

リスクファイナンスのための 線状施設の地震リスク評価

大峯 秀人¹・吉川 弘道²・矢代 晴実³・大滝 健⁴

¹正会員 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 リスクモデリンググループ
(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1丁目2-1東京海上日動ビル新館8階)
E-mail: hideto.omine@tokiorisk.co.jp

²正会員 東京都市大学教授 総合研究所 地震リスクマネジメント研究室
(〒158-0082 東京都世田谷区等々力8-15-1)
E-mail: hyoshika@tcu.ac.jp

³正会員 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 リスクモデリンググループ
(〒100-0005 東京都千代田区丸の内1丁目2-1東京海上日動ビル新館8階)
E-mail: harumi.yashiro@tokiorisk.co.jp

⁴正会員 株式会社クレアテック 技術部 (〒107-0052 東京都港区赤坂4-11-19)
E-mail: ohtaki@createc-jp.com

複数の異種構造物により構成される線状施設を対象に、リスクファイナンスのための地震リスク評価手法を提示する。事業者は保有するリスクをリスクファイナンスにより第三者へ移転する際に、互いの情報の非対称性を解消するためリスクを定量化することが必要となる。リスクの定量化は合理的で説明性のある手法により算定され、リスクカーブや各リスク指標にて示すことが一般的となっている。

本手法は、線状施設を離散的に取扱い、既往の分析技術を活用し、各種構造物の脆弱性と構成から集約地震ロス関数を設定し分析するものである。集約地震ロス関数の設定は、構造物の脆弱性に関する既往研究を統一の損傷レベルへの分類、地震動強度指標へ変換し実施する。また試算として首都圏を放射線に延びる直線20kmの鉄道路線を想定し、分析を行う。

Key Words : risk finance, linear facility, seismic risk evaluation, damage function, risk curve, risk index

1. はじめに

鉄道や道路など線状に広がる施設は重要な社会基盤を担っており、地震などの自然災害が生じた場合、事業者だけでなく社会へ与える損失も大きい。そのため事業者は自らの事業継続や社会的責務のため、減災や復旧を目指すこととなる。これらを実現するための対策は、図-1に示すように構造物のハード対策である耐震設計・補強等によるリスクコントロールと、財務的対策である保険等のリスクファイナンスがあり、これらを講じる前提に必要なのがリスクの定量化である。定量化されたリスクは、リスクコントロールの効果を検証するための費用便益分析などに活用でき、リスクファイナンスではリスクのヘッジ側である事業者と、保険商品であれば保険会社、地震デリバティブ等の金融商品であれば投資家等のリスクのテイク側との合意

に必要な資料となる。

本論は、複数異種構造物にて線状に構成される鉄道路線を対象とし、リスクファイナンスに用いるための地震リスク解析に関する一連の評価フローを提示し、数十万個のシナリオ地震を取り扱ったモンテカルロ法を援用した確率論的解析手法を実施する。評価フローは、各種構造物の脆弱性に関する既往研究、国の公表する地震危険度やポートフォリオ地震リスク評価など

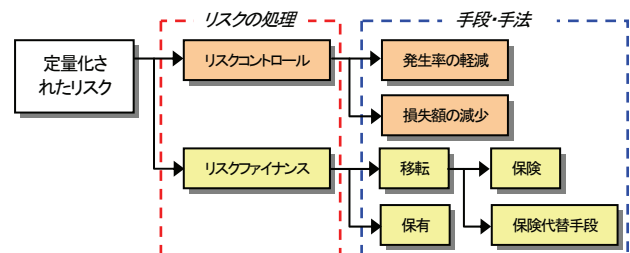


図-1 リスクへの対策

の既往技術を基盤とする。適用事例として、首都圏を放射状に延びる想定路線を4路線設定し、地震リスクカーブを出力し、各リスク指標（年間損失期待値、99%VaR、99%Tail-VaR）について比較、考察を行った。

2. 線状施設の地震リスク評価手法

鉄道路線のような線状施設の地震リスク評価では、施設に生じる地震動強度を評価し、該当構造物の地震被害に伴う損失を算定/集積する。地震リスク評価の手順は図-2の5つのModuleで構成される。線状施設の位置、構造物等を定義するSet-UP Module、線状に広がる施設に生じる地震動強度を評価するHazard Module、また地震動強度に対する各種構造物の脆弱性を評価するVulnerability Moduleがあり、以上の3つのModuleの出力を基に、Seismic Loss & Risk Moduleにて地震リスクを定量化する。Manage & Finance Moduleでは、リスクマネジメントを取扱うが、これは次報での課題とする。

本論では、連続する施設群のVulnerability Moduleについて、特定施設や複数地点のポートフォリオを対象とした既往の地震リスク評価^{1),2),3)}を活用した手法を提案する。これは、連続する施設をある分割長に等分割し、線要素に離散化する。1つの線要素の中央に1個の集約施設を定義し、図-3のように基点より1, 2, ..., i, i+1のように付番する。

本提案手法は、評価長さ線要素の中心点に構造物の資産を集約し、線状施設に点在する各種構造物を簡易的に取り扱うものである。なお、分割長は、リスクファイナンスのための分析結果を得る合理的な長さを設定する。

各Moduleでの考え方と手法を以下に記す。また、本論での具体的な手法については、「4. 想定20km路線の地震リスク評価」にて詳述する。

(1) Set-Up Module

評価対象とする線状施設を設定する。まず線状に広がる路線を地図上にて確認し、緯度経度による位置、延長長さを定義する。以上の条件から図-4のようにHazard Moduleより設定される震源との距離、位置する地盤による地震増幅特性を評価することができる。

次に線状施設を構成する構造物の種別を調査し、Vulnerability Moduleに引き継がれる。

(2) Hazard Module

Hazard Moduleでは、Set-Up Moduleで定義した線状施設の集約点における地震動強度を評価する。評価項目は大きく3つの過程があり、本論ではいずれも既往の研究

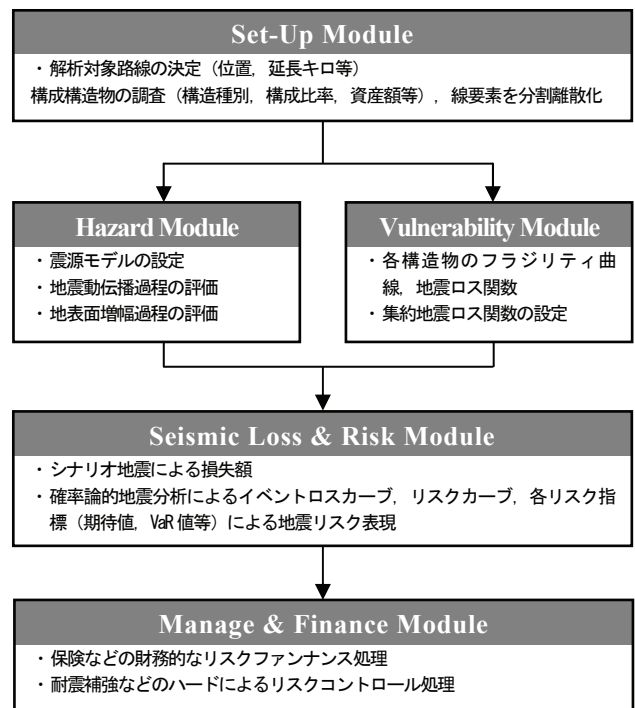


図-2 地震リスク評価における各Module

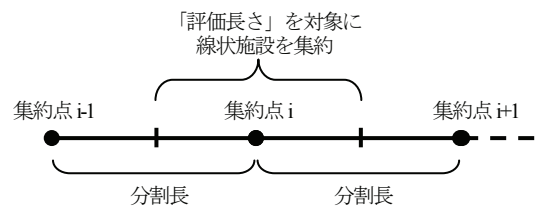


図-3 線状施設の離散的取扱い

成果を活用する。震源モデルは、震源パラメータ（位置、マグニチュード、発生確率等）の設定が必要であり、地震調査研究推進本部（全国地震動予測地図）⁴⁾や日本建築学会（建築物荷重指針・同解説 付7.3 地震ハザード）⁵⁾の成果が公表されている。

次に震源から工学的基盤面（せん断波速度400～600m/sec程度）への地震動伝播過程の評価では、過去の地震記録を回帰した経験式である距離減衰式が各種公表されている。最後に工学的基盤面から地表面への増幅過程は、日本全国の250mメッシュによる微地形区分に関連付く地盤増幅率が公表されている。

また各評価には不確実性（ばらつき）が含まれ、これらを適切に考慮する必要があるが、本論では、不確実性を考慮したリスクカーブの算出手法を例示することを目的としている。そのため、予測のばらつきが最も大きいとされる距離減衰式のばらつきのみを採用した。なお、評価する地震動強度には様々な指標があるが（例えば、地表面の最大速度、加速度、計測震度等）、対象構造物の被害に対して相関の高い指標を採用することが望ましい。

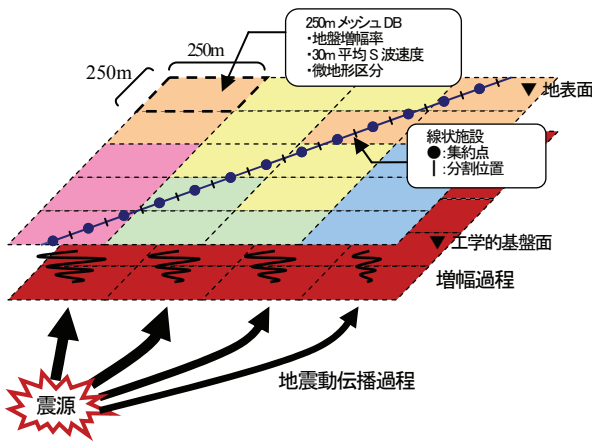


図4 線状施設とHazard Moduleの関係

(3) Vulnerability Module

Vulnerability Moduleでは、異なる各種構造物の耐震性能から fragility 曲線を設定し、これにより地震ロス関数を定義する。例えば、橋梁構造物の脆弱性評価の手法として、Shinozuka et al.⁹⁾によれば、1) 専門技術者による工学的な判断、2) 準静的で示方書に準拠した解析、3) 過去の地震被災事例の活用、4) 動的解析に基づく数値解析的手法、の4つに大別される。

本論で用いる手法は、線状施設を構成する各種構造物の脆弱性を取り扱った既往の研究（付録）から、統一的な解釈による fragility 曲線の再設定を行い、個別の地震ロス関数を作成する。これは上記の主として2)に基づくものであるが、他の1), 3), 4)の知見も間接的に反映されている。さらに、図-3で示す線要素における各構造物の構成比率より集約した地震ロス関数を設定するもので、本論の特徴の一つである（各構造物の個別及び集約点での地震ロス関数については、3章において述べる）。

(4) Seismic Loss & Risk Module

Set-Up Moduleにて設定した線状施設について地震リスクを定量化する。まずHazard Moduleより線状施設に対し影響を与える地震シナリオを震源モデルに従い発生させる。次に離散化した全集約点における地震動強度である地表面最大速度（PGV）が、距離減衰式や地盤増幅率より算出される。

Vulnerability Moduleでは、線状施設の各構造物の脆弱性と評価長さ内の構造物構成比により、集約点毎の集約地震ロス関数が設定される。

以上の2つのModuleを組み合わせ、各集約点の地震損失額の集積によりシナリオ地震の路線の損失が定量化できる。

本論では、地震リスク（当該損失）をリスクファイナンス構築で必要となる発生頻度との関係で表す。

線状施設に影響を与える全イベントの実施により、

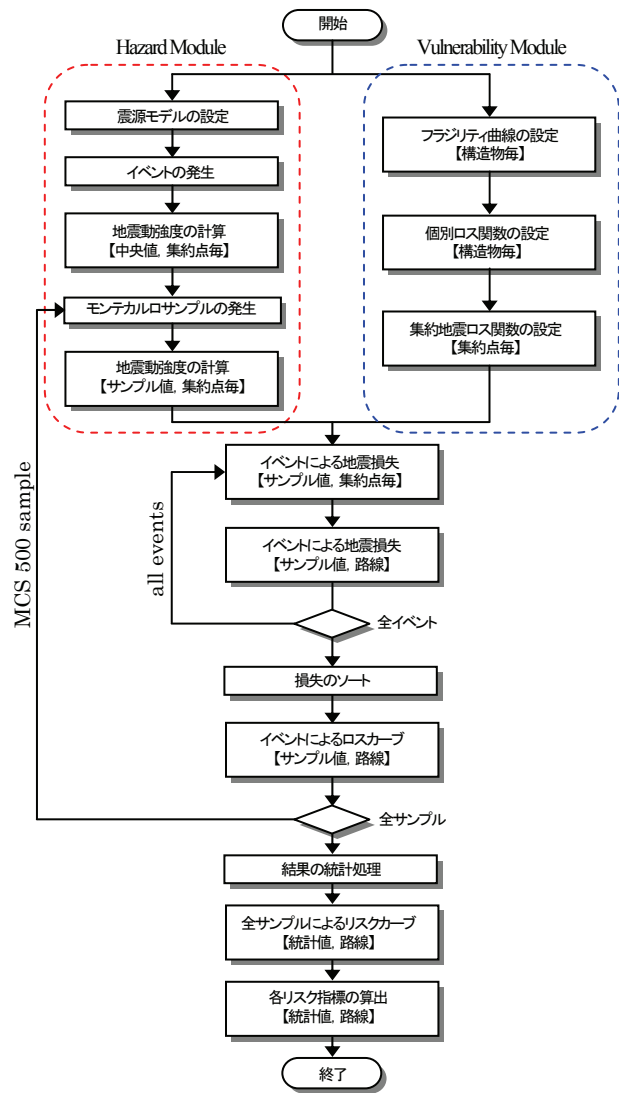


図5 Seismic Loss & Risk Moduleの評価フロー

集約点毎、または路線における地震損失を算出し、あるサンプル値のイベントリスクマップの算出が可能である。本手法では、Hazard Moduleで記載した通り距離減衰式のばらつきを評価するため、モンテカルロ法（以下、MCS）により所与のばらつきを与えて地震動強度を算定する。これによりサンプルごとに同一イベントで複数の地震動強度となり、十分なサンプル結果の統計処理を通じ、不確定性を評価したリスクマップの算出が可能となる。具体的な手法については「4. 想定20km路線の地震リスク評価」にて詳述する。

本論の試算では、全イベント数が数十万個に相当し、所与のばらつきを与えるMCSはリスクファイナンスへ有用となるリスクマップの算出のため、福島・矢代¹⁾を参考として500サンプルとした。

さらに、年間損失期待値AELや低頻度領域のリスク値（99%VaR, 99%Tail-VaR）などスカラー量による各リスク指標についても所与のばらつきを含めた結果から算定を行う。図-5に一連の評価フローを示す。

(5) Manage & Finance Module

線状施設を経営する事業者は、地震リスクに対し「リスクコントロール」及び「リスクファイナンス」等の手法によりマネジメントが必要となる。Manage & Finance Moduleではマネジメントの設計、意思決定、検証を行うこととなるが、ここでSeismic Loss & Risk Moduleによる地震リスクの定量化が活用される。

3. 個別地震ロス関数と集約地震ロス関数

通例、数10kmの首都圏鉄道路線では、多くの異なる構造物にて構成される。対象路線が特定され資産台帳、設計図書、現地調査等により全ての構造物が明らかであれば、その脆弱性を個別に取扱うことも可能となるが、モデル化および計算について非常に煩雑となる。

一方、本論ではリスクファイナンスを目的とした合理的な手法により想定路線の脆弱性評価を行うため、統一的な解釈による個別地震ロス関数から、地震動強度が算出される集約点に対応した各集約地震ロス関数の作成方法を提案する。

(1) 個別地震ロス関数の設定

地震ロス関数は地震動強度に対する対象物の損失規模で表現され、その損失は、表-1に示すように地震により構造物に生じる直接損失及び間接損失にて表される。本論はリスクファイナンスのための定量化であり、財務的な定量化が困難な人命損失を対象外とし、復旧・補修費の直接損失のみを地震損失関数としてモデル化する。

a) フラジリティ曲線 (SFC)

フラジリティ曲線は、特定した損傷レベル（大破、中破、小破等）の条件付き発生確率として定義される。図-6のように応答の確率分布 R 、耐力の確率分布 C_k を仮定した場合、各損傷レベル k の発生確率 p_{fk} は応答値が耐力値を超える確率であり式(1)の通りとなる。

$$p_{fk} = P\left[\frac{C_k}{R} \leq 1\right] = P[X \leq 1] \quad (1)$$

ここで、確率 R 及び C_k の分布形状は、建築物の被害率回帰の研究をまとめた佐藤ら⁷⁾の研究から、モデル化に多く採用されている対数正規分布に従うと仮定した。それぞれの中央値を δ_r, δ_k 、変動係数を ν_r, ν_k とした場合、確率 p_{fk} についても式(2)の対数正規分布の関数として記述される。

$$p_{fk}(\delta_r) = \Phi\left[\frac{\ln(\delta_r / \delta_k)}{\zeta_x}\right] \quad (2)$$

表-1 地震による企業の損失

損失の種類	推定手法
直接損失 ・ 物理的損害 ・ 復旧・補修 ・ 人命損失 等	解析的に推定方法 ・ 数値解析 ・ 設計規範
間接損失 ・ 営業停止日数 ・ 機会損失額 ・ 信頼失墜 ・ 利用意欲減退 等	統計的な推定方法 ・ 過去の被災状況の集計、統計

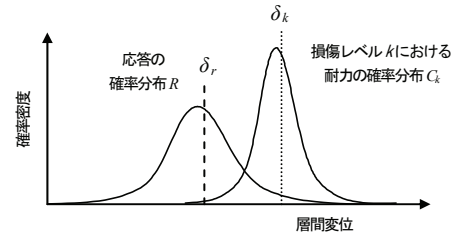


図-6 損傷レベル k における応答と耐力の確率分布関係

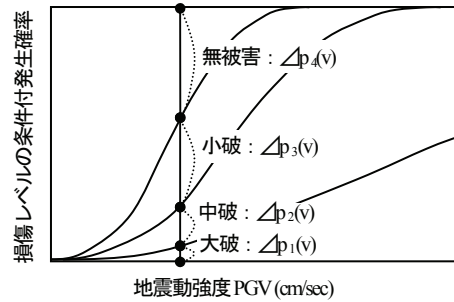


図-7 各損傷レベルのフラジリティ曲線

式(2)の $\Phi(*)$ は標準正規分布関数を表し、これよりフラジリティ曲線は、応答の中央値と損傷レベルを定義する耐力の中央値、及び確率分布の対数標準偏差の3変数により表現できる。

上式のうち標準偏差 ζ_x は、前述した確率分布 R 及び C_k それぞれの変動係数により以下のとおり表される。

$$\zeta_x = \sqrt{\ln\{(1+\nu_k^2)(1+\nu_r^2)\}} \quad (3)$$

b) 地震ロス関数 (DF)

構造物 j の地震ロス関数は、フラジリティ曲線に損傷レベルの重み付けした期待損失関数として定義される。例えば損傷レベルを大破 ($k=1$)、中破 ($k=2$)、小破 ($k=3$)、無被害 ($k=4$) の4つとした場合、それぞれの地震動強度を変数とするフラジリティ曲線 p_{fk} は図-7で表され、さらにそれぞれの損傷レベル対応する損失 L_k を掛け合わせることで地震ロス関数 DF は式(4)で表現される。なお、各構造物のフラジリティ関数の説明変数である応答中央値 δ_r は、付録に示した地震動強度との関係から、地表面最大速度 PGV へ変換している。

$$DF^j(PGV) = \sum_{k=1}^4 L_{jk}^j \cdot \Delta p_{jk}^j(PGV) \quad (4)$$

ここで、 k : 損傷レベル、 $k=1$: 大破、 $k=2$: 中破、 $k=3$: 小破、 $k=4$: 無被害であり、 $\Delta p_{jk}^j(v)$ は、図-7に示す通り各損傷レベルの単独の発生確率を示す。

首都圏における鉄道路線へ適用する試算では、鉄道を線状に繋ぐ代表的な構造物である、高架橋、橋梁構造物、地中構造物、その他の盛土/切土の4つを選定し、既往文献(付録)での検討例を基に、フラジリティ曲線と地震ロス関数を設定する。

c) 統一した個別地震ロス関数の設定方針

選定した4構造物の個別地震ロス関数(individual damage function)については、1)~4)の手法により設定する。

- 1) 既往文献を基に、4構造物毎に被害形態と地震動強度との関連、及び損失額に関して分析整理する。
- 2) 地震時被害形態を大破、中破、小破、無被害の4つの損傷レベルに分類し、各被害レベルにおける復旧金額を整理する。
- 3) 分類された損傷レベルの説明変数は地表面最大速度(PGV)とし、フラジリティ曲線(対数正規分布)の中央値と対数標準偏差を仮定する。さらに、前節のa)、b)項により地震ロス関数を得る。
- 4) 4つの地震ロス関数は評価の対象長さが異なるため、100mの換算長さに統一し個別地震ロス関数とする。

検討対象とした主要構造物を表-2に示し、手順に用いるパラメータを併せて表記する。また、これらの具体的な手法は付録にて記載している。図-8に、本論で作成した個別地震ロス関数を示す。

(2) 集約地震ロス関数の設定

本論では、リスクファイナンスのための地震リスク評価を実施するため、実務上の観点から集約地震ロス関数(aggregate damage function)を作成して路線に適用する。これは、先に設定した主要4構造物の個別地震ロス関数を路線上の構成比率を勘案して、線要素の集約点1個に設置するためのものであり、次式にて表される。

$$ADF(PGV) = \sum_{j=1}^4 \beta^j \times DF^j(v) \quad (5)$$

ここで、 $j=1$: ラーメン高架橋、 $j=2$: 橋梁構造物、 $j=3$: 地中構造物、 $j=4$: 盛土/切土構造物を示す。

$$\sum_{j=1}^4 \beta^j = 1 \quad (6)$$

β^j は、路線内の構成比率を表し、総和は1となる。このことにより対象線状施設にある多くの実構造物の個別評価を回避し、また適切な評価長さの資産割合を用いて集約を行えば、個別評価と著しく乖離することなく、評価結果を得ると考える。

表-2 構造物の評価パラメータ

j	構造物	損傷レベルの定義	対象長さ
1	H4年ラーメン高架橋 ⁸⁾ (直角方向)	層間変形角	40m 5径間連続
2	橋梁構造物 ⁹⁾	構成部材の被害程度の組合せ	60m*
3	地中構造物 ¹⁰⁾ (ボックスカルバート)	層間変形角	500m*
4	盛土/切土構造物 ¹¹⁾	被害箇所数(箇所/km)	1000m*

*評価長さが文献に記載されていないため、各構造物の標準的な長さを設定した

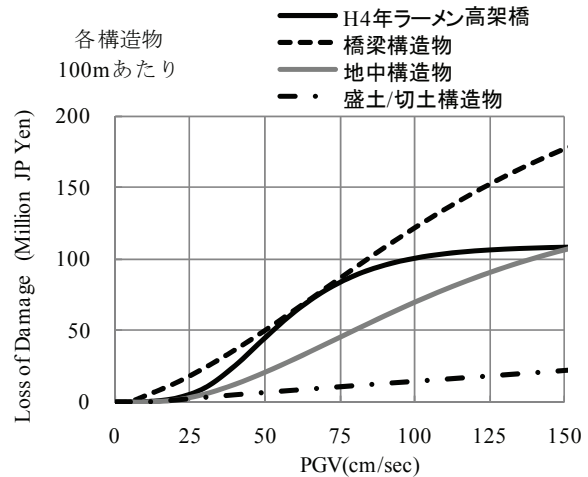


図-8 単位長さの各個別地震ロス関数

a) 評価長さの設定

線状施設を離散化し各集約点を決定する評価長さについては、地震動評価に採用された各手法の感度を鑑みて設定する。すなわち工学的基盤の地震動強度評価に用いた距離減衰式へ入力される距離スケールや、採用した地盤増幅率データベースの密度(250mメッシュ)を考慮し、本論では評価長さを100mと設定した。よって想定路線は100m毎に離散化され、その区間における各構造物(表-2の4構造物)の構成比率により集約地震ロス関数が作成される。

b) 構造構成比率による集約

想定路線における評価長さ100mにおける各構造物の構成比率は、国土交通省が公表する実在路線の統計情報¹²⁾から設定した。

設定方法は、まず統計情報である表-3の全9路線の各構造名称の長さを合計し、表-4に示した4構造物の個別地震ロス関数と統計情報における構造名称を関連付け、集計した比を路線内の構成比率 β^j とする。

以上の構造物構成比率を用いて、前節c)項で設定した4構造物の個別地震ロス関数を式(5)により集約すると図-9の100mあたりの集約地震ロス関数として表現される。本関数がVulnerability Moduleにおける成果となる。

表-3 実在路線の統計情報¹²⁾

実在線路名	営業キロ (km)	トンネル (m)	橋梁(m)				橋梁合計 (m)	橋梁のうち高架橋 (m)
			プレストレスコンクリート	鉄筋コンクリート橋	鋼橋	その他		
東武東上本線	75.0	0	237	1,146	1,789	181	3,353	0
西武池袋線	84.6	233	1,691	17,316	1,577	420	21,004	18,860
西武新宿線	72.0	0	180	1,592	452	0	2,224	839
京王線	72.0	12,650	1,537	11,171	1,290	0	13,998	12,426
小田急小田原線	120.5	3,030	1,600	9,506	3,841	512	15,459	12,309
東急田園都市線	31.5	13,311	870	4,594	1,426	0	6,890	3,830
東急東横線	24.2	2,341	310	9,235	3,231	0	12,776	6,297
京急本線	56.7	7,288	6,878	13,701	13,701	4,582	38,862	22,135
京成本線	69.3	1,991	522	13,607	7,218	3	21,350	6,636

表-4 実路線から設定した構造物構成比率

j	個別地震ロス関数	統計情報における構造名称	構成比率 β
1	H4年ラーメン高架橋 (線路直角方向)	橋梁のうち高架橋	13.8%
2	橋梁構造物	橋梁-橋梁のうち高架橋	8.7%
3	地中構造物 (ボックスカルバート)	トンネル	6.7%
4	盛土切土構造物	その他	70.8%

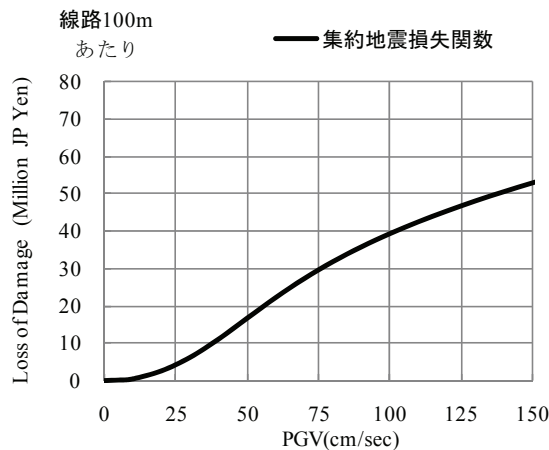


図-9 100mあたりの集約地震ロス関数

4. 想定20km路線の地震リスク評価

前章で設定された集約地震ロス関数を用いて、首都圏における長さ20kmの鉄道路線を想定し、確率論的手法による地震リスク評価を実施する。本評価手法は公表データより具体的な鉄道路線へ適用可能であるが、本論ではリスクファイナンスのための線状施設の一連の地震リスク評価手法を提示し、首都圏内の地域性による結果の違いを比較することが目的であり、単純化した路線にて試算を実施した。

(1) 想定路線の設定及び解析手法

Set-Up Moduleにおける想定路線は、渋谷を起点とし横浜方面へ延びる20kmの直線路線とする。

各評価長さは均一に100mとし、分割された計201地点

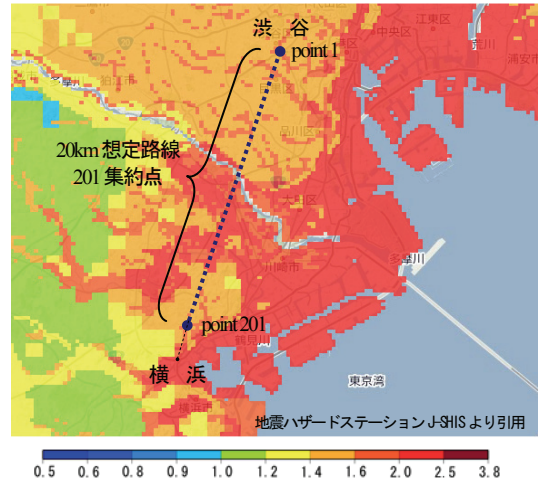


図-10 想定20km路線と地盤増幅率

表-5 Hazard Moduleで採用した各評価手法

評価項目	採用手法	備考
震源モデル	地震調査研究推進本部 (2007) ⁹⁾	<断層パラメータ> カテゴリ-I: 海溝型地震のうち震源断層を特定できる地震 カテゴリ-II: 海溝型地震のうち震源断層を特定しにくい地震 カテゴリ-III: 活断層など陸域と海域の浅い地震
		<発生確率> ポアソン分布
地震伝播過程	司・翠川 (1999) ¹³⁾	工学的基盤における最大速度の距離減衰式
地盤増幅率	若松・他 (2008) ¹⁴⁾	日本全国の250mメッシュにおける微地形区分の設定
	松岡・若松 (2005) ¹⁵⁾	各地盤分類における地盤平均S波速度分布の推定
	藤本・翠川 (2006) ¹⁶⁾	平均S波速度と地盤増幅率の関係

が集約点となる。図-10に想定路線と250mメッシュの地震増幅率との関係を示す。路線の中央部が両端に比べ地盤増幅率が高くなっていることが分かる。これは地盤増幅率が特に高いとされる微地形区分の旧河道や後背湿地が路線の中央部に分布し、起点の渋谷～多摩川東岸、横浜近傍では地盤増幅率の低いとされる谷底低地やローム台地が広がっているためである。Hazard Moduleにおいて採用した解析手法は、表-5示す既往の研究成果を用いる。

(2) 結果及び考察

a) 各集約点におけるリスク試算結果

20kmの想定路線を201集約点へ離散化し分析した結果を示す。図-11は各集約点の地盤増幅率と再現期間475年に相当する地震動強度を示し、工学的基盤最大速度(PBV)に対し、路線中央部では多摩川西岸の地形特徴から地震動の地盤増幅が強く働き、地表面最大速度(PGV)が大きくなっている。

またPBVについて、始点より終点に向けて若干の上昇傾向があり、地盤増幅率を除いた地震リスクを考察した場合、渋谷より横浜側が相模トラフを震源とする地

震の影響を受けるためである。

次に図-12では、再現期間100年～2,000年におけるPGVを表記しており、再現期間が長くなるほど各地点に生じる地震動が大きくなっている。

これらの各地点の地震動により発生する路線の予測損失額を示したのが図-13であり、再現期間475年のPGVに対して、集約地震ロス関数により算出された各集約点の損失額(Loss)を表記している。各点の数値は路線100mあたりの復旧工事に必要とされる金額を意味し、最小30.9百万円、最大49.9百万円となり、20km路線全体では77.2億円となった。

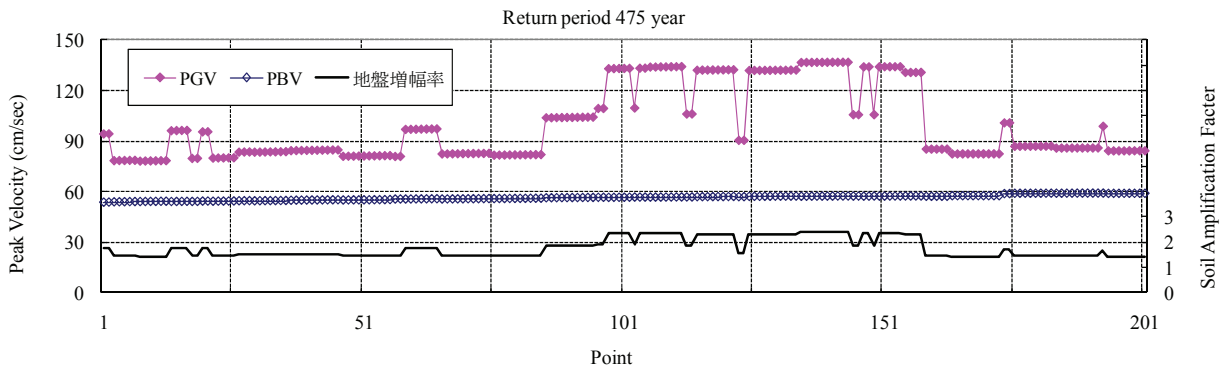


図-11 集約点における Hazard Module 結果 (再現期間 475 年)

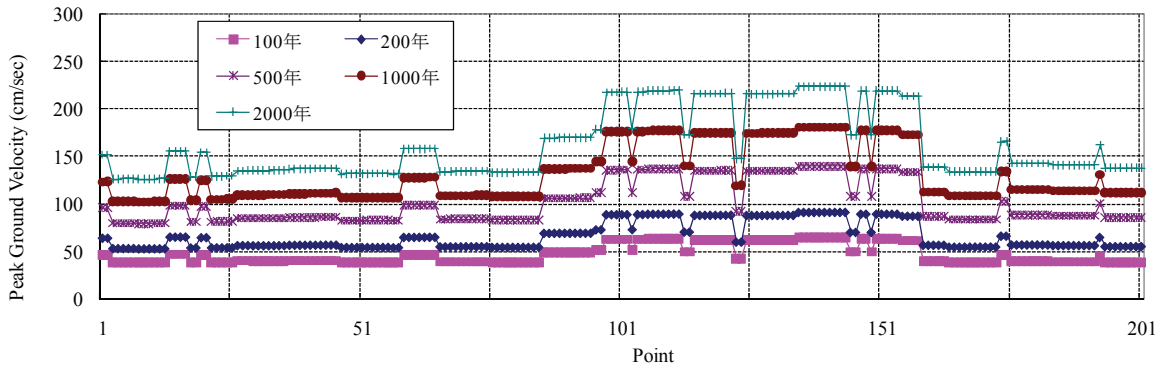


図-12 集約点における各再現期間の PGV

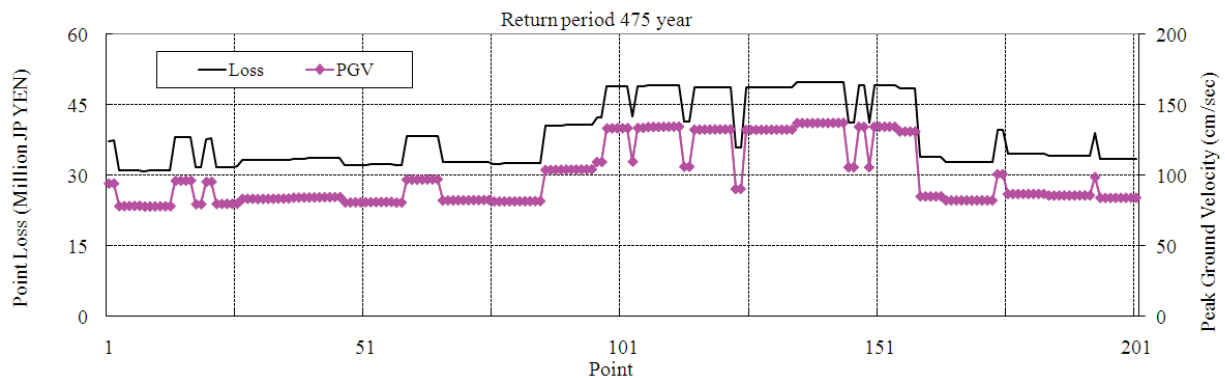


図-13 集約点における PGV と損失額 (再現期間 475 年)

b) イベントロスカーブ及びリスクカーブ

MCSを用いた確率論的分析より得られた結果について年超過確率に関係付けられたイベントロスカーブ及びリスクカーブにて表記を行う。これらは、年発生確率の累積値(年超過確率)と路線の予測損失額の関係を示したものである。イベントロスカーブはMCSより距離減衰式のばらつきを評価した全イベントを500サンプル算出している。リスクカーブは500サンプルのイベントロスカーブを超過確率の各値で損失額のばらつきを統計処理し、任意の非超過値となる損失額をプロットしたものである。図-14に距離減衰式の中央値による地震動強度でのイベントロスカーブを、図-15に50%及び90%非超過値となるリスクカーブを示す。

c) リスク指標

前項で算出されたイベントロスカーブやリスクカーブに対して、全頻度領域や低頻度領域におけるリスク量をスカラーとして取り扱う以下の代表的リスク指標の計測がある。

- AEL (Annual Expected Loss): 全頻度領域におけるリスクの平均値を求めた「1年間の年間損失期待値」を意味するリスク指標
- VaR (Value at Risk): 低頻度におけるリスク量の指標として「ある確率で今後1年間にX以上の損失を被ることはない」ことを意味するリスク指標
- Tail-VaR (Tail Value at Risk): リスクカーブのある確率以下のテイル分布を捉えるリスク指標(期待ショートフォールとも呼ばれる)

各リスク指標の計測法からリスクファイナンス構築にあたり、年間の期待損失であるAELは、長期間そのリスク量を準備、積立を行えば補填できることとなり、損害保険の設計で必要となる。また図-16に示す99%VaR, 99%Tail-VaRなどのリスク量は、地震のような低頻度で大きなインパクトを与えるリスクに対する定量化として適しており、リスクヘッジの上限額などを検証する際に必要となる。試算結果では50%非超過リスクカーブで算出した場合、AEL: 123百万円, 99%VaR: 3,243百万円, 99%Tail-VaR: 5,711百万円となった。

5. 首都圏放射4路線の地震リスク評価

前章の路線に加え、首都圏を放射状に延びる計4路線を設定し、地震リスク分析結果の比較を行う。

(1) 想定路線の設定

想定路線は前章の渋谷-横浜方面をLine3とし、これに加え表-6に示した山手線の各駅を始点とし、首都圏を直線で放射線状に20km延びる図-17の路線を設定する。

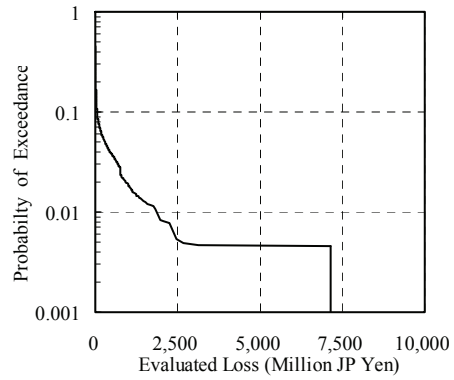


図-14 イベントロスカーブ

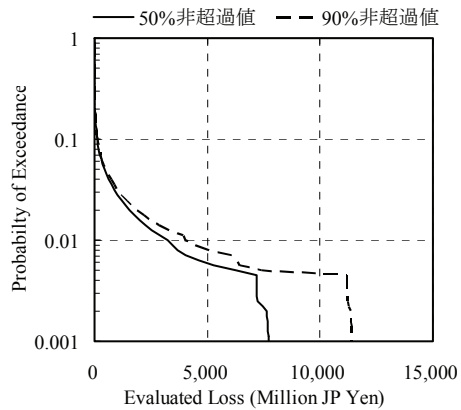


図-15 リスクカーブ

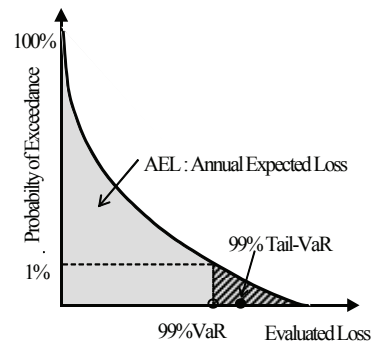


図-16 リスク指標の概念図

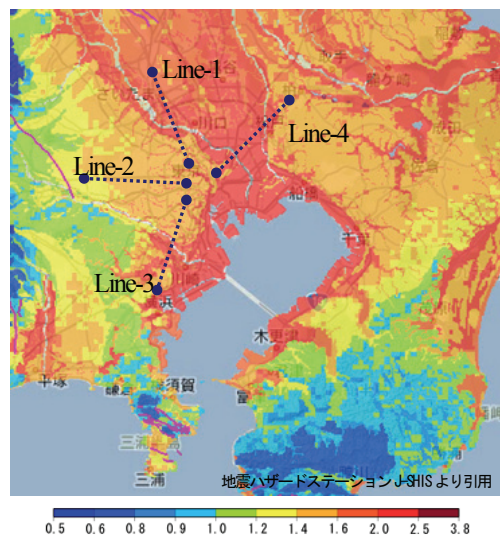


図-17 想定4路線と地盤増幅率

表-6 各路線の始終点位置

路線名	始点/終点	北緯	東経
Line-1	池袋発	35.729	139.710
	大宮方面	35.897	139.629
Line-2	新宿発	35.691	139.700
	国立方面	35.700	139.480
Line-3	渋谷発	35.659	139.701
	横浜方面	35.487	139.631
Line-4	上野発	35.714	139.777
	柏方面	35.840	139.936

Line-1/池袋-大宮方面：終点に向け荒川流域で地盤増幅率が大きい

Line-2/新宿-国立方面：武蔵野台地におけるローム台地であり比較的良い地盤が広がる

Line-3/渋谷-横浜方面：路線中央部が多摩川流域より地盤増幅率が大きい

Line-4/上野-柏方面：荒川及び江戸川の流域から後背湿地が広がり地盤増幅率が大きい

(2) 結果及び考察

前章と同様にSeismic Loss & Risk Moduleの評価フローに従い分析した結果を示す。距離減衰式の中央値を用いたイベントロスカーブの比較を図-18に示す。いずれの年超過確率の範囲においても地盤が不良なLine-4の予測損失額が最大、地盤の良いLine-2が最小、Line-1とLine-3は同程度である。各路線のイベントロスカーブは、各損失額は異なるが年超過確率10%程度から損失が大きくなり、0.5%程度で頭打ちで同様な形状を持つ。これは設定した4路線の互いの距離が近く、各年超過確率においてほぼ同じ震源の影響を受けるため、形状が近似している。また各地震動評価の大小が、損失額の違いを生じさせる。

各イベントセットの統計処理により得られたリスクカーブ(図-19)についても同様な大小関係を示している。

さらに詳細な比較をすると、年超過確率0.5%以下の頻度でLine-3がLine-1を上回っている。これは当該頻度で影響が大きい相模トラフの地震に対し、より震源に近いLine-3で大きな損失額が計上されたためである。

各路線の50%非超過リスクカーブより算出されるリスク指標は、表-7及び図-20の関係となる。いずれの指標においてもLine-4が最大となり、年間損失期待値(AEL)で185百万円の地震リスクを保有し、発生する可能性が1%以下でのリスク期待値を示す99Tail-VaRで67.0億円となっている。またLine-1とLine-3の比較において、AELではLine-1が128百万円とLine-3の123百万円を上回っているが、99Tail-VaRでは、Line-3の57.1億円がLine-1の53.9億円を上回っている。これは、前述したLine-3の年超過確率0.5%以下の範囲(テールリスク)におけるリスクの増大をよく表現している。

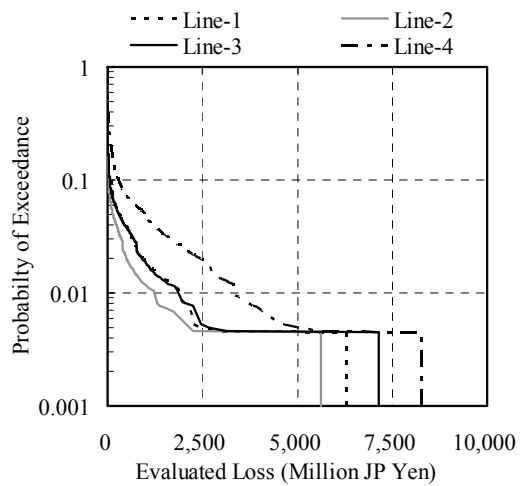


図-18 各路線の中央値イベントロスカーブ

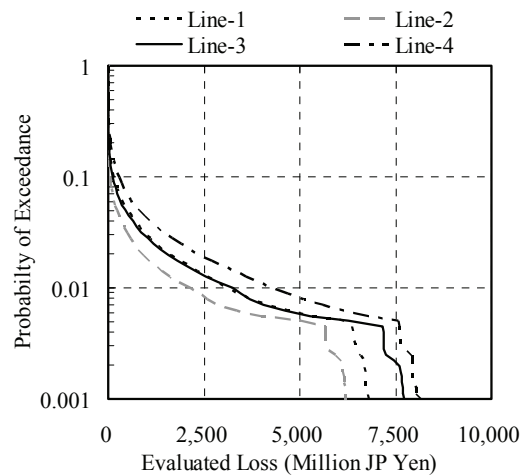


図-19 各路線の50%非超過リスクカーブ

表-7 各リスク指標

路線	リスク指標 (百万円)		
	AEL	99%VaR	99%Tail-VaR
Line-1	128	3,128	5,387
Line-2	80	2,150	4,424
Line-3	123	3,243	5,711
Line-4	185	4,291	6,699

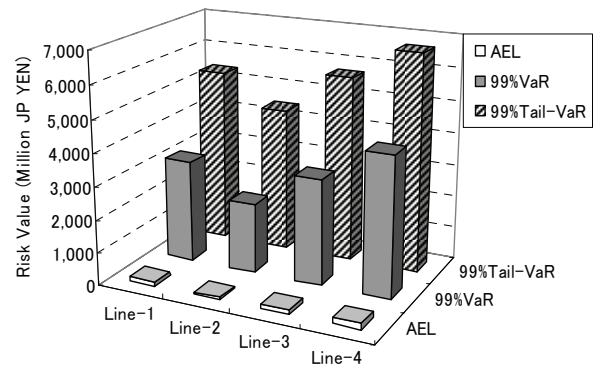


図-20 各リスク指標

6. 結論

本論では、リスクファイナンスのための線状施設の地震リスク評価として5つのModuleにて構成される評価フローを提示し、脆弱性評価であるVulnerability Moduleで鉄道路線の集約地震ロス関数の作成手法を提案した。また一連の評価について、首都圏鉄道路線への適用を行った。得られた主要な結果は以下の通りである。

- 1) 本論は、複数の異種構造物にて線状に構成される鉄道路線を対象として、地震リスク解析に関する一連の評価フローを提示し、影響する全てのシナリオ地震を取り扱った確率論的解析手法を提示した。ここでは、構造物の脆弱性評価手法、地震調査研究推進本部による地震危険度解析法、ポートフォリオ地震リスク評価などの既往の先端技術を基盤とするものである。
- 2) 線状に点在する各種構造物の脆弱性を個別地震ロス関数としてモデル化し、構造物の構成比率により算定した、評価区間の集約地震ロス関数を定義し、その構築方法を示した。(ここでは、主要構造物として、ラーメン高架橋、橋梁構造物、地中構造物、盛土/切土構造物の4構造を選定した)。集約地震ロス関数は、鉄道路線のように複数の異種構造物が不規則に点在する線状施設を取扱う場合、その包括的な脆弱性評価に有用である。
- 3) 数値解析として、数十万個のシナリオ地震全てを考慮したモンテカルロ法による数値計算法、および算定結果を統計学的に処理する一連の解析フローを実施した。そして、年超過確率によって表示するイベントロスカーブとリスクカーブを示すとともに、企業の統合リスク管理およびリスクファイナンス構築に用いられる主要リスク指標(AEL, 99%VaR, 99%Tail-VaR)を提示した。
- 4) 数値シミュレーションとして、首都圏の中心部から放射線状に伸びる直線20kmの鉄道路線を設定し、地震リスク評価を実施した。ここでは、集約地震ロス関数の採用により、各種構造物の脆弱性を一律均等に評価したことが特徴である。数値シミュレーションでは影響する震源(評価対象路線の半径300km内における震源)の規模と震源深さと等価距離、表層地盤の増幅率を反映するものであり、路線位置による評価結果の違いを定量的に把握することができた。
- 5) 首都圏の中心部から放射線状に伸びる4路線の比較では、地盤増幅率の大きい上野-柏方面の路線(Line-4)の地震リスク評価値がいずれの頻度領域でも最大となるといった路線により算定結果に差異が生じた。
- 6) 想定4路線の比較により、路線の位置・経路による

イベントロスカーブ、リスクカーブともに形状の違いが明確化し、また、年間損失期待値AELと低頻度領域のリスク値(99%VaR, 99%Tail-VaR)の大小関係が、必ずしも一致しない(Line-1とLine-3)ことを示した。

今後の課題として、首都圏鉄道路線の構造特性と脆弱性を勘案した地震リスク評価の確立や、本評価結果のリスクファイナンスへの適用が必要である。

謝辞: 本研究では震源断層データについて地震調査研究推進本部が収集した断層帯に関する成果を使用した。また地盤増幅率および地図について防災科学技術研究所地震ハザードステーションより引用させて頂いた。

付録 各鉄道構造物のフラジリティ曲線及び地震ロス関数の算定

(1) ラーメン高架橋

ラーメン高架橋のフラジリティ及び地震ロス関数は吉川ら^{8),17)}の研究を参考に設定した。既往の研究で示される平成4年2柱式5径間連続ラーメン高架橋の線路直角方向の荷重変形曲線を簡単なバイリニアモデルに置き換え付表-1に示す損傷レベルを仮定した。

これら損傷レベルの説明変数と吉川ら⁸⁾が示した対数標準偏差(0.415:変動係数0.3を仮定)を用いて本論に述べた手法によりフラジリティ曲線を設定した(付図-1)。各損傷レベルにおける損失額は、既往の研究で示された各損傷レベルに達するまでに生じる損傷イベントにおける累積値とした。ここで示される地震ロス関数は対象とした2柱式5径間連続ラーメン高架橋(線路長40m)に対応するものである(付図-2)。

(2) 橋梁構造物

庄司ら^{9),18)}は高架道路橋の被災データよりRC橋脚、支承、桁の被害形態を4段階に分類し、橋梁全体系のイベントツリー(ET)を作成するとともに各構造要素のフラジリティ曲線を求めている。本論では、各構造要素の最大被害がそのETにおける被災レベルを代表するものとして、同被災レベルのフラジリティを総和することにより橋梁全体系のフラジリティ曲線を小破、中破、大破として求めた。

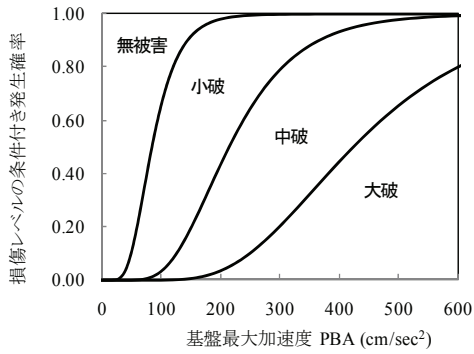
また、この研究では各構造要素の損失コストが示されており、本論でもこれを用いて損失額を算定した。ただし、同被災レベルのイベントが複数存在するため、最大損失額を各イベントの損失額によって重み付けしている。得られた橋梁全体系のフラジリティ曲線及び地震ロス関数を付図-3、付図-4に示す。

付表-1 各損傷レベル及び損失額の定義

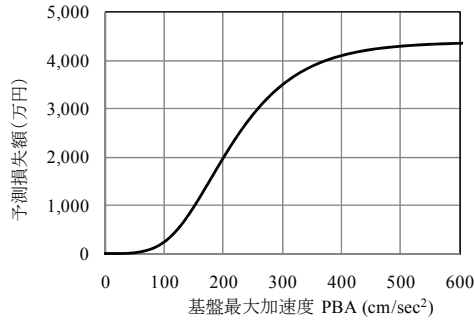
損傷レベル	変形角	基盤加速度 (cm/sec ²)	損失額 (百万円)
無被害	$\delta_1 \leq h/100$	0	0
小破	$\delta_1 \leq h/50$	85	1.47
中破	$\delta_1 \leq h/25$	215	43.74
大破	$h/25 \leq \delta_1$	425	43.74

付表-2 各損傷レベル及び損失額の定義

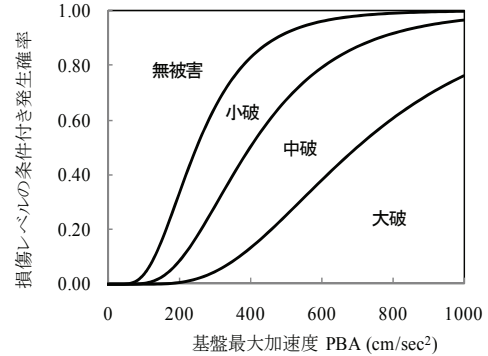
損傷レベル	変形角	基盤加速度 (gal)	損失率	損失額 (億円)
無被害	$\delta_1 \leq h/100$	~250	0.0	0.0
小破	$\delta_1 \leq h/50$	~400	0.093	0.7
中破	$\delta_1 \leq h/33$	~700	0.3	2.2
大破	$h/33 \leq \delta_1$	700~	1.0	7.2



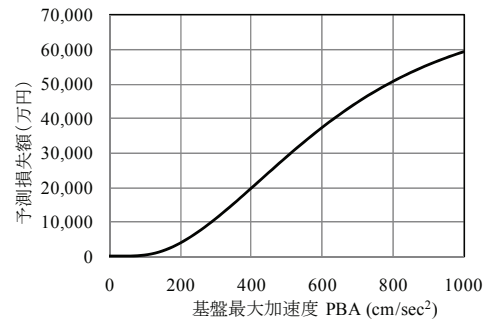
付図-1 ラーメン高架橋のフラジリティ曲線



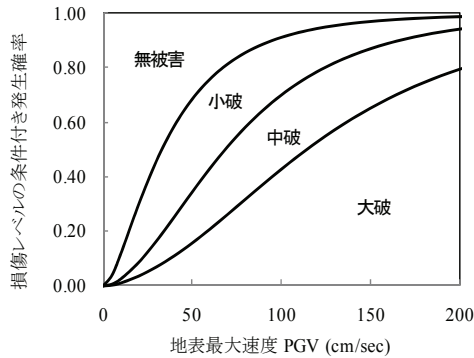
付図-2 ラーメン高架橋の地震ロス関数



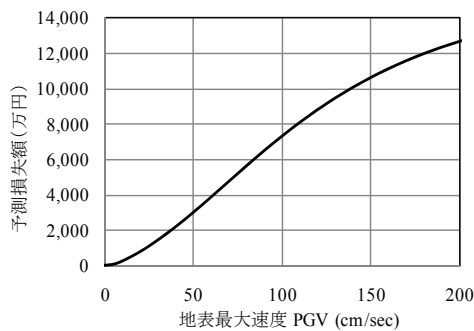
付図-5 ボックスカルバートのフラジリティ曲線



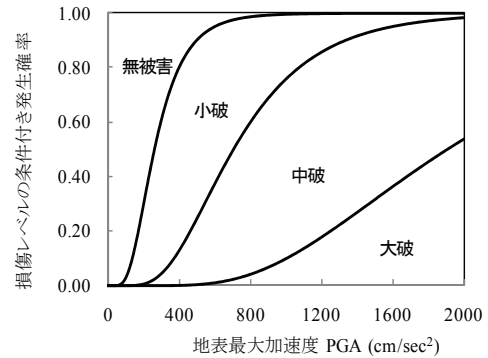
付図-6 ボックスカルバートの地震ロス関数



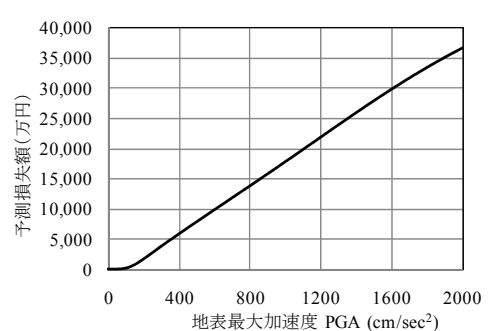
付図-3 橋梁構造物のフラジリティ曲線



付図-4 橋梁構造物の地震ロス関数



付図-7 盛土のフラジリティ曲線



付図-8 盛土の地震ロス関数

付表-3 各損傷レベル及び損失額の定義

被害レベル	計測震度 I	基盤加速度 PGA (gal)	被害確率 (箇所/km)	損失額 (億円)
無被害	~5	~263	0.0	0.0
小破	~6	~708	0.18	0.54
中破	~7	~1905	0.57	1.7
大破	7~	1905~	1.81	5.39

(3) 地中構造物 (ボックスカルバート)

ここでは地下駅舎部で用いられる一般的な2連のボックスカルバートを対象としている。松尾ら¹⁰⁾はボックスカルバートの損傷状態と層間変形角の関係を既往の実験結果及び解析結果に基づき整理している。また、一門・吉川¹⁹⁾は解析的に基盤加速度とボックスカルバートの層間変形角の関係を評価している。本論ではこれらを参考にボックスカルバートの被害形態と層間変形角及び地震動強度の関係を付表-2のように設定した。また損失額は既往の研究²⁰⁾より阪神大震災における中柱の損傷レベルごとの修復費用から各損失率を算定し、地下構造物の総修復費用とこの損失率から各損傷レベルごとの損失額を算定した。なお、既往の研究に本構造物を対象とした対数標準偏差の設定が無いため、各種の構造物のばらつきを一覧化された吉川らの研究²¹⁾を鑑みて0.5と仮定した。以上より作成されたフラジリティ曲線及び地震ロス関数を付図-5、付図-6に示す。

(4) 盛土構造物

盛土の被災レベルは高さ、天端幅、勾配、地盤条件等様々な影響を受けるため、被災レベルと地震動の強さ統一的に関連づけるのは困難である。したがってここでは、既往の研究¹¹⁾に示される地震動強度と盛土の被害確率(単位延長当たりの被害発生箇所数)の関係を参考とし、震度7以上を大破、震度6以上を中破、震度5以上を小破と定義し、被災箇所数を被害確率として地震動強さとの関係を整理した(付表-3)。また、損失額は既往の研究^{22), 23), 24)}を参照し、高さ10.0m、天端幅14.0m、延長150mの盛土の復旧費約2.98億円を被災箇所1箇所あたりの損失額とした。なお、ここでは盛土土量と復旧土量は同一と見なしている。対数標準偏差をボックスカルバートと同様に0.5と仮定した。フラジリティ曲線と地震ロス関数を付図-7及び付図-8に示した。

なお各既往研究において扱われる地震動強度は、評価地盤レベルについて基盤や地表面、強度指標について最大速度や加速度と様々である。本論で用いた地震動強度は地表面における最大速度(PGV)であるため、既往研究で取り扱われた地盤特性を考慮した基盤~地表面までの増幅率の定義や、翠川ら²⁵⁾による式(付-1)を用いて加速度から速度への変換等を行い、地表面PGVによる統一的な個別地震ロス関数を設定した。

$$I = 1.90 \log_{10}(PGA) + 0.14 = 1.72 \log_{10}(PGV) + 2.68$$

$$\log(PGA) = 0.43 \times I + 0.27 \quad (付-1)$$

参考文献

- 1) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, 第552号, pp. 169-176, 2002.2.
- 2) 中村孝明, 中村敏治: ポートフォリオ地震予想最大損失額(PML)評価, 日本リスク研究学会誌, Vol.12, No.2, pp. 69-76, 2001.1.
- 3) 石川裕, 武田正紀: 複数建物の集積地震リスク評価, JCROSSAR2000論文集, pp. 69-76, 2000.
- 4) 地震調査研究推進本部: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書, 2007.
- 5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, pp. 517-540, 2004.
- 6) Shinozuka, M., Feng, M., Q., Kim, H., Uzawa, T. and Ueda, T.: Statistical Analysis of Fragility Curves, Technical Report submitted to MCEER under Federal Highway Administration, 1999.
- 7) 佐藤一郎, 矢代晴実, 太田孝平, 福島誠一郎: 既往の被害曲線のまとめ, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-2, pp. 359-360, 2006.7.
- 8) 前田欣昌, 野口聡, 大滝健, 服部尚道, 吉川弘道: RC ラーメン高架橋の地震損傷イベント解析と地震損失評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp. 747-754, 2007.3.
- 9) 笛木孝哲, 庄司学: 高架道路橋の地震時機能損失評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.55A, pp. 449-459, 2009.
- 10) 松尾豊史, 金津努, 大友敬三, 福本彦吉: コンクリート製地中構造物の合理的な耐震性能評価指標に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, pp. 1-8, 2003.
- 11) 損害保険料率算出機構: 自治体の地震被害想定における被害予測手法の調査, pp. 240-243, 2006.7.
- 12) 国土交通省鉄道局監修: 鉄道統計年報平成18年度版, 2008.3.
- 13) 司宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp. 63-70, 1999.
- 14) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp. 213-232, 2004.4.
- 15) 松岡昌志, 若松加寿江: 地形・地盤分類250mメッシュマップを用いた地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会大会2005梗概集, pp. 418-419, 2005.11.
- 16) 藤本一雄, 翠川三郎: 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 第1号, pp. 11-22, 2006.
- 17) 吉川弘道, 大滝健, 服部尚道, 野口聡, 奥村幹也: 鉄道RCラーメン高架橋のEFM法による地震損失評価と地震リスク解析, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.1, pp. 33-43, 2009.1.
- 18) 庄司学, 藤野陽三, 阿部雅人: 高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp. 79-93, 1997.4.
- 19) 一門貴士, 吉川弘道: ボックスカルバートの非線形動

- 的応答解析と中柱の靱性評価, 東京都市大学卒業論文, 2006.
- 20) 土木学会: 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―, コンクリート技術シリーズ 67, pp. 220-238, 2005.9.
- 21) 吉川弘道: 鉄筋コンクリート構造物の耐震設計と地震リスク解析 15章 地震リスクの考え方と要素技術, 丸善, 2008.
- 22) 小路泰広: 道路盛土のライフサイクル地震リスク評価, 地盤工学会誌, Vol.57, No.3, pp. 12-15, 2009.3.1.
- 23) 鶴田舞, 日下部毅明: 実用的な道路防災事業効果評価手法の開発, 土木技術資料, Vol.48, No.12, pp. 36-41, 2006.12.
- 24) 日下部毅明, 谷屋秀一, 吉澤勇一郎: 道路施設に対する地震の防災投資効果に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.160, 2004.3.
- 25) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度及び地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, Vol.1, pp. 51-56, 1999.11.

(2010.9.3 受付)

SEISMIC RISK EVALUATION OF LINEAR FACILITY FOR RISK FINANCE

Hideto OMINE, Hiromichi YOSHIKAWA, Harumi YASHIRO and Takeshi OHTAKI

We propose a seismic risk evaluation method of linear facility for risk finance. This method treats linear facility as discretized interval, a number of structure's vulnerability as aggregate damage function. It may have applicability to production of previous study. In addition, we estimate seismic risk of railroad which is 20km straight line made by typical four structures in the metropolitan area, and describe risk in various forms.