

# 矮塔斜拉桥主梁支点截面梁高参数敏感性研究

涂光亚,江兴\*,刘静,陈林伟

(长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**矮塔斜拉桥主梁支点截面梁高是矮塔斜拉桥的重要设计参数之一。为研究该参数对矮塔斜拉桥主梁受力性能的影响,该文以石滩大桥为例,采用有限元方法进行参数敏感性分析。在分析过程中,保持斜拉索索力、主梁纵向预应力数量及其位置、跨中截面梁高等因素不变,仅改变主梁支点截面梁高。分析该变化对成桥状态下主梁的弯矩、应力、刚度以及正常使用极限状态和承载能力极限状态下主梁的应力、弯矩、强度和载强比的影响。结果表明:矮塔斜拉桥主梁应力、内力、强度与载强比对主梁支点截面梁高具有较高敏感性;随着主梁支点截面增大,其相应主梁成桥负弯矩减小,主梁抗弯强度增大,主梁上缘压应力增大,下缘压应力减小,且下缘压应力的变化幅度大于上缘压应力,越靠近支点截面变化幅度越大;影响范围主要集中在以主墩为中心的边跨 $L_1/3$ 位置( $L_1$ 为边跨跨径)至中跨 $L_2/4$ 位置( $L_2$ 为中跨跨径)范围内。

**关键词:**矮塔斜拉桥;支点截面梁高;参数敏感性;主梁弯矩;主梁应力;载强比

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

## Sensitivity for Beam Height Parameter of Main Girder Fulcrum Section of Extradosed Cable-Stayed Bridge

TU Guangya, JIANG Xing\*, LIU Jing, CHEN Linwei

(School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** The beam height of the main girder fulcrum section is one of the important design parameters of the extradosed cable-stayed bridge. In order to study the influence of the beam height of the main girder fulcrum section on the mechanical performance of the main girder of the extradosed cable-stayed bridge, the parameter sensitivity analysis was carried out. The analysis kept the cable force, the number and location of longitudinal prestress of the main girder, and the beam height of the mid-span section unchanged and only changed the beam height of the main beam fulcrum section. The influence of the change on the bending moment, stress, and stiffness of the main girder under the bridge completion state, as well as the stress, bending moment, strength, and load-strength ratio of the main girder under the normal use limit state and the bearing capacity limit state was analyzed. The results show that the stress, internal force, strength, and load-strength ratio of the main girder of the extradosed cable-stayed bridge are highly sensitive to the beam height of the main girder fulcrum section. With the increase in the main girder fulcrum section, the negative bending moment of the corresponding main girder under the bridge completion state decreases; the bending strength of the main girder increases; the compressive stress of the upper edge of the main girder increases, and the compressive stress of the lower edge decreases. The change range of the compressive stress of the lower edge is greater than that of the upper edge, and the change range is greater as it is closer to the fulcrum section. The influence range is mainly from the side span  $L_1/3$  position ( $L_1$  is the side span length) centered on the main pier to the middle span  $L_2/4$  position ( $L_2$  is the middle span length).

**Keywords:** extradosed cable-stayed bridge; beam height of fulcrum section; parameter sensitivity; main girder bending moment; main girder stress; load-strength ratio

收稿日期:2024-05-28(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073)

作者简介:涂光亚,男,博士,副教授.E-mail:runner\_mail@126.com

\*通信作者:江兴,男,硕士研究生.E-mail:1258144414@qq.com

## 0 引言

矮塔斜拉桥是介于梁桥与斜拉桥之间的组合桥梁,与常规斜拉桥相比主梁刚度较大,承担了大部分荷载,斜拉索则起辅助作用分担部分荷载,因而也称为部分斜拉桥;与梁桥相比,主梁由于受到斜拉索的多点弹性支承作用,主梁弯矩较小,但仍然保持大跨度梁桥主梁变高度的特点。矮塔斜拉桥结构形式丰富,具有良好的经济效益和造型优美的特点,在国内外得到了广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。

矮塔斜拉桥的整体受力性能与其主要设计参数密切相关,其敏感性分析一直是矮塔斜拉桥的研究热点。国内外众多学者对这些设计参数进行了分析研究,如李振<sup>[6]</sup>、张新军等<sup>[7]</sup>、曾奎等<sup>[8]</sup>、刘沐宇等<sup>[9]</sup>、蔡小杨等<sup>[10]</sup>、佟志峰等<sup>[11]</sup>对主塔高度、无索区长度、边中跨比、桥塔刚度等结构总体布置参数进行分析研究,揭示了以上参数对主梁受力及变形的影响规律,探讨了矮塔斜拉桥各个设计参数的合理取值范围;魏春明等<sup>[12]</sup>、陈孔亮等<sup>[13]</sup>、周勇军等<sup>[14]</sup>、刘来君等<sup>[15]</sup>对主梁重度、主梁弹性模量、预应力等参数进行分析研究,确定了各个参数对结构成桥线形的影响程度。

矮塔斜拉桥主梁为压弯结构,主梁自重及其他可变作用产生的弯矩由斜拉索索力、主梁纵向预应

力和主梁截面本身共同承担,其受力性能主要与斜拉索索力、主梁纵向预应力和主梁截面尺寸密切相关。其中,支点截面梁高是主梁最关键的截面尺寸之一,在很大程度上决定了矮塔斜拉桥主梁的受力性能。根据文献<sup>[1]</sup>和<sup>[16]</sup>,矮塔斜拉桥支点截面梁高与主跨跨径之比为 $1/25\sim 1/35$ 。在斜拉索索力、主梁纵向预应力不变的情况下,为定量研究主梁支点截面梁高与矮塔斜拉桥成桥受力性能之间的影响关系,本文以石滩大桥为工程背景,从成桥状态、正常使用极限状态和承载能力极限状态下的主梁受力性能出发,研究主梁支点截面梁高对主梁受力性能的影响规律,为矮塔斜拉桥截面设计尺寸拟定和成桥状态受力性能调整提供参考。

## 1 工程背景

石滩大桥主桥为双塔双索面矮塔斜拉桥,公路等级为一级公路结合城市主干路,设计汽车荷载等级为公路-I级,车道数为双向四车道。该桥采用塔墩梁固结体系,主桥起始里程桩号为K4+299,终点桩号为K4+613,跨径布置为 $(83+148+83)$  m,里程382 m和530 m分别为13<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>桥墩中心位置处,里程299.12 m与612.88 m分别为12<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>桥墩支座位置处,里程456 m为中跨跨中位置处。桥型布置见图1。

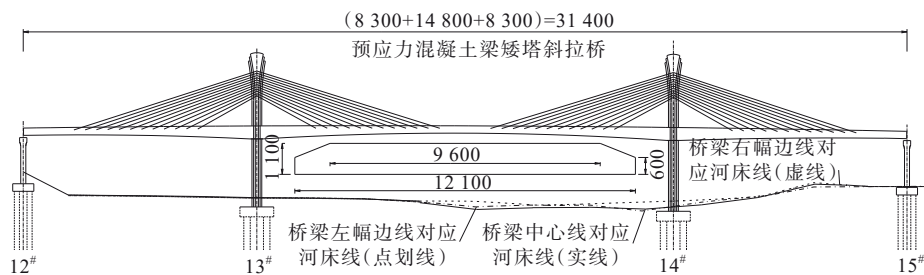


图1 石滩大桥桥型布置图(单位:cm)

Figure 1 Layout of Shitan Bridge (unit: cm)

石滩大桥主桥主梁采用变高度斜腹板单箱双室宽幅断面,主梁顶板宽26.24 m,外侧悬臂长4.5 m,内侧悬臂长3.0 m;主梁跨中梁高2.5 m,支点梁高4.5 m,梁底曲线按二次抛物线变化;顶板板厚0.28 m;底板板厚由跨中的0.30 m变厚至塔根部的1.05 m;边、中腹板在主塔根部向两边由0.6 m变厚至0.9 m,其余部分板厚均为0.60 m;主梁标准断面见图2。

主塔为独柱式钢筋混凝土结构,立面为长腰花瓶状,断面为矩形,并单面阳刻装饰纹理。主塔高度为26.0 m(含索顶以上6.5 m装饰段),主塔截面等宽

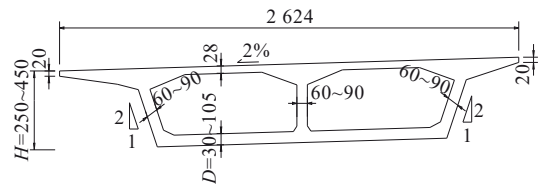


图2 主梁标准断面(单位:cm)

Figure 2 Standard section of main girder (unit: cm)

段顺桥向厚为3.5 m,横桥向宽1.7~2.3 m;塔顶花瓶段顺桥向宽3.5~6.0 m,横桥向厚2.0~2.3 m。主墩高约24 m,采用双柱式矩形墩柱,顺桥向宽3.5 m,横

桥向宽4.0~5.0 m。主墩承台为整体式矩形承台,厚3.5 m,宽12.0 m,长49.25 m,主墩基础采用16根 $\phi$ 2.3 m大直径桩基,按摩擦桩设计。

斜拉索为双索面扇形布置,每个主塔布设12对斜拉索,布置在主梁侧分带及中分带处,全桥共96根斜拉索;塔根两侧无索区长40.7 m,边跨无索区长18.65 m,中跨无索区长19.3 m,梁上索距4.0 m,塔上索距0.8 m,斜拉索在塔上采用分丝管锚固结构。

## 2 计算思路和计算模型

为研究矮塔斜拉桥主梁支点梁高的合理取值以及主梁支点梁高变化对主梁受力性能的影响,对矮塔斜拉桥主梁支点梁高进行参数敏感性分析。具体思路为:保持斜拉索索力不变,主梁纵向预应力数量及离上、下缘的距离不变,跨中截面梁高不变,顶、底、腹板厚度不变,将支点截面梁高分别设为4.0 m、4.5 m和5.0 m,支点截面至跨中截面的梁高按二次抛物线变化;考虑结构自重、预应力、斜拉索索力、收缩徐变、支座沉降、汽车荷载、人群荷载、温度作用,通过有限元建模计算分析支点截面梁高对以下状态变量的影响:①考虑施工过程,成桥状态下的主梁弯矩和主梁上、下缘应力;②结构刚度;③正常使用极限状态下的主梁上、下缘应力;④承载能力极限状态下的主梁弯矩和载强比;最终得到支点截面梁高对各状态变量的影响程度及敏感性。

采用软件Midas/Civil建立石滩大桥有限元模型,主梁、主塔及桥墩均采用梁单元模拟,单元尺寸按实际考虑,斜拉索采用只受拉桁架单元模拟(图3)。其中,主梁采用单梁模型,使用有限元软件的PSC截面输入实际设计截面;墩塔梁三者采用考虑主从节点的刚性连接进行模拟,主节点在主梁上。

有限元模型共有3个,分别为支点梁高4.0 m,支点梁高至跨中梁高按 $h(m)=2.5+0.000\ 390\ 22X^2$ ( $X$ 为距支点截面的距离)变化;支点梁高4.5 m,支点梁高至跨中梁高按 $h(m)=2.5+0.000\ 520\ 3X^2$ 变化;支点梁高5.0 m,支点梁高至跨中梁高按 $h(m)=2.5+0.000\ 650\ 36X^2$ 变化。梁高由4.0 m增加至4.5 m,主梁材料用量增加了3.62%;梁高由4.5 m增加至5.0 m,主梁材料用量增加了3.50%。每个有限元模型共有单元数338个,节点数463个,其中梁单元242个,桁架单元96个;主梁单元为1~166,主梁节点为1~167;结构几何特性、材料特性按实际输入;边界条件为:主墩底固结,边墩处为活动铰支座,索梁节点、索

塔节点之间的连接为刚性连接。计算时按实桥施工过程考虑施工阶段,按规范[16]要求考虑收缩徐变;支座沉降按10 mm不均匀沉降考虑;汽车荷载按四车道考虑,横向车道布载系数为0.67;人群荷载按2.5 kN/m<sup>2</sup>考虑,人行道宽度为3.0 m,人群荷载线荷载为7.5 kN/m;均匀温度荷载按温升20℃,温降-20℃考虑,梯度温度荷载按规范[17]考虑。

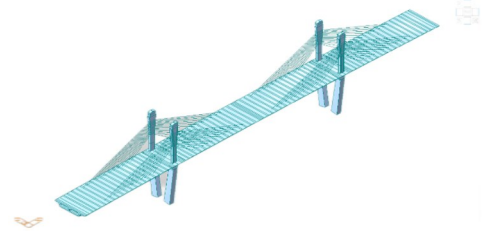


图3 石滩大桥有限元模型

Figure 3 Finite element model of Shitan Bridge

## 3 结果分析

### 3.1 成桥状态下主梁弯矩、应力

按实桥施工过程考虑施工阶段,收缩徐变考虑至桥面铺装后10年,得到成桥状态下的主梁弯矩如图4、表1所示,其中预应力引起的弯矩效应如图5、表2所示。

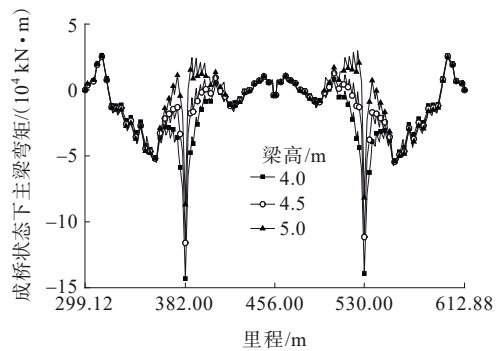


图4 成桥状态下主梁弯矩图

Figure 4 Bending moment of main girder under bridge completion state

表1 成桥状态下主梁弯矩对比表

Table 1 Comparison of main girder bending moments under bridge completion state

支点主梁高度/m	跨中主梁高度/m	13 <sup>#</sup> 主墩支点截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)	中跨跨中截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)	14 <sup>#</sup> 主墩支点截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)
4.0	2.5	-14.318	-0.388	-13.926
4.5	2.5	-11.603	-0.386	-11.146
5.0	2.5	-8.692	-0.383	-8.169

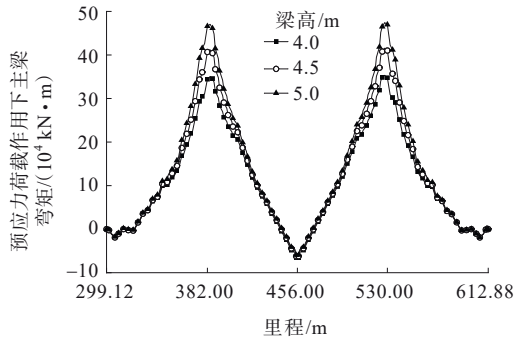


图5 预应力荷载引起的主梁弯矩及变化图

Figure 5 Bending moment and variation of main girder caused by prestress load

表2 预应力荷载引起的主梁弯矩对比表

Table 2 Comparison of main girder bending moments caused by prestress load

支点主梁高度/m	跨中主梁高度/m	13 <sup>#</sup> 主墩支点截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)	中跨跨中截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)	14 <sup>#</sup> 主墩支点截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)
4.0	2.5	34.451	-6.587	34.743
4.5	2.5	40.678	-6.208	41.024
5.0	2.5	46.591	-5.924	46.974

由图4可知:主梁支点截面梁高变化对成桥弯矩的影响主要集中在以主墩为中心的 $L_1/3$ ( $L_1$ 为边跨跨径)至 $L_2/4$ ( $L_2$ 为中跨跨径)范围内,对主梁其他截面基本无影响。在该范围内,随着主梁支点截面梁高的增加,主梁成桥负弯矩减小,越靠近主墩的位置,变化的幅度越大。由表1可知:成桥状态下,对于14<sup>#</sup>支点截面,梁高由4.0 m增加至4.5 m,负弯矩减小了 $2.780 \times 10^4$  kN·m,减小百分比为20%;梁高由4.5 m增加至5.0 m,负弯矩减小了 $2.977 \times 10^4$  kN·m,减小百分比为26.7%。13<sup>#</sup>主墩支点截面变化规律相同,两者变化数值非常接近,后文对13<sup>#</sup>主墩截面不再赘述。

由图5和表2可知:不改变预应力荷载及其上下缘位置,主梁支点截面梁高变化对预应力荷载引起的弯矩的影响主要在支点截面附近,与图4中变化范围相似。随着支点梁高增加,预应力荷载引起的弯矩逐渐增大,越靠近主墩的位置,变化的幅度越大。

由表2可知:对于14<sup>#</sup>主墩支点截面,梁高由4.0 m增加至4.5 m,预应力荷载引起的弯矩增大了 $6.281 \times 10^4$  kN·m,增大百分比为18.1%;梁高由4.5 m增加至5.0 m,预应力荷载引起的弯矩增大了 $5.95 \times 10^4$  kN·m,增大百分比为14.5%。

综上可知,主梁支点截面高度增加,自重作用下的负弯矩本应该增大,但由于主梁高度增加的同时,截面上缘束对截面形心的偏心距也随之增加,使得预应力效应的正弯矩增加,并且该正弯矩的增加幅度大于自重增加引起的负弯矩增量,所以最终表现为负弯矩变小。

按实桥施工过程考虑施工阶段,收缩徐变考虑至铺装后10年,得到成桥状态下的主梁上、下缘应力如图6、表3所示。

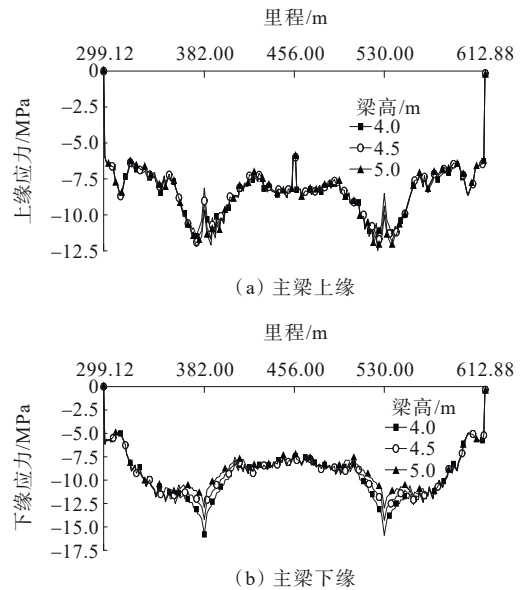


图6 成桥状态下主梁上下缘应力图

Figure 6 Stress of upper and lower edges of main girder under bridge completion state

表3 成桥状态下主梁上下缘应力对比表

Table 3 Stress comparison of upper and lower edges of main girder under bridge completion state

应力位置	支点主梁高度/m	13 <sup>#</sup> 主墩支点截面应力/MPa	中跨跨中应力/MPa	14 <sup>#</sup> 主墩支点截面应力/MPa	边跨最大应力/MPa
主梁上缘	4.0	-8.13	-5.99	-8.51	-11.50
	4.5	-9.02	-5.97	-9.39	-11.90
	5.0	-9.67	-5.95	-10.00	-12.20
主梁下缘	4.0	-15.80	-7.39	-15.90	-13.20
	4.5	-14.20	-7.30	-14.30	-12.10
	5.0	-12.90	-7.25	-13.00	-11.20

由图6可知:主梁支点截面梁高变化对成桥主梁应力的影响范围与对成桥主梁弯矩的影响范围基本相同,而对主梁其他截面基本没有影响。在该范围内,随着主梁支点截面梁高增加,主梁上缘压应力增

大,主梁下缘压应力减小,下缘压应力的变化幅度比上缘压应力的变化幅度更大,且越靠近主墩的位置,变化的幅度越大。原因为:索力、预应力不变,轴力基本不变,主梁高度的增加引起主梁截面积增大,轴向压应力会略变小;又由图4可知主梁负弯矩减小,主梁上缘压应力增大,主梁下缘压应力减小,因此,最后总的效应为上缘压应力增大,下缘压应力减小,并且下缘压应力的变化幅度更大。由表3可知:对于14#主墩支点截面,梁高由4.0 m增加至4.5 m,上缘压应力增加了0.88 MPa,增加百分比为10.3%,下缘压应力减少了1.6 MPa,减少百分比为10.1%;梁高由4.5 m增加至5.0 m,上缘压应力增加了0.65 MPa,增加百分比为6.5%;下缘压应力减少了1.3 MPa,减少百分比为9.1%。这表明:支点截面梁高的增加,能有效减小成桥状态下支点截面的下缘压应力,缩小上下缘应力差。

3.2 结构刚度

在汽车荷载作用下,不同梁高主梁竖向位移最小值如图7所示。

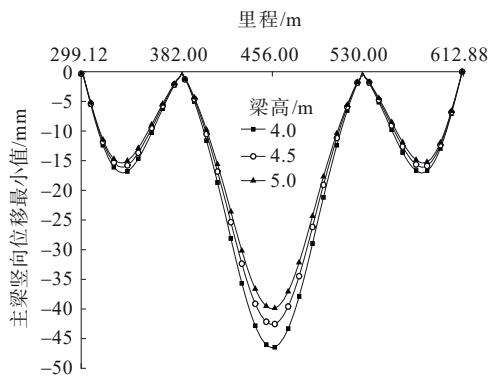


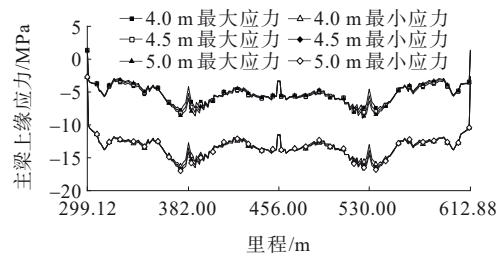
图7 汽车荷载作用下主梁各截面最小竖向位移图

Figure 7 Minimum vertical displacement of main girder sections under vehicle load

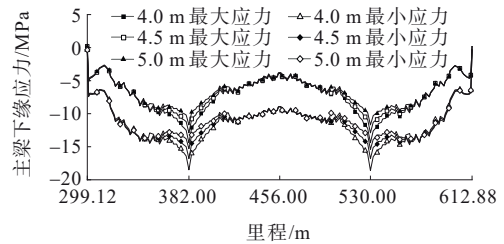
由图7可知:随着主梁梁高增加,中跨和边跨跨中的主梁位移减小,主桥结构刚度增大。当支点截面梁高由4.0 m增加至4.5 m,跨中位移由-46.52 mm减小至-42.62 mm,减小了3.9 mm,结构刚度增加百分比为8.4%;支点截面梁高由4.5 m增加至5.0 m,跨中位移由-42.62 mm减小至-39.96 mm,减小了2.6 mm,结构刚度增加了6.2%。

3.3 正常使用极限状态下主梁应力

对正常使用极限状态下的主梁应力进行频遇组合(1.0自重+1.0预应力+1.0收缩徐变+1.0支座沉降+0.7汽车荷载+0.4人群荷载+1.0整体温度+0.8梯度温度)得到正常使用极限状态下的主梁上、下缘应力如图8、表4所示。



(a) 主梁上缘



(b) 主梁下缘

图8 频遇组合下主梁应力图

Figure 8 Stress of main girder under frequency combinations

表4 频遇组合下主梁支点截面上、下缘最大最小应力对比表

Table 4 Comparison of maximum and minimum stresses at upper and lower edges of main girder fulcrum section under frequency combinations

项目	不同梁高处的应力/MPa			②-①变	③-②变	②-①变化	③-②变化	
	4.0 m①	4.5 m②	5.0 m③	化量/MPa	化量/MPa	量百分比/%	量百分比/%	
上缘应力	最大值	-4.55	-5.57	-6.37	-1.02	-0.80	18.3	12.6
	最小值	-13.00	-13.90	-14.50	-0.90	-0.60	6.5	4.1
下缘应力	最大值	-14.40	-12.90	-11.70	1.50	1.20	-11.6	-10.3
	最小值	-18.60	-16.80	-15.40	1.80	1.40	-10.7	-9.1

由图8可知:主梁支点截面梁高变化对正常使用极限状态下频遇组合的主梁应力影响范围与前文相

似。在该范围内,随着主梁支点截面梁高的增加,主梁上缘压应力值均变大,主梁下缘压应力值均变小,

下缘压应力的变化幅度比上缘压应力的变化幅度更大,越靠近主墩位置其变化幅度越大。由表4可知:梁高变化对支点截面应力的最大变化量为1.8 MPa,最大百分比为18.3%。与梁高变化对成桥状态下主梁的应力影响(表3)相比,两者的影响量差别不大,说明梁高变化对可变荷载作用的主梁应力效应影响不大。

**3.4 承载能力极限状态下主梁弯矩、载强比**

对承载能力极限状态下的主梁弯矩进行基本组合(1.2自重+1.0预应力+1.0收缩徐变+0.5支座沉降+1.4汽车荷载+1.05人群荷载+1.05整体温度+1.05梯度温度)得到承载能力极限状态下的主梁弯矩如图9、表5所示。定义主梁载强比为基础组合下截面承受的最不利弯矩与截面抗弯承载能力之比值,主梁各截面的强度和载强比如图10、11所示。

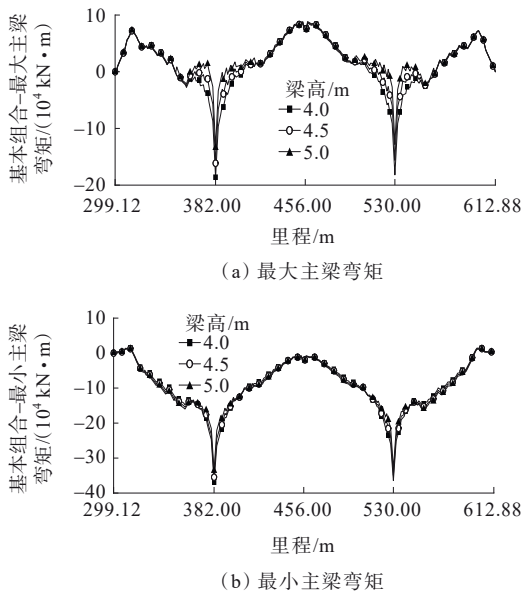


图9 基本组合下主梁弯矩图

Figure 9 Bending moment of main girder under basic combinations

表5 基本组合下主梁弯矩对比表

Table 5 Comparison of bending moments of main girder under basic combinations

弯矩类型	支点主	跨中主	13#主墩	14#主墩
	梁高/度/m	梁高/度/m	截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)	截面弯矩/(10 <sup>4</sup> kN·m)
最大值	4.0	2.5	-18.643	7.761
	4.5	2.5	-16.139	7.632
	5.0	2.5	-13.411	7.464
最小值	4.0	2.5	-36.880	-1.831
	4.5	2.5	-35.463	-1.900
	5.0	2.5	-33.602	-2.047

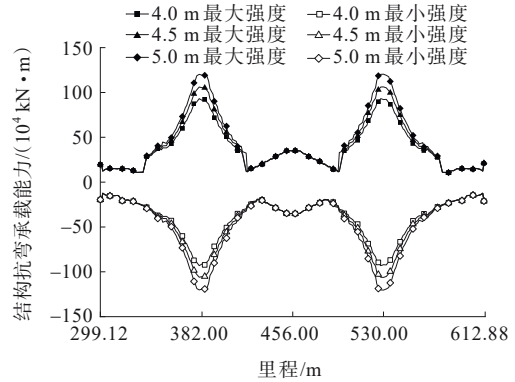


图10 主梁强度对比图

Figure 10 Comparison of main girder strengths

由图9、10可知:主梁支点截面梁高变化对承载能力极限状态下主梁弯矩和主梁抗弯承载能力的影响比较明显的范围是以主墩为中心的 $L_1/3 \sim L_2/4$ ,对支点截面影响最大,越远离主墩影响越小。由表5可知:梁高由4.0 m增加至4.5 m时,14#主墩支点截面最大负弯矩减小了 $1.485 \times 10^4$  kN·m,减小百分比为4.1%;梁高由4.5 m增加至5.0 m时,支点截面最大负弯矩减小了 $1.929 \times 10^4$  kN·m,减小百分比为5.5%。主梁截面载强比对比结果见表6。

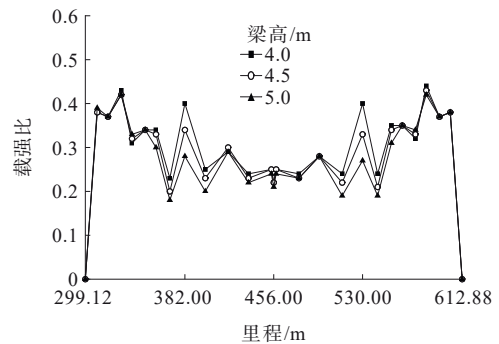


图11 主梁载强比对比图

Figure 11 Comparison of load-strength ratios of main girder

表6 主梁截面载强比对比表

Table 6 Comparison of load-strength ratios of main girder section

组合类型	支点主梁高/度/m	载强比				
		左边跨L <sub>1</sub> /3截面	13#墩支点截面	跨中截面	14#墩支点截面	右边跨L <sub>1</sub> /3截面
基本组合	4.0	0.43	0.40	0.22	0.40	0.44
	4.5	0.42	0.34	0.22	0.33	0.43
	5.0	0.42	0.28	0.21	0.27	0.42

由图10可知:对于14<sup>#</sup>主墩支点截面,梁高由4.0 m增加至4.5 m时,截面抗弯承载能力增加了 $1.40 \times 10^5$  kN·m,增长百分比为15.4%;梁高由4.5 m增加至5.0 m时,截面抗弯承载能力增加了 $1.40 \times 10^5$  kN·m,增长百分比为13.3%。

从图11可知:主梁载强比随支点截面梁高增大而逐渐减小,对支点截面比较明显,对中跨跨中截面影响较小。

由表6可知:对于14<sup>#</sup>主墩支点截面,梁高由4.0 m增加至4.5 m时,载强比减少了0.07,减少百分比为17.5%;梁高由4.5 m增加至5.0 m时,载强比减少了0.06,减少百分比为18.2%。这说明支点截面梁高的增加增大了支点截面本身的安全性,但由于最不利截面在距边墩约 $L_1/3$ 处,因此对整桥的安全性影响并不大。

## 4 结论

(1) 支点截面梁高变化对成桥主梁弯矩、应力、正常使用极限状态下主梁应力、支点截面的强度和载强比的影响较大,对承载能力极限状态下的主梁弯矩、整桥结构刚度和安全性影响较小。

(2) 支点截面梁高变化对各状态参数的影响范围主要为以主墩为中心的 $L_1/3$ ( $L_1$ 为边跨跨径)至 $L_2/4$ ( $L_2$ 为中跨跨径)范围内,对其他截面的影响基本可以忽略。在该范围内,随着主梁支点截面梁高的变大,主梁成桥负弯矩减小,上缘压应力增大,下缘压应力减小,越靠近支点截面变化幅度越大;对于本工程背景支点梁高每增大0.5 m,支点截面上缘压应力增加0.89 MPa,下缘压应力减小1.8 MPa。该规律可用于矮塔斜拉桥主梁的截面设计与成桥状态主梁应力的调整。

(3) 主梁支点截面梁高增加,频遇组合下主梁上缘压应力值均增加,主梁下缘压应力值均减小,下缘压应力的变化幅度大于上缘压应力,越靠近支点截面变化幅度越大;在可变荷载作用下,支点截面梁高对主梁应力的影响较小。

(4) 主梁支点截面梁高增加,主梁抗弯强度增大,承载能力极限状态下的主梁弯矩略有减小,载强比减小,支点截面本身的安全性增加;对于本工程背景支点梁高每增大0.5 m,支点截面载强比减小约18%;但对整桥来说,由于最不利截面在距边墩约 $L_1/3$ 处,而该截面的载强比基本不变,所以对整桥的

安全性影响不大。

## 参考文献:

### References:

- [1] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版社,2013. XIAO Rucheng. Bridge structural systems[M]. Beijing: China Communications Press,2013.
- [2] 陈从春. 矮塔斜拉桥[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016. CHEN Congchun. Extradosed cable-stayed bridge[M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2016.
- [3] LEI Zhongwei. Structure parameter sensitivity analysis for an extradosed cable-stayed bridge[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2015.
- [4] 涂光亚,周郅哲. 大跨度钢箱梁斜拉桥主梁制造误差分析与优化调整[J]. 中外公路,2023,43(3):88-92. TU Guangya, ZHOU Zhizhe. Analysis and optimal adjustment of manufacturing errors of main girder of long-span steel box cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(3):88-92.
- [5] 杨如刚,陈博,韩冰. 大跨叠合梁斜拉桥主梁施工控制误差传播分析[J]. 中外公路,2023,43(5):148-155. YANG Rugang, CHEN Bo, HAN Bing. Analysis of error propagation in construction control of main beams of large-span composite beam cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 148-155.
- [6] 李振. 某矮塔斜拉桥整体设计参数敏感性分析[J]. 中外公路,2014,34(1):157-159. LI Zhen. Sensitivity analysis of overall design parameters of a low-pylon cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2014,34(1):157-159.
- [7] 张新军,杨强. 高墩大跨矮塔斜拉桥结构体系及静力性能研究[J]. 浙江工业大学学报,2020,48(1):112-118. ZHANG Xinjun, YANG Qiang. Study on structural system and static performance of long-span high-pier extradosed cable-stayed bridges[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2020,48(1):112-118.
- [8] 曾奎,邱敏捷. 无背索斜拉桥塔梁墩固结区有限元分析[J]. 中外公路,2022,42(6):131-136. ZENG Kui, QIU Minjie. Finite element analysis of pier-tower-girder fixed region of cable-stayed bridge without backstays[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):131-136.
- [9] 刘沐宇,孙向东,涂开智,等. 四塔单索面矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2009,26(4):10-14,35. LIU Muyu, SUN Xiangdong, TU Kaizhi, et al. Sensitivity analysis for the structural design parameters of four-tower extradosed cable-stayed bridge with single plane [J]. Journal of Huazhong University of Science and

- Technology (Urban Science Edition), 2009, 26(4): 10-14,35.
- [10] 蔡小杨,王雷,谭卜豪. 柔梁密索体系矮塔斜拉桥敏感参数分析[J]. 中外公路,2021,41(4):210-214.  
CAI Xiaoyang, WANG Lei, TAN Buhao. Key design factors of low-tower cable-stayed bridge with flexible girder and densely arranged cables[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(4):210-214.
- [11] 佟志峰,熊雷,刘小奇,等. 单索面独斜塔斜拉桥桥塔施工关键设计参数影响研究[J]. 中外公路, 2022,42(4): 47-52.  
TONG Zhifeng, XIONG Lei, LIU Xiaoqi, et al. Study on key design parameters of the constructional safety of the leaning single-tower cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022, 42(4):47-52.
- [12] 魏春明,陈淮,王艳. 矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 郑州大学学报(理学版),2007,39(3):178-182.  
WEI Chunming, CHEN Huai, WANG Yan. Parameters' sensitivity analysis of extradosed cable-stayed bridge[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition),2007,39(3):178-182.
- [13] 陈孔亮,叶健新,徐郁峰,等. 独塔混合梁斜拉桥参数灵敏度分析[J]. 中外公路, 2024,44(2): 182-190.  
CHEN Kongliang, YE Jianxin, XU Yufeng, et al. Parameter sensitivity analysis of single-tower cable-stayed bridge with mixed beam[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024,44(2):182-190.
- [14] 周勇军,吴领领,刘将,等. 预应力混凝土矮塔斜拉桥线形敏感参数研究[J]. 公路,2020,65(3):86-91.  
ZHOU Yongjun, WU Lingling, LIU Jiang, et al. Research on geometry sensitive parameters for PC extradosed cable-stayed bridge[J]. Highway,2020,65(3):86-91.
- [15] 刘来君,倪富陶,张筱雨,等. 预应力混凝土矮塔斜拉桥参数敏感性分析[J]. 中外公路,2015,35(4):142-144.  
LIU Laijun, NI Futao, ZHANG Xiaoyu, et al. Parameter sensitivity analysis of prestressed concrete low-pylon cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2015,35(4):142-144.
- [16] 招商局重庆交通科研设计院. 公路斜拉桥设计规范: JTG/T 3365-01—2020[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.  
China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd.. Specifications for design of highway cable-stayed bridge: JTG/T 3365-01—2020[S]. Beijing:China Communications Press,Co.,Ltd.,2020.
- [17] 中交公路规划设计院. 公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S]. 北京:人民交通出版社,2015.  
CCCC Highway Consultants. Co., Ltd.. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing:China Communications Press, 2015.