

大墩高差多跨简支钢箱梁桥顺桥向抗震性能研究和 抗震韧性提升策略

曲 慧

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘 要: 以既有工程项目为依托,为提高简支钢箱梁桥在高烈度山区桥梁中应用的安全性,研究桥墩高差对简支钢结构桥梁的纵向地震响应影响规律。首先明确研究案例,选择10跨标准跨径为36 m左右的简支钢箱梁为研究对象;然后通过调整模型中墩高参数、支座参数,对比墩高差对普通约束体系桥梁和采用减隔震约束体系的桥梁在纵向地震作用下的结构响应影响规律;得到桥梁动力特性和纵向地震响应随墩高差的变化规律。同时还提出多跨简支钢箱梁桥的抗震韧性提升策略,为今后同类桥梁抗震设计提供一定的借鉴作用。

关键词: 大墩高差;多跨简支钢箱梁;顺桥向抗震性能;抗震韧性体系

中图分类号: U442.5*5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0129-07

Study on Seismic Performance along Bridge and Seismic Resilience Upgrading Strategy of Large-pier Height-difference Multi-span Simple- supported Steel Box Girder Bridge

QU Hui

[Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: Based on the existing engineering projects, in order to improve the safety in the application of simple-supported steel box girder bridges in high-seismic mountainous areas, the influence of pier height difference on the longitudinal seismic response of simple-supported steel structure bridge is studied. The study case is clarified by selecting a 10-span simple-support steel box girder with the standard span of about 36m as the research object, and then by adjusting the pier height parameter and the support parameter in the model, the effect of pier height difference on the structural response of bridges with ordinary constraint system and bridges with vibration isolation constraint system under longitudinal seismic action is compared. Finally, the change law of the dynamic characteristics and longitudinal seismic response of the bridges with the pier height difference is obtained. In addition, the strategies for upgrading the seismic toughness of multi-span simple-supported steel girder bridges are proposed, which provides some reference for future design of similar bridges.

Keywords: large pier height difference; multi-span simple-supported steel box girder; seismic performance along bridge; seismic toughness system

0 引 言

我国幅员辽阔,地形地貌复杂多样,位于高烈度区的山区桥梁项目,为了适应山区地形,受道路选线影响,经常出现桥梁必须布置在山间峡谷区或山间河谷区,桥梁纵断剖面呈现“V”字形或“U”字形,导致采用上部结构跨径布置相差不多的桥梁结构,桥墩墩身高度高矮不一,从而导致相邻联桥梁的动力

特性存在显著的差异。尤其处于高烈度区的桥梁,相邻联之间较大的动力特性差异,会带来一系列的抗震风险。

虽然国内有一些学者对墩高差对高墩桥梁的抗震性能影响做过分析,但是针对的上部结构形式多局限于三跨或四跨的标准混凝土T梁或小箱梁连续梁结构,如田英侠、张墨的近场地震动作用下墩高差对高墩桥梁的影响分析^[1],针对多跨简支梁结构的一般都针对的是交通部通用的桥面连续简支混凝土主梁,如王强、张亚洲的纵向墩高差对桥梁抗震响应的研究^[2],研究对象并未涉上部结构为钢结构

收稿日期: 2024-11-08

作者简介: 曲慧(1984—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

的简支主梁结构形式^[3-5]。然而钢结构桥梁因其结构自重轻,在高烈度区也是优选的桥梁类型。

本文将以实际工程案例为背景,建立存在墩高差的多跨简支钢箱梁桥、等高墩和等高矮墩的桥梁三种模型,通过对比是否存在墩高差以及选用墩的不同高度,对结构动力特性、墩底内力、联间相对位移和减隔震支座减震效率的影响,来研究墩高差对多跨简支钢箱梁桥顺桥向抗震性能的影响。并提出对于多跨简支钢箱梁的提升抗震体系韧性的策略,为将来同类桥梁的抗震设计提供一定的借鉴作用。

1 工程概况

以山西省太原市西山旅游公路上,一段跨越山谷桥梁为工程依托,桥梁效果见图1。由于所跨越的山谷为采煤采空区且跨越一条地质断裂带,因此在桥梁结构类型上选择对沉降和基础变位不敏感的简支梁桥,同时考虑减轻主梁结构自重,从而减少基础沉降,选择主梁的材料为钢结构 Q345qE,为了提高

行车的舒适性,选择将桥面层做成连续的,增加行车的平稳性。桥梁总长为 370 m,桥跨径布置为 U01 (3×36 m)+U02 (36 m+2×38 m)+ U03 (38 m+52 m)+ U04 (2×30 m),桥宽 8.5 m,最高墩高为 28 m,最矮墩高为 11 m。下部结构采用 T 形盖梁独柱墩,盖梁采用造型别致的钻石形状断面,立柱采用椭圆形截面,矮墩为等截面椭圆,椭圆直径为 1.65 m×2.0 m,高墩为变截面椭圆,椭圆直径为 2.0 m×3.0 m~2.0 m×3.8 m,材料为 C40 混凝土。基础采用钻孔灌注群桩基础,单桩桩基直径为 1.5 m,矮墩桩基布置为 4×1.5 m,高墩桩基布置为 5×1.5 m。桥梁的总体布置见图 2。



图1 桥梁效果图

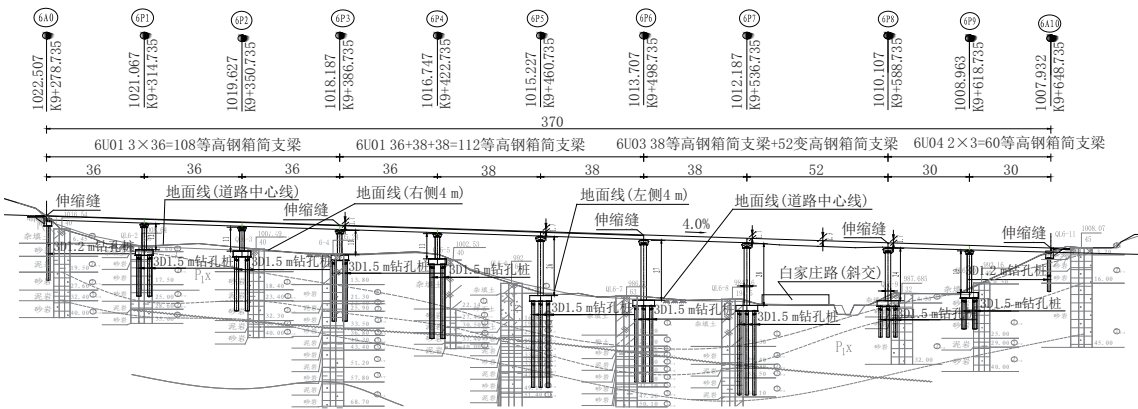


图2 桥梁总体布置图(单位:m)

2 计算模型

桥梁所处场地抗震设防烈度为 8 度(0.20g),场地类别为 II 类。在 7 号墩和 8 号墩之间跨越地质断裂带。采用双曲面减隔震球钢支座,承台底采用 6×6 弹簧模拟桩土相互作用。在动力特性模型和反应谱模型中,支座采用弹性连接模拟静力约束体系,在非线形时程分析模型中,支座采用双线性连接模拟,考虑边界的非线性。为了方便分析不同墩高差对桥梁地震响应的影响,故建立存在大墩高差、等墩高差(矮墩)和等墩高差(高墩)三种模型进行对比,三种模型墩高参数见表 1,利用大型商业空间有限元软件 MIDAS Civil 建立有限元模型见图 3。减隔震支座参

数见表 2。

表 1 不同模型墩高相关参数列表

类型	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5	模型 6
支座约束	静力约束				减隔震	
分析方法	线性				非线性	
P1 墩/m	12	11	28	12	11	28
P2 墩/m	11	11	28	11	11	28
P3 墩/m	11	11	28	11	11	28
P4 墩/m	11	11	28	11	11	28
P5 墩/m	26	11	28	26	11	28
P6 墩/m	27	11	28	27	11	28
P7 墩/m	28	11	28	28	11	28
P8 墩/m	24	11	28	24	11	28
P9 墩/m	19	11	28	19	11	28

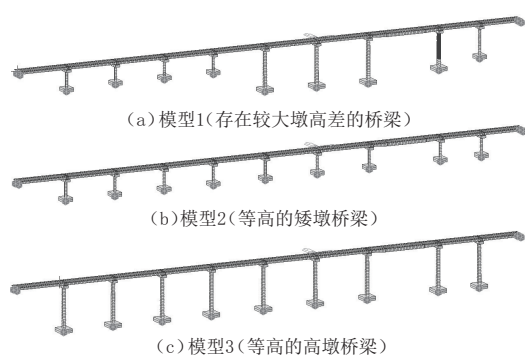


图3 三种墩高有限元模型

表2 减隔震支座参数

支座型号/t	半径/m	摩擦系数	屈服前刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	屈服后刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
200	3.5	0.03	129 60	247

3 场地设计反应谱的选取

依据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020),本项目道路等级为三级公路,桥梁的抗震设防分类为C类(属于单跨跨径不超过150 m的三级公路上的大桥),地震基本烈度为8度($0.20g$),分组为第一组,结构阻尼比为0.03,选取的E1地震作用下,场地设计加速度反应谱最大值 $S_{\max}=0.2g$;选取的E2地震作用下,场地设计加速度反应谱最大值 $S_{\max}=0.58g$;设计反应谱见图4。模型计算中采用的地震输入仅采用顺桥向和横桥向水平向地震输入工况。

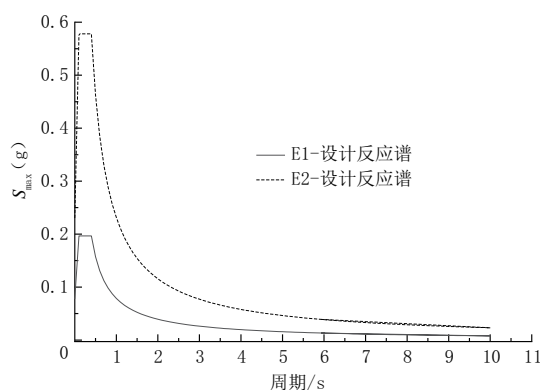


图4 场地设计反应谱

4 动力特性分析

桥梁结构的自振周期和振型可以最为直观的反应结构的刚度和动力特性,利用有限元软件中的Lanczoc方法计算得到各模型的自振周期。仅列出模型的前20阶周期,具体情况见图5。

通过图5可知,对于按照正常使用阶段约束体系的模型,等高墩高为28 m的模型,结构的周期整体较等高墩高为11 m的模型的周期更长,等高墩高

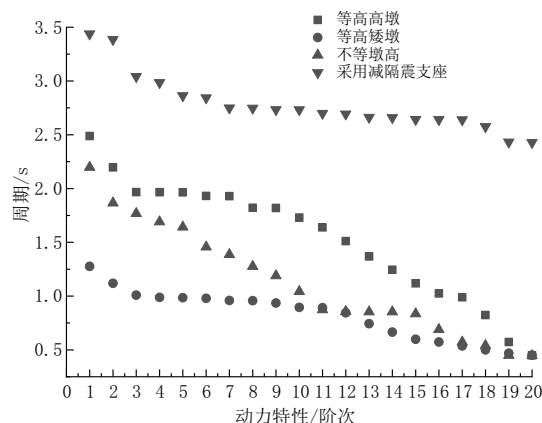


图5 不同模型的前20阶周期分布情况图

28 m模型的主梁整体纵漂周期为2.49 s,等高墩高为11 m模型的主梁整体纵漂周期为1.28 s,不等高墩高模型的主梁纵漂基本周期为2.2 s,不等高墩高模型的周期随着墩高的变化,前20阶周期分散于两个等高墩高模型的周期之间。

从图5中还可以看出,采用减隔震支座的模型,可以有效的延长结构的周期,结构的主梁整体纵漂和整体横漂的基本周期都延长到3.44 s左右。较原来的不等高墩高模型的基本周期2.2 s,周期延长值接近1 s,前20阶结构的周期均超过2.5 s。

5 纵向抗震性能分析

5.1 墩高差对桥墩内力的影响

在E1地震作用和E2地震作用下,对采用静力约束体系的模型1(大高差)、模型2(等墩高矮墩)、模型3(等墩高高墩)进行线性分析,采用反应谱分析方法,得到桥墩的顺桥向地震内力响应,图6至图8为墩底内力响应对比图。

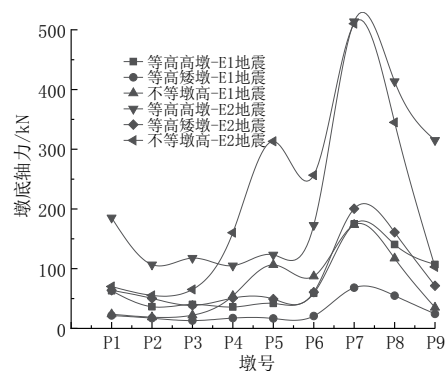


图6 (静力约束下)3种模型墩底轴力的对比

图6为3种模型墩底地震轴力的对比图,可以看出存在较大墩高差的桥梁(模型1)对顺桥向地震作用下产生的地震轴向力在P4~P6墩范围有一定的放大作用,存在墩高差的桥梁(模型1)中在墩高过渡区

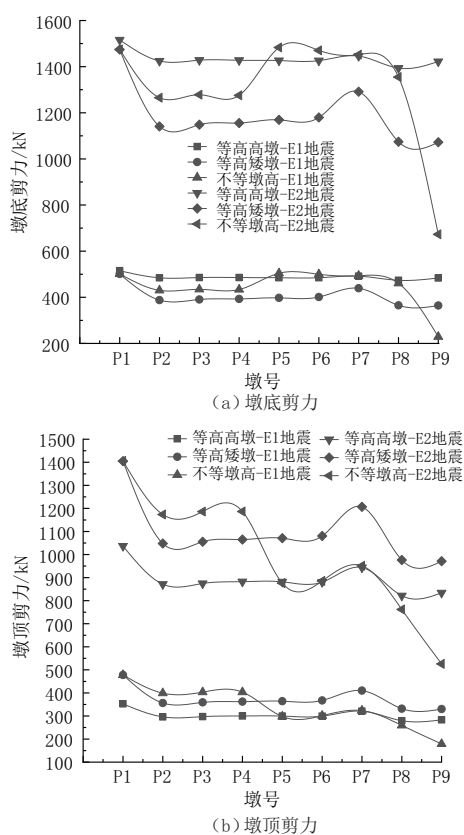


图7 (静力约束下)3种模型墩底、墩顶剪力对比图

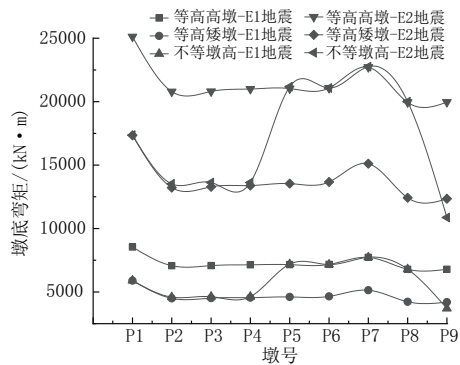


图8 (静力约束下)3种模型墩底弯矩的对比

(P4~P7墩)的地震轴向力比等高墩(模型3)的轴向力更大。图7为3种模型墩底剪力和墩顶剪力的对比图,可以看出存在较大墩高差的桥梁(模型1)对顺桥向地震作用下产生的桥墩墩顶剪力在墩高较矮区域(P2~P4墩)有一定的放大作用,墩高较高区域(P6~P9墩)有一定的缩小作用。图8为三种模型墩底截面地震顺桥向弯矩的对比图,可以看出存在墩高差的桥梁(模型1)中墩底弯矩基本在等高墩(模型3)和等高矮墩(模型2)中,根据墩高分布,对于较高的桥墩,模型1中的墩底弯矩更接近等高墩(模型3),对于较矮的桥墩,模型1中的墩底弯矩更接近等高矮墩(模型2)。

5.2 减隔震支座对大墩高差桥墩内力的影响

在E1地震作用和E2地震作用下,对采用减隔震支座约束体系的模型4(大高差),采用边界非线性时程分析。与采用静力约束体系模型1(大高差)进行对比,得到的桥墩的顺桥向地震内力响应对比图,见图9至图11。

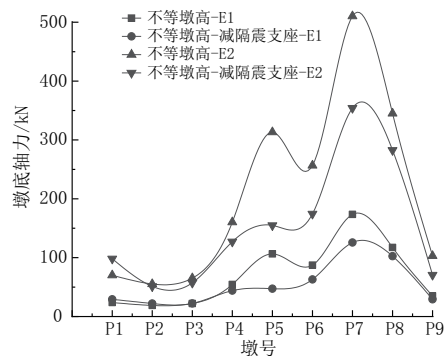


图9 两种模型墩底轴力的对比

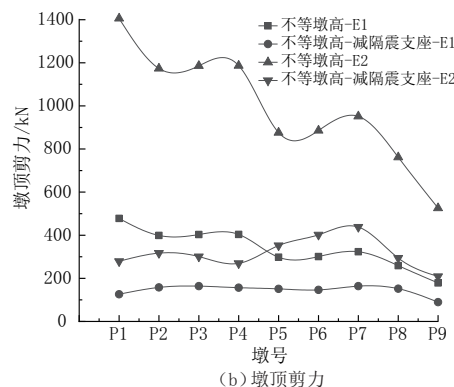
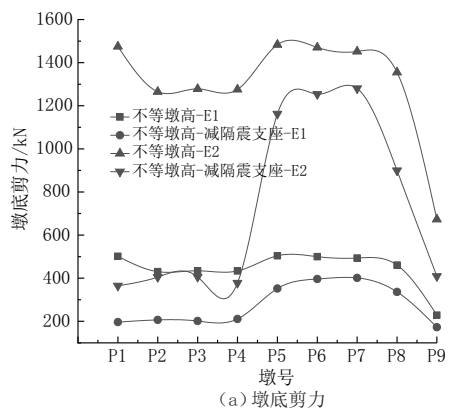


图10 两种模型墩底、墩顶剪力的对比

从图9可以看出,采用减隔震支座对墩底地震轴向力有一定的降低作用。从图10可以看出,采用减隔震支座对墩顶底地震剪力有大幅度的降低。从图11可以看出,采用减隔震支座对墩顶底地震顺桥向弯矩也有较大幅度的降低,可以将E2地震作用下的弯矩作用,降低到与E1地震作用下的弯矩持平,大大降低结构在地震作用下的受力。可见对于大墩高差的桥梁,减隔震支座的应用对降低结构的地震响应

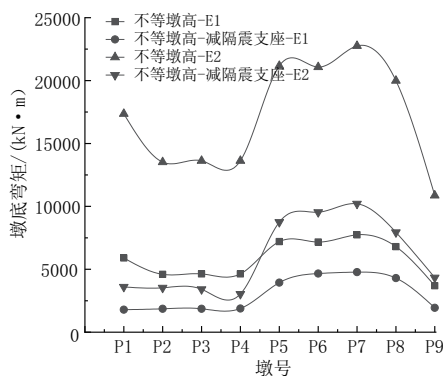


图11 两种模型墩底弯矩的对比

还是有较为明显的作用,但对于墩高较高范围的桥墩(P5~P8),地震效应降低幅度不如矮墩范围桥墩(P2~P4和P9)更显著。

5.3 墩高差对联间相对位移的影响

通过对模型1至模型6进行E2作用下,非线性时程分析,得到同一时刻下,相邻梁端之间的位移差,从而得到相邻简支联之间的顺桥向最大相对位移。对比图12至图17中的联间相对位移值可以看出,采用减隔震支座后,有效的降低了地震作用导致的顺桥向联间相对位移值,从未设减隔震支座的联间最大位移值为200 mm,减少到联间位移值为40 mm,减少了80%的地震效应。通过对比图12至图14可以看出,采用减隔震支座后,联间纵向相对位移较大的位置主要集中在P7墩和P8墩位置处,为单跨52 m大跨处与单跨38 m和单跨30 m跨处交接位置纵向梁间相对位移最大。

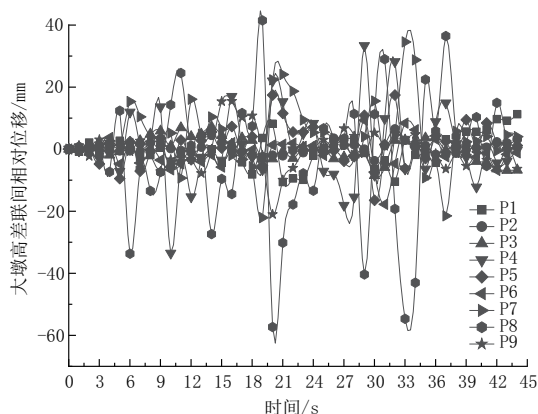


图12 大墩高差模型联间相对位移(E2)-采用减隔震支座

通过对比图15至图17可以看出,对于未采用减隔震支座的桥梁,墩高高的桥梁,纵向联间相对位移也大,图15和图16中模型的纵向联间最大位移为200 mm,在P7和P8处值最大。而墩高矮的桥梁,图17中模型的最大联间位移为100 mm,在P2、P7和P8处值最大。图15中模型,大墩高差的桥梁纵向联间相对位移在多跨间都表现的很大。

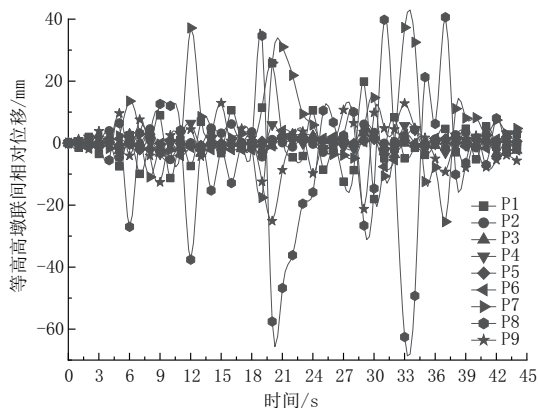


图13 等高墩模型联间相对位移(E2)-采用减隔震支座

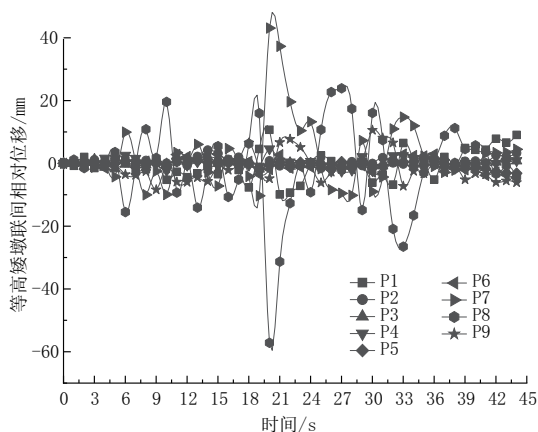


图14 等高矮墩模型联间相对位移(E2)-采用减隔震支座

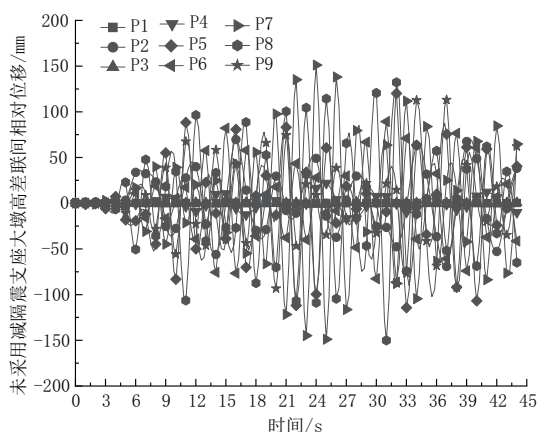


图15 大墩高差模型联间相对位移(E2)-未采用减隔震支座

通过上面的分析可以看出,无论是否采用减隔震支座,纵向联间相对位移整体表现为在大跨和高墩位置的联间相对位移最大,需要在这些位置加强防落梁设计。而对于未采用减隔震设计的桥梁,规范中并未对要求对联间相对位移进行验算,但依然需要面对在实际地震中联间相对位移较大的问题,尤其墩高差较大的桥梁,梁间相对位移在多联位置都出现很大的位移差,容易产生梁间相互碰撞,就像多米诺骨牌一样,引起连锁的碰撞效应,产生二次损伤,因此在设计中需要注意给联间留有足够的结构

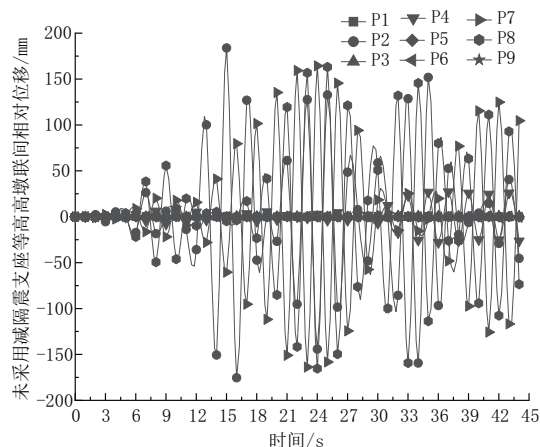


图16 等高墩模型联间相对位移(E2)-未采用减隔震支座

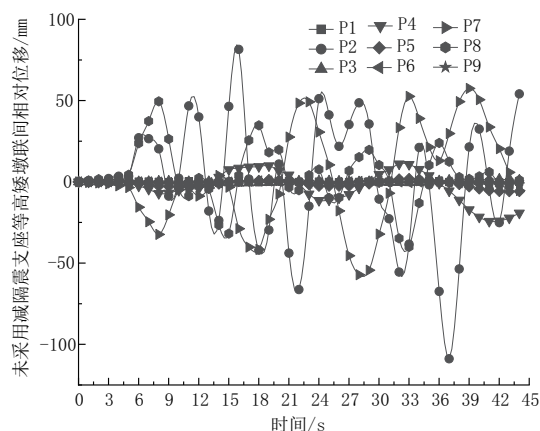


图17 等高矮墩模型联间相对位移(E2)-未采用减隔震

缝,以保证结构不碰撞,同时应注意留好墩梁搭接值,防止主梁在运动过程碰撞,带动落梁。

6 抗震韧性体系提升策略

前面通过定量的有限元分析,得到了墩高差较大的简支梁在地震作用下可能面临的抗震重要问题,由于墩高差的存在,与等墩高桥相比对桥墩地震效应存在一定的地震效应放大作用,同时在墩高差变化剧烈的位置,容易发生较大的“墩-梁”和“梁-梁”相对位移。由于上部结构为简支梁桥,整个桥梁的结构冗余度较小,在面对突发的地震作用时,桥梁抵御地震作用的能力较弱。在以往发生的震害中,不难发现对于简支梁最容易发生的震害就是落梁,无论是在大跨度带上构主桥接简支引桥位置,还是多跨简支桥梁仅桥面连续的混凝土梁桥上,都在人类抗震历史上,被观测到多次简支梁桥落梁震害发生,在我国2008年在汶川发生的8.0级地震中高原桥,发生了简支梁的落梁震害^[7-9](见图18)。在我国2021年在青海玛多发生的7.4级地震中的野马滩大桥,其采用25跨20 m简支仅桥面连续的预应力混凝土

土空心板结构,在进断层地震作用下,发生了连续的过跨落梁震害^[10-15](见图19)。



图18 高原大桥(2008年汶川)



图19 野马滩大桥(2021年青海)

经过事故分析,简支梁在地震中最易发生的落梁破坏,尤其近场地震时,相邻梁体之间结构周期差异较大或是受到不同步激励作用墩梁间纵向运动较大,在搭接长度不满足地震需求条件下,导致主梁碰撞和落梁破坏(见图18)。还有的桥梁虽然联间搭接长度够,但是由于桥台台背在地震中被梁体撞坏,导致主梁的纵向位移没有台背约束,纵向位移失控,发生连续的多联碰撞,而导致多联坠落^[16-20](见图19)。

那么对于本文所讨论的大墩高差多跨简支钢箱梁桥,虽然上部结构自重较轻,地震效应相较于混凝土主梁会减小很多,但是由于墩高差距较大,导致相邻联的动力特性相差较多,在墩高突变的地方地震造成的纵向墩梁位移加大,因此应该考虑连梁装置或者带有防落梁功能的支座,增加上部结构的冗余度。

当强震发生时,连梁装置和防落梁装置,将多跨简支的主梁,转化为连续梁,一起抵抗水平向的地震作用,将联间约束强化,将落梁的风险转移,从而增大了桥梁的韧性,提升了桥梁体系的抗震性能。同时注意加强桥台背墙的强度,让台背有能力限制住梁体的纵向地震运动,提高简支梁抗震体系的韧性。让简支梁这种结构形式,在强震区也可以安全的使用,避免发生系统性的倒塌破坏。

7 结 语

通过对比在高烈度区存在大墩高差的多跨简支

钢梁桥的纵桥向地震响应与没有墩高差的多跨简支钢梁的纵桥向地震响应,进行较为全面的分析可以得到以下结论。

(1)在纵向动力特性表现上,存在墩高差桥梁的纵向基本周期,分散于两个等高墩高桥梁的纵向基本周期之间。对于存在墩高差桥梁,采用减隔震设计可以有效的延长结构的基本周期,起到隔震作用。

(2)在纵向墩柱地震性能表现上,存在墩高差桥梁对墩柱轴向力有一定的放大作用,在墩高过渡区的地震轴向力比等高高墩桥梁的轴向力更大。存在较大墩高差桥梁对桥墩墩顶剪力在墩高较矮区域有一定的放大作用,在墩高较高区域有一定的缩小作用,存在较大墩高差桥梁墩底弯矩,按照墩高均匀分布在等高桥梁墩底弯矩之间。

(3)在纵向减隔震支座使用效果的表现上,采用减隔震支座后,存在墩高差桥梁对墩底地震轴力、剪力有一定的降低作用,对墩底弯矩降低幅度最大,可以将E2地震作用下的弯矩作用,降低到与E1地震作用下的弯矩持平,大大降低结构在地震作用下的受力。对于大墩高差的桥梁,减隔震支座的应用对降低结构的地震响应还是有较为明显的作用,但对于墩高较高范围的桥墩,地震效应降低幅度不如矮墩范围桥墩更显著。

(4)在纵向联间相对位移的表现上,存在墩高差桥梁的联间相对位移值基本与等高高墩桥梁的联间相对位移值相差不大,比等高矮墩桥梁的联间相对位移值大很多,可见大墩高差桥梁的联间相对位移是需要密切注意的地方。但采用减隔震支座后,无论存在墩高差桥梁和等高墩高桥梁的联间相对位移值均大幅减小。减隔震支座对联间相对位移的减震效果明显。

最终提出对于大墩高差简支钢箱梁桥,在抗震韧性体系提升的策略,应该设置连梁装置或者带有防落梁功能的支座,增加上部结构的冗余度,加强“梁-梁”和“梁-墩”之间的薄弱环节。

同时注意加强桥台背墙的强度,让台背有能力限制住梁体的纵向地震运动,提高简支梁抗震体系的韧性。为其他同类桥梁在高烈度区使用提供一定

的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 田英侠,张墨.近场地震动作用下墩高差对高墩桥梁的影响分析[J].西安工业大学学报,2023,43(1):15-22.
- [2] 王强,张亚州.纵向墩高差对桥梁抗震响应的影响研究[J].中外公路,2022,42(6):152-156.
- [3] 何贝贝,冯仲仁,陈百奔.参数变化对高墩弯桥地震响应特性的影响[J].中外公路,2017,37(3):164-167.
- [4] 王统宁,刘健新,于泳波.近断层地震动作用下减隔震桥梁空间动力分析[J].交通运输工程学报,2009,9(5):20-25;31.
- [5] 何瑞玺.山区高墩桥梁的抗震设计要点与构造措施分析[J].工程技术研究,2018(10):145-146.
- [6] Wang Zhiqiang, George C. Lee. A comparative study of bridge damage due to the Wenchuan, Northridge, Loma Prieta and San Fernando earthquakes[J]. EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING VIBRATION, 2009, 8(2): 251.
- [7] 王东升,郭迅,孙治国,等.汶川大地震公路桥梁震害初步调查[J].地震工程与工程振动,2009,29(3):84-94.
- [8] 杜修力,韩强,李忠献,等.5·12汶川地震中山区公路桥梁震害及启示[J].北京工业大学学报,2008(12):1270-1279.
- [9] 张精岳,王志强,刘福康.在役桥梁支座性能检测评估与提升技术研究[J].中外公路,2023,43(6):195-200.
- [10] 管仲国,黄勇,张昊宇,等.青海玛多7.4级地震桥梁工程震害特性分析[J].世界地震工程,2021,37(3):38.
- [11] 周成,叶爱君,王晓伟,等.玛多7.4级地震野马滩大桥桥台纵桥向破坏机理分析[J].土木工程学报,2024,57(5):53-64.
- [12] 黄勇,宋光有,李国昌,等.玛多地震中大野马岭大桥震害机理分析[J].世界地震工程,2021,37(4):12-20.
- [13] 李志敏,李文巧,李涛,等.2021年5月22日青海玛多Ms7.4地震发震构造和地表破裂初步调查[J].地震地质,2021,43(3):722-737.
- [14] 李春果,王宏伟,温瑞智,等.2021年青海玛多MS7.4地震随机有限断层三维地震动模拟[J].地震地质,2021(5):1085-1100.
- [15] 李春果,王宏伟,温瑞智,等.青海玛多M7.4地震中野马滩大桥地震动特征初判[J].地球与行星物理论评,2022,53(1):101-106.
- [16] 管仲国,李建中,范立础.公路桥梁合理抗震设防理念研究[J].土木工程学报,2010,43(4):99.
- [17] 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.
- [18] 贡金鑫,张勤,王雪婷.从汶川地震中桥梁震害看现行国内外桥梁抗震设计方法(二)[J].公路交通科技,2010,27(10):35-46.
- [19] 王东升,孙治国,郭迅,等.汶川地震桥梁震害经验及抗震研究若干新进展[J].公路交通科技,2011,28(10):44-53.
- [20] 王晓伟,叶爱君,吴学平,等.梁式桥抗震韧性评估方法:I.基于专家意见的构件震后功能恢复模型[J].土木工程学报,2025,58(1):65-76.