

高烈度地震山区中等跨度梁桥抗震韧性设计

古 锐

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 为适应高烈度地震山区多灾害的高速公路建设条件, 基于梁桥体系的轻型化、标准化、工厂化, 以及高韧性、高抗震能力的设计理念, 开发了60~80 m跨径的分离式钢箱组合梁与钢管混凝土桁式墩组合体系梁桥。该组合体系梁桥采用的轻型结构和整跨顶推箱梁的快速施工技术, 为复杂山区条件下的中等跨径梁桥建设提供新的思路, 并从结构、材料、体系三个不同维度提出抗震韧性技术的成套解决方案, 提升中等跨径梁桥的综合抗灾能力。

关键词: 钢箱组合梁; 钢管混凝土桁式墩; 抗震韧性

中图分类号: U442.55; U443.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0208-04

Design of Seismic Resilience for Medium-span Beam Bridge in High-intensity Earthquake Mountainous Area

GU Rui

(Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041)

Abstract: To adapt to the construction conditions of expressways in mountainous areas with high-intensity earthquakes and multiple disasters, based on design concept of lightweight, standardization, factory-like, high resilient and seismic capacity, the separate steel box composite beam with 60~80 m span and CFST truss pier composite system beam bridge has been developed. The rapid construction technology of lightweight structure and full-span incremental launching box beam is used for this composite system beam bridge, which provides new ideas for the construction of medium-span beam bridges in complex mountainous area. A complete set of solutions is proposed for seismic resilience technology from three different dimensions of structure, materials and systems, which enhances the comprehensive disaster resistance capacity of medium-span beam bridges.

Keywords: steel box composite beam; CFST truss pier; seismic resilience

0 引 言

随着我国经济的发展, 高速公路建设逐渐向地质复杂、地震烈度高的西部山区不断推进^[1-2], 公路、桥梁的建设难度也在不断加大。泸定至石棉高速公路(简称“泸石高速”)地处四川盆地到青藏高原过渡带, 沟谷纵横, 地形起伏大, 其所在的龙门山地震带和鲜水河—滇东地震带交接地带属于强震区。其中, 鲜水河断裂带^[3]作为青藏高原东南缘主要的左旋走滑断裂带, 近500年来已发生7级以上强震8次, 具有显著的地震空区特征。泸石高速^[4]场区地震动峰值加速度为 $0.20g \sim 0.30g$, 地震动反应谱特征周期为0.45 s, 对应地震基本烈度为Ⅷ度。由于山区

建设场地特殊复杂的地形地质条件, 泸石高速全线桥隧比78.6%, 中等跨径的梁桥占比达25.5%, 这些桥梁需要跨越地震断裂带、泥石流沟、滑坡体、深沟峡谷^[5-6], 还将经历暴雨、洪水等多种自然灾害。因此, 针对泸石高速的中等跨径梁桥, 开展抗震韧性设计^[7-9], 可完善高烈度区桥梁应对多灾害耦合作用, 并对促进高烈度地震区梁桥的抗震抗灾技术的发展具有重要意义。

1 桥梁设计

泸石高速沿线多为深切峡谷、陡峻的地形, 桥梁遇到多灾害沟谷^[10], 通常需要避免或减少在受灾严重的沟心、谷底设置桥墩。这种情况下20~50 m常规跨度的简支梁桥由于跨径较小, 往往不能满足抗灾的需求; 跨度90 m及以上的大跨桥梁, 抗灾能力强, 但结构复杂, 面临施工工序多、难度大、造价高等

收稿日期: 2024-09-26

作者简介: 古锐(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事大跨度桥梁及组合结构桥梁设计工作。

难点;而 60~80 m 跨径的中等跨径梁桥,跨沟谷能力强、风险可控、造价适宜,是深切峡谷地带理想的桥跨、桥型方案。

以泸石高速得妥特大桥为例,其主梁结构采用 72 m 或 70 m 钢混组合箱梁,箱梁采用双边箱主梁+横梁体系,桥面板采用钢-混凝土组合桥面板结构(见图 1)。墩柱采用钢管混凝土桁式结构,由 4 肢分节段安装的 1.3 m 钢管组成,钢管内灌 C40 自密实补偿收缩微膨胀混凝土。墩顶设置钢箱混凝土组合盖梁,盖梁采用双腹板的“工”字形梁,其内灌注 C40 微膨胀混凝土,钢箱混凝土组合梁再纵横向组合形成井字形的盖梁,与钢管混凝土桁式墩柱锚固连接形成固结(见图 2)。

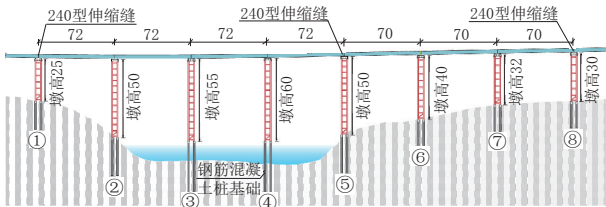


图1 得妥特大桥桥型布置(单位:m)

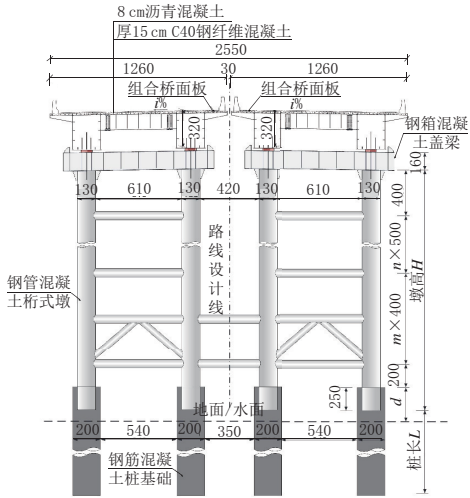


图2 组合体系梁桥构造(单位:cm)

该组合体系梁桥全部采用钢结构,集中在工厂内加工制造。待匹配精度检验合格后,拆卸成体积满足山区运输要求的运输单元件,通过车辆运输至桥位处的匹配场地,再次匹配还原成整体桁式墩安装构件或整跨箱梁。待桁式墩逐节段安装完成后,整跨顶推箱梁。

2 抗震体系设计

现有多跨梁桥结构体系(见图 3),桥墩与主梁采用常规橡胶支座传递荷载^[11],主梁伸缩缝间距一般设计为 100~200 m。该传统梁桥体系的伸缩缝间距设置不考虑桥墩高度的影响,支座水平刚度均相同

且未与桥墩刚度相匹配,致使桥墩承受弯矩偏大,高墩桥梁的自振频率偏低,桥梁的极限安全储备不足,抗震能力较弱。大量的工程实践及地震灾害研究表明^[12],该类桥梁结构整体性差、重量大、延性差,无法满足高烈度地震区抗震需求。

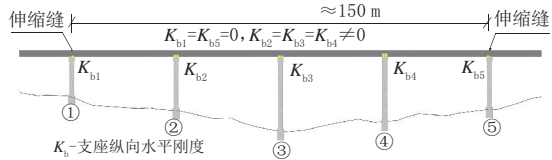


图3 现有多跨梁桥结构体系

考虑高速公路运营的整体性和舒适性,高烈度地震区桥梁宜采用连续结构体系,但连续结构体系设计时会遭遇内力分配问题。桥梁的下部结构一般由桥墩和支座构成,下部结构的水平刚度也由这两部分来共同决定。调整桥墩自身水平刚度的方法一般为调整其截面尺寸,但对于超高墩,这种方法效果较差,资源耗费巨大,不适宜采用。经过对比分析,调整支座的水平刚度不失为一种最佳的办法。为降低资源消耗,同时改善桥梁各墩内力分配不均问题,变刚度抗震支座(见图 4)的概念应运而生。也就是以不同水平刚度的支座匹配不同水平刚度的桥墩,在墩身本身水平刚度不一致的情况下,调整支座的水平刚度,使“墩身+支座”组合水平刚度趋于均衡匹配,使各墩地震力分配均匀,从而达到有效消除桥墩内力峰值的目的。

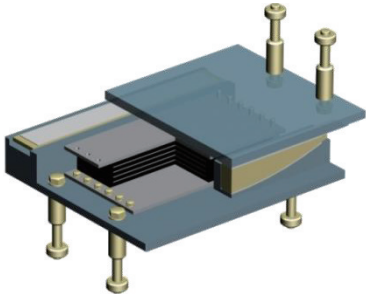


图4 变刚度抗震支座

为了匹配泸石高速的抗震需求,提升高烈度地震山区中等跨度梁桥的抗震能力,在大量的工程实践经验基础上^[13],通过变刚度抗震支座的研发,建立了桥墩高度与主梁最优联长的计算方法以增强多跨桥梁的整体性,提出了支座与桥墩水平刚度相串联的匹配技术以提高桥梁的总体刚度,开发了变刚度支座构造技术以使各墩组合水平刚度均衡匹配,实现了多跨梁桥各墩均衡受力的抗震结构体系(见图 5)。

得妥特大桥地震动峰值加速度为 0.30g,对应地

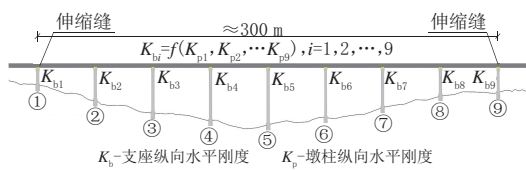


图5 墩群均衡受力的抗震结构体系

震基本烈度为Ⅷ度,大桥桥墩最大高度60 m,最小高度25 m,采用变刚度抗震支座和4跨一联的长联体系,伸缩缝间主梁长度约280 m,全桥伸缩缝数量减半,形成了基于墩群均衡受力的抗震结构体系,在地震作用时,尽量将各墩墩底地震内力响应调控至均衡一致。

表1 采用不同分联形式和支座刚度时,得妥特大桥固有模态对比

分联形式	支座刚度	动力特性		
		振型(一阶)	频率/Hz	振型图示
2跨一联	等刚度	面内	0.21	
		面外	0.27	
4跨一联	变刚度	面内	0.30	
		面外	0.32	

理论计算表明(见表1),4跨一联变刚度桥型方案的面内一阶频率为0.30 Hz,面外一阶频率为0.32 Hz,分别是2跨一联等刚度桥型方案面内一阶频率(0.21 Hz)和面外一阶频率(0.27 Hz)的1.48倍和1.15倍。该支座变刚度、长联的结构体系提高了桥梁结构整体性,改善了桥梁动力性能。与2跨一联等刚度桥型方案相比(见图6),4跨一联变刚度桥型方案的桥墩在地震作用下弯矩、剪力峰值降低18%,墩顶位移峰值减少21%。基于变刚度抗震支座的这种新型抗震结构体系,有利于各墩内力分配均匀,减小弯矩、剪力峰值,提高桥梁结构安全储备,改善此类中等跨径梁桥的抗震能力。

3 桥墩韧性设计

钢管混凝土具有轻质、高强的特点,属于典型的延性材料,因而广泛应用于各类桥梁结构^[14]。得妥特大桥墩柱设计为钢管混凝土桁式墩^[15],由4肢分节段安装的1.3 m钢管组成。钢管肢柱横桥向中心距7.4 m,顺桥向中心距5.0 m;竖向每4~5 m设置水平横撑,并在墩底位置增设斜撑形成加强段。横撑、斜撑与主管构成桁式结构,其中4肢主管及墩底加强段支管灌注C40自密实补偿收缩微膨胀混凝土。

对比计算结果表明(图7),在E2地震作用时,墩柱均保持弹性的情况下,与传统钢筋混凝土桥墩相

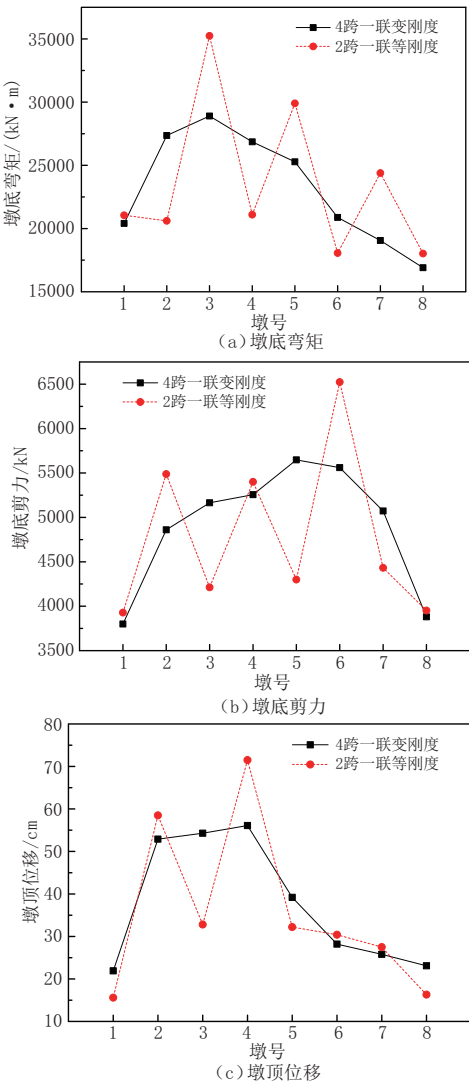


图6 E2地震下,不同分联形式和支座刚度时内力、位移对比

比,本桥钢管混凝土桁式墩自重减轻约60%,极限承载能力提高了1.2倍以上,截面延性系数提高了3倍以上,表明钢管混凝土桁式墩延性更好、耗能更强、抗震性能更优。

4 结 论

(1)在山区复杂环境下,开发了60~80 m跨径的分离式钢箱组合梁与钢管混凝土桁式墩组合体系梁桥。其轻型化的集成创新技术,使桥梁的重量更轻、强度更高、安全储备更大。与钢筋混凝土简支梁桥相比,组合体系梁桥主梁自重减轻约35%,桥墩自重减轻约60%,桥梁总体重量减轻45%,墩柱地震内力降低37%,极限承载能力提高20%以上。

(2)分离式钢箱组合梁与钢管混凝土桁式墩组合体系梁桥采用强度高、重量轻的钢-混组合结构,降低了桥墩地震内力。采用延性好的钢管混凝土材料,提高了桥墩地震抗力。开发的墩群均衡受力的

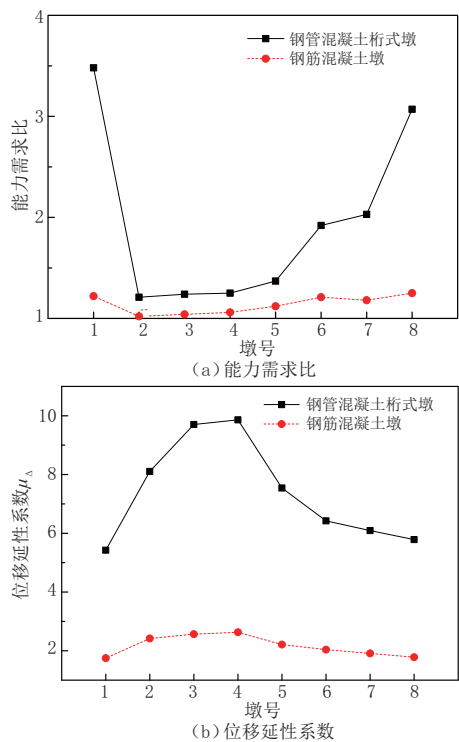


图7 E2地震下,不同墩柱类型的能力需求、位移延性系数对比

抗震结构体系,降低了桥墩地震内力峰值。该组合体系梁桥从结构、材料、体系三个不同维度,提出了抗震韧性体系的成套解决方案,提升了高烈度地震山区中等跨度桥梁的综合抗灾能力。

参考文献:

[1] 赵智,文丽娜.雅叶高速康定过境段超高烈度区桥梁抗震设计[J].城市道桥与防洪,2023(1):73-80.

[2] 殷开维,孙鹏.高烈度区高墩桥梁抗震设计计算[J].交通科技与管理,2024(14):92-94.

[3] 廖程,梁明剑,左洪,等.川滇块体东边界活动断裂的大地震活动特征分析[J].四川地震,2023(3):1-8.

[4] 倪小军,白秀银.泸石高速公路复杂山区地质选线研究[J].路基工程,2020(5):148-152.

[5] 葛胜锦,王学军.山区高速公路桥梁的设计方法与实践[J].公路,2008(9):237-244.

[6] 余志祥,许浒,吕蕾,等.落石冲击对山区桥梁墩柱破坏的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2012(6):89-94.

[7] 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(1):92-96.

[8] 杨沪湘,许航.高烈度地震山区桥梁抗震设计研究[J].公路,2009(8):258-262.

[9] 刘文华,黎立新.山区高墩桥梁抗震设计[J].公路,2010(7):73-78.

[10] 杨绪波,李天涛,廖芳茂.泸石高速水井湾泥石流特征分析及防治对策[J].山西建筑,2022(19):71-74.

[11] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997.

[12] 陈乐生,庄卫林,赵河清,等.汶川地震公路震害调查[M].北京:人民交通出版社,2012.

[13] 狄秉臻,赵人达,牟廷敏.地震作用下山区高低墩长联梁桥支座刚度优化研究[J].世界桥梁,2018(6):56-60.

[14] 牟廷敏,范碧琨,赵艺程,等.钢管混凝土桥梁在中国的应用与发展[J].公路,2017(12):160-165.

[15] 吴庆雄,黄育凡,陈宝春.钢管混凝土组合桁梁-格构墩轻型桥梁振动台阵试验研究[J].工程力学,2014(9):89-96.

《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

