

大跨度钢-混凝土混合连续梁桥设计

沈炯伟

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要:以南宁市324国道金陵大桥为背景,研究大跨度钢-混凝土混合连续梁桥设计与施工关键技术。金陵大桥主桥为跨径布置(75+180+75)m的连续梁桥,为国内最大跨度的钢-混凝土混合连续梁桥。结合该桥特点,对桥梁设计与施工关键技术进行研究,供类似工程参考。

关键词:钢-混凝土混合梁;箱梁;钢-混结合段;设计

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)03-0088-06

0 引言

预应力混凝土连续箱梁桥以良好的抗扭工作性能和成熟的施工技术,在中国桥梁建设中得到广泛应用。该桥型的经济合理跨径在160 m以下^[1],当跨径增加时,其自重也相应增大,其承载能力大部分消耗于结构自重,从而限制了它的跨越能力。目前国内最大的预应力混凝土连续梁桥为四川乐自高速公路岷江特大桥(主跨180 m)^[2]。

钢-混凝土混合连续梁在中跨全部或部分采用钢主梁,两侧采用预应力混凝土梁,充分发挥了混凝土材料的压重作用和钢材跨越能力大的优势,自重轻、施工快、节省材料。近年来,钢-混凝土混合梁已较多地应用于公路及城市桥梁中,如上海南滨公路桥(主跨142 m)^[3]、上海G1501浏港大桥(主跨135 m)、南京机场二通道跨秦淮新河桥(主跨130 m)^[4-5]、湖州G104国道五一大桥(主跨128 m)^[6]、无锡盛新大桥(主跨121 m)^[7]等桥梁中。

本文以南宁市324国道金陵大桥为背景,对大跨度钢-混凝土混合连续梁设计和施工关键技术进行研究。

1 工程概况

金陵大桥位于南宁市西乡塘区金陵镇,是324国道跨右江特大桥。324国道作为南宁市的一条国道公路,是西乡塘区金陵、兴贤片区通往南宁的最便捷通道,承担着区域路网主要的交通量。

桥梁全长约1.08 km,主桥采用连续梁桥,跨径布置(75+180+75)m,满足现状右江Ⅲ级航道双向通航需求(并预留远期提升至Ⅱ级航道的空间),两岸引桥采用跨径28~29 m简支变连续小箱梁结构,桥梁分幅设计、分幅施工,单幅标准桥宽23.5 m(见图1、图2)。

2 技术标准

(1)道路等级:城市主干路,主线设计车速 $V=60$ km/h,辅道设计车速 $V=40$ km/h。

(2)汽车荷载等级:城—A级。

(3)桥面宽度:分两幅设计,单幅桥宽23.5 m,横断面布置为2.75 m人行道+7.5 m辅道+0.5 m防撞护栏+12.25 m机动车道+0.5 m防撞护栏=23.5 m。

(4)设计洪水频率:1/300。

(5)航道等级:Ⅲ级航道,通航净宽125 m,净高10 m;设计最高通航水位81.00 m,设计正常水位75.5 m。

(6)抗震设防:地震基本烈度定7度,主桥抗震设防分类甲类,引桥抗震设防分类乙类。

(7)环境类别:I类。

(8)设计基准期:100 a。

(9)设计使用年限:100 a。

(10)设计安全等级:一级。

3 桥梁总体设计

3.1 桥梁总体布置

桥位所在的右江现状河口宽约170 m,航道等级为Ⅲ级航道,金陵大桥主桥采用一跨过江方案,主跨180 m。经比选,采用以下2种方案:

收稿日期:2022-03-24

作者简介:沈炯伟(1985—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

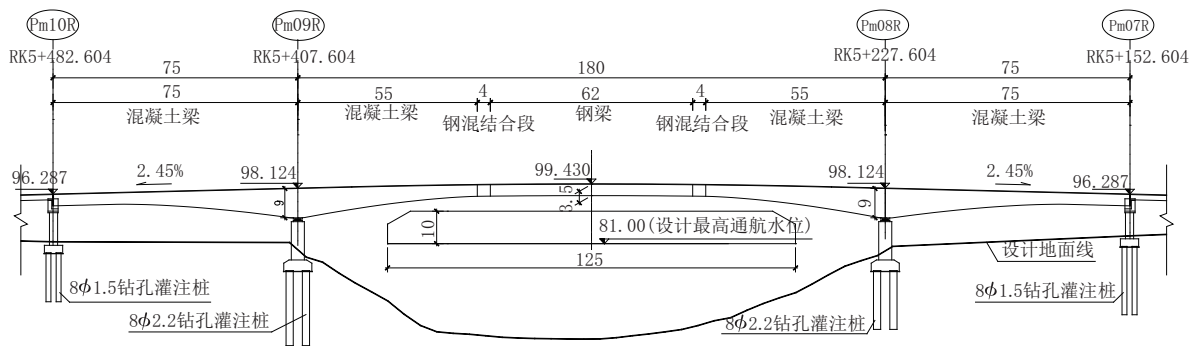


图 1 金陵大桥立面(单位:m)

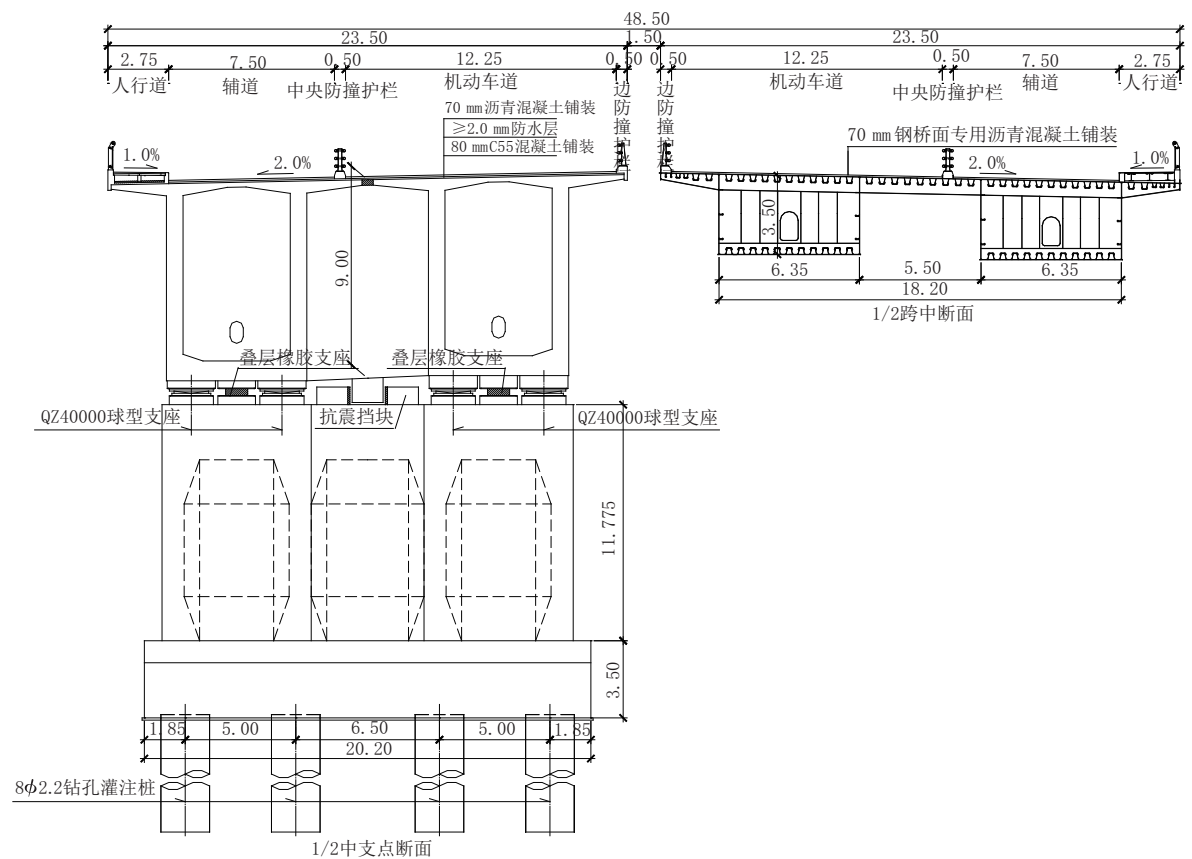


图 2 金陵大桥横断面(单位:m)

方案一： $L=75+180+75=330$ m 钢 - 混凝土混合梁连续梁。中支点梁高 9 m，跨中梁高 3.5 m，中跨跨中 62 m 范围为钢梁，其余范围为预应力混凝土梁，两者通过钢 - 混结合段连接。该方案具有结构自重轻、恒载占比小、配束简单、跨中挠度较小、下部结构地震力较小的优点。但施工较为复杂，尤其是钢 - 混结合段施工。

方案二： $L=100+180+100=380$ m 预应力混凝土连续梁。中支点梁高 11m，跨中梁高 4.0 m。该方案主梁全为混凝土结构，采用悬臂浇注，施工较为成熟，但结构自重较重，恒载占比大，预应力配束难度较大（需要体内、体外混合配束），跨中长期下挠较为明显。

鉴于 180 m 跨径预应力混凝土连续梁已是国内最大跨径的混凝土连续梁，结构自重大，梁高较高，边跨长度较大，下部结构抗震较为不利，经济性指标较差。而相同中跨的钢 - 混凝土混合梁，由于中跨 1/3 采用自重较轻的钢梁，可以有效降低中跨结构自重，从而降低梁高，缩短边跨长度，减轻下部结构负担。

因此，综合对结构受力、工程造价、施工难易程度、后期维修养护、景观效果等方面考虑，推荐采用方案一。

3.2 混凝土梁设计

主桥单幅标准桥宽 23.5 m，扣除两侧混凝土防撞护栏滴水缘 0.15 m，实际混凝土箱梁结构宽 23.2 m，

采用分离式箱型截面,由两片单箱单室混凝土箱梁通过桥面板后浇段+横梁(横隔板)组成。单片箱梁宽 11.35 m,桥面板后浇段 0.5 m,箱梁顶板设 2%横坡,底板水平。

主梁采用变高度梁,中支点梁高 9.0 m,跨中及边支点梁高 3.5 m,梁底按 1.6 次抛物线变化。两片箱梁之间通过墩顶横梁及跨间 2 道横隔板连成整体。墩顶横梁宽 4 m,横隔板宽 0.4 m。

主梁顶板厚 0.25 m,支点处加厚至 0.55 m;底板厚 0.30 m,中支点处加厚至 1.2 m,边支点处加厚至 0.9 m;腹板厚 0.65 m,支点处加厚至 0.75 m。混凝土采用 C55 高性能混凝土。

混凝土箱梁采用三向预应力体系(见图 3)。纵、横向预应力采用 $\phi 15.20$ 高强度低松弛钢绞线,标准强度为 1 860 MPa。竖向预应力采用 $\phi 32$ PSB785 级精轧螺纹钢筋。

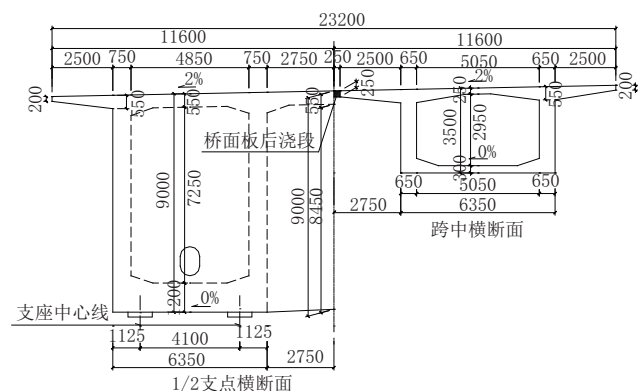


图 3 混凝土梁横断面(单位:mm)

3.3 钢梁设计

主桥跨中 62 m 的整体吊装钢箱梁采用分离式钢箱梁结构,双箱单室截面,外轮廓与混凝土箱梁一致(见图 4)。

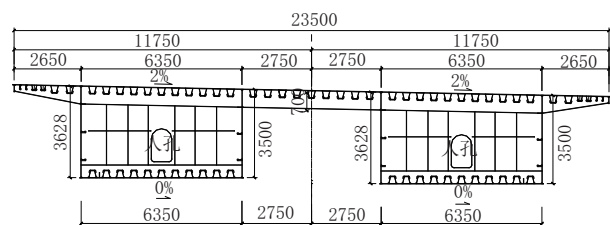


图 4 钢箱梁横断面(单位:mm)

钢箱梁顶底板厚 16 mm,腹板厚 14 mm。顶、底板纵向加劲肋采用 U 形加劲肋;腹板纵向加劲肋采用 I 形加劲肋;横隔板间距 4 m,两道横隔板间设置一道倒 T 形环向横肋。

钢梁采用 Q345qC 钢材,采用工厂分段制作,横桥向分为两段,纵桥向不分段,两段之间设置嵌补

段。两段分别提升就位,分别与钢-混结合段焊接形成整体,最后焊接嵌补段形成整体。

3.4 钢-混结合段设计

钢-混结合段是混合梁桥受力的关键部位,是本桥设计的关键部位。

金陵大桥钢-混结合段纵向总长 4.0 m,其中钢梁段长 3.2 m,混凝土梁段长 0.8 m。靠中跨的钢梁段和跨中 62 m 钢梁现场焊接,另一头则和悬浇混凝土梁段通过 0.8 m 现浇混凝土连接成整体。

结合段范围内布置焊钉连接件,焊钉规格 $\phi 22-150-ML15$,间距为 150×150 mm。

为保证钢-混结合段与混凝土梁连接的整体性,布置通过混凝土梁与钢-混结合段交界面的预应力钢束,通过施加预压力,保证该交界面不受拉。

钢-混结合段立面图如图 5 所示。

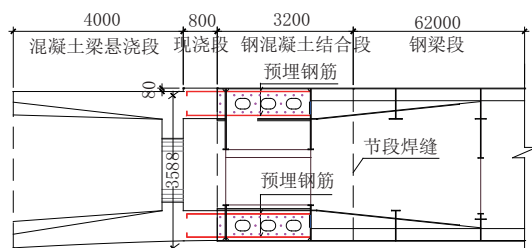


图 5 钢-混结合段立面图(单位:mm)

3.5 桥墩及基础设计

主桥中墩采用空心薄壁墩,长 18.6 m,宽 5.0 m,高 11.775 m,基础采用直径 8 根直径 2.2 m 钻孔灌注桩。边墩采用框架式桥墩,桥墩长 6.75 m,宽 2.5 m,盖梁采用高低盖梁,主桥侧盖梁高 1.2 m,引桥侧高 3.79 m。基础采用 8 根直径 1.5 m 钻孔灌注桩。

桥位所在位置岩溶发育,桩基持力层为中风化灰岩。为减少岩溶对桥梁桩基的不利影响,设计时尽量采用大直径桩基,同时对桩长、桩基入岩深度、桩底嵌岩深度等进行全方面把控:桩长不小于 12 m,桩底进入完整中风化灰岩深度不小于 $2.5d$ (d 为桩基直径),并通过超前钻确保桩端下 $3d$ (d 为桩基直径)并不小于 5 m 范围内无溶洞或破碎带分布。

3.6 桥梁抗震设计

金陵大桥为大跨度低墩连续梁桥,上部结构梁体较重,桥墩较矮,在地震力作用下,下部结构会承受较大的水平力,因此需要采取减隔震措施。目前对大跨度桥梁的减隔震措施主要有两种:

(1)采用阻尼器或 lock-up 装置。该方法只能减小固定墩纵桥向的地震反应,且存在阻尼器或 lock-up 装置的耐久性和养护问题。当地震力较大

时,即使由多个主墩共同承担,可能也无法满足抗震设计要求。

(2)采用减隔震支座。目前常用的减隔震支座包括铅芯橡胶支座和摩擦摆式减隔震支座。铅芯橡胶支座所能承受的竖向荷载较小(1 600 t以内^[8]),很难在大跨度桥梁中应用。摩擦摆式减隔震支座地震发生时剪切螺栓剪断,支座通过滑动界面摩擦消耗地震能力实现减震功能,通过球面摆动延长梁体运动周期实现隔震功能,支座能承受的竖向荷载较大(6 000 t以内^[9]),但大吨位的减隔震支座尺寸大,用钢量多,造价较高。

针对金陵大桥主桥结构较重(主墩支座4 000 t,见图6)、桥墩较矮,如何提供一种能有效减轻大跨度低墩连续梁上部结构对下部结构的地震作用,控制梁体水平位移,且结构简单、经济合理的减隔震结构是本工程亟须解决的技术难题。

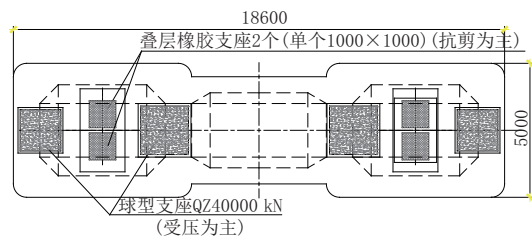


图6 主墩支座平面布置图(单位:mm)

本桥减隔震措施采用在常规球型钢支座处并联叠层橡胶支座的方案,即在使用荷载作用下,其支撑体系与常规球钢支撑体系性能相同,满足使用荷载作用下的性能;在地震作用下,球型钢支座剪断,梁体与球型钢支座间的滑动提供摩擦耗能,而中墩上的叠层橡胶支座共同承受梁体水平地震惯性力,控制梁体位移。该方案在大跨径斜拉桥中有一定的应用,如上海浏港大桥(主跨225 m)^[10],在连续梁中应用较少。

本桥在中墩处设置两个叠层橡胶支座,纵向并排布置,单个橡胶支座(见图7)尺寸1.0 m(横向)×1.0 m(纵向)×0.31 m,支座顶底面和上下钢板连成整体。

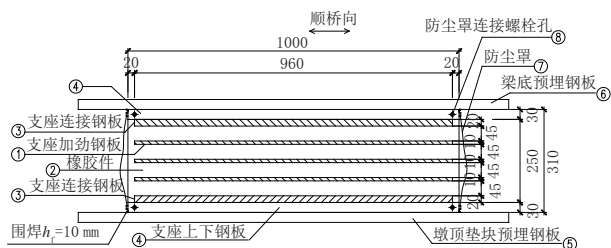


图7 叠层橡胶支座构造(单位:mm)

这一减隔震体系的优点在于,结合了用常规球型钢支座的摩擦耗能性能和并联叠层橡胶支座的水平剪切性,构造简单,经济。与常规的摩擦摆式减隔震支座减震方案相比,本方案减少约20%~30%的减震支座费用,极具应用价值。

4 结构受力分析

4.1 桥梁整体计算分析

设计计算采用桥梁博士V3.5.0程序,主梁共划分为150个梁单元,施工阶段考虑节段悬浇过程(见图8至图11)。

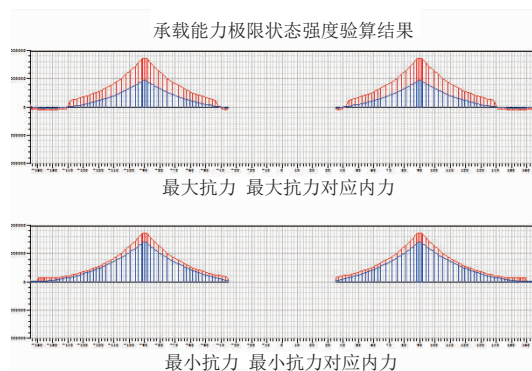


图8 持久状况承载力极限状态内力验算

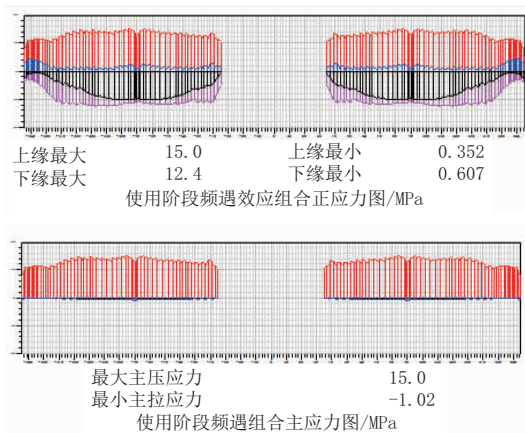


图9 持久状况正常使用极限状态抗裂验算

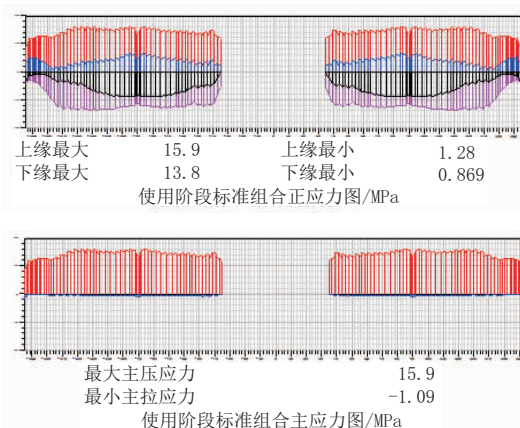


图10 持久状况预应力混凝土构件应力验算

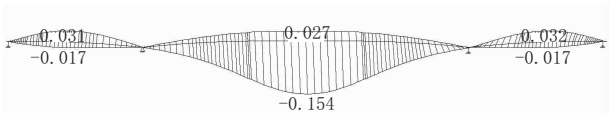


图 11 持久状况正常使用极限状态挠度验算(单位:m)

经验算,混凝土主梁承载能力验算、抗裂验算、应力及挠度验算均满足规范要求。

4.2 桥梁局部计算分析

计算采用 ANSYS 计算程序,建立全桥有限元计算模型(见图 12),混凝土箱梁段为空间实体单元 solid45,钢箱梁段为空间板壳单元 shell63。

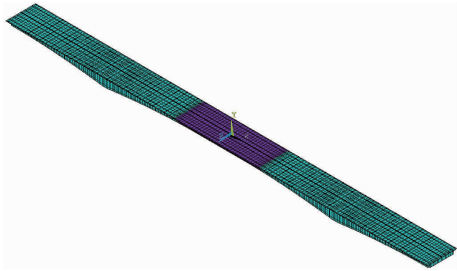


图 12 全桥有限元模型

经验算,钢-混结合段在标准组合作用下应力水平在 56~139 MPa 之间,结构强度满足要求(见图 13)。在结合段预应力钢束锚固断面附近,由于钢结构刚度过渡段与结合段混凝土实心浇注段间存在刚度差,近腹板位置钢结构顶底板局部范围有应力集中现象,但应力水平不高(底板处 139 MPa 压应力)。

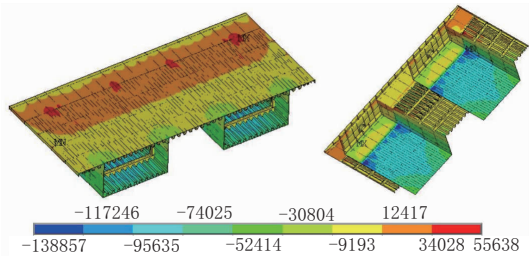


图 13 标准组合钢-混结合段应力(单位:kPa)

4.3 桥梁抗震计算分析

该桥桥址处的地震基本烈度为 7 度,地震动峰值加速度为 0.1g。本文地震动输入采用 E2 地震作用下 3 条场地人工波。

根据《南宁市 324 国道改扩建工程金陵大桥安全性评价报告》提供的 E2 地震动输入情况下的加速度时程曲线如图 14 所示。

在 E2 地震作用下,分别输入纵向、横向地震作用,分别验算各桥墩在纵横桥向地震作用下受力(见表 1、表 2)。

在 E2 地震纵横向输入下,球型钢支座剪切销剪断,成为双向活动支座。此时,在拟定的配筋形式下,各桥墩关键截面的地震响应小于以材料标准值得出

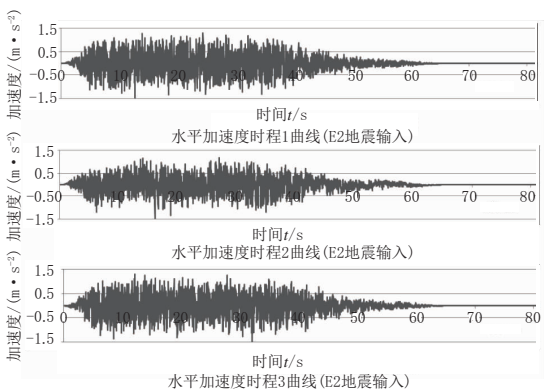


图 14 金陵大桥 E2 地震加速度时程曲线

表 1 各桥墩墩底截面抗震验算(纵向地震输入)

截面位置	验算轴力/kN	弯矩需求/(kN·m)	等效屈服弯矩/(kN·m)	能力需求比	配筋率/%	验算结果
边墩墩底截面	9 216	22 002	98 470	4.48	1.14	通过
中墩墩底截面	135 178	75 153	1 125 000	14.97	2.24	通过

表 2 各桥墩关键截面抗震验算(横向地震输入)

截面位置	验算轴力/kN	弯矩需求/(kN·m)	等效屈服弯矩/(kN·m)	能力需求比	配筋率/%	验算结果
边墩墩底截面	8 021	42 796	246 900	5.77	1.14	通过
中墩墩底截面	137 805	85 181	3 967 000	46.57	2.24	通过

的截面等效屈服弯矩,全桥抗震性能满足要求。

叠层橡胶支座剪应变验算见表 3。经验算,在 E2 地震作用下,叠层橡胶支座最大剪应变为 34.2%,满足要求。

表 3 叠层橡胶支座剪应变验算

地震输入	截面位置	地震内力/kN	支座水平位移/m	支座剪应变/%	理论剪应变/%	验算结果
纵桥向	Pm08	1 628	0.087	34.2	100	通过
	Pm09	1 631	0.087	34.2	100	通过
横桥向	Pm08	1 407	0.075	29.5	100	通过
	Pm09	1 450	0.077	30.2	100	通过

5 桥梁施工方案

连续梁采用悬臂浇筑法施工,先在托架上浇筑 0# 段,再依次浇筑 1#~13# 节段,以及支架现浇边孔现浇段。先进行边跨合龙,再施工中跨钢-混结合段,最后进行中跨钢结构吊装合龙。

为保证钢-混结合段内混凝土浇筑质量,结合段内混凝土浇筑时,需将钢梁翻转 90°成直立姿态浇注混凝土直至结合段顶面(顶面按施工缝做好凿毛处理)。待混凝土强度达到后,整体提升钢-混结合

段进行定位。

全桥为分幅设计、分幅施工。先施工南幅桥,后拆除老桥,再施工北幅桥,确保施工期间的过江交通及南幅桥施工时对老桥的结构安全。

6 结 论

本文对大跨度钢-混凝土混合连续梁设计与施工关键技术进行研究,主要结论如下:

(1)钢-混混合连续梁,通过中跨跨中设置自重较轻的钢梁,有效降低了主梁自重,提高了连续梁的跨越能力。

(2)钢-混结合段是混合连续梁传力的关键部位,设计时需要兼顾构造、受力、施工等因素,做到构造简单、传力明确、施工便捷。

(3)球型钢支座并联叠层橡胶支座的复合隔震体系利用了球型钢支座的摩擦耗能性能和叠层橡胶支座的水平剪切性能,具有受力明确、构造简单、经济

可行、减震效果好的特点,在大跨度连续梁中具有较大推广应用价值。

参考文献:

- [1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2005:63-68.
- [2] 刘清华.乐自高速公路岷江特大桥总体设计[J].西南公路,2012(2):13-16.
- [3] 李华.基于挂篮作为提升平台的液压同步提升技术在超大跨钢箱梁安装中的应用[J].建筑施工,2019(4):660-662.
- [4] 周飞秦.钢-混混合结构在极小边中跨比连续梁桥中的应用[J].市政技术,2019(6):76-79.
- [5] 刘伟.小边跨钢-混凝土混合梁桥设计[J].上海公路,2018(2):39-42.
- [6] 徐敏.钢-混凝土混合连续梁桥钢混结合段局部分析及检测[J].城市道桥与防洪,2019(5):97-100.
- [7] 齐新.无锡市盛新大桥钢-混凝土混合连续梁桥设计与施工[J].城市道桥与防洪,2011(10):54-59.
- [8] JT/T 822—2011,公路桥梁铅芯隔震橡胶支座[S].
- [9] JT/T 852—2013,公路桥梁摩擦摆式减隔震支座[S].
- [10] 王瑞龙.采用复合隔震体系的浏港大桥抗震性能研究[J].城市道桥与防洪,2018(2):158-161.

(上接第64页)

料,为增加防水涂料与桥面的黏结度,对桥面混凝土进行抛丸处理,桥面沥青混凝土在陕西第一次采用了粗粒式 SMA 改性沥青混凝土。

3 结 语

灞河大桥工程于2005年6月开工,2006年12月竣工,概算总投资为2.197亿元。灞河大桥的建成,为西安市的城市建设增添了一道亮丽的风景,成为了西安市三环路上的标志性建筑,极大地改善了西安市东部的交通环境,对于完善西安市城市主骨架路网,构筑快速三环路,为西安城市各组团间长距离出行提供快速通道,改善旅游和投资环境,拉动西安市经济增长,加快和促进西安城市化进程,实现西

安市面向新世纪制定的城市交通发展目标和宏伟蓝图具有十分重要的意义,取得了明显的社会效益。

参考文献:

- [1] CJJ 77—98,城市桥梁设计荷载标准[S].
- [2] GB J17—88,钢结构设计规范[S].
- [3] 林荣奋.灞河大桥80m钢管混凝土拱支架体系设计与施工[J].市政技术,2011(4):43-46.
- [4] 孙亚刚.西安灞河钢管混凝土拱桥施工监控研究[J].山西建筑,2012(15):195-197.
- [5] 兰国友.灞河大桥80m跨钢管混凝土拱梁组合体系施工[J].城市建设理论研究(电子版),2013(16):1-11.
- [6] 杨学伟.三门峡市209国道涧河桥钢管拱架设施施工技术探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2012(36).