

首都圏における鉄道施設の地震リスクとリスクファイナンス

Risk of Railroad in the Metropolitan Area and Application of Risk Finance

○大峯 秀人¹, 吉川 弘道², 矢代 晴実¹, 福島 誠一郎³
 Hideto OMINE¹, Hiromichi YOSHIKAWA²,
 Harumi YASHIRO¹, and Sei'ichiro FUKUSHIMA³

¹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
 Risk Modeling Group, Tokio Marine & Nichido Risk Consulting, Co., Ltd.

²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
 Advanved Reserch Laboratory, Tokyo City University, Dr. Eng.

³東電設計株式会社 防災グループ
 Disaster Reduction Engineering Group, Tokyo Electric Power Services, Co., Ltd.

We proposed method of seismic risk evaluation for linear facility. 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. We also introduce the risk finance that uses the technique of property insurance.

Keywords : linear facility, seismic risk evaluation, risk curve, risk index, risk finance, property insurance

1. はじめに

鉄道などの線状施設は人やモノを運ぶ重要な役割を担っている。また地震などの災害時においては、緊急時の人の参集や帰宅、緊急物資の輸送など社会基盤として重要性がより強まる。

これらの施設に対し、事業者は災害時の影響を出来るだけ小さくし、また復旧に要する期間を出来るだけ短くするため、事前対策や事後対策などのリスクへのマネジメントが必要となる。

リスクへの対応として、発生率の軽減、損失の減少、リスク移転、リスク保有などがあるが、図-1.1 に示すリスクコントロール、リスクファイナンスが代表的な手段となる。具体的には構造物の事前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、事後の金銭的補填を受ける保険等のリスクファイナンスが上げられる。いずれにしてもマネジメントを講じる前提に必要なのがリスクの定量化であり、マネジメント実施の意思決定、効果の妥当性の検証に有用な情報となる。

本論では既往のポートフォリオを対象とした確率論的地震リスク評価を応用した線状施設における地震リスク評価手法を紹介し、首都圏における鉄道路線を想定した地震リスクの定量化を行う。またマネジメントとして、保険によるリスクファイナンスのスキームを紹介し、試算を行った鉄道路線への適用例を提示しその効果を記述する。

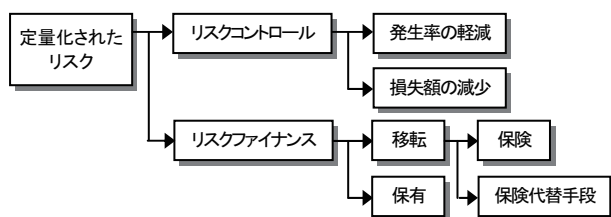


図-1.1 リスクへのマネジメント

2. 線状施設の地震リスクの定量化手法

(1) 線状施設の確率論的地震リスク評価手法

本論では、鉄道のような線状施設の地震リスク評価手法として、図-2.1 に示すように連続的な線状施設を離散的に取り扱い、各分割長の集約点*i*として評価する。これにより、既往の研究¹⁾における複数地点で構成される目的物のポートフォリオを対象とした確率論的地震リスク評価の手法を活用することが可能となる。

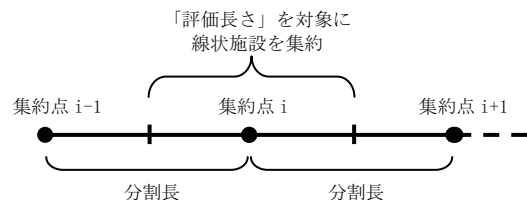


図-2.1 線状施設の離散的取扱い

確率論的地震リスク評価の流れは、所在地の地震危険度評価と目的物の脆弱性の評価に大別される。本論では、各集約点の地震危険度分析について地震調査研究推進本部²⁾の成果を用い、脆弱性の評価について鉄道施設を構成する代表的な土木構造物を選定し、統一的な解釈による地震ロス関数を新たに構築し用いる。

(2) 鉄道施設の地震ロス関数の構築

本論で対象とする鉄道施設は、高架橋、橋梁、地中構造物、盛土/切土の4土木構造物とした。次に、これらの地震ロス関数を構築するため、各構造物の脆弱性に関する既往の研究^{3), 4), 5) 6)}を考察し、地震動強度に対する被害程度(小破、中破、大破)の生起確率や、被害程度における復旧金額を整理し、図-2.2 の各構造物の単位長さ当たりの復旧金額曲線である各地震ロス関数としてまとめた。なお、本論では地震動強度を地表面最大速度(PGV)で統一している。

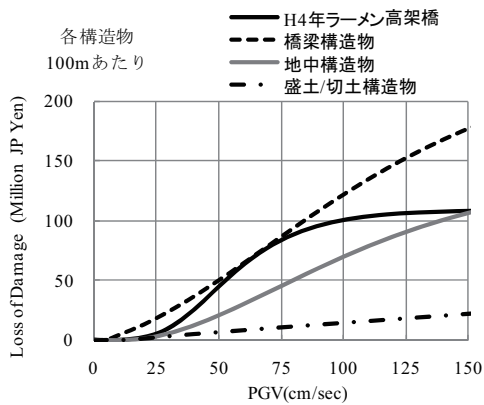


図-2.2 単位長さの各地震ロス関数

次に、線状施設の集約点 i における構造物の脆弱性を表す集約地震ロス関数 ADF を構築する。前述した 4 土木構造物 j の地震ロス関数 DF を各構造物の線状内の構成比 β から下式により集約する。

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

ここで、 $j=1$ ：高架橋、 $j=2$ ：橋梁、 $j=3$ ：地中構造物、 $j=4$ ：盛土/切土とし、首都圏を放射状に延びる代表的な私鉄沿線の統計資料より構成比 β を設定した。表-2.1 に各構造物の構成比率を示す。

表-2.1 各構造物の構成比率

j	個別地震ロス関数	既往の研究における取り扱い	構成比率 β
1	高架橋	H4年ラーメン高架橋 (線路直角方向)	13.8%
2	橋梁	橋梁構造物	8.7%
3	地中構造物	トンネル (ボックスカルバート)	6.7%
4	切土/盛土	盛土/切土構造物	70.8%

以上より作成された集約地震ロス関数は図-2.3 となり、これは 4 土木構造物で構成される線路 100m における地震動強度に対する予測復旧額を示す。

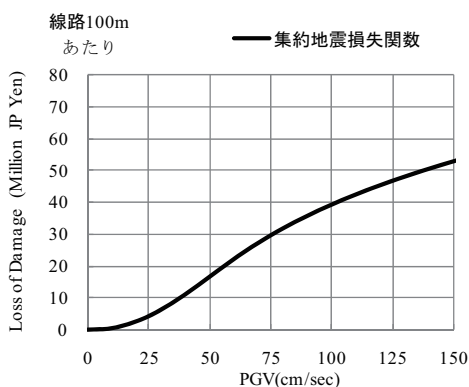


図-2.3 100m あたりの集約地震ロス関数

(3) 地震リスクカーブと各リスク指標

以上の集約地震ロス関数と、モンテカルロシミュレーション（以下、MCS）を援用した地震危険度分析により各集約点における予測復旧額を集積し線状施設の損害額

とする。MCS は、あらかじめ設定した震源データに基づき、1 サンプルにつき数十万個のシナリオ地震を発生させている。また使用する強震動予測（距離減衰式）のばらつきを考慮し 500 サンプルの分析を実施する。これより地震の発生頻度を考慮した確率的地震リスクが評価可能となり、図-2.4 に示す非超過確率と損害額の関係であるリスクカーブとなる。

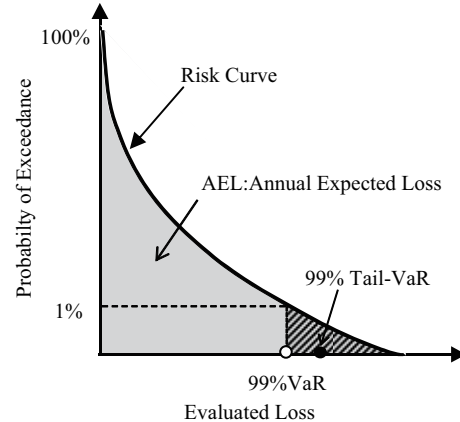


図-2.4 リスクカーブとリスク指標の概念図

その他の地震リスクの表現方法として、リスクファイナンス構築に用いられている年間損失期待値 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りリスク指標がある。これらは、リスクカーブにより算出され、以下の意味を持つ。

- 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）

本論では、以上の指標により地震リスクを取り扱う。

3. 首都圏鉄道路線における試算

(1) 想定直線路線の設定

線状施設の地震リスクの定量化の試算を行う。対象は、首都圏を放射線状に延長する直線 20km の鉄道路線とする。計 4 路線を想定し、震源との距離関係、表層地盤の特性による地震リスクへの影響を明らかにする。

表層地盤の特性は、地震調査研究推進本部が公表する 250m メッシュごとの地盤増幅率（工学的基盤から表層地盤までの増幅特性）とし、図-3.1 に 4 路線との位置関係を示す。また表-3.1 に各路線の始終点および地盤の定性的な特性を示す。

表-3.1 各路線の始終点と地盤の特徴

路線名	始点/終点	表層地盤の特徴
Line-1	池袋発	終点に向け荒川流域で地盤増幅率が大きい
	大宮方面	
Line-2	新宿発	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
	国立方面	
Line-3	渋谷発	路線中央部が多摩川流域より地盤増幅率が大きい
	横浜方面	
Line-4	上野発	荒川及び江戸川の流域から後背湿地が広がっており地盤増幅率が大きい
	柏方面	

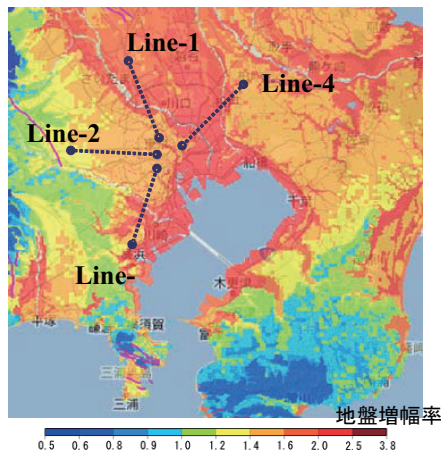


図-3.1 想定4路線と地盤増幅率関係

(2) 地震リスク試算結果

MCSの結果から集計された4路線のリスクカーブは図-3.2の通りであり、以下の傾向を示している。

- いずれの非超過確率領域についてもLine-2の損害額が最小、Line-4が最大となり、表層地盤の特性による影響が生じている。
- Line-1およびLine-3は、非超過確率0.5%以上の領域ではほぼ同じ損害額となるが、0.5%以下の低頻度領域ではLine-3の損害額が大きくなっている。
- Line-1とLine-3の線状における地盤増幅率は同程度であり、上記の違いは影響の大きい相模トラフの地震に対しLine-3が近傍に位置するためである。

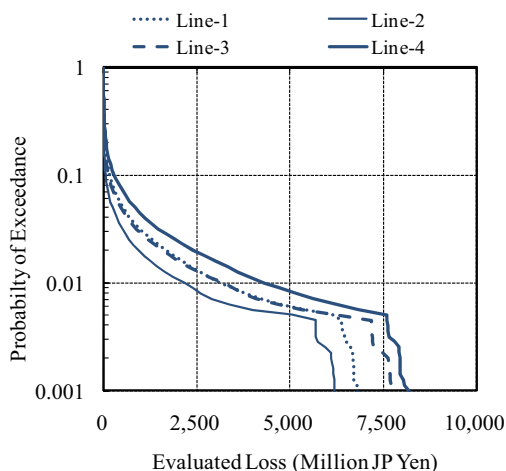


図-3.2 各路線のリスクカーブ

リスクカーブより算出される各リスク指標は、表-3.2となり、いずれの指標においてもLine-2が最小値、Line-4が最大値である。またLine-1とLine-3のAELが同程度であるが、低頻度のリスク指標である99%Tail-VaRではLine-3がLine-1を上回っており、リスク指標による数値がリスクカーブの形状を良く表現している。

表-3.2 各リスク指標 (百万円)

路線	AEL	99% VaR	99% Tail-VaR
Line-1	129	3,128	5,483
Line-2	81	2,150	4,503
Line-3	124	3,243	5,802
Line-4	186	4,291	6,807

4. リスクファイナンスによるリスク移転

(1) 保険によるリスク移転の特徴

リスクファイナンスの代表的な手法は、保険によるリスク移転であり、本論ではその特徴を述べる。

鉄道資産の損害を担保するための損害保険には、軌道・プラットフォーム・トンネル・橋梁などの土木構造物を対象とした「土木構造物保険」がある。しかし、本保険は河川の増水に起因した流出による損害、土砂崩壊に起因した損害、トンネル内での車両の炎上に起因した焼損による損害などを担保しており、地震・噴火・津波による損害やなどは担保しない。従って、鉄道資産の地震リスクを移転するためには、土木構造物保険などの主契約に、地震による損害を担保する特約条項である「地震危険担保特約」を付帯することが必要となる。

「地震危険担保特約」は保険金額(目的物の価値)を上限として、地震・噴火・津波を起因とする実際の損害額を支払保険金として受取る「実損填補」である。

しかしながら、実際の保険契約の場合では、比較的高い頻度で生じる軽微な損害を含め付保範囲にすると契約者の支払保険料が高額になること、また支払保険金の上限を保険金額とすると保険会社の責任範囲が大規模となることから、図-4.1の支払限度額方式などによる「特別約款」にて約定されることが一般的である。

これにより軽微な損害は免責金額により契約者が負担し、それを超える損害は支払限度額を限度として保険会社が負担するスキームが可能となる。

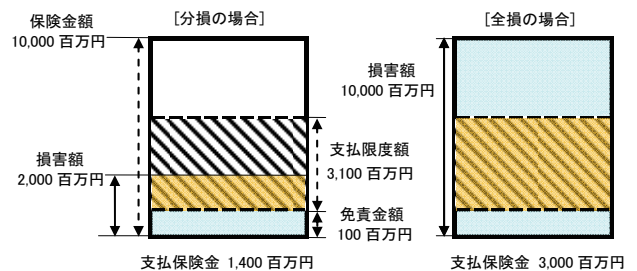


図-4.1 支払限度額(免責付)方式の支払保険金

図-4.1の支払限度額(免責付)方式の例では、損害に対する契約者および保険会社の負担は以下の通りとなる。

- 損害額が100万円以下の場合、免責金額以内のため契約者の保有リスク
- 損害額が100万円を超え、かつ3,200万円(支払限度額と免責金額の合計)以下の場合、100万円が契約者の保有リスク、損害額から100万円を控除した金額が保険会社への移転リスク
- 損害額が3,200万円を超える場合、3,200万円が保険会社への移転リスク、免責金額100万円と3,200万円を超える金額が契約者の保有リスク

(2) 各路線のリスクファイナンスによる効果

3章で示した4路線の地震リスクを前項の支払限度額方式によりリスク移転した場合の特徴を述べる。

設定した支払条件は、いずれも免責金額100万円、支払限度額は3,100万円とした。なお支払限度額は4路線の99%VaR値の平均値である3,200万円から免責金額100万円を控除した数値とした。

以上の支払条件を4路線に適用した場合、各路線のリスクカーブに対して「保険会社への移転リスク」、「鉄道会社の残余リスク」と2つのリスクカーブに分離でき、

これにより非超過確率（発生確率）に対する両者のリスク負担スキームが明らかとなる。図-4.2、4.3 にリスクが最小となる Line-2 と最大となる Line-4 の各リスクカーブを示し、表-4.1 に両者のリスク指標を示す。

傾向は、以下の通りである。

＜鉄道会社の残余リスク＞

- Line-2 では鉄道会社の残余リスクが免責金額内に収まる非超過確率は 0.7%、Line-4 で 1.5%となる。
- いずれの路線も上記の非超過確率以下になると急激に残余リスクが上昇する。

＜保険会社への移転リスク＞

- Line-2 では、保険会社への移転リスクが始まるのが非超過確率 6%、支払限度額に達するのが 0.7%
- Line-4 では、保険会社への移転リスクが始まるのが非超過確率 20%、支払限度額に達するのが 1.5%

＜リスク指標＞

- 各路線のリスク指標の大小関係は、3 章の全体リスク指標と同様な傾向を示す。ただし保険会社への移転リスクは支払限度額 3,100 百万円であり、Line-3 および Line-4 の 99%Tail-VaR は上限値となる。
- Line-3 および Line-4 の鉄道会社の残余リスクの 99%VaR は免責金額 100 百万円を超える。
- 鉄道会社の残余リスクの 99%Tail-VaR は各路線の相違の比率が、全体のリスク指標の比率より大きい。

表 4.1 各レイヤーのリスク量（百万円）

路線	保険会社への移転リスク			鉄道会社の残余リスク		
	AEL	99% VaR	99% Tail-VaR	AEL	99% VaR	99% Tail-VaR
Line-1	87	3,028	3,096	41	100	2,387
Line-2	55	2,050	2,881	26	100	1,623
Line-3	81	3,100	3,100	42	143	2,702
Line-4	124	3,100	3,100	63	1,191	3,707

5. まとめ

本論では、土木構造物による線状施設の地震リスク評価手法を紹介し、首都圏を放射線状に延長する直線 20km の鉄道を 4 路線想定して試算を行った。またリスクファイナンスとして保険によるリスク移転の例を提示し、その特性を分析した。

その結果、以下としてまとめられる。

- 路線の配置により、震源との距離関係や表層地盤の特性によりそれぞれの地震リスクが異なる。
- 地震リスクは、リスクカーブや各リスク指標により表現が可能である。
- 保険によるリスクファイナンスでは、損害額と支払条件の設定により契約者の残余リスクと保険会社への移転リスクの関係が変化する。
- 今後の課題として、リスクファイナンスによる効果と、耐震補強などのリスクコントロールの効果の関係等を考察したい。

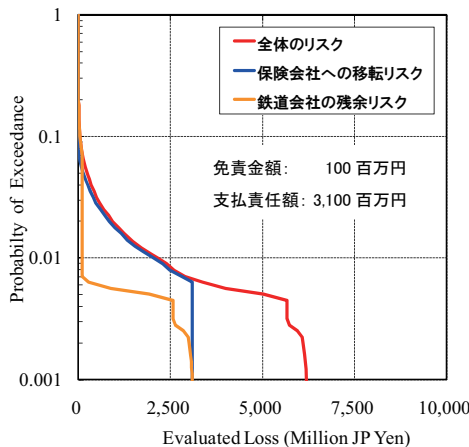


図-4.2 Line2 の各リスクカーブ

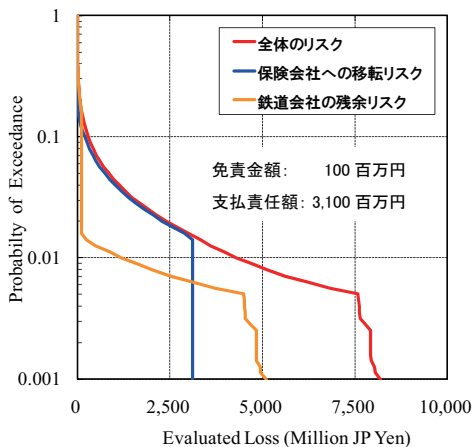


図-4.3 Line4 の各リスクカーブ

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) 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.
- 3) 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.
- 4) 庄司学, 藤野陽三, 安部雅人: 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.
- 5) 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.
- 6) 小路泰広: 道路盛土のライフサイクル地震リスク評価, 社団法人地盤工学会 地盤工学会誌, Vol. 53-3, pp. 12-15, 2009.3.1.