DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260900

新型高抗震性能超宽斜拉桥设计研究

刘　彬,朱安静,马国纲,高　凡,罗亚林
(中国市政工程西北设计研究院有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘　要: 基于台塔协同抗震思路,在国内首次将桥台引入到斜拉桥抗震体系中,提出了一种新型高抗震性能超宽斜拉桥结构体系,从结构设计、关键技术等方面全方位介绍了国内设防烈度最高、桥面最宽的全漂浮体系多塔斜拉桥——西安国际社区沣邑大桥,重点阐述了新型抗震体系、嵌入式抗震桥台及钢混组合独柱桥塔在沣邑大桥中的应用。高抗震性能超宽斜拉桥设计研究表明:与常规塔梁固结斜拉桥相比,E2 时程地震作用下新型抗震体系斜拉桥桥塔地震响应显著降低,桥塔塔底纵桥向弯矩、轴力降幅分别达 54.5%、5.9%,横桥向弯矩、轴力降幅分别达 55.3%、15.3%;嵌入式抗震桥台通过纵向限位弹簧、加强型抗震背墙、插入式台身等一系列复合构造,可有效传递结构纵向地震力;钢混组合独柱桥塔依靠空间双索面支撑起 57 m 超宽桥面,“独柱桥塔+空间双索面+主横梁”的结构手法展示了极高的传力效率。西安国际社区沣邑大桥的建成是新型高抗震性能超宽斜拉桥结构体系在强震区城市桥梁建设中的一次尝试,新型高抗震性能超宽斜拉桥在静力、抗震两方面均具有卓越的传力效能,对国内强震区斜拉桥的设计建造具有很好的借鉴意义。

关键词: 台塔协同抗震;高抗震性能超宽斜拉桥;嵌入式抗震桥台;强震区城市桥梁
中图分类号: U442;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0166-05

Design and Research on a Novel of Ultra Wide Cable-stayed Bridge with High Seismic Performance

LIU Bin, ZHU Anjing, MA Guogang, Gao Fan, LUO Yalin
(CSCEC AECOM Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: Based on the concept of pier-tower collaborative seismic resistance, the first introduction of bridge piers into the seismic system of cable-stayed bridges in China was achieved, proposing a novel high-seismic-performance ultra-wide cable-stayed bridge structural system. The design and key technologies of Xi'an International Community Fengyi Bridge, the highest seismic intensity and widest deck full-floating multi-tower cable-stayed bridge in China which were comprehensively introduced, with a focus on the application of the new seismic system, embedded seismic piers, and steel-concrete composite single-column bridge towers. Research on the high-seismic-performance ultra-wide cable-stayed bridge design revealed that, compared to conventional tower-girder fixed cable-stayed bridges, the seismic response of the tower in the new seismic system under E2 time-history seismic action was significantly reduced. The longitudinal bending moment and axial force at the tower base decreased by 54. 5% and 5. 9%, respectively, while the transverse bending moment and axial force decreased by 55. 3% and 15. 3%, respectively. The embedded seismic pier effectively transmits longitudinal seismic forces through a series of composite structures, including longitudinal limiting springs, reinforced seismic backwalls, and inserted pier bodies. The steel-concrete composite single-column bridge tower supports the 57-meter-wide deck with spatial double-plane cable systems, demonstrating exceptional load transmission efficiency through the structural approach of "single-column bridge tower + spatial double-plane cable + main transverse beam". The completion of Xi'an International Community Fengyi Bridge represents a pioneering attempt in urban bridge construction within seismic-prone areas using the novel high-seismic-performance ultra-wide cable-stayed bridge structural system. This new system exhibits outstanding load transmission efficiency in both static and seismic aspects, providing valuable insights for the design and construction of cable-stayed bridges in high-seismic-intensity regions across China.

Keywords: collaborative seismic resistance of abutments and towers; ultra-wide cable-stayed bridge with high seismic performance; embedded seismic bridge abutment; urban bridges in seismic zones

收稿日期: 2026-07-10
基金项目: 甘肃省住建厅建设科技计划项目(JK2025-14)
作者简介: 刘彬(一),　,高级工程师,从事组合结构桥梁与韧性桥梁设计及研究工作。
通信作者: 朱安静(一),　,教授级高级工程师,从事大跨度复杂桥梁与城市景观桥研究工作。电子信箱:404105591@qq.com

1　工程概况

沣邑大桥位于西安国际社区灵韵北路，为使桥梁形态与周围环境相协调，大桥采用轻盈通透的多塔全漂浮斜拉桥结构体系，大桥全长 526 m，桥梁总宽为 57 m。技术标准：城市主干路，双向 10 车道，基本地震烈度 8 度，基本地震动峰值加速度 0.225g。

2　结构设计

2.1　总体布置

根据防洪要求和美学比例，将桥梁跨径布置为 87 m+176 m+176 m+87 m，桥梁采用三塔四跨双索面全漂浮斜拉桥结构体系（见图 1），独柱桥塔依靠双索面拉索支撑起 57 m 超宽桥面，显示了结构卓越的传力效率。为使桥梁在强震区具有优异的抗震性能[1-6]，将桥台引入到斜拉桥总体抗震体系中，构建基于台塔协同作用的新型抗震结构体系。

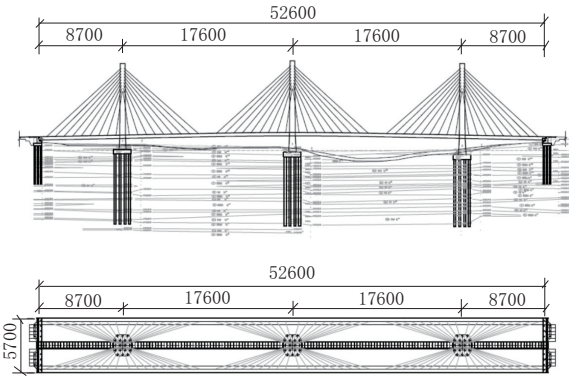


图 1　桥型布置图（单位：cm）

2.2　主梁

桥梁主梁采用双边纵梁+横梁体系（见图 2），边纵梁采用箱型断面，横梁采用倒 T 型、工字型断面，桥面系采用正交异性桥面板，边纵梁、横梁材料均采用 Q345qD 钢。边纵梁箱室宽 9.9 m，内外腹板采用直腹板，箱室外侧悬臂长 4.25 m，纵梁标准段顶板厚 16 mm、中分带 6.5 m 范围内顶板厚 28 mm，纵梁标准段底板厚 16 mm、外腹板厚 32 mm、内腹板厚 20 mm。横梁沿纵桥向 3 m 设置一道，车行道范围、中分带范围分别设置为倒 T 形、工字形，倒 T 形横梁底板宽 600 mm、板厚 28 mm，工字形横梁顶、底板板宽为 600 mm、板厚 28 mm，横梁腹板厚度均为 16 mm。正交异性桥面板在车行道范围内设置 U 肋，U 肋高 280 mm、厚 8mm、间距 600 mm，人非混行道范围内设置为板肋，高 140 mm、厚 12 mm、间距 300 mm。

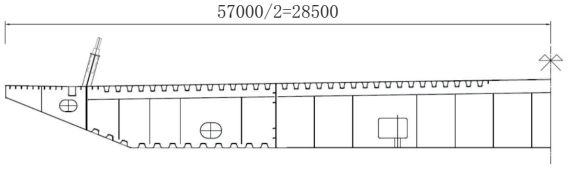


图 2　主梁构造图

2.3　拉索

拉索采用空间扇形索面，每个桥塔处布置 18 对，拉索塔上竖向间距为 3 m、梁上纵向间距为 9 m，索梁、塔梁拉索锚固形式均采用锚拉板。拉索材料采用 ϕ_s15.2 环氧涂层钢绞线，钢绞线标准强度 1 860 MPa，根据受力采用 34、43 根两种规格。为控制拉索振幅在其索长的 1/1 700 内，拉索下端设置外置式磁流变阻尼器。

2.4　主塔及基础

主塔采用钢-混凝土混合桥塔（见图 3），主塔平均高度为 95 m，桥塔分为上塔柱、中塔柱、下塔柱三部分，上塔柱采用钢结构，中塔柱、下塔柱采用混凝土结构，桥塔采用圆形断面。主塔基础采用八边形承台+桩基础，承台平面尺寸为 22.2 m×18.2 m，厚度为 5.0 m，下设 18 根桩径为 2.0 m 的钻孔灌注桩。

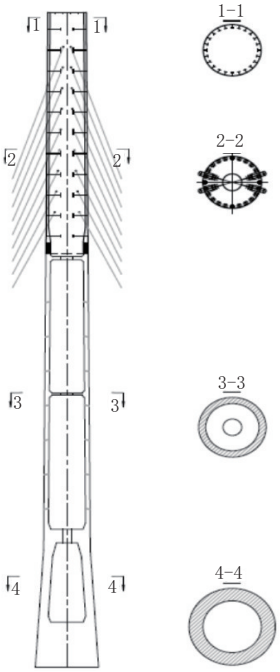


图 3　桥塔构造图

2.5　桥台及基础

桥台采用一字型桥台（见图 4），台身与桥面同宽为 57 m，承受纵向地震作用处局部加厚。台身下设异形承台，承台厚 2.5 m，标准截面宽 5.4 m，局部加宽至 8.6 m，承台下设 26 根桩径为 1.2 m 的钻孔灌注桩。

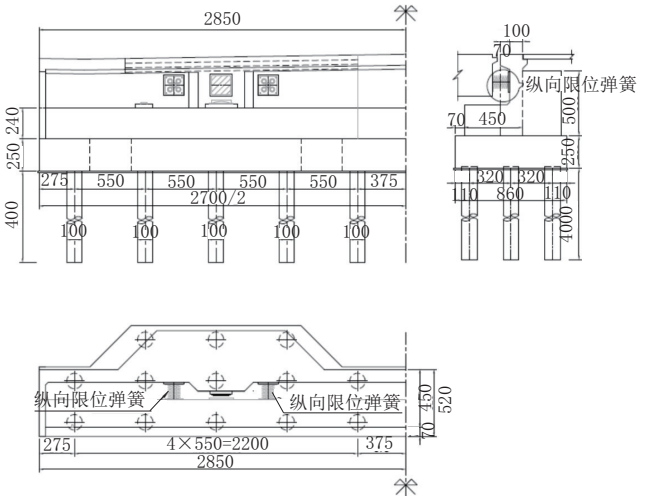


图4　桥台构造图（单位：cm）

3　设计关键技术

3.1　新型抗震结构体系

常规斜拉桥通过塔梁固结方式来抵抗地震作用[7]，此种抗震模式下仅桥塔承受地震作用，势必造成桥塔所受弯矩、剪力较大，进而致使桥塔结构尺寸、设计配筋较大，桥塔抗震设计成为控制整个设计的关键点。而沣邑大桥采用基于“桥台-桥塔协同抗震”设计思想的新型抗震体系，通过引入桥台来协助桥塔抗震，有效分担了桥塔所受地震作用，降低了桥塔设计难度和材料用量。

新型抗震体系通过主梁与桥台、主梁与桥塔之间设置纵向、横向、竖向一系列复合构造来实现台塔协同抗震的设计思想，纵向、横向、竖向相关构造措施如下。

3.1.1　纵向

为满足地震工况下桥梁纵向变形需求，主梁与桥台纵向之间需设置25 cm间隙，并安装纵向限位弹簧，弹簧的功能在于确保运营状态下主梁的变形及回位，限位弹簧每侧桥台处共设4组，每组由5个压缩弹簧构成（见图5）。

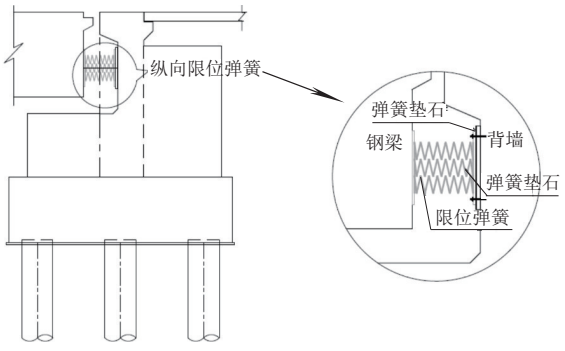


图5　纵向限位弹簧

3.1.2　横向

主梁与桥台、主梁与桥塔横向均设置限位拉索（见图6），拉索索体材质采用碳纤维，拉索公称直径7 mm，屈服强度为2 800 MPa，弹性模量为1.75×10^{11} MPa，桥台、桥塔处拉索张拉端分别位于台身、主梁。

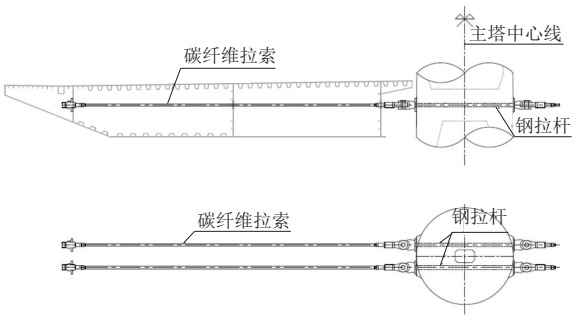


图6　横向限位拉索

3.1.3　竖向

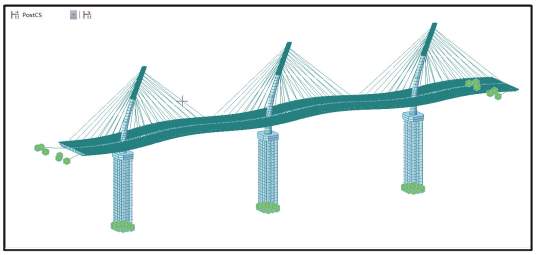
为有效防止超宽斜拉桥伸缩缝在温度作用下产生过大竖向变形，桥台处采用“受力主支座+变形辅助支座”的构造措施，受力主支座功能在于传递主梁竖向力，变形辅助支座功能在于通过设置支撑点减小变形长度，受力主支座、变形辅助支座分别采用双向活动球型钢支座、四氟滑板矩形橡胶支座。

采用大型有限元软件MIDAS Civil对沣邑大桥进行动力抗震分析，主梁、横梁、桥塔均采用梁单元模拟，拉索采用桁架单元模拟，桥台纵向限位弹簧采用间隙单元模拟，桩基边界采用土弹簧模拟。E_1、E_2地震加速度峰值分别采用0.225g、0.485g，由沣邑大桥前三阶自振模态可知（见图7），结构第一阶自振模态表现为主梁纵飘，表明结构各向刚度中，纵向刚度最弱，此方向的振型最易被激发。

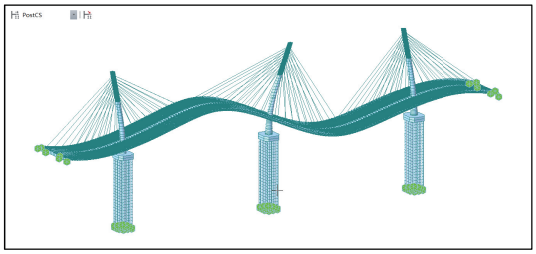
由于E_2时程地震作用控制设计，所以仅分析对比新型抗震体系斜拉桥与常规塔梁固结斜拉桥在E2时程地震作用下的地震响应，采用新型抗震体系后斜拉桥桥塔地震响应明显降低，E_2时程地震作用下塔底纵桥向弯矩下降达54.5%、轴力下降达5.9%（见图8至图9），塔底横桥向弯矩下降达55.3%、轴力下降达15.3%（见图10至图11）。

3.2　嵌入式抗震桥台

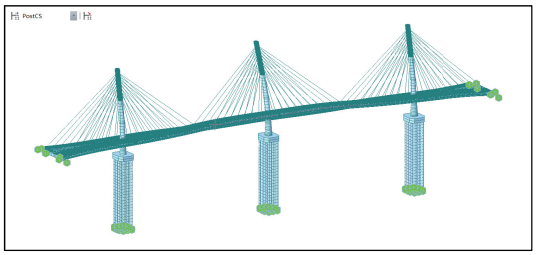
嵌入式抗震桥台由常规的一字型桥台衍化而来，抗震桥台由加强型抗震背墙、插入式台身、耳墙组成，核心组件加强型抗震背墙平面呈楔形，标准段厚1.0 m，承受地震作用处局部加厚至4 m，插入式台身标准段厚4.5 m、加强段厚7.5 m。受力主支座、变形



（a）模态一：主梁纵飘

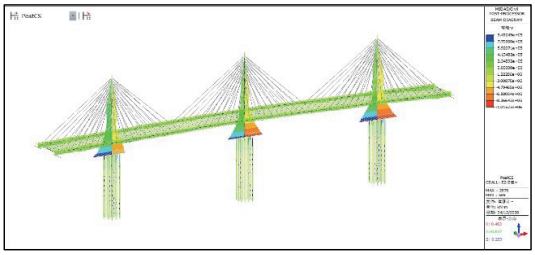


（b）模态二：主梁竖弯

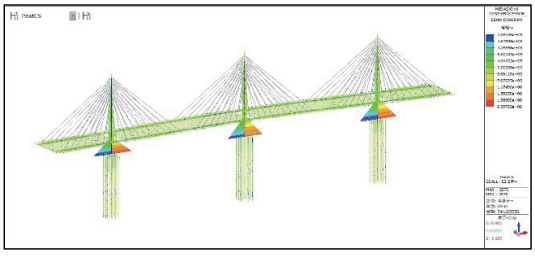


（c）模态三：主塔横弯

图 7　桥梁自振模态



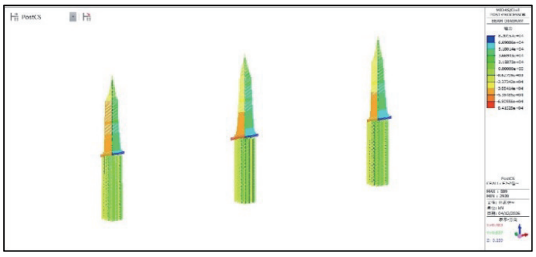
（a）台塔协同抗震体系



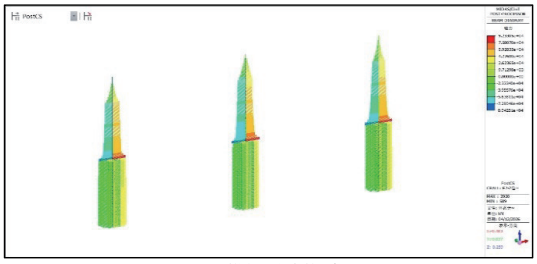
（b）塔梁固结体系

图 8　两抗震体系塔底纵桥向弯矩

辅助支座相距桥台横向中心线分别为 14.35、20.35 m，纵向限位弹簧组位于受力主支座两侧、相距 7.3 m。当地震作用时，主梁变形超过预设间隙时，主梁便可通过受力主支座撞击点将纵向地震力传递给桥台，从而达到协助桥塔分担地震力的设计目的。E2 时程地震作用下，主梁通过受力主支座撞击点传递给桥台的纵向地震力为 271 076 kN，同时台后填土也可作为安全储备承受纵向地震撞击力。

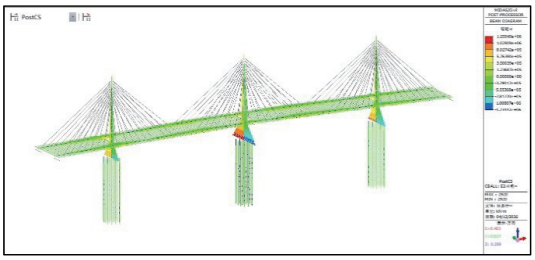


（a）台塔协同抗震体系

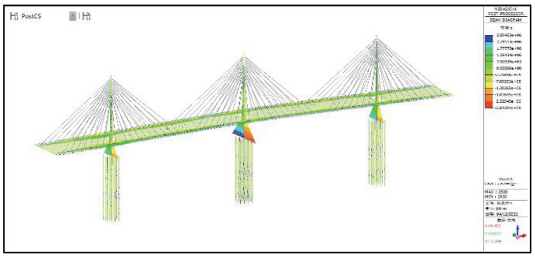


（b）塔梁固结体系

图 9　两抗震体系塔底纵桥向轴力

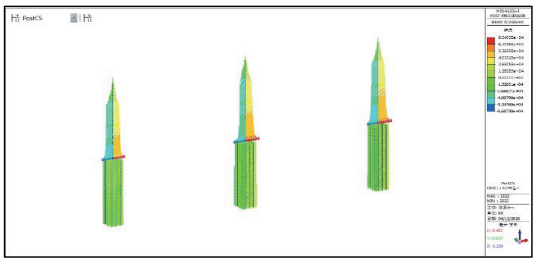


（a）台塔协同抗震体系

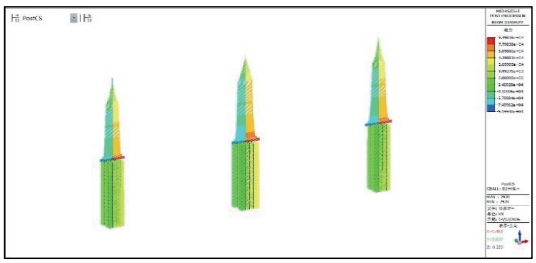


（b）塔梁固结体系

图 10　两抗震体系塔底横桥向弯矩



（a）台塔协同抗震体系



（b）塔梁固结体系

图 11　两抗震体系塔底横桥向轴力

3.3　钢混组合独柱桥塔

“独柱桥塔+空间双索面+主横梁”的结构体系使得沣邑大桥具有极高的传力效率，尤其是钢-混凝土独柱桥塔与空间双索面的组合运用[8-10]，使得整个桥梁外形简洁、传力高效（见图 12）。钢-混凝土混合独柱桥塔由上塔柱、中塔柱、下塔柱三部分组成，其中上塔柱长 35 m，采用钢结构圆形截面，塔柱直径 5.000~5.449 m，塔身壁厚 36 mm，内侧均布 24 个高 300 mm 的 T 型加劲肋，钢材采用 Q345qD 钢。中塔柱长 43 m，采用混凝土空心圆形截面，塔柱直径 5.449~6.000 m，壁厚 0.6 m，塔柱与主梁对应处设 2 m 厚隔板，桥面以上间隔不大于 20 m 设置一道 0.4 m 厚隔板，混凝土均采用 C60。下塔柱长 11.27~16.99 m，采用混凝土空心圆形截面，塔柱直径由梁底 6 m 按 1∶16 坡率变化至塔底，壁厚 1.2 m，塔底设实心段。上塔柱和中塔柱之间设置 1.6 m 长钢混结合段，钢混结合段由锚栓、PBL 刚性剪力键、钢格室共同构成，以传递剪力及弯矩产生的拉力。



图 12　桥梁施工照片

4　结　语

（1）沣邑大桥“独柱塔+空间双索面+纵横梁”的结构体系，使得整个桥梁具有轻盈简洁的外形与卓越高效的传力效率。

（2）首次提出并应用基于台塔协同抗震设计思想的新型斜拉桥抗震体系，是沣邑大桥的一大技术特色，相比塔梁固接斜拉桥，新型抗震体系斜拉桥在 E2 时程地震作用下桥塔塔底纵桥向弯矩、轴力降幅分别达 54.5%、5.9%，横桥向弯矩、轴力降幅分别达 55.3%、15.3%。

（3）嵌入式抗震桥台通过纵向限位弹簧、加强型抗震背墙、插入式台身等一系列构造组合而成，抗震桥台可通过有效传递结构纵向地震力降低桥塔地震响应。

（4）沣邑大桥是新型斜拉桥抗震体系在国内城市桥梁的一次成功实践，可对国内强震区城市斜拉桥的设计建造提供借鉴（见图 13）。



图 13　桥梁竣工照片

参考文献：

[1] 康银庚，陈磊，杜通道，等. 高速铁路长联多塔大跨部分斜拉桥抗震设计研究[J]. 世界桥梁，2025，53（4）：78-86.

[2] 付炳宁，宋松林. 格巧高速双河特大桥总体设计[J]. 世界桥梁，2025，53（2）：1-7.

[3] 杨钻，徐东进，李保木，等. 牛田洋大桥主桥结构抗震及计算方法研究[J]. 桥梁建设，2025，55（4）：18-24.

[4] 黄鸣柳，沈文爱，何铁明，等. 双座串联大跨度斜拉桥横向约束体系研究[J]. 地震工程与工程振动，2020，40（6）：217-224.

[5] 王斌. 珠肇高铁西江特大桥主桥总体设计[J]. 世界桥梁，2025，53（1）：15-21.

[6] 怀臣子，李冲，崔延省，等. 地震高烈度地区部分斜拉桥超大吨位减隔震支座设计研究[J]. 世界桥梁，2024，52（1）：87-94.

[7] 万沐聪，宋随弟，申庆灿. 边墩约束对塔梁墩固结体系斜拉桥横桥向减震影响研究[J]. 桥梁建设，2024，54（4）：106-111.

[8] 陈志涛，黄细军，刘汉顺，等. 马鞍山长江公铁大桥主航道桥桥塔设计[J]. 桥梁建设，2024，54（3）：1-7.

[9] 牟兆祥，李恩良，杜宝军. 包银铁路乌海黄河特大桥主桥桥塔方案比选及设计[J]. 桥梁建设，2021，51（3）：108-115.

[10] 张超，傅光辉，林志滔，等. 主塔类型对斜拉桥横向地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动，2020，40（3）：97-107.