

咸阳高新区渭河大桥抗震体系研究与结构设计

徐海军,戎华钦

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 咸阳高新区渭河大桥是一座双塔无背索斜拉桥,桥型通过方案竞赛确定,造型独特。大桥位于8度区,在高烈度地区由于桥塔自重大的问题而很少采用无背索斜拉桥,设计对桥梁抗震体系展开研究,对比了两种体系的地震响应后,主梁连续、塔梁固结并在梁底设置支座的连续支承体系更为合理;桥塔采用钢-混组合结构,不仅可以平衡索力,还可以更好适应塔柱偏心受压的要求,主梁则根据场地施工条件采用多主梁形式;桥梁结构计算表明结构设计均满足规范要求,可以为高烈度地区建造无背索斜拉桥提供参考。

关键词: 无背索斜拉桥;抗震体系;结构设计;结构分析

中图分类号: U448.27;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0180-04

Seismic System Research and Structural Design of Weihe Bridge in Xianyang High-tech Zone

XU Haijun, RONG Huaqin

[Tongji Architectural Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Weihe River Bridge in the Xianyang High-tech Zone is a double-pylon no-backstay cable-stayed bridge. Its unique design was determined through a competition. The bridge is located in an 8-degree earthquake zone. In high-intensity areas, the cable-stayed bridges without backcables are rarely used due to the heavy weight of the bridge pylons. The seismic resistance system of the bridge is studied and designed. After comparing the seismic responses of the two systems, the continuous support system, in which the girder is continuous, the pylon beam is consolidated and the support is set at the bottom of the beam, is more reasonable. The bridge pylon is used of steel-concrete composite structure, which not only balances the cable forces, but also better accommodates the eccentric compression requirements of the pylon. The girder is in a multi-girder form according to the construction conditions of the site. The structural calculations of the bridge show that the structural design all meet the code requirements and can provide a reference for the construction of cable-stayed bridges without backstays in high-seismic regions.

Keywords: no-backstay cable-stayed bridge; seismic resistance system; structural design; structural analysis

0 引言

咸阳高新区渭河大桥是西安-咸阳一体化重要交通基础设施项目。由于大桥所处地理位置十分重要,使得桥梁景观成为重要设计因素。通过桥型方案竞赛,一座以无背索斜拉桥为结构基础、以“双手合十,祈福未来”为造型主题的景观桥梁最终胜出,见图1。

大桥以两个无背索斜拉桥为基本结构,通过组合形成独特的立面造型,对称相望的桥塔如同合十的双手,寓意着两岸牵手发展。独特的桥梁造型给结构设计带来了挑战。首先,不同于常规独塔无背



图1 渭河大桥桥型立面效果图

索斜拉桥,双塔无背索斜拉桥合理结构体系确定需要进行研究;其次,本桥位于地震8度区,国内尚未有高烈度无背索斜拉桥建造先例,桥梁的抗震性能及相关结构设计值得关注。

1 总体设计

渭河属于游荡性河流,水位变动较大,桥位处南北河堤间距约900 m,枯水期时仅主河槽过水,水面

收稿日期: 2025-07-25

作者简介: 徐海军(1978—),男,博士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

宽约 200 m,而洪水期间水面宽度可达 800 m 以上。由于主河槽明显偏向北侧,如果将主桥中跨布置于主河槽中,则作为视觉焦点的上构桥塔会明显偏离全桥中心,景观效果十分不利。注意到概念方案提出的三跨结构呈现出两个边跨大而中跨小的特征,结合地形、水文条件和以及跨度、桥宽和塔高的空间尺寸比例,设计将主桥跨径确定为 140 m+110 m+140 m=390 m;把 140 m 边跨布置于主河槽中,110 m 中跨和另一个 140 m 边跨布置于河漫滩上,使得主桥基本位于全桥的中央位置,较好地适应了水位涨跌引起的水面宽度变化的场地条件。

桥型立面布置见图 2,倒 V 形桥塔桥面以上垂直高 76.9 m,塔柱顺桥向倾角 62.2°,横桥向倾角 75.8°;每个塔柱设 8 对斜拉索,拉索采用扇形索面,梁上索距 12.0 m,塔上索距 6.0~6.35 m。

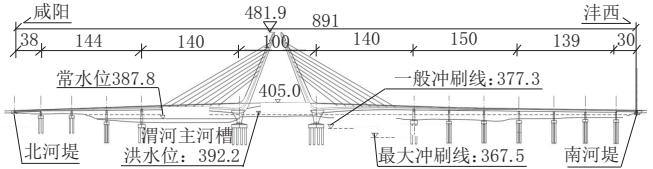


图 2 渭河大桥桥型布置图(单位:m)

2 抗震体系研究

无背索斜拉桥是在独塔斜拉桥基础上演变而来的一种特殊形式的斜拉桥,利用倾斜的桥塔自重平衡拉索索力^[1-2]。由于体系复杂,无背索斜拉桥一般只用在景观要求较高的项目上。从 1992 年第一座无背索斜拉桥西班牙 Alamillo 桥^[3-4]开始,至今全世界不过建造了二十来座这样的桥梁^[5-6],且均为独塔结构。本项目为双塔无背索斜拉桥,其受力特征与独塔无背索斜拉桥有不同之处,且本桥位于 8 度区,在高烈度地区无背索斜拉桥由于桥塔自重大而很少采用,因此有必要从抗震性能角度对结构体系进行研究。

在斜拉桥常见结构体系中,塔梁墩固结体系由于结构整体刚度大,适合独塔斜拉桥或主墩较高柔度较大的双塔斜拉桥,本桥主墩墩高较小不宜采用,提出了两种结构体系进行研究。

体系一:将桥梁分为两个独立的独塔无背索斜拉桥,并采用常用的塔梁墩固结体系^[7],之间设置挂孔,本文称之为塔梁墩固结+挂孔体系,见图 3。

体系二:主梁连续、塔梁固结并在梁底设置支座的连续支承体系,本文称之为塔梁固结+连续支承体系,见图 4。

建立空间梁格分析模型对地震响应进行对比计

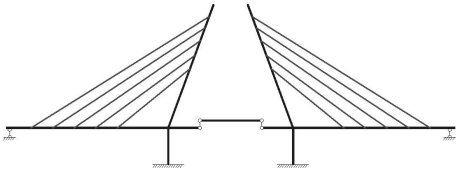


图 3 体系一结构简图

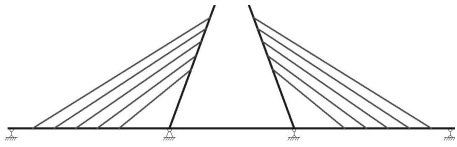


图 4 体系二结构简图

算,模型考虑主桥相邻两联引桥的影响,见图 5。

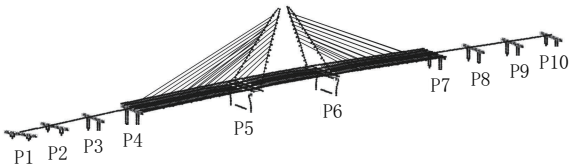


图 5 抗震分析模型

体系二采用减隔震抗震体系^[8-10],桥墩设置摩擦摆支座^[11]和黏滞阻尼器进行耗能^[12],分别通过调整结构周期和增加结构阻尼来降低地震效应。如图 6 所示,支座摆动半径 5 m,摩擦系数 0.05,屈服位移 3 mm;中墩支座横桥向、顺桥向各布置一对阻尼器,边墩支座横桥向布置一个阻尼器。阻尼器最大阻尼力 2 000 kN,阻尼系数 2 000 kN/(s/m)^α,速度指数 α 为 0.2。

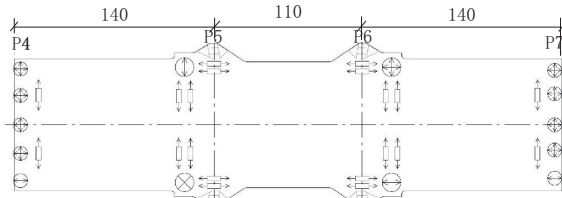


图 6 支座和阻尼器平面图布置示意图(单位:m)

表 1 给出纵向地震和横向地震作用下桩身最大弯矩和桥墩墩底最大弯矩值。从表可知,体系二整体地震作用要低于体系一。一方面,体系一塔梁墩固结体系整体刚度大,加大了地震响应;另一方面,体系一由于桥墩高度低无法采用塑性铰延性体系进行耗能,而体系二则可以利用减隔震支座和阻尼装置进行耗能。

3 结构设计

3.1 桥塔

为体现建筑设计理念,桥塔采用倒 V 塔型,并将塔柱与主梁侧面造型结构连为一体,形成一个完整的形态,见图 7。

表1 不同体系地震响应对比

地震作用	位置	桩身最大弯矩/ (kN·m)		墩底最大弯矩/ (kN·m)	
		体系一	体系二	体系一	体系二
纵向地震	边墩	22 560	17 660	57 658	52 534
	中墩	62 560	27 630	937 212	232 951
横向地震	边墩	33 130	30 760	30 121	27 922
	中墩	39 360	247 90	476 241	244 589

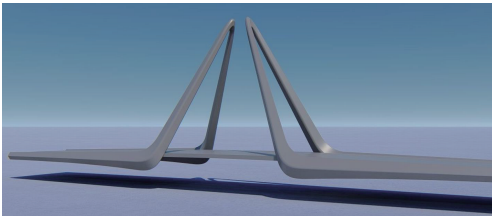


图7 桥塔整体造型

索塔截面由外侧壁板A~E围成八边形,内侧设置纵隔板F~H,塔柱纵向尺寸W从4.0 m变化到8.5 m,横向尺寸H从2.6 m变化到4.9 m。

壁板和隔板将截面划分为5个仓室,编号I~V(见图8),中间仓室V作为检修通道使用。由于无背索斜拉桥塔柱处于偏心受压状态,在仓室I中填充混凝土形成钢-混组合受力结构^[13-14],可以充分发挥材料性能。钢板和混凝土之间采用PBL抗剪连接件,开孔板孔径50 mm,间距200 mm,内穿直径22 mm钢筋。

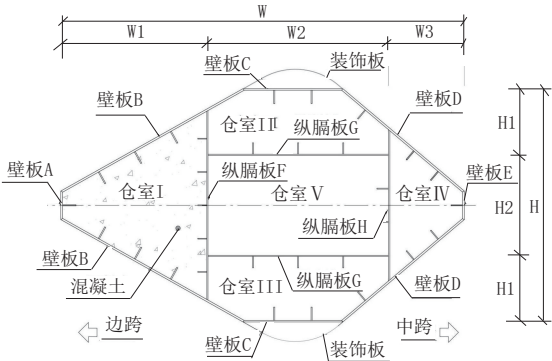


图8 桥塔截面图

对仓室II~IV是否填充混凝土进行研究,见表2,填充混凝土通过增加塔重降低了主梁弯矩,但由于桥塔重心高,也会显著加大地震响应,整体上造价高且存在施工难度大的问题,因此采用仅填充仓室I的方案。

表2 填充混凝土中墩地震响应对比

地震作用	桩身最大弯矩/(kN·m)		墩底最大弯矩/(kN·m)	
	不填充	填充	不填充	填充
纵向地震	27 630	50 178	232 951	491 732
横向地震	24 790	47 210	244 589	453 232

3.2 主梁

结构计算表明本桥呈现斜拉-连续梁协作受力

的特征,多主梁截面剪力滞影响小,参与纵向受力的有效截面大,符合桥梁的受力实际特点。多主梁也符合本桥只能采用公路运输的要求,降低了现场安装难度和施工成本。主梁横截面见图9,断面上划分为五道纵梁,中梁和边梁宽度均为3.5 m,但根据各自受力特点分别进行板厚设计。

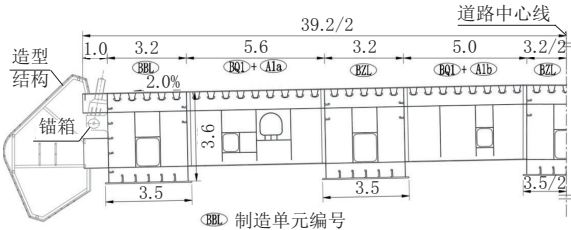


图9 1/2主梁截面(单位:m)

3.3 斜拉索

斜拉索索体采用 ϕ 15.2-31环氧涂层钢绞线成品索,共16对。最大索长174.4 m,最小索长64.3 m,基本组合索力3 164~3 750 kN。

4 结构分析

4.1 整体计算

如图10所示,采用MIDAS Civil建立空间杆系模型对主桥进行静力分析,支座按照设计图纸进行模拟,约束固定方向,释放滑动方向。

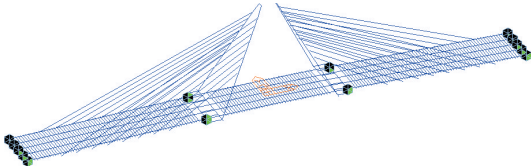


图10 主桥有限元分析模型

为了准确模拟组合桥塔受力,对塔柱截面进行迭代计算,混凝土达到抗拉强度后即退出工作,以此确定有效受力截面^[15],见图11。

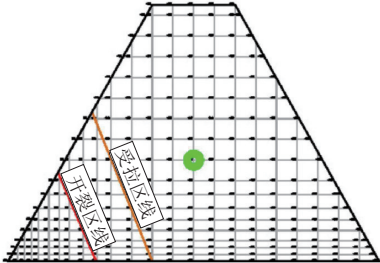


图11 塔柱混凝土有效截面迭代计算

计算结果表明,承载能力极限状态基本组合下主梁最大压、拉应力分别为251.4 MPa和227.7 MPa,小于材料设计强度270 MPa。主梁最大挠度为108 mm,为跨径的1/1296,说明主梁有足够的结构刚度。桥塔钢结构最大压、拉应力分别为-198.8 MPa和243.6 MPa,

小于材料设计强度 270 MPa;混凝土最大压应力为 -25.4 MPa,小于混凝土抗压强度设计值-26.5 MPa。

4.2 局部受力计算

对桥梁受力复杂的关键构造,如塔梁结合段、索塔锚固和索梁锚固区建立了板壳和实体单元分析模型。图 12 是塔梁结合段钢板 Von Mises 应力计算结果,最大应力发生基本组合下塔柱与主梁交汇边跨一侧。通过局部构造加强,钢板有效应力均不超过 270 MPa。

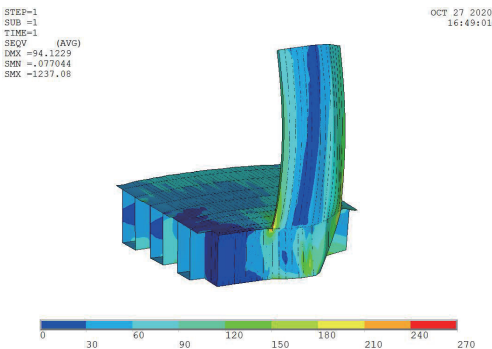


图 12 塔梁结合段钢板 Von Mises 应力云图(单位:MPa)

5 结 语

抗震体系是高烈度地区建造无背索斜拉桥关键控制因素,本桥采用主梁连续、塔梁固结支承体系,并通过摩擦摆支座和阻尼器进行耗能,降低了桥梁的地震响应。钢-混组合桥塔的设计符合塔柱偏心受压的特点,多主梁的设计降低了钢梁运输和架设的难度,本桥为高烈度地区建设无背索斜拉桥提供了一个较好的结构方案。

参考文献:

[1] 王伯惠.斜拉桥结构发展和中国经验[M].北京:人民交通出版社,2001.

[2] 严国敏.现代斜拉桥[M].成都:西南交大出版社,1996

[3] J. K. Guest, Powell Draper, David Billington. Santiago Calatrava's Alamillo Bridge and the Idea of the Structural Engineer as Artist[J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(10): 936-945

[4] A. C. APARICIO, J. R. CASAS. The Alamillo cable-stayed bridge: special issues faced in the analysis and construction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and buildings, 1997, 122(4): 432-450.

[5] 陈爱军,邵旭东.无背索竖琴式斜拉桥混凝土斜塔柱合理结构型式分析[J].公路工程,2007(4):130-135.

[6] 楼庄鸿,酆铃福.无背索斜拉桥[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2005年全国桥梁学术会议论文集,2005.

[7] 彭旺虎,邵旭东,李立峰,等.无背索斜拉桥的概念、设计与施工[J].土木工程学报,2007(5):26-33.

[8] 穆祥纯.论中外城市桥梁减、隔震的技术创新[J].城市道桥与防洪,2016(8):60-64.

[9] 黄华.高烈度震区桥梁减隔震设计分析[J].城市道桥与防洪,2023(9):153-157.

[10] 朱晞,弓俊青.钢筋混凝土桥梁延性抗震设计的研究及发展[J].桥梁建设,2000(1):1-5.

[11] 张忠伟,关清杰,刘严.摩擦摆球型支座对斜拉桥抗震性能的影响[J].城市道桥与防洪,2020(9):73-75;79.

[12] 杜世界.混凝土梁斜拉桥黏滞阻尼器参数分析[J].城市道桥与防洪,2015(6):100-104.

[13] 王鹏,王康宁,黄春雷.新型钢-混组合桥塔构造型式研究[J].城市道桥与防洪,2025(1):75-79.

[14] 吴巨军.钢管混凝土组合桥塔设计研究[J].中国市政工程.2021(2):76-79.

[15] 罗钧,谢传喜,王耀伟.基于有限元模型的混凝土结构裂缝成因分析新方法[J].建筑结构,2019(23):134-138.