

宋帅, 王帅, 吴刚, 2019. 考虑支座滑移及挡块破坏的中小跨径梁桥地震易损性研究. 震灾防御技术, 14(4): 781—789. doi: 10.11899/zzyfy20190409

考虑支座滑移及挡块破坏的中小跨径梁桥 地震易损性研究¹

宋帅¹⁾ 王帅¹⁾ 吴刚²⁾

1) 太原理工大学, 土木工程学院, 太原 030024

2) 华东交通大学, 土木建筑学院, 南昌 330013

摘要 从板式橡胶支座及混凝土挡块抗震设计角度, 以一座典型的3跨预应力混凝土连续梁桥为例, 结合概率地震需求分析及桥墩、支座等抗震关键构件极限破坏状态, 建立不同支座及挡块分析模型的中小跨径梁桥地震易损性曲线, 研究考虑支座滑移效应及挡块破坏的中小跨径梁桥的易损性特征。研究表明: 不考虑橡胶支座的滑移效应及混凝土挡块破坏, 桥墩地震破坏概率明显增大, 且会低估支座破坏概率; 桥梁系统易损性受支座破坏状态的影响显著, 需设置合理的限位装置; 在中小跨径梁桥地震易损性分析中, 考虑支座的滑移效应及混凝土挡块的破坏十分必要。

关键词: 桥梁工程 地震易损性 支座滑移效应 挡块破坏 有限元分析

引言

采用板式橡胶支座的中小跨径梁桥因施工简便、质量可靠, 在我国公路交通网中占有较大比例。通过总结汶川地震中梁桥的破坏, 发现板式橡胶支座普遍发生了支座滑移, 主梁位移偏大, 主梁与挡块或桥台间的碰撞现象明显, 而下部结构的破坏却相对较轻。这种典型震害表现与既有延性抗震设计方法的预期目标具有一定差异。传统的延性抗震设计假定支座在地震作用下表现为线弹性, 桥梁通过桥墩潜在塑性铰的转动实现耗能。针对此问题, 王克海等(2014)通过总结既有震害, 提出考虑支座摩擦滑移的中小跨径梁桥抗震设计方法; 王凯睿等(2017)通过振动台试验研究不同设计条件下板式橡胶支座的滑移效应, 提出相应的抗震措施。针对采用板式橡胶支座的中小跨径梁桥, 李建中等(2015)提出一种新型隔震系统; 赵宇翔(2018)对不同支座形式的简支梁桥地震响应开展专门研究。由此可见, 在中小跨径梁桥抗震设计中, 考虑板式支座滑移效应的设计理念已逐渐被广大学者所认识(吴刚等, 2018)。然而, 在目前中小跨径梁桥的地震易损性的研究中, 尚未充分考虑支座滑移效应及挡

1 基金项目 国家自然科学基金资助项目(51808376); 中国博士后科学基金资助项目(2019M651076); 山西省高等学校科技创新资助项目(20192L0276); 江西省青年科学基金资助项目(20192BAB216032)

[收稿日期] 2019-03-27

[作者简介] 宋帅, 男, 生于1987年。博士后, 讲师。研究方向为桥梁抗震。E-mail: songshuai@tyut.edu.cn

块破坏的影响（张磊鑫等，2018）。

作为基于性能地震评估的重要组成部分，地震易损性分析在桥梁抗震领域中得到广泛应用，如桥梁抗震设计优化、抗震加固方法优选及地震风险评估等（李宏男等，2018；Billah等，2015）。本文采用基于离散概率的地震易损性分析方法，综合考虑地震动的随机性及梁桥结构中参数的不确定性，以一座典型的3跨预应力混凝土连续梁桥为例，对比分析包含板式橡胶支座及挡块的不同分析模型计算结果，建立桥梁构件及系统的地震易损性曲线，研究支座滑移及挡块破坏对中小跨径梁桥地震易损性的影响。

1 桥梁地震易损性分析方法

1.1 基本理论

地震易损性是指在给定地震作用下，结构地震需求超过指定极限状态的概率水平。用结构地震需求及抗震能力可表示为式（1）所示的条件概率形式：

$$P_{Fr} = P[D > C | IM] \quad (1)$$

式中 IM 为地震动参数； C 为结构或构件抗震能力； D 为结构或构件地震需求。

当采用对数正态分布函数对结构抗震能力及地震需求进行描述时，结构地震易损性可以进一步表示为：

$$P_{Fr} = P[D > C | IM] = \Phi \left[\frac{\ln(\hat{D}/\hat{C})}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2}} \right] \quad (2)$$

式中 \hat{D} 为结构需求统计均值； \hat{C} 为结构抗震能力均值； $\beta_{D|IM}$ 为地震需求对数标准差； β_C 为抗震能力对数标准差。既有研究表明 \hat{D} 及 $\beta_{D|IM}$ 可基于概率地震需求分析得到，其中 \hat{D} 可由地震动强度指标表示为（Cornell等，2002）：

$$\hat{D} = aIM^b \quad (3)$$

式中 a 、 b 为回归系数。结合式（3）及结构地震需求样本，进而得到 $\beta_{D|IM}$ 表达式为：

$$\beta_{D|IM} \cong \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln d_i - \ln(aIM_i^b))^2}{N-2}} \quad (4)$$

式中 d_i 为第 i 个地震需求样本值； IM_i 为第 i 个地震动强度指标。结构抗震能力均值及对数标准差可根据构件极限状态进行定义。

1.2 分析流程

结合结构概率地震需求分析及极限状态，基于回归分析即可建立结构地震易损性曲线，分析流程如图1所示。

2 工程背景及分析模型

2.1 工程背景

以一座连续梁桥为例（3×30m），主梁为预应力混凝土单箱单室箱梁，材料为 C50 混凝

土。桥墩为圆形单墩形式，直径 1.8m，桥墩高 9m，材料为 C30 混凝土，纵向 HRB335 钢筋配筋率 1.1%。支座为板式橡胶形式，橡胶层厚 76mm。墩顶横桥向混凝土挡块高 0.5m，厚 0.3m，挡块内设置倒 U 形直径 16mm 的 HRB335 钢筋 19 根，水平箍筋间距 0.1m。桥址为 II 类场地，设防烈度为 7 度。

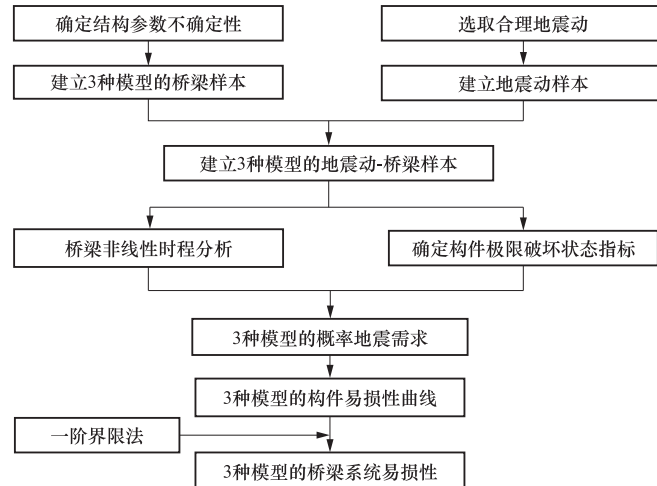


图 1 桥梁地震易损性分析流程

Fig. 1 Flow chart of bridge seismic vulnerability analysis

2.2 分析模型

为分析支座滑移及挡块破坏的影响，采用 OpenSees 建立 3 种全桥对比模型为：

- (1) 模型一：基于传统延性设计，支座采用线弹性模型模拟，挡块采用双折线模型模拟；
- (2) 模型二：考虑支座摩擦滑移，支座采用基于库仑摩擦的双折线模型模拟，挡块采用双折线模型模拟；
- (3) 模型三：支座采用基于库仑摩擦的双折线模型模拟，采用考虑损伤的模型模拟挡块（汤虎等，2016）。

桥梁有限元模型如图 2 所示，主梁采用弹性梁柱单元模拟。桥墩采用纤维单元模拟，将截面划分为钢筋纤维、约束混凝土和非约束混凝土纤维，分别采用 Concrete02 材料模型及 Steel02 材料模型模拟混凝土及钢筋，无约束混凝土的峰值应力及峰值应变均值分别取 28.03MPa 及 0.002，约束引起的混凝土强度增加系数取 1.06；钢筋屈服应力及弹性模量均值分别取 381.65MPa 及 2.06×10^5 MPa。对于桥台，参考加州桥梁抗震设计规范（Caltrans，2013），采用理想弹塑性单元进行简化（Aviran 等，2008），将弹塑性材料属性赋予零长度单元，材料的屈服力及刚度分别为 1.0×10^5 kN 及 1.0×10^7 kN/m。支座弹性刚度 K_z 取为 6280kN/m，在库仑摩擦模型中，其屈服力取为 420kN。采用程序中内置的 Gap 单元模拟碰撞效应，主要包括主梁与桥台的碰撞及主梁与横向挡块间的碰撞。在挡块弹塑性模型中，其屈服力取支座竖向力的 15%，初始刚度为 1.0×10^5 kN/m；在考虑损伤的挡块模型中，A、B、C 3 个关键点对应的力分别为 593.5kN、878.6kN 及 555.8kN，相应的位移分别为 3.0mm、24.8mm 及 76.4mm。

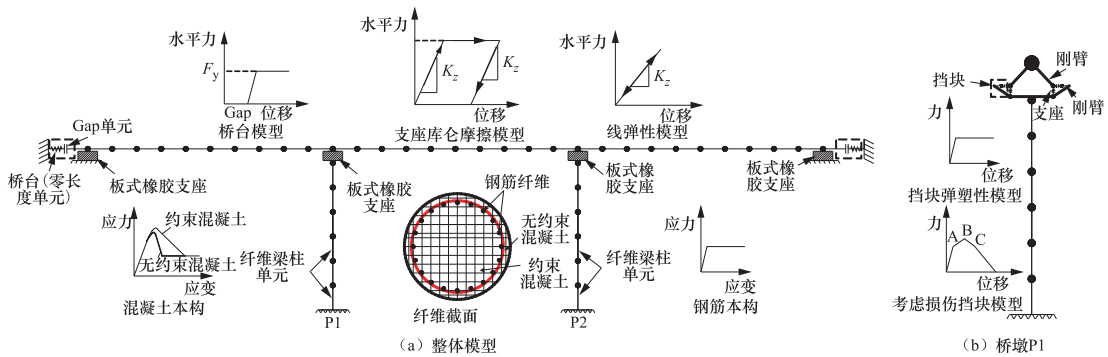


图2 桥梁有限元模型

Fig.2 Finite element model of the bridge

2.3 结构参数不确定性

桥梁结构参数的不确定性复杂多样。根据已有研究（宋帅，2017；Nielson，2005），汇总得到梁桥中主要的不确定参数及其概率分布，如表1所示。

表1 梁桥不确定参数及其概率分布

Table 1 Uncertainty parameters and distribution types of girder bridges

参数	分布类型	均值	变异系数
钢筋屈服强度/MPa	对数正态分布	381.65	0.074
混凝土抗压强度/MPa	正态分布	28.03	0.172
滑动支座摩擦系数	正态分布	0.06	0.5
支座剪切模量/MPa	正态分布	1.18	0.14
阻尼比	正态分布	0.05	0.2
上部结构质量/(kg · m ³)	正态分布	2600	0.1

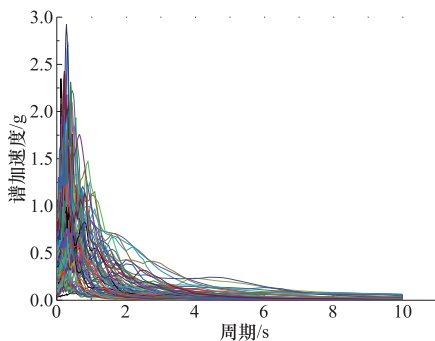


图3 地震动加速度反应谱

Fig.3 Acceleration spectrum of ground motions

进行非线性动力时程分析，将选取的地震动沿纵、横桥向同时输入。

2.4 地震动选择

地震动自身具有强烈的不确定性。为接近实际，根据地震场地条件，基于太平洋地震工程中心新一代强震记录数据库，选取100条实际地震波，选取准则如下（Bommer等，2004）：①地震波均来源于自由场地；②震中距小于100km；③震级大于5.5级；④平均剪切波速为260—510m/s。

基于选取的地震动，绘制其加速度反应谱，如图3所示。

采用OpenSees有限元平台对3种全桥模型

3 构件破坏极限状态

3.1 桥墩破坏状态

在基于性能的地震评估中，常用曲率延性定义桥墩的破坏极限状态（李立峰等，2012），本文以墩底截面曲率延性比 μ_ϕ 作为桥墩极限状态指标，定义轻微、中等、严重及完全破坏 4 种状态。结合单墩截面分析，并与位移延性对应，得到不同破坏状态下的桥墩曲率延性比，如表 2 所示。

表 2 构件极限破坏状态及其限值

Table 2 Damage states and limit values of components

破坏状态	桥墩曲率延性比 μ_ϕ	支座水平位移 u/mm
轻微破坏	$1 \leq \mu_\phi < 1.41$	$76 \leq u < 114$
中等破坏	$1.41 \leq \mu_\phi < 5.28$	$114 \leq u < 152$
严重破坏	$5.28 \leq \mu_\phi < 8.28$	$152 \leq u < 190$
完全破坏	$8.28 \leq \mu_\phi$	$190 \leq u$

3.2 支座破坏状态

已有研究中，对于板式橡胶支座，以剪切应变达 100%、150%、200%和 250%所对应的剪切变形作为支座轻微、中等、严重及完全破坏的极限指标（李立峰等，2012），相应的支座位移分别为 76mm、114mm、152mm 和 190mm，如表 2 所示。

4 桥梁易损性分析

4.1 概率地震需求

基于不确定参数的概率分布特征，采用拉丁超立方分层抽样方法建立 3 种全桥模型的概率需求分析样本，结合选取的 100 条地震波，进行非线性动力时程分析，限于篇幅，仅列出模型一中支座及桥墩概率地震需求，如图 4 所示。

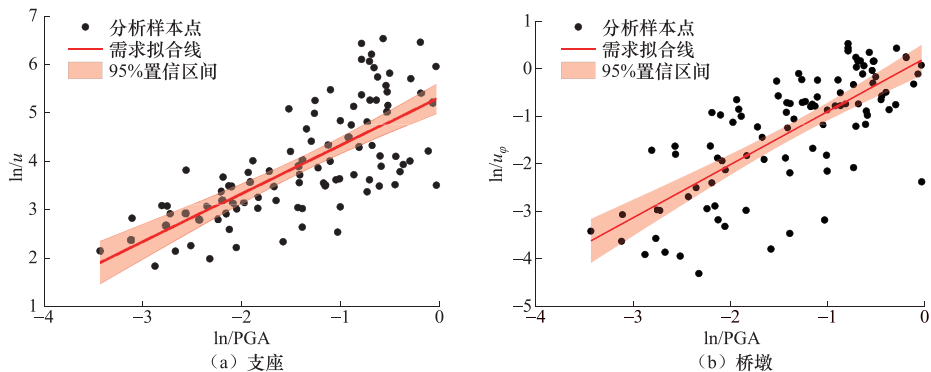


图 4 构件概率地震需求

Fig. 4 Seismic demands of bridge components

由图 4 可知, 在对数空间下采用线性函数对构件地震需求与地震动强度进行描述时, 其 95% 的置信区间范围均较小, 因此采用式 (3) 所示的指数函数对梁桥地震需求进行描述, 满足统计分析中置信水平的要求。

4.2 支座易损性曲线

结合支座概率地震需求及其极限状态, 根据式 (2) 计算得到 3 种模型中板式橡胶支座易损性曲线, 如图 5 所示。

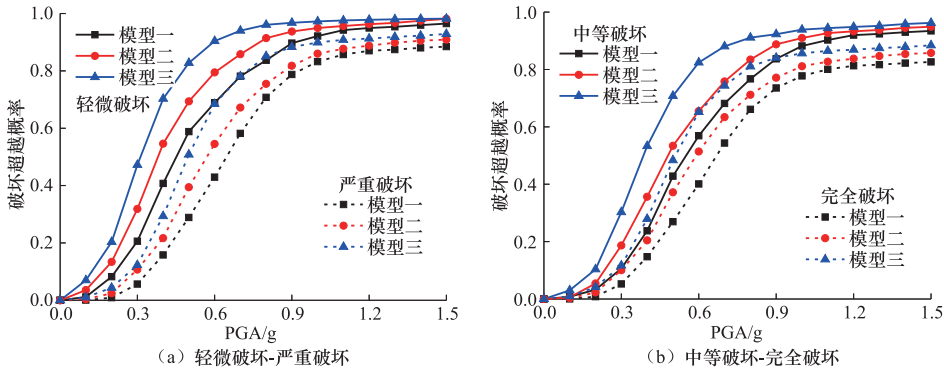


图 5 支座易损性曲线对比

Fig. 5 Comparison of seismic vulnerability curves of bearings

由图 5 可知, 在不同破坏状态下, 模型三中支座破坏概率均最大, 模型一中支座破坏概率最小。可见由于模型三同时考虑了支座滑移效应及挡块损伤退化, 混凝土挡块在变形达到一定值时, 其承载力下降, 限位能力也相应退化, 甚至完全失去限位能力, 导致主梁位移显著增加, 支座滑动位移也明显增加。而模型一仅考虑挡块发生屈服, 未模拟其限位能力的退化, 且支座模型为线弹性, 对主梁位移具有一定限制作用, 导致橡胶支座的位移也较小。

4.3 桥墩易损性曲线

结合桥墩概率地震需求及其极限状态, 根据式 (2) 计算得到 3 种模型中桥墩易损性曲线, 如图 6 所示。

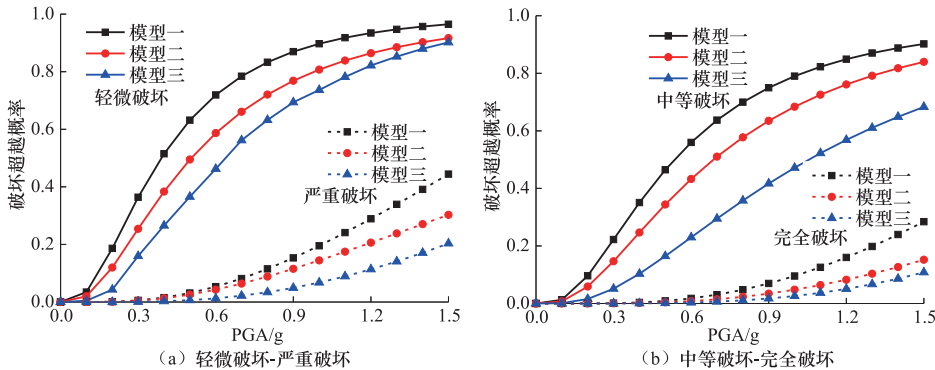


图 6 桥墩易损性曲线对比

Fig. 6 Comparison of seismic vulnerability curves of piers

由图 6 可知, 模型一中桥墩破坏概率最大, 而模型三中桥墩破坏概率最小, 桥墩与支座破坏规律正好相反, 主要原因为: 支座及挡块的力学特性直接影响了传至桥墩的地震作用大小, 模型三中支座发生了滑移, 起到较好的隔震作用, 同时挡块在一定变形后发生退化, 导致总体传至桥墩的地震作用较小, 而模型一中未考虑板式橡胶支座的滑移效应, 上部结构的地震作用通过支座及挡块传至桥墩。此外, 4 种破坏状态下, 桥墩破坏概率均小于支座破坏概率, 说明支座是梁桥中较为薄弱的一环。模型三中桥墩严重破坏及完全破坏的概率均较小, 即桥墩发生混凝土压碎及倒塌的概率较小, 这与汶川地震中观察到的中小跨径梁桥桥墩破坏表现一致。

4.4 系统易损性曲线

为对比支座滑移效应及挡块退化对桥梁整体系统地震易损性水平的影响, 基于一阶界限法的上界建立系统易损性曲线, 如图 7 所示。

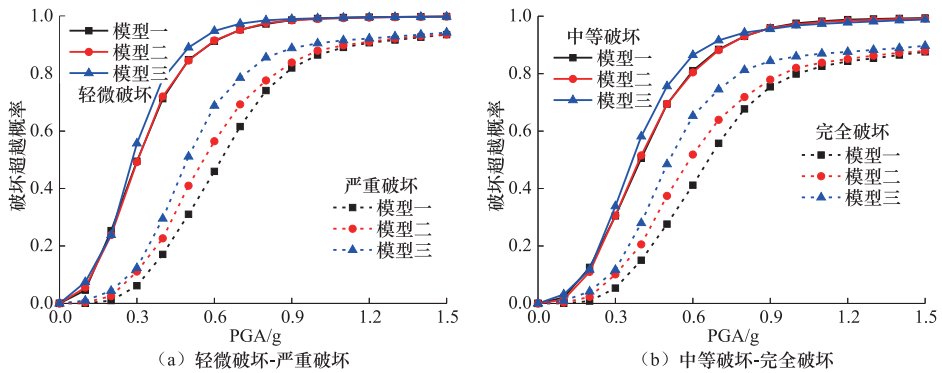


图 7 桥梁系统易损性曲线对比

Fig. 7 Comparison of seismic vulnerability curves of bridge system

由图 7 可知, 在 4 种破坏状态下, 模型三的系统易损性总体上最大。模型一与模型二在轻微及中等破坏状态下, 系统破坏概率接近, 在严重及完全破坏状态下, 模型二的系统破坏概率大于模型一。结合支座及桥墩易损性, 对于中小跨径梁桥, 其整体破坏状态主要取决于支座的破坏状态。由此可知, 支座滑移效应及挡块对中小跨径梁桥桥梁构件及系统地震易损性的影响较显著, 合理利用及准确模拟支座的滑移效应及挡块的破坏对桥梁抗震设计及地震评估具有重要意义。

5 结论

本文以一座典型 3 跨预应力混凝土连续梁桥为例, 建立考虑支座滑移及挡块破坏的中小跨径梁桥地震易损性曲线。得出以下主要结论:

(1) 在不同的破坏水平下, 板式支座的破坏概率明显大于桥墩的破坏概率, 表明板式支座比桥墩更脆弱, 是结构中最薄弱的一环。

(2) 支座的滑移效应及挡块的破坏使中小跨径梁桥桥墩发生严重及完全破坏的概率均较小, 与汶川地震时中小跨径梁桥墩的破坏一致。

(3) 对于中小跨径梁桥, 不计支座滑移及挡块破坏时会低估支座的破坏概率并高估桥墩的破坏概率, 建议在中小跨径梁桥抗震设计、分析和评估过程中考虑支座滑移及挡块损坏。

(4) 中小跨径梁桥易损性主要取决于支座破坏状态, 应设置合理的限位装置减轻支座破坏。

参考文献

- 李宏男, 成虎, 王东升, 2018. 桥梁结构地震易损性研究进展述评. 工程力学, **35** (9): 1—16.
- 李建中, 汤虎, 管仲国, 2015. 中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统. 中国公路学报, **28** (3): 35—43.
- 李立峰, 吴文朋, 黄佳梅等, 2012. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究. 土木工程学报, **45** (10): 152—160.
- 宋帅, 2017. 考虑构件相关性的桥梁系统地震易损性分析方法研究. 成都: 西南交通大学.
- 汤虎, 李建中, 邵长宇, 2016. 中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震性能. 中国公路学报, **29** (3): 55—65.
- 王凯睿, 徐秀丽, 李雪红等, 2017. 考虑板式支座滑动效应的桥梁振动台试验研究. 振动与冲击, **36** (12): 68—74.
- 王克海, 李冲, 李茜等, 2014. 考虑支座摩擦滑移的中小跨径桥梁抗震设计方法. 工程力学, **31** (6): 85—92.
- 吴刚, 王全录, 王克海等, 2018. 考虑支座及挡块力学性能退化的桥梁横向地震响应分析. 振动与冲击, **37** (2): 189—196.
- 张磊鑫, 龙晓鸿, 樊剑等, 2018. 考虑碰撞的隔震桥梁易损性分析. 工程力学, **34** (S1): 99—104.
- 赵宇翔, 2018. 支座形式对简支梁桥地震反应的影响. 震灾防御技术, **13** (4): 903—910.
- Aviran A., Mackie K. R., Stojadinovic B., 2008. Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Billah A. H. M. M., Alam M. S., 2015. Seismic fragility assessment of highway bridges: A state-of-the-art review. Structure and Infrastructure Engineering, **11**(6): 804—832.
- Bommer J. J., Acevedo A. B., 2004. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. Journal of Earthquake Engineering, 8(Spec001): 43—91.
- Caltrans, 2013. Seismic design criteria (Version 1.7). California Department of Transportation.
- Cornell C. A., Jalayer F., Hamburger R. O., et al., 2002. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines. Journal of Structural Engineering, **128**(4): 526—533.
- Nielson B. G., 2005. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones. Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Seismic Vulnerability Analysis of Small and Medium Span Girder Bridges Considering the Sliding of Bearing and Shear Key Damage

Song Shuai¹⁾, Wang Shuai¹⁾ and Wu Gang²⁾

1) College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China

2) School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China

Abstract From the perspective of seismic designs of plate type elastomeric pad bearings and concrete shear key, a typical three-span prestressed concrete continuous girder bridge was taken as a case study. Combined with the probabilistic seismic demand analysis and the limit failure states of critical members such as piers and bearings, this study developed the vulnerability curves of the bridges with different models of bearings and shear keys and studies the Vulnerability characteristics of the small and medium-span bridge considering the slip effect of the bearing and the shear key damage. The results show that the seismic damage probability of the pier is obviously increased without considering the slip effect of bearings and the shear key damage, and the probability of the bearing damage is underestimated; the system vulnerability is significantly affected by the damage of bearings, and a reasonable limit device is needed for the bearing; the sliding effect of bearings and shear key damages should be considered in the seismic vulnerability analysis of small and medium span girder bridges.

Key words: Bridge engineering; Seismic vulnerability; Sliding effect of bearing; Shear key damage; Finite element analysis