

采用拉索模数伸缩缝的斜交桥地震易损性分析

张鹏辉, 冯睿为, 周连绪, 郭军军, 袁万城

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了研究拉索模数伸缩缝对一座30°斜交角的三跨混凝土斜交连续梁桥抗震性能的影响, 利用理论易损性分析方法分析了脉冲地震动和无脉冲地震动作用下拉索模数伸缩缝的减震效果, 并提出了以震后维修费用曲线评价桥梁结构体系抗震性能的方法。结果表明, 采用拉索模数伸缩缝后桥墩和支座的易损性均显著降低; 速度脉冲效应不会改变结构的破坏模式, 但对于采用拉索模数伸缩缝的斜交桥, 速度脉冲效应会显著增加支座和桥墩的易损性; 无论是脉冲地震动还是无脉冲地震动作用下, 采用拉索模数伸缩缝均能有效减小斜交桥的震后维修费用。

关键词: 斜交桥; 拉索模数伸缩缝; 地震易损性分析; 震后维修费用; 速度脉冲效应

中图分类号: U442.55

文献标志码: A

Seismic Fragility Analysis of Skew Bridges with Cable-Slide Modular Expansion Joints

ZHANG Penghui, FENG Ruiwei, ZHOU Lianxu, GUO Junjun, YUAN Wancheng

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to investigate the influence of sliding-cable modular expansion joints on the seismic performance of a three-span concrete skew continuous beam bridge with a 30° skew angle, sliding-cable modular expansion joints are adopted to restrict the rotation of skew bridge girders, the seismic performance of the skew bridge equipped with sliding-cable modular expansion joints in pulse-like and no pulse-like ground motions is explored using analytical fragility curves, and the post-earthquake repair cost curve is proposed to evaluate the seismic performance of bridge structures. The results show that the fragility of piers and bearings is significantly

reduced after cable-sliding modular expansion joints are adopted. Under the influence of velocity pulse effect, the fragility of both skew bridge bearings and piers with cable modulus expansion joints significantly increase but the structure failure mode remains the same, and the use of cable-sliding modular expansion joints effectively reduces the seismic repair cost of the bridge regardless of whether ground motions are pulse-like or not.

Key words: skew bridge; sliding-cable modular expansion joint; seismic fragility analysis; seismic repair cost; velocity pulse effect

斜交桥具有良好的地形和线路适应能力, 被广泛应用于城市立交及公路桥梁中。据统计, 在我国高等级公路系统中, 斜交桥的数量一般可以达到整条线路桥梁总数的40%~50%^[1]。由于斜交角的存在, 影响了结构静动力荷载的传递机制, 进而影响了结构在荷载作用下的力与位移响应。其中, 由于主梁刚度中心与质量中心不重合, 以及主梁与桥台或相邻主梁之间的碰撞, 将导致主梁在地震作用下发生平面转动, 造成支座和桥台发生严重损伤。在1971年美国San Fernando地震后, 加利福尼亚州的Foothill Boulevard下穿式立交桥桥台在斜交角方向的位移增幅达10 cm, 且中墩发生严重剪切破坏^[2]。自此, 斜交桥的地震破坏机理和性能提升引起了研究人员的广泛关注。对两端支撑于桥台的斜交跨线桥, Buckle等^[3]分析后认为, 其转动机理是, 在水平地震作用下, 主梁钝角处与桥台背墙相接触, 随后主梁绕该钝角处转动, 导致锐角处及另一端主梁处的支座位移过大。

为了防止梁端位移过大导致落梁, 设计人员需要设置足够的支撑宽度, Wu等^[4]根据Buckle等提出

收稿日期: 2020-06-09

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0112300); 国家自然科学基金(51978512, 51778471); 土木工程防灾国家重点实验室基金(SLDRCE19-B-19); 山东省交通运输科技计划(2020B74)

第一作者: 张鹏辉(1995—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁抗震。Email: penghui@tongji.edu.cn

通信作者: 袁万城(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为桥梁抗震。Email: yuan@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

的主梁转动机制,给出了斜交桥最小支撑宽度的设计方法,同时基于振动台试验结果^[4-5],对其进行验证,发现在伸缩缝宽较大时,主梁碰撞后的回弹效应会加剧主梁转动,应在支撑宽度设计时加以考虑。当地震动强度较大时,对支撑宽度的要求过高,因此需要进一步采用减隔震装置控制主梁的位移响应,如减隔震支座和限位装置。研究人员提出采用减隔震支座减小主梁地震响应的方法,如摩擦摆支座^[6]、铅芯橡胶支座^[7]、高阻尼橡胶支座^[8],发现都能取得较好的效果。但是我国的中小跨径桥梁的主梁通常采用多主梁预制拼装形式,支座采用吨位较小、布置简单且价格便宜的板式橡胶支座,减隔振支座应用较为困难,同时高阻尼橡胶支座性能不稳定,受温度的影响较大。Saiidi等^[9]在主梁与桥台、主梁联间设置拉索限位器,并改进了拉索限位器设计方法。王军文等^[10]指出横向限位挡块的设置能够显著减小梁端的纵向位移和主梁的峰值转角。Sevgili等^[11]采用桥面连续的方式以减小多跨简支斜交桥主梁横向和纵向的位移。但拉索限位器设计复杂,布置麻烦;限位挡块常常引起桥台和盖梁的连带损伤,震后修复繁琐;桥面连续方式不适用于温度、收缩和徐变作用下伸缩量较大的长联桥梁。

另外,减隔震装置的抗震性能需要采用系统的量化指标加以衡量,考虑到桥梁抗震中普遍存在的几何参数不确定性、材料不确定性、以及地震动输入的不确定性,斜交桥的抗震性能需采用概率性方法进行评估。理论易损性曲线是目前概率性抗震性能评估中使用最广泛的手段,部分学者也开始用易损性分析手段对斜交桥的抗震性能进行概率性评估:Serdar等^[12]为混凝土斜弯桥选取了合适的地震动强度指标;Yang等^[13]采用易损性方法分析了美国中部和东南部的斜交桥,并衡量了斜交角对抗震性能的影响;Torbol等^[14]研究了地震动输入角度对斜交桥地震易损性的影响;Ghotbi^[15]分析了桩土效应对斜交桥地震易损性的影响;Zakeri等^[16]考虑桥台类型、桥梁服役时间、桥墩形式的影响分析了混凝土斜交箱梁桥的地震易损性。

基于上述研究背景,本文提出采用拉索模数伸缩缝来限制斜交桥主梁的旋转,并采用理论易损性分析方法对比研究了脉冲地震动和无脉冲地震动作用下,采用拉索模数伸缩缝和普通模数伸缩缝的斜交桥抗震性能,同时提出了用震后维修费用曲线评价结构抗震性能的方法。

1 拉索模数伸缩缝工作原理及力学本构

袁万城等^[17-18]为了限制相邻梁体间的位移,创造性地将拉索限位器与伸缩缝结合起来,提出了拉索模数伸缩缝(cable-sliding modular expansion joint, CMEJ),并将其应用于连续梁桥,分析了近场地震动及主余震序列下装置的减震效果,结果表明拉索模数伸缩缝可使桥梁各联间协同作用,控制墩梁相对位移,改善桥墩受力。如图1a所示,拉索模数伸缩缝是在传统模数伸缩缝(modular expansion joint, MEJ)的基础上,用贯穿的拉索将支承箱体与支承横梁连接起来。拉索具有一定的自由程,以满足正常使用状况下温度变化、收缩徐变等对伸缩位移的要求。目前,拉索模数伸缩缝已成功应用于上海浦东运河桥。

拉索模数伸缩缝的工作原理如图1b、1c和1d所示,在强震作用下当相邻梁体间发生相对运动时,若相邻梁体间相对位移小于自由程时,拉索不发生作用;当相邻梁体间相对位移大于自由程时,拉索拉紧,阻止梁体进一步靠近或远离,从而防止了落梁和主梁平面转动。相较于传统限位装置,拉索模数伸缩缝巧妙地将伸缩缝与限位功能结合起来,简化了限位装置设置的工序,且在地震作用下,能有效地防止碰撞和落梁等震害的发生。其非线性力-位移关系如式(1)所示^[18]:

$$F = \begin{cases} K_1(\Delta x - D_0), & \Delta x \geq D_0 \\ 0, & \Delta x < D_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_1 为拉索受拉刚度, $K_1 = nEA/L$, n 为拉索根数, E 为拉索弹性模量, A 为拉索横截面积, L 为拉索长度; D_0 为拉索自由程; Δx 为梁端相对位移或桥台与梁端的相对位移。

2 易损性分析方法简介

Cornell等^[19]假设工程需求参数(engineering demand parameter, EDP)的均值 S_D 与地震动强度指标 G (ground motion intensity measure)之间满足对数线性关系,并建立了最小二乘线性回归模型,如式(2):

$$\ln(D) = a + b \ln(G) + \epsilon, \epsilon \sim N(0, \beta_D^2) \quad (2)$$

式中: D 为构件需求; a 、 b 为回归系数; ϵ 为回归残差; β_D^2 为残差平方和。在此基础上提出了理论易损性分

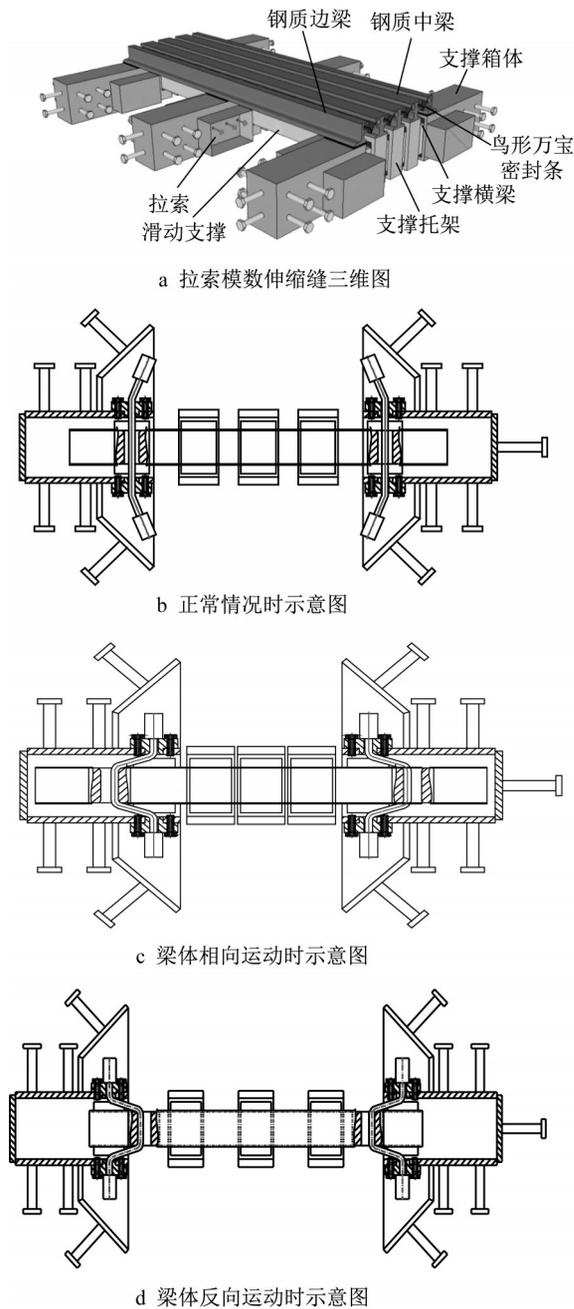


图1 拉索模数伸缩缝示意

Fig. 1 Cable-sliding modular expansion joint

析的云图法,由于最小二乘回归线性模型的引入,使得云图法需要满足线性、正态性和同方差性3个基本假设^[20]。但实际应用中存在大量与之不符的情况^[21],故引入Box-Cox变换改善模型的线性、正态性和同方差性,将式(2)更新为Box-Cox回归模型,为

$$\ln(D)^\lambda = a' + b' \ln(G) + \epsilon', \epsilon' \sim N(0, \beta_b'^2) \quad (3)$$

Box-Cox变换的定义式为^[22]

$$\ln(D)^\lambda = \begin{cases} \frac{[\ln(D) + s]^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln[\ln(D) + s], & \lambda = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: s 为使 $\ln(D) + s$ 的各个分量都大于零的系数,即,当 $\min[\ln(D)] > 0$ 时 $s = 0$,当 $\min[\ln(D)] \leq 0$ 时 $s = \text{ceil}\{|\min[\ln(D)]|\}$,其中 $\text{ceil}(\cdot)$ 为向上取整函数;系数 λ 的取值通过对残差 ϵ' 的联合概率密度进行最大似然估计求得^[23]。记 $x = \ln(G)$ 、 $y = \ln(D)$ 、 $y \sim N(a' + b'x, \beta_b'^2)$,则 $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的联合概率密度函数可表示为

$$f(y) = (2\pi\beta_b'^2)^{-\frac{n}{2}} \cdot \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{[y_i^{(\lambda)} - (a' + b'x_i)]^2}{2\beta_b'^2}\right\} \prod_{i=1}^n y_i^{\lambda-1} \quad (5)$$

对式(5)两边取对数,可得极大似然函数,为

$$L(\lambda) = (\lambda - 1) \sum_{i=1}^n \ln(y_i) - \frac{n}{2} \ln\left\{\sum_{i=1}^n \frac{[y_i^{(\lambda)} - (a' + b'x_i)]^2}{n - 2}\right\} \quad (6)$$

考虑到式(6)求偏导较为困难,故以0.01作为搜索步长,找到使 $L(\lambda)$ 达到最大值的 λ 作为其最优解。

根据 $\ln(D)^\lambda \sim N(a' + b' \ln(G), \beta_b'^2)$ 对每个 G 取值下的 $\ln(D)^\lambda$ 进行 10^6 次蒙特卡洛抽样,并采用式(4)的逆变换得到 $\ln(D)$ 。同时假定构件在某一极限状态(limit state, LS)下的能力服从对数正态分布,对 $\ln(C)$ 也进行 10^6 次蒙特卡洛抽样。对每一次抽样进行判断,结果用指示函数表示为

$$I_k = \begin{cases} 0, & \ln(D) < \ln(C) \\ 1, & \ln(D) \geq \ln(C) \end{cases} \quad (7)$$

则构件在第 j 个损伤状态 S (damage state)下的失效概率为

$$P[S_j|G] = \sum_{k=1}^{10^6} I_k / 10^6 \quad (8)$$

3 背景工程与考虑不确定性的有限元模型

以一座三跨混凝土斜交连续梁桥(3×30 m)为背景,该桥斜交角为30°,主梁结构采用4片预制小箱梁拼装,梁高1.6 m,单个箱梁顶板宽2.4 m、厚18 cm,底板宽1 m、厚18 cm,腹板厚18 cm;支座为板式橡胶支座,全为双向滑动;桥墩墩高15 m,直径为2 m,采用C40混凝土,钢筋种类为HRB400,纵向

钢筋配筋率1.18%,体积配箍率1.1%;基础为直径1.8 m 钻孔灌注桩。桥台与梁端的初始缝隙及伸缩缝自由程均为5 cm,拉索刚度选用70 000 kN·m⁻¹。

采用OpenSees 程序建立三维有限元模型,如图2所示。其中,主梁采用弹性梁柱单元模拟;桥墩采用弹塑性纤维单元模拟;拉索模数伸缩缝采用多段线性本构的truss 单元模拟;支座、桩基、碰撞均采用零长单元模拟,假设碰撞仅发生于垂直桥台方向。混凝土本构采用Kent-Scott-Park 模型,极限压应力和极限压应变分别为 Kf'_c 、 ϵ_{cu} ,其中 $K = 1 + \rho_s f_{yh}/f'_c$, $\epsilon_{cu} = 0.004 + 0.9\rho_s f_{yh}/300$, ρ_s 为体积配箍率, f_{yh} 为箍筋屈服强度, f'_c 为保护层混凝土抗压强度。考虑板式支座的滑动,屈服力 F_y 取为滑动摩擦力,橡胶与

混凝土的摩擦系数取0.25。采用“m法”计算群桩6个方向的刚度并分别赋予土弹簧的6个方向。

在地震易损性分析中,不确定性主要来源于材料不确定性、几何不确定性和地震动不确定性^[24]。以往的研究表明,桥梁结构的地震响应对如下参数的不确定性较为敏感:桥台刚度、混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、上部结构自重、伸缩缝缝宽^[25-26]。因此考虑以上各参数的不确定性,采用拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)技术对各随机变量进行抽样,生成与地震波数目相同的桥梁样本,与地震动时程组合成结构-地震波样本对,计算得到每条地震波作用下的结构关键部位的峰值响应。表1给出了各随机变量的分布模型、均值、方差及上下界。

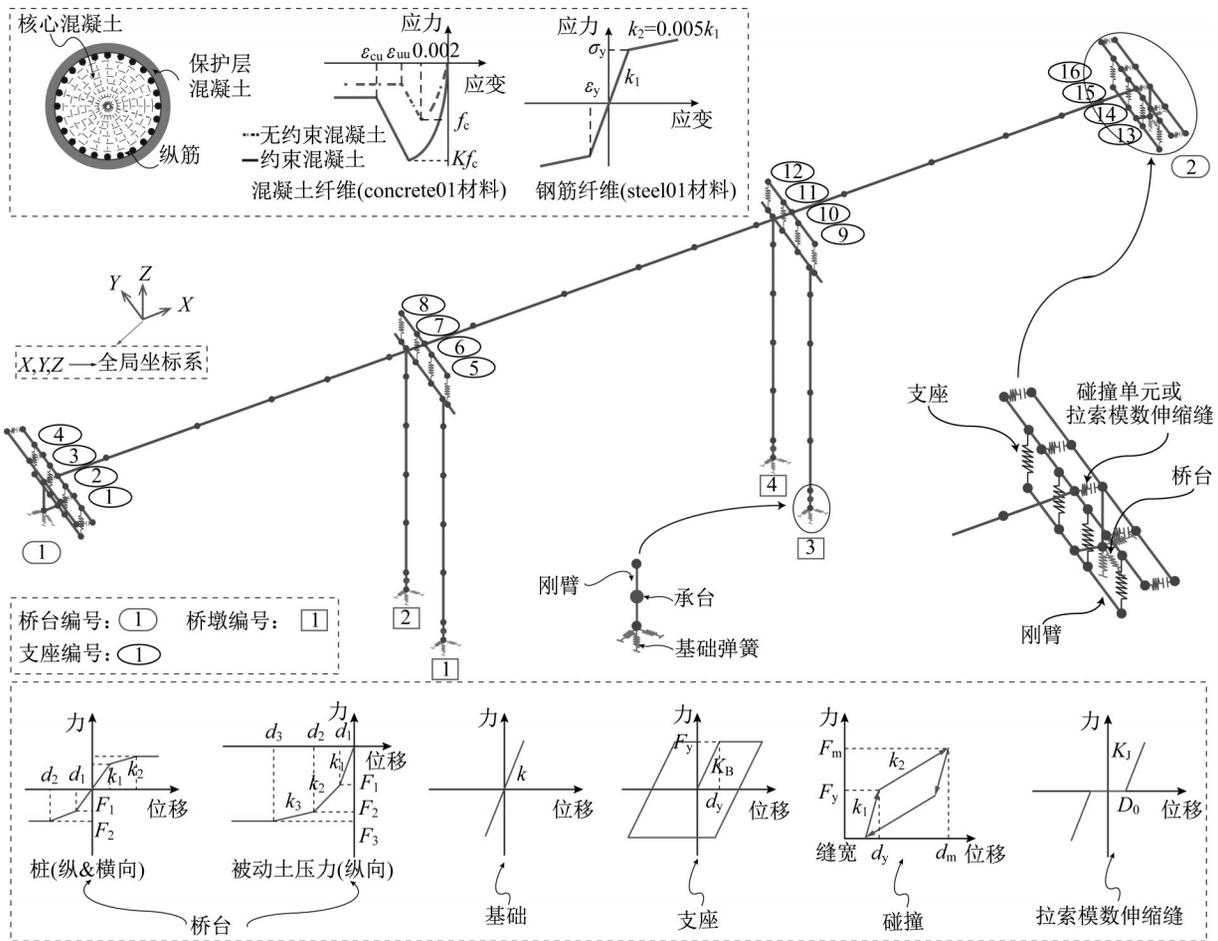


图2 有限元模型示意

Fig.2 Numerical model of prototype bridge

4 地震动时程

对于无脉冲地震动,参考Baker等^[30]提出的非条件谱选波方法,首先按焦驰宇^[31]给出的中美剪切

波速换算公式得到Ⅲ类场地30m深度范围内的土层平均剪切波速 V_{30} ;然后根据Boore等^[32]提出的地震动预测模型生成适用于中国区域震级 $M=7$ 、断层距 $R_b=20$ km、 $V_{30}=215$ m·s⁻¹的反应谱概率分布;最

表1 桥梁模型的不确定因素及其概率分布

Tab.1 Uncertainty factors and their probability distribution of bridge model

项目	钢筋屈服强度/MPa	混凝土抗压强度/MPa	上部结构自重放缩系数	伸缩缝宽/mm	桥台被动刚度/(kN·mm ⁻¹ ·m ⁻¹)	桥台主动刚度/(kN·mm ⁻¹ ·m ⁻¹)	桥台横向刚度/(kN·mm ⁻¹ ·m ⁻¹)
分布模型	对数正态分布	正态分布	均匀分布	正态分布	均匀分布	均匀分布	均匀分布
均值	400	26.8	1	50	20.15	7	7
方差	0.05	0.13	0.057	441	0.248	0.289	0.289
下界	354.3	15.79	0.902	6	11.643	3.562	3.562
上界	457.8	36.31	1.099	108	28.749	10.482	10.482
参考文献	[27]	[28]	[29]	[26]	[29]	[29]	[29]

后从 NGA-West2 强震数据库中按 $M=5\sim 8$ 、 $R_{jb}=0\sim 120$ km、 $V_{30}=150\sim 260$ m·s⁻¹ 选出 100 条符合目标反应谱分布的双向地震动记录。图 3 给出了它们的速度反应谱。

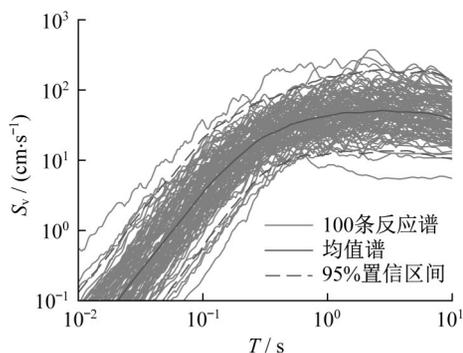


图3 阻尼比5%时无脉冲地震动的速度反应谱

Fig.3 Velocity response spectra of no plus-like ground motions (5% damping)

由于我国地震断裂带分布广泛,随着公路建设规模的增加,一些桥梁难免要建设在靠近断层的位置。在先前的地震中,近断层地震动表现出诸多与远场地震动不同的特点,主要包括上盘效应、方向性效应、速度脉冲效应、滑冲效应、竖向加速度效应等,其中最为突出的是速度脉冲效应^[33]。尽管随着时间的推移地震动数据库正在不断扩大,但具有脉冲效应的地震动记录依然很少。为此本文获取了 NGA-west2 强震数据库中现有的 139 条具有脉冲效应的地震动记录,其速度反应谱见图 4。

5 构件易损性曲线对比

斜交连续梁桥的震害调查发现,其易损构件主要包括墩柱、支座和桥台,且对于剪跨比较大的长柱,一般均发生弯曲破坏。因此工程需求参数选用桥台被动土压力方向位移 δ_p 、桥台主动土压力方向位移 δ_a 、桥台横向位移 δ_t 、支座橡胶层剪切应变 γ_b 、

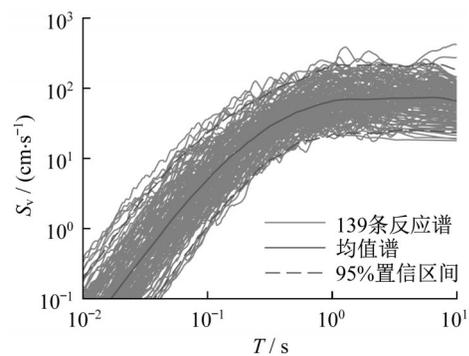


图4 阻尼比5%时脉冲地震动的速度反应谱

Fig.4 Velocity response spectra of plus-like ground motions (5% damping)

墩顶漂移率 D_r 。不同损伤极限状态(即轻微损伤 LS_1 、中等损伤 LS_2 、严重损伤 LS_3 、完全损伤 LS_4)的能力均值和对数标准差见表 2。以式(3)的回归决定系数为评价指标,比较文献[34]中的 20 个地震动强度指标,其中,速度谱强度(velocity spectra intensity, V_{SI})是适用于该斜交桥的最优地震动强度指标。表 3 给出了概率地震需求模型的具体计算结果。

如图 5 所示,对分别采用拉索模数伸缩缝(CMEJ)和普通模数伸缩缝(MEJ)的斜交桥,建立 2 种类型地震动作用下构件易损性曲线。由图可知,采用普通模数伸缩缝时,最易损构件为支座;而采用拉索模数伸缩缝时最易损构件为桥台,且采用拉索模数伸缩缝后桥墩和支座的易损性均显著降低。这主要是因为采用拉索模数伸缩缝后,拉索限制了桥台与主梁间的相对位移,减小了主梁转动角度,使支座位移和支座传递的剪力都显著减小,故而增加了桥台的地震力,而减小了支座和桥墩的地震响应。

由图 6 可知,速度脉冲效应对各构件失效概率的相对排序影响不大,即结构的破坏模式不变,但会增加各构件的损伤概率。采用普通模数伸缩缝时,速度脉冲效应只对支座和桥台易损性具有轻微影响。采用拉索模数伸缩缝时,速度脉冲效应对中等、

表 2 构件的能力极限状态

Tab.2 Capacity limit states of components

EDP	δ_p/mm	δ_a/mm	δ_t/mm	γ_b	$D_r/\%$	
LS ₁	S_c	37.0	9.8	9.8	1.0	0.5
	β_c	0.46	0.70	0.7	0.25	0.25
LS ₂	S_c	146.0	37.9	37.9	1.5	1.0
	β_c	0.46	0.90	0.90	0.25	0.25
LS ₃	S_c		77.2	77.2	2.0	2.0
	β_c		0.85	0.85	0.47	0.46
LS ₄	S_c				2.5	2.5
	β_c				0.47	0.46
参考文献	[29]	[29]	[29]	[7]	[35]	

严重和完全损伤状况的支座和桥墩易损性具有显著影响。相比普通模数伸缩缝,采用拉索模数伸缩缝

时脉冲地震动作用下桥墩在中等、严重和完全损伤状况的失效概率分别增加 0.224、0.294、0.094;支座失效概率分别增加 0.025、0.058、0.098。速度脉冲效应的影响随着损伤状态的提升有增加趋势。

6 震后维修费用曲线

目前常采用体系易损性曲线评价整个桥梁结构的抗震性能,存在结构体系的损伤状态判定困难的问题,无法确定多少构件到达损伤状态 S_i 才认为结构到达损伤状态 S_i 。因此,以结构震后直接经济损失(即桥梁震后维修费用)作为评价桥梁抗震性能的

表 3 各个构件的概率地震需求模型

Tab.3 Probabilistic seismic demand models of each component

构件	拉索模数伸缩缝				普通模数伸缩缝				
	BOX-COX 回归	s	λ	R^2	BOX-COX 回归	s	λ	R^2	
无速度脉冲	δ_p	$0.599\ln(V_{SI})-6.475$	6	1.89	0.646	$0.850\ln(V_{SI})-7.671$	5	0.82	0.718
	δ_a	$0.864\ln(V_{SI})-6.826$	5	0.94	0.724	$0.652\ln(V_{SI})-6.515$	5	0.73	0.547
	δ_t	$1.132\ln(V_{SI})-8.032$	5	0.59	0.799	$0.710\ln(V_{SI})-6.560$	5	1.26	0.735
	γ_b	$0.964\ln(V_{SI})-6.605$	4	0.72	0.845	$1.265\ln(V_{SI})-7.586$	4	0.45	0.881
	D_r	$0.858\ln(V_{SI})-9.593$	8	1.26	0.819	$1.104\ln(V_{SI})-10.569$	8	0.66	0.804
有速度脉冲	δ_p	$0.625\ln(V_{SI})-6.563$	5	0.67	0.620	$0.928\ln(V_{SI})-8.133$	5	0.86	0.579
	δ_a	$0.911\ln(V_{SI})-7.097$	4	0.63	0.673	$0.748\ln(V_{SI})-7.026$	5	0.76	0.568
	δ_t	$1.325\ln(V_{SI})-8.922$	4	0.64	0.772	$0.678\ln(V_{SI})-6.345$	5	1.18	0.601
	γ_b	$1.114\ln(V_{SI})-7.304$	4	0.65	0.808	$1.333\ln(V_{SI})-7.946$	3	0.74	0.831
	D_r	$0.904\ln(V_{SI})-9.841$	7	0.95	0.800	$1.195\ln(V_{SI})-11.104$	7	0.97	0.733

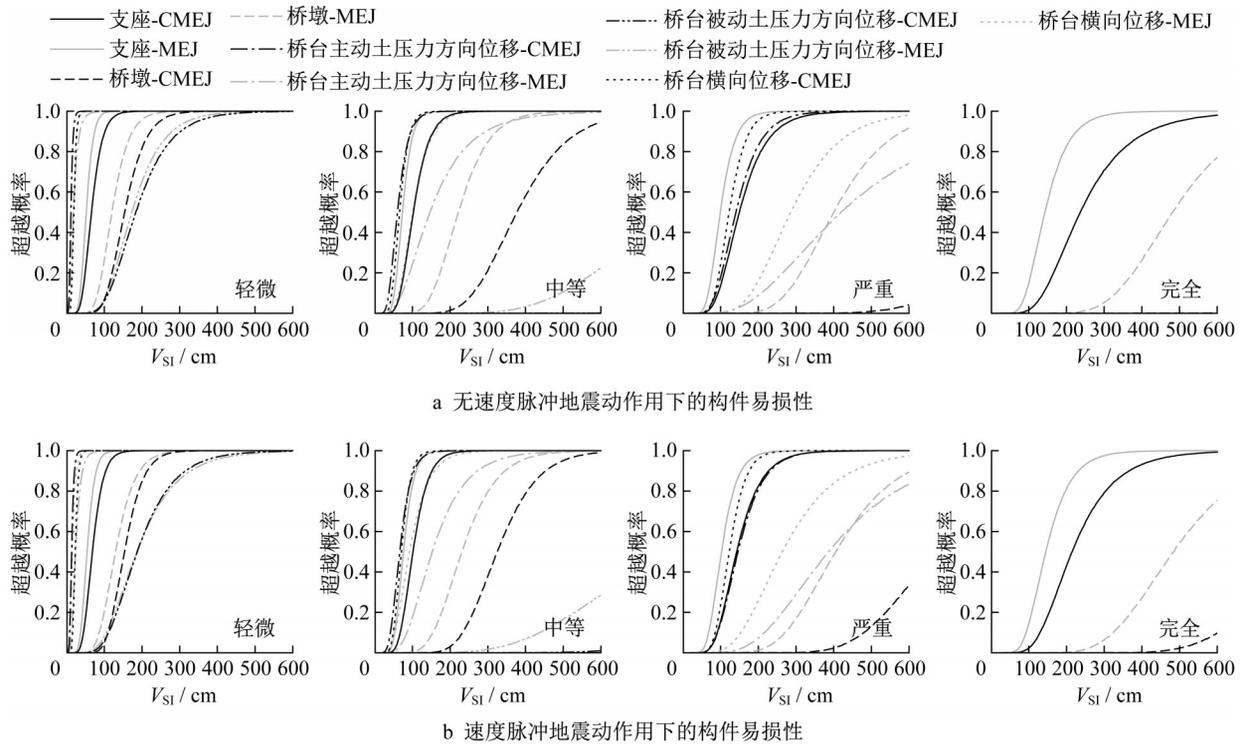


图 5 构件易损性曲线

Fig. 5 Fragility curves of components

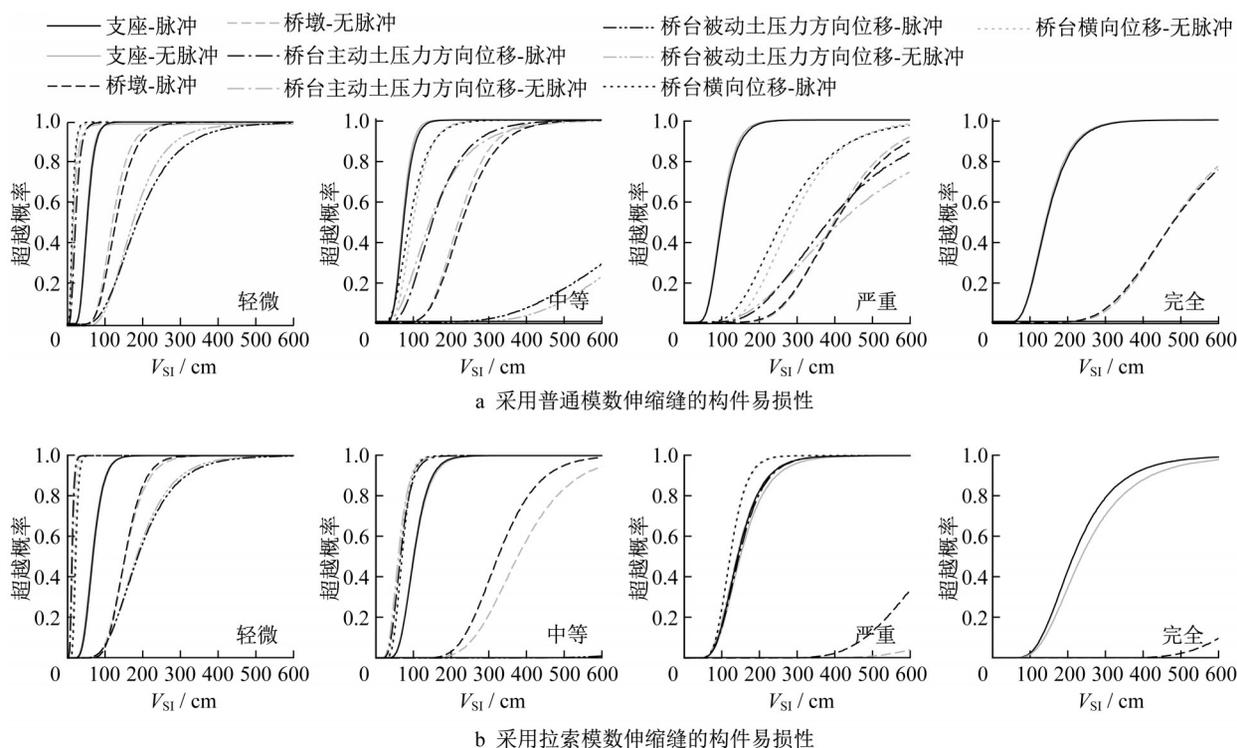


图6 速度脉冲效应影响

Fig. 6 Influence of velocity pulse

依据。震后维修费用的计算方法采用Kameshwar和Padgett^[36]提出的基于构件的全桥维修费用估计方法,通过对每个构件的维修费用求和得到

$$C_T = \sum_{c=1}^{n_c} \sum_{d=1}^{n_{cd}} \sum_{e=1}^{n_{cde}} R \left[\sum_{l=1}^4 \delta(l - S_{cde}) A_{cdl} \right] \quad (9)$$

式中: C_T 为全桥维修费用; n_c 为构件类型总数,本文只考虑桥台、支座和桥墩3类构件; n_{cd} 为同类构件的损伤类型总数; n_{cde} 为同类构件同一损伤类型下的构件总数; $R(\cdot)$ 为根据维修费用均值和变异系数按对数正态分布进行随机抽样的函数。 A_{cdl} 为 c 类构件在损伤类型 d 和损伤状态 l 下采取的修复措施,根据式(10)确定:

$$A_{cdl} = 1 + \sum_{k=1}^{n_{cdk}} I \left[z > \sum_{k=1}^a p_{cdk}(l) \right] \quad (10)$$

式中: $I(\cdot)$ 为指示函数; z 为 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机数; $p_{cdk}(l)$ 为 c 类构件在损伤类型 d 和损伤状态 l 下选取维修方法 k 的概率。 S_{cde} 为第 e 个损伤类型为 d 的 c 类构件的损伤状态,通过式(11)计算:

$$S_{cde} = \sum_{l=1}^4 I(D_{cde} > C_{cdel}) \quad (11)$$

$\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数,取值如式(12)所示:

$$\delta(x) = \begin{cases} 0, & x \neq 0 \\ 1, & x = 0 \end{cases} \quad (12)$$

震后维修费用曲线获取的步骤如下:

步骤1:为各工程需求参数(EDP)建立概率地震需求模型,并计算各构件响应峰值的协方差矩阵。

步骤2:对每一个强度指标取值 IM_i ,都根据协方差矩阵对每个构件的需求进行 10^6 次抽样,同时对能力端按各损伤状态的均值和标准差也进行 10^6 次抽样,并判断每次抽样的各构件损伤状态 S 。

步骤3:按式(9)计算每次抽样的全桥维修费用,得到 G_i 下费用的均值和标准差。

步骤4:循环步骤2、步骤3,得到所有 G 取值下的震后维修费用,最后绘制震后维修费用曲线(C_T - G 曲线),计算得到算例桥的震后维修费用曲线如图7所示。

由图可知,无论是脉冲地震动还是无脉冲地震动作用下,拉索模数伸缩缝的使用均能有效减小全桥的维修费用;全桥维修费用的标准差随地震动强度的增加呈先增大后减小的趋势,这是因为随着地震动强度的增大,各构件损伤程度增加,维修措施中选桥梁重建(维修费用取最大值,即桥梁重建费用)的概率越来越大。

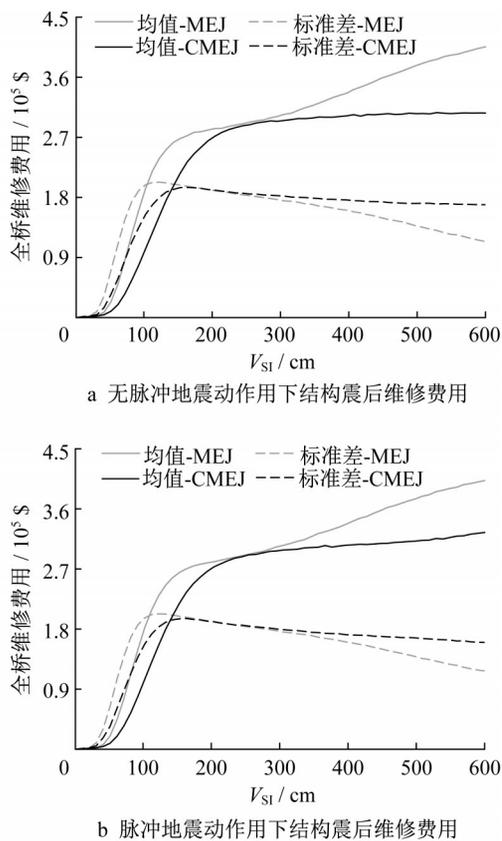


图7 震后维修费用曲线

Fig. 7 Curves of seismic repair cost

7 结论

(1) 提出采用拉索模数伸缩缝限制斜交桥主梁转动以提高其抗震性能的方法,建立了无脉冲地震动和脉冲地震动作用下斜交桥的构件易损性曲线,发现采用普通模数伸缩缝时最易损构件为支座,而采用拉索模数伸缩缝时最易损构件为桥台,且采用拉索模数伸缩缝后桥墩和支座的易损性均显著降低。

(2) 速度脉冲效应不会改变结构的破坏模式,但会增加各构件的损伤概率,对于采用拉索模数伸缩缝的斜交桥,速度脉冲效应会显著增加支座和桥墩的易损性。

(3) 针对体系易损性曲线在由构件损伤状态得到体系损伤状态的过程中存在的局限性,提出以体系维修费用曲线评价桥梁抗震性能,无论是脉冲地震动还是无脉冲地震动作用下,拉索模数伸缩缝的使用均能有效减小全桥的维修费用,全桥维修费用的标准差随地震动强度的增加呈先增大后减小的趋势。

作者贡献说明:

张鹏辉:文章构思、起草与撰写。
冯睿为:文章修改。
周连绪:文章修改。
郭军军:文章修改。
袁万城:文章审阅、基金支持。

参考文献:

- [1] 卢明奇, 杨庆山, 李英勇. 斜度对斜交桥地震作用下的扭转效应影响 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(2): 155.
LU Mingqi, YANG Qingshan, LI Yingyong. Torsion effects of skew angles on skew bridges during earthquakes [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(2): 155.
- [2] YI MENG J, LUI E M. Seismic analysis and assessment of a skew highway bridge [J]. Engineering Structures, 2000, 22(11): 1433.
- [3] BUCKLE I, HUBE M, CHEN G, *et al.* Structural Performance of Bridges in the Offshore Maule Earthquake of 27 February 2010 [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28: S533.
- [4] WU S, BUCKLE IAN G, ITANI AHMAD M, *et al.* Experimental studies on seismic response of skew bridges with seat-type abutments. I: Shake table experiments [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(10): 04019096.
- [5] WU S, BUCKLE IAN G, ITANI AHMAD M, *et al.* Experimental studies on seismic response of skew bridges with seat-type abutments. II: Results [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(10): 04019097.
- [6] ERÖZ M, DESROCHES R. The influence of design parameters on the response of bridges seismically isolated with the Friction Pendulum System (FPS) [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 585.
- [7] BAYAT M, DANESHJOO F, NISTICÒ N, *et al.* Seismic evaluation of isolated skewed bridges using fragility function methodology [J]. Computers and Concrete, 2017, 20(4): 419.
- [8] HEDAYATI DEZFULI F, ALAM M S. Effect of different steel-reinforced elastomeric isolators on the seismic fragility of a highway bridge [J]. 2017, 24(2): 1866.
- [9] SAIIDI M, RANDALL M, MARAGAKIS E, *et al.* Seismic restrainer design methods for simply supported bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2001, 6(5): 307.
- [10] 王军文, 吴天宇, 闫聚考. 斜交简支梁桥地震碰撞反应参数分析 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 209.
WANG Junwen, WU Tianyu, YAN Jukao. Parametric analysis for seismic pounding responses of a skewed simply-supported girder bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 209.
- [11] SEVGILI G, CANER A. Improved seismic response of multisimple-span skewed bridges retrofitted with link slabs [J]. Journal of Bridge Engineering, 2009, 14(6): 452.
- [12] SERDAR N, FOLIĆ R. Vulnerability and optimal probabilistic seismic demand model for curved and skewed RC bridges [J].

- Engineering Structures, 2018, 176: 411.
- [13] YANG C-S W, WERNER S D, DESROCHES R. Seismic fragility analysis of skewed bridges in the central southeastern United States [J]. Engineering Structures, 2015, 83: 116.
- [14] TORBOL M, SHINOZUKA M. Effect of the angle of seismic incidence on the fragility curves of bridges [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 2111.
- [15] GHOTBI A R. Performance-based seismic assessment of skewed bridges with and without considering soil-foundation interaction effects for various site classes [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(3): 357.
- [16] ZAKERI B, PADGETT Jamie E, AMIRI Gholamreza G. Fragility analysis of skewed single-frame concrete box-girder bridges [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(3): 571.
- [17] GAO K, YUAN W C, CAO S, *et al.* Seismic performance of cable-sliding modular expansion joints subject to near-fault ground motion [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2015, 12(7): 1397.
- [18] GAO K, YUAN W C, DANG X Z. Development and experimental study on cable-sliding modular expansion joints [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 61(6): 795.
- [19] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER RONALD O, *et al.* Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526.
- [20] BAKER J W. Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1861.
- [21] KARAMLOU A, BOCCHINI P. Quantification of the approximations introduced by assumptions made on marginal distributions of the demand for highway bridge fragility analysis [C]// proceedings of the Second International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM 2014). Liverpool: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2014: 1321-1330
- [22] BOX G E P, COX D R. An analysis of transformations [J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1964, 26(2): 211.
- [23] COLLINS S. Prediction techniques for Box - Cox regression models [J]. Journal of Business & Economic Statistics, 1991, 9(3): 267.
- [24] MONTEIRO R, DELGADO R, PINHO R. Probabilistic seismic assessment of RC bridges: Part I — Uncertainty Models [J]. Structures, 2016, 5: 258.
- [25] PADGETT J E, GHOSH J, DUEÑAS-OSORIO L. Effects of liquefiable soil and bridge modelling parameters on the seismic reliability of critical structural components [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9(1): 59.
- [26] PAN Y, AGRAWAL A K, GHOSN M. Seismic fragility of continuous steel highway bridges in new york state [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(6): 689.
- [27] CELAREC D, DOLŠEK M. The impact of modelling uncertainties on the seismic performance assessment of reinforced concrete frame buildings [J]. Engineering Structures, 2013, 52: 340.
- [28] MEHDIZADEH M. Uncertainty treatment in performance based seismic assessment of typical bridge classes in United States [D]. Florida: University of Central Florida, 2014.
- [29] NIELSON B G, DESROCHES R. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and southeastern United States [J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(3): 615.
- [30] BAKER J W, LEE C. An improved algorithm for selecting ground motions to match a conditional spectrum [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(4): 708.
- [31] 焦驰宇. 基于性能的大跨斜拉桥地震易损性分析 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
JIAO Chiyu. Seismic fragility analysis of long-span cablestayed bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [32] BOORE D M, STEWART J P, SEYHAN E, *et al.* NGA-West2 equations for predicting PGA, PGV, and 5% damped PSA for shallow crustal earthquakes [J]. Earthquake Spectra, 2013, 30(3): 1057.
- [33] HAMIDI H, KHOSRAVI H, SOLEIMANI R. Fling-step ground motions simulation using theoretical-based Green's function technique for structural analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 115: 232.
- [34] 张鹏辉, 郭军军, 冯睿为, 等. 连续梁桥的矢量地震动强度指标选取 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 68.
ZHANG Penghui, GUO Junjun, FENG Ruiwei, *et al.* Selection of vector-valued ground motion intensity measures for continuous girder bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3): 68.
- [35] JEON J-S, SHAFIEEZADEH A, LEE D H, *et al.* Damage assessment of older highway bridges subjected to three-dimensional ground motions: Characterization of shear - axial force interaction on seismic fragilities [J]. Engineering Structures, 2015, 87: 47.
- [36] KAMESHWAR S, PADGETT J E. Characterizing and predicting seismic repair costs for bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(11): 04017083.