

線状施設の震災後機能停止期間に関する システムリスク解析

吉川 弘道¹・静間 俊郎²・高澤 尚子³・中村 孝明⁴

¹正会員 東京都市大学教授 総合研究所 (〒158-0082 東京都世田谷区等々力8-15-1)
E-mail: hyoshika@tcu.ac.jp

²正会員 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1 幸伸ビル新宿3F)
E-mail: shizuma@shinozukaken.co.jp

³学生会員 東京都市大学大学院工学研究科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail: g0881606@tcu.ac.jp

⁴正会員 株式会社篠塚研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿4-5-1 幸伸ビル新宿3F)
E-mail: koumei@shinozukaken.co.jp

本論は、都市内鉄道路線のような線状構造施設を対象とした地震時のシステムリスクを論ずるものである。システム信頼性理論、およびシステムを構成する要素の地震時損傷相関を考慮した機能停止期間算定法により、理論的なフレームワークを構築した。

基本3モデルおよび都市内鉄道路線を設定して、数値シミュレーションを実行/考察し、主要な出力となる、地震イベントリスク曲線、復旧曲線、ボトルネック指標を提示し、それらの有用性について考察した。本論にて提案する地震時システムリスク解析は、SRM (Seismic Risk Management) / リスクマネジメントとBCP/事業継続計画策定のための支援情報として、有用的かつ効果的であると考えられる。

Key Words : *intercity railway system, seismic system risk, seismic fragility curve, seismic event risk curve, recovery time expectancy, bottleneck index*

1. まえがき

現在、首都圏は、高度に発達した都市内鉄道路線により、多くの通勤通学者が、都市中心部（例えば、JR 山手線）に移動流入する。地震時には、地震動レベルに応じた各種の地震災害が想定され、強震時には首都東京における多大な社会的機能・インフラ機能の損失が懸念される¹⁾。

特に、都市内鉄道路線は線状構造のため、構造施設 1 か所の損傷により、10km～数 10km に亘る路線運休を招く。路線を構成する構造施設は高架橋、橋梁、土構造物、地下構造など異なる構造物が、所定の示方書/指針類にて設計施工されている。加えて、設計年代も様々であり、旧示方書にて設計された構造物に対する耐震補強の手法と程度が相当異なることも事実である。

一方では、都心部への流入経路は、複数路線が存在し、互いの機能停止を補完し、ある程度の冗長性も有する。そこで、本研究では都市内鉄道路線に着目し、これを線状システムとしてモデル化し、地震時のシステムリスク解析を論ずるものである。

地震リスク解析は、これまで建築建物を対象とした研究が先行し、近年、橋脚/橋梁などの土木構造物に対するものが提案/報告され、例えば、文献 2), 3)にて、両学会での成果が整理/報告されている。これまでの既往研究は単独施設を対象としたものが多く、システムリスクへの適用は限られたものであり、機能停止期間に言及したものは散見されるに過ぎない。そこで、土木系ライフライン施設に対するシステム信頼性理論⁴⁾⁵⁾およびその応用事例^{例えば、6)}をもとに、機能停止期間に特化したリスク評価について考察し、‘点から線へ’の展開を試みるものである。

さらに、本論で展開するシステムリスク解析の出力は、どの程度の期間で復旧するのか（復旧曲線の提示）、どこがクリティカルなのか（ボトルネック指標の算出）、特定のターゲット地震に対するリスク評価など、具体的な定量的なリスク情報となることが特徴である。これは、地震リスクを定量的に示すことであり、SRM (Seismic Risk Management) (リスクマネジメント) と事業継続計画 (BCP/Business Continuity Plan) のための説明性の高い情報を付与すると考える。

本文は、まず、中村らの定式化^{7,8,9)}を出発点として、システムリスク評価のためのシステム信頼性について言及し、次に要素間の地震損傷相関を考慮した機能停止期間の算定法¹⁰⁾を述べる。次に、主要な出力となる、地震イベントリスク曲線、復旧曲線(D曲線, TL曲線)、ボトルネック指標の定義を示す。適用事例として、基本3モデルおよび具体的な都市内鉄道路線を設定して、数値シミュレーションを実行/考察する。

なお、本論では‘機能停止期間’と‘復旧期間’は事実上、同意語であることを付記する。

2. システムリスクの評価手法

構造物を機能で捉えると、それぞれの機能は構成要素が有機的に連なったシステムとして構成される。また、インフラ施設は直列・並列混在システム(鉄道など)、あるいはネットワークシステム(水道管など)として構成され、その必要機能を果たしている。

そこで、構成要素個々の地震リスクを進展させ、システム全体でのリスク評価を行っていくことが必要である。本論では、システム全体のリスクをシステムリスク(System Risk)と呼ぶこととし、地震後の復旧に要する時間(復旧期間)を指標にシステム信頼性手法を援用し、システムリスクを評価する。本章2.では、主として著者らの既往論文⁷⁻¹¹⁾を再構築して、論述するものである。

(1) システム信頼性に基づく機能評価^{4,5,11)}

図-1, 2に、直列・並列システム、またこれらが混在したシステムを示す。図の四角はシステムの構成要素(以下、コンポーネント)を示している。ここで、システムの機能停止はコンポーネントの物理的損傷によって引き起こされ、いくつかのコンポーネントが同時に損傷した場合には同時に復旧を行い、最短で修復が完工すると考える。

このように考えれば、直列システムの復旧期間は、それぞれの確率変数(復旧期間)の組み合わせの最大値が選択され、並列システム場合はそれぞれの確率変数(復旧期間)の組み合わせの最小値が選択される。

地震動 x の条件において、システムの復旧期間の非超過確率関数は、コンポーネント間の損傷事象を独立と仮定すると、直列システムの場合は、式(1)ようになる。

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

ここに、 $F_{T_i}(t|x)$ は、コンポーネント i の地震動 x の条件付復旧期間 t の非超過確率関数、 n は直列システムに含まれるコンポーネントの総数である。また、並列システムの場合は、式(2)ようになる。

$$F_T(t|x) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{T_i}(t|x)) \quad (2)$$

さらに、直列と並列システムが混在するシステムにも拡張でき、図-2に示す混在システムの復旧期間の非超過確率関数は式(3)ようになる。

$$F_T(t|x) = \{1 - (1 - F_{T_1}(t|x)F_{T_2}(t|x)) \dots (1 - F_{T_3}(t|x)F_{T_4}(t|x))\} F_{T_5}(t|x)F_{T_6}(t|x) \quad (3)$$

なお、コンポーネントの非超過確率関数 $F_{T_i}(t|x)$ の評価方法については、2.(2)にて詳述する。

(2) 復旧期間確率関数評価

各コンポーネントの復旧期間の非超過確率関数 $F_{T_i}(t)$ は、図-3に示すコンポーネントの損傷発生確率(以下、損傷確率) $P_i(x)$ と復旧期間によって記述ができる。同図は、‘損傷が発生する’、‘損傷が発生しない’の2分岐の例を示しており、損傷発生時のコンポーネントの復旧期間を t_{max} (図-3では30日) とすると、復旧期間の非超過確率関数は下式で表すことができる。

$$F_{T_i}(t|x) = 1.0 - P_i(x), 0 \leq t < t_{max} \\ = 1.0, t = t_{max} \quad (4)$$

上式の損傷確率 $P_i(x)$ を、構造信頼性に基づく Fragility Curve により以下のように求める。

$$P_i(x) = F_{R_i}(\ln x; r_{mi}, \zeta_{R_i}) \quad (5)$$

$F_{R_i}()$ はコンポーネント i の加速度、速度などの地震動指

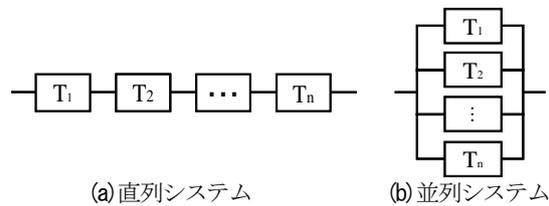


図-1 基本システム

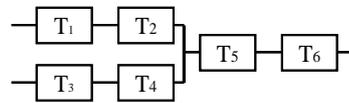


図-2 直列並列混在システム

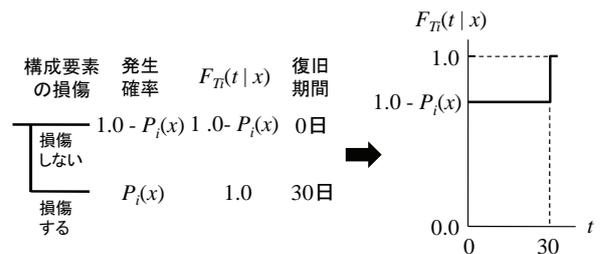


図-3 コンポーネント i の損傷確率と復旧期間の非超過確率関数

標に換算した耐震耐力を対数正規確率関数で近似したもので、 r_{mi} , ζ_{Ri} は中央値, 対数標準偏差である. Fragility Curveとは, 地震動の大きさ x を条件とした, 損傷可能性を示す曲線であり, 損傷形態(例えば, 軽微以上, 大破以上, etc.)ごとに示される.

なお, 図-3は簡単のため, 2分岐となっているが, 必要に応じて, 無被害, 中破, 倒壊などの3分岐以上にすることも可能である.

(3) コンポーネント間の地震損傷相関の評価^{8),9),10)}

近年, 地震動強さの空間的な相関の研究^{例えば, 12)}が進められており, その相関の程度が物的損失額や復旧期間の特性値に影響することが報告されている. 損傷相関を考慮した主なものとしては, 広域に散在する建築物の物的損失^{9), 13), 14), 15)}や高速道路システム^{8),10)}の復旧期間を扱った研究がある. 文献8), 9), 10)によると, 地震時におけるコンポーネント間の損傷相関は, 以下に示すように導かれる.

まず, システムを構成する2つのコンポーネントの地震損傷を例にとり, それぞれの耐震耐力の確率変数を R_1, R_2 , それぞれに作用する地震動の確率変数を Q_1, Q_2 と置き, 耐力, 地震動の大きさは, ともに対数正規分布に近似できるものとする. 損傷を定義する性能関数 G_i は以下のように表される.

$$G_i = R_i / Q_i, \quad i=1,2 \quad (6)$$

ここに, i はコンポーネントである. さらに, Q_1, Q_2 は相関があるものとし, R_1 と R_2 , R_i と Q_i などの関係は独立とする. 式(6)の性能関数の両辺について対数を取ると下式となる.

$$\ln G_i = \ln R_i - \ln Q_i, \quad i=1,2 \quad (7)$$

$\ln R_i$ および $\ln Q_i$ は正規分布であり, 式(7)より, $\ln G_i$ も正規分布となる. また, $\ln G_i$ の共分散は, 式(7)の関係および, R_1 と R_2 , R_i と Q_i などの関係を独立としていることから, 最終的に $\ln Q_i$ の共分散と同一となる.

$$\text{cov}(\ln G_1, \ln G_2) = \text{cov}(\ln Q_1, \ln Q_2) \quad (8)$$

式(8)を用いると, コンポーネント 1, 2間の損傷相関係数 ρ_{G12} は, 以下のように求められる.

$$\rho_{G12} = \frac{\zeta_{Q1} \cdot \zeta_{Q2}}{\zeta_{G1} \cdot \zeta_{G2}} \cdot \rho_{Q12} \quad (9)$$

ここに, ζ_{Q1}, ζ_{Q2} はコンポーネントに作用する地震動の対数標準偏差, ρ_{Q12} は地震動の相関係数である. また, 母の ζ_{G1}, ζ_{G2} は複合偏差を示し, 以下にて与えられる.

$$\zeta_{G_i} = \sqrt{\zeta_{R_i}^2 + \zeta_{Q_i}^2}, \quad i=1,2 \quad (10)$$

ここに, ζ_{R1}, ζ_{R2} はコンポーネントの耐力の対数標準偏差

である. 式(9)は, 地震動の対数標準偏差, ならびに複合偏差とコンポーネントの損傷事象の相関係数の関係を示している. 地震動について完全相関とすると, コンポーネント1,2間の損傷相関係数は, 下式で表される.

$$\rho_{G12} = \frac{\zeta_{Q1} \cdot \zeta_{Q2}}{\zeta_{G1} \cdot \zeta_{G2}} \quad (11)$$

(4) コンポーネント間の地震損傷相関を考慮したシステムの機能停止期間の評価^{8),10)}

(2)で示したコンポーネント i の損傷確率 $P_i(x)$ は, 耐震耐力の不確実性は考慮しているものの, 地震動 x のそれは考慮していない. 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. そこで, 全確率の定理を使い, 地震 S におけるコンポーネントの損傷確率を求めると以下ようになる.

$$P_i(S) = \int_0^{\infty} P_i(x) \cdot dp(x|S) \quad (12)$$

ここに, $P_i(S)$ は作用地震動のばらつきを考慮した地震 S によるコンポーネント i の損傷確率である. $dp(x|S)$ は, 地震 S によりコンポーネントに作用する地震動が x である微小確率を示している. システムの復旧期間の非超過確率関数を地震 S による条件付に変換すると, 以下のように求められる.

$$F_T(t|S) = \int_0^{\infty} F_T(t|x) \cdot dp(x|S) \quad (13)$$

ここに, $F_T(t|S)$ は, 地震 S によるシステムの復旧期間の非超過確率関数, $F_T(t|x)$ は, コンポーネント間の損傷の独立を前提としたシステムの復旧期間の非超過確率関数である. さらに, $dp(x|S)$ を作用地震動の大きさの密度関数にすると, $F_T(t|S)$ は, 以下のように表される.

$$F_T(t|S) = \int_0^{\infty} F_T(t|x) \cdot f_{Q_i}(\ln x; r_{mi}, \zeta_{Q_i} | S) dx \quad (14)$$

ここに, $f_{Q_i}(\cdot)$ はコンポーネント i に作用する地震動の対数正規密度関数で, r_{mi}, ζ_{Q_i} は耐震耐力中央値, 対数標準偏差である.

ここで, 式(11)の各コンポーネントの複合偏差 ζ_G を一定とし, 地震動の対数標準偏差 ζ_{Q1}, ζ_{Q2} の値を調整して, 式(14)に適用することで, コンポーネント間の損傷相関を考慮したシステムの復旧期間の非超過確率関数 $F_T(t|S)$ を求めることができる. 複合偏差 ζ_G は, 高架橋梁^{例えば, 16)}, トンネル^{例えば, 17)}, 自然斜面^{例えば, 18)}など各構築物毎に統計的に評価されている. なお, 耐力の対数標準偏差 ζ_{R1}, ζ_{R2} は, 調整した ζ_{Q1}, ζ_{Q2} をそれぞれ式(10)に代入して求める.

なお, 地震 S による地震動の大きさ x を記述する場合, 最大加速度, 最大速度, またはその時刻歴, 入力エネルギーなどが挙げられるが, ここでは基盤面最大加速度(PBA/Peak Bedrock Acceleration)を用いるものとする.

(5) 復旧曲線の基本理論^{7,11)}

復旧曲線は、本来の機能が低下あるいは停止し、その後、機能が完全に回復するまでの経過的なプロセスを描いた曲線と定義できる。また、ターゲット地震が発生した場合の復旧過程を見るものであり、減災対策における経営判断や事業継続計画 (BCP) に有益である。復旧曲線の横軸は復旧に要する日数、縦軸は本来の機能を 1.0 とした機能復旧率 (回復率) である。一方、地震被害の発生や復旧期間は不確実性を伴い、確定的に設定することはできず、合理的な確率論的アプローチを採る必要がある。この場合、様々な復旧過程が予想でき、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が、実現するであろう復旧曲線を特定することはできない。

そこで、平均的な曲線を求め、これを復旧曲線として代表することにする。図-4 の T 曲線と D 曲線がこれに相当し、それぞれは時間と機能復旧率の 2 つの測度軸を持つ。

D 曲線：機能復旧率を確率変数に縦軸に分布する曲線群の平均値を復旧期間に対し結んだ曲線

T 曲線：復旧期間を確率変数に横軸に分布する曲線群の平均値を機能復旧率に対し結んだ曲線

D 曲線および T 曲線は、機能復旧率 r を条件とした復旧期間 t の超過確率関数 $G_T(t|r)$ を用いて、それぞれ下式で示されている。

$$D \text{ 曲線: } R_D(t) = 1 - \int_0^1 G_T(t|r) dr \quad (15)$$

$$T \text{ 曲線: } R_T(r) = \int_0^\infty G_T(t|r) dt \quad (16)$$

一方、システムを構成するコンポーネントの数が多く、多機能となると、 $G_T(t|r)$ を求めることは困難となる。そこで、複数機能を有するシステムを想起し、これを機能毎に L 個の直列システムに分解して、各直列システムの機能を全体機能を 1.0 とした機能比率 $r_k (k=1 \sim L)$ で表す (ただし、 r_k は交通量、売上額などで、入力条件として与えられる)。そして、式(1)を用い、各直列システムの復旧期間の非超過確率関数 $F_T(t|r_k)$ を求め、これを超過確率 $G_T(t|r_k)$ に変換する。これを式(15)に適用すると、D 曲線は下式で求められる。

$$R_D(t) = 1 - \sum_{all k} r_k \cdot G_T(t|r_k) \quad (17)$$

一方、超過確率 $G_T(t|r_k)$ を式(24)に適用すると、以下となる。

$$R_T(r_k) = \int_0^\infty G_T(t|r_k) dt \quad (18)$$

上式は、分解した各直列システムの復旧期間の期待値をそれぞれ表しており、T 曲線を直接求めることはできない。そこで、機能毎に分解された L 個の直列システムの復旧期間の期待値を短い順に、機能復旧率に対し結んだ

曲線を TL 曲線と呼び、下式で表す。また、図-5 に TL 曲線の一例を示す。

$$R_{TL}(r_k) = \int_0^\infty G_T(t|r_k) dt, k=1 \sim L \quad (19)$$

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機能比率を乗じることにより求められる。

$$RTE = \sum_{k=1}^L R(r_k) \cdot r_k \quad (20)$$

図-5 は、対象とするシステムが、機能 1 (機能比率 0.5) と機能 2 (機能比率 0.5) の機能を保有している場合の TL 曲線の例である。それぞれの機能の復旧期間の期待値は、D1, D2 (D1 < D2) である。図より、発災 (地震発生) 後 D1 で機能 1 が復旧し、システム全体としては 0.5 の機能復旧率となる。それから、D2 - D1 後に機能 2 が復旧し、システムとして完全復旧 (機能復旧率 1.0) となる。RTE は、図中に示した通り、D1, D2 にそれぞれ機能比率 0.5 を乗じ、和算することで求められる。つまり、RTE は、TL 曲線で囲まれた左側の面積 (図-5 の灰色部分) であることが分かる。

(6) ボトルネック指標 (B.I.)¹⁹⁾

システムのボトルネック (弱点) となるコンポーネントを特定することにより、補強やバックアップなどの対

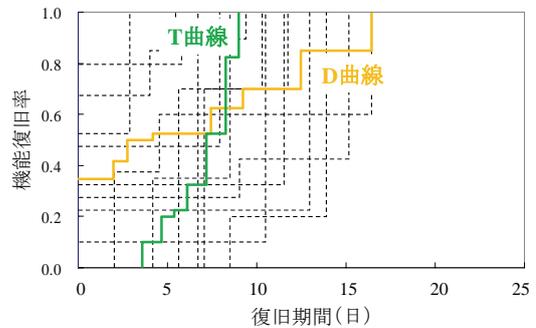


図-4 復旧曲線の例

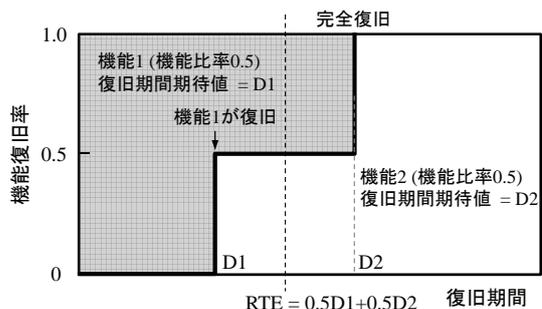


図-5 TL 曲線の例

策の優先順位を知ることができ、ボトルネックを選定するための指標が提案されている²⁰⁾。

ここでは、ボトルネック指標は、機能への重要度(重要性)、脆弱性(耐震性)、復旧の難易度(復旧性)を採り入れた指標として提案し、式(21)のように表す。

$$B_i = e_i \cdot E(T_i), \quad i = 1 \sim n \quad (21)$$

ここに、 i はコンポーネント、 n はその総数、 e_i は全体機能への影響度(機能重要度)であり、解析者の判断により入力される(重要度が均等の場合、全てのコンポーネントに対して1.0としてもよい)。また、 $E(T_i)$ はシナリオ地震発生を条件とした各コンポーネントの復旧期間期待値を表し、以下のようになる。

$$E(T_i) = \sum_{all j} p_{fij} \cdot t_{ij} \quad (22)$$

ここに、 j は損傷形態、 p_{fij} と t_{ij} はコンポーネント 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} はコンポーネントの脆弱性を表し、 t_{ij} は復旧難易度を表す。

式(22)より、B.I.は時間の単位を持つ。以上までの基本理論に、説明を割愛したが、地震危険度解析(Phase1)加えることにより、一連の地震時システム解析の実行が可能となる。具体的手順を図-6、および図-15にて後述する。

3. 基本モデルのシステムリスク評価

3個の基本的なモデル(完全直列モデル、直列・並列混在モデル、ラダーモデル)を作成し、各モデルのユニットに施設(コンポーネント)の脆弱性を付与して、地震リスク評価を実施した²⁰⁾。ここでは、図-6のようなPhase0~Phase4にて構成される評価フローに従い、地震時システムリスク評価を実施する。なお、ここでのユニットとは、コンポーネントの集合体を意味し、ユニット

に含まれる各コンポーネントは機能上、直列に連結されているものとして扱う。

(1) 評価に用いる基本モデル(Phase0/Phase2)

本評価においては、道路/鉄道施設に共通する、3つの基本システムを設定した(図-7)。すなわち、

- ・モデル1: 完全直列モデル
- ・モデル2: 直列・並列混在モデル
- ・モデル3: 並列部分に迂回経路(ブリッジ機能)を持つラダーモデル

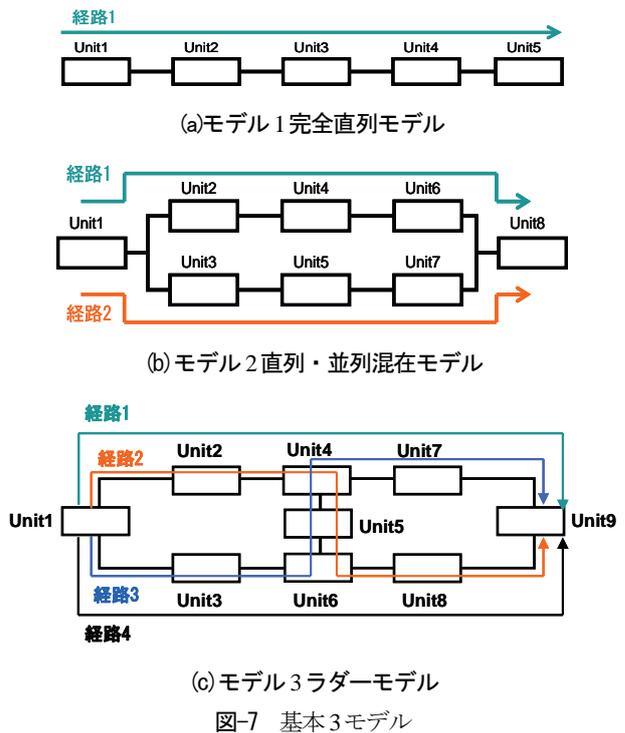


図-7 基本3モデル

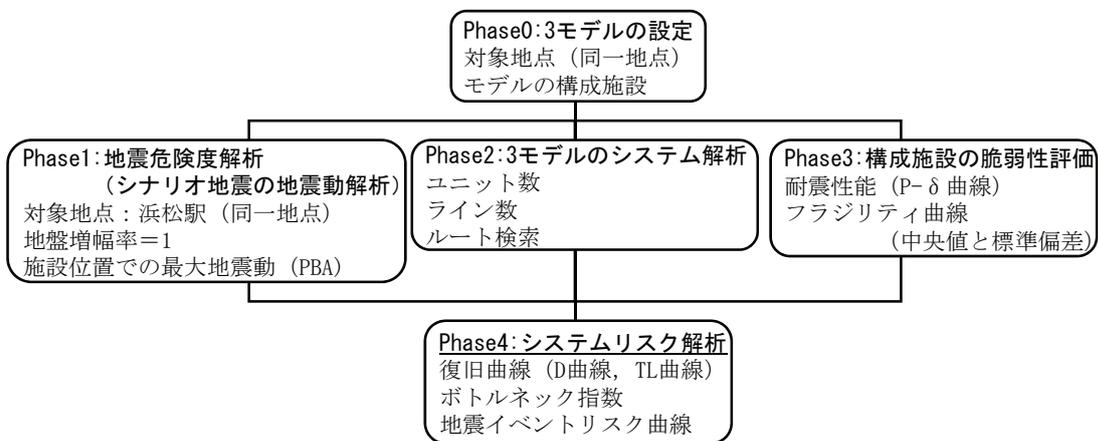


図-6 基本モデルの解析フロー

モデル1は、ただ1か所のユニットの損傷(機能停止)により、システム全体が機能停止する直列モデルであり、これに対し、モデル2とモデル3は複数の経路を保持し、冗長性を有する。このことは、たとえばモデル2のUnit2が損傷したとしても経路2を用いることができ、システム機能が完全に停止するリスクを回避できるということである。

以上の特性は、定性的には容易に判断されるが、Phase2におけるシステム解析により、合理的/定量的に算定/考察することができる。

(2) 地震危険度解析(Phase1)

評価対象地点は静岡県浜松駅とし、各ユニットは同一敷地として緯度経度を同一に設定し、地震危険度解析を行った。これは、マルチイベントモデル(Multi Event Model: 複数震源モデル)に基づくものである²¹⁾。マルチイベントモデルによる方法とは、個々の地震を、どこで、どの程度の可能性で発生するかを特定して地震危険度を評価する方法であり、想定される地震のことをシナリオ地震と呼ぶ。

この結果、シナリオ地震による当該敷地のPBAと地震の年間発生確率がセットで得られ、このうちPBA上位50個を抽出し、後述する表-2に示した(因みに、最大値は487.1Galであった)。なお、PBAは安中の距離減衰式²²⁾から求めた。

(3) ユニットの耐震脆弱性と復旧期間(Phase3)

システムを構成するユニットは、高架橋梁と架線設備の2つのコンポーネントを有するものとし、これらコンポーネントの損傷形態を次のように設定した。

- ・高架橋梁構造被害: 無被害, 軽微, 大破, 倒壊の4形態
- ・架線設備構造被害: 無被害, 軽微, 倒壊の3形態

これらの2つの損傷要因をイベントツリーを用い10損傷形態に集約し(2要因10形態モデルと呼ぶ)、これを図-8に示す。このイベントツリーを全ユニットに設定し、システムリスクを評価する。なお、コンポーネントの各損傷形態に応じた耐震耐力中央値(PBA換

算表示)と復旧期間を表-1に示す。表中の被害形態毎の耐力中央値と対応する復旧期間は、これまでの経験から得られた概略値を例示したものである。

このようにユニット毎に設定したイベントツリーに損傷形態の発生確率を取り込み、システムの復旧期間を算出する。イベントツリーにおける損傷形態の発生確率はFragility Curveを用いて評価する。各コンポーネントに関するFragility Curveは、対数正規分布にて近似できるものとし、本評価では、全コンポーネントについて、耐力の対数標準偏差は0.33に、地震動の対数標準偏差は0.50に設定した。この結果、これらを合わせた複合偏差は、式(10)より0.60、損傷相関係数は、式(11)より0.69となる。



図-8 ユニットのイベントツリー(2要因10形態モデル)

表-1 コンポーネントの損傷形態に応じた耐力と復旧期間

		高架橋梁構造被害			
		無被害 -	軽微 320gal	大破 690gal	倒壊 1060gal
構造設備被害	無被害 -	0日	1日	7日	30日
	軽微 570gal	1日	1日	7日	
	倒壊 850gal	3日	3日	7日	

表-2 地震リスク評価結果(上位50地震)

No.	震源名	Magnitude	年間発生確率 ×10 ⁻²	累積確率 ×10 ⁻²	PBA (Gal)	復旧期間期待値(日)		
						モデル1	モデル2	モデル3
1	南海トラフ全域 (M8.6)	M8.6	0.137	0.137	487.1	9.6	8.2	8.1
2	東海・東南海連動 (M8.4)	M8.4	0.487	0.623	457.3	8.6	7.2	7.1
3	南海トラフ全域 (M8.3)	M8.3	0.137	0.759	442.0	8.1	6.8	6.7
4	東海・東南海連動 (M8.2)	M8.2	0.487	1.243	426.5	7.5	6.3	6.2
5	南海トラフ全域 (M8.1)	M8.1	0.137	1.378	410.9	7.0	5.8	5.8
49	(137.90, 34.60)	M6.0	0.021	7.609	192.8	0.9	0.6	0.6
50	(137.50, 34.90)	M6.5	0.010	7.618	185.2	0.8	0.6	0.5

(4) システムリスク解析(Phase4)

以上までの解析条件に基づき諸データを取込み、Phase4を実施した。

a)地震イベントリスク曲線(Phase4)

以上までの準備のもと、地震時システムリスク解析を実行し、表-2に復旧期間に関する評価結果(震源情報、PBA, RTE)を、図-9、図-10にそれぞれ、マルチイベントモデルによる地震ハザード曲線と地震イベントリスク曲線を示す。

表-2は、影響を与えるシナリオ地震(PBAベースにて上位50個をリストアップ)に対して、RTE(単位:日)を、3モデル毎に一覧化したものである。RTEは、地震動情報(地震動(PBA)と年間発生確率)、およびシステム脆弱性(ユニット/コンポーネントの脆弱性とシステム冗長性)の両者が反映されたものと理解できる。

図-10の地震イベントリスク曲線は、上記表-2の累積発生確率(超過確率)とRTEとの関係をプロットしたものである。ここで、年間発生確率 P_{Ei} から累積発生確率 Q_{Ei} への変換は、次式により算定される。

$$P_{Ei} = Q_{Ei} \tag{23}$$

$$Q_{Ei} = 1 - (1 - P_{Ei})(1 - Q_{Ei-1}) \tag{24}$$

ここで、 Q_{Ei} は*i*番目までのシナリオ地震の累積発生確率、 P_{Ei} は*i*番目の年間発生確率、*i*はPBAの大きいものから附番している。

図中のプロット(◇, □, △)は、それぞれ各シナリオ地震によるRTEを示している。同図より、年間累積確率1/475(再現期間475年相当=50年間で10%の超過確率、地震の発生はポアソン過程)の復旧期間はモデル1では9.5日、モデル2では8.0日、モデル3では7.9日となっていることが分かる。

当然のことながら、モデル1のRTEが最も大きく、モデル2とモデル3のRTEは、これより小さく、ほぼ同等であった(モデル2が若干大きい)。完全直列モデル(モデル1)に対して、並列経路の付加、または並列システムに対する迂回経路による復旧期間の改善が定量的に示されたと考えられる。また、ラダーモデルにおける迂回経路の効用は、この場合、僅かであることが示唆された。

このように、地震イベントリスク曲線から着目する特定のシナリオ地震(ターゲット地震と呼ぶ)に対するRTEを知ることができることも、地震イベントリスク曲線の重要な利点である。

b)復旧曲線

選定したターゲット地震(南海トラフ全域(M8.6)を震源とした地震時)に対する復旧曲線を図-11に示す。図-11(a)はTL曲線、図-11(b)はD曲線である。なお、

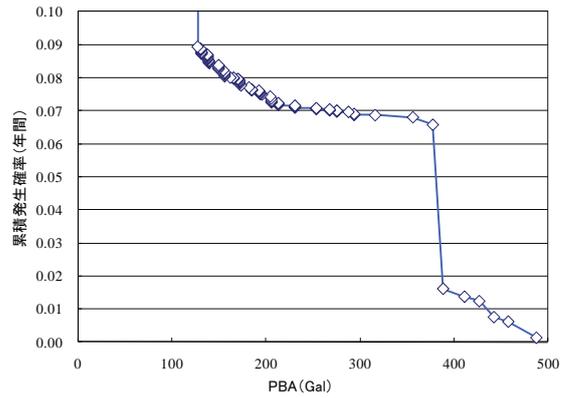


図-9 地震ハザード曲線(静岡県浜松市:モデル2)

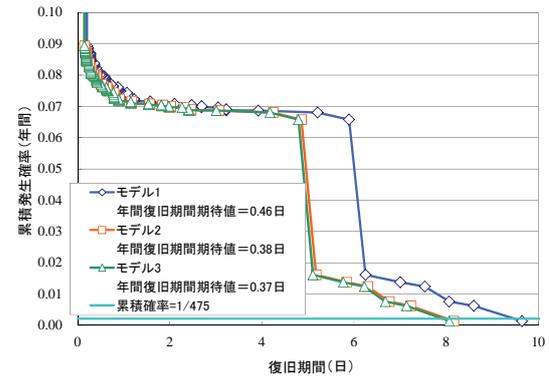
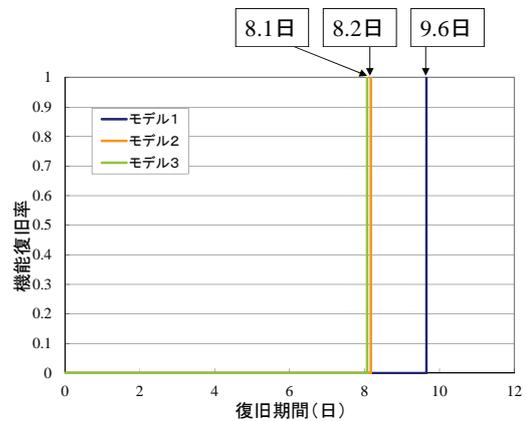
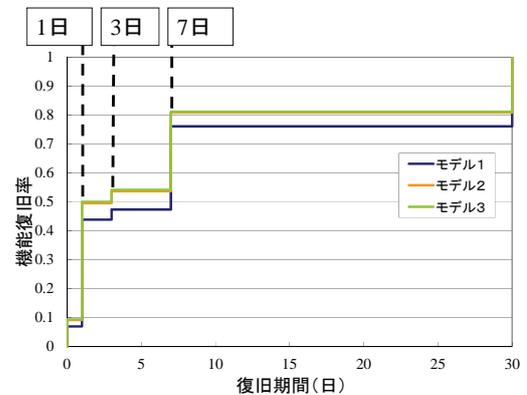


図-10 地震イベントリスク曲線(3モデルの比較)



(a)復旧曲線(TL曲線)



(b)復旧曲線(D曲線)

図-11 復旧曲線:南海トラフ全域(M8.6)

本基本モデルは‘機能する’, ‘機能しない’の2つの状態のみ評価対象としていることから, TL 曲線の機能復旧率は, 0.0 (機能しない) から 1.0 (機能する) に一直線に立ち上がっている。

同図より, 基本3モデルの優劣は, 地震イベントリスク曲線と同じ傾向にあるが, D 曲線によりその復旧過程を察知できることが特徴である。また, 復旧曲線で囲まれた左側面積は TL 曲線, D 曲線ともに, 理論上同一の値となり, RTE として求まる。

c) ボトルネック指標

次に, ボトルネック指標を算出し, 図-12 に示した。同図は, 南海トラフ全域 (M8.6) 地震時のユニットのボトルネック指標である。図中のユニット名に対応する Unit を, 以下に示す。

- ・始 点: 各モデルとも Unit1
- ・分岐点: 各モデルとも Unit2
- ・中間点: モデル1⇒Unit3,
 モデル2,モデル3⇒Unit4
- ・ラダー部分: モデル1,モデル2⇒保持しない
 モデル3⇒Unit5

通例, 高架橋梁構造被害の方が架線設備構造被害に比べて多くの復旧日数を要し, 各々のボトルネック指標もそのように評価されている (ただし, 先述の定式化にて示したように, 機能重要度と復旧難易度が加味されている)。各モデル毎の特徴は, 以下のように説明することができる。

まず, モデル1の場合, 各々コンポーネント (高架橋, 架線設備) にて, 同一のボトルネック指標となっている。単純直列モデルのため, 各コンポーネントの脆弱性, 復旧難易度ともに同じ値となるためである。モデル2では, 始点が分岐点・中間点に比べてボトルネック指標が大きくなっている。これは, このユニットが損傷すると, システム全体の機能が停止してしまうからである。モデル3では分岐点・ラダー部分のボトルネック指標が比較的小さく, 始点のボトルネック指標が一番大きくなっている。また, 始点に次いで中間地点のボトルネック指標が大きくなっている。これは, 中間点のユニットがシステムの迂回経路の分岐点となっており, ここで定義した分岐点・ラダー部分より多くの経路の通過地点として機能しているからである。

以上の特徴は概ね推察できる範囲であるが, 複雑な実モデルの場合, 本提案手法により, 論理的数値的に考察する必要がある。なお, 本論にて提案するボトルネック指標は, 機能重要度, 脆弱性, 復旧難易度には影響されるが, ターゲット地震の発生頻度には関係しない。すなわち, ‘もし起きたら’ という条件付指標であり, リスク指標ではないが, これだけでも例えば, 既存路線の維持管理, 耐震補強の優劣付けに用いることが期待できる。

(5) パラメトリックスタディ

3つの基本モデルについて, Fragility Curve の耐震耐力に対する対数標準偏差 ζ_R , および地震動の対数標準偏差 ζ_Q を変化させたパラメトリックスタディを追加した。

a) 検討ケース

複合偏差 ζ_G を一定のもとで ($\zeta_G=0.6$), 耐力の対数標準偏差 ζ_R と地震動の対数標準偏差 ζ_Q を変化させ, 5 ケースのパラメータを設定する (このうち, No.2 が前節までの解析にて用いた値である)。これにより, 損傷事象の相関係数 ρ_G と RTE の関係を調べるものである。

なお, 損傷事象の相関係数 ρ_G は, ‘地震動完全相関/構

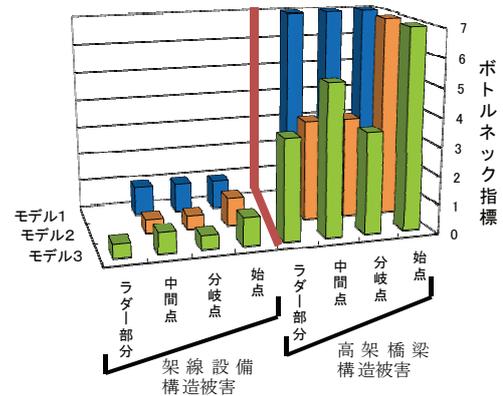


図-12 ボトルネック指標の図示

表-3 パラメーター一覧

	耐力の標準偏差 ζ_R	地震動の標準偏差 ζ_Q	複合偏差 ζ_G	相関係数 ρ_G
No.1	0.00	0.60	0.60	1.00
No.2	0.33	0.50		0.69
No.3	0.45	0.40		0.44
No.4	0.52	0.30		0.25
No.5	0.60	0.00		0.00

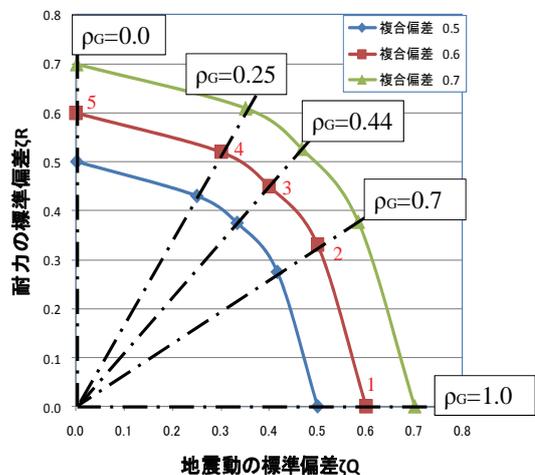


図-13 対数標準偏差 ζ_R, ζ_Q と損傷事象の相関係数 ρ_G との関係

造施設耐震耐力無相関‘の前提のもと得られた式(11)より、 $\rho_G=(\zeta_Q/\zeta_G)^2$ に従って算出したものである。表-3に各ケース(No.1~No.5)のパラメータを、図-13に耐力の対数標準偏差 ζ_R 、地震動の対数標準偏差 ζ_Q とコンポーネント間の損傷事象の相関係数 ρ_G との関係を示す。

b) シミュレーション結果

図-14(a)は5つの選定した主要シナリオ地震(ターゲット地震)時に対する、モデル1のRTEと相関係数 ρ_G との関係を示したものである。相関係数 ρ_G の増加とともにRTEが小さくなり、かつ各シナリオ地震の乖離は減少する。特に、 $\rho_G=1.0$ の時、5曲線はほぼ合致する(5つのターゲット地震による僅差は、そのPBAの大小に起因する)。

一方、図-14(b)は、南海トラフ全域(M8.6)地震時における、3つモデルごとのRTEと相関係数の関係を示したものである。相関係数が $\rho_G=1.0$ のとき、RTEは最小値となり、各モデルは完全に合致し(RTE=4.2日)、以降、相関係数 ρ_G の減少とともにRTEは増加し、3基本モデルの優劣が顕在化することがわかる。

図-14(a), (b)に見られる、コンポーネント間の損傷相関の程度が高くなるにつれ、各モデルの差異が希薄になるという傾向は、損傷相関が高いほどコンポーネント間の損傷同時性が高くなることに起因する。例えば、システムの脆弱性は、独立を仮定した場合、全コンポーネントのそれぞれの脆弱性の影響を受けるのに対し、完全相関ではある特定のコンポーネント(直列システムでは最弱、並列システムでは最強)の脆弱性で決まり、その場合、モデルの差異は消失する。

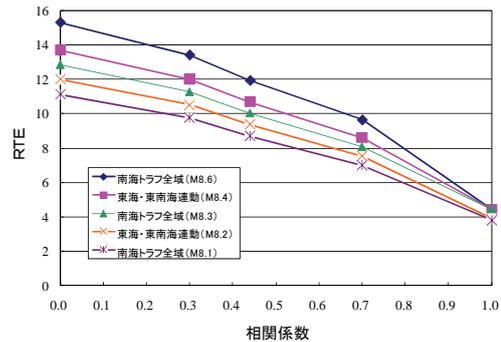
4. 都市内鉄道路線への適用

今回は、都市内鉄道路線の特徴を反映したモデル路線を設定して、図-15のような評価フローに従って、地震時システムリスク解析を実施するものである²⁰⁾。

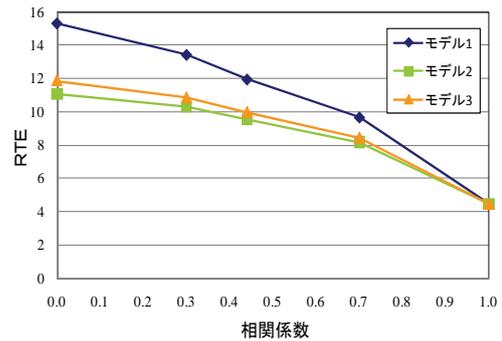
(1) 解析概要

ここでは、次のような方針に基づいてモデル路線(図-16, 図-17)を設定した。

- ・ 郊外ターミナル駅と都心環状線(JR 山手線)を繋ぐ放射状都市路線を想定する。ここでは、東京西方/ 神奈川地区の電鉄路線を参考にして、10km離れた2地点を繋ぐ簡略化した都市内鉄道路線を設定する(図-16)。



(a) シナリオ地震時の相関係数と RTE の関係 (モデル1)



(b) モデルごとの相関係数と RTE の関係 (南海トラフ全域地震時 (M8.6))

図-14 相関係数と RTE の関係

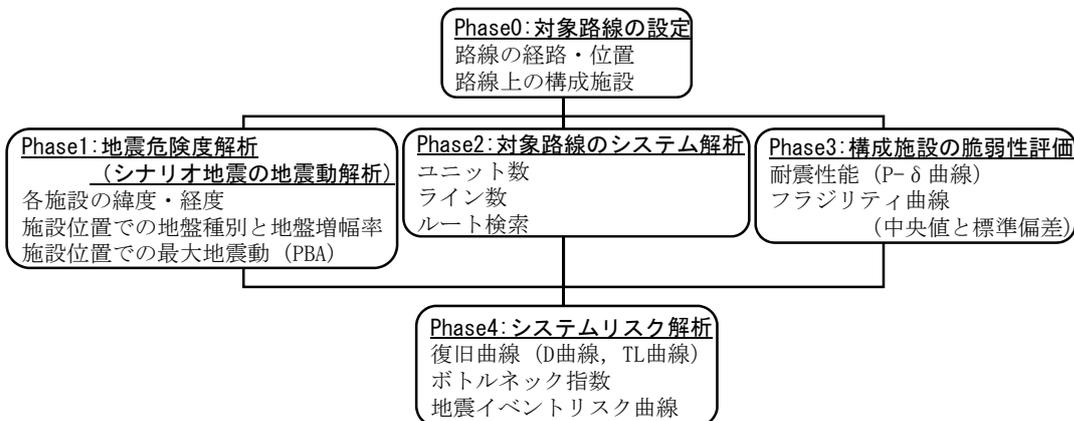


図-15 リスク評価フロー

・A 駅を起点/origin として、中継駅 D 駅から 2 路線に分岐し、J 駅および U 駅の 2 つが終点/destination となる。終点の 2 駅は同一地点に位置し、ともに都心環状線に乗り入れるが、機能と被災可能性は別個の施設とする。これにより、総延長 22km の 2 方向路線モデルとなり、図-17 のシステム図に示した。なお、2 方向の路線の運行機能は、全体機能に対し、それぞれ 0.5 の機能比率とする。

・既往都市内鉄道路線の現地踏査と写真撮影を行い、路線を構成する主要構造施設として、駅舎、高架橋、トンネル、橋梁、平地部（盛土切土）を採り上げることとした（写真-1 参照）。これら主要施設を総延長 22km の路線内に設置する。なお、写真は構造施設の一例を示したものであり、設定した都市内鉄道路線とは特に関係はない。

・さらに、これら主要構造施設の脆弱性評価を行い、前章と同様に、各ユニット/コンポーネントに対して対数正規確率モデルにて Fragility Curve（耐震耐力中央値と対数標準偏差）を決定する。

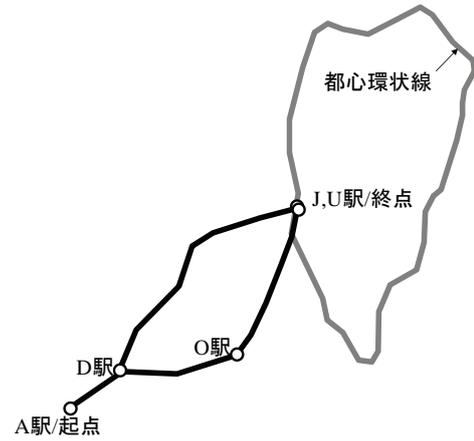


図-16 対象路線（イメージ図）

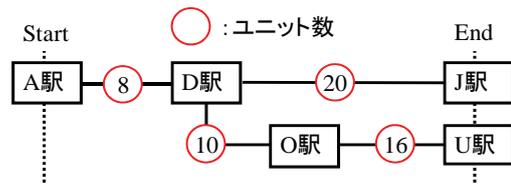


図-17 モデルの簡略図

(2) 対象路線内施設のユニット化

対象路線中の施設群は、駅構築物、高架橋、トンネル、土構築物、および、これらに付随する電車線、電車線柱などの屋外設備で構成される。各施設・設備について、それらが持つ機能を考慮してユニットに分割し、それぞれのユニットに含まれる施設・設備をコンポーネントとして扱う。このコンポーネントは、リスク解析における最小の評価単位である。表-4 に、延長 22km の対象路線に敷設した分割ユニットと付随するコンポーネントを一覧化した。分割したユニットの総数は 59 で、起点側 A 駅から、(1),(2)のように付番した。

・損失情報：各ユニットのコンポーネントごとの再構築に要する期間（復旧期間）をコンポーネントのタイプ別に設定し、表-5 に示した。同期間については、文献 23)などを参考としたが、工学的判断による想定を含むものである。また、被災直後からの復旧作業は、複数の被害箇所を同時かつ最短で行われる「同時復旧の原則」に従うものとする。

(3) イベントツリーとフラジリティ情報

a) イベントツリー

以上のように、基本ユニットとして、高架駅、地上駅、地下駅、河川橋梁、切土区間、盛土区間、高架区間、トンネル区間、平地区間の合計 9 様式を取扱うこととなり、これらのイベントツリーを作成した（一例として、高架区間のイベントツリーを図-18 に示した）。ここでは、各ユニットのイベントツリーの損傷要因は、地震動による建屋躯体・土木構築物躯体・設備躯体、擁壁や電車線



(a) 高架橋



(b) 橋梁



(c) トンネル

写真-1 主要構造物の例示

（設定した都市内鉄道路線とは特に関係はない）

などの構造被害, 盛土の崩壊被害としている. なお, イベントツリーの各損傷形態に応じた復旧期間は, コンポーネントの損傷程度を勘案し, 表-5 に示す再構築に要する期間をベースとして設定した. また, ユニットに含まれるコンポーネント群は, 直列に連なっているものと扱い, コンポーネントが同時損傷した場合, ユニットの復旧期間は, 損傷したコンポーネントの復旧期間の最大値をとるものとする.

b) ユニットの耐震脆弱性

次に, コンポーネントの Fragility Curve を設定する.

Fragility Curve は, コンポーネントの振動特性や地震動, 耐震性能などを考慮して評価するが, 本論においては文

献 24) に示すような建築設備の設計指針を踏まえて簡易的に評価している. また, 地盤条件は, 検討対象とせず, 地盤増幅率は全ての地点において 1.0 とした (すなわち, 地表面地震動と基盤面地震動を同一とした).

以上のような考察のもと, コンポーネントの損傷要因に対応した耐震耐力 (中央値) を設定し, 表-6 に一覧化した. また, 図-19 に一例として, 高架区間の連続高架橋の構造被害の Fragility Curve を示す. ここでは, 耐力の対数標準偏差は $\zeta_R=0.33$, 地震動の対数標準偏差として $\zeta_Q=0.50$ に設定する. これらを合わせた複合偏差は式(10)より $\zeta_G=0.60$ となり, 損傷事象の相関係数は式(11)より $\rho_G=0.69$ となる.

表-4 対象路線のユニットとコンポーネント

ユニット	コンポーネント
(1) A駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(2) 高架区間1	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(3) 高架区間2	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(4) B駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(5) 高架区間3	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(6) 高架区間4	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(7) C駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(8) 高架区間5	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(9) 橋梁	鉄骨橋梁, 電車線・付帯設備
(10) D駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(11) 高架区間6	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(12) 盛土区間	盛土, 電車線・付帯設備
(13) 切土区間1	擁壁, 電車線・付帯設備
(14) トンネル区間1	トンネル, 電車線・付帯設備
(15) トンネル区間2	トンネル, 電車線・付帯設備
(16) E駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(17) トンネル区間3	トンネル, 電車線・付帯設備
(18) トンネル区間4	トンネル, 電車線・付帯設備
(19) F駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(20) トンネル区間5	トンネル, 電車線・付帯設備
(21) トンネル区間6	トンネル, 電車線・付帯設備
(22) G駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(23) トンネル区間7	トンネル, 電車線・付帯設備
(24) トンネル区間8	トンネル, 電車線・付帯設備
(25) H駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(26) トンネル区間9	トンネル, 電車線・付帯設備
(27) トンネル区間10	トンネル, 電車線・付帯設備
(28) I駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(29) トンネル区間11	トンネル, 電車線・付帯設備
(30) トンネル区間12	トンネル, 電車線・付帯設備
(31) J駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(32) 高架区間7	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(33) 切土区間2	擁壁, 電車線・付帯設備
(34) K駅	駅構造物, ホーム屋根, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(35) 平地区間1	電車線・付帯設備
(36) L駅	駅構造物, ホーム屋根, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(37) 平地区間2	電車線・付帯設備
(38) M駅	駅構造物, ホーム屋根, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(39) 平地区間3	電車線・付帯設備
(40) N駅	駅構造物, ホーム屋根, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(41) 平地区間4	電車線・付帯設備
(42) O駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(43) 高架区間8	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(44) 高架区間9	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(45) P駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(46) 高架区間10	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(47) 高架区間11	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(48) Q駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(49) 高架区間12	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(50) 高架区間13	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(51) R駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(52) 高架区間14	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(53) 高架区間15	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(54) S駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(55) 高架区間16	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(56) T駅	高架駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備
(57) 高架区間17	連続ラーメン高架橋 (RC), 電車線・付帯設備
(58) トンネル区間13	トンネル, 電車線・付帯設備
(59) U駅	地下駅構造物, 駅構内設備, 電車線・付帯設備

表-5 コンポーネントの復旧日数 (再構築に要する期間)

	コンポーネント	復旧日数
高架駅	駅構築物	120
	駅構内設備	3
	電車線・付帯設備	3
地下駅	駅構築物	270
	駅構内設備	3
地上駅	駅構築物, ホーム屋根	90
	電車線・付帯設備	3
高架区間	連続高架橋	90
	電車線・付帯設備	3
橋梁	鉄橋	120
	電車線・付帯設備	3
盛土区間	盛土	15
	電車線・付帯設備	3
切土区間	擁壁	15
	電車線・付帯設備	3
トンネル区間	トンネル	210
	電車線・付帯設備	3
平地区間	電車線・付帯設備	3

連続高架橋 構造被害	電車線・付帯 設備構造被害	停止日数 (日数)
なし	なし	0
	軽微	1
	大破・倒壊	3
軽微	なし	2
	軽微	2
	大破・倒壊	3
大破	なし	20
	軽微	20
	大破・倒壊	20
倒壊		90

図-18 高架区間イベントツリー

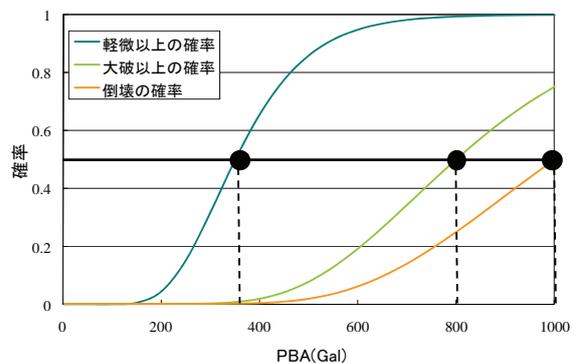


図-19 Fragility Curve : 高架区間の連続高架橋構造被害

このように設定したイベントツリーに各損傷形態の発生確率を取り込み、路線施設の脆弱性評価の入力条件とする。

(4) システムリスク解析(Phase4)

以上までの解析条件に基づき諸データを取込み、再度、マルチイベントモデル(震源情報: J-SHIS(2008年度))により対象路線の地震リスク評価(Phase4)を実施した。

a) 地震イベントリスク曲線

復旧期間に関する対象路線の地震リスク評価(震源情報, RTE)を、表-7に示す。表中の安中の距離減衰式²²⁾によるPBAは起点A駅と終点J駅における値を示したが、シナリオ地震の震源位置によって差異が見られる。

図-20に地震イベントリスク曲線を示す。同図より、年間RTE(軸と地震イベントリスク曲線で囲まれた左側面積)は0.076日、累積確率1/475の復旧期間は15.9日となっていることが分かる。

表-6 設定したフラジリティ特性: 損傷要因に応じた耐力中央値(PBA表示/単位: Gal)

ユニット	損傷要因	耐力の基盤最大応答加速度 PBA		
		軽微	大破	倒壊
高架駅	駅構築物	350	800	1000
	駅構内設備	500		750
	電車線・付帯設備	550		800
地下駅	駅構築物	900	1400	1800
	駅構内設備	500		750
地上駅	駅構築物, ホーム屋根	200	400	500
	電車線・付帯設備	350		500
高架区間	連続高架橋	350	800	1000
	電車線・付帯設備	550		800
橋梁	鉄橋	550	1100	1500
	電車線・付帯設備	550		800
盛土区間	盛土	250		600
	電車線・付帯設備	550		800
切土区間	擁壁	750		1000
	電車線・付帯設備	550		800
トンネル区間	トンネル	900	1400	1800
	電車線・付帯設備	750		1100
平地区間	電車線・付帯設備	350		500

b) 復旧曲線

図-21(a), (b)にTL曲線とD曲線を示す。復旧曲線の横軸には地震発生からの経過時間、縦軸には平常時の機能(本論では、路線の運行機能)を1.0とした場合の機能復旧率をとっている。同図の復旧曲線で囲まれた左側面積はRTEそのものとなり、TL曲線, D曲線ともに同値となるが、読み方が異なる。

図-21(a)のTL曲線では、ある特定の機能復旧率(本例では0.5と1.0)に対する復旧期間の期待値を読み取ることになり、図-21(b)のD曲線では、所定の復旧日数(表-5にある3, 15, 90, 120, 210, 270日など)に対応する機能復旧率の期待値を知ることになる(SRM, BCPなどの目的に応じて使い分けることになる)。

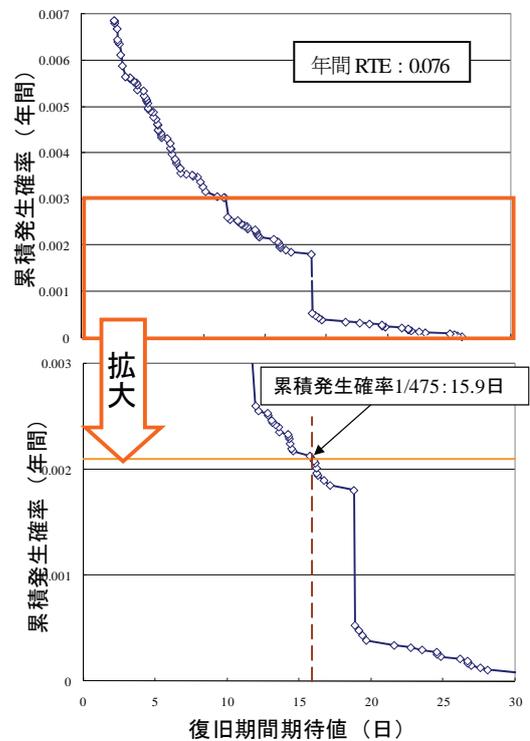


図-20 地震イベントリスク曲線

表-7 対象路線の地震リスク評価(復旧期間上位(50地震))

No.	震源名	Magnitude	PBA(gal)		年間発生確率 ×10 ⁻³	累積確率 ×10 ⁻³	RTE (日)
			A駅	J駅			
1	(139.70, 35.60)	M7.0	355.8	355.8	0.021	0.021	31.1
2	(139.60, 35.60)	M7.0	355.8	338.6	0.021	0.042	30.7
20	(139.60, 35.70)	M6.5	267.8	275.9	0.047	0.432	18.9
21	1703,1923 関東	M8.0	295.5	274.0	1.277	1.709	18.8
22	(139.80, 35.60)	M6.5	275.8	293.7	0.047	1.756	17.2
44	(139.50, 35.80)	M6.5	166.0	186.4	0.021	2.444	12.0
45	立川断層帯	M7.4	260.0	206.3	0.430	2.873	11.8
46	関東平野北西緑断層帯主部	M8.0	240.3	249.4	0.021	2.895	11.7
50	(139.70, 35.70)	M6.0	206.1	231.0	0.106	3.369	9.8

c) ボトルネック指標

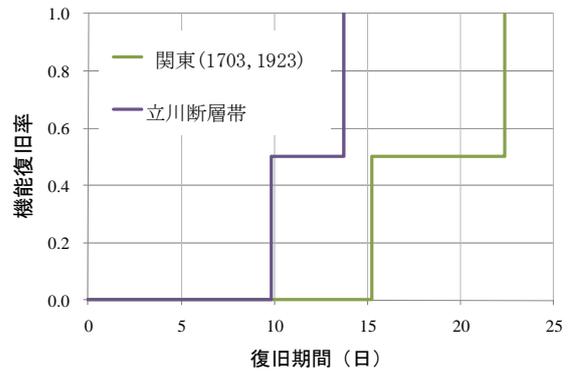
ここで想定路線を区間 A~D に分割し、区間内の各ユニットの全路線への影響度（機能重要度）を図-22 のように設定し、立川断層帯を震源とした地震時のボトルネック指標を算出し、その上位 50 を図-23 に図化した（同図に示したユニット番号は表-4 に対応している）。

同図より、ボトルネック指標は、区間 C の地上駅構築物の値が特に大きくなっている。また、単線経路区間（影響度 1.0）である A 区間の連続高架橋や高架駅構築物の値も比較的大きく、これらの被害が対象路線の運行上、ボトルネック（弱点）となっていることが分かる。区間 B は、トンネル区間および地下駅にて構成され、両者とも高い耐震性を有しているため（表-6）、ボトルネック指標が低い結果となっている。

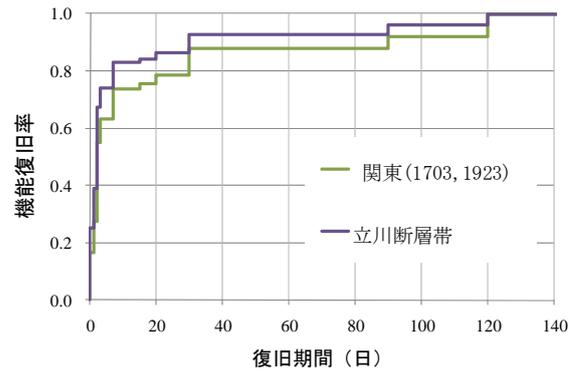
(5) フラジリティ特性に関する感度解析

a) 耐力中央値の影響

本節では、前節での解析モデルを基本ケースとし、コンポーネントの Fragility Curve の耐震耐力中央値を増減させ、その感度解析を試みるものである。まず、図-22 に示す区間 A と区間 B の耐震耐力（中央値）を±100Gal 変化させたときのシステムリスク解析を再度実施し、地震イベントリスク曲線、復旧曲線（TL 曲線）、ボトルネック指標を求める。これら一連の解析により、区間ごとの耐力中央値の変化がシステムリスクに与える影響を解析する。表-8 に 5 ケース（No.0~No.4）の設定条件を示す。ここで、No.0 は耐力中央値を変化させていない基本ケース（表-6）である。



(a) 復旧曲線 (TL 曲線)



(b) 復旧曲線 (D 曲線)

図-21 対象路線の復旧曲線

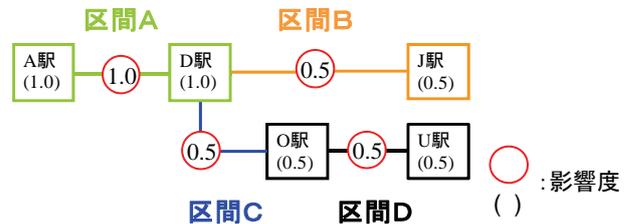


図-22 各ユニットの全路線への影響度

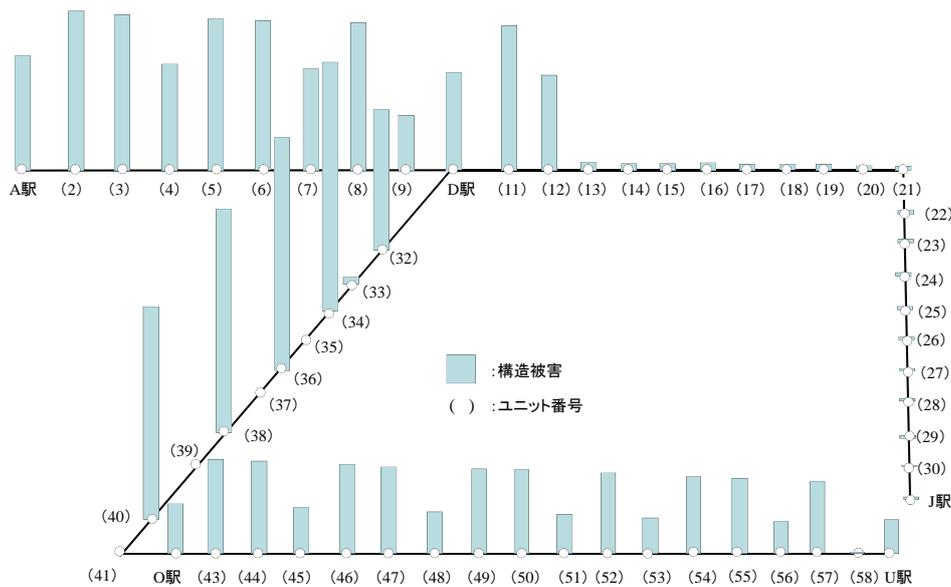


図-23 ボトルネック指標 (立川断層帯による地震時)

このような5ケースの解析結果を、図-24～図-26による図化にて考察した。まず、図-24は、5ケースの解析結果を地震イベントリスク曲線として示したもので、図-25は、シナリオ地震時(関東地震(1703/1923:M8クラス))に対する復旧曲線(TL曲線)を示したものである。図-26は、3シナリオ地震時における、基本ケースを基準に耐力中央値を100Gal増加させたケース(図(a):No.0, No.1, No.3)と100Gal減少させたケース(図(b):No.0, No.2, No.4)ごとにRTEを比較した図を示す。

3例とも、当然のことながら、基本ケース(No.0)を基準として、コンポーネントの耐力(中央値)が増大すると(高耐震化すると)復旧期間は減少し、耐力(中央値)が減少すると(例えば、経年劣化すると)復旧期間は増大することがわかる(ただし、その影響度/様相は単純ではなく、仔細に考察するにはさらなる解析ケースの追加が必要である)。

表-8 耐力中央値のパラメータ

	No.0	No.1	No.2	No.3	No.4
耐力中央値 の変化量	基本 ケース	+100	-100	+100	-100
適用区間		区間A		区間B	

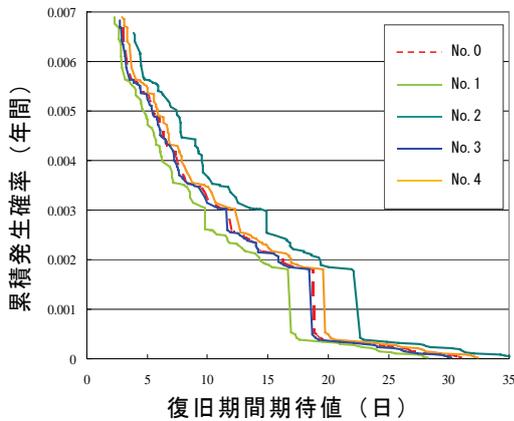


図-24 耐力を増減させた各ケースにおける地震イベントリスク曲線の比較

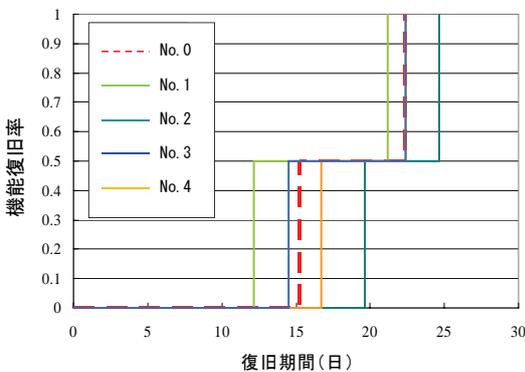
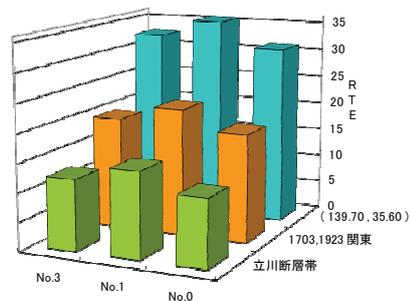


図-25 耐力を増減させた各ケースによる復旧曲線(TL曲線) 関東地震時(1703, 1923:M8クラス)

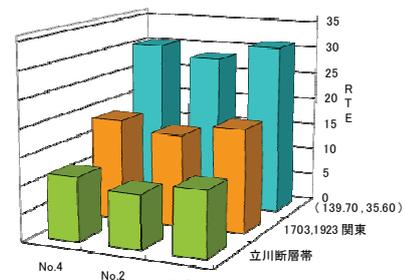
全シナリオ地震を対象とした地震イベントリスク曲線(図-24)では、シナリオ地震による地震動規模(または累積発生確率)によって5ケースの差異が現れる(本例では、累積発生確率0.05~0.2%程度の範囲にて5ケースの乖離は大きい)。これは、対数正規分布にて近似したFragility Curveの感度によるもので、耐震耐力中央値を-100gal, +100galとした場合、その分布曲線は中央値での開きが最も大きく、この近傍での震源規模に対する復旧期待値が最も大きな差異となったものと推察される。

図-25では、単一経路区間Aの耐力を増減させた場合(No.1, No.2)の方が、区間B(No.3, No.4)の場合よりも、その影響が大きい。これは、両区間の影響度(図-22)の違いを反映したものである(区間A:単一路線にて影響度=1.0, 区間B:分岐路線を0.5ずつに振分け)。また、機能復旧率が0.5に達した後は、No.3とNo.4は、基本ケース(No.0)と同等となっており、この段階での区間Bの耐力向上の効果は消失していることが分かる。

図-26では、採用したシナリオ地震によって、RTEの大きさは異なるが、耐力中央値の増減によるRTEの大小関係は、3震源ともほぼ同等であることが認められる。一般的には、シナリオ地震の地震規模、および震源と施設との位置関係に起因するが、本例の場合、最も離れたA駅(始点)とJ駅(終点)のPBAについても、大きな差異はなく(例えば、表-7参照)、RTEに関しては上述の結果となった。



(a) 中央値+100



(b) 中央値-100

図-26 耐力を増減させた各ケースとシナリオ地震時のRTEの関係

b) 相関係数の影響

地震時のコンポーネント間の損傷相関係数 ρ_G に関するパラメトリックスタディを実施し、相関係数の感度を考察する。ここでは、前出表-3 にて設定した対数標準偏差のパラメータを再度採用する (No.1 $\Rightarrow \rho_G=1.0$, No.2 $\Rightarrow \rho_G=0.69$, No.3 $\Rightarrow \rho_G=0.44$, No.4 $\Rightarrow \rho_G=0.25$, No.5 $\Rightarrow \rho_G=0.0$ と設定していることを再記する)。これら 5 ケースのシステムリスク解析結果を整理し、図-27 と図-28 のように図化考察した。

まず、図-27 は、5 ケースの解析結果を地震イベントリスク曲線として図化したもので、図-28 は、3 シナリオ地震時の各ケースでの RTE を示している。

これらより、相関係数 ρ_G が大きくなると RTE が小さくなることが認められ、前章と全く同じ傾向である。また、5 ケースの乖離の様相は、シナリオ地震の規模に依らずほぼ一定であることも特徴的である。

このように、損傷相関係数 ρ_G に対する復旧期間または RTE の感度が、相当大きいことが認められ、地震リスク解析における相関特性の重要性を示唆するものである。ただし、本理論は、'地震動完全相関/構造施設耐震耐力無相関'の前提に立ち、地震動と施設耐震耐力の対数標準偏差によって、損傷事象の相関特性をコントロールするものである。

5. 結論

本論は、都市内輸送路線を対象とした地震時システムリスクを論ずるもので、機能停止期間(復旧期間)を地震リスク値としたことが特徴である。本論文にて得られた知見を以下に示す。

- 1) 本論は、線状施設を対象として地震時損傷相関を考慮した機能停止期間算定法に関する解析手法を構築したものである。さらに、マルチイベントモデルによる地震危険度解析、応答スペクトル表示型距離減衰式、フラジリティ特性を付帯したイベントツリー解析など、地震工学の最新手法を援用していることも本論の特徴と言える。提案手法は、多数の異種施設が、直列/並列にて構成される鉄道路線の機能停止期間を、リスク値として定量的に算定するものである。
- 2) 主要出力となる、地震イベントリスク曲線、ボトルネック指標、復旧曲線に対する算定手法の定式化を提示した。さらに、2例の数値シミュレーションにより、リスク情報としての有用性と説明性を確認することができたと言える。
- 3) 最初のシミュレーションモデルでは、3つの基本モデル(完全直列モデル、直列・並列混在モデル、ラダーモデル)に対して同様のフラジリティ特性

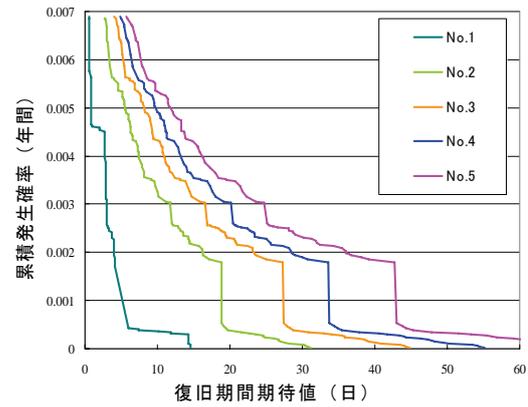


図-27 損傷相関係数を増減させた各ケースにおける地震イベントリスク曲線の比較

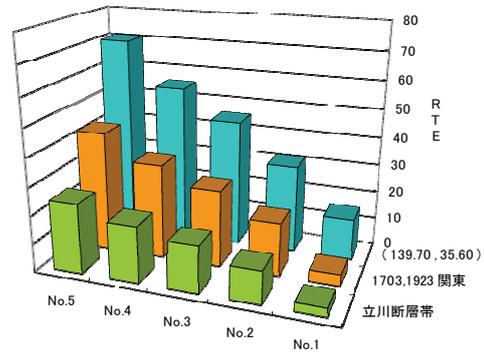


図-28 損傷相関係数を増減させた各ケースとシナリオ地震時の RTE の関係

を付与して、地震時システムリスク評価を実施した。完全直列モデルに比べて、直列・並列混在モデルでは並列路線により、ラダーモデルでは迂回ブリッジにより、停止期間の低減効果が定量的に確認できた。

- 4) 次に、分枝路線を持つ総延長 22km の都市内鉄道路線を首都圏西方に想定して、地震時システムリスク解析を実行した。対象路線を 4 区間に分けて、区間ごとに耐力(中央値)を増減させた全 5 ケースのシステムリスク解析を行った結果、基本ケースを基準として、耐力の増大(高耐震化)により復旧期間は減少し、耐力減少により復旧期間は増大することが確認でき、この影響は、区間 A (単一路線) の場合顕著であった。
- 5) 地震イベントリスク曲線は、路線全体に影響を与えるすべての地震動の規模と発生頻度が考慮されるので、具体的な非超過確率または再現期間などが設定されれば、対応する機能停止期間が期待値として与えられる。
- 6) ボトルネック指標は、地震動規模、システム機能への影響度(機能重要度)、復旧難易度から算出

される。施設個々の相対的な脆弱値として算出され、例えば、構造施設の維持管理および耐震補強戦略に、有用な数値情報となることが期待できる。

- 7) 2つの復旧曲線は、被災後の復旧過程を算定/描画するもので、これらの閉合面積は同一の RTE を表す。TL 曲線では、ある特定機能の機能復旧率に対する復旧期間を与え、D 曲線では所定の復旧日数に対応する機能復旧率の平均値を知ることになる。用途/目的に応じて両曲線を使い分けることより、説明性の高い SRM と BCP が達成が期待できる。
- 8) 本論では、システムを構成する施設間の損傷事象の相関特性を、‘地震動完全相関/構造施設耐震耐力無相関’の仮定のもとに定式化した。2例の数値シミュレーションから、損傷事象の相関係数 ρ_G が、復旧期間に大きな影響を与えることが判明し、これは相関特性の重要性を示唆するものである。また、基本 3 モデルのシミュレーションでは、相関係数 ρ_G の増大とともに RTE は減少し、3 モデルの差異は小さくなる。相関係数が $\rho_G=1.0$ のとき、3 モデルでの RTE は合致し、かつ最小値をとる。

謝辞：本研究は、東京都市大学 重点推進研究の一環として行い、研究の一部は、平成 20-22 年度 科学研究費補助金「鉄道施設の地震リスク解析とリスク転嫁策の研究」(基盤研究(C)：代表者 吉川弘道)の助成にて実施したものです。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋勉, 翠川三郎, 大堀道広：鉄道事業者の地震時対応の調査に基づいた地震発生後の鉄道輸送能力低下に関する検討, 地域安全学会論文集, No.2, pp.1-6, 2006.11.
- 2) 日本建築学会：地震リスク評価とリスクコミュニケーション, 日本建築学会大会, 2009.8.
- 3) 土木学会地震工学委員会 地震リスクマネジメントと事業継続性小委員会：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/委員会報告講演論文, 2009.11.
- 4) 都市防災と環境に関する研究会編 久保慶三郎/篠塚正宣監修：地震と都市ライフライン 4. システム信頼性基礎理論, pp.123-160, 1998.1.
- 5) 熊本博光：モダン信頼性工学—リスクの数値化と概念化—, コロナ社, 2005.
- 6) Shiraki, N., Shinozuka, M., Moore, J. E., II, Chang, S. E., Kameda, H., and Tanaka, S. : System Risk Curves: Probabilistic Performance Scenarios for Highway Networks Subject to Earthquake Damage, *J. of Infrastruct. Syst. Div., ASCE*, Vol.13, No. 1, pp.43-54, 2007.
- 7) 静間俊郎, 中村孝明：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.
- 8) Shizuma, T., Nakamura, T. and Yoshikawa, H.: Evaluation of Outage Time for a System Consisting of Distributed Facilities Considering Seismic Damage Correlation, *Proceedings of ICOSSAR'09 (CD-ROM)*, 2009.
- 9) 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.
- 10) 静間俊郎, 中村孝明, 吉川弘道：地震損傷相関を考慮した施設群の機能停止評価, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.2, pp.299-309, 2009.
- 11) 中村孝明：BCP に資する 2 つの地震時復旧曲線, 土木学会地震工学委員会地震リスクマネジメントと事業継続性小委員会, 専用 Web, 技術フォーラム, 2009.5, http://www.srm-bcp.com/php/cms4/cms.php?Kiji_List&kijiCategoryId=1
- 12) Wang, M. and Takada, T.: Macro-spatial Correlation Model of Seismic Ground Motions, *Proceedings of ICOSSAR'05 (CD-ROM)*, 2005.
- 13) Park, J., and Bazzurro, P. : Modeling spatial correlation of ground motion Intensity Measures for regional seismic hazard and portfolio loss estimation, *Proceedings of ICASP10 (CD-ROM)*, 2007.
- 14) 清水友香子, 石田寛：地盤増幅特性を考慮した建築物ポートフォリオ地震リスク評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 626 号, pp.511-518, 2008.
- 15) 諏訪仁, 萩原由訓：建物の地震リスク評価における損失発生時の相関の影響, 大林組技術研究所報, No.73, pp.1-8, 2009.
- 16) Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J., and Naganuma, T. : Statistical Analysis of Fragility Curves, *J. of Eng. Mech. Div., ASCE*, Vol.126, No.12, pp.1224-1231, 2000.
- 17) 佐々木義裕, 清水保明, 砂坂善雄：地震被害に基づくトンネル・土構造物の損傷度曲線に関する研究, 第 10 回地域安全学会梗概集, pp.17-20, 2000.
- 18) 下野正人, 大矢敏雄, 中村孝明, 大津宏康：自然斜面の地震時崩壊危険度の統計的評価, 日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10-3, pp.3541-3546, 1998.
- 19) 中村孝明, 遠藤透：BCP への貢献を目的とした建物の機能確保に関する研究, 建築学会総合論文集, 第 7 号 都市・建築に関わる安全・安心のフロンティア, pp.87-92, 2009.
- 20) 高澤尚子：都市内鉄道路線の地震時システムリスク解析, 武蔵工業大学大学院都市基盤専攻, 平成 21 年度修士論文, 2010.3.
- 21) 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, 建築学会構造系論文集, 第 541 号, pp.95-104, 2001.
- 22) 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震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, 1997.
- 23) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.67, 地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計—設計と照査の現状と将来展望—, pp.220-252, 2005.
- 24) 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針, 2005.

(2010.5.11 受付)

EVALUATION AND SIMULATION OF SEISMIC OUTAGE RISK OF INTERCITY RAILWAY SYSTEM

Hirromichi YOSHIKAWA, Toshiro SHIZUMA, Naoko TAKAZAWA
and Takaaki NAKAMURA

The present paper deals with evaluation and simulation of seismic system risk of intercity railway system. The analytical framework of the proposed method system combining reliability theory by means of minimum pass set and outage time evaluation considering seismic damage correlation is first formulated.

Two series of numerical simulations; three basic models and simplified intercity railway system including parametric studies with regards to damage correlation, are then carried out. Major outputs of simulations such as seismic event risk curves of outage time of the system, recover process presentation in post-earthquake and bottleneck index of each unites are presented and discussed.