

超高墩对山区三塔斜拉桥力学响应的影响

潘子超¹, 方许锐¹, 胡晓红¹, 杨鸿波², 徐向东², 马白虎³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司,

贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省公路开发有限责任公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 多塔斜拉桥是跨越宽阔水面和山谷的一种可行方案。然而, 山区多塔斜拉桥的超高桥墩会改变全桥结构的整体刚度, 使其力学响应有别于普通的多塔斜拉桥。为研究超高墩对三塔斜拉桥力学行为的影响程度, 以某在建的超高墩三塔斜拉桥为例, 首先确立了力学响应指标和计算方法, 然后分析了桥墩高度、桥墩高差、主梁刚度和主塔刚度对塔顶位移、墩底弯矩、跨中挠度等结构响应的规律。结果表明: 当桥墩高度增加时, 车道荷载和温度荷载所引起的墩底附加弯矩会随之减小, 而塔顶的纵向位移和主梁的跨中挠度随之增大; 桥墩高差对桥墩的内力影响很大, 高差较大时, 矮墩会承受更多的弯矩; 提高主塔刚度能够更有效的控制结构位移。

关键词: 三塔斜拉桥; 超高墩; 力学响应; 塔梁刚度

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

Influence of Ultra-high Piers on Mechanical Response of Three-pylon Cable-stayed Bridge in Mountain Area

PAN Zichao¹, FANG Xuru¹, HU Xiaohong¹, YANG Hongbo², XU Xiangdong², MA Baihu³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guizhou Transportation Planning Survey and Design Academe Co. Ltd., Guiyang 550081, China; 3. Highway Administration Bureau of Guizhou Province, Guiyang 550081, China)

Abstract: The multi-pylon cable-stayed bridge is a feasible scheme for spanning wide rivers and valleys. However, the ultra-high piers of multi-pylon cable-stayed bridges in mountainous areas can decrease the overall stiffness of the bridge structure, which makes its mechanical response different from those of ordinary multi-pylon cable-stayed bridges. To study the influence of ultra-high piers on the mechanical behaviour of three-pylon cable-stayed bridge in deep and wide valleys, a

typical three-pylon cable-stayed bridge under construction is taken as an example. The index and calculation method for mechanical response are firstly established. Then, the effects of the pier height, pier height difference and stiffness of girder and pylon on the displacement at the top of the pylon, bending moment at the bottom of the pier and deflection at the mid-span are analyzed. The results show that: when the pier height increases, the additional bending moment at the bottom of the pier caused by the traffic lane load and the temperature decreases while longitudinal displacement at the top of the pylon and deflection at the mid-span of the girder increase; the difference of the pier height has a great influence on the internal force of the pier and the lower pier will bear more bending moment; the structural displacement can be better controlled by increasing the stiffness of the pylon.

Key words: three-pylon cable-stayed bridge; ultra-high piers; mechanical response; stiffness of girder and pylon

多塔斜拉桥^[1]具有塔多联长的形式特点, 是跨越宽阔水面和深宽山谷的理想桥型之一。我国的嘉绍大桥^[2]和法国的 Millau 大桥^[3]就是其中的典型代表。然而这种桥型可能存在着整体刚度较弱的问题, 使得其力学响应有别于一般的双塔斜拉桥。针对这一问题, 国内外学者在多个方面进行了理论研究。Okamoto 等^[4]研究了在三种不同桥墩高度下多塔斜拉桥的桥塔弯矩在高度方向上的分布规律。喻梅等^[5-6]研究了结构布置、中塔刚度和拉索刚度对多塔斜拉桥力学行为的影响。曹珊珊等^[7]总结了不同桥塔数量下提高多塔斜拉桥整体刚度的有效方法。李忠三等^[8]分析了在公路-I 级汽车荷载作用下, 多

收稿日期: 2019-07-24

基金项目: 黔科合重大专项([2016]3013)

第一作者: 潘子超(1984—), 男, 助理研究员, 工学博士, 主要从事混凝土耐久性和桥梁结构安全研究。

E-mail: z.pan@tongji.edu.cn

通信作者: 胡晓红(1977—), 女, 讲师, 工学博士, 主要从事桥梁与结构抗风性能研究。E-mail: xhu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

塔斜拉桥的力学特性随桥塔数量增加的变化规律。耿方方等^[9]讨论了塔梁纵向约束形式对6塔斜拉桥动力特性和抗震性能的影响特点。部分学者还研究了交叉索^[10]、加劲索^[11-12]、刚性铰^[13]、辅助墩^[14]以及主梁梯度温差^[15]对多塔斜拉桥力学行为的影响。然而上述研究主要针对的是平原丘陵地区的多塔斜拉桥,桥墩的高度和高差均较小。研究内容也大多着眼于桥塔数量、结构约束等因素对多塔斜拉桥力学行为的影响。

三塔斜拉桥作为多塔斜拉桥的一种典型形式,已在我国西南山区得到应用。由于山区地形复杂,不可避免的要跨越超宽、超深的“U”型、“W”型或者不对称的“V”型山谷。在这种特殊地形下,三塔斜拉桥多采用超高墩结构,降低了体系的整体刚度。鉴于目前针对山区超高墩三塔斜拉桥力学行为的研究不足,本文以在建的某三塔斜拉桥为工程案例,研究了在车道荷载和温度荷载作用下,桥墩高度、桥墩

高差、主梁刚度和主塔刚度等结构参数对超高墩三塔斜拉桥力学响应的影响规律。该研究可为类似的桥梁结构设计提供参考。

1 计算模型与方法

以我国西南山区在建的某超高墩三塔斜拉桥为研究对象,其跨径布置为249.5 m + 2×550 m + 249.5 m,总体布置如图1所示。主梁采用钢混叠合梁,典型断面如图2所示。主塔采用钻石型混凝土塔,三个桥塔在桥面以上的高度分别为145.2 m、149.2 m和145.2 m。由于所处地形为“U”型深宽山谷,三个桥墩在桥面以下的高度分别为174.8 m、182.8 m和152.8 m,墩塔固结。全桥采用半漂浮体系,在中塔处采用铰接,边塔和辅助墩处仅约束竖向和侧向自由度,释放纵向自由度。

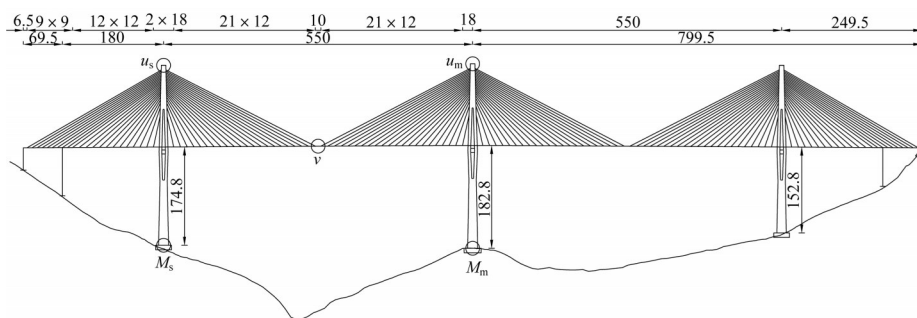


图1 三塔斜拉桥立面布置(单位:m)

Fig.1 Elevation of three pylon cable-stayed bridge (Unit: m)

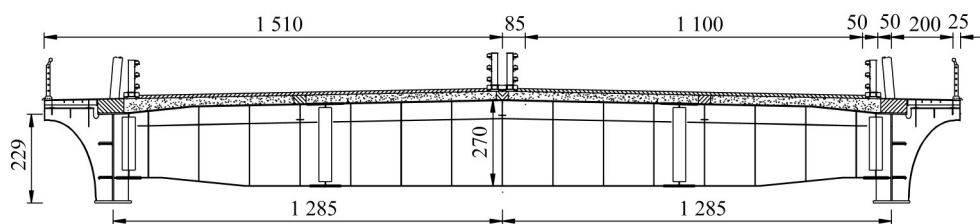


图2 主梁断面(单位:cm)

Fig.2 Cross-section of main girders (Unit: cm)

利用有限元软件建立了实桥空间杆系模型,如图3所示。模型不考虑桩基础的影响,即桥墩和辅助墩的底部均设置为全固结。桥塔、桥墩和主梁采用梁单元进行模拟。斜拉索用杆单元模拟,并采用Ernst公式^[16]修正斜拉索的弹性模量,即

$$E_{eq} = \frac{E_c}{1 + \frac{(\gamma L)^2}{12\sigma^3} E_c}$$

式中: E_{eq} 为斜拉索等效弹性模量(Pa); E_c 为不考虑刚度折减的斜拉索弹性模量(Pa); γ 为斜拉索单位体积重力($N \cdot m^{-3}$); σ 为斜拉索应力(Pa); L 为斜拉索水平投影长度(m)。

为了表征桥墩高度、桥墩高差、主梁刚度和主塔刚度对斜拉桥力学行为的影响程度,选取图1左侧边塔的塔顶最大顺桥向位移 u_s 、墩底最大顺桥向弯矩 M_s 、左侧中跨的跨中最大竖向挠度 v 、中塔塔顶最



图3 实桥有限元模型

Fig.3 Finite element model of bridge

大顺桥向位移 u_m 和墩底最大顺桥向弯矩 M_m 作为力学响应指标。考虑到响应值不能够清晰直观地表现出变化规律,采用量纲为一后的比值 u/u_0 、 M/M_0 和 v/v_0 来反映模型的响应值在荷载作用下的变化趋势。其中, u_0 、 M_0 和 v_0 分别是实桥模型在荷载作用下的塔顶位移、墩底弯矩和跨中挠度。

参照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015)选取公路-I级车道荷载和温度荷载作为计算荷载,不考虑荷载组合。在车道荷载作用下,首先计算每个力学响应指标的影响线,然后将车道荷载按照最不利工况加载得到指标的最不利响应值。以实桥中塔的墩底弯矩为例,影响线如图4所示。在负号区域加载将得到负弯矩,在正号区域加载得到正弯矩,选取两种加载方式的最大值作为最不利响应值。在温度荷载作用下,全桥均匀升降温 25°C ,同样选取力学响应的最大值作为最不利响应值。

2 参数影响分析

2.1 桥墩高度

为了探讨桥墩高度对塔顶位移、墩底弯矩和跨中挠度等力学响应的影响规律,在实桥模型基础上,

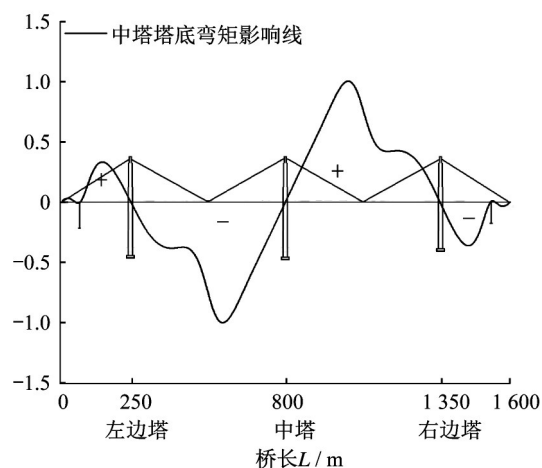


图4 车道荷载加载区段

Fig.4 Loading section of traffic lane load

保持辅助墩高度不变,先后将三个桥墩的墩高减少 20 m, 40 m, 60 m 和 80 m, 研究结构在车道荷载和温度荷载作用下的力学响应的变化规律。墩高减少之后的全桥模型如图5所示。

图6和图7为墩高减少值 Δh 与力学响应的关系曲线。从图中可以看出随着 Δh 的增大,在车道荷载和温度荷载作用下,塔顶位移和跨中挠度会显著减小,墩底弯矩会逐渐增大。 Δh 从0增大到80 m时有

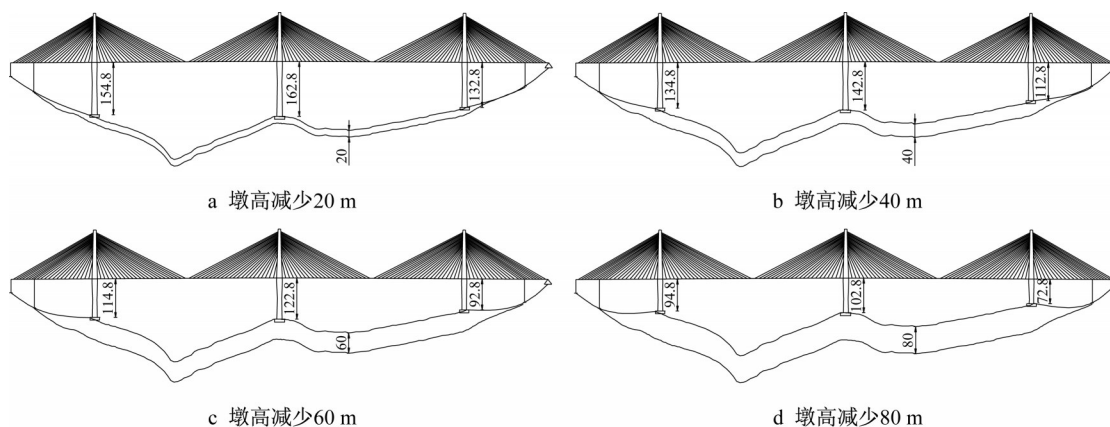


图5 墩高变化(单位: m)

Fig.5 Change of pier height (Unit: m)

如下情况:

(1)在车道荷载作用下,中塔的塔顶位移减小 23.9%,边塔的塔顶位移减小 13.6%;中塔的墩底弯矩增大 25.0%,边塔的墩底弯矩增大 9.4%;中跨的跨中挠度减小 11.1%。

(2)在温度荷载作用下,中塔的塔顶位移减小 22.9%,边塔的塔顶位移减小 9.9%;中塔的墩底弯矩增大 24.1%,边塔的墩底弯矩增大 16.2%;中跨的跨中挠度减小 16.4%。

(3)从曲线的斜率来看,荷载对中塔的影响比边

塔更为显著。这主要是因为中塔没有背索固定,纵向刚度小,在荷载作用下受影响程度更大。

综上所述,超高墩斜拉桥的桥墩越高,桥墩的线刚度就会越小。在荷载作用下,虽然墩底弯矩会相应的减小,但是塔顶位移和跨中挠度都会相应的增大。此外,由于中塔没有背索固定,超高墩斜拉桥的中塔纵向位移会显著增加,在设计必要时可以采取增大中塔纵向截面尺寸或相应的构造措施来增大中塔的纵向刚度,以减小中塔的纵向位移。

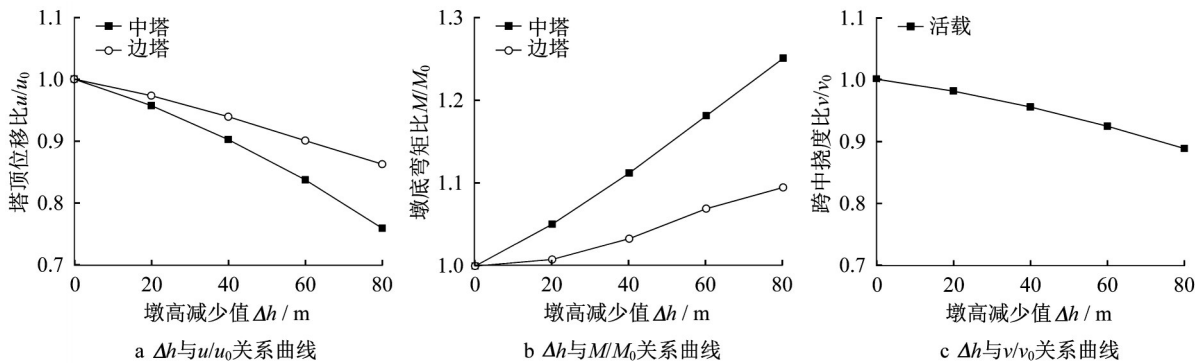


图 6 车道荷载下 Δh 与力学响应的关系

Fig.6 Relationship between Δh and mechanical response under traffic lane load

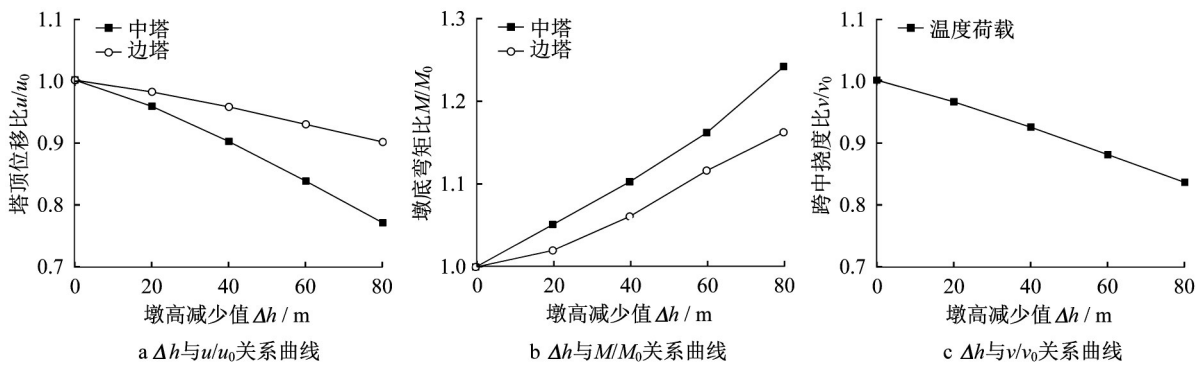


图 7 温度荷载下 Δh 与力学响应的关系

Fig.7 Relationship between Δh and mechanical response under temperature load

2.2 桥墩高差

实桥的上部结构对称,但是下部结构不对称,左右边塔的墩高与中塔的墩高分别有 10 m 和 30 m 的高差。在实桥模型基础上考虑两种工况:工况 I 考虑“V”型山谷,保持中塔的墩高不变,两个边塔的墩高逐渐减少 20 m,40 m,60 m 和 80 m;工况 II 考虑“W”型山谷,保持两个边塔的墩高不变,中塔的墩高逐渐减少 20 m,40 m,60 m 和 80 m。研究这两种工况在车道荷载和温度荷载作用下的内力和变形趋势。图 8 为两种工况的高差变化图。

图 9 为车道荷载作用下桥墩相对高差 ΔH 与力学响应的关系曲线。对于工况 I,中塔的墩高不变,边塔的墩高减小 80 m 时,对边塔的力学响应影响较大。具体表现在,边塔的塔顶位移减小 9.1%,墩底弯矩增大 15.4%,而中塔的塔顶位移仅减小 2.2%,墩底弯矩仅减小 8.2%,跨中挠度减小 4.7%。对于工况 II,边塔的墩高不变,中塔的墩高减小 80 m 时,对中塔的力学响应影响较大。具体表现在,中塔的塔顶位移减小 23.9%,墩底弯矩增大 24.8%,而边塔的塔顶位移仅减小 5.3%,墩底弯矩仅减小

5.0%,跨中挠度减小6.6%。

图10为温度荷载作用下桥墩相对高差 ΔH 与力学响应的关系曲线。对于工况I,当中塔的墩高不变,中塔和边塔的塔顶位移均随着边塔墩高的减小而减小。边塔的墩高减小80 m时,中塔的塔顶位移减小7.8%,墩底弯矩减小37.1%。边塔的塔顶位移减小9.2%,墩底弯矩增大16.9%,跨中挠度减小了12.7%。对于工况II,当边塔的墩高不变,中塔的墩高减小80 m时,边塔的塔顶位移和墩底弯矩没有呈现明显的变化趋势,而中塔的塔顶位移和跨中挠

度分别减小了20.1%和4.2%,中塔的墩底弯矩增大了44.1%。

综上所述,边墩和中墩的高差对桥墩和桥塔的影响较大,而对主梁的影响相对较小。通过比较工况I和II的计算结果可以看出:当中墩高度小于边墩高度时(工况II),在车道荷载和温度荷载作用下,中墩的受力情况更为不利。因此,当需要跨越“W”形山谷时,应尽量避免形成中塔基础高于边塔基础过大的情况,可以通过调整跨径或中塔刚度的方式来改善中塔的受力性能。

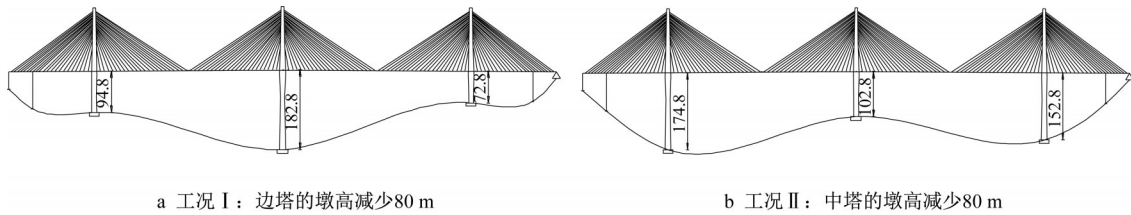


图8 高差变化(单位: m)

Fig.8 Pier height difference (Unit: m)

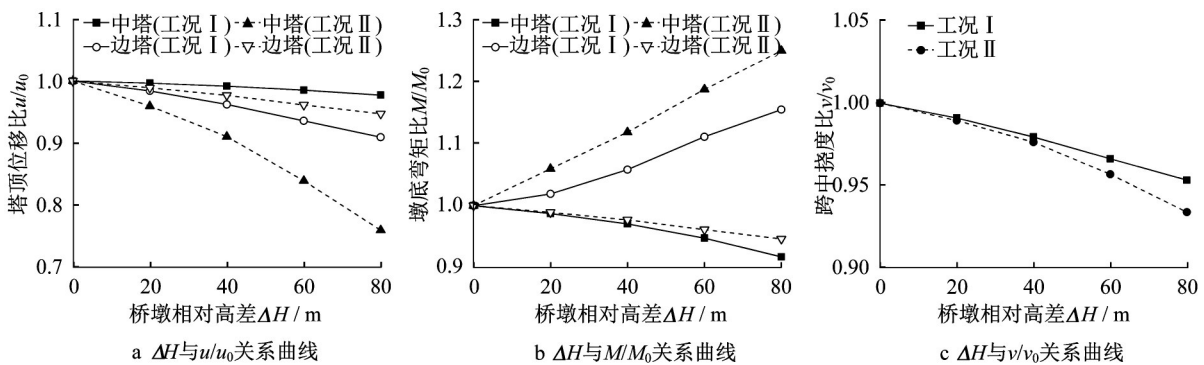


图9 车道荷载下 ΔH 与力学响应的关系

Fig.9 Relationship between ΔH and mechanical response under traffic lane load

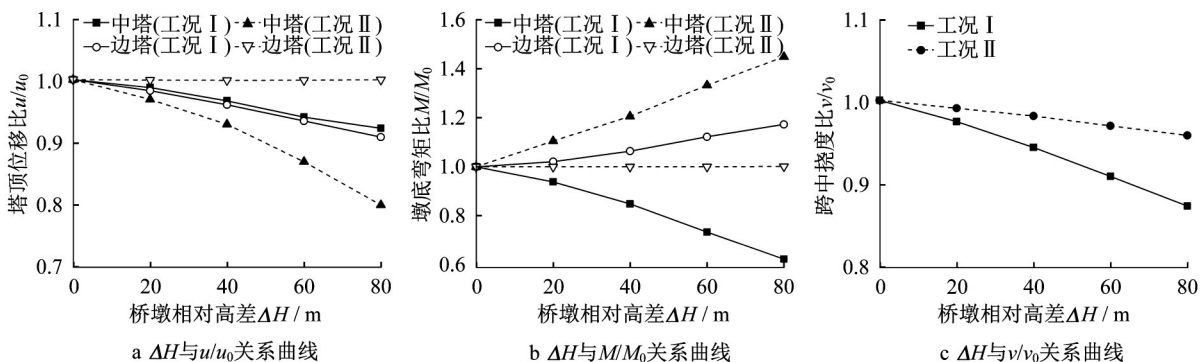


图10 温度荷载下 ΔH 与力学响应的关系

Fig.10 Relationship between ΔH and mechanical response under temperature load

2.3 主塔刚度和主梁刚度

为了分析主塔刚度 S_T 和主梁刚度 S_B 对三塔斜拉桥力学响应的的影响程度,分别以实桥主塔和主梁

的设计刚度 S_{T0} 、 S_{B0} 为基准刚度,通过改变主塔和主梁的弹性模量,使得主塔和主梁刚度在基准刚度的0.1~2.0倍范围内变化,分析车道荷载作用下主梁

的最大竖向挠度 V_{\max} 、中塔塔顶的顺桥向位移 u 和墩底的顺桥向弯矩 M 随主塔刚度比 S_T/S_{T0} 、主梁刚度比 S_B/S_{B0} 的变化规律。

图 11 为车道荷载作用下主塔刚度比 S_T/S_{T0} 、主梁刚度比 S_B/S_{B0} 与力学响应的关系曲线。从图 11 中曲线的变化趋势可以看出,增大主梁刚度和主塔刚度对主梁最大竖向挠度、塔顶位移和墩底弯矩都

能起到明显的控制作用。仅增加主塔刚度或主梁刚度时,主梁的最大竖向挠度和中塔的塔顶位移都会减小,中塔的墩底弯矩会增大。图 11a 中最大竖向挠度在 1.375 m 以上的塔梁刚度都能够满足《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T D65-01-2007)4.4.1 条的要求,即斜拉桥在车道荷载作用下,最大竖向挠度不大于 $l/400$ 。

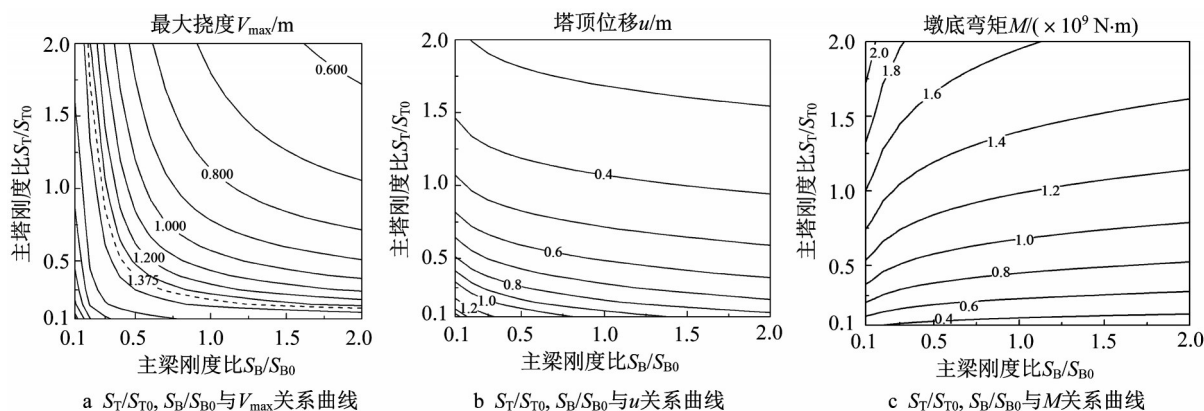


图 11 车道荷载下 S_T/S_{T0} 、 S_B/S_{B0} 与力学响应的关系

Fig.11 Relationship among S_T/S_{T0} 、 S_B/S_{B0} and mechanical response under traffic lane load

从曲线的斜率可知:

(1)增大主塔刚度和主梁刚度对控制主梁最大竖向挠度的效果近似相同;

(2)对于控制塔顶位移而言,增大主塔刚度的效果更为突出;

(3)对于控制墩底弯矩而言,增大主梁刚度所取得控制效果较为明显。

此外,随着主塔刚度和主梁刚度的增加,最大竖向挠度和中塔的塔顶位移减小的速率越来越小。在实际工程设计中,可以根据桥梁结构安全的主要控制因素,选择合理的刚度控制措施。

3 结论

研究了超高墩的结构参数对山区三塔斜拉桥力学响应的影响规律。首先介绍了力学响应指标和计算方法,然后分析了桥墩高度、桥墩高差、主梁刚度和主塔刚度对塔顶位移、墩底弯矩、跨中挠度等力学响应的影响规律。根据分析结果,可得到结论如下:

(1)三塔斜拉桥的桥墩越高,桥墩的线刚度越小。在车道和温度荷载作用下,随着墩高的减小,墩底弯矩会随之减小,塔顶位移和跨中挠度会随之增大。墩高减少值 Δh 从 80 m 减小到 0 m 时,中塔的墩底弯矩最多能减少 25%;中塔的塔顶位移最多能增

加 23.9%;跨中挠度最多能增加 11.1%。

(2)三塔斜拉桥的桥墩高差越大,桥墩受力的差异性越大。当中墩高度小于边墩时,中墩会承受更大的弯矩。因此,对于跨越“W”形山谷的情况,可以通过调整跨径或中塔刚度的方式来改善中塔的受力性能。

(3)三塔斜拉桥的主塔刚度和主梁刚度对主梁最大竖向挠度的影响接近,主塔刚度对塔顶位移的影响较大。因此,增大主塔刚度能够更有效地提高结构的整体刚度,减小变形程度。

由于该研究成果立足于实际工程案例,对推广此类超高墩三塔斜拉桥在我国西南山区的应用可提供借鉴。

参考文献:

- [1] VIRLOGEUX M. Bridges with multi-span cable-stayed spans [J]. Structural Engineering International, 2001, 11(1): 61.
- [2] 张喜刚,王仁贵,林道锦,等.嘉绍大桥多塔斜拉桥创新结构体系设计[J].公路,2013(7): 286.
ZHANG Xigang, WANG Rengui, LIN Daojin, et al. Design of innovative structural system for multi-pylon cable-stayed bridge of Jiashao bridge[J]. Highway, 2013(7): 286.
- [3] VIRLOGEUX M, SERVANT C, CREMER J M, et al. Millau viaduct, France [J]. Structural Engineering

- International, 2005, 15(1): 4.
- [4] OKAMOTO Y, NAKAMURA S. Static and seismic studies on steel/concrete hybrid towers for multi-span cable-stayed bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(2): 203.
- [5] 喻梅, 李乔. 结构布置对多塔斜拉桥力学行为的影响[J]. 桥梁建设, 2004(2): 1.
YU Mei, LI Qiao. Effect of structural arrangement on mechanical behavior of multispan cable-stayed bridges [J]. Bridge Construction, 2004(2): 1.
- [6] 喻梅, 李乔, 廖海黎. 多塔斜拉桥的刚度配置[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(4): 67.
YU Mei, LI Qiao, LIAO Haili. Stiffness configuration of multi-pylon cable-stayed bridges [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(4): 67.
- [7] 曹珊珊, 雷俊卿, 李忠三, 等. 多塔斜拉桥刚度分析[J]. 世界桥梁, 2012, 40(1): 55.
CAO Shanshan, LEI Junqing, LI Zhongsan, *et al.* Analysis of rigidity of multi-pylon cable-stayed bridges [J]. World Bridges, 2012, 40(1): 55.
- [8] 李忠三, 雷俊卿, 林道锦. 多塔斜拉桥力学特性分析[J]. 世界桥梁, 2014, 42(1): 40.
LI Zhongsan, LEI Junqing, LIN Daojin. Mechanical performance analysis of cable-stayed bridge with multiple pylons [J]. World Bridges, 2014, 42(1): 40.
- [9] 耿方方, 丁幼亮, 谢洪恩, 等. 结构体系对多塔斜拉桥抗震性能的影响分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(7): 65.
GENG Fangfang, DING Youliang, XIE Hongen, *et al.* Influences of structural system on seismic performance of multi-pylon cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7): 65.
- [10] 郑春, 刘晓东. 论多塔斜拉桥的刚度[J]. 公路, 2002(6): 98.
ZHENG Chun, LIU Xiaodong. Rigidity of multi-tower cable-stayed bridge [J]. Highway, 2002(6): 98.
- [11] 易伦雄. 洞庭湖主跨406m三塔铁路斜拉桥设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 86.
YI Lunxiong. Key techniques for design of Dongting Lake three-pylon railway cable-stayed bridge with main span of 406m [J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 86.
- [12] 张晔芝, 张超超, 易伦雄, 等. 特大跨度三塔铁路斜拉桥加劲措施的研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 41.
ZHANG Yezhi, ZHANG Chaochao, YI Lunxiong, *et al.* Stiffening measures for triple-tower railway cable-stayed bridge with exceptionally large span [J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 41.
- [13] 雷俊卿, 曹珊珊, 林道锦. 多塔斜拉桥钢箱梁中设置刚性铰研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 53.
LEI Junqing, CAO Shanshan, LIN Daojin. Study of arrangement of rigid hinges in steel box girder of multi-pylon cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 53.
- [14] 赵东明. 三塔混凝土斜拉桥静力性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2012.
ZHAO Dongming. Research on the static performance of the three towers concrete cable-stayed bridges [D]. Xi'an: School of Highway Engineering of Chang'an University, 2012.
- [15] 肖萃彪. 高墩多塔斜拉桥温度效应研究[D]. 成都: 西南交通大学土木工程学院, 2011.
XIAO Luobiao. Temperature effect study on cable-stayed bridge with high-pier&multi-pylon [D]. Chengdu: School of Civil Engineering of Southwest Jiaotong University, 2011.
- [16] ERNST H J. The E-module of rope with consideration of the dip [J]. The Civil Engineering, 1965, 40(1): 52.