

ISSN 1346-7328

国総研資料 第830号
平成 27 年 3 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.830

March 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

小野 正博、中島 由貴、中村 孝明、静間 俊郎

Risk Management to Maintain Performance and Achieve Early Restoration
of Airports after Earthquakes

Masahiro ONO, Yoshitaka NAKASHIMA, Takaaki NAKAMURA, Toshiro SHIZUMA

国土交通省 国土技術政策総合研究所

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

空港の性能維持・早期復旧に関する地震リスクマネジメント

小野 正博*, 中島 由貴**, 中村 孝明***, 静間 俊郎****

要 旨

本研究では、地域防災に資する空港の効率的な運用を実現するため、空港の性能維持・早期復旧を目標としたリスクマネジメントの方法論を構築した。具体的には、架空の空港を想定して、複数のシナリオ地震を対象に、救急・救命、緊急物資・人員輸送、民間航空機運航に関する性能について、性能回復や復旧期間の評価方法を開発した。そして、対策が必要な施設の優先順位を評価する方法を示した。

キーワード：地震リスクマネジメント，確率論的リスク評価，復旧時間期待値，復旧曲線，健全度

*空港研究部 空港計画研究室長

**空港研究部 空港新技術研究官

***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：046-844-5032 Fax：046-844-5080 E-mail: ono-m92y2@ysk.nilim.go.jp

Risk Management to Maintain Performance and Achieve Early Restoration of Airports after Earthquakes

Masahiro ONO*
Yoshitaka NAKASHIMA**
Takaaki NAKAMURA***
Toshiro SHIZUMA****

Synopsis

This study constructed a risk management methodology intended to maintain airport performance and achieve early recovery of airports in order to efficiently operate airports that contribute to local disaster prevention. Specifically, assuming a fictitious airport, a method of evaluating the recovery level and time for each performance emergency assistance/life-saving, emergency supplies/personnel transport, and civil aviation was developed based on a multi-event model. An evaluation method to prioritize measures was also shown.

Key Words : earthquake risk management , stochastic evaluation of risk, recovery time expectancy, recovery curve, level of soundness

* Head of Airport Planning Division, Airport Department

** Research Coordinator for advanced Airport Technology, 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: ono-m92y2@ysk.nilim.go.jp

目 次

1. はじめに	1
2. 地域防災と研究のスコープ	1
3. 既往研究と基本手法	2
4. 復旧曲線の評価方法	2
4.1 定義と定式化	2
4.2 健全度曲線の評価	3
4.3 システム性能の超過確率関数の評価	4
4.4 要素の損傷相関	5
4.5 損傷相関の評価方法	5
4.6 復旧曲線の評価フロー	6
5. 評価対象の空港のシステムモデル等の設定	7
5.1 対象空港と空港の性能のシステムモデルの設定	7
5.2 空港施設の耐震性能と復旧時間の設定	10
5.3 空港施設のFragility Curve と損傷相関	11
5.4 マルチイベントモデルによる地震/津波危険度	11
6. 空港の性能の健全度ならびに復旧曲線の評価	11
6.1 リスクリスト	11
6.2 復旧曲線と健全度曲線	13
6.3 外部調達, 要員参集, 発生状況による遅延を含めた健全度曲線	15
6.4 生存救出率への影響	15
6.5 損傷相関の影響	16
7. 対策の優先順位と対策効果	17
7.1 必要な対策と優先順位の評価	17
7.2 対策の効果	19
8. まとめ	20
謝辞	21
参考文献	21
付録	23
付録A マルチイベントモデル	23
付録B 地盤増幅の評価と応答スペクトル比	26
付録C 建屋の耐震性能評価方法	29
付録D 全確率を用いた積分法の誘導	37
付録E 津波浸水確率の評価	40

1. はじめに

空港は地震時において孤立した被災者の救援や支援物資の輸送の拠点と強く期待されている。このような観点から、国土交通省航空局は、2004年の中越地震を踏まえ「地震に強い空港のあり方(2007)」を、2011年の太平洋東北沖地震を踏まえ「空港の津波対策方針(2011)」を示した。また、2013年5月に「南海トラフ地震防災対策推進基本計画(2014.3, 中央防災会議)」が示されたこととともない、2014年11月に「南海トラフ地震等広域的災害を想定した空港施設の災害対策のあり方検討委員会」を立ち上げた。

特に、「地震に強い空港のあり方」において、「救急・救命活動の拠点機能(発災後極めて早期の段階)」、「緊急物資・人員等輸送の受入機能(同3日以内)」、「定期航空輸送機の運航(同3日を目途)、通常時の50%の運航規模(極力早期)」と、空港の地震時の性能とその発現の期限を具体的に示した。しかしながら、地震の不確実性を考慮したうえで、示された性能を期限までに実現するには、構造信頼性理論に基づくリスクマネジメント手法の検討が不可欠である。

著者らは、国土技術総合研究所資料 No.718(2013)にて仙台空港の被災・復旧過程と陸上自衛隊駐屯地等の発災直後の代替空港の役割を整理した。同研究所資料 No.756(2013)にてイベントツリー解析など構造信頼性理論を導入し地震リスクの視覚化・定量化方法を提案した。さらに、同研究所報告 No.55(2014)にて、マルチイベントモデルやシステムモデルといった同理論に基づく要素技術を用いて地震リスクの評価方法の高度化を提案したが、その対象は財務面に限定した。したがって、発災直後から求められる性能維持・早期復旧について、同理論を踏まえたリスクマネジメント手法は未整備である。

本研究は、「地震に強い空港のあり方」で明示された性能を期限までに実現するため、これまでの研究の要素技術も活用し、性能維持と早期復旧を目標とするリスクマネジメントの方法論を構築する。本稿の具体的内容は、広域的災害への応用も視野に、複数のシナリオ地震の発生を前提(マルチイベントモデル)として、空港の性能の健全度や復旧時間の評価方法を開発する。復旧の遅延要因の抽出方法や対策の優先順位付けの方法を整備する。検討に際し、地方空港を例に、性能の健全度や復旧過程に着目し、健全確率や復旧曲線を評価する。耐震化策の優先順位を把握するための指標を考察し、対策による健全確率や復旧曲線の改善効果を示す。

2. 地域防災と研究のスコープ

被災者の救急・救命活動、被災地への緊急物資・人員等輸送の拠点としての機能を実効化するには、地域あるいは広域防災を担う国や自治体と情報共有を図りつつ協同して進める必要がある。図-1は自治体と個別空港の連携を模式的に表した図である。

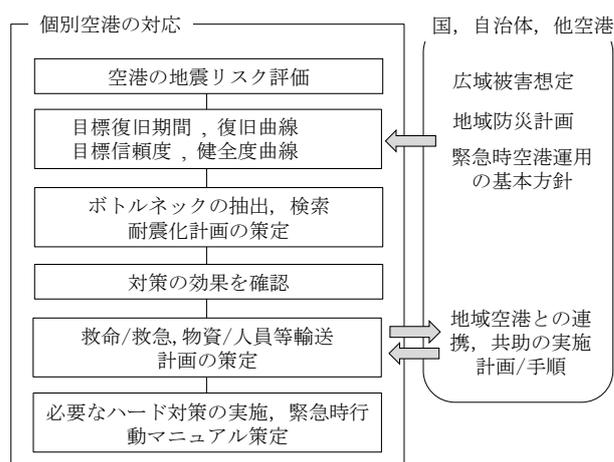


図-1 緊急時の空港運用と地域防災計画

自治体は広域被害想定に基づき地域の防災計画を策定する。空港は緊急時の役割や運用方針を、自治体を含めた関係各機関と協議し共有する。運用方針の具体は、例えば発災後2時間程度で消防ヘリ、防災ヘリ等を参集させ、4時間程度でSCU(Staging Care Unit, 広域搬送拠点臨時医療施設)を設置、その後域内での輸送を開始する、などである。しかしながら、罹災地域に位置する空港は同時被災の可能性がある、このような運用ができるかどうかは不明である。そこで、空港の地震リスク評価と、評価結果の共有化が必要になる。リスク情報としては、空港の緊急時の性能(救急・救命活動、緊急物資・人員等輸送)の健全度や、性能の予想復旧時間等が有益である。これらは緊急時の運用可否やどの程度までなら運用できるかなどを、机上ではあるものの、事前に把握できるからである。そして、緊急時の運用方針に従った目標復旧時間や健全度(健全確率)を定め、それに満たないのであれば、その要因(ボトルネック)を抽出すると共に、ボトルネックを解消するための耐震化策を実施する必要がある。その際、耐震化策が有効かどうかを確認するため、対策を施したと仮定した健全度や復旧時間を再評価する。現状との対比によって対策の効果を確認する。

このような評価は、災害時の共助連携を行う空港個々に実施する必要がある。そして、それぞれのリスク情報を自治体や各種機関（消防、警察、病院等）、他空港と共有することで、緊急時の共助の計画や具体的な手順を協議/策定することができる。

一方、被災の地域特性や規模は震源位置やマグニチュードによって異なる。このため、将来的には危険地震を複数取上げ、各空港の同時被災を考慮したリスク評価を実施する必要がある。本稿では、この準備として複数震源モデル（マルチイベントモデル）を整備し、空港の地震リスクを評価する。

本稿では、個別の空港を対象に空港の性能の健全度や復旧曲線の評価を行う。空港の性能は救急・救命活動、緊急物資・人員等輸送、民航空機（以下、民航という）の運航の各フェーズに分け、それぞれ評価する。その際、各フェーズに要求される性能と空港の持つ諸施設の役割とを明確に関連させるため、救急・救命活動は回転翼機の運航性能（主に孤立地域からの被災者輸送）とし、救急・救命活動のうちの DMAT の広域医療搬送及び緊急物資・人員等輸送は、固定翼機の運航性能とする。

3. 既往研究と基本手法

空港は様々な構造物や設備で構成された巨大システムであるが、これまでの耐震設計あるいは耐震診断は構造物や設備個々の耐震性能を照査するもので、空港総体としての性能維持・早期復旧を目標としたものではない。このため、空港の性能を構成する構造物や諸設備の耐震性能の過不足を明らかにできず、これが耐震化策の優先順位を把握できないという盲点となっている。

そこで空港の性能を、構造物や設備が有機的に連結したシステムとして捉え、構造信頼性理論に基づいて複数の要素から構成されるシステム全体の損傷パターンを評価する、システム信頼性評価の方法を応用し、空港の性能の健全度や復旧曲線を評価する。システムの健全度や復旧時間に関するこれまでの研究を概観すると、星谷ら（1983）は順次復旧、同時復旧の場合に分けそれぞれの健全度や復旧評価の基本的な考え方を示し、能島ら（1992）は復旧過程を可視化した復旧曲線の評価手法を提示している。最近では、事業継続計画（BCP）への関心の高まりとともに、製造業の生産ラインを対象に地震時の復旧時間を評価する研究（中村、2007）、浄水場管路の送水機能の復旧に着目した研究（馬場ら、2010）、建築設備機能の復旧時間を評価する研究（坂本、2007）など、性能をシステムとして捉え、経過時間と共に性能

が回復する過程を追う、いわゆる復旧曲線を評価する研究が見られる。また、中村ら（2011）や能島（2009）は、システムを構成する要素の損傷相関を考慮した研究において、システムの健全度や復旧時間は損傷相関の影響が極めて大きいと論じている。中村ら（2011）は全確率の定理を利用した方法を採用し、能島（2009）は同時確率密度関数の積分による方法を採用している。方法は異なるものの、復旧時間や復旧曲線を評価する上で損傷相関を考慮した評価が不可欠であると結論付けている。

一方、国土交通省航空局（2007）では、発災から極めて早期の段階で通常時の 50%に相当する運航能力を確保するよう求めている。これは、滑走路やエプロン、管制機能などがある程度被災しても、一定の運航能力を確保できるよう求めているもので、そのための代替性の確保についても対策の一つとして組み入れることを示唆している。そこで本稿では、空港の性能の健全度や復旧曲線を評価する上で、システムを構成する要素の多様な性能（航空機の運航能力）を考慮できる中村ら（2011）、能島（2009）の方法を基本に、空港の性能の代替性を考慮できる方法を提案する。また、構成要素の損傷相関についても考慮する。損傷相関については利便性の面から全確率の定理を利用した方法を採用する。

4. 復旧曲線の評価方法

4.1 定義と定式化

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。横軸は復旧に要する時間、縦軸は性能である。縦軸の性能は一般的に、本来の性能を 1.0 とした性能回復率で表すことが多い。一方、地震被害の発生や復旧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。

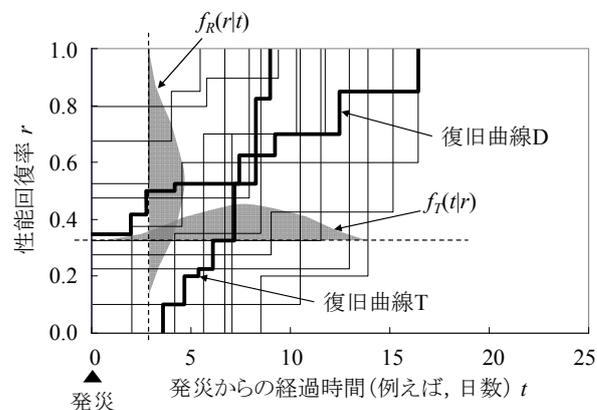


図-2 復旧曲線の概念図

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、図-2 の細線で示すように、様々な（無数の）復旧過程が予想され、予想に漏れがない限りこの中の一つは必ず実現することになる。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、平均的な曲線を復旧曲線として代表する。

復旧曲線は復旧時間と性能の2つの軸に描画されるため、基本的には2種類存在する。図中太線のT曲線とD曲線がこれらに相当する。D曲線は性能を確率変数とした縦軸に分布する曲線群の平均値を、復旧時間に対し結んだ曲線である。一方のT曲線は復旧時間を確率変数とした横軸に分布する曲線群の平均値を、性能に対し結んだ曲線である。D曲線は復旧時間 t を条件とした性能 r の確率密度関数 $f_R(r | t)$ より、以下のように求めることができる。

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

T曲線は性能 r を条件とした復旧時間 t の確率密度関数 $f_T(t | r)$ より、以下のようになる。

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

一方、 $f_R(r | t)$ の非超過確率関数 $F_R(r | t)$ と、 $f_T(t | r)$ の超過確率関数 $G_T(t | r)$ は同じ値を取る。これは、図-2 に示した曲線群はそれぞれ交差するものの経過時間に対し必ず上昇する（図中右上に向かう）ことが理由である。これより以下の式が成立する（静間ら、2009）。

$$\begin{aligned} F_R(r | t) &= 1 - G_R(r | t) \\ &= G_T(t | r) \end{aligned} \quad (3)$$

(1)式をさらに展開すると以下のようになる。

$$R_D(t) = \int_0^{1.0} G_R(r | t) dr \quad (4)$$

また、(2)式は以下のようになる。

$$R_T(r) = \int_0^{\infty} G_T(t | r) dt \quad (5)$$

これより、 $G_R(r | t)$ からD曲線が求められ、さらに(3)式と(5)式を使いT曲線を求めることができる。

次に、システム全体の復旧期間期待値を求める。これを RTE (Recovery Time Expectancy) と呼ぶ。D曲線の

期待値 $E(D)$ は以下のように求められる。

$$E(D) = \int_0^{\infty} [1 - R_D(t)] dt = \int_0^{\infty} \int_0^{1.0} G_R(r | t) dr dt \quad (6)$$

T曲線の期待値 $E(T)$ は以下のようになる。

$$E(T) = \int_0^{1.0} R_T(r) dr = \int_0^{1.0} \int_0^{\infty} G_T(t | r) dt dr \quad (7)$$

(3)式より、D曲線とT曲線の期待値は一致する。復旧曲線を求めるには性能 r の超過確率関数 $G_R(r | t)$ 、あるいは時間 t の超過確率関数 $G_T(t | r)$ を求めればよい。

なお、上水や電力システムのように供給 node が無数に存在する場合にはD曲線は実状をよく説明できるとの報告 (Shinozuka et al, 2004) がある。一方、性能が比較的限定され、その性能の復旧時間を知りたい場合にはT曲線が有効とされる (中村ら、2007)。本稿では空港の性能の経時的復旧を直感的に把握できることが重要であるとの観点に立ち、2種の復旧曲線の良否を考察する。

4.2 健全度曲線の評価

地震発生後、空港は救急・救命活動や緊急物資・人員等輸送、いわゆる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、性能 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。

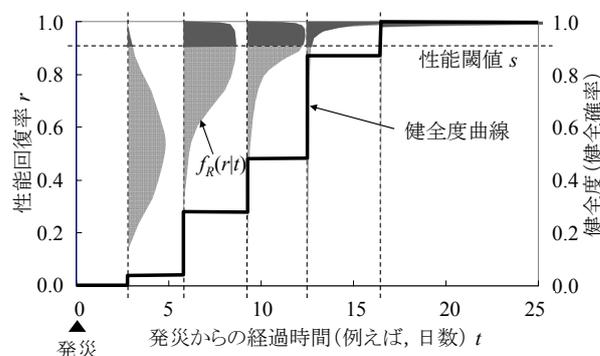


図-3 健全度曲線の概念図

$$p_{r>s}(t) = G_R(r=s|t) = \int_s^{1.0} f_R(r|t) dr \quad (8)$$

ここに、 s は緊急時に必要となる最小限の性能である。(8)式にて求められる関数を、本稿では健全度曲線と呼び、概念図を図-3 に示す。図の右側の縦軸は健全度曲線の確率を示している。

4.3 システム性能の超過確率関数の評価

構成要素の性能を考慮したシステム性能について、具体例を使い考え方を説明する。図-4 に例示する 4 つの構成要素（以下要素）から成るシステムを想起する。図中の数値（%）は、各要素の処理能力（以下性能）を表す。地震によって要素が損傷すると、その性能は 0.0 になるとする。通常時にシステムに要求される性能を 100%とすると、並列に組まれた要素 R_1 と R_2 の性能は足され 120%となり 20%の余剰が生じる。同様に要素 R_3 と R_4 の性能は 150%であり 50%の余剰がある。例えば、 R_3 のみ損傷した場合にはシステムの性能は 50%であるのに対し、 R_4 のみ損傷した場合は 100%の性能を維持する。一方、 R_1 と R_4 が損傷すると、 R_3 は 100%の性能があるにも関わらず、システムの性能は 20%になる。この時、並列に組まれたシステムはそれぞれの性能は足され、直列に組まれたシステムはそれぞれの性能の最小値を採るよう定式化すればよい。

一方、空港の運航性能は、例えば、管制塔が何らかの被害を受け、その機能が喪失した場合でもガンセット（携帯用航空機無線）の利用で一定の管制機能を補完することができる。また、買電が停止しても、自家発電で一定の運航性能を補完することができる。これら代替性は運航性能の冗長性確保を目的したもので、システム上は並列システムとして組み込まれる。ところが、上記のように要素の性能を足すことになると、買電と自家発電が同時に利用されるケースが含まれ、実状から乖離する。そこで、性能を足すのではなく最大値を採るよう修正する。これにより、双方が利用できる状況では買電を利用し、買電が停止した場合は自家発電を利用する、といった機能の代替性を考慮した評価が可能となる。

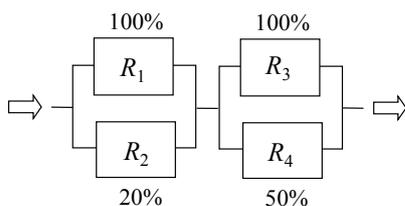


図-4 システム例と構成要素の性能

以下、この考え方に則って、システム性能の超過確率関数 $G_R(r|t)$ の定式化を行う。その際、煩雑になるので、条件付きとしての時間 t は省く。

まず、 n 個の要素で構成される並列システムを取り上げる。このシステムの性能は各要素の最大値を採ることになり、以下のようになる。

$$R = \max_{i=1}^n R_i \quad (9)$$

ここに、 R はシステム性能の確率変数を、 R_i は要素 i の性能の確率変数である。 n 個の要素で構成される直列システムでは要素の性能の最小値を採ることになり、以下のようになる。

$$R = \min_{i=1}^n R_i \quad (10)$$

図-4 の例では、システム性能の確率変数は以下のように求められる。

$$R = \min(\max(R_1, R_2), \max(R_3, R_4)) \quad (11)$$

並列と直列が複雑に混在するシステムであっても、上記のような定式化によりシステム性能の確率変数は求められる。また、(11)式の定式化の際には、ブール代数の諸定理を利用することができ、便利である。

一方、要素性能の確率変数 R_i の一例を図-5 示す。図中の p_M 、 p_S は要素の軽微以上、大破の損傷確率を表し、一般的には地震動 x の条件付きとして以下のように求められる。

被害モード	確率	停止期間	性能
無被害	$1 - p_M$	0	r_N
軽微被害	$p_M - p_S$	t_M	r_M
大破被害	p_S	t_S	0.0

図-5 構成要素の損傷確率と性能の確率関数

$$p_M(x) = \int_0^x f_C(\ln c; c_m, \zeta_C) dc \quad (12)$$

(12)式は耐力の不確実性を考慮した Fragility Curve である。ここに、 $f_C(\cdot)$ は正規確率密度関数であり、 c_m は軽微被害に対応した耐力中央値である。 ζ_C は対数標準偏差である。 p_S についても同様に求められる。一般的には地震動の不確実性も含めるが、本稿では後述する要素

間の損傷相関を評価する際にこれを考慮する。ここで、本稿では複数のシナリオ地震に対し一貫して計算すること、各要素の脆弱性を比較しやすいこと、などから耐力中央値は工学的解放基盤面での最大加速度（PBA；Peak Base-rock Accelaretion）に換算する。換算方法については「付録 B 地盤増幅の評価と応答スペクトル比」に詳記する。

システム性能の超過確率関数 $G_R(r)$ の具体的な計算方法について説明する。(9)式は要素間の損傷事象の独立を前提に、以下のように求められる。

$$G_R(r) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - G_{Ri}(r)) \quad (13)$$

ここに、 $G_{Ri}(r)$ は要素 i の性能の超過確率関数である。(10)式は以下のようになる。

$$G_R(r) = \prod_{i=1}^n G_{Ri}(r) \quad (14)$$

図-4 の例では、システム性能の超過確率関数は以下のようになる。

$$G_R(r) = [1 - (1 - G_{R1}(r)) \cdot (1 - G_{R2}(r))] \cdot [1 - (1 - G_{R3}(r)) \cdot (1 - G_{R4}(r))] \quad (15)$$

次に、発災からの経過時間 t の扱いについて解説する。被災からの復旧は同時並行的に複数の要素の復旧を進めるものとする、要素の復旧時間は要素間においてそれぞれ独立に考えることができる。図-5 の例では、発災からの経過時間を t_M までと、 t_S までに分け、それぞれの時間において(15)式の計算を行えば、復旧時間 t を条件とした性能 r の超過確率関数 $G_R(r | t)$ を求めることができる。つまり、所与である要素の復旧時間に応じて、離散的に計算を進めればよい。

4.4 要素の損傷相関

本稿で扱う損傷相関は、物理的な従属事象ではなく地震動評価の誤差や耐震性能の不確実性などに起因する統計的相関を意味する。図-6 に示す架台上の 2 つの要素に着目する。

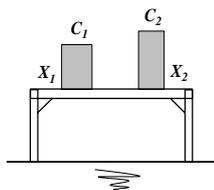


図-6 構成要素の耐力 C と作用地震動 X

要素の耐力ならびに作用地震動を確率変数 C_1, C_2, X_1, X_2 と置く。これらは対数正規分布に近似できるとし、 C_i と X_i は独立とする。損傷を定義する関数として以下を設定する。

$$F_i = C_i / X_i, \quad i = 1 \sim 2 \quad (16)$$

(16)式対数の対数を取り共分散を求めた上で、要素の損傷事象の相関係数 ρ_{Fi2} は以下のように求められる。

$$\rho_{Fi2} = \frac{\rho_{C12} \cdot \zeta_{C1} \zeta_{C2} + \rho_{X12} \cdot \zeta_{X1} \zeta_{X2}}{\zeta_{F1} \zeta_{F2}} \quad (17)$$

ここに、 ρ_{C12} は要素の耐力の相関係数、 ρ_{X12} は要素に作用する地震動の相関係数である。また ζ_{C1}, ζ_{C2} は耐力の対数標準偏差、 ζ_{X1}, ζ_{X2} は作用地震動の対数標準偏差、 ζ_{F1}, ζ_{F2} は複合偏差であり、以下のようになる。

$$\zeta_{Fi} = \sqrt{\zeta_{Ci}^2 + \zeta_{Xi}^2}, \quad i = 1 \sim 2 \quad (18)$$

(17)式は作用地震動の相関係数、対数標準偏差、ならびに複合偏差と要素の損傷事象の相関係数の関係を示している。

Wang & Takada(2005) は、作用地震動の相関係数 ρ_{Xij} をサイト間の相対距離を変数とした指数関数として以下のように示している。

$$\rho_{Xij} = \exp(-h_{ij} / \alpha) \quad (19)$$

ここに、 h_{ij} は要素 i と j の相対距離 (km)、 α は相関距離 (km) であり種々の距離減衰式に対し評価されている。本稿では $\alpha = 27.1\text{km}$ とする。この相関係数は観測された地震動の自然対数の誤差の相関を表している。一方、各要素の耐力の相関係数は、能島(2009)より $\rho_{C12} = 0.2$ とする。(19)式を(17)式に適用し一般的に記述すると、損傷の相関係数は以下のようになる。

$$\rho_{Fi2} = \frac{0.2 \zeta_{C1} \zeta_{C2} + \exp(-h_{ij} / 27.1) \cdot \zeta_{X1} \zeta_{X2}}{\zeta_{F1} \zeta_{F2}} \quad (20)$$

(20)式より、要素の相対距離 (km)、耐力の対数標準偏差、作用地震動の対数標準偏差を与えれば、要素の損傷相関係数を得る。

4.5 損傷相関の評価方法

損傷確率 $p_M(x)$ ((12)式参照) は耐力の不確実性は考慮しているものの、作用地震動 x のそれは考慮していない。このため、地震 S を想定した場合には波動伝播や表層地盤の増幅特性の不確実性など、これらが複合した作

用地震動のばらつきを考慮する必要がある。そこで、全確率の定理を利用し地震 S による要素の損傷確率を以下のように求める。

$$p_M(S) = \int_0^{\infty} p_M(x) \cdot dp(x|S) \quad (21)$$

ここに、 $p_M(S)$ は作用地震動のばらつきを考慮した地震 S による軽微以上の損傷確率である。 $dp(x|S)$ は地震 S による要素に作用する地震動 x が生じる微小確率を示している。

この考え方はシステムに拡張することができ、システム性能の超過確率関数は以下のように求められる。

$$G_R(r|t; S) = \int_0^{\infty} G_R(r|t; x) \cdot dp(x|S) \quad (22)$$

ここに、 $G_T(r|t; S)$ はシナリオ地震 S によるシステム性能の超過確率関数、 $G_T(r|t; x)$ は要素の損傷の独立を前提とした地震動 x によるシステムのそれである。さらに、 $dp(x|S)$ は要素に作用する地震動の確率変数 X の密度関数として記述でき、積分変数の変換により以下のように表される。

$$G_T(r|t; S) = \int_0^{\infty} G_R(r|t; x) \cdot f_X(\ln x; x_m, \zeta_X | S) dx \quad (23)$$

ここに、 $f_X(\cdot)$ は要素に作用する地震動の確率密度関数であり、対数正規密度関数に近似している。 x_m は中央値、 ζ_X は対数標準偏差である。(23)式の誘導については、「付録 D 全確率を用いた積分法の誘導」に詳記している。なお、積分は陽に解けないため数値積分を使う。

次に、要素に作用する地震動 X を要素間において完全相関、耐力 C を独立と仮定する。これより、完全相関成分である作用地震動の条件付として要素の損傷確率を与え、全確率の定理による確率の積和 ((23)式の積分) を実行することで損傷相関を考慮したシステム性能の超過確率関数を求めることができる。具体的には、(17)式の $\rho_{C12}=0$, $\rho_{X12}=1.0$ と置き以下のように変形する。その際、一般的に記述する。

$$\rho_{Fi j} \cdot \zeta_{Fi} \zeta_{Fj} = \zeta'_{Xi} \zeta'_{Xj} \quad (24)$$

ここに、添字 i, j は要素を表す。 ζ'_{Xi} は地震動を完全相関と仮定した場合の便宜上の地震動の対数標準偏差であ

る。このため、(17)式～(20)式の対数標準偏差と区別し、'(ダッシュ)を付けている。(24)式を行列で表記すると以下となる。

$$\begin{bmatrix} \rho_{I1} \zeta_{F1} \zeta_{F1} & \cdots & \rho_{IJ} \zeta_{F1} \zeta_{FJ} \\ \cdot & \ddots & \vdots \\ \cdot & & \rho_{IJ} \zeta_{FI} \zeta_{FJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta'_{X1} \\ \vdots \\ \zeta'_{XI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta'_{X1} & \cdots & \zeta'_{XJ} \end{bmatrix} \quad (25)$$

ここに、 I, J は要素数であり、 $I=J$ である。上式を以下のようにベクトル表記する。

$$\mathbf{V} = \mathbf{W}^T \mathbf{W} \quad (26)$$

ここに、添え字 T は転置を意味する。左辺 \mathbf{V} を所与とし、右辺 \mathbf{W} を求める。解析方法は連立方程式や最小二乗法などがあるが、ここでは問わない。さらに(18)式より要素の耐力の対数標準偏差 ζ_{Ci} を求めることができる。

一方、要素間の損傷の相関係数ならびに複合偏差が同じ場合には、(26)式を解く必要はなく、以下のように作用地震動の対数標準偏差 ζ'_X を一律に与えることができる。

$$\zeta'^2_X = \rho_F \cdot \zeta^2_F \quad (27)$$

さらに、

$$\zeta^2_C = \zeta^2_F - \zeta'^2_X \quad (28)$$

によって、要素の耐力の対数標準偏差 ζ'_C を求めることができる。求められた作用地震動ならびに耐力の対数標準偏差を(23)式に適用することで、相関係数を所与としたシステム性能の超過確率関数を得る。

4.6 復旧曲線の評価フロー

図-7 に損傷相関を考慮した復旧曲線の評価フローを示す。以下の要素間の損傷相関は全て同じとする。先ずシナリオ地震 S を設定し、適当な距離減衰式を用い工学的基盤での地震動を推計する。さらに地盤増幅を考慮した当該サイトでの地震動の中央値 x_m を求める。

複合偏差 ζ_F ならびに相関係数 ρ_F を所与とし、(27),(28)式等より作用地震動と耐力の対数標準偏差 ζ'_X , ζ'_C をそれぞれ計算する。地震動の中央値 x_m と対数標準偏差 ζ'_X から離散化された地震動 x を設定する。要素の復旧時間 t の数だけ(23)式の数値積分を繰り返し、シナリオ地震 S によるシステム性能の超過確率関数 $G_R(r|t; S)$ を求める。さらに復旧曲線 $R_D(t)$, $R_T(r)$, ならびに時間依存の健全確率を $p_{r>s}(t)$ を計算する。

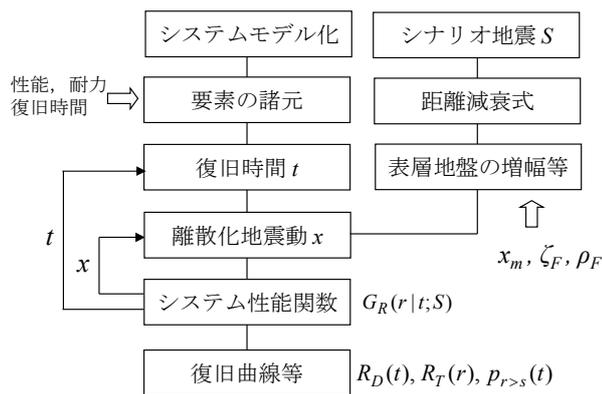


図-7 損傷相関を考慮した復旧曲線の評価フロー

この方法の利点は、要素間の損傷の独立を前提としたシステム性能の超過確率関数 $G_R(r|t; x)$ の評価ロジックに数値積分による繰り返し計算を加えることで利用できることである。また地震動の分散化は、1,000 程度で十分であるとの報告（中村，2008）があり，この点モンテカルロシミュレーションより実用的である。

5. 評価対象の空港のシステムモデル等の設定

5.1 対象空港と空港の性能のシステムモデルの設定

(1) 評価対象とする標本空港

対象空港は埋め立ての人工島であり，アクセスは専用の連絡橋で行われる。連絡橋には道路・鉄道に加え，上中水や電力などのライフラインも併設されている。空港の主な施設は，滑走路，誘導路，エプロン，場周柵，管制塔，場面管理施設，電源局舎（灯火，ILS 等の電源管理），旅客ターミナルビルなどである。また，南海トラフ全域や近隣で発生する巨大地震では，救急・救命活動や緊急物資・人員等輸送の活動の拠点としての機能を期待されている。

(2) 運航性能のシステムモデル

a) 民航運航性能に関するシステムモデル

まず，同空港の民航運航性能に関するシステムモデルを図-8 に示す。図の□は構造物や施設を性能として捉えた構成要素，ならびに性能喪失や遅延を来す要因である。モデルの特徴は，連絡橋が損傷した場合でも，船舶によるアクセスが可能であること，発災時には買電はほぼ停止するものと予想されるが，灯火と場面管理の自家発電（電源局舎），管制塔の自家発電，旅客ターミナルビルの自家発電，計3つの自家発がバックアップとしてある。また，通常の管制機能が失われてもガンセット（携帯用航空機無線）の利用によって一定の管制機能を

担うことができる。これらは運航性能の代替性を意味するもので，図の並列部がこれに相当する。図の後尾に位置する点検は強い地震動を受けたときに行う空港の点検作業であり，その間空港を閉鎖するための要素である。なお，航空機燃料は，タンカリング（出発空港で復路の燃料を搭載する方法）により対応可能であることから，必ずしも必要としないと判断し，民航運航性能のシステムモデルから省いた。一方，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。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，性能喪失の要因として別途設け，図の最前列に配置している。

VOR/DME（超短波全方向式無線標識/距離測定装置）や ILS（計器着陸装置）等は，津波や液状化に起因した冠水による性能喪失を考慮するが，これは図の津波浸水，滑走路，誘導路の液状化被害に含むものとする。なお，図の自家発電はターミナルビル，管制塔，電源局舎にそれぞれ内装されている。このため，これらの建屋が大破した場合には自家発電機にも何らかの被害が及ぶと予想されるが，大破した場合の復旧時間を超えて自家発電機が性能停止するとは考えにくい。従って図のように分離しても計算上差し支えない。

b) 固定翼機の運航性能に関するシステムモデル

図-9 に，緊急時に固定翼機の運航性能に関するシステムモデルを示す。同モデルは緊急物資・人員等輸送のみならず，自衛隊固定翼機による，DMAT（Disaster Medical Assistance Team；災害派遣医療チーム）の広域参集，被災地外の広域医療搬送拠点への広域搬送などの運用性能を評価するモデルである。このときの固定翼機は，被災地外からの調達とする。同モデルは，図-8 の民航運航性能のシステムモデルから，緊急時に必要な機能を洗い出し，構成要素の削除・追加を行っている。

特徴は，緊急物資や機材，医療機器などを被災地へ輸送する際，空港施設の屋内に SCU の設置や物資の一時保管，ならびに荷捌き等の作業スペースを要するため，作業スペース機能を加えている。電源については，買電，自家発（旅客ターミナルビルあるいは電源局舎）のどちらか一つでも機能していれば，性能は確保できるものとした。また，航空機燃料は貯蔵施設（給油タンク）に限定し，空港内で燃料輸送するための給油車（レフューラー）は発災時においても使用可能であると考えた。緊急時対応の点検作業は短時間で完了することから，これを簡易点検としてモデルに組み入れた。民航での点検と同様に，空港の性能を一時的に停止するための要素である。

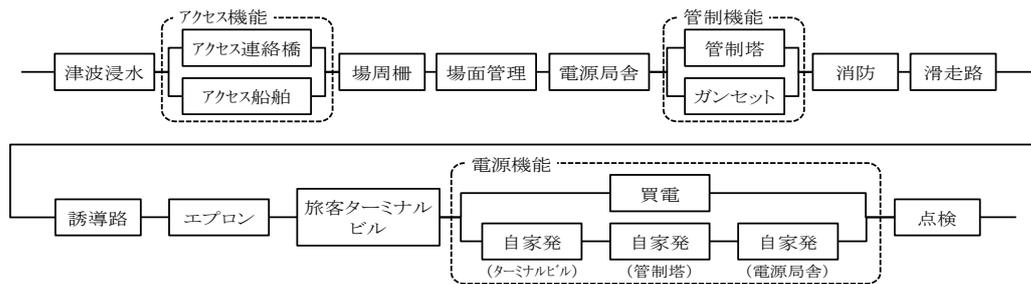


図-8 民航運航性能に関するシステムモデル

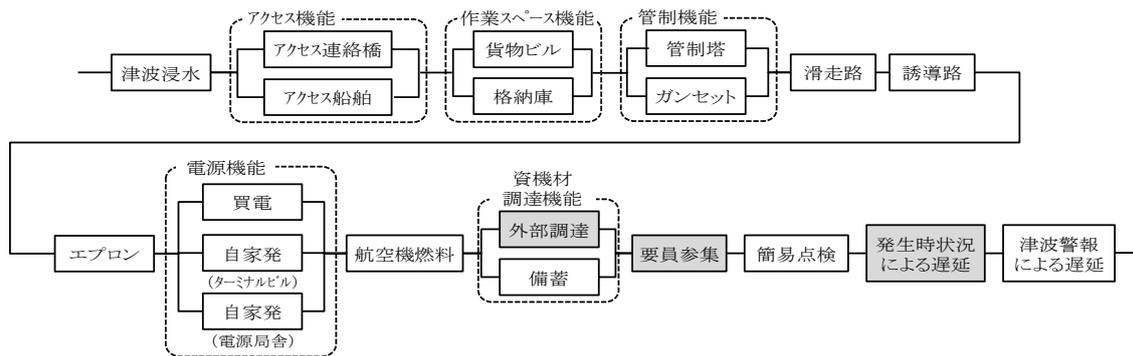


図-9 固定翼機の運航性能に関するシステムモデル

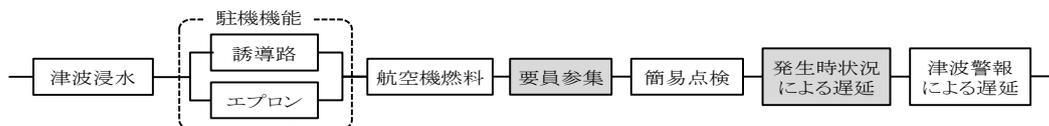


図-10 回転翼機の運航性能に関するシステムモデル

要員参集は、空港外部からの人員であり、主に指揮命令主事者、関連する作業員である。広域災害では速やかな要員参集は出来ない可能性があることから、これを組み込んでいる。資機材調達は、瓦礫等の撤去に用いるロードスリッパ、クラック箇所を補修する応急復旧資材、広域搬送用の自衛隊固定翼機の到着・搬送準備、非常用の無線通信機器等、緊急時に必要な資機材の調達及びその資機材が使用できるまでの行為を含んでおり、空港内に備蓄されている場合はこれを利用するものの、無い場合は外部からの調達となる。ただし、現状では備蓄はないものとした。また、活動は発災後速やかに始動するが、発災が夜間、あるいは悪天候、さらに津波警報の発令などにより遅延することがある。図中の発災時状況による遅延、津波警報により遅延は、これらを考慮するための要素である。

なお、外部調達、要員参集、発災時状況による遅延は、発災時の状況を踏まえた事後行動の適正化によって一定程度対応することが可能である。例えば、悪天候を前提

とした事後行動のマニュアル整備や訓練、被災パターンによる要員参集の多様化、などである。従って、これら要因は事業継続計画（BCP；Business Continuity Planning）と称する事後対策の範疇であり、他と区別するためにハッチングしている。

c) 回転翼機の運航性能に関するシステムモデル

図-10 に救急・救命活動における回転翼機の運航性能に関するシステムモデルを示す。使用される回転翼機は空港島に所在する常駐機及び近隣からの応援機を対象とし、モデルは被災者の救命を目的とした怪我人搬送を行うための必要機能をモデル化したものである。搬送範囲は被災地と医療機関等であり、回転翼機の整備、給油などを当該空港で行う。その際に求められる空港の性能の具体は、回転翼機の離発着、駐機、点検整備、給油（航空機燃料）などである。図中の駐機機能は、離発着、ならびに駐機するためのスペースであり、誘導路あるいはエプロンが使用可能であれば、必要性能は満たされると

した。要員参集以下4つの構成要素は図-9の固定翼機の運航性能と同様とする。なお、要員参集については、回転翼機や公用船等での参集を想定し、アクセス連絡橋・アクセス船舶はシステムモデルから除外している。

(3)各構成要素のイベントツリー、被害レベルと運航性能の設定

図-11に、図-8、-9、-10に示したシステムモデルの各構成要素のイベントツリー(Event Tree, 以下ET)と、通常時(無被害の状態)を100%とした性能の低下を被害形態毎に示す。性能の低下は、民航、固定翼機、回転翼機の運航性能に分け、それぞれ示している。

ガンセットの被害については、ガンセットは管制塔内に常備してあり、管制塔が被害を受けた場合でも、避難時に搬出することができるため、「被害なし」とした。ただし、ガンセットによる管制は、民航運航では20%に低減、固定翼機の運航は100%とした。エプロンの液状化は小規模であり範囲は限定されることから、発生した場合の民航運航性能の低下は半減とした。その他多くの要素は、何らかの被害発生により性能は0%とした。

要員参集、外部調達、発生時状況による遅延、津波警報による遅延は、遅延なしの場合は100%であるが、遅延の場合は、遅延している間のみ0%とした。遅延時間については後述の表-1に示す。

【津波浸水】	津波浸水被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無被害	100%	100%	100%		
	一部浸水	0%	100%	0%		
	全面浸水	0%	0%	0%		
【アクセス船舶】	機橋被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無被害	10%	100%	100%		
	破損	0%	0%	0%		
【ガンセット】	ガンセット被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	なし	20%	100%	100%		
【滑走路】	液状化被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無被害	100%	100%	100%		
	小規模液状化	0%	0%	0%		
【エプロン】	液状化被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無被害	100%	100%	100%		
	小規模液状化	50%	0%	0%		
【場面管理(場面管理棟)、電源局舎】	建屋被害	設備被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	中破	無被害	0%	0%	0%	
	大破	無被害	0%	0%	0%	
【消防(消防車庫)】	建屋被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無被害	100%	100%	100%		
	大破	0%	0%	0%		
【貨物ビル】	建屋被害	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航		
	無被害	100%	100%	100%		
	中破	0%	0%	0%		
	大破	0%	0%	0%		
【航空機燃料】	液状化被害	給油タンク被害	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	小規模液状化	破損	0%	0%	0%	
【買電】	送電停止	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無停止	100%	100%	100%		
	停止	0%	0%	0%		
	長期停止	0%	0%	0%		
【自家発(管制塔)】	燃料タンク被害	冷却設備被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	破損	破損	0%	0%	0%	
【点検】	点検	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	なし	100%	100%	100%		
	点検あり	0%	0%	0%		
【簡易点検】	点検	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航		
	なし	100%	100%	100%		
	点検あり	0%	0%	0%		
【備蓄】	備蓄	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航		
	なし	0%	0%	0%		
【発生時状況による遅延】	悪天候・夜間	回転翼機運航	固定翼機運航	民航運航		
	遅延なし	100%	100%	100%		
	遅延	0%	0%	0%		
【アクセス連絡橋】	連絡橋被害	液状化被害	新交通橋脚被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航
	無被害	無被害	無被害	100%	100%	100%
	破損	小規模液状化	破損	50%	100%	100%
		小規模液状化	無被害	0%	0%	0%
		小規模液状化	破損	0%	0%	0%
【管制塔】	建屋被害	設備被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	中破	無被害	0%	0%	0%	
	大破	無被害	0%	0%	0%	
【誘導路】	液状化被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航		
	無被害	100%	100%	100%		
	小規模液状化	0%	0%	0%		
【場周柵】	液状化被害	場周柵被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	小規模液状化	倒壊	0%	0%	0%	
【旅客ターミナル】	建屋被害	天井被害	上中水システム被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航
	無被害	無被害	無被害	100%	100%	100%
	中破	落下	無被害	0%	0%	0%
	大破	落下	破損	0%	0%	0%
【格納庫】	液状化被害	建屋被害	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	小規模液状化	扉の開閉不能	0%	0%	0%	
		大破	0%	0%	0%	
【自家発(ターミナル)】※建屋はエネルギー棟	建屋被害	燃料タンク被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航	
	無被害	無被害	100%	100%	100%	
	中破	無被害	0%	0%	0%	
	大破	破損	0%	0%	0%	
【自家発(電源局舎)】	燃料タンク被害	冷却設備被害	受水槽被害	民航運航	固定翼機運航	回転翼機運航
	無被害	無被害	無被害	100%	100%	100%
	破損	破損	無被害	0%	0%	0%
		破損	破損	0%	0%	0%
	破損	無被害	無被害	0%	0%	0%
		破損	無被害	0%	0%	0%
		破損	無被害	0%	0%	0%
【外部調達】	空港外被害	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航		
	遅延なし	100%	100%	100%		
	遅延	0%	0%	0%		
【要員参集】	空港外被害	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航		
	遅延なし	100%	100%	100%		
	遅延	0%	0%	0%		
【津波警報による遅延】	津波警報	固定翼機運航	回転翼機運航	民航運航		
	遅延なし	100%	100%	100%		
	遅延	0%	0%	0%		

図-11 各構成要素のイベントツリーと被害レベルと運航性能

5.2 空港施設の耐震性能と復旧時間の設定

システムモデルの各構成要素の被害要因，ならびに被害レベル毎の耐震性能と復旧時間を表-1 に示す．表中の耐震性能は工学的解放基盤面での最大加速度（PBA；Peak Base-rock Acceleration）に換算したもので，(12)式の耐力中央値 c_m である．耐力中央値を求める際，管制塔建屋，ならびに旅客ターミナルビル建屋は，設計図書から解析的に求め，その他は石田ら（1999）やShinozuka（1999）を参照し，適宜設定した．復旧時間は，東日本大震災時における仙台空港の停止期間を取りまとめた国土技術政策総合研究所資料 No.718（2013）を参照した．津波浸水については，後述する地震危険度（表-2）に，津波高さと同浸水確率を示す．

ガンセットは前述の通り，実質的な被害はないものとした．備蓄については，対象空港には緊急時に必要な資機材はないものとした．なお，記載はないものの，対策として備蓄を設ける場合には，備蓄の要素の所に備蓄保管庫（建屋）等の被害が組入れられる．点検の要素は， 100cm/s^2 程度以上の加速度を記録した場合，点検作業に1日を要し，その間の空港の性能は停止とする．簡易点検は1時間要するとした．また，外部調達，要員参集，発生状況による遅延の各要因は，表に示した確率を直接与える．発生状況による遅延の確率は，聖隷三方原病院のHPに公開されているドクターヘリの出勤可能率を参照し，0.25とした．津波警報による遅延は，津波の発生が予想される地震（表-2の津波高さが明記している地震）において南海トラフ全域（M8.6）では24時間，その他の津波地震は12時間とした．この間は一切の作業はできない．外部調達と参集は，遅延の確率を0.1とした．

ここで，外部調達，要員参集，発生状況による遅延の各要因は事後対応の適正化に起因する．従って，本稿では，これら3要因は基本的には含めないものとする．ただし，現実的には3要因は顕在していることから，別途3要因を含めた評価も併せて行う．

なお，今回は，被害要因として，余震や二次災害（火災等）は除外しているが，余震，二次災害が発生した場合には，作業の遅延・中断，あるいは復旧時間の延長となる点に留意が必要である．

表-1 被害要因の耐力中央値と復旧時間

システム構成要素	被害要因	被害レベル・状態	耐力中央値 PBA(cm/s^2)	復旧時間	
津波浸水	浸水被害	一部浸水	浸水確率を別添	7日	
		全面浸水		30日	
アクセス連絡橋	連絡橋被害	破損	2000	60日	
	液状化被害	小規模液状化	800	30日	
	新交通橋脚被害	破損	2000	60日	
アクセス船舶	棧橋被害	破損	1500	60日	
場周柵	液状化被害	小規模液状化	800	5日	
	場周柵被害	倒壊	860	5日	
場面管理（場面管理棟）	建屋被害	中破	810	15日	
	管理設備被害	大破	1200	30日	
電源局舎	建屋被害	中破	810	15日	
	管理設備被害	大破	1200	30日	
消防（消防車庫）	建屋被害	破損	860	7日	
	建屋被害	中破	810	15日	
管制塔	建屋被害	大破	1290	60日	
	管制設備被害	破損	890	35日	
ガンセット	-	-	-	-	
滑走路誘導路エプロン	液状化被害	小規模液状化	1600	7日	
旅客ターミナル	建屋被害	中破	600	15日	
	天井被害	大破	850	60日	
	落下	落下	550	7日	
買電	送電停止	上中水システム被害	破損	840	7日
		停止	350	12時間	
自家発（ターミナルビル）	エネルギー棟	長期停止	600	3日	
		建屋被害	中破	810	15日
自家発（電源局舎）	燃料タンク被害	大破	1200	30日	
		破損	1290	7日	
		破損	1290	7日	
自家発（管制塔）	冷却設備被害	破損	860	7日	
	受水槽被害	破損	1290	7日	
航空機燃料	燃料タンク被害	破損	1290	7日	
	給油タンク被害	破損	860	7日	
格納庫	液状化被害	小規模液状化	1600	1日	
	建屋被害	破損	1770	30日	
備蓄	空港外被害	中破	810	15日	
		大破	1200	30日	
		破損	800	1日	
外部調達	点検あり	扉開閉不能	600	1日	
		大破	980	30日	
点検	-	-	-	-	
簡易点検	-	点検あり	確率を0.1と設定	確率を0.1と設定	
要員参集	-	点検あり	100 cm/s^2 で点検	100 cm/s^2 で点検	
発生時状況による遅延	悪天候・夜間	遅延	確率を0.1と設定	確率を0.25と設定	
津波警報による遅延	津波警報	遅延	確率を0.1と設定	確率を0.25と設定	
津波警報による遅延	津波警報	遅延	津波発生時は遅延	津波発生時は遅延	

※1 津波発生の可能性のある地震時は警報解除後(24時間もしくは12時間後)に点検を開始とする。
 ※2 南海トラフ全域で発生する海溝型の巨大地震では24時間、その他の津波発生可能性のある地震については12時間の遅延とする。

5.3 空港施設のFragility Curveと損傷相関

表-1 中の耐力中央値と対数標準偏差より、Fragility Curve を介して各被害要因の発生確率が得られる。対数標準偏差については、先ず、複合偏差 ζ_F を 0.54 (吉川ら, 2007) とし、作用地震動の対数標準偏差 ζ_X を 0.45 (安中ら, 1997) とした。これらを(18)式に適用し耐力の対数標準偏差 $\zeta_C=0.3$ とした。

次に、空港の広域相対距離を 3km 程度とし(20)式を使い、各要素の損傷相関係数を評価する。 h_{ij} を 0~3km, 複合偏差 $\zeta_F=0.54$, 作用地震動の対数標準偏差 $\zeta_X=0.45$, 耐力の対数標準偏差 $\zeta_C=0.3$ とし、それぞれ(20)式に代入する。その結果、相関係数 0.75~0.84 を得る。平均的には各要素の損傷の相関係数は $\rho_F = 0.7$ 程度となり、本稿ではこの値を一律用いることとする。この場合、(27)式より地震動を完全相関と仮定した便宜上の地震動の対数標準偏差 ζ'_X は約 0.45, 耐力の対数標準偏差 ζ'_C は約 0.3 となる。

一方、津波浸水、外部調達等、確率を直接与える要因については全て独立とした。理由は、空港外部で発生する要因であること、気象や警報など必ずしも地震動の大きさと直接関係しないこと、などである。

5.4 マルチイベントモデルによる地震/津波危険度

マルチイベントモデルの整備は文科省地震調査研究推進本部 (2012) を参照し、その詳細は「付録 A マルチイベントモデル」に示す。対象空港の位置関係より、マルチイベントモデルによる危険なシナリオ地震上位 30, ならびに南海トラフで発生する地震を表-2 に示す。同リストは震源名、マグニチュード、空港直下の工学的基盤面での最大加速度 (PBA), 年発生頻度 (確率) を示している。工学的基盤での最大加速度 PBA は、安中ら (1997) の距離減衰式を使った。同表にはシナリオ地震による当該空港地点での津波高さ (T.P.表示) ならびに津波浸水確率を示している。津波は、大阪湾断層帯 (M7.5) ならびに南海トラフ全域 (M8.6) の各地震において最大の 3.0m となる。この津波高さは中央防災会議資料 (2003,2006) を参照した。

津波浸水確率は、津波高さを対数正規分布に近似し、護岸高さを超える確率とする。対数正規分布のパラメータは、表-2 に示す津波高さを中央値、対数標準偏差は阿部 (1989) を参照し 0.44 とした。また、護岸高さは空港の最も低い地点 (T.P.+7.5m) を採用した。なお 3.0m を下回る津波高さは、阿部 (1989) の方法を参照した。津波高さならびに浸水確率については詳細を「付録 E 津波浸水確率の評価」に示す。

表-2 地震/津波危険度のリスト (PBA の大きい順)

No.	シナリオ地震 震源名	マグニチュード	PBA (cm/s ²)	年発生確率 (×10 ⁻³)	津波高 (m,TP)	浸水確率 (×10 ⁻²)	
						一部	全面
1	大阪湾断層帯	M7.5	536	0.0001	3.0	1.86	0.90
2	(135.25, 34.65)	M7.0	528	0.0003	-	-	-
3	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	518	0.0039	-	-	-
4	(135.15, 34.65)	M7.0	492	0.0003	-	-	-
5	(135.25, 34.55)	M7.0	479	0.0003	-	-	-
6	(135.15, 34.55)	M7.0	453	0.0003	-	-	-
7	(135.35, 34.65)	M7.0	431	0.0003	-	-	-
8	(135.35, 34.55)	M7.0	390	0.0003	-	-	-
9	(135.25, 34.75)	M7.0	389	0.0003	-	-	-
10	(135.15, 34.75)	M7.0	361	0.0019	-	-	-
11	(135.25, 34.65)	M6.5	358	0.0013	-	-	-
12	(135.05, 34.65)	M7.0	357	0.0003	-	-	-
13	(135.15, 34.65)	M6.5	334	0.0013	-	-	-
14	(135.05, 34.55)	M7.0	330	0.0003	-	-	-
15	六甲・淡路断層帯(淡路島西岸)	M7.1	327	0.0000	-	-	-
16	(135.35, 34.75)	M7.0	325	0.0003	-	-	-
17	(135.25, 34.55)	M6.5	320	0.0013	-	-	-
18	有馬-高槻断層帯	M7.5	315	0.0001	-	-	-
19	(135.25, 34.45)	M7.0	307	0.0003	-	-	-
20	(135.15, 34.45)	M7.0	294	0.0003	-	-	-
21	(135.15, 34.55)	M6.5	294	0.0013	-	-	-
22	(135.45, 34.65)	M7.0	288	0.0003	-	-	-
23	中央構造線(和泉山脈)	M7.7	284	0.0967	-	-	-
24	(135.05, 34.75)	M7.0	280	0.0019	-	-	-
25	(135.35, 34.65)	M6.5	276	0.0013	-	-	-
26	(135.45, 34.55)	M7.0	271	0.0003	-	-	-
27	(135.35, 34.45)	M7.0	269	0.0003	-	-	-
28	上町断層帯	M7.5	262	0.0986	-	-	-
29	(135.35, 34.55)	M6.5	248	0.0013	-	-	-
30	(135.25, 34.75)	M6.5	247	0.0013	-	-	-
...
80	南海トラフ全域(M8.6)	M8.6	150	0.0282	3.0	1.86	0.90
81	東海~南海領域93 (M7.2)	M7.2	149	0.0728	1.0	0.00	0.00
...
87	東海~南海領域92 (M7.2)	M7.2	146	0.0728	1.2	0.00	0.00
...

6. 空港の性能の健全度ならびに復旧曲線の評価

6.1 リスクリスト

空港の性能のリスクリストを表-3 に示す。表の順位は表-2 の地震/津波危険度のリストに準ずる。回転翼機運航性能の健全確率は発災後 1 時間後の性能健全確率である。固定翼機運航性能のそれは、発災から 8 時間後の健全確率である。回転翼機の運航には空港の簡易点検に 1 時間要すること、固定翼機の運航には外部からの資機材ならびに DMAT 等の航空機の調達に概ね 8 時間要すること、などから設定した。1 時間ならびに 8 時間は中央防災会議幹事会 (2007) を参照し、発災から計画通りに活動準備が整う最低の時間である。表より、例えば六甲・淡路断層帯 (六甲南縁) では、回転翼機は発災から 1 時間後には、0.973 の確率で運航でき、固定翼機は 8 時間後 0.767 の確率で運航できることが分かる。また、大阪湾断層帯や南海トラフ全域 (M8.6) の地震では、確率は 0 となっている。これは津波警報が解除に至っていないことによる。健全確率の評価は(8)式によって求

められるが、その際 $s=1.00$ としている。

民航運航性能については、システム全体の復旧期間期待値 (RTE) を列記している。これは(6)、あるいは(7)式にて求められる。例えば、最悪地震である大阪湾断層帯地震では、平均的に復旧に 20.4 日を要する。東日本大震災では、仙台空港の再開にほぼ 1 カ月を要していること、大阪湾断層帯地震は直下で発生する稀な巨大地震であること、などから 20.4 日での復旧は、比較的早期と言える。一方、南海トラフ全域地震 (M8.6) では 2.4 日を要する。これは津波警報の発令により 1 日、その後点検作業に 1 日要することを勘案すると、空港の性能はほぼ健全と解釈でき、民航運航に支障を来さないことが分かる。

表-3 空港の性能のリスクリスト
(健全確率と復旧期間期待値 RTE)

No.	シナリオ地震 震源名	マグニチュード	PBA (cm/s ²)	回転翼機	固定翼機	民航運航性能
				運航性能	運航性能	
				健全確率 (1時間後)	健全確率 (8時間後)	RTE (日)
1	大阪湾断層帯	M7.5	536	0.000	0.000	20.4
2	(135.25, 34.65)	M7.0	528	0.970	0.754	19.5
3	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	518	0.973	0.767	18.7
4	(135.15, 34.65)	M7.0	492	0.978	0.798	16.9
5	(135.25, 34.55)	M7.0	479	0.981	0.813	15.9
6	(135.15, 34.55)	M7.0	453	0.986	0.842	14.1
7	(135.35, 34.65)	M7.0	431	0.989	0.866	12.6
8	(135.35, 34.55)	M7.0	390	0.994	0.905	9.9
9	(135.25, 34.75)	M7.0	389	0.994	0.906	9.8
10	(135.15, 34.75)	M7.0	361	0.998	0.929	8.1
11	(135.25, 34.65)	M6.5	358	0.997	0.932	7.9
12	(135.05, 34.65)	M7.0	357	0.998	0.932	7.9
13	(135.15, 34.65)	M6.5	334	0.999	0.948	6.6
14	(135.05, 34.55)	M7.0	330	0.999	0.951	6.4
15	六甲・淡路断層帯(淡路島西岸)	M7.1	327	0.998	0.952	6.3
16	(135.35, 34.75)	M7.0	325	0.999	0.954	6.1
17	(135.25, 34.55)	M6.5	320	0.999	0.957	5.9
18	有馬一高槻断層帯	M7.5	315	0.999	0.960	5.6
19	(135.25, 34.45)	M7.0	307	0.999	0.964	5.2
20	(135.15, 34.45)	M7.0	294	0.999	0.971	4.6
21	(135.15, 34.55)	M6.5	294	0.999	0.971	4.6
22	(135.45, 34.65)	M7.0	288	1.000	0.973	4.4
23	中央構造線(和泉山脈)	M7.7	284	1.000	0.975	4.2
24	(135.05, 34.75)	M7.0	280	1.000	0.976	4.1
25	(135.35, 34.65)	M6.5	276	1.000	0.978	3.9
26	(135.45, 34.55)	M7.0	271	1.000	0.980	3.7
27	(135.35, 34.45)	M7.0	269	1.000	0.981	3.6
28	上町断層帯	M7.5	262	1.000	0.983	3.4
29	(135.35, 34.55)	M6.5	248	1.000	0.988	2.9
30	(135.25, 34.75)	M6.5	247	1.000	0.988	2.9
...
80	南海トラフ全域 (M8.6)	M8.6	150	0.000	0.000	2.4
81	東海～南海領域93 (M7.2)	M7.2	149	0.000	0.000	1.6
...
87	東海～南海領域92 (M7.2)	M7.2	146	0.000	0.000	1.6
...

なお、RTE はシステム全体としての復旧期間期待値であり、通常の運航能力の 20%、あるいは 50%の復旧

期間を知ることはできない。この点については後述する復旧曲線にて知ることが出来る。

図-12 に、地震イベントのハザードカーブを示す。同図は、表-2 に示した地震/津波危険度のリスト (PBA の大きい順) より、各シナリオ地震による工学的基盤面での最大加速度 (PBA) を横軸、年発生確率の累積を縦軸に示している。また、代表的なシナリオ地震名を記す。一方、横軸に民航運航性能の RTE を大きい順に取り、縦軸にシナリオ地震の発生確率の累積を取った、いわゆるイベントリスクカーブを図-13 に示す。図には、図-12 と同様に代表的なシナリオ地震名を記している。双方の図のシナリオ地震の順番が違っているのは、津波浸水の可能性がある地震とそうでない地震との RTE の違いによって起こる。図-12 は空港所在地の地震危険度を比較する際に使われ、図-13 は地震危険度と空港の脆弱性を併せて比較する際に有用となる。

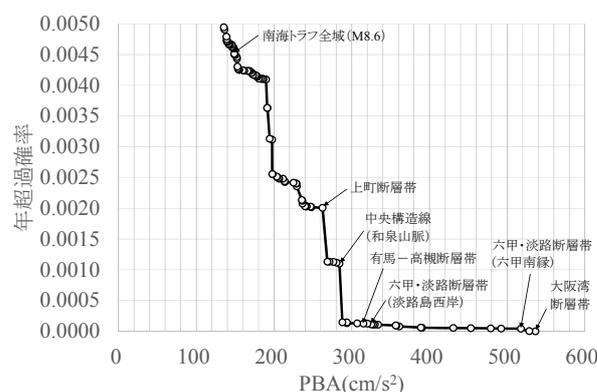


図-12 地震イベントハザードカーブ

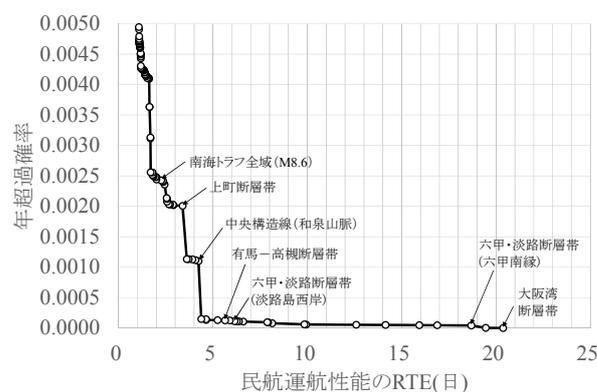


図-13 民航運航性能の復旧期間期待値 RTE のイベントリスクカーブ

6.2 復旧曲線と健全度曲線

復旧曲線と健全度曲線はリスクリストに示したシナリオ地震毎に求められる。本稿では代表的な地震として最悪地震である大阪湾断層帯地震，六甲・淡路断層帯（六甲南縁）地震，南海トラフ全域（M8.6）地震の3地震を取り上げる。六甲・淡路断層帯（六甲南縁）以外は津波浸水の可能性がある。

最初に，大阪湾断層帯地震が発生した場合の復旧曲線（D曲線とT曲線）を図-14に示す。(a)は民航運航性能，(b)は固定翼機の運航性能，(c)は回転翼機の運航性能に関する復旧曲線である。それぞれ横軸のスケールが異なるので注意する。先ず，(a)の民航運航性能を取上げ，D曲線とT曲線を空港の性能の復旧時間の視覚化という観点から比較する。

(1) 復旧曲線による表現方法の評価

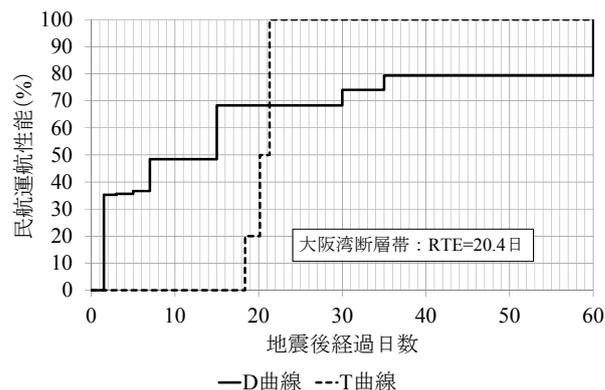
a) 民航運航性能の表現

民航の運航能力は図-11より10%，20%，50%，100%の4段階を所与としている。T曲線からは，これらの運航能力が回復するまでの平均的な復旧時間を読み取ることができる。例えば，民航の運航能力が20%に回復するには18.4日要し，その後50%に回復するのに20.2日，100%になるには21.3日要する，などである。また，図示していないものの，18.4日の信頼度は0.77（18.4日以下となる確率が77%），20.2日は0.71，21.5日は0.68となる。平均値ではあるものの，時間軸方向の確率分布（図-2に示す $f_T(t|r)$ ）の形状が偏っているため上記のような確率となる。

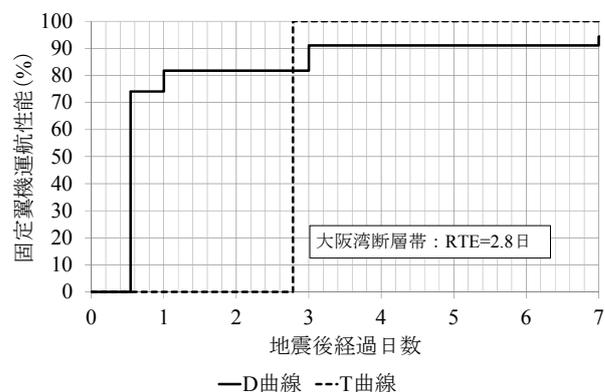
一方のD曲線からは，図上では1.5日後の運航能力が35.2%，15日後には48.4%となるが，これはそれぞれの復旧時間に対して，確率変数として縦軸に分布する性能の平均値を表現したものであり，実際に35.2%，48.4%の能力で運航可能というわけではない。実現される運航能力は，図-11より限定（20%，50%など）されており，ある性能のときの復旧期間をみたい場合には，T曲線のほうが適している。

b) 回転翼機，固定翼機の運航性能の表現

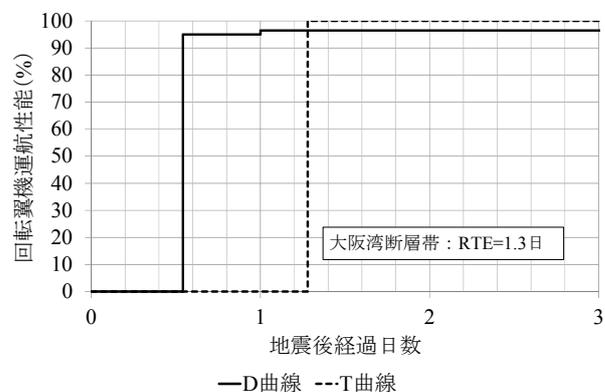
図-14の(b)の固定翼機，(c)の回転翼機の運航性能のD曲線は，(a)の民航運航と同様に有益な情報を得ることは難しい。T曲線は，運航能力を段階的に設定していない（図-11参照）ため直立している。復旧時間の平均値は，(b)の固定翼機は2.8日，(c)の回転翼機は1.3日要することが示されている。



(a) 民間航空機の運航性能に関する復旧曲線



(b) 固定翼機運航性能に関する復旧曲線



(c) 回転翼機運航性能に関する復旧曲線

図-14 大阪湾断層帯による地震が発生した場合の復旧曲線および健全確率曲線（損傷相関係数 $\rho_F=0.7$ ）

大阪湾断層帯地震では，津波警報発令により12時間は一切の作業はできず，さらに津波警報解除後に簡易点検作業に1時間を要することから，少なくとも13時間は回転翼機，固定翼機の運航はできない。この点を勘案すると，例えば回転翼機の運航までの1.3日（31時間）は，実質的には18時間（ $18=31-13$ ）の遅延となる。こ

これは、航空機燃料の給油タンクが破損した場合の復旧期間（30日）の影響が大きい。この時間を短縮するには、航空機燃料を他から調達する等で補うことになる。この点については、今後、システムモデルの改良が必要である。

また、1.3日の信頼度は0.965（1.3日以下となる確率が96.5%）と、極めて高いが、回転翼機の運航までに1.3日を要するとなると、救急・救命活動に求められる期限としては遅く、代替空港での活動を最初から想定しておくことを意味する。しかし、当該空港においては、後述する健全度曲線でみると、大阪湾断層帯地震においても、ほぼ空港施設は壊れず、発災直後に回転翼機の運航が可能であることから、T曲線による表現のみでは誤解を与えかねない。今後、回転翼機、固定翼機の運航性能を復旧曲線で表現していく場合には、システム全体の復旧期間期待値（RTE）だけでなく、信頼度や復旧日数の分布、さらには後述の健全曲線を併せて見ていく必要がある。

c) シナリオ地震によるT曲線の違い

ここで、民航運航性能について、3つのシナリオ地震のT曲線をまとめて図-15に示す。大阪湾断層帯地震と六甲・淡路断層帯地震を比較すると、大阪湾断層帯地震は津波の影響があるものの、双方の復旧過程は類似している。また南海トラフの地震では2.4日で民航の運航が再開される。なお、3つのT曲線に共通するが、10%の復旧時間が20%と同じになっているのは、アクセス船舶の棧橋被害より連絡橋の耐震性能が勝っているからである。

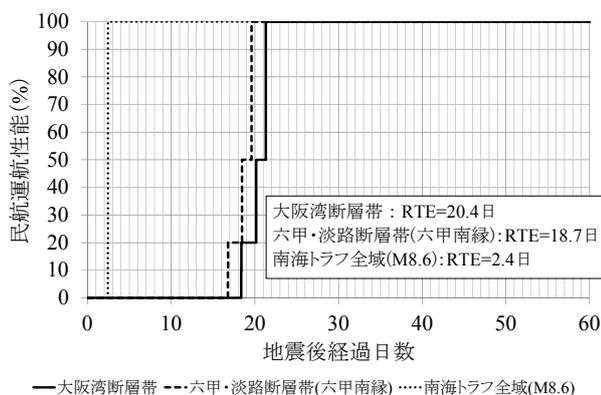


図-15 シナリオ地震時による民航運航性能の復旧曲線（T曲線）の比較（損傷相関係数 $\rho_F = 0.7$ ）

次に、六甲・淡路断層帯地震による民航運航能力毎の復旧日数は、20%に回復するには16.8日、50%に回復するのに18.5日、100%になるには19.6日要する。図からも知るように、16.8日と19.6日の差は僅かであり、少しでも運航が再開できれば早い段階で100%の運航状態に回復することを示している。東日本大震災における仙台空港は、発災から1カ月後に再開されたものの、当初は臨時便のみの暫定運用であり、完全復旧には6カ月を要している。この事例を勘案すると、六甲・淡路断層帯地震の場合、20%の運航は暫定運用と解釈でき、16.8日は平均値ではあるものの、その信頼度（健全確率と同意）は0.80である。つまり、16.8日間で暫定運用できる可能性は8割であり、信頼度は高いと解釈できる。

(2) 健全度曲線による表現方法の評価

地震発生後、空港は救急・救命活動や緊急物資・人員等輸送、いわゆる緊急対応の拠点としての役割を担う。このとき、緊急対応拠点としては、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て、健全度の推移を表した健全度曲線で評価する。

健全度曲線は横軸に発災からの経過時間、縦軸に各種性能の健全確率を取った曲線であり、(8)式にて求められる。ここで、緊急時に必要となる最小限の性能 s を1.00とする。

図-16の(a)は大阪湾断層帯地震、(b)は六甲・淡路断層帯地震、(c)は南海トラフ全域地震である。先ず、(a)の大阪湾断層帯地震は津波を伴う地震であることから津波警報発令により12時間は作業できない。その後簡易点検作業に1時間を要する。このため、少なくとも13時間は回転翼機、固定翼機の運航はできない。図より13時間後の健全確率を把握することができ、回転翼機は0.950、固定翼機は0.741である。発災から24時間後には回転翼機は0.965、固定翼機は0.817になる。

回転翼機の運航性能の健全確率0.950という値は、同様の空港が20あり、その内19の空港は健全に運用できることを意味する。あるいは、同じ地震が20回発生した場合に、その内19回は健全に運用できることを意味する。これだけの健全度であれば、実際の現場では、施設が壊れないことを前提に簡易点検もせず回転翼機の運航をはじめると考えられる。それほど確率であるから、概ね許容できる確率であると考えられる。このように、科学的かつ合理性に基づいた意思決定を進める上で、健全度曲線による評価は有用な手法である。

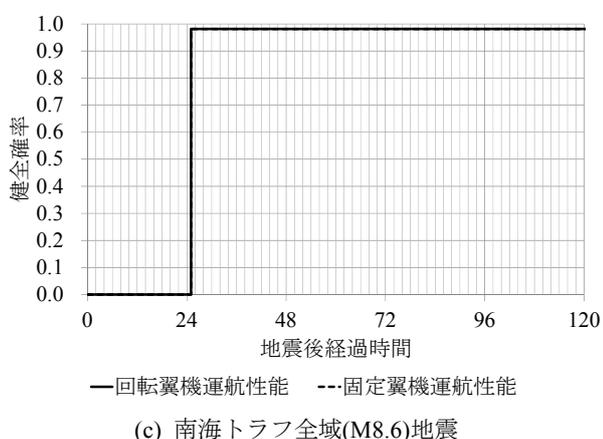
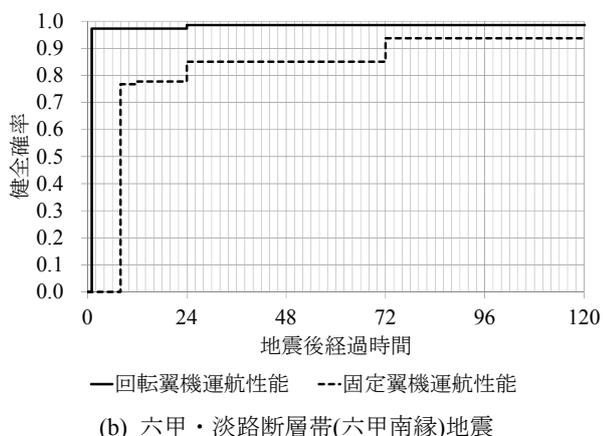
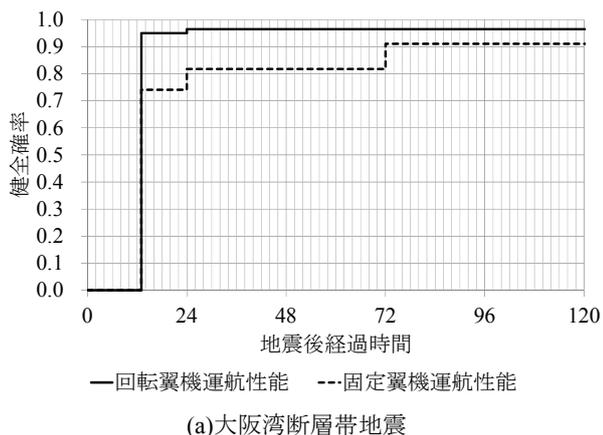


図-16 シナリオ地震による回転翼および固定翼機運航性能の健全度曲線 (損傷相関係数 $\rho_F = 0.7$)

(b)の六甲・淡路断層帯地震では、津波は発生しないことから、回転翼機は発災から簡易点検1時間を経て健全確率は0.973、24時間後には0.986まで上昇する。固定翼機は資機材調達に8時間を要することから、その時点での健全確率は0.767、24時間後には0.850になる。固定翼機運航性能の健全確率が低く現れる理由は、回転

翼機性能のシステムモデル図-10 に比べ、必要機能が増し、確率分布の組み合わせ数が増えるからである。

(c)の南海トラフ全域地震では、津波警報発令のため24時間、さらに簡易点検作業に1時間を要し、計25時間は回転翼機、固定翼機の運航はできない。その後の回転翼機、固定翼機の運航性能の健全確率は共に0.981であり、双方の曲線は重なっている。

6.3 外部調達, 要員参集, 発生状況による遅延を含めた健全度曲線

つぎに、外部調達、要員参集、発生状況による遅延の3要因を含めた健全度曲線を図-17に示す。図は六甲・淡路断層帯地震のそれである。発災から1時間後の回転翼機運航性能の健全確率は0.973であったものが、0.657まで低下する。また、8時間後の固定翼機運航性能の健全確率は0.767であったものが、0.622まで低下する。この低下は、表-1に示した外部調達による遅延確率0.1、要員参集の遅延確率0.1、発生状況による遅延確率0.25による影響である。発生状況による遅延を除く2要因は、確実な調達や要員参集を目標とした参集計画及びその訓練、災害時協力協定、発災時行動の適正化によって改善できる要因である。

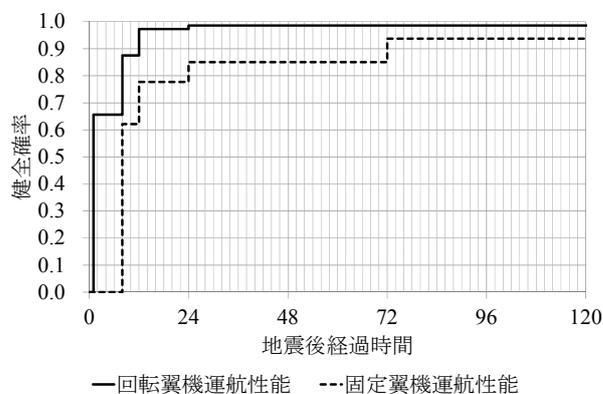


図-17 六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震による要員参集等を含めた回転翼および固定翼機運航性能の健全度曲線 (損傷相関係数 $\rho_F = 0.7$)

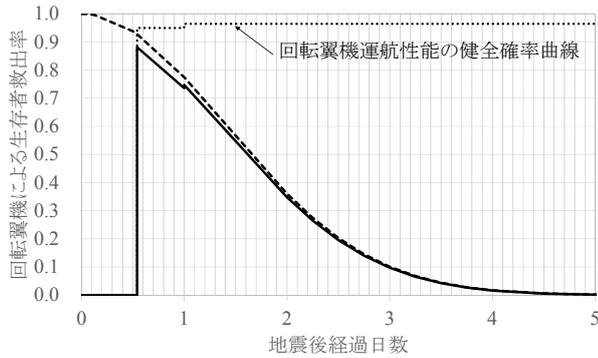
6.4 生存救出率への影響

回転翼機の運航は、孤立した地域の被災者を医療機関等へ直接搬送することが主な目的である。このため、運航性能の遅延は被災者の救出の遅れに直接影響する。そこで、回転翼機が機能しないことによる生存救出率への影響を検討する。鶴飼卓(1995)は発災からの救出時間

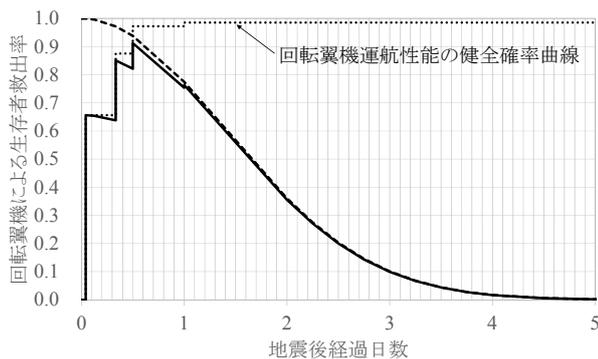
(日数)による生存救出率を、兵庫県南部地震を含めた諸地震について調査している。調査結果の回帰式を以下に示す。

$$h_S(d) = \exp(-0.255d^2) \quad (29)$$

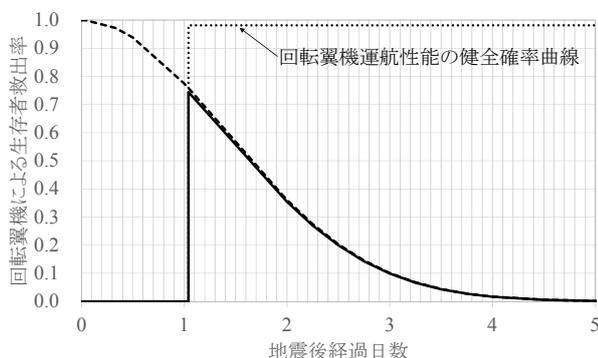
ここに、 d は発災からの日数、 $h_S(d)$ は生存救出率である。



(a)大阪湾断層帯地震



(b)六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震



(c)南海トラフ全域(M8.6)地震

図-18 回転翼機運航性能の健全性を考慮した生存救出率 (損傷相関係数 $\rho_F = 0.7$)

そして、(29)式に、図-16(a)の大阪湾断層帯、(c)の南海トラフ全域(M8.6)、ならびに図-17の六甲・淡路断層帯(六甲南縁)の回転翼機の健全度曲線を乗じ、回転翼機による生存救出率を求めた。これを図-18に示す。

(a)は大阪湾断層帯地震、(b)は六甲・淡路断層帯地震、(c)は南海トラフ全域(M8.6)地震である。なお、それぞれ図には比較のため、(29)式にて求められる生存救出率(図中破線)と各地震による健全度曲線を併記する。ここで、救急・救命活動を行う回転翼機は、当該空港でのみ駐機、給油、整備を行うと仮定する。すなわち、被災地域で活動する回転翼機の勢力が当該空港の能力によって決まると考えた。また、回転翼機の運航性能の健全率曲線は、6.2の外部調達、要員参集等の遅延を考慮したものを使用する。

図より、津波警報や簡易点検により発災から一定時間は運航できないものの、その後、回転翼機による生存者の救出が始まる。その時、(29)式にて求められる生存救出率を下回っている。この差は、現場で救出されたものの回転翼機による医療機関への搬送ができない被災者を示したもので、換言すれば、回転翼機が移動していれば助かる可能性のある人命を示している。津波警報により運航できない場合にあっては((a)大阪湾断層帯地震、ならびに(c)南海トラフ全域地震)、津波の影響を受けない近傍の代替空港での回転翼機の活動で補うこととなる。一方(b)の六甲・淡路断層帯地震では、簡易点検後(1時間後)の救出率と、(29)式の生存救出率の差が大きく、この差を埋める努力が必要であるが、この主因は要員参集、発生状況による遅延等の要因である。このため、前述したように、要員参集を確実なものとする参集計画・訓練や災害時協力協定、発災時行動の適正化が必要になる。

6.5 損傷相関の影響

復旧時間に対する損傷相関係数 ρ_F の影響を見るため、六甲・淡路断層帯地震を取り上げ、 ρ_F を変化させた場合のシステム全体の復旧期間期待値 RTE、ならびに運航性能の健全率を求めた。これを図-19、図-20に示す。 $\rho_F = 0$ は独立、1.0 は完全相関である。図-20の回転翼機は発災から1時間後、固定翼機は8時間後の各健全率である。共に外部要因は考慮していない。先ず、図-19より、RTEは26.3日から15.1日の幅となり、顕著な差がある。これは復旧時間や復旧曲線を評価する上で損傷相関を考慮することが不可欠であることを示しており、中村ら(2011)や能島(2009)の指摘を追認する結果となった。

一方、図-20 に示す健全確率の変化は緩慢である。この理由について、システムモデルの直列部が優勢か、並列部が優勢かによって損傷関連の影響は、逆の傾向が表れるが、図-9 ならびに図-10 より、直列部と並列部が混在し明確な優勢性は判然としない。このため、変化は緩慢であったと考える。つまり、本結果は、提示したシステムモデルの特徴を反映したものと解釈でき、一般的傾向ではない。

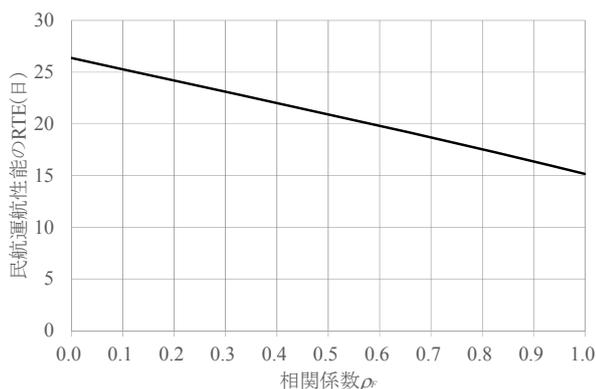
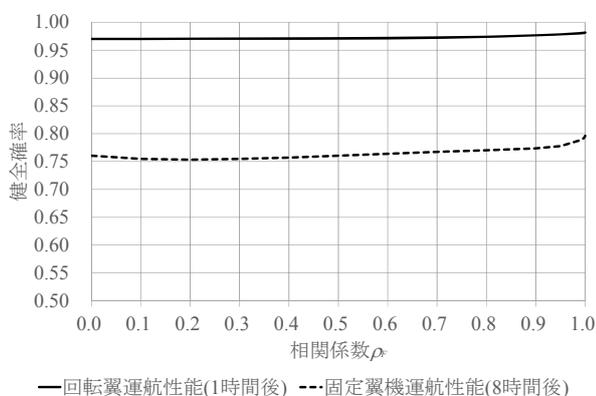


図-19 損傷相関係数と民航空航の期待復旧時間 RTE (六甲・淡路断層帯地震)



— 回転翼機運航性能(1時間後) --- 固定翼機運航性能(8時間後)

図-20 損傷相関係数と回転翼および固定翼機運航性能の健全確率 (六甲・淡路断層帯地震)

7. 対策の優先順位と対策効果

7.1 必要な対策と優先順位の評価

必要な対策や優先順位を比較する指標として、各被害要因の復旧時間の期待値に重要度を加味した指標 (中村ら, 2007), 被害要因の復旧時間が任意に設定した時間以上になる確率 (土居ら, 2013) などがある。他にも、システム内の脆弱要素を見出す幾つかの指標が提案

(Henly et al, 1981) されている。本稿では各被害要因 (システムモデルの構成要素) の復旧時間の期待値、ならびに運航性能の不健全確率 (ある時間断面において必要な性能に至っていない確率) を、対策の優先順位を抽出するための指標とする。ここで、対策は空港運営主体者が実施できる物理的対策に限るものとし、外部調達、要員参集、発生状況による遅延の各要因は省く。

図-21 は、発災から 1 時間後の回転翼機運航性能の不健全確率を各要素において比較したものである。(a)は大阪湾断層帯地震、(b)は六甲・淡路断層帯地震、(c)は南海トラフ全域地震である。図より、津波浸水を除くと、航空機燃料の被害 (給油タンクの被害) による影響が際立っている。一方で、図-16 に示したように、回転翼機運航性能に関する健全確率は 0.95 以上であること、図-12 に示したように六甲・淡路断層帯地震の発生確率は稀であることを考慮すると、空港運営主体者の裁量範囲の対策は必ずしも必要ではないと考える。

施設/機能	1時間後不健全確率
津波浸水	0.019
駐機機能	0.006
航空機燃料	0.030

(a) 大阪湾断層帯地震

施設/機能	1時間後不健全確率
津波浸水	0.000
駐機機能	0.005
航空機燃料	0.025

(b) 六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震

施設/機能	1時間後不健全確率
津波浸水	0.019
駐機機能	0.000
航空機燃料	0.000

(c) 南海トラフ全域(M8.6)地震

図-21 地震発生から 1 時間経過後における回転翼機運航性能の各要素の不健全確率の比較

発災から 8 時間後の固定翼機運航性能の不健全確率を各要素において比較したものを図-22 に示す。図より、作業スペース機能 (格納庫あるいは貨物ビル) と電源機能 (旅客ターミナルビル自家発あるいは電源局舎自家発) が際立っている。例えば、大阪湾断層帯地震での作業スペース機能の不健全確率は 0.195 であり、広域医療搬送で固定翼機を出発させなければいけない段階で、作業スペースが 19.5%の確率で使えないことを意味する。また、図-16 より、回転翼機運航性能の健全確率に比べ、

固定翼機運航性能の健全確率は必ずしも高くない。これより、空港運営主体者の耐震化対策として、貨物ビル（作業スペース機能）ならびに電源局舎の自家発電（電源機能）の耐震化策が有効と考えられる。

施設/機能	8時間後不健全確率
津波浸水	0.019
アクセス機能	0.003
作業スペース機能	0.195
管制機能	0.000
滑走路	0.021
誘導路	0.021
エプロン	0.021
電源機能	0.171
航空機燃料	0.030

(a) 大阪湾断層帯地震

施設/機能	8時間後不健全確率
津波浸水	0.000
アクセス機能	0.002
作業スペース機能	0.176
管制機能	0.000
滑走路	0.018
誘導路	0.018
エプロン	0.018
電源機能	0.154
航空機燃料	0.025

(b) 六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震

施設/機能	8時間後不健全確率
津波浸水	0.019
アクセス機能	0.000
作業スペース機能	0.000
管制機能	0.000
滑走路	0.000
誘導路	0.000
エプロン	0.000
電源機能	0.000
航空機燃料	0.000

(c) 南海トラフ全域(M8.6)地震

図-22 地震発生から8時間経過後における各要素の固定翼機運航性能の不健全確率の比較

なお、貨物ビルの耐震化策の代わりに格納庫の耐震化策としても良いが、格納庫の整備主体は民間事業者であることが多いことから、ここでは貨物ビルを選択した。電源機能は、旅客ターミナルビルの自家発電よりも電源局舎の自家発電の方が、空港運営主体者にとっては電源の融通が利きやすいと考え、電源局舎の自家発電を選択した。この場合、自家発電の耐震化だけでなく、自家発電を覆っている電源局舎についても耐震化策を講じることが有効と考えた。

次に、民航運航性能に関する各要素の復旧期間期待値を比較したものを図-23に示す。図より、津波浸水を除けば、旅客ターミナルビルの脆弱性が際立っている。そこで、旅客ターミナルビルに関する各要素の耐力中央値(表-1)を比較すると、建屋中破ならびに天井落下の値が相対的に高い。従って、同建屋の耐震化ならびに天井落下被害を抑止する対策が有効と考えられる。

施設/機能	復旧期間期待値
津波浸水	0.337
アクセス機能	3.823
場周柵	1.507
場面管理	4.875
電源局舎	4.875
管制機能	6.865
消防	0.368
滑走路	0.147
誘導路	0.147
エプロン	0.074
旅客ターミナルビル	16.319
電源機能	0.862

(a) 大阪湾断層帯地震

施設/機能	復旧期間期待値
津波浸水	0.000
アクセス機能	3.461
場周柵	1.388
場面管理	4.433
電源局舎	4.433
管制機能	6.199
消防	0.306
滑走路	0.125
誘導路	0.125
エプロン	0.062
旅客ターミナルビル	15.121
電源機能	0.825

(b) 六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震

施設/機能	復旧期間期待値
津波浸水	0.337
アクセス機能	0.009
場周柵	0.005
場面管理	0.011
電源局舎	0.011
管制機能	0.009
消防	0.000
滑走路	0.000
誘導路	0.000
エプロン	0.000
旅客ターミナルビル	0.134
電源機能	0.001

(c) 南海トラフ全域(M8.6)地震

図-23 民航運航性能に関する各要素の復旧期間期待値の比較

また、管制機能、電源局舎、場面管理の復旧期間期待値が旅客ターミナルビルの次に大きいのが、電源局舎については、固定翼機の運航性能での耐震化策が講じられることで、灯火や ILS 等の使用が可能となる。つまり、空港の活動を総合的に考えれば、電源局舎の自家発電だけでなく、電源局舎の建物自体も耐震化することが有効と考えられる。

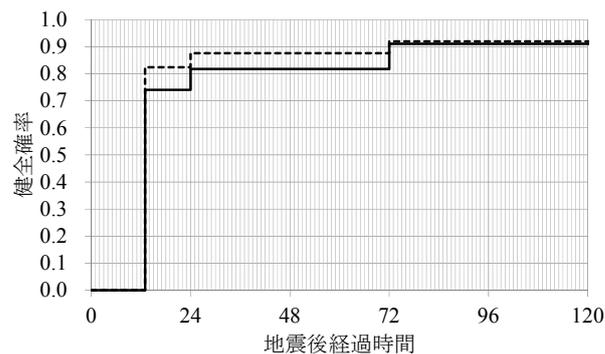
7.2 対策の効果

各被害要因の復旧時間の期待値、ならびに運航性能の不健全確率の比較から、耐震化策として、貨物ビル、電源局舎建屋、ならびに自家発電に関わる被害要因の耐震化、さらに旅客ターミナルビル建屋の耐震化、天井落下抑止策を加える。耐震化により、耐力中央値は表-4 のように改善されたと仮定する。図中∞は、十分な耐震化により被害の発生はないものとした。

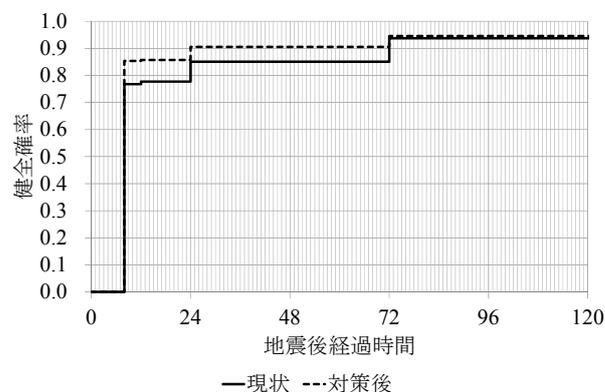
表-4 耐震化策による耐力中央値の改善

			現状	対策後
電源局舎	建屋被害	中破	810	1000
		大破	1200	1400
旅客ターミナル	建屋被害	中破	600	750
		大破	850	1000
	天井被害	落下	550	∞
自家発(電源局舎)	燃料タンク被害	破損	1290	∞
	冷却設備被害	破損	860	∞
	受水槽被害	破損	1290	∞
貨物ビル	建屋被害	中破	810	1000
		大破	1200	1400

表-4 の対策を全て実施したと仮定し、空港の性能の復旧曲線ならびに健全度曲線を評価する。その際、南海トラフ全域(M8.6)地震は省く。図-24 に現状と対策を実施した場合の固定翼機運航性能の健全度曲線を比較する。(a)は大阪湾断層帯地震、(b)は六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震図である。図より、発災から 13 時間後、8 時間後の健全確率は、大阪湾断層帯地震では 0.741 (現状) は 0.824 (対策後) に改善し、六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震では 0.767 は 0.853 に改善する。なお、旅客ターミナルビルの耐震化策は、固定翼機運航性能には関わっていない(図-9 参照)。



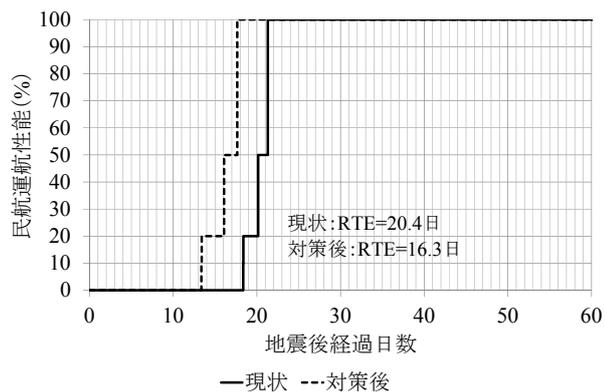
(a) 大阪湾断層帯地震



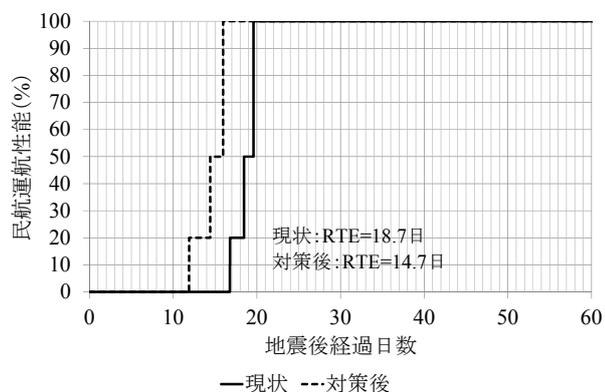
(b) 六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震

図-24 現状と対策を実施した場合の固定翼機運航性能の健全度曲線の比較

図-25 は、民航運航性能の復旧曲線を現状と対策後(表-4 の全ての対策を実施)を比較したものである。図より、運航性能のシステム全体の復旧期間期待値 RTE は、大阪湾断層帯地震では 20.4 日が 16.3 日に、六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震では、18.7 日が 14.7 日にそれぞれ改善する。復旧過程を細かく見ると、大阪湾断層帯地震において 20%に回復するには 18.4 日要したのに対し対策後は 13.4 日に、50%に回復するには 20.2 日が 16.1 日に、100%にするには 21.3 日が 17.6 日にそれぞれ改善する。また、六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震では 20%に回復するには、現状 16.8 日が対策後 11.9 日に、50%に回復するには 18.5 日が 14.4 日に、100%にするには 19.6 日が 16.0 日にそれぞれ改善する。この効果が十分かどうかは、最悪地震時の地域防災計画で期待される空港の復旧日数のしきい値との比較で議論されるものとする。このように、対策による改善効果を定量的に示すことは、対策実施の判断の合理的根拠を与えると共に、説明性を高めることにも貢献する。



(a) 大阪湾断層帯地震



(b) 六甲・淡路断層帯(六甲南縁)地震

図-25 現状と対策を実施した場合の民航運航性能の復旧曲線の比較

8. まとめ

本稿は空港の性能の維持，早期復旧を目標としたリスクマネジメント手法の整備を目的としている．成果として①複数のシナリオ地震発生を前提に，空港の性能の健全度や復旧時間の評価方法を整備した．②地方空港を例に，空港の性能を回転翼機の運航性能（救急・救命活動），固定翼機の運航性能（主に緊急物資・人員等輸送），民航運航性能に分け，それぞれの健全度曲線や復旧曲線の評価し，性能に応じた記述方法の優劣を考察した．③システムモデルの構成要素の損傷相関について検討した．④復旧を遅らせる要因や対策の優先順位を把握するための指標を検討し，対策による健全度曲線や復旧曲線の改善効果を示した．

①については以下のようにまとめられる．

- ・複数のシナリオ地震を備えたマルチイベントモデル（複数震源モデル）を整備した．
- ・構造信頼性理論に基づいて複数の要素から構成される

システム全体の損傷パターンを評価する，システム信頼性手法に基づいた復旧曲線の評価方法を整備し，これを応用した性能の健全度曲線の評価方法を示した．

- ・システムを構成する要素の損傷相関を考慮できる簡便な方法を整備した．

②については以下のようにまとめられる．

・システム全体の復旧期間期待値 RTE を横軸に，縦軸にシナリオ地震の発生確率の累積を取った，イベントリスクカーブは空港所在地の地震危険度と空港の脆弱性を空港間で相対比較する際に有益である．

・空港の運航能力が限定（20%，50%など）され，その復旧時間を把握する場合には T 曲線が有効である．また，T 曲線の立ち上がり点の日数を暫定運用の開始とし，100%に回復する日数を完全復旧日数と説明すると，理解されやすい．

・回転翼機の運航性能（救急・救命活動），固定翼機の運航性能（主に緊急物資・人員等輸送）の検討では，性能の健全度（健全確率）を経時的に示した健全度曲線が有用である．

・健全度曲線より，当該空港の回転翼機の運航性能に関する諸施設は比較的良好であることが分かった．一方で，外部調達，要員参集，発生状況による遅延などの要因を含めると，健全確率は低下する．

・健全確率を利用した安全性の評価や対策の検討では，許容される健全確率を定めることが優先的事項である．許容される健全確率の議論は，科学的かつ経済的合理性に基づいた意思決定を進める上で，不可避の課題である．

・外部調達，要員参集，発災時状況による遅延の各要因は，発災時の状況を踏まえた事後行動の適正化によって対応する．例えば，悪天候を前提とした事後行動のマニュアル整備や訓練，被災パターンによる要員参集の選択肢の多様化など，いわゆる BCP 対応である．

③については以下のようにまとめられる．

・復旧時間や復旧曲線の評価する上で損傷相関を考慮することが不可欠であることが分かった．これは既往の研究結果を追認する結果となった．

④については以下のようにまとめられる

・回転翼機の運航性能，固定翼機の運航性能では，各要素の不健全確率を指標として対策の優先度を比較した．また，民航運航性能については各要素の復旧期間期待値を指標とした．

・その結果，固定翼機運航性能については作業スペース機能（格納庫あるいは貨物ビル）と電源機能（旅客ターミナルビル自家発あるいは電源局舎自家発）がボトルネックであることが分かった．

・ 民航運航性能については、津波浸水を除けば旅客ターミナルビルの脆弱性が際立っていることが分かった。

・ 対策による改善効果を定量的に示すことは、対策実施の判断の合理的根拠を与えると共に、説明性を高めることにも貢献する。

このように、本稿で示したリスクマネジメントの方法は空港運営の主体者の視点から、対策の必要性や優先順位を検討する際に有益であると考えられる。

今後の課題としては、より実用に即した手法とするために、アクセスに制約される場合の要員参集、余震・二次災害（火災等）、各構成要素の被害レベル別の運航性能の能力等について、現実を踏まえた事態想定を反映し、手法を高度化していく必要があると考えている。

また、平成 26 年 3 月に中央防災会議から「南海トラフ地震防災対策推進基本計画」が示された。本稿で採用したマルチイベントモデルは、サプライチェーンの倉庫・工場のように広域に分散しネットワークする施設群について、一つのシナリオ地震による同時被災の評価に用いられてきた実績がある。同様に、巨大地震が広域に散在する空港群に同時に作用し、同時にどのように被災し復旧していくか、評価することが可能である。これを用いて、空港個々に地震リスクを評価するだけでなく、被害の多様性を念頭に置いた広域の航空ネットワークのリスクの定量的評価についても、今後の研究を深める対象と考えている。

なお、本報告書は、国土交通省国土技術政策総合研究所、株式会社篠塚研究所の二者で実施した共同研究の成果をとりまとめたものである。

謝辞

本研究を進めるに当たり、大阪航空局の関係各位、株式会社篠塚研究所の関係各位、株式会社シオ政策経営研究所及び株式会社日本空港コンサルタンツの関係各位には、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

阿部勝征（1989）：地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測，地震研究所彙報，Vol.64，pp.51-69
 安中正，山崎文雄，片平冬樹（1997）：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式

の提案，第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.161-164

石田寛，水越薫（1999.3）：建物フラジリティ関数の評価手法に関する検討，1998 年度日本建築学会関東支部研究報告集，pp.65-68

鶴飼卓（1995）：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 14

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

坂本成弘（2007.8）：事務所ビルの地震後復旧曲線，建築学会大会梗概集，B-1，pp.65-66

静間俊郎，中村孝明（2009.11）：復旧曲線の理論的考察と BCP への適用，土木学会第 1 回地震リスクマネジメントと事業継続性シンポジウム論文報告集，pp.231-236

聖隷三方原病院ホームページ（2014.10）：
<http://www.seirei.or.jp/mikatahara/outline/852.html>

土居賢彦，静間俊郎，中村孝明（2013.11）：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

中央防災会議（2003）：東南海・南海地震等に関する専門委員会（第 16 回）資料図表集 2，pp.16-50

中央防災会議（2006）：東南海・南海地震等に関する専門委員会（第 26 回）中部圏・近畿圏の内陸地震の震度分布等について - 図表集一，pp.30-31

中央防災会議幹事会（2007）：東南海・南海地震応急対策活動要領に基づく具体的な活動内容に係る計画，pp.1-23

中島由貴，中神啓介，西崎英治，清水啓（2013.3）：津波被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（2013.9）：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（2014.3）：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

中村孝明，境茂樹，吉川弘道（2011.3）：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（2008.1）：相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価，日本建築学会構造系論文集，第 73

巻, 第 623 号, pp.49-56

中村孝明 (2007.3) : BCP 策定支援情報としての操業停止評価と財務影響分析, 土木学会第 8 回地震災害マネジメントセミナー ―事業継続計画のこれから― 講演集

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

能島暢呂, 亀田弘行 (1992.7) : 幹線・支線の階層性を考慮したライフライン系の最適震後復旧アルゴリズム, 土木学会論文集, No.450/I-20, pp.171-180

馬場啓輔, 大嶽公康, 静間俊郎, 吉川弘道 (2010.11) : 地震システム解析を用いた浄水場配管の最適投資額の算定, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1724-1729

星谷勝, 宮崎正敏 (1983.3) : 上水道システムの地震災害復旧の戦略と予測, 土木学会論文集, 第 331 号, pp.45-54

文部科学省 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 (2012.12) : 全国を概観した地震動予測地図

吉川弘道, 大滝健, 前田欣昌, 中村孝明 (2007.10) : 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

Henly, E.J. and Kumamoto, H. (1981) : Reliability Engineering and Risk Assessment, Prentice Hall Inc.

Shinozuka M, & et al. (2004) : Resilience of Integrated Power and Water Systems, Seismic Evaluation and Retrofit of Lifeline Systems, Articles from MCEER's Research Progress and Accomplishments Volumes, pp.65-86

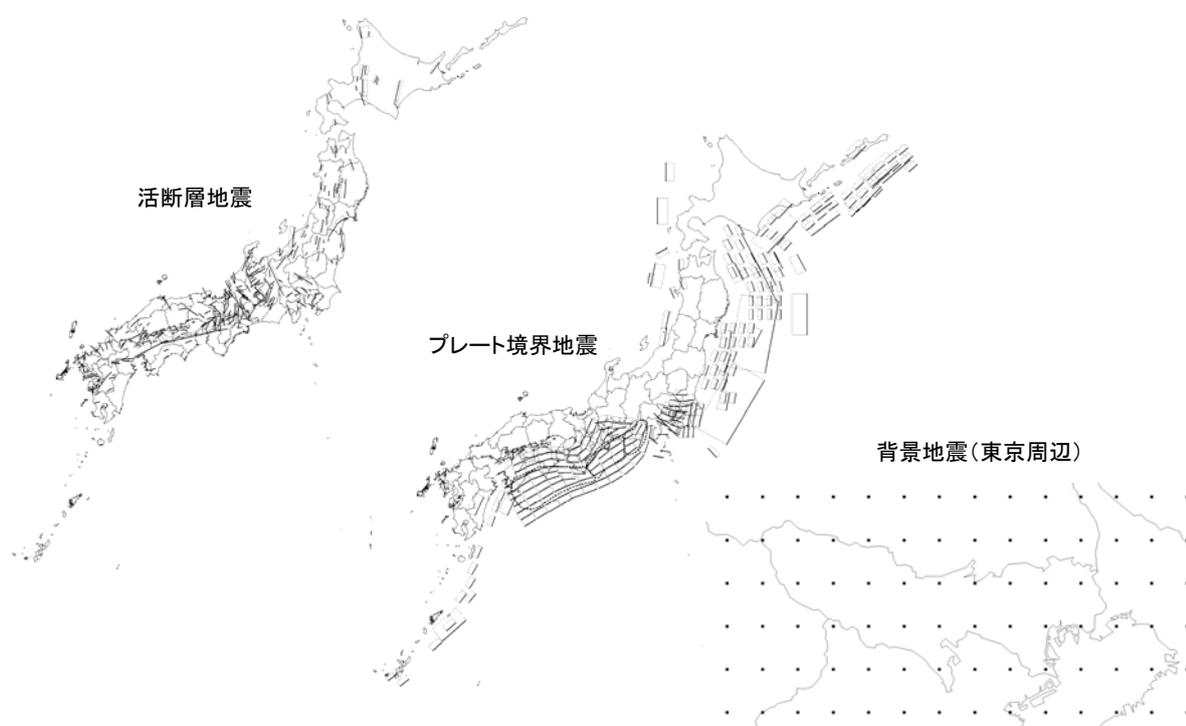
Shinozuka M. (1999) : Statistical Analysis of Fragility Curves, Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability its Application, Taiwan, R.O.C.

Wang, M. and Takada, T. (2005.11) : Macro Space Correlation Model of Seismic Ground Motions, Earthquake Spectra, Vol.21, No.4, pp.1137-1156

付録

付録A マルチイベントモデル

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、被害をもたらすであろうシナリオ地震を全国規模で特定する。具体的には図A-1に示すように、活断層地震やプレート境界で発生する地震を設定し、それぞれの断層位置、マグニチュード、発生確率を特定する。さらに活断層として現れない陸域（一部海域も含まれる）で発生する地殻内地震を設定する。この地殻内地震を背景地震と呼び、図のように網の目状に地震源を分布させ、それぞれの断層位置、マグニチュード、発生確率を設定する。図の点は震源の代表点を表している。これらシナリオ地震群を総称してマルチイベントモデルと呼ぶ。マルチイベントモデルは、背景地震を特定の震源としてモデル化するところに特徴がある。本研究で対象とした空港の位置において抽出されたPBA（Peak Engineering Bedrock Acceleration）の大きい上位100のイベントリストを表A-1、表A-2に示す。なお、各表中の震源名に緯度経度が示された地震が背景地震である。



図A-1 マルチイベントモデルの地震源

出典：中村孝明『実務に役立つ地震リスクマネジメント』（2013，丸善出版）

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
 ／小野正博・中島由貴・中村孝明・静間俊郎

表 A-1 本研究で対象とした空港の位置において抽出された PBA の大きい上位 100 のイベントリスト
 (上位 1~50 位)

No.	震源名	M	PBA (cm/s ²)	年発生確率	年超過確率
1	大阪湾断層帯	M7.5	536	0.00000105	0.00000105
2	(135.25, 34.65)	M7.0	528	0.00000301	0.00000406
3	六甲・淡路断層帯(六甲南縁)	M7.9	518	0.00003866	0.00004273
4	(135.15, 34.65)	M7.0	492	0.00000301	0.00004574
5	(135.25, 34.55)	M7.0	479	0.00000302	0.00004876
6	(135.15, 34.55)	M7.0	453	0.00000302	0.00005177
7	(135.35, 34.65)	M7.0	431	0.00000301	0.00005478
8	(135.35, 34.55)	M7.0	390	0.00000302	0.00005780
9	(135.25, 34.75)	M7.0	389	0.00000301	0.00006081
10	(135.15, 34.75)	M7.0	361	0.00001879	0.00007959
11	(135.25, 34.65)	M6.5	358	0.00001257	0.00009216
12	(135.05, 34.65)	M7.0	357	0.00000301	0.00009517
13	(135.15, 34.65)	M6.5	334	0.00001257	0.00010774
14	(135.05, 34.55)	M7.0	330	0.00000302	0.00011076
15	六甲・淡路断層帯(淡路島西岸)	M7.1	327	0.00000000	0.00011076
16	(135.35, 34.75)	M7.0	325	0.00000301	0.00011377
17	(135.25, 34.55)	M6.5	320	0.00001259	0.00012635
18	有馬一高槻断層帯	M7.5	315	0.00000108	0.00012743
19	(135.25, 34.45)	M7.0	307	0.00000302	0.00013045
20	(135.15, 34.45)	M7.0	294	0.00000302	0.00013347
21	(135.15, 34.55)	M6.5	294	0.00001259	0.00014605
22	(135.45, 34.65)	M7.0	288	0.00000301	0.00014906
23	中央構造線 (和泉山脈)	M7.7	284	0.00096656	0.00111548
24	(135.05, 34.75)	M7.0	280	0.00001879	0.00113425
25	(135.35, 34.65)	M6.5	276	0.00001257	0.00114681
26	(135.45, 34.55)	M7.0	271	0.00000302	0.00114982
27	(135.35, 34.45)	M7.0	269	0.00000302	0.00115283
28	上町断層帯	M7.5	262	0.00098630	0.00213800
29	(135.35, 34.55)	M6.5	248	0.00001259	0.00215056
30	(135.25, 34.75)	M6.5	247	0.00001256	0.00216309
31	(135.45, 34.75)	M7.0	242	0.00000301	0.00216609
32	(135.05, 34.45)	M7.0	242	0.00000302	0.00216911
33	(134.95, 34.65)	M7.0	240	0.00000301	0.00217211
34	(135.25, 34.65)	M6.0	237	0.00005247	0.00222446
35	(135.15, 34.75)	M6.5	236	0.00005480	0.00227915
36	(135.25, 34.85)	M7.0	236	0.00001876	0.00229787
37	中央構造線 (紀淡一鳴門)	M7.7	229	0.00005709	0.00235482
38	(134.95, 34.55)	M7.0	229	0.00000302	0.00235783
39	(135.15, 34.85)	M7.0	228	0.00001876	0.00237655
40	(135.05, 34.65)	M6.5	225	0.00001257	0.00238909
41	(135.35, 34.85)	M7.0	214	0.00001876	0.00240781
42	(135.15, 34.65)	M6.0	214	0.00005247	0.00246015
43	(135.45, 34.45)	M7.0	212	0.00000302	0.00246316
44	(135.05, 34.55)	M6.5	207	0.00001259	0.00247572
45	(134.95, 34.75)	M7.0	206	0.00001879	0.00249446
46	(135.35, 34.75)	M6.5	204	0.00001256	0.00250698
47	(135.25, 34.55)	M6.0	203	0.00005253	0.00255938
48	(135.55, 34.65)	M7.0	198	0.00000301	0.00256238
49	山崎断層帯 南東部	M7.3	198	0.00075206	0.00331252
50	(135.05, 34.85)	M7.0	197	0.00001876	0.00333122

表 A-2 本研究で対象とした空港の位置において抽出された PBA の大きい上位 100 のイベントリスト
(上位 51~100 位)

No.	震源名	M	PBA (cm/s ²)	年発生確率	年超過確率
51	(135.25, 34.35)	M7.0	194	0.00000302	0.00333423
52	(135.25, 34.45)	M6.5	192	0.00001260	0.00334679
53	(135.55, 34.55)	M7.0	191	0.00000302	0.00334980
54	(135.15, 34.35)	M7.0	190	0.00000302	0.00335281
55	(134.95, 34.45)	M7.0	186	0.00000302	0.00335582
56	(135.15, 34.55)	M6.0	185	0.00005253	0.00340817
57	(135.15, 34.45)	M6.5	183	0.00001260	0.00342073
58	(135.35, 34.35)	M7.0	180	0.00000302	0.00342374
59	(135.45, 34.65)	M6.5	179	0.00001257	0.00343627
60	(135.45, 34.85)	M7.0	178	0.00001876	0.00345497
61	(135.55, 34.75)	M7.0	177	0.00000301	0.00345797
62	(135.05, 34.75)	M6.5	177	0.00005480	0.00351258
63	(134.85, 34.65)	M7.0	176	0.00000232	0.00351490
64	(135.35, 34.65)	M6.0	173	0.00005247	0.00356718
65	生駒断層帯	M7.5	172	0.00000065	0.00356783
66	(134.85, 34.55)	M7.0	171	0.00000233	0.00357015
67	(135.05, 34.35)	M7.0	169	0.00000302	0.00357316
68	(135.45, 34.55)	M6.5	168	0.00001259	0.00358570
69	(135.35, 34.45)	M6.5	166	0.00001260	0.00359826
70	(135.55, 34.45)	M7.0	162	0.00000302	0.00360127
71	(134.95, 34.85)	M7.0	160	0.00001876	0.00361997
72	(135.25, 34.95)	M7.0	155	0.00001874	0.00363864
73	(135.45, 34.35)	M7.0	155	0.00000302	0.00364165
74	(135.35, 34.55)	M6.0	154	0.00005253	0.00369398
75	(135.25, 34.65)	M5.5	154	0.00021895	0.00391212
76	(135.25, 34.75)	M6.0	154	0.00005241	0.00396432
77	中央構造線 (金剛山地)	M6.9	153	0.00006072	0.00402480
78	(135.15, 34.95)	M7.0	152	0.00001874	0.00404347
79	(134.85, 34.75)	M7.0	152	0.00001879	0.00406217
80	南海トラフ全域 (M8.6)	M8.6	150	0.00028226	0.00434329
81	東海~南海領域93 (M7.2)	M7.2	149	0.00072816	0.00506829
82	(135.15, 34.75)	M6.0	149	0.00015988	0.00522735
83	(135.45, 34.75)	M6.5	148	0.00001256	0.00523985
84	(135.05, 34.45)	M6.5	148	0.00001260	0.00525238
85	(134.95, 34.65)	M6.5	147	0.00001257	0.00526489
86	(135.35, 34.95)	M7.0	146	0.00001874	0.00528353
87	東海~南海領域92 (M7.2)	M7.2	146	0.00072816	0.00600784
88	(135.25, 34.85)	M6.5	146	0.00005474	0.00606225
89	(135.65, 34.65)	M7.0	143	0.00000301	0.00606524
90	(134.85, 34.45)	M7.0	142	0.00000302	0.00606825
91	(134.95, 34.35)	M7.0	142	0.00000302	0.00607125
92	(135.55, 34.85)	M7.0	142	0.00001876	0.00608990
93	(135.15, 34.85)	M6.5	141	0.00005474	0.00614431
94	(135.65, 34.55)	M7.0	140	0.00000302	0.00614730
95	(134.95, 34.55)	M6.5	140	0.00001259	0.00615981
96	(135.05, 34.95)	M7.0	139	0.00001874	0.00617844
97	(135.05, 34.65)	M6.0	139	0.00005247	0.00623058
98	御所谷断層帯	M7.3	139	0.00007692	0.00630702
99	(135.15, 34.65)	M5.5	136	0.00021895	0.00652458
100	山崎断層帯 北西部	M7.7	135	0.00007509	0.00659919

付録B 地盤増幅の評価と応答スペクトル比

(1) 地盤増幅の評価

構造物の応答は、表層の軟らかい地盤の影響を強く受けるため、構造物の振動特性に加え、表層地盤の増幅特性を考慮した応答評価を行う必要がある。そこで、図B-1に示すように、工学的基盤面において加速度応答スペクトルを設定し、固有周期に依存した表層地盤の増幅を評価する。その際、ターゲットとなる地震が予め設定されている場合は、固有のスペクトルを利用するのが望ましいが、図のように建築基準法告示に示されている設計用加速度応答スペクトルを用いることもできる。地盤増幅特性は土質やN値、PS検層や密度試験などの情報を基に地盤モデルを作成し、加速度応答スペクトル比として評価する。同比は、同一の加速度レベルを持つ複数の地震波を用意し、地表面（基礎底）と基盤面との応答スペクトルの比の平均値として求めることができる。地盤増幅の評価方法は、重複反射理論や非線形時刻歴解析などがあるが、ここでは特に言及しない。一方、地盤の非線形挙動（剛性低下と減衰の上昇）の影響により、加速度レベルに応じて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。地表面あるいは対象建物の基礎底面での加速度応答スペクトルは、工学的基盤面で設定した加速度応答スペクトルに地盤の応答スペクトル比を乗じて求められる。ここで求められた加速度応答スペクトルは、基盤に作用する地震波の周期特性ならびに当該地盤の増幅特性を考慮したものとなる。なお、図B-1に示すスペクトルは基準化したものであるが、工学的基盤面での耐力を評価する際に有用である。

(2) 工学的基盤面での耐力

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B-2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。前記した方法に則り、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。

$$S_a^N(T) = \bar{R}_a(T) \cdot S_a^{NB}(T) \quad (\text{B1})$$

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（求め方は付録Cにて説明）、これを工学的基盤面での耐力中央値 c_m に換算する。換算式は以下である。

$$c_m = \frac{a}{S_a^N(T_1)} \quad (\text{B2})$$

(B2)式は(B1)式を使い、以下のように書き換えられる。

$$c_m = \frac{a}{\bar{R}_a(T_1) \cdot S_a^{NB}(T_1)} \quad (\text{B3})$$

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（付録A参照）。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、構造健全性理論に基づく二山モデルから、Fragility Curveを直接求めることができる。また、構造物間の耐力中央値を比較することで、耐震性能の優劣を確認でき便利である。

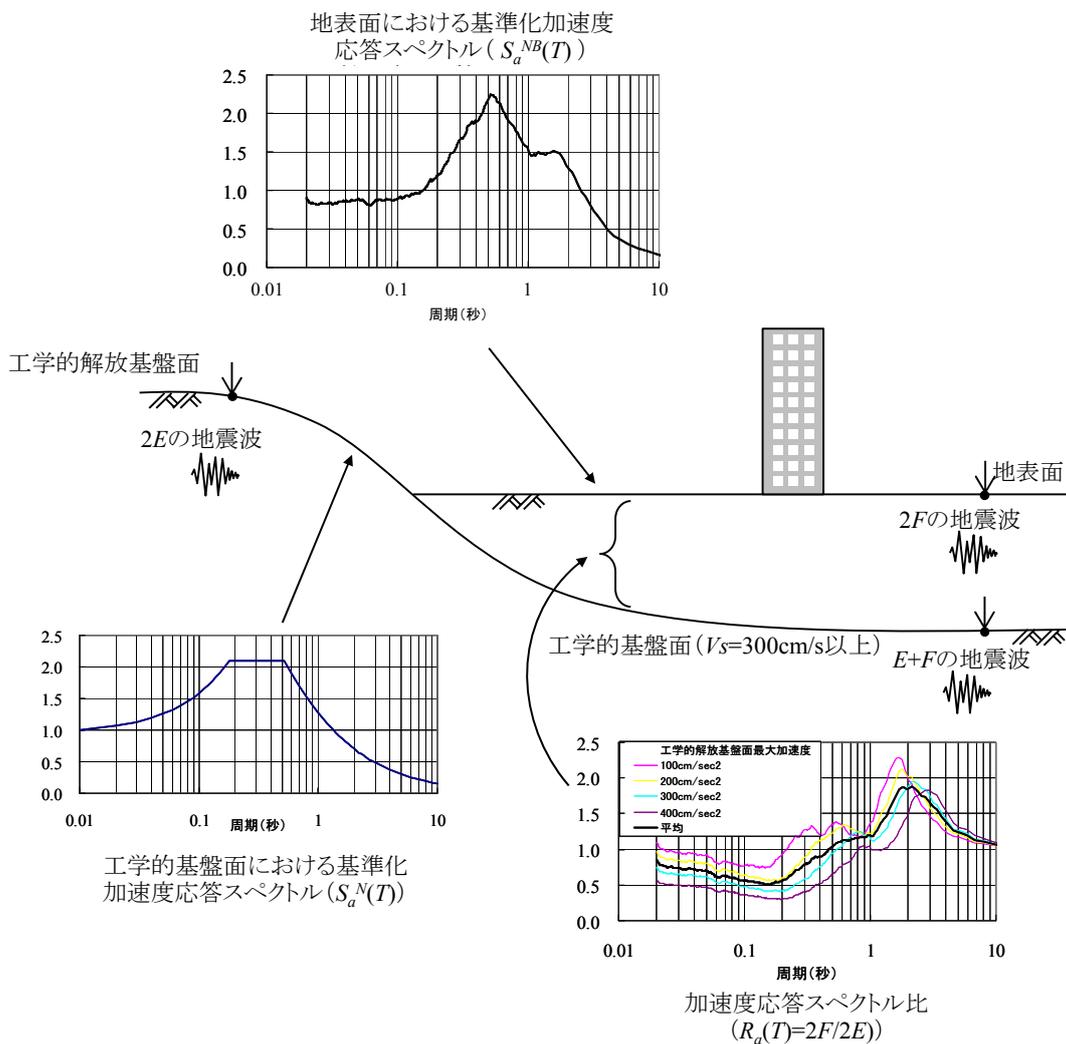


図 B-1 表層地盤の加速度応答スペクトル比を使った地表面の加速度応答スペクトルの求め方

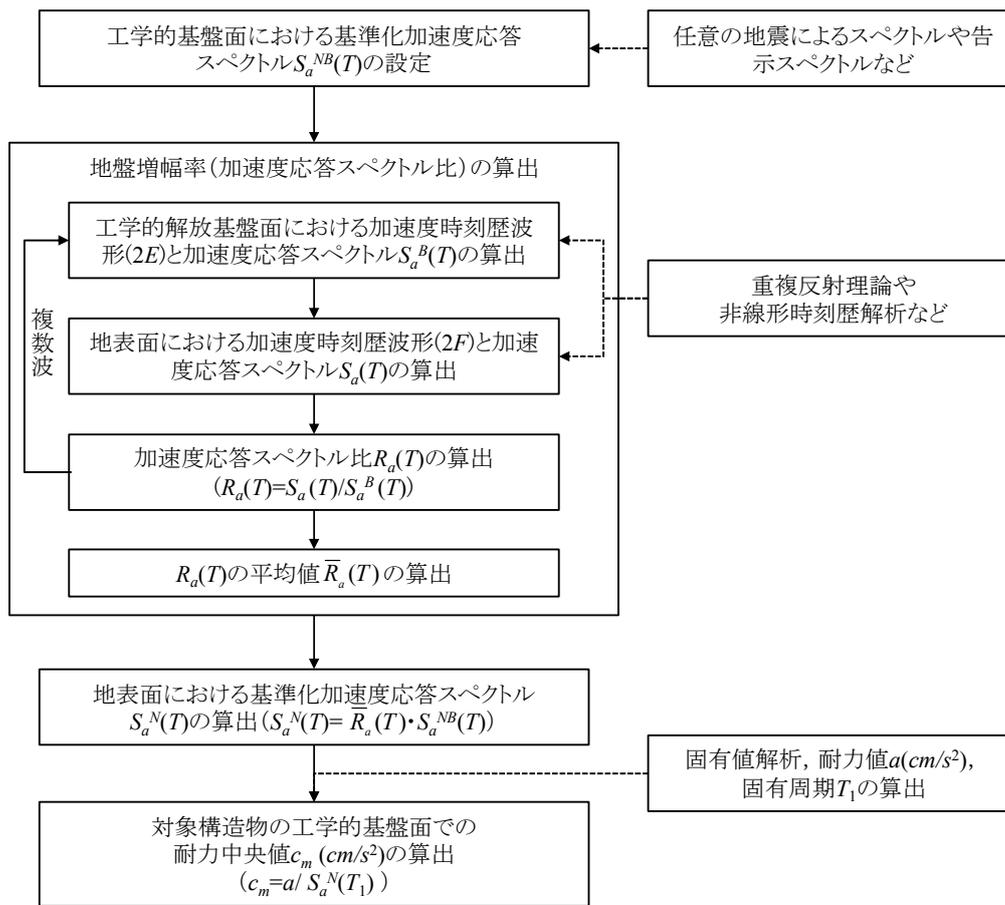


図 B-2 工学的基盤面での耐力中央値 $c_m (cm/s^2)$ の算出フロー

付録 C 建屋の耐震性能評価方法

(1) 各層の復元力特性の設定

地震リスク評価における建造物の耐震性能評価は、作用地震動の大きさに換算した被害モード毎の耐力を求めることに帰着する。ここでは、旅客ターミナルビルを対象（以下建屋）に、応答加速度換算の耐力を求め、これを工学的基盤面での最大加速度に換算（(B3)式）する。耐力評価にはモーダルアナリシスを用いることとし、そのフローを図 C-1 に示す。

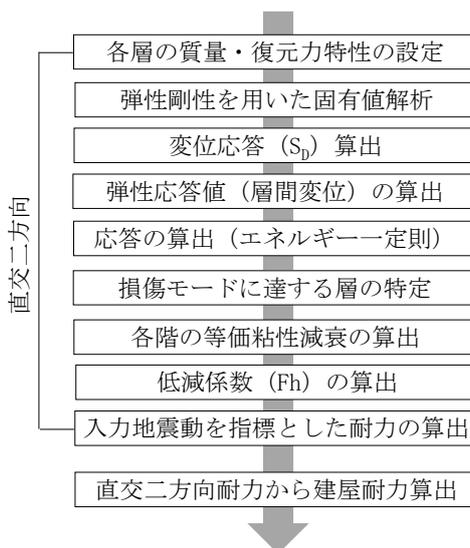
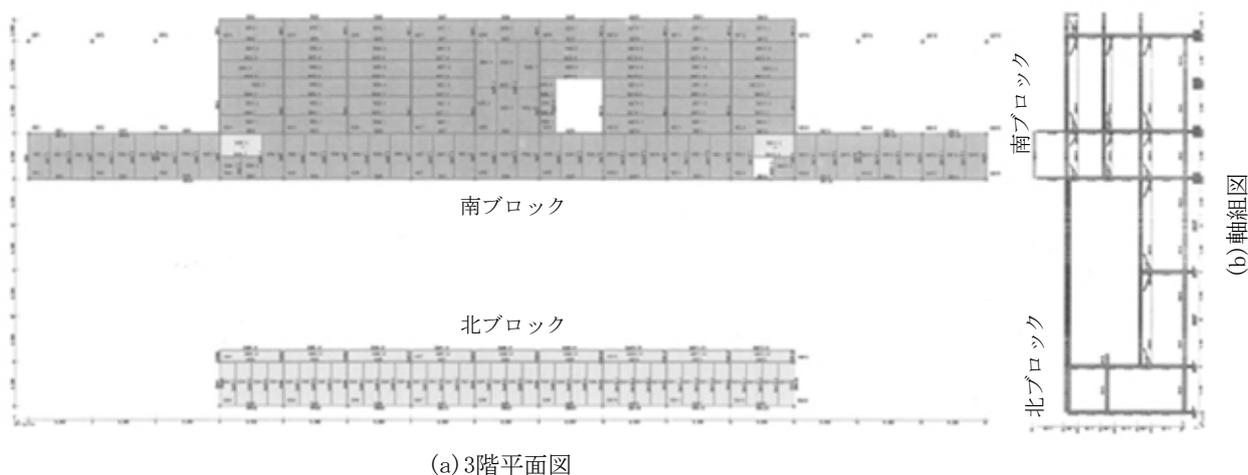


図 C-1 地震リスク評価に用いる建屋の耐震性能評価フロー

旅客ターミナルビルは、建屋内部に大きな吹き抜け空間を有する多剛床による鉄骨造の建物（図 C-2 参照）である。提供資料である構造計算書内に、それを質点系にモデル化するに十分な情報が含まれていないことから、多剛床による質点系モデルを各階 1 質点とする多質点系にモデル化し、地震リスク評価に用いる耐力を算出する解析モデルを作成する（以下に、旅客ターミナルビル短辺方向の耐震性能を用い、耐力評価の数値計算の説明を行う）。また、提供資料である構造計算書では、各階を床面から柱方杖の下端、方杖下端から上階床面の 2 層としてモデル化しているが、本地震リスク評価ではそれらを 1 層としてモデル化している。

提供資料内には図 C-3(c) の保有耐力時負担せん断力の数値が示されている。具体的には建屋 1 階は 1 つ、2 階は多剛床により 2 つ、3 階は 1 つ、塔屋階は 1 つの荷重増分解析によるせん断力-変形関係のみが示され、3 階が 2 つの質点として示されていない。以上より、各ブロック（北ブロックと南ブロック）の保有水平耐力時負担せん断力比や 1 次設計時の各剛床の重心位置に作用する設計用せん断力を参考に、北ブロックの 3 階及び 2 階の地震時重量を南ブロックもしくは北ブロックの下階に分配し、各階 1 質点とする 4 質点にモデル化する。なお、対象建物の偏心率は低く、また北ブロックの負担せん断力は南ブロックに比べ 1/10 程度と低いことから、南ブロックの耐震性能を用いて耐震性能を評価した。

次に、提供資料内に含まれている保有水平耐力計算時の Q-δ 曲線を読み取り、その読み取り値とエネルギー（履歴面積）の誤差が小さくなるよう、表 C-1、図 C-4 に示す通り各階の復元力を等価せん断モデルとしてトリリニアに設定した。ただし、前述のモデル化の条件より、3 階の復元力設定においては北ブロックの負担するせん断力を、各ブロックの保有水平耐力分担率を参考に 3 階の復元力特性から差し引いて実施している。



(a) 3階平面図

(b) 軸組図

図 C-2 建屋解析モデル図

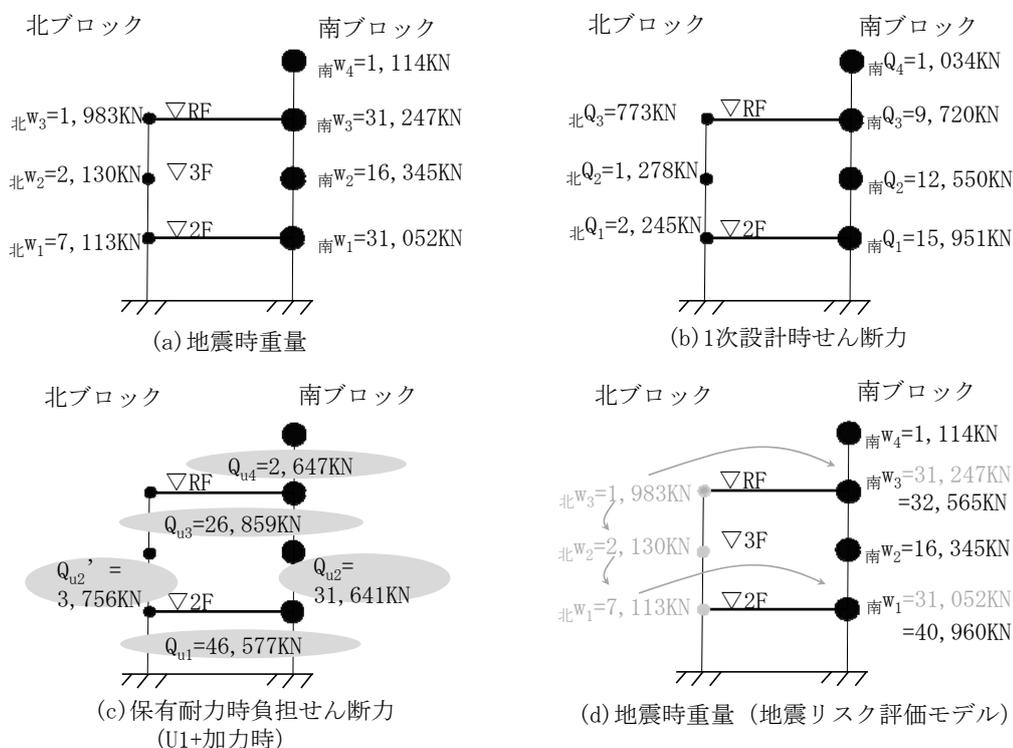


図 C-3 質点系モデルの作成

表 C-1 トリリニアモデルによる復元力のモデル化

	階高 (mm)	w_i (KN)	Q1 (KN)	k1 (KN/mm)	$\delta 1$ (mm)	Q2 (KN)	k2 (KN/mm)	$\delta 2$ (mm)	k3 (KN/mm)
4階	4,300	1114	1985	65	30.3	3069	65	45.3	0.001
3階	5,000	32565	22467	741	30.3	30563	612	43.5	0.001
2階	5,000	16345	24347	708	34.4	36004	451	60.2	0.001
1階	6,000	40960	38440	743	51.8	53000	483	81.9	0.001

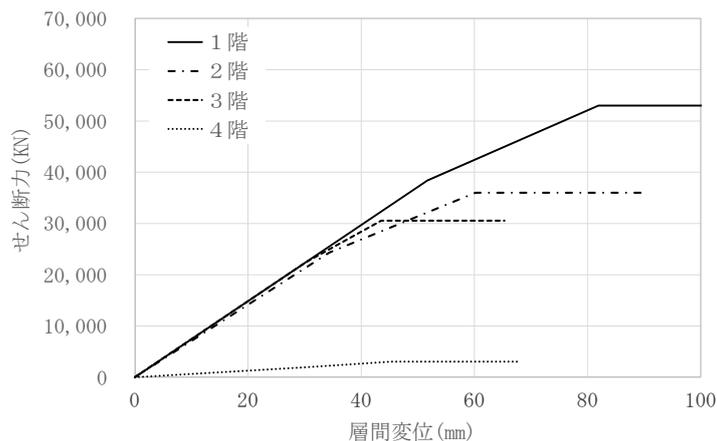


図 C-4 各階の荷重-変形関係

(2) 固有値解析結果から応答値の算出

表 C-1 に示す諸元（線形剛性）を用い固有値解析を実施し、各次の固有周期や固有ベクトル、刺激係数を算出する。モーダルアナリシスでは、固有値解析結果と入力地震動の応答スペクトルを基に、(C1)式を用いて各階の最大応答変位を算出する手法であり、建屋の損傷を層間変形角から定義する場合には(C2)式により、最大の層間変位を算出して評価を行う。ここに、 $|y_i|_{max}$ は i 階の最大応答変位、 $|\Delta y_i|_{max}$ は i 層の最大応答層間変位、 T_i と β_i は i 次モードの固有周期と刺激係数、 $u_{i,j}$ は i 次モードの j 階の固有ベクトル、 $S_D(T_i, h_i)$ は地震危険度評価に表層地盤の増幅特性を考慮した変位応答スペクトル値であり、本評価では、加速度応答スペクトルから円固有振動数である ω を用いて換算する。なお、 h_i は i 次モードの減衰定数であり、本評価では振動数比例減衰を用いた。表 C-2 に固有値解析結果を示す。対象建物は鉄骨造であることから減衰定数 $h_i=0.03$ とする振動数比例減衰に従う 2 次および 3 次の減衰定数を併記している。ここに、本評価建物は 2 次モードまでの有効質量比は 99% 程度である。

$$|y_j|_{max} = \sqrt{\sum |\beta_i \cdot u_{i,j} \cdot S_D(T_i, h_i)|^2} \tag{C1}$$

$$|\Delta y_j|_{max} = \sqrt{\sum |\beta_i \cdot (u_{i,j} - u_{i,j-1}) \cdot S_D(T_i, h_i)|^2} \tag{C2}$$

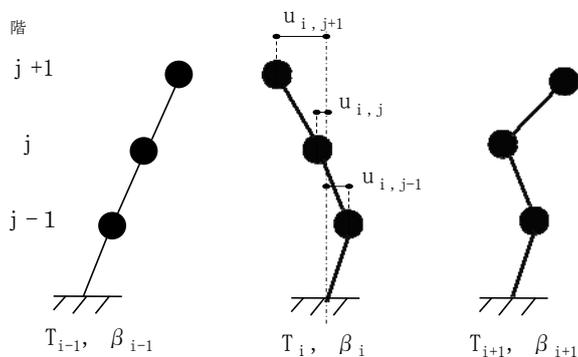


図 C-5 モーダルアナリシスの概説図

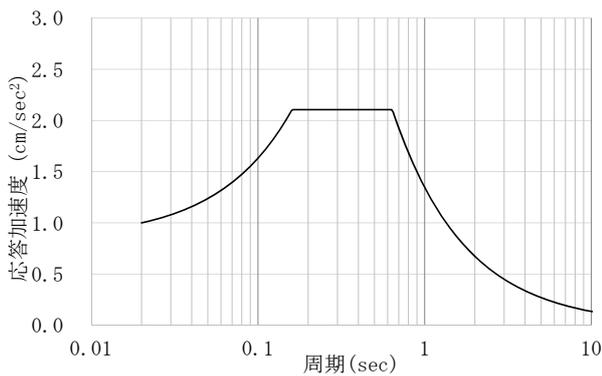
表 C-2 固有値解析結果

		1次	2次	3次
固有周期 $T_i(\text{sec})$		0.89	0.36	0.26
減衰定数 h_i		0.03	0.07	0.10
刺激係数 β_i		2.89	1.04	0.07
固有ベクトル	$u_{i,4}$	0.47	-0.53	2.84
	$u_{i,3}$	0.43	-0.25	-0.11
	$u_{i,2}$	0.33	0.11	-0.08
	$u_{i,1}$	0.19	0.41	0.06

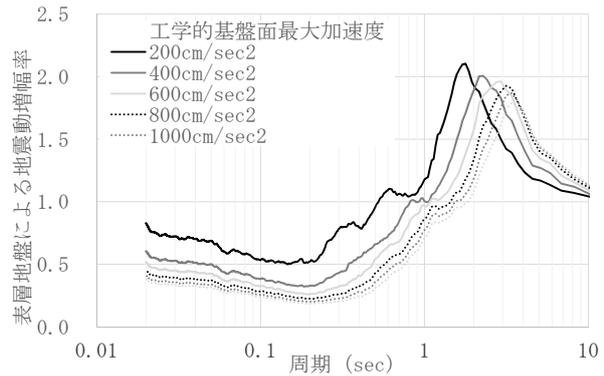
次に、工学的基盤面に図 C-6 に示す加速度応答スペクトルに従う地震動特性を有する最大加速度 200cm/sec^2 の地震動が作用した場合の $S_D(T_i, h_i)$ を求める。まず、1 次の固有周期(T_1)は表 C-2 より 0.89 秒であることから、図 C-6 (a)より工学的基盤面における応答加速度は $200\text{cm/sec}^2 \times 1.5$ 倍程度 $\approx 300\text{cm/sec}^2$ であり、これに図 C-6 (b)により表層地盤の増幅率を読み取ると $300\text{cm/sec}^2 \times 1.03$ 倍程度 $\approx 309\text{cm/sec}^2$ となる結果が得られる。これに、工学的基盤面における応答加速度は 5%減衰を対象に描いたグラフであることから、減衰補正係数 Fh の項として(C3)式を用い、3%減衰の対象建物の減衰補正係数 $Fh=1.154$ を得る。そして $S_A(T_i, h_i)$ は $309\text{cm/sec}^2 \times 1.154 \approx 357\text{cm/sec}^2$ 、1 次周期から換算される 1 次の円固有振動数 $\omega_1=2\pi/T_1=7.04$ を用いて、 $S_D(T_i, h_i)$ は $357\text{cm/sec}^2 / 7.04^2 \approx 7.2\text{cm}$ と得られる。同様に 2 次モード、3 次モードの応答変位を求め、(C2)式により建築基準法告示に示される加速度応答スペクトルに従う工学的基盤面における最大加速度 200cm/sec^2 が作用する際の各階の最大応答層間変形角を表 C-3 の通り得る。

結果としては、1 階の最大応答層間変形角は 3.98cm、同様に 2 階は 3.01cm、3 階は 2.11cm、4 階は 0.89cm であり、各階ともに表 C-1 に示す第一折れ点の変位 (δ_1) 以内であることから、同地震動に対しては線形応答であることが確認される。また、表 C-3 には工学的基盤面最大入力加速度 200cm/sec^2 に対する各層の最大応答層間変形から得られる歪エネルギーを ${}_{200}E_j$ として示している。

$$Fh = \frac{1+10h_0}{1+10h} \quad (\text{C3})$$



(a)工学的基盤面加速度応答スペクトル (h=0.05)



(b)表層地盤の加速度応答スペクトル比

図 C-6 工学的基盤面加速度応答スペクトル (h=0.05) と表層地盤増幅特性

表 C-3 最大応答変形角と各階入力エネルギー

	$\beta_i \cdot S_D \cdot (u_{i,j} - u_{i,j-1})$			$ \Delta y_j _{\max}$ (m)	$200E_j$ (KN・m)
	1次	2次	3次		
4階	0.85	0.26	0.06	0.009	3
3階	2.09	0.34	0.00	0.021	166
2階	3.00	0.28	0.00	0.030	321
1階	3.96	0.39	0.00	0.040	589

(3) エネルギー一定則に従う非線形応答の推定

前述の応答値の算出法は、各層が線形範囲内にある場合を対象としており、各被害モードに対する工学的基盤面における最大加速度値を指標としての耐力の算出においては、少なくとも一層以上の層が線形範囲を超えることを考慮する必要がある。本手法では各階の弾性線形の応答変位を、エネルギー一定則（図 C-7）に従い降伏後の変位に換算して評価する。

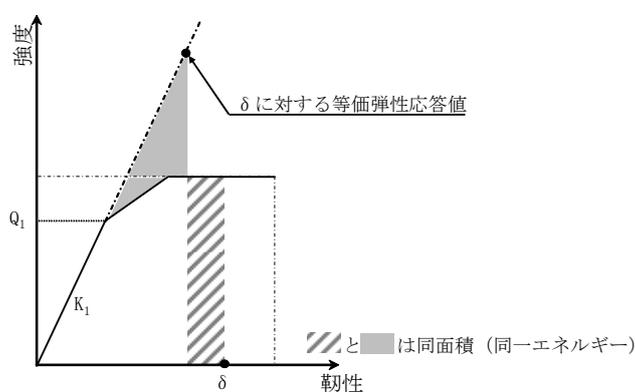


図 C-7 エネルギー一定則

(4) 損傷モードに達する層の特定

建物の被害モードの設定は、各層ごとに層の塑性率が 1.0 となる変位を $\delta_{\text{軽微}}$ とし、いずれかの層においてこの変位に達した場合に被害モードとして軽微に至り、 $\delta_{\text{倒壊}}$ の変位に達した場合に倒壊に至ると設定した。なお、この倒壊時の変位の設定法には、構造種別や構造形式を基に特定値（層間変形角 1/50 や 1/30）に設定する手法もあるが、本稿では、構造計算において求められる構造特性係数（Ds）から想定される塑性率と建物として鉛直荷重が支持できるであろう限界の閾値から最少となる方を選択している。また、軽微と倒壊の間にその他の被害モード（小破、中破、大破）を設ける場合には、その軽微と倒壊の間のエネルギー吸収量を等分して決定する場合や、変形量を等分して設定する場合があり、本稿ではこの変形量を等分する方法を用いて設定している。

表 C-4 に、旅客ターミナルビルの短辺方向の耐力算出にあたり設定した各階の各被害モード時の変位を示す。なお、被害モード軽微の変位（塑性率 1.0）が層間変形角 1/100 以上となる場合には、層間変形角 1/100 に相当する変位、倒壊時の変位の閾値は、鉄骨造による純ラーメン構造であることから層間変形角 1/25 としている。

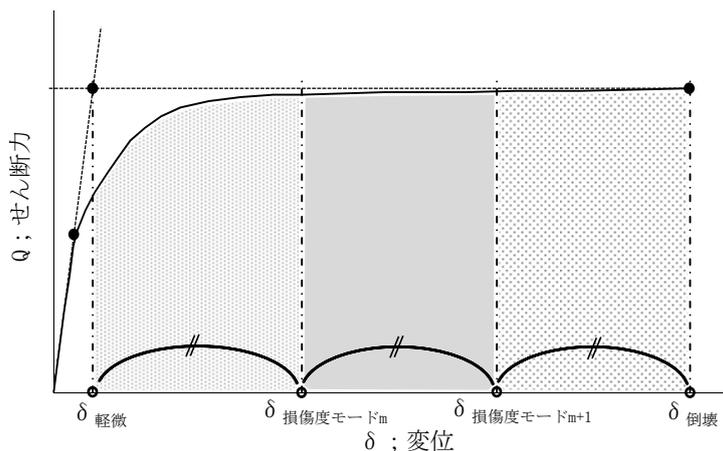


図 C-8 荷重変形関係と被害モード

表 C-4 各階の各被害モード時の変位

	各階の被害モード時変位(m)			
	軽微;m=1	中破;m=2	大破;m=3	倒壊;m=4
4階	0.04 (1/ 100)	0.09 (1/ 50)	0.13 (1/ 33)	0.17 (1/ 25)
3階	0.04 (1/ 121)	0.09 (1/ 53)	0.15 (1/ 34)	0.20 (1/ 25)
2階	0.05 (1/ 100)	0.10 (1/ 50)	0.15 (1/ 33)	0.20 (1/ 25)
1階	0.06 (1/ 100)	0.12 (1/ 50)	0.18 (1/ 33)	0.24 (1/ 25)

※各階の被害モード時変位として () 付きの数値で示した値は、層間変形角として換算した値である。

(C2)で算出した地震動に対する最大層間変形角と表 C-4 で設定したいずれかの層が各被害モードに対応する変形量を用い、エネルギー一定則に従い、評価対象地震動の入力に対して何倍の耐力(余裕率)を有しているかを算出することで、地震リスク評価に用いる建物の耐力を評価する。

表 C-3 に示す最大速度振幅 200cm/sec^2 を作用させた場合の各階の入力エネルギー (${}_{200}E_j$) と、表 C-5 に示す各階の各被害モードに達する時点のエネルギー量 ($E_{j,m}$, j は階数を, m は被害モードを示し, $m=1$ は軽微, $m=2$ は中破, , , を示す) を比べ、その比率が最小値となる層を得る。この値が最小値となる層が最初にその被害モードに達する層であると判断される。また、この値はエネルギー量の比であることから、この値の平方根により何倍の入力地震動が作用した際に、その入力エネルギーとなるかを線形範囲内で想定することが可能である。この結果を表 C-5 に示す。各被害モードともに1階において最初に設定変位に達し、その値は軽微時で1.5倍 ($200\text{cm/sec}^2 \times 1.5 = 300\text{cm/sec}^2$) 程度であることが分かる。

表 C-5 被害モードに達する階の特定

	$E_{j,m}$ (KN・m)				$\sqrt{(E_{j,m}/{}_{200}E_j)}$			
	軽微	中破	大破	倒壊	軽微	中破	大破	倒壊
4階	60	193	325	457	4.81	8.59	11.15	13.22
3階	622	2238	3856	5473	1.94	3.68	4.82	5.75
2階	854	2630	4431	6231	1.63	2.86	3.72	4.41
1階	1328	4392	7572	10752	1.50	2.73	3.59	4.27

(5) 履歴減衰による最大応答値の低減

エネルギー一定則に従う各被害モードに達する入力地震動強さを、最大加速度値として求めたことが、減衰定数には架構の有する粘性減衰の他に、履歴減衰として吸収されるエネルギーがあり、これを加味する必要がある。

まず、表 C-6 の通りいずれかの層が各被害モードに達する時点の入力エネルギーより各層の変位 ($\delta_{j,m}$) をエネルギー一定則に従い算出する。次に、(C4)式により各階の履歴減衰の等価粘性減衰換算値を算出する。なお、同式における D_f は建物の塑性の程度を、 γ_l は構造形式に応じた建築物の減衰特性を示す係数であり、本評価建物は鉄骨造の純ラーメン構造であることから $\gamma_l=0.25$ を採用した。各階の等価粘性減衰が得られた後に、その変位に対応する各階の等価粘性減衰定数 h_{eq} を各層の歪エネルギーを用いて、歪エネルギー比例減衰により履歴減衰による付加減衰 (h_{eq}) を得る。

$$h_j = \gamma_l \left(1 - 1/\sqrt{D_f}\right) \quad (C4)$$

$$h_{eq} = \frac{\sum h_m \cdot E_m}{\sum E_m} \quad (C5)$$

表 C-6 Df と等価粘性減衰

	$\delta_{j,m}$ (m)		Df		等価減衰; heq				軽微	中破	大破	倒壊				
	軽微	倒壊	軽微	倒壊	軽微	倒壊										
4階	0.02	0.07	1.00	1.52	0.00	0.05	heq	0.01	0.02	0.04	0.06					
3階	0.04	0.15	1.03	3.74	0.00	0.12						Fh	0.94	0.84	0.76	0.69
2階	0.05	0.19	1.11	3.83	0.01	0.12										
1階	0.06	0.24	1.05	3.36	0.01	0.11						PBA	318	650	947	1240

※PBA は、工学的基盤面における地震動の最大加速度値に換算した耐力であり、単位は cm/sec^2 である。

本評価では、履歴減衰による応答の減衰補正係数を Fh として(C3)式で算出し考慮する。ただし、本評価手法は線形剛性に基づくモーダルアナリシスを基に行われており、各層が降伏することで剛性低下し固有モードや固有周期が変化することが考慮されていない。このことから、被害モードとして倒壊に達する時点の付加減衰 (heq) には、その算出結果を 0.5 倍し、中破ならびに大破の際には、軽微時の付加減衰と以上で求められた倒壊時の付加減衰を線形補間することで得た上で減衰補正係数 Fh を求めている。なお、倒壊時の変形およびせん断力を用いた等価剛性による 1 次固有周期は 1.8 秒程度であること、図 C-6 (b) より、倒壊時耐力となる最大加速度 $1,000\sim 1,200cm/sec^2$ を最大加速度とする地震動が入力した際の表層地盤の増幅率は 1.0 倍程度であること、基準として $200cm/sec^2$ を入力した際の弾性固有周期に近いことなどから、その増幅率は変化しないものとして耐力を算出している。

以上の手法では、簡便に線形弾性のモーダルアナリシスによる応答値を基に耐力を算出している。ただし、前述の通り、入力地震動が大きくなると、図 C-6 (b) に示すように地盤増幅特性が変化するとともに、固有周期や固有モードが変化する。このような影響を詳細に考慮し、工学的基盤面での最大加速度値として建物耐力値を得る場合には、イテレーションが必要となる。

(6) 直交二方向の耐力と建屋としての耐力

建屋短辺方向、ならびに長辺方向の工学的基盤面最大加速度値として算出した耐力を表 C-7 に示す。対象の旅客ターミナルビルは、建屋長辺方向の耐震性能が短辺方向に比べ低く（必要保有水平耐力に対する安全率が低く）、表層地盤や建屋の剛性バランスの影響もあるものの、構造計算書に示される必要保有水平耐力に対する安全率と、その傾向は一致する。

地震リスク評価を行う際、建屋の耐力として直交二方向の耐力を単純平均する方法や、直交二方向のうちの耐力の低い方向を代表させる方法等が考えられるが、本稿では直交二方向それぞれの計算により得られた各被害モードにおける耐力（工学的基盤面における最大加速度値）を対数正規分布の中央値とし、耐震性能のバラツキを対数標準偏差で 0.3 と設定する。特定最大加速度を入力した際の直交二方向それぞれの各被害モード以上となる確率を算出し、確率の平均を求めた上で、平均確率になるように耐力中央値を求めた。表 C-7 に計算結果を示す。なお、確率算出時の地震動強さには

200cm/sec²を採用し、各被害モードに達する確率を算出し求めた結果である。

表 C-7 直交二方向の耐力値と建屋の耐力値

	入力最大加速度 200 cm/sec ² 耐力の対数標準偏差 0.3			
	軽微	中破	大破	倒壊
X方向耐力 ^{※)}	318	650	947	1240
Y方向耐力 ^{※)}	295	573	818	1057
Px	0.061	0.000	0.00000	0.00000
Py	0.097	0.000	0.00000	0.00000
average(Px,Py)	0.079	0.000	0.00000	0.00000
建屋耐力 ^{※)}	305	597	849	1094

※耐力は、単位を cm/sec² とする工学的基盤面最大加速度値として示した耐力である。

付録D 全確率を用いた積分法の誘導

(1) 高次同時確率分布の積事象確率の計算

相関がある n 個の要素 $X_i, i=1\sim n$ を想起し, 全てが損傷する確率 (積事象) を求める. この場合, 高次元正規分布 (同時確率分布) に従う各変量 X_1, X_2, \dots, X_n に関し, $-\infty < X_i \leq b_i, i=1\sim n$ の重なり合う部分の積分によって求められる.

$$p(X_i < b_i) = \int_{-\infty}^{b_1} \int_{-\infty}^{b_2} \dots \int_{-\infty}^{b_n} f(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (D1)$$

ここで,

$$X_i = \sqrt{1-\theta^2} Y_i - \theta_i Z \quad i=1\sim n \quad (D2)$$

と置く. ここに, $Y_i, i=1\sim n$ は互いに独立である. また, Y_i と Z も独立である. Gupta, S.S.(1963)は, (D2)を使い高次同時確率分布の多重積分を一回の積分で求められる式を誘導した.

$$p(X_i < b_i) = \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[\Phi \left(\frac{\theta_i z + \beta_i}{\sqrt{1-\theta_i^2}} \right) \right] \phi(z) dz \quad (D3)$$

ここに,

$$\beta_i = \frac{b_i - \mu_i}{\sigma_i}, i=1\sim n \quad (D4)$$

$$b_i = \Phi^{-1}(p(E_i)) \quad , i=1\sim n \quad (D5)$$

$\Phi(\quad), \phi(\quad)$ は標準正規分布の累積確率関数, 標準正規密度関数である. また, 式中の θ_i は, 要素間の相関係数 ρ_{ij} と以下のような関係にある.

$$\rho_{ij} = \theta_i \theta_j \quad , i \neq j \quad (D6)$$

なお, $0 < \theta \leq 1$ である.

(2) 要素間の損傷相関

損傷状態を以下のように定義する.

$$F_i = C_i / R_i \quad , i=1\sim n \quad (D7)$$

ここに, $C_i, i=1\sim n$ は耐力の確率変数で互いに独立, $R_i, i=1\sim n$ は作用地震動の確率変数で完全相関と仮定する. それぞれ対数正規分布とする. F_1 と F_2 の共分散を取り, 要素の相関係数を求める.

$$\rho_{ij} = \frac{\zeta_{Ri} \zeta_{Rj}}{\zeta_{Fi} \zeta_{Fj}} \quad , i \neq j \quad (D8)$$

ここに, ζ_{Fi}, ζ_{Ri} ではそれぞれ対数標準偏差である. また, $\zeta_F = \zeta_{Fi} \quad , i=1\sim n$ とすると, 相関係数は以下となる.

$$\rho_{ij} = \frac{\zeta_{Ri} \zeta_{Rj}}{\zeta_F^2} \quad , i \neq j \quad (D9)$$

(D9)と(D6)より, 以下の関係を得る.

$$\theta_i = \frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} \quad , i \sim n \quad (D10)$$

また,

$$\zeta_{Ci}^2 + \zeta_{Ri}^2 = \zeta_F^2 \quad (D11)$$

である。ここに、 ζ_{Ci} は耐力の対数標準偏差である。次に、(D7)式より、各要素の損傷確率は以下のように表される。

$$C_i / R_i = F_i < 1, \quad i=1 \sim n \quad (D12)$$

つまり、各要素それぞれの損傷確率は以下ようになる。

$$p_{fi} = \int_0^{1.0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{Fi}x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda_{Fi}}{\zeta_{Fi}}\right)^2\right) dx, \quad i=1 \sim n \quad (D13)$$

ここに、

$$\lambda_{Fi} = \lambda_{Ci} - \lambda_{Ri}, \quad i=1 \sim n \quad (D14)$$

である。また、 λ_{Fi} , λ_{Ri} , λ_{Ci} はそれぞれ対数の平均値である。

(3) 全確率を用いた積分法の誘導

確率変数 F_i , $i=1 \sim n$ を多次元の同時確率分布（対数正規分布）と考える。(D3)式への適用する場合、積分範囲 $-\infty < X_i \leq b_i$ は $0 < X_i \leq 1.0$ となる。これを(D4)式に代入する。その際、 $\ln(1.0) = 0.0$ に注意し、

$$\beta_i = \frac{-\lambda_{Fi}}{\zeta_F}, \quad i=1 \sim n \quad (D15)$$

となる。さらに(D14)式を適用すると、

$$\beta_i = \frac{-(\lambda_{Ci} - \lambda_{Ri})}{\zeta_F}, \quad i=1 \sim n \quad (D16)$$

となる。次に、(D3)式の以下の項を取上げ、(D10)式を代入する。

$$\Phi\left(\frac{\theta_i z + \beta_i}{\sqrt{1-\theta_i^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} z + \beta_i}{\sqrt{1-\frac{\zeta_{Ri}^2}{\zeta_F^2}}}\right) = \Phi\left(\frac{\frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} z + \beta_i}{\frac{\zeta_{Ci}}{\zeta_F}}\right) \quad (D17)$$

(D16)式を代入する。

$$= \Phi\left(\frac{\frac{\zeta_{Ri}}{\zeta_F} z + \frac{\lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_F}}{\frac{\zeta_{Ci}}{\zeta_F}}\right) = \Phi\left(\frac{\zeta_{Ri} z + \lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}}\right) \quad (D18)$$

改めて、(D3)式を書き直すと、

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \left[\Phi\left(\frac{\theta_i z + \beta_i}{\sqrt{1-\theta_i^2}}\right) \right] \phi(z) dz \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\zeta_{Ri} z + \lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}}\right) \phi(z) dz \end{aligned} \quad (D19)$$

ここで、積分変数の変換 $z \rightarrow x$ を行う。

$$x = \exp(z\zeta_{Ri} + \lambda_{Ri}), \quad dz = \frac{1}{\zeta_{Ri}} \frac{1}{x} dx, \quad z = \frac{\ln x - \lambda_{Ri}}{\zeta_{Ri}} \quad (D20)$$

積分範囲が $-\infty$ から 0 に変わること注意到し、(D19)式に適用する。

$$\begin{aligned}
 &= \int_0^\infty \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda_{Ri} + \lambda_{Ri} - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}}\right) \phi\left(\frac{\ln x - \lambda_{Ri}}{\zeta_{Ri}}\right) \frac{1}{x} \frac{1}{\zeta_{Ri}} dx \\
 &= \int_0^\infty \prod_{i=1}^n \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda_{Ci}}{\zeta_{Ci}}\right) \phi\left(\frac{\ln x - \lambda_{Ri}}{\zeta_{Ri}}\right) \frac{1}{x} \frac{1}{\zeta_{Ri}} dx \tag{D21}
 \end{aligned}$$

上式は、以下のように表すこともできる。

$$= \int_0^\infty \prod_{i=1}^n F_{Ci}(x) f_{Ri}(x) dx \tag{D22}$$

ここに、 x は地震動、 $F_{Ci}(\cdot)$ 耐力の非超過確率関数（対数正規分布）、 $f_{Ri}(\cdot)$ は作用地震動の対数正規密度関数である。（D22）式は、相関がある n 個の要素の積事象確率を求める式であるが、要素の被害レベルの組合せ事象全てに適用できる。ここで、作用地震動を誘発するシナリオ地震を S と置くと、以下のように表記することができる。

$$G_R(r|t, S) = \int_0^\infty G_R(r|t, x) \cdot f_{Ri}(\ln x; x_{mi}, \zeta_{xi} | S) dx \tag{D23}$$

ここに、 $G_R(r|t, x)$ は地震動 x による組合せ事象の確率、 $G_R(r|t, x)$ はシナリオ地震 S による組合せ事象の確率である。（D23）式は本稿(23)式に対応する。一方、各要素において相関が同じ場合には、(D9)式は以下となる。

$$\rho = \frac{\zeta_R}{\zeta_F} \tag{D24}$$

つまり、(D24)式が成立する対数標準偏差を与え、(D23)式の積分を行えばよい。

付録 D の参考文献

Gupta, Shanti S.(1963) : Probability integrals of multivariate normal and multivariate t. Annuals of Math. Stat., Vol.34, No.3, Sep., pp.792-828.

付録 E 津波浸水確率の評価

(1) 津波一般

津波は海域で発生した地震や火山活動により、海底面が隆起、沈降し、その作用によって起きる現象である。このため、海底面が横にずれるような地震（横ずれ断層）では津波は起きず、また、地震のマグニチュードが概ね 6.5 以下であれば、被害をもたらすような津波は起きないと考えられている。このように津波を引き起こすシナリオ地震は限られていることに注意し、津波リスク評価用のシナリオ地震を定める必要がある。

津波の水理的特性について幾つか示す。水深に対し波長が 20 倍以上の波を長波と呼び、津波はこの長波に分類される。長波の特徴として、水粒子は水平方向へのみ運動し、鉛直方向には運動しないと仮定する。津波の速度（波速）は、例えば水深 3000m の場合、617km/h になり、地形効果により海岸に近づくと速度は急速に低下する。例えば、水深 20m では、50km/h になる。また、津波の周期は地震のマグニチュードにほぼ比例し、例えば、M8 では周期は約 51 分になる。この場合、津波の波長は水深 3000m では約 530km に達する。

(2) 津波シミュレーションの方法

津波シミュレーションには、簡便なものから、高度で複雑なものまで、様々であり、シミュレーションに掛かる手間に幅がある。このため、どのような目的で、何を知りたいのか、この点をはっきりさせ、必要に応じて使い分けることが重要である。ここでは 3 種類の解析手法を紹介する。レベル湛水法、非線形長波理論による平面 2 次元解析、3 次元 VOF (Volume of Fluid) 法である。

レベル湛水法は、来襲する津波高さを海岸域で設定し、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。難しい数値解析を要しないので、簡便な方法と言える。ただし、来襲する津波高さを海岸域で設定する際には、津波距離減衰式を併用したり、既往の調査報告や津波ハザードマップなどを参照し、津波高さの誤差を修正する必要がある。

非線形長波理論による平面 2 次元解析は、震源海域の海面の盛り上がりを入力として、海域での津波の伝搬や陸域での遡上を時々刻々解析する方法である。国や自治体から公開されている津波高さの情報、津波ハザードマップ作成の基となるデータの解析などに使われている。平面 2 次元解析とあるが、前述のように、津波の水粒子は水平方向へのみ動く、との前提があるため、平面をメッシュ分割した 2 次元解析で十分な精度を得ることができる。一方で、震源域での海面の盛り上げ方法、適切なメッシュ分割、陸域での粗度評価などによって津波高さには違いが生じる。このため、海岸工学や海洋水理学を専門とする技術者の知見や経験が必要になる。

VOF (Volume Of Fluid) 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ている。本手法は、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。一方で、計算時間がかかるため、海岸に到達した津波を入力として、陸域のみを計算する方法が採られている。また、海域は前記した平面 2 次元解析を使い、陸域に VOF 法を使うなど、いわゆるハイブリットな方法もある。

(3) 津波浸水被害の発生確率の計算法

津波リスク評価では、浸水深や浸水範囲を明確に定義し、その状態が起きる確率と、その状態による損害額や復旧時間を推計する。津波被害が発生する確率は、図 E-1 に示す様に、当該地点に来襲する津波高さが、防波堤や護岸の高さを超える確率として評価する。その際、被害に至る津波高さを、防波堤や護岸の高さに加える。

シナリオ地震による当該地点での津波高さは、阿部(1989)による津波距離減衰式を用いる。同式は以下のように表される。

$$\log H_t = M_w - \log \Delta - 5.55 \quad (E1)$$

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、 H_t は伝搬距離によらず、以下の式で算出される。

$$\log H_t = 0.5M_w - 3.30 \quad (E2)$$

ここで、 r_0 は以下の式である。

$$\log r_0 = 0.5M_w - 2.25 \quad (E3)$$

ただし、(E1)式は太平洋側（外海）の津波を想定したものであるため、内海である港湾域沿岸における想定高さと実際の津波高さには隔たりがある。そこで、過去の地震による津波観測値や非線形長波理論によるシミュレーション結果を用いて津波高さの補正を行う。そして津波高さを対数正規分布に近似できると仮定し、距離減衰式から得られる津波高さ（補正後）を中央値とする。対数標準偏差は概ね0.44程度である。

津波の陸域への浸水はレベル湛水法を用い、空港施設の浸水高さを評価し、被害を推計する。

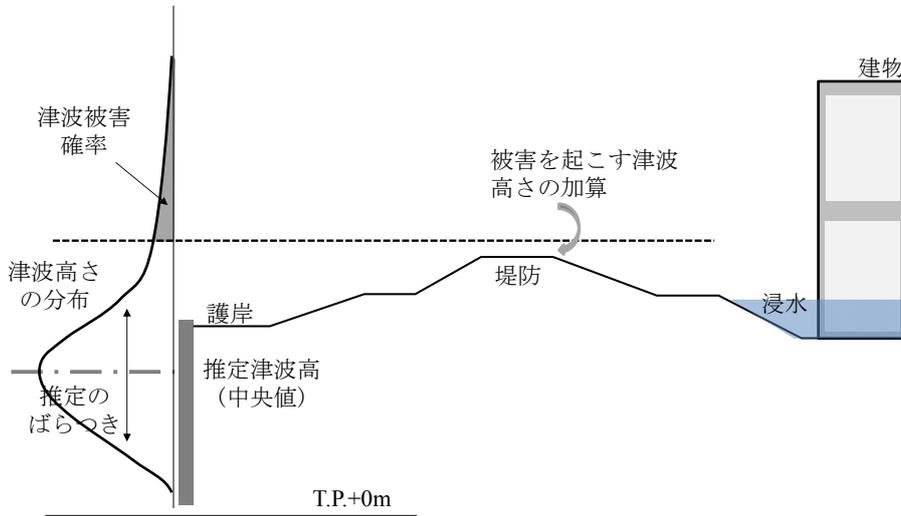


図 E-1 津波被害の発生確率の評価

図 E-2 に、津波被害の発生確率の評価フローを示す。

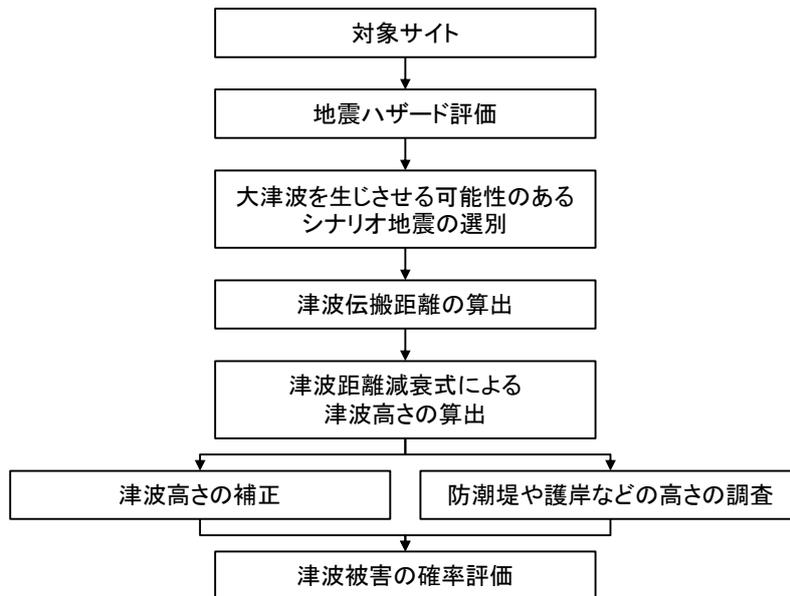


図 E-2 津波被害の発生確率の評価フロー

付録 E の参考文献

阿部勝征：地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測，地震研究所彙報，Vol.64, pp.51-69, 1989.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 830 March 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:046-844-5018