

亢兴军,张荣凤,常敬宇,等.基于损伤分析的旧曲线梁桥抗震性能评估[J].地震工程学报,2021,43(3):636-643.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.636

QI Xingjun, ZHANG Rongfeng, CHANG Jingyu, et al. Seismic Performance Evaluation of Old Curved Bridges Based on Damage Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(3): 636-643. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.636

基于损伤分析的旧曲线梁桥抗震性能评估

亢兴军¹, 张荣凤¹, 常敬宇¹, 王珊珊², 丁晓岩²

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101;

2. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098)

摘要: 曲线桥梁在役期间可能面临地震灾害,导致结构损坏甚至坍塌,为了评估在役桥梁的抗震性能,提出基于损伤分析的曲线梁桥抗震性能评估方法。建立旧曲线梁桥有限元模型,基于损伤分析的原理,提出适合曲线梁桥地震响应特性的构件损伤模型,在全桥有限元模型中输入不同类型地震动,计算各构件的损伤指数,并结合旧桥检算系数,由各构件损伤指数综合得到桥梁的整体损伤指数。结果表明:不同地震动下主梁会发生碰撞破坏,桥梁两端的支座容易发生移位,桥墩沿横桥向或顺桥向均会产生位移;不同地震动对主梁、支座、桥墩等构件造成的损害程度有较大差异,各构件的地震响应会影响桥梁整体结构的抗震性能,其中桥墩对桥梁整体抗震性能的影响最大,桥墩位移超过极限值可能导致倒塌;主梁反复碰撞会加剧桥梁的破坏程度,桥梁两端支座在地震作用下更容易发生损坏。

关键词: 损伤指数; 损伤状态; 抗震性能; 旧曲线梁桥

中图分类号: U442.5+5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)03-0636-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.03.0636

Seismic Performance Evaluation of Old Curved Bridges Based on Damage Analysis

QI Xingjun¹, ZHANG Rongfeng¹, CHANG Jingyu¹, WANG Shanshan², DING Xiaoyan²

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China;

2. Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China)

Abstract: Curved bridges may bear earthquake disasters during service, resulting in structural damage or even collapse. To evaluate the seismic performance of existing bridges, a seismic performance evaluation method of curved girder bridges based on damage analysis was proposed in this paper. The finite element model of an old curved girder bridge was established, then based on the principle of damage analysis, the component damage model which can describe the seismic response characteristics of curved girder bridge was proposed. The damage indexes of each component of the bridge were calculated by inputting different ground motions into the finite element model. Combined with the checking coefficient of the old bridge, the whole damage index of the bridge was inferred from the damage index of each component. The results showed that: (1) Un-

收稿日期: 2019-10-09

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(2020B69); 山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目(XTM201904)

第一作者简介: 亢兴军(1974-), 男, 教授, 主要从事桥梁健康监测与抗震防灾研究。E-mail: qxj123@163.com。

der different ground motions, the main girder will cause impact damage, the bearings at both ends of the bridge are prone to shift, and the piers will cause displacements both along the transverse and longitudinal direction of the bridge. (2) The damage degree of main girder, bearing, bridge pier, and other components caused by different ground motions is quite different; the seismic response of each component will affect the seismic performance of whole bridge, among which, the pier has the greatest impact, and the pier displacement exceeding the limit value may lead to collapse; (3) Repeated collision of the main girder will aggravate the damage degree of bridge, and the bearings at both ends of the bridge are more likely to be damaged under earthquake.

Keywords: damage index; damage state; seismic performance; old curved bridge

0 引言

桥梁抗震性能研究方法目前有能力谱分析法、结构损伤分析法^[1]、经验统计法、动力实验法等^[2]。国内外相关规范推荐的结构抗震性能分析方法有非线性静力分析和增量动力分析等^[3]。能力谱法中最有效的是 Pushover 方法,但该方法需要以大量数据为基础建立破坏准则,耗时耗力;经验统计法具有快速确定桥梁损伤等级的优点,但也需要大量的统计工作;动力实验法通过现场实测得到模态参数,进而判断桥梁的抗震能力,在实测过程会耗费大量人力物力。

结构损伤分析法首先建立损伤模型,通过仿真实验输入地震动,对各构件进行抗震能力分析,得到损伤指数从而对桥梁进行抗震性能评估。该方法在评估过程中计算量小,易于操作,其分析结果也较合理,因此国内外许多学者利用该分析方法对桥梁及其他结构物进行了抗震分析。

Ghobarah 等^[4]提出采用震后结构的预期损伤状态来衡量结构的抗震能力,利用损伤指数量化损伤程度,明确结构的损伤状态。Kim 等^[5]采用双参数正态分布函数,对混凝土桥梁加固前后进行了损伤分析,量化了加固对桥梁易损性的改善程度。Mahboubi 等^[6]采用基于位移、基于能量和基于刚度的损伤指标,研究了地震对钢筋混凝土桥墩的损伤。王丰等^[7]采用简化的 IDA 方法给出了损伤指数与结构反应限值和抗震三水准之间的对应关系,通过结构的损伤指数期望值评估了结构地震损伤等级。郑山锁等^[8]建立了能够反映构件到整体之间的钢筋混凝土核心筒地震损伤模型,并验证了模型的可靠性。徐强等^[9]基于结构整体损伤指标对结构整体进行抗震损伤评估。陆本燕等^[10]对钢筋混凝土桥墩展开研究,对比不同的地震损伤模型,得出 Park & Ang 模型能够较好代表实际损伤的结论。邹顺^[1]通过单参数、双参数、改进地震损伤等三种模型计算

结构损伤值,得出双参数损伤模型计算结果更可靠的结论。众多文献表明,利用构件和结构整体的损伤模型对桥梁进行抗震分析,从而对桥梁结构进行抗震性能评估是一种有效手段。

曲线梁桥因其能够很好地解决地势和路线走向等问题,被广泛应用于桥梁工程建设中,但因曲线半径的存在,地震作用下会出现一些弯扭耦合变形的复杂震害,目前并没有系统的曲线梁桥抗震性能评估方法。本文选取某桥梁的曲线段,建立曲线梁桥有限元模型,利用损伤分析方法,得到构件的损伤指数,分析桥梁曲线段构件损伤的程度,进而采用加权组合法对桥梁结构整体抗震性能进行评估。

1 桥梁地震响应分析

1.1 损伤参数确立

现有的结构损伤识别方法中,损伤的模拟方法大多采用人为指定结构某处发生某种程度的损伤^[11]。合理的损伤指标对于研究桥梁结构和构件的损伤过程尤为重要,损伤指标通常由变形、刚度退化、滞回耗能或其之间相互组合形式定义;损伤程度由损伤指数 DM 量化。损伤指数 DM 的取值范围一般为 $0 \sim 1$,当 DM 等于 0 时表示结构或构件处于无损状态;当 DM 大于等于 1 时表示结构或构件完全破坏。

桥梁在地震作用下破坏形式多种多样,其中上部结构破坏形式有位移、碰撞、落梁等,下部结构有桥墩破坏、桥台破坏、基础破坏等,连接处有支承滑移、支座破坏等^[7]。本文选择主梁、支座、桥墩三类构件进行损伤分析。

1.2 地震损伤模型

(1) 桥梁构件损伤模型

曲线桥主梁在地震动作用下通常发生面内旋转、落梁、碰撞等破坏。本文对主梁与相邻联主梁在伸缩缝处碰撞情况进行研究,在碰撞力作用下梁体

的应力应变会发生变化,因此选取基于最大碰撞压应变的地震损伤模型作为主梁损伤模型,该模型损伤指数表达为:

$$DM=\frac{\epsilon}{\epsilon_{cu}}$$

(1)

式中: ϵ 表示地震动作用下主梁产生的最大碰撞压应变; ϵ_{cu} 表示主梁混凝土材料的极限压应变。

本文桥梁采用普通盆式橡胶支座,相关文献表明基于构件最大位移的地震损伤模型在研究支座变形、确定其损伤指数时可以很好地反映其损伤状态。该模型的损伤指数表达式为:

$$DM=\frac{\delta_m}{\delta_u}$$

(2)

式中: δ_m 为地震动作用下支座实际最大变形; δ_u 为支座允许最大变形。

Park-Ang 双参数地震损伤模型能较为准确地反映弯压构件的实际损伤情况,因此本文选择 Park-Ang 双参数地震损伤模型作为桥墩损伤模型。具体表达式为:

$$DM=\frac{\delta_m}{\delta_u}+\beta\frac{\int d\epsilon}{Q_y\delta_u}$$

(3)

式中: δ_m 为地震作用下构件最大位移; δ_u 为构件极

限位移; $\int d\epsilon$ 为构件在地震作用下的累积滞回耗能; Q_y 为构件屈服强度; β 为滞回耗能因子。

(2) 桥梁整体结构地震损伤模型

桥梁整体结构的损伤评价一般分为两种:一种将桥梁看作一个整体,通过对比桥梁地震前后的力学性能来进行整体结构的抗震性能评估;一种通过分析桥梁各构件的地震响应,对各构件的损伤指数进行加权组合得到桥梁整体结构的损伤指数,从而进行桥梁整体结构的抗震性能评估。

本文选取后者进行曲线梁桥整体结构的抗震性能评估。P.Fajfar 给出了整体结构的损伤模型,该模型依据构件的损伤指数便可求得相应结构整体的损伤指数,简单明了。具体表达式为:

$$DM_T=\sum\frac{DM_i}{\sum DM_i}DM_i=\frac{\sum DM_i^2}{\sum DM_i}$$

(4)

式中: DM_T 表示桥梁整体结构的损伤指数; DM_i 表示第 i 个构件的损伤指数。

1.3 桥梁构件损伤指数与损伤等级的对应关系

桥梁构件的损伤指数能够反映构件的受损程度。本文将构件损伤分为 5 个等级,具体损伤指数与损伤等级的关系如表 1 所列^[12-13]。

表 1 桥梁构件损伤等级及损伤指数范围

Table 1 Damage grade and damage index range of bridge members					
损伤等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏
主梁	$0\leqslant D<0.1$	$0.1\leqslant D<0.33$	$0.33\leqslant D<0.61$	$0.61\leqslant D<1.0$	$D=1.0$
支座	$0\leqslant D<0.025$	$0.025\leqslant D<0.15$	$0.15\leqslant D<0.5$	$0.5\leqslant D<1.0$	$D=1.0$
桥墩	$0\leqslant D<0.1$	$0.1\leqslant D<0.25$	$0.25\leqslant D<0.4$	$0.4\leqslant D<1.0$	$D=1.0$

1.4 桥梁整体结构损伤指数与损伤等级的对应关系

桥梁整体结构损伤指数与损伤等级对应关系研

究结果较为丰富,本文中具体对应关系如表 2 所列^[12-13]。

表 2 桥梁结构损伤等级与损伤指数对应关系

Table 2 Correspondence between damage grade and damage index of bridge structure

损伤等级	震害描述	损伤指数
基本完好	桥梁结构整体基本完好,结构功能正常,基本未受影响。	0~0.2
轻微破坏	桥梁结构出现允许范围内的裂缝,结构承载能力基本未受影响,经小修即可恢复正常使用。如桥面伸缩缝变化,主梁面内轻微旋转,墩台轻微变位等。	0.2~0.4
中等破坏	桥梁结构损伤较严重,如墩台轻微变位,桥墩出现细小裂缝,活动支座倾斜、移位,固定支座损坏,主梁面内旋转等,桥梁结构承载能力下降,修复后可正常使用。	0.4~0.65
严重破坏	桥梁主要结构破碎、断裂,如梁体出现较大裂缝、墩台严重倾斜甚至断裂等,桥梁跨度发生明显变化,结构承载能力明显降低,需大修后才能继续使用。	0.65~0.9
倒塌	墩台断裂、倒塌,发生落梁,桥梁完全丧失正常使用功能。	0.9~1.0

2 工程实例及计算模型

2.1 工程背景

某市高架桥第一联和第三联为直线连续梁桥,

第二联为曲线连续梁桥,圆曲线半径 55 m,本文对该桥的第二联曲线梁桥展开研究。该桥上部结构为单箱单室现浇预应力混凝土连续箱梁,纵向跨径布置均为 3×20 m,桥梁宽度为 8.8 m,主梁采用 C40

混凝土。桥墩高度 10 m,为钢筋混凝土圆形截面墩,墩直径 1.3 m,采用 C30 混凝土。全桥支座采用 JPZ(I)型普通盆式橡胶支座^[14]。

2.2 模型建立

采用 Midas/Civil 有限元软件建立模型,上部结构采用梁单元模拟,为使计算结果更加准确,单元长度取 0.3 m,材料参数取现场实测值。主梁与挡块的碰撞作用采用间隙单元模拟,桥梁挡块尺寸为 1 m×0.3 m×0.3 m,碰撞间隙 1 cm。桥梁有限元模型平面图如图 1 所示。

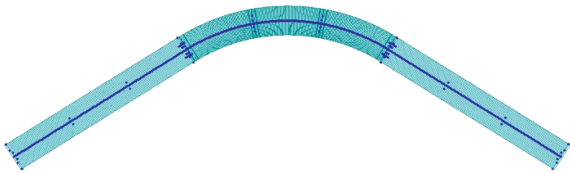


图 1 桥梁有限元模型平面图
Fig.1 Plan of finite element model of bridge

使用该模型模拟碰撞情况之前,需要先确定碰撞弹簧刚度。参考文献[15-16],不考虑碰撞过程的能量损失。碰撞弹簧刚度的计算式为:

$$K = \frac{EA}{L}$$
(5)

式中: E 为挡块混凝土弹性模量; A 为主梁挡块接触面积; L 为端横梁长度。由式(5)可得挡块模型弹簧刚度为 1.09×10^6 kN/m。

桩底完全固结,桩长为 25 m,考虑桩土相互作用,采用“m”法结合各桩周围土质、桩长以及桩的计算宽度等计算桩上各节点的土弹簧刚度。桥梁三维计算模型如图 2 所示。

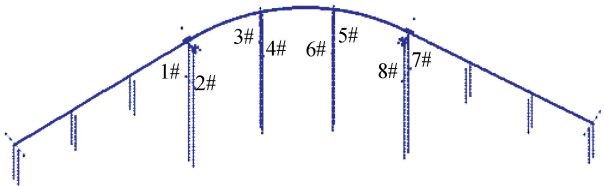


图 2 全桥三维计算模型
Fig.2 Three-dimensional computing model of full bridge

参考《JPZ 系列新型盆式橡胶支座设计指南》与《公路桥梁盆式支座(JT/T 391-2009)》,得到普通盆式橡胶支座性能参数如表 3 所列。

表 3 盆式橡胶支座性能参数

Table 3 Performance parameters of basin rubber bearing

支座	型号	支座高度 /mm	临界水平 位移/mm	临界竖向 位移/mm	竖向承载力 /kN	水平承载力 /kN
固定支座	JPZ(I)-6-GD	135	-	2.7	6 000	600
单向活动支座(一)	JPZ(I)-6-DX	160	3	3.2	6 000	600
单向活动支座(二)	JPZ(I)-3-DX	135	3	2.7	3 000	300

注:水平承载力取竖向承载力的 10%

2.3 地震动的选择

为使计算结果更具准确性和适用性,选择三种不同的地震动对结构进行分析。第一种为反应谱周期在 1 s 左右的低频地震动-天津地震动,第二种为反应谱的周期 0.5 s 左右的中频地震动-Anderson 地震动;第三种为反应谱周期在 0.2 s 左右的高频地震动-Taft 地震动。沿着曲线梁桥的 X、Y、Z 坐标方向分别输入地震动的 E-W 向、N-S 向、V 向三向地震动,每种地震动在 E-W 向的地震动峰值加速度按照地震烈度分别调整为 100 gal、200 gal、400 gal,峰值加速度根据 1(E-W 向):0.85(N-S 向):0.65(V 向)的比例调整。

3 构件损伤分析

3.1 主梁损伤分析

主梁的碰撞角点以及挡块位置具体如图 3、图 4 所示。利用主梁碰撞后的应力响应,进行应变损伤分析。

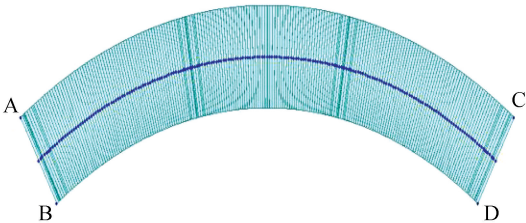


图 3 主梁碰撞角点示意图
Fig.3 Schematic diagram of main girder collision corner

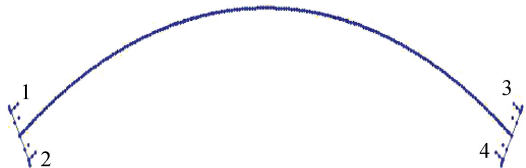


图 4 挡块位置示意图
Fig.4 Schematic diagram of main girder restraint block position

输入三种不同地震动后分析主梁的碰撞力,结果表明在三种地震动对应的大震以及天津地震动中

震作用下,主梁与相邻联主梁发生碰撞,且与各挡块发生碰撞。碰撞可能会使主梁发生面内旋转,也会使得应力应变发生突变。在主梁与挡块之间设置三处碰撞接触点,计算应力应变时,挡块碰撞力取接触点最大碰撞力的三倍,接触面面积为 0.3 m²,计算结果如表 4 所列。

表 4 不同强度地震动作用下主梁与各挡块之间碰撞压应力及压应变
Table 4 Impact compressive stress and compressive strain between main beam and each block under ground motions of different intensities

挡块	地震响应	天津地震动			Anderson 地震动			Taft 地震动		
		100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal
1	应力/MPa	3.9	9.5	21.4	/	/	8.1	0.9	3.7	9.3
	应变/ $\mu\epsilon$	98.7	254	637	/	/	215	22.9	93.9	247
2	应力/MPa	7.0	8.8	12.1	/	2.4	4.7	1.0	3.9	8.2
	应变/ $\mu\epsilon$	184	235	331	/	61.7	122	25.9	100	217
3	应力/MPa	6.4	4.8	24.1	/	/	7.2	1.9	5.9	5.5
	应变/ $\mu\epsilon$	168	124	738	/	/	189	47.6	154	143
4	应力/MPa	4.9	5.7	15.8	/	/	6.3	/	5.4	7.2
	应变/ $\mu\epsilon$	128	148	443	/	/	164	/	141	188

由表 4 知在各地震动作用下,主梁与各挡块之间发生多次不同程度的碰撞,压应变因此突变且变化幅度很大;3#挡块处压应变数值最大为 738 $\mu\epsilon$,发生于天津地震动的大震作用下,结合表 5 知,该挡块处在轻微破坏损伤状态中。在 Anderson 地震动和 Taft 地震动作用下,各挡块碰撞压力以及压应变很小,甚至低震作用下没有出现碰撞。但碰撞发生时是循环往复和不断变化的,因此即使压应变没有达到完全破坏的损坏状态,但是反复的激烈碰撞也会对结构的安全性产生威胁。

表 5 混凝土 C40 试件损伤状态与划分标准
Table 5 Damage state and division standard of concrete specimen C40

压应变	$0 \leq \epsilon < 3.3 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4} \leq \epsilon < 1.1 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3} \leq \epsilon < 2.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-3} \leq \epsilon < 3.3 \times 10^{-3}$	$\epsilon \geq 3.3 \times 10^{-3}$
损伤状态	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏

3.2 支座损伤分析

在地震作用下,无论沿横桥向还是顺桥向,支座约束方向受到的剪切力容易达到屈服强度。因此首先分析支座沿约束方向的剪力判断其是否达到屈服,再通过变形成得到损伤指数。该桥各支座布置示意如图 5 所示,采用滞后系统模拟盆式支座滑动方

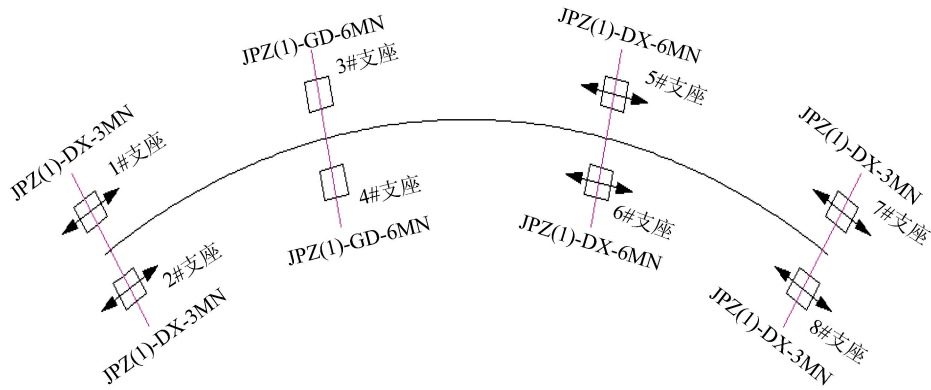


图 5 支座布置示意图
Fig.5 Schematic diagram of bearing position

向和约束方向的滞回曲线。地震作用下,支座沿横桥向及顺桥向会发生位移,位移过大将会威胁桥梁结构的安全性。各支座约束方向的最大位移如表 6 所列。结合表 6 和表 7 知,在天津地震动大震作用下,1#、2#、7# 和 8# 支座位移超过 40 mm,出现了完全破坏;在天津地震动中震作用下和 Taft 地震动大震作用下,部分支座出现严重破坏;Anderson 地震动作用下,支座最严重的损伤状态为中等破坏。由此可知,使支座出现破坏最严重的地震动为低频地震动。

表 6 不同强度地震动作用下支座约束方向最大位移

Table 6 Maximum displacement of bearing in constraint direction under ground motions of different intensities

支座 编号	天津地震动下位移/mm			Anderson 地震动下位移/mm			Taft 地震动下位移/mm		
	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal
1	12.8	29.3	42.9	0.6	3.7	15.8	0.6	8.1	21.9
2	12.7	29.9	43.2	0.5	3.7	15.9	0.6	8.1	21.8
3X	0.4	0.7	15.3	0.4	0.8	1.0	0.3	0.6	0.7
3Y	0.2	0.3	0.6	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
4X	0.4	0.7	0.9	0.4	0.6	1.1	0.3	0.6	0.8
4Y	0.2	0.3	0.8	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3
5	0.6	0.8	23.8	0.5	0.9	1.3	0.4	0.7	0.9
6	0.5	0.8	1.2	0.5	0.6	2.0	0.4	0.6	0.8
7	4.4	8.5	91.5	0.7	1.0	10.3	0.5	6.1	17.4
8	4.2	8.2	92.7	0.4	0.6	10.6	0.5	6.0	17.4

表 7 盆式支座约束方向损伤状态及判断标准^[13]

Table 7 Damage condition and criterion of restraint direction of basin bearing^[13]

位移/mm	$\delta_m < 1$	$1 \leq \delta_m < 6$	$6 \leq \delta_m < 20$	$20 \leq \delta_m < 40$	$\delta_m \geq 40$
损伤状态	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	完全破坏

3.3 桥墩损伤分析

地震作用下,桥墩的墩顶会沿着横桥向和顺桥向发生位移,过大的位移可能造成桥墩破坏,桥墩破坏

严重会对桥梁整体结构带来倒塌的威胁,因此选择桥墩的墩顶位移进行构件损伤分析。不同强度地震动作用下墩顶沿横桥向及顺桥向最大位移如表 8 所列。

表 8 不同强度地震动作用下墩顶最大位移

Table 8 Maximum displacement of pier top under ground motions of different intensities

墩号及 方向	天津地震动下位移/cm			Anderson地震下位移/cm			Taft地震动下位移/cm			
	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal	
1	横桥向	2.23	5.37	/	1.53	3.64	7.1	1.15	2.47	4.39
	顺桥向	4.36	7.19	/	0.33	1.19	4.37	0.62	2.78	7.90
2	横桥向	2.28	5.14	/	1.55	3.74	7.25	1.17	2.54	4.46
	顺桥向	4.40	7.21	/	0.28	1.02	4.09	0.62	2.71	7.87
3	横桥向	2.64	8.07	/	1.90	5.89	10.8	1.44	3.7	6.37
	顺桥向	8.30	9.7	/	0.71	1.84	5.59	2.64	5.48	11.3
4	横桥向	2.62	8.02	/	1.88	5.99	10.7	1.44	3.69	6.32
	顺桥向	8.30	9.93	/	0.71	1.69	5.57	2.64	5.49	11.3
5	横桥向	2.93	9.24	/	2.11	7.36	12.7	1.59	4.34	7.80
	顺桥向	8.23	16.5	/	0.47	1.73	5.01	1.18	5.01	15.3
6	横桥向	2.92	9.12	/	2.13	7.42	12.8	1.57	4.29	/
	顺桥向	6.19	11.2	/	0.54	1.57	5.26	1.22	2.87	/
7	横桥向	3.19	10.4	/	2.07	7.69	12.5	1.51	4.10	8.50
	顺桥向	5.62	11.3	/	0.41	1.52	4.32	0.67	3.63	9.92
8	横桥向	3.22	10.3	/	2.10	7.71	12.5	1.52	4.13	8.47
	顺桥向	5.63	11.5	/	0.37	1.58	4.40	0.68	3.57	10.0

由表 8 可知,在三种不同强度地震动作用下,各桥墩墩顶沿横桥向和顺桥向均产生了位移。天津地震动中震作用下出现了顺桥向最大位移;Anderson 地震动作用下,横桥向位移均大于纵桥向位移;而天津地震动对应的大震作用下墩顶位移过大,表中未给出具体位移数值,桥墩已经发生倒塌。分析天津地震动下墩顶位移极限,结果表明:中震作用下,3#~8# 桥墩墩顶位移已经超过了各墩柱墩顶极限位

移,墩柱完全破坏;大震作用下,所有墩柱墩顶位移均已超过极限位移,墩柱均发生完全破坏。

4 旧曲线梁桥抗震性能评估

《公路桥梁承载能力检测评定规程(JTG/T J21-2011)》建议,在计算钢筋混凝土桥梁结构承载能力极限状态抗力效应时,应根据桥梁实际检测结果,引入检算系数 Z_1 进行修正计算。对于钢筋混

凝土桥梁的修正同时需要考虑结构或构件的材质强度、结构自振频率及表观缺损状况等检测评定结果。

结合桥梁的检测数据,本文得到的各构件承载力检
算系数如表 9 所列。

表 9 桥梁各构件检算系数 Z_1 值

Table 9 Z_1 value of check coefficient of each bridge component						
检测指标		缺损状况	材质强度	自振频率	评定标度 D	检算系数 Z_1
权重		0.4	0.3	0.3		
主梁		2	1	2	1.7	1.165
支座		2	-	-	-	1.115
桥墩	1 #	2	1	2	1.7	1.115
	2 #	2	1	2	1.7	1.115
	3 #	2	1	2	1.7	1.115
	4 #	2	1	2	1.7	1.115
	5 #	2	1	2	1.7	1.115
	6 #	2	1	2	1.7	1.115
	7 #	2	1	2	1.7	1.115
	8 #	2	1	2	1.7	1.115

4.1 构件损伤指数与损伤状态

引入检算系数结合式(1),得到修正后的各地震

动作用下对应的主梁损伤指数及主梁损伤状态,具
体如表 10 所列。

表 10 修正后主梁损伤指数及对应损伤状态

Table 10 Damage index and corresponding damage state of main girder after modification					
地震动	峰值加速度	应力/MPa	应变	损伤指数 DM	损伤状态
天津地震动	100 gal	7.01	1.84e-4	0.048	基本完好
	200 gal	9.51	2.54e-4	0.066	基本完好
	400 gal	24.08	7.38e-4	0.192	轻微破坏
Anderson 地震动	100 gal	/	/	0	基本完好
	200 gal	2.43	6.17e-5	0.016	基本完好
	400 gal	8.14	2.15e-4	0.056	基本完好
Taft 地震动	100 gal	1.88	4.76e-5	0.012	基本完好
	200 gal	5.92	1.54e-4	0.040	基本完好
	400 gal	9.28	2.47e-4	0.064	基本完好

由表 10 可知,主梁在天津地震动对应的大震作用下出现轻微破坏损伤,其他地震动作用下处于基本完好的状态。

同样利用检算系数 Z_1 并结合式(2),得到支座的损伤指数与对应的损伤状态,量化后的结果显示支座的损伤状态与支座在地震动作用下的位移大小基本一致,一部分支座仍处于基本完好状态,一部分支座发生了轻微破坏和中等破坏,还有一部分支座发生了严重破坏甚至完全破坏。对于桥墩,引入检算系数 Z_1 并结合式(3),得到桥墩的损伤指数表明,在天津地震动作用下,桥梁各墩柱的损伤破坏情况较严重,除 5 # 墩柱完全破坏发生倒塌外,其他各墩柱均发生严重破坏,而在其对应的大震作用下,所有桥墩都已经完全破坏,发生倒塌。在 Anderson 地震动及 Taft 地震动作用下,各桥墩损伤破坏程度随地震强度等级的增加而逐渐加重,除在 Taft 地震动对应的大震作用下 5 #、6 # 墩柱发生严重破坏外,其他情况下各墩柱仅发生不同程度的破坏,均未发生倒塌。

4.2 桥梁整体结构抗震性能评估

依据桥梁各构件的损伤指数,参照规范结合式(4),对桥梁整体结构损伤状况进行分析,给出相应损伤指数及损伤状态,具体如表 11 所列。

由表 11 可知,在天津地震动作用下,桥梁整体结构损伤最为严重,小震和中震分别对桥梁造成中等破坏与严重破坏,大震作用下桥梁发生倒塌;在

表 11 桥梁整体结构损伤指数及相应损伤状态

Table 11 Damage index and corresponding damage state of the whole structure of bridge									
墩号及 方向	天津地震动			Anderson 地震动			Taft 地震动		
	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal	100 gal	200 gal	400 gal
损伤指数	0.40	0.66	1.00	0.11	0.38	0.63	0.11	0.25	0.68
损伤状态	中等破坏	严重破坏	倒塌	基本完好	轻微破坏	中等破坏	基本完好	轻微破坏	严重破坏

Anderson 与 Taft 地震动对应的小震与中震作用下,桥梁整体结构分别处于基本完好与轻微破坏的状态,大震作用下分别出现中等破坏与严重破坏的现象。

5 结论

建立旧曲线梁桥有限元模型,输入不同频谱特征的地震动,采用损伤分析方法对桥梁的各主要构件以及桥梁整体结构进行抗震性能评估,得到如下结论:

(1) 地震作用下,曲线梁桥主梁发生碰撞,低频地震动作用下主梁激烈反复碰撞会使结构发生破坏;位于桥梁两端的支座在地震作用下更容易发生位移变形;桥墩墩顶最大位移超过极限位移时,会发生倒塌破坏。

(2) 该桥在天津地震动作用下破坏程度比在 Anderson 地震动和 Taft 地震动作用下严重,特别是天津地震动大震作用下桥梁发生了倒塌。

(3) 桥梁结构的破坏是各构件累积损伤破坏的结果,任何构件发生损伤均会对整体结构的安全性造成影响。本文曲线梁桥结构的损伤程度由主梁、支座、桥墩三类构件的损伤程度加权组合得到,主梁及支座的破坏通常不会导致桥梁发生倒塌,但桥墩的损伤状况对桥梁整体结构的损伤程度具有非常重要的影响。

参考文献(References)

- [1] 邹顺.基于损伤分析的桥梁结构抗震性能评估方法研究[D].西安:长安大学,2012.
- [2] 赵珺,牛荻涛.在役钢筋混凝土连续刚构桥梁抗震性能评估[J].中国公路学报,2014,27(9):74-81.
ZHAO Jun, NIUDitao. Seismic performance evaluation for reinforced concrete continuous rigid frame bridge in service[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 74-81.
- [3] 李立峰,黄佳梅,吴文朋,等.基于 IDA 的高墩大跨桥梁抗震性能评估[J].地震工程与工程振动,2012,32(1):68-77.
LI Lifeng, HUANG Jiamei, WU Wenpeng, et al. Research on the seismic performance of bridge with high piers and long spans using incremental dynamic analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(1): 68-77.
- [4] GHOBARAH A, ABOU-ELFATH H, BIDDAR, A. Response-based damage assessment of structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1999, 28(1): 79-104.
- [5] KIM S H, SHINOZUKA M. Development of fragility curves of

bridges retrofitted by column jacketing[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2004, 19(1-2): 105-112.

- [6] MAHBOUBI S, SHIRAVAND M R. Failure assessment of skew RC bridges with FRP piers based on damage indices[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 153-168.
- [7] 王丰,李宏男.基于简化 IDA 的结构地震损伤评估方法[J].工程力学,2018,35(12):194-202.
WANG Feng, LI Hongnan. Seismic damage assessment procedure of structures by using simplified ida[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(12): 194-202.
- [8] 郑山锁,徐强,杨丰,等.基于构件的钢筋混凝土核心筒结构地震损伤分析[J].振动与冲击,2014,33(17):68-73,89.
ZHENG Shansuo, XU Qiang, YANG Feng, et al. Seismic damage analysis for reinforced concrete core walls based on members[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(17): 68-73, 89.
- [9] 徐强,郑山锁,韩言召,等.基于结构整体损伤指标的钢框架地震易损性研究[J].振动与冲击,2014,33(11):78-82,106.
ZHENG Shansuo, HAN Yanzhao, et al. Steel frame seismic vulnerability based on a global structural damage index[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(11): 78-82, 106.
- [10] 陆本燕,刘伯权,吴涛,等.基于 RC 桥梁墩柱的地震损伤模型比较分析[J].土木工程学报,2010,43(增刊 1):186-191.
LU Benyan, LIU Boquan, WU Tao, et al. Comparative analysis of seismic damage models for reinforced concrete bridge piers[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Suppl): 186-191.
- [11] 单德山,周筱航,杨景超,等.结合地震易损性分析的桥梁地震损伤识别[J].振动与冲击,2017,36(16):195-201.
SHAN Deshan, ZHOU Xiaohang, YANG Jingchao, et al. Bridge seismic damage identification based on seismic fragility analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 195-201.
- [12] 解咏平,李振宝,杜修力,等.钢筋混凝土柱 Park-Ang 损伤模型的尺寸效应修正[J].建筑结构,2015,45(12):13-17.
XIE Yongping, LI Zhenbao, DU Xiuli, et al. Size effect modification of the Park-Ang damage model for RC columns[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 13-17.
- [13] 于妍妍.强震作用下高架桥梁非线性损伤和抗震性能评估[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [14] 常敬宇.在役曲线梁桥抗震性能评估[D].济南:山东建筑大学,2017.
- [15] 杨草方.考虑碰撞作用的大跨径斜拉桥地震响应分析[D].西安:长安大学,2016.
- [16] 王煦,董军,焦驰宇.纵向碰撞下 FPS 隔震曲线桥地震响应分析[J].工程抗震与加固改造,2015,37(6):64-70.
WANG Xu, DONG Jun, JIAO Chiyu. Analysis of seismic response of FPS isolated curved bridge with longitudinal collision[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(6): 64-70.