

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241024005

非规则 LRB 隔震桥梁参数分析与优化*

秦洪果^{1,2}, 王学鑫², 石岩², 刘云帅², 熊利军²

(1. 兰州城市学院环境与城市建设学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 受复杂的地形地貌影响, 具有不同墩高的非规则桥梁的抗震性能受支座参数的影响较大。以下部结构为双柱式排架墩的中等跨径连续梁桥为研究对象, 通过设置不同墩高组合构造了4类具有不同外形特征的规则和非规则桥梁, 保持支座屈服前刚度和屈服后刚度之比不变, 改变支座屈服强度和屈服前刚度建立了160个不同隔震参数的连续梁桥, 基于OpenSees地震分析平台建立隔震桥梁动力分析模型, 通过大量的非线性动力时程分析探讨了规则和非规则桥梁在不同隔震参数下支座剪应变、桥墩位移延性系数、弯矩及剪力需求。结果表明: 墩高不一致的非规则桥梁各墩剪力和弯矩需求差异显著大于规则桥梁, 一定墩高变化范围下的非规则桥梁桥墩弯矩最大值与最小值的比值约为规则桥梁的2倍, 剪力比值约为1.1倍; 墩高差异越大, 非规则桥梁支座与桥墩的地震响应对隔震参数越敏感; 合理设置铅芯橡胶支座(Lead Rubber Bearing, LRB)屈服强度和屈服前刚度是改善非规则桥梁抗震性能的有效途径, 当非规则桥梁支座与桥墩屈服强度的比值、屈服前刚度的比值与桥梁等效周期1.5 s时对应的最大刚度的比值之比均为40%~50%时可以在充分发挥支座抗震性能、保护桥墩安全的同时优化其结构受力; 研究成果可为LRB隔震桥梁的设计和性能评估提供参考。

关键词: 桥梁工程; 非规则桥梁; 铅芯橡胶支座; 非线性时程分析; 隔震参数

中图分类号: U448.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0807-12

Parameter Analysis and Optimization of Irregular LRB-isolated Bridges

QIN Hongguo^{1,2}, WANG Xuexin², SHI Yan², LIU Yunshuai², XIONG Lijun²

(1. School of Environment and Urban Construction, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Due to the complex terrain and landform, the seismic performance of irregular bridges with different pier heights is strongly influenced by bearing parameters. This study focused on a medium-span continuous girder bridge with double-column bent piers as substructures. Four types of regular and irregular bridges with different geometric characteristics were constructed by setting different pier height combinations. A total of 160 continuous girder bridges with different isolation parameters were established by changing the yield strength and pre-yield stiffness of the lead rubber bearings (LRBs), while keeping the ratios of pre-yield stiffness and post-yield stiffness unchanged. Then, nonlinear dynamic analysis models of the bridges were established using the OpenSees earthquake analysis platform. Through extensive nonlinear dynamic time history analysis, the shear strain of the bearings, dis-

* 收稿日期:2024-10-24;修回日期:2024-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(52468071,52268075)、甘肃省教育厅青年博士项目(2023QB-031)、兰州城市学院博士科研基金项目(LZCU-BS2023-26)资助

作者简介:秦洪果(1983—),女,讲师,博士。主要从事桥梁结构抗震研究。E-mail: qinhg27@163.com

通信作者:石岩(1985—),男,教授,博导,博士。主要从事桥梁结构抗震研究。E-mail: syky86@163.com

placement ductility coefficient of the bridge piers, and the bending moment and shear demand of both regular and irregular bridges under different seismic isolation parameters were investigated. The results showed that the differences in shear and bending moment demands among piers in irregular bridges with inconsistent pier heights were significantly greater than those in regular bridges. Within a certain range of pier height variation, the ratio of maximum to minimum bending moments in irregular bridges was approximately twice that in regular bridges, and the shear ratio was about 1.1 times that in regular bridges. The greater the difference in pier heights, the more sensitive the seismic response of the bearings and piers in irregular bridges became to isolation parameters. Proper selection of the yield strength and pre-yield stiffness of LRBs was an effective way to improve the seismic performance of irregular bridges. When the ratio of bearing-to-pier yield strength, as well as the ratio of bearing-to-pier pre-yield stiffness to the maximum stiffness corresponding to the bridge's equivalent period of 1.5s were in the range of 40%~50%, the structural force could be optimized while fully utilizing the seismic performance of the bearings and ensuring pier safety. The findings can provide references for both the design and performance evaluation of bridges with LRB seismic isolation.

Keywords: bridge engineering; irregular bridges; lead rubber bearing; nonlinear time history analysis; seismic isolation parameters

0 引言

我国西部地区受山区地形的限制,交通线路上的桥梁占相当大比重,桥梁下部结构往往采用不等高形式,高阶振型对其地震响应影响显著,这类桥梁称为非规则桥梁^[1]。而西部地区断层与断裂带发育广泛,地震活动活跃,区域地震危险性较高,桥梁结构具有很高的地震易损性,其中全桥结构纵横向刚度分布不均匀的非规则桥梁抗震问题突出^[2],如汶川地震中,百花大桥由于墩高差异大,第5联整体发生了倒塌^[3-4],回澜立交每个匝道桥均有1~2个矮桥墩遭受严重破坏、桥墩上箱梁发生断裂^[5],以及Waimakariri Motorway桥受河道冲刷影响中墩与边墩墩高差异显著,在Darfield地震中矮墩产生了明显的裂缝损伤^[6]。因此,非规则桥梁的抗震研究一直备受关注^[7-9]。

目前,国内外相关学者已在非规则桥梁的震害机理分析^[10-12]、挡块与土-结构相互作用等的影响研究^[13-15]、地震易损性评估^[16]和抗震设计方法^[17-18]等方面做了较多的工作。在提升非规则桥梁抗震性能研究方面,M. G. Ishac等^[19]研究认为通过合理地设计桥墩的配筋率和墩-梁连接方式可以有效的优化非规则桥梁地震响应的分布;宋晓东等^[20]从抗震概念设计的角度提出了可以通过调整墩的直径和支座的刚度来改善非规则桥梁的平衡情况;张文学

等^[21]探究了非规则连续梁桥滑动墩和梁体之间安装锁死销减震装置对其整体抗震性能的影响。魏标等^[1]和吴文朋等^[22]研究了支座的布置对非规则桥梁抗震性能影响,发现低墩处采用板式橡胶支座或活动支座可以有效改善非规则连续梁桥的地震反应;陈亮等^[23]研究发现梁、墩横向刚度比对连续梁桥横桥向规则性起控制作用,梁、墩横向刚度比越大,梁桥规则性越好;李建中等^[24]针对非规则桥梁伸缩缝处相邻梁体相对位移和碰撞较大的问题,提出的连梁装置可以有效地减小非规则桥梁伸缩缝处的不利响应。从现有研究来看,国内外学者主要是通过增设新装置、合理设计桥墩刚度(直径、配筋率等)、减隔震装置构造及布置形式等来改善非规则桥梁的抗震性能,非规则隔震桥梁减隔震装置的研究大多是针对板式橡胶支座以及活动支座,而应用更为广泛的铅芯橡胶支座(lead rubber bearing, LRB)隔震桥梁抗震研究仍有不足。

减隔震技术作为提高结构抗震能力的重要手段,在桥梁中被广泛应用,它主要是通过减隔震装置阻止、消耗或减少地震能量传入结构体系,从而提高结构的抗震性能^[25-26]。铅芯橡胶支座是在叠层橡胶支座中插入铅芯,同时具备较好的隔震和耗能能力,是目前应用最为广泛的隔震支座,被普遍应用于建筑和桥梁等结构中,其减震效果也经受住了部分实际地震的检验^[25],如1987年新西兰艾吉科母地震的Te Teko桥^[25]、2010年智利的马乌莱地震的

Marga-Marga 桥^[27]、冰岛的 Thjorsa 桥和 Oseyrar 桥^[28-29]、2013年中国芦山地震的芦山县人民医院门诊大楼^[30]等。随着减隔震技术的发展和抗震经验的积累,发现非规则 LRB 隔震桥梁抗震性能尚未被完全掌握,已有相关学者通过改变桥墩、支座的构造与布置形式等来提升该类桥梁的抗震性能,而如何结合 LRB 隔震参数降低桥梁的非规则性,使各墩协同受力以减少力需求的集中鲜有研究,并且缺乏隔震参数详细的量化分析。

鉴于此,以下部结构为典型双柱式排架墩的(5×30) m 连续梁桥为研究对象,通过设置不同的墩高组合共构造了4类具有不同结构特征的规则和非规则桥梁,改变支座屈服强度和屈服前刚度共建立了160个不同隔震参数的桥梁模型。选取10组地震动记录开展非线性动力时程分析,考察不同隔震参数下支座剪应变、桥墩位移延性系数、弯矩和剪力需求,力求确定合理的隔震参数范围,改善非规则隔震桥梁抗震性能。

1 桥梁分析模型及地震动的选取

1.1 工程背景

以一座(5×30) m 减隔震连续梁桥为工程背景进行研究,上部结构为5片连续 T 梁,下部结构为公路桥梁工程中被广泛采用的双柱式排架墩^[7]。如图1所示,设置了4类由不同墩高组成的规则和非规则布置形式,共10种工况,桥梁编号及墩高布置见表1。其中,规则形式为 BM.1 和 BM.2,非规则形式为 BM.3 和 BM.4, BM.1 为等墩高设置,分别设置高墩(12 m)、中等墩(9 m)、低墩(6 m)3种工况, BM.2 为对称布置,分别设置矮墩与中等墩、矮墩与高墩、中等墩与高墩对称布置3种工况, BM.3 主要表现出3[#]墩与其他墩的差异性,分别设置3[#]墩为中等墩及其他墩为矮墩、3[#]墩为高墩及其他墩为矮墩、3[#]墩为高墩及其他墩为中等墩3种工况。 BM.4 墩高则由边矮墩(1[#]墩)向中高墩依次递增。值得注意的是,过低的桥墩需要考虑剪切破坏作用,而过高的桥墩由于其本身变形能力较大,通常需要额外设置间系梁来保护桥墩并发挥支座的抗震性能,故本文并没有考虑过低或过高的桥墩。所有桥梁模型中,上部结构、下部结构分别采用 C50 混凝土和 C30 混凝土,纵筋采用 HRB335。桥梁所在场地类别为 II 类,水平设计地震动峰值加速度为 0.4g。

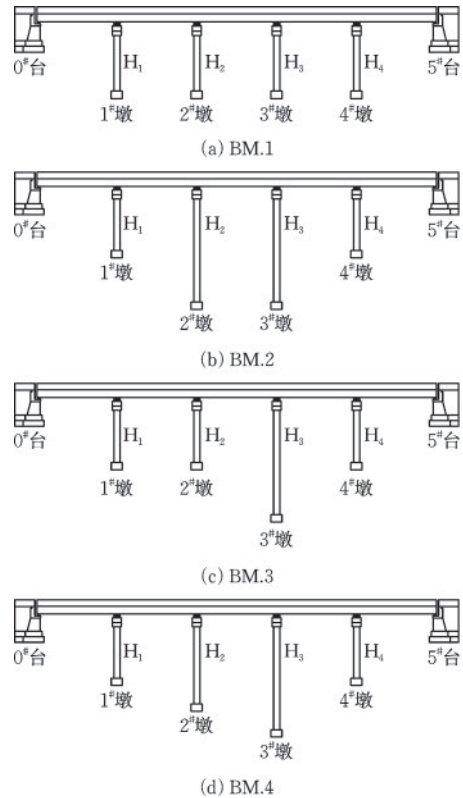


图1 不同桥型布置示意图

Fig.1 Schematic diagrams of different bridge layouts

表1 桥梁编号及墩高布置

Table 1 Bridge number and pier height layout

桥梁编号	墩高/m				H_2/H_1	H_3/H_1
	1 [#] 墩 (H_1)	2 [#] 墩 (H_2)	3 [#] 墩 (H_3)	4 [#] 墩 (H_4)		
BM.1_1	6	6	6	6	1.0	1.0
BM.1_2	9	9	9	9	1.0	1.0
BM.1_3	12	12	12	12	1.0	1.0
BM.2_1	6	9	9	6	1.5	1.5
BM.2_2	6	12	12	6	2.0	2.0
BM.2_3	9	12	12	9	1.3	1.3
BM.3_1	6	6	9	6	1.0	1.5
BM.3_2	6	6	12	6	1.0	2.0
BM.3_3	9	9	12	9	1.0	1.3
BM.4_1	6	9	12	6	1.5	2.0

纵桥向均有足够运动间隙。采用基于位移的抗震设计方法^[26]对10座桥梁进行隔震设计,减隔震桥梁基于位移的抗震设计步骤依次为:确定性能目标、初步概念设计、假定桥墩配筋及截面弯矩-曲率($M-\varphi$)分析、估计和假定目标位移、桥墩(台)-支座体系位移分配、形成等效单自由度体系(SDOF)、修正设计反应谱、计算SDOF体系位移、设计位移检验、支座安全性校验、构造细节设计。为便于建模

分析,所有桥梁等高度桥墩均采用相同的几何和材料特性。经设计,桥台和桥墩处支座分别采用Y4Q670×232和Y4Q620×229,具体参数见表2,表中 K_{B1} 为支座屈服前刚度, K_{B2} 为支座屈服后刚度, F_{By} 为支座屈服强度, Q_d 为支座特征强度;6 m和9 m桥墩墩身直径为1.5 m,12 m桥墩直径为1.7 m,除6 m桥墩主筋选用直径28 mm外,其余桥墩均采用32 mm,墩高由低到高桥墩配筋率依次为0.80%、1.27%和1.56%。

表2 桥梁支座特性

Table 2 Characteristics of bridge bearings

参数	桥墩处支座 (Y4Q670×232)	桥台处支座 (Y4Q620×229)
$K_{B1}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	8 600	7 100
$K_{B2}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	1 300	1 100
F_{By}/kN	162	142
Q_d/kN	137.51	120

1.2 有限元模型的建立

基于OpenSees抗震分析平台分别建立连续梁的非线性动力分析模型,如图2所示。主梁与盖梁均采用弹性梁柱单元模拟,铅芯橡胶支座采用双线性的橡胶支座单元模拟。桥墩采用纤维截面的非线性梁柱单元模拟,保护层混凝土及核心混凝土用Concrete04模拟,加卸载规则按Filippou修正后Karsan-Jirsa模式确定。钢筋采用Steel02模拟,基于Giffre-Menegotto-Pinto模型建立钢筋的应力-应变关系,考虑了钢筋在加载卸载的循环过程中包兴格效应的影响。不考虑隔震桥梁桩-土-结构及桥台-填

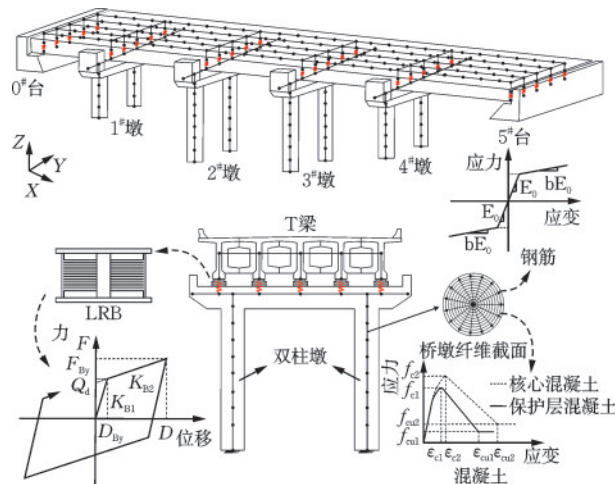


图2 全桥有限元模型示意图(以BM.2为例)

Fig.2 Schematic diagram of finite element model of entire bridge (taking BM.2 as an example)

土的相互作用,即所有桥墩、桥台处边界条件均采用固结。

1.3 地震动的选择与输入

由PEER数据库选取了10组地震动记录,每组地震动记录均包含2个水平方向分量。选择的地震动满足如下原则^[26,31]:(1)地震震级(M_s)在6级以上;(2)震中距或断层距为20~40 km;(3)加速度峰值在0.15g以上;(4)高通滤波截止频率在0.2 Hz以下;(5)场地条件为中硬(软)土。非线性时程分析时将PGA较大的分量调整为0.4g后沿纵桥向输入,PGA较小的分量沿横桥向输入并按纵桥向相同的调幅系数调整,图3给出了选取地震动的沿纵桥向和横桥向输入分量的反应谱和平均谱。非线性动力时程分析时均以均值为讨论指标。

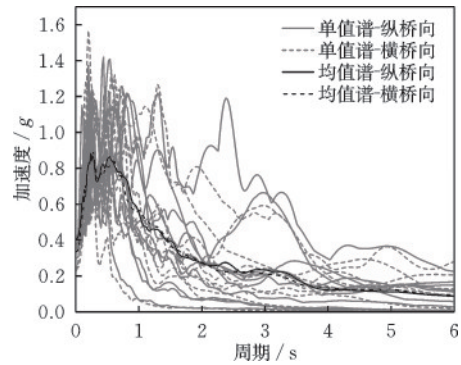


图3 选取地震动记录的反应谱及平均谱

Fig.3 Response spectrum and average spectrum of selected ground motion records

2 抗震性能参数分析

2.1 分析工况

为了方便分析隔震支座的力学参数对非规则连续梁桥抗震性能的影响,定义了屈服强度比 ϕ_F 和屈服前刚度比 ξ_K 两种参数,具体如下:

$$\phi_F = \frac{F_{iso}}{F_{pier}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\xi_K = \frac{K_{iso}}{K_{pier}} \quad (2)$$

式中, F_{iso} 、 K_{iso} 分别为全桥支座(包括桥台处支座)屈服强度和屈服前刚度之和; F_{pier} 、 K_{pier} 分别为桥墩纵向屈服强度和屈服前刚度之和。

在设计桥梁基础上,强度比和刚度比另分别设置4种工况。强度比工况分别为1A~4A,其中,工

况 1A(强度比取最小值)为支座刚好满足桥梁水平制动力要求,工况 2A 和工况 4A 分别为强度比等于 40% 和 100%,工况 3A 则是设计桥梁的初始值。设计桥梁等效 SDOF 周期(具体计算见论文[26])约为 1.7~2.0 s,考虑到常见 LRB 隔震桥梁结构屈服后周期为 3.0 s 以下^[32],故另外调整支座屈服前刚度使桥梁等效 SDOF 周期分别等于 1.5、2.5 和 3.0 s,周期由低到高依次为刚度比工况 1B~4B,共 4 种工况。需要说明的是,所有工况中支座的屈服后刚度与屈服前刚度之比保持不变。

2.2 强度比

为考察不同桥型支座的损伤程度随强度比的变化,图 4 给出了所有桥型支座峰值剪应变与强度比的关系,可以看出:支座纵向和横向剪应变均随强度比的增大而减小,纵向略大于横向,支座纵向和横向峰值剪应变分别为 147% 和 136%,均满足我国规范《公路桥梁抗震设计规范》^[33](JTG/T 2231-01—2020)规定不超过 250% 的性能要求;不同桥型的支座峰值剪应变随着规则桥梁墩高增加和非规则桥梁墩高差异变大均有所增大。当强度比大于

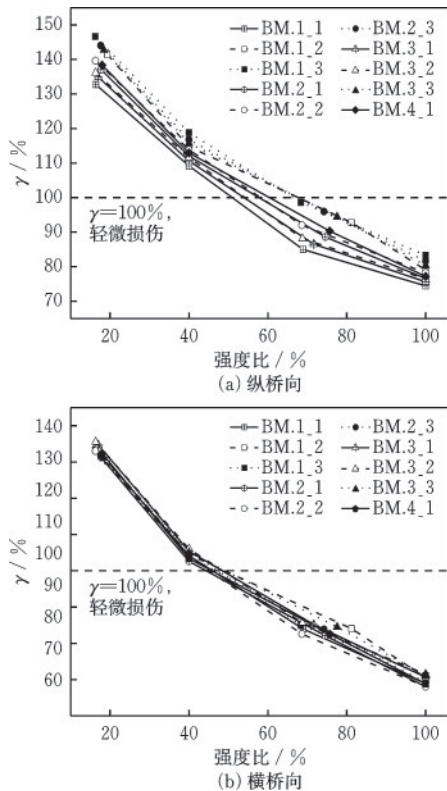


图 4 支座峰值剪应变随强度比的变化
Fig.4 Relationship between peak shear strain of bearings and yield strength ratio (ϕ_F)

50% 时支座基本不损伤,此时支座性能可能设计过大,不利于地震中支座的减震和耗能,从保护下部结构的角度来说,此时设计可能偏于不安全。

桥墩位移延性系数随强度比的变化如图 5 所示,可以看出,桥墩纵桥向的位移延性系数大于横桥向,这主要是因为双柱式排架墩沿纵桥向呈悬臂体系,而横桥向则为框架体系;桥墩位移延性系数随强度比的增大呈先减小后增大的趋势,当强度比为 40%~60% 时纵向和横向位移延性系数较小,桥墩损伤最小;高墩规则桥梁和墩高差异大非规则桥梁的位移延性系数明显大于矮墩规则桥梁和墩高差异小的非规则桥梁,并且前者受强度比的影响更为显著,可见地形高程差异大的地区对桥墩设计提出了更高的性能要求。

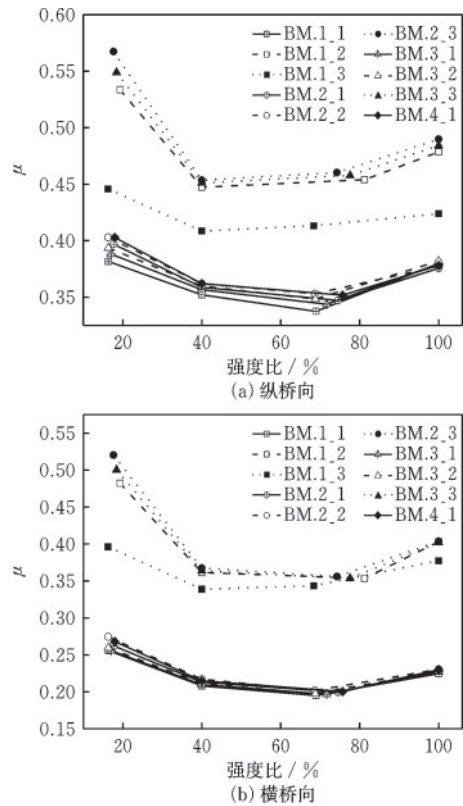


图 5 桥墩位移延性系数随强度比的变化
Fig.5 Relationship between displacement ductility coefficient of piers and yield strength ratio (ϕ_F)

图 6 到图 9 分别为不同强度比下桥墩峰值弯矩、峰值弯矩最大值与最小值的比值(后简称“弯矩比值”)和峰值剪力、峰值剪力最大值与最小值的比值(后简称“剪力比值”),可以看出:(1) 桥墩纵向和横向的峰值弯矩均随强度比的增大呈先减小后增大的趋势,强度比为 40% 时桥墩弯矩达最小值;相同强度比下,高墩规则桥梁和墩高差异大非规则桥

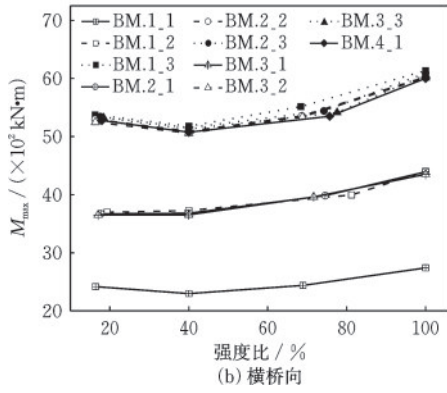
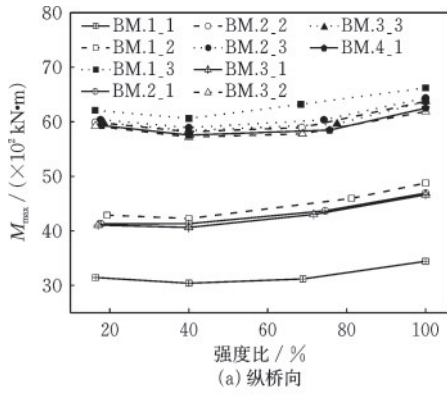


图6 桥墩峰值弯矩随强度比的变化

Fig.6 Relationship between peak bending moment of piers and yield strength ratio (ψ_F)

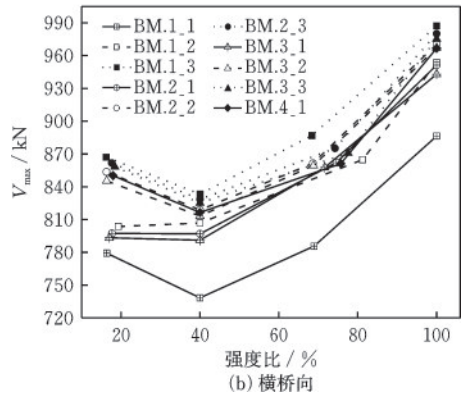
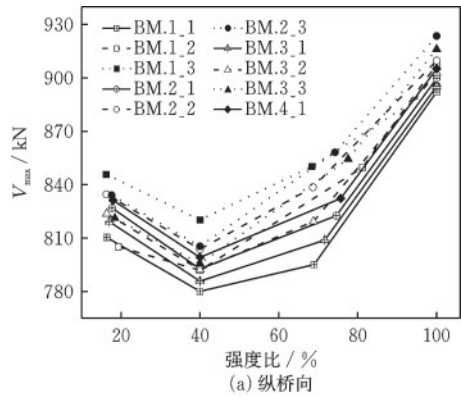


图8 桥墩峰值剪力随强度比的变化

Fig.8 Relationship between peak shear force of piers and yield strength ratio (ψ_F)

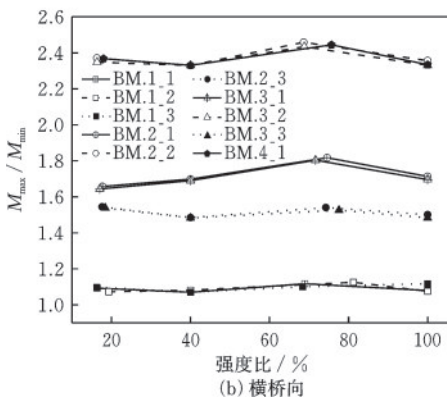
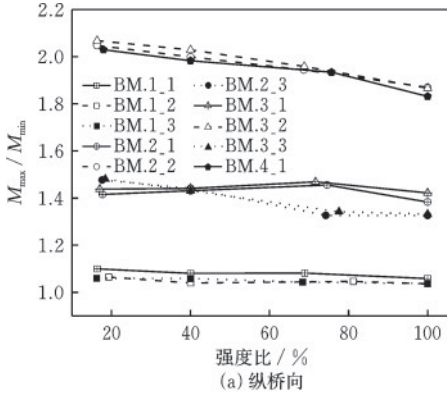


图7 桥墩峰值弯矩最大值与最小值比值

Fig.7 Relationship between ratio of maximum to minimum bending moment of piers and yield strength ratio (ψ_F)

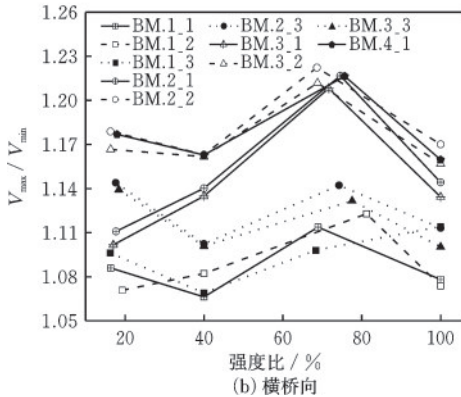
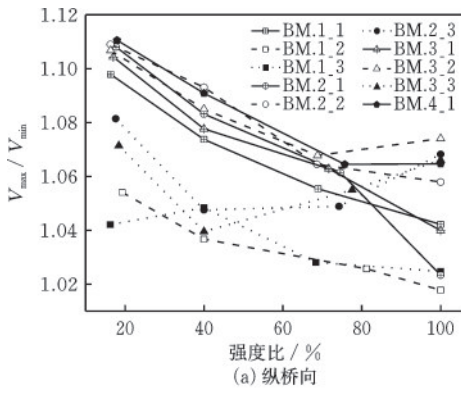


图9 桥墩峰值剪力最大值与最小值比值随强度比的变化

Fig.9 Relationship between ratio of maximum to minimum shear force of piers and yield strength ratio (ψ_F)

梁桥墩承受弯矩明显大于矮墩规则桥梁和墩高差异小的非规则桥梁;(2) 桥墩峰值剪力随强度比的增大先减小后增大,强度比取40%桥墩剪力最小,桥梁墩高变化对剪力的影响显著大于墩高不规则性;(3) 非规则桥梁桥墩弯矩比值和剪力比值普遍大于规则桥梁,一定墩高范围下的非规则桥梁剪力比值最大约为规则桥梁的2倍,弯矩比值则为1.1倍;强度比为40%时弯矩比值和剪力比值均处于较

小的水平,桥墩力分布为合理。

2.3 刚度比

为了进一步确定强度比的合理范围,并探究刚度比对隔震桥梁抗震性能影响,分别分析了强度比为30%、40%和50%时刚度比的变化对桥梁抗震性能的影响,不同工况下桥梁具体参数见表3。观察到,不同桥梁相同等效SDOF周期下刚度比范围

表3 不同工况下桥梁刚度比及归一化参数

Table 3 Stiffness ratios (ξ_k) and normalized parameters (ζ_k) of bridges under different conditions

模型编号	强度比30%			强度比40%			强度比50%		
	周期/s	刚度比 ξ_k	归一化参数 $\zeta_k/\%$	周期/s	刚度比 ξ_k	归一化参数 $\zeta_k/\%$	周期/s	刚度比 ξ_k	归一化参数 $\zeta_k/\%$
BM.1_1	1.50	1.40	100.00	1.50	1.28	100.00	1.50	1.18	100.00
	1.89	0.78	55.56	1.82	0.78	60.61	1.75	0.78	65.79
	2.50	0.39	27.78	2.50	0.34	26.79	2.50	0.30	25.33
	3.00	0.25	17.56	3.00	0.21	16.55	3.00	0.18	15.46
BM.1_2	1.50	5.63	100.00	1.50	5.16	100.00	1.50	4.69	100.00
	2.03	2.35	41.67	1.95	2.35	45.45	1.89	2.35	50.00
	2.50	1.34	23.75	2.50	1.20	23.18	2.50	1.07	22.75
	3.00	0.84	14.88	3.00	0.73	14.18	3.00	0.64	13.65
BM.1_3	1.50	8.95	100.00	1.50	8.29	100.00	1.50	7.46	100.00
	2.07	3.31	37.04	1.99	3.31	40.00	1.92	3.31	44.44
	2.50	1.94	21.67	2.50	1.69	20.40	2.50	1.49	20.00
	3.00	1.19	13.26	3.00	1.01	12.20	3.00	0.87	11.73
BM.2_1	1.50	2.34	100.00	1.50	2.16	100.00	1.50	1.98	100.00
	1.95	1.17	50.00	1.88	1.17	54.05	1.81	1.17	58.82
	2.50	0.62	26.50	2.50	0.55	25.41	2.50	0.48	24.41
	3.00	0.39	16.75	3.00	0.34	15.68	3.00	0.29	14.71
BM.2_2	1.50	2.64	100.00	1.50	2.43	100.00	1.50	2.22	100.00
	1.97	1.26	47.62	1.89	1.26	51.81	1.82	1.26	56.82
	2.50	0.67	25.24	2.50	0.59	24.09	2.50	0.51	23.01
	3.00	0.42	15.71	3.00	0.36	14.66	3.00	0.31	13.81
BM.2_3	1.50	6.87	100.00	1.50	6.32	100.00	1.50	5.77	100.00
	2.04	2.75	40.00	1.96	2.75	43.48	1.90	2.75	47.62
	2.50	1.58	23.00	2.50	1.39	21.96	2.50	1.21	21.05
	3.00	0.97	14.12	3.00	0.84	13.22	3.00	0.73	12.57
BM.3_1	1.50	1.75	100.00	1.50	1.61	100.00	1.50	1.49	100.00
	1.92	0.93	53.48	1.84	0.93	57.80	1.78	0.93	62.50
	2.50	0.48	27.54	2.50	0.42	26.01	2.50	0.37	25.00
	3.00	0.30	17.38	3.00	0.26	16.18	3.00	0.22	15.00
BM.3_2	1.50	1.83	100.00	1.50	1.69	100.00	1.50	1.56	100.00
	1.92	0.96	52.63	1.85	0.96	56.82	1.78	0.96	61.73
	2.50	0.49	26.84	2.50	0.43	25.57	2.50	0.38	24.38
	3.00	0.31	16.95	3.00	0.26	15.63	3.00	0.23	14.63
BM.3_3	1.50	6.15	100.00	1.50	5.72	100.00	1.50	5.19	100.00
	2.03	2.53	41.15	1.96	2.53	44.25	1.89	2.53	48.78
	2.50	1.44	23.46	2.50	1.28	22.35	2.50	1.14	21.95
	3.00	0.90	14.61	3.00	0.78	13.67	3.00	0.68	13.02
BM.4_1	1.50	2.78	100.00	1.50	2.58	100.00	1.50	2.38	100.00
	1.98	1.32	47.62	1.90	1.32	51.28	1.84	1.32	55.56
	2.50	0.72	25.95	2.50	0.63	24.62	2.50	0.56	23.61
	3.00	0.45	16.19	3.00	0.39	15.13	3.00	0.34	14.22

差异较大,如强度比为30%时桥梁BM.1_1刚度比范围为0.25~1.40,而桥梁BM.1_3刚度比范围为1.19~8.95,因此,为便于后面的对比分析,将刚度比归一化为式(3)所示的参数 ζ_k (后用“归一化参数”代指):

$$\zeta_k = \frac{\xi_k}{\xi_{k, \max}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, ξ_k 为不同等效周期对应的刚度比; $\xi_{k, \max}$ 为桥梁等效周期为1.5s时对应的最大刚度比。

桥梁纵向与横向地震反应规律基本一致,并且纵向大于横向,限于篇幅,后面仅给出桥梁纵向地震响应。图10为3种强度比下支座峰值剪应变随

归一化参数的变化,可以看出,当强度比处于30%~50%时,随强度比的增大,支座峰值剪应变逐渐减小;支座剪应变随归一化参数的增大而减小,并且归一化参数越小,支座剪应变变化越显著;当归一化参数大于60%时,支座剪应变小于100%,处于弹性状态。

不同归一化参数下桥墩位移延性系数的变化规律如图11所示,可以发现,在选择的强度比范围内,桥墩位移延性系数随强度比的增大而减小,随归一化参数的增大而增大;高墩规则桥梁和墩高差异大非规则桥梁受归一化参数影响相较于矮墩规

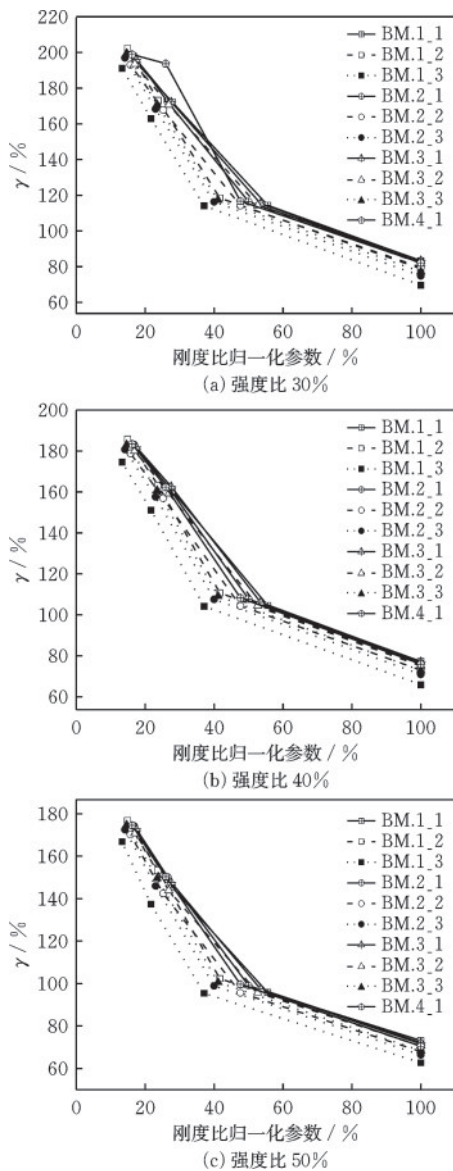


图10 不同强度比下支座峰值剪应变随归一化参数的变化
Fig.10 Relationship between peak shear strain of bearings and normalized parameter (ζ_k) under different yield strength ratios

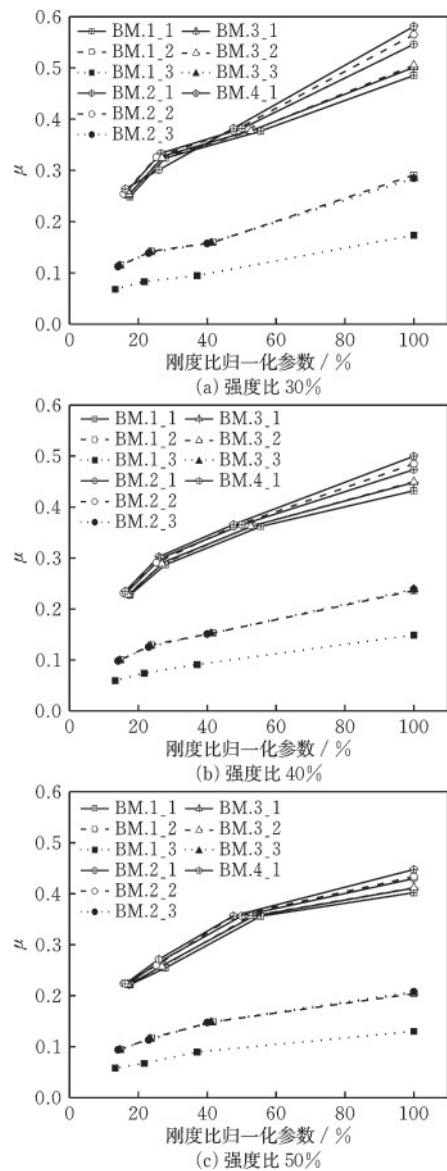


图11 不同强度比下桥墩位移延性系数随归一化参数的变化
Fig.11 Relationship between displacement ductility coefficient of piers and normalized parameter (ζ_k) under different yield strength ratios

则桥梁和墩高差异小的非规则桥梁变化更为明显,如当强度比为30%时,在所选刚度比归一化参数范围内,桥梁BM.1_3纵向位移延性系数增长了155%,而桥梁BM.1_1仅为95%。

图12~15分别给出了3种强度比下桥墩峰值弯矩、弯矩比值、峰值剪力与剪力比值随归一化参数的变化曲线,可以看出:桥墩剪力、弯矩与位移延性系数变化规律类似,随强度比的增大而增大,随归一化参数的增大而减小;归一化参数相同时,对于

高墩规则桥梁和墩高差异大的非规则桥梁桥墩,其峰值弯矩和峰值剪力大于矮墩规则桥梁和墩高差异小的非规则桥梁;非规则桥梁和弯矩比值和剪力比值普遍大于规则桥梁,并且墩高越不规则其弯矩比值、剪力比值越大;随归一化参数的增大弯矩比值呈先减小后增大的趋势,剪力比值则基本呈“斜N”趋势变化,当强度比和归一化参数均为40%~50%时,桥墩剪力比值和弯矩比值处于较小的水平。

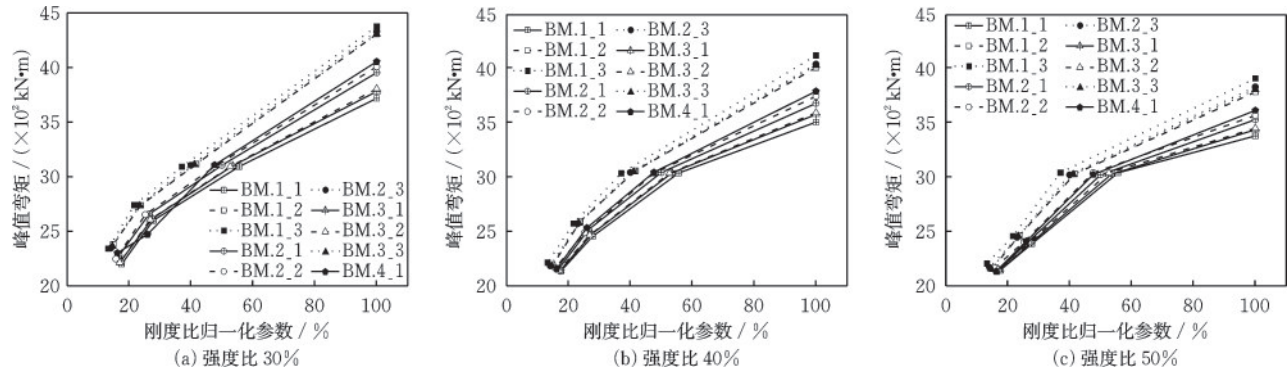


图12 不同强度比下桥墩峰值弯矩随归一化参数的变化

Fig.12 Relationship between peak bending moment of piers and normalized parameter (ζ_k) under different yield strength ratios

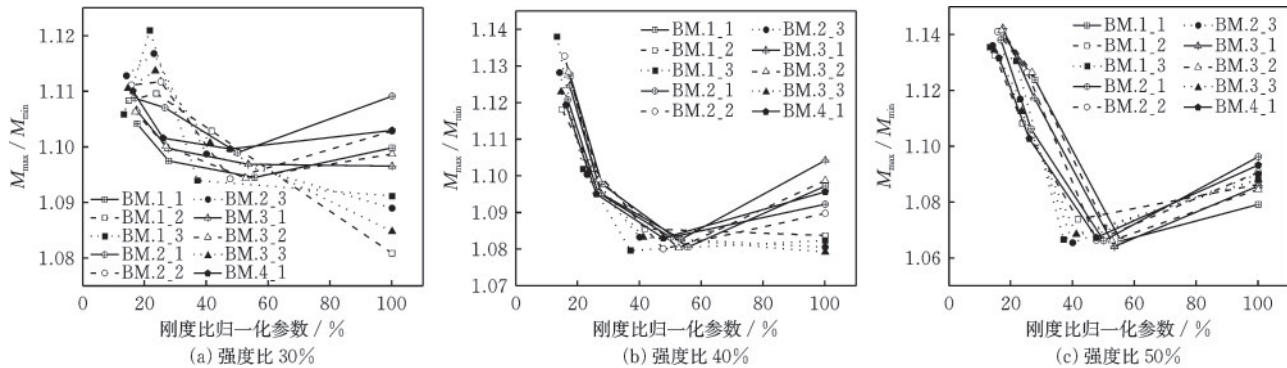


图13 不同强度比下桥墩弯矩比值随归一化参数的变化

Fig.13 Relationship between ratio of maximum to minimum bending moment of piers and normalized parameter (ζ_k) under different yield strength ratios

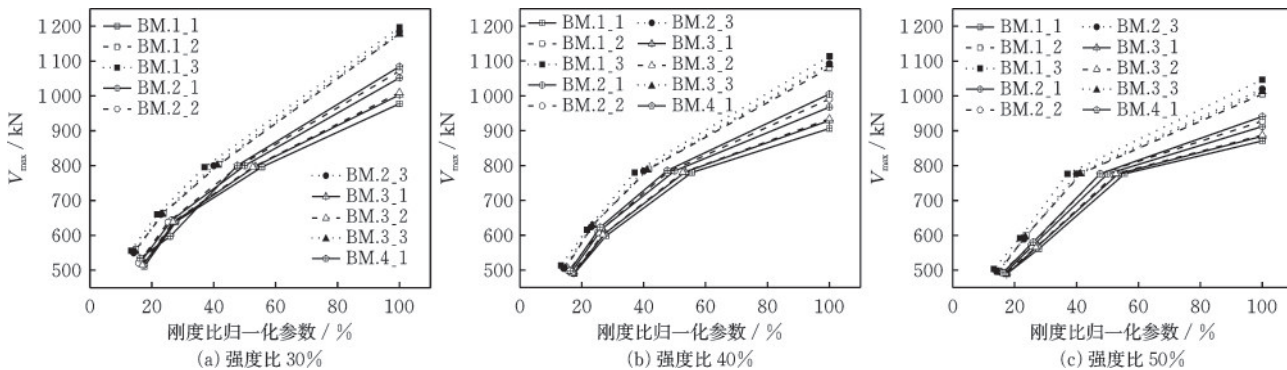


图14 不同强度比下桥墩峰值剪力随刚度比归一化参数的变化

Fig.14 Relationship between peak shear force of piers and normalized parameter of stiffness ratios (ζ_k) under different yield strength ratios

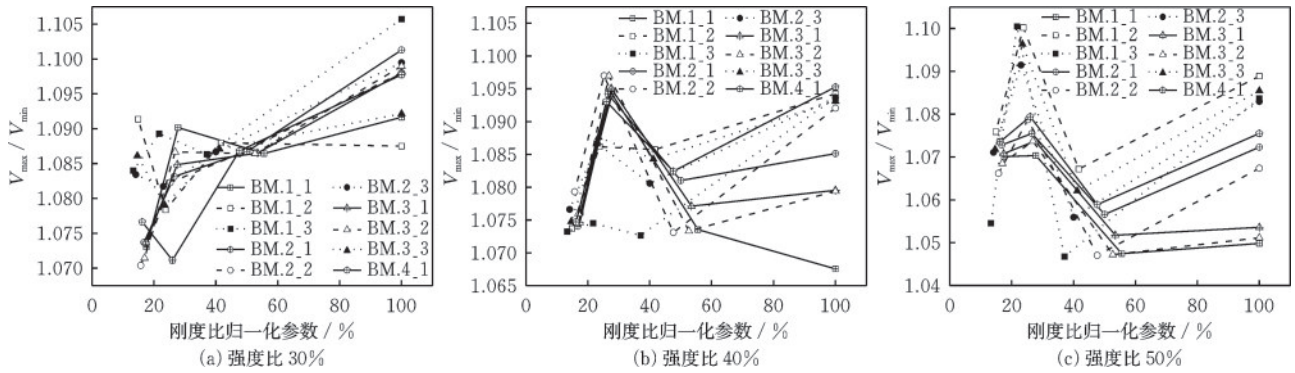


图15 不同强度比下桥墩剪力比值随归一化参数的变化

Fig.15 Relationship between ratio of maximum to minimum shear force of piers and normalized parameter (ζ_k) under different yield strength ratios

综上所述,强度比、归一化参数取不同值时规则和非规则桥梁支座和桥墩的地震反应变化规律较为一致,无量纲参数强度比和归一化参数普遍适用性较强;强度比和归一化参数均设计在40%~50%范围内可以有效发挥隔震支座抗震性能,减小非规则桥梁桥墩弯矩、剪力的集中分布。

3 结论

以具有不同墩高特征的规则和不规则桥梁为研究对象,利用非线性动力时程分析探究了采用不同屈服强度和屈服前刚度LRB隔震桥梁的支座剪应变、桥墩位移延性系数、弯矩及剪力地震需求,主要得到如下结论:

(1) 墩高不一致的非规则桥梁各墩剪力和弯矩需求差异显著大于规则桥梁,一定墩高变化范围下的非规则桥梁桥墩弯矩最大值与最小值的比值约为规则桥梁的2倍,剪力比值约为1.1倍。

(2) 当强度比(ϕ_F)取不同值时,不同工况隔震桥梁地震响应变化趋势相同,说明 ϕ_F 普适性较强;当 ϕ_F 一定时,支座、桥墩地震反应随支座和桥墩屈服前刚度比(ξ_k)与桥梁等效周期1.5s时对应最大刚度比($\xi_{k,max}$)之比($\xi_k/\xi_{k,max}$)的变化规律明显且基本一致,则说明 $\xi_k/\xi_{k,max}$ 普适性较强;综上 ϕ_F 和 $\xi_k/\xi_{k,max}$ 可代表支座力学参数对桥梁进行抗震设计。

(3) 墩高差异大的非规则桥梁支座、桥墩的地震响应受LRB屈服强度和屈服前刚度影响显著大于墩高差异小的非规则桥梁,墩高差异越大非规则桥梁地震响应对隔震参数越敏感。

(4) 合理设置LRB屈服强度和屈服前刚度是改善非规则桥梁抗震性能的有效途径。当非规则

隔震桥梁支座与桥墩屈服强度之比(F_{iso}/F_{pier})、支座与桥墩屈服前刚度比(ξ_k)与桥梁等效周期1.5s时对应最大刚度比($\xi_{k,max}$)之比($\xi_k/\xi_{k,max}$)均为40%~50%时可以在充分发挥支座抗震性能、保护桥墩安全的同时优化其结构受力。

参考文献:

[1] 魏标,崔睿博,戴公连,等. 橡胶支座对非规则连续梁桥地震反应的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 110-117.
Wei B, Cui R B, Dai G L, et al. Impact of laminated rubber bearings on seismic response of irregular continuous bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 110-117. (in Chinese)

[2] 李建中,管仲国. 桥梁抗震设计理论发展:从结构抗震减震到震后可恢复设计[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 1-9.
Li J Z, Guan Z G. Research progress on bridge seismic design: target from seismic alleviation to post-earthquake structural resilience [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(12): 1-9. (in Chinese)

[3] Li J Z, Peng T, Xu Y. Damage investigation of girder bridges under the Wenchuan earthquake and corresponding seismic design recommendations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337-344.

[4] 宋飞,李建中,管仲国. 汶川地震百花大桥震害分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 121-128.
Song F, Li J Z, Guan Z G. Seismic damage analysis of Baihua Bridge under Wenchuan earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8): 121-128. (in Chinese)

[5] Sun Z G, Wang D S, Guo X, et al. Lessons learned

- from the damaged Huilan interchange in the 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(1): 15-24.
- [6] Palermo A, Le Heux M, Bruneau M, et al. Preliminary findings on performance of bridges in the 2010 Darfield earthquake[J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2010, 43 (4) : 412-420.
- [7] 石岩,李军,秦洪果,等. 桥梁双柱式排架墩抗震性能研究进展述评[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2) : 134-154.
Shi Y, Li J, Qin H G, et al. Review on seismic performance of bridge double-column bents[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2) : 134-154. (in Chinese)
- [8] Jara J M, Villanueva D, Jara M, et al. Isolation parameters for improving the seismic performance of irregular bridges[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2013, 11(2): 663-686.
- [9] 夏人杰,赵人达. 非规则多跨连续梁桥横向地震碰撞效应研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(2) : 327-335.
Xia R J, Zhao R D. Study on transverse pounding effects of irregular multi-span continuous girder bridges during earthquakes [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38 (2) : 327-335. (in Chinese)
- [10] Jara J M, Reynoso J R, Olmos B A, et al. Expected seismic performance of irregular medium-span simply supported bridges on soft and hard soils[J]. *Engineering Structures*, 2015, 98: 174-185.
- [11] 程麦理,李青宁,尹俊红,等. 非规则高墩曲线桥梁振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(2): 24-30.
Cheng M L, Li Q N, Yin J H, et al. Shaking tables tests of irregular curved bridge with high piers[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2) : 24-30. (in Chinese)
- [12] Soleimani F. Propagation and quantification of uncertainty in the vulnerability estimation of tall concrete bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 202: 109812.
- [13] 王军文,李建中,范立础. 非规则梁桥伸缩缝处的碰撞对地震反应的影响[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(1): 54-59.
Wang J W, Li J Z, Fan L C. Effect of pounding at expansion joints on seismic response of irregular girder bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39 (1): 54-59. (in Chinese)
- [14] 陈敬一,王利辉,周雨龙,等. 近场地震作用下单跨斜交桥地震反应分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42 (6): 1314-1323.
Chen J Y, Wang L H, Zhou Y L, et al. Seismic response analysis of skewed bridges under near-field ground motions[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(6) : 1314-1323. (in Chinese)
- [15] Soltanieh S, Memarpour M M, Kilanehi F. Performance assessment of bridge-soil-foundation system with irregular configuration considering ground motion directionality effects[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 118: 19-34.
- [16] Akbari R. Seismic fragility analysis of reinforced concrete continuous span bridges with irregular configuration [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(9): 873-889.
- [17] 魏标,李建中. 基于位移的非规则梁桥抗震设计[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(8): 95-101.
Wei B, Li J Z. Displacement-based seismic design of irregular continuous bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(8): 95-101. (in Chinese)
- [18] Shi Y, Zhong Z W, Qin H G, et al. Toggle buckling-restrained brace systems and a corresponding design method for the seismic retrofit of bridge bents[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 110996.
- [19] Ishac M G, Mehanny S S F. Do mixed pier-to-deck connections alleviate irregularity of seismic response of bridges with unequal height piers[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017, 15(1): 97-121.
- [20] 宋晓东,李建中. 山区桥梁的抗震概念设计[J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(1): 92-96.
Song X D, Li J Z. Seismic conceptual design for mountain bridges[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2004, 24(1): 92-96. (in Chinese)
- [21] 张文学,陈士通,杜修力,等. 非规则连续梁桥应用锁死销减震控制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(12): 3384-3391.
Zhang W X, Chen S T, Du X L, et al. Seismic control of irregular continuous bridge with locking dowel [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(12): 3384-3391. (in Chinese)
- [22] 吴文朋,彭巧威,龙士国,等. 支座布置对不等高墩曲线桥梁抗震性能的影响分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2019, 39(4): 227-235.
Wu W P, Peng Q W, Long S G, et al. Influences of bearing arrangement on seismic performance of curve

- bridge with unequal height piers[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2019, 39(4): 227-235. (in Chinese)
- [23] 陈亮, 李建中, 张文学. 梁墩刚度分布对连续梁桥横向规则性的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(9): 1175-1180.
Chen L, Li J Z, Zhang W X. Effects of girder and pier stiffness on continuous bridge regularity in transverse direction[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, 35(9): 1175-1180. (in Chinese)
- [24] 李建中, 范立础. 非规则梁桥纵向地震反应及碰撞效应[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(1): 84-90.
Li J Z, Fan L C. Longitudinal seismic response and pounding effects of girder bridges with unconventional configurations [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(1): 84-90. (in Chinese)
- [25] 石岩, 王东升, 韩建平, 等. 桥梁减隔震技术的应用现状与发展趋势[J]. *地震工程与工程振动*, 2017, 37(5): 118-128.
Shi Y, Wang D S, Han J P, et al. Application status of seismic isolation for bridges and its development tendency[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2017, 37(5): 118-128. (in Chinese)
- [26] 石岩, 王东升, 孙治国. 基于位移的中等跨径减隔震桥梁抗震设计方法[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(2): 71-81.
Shi Y, Wang D S, Sun Z G. Displacement-based seismic design method for medium span bridges with seismic isolation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(2): 71-81. (in Chinese)
- [27] Sarrazin M, Moroni O, Neira C, et al. Performance of bridges with seismic isolation bearings during the Maule earthquake, Chile [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, 47: 117-131.
- [28] Bessason B, Haflidason E. Recorded and numerical strong motion response of a base-isolated bridge [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 309-332.
- [29] Jónsson M H, Bessason B, Haflidason E. Earthquake response of a base-isolated bridge subjected to strong near-fault ground motion[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30(6): 447-455.
- [30] 周云, 吴从晓, 张崇凌, 等. 芦山县人民医院门诊综合楼隔震结构分析与设计[J]. *建筑结构*, 2013, 43(24): 23-27.
Zhou Y, Wu C X, Zhang C L, et al. Analysis and design of seismic isolation structure in outpatient building of the Lushan County People's Hospital [J]. *Building Structure*, 2013, 43(24): 23-27. (in Chinese)
- [31] 王东升, 李宏男, 王国新, 等. 弹塑性地震反应谱的长周期特性研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(2): 49-55.
Wang Dongsheng, Li Hongnan, Wang Guoxin, et al. Study on characters of long period portion of inelastic spectra [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2006, 26(2): 49-55. (in Chinese)
- [32] Ozdemir G, Dicleli M. Effect of lead core heating on the seismic performance of bridges isolated with LRB in near-fault zones [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2012, 41(14): 1989-2007.
- [33] 公路桥梁抗震设计规范: JTG/T 2231-01—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
(本文编辑: 周小潭)