

大跨度塔梁固结独塔斜拉桥抗震性能研究

周守强

[上海市政设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为研究大跨度塔梁固结独塔斜拉桥的抗震性能,以主跨350 m独塔独柱斜拉桥——淮南淮河大桥为研究对象,针对其非对称结构特性展开系统性抗震研究。基于精细化有限元模型,通过动力特性分析,提取结构自振频率与模态,揭示独塔固结体系在动力响应中的薄弱环节;此外,相较于半漂浮体系,塔梁固结体系在地震作用下的特性表现为塔底弯矩减小59%,但梁端位移增大58%。通过阻尼器参数敏感性研究,优化黏滞阻尼器关键参数,可减小塔底弯矩11%、塔底剪力12%。

关键词: 独塔斜拉桥;固结体系;半漂浮体系;黏滞阻尼器;抗震

中图分类号: U443;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0075-04

Study on Seismic Performance of Long-Span Pylon-Girder Consolidated Single-Pylon Cable-Stayed Bridge

ZHOU Shouqiang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To study the seismic performance of a long-span pylon-girder consolidated single-eyre cable-stayed bridge, taking Huainan Huaihe River Bridge - a single-eyre single-column cable-stayed bridge with the main span 350 m as a research object, the systematic seismic study is conducted on its asymmetric structural characteristics. Based on a refined finite element model, the dynamic characteristic analysis is performed to extract the natural vibration frequencies and modes of the structure, and to reveal the weak links in the dynamic response of the single-eyre consolidation system. In addition, compared with the semi-floating system, the characteristics of the consolidated system under seismic action are manifested as a 59% reduction in the bending moment at the bottom of the pylon, but a 58% increase in the displacement at the end of girder. Through a sensitivity study of damper parameters, the key parameters of viscous dampers are optimized to reduce the bending moment at the bottom of the pylon by 11% and the shear force at the bottom by 12%.

Keywords: single-eyre cable-stayed bridge; consolidated system; semi-floating system; viscous damper; anti-seismic

0 引言

近年来,随着大跨桥梁工程的快速发展,斜拉桥因其优异的跨越能力和美学表现,成为城市地标性建筑的重要选择。在抗震研究领域,国内外学者针对常规双塔斜拉桥的减震体系研究已取得丰硕成果,从黏滞阻尼器参数优化(如Taylor公式的指数模型)、弹塑性钢耗能梁设计,到摩擦摆支座的隔震机理探索^[1-6],逐步形成多级设防的成熟技术框架。从塔形、塔高到抗震体系、约束体系^[7-9],研究成果颇为丰富。对于跨度较大的斜拉桥,学者多从地震响应

和减震措施视角开展研究分析^[10-16]。然而值得注意的是,当前学者对单跨且跨径超过300 m的独塔斜拉桥抗震性能的研究较少。此类桥梁具有非对称荷载分布的特性,且单塔结构的动力响应更为集中。因此,在地震作用下,其塔梁位移耦合机制更为复杂,扭转变形的风险也更加突出。如何为超大跨度独塔结构设计合理的抗震体系,是我国高烈度地震区桥梁安全面临的一项紧迫课题。

本文以淮南淮河大桥(主跨350 m的独塔独柱斜拉桥)为研究对象,针对其Ⅶ度地震设防要求与非对称结构特性展开系统性抗震体系研究。

1 工程背景与模型建立

1.1 工程概况

淮南淮河大桥跨淮河主桥为独塔双索面斜拉

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 上海市政总院拂晓计划(第五期)

作者简介: 周守强(1995—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

桥,跨径布置采用“350 m+210 m”,全宽 49.5 m。斜拉桥总体布置如图 1 所示。主跨采用钢箱梁,边跨采用混凝土梁,梁高 3.5 m。钢结构主梁与混凝土主梁为分离式双主梁,2 根主梁间的距离为 9 m,箱梁全宽 49.5 m。其中,钢结构主梁采用钢箱横梁连接,混凝土主梁采用 T 形横梁连接。钢箱梁标准横断面如图 2 所示,混凝土主梁标准横断面如图 3 所示。主塔整体高 209.6 m,其中桥面以上部分高 174.68 m,采用钢筋混凝土结构。考虑到造型立意,主塔结构外缘附着 6 片装饰构造,设计为“竹筒肌理”。主塔采用变截面,其中,最大尺寸为 12 m×12 m,最小尺寸为 9 m×9 m。主桥采用塔梁墩固结体系,边跨设置辅助墩,在辅助墩和过渡墩处各设置 2 个球形支座。

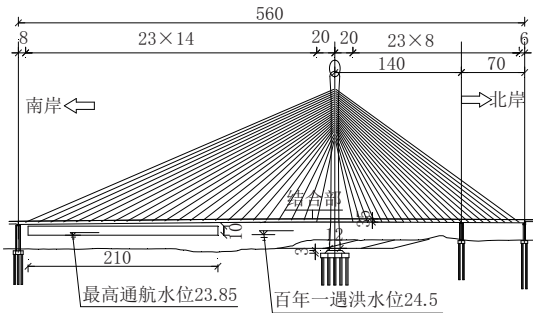


图1 桥梁总体布置图(单位:m)

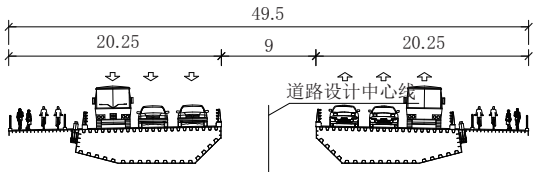


图2 钢箱梁标准横断面(单位:m)

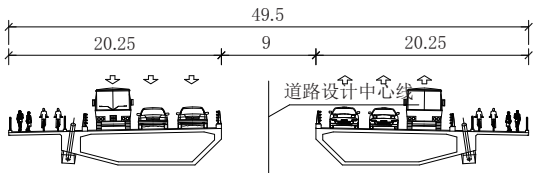


图3 混凝土梁标准横断面(单位:m)

1.2 有限元模型

为深入研究淮南淮河大桥的结构静、动力特性及抗震性能,本文利用大型通用有限元软件 MIDAS Civil,建立了该桥的精细化三维有限元模型(见图 4)。在模型中,主梁、主塔及桥墩等主要承重构件,均采用空间梁单元(Beam Element)进行模拟,从而准确反映其弯曲、剪切及轴力行为。斜拉索作为关键的预张力构件,采用桁架杆元(Truss Element)进行模拟。桥梁塔柱基础及过渡墩、辅助墩承台桩基础,在计算刚度后,利用一般弹性支承进行模拟,具体参数如表 1 所示。对于设置在桥梁特定位置的液

黏滞阻尼器,采用软件内置的黏弹性消能器单元进行模拟,该单元能有效捕捉阻尼器的速度相关非线性耗能特性。

表 1 弹性支承参数		单位:kN/m
位置	竖向刚度	顺桥向和横桥向刚度
塔底	1.4×10^8	1.5×10^7
南岸过渡墩底	5.1×10^7	4.8×10^6
北岸过渡墩底	9.3×10^7	1.8×10^6
北岸辅助墩底	1.7×10^7	1.3×10^6

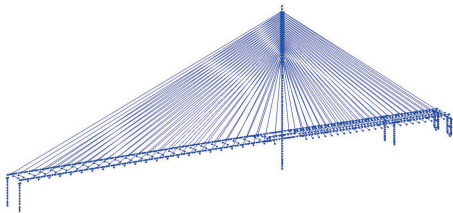


图4 独塔斜拉桥动力计算模型

1.3 地震动输入

本项目按Ⅶ度抗震设防烈度进行抗震设防。淮河北岸 50 年超越概率 10% 的设计基本地震加速度取值为 0.125g,相应的特征周期值为 0.55 s;淮河南岸 50 年设计基准期内、超越概率为 10% 的设计基本地震加速度取值为 0.135g,相应的特征周期值为 0.40 s。根据地震安全性评价报告,项目选用 E2 地震作用(100 年设计基准期内、超越概率为 5%)下 7 条人工地震动的加速度时程,以“水平向+竖向”的组合方式输入结构,并采用非线性时程分析方法进行计算。第一条地震波的波形如图 5 所示。

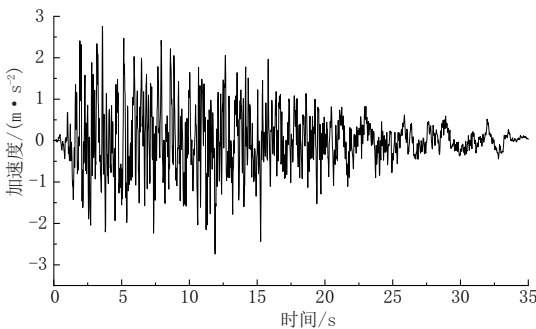


图5 地表水平地震加速度时程
(主桥、E2 地震作用下、第一条地震波)

2 动力特性分析

为准确获取桥梁的固有动力特性(自振频率及相应振型),本文对三维有限元模型,采用高效的 Lanczos 向量迭代法进行特征值分析。考虑到模型的复杂性和累积质量参与系数,本研究计算并提取了结构前 50 阶的自振振型。表 2 详细列出了计算所得模型的前 10 阶振型的自振频率、振动方向(如主梁

竖弯、横弯、扭转,主塔纵弯、横弯等),以及主要特征描述。前4阶振型如图6所示。

表2 结构自振特性

阶次	频率/Hz	周期/s	振型特性
1	0.155	6.42	主塔横向弯曲
2	0.321	3.11	主梁纵弯
3	0.485	2.06	主梁水平扭转
4	0.529	1.89	主塔纵向弯曲、主梁纵弯
5	0.608	1.65	主梁水平扭转
6	0.681	1.47	主塔纵向弯曲、主梁纵弯
7	0.787	1.27	主塔横向弯曲、主梁扭曲
8	0.869	1.15	主塔纵向弯曲、主梁纵弯
9	0.879	1.14	主梁左右幅反对称竖弯
10	0.883	1.13	主塔纵向弯曲、主梁纵弯

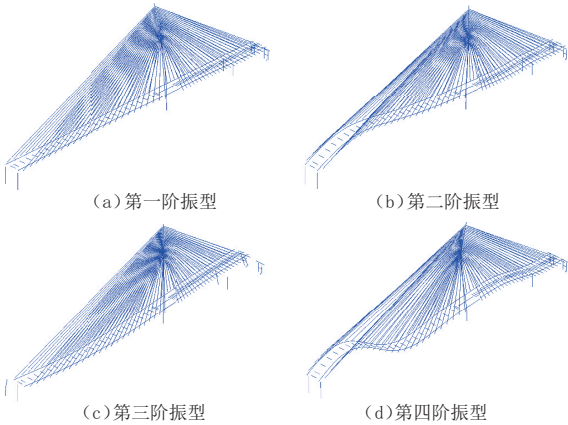


图6 前4阶振型图

计算结果表明,本桥第一阶自振振型表现为主塔横桥向弯曲。这与常规的塔梁墩固结体系(通常第一阶振型为主梁纵向或竖向弯曲)形成显著差异。其根本原因在于主塔采用了独柱式结构,且主塔高度较高,导致横向抗弯刚度相对弱化。虽然塔梁墩固结体系增强了主梁刚度,但由于高柔塔柱的质量惯性集中于塔顶,横向的低频弯曲振型成为第一阶振型。

观察模态序列可知,在第二、第四、第六、第八和第十阶模态中,主塔与主梁的纵向弯曲反复出现。该现象符合塔梁固结体系在地震作用下的一般动力响应规律:由于塔梁固结区域刚度较大,主梁的横向位移受到约束,因此在中低阶模态中呈现出以主塔和主梁纵向弯曲为主的振型。这一结果揭示出一个关键的结构特性:主梁因跨度大且采用钢箱梁截面,相对刚度较低,在外部激励(如地震或风荷载)作用下,可能表现出较大的位移响应。因此,这一结构特性应成为结构位移控制的重要指标之一。

3 体系对比

依据塔、梁、墩的连接关系,斜拉桥的结构体系

可划分为漂浮体系、半漂浮体系、塔梁固结体系。本桥为独塔独柱斜拉桥,主桥跨径较大,且采用混合梁。若采用漂浮体系,主梁纵向自由浮动,在活载和温度荷载下会产生显著的纵向位移。且独塔斜拉桥无法设置0号索,导致主梁近塔区缺乏有效的竖向约束,漂浮体系下梁端挠度及振动幅值将被进一步放大,因此不宜采用漂浮体系。本文对半漂浮体系和塔梁固结体系作进一步比较分析。

3.1 受力及位移对比

在半漂浮体系下,第一阶自振振型如图7所示,表现为主梁纵向漂浮、主塔纵向弯曲,对应的周期为10.56 s。半漂浮体系与塔梁固结体系的最大差异体现在主梁顺桥向的刚度上。在半漂浮体系下,主梁与索塔之间仅通过支座和阻尼器连接,刚度较小,且大跨度主梁质量巨大,在纵向自由度上的惯性效应显著。

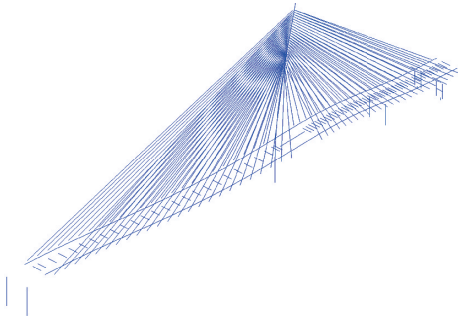


图7 半漂浮体系下斜拉桥动力计算模型

由计算结果可知(见表3和表4),采用塔梁固结体系,主梁负弯矩比半漂浮体系大18.6%,但在恒载时,主塔处主梁内受到较大的压应力。经综合比较,2个方案的主梁力学性能相近。

表3 不同结构体系下梁端纵向位移对比表 单位:mm

不同结构体系	恒载+E2地震 工况下(max)	恒载+E2地震 工况下(min)
塔梁固结体系	118	-118
半漂浮体系	280	-280

表4 不同结构体系下内力对比表

不同结构体系	基本组合主塔处主 梁负弯矩/(kN·m)	恒载+E2地震塔底 弯矩/(kN·m)	恒载+E2地震 塔底轴力/kN
塔梁固结体系	686 104	3 440 410	951 408
半漂浮体系	578 416	1 434 490	949 955

在E2地震作用下,半漂浮体系梁端位移达到280 mm,易引发碰撞风险,而塔梁固结体系将位移控制在118 mm,降幅超58%。塔梁固结体系增大了结构刚度,使其在地震响应下内力增大,在E2地震作

用下,塔梁固结体系的塔底弯矩为3 440 410 kN·m,但主塔底的尺寸较大,在E2地震作用下仍处于弹性状态,满足抗震要求。本桥为混合梁,主塔处为混凝土主梁,采用塔梁固结体系,构造处理便捷,同时可以增大主梁刚度,减小主梁挠度及梁端位移,也可避免使用大型抗震支座和大位移伸缩缝。

3.2 经济性对比

根据前述静、动力性能对比分析,项目采用半漂浮体系可显著改善主塔的受力状态。在静力荷载作用下,主塔整体弯矩降低约10%;在地震工况下,塔底弯矩降幅达59%,桥面以上塔身弯矩减小约12%。得益于内力优化,塔底截面尺寸可由12 m缩减至10 m,混凝土用量减少约180 m³,主塔整体钢筋配置量降低20%(约300 t)。

然而,半漂浮体系需增设支座挑臂构造(单侧尺寸为宽4 m×高5 m×长9 m),混凝土用量增加312 m³,钢筋增量50 t,钢绞线($\phi 15.2$ mm)增加45 t,并需配置2个50 000 kN级支座。此外,施工期需设置临时固结措施,增加额外的措施费用约60万元。

综合对比2种结构造价,塔梁固结体系更具优势。

4 黏滞阻尼器优化设计

塔梁固结体系虽能增强刚度,但会导致塔底弯矩显著增大。为此,可通过加设黏滞阻尼器或采用减隔震体系,来减小关键部位的地震响应。本桥在过渡墩和辅助墩处各设置2个黏滞阻尼器,布置图如图8所示。目前黏滞阻尼器优化设计研究,主要通过对比阻尼器参数、位置、数量3个因素进行优化。本文初步模拟3种参数的黏滞阻尼器。阻尼器D1:阻尼系数为3 000,阻尼指数为0.3;阻尼器D2:阻尼系数为4 500,阻尼指数为0.3;阻尼器D3:阻尼系数为6 000,阻尼指数为0.3。3种黏滞阻尼器设计速度均为1 m/s。方案一:全桥设置6个D1型阻尼器。方案二:全桥设置6个D2型阻尼器。方案三:全桥设置6个D3型阻尼器。

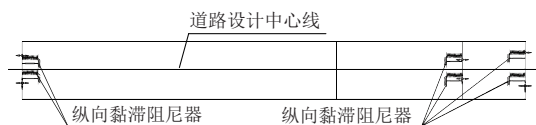


图8 桥梁黏滞阻尼器布置示意图

由图9至图11中的数据可知,设置黏滞阻尼器可以很好地降低地震作用下塔底弯矩和剪力,但对降低主塔塔顶位移的作用有限。当阻尼器的阻尼系

数增大至6 000时,塔底弯矩和剪力减小情况不明显。因此,可选用方案一作为斜拉桥纵向约束体系的布置方式。

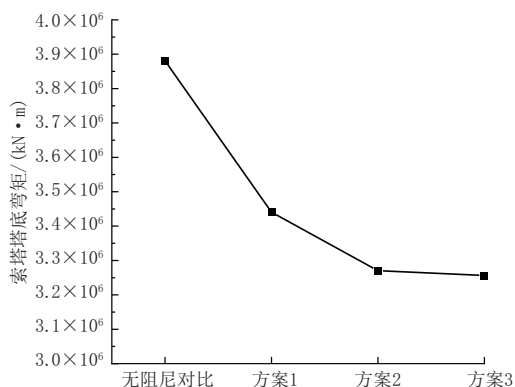


图9 各方案下索塔塔底弯矩对比图

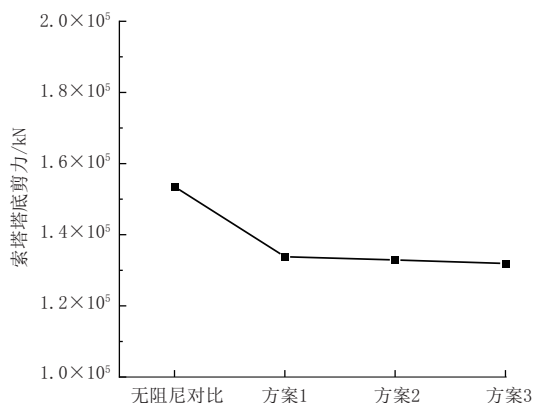


图10 各方案下索塔塔底剪力对比图

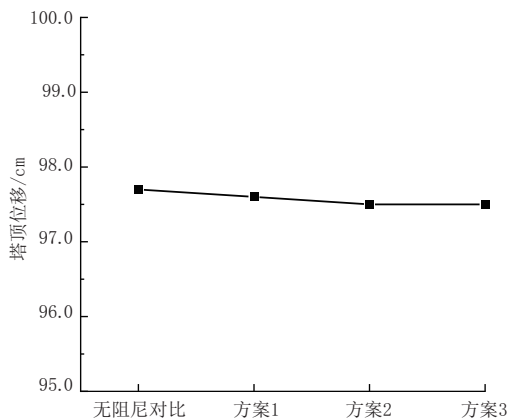


图11 各方案下索塔塔顶位移对比图

5 结论

(1)350 m大跨度独塔斜拉桥的主塔横向刚度较小,独柱结构导致其在地震作用下易发生主塔横向弯曲、主梁水平扭转,梁端易产生较大的横向位移。

(2)采用塔梁固结体系,可增大主梁刚度。在E2地震作用下,相较于半漂浮体系,塔梁固结体系的梁端位移可降低58%,且避免了施工时的临时固结措施,在缩短工期的同时降低了施工难度。

(下转第85页)