

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	広域鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する研究
Title(English)	A Study on Earthquake Damage Estimation Method for Wide Area Railway Network
著者(和文)	他谷周一
Author(English)	Shuichi Taya
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9996号, 授与年月日:2015年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:翠川 三郎,盛川 仁,松岡 昌志,室町 泰徳,山中 浩明
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9996号, Conferred date:2015/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成 27 年度学位論文

広域鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する研究

2015 年 9 月

東京工業大学

他谷 周一

広域鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する研究

要 旨

本論文は、「広域鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する研究」と題し、以下の6章により構成されている。

第1章「序論」では、本研究の背景と目的を述べ、鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する既往の研究を概観している。既往の地震被害関数ならびに地震による鉄道の運休期間の推計手法の課題を指摘し、構造種別ごとに地震被害関数を作成すること、および、構造物の被害状況等を反映した運休期間推計モデルを作成することの意義を述べている。

第2章「対象地震の選定と基礎データの作成」では、まず、鉄道に被害が発生した近年の地震の中から、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震の4地震を本研究での検討対象地震として選定している。また、国土地理院の地理院地図等の公開データをもとに、対象路線の位置・構造種別に関する情報を整理する手順を検討し、その手順に従って対象路線の鉄道構造物台帳データを作成している。さらに、対象地震について、面的な震度分布を推計し、その結果をもとに鉄道沿線各点の震度データを作成している。

第3章「構造種別を考慮した鉄道の地震被害関数の検討」では、対象4地震における鉄道構造物の地震被害に関する記録を収集し、資料をもとに被害1件ごとに被害位置、被害構造種別、震度、被害程度、被害内容等の諸元を読み取り、整理している。また、被害記録の整理結果と鉄道構造物台帳データ、鉄道沿線震度データをもとに、7区分の構造種別について、震度階毎の被害率を算出し、構造種別を考慮した鉄道構造物の被害関数を作成している。作成した被害関数から、各構造種別の被害発生下限震度を示している。また、構造種別間で被害関数を比較し、同じ震度階でも構造種別や被害程度により被害率が異なることなどを定量的に示している。さらに、高架橋の被害関数について、1995年兵庫県南部地震と2011年東北地方太平洋沖地震とで比較検討し、2011年東北地方太平洋沖地震では、重度被害率が大幅に減少した一方、軽度被害率が増加したものの、軽度被害と重度被害を合計した被害率は同程度であったことを示している。その理由として、1995年兵庫県南部地震以降施工された耐震補強工事の効果により、重度被害が軽度被害に転換したためとの推察を示している。

第4章「地震による鉄道の運休期間に関する検討」では、対象4地震における鉄道の運休事例をもとに、地震による鉄道の運休期間と、各種要因として、被害程度、被害件数、被害構造種別、地震規模、路線の重要度（輸送密度）との関係について検討している。その結果、軽度被害が発生した区間の運休期間は、地震規模と震度階によって傾向が異なること、および、重度被害が発生した区間の運休期間は被害構造種別が土構造物とその他と

で傾向が異なることを示している。この知見をもとに、各種要因と鉄道の運休期間との関係について、被害程度・被害構造種別・地震規模・震度階に応じて 10 区分の運休期間推計モデルを作成している。

第 5 章「広域鉄道網に対する地震被害推計手順の検討」では、第 2 章から第 4 章で検討した、鉄道構造物台帳データ作成手順、構造種別を考慮した地震被害関数、構造物被害等の各種要因を考慮した運休期間推計モデルを組み合わせることによって、広域鉄道網を対象とする地震被害推計手順を提案している。また、この手順を利用した鉄道の地震被害推計の例として、都心南部直下を震源とする地震を想定し、東京都心部ー千葉方面の鉄道各線・各区間の被害件数等の推計と運休期間の推計を実施している。その結果、本論文で提案する手順により、各路線の構造種別が異なるために、被害状況や運休期間が異なる状況が推定され、対象鉄道網の事前対策や事後の復旧戦略に資する情報を提供でき、本推定手順の有効性を示している。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

以上を要するに、本論文は、広域鉄道網を対象として、事前の地震対策や地震直後の復旧作業の戦略のために行う被害推計手法について検討したものである。すなわち、国土地理院の地理院地図等の公開データに基づく鉄道構造物台帳データの作成手順を示した上で、過去の鉄道の被害事例を整理し、それに基づく構造種別を考慮した鉄道構造物の地震被害関数と、鉄道構造物被害状況等の要因を考慮した運休期間モデルとを作成し、これらを組み合わせ、広域鉄道網の地震被害推計手順を提案したものである。

A Study on Earthquake Damage Estimation Method for Wide Area Railway Network

Abstract

The purpose of this study is to construct a method to estimate earthquake damages on railway structures and suspended periods. Previous vulnerability functions do not show relationships between railway structure damage and JMA seismic intensity for different structural types. Few researches exist about relationships between suspended periods and structural damages. In this study, seismic vulnerability functions for each structural type and suspended period estimation models considering structure damages are constructed.

As preparatory for studies, the length of earth structures of all lines are measured from web-GIS data by GSI. The number of bridges and tunnels of all lines surveyed are also measured. The spatial distributions of the JMA seismic intensity along the lines surveyed are estimated from the observed intensity data.

The damage survey data of railway structures in the 1995 Kobe Earthquake, the 2004 Niigata Chuetsu Earthquake, the 2007 Niigata Chuetsu-oki Earthquake, and the 2011 Great East Japan earthquake are collected and compiled. Seismic vulnerability functions for each railway structural type are constructed. The results indicate that (1) the lowest seismic intensity level which cause damages are different by each structural type, (2) damage rates at each seismic intensity level are also different by each structural type, and (3) heavy damage rates of viaducts in the 2011 Great East Japan Earthquake are lower than those in the 1995 Kobe Earthquake, due to the seismic retrofit actions after the 1995 Kobe Earthquake.

The railway suspended data are collected and compiled. The relationships between suspended periods due to an earthquake and factors such as structure damage and other are examined. The Models to estimate suspended periods of railway are classified by damage level or earthquake type, and 10 models are constructed.

Applying the seismic vulnerability functions and the suspended period estimation models in railway lines from Tokyo to Chiba, structure damages and suspended periods of each line due to a scenario earthquake which will occur under the central part of Tokyo are estimated. The results indicate that the method could estimate structure damages and suspended periods considering the differences in the structural type.

広域鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する研究

目 次

第1章 序論

1.1. 研究の背景と目的	1-1
1.2. 鉄道網を対象とした地震被害推計手法に関する既往の研究	1-2
1.3. 鉄道以外のインフラを対象とした地震被害推計手法の既往の研究	1-5
1.4. 本研究の位置づけと本論文の構成	1-7

第2章 対象地震の選定と基礎データの作成

2.1. はじめに	2-1
2.2. 対象とする地震と路線の選定	2-2
2.3. 対象路線の構造物台帳データの作成	2-3
2.3.1. 国土数値情報を用いた鉄道沿線緯度経度情報の取得手順	2-3
2.3.2. 地理院地図を用いた構造種別情報の取得手順	2-4
2.3.3. 対象路線の鉄道構造物台帳データ	2-7
2.4. 対象地震の鉄道沿線震度データの作成	2-8
2.4.1. 1995年兵庫県南部地震の鉄道沿線震度データ	2-8
2.4.2. 2004年新潟県中越地震の鉄道沿線震度データ	2-9
2.4.3. 2007年新潟県中越沖地震の鉄道沿線震度データ	2-10
2.4.4. 2011年東北地方太平洋沖地震の鉄道沿線震度データ	2-11
2.5. まとめ	2-12

第3章 構造種別を考慮した鉄道の地震被害関数の検討

3.1. はじめに	3-1
3.2. 対象地震の構造物被害データの作成	3-2
3.2.1. 被害資料の収集	3-2
3.2.2. 資料に基づく構造物被害データの作成手順	3-4
3.2.3. 対象地震での構造物被害データ	3-6
3.3. 構造種別毎の被害関数の作成	3-8
3.3.1. 土構造物の被害関数	3-8
3.3.2. 橋りょうの被害関数	3-9
3.3.3. 高架橋区間の被害関数	3-10
3.3.4. トンネルの被害関数	3-11
3.3.5. 構造種別間の被害関数の比較	3-14
3.3.6. 被害関数のばらつきの検討	3-15
3.3.7. 他のインフラの被害関数との比較	3-16
3.4. まとめ	3-18

第4章 地震による鉄道の運休期間に関する検討

4.1. はじめに	4-1
4.2. 対象地震の運休期間データの作成	4-2
4.2.1. 運休期間データの作成手順	4-2
4.2.2. 対象地震の運休期間データの作成	4-4
4.3. 構造物被害と運休期間の関係の検討	4-7
4.3.1. 被害構造種別と運休期間の関係	4-7
4.3.2. 被害程度と運休期間の関係	4-8
4.3.3. 被害件数と運休期間の関係	4-9
4.4. 構造物被害以外の要因と運休期間の関係の検討	4-10
4.4.1. 対象地震間の運休期間の比較	4-10
4.4.2. 路線の重要度と運休期間の関係の検討	4-11
4.5. 各種要因と運休期間の関係	4-12
4.6. まとめ	4-13

第5章 広域鉄道網に対する地震被害推計手順の検討

5.1. はじめに	5-1
5.2. 地震被害推計手順の検討	5-2
5.2.1. 地震被害推計フロー	5-2
5.2.2. 構造物台帳データの作成	5-3
5.2.3. 鉄道沿線震度データの作成	5-6
5.2.4. 各構造種別の被害件数の推計	5-8
5.2.5. 運休期間の推計	5-10
5.3. 首都圏の一部路線を対象とした地震被害推計例	5-11
5.3.1. 想定地震と対象路線	5-11
5.3.2. 対象路線の構造物台帳データと鉄道沿線震度データの作成	5-12
5.3.3. 想定地震時の被害状況の推計	5-13
5.3.4. 想定地震時の運休期間の推計	5-15
5.4. まとめ	5-17

第6章 結論

本研究に関する発表論文

謝辞

第1章 序論

1.1. 研究の背景と目的

世界有数の地震国である我が国において安全に鉄道を運行するためには、地震対策は欠かせない。我が国の鉄道は、1872年に品川～横浜間で開業して以来、地震によりこれまでに何度も大きな被害を受けてきた。近年ではたとえば、1995年兵庫県南部地震では、神戸～大阪間を結ぶ主要路線が甚大な被害を受け、長期間不通となった。復旧には乗り換えながらもこの間が鉄道で往来できるまでに約1ヶ月、地震前の状況に戻るまでには約5ヶ月を要し、物資輸送や人の移動に長期間にわたり大きな影響を及ぼした [1]。また、2011年東北地方太平洋沖地震では、関東地方から東北地方にかけて非常に広い範囲で鉄道構造物が被害を受け、津波被害区間を除く各区間の復旧に約1ヶ月半を要した [2]。津波被害区間に関しては、2015年現在で未だ復旧されていない区間もある。

我が国において、地震は過去の話ではなく、今後も発生が危惧される脅威であるといえる。たとえば、今世紀前半には再び南海トラフを震源とする巨大地震の発生が懸念されており、同地震が発生した場合には、鉄道構造物に関しても最大で約18,000箇所被害が発生し、半年程度運休することにより最大数兆円規模の経済的影響を受ける、と想定されている [3]。このような今後発生しうる巨大地震による鉄道の被害を軽減し、復旧までの期間を極力短くするためには、鉄道の地震防災の更なる強化が必要とされる。

鉄道の地震防災施策は事前の策と事後の策に分けられる。事前の施策としては、被害そのものの防止・軽減を目的として、構造物の耐震補強や列車の脱線・逸脱防止対策などが行われる。また、被害を想定した事前準備の充実を目的として、復旧用資機材の備蓄や災害復旧訓練の徹底などが行われる。これら施策を効果的に推進していくためには、事前に構造物被害の推計を行うこと、すなわち、どこでどの程度の被害が発生するかを推計することが重要である。また、運休期間の推計を行うこと、すなわち、被害によりどの程度運休するかを推計することも同様に重要となる。

事後の施策としては、被害箇所の迅速な復旧を目的として、速やかな被害状況の把握、その結果に基づく戦略的な復旧計画策定、復旧工事の施工が行われる。また、被害による運休期間中の代替交通手段を確保するため、迂回ルートの設定やバス代替等の手配が行われる。これらを的確に実施していくためにも、事前の被害推計が重要となる。また、事後についても、特に地震直後は被害に関する直接的な情報はほとんど入手できないと想定されるため、各地で観測された揺れの情報をもとに被害を推計し、その結果をもとに復旧戦略等を検討することとなるため、精度のよい被害推計手法を持つことが必要とされる。

本研究は、広域鉄道網を対象として、事前の地震対策の計画のため、あるいは地震直後の復旧作業の戦略のために行う被害推計に適用できる被害推計手法を検討することを目的としている。

1.2. 鉄道網を対象とした地震被害推計手法の既往の研究

事前の地震対策や地震直後の復旧戦略を検討する際には、被害内容、すなわち被害位置・被害程度・被害数量等の推計結果と、被害が発生した区間の運休期間の推計結果が重要な情報となる。まず、被害内容の推計手法について既往の事例を示す。

前者の被害推計手法は、個々の鉄道構造物の耐震性能に関する情報を必要とする手法と、鉄道構造物被害事例の整理結果から作成された地震被害関数を用いて被害を推計する手法とに大別できる。個々の鉄道構造物の耐震性能に関する情報を必要とする被害推計手法としては、中村(1994)による各構造物の常時微動の測定・解析結果を基に求められる地震被害危険度判定指標(K 値)[4]を用いた被害推計手法や、室野・芦谷(2002)による、地震動の卓越周期と最大加速度から構造物の耐震性能に応じた被害ランク推定曲線を求め、これを用いて被害を推計する手法[5]などが提案されている。中村(1994)による手法は、これを適用した被害推計システムのプロトタイプとして「HERAS」が構築されている[6]。HERAS のシステム構成及び処理概要を図 1.1 に示す。また、室野・芦谷(2002)による手法は、これを適用した被害推計システムのプロトタイプとして、岩田ほか(2014)により「早期運転再開支援システム」が試作されている[7]。早期運転再開支援システムの構成及び処理概要を図 1.2 に示す。

これら手法はいずれも、各構造物の耐震性能に関する詳細な情報が利用できる場合には、精度よく被害を推計することができ、有用であると言える。しかし、あらかじめ個々の構造物の耐震性能に関する情報をデータベース化する必要があり、広域にわたる実際の営業路線にこれらの手法を適用する際には、非常に多数の構造物を対象とする調査・測定等を実施する必要があり、多大な費用や時間を要する。また、現在のところ、これら手法を適用できるのは、モデル化が容易なコンクリート橋脚等に限定され、土構造物やトンネルのような構造物の被害推計に適用するのは難しい。

鉄道構造物の地震被害関数の既往の事例としては、埼玉県(1982)[8]によるものや、内閣府(2013)[9]による 2011 年東北地方太平洋沖地震時の JR 東日本の構造物被害事例に基づいて作成されたものなどがある。また、高浜・翠川(2009)[10]のように、地形・地盤分類ごとに作成された被害関数もある。既往の各種被害関数を表 1.1～1.3 および図 1.3 に示す。被害関数を用いる手法は、個々の構造物の耐震性能に関する情報を必要としないため、被害推計システムをより現実的に導入できるものになると考えられるが、推計結果は概略的なものとどまる。なお、地震時の鉄道構造物の被害は構造物の種別や建設時期によって異なることが指摘されている [1]が、既往の被害関数はいずれも構造種別を分けずに作成された被害関数が多い。

構造種別を考慮して作成された被害関数としては、富田ほか(1996)[11]による、構造物の被害事例を整理した結果をもとに、地表面推定最大加速度に対する累積被害発生確率曲線を高架橋・橋りょうと土構造物等との 2 つに分けて作成されたものがある。これは、1923

年関東地震から 1987 年千葉県東方沖地震までの 6 地震の被害事例に基づいて作成された被害関数であるが、被害データの内容や被害位置での地震動の推定法の詳細などについては示されておらず、1995 年兵庫県南部地震などの最近の被害事例が含まれていないこともあり、現代の鉄道構造物の被害推計に適用できるとは限らない。

東京都(2006)[12]では、1995 年兵庫県南部地震時の被害事例をもとに震度 7 及び 6 強での高架橋・橋りょうのキロ当たりの落橋・倒壊率とその他の被害率とが示されている。東京都(2006)では、高架橋以外で構成されている区間も含めた路線総延長を分母にして被害率を算出しているため、阪神地区以外でこの被害関数を適用する場合、高架橋の設置密度によっては、被害率を過大に、あるいは過小に評価することがありうる。また、東京都(2006)では、耐震補強工事が行われた橋りょう・高架橋の被害率については「落橋・倒壊は発生しなくなるが、その他の被害を含む被害発生箇所数は減らない」という仮定のもと決められているが、この仮定の妥当性は検証されていない。

続いて、被害が発生した区間の運休期間の推計手法について、既往の事例を示す。地震被害と鉄道の運休期間の関係について検討された事例の 1 つとして、日本海中部地震調査研究グループ(1984)[13]が挙げられる。同グループでは、1983 年日本海中部地震の後、北東北地方の鉄道各線の運転再開日と利用者数の回復状況の関係について検討している。その結果、いずれの路線も機能回復の効果が大きいところから復旧されており、重要な区間から復旧する基本方針に従っているとしている。

東京都(2006)[12]では、1995 年兵庫県南部地震での鉄道の運休事例をもとに図 1.3 の復旧曲線を作成し、表 1.4 の震度階と運休日数のごく大まかな関係をモデルとして整理している。また、1995 年兵庫県南部地震の事例をもとに、震度 7、震度 6 強、震度 6 弱での 1 日後の鉄道の不通率を定義し、各駅間の不通率が 0.5 を超えた場合に 1 日後不通になり、不通となる区間の震度階から表 1.4 に基づいて運休期間を推計する方法を提案している。

高浜・翠川(2011)[14]では、1978 年宮城県沖地震、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震での鉄道の運休事例を整理し、図 1.4 のような各区間の被害率と運休期間の関係をモデルとして示すとともに、地震発生時の各区間の被害率から運休期間を推計する手法を提案している。しかし、この手法により推定された運休日数と実際の運休日数の間には 3 倍程度のばらつきがあるとされている。

東京都(2006)や高浜・翠川(2011)のような個別構造物の情報を必要としない簡便な手法は、システム化が容易である一方、既往の手法はいずれも、被害の程度、路線の重要度等の要素が考慮されていないため、推計された運休日数と実際の運休日数の間には大きなばらつきを伴うこととなる。

畠山ほか(2010)[15]では、鉄道構造物の情報を基に解析的に求めた被害曲線を用いて地震発生時の構造物の損傷レベルや脱線発生率を予測し、損傷レベルと列車脱線の有無により営業できない日数を 10 日・30 日・60 日・120 日の 4 区分で評価する手法を提案している。

しかし、営業できない日数の 4 区分について、その設定根拠は明らかにされていない。また、畠山ほか(2010)のような構造物の詳細情報を必要とする手法は、広域にわたる実際の営業路線に適用する際には、膨大な構造物情報の収集に多大な費用や時間を要する可能性があることが課題であるといえる。

以上を踏まえ、既往の鉄道の地震被害推計手法の課題を示す。個々の鉄道構造物の耐震性能に関する情報を必要とする被害推計手法及び運休期間推計手法については、広域にわたる実際の営業路線にこれらの手法を適用する際、非常に多数の構造物の詳細情報を得るための調査・測定等を実施する必要があり、多大な費用や時間を要する可能性があることが課題であるといえる。

一方、既往の被害データをもとに作成した被害関数や運休期間推計モデルを用いる手法については、個々の構造物の情報を必要としない点で利便性は高い。しかし、被害関数についていえば、鉄道を支える構造物は多種多様であり、地震被害の出やすさは構造種別により異なるものと考えられるにもかかわらず、既往の地震被害関数の多くは構造種別について考慮されていない。したがって、構造種別ごとに被害関数を作成し、それを用いて被害推計を行うことで改善の余地があると考えられる。

また、運休期間推計モデルについていえば、運休期間は構造物被害をはじめとする各種要因と関連性があると考えられるにもかかわらず、既往の運休期間推計手法は、特に構造物被害に関する要素があまり考慮されていない。また、概略的な推計にとどまるため、その推計結果も地域全体の運休期間を大まかに示すにとどまり、今のところ路線単位、区間単位での運休期間の推計は困難である。地震による鉄道の運休期間を決める要因として考えられる、地震動強さや被害状況、路線の重要度等の各要因と運休期間の関係について、事例に基づいて網羅的に整理・検討し、得られた知見をもとに運休期間推計モデルを作成することで、改善の余地があると考えられる。

1.3. 他のインフラを対象とした地震被害推計手法の既往の研究

鉄道以外のインフラでも、事前・事後の被害推計は地震防災上重要視されており、多くの被害推計手法が検討され、被害推計システムが開発されている。

地域を対象とした被害推計システムとしては、内閣府では、地形・地盤・人口・建物・防災施設等の情報を管理する地理情報システム（GIS）を活用した地震防災情報システム DIS（Disaster Information System）及びそのサブシステムとして地震被害早期評価システム EES（Early Estimation System）の整備・運用を行っている[16]。EES は地震発生直後に被害のおおまかな規模を把握することを目的としており、地震発生から概ね 30 分以内に建築物倒壊棟数や建築物の倒壊に伴う人的被害状況等を推計する。

青井ほか(2013)は、地震ハザードステーション(J-SHIS)の開発にあたり蓄積してきた表層地盤の増幅特性データや人口・建物に関する情報等の基本情報や、地震動の予測手法、建物の被害評価手法と、K-NET や KiK-net から得られるリアルタイム強震データ等の観測データを組み合わせることで、即時的に被害推定を行い、情報を提供するリアルタイム地震被害推定システム(J-RISQ)を試作した[17]。J-RISQ は 2015 年現在、Web サービスとして公開されている[18]。

道路を対象とした被害推計関数は多数あるがそのうちの一部を示す。東京都(2006)は、1995 年兵庫県南部地震時の阪神地区の高速道路の被害事例データを収集し、震度階ごとに落橋・倒壊箇所数を路線延長で除して被害率を算出したほか、一般道路についても同様の方法で被害率を算出している[12]。

また、山崎ほか(1998)は、1995 年兵庫県南部地震時の阪神地区の高速道路の被害事例データを収集するとともに、高速道路沿線の地震動強度を観測値の空間補間により推計し、これらを用いて高速道路の橋りょう・高架橋の被害関数を作成した[19]。丸山ほか(2008)は、2004 年新潟県中越地震の関越自動車道と北陸自動車道の被害事例データと高速道路沿線の推計震度データをもとに、高速道路の盛土部の被害関数を作成した[20]。

道路を対象とした被害推計システムの例としては、国土交通省関東地方整備局の「即時震害予測システム（SATURN）」が挙げられる[21]。SATURN は地震直後の管内の道路・河川の被害状況を大まかに予測し、復旧戦略の意思決定を支援することを目的としており、所管する地震計ネットワークより最大加速度、SI 値等の地震動情報を収集し、所管施設の構造物条件データベースと合わせて、地盤の液状化や橋りょう被害の状況を地震発生後 15 分程度で推計することができる。橋りょう被害推計は過去の地震による被害と地震動（SI 値）の関係をもとに、数値解析を実施し、事例を補って決定した被害関数がもちいられている。また、高田ほか(2006)は、阪神高速道路を対象とした地震被害予測システムを開発した[22]。このシステムでは、兵庫県南部地震における高速道路の被害事例や、阪神高速道路の構造諸元データベースを利用した解析的検討により計測震度と被害ランク（As、A、B）

毎の被害率の関係式より、沿線の被害状況を推計するものである。

都市ガスを対象とした被害推計システムとしては、地震直後にガス導管網の被害の全体像を定量的に把握することを目的とした被害推計システム「**SIGNAL**」が東京ガスにて 1994 年に実用化されている[23]。**SIGNAL** では 331 地点に地震計が設置されており、地震計により計測された **SI** 値をもとに、過去の地震によるガス導管の被害事例をもとに作成された **SI** 値と被害率の関係式を適用して、およそ 200m 程度の大きさのメッシュ単位で被害率を推計することができる。東京ガスでは、2001 年に **SIGNAL** が「**SUPREME**」に改良・強化されている[24]。**SUPREME** では、地震計の数が 3700 台に増加され、推計の単位も 50m メッシュ単位できめ細かく行われるようになった。大阪ガスや東邦ガスでも同様のシステムが運用されている。

1.4. 本研究の位置づけと論文の構成

本研究の目的は、広域な鉄道網を対象として、事前の地震対策の計画立案のために行う被害想定や、地震直後の復旧作業の戦略検討のために行う被害推計に適用できる被害推計手法について検討するものである。地震被害推計は鉄道のみならず、道路やガスなどでも行われており、地震被害推計の一般的な流れは図 1.5 のとおりである。

被害推計の精度を向上するには、フローの上流にある、地震動分布の推定精度を向上させることも考えるべきであるが、こちらは既往の研究成果が多数報告されているため、今回の研究の範囲とはしないこととした。また、個々の構造物に関する詳細な情報を収集し、それに基づいた被害推計処理を行うことで被害推計精度も向上させられると考えられるが、広域鉄道網を構成する個々の構造物情報を収集するには膨大な現地調査が必要となり、実務への活用が難しくなるものと想定される。したがって、本研究では、構造物情報の収集のための膨大な現地調査を要さない被害推計手法として、地震被害関数を用いた被害推計手法を検討することとした。

しかし、既往の地震被害関数はいずれも、構造種別の違いについて十分に考慮されているとは言えない。鉄道構造物は図 1.6 に示すように、多種多様な構造種別で構成されており、地震による被害の出やすさも構造種別により異なるものと想定されるが、地震被害関数により被害推計を行う場合でも、構造種別ごとに被害関数を作成し、それを用いることで被害推計精度の改善を図ることができると考えられる。したがって、本研究では、過去の地震による鉄道構造物の被害記録をもとに、構造種別ごとに地震被害関数を作成することとした。また、被害関数の説明変数については、加速度や速度、SI 値なども考えられるが、地震直後であっても多数の地点の情報を得やすいこと、鉄道構造物被害との相関が良いとされ[25][26]、地震時運転規制等の実務上よく用いられていること[27]などから、実用性が高いと考えられる震度階を適用することとした。

また、事前の地震対策や地震直後の復旧戦略の検討のためには、被害規模のほか、被害に伴う運休期間の推計も必要とされる。既往の運休期間推計手法は、被害地域全体での全体的な運休期間を推計するものがほとんどである。また、個々の路線単位で運休期間を推計する手法であってもその推計精度はまだ改善の余地があると考えられる。地震による鉄道の運休期間を決める要因としては、構造物の被害状況のほか、路線の重要度など、多種多様な要因が考えられ、また各種要因が非常に複雑に絡まりあっているものと想定されるが、各種要因と鉄道の運休期間の関係について詳細に検討した事例は見当たらない。以上を踏まえ、本研究では、構造物の被害状況をはじめとする各種要因と運休期間との関係を検討し、得られた知見をもとに運休期間推計モデルを検討することとした。

図 1.7 に本研究の構成を示す。第 2 章「対象地震の選定と基礎データの作成」では、検討対象地震と検討対象路線の選定を行い、対象路線の鉄道構造物の位置・構造種別に関する

情報を鉄道構造物台帳データとして整理するとともに、対象地震時の鉄道沿線各点の震度を推計する。

第 3 章「構造種別を考慮した鉄道の地震被害関数の検討」では、過去の地震による鉄道構造物の被害事例をもとに、震度階と被害率の関係を示す被害関数を構造種別ごとに作成する方法を検討する。

第 4 章「地震による鉄道の運休期間に関する検討」では、構造物の被害状況、路線の重要度等の各種要因と鉄道の運休期間との関係を検討し、得られた知見をもとに運休期間推計モデルを作成する。

第 5 章「広域鉄道網に対する地震被害推計手法の検討」では、第 2 章から第 4 章で検討した、鉄道構造物台帳データ作成手順、構造種別を考慮した地震被害関数、構造物被害等の各種要因を考慮した運休期間推計モデルを組み合わせることによって、広域鉄道網を対象とする地震被害推計手順を提案する。また、この手順を利用した鉄道の地震被害推計の例として、東京都心南部直下を震源とする地震を想定し、東京都心部－千葉方面の鉄道各線・各区間の被害件数等の推計と運休期間の推計を行う。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括する。

【1 章の参考文献】

- [1] 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会：よみがえる鉄路 阪神・淡路大震災鉄道復興の記録, 1996.
- [2] 佐久間香奈：特集「東日本大震災の取組み」運行再開への道のり, 2011.
- [3] 内閣府：南海トラフ巨大地震の被害想定について（二次報告）, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html.
- [4] 中村豊, 日高和利, 佐藤新二, 西永雅行：ラーメン高架橋および盛土の地震被害判定指標の提案, 鉄道総研報告, Vol.8, No.5, 1994.
- [5] 室野剛隆, 芦谷公稔：早期被害予測のための鉄道構造物の地震被害ランク推定方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.16, No.8, 2002.
- [6] 中村豊：総合地震防災システムの研究, 土木学会論文集, No.531/I-34, 1996.
- [7] 岩田直泰, 山本俊六, 是永将宏, 野田俊太, 伊藤賀章：公的地震情報を活用した早期運転再開支援システムの試作, 鉄道総研報告 Vol.26, No.9, 2012.
- [8] 埼玉県, 埼玉県地震被害想定策定調査報告書, 1982.
- [9] 内閣府：南海トラフ巨大地震の被害想定について（二次報告）南海トラフ巨大地震の被害想定, http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo4.pdf.
- [10] 高浜勉, 翠川三郎：地盤条件を考慮した地震による鉄道構造物の被害関数の構築, 日本地震工学会論文集, Vol.9, No.5, 2009.
- [11] 富田健司, 上半文昭, 佐藤新二, 井上英司：“HERAS(ヘラス)”の災害発生予測手法, 鉄道総研報告, Vol.12, No.6, 1998.
- [12] 東京都防災会議：首都直下地震による東京の被害想定（最終報告）Ⅲ 手法編, 2006.
- [13] 日本海中部地震調査研究グループ：1983 年日本海中部地震調査報告, 鉄道技術研究資料, Vol.41, No.9, 1984.
- [14] 高浜勉, 翠川三郎：地震時の鉄道運休時間の推定方法, 日本地震工学論文集, Vol.11, No.2, 2011.
- [15] 畠山直, 柴田徹, 豊岡亮洋, 坂井公俊, 室野剛隆：地震動の解析モデルに基づいた鉄道のリスク評価手法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.11, 2010.
- [16] 内閣府：地震防災情報システムの整備, 平成 14 年防災白書, 2002
- [17] 青井真, 中村洋光, 功刀卓, 鈴木亘, 藤原広行：リアルタイム地震被害推定システム J-RISQ の試作, 日本地球惑星科学連合大会予稿集, 2013
- [18] J-RISQ 地震情報： <http://www.j-risq.bosai.go.jp/report/>
- [19] 山崎文雄, 大西淳一, 田山聡, 高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推計式の提案, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.3491-3496, 1998
- [20] 丸山喜久, 山崎文雄, 用害比呂之, 土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係, 土木学会論文集 A Vol.64, No.2, 208-216

- [21]日下部毅明, 杉田秀樹, 大谷康史, 金子正洋, 浜田禎:即時震害予測システム (SATURN) の開発, 国土技術政策総合研究所資料, No.71, 2003
- [22]高田佳彦, 平野敏彦, 鈴木直人, 藤野秀隆: 阪神高速道路ネットワークの耐震性能と被害予測, 第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2006
- [23]清水善久: 早期地震時被害推定システムーSIGNALー, 計測と制御, 第36巻, 第1号, 1997
- [24]清水善久, 石田栄介, 磯山龍二, 山崎文雄, 小金丸健一, 中山渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集 No.738/I-64, pp283-296, 2003.7
- [25]伊藤雄郷, 他谷周一: 地震発生後の運転規制判断の適正化, 日本鉄道施設協会誌 2006年10月号, 2006.
- [26]鈴木博人, 島村誠: 地震時運転規制方法の検討, JR 東日本テクニカルレビューNo.3, 2003.
- [27] 高浜勉, 翠川三郎, 大堀道弘: 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.8, 2006.

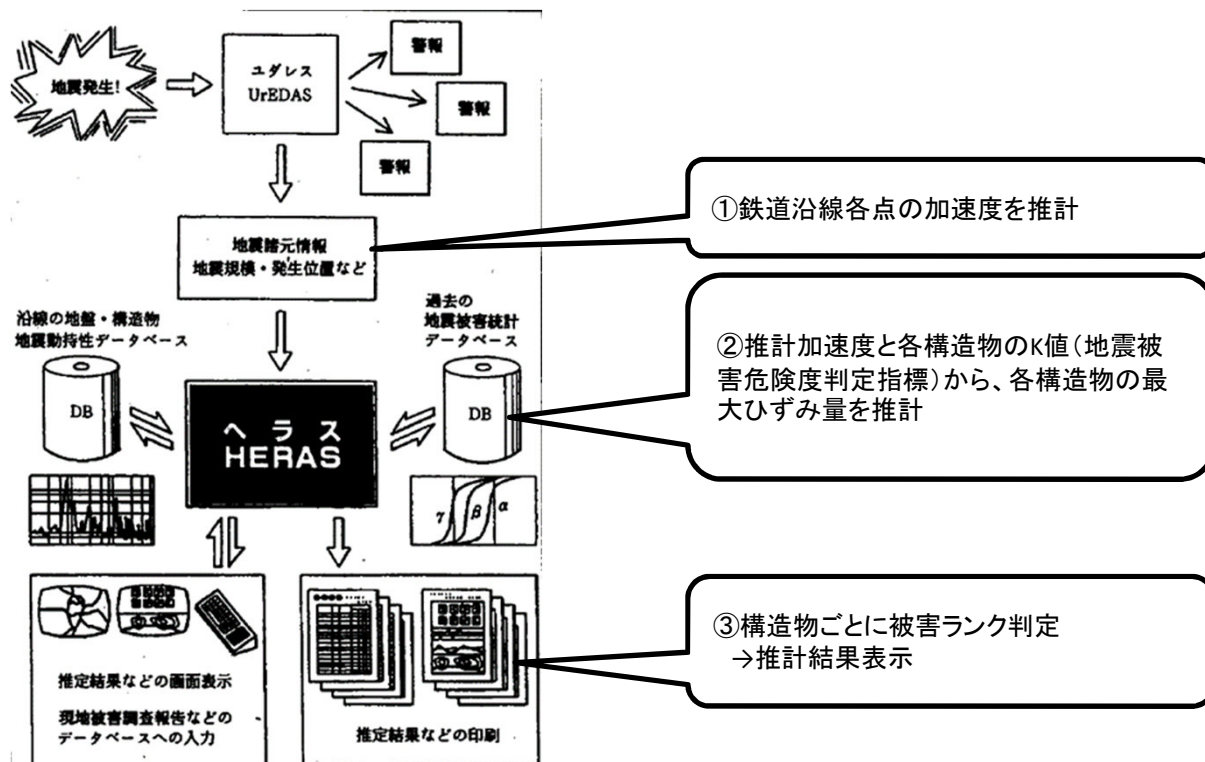


図 1.1 HERASのシステム構成と処理概要

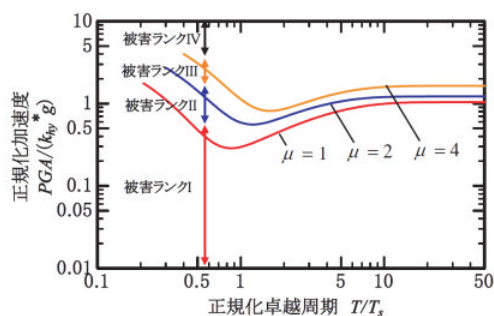
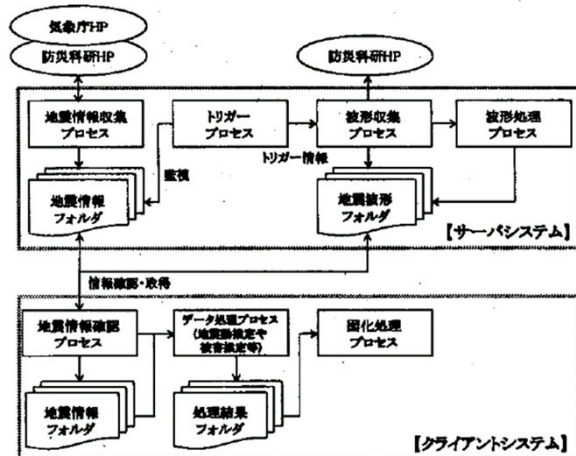


図 1.2 早期運転再開支援システムの構成と処理概要

表1.1 埼玉県(1982)の被害率(箇所/km)

震度	地盤種別		
	1～2種	3種	4種
VI	(0.62)	1.00	(1.71)
V	0.41	0.66	1.13
IV	(0.01)	(0.02)	(0.04)

※カッコ内の数値は
推定値

表1.2 東京都(2006)の被害率(箇所/km)

震度	落橋・ 倒壊率	その他 被害率
7	0.323	4.091
6強	0.057	0.692
6弱	-	0.088

表1.3 内閣府(2013)の被害率(箇所/km)

震度	在来線等 被害率
6強以上	2.80
6弱	2.03
5強	1.01
5弱	0.26

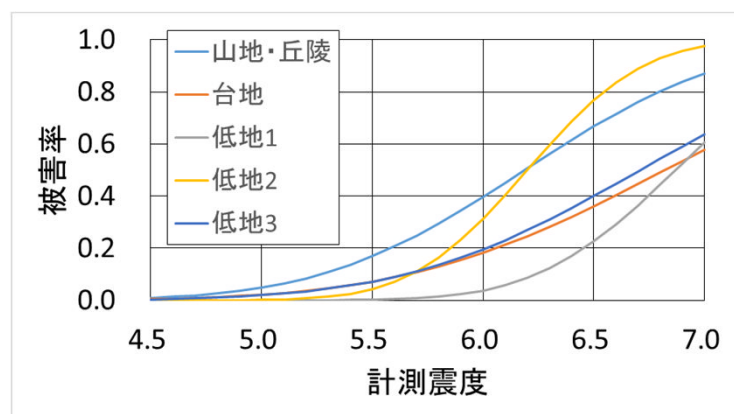


図1.3 高浜・翠川(2009)の被害関数
(被害メッシュ数/総メッシュ数)

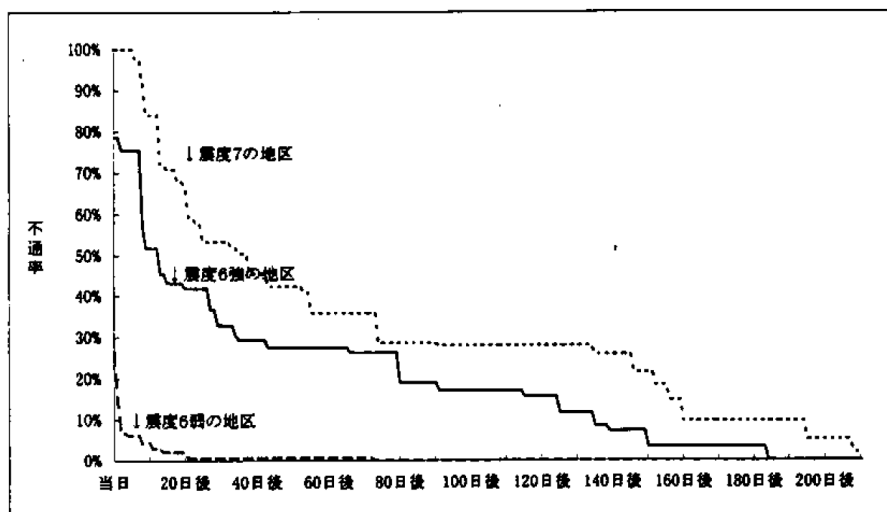


図 1.3 東京都(2006)の復旧曲線

表 1.4 東京都(2006)の震度階と運休期間の関係

震度階	運休期間	
	耐震補強なし	耐震補強あり
7	7ヶ月	40日
6強	6ヶ月	30日
6弱	20日	数日程度

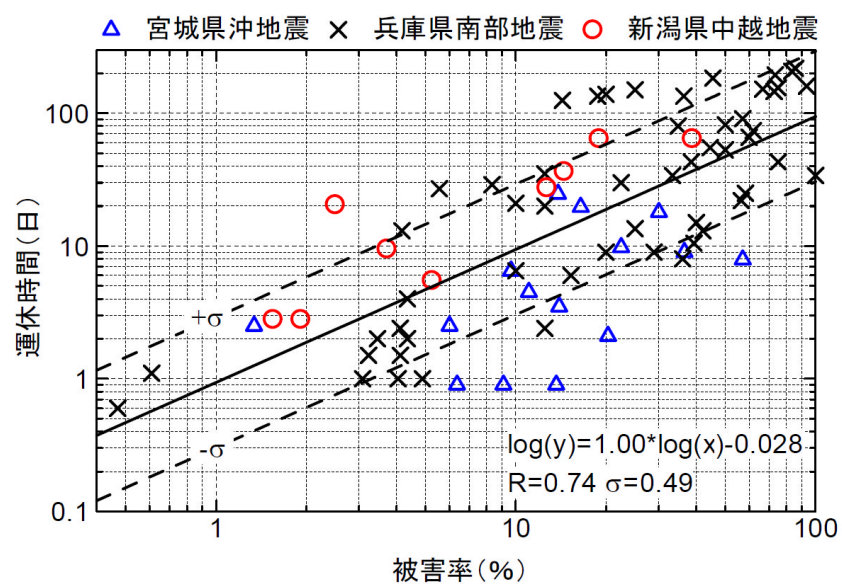


図 1.4 高浜・翠川(2011)の被害率と運休期間の関係

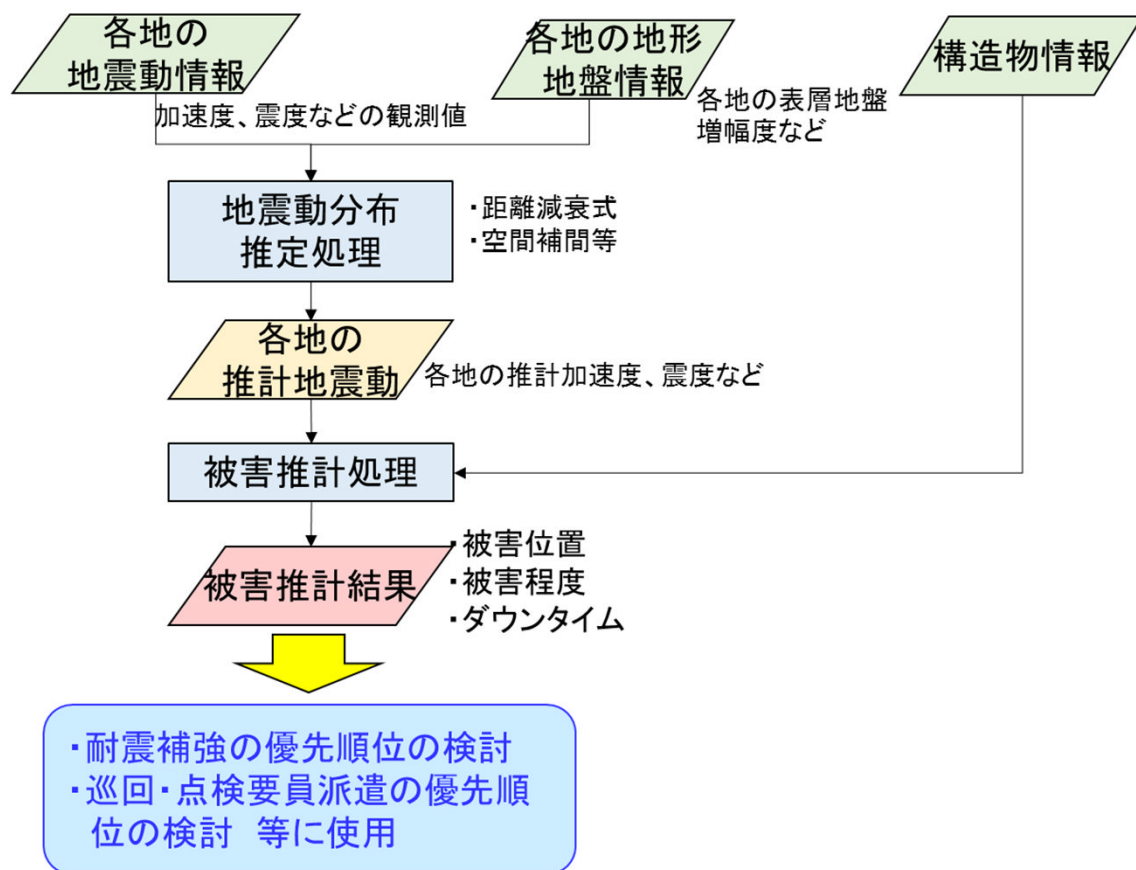


図 1.5 地震被害推計の一般的な流れ

素地＝原地盤を路床とする構造
低盛土＝高さ3m未満の盛土
盛土＝高さ3m以上の盛土

【土構造物】



図 1.6 鉄道構造物の種別

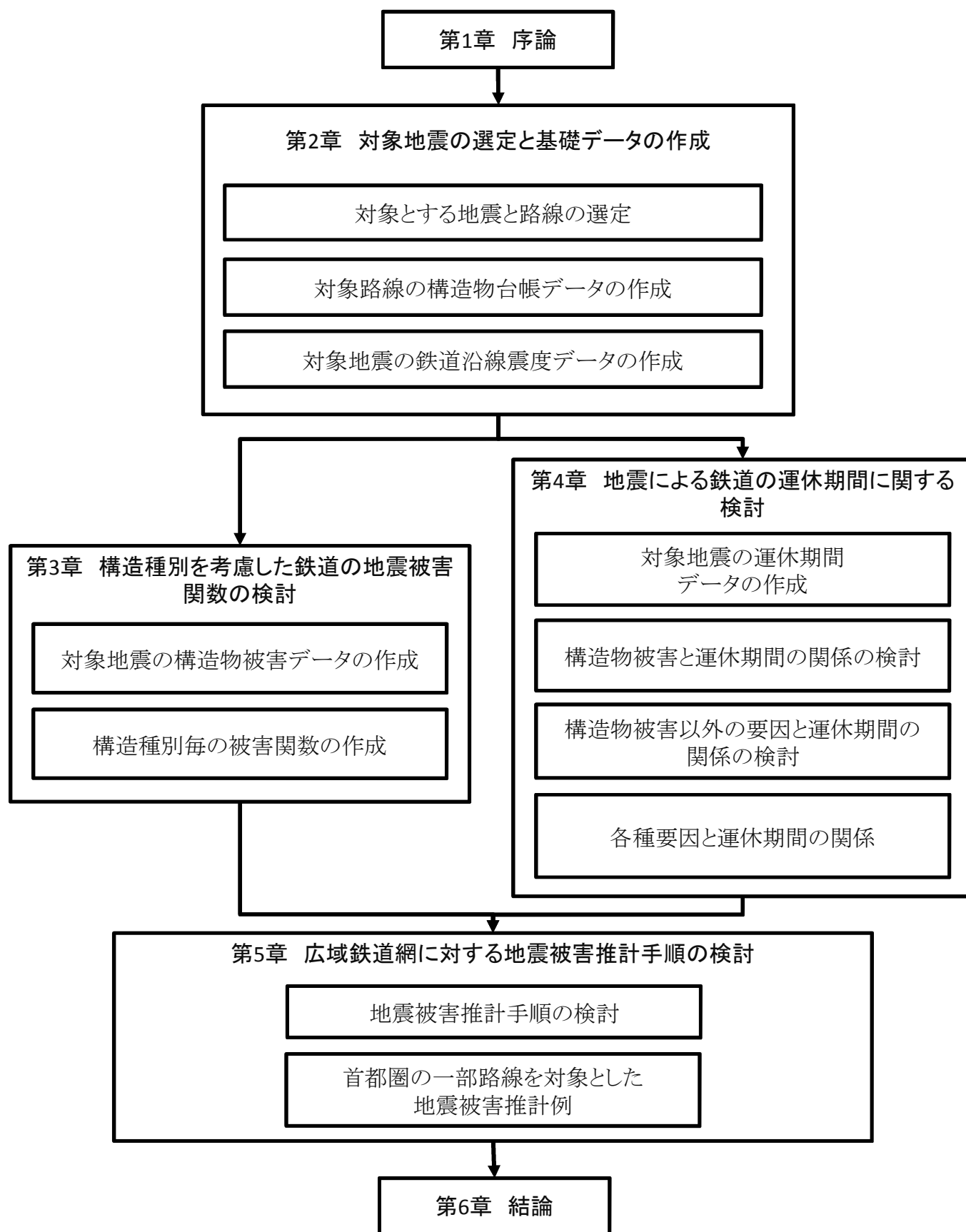


図 1.7 本論文の構成

第2章 対象地震の選定と基礎データの作成

2.1. はじめに

本章では、3章及び4章での検討を行う上での基礎資料を得ることを目的に、検討対象地震と検討対象路線の選定を行い、対象路線の鉄道構造物の位置・構造種別に関する情報を鉄道構造物台帳データとして整備するとともに、対象地震時の鉄道沿線各点の震度を推計した。

2.2.では、検討対象とする地震と路線の選定について示す。

2.3.では、鉄道構造物を「素地・低盛土」「盛土」「切土」「橋りょう」「山岳トンネル」「高架橋」「地下トンネル」に分類し、それぞれの総延長及び位置座標を得る方法を検討した内容を示し、実際に検討対象路線の鉄道構造物情報を整理した結果を示す。

2.4.では、対象地震時の面的な震度分布の推計方法とその結果をもとに鉄道沿線の震度データを作成した結果について述べる。

2.5.では、本章の内容をまとめる。

2.2. 対象とする地震と路線の選定

鉄道構造物に被害が発生した近年の地震の一覧を表 2.1 に示す。本研究での検討対象地震は、①被害位置・被害内容が詳細に記述された資料が存在すること、②鉄道沿線各地点の震度を適切に推計できること、③鉄道が長期間(30 日以上)運休した地震であること、を満たす地震として、1995 年兵庫県南部地震(1995 兵庫)、2004 年新潟県中越地震(2004 中越)、2007 年新潟県中越沖地震(2007 中越沖)の 3 地震を選定した。2011 年東北地方太平洋沖地震(2011 東北)については、公開されている資料の収集のほか、個別に鉄道事業者にお問い合わせ、資料提供の依頼も行ったが、全ての被害事例のデータを収集することはできなかった。ただし、高架橋の被害資料に限っては、被害が発生したとされる事業者の全てから資料を収集することができた。したがって、2011 年東北地方太平洋沖地震については、高架橋の被害関数の検討と運休期間の検討について対象に含めることとした。対象路線は、対象地震での被害位置を網羅する範囲とした。対象 4 地震の震央位置と対象路線の位置を図 2.1 に示す。本研究では、JR 及び民鉄・公営・第 3 セクターの在来線鉄道を対象とした。新幹線鉄道は、構造物の設計基準等さまざまな条件が在来線鉄道とは異なるため、対象外とした。

2.3. 対象路線の構造物台帳データの作成

2.3.1 国土数値情報を用いた鉄道沿線緯度経度情報の取得手順

通常、鉄道構造物に関するあらゆる情報は、始点からのキロ程で表示されることが多い。一方、震度分布の推計結果などはメッシュデータ（すなわち緯度経度）で表示される。このため、「鉄道のキロ程」「緯度経度」「構造物位置」の3要素を結び付ける必要がある。多くの鉄道事業者では、キロ程ごとに構造物の諸元を示した構造物管理台帳等を所有し、日々の構造物の保守に活用している。また、台帳とGISをリンクした構造物データベースを整備している鉄道事業者も増えてきている。しかし、これらデータはセキュリティ上、一般的には非公開である。本研究では、公開されている情報源を利用して、鉄道のキロ程・緯度経度・構造物位置の3要素を結び付ける方法を検討した。

公開されている情報源として利用可能なものの1つに、国土数値情報 [1]がある。国土数値情報の鉄道データの中には沿線各点の緯度経度に関する情報が含まれている。そこで、国土数値情報をもとに、キロ程が分かっている駅を起点にラインデータ上を一定間隔ずつ測りながら緯度経度をピックアップして、キロ程と緯度経度を照合することとした。作業手順の概要を図2.4に示す。緯度経度を取得する点の間隔は、後述する面的な計測震度分布の推計の単位が250mメッシュであること、2.3.2.で述べる構造種別の取得の際に用いる地理院地図上の盛土および切土記号の取得基準 [2]が長さ75m以上となっていること等を考慮し、100m間隔とした。座標データを取得した点のことを以下では「100m点」と呼ぶ。なお、高速道路を対象とした類似の研究である丸山ほか（2008） [3]でも高速道路盛土の位置を決定する際に100m単位としている。

2.3.2. 地理院地図を用いた構造種別情報の取得手順

(1)土構造物台帳データ

土構造物は個単位で計上することの難しい構造物であることから、100m 点を単位とした延長で計上することとし、地理院地図（旧：電子国土） [2]上に 100m 点をプロットし、各 100m 点位置の地図記号から判読することとした。地理院地図では、表 2.2 のように鉄道構造物について「盛土」「切土」「橋りょう」「高架橋」「トンネル」が記号で分類表示されている。また、無記号の場合は、素地(盛土や切土をせず原地盤をそのまま線路の路床とする構造)または低盛土のいずれかであると考えられる。すなわち、無記号の箇所は「素地・低盛土」と分類表示されていると解釈することで、6 種類の構造種別を区分することが出来る。読み取り作業の概要を図 2.5 に示す。

(2) 橋りょう台帳データ

橋りょうの位置座標及び数量は、地理院地図上から直接 1 つずつピックアップして整理することとした。短スパンの橋りょうは地理院地図で省略されていることもあるため、地理院地図だけでなく、国土画像情報 [4]、Google Maps [5]を使用して鉄道と河川および道路が交差している点の構造を確認し、線路と河川や道路とが立体交差していることが確認できた場合には、それも橋りょうと判断することとした。

(3) 高架橋台帳データの作成

地理院地図では、表 2.2 に示すように、橋りょう・架道橋・跨線橋の位置は線で示され、高架橋の位置は点付きの線で示される。したがって、原則としては、高架橋の記号で表示されている箇所の 100m 点の構造種別は高架橋であると読み取ればよい。しかし、地理院地図の表示上では河川をまたがる区間であっても高架橋記号で表示されている場合や、陸域で 200m 以上連続して橋りょう記号で表示されている場合もある。そこで、記号の通りに読み取れない場合の読み取り方について、以下のルールを設定した。

- ・河川をまたがる区間が高架橋の記号で表示されている場合の読み取り方
100m 点が河川敷部分（堤防記号で挟まれた間）の中にある場合は橋りょうとして読み取る。
- ・陸域で 200m 以上連続して橋りょう記号で表示されている場合の読み取り方
橋りょう区間全長に対して、河川を跨いでいる部分がない、またはわずかで、大半が陸域上の橋りょうとなっている場合は高架橋として読み取る。

なお、検討対象路線のうち、阪神地区及び首都圏の鉄道には、2 本の鉄レールの上を鉄輪で走行する「普通鉄道」のほかに、モノレール鉄道や案内軌条式鉄道といったいわゆる「新

交通システム」も含まれる。新交通システムは、高架橋で構成されるものが多く、その形式は図 2.2 に示すように、都市部の道路上やわずかな空間を縫うように設置され、桁式とされることが多く、桁高が高く、径間が長いものが多い。一方、普通鉄道の高架橋は図 2.3 に示すようなラーメン形式とされることが多く、桁高が低く、径間が短いものが多い。また、新交通システムの構造物には、自動運転のための案内軌条等の精密な設備が設置されている。今回の検討範囲の中でも特に阪神地区の新交通システムについては、臨海部の埋立地上に設置されている路線が多く、普通鉄道と新交通システムとでは、高架橋の構造や軌道設備の構造、地盤条件等が異なることから、地震による被害の発生状況にも違いがあると考えられる。そのため、高架橋の構造物台帳データを作成する際、普通鉄道と新交通システムについても分けて整理することとした。

(4) トンネル台帳データの作成

鉄道のトンネルには、山を貫通するように設けられた山岳トンネルと、都市内平野部の地価に設けられた地下トンネルとがある。山岳トンネルは矢板工法や NATM 工法で掘削されるが、地下トンネルは開削工法やシールド工法で掘削され、構造が大きく異なる。このため、山岳トンネルと地下トンネルでは、地震による被害の出方も異なる。地下トンネル（開削トンネル）は図 2.6 のような構造となっている。1995 年兵庫県南部地震の際には、開削トンネルの中柱でせん断破壊が生じ、大開駅などで甚大な被害をもたらした。開削トンネルに生じる被害としては、中柱の損傷のほか、外壁の剥離や亀裂なども挙げられる。したがって、本検討では、山岳トンネルと地下トンネルを区分することとした。

山岳トンネルの位置座標及び数量については、地理院地図上にトンネル坑口位置が記号で示されているので、それをもとに緯度経度をピックアップし整理した。

地下トンネルの数量は、旅客設備が設置され、構造が複雑となり、また、比較的地表から浅い位置に設置されることが多い駅部と、列車を通すのみの最小限の空間で構成される駅間とで構造や設置条件が異なるため、駅部、駅間でそれぞれ 1 本のトンネルとして計上した。位置座標については、地理院地図上では山岳トンネルと同じ記号で表されており、記号だけではピックアップできないため、個別に検討することとした。まず神戸市営地下鉄については、阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会(1996) [6]に区間ごとのトンネル種別（山岳／地下）が示されているので、それに基づいて、新神戸～板宿間を地下トンネルとした。神戸高速鉄道全線と神戸電鉄有馬線湊川駅付近は、すべて市街地を通過していることから、全線を地下トンネルと判断することとした。トンネル上部が宅地等に利用されている丘陵地のトンネルのように、地形や土地利用状況だけで判断できない場合は、YouTube で公開されている前面展望動画を確認し、箱型の場合は地下トンネルと判断することとした。トンネル種別の区分方法の例を図 2.7 に示す。

(5) 地震発生当時と現状とで構造種別が異なる区間の取り扱い

ここまでに述べたとおり、本検討での構造種別の読み取りは地理院地図の記号によることとしているが、地理院地図の標準地図は電子国土基本図（地図情報）を基に作成した電子地形図 25000 から作成されており、その表示内容は電子地形図 25000 と同時に更新されている。このため、現在の地理院地図の表示と地震発生当時の状況とは異なる場合もある。当時と現状とで構造種別が異なる区間においては、「今昔マップ on the web」 [7]を用いて、当該位置の当時の構造種別を読み取ることとした。

(6) 地理院地図上での記号が省略されている区間の読み取り方

地理院地図では、周辺に構造物が多く、記号が輻輳するような場合には、盛土・切土・高架橋の記号が省略されることがある。その場合には、Google Map [5]ストリートビューでの確認または現地での直接確認により確認した構造種別で読み取ることとした。

2.3.3 対象路線の鉄道構造物台帳データ

今回の対象路線に対し、2.2.及び2.3に示した方法を適用し、台帳データを作成した。新潟地区・阪神地区については検討対象全線について台帳データを作成した。2011年東北地方太平洋沖地震の被害データをもとにした被害関数の検討は高架橋についてのみ行うため、関東・東北地方については、高架橋の台帳データのみ作成した。結果を図2.8～図2.10及び表2.3、2.4に示す。

2.4. 対象地震の鉄道沿線震度データの作成

2.4.1. 1995 年兵庫県南部地震の鉄道沿線震度データ

1995 年兵庫県南部地震の当時は現在と比較して地震計が密に配置されていないため、アンケート震度をもとに推計された既往の研究成果を組み合わせ適用することとした。主に兵庫県内の震度分布としては藤本・翠川(1999) [8]を用い、主に大阪府内の震度分布としては鶴来ほか(1999) [9]を用いた。メッシュサイズは 250m メッシュとした。大阪府・兵庫県境付近で、同一メッシュに両方の推計震度が得られる場合は、両方の値を比較し大きい値を採用することとした。今回適用する推計震度分布を図 2.11 に示す。

各 100m 点の震度は、250m メッシュの震度データと 100m 点の緯度経度とを照合することで取得した。対象路線の各構造種別の震度階ごとの延長を表 2.5 に、橋りょう及びトンネルの震度階毎の数量を表 2.6 に示す。

藤本・翠川(1999)では、神戸市北西部などで推計震度が得られていない地域があるが、当該地域の震度は鉄道総研報告(1996)[10]などで鉄道沿線地震計の加速度値が示されている場合には、加速度値を震度に換算し適用することとした。また、高田・嘉島(1996)[11]にてアンケート震度が得られている町丁目に属する区間の震度はアンケート震度の値を参照することとした。アンケート震度の値も得られていない地域については、一律震度 5 強（計測震度 5.25）であると仮定した。

2.4.2. 2004 年新潟県中越地震の鉄道沿線震度データ

面的な震度分布を推計する際、山崎ほか(1998)[12]や丸山ほか(2008)[3]などでは、図 2.12 に示すように、1)地表面上の観測値を表層地盤増幅度で除して工学的基盤上での推計値に変換、2)工学的基盤上で空間補間、3)推計点での表層地盤増幅度を乗じて基盤上での推計値から地表面上の推計値に変換、とする方法が用いられている。本研究でも同様の方法を適用し、250m メッシュで震度分布を推計した。観測値としては、K-NET、気象庁震度計、自治体震度計、JR 東日本の沿線地震計データ、JH（現 NEXCO 東日本）の地震計データなどを利用した。

工学的基盤上で空間補間方法については、ここでは、断層近傍である上越線沿線の震度を適切に評価する必要があると考え、断層近傍の震度分布をより適切に推計する方法とされている Kriging 法を用いることとした。なお、断層モデルは産総研のモデル[13]を用い、トレンド成分には司・翠川(1999) [14]を用いた。地表面での観測震度から速度への換算には藤本・翠川(2010)[15]を用い、各メッシュの最大速度の増幅率は、J-SHIS[16]で公開されている微地形区分から求められた表層地盤の層厚 30m での平均 S 波速度(AVS30)をもとに、藤本・翠川(2006)[17]を用いて求めた。今回適用する推計震度分布を図 2.13 に示す。各 100m 点の震度は、2.4.1.と同様に取得した。対象路線の各構造種別の震度階ごとの延長を表 2.5 に、橋りょう及びトンネルの震度階毎の数量を表 2.6 に示す。

2.4.3. 2007 年新潟県中越沖地震の鉄道沿線震度データ

震度分布の推計手法は 2.5.2. と同様とした。ただし、工学的基盤上での空間補間方法については、簡便な手法である IDW 法を適用した。IDW 法は、以下の式に示すような、計算点と観測点の距離の逆数を重みとして補間計算を行う手法である。

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i Y_i \quad w_i = \frac{\frac{1}{r_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^p}}$$

ここで、 Y は計算値、 Y_i は観測点 i での値、 r_i は計算点と観測点 i との距離、 n は補間に用いる観測点数、 p は累乗のパラメータである。今回は $n=5$ 、 $p=1$ とし、ある点の計算値を求める際に使用する観測点の探索範囲を 20 km 以内とした。また、各メッシュの表層地盤による震度の増幅度 ΔI は、J-SHIS で公開されている AVS30 をもとに、翠川・他(2008)[18]を用いて求めた。また、今回適用した推計震度分布を図 2.14 に示す。また、各 100m 点の震度は、2.4.1. と同様に取得した。対象路線の各構造種別の震度階ごとの延長を表 2.5 に、橋りょう及びトンネルの震度階毎の数量を表 2.6 に示す。

2.4.4. 2011 年東北地方太平洋沖地震の鉄道沿線震度データ

推計手法は、2004 年新潟県中越地震及び 2007 年新潟県中越沖地震と同様とし、工学的基盤上での空間補間方法についても、2007 年新潟県中越沖地震と同様に IDW 法を適用した。ある点の計算値を求める際に使用する観測点の探索範囲は、東北地方の北部に観測点配置が疎な地域があったため、30km とした。また、今回適用した推計震度分布を図 2.15 に示す。また、各 100m 点の震度は、2.5.1.と同様に取得した。高架橋区間の震度別延長を表 2.5 に示す。

2.5. まとめ

本章では、3 章及び 4 章での検討を行う上での基礎資料を得ることを目的に、まず、鉄道に被害が発生した近年の地震の中から、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震の 4 地震を本研究での検討対象地震として選定した。また、対象 4 地震で鉄道に被害が発生した範囲を網羅するように検討対象路線を設定した。

構造物台帳データを作成する手順として、国土数値情報の鉄道データをもとに沿線各点の緯度経度を取得する手順と、鉄道構造物を「素地・低盛土」「盛土」「切土」「橋りょう」「高架橋」「山岳トンネル」「地下トンネル」に区分し、地理院地図を用いて各構造種別の台帳データを作成する手順を検討した。

本章で検討した手順に従って対象路線の鉄道構造物台帳データを作成し、さらに、対象地震について、面的な震度分布を推計し、その結果をもとに鉄道沿線各点の震度データを作成した。

【2 章の参考文献】

- [1] 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報，<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>.
- [2] 国土地理院：地理院地図，<http://portal.cyberjapan.jp/index.html>.
- [3] 丸山喜久，山崎文雄，用害比呂之，土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係，土木学会論文集 A Vol.64, No.2, 208-216, 2008.
- [4] 国土画像情報，http://w3land.mlit.go.jp/WebGIS/about_photo.html.
- [5] Google Maps，<https://maps.google.com/>.
- [6] 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会：よみがえる鉄路 阪神・淡路大震災鉄道復興の記録，山海堂，1996.
- [7] 今昔マップ on the web：<http://ktgis.net/kjmapw/index.html>.
- [8] 藤本一雄，翠川三郎：被害分布から推定した 1995 年兵庫県南部地震の震度分布，日本建築学会構造系論文集，No.523, pp.71-78, 1999.
- [9] 鶴来雅人，澤田純男，入倉孝次郎，土岐憲三：アンケート調査による兵庫県南部地震の大阪府域の震度分布，土木学会論文集 No.612／I-46, 165-179, 1999.
- [10] 兵庫県南部地震鉄道被害調査報告書，鉄道総研報告，特別第 4 号，1996
- [11] 高田至郎，嘉島崇志：兵庫県南部地震に関するアンケート調査－集計結果報告書－，1996.11
- [12] 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.3491-3496, 1998.
- [13] (独)産業技術総合研究所 HP: 2004 年中越地震の断層モデル（序報），
<http://staff.aist.go.jp/h.horikawa/2004Chuetsu/source.html>
- [14] 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.
- [15] 藤本一雄，翠川三郎：マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式，日本地震工学会論文集, 第 10 巻, 第 2 号, pp.1-11, 2010.
- [16] J-SHIS 地震ハザードステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.
- [17] 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.
- [18] 翠川三郎，駒澤真人，三浦弘之：横浜市高密度強震計ネットワークの記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係，日本地震工学論文集, 第 8 巻, 第 3 号, 2008.

表2.1 鉄道構造物に被害が発生した近年の地震

No	年月日	震央地名	M	主な被害	運休期間 (日)	被害資料 ※3	検討対象 地震※4
1	1987/12/17	千葉県東方沖	6.7	千葉県内在来線の土構造・橋りょうの被害	1	○	
2	1993/1/15	釧路沖	7.5	北海道東部在来線の土構造物・橋りょうの被害	17	△	
3	1993/7/12	北海道南西沖	7.8	北海道南西部在来線の土構造物・橋りょうの被害	5	△	
4	1994/10/4	北海道東方沖	8.2	北海道東部在来線の土構造物・橋りょうの被害	12	△	
5	1994/12/28	三陸はるか沖	7.6	青森圏内在来線の軌道変状・高架橋損傷	1	○	
6	1995/1/17	兵庫県南部	7.3	東海道・山陽新幹線の高架橋損傷・落橋・トンネル被害 阪神地区在来線の土構造物・橋りょう・トンネル被害	208	○	◎
7	2000/10/6	鳥取県西部	7.3	島根県内在来線の土構造物被害・落石	4	○	
8	2001/3/24	安芸灘	6.7	山陽新幹線の軌道変状・高架橋損傷 広島県内在来線の土構造物被害・落石	1	△	
9	2003/5/26	宮城県沖	7.1	東北新幹線高架橋損傷 岩手県内在来線の土構造物被害	1	○	
10	2003/7/26	宮城県北部	6.4	宮城県内在来線の土構造物被害	1	△	
11	2003/9/26	十勝沖	8.0	北海道東部在来線の軌道変状・土構造物被害	12	△	
12	2004/10/23	新潟県中越地方	6.8	上越新幹線の高架橋損傷・トンネル被害 新潟県内在来線の土構造物・トンネル・橋りょう損傷	64	○	◎
13	2007/3/25	能登半島沖	6.9	のと鉄道の土構造物等の被害	5	△	
14	2007/7/16	新潟県中越沖	6.8	新潟県内在来線の土構造物・トンネル・橋りょうの被害	59	○	◎
15	2011/3/11	東北地方太平洋沖	9.0	東北新幹線の高架橋損傷・トンネル被害 東北地方・関東地方の在来線土構造物・トンネル・橋りょう被害	123 ※1	△	○
16	2011/3/15	長野県北部	6.7	長野県内在来線の土構造物被害	48	△	
17	2011/4/7	宮城県沖	7.2	東北新幹線高架橋の損傷 仙台地区在来線の土構造物等被害	※2	△	

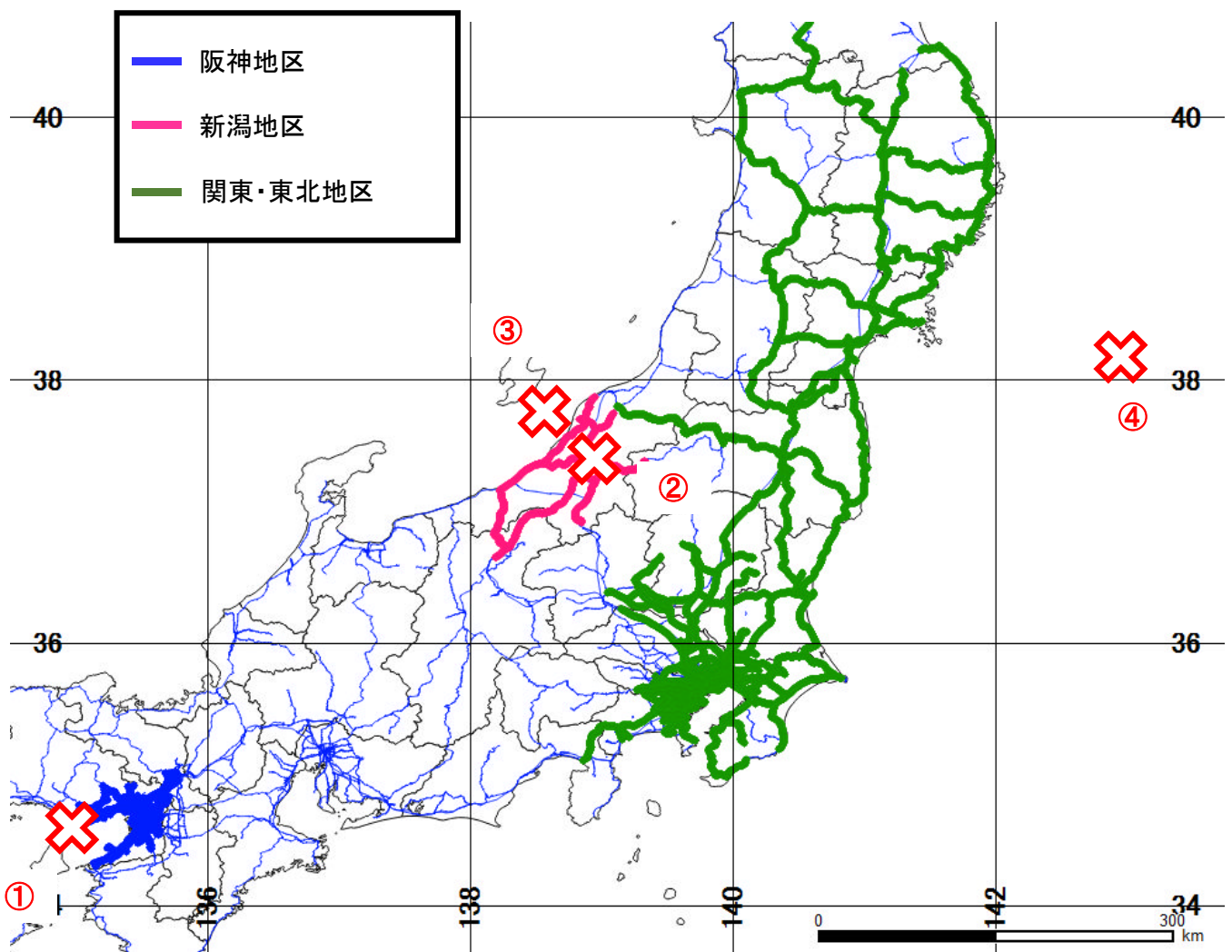
※1 地震動による被害での運休。津波被害によるものは2015年現在で未だ不通区間有。

※2 2011年東北地方太平洋沖地震の余震。本震による被害の復旧途中に発生。

※3 ○＝被害位置・被害内容が詳細に記述された資料が存在する地震。

△＝被害位置・被害内容が詳細に記述された資料が存在しない地震。

※4 ◎＝被害関数の検討、運休期間の検討の両方の対象地震。○＝高架橋の被害関数の検討と運休期間の検討の対象地震。



No	発生年月日	震央地名	M	最大震度 (気象庁)	鉄道の最長 運休期間 (日)
1	1995/1/17	兵庫県南部	7.3	7	208
2	2004/10/23	新潟県中越	6.9	7	64
3	2007/7/16	新潟県中越沖	6.8	6強	59
4	2011/3/11	東北地方太平洋沖	9.0	7	123※

※地震動による被害での
最長運休期間

図2.1 検討対象地震と路線



図2.2 新交通システムの高架橋の例



図2.3 普通鉄道の高架橋の例

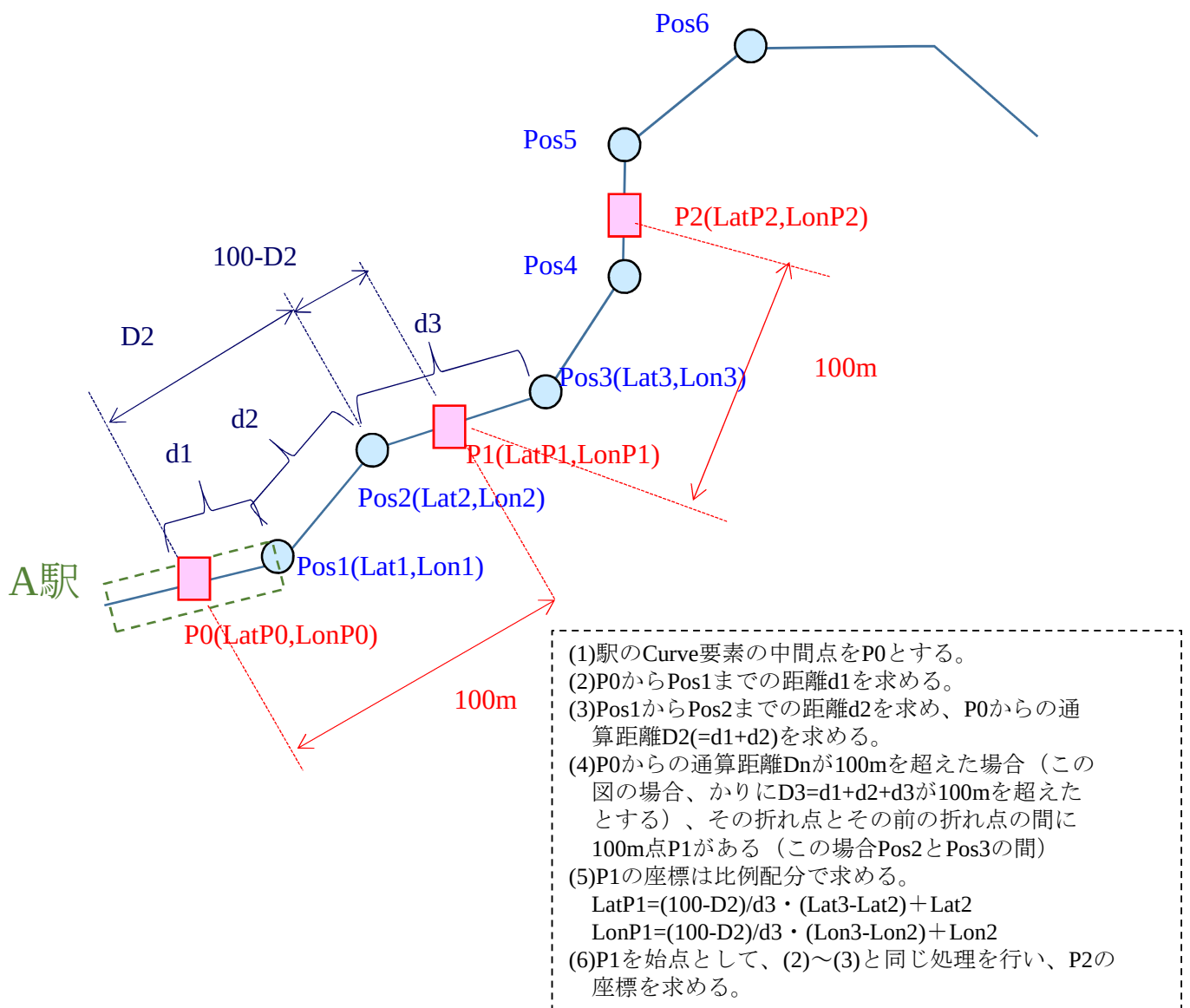


図2.4 国土数値情報を用いた鉄道キロ程と緯度経度の照合

表2.2. 地理院地図での鉄道構造物の記号表記

構造種別		記号
土 構 造 物	素地・低盛土	
	盛土	
	切土	
トンネル		
橋りょう		
高架橋		

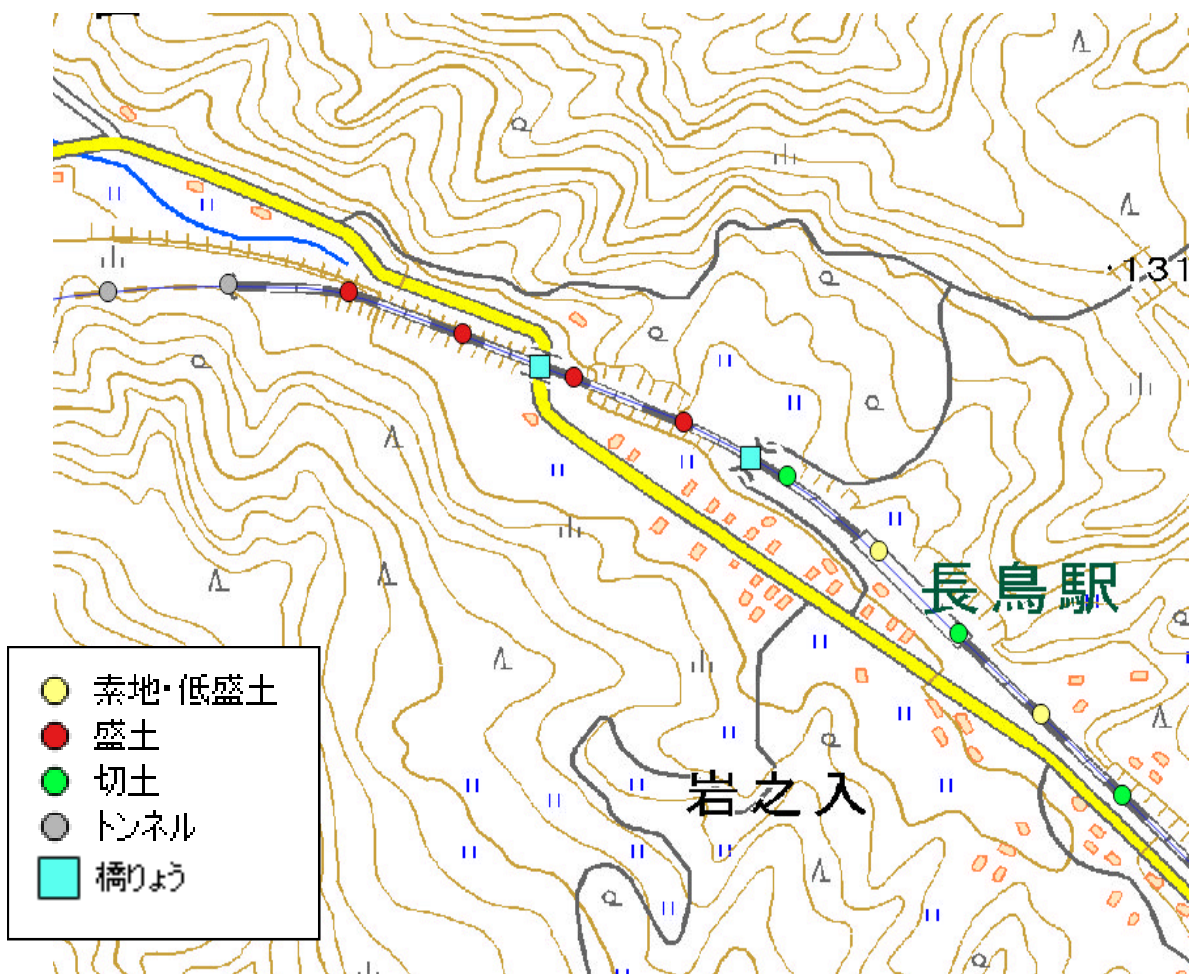


図2.5 地理院地図を用いた構造物台帳データの整理

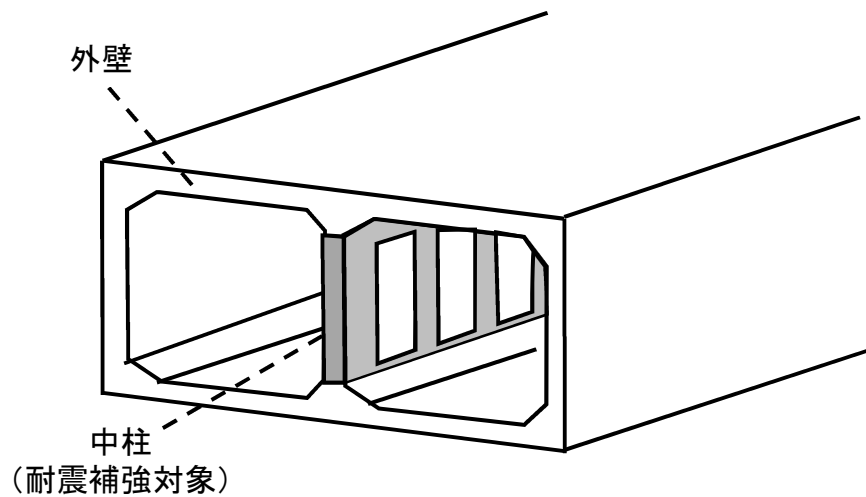


図2.6 地下トンネル(開削トンネル)の構造

つくばエクスプレス みどりの→みらい平間



断面が箱型→地下トンネルと判断



つくばエクスプレス 前面展望 つくば⇒秋葉原 TX2000系

図2.7 You Tubeを用いたトンネル種別の区分の例

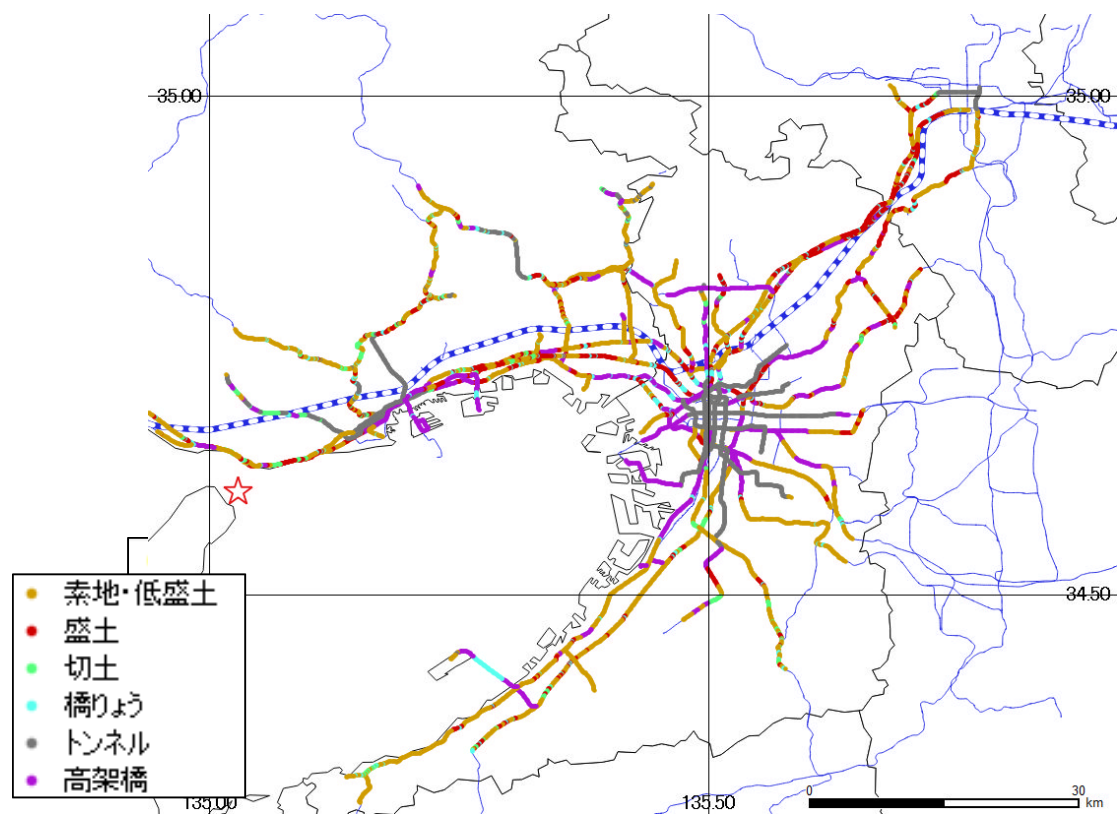


図2.8 阪神地区の構造物台帳データ

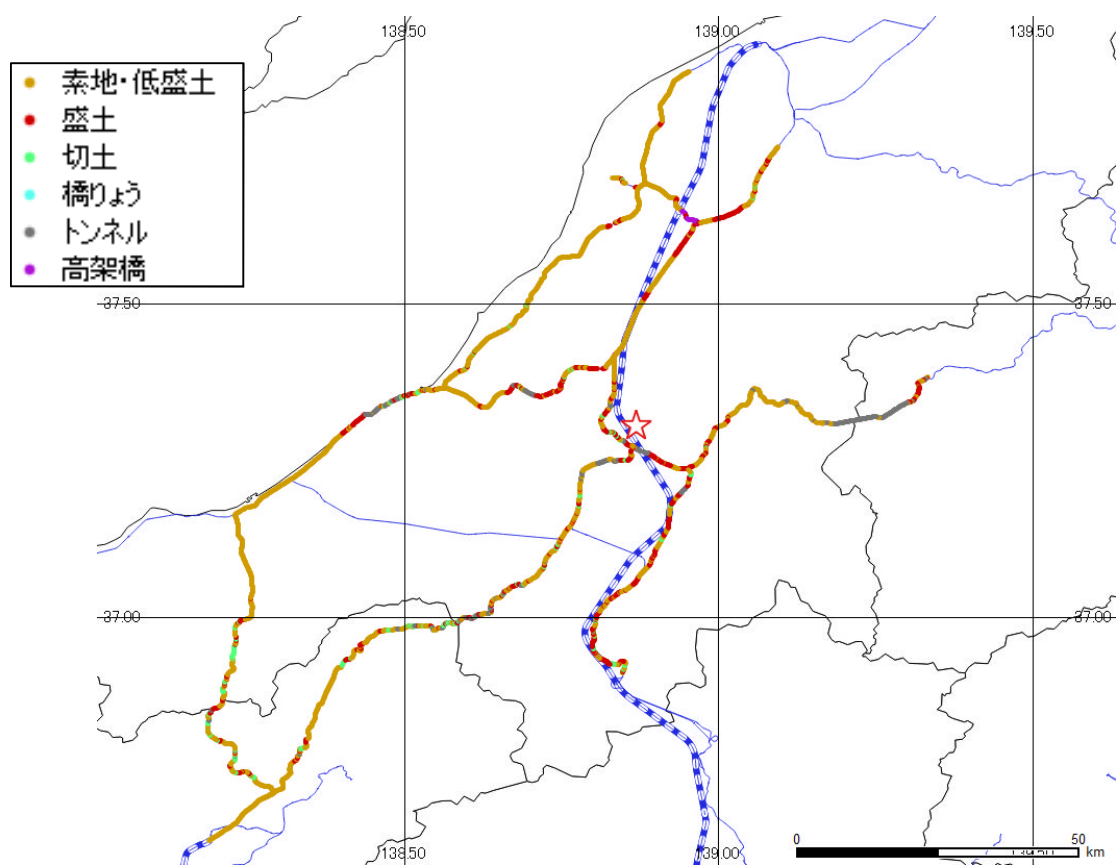


図2.9 新潟地区の構造物台帳データ

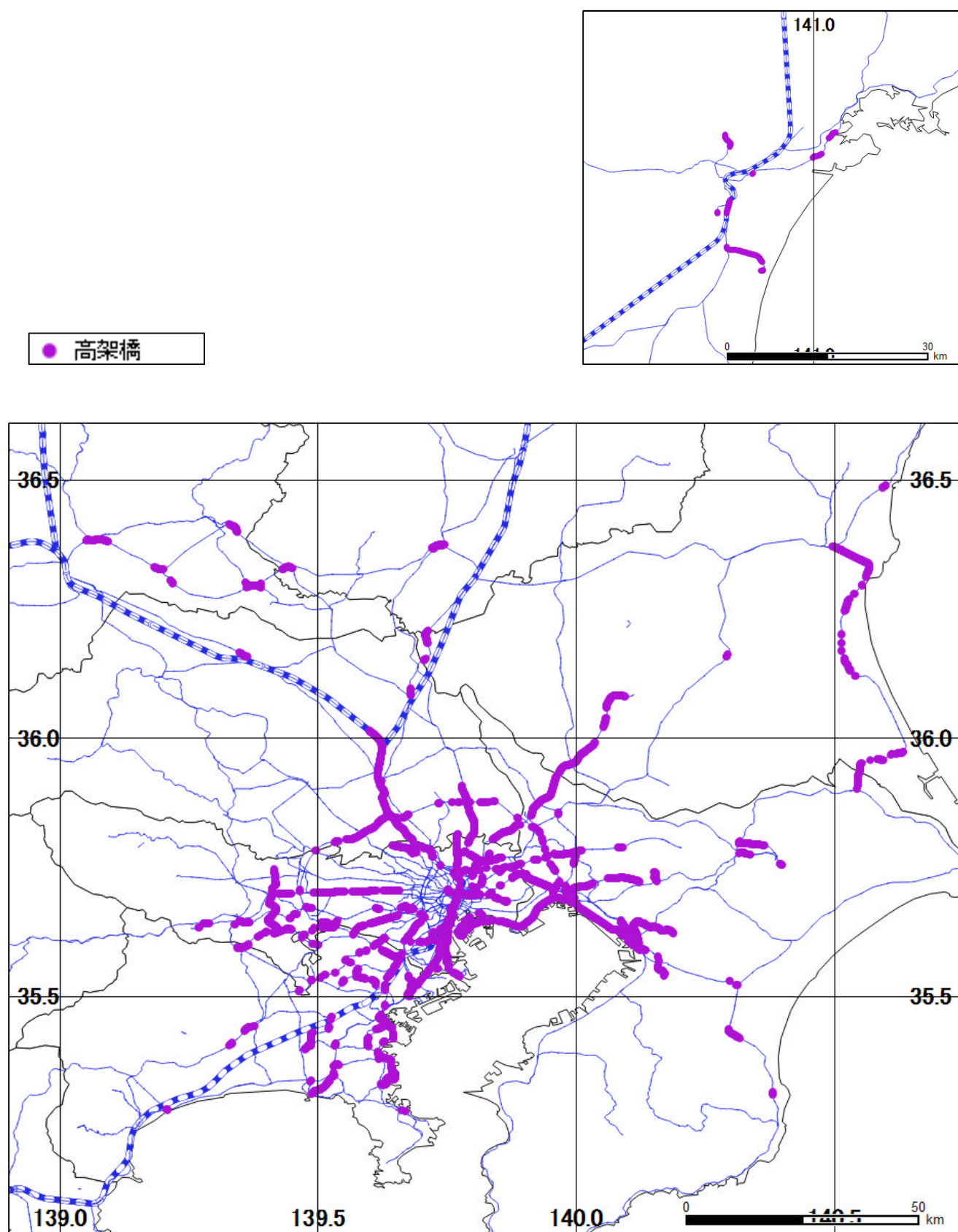


図2.10 首都圏及び仙台地区 高架橋台帳データ

表2.3 各構造種別の延長内訳

地区	鉄道種別	構造種別	延長 (km)	鉄道種別計 (km)	地区計 (km)
阪神	普通鉄道	素地・低盛土	374.9	890.2	918.5
		盛土	129.5		
		切土	30.7		
		高架橋	151.8		
		その他	203.3		
	新交通	高架橋	27.3	28.3	
		その他	1.0		
新潟	普通鉄道	素地・低盛土	308.7	500.5	500.5
		盛土	94.2		
		切土	23.6		
		高架橋	3.4		
		その他	70.6		
	新交通	高架橋	0.0	0.0	
	関東 東北	普通鉄道	高架橋	431.2	
新交通		高架橋	98.0	98.0	

表2.4 橋りょう・トンネルの数量

地区	構造種別	数量
阪神	橋りょう	534
	山岳トンネル	38
	地下トンネル	240
新潟	橋りょう	547
	山岳トンネル	66
	地下トンネル	0

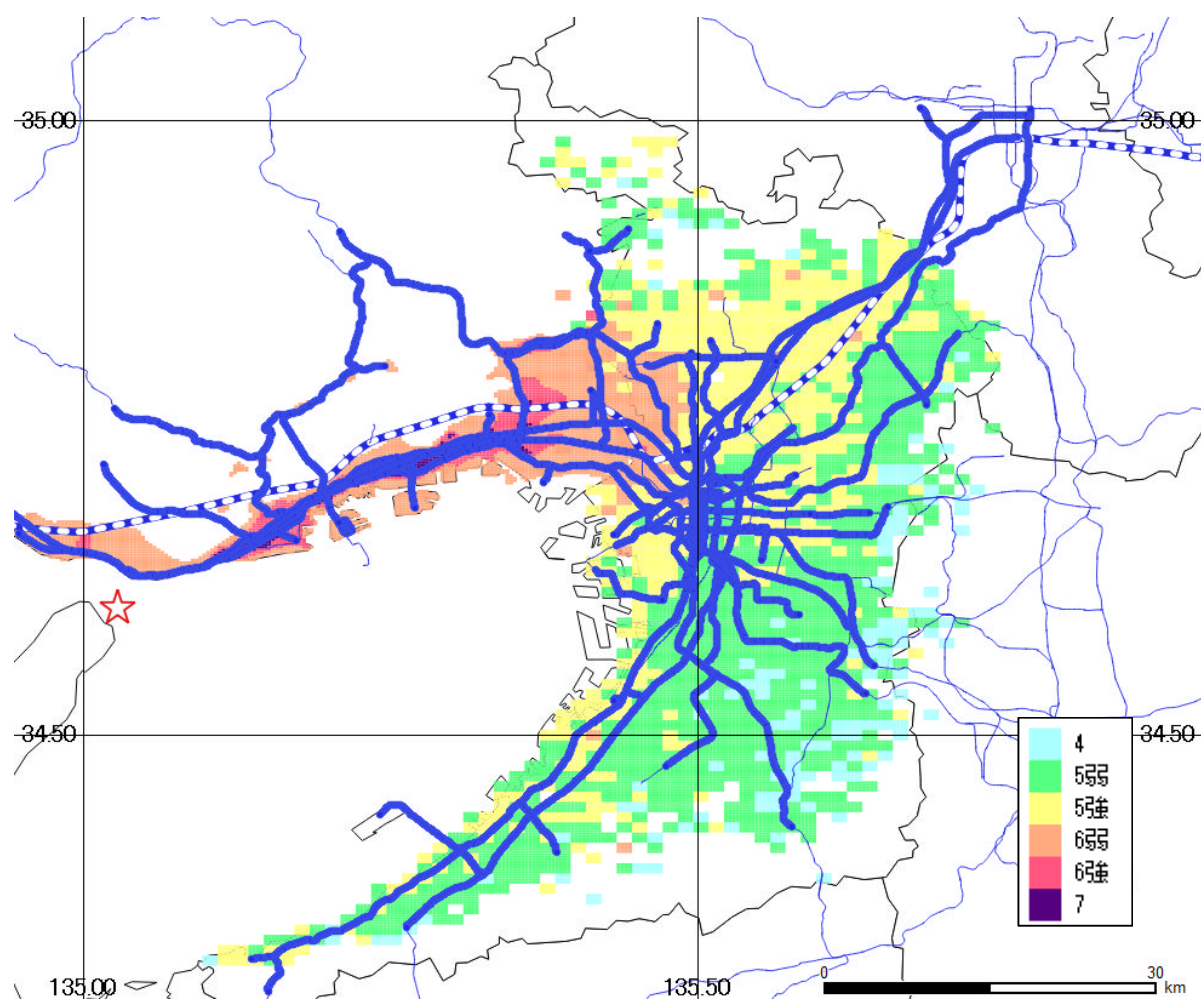


図2.11 1995年兵庫県南部地震の推計震度分布

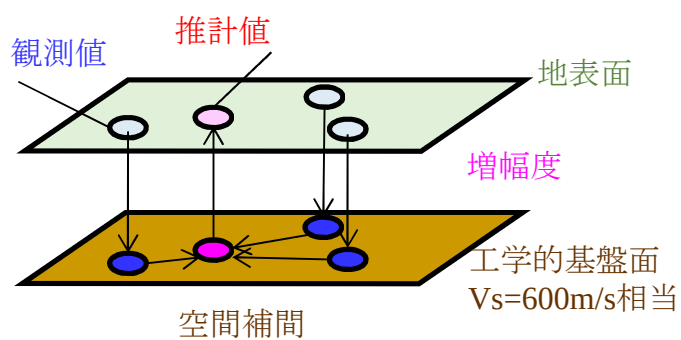


図2.12 震度の空間分布推計概要

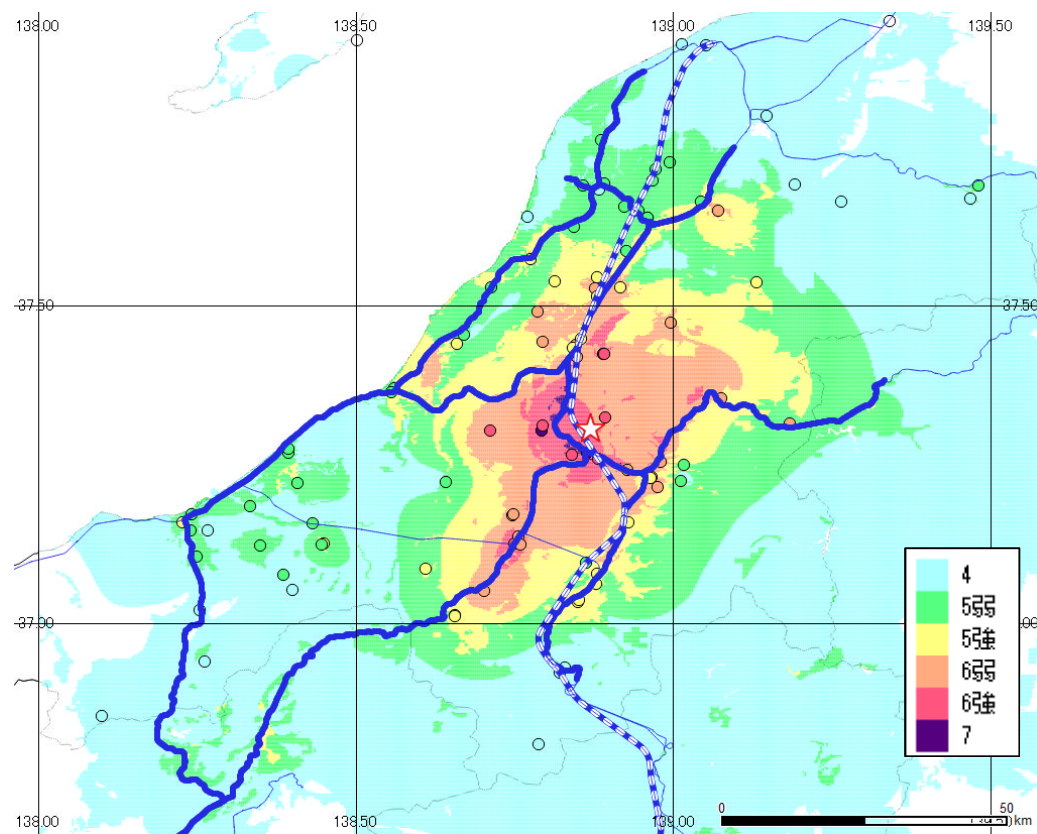


図2.13 2004年新潟県中越地震の推計震度分布

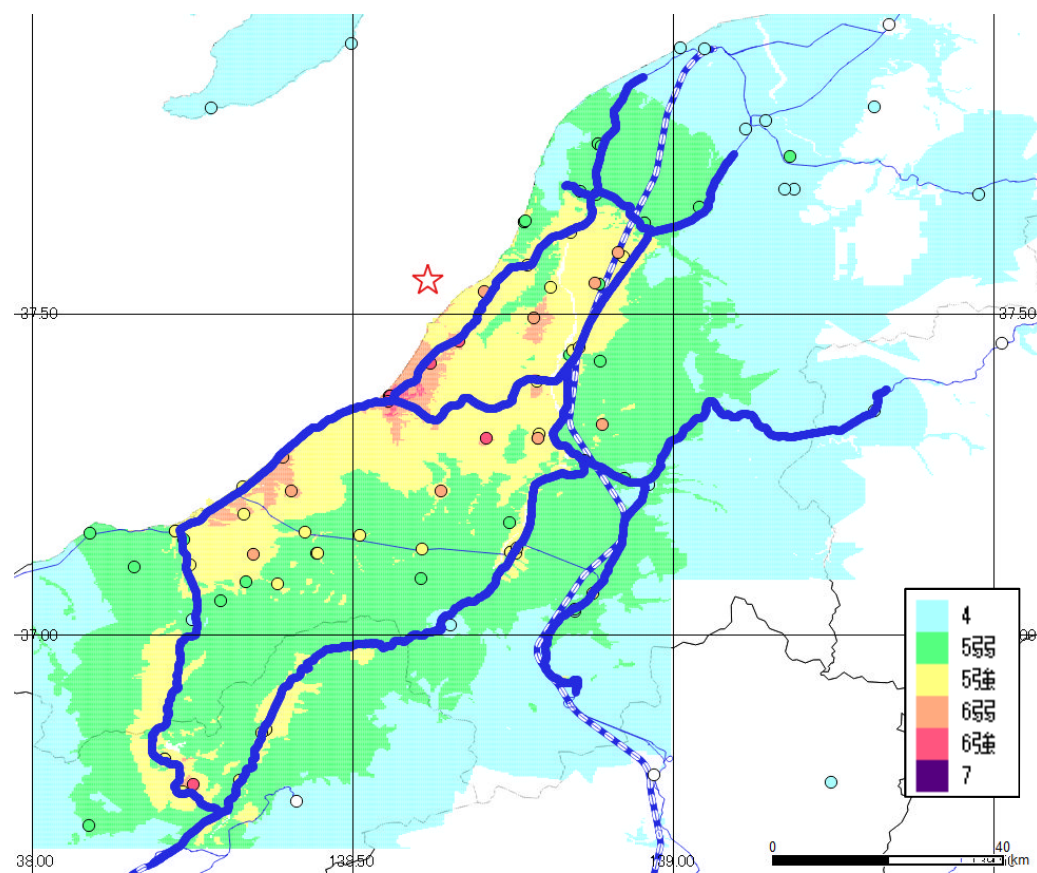


図2.14 2007年新潟県中越沖地震の推計震度分布

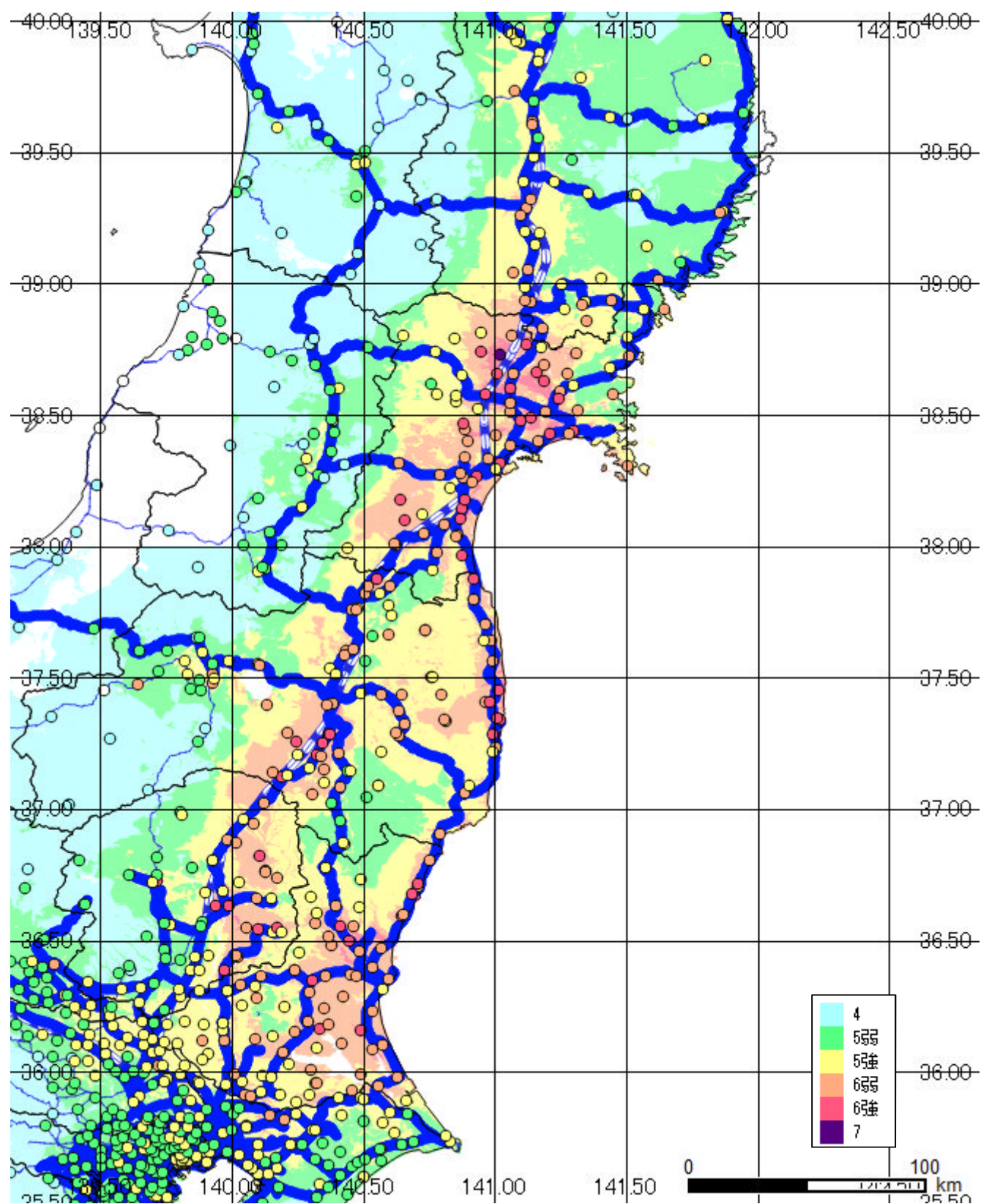


図2.15 2011年東北地方太平洋沖地震の推計震度分布

表2.5 各構造種別の震度階毎の延長(km)

地震	鉄道種別	構造種別	震度階						計
			4以下	5弱	5強	6弱	6強	7	
1995 兵庫	普通鉄道	素地・低盛土	7.3	144.0	116.3	65.3	25.0	17.0	374.9
		盛土	2.0	47.2	35.8	24.5	12.8	7.2	129.5
		切土	0.7	11.3	11.2	4.8	1.1	1.6	30.7
		高架橋	1.1	47.4	62.4	16.5	8.3	16.1	151.8
		その他	0.8	77.4	88.4	14.6	9.2	12.9	203.3
	新交通	高架橋	0.0	1.9	10.9	11.2	1.6	1.7	27.3
2004 中越	普通鉄道	素地・低盛土	88.8	89.4	58.7	57.9	13.5	0.4	308.7
		盛土	18.4	17.2	22.1	23.4	10.8	2.3	94.2
		切土	12.9	3.5	2.5	3.0	1.7	0.0	23.6
		高架橋	0.0	2.7	0.2	0.5	0.0	0.0	3.4
		その他	15.4	28.0	10.3	10.7	5.8	0.4	70.6
2007 中越沖	普通鉄道	素地・低盛土	25.6	133.9	116.7	24.0	8.5	0.0	308.7
		盛土	8.8	50.5	28.9	5.3	0.7	0.0	94.2
		切土	1.5	9.8	11.1	1.1	0.1	0.0	23.6
		高架橋	0.0	2.9	0.5	0.0	0.0	0.0	3.4
		その他	21.5	27.1	18.4	2.5	1.1	0.0	70.6
2011 東北	普通鉄道	高架橋	14.2	247.0	129.7	29.0	11.3	0.0	431.2
	新交通	高架橋	5.1	69.7	23.2	0.0	0.0	0.0	98.0

表2.6 橋りょう・トンネルの震度階毎の数量 (箇所)

地震	構造種別	震度階						計
		4以下	5弱	5強	6弱	6強	7	
1995 兵庫	橋りょう	-	-	224	136	96	78	534
	山岳トンネル	0	5	27	4	1	1	38
	地下トンネル	0	100	90	11	19	20	240
2004 中越	橋りょう	123	145	115	116	34	14	547
	山岳トンネル	14	26	5	13	8	0	66
	地下トンネル	0	0	0	0	0	0	0
2007 中越沖	橋りょう	63	246	198	33	7	0	547
	山岳トンネル	18	33	13	2	0	0	66
	地下トンネル	0	0	0	0	0	0	0

第3章 構造種別を考慮した鉄道の地震被害関数の検討

3.1. はじめに

本章では、過去の地震による鉄道構造物の被害事例をもとに、震度と被害率の関係を示す被害関数を構造種別ごとに作成する方法を検討した。

3.2.では、鉄道構造物の被害に関する文献上の記述をもとに被害形態・被害程度を分類・整理する手順等を検討した内容を示し、実際に検討対象地震時の鉄道構造物被害リストを作成した結果を示す。

3.3.では、構造種別ごとに被害関数を作成し、その結果をもとに考察した内容を述べる。

3.4.では、本章の検討結果をまとめる。

3.2. 対象地震の構造物被害データの整理

3.2.1. 被害資料の収集

鉄道構造物の地震被害に関する記録は、各鉄道事業者から公開されているものを中心に収集した。そのほか、各鉄道事業者に問い合わせ、提供された資料も用いることとした。収集した各地震の鉄道構造物被害の記録資料の一覧を表 3.1 に示す。

(1) 1995 年兵庫県南部地震

1995 年兵庫県南部地震では、JR 西日本のほか阪神地区の各民鉄・第 3 セクターでも被害が発生した。阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会(1996)には、各社の被害が網羅されており、本資料を基本として、その他の資料の記述内容も参考にしながら、被害位置・内容を推定できる情報をピックアップし、整理した。また、各区間の運休期間についても本資料をもとに整理した。

(2) 2004 年新潟県中越地震

2004 年新潟県中越地震では、JR 東日本の新潟地区の在来線で被害が発生した。東日本旅客鉄道の資料(東日本旅客鉄道(2005))では、被害発生位置のキロ程と構造物の名称、被害の内容、被害構造種別等が一覧表で整理されている。この一覧表の情報を基本として、個別の記述も参考にしながら、被害位置・内容を推定できる情報をピックアップし、整理した。また、各区間の運休期間についても本資料をもとに整理した。

(3) 2007 年新潟県中越沖地震

2007 年新潟県中越沖地震では、JR 東日本の新潟地区の在来線で被害が発生した。2004 年新潟県中越地震と同様、東日本旅客鉄道の資料(東日本旅客鉄道(2007))にて、被害発生位置のキロ程と構造物の名称、被害の内容、被害構造種別等が一覧表で整理されている。また、各区間の運休期間についても本資料をもとに整理した。

(4) 2011 年東北地方太平洋沖地震

2011 年東北地方太平洋沖地震では、関東・東北地方の非常に広い範囲にわたり、JR 東日本の在来線各線で約 4400 箇所の被害が発生したとされるほか、民鉄・公営・第 3 セクター各線でも被害が多数発生した。JR 東日本の被害については、主なものは JR 東日本の資料(東日本旅客鉄道(2011)・東日本旅客鉄道水戸支社(2013))に示されていたので、これら資料を中心にその他の資料も参考にしながら、被害位置・内容を推定できる情報を可能な限りピックアップしたが、被害の全てを網羅することはできなかった。

民鉄・公営・第 3 セクター各線の被害については、秋山(2011)及び東北の鉄道震災復興誌

編集委員会に概要が示されていた。上記資料で被害有とされている各事業者に直接問い合わせた結果、一部事業者からは詳細な被害状況が記述された資料を得ることができたが、被害の全てを網羅することはできなかった。

3.2.2. 資料に基づく構造物被害データの作成手順

収集した資料をもとに、列車運行に影響を及ぼしうる被害に関する記述を抽出し、構造物被害データを作成した。被害の計上単位については、土構造物は亀裂長や崩壊延長の長短にかかわらず1件の被害とみなせるものを1件として計上した。また、橋りょう、山岳トンネル、地下トンネルの被害件数は構造物単位で計上した。

高架橋の被害については、被害延長で計上することとし、その最小単位は位置情報の取得基準に合わせて0.1kmとした。すなわち、ある100m点の前後50mの区間内でなんらかの被害があったとする記述があれば被害延長を0.1kmと計上することとした。高架橋の被害形態はさまざまな形で現れるため、被害の計上の仕方も被害形態によって異なることがある。たとえば、東京都(2006)では、柱や橋脚の被害であれば本数で計上され、桁の被害は件数で計上されている。今回は、被害を概略的に把握する被害関数の作成を目指すため、被害形態によらず計上の仕方を統一する必要があると考え、被害延長で計上することとした。

被害1件ごとに被害位置(路線・駅間・キロ程)、被害構造種別、震度、被害程度、被害内容等の諸元を以下に示す方法により読み取った。

(1)被害位置

文献に被害位置がキロ程で記載されている場合はそれをもとに最寄り100m位置で被害が発生したこととした。橋りょうや高架橋などについては構造物名で記載されている場合もあるが、構造物名は河川名や近隣の地名で記載されている場合が多く、それを手がかりに地理院地図、Google Map、あるいは現地調査などにより可能な限り被害位置を特定した。新交通システムの被害記録の一部については、被害位置がキロ程や構造物名称ではなく、駅間でしか表示されておらず、詳細な位置が特定できない場合もあった。このような被害情報は検討対象から除外するという取り扱いも考えられるが、新交通システムは普通鉄道と比較して駅間が短く、当該駅間の高架橋区間全てで被害が発生したと仮定しても過大評価になりにくい、と考え、上記のような取り扱いで被害として計上することとした。

(2)被害構造種別

被害構造種別は文献に明記されている場合は、それをそのまま適用した。文献に構造種別が明記されていない場合には、被害箇所の最寄り100m点の構造種別を被害構造種別として適用することとした。また、2007年中越沖地震の際に発生した青海川駅付近での斜面崩壊のように、鉄道構造物そのものに被害が発生するのではなく、線路外から土砂等が流入することによる被害については、被害構造種別が文献に明記されていないこともあったが、このような場合にも、被害箇所の最寄り100m点の構造種別を被害構造種別として適用することとした。

(3)被害程度・被害内容・被害位置の震度階

地震により鉄道構造物に発生しうる被害内容は、「鉄道構造物等設計標準 [1] [2]」や「鉄道構造物維持管理標準 [3] [4]」に示されている。本研究でもこれら資料に基づいて、被害内容および被害程度を表 3.2 のように区分することとした。被害程度については、本研究では、文献だけから被害程度を判断していく際に、被害形態が具体的に記述されていないもの（橋りょう被害とだけ書かれているもの等）も可能な限り被害数として計上しようとしたため、「構造全体の崩壊に至らず、修復が比較的容易と考えられる被害形態」を軽度被害、「構造全体に影響が及び修復に相当な時間を要すると思われる被害形態」を重度被害と 2 段階のみで区分することとした。

本研究での土構造物の重度被害は、「鉄道構造物等設計標準」の変形レベル 4（復旧に長時間を要する被害：沈下量 50mm 以上）に相当し、軽度被害は変形レベル 3 以下に相当する。橋りょうや高架橋の重度被害は「鉄道構造物等設計標準」の損傷レベル 4（補修が必要な損傷で、場合によっては部材の取替えが必要な損傷）に相当し、軽度被害は損傷レベル 3 以下に相当する。各被害の内容は、資料の文面や図、画像等をもとに表 3.2 の中から最も近いものを適用することとした。

本研究では、被害関数の説明変数に震度階を適用するため、被害位置の震度階についても整理した。被害位置の震度階は、被害位置のキロ程と 2 章で作成した鉄道沿線震度データとを照合することで整理した。一般的な鉄道構造物の固有周期は、計測震度のフィルタ特性に近く、0.5 秒～1 秒といわれており、震度階で検討を進める限りにおいては、4 地震の間の地震動特性の違いは結果にあまり影響を及ぼさないものと考えられる。

なお、高架橋柱の被害を分類する際、破壊モード（曲げ破壊、せん断破壊）で区分することもあるが、今回参照した文献では、全ての柱被害について曲げ破壊／せん断破壊の区分が必ずしも明記されていなかった。このため、今回は破壊モードによらず被害の程度のみで分類することとした。また、近隣で異なる区分の被害があった場合には、重大な被害区分のほうにまとめた。たとえば、1995 年兵庫県南部地震の際には、ラーメン高架橋の柱損傷と落橋・倒壊が近隣で発生しているケースが見られたが、この場合、落橋・倒壊にまとめた。

3.2.3. 対象地震での構造物被害データ

各構造種別について、震度階ごとの被害件数を整理した結果を表 3.3 に示す。構造種別毎の被害データの特徴について、以下に示す。

(1)土構造物の被害データ

土構造物の被害件数は、1995 年兵庫県南部地震は 112 件、2004 年新潟県中越地震は 76 件、2007 年新潟県中越沖地震は 39 件であった。2011 年東北地方太平洋沖地震は、特定できた範囲のみであるが 145 件であった。表 3.3 から、土構造物にて被害が発生する下限震度は震度 5 弱であることが分かる。被害が発生する下限の震度について、既往の研究と比較すると、たとえば伊藤・他谷(2006) [5]では、鉄道構造物被害は震度 5 強から発生すると指摘されているのに対して、今回の検討結果ではそれよりも小さな震度から被害が発生する、という結果になっている。たとえば、2004 年新潟県中越地震において、震度 5 弱で被害が発生したとされる箇所について、地図上及び現地で被害発生位置の盛土の設置状況を確認したところ、これらは上越線の盛土で、複線化工事の際に単線の旧盛土に腹付盛土がなされた構造であり、さらに傾斜地盤上の盛土あるいは谷埋め盛土と推測される。中越地震において、震度 5 弱という比較的低い震度で被害が発生したのは、盛土の不安定要因が複合していることが関係しているものと推測される。

(2)橋りょうの被害データ

橋りょうの被害件数は、1995 年兵庫県南部地震は 47 箇所、2004 年新潟県中越地震は 17 箇所、2007 年新潟県中越沖地震は 7 箇所であった。2011 年東北地方太平洋沖地震は、特定できた範囲のみであるが 47 箇所であった。1995 年兵庫県南部地震の被害箇所数が多いのは、都市部の架道橋での被害事例が多いことによると想定される。また、2011 年東北地方太平洋沖地震では、非常に広い範囲で強く揺れたため被害箇所数も多くなったと想定される。被害発生下限震度は震度 5 強で、2007 年新潟県中越沖地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震にて被害が見られた。

(3)山岳トンネルの被害データ

山岳トンネルの被害件数は、1995 年兵庫県南部地震は 6 箇所、2004 年新潟県中越地震は 16 箇所、2007 年新潟県中越沖地震は 4 箇所であった。2011 年東北地方太平洋沖地震は、特定できた範囲のみであるが 8 箇所であった。2004 年新潟県中越地震で被害箇所数が多いのは、上越線の山間部区間で強く揺れたためと想定される。被害発生下限震度は震度 5 弱で、2011 年東北地方太平洋沖地震にて被害が見られた。一般にトンネルは地震に強いといわれるが、剥離剥落や亀裂程度の軽度被害は比較的低い震度階でも発生しうることがわかった。

(4)地下トンネルの被害データ

地下トンネルでの被害は、1995 年兵庫県南部地震のみで 22 箇所が発生していた。うち軽度被害が 21 か所、重度被害が 1 か所であった。軽度被害について、部位別に示すと、中柱の損傷が 17 か所、外壁等の損傷が 4 か所であった。新潟地区には地下トンネルが存在せず、被害は見られなかった。2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、仙台市地下鉄、JR 仙石線、つくばエクスプレスの地下トンネル区間において震度 6 弱以上(最大震度 6 強・計測震度 6.0)で揺れた区間があったが被害は発生していなかった。被害発生下限震度は 6 強で、他の構造種別と比較して高い。

(5)高架橋の被害データ

高架橋での被害は、1995 年兵庫県南部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震で発生していた。2004 年新潟県中越地震でも北越急行で高架橋被害が発生していたとの報告もあるが、被害位置や延長が不明であったため、検討対象外とした。1995 兵庫では、全高架橋延長 179.1km のうち、被害総延長は 24.5km であった。そのうち、普通鉄道 151.8km に対する被害延長は 14.0km(軽度被害 6.0km、重度被害 8.0km)、新交通システム 27.3km に対する被害延長は 10.5km (軽度被害 1.6km、重度被害 8.9km)、であった。また、2011 東北では、全高架橋延長 529.2km のうち、被害総延長は 9.7km であった。そのうち、普通鉄道 431.2km に対する被害延長は 8.4km(軽度被害 8.2km、重度被害 0.2km)、新交通システム 98.0km に対する被害延長は 1.3km(軽度被害 1.3km、重度被害 0.0km)であった。

高架橋の被害延長を震度階・被害程度・被害区分毎に詳細に整理した結果を表 3.4 及び表 3.5 に示す。被害区分に着目して表 3.4 を見ると、普通鉄道と新交通システムの間で、また、2 地震の間でも、被害の出方が大きく異なることが分かる。表 3.4 より、1995 年兵庫県南部地震では、普通鉄道の軽度被害としては柱亀裂がもっとも多く発生しており、柱鉄筋露出、桁支承部損傷と続くが、新交通システムの軽度被害としては軌道設備損傷のみ発生していたことがわかる。また、普通鉄道の重度被害としては落橋・倒壊が大半を占めていたが、新交通システムの重度被害としては落橋・倒壊のほかに基礎部損傷が多く発生していたことがわかる。基礎部損傷は、地盤の側方流動による基礎の移動や基礎の下部の空洞の発生などで、ポータルライナーで多く発生していた被害であった。ポータルライナーは構造物が埋立地上に設置されており、上記のような被害は地盤条件にも要因があるものと思われる。

表 3.5 より、2011 年東北地方太平洋沖地震では、普通鉄道の軽度被害としては桁支承部損傷がもっとも多く発生し、桁ずれ、柱鉄筋露出と続いており、1995 年兵庫県南部地震と特徴が異なっていたことがわかる。新交通システムの軽度被害としては 1995 年兵庫県南部地震と同様、軌道設備損傷のみが発生していたことがわかる。また、普通鉄道の重度被害としては、桁破損と橋脚破損が発生しているが、1995 年兵庫県南部地震とは異なり、落橋・倒壊は発生していなかったことがわかる。なお、新交通システムにおいて重度被害は発生していないが、これは震度 6 弱以上で揺れた区間がなかったためと考えられる。

3.3. 構造種別毎の地震被害関数の作成

3.3.1. 土構造物の被害関数

土構造物をさらに「素地・低盛土」「盛土」「切土」の 3 つに区分し、それぞれの区分で被害程度ごと、震度 5 強から 7 にかけて震度階ごとに被害率を算出した。被害率の算出にあたっては、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震の 3 地震のデータを使用し、地震ごとの被害率と 3 地震の被害数・延長を合算した被害率を算出した。結果を図 3.1 及び表 3.6 に示す。切土の軽度被害については、震度 6 強以上のデータがなかったため、震度 6 弱以下のみ被害率を算出した。切土は、全ての震度階において総延長が短く、十分なデータに基づいて被害率を算出できたものではないため、以下では素地・低盛土と盛土のみについて、比較検討する。

同じ被害程度で盛土と素地・低盛土を比較すると、どの震度階においても盛土の被害率が素地・低盛土の被害率を上回る。すなわち、「盛土では、素地・低盛土と比較して重度被害が発生しやすい」ことが示唆される。盛土は素地・低盛土と比較して高さのある構造物であるが、那須ほか(1996) [6]などでも、高さ 3m 以上の盛土で沈下被害が多く発生する、と指摘されており、今回の検討により過去の知見を定量化できたと考える。

3 地震合計の被害率と、個別地震の被害率の乖離に着目すると、同じ土構造物でも素地・低盛土の被害率の乖離が盛土と比較して小さいことがわかる。素地は原地盤に直接碎石を積み上げ、軌道を構成している構造であり、低盛土も 3m 未満の高さの盛土であるように、素地・低盛土は他の構造種別と比較して構造物の規模が小さく、個別構造物間の物理的な特性のばらつきも小さくなると想定される。このため、被害率のばらつきも小さくなると推察される。また、表 3.6 を改めて確認すると、素地・低盛土の被害率はどの地震においても、盛土と比較して被害率の分母となる総延長が長いデータをもとに算出されていることが分かる。これも素地・低盛土の被害率の乖離の小ささにつながっている要因の 1 つと推察される。

3.3.2. 橋りょうの被害関数

橋りょうの被害関数の作成についても、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震の 3 地震のデータを使用した。橋りょうの震度別被害率は、まず被害構造物数を総構造物数で除した形（被害数/総数）で算出した。結果を図 3.2 及び表 3.7 に示す。

地震ごとの被害率と 3 地震合計の被害率とを比較すると、まず、軽度被害の震度 6 強で 2007 年新潟県中越沖地震では被害率が他と比較して倍以上となっているが、これは総数が 7 箇所而其他の 2 地震と比較して非常に少なかったためと考えられる。このデータ以外については、3 地震合計の被害率を基準として概ね違いはなく、3 地震を合計して算出した被害率は、橋りょうの震度階と被害率の関係を代表したものと考えられる。

橋りょうの被害発生下限震度は震度 5 強であり、震度とともに被害率が高くなる傾向があることが分かる。今回検討した橋りょうの地震被害関数について、過去の研究事例である室野・芦谷(2002) [7]と比較する。室野・芦谷(2002)では、標準的な橋脚（降伏震度 0.4、降伏周期 1.0 秒）においては、震度 5 強程度で亀裂等の軽度な被害が発生し始めるとされている。今回検討した被害関数でも被害発生下限は震度 5 強であり、両者はおおむね調和的であると言える。

3.3.3. トンネルの被害関数

本研究では、2章で述べたとおり、鉄道のトンネルを山岳トンネルと地下トンネルに大別しているので、山岳トンネルと地下トンネルでそれぞれに被害関数を作成した。

山岳トンネルおよび地下トンネルの震度別被害率は、橋りょうと同様に、被害構造物数を総構造物数で除した形（被害数/総数）で表すこととした。1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震の3地震のデータを使用して、地震ごとの被害率と3地震の被害数・延長を合算した被害率を算出した。山岳トンネルの震度階毎の被害率の算出結果を図3.3及び表3.8に示す。

山岳トンネルの被害関数は、他の構造種別と比較して、3地震の合計被害率と個別地震の被害率の差が大きい。表3.8を改めて確認すると、震度階ごとの山岳トンネルの総数が10以下のデータが多いことが分かる。すなわち少ない抽出データで被害率を算出していることとなる。このために、ばらつきが大きいと推察される。

地下トンネルについては、駅部・駅間の合計を総数として被害率を算出した。新潟県内には地下トンネルが設置されていないため、2004年新潟県中越地震および2007年新潟県中越沖地震の地下トンネルの被害率は計算できなかった。また、2011年東北地方太平洋沖地震では地下トンネルの被害事例が見当たらなかった。地下トンネルの震度階ごとの被害率の算出結果を図3.4および表3.9に示す。また、1995兵庫の軽度被害の被害率を被害部位別に算出した。結果を図3.5および表3.10に示す。図3.5より、中柱での被害率が外壁の被害率よりも高いことが分かる。なお、重度被害は中柱の崩壊に伴いトンネル全体が崩壊した1例のみであった。

山岳トンネルと地下トンネルで被害発生下限震度を比較すると、山岳トンネルでは震度5強から軽度被害が発生しているのに対し、地下トンネルでは震度6強から軽度被害が発生していることが分かる。また、重度被害は山岳トンネル・地下トンネルいずれも震度7でのみ発生していた。山岳トンネルと地下トンネルで、同じ震度階での被害率を比較すると、山岳トンネルの被害率のほうが高いことが分かる。また、トンネルにおける震度階と被害の関係について、本研究での成果と従来の研究事例との比較を試みようとしたが、従来の研究事例は、断層からの距離との関係を軸に整理されているものが多く（たとえば[8]）、単純な比較検討はできなかった。

3.3.4. 高架橋区間の被害関数

(1) 1995 年兵庫県南部地震における普通鉄道の被害関数

1995 兵庫について、軽度被害と重度被害を合計して作成した被害関数と、軽度被害・重度被害それぞれの被害関数を図 3.6 に示す。基礎部損傷のような地盤条件に起因する被害と橋脚や桁の損傷のような慣性力に起因する被害とでは、震度階と被害率の関係は異なる可能性があると思われるが、今回は両者を分けて論ずるには被害データの量が十分ではないと考え、両者を分離せずに被害関数を作成した。

図 3.6 について、軽度被害の被害率については震度 5 強から 6 強までは震度階が 1 段階上がるにつれ、おおむね 3 倍程度高くなるが、震度 7 では震度 6 強と比較して 2/3 程度低くなる。重度被害の被害率は震度 6 弱から 7 まで震度階が 1 段階上がるにつれ、2~3 倍程度高くなる。震度 7 の軽度被害率が震度 6 強よりも低下するのは、軽度被害の一部が重度被害に転換したためと推察される。被害発生下限震度に着目すると、軽度被害は 5 強、重度被害は 6 弱であった。

(2) 2011 年東北地方太平洋沖地震における普通鉄道の被害関数

2011 東北について、軽度被害と重度被害を合計して作成した被害関数、及び軽度被害・重度被害それぞれの被害関数を図 3.7 に示す。なお、震度 7 で揺れた区間がなかったため震度 7 の被害率を算出できなかった。軽度被害と重度被害を合計した被害率、及び軽度被害率について、震度 5 弱、5 強では被害率はごく低い値であった。また、震度 6 弱、6 強と震度階が高くなるにつれ被害率が単調に増加していた。図 3.7 の震度 6 弱、6 強での重度被害率はいずれもごく低い値であった。また、被害発生下限震度は、軽度被害は 5 弱、重度被害は 6 弱であった。

(3) 新交通システムにおける各震度階の被害率

1995 兵庫においては新交通システムのデータが延長 27.3km 分しかなく、また、2011 東北においても震度 6 弱以上で揺れた新交通システムのデータがない等、いずれも詳細な検討に適したものとは言い難いが、参考までに各震度階の被害率を整理した結果を図 3.8 に示す。また、2011 東北においては、震度 6 弱以上で揺れた区間がなかったためと推察されるが、重度被害が発生していなかったため、軽度被害率のみを示した。図 3.6~図 3.8 をそれぞれ比較すると、同じ地震、同じ震度階でも、普通鉄道と新交通システムとでは被害率が大きく異なっていることがわかる。これは 2 章で指摘した高架橋の構造の違いや軌道設備の構造の違い、地盤条件の違い等が考えられる。

(4) 2地震の間での普通鉄道の高架橋区間の被害関数の比較

1995年7月、兵庫県南部地震の際の高架橋の落橋・倒壊の多発を受け、運輸省(当時)より

「既存鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置」が出された [9]。これは新幹線及び輸送量の多い在来線のせん断破壊先行型のコンクリート高架橋柱・橋脚を対象に各鉄道事業者に対して緊急に耐震補強を実施するよう指示した内容であり、期限は、新幹線は概ね3年以内、在来線は概ね5年以内とされていた。また、1995兵庫のほか近年に発生したマグニチュード7前後の大きな地震の経験をもとに、耐震設計法も随時見直しが図られており、近年に建設された鉄道構造物は1999年に改定された新しい耐震設計標準 [1]に則っている。以上より、1995兵庫の当時と比較して、2011東北の時点では鉄道高架橋は既設・新設とも耐震性能が向上していると想定され、被害関数を比較することでその違いを見ることができると考えられる。

2 地震の間で軽度被害と重度被害を合計した被害関数を比較した結果を図 3.8 に示す。被害発生下限震度を比較すると、1995 兵庫では5 強からとなっている一方、2011 東北では被害率は極めて低いものの5 弱からとなっている。2 地震の間で差異があるが、鉄道高架橋区間での軽度被害は震度 5 弱以上で発生しうるものである、と安全側に解釈するのが妥当であると考えられる。室野・芦谷(2002) [7]でも、本研究の軽度被害に相当する「被害ランク 2(小被害：亀裂が発生することがある)」が震度 5 弱より発生しうることが指摘されている。震度 6 弱、6 強での被害率は 2 地震の間ではほぼ同程度の値であった。

2 地震の間で重度被害の被害関数を比較した結果を図 3.9 に示す。被害発生下限震度を比較すると、1995 兵庫、2011 東北いずれも震度 6 弱からとなっており、鉄道高架橋区間での重度被害は震度 6 弱以上で発生しうるものであると推察される。室野・芦谷(2002) [7]でも、本研究の重度被害に相当する「被害ランク 4(大被害：大きな亀裂がかなり発生し、破壊に至ることがある)」が震度 6 弱より発生しうることが指摘されている。震度 6 弱、震度 6 強での被害率を比較すると、2011 東北の被害率は 1995 兵庫と比較して大幅に低下していた。3.2.3(5)節で「1995 兵庫では震度 6 弱以上で落橋・倒壊が多数発生していたが、2011 東北ではどの震度階でも落橋・倒壊が発生していなかった」と指摘したが、被害率でも 2011 東北は 1995 兵庫に比べ重度被害が少なかったと言える。これは、鋼板巻等による高架橋柱や橋脚の補強、落橋防止工などの耐震補強工事によるものと推察される。

2 地震の間で軽度被害の被害関数を比較した結果を図 3.10 に示す。震度 6 強での軽度被害率については、重度被害率とは異なり、2011 東北が 1995 兵庫を上回る結果となった。

その理由を考察するに際し、3.2.3(5)節で「2011 東北では、普通鉄道の軽度被害としては桁支承部損傷がもっとも多く発生し、桁ずれ、柱鉄筋露出と続いており、1995 兵庫と特徴が異なっていた」と指摘したことに着目した。2011 東北と 1995 兵庫とでは、同じ軽度被害でも被害が発生した部位に違いがあったと考えられる。そこで、高架橋の部位を大きく「下部工」「上部工」に分け、部位ごとに軽度被害率を算出し、2 地震の間で比較することとした。

被害区分「柱亀裂」「柱鉄筋露出」「橋脚傾斜(軽)」「橋台傾斜」を「下部工被害」とし、

下部工での軽度被害率を 2 地震の間で比較した結果を図 3.11 に示す。図 3.11 より、下部工に関してはどの震度階でも 2011 東北の軽度被害率が 1995 兵庫の軽度被害率を大幅に下回っていた。これは、鋼板巻等による高架橋柱や橋脚の耐震補強工事の効果によるものと推察される。

また、被害区分「桁支承部損傷」「桁ずれ」「アーチ亀裂」を「上部工被害」とし、上部工での軽度被害率を 2 地震の間で比較した結果を図 3.12 に示す。1995 兵庫の震度 6 弱での被害率を算出できなかったが、被害延長が 0.0km であったためである。図 3.12 より、上部工に関してはどの震度階でも 2011 東北の軽度被害率が 1995 兵庫の軽度被害率を大幅に上回っていた。また、図 3.12 の震度 6 弱、6 強での上部工の軽度被害率は、図 3.10 の震度 6 弱、6 強での軽度被害率とほぼ等しかった。すなわち、図 3.10 および図 3.12 で 2011 東北の被害率が 1995 兵庫の被害率を上回った理由は、落橋防止工等の効果により落橋等の上部工での重度被害が軽度被害に転換したためであると推察される。

以上の検討結果より、1995 年兵庫県南部地震の被害事例をもとに作成した各被害関数は、耐震補強工事が行われていない高架橋区間の概略的な地震被害予測をする際に適用可能なものであると考えられる。また、2011 年東北地方太平洋沖地震の被害事例をもとに作成した各被害関数は、耐震補強工事の効果を織り込んだものであり、耐震補強工事済みの高架橋区間の概略的な地震被害予測に適用可能なものであると考えられる。

3.3.5. 構造種別間の被害関数の比較

2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震の2地震のデータをもとに被害関数を作成した構造種別のうち、切土を除く4種の構造種別の震度別被害率(件/km)を比較した結果を図3.13に示す。参考に、構造種別を分類しないで算出した震度別被害率も掲載した。また、式2の形で回帰計算を行い、表3.11に示す係数を得た。

震度を示す説明変数Iは、たとえば、震度5弱(計測震度4.5~4.9)であれば、4.75とするなど、各震度階に対応する計測震度の中央の値に置き換えた。また今回は、震度7の被害は震度6強(計測震度6.25)として計上した。

図3.13より、同じ震度でも構造種別によって被害率が異なっていることが分かる。地震による被害の発生しやすさは構造種別により異なるとする知見に対し、定量的に裏付けをすることができたといえる。被害率が高い方から構造種別を並べるとおおむね、

盛土(軽度) > 素地・低盛土(軽度) > 盛土(重度) > 橋りょう≒トンネル > 素地・低盛土(重度)

の順となり、震度6強では盛土(重度)の被害率が素地・低盛土(軽度)の被害率を上回る。今回の検討により、鉄道構造物の中では盛土が最も被害が発生しやすい構造種別であることを定量的に示すことができた。

また、震度階ごとの被害率に着目すると、各構造種別の被害発生下限震度階での被害率は0.01~0.02件/km程度で、震度階が1段階上がるごとに被害率が3~5倍程度高くなっていくことが分かる。

なお、内閣府の被害関数[10]と比較すると、本研究の被害率の方が小さい傾向となっている。内閣府に問い合わせたところ、上記被害関数を検討する際、土木構造物のほかに、電気設備や駅設備の被害についても被害件数として計上しているとのことであった。本研究では、土木構造物の被害のみ被害件数として計上しており、この違いが被害率の違いにつながっていると考えられる。

3.3.6. 被害関数のばらつきの検討

本研究における震度階毎の被害率は、阪神地区と新潟地区の鉄道構造物データと被害データをもとに算出している。2地区のデータは同じ在来線の被害データとはいえ、建設年代や地形等に違いがあるので、偏りがないとは限らない。そこで、阪神地区と新潟地区2地震の間でのデータの不偏性を確認するため、統計的な検定を行った。ここでは、各構造種別の震度階毎の総数は標本数に相当し、各構造種別の震度階毎の被害率（＝【被害数】／【総数】）は比率に相当すると考え、以下に示す母比率の差の検定を行うこととした。

2つのグループの標本数をそれぞれ m 、 n 、比率を p_1 、 p_2 としたとき、以下の式で算出される z は標準正規分布に従うことが知られている。

$$z = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{X(1-X)\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n}\right)}}$$
$$X = \frac{p_1 m + p_2 n}{m + n}$$

2つのグループの標本数、比率をもとに算出した検定統計量 z が有意水準 α による検定水準よりも棄却域に入れば、帰無仮説 H_0 は棄却される。

2地区の被害率の差の検定の考え方を図 3.15 に示す。ここでは、同じ構造種別、同じ震度階の2地区の被害率の差について検定を行うこととした。阪神地区の被害率は1995兵庫の被害率を適用し、新潟地区の被害率は2004中越と2007中越沖の2地震の被害数の合計を2地震の総数の合計で除したものを適用した。検定は被害率の分母となる総数が大きい素地・低盛土、盛土、橋りょうの3つの構造種別の被害率に対して実施した。新潟地区での震度7の構造物総数が少なかったため、震度7の被害率については検定対象外とした。なお、土構造物の被害率は3.3.1節では件/kmとして表しているが、ここでは、総延長0.1kmを1個の土構造物とし、1件の被害を1個の被害土構造物と置き換え、被害率＝【被害数】／【総数】として、比率で表現しなおしている。

各構造種別の震度階毎の総数、被害率、検定統計量 z 、有意水準 $\alpha=0.05$ （検定水準： ± 1.96 ）とした場合の検定結果を表3.12に示すが、全てのデータで帰無仮説 H_0 が棄却されなかった。したがって、阪神地区の被害率と新潟地区の被害率は、有意に異なるとまではいえない、との結果となった。

3.3.7. 他のインフラの被害関数との比較

鉄道と同じく線状のインフラである高速道路でも、山崎ほか(1998) [11]による橋りょう・高架橋を対象とした被害関数や、丸山ほか(2008) [12]による盛土を対象とした被害関数のように、構造種別ごとに被害関数が作成されている。本研究の被害関数と高速道路の被害関数とを比較した。

(1)盛土の地震被害関数の比較

本研究の盛土の被害率と丸山ほか(2008)の被害率を比較した結果を図 3.16 に示す。丸山ほか(2008)では、2004 年新潟県中越地震の関越自動車道と北陸自動車道での盛土被害データをもとに、計測震度と被害率(件/km)の関係を示す被害関数が示されている。被害関数は被害程度に応じて 2 つ（軽微 (D) 以上、中程度 (B) 以上) 作成されている。車両の走行に支障をきたす被害は中程度以上とされているので、ここでは、本研究の盛土の被害関数の軽度と重度の合計の被害率と、被害ランク B 以上の被害率とを比較することとした。また、丸山ほか(2008)の被害関数は、計測震度を説明変数とする累積正規分布曲線モデルで表されているため、ある震度階の中央の計測震度値（たとえば震度 5 強なら 5.25）に対応する被害率をその震度階の被害率として、本研究の被害関数と比較した。

被害程度の定義が必ずしも一致していないため、厳密な比較は困難ではあるが、震度 5 強程度で被害率が 0.1 件/km 程度となることや、震度階が高くなるほど被害率が高くなり、最大で 2~3 件/km 程度となること等、類似点がみられる。

(2)高架橋の地震被害関数の比較

本研究の高架橋の被害率と山崎ほか(1998)の被害率を比較した結果を図 3.17 に示す。山崎ほか(1998)では、1995 年兵庫県南部地震の阪神地区の高速道路 4 路線の橋りょう・高架橋の被害データをもとに、計測震度と被害率（被害数／総数）の関係を示す被害関数が示されている。被害関数は被害程度に応じて 4 つ（甚大(As)、大(A)、中 (B)、小 (C)) 作成されている。落橋・倒壊が As に相当するので、ここでは、(a)本研究の 1995 兵庫の高架橋重度被害の被害関数と、山崎ほか(1998)の被害程度 As の被害関数の比較、(b)本研究の 1995 兵庫の高架橋軽度被害の被害関数と、山崎ほか(1998)の被害程度 A 及び B の被害関数を比較した。山崎ほか(1998)の被害関数は、ある計測震度 I のとき、被害程度 R 以上が発生する確率 $P(I)$ を、累積正規分布で表せるとの仮定のもとで作成されている。このため、ある震度階の中央の計測震度値（震度 5 強なら 5.25）に対応する被害率をその震度階の被害率として比較した。また、被害程度 A 及び B の被害率は、被害程度 B 以上が発生する被害率と被害程度 As が発生する被害率の差を適用した。

被害程度の定義や被害数量の計上の仕方が必ずしも一致しないため、厳密な比較は困難ではあるが、軽度被害率、重度被害率とも、震度 6 弱までは両者の被害率は近い値となっ

ていること、重度被害率は震度 7 まで単調に増加すること、軽度被害率は震度 6 強がピークとなり、震度 7 では若干低下すること等、類似点が見られる。

3.4. まとめ

本章では、対象 4 地震における鉄道構造物の地震被害に関する記録を収集し、資料をもとに被害 1 件ごとに被害位置、被害構造種別、震度、被害程度、被害内容等の諸元を読み取り、整理した。また、被害記録の整理結果と鉄道構造物台帳データ、鉄道沿線震度データをもとに、7 区分の構造種別について、震度階毎の被害率を算出し、構造種別を考慮した鉄道構造物の被害関数を作成した。

作成した被害関数を比較検討し、土構造物の軽度被害・高架橋の軽度被害は震度 5 弱から、土構造物の重度被害・橋りょうの軽度被害・山岳トンネルの軽度被害は震度 5 強から、高架橋の重度被害・地下トンネルの軽度被害は震度 6 弱から、山岳トンネルの重度被害は震度 6 強から発生していることを示した。また、橋りょうの重度被害・地下トンネルの重度被害は震度 7 でのみ発生していることを示した。

また、高架橋の被害関数について、1995 年兵庫県南部地震と、2011 年東北地方太平洋沖地震の被害関数とで比較し、2011 年東北地方太平洋沖地震では、重度被害が大幅に減少した一方、軽度被害は増加したものの、軽度被害と重度被害を合計した被害率は同程度であったことを示した。その理由として、1995 年兵庫県南部地震以降施工された耐震補強工事の効果により、重度被害が軽度被害に転換したためとの推察を示した。

【3 章の参考文献】

- [1] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)，2012.
- [2] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(土構造物)，2013.
- [3] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) 土構造物(盛土・切土)，2007.
- [4] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物)，2009.
- [5] 伊藤雄郷，他谷周一：地震発生後の運転規制判断の適正化,日本鉄道施設協会誌 2006 年 10 月号, 2006.
- [6] 那須誠，藤沢一，安田祐作，匹本慶一：盛土の地震被害一文献調査一，鉄道技術研究所速報，No.A-86-33, 1986.
- [7] 室野剛隆，芦谷公稔：早期被害予測のための鉄道構造物の地震被害ランク推定方法の開発，鉄道総研報告，Vol.16, No.8, 2002.
- [8] 橘直毅，野城一栄，小島芳之，朝倉俊弘，野々村政一：兵庫県南部地震(1995 年)，新潟県中越地震(2004 年)におけるトンネルの被害の傾向，土木学会第 62 回年次学術講演会，pp.331-332, 2007.
- [9] 国土交通省鉄道局：鉄道施設耐震構造検討委員会の提言に基づく鉄道構造物の耐震性能に係る当面の措置について，1995.
- [10] 内閣府：南海トラフ巨大地震の被害想定について（二次報告） 南海トラフ巨大地震の被害想定，
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo4.pdf.
- [11] 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム,pp.3491-3496, 1998.
- [12] 丸山喜久，山崎文雄，用害比呂之，土屋良之：新潟県中越地震の被害データに基づく高速道路盛土の被害率と地震動強さの関係，土木学会論文集 A Vol.64, No.2, 208-216, 2008.

表3.1 各地震の鉄道構造物被害資料の一覧

地震	作成者	資料名
1995年 兵庫県南部地震	阪神・淡路大震災鉄道復興記録編集委員会 (財)鉄道総合技術研究所	よみがえれる鉄道 阪神・淡路大震災鉄道復興の記録 山海堂、1996
	西日本旅客鉄道株式会社	兵庫県南部地震被災被害調査報告書、鉄道総研報告、特別第4号、1996
	内芝伸一、片岡孝規	阪神・淡路大震災 鉄道復興記録誌、1996
	脇保仁、松井順一	阪急電鉄の震災および復旧方法、日本鉄道施設協会誌、第34巻、第1号、pp.8-13、1996
	戴下武資、光本香	阪神電鉄西灘～御影間の被災状況と復旧の概要、日本鉄道施設協会誌、第34巻、第2号、pp.6-11、1996
	前田昌彦、安藤信三	(1)神戸高速度鉄道の被害と復旧工事－高架橋・大開駅－、日本鉄道施設協会誌、第34巻、第4号、pp.6-9、1996
	中西蔵	(2)神戸電鉄の被災状況と復旧概要、日本鉄道施設協会誌、第34巻、第4号、pp.10-12、1996
	佐保千載	(3)山陽電気鉄道の震災および復旧方法、日本鉄道施設協会誌、第34巻、第4号、pp.13-14、1996
	神戸新交通株式会社	鉄道の被災と復旧(1)神戸市営地下鉄、日本鉄道施設協会誌、第34巻、第5号、pp.8-10、1996
	東日本旅客鉄道株式会社	神戸新交通システム 阪神・淡路大震災復興記録集、1996
2004年 新潟県中越地震 2007年新潟県 中越沖地震	東日本旅客鉄道株式会社	特集「新潟県中越地震と鉄道」1. STRUCTURAL ENGINEERING DATA、第24号、2005
	東日本旅客鉄道株式会社	新潟県中越地震震災復興記録誌、2005
	東日本旅客鉄道株式会社	小特集 新潟県中越沖地震 STRUCTURAL ENGINEERING DATA、第29号、2007
	東日本旅客鉄道株式会社	二度の震災から学んだ記録 平成19年新潟県中越沖地震震災対応記録誌、2008
	東日本旅客鉄道株式会社	特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」1. STRUCTURAL ENGINEERING DATA、第37号、2011
	東日本旅客鉄道株式会社 水戸支社	3.11東日本大震災 震災対応記録誌、2013
	東北の鉄道震災復興誌編集委員会	よみがえれ！みちのくの鉄道 第2編 各鉄道の被害と復旧
	岩崎浩、松尾伸二	JR東日本の土木構造物の被害と復旧、日本鉄道施設協会誌2011年10月号、pp.32-35、2011
	秋山敬介	民鉄・公営事業者の被害状況、日本鉄道施設協会誌2011年10月号、pp.40-42、2011
	望月正彦	三陸鉄道の震災から今日まで、日本鉄道施設協会誌2011年10月号、pp.43-45、2011
2011年東北地方 太平洋沖地震	大沢美春	仙台空港線の被災と復旧状況、日本鉄道施設協会誌2011年10月号、pp.46-47、2011
	鈴木佑典、水谷一樹、岡田直久	京成電鉄における被害状況と復旧の取り組み、日本鉄道施設協会誌2011年10月号、pp.46-47、2011
	岩本博	つくばエクスプレス線・利根川東高架橋の復旧工事、日本鉄道施設協会誌2011年10月号、pp.52-54、2011
	石川登志男	鹿島臨海鉄道の東日本大震災の被害と復旧、日本鉄道施設協会誌2012年6月号、pp.28-30、2011
	山万株式会社	山万ユーカーが丘線 安全報告書【2011年】、2012
	千葉都市モノレール株式会社	安全報告書 2011、2011
	大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会	大規模地震発生時における首都圏鉄道の運転再開のあり方に関する協議会報告書、2012.3
	新潮社	日本鉄道旅行地図帳 東日本大震災の記録、2011
	山形鉄道株式会社	安全報告書(平成22年度)2011
	山形鉄道株式会社	平成22年度由利高原鉄道安全報告書2011
2011年東北地方 太平洋沖地震	由利高原鉄道株式会社	安全報告書 飯坂線 2011年度2011
	福島交通株式会社	秋田内陸縦貫鉄道安全報告書 2010年度2011
	秋田内陸縦貫鉄道株式会社	2010年度版 安全報告書
	青森県(青い森鉄道)	安全報告書2011
	わたらせ渓谷鉄道株式会社	安全報告書 2011年(平成23年)版
	三陸鉄道株式会社	安全報告書 2011
	野岩鉄道株式会社	2011 安全報告書
	関東鉄道株式会社	2011 安全報告書
	茨城大学工学部都市システム工学科 防災・環境地盤工学研究室	東北地方太平洋沖地震地盤被害調査報告書(速報版、その7)、2011
	ひたちなか市	東日本大震災 ひたちなか市の記録、2011
2011年東北地方 太平洋沖地震	佐々博明、松田達明	仙台支社管内における震災対応、新線路2011年12月号、pp.30-32、2011
	河野裕和	東北太平洋沖地震による水戸支社管内線路設備の被害状況と復旧、新線路2011年12月号、pp.33-35、2011
	高橋範明	Sto(ストー)乾式吹付け工法による震災被害橋りよの復旧、日本鉄道施設協会誌2013年10月号、pp.87-91、2013
	木村正喜	JR仙石線 陸前大塚～陸前小野間 移設復旧計画、日本鉄道施設協会誌2014年1月号、pp.70-74、2014
	一般社団法人 鉄道建築協会	特集 東日本大震災、鉄道建築ニュース2011年12月号

表3.2 被害程度及び被害内容の区分

		被害程度	
		軽度	重度
被害状況		構造全体が崩壊に至らず、修復が比較的容易と考えられる被害	構造全体に影響が及び修復に相当な時間を要すると考えられる被害
被害内容	土構造物	・軌道変状 ・盛土亀裂・はらみ ・盛土沈下(50cm未満) ・石積崩落 ・落石・倒木等 ・土留壁損傷 等	・盛土崩壊・沈下(50cm以上) ・切土崩壊 ・土留壁崩壊 ・斜面崩壊
	橋りょう・高架橋	・支承部損傷 ・柱及び橋脚亀裂・鉄筋露出 ・桁ずれ	・落橋・崩壊 ・桁逸脱
	トンネル	覆工亀裂・剥離 坑門亀裂・剥離 等	覆工崩壊 坑口崩壊

表3.3 各構造種の震度階毎の被害件数・延長

地震	震度階	素地・低盛土 (件)		盛土 (件)		切土 (件)		橋りょう (件)		山岳トンネル (件)		地下トンネル (件)			高架橋(普) (km)		高架橋(新) (km)	
		軽度	重度	軽度	重度	軽度	重度	軽度	重度	軽度	重度	軽度		重度	軽度	重度	軽度	重度
												中柱	外壁					
1995 兵庫	5弱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5強	2	0	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	1.5	0.0	1.6	0.0
	6弱	18	2	12	0	1	0	12	0	2	0	0	0	0	1.1	0.5	0.0	5.6
	6強	11	5	19	4	0	0	10	0	1	0	5	1	0	1.4	1.5	0.0	1.6
	7	9	5	9	10	0	2	24	1	1	0	12	3	1	2.0	6.0	0.0	1.7
2004 中越	5弱	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5強	5	0	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6弱	6	1	5	2	2	1	8	0	8	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6強	6	1	16	8	0	2	6	0	6	2	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0	1	10	1	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
2007 中越沖	5弱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	5強	8	0	4	1	0	3	2	0	2	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6弱	8	1	5	1	0	3	2	0	2	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6強	3	1	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
2011 東北	5弱	5	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0.3	0.0	0.3	0.0
	5強	58	0	11	1	1	0	3	0	4	0	0	0	0	0.8	0.0	1.0	0.0
	6弱	102	1	38	9	2	1	30	1	2	0	0	0	0	2.3	0.1	0.0	0.0
	6強	11	0	6	1	2	0	12	1	0	0	0	0	0	4.8	0.1	0.0	0.0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0

表3.4 1995年兵庫県南部地震の高架橋の震度階毎の被害延長

被害 程度	被害区分	普通鉄道(km)							新交通システム(km)						
		4	5弱	5強	6弱	6強	7	計	4	5弱	5強	6弱	6強	7	計
軽度	柱亀裂	0.0	0.0	0.7	1.1	1.2	1.8	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	柱鉄筋露出	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	橋脚傾斜(軽)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	橋台亀裂	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	桁支承部損傷	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	桁ずれ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	アーチ亀裂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	限界支障	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	軌道設備損傷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	1.6
軽度被害計		0.0	0.0	1.5	1.1	1.4	2.0	6.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.0	0.0	1.6
軽度被害率		0.00	0.00	0.024	0.067	0.17	0.12	-	-	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	-
重度	橋脚破損	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	橋脚傾斜(重)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.7	0.0	0.8
	桁破損	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	落橋・倒壊	0.0	0.0	0.0	0.5	1.5	5.8	7.8	0.0	0.0	0.0	2.1	0.9	1.7	4.7
	基礎部損傷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	0.0	0.0	3.4
重度被害計		0.0	0.0	0.0	0.5	1.5	6.0	8.0	0.0	0.0	0.0	5.6	1.6	1.7	8.9
重度被害率		0.00	0.00	0.00	0.030	0.18	0.37	-	-	0.00	0.00	0.50	1.00	1.00	-
軽度+重度延長		0.0	0.0	1.5	1.6	2.9	8.0	14.0	0.0	0.0	1.6	5.6	1.6	1.7	10.5
(軽度+重度)被害率		0.00	0.00	0.024	0.10	0.35	0.50	-	-	0.00	0.15	0.50	1.00	1.00	-
総延長		1.1	47.4	62.4	16.5	8.3	16.1	151.8	0.0	1.9	10.9	11.2	1.6	1.7	27.3

表3.5 2011年東北地方太平洋沖地震の高架橋の震度階毎の被害延長

被害 程度	被害区分	普通鉄道(km)							新交通システム(km)						
		4	5弱	5強	6弱	6強	7	計	4	5弱	5強	6弱	6強	7	計
軽度	柱亀裂	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	柱鉄筋露出	0.0	0.1	0.1	0.2	0.2	-	0.6	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	橋脚傾斜(軽)	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	橋台亀裂	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	桁支承部損傷	0.0	0.0	0.0	1.6	4.4	-	6.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	桁ずれ	0.0	0.0	0.6	0.4	0.2	-	1.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	アーチ亀裂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	限界支障	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	軌道設備損傷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.3	1.0	-	-	-	1.3
軽度被害計		0.0	0.3	0.8	2.3	4.8	-	8.2	0.0	0.3	1.0	-	-	-	1.3
軽度被害率		0.00	0.001	0.006	0.079	0.42	-	-	0.00	0.004	0.043	-	-	-	-
重度	橋脚破損	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	橋脚傾斜(重)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	桁破損	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	落橋・倒壊	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
	基礎部損傷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
重度被害計		0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	-	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0
重度被害率		0.00	0.00	0.00	0.003	0.009	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	-	-
軽度+重度延長		0.0	0.3	0.8	2.4	4.9	-	8.4	0.0	0.3	1.0	-	-	-	1.3
(軽度+重度)被害率		0.00	0.001	0.006	0.083	0.43	-	-	0.00	0.004	0.043	-	-	-	-
総延長		14.2	247.0	129.7	29.0	11.3	-	431.2	5.1	69.7	23.2	-	-	-	98.0

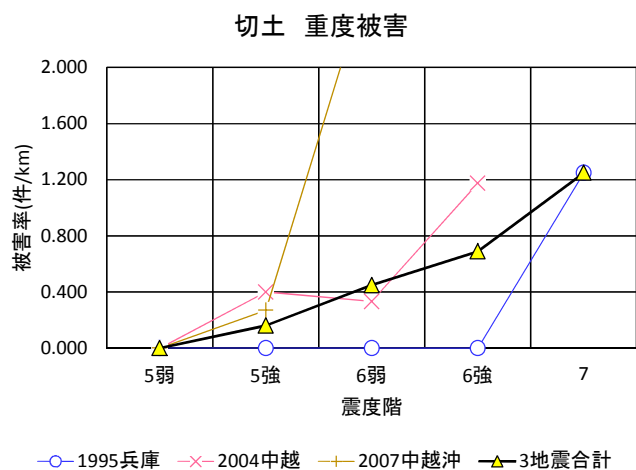
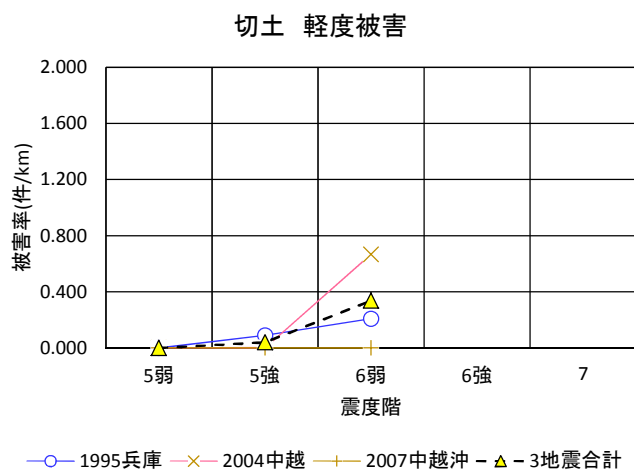
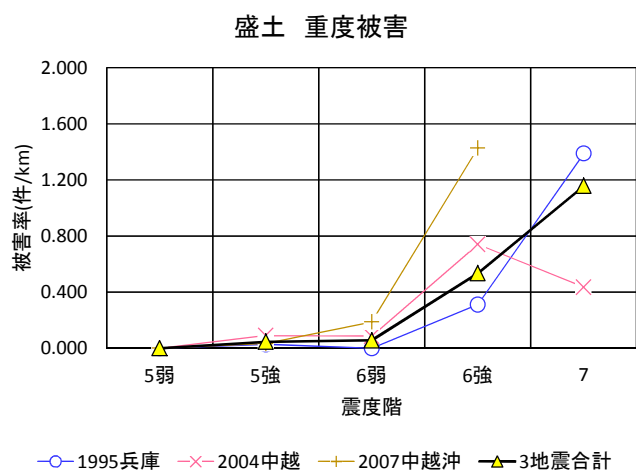
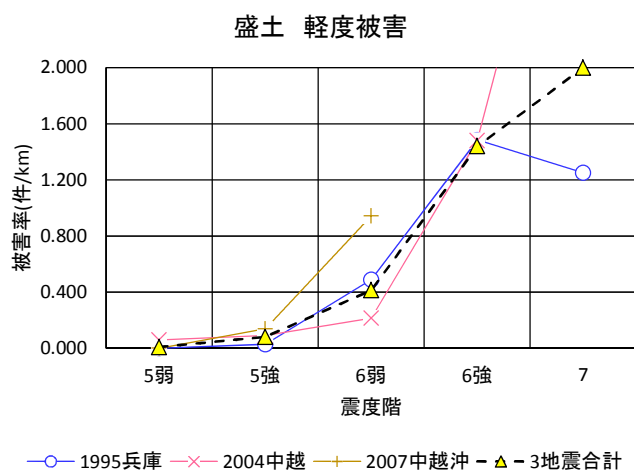
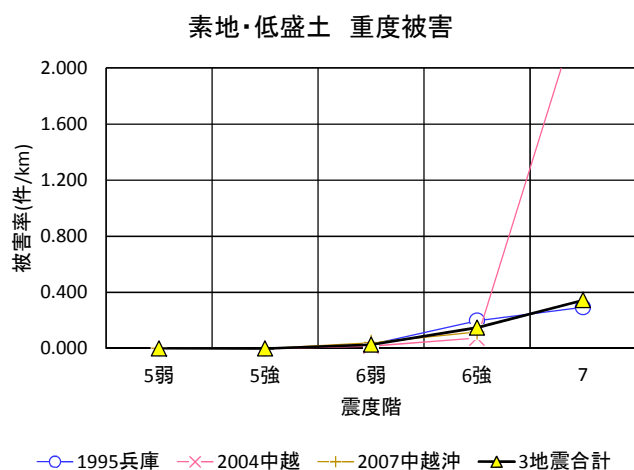
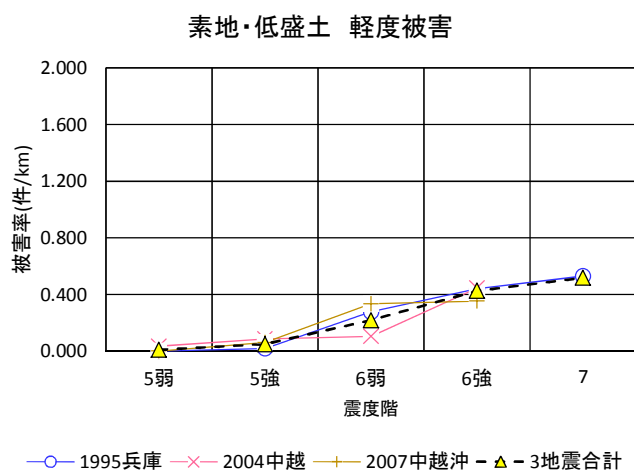


図3.1 土構造物の地震被害関数

表3.6 土構造物の震度階ごとの被害率

(1)素地・低盛土

程度	地震		震度階				
			5弱	5強	6弱	6強	7
軽度	1995 兵庫	総延長	144.0	116.3	65.3	25.0	17.0
		被害件数	0	2	18	11	9
		被害率	0.000	0.017	0.276	0.440	0.529
	2004 中越	総延長	89.4	58.7	57.9	13.5	0.4
		被害件数	3	5	6	6	0
		被害率	0.034	0.085	0.104	0.444	0.000
	2007 中越沖	総延長	133.9	116.7	24.0	8.5	0.0
		被害件数	0	7	8	3	0
		被害率	0.000	0.060	0.333	0.353	-
	3地震 合計	総延長	367.3	291.7	147.2	47.0	17.4
		被害件数	3	14	32	20	9
		被害率	0.008	0.048	0.217	0.426	0.517
重度	1995 兵庫	総延長	144.0	116.3	65.3	25.0	17.0
		被害件数	0	0	2	5	5
		被害率	0.000	0.000	0.031	0.200	0.294
	2004 中越	総延長	89.4	58.7	57.9	13.5	0.4
		被害件数	0	0	1	1	1
		被害率	0.000	0.000	0.017	0.074	2.500
	2007 中越沖	総延長	133.9	116.7	24.0	8.5	0.0
		被害件数	0	0	1	1	0
		被害率	0.000	0.000	0.042	0.118	-
	3地震 合計	総延長	367.3	291.7	147.2	47.0	17.4
		被害件数	0	0	4	7	6
		被害率	0.000	0.000	0.027	0.149	0.345

表3.6 土構造物の震度階ごとの被害率

(2)盛土

程度	地震		震度階				
			5弱	5強	6弱	6強	7
軽度	1995 兵庫	総延長	47.2	35.8	24.5	12.8	7.2
		被害件数	0	1	12	19	9
		被害率	0.000	0.028	0.490	1.484	1.250
	2004 中越	総延長	17.2	22.1	23.4	10.8	2.3
		被害件数	1	2	5	16	10
		被害率	0.058	0.090	0.214	1.481	4.348
	2007 中越沖	総延長	50.5	28.9	5.3	0.7	0.0
		被害件数	0	4	5	0	0
		被害率	0.000	0.138	0.943	-	-
	3地震 合計	総延長	114.9	86.8	53.2	24.3	9.5
		被害件数	1	7	22	35	19
		被害率	0.009	0.081	0.414	1.440	2.000
重度	1995 兵庫	総延長	47.2	35.8	24.5	12.8	7.2
		被害件数	0	1	0	4	10
		被害率	0.000	0.028	0.000	0.313	1.389
	2004 中越	総延長	17.2	22.1	23.4	10.8	2.3
		被害件数	0	2	2	8	1
		被害率	0.000	0.090	0.085	0.741	0.435
	2007 中越沖	総延長	50.5	28.9	5.3	0.7	0.0
		被害件数	0	1	1	1	0
		被害率	0.000	0.035	0.189	1.429	-
	3地震 合計	総延長	114.9	86.8	53.2	24.3	9.5
		被害件数	0	4	3	13	11
		被害率	0.000	0.046	0.056	0.535	1.158

表3.6 土構造物の震度階ごとの被害率

(3)切土

構造種別	程度	地震		震度階				
				5弱	5強	6弱	6強	7
切土	軽度	1995 兵庫	総延長	11.3	11.2	4.8	1.1	1.6
			被害件数	0	1	1	0	0
			被害率	0.000	0.089	0.208	0.000	0.000
		2004 中越	総延長	3.5	2.5	3.0	1.7	0.0
			被害件数	0	0	2	0	0
			被害率	0.000	0.000	0.667	0.000	-
		2007 中越沖	総延長	9.8	11.1	1.1	0.1	0.0
			被害件数	0	0	0	0	0
			被害率	0.000	0.000	0.000	0.000	-
		3地震 合計	総延長	24.6	24.8	8.9	2.9	1.6
			被害件数	0	1	3	0	0
			被害率	0.000	0.040	0.337	0.000	0.000
	重度	1995 兵庫	総延長	11.3	11.2	4.8	1.1	1.6
			被害件数	0	0	0	0	2
			被害率	0.000	0.000	0.000	0.000	1.250
		2004 中越	総延長	3.5	2.5	3.0	1.7	0.0
			被害件数	0	1	1	2	0
			被害率	0.000	0.400	0.333	1.176	-
		2007 中越沖	総延長	9.8	11.1	1.1	0.1	0.0
			被害件数	0	3	3	0	0
			被害率	0.000	0.270	2.727	0.000	-
		3地震 合計	総延長	24.6	24.8	8.9	2.9	1.6
			被害件数	0	4	4	2	2
			被害率	0.000	0.161	0.449	0.690	1.250

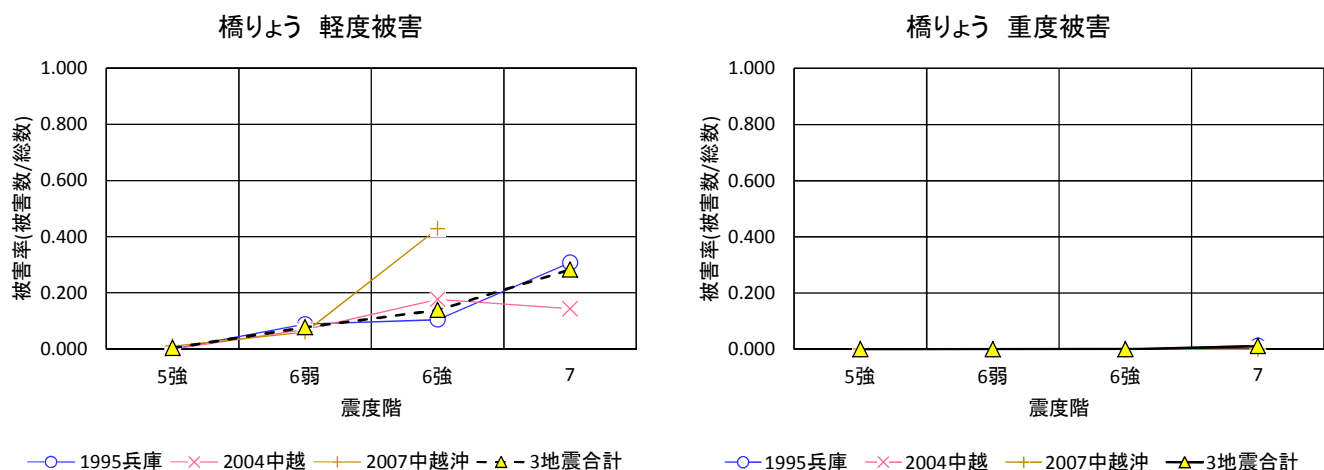


図3.2 橋りょうの地震被害関数

表3.7 橋りょうの震度階ごとの被害率

程度	地震		震度階			
			5強	6弱	6強	7
軽度	1995 兵庫	総数	224	136	96	78
		被害数	0	12	10	24
		被害率	0.000	0.088	0.104	0.308
	2004 中越	総数	115	116	34	14
		被害数	0	8	6	2
		被害率	0.000	0.069	0.176	0.143
	2007 中越沖	総数	198	33	7	0
		被害数	2	2	3	0
		被害率	0.010	0.061	0.429	-
	3地震 合計	総数	537	285	137	92
		被害数	2	22	19	26
		被害率	0.004	0.077	0.139	0.283
重度	1995 兵庫	総数	224	136	96	78
		被害数	0	0	0	1
		被害率	0.000	0.000	0.000	0.013
	2004 中越	総数	115	116	34	14
		被害数	0	0	0	0
		被害率	0.000	0.000	0.000	0.000
	2007 中越沖	総数	198	33	7	0
		被害数	0	0	0	0
		被害率	0.000	0.000	0.000	-
	3地震 合計	総数	537	285	137	92
		被害数	0	0	0	1
		被害率	0.000	0.000	0.000	0.011

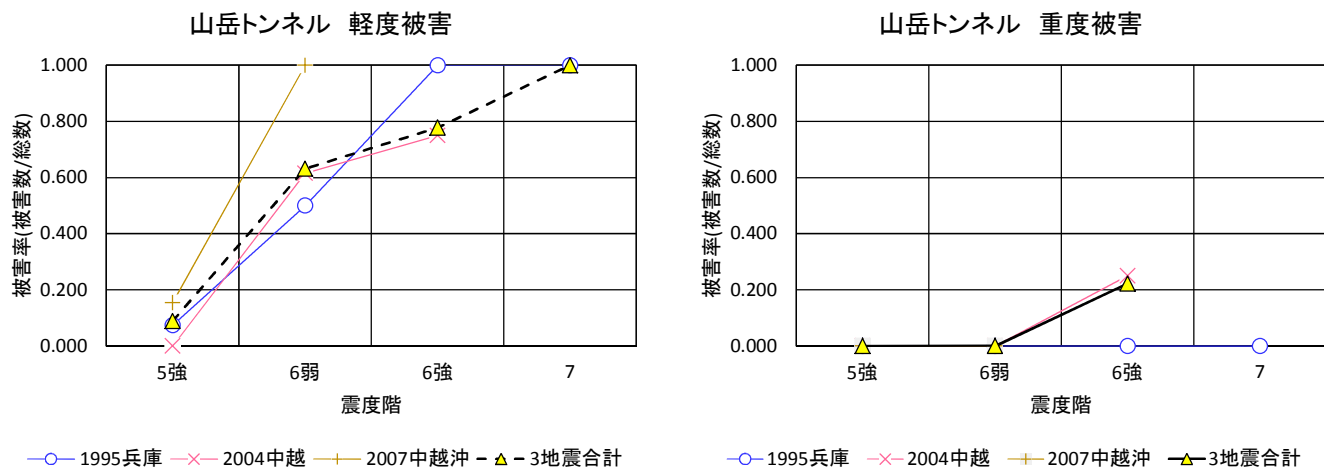


図3.3 山岳トンネルの地震被害関数

表3.8 山岳トンネルの震度階ごとの被害率

程度	地震		震度階			
			5強	6弱	6強	7
軽度	1995 兵庫	総数	27	4	1	1
		被害数	2	2	1	1
		被害率	0.074	0.500	1.000	1.000
	2004 中越	総数	5	13	8	0
		被害数	0	8	6	0
		被害率	0.000	0.615	0.750	-
	2007 中越沖	総数	13	2	0	0
		被害数	2	2	0	0
		被害率	0.154	1.000	-	-
	3地震 合計	総数	45	19	9	1
		被害数	4	12	7	1
		被害率	0.089	0.632	0.778	1.000
重度	1995 兵庫	総数	27	4	1	1
		被害数	0	0	0	0
		被害率	0.000	0.000	0.000	0.000
	2004 中越	総数	5	13	8	0
		被害数	0	0	2	0
		被害率	0.000	0.000	0.250	-
	2007 中越沖	総数	13	2	0	0
		被害数	0	0	0	0
		被害率	0.000	0.000	-	-
	3地震 合計	総数	45	19	9	1
		被害数	0	0	2	0
		被害率	0.000	0.000	0.222	0.000

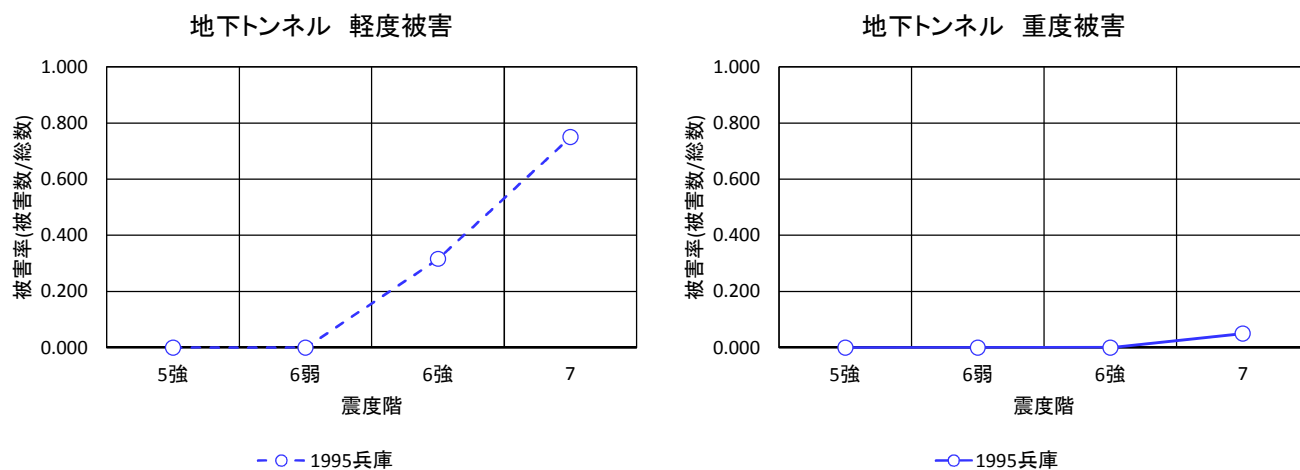


図3.4 地下トンネルの地震被害関数

表3.9 地下トンネルの震度階ごとの被害率

程度	地震		震度階			
			5強	6弱	6強	7
軽度	1995 兵庫	総数	90	11	19	20
		被害数	0	0	6	15
		被害率	0.000	0.000	0.316	0.750
	2011 東北	総数	-	17	3	-
		被害数	0	0	0	-
		被害率	-	0.000	0.000	-
重度	1995 兵庫	総数	90	11	19	20
		被害数	0	0	0	1
		被害率	0.000	0.000	0.000	0.050
	2011 東北	総数	-	17	3	-
		被害数	0	0	0	-
		被害率	-	0.000	0.000	-

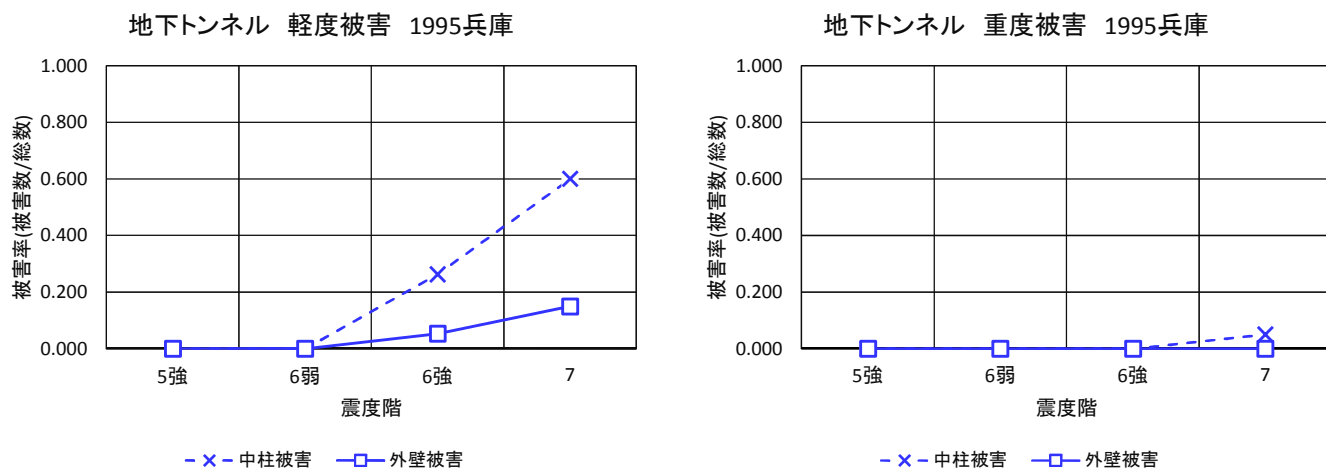


図3.5 地下トンネルの被害部位別の地震被害関数

表3.10 地下トンネルの部位別の被害率

地震	程度	項目	震度階			
			5強	6弱	6強	7
1995兵庫	総数		90	11	19	20
	軽度	中柱被害	0	0	5	12
		外壁被害	0	0	1	3
		中柱被害率	0.000	0.000	0.263	0.600
		外壁被害率	0.000	0.000	0.053	0.150
	重度	中柱被害	0	0	0	1
		外壁被害	0	0	0	0
		中柱被害率	0.000	0.000	0.000	0.050
		外壁被害率	0.000	0.000	0.000	0.000
2011東北	総数		-	17	3	-
	軽度	中柱被害	0	0	0	-
		外壁被害	0	0	0	-
		中柱被害率	0.000	0.000	0.000	-
		外壁被害率	0.000	0.000	0.000	-
	重度	中柱被害	0	0	0	-
		外壁被害	0	0	0	-
		中柱被害率	-	0.000	0.000	-
		外壁被害率	-	0.000	0.000	-

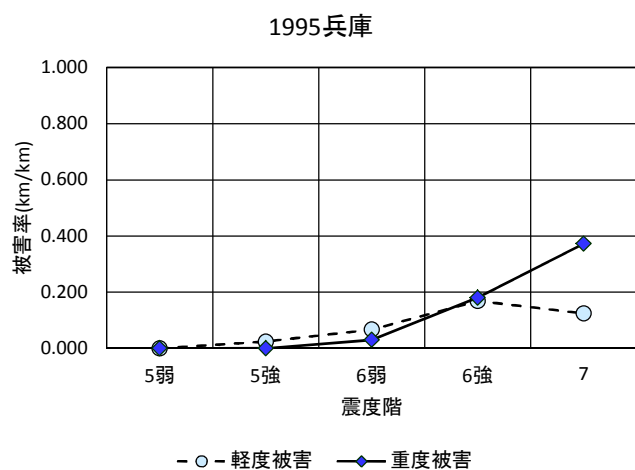
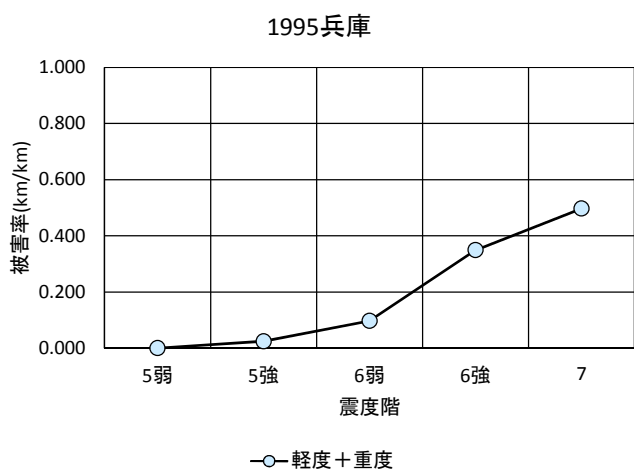


図3.6 1995年兵庫県南部地震の普通鉄道の高架橋の被害関数

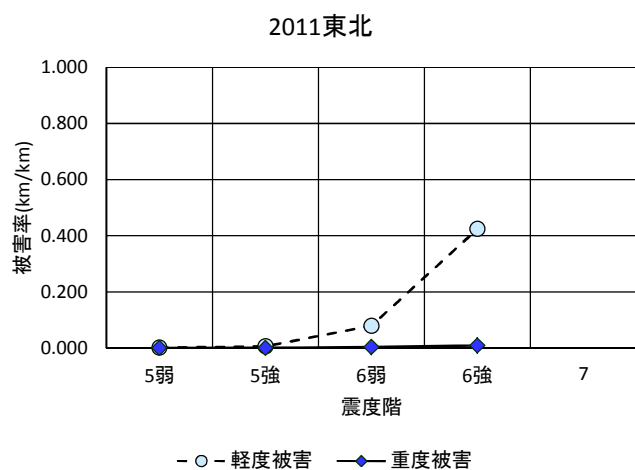
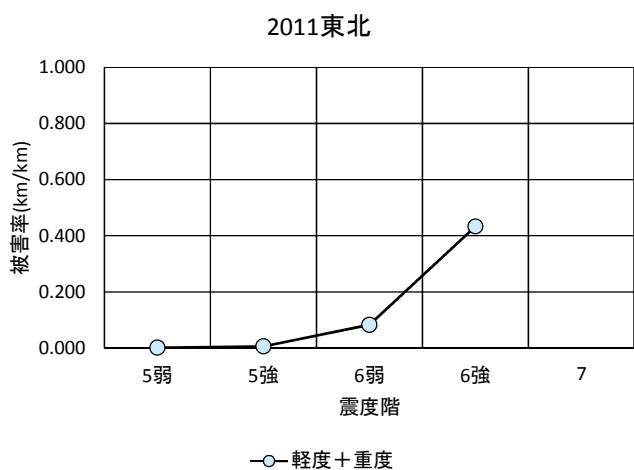


図3.7 2011年東北地方太平洋沖地震の普通鉄道の高架橋の被害関数

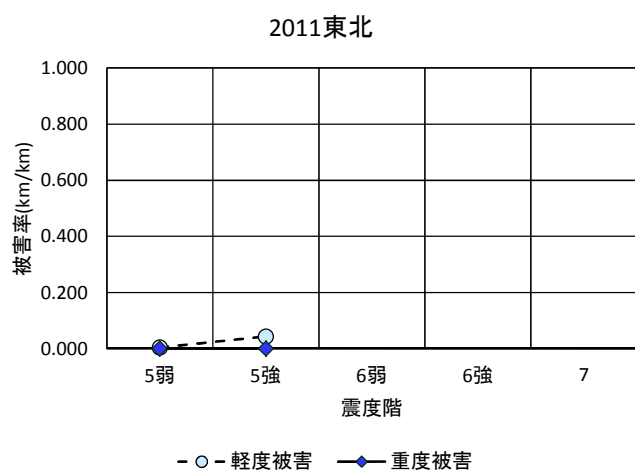
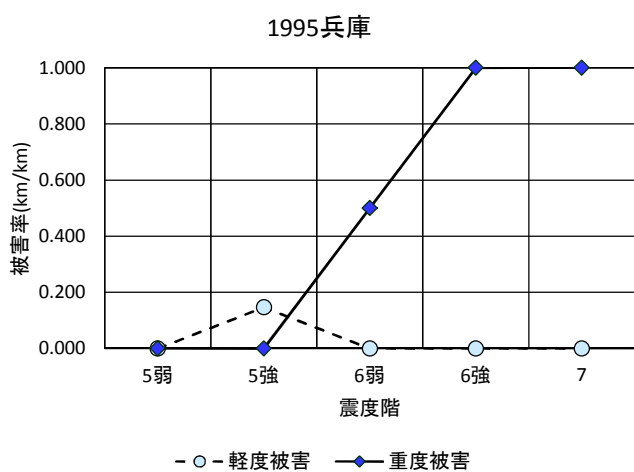


図3.8 新交通システム高架橋の震度階ごとの被害率

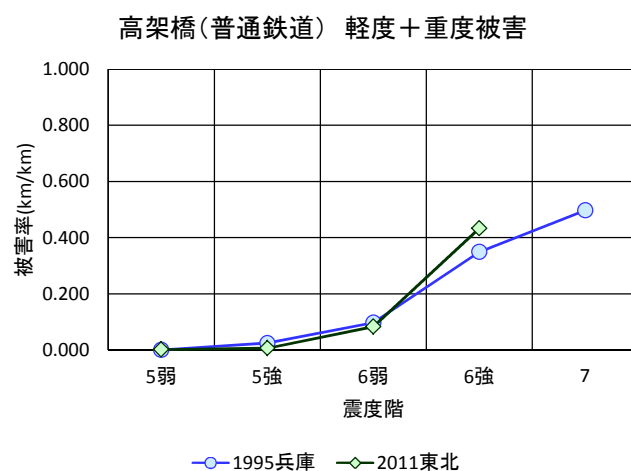


図3.9 軽度被害率・重度被害率を合計した被害関数の2地震間の比較

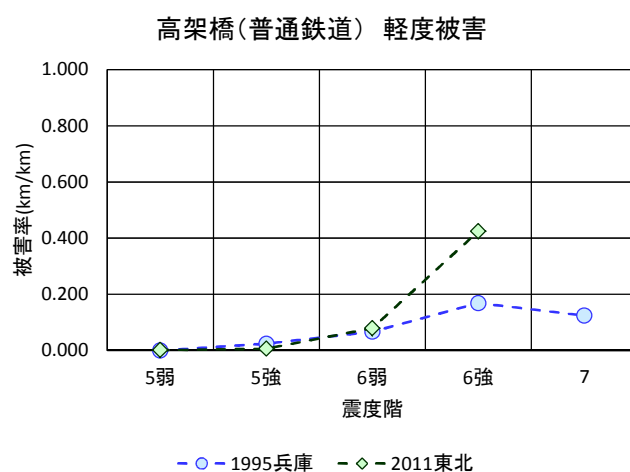
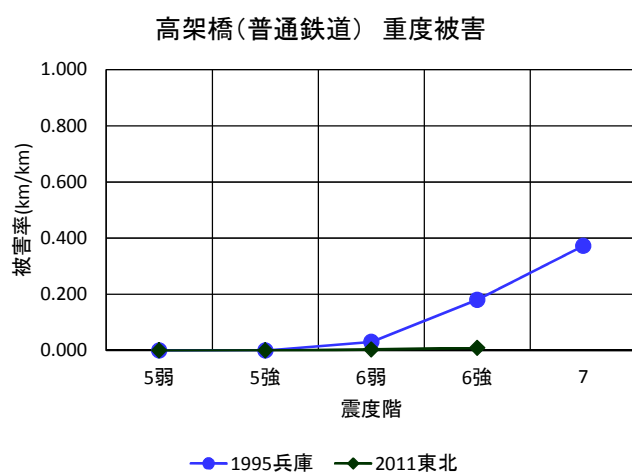


図3.10 重度被害の被害関数の2地震間の比較

図3.11 軽度被害の被害関数の2地震間の比較

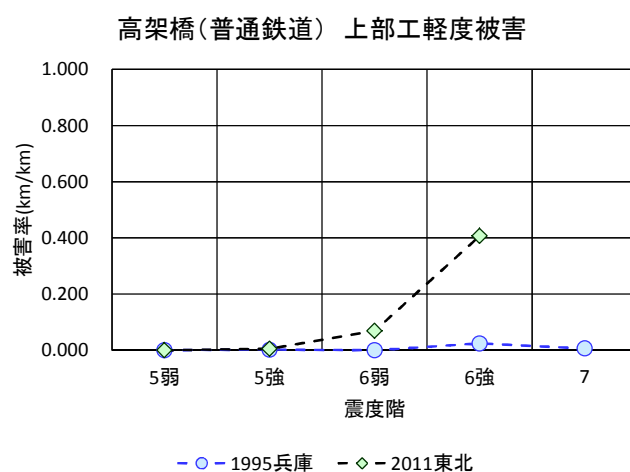
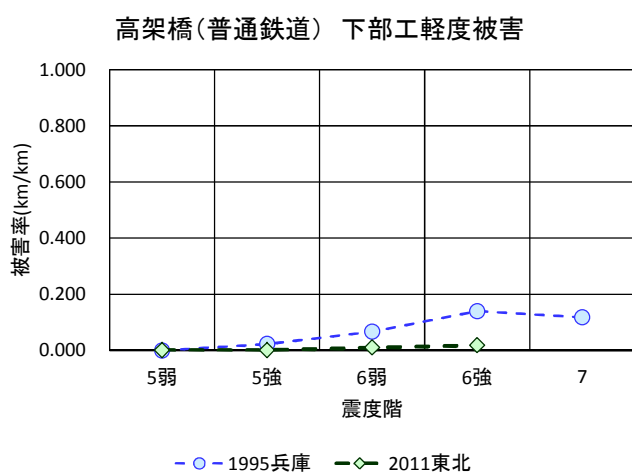


図3.12 下部工軽度被害の被害関数の2地震間の比較

図3.13 上部工軽度被害の被害関数の2地震間の比較

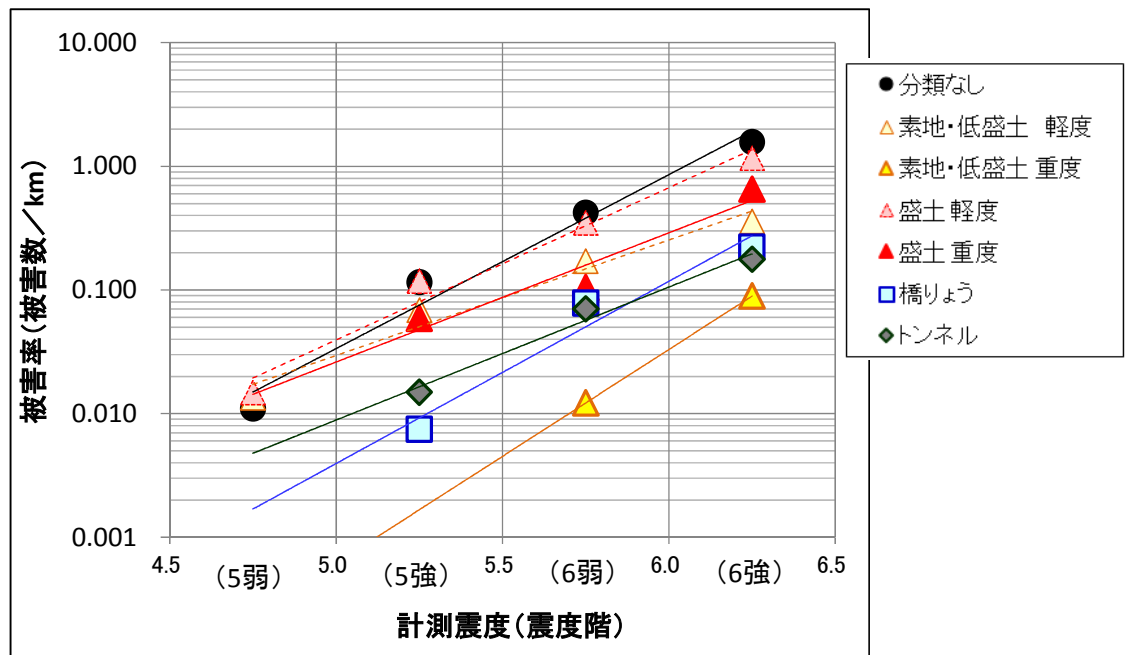
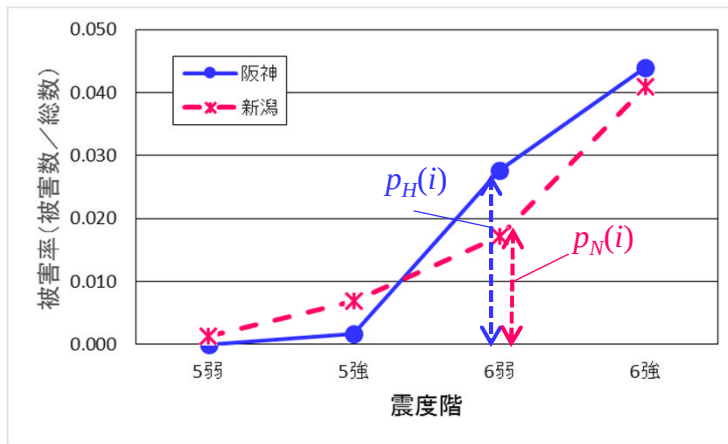


図3.14 構造種別間の震度別被害率の比較

表3.11 回帰式の係数

構造種別・被害程度	α	β	相関係数 R^2
分類なし	1.41	-8.51	0.98
素地・低盛土 軽度	0.93	-6.20	0.96
素地・低盛土 重度	1.73	-11.85	1.00
盛土 軽度	1.23	-7.56	0.97
盛土 重度	1.04	-6.81	0.92
橋りょう	1.47	-9.77	0.95
トンネル	1.08	-7.43	0.98

(1)地区ごとの被害率の算出



$p_H(i)$:震度階 i の阪神地区の被害率

$p_N(i)$:震度階 i の新潟地区の被害率

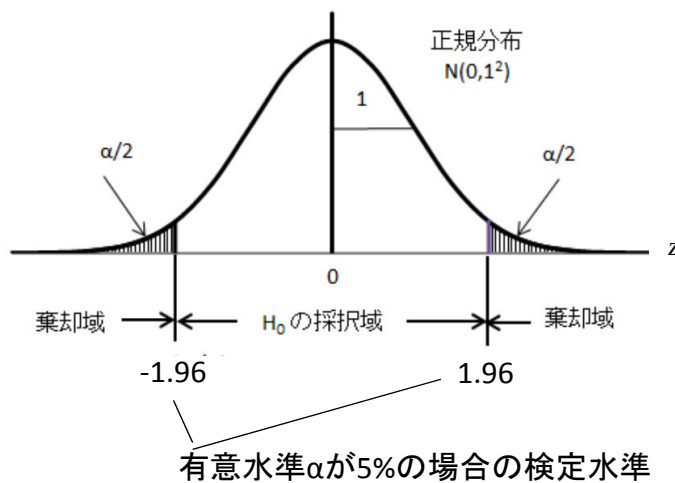
(2)検定統計量の算出

$$z = \frac{p_H(i) - p_N(i)}{\sqrt{X(1-X) \left(\frac{1}{N_H(i)} + \frac{1}{N_N(i)} \right)}}, \quad X = \frac{p_H N_H + p_N N_N}{N_H + N_N}$$

$N_H(i)$:震度階 i の阪神地区の総数

$N_N(i)$:震度階 i の新潟地区の総数

(3)検定



帰無仮説 H_0

阪神地区と新潟地区の被害率は同じ

対立仮説 H_1

阪神地区と新潟地区の被害率は異なる

$|z| \leq 1.96$ の場合、 H_0 は棄却されない
すなわち、有意に異なるとまではいえない

図3.15 被害率の差の検定の手順

表3.12 阪神地区と新潟地区の被害率の差の検定

(1)素地・低盛土

被害 程度	震度階	地区	総数	被害数	被害率	検定統計量 (z)	検定結果 ○ : $ Z \leq 1.96$ × : $ Z > 1.96$
軽度	5弱	阪神	1440	0	0.000	-1.39	○
		新潟	2233	3	0.001		
	5強	阪神	1163	2	0.002	-1.96	○
		新潟	1754	12	0.007		
	6弱	阪神	653	18	0.028	1.37	○
		新潟	819	14	0.017		
	6強	阪神	250	11	0.044	0.17	○
		新潟	220	9	0.041		
重度	6弱	阪神	653	2	0.003	0.23	○
		新潟	819	2	0.002		
	6強	阪神	250	5	0.020	0.97	○
		新潟	220	2	0.009		

(2)盛土

被害 程度	震度階	地区	総数	被害数	被害率	検定統計量 (z)	検定結果 ○ : $ Z \leq 1.96$ × : $ Z > 1.96$
軽度	5弱	阪神	472	0	0.000	-0.84	○
		新潟	677	1	0.001		
	5強	阪神	358	1	0.003	-1.45	○
		新潟	510	6	0.012		
	6弱	阪神	245	12	0.049	0.82	○
		新潟	287	10	0.035		
	6強	阪神	128	19	0.148	0.21	○
		新潟	115	16	0.139		
重度	6弱	阪神	245	0	0.000	-1.60	○
		新潟	287	3	0.010		
	6強	阪神	128	4	0.031	-1.63	○
		新潟	115	9	0.078		

(3)橋りょう

被害 程度	震度階	地区	総数	被害数	被害率	検定統計量 (z)	検定結果 ○ : $ Z \leq 1.96$ × : $ Z > 1.96$
軽度	5強	阪神	224	0	0.000	-1.20	○
		新潟	313	2	0.006		
	6弱	阪神	136	12	0.088	0.67	○
		新潟	149	10	0.067		
	6強	阪神	96	10	0.104	-1.79	○
		新潟	41	9	0.220		

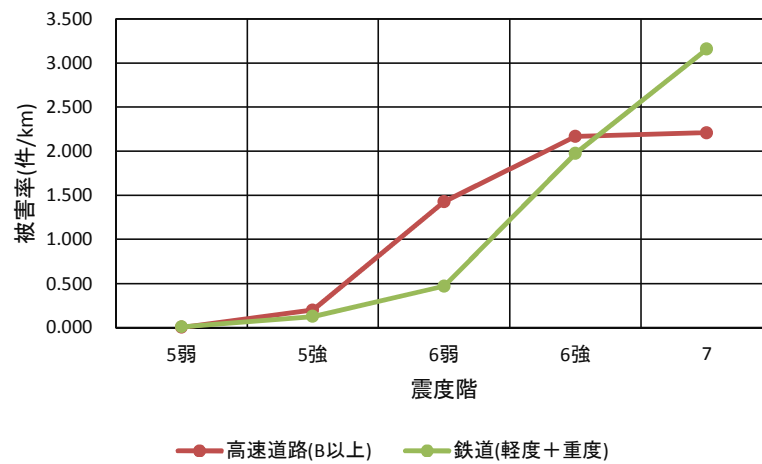


図3.16 盛土の地震被害関数の比較

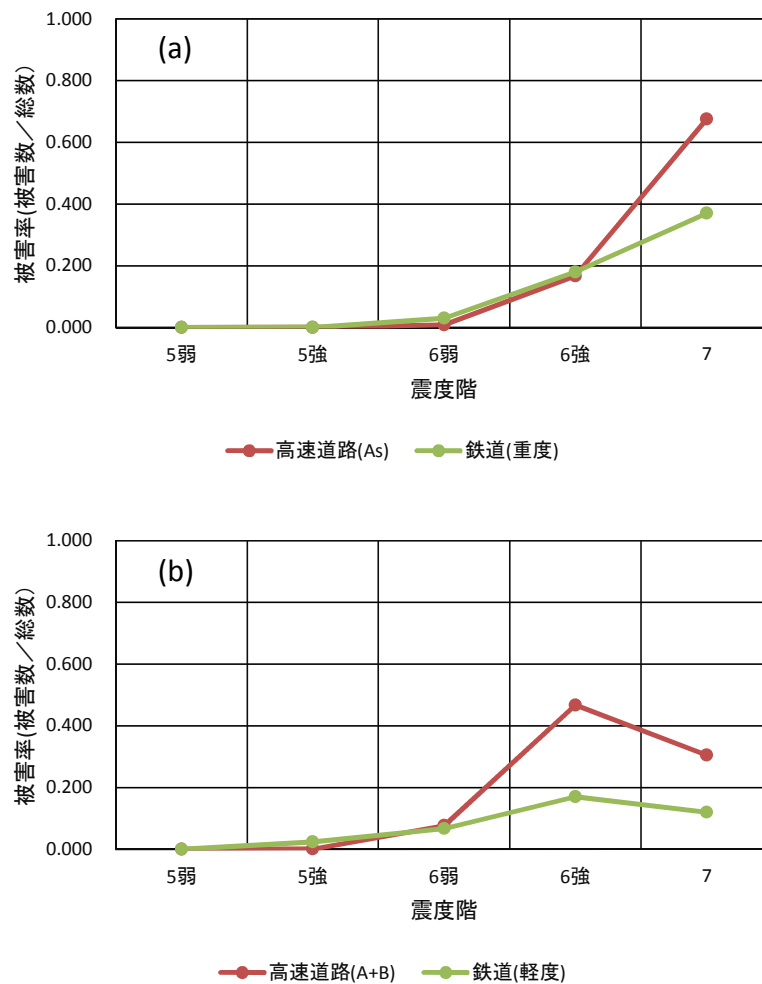


図3.17 高架橋の地震被害関数の比較

※高速道路の被害ランク
 As : 落橋・倒壊
 A : 大
 B : 中(通行に支障)

第4章 地震による鉄道の運休期間に関する検討

4.1. はじめに

地震により構造物に被害が発生してから運転が再開されるまでの流れは、図 4.1 に示すように、調査→計画→設計→施工→検査の順をたどり、運休期間の内訳の大半は、被害調査期間と復旧工事の工期で占められる。これらの期間は構造物の被害状況によって異なるものと考えられ、被害を受けた構造物の種別、被害の程度、被害件数などが復旧工事の工期に影響を及ぼす要因として考えられる。

構造物被害以外にも、災害規模も運休期間に影響を及ぼす要因となりうる。2011 年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震の際には、鉄道のみならず道路やライフラインでも広範囲にわたり被害が発生し、被災地全体のあらゆる活動に支障をきたしたが、社会全体の機能性の低下が被害調査や復旧工事の作業性にも影響を及ぼしたと想定される。そのほか、複数の路線が被害を受けた場合には、重要度の高い路線から復旧させていく方針が立てられることがある [1] [2] ので、路線の重要度も運休期間に影響を及ぼす要因の 1 つであると考えられる。

これらの他にも、地震による鉄道の運休期間に影響を及ぼす要因は多岐にわたるが、本章では、上記の要因と運休期間との関係を検討し、得られた知見をもとに地震発生からの時間経過と鉄道の運転再開の関係を示すモデルを作成する。

4.2.では、対象 4 地震の運休期間データの作成方法と作成したデータを示す。

4.3.では、構造物被害と運休期間の関係を検討する。

4.4.では、構造物被害以外の要因と運休期間の関係を検討する。

4.5.では、前節までの検討結果をふまえ、各種要因を考慮した、地震発生からの時間経過と鉄道の運転再開の関係を示すモデルを示す。

4.6.では、本章をまとめる。

4.2. 対象地震の運休期間データの作成

4.2.1. 運休期間データの作成手順

鉄道では、図 4.2. に示すように、地震により一部区間が運休とされる場合には、1 駅間ごとではなく、複数の駅間単位で判断される。これは、わたり線とよばれる隣接する線路に渡るための設備や折り返し運転に対応するための電力・信号設備が整備されていて、上下線列車の折り返し運転が可能な駅とそうでない駅とがあるためである。本研究では、時刻表等を参考に折り返し運転が設定されている駅、及び対象地震時に実際に折り返し運転がなされた駅を折り返し可能駅とし、折り返し可能駅間を 1 つの運転区間とし、運転区間単位で、以下に示す要領で各種要因データを整理した。

(1) 運休期間

対象地震における各区間の運休期間を各種資料 [3] [4] [5] [6] より整理した。地震により被害が発生した場合の運休期間は比較的長期にわたるため、運休期間を 1 日単位で整理した。したがって、たとえば夕方に地震が発生し、翌日始発から運転再開した場合で、運休期間が 24 時間以内となるようなケースでも運休期間 1 日として整理している。

また、「地震動による被害が発生し、1 日以上運休した区間」を運休区間として整理した。被害が発生したが当日に運転再開した区間については、補修が不要であったか、ごく簡単な補修作業で復旧できたものと考え、無被害と同等として扱うこととした。また、1 日以上運休したが被害が確認されなかった区間についても、点検等で時間を要したものと考え、無被害と同等として扱うこととした。

(2) 被害発生状況（被害件数・被害程度・被害構造種別・震度階）

鉄道施設の被害のうち、土木構造物以外に電気設備等の被害も運休期間に影響を及ぼしうると考えられる。たとえば、2011 年東北地方太平洋沖地震の際、東北新幹線では広い範囲で多くの電化柱に損傷が発生し、復旧にも多くの時間を要したと報告されている [7]。しかし、電気設備の被害位置・被害内容については、各文献では概略的にしか記述されておらず、被害の集約が困難であった。このため、本研究では電気設備等の被害と運休期間の関係については検討対象外とした。

各区間の被害構造種別は 3.2.3 節で整理した結果を参照し、各区間の被害程度ごと・構造種別ごとの被害件数を整理した。3 章と同様に構造種別は 7 種類に区分し、被害程度は軽度・重度の 2 区分とした。この場合、たとえば軽度被害であれば、無被害に近い微細な亀裂から、重度被害に近い規模の陥没や高架橋柱損傷までが含まれており、同じ軽度被害でもその内容によっては復旧工事の工期にも違いが生じると考えられる。すなわち、被害程度と運休期間の検討を詳細に行うには、被害程度の区分けは詳細であるほど良いと考えられる。

しかし、3.2.2.節(5)に示したとおり、本研究では文献だけから被害程度を判断していく際に、被害形態が具体的に記述されていないもの（橋りょう被害とだけ書かれているもの等）も可能な限り被害数として計上しようとしたため、被害程度の区分を2段階にとどめており、被害程度をさらに細分化すると、データが不足すると考えられる。そこで、本検討では、同じ被害程度の中であれば地震動が強いほど被害が重度化すると想定し、被害程度の細分化の代替手段として、各区間の震度階に着目することとした。震度階は、2.4節で作成した各100m点の計測震度を区間ごとに集計し、平均値と最大値を算出し、これらに計測震度から震度階への換算方法 [7]を適用して、「区間平均震度階」「区間最大震度階」を整理した。

また、各区間での被害構造種別を整理した。1種類の構造種別で被害が発生している場合はその構造種別を被害構造種別とした。同一区間内で複数の構造種別で被害が発生している場合は、下記により整理した。

- ・ 重度被害と軽度被害が同一区間内で発生している場合は、重度被害が発生している構造種別を被害構造種別とする。
- ・ 複数の構造種別で同じ被害程度の被害が同一区間内で発生している場合は、表 4.1 に示す「運休期間の平均値が長い構造種別」の順位が高いものを被害構造種別とする。表 4.1 は、単一の構造種別で被害が発生している区間のデータのみを用いて、被害構造種別ごとに運休期間の平均値を算出し、その平均値が高い順に並べたものである。

(3)路線の重要度

復旧戦略を検討する際、鉄道網全体で見た場合に最も復旧効率の良い順序で復旧させるような戦略が求められる。その際、構造物被害の状況だけではなく、折り返し区間の空間的な配置、各路線・区間の輸送量、乗り継ぎの利便性等のさまざまな要因を考慮する必要がある。本研究では、復旧戦略の検討に影響を及ぼしうる各種要因のうち、定量的に表すことができる輸送量に着目し、輸送量を示す尺度の1つである「輸送密度」と過去の地震時の運休期間との関係を検討することとした。その他の要因については、本研究の対象 4 地震のデータだけでは定量的な検討を行うには十分でないと考えられるため、検討対象とはしなかった。

輸送密度とは、平均通過人員とも呼ばれ、乗客1日1kmあたりの人数を表す指標であり、以下の計算により算出されるものである [8]。単位は人キロ/日で表される。

$$\text{【輸送密度】} = \frac{\text{【各路線の年度内の旅客輸送人キロ】}}{\text{【当該路線の年度内営業キロ】} \div \text{年度内営業日数}}$$

各路線及び区間の輸送密度は文献 [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]を参照した。原則として、地震発生年度の輸送密度を参照することとしたが、JR 西日本の各路線については、1995 年当時の各路線の輸送密度が公開されていなかったため、最近のデータを参照した。

4.2.2. 対象地震の運休期間データの作成

(1) 1995 年兵庫県南部地震

1995 年兵庫県南部地震の各区間の運休事例は、阪神・淡路大震災復興記録編纂委員会(1996) [3]を参照した。4.3.節では、地震動による被害と運休期間の関係について検討するが、以下に示す条件に合致する区間の運休期間は地震動による被害以外の要因が大きく関係していると考えられるため、整理対象外とした。

- ・ 当時開業間近だった地下新線で運転を再開させた区間

神戸高速鉄道西代～高速長田間、山陽電鉄西代～東須磨間は、当該区間で発生した被害を修復させず、当時開業間近だった地下新線で運転を再開させた区間であり、条件が特殊であると考え、整理対象外とした。

- ・ 隣接する区間で甚大な被害が発生した影響を受けたと考えられる区間

たとえば阪急甲陽線夙川～甲陽園間などについては、隣接する神戸線で甚大な被害が発生した影響を受け、当該区間も運休期間が長期化したと考えられるので、整理対象外とした。

- ・ 新交通システム各線

ポートライナー、六甲ライナー等の新交通システム各線でも甚大な被害が発生し長期間運休となったが、2.2 節で述べたとおり、新交通システムと普通鉄道では設置条件や構造が異なるため、同列に扱えないと考え、整理対象外とした。

結果として、検討対象データは表 4.2 に示す 54 区間となった。検討対象各区間の運休期間を図 4.3 に示す。

(2) 2004 年新潟県中越地震

2004 年新潟県中越地震の各区間の運休事例は、JR 東日本(2005) [4]を参照した。「被害が発生し、1 日以上運休した区間」は 9 区間であった。2004 年新潟県中越地震で運休した各区間には、特殊な状況は見られなかったため、整理対象外とした区間はなかった。検討対象データを表 4.3 に示す。また、検討対象各区間の運休期間を図 4.4 に示す。

(3) 2007 年新潟県中越沖地震

2007 年新潟県中越沖地震の各区間の運休事例は、JR 東日本(2007) [5]を参照した。「被害が発生し、1 日以上運休した区間」は 4 区間であった。2007 年新潟県中越沖地震で運休した各区間についても、2004 年新潟県中越地震と同様、特殊な状況は見られなかったため、

整理対象外とした区間はなかった。作成したデータを表 4.4 に示す。また、検討対象各区間の運休期間を図 4.5 に示す。

(4) 2011 年東北地方太平洋沖地震

2011 年東北地方太平洋沖地震の各区間の運休事例は、新潮社(2011) [6]を参照した。ただし、以下に示す条件に合致する区間の運休期間は地震動による被害以外の要因が大きく関係していると考えられるため、整理対象外とすることとした。

- ・ 津波被害の影響を受けて運休となった区間

JR 東日本仙石線東塩釜～石巻間等の東北地方の太平洋沿岸部を通過する各線では、津波により甚大な被害が発生し、運転再開までに長期間を要した区間がある。これら区間については、地震動による被害と津波による被害との区別が難しいと考え、整理対象外とした。

- ・ 福島第一原子力発電所の事故の影響をうけて運休となった区間

JR 東日本常磐線四ツ倉～原ノ町間は福島第一原子力発電所の近隣を通過する区間であり、地震直後、周辺が警戒区域に設定され、被害の調査すらできない状態であったため、整理対象外とした。

- ・ 2011 年 4 月 7 日に発生した宮城県沖を震源とする余震による影響を受けたと考えられる区間

仙台近郊では、4 月 7 日に発生した宮城県沖を震源とする余震により、復旧作業の途中で再度被害が発生し、運転再開が遅れた区間があった [15]。たとえば JR 東日本松島～小牛田間等の仙台近郊の各線で、運転再開が 2011 年 4 月 8 日以降の区間は、本震による被害と余震による被害の区別が難しいと考え、整理対象外とした。

- ・ 隣接する区間で甚大な被害が発生した影響を受けたと考えられる区間

たとえばひたちなか海浜鉄道湊線では、全線で長期にわたり運休しているが、勝田～中根間で甚大な被害が発生しており、その影響を受けて中根より先の各区間の運休期間も長期化したと考えられる。この例の中根より先の各区間のようなデータは整理対象外とした。

- ・ 新交通システム各線

千葉モノレール 1 号線やゆりかもめ等の新交通システム各線においても地震により被害が発生し、運休となったが、2.2 節で述べたように新交通システムと普通鉄道では設置条件や構造が異なるため、同列に扱えないと考え、整理対象外とした。

また、阿武隈急行線や東武伊勢崎線などのように、地震動による被害があり、1 日以上運休したと報告されている [16]ものの、詳細な被害の記録資料が得られず、被害位置・被害構造種別を把握できなかった路線もあった。

結果として、検討対象データは 81 区間となった。作成したデータを表 4.5 に示す。また、検討対象各区間の運休期間を図 4.6 に示す。

4.3. 構造物被害と運休期間の関係の検討

4.3.1. 被害構造種別と運休期間の関係

被害構造種別と運休期間の関係を検討するため、被害程度ごとに各被害構造種別の運休期間ヒストグラムを作成した。軽度被害の構造種別毎の運休期間ヒストグラムを図 4.7 に示す。また、各構造種別の運休期間の平均値等を算出した結果を表 4.6 に示す。最長運休期間に着目して構造種別間でヒストグラムを比較したが、明瞭な違いはみられず、どの構造種別についても最長でも 40 日未満であった。土構造物は他の構造種別と比べ復旧が容易であるとの指摘 [17]があるが、軽度被害に関しては土構造物とその他の間で明瞭な違いがあるとはいえなかった。また、ヒストグラムのピークに着目して構造種別間での違いを比較すると、素地・低盛土、盛土、高架橋については最大のピークが 1 日～2 日にあるヒストグラムとなったが、橋りょうはピークが明瞭に現れないヒストグラムとなったようにピークは異なるが、表 4.6 にて素地・低盛土、盛土と橋りょうの間で平均運休期間を比較した場合には、両者の間に大きな違いは見られなかった。なお、切土やトンネルはデータが少ないためにピークが明瞭に現れず、比較できなかった。以上のとおり、軽度被害においては、構造種別が異なることでヒストグラムのピークに違いが表れることがあるものの、最長運休期間や平均運休期間で見た場合には明瞭な違いがあるとはい切れず、被害構造種別だけで運休期間を説明することができるような、明確な相関関係は見出せなかった。

重度被害の構造種別毎の運休期間ヒストグラムを図 4.8 に示す。また、各被害構造種別の運休期間の平均値等を算出した結果を表 4.7 に示す。ここでは、データが比較的多い盛土と高架橋に絞って比較検討する。被害構造種別間でヒストグラムを比較すると、盛土については、ピークが 20～40 日にあり、最短 6 日で復旧している事例がある一方、高架橋では明瞭なピークがなく、最短でも復旧までに 34 日を要している。また、盛土と高架橋とで平均運休期間を比較すると、盛土が 58.3 日であるのに対して、高架橋が 86.6 日であるように 30 日近く違いがある。土構造物は他の構造種別と比べ復旧が容易であるとの指摘 [17]があるが、ヒストグラムの形状や最短運休期間、平均運休期間の違いにもその特徴が表れているものと考えられる。なお、復旧が容易とされる盛土においても、運休期間が最長で 156 日間に及ぶ事例も含まれている。たとえば阪急神戸線岡本～御影間や山陽電鉄本線須磨浦公園～滝の茶屋間などであるが、これらは、被害箇所の近隣に住宅や他社路線があり、復旧作業のためのスペースが限られ、復旧に時間を要したと報告されている [3]。他の 3 地震の土構造物の重度被害の発生位置は、被害箇所は住宅密集地ではなく、1995 年兵庫県南部地震の例と比較して被害位置の周辺環境の条件が良かったものと考えられる。

以上より、重度被害においては、被害構造種別が異なることにより（土構造物／その他）、運休期間の傾向が異なる可能性があると考えられる。

4.3.2. 被害程度と運休期間の関係

図 4.9 に軽度被害と重度被害で色分けした各地震の運休期間ヒストグラムを示す。軽度被害の最長運休期間で比較すると、4 地震いずれも 40 日未満であるが、重度被害は運休期間 40 日を超えるデータが複数見られる。このように、重度被害が発生した区間では、軽度被害のみが発生した区間よりも運休期間が長期にわたる傾向が明らかである。

本研究では、3.2.2 節で述べたように、文献だけから被害程度を判断していく際に、被害形態が具体的に記述されていないもの（橋りょう被害とだけ書かれているもの等）も可能な限り被害数として計上しようとしたため、被害程度を軽度・重度の 2 段階としたが、被害程度をさらに細分化することができれば、被害程度と運休期間の関係をより詳細に表すことができると想定される。そこで、被害程度を細分化する代わりに、震度階が高いほど程度の重い被害が発生すると想定し、同じ被害程度の中で震度階と運休期間の関係について検討することとした。

まず、軽度被害について、震度階と各区間の運休期間の関係をあらわす散布図を図 4.10 に示す。軽度被害については、震度階が高くなるにつれ、運休期間が長期化する傾向が明らかである。これは先述したとおり、同じ軽度被害の中では震度階が高いほど重度被害に近い被害が発生しているためと推察される。なお、地震間で比較すると、2011 東北が他の 3 地震と比較して全体的に運休期間が長期化する傾向が見られるが、これは 4.4.1. で議論する。

重度被害について、震度階と各区間の運休期間の関係をあらわす散布図を図 4.11 に示す。重度被害については、震度階と運休期間の間に相関関係は見られなかった。重度被害は、盛土の崩壊や落橋、高架橋の倒壊などの「構造全体に影響が及び修復に相当な時間を要すると思われる被害形態」であり、既に被害程度としては最大級の被害であるため、震度階が高くなってもそれ以上運休期間が長期化することはないものと推察される。

なお、図 4.10、図 4.11 は評価軸として用いる震度階として「区間平均震度階」「区間最大震度階」の両方を使用したが、どちらを横軸にした場合でも顕著な違いは見られなかった。区間平均震度階は、各区間の長さにも影響を受ける指標であるため、以下の検討では地震動強さ以外の要素の影響を受けない区間最大震度階を用いることとする。

4.3.3. 被害件数と運休期間の関係

同じ被害程度であっても、被害件数が多いほど復旧に要する手間がかかると想定されることから、被害件数についても運休期間に影響を及ぼすものと想定される。そこで、運休期間と被害件数の関係について検討することとした。

まず、軽度被害における被害件数と運休期間の関係をあらわす散布図を図 4.12 に示す。表 4.2～4.5 では、高架橋の被害は延長 0.1km 単位で表現しているが、ここでは区間内で 0.1km 以上被害があった場合に被害 1 件として換算している。図 4.12 からは、4 地震に共通する明瞭な相関関係は見られなかった。

重度被害における被害件数と運休期間の関係をあらわす散布図を図 4.13 に示す。重度被害については、4.3 節で示したように、土構造物被害区間とその他の構造種別の被害区間とで運休期間に違いがあることが分かっているので、図 4.13 においても、土構造物被害とその他構造物被害とでプロットを色分けしている。高架橋の被害件数の表し方は図 4.12 と同様である。図 4.13 からは、4 地震に共通する明瞭な相関関係は見られなかった。

4.4. 構造物被害以外の要因と運休期間の関係の検討

4.4.1 対象地震間の運休期間の比較

図 4.9 に戻り、地震の間でヒストグラムの特徴を比較する。4 地震の中では、1995 兵庫での運休期間が長く、最長 208 日を要した区間をはじめ 100 日を超える長期間運休となった区間が他の地震よりも多いことが分かる。2004 中越、2007 中越沖は 60～70 日で全線の運転が再開されており、2011 東北については、運転再開までに 110～130 日を要した区間が 2 区間だけあるが、その他は重度被害も含め 40 日で運転が再開されていることが分かる。4 地震の最長運休期間を比較すると、まず、1995 兵庫の運休期間の長さが目立つ。重度被害の運休期間の違いが目立つ。これは 1995 兵庫では高架橋や地下トンネルでの重度被害が発生したのに対して、他の 3 地震での重度被害はほとんどが土構造物での被害であったことが関連していると考えられ、地震の違いではなく被害構造種別の違いの現れであると考えられる。

一方、軽度被害については、4 地震いずれも 40 日以内で復旧している。ヒストグラムのピークに注目すると、4 地震いずれも 10 日以内がピークとなるものの、2011 東北については、20～30 日にも小さなピークがある形となっている。また、4.3.2 で述べたように、2011 東北が他の 3 地震と比較して全体的に運休期間が長期化する傾向が見られる。このように、2011 東北と他の 3 地震では運休期間の特徴が異なっている。

図 4.6 を改めて見返すと、2011 東北において 20～30 日で運転再開している区間は、宮城・福島・茨城各県内に集中していることが分かる。これら地域では、地域内のほぼ全路線が被災し、調査対象箇所が膨大であったことに加え、地震直後の交通渋滞やガソリン不足の影響により調査が思うように進まなかった、と報告 [2]されている。

以上より、軽度被害に関しては、同じ被害程度の中でも、1995 兵庫・2004 中越・2007 中越沖と、2011 東北とでは、地震直後の被害地域の道路事情・燃料事情等の状況が異なったこと、すなわち、社会全体の機能性の低下の度合いの違いにより、鉄道の運休期間にも差が生じたものと考えられる。

4.4.2. 路線の重要度と運休期間の関係の検討

まず、本検討で用いた運休期間データについて、輸送密度を横軸に取り、縦軸に区間数を取ったヒストグラムを図 4.14 に示す。1995 兵庫については、輸送密度が高い区間、すなわち重要度が高い区間が大半を占めているが、これは、被害区間がほぼ全て大都市圏内にあったためであると考えられる。一方、他の 3 地震は 1995 兵庫と比較して輸送密度が高い区間、すなわち重要度が高い区間が少なかったが、これは、被害区間の多くが新潟・北関東・東北の地方部にあったためであると考えられる。

軽度被害について、輸送密度と運休期間の関係を示す散布図を図 4.15 に示す。一見、輸送密度が高いほど運休期間が短いように見えるが、地震の違いに着目すると、運休期間が長いデータは 2011 東北に多く、運休期間が短いデータは他の 3 地震に多くあり、輸送密度の違いよりも地震の違いのほうが強く現れていると考えられる。また、重度被害について、輸送密度と運休期間の関係を示す散布図を図 4.16 に示す。輸送密度の大きさと運休期間の間に相関関係は見られない。

以上のとおり、本研究でのデータだけでは、路線の重要度と運休期間の間に明瞭な相関関係を見出すことはできなかった。広域鉄道網全体を俯瞰的に見た場合には、路線の重要度が運休期間に及ぼす影響力は他の要因と比較して弱いものと推察される。

4.5. 各種要因と運休期間の関係

ここまでの検討結果をまとめると下記の通りとなる。

- ・被害構造種別については、軽度被害では構造種別間で大きな違いは見られないが、重度被害では、土構造物とその他とで運休期間に違いが出る可能性がある。
- ・被害程度については、軽度被害と重度被害とで、ヒストグラムのピークの位置と広がりにより明瞭な違いが見られた。また、軽度被害については、同じ被害程度の中でも、震度階が高いほど運休期間が長期化する傾向が見られた。
- ・地震間で比較すると、2011 年東北地方太平洋沖地震の軽度被害については、同じ震度階でも他の 3 地震と比較して運休期間が長期化する傾向が見られた。
- ・被害件数と輸送密度については、運休期間の間との間に明瞭な相関関係は見られなかった。

さらに、被害程度を基準に整理すると下記の通りとなる。

- ・軽度被害が発生した区間では、被害構造種別では違いはないものの、震度階が高いほど運休期間が長期化し、2011 年東北地方太平洋沖地震の場合にも、1995 年兵庫県南部地震などと比較して運休期間が長期化する。
- ・重度被害が発生した区間では、被害構造種別が土構造物であるか否かで違いがあり、震度階や地震の違いは支配的ではない。

この知見をもとに、各種要因と鉄道の運休期間との関係を図 4.17 のような樹形図にまとめた。樹形図の末端を 1 つの区分とすると、10 区分に整理することができる。区分ごとに、地震発生からの時間経過と鉄道の運転再開の関係を示すモデル（運休期間推計モデル）を図 4.18 のように作成した。縦軸は区分間で比較しやすいように、各区分の総区間数で除して正規化した。各区分の運休期間の最小値、50 パーセンタイル値（中央値）、85 パーセンタイル値（ $+1\sigma$ に相当する）、最大値を表 4.8 に示す。なお、運休タイプ L4（軽度被害・2011 東北・震度 7）は該当する運休期間データがなかったため、モデルを作成できなかった。

この運休期間推計モデルを用いる際には、50 パーセンタイル値を適用することで、平均的な運休期間を推計することができ、85 パーセンタイル値を適用することで、長期化することを想定した運休期間を推計することができる。

4.6. まとめ

本章では、地震による鉄道の運休期間の推計方法を検討する際の基礎的知見を得ることを目的として、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震の 4 地震の鉄道の運休事例をもとに、地震による鉄道の運休期間と、各種要因として、被害程度、被害件数、被害構造種別、地震規模、路線の重要度（輸送密度）との関係について検討した。

その結果、軽度被害が発生した区間の運休期間は、地震規模と震度階によって傾向が異なること、および、重度被害が発生した区間の運休期間は被害構造種別が土構造物とその他とで傾向が異なることを示した。この知見をもとに、各種要因と鉄道の運休期間との関係について、被害程度・被害構造種別・地震規模・震度階に応じて 10 区分の運休期間推計モデルを作成した。

【4 章の参考文献】

- [1] 日本海中部地震調査研究グループ：1983 年日本海中部地震調査報告,鉄道技術研究資料, Vol.41, No.9, 1984.
- [2] 東日本旅客鉄道株式会社 水戸支社：3.11 東日本大震災 震災対応記録誌, 2013.
- [3] 阪神・淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会：よみがえる鉄路 阪神・淡路大震災鉄道復興の記録,山海堂, 1996.
- [4] 東日本旅客鉄道株式会社：新潟県中越地震震災復旧記録誌,2005.
- [5] 東日本旅客鉄道株式会社：SED 第 29 号 小特集 新潟県中越沖地震, STRUCTURAL ENGINEERING DATA, 2007.
- [6] 日本鉄道旅行地図帳 東日本大震災の記録, 新潮社.
- [7] 気象庁：震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.
- [8] 東日本旅客鉄道株式会社：路線別ご利用状況,
http://www.jreast.co.jp/rosen_avr/pdf/2009_2013.pdf.
- [9] 国土交通省鉄道局：平成 6 年版 都市交通年報.
- [10] 国土交通省鉄道局：平成 7 年版 都市交通年報.
- [11] 東日本旅客鉄道：路線別ご利用状況(2004～2008 年度)
http://www.jreast.co.jp/rosen_avr/pdf/2004_2008.pdf.
- [12] 西日本旅客鉄道株式会社：データで見る JR 西日本,
https://www.westjr.co.jp/company/info/issue/data/pdf/data2014_08.pdf.
- [13] 平成 22 年度版 鉄道統計年報
- [14] 平成 23 年度版 都市交通年報
- [15] 東日本旅客鉄道株式会社：SED 特集「東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物」, STRUCTURAL ENGINEERING DATA No.37, 2011.
- [16] 秋山敬介：民鉄・公営事業者の被害状況,日本鉄道施設協会誌 2011 年 10 月号, 2011.
- [17] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物）,2013.
- [18] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計),2012.

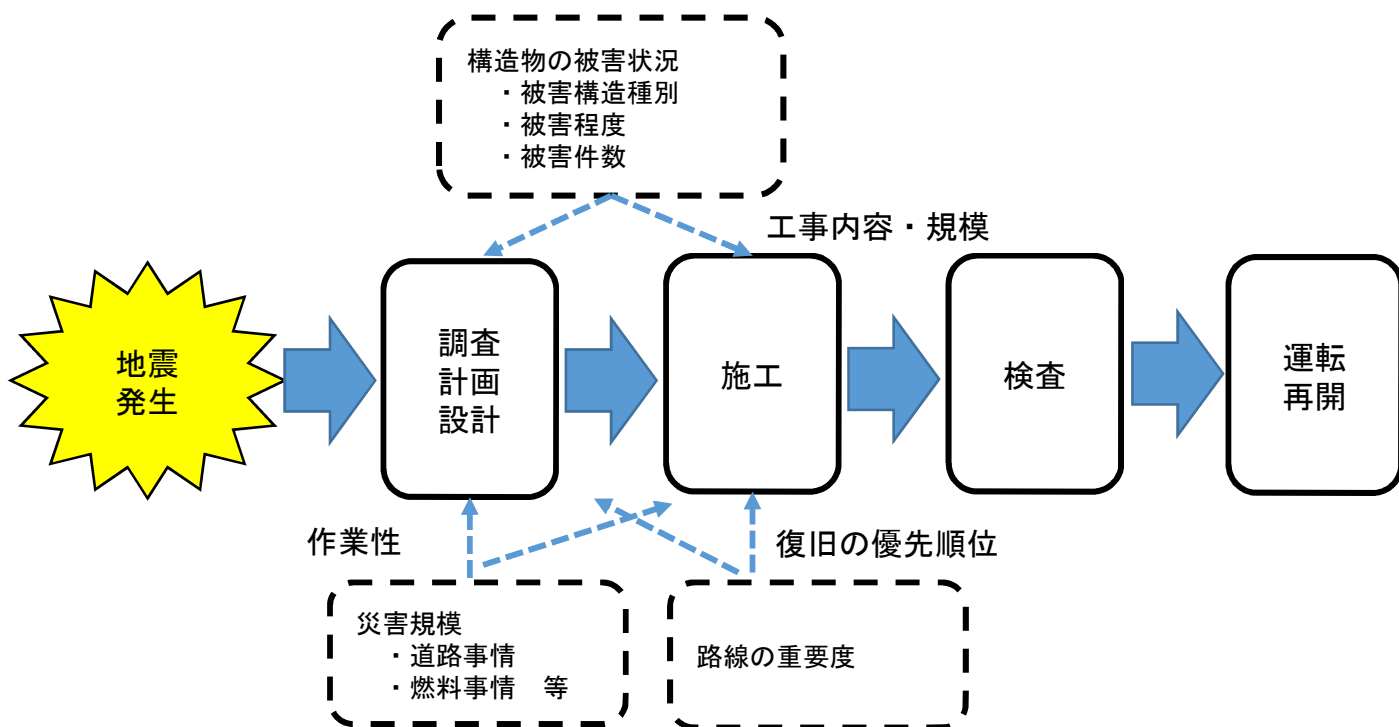


図4.1 地震発生から運転再開までの過程と運休期間に影響を及ぼす要因

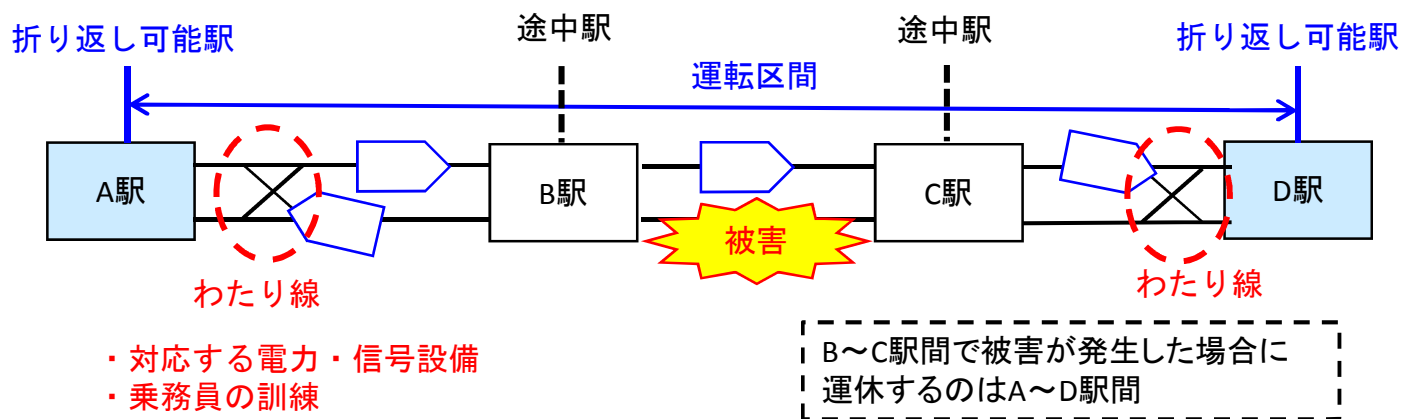


図4.2 運転区間の概要

表4.1 運休期間の平均値が長い構造種別順位

(1) 軽度被害

順位	構造種別	区間数	最小値	平均値	最大値
1	地下トンネル	3	15	26.3	34
2	橋りょう	3	6	17	23
3	素地・低盛土	42	1	12.2	37
4	切土	3	3	10.7	21
5	山岳トンネル	4	1	8.5	20
6	盛土	8	1	4.8	20
7	高架橋	10	1	3.9	27

(2) 重度被害

順位	構造種別	区間数	最小値	平均値	最大値
1	地下トンネル	1	208	208	208
2	高架橋	5	36	85	146
3	盛土	19	6	58	150
4	橋りょう	1	35	35	35
5	切土	2	14	23.5	37
-	素地・低盛土	0	-	-	-
-	山岳トンネル	0	-	-	-

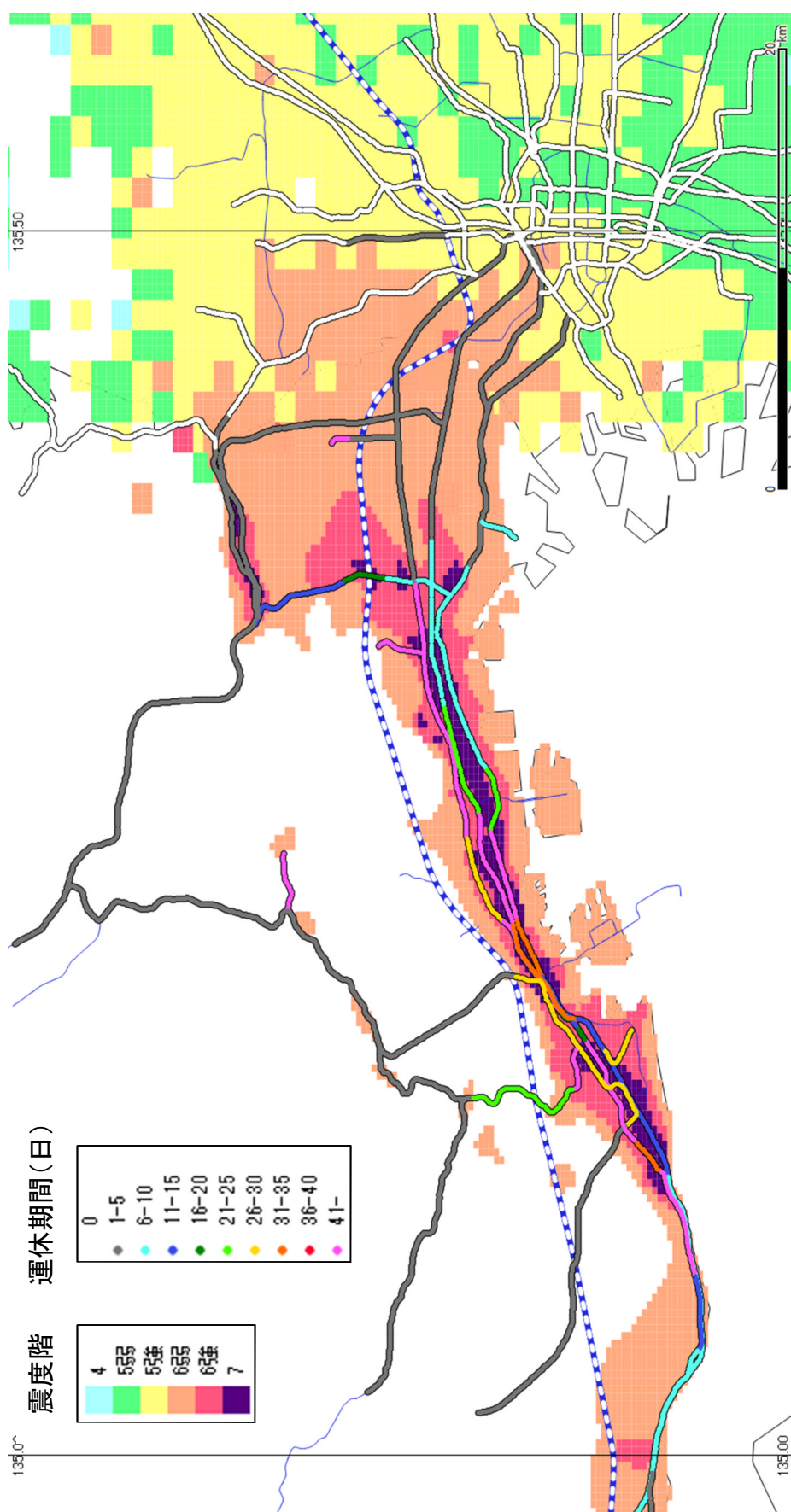


図4.3 1995年兵庫県南部地震時の各区間の運休期間

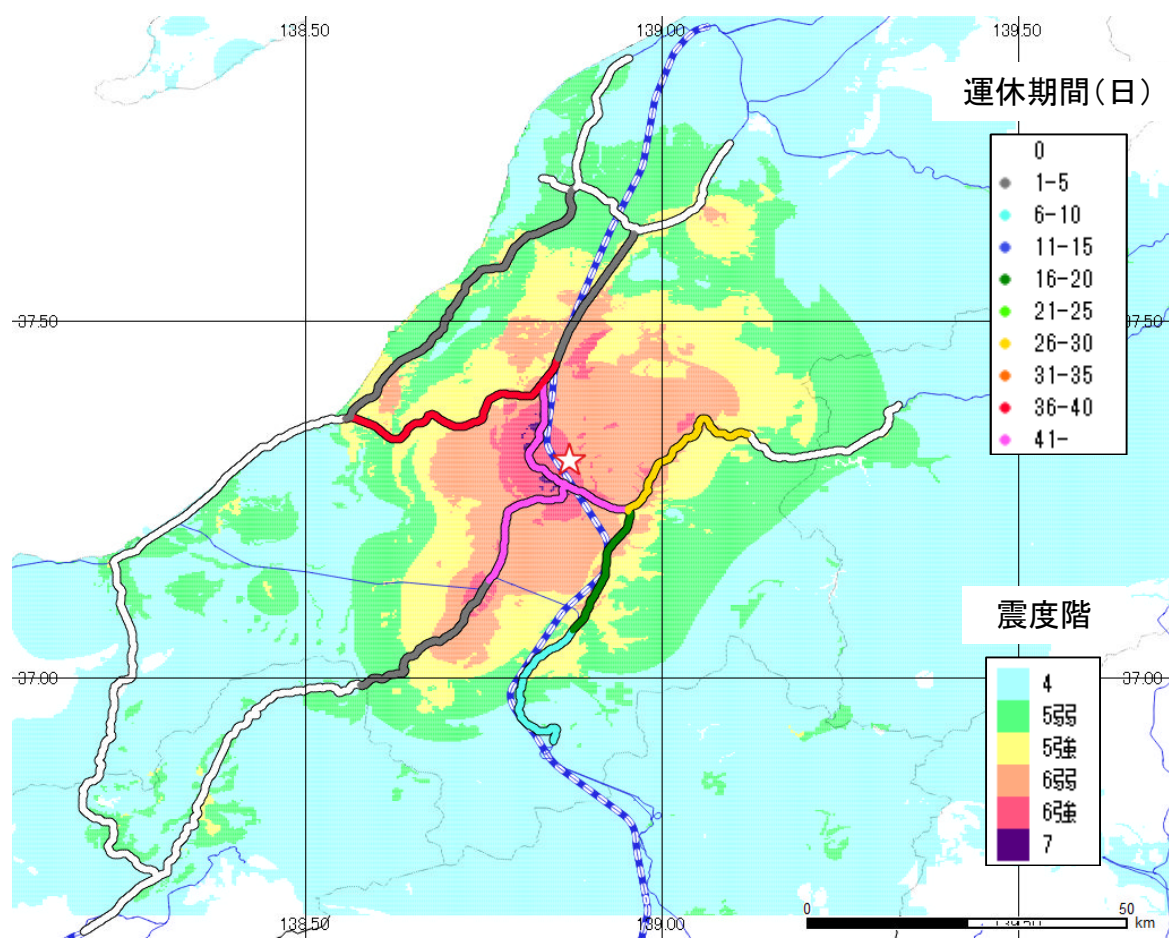


図4.4 2004年新潟県中越地震時の各区間の運休期間

表4.3 2004年新潟県中越地震の運休期間データ

No.	事業者	路線	自駅	至駅	運転区間	輸送密度 (人キロ/日)	キロ程		延長 (km)	区間最大 計測震度	区間最大 震度階	運休期間 (日)	被害 程度	被害構造 種別	被害程度ごと・構造種別ごとの被害件数(件) ※高架橋は被害延長(km)												地下T 重量計	地下T 軽度	地下T 重度	
							自	至							素地 軽	素地 重	盛土 軽	盛土 重	切土 軽	切土 重	橋梁 軽	橋梁 重	高架 軽	高架 重	山岳T 軽	山岳T 重				
1	JR東日本	上越線	柏崎	吉田	柏崎～吉田	6,346	0	49.8	49.6	5.54	6弱	3	軽度	素地	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
2	JR東日本	上越線	越後湯沢	六日町	越後湯沢～六日町	4,626	169	186.5	17.5	5.22	5強	9	軽度	素地	3	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
3	JR東日本	上越線	六日町	小出	六日町～小出	4,626	207	20.4	5.87	6弱	7	20	軽度	山岳T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
4	JR東日本	上越線	小出	宮内	小出～宮内	4,626	207.1	237.5	30.3	6.69	7	64	重度	山岳T※	1	2	11	9	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	20
5	JR東日本	信越線	柏崎	長岡	柏崎～長岡	6,185	36.4	73	3.66	6.14	6強	36	重度	盛土	2	0	6	4	0	1	3	0	0	0	3	0	0	0	14	5
6	JR東日本	信越線	長岡	東三条	長岡～東三条	15,698	73.1	96.2	2.31	5.78	6弱	3	軽度	素地	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
7	JR東日本	只見線	大白川	小出	大白川～小出	400	109.2	135.2	2.6	6.16	6強	27	軽度	橋りょう	7	0	3	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	14	0
8	JR東日本	飯山線	森宮野原	十日町	森宮野原～十日町	820	49.7	75.3	25.6	6.15	6強	5	軽度	橋りょう	1	0	2	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	6	0
9	JR東日本	飯山線	越後川口	十日町	越後川口～十日町	820	75.4	96.6	21.2	6.56	7	64	重度	橋りょう	5	1	10	0	2	3	4	1	0	0	5	0	0	0	26	5

※ 2004年新潟県中越地震の小出～宮内間では、盛土などでも重度被害が発生していたが、表4.1で順位がつけられなかった、山岳トンネル被害の影響がもつとも顕著と判断し、被害構造種別を山岳トンネルとして分類した。

表4.4 2007年新潟県中越沖地震の運休期間データ

No.	事業者	路線	自駅	至駅	運転区間	輸送密度 (人キロ/日)	キロ程		延長 (km)	区間最大 計測震度	区間最大 震度階	運休期間 (日)	被害 程度	被害構造 種別	被害程度ごと・構造種別ごとの被害件数(件) ※高架橋は被害延長(km)												軽度 計	重度 計	
							自	至							素地 軽	素地 重	盛土 軽	盛土 重	切土 軽	切土 重	橋梁 軽	橋梁 重	高架 軽	高架 重	山岳T 軽	山岳T 重			地下T 軽
1	JR東日本	越後線	柏崎	吉田	柏崎～吉田	6,346	0	49.8	49.6	6.17	6強	25	重度	盛土	11	2	0	1	0	3	5	0	0	0	0	0	0	16	6
2	JR東日本	信越線	犀潟	柿崎	犀潟～柿崎	6,185	7.3	17.5	10.2	5.84	6弱	7	軽度	素地	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
3	JR東日本	信越線	柿崎	柏崎	柿崎～柏崎	6,185	17.6	36.3	18.7	6.08	6強	59	重度	盛土	8	0	5	2	0	2	2	0	0	4	0	0	0	19	4
4	JR東日本	信越線	柏崎	宮内	柏崎～宮内	6,185	36.4	70	33.6	6.13	6強	14	重度	切土	0	0	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	1

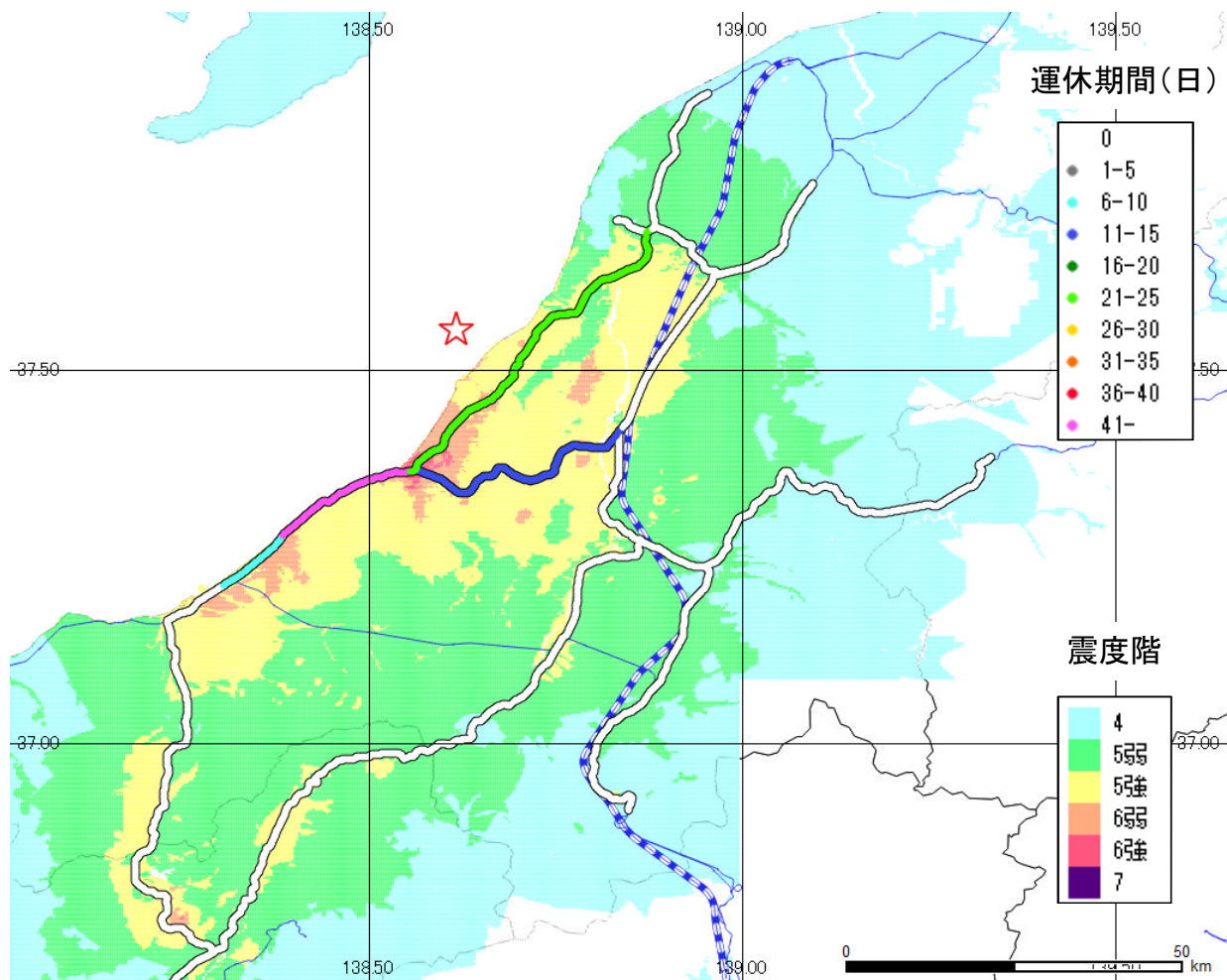


図4.5 2007年新潟県中越沖地震時の各区間の運休期間

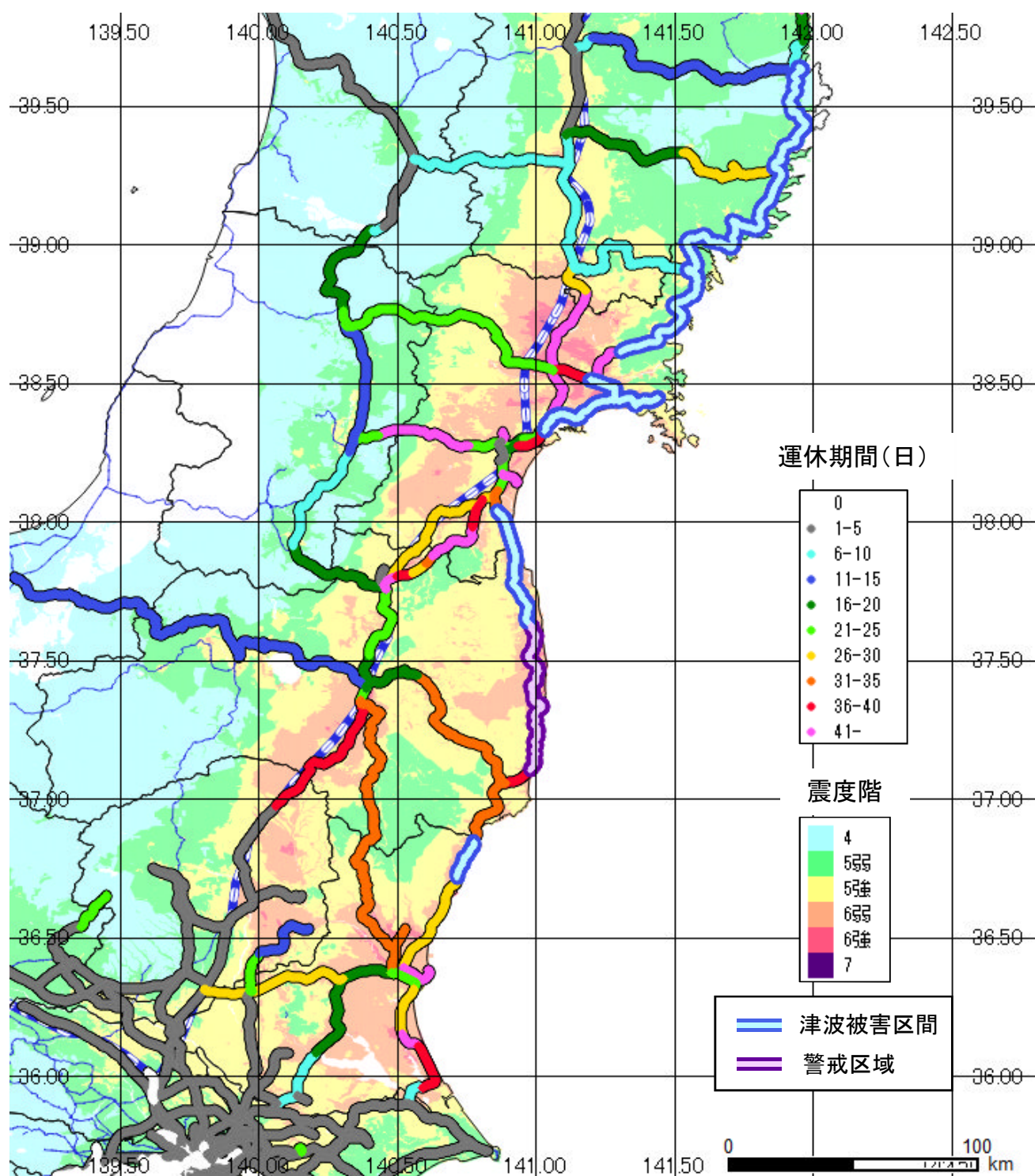


図4.6 2011年東北地方太平洋沖地震時の各被害区間の運休期間

表4.5 2011年東北地方太平洋沖地震の運休期間データ

[illegible]

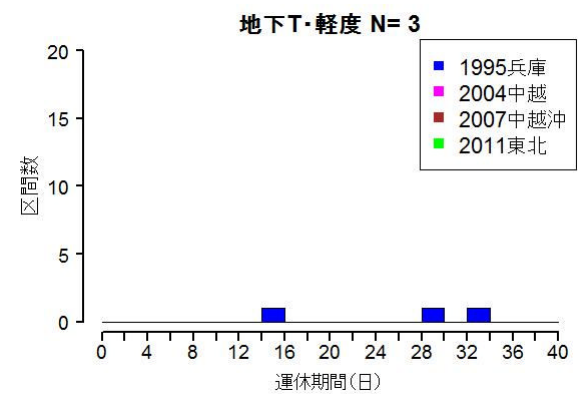
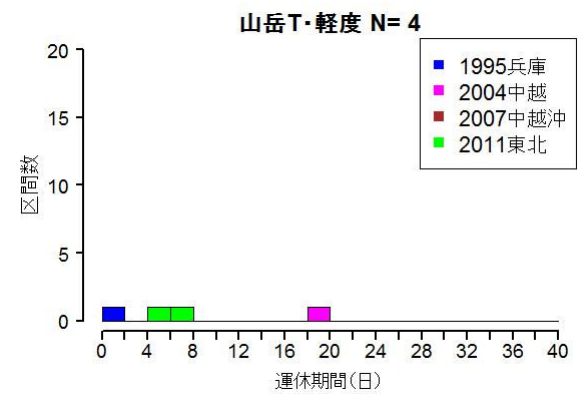
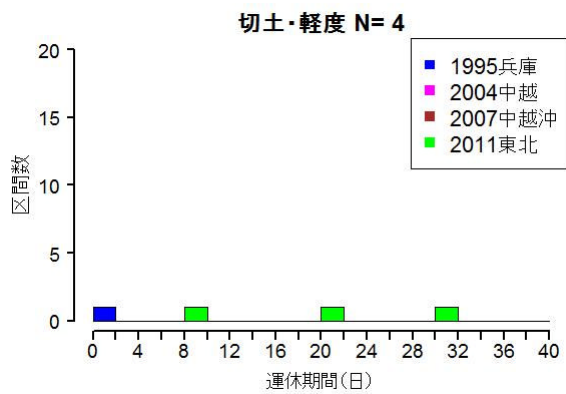
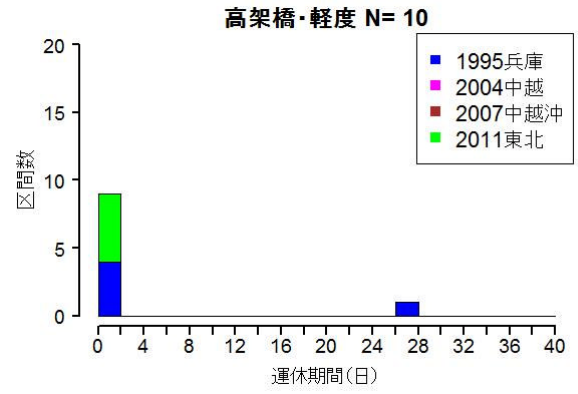
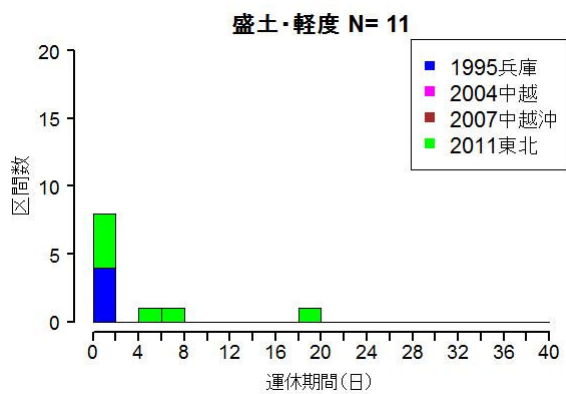
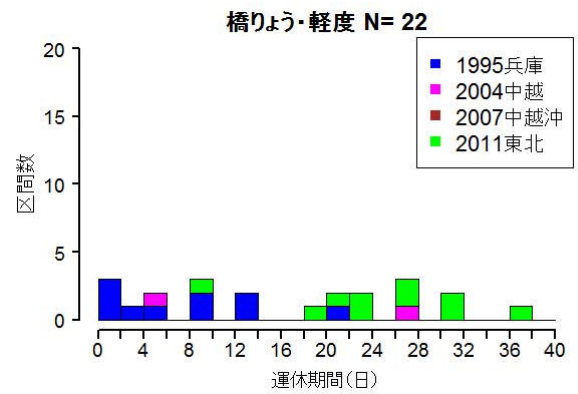
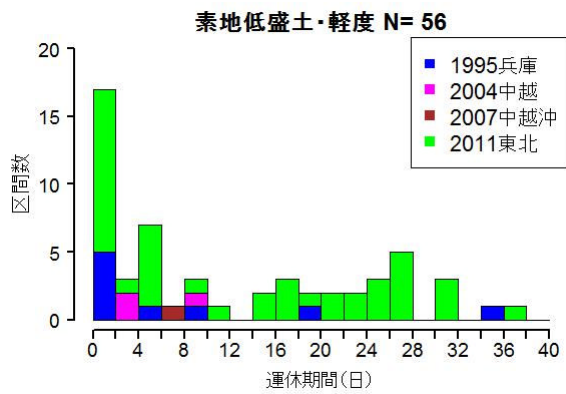


図4.7 軽度被害の構造種別ごとの運休期間ヒストグラム

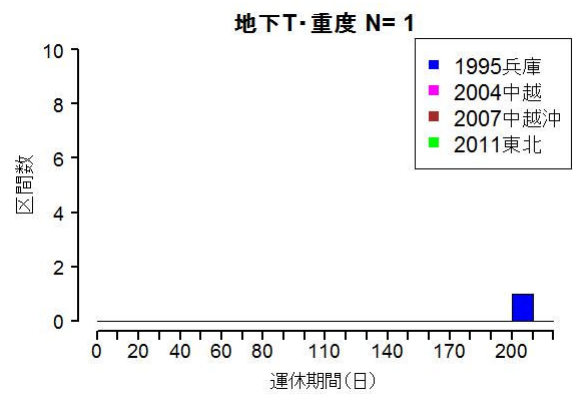
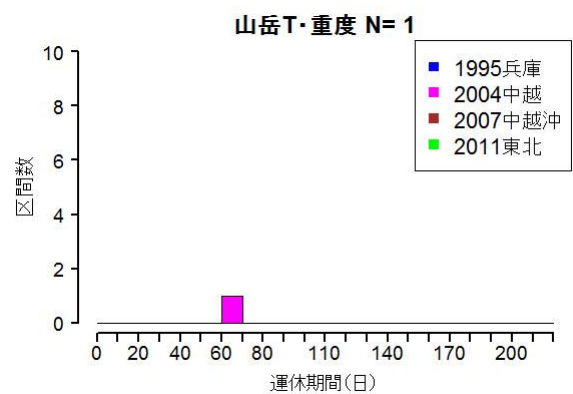
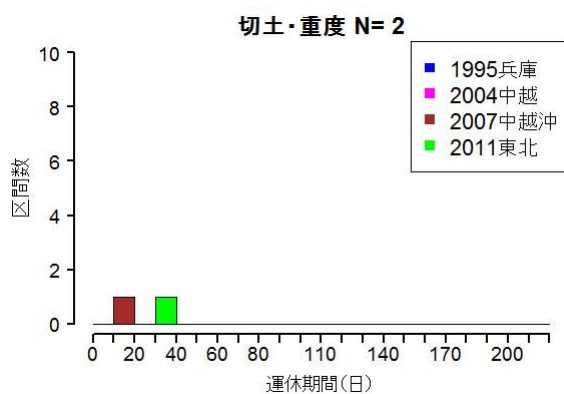
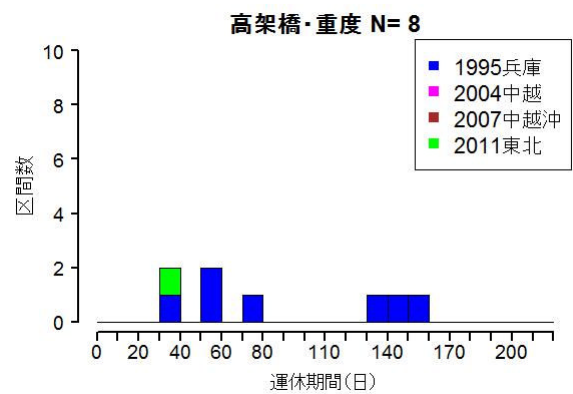
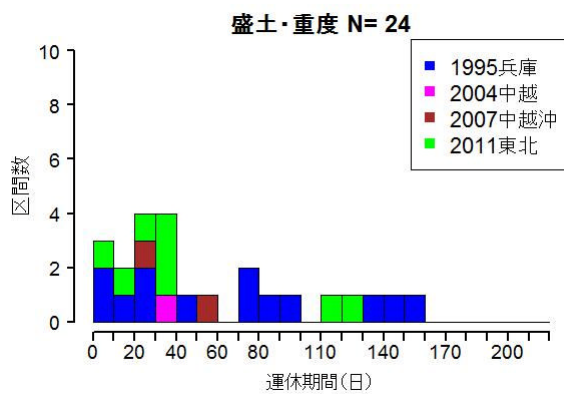
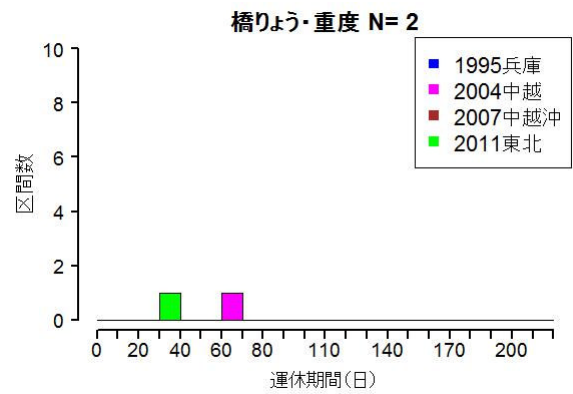
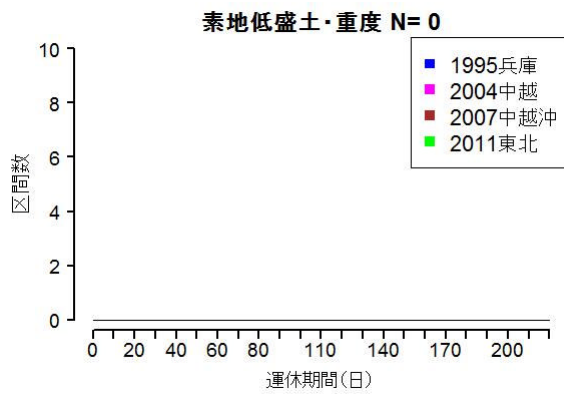


図4.8 重度被害の構造種別ごとの運休期間ヒストグラム

表4.6 被害構造種別ごとの運休期間
最小値・平均値・最大値(軽度被害)

被害構造種別	軽度被害			
	区間数	最小値	平均値	最大値
全体	110	1	12.0	37
素地・低盛土	56	1	12.6	37
盛土	11	1	3.8	20
切土	4	2	15.8	31
橋りょう	22	1	16.5	37
高架橋	10	1	3.9	27
山岳トンネル	4	1	8.5	4
地下トンネル	3	15	26.3	34

表4.7 被害構造種別ごとの運休期間
最小値・平均値・最大値(重度被害)

被害構造種別	重度被害			
	区間数	最小値	平均値	最大値
全体	38	6	66.2	208
素地・低盛土	0	-	-	-
盛土	24	6	58.3	156
切土	2	14	25.5	37
橋りょう	2	35	49.5	64
高架橋	8	34	86.6	160
山岳トンネル	1	64	64	64
地下トンネル	1	208	208	208

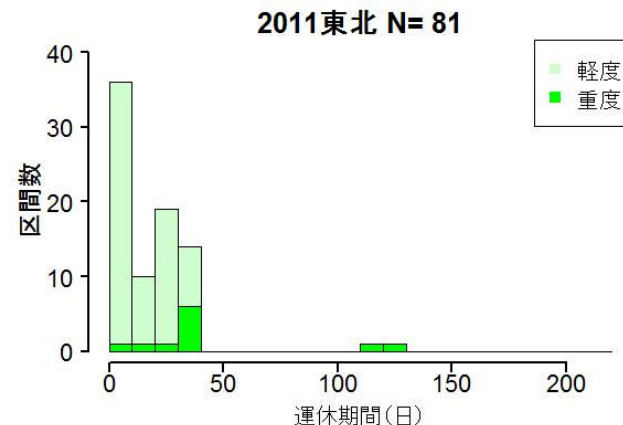
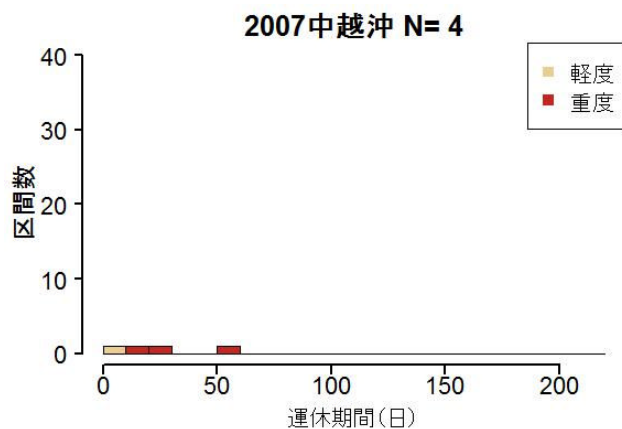
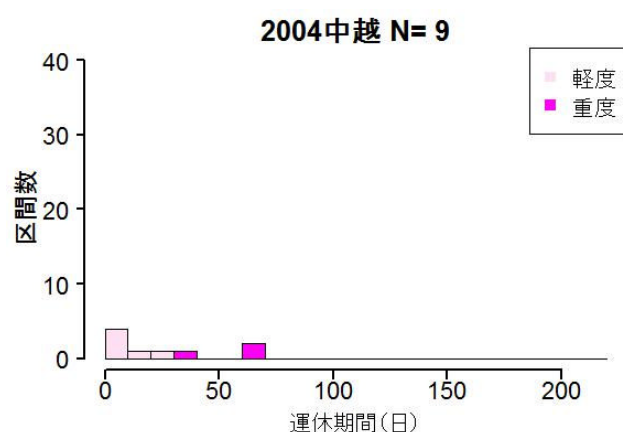
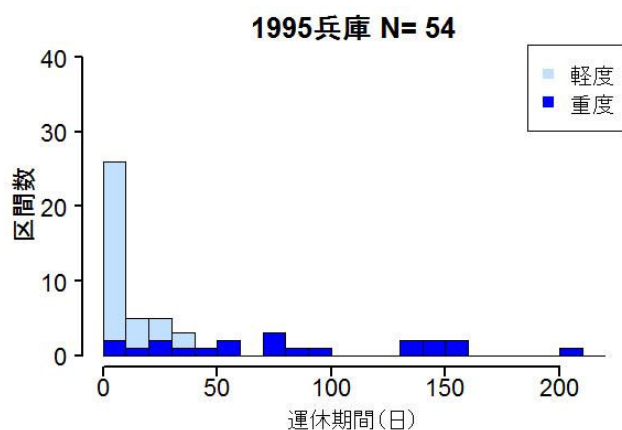


図4.9 被害程度で区分した運休期間ヒストグラム

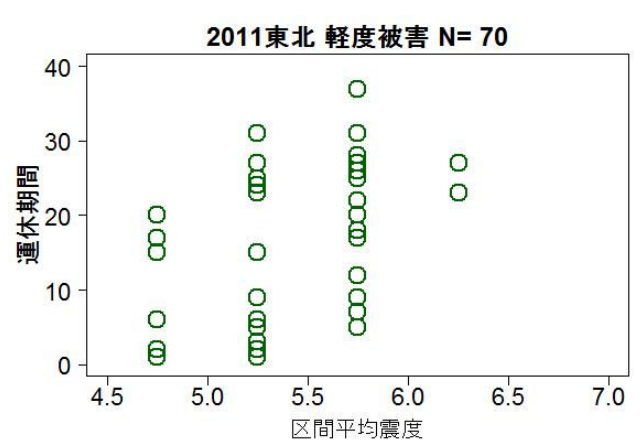
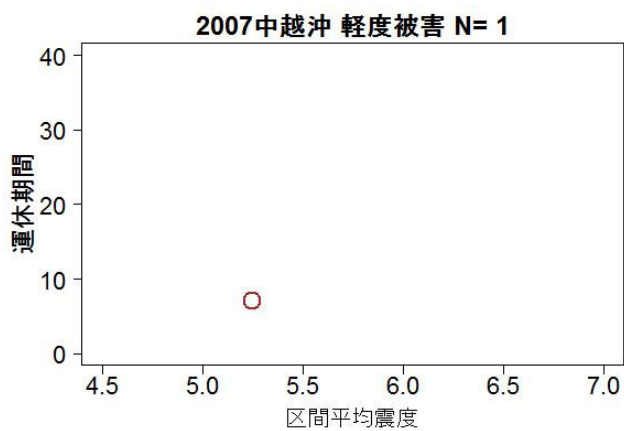
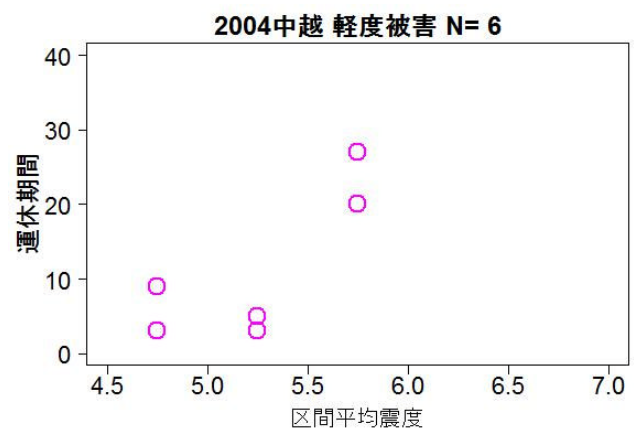
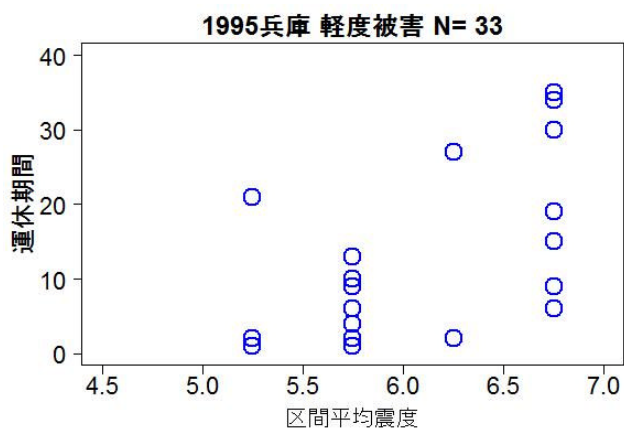
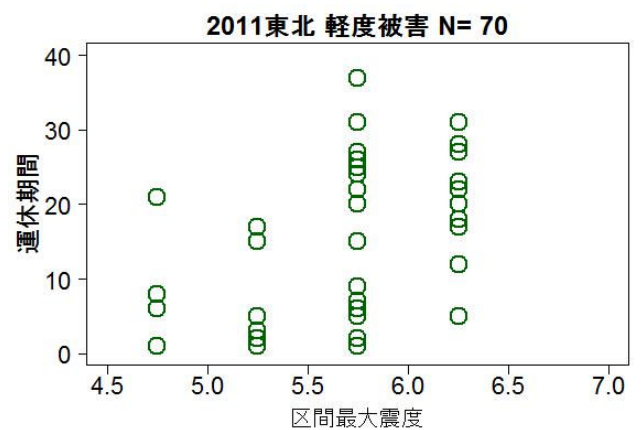
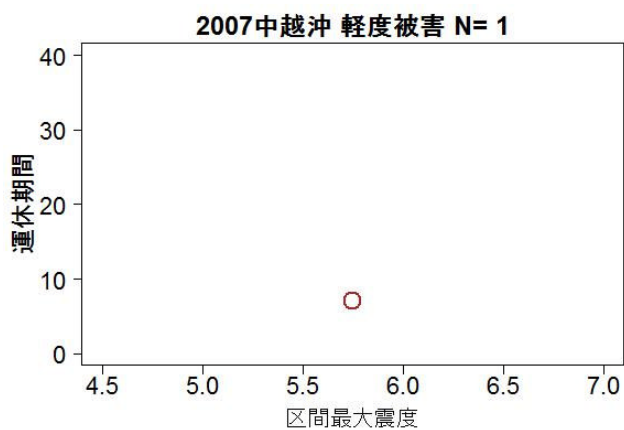
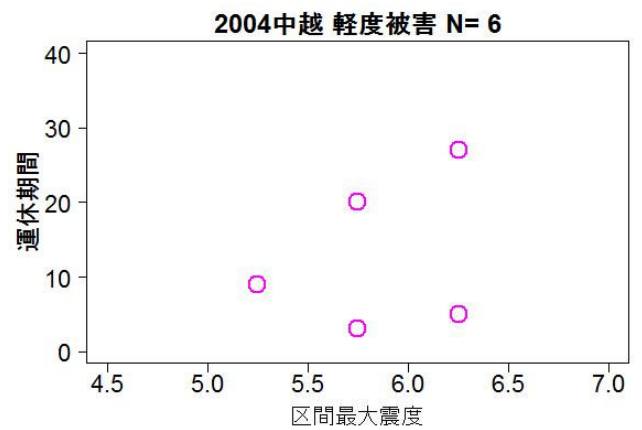
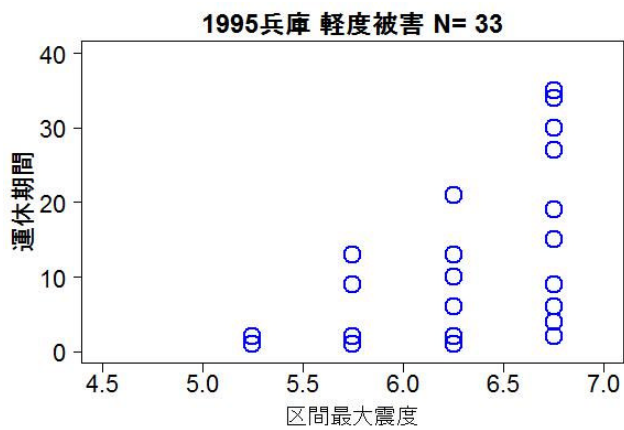


図4.10 震度階と運休期間の関係(軽度被害)

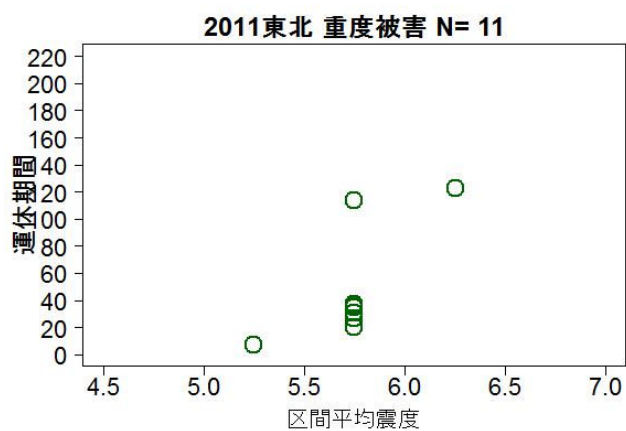
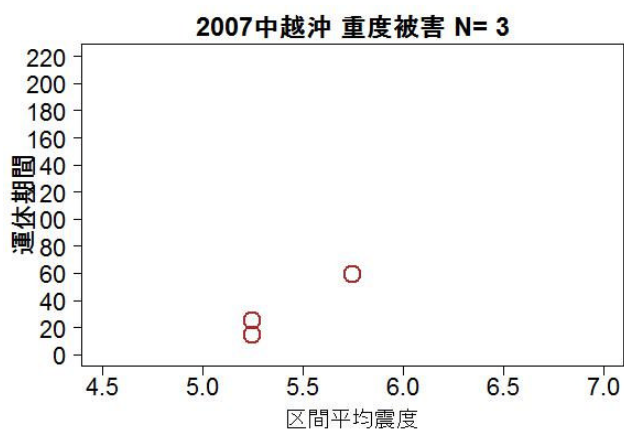
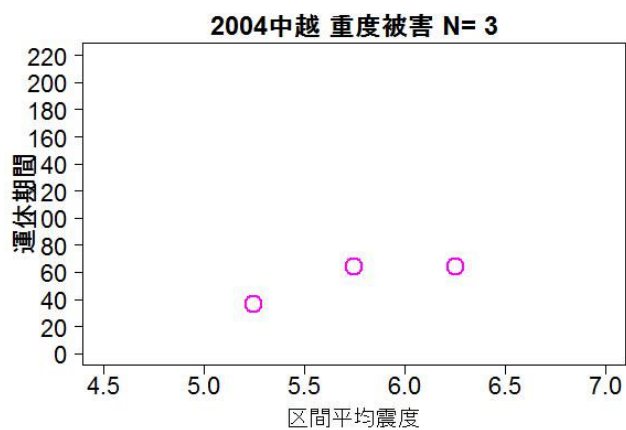
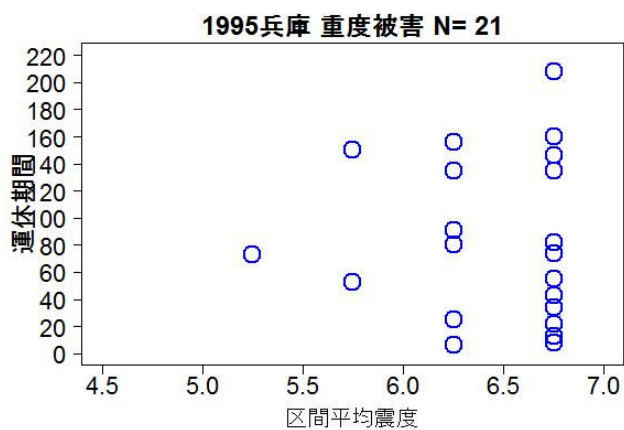
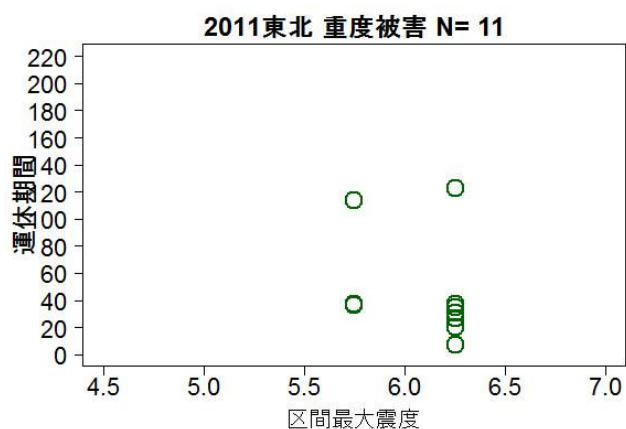
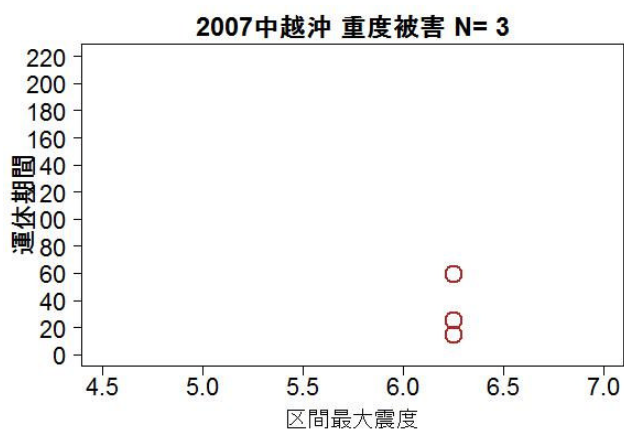
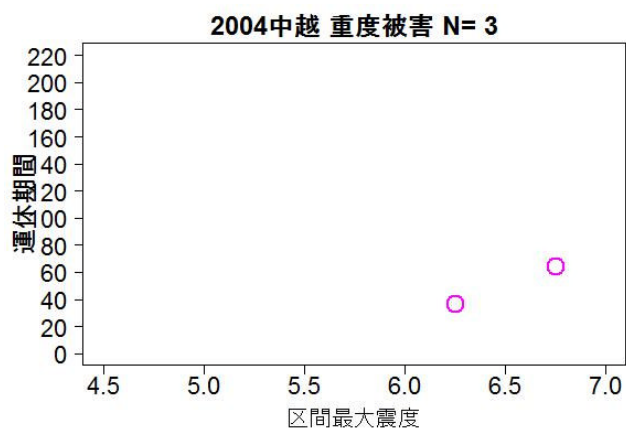
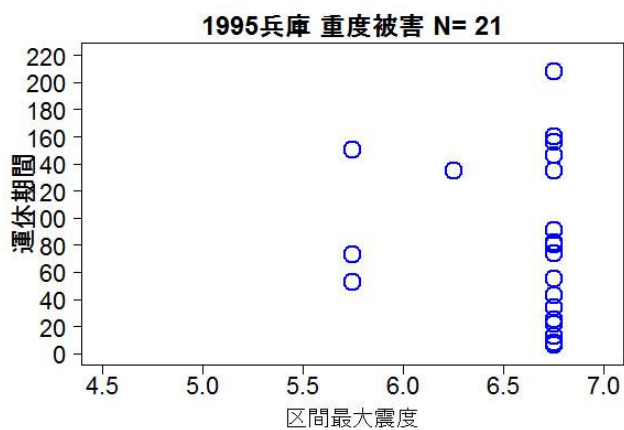


図4.11 震度階と運休期間の関係(重度被害)

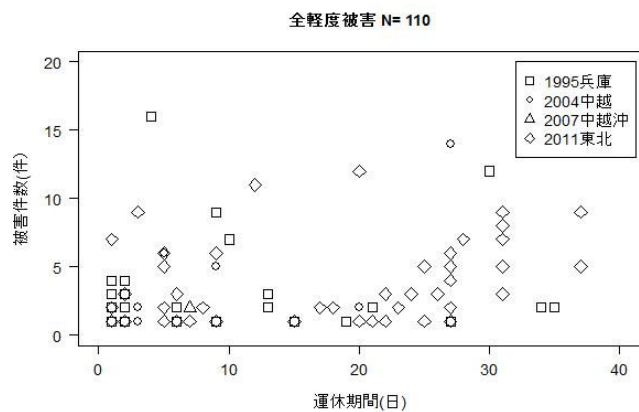


図4.12 軽度被害の件数と運休期間の関係散布図

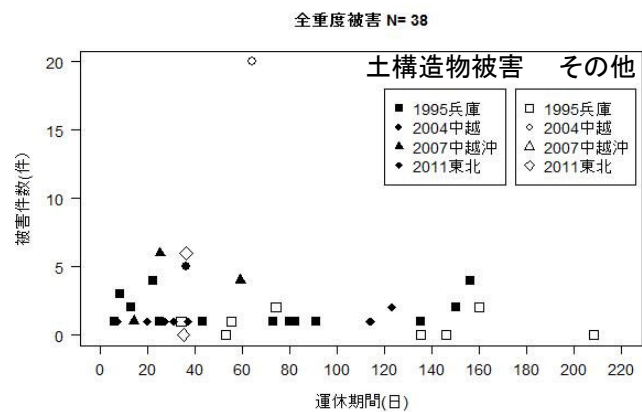


図4.13 重度被害の件数と運休期間の関係散布図

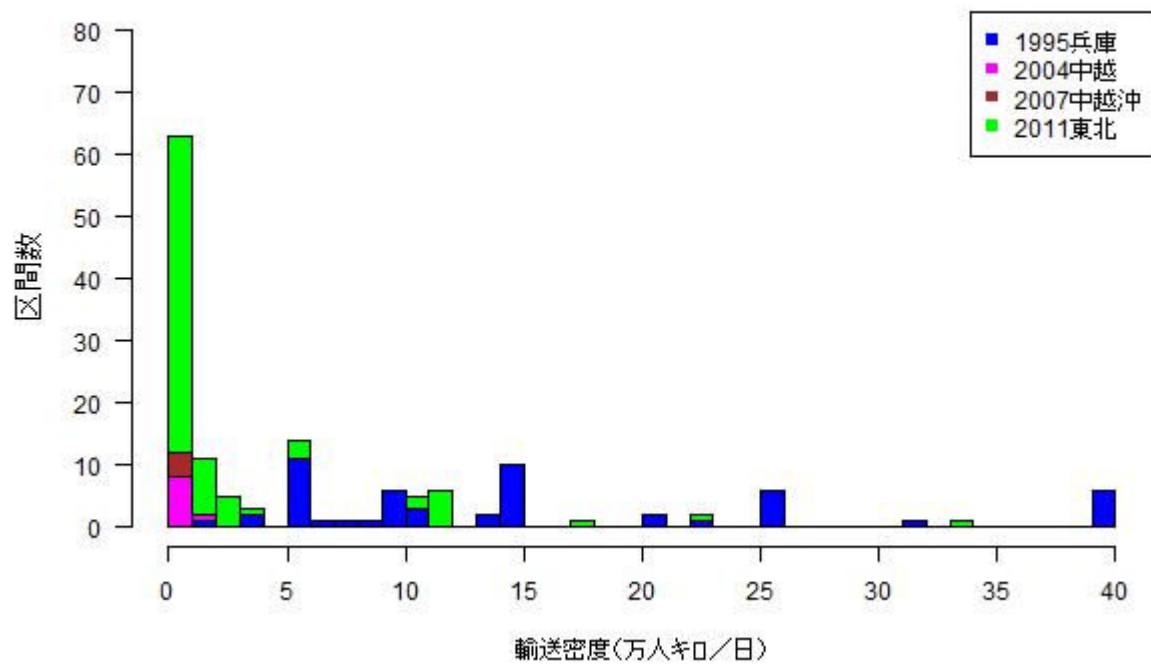


図4.14 輸送密度ヒストグラム

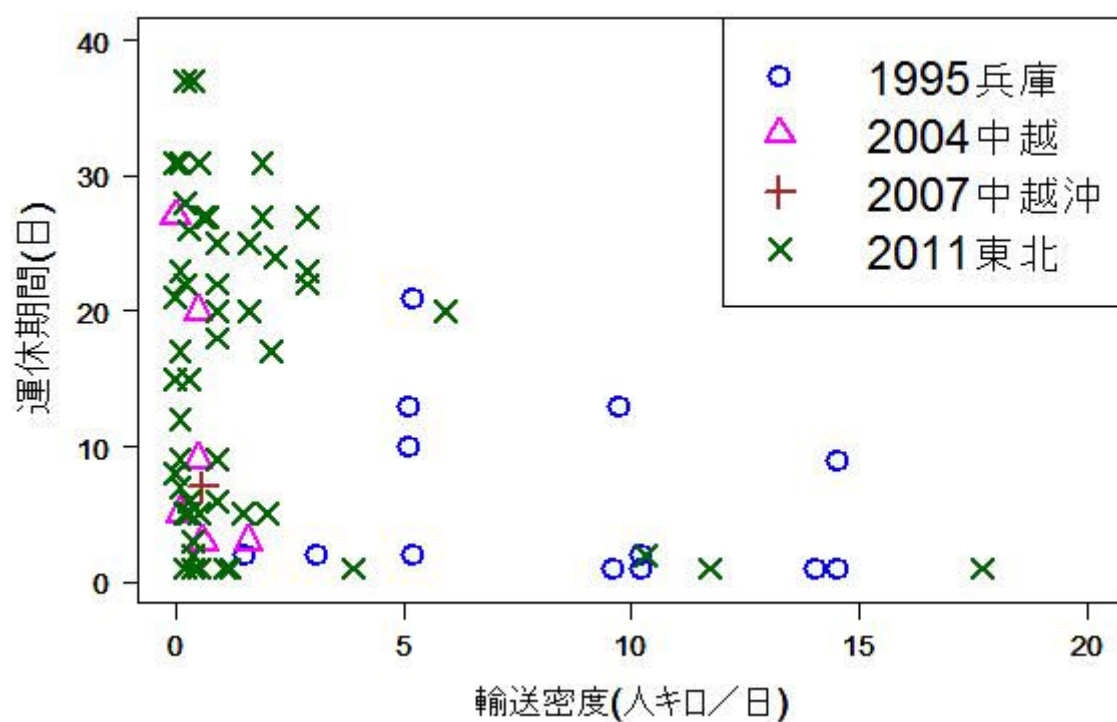


図4.15 軽度被害における輸送密度と運休期間の関係

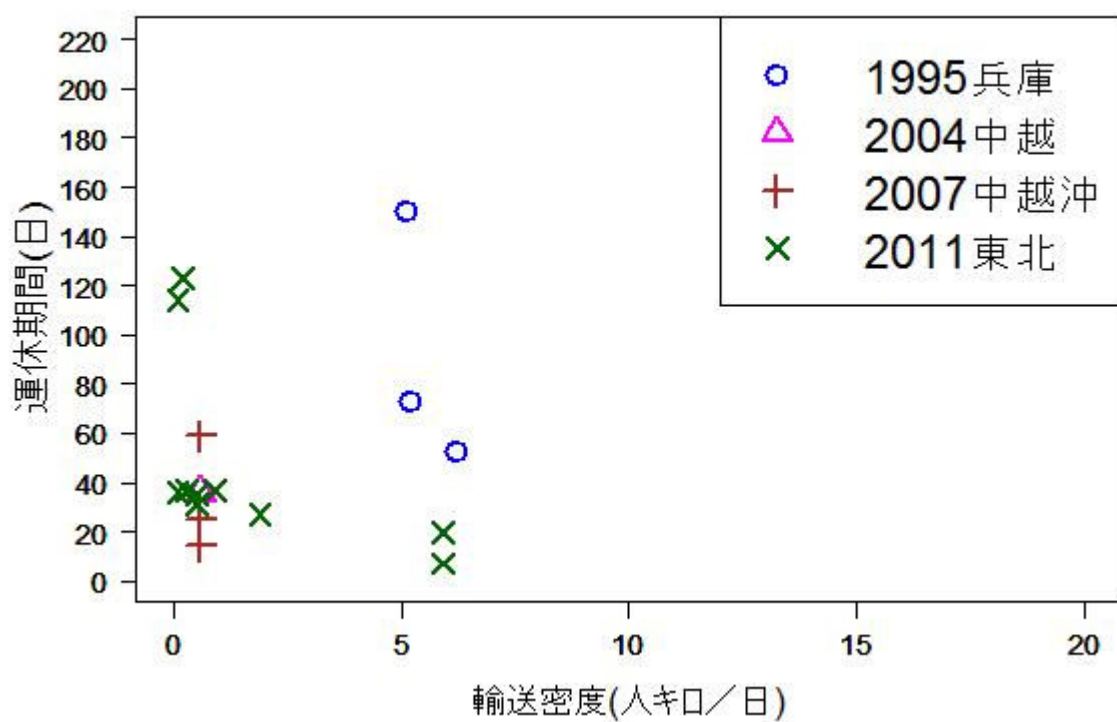


図4.16 重度被害における輸送密度と運休期間の関係

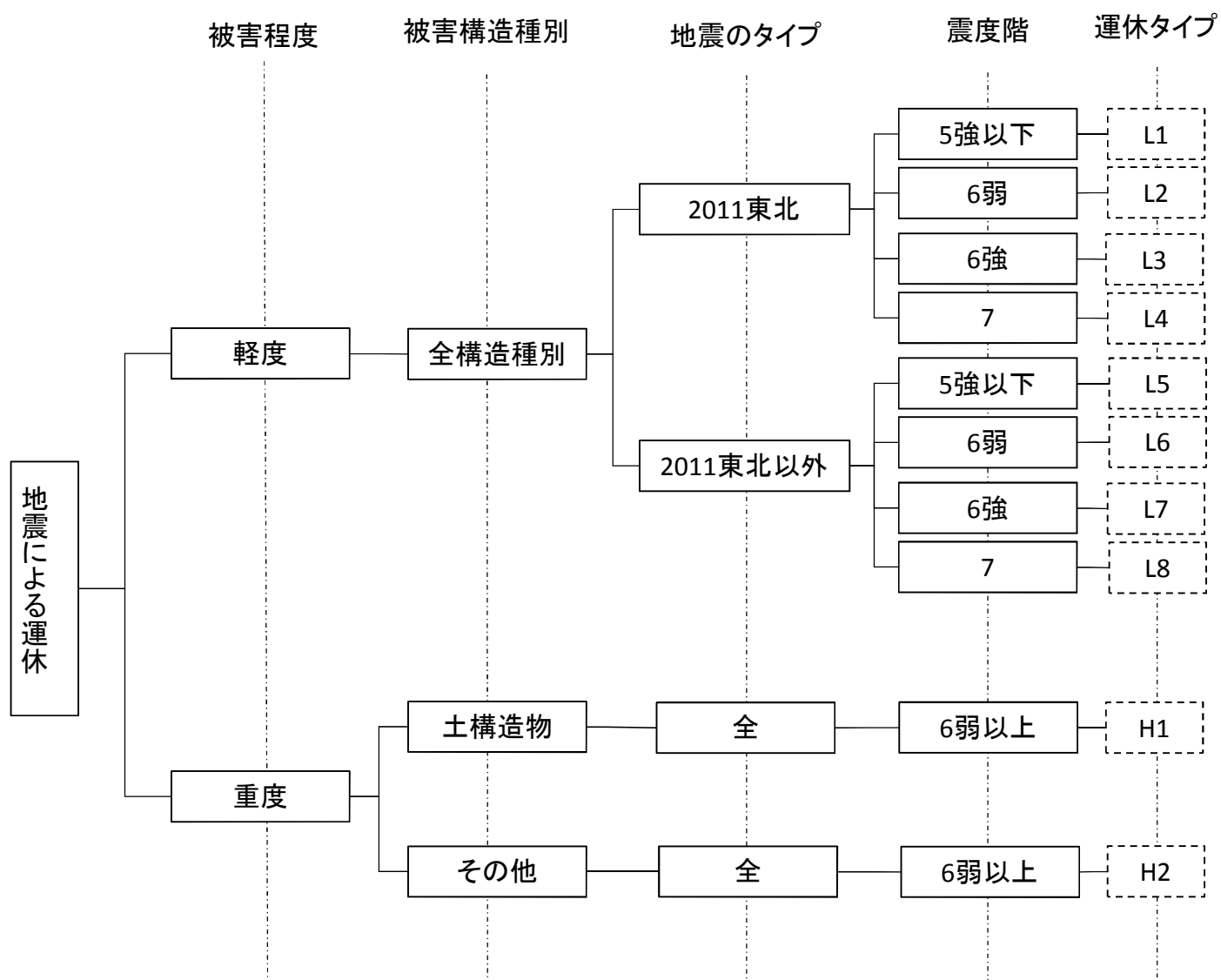


図4.17 各種要因を考慮した運休期間推計モデルの区分

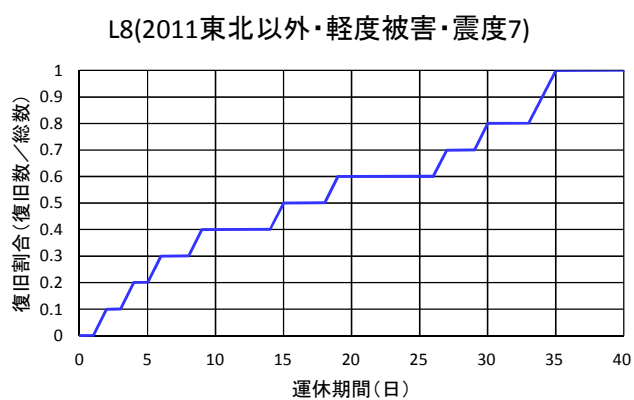
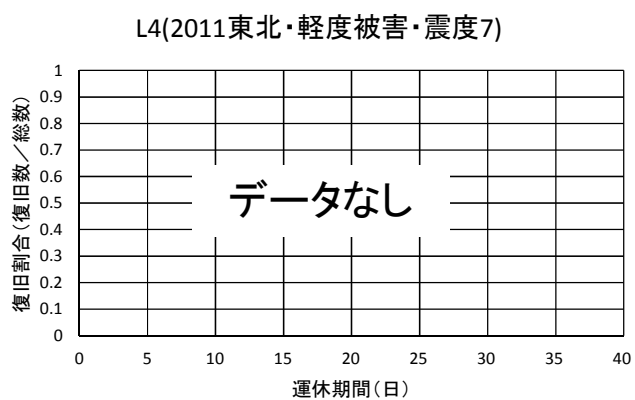
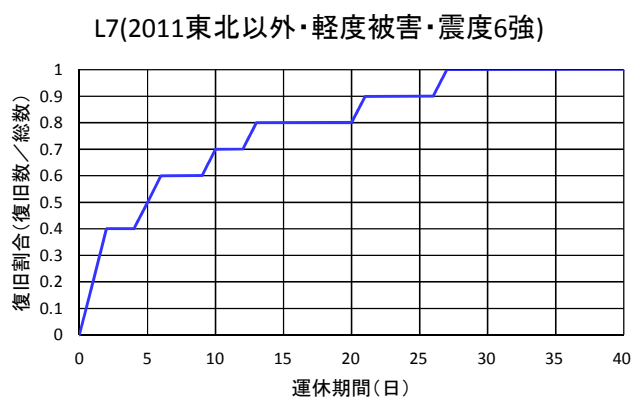
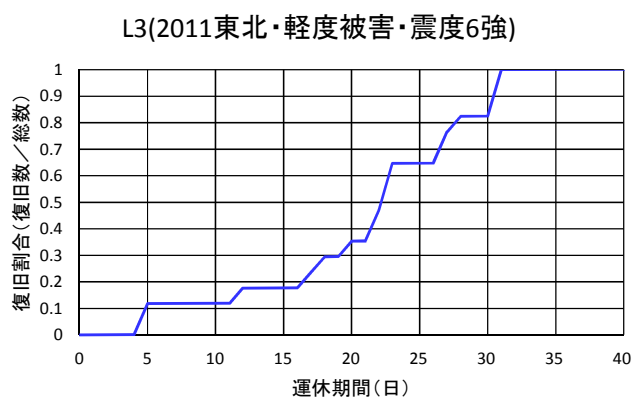
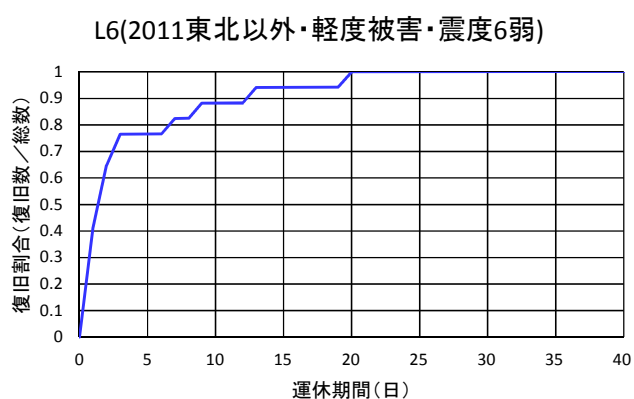
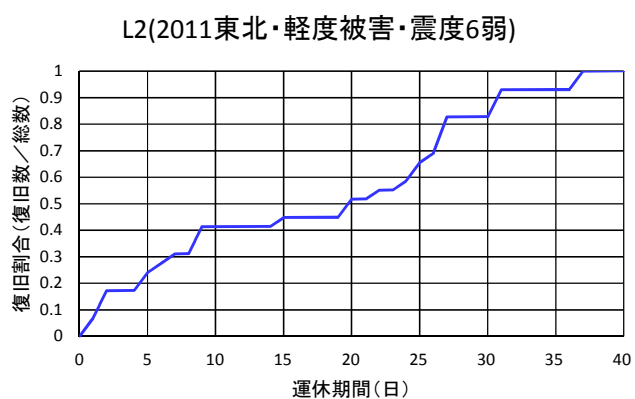
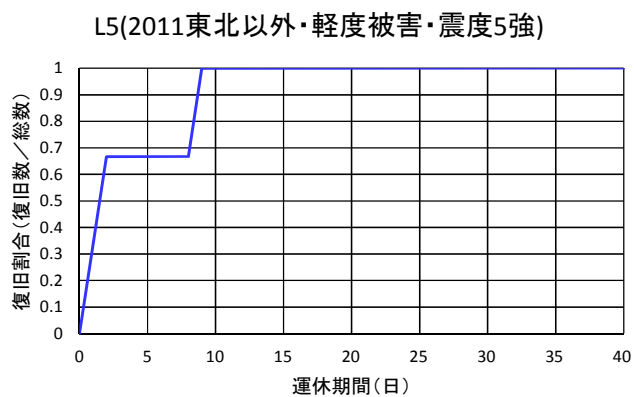
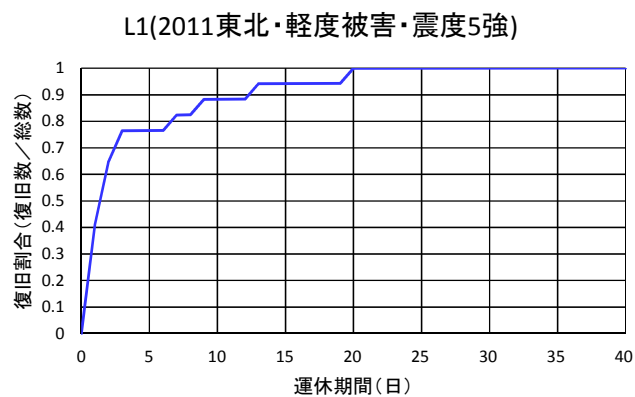


図4.16(1) 各種要因で区分した運休モデル

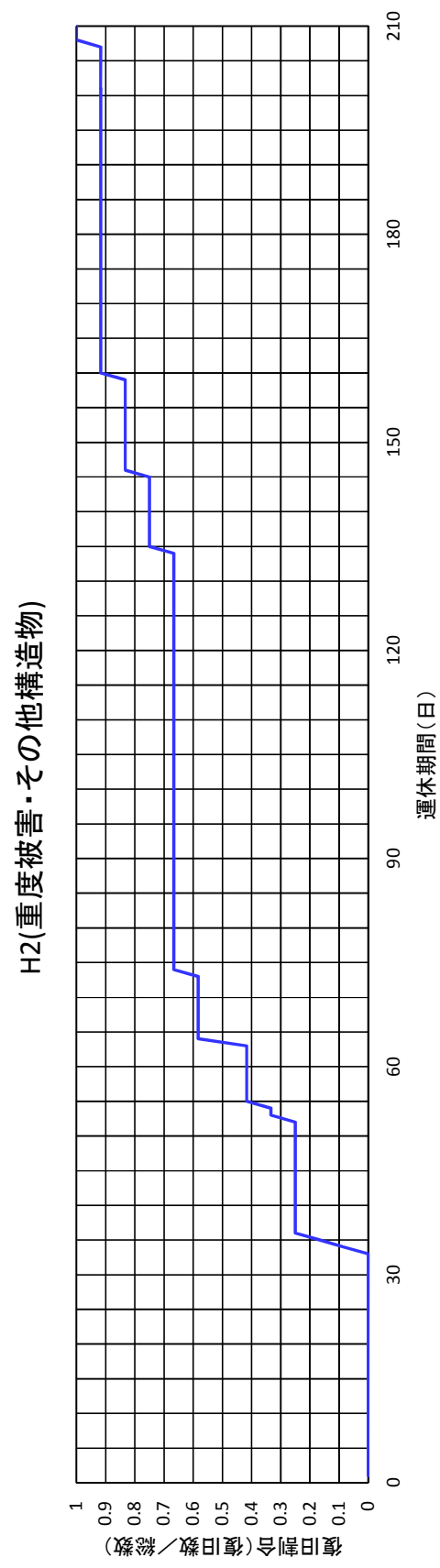
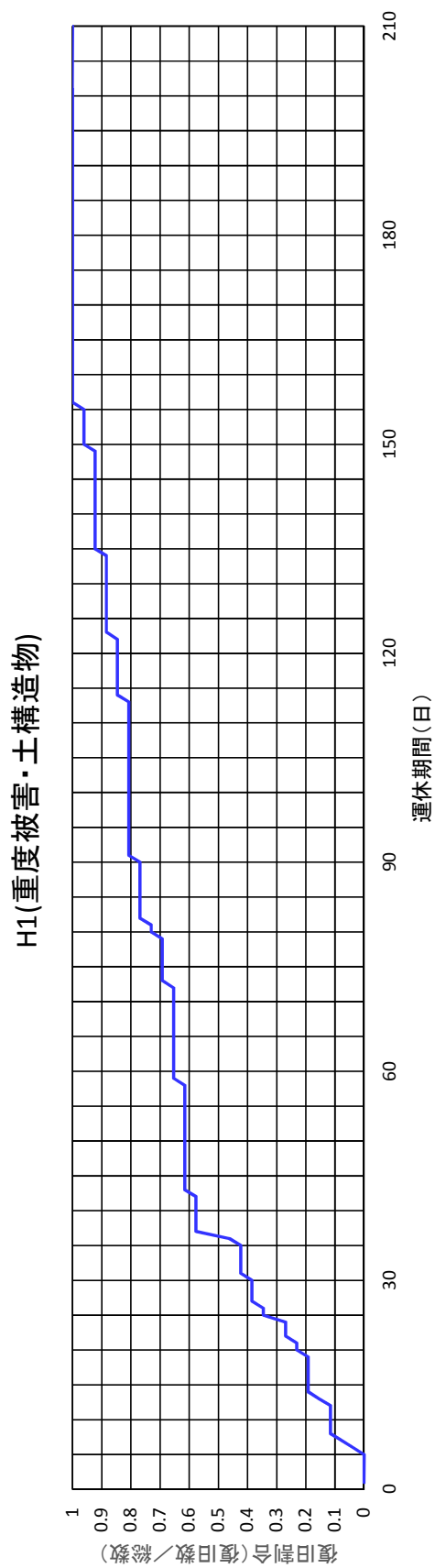


図4.16(2) 各種要因で区分した運休モデル

表4.8 各運休モデルにおける運休期間の諸元

被害 程度	構造種別	地震タイプ	区間最大 震度階	運休 モデル	区 間 数	最 小	50 ハ ー セ ン タ イ ル	85 ハ ー セ ン タ イ ル	最 大
軽度	全	2011東北	5強以下	L1	24	1	1	8	21
			6弱	L2	29	1	20	31	37
			6強	L3	17	5	23	31	31
			7	L4	-	-	-	-	-
		その他	5強以下	L5	2	1	2	9	9
			6弱	L6	17	1	2	9	9
			6強	L7	10	1	5	21	27
			7	L8	10	1	15	34	35
重度	土構造物	全	全	H1	26	5	37	123	156
	その他		全	H2	12	34	64	160	208

第5章 広域鉄道網に対する地震被害推計手法の検討

5.1. はじめに

本章では、構造物台帳データ、鉄道沿線震度データ、被害関数、運休モデルを組み合わせ、各区間の構造物被害件数と各区間の運休期間を推計する手順を示す。一例として、東京都心南部直下を震源とする地震を想定した場合の、首都圏の一部路線の構造種別毎の被害件数の推計と各区間の運休期間の推計結果を示す。

5.2.では、地震被害推計手順として、構造物台帳データの作成手順、鉄道沿線震度データの作成手順、各構造種別の被害件数の推計手順、運休期間の手順を検討する。

5.3.では、首都圏の一部路線を対象として対象路線の構造物台帳データと鉄道沿線震度データを作成し、想定地震時の被害状況と運休期間を推計する。

5.4.では、本章をまとめる。

5.2. 地震被害推計手順の検討

5.2.1. 地震被害推計フロー

第2章から第4章までの成果に基づいた、地震被害推計手順のフローを図5.1に示す。被害推計を行う際には、事前に対象地震の推計震度分布メッシュデータと対象路線の構造物台帳データを作成する。構造物台帳データの作成にあたっては、第2章で示した国土数値情報 [1]と地理院地図 [2]を用いた手順に従う。鉄道沿線震度データは、構造物台帳データと面的推計震度メッシュデータと照合することで作成する。

地震被害件数は、各構造種別の震度階毎の延長等に被害関数を適用し、運転区間単位で被害程度ごとの各構造種別の被害件数を推計する。各区間の運休期間は、想定地震のタイプ、被害構造種別、各運転区間の最大震度階をもとに、運休期間推計モデルを適用して推計する。

5.2.2. 構造物台帳データの作成

(1) 鉄道沿線位置情報の取得

国土数値情報の鉄道データ [1]を用いて、鉄道沿線の緯度経度を 100m 間隔で取得し、取得した緯度経度の点データを csv ファイル化した。国土数値情報の鉄道データは複数年度の Version があるが、今回は平成 24 年版として公開されているものを使用した。また同じ年式でも、ファイル形式が XML 形式のものと shape ファイル形式のものがあるが、今回は XML ファイルを使用することとした。XML ファイルから緯度経度点データ csv ファイルを作成する方法は、図 5.2 に示す手順で行った。

(a) XML から csv ファイルへの変換

鉄道データの XML ファイルは図 5.3 のような構造となっており、Curve 要素、RailroadSection 要素、Station 要素の 3 要素で構成されている。各要素は ID で結びつけられるようになっている。3 要素の関係を図 5.4 に示す。XML ファイルのままではデータ処理がしにくいいため、1 つの XML ファイルから、Curve データファイル、Railroad データファイル、Station データファイルの 3 つの csv ファイルを生成する。各 csv ファイルの様式を表 5.1 に示す。

(b) 起点→終点方向への座標データの並べ替え

生成した csv ファイルには、全国の鉄道の位置情報が含まれているが、実際に必要なのは対象路線のデータだけである。対象路線のデータだけ抽出する作業は以下の手順により行った。

- (i) RailroadSection データの LineName 要素に検討対象線区名でフィルタをかけて対象データだけを抽出する。
- (ii) 抽出した RailroadSection データの LocationLink 要素の ID と合致するデータを Curve データから抽出する。
- (iii) 抽出した RailroadSection データの StationLink 要素の ID と合致するデータを Station データから抽出する。

路線データの抽出例を図 5.5 に示す。

図 5.5 を見ると、CurveID は必ずしも起点→終点の順に整列しているわけではなく、また、Curve 要素内の折れ点の座標データも、起点→終点の順に並んでいるとは限らない(終点→起点の順に並んでいる場合もある)。このため、起点→終点の順に Curve 要素を並べなおし、Curve 要素内の座標データも起点→終点方向に並べなおす作業を行う必要がある。並べなおし作業は、以下の手順により行う。

- (i) 起点駅を1行目に挿入する。
- (ii) 起点駅の Curve 要素の Lat1,Lon1 と Lat2,Lon2 のどちらが終点側になるかを確認する。具体的には2点の緯度経度を地図に落として確認する。Lat2,Lon2 の方を終点側になるようにデータを修正する。
- (iii) 起点駅の Curve 要素と接続する Curve 要素を探す。具体的には起点駅 Curve 要素の Lat2,Lon2 と、2行目以下の Curve 要素の Lat1,Lon1 または Lat2,Lon2 が合致するものを探す。Lat1,Lon1 の方が合致した場合は、折れ点データが起点→終点順に並んでいるので折れ点データの並べなおしは不要。Lat2,Lon2 の方が合致した場合は折れ点データが終点→起点の順に並んでいるので、Lat1,Lon1 と Lat2,Lon2 を入れ替え、さらに折れ点データも逆順に並べなおす。
- (iv) 起点駅の Curve 要素と接続する Curve 要素を起点駅 Curve 要素の下に挿入する。
- (v) 2行目の Curve 要素と接続する Curve 要素を3行目以下から探す。具体的な作業は③と同じ。
- (vi) 以下、③～⑤の作業を繰り返すことで Curve 要素を起点→終点順に並べなおし、折れ点データもすべて起点→終点に並べなおす。

図 5.5 のデータを並べなおした結果を図 5.6 に示す。

(c) 路線座標データ集合からの 100m 点データの作成

図 5.6 の状態から、折れ点データを起点→終点の方向に直列に並べなおした表 5.2 のようなフォーマットの csv ファイルを作成する。これをもとに図 5.7 に示す手順で 100m 点間隔の点座標を求める。

(2) 土構造物位置・延長の取得

(1)で作成した csv ファイルを GIS 上で地理院地図と重ね合わせ、地図記号をもとに各 100m 点位置の構造種別を目視で読み取ることとした。現在の地理院地図では、盛土記号の取得基準が高さ 5m からとなっており、本研究での盛土の取得基準（高さ 3m 以上）と一致しない。そこで、地理院地図上で無記号となっている箇所については、旧版地図を表示できる「今昔マップ on the web」 [3]を併用し、盛土の位置情報を整理することとした。

(3) 橋りょうの位置・数量の取得

橋りょうの位置座標及び数量は、地理院地図上から直接1つずつピックアップして整理することとした。短スパンの橋りょうは地理院地図で省略されていることもあるため、地理院地図だけでなく、国土画像情報 [4]、Google Maps [5]を使用して鉄道と河川および道路が交差している点の構造を確認し、線路と河川や道路とが立体交差していることが確認できた場合には、それも橋りょうと判断することとした。橋りょうのキロ程は、橋りょう位

置最寄の 100m 点のキロ程を参照することとした。

(4) トンネルの位置・数量の取得

山岳トンネルの位置座標及び数量については、地理院地図上にトンネル坑口位置が記号で示されているので、それをもとに緯度経度をピックアップし整理した。山岳トンネルのキロ程は、入り口・出口それぞれの最寄 100m 点のキロ程を参照することとした。

地下トンネルの数量は駅部、駅間でそれぞれ 1 本のトンネルとして計上した。位置情報については、地理院地図上では山岳トンネルと同じ記号で表されているため、記号だけではピックアップできないので、トンネル位置の土地利用状況を確認し、たとえば道路の下を通過している場合等は地下トンネルと判断することとした。なお、トンネル上部が宅地等に利用されている丘陵地のように、地形や土地利用状況だけで判断できない場合は、[youtube](#) で公開されている前面展望動画を確認し、箱型の場合は地下トンネルと判断することとした。地下トンネルのキロ程は、駅部は駅構内起点側のキロ程を入り口のキロ程、駅構内終点側のキロ程を出口のキロ程とすることとした。駅間部は起点側駅の終点方 100m 点を入り口のキロ程、終点側駅の起点側 100m 点を出口のキロ程とすることとした。

(5) 高架橋の位置・延長の取得

(1)で作成した鉄道沿線位置情報が収まった csv ファイルを GIS 上で地理院地図と重ね合わせ表示し、100m 点の位置が高架橋の記号で表示されている箇所を高架橋であると読み取ることとした。なお、周辺に構造物が多く、記号が輻輳するような場合等、記号の通りに読み取れない場合には、下記のルールで読み取りを行うこととした。

- ・河川をまたがる区間が高架橋の記号で表示されている場合の読み取り方
100m 点が河川敷部分（堤防記号で挟まれた間）の中にある場合は橋りょうとして読み取る。
- ・陸域で 200m 以上連続して橋りょう記号で表示されている場合の読み取り方
橋りょう区間全長に対して、河川を跨いでいる部分がない、またはわずかで、大半が陸域上の橋りょうとなっている場合は高架橋として読み取る。
- ・地理院地図上での記号が省略されている区間の読み取り方
[Google Map \[5\]](#)ストリートビューでの確認または現地での直接確認により高架橋区間であることを確認した場合は高架橋として読み取る。

5.2.3 鉄道沿線震度データの作成

(1) 運転区間の設定

被害状況の推計及び運休期間の推計は、運転区間単位で行う。運転区間とは、折り返し運転設備が整っている駅（折り返し可能駅）同士の間の 1 区間をいう。今回は時刻表(交通新聞社(2015)) [6]を参考に実際に折り返し運転が設定されている駅を折り返し可能駅として抽出した。

(2) 区間最大震度階の取得

運転区間内の 100m 点の緯度経度と面的推計震度メッシュデータとを照合し、各 100m 点の推計計測震度を整理した。ある運転区間内の 100m 点の推計計測震度の集合から最大値を求め、これに計測震度から震度階への換算方法 [7]を適用して「区間最大震度階」とした。

(3) 震度階毎の土構造物延長の取得

ここでは例として素地・低盛土の軽度被害件数の推計方法を示すが、盛土・切土でも同様である。ある運転区間内の全ての素地・低盛土の 100m 点の震度を参照し、震度階ごとに素地・低盛土の 100m 点の数を計上した。ある震度階の 100m 点数を 10 で除すことでその震度階の素地・低盛土の延長を取得した。震度階ごとの延長の取得は被害発生下限震度である 5 弱以上を対象とした。

(4) 震度階毎の橋りょう数量の取得

橋りょうの震度階は、各橋りょうの最寄 100m 点の震度階を参照した。ある運転区間内について、震度階ごとに橋りょう数を計上し、数量を取得した。震度階ごとの数量の取得は被害発生下限震度である 5 強以上を対象とした。

(5) 震度階毎の山岳トンネル数量の取得

山岳トンネルの震度階は、入り口の最寄 100m 点の震度階と出口の最寄 100m 点の震度階との大きいほうを参照する。運転区間ごと、震度階ごとに山岳トンネル数を計上し、数量を取得した。震度階ごとの数量の取得は被害発生下限震度である 5 強以上を対象とした。

(6) 震度階毎の地下トンネル数量の取得

地下トンネルの震度階は、入り口～出口の間の 100m 点の中で最大値を参照した。運転区間ごと、震度階ごとに山岳トンネル数を計上し、数量を取得した。震度階ごとの数量の取得は被害発生下限震度である 6 弱以上を対象とした。

(7) 震度階毎の高架橋延長の取得

運転区間ごとに全ての高架橋の 100m 点の震度を参照し、震度階ごとに高架橋の 100m 点の数を計上した。ある震度階の 100m 点数を 10 で除すことでその震度階の高架橋延長を取得した。震度階ごとの延長の取得は被害発生下限震度である 5 弱以上を対象とした。

5.2.4. 各構造種別の被害件数の推計

(1) 土構造物の被害件数の推計

被害件数の推計は、運転区間単位で行い、土構造物に関しては「素地・低盛土」「盛土」「切土」それぞれで実施する。ここでは例として素地・低盛土の軽度被害件数の推計方法を示すが、盛土・切土でも同様である。また重度被害件数を推計する際は、対応する被害関数を用いる。

ある運転区間 n での素地・低盛土の総延長を $L_{Nn}(\text{km})$ 、素地・低盛土の推計被害件数を D_{Nn} (件)、震度階 i に対する素地・低盛土の軽度被害の被害率を $f_N(i)$ (件/km) とすると、(5.1)式により計算される。

$$D_{Nn} = \sum_i f_N(i) \cdot L_{Nn} \quad (5.1)$$

各構造種別・各被害程度の被害関数は図 5.8 を適用する。図 5.8 は原則として、3.3 節の成果に基づいている。ただし、切土に関しては、3.3 節の検討結果では、震度 6 弱で重度被害率が軽度被害率を上回る等の不整合があり、そのまま被害推計に適用するのは適切ではないと考え、切土と同じ土構造物で、高さのある構造種別である盛土の被害関数を適用することとした。

(2) 橋りょう及びトンネルの被害件数の推計

土構造物と同様、運転区間単位で被害程度ごとに被害件数の推計を行う。ここでは例として橋りょうの軽度被害件数の推計方法を示すが、山岳トンネル、地下トンネルでも同様である。また、また重度被害件数を推計する際は、対応する被害関数を用いる。

ある運転区間 n での橋りょうの総数を N_{Bn} 、橋りょうの推計被害件数を D_{Bn} 、震度階 i に対する橋りょうの軽度被害の被害関数を $f_B(i)$ (被害数/総数)とすると、(5.2)式により計算される。

$$D_{Bn} = \sum_i f_B(i) \cdot N_{Bn} \quad (5.2)$$

各構造種別・各被害程度の被害関数は図 5.9 を適用する。3.5 節の検討結果では、山岳トンネルの被害関数は震度 7 での重度被害のデータがなく、被害率が算出されていない。このため、震度 7 での山岳トンネルの重度被害率は、震度 6 強の倍の値(0.444)を仮定することとした。地下トンネルについては既設の開削トンネル中柱は高架橋と同様、1995 年 7 月の運輸省(当時)の指導により、新幹線は 3 年以内、在来線は概ね 5 年以内に耐震補強を実施することとされ、現在では全ての路線で耐震補強が完了している。耐震補強の効果により開

削トンネル中柱での被害は減るものと想定されるが、外壁については耐震補強の対象外であることから、現在でも被害が発生しうると考えられる。また、シールドトンネルについては、1995 兵庫、2011 東北いずれについても被害報告がほとんどないものの、今後とも被害が発生しないと断言することはできないと考えられる。

以上を踏まえ、本検討では、開削工法の地下トンネル、シールドトンネルの地下トンネルのいずれも外壁に軽度被害が発生しうると想定することとした。軽度被害率は、図 3.5 の外壁の被害率（震度 6 強：0.053、震度 7：0.150）を適用することとし、重度被害は発生しない（被害率 0）こととした。

(3) 高架橋の被害延長の推計

土構造物や橋りょう等と同様、運転区間単位で被害程度ごとに被害延長の推計を行う。ここでは例として軽度被害延長の推計方法を示すが、重度被害件数を推計する際は対応する被害関数を用いる。

ある運転区間 n での高架橋の総延長を $L_{Ln}(\text{km})$ 、高架橋の推計被害延長を $D_{Ln}(\text{km})$ 、震度階 i に対する高架橋の軽度被害の被害率を $f_L(i)$ (km/km) とすると、(5.3)式により計算される。

$$D_{Ln} = \sum_i f_L(i) \cdot L_{Ln} \quad (5.3)$$

高架橋の被害関数は図 5.10 を適用する。耐震補強の効果を見込まない場合には、3.3.4 の 1995 年兵庫県南部地震の被害関数を適用し、耐震補強の効果を見込む場合には、3.3.4 の 2011 年東北地方太平洋沖地震の被害関数を適用する。なお、3.3.4 の 2011 年東北地方太平洋沖地震の被害関数では、震度 7 でのデータがなく、被害率が算出されていない。3.3.4(4)で述べたように、1995 年兵庫県南部地震以降、輸送量の多い都市部の在来線においては、せん断破壊先行型の鉄道高架橋柱及び橋脚の耐震補強が行われてはいるものの、現時点では震度 7 で耐震補強の効果が確認された実績がないことから、震度 7 に限り、1995 年兵庫県南部地震の被害率を適用し、過小推計とならないようにする。

5.2.5. 運休期間の推計

運休期間の推計についても、運転区間単位で行う。まず、5.2.2.で算出した各構造種別の推計被害件数を参照し、0.5 件（高架橋については 0.05km）以上の構造種別にて「被害有」と判断する。被害有と判断された構造種別が複数ある場合には、下記のルールにより、被害程度・被害構造種別を判定する。

- ・ 重度被害と軽度被害が同一区間内で発生している場合は、重度被害が発生している構造種別を被害構造種別とする。
- ・ 複数の構造種別で同じ被害程度の被害が同一区間内で発生している場合は、表 4.1 に示す「運休期間の平均値が長い構造種別」の順位が高いものを被害構造種別とする。

被害程度・被害構造種別と推計したい運転区間の最大震度階に加え、想定地震のタイプを設定し、表 5.3 の運休モデルを適用することで推計運休期間を得る。想定地震タイプは、地震後の社会全体の機能性の低下を見込む場合には、2011 東北を設定し、見込まない場合は 2011 東北以外を設定する。

表 5.3 は、原則として表 4.8 に基づいているが、2011 年東北地方太平洋沖地震では区間最大震度 7 のデータがなく、運休モデル(L4)を作成できなかった。震度 7 での運休期間は、(被害関数) からは、震度 6 強よりも震度 7 の被害件数の方が多くなることから、震度 6 強の運休期間よりも長くなると想定される。そこで、L4 の平均的ケースの運休期間には、震度 7 で十分発生しうる最長の運休期間と考えられる、運休モデル L8 の 85 パーセンタイル値(34 日)を適用することとした。また、L4 の長期化ケースの運休期間には、軽度被害区間で発生した最長の運休期間である 37 日を適用することとした。

5.3. 首都圏の一部路線を対象とした地震被害推計例

5.3.1. 想定地震と対象路線

本研究では、首都圏の広域で被害の発生が予想される、都心南部直下の M7 クラスの地震を想定地震とすることとし、震度分布は首都直下地震モデル検討会のもの [8]を使用した。首都圏の鉄道は、山手線を中心に放射線状に伸びる路線と、放射線の間を接続する環状路線とで構成される。本研究での被害推計の対象路線は、山手線及び放射線状路線の放射線状路線の中でもっとも輸送密度が高い総武線を含む千葉方面の JR 及び民鉄各線とした。また、山手線で乗降客数が多い主要ターミナル駅（東京・品川・渋谷・新宿・池袋）から千葉方面に向かって移動する際に経路として選択されることが想定される地下鉄（丸の内線池袋～新宿間・銀座線渋谷～上野間）と、京成線が相互乗り入れする都営浅草線（泉岳寺～押上）も検討対象に含めることとした。なお、主要ターミナル5駅は JR 東日本の資料 [9]をもとに、乗車人員の多い5駅を選定した。

対象路線は、高架橋主体の路線（京葉線）、トンネル主体の路線（東西線、新宿線）、土構造物主体の路線（総武線、京葉線）が並行しており、構造種別を考慮する本研究の手法の適用性を検討する際に最適であると考えられる。都心南部直下地震の震度分布と、対象路線を図 5.11 に示す。この図より、都心南部直下地震では、対象路線の全域で震度 6 弱以上の揺れとなり、東京湾奥部の沿岸部と、東京都と千葉県の間より西側の荒川沿いの領域の広い範囲で震度 6 強の揺れとなり、さらに京葉線沿線の一部では震度 7 で揺れる箇所もあることが分かる。対象路線の鉄道構造物に被害が生じる可能性は高いと想定される。

5.3.2. 対象路線の構造物台帳データと鉄道沿線震度データの作成

対象路線の構造物台帳データは、国土数値情報 [1]と地理院地図 [2]をもとに、5.2.2 節に示した方法により作成した。対象路線の運転区間は、時刻表(交通新聞社(2015)) [6]を参考に、折り返し運転の設定がある駅で区分した。また、構造物台帳データと図 5.11 に示した面的推計震度データとを照合し、5.2.3 節に示した方法により各区間の区間最大震度階と各構造種別の震度階毎の総延長等の鉄道沿線震度データを作成した。作成した構造物台帳データと各区間の鉄道沿線震度データを図 5.12 及び表 5.4 に示す。図 5.12 では、たとえば、荒川沿い（橋りょうを意味する水色の線が並行する部分）の領域に注目すると、京葉線、東西線、新宿線の構造種別は高架橋と地下トンネルが主体となっている一方、総武線及び京葉線では土構造物が主体となっている。この領域の推計震度は、各線とも 6 強であるが、構造種別が異なっているため、同じ震度階でも被害の発生状況や運休期間に違いが現れることが想定される。

5.3.3. 想定地震時の被害状況の推計

5.3.2.で作成した鉄道沿線震度データをもとに、各構造種別について、5.2.2.に示した手順により、各構造種別の推計被害件数等を算出した。対象路線の各構造種別の推計被害件数等を表 5.5 に、土構造物の被害発生状況を図 5.14 に、橋りょうの被害発生状況を図 5.15 に、トンネルの被害発生状況を図 5.16 に、高架橋の被害発生状況を図 5.17 に示す。

図 5.14 によると、土構造物の被害が発生しているのは、山手線、中央線、総武線、京成線であり、高架橋と地下トンネル主体の東西線、新宿線等の地下鉄各線、および京葉線東京～南船橋間では被害が発生していない。京葉線については、千葉寄りの海浜幕張～蘇我間で土構造物の軽度被害が発生しているが、図 5.13 を確認すれば分かるとおり、一部に素地・低盛土が含まれており、この付近で被害が発生するものと想定される。また、山手線大崎～池袋間、中央線東京～新宿間、総武線錦糸町～西船橋間、京成線京成上野～京成高砂間では盛土の重度被害が発生している。図 5.13 を確認すると、荒川をはさむ両側に盛土区間があり、この一帯で重度被害が発生する可能性があることが想定される。なお、図 5.13 では、江戸川付近や船橋付近にも盛土区間があるが、図 5.14 では、この盛土区間を含む運転区間では、軽度被害が発生すると推定されている。この区間での震度は 6 弱で、荒川付近より低いため、軽度被害にとどまるとの推定結果になったものと想定される。

図 5.15 によると、橋りょうの軽度被害が発生しているのは、山手線、中央線、京葉線、総武線、京成線であった。高架橋と地下トンネルが主体の東西線や新宿線及び都心部の地下鉄各線では、橋りょうそのものがわずかしかない、または全くないため、橋りょう被害が発生しないとの結果になった。京葉線南船橋以東についても、表 5.4 を確認すると橋りょうが 2 箇所しかないため、被害が発生しないとの推計結果になった。

図 5.16 によると、地下トンネルの軽度被害が発生しているのは、地下トンネル区間が続く横須賀線及び丸の内線、東西線、新宿線等の都心部の地下鉄各線であった。地下トンネルがある地域は広範囲にわたって震度 6 強で揺れるために被害が発生するとの推計結果になったものと考えられる。京葉線東京～南船橋間で被害なしと推計されたのは、トンネル数が少なかったことによると考えられる。また、東西線中野～九段下間、丸の内線茗荷谷～池袋間、新宿線大島～瑞江間で被害なしと推計されたのは、区間最大震度が 6 弱であったためと考えられる。

図 5.17 によると、高架橋の重度被害が発生しているのは、山手線池袋～田町間、東西線、京葉線であり、並走する新宿線や総武線や京成線では軽度被害が発生するとの推計結果になった。これら区間の震度を確認すると、京葉線のごく一部で震度 7 となっている以外は、大半が震度 6 強であるので、被害程度の違いは揺れの違いではないと考えられる。表 5.4 を確認すると、重度被害となった山手線、京葉線と東西線は震度 6 強で揺れた高架橋延長がそれぞれ 4.7km、16.8km、8.3km と長い一方、軽度被害にとどまった新宿線、総武線、京成線では震度 6 強で揺れた高架橋延長がそれぞれ 1.6km、1.6km、3.8km と短かったために軽

度被害にとどまったものと考えられる。

なお、本検討では 3 章で作成した被害関数を使用して構造物被害の有無を推計しているが、被害関数の作成した際に用いた 3 地震（1995 兵庫、2004 中越、2007 中越沖）の際には、液状化によると想定される盛土等の被害がほとんど含まれていないため、液状化による被害の発生は考慮されない。本検討での対象路線の周辺ではたとえば荒川付近の一带や東京湾岸の埋立地帯では地盤の液状化が想定されており、鉄道構造物においても液状化による被害が発生しないとはいえないので、被害推計結果をもとに考察する際にはこの点に留意する必要がある。

5.3.4. 想定地震時の運休期間の推計

5.3.2.で整理した各区間の区間最大震度階と 5.3.3.で推計した各区間の被害程度及び被害構造種別とをもとに、運休モデルを適用して各区間の運休期間を推計した。本研究では、運休モデルの地震タイプを 2011 東北とすることとした。都心南部直下地震のマグニチュードは 7.3 と想定されており、2011 年東北地方太平洋沖地震よりも規模は小さいが、被害規模は甚大で、鉄道のみならず道路やライフラインが軒並み被害を受け、社会全体の機能性の低下が発生するものと考えたためである。比較検討のため、参考までに、平均的ケースと長期化ケースの両方で運休期間を算出し、さらに地震タイプを 2011 東北以外とした場合でも平均的ケースと長期化ケースの両方で運休期間を算出した。計算結果を表 5.6 及び図 5.18～図 5.21 に示す。

図 5.18 は地震タイプを 2011 東北とした場合の平均的ケースの運休期間の算出結果を地図上に表したものである。この場合、東西線中野～九段下間、丸の内線茗荷谷～池袋間、新宿線瑞江～本八幡以外の対象路線全線で被害が発生し、運休期間は最短でも 20 日で、高架橋の重度被害が発生しうる京葉線や東西線などでは運休期間が 64 日となった。図 5.18 を見ると、京葉線や東西線と並走する新宿線、総武線、京成線では運休期間が比較的短く、新宿線で 23 日、総武線、京成線では 37 日となった。新宿線は、重度被害が発生しにくい地下トンネルが大半を占めるため、他の 4 路線より運休期間が短く推計されたものと考えられる。各線の推計最大震度は 6 強で同程度であるが、以上のように推計運休期間に違いが生ずるのは、被害構造種別の違いが反映されたものと考えられる。なお、東西線、丸の内線、新宿線の一部区間は、ほぼ全線が地下トンネルで、区間最大震度が震度 6 弱であったために被害及び運休が発生しないと推定されたものと考えられる。

図 5.19 は地震タイプを 2011 東北とした場合の長期化ケースの運休期間の算出結果を地図上に表したものである。この場合は、運休期間は最短でも 31 日、土構造物の重度被害が発生する総武線や京成線では運休期間が 123 日、高架橋の重度被害が発生しうる京葉線や東西線などでは運休期間が 160 日となった。並走する各路線の運休期間の相対的な違いは図 5.18 と同様だが、長期化ケースでの推計であるため、図 5.18 よりも全体的に長期間の運休期間が推計された。この推計が現実になる場合には、東京～千葉間の膨大な輸送量を約 3 ヶ月間、新宿線のみで支えることになり、需要にこたえきれなくなると想定される。鉄道の地震被害による社会への影響を小さくするには、新宿線に並行する各線の耐震性の向上、被災時の復旧性の向上等が必要であるといえる。

図 5.20 は地震タイプを 2011 東北以外とした場合の平均的ケースの運休期間の算出結果を地図上に表したものである。この場合、運休期間は最短で 2 日だが、重度被害が発生する区間の運休期間は図 5.18 と同様で、京葉線と東西線では 64 日、総武線と京成線では 37 日となった。地震タイプを 2011 東北以外とすることで、社会全体の機能低下を見込まない分、軽度被害区間の運休期間を図 5.18 の場合よりも短く推計することとなった。重度被害の場

合は、被害の復旧作業に長期間を要するため、社会全体の機能低下の影響が相対的に小さく評価することになると考えられる。

図 5.21 は地震タイプを 2011 東北以外とした場合の長期化ケースの運休期間の算出結果を地図上に表したものである。この場合、運休期間は最短で 9 日だが、重度被害が発生する区間の運休期間は図 5.19 と同様で、総武線や京成線で 123 日、京葉線や東西線などで 160 日となった。長期化ケースの推計であるため、図 5.20 よりも全体的に長期間の運休期間が推計された。また、重度被害区間の運休期間が図 5.19 と同様となる理由は、図 5.20 の考察で述べた内容と同じである。

5.4. まとめ

本章では、第 2 章から第 4 章までで検討した、鉄道構造物台帳データ作成手順、構造種別を考慮した地震被害関数、地震被害の復旧に係わる各種要因を考慮した運休期間推計モデルを組み合わせることによって、広域鉄道網を対象とする地震被害推計手順を提案した。

この手順を利用した鉄道の地震被害推計の例として、都心南部直下を震源とする地震を想定し、東京都心部ー千葉方面の鉄道各線・各区間の被害件数等の推計と運休期間の推計を実施した。その結果、本論文で提案する手順により、各路線の構造種別が異なるために、被害状況や運休期間が異なる状況が推定され、対象鉄道網の事前対策や事後の復旧戦略に資する情報を提供でき、本推定手順の有効性を示した。

【5 章の参考文献】

- [1] 国土交通省国土政策局国土情報課：国土数値情報,<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>.
- [2] 国土地理院：地理院地図,<http://portal.cyberjapan.jp/index.html>.
- [3] 今昔マップ on the web： <http://ktgis.net/kjmapw/index.html>.
- [4] 国土画像情報, http://w3land.mlit.go.jp/WebGIS/about_photo.html.
- [5] Google Maps,<https://maps.google.com/>.
- [6] 交通新聞社：東京時刻表,2015.
- [7] 気象庁：震度を知る 基礎知識とその活用,ぎょうせい, 1996.
- [8] 首都直下地震モデル検討会：首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書,2013.
- [9] 東日本旅客鉄道株式会社：各駅の乗車人員(2014 年度),
<http://www.jreast.co.jp/passenger/>.
- [10] 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ：首都直下地震の被害想定と対策について（最終報告）.

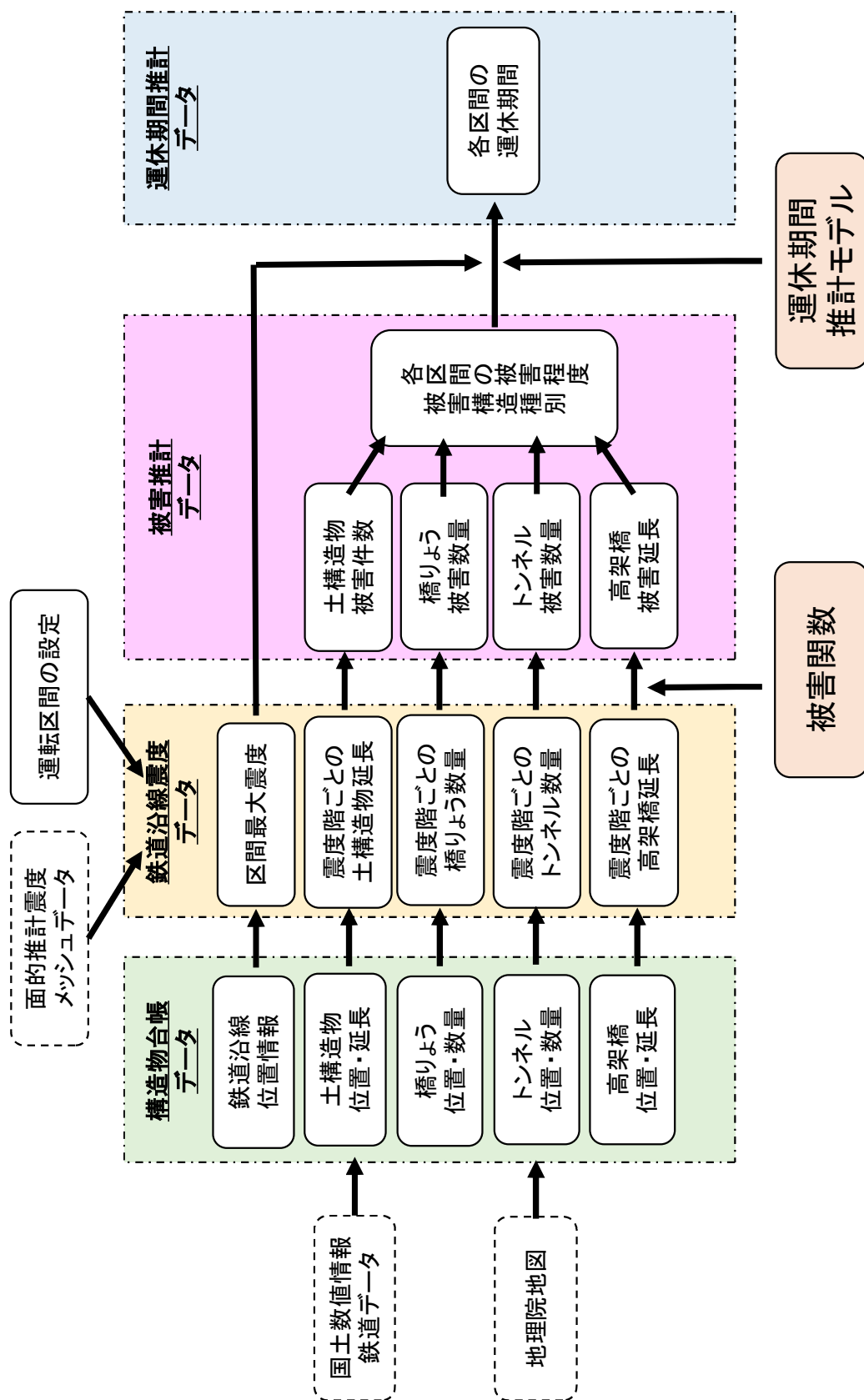


図5.1 地震による鉄道の被害概要および運休期間の推計フロー

XMLファイルから
csvファイルへの変換

起点→終点への
座標データの
並べ替え

路線座標データ
集合からの
100m点データの作成

図5.2 国土数値情報XMLファイルからの
鉄道沿線位置情報取得フロー



図5.3 鉄道位置データxmlファイル構造

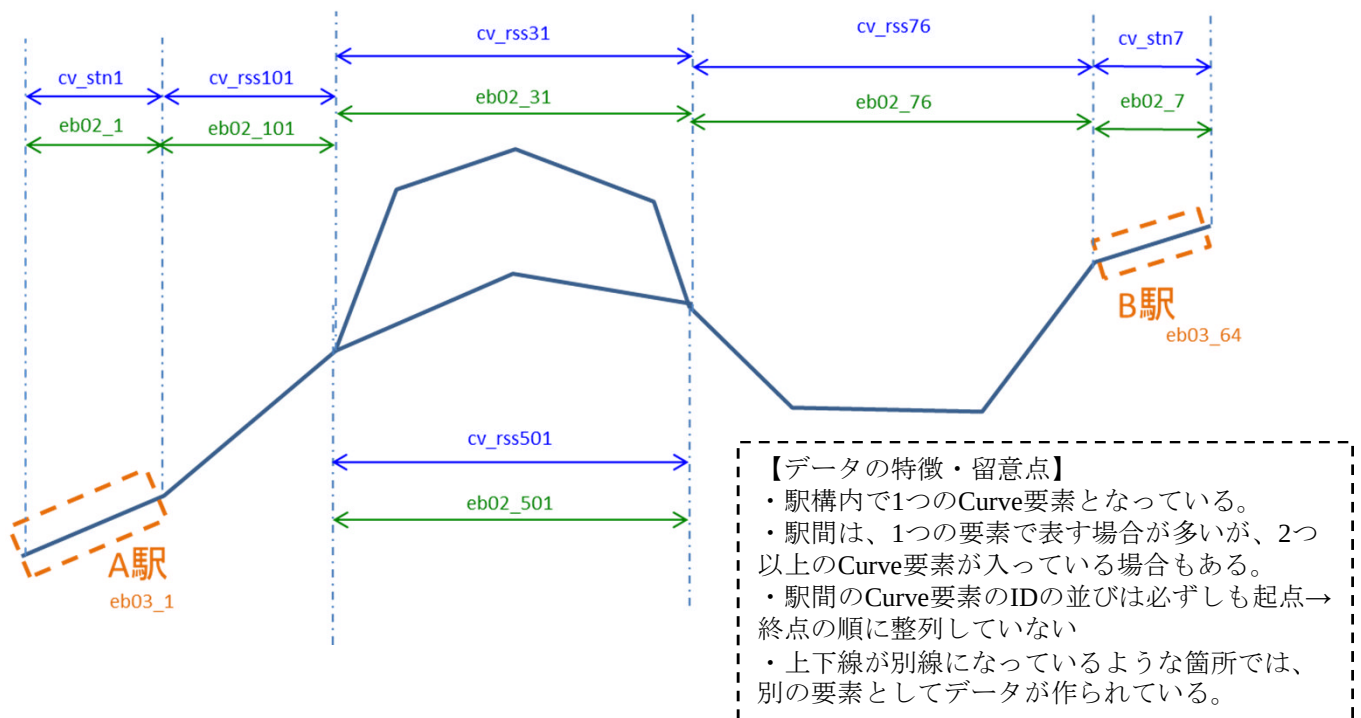


図5.4 Curve要素、RailroadSection要素、Station要素の関係の例

表5.1 各要素を抽出したcsvファイル様式

(1)Curve要素

ID	PointNum	StLat	StLon	EnLat	EnLon	Pos001Lat	Pos001Longi	Pos002Lat	Pos002Longi	...
cv_rss1	7	26.21454	127.6795	26.21905	127.6842	26.2145	127.6795	26.2147	127.6797	...
cv_rss2	10	40.3374	141.2914	40.33317	141.2986	40.3374	141.2914	40.3372	141.2918	...
cv_rss3	17	40.23936	141.2755	40.22874	141.2834	40.2394	141.2755	40.2388	141.2757	...
cv_rss4	2	40.26092	141.2866	40.25874	141.2854	40.2609	141.2866	40.2587	141.2854	...
cv_rss5	3	40.28615	141.2908	40.28485	141.291	40.2862	141.2908	40.2858	141.2909	...

(2) RailroadSection要素

ID	LocationLink	RailwayType	ProviderType	LineName	Company	StationLink
eb02_1	cv_rss1	23	5	沖縄都市モノレール線	沖縄都市モノレール	
eb02_2	cv_rss2	12	5	いわて銀河鉄道線	アイジーアールいわて銀河鉄道	
eb02_3	cv_rss3	12	5	いわて銀河鉄道線	アイジーアールいわて銀河鉄道	
eb02_4	cv_rss4	12	5	いわて銀河鉄道線	アイジーアールいわて銀河鉄道	eb03_54
eb02_5	cv_rss5	12	5	いわて銀河鉄道線	アイジーアールいわて銀河鉄道	eb03_57

(3)Station要素

strID	LocationLink	RailwayType	Company	StationName	SectionLink
eb03_1	cv_stn1	11	九州旅客鉄道	二月田	eb02_2881
eb03_2	cv_stn2	23	沖縄都市モノレール	古島	eb02_984
eb03_3	cv_stn3	24	ゆりかもめ	お台場海浜公園	eb02_21548
eb03_4	cv_stn4	24	ゆりかもめ	船の科学館	eb02_21547
eb03_5	cv_stn5	24	ゆりかもめ	テレコムセンター	eb02_21545

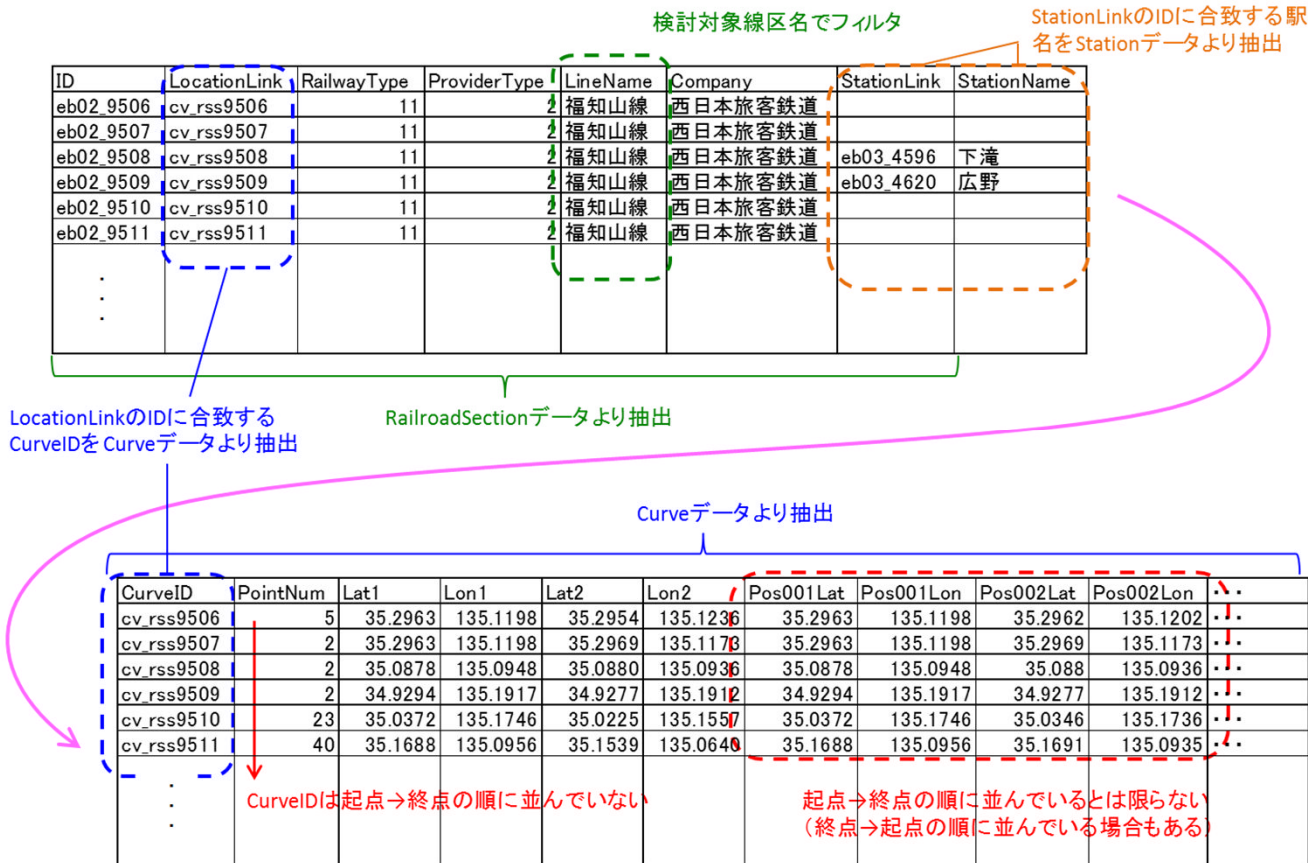


図5.5 路線データの抽出例 上の行のLat2,Lon2が次の行のLat1,Lon1と同じ
起点側→終点側の順に並んでいる

ID	LocationLink	LineName	StationLink	PointNum	Lat1	Lon1	Lat2	Lon2	Pos001Lat	Pos001Lon	Pos002Lat	Pos002Lon	...
eb02_7040	cv_rss7040	福知山線	eb03_4619	2	34.7317	135.4329	34.7320	135.4307	34.7317	135.4329	34.7320	135.4307	...
eb02_9545	cv_rss9545	福知山線		3	34.7320	135.4307	34.7324	135.4285	34.7320	135.4307	34.7324	135.4286	...
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		26	34.7324	135.4285	34.7422	135.4267	34.7325	135.4285	34.7325	135.4277	...
eb02_9549	cv_rss9549	福知山線		6	34.7422	135.4267	34.7499	135.4253	34.7423	135.4267	34.7429	135.4266	...
eb02_9546	cv_rss9546	福知山線	eb03_4618	2	34.7499	135.4253	34.7517	135.4250	34.7499	135.4253	34.7517	135.4250	...
eb02_9548	cv_rss9548	福知山線		37	34.7517	135.4250	34.7632	135.4228	34.7517	135.4250	34.7533	135.4247	...
eb02_9560	cv_rss9560	福知山線	eb03_4610	2	34.7632	135.4228	34.7648	135.4225	34.7632	135.4228	34.7648	135.4225	...
eb02_9551	cv_rss9551	福知山線		31	34.7648	135.4225	34.7801	135.4218	34.7648	135.4225	34.7653	135.4224	...
eb02_9552	cv_rss9552	福知山線	eb03_4614	2	34.7801	135.4218	34.7811	135.4218	34.7801	135.4218	34.7811	135.4218	...
eb02_9558	cv_rss9558	福知山線		43	34.7811	135.4218	34.7998	135.4197	34.7811	135.4218	34.7818	135.4217	...
eb02_9559	cv_rss9559	福知山線	eb03_4609	3	34.7998	135.4197	34.8019	135.4194	34.7998	135.4197	34.8018	135.4194	...
eb02_9561	cv_rss9561	福知山線		79	34.8019	135.4194	34.8247	135.4104	34.8019	135.4194	34.8022	135.4193	...
eb02_9547	cv_rss9547	福知山線	eb03_4617	2	34.8247	135.4104	34.8251	135.4092	34.8247	135.4104	34.8251	135.4092	...
eb02_9556	cv_rss9556	福知山線		95	34.8251	135.4092	34.8166	135.3748	34.8251	135.4092	34.8253	135.4083	...
eb02_9557	cv_rss9557	福知山線	eb03_4612	2	34.8166	135.3748	34.8167	135.3732	34.8166	135.3748	34.8167	135.3732	...
eb02_9555	cv_rss9555	福知山線		51	34.8167	135.3732	34.8110	135.3416	34.8167	135.3732	34.8167	135.3722	...
eb02_9550	cv_rss9550	福知山線	eb03_4615	2	34.8110	135.3416	34.8117	135.3401	34.8110	135.3416	34.8117	135.3401	...
eb02_9564	cv_rss9564	福知山線		45	34.8117	135.3401	34.8197	135.3261	34.8117	135.3401	34.8120	135.3395	...
eb02_9568	cv_rss9568	福知山線	eb03_4613	2	34.8197	135.3261	34.8190	135.3245	34.8197	135.3261	34.8190	135.3245	...
eb02_9572	cv_rss9572	福知山線		60	34.8190	135.3245	34.8268	135.3089	34.8190	135.3245	34.8188	135.3241	...
eb02_9569	cv_rss9569	福知山線	eb03_4611	2	34.8268	135.3089	34.8277	135.3089	34.8268	135.3089	34.8277	135.3089	...
eb02_9563	cv_rss9563	福知山線		46	34.8277	135.3089	34.8550	135.3061	34.8277	135.3089	34.8280	135.3089	...
eb02_9562	cv_rss9562	福知山線	eb03_4616	4	34.8550	135.3061	34.8560	135.3053	34.8550	135.3061	34.8554	135.3058	...
eb02_9567	cv_rss9567	福知山線		83	34.8560	135.3053	34.8673	135.2566	34.8560	135.3053	34.8563	135.3051	...
eb02_9565	cv_rss9565	福知山線	eb03_4622	2	34.8673	135.2566	34.8673	135.2550	34.8673	135.2566	34.8673	135.2550	...
eb02_9571	cv_rss9571	福知山線		102	34.8673	135.2550	34.8883	135.2312	34.8673	135.2550	34.8673	135.2547	...
eb02_9566	cv_rss9566	福知山線	eb03_4623	2	34.8883	135.2312	34.8891	135.2286	34.8883	135.2312	34.8891	135.2286	...
eb02_9570	cv_rss9570	福知山線		53	34.8891	135.2286	34.9096	135.2089	34.8891	135.2286	34.8891	135.2286	...
eb02_9515	cv_rss9515	福知山線	eb03_4621	2	34.9096	135.2089	34.9107	135.2083	34.9096	135.2089	34.9107	135.2083	...
eb02_9528	cv_rss9528	福知山線		55	34.9107	135.2083	34.9277	135.1912	34.9107	135.2083	34.9107	135.2083	...

折れ点データはすべて起点→終点に並べなおし済み

図5.6 路線データ並べなおし例

表5.2 折れ点座標を直列に並べたcsvファイル例

eb02	cvID	LineName	StationLink	StationName	PointNum	PointLat	PointLongi
eb02_7040	cv_rss7040	福知山線	eb03_4619	尼崎	1	34.7317	135.4329
eb02_9545	cv_rss9545	福知山線		尼崎～塚口	1	34.7320	135.4307
eb02_9545	cv_rss9545	福知山線		尼崎～塚口	2	34.7324	135.4286
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	1	34.7325	135.4285
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	2	34.7325	135.4277
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	3	34.7326	135.4267
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	4	34.7327	135.4258
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	5	34.7331	135.4240
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	6	34.7332	135.4234
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	7	34.7333	135.4230
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	8	34.7335	135.4227
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	9	34.7336	135.4225
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	10	34.7338	135.4224
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	11	34.7340	135.4222
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	12	34.7343	135.4221
eb02_9554	cv_rss9554	福知山線		尼崎～塚口	13	34.7346	135.4220

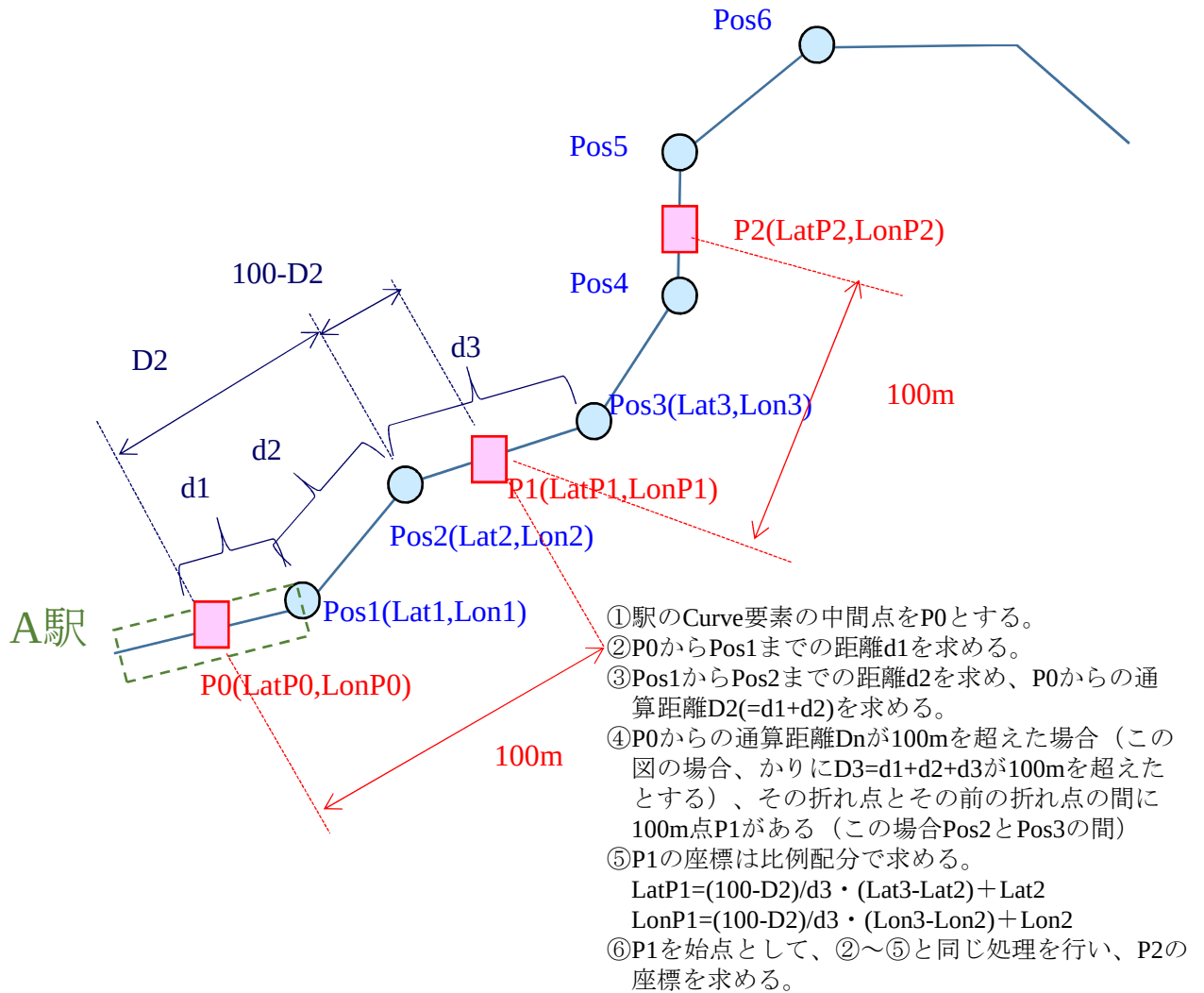
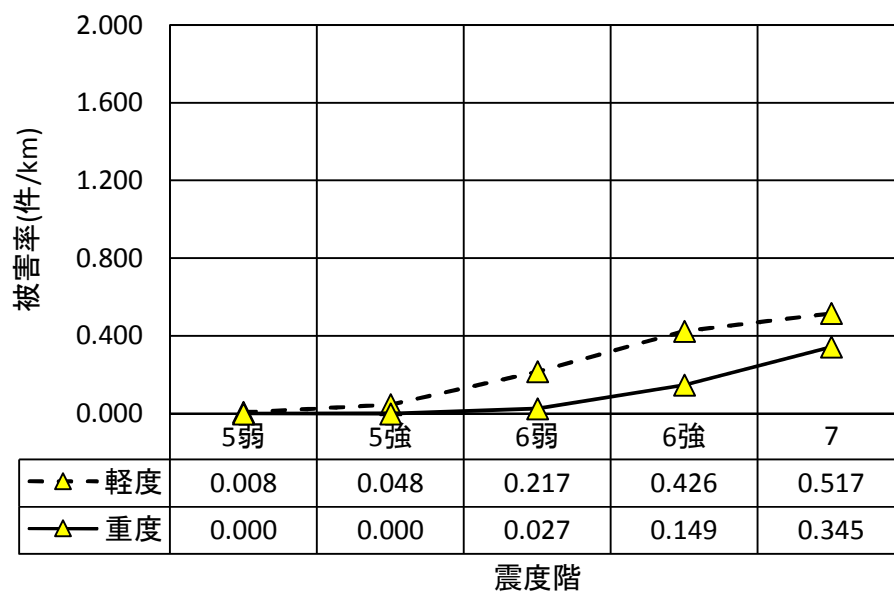


図5.7 折れ点データから100m点の緯度経度の取得

素地・低盛土



※切土の軽度・重度被害率は、盛土の軽度・重度被害率を適用

盛土・切土 ※

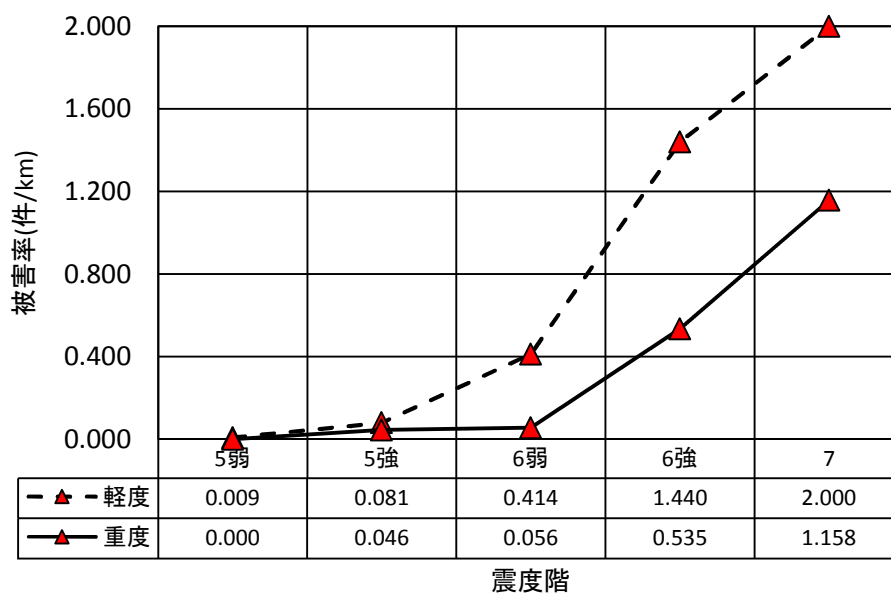
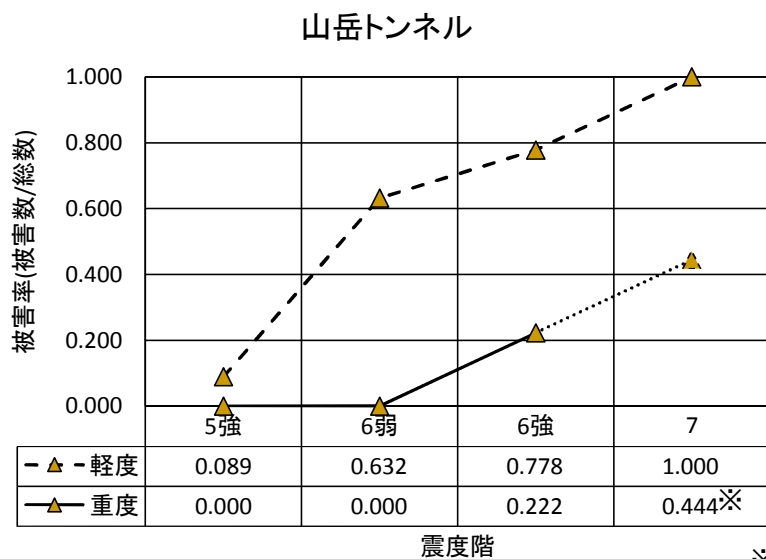
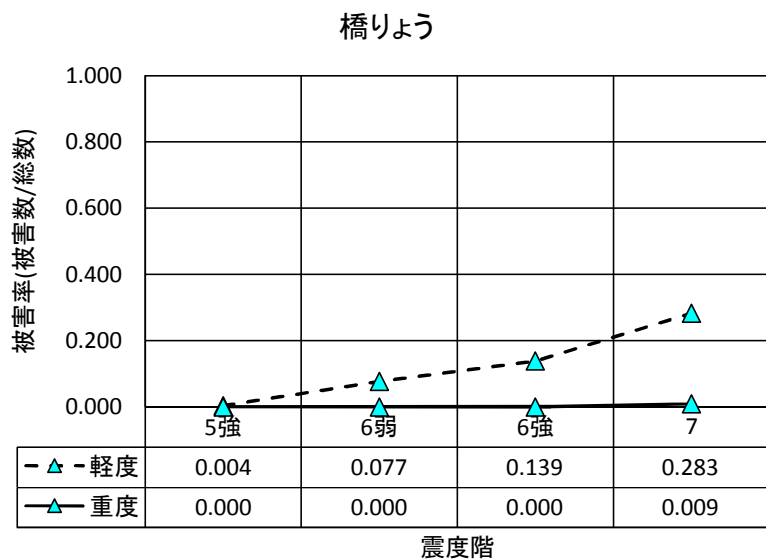


図5.8 土構造物の被害関数



※山岳トンネルの震度7の
重度被害率は震度6強の被
害率の倍の値を適用

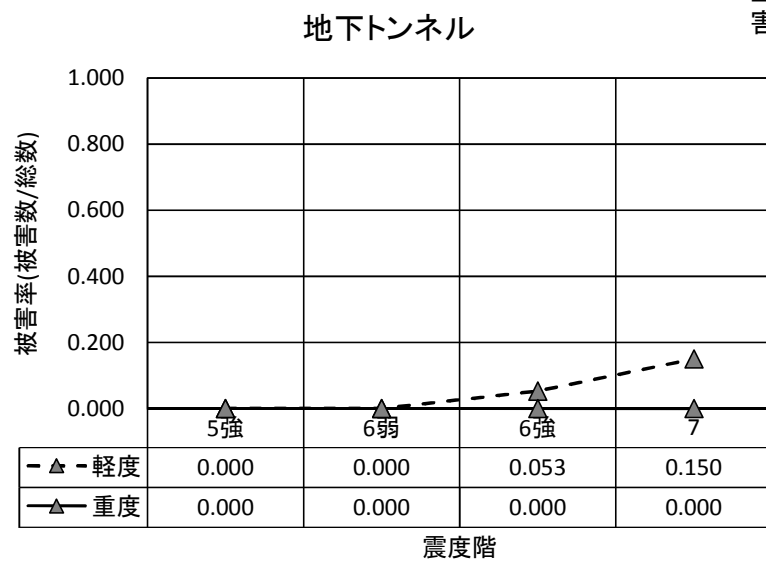
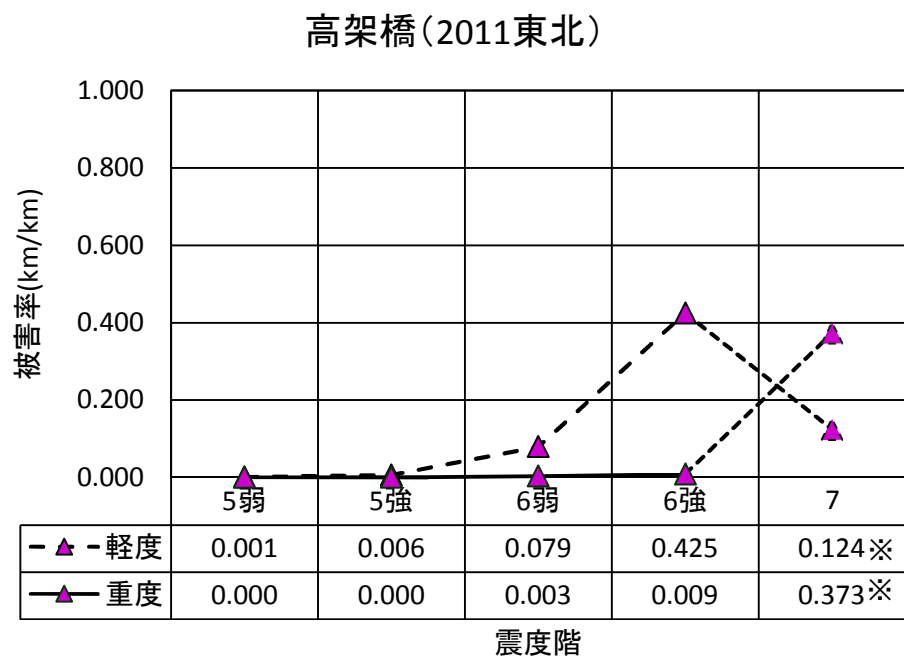
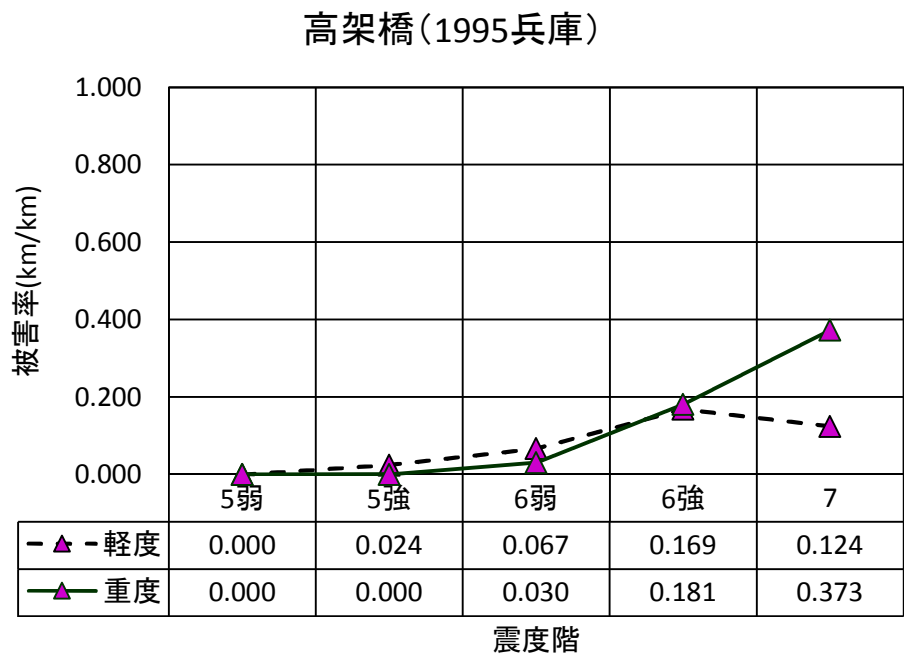


図5.9 橋りょう及びトンネルの被害関数



※2011東北の震度7の軽度・重度の被害率は1995兵庫を適用

図5.10 高架橋の被害関数

表5.3 運休期間の推計に用いる運休モデル

被害 程度	構造種別	地震タイプ	区間最大 震度階	運休 モデル	標準 ケース	長期化 ケース
軽度	全	2011東北	5強以下	L1	1	8
			6弱	L2	20	31
			6強	L3	23	31
			7	L4	34 _{※1}	37 _{※2}
		2011東北 以外	5強以下	L5	2	9
			6弱	L6	2	9
			6強	L7	5	21
			7	L8	15	34
重度	土構造物	全	全	H1	37	123
	その他		全	H2	64	160

※1 運休モデルL8の85パーセンタイル値（34日）を適用

※2 軽度被害区間で発生した最長の運休期間である37日を適用

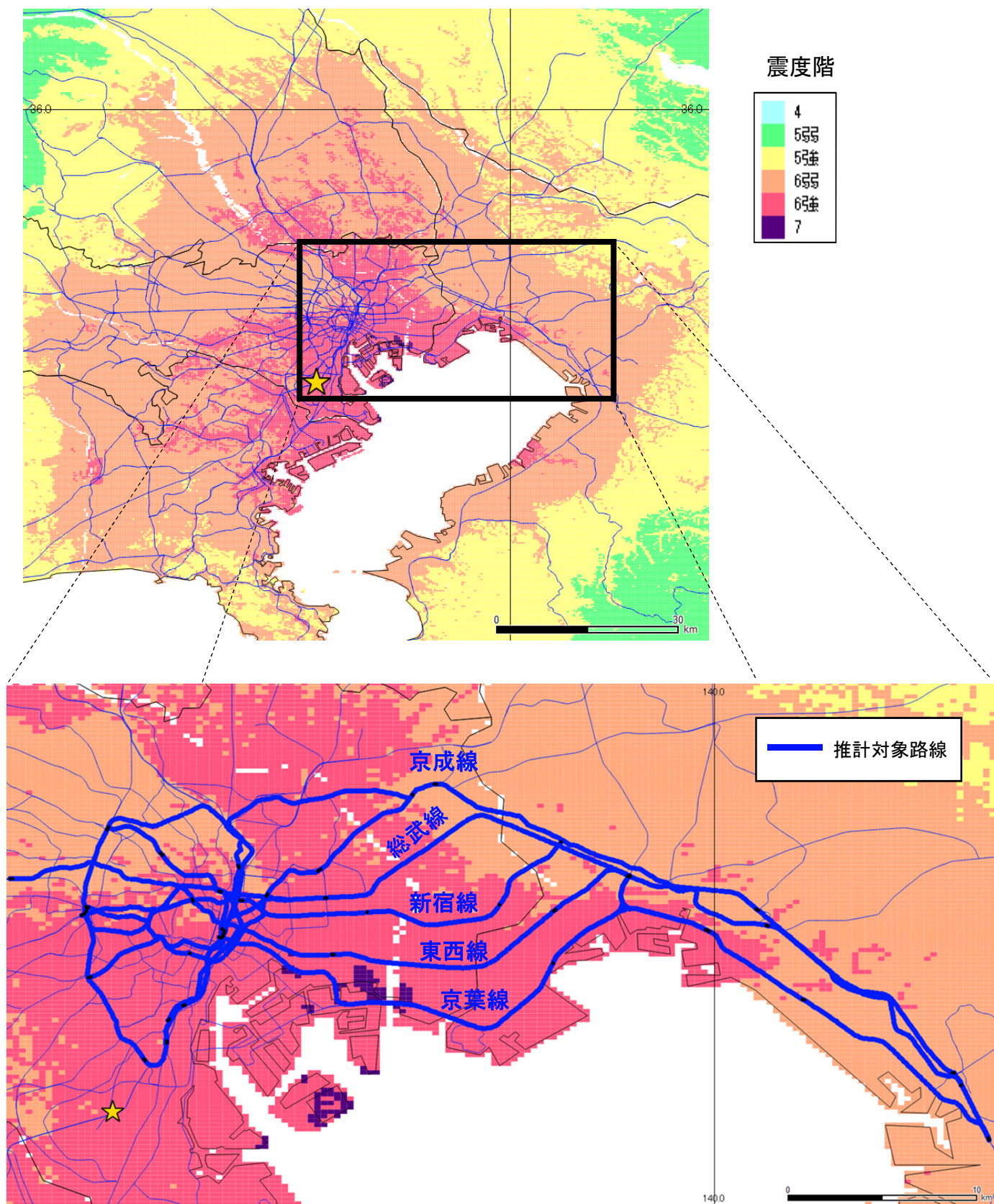


図5.11 都心南部直下地震の推定震度分布と対象路線

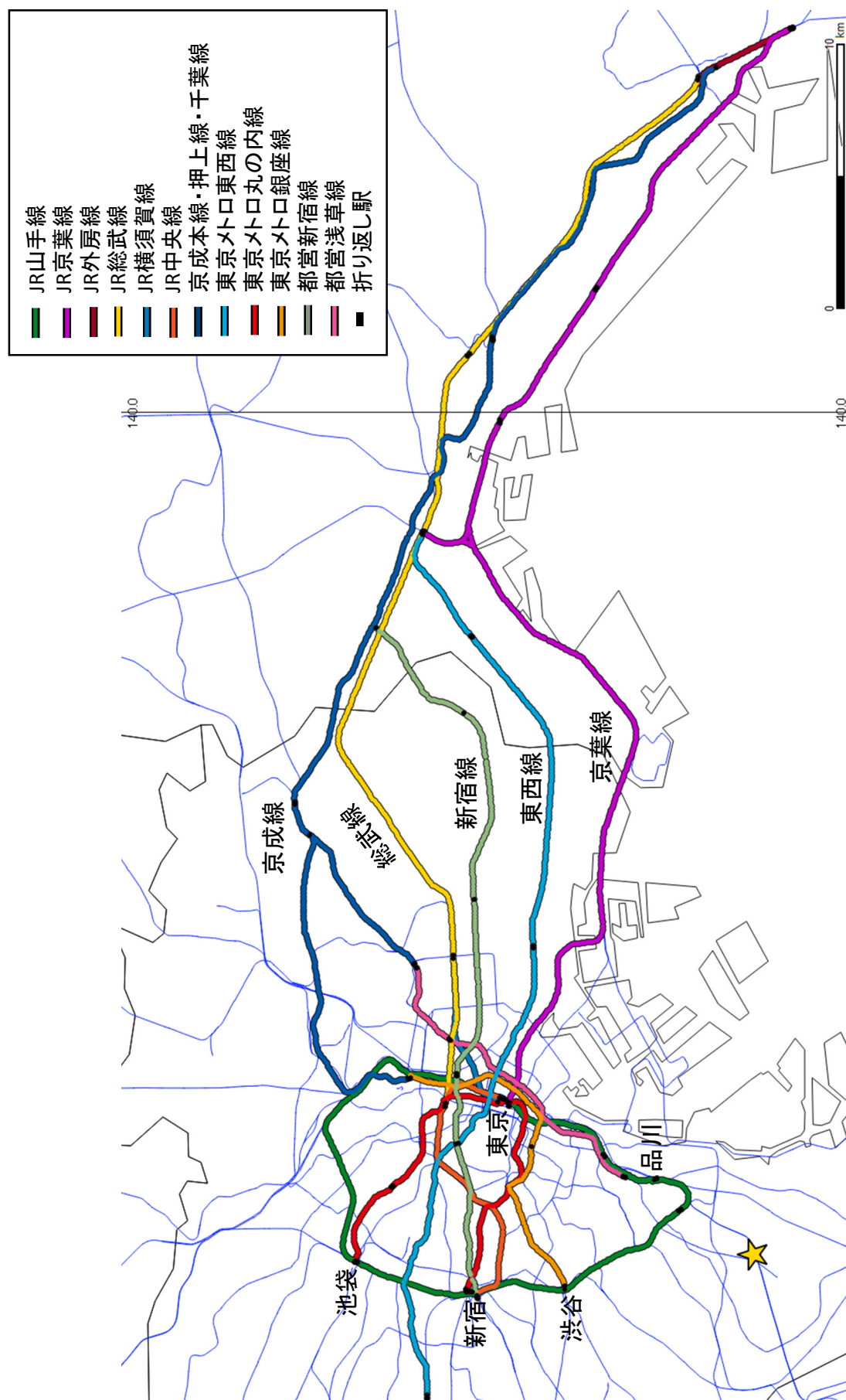


図5.12 対象路線

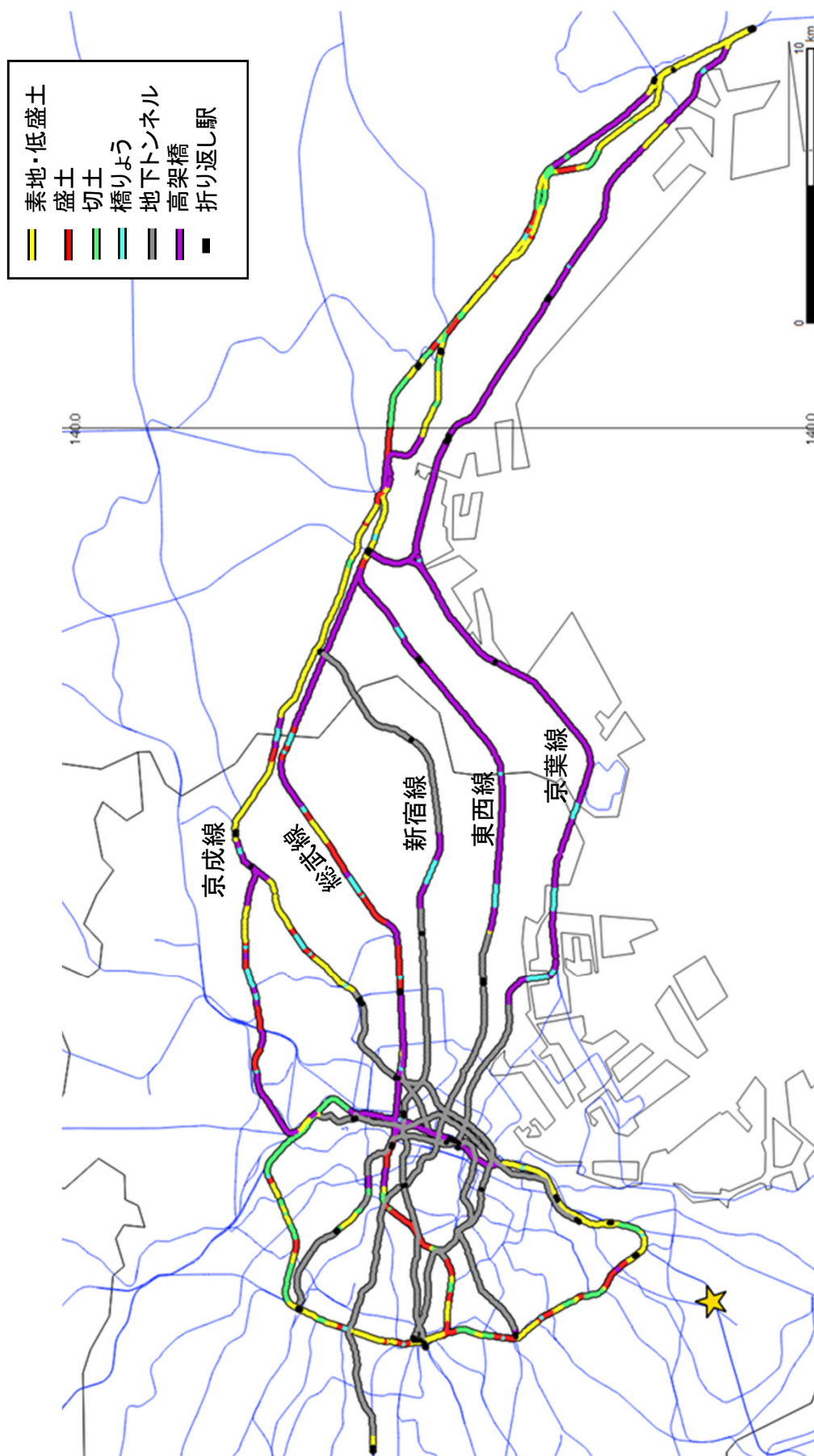


図5.13 対象路線の構造物台帳データ

表5.4 各区分・各構造種別の震度階ごとの延長

事業者	路線	区間	震度6弱						震度6強						震度7						橋りょう 総数 (箇所)	地下T 総数 (箇所)										
			素地 (km)	盛土 (km)	切土 (km)	高架 (km)	他 (km)	橋りょう (箇所)	素地 (km)	盛土 (km)	切土 (km)	高架 (km)	他 (km)	橋りょう (箇所)	素地 (km)	盛土 (km)	切土 (km)	高架 (km)	他 (km)	橋りょう (箇所)			地下T (箇所)									
JR東日本	山手線	大崎～池袋	2.6	0.2	0.3	0.0	0.0	0.1	2	0	3.7	3.3	2.2	0.2	0.5	15	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	13.0	22	0	
		池袋～田町	1.9	0.6	6.0	1.0	0.1	2	0	3.6	0.0	0.8	0.0	0.1	1	3	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	16.6	5	0
	京葉線	東京～南船橋・西船橋	0.0	0.0	0.0	2.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	17.9	6.3	6	5	0.0	0.0	0.0	0.9	1.5	2	1	28.6	8	0	0	5.8	0	0		
		南船橋～海浜幕張	0.0	0.0	0.0	2.3	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	11.2	2	0	
	外房線	海浜幕張～蘇我	2.3	0.0	0.0	8.6	0.3	2	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	4.2	0	0	
		千葉～蘇我	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	4.8	1	0	
	総武線	東京～錦糸町	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.2	0.0	0.0	1.5	3.3	0	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	5.0	0	6	
		御茶ノ水～錦糸町	0.2	0.0	0.0	0.3	0.0	0	0	0.2	0.0	0.0	4.0	0.1	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	4.8	1	0	
	京成	横須賀線	錦糸町～西船橋	0.6	1.1	0.0	6.3	0.7	5	0	0.5	3.5	0.0	1.6	0.8	8	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	15.1	13	0
			西船橋～津田沼	2.2	1.0	1.6	0.9	0.2	4	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	5.9	4	0
中央線		津田沼～千葉	4.7	0.8	2.5	3.8	0.3	5	0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	12.7	6	0	
		東京～品川	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.6	0.0	0.0	0.0	6.0	0	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	6.6	0	3	
京成本線		東京～新宿	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0	0	2.1	4.0	0.9	2.9	0.4	7	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	10.6	7	1	
		京成上野～京成高砂	1.1	0.0	0.0	2.7	1.7	14	2	0.8	1.9	0.0	3.3	1.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	12.5	14	2	
千葉線		京成高砂～京成津田沼	11.1	1.0	0.9	2.9	0.4	8	0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	17.2	8	0	
		京成津田沼～千葉中央	8.9	1.5	2.3	0.0	0.0	6	0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	12.9	6	0	
東京メトロ		押上線	押上～青砥	0.3	0.0	0.0	0.8	0.3	3	0	3.1	0.5	0.0	0.0	0.8	0	2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	5.8	3	2
			中野～九段下	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	5	0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.2	0	6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	8.6	0	11
	東西線	九段下～東陽町	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.1	0	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	6.2	0	12	
		東陽町～妙典	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2	0	0.1	0.0	0.0	8.3	2.4	0	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	10.8	2	4	
	丸の内線	妙典～西船橋	0.3	0.3	0.0	2.0	0.4	1	0	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	4.3	1	0	
		新宿～茗荷谷	0.4	0.0	0.3	0.0	0.5	0	0	0.3	0.0	0.2	0.4	11.4	1	29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	13.5	1	29	
	銀座線	茗荷谷～池袋	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	0	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	3.1	0	5	
		渋谷～虎ノ門	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.3	5.3	0	11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	5.6	0	11	
	新宿線	虎ノ門～上野	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0	2	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	0	17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	6.6	0	19	
		新宿～岩本町	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	0	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	7.1	0	14	
浅草線	岩本町～大島	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	0	14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	5.5	0	14		
	大島～瑞江	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	0	0.0	0.0	0.0	1.6	4.5	0	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	6.1	1	5		
計	浅草線	瑞江～本八幡	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	4.4	0	5	
		泉岳寺～浅草橋	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.1	0	18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	8.1	0	18	
計	浅草線	浅草橋～押上	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.9	0	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	3.1	0	9	
		計	41.3	6.8	13.9	33.6	17.7	60	16	18.5	13.5	4.2	51.6	82.4	43	159	0.0	0.0	0.0	0.9	1.6	2	1	286.0	105	176						

表5.5 各構造種別の推計被害件数

事業者	路線	区間	推計被害件数(軽度)						推計被害件数(重度)						被害 程度
			素地	盛土	切土	橋りょう	地下T	高架橋	素地	盛土	切土	橋りょう	地下T	高架橋	
JR東日本	山手線	大崎～池袋	2.1	4.8	3.3	2.6	0.00	0.09	0.6	1.8	1.2	0.0	0.00	0.00	重度
		池袋～田町	1.3	0.2	2.5	0.6	0.00	2.08	0.4	0.0	0.3	0.0	0.00	0.05	重度
		田町～大崎	1.5	0.0	1.2	0.1	0.00	0.00	0.5	0.0	0.4	0.0	0.00	0.00	重度
	京葉線	東京～南船橋・西船橋	0.0	0.0	0.0	1.4	0.42	7.87	0.0	0.0	0.0	0.0	0.05	0.50	重度
		南船橋～海浜幕張	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	1.67	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.04	軽度
		海浜幕張～蘇我	0.5	0.0	0.0	0.2	0.00	0.68	0.1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.03	軽度
	外房線	千葉～蘇我	0.9	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
		東京～錦糸町	0.1	0.0	0.0	0.0	0.32	0.64	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.01	軽度
		御茶ノ水～錦糸町	0.1	0.0	0.0	0.1	0.00	1.72	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.04	軽度
	総武線	錦糸町～西船橋	0.3	5.5	0.0	1.5	0.00	1.18	0.1	1.9	0.0	0.0	0.00	0.03	重度
西船橋～津田沼		0.5	0.4	0.7	0.3	0.00	0.07	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	0.00	軽度	
津田沼～千葉		1.1	0.8	1.2	0.5	0.00	0.34	0.1	0.2	0.2	0.0	0.00	0.01	軽度	
京成	横須賀線	東京～品川	0.3	0.0	0.0	0.0	0.16	0.00	0.1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
	中央線	東京～新宿	0.9	5.9	1.3	1.0	0.05	1.23	0.3	2.2	0.5	0.0	0.00	0.03	重度
		京成上野～京成高砂	0.6	2.7	0.0	1.1	0.00	1.62	0.1	1.0	0.0	0.0	0.00	0.04	重度
	京成本線	京成高砂～京成津田沼	2.8	0.4	0.4	0.6	0.00	0.23	0.4	0.1	0.1	0.0	0.00	0.01	軽度
		京成津田沼～千葉中央	2.0	0.6	1.0	0.5	0.00	0.00	0.3	0.1	0.1	0.0	0.00	0.00	軽度
	押上線	押上～青砥	1.4	0.7	0.0	0.2	0.11	0.06	0.5	0.3	0.0	0.0	0.00	0.00	重度
		中野～九段下	0.1	0.0	0.0	0.0	0.32	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	なし
	東西線	九段下～東陽町	0.0	0.0	0.0	0.0	0.58	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
		東陽町～妙典	0.0	0.0	0.0	0.2	0.21	3.53	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.07	重度
	東京メトロ	丸の内線	妙典～西船橋	0.1	0.1	0.0	0.1	0.00	0.71	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.02
新宿～茗荷谷			0.2	0.0	0.4	0.1	1.54	0.17	0.1	0.0	0.1	0.0	0.00	0.00	軽度
茗荷谷～池袋			0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	なし
銀座線		渋谷～虎ノ門	0.0	0.0	0.0	0.0	0.58	0.13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
		虎ノ門～上野	0.0	0.0	0.0	0.0	0.90	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
新宿線		新宿～岩本町	0.0	0.0	0.0	0.0	0.74	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
		岩本町～大島	0.0	0.0	0.0	0.0	0.74	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
		大島～瑞江	0.0	0.0	0.0	0.1	0.27	0.68	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.01	軽度
浅草線		瑞江～本八幡	0.0	0.0	0.0	0.0	0.21	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	なし
		泉岳寺～浅草橋	0.0	0.0	0.0	0.0	0.95	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度
		浅草橋～押上	0.0	0.0	0.0	0.0	0.48	0.00	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	軽度	

0.5 : 推計被害件数0.5件以上、高架橋の場合は推計被害延長0.05km以上

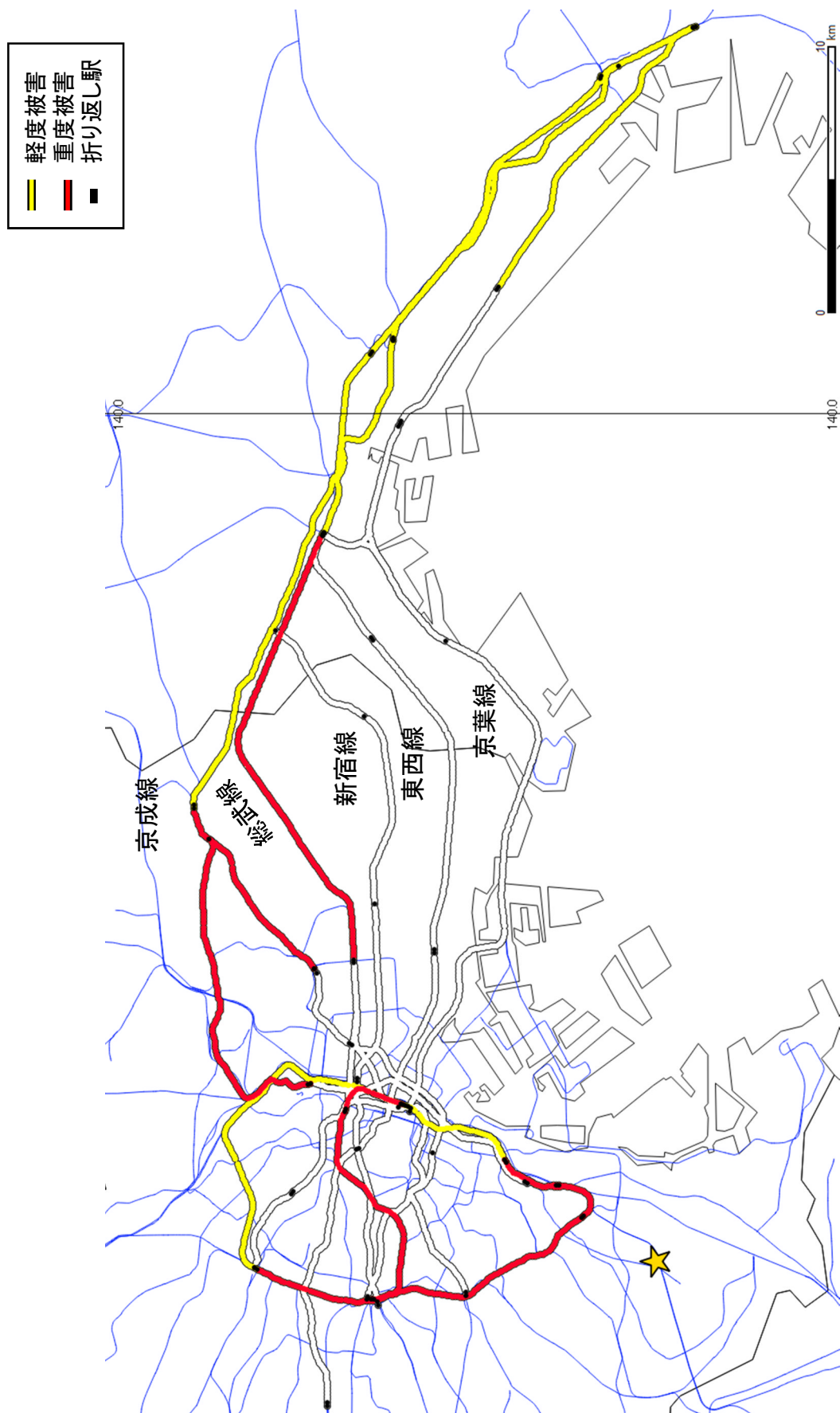


図5.14 土構造物被害が発生すると想定される区間

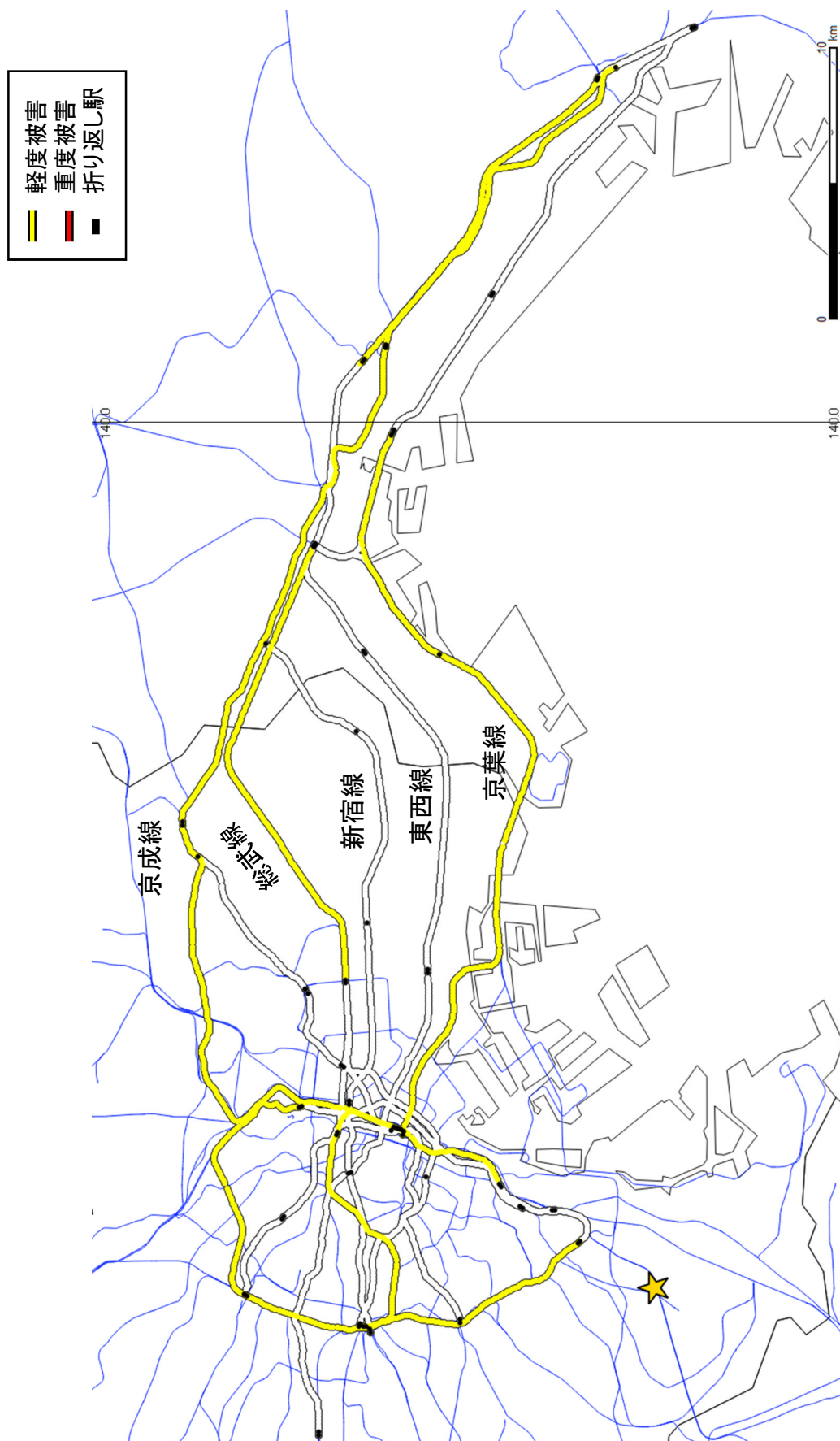


図5.15 橋りよう被害が発生すると想定される区間

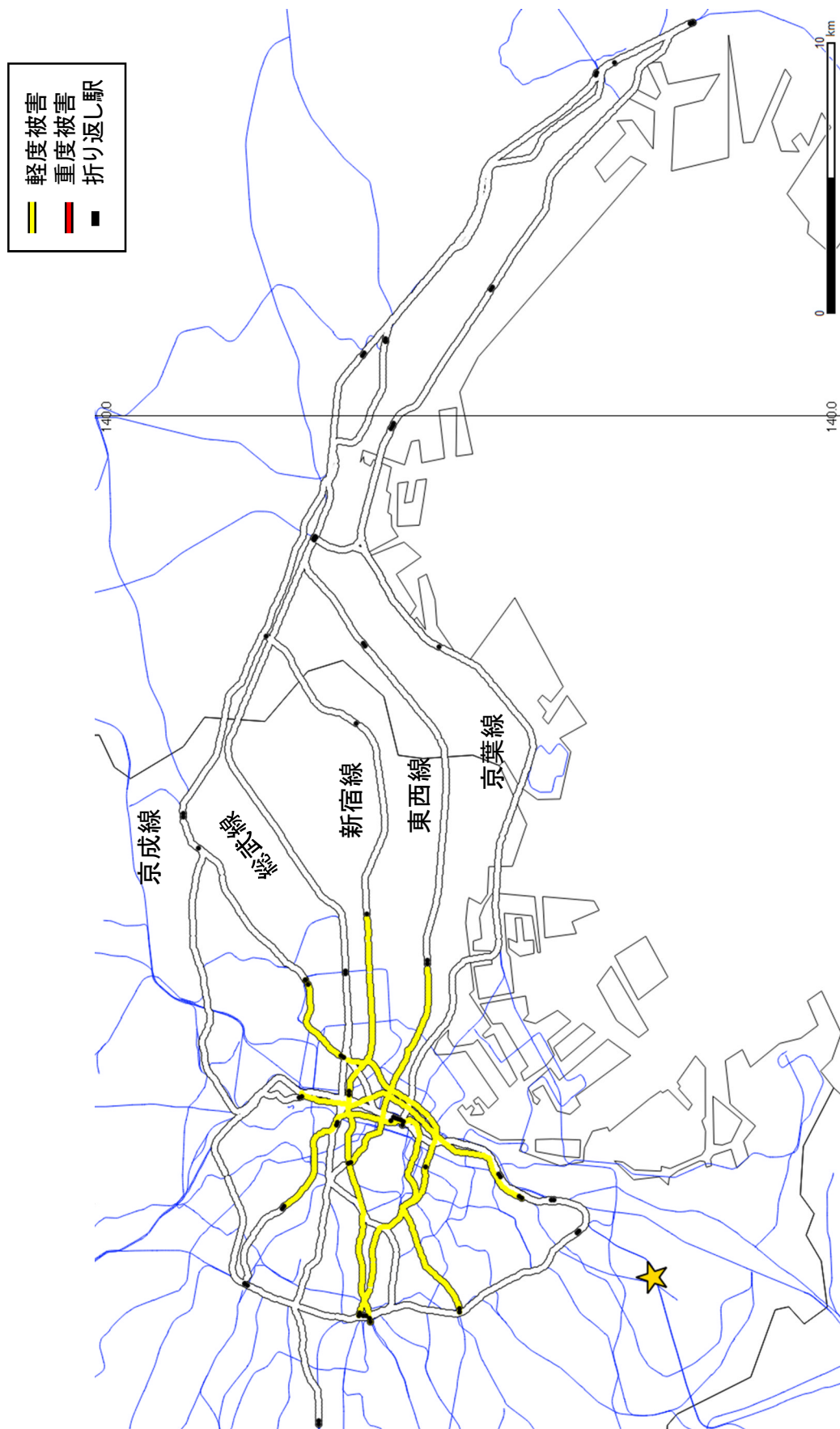


図5.16 地下トンネル被害が発生すると想定される区間

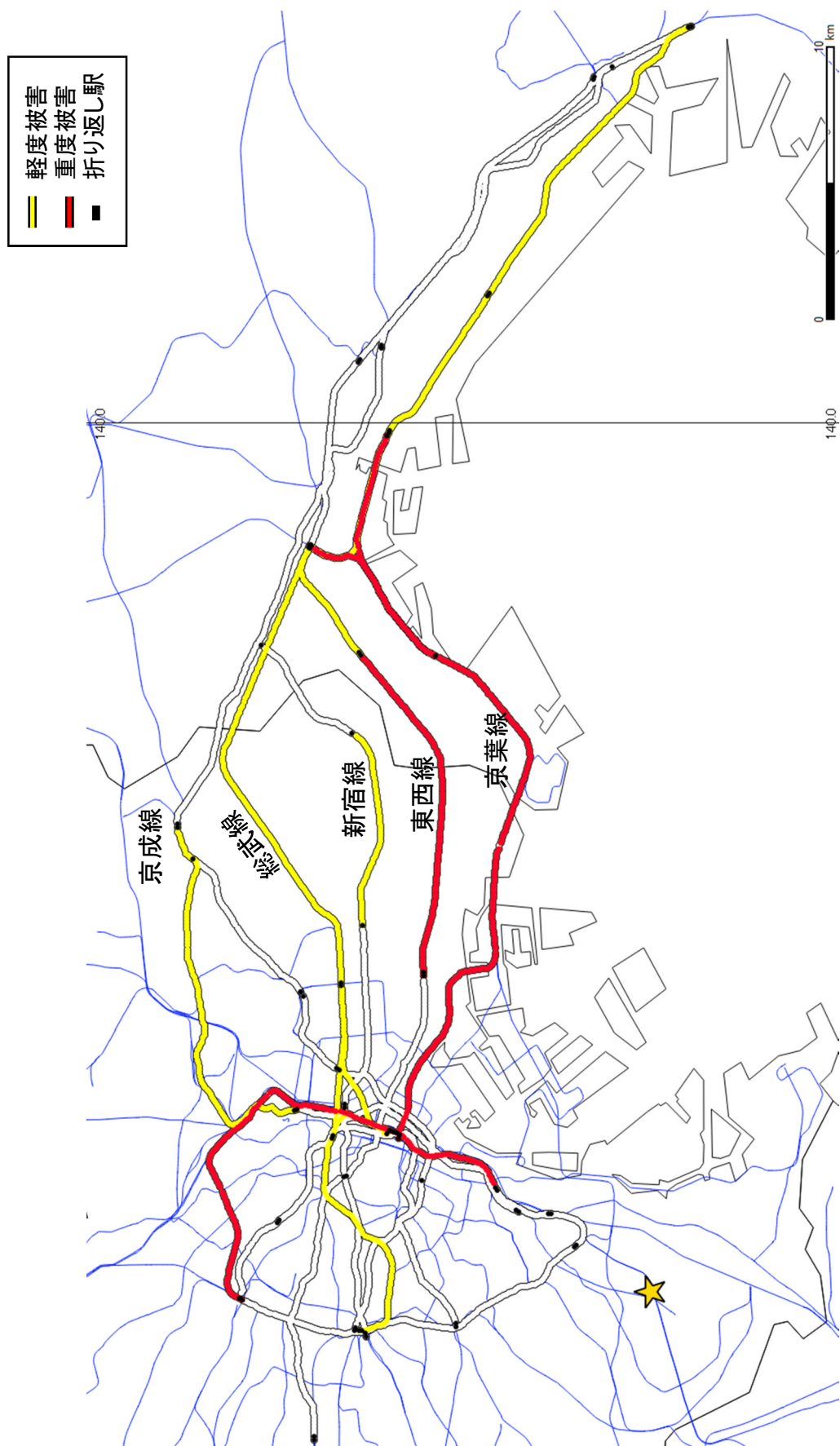


図5.17 高架橋被害が発生すると想定される区間

表5.6 運休期間推計結果

事業者	路線	区間	被害 程度	被害構造 種別	区間最大 震度階	地震タイプ=2011東北			地震タイプ=2011東北以外		
						運休 モデル	推計運休期間(日)	安全側	運休 モデル	推計運休期間(日)	安全側
JR東日本	山手線	大崎～池袋	重度	土構造物	6強	H1	37	123	H1	37	123
		池袋～田町	重度	その他	6強	H2	64	160	H2	64	160
	京葉線	田町～大崎	重度	土構造物	6強	H1	37	123	H1	37	123
		東京～南船橋・西船橋	重度	その他	7	H2	64	160	H2	64	160
		南船橋～海浜幕張	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		海浜幕張～蘇我	軽度	全	6弱	L2	20	31	L6	2	9
	外房線	千葉～蘇我	軽度	全	6弱	L2	20	31	L6	2	9
		東京～錦糸町	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
	総武線	御茶ノ水～錦糸町	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		錦糸町～西船橋	重度	土構造物	6強	H1	37	123	H1	37	123
京成	横須賀線	西船橋～津田沼	軽度	全	6弱	L2	20	31	L6	2	9
		津田沼～千葉	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
	中央線	東京～品川	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		東京～新宿	重度	土構造物	6強	H1	37	123	H1	37	123
	京成本線	京成上野～京成高砂	重度	土構造物	6強	H1	37	123	H1	37	123
		京成高砂～京成津田沼	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
	千葉線	京成津田沼～千葉中央	軽度	全	6弱	L2	20	31	L6	2	9
		押上～青砥	重度	土構造物	6強	H1	37	123	H1	37	123
	東西線	中野～九段下	なし	全	6強						
		九段下～東陽町	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
東京メトロ	丸の内線	東陽町～妙典	重度	その他	6強	H2	64	160	H2	64	160
		妙典～西船橋	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
	銀座線	新宿～茗荷谷	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		茗荷谷～池袋	なし	全	6強						
	有楽町線	渋谷～虎ノ門	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		虎ノ門～上野	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
	丸の内線	新宿～岩本町	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		岩本町～大島	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
	丸の内線	大島～瑞江	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		瑞江～本八幡	なし	全	6強						
東京都	浅草線	泉岳寺～浅草橋	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21
		浅草橋～押上	軽度	全	6強	L3	23	31	L7	5	21

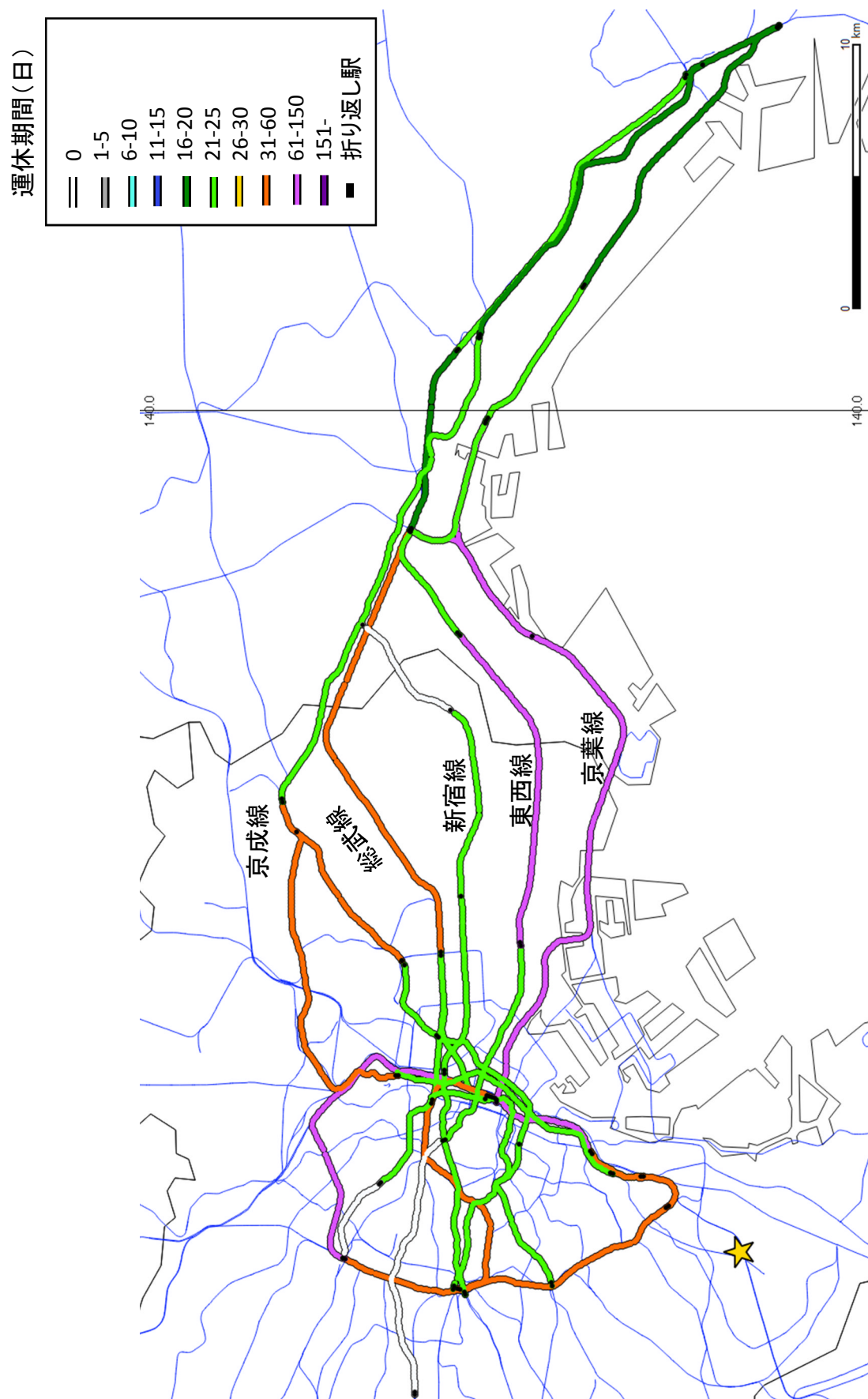


図5.18 運休期間推計結果(地震タイプ:2011東北、平均的ケース)

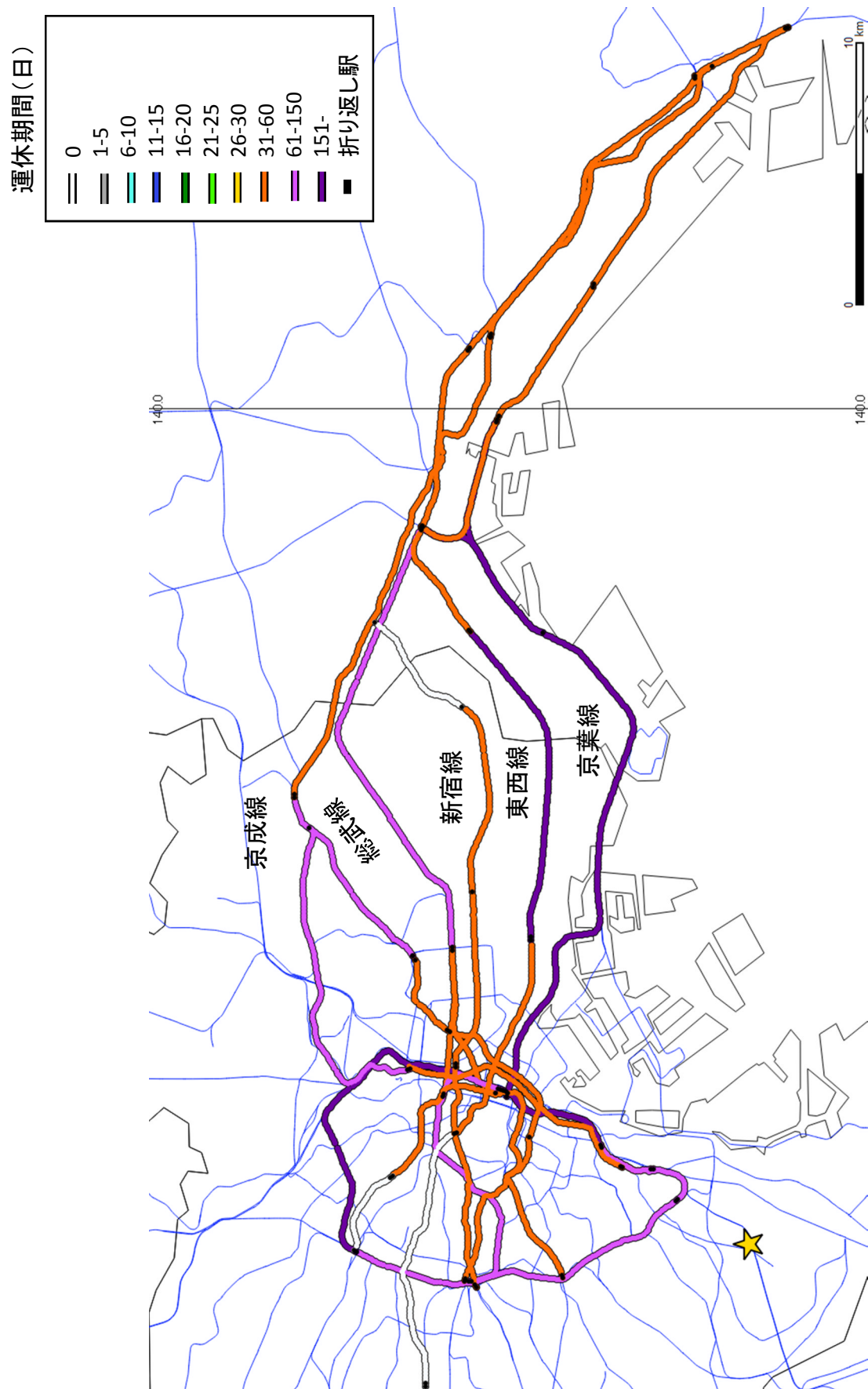


図5.19 運休期間推計結果(地震タイプ:2011東北、長期化ケース)

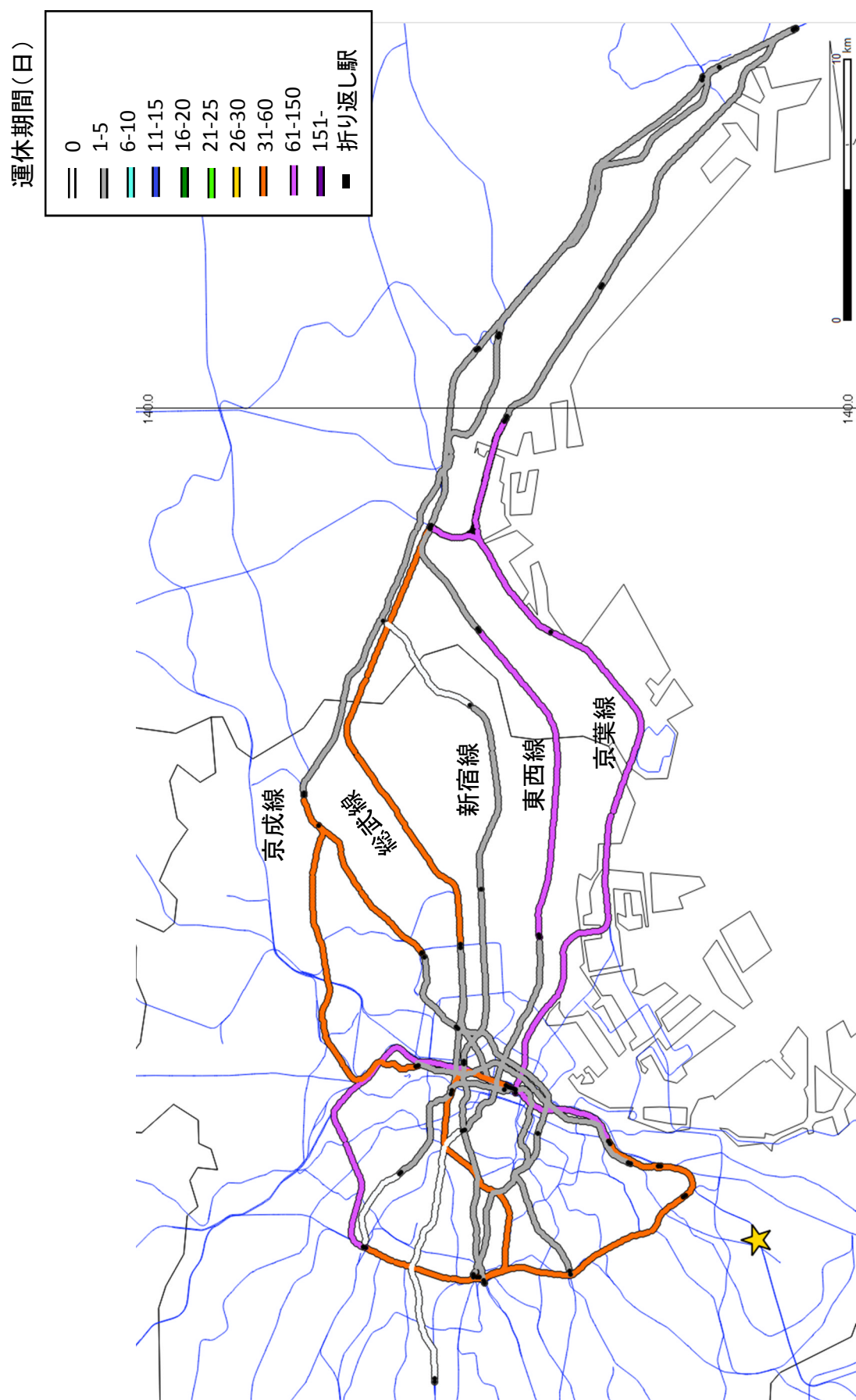


図5.20 運休期間推計結果(地震タイプ:2011東北以外、平均的ケース)

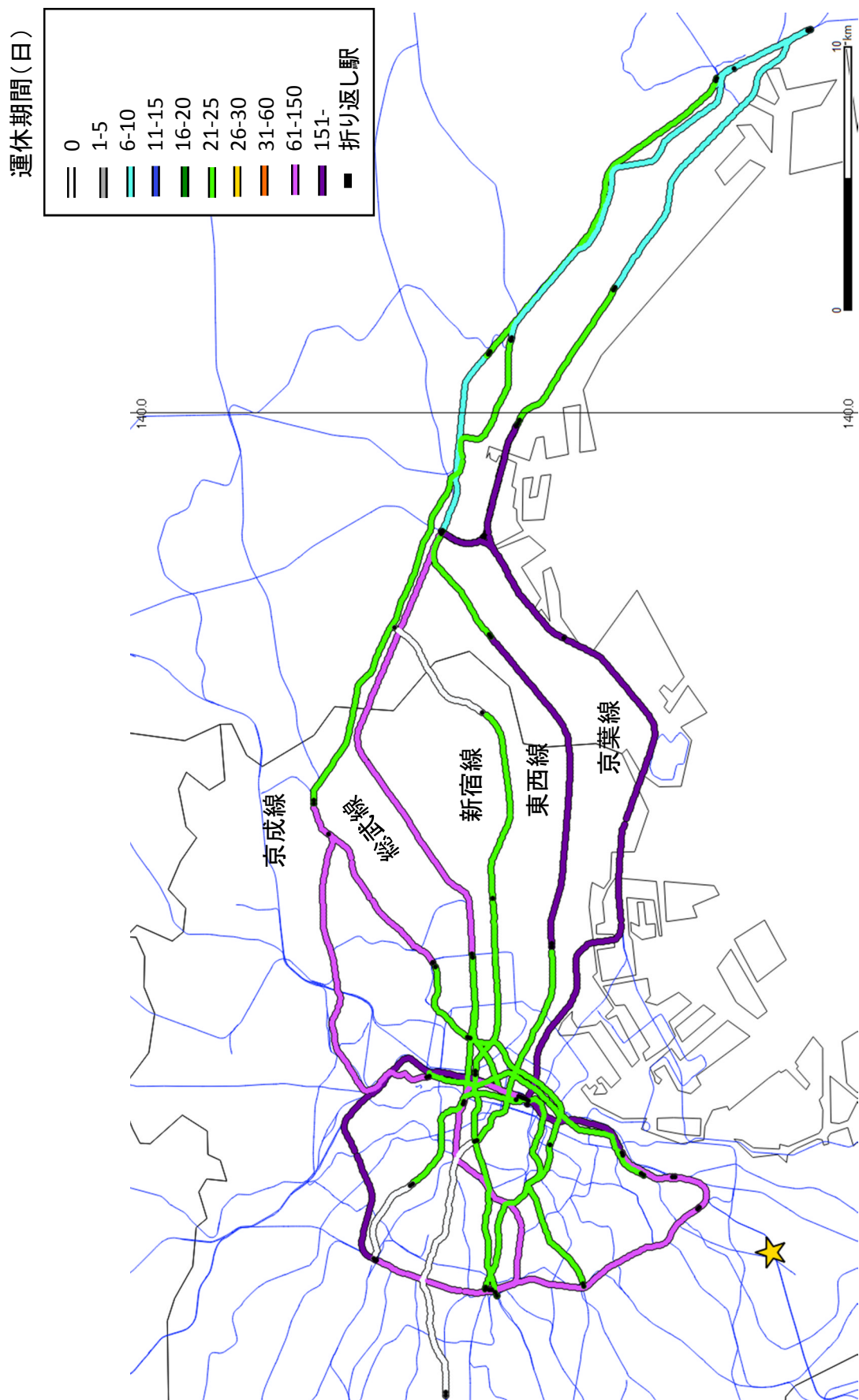


図5.21 運休期間推計結果(地震タイプ:2011東北以外、長期化ケース)

第 6 章 結論

本研究は、広域鉄道網を対象として、事前の地震対策の計画および地震直後の復旧作業の戦略のために適用できる被害推計手法を検討したものである。1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震の 4 地震を検討対象地震とし、地理院地図等の公開データに基づく鉄道構造物台帳データの作成手順を示した上で、過去の鉄道の被害事例を整理し、それに基づく構造種別を考慮した鉄道構造物の地震被害関数と、鉄道構造物被害状況等の要因を考慮した運休期間モデルとを作成し、これらを組み合わせ、広域鉄道網の地震被害推計手順を提案した。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1)対象 4 地震における被害記録の整理結果と鉄道構造物台帳データ、鉄道沿線震度データをもとに、7 区分の構造種別について、震度階毎の被害率を算出し、構造種別を考慮した鉄道構造物の被害関数を作成した。作成した被害関数から、各構造種別の被害発生下限震度が異なることや、同じ震度階でも構造種別や被害程度により被害率が異なること等を定量的に示した。さらに、高架橋の被害関数について、1995 年兵庫県南部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震とで比較検討し、2011 年東北地方太平洋沖地震では、重度被害率が大幅に減少した一方、軽度被害率が増加したものの、軽度被害と重度被害を合計した被害率は同程度であったことを示した。その理由として、1995 年兵庫県南部地震以降施工された耐震補強工事の効果により、重度被害が軽度被害に転換したためとの推察を示した。
- (2)対象 4 地震における鉄道の運休事例をもとに、地震による鉄道の運休期間と、各種要因として、被害程度、被害件数、被害構造種別、地震規模、路線の重要度（輸送密度）との関係について検討した。その結果、軽度被害が発生した区間の運休期間は、地震規模と震度階によって傾向が異なること、および、重度被害が発生した区間の運休期間は、被害構造種別が土構造物とその他とで傾向が異なることを示した。また、この知見をもとに、各種要因と鉄道の運休期間との関係について、被害程度・被害構造種別・地震規模・震度階に応じた 10 区分の運休期間推計モデルを作成した。
- (3)本研究で検討した鉄道構造物台帳データ作成手順、構造種別を考慮した地震被害関数、構造物被害等の各種要因を考慮した運休期間推計モデルを組み合わせることによって、広域鉄道網を対象とする地震被害推計手順を提案した。また、この手順を利用した鉄道の地震被害推計の例として、都心南部直下を震源とする地震を想定し、東京都心部一千葉方面の鉄道各線・各区間の被害件数等の推計と運休期間の推計を実施した。その結果、本論文で提案する手順により、各路線の構造種別が異なるために、被害状況や運休期間が異なる状況が推定され、対象鉄道網の事前対策や事後の復旧戦略に資する情報を提供でき、本推定手順の有効性を示した。

なお、本研究で作成した被害関数は、切土や山岳トンネルなどのように少ないデータをもとに被害率を算出しているものや、2011 年東北地方太平洋沖地震の高架橋の震度 7 のように被害事例データが得られず、被害率を算出できなかったものなどがある。今後、被害データの蓄積やさまざまな構造物モデルに対する地震応答解析結果等を利用して、被害率評価の精度向上を図る必要があろう。

また、本研究で作成した運休期間推計モデルは、運休期間に関係するさまざまな要因のうち主な要因に限定して検討したものである。今回検討対象とした要因以外にも、電気設備や駅設備の被害状況、列車脱線の有無等も運休期間に影響を及ぼすものと考えられ、運休期間推計モデルの精度向上を図る余地があろう。

本研究に関する発表論文

○査読付き論文

- ・ 他谷周一、翠川三郎：構造種別を考慮した鉄道構造物の地震被害関数の検討、日本地震工学会論文集、第 14 巻、第 1 号、2014.
- ・ 他谷周一、翠川三郎：鉄道高架橋区間の地震被害関数の検討、日本地震工学会論文集、第 15 巻、第 4 号、2015（掲載予定）.

○口頭発表

- ・ 他谷周一、高浜勉、翠川三郎：2004 年新潟県中越地震による鉄道構造物被害と計測震度の関係、第 67 回土木学会年次学術講演会、2012.
- ・ Shuichi TAYA and Saburoh MIDORIKAWA : Relationships between Damage to Railway Structures and Seismic Intensity in the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake and the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013.

謝 辞

東京工業大学教授 翠川三郎先生には、本研究を進めるにあたり、終始熱心かつ丁寧にご指導いただきました。また、研究者としての物の見方・考え方などを惜しみなく私にお伝えくださいました。研究が行き詰まり、悩んでいる際には、先生から励ましのお言葉をいただき、そのおかげで挫折しかけたところから立て直せたということも幾度となくありました。心より厚く御礼申し上げます。

東京工業大学教授 山中浩明先生、同教授 盛川仁先生、同准教授 松岡昌志先生、同准教授 室町泰徳先生には、本論文を審査していただくとともに、改善点について貴重なアドバイスをいただきました。盛川先生、松岡先生には、普段お会いした際にもたびたび明るいお言葉をかけていただき、励ましていただきました。厚く御礼申し上げます。

広島大学准教授(元東京工業大学助教) 三浦弘之先生、高知大学講師(元東京工業大学特別研究員) 藤岡正樹先生、東京工業大学特別研究員 司宏俊博士、同特別研究員 飯山かほり博士、株式会社構造計画研究所 高浜勉博士には、研究内容に関する事柄のみならず、社会人博士課程で研究活動を進めていく上での貴重なアドバイスを多数いただきました。厚く御礼申し上げます。

同時期に翠川研究室に在籍した吉村昌宏博士(損害保険料率算出機構)、山口亮博士(損害保険料率算出機構)、正月俊行博士(株式会社構造計画研究所)、佐藤吉之氏(株式会社竹中工務店)、平野悠輔氏(北海道旅客鉄道株式会社)、堀苑子氏(小田急電鉄株式会社)、Soh Hui Chen 氏(ナブテスコ株式会社)、渥美知宏氏(西日本旅客鉄道株式会社)、荒木耕太氏(東海旅客鉄道株式会社)、小林ひかる氏(住友林業株式会社)、沖祐哉氏(大成有楽不動産株式会社)、河村哲哉氏(国土交通省)、三東峻氏(三菱地所プロパティマネジメント株式会社)、野木淑裕氏(株式会社大林組)、堀愛里香氏、三浦太郎氏、山崎暢允氏、学生部屋を共にした松岡研究室所属の大串文誉氏(ExelisVIS 株式会社)、篠原崇之氏(株式会社パスコ)、河野洋行氏、Hatice Kubra Oguz 氏、Patcharavadee Thamarux 氏、Vidya Nahdhiyatul Fikriyah 氏、石井友氏、賀川健人氏、西澤勇祐氏、陳龍澤氏には、研究室仲間としてオン・オフ両面で気さくに接していただきました。皆様のおかげで楽しい研究生活を送ることができました。ありがとうございました。

翠川研究室秘書 神前芳美氏には、事務手続き等で大変お世話になりました。また研究生活を過ごす上でも、暖かいお心遣いをいただきました。ありがとうございました。

会社に籍をおきながら社会人博士課程に進学し、研究活動を行うにあたり、東海旅客鉄道株式会社の皆様より、多大なるご支援をいただきました。特に入学当時の上司であった井上陽一氏、中嶋繁氏は、私が社会人博士課程に進学したい旨相談した際に、親身になって相談に乗っていただくとともに、私の進学のための社内調整に奔走していただきました。また、在学中に上司であった田畑裕氏、津田英朗氏、畑中達彦氏、庄治朋宏氏は、私が本来業務と並行して社会人博士課程で研究活動を行うことについてご理解をいただき、業務上でもさまざまなご配慮をしていただきました。直属の部下であった児玉聡氏、梁田真広氏、岡本弘氏は、各自の業務を自主的・自立的に遂行することで、私が本来業務と研究活動を両立できる環境を整えてくださいました。厚く御礼申し上げます。

私が本来業務に加え、研究活動まで始めたことで多忙となり、ときには家庭のことがおろそかになってしまうこともありましたが、妻なお子、長男悠真、次男祥真が家庭を支えてくれました。おかげで私は研究に邁進することができました。ありがとうございました。

このほかにも、数多くの親族・友人・知人より、叱咤・激励のお言葉、お心遣いを多数いただきました。皆様に支えられて、私は4年半にわたる研究活動を続け、本学位論文を上梓することができました。深く感謝申し上げます。

本研究では、防災科学技術研究所、気象庁、自治体震度情報ネットワーク、東日本旅客鉄道、東日本高速道路の強震記録及び防災科学技術研究所の地盤データ(J-SHIS)を使用させていただきました。2011 年東北地方太平洋沖地震における鉄道構造物被害事例データの収集にあたっては、各鉄道事業者の担当者の方々より構造物被害状況についてご教示いただきました。1995 年兵庫県南部地震の震度分布の推計にあたっては、千葉科学大学教授 藤本一雄先生よりデータをご提供いただきました。記して謝意を表します。

