鉄道高架橋区間の地震被害関数の検討

他谷周一¹⁾、翠川三郎²⁾

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

e-mail : taya.s.aa@m.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

1995年兵庫県南部地震と2011年東北地方太平洋沖地震の2地震を対象として、鉄道高架橋区間での地震被害データを整理し、その結果をもとに鉄道高架橋区間の地震被害関数を作成した。鉄道高架橋区間では、震度5弱より軽度被害が発生しうること、及び震度6弱より重度被害が発生しうことを示した。また、2地震の間で鉄道高架橋区間の震度階ごとの被害率を比較した結果、2011年東北地方太平洋沖地震の重度被害率は1995年兵庫県南部地震よりも低くなっていた一方、軽度被害率は増加し、軽度被害と重度被害を合計した被害率は2地震の間で同程度であったことを示した。

キーワード： 鉄道高架橋、震度、被害率、被害関数、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震

1. はじめに

今後発生すると想定されている南海トラフ巨大地震や首都直下地震等に対し、鉄道の被害を軽減し、運転再開までの期間を極力短くするためには、構造物の耐震補強、脱線逸脱防止策の実施、早期地震警報システムの整備等の事前対策と、地震後の迅速かつ適切な事後対応策の両方が必要とされる。合理的な事前・事後両面の地震対策を推進するうえで、地震被害推計システムの開発・導入は効果的な手段の1つであると考えられる。地震被害推計システムは、地震が発生した際の被害を事前に推計することで被害リスクが高い箇所を抽出する等により、事前対策の整備計画の立案を支援することや、地震の直後に各地の被害を推計し、適切な事後対応を支援することなどに用いられる。鉄道以外の分野では、内閣府の地震防災情報システム（DIS）¹⁾や、東京ガスのリアルタイム防災システム「SUPREME」²⁾などが既に実用化されており、鉄道分野においても「HERAS」³⁾などが提案されている。

「HERAS」では、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が採用されている。鉄道構造物の地震被害推計手法としては、その他にも、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。これらを広域にわたる多様な路線を対象としたシステムに導入する際には、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。対して、過去の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は、推計結果は概略的なものとなるが、被害推計に構造物の詳細情報を

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。

これまでに作成された鉄道構造物の地震被害関数には、埼玉県(1982)⁶⁾によるものや、内閣府(2013)⁷⁾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)⁸⁾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。これらはいずれも構造種別を分けずに作成された被害関数であるが、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⁹⁾。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)¹⁰⁾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)¹¹⁾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)¹¹⁾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)¹¹⁾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。他谷・翠川(2014)¹²⁾は、2004年新潟県中越地震及び2007年新潟県中越沖地震時の新潟県内のJR在来線鉄道の被害事例に基づき、鉄道構造物を「素地・低盛土」「盛土」「切土」「橋りょう」「トンネル」の5種類に分類して構造種別ごとに震度階と被害率の関係を示した被害関数を作成したが、高架橋区間を対象とした被害関数は作成されていない。これは、新潟県内のJR在来線では高架橋の被害事例がなかったためであるが、都市部の鉄道に対して地震被害を推計する際には、都市部で多く見られる高架橋区間を対象とした被害関数も必要とされる。

本論文は、最近の被害事例に基づく鉄道高架橋区間を対象とした地震被害関数を作成することを目的に、耐震補強されていない鉄道高架橋が非常に強い地震動を受けた事例である1995年兵庫県南部地震(以下、1995兵庫と表記)時と、耐震補強がなされた多数の鉄道高架橋が強い地震動を受けた最近の事例である2011年東北地方太平洋沖地震(以下、2011東北と表記)時の鉄道高架橋区間での地震被害事例を整理し、被害関数を作成するとともに、両者を比較検討した内容を述べるものである。

2. 本研究のフロー

今回作成する被害関数は、概略的な被害推計を行う際などに使用することを考えており、高架橋区間における震度階ごとの被害率(被害延長／高架橋総延長)を求める。被害関数を作成する作業の骨子は、他谷・翠川(2014)¹²⁾とほぼ同様で、図1に示すように、1)「検討対象地震時の面的震度分布の推計」として鉄道構造物被害が発生した領域およびその周辺まで含めた領域の震度分布を推計し、2)「鉄道高架橋区間の位置情報の整理」により、鉄道高架橋区間の位置と総延長を求め、また、震度分布と照合し鉄道高架橋区間の各点での震度階を評価し、3)「鉄道高架橋区間の被害情報の整理」にて、文献をもとに被害位置・被害延長・被害程度等を整理し、4) 1)～3)の結果をもとに被害程度別に震度階ごとの被害率を算出する、という流れである。さらに、5)2 地震の間で被害関数を比較することで、耐震補強工事の影響についても検討した。

検討対象線区は阪神地区・首都圏・仙台地区の3地区内で高架橋区間が含まれるJR在来線および民鉄・公営・第3セクターの各線とした。検討対象線区の一覧を表1及び表2に示す。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。普通鉄道の高架橋は図2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のに対し、新交通システムの高架橋は図3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。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では設置位置の地盤の傾向も異なる。このように、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、本研究では普通鉄道と新交通システムで分けて検討することとした。

図1 本研究のフロー

図2 普通鉄道の高架橋の例

図3 新交通システムの高架橋の例

表1 検討対象線区一覧（阪神地区）

事業者	路線	区間		延長 (km)	事業者	路線	区間		延長 (km)
【阪神・普通鉄道】					阪神	西大阪線	尼崎	西九条	6.3
JR西日本	東海道線	京都	神戸	75.7	山陽電鉄	本線	梅田	元町	32.1
	関西空港線	日根野	りんくうタウン	3.7	神戸市	地下鉄	新神戸	西神中央	22.7
	関西線	柏原	JR難波	14.0	神戸電鉄	三田線	有馬口	三田	12.0
	阪和線	天王寺	和泉鳥取	43.3	泉北高速鉄道	泉北高速鉄道線	中百舌鳥	光明池	12.2
		鳳	東羽衣	1.7	大阪市	御堂筋線	江坂	梅田	6.5
	山陽本線	神戸	西明石	22.8		中央線	大阪港	阿波座	8.3
	大阪環状線	大阪	大阪	21.6		関西空港線	泉佐野	りんくうタウン	1.9
	福知山線	尼崎	新三田	36.9		高師浜線	羽衣	高師浜	1.5
	片町線	長尾	京橋	26.0	南海	高野線	汐見橋	美加の台	26.7
京阪	交野線	枚方市	私市	6.9	本線	難波	箱作	46.6	
	本線	淀屋橋	三条	49.3	新関西国際空港	関西空港線	りんくうタウン	関西空港	6.9
近鉄	けいはんな線	長田	新石切	4.5	北大阪急行	北大阪線	江坂	千里中央	5.9
	大阪線	大阪上本町	大阪教育大前	19.8	阪神・普通鉄道 計				692.4
	奈良線	布施	石切	10.1					
	南大阪線	大阪阿部野橋	上ノ太子	22.0	【阪神・新交通システム】				
阪急	伊丹線	塚口	伊丹	3.1	神戸新交通	ポートライナー	三宮	中公園	6.1
	京都線	十三	河原町	45.3		六甲ライナー	住吉	マリンパーク	3.9
	今津線	宝塚	今津	9.3	大阪市	南港ポートタウン線	中心頭	住之江公園	6.9
	神戸線	梅田	三宮	32.3		大阪モノレール	柴原	南茨木	10.4
	千里線	天神橋筋六丁目	北千里	13.6	阪神・新交通システム 計				27.3
	宝塚線	十三	宝塚	21.8	神戸高速鉄道	高速神戸線	高速神戸	阪急神戸三宮	2.2

表 2 検討対象線区一覧（首都圏・仙台地区）

事業者	路線	区間		延長 (km)	事業者	路線	区間		延長 (km)		
【首都圏・普通鉄道】											
JR東日本	東海道線	東京	大船	46.2	東急	池上線	五反田	蒲田	11.0		
		品川	鶴見	17.9			田園都市線	渋谷	中央林間	30.5	
	赤羽線	池袋	赤羽	5.7	京急	本線	泉岳寺	浦賀	56.1		
	南武線	川崎	立川	35.1			空港線	京急蒲田	羽田空港国内線ターミナル	6.5	
		尻手	浜川崎	3.7	相鉄	いずみ野線	二俣川	湘南台	11.4		
	鶴見線	鶴見	扇町	6.9			銀座線	渋谷	浅草	14.5	
	武蔵野線	府中本町	西船橋	71.9	東京メトロ	丸ノ内線	荻窪	池袋	24.2		
	横浜線	東神奈川	八王子	42.6			日比谷線	中目黒	北千住	19.9	
	根岸線	横浜	大船	22.0			東西線	中野	西船橋	30.8	
	中央線	東京	高尾	53.2			千代田線	代々木上原	北綾瀬	23.6	
	東北線	東京	黒磯	163.4			有楽町線	和光市	新木場	29.0	
	埼京線	赤羽	大宮	18.2	東京都	三田線	目黒	西高島平	26.0		
	常磐線	日暮里	水戸	115.3			新宿線	新宿	本八幡	23.1	
	高崎線	大宮	神保原	60.3		横浜市	1号線	湘南台	関内	19.9	
	両毛線	小山	新前橋	84.8				3号線	関内	あざみ野	20.5
	総武線	御茶ノ水	銚子	119.0				4号線	中山	日吉	13.0
	外房線	千葉	御宿	65.0	北総鉄道	北総線	京成高砂	印旛日本医大	32.1		
	京葉線	東京	蘇我	43.0	東葉高速鉄道	東葉高速線	西船橋	東葉勝田台	16.3		
		西船橋	南船橋	5.5	東京臨海高速鉄道	りんかい線	新木場	大崎	12.4		
		市川塩浜	西船橋	6.1	江ノ島電鉄	江ノ島線	藤沢	鎌倉	10.3		
		成田線	佐倉	松岸	75.4	芝山鉄道	芝山鉄道線	東成田	芝山千代田	2.2	
			成田	成田空港	11.3	首都圏新都市鉄道	常磐新線	秋葉原	つくば	58.2	
		鹿島線	香取	鹿島サッカースタジアム	17.6	鹿島臨海鉄道	大洗鹿島線	水戸	鹿島サッカースタジアム	53.1	
JR東海		御殿場線	国府津	沼津	61.1	首都圏・普通鉄道 計				2380.4	
東武	伊勢崎線	浅草	伊勢崎	114.2	【首都圏・新交通システム】						
	大師線	西新井	大師前	1.0							
	桐生線	太田	赤城	20.6	埼玉新都市交通	伊奈線	大宮	内宿	13.0		
	小泉線	館林	太田	16.4	山万	ユーカリが丘線	ユーカリが丘	井野	4.1		
	野田線	大宮	船橋	62.5	東京都	日暮里舎人線	日暮里	見沼代親水公園	10.0		
	日光線	東武動物公園	東武日光	94.7	ゆりかもめ	東京臨海新交通臨海線	新橋	豊洲	15.1		
西武	池袋線	池袋	吾野	57.8	東京モノレール	東京モノレール線	モノレール浜松町	羽田空港第2ビル	17.8		
	拝島線	小平	拝島	14.3	多摩都市モノレール	多摩都市モノレール線	上北台	多摩センター	16.0		
	多摩川線	武蔵境	是政	8.0	千葉モノレール	1号線	千葉みなと	県庁前	3.1		
京成	本線	京成上野	成田空港	69.3	千葉モノレール	2号線	千葉駅	千城台	12.1		
	押上線	押上	青砥	5.8	横浜シーサイドライン	金沢シーサイドライン線	新杉田	金沢八景	10.7		
	千原線	千葉中央	ちはら台	11.2	湘南モノレール	江ノ島線	大船	湘南江の島	6.7		
京王	京王線	新宿	京王八王子	37.2	首都圏・新交通システム 計					108.6	
	相模原線	調布	橋本	22.9							
	高尾線	北野	高尾山口	8.7	【仙台地区・普通鉄道】						
	井の頭線	渋谷	吉祥寺	12.6	JR東日本	東北線	岩沼	松島	41.0		
小田急	小田原線	新宿	小田原	82.2			仙石線	あおば通	東塩釜	17.2	
	多摩線	新百合ヶ丘	唐木田	10.8	仙台市	南北線	泉中央	富沢	14.8		
東急	東横線	渋谷	横浜	24.0	仙台空港鉄道	仙台空港線	名取	仙台空港	7.1		
	大井町線	大井町	二子玉川	10.4	仙台地区・普通鉄道 計					80.1	

3. 検討対象地震時の面的震度分布の推計

3.1 1995年兵庫県南部地震の面的震度分布の推計

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て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)¹³⁾を用い、主に大阪府内の震度分布としては鶴来ほか(1999)¹⁴⁾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4に示す。

3.2 2011年東北地方太平洋沖地震の面的震度分布の推計

他谷・翠川(2014)¹²⁾と同様、図5に示すような、1)地表面上の観測値から表層地盤増幅度を減じて工学的基盤上での推計値に変換、2)工学的基盤上でIDW法（Inverse Distance Weighting：逆距離加重法）により空間補間、3)推計点での表層地盤増幅度を加えて基盤上での推計値から地表面上の推計値に変換、とする方法により、250mメッシュで震度分布を推計した。

図4 1995年兵庫県南部地震時の推計震度分布と高架橋の配置

図5 震度の空間分布推計概要

図6 2011年東北地方太平洋沖地震時の首都圏の推計震度分布

図7 2011年東北地方太平洋沖地震時の仙台地区の推計震度分布

IDW法は、(1)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。

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

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20km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-SHIS¹⁵⁾で公開されているAVS30から翠川・他(2008)¹⁶⁾により求めた。観測値としては、K-NET、気象庁震度計、自治体震度計、鉄道沿線地震計データなどの地震計データを利用した。震度分布の推計結果を図6及び図7に示す。

4. 鉄道高架橋区間の位置情報の整理

鉄道橋はその設置の目的に応じて、河川等を渡る「橋りょう」、道路を渡る「架道橋」、鉄道線路を渡る「線路橋」、渡るべき特定の目的物はないが連続的に地表面よりも高い位置に線路を設ける場合に用いられる「高架橋」と呼び分けられる。主に都市部で見られる鉄道高架橋区間では、複数の高架橋・橋りょう・架道橋・線路橋が数百m～数km以上連なるように構成されることが一般的である。今回は土構造やトンネルを挟まずに、陸域で高架橋等の鉄道橋のみで200m以上連続して構成されている区間を「高架橋区間」と呼ぶこととする。

鉄道では、構造物に関する位置情報を始点からのキロ程で管理するのが一般的であり、被害位置などもキロ程で表されることが多い。そのため、今回のような検討を行うには「鉄道のキロ程」「緯度経度」「構造種別」の3要素を結び付ける作業が必要となる。他谷・翠川(2014)¹²⁾では、地理院地図¹⁷⁾(旧・電子国土)を用いて100m間隔で緯度経度とその位置の構造種別をピックアップする方法を提案しているが、今回も同様の手法により、地理院地図上で鉄道線路100mごとに100m点を設け、各100m点のキロ程・緯度経度・構造種別を整理することとした。

地理院地図では、図8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

構造種別	橋りょう・架道橋 線路橋	高架橋
記号		

図8 地理院地図上での橋りょう等及び高架橋の記号表示

いる場合もある。また、周辺に構造物が多く、記号が輻輳するような場合には、高架橋記号が省略されることもある。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。
- ・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 Map¹⁸⁾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。

なお、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、地理院地図の標準地図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 1995 年当時、2011 年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、旧版地形図を表示できる「今昔マップ on the web」¹⁹⁾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。

上記の方法で検討対象範囲内の高架橋位置を特定した結果、高架橋の総延長は阪神地区が 179.1km（普通鉄道 151.8km、新交通システム 27.3km）、首都圏が 515.2km（普通鉄道 417.2km、新交通システム 98.0km）、仙台地区が 14.0km（すべて普通鉄道）であった。高架橋位置を図 4・図 6・図 7 に重ね描いた。なお、今回の検討範囲では、一部鋼橋脚の高架橋区間も含まれているが、大半は RC 構造の高架橋であった。

得られた高架橋位置と震度分布を照合し、高架橋位置での震度を把握した。震度階ごとの高架橋延長は表 3 のとおりであった。阪神地区において、神戸市の北西部等で推計震度分布が得られていない領域にわずかに高架橋区間がある（6.4km、阪神地区の全高架橋区間延長の 4%程度）が、これらは高架橋に近い観測記録やアンケート震度結果^{20)~22)}などを参照して個別に各高架橋位置の震度を推計した。2011 東北では、普通鉄道において震度 7 で揺れた区間がなく、また、新交通システムにおいて震度 6 弱以上で揺れた区間がなかった。

表 3 2 地震における震度階別高架橋区間延長

地 震	鉄道 種別	震度階別高架橋区間延長(km)						計 (km)
		4	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7	
1995 年兵庫県南部地震	普通鉄道	1.1	47.4	62.4	16.5	8.3	16.1	151.8
	新交通システム	0.0	1.9	10.9	11.2	1.6	1.7	27.3
2011 年東北地方太平洋沖地震	普通鉄道	14.2	247	129.7	29.0	11.3	-	431.2
	新交通システム	5.1	69.7	23.2	-	-	-	98.0

5. 鉄道高架橋区間での被害情報の整理

1995 兵庫については文献^{9),23)~30)}をもとに、2011 東北については文献^{31)~42)}をもとに、被害位置・被害位置の推計震度ごとの延長・被害区分・被害程度等を表 4 のような形式で整理した。被害延長の最小単位は位置情報の取得基準に合わせて 0.1km とし、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)¹¹⁾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。

被害位置の整理の仕方については、被害位置がキロ程で示されている場合は、そのキロ程をもとに被害位置を特定し、構造物名で示されている場合は、その構造物名を手がかりとして地理院地図¹⁷⁾、Google Map¹⁸⁾、あるいは現地調査などにより可能な限り位置を特定した。被害位置がキロ程や構造物名称ではなく、駅間でしか示されておらず、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、被害を過小に評価する恐れがあることから、過大評価側になるが、今回は当該駅間の高架橋区間すべてで被害が発生したと仮定することとした。

被害位置の推計震度は、被害位置の100m点の緯度経度と3章で作成した250mメッシュの推計震度とを照合することで整理した。被害程度は、「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区分」を軽度被害、「構造全体に影響が及び修復に困難を伴うと考えられる被害区分」を重度被害と整理し、被害区分は、被害の部位・特徴に応じて14区分を設定し、文献の記載内容をもとに各被害情報の被害程度・被害区分を整理した。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、すべ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。なお、近隣で異なる区分の被害があった場合には、重大な被害区分の方にまとめた。たとえば、1995兵庫で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。被害程度・被害区分ごとの震度階別被害延長を表5及び表6に

表4 鉄道高架橋区間での被害情報の整理形式例

事業者	線区	自	至	高架橋延長	うち被害延長	被害箇所震度階別延長					高架橋被害概要	被害程度	高架橋被害詳細	備考
						5弱	5強	6弱	6強	7				
●●	△△線	〇〇	〇〇	##	##				##	##	柱損傷	軽度	高架橋の柱18本で損傷	
●●	△△線	〇〇	〇〇	##	##			##			倒壊	重度	440mにわたって被害。高架橋柱135本が損傷。駅部84本(延長約200m)については完全に崩壊	
●●	△△線	〇〇	〇〇	##	##				##	##	倒壊	重度	...	

表5 1995年兵庫県南部地震の被害程度・区分ごとの震度階別被害延長

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
重度	軌道設備損傷	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	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	-
	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6 2011年東北地方太平洋沖地震の被害程度・区分ごとの震度階別被害延長

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

示す。表5および表6には被害程度別に「震度階ごとの被害延長(km)」を「震度階ごとの高架橋総延長(km)」で除し、被害率を求めた結果も掲載した。

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。

被害区分に着目して表5、表6をみると、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わかる。表5より、1995 兵庫では、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6より、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ことがわかる。新交通システムの軽度被害としては 1995 兵庫と同様、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、桁破損と橋脚破損が発生しているが、1995 兵庫とは異なり、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。2 地震の間での違いに関する考察は7章で詳しく述べる。

6. 高架橋区間の被害関数の作成

6.1 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を図9に、軽度被害・重度被害それぞれの被害関数を図10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。また、今回の検討では、被害延長、総延長とも0.1km単位で計上しているので、被害率0.01未満の値は信頼性が乏しいと思われるが、わずかではあるが被害があった、ということを表示するため、0.01未満の値についても図示することとした。これらは6.2以下の節に示した図についても同様である。

図9について、被害率は震度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4倍程度高くなり、震度6強から7へ上がる際には被害率は1.5倍程度高くなる。図10について、軽度被害の被害率(軽度被害率)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(重度被害率)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。

6.2 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を図11に、軽度被害・重度被害それぞれの被害関数を図12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。図11の被害率、及び図12の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12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。

6.3 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示す。1995兵庫における各震度階の被害率を図13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、軽度被害率のみを図14に示す。図10と図13、また図12と図14をそれぞれ比較すると、新交通システムの被害率は普通鉄道の被害率とは大きく特徴が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。

7. 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年兵庫県南部地震以降、運輸省(当時)及び国土交通省の指導により各鉄道事業者にて既設の高架橋、橋りょう等の耐震補強が行なわれてきている^{43),44)}。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新しい耐震設計標準⁴⁵⁾に則っている。したがって、1995兵庫の当時と比較して、2011東北の時点での鉄道高架橋は耐震性能が向上していると思われ、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15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)⁹⁾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弱より発生しうるものが

図9 1995年兵庫県南部地震における
軽度被害率・重度被害率を合計した被害関数

図10 1995年兵庫県南部地震における
軽度被害率・重度被害率の被害関数

図11 2011年東北地方太平洋沖地震における
軽度被害率・重度被害率を合計した被害関数

図12 2011年東北地方太平洋沖地震における
軽度被害・重度被害の被害関数

図13 1995年兵庫県南部地震における
新交通システムの各震度階の被害率

図14 2011年東北地方太平洋沖地震における
新交通システムの各震度階の被害率

図 15 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 16 重度被害の被害関数の 2 地震間の比較

図 17 軽度被害の被害関数の 2 地震間の比較

図 18 下部工軽度被害の被害関数の 2 地震間の比較

図 19 上部工軽度被害の被害関数の 2 地震間の比較

指摘されている。震度5強での被害率を比較すると、2011東北よりも1995兵庫の方が大きく見えるが、6.1節で述べたように被害率0.01未満の値は信頼性が乏しいことから、震度5強での2地震の被害率の差は有意なものとは考えにくい。震度6弱、6強での被害率は2地震の間で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16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)⁵⁾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弱より発生しうるという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。5章で「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、被害率でみても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17に示す。図17について、震度6弱以下の被害率に対する解釈は図15と同様である。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、5章で「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18に示す。図18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19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19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19の震度6弱、6強での上部工の軽度被害率は、図17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17および図19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。

8. 結論

本研究では、1995年兵庫県南部地震及び2011年東北地方太平洋沖地震を検討対象地震として、鉄道高架橋区間における地震被害関数を作成する方法を検討し、震度階ごとの被害率（被害延長／高架橋総延長）を示す被害関数を被害程度（軽度・重度）別に作成し、鉄道高架橋区間においては、震度5弱より軽度被害が発生しうること、また、震度6弱より重度被害が発生しうことを示した。

さらに、2地震の間で被害関数を比較検討し、2011年東北地方太平洋沖地震では、重度被害が大幅に減った一方、軽度被害が増加し、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。この原因として、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。

謝 辞

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。また、1995年兵庫県南部地震の震度分布の推計にあたっては、千葉科学大学の藤本一雄教授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。

参考文献

- 1) 内閣府：地震防災情報システムの整備、<http://www.cao.go.jp/others/kichou/it/gis/dis-s.html>.
- 2) 高橋邦碩：東京ガスのリアルタイム防災システムの現状と今後の展望、地震災害マネジメント：巨大地震に備えるための手法と技法：土木学会地震災害マネジメントセミナー10年の軌跡、pp.29-35、2010.
- 3) 中村豊：研究展望 総合防災システムの研究、土木学会論文集、No.531／I-34、pp.1-33、1996.
- 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、pp.25-28、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、pp.7-12、2002.
- 6) 埼玉県：埼玉県地震被害想定策定調査報告書、1982.
- 7) 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。
項目及び手法の概要：http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo4.pdf.

- 8) 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、pp.57-72、2009.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) J-SHIS 地震ハザードステーション: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>.
- 16) 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、日本地震工学会論文集、第8巻、第3号、2008.
- 17) 地理院地図: <http://portal.cyberjapan.jp/index.html>.
- 18) Google Maps : <https://maps.google.com/>.
- 19) 今昔マップ on the web : <http://ktgis.net/kjmapw/index.html>.
- 20) 財団法人鉄道総合技術研究所：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.
- 21) 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.
- 22) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集、1996.
- 23) 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.
- 24) 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、第34巻、第1号、pp.8-13、1996.
- 25) 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、第34巻、第2号、pp.6-11、1996.
- 26) 藪下武資、光木香：(1)神戸高速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.
- 27) 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、第34号、第4号、pp.10-12、1996.
- 28) 中西巖：(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号、第4号、pp.13-14、1996.
- 29) 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、第34巻、第5号、pp.8-10、1996.
- 30) 神戸新交通株式会社：神戸新交通システム 阪神・淡路大震災復旧記録集、1996.
- 31) 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.
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 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.
- 35) 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.
- 36) 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.
- 37) 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.
- 38) 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.

- 39) 山万株式会社：山万ユーカリが丘線 安全報告書【2011年】、2012.
40) 千葉都市モノレール株式会社：安全報告書 2011、2011.
41) 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.
42) 新潮社：日本鉄道旅行地図帳 東日本大震災の記録、2011.
43) 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、1995.7.
44) 国土交通省鉄道局：既設鉄道構造物の耐震補強に関する指針、2001.6.
45) 運輸省鉄道局監修、(財)鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）、丸善、2012.

(受理：2014年10月30日)
(掲載決定：2015年5月18日)

A Study for Seismic Vulnerability Functions of Elevated Railway

TAYA Shuichi ¹⁾ and MIDORIKAWA Saburoh ²⁾

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

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

ABSTRACT

In this study, we propose a procedure for constructing seismic vulnerability functions of elevated railway based on case histories of elevated railway structures damaged by past earthquakes. Damage rates at each seismic intensity level in the 1995 Southern Hyogo Earthquake and the 2011 Great East Japan Earthquake are calculated. The results indicate that (1) slight damages on structures of elevated railways appear from the JMA seismic intensity 5- and heavy damages appear from the JMA seismic intensity 6-, (2) heavy damage rates in the 2011 Great East Japan Earthquake are lower than that in the 1995 Southern Hyogo Earthquake, (3) slight damage rates in the 2011 Great East Japan Earthquake are higher than that in the 1995 Southern Hyogo Earthquake, (4) total damage rates in the 2011 Great East Japan Earthquake are comparable with that in the 1995 Southern Hyogo Earthquake.

Keywords: Elevated Railway, Seismic Intensity, Damage Rate, Vulnerability function, 1995 Southern Hyogo Earthquake, 2011 Great East Japan Earthquake