

通信用橋梁系設備の既往地震被害データ に関する体系的整理と分析・考察

寺 嶋 幹 裕¹・庄 司 学²・奥 津 大³・若 竹 雅 人⁴・
末 富 岩 雄⁵・塚 本 博 之⁶・鈴 木 崇 伸⁷

¹学生会員 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1-1)
E-mail: s1820915@s.tsukuba.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 システム情報系 (同上)
E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

³正会員 日本電信電話株式会社 (〒305-0805 茨城県つくば市花畑1-7-1)
E-mail: masaru.okutsu.ef@hco.ntt.co.jp

⁴正会員 西日本電信電話株式会社 関西事業本部 設備部 (〒541-0059 大阪市中央区博労町2-5-15)
E-mail: masato.wakatake@west.ntt.co.jp

⁵正会員 株式会社エイト日本技術開発 東京支社 防災保全部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp

⁶正会員 株式会社エイト日本技術開発 東京支社 防災保全部 (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)
E-mail: tsukamoto-hi@ej-hds.co.jp

⁷正会員 東洋大学教授 理工学部都市環境デザイン学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井2100)
E-mail: tsuzuki@toyo.jp

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及び2016年熊本地震では通信管路に甚大な被害が生じた. 本論文では, これらの中で曝された橋梁区間における通信管路を対象とした上で, 橋梁種別, 建設年, 橋長及び液状化の有無を考慮した微地形区分の観点からデータセットを構築し, 属性に対するクロス集計を行い, 被害率 R の特徴を分析した. さらに, 地震動強さの指標である地表面最大加速度 PGA , 地表面最大速度 PGV , スペクトル強度 SI 及び計測震度 IJ を取りあげ, 地震動強さと被害率 R の関係を明らかにし, 標準被害率データの抽出及びそのモデル化を試みた.

Key Words : telecommunication bridge facility, seismic damage, damage ratio, seismic intensity, the 2016 Kumamoto earthquake, damage function

1. はじめに

2016年熊本地震では, 熊本県周辺において通信管路に地震動による甚大な被害が生じた. 被災状況として, 通信各社合計で固定通信の約2100回線が被災した¹⁾. また, 2004年新潟県中越地震, 2007年新潟県中越沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震の際においても通信管路に被害が生じた²⁾⁴⁾. 過去の地震による被害データを構築した上で, 構造的な特徴を有する通信管路の被害メカニズムを明らかにすることは今後の通信管路の地震対策において喫緊の課題となっている.

山崎ら⁵⁾は2011年東北地方太平洋沖地震による被害を受けた通信埋設管路, マンホール, 橋梁添架管路及び電

柱の被災率を算出し, 津波, 液状化及びその他のエリアに分類して被災状況の特徴を分析している. 庄司ら⁶⁾は東北地方太平洋沖地震の際に, 地震動及び津波に曝された通信埋設管路を分析対象として, 被害モードを屈曲, 折損, 扁平, 離脱, 土砂流入及び流出の6つに分類している. その上で, 地震動強さの指標として地表面最大加速度 PGA , 地表面最大速度 PGV 及び計測震度 IJ を取りあげ, それらと通信埋設管の被害率との関係を管種, 亘長, 建設年及び微地形区分の観点から分析している. また, 庄司ら⁷⁾は前述した文献⁶⁾よりまとめられた通信埋設管のデータセットを活用し, 通信埋設管のスクリーニング手法を提案している. さらに, 近藤・若竹⁸⁾は通信用橋梁添架設備に対象を絞り, 地震時の被害状況を説明

表-1 橋梁区間における通信管路の被害状況

		熊本地震	新潟県 中越地震	新潟県 中越沖地震	東北地方 太平洋沖地震
被害有 (スパン)	液状化領域	12	0	0	1
	非液状化領域	26	20	11	91
	総計	38	20	11	92
被害無 (スパン)	液状化領域	22	2	0	13
	非液状化領域	171	89	37	791
	総計	193	91	37	804
被害率	液状化領域	0.35	0	-	0.07
	非液状化領域	0.13	0.18	0.23	0.10
	総計	0.16	0.18	0.23	0.10

した上で、熊本地震による被害の特徴を東北地方太平洋沖地震における被害事例と比較しながら報告している。

以上を踏まえ、本研究では、まず新潟県中越地震、新潟県中越沖地震、東北地方太平洋沖地震及び熊本地震の際の橋梁区間における通信管路のデータセットの構築を行う。その上で、地震動強さの指標である地表面最大加速度PGA、地表面最大速度PGV、スペクトル強度SI及び計測震度Iと通信管路の被害率Rとの関係を橋梁種別、建設年、橋長及び液状化の有無を考慮した微地形区分の観点から体系的に整理し、分析・考察を行う。

具体的には、強震動に曝された全データを対象に、数量化I類⁹⁾を用いて橋梁種別、建設年、橋長及び微地形区分の属性間の関係を明らかにする。その上で、標準被害率データを抽出し、標準被害率曲線の構築を行う。

2. 本研究で用いるデータセット

(1) データセットの特徴と被害状況

分析対象とする通信管路データは、原則として橋台間を1スパンとして計量化されており、その長さを橋長と定義している。本研究では、地震動による橋梁部の損傷に伴った橋梁区間における通信管路の被害を対象とする。これらの被害データは、被災後、日本電信電話株式会社(以下、NTT)によって詳細点検が行われ、地震動による被害と同定されたデータである。また、被害無データは、被害が見られた通信局が管理する橋梁区間における通信管路のデータを対象としている。津波による被害は対象外である。地震動による管路の被害形態としては継手の離脱、折損が一般的であり、橋梁添架管路の被害形態としては継手の離脱、折損、管本体の座屈、橋台パラペット部の損傷が多くを占めている¹⁰⁾。

データセットは、対象地域において被害有データと被害無データから構成されている。また、これらの管路が位置する箇所について、液状化の有無を判断するデータは、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震では液状化履歴マップ¹⁰⁾に基づき、東北地方太平洋沖地震では若松ら¹¹⁾、熊本地震では若松ら¹²⁾に基づいた。

橋梁区間における通信管路の被害状況を表-1に示す。



図-1 添架の例(鋼橋)



図-2 専用橋の例(トラス)

熊本地震では、被害有は38スパン、被害無は193スパン、合計231スパンであり、液状化領域では、被害有は12スパン、被害無は22スパンが確認された。新潟県中越地震では、被害有は20スパン、被害無は91スパン、合計111スパンであり、液状化領域では、被害無にのみ2スパンが確認された。新潟県中越沖地震では、被害有は11スパン、被害無は37スパン、合計48スパンと対象とするスパンが相対的に少なく、また、被害有、被害無ともに液状化領域にはデータは確認されなかった。東北地方太平洋沖地震では、被害有は92スパン、被害無は804スパン、合計896スパンと対象とするスパンが相対的に多く、液状化領域では、被害有は1スパン、被害無は13スパンが確認された。

地震動による被害を受けた通信管路スパン数を被害スパン数 N_d [スパン]、地震動に曝された全ての通信管路スパン数を総スパン数 N [スパン]とし、被害率 R [スパン/スパン]を次式のように定義する。なお、被害スパンを定義する際には、1スパン当たり少なくとも1箇所の被害を受けたものとしている。よって、被害率 R の上限は1となる。

$$R = \frac{N_d}{N} \quad (1)$$

平均的な被害率を算定すると、新潟県中越沖地震の被害率 R が最も高く、東北地方太平洋沖地震が最も低い。また、熊本地震における被害率 R については、液状化領域では0.35、非液状化領域では0.13となり、液状化領域の方が被害率 R は高くなっている。

(2) 通信管路の属性

通信管路の属性データとしては、1スパンの橋梁種別、建設年、橋長及び微地形区分の情報である。橋梁区分における通信管路は添架、専用橋、管橋に大別される。添架は管路を道路橋等の橋桁に設置する設備、専用橋は通信専用の上部工・下部工を有する設備、管橋は管単体で渡河等をする設備である。橋梁種別は添架の場合、添架先の橋梁の形式であるプレストレス・コンクリート橋（以下、PC）、鉄筋コンクリート橋（以下、RC）、鋼橋の3種類に、専用橋の場合、片持ち梁、トラス、圧延鋼桁、鋼管結束、箱桁の5種類にそれぞれ分類し、管橋とその他、不明を加えた11種類である。橋梁種別の例を図-1、図-2に示す。管路の位置における微地形区分は、文献13)に示されたデータに基づき、通信管路スパンの中心が属する250mメッシュの微地形区分を対象とする。

(3) 地震動強さの空間分布

前述したように、地震動強さの指標としてはPGA、PGV、SI及びLIの空間分布を扱う。熊本地震の空間分布については、水越・庄司¹⁴⁾の知見に基づき、地震観測点より得られた強震観測データ及びJ-SHIS¹⁵⁾のAVS30のデータを用いて、Simple Kriging法により250mメッシュ単位の空間情報とした。新潟県中越地震、新潟県中越沖地震の空間分布については、末富ら¹⁶⁾の知見に基づき、東北地方太平洋沖地震については庄司ら⁷⁾の知見に基づき、同様に250mメッシュの空間情報とした。なお、以上の地震動強さの空間分布について、地盤の非線形性を考慮した地震動の増幅度については末富ら¹⁶⁾の知見に基づくものとしている。

3. 各地震における被害の特徴

(1) 橋梁管路の属性における被害の特徴

図-3には、橋梁種別毎の被害率 R を示す。図-3を含め、以降の図においては液状化領域と非液状化領域のデータに区分していずれも示す。なお、図中において、各地震被害の呼称を熊本、中越、中越沖及び東日本と省略している。また、ゼロの被害率 R は図中に0と記し、該当する管路が存在しない場合は何も明記していない。図-3より、液状化領域では、PCの被害率 R が相対的に高い値を示す。非液状化領域では、全ての地震において、PCと

鋼橋の被害率 R は相対的に高く、管橋は低い値を示す。

図-4には、橋長の観点から見た被害率 R を示す。なお、図には含めていないが、全ての地震被害地域において、橋長50.0m以下となる通信管路が、熊本地震、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震及び東北地方太平洋沖地震の各々に対して、被害を受けたスパン全体の84.2%、70.0%、90.9%、34.8%を占め、被害を受けなかったスパン全体の81.9%、85.7%、81.1%、74.8%を占めている。液状化領域において、熊本地震では橋長150.0m以下、東北地方太平洋沖地震では橋長250.0m以上のみの通信管路に被害が生じていた。図-4より、東北地方太平洋沖地震の被害率 R は橋長が長くなると相対的に大きくなる傾向を示す。新潟県中越地震の被害率 R は橋長30.0mから40.0mが高い値を示し、添架の被害が多くを占めている。

図-5には、建設年5年毎の被害率 R を示す。なお、図には含めていないが、熊本地震と新潟県中越沖地震においては、1971年から1975年に建設された管路が最も多く、熊本地震では19.5%、新潟県中越地震では54.0%占めている。また、新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震においては、1976年から1980年に建設された管路が最も多く、新潟県中越沖地震では22.5%、東北地方太平洋沖地震では16.1%占めている。図-5より、非液状化領域では、全ての地震において、1966年から1985年の被害率 R は相対的に高く、1991年以後は低い値を示す。

図-6には、微地形区分の観点から見た被害率 R を示す。液状化領域において、熊本地震では、後背湿地、扇状地に多く被害が見られ、東北地方太平洋沖地震では、自然堤防にのみ被害が見られた。図-6より、非液状化領域では、新潟県中越地震と新潟県中越沖地震においては、砂礫質土地、谷底低地の被害率 R が相対的に高い値を示す。熊本地震では火山山麓地、東北地方太平洋沖地震では埋立地の被害率 R が相対的に高い値を示す。

以上より、表-2には、属性データの橋梁種別、橋長、建設年及び微地形区分の各々の類似性に着目してまとめた結果を示す。橋梁種別では、トラス、圧延鋼桁を標準専用橋、鋼管結束、片持ち梁、箱桁とその他の専用橋を特殊専用橋にまとめた。さらに、分類2として、PC、RC及び鋼橋を添架、標準専用橋と特殊専用橋を専用橋とまとめた。橋長によって地震動による応答が異なり、また、地震動により空間的に影響を受ける範囲も異なる。よって、橋長を10m以下、10mから20m、20mから50m、50m以上の4つに分類した。建設年については、NTTの継手の規格として1982年以前、温度伸縮のみ考慮していたが、1983年以後、地震動の影響も考慮する規格としているため、1982年以前と1983年以後に分類した。微地形区分は、庄司ら⁷⁾の微地形区分の分類を参考に分類した。また、表-3に示す先名・翠川¹⁷⁾の微地形区分毎の平均スペクトル増幅率の平均卓越周期の値 T を参考に、庄司ら⁷⁾の沖積

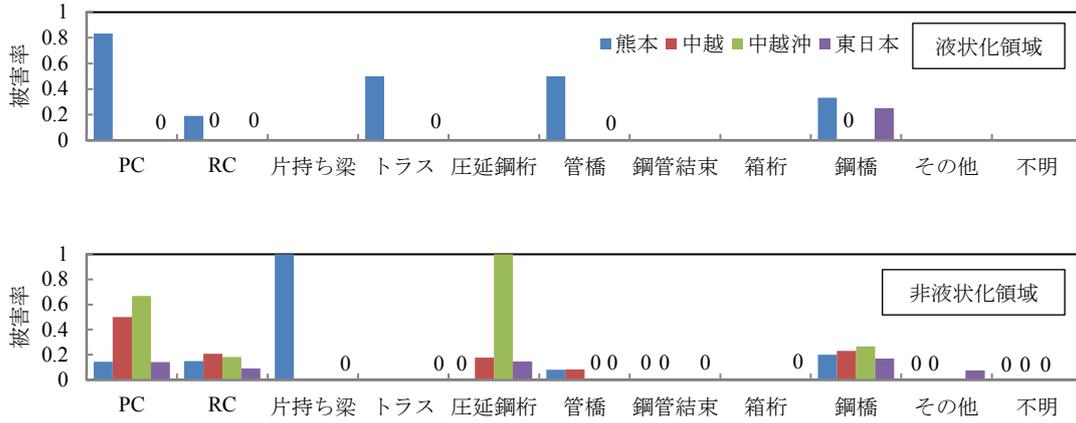


図-3 橋梁種別の観点から見た被害率 R

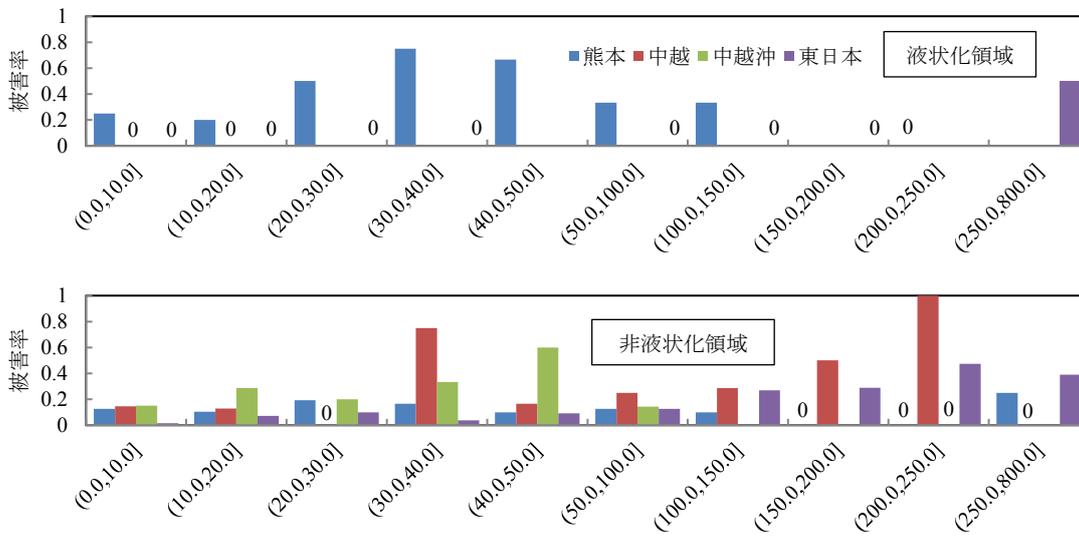


図-4 橋長[m]の観点から見た被害率R

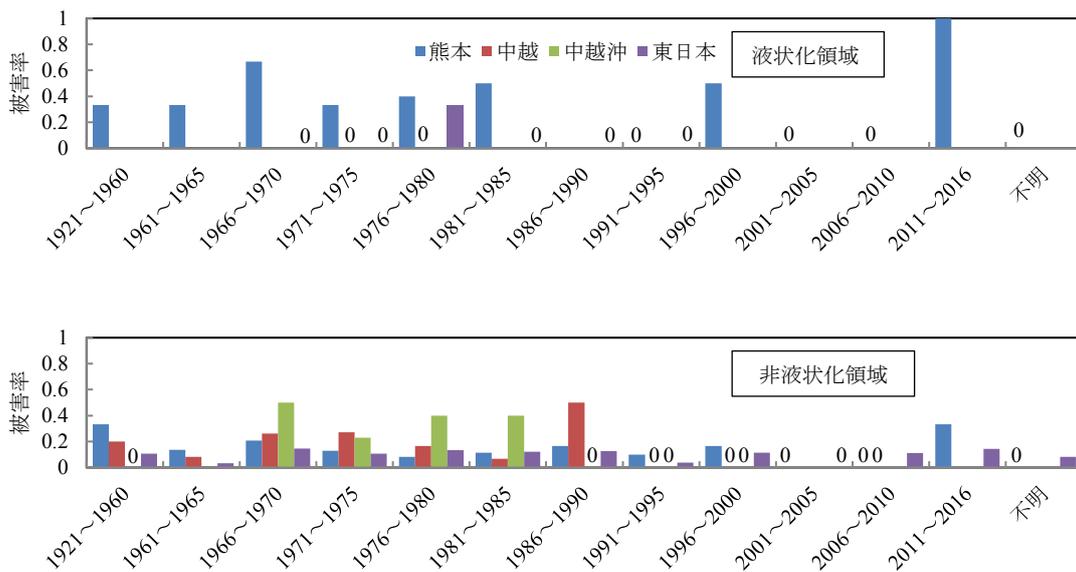


図-5 建設年の観点から見た被害率 R

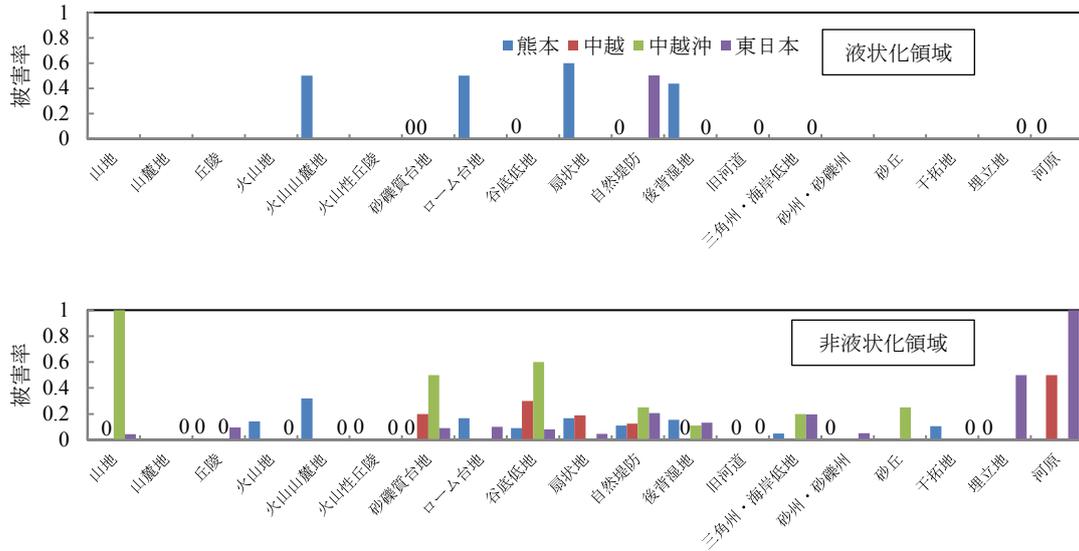


図6 微地形区分の観点から見た被害率 R

表-2 橋梁種別, 橋長, 建設年及び微地形区分の分類

(a)橋梁種別			(d)微地形区分		
分類2	分類1	橋梁種別	分類2	分類1	微地形区分
添架	PC	PC	丘陵・山地・山麓地	山地・山麓地	山地
	RC	RC		山麓地	山麓地
	鋼橋	鋼橋		丘陵	丘陵
専用橋	標準専用橋	トラス	火山性丘陵	火山性丘陵	火山性丘陵
		圧延鋼桁		火山地	火山地
	特殊専用橋	箱桁	火山地・火山山麓地	火山山麓地	火山山麓地
		鋼管結束	砂礫質台地	砂礫質台地	砂礫質台地
		片持ち梁	ローム台地	ローム台地	ローム台地
その他	その他				
管橋	管橋	管橋	谷底低地・扇状地	谷底低地	
			扇状地	扇状地	
			自然堤防	自然堤防	
			後背湿地	後背湿地	
			旧河道	旧河道	
			三角洲・海岸低地	三角洲・海岸低地	
			砂州・砂礫州	砂州・砂礫州	
			砂丘	砂丘	
			干拓地	干拓地	
			埋立地	埋立地	
			河原	河原	
			液状化	液状化	液状化領域

(b)橋長	
分類1	橋長[m]
-10	$d \leq 10$
10-20	$10 < d \leq 20$
20-50	$20 < d \leq 50$
50-	$50 < d$

(c)建設年	
分類1	建設年
-1982	$c \leq 1982$
1983-	$1983 \leq c$

表-3 微地形区分における平均スペクトル増幅率の平均卓越周期の値 T

微地形区分	山地	山麓地	丘陵	火山地	火山山麓地	火山性丘陵	砂礫質台地	ローム台地	谷底低地	扇状地
卓越周期 T[s]	0.09	0.13	0.12	0.11	0.17	0.17	0.11	0.17	0.13	0.13
微地形区分	自然堤防	後背湿地	旧河道	三角洲・海岸低地	砂州・砂礫州	砂丘	干拓地	埋立地	河原	
卓越周期 T[s]	0.70	0.70	0.70	0.70	0.50	0.13	0.50	1.10	-	

平野の分類を谷底低地・扇状地, 砂丘, 砂州・砂礫州, 沖積平野の4つに分類した. なお, 液状化領域に位置したデータについては液状化として分類した. さらに, 分類2として, 丘陵・山地・山麓地, 台地, 沖積平野, 埋立・干拓地, 液状化領域の5種類に分類した.

(2) 地震動強さの指標における被害の特徴

2.(3)で定義した地震動強さの指標を用い, 各地震における通信管路の被害の特徴を分析する. 東北地方太平洋沖地震では, 地震動が不明な管路が被害有に2スパン, 被害無に3スパン存在し, これらは地震動と被害の特徴

の分析の際には除外する. 図-7には, 地震動強さの指標毎の各地震被害における被害率 R を示す. 熊本地震, 新潟県中越地震, 新潟県中越沖地震をまとめたデータを地殻内地震及び東北地方太平洋沖地震をプレート間で発生した地震と定義する. なお, 地震動の指標における尺度の一例として, 都市ガスの第1次緊急停止判断では, 観測 SI 値が遮断基準値 $SI^* = 60 \text{cm/s}$ 以上となったときに供給を停止する取り決めがなされている¹⁸⁾.

図-7より, 全ての地震動ともに液状化領域については, 明確な地震動と被害率 R の関係は見られなかった. 熊本地震における液状化領域の被害率 R は非液状化領域より

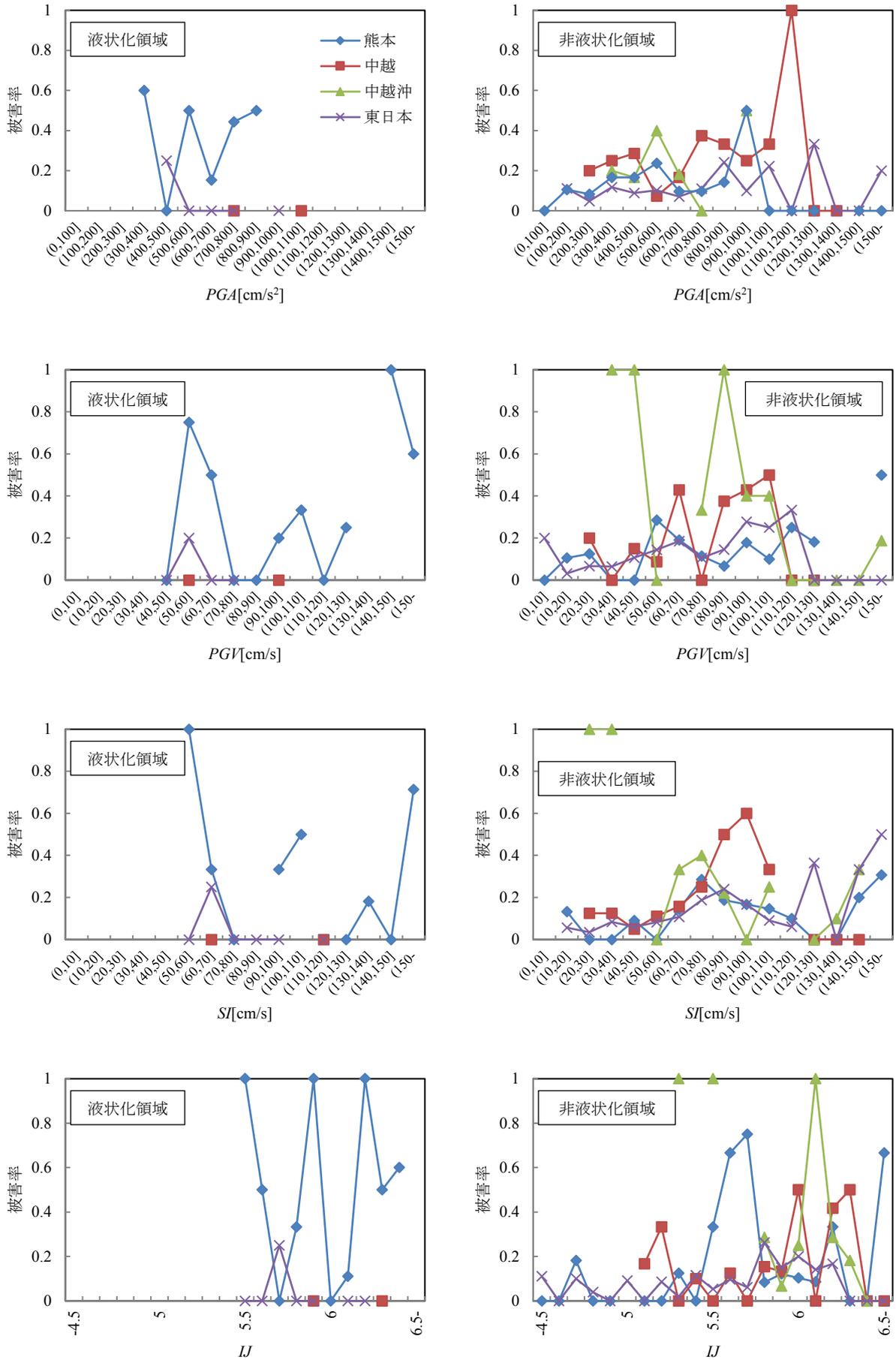


図-7 地震動強さと被害率 R の関係

表-4 地殻内地震の被害データのクロス集計

(上段：被害有スパン数 N_d , 中段：総スパン数 N , 下段：被害率 R *被害率 R が生じた箇所を赤で囲んでいる)

	丘陵・山地・山麓地		台地		沖積平野		埋立・干拓地		液状化	
	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-
添架	7	2	5	1	26	4	0	2	8	2
	25	15	17	11	133	39	5	9	22	9
	0.28	0.13	0.29	0.09	0.2	0.1	0	0.22	0.36	0.22
専用橋	1	0	0	0	4	0				1
	1	2	1	1	25	3				2
	1	0	0	0	0.16	0				0.5
管橋	1	0	0	0	4	0	0	0	1	1
	11	2	6		35	4	5	2	2	2
	0.09	0	0		0.11	0	0	0	0.5	

表-5 東北地方太平洋沖地震の被害データのクロス集計

(上段：被害有スパン数 N_d , 中段：総スパン数 N , 下段：被害率 R *被害率 R が生じた箇所を赤で囲んでいる)

	丘陵・山地・山麓地		台地		沖積平野		埋立・干拓地		液状化	
	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-
添架	4	2	11	3	46	14	1	0	1	0
	47	30	92	32	354	138	2	2	8	4
	0.09	0.07	0.12	0.09	0.13	0.1	0.5	0	0.13	0
専用橋	0	0	1	0	7	2				0
	12	8	12	8	42	26				1
	0	0	0.08	0	0.17	0.08				0
管橋	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1	16	2	47	6	1		1	1
	0	0	0	0	0	0	0		0	0

も相対的に高い傾向がある。

図-7 より, PGA について, 地殻内地震の被害をまとめてみると, $PGA=200\sim 1200\text{cm/s}^2$ において, PGA が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.07\sim 0.50$ の範囲で増加する傾向がある。その際に, $PGA=200\sim 900\text{cm/s}^2$ の間では徐々に増加し, RC の管路の被害が多く見られた。 $PGA=900\sim 1200\text{cm/s}^2$ の間では急激に増加し, 建設年が旧規格である管路の被害が多く見られた。一方, 東北地方太平洋沖地震では, $PGA=100\sim 1300\text{cm/s}^2$ の広い地震動帯域において, PGA が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.04\sim 0.33$ の範囲で徐々に増加する傾向がある。また, 図には含めていないが, 相対的に地震動の大きい $PGA=1500\text{cm/s}^2$ を超えるところにも 3 スパンの被害が見られた。

図-7 より, PGV について, 熊本地震では, $PGV=140\text{cm/s}$ 以上の被害は益城町と阿蘇市に多く分布している。新潟県中越沖地震では, $PGV=30\sim 50\text{cm/s}$ の相対的に地震動が低い領域では, 建設年が旧規格であり, 砂礫質台地に位置する管路と橋梁種別が PC の管路に被害が見られた。以上を踏まえ, PGV について, 地殻内地震の被害をまとめてみると, $PGV=30\sim 110\text{cm/s}$ において, 新潟県中越沖地震のデータに大きなばらつきが見られるが, PGV が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.06\sim 0.50$ の範囲で増加する傾向がある。一方, 東北地方太平洋沖地震では, $PGV=120\text{cm/s}$ 以下において, PGV が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.03\sim 0.33$ の範囲で増加する傾向があり, 地殻内地震と比べて相対的に低い地震動で被害が発生している。

図-7 より, SI について, 地殻内地震の被害をまとめてみると, $SF=40\sim 110\text{cm/s}$ において, SI が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.05\sim 0.60$ の範囲で徐々に増加する傾向がある。一方, 東北地方太平洋沖地震では, $SF=10\sim 160\text{cm/s}$ の広い地震動帯域において, SI が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.03\sim 0.50$ の範囲で徐々に増加する傾向がある。地殻内地震とプレート間地震ともに PGV と同様の傾向が見られた。

図-7 より, 計測震度 IJ について, 熊本地震では, $IJ=5.5\sim 5.7$ の相対的に地震動が低い領域において, 被害率 R は高い値を示す。この地震動帯域では, 谷底低地・扇状地に位置する管路や橋梁種別が RC の管路の被害が多く見られた。以上を踏まえ, IJ について, 地殻内地震の被害をまとめてみると, $IJ=5.9\sim 6.2$ の狭い地震動帯域において, IJ が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.07\sim 0.42$ の範囲で増加する傾向がある。一方, 東北地方太平洋沖地震では, $IJ=4.7\sim 6.2$ の広い地震動帯域において, IJ が増加するにつれて, 非液状化領域の被害率 R は $0.04\sim 0.26$ の範囲で徐々に増加する傾向があり, 地殻内地震と比べて緩やかに増加している。また, 図には含めていないが, 相対的に地震動の低い $IJ=5.0$ 以下の領域にも 5 スパンの被害が存在している。

4. 被害率間の関係の分析

(1) クロス集計に基づく数量化I類による多変量解析

表-4, 表-5 には, 地殻内地震とプレート間地震に対し

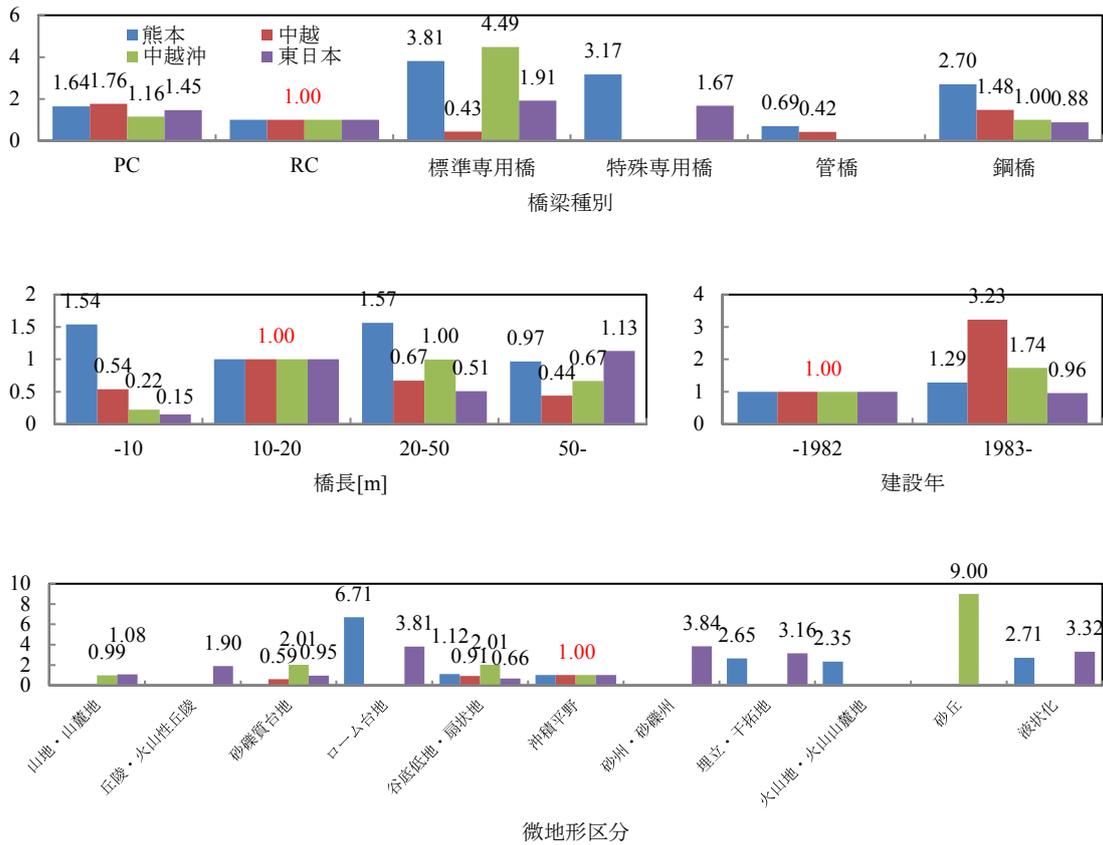


図8 橋梁種別, 橋長, 建設年, 微地形の観点から見た補正係数の数値

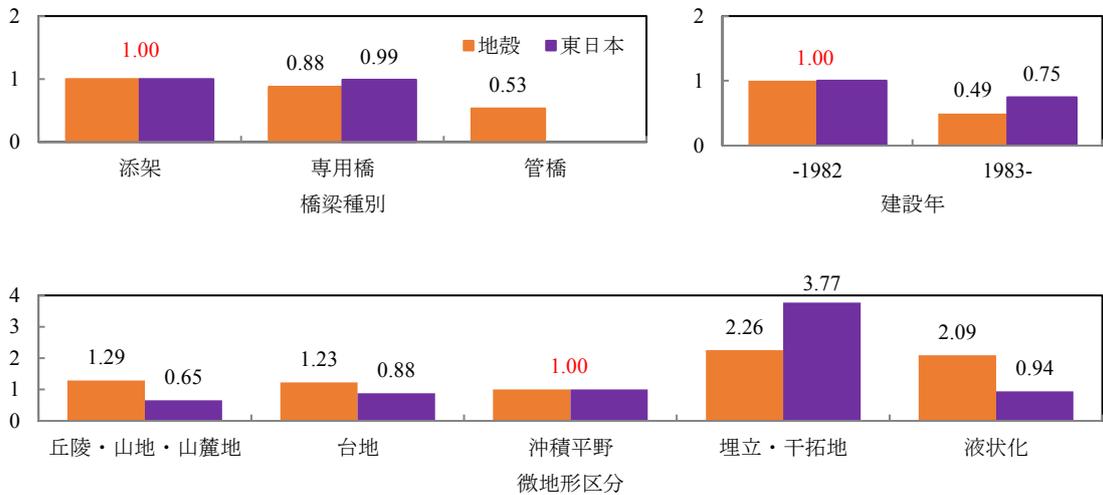


図9 橋梁種別並びに微地形区分の分類を表-2の分類2とした場合の補正係数の数値

て、付表-1から付表-4には、各地震に対して橋梁種別、橋長、建設年及び微地形区分の観点からクロス分析を行った結果を示す。

橋梁種別と微地形区分を表-2の分類2に区分し、橋長が橋梁種別に依存することを考慮し、橋長による分類を行わないこととした。上段から被害有のスパン数 N_a 、総スパン数 N 、被害率 R をそれぞれ示している。被害率 R が生じた箇所を赤で囲んでおり、数字がなく空白にな

っている箇所については、その箇所に該当する管路が存在しないことを示している。クロス分析する際に、橋梁種別と建設年における不明のデータは取り除いている。ただし、建設年が不明であるが旧規格と記載されたデータは1982年以前、現行規格と記載されたデータは1983年以後に分類した。また、橋梁種別が不明であるが、設置区分として添架、専用橋と記載されたデータはそれぞれ添架、専用橋としてここでは分類した。

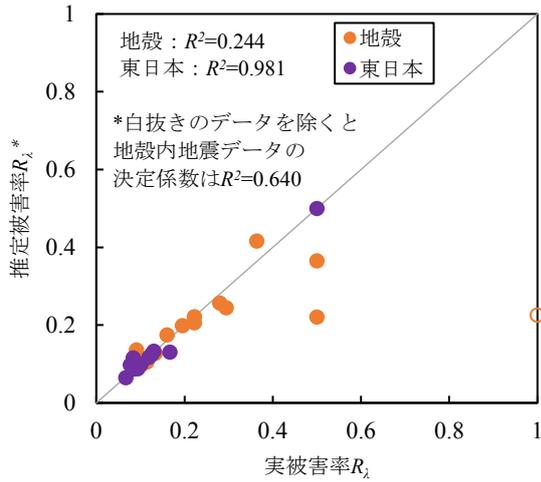


図-10 実被害率 R_λ と推定被害率 R_λ^* の関係

表-4, 表-5 より, クロス集計データの特徴を分析すると, 地殻内地震及び東北地方太平洋沖地震ともに, 添架の被害率 R は相対的に高く, 管橋は低い値を示す. さらに, 1982年以前に建設された管路の方が, 1983年以後に建設された管路より被害率 R は相対的に高い値を示す. 地殻内地震では, 液状化領域に位置する管路の被害率 R は相対的に高い値を示す. 東北地方太平洋沖地震では, 埋立・干拓地に位置する 1982 年以前に建設された添架の被害率 R は 0.5 と相対的に高い値を示す.

以上より, 通信管路の橋梁種別, 橋長, 建設年及び微地形区分の組み合わせに応じて実被害率 R_λ に相違が生じる. 被害率間の関係の分析に当たっては, 数量化I類を適用する. 組み合わせの番号を λ , 組み合わせ総数を N^λ と定義し, 組み合わせ λ でのみ 1 となるダミー変数 $x_{ij\lambda}$ を導入することにより質的データを数値化し, それぞれの組み合わせ λ に対する被害率の回帰モデル R_λ^* を算出する. 橋梁種別, 橋長, 建設年及び微地形区分をアイテム i と呼び, それぞれの中の種別をアイテム i の中のカテゴリ j と呼ぶ.

$$R_\lambda^* = \prod_{i=1}^{N_i} \prod_{j=1}^{N_{ij}} c_{ij}^{x_{ij\lambda}} \cdot R_s \quad (2)$$

式(2)において N_i はアイテム i の数, N_{ij} はアイテム i に依存したカテゴリ j の数, c_{ij} はカテゴリ数量と呼び, R_s^* を実被害率 R_λ に近づけるための補正係数, R_s は標準被害率であり, $c_{ij\lambda}$ はダミー変数 $x_{ij\lambda}$ を指数部とするカテゴリ数量 c_{ij} である.

ここで, 両辺対数をとると次式のようになる.

$$\ln R_\lambda^* = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_{ij}} x_{ij\lambda} c_{ij} + \ln R_s \quad (3)$$

補正係数 c_{ij} は組み合わせ λ に対応した通信管路の総スパン数 N で重みづけされた以下の式(4)の目的関数 ε を最小化するように決定される. なお, 実被害率 R_λ が 0 となる場合には式(4)に示す対数場における数量化I類の理論が適用できないため, 分析の際には対象外としている.

$$\varepsilon = \sum_{\lambda=1}^{N^\lambda} (\ln R_\lambda - \ln R_\lambda^*)^2 N \quad (4)$$

(2) 補正係数の観点から見た被害率間の関係

以上より, 式(2)の補正係数 c_{ij} を算出した結果を図-8, 図-9に示す. また, 図中において, 地殻内地震を地殻と省略している. 図-8は基準区分として橋梁種別はRC, 橋長10-20m, 建設年1982年以前, 微地形区分を沖積平野とした場合の被害率データ間の相対的な倍率を表している. 図-8において定めた基準区分は総スパン数が十分に多いカテゴリ j とした. また, 図-9は, 橋長の区分を行わず, 橋梁種別と微地形区分を表-2の分類2の分類とした上で, 基準区分として橋梁種別を添架, 建設年を同じく1982年以前, 微地形区分を沖積平野とした場合の結果を示している.

なお, 図-9における補正係数 c_{ij} 及び実被害データに基づく標準被害率 R_s を用いて式(2)より算出した推定被害率 R_λ^* は0以上1以下を示し, この場合は定式化の妥当性は保証されている.

橋梁種別, 橋長, 建設年及び微地形区分の分類・種別に対して, 補正係数が1.0より大きいということは基準区分に対して通信管路の被害データの中で当該分類・種別の被害率 R の寄与が大きく, これらで被害率データを回帰した場合に当該分類・種別の要因が高いことを意味する.

図-10には, 実被害データに基づくクロス分析より算出した実被害率 R_λ と数量化I類を用いた回帰モデルより算出した推定被害率 R_λ^* の関係を示す. 決定係数は, 白抜きデータを除いた地殻内地震では0.640, 東北地方太平洋沖地震では0.981を示し適合度は良いと考えられる.

図-8において, 熊本地震では, 標準専用橋, 特殊専用橋, 鋼橋, ローム台地, 液状化領域の補正係数は高く, 管橋は低い値を示す. 新潟県中越地震では, PC, 建設年1983年以後の補正係数は高く, 標準専用橋並びに熊本地震同様に管橋は低い値を示す. 新潟県中越沖地震では, 標準専用橋, 砂丘の補正係数は高く, 橋長10m以下は低い値を示す. また, 東北地方太平洋沖地震では, 標準専用橋, ローム台地, 砂州・砂礫州, 埋立・干拓地,

液化領域の補正係数は高く、橋長10m以下は低い値を示す。

熊本地震におけるローム台地、新潟県中越地震における建設年1983年以後、新潟県中越沖地震における砂丘の補正係数は相対的に高い値を示し、この要因としてはクロス分析においてこれらの属性が示す被害率Rにおいて1.0となる箇所が存在したためと考えられる。また、東北地方太平洋沖地震における橋長10m以下の補正係数が相対的に低い値を示す要因としては、クロス分析において橋長10m以下のRCの被害率Rが相対的に低い値であるためと考えられる。

図-9において、地殻内地震と東北地方太平洋地震ともに埋立・干拓地の補正係数は高く、管橋、建設年1983年以後は低い値を示す。東北地方太平洋沖地震における液化領域の補正係数は図-8では3.32、図-9では0.94と逆の傾向を示す。この要因としては、PC、RC及び鋼橋が添架としてまとめられ、表-5では液化領域の被害率Rは0.13と低い値を示したためと考えられる。

5. 標準被害率データと標準被害率曲線の特徴

(1) データ解析の手法

2.(3)で定義した地震動強さの各指標に対して標準被害率データを抽出するとともに、そのモデル化を試み、標準被害率曲線の構築を行う。ここでは、橋梁種別として表-2に示す分類2の添架、専用橋、管橋に分けて、橋長による区分はせず、建設年は1982年以前、微地形区分は表-2の分類2に示す沖積平野の管路データに基づき、地震動強さの指標毎に各地震被害において標準被害率R_sを抽出した。上述した3つの地殻内地震を合算したデータとプレート間地震である東北地方太平洋沖地震のデータを用い、標準被害率曲線を構築した。なお、橋梁種別が管橋のデータについてはデータ数が十分ではないため、モデル化は行わないこととした。

標準被害率曲線R[^](x)は標準正規分布の累積分布関数Φ()を用い、対数正規分布あるいは正規分布にパラメータCを掛け合わせた式(5a)、(5b)のモデルとする。PGA、PGV、SIにおいては式(5a)、LIにおいては式(5b)を適用する。なお、添架、専用橋について、ある地震動強さに曝されたスパン数に対して、様々なモードで損傷し被災したスパン数の比率の上限を被災データに基づき現実的に説明しうるパラメータとしてCを導入する。よって、Cは式(5a)、(5b)において地震動強さxが大きな値となった場合に漸近する被害率を示している。

$$R^{\wedge}(x) = C\Phi\left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\zeta}\right) \quad (5a)$$

$$R^{\wedge}(x) = C\Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (5b)$$

ここで、式(5a)、式(5b)中のC、λ、ζ、μ、σはパラメータであり、回帰により得られる定数である。それらは、式(6)の目的関数εを最小化するように、区間幅のスパン数を総スパン数で除した比率Mによって重み付けされた最小二乗法に基づき決定される。解法には信頼領域法に基づく非線形最小二乗法を用いた。また、R_s(x)は実被害に基づく標準被害率データである。PGAの区間幅を100cm/s²、PGV、SIの区間幅を10cm/s及びLIの区間幅を0.1とする。

$$\varepsilon = \sum (R_s(x) - R^{\wedge}(x))^2 M \quad (6)$$

また、最適化計算の際に、パラメータの値が適切に収束しない場合が多いため、パラメータの値が取りうる範囲を設定する。Cの範囲は、被害率の上限が1.0であるため、0 ≤ C ≤ 1.0と設定した。また、対数正規分布に従う被害率曲線のパラメータλ、ζは、式(7a)、式(7b)を用いて平均値μ、標準偏差σに変換し、比較する。なお、LIは正規分布に従う被害率曲線であるため、パラメータμ、σは平均値及び標準偏差である。なお、μ及びσの範囲は実データが発生した区間に適する値に設定する。

$$\mu = \exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\zeta^2\right) \quad (7a)$$

$$\sigma = \sqrt{\mu^2(\exp(\zeta^2) - 1)} \quad (7b)$$

一方、地震動強さxにおけるばらつきを表す確率密度関数は式(8)で表すことができる。

$$f(R_s(x)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_v R_s(x)} e^{-\frac{1}{2}\left\{\frac{\ln(R_s(x) - \lambda_v)}{\zeta_v}\right\}^2} \quad (8)$$

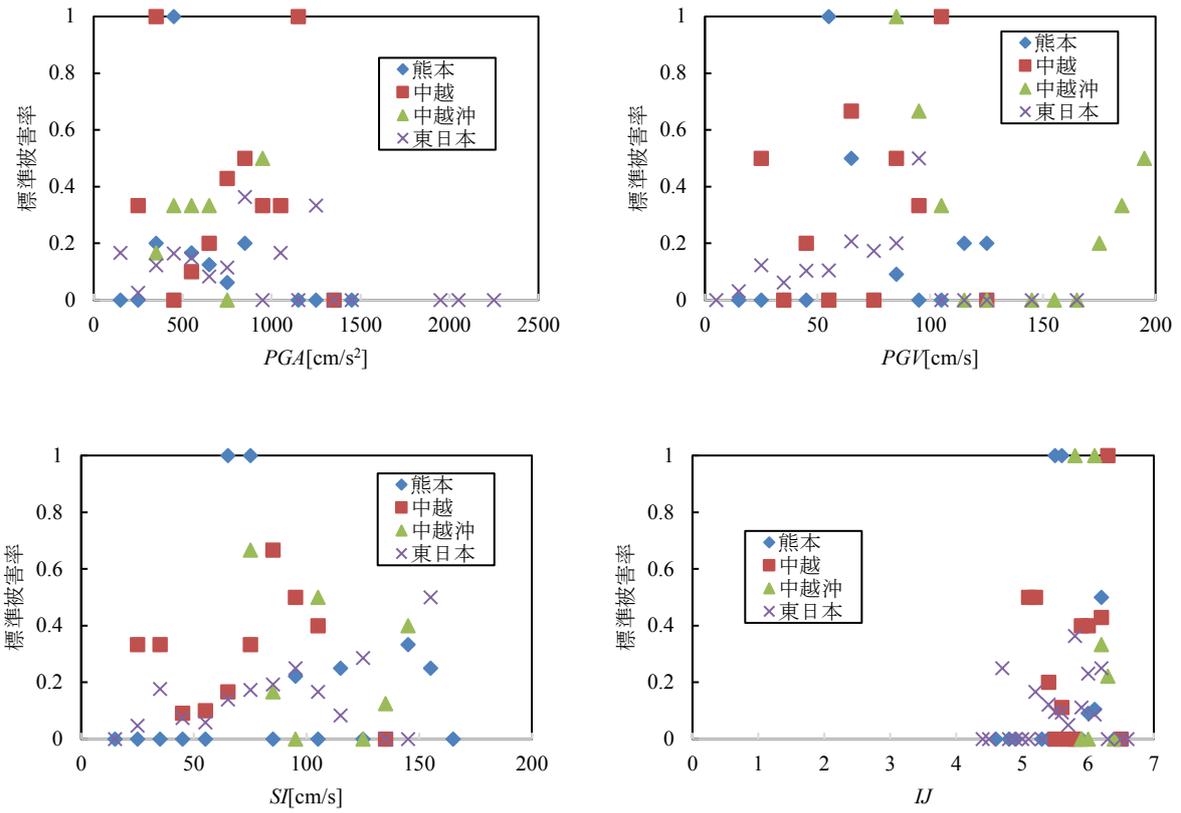
ここで、λ_vはln(R_s(x))の平均値、ζ_vはln(R_s(x))の標準偏差である。このばらつきの平均値がR[^](x)であるが、これはR_s(x)の平均値である。よって式(9)を用いて変換を行う。

$$\lambda_v = \ln(R^{\wedge}(x)) - \frac{1}{2}\zeta_v^2 \quad (9)$$

これらの式で求めたパラメータを用いて10%超過確率及び10%非超過確率を算出する。

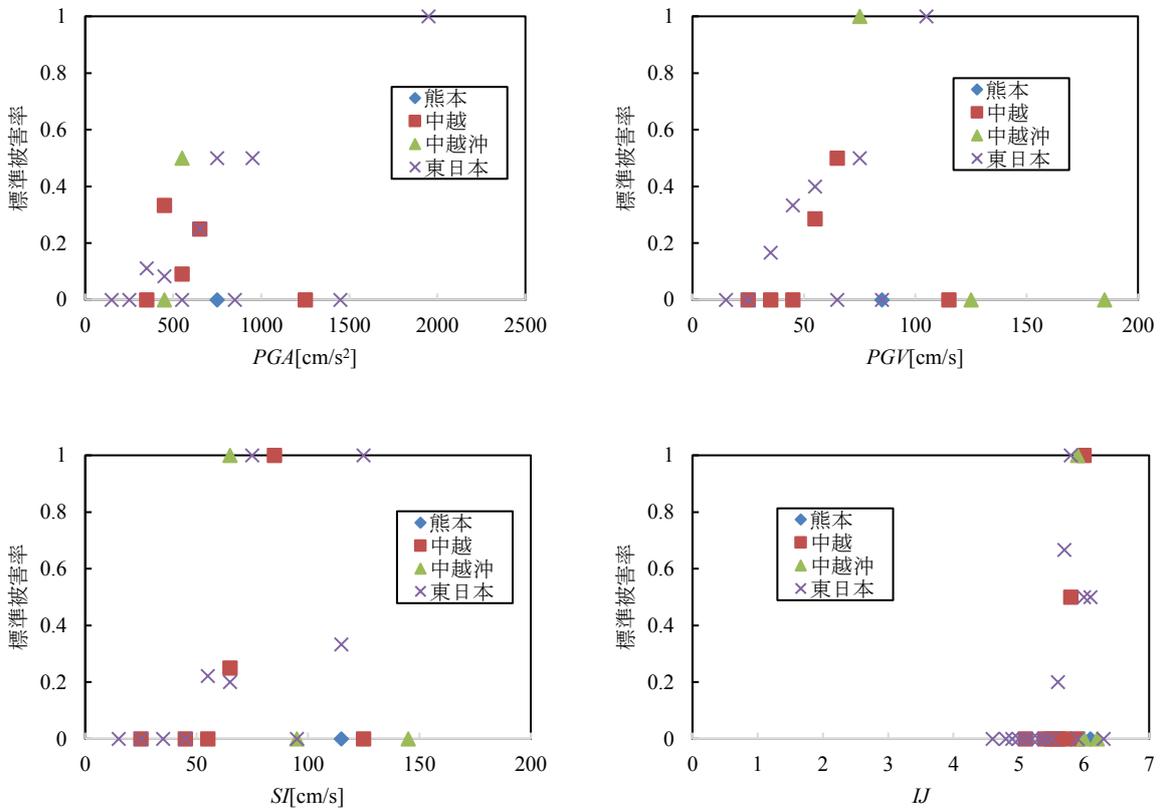
(2) 標準被害率データの抽出及びそのモデル化

以上により、抽出された標準被害率R_sとモデル化された標準被害率曲線を図-11から図-15に示し、パラメータの値及び適用範囲を表-6、表-7に示す。標準被害率曲線



(橋梁種別：添架，建設年：1982年以前，微地形区分：沖積平野)

図-11 各地震被害に対する標準被害率データ



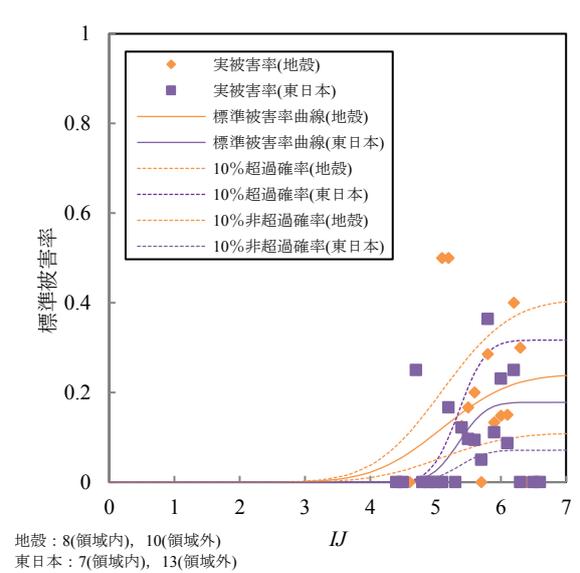
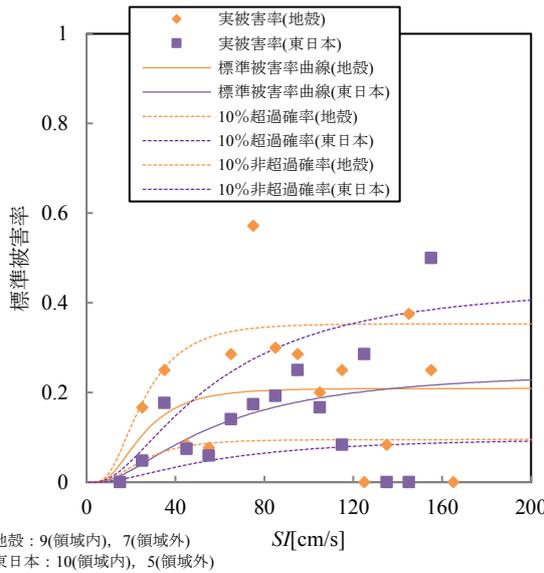
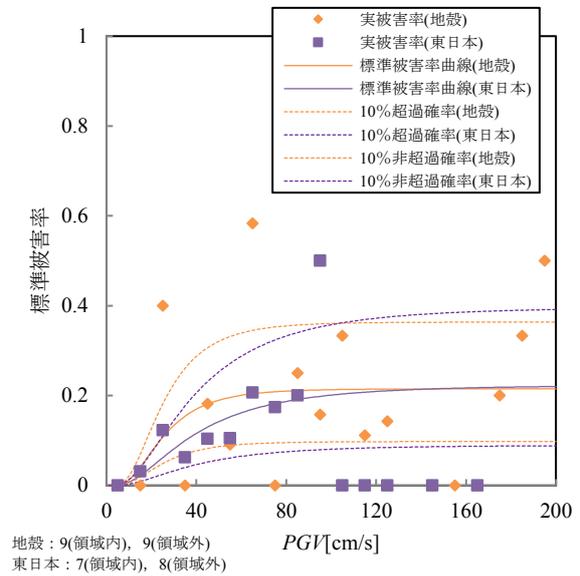
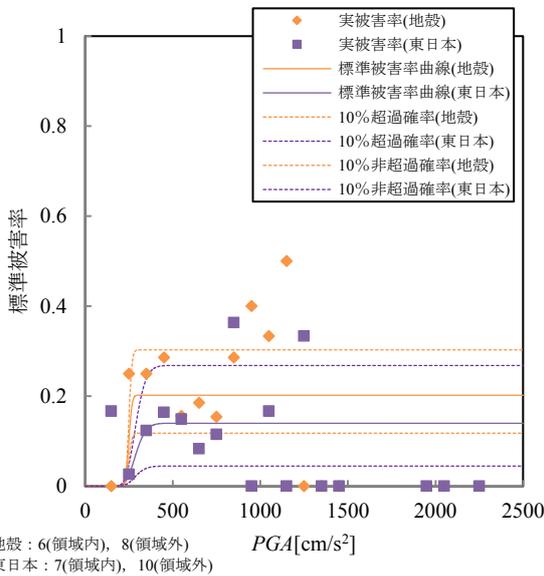
(橋梁種別：専用橋，建設年：1982年以前，微地形区分：沖積平野)

図-12 各地震被害に対する標準被害率データ

表-6 添架管路データにおける標準被害率曲線のパラメータ推計結果 (上段：地殻内地震, 下段：東北地方太平洋沖地震)

		C	λ	ζ	μ	σ	適用範囲
PGA	重み付けあり	0.20	5.52	0.06	250.03cm/s ²	14.10cm/s ²	0cm/s ² ≤ PGA ≤ 2500cm/s ²
	重み付けなし	0.22	5.52	0.06	250.03cm/s ²	9.58cm/s ²	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	5.52 ≤ λ ≤ 7.05	0.05 ≤ ζ ≤ 0.90	250 ≤ μ ≤ 1150	3.84 ≤ σ ≤ 496.15	
PGV	重み付けあり	0.22	3.22	0.58	29.66cm/s	18.94cm/s	0cm/s ≤ PGV ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.20	3.22	0.53	28.76cm/s	16.36cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	3.22 ≤ λ ≤ 5.27	0.08 ≤ ζ ≤ 1.14	25 ≤ μ ≤ 195	2.69 ≤ σ ≤ 107.31	
SI	重み付けあり	0.21	3.22	0.58	29.57cm/s	18.67cm/s	0cm/s ≤ SI ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.22	3.22	0.43	27.45cm/s	12.46cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	3.22 ≤ λ ≤ 5.04	0.01 ≤ ζ ≤ 1.22	25 ≤ μ ≤ 155	3.46 ≤ σ ≤ 66.54	
IJ	重み付けあり	0.24	-	-	5.1	0.83	0 ≤ IJ ≤ 7.0
	重み付けなし	0.22	-	-	5.1	0.83	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	-	-	5.1 ≤ μ ≤ 6.3	0.03 ≤ σ ≤ 0.83	

		C	λ	ζ	μ	σ	適用範囲
PGA	重み付けあり	0.14	5.66	0.16	292.01cm/s ²	46.19cm/s ²	0cm/s ² ≤ PGA ≤ 2500cm/s ²
	重み付けなし	0.10	5.56	0.06	260.78cm/s ²	16.56cm/s ²	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	5.01 ≤ λ ≤ 7.13	0.06 ≤ ζ ≤ 1.24	150 ≤ μ ≤ 1250	6.81 ≤ σ ≤ 693.18	
PGV	重み付けあり	0.22	3.65	0.74	50.63cm/s	42.95cm/s	0cm/s ≤ PGV ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.12	3.55	0.08	34.88cm/s	2.95cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	2.70 ≤ λ ≤ 4.55	0.05 ≤ ζ ≤ 1.25	15 ≤ μ ≤ 95	2.95 ≤ σ ≤ 42.95	
SI	重み付けあり	0.24	4.04	0.84	80.72cm/s	82.05cm/s	0cm/s ≤ SI ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.22	3.81	0.93	69.84cm/s	82.05cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	3.21 ≤ λ ≤ 5.04	0.03 ≤ ζ ≤ 0.99	25 ≤ μ ≤ 155	2.04 ≤ σ ≤ 82.05	
IJ	重み付けあり	0.18	-	-	5.4	0.33	0 ≤ IJ ≤ 7.0
	重み付けなし	0.12	-	-	4.9	0.49	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	-	-	4.7 ≤ μ ≤ 6.2	0.02 ≤ σ ≤ 0.98	



(橋梁種別：添架, 建設年：1982年以前, 微地形区分：沖積平野)

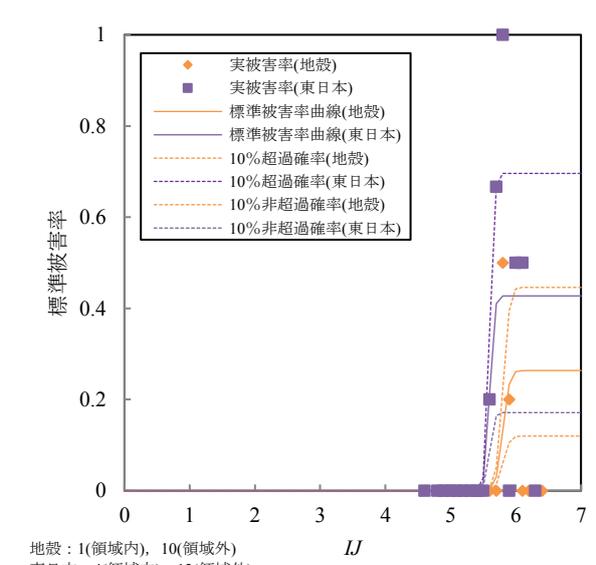
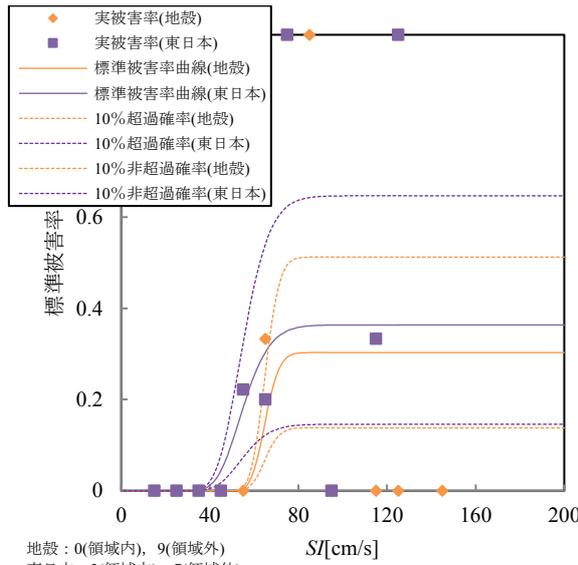
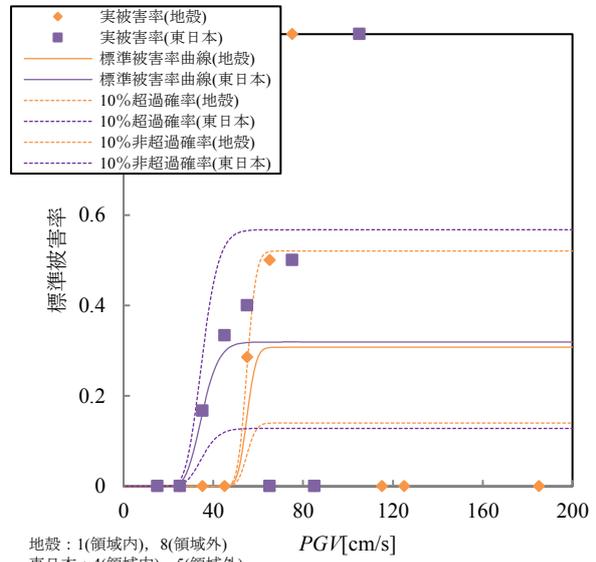
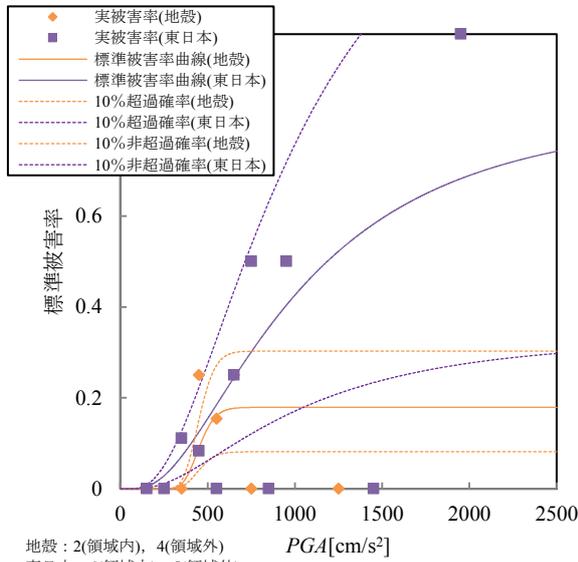
*10%超過確率と10%非超過確率で示す領域における標準被害率R_sの数を左下に示している

図-13 地殻内地震と東北地方太平洋沖地震に対する標準被害率データと標準被害率曲線

表-7 専用橋データにおける標準被害率曲線のパラメータ推計結果 (上段: 地殻内地震, 下段: 東北地方太平洋沖地震)

		C	λ	ζ	μ	σ	適用範囲
PGA	重み付けあり	0.18	6.11	0.16	455.85cm/s ²	73.75cm/s ²	0cm/s ² ≤ PGA ≤ 2500cm/s ²
	重み付けなし	0.12	6.11	0.03	450.22cm/s ²	14.34cm/s ²	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	6.11 ≤ λ ≤ 6.48	0.01 ≤ ζ ≤ 0.19	450 ≤ μ ≤ 650	0 ≤ σ ≤ 100	
PGV	重み付けあり	0.31	4.01	0.06	55.09cm/s	3.22cm/s	0cm/s ≤ PGV ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.26	4.01	0.05	55.06cm/s	2.63cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	4.01 ≤ λ ≤ 4.32	0.04 ≤ ζ ≤ 0.19	55 ≤ μ ≤ 75	2.5 ≤ σ ≤ 12.5	
SI	重み付けあり	0.30	4.17	0.08	65.20cm/s	5.06cm/s	0cm/s ≤ SI ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.22	4.17	0.08	65.20cm/s	5cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	4.17 ≤ λ ≤ 4.44	0.06 ≤ ζ ≤ 0.20	65 ≤ μ ≤ 85	5 ≤ σ ≤ 15	
IJ	重み付けあり	0.26	-	-	5.8	0.08	0 ≤ IJ ≤ 7.0
	重み付けなし	0.18	-	-	5.8	0.02	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	-	-	5.8 ≤ μ ≤ 6.0	0.02 ≤ σ ≤ 0.13	

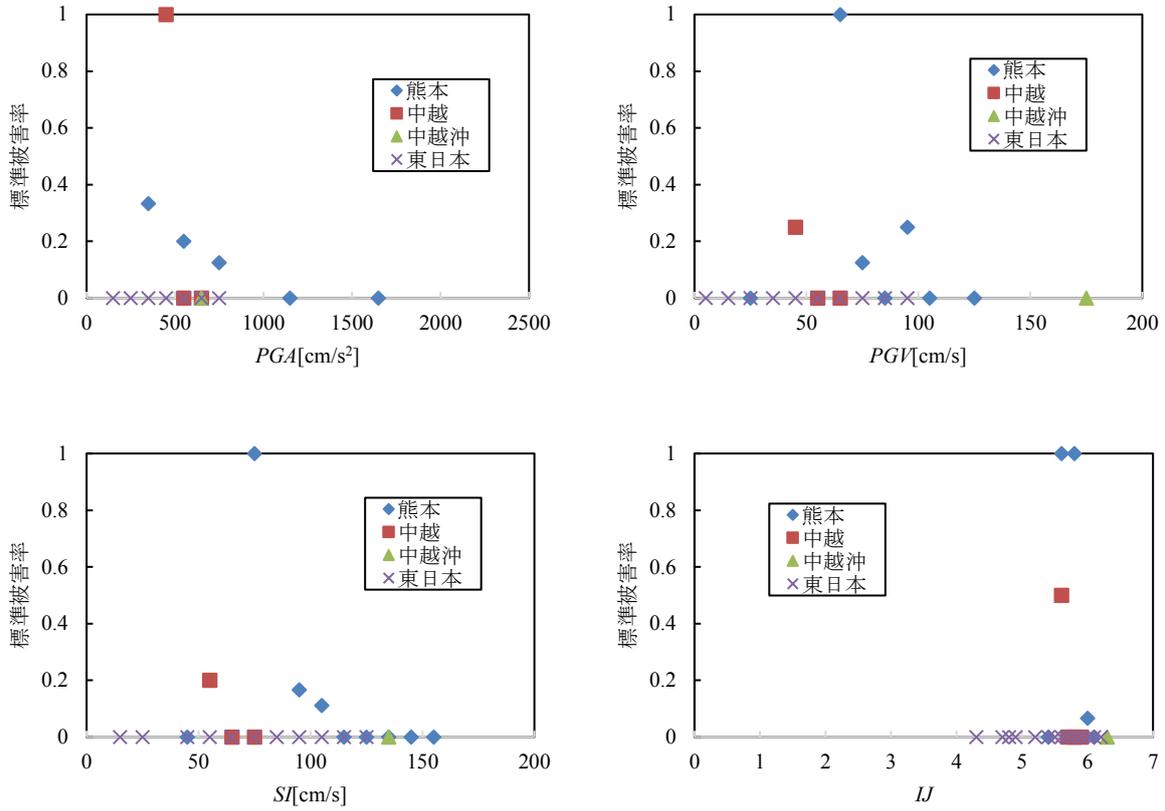
		C	λ	ζ	μ	σ	適用範囲
PGA	重み付けあり	0.83	6.88	0.75	1287.46cm/s ²	1114.29cm/s ²	0cm/s ² ≤ PGA ≤ 2500cm/s ²
	重み付けなし	0.88	7.10	0.66	1507.69cm/s ²	1114.29cm/s ²	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	5.85 ≤ λ ≤ 7.58	0.03 ≤ ζ ≤ 0.99	350 ≤ μ ≤ 1950	85.71 ≤ σ ≤ 1114.29	
PGV	重み付けあり	0.32	3.56	0.17	35.49cm/s	6.00cm/s	0cm/s ≤ PGV ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.37	3.58	0.12	35.96cm/s	4.29cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	3.55 ≤ λ ≤ 4.65	0.01 ≤ ζ ≤ 0.63	35 ≤ μ ≤ 105	4.28 ≤ σ ≤ 45.71	
SI	重み付けあり	0.36	4.01	0.17	55.82cm/s	9.67cm/s	0cm/s ≤ SI ≤ 200cm/s
	重み付けなし	0.55	4.10	0.12	61.03cm/s	7.22cm/s	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	4.00 ≤ λ ≤ 4.83	0.02 ≤ ζ ≤ 0.49	55 ≤ μ ≤ 125	5.71 ≤ σ ≤ 44.29	
IJ	重み付けあり	0.43	-	-	5.6	0.06	0 ≤ IJ ≤ 7.0
	重み付けなし	0.44	-	-	5.6	0.06	
	制御範囲	0 ≤ C ≤ 1	-	-	5.6 ≤ μ ≤ 6.1	0.06 ≤ σ ≤ 0.26	



(橋梁種別: 専用橋, 建設年: 1982年以前, 微地形区分: 沖積平野)

* 10%超過確率と10%非超過確率で示す領域における標準被害率R₀の数を左下に示している

図-14 地殻内地震と東北地方太平洋沖地震に対する標準被害率データと標準被害率曲線



(橋梁種別：管橋，建設年：1982年以前，微地形区分：沖積平野)

図-15 各地震被害に対する標準被害率データ

のパラメータ決定に際しては、式(6)のように比率 M によって重み付けを行った場合と重み付けを行わなかった場合において算出した。また、それぞれの 10%超過確率及び 10%非超過確率を算出し、その領域内に含む標準被害率データが多い方を適切なモデルと判断することとした。これより重み付けを行った場合の方が適合度は良いため、重み付けを行った場合の標準被害率曲線を図-13、図-14には示している。

a) 添架データ

図-11には、添架データに基づいて、地震動強さの指標毎に各地震被害において抽出した標準被害率 R_s を示す。図-11より、PGAについて、熊本地震では、相対的に地震動の低いPGA=450cm/s²において、標準被害率 R_s は1.0を示し、熊本県阿蘇市に位置する管路であった。新潟県中越地震では、相対的に地震動の低いPGA=250cm/s²、PGA=350cm/s²において、標準被害率 R_s は0.33を越えるような高い値を示し、それぞれ新潟県見附市及び南魚沼市に位置する管路であった。また、PGA=1150cm/s²において、標準被害率 R_s は1.0を示す。この被害は、図-7に示す非液化化領域のPGA=1100~1200cm/s²における被害率 R が1.0となる要因である。

図-11より、PGIについて、熊本地震では、PGI=55cm/s、PGI=65cm/sにおいて、標準被害率 R_s は0.5を

越えるような高い値を示す。新潟県中越地震では、相対的に地震動の低いPGI=25cm/sにおいて、標準被害率 R_s は0.5と高い値を示す。また、PGI=105cm/sにおいて、標準被害率 R_s は1.0を示す。新潟県中越沖地震では、PGI=85cm/s、PGI=95cm/sにおいて、標準被害率 R_s は0.67を越えるような高い値を示し、新潟県柏崎市、長岡市に位置する管路であった。この被害は、図-7に示す非液化化領域のPGI=80~100cm/sにおける被害率 R が相対的に高い要因となっている。東北地方太平洋沖地震では、PGI=95cm/sにおいて、標準被害率 R_s は0.5と高い値を示す。

図-11より、SIについて、熊本地震では、SI=65cm/s、SI=75cm/sにおいて、標準被害率 R_s は1.0を示す。新潟県中越地震では、相対的に地震動の低いSI=25cm/s、SI=35cm/sにおいて、標準被害率 R_s が0.33を越える高い値を示す。新潟県中越沖地震では、SI=75cm/s、SI=105cm/sにおいて、標準被害率 R_s は0.5を越えるような高い値を示す。東北地方太平洋沖地震では、相対的に地震動の大きいSI=155cm/sにおいて、標準被害率 R_s は0.5と高い値を示す。この被害は、図-7に示す非液化化領域のSI=150cm/s以上における被害率 R が相対的に高い要因となっている。

図-11より、計測震度IJについて、熊本地震では、IJ=5.5、IJ=5.6において、標準被害率 R_s は1.0を示す。この被害は、図-7に示す非液化化領域のIJ=5.5~5.6における

被害率 R が相対的に高い要因となっている。新潟県中越地震では、相対的に地震動の低い $IJ=5.1$, $IJ=5.2$ 及び $IJ=6.3$ において、標準被害率 R_s が0.5または1.0と高い値を示す。新潟県中越沖地震では、 $IJ=5.8$, $IJ=6.1$ において、標準被害率 R_s が1.0を示す。東北地方太平洋沖地震では、相対的に地震動の低い $IJ=4.7$ において、標準被害率 R_s は0.25を示し、岩手県久慈市に位置する管路であった。

地震動強さの指標である PGA , PGV , SI 及び IJ と標準被害率 R_s の関係にそれぞれ特徴が見られた。この理由は地震動強さの指標毎に算出方法が異なり、管路の位置によってそれぞれの地震動強さの値が変化するためである。

以上の結果を踏まえ、**図-13**には、添架管路のデータに基づいて、地殻内地震と東北地方太平洋沖地震における抽出した標準被害率 R_s 及び構築した標準被害率曲線を示す。**図-13**より、全ての地震動強さの指標において、地殻内地震では、東北地方太平洋沖地震よりも地震動が高い領域において、標準被害率 R_s は相対的に高い値を示す。また、東北地方太平洋沖地震では、地震動が大きくなるにつれて、徐々に標準被害率 R_s は増加していく傾向を示す。

一方、標準被害率曲線については、**図-13**より、地殻内地震において、式(5a)及び式(5b)における C の値は0.20~0.24を示している。 PGA における標準被害率 R' は、 $PGA=250\text{cm/s}^2$ 付近で0.1を越え、 $PGA=280\text{cm/s}^2$ 付近で0.20を示し漸近した。 PGV と SI における標準被害率 R' は、同様の傾向を示し、いずれも 25cm/s 付近で0.1を越え、 $60\sim 80\text{cm/s}$ 付近でそれぞれ0.22, 0.21を示し漸近した。また、計測震度 IJ における標準被害率 R' は、 $IJ=5.0$ 付近で0.1を超え、適用範囲の上限の $IJ=7.0$ において0.24を示し最も漸近した。

東北地方太平洋沖地震において、 C の値は0.14~0.24を示している。 PGA における標準被害率 R' は、 $PGA=310\text{cm/s}^2$ 付近で0.1を越え、 $PGA=500\text{cm/s}^2$ 付近で0.14を示し漸近した。 PGV と SI における標準被害率 R' は、同様の傾向を示し、いずれも 40cm/s 付近で0.1を越え、適用範囲の上限においてそれぞれ0.22, 0.23を示し漸近した。また、計測震度 IJ における標準被害率 R' は、 $IJ=5.4$ 付近で0.1を超え、 $IJ=6.1$ で0.18を示し漸近した。

地殻内地震と東北地方太平洋沖地震を比較すると、地殻内地震の標準被害率曲線は、東北地方太平洋沖地震よりも低い地震動から標準被害率 R' が上昇する傾向がある。 PGA と IJ では、地殻内地震の方が標準被害率 R' は常に高い値を示す。一方、 PGV と SI では、標準被害率 R' は低い地震動において、地殻内地震の方が高いが、地震動がある一定の値を超えると地殻内地震と東北地方太平洋沖地は同様の値を示す。

10%超過確率と10%非超過確率で示す領域内に含まれる標準被害率 R_s の数は地殻内地震と東北地方太平洋沖地

震ともに SI において最も多く含まれ、相対的に適合度が良いと考えられる。

なお、標準被害率曲線は、式(5a), (5b)で定義した被害率の性質より、地震動強さが大きくなるにつれて被害スパン数が多くなり、被害率は1に近づいていくことが考えられる。今回のデータの場合には、地震動強さが大きくなるとある値に漸近する結果を示したが、この要因としては、橋梁区間における通信管路の振動やその周辺の地盤震動において不確定性があることが考えられる。また、標準被害率曲線を構築する際に総スパン数で重み付けを行ったことや、低い地震動における被害率が相対的に高い傾向を示したことも要因として考えられる。

b) 専用橋データ及び管橋データ

図-12には、専用橋のデータに基づいて、地震動強さの指標毎に各地震被害において抽出した標準被害率 R_s を示す。なお、熊本地震では被害有スパンは抽出されなかった。

図-12より、新潟県中越沖地震では、 $PGV=75\text{cm/s}$, $SI=85\text{cm/s}$ 及び $IJ=6.0$ において、標準被害率 R_s は1.0を示す。新潟県中越沖地震では、 $PGV=75\text{cm/s}$, $SI=65\text{cm/s}$ 及び $IJ=5.9$ において、標準被害率 R_s は1.0を示す。また、東北地方太平洋沖地震では、 $PGA=1950\text{cm/s}^2$, $PGV=105\text{cm/s}$, $SI=75\text{cm/s}$, $SI=125\text{cm/s}$ において、標準被害率 R_s は1.0を示し、 $IJ=5.7$, $IJ=5.8$ において、標準被害率 R_s は0.67を越える高い値を示す。これらの高い標準被害率 R_s を示すデータは、**図-7**に示す非液状化領域の被害率 R において、これらの被害が属する地震動帯域での支配要因となっている。また、東北地方太平洋沖地震において相対的に地震動の大きい $PGA=1950\text{cm/s}^2$ を示す管路は、宮城県塩竈市に位置する。

以上の結果を踏まえ、**図-14**には、専用橋のデータに基づいて、地殻内地震と東北地方太平洋沖地震における抽出した標準被害率 R_s 及び構築した標準被害率曲線を示す。**図-14**より、全ての地震動強さの指標において、地殻内地震では、東北地方太平洋沖地震よりも標準被害率 R_s は相対的に急激に増加する傾向がある。また、添架管路の標準被害率 R_s と同様に、東北地方太平洋沖地震では、地震動が大きくなるにつれて、徐々に標準被害率 R_s は増加していく傾向がある。

一方、標準被害率曲線については、**図-14**より、地殻内地震において、式(5a)及び式(5b)における C の値は0.18~0.31を示している。 PGA における標準被害率 R' は、 $PGA=460\text{cm/s}^2$ 付近で0.1を越え、 $PGA=650\text{cm/s}^2$ 付近で0.18を示し漸近した。 PGV と SI における標準被害率 R' は、同様の傾向を示し、 $50\sim 60\text{cm/s}$ 付近で0.1を越え、 70cm/s 付近でそれぞれ0.31, 0.30を示し漸近した。また、計測震度 IJ における標準被害率 R' は、 $IJ=5.8$ 付近で0.1を超え、適用範囲の上限の $IJ=7.0$ 付近で0.26を示し漸近した。

東北地方太平洋沖地震において、 C の値は0.30~0.86を示している。PGAにおける標準被害率 R は、 $PGA=400\text{cm/s}^2$ 付近で0.1を越え、適用範囲の上限において0.74を示した。PGVとSIにおける標準被害率 R は、同様の傾向を示し、30~50cm/s付近で0.1を越え、60~80cm/s付近でそれぞれ0.32, 0.36を示し漸近した。また、計測震度 I における標準被害率 R は、 $I=5.6$ 付近で0.1を超え、 $I=5.8$ 付近で0.43を示し漸近した。

地殻内地震と東北地方太平洋沖地震を比較すると、東北地方太平洋沖地震の標準被害率曲線は、地殻内地震よりも低い地震動から標準被害率 R が上昇する傾向があり、添架データとは反対の傾向を示す。また、全ての地震動強さの指標において、東北地方太平洋沖地震の方が標準被害率 R は高い値を示す。

10%超過確率と10%非超過確率で示す領域内に含まれる標準被害率 R_0 の数は地殻内地震と東北地方太平洋沖地震ともにPGAにおいて最も多く含まれ、相対的に適合度が良いと考えられる。

図-15には、管橋のデータに基づいて、地震動強さの指標毎に各地震被害において抽出した標準被害率 R_0 を示す。なお、新潟県中越沖地震と東北地方太平洋沖地震では被害有スパンは抽出されなかった。

図-15より、熊本地震では、 $PGV=65\text{cm/s}$ 、 $SI=75\text{cm/s}$ において、標準被害率 R_0 は1.0を示す。また、新潟県中越地震では、 $PGA=450\text{cm/s}^2$ において、標準被害率 R_0 は1.0を示し、 $I=5.6$ において、標準被害率 R_0 は0.5と高い値を示す。これらの高い標準被害率 R_0 を示すデータは、図-7に示す非液状化領域の被害率 R において、これらの被害が属する地震動帯域での支配要因となっている。

6. 結論

本研究では、2016年熊本地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震及び2011年東北地方太平洋沖地震の際の橋梁区間における通信管路のデータセットに基づき、地震動強さの指標であるPGA, PGV, SI及び計測震度 I と被害率 R の関係について体系的な整理並びに分析・考察を行った。その際、橋梁種別、橋長、建設年及び微地形区分の観点からクロス分析を踏まえた、数量化I類による多変量解析を適用し、被害率間の関係を明らかにした。以下得られた知見を示す。なお、熊本地震、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震を地殻内地震及び東北地方太平洋沖地震をプレート間で発生した地震と定義する。

(1) 橋梁種別については、地殻内地震と東北地方太平洋沖地震ともに添架(PC, RC, 鋼橋)の被害が最も大きく、地殻内地震では管橋はその半分程度の被害

の大きさを示した。橋長については、熊本地震では、10m以下の被害が相対的に大きい傾向を示し、10m以下の管路に多くの被害が見られたことを示す。また、東北地方太平洋沖地震では、50m以上の被害が最も大きい傾向を示した。建設年については、地殻内地震と東北地方太平洋沖地震に区分してまとめると、地震動の影響を考慮した継手の規格である1983年以後の方が被害は小さくなる傾向を示した。微地形区分については、沖積平野を基準にすると、熊本地震では、ローム台地、埋立・干拓地、火山地・火山山麓地、液状化領域の被害は相対的に大きい傾向を示した。新潟県中越沖地震では、砂丘の被害が最も大きく、東北地方太平洋沖地震では、ローム台地、砂州・砂礫州、埋立・干拓地、液状化領域の被害が相対的に大きい傾向を示した。

- (2) 地震動強さの傾向を分析した結果、全ての地震動強さにおいて、一定の地震動帯域で地震動の増加に伴い被害率の上昇が確認された。添架データにおける標準被害率について、地震動強さが大きい領域で地殻内地震では、プレート間地震よりも被害率が高い値を示した。これは熊本地震における益城町で観測されたような強烈なパルス状の地震動によって通信管路は曝され、添架管路の場合、地盤変状及び橋桁の振動に伴う被害が見られた可能性が考えられる。今後、強震動及び液状化作用に曝された地域を対象に、地盤震動の特徴及び橋桁の振動に伴う管路の被害の解明を試みる。
- (3) 標準被害率曲線の適合度は10%超過確率と10%非超過確率で示す領域内に含まれる標準被害率 R_0 の数より、添架データの場合SI, 専用橋データの場合PGAが最も高い結果となった。

謝辞：本研究は(財)地震予知総合研究振興会との共同研究により実施され、同・大保直人博士をはじめ、関係する皆様方より貴重なご助言を賜りました。また、関東学院大学理工学部土木学系の若松加寿江先生、東京工業大学大学院の松岡昌志先生及び防災科学技術研究所の先名重樹博士より熊本地震における液状化メッシュデータ及び微地形区分のデータを頂きました。さらに、元NTTアクセスサービスシステム研究所の張秋松氏にはデータの分析の際に多大なご協力を頂きました。関係者の皆様にはここに記して感謝の意を表します。

付録 各地震被害におけるクロス集計

付表-1から付表-4には、各地震被害におけるクロス分析の結果を付録として示す。

付表-1 2016年熊本地震の被害データ

		丘陵・火山性丘陵		砂礫質台地		ローム台地		谷底低地・扇状地		沖積平野		砂州・砂礫洲	埋立・干拓地		火山地・火山山麓地		液状化	
		-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	
PC	-10							0								1		
								1								1		
								0		0	0			0	1			1
	10-20							1		2	1			1	2	1		1
									0	0	0			0	0.5	0		1
RC	-10							0	2		1				0	1		1
								1	6		11				1	3		2
								0	0	0.33	0.09			0	0	0.33		0.5
	10-20							0	0	0	0	0			0	2	0	1
									2	1	5	3		1		3	5	7
鋼橋	-10							0										0
								1			1							1
								0			0							0
	20-50							1	1		2	2						1
									0	0	0	0.5						0.5
標準専用橋	-10							0										0
								1										1
								0										0
	20-50							0		2								1
									0		0							1
特殊専用橋	-10															1		
																1		
																1		
	20-50															0		
																1		
管橋	-10							0		1					0	1		1
								2		8					2	8		2
								0		0.13					0	0.13		0
											2	0			0	1		0
											17	3		5	2	8		2

付表-2 2004年新潟県中越地震の被害データ

		山麓・山麓地		砂礫質台地		谷底低地・扇状地		沖積平野		液状化	
		1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982
PC	-10							0	1		
								1	1		
								0	1		
	10-20							1			
									1		
RC	-10							0			0
								1	6		1
								0	0.33		0
	10-20							2	0	0	0
									0	0	0
鋼橋	-10							0			0
								2			1
								0			0
	20-50							1	1		1
									0		0
標準専用橋	-10							0			0
								1			1
								0			0
	20-50							0			0
									0		0
特殊専用橋	-10							0			0
								1			1
								0			0
	20-50							0			0
									0		0
管橋	-10							0			0
								1			1
								0			0
											0
											0

付表-3 2007年新潟県中越沖地震の被害データ

		山麓・山麓地		丘陵・火山性丘陵		砂礫質台地		谷底低地・扇状地		沖積平野		砂丘	
		1983-	-1982	-1982	-1982	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-		
PC	-10												
	20-50												
RC	-10							0		0	1		1
								1		9			1
								0		0	0.11		1
	10-20							0		0	1	0	0
											0.5	0	0
鋼橋	-10							0					0
								1					0
								0					0
	20-50							0		1	0		0
										1	1		1
標準専用橋	-10							0					0
								1					0
								0					0
	20-50							0		1	0		0
										1	1		1
管橋	-10							0					0
								1					1
								0					0
													0
													0

付表4 2011年東北地方太平洋沖地震の被害データ

		山地・山麓地		丘陵・火山性丘陵		砂礫質台地		ローム台地		谷底低地・扇状地		沖積平野		砂州・砂礫州		埋立・干拓地		火山地・火山山麓地		液状化		
		-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	-1982	1983-	
PC	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	1	1	1	1	2	2	1	1	7	5	4	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	20-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-	0	1	0	3	1	1	1	0	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		0	0	0	0.6	0.25	0	0	0	0	0.44	0.33	0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
RC	-10	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	4	1	2	1	8	3	2	1	20	9	17	7	3	1	1	1	1	1	1	1	1
	20-50	0	0	0	0.13	0.33	0	0	0	2	2	0	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-	0	1	0	1	0	0	0	0	2	9	21	7	4	2	1	1	1	1	1	1	1
		0	0.5	0	0.11	0	0	0	0.08	0.22	0.1	0.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
鋼橋	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	20-50	0	0	0	0.14	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-	0	2	0	0	0	0	0	0	1	2	15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0.25	0	0	0	0	0	0	0.06	0.33	0.41	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0
標準専用橋	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	2	2	2	4	1	1	1	1	3	3	4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	20-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0.13	0	0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
特殊専用橋	-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10-20	1	1	2	2	3	3	3	3	4	5	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	20-50	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50-	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
管橋	-10	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

参考文献

- 電気通信事業者の平成28年熊本地震への対応状況-総務省, http://www.soumu.go.jp/main_content/000432337.pdf (2017年12月13日閲覧)
- 新潟県中越地震の実態調査等を踏まえた検討課題の整理, <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/050629shiryu1-2-1.pdf> (2017年12月13日閲覧)
- 平成19年7月16日新潟県中越沖地震によるライフライン被害状況, http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/lifeline1907161600.pdf (2017年12月13日閲覧)
- 東日本電信電話株式会社: 東日本大震災による被害の復旧状況及び今後の対応について, https://www.ntt-east.co.jp/release/detail/20110427_02.html (2018年2月2日閲覧)
- 山崎泰司, 瀬川信博, 石田直之, 鈴木崇伸: 東日本大震災における電気通信土木設備の被害状況に関する考察, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第5号(特集号), pp. 55-68, 2012.
- 庄司学, 岸太陽, 宮崎史倫, 若竹雅人, 伊藤陽, 鈴木崇伸: 東北地方太平洋沖地震の作用を受けた通信埋設管の被害分析, 日本地震工学会論文集, 第16巻, 第3号(特集号), p. 3_213-3_233, 2016.3.
- 庄司学, 宮崎史倫, 若竹雅人, 伊藤陽, 鈴木崇伸: 通信埋設管路の地震対策に活用するスクリーニング手法の提案及び地震被害関数の構築, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 4(地震工学論文集第35巻), pp. I_523-I_531, 2016.
- 近藤卓, 若竹雅人: 熊本地震の作用を受けた橋梁に添架された通信用橋梁管路設備の被害の特徴について, 第7回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, pp. 187-191, 2016.
- 林知己夫: データの科学, pp. 106-108, 朝倉書店, 2003.
- 若松加寿江: 日本の液状化履歴マップ 745-2008, DVD, 2011.
- 若松加寿江, 先名重樹, 小澤京子: 2011年東北地方太平洋沖地震による液状化発生の特性, 日本地震工学会論文集, 第17巻, 第1号, pp. 43-62, 2017.2.
- 若松加寿江, 先名重樹, 小澤京子: 平成28年(2016年)熊本地震による液状化発生の特性, 日本地震工学会論文集, 第17巻, 第4号, pp. 81-100, 2017.8.
- 防災科学技術研究所: J-SHIS, <http://www.jshis.bosai.go.jp/> (2017年12月13日閲覧)
- 水越湧太, 庄司学: 2016年熊本地震において強震動の作用を受けた道路ネットワークの被害分析, 土木学会第72回年次学術講演会概要集(DVD-ROM), pp. 171-172, 2017.9.
- 末富岩雄, 塚本博之, 福島康宏, 尾茂淳平, 大保直

- 人：近年の被害地震における表層地盤の AVS30 と震度分布評価に関する一検討，第 37 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集（USB），土木学会，2017.10
- 16) 末富岩雄，石田栄介，磯山龍二：空間補間による地震動分布推定の高精度化のための一検討，第 28 回土木学会地震工学論文集，CD-ROM，2005
- 17) 先名重樹，翠川三郎：地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定，日本地震工学会論文集，第 9 巻，第 4 号，pp. 11-25, 2009.
- 18) 森山達也，能島暢呂，猪股渉，小山高寛，山端悠介：都市ガス供給システムにおける地震時供給停止判断の性能評価，第 36 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，2016.10.
- (2018.10.29 受付，2019.1.25 修正，2019.2.17 受理)

PREVIOUS SEISMIC DAMAGE OF TELECOMMUNICATION PIPELINES IN BRIDGE SECTION

Mikihiro TERASHIMA, Gaku SHOJI, Masaru OKUTSU, Masato WAKATAKE,
Iwao SUETOMI, Hiroyuki TSUKAMOTO and Takanobu SUZUKI

The 2004 Niigataken Chuetsu earthquake, the 2007 Niigataken Chuetsu offshore earthquake and the 2016 Kumamoto earthquake caused severe damage to the telecommunication pipelines in bridge section. In this study, data set was constructed from view of points of bridge type, construction year, bridge length, micro-topography and liquefaction occurrence for the telecommunication pipelines exposed to previous seismic damage. In addition, the peak ground acceleration PGA, the peak ground velocity PGV, the value of spectral intensity SI and the instrumental seismic intensity IJ, which are indicators of the ground motion intensity, are selected and the relation between these indicators and the damage rate was revealed.