

文章编号:1671-4229(2023)03-0044-09

基于响应面法的高铁隔震桥梁地震风险分析

张添俊^{a,b}, 赵桂峰^{b,c*}, 马玉宏^{a,b}, 石岩^{b,c}, 陈发扬^{a,b}

(广州大学 a. 工程抗震研究中心; b. 广东省地震工程与应用技术重点实验室/
工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室; c. 土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 考虑高铁桥梁结构自身和地震动的不确定性,采用 SAP2000 分别建立隔震与非隔震高铁桥梁模型,运用中心复合设计法建立试验样本,对桥梁结构模型进行非线性动力时程分析,分别建立以墩柱位移延性系数和支座剪切位移为输出的响应面函数。基于拉丁超立方抽样,获得隔震与非隔震桥梁构件的易损性曲线;基于结构易损性和地震所造成的损失分析,得出桥梁结构在其全寿命期内的总费用。研究表明:通过中心复合设计法得到响应面函数的方法,可以大幅提高高铁隔震桥梁易损性分析的计算效率;隔震墩柱发生各级破坏的超越概率均明显低于非隔震墩柱,说明摩擦摆隔震支座通过延长结构周期和摩擦耗能对高铁桥梁墩柱起到了很好的保护作用;隔震桥梁全寿命期内地震经济损失、检修费用及全寿命总费用等均低于非隔震结构,说明隔震桥梁在全寿命周期内的经济性好。

关键词: 响应面法; 隔震结构; 易损性分析; 高铁桥梁

中图分类号: P 315.9 **文献标志码:** A

Seismic risk analysis of high-speed railway isolated bridges based on response surface method

ZHANG Tian-jun^{a,b}, ZHAO Gui-feng^{b,c*}, MA Yu-hong^{a,b}, SHI Yan^{b,c}, CHEN Fa-yang^{a,b}

(a. Earthquake Engineering Research & Test Center; b. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology/Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education; c. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Considering the uncertainty of the high-speed railway isolated bridges and the ground motion, SAP2000 is used in this paper to establish isolated and non-isolated bridge models respectively. A structure-ground motion sample pair is established by the Central Composite Design method. The nonlinear dynamic time-history analysis of the bridge structure model was carried out, to establish response surface functions with the displacement ductility coefficient of the pier column and the shear displacement of bearings as outputs. Then, based on the Latin Hypercube Sampling method, the vulnerability curves of isolated and non-isolated bridge members were obtained. Based on the analysis of structural vulnerability and seismic loss, the total cost of the bridge structure in its whole life cycle was obtained. The results show the method of obtaining the response surface function by the Central

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-02-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFE0112500); 国家自然科学基金资助项目(51878196, 52078150)

作者简介: 张添俊(1997—), 男, 硕士研究生. E-mail: 1259314812@qq.com

* 通信作者. E-mail: 1766674920@qq.com

引文格式: 张添俊, 赵桂峰, 马玉宏, 等. 基于响应面法的高铁隔震桥梁地震风险分析[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(3): 44-52.

Composite Design can effectively reduce the calculation times and improve the calculation efficiency of vulnerability analysis of bridge structures. The exceedance probability of each damage level of isolated piers is lower than that of non-isolated piers, which shows that friction pendulum bearings play a good role in protecting high-speed railway bridge piers through friction energy consumption. Seismic economic loss, maintenance cost, and total life cost of isolated bridges are lower than those of non-isolated structures in the full life cycle, which shows that the economy of isolated bridges in the full life cycle is good.

Key words: response surface method; isolated structure; vulnerability analysis; high-speed railway bridge

随着我国高铁建设事业的发展,部分线路不可避免地建在高烈度地震区域内,高铁桥梁的抗震性能成为需要着重考虑的关键问题。摩擦摆支座具有刚度大、位移大以及自复位等优点,在遭受地震作用时可以延长结构的自振周期,通过轨道面摩擦消散地震能量,其作为高铁桥梁的隔震支座极具优势。张常勇等^[1]通过数值模拟对连续梁桥采用摩擦摆支座隔震前后的结构地震能量响应进行了对比,结果表明,摩擦摆支座的高耗能能力可大大降低结构的耗能要求。邵长江等^[2]进行1/10缩尺的摩擦摆支座连续梁桥的振动台试验,结果表明,摩擦摆支座的隔震效果随着地震波地面峰值加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)的增高而增强。邓细鹏等^[3]建立摩擦摆隔震高铁桥梁非线性分析模型,对模型进行罕遇地震和极罕遇地震作用下的地震响应分析,结果表明,摩擦摆支座在罕遇地震和极罕遇地震作用下均能有效降低结构的地震响应。由于摩擦摆支座在高铁桥梁的应用相对较晚,缺乏其遭受极端地震作用下的抗震性能相关资料,而高铁对于我国经济发展起着举足轻重的作用,其在地震中的破坏可能导致交通中断,进而造成不可估量的经济损失。因此,评估高铁桥梁在将来可能地震下的风险程度,衡量其在地震下的经济损失和全寿命费用是十分必要的。

地震易损性分析是评估结构失效损失和全寿命费用的基础,主要包括增量动力法^[4]、云图法及响应面法等。响应面法被 Bucher 等^[5]首次应用于土木工程领域。之后各国学者采用该法对曲线工字梁钢梁、单跨砌体拱桥、多跨连续梁桥、隔震连续梁桥、混凝土拱坝等进行了易损性分析^[5-12]。Li 等^[13]提出了一种改进的均匀设计-响应面模型方法对桥梁构件及系统进行易损性分析。Xiao 等^[14]基于改进的响应面方法,完成了对结构的易损性分析。吴文朋等^[15]分析了不确定因素联

合效应对桥梁易损性的影响。Li 等^[16]通过易损性分析发现近断层地震作用下钢筋混凝土桥梁失效概率较远场地震动明显更高。钟剑等^[17]通过蒙特卡洛法对钢筋混凝土连续梁桥进行易损性研究,结果表明,构件相关性对桥梁易损性分析结果的误差影响大。

在地震风险分析方面,Chan 等^[18]采用全寿命分析法分析美国 10 条高速路段的成本及维护费用;Kong 等^[19]提出劣化结构全寿命维护成本评估方法;Wang 等^[20]分析钢桥全寿命周期成本模型,环境成本作为其间接成本;党育等^[21]提出将建筑预期损失与全寿命费用之比作为指标,对比隔震和非隔震结构抗震性能;林政园等^[22]研究基于桥梁耐久性和安全性的恢复时间功能函数。综上所述,国内外学者采用不同的分析方法对各类桥梁结构进行了地震风险分析,研究成果较丰硕,然而对高铁摩擦摆隔震桥梁结构所面临的地震风险则了解得不够透彻。

本文基于响应面法,考虑结构和地震动的不确定性,以位移延性比、剪切变形分别作为墩柱和支座的评价指标,对比高铁桥梁隔震前、后墩柱和支座的易损性曲线,以及隔震和非隔震高铁桥梁的经济损失和全寿命费用,深入了解高铁隔震桥梁的地震风险。

1 基于响应面法的高铁隔震桥梁地震易损性分析方法

1.1 响应面函数的确定

响应面法选取少量但有代表性的样本对结构进行地震响应分析,建立样本和结构响应间的响应面模型,利用该模型对抽样的大量样本进行计算,求出结构响应,提高计算效率。一般假设结构的地震反应与输入地震动的关系为一阶或二阶多项式函数,其未知量可拟

合确定。二阶多项式响应函数 \hat{y} 为

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>i}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \varepsilon, \quad (1)$$

式中: k 为不确定因素个数; x_i, x_j 为结构设计变量, 如 PGA 或结构强度等参数; a_0, a_i, a_{ij} 为待定系数; ε 为拟合误差, 服从正态分布。

响应面法的关键一环是选择合理的试验设计方法。其中, 中心复合设计方法由于具有高效、灵活及试验数合理等优点得到了广泛应用, 本文采用该法开展试验设计, 需要确定的试验点数为 $2^k + 2k + 1$ 个, 包括 1 个中心点, $2k$ 个轴线点和 2^k 个象限点。对试验样本进行非线性分析得到响应值, 通过最小二乘法回归确定待定参数, 进而得到地震动强度 - 结构响应值, 即响应面函数。

为了验证响应面模型的拟合效果, 需要对其进行检验。一般要求拟合系数 R^2 和 R_a^2 中至少有一个大于 0.9 才能保证模型的准确性^[20]。

$$R^2 = A/B, \quad (2)$$

$$A = \alpha^T X^T Y - (I^T Y)^2 / N, \quad (3)$$

$$B = Y^T Y - (I^T Y)^2 / N, \quad (4)$$

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2)(N - 1) / (N - k), \quad (5)$$

式中, α 为待定参数, X, Y 分别为设计变量矩阵和真实响应向量, I 为单位向量, N 为样本数量。

1.2 构件损伤指标

支座和墩柱作为隔震桥梁的主要竖向受力构件, 在地震作用下若出现损伤或破坏, 不仅导致其自身的性能发生退化, 而且可能危及整座桥梁的安全性, 故需要定义其损伤指标及判别准则, 以便分析其损伤情况。本文选取位移延性系数^[23]作为桥墩的损伤判别指标:

$$\lambda = \frac{\Delta}{\Delta_{cy1}}, \quad (6)$$

式中, Δ, Δ_{cy1} 分别为地震下桥墩墩顶最大位移和首次屈服位移。桥墩损伤破坏一般划分为 5 个等级: 基本完好 $\lambda \leq 1$, 轻微破坏 $1 < \lambda \leq 1.232$, 中等破坏 $1.232 < \lambda \leq 3.011$, 严重破坏 $3.011 < \lambda \leq 6.011$, 完全破坏 $\lambda > 6.011$ 。

对于摩擦摆支座及盆式橡胶支座, 其在遭受地震作用下能通过剪切变形来延长结构周期和耗散地震能量, 但若其剪切位移大于支座的设计位移时将会发生剪切破坏导致支座失效, 参考了相关文献^[24-27]的相关规定后, 本文选取支座剪切位移 D 作为其损伤判别指标。将设计位移 D 作为轻微破坏的阈值, 本文取 200 mm, 支座损伤等级划分标准见表 1, 借鉴公路桥梁的划分标准, 结

合相关文献^[28]定义其损伤等级。

表 1 支座损伤等级划分标准

Table 1 Damage grade classification of bearings

损伤等级	摩擦摆支座 损伤准则/mm	盆式橡胶支座 损伤准则/mm
基本完好	$D \leq 200$	$D \leq 50$
轻微破坏	$200 < D \leq 235$	$50 < D \leq 100$
中等破坏	$235 < D \leq 270$	$100 < D \leq 150$
严重破坏	$270 < D \leq 300$	$150 < D \leq 225$
完全破坏	$D > 300$	$D > 225$

1.3 结构 - 地震动样本不确定性及随机参数归一化

以 PGA 为地震动输入变量, 并考虑其不确定性是目前的常见做法^[29]。在结构的不确定性方面, 考虑到高铁桥梁建造过程中环境和施工技术等因素的影响而导致自身具有很大的不确定性, 因此, 选取钢筋弹性模量 E_s 、屈服强度 f_y 及混凝土抗压强度 f_c 这些主要影响因素作为结构的随机参数, 它们均符合对数正态分布。

采用中心复合设计法对变量进行试验设计时, 应使其尽量包含于随机区域 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$ 内。为了加快运算速度并提高拟合效果, 对各随机参数进行归一化处理, $\xi_1 \sim \xi_4$ 分别代表 f_y, E_s, f_c 及 PGA 这 4 个随机参数, $x_1 \sim x_4$ 分别代表 4 个随机参数归一化值。

$$x_i = \frac{\xi_i - (\xi_{\max} + \xi_{\min})/2}{(\xi_{\max} - \xi_{\min})/2}, \quad (7)$$

式中, $x_i = 1, 0, -1$ 分别代表 ξ_i 取最大值、最大与最小值的平均值及最小值。

1.4 基于响应面法的地震易损性分析

在得到构件地震响应平均值与标准差的响应面函数后, 就可以对高铁隔震桥梁进行地震易损性分析。采用拉丁超立方方法 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 抽取并建立若干个桥梁 - 地震动样本对, 将样本对的随机参数 $f_y(x_1), E_s(x_2), f_c(x_3)$ 及 PGA 代入响应面函数, 判断结构所处的破坏状态, 即可得到相应损伤指标的概率分布及每个破坏等级的超越概率, 重复以上步骤得到易损性曲线:

$$P_f = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M N(u \geq LS_i), \quad (8)$$

式中, P_f 为在地震作用下结构达到或超过某种破坏状态的失效概率; M 为桥梁 - 地震动样本对的个数; $N(u \geq LS_i)$ 为结构响应达到或超过指定极限状态的次数。

2 高铁隔震桥梁响应面模型

2.1 高铁隔震桥梁有限元模型

以某典型摩擦摆隔震高铁简支梁桥为研究对象,共6跨,每跨32 m,桥墩高度均为22 m,采用双线圆端形实体桥墩,混凝土C35。主梁采用C50混凝土,相邻主梁间距10 m。8度地震区,场地特征周期为0.45 s,PGA为0.3 g。

本文所采用的摩擦摆支座主要性能参数如下:支座的滑动曲率半径为1.5 m,摩擦系数为0.03,竖向设计承载力为5 000 kN,设计极限位移为200 mm。

通过SAP2000建立高铁桥梁有限元模型,非隔震和隔震结构分别采用盆式支座和摩擦摆隔震支座。桥墩混凝土和钢筋分别采用Mander本构模型和双折线本构模

型。摩擦摆支座采用Friction Isolator连接单元,主梁采用弹性梁柱单元。采用PMM纤维铰单元来模拟桥墩的柔性转动能力。高铁隔震桥梁的有限元模型如图1所示。

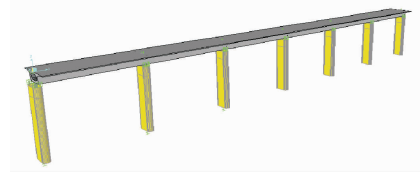


图1 高铁隔震桥梁有限元分析模型

Fig.1 Finite element model of a high-speed railway bridge

2.2 响应面函数模型的建立

本例中,选取钢筋屈服强度 f_y 、弹性模量 E_s 以及混凝土的抗压强度 f_c 为结构参数输入变量,其分布类型见表2。另外选取PGA作为地震波输入变量从而模拟地震波的不确定性,4个参数归一化后的均值见表3。

表2 结构参数输入变量的分布

Table 2 Distribution type of input variables of structural parameters

输入变量	分布类型	均值	标准差	变异系数
钢筋屈服强度 f_y	对数正态分布	448	26.88	0.06
弹性模量 E_s	对数正态分布	200 000	2 000	0.01
混凝土的抗压强度 f_c	对数正态分布	32.05	5.26	0.164

表3 随机参数及其归一化

Table 3 Random parameters and normalization

随机参数	归一化前后变量	最小值	平均值	最大值
钢筋屈服强度 f_y /MPa	ξ_1	367.4	448.0	528.6
	x_1	-1	0	1
钢筋弹性模量 E_s /MPa	ξ_2	194 000	200 000	206 000
	x_2	-1	0	1
混凝土抗压强度 f_c /MPa	ξ_3	16.3	32.1	47.8
	x_3	-1	0	1
地震峰值加速度/g	ξ_4	0.10	0.55	1.00
	x_4	-1	0	1

高铁桥梁横桥向刚度大,不易破坏,因此,本文分析仅考虑纵桥向地震动输入。根据目标反应谱选取10条符合条件的天然地震波,10条天然波的具体信息见表4,按照0.05 g的间隔在0.1~1.0 g范围内逐渐增大。本算例随机变量 $k=4$,因此,试验点数为25个。利用SAP2000对25组试验样本在10条地震波下进行250次非线性动力时程分析。假定墩柱和隔震支座的响应都服从正态分布,所以25组试验下墩柱或支座的响应平均值和标准差就构成每一试验点下的响应面模型。非隔震和隔震高铁桥梁墩柱墩顶位移地震响应如表5,支座最大剪切变形等响应结果限于篇幅,不再赘述。

表4 地震波信息

Table 4 Seismic wave information

地震名称	年份	震级	震中距	V_{s30}
		M_w	/km	$/(m \cdot s^{-1})$
Imperial Valley-02	1940	6.95	6.09	213.44
Borrego	1942	6.50	56.88	213.44
Kern County	1952	7.36	38.42	385.43
Northern Calif-02	1952	5.20	42.69	219.31
Southern Calif	1952	6.00	73.35	493.50
Imperial Valley-05	1955	5.40	13.78	213.44
Hollister-01	1961	5.60	19.55	198.77
Borrego Mtn	1968	6.63	129.11	442.88
San Fernando	1971	6.61	25.47	415.13
Point Mugu	1973	5.65	15.48	248.98

表 5 非隔震与隔震高铁桥梁墩顶位移

Table 5 Pier top displacement of non-isolated and isolated high-speed railway bridges

试验点号	x_1	x_2	x_3	x_4	非隔震边墩/mm		非隔震中墩/mm		隔震边墩/mm		隔震中墩/mm	
					平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
1	-1	-1	0	0	335.8	91.0	323.8	90.2	195.5	69.1	175.7	42.2
2	-1	1	0	0	331.9	90.7	320.0	89.8	205.9	63.3	180.6	37.5
3	1	-1	0	0	347.6	93.7	335.4	92.9	194.8	65.5	175.9	42.3
...
23	0	1	0	-1	77.3	35.0	69.2	35.5	15.2	4.4	15.0	4.9
24	0	1	0	1	539.1	239.8	546.3	236.7	298.7	106.6	267.8	75.0
25	0	0	0	0	362.9	149.7	339.4	105.5	196.5	71.6	176.2	44.5

表 5 中,试验点号 1~25 代表中心复合设计的 25 组试验。由以上试验数据可以得到各构件地震响应平均值 μ 和标准差 σ 的拟合多项式响应面函数,函数中的未知参数通过最小二乘法拟合确定。隔震桥墩损伤指标的平均值和标准差响应面函数如下:

$$\hat{y}_\mu = 196.84 + 0.09x_1 + 0.86x_2 - 8.43x_3 + 141.95x_4 - 2.08x_1x_2 + 0.7x_1x_3 + 1.55x_1x_4 - 0.69x_2x_3 - 1.68x_2x_4 - 13.71x_3x_4 + 1.31x_1^2 + 2.29x_2^2 + 1.3x_3^2 - 40.82x_4^2,$$

$$\hat{y}_\sigma = 71.57 - 1.02x_1 - 0.83x_2 - 7.12x_3 + 54.4x_4 + 0.76x_1x_2 + 0.14x_1x_3 - 1.85x_1x_4 + 1.34x_2x_3 + 0.78x_2x_4 - 6.22x_3x_4 - 6.01x_1^2 - 6.32x_2^2 - 4.47x_3^2 - 7.29x_4^2. \quad (9)$$

4 个随机参数对隔震与非隔震桥梁墩顶位移及支座剪切位移影响的响应等高线与响应曲面如图 2,限于篇幅,只列出钢筋屈服强度 f_y 和钢筋弹性模量 E_s 对隔震与非隔震桥梁边墩墩顶位移影响的响应曲面。

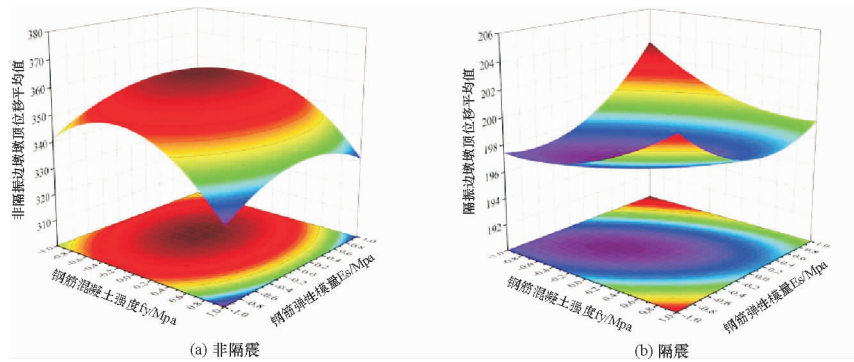


图 2 钢筋屈服强度和弹性模量对非隔震与隔震高铁桥梁边墩墩顶位移的影响

Fig. 2 Response surface diagram of the effect of yield strength and elastic modulus of reinforcement on the displacement of pier top of isolated and non-isolated bridges

2.3 响应面模型准确性检验

由式(4)~式(7)计算可得 R^2 和 R_a^2 ,如表 5。可见,虽然个别隔震与非隔震桥梁墩柱和支座位移响应标准

差的修正拟合系数小于 0.9,但其均值的拟合系数和修正拟合系数均大于 0.9,标准差的修正拟合系数小于 0.9,但均在 0.8 以上,因此,拟合准确性满足要求,见表 6。

表 6 非隔震与隔震高铁桥梁桥墩与支座响应面拟合系数

Table 6 Fitting coefficients of response surface of piers and bearings of non-isolated and isolated high-speed railway bridges

误差类型	边墩墩柱		中墩墩柱		边墩支座		中墩支座	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
R^2 (非隔震)	0.997	0.976	0.998	0.975	0.998	0.935	0.983	0.947
R_a^2 (非隔震)	0.992	0.803	0.996	0.801	0.994	0.845	0.983	0.872
R^2 (隔震)	0.998	0.980	0.999	0.973	0.993	0.984	0.987	0.951
R_a^2 (隔震)	0.994	0.951	0.996	0.936	0.983	0.821	0.968	0.884

3 隔震与非隔震高铁桥梁构件易损性对比

3.1 隔震与非隔震高铁桥梁桥墩地震易损性

依据前述方法,建立1 000个桥梁-地震动样本对带人响应面函数来计算易损性曲线。隔震与非隔震高铁桥梁墩柱位移延性系数的地震易损性曲线,及其在各级破坏状态下的对比如图3和图4所示。

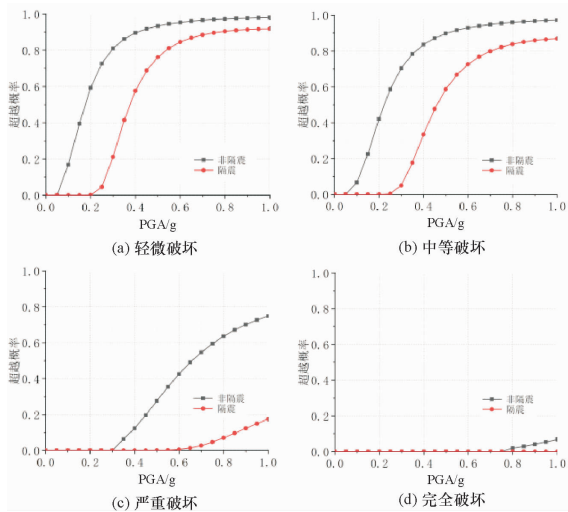


图3 隔震与非隔震高铁桥梁边墩易损性曲线对比

Fig. 3 Comparison of edge pier vulnerability curves of non-isolation and isolation high-speed railway bridges

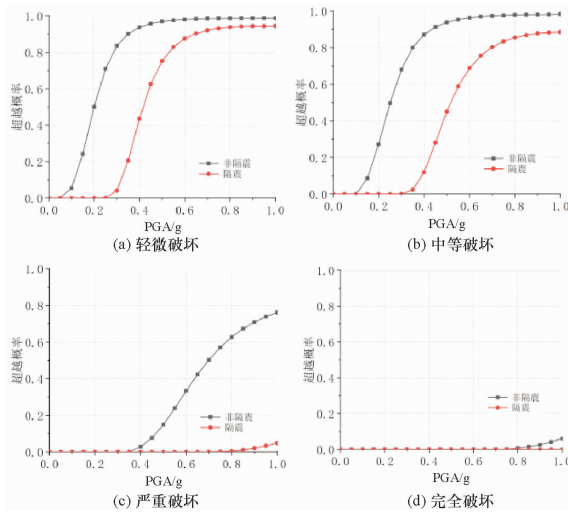


图4 隔震与非隔震高铁桥梁中墩易损性曲线对比

Fig. 4 Comparison of vulnerability curves of middle piers of non-isolation and isolation high-speed railway bridges

由图3~图4可知,地震动加速度峰值越大,结构构件的累积损伤超越概率越大;从轻微破坏到完全破坏,隔震与非隔震桥墩超越概率均逐渐减小;隔震桥墩各级

损伤状态的超越概率均明显小于非隔震桥墩:在罕遇地震PGA为0.57g时,隔震与非隔震桥梁中墩出现严重破坏的超越概率分别接近0和27.6%;当PGA达到1.0g时,隔震和非隔震桥梁中墩出现完全破坏的超越概率分别为0和6.1%。以上数据说明隔震支座能明显降低高铁桥梁墩柱在地震中的损伤程度,有效保护高铁桥梁的安全性。

3.2 隔震与非隔震高铁桥梁支座地震易损性

各级破坏状态下,隔震与非隔震高铁桥梁边墩支座以及中墩支座的剪切位移的地震易损性曲线分别见图5和图6。

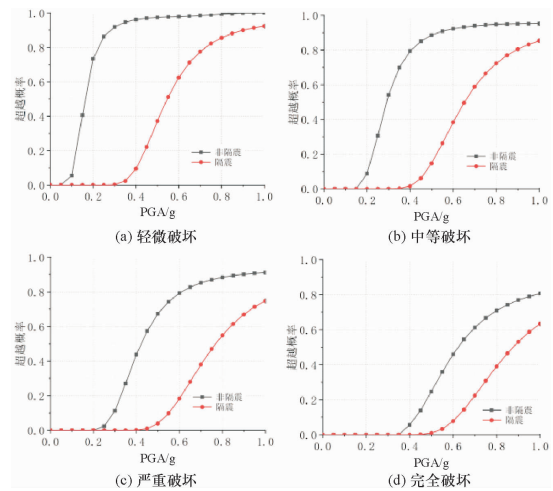


图5 隔震与非隔震高铁桥梁边墩支座易损性曲线对比

Fig. 5 Comparison of the vulnerability curves of edge pier supports of non-isolation and isolation high-speed railway bridges

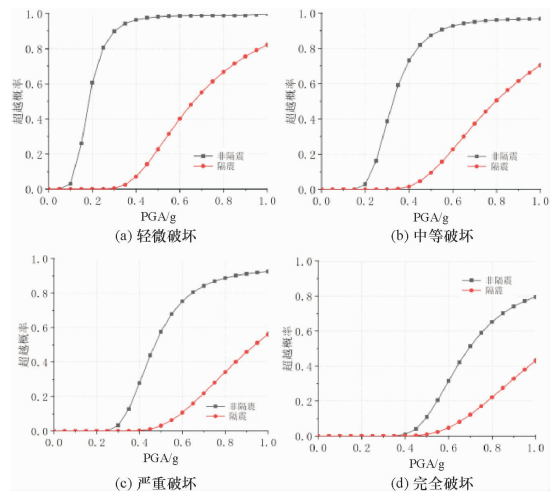


图6 隔震与非隔震高铁桥梁中墩支座易损性曲线对比

Fig. 6 Comparison of the vulnerability curves of the middle pier supports of non-isolation and isolation high-speed railway bridges

由图5~图6可知,中墩与边墩支座同一损伤状态

的变化规律类似;从轻微破坏到完全破坏,相同地震动对应的支座超越概率逐渐变小;无论何种损伤状态,隔震支座的超越概率比非隔震支座小;当 PGA 等于 0.57 g 时,桥梁中墩的非隔震和隔震支座严重破坏的超越概率分别为 70.9% 和 6.3%,而完全破坏的超越概率分别为 26.7% 和 3.0%,说明隔震支座超越严重破坏以及完全破坏的概率远低于非隔震支座。

4 高铁隔震桥地震风险分析

4.1 结构的震害矩阵

由上节得到的桥墩和支座各级破坏状态的超越概率,根据文献[30]给出的地震脆弱性定义以及公式,将上节易损性分析数据代入式(10),得到不同破坏状态的发生概率。限于篇幅,图 7 给出非隔震和隔震边墩各级损伤状态的发生概率。

$$\begin{cases} P_{Df_i} = 1 - P_{f_i}, \\ P_{Df_i} = P_{f_{i-1}} - P_{f_i}, i = 2, 3, 4, \\ P_{Df_5} = P_{f_5}, \end{cases} \quad (10)$$

表 7 隔震、非隔震高铁桥梁边墩墩柱的震害矩阵

Table 7 Earthquake damage matrix of side piers of non-isolation and isolation high-speed railway bridges

地震烈度	VI		VII		VIII		IX		X	
损伤状态	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震	非隔震	隔震
基本完好	0.999	0.999	0.831	0.999	0.189	0.788	0.046	0.155	0.022	0.085
轻微破坏	0.001	0.001	0.103	0.001	0.106	0.161	0.024	0.119	0.011	0.055
中等破坏	0	0	0.066	0	0.680	0.050	0.504	0.721	0.266	0.736
严重破坏	0	0	0	0	0.024	0.000	0.425	0.005	0.660	0.123
完全破坏	0	0	0	0	0.000	0.000	0.001	0.000	0.041	0.000

4.2 地震损失分析

基于震害矩阵,构件在服役周期内不同破坏状态下的损伤概率 $P_f[D_i]$ 为

$$P_f[D_i] = \sum_j P[D_i | I_j] \cdot P[I_j], \quad (12)$$

式中, $P[D_i | I_j]$ 为构件震害矩阵, $P[I_j]$ 为烈度发生概率。

地震造成的经济损失主要包括直接和间接经济损失,以及抗震救灾投入费用 3 部分。在服役期内遭受各种可能地震烈度时,结构破坏造成的直接经济损失可由破坏状态的损伤概率求得:

$$L_{dir} = \sum_i^5 P_f[D_i] \cdot l(D_i) \cdot C_I, \quad (13)$$

式中, $l(D_i)$ 为结构各级状态对应的损失比,铁路桥梁 5 个破坏等级对应的损失比分别为 10%、20%、40%、70% 和 100%^[9]; C_I 指高铁桥梁初始造价^[20]。

式中, P_{Df_i} 为各级破坏状态的发生概率, i 为破坏等级。

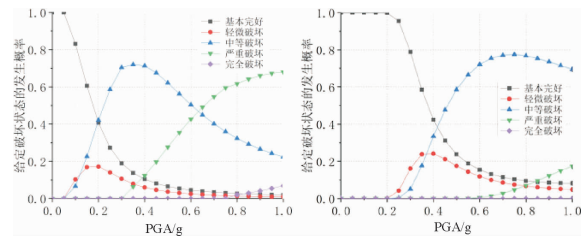


图 7 非隔震与隔震桥梁边墩墩柱各级破坏状态发生概率
Fig. 7 The occurrence probability of different failure states of side piers for non-isolated and isolated bridges

烈度与加速度之间的换算关系为

$$A_{\max} = 10^{(I-0.1047575)}, \quad (11)$$

式中, A_{\max} 为地震峰值加速度, I 为基本烈度。

根据公式(11)的换算关系以及响应发生概率曲线,可得到隔震和非隔震高铁桥梁桥墩和支座的震害矩阵(表 7)。限于篇幅,只给出非隔震、隔震边墩墩柱的震害矩阵。可见,非隔震桥墩发生严重破坏和完全破坏的概率远高于隔震桥墩。

由于间接经济损失计算的复杂性,本研究中暂不考虑。根据《地震现场工作大纲和技术指南》^[31],救灾投入费用等于直接经济损失乘以一定的比例系数,6 度以下、6~7 度及 7 度以上地震,比例系数分别取 1.5%、3.5% 和 6%。

4.3 全寿命费用分析

结构全寿命费用包含整个寿命周期内的初始造价、损失费用及检修维护费用:

$$C_{LCC} = C_I + C_M + C_L, \quad (14)$$

式中, C_I 、 C_M 、 C_L 分别指桥梁初始造价、检修费用和地震损失。检修维护费用一般等于初始造价乘以检修系数,非隔震、隔震高铁桥梁检修系数分别等于 5% 和 4%。基于前文的分析结果,高铁隔震及非隔震桥梁的全寿命费用如表 8 所示。

表8 高铁桥梁全寿命费用分析

Table 8 Total life cost of structure

费用类别	非隔震高	隔震高	隔震与非隔
	铁桥梁/万元	铁桥梁/万元	震增幅/%
初始造价	816.76	822.76	+0.73
直接经济损失	49.97	39.47	-21.01
检修维护费用	40.84	32.91	-19.42
全寿命总费用	907.57	895.14	-1.38

由表8可见,与非隔震桥梁相比,隔震桥梁的直接经济损失费用、救灾投入费用及检修费用均明显降低,平均减少20%左右,说明隔震技术可有效降低结构的地震损失,减少救灾和维护费用。尽管隔震桥梁的初始造价比非隔震结构增加了0.73%,但从全寿命周期总费用来看,隔震结构仍然比非隔震结构费用降低。

5 结论

本文将响应面法运用于高铁隔震桥梁地震易损性

分析中,目的是减少模型的计算量,提高计算效率。结论如下:

(1)采用响应面法分析高铁桥梁的易损性,可通过较少的非线性分析(本例250次)得到结构响应面函数,进而可以分析数倍的样本响应(本例1000个),说明该法极大地提高了计算效率。

(2)隔震桥梁桥墩各级破坏状态的超越概率明显小于非隔震桥梁,说明隔震桥梁在地震中能得到有效的保护,不易发生破坏。与隔震支座相比,非隔震支座在各级损伤状态下的超越概率明显更高,说明非隔震支座在地震作用下可能会产生较为严重的损伤。

(3)隔震桥梁的直接经济损失、救灾投入费用及检修费用均明显小于非隔震结构,说明隔震技术能够有效降低地震所造成的损失。从全寿命总费用角度看,隔震桥梁的全寿命总费用相对于非隔震桥梁有所减少,说明隔震桥梁具有较好的经济性。

参考文献:

- [1] 张常勇,钟铁毅,杨海洋. 摩擦摆支座隔震连续梁桥地震能量反应研究[J]. 振动与冲击,2017,36(16):63-67,121.
- [2] 邵长江,肖正豪,漆启明,等. 摩擦摆支座隔震铁路连续梁桥振动台试验研究[J]. 振动与冲击,2021,40(14):292-298,306.
- [3] 邓细鹏,赵桂峰,马玉宏,等. 极罕遇地震作用下摩擦摆隔震高铁桥梁的地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造,2020,42(1):97-105.
- [4] Miari M, Jankowski R. Incremental dynamic analysis and fragility assessment of buildings founded on different soil types experiencing structural pounding during earthquakes[J]. Engineering Structures, 2022,252:1-20.
- [5] Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57-66.
- [6] Seo J, Linzell D G. Use of response surface metamodels to generate system level fragilities for existing curved steel bridges [J]. Engineering Structures, 2013, 52: 642-653.
- [7] Zampierip P, Zaninim A, Faleschini F. Derivation of analytical seismic fragility functions for common masonry bridge types: Methodology and application to real cases[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 68: 275-291.
- [8] 李立峰,吴文朋,黄佳梅,等. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 152-160.
- [9] Jara J M, Madrigal E, Jara M, et al. Seismic source effects on the vulnerability of an irregular isolated bridge[J]. Engineering Structures, 2013, 56:105-115.
- [10] 龙晓鸿,杨斌斌,樊剑,等. 基于响应面法的隔震连续梁桥地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2014,34(2):172-179.
- [11] 田硕,范书立,陈健云. 基于多个响应量的拱坝地震易损性分析[J]. 振动与冲击,2020,39(1):253-259,288.
- [12] 叶昆,严文轩,符蓉. 基于响应面法的 LRB 基础隔震结构地震易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(S1): 144-152.
- [13] Li H H, Li L F, Wu W P, et al. Seismic fragility assessment framework for highway bridges based on an improved uniform design-response surface model methodology[J]. Bulletin of Earthquake Engineering: Official Publication of the European Association for Earthquake Engineering,2020,18(5):2329-2353.

- [14] Xiao Y, Ye K, He W F. An improved response surface method for fragility analysis of base-isolated structures considering the correlation of seismic demands on structural components[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, 18(8):4039-4059.
- [15] 吴文朋,李立峰,徐卓君,等. 不确定性对钢筋混凝土桥梁系统地震易损性的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2018, 38(6):161-170.
- [16] Li Z X, Li Y, Li N. Vector-intensity measure based seismic vulnerability analysis of bridge structures[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 13(4):695-705.
- [17] 钟剑,庞于涛,曹飒飒,等. 基于构件的 RC 连续梁桥地震体系易损性分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(2):193-198.
- [18] Chan A, Keoleian G, Gabler E. Evaluation of life-cycle cost analysis practices used by the michigan department of transportation[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2008, 134(6):236-245.
- [19] Kong J S, Frangopol D M. Evaluation of expected Life-cycle maintenance cost of deteriorating structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(5):682-691.
- [20] Wang Z J, David Y Y, Dan M F, et al. Inclusion of environmental impacts in life-cycle cost analysis of bridge structures [J]. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2020, 5(4):252-267.
- [21] 党育,李涌涛. 基于全寿命费用的隔震结构抗震性能分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(6):244-250.
- [22] 林政园,肖光术,冯玉龙,等. 基于全寿命周期的桥梁安全和耐久性设计研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(4):120-122, 210.
- [23] Papila M, Haftka R T. Response surface approximations: Noise, error repair, and modeling errors[J]. *Aiaa Journal*, 2000, 38(12):2336-2343.
- [24] 王东升,李宏男,赵颖华,等. 钢筋混凝土桥墩基于位移的抗震设计方法[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10):80-86.
- [25] 李冰. 摩擦摆支座的隔震桥梁抗震性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [26] 李立峰,吴文朋,黄佳梅,等. 地震作用下中等跨径 RC 连续梁桥系统易损性研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(10):152-160.
- [27] 王炎. 铁路减隔震桥梁地震反应分析及易损性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- [28] Choi E, Desroches R, Bryant N. Seismic fragility of typical bridge in moderate seismic zones[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(2):187-199.
- [29] 任叶飞,尹建华,温瑞智,等. 结构抗倒塌易损性分析中地震动输入不确定性影响研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(1):115-125.
- [30] 吕大刚,刘洋,于晓辉. 第二代基于性能地震工程中的地震易损性模型及正逆概率风险分析[J]. *工程力学*, 2019, 36(9):1-11, 24.
- [31] 中国地震局. 地震现场工作大纲和技术指南[M]. 北京:地震出版社, 1998.

【责任编辑:周全】