



## 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

高浜 勉<sup>1)</sup>、翠川 三郎<sup>2)</sup>

- 1) 正会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻、修士（工学）  
e-mail : takahama@enveng.titech.ac.jp
- 2) 正会員 東京工業大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻、教授 工博  
e-mail : smidorik@enveng.titech.ac.jp

### 要 約

1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震による鉄道構造物の被害資料を収集・整理し、被害発生地点を震度分布と重ね合わせ、計測震度とメッシュ単位での鉄道構造物の被害率との関係を地形・地盤分類ごとに整理した。さらに被害率の傾向が類似した地形・地盤分類を統合し、震度4～7で適用可能な被害関数を構築した。その結果、鉄道構造物の被害は震度5強程度から生じ始めること、被害率は山地・丘陵や谷底低地などで高いことを確認した。

キーワード：鉄道構造物、震度分布、被害関数、地形・地盤分類、メッシュマップ

### 1. はじめに

鉄道は重要な交通手段の一つであり、地震時に鉄道が被害を受け運休した場合には大きな影響が生じる。例えば1995年兵庫県南部地震では、神戸－大阪間を結ぶ主要な3路線が長期間不通となった。復旧までには、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ヶ月かかり<sup>1)</sup>、物資輸送や人の移動に長期間に渡って影響を及ぼした。首都圏の直下でもM7クラスの地震の発生が懸念されており、その際には鉄道構造物に被害が発生し、長期間の運休により多くの鉄道利用者が影響を受けることが予想される。このような将来起こりうる地震に対し鉄道構造物の被害を予測し、その対策を検討することは重要である。

地震時の鉄道構造物の被害の程度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<sup>2)</sup>。室野・芦谷<sup>3)</sup>は、鉄道橋脚や高架橋をモデル化して応答解析を行い、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予測する方法を提案している。各構造物の耐震性能や設置位置などの詳細な情報が利用できる場合には、この方法により精度良く被害を予測することが可能であり、有用であるといえる。

しかし、自治体の被害想定など、広域を対象とし、詳細な構造物の情報が利用できない場合には、少ない情報で被害予測が可能である、より簡便な方法が用いられる場合が多い<sup>4)</sup>。例えば、埼玉県(1982)<sup>5)</sup>による、1978年宮城県沖地震の被害事例から作成された被害関数がある。これは当時の仙台鉄道管理局管内での鉄道構造物の被害のうち、路盤等の施設関係で鉄道車両が通行不能となるような被害程度に限定して集計した被害数を路線総延長で除して求められた被害率であり、旧震度階IV、V、VIでの値が示されている。また、被害率は地盤種別（1～4種）ごとに求められており、被害が地形や地盤条件にも影

響されること<sup>6,7)</sup>が考慮されている。ただし、この被害関数の震度V以外の被害率は震度Vの値から推定した値とされているが、その推定方法や被害データの集計方法は明記されていない。

1995年兵庫県南部地震の被害事例から作成された被害関数としては、東京都<sup>8)</sup>によるものがある。この被害関数は在来線については落橋・倒壊、橋脚（被災程度別）、桁ずれ、橋台の損傷、アーチ橋の損傷、盛土・土留壁の被害箇所数を、新幹線については落橋・倒壊の被害箇所数を震度別（7、6強、6弱）に整理し、これを路線総延長で除して求めた落橋・倒壊率（新幹線・在来線）とその他の被害率（在来線のみ）を示したものである。なお、この被害関数では震度6弱未満の評価がないが、過去の事例では鉄道構造物の被害は震度5強から生じ始めるという指摘もある<sup>9)</sup>。

その他、これらの既往の鉄道構造物の被害関数は、単一の地震による被害事例から作成されたものであることから、それぞれ適用可能な震度の範囲も限られている。本研究では、広域を対象とした地震被害想定のように、詳細な構造物の情報が利用できない場合に利用可能な鉄道構造物の被害関数を構築する。また、既往の地震時の鉄道構造物の被害予測で用いられている1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震の被害事例に加えて、近年鉄道構造物に多くの被害が発生した2004年新潟県中越地震の被害事例を収集し、3地震の事例を総合することにより、より広い震度の範囲で適用可能な被害関数を構築する。被害の整理は地形・地盤分類ごとに行い、地形・地盤と被害率との関係についても検討を行う。なお、本研究では在来線の被害関数を作成することを目的とし、新幹線の被害は含めないものとする。

## 2. 鉄道構造物の被害資料の収集と被害地点の推定

鉄道構造物の被害が記載された資料が数多く存在する1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震を対象として、鉄道構造物の被害について網羅的に記載されている資料、被災した構造物の所在地や名称、各路線の起点からの距離であるキロ程など、被害発生地点が推定可能な情報が記載されている資料を収集した。

1978年宮城県沖地震については、鉄道技術研究所の調査資料<sup>10)</sup>では、路盤構造物の被害として路盤、築堤、橋台、線路、土留壁等の被害発生地点のキロ程、構造物の名称、被災延長とその被害量（例えば沈下量など）が一覧表に整理されている。その他、被害を受けた高架橋柱や橋脚の位置や、停車場工作物関係の被害の一覧表が掲載されている。土木学会の資料<sup>11)</sup>では、鉄道技術研究所の調査資料<sup>10)</sup>と同様の記載の他、被害を受けたトンネルの名称、キロ程、被害内容について記載がある。2004年新潟県中越地震については、JR東日本の資料<sup>12)</sup>では被害発生地点のキロ程と構造物の名称、被害の内容と被害量、橋梁、高架橋、切盛ほか、トンネル、停車場などの被害内容の分類が一覧表に整理されている。

1995年兵庫県南部地震については、前述の東京都(1997)<sup>8)</sup>による被害率の作成でも参照されている資料<sup>1)</sup>に、被害が発生した路線について駅間ごとに高架橋・橋梁の被害として落橋・倒壊数、橋脚・高架橋柱の被災程度と本数、桁ずれ、橋台損傷、アーチ橋損傷の数、山岳トンネルの覆工損傷が発生した場合トンネルの名称、開削トンネルの側壁損傷長さ、損傷中柱本数、被災箇所延長、盛土・土留壁の被害箇所と延長、停車場設備の被災箇所とその内容、軌道変状の有無、電気設備の被害内容が整理された一覧表と、鉄道事業者ごとの被害調査結果が記載されている。ただし、この資料のみでは被害発生地点を特定できないものも多いため、国、鉄道事業者、大学などによる複数の調査資料<sup>2,13~22)</sup>を合わせて参照して、この一覧表に記載されている各被害の発生地点をできる限り特定した。

これらの資料から収集する被害内容は、橋梁、高架橋、山岳トンネル、開削トンネル、橋台、盛土、築堤などの構造物の被害、軌道の変状、停車場の被害とし、架線や電気設備などの被害は含めていない。被害の程度については、記載が無く不明なものも多く存在する。しかしこれらを除外するとデータ数が少なくなること、資料に記載された被害は、数多く発生した被害の中で記載すべき重要なものと判断された内容であると考えられることから、前述の対象とした構造物に関する被害内容は、記載されているものを全て用いることとした。

鉄道路線の位置は数値地図<sup>23)</sup>の鉄道のラインデータとし、この上に被害をプロットした。被害発生地点がキロ程で記載されている場合は、駅と被害発生地点のキロ程の差より駅から被害発生地点までの距離を求め、この距離をラインデータ上で計測してプロットした。駅のキロ程が資料に記載されていない場合は、時刻表に記載されている各駅の営業キロで代用した。被災した構造物の種別や名称、被害発生

表1 1978年宮城県沖地震での路線ごとの被害箇所数

事業者	路線名	駅間		総延長 (km)	被害 箇所数
日本国有鉄道	東北本線	金谷川	石越	159.5	98
	東北本線宮城野貨物線	長町	東仙台	6.6	9
	東北本線利府支線	岩切	利府	4.2	2
	陸羽東線	小牛田	羽前赤倉	61.1	32
	気仙沼線	前谷地	本吉	51.5	48
	石巻線	小牛田	女川	44.9	23
	仙石線	仙台	石巻	50.5	39
	丸森線	槻木	丸森	17.4	6
	仙山線	仙台	作並	28.7	4
合計				424.4	261

表2 1995年兵庫県南部地震での路線ごとの被害箇所数

事業者	路線名	駅間		総延長 (km)	被害 箇所数
西日本旅客鉄道	山陽本線	神戸	大久保	25.6	12
	福知山線	尼崎	生瀬	19.7	6
	東海道本線	塚本	神戸	29.7	21
	和田岬線	兵庫	和田岬	2.7	2
神戸高速鉄道	東西線	西代	三宮,元町	7.2	2
神戸市営地下鉄	山手線・西神線	新神戸	妙法寺	12.0	5
神戸電鉄	有馬線	新開地	有馬温泉	22.5	16
	粟生線	鈴蘭台	西鈴蘭台	0.8	4
山陽電鉄	本線	西代	西江井ヶ島	24.9	23
阪急電鉄	神戸線	神崎川	三宮	28.2	16
	宝塚線	三国	宝塚	20.1	1
	今津線	宝塚	今津	9.3	3
	伊丹線	塚口	伊丹	3.1	1
	甲陽線	夙川	甲陽園	1.3	2
阪神電鉄	本線	杭瀬	元町	24.4	40
	西大阪線	尼崎	出来島	2.3	1
	武庫川線	武庫川	洲先	1.1	1
神戸新交通	ポートアイランド線	三宮	市民広場 中公園	6.4	11
	六甲アイランド線	住吉	マリンパーク	4.5	7
北神急行電鉄	北神線	新神戸	谷上	7.5	3
合計				253.3	177

表3 2004年新潟県中越地震での路線ごとの被害箇所数

事業者	路線名	駅間		総延長 (km)	被害 箇所数
東日本旅客鉄道	信越本線	直江津	新潟	136.3	31
	越後線	柏崎	新潟	83.8	4
	上越線	越後中里	宮内	75.2	50
	只見線	大白川	小出	26.0	23
	飯山線	森宮野原	越後川口	47.0	51
合計				386.3	159

地点の所在地のみ記載されている場合は、地形図や道路地図などを参考に位置を推定してプロットした。被害が発生した長さや区間については、数値が記載されている場合や記載内容から判断できる場合はデータに反映した。各地震による路線ごとの被害箇所数と本研究で考慮した総延長を表1~3に示す。なお、表中の事業者・路線・駅名は地震発生当時のものであり、現在の名称とは異なるものもある。

### 3. 震度分布の推定

鉄道路線の位置での計測震度を得るため、前述の3地震の震度分布を推定した。1978年宮城県沖地震では神山・松川(1979)<sup>24)</sup>により宮城県内で実施されたアンケート震度調査実施地点(506地点)、2004年新潟県中越地震では気象庁、自治体、国土交通省、日本道路公団(当時)、JR東日本による地震観測点(計230地点)(以降これらを観測点という)で得られた地震動強さを基に、以降に示す手順にて震度分布を推定した。

まず、1978年宮城県沖地震のアンケート震度調査結果は気象庁旧震度階のIV、V、VIをそれぞれ2段階に分けた震度階で整理されているため、これを計測震度を読み替えた。2004年新潟県中越地震については、観測記録から算出することにより計測震度を得た。次に、Wakamatsu et al.(2006)<sup>25)</sup>による250mメッシュ地形・地盤分類を利用し、松岡ほか(2005)<sup>26)</sup>による関係式を用いてメッシュごとに深度30mまでの平均S波速度( $AVS30$ )を推定した。この $AVS30$ と藤本・翠川(2005)<sup>27)</sup>による $AVS30$ と最大速度の増幅度( $AF$ )との関係式を用いて、メッシュごとの $AF$ を推定した。各観測点の計測震度は、藤本・翠川(2005)<sup>28)</sup>による計測震度と最大速度の関係式を用いて地表の最大速度( $PGV$ )に変換し、これを各観測点が位置するメッシュの $AF$ で除すことにより、各観測点での $AVS30$ が600m/s程度である基準地盤上における最大速度( $PRV$ )を推定した。

このようにして求めた各観測点の $PRV$ を距離減衰式で平均値を与える単純型クリギング法<sup>29)</sup>で補間した。距離減衰式は司・翠川(1999)<sup>30)</sup>による式を用いた。震源断層のパラメータとしては、1978年宮城県沖地震は佐藤(1989)<sup>31)</sup>に掲載されている値を、2004年新潟県中越地震は国土地理院<sup>32)</sup>の値を使用した。補間により求めた250mメッシュ中心位置での $PRV$ を各メッシュの値とし、これと $AF$ とを掛け合わせ各メッシュの $PGV$ を求め、最後に藤本・翠川(2005)<sup>28)</sup>による計測震度と最大速度の関係式を用いて $PGV$ を計測震度に変換した。

1995年兵庫県南部地震については、アンケート震度の調査結果<sup>33)</sup>が存在するものの、アンケート震度は高震度での適用性に問題がある。その他、観測記録など、他の2地震と同様に点のデータから補間計算ができるだけの十分なデータを収集できなかった。そこで、藤本・翠川(1999)<sup>34)</sup>による、現地調査に基づいた計測震度5.5以上、6.0以上、6.5以上の3領域の震度分布のコンターを利用することとした。本研究ではこの領域を250mメッシュに置き換えた後、5.5以上と6.0未満の間および6.0以上と6.5未満の間を補間によりそれぞれ2分割して、5.50~5.75、5.75~6.00、6.00~6.25、6.25~6.50、6.50以上の合計5段階の領域として用いた。

以上のように各地震で推定した震度分布およびWakamatsu et al.(2006)<sup>25)</sup>による250mメッシュ地形・地盤分類と鉄道構造物の被害発生地点を重ね描いた図を図1~3に示す。

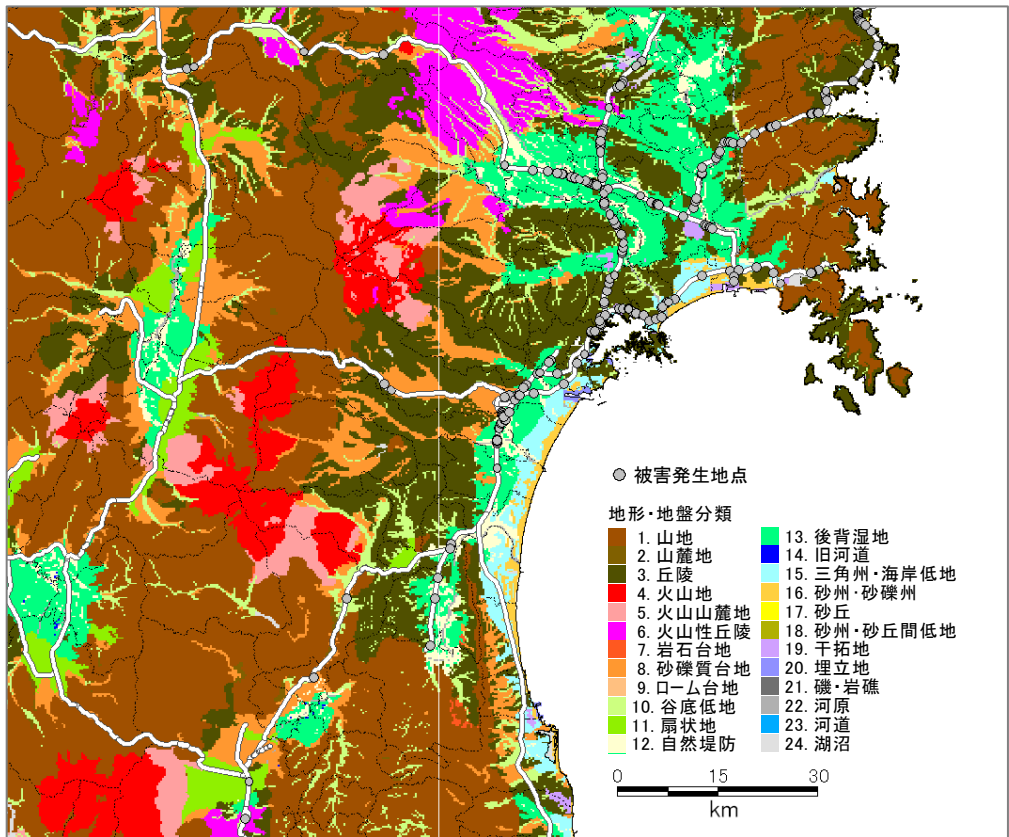


図1(1) 1978年宮城県沖地震での地形・地盤分類図と被害発生地点

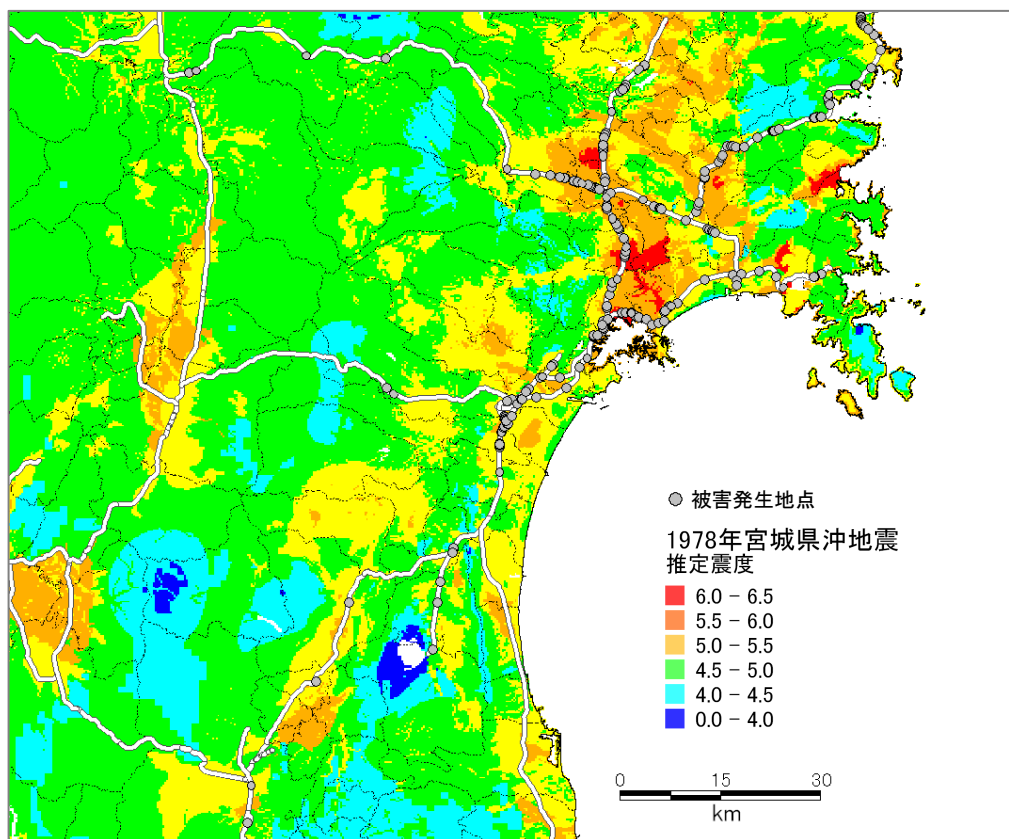


図1(2) 1978年宮城県沖地震での推定震度分布図と被害発生地点

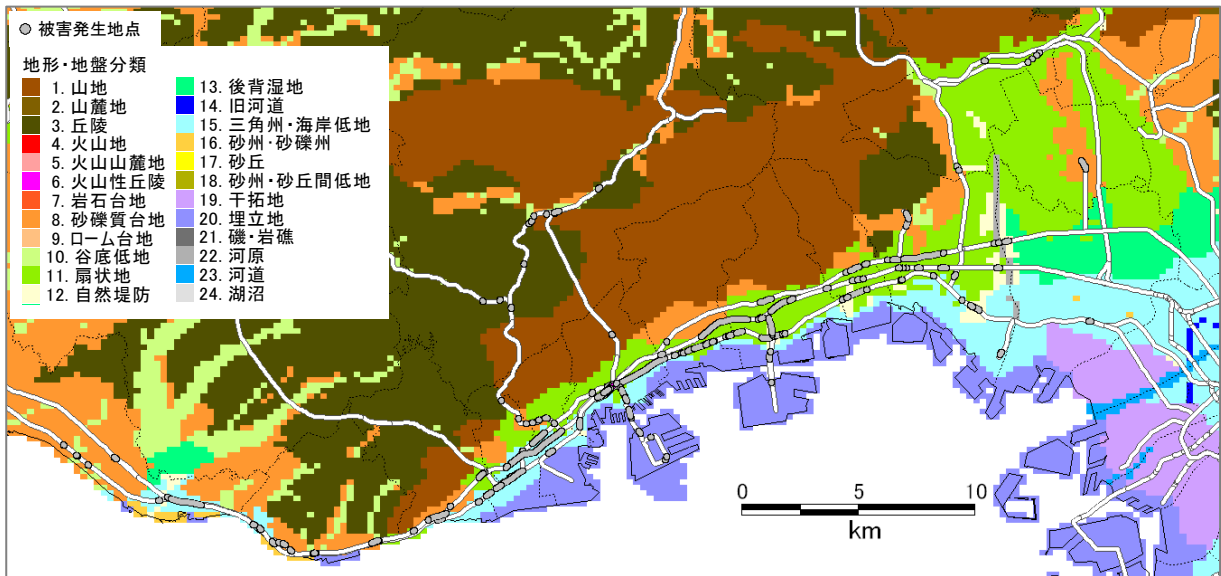


図2(1) 1995年兵庫県南部地震 地形・地盤分布と被害発生地点

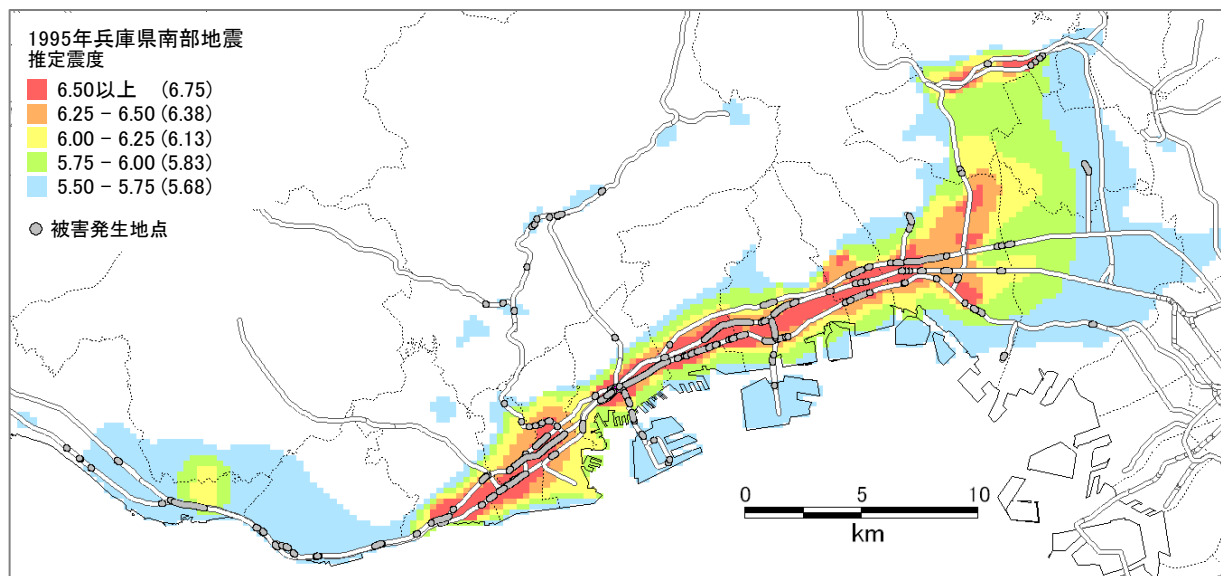


図2(2) 1995年兵庫県南部地震での推定震度分布図と被害発生地点

#### 4. 計測震度と鉄道構造物の被害との関係

##### 4.1 被害の整理方法

過去の地震での被害事例でも指摘されているように、被害の発生しやすさは高架橋、橋梁、盛土のような構造種別で異なる可能性がある。そのため、被害を構造種別ごとに整理して、それぞれの被害関数を構築することが望ましいと考えられる。構造種別ごとの被害関数を作成するためには、被害の有無を問わず、検討に用いる全路線区間での地震動強さと構造種別情報が必要となる。本研究では、地震ごとに震度分布を推定しているため、検討に用いる全路線区間の任意の地点において地震動強さを得ることは可能である。しかし、構造種別については、被害地点の構造種別は資料から推定可能であるが、無被害の区間を含めた全ての路線区間での構造種別情報を得ることができなかった。

一方、前述のように、鉄道構造物の被害と地形や地盤条件との関連性も指摘されている。地形や地盤の条件は地盤の揺れやすさ、液状化や斜面崩壊の起こりやすさなどと関係するなど、構造物の被害要因



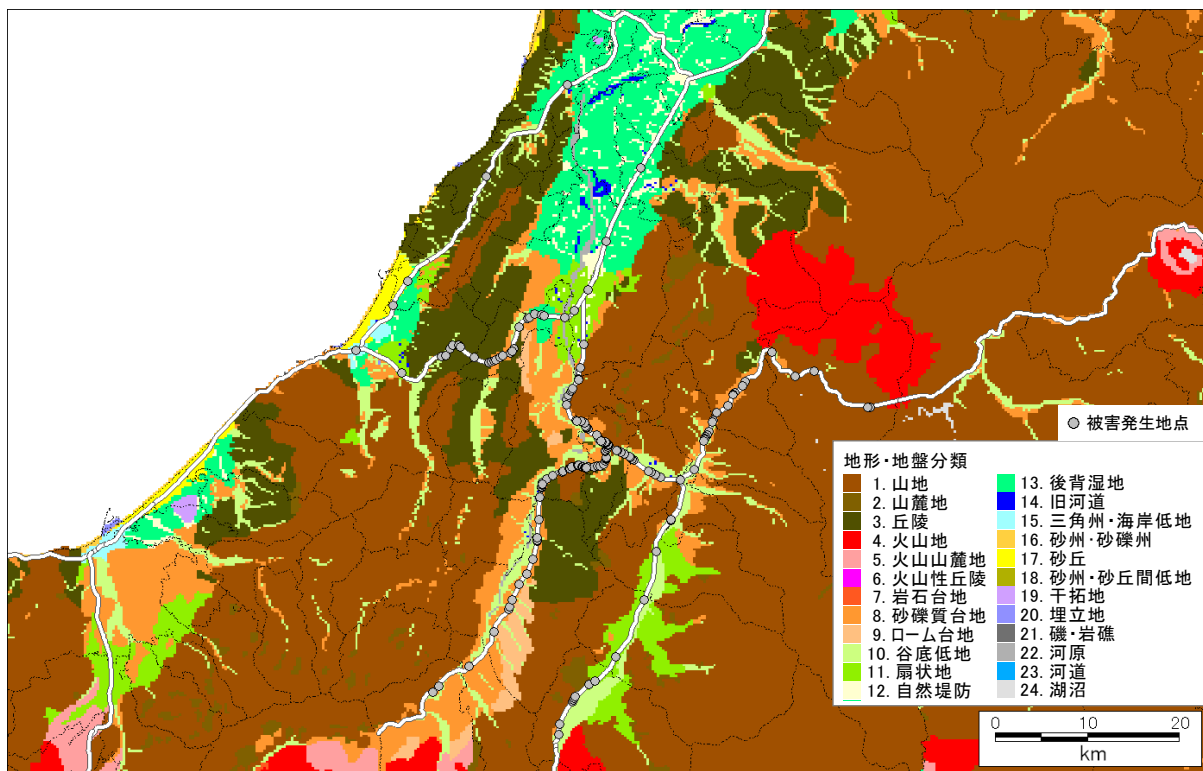


図3(1) 2004年新潟県中越地震での地形・地盤分類図と被害発生地点

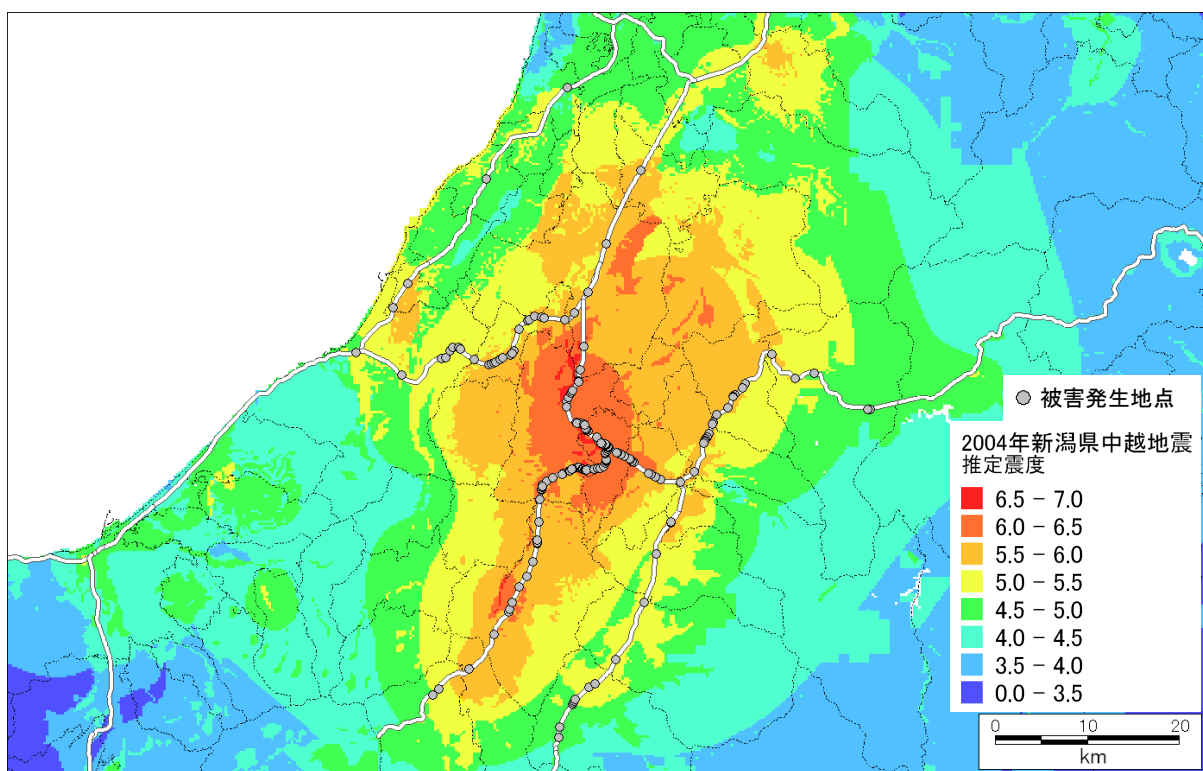


図3(2) 2004年新潟県中越地震での推定震度分布と被害発生地点

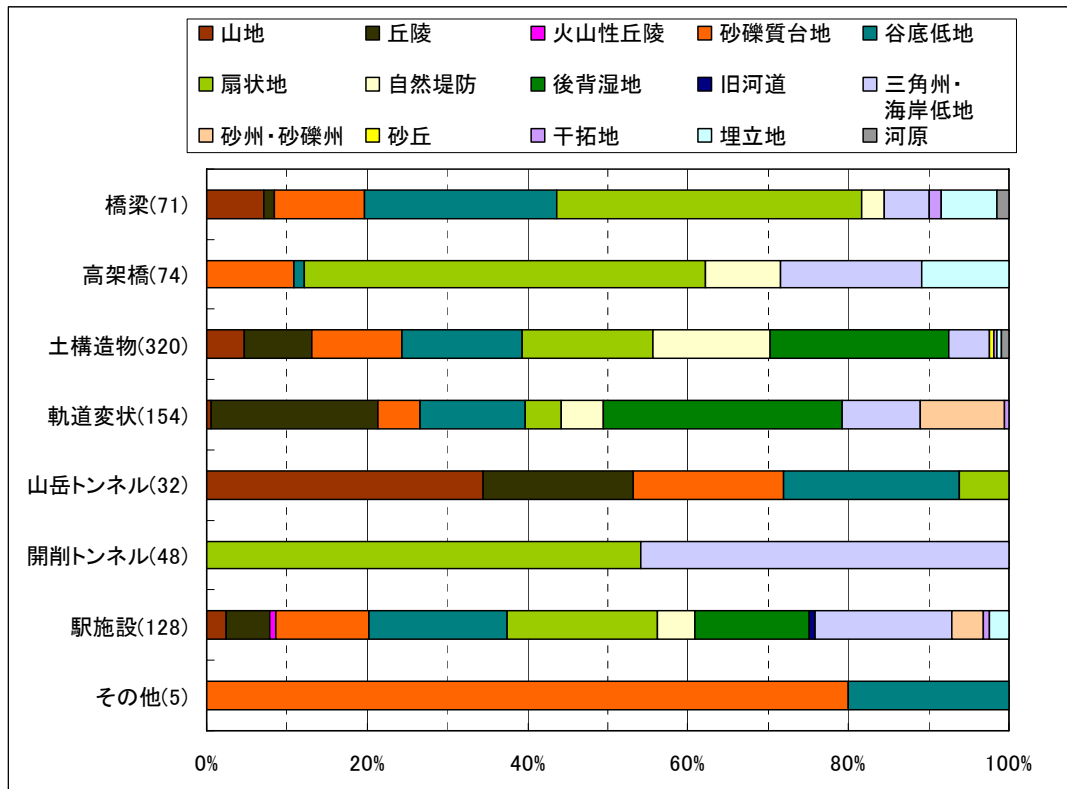


図4 被災した構造物種別ごとの地形・地盤分類の割合

と関連する情報を含んでいる。また、橋梁やトンネルのように、地形や地盤の条件とその地点に存在する構造種別には相関があるものと推測される。

図4では、資料の記載内容に従い、被災した構造物を「橋梁」、「高架橋」、盛土や擁壁などの「土構造物」、プラットホームの被害などの「駅施設」、「軌道変状」、「開削トンネル」、「山岳トンネル」と「その他」の6種類に大別し、被災した構造物が位置する250mメッシュの地形・地盤分類との関係を整理した。横軸は被災した構造物が存在するメッシュの総数（括弧内の数値）に含まれる地形・地盤分類の種別の割合である。この図を見ると、土構造物、駅施設、橋梁の被害は、多くの地形・地盤分類に特に偏り無く存在している。一方、山岳トンネルは半数が山地・丘陵に存在し、台地まで含めれば70%に達する。残る30%は谷底低地、扇状地のような、山地・丘陵等に隣接する低地に存在している。

低地に山岳トンネルが存在している原因としては、本研究では地形・地盤分類にメッシュデータを用いており、地形の幅があまり広がらないと考えられる谷底低地や、河川上流側の山地、丘陵近傍の扇状地では、山地がメッシュ内に含まれている場合があることが考えられる。

その他の構造物種別では、開削トンネルの被害は低地にのみ存在している。同様に高架橋は90%が低地に、残る10%は台地に存在しており、その他の地形には存在していない。このように地形・地盤分類と構造物種別にはある程度の相関がみられるものもことから、地形・地盤分類ごとに整理して求めた被害関数には被害原因や構造種別の違いが間接的に反映されるものと期待される。そこで本研究では、構造物種別ごとの被害率の整理の代替として、震度分布の推定に利用した250mメッシュの地形・地盤分類を活用し、地形・地盤分類と被害の関係について検討することとした。

#### 4.2 被害率と地形・地盤分類との関係

広域を対象とした地震被害想定では、本研究と同様に地震動強さの分布をメッシュ単位で評価することが多い。そこで本研究では、メッシュ単位の地震被害想定に利用できるように、地震動強さの推定単位と同じ250mメッシュ単位で被害が発生する割合を算出し、各メッシュ内で被害が発生する可能性を表



す被害率で整理した。この被害率は各メッシュ内で被害が1箇所以上発生する割合であり、被災箇所数を示すものではない。算出方法は以下の通りである。

- (1) メッシュのうち、その内部に鉄道のラインデータを含むものを抽出し、地形・地盤分類ごとに集計する。これを【鉄道を含むメッシュ】とする。
- (2) 抽出された【鉄道を含むメッシュ】内の鉄道のラインデータ上に被害を有するメッシュを【被害を含むメッシュ】とする。
- (3) 【中心とする計測震度】ごとにメッシュ数を集計して、【被害を含むメッシュ数】／【鉄道を含むメッシュ数】で求まる値を各計測震度での被害率とする。

【中心とする計測震度】は、各メッシュの計測震度を補間により推定した1978年宮城県沖地震、2004年新潟県中越地震の場合で、各計測震度に対するデータ数がある程度（10個以上）確保し、安定した結果を得ることを目的として設定したものである。具体的には、中心とする計測震度を0.1ピッチで設定し、その±0.15の範囲に含まれるメッシュ数を集計して被害率を求めている。例えば計測震度5.0の被害率は計測震度が4.85～5.15のメッシュから求めたものである。

1995年兵庫県南部地震については他の2地震とデータの性質が異なるため、前述のように推定した5段階の計測震度の領域のうち、5.50～5.75、5.75～6.00、6.00～6.25、6.25～6.50の4領域は、各領域に含まれる全メッシュの計測震度をそれぞれの中央値である5.63、5.88、6.13、6.38とし、6.50以上の領域では全メッシュの計測震度を6.75として整理した。なお、1978年宮城県沖地震、2004年新潟県中越地震の場合ではそれぞれの中心とする計測震度、1995年兵庫県南部地震では5つの領域の計測震度で集計を行った結果、鉄道を含むメッシュ数が10個未満の場合は信頼度が低いと判断して除外した。

図5に、地形・地盤分類別に被害率を集計した結果を示す。図中のNは、各地震の地域で当該地形・地盤分類の鉄道を含むメッシュ数である。図5で示されていない地形・地盤分類は、鉄道を含むメッシュが無い、もしくは前述の計測震度の各ピッチにおいて、信頼度の条件を満たす計測震度が無いため図示できない分類である。

地形・地盤分類ごとに計測震度と被害率の関係を見ると、3地震間の違いはそれほど大きくないが、自然堤防では2004年新潟県中越地震と比較して1978年宮城県沖地震での被害率が高い。2004年新潟県中越地震での自然堤防の被害は信濃川に沿った長岡市付近に見られる。この地域での地盤断面図<sup>35)</sup>を見ると、地表付近は砂礫が10m程度堆積し、その下部は洪積砂礫層となっている。一方、1978年宮城県沖地震での自然堤防の被害は、仙台市東南部や仙台市北部・旧古川市周辺に見られる。この地域での地盤断面図<sup>36)</sup>を見ると、地表付近は砂層が卓越しており、やや硬質の砂や砂礫の層と軟弱な砂や粘土の層が繰り返し堆積している。一般的に自然堤防の地表付近ではシルトや砂質土が卓越する<sup>37)</sup>と考えられることから、自然堤防の計測震度と被害率の関係は1978年宮城県沖地震のデータを重視するのが適切と判断した。

#### 4.3 被害率の傾向が類似した地形・地盤分類の統合

全体的に見ると、データが限られ、計測震度と被害率との関係が明確とは言えない地形・地盤分類も多く存在しているため、被害率の傾向が類似した分類を統合して評価することとした。山地と丘陵は被害率の傾向が全体的に類似しているため統合した。砂礫質台地の被害率は山地、丘陵と比較すると高震度側で低く、低地と比較すると全体的にやや低い傾向にあるため、別のグループとした。

低地の分類では、扇状地、三角州・海岸低地、谷底低地はデータ量が多く、対応する計測震度も広範囲に存在する。これらの3分類を比較すると、扇状地の被害率は他の2分類よりも全体的に低く、谷底低地と三角州・海岸低地の被害率は震度5強までは大きな差は無いが、それ以上の震度では谷底低地の方がかなり高い。このように、扇状地、谷底低地、三角州・海岸低地の3分類はそれぞれ特徴が見られることから、別々に扱うこととした。

扇状地、谷底低地、三角州・海岸低地以外の低地の分類はデータが限られているため、これらの3分類のうち被害率の傾向が近いと見なせる分類と統合して評価することとした。そこで、非線形最小二乗法によりこれらの3分類の被害率を関数化し、データが限られた低地の分類の被害率との傾向を比較した。関数形は既往の研究<sup>38)</sup>を参考に(1)式に示す累積対数正規曲線モデルとした。

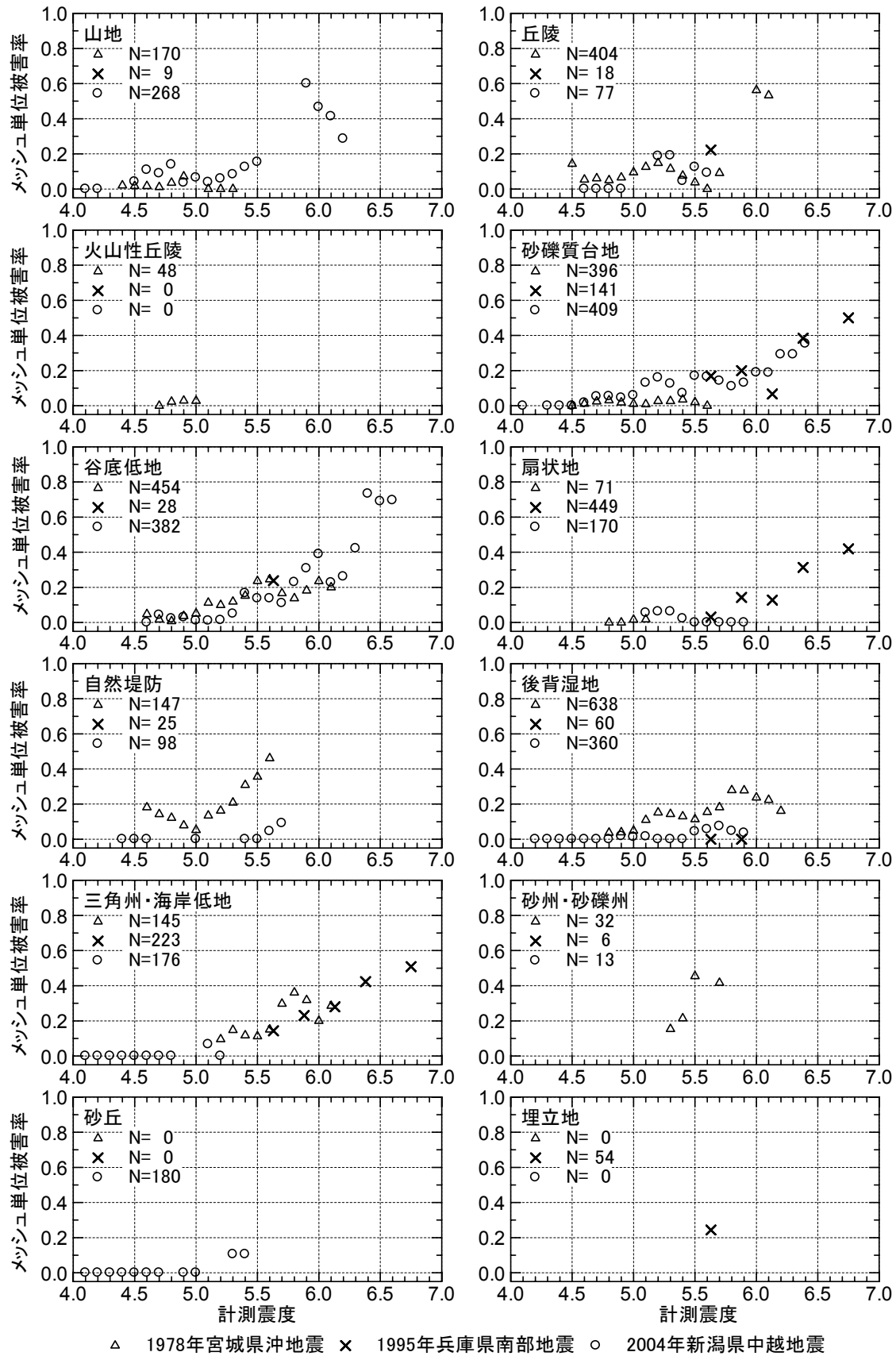


図5 地形・地盤分類ごとに整理した250mメッシュ単位鉄道構造物被害率

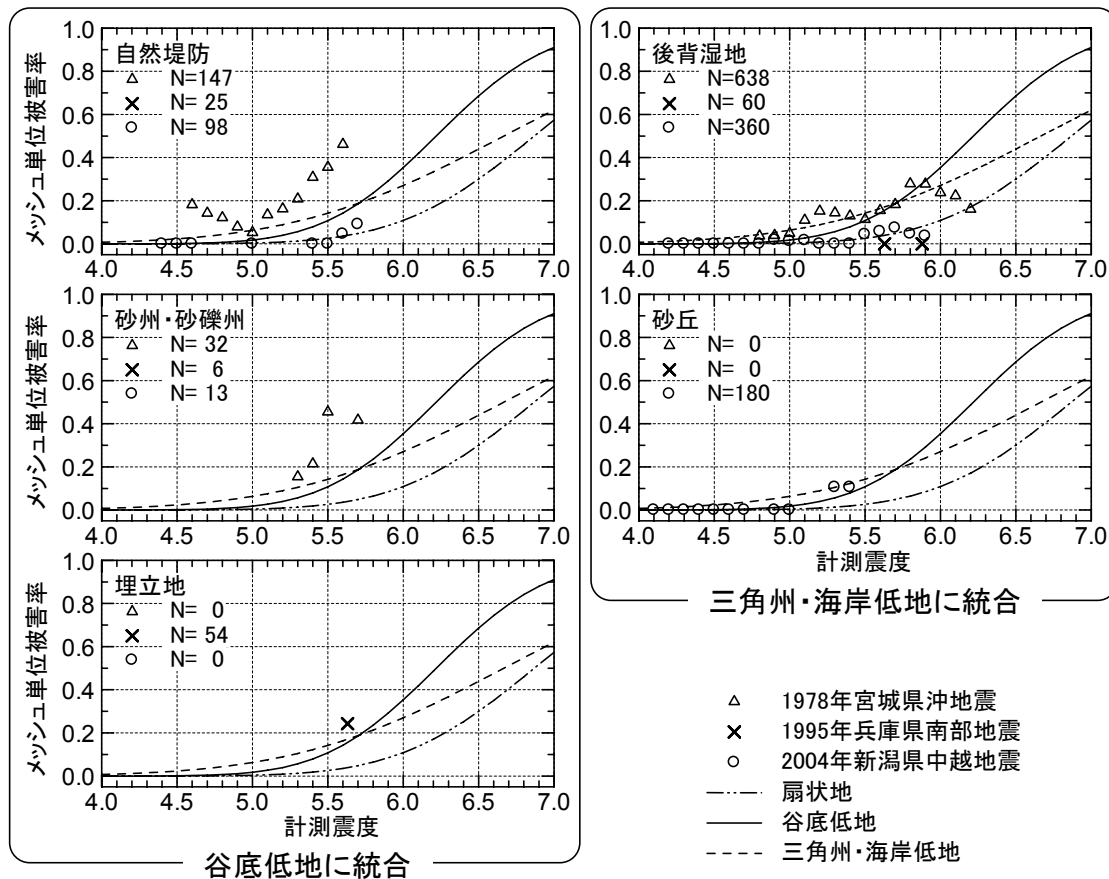


図6 低地の地形・地盤分類のうち、データが限られた分類とデータ量の多い分類の関係の比較

$$P = \Phi((I - \lambda) / \zeta) \quad (1)$$

ここに、 $P$  は250mメッシュ単位の被害率、 $I$  は計測震度、 $\lambda$  は平均値、 $\zeta$  は標準偏差である。求めた扇状地、谷底低地、三角州・海岸低地の3分類の結果とデータが限られた分類の被害率を重ね描き、図6に示す。自然堤防や砂州・砂礫州では、計測震度の増加とともに被害率が急激に増加する傾向がみられることから、谷底低地に統合することとした。埋立地はデータが1点のみで判断が難しいが、高震度で被害率がより大きくなる谷底低地に統合することとした。後背湿地については、計測震度の増加とともに被害率が増加する割合が小さいことから、三角州・海岸低地に統合することとした。砂丘はデータを有する範囲でより類似している三角州・海岸低地に統合することとした。

このように地形・地盤分類を5つのグループに統合した結果を改めて整理すると以下ようになる。なお、前述の地形・地盤分類以外に山麓地、火山地、ローム台地、旧河道、河原、干拓地のデータも存在するが、データ数が少なく被害率と計測震度の傾向を判断できない。そのため、これらの分類は存在する地形的条件の類似性を考慮して統合することとし、各グループ内で括弧を付けて記載した。

- 1) 「山地・丘陵」：山地、丘陵、火山性丘陵、(山麓地)、(火山地)
- 2) 「台地」：砂礫質台地、(ローム台地)
- 3) 「低地1」：扇状地
- 4) 「低地2」：谷底低地、自然堤防、砂州・砂礫州、埋立地、(干拓地)
- 5) 「低地3」：三角州・海岸低地、後背湿地、砂丘、(旧河道)、(河原)

表4 回帰分析結果

グループ	平均値 $\lambda$	標準偏差 $\zeta$	回帰分析に 用いたデータ数 n
1) 「山地・丘陵」 山地、丘陵、火山性丘陵、(山麓地)、(火山地)	6.19	0.72	34
2) 「台地」 砂礫質台地、(ローム台地)	6.82	0.95	39
3) 「低地1」 扇状地	6.87	0.70	19
4) 「低地2」 谷底低地、自然堤防、砂州・砂礫州、埋立地、(干拓地)	6.20	0.64	38
5) 「低地3」 三角州・海岸低地、後背湿地、砂丘、(旧河道)、(河原)	6.71	0.91	40

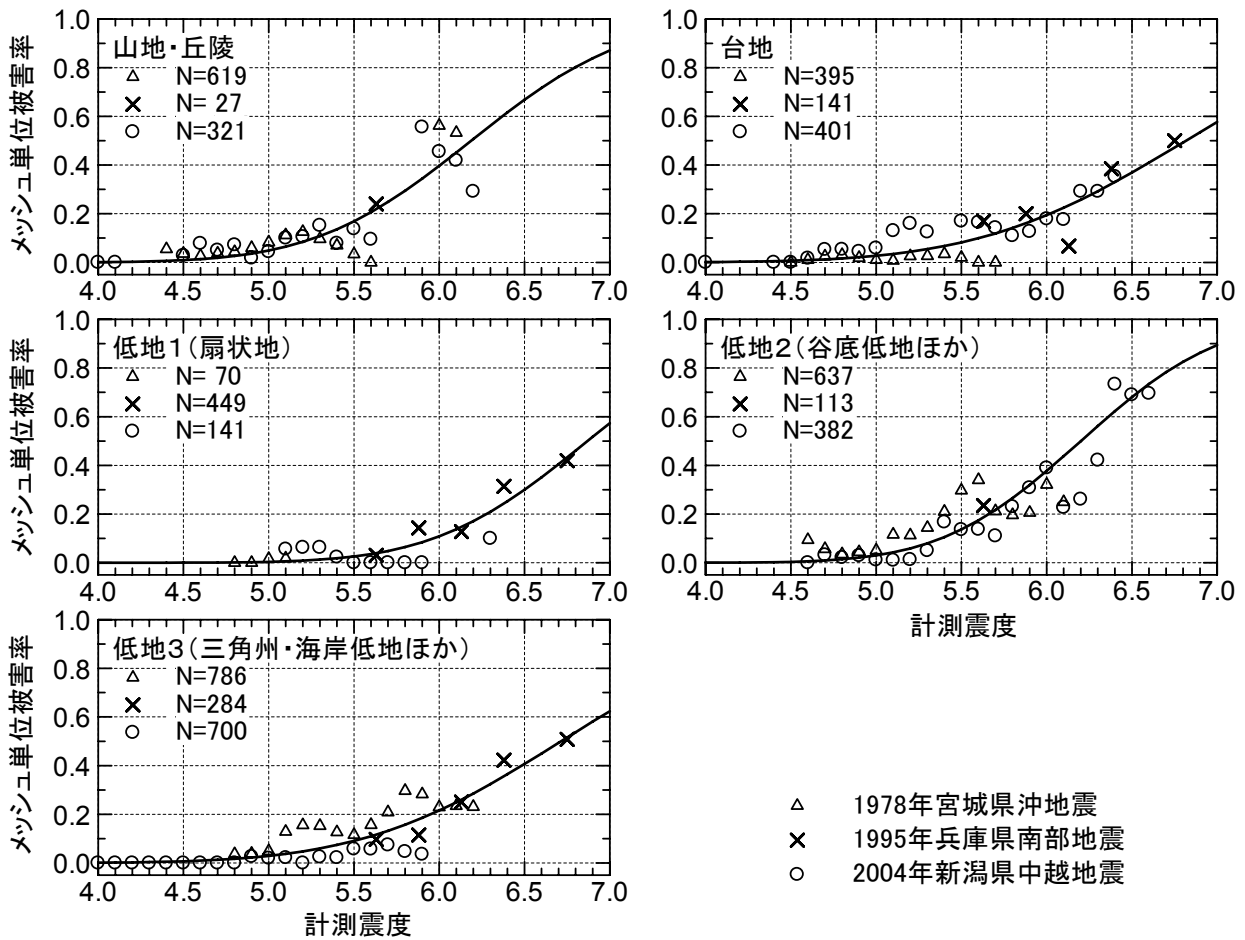


図7 グループ分けによる被害整理結果と求めた被害関数

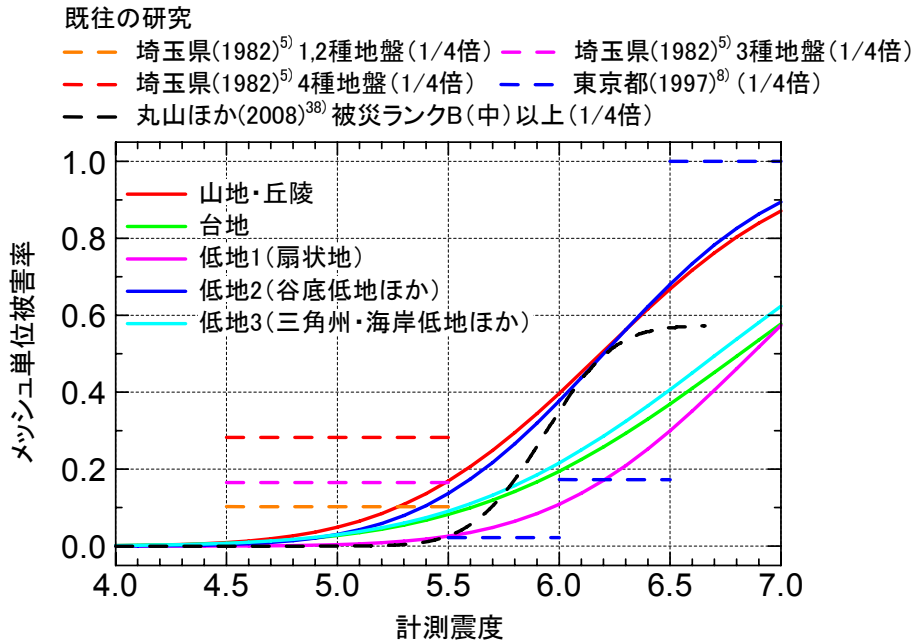


図8 本研究の被害関数と既往の被害関数との比較

#### 4.4 回帰分析による各グループの被害関数

前述の5グループによる整理結果を用いて、回帰分析により計測震度を地震動強さの指標とする被害関数を求めた。回帰分析の方法、及び関数形は前節の低地のグループ分けの検討と同じである。なお、ここでは、前述の検討結果により、2004年新潟県中越地震の自然堤防の値は用いていない。求められた平均値と標準偏差を表4に示す。

図7では、求めた被害関数を5グループに統合した整理結果と共に重ね描いた。これを見ると、分類を統合してデータが増加したことにより、「山地・丘陵」は震度6強のレンジまで、それ以外は震度7のレンジまでデータを有するようになった。被害率は「山地・丘陵」と「低地2」が最も高く、以下、「低地3」、「台地」、「低地1」の順である。グループ間に多少の差は見られるが、多くのグループで被害が開始する計測震度は5.0前後であり、過去の被害地震では鉄道構造物には震度5強程度から被害が開始するという調査結果<sup>9)</sup>と概ね対応している。

「山地・丘陵」では、被害発生地点が山地・丘陵の地形と他の地形との境界部に多くみられる。地形の境界では構造種別や形状が変わる可能性が高く、構造形態の変更点で地震時の被害が発生しやすいため、被害率が高くなった可能性が考えられる。同様に「低地2」に含まれる谷底低地は「山地・丘陵」と隣り合う可能性が高いことから、他の低地のグループよりも被害率が高くなった可能性が考えられる。

本研究の被害率と既往の埼玉県(1982)<sup>5)</sup>、東京都(1997)<sup>8)</sup>による鉄道構造物の被害率、参考として鉄道構造物に近いと考えられる高速道路の盛土の被害から作成された被害関数<sup>38)</sup>を比較した。これを図8に示す。本研究の被害率は250mメッシュ内に含まれる鉄道路線で被害が1箇所以上発生する割合であるのに対し、既往の被害率は単位路線延長(km)当たりの被害箇所数、もしくは被害件数である。このように本研究と既往の研究とは被害率の定義が異なるため、本来これらは直接比較できるものではない。しかし、図8では、本研究の1メッシュ内の平均的な路線延長が250mであると見なして、路線延長1km当たりの被害率である既往の研究の被害率を1/4倍して250m当たりの被害率とすることにより、略算的に調整して比較することとした。

埼玉県(1982)<sup>5)</sup>は、最も信頼性が高いと考えられる震度Vの値を、東京都(1997)<sup>8)</sup>は構造種別が無い「その他の被害率」を用いた。高速道路盛土の被害関数<sup>38)</sup>は地震動強さを最大速度から計測震度に変換し、「盛土路面と盛土のり面の被害」の被災ランクB(中)以上の値を用いた。本研究と既往の研究とは被害率の定義に違いがあり、厳密な比較は困難であるが、概略的に見て本研究の被害関数は既往の研究結果と整合的であると考えられる。

## 5. 結論

本研究では、1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震による鉄道構造物の被害について、被害資料を収集・整理し、被害箇所を特定した。これと各地震で推定した震度分布とを重ね合わせ、250mメッシュ単位で算出した被害率を地形・地盤分類ごとに整理した。これらを被害率が類似したグループで整理し、震度4～7の範囲で適用可能な被害関数を構築した。その結果、1)被害は整理したグループ間で多少の違いはあるが、震度5強程度から生じ始めること、2)被害率は山地・丘陵や谷底低地などで高いこと、を確認した。本研究で構築した被害関数は、路線の構造物の情報を必要とせずメッシュ単位での簡便な地震被害想定を行う場合に有効なものと考えられる。今後この被害関数を用いて、想定地震に対する被害想定を行っていきたい。

## 謝 辞

2004年新潟県中越地震の震度分布の作成には、国土交通省、気象庁、自治体、独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET、KiK-NET、東日本旅客鉄道株式会社の観測記録を使用させていただきました。震度の面的補間には、大都市大震災軽減化特別プロジェクトの成果を使用させていただきました。1995年兵庫県南部地震の震度分布のデータは千葉科学大学藤本一雄氏より、250mメッシュ地形・地盤分類メッシュマップは関東学院大学若松加寿江氏よりご提供いただきました。地形・地盤分類メッシュマップからの平均S波速度の推定では、独立行政法人産業技術総合研究所松岡昌志氏よりご助言をいただきました。記して謝意を表します。

## 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、山海堂、1996.
- 2) 財団法人鉄道技術総合研究所：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.
- 3) 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、pp.7-12、2002.
- 4) 損害保険料率算出機構：自治体の被害想定における被害予測手法の調査、2006.
- 5) 埼玉県：埼玉県地震被害想定策定調査報告書、1982.
- 6) 松本正人、森川英典、高田至郎：兵庫県南部地震における鉄道被害の要因と補強対策上の問題点について、土木学会第50回年次学術講演梗概集、1-476、pp.952-953、1995.
- 7) 那須誠、北村直樹：阪神・淡路大震災における高架橋の被害と地盤と基礎の関係、第25回地震工学研究発表会講演論文集、pp.9-12、1999.
- 8) 東京都防災会議：東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書(被害想定手法編)、1997.
- 9) 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、第44巻10号、pp.29-31、2006.
- 10) 鉄道技術研究所：1978年宮城県沖地震調査報告、鉄道技術研究所報告、No.1111、1979.
- 11) 土木学会東北支部：1978年宮城県沖地震調査報告書、1980.
- 12) 東日本旅客鉄道株式会社：SED STRUCTURAL ENGINEERING DATA、第24号、2005.
- 13) 鉄道施設耐震構造検討委員会：兵庫県南部地震による鉄道施設の被災に関する調査(中間整理)、1995.
- 14) 西日本旅客鉄道株式会社：阪神・淡路大震災 鉄道復旧記録誌、1996.
- 15) 内芝伸一、片岡孝視：阪急電鉄の震災および復旧方法、日本鉄道施設協会誌、34巻1号、pp.8-13、1996.
- 16) 脇保仁、松井順一：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、34巻2号、pp.6-11、1996.
- 17) 藪下武資、光木香：(1)神戸高速鉄道の被害と復旧工事一高架橋・大開駅一、日本鉄道施設協会誌、34巻4号、pp.6-9、1996.



- 18) 前田昌彦、安藤信三：(2)神戸電鉄の被災状況と復旧概要、日本鉄道施設協会誌、34巻4号、pp.10-12、1996.
- 19) 中西巖：(3)山陽電気鉄道の震災及び復旧方法、日本鉄道施設協会誌、34巻4号、pp.13-14、1996.
- 20) 佐俣千載：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、34巻5号、pp.8-10、1996.
- 21) 財団法人建設工学研究所：阪神大震災被害状況調査報告書、1995.
- 22) 神戸大学工学部：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書、1995.
- 23) 国土地理院：数値地図25000（空間データ基盤）宮城県、福島県、山形県、秋田県、新潟県、長野県、大阪府、兵庫県）
- 24) 神山眞、松川忠司：通信調査による震度分布（1978年宮城県沖地震による宮城県内の例）、第15回地震工学研究発表会講演概要、pp.117-120、1979.
- 25) Wakamatsu, K., and Matsuoka, M.: Development of the 7.5-arc-second engineering geomorphologic classification database and its application to seismic microzoning, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, Vol.81, pp.317-324, 2006.
- 26) 松岡昌志、若松加寿江、藤本一雄、翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定、土木学会論文集、No.794/I-72、pp.239-251、2005.
- 27) 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.
- 28) 藤本一雄、翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、No.7、pp.241-246、2005.
- 29) 大都市大震災軽減化特別プロジェクト：観測値の空間補間による最大地動分布の推定シミュレータ <http://www.kedm.bosai.go.jp/japanese/daidaitoku/software.html>
- 30) 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.
- 31) 佐藤良輔：断層パラメーターハンドブック、鹿島出版会、1989.
- 32) 国土地理院地理地殻活動研究センター：2004（平成16）年新潟県中越地震断層モデル、2004. <http://cais.gsi.go.jp/Research/topics/topic041023/index.html>
- 33) 神戸大学工学部建設学科土木系教室耐震工学研究室兵庫県南部地震アンケート調査分析グループ（代表 高田至郎、嘉嶋崇志）：兵庫県南部地震に関するアンケート調査一集計結果報告書一、1996.
- 34) 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.
- 35) 新潟県地盤図編集委員会：新潟県地盤図、2002.
- 36) 宮城県：宮城県地震地盤図作成調査報告書、1985.
- 37) Kotoda, K., Wakamatsu, K., and Midorikawa, S. : Seismic microzoning on soil liquefaction potential based on geomorphological land classification, Soils and Foundations, Vol.28, No.2, pp.127-143, 1988.
- 38) 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、pp.208-216、2008.

（受理：2009年5月26日）  
（掲載決定：2009年9月14日）

# **Seismic Vulnerability Functions of Railway Structures for Different Geomorphologic Conditions Derived from Damage Survey Data**

TAKAHAMA Tsutomu <sup>1)</sup> and MIDORIKAWA Saburoh <sup>2)</sup>

1) Member, Graduate Student, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

2) Member, Professor, Department of Built Environment, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

## **ABSTRACT**

The damage survey data of railway structures in the 1978 Miyagi-ken Oki earthquake, the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, and the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake are collected and compiled. The seismic vulnerability functions of railway structures for different geomorphologic conditions are constructed in the range of the JMA seismic intensity 4 to 7. The results indicate that the railway structure damage appears from the JMA seismic intensity 5+ and that the damage is higher at mountain, hill or valley plane.

*Key Words: Railway Structures, Seismic Intensity, Vulnerability Function, Geomorphologic Classification, Mesh Map*