

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2015.06.015

考虑桥梁建筑相互作用景观廊桥地震易损性研究

宋帅, 钱永久, 冯博

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:以一座上部布置钢筋混凝土框架结构的三跨预应力混凝土连续刚构景观廊桥为例,采用基于传统可靠度理论的方法对结构的地震易损性进行研究。通过建立结构的有限元模型,考虑了上部建筑结构对桥梁结构的影响,对其进行了非线性动力时程分析;在基于位移破坏准则的基础上定义桥墩、支座的损伤指标,同时考虑地面运动和结构材料的不确定性,以地面峰值加速度作为自变量,分别形成了桥墩、支座的易损性曲线;最后运用一阶界限法分别计算考虑建筑结构和不考虑建筑结构桥梁系统易损性曲线的上下界,分析了上部建筑结构对桥梁系统易损性的影响,对全桥的抗震性能进行分析评估。结果表明:上部建筑结构对桥梁系统的地震易损性影响显著,使桥梁发生严重破坏和完全破坏的概率明显增大。

关键词:桥梁工程;景观廊桥;非线性时程分析;易损性曲线;一阶界限可靠度法

中图分类号:U442.5⁺5

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2015)06-0095-08

Analysis on Seismic Fragility of Landscape Covered Bridge Considering Bridge-building Interaction

SONG Shuai, QIAN Yong-jiu, FENG Bo

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Taking a 3-span of RC continuous rigid frame landscape covered bridge with superstructure of reinforced concrete frame for instance, the seismic fragility analysis is performed by using the method based on traditional reliability theory. The nonlinear dynamic time history analysis is performed on the basis of the established spatial finite element model of the structure considering the influence of the superstructure on the bridge. The damage indexes of the pier and the bearing are defined based on the displacement failure criterion. Considering the uncertainties of ground motion and structure material, taking peak ground acceleration as independent variable, the fragility curves of piers and bearings are obtained. Finally, the upper and lower limits of bridge system fragility curves including superstructure and not including superstructures are calculated by using the first-order boundary method. The influence of the superstructure on the bridge system fragility is analyzed, and the seismic property of the bridge is assessed. The result shows that the superstructure affects the seismic vulnerability of the bridge system significantly, which make the probability of serious damage and complete damage to the bridge increase dramatically.

Key words: bridge engineering; landscape covered bridge; nonlinear time history analysis; fragility curve; first-order boundary reliability method

0 引言

地震易损性是指结构在不同强度的地震作用下,

反应超过某一规定破坏极限状态的概率,是进行地震风险分析的基础。由于桥梁结构在地震作用下较易发生损坏,国内外许多学者对桥梁结构的地震易

收稿日期:2014-04-25

作者简介:宋帅(1987-),男,河南虞城人,博士研究生。(717134965@qq.com)

损性进行了大量的研究, Basoz 和 Kiremidjian^[1]通过对灾后数据进行回归分析, 得到常见桥梁结构的经验易损性曲线; Bryant^[2]考虑了支座、桥墩和桥台对桥梁系统的影响, 对美国中部和东南部的典型简支梁桥的地震易损性进行了研究; Hwang、刘晶波^[3]采用数值分析的方法对美国中东部地区的典型混凝土板式连续梁桥进行了地震易损性分析, 得到了该类桥梁的地震易损性曲线; 李立峰等^[4]对我国中等跨径连续梁桥的易损性进行研究, 并采用联合概率的方法分析了桥梁系统的易损性; 郑凯锋等^[5]采用概率地震需求分析方法对汶川地区简支梁桥的地震易损性进行了研究, 得到了汶川地震典型简支桥梁的地震易损性曲线; 王其昂等^[6]对连续梁的多维易损性进行研究, 提出了基于多地震需求参数分析的桥梁系统易损性评估方法; 谷音^[7]对连续刚构桥的易损性进行研究, 得到了基于整体性能的地震易损性曲线。以上研究主要针对规则的简支梁、连续梁及连续刚构桥, 对结构较为复杂的廊桥结构地震易损性研究较少。景观廊桥造型优美, 在城市及旅游地区大量应用, 但其结构规模一般较大, 上部结构复杂, 在地震作用下, 建筑结构与桥梁结构相互影响, 结构的受力性能、破坏过程与一般的桥梁结构差别较大, 因此对该类结构抗震性能进行研究十分必要。针对该类结构开展地震易损性研究, 提出其理论易损性曲线, 计算其在地震作用下的构件和系统的失效概率, 对该类廊桥结构抗震设计以及震害损失评估具有重要意义。

本文以一座上部布置钢筋混凝土框架结构的三跨预应力混凝土连续刚构景观廊桥为研究对象, 同时考虑地面运动不确定性和建筑材料的变异性, 用 SAP2000 程序分别建立了包括上部建筑结构和不包括上部建筑结构的两种空间有限元模型。通过对结构地震需求和能力的计算分析, 得到地震需求与地震强度指标的函数关系, 然后运用概率的方法分别形成了桥墩、支座的易损性曲线。最后运用一阶界限法^[8]求出桥梁系统易损性曲线的上、下界限。通过两种模型地震易损性的对比分析, 研究了上部建筑结构对桥梁结构地震易损性的影响。

1 工程概况及有限元模型

1.1 工程概况

该景观廊桥上部设置 2~4 层商业建筑, 建筑高度 10.4~24.0 m, 采用钢筋混凝土框架结构形式, 柱截面为 0.6 m×0.6 m, 梁截面为 0.5 m×0.3 m。

下部采用三跨预应力混凝土连续刚构桥, 跨径布置为 (31.5+36+31.5) m, 桥宽 36 m, 墩高 11.2 m, 主梁采用 C50 混凝土, 桥墩采用 C40 混凝土, 每个桥墩采用 3 个 4 m×1.4 m 的实心混凝土矩形柱, 纵向钢筋和箍筋都采用 HRB335 钢筋, 纵向配筋率为 1.2%, 配箍率 0.7%。桥台处设置双向活动 GPZ (II) 盆式橡胶支座, 地质条件为 II 类场地。桥梁结构布置如图 1 所示。

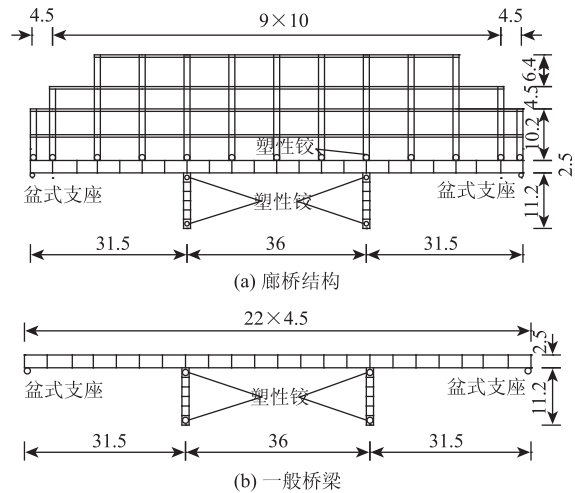


图1 廊桥结构与一般桥梁布置图 (单位: m)

Fig. 1 Layout of landscape covered bridge and ordinary bridge (unit: m)

1.2 有限元模型

在地震作用下, 底层柱以及梁端较易出现大的塑性变形, 采用梁-柱单元模拟上部钢筋混凝土框架结构, 用纤维 P-M2-M3 铰来模拟底层框架柱可能出现的塑性铰。在地震作用下, 主梁结构一般保持在弹性状态, 很少发生塑性破坏, 用梁柱单元模拟。由桥梁的结构形式可知, 在桥梁的纵向和横向, 桥墩的非线性主要集中在墩顶、墩底位置, 因此用纤维 P-M2-M3 铰来模拟墩顶、墩底可能出现的塑性铰, 其他部位假设保持弹性状态, 用梁-柱单元模拟。框架结构的柱与主梁, 桥墩与主梁采用刚性单元连接。活动盆式橡胶支座采用双线性理想弹塑性弹簧单元模拟, 滑动摩擦系数取为 0.02, 屈服位移取 0.03 m。用 Gap 间隙单元模拟桥台与主梁之间伸缩缝的影响。同时采用简化模型模拟桥台^[9], 桥台刚度和极限强度采用文献 [10] 给出的简化方法计算。由于场地地质条件较好, 不考虑基础弹性变形的影响, 在墩底施加刚性约束。

核心混凝土应力-应变关系采用 Mander 约束混凝土模型来模拟, 保护层混凝土采用 Mander 非约束

混凝土模型来模拟, 钢筋采用 Ramberg - Osgood 钢筋本构模型模拟, 并考虑钢筋的硬化效应。

2 地震动 - 桥梁样本

2.1 地震动的不确定性

合理选择地震动输入是进行结构地震响应分析的基础, 是保证分析合理性和可靠性的关键。地震动的频谱特性、持续时间以及幅值是影响结构地震响应的主要因素。由于地震动的不确定性, 采用传统可靠度概率的方法计算结构的易损性需要大量的地震动。

本文从已有的强震数据库中选取地震动的方法来考虑地面运动的不确定性。首先根据桥梁的场地类型, 将 20 m 以内土层的等效剪切波速换算为场地地表以下 30 m 平均剪切波速^[11], 然后从美国太平洋地震工程研究中心 (PEER) 强震数据库中选取符合设定剪切波速范围内的 100 条地震波, 同时保证地震动的峰值加速度的分布范围尽量较宽。本文选取地震动的剪切波速范围为 $260 \text{ m/s} \leq V_{s30} \leq 500 \text{ m/s}$, 地震动峰值加速度范围为 $0.01g \sim 1.00g$, 地震动的有效持续时间设置为结构基本周期的 10 倍。采用该方法获得的地震波与我国 II 类场地相符。100 条地震波的 PGA 的峰值加速度分布如图 2 所示。

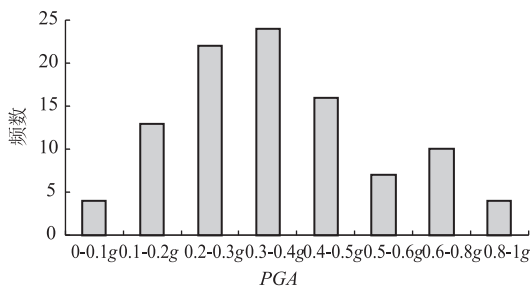


图 2 地震波的 PGA 分布图

Fig. 2 PGA distribution of seismic waves

2.2 结构的不确定性

桥梁结构的不确定性主要来自混凝土、钢筋的材料性能, 结构的构件尺寸、以及支座特性。桥墩的延性能力受钢筋的屈服强度、上部结构的重量、混凝土的抗压强度的影响较大^[12]。因此, 分析的过程中, 忽略结构构件尺寸以及支座特性的变异性, 仅考虑混凝土强度、容重以及钢筋的屈服强度对结构易损性的影响。根据建筑材料试验资料 and 实际施工水平, C40 混凝土的抗压强度, 可用均值为 33.4 MPa 、变异系数为 0.12 的正态分布来表示。HRB335 的钢筋的屈服强度常用均值为 380.1 MPa 和

变异系数为 0.06 的对数正态分布来表示。混凝土容重服从均值为 26.0 kN/m^3 , 变异系数为 0.1 的正态分布。根据混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、混凝土容重的概率分布, 将其 5% ~ 95% 累计概率分布区间等间距地分为 10 份, 采用拉丁超立方抽样^[13]的方法建立 10 个桥梁样本, 如表 1 所示。

表 1 桥梁样本参数

Tab. 1 Bridge sample parameters

样本	C40		上部重度 $W/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	HRB335 f_y/MPa
	f_c/MPa	E_c/MPa		
1	29.8	25 840.0	28.4	350.6
2	34.8	27 923.1	25.1	360.5
3	38.9	29 526.3	24.4	367.1
4	35.8	28 325.6	25.7	372.7
5	27.9	25 007.4	26.9	377.7
6	32.0	26 774.8	23.6	382.7
7	37.0	26 355.5	29.5	387.7
8	31.0	30 362.9	22.5	393.3
9	32.9	27 151.7	26.3	399.9
10	33.9	27 566.8	27.6	409.8

将以上 10 个桥梁样本与选取的 100 条地震动进行随机组合, 进而得到 100 组地震动 - 桥梁分析样本。

3 损伤指标

桥台破坏、支座破坏和墩柱破坏都会引起桥梁系统失效。由于桥台损伤指标目前尚无统一、准确的确定方法, 因此本文只针对桥墩和支座两种构件的破坏形式进行研究。

公路桥梁抗震设计细则^[14]规定将墩柱作为延性构件设计, 且墩柱的抗剪强度按能力保护原则设计。因此, 在地震作用下, 桥墩较易发生弯曲破坏。根据桥墩和上部梁体结构的相互关系, 塑性铰可能出现在墩顶或墩底的位置, 桥墩破坏时, 会产生较大的变形, 从而起到耗散地震能量的作用。

目前评估桥墩损伤的指标主要有墩顶位移、墩顶漂移率、位移延性比、曲率延性等^[15]。其中, 位移延性比是 Hwang^[3]等提出的无量纲的桥墩损伤指标, 并以此对桥墩各极限状态进行了量化。以位移延性比作为桥墩的损伤指标与延性抗震设计的方法相一致。墩柱在地震作用下相对位移延性比用下式来表示:

$$\mu_d = \frac{\Delta}{\Delta_{cyl}}, \quad (1)$$

式中, Δ 为墩顶最大相对位移; Δ_{eyl} 为边缘钢筋中单根钢筋首次屈服时墩顶相对位移。以钢筋屈服、混凝土开裂、混凝土剥落、和钢筋屈曲 4 种情形分别定义结构的轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏状态, 并与美国地震风险评估软件 HAZUS^[16] 定义的破坏状态相一致。因此, 用墩顶延性位移比表示桥墩的 5 种破坏状态, 如表 2 所示。

表 2 桥墩相对位移延性比表示的破坏状态

Tab. 2 Damage state described by relative displacement ductility ratios of piers

破坏状态	无破坏	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
破坏准则	$\mu_d < \mu_{\text{eyl}}$	$\mu_{\text{eyl}} < \mu_d \leq \mu_{\text{ey}}$	$\mu_{\text{ey}} < \mu_d \leq \mu_{\text{c4}}$	$\mu_{\text{c4}} < \mu_d \leq \mu_{\text{cmax}}$	$\mu_d > \mu_{\text{cmax}}$

表中 μ_{eyl} 为单根钢筋首次屈服位移延性比; μ_{ey} 为截面等效屈服位移延性比; μ_{c4} 为桥墩截面受压边缘混凝土压应变达到 0.004 时的位移延性比; μ_{cmax} 为最大破坏位移延性比。

活动盆式橡胶支座一般由顶板、不锈钢冷轧钢板、聚四氟乙烯滑板、中间钢板、黄铜密封圈、橡胶板、钢盆、锚固螺栓、防尘圈和防尘围板等组成。该类支座是通过上顶板与滑动板之间的滑动来实现水平移动, 采用密封的橡胶板来完成各方向的转动功能。地震作用下, 盆式橡胶支座能够有效延长结构自振周期, 减小上部结构地震响应, 近年来得到了广泛的应用。

在强震作用下, 活动盆式橡胶支座存在钢衬板磨损现象, 橡胶密封圈有被挤出的危险。活动支座位移过大会导致支座倾斜、脱落, 梁体纵、横向变位, 严重时会发生落梁事故。因此, 对活动盆式橡胶支座的滑动位移要进行限制。基于位移破坏准则, 本文采用支座的滑动位移作为双向活动盆式橡胶支座的损伤指标。

4 易损性分析

4.1 结构延性能力概率分析

结构的延性能力可用各构件的损伤指标来量化, 通常假定结构延性能力 S_c 服从对数正态概率分布^[17]:

$$S_c = \ln(\tilde{S}_c, \beta_c), \quad (2)$$

式中, \tilde{S}_c 为延性能力对数均值; β_c 为延性能力的对数标准差。

桥墩的延性能力用 10 个桥梁样本在各极限状态对应的相对位移延性比的极大似然估计值表示。钢

筋混凝土延性构件的变形能力, 取决于构件的弹性变形和塑性铰区的塑性转动能力。通过对截面进行弯矩-曲率分析可以得到各极限状态下结构的曲率限值。根据各极限状态曲率和位移的关系, 对各极限状态的曲率进行分析, 得出结构各极限状态下的位移限值。过程如下:

$$\Delta = \Delta_y + \Delta_p, \quad (3)$$

墩柱边缘钢筋首先屈服时的墩顶位移为:

$$\Delta_{\text{eyl}} = \frac{\phi_1 L^2}{3}, \quad (4)$$

墩柱截面等效屈服时的墩顶位移为:

$$\Delta_y = \frac{\phi_y L^2}{3}, \quad (5)$$

塑性铰区域转动产生的墩顶位移为:

$$\Delta_p = \theta_p \times \left(L - \frac{L_p}{2} \right), \quad (6)$$

$$\theta_p = L_p \times \phi_p, \quad (7)$$

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y, \quad (8)$$

$$L_p = 0.08L + 0.022f_y d_{bl} \geq 0.044f_y d_{bl}, \quad (9)$$

式中, ϕ_1 , ϕ_y , ϕ_u 分别为边缘单根钢筋首先屈服时的曲率、截面等效曲率、极限破坏状态曲率, 由截面的弯矩-曲率分析得到。 L 为弯矩最大的截面到反弯点的距离; L_p 为塑性铰长度; f_y 为纵向钢筋的屈服强度; d_{bl} 为纵筋的直径。

求出桥墩在各种破坏状态下的位移限值, 按照式 (1) 即可计算桥墩在各破坏状态下的相对位移延性比, 结果如表 3 所示。参考美国公路桥梁抗震加固手册^[18], 最大破坏位移延性比取 $\mu_{\text{cmax}} = \mu_{\text{c4}} + 3$ 。

采用的双向活动盆式支座纵向容许位移为 100 mm, 横向容许位移为 50 mm, 以支座设计容许位移作为轻微破坏的限值。当活动盆式支座的滑动位移大于聚四氟乙烯滑板直径的 1/2 时, 支座有脱落的危险, 以聚四氟乙烯滑板直径的 1/2 作为完全破坏的限值, 取为 300 mm。当地震动强度较大, 支座位移超过一定的值, 钢衬板会发生磨损, 橡胶密封圈也存在被挤出的危险^[19]。因此, 以 150, 200 mm 作为支座纵向发生中等破坏和完全破坏的位移限值, 以 100, 150 mm 作为支座横向发生中等破坏和完全破坏的位移限值, 如表 3 所示。

4.2 结构概率需求分析

结构地震需求通常假定服从对数正态分布^[2], 并用以下函数来表示:

$$S_d = \ln(\tilde{S}_d, \beta_d), \quad (10)$$

式中, \tilde{S}_d 为结构地震需求对数均值; β_d 为结构需求对数标准差。

表 3 不同破坏状态下构件延性能力均值

Tab. 3 Mean ductility capacity of structure in different damage states

构件名称	结构延性能力均值			
	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
桥墩 (纵桥向)	1	1.319	4.483	7.483
桥墩 (横桥向)	1	1.141	4.406	7.406
支座纵向/mm	100	150	200	300
支座横向/mm	50	100	150	300

分别对两种模型下地震动 - 桥梁样本进行非线性动力时程分析, 每种模型各得到 100 组结构动力响应值。用墩顶的相对位移延性比衡量桥墩的地震需求, 用滑动位移量来衡量双向活动支座地震需求。由模态分析可知, 在考虑上部建筑结构的影响下, 高阶振型对结构在地震作用下的响应较大。因此, 本文采用地震动峰值加速度 PGA 作为自变量。采用最小二乘法, 对每种模型 100 条地震波作用下各构件需求值与地震动的峰值加速度 PGA 的进行对数回归分析, 结果如图 3 所示。

图 3 仅给出考虑上部建筑结构影响的地震需求回归分析的结果。为对比分析上部建筑结构对桥墩、支座地震需求的影响, 把两种模型下地震概率需求与地震动峰值加速度的回归关系列于表 4。模型 1 为考虑上部建筑结构的影响, 模型 2 为不考虑上部建筑结构的影响。由决定性系数 R^2 可知, 采用该拟合函数能较好地揭示结构的地震需求与地震动强度之间的关系。

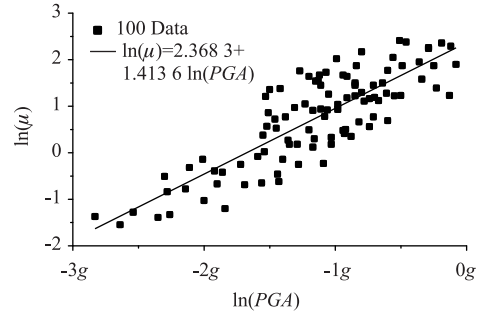
表 4 构件概率地震需求模型

Tab. 4 Seismic probabilistic demand models for components

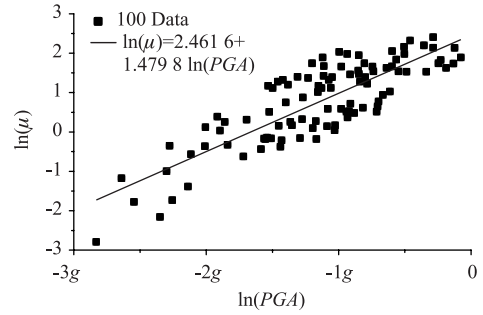
	响应值	概率需求模型	R^2
模型 1	$\ln(\mu_z)$	$2.3683 + 1.4136 \ln(PGA)$	0.6779
	$\ln(\mu_H)$	$2.4616 + 1.4798 \ln(PGA)$	0.6998
	$\ln(\Delta_z)$	$4.0617 + 1.1708 \ln(PGA)$	0.7284
	$\ln(\Delta_H)$	$3.2298 + 1.0973 \ln(PGA)$	0.6528
模型 2	$\ln(\mu_z)$	$1.7115 + 0.8952 \ln(PGA)$	0.6352
	$\ln(\mu_H)$	$1.7582 + 0.9391 \ln(PGA)$	0.8143
	$\ln(\Delta_z)$	$4.9432 + 0.9096 \ln(PGA)$	0.6467
	$\ln(\Delta_H)$	$4.3101 + 0.8793 \ln(PGA)$	0.8381

4.3 易损性曲线的形成

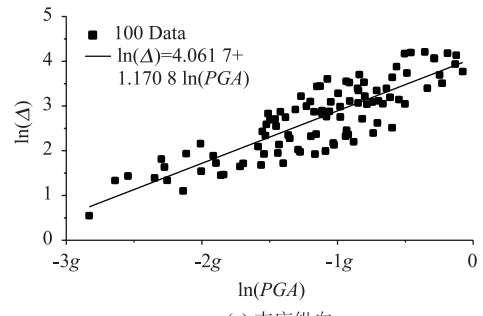
根据地震易损性的定义, 结构地震需求 S_d 超过结构延性能力 S_c 的概率计算如下:



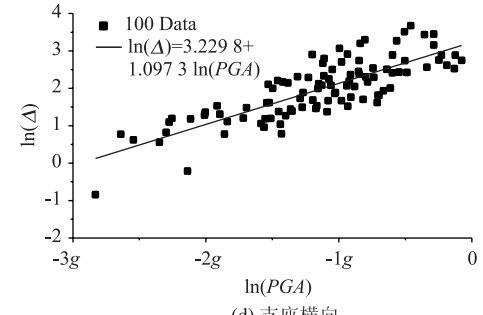
(a) 桥墩纵向



(b) 桥墩横向



(c) 支座纵向



(d) 支座横向

图 3 构件地震响应需求回归分析

Fig. 3 Regression analysis of component seismic response demands

$$P_f = P_r \left(\frac{S_c}{S_d} \leq 1 \right). \quad (11)$$

因为 S_c 和 S_d 都服从对数正态分布, 且正态分布的差也服从正态分布, 所以结构的失效概率 P_f 可由以下标准正态分布函数确定:

$$P_f = \Phi \left[\frac{-\ln(\tilde{S}_c/\tilde{S}_d)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2}} \right]. \quad (12)$$

根据地震风险评估软件 HAZUS^[16], 当地震易损性曲线以 PGA 为自变量时, $\sqrt{\beta_c^2 + \beta_d^2} = 0.5$ 。不同的破坏状态下构件的能力均值 \tilde{S}_c 由表 3 确定。地震作用下构件的地震需求均值 \tilde{S}_d 由表 4 中的拟合函数来确定, 利用式 (12) 即可求得各构件在不同破坏状态下的失效概率, 将其绘制成易损性曲线, 如图 4 所示。由于篇幅限制, 这里只列出考虑上部建筑结构影响的构件易损性计算结果。

由图 4 可知, 在地震作用下, 桥墩纵向和横向发生轻微破坏和中等破坏的概率相近; 当地震动峰值加速度大于 0.6g 时, 桥墩横向发生严重破坏和完全破坏的概率大于纵向; 支座纵向和横向发生轻微破坏的概率相近; 当地震动峰值加速度大于 0.4g 时, 支座纵向发生中等破坏、严重破坏和完全破坏的概率大于横向。

由桥墩或支座在纵向和横向失效的概率, 可以得到桥墩或支座在指定状态下的失效概率, 即:

$$P = P_Z + P_H - P_Z \times P_H, \quad (13)$$

式中, P 为桥墩或支座指定破坏状态下的失效概率; P_Z 为桥墩或支座指定破坏状态下纵向失效的概率; P_H 为桥墩或支座指定破坏状态下横向失效的概率。将式 (12) 分析得到的结果代入式 (13), 可得桥墩、支座的各破坏状态下的地震易损性曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 该类廊桥结构在地震动峰值加速度小于 0.1g 时, 桥墩、支座发生各种极限状态破坏的概率均较小; 当地震动峰值加速度介于 0.1g 和 0.2g 之间, 桥墩发生轻微破坏和中等破坏的概率明显大于支座; 在地震动峰值加速度大于 0.4g 的情况下, 支座发生严重破坏和完全破坏的概率大于桥墩。

4.4 上部建筑结构对桥梁系统易损性曲线的影响

桥梁是由多个构件组成的整体, 由各构件的地震易损性准确建立桥梁系统的地震易损性需要确定不同构件的联合概率分布, 这是很困难的。本文考虑桥墩、支座两种构件对桥梁系统易损性的影响, 采用一阶界限法计算桥梁系统失效概率的上界和下界, 来逼近桥梁系统的易损性。

一阶界限法也称为宽界限法, 假设结构系统的各种失效模式为正相关, 即相关系数 $\rho > 0$ 。结构系统的失效概率可用下式表示^[20]:

$$\max_{i=1}^m [P_i] \leq P_{\text{sys}} \leq 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_i], \quad (14)$$

式中, P_{sys} 为全桥系统失效概率; P_i 为第 i 种构件发

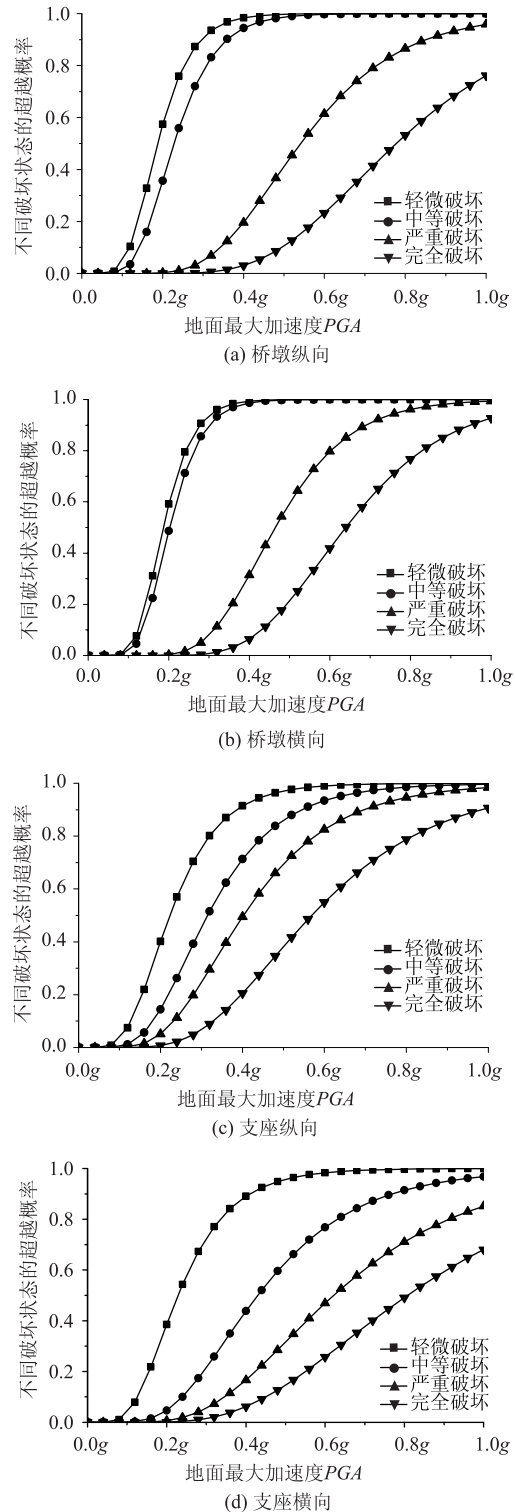


图 4 构件地震易损性曲线

Fig. 4 Seismic vulnerability curves of components

生破坏的概率; m 为构件数量。假设构件的地震需求是完全相关的情况下, 则构件易损性的最大值为系统易损性的下界。假设构件地震需求完全不相关的情况下, 则由式 (14) 可以得到系统易损性的上界。

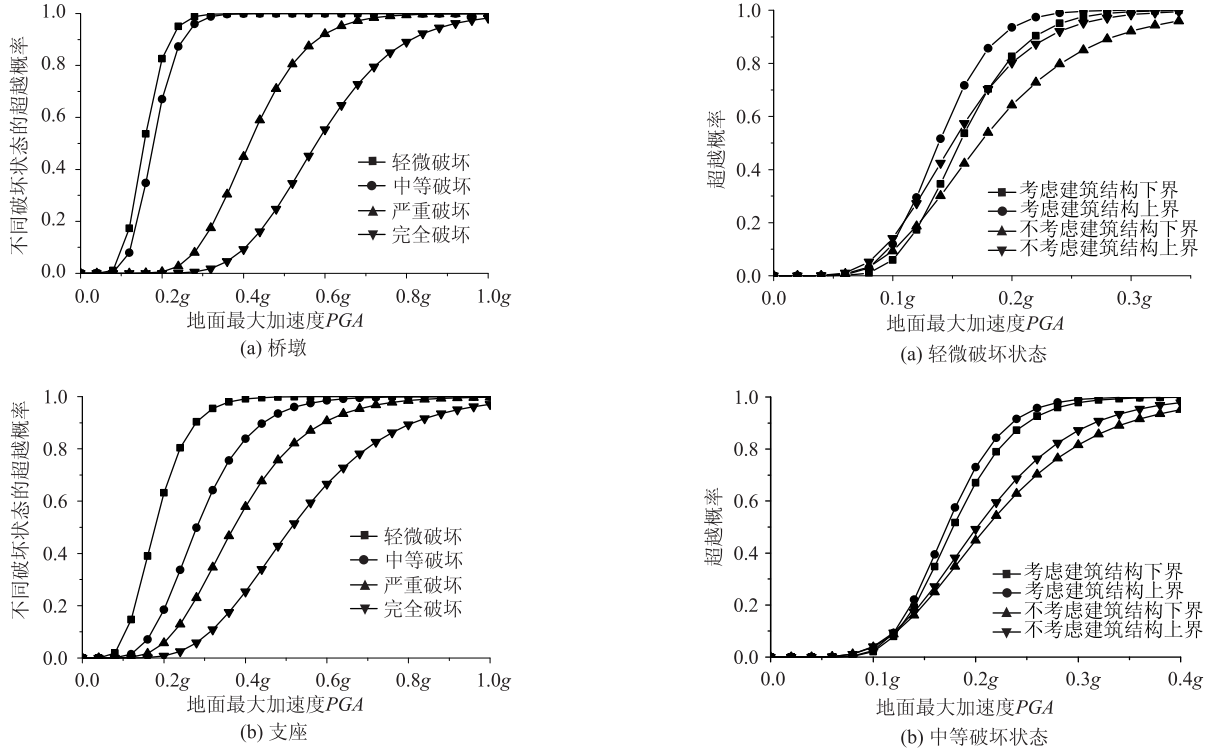


图5 桥墩、支座地震易损性曲线

Fig. 5 Seismic vulnerability curves of pier and bearing

为了研究上部建筑结构对桥梁地震易损性的影响, 分别计算考虑上部建筑结构和不考虑上部建筑两种模型的系统易损性, 得到两种模型桥梁系统在各种损伤状态下的易损性曲线上界和下界, 如图6所示。

由图6可知: 上部建筑结构对桥梁系统的地震易损性影响明显, 增加上部建筑结构, 桥梁发生各种破坏状态的概率都增加。采用一阶界限法计算时, 轻微破坏和中等破坏状态系统易损性上下界之间的带宽较小, 严重破坏和完全破坏状态系统易损性上下界之间的带宽较大。有研究表明桥梁系统的易损性曲线接近一阶界限法上界^[21]。因此, 采用上界作为桥梁易损性来定量分析上部建筑结构对桥梁易损性的影响。不考虑上部建筑的情况下, 桥梁系统发生轻破坏、中破坏、严重破坏、完全破坏的峰值加速度的中位值分别为 0.15g, 0.20g, 0.72g, >1g, 考虑上部建筑的情况下, 桥梁系统发生轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏的峰值加速度的中位值分别为 0.13g, 0.17g, 0.32g, 0.45g, 可见上部建筑对桥梁系统发生严重破坏和完全破坏的影响显著。将桥梁系统的易损性曲线和单个构件的易损性曲线对比发现, 地震作用下桥梁系统比单个构件更容易遭受地震破坏, 仅用

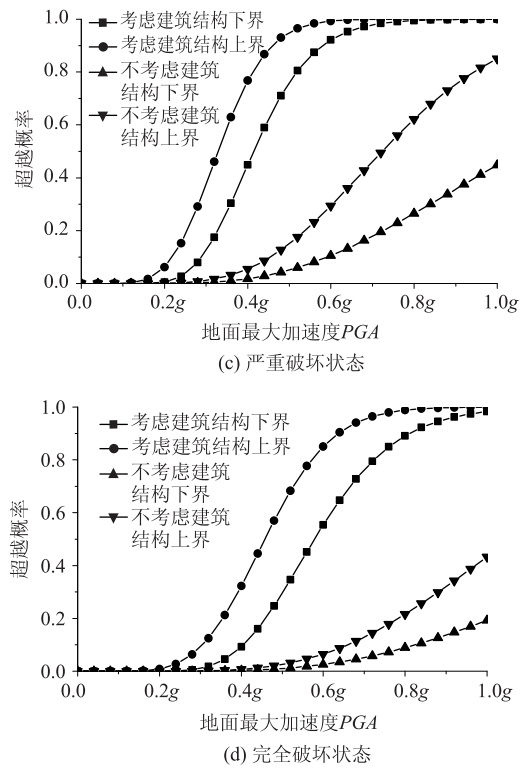


图6 系统地震易损性上下界曲线

Fig. 6 Bound curves of system seismic vulnerability

墩柱或支座的易损性来评估桥梁结构的易损性会高估结构的抗震能力。

5 结论

在目前对该类景观廊桥结构地震易损性研究较

少的情况下,本文考虑了上部建筑结构与桥梁结构的相互影响,对一座三跨预应力混凝土连续刚构景观廊桥进行非线性动力时程分析;以地面峰值加速度作为自变量,以墩顶相对位移延性比和支座滑动位移量为损伤指标,同时考虑地震动和结构本身的不确定性,分别形成了桥墩、支座的易损性曲线;最后,采用一阶界限法得到了两种模型下桥梁系统易损性的上界和下界。经过对比分析,得出如下结论:

(1) 该桥桥墩横向发生严重破坏和完全破坏概率大于纵向;支座纵向发生中等破坏、严重破坏和完全破坏概率大于横向。

(2) 该桥桥墩发生轻微破坏和中等破坏的概率大于支座;支座发生严重破坏和完全破坏的概率大于桥墩。

(3) 上部建筑结构对桥梁的地震易损性有显著影响,增加上部建筑结构,桥梁发生各破坏状态的概率都增加,发生严重破坏和完全破坏的概率增大尤为明显。

(4) 桥梁系统易损性大于单个构件的易损性;采用一阶界限法计算系统易损性,上下界之间的带宽在严重破坏和完全破坏状态下较大,用上界评价桥梁系统的易损性可得到偏于安全的结果,对系统易损性进行更为精确的分析可采用 Monte Carlo 方法。

参考文献:

References:

- [1] BASOZ N, KIREMIDJIAN A S. Risk Assessment of Bridges and Highway Systems from the Northridge Earthquake [C] // Proceedings of the 2nd National Seismic Conference on Bridges and Highways. Sacramento: California Department of Transportation, 1997: 65 - 79.
- [2] NIELSON B G. Analytical Fragility Curves for Highway Bridges in Moderate Seismic Zones [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [3] HWANG H, LIU J B, CHIU Y H. Seismic Fragility Analysis of Highway Bridges, MAEC RR - 4 [R]. Memphis: Mid-America Earthquake Center, 2001.
- [4] 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.
LI Li-feng, WU Wen-peng, HUANG Jia-mei, et al. Study on System Vulnerability of Medium Span Reinforced Concrete Continuous Girder Bridge under Earthquake Excitation [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (10): 152 - 160.
- [5] 郑凯锋, 陈力波, 庄卫林, 等. 基于概率性地震需求模型的桥梁易损性分析 [J]. 工程力学, 2013, 30 (5): 165 - 171, 187.
ZHENG Kai-feng, CHEN Li-bo, ZHUANG Wei-lin, et al. Bridge Vulnerability Analysis Based on Probabilistic Seismic Demand Models [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (5): 165 - 171, 187.
- [6] 王其昂, 吴子燕, 贾兆平. 桥梁系统地震多维易损性分析 [J]. 工程力学, 2013, 30 (10): 192 - 198.
WANG Qi-ang, WU Zi-yan, JIA Zhao-ping. Multi-dimensional Fragility Analysis of Bridge System under Earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (10): 192 - 198.
- [7] 谷音, 黄怡君, 卓卫东. 高墩大跨连续刚构桥梁地震易损性分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31 (2): 91 - 97.
GU Yin, HUANG Yi-jun, ZHUO Wei-dong. Study on Seismic Vulnerability of Long-span Continuous Rigid Frame Bridge with High Piers [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31 (2): 91 - 97.
- [8] CORNELL C A. Bounds on the Reliability of Structural Systems [J]. Journal of Structural Division, 1967, 93 (1): 171 - 200.
- [9] AVIRAM A, MACKIE K R, STOJADINOVIĆ B. Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California, UCB/PEER 2008/03 [R]. San Francisco: Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2008.
- [10] AVIRAM A, MACKIE K R, STOJADINOVIĆ B. Effect of Abutment Modeling on the Seismic Response of Bridge Structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7 (4): 395 - 402.
- [11] 魏雷涛. 时程分析中地震动记录筛选及调整研究 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
WEI Lei-tao. Research on Selection and Adjustment of Ground Motion Records in the Time-history Analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [12] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSN M, et al. Seismic Fragility of Multi-span Simply Supported Steel Highway Bridges in New York State. I: Bridge Modeling, Parametric Analysis, and Retrofit Design [J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15 (5): 448 - 461.
- [13] OLSSON A, SANDBERG G, DAHLBLOM O. On Latin Hypercube Sampling for Structural Reliability Analysis [J]. Structural Safety, 2003, 25 (1): 47 - 68.

- Topological Structure and Evolution Model of Urban Transit Network [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26 (11): 108 - 112.
- [6] 黄敏. 多层次公交线网拓扑结构分析 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27 (5): 93 - 99.
HUANG Min. Analysis on Topology Frame of Multi-level Transit System Network [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27 (5): 93 - 99.
- [7] 许伦辉, 林泉. 基于GBAS的公交出行最优路径选择算法 [J]. *公路交通科技*, 2010, 27 (3): 154 - 158.
XU Lun-hui, LIN Quan. Transit Trip Optimal Route Choice Algorithm Based on GBAS [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27 (3): 154 - 158.
- [8] 周康, 马晓旦, 夏晓梅. 基于最小换乘的公交线网优化模型 [J]. *城市公共交通*, 2011 (6): 43 - 45.
ZHOU Kang, MA Xiao-dan, XIA Xiao-mei. Model of Public Transportation Network Optimization Based on Minimal Transfer [J]. *Urban Public Transport*, 2011 (6): 43 - 45.
- [9] 于滨, 杨永志, 杨忠振, 等. 基于直达客流密度最大的公交线网优化 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2009, 41 (2): 205 - 207.
YU Bin, YANG Yong-zhi, YANG Zhong-zhen, et al. Transit Network Optimization Based on Direct Passenger Flow Density Maximization [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 41 (2): 205 - 207.
- [10] YANG Xu-hua, WANG Bo, WANG Wan-liang, et al. Research on Some Bus Transport Networks with Random Overlapping Clique Structure [J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2008, 49 (11): 1249 - 1254.
- [11] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
WANG Xiao-fan, LI Xiang, CHEN Guan-rong. *Complex Network Theory and Its Application* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [12] 王波. 基于派系的复杂网络及其在公交网络上的应用研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2009: 64 - 72.
WANG Bo. Study on Complex Network Based on Cliques and Its Application in Bus Transport Network [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2009: 64 - 72.
-
- (上接第102页)
- [14] JTG/T B02—01—2008, 公路桥梁抗震设计细则 [S].
JTG/T B02—01—2008, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges [S].
- [15] 陈力波, 郑凯锋, 栗怀广, 等. 基于扩展增量动力分析的桥梁地震易损性研究 [J]. *公路交通科技*, 2012, 29 (9): 43 - 49, 57.
CHEN Li-bo, ZHENG Kai-feng, LI Huai-guang, et al. Research of Bridge Seismic Vulnerability Based on Extended Incremental Dynamic Analysis [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29 (9): 43 - 49, 57.
- [16] FEMA. HAZUS-MH MR4 Earthquake Model Technical Manual [M]. Washington, D. C.: Federal Emergency Management Agency, 2003: 1 - 93.
- [17] HWANG H, 刘晶波. 地震作用下钢筋混凝土桥梁结构易损性分析 [J]. *土木工程学报*, 2004, 37 (6): 47 - 51.
HWANG H, LIU Jing-bo. Seismic Fragility Analysis of Reinforced Concrete Bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37 (6): 47 - 51.
- [18] BUCKLE I G, FRIEDLAND I, MANDER J, et al. Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 - Bridges, MCEER - 06 - SP10 [R]. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 2006.
- [19] 汪洋, 曹加良, 施卫星. 盆式橡胶支座基础隔震结构地震模拟振动台试验研究 [J]. *建筑结构*, 2013, 43 (7): 9 - 13.
WANG Yang, CAO Jia-liang, SHI Wei-xing. Shaking Table Test Study of Base-isolated Structure with Pot Bearings [J]. *Building Structure*, 2013, 43 (7): 9 - 13.
- [20] CHOI E, DESROCHES R, NIELSON B. Seismic Fragility of Typical Bridges in Moderate Seismic Zones [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26 (2): 187 - 199.
- [21] NIELSON B G, DESROCHES R. Seismic Fragility Methodology for Highway Bridges Using a Component Level Approach [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36 (6): 823 - 839.