

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.09.035

中小跨径钢箱-混凝土组合梁闭口与开口截面对比分析

张雅杰, 汪维安

(四川省公路规划勘察设计院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 对一种钢箱-混凝土组合梁的受力过程开展理论分析研究, 为我国中小跨径钢箱-混凝土组合梁的设计和 应用提供参考。对闭口和开口钢箱截面进行对比分析发现, 闭口截面相比开口截面, 虽增加少量用钢量, 但减低了 钢梁应力水平, 减少了焊缝数量, 进而减少了焊接问题的出现, 适用于中小跨径钢箱-混凝土组合梁桥的建设。

关键词: 钢箱-混凝土组合梁; 闭口截面; 开口截面; 局部稳定; 有效宽度; 应力; 焊缝

中图分类号: U448.21+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)09-0149-04

0 引言

随着我国交通事业不断发展, 钢铁产量持续增加, 我国开始大力推广在桥梁结构中应用钢材^[1]。钢箱-混凝土组合梁桥因其整体性能好, 抗震性能优, 承载能力强, 能充分发挥两种材料的优势, 且钢结构自重轻, 便于运输吊装, 施工工期短, 对既有公路影响小等优势, 越来越多地被应用于实际工程, 尤其是中小跨径的跨线桥中。

本文基于高速公路钢混组合梁通用图, 以中小跨径钢箱-混凝土组合梁为例, 对其受力过程开展理论分析研究, 对闭口钢箱截面和开口钢箱截面下该类组合梁的应力、挠度、用钢量增量和焊缝减少量进行了分析, 为我国中小跨径钢箱-混凝土组合梁的设计和 建设应用提供参考。

1 钢箱-混凝土组合梁结构

钢箱-混凝土桥面板组合梁桥主要由钢箱主梁(或钢箱主梁+工字型小纵梁)、钢横梁、加劲板、边侧板、拼接板和螺栓、混凝土桥面板及其底钢板等组成(见图1)。

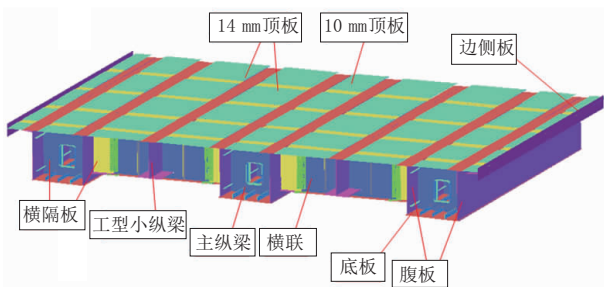


图1 钢箱-混凝土组合梁构造示意图

收稿日期: 2022-12-03

作者简介: 张雅杰(1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

图2中 b_1 为顶板有效宽度范围, 截面(a)中 b_2 与 b_1 等厚度, 顶板为整块钢板, b_1 与 b_2 间无焊缝。截面(b)中 b_2 采用8mm厚底钢板, b_2 与 b_1 不等厚, b_1 与 b_2 间采用焊接连接。截面(c)为顶板按局部稳定折减后的计算截面。

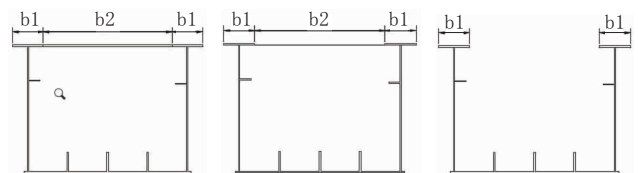


图2 钢箱截面形式

图2 钢箱截面形式

2 钢梁顶板有效宽度

施加混凝土桥面板湿重阶段, 钢梁顶板由于宽厚比过大, 钢板将发生屈曲现象, 构件发生局部失稳。此时, 部分板件屈曲后退出工作, 顶板有效宽度减小, 截面承载能力减小。为保证截面有效宽度, 在顶板上侧设置加劲肋, 改善顶板局部失稳现象, 保证截面强度和承载能力。顶板局部稳定屈曲模型见图3。

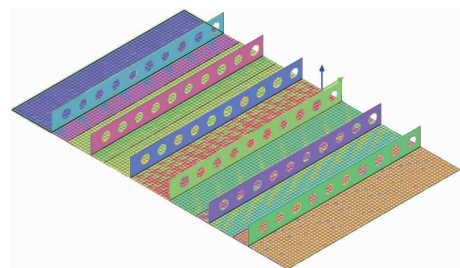


图3 顶板局部稳定屈曲模型

钢板有效宽度计算方法按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[2]中5.1.6和5.1.7条执行。顶板纵向加劲肋分为刚性加劲肋和柔性加劲肋, 根据表1可知, 本文实例分析中的顶板纵向加劲肋为柔性加劲肋, 板的局部稳定折减系数 ρ 取0.45。

表 1 刚性、柔性加劲肋判断

纵向加劲肋刚度验算 (偏安全按受压翼缘考虑)	支点	
	上翼缘	跨中上翼缘
纵向加劲肋宽 b/mm	12	12
纵向加劲肋高 h/mm	130	130
母板厚度 t/mm	16	32
等间距布置纵向加劲肋根数 n_1	8	8
纵向加劲肋分板件数 n	9	9
纵向加劲肋相对刚度 γ_1	11.6	1.5
临界刚度比 γ_{1c}	80.2	67.9
刚性 or 柔性加劲肋	柔性加劲肋	柔性加劲肋

3 钢箱 - 混凝土组合梁力学行为过程

中小跨径钢箱 - 混凝土组合梁的建设可不设临时支墩,而是通过分段浇筑混凝土桥面板的方法来达到控制主梁应力和变形的目的,从而实现组合梁快速施工,并避免了临时支墩施工对周边环境的影响。中小跨径钢箱 - 混凝土组合梁的施工步骤主要分为以下几个阶段(见图 4):

- (1)钢梁架设,包括钢构件焊接和纵、横向节段拼接等。
- (2)整体浇筑或分段浇筑混凝土桥面板。
- (3)钢梁与混凝土桥面板形成整体,施加防撞墙、桥面铺装等二期荷载。
- (4)结构完成收缩徐变,结构投入运营开始承担移动活载。

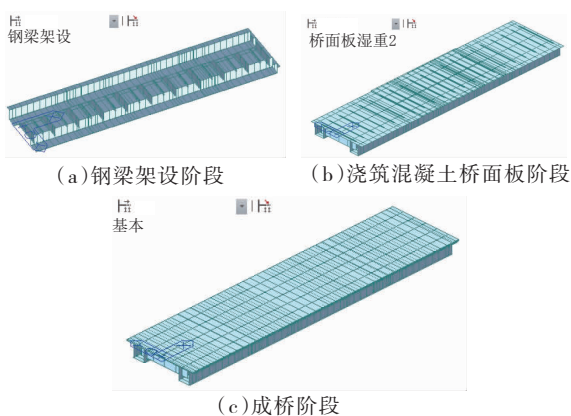


图 4 计算模型

考虑钢梁顶板有效宽度折减后,对于闭口箱形截面(a),在钢梁架设过程中,由开口箱形截面承担结构自重;在浇筑混凝土桥面板过程中,由开口箱形截面承担混凝土桥面板湿重;在施加二期荷载和成桥阶段,由闭口箱形截面承担混凝土桥面板湿重(见图 5)。

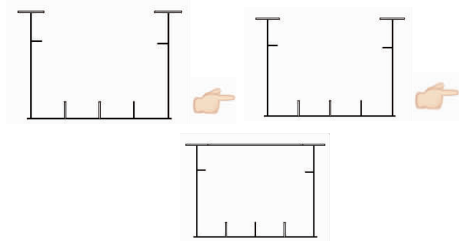


图 5 闭口钢箱受力截面变化形式(未示出顶板加劲肋)

对于开口箱形截面(b),在钢梁架设过程中,由开口箱形截面承担结构自重;在浇筑混凝土桥面板过程中,由开口箱形截面承担混凝土桥面板湿重;在施加二期荷载和成桥阶段,由开口箱形截面承担混凝土桥面板湿重(见图 6)。

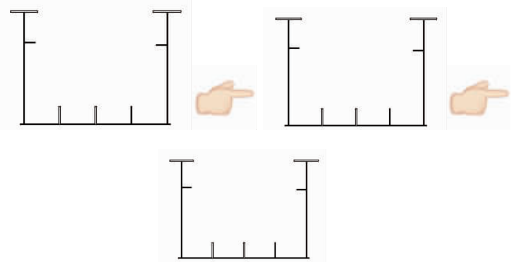


图 6 开口钢箱受力截面变化形式(未示出顶板加劲肋)

4 闭口、开口钢箱受力对比

利用通用有限元软件 Midas Civil 建立整体模型,采用梁单元和施工阶段联合截面建立梁格模型。通过 Midas FEA 建立局部模型,采用板壳单元模拟钢板屈曲,并结合手算和 ABAQUS 确定钢板局部稳定折减系数。

4.1 截面和材料

钢箱 - 混凝土组合梁采用 $L=50\text{ m}$, $B=12.6\text{ m}$ 的直线桥,主次横梁间距分别为 5 m ,主次横梁交叉布置,钢纤维混凝土桥面板 180 mm ,钢梁腹板均为 12 mm 厚钢板,悬臂宽 1 m ,箱室宽 2 m ,桥宽范围内共设两个主箱,不设工字小纵梁,顶板设柔性加劲肋,图 7、图 8 宽度范围以外的顶板板厚采用 8 mm 。取 3 种板厚截面进行对比分析,详见表 2。

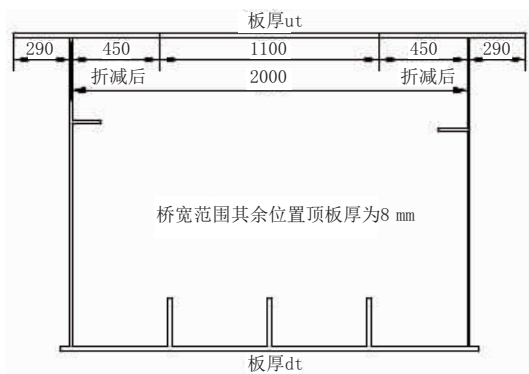


图 7 闭口截面尺寸

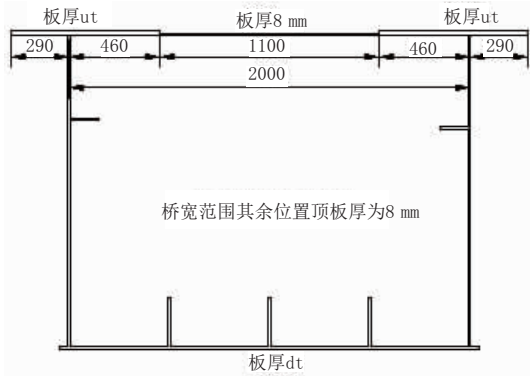


图 8 开口截面尺寸

表 2 截面板厚对应

截面	截面 1	截面 2	截面 3
方向	支点→跨中		
顶板厚 ut/mm	16	26	32
底板厚 dt/mm	24	34	40

4.2 荷载

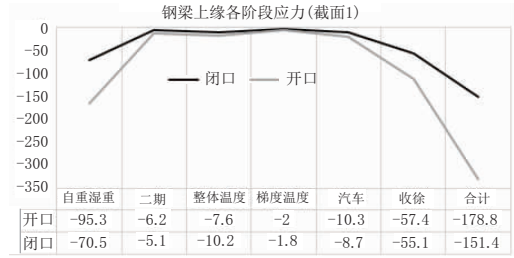
一期恒载,即为自重,按材料容重加载,加劲肋重量单独加载。二期恒载包括防撞护栏、桥面铺装,按均布荷载施加,单侧防撞护栏取 10 kN/m。钢纤维混凝土桥面板按湿重荷载施加。汽车活载按照汽车荷载公路 -I 级标准取值。整体温度、梯度温度、收缩徐变均按规范要求进行加载^[3]。

4.3 应力对比

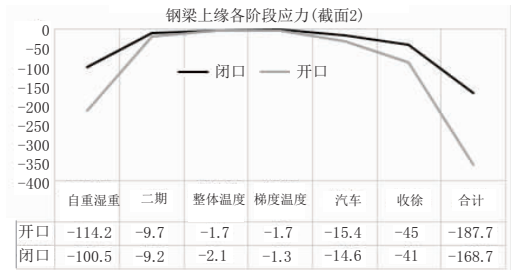
本文通过分别对 3 种不同尺寸的闭口钢箱截面和开口钢箱截面进行计算,获得各截面上、下缘及腹板分别在不同施工阶段和荷载作用下的应力结果,并对其进行了对比分析。图 9 至图 11 中给出了不同阶段应力数值,单位均为 MPa。

由图 9 可以看出,钢梁顶底板采用相同厚度时,闭口截面钢梁上翼缘应力小于开口截面,约减小 10~20 MPa。钢梁上翼缘应力差异主要存在于浇筑钢纤维混凝土桥面板湿重阶段,钢梁上翼缘在二期恒载、温度、活载、收缩徐变作用下的应力差别不大。跨中位置闭口截面与开口截面上翼缘应力差值,较支点位置闭口截面与开口截面上翼缘应力差值更小。

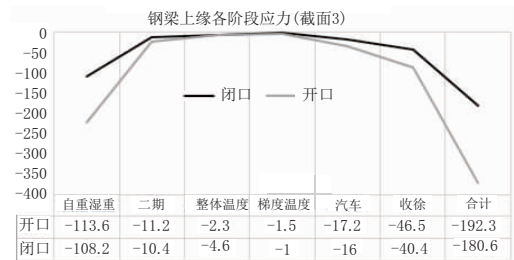
由图 10 可以看出,钢梁顶底板采用相同厚度时,支点位置闭口截面钢梁下翼缘应力小于开口截面,约减小 0~10 MPa。钢梁下翼缘应力差异主要存在于浇筑钢纤维混凝土桥面板湿重阶段,钢梁下翼缘在二期恒载、温度、活载、收缩徐变作用下的应力差别不大。跨中位置闭口截面与开口截面下翼缘应力相差不大。



(a) 截面 1

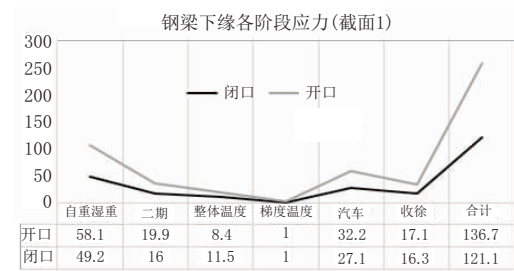


(b) 截面 2

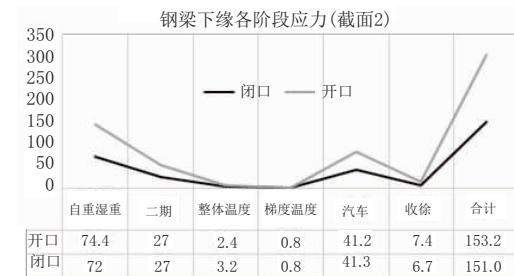


(c) 截面 3

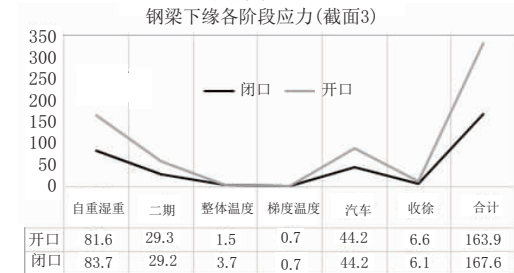
图 9 不同截面、不同工况下钢梁上翼缘应力图



(a) 截面 1



(b) 截面 2



(c) 截面 3

图 10 不同截面、不同工况下钢梁下翼缘应力图

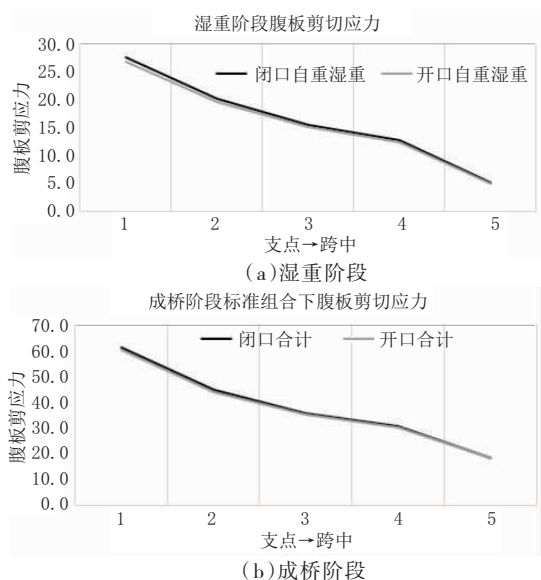


图 11 腹板剪切应力

由图 11 可以看出, 钢梁顶底板采用相同厚度, 闭口截面钢梁腹板剪切应力略小于开口截面钢梁腹板剪切应力。钢梁腹板剪切应力差异主要存在于浇筑钢纤维混凝土桥面板湿重阶段, 钢梁腹板在二期恒载、活载作用下的剪切应力差别不大。

4.4 挠度、用钢量与焊缝增量对比

由图 12 可以看出, 钢梁顶底板采用相同厚度, 闭口截面钢梁挠度略小于开口截面钢梁挠度。钢梁挠度差异主要存在于浇筑钢纤维混凝土桥面板湿重阶段, 钢梁在二期恒载、活载作用下的挠度差别不大。

由表 3、表 4 可知, 相同板厚下, 相比开口截面, 闭口截面以增加少量用钢量为代价, 来换取钢梁应力水平的降低和焊缝数量的减少。

5 结语

(1)对钢箱-混凝土组合梁, 相同板厚下, 闭口截面钢梁应力较开口截面更小, 尤其是钢梁上翼缘应力减小较多, 钢梁下翼缘正应力和腹板剪切应力减小较少; 支点位置钢梁应力减小幅度大于跨中位置。

(2)对钢箱-混凝土组合梁, 相同板厚下, 闭口截面钢梁挠度略小于开口截面钢梁挠度。

(3)钢梁上下翼缘应力、腹板剪切应力和主梁挠度差异均主要存在于浇筑钢纤维混凝土桥面板湿重阶段, 而在二期恒载、活载、温度及收缩徐变作用下的差别不大。

(4)相同板厚下, 相比开口截面, 闭口截面虽增加少量用钢量(桥面全宽范围内该增量还将大大减小), 但钢梁应力水平降低较多, 且焊缝数量大大减

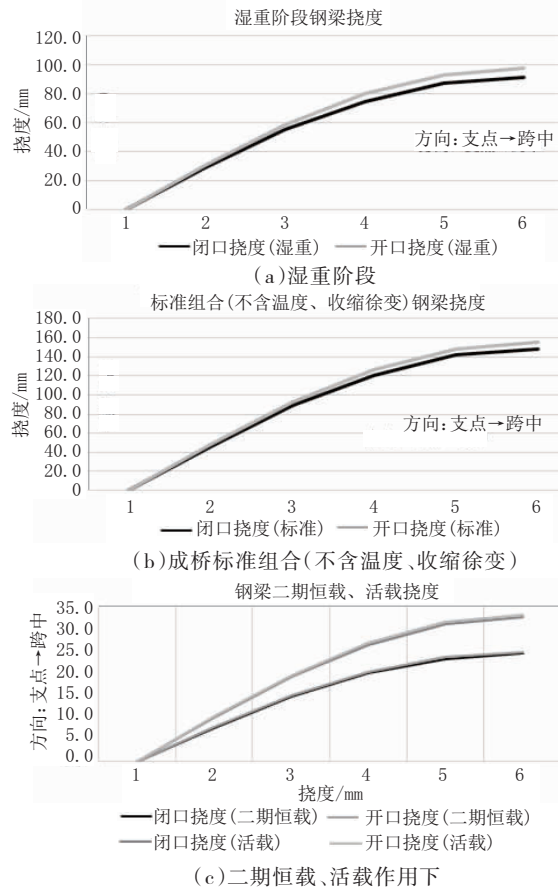


图 12 主梁挠度对比图

表 3 用钢量增量与焊缝增量
B=2 m(以 2.5 m 长节段计算)

项目	截面 1	截面 2	截面 3
单个箱室内用钢量变化/(kg·m ⁻²)	14.1	31.8	42.4
焊缝变化/m	-5	-5	-5

表 4 用钢量增量与焊缝增量
B=12.6 m(以 2.5 m 长节段计算)

项目	截面 1	截面 2	截面 3
桥宽范围内用钢量变化/(kg·m ⁻²)	4.5	10.1	13.5
焊缝变化/m	-10	-10	-10

少。由于工人技术、环境等因素影响, 钢结构焊接质量难以有效控制^[4], 组合梁结构应用中焊接问题较为突出, 采用闭口截面能够减少焊缝数量, 进而减少过多集中焊接量, 可适当避免焊接质量问题。另外, 由于闭口截面应力水平低于开口截面, 采用闭口截面时可适当降低钢梁顶底板厚度, 进而在相同应力水平下, 闭口截面与开口截面用钢量能够基本保持一致。

(5)本文按规范给出了钢板有效宽度计算方法, 对钢箱-混凝土组合梁的受力过程开展了详细的理论分析, 并对闭口钢箱截面和开口钢箱截面进行了对比分析, 为今后中小跨径钢箱-混凝土组合梁的

(下转第 157 页)

(2)横向限位装置

挡块作为最后一道横向防落梁屏障,不应阻碍隔震支座的正常变形。根据前述分析,在整个地震激励过程中,隔震支座最大横向变形为 24 cm,因此,本桥横向限位装置间隙最终取 26 cm,内侧中心位置设置 30 cm × 30 cm × 3 cm 的减震橡胶垫块。

5.2 伸缩缝选型及缓冲设计

根据规范要求,对于减隔震设计的桥梁,减隔震装置应具有足够的初始刚度和屈服强度,满足正常使用条件的要求。相邻上部结构之间必须在桥台、桥墩等处设置足够的间隙,满足位移需求^[4]。因此,伸缩缝选型除考虑常时荷载作用外,还应考虑地震作用。本桥主梁梁端缝设计为 16 cm,地震非线性时程分析表明,主梁之间在强震下仍可能发生碰撞,故伸缩缝型号不宜取得过小,否则将限制减隔震支座发挥作用。本桥伸缩缝型号提高一档,选择 D240 型。

同时,为缓冲和降低强震下梁梁之间的碰撞效应,本桥在每联端部箱梁腹板区域设置了 8 个尺寸为 25 cm × 15 cm × 5 cm 的天然橡胶垫,橡胶垫用环氧树脂粘贴在主梁或桥台背墙对应于梁体腹板处的预埋钢板处。

6 结 语

在高烈度震区的桥梁结构,采用减隔震设计,在同等造价下,可以获得比传统抗震设计更高的抗震性能,在经历大震后,隔震装置的更换比较容易,维修时间和费用均较低^[5]。与传统的桥梁抗震设计相比,减隔震桥梁设计既有与其相似之处也有其独特特点。通过前述对 8 度区连续梁桥的减隔震分析,可

以总结出一些有益的经验结论。

(1)采用减隔震装置后,改变了常规抗震设计中仅由固定墩抗震的不利状态,通过隔震装置的摆动耗能大大减小桥墩桩基的地震反应。本桥固定墩在 E2 地震作用减隔震设计下的内力响应甚至低于 E1 地震常规设计下的内力响应,说明减隔震支座可以发挥出优良的隔震及分摊地震力响应作用。

(2)与常规支座相比,通过设置减隔震装置,固定墩内力及变形响应下降非常明显,本桥减震率达到 70%以上,说明减隔震效果显著。

(3)非连续墩处下部构件的横向地震响应要大于连续墩下部构件的横向地震响应,因此对于非连续墩的抗震设计应予以重视。

(4)在地震作用下桩基轴力在恒载轴力基础上出现较大波动,主要由桩-承台的框架效应及竖向地震动引起。

(5)E2 地震作用下摩擦摆支座位移需求较大,需要在伸缩缝及横向限位装置处提供较大间隙来保证其减隔震功能的顺利发挥,同时还应充分考虑梁体撞击的可能,采取必要的措施进行缓冲和降低其不利影响。当减隔震装置位移需求过大时建议采用如具有拉索约束的拉索摩擦摆体系提升其限位能力,增强防落梁能力和支座震后复位的可靠性。

参考文献:

[1] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
 [2] JT/T 852—2013,公路桥梁摩擦摆式减隔震支座[S].
 [3] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
 [4] JTG/T 2231-01—2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
 [5] 范立础,王志强.桥梁减隔震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.



(上接第 152 页)

设计和建设提供了参考。

参考文献:

[1] 交通运输部.关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见[Z].北京:交

通运输部,2016.
 [2] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
 [3] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
 [4] GB 50661—2011,钢结构焊接规范[S].