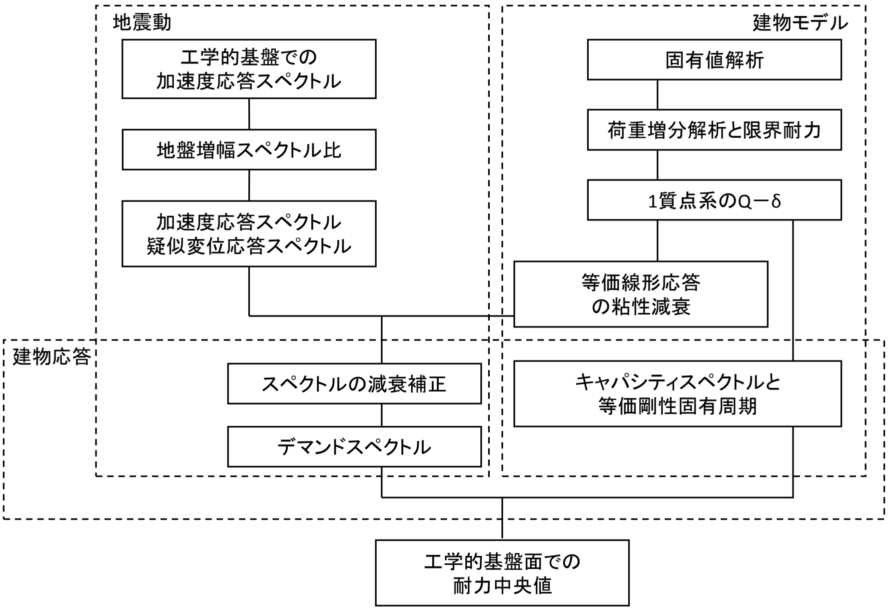
（PBA の大きい上位 51～100 位のイベントリスト）

No.	震源名	M	PBA(cm/s^2)	年発生確率	年超過確率（累積確率）
51	(139.95 , 35.75)	M7.0	198	0.0000706	0.0088370
52	(139.45 , 35.55)	M7.0	198	0.0000094	0.0088463
53	(139.75 , 35.35)	M6.5	192	0.0000178	0.0088639
54	(139.75 , 35.25)	M7.0	192	0.0000178	0.0088815
55	(139.45 , 35.45)	M7.0	191	0.0000178	0.0088991
56	(139.85 , 35.25)	M7.0	187	0.0027205	0.0115954
57	関東平野北西縁断層帯主部	M8.0	186	0.0001779	0.0117713
58	(140.05 , 35.35)	M7.0	185	0.0000383	0.0118091
59	(139.85 , 35.55)	M5.5	184	0.0000257	0.0118345
60	(139.85 , 35.35)	M6.5	182	0.0000093	0.0118437
61	(139.55 , 35.55)	M6.5	180	0.0000257	0.0118691
62	関東09（M7.1）	M7.1	179	0.0000178	0.0118867
63	(139.55 , 35.75)	M7.0	179	0.0000093	0.0118959
64	(139.65 , 35.25)	M7.0	178	0.0027205	0.0145840
65	立川断層帯	M7.4	177	0.0000177	0.0146015
66	(139.45 , 35.65)	M7.0	177	0.0000257	0.0146268
67	(139.95 , 35.65)	M6.5	177	0.0000178	0.0146443
68	関東02（M7.1）	M7.1	176	0.0001781	0.0148198
69	(139.65 , 35.45)	M6.0	171	0.0000707	0.0148895
70	(140.15 , 35.55)	M7.0	169	0.0000177	0.0149070
71	(139.75 , 35.65)	M6.0	169	0.0000383	0.0149447
72	(139.55 , 35.45)	M6.5	168	0.0000705	0.0150142
73	(139.75 , 35.45)	M5.5	167	0.0000094	0.0150234
74	(139.95 , 35.25)	M7.0	167	0.0000093	0.0150326
75	関東05（M7.1）	M7.1	166	0.0000093	0.0150418
76	(139.65 , 35.35)	M6.5	165	0.0000177	0.0150592
77	(140.15 , 35.45)	M7.0	164	0.0000178	0.0150767
78	(140.05 , 35.75)	M7.0	161	0.0000093	0.0150859
79	(139.45 , 35.35)	M7.0	161	0.0000705	0.0151554
80	関東13（M7.1）	M7.1	159	0.0000825	0.0152366
81	衣笠・北武断層帯	M7.0	159	0.0000000	0.0152366
82	(139.75 , 35.85)	M7.0	155	0.0000257	0.0152618
83	(139.85 , 35.65)	M6.0	155	0.0027205	0.0179408
84	(140.15 , 35.65)	M7.0	154	0.0000093	0.0179500
85	(139.55 , 35.25)	M7.0	153	0.0000382	0.0179875
86	(139.85 , 35.85)	M7.0	152	0.0000383	0.0180251
87	(139.95 , 35.55)	M6.0	151	0.0000256	0.0180503
88	(139.65 , 35.85)	M7.0	147	0.0000094	0.0180595
89	(139.55 , 35.65)	M6.5	146	0.0000093	0.0180686
90	(139.95 , 35.35)	M6.5	146	0.0027205	0.0207400
91	(140.05 , 35.55)	M6.5	146	0.0001781	0.0209144
92	(139.35 , 35.55)	M7.0	143	0.0000178	0.0209317
93	(139.75 , 35.75)	M6.5	143	0.0027205	0.0235953
94	(139.45 , 35.75)	M7.0	143	0.0000178	0.0236127
95	(139.85 , 35.45)	M5.5	143	0.0000094	0.0236218
96	(140.15 , 35.35)	M7.0	142	0.0000256	0.0236468
97	(140.05 , 35.25)	M7.0	141	0.0000093	0.0236559
98	(139.35 , 35.45)	M7.0	140	0.0000383	0.0236933
99	(139.95 , 35.85)	M7.0	139	0.0027205	0.0263493
100	(139.85 , 35.75)	M6.5	138	0.0000825	0.0264297

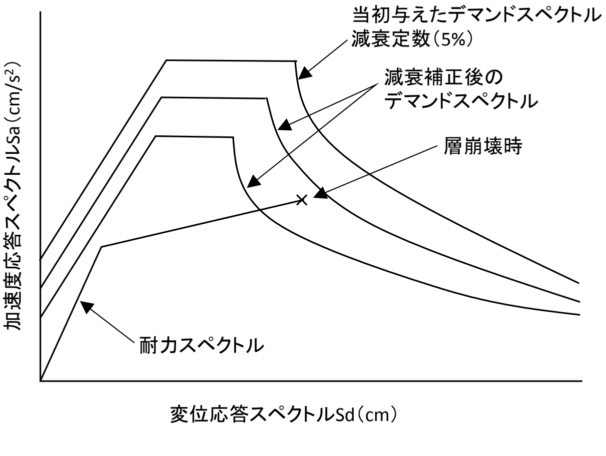
技術資料－２　耐力中央値の評価方法

耐力中央値の評価方法には種々のものがあるが，ここでは地震リスク評価での実用性を考え，応答スペクトル法による方法を解説する．

地震動が大きくなると，建物は弾性限界を超え塑性変形へと移行するが，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，塑性変形を伴う応答を等価な弾性応答に置き換える作業が必要となる．具体的には耐力スペクトル法，限界状態設計，さらに細かい手法ではエネルギー一定則，等価剛性等がある．ここでは一例として耐力スペクトル法を概説する．**図技-2-1** に耐力スペクトル法のフロー図を示す．まず，固有値解析ならびに各階の被害形態（軽微，中破，大破，倒壊等）の限界耐力を設定する．荷重増分解析を行い，これを等価な 1 質点系に置き換え，各被害形態と 1 質点系の Q－δ を対応させる．1 質点系をバイリニア，トリリニア等適宜モデル化を行い，等価線形応答の固有周期，ならびに粘性減衰（履歴減衰）を求める．さらに，これを耐力スペクトルに変換する．この時点で，各階の被害形態の発生限界を耐力スペクトル上に落とし込むことができ，これらに対応する固有周期，粘性減衰を得ることができる．次に**図技-2-2** に示すように予め設定した加速度応答スペクトルを減衰補正し，デマンドスペクトルを求める．耐力スペクトルとデマンドスペクトルにより，各被害形態に対応する工学的基盤面での耐力中央値を求める．



図技-2-1　耐力スペクトル法のフロー



図技 2-2　耐力スペクトルとデマンドスペクトル

技術資料－３　財務影響分析と金融対策

（１）財務影響分析

財務影響分析は，発災後，運営資金の枯渇，債務の不履行等が危惧される場合，地震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のか，等を把握するための方法である．この財務影響分析とストレステストを併用する．ストレステストは，経済，原子力，機械や電気，生物等，広い分野で活用されており，端的にいうと，検体に不利な状況（ストレス）を課していき，どこまで課したら基準値を超えるか，あるいは健全な状態を逸脱するかを見極める方法である．つまり，財務諸表にストレスを加えていき，どこまでかけたら債務を履行できなくなるか等を見極める．ここでいうストレスは，地震による財物損失額，逸失利益などの地震リスクを指す．

（２）財務から見た地震リスク

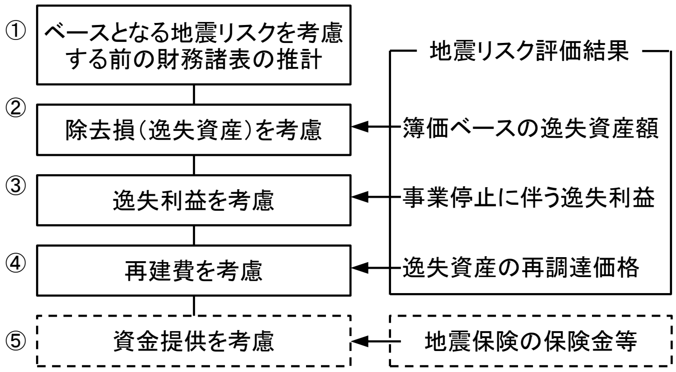
財務諸表は，貸借対照表，損益計算書，キャッシュフロー計算書の 3 つから構成されている．キャッシュフロー計算書は上場企業を対象に 2000 年から組み入れられたものである．また，2006 年より株主資本等変動計算書が加わり，近年ではこれを加え財務 4 表と呼ばれるようになっている．財務分析では，現金あるいは現金同等物が不足し，運営資金の枯渇や債務不履行等が発生するかといったことを把握するために行う．したがって，財務状況を把握するための各種業績指標の中で，特に流動比率，当座比率，自己資本比率，あるいは現金または現金同等物等を見ることになる．このため，純資産の各項目の変動や連続性を細かく把握するための株主資本等変動計算書は必ずしも重要ではない．そこで，財務影響分析では，地震が発生した期末の貸借対照表，損益計算書，キャッシュフロー計算書を推計し，業務指標を計算することになる．

一方，地震リスクは，財物損失額と逸失利益に分けられ，財物損失額は建屋や設備等の有形固定資産と仕掛品や在庫等の流動資産，特に棚卸資産の損失からなり，それぞれ扱い方が異なる．まず，有形固定資産については，施設の再調達価格（再建するために必要な費用，時価と同じ）と簿価上の価格とは一致しない．これは，貸借対照表の資産価値は減価償却によって当初の資産価値より目減りしていること，物価の上昇や下落によって建設当初の再調達価格が変化していること，この 2 点が原因となっている．地震リスク評価で求められた財物損失額は，再調達ベースの損失額に加え，貸借対照表から差し引く除去損（簿価上での逸失損失額）も計算しなければならない．つまり，有形固定資産の財物損失額は，再調達ベースと簿価ベースの 2 つが必要になる．また，仕掛品や在庫品等の流動資産は，少なくとも 1 年以内に換金できる資産のため，再調達ベースの損失額だけ計算すればよい．

また，損傷した施設を再建するまでに要する期間中は事業活動ができない．逸失利益は，この期間中に稼ぐことができた利益に相当する．基本的には，事業中断日数に一日当りの売上高等を乗じて求めるが，事業停止期間が長期に及ぶ場合には，何らかの付加的な損失を考慮する必要がある．逸失利益の留意点として，事業活動が行えない期間は売り上げの減少と共に，原材料費や光熱費，外注費等も減ることになる．つまり製造原価は下がることになる．但し，従業員の給料は支払わなくてはならず，また，事業を継続していなくても支払わなくてはならない経費はある．このため費用の仕分けには留意が必要である．一般的には，粗利益や売上総利益が近いといえる．

（３）財務影響分析の手順

図技 3-1 に地震リスク評価の結果を踏まえた財務影響分析の手順を示す．**図技 3-1** より，まず①ベースとなる地震リスクを考慮する前の財務諸表（損益計算書，貸借対照表及びキャッシュフロー計算書）を今後の事業計画などを踏まえて推計する．そして，設定した評価期間中に地震が発生したと仮定し，②財物損失のうちの除去損を計上する．除去損を計上する逸失資産については，損壊した有形固定資産は簿価上の価値を，損壊した仕掛品や在庫品は逸失棚卸資産としての再調達価値をそれぞれ計上する．一方，損益計算書では資産の除去損として特別損失を計上する．ここで，法人税が減ることに注意を要する．



図技-3-1　財務影響分析の手順

③逸失利益を考慮する．逸失利益は企業活動ができない期間の売上減を当初の売上からマイナス計上し，さらに営業できない期間の外注費などもマイナス計上する．逸失利益の影響は損益計算書とキャッシュフロー計算書の営業活動キャッシュフローを悪化させ，その結果は貸借対照表にも影響する．

④再建費を計上する．再建費は壊れて使えなくなった施設を元に戻す復旧費用であり，新たな設備投資と解釈できる．建物や設備機器などの有形固定資産が主な対象になる．このとき，貸借対照表の流動資産が固定資産に移動し，損益計算書には変化はない．ここで問題が生じるのは流動資産の中の現金と現預金に，再建に必要な費用がない場合である．この場合には外部から調達しなければならず，地震保険や代替の金融対策，借入などの対策が必要になる．

通常の財務影響分析はここまでであるが，地震保険などの金融対策を行った場合には，発災時には特別利益として保険金などが入る．そこで資金提供の効果を業績指標の改善効果として確認する必要がある．⑤は資金提供を受けた場合の財務諸表への影響を分析する項目である．

（４）財務影響分析の具体例

表技-3-1 の地震リスクを想定して，製造業を対象とした財務影響分析の例を示す．**表技-3-2**～**表技-3-5** に，**図技 3-1** の①～④の手順に従った財務諸表を示すが，簡単のため，財務諸表は損益計算書と貸借対照表の 2 つとし，また，変化の少ない収支項目や後述する業務指標に影響の少ない収支項目は省いている．**表技-3-2** はベースとなる財務諸表，**表技-3-3** は除去損（逸失資産）を考慮，**表技-3-4** は逸失利益を考慮，**表技-3-5** は再建費を考慮したものである．まず，**表技-3-2** のベースとなる財務諸表を見ると，自己資本比率は 0.37，流動比率は 1.54，財務状況は比較的よい状況といえる．この期にシナリオ地震が発生したと仮定する．事業停止による逸失利益は，売上減，製造原価のうち，材料費などの買入れ減，ならびに外注費減を用意している．

まず始めに除去損を計上し，これが**表技 3-3** になる．**表技-3-2** と比較して変化した項目を灰色で示す．**表技-3-1** のリスク情報のうち，有形固定資産の簿価ベース 50 と棚卸資産の再調達ベース 20 の損害を除去損として差し引く．除去損の合計 70 は特別損失に計上する．なお，法人税は，税引前当期純利益の 40%としている．

次に，逸失利益を計上し，これが**表技-3-4** になる．**表技-3-3** と比較して変化した項目を灰色で示す．売上，材料費等，外注費が減っているが，損益計算書では，材料費と外注費が減ると，営業利益は増えることになり，結果として営業利益の損失は 20 となる．

最後に**表技-3-5** で再建費を計上する．**表技-3-4** と比較して変化した項目を灰色で示す．再建費は，貸借対照表の中で，流動資産が固定資産に移動するだけで，損益計算書に変化はない．但し，現金・現預金に再建に必要な費用があることが前提である．**表技-3-5** の評価が，地震による損害額をすべて考慮した最終的な財務諸表になる．

この分析から，約 1 か月間生産は停止しているが，当期純利益はマイナスにはなっていない．一方で，690 あった流動資産は 480 まで減少している．この減少はどこで起きるのか，**表技-3-2** から**表技-3-5** に至る際の業績指標の変化を見ると明らかとなる．

表技-3-1　財務影響分析用の地震リスク情報

財物損失額

施設	分類	再調達ベース	簿価ベース
建屋	有形固定資産	100	20
製造設備	有形固定資産	110	30
仕掛品，製品等	棚卸資産	20	－

逸失利益

事業停止期間	分類	増減分
30日	売上	160
	材料費等	120
	外注費	20

表技-3-2　ベースとなる財務諸表

損益計算書(P/L)

売上高	1,800
売上原価	
材料費等	1,300
人件費等	60
売上総利益(粗利)	440
販売費および一般管理費	
役員報酬	5
外注費	200
減価償却費	20
その他	70
営業利益	145
営業外収入	5
営業外支出	10
経常利益	140
特別利益	－
特別損失	－
税引前当期純利益	140
法人税等	56
当期純利益	84

貸借対照表(B/S)

流動資産	694	流動負債	450
現金・現預金	634	支払手形・買掛金	100
買取手形・売掛金	20	短期借入金	300
棚卸資産	－	未払い費用	50
その他	40	その他	－
有価証券・その他	－		
有形固定資産	420	固定負債	250
土地	40	社債	－
建物	180	長期借入金	250
設備機器	200	その他	－
無形固定資産・投資等	－	純資産	414
投資有価証券	－	資本金	50
子会社株式・出資	－	資本剰余金	80
その他	－	利益剰余金	284
		利益準備金	200
		繰越利益剰余金	84
資産合計	1,114	負債・純資産総額	1,114

自己資本比率	0.37
流動比率	1.54

表技-3-3　除去損を考慮した財務諸表

損益計算書(P/L)

売上高	1,800
売上原価	
材料費等	1,300
人件費等	60
売上総利益(粗利)	440
販売費および一般管理費	
役員報酬	5
外注費	200
減価償却費	20
その他	70
営業利益	145
営業外収入	5
営業外支出	10
経常利益	140
特別利益	－
特別損失	70
税引前当期純利益	70
法人税等	28
当期純利益	42

貸借対照表(B/S)

流動資産	702	流動負債	450
現金・現預金	662	支払手形・買掛金	100
買取手形・売掛金	20	短期借入金	300
棚卸資産	－	未払い費用	50
その他	20	その他	－
有価証券・その他	－		
有形固定資産	370	固定負債	250
土地	40	社債	－
建物	160	長期借入金	250
設備機器	170	その他	－
無形固定資産・投資等	－	純資産	372
投資有価証券	－	資本金	50
子会社株式・出資	－	資本剰余金	80
その他	－	利益剰余金	242
		利益準備金	200
		繰越利益剰余金	42
資産合計	1,072	負債・純資産総額	1,072

自己資本比率	0.35
流動比率	1.56

表技-3-4　逸失利益を考慮した財務諸表

損益計算書(P/L)

売上高	1,640
売上原価	
材料費等	1,180
人件費等	60
売上総利益(粗利)	400
販売費および一般管理費	
役員報酬	5
外注費	180
減価償却費	20
その他	70
営業利益	125
営業外収入	5
営業外支出	10
経常利益	120
特別利益	－
特別損失	70
税引前当期純利益	50
法人税等	20
当期純利益	30

貸借対照表(B/S)

流動資産	690	流動負債	450
現金・現預金	650	支払手形・買掛金	100
買取手形・売掛金	20	短期借入金	300
棚卸資産	－	未払い費用	50
その他	20	その他	－
有価証券・その他	－		
有形固定資産	370	固定負債	250
土地	40	社債	－
建物	160	長期借入金	250
設備機器	170	その他	－
無形固定資産・投資等	－	純資産	360
投資有価証券	－	資本金	50
子会社株式・出資	－	資本剰余金	80
その他	－	利益剰余金	230
		利益準備金	200
		繰越利益剰余金	30
資産合計	1,060	負債・純資産総額	1,060

自己資本比率	0.34
流動比率	1.53

表技-3-5　再建費を考慮した財務諸表

損益計算書(P/L)

売上高	1,640
売上原価	
材料費等	1,180
人件費等	60
売上総利益(粗利)	400
販売費および一般管理費	
役員報酬	5
外注費	180
減価償却費	20
その他	70
営業利益	125
営業外収入	5
営業外支出	10
経常利益	120
特別利益	－
特別損失	70
税引前当期純利益	50
法人税等	20
当期純利益	30

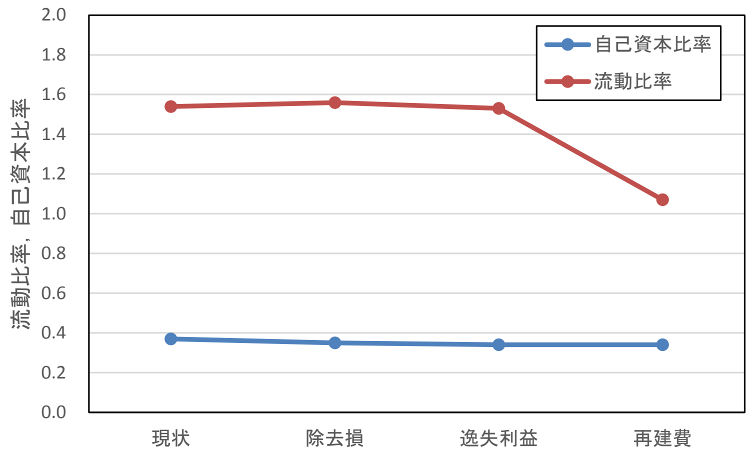
貸借対照表(B/S)

流動資産	480	流動負債	450
現金・現預金	440	支払手形・買掛金	100
買取手形・売掛金	20	短期借入金	300
棚卸資産	－	未払い費用	50
その他	20	その他	－
有価証券・その他	－		
有形固定資産	580	固定負債	250
土地	40	社債	－
建物	260	長期借入金	250
設備機器	280	その他	－
無形固定資産・投資等	－	純資産	360
投資有価証券	－	資本金	50
子会社株式・出資	－	資本剰余金	80
その他	－	利益剰余金	230
		利益準備金	200
		繰越利益剰余金	30
資産合計	1,060	負債・純資産総額	1,060

自己資本比率	0.34
流動比率	1.07

（５）業務指標を悪化させる要因

製造業を対象とした財務影響分析の具体例（**表技-3-2**～**表技-3-5**）を示したが，この財務部影響分析の過程で業績指標がどのように変化するのかをみてみる．業績指標は流動比率と自己資本比率に着目する．地震が起きなければ，この企業の自己資本比率は 0.37，流動比率は 1.54 で，財務的には比較的よい状況にある．ところが，地震発生によって，これらの指標は**図技-3-2** のように変わっていく．まず自己資本比率は，特に大きな変化は見られない．この理由は，外部資金の調達を必要とせず，内部資金でほぼ賄えたことが大きな理由である．一方，流動比率は 1.07 まで低下している．ここで，流動比率の過程を見ると，逸失利益までは特に変化はないものの，再建費によって大きく低下していることが分かる．これは，地震災害を含めた自然災害に共通していることだが，建屋や製造設備等の損壊によって失った経営資源を，新たな設備投資として復活させなくてはならないからである．製造業にとっては，新たな設備投資はかなりの重荷になる．このことから，事業停止が長期化することも問題だが，再建費の捻出にも十分配慮しなければならない．事業停止の長期化と再建の重圧，双方を軽減するためには，被害を水際で止めることができる事前のハード対策が非常に重要になる．



図技-3-2　自己資本比率と流動比率の推移

（６）金融対策

金融対策は地震リスクを他社に転嫁することで，財務上の損失を補てんする対策である．その代表格として，地震保険（Earthquake Insurance）がある．その他にもキャプティブ保険（Captive Insurance），保険デリバティブ（Insurance Derivative），キャット・ボンド（Catastrophe Bond），コミットメント・ライン（Commitment Line），コンティンジェント・デッド（Contingent Debt）等がある（**表技-3-6**）．

地震保険以外は代替的金融対策と呼ばれる．金融対策による資金を事業主体側から捉えると，負債に参入されるものと資本（純資産）に入れるものとで二分できる．コミットメント・ライン，コンティンジェント・デットは負債に，その他は基本的に資本に入る．

自己資本比率が低い状況では，負債が増加する金融対策は避ける必要があるが，自己資本比率が高い（負債比率が低い）場合には，借入策もとれることになり，選択肢は広がる．一方，地震保険の保険金は被災後の調査によって査定されるが，保険金でカバーされる範囲は再建費のみで，逸失利益は対象外である．これに対して地震発生後速やかに（被災調査なしで）資金調達でき，その使途に制限がないのが，保険デリバティブ，キャット・ボンド，コンティンジェント・デット等である．

表技-3-6　金融対策の概要 [1)]

名称*	概要
○　コミットメント・ライン	予め定めた期間及び融資枠の範囲内で金融機関が融資を実施．但し，天災等は面積となる．
○　コンティンジェント・デット	特定のリスクに対する融資枠契約．SPC が融資を実施．コミットメント・ラインの脆弱性を克服するもの．
□　地震保険	地震等による損害を補償する地震災害専用の保険．カバー範囲は再建費のみ．
□　キャプティブ保険	キャプティブとは，親会社のリスクを専門的に引き受けるために，当該親会社に所有・管理されている保険会社．自家保険によるリスクの内部化
□　保険デリバティブ	契約締結時に取り決めた条件（一定規模の地震発生等）が満たされた場合，金融機関から契約締結時に取り決めた金額を受領
□　キャット・ボンド	企業と SPC が契約し，それに基づき債権（キャット・ボンド）を発行し，リスク顕在化時に資金の一部又は全部を提供

*名称左側の「○」印は資金提供を受けた会社の負債となる金融対策，「□」印は資本となる金融対策

参考文献

1) 中島由貴，中村孝明，中神啓介，西崎英治: 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，ISSN1346-7328，国土技術政策総合研究所資料　第 783 号，P.37，2014.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 863　　　　　September 2015

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