

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560579

研究課題名(和文)線状施設の地震時システムリスク解析とGISパノラマ鳥瞰図法の開発

研究課題名(英文) Seismic risk analysis for civil engineering facilities as multiple linear system and GIS-based visualization of system risk

研究代表者

吉川 弘道 (Yoshikawa, Hiromichi)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：10220609

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：土木系線状施設の地震時システムリスク解析手法を確立するため3つのstepにて実施した。1:施設群の損傷確率理論とシステム信頼性理論に基づき解析手法を構築した。複数震源モデル、距離減衰/地盤増幅、脆弱性評価を支援技術とし、地震イベントリスク曲線、復旧曲線、ボトルネック指数、NELとPMLを算出する。2:事例解析として大学キャンパス内の上水道施設、連結路を含む東名新東名高速道路、東海道新幹線について実施した。3:地震ハザードや地震リスク指標をGIS上にパノラマ表示するものとして都市鉄道沿い主要駅地点の地表面最大加速度、震源の3次元構造の動画、線状施設沿の主要施設のボトルネック指標の表示を試みた。

研究成果の概要(英文)：The present research was carried out by three Steps. In Step1, the procedure for system risk analysis has been formulated by combining damage probability theory and system reliability theory. The proposed system risk analysis provides essential risk outcomes such as seismic event risk curves of system, operation outage time diagram, bottleneck index of each component, and risk indices as NEL and PML. As Step2, three numerical simulations were conducted; the water-supply facility with sixteen branching pipes, Tomei & new Tomei expressways including connecting road, and Tokaido Shinkansen system connected by seventeen sub-facilities. Step3 deals with GIS-based panoramic visualization of system risk. The importance and usefulness of seismic risk curves and PML evaluation considered as the quantitative information can be highlighted from the viewpoints of earthquake disaster mitigation and decision-making for asset management.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：地震防災 リスク転嫁

### 1. 研究開始当初の背景

・巨大都市災害が警鐘され、災害リスクは認知されているが、その定量的な情報が提供されない。

・阪神大震災を経験し、多くの耐震補強が実施され、かつ性能設計法は確立されたが、土木系各種構造物は異なる示方書に基づくもので、耐震補強と耐震性能のレベルはバラバラである。

・欧米では地震リスクマネジメント先進国として多くの研究が進み、世界を先導している。

・建築建屋の物的損失に関するリスクマネジメントは定着しているが、土木系施設への適用または線状施設への拡張は見られない。

### 2. 研究の目的

土木系線状施設（道路，鉄道，水道施設）を対象とし、研究目的を以下に設定する。

- (1)信頼性理論とシステム理論に立脚した地震時システムリスクの解析理論を構築する。リスク値として機能停止期間を考える。
- (2)具体的な線状施設に適用し、システムの機能停止期間、復旧曲線、ボトルネック指数、リスク曲線を合理的に算出する。
- (3)GIS上に地震リスクを可視化し、設計技術者、利用者、事業者への分かりやすいリスク情報の共有を試みる。

### 3. 研究の方法

・Step1 解析理論の構築と解析プログラムの開発：骨格理論（施設群の損傷確率理論とシステム信頼性理論に基づく機能停止理論）および関連理論（複数震源モデルによる地震動評価，Fragility 関数による脆弱性評価）をもとに解析手法を構築し、エクセル機能によりプログラムを作成した。

・Step2 事例解析シミュレーション：土木系施設は、直列モデル/並列モデルの組合せとなる線状施設が多く、道路/鉄道路線、浄水処理場などの解析シミュレーションを実施し、提案手法の実効性を検証した。

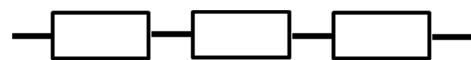
・Step3 地震リスク指標を GIS 上に可視化(パ

ノラマ表示)のため、シナリオ地震による最大速度/被災人口分布、地震時システムリスクのボトルネック表示等を試みた。

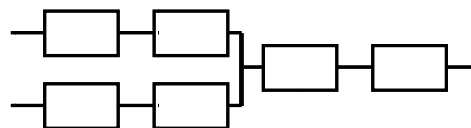
### 4. 研究成果

#### (1) システムリスクの考え方とモデル化

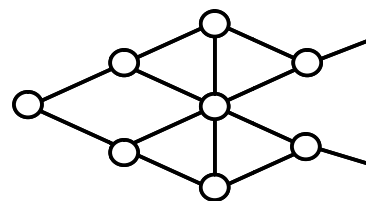
土木系インフラ施設は、直列・並列混在システム（鉄道，高速道路など）あるいはネットワークシステム（水道管など）として構成され、その必要機能を果たしている(図1)。例えば、直列システムでは、ただ1個所の被災によりすべての機能が停止することがある。このため、構成要素個々のリスク評価に加えて、システム全体でのリスク評価を実施することが肝要である。本論は、対象施設のリスクをシステムリスクと呼び、地震時の復旧に要する時間（復旧期間）、リスク曲線などにより、地震時システムリスクを定量的合理的に評価するものである。



(a) 直列システム



(b) 直列・並列混在システム



(c) ネットワークシステム

図1 システムモデルの例

#### (2) 地震時システムリスクの定式化

##### 復旧曲線

復旧曲線は、本来の機能が低下/停止し、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できる（通例、横軸：復旧

に要する日数、縦軸：本来の機能を 1.0 とした復旧率となる)。一方、地震被害の発生や復旧期間は不確実性を伴い、確率論的アプローチを採る必要がある。この場合、図 2 の点線で示すように、様々な復旧プロセスが予想でき、この中の一つが実現することになる。しかし、実現する復旧曲線を特定することはできないので、平均的な曲線を求め、これを復旧曲線と考える。さらに、平均的な復旧曲線は、図中太線のように二つを定義することができ、T 曲線および D 曲線と呼ぶ。

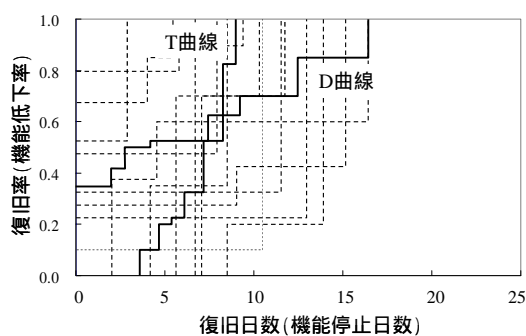


図 2 復旧曲線の概念図

・D 曲線：機能復旧率（機能低下率）を確率変数として、縦軸に分布する曲線群の平均値を復旧日数に対して結んだ曲線。

・T 曲線：復旧日数を確率変数として、横軸に分布する曲線群の平均値を機能復旧率（機能低下率）に対して結んだ曲線。

両曲線は、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、それぞれ以下の式で示される。

$$D \text{ 曲線} : R_D(t) = 1 - \int_0^{1.0} G_T(t|r) dr \quad (1)$$

$$T \text{ 曲線} : R_T(r) = \int_0^{\infty} G_T(t|r) dt \quad (2)$$

一方、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ので、複数機能を有するシステムを想起し、これを機能ごとに  $L$  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 1.0

とした機能比率  $r_k (k=1 \sim L)$  で表す ( $r_k$  は交通量などで、入力条件として与えられる)。

次に、各直列システムの復旧期間の非超過確率  $F_T(t)$  を求め、これを超過確率  $G_T(t|r_k)$  に変換すると、D 曲線は以下のように書き換えられる。

$$R_D(t) = 1 - \sum_{\text{all } k} r_k G_T(t|r_k) \quad (3)$$

さらに、T 曲線については、機能ごとに分解された  $L$  個の直列システムの復旧期間の期待値を小さい順に、機能復旧率に対し結んだ曲線を TL 曲線と呼び、以下の式で表す。

$$R_T(r_k) = \int_0^{\infty} G_T(t|r_k) dt, \quad k = 1 \sim L \quad (4)$$

さらに、RTE (Recovery Time Expectancy) を、システムとしての復旧期間の代表値として定義する。RTE は下式に示すように各機能の復旧期間の期待値に、その機能比率を乗じることにより求める。

$$RTE = \sum_{k=1}^L R(r_k) r_k \quad (5)$$

#### ボトルネック指標

線状施設には、脆弱性や復旧日数などの観点でボトルネック(弱点)となる部分が存在し、その指標としてボトルネック指標を定義する。ボトルネック指標は施設全体機能に対する影響度(全体に占めるラインの比率)、脆弱性(フラジリティ、機能損傷確率など)、復旧日数の合積で表し、下式にて定義する。

$$B_j = e_j \cdot E(T_j) \quad j = 1 \sim n \quad (6)$$

ここで、 $j$  : ユニット、 $n$  : システム中におけるユニットの総数、 $e_j$  : システム全体への影響度である。 $E(T_j)$  は地震発生を条件とした各コンポーネントの停止期間の期待値を表したもので、下式より得られる。

$$E(T_j) = \sum_{j=1}^t P_{jk} \cdot t_{jk} \quad (7)$$

ここで、j：損傷形態、 $p_j$ 、 $t_j$ ：要素 j に関する損傷形態の発生確率と復旧期間である。これより、ボトルネック指標は時間（本論では日）の単位を持ち、数値が大きいほどボトルネックとなることを示す相対値となる。

### 地震時イベントリスク曲線

地震時イベントリスク曲線は、ある地点で発生するシナリオ地震をマルチイベントモデル (*Multi Event Model*: 複数震源モデル) により求め、その年発生確率の累積を縦軸に、対応する損失の期待値を横軸にとる(図3に解析事例を示す)。マルチイベントモデルとは、個々の地震の「いつ、どこで、どの程度の確率で発生するか」を特定して地震危険度を評価する方法である(想定される地震のことをシナリオ地震と呼ぶ)。地震時イベントリスク曲線からは、シナリオ地震の発生頻度あるいは再現期間に対応した損失の分布を知ることができる。

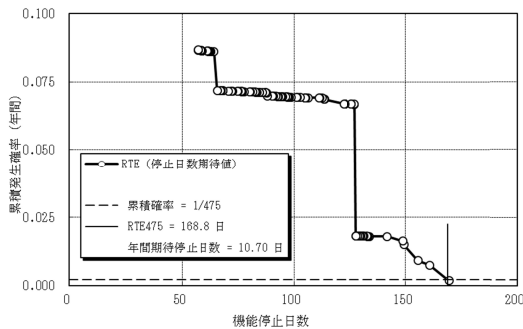


図3 地震イベントリスク曲線

### (3) 地震時システムリスクの解析事例

#### 解析条件

#### 対象路線（東名・新東名高速道路）

- ・東京IC～小牧ICの総延長508.7km（東名高速道路：348.6km，新東名高速道路（清水連絡路，引佐連絡路を含む）：161.9km）
- ・直線距離5km区切りにし、中心の座標をユニットの座標とし、集約点と呼ぶ。

・計100ユニット，294コンポーネントのシステムとした(図4)。

・各路線の比率は平成22年の交通センサスとNEXCO中日本発表資料より作成(表1)。



図4 対象路線

表1 各路線の比率

	路線	輸送量割合
新東名のみ	ルート1	0.232
新清水-清水	ルート2	0.268
清水-新清水	ルート3	0.235
東名のみ	ルート4	0.265

#### 対象構造物

- ・高架橋/盛土/切土/自然斜面/トンネルの5種
  - ・高架橋/トンネル/盛土/切土は、国土地理院の地形図より設定
  - ・斜面崩壊の危険性のある斜面は、国土地理院国土政策局情報化のGISデータより設定
- 距離減衰式・地盤増幅率
- ・地震動強度は、安中式による最大地表速度 (Kine) を採用する。
  - ・地盤増幅率は地震ハザードステーション J-SHIS を参考に構造物ごとに設定。
  - ・構造物が複数区分にわたる場合は最大の地盤増幅率を採用し、地盤増幅率は構造物の耐力中央値を地盤増幅率で除すことにより反映する。

#### 解析結果

#### 地震イベントリスク曲線(図5)

停止期間の期待値 RTE のイベントリスク曲線を示したが、RTE の増大とともに超過確率が減少する右下がりの曲線となる。ここでは、並行路線（新東名）に対して、損傷事象を独立または完全相関とした場合、および並行路線が存在しない場合の3つ解析結果を示し、3例の大小関係を見ることできる。

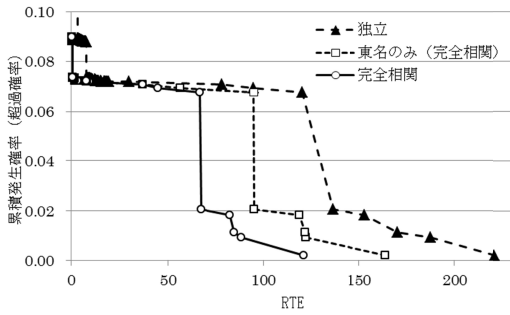


図5 RTEに関するイベントリスク曲線

復旧曲線 (図6)

相関関係に関して3つ条件を課し、得られた復旧曲線を図6に示した。

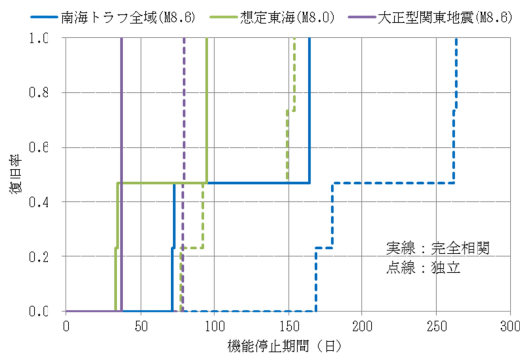


図6 復旧曲線

ボトルネック指標 BI (表2)

特定のシナリオ地震 (南海トラフ全域 (M8.6)) に対するボトルネック指標として、表2に一覧化した。ボトルネック指標値は、全体機能に対する影響度、脆弱性、復旧日数で表される、コンポーネント毎の相対数値であるが、これが相関特性によっても異なることが分かる。

表2 3事例に対する、上位のボトルネック指標

地震名	南海トラフ全域 (M8.6)		
高架橋30	0.533	248.96	132.76
高架橋52	1.000	73.81	73.81
大井川橋	0.533	100.81	53.76
浜松	0.533	90.41	48.21
富士川橋	0.500	96.31	48.15
新富士	0.500	88.51	44.26
清水JCT	0.768	53.33	40.96
矢作川橋	1.000	38.46	38.46
高架橋41	0.533	66.19	35.30
東名安倍川橋	0.533	59.75	31.86
藤枝岡部IC	0.467	67.85	31.67
新天竜川橋、豊岡高架橋	0.467	67.67	31.58
中ノ合高架橋	0.467	64.42	30.06
坂部橋	0.533	54.01	28.80
新静岡 (新安倍川橋)	0.467	55.59	25.95
高架橋24	0.500	45.95	22.97
高架橋25	0.500	40.69	20.34
高架橋29	0.533	34.51	18.40
高架橋23	0.500	34.62	17.31
高架橋34	0.533	31.16	16.62

(4) 地震リスクのGIS上への可視化

地震リスク情報をGIS上に可視化 (パノラマ表示) するにより、リスクの認知と共有に有効な手段となることが期待できる。

ここでは、以下の3つの事例を示す。

事例#1

特定シナリオ地震 (立川断層帯) による最大速度分布をArc-GIS上にカラーコンターに示すものである。

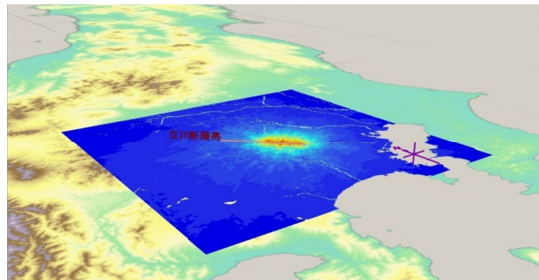


図7 立川断層帯地震による最大速度分布

事例#2

次は、上記のシナリオ地震に対する、震度5弱以上の市町村別暴露人口を示す。

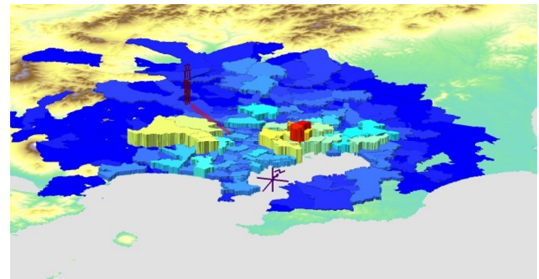


図8 立川断層帯地震による、震度5弱以上の市町村別暴露人口の分布

事例#3

事例#3として、東海道新幹線を対象としたボトルネック指標の表示事例を示す。

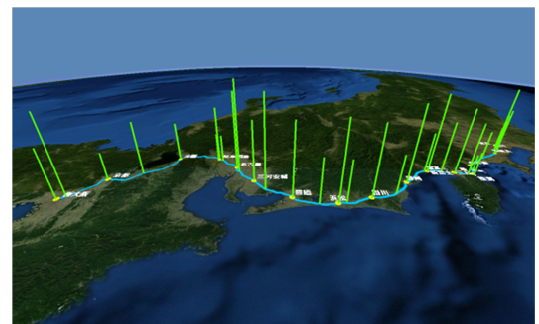


図9a 東海道新幹線のボトルネック指標 (南方向より)



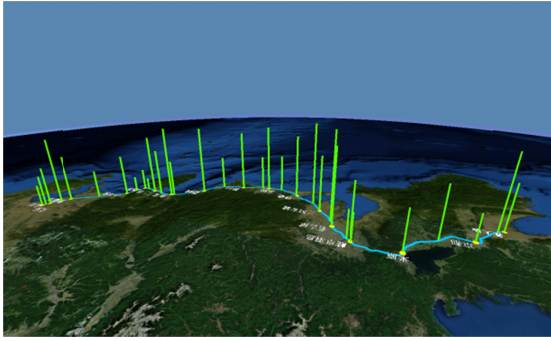


図 9b 東海道新幹線のボトルネック指標  
(北方向より)

#### (4) 結語

本研究は、複数の異なる構造施設を有する複雑な線状施設を、直列/並列混在モデルに置換することにより、地震時システムリスク解析を実施するものである。本論での研究成果は、より広範囲かつより合理的な地震リスクマネジメントの発展に繋がるもとと考える。さらには、提案するリスク規範の解析手法を、現在主流となっている性能照査型設計法と一体化する（表裏をなす）ことで、より先端的な耐震設計の構築を期待することができる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者には下線)

〔雑誌論文〕(計3件)

吉川弘道・中村孝明・大滝健：テクニカルレポート コンクリート構造物の地震リスク曲線と NEL/PML 評価 -基本理論と応用事例の紹介-, コンクリート工学誌, Vol.50 No.3, 261-268 (2012.3)

吉川弘道：地震リスクで考える都市防災 -リスクの定量化と可視化への挑戦- (震災特集 東日本大震災-災害リスクマネジメント-) 土木学会誌 vol.97 no2, 48-51 (2012.2)

吉川弘道：性能設計と地震リスク評価：防災減災技術を支えるソフト技術の両輪 (建設産業特集：防災・減災に欠かせない建設の力3)

(日刊工業新聞 2012年2月22日掲載)

〔図書〕(計2件)

Hikomichi Yoshikawa: 'Chaper27 Seismic risk and possible maximum loss (PML) analysis of reinforced concrete structures',

Part Assessing Financial and Other Losses from Earthquake Damage, Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems, S. Tesfamariam, & K. Goda (eds), Woodhead Publishing Ltd, 741-759 (2013)

編者吉川弘道・著者4名：都市の地震防災 - 地震・耐震・津波・減災を学ぶ -、フォーラムエイトパブリッシング、全176頁(2013.4)

〔その他〕ホームページ  
地震に負けないエンジニアリング講座  
「耐震設計と地震リスク」  
<http://www.srm-bcp.com/>

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

吉川 弘道 (YOSHIKAWA, Hiromichi)  
東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号：10220609

##### (2)研究分担者

中村 孝明 (NAKAMURA, Takaaki)  
東京都市大学・工学部・客員教授  
研究者番号：60424777

丸山 收 (MARUYAMA, Osamu)  
東京都市大学・工学部・教授  
研究者番号：50209699