

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2021.03.020

陆港大桥总体设计与技术创新

王军¹, 王萍², 任润田¹, 王俊³

[1.西安市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 2.内蒙古阿拉善盟公路运输维护中心, 内蒙古 阿拉善盟 737300; 3.西安水务(集团)规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710082]

摘要: 陆港大桥为 102 m+208 m+102 m 半漂浮体系斜拉桥。主梁采用正交异性板流线型扁平整幅箱梁。斜拉索采用平行钢绞线拉索体系。主塔采用格构柱式钢-混组合结构“门”式塔。详细介绍了该塔型以及针对该特殊塔型设计的斜拉索锚固系统, 对类似斜拉桥设计具有重要参考价值。

关键词: 斜拉桥; 格构柱式钢-混组合塔; 斜拉索锚固

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)03-0065-03

1 工程概况

宝鸡市渭河陆港大桥位于宝鸡市陈仓区阳平镇, 道路南起现状西宝高速南线, 上跨现状南、北河堤路、渭河及连霍高速。道路全长 4 317.599 m, 桥梁总长 1 296 m, 其中主桥总长 412 m。大桥跨径布置为 102 m+208 m+102 m, 斜拉桥主塔结构形式为格构柱式钢-混组合塔, 该塔型为国内首创^[1-2]。

1.1 地质水文条件

桥址区在区域上属渭河河谷区, 微地貌单元属渭河河漫滩区, 河谷开阔平坦。河床心形滩分布较多, 淤积较严重。自上而下主要地层分布为素填土、粉质黏土、中粗砂、卵石、粉质粘土、砾砂。

地下水类型为潜水, 受大气降水及渭河上游河流地下水补给, 排泄方式为蒸发和向河流下游渗流。

1.2 设计标准

道路等级: 城市主干路; 设计速度: 主路 50 km/h; 设计荷载等级: 城-A 级; 地震设防烈度为 8 度; 地震动峰值加速度 0.20g; 反应谱特征周期为 0.40 s; 栏杆荷载: 竖向 1.2 kN/m; 水平向 2.5 kN/m。

2 总体设计

2.1 主桥及引桥

主桥跨径布置为 102 m+208 m+102 m, 全长 412 m, 为双塔双索面半漂浮体系斜拉桥, 立面布置

见图 1。

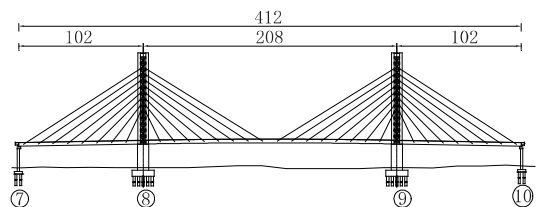


图 1 主桥总体布置图(单位:m)

引桥在跨越南、北侧堤顶路以及现状连霍高速采用变截面连续梁, 跨径采用 65 m 大跨跨越。同时为保护渭河河堤, 桥墩距渭河河堤内坡脚线不小于 5 m。引桥其余段采用 30~40 m 跨径的等高连续梁。下部结构采用钻孔灌注桩, 板式弧形桥墩。

2.2 主桥断面

主桥横断面布置见图 2。

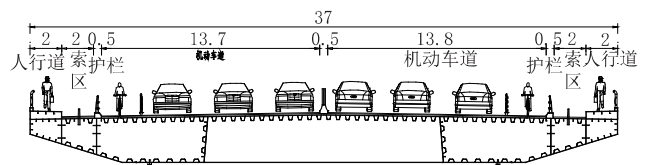


图 2 主桥横断面布置图(单位:m)

2.3 支撑体系

主桥主塔处支座采用 FPQZ 型摩擦摆球型支座配合智能型粘滞阻尼器安装于主墩处, 当地震来临时可通过阻尼元件的塑性性能吸收和耗散地震能量。

主桥边墩支座采用 JKQZ 型减震抗拉球型支座, 在地震时通过抗拉钢衬板抵抗垂直方向的上拔力, 防止桥梁与桥墩脱离。

引桥现浇梁采用超高阻尼隔震橡胶支座, 可有效提高结构阻尼比, 消耗地震能量。

收稿日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51308055)

作者简介: 王军(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事大跨度桥梁设计及计算分析工作。

3 主塔设计

3.1 塔型方案构思

斜拉桥塔型方案设计首先要考虑结构受力需求,同时也要兼顾景观、周边环境和造价等因素。该桥南连吉利汽车以及配套的工业园区、宝鸡高新区科技新城以及综合保税区,北接铁路物流中心,桥位周边工业气息比较浓厚(见图3、表1)。

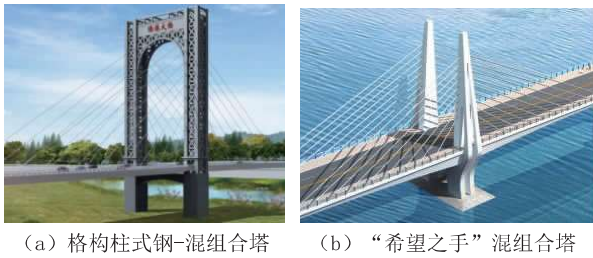


图3 两种主塔方案效果图

表1 塔型方案比较表

比较项目	a塔型	b塔型
景观效果	1.“门”型钢结构塔简洁、轻盈,高耸、通透感强; 2.塔型端庄、雄伟、工业感强,与周边工业气息浓厚相匹配;	1.“希望之手”塔型寓意深远;有种种积极向上的冲劲; 2.上下塔柱流线型设计,体现了很强的韵律感;
受力性能	1.双塔“门”式结构体系传力明确、塔型新颖; 2.塔柱镂空设计有效改善了风载下主塔驰振稳定性,减小了阻风面积,增加了行车的安全性。	1.该塔型传力明确,但塔内锚固系统设计复杂; 2.阻风相对面积大,风载下主塔驰振稳定性较差;
施工难度	1.阶段预制、节段吊装; 2.便于施工、运输; 3.极大节约施工工期; 4.钢塔下部基础尺寸小	1.塔内锚固系统施工难度大; 2.塔柱施工模板变化大; 3.混凝土塔基础尺寸大; 4.施工周期长
综合评述	a塔造价虽略高于b塔,但a塔工业感强,与周边工业气息浓厚相匹配,且施工便捷,故为最终方案	

3.2 桥塔设计

桥塔采用格构柱式钢—混组合结构,整体造型为“门”型,由塔柱、塔顶平联、基础组成。塔柱自上而下一分为上塔柱、下塔柱。上塔柱及塔顶平联为钢结构,下塔柱为钢筋混凝土结构。

下塔柱高21.5m,纵横向尺寸为9.3m×8.4m,采用单箱单室截面,为增强塔柱的稳定性以及抗震效果,用弧形横梁将两个下塔柱连接起来,同时便于支座的安放。

上塔柱塔高75m。单侧塔柱由4个钢箱型钢柱

组成,呈镂空状。钢柱横截面尺寸为1.8m×2.0m,板厚30~40mm。钢柱内每隔2m左右设置一个横隔板。钢柱各板件均采用板式加劲肋。各钢柱间设置斜撑将其联接成整体,斜撑为“工”字型截面,高0.7m、宽0.65m,见图4、图5。

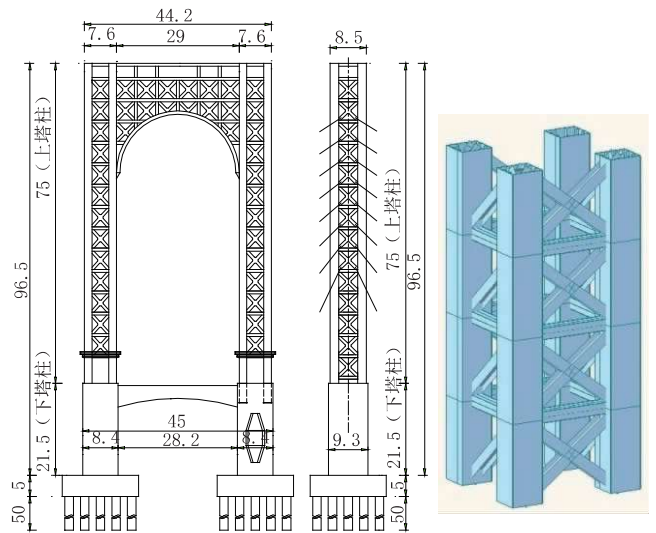


图4 桥塔立面、侧面及格构柱式塔柱节段三维图(单位:m)

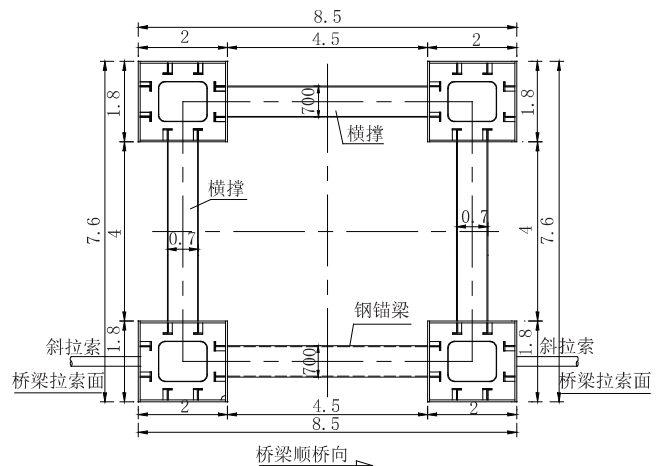


图5 上塔柱节段横断面示意图(单位:m)

塔顶平联采用全钢桁架式横联,平联底端采用弧形门洞造型。平联跨中高11.25m,端部高25.65m,端中部采用弧形过渡。桁架主受力构件采用矩形截面,高宽均为0.7m,厚度14~20mm。横联相交节点间采用“工”字型杆件连接,高0.7m,宽0.6m,翼缘16mm,腹板12mm。

考虑到渭河河道内有通航要求,故下塔柱采用钢筋混凝土结构,一方面混凝土结构有较强的防撞能力;另一方面其耐久性较好,枯水期施工便利,同时可以降低工程造价。主塔承台尺寸为18m(长)×18m(宽)×5m(高),下设13根直径2.0m钻孔灌注桩基础,桩长50m。

4 主梁

主梁采用正交异性板流线型扁平整幅钢箱梁,由顶、底板、锚腹板、中、边腹板、U型加劲肋、横隔板、人行道板封闭而成。箱梁内腔被纵横隔板分割。主梁采用双边箱主梁,中心线处梁高3 m,顶板分别向两侧按照1.5%的横坡降低且底板保持水平。标准断面顶板全宽37 m,底板水平段宽25.4 m,两侧斜底板各宽5.8 m,倾斜底板与水平底板之间夹角为17°。该型断面横好的解决了宽幅桥面抗风稳定性的问题,显著提高了主梁的涡振风速和颤振临界风速(见图6)。

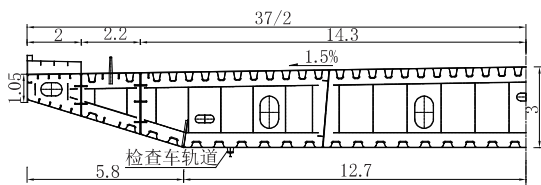


图6 主桥横断面布置图(单位:m)

主梁顶、底板厚采用16 mm(正常区域)和20 mm(支座区和主塔区)两种板厚;顶、底板在车行道区域采用采用8 mm U形肋;斜底板厚16 mm,在人行道范围内采用高140 mm、厚12 mm的板肋。

锚腹板厚24 mm,其纵向加劲肋采用18 mm厚,高度200 mm钢板,腹板两侧均设置,每个锚腹板设置2~3道;其竖向加劲肋采用20 mm厚钢板。锚腹板及其纵向加劲肋全桥贯通。

为增强箱梁的断面的抗扭刚度、横向刚度,限制其横向弯曲变形和畸变的发生,并保证正交异性桥面及纵横向加劲肋的应力和变形在合理范围内,设计在箱梁内间距3 m设置一道横隔板,塔区、中支点、边支点附近适当加密。

主梁经过塔区时,顶板和底板进行开洞处理,8个塔柱从主梁顶底板中穿过,塔梁分离。一个塔柱开洞大小为1.964 m(横桥向)×2.352 m(纵桥向)。

5 斜拉索

全桥共设64根拉索,两边跨布置32根,中跨布置32根。边、中跨在桥面纵向拉索间距均为12 m,在桥塔上竖向间距均为5 m。桥梁横向拉索间距为30.8 m。斜拉索与主梁的夹角为31.7°~64.6°。

本桥斜拉索采用平行钢绞线拉索体系,标准强度1 860 MPa。采用直径为 $\phi^s=15.20$ mm镀锌或环氧涂层钢绞线。

6 关键技术与技术创新

6.1 格构柱式钢—混组合塔

上下塔柱连接处采用插入式钢—混连接,即上塔柱4个格构塔柱伸入下塔柱混凝土内4.5 m,伸入部分钢塔柱内外侧均设置PBL剪力连接件,保证上下塔柱紧密连接。

上塔柱为钢结构,创新地采用格构柱式造型,通透感强。连接两个上塔柱的塔顶平联采用钢桁架杆件,整个结构轻盈通透。

上塔柱及平联部分可工厂预制,现场拼装,极大节约了施工工期,同时能保证加工质量及桥塔的景观效果。工厂加工时合理划分塔柱节段,分段预制、分段吊装,很好的解决了现场运输和吊装的问题。另外平联施工采取了整体预制,整体提升方案,也极大的加快了施工速度同时降低了施工风险。

6.2 格构柱式钢塔锚固系统

斜拉桥中锚固系统是整个设计过程中难点和重点。由于主塔较高,斜拉索在梁端为张拉端,塔端为锚固段。本桥设计采用钢锚梁与钢锚箱共同组成锚固系统。钢锚梁置于两个箱型塔柱之间,钢锚箱则置于塔柱内,均采用焊接连接。

钢锚梁为箱形结构,由锚垫板、锚板、锚下加劲板、顶、底板、侧板、箱形拉板、横隔板等组成。每对斜拉索的水平力由钢锚梁承受,竖向分力通过钢锚梁传递给塔柱。

钢锚箱主要有两个传递剪力的“u”型板和与其垂直的支撑板构成(见图7)。

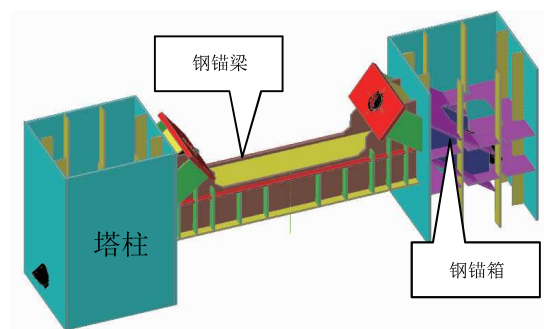


图7 桥塔锚固系统三维图

7 结语

陆港大桥(见图8)在设计过程中,依据桥塔的受力特点采用了钢—混组合结构塔柱,充分考虑了结构的美观性以及经济性,发挥了钢材和混凝土材料的最优性能。同时解决了格构式塔柱斜拉索的锚固问

(下转第84页)

$$\sigma_{i6}(t) = \frac{0.9[E_p \varepsilon_{cs}(t, t_0) + \alpha_{EP} \sigma_{pc} \phi(t, t_0)]}{1 + 15\rho_{ps}} \quad (3)$$

式中： ψ 为拉张系数； ζ 为预应力钢筋的松弛系数； σ_{pe} 为传力锚固条件下的钢筋应力； σ_{pc} 为由预应力导致的承拉区域各纵筋断面重心部位的法向混凝土压力； $\phi(t, t_0)$ 为加载龄期 t_0 下，计算龄期 t 的徐变常数； $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ 为应力筋导力锚固龄期 t_0 下，计算龄期 t 的混凝土收缩应变； α_{EP} 为预应力筋弹塑性模量与混凝土弹塑性模量的比值。

测试垂向预应力时，因为未在现场测试混凝土应变，所以只能得出其实际测量值。同时结合式(2)和式(3)，计算得出混凝土收缩徐变损耗和预应力筋松弛损耗理论值，汇总结果见表7。

表7 垂向预应力筋第2批损耗实际测量

计算时刻 /d	结果汇总值			单位:MPa		
	计算值			实测值		
	σ_{i4}	σ_{i5}	σ_{i6}	N23	N23'	N23''
7	0.40	19.20	19.50	18.50	18.50	13.80
30	5.50	29.30	30.00	33.20	25.80	24.50
60	7.20	33.70	40.80	39.00	26.50	25.50
87	8.30	33.70	42.00	40.20	28.70	28.30
130	9.40	33.70	43.10	41.30	29.50	29.10
150	9.90	33.70	43.50	41.70	30.20	29.80
180	10.50	33.70	44.20	42.40	30.60	30.10
205	11.00	33.70	41.00	42.80	30.90	30.50

根据表7能够得出：垂向预应力筋第2批损耗实测均值在第60d、130d、205d依次是30.3MPa、

33.3MPa和34.7MPa，与理论值相比，实际测量值均小于理论值；而且，垂向预应力筋对应有效预应力在150d后基本维持恒定。

4 结语

针对案例桥箱体梁腹板垂向预应力筋，依据路桥设计规范中相关纵向预应力损耗计算规定，对混凝土收缩徐变损耗、混凝土弹塑性压缩损耗、钢束松弛损耗、垂向预应力筋的摩擦损耗以及锚固损耗进行了计算。根据计算结果发现：除去计算所获得的锚固损耗显著偏大，其他各项损耗的计算值都与实际测量值相符合。针对垂向预应力筋，锚固损耗所占比例最大，垂向预应力筋N23、N23'、N23''依次占总损耗的35.3%、47.5%和52.8%。实测锚固损耗偏小，一方面表明选用计算方法对垂向预应力筋的此项损耗开展计算相对安全，同时亦表明施工现场的垂向预应力筋拉张施工功效较佳。

参考文献：

- [1] 许康曦. 预应力混凝土T梁桥预应力损失检测技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [2] 梁南平. 预应力混凝土连续弯梁桥的预应力损失试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [3] 祁义辉. 大跨径T形刚构桥长束预应力沿程损失及影响效应分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [4] 李明泽. 基于结构自振特性的预应力混凝土连续梁桥有效预应力识别研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [5] 赵静超. 折线先张及曲线后张预应力混凝土梁徐变性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

(上接第67页)

题；该塔型及锚固系统系统均已获得国家发明专利。



图8 陆港大桥

大桥于2019年12月底建成通车，运营良好。成桥荷载实验各项数据符合规范要求，成桥线形与设计数值吻合良好。该桥已经成为宝鸡市渭河上标志性建筑。大桥在设计过程中取得的创新成果，可为今后类似桥梁工程的建设提供借鉴与参考。

参考文献：

- [1] 西安市政设计研究院有限公司. 宝鸡市陆港渭河大桥工程施工图[Z]. 西安: 2017.
- [2] 袁毅, 易伦雄. 武汉古田桥一自锚式悬索桥设计及关键技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 82-83.