

地震動の解析モデルに基づいた 鉄道のリスク評価手法

畠山 直* 柴田 徹* 豊岡 亮洋**
坂井 公俊** 室野 剛隆**

Methodology for Risk Assessment of Railway Based on Seismic Analysis Model

Naoki HATAKEYAMA Toru SHIBATA Akihiro TOYOOKA
Kimitoshi SAKAI Yoshitaka MURONO

In this study, we have proposed the methodology for risk assessment in which the damage of human, railway structure, and train car, and also operating loss are considered. This method is composed of the following steps. 1) The ground motion from some seismic sources is simulated and the occurrence probability is calculated based on an analytical model. 2) The sequence of derailment events is analyzed by event tree analysis. 3) The risk is estimated based on these results. We have implemented some case studies to evaluate the validity of this method.

キーワード：リスク、イベントツリー分析、地震、年発生確率、脱線、損傷確率

1. はじめに

鉄道が影響を受ける災害には、台風、風水害、雪害、地震など様々なものがある。これらの災害の中で、地震がもたらす被害の大きさは極めて大きいと考えられる。兵庫県南部地震による阪神淡路大地震や新潟県中越沖地震において被災地域の被災被害は記憶に新しい。また今後、東海地震をはじめとし、首都直下地震、東南海地震などが起こるであろうと予想されており、地震対策をとることが求められている^{1), 2)}。

従来から地震災害に対するリスク評価の研究^{3), 4)}はなされてきており、例えば、内閣府中央防災会議で行われた首都直下地震に係る想定手法の研究⁵⁾などが挙げられる。しかし、このような従来の研究では、想定した地震に対してのみのリスク評価となっており、個別の地震の影響を評価しているものが多い。しかし、地震対策を実施するためには、費用対効果の大きい区間を選択できるような手法となっていることが望ましい。また、従来の研究は鉄道分野に関する詳細な分析結果ではないため、鉄道事業者が効率的な対策を講じるためのリスク評価手法としては十分なものではなかった。

このようなことから、本研究では地震の発生確率やその規模、構造物の損傷確率、列車の運行状況などから、確

率論的な枠組みでリスク評価を行うことにより、地震対策の費用対効果の大きい区間を選出できるような評価手法（以下、本手法と記述）の提案を目的としている。

2. 提案手法の概要

本手法の概要を図1に表わす。地震が起きると、その振動は地盤、構造物を伝播して、列車に伝わる。このとき、構造物の損傷程度と列車が脱線したかどうかに応じて、鉄道施設の被害や列車被害などが生じる。これらの現象を以下の手順で、確率論的に数値化しリスクを求める。

本手法では、対象となる路線区間の周りに複数の地震源が存在することを想定している。これら複数の地震の情報から、対象区間の各地点における総合的な地震動の発生確率としてまとめられる（図1中I）。

次に、この地震動の発生確率に基づき鉄道構造物の損傷程度を算出する（図1中II）。この損傷程度は、鉄道構造物の被害率曲線から損傷確率として求められる。

さらにイベントツリー分析により、構造物の損傷確率に応じて、列車の脱線確率を算出する（図1中III）。

このようにして求められた構造物の損傷確率と列車の脱線確率に対して、損害規模と損害額を設定することにより（図1中IV）、対象路線区間の各地点におけるリスクを算出する。

* 人間科学研究部（安全性解析）

** 構造物技術研究部（耐震構造）

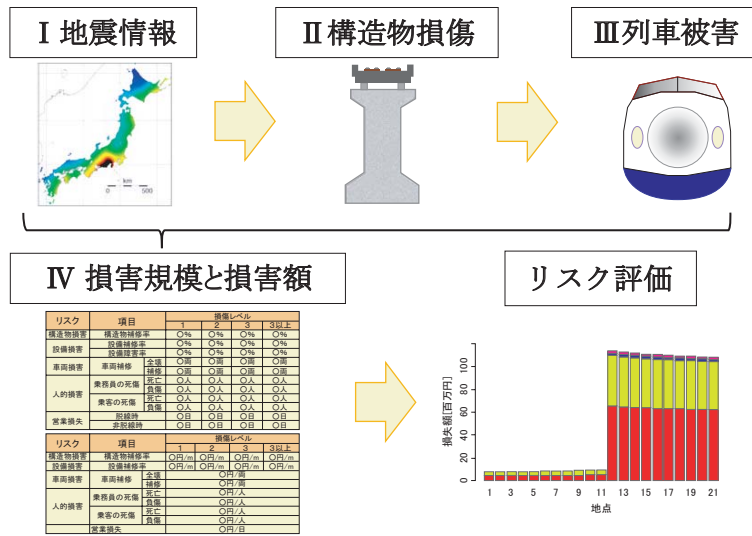


図1 リスク評価手法の概要

3. 構造物の損傷確率の算定

まず、各地点の地表面における地震動の最大加速度と発生確率を次の手順で算出する。最初に、過去の地震発生履歴や活断層調査結果に基づいて対象構造物に影響を与える地震活動を個々にモデル化し、各震源での最大加速度と発生確率を求める(図2中①)。次に、震源の情報に基づき対象地点の基盤位置での最大加速度と発生確率を算出する。対象となる震源が複数ある場合、その全ての震源について同様の計算を行い、その結果を統合する(図2中②)。さらに地盤の硬・軟による地震動の増幅を考慮することによって(図2中③)、地表面における最大加速度とその発生確率が算出される(図2中④)。

次に、非線形応答解析を多数実施し、構造物(等価固有周期 T 、降伏震度 Kh)の応答塑性率 μ がある値を超え

る確率値と構造物への入力地震動レベル(地表面の最大加速度)との関係を求める(図3)。ここで、応答塑性率 μ は δ_{max}/δ_y (δ_{max} :構造物の最大応答変位、 δ_y :構造物全体としての降伏変位)である。この応答塑性率 μ を用いて、過去の被災事例等から次のように損傷レベルを、 $\mu \leq 1$ の場合を損傷レベル1、 $1 < \mu \leq 2$ を損傷レベル2、 $2 < \mu \leq 4$ を損傷レベル3、それ以上を損傷レベル3以上と定義した。従って、損傷レベル1の場合は構造物の弾性範囲となり、損傷レベル2以上の場合は構造物の塑性範囲となる。図3では、青線が応答塑性率=1、緑線が応答塑性率=2、赤線が応答塑性率=4の場合の累積損傷確立を表している。従って、対象となる地表面の最大加速度における、累積損傷確立の差が各損傷レベルの生じる確率(損傷確率)となる。

最後に、構造物に作用する地震動の最大加速度とその発生確率(図2中④)および対象とする構造物の被害曲線(図3)を用いて、各地点で各損傷レベルが生起する確率を求める(図2中⑤)。

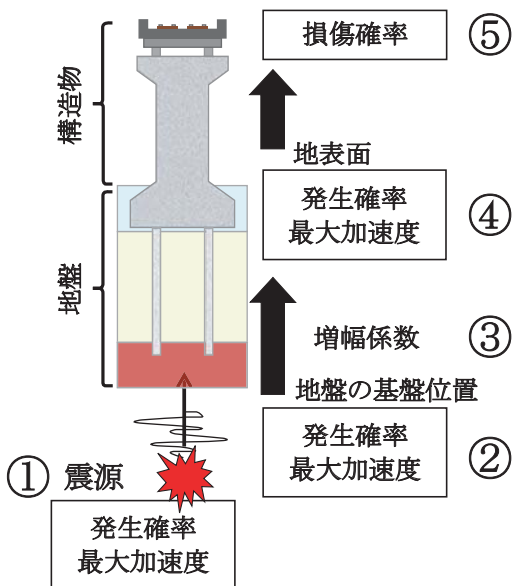


図2 損傷確率算定の概念図

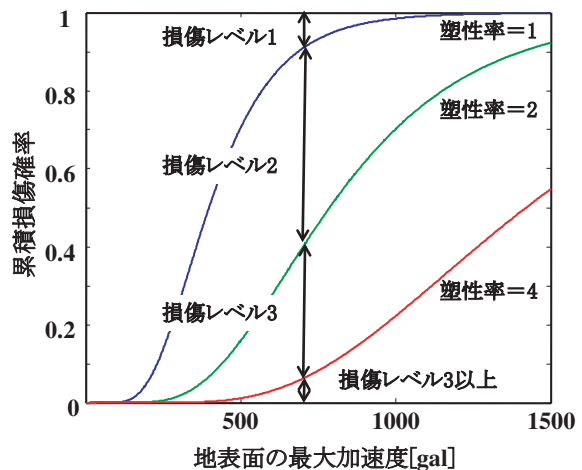


図3 損傷確率の算出

4. 脱線事象の分析

地震動が列車へ与える被害を算出するため、まず列車脱線に関してイベントツリー分析を行った(図4)。図4のイベントツリー分析は、列車がその対象区間にいるかどうか、構造物の揺れにより脱線するかどうか、残留変形によって脱線するかどうかの3事象の分岐からなる。イベントツリーにおける各分岐に対する確率は、次のようにして求めていく。

まず、列車が対象区間にいるかどうかの確率を表す在线確率は、運行ダイヤなどの情報から対象区間に列車がいる時間の割合を求めることで算出できる。対象路線区間に列車がいなければ、脱線は起こらない。

次に、対象路線区間に列車が存在するとき、構造物のゆれによる脱線が起こる確率を求める。これは、走行安全性判定ノモグラム(図5)を用いて算出する。走行安全性判定ノモグラムでは、構造物の振動卓越周期と最大応答加速度から列車の脱線・非脱線を判定する⁶⁾。ただし、本ノモグラムでは地震による構造物の角折れ等の影響などは考慮されていない。

ここで横軸の振動卓越周期は、構造物の等価固有周期と応答塑性率の値を用いて以下の式(1)、(2)により求めることができる⁶⁾。

$$\begin{aligned} & \text{応答塑性率 } \mu \leq 1 \text{ のとき} \\ & \text{振動卓越周期} = \text{等価固有周期} \quad (1) \\ & \text{応答塑性率 } \mu > 1 \text{ のとき} \end{aligned}$$

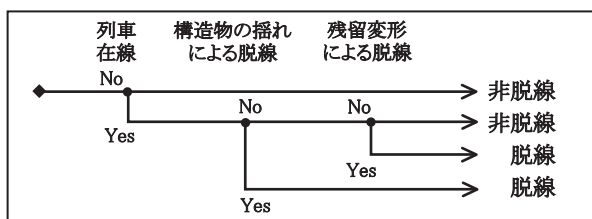


図4 脱線事象のイベントツリー分析

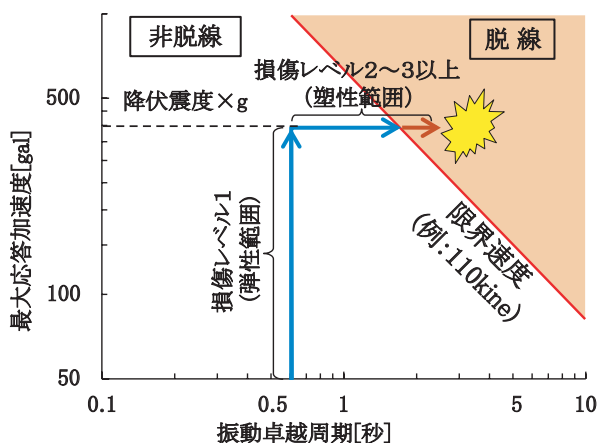


図5 走行安全性判定ノモグラム

$$\text{振動卓越周期} = \sqrt{\mu} \times \text{等価固有周期} \quad (2)$$

このように、構造物の振動卓越周期は、弾性範囲内(損傷レベル1: $\mu \leq 1$)のときは等価固有周期と等しく、入力地震動が大きくなり塑性範囲(損傷レベル2以上: $\mu > 1$)に至ると、応答塑性率の値に応じて周期が増加する。

図5の走行安全性判定ノモグラムは、構造物の限界速度を閾値(例110Kine)として、脱線・非脱線を判定するものである⁶⁾。右上の橙色の領域内に至ると列車が脱線していると判定される。図の青矢印は、等価固有周期0.6秒の構造物において、入力地震動(地表面の地震動)が大きくなっていったときの進展を示している。まず、入力地震動の大きさが構造物の弾性範囲内の場合、横軸の振動卓越周期は構造物のもつ等価固有周期のまま変化しないので、縦軸の構造物の最大応答加速度が大きくなっていく。その最大応答加速度が降伏震度 $\times g$ の値にまで達すると、構造物の塑性化が始まる(g は重力加速度)。このため、縦軸の応答加速度は増加しない。一方、式(2)より構造物の振動卓越周期は増加し、構造物は等価固有周期よりゆっくりとした周期で揺れるようになる。このため、塑性範囲では入力地震動が大きくなるに従って、グラフ上を右側に移動してゆく形となる。さらに入力地震動が大きくなり橙色の領域に入ると脱線と判定される。

上記以外にも、構造物のゆれによる脱線が生じなかった場合でも構造物が損壊している箇所へ列車が進入して脱線にいたるようなケースも考えられる(=残留変形による脱線)。このような事象に対する確率は各損傷レベルに応じて確率値を設定することによって求めることとした。ケーススタディでは設定値として50%を用いたが、どのような設定値が適切であるかは今後の課題と考えている。

5. 損害状況と損害額の設定

対象となる損害状況として、高架や橋梁など鉄道構造物の損害、鉄道構造物上の信号設備などの設備に関する損害、列車の車両に対する損害、乗務員・乗客の死傷による人的被害、構造物等の損壊のため営業できないことによる損失を対象とした。

リスクの定義・解釈には様々なものが存在するが、一般的には事象の発生確率と事象の結果の組合せで表わされることが多い。本手法では、構造物の損傷確率と列車の脱線確率から、各事象の発生確率を求め、損害金額との積によりリスクを表すこととする。

表1、表2は、損傷確率と脱線確率からリスクを求めるために必要となるパラメータを整理する表である。ただし、欄の中の値は本報告で示すケーススタディで用い

特集：ヒューマンファクター

た値である。表1の構造物補修率は、構造物が損傷したために補修が必要な割合のことで、構造物の損傷確率と等しい。設備補修率とは、構造物上の信号設備などが損傷した割合を示す。設備補修率は、構造物の損傷確率に設備障害率を乗じた値とする。これは、構造物が損傷した区間でも、全ての信号設備が損傷するとは限らないことを考慮している。車両補修数は、ある列車が脱線もしくは転覆した場合に、全壊した車両数と補修の必要な車両数を表す。乗客・乗務員の死傷者数は、同じく列車が脱線もしくは転覆した場合に生じた死傷者数を示す。車両補修数および乗客・乗務員の死傷者数は、脱線時の損害を示しているため、構造物の損傷レベルごとに脱線確率を求める必要がある。最後に営業損失は車両脱線有無に応じて、それぞれに営業出来ない日数を設定する。表2は、表1の各損害状況に対応して、補修または損失を補てんするためにかかる費用を設定する。

構造物の損傷確率、列車の脱線確率に表1、表2から求まる損害状況および損害額を図4のイベントツリーに従って掛け合わせていくことにより、各ケースのリスクを求めることが出来る。イベントツリー分析（図4）お

表1 ケーススタディで用いた損害状況の設定値

リスク	項目	損傷レベル		
		2 & 3	3以上	
構造物損害	構造物補修率	損傷確率		
設備損害	設備障害率	70%	100%	
	設備補修率	損傷確率×設備障害率		
車両損害	車両補修	全壊	1両	2両
		補修	2両	8両
人的損害	乗務員の死傷	死亡	1人	
		乗客の死傷	死亡	3人
		負傷	75人	360人
営業損失	非脱線時	10日	60日	
	脱線時	30日	120日	

表2 ケーススタディで用いた損害額の設定値

リスク	項目	損傷レベル		
		2 & 3	3以上	
構造物損害	構造物補修率 [/m]	100万円	400万円	
設備損害	設備補修率 [/m]	100万円	200万円	
車両損害	車両補修	全壊	2.5億円/両	
		補修	1.25億円/両	
人的損害	乗務員の死傷	死亡	1.5億円/人	
		乗客の死傷	死亡	2.5億円/人
		負傷	200万円/人	
営業損失		1200万円/日		

よび損害状況（表1）、損害額（表2）は、リスクを出すために最低限必要なパラメータを整理したものであり、現実の評価では、さらに詳細な分析および設定が必要と考えている。

6. ケーススタディ

本手法を用いてケーススタディを実施した。ケーススタディでは、対象路線の周囲に海溝型の地震と活断層型の地震が存在する状況を想定する。海溝型の地震は対象路線から比較的遠くに位置し、活断層型の地震は路線の近くに存在するように設定してある。活断層型の地震の位置については、対象路線区間の中間にある場合（図6）と左端にある場合（図7）の2通りを考える。このとき、各地震のパラメータを表3のように設定する。

対象路線区間は100kmとし、その路線区間をさらに5kmごとの区間に区切る。5kmごとに区切られた地点に対して、図の左側から1～21の地点番号がふつてある。

地盤は硬い地盤（G3）と軟らかい地盤（G5）の2種類を想定する。鉄道構造物は等価固有周期が0.4秒で降伏震度が0.4のもの、等価固有周期が1.0秒で降伏震度0.4のもの2種類を考える。

地震、地盤、構造物の組合せは、以下の3ケースについて考慮する。まず、活断層型の地震が対象区間の中央にある位置関係（図6）に対して地盤・構造物の組合せ2ケース（表4）を考える。表4のケース1では、対象区間において構造物は全て同じで、等価固有周期0.4秒、降伏震度0.4である。地盤は硬い地盤と軟らかい地盤の半々で構成されている。表4のケース2では、地盤の条件はケース1と同じであるが、硬い地盤の上に位置する構造物の等価固有周期を1.0秒に変更する。次に活断層型の地震が対象区間の左端に位置する関係（図7）に対して地盤・構造物の組合せ1ケース（表5）を考える。表5のケース3では、地盤は硬い地盤のみ、構造物も等価固有周期0.4秒、降伏震度0.4のものだけで構成されている。

ケース1では地盤の硬軟がリスクに与える影響、ケース2では構造物の固有周期と地盤の固有周期の関係がリスクに与える影響、ケース3では断層からの距離がリスクに与える影響について考慮している。対象路線における列車の運行環境は3ケースとも同じであると想定し、損害状況と損害額を表1、表2のように設定した。上述した3ケースについて提案手法に従ってリスク評価を行った結果を図8～図10に表わす。

ケース1の結果からは、等価固有周期0.4秒、降伏震度0.4の構造物の条件では地盤が硬い地点のリスクが高くなっている。しかし、構造物の等価固有周期が1.0秒の場合（ケース2の左半分）、ケース1の軟らかい地盤の

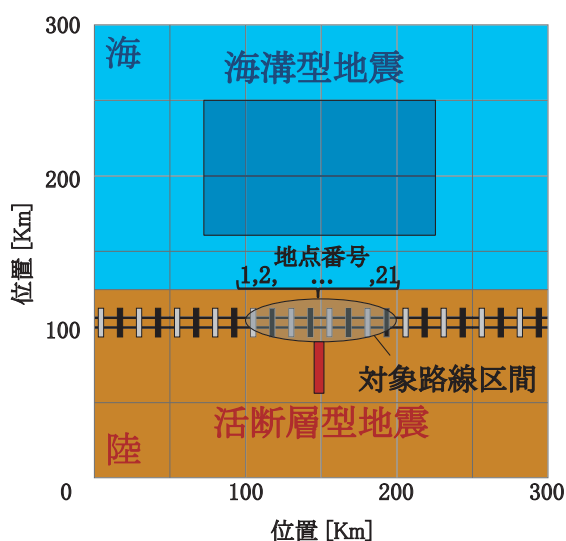


図6 地震と路線の位置関係
(活断層型地震の位置が路線の中間)

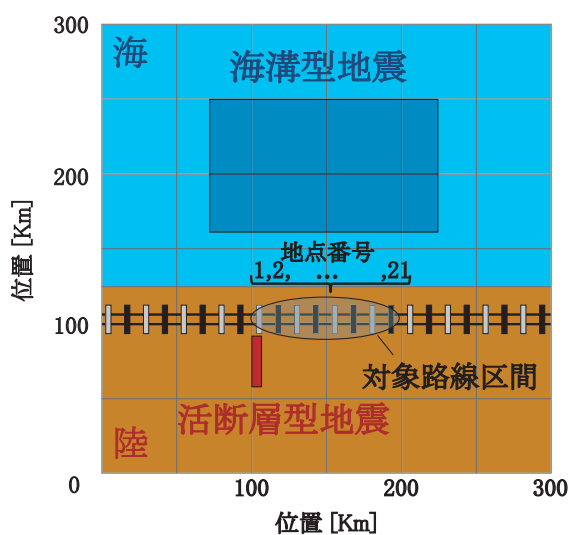


図7 地震と路線の位置関係
(活断層型地震の位置が路線の左端)

表3 地震のパラメータ

パラメータ	単位	海溝型	活断層型
規模	Mw	8.0	7.0
延長	km	150	40
幅	km	100	20
上端深度	km	20	2
走向	deg	90	180
傾斜角	deg	30	90
発生間隔	年	50	2000

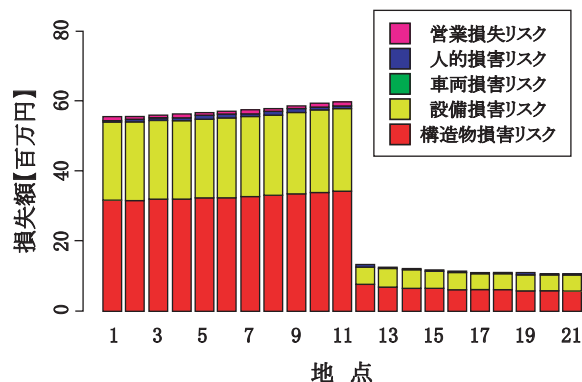


図8 ケース1のリスク評価結果

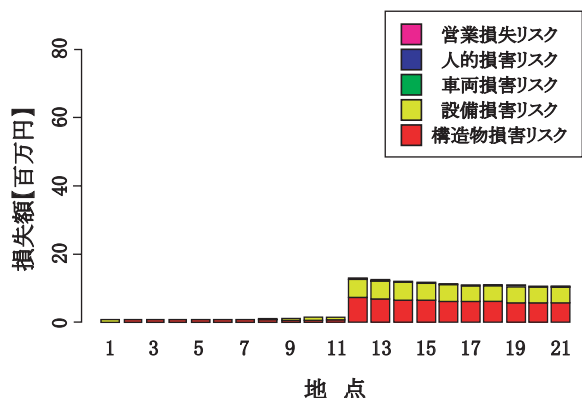


図9 ケース2のリスク評価結果

表4 地盤と構造物の設定 (ケース1, 2)

地点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
ケース1	構造物	等価固有周期											0.4										
		降伏震度											0.4										
	地盤	硬 (G3)										軟 (G5)											
ケース2	構造物	等価固有周期	1.0										0.4										
		降伏震度											0.4										
	地盤	硬 (G3)										軟 (G5)											

表5 地盤と構造物の設定 (ケース3)

地点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
ケース3	構造物	等価固有周期												0.4									
		降伏震度												0.4									
	地盤	硬 (G3)																					

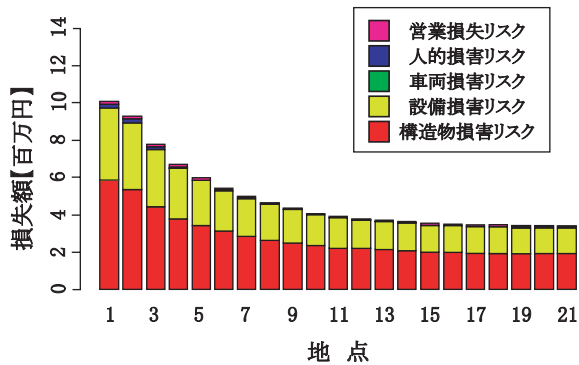


図10 ケース3のリスク評価結果

リスクよりも低くなるのがわかる。地盤の硬軟だけではなく、構造物の等価固有周期の関係により、リスクが変動することがわかる。

また、ケース3の結果から（図10）活断層型の地震の影響により、断層から離れるに従い指数関数的にリスクは低くなるが、海溝型の地震の影響によりリスク値の低下はある一定値で下げ止まることがわかる。

このように、本手法では、地震の規模や位置関係、地盤、構造物の種類・特徴に応じて、対象路線の地点ごとのリスクを評価することが可能である。また、各パラメータや設定値に地震対策の効果を反映させ、リスクを比較することによって、費用対効果を考慮することも可能な手法となっている。

7. まとめ

地震動が震源から地盤を伝播し地表面を揺らす過程と地表面の揺れが構造物に与える影響を分析し、構造物の損傷確率としてまとめた。地震の発生確率と構造物の損傷確率から、地震の発生確率を考慮した構造物の損傷確率が求まる。さらに、構造物の揺れと車両の脱線の関係进行分析し、脱線確率としてまとめた。これら構造物の損傷確率と車両の脱線確率に基づいて、構造物損害、設備損害、車両損害、人的損害、営業損失を整理し、リスク算出手法を開発した。本手法に基づき、ケーススタディを用いて、各損害に対するリスクを算出し、その結果について比較検討した。

文献

- 1) 内閣府：事業継続ガイドライン（第一版），2005
- 2) 土木学会誌編集委員会：これからの安全・安心－災害情報を生かす－，土木学会誌叢書，2008
- 3) 大沢幸雄，土屋清人：地震リスク対策 建物の耐震改修・除去法－災害時の事業継続計画・税務戦略のつくり方，中央経済社，2009
- 4) 中村孝明，宇賀田健：地震リスクマネジメント，技報堂出版，2009
- 5) 中央防災会議：首都直下地震対策専門調査会報告，2005
- 6) 野上雄太，室野剛隆，宮本岳史，佐藤勉：地震時の広域な構造物被害および走行安全に関する簡易推定法，鉄道総研報告 Vol.22, No.10, 2008