

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240625001

不同水准地震下城际铁路高架桥梁延性抗震性能*

郭 歆¹, 冯玉林^{2,3}, 庄海洋², 谢宇航²

(1. 南昌铁路勘测设计院有限责任公司, 江西 南昌 330002; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013;
3. 中南大学高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

摘要: 针对既有城际铁路高架桥不同水准地震下抗震性能认知的不足, 开展不同水准地震下既有城际铁路高架桥梁延性抗震能力评估研究。以某三跨32.7 m标准城际铁路高架桥为研究对象, 基于OpenSees建立三维纤维梁柱单元城际铁路高架桥有限元模型, 并对其进行验证, 进而开展多遇、设计及罕遇地震下城际铁路高架桥地震响应分析, 研究不同水准地震下城际铁路高架桥的支座、桥墩的地震反应规律与损伤破坏特征, 并对桥墩进行延性抗震验算。结果表明: 对比验证模型前6阶自振周期误差均在5%以内, 说明所建立的OpenSees三维纤维梁柱单元城际铁路高架桥模型准确。多遇地震下各支座均未屈服, 设计和罕遇地震下支座会进入屈服状态, 但均在允许范围内。罕遇地震下, 桥墩在横桥向均进入屈服状态, 非线性位移比最大为1.52, 但未达到极限位移, 满足铁路规范中的延性抗震验算要求。建议罕遇地震下延性设计增加防落梁、销钉等支座位移限制装置。

关键词: 城际铁路高架桥梁; 延性抗震; 纤维模型; 弹塑性分析; 球形钢支座

中图分类号: TU375 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0829-09

Ductility Seismic Performance of Intercity Railway Viaducts under Different Levels of Earthquakes

WU Xin¹, FENG Yulin^{2,3}, ZHUANG Haiyang², XIE Yuhang²

(1. Nanchang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330002, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. National Engineering Research Center of High-speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To address the insufficient understanding of the seismic performance of existing intercity railway viaducts (IRV) under different levels of earthquakes, this study conducted an evaluation of their ductility seismic capacity. Taking a standard three-span, 32.7m IRV as the research object, a finite element model of the IRV with three-dimensional fiber beam-column elements was established based on OpenSees and subsequently validated. Furthermore, seismic response analysis of the IRV was conducted under frequent, design, and rare earthquakes to investigate the seismic response patterns and damage characteristics of bearings and piers of the IRV under different levels of earthquakes. Additionally, ductility seismic capacity verification was performed for the piers. The results showed that errors in the first six-order natural vibration modes of the model, compared with the verifi-

* 收稿日期:2024-06-25;修回日期:2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52268074, 52478517)、湖南省自然科学基金项目(2023JJ40724)、江西省自然科学基金项目(20232BAB204081)、中铁上海设计院集团有限公司2022年度科研项目(J22-41)资助

作者简介: 郭歆(1975—),男,高级工程师。主要从事桥梁工程抗震设计研究。E-mail: 123180629@qq.com

通信作者: 冯玉林(1990—),男,副教授,博导,博士。主要从事桥梁抗震研究。E-mail: fengyulin@ecjtu.edu.cn

cation data, were all within 5%, demonstrating the accuracy of the established IRV model with three-dimensional fiber beam-column elements based on OpenSees. Under frequent earthquakes, none of the bearings yielded. Under design and rare earthquakes, the bearings yielded but remained within the allowable range. Under rare earthquakes, all piers yielded in the transverse direction of the bridge, with a maximum nonlinear displacement ratio of 1.52, but did not reach the ultimate displacement, meeting the requirements of ductility seismic capacity verification specified in the railway code. It is recommended to incorporate displacement limiting devices such as anti-fall beams and pins into the bearings in the ductility design under rare earthquakes.

Keywords: intercity railway viaducts; ductility seismic capacity; fiber model; elastic-plastic analysis; spherical steel bearings

0 引言

城际铁路高架桥梁多位于城市交通密集处,安全性要求较高,我国属于地震多发区,在兴建城市轨道交通时,不可避免地会涉及桥梁或轨道结构抗震问题^[1]。城际铁路高架桥梁结构作为重要的公共交通枢纽工程,要求其在遭遇地震灾害时,可以发生严重的损坏,但一定要免于倒塌落梁,这是桥梁结构抗震设防的最低目标,也是桥梁结构延性抗震设计的基本原则。因此,对城际铁路桥梁结构进行不同水准地震下弹塑性地震响应分析和延性抗震设计,具有重要的工程价值和研究意义^[2]。

区别于强度理论,延性抗震理论通过增强桥墩延性、桩基强度等提升桥梁自身抗震性能,通过桥梁自身弹塑性变形性能的提升确保其在地震发生后形成塑性变形区域,桥梁从屈服到发生破坏的非弹性变形能力可以使桥梁在发生非弹性变形后强度不会急剧下降,使整体结构因塑性区域所具有的滞回延性,在遭遇震害后即使出现严重破坏,也不至于发生倒塌,并通过反复变形消耗地震能量,最终适应地震变形^[3]。

目前,城际铁路延性抗震设计已有较多研究^[4-6],在现行抗震设计规范中,将城际铁路的抗震设计纳入B类、C类桥梁,并将多遇地震的重要性系数由1.4调整为1.5以适应城际铁路的B类以上桥梁,按现行抗震规范设计的城际铁路梁桥延性抗震能力,是否满足罕遇地震下的延性抗震验算和“三水准”性能要求尚不清楚^[7]。鉴于此,以城际铁路高架三跨32.7 m标准跨径简支箱梁桥为研究对象,基于OpenSees建立三维弹塑性桥梁有限元模型,并进行验证,进而开展三向多遇、设计及罕遇地震下的桥梁地震响应分析,研究不同水准地震下支

座、桥墩地震反应规律与损伤破坏特征,并对桥墩进行延性抗震验算。以期为城际铁路高架桥梁结构在不同水准地震下的弹塑性地震响应和延性抗震设计提供理论依据。

1 城际铁路高架桥梁工程概况

选取福州至长乐机场城际铁路工程某高架区间的三跨32.7 m标准双线简支梁,如图1所示。主梁采用C50混凝土,梁顶宽11.4 m,梁高2.0 m,梁底宽5.4 m;箱梁顶板厚0.3 m,底板厚0.3~0.35 m,腹板斜置1:3,厚0.35~0.5 m;悬臂板长度2.5 m,悬臂端部厚0.26 m,根部厚0.5 m,梁端设置横隔梁,横隔梁厚1.5 m。桥墩采用C40混凝土,纵筋与箍筋全部采用HRB400钢筋,标准双线简支梁墩柱,墩顶顺桥向长度为2.2 m,横桥向长度为2.8 m。桩基采用墩底平动、转动等六个弹簧模拟^[8]。支座采用球式钢支座,型号为QZ-4500型,布置形式如图1所示,参数见表1^[9-10]。

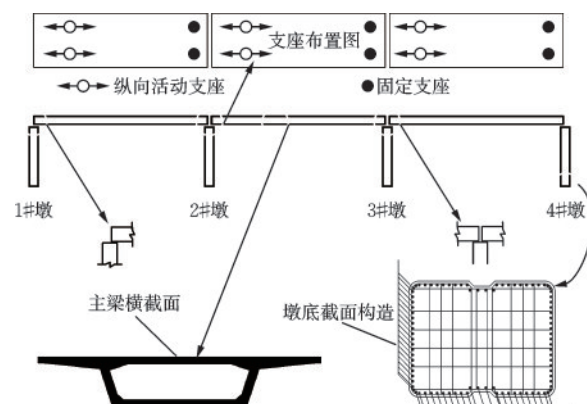


图1 某三跨32.7 m标准城际铁路高架桥示意图

Fig.1 Schematic diagram of a standard three-span 32.7 m intercity railway viaduct

表1 球形钢支座参数

Table 1 Parameters of spherical steel bearings

竖向承载力/ kN	摩擦系数	支座活动 位移/mm	支座失效 位移/mm
4 500	0.02	±50	±150

2 桥梁弹塑性分析模型

2.1 主梁、桥墩、支座的模拟

如图2(a)所示,主梁采用Elastic Beam Column单元模拟,桥墩采用Disp Beam Column单元模拟,桥墩截面保护层混凝土采用Concrete 01模拟。Concrete 01是以Kent-Scott-Park提出的单轴受压本构模型作为骨架曲线,不考虑混凝土抗拉强度,符合保护层混凝土受力规律,本构模型见图2(c), σ 为混凝土峰值抗压强度,即28天抗压强度; ϵ_0 为混

凝土峰值强度对应的应变; σ_U 为混凝土残余强度; ϵ_U 为与混凝土残余强度对应的应变;混凝土强度与应变均以受压为负,混凝土的初始弹模 E_c 默认为两倍的混凝土峰值抗压强度除以峰值应变。重复荷载下滞回规则采用Karsan-Jirsa提出的加卸载模型,其卸载和再加载路径均采用相同直线,见图2(g)^[11-13]。

桥墩截面核心混凝土采用Concrete 02模拟,核心层分为左中右三块,每块为 8×8 的纤维;Concrete 02受压曲线同Concrete 01,但考虑双折线抗拉强度,本构模型见图2(f), f_t 为混凝土抗拉强度, λ 为 σ_U 处的卸载斜率与初始斜率 $2\sigma/\epsilon_0$ 的比值, E_{cs} 为混凝土受拉软化刚度,其余参数意义与Concrete 01相同。其在反复荷载下的滞回曲线采用两段式的分段形式,再加载曲线为从再加载点到卸载点的直线,如图2(h)所示。

钢筋选用Steel 01模拟,该材料采用双线性本

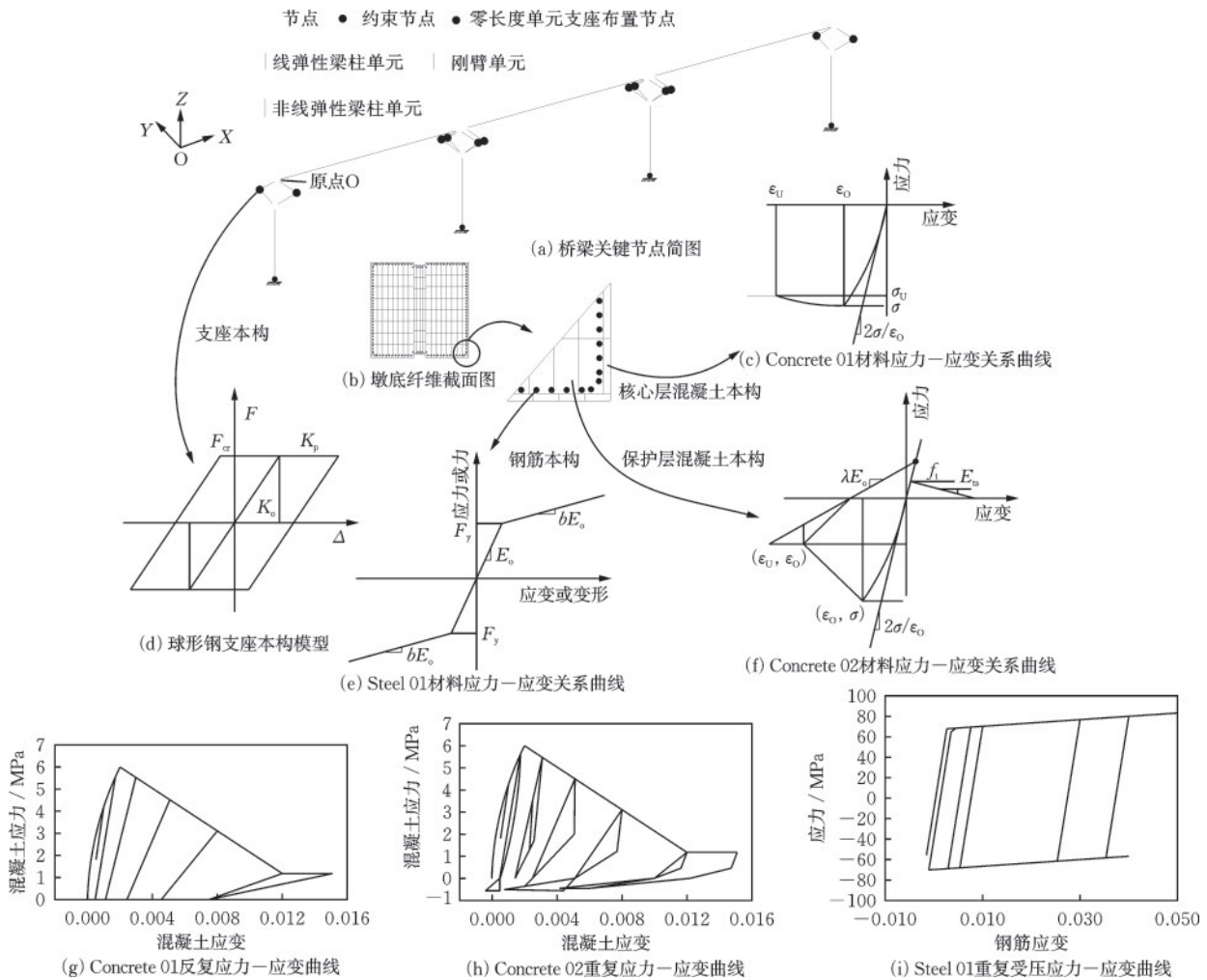


图2 基于OpenSees的三维桥梁弹塑性分析模型

Fig.2 Three-dimensional elastic-plastic analysis model of bridge based on OpenSees

构,考虑重复荷载下钢筋随动强化和等向强化,如图2(e)所示, F_y 为钢筋屈服强度, b 为应变强化率,即屈服后斜率与初始弹性模量的比值。不考虑等向强化、分别考虑受压和受拉等向强化时滞回应力-应变关系曲线,如图2(i)所示。表2~4分别为钢筋和混凝土材料参数。

表2 核心层混凝土材料特性

核心层混凝土	峰值抗压应变 ϵ	峰值抗压强度/MPa	极限抗压强度/MPa	极限压应变 ϵ	混凝土抗拉强度/MPa	受拉软化刚度/MPa
C40	0.001 79	13.5	27	0.005	2.7	2.7

表3 钢筋材料特性

材料类型	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	强化系数
HRB400	400	2.00E+05	0.001

表4 保护层混凝土材料特性

保护层混凝土	峰值抗压强度/MPa	峰值抗压应变 ϵ_{c0}	极限抗压强度/MPa	极限抗压应变 ϵ_{cu}
C40	13.5	0.001 79	27	0.005

选用ZeroLength零长度单元模拟球形钢支座,设置ElasticPP与ENT本构模拟各方向上的应力-应变关系,支座本构见图2(d),其中 F_{cr} 为支座屈服力, Δ 为支座位移, K 为弹性刚度, K_p 为屈服后刚度^[14]。

2.2 模型验证

为验证模型准确性,采用MIDAS/Civil建立相同的模型与本文OpenSees模型进行对比,通过表5自振周期的对比可得,前6阶自振周期误差均在5%以内,证明本文模型的准确性,同时前6阶阵型如图3所示^[15]。

表5 自振特性表

阶数	Midas周期/s	OpenSees周期/s	误差率/%
1	1.074 7	1.097 5	2.12
2	1.072 0	1.082 6	0.99
3	1.069 5	1.074 7	0.49
4	1.051 8	1.019 2	3.10
5	0.782 8	0.753 2	3.78
6	0.537 1	0.523 0	2.63

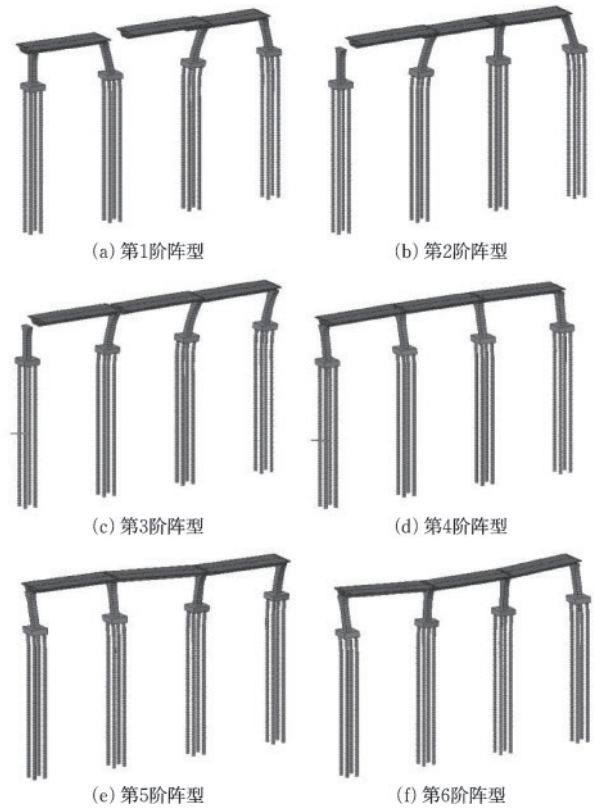


图3 前6阶振型图

Fig.3 First six-order vibration modes

3 地震时程响应分析

3.1 地震波选择

根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909-2014)和《福州至长乐机场城际铁路:工程抗震设防专项论证报告》,本高架区间桥梁结构抗震设防类别为重点设防类,设防烈度为7度,抗震措施为8度,特征周期为0.65 s,场地类别为Ⅲ类,设计地震分组第三组。规范规定取多组地震动进行分析、比较,常包括如下三种形式:① 根据规范反应谱拟合的人工地震动;② 地震灾害性分析提供的至少3条人工地震动;③ 历史记录的实际地震动。

基于与目标谱吻合的原则,从PEER上选取三条合适地震动(Kern County_ "LA-Hollywood Stor FF"、"Imperial Valley-03"_"El Centro Array #9"和"Hollister-01"_"Hollister City Hall"),经不同程度放大的反应谱曲线与目标谱对比情况如图4(a)所示^[16]。本桥一阶自振周期为1.098 s,可以看出,在周期为2 s内,所选地震动反应谱与目标谱吻合较好^[17]。按纵、横、竖向分别1:0.85:0.65的比例对地震波进行调整,开展不同水准地震下模型的响应分析^[18]。

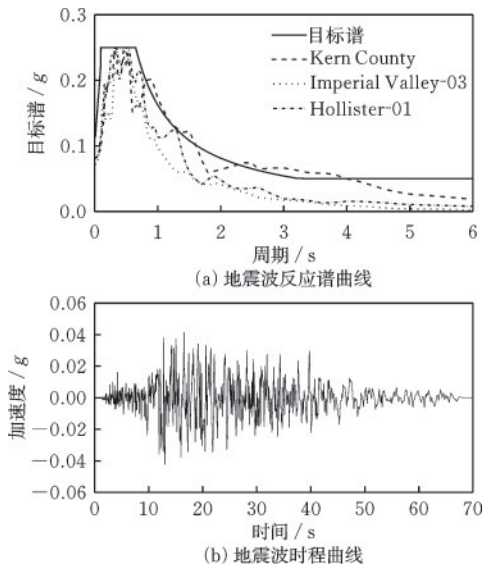


图4 Kern County_ "LA-Hollywood Stor FF"地震波反应谱曲线与时程曲线

Fig.4 Response spectrum curves and time history curve of Kern County_ "LA-Hollywood Stor FF" seismic wave

经过对比,发现 Kern County_ "LA-Hollywood Stor FF"地震动对该桥的地震效应最明显,其地震波时程曲线如图4(b)所示。限于篇幅,后文均以 Kern County_ "LA-Hollywood Stor FF"地震分析结果为例。Kern County波是1952年发生的震级为7.36的地震,在PEER上的台站分别是"LA-Hollywood Stor FF"、"Pasadena-CIT Athenaeum"、"Santa Barbara Courthouse"和"Taft Lincoln School",5%~75% Duration (sec)分别是18.6、16.6、12.4和10.7等。

3.2 支座地震响应分析

不同水准地震下,各桥墩上的支座在纵桥向、横桥向上的最大相对位移见表6。其中,1#、2#、3#墩选取活动支座的位移,4#墩选择固定支座的位移。

多遇地震下,活动支座在纵桥向、横桥向最大相对位移均小于容许位移50 mm,固定支座在纵桥

表6 不同水准地震下支座纵、横桥向最大相对位移

Table 6 Maximum relative displacements of bearings in longitudinal and transverse directions of bridge under different levels of earthquakes

地震水准	支座最大相对位移/mm				
	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩	
纵桥向	多遇	36.32	14.06	45.13	1.00
	设计	65.01	14.47	10.92	2.36
	罕遇	106.68	69.32	128.54	117.57
横桥向	多遇	0.58	0.68	0.56	0.59
	设计	0.84	0.95	0.81	0.89
	罕遇	1.68	1.84	1.60	1.80

向、横桥向位移均在2 mm内,表明多遇地震下,各支座均未进入屈服状态。设计地震下,1#墩在纵桥向超过容许位移50 mm,4#墩固定支座在纵桥向超过屈服位移2 mm,进入塑性状态。罕遇地震下,1#、2#、3#墩活动支座在纵桥向超过容许位移50 mm,达到部分破坏,但是均在权限位移150 mm内,4#墩固定支座在纵桥向位移达117.57 mm,各支座的最大相对位移均在支座失效位移内。综上,多遇地震下,延性支座能够保持良好性能,设计和罕遇地震下支座会发生屈服,但均在允许位移内。

通过对比支座可知,布置在3#墩的活动支座与4#墩的固定支座在罕遇地震下位移较大,其滞回曲线与位移时程如图5所示。3#、4#墩支座的纵桥向残余位移分别为84.65、115.47 mm,结合图5可知,

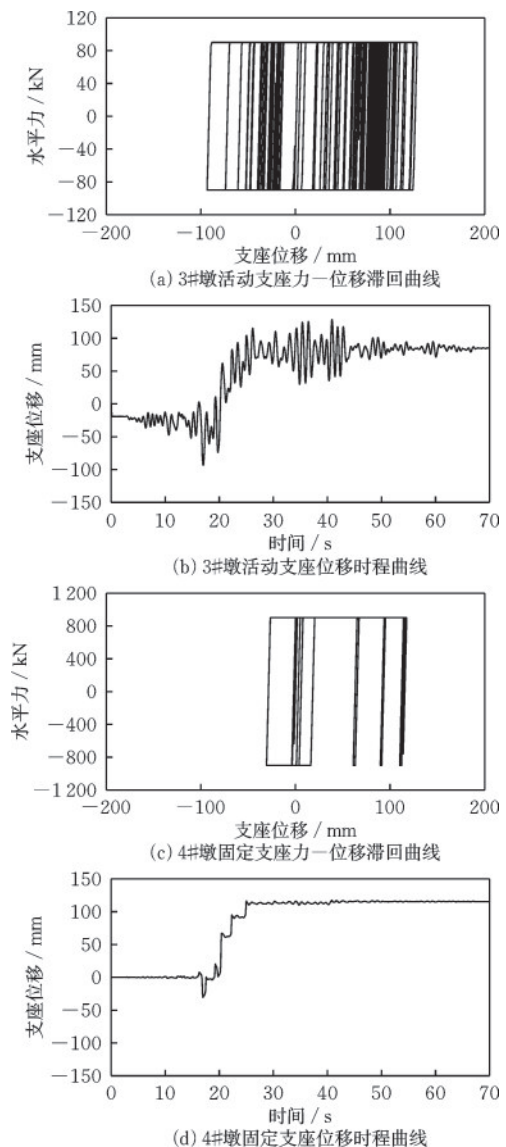


图5 罕遇地震下支座滞回曲线与时程曲线

Fig.5 Hysteresis curves and time history curves of bearings under rare earthquakes

由于固定支座摩擦力比活动支座大,在固定支座屈服后其位移变化趋势相较稳定,残余变形更大。

3.3 桥墩地震响应分析

桥墩墩底的最大剪力、弯矩见表7、表8。通过

表7 不同水准地震下墩底纵桥、横桥向最大剪力

Table 7 Maximum shear forces at pier bottom in longitudinal and transverse directions of bridge under different levels of earthquakes 单位:kN

地震水准	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
纵桥向				
多遇	454.478	924.784	1 038.41	874.183
设计	732.176	2 111.39	2 094.25	1 926.19
罕遇	993.439	2 743.67	2 746.15	2 546.86
横桥向				
多遇	665.761	1 162.15	1 103.71	614.759
设计	948.991	1 768.27	1 672.26	951.814
罕遇	1 840.31	3 202.88	3 282.55	1 922.11

表8 不同水准地震下墩底纵桥、横桥向最大弯矩

Table 8 Maximum bending moments at pier bottom in longitudinal and transverse directions of bridge under different levels of earthquakes 单位:kN·m

地震水准	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
纵桥向				
多遇	8 520.41	8 097.28	7 086.01	8 899.82
设计	10 335.6	16 507.6	12 967.8	11 864.9
罕遇	11 621.5	17 897.7	14 326.8	14 184.4
横桥向				
多遇	10 081	14 054.8	12 381.1	7 341.3
设计	15 319.6	21 794.6	19 270.6	11 381.5
罕遇	32 379.5	38 999.9	35 193.9	24 267.9

对比得知,随着地震动峰值加速度的递增,墩底所受剪力与弯矩也随之增大。其中最大剪力和弯矩集中在2#,3#墩。2#,3#墩剪力、弯矩时程如图6所示。

在横桥向上,桥墩所受的剪力与弯矩大于纵桥

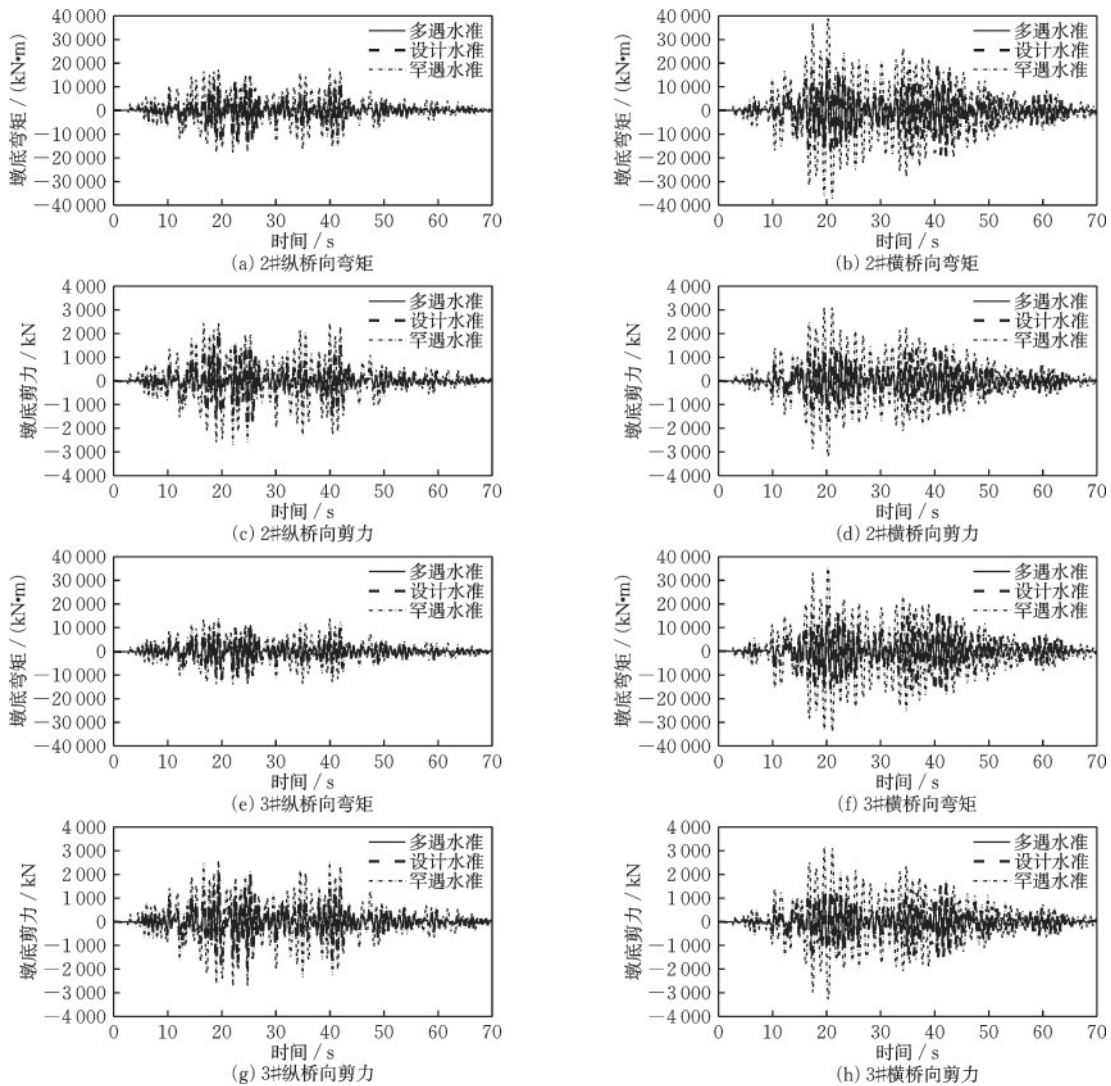


图6 不同水准地震下2#、3#墩底弯矩和剪力时程

Fig.6 Time histories of bending moments and shear forces at 2# and 3# pier bottoms under different levels of earthquakes

向,这是因为横桥向上桥墩支座均为固定支座,地震力直接传递给桥墩。不同水准地震下2#、3#墩底截面弯矩—曲率关系如图7所示。在纵桥向,不同水准地震下,2#、3#墩的滞回曲线呈线性状态;而在横桥向,罕遇地震下,2#、3#墩呈现屈服状态,墩柱进入延性耗能状态。因此,需要对桥墩延性进行抗震验算。

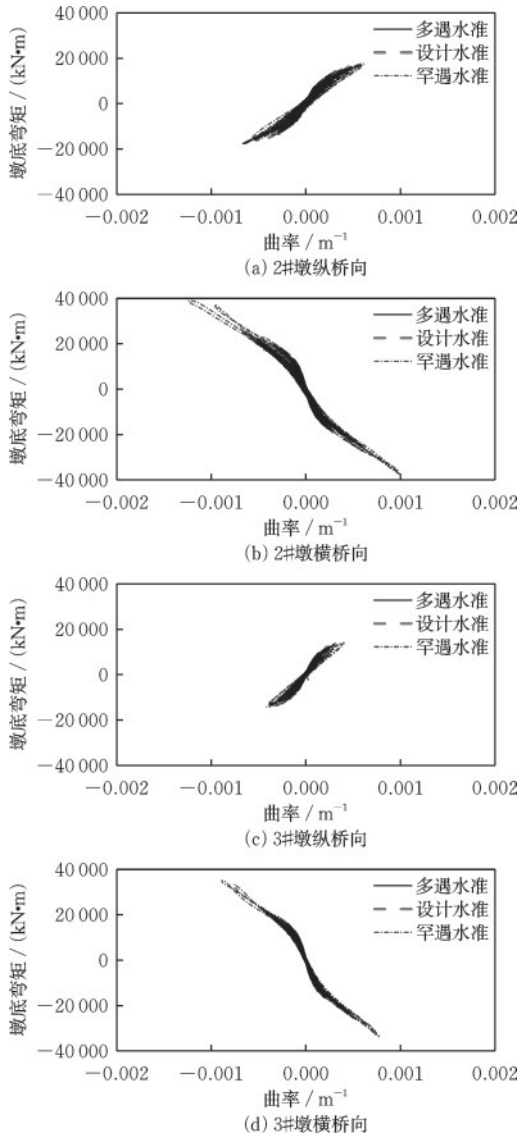


图7 2#、3#墩底截面弯矩—曲率曲线

Fig.7 Moment-curvature curves of cross-sections of 2# and 3# pier bottoms

4 最不利桥墩延性抗震验算

依据《城市轨道交通结构抗震设计规范》对罕遇水准下的桥墩进行延性抗震验算,延性计算公式如下:

$$\mu_u = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} < [\mu_u] \quad (1)$$

式中, μ_u 为非线性位移延性比; $[\mu_u]$ 为允许位移延性比,规范容许值为4.8; Δ_{\max} 为桥墩的非线性响应最大位移; Δ_y 为桥墩屈服位移,取值见表9。

表9 桥墩截面的屈服位移

Table 9 Yield displacement of pier cross-section

单位:mm

	屈服位移	极限位移
纵桥向	110.494	379.788
横桥向	86.817	328.322

以横桥向1#墩延性计算为例,计算过程如下,1#墩的屈服位移为 $\Delta_y = 86.82$ mm,桥墩的非线性响应最大位移 $\Delta_{\max} = 91.93$ mm,因此,非线性位移延性比为:

$$\mu_u = \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_y} = \frac{91.93 \text{ mm}}{86.82 \text{ mm}} = 1.06 < [\mu_u] = 4.8 \quad (2)$$

同理,可计算得到2#、3#、4#墩的非线性位移延性比,结果见表10。计算表明,罕遇地震下,桥墩在纵桥向上均为未屈服状态,在横桥向均为屈服状态,但未达到极限位移。其中,3#墩非线性位移比最大为1.52,满足延性抗震验算要求。

表10 桥墩位移延性计算

Table 10 Calculation of pier displacement ductility

项目	1#墩	2#墩	3#墩	4#墩
Δ_y /mm	—	—	—	—
Δ_{\max} /mm	32.61	54.94	55.46	50.64
是否屈服	否	否	否	否
μ_u	—	—	—	—
$[\mu_u]$	4.8	4.8	4.8	4.8
结构状态	安全	安全	安全	安全
Δ_y /mm	86.82	86.82	86.82	86.82
Δ_{\max} /mm	91.93	128.29	131.56	100.55
是否屈服	屈服	屈服	屈服	屈服
μ_u	1.06	1.48	1.52	1.16
$[\mu_u]$	4.8	4.8	4.8	4.8
结构状态	安全	安全	安全	安全

5 结论

以某三跨32.7 m城际铁路高架简支箱梁桥为研究对象,基于OpenSees建立三维弹塑性桥梁有限

元模型,采用Midas模型对其进行验证,两种模型前6阶自振周期误差均不超过5%,表明所建立模型的准确性。进而基于OpenSees模型进行三向多遇、设计及罕遇水准下的桥梁地震响应分析,研究不同水准“Kern County”地震下支座、桥墩地震反应规律与损伤破坏特征,并对桥墩进行延性抗震验算,得出以下结论:

(1)多遇地震下各支座均未进入屈服状态。设计地震下,1#墩在纵桥向超过50mm的容许位移,4#墩固定支座在纵桥向超过2mm的屈服位移,进入塑性状态。罕遇地震下,各墩支座在纵桥向超过50mm的容许位移,但未超过150mm的极限位移。

(2)多遇地震下,支座能保持良好性能,设计、罕遇地震下支座会发生屈服,但并未超限。建议罕遇地震下延性设计增加防落梁、销钉等支座位移限制装置。

(3)罕遇地震下,桥墩在纵桥向上均未屈服,在横桥向均进入屈服状态,如3#墩非线性位移比最大为1.52,但并未达到极限位移,满足铁路相关规范中的延性抗震验算要求。

参考文献:

- [1] 钱光,李静.城市轨道交通高架桥墩延性抗震设计分析[J].铁道建筑,2016,56(6):31-32,47.
Qian G, Li J. Seismic design analysis of viaduct pier ductility for urban rail transit [J]. Railway Engineering, 2016, 56(6): 31-32, 47. (in Chinese)
- [2] 黄瑞峰.城际铁路大跨度连续梁桥减隔震分析[J].铁道建筑,2019,59(7):22-24.
Huang R F. Seismic isolation analysis of large span continuous girder bridge of intercity railway [J]. Railway Engineering, 2019, 59(7): 22-24. (in Chinese)
- [3] 赵帆.高烈度山区梁桥延性抗震设计技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
Zhao F. Research on ductility seismic design technology of beam bridges in high seismic intensity mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [4] 刘璐,徐刚,赵川杰,等.罕遇地震作用下铁路连续梁桥抗震分析[J].公路工程,2015,40(6):111-113,118.
Liu L, Xu G, Zhao C J, et al. Seismic analysis of railway continuous bridge under rare earthquakes [J]. Highway Engineering, 2015, 40(6): 111-113, 118. (in Chinese)
- [5] 陈泽.罕遇地震下简支梁桥墩延性抗震分析[J].高速铁路技术,2018,9(4):9-13,43.
Chen Z. Seismic ductility analysis of simply supported girder bridge pier under rare earthquake [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 9-13, 43. (in Chinese)
- [6] 赫永峰,嵇一.城际铁路连续梁桥抗震计算方法对比分析[J].铁道工程学报,2017,34(6):43-49.
He Y F, Zhuo Y. Comparative analysis of seismic design methods for intercity railway continuous bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(6): 43-49. (in Chinese)
- [7] 王春阳.高速铁路简支梁桥普通支座水平地震作用效应分析[D].兰州:兰州交通大学,2022.
Wang C Y. Effect analysis of common bearings for high-speed-railway simply supported girder bridges under the horizontal earthquake [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [8] 张浩,贾亚杰,梁发云.砂土中垫层隔震基础地震响应离心模型试验及数值分析[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(6):770-782.
Zhang H, Jia Y J, Liang F Y. Centrifuge test and numerical analysis of seismic response of cushioned pile raft foundation in sand [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(6): 770-782. (in Chinese)
- [9] 曾永平,董俊,陈克坚,等.九度地震区高铁简支梁减隔震体系适应性分析[J].铁道工程学报,2020,37(2):46-52.
Zeng Y P, Dong J, Chen K J, et al. Adaptability analysis of the seismic isolation system for high-speed railway simply supported beam bridge in nine-degree seismic regions [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(2): 46-52. (in Chinese)
- [10] 冯玉林,何帅,蒋丽忠,等.边墩沉降致连续简支桥段纵连线桥系统层间联结劣化规律[J].防灾减灾工程学报,2024,44(3):623-631.
Feng Y L, He S, Jiang L Z, et al. Deterioration patterns of interlayer connections in longitudinally connected line bridge systems on continuous simply supported beam bridge sections induced by side pier settlement [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 623-631. (in Chinese)
- [11] 石岩,李军,秦洪果,等.大跨高墩连续刚构桥内力状态及其对地震反应的影响[J].交通运输工程学报,2022,22(1):70-81.
Shi Y, Li J, Qin H G, et al. Internal force state of long-span continuous rigid-frame bridge with high-rise piers and its effect on seismic response [J]. Journal of Traffic

- and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 70-81. (in Chinese)
- [12] 蒋雨润,梅竹,刘洋,等.地震下RC空心墩弯-剪数值模型及混合试验验证[J].防灾减灾工程学报,2024,44(3):596-604.
Jiang Y R, Mei Z, Liu Y, et al. Seismic bending-shear model for RC hollow pier and the hybrid-test validation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 596-604. (in Chinese)
- [13] 石岩,赵翔宇,焦应乾,等.考虑轨道约束的连续梁拱桥地震反应及减震控制研究[J].世界地震工程. 2022, 38(1): 148-157.
Shi Y, Zhao X Y, Jiao Y Q, et al. Seismic response and control study of continuous beam arch bridges under track constraint [J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(1): 148-157. (in Chinese)
- [14] 张永亮,王春阳,刘正楠,等.高速铁路多跨筒支梁桥纵向地震力分布规律[J].铁道工程学报,2022, 39(7): 55-60.
Zhang Y L, Wang C Y, Liu Z N, et al. Research on a logistics network planning model of the urban underground [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(7): 55-60. (in Chinese)
- [15] Yu J, Jiang L, Zhou W, et al. Study on the influence of trains on the seismic response of high-speed railway structure under lateral uncertain earthquakes [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(7): 2971-2992.
- [16] 蒋家卫,高权宝,陈国兴,等.基于IDA方法地下结构易损性的地震动记录规模选取[J].防灾减灾工程学报,2022, 42(6): 1144-1152.
Jiang J W, Gao Q B, Chen G X, et al. Quantification of ground motion record sets scale in the IDA method for vulnerability analysis of underground structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1144-1152. (in Chinese)
- [17] 梁发云,袁周驰,梁轩.深水桥墩地震响应离心振动台试验及数值模拟[J].建筑结构学报,2023,44(7): 93-104.
Liang F Y, Yuan Z C, Liang X. Centrifuge shaking table test and numerical simulation on seismic response of deep-water bridge pier [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(7): 93-104. (in Chinese)
- [18] 卢皓.罕遇地震作用下高速铁路筒支梁桥抗震性能分析[J].铁道标准设计,2015(8): 102-106, 107.
Lu H. Study on seismic performance of high-speed railway simply-supported girder bridge under strong earthquake motion [J]. Railway Standard Design, 2015(8): 102-106, 107. (in Chinese)

(本文编辑:赵霞)