

## 首都圏鉄道路線の地震時システムリスク解析(その1) —考え方と基礎理論—

(株)篠塚研究所 正会員 ○静間俊郎

東急建設(株) 正会員 前田欣昌 正会員 服部尚道 正会員 奥村幹也

東京都市大学 フェロー会員 吉川弘道

## 1. はじめに

事業継続計画(以下,BCP)<sup>1)</sup>への関心に伴い,製造業のみならず,道路,鉄道,港湾,空港などのインフラ施設についても,BCPという観点からの耐震検討が進められつつある. BCP策定では,事業(機能)停止・低下の可能性やその期間の推計が重要となる.

鉄道路線や高速道路などは,直列状に構築物が連なったシステムとして構成されており,1箇所の被災が路線運休や通行止めを招く.一方で,巨視的にみると代替路線や迂回路などにより,システムとしての冗長性は最低限保たれ,ある程度の機能水準は確保できる.

本稿は,首都圏鉄道路線の主事業である輸送機能に着目し,地震時におけるシステムリスクを解析する.具体的には,本稿(その1)でシステムリスク解析における基礎理論について整理し,さらに復旧曲線およびボトルネック指標の評価方法を示した.また,本稿(その2)では,解析モデルを詳述し,現状および耐震対策後の結果を考察する.なお,ここでのシステムリスクとは,システムとしての復旧期間,復旧過程,ボトルネック,システム全体としての冗長性などを捉えたシステム性能の低下や喪失を意味する.

## 2. システムの復旧期間確率関数の評価方法

システムが地震損傷を受ける場合を想起し,直列システムの復旧期間確率関数の評価方法を以下に示す.復旧に要する期間(以下,復旧期間)は,損傷の箇所やその程度により異なるが,施設の持っている機能の早期回復を目的としていることから,損傷箇所について同時に作業が進められるものとし,最短の期間で復旧作業は完了するものとする.これを復旧期間最小化原則と呼ぶこととする.

復旧期間最小化原則に従うと,システム中の最も復旧に要する施設の復旧期間が,システム全体のそれとなる.ここで,図1に示すような $n$ 個の施設(以下,要素)の地震時の復旧期間をそれぞれ確率変数 $T_1 \sim T_n$ とすると,直列システムの復旧期間は,複数要素の復旧期間の組み合わせの最大値が選ばれることになる.これより,復旧期間は,地震動の大きさ $x$ を条件として以下のように表すことができる.

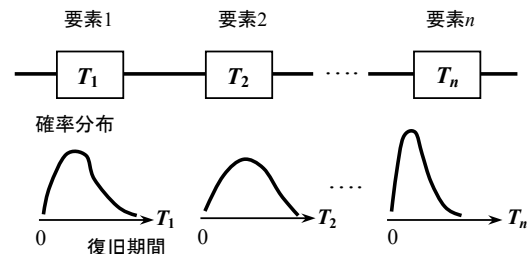


図1 直列システムを構成する要素の復旧期間

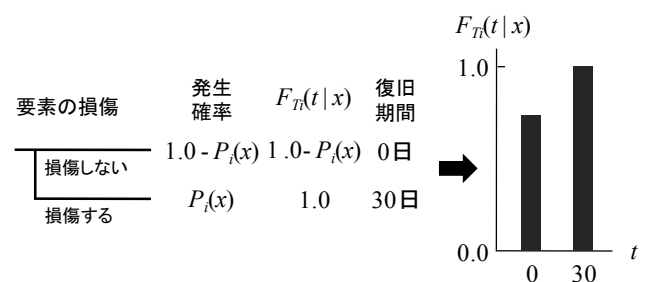


図2 要素iの復旧期間非超過確率関数

$$T_x = \max(T_1, T_2, \dots, T_n | x) \quad (1)$$

(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るという意味である.極値の確率分布の教えるところにより,復旧期間の非超過確率関数(以下,確率関数) $F_T(t|x)$ は,要素の損傷事象の独立を前提に,直列システム((1)式)の場合は以下となる.

$$F_T(t|x) = P(T_1 \leq t, T_2 \leq t, \dots, T_n \leq t | x) \quad (2)$$

$$F_T(t|x) = \prod_{i=1}^n F_{T_i}(t|x) \quad (3)$$

ここに, $F_{T_i}(t|x)$  ( $i = 1 \sim n$ )は,要素の地震動の大きさ $x$ の条件付復旧期間の確率関数である.これより,システムの復旧期間は,各要素の復旧期間の確率関数の積によって求められることになる.

## 3. 要素の復旧期間確率関数の評価方法

各要素の復旧期間の確率関数 $F_{T_i}(t|x)$ は,図2に示す要素の損傷確率 $P_i(x)$ と復旧期間によって求められる.同図は,損傷が発生する,しないの2分岐の例であり,損傷発生時の要素の復旧期間を $t_{max}$ (図2では30日)とすると,復旧期間の確率関数は下式で表すことができる.

Key words : BCP, システムリスク, システム性能, 冗長性, 復旧曲線, ボトルネック指標

連絡先: 東京都新宿区西新宿 4 丁目 5-1 幸伸ビル 3F TEL: 03-5351-3781 FAX: 03-5351-3783

$$F_{Ti}(t|x) = 1.0 - P_{fi}(x), t = 0$$

$$= 1.0, t = t_{\max} \quad (4)$$

上式の損傷確率  $P_{fi}(x)$  は、構造信頼性に基づく Fragility Curve により求める。なお、図 2 は 2 分岐としたが、必要に応じ適宜、無被害、軽微、全壊などの 3 分岐以上にする。

ここで、地震動の大きさ  $x$  は確定量であることに注意する。Fragility Curve より求めた損傷確率  $P_{fi}(x)$  は、耐震耐力の不確実性は考慮しているものの、地震動の大きさ  $x$  のそれは考慮していない。リスク解析において、シナリオ地震を想定した場合には、波動伝播の誤差や表層地盤の増幅特性の不確実性等、作用地震動の大きさのばらつきを考慮する必要がある。この地震動の大きさの不確実性を考慮する方法の具体的記述については、文献 2) を参照されたい。

#### 4. 復旧過程とボトルネックの評価方法

##### (1) 復旧曲線

復旧曲線は本来の機能が低下或いは停止し、その後機能が完全に回復するまでの経時的なプロセスを描いた曲線と定義する。横軸は復旧に要する期間、縦軸は本来の機能を 1.0 とした機能回復率(復旧率)である。地震被害の発生や復旧期間の不確実性を前提とすると、無数の復旧曲線が予想でき、予想に漏れ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させる。また、復旧曲線は復旧期間と機能回復率の 2 軸に描画されるため、それぞれの軸方向の平均値を採ると 2 種の曲線<sup>3)</sup>が求められる。

本稿では予め設定した機能毎の復旧期間の期待値を短い順に、機能回復率に対して結んだ曲線を復旧曲線とする。図 3 に示すこの曲線は、機能が限定されるシステムの復旧過程を視覚的に把握するのに優れている。復旧曲線は一般的に下式で示される<sup>3)</sup>。

$$R(r_k) = \int_0^{\infty} (1 - F_T(t, r_k)) dt, k = 1 \sim L \quad (5)$$

ここに、 $F_T(t, r_k)$  は機能  $k$  の復旧期間の確率関数であり、 $r_k$  は全体機能を 1.0 とした各機能の率である。右辺は各機能の復旧期間の期待値を計算している。

また、図中の RTE (Recovery time expectancy; 以下、RTE) はシステムとしての復旧期間の代表値であり、下式に示すように各機能の復旧期間の期待値にその機能の率を乗じることにより求められる。

$$RTE = \sum_{k=1}^L R(r_k) \cdot r_k \quad (6)$$

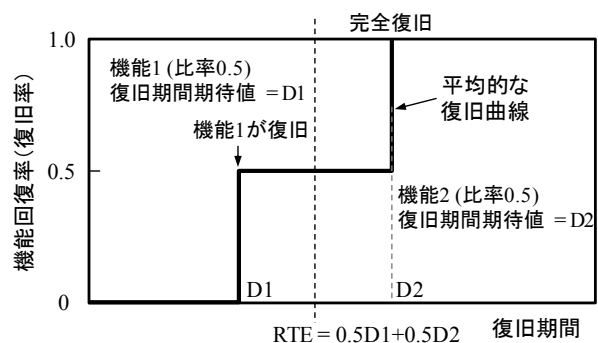


図 3 平均的な復旧曲線

##### (2) ボトルネック指標

システムを構成する要素が多数、あるいはシステムの機能が多様となると、対象システムにおいてボトルネックとなる要素を見出すことが難しい。そこで、ボトルネックとなる要素を効率的に選定するためにボトルネック指標 (Bottleneck Index; 以下、B.I.) が提案<sup>3)</sup>されている。B.I. は、システム全体機能への影響度(重要性)、脆弱性(耐震性)、復旧難易度(修復性)の積で表され、以下のようになる。

$$B_i = e_i \cdot E(T_i), i = 1 \sim n \quad (7)$$

ここに、 $i$  は要素、 $n$  はシステム中の要素総数、 $e_i$  はシステム全体機能への影響度である。 $E(T_i)$  は、地震発生を条件とした要素  $i$  の復旧期間の期待値を表し、下式で示される。

$$E(T_i) = \sum_{all j} p_{fij} \cdot t_{ij} \quad (8)$$

ここに、 $j$  は損傷形態、 $p_{fij}$  と  $t_{ij}$  は要素  $i$  に関する損傷形態  $j$  の発生確率ならびに復旧期間である。 $p_{fij}$  は要素の脆弱性を表し、 $t_{ij}$  は復旧難易度を表す。(8)式より、B.I. は時間の単位を持つ。

##### 5. まとめ

本稿(その1)ではシステムリスク解析における基礎理論を整理すると共に、復旧曲線、ボトルネック指標の評価方法を示した。なお、本稿(その2)ではシステムモデルを構築し、シナリオ地震時の復旧曲線、RTE、B.I.を算出する。

##### 参考文献

- 1) 内閣府:中央省庁業務継続ガイドライン第一版, 2007
- 2) 中村孝明: 相関を考慮した建物群の地震損失確率関数の評価, 建築学会構造系論文集, 第 623 号, pp.49-56, 2007.
- 3) 静間俊郎他: 復旧曲線の理論的考察と BCP への適用, 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—SRM&BCPの現状と課題—講演論文集, pp.231-236, 2009.
- 4) 中村孝明他: 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., 2009.1