

高烈度区预制拼装桥梁复合减隔震体系研究

鲁传安

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 超高性能混凝土连接预制拼装小箱梁桥的板式橡胶支座在E2地震作用下会发生滑动,可能使梁体位移过大而导致落梁风险,且这一风险对于高烈度地震区而言尤为明显。为改善桥梁抗震性能,基于乌鲁木齐市东进场高架标准段4×30 m连续小箱梁,针对性地提出了板式橡胶支座+水平叠层橡胶支座复合减隔震体系、板式橡胶支座+三角形钢阻尼器复合减隔震体系,并通过所建立的动力分析模型进行了桥梁抗震性能分析。结果表明:采用2种复合减隔震体系均能有效控制梁体位移,叠加三角形钢阻尼器的复合减隔震体系横向位移控制能力优于叠加水平橡胶支座复合减隔震体系;相对于常规板式橡胶支座体系,复合减隔震体系下部结构的地震内力响应有所增大,但仍保持在弹性范围内;2种复合减隔震体系所增加的费用对桥梁总体造价影响较小。

关键词: 高烈度地震区;板式橡胶支座;水平叠层橡胶支座;三角形钢阻尼器;复合减隔震

中图分类号: U443.36

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0109-05

Analysis on Composite Seismic Isolation System of Prefabricated and Assembled Bridges in High Seismic Intensity Area

LU Chuanan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The plate rubber supports of ultra-high performance concrete (UHPC) continuous prefabricated assembled small-box girder bridges are prone to sliding under E2 seismic action, which may cause the excessive displacement of the girder, resulting in the risk of girder dropping. And this risk is particularly significant in high seismic intensity areas. To improve the seismic performance of bridge, based on the 4×30 m continuous small-box girder of the elevated standard section of Urumqi East Access, two composite seismic isolation systems of plate rubber support + horizontal laminated rubber support and plate rubber support + triangular steel damper are specially proposed. A dynamic analysis model is established to analyze the seismic performance of bridge. The results indicate that the two composite isolation systems can all effectively control the displacement of girder body. The composite seismic isolation system of laminated triangular steel dampers has the lateral displacement control capacity better than the system of laminated horizontal rubber supports. Compared with the conventional plate rubber support system, the seismic internal force response of the substructure of composite seismic isolation system has increased, but it still remains within the elastic ranges. The increased costs of two composite seismic isolation systems have a minimal impact on the overall engineering cost of bridge.

Keywords: high seismic intensity area; plate rubber support; horizontal laminated rubber support; triangular steel damper; composite seismic isolation

0 引言

近年来,为了提高桥梁工业化建造水平,缩短工期,减少污染和噪声,预制拼装桥梁技术在国内得到了广泛应用。超高性能混凝土(UHPC)具有超高强度和优良的韧性,同时具备良好的耐久性和抗渗性,因此越来越多地应用到预制拼装桥梁构件连接中。

特别是高烈度地震区,因桥梁下部结构往往采用束筋配筋形式,适应束筋预制构件连接的UHPC连接拼装技术具有先天优势。目前城市预制拼装桥梁较多采用预制小箱梁作为主梁,支座则通常采用板式橡胶支座。

根据相关的试验研究^[1-2],采用UHPC连接的预制拼装桥墩在地震作用下表现出了优异的抗震性能,其破坏位置往往发生在非连接接头处,而不是连接部位。然而,根据震害调查及相关研究^[3-5],地震时板式橡胶支座易发生滑动,且由于滑动后缺乏恢

收稿日期: 2024-11-20

作者简介: 鲁传安(1983—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计及工程管理工作。

复力,桥梁往往处于随遇平衡状态,从而引起梁体位移过大甚至发生落梁灾害。这种不确定性增加了桥梁在地震中的脆弱性,特别是在高烈度地震区,桥梁的抗震安全性面临较大挑战。

为了提高高烈度地震区预制拼装桥梁的韧性,有必要对其抗震性能进行深入研究。通过合理设计减隔震体系,可以有效控制支座的滑动位移,降低桥梁上部结构与墩柱之间的相对位移,进而提高桥梁的整体抗震性能。本文将基于乌鲁木齐市东进场高架项目,通过对不同复合减隔震体系的分析 and 比选,探讨其在高烈度地震区的减震效果,以期类似桥梁工程的抗震设计提供参考。

1 工程概况

乌鲁木齐市东进场高架主线标准段采用连续预应力混凝土小箱梁结构,标准跨径 30 m,4 跨 1 联。桥梁横断面布置图见图 1。

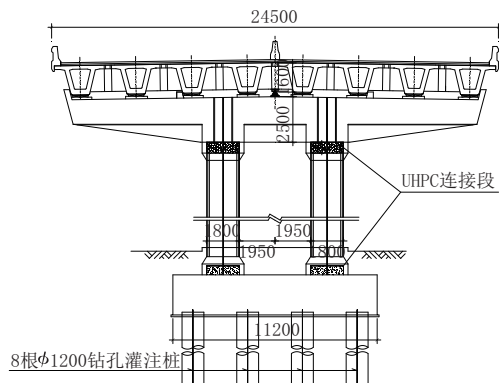


图1 桥梁横断面布置图(单位:mm)

标准段桥宽 24.5 m,由 8 片小箱梁组成,小箱梁梁高 1.6 m。下部结构采用双柱式大悬臂盖梁桥墩,立柱中心间距 5.7 m,每根立柱横桥向尺寸为 1.8 m,纵桥向尺寸为 1.5 m,桥墩基础采用 8 根 $\phi 1.2$ m 钻孔灌注桩。盖梁为预应力混凝土结构,采用梯形截面形式,高 2.5 m,顶面宽 2.2 m,全长 23.9 m。小箱梁支座采用板式橡胶支座,中支点为 GBZJ 400 mm $\times$ 500 mm $\times$ 114 mm 矩形板式橡胶支座,边支点为 GBZJ 300 mm $\times$ 400 mm $\times$ 85 mm 矩形板式橡胶支座。小箱梁、盖梁以及桥墩立柱均在预制厂进行整体预制,运至现场后采用 UHPC 拼装连接。

2 动力分析模型

2.1 计算模型

本文采用空间杆系有限元分析方法建立标准段 4 $\times$ 30 m 1 联梁空间动力分析模型;为考虑相邻联结

构影响,模型建立了与计算联相邻的 2 联边界联,如图 2 所示。主梁、盖梁及立柱均采用弹性梁单元模拟;承台近似按刚体模拟,其质量集中在质心位置,并通过主从约束连接墩底、承台中心及桩顶节点。桩基础根据 m 法计算模拟群桩基础土弹簧刚度。

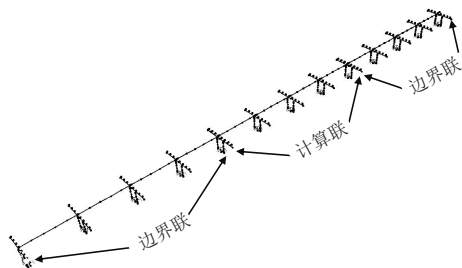
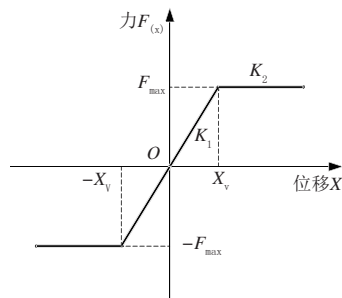


图2 动力计算模型

板式橡胶支座滑动性能采用理想双线性模型进行模拟^[6-8],其典型恢复力模型见图 3。



注: $F_{\max}$ 为屈服力; K_1 为初始刚度; K_2 为屈后刚度;
 X_v 为支座滑动位移。

图3 板式橡胶支座滑动效应恢复力模型

屈服力 $F_{\max}$ 为支座临界滑动摩擦力,其计算式为:

$$K_1 \cdot X_v = F_{\max} = f \cdot N \quad (1)$$

式中: f 为滑动摩擦系数,取 0.1; N 为支撑点恒载反力。

初始刚度 K_1 即支座未发生滑动时的剪切刚度,每个桥墩盖梁上支座总剪切刚度 $K_1 = nk$,其中 n 为盖梁上板式橡胶支座总个数, k 为单个板式橡胶支座剪切刚度。 K_1 的计算式为:

$$K_1 = \frac{G_d A_r}{\sum t} \quad (2)$$

式中: G_d 、 A_r 、 t 分别为单个板式橡胶支座的剪切刚度、剪切面积和橡胶层厚度。

屈后刚度 K_2 近似取 0。

2.2 地震动输入

乌鲁木齐市东进场高架的地震基本烈度为 8 度,地震动峰值加速度为 0.2g。项目场地类别为 II 类,所属的地震分区为 2 区,反应谱特征周期值 0.40 s,抗震设防类别为乙类。以 E2 地震反应谱为目标,拟合 3 条人工地震动时程波对应的反应谱曲线,并与规范 E2 反应谱曲线进行对比,如图 4(a) 所示。对比

结果表明,拟合人工波反应谱曲线与规范反应谱曲线吻合度较好。图 4(b)代表性地列出了人工波 1 地震动时程曲线。

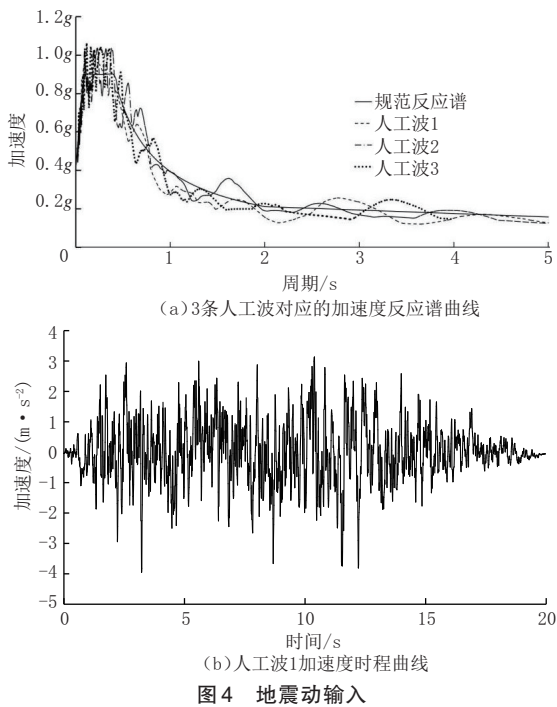


图4 地震动输入

3 常规体系地震响应分析

本文所述常规体系指结构体系仅采用板式橡胶支座。考虑支座滑移耗能,采用前述地震分析模型和地震动输入,进行地震响应分析。

桥墩、桩基关键截面地震内力及验算见表 1、表 2。

表 1 桥墩关键截面地震内力及验算						
截面位置	方向	组合轴力/ kN	弯矩/ (kN·m)	抗弯能力/ (kN·m)	能力需求比	
边墩	墩顶	纵向	6 681	4 801	13 270	2.76
		横向	3 057	5 535	13 390	2.42
	墩底	纵向	7 098	12 662	13 450	1.06
		横向	3 415	7 090	13 590	1.92
中墩	墩顶	纵向	7 607	4 759	13 660	2.87
		横向	3 467	6 170	13 610	2.21
	墩底	纵向	8 025	13 642	14 190	1.04
		横向	3 826	7 932	13 810	1.74

表 2 单桩反力及验算					
位置	方向	最不利单桩内力			能力需求比
		轴力/kN	弯矩/ (kN·m)	抗弯能力/ (kN·m)	
边墩	纵向	-686	595	2 230	3.75
	横向	1 839	1 437	3 106	2.16
中墩	纵向	-862	604	2 162	3.58
	横向	-1 621	1 466	1 879	1.28

由表 1、表 2 可知,常规体系桥墩及其桩基关键截面抗弯能力大于地震响应最大弯矩。原因是考虑板式橡胶支座滑移后,主梁的地震惯性力难以传至桥墩。

表 3 为 E2 地震作用下板式橡胶支座滑动水平位移。

表 3 支座水平位移		
位置	方向	水平位移/m
边墩	纵向	0.179
	横向	0.145
中墩	纵向	0.176
	横向	0.146

由表 3 可知,支座水平位移相对较大,纵向最大位移为 0.179 m,横向最大位移为 0.146 m。因为板式橡胶支座滑动后,屈后刚度接近于 0,且结构体系缺少恢复力来帮助其恢复平衡,仅仅处于一种随遇平衡状态。在横桥向,梁与挡块间距一般较小,支座滑动一段距离后会碰撞挡块,而挡块一般抗剪能力较弱,易产生剪切破坏而导致落梁。

4 复合减隔震体系比选分析

针对常规体系板式橡胶支座滑动位移较大,且梁滑移后处于随遇平衡现状,本节探讨在常规体系基础上通过增设减隔震装置来形成复合减隔震体系^[9-11],以增加支座滑动后支撑构件的剪切刚度,在保证桥墩及桩基处于弹性范围的基础上,有效控制梁体位移。

4.1 复合减隔震体系设计

4.1.1 复合减隔震体系 A

复合体系 A 的组成为:板式橡胶支座+水平叠层橡胶支座^[12]。在正常使用荷载作用下,该体系的竖向荷载由板式橡胶支座承受;在 E2 地震作用下,板式橡胶支座发生滑动,提供摩擦耗能,而各墩上的水平叠层橡胶支座承受水平地震力,提供恢复力。叠层橡胶支座采用线性弹簧单元模拟,其水平刚度计算式与式(2)相同;复合体系 A 的整体恢复力模型为双线性模型。

减隔震装置具体布置如下:每个桥墩设置 2 个水平叠层橡胶支座,边墩采用 JLZ-1400 型,水平刚度 1 400 kN/m;中墩采用 JLZ-2800 型,水平刚度 2 800 kN/m。

4.1.2 复合减隔震体系 B

复合体系 B 的组成为:板式橡胶支座+钢阻尼器^[13]。与复合体系 A 相似,板式橡胶支座承担结构

竖向荷载, E2地震作用下支座滑动摩擦提供一定耗能能力;钢阻尼器在通过自身变形耗能的同时提供自恢复力能力, 限制梁体位移。

钢阻尼器种类较多, 本文背景工程小箱梁与盖梁顶空间有限, 因此采用尺寸相对较小的三角形钢阻尼器, 其构造及恢复力模型如图5所示。

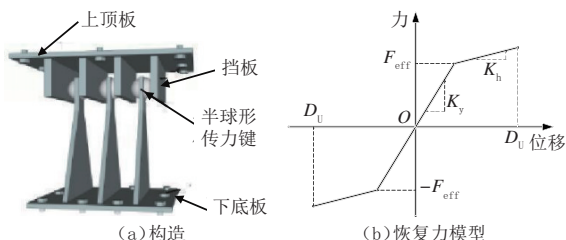


图5 三角形钢阻尼器构造及恢复力模型

三角形钢阻尼器布置为: 边墩和次边墩各布置1个横向钢阻尼器, 中墩布置1个纵向钢阻尼器。本文选用的三角形钢阻尼器由3片钢板组成, 每块板的高、宽、厚尺寸分别为350、400、30 mm, 钢材为Q345q。根据相关文献计算方法^[14-15], 钢阻尼器的初始刚度为25 800 kN/m; 屈服力为234 kN; 屈后刚度为0.1。

4.2 地震响应分析

对常规体系与复合减隔震体系的地震响应进行分析, 得到3种体系的支座位移(见图6)。

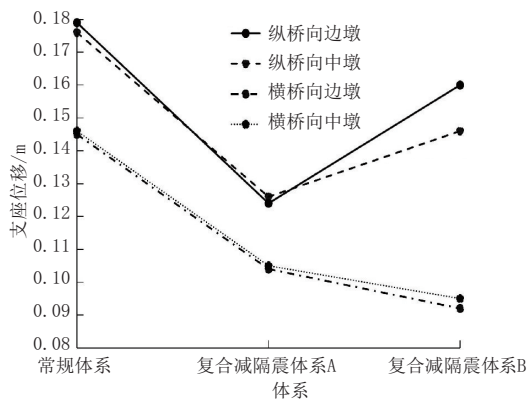


图6 支座位移比较图

由图6可知, 与常规体系相比, 复合体系A、B的支座位移均有较大幅度的降低。其中复合体系A的支座位移要比常规体系下降28%~31%; 复合体系B的纵桥向支座位移要比常规体系下降11%~17%, 横桥向支座位移要比常规体系下降35%~37%。由此可见, 复合体系B的横桥向支座位移控制效果要比复合体系A更优, 但其纵桥向支座位移控制效果要比复合体系A差。原因主要是叠层橡胶支座的纵桥向、横桥向刚度相同, 能同时在纵横向发挥滞回耗能减震作用; 而单个三角形钢阻尼器的刚度具有方向

性, 本文复合体系B之中的钢阻尼器主要布置在横桥向, 纵向阻尼器仅布置在中墩上。

不同减隔震体系纵桥向桥墩关键截面弯矩比较图、横桥向桥墩关键截面弯矩比较图、单桩顶弯矩比较图见图7至图9。

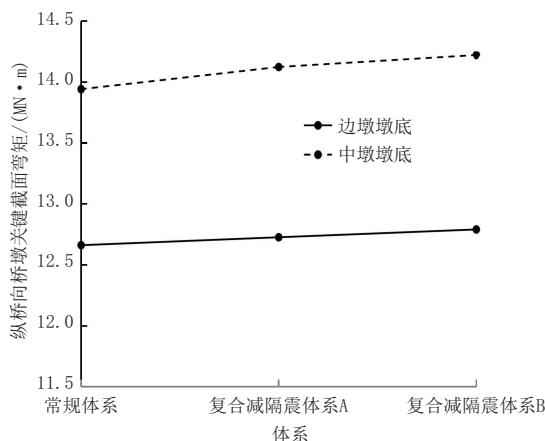


图7 纵桥向桥墩关键截面弯矩比较图

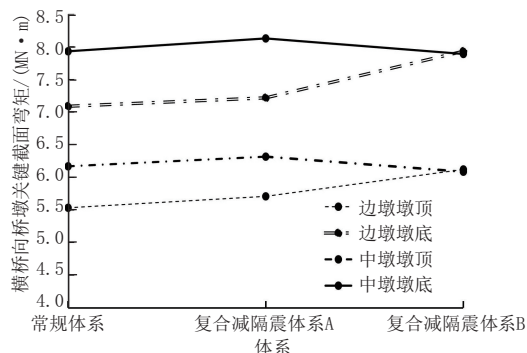


图8 横桥向桥墩关键截面弯矩比较图

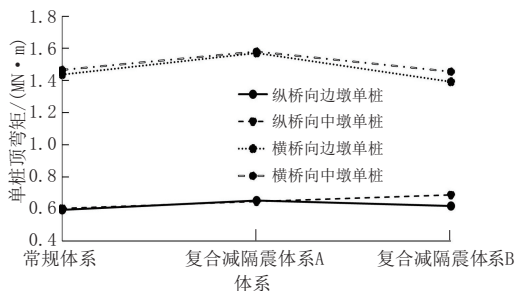


图9 单桩顶弯矩比较图

由图7至图9可知, 复合体系A、B的纵桥向边墩和中墩地震关键截面弯矩均较常规体系大, 但是增大幅度较小, 其中复合体系A增大约1%, 复合体系B增大约2%; 复合体系A的横桥向边墩和中墩地震关键截面弯矩较常规体系有小幅增大, 增幅约2%~3%; 复合体系B的边墩关键截面弯矩较常规体系有约11%的增幅, 但中墩关键截面弯矩较常规体系下降约1%。原因是叠层橡胶支座纵桥向和横桥向刚度相同, 均能增加纵横向刚度, 造成内力增大; 而复合体系B仅中墩设置了纵向钢阻尼器, 横桥向刚度

相比其余墩减小,导致其纵桥向弯矩增大、横桥向弯矩减小。边墩和中墩单桩顶地震弯矩与桥墩关键截面类似,限于篇幅不再赘述。

经截面抗弯承载力验算可知,3种体系桥墩关键截面及单桩顶抗弯承载力均满足要求。因此,复合减隔震体系在有效控制支座位移基础上,桥梁下部结构承载能力满足要求,均保持在弹性范围内。

3种体系造价比较见表4。

按本文设计方案,1联桥梁复合体系A增加减隔震装置费用约6.2万元;复合体系B增加减隔震装置费用约6万元;叠加1联桥梁总建安费,复合减隔震体系相比常规体系建安费增加0.3%。由此可见,设置复合减隔震体系增加费用相对较小,对工程总造价的影响可忽略不计,经济性较好。

表4 3种体系造价比较表

项目	常规体系	复合体系A	复合体系B
增设减隔震装置费用/万元	0	6.2	6.0
1联总建安费/万元	1 975	1 981.2	1 981.0
与常规体系建安费比值	1.000	1.003	1.003

注:1. 水平叠层橡胶支座JLZ-1400型、JLZ-2800型分别以4 500、7 260元计价。

2. 三角形钢阻尼器每个以12 000元计价。

5 结 语

(1)在E2地震作用下,常规体系的下部结构保持在弹性范围内,但是板式橡胶支座位移过大,且板式橡胶支座滑动后处于随遇平衡状态,容易导致梁体与挡块碰撞甚至落梁风险。

(2)采用水平叠层橡胶支座的复合减隔震体系A以及采用三角形钢阻尼器的复合减隔震体系B均能有效控制支座位移。相对于常规体系,2种复合体系的下部结构地震内力响应有所增大,但仍保持在

弹性范围内。

(3)本文复合体系B控制支座横桥向位移能力要优于复合体系A,而控制纵桥向支座位移能力则正好相反。

(4)采用本文提出的2种复合体系后,造价相对于常规体系增加约0.3%,对桥梁总体造价影响较小。

参考文献:

[1] 莫金生,马磊,张洁,等.UHPC连接节段拼装桥墩拟静力试验[J]. 结构工程师,2018(34):88-95.

[2] 徐文靖,邵旭东,马磊.采用UHPC连接的预制拼装桥墩构造及试验研究[J]. 土木工程学报,2022,55(12):105-116.

[3] 汤虎,李建中.板式橡胶支座桥梁地震位移控制方法[J]. 中国公路学报,2022,26(3):110-116.

[4] 汤虎,李建中,邵长宇.中小跨径板式橡胶支座梁桥横向抗震性能[J]. 中国公路学报,2016,29(3):56-65.

[5] 徐略勤,傅沛瑶,李建中,等.板式橡胶支座梁桥的典型横向震害及其影响因素分析[J]. 振动与冲击,2020,39(2):209-217.

[6] 范立础,聂利英,李建中.地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J]. 中国公路学报,2003,16(4):30-35.

[7] 项乃亮,崔侠侠,李建中.板式橡胶支座滑动摩擦性能试验及其力学模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016,44(12):1828-1834.

[8] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].

[9] 高健峰,李建中,方志伟.不同减隔震支座对跨断层桥梁地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动,2021,41(4):48-58.

[10] 徐辉,孙晨然,李雪峰.基于减隔震技术的预制拼装桥墩抗震设计[J]. 中国公路学报,2021(3):75-77.

[11] 李建中,汤虎,管仲国.中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统[J]. 中国公路学报,2015,28(3):35-43.

[12] 王瑞龙.采用复合隔震体系的泖港大桥抗震性能研究[J]. 城市道桥与防洪,2018(2):158-161.

[13] 沈星,倪晓博,叶爱君.桥梁新型横向金属阻尼器研究[J]. 振动与冲击,2014,33(21):96-101.

[14] 叶爱君,方家欣,张少为,等.小箱梁桥横向减震体系及其耗能特性[J]. 中国公路学报,2017,30(12):21-29.

[15] 吴学平,李闯,叶爱君.中小跨度斜交连续梁桥的抗震体系研究[J]. 城市道桥与防洪,2022(6):219-223.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

