

汶川 M_s 8.0 地震公路易损性研究^{*}

李廷辉, 林均岐, 刘金龙

(中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 基于汶川地震的公路震害资料, 选择地震动峰值加速度作为地震动参数, 选用双参数对数正态分布作为易损性函数, 将线性结构的公路离散为每 1 km 一处的工点进行回归分析得到公路结构易损性曲线, 再结合公路结构发生某一种破坏状态时的损失比, 建立了公路的平均损失率模型。结果表明: 在轻微破坏状态下, 边坡的易损性大于支挡结构与路基; 在毁坏情况下, 边坡的易损性则略小于支挡结构与路基; 公路整体的易损性比边坡、支挡结构、路基都要大, 公路平均损失率在 $PGA < 0.1\text{ g}$ 时增长较慢当 $PGA > 0.1\text{ g}$ 时, 随着 PGA 的增加开始快速增长。

关键词: 汶川地震; 易损性模型; 公路平均损失率; 震害分级; 损失比

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)04-0682-07

0 引言

公路作为生命线工程的重要组成部分, 在震后紧急救援与恢复重建工作中有着至关重要的作用。保证震后公路的畅通可以在很大程度上减少地震人员伤亡与经济损失。

Duke (1960) 对智利 8.5 级地震的震害进行调查发现, 海港重力式挡墙的破坏较严重, 主要以倾覆为主, 并定性分析了挡墙失稳的原因。1976 年意大利发生 6.5 级地震, 震害调查报告显示在莱德拉河沿岸有大量挡土墙发生震害破坏, 并伴随砂土液化。2004 年 10 月 23 日发生的日本新潟中越地区 M_w 6.7 地震主要影响菅越高速公路和北陆高速公路的路堤部分, 高速公路路堤出现了 3 次大规模垮塌, 导致高速公路实施交通管制, 大约 1 个月后才正式通车 (Honda *et al.*, 2005)。Ian (1999) 研究发现, 中国台湾省的高速公路在集集 7.6 级地震中产生了较为严重的破坏, 其中以边坡垮塌、

路基沉陷、断裂居多。Maruyama 和 Yamazaki (2010) 收集了宫城县北部地震、德川大地震、新潟中越地震的公路路基震害资料, 通过回归方法得到了路基的地震地震易损性曲线。Sotiris 和 Amir (2015) 建立二维有限元模型, 采用 IDA 方法得到了路堤与路堑的易损性曲线。尹超等 (2017) 采用 Flac 软件建立了有无挡土墙路堤有限差分模型, 通过 IDA-PSDA 方法得到了有无挡土墙条件下的路堤易损性。朱宏伟等 (2020) 基于振动台试验划分了挡墙的抗震性能水准, 采用 IDA 方法对重力式挡墙进行了地震易损性分析。

2008 年汶川地震对公路系统造成了严重破坏, 导致救援人员与物资在地震发生后不能及时通过公路系统输送到地震灾区, 影响了救援进度, 造成了不可挽回的损失。如果在震后能快速估算出灾区公路系统的破坏情况与损失, 决策层就能够采取更为合理的措施进行恢复重建工作, 也就可以大幅减少地震所造成的损失。本文基于汶川地震公路震害调查资料, 建立了汶川公路地震易损性模型, 在今后发生类似地震的情况下可以用该模型快速估算灾区

^{*} 收稿日期: 2021-02-05.

基金项目: 国家重点研发项目、地震保险承载体易损性模型研究 (2018YFC1504602) 和国家重点研发项目和城市地震巨灾情景构建技术 (2018YFC1504401) 联合资助。

第一作者简介: 李廷辉 (1992-), 博士研究生, 主要从事生命线抗震及易损性研究. E-mail: 13836116409@163.com.

公路的损失。该易损性模型也可以应用在再保险行业中，为其提供技术支持与参考。

1 公路震害统计

依据灾害调查人员对四川、甘肃、陕西地震灾区省内省干道以及部分县乡道路的调查结果（陈乐生，2012），本文对 VI ~ XI 烈度区内、道路等级为 2

~4 级的 15 条道路进行了震害统计，道路总长 1 114.06 km。通过分析发现公路的震害可以按结构类型与所在位置分为路基本体震害、边坡震害和支挡结构震害 3 类。廖燊（2009）考虑了汶川地震公路路基震害的实际情况，结合震后道路使用功能等因素提出了路基震害分级的概念，具体为轻微、中度、严重、损毁 4 级。3 类结构的震害等级主要特征见表 1（陈乐生，2012）。

表 1 3 类公路结构的震害等级特征
Tab. 1 Classification of seismic damage to highway structures

等级	支挡结构	边坡	路基
轻微	支挡结构无明显破坏，破坏区域不超过支挡结构总体的 10%；仍可实现支挡目的，在不进行修复的情况下仍可使用	有防护边坡其防护结构无明显破坏，破坏区域不超过防护结构总体的 5%；无防护边坡存在局部破坏现象，但未对路基造成破坏，未阻塞交通	路基无明显破坏，未对交通产生影响
中度	支挡结构破坏较明显，破坏区域不超过支挡结构总体的 10% ~ 30%，结构上部发生明显移位；需对支挡结构进行局部修复以实现支挡功能	有防护边坡其防护结构发生了较明显的破坏，破坏区域不超过防护结构总体的 5% ~ 20%；无防护边坡存在局部破坏现象，且滑塌体对路基造成了局部破坏，对道路进行基本处理可以恢复交通	路基存在明显破坏，开裂宽度不超过 10 cm，路堤存在局部崩塌，滑塌体掩埋局部路面，阻塞交通，需对道路进行基本处理以恢复交通
严重	支挡结构破坏明显，破坏区域不超过支挡结构总体的 30% ~ 60%，结构上部发生明显移位，结构失稳；需对支挡结构立即进行修复	有防护边坡其防护结构发生了明显的破坏，破坏区域不超过防护结构总体的 20% ~ 50%；无防护边坡发生了严重破坏，且滑塌体对路基造成严重破坏，需要对道路进行处理方可恢复交通	路基存在明显破坏，开裂宽度超过 10 cm，路堤存在局部崩塌，滑塌体掩埋大部分路面，阻塞交通，需要对道路进行处理方可恢复交通
损毁	支挡结构完全破坏，没有修复的可能	有防护边坡其防护结构发生了严重的破坏，破坏区域超过防护结构总体的 50%；无防护边坡产生大规模破坏，且滑塌体砸毁路基阻塞交通，需要要花大量时间处理方可恢复交通	路基存在严重破坏，开裂宽度过大导致路基彻底失效，滑塌体完全掩埋路面，阻塞交通，需要要花大量时间处理方可恢复交通

对研究路段的公路震害进行统计，见表 2，其中支挡结构震害 116 处、路基本体震害 142 处、边坡震害 176 处，在地震烈度为 IX ~ XI 度范围内路基震害尤为明显。随着地震烈度的降低，路基震害数量和震害程度在 VII 度区以下大幅度减小。从图 1a 可知，路基震害多集中在路面沉陷、开裂与边坡滑塌所导致的路基掩埋。支挡结构震害绝大多数发生在重力式挡土墙，占比达 95%，从图 1b 可知，支挡结构震害主要表现为垮塌、变形开裂、支挡结构倾斜与边坡滑塌体导致的掩埋。没有防护措施的边坡发生地震破坏的数量要大于有防护的边坡。边坡震害中无防护的边坡占比

66.7%，有防护的边坡占比 33.3%，从图 1c 可知，边坡震害中垮塌占了绝大多数。

表 2 不同震害等级下 3 类公路结构的破坏数量
Tab. 2 Quantity of damage to each highway structure on different levels

破坏等级	支挡结构	边坡	路基本体
轻微	32	48	28
中度	39	78	41
严重	24	34	55
损毁	21	16	18
合计	116	178	142

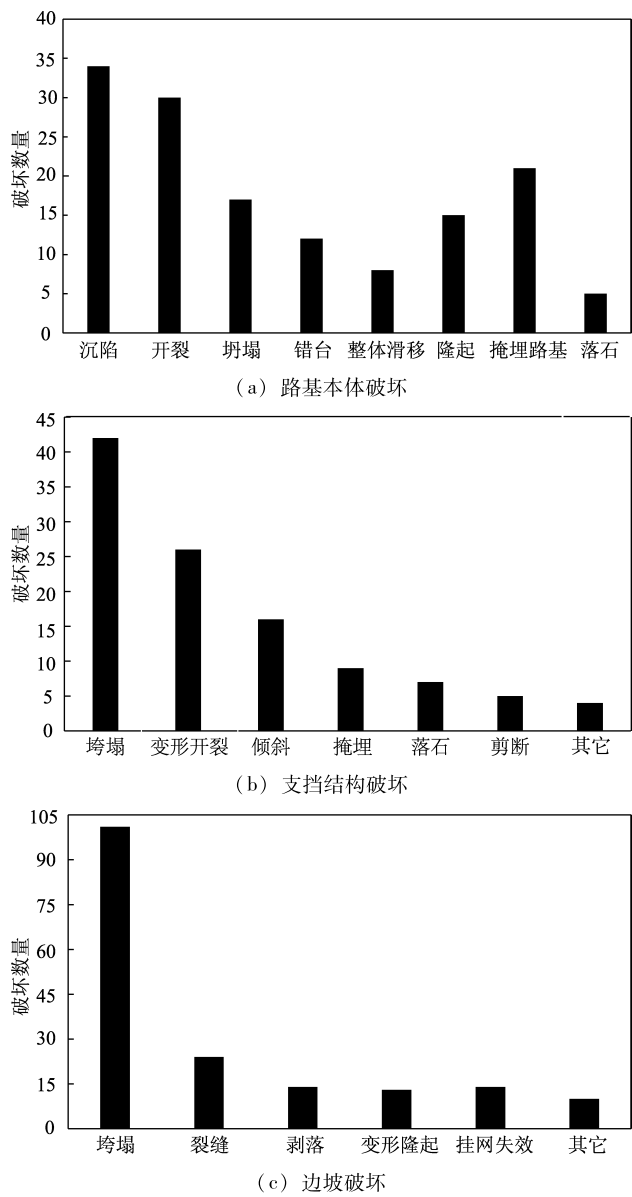


图1 3类公路结构的破坏数量
Fig.1 Column chart of quantity of damage
to highway structures

2 地震动参数的确定

在结构地震易损性分析中，地震动参数的确定是十分重要的，其直接影响了结构地震易损性模型的建立。在以往研究中，有部分学者会选择谱加速度 (Sa) 作为计算结构地震易损性的地震动参数 (Joyner, Boore, 1981; Fukushima, Tanaka, 1990; Molas, Yamazaki, 1995)，其计算结果也表明谱加速度的拟合结果要比地震峰值加速度 (PGA) 更佳，但是由于无法大量获得公路样本基频，因此

本文选择地震峰值加速度 (PGA) 作为地震动参数。

公路结构不同于房屋与桥梁，其分布范围十分广泛，为了便于回归分析，本文将公路结构离散成每 1 km 为 1 个工点进行统计。Lu 等 (2010) 通过对 167 个地震观测台站共计 501 条强震记录，采用统计回归的方式获得了汶川地震的地震动衰减模型如下：

$$\lg PGA = c_1 + c_2 \lg(R + h) \tag{1}$$

式中： c_1 与 c_2 为回归系数，见表 3； R 为断层距 (km)，代表工点距断层破裂面的最短距离； h 为震源深度影响系数，计算时可取 25。

经过计算发现，当 R 值小于 130 km 时，按照 NS 向计算得到的 PGA 值要相对大一些，随着 R 值的不断增加，NS 向与 EW 向的 PGA 数值不断接近，为使最终得到的易损性模型相对保守，利于再保险行业进行定价，本文选择 NS 向 PGA 作为公路工点处的地震动强度指标。

表 3 PGA 衰减关系回归系数		
Tab. 3 Regression coefficients of the PGA attenuation relation		
方向	c_1	c_2
NS	4.787 38	-1.314 35
EW	4.718 15	-1.284 48
UD	4.844 02	-1.446 50

本文通过百度地图 (2021) 拾取坐标系统对公路每处工点的经纬度进行采集，选用美国地质调查局 (USGS) 给出的汶川地震断层模型，采用 Campbell (1997) 的方法，求解出每处工点到发震断层破裂面的最短距离。具体过程如下：首先计算断层上每一个点到地面上工点的球面距离，再将计算得到的球面距离与高度取平方和再开方，得到每个断层点的断层距，最后，求这些断层距中的最小值。在计算出工点断层距后就可依据式 (1) 给出的地震动衰减模型求出每个工点的 PGA 值。

3 易损性函数的参数估计

易损性函数的选择要合理，要能够较好地体现地震动强度 (IM) 与结构破坏之间的关系。在

过去的研究中,学者们选择了很多种数学模型进行易损性回归分析,如逻辑回归、威布尔分布以及对数正态分布等。

本文选用双参数对数正态分布作为易损性函数,这一易损性函数表达式最早出现于 20 世纪 70 年代,最初是美国用来进行核电站地震风险概率评估的基本假定,后来被许多学者广泛地应用在土木与地震工程领域。双参数对数正态分布函数有着数学计算简便的优点,可以将结构的实际强度与设计强度通过一个总体安全影响因子联系起来。总体安全因子由一系列的子安全影响因子的乘积得来,而这些子安全影响因子又都包含了不确定性。假设子安全影响因子服从对数正态分布,那么作为乘积的总体安全影响因子也同样服从对数正态分布,对应的易损性函数为:

$$F(a)=\Phi\left[\frac{\ln(a/c)}{\zeta}\right]$$

(2)

式中: $F(a)$ 代表结构某一损伤等级下的易损性函数; a 代表 PGA ; Φ 代表标准正态分布函数; c 与 ζ 分别代表中位值与对数标准差。

为了求出 c 与 ζ , 本文采用独立估计的极大似然估计方法 (陈力波, 2012; Shinozuka *et al.*, 2001), 似然函数为:

$$L(c,\zeta)=\prod_{i=1}^n[F(a)]^{x_i}[1-F(a)]^{1-x_i}$$

(3)

式中: n 代表工点的总数; a_i 代表第 i 处工点的 PGA ; x_i 代表伯努利随机事件 X_i 的取值, 当 $PGA = a_i$ 时工点达到了某一损伤等级, x_i 取 1, 反之取 0。

依据本文第 2 节所给出的方法得到工点处的 PGA , 便可以建立起“公路工点-破坏状态-工点处 PGA ”样本, 见表 4, 最后通过极大似然估计求解易损性函数中的 c 与 ζ 。

表 4 公路工点震害样本

Tab. 4 Samples of earthquake damages to highway on worksites

序号	工点处 PGA/g	破坏等级				
		完好	轻微	中等	严重	损毁
1	1.076 4	1	1	1	1	1
2	0.771 2	1	1	1	0	0
...		

注: 0 代表未达到该破坏等级; 1 代表已达到该破坏等级。

4 基于汶川地震震害数据的公路易损性模型

损失比是指结构发生不同程度的破坏时, 用来修复或重建的费用与原造价的比值。概率易损性模型表达形式为:

$$R_M=\sum_{i=1}^5P_i\times R_i$$

(4)

式中: R_M 代表平均损失率; P_i 代表第 i 等级的破坏概率; R_i 代表第 i 等级的结构损失比; i 取 1 ~ 5, 分别代表结构完好、轻微损伤、中等损伤、严重损伤以及损毁。

公路各部分的损失比相对容易得到, 建立概率易损性模型的关键在于得到概率易损性曲线。按照本文提出的方法可以得到基于汶川震害数据的公路易损性曲线, 如图 2 所示。回归得到的均值与标准差见表 5。通过图 2 可以看出, 在轻微破坏情况下, 边坡易损性要大于支挡结构与路基; 在毁坏情况下, 边坡的易损性略小于支挡结构与路基; 公路整体的易损性比边坡、支挡结构、路基都大。

表 5 易损性函数的参数估计值

Tab. 5 Estimated parameter of the fragility function

类别	参数	轻微破坏/g	中等破坏/g	严重破坏/g	毁坏/g
公路整体	均值	0.541	0.655	1.243	1.488
	标准差	0.774	0.849	0.913	0.501
边坡	均值	0.967	1.267	2.137	7.147
	标准差	0.785	0.862	0.884	1.079
支挡结构	均值	0.902	1.751	2.742	3.431
	标准差	1.816	1.456	1.224	0.902
路基	均值	1.141	1.404	2.497	3.466
	标准差	0.933	1.028	1.220	0.897

目前, 常用的损失比确定方法有资料统计法、专家咨询法、界限状态估计法、估计震损程度法。本文选用《地震现场工作第 4 部分: 灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011) 给出的公路系统工程结构的地震损失比, 见表 6。

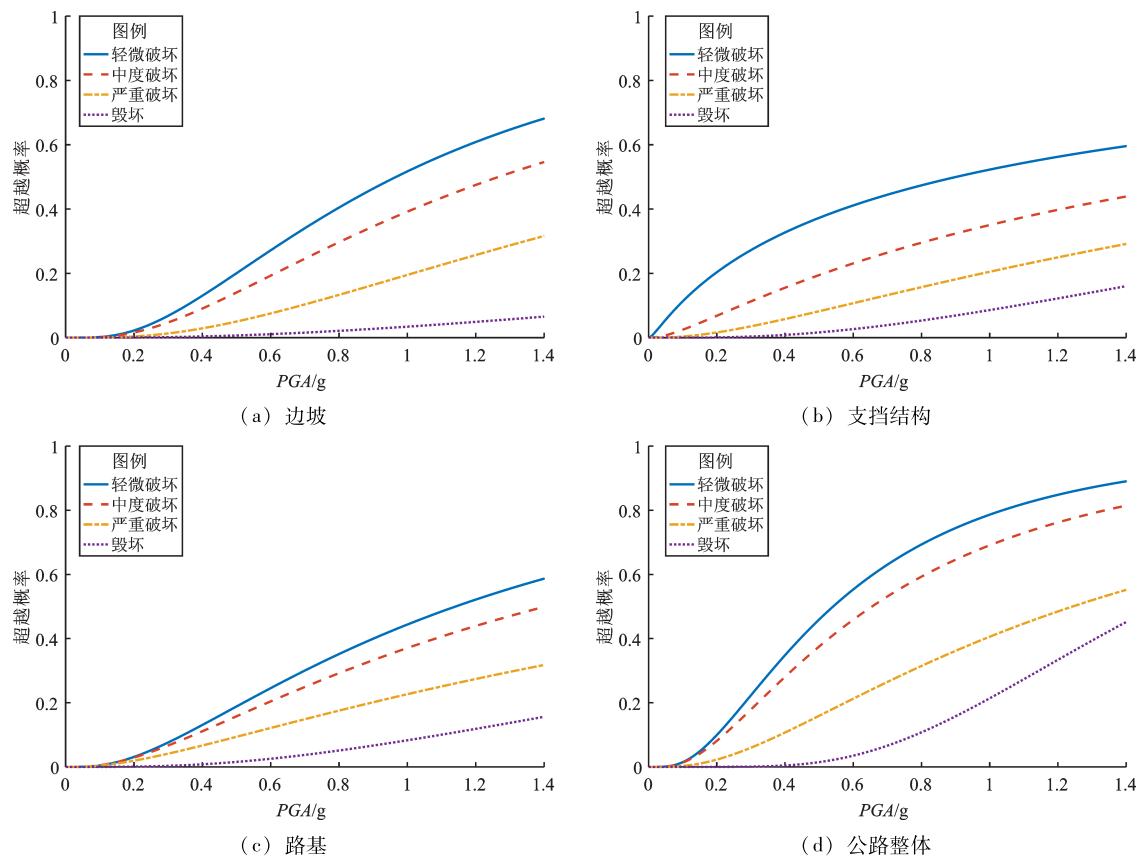


图 2 公路各结构易损性曲线
Fig. 2 Fragility curves of highway structures

表 6 公路系统工程结构破坏损失比						
Tab. 6 Loss ratio of the damage to structures of the highway system						
		破坏等级				
类别		基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
公路、挡土墙	范围	0 ~ 10	11 ~ 20	21 ~ 40	41 ~ 70	71 ~ 100
桥梁、隧道	中值	5	16	31	56	86

由式 (4) 结合表 5、6 就可以求出公路系统平均损失率, 如图 3 所示。公路平均损失率在 $PGA < 0.1\text{ g}$ 时增长较慢; 当 $PGA > 0.1\text{ g}$ 时, 随 PGA 的增加开始快速增长。

地震发生后可以根据此模型快速估算出某个地区的公路震害损失, 再结合桥梁、隧道等建筑物的震害损失得到灾区交通系统总的震害损失。

5 结论

本文依托地震灾害调查人员对四川、甘肃、

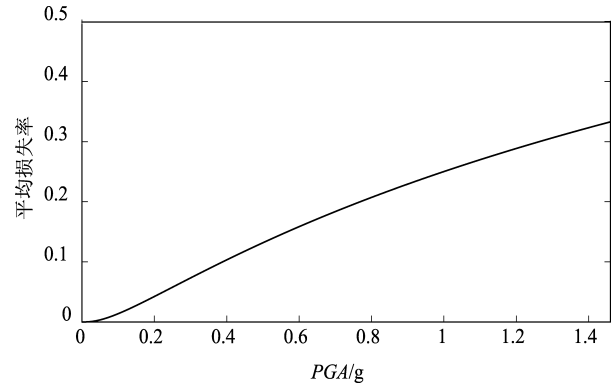


图 3 公路平均损失率
Fig. 3 Average loss - rate of the highway

陕西地震灾区内国省干道以及部分县乡道路的调查资料, 对 VI ~ XI 烈度区内、道路等级 2 ~ 4 级, 共计 15 条道路 (总长 1 114.06 km) 进行了震害统计。选择地震动峰值加速度作为地震动参数, 选用双参数对数正态分布作为易损性函数, 为了便于回归分析将线性结构的公路离散为每 1 km 一处的工点, 经分析得到如下结论:

(1) 在轻微破坏的情况下,边坡的易损性大于支挡结构与路基;在毁坏情况下,边坡的易损性略小于支挡结构与路基;公路整体的易损性比边坡、支挡结构、路基都要大。

(2) 公路平均损失率在 $PGA < 0.1\text{ g}$ 时增长较慢;当 $PGA > 0.1\text{ g}$ 时,开始随着 PGA 的增加开始快速增长。

(3) 本文基于汶川震害数据,采用双参数对数正态分布函数分别建立了路基、边坡、支挡结构的地震易损性模型。虽然数据量有限,且部分震害主观性较强,但依然可以为山区公路震后快速灾害损失评估提供帮助。将来可以通过基于数值分析的方式,对路基、边坡、支挡结构进行理论易损性研究,与基于历史震害的经验易损性进行对比,完善公路公路易损性模型。

参考文献:

- 陈乐生. 2012. 汶川地震公路震害调查[M]. 北京:人民交通出版社.
- 陈力波. 2012. 汶川地区公路桥梁地震易损性分析研究[D]. 成都:西南交通大学.
- 廖燚. 2009. 汶川地震公路路基震害调查分析及易损性研究[D]. 成都:西南交通大学.
- 尹超,师郡,刘菲菲,等. 2017. 基于IDA-PSDA的路堤震害易损性评价[J]. 中国公路学报,30(5):28-37.
- 朱宏伟,姚令侃,赖军. 2020. 基于性能的重力式挡墙地震易损性分析[J]. 岩土工程学报,42(1):150-157.
- 百度地图. 2021. 拾取坐标系统[DB/OL]. <http://api.map.baidu.com/lbsapi/getpoint/index.html>.
- Campbell K W. 1997. Empirical near-source attenuations for horizontal and vertical components of peak ground acceleration peak ground velocity and pseudo absolute acceleration response spectra[J]. Seismological Research Letters,68(1):154-179.
- Duke C M. 1960. The Chilean Earthquakes of May 1960[J]. Science,132(3442):1797-1802.
- Fukushima Y, Tanaka T. 1981. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong ground motion in Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,80(4):757-783.
- Honda R, Aoi S, Morikawa N, et al. 2005. Ground motion and rupture process of the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake obtained from strong motion data of K-NET and KiK-net[J]. Earth Planets and Space,57(6):527-532.
- Ian G B. 1999. MCEER/NCREE Response; The 921 Taiwan Earthquake Bridge Damage - MCEER-99-SP03[R]. MCEER/NCREE.
- Joyner W B, Boore D M. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley California earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,71(6):2011-2038.
- Lu D W, Cui J W, Li X J, et al. 2010. Ground motion attenuation of $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Science, 23(1):95-100.
- Maruyama Y, Yamazaki F. 2010. Fragility curves for express way embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(11):1158-1167.
- Molas G L, Yamazaki F. 1995. Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus event[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,85(5):1343-1358.
- Shinozuka, Feng M Q, Kim H, et al. 2001. Statistical analysis of fragility curves[R]. Buffalo, NY Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Sotiris A, Amir M K. 2015. Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,44(11):1863-1879.
- GB/T 18208.4—2011,地震现场工作第4部分:灾害直接损失评估[S].

Research of Highway Fragility Based on the Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake

LI Tinghui, LIN Junqi, LIU Jinlong

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics,
China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

Using the seismic – damage data of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, we respectively established the seismic – fragility models of the highway, subgrade, slope, and retaining structure based on the earthquake damage. Selecting the peak ground motion acceleration (PGA) as the ground motion parameters and the double – parameter lognormal distribution as the fragility function, we discretized the linear highway structure into worksites (one worksite per kilometer) for regression analysis according to the highway's own features. Then we established the average loss – rate model of highway structure by combining the fragility curve with the loss ratio of highway structure when it was in a particular failure state. We found that in slight damage state, the fragility of the slope is greater than that of the retaining structure and that of subgrade. In collapse state, the fragility of the slope is slightly less than that of the retaining structure and that of subgrade. The fragility of the highway is higher than that of the slope, the retaining structure, and the subgrade. When PGA was lower than 0.1 g , the average loss – rate of highway increased slowly. When PGA was greater than 0.1 g , the average loss – rate of highway began to increase rapidly.

Keywords: the Wenchuan earthquake; fragility model; average loss – rate of highway; seismic – damage classification; loss ratio