

不同无索区长度下独塔斜拉桥静力性能的有限元分析

李 帆, 陈李俊, 沈尹君

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 无索区长度对桥梁受力性能的影响显著, 适宜的无索区长度能够优化桥梁整体结构的受力, 因此长度的选取在桥梁设计中尤为重要。本文以湘西某跨径为 $(196 + 101 + 62)$ m 的独塔斜拉桥为工程背景, 利用有限元分析软件 Midas civil 建立分析模型, 对塔根处和梁端处的无索区长度进行单因素分析。结果表明: 塔根处及梁端处无索区长度的变化对主跨主梁挠度, 边跨主梁挠度等影响显著, 而对斜拉索最大拉力的影响较小。本文成果可为斜拉桥总体设计提供一定的借鉴与参考。

关键词: 无索区长度; 独塔斜拉桥; 静力特性; 力学性能; 有限元分析

中图分类号: U448. 27

文献标识码: A

文章编号: 1673 - 8993(2024)01 - 0024 - 05

doi:10. 13402/j. gcjs. 2024. 01. 005

Finite element analysis on static properties of a single-tower cable-stayed bridge under different lengths without cable

LI Fan, CHEN Lijun, SHEN Yinjun

(College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: The length without cable has a significant effect on the mechanical properties of the bridge, and the appropriate length without cable can optimize the force of the overall structure of the bridge, so the length selection is particularly important in the bridge design. A single-tower cable-stayed bridge with a span diameter of $(196 + 101 + 62)$ m in the western Hunan is taken as the engineering background, and the finite element analysis software Midas civil is used to establish an analysis model, and the length without cable at the root of the tower and the end of the beam is analyzed by single factor. The results show that the change of the length without cable at the root of the tower and the end of the beam has a significant effect on the deflection of the main beam of the main span and the deflection of the main beam of the side span, but has little influence on the maximum tensile force of the stay cable. The results can provide a certain reference for overall design of cable-stayed bridge.

Key words: the length without cable; single-tower cable-stayed bridge; static properties; mechanical properties; finite element analysis

随着国内斜拉桥的数量越来越多, 桥梁设计师越来越青睐于斜拉桥^[1]。斜拉桥其引人注目的桥型、出色的跨越能力、良好的经济性强、适用性及可调节的特点深受人们热爱^[2]。其中, 独塔斜拉桥在斜拉桥中的数量居首^[3], 其优美的造型和适用于各种场地地形的特点使得它被众多桥梁设计师所选择。斜拉桥的整体受力性能与各项设

计参数息息相关, 无索区长度就属于重要的设计参数之一^[4]。陈开利^[5]对多所独塔斜拉桥进行归纳和分析, 介绍了该类桥的结构特点和经济性, 认为独塔斜拉桥具有往大跨度发展的潜力; 严国敏^[6]结合国内外大量桥梁方案, 指出斜拉桥最大理论跨径可达 3 600 m, 但斜拉桥跨径范围为 200 ~ 500 m 时最为经济; 李晓莉^[7]研究了桥梁总体设计参数,

收稿日期: 2023 - 03 - 30

作者简介: 李 帆(1999—), 男, 硕士研究生, 从事桥梁与隧道施工监控与检测方面的研究。

指出无索区长度的设置与梁塔刚度有关;戴利民等^[8]以某协作体系斜拉桥为背景,指出该桥主跨的无索区长度宜设置为主跨跨径的五分之一;蒲黔辉等^[9]研究发现,独塔斜拉桥主跨边跨受力具有不同步性,当需要较大幅度地调整边跨受力而又不显著改变主跨时,可采用优化主跨无索区长度的方法;张韬^[10]研究了非对称斜拉桥在活载作用下主梁受力及变形情况。本文以湘西某跨径为(196+101+62)m的独塔斜拉桥为工程背景,利用有限元分析软件 Midas civil 研究无索区长度的变化对桥梁结构整体受力的影响,以期为同类型斜拉桥设计优化提供参考和指导。

1 工程概况

某独塔非对称双索面斜拉桥,全长 359 m,主跨 L_1 为 196 m,边跨 L_2 为 163 m。桥面宽度为 29.5 m,桥梁横断面布置:1.5 m(索区)+2.25 m(人行道)+10.5 m(机动车道)+1.0 m(中央护栏)+10.5 m(机动车道)+2.25 m(人行道)+1.5 m(索区)。主塔为混凝土钻石型塔,主梁采用预应力混凝土箱梁结构,采用单箱三室截面,主梁梁高为 2.7 m,顶板宽度为 29.5 m,底板宽度为 12.5 m。斜拉索位于人行道外侧,中跨及边跨共 52 对,分布方式为扇形布置。主跨塔根无索区长度 L_3 为 17 m,梁端处无索区长度 L_4 为 3 m,主跨上斜拉索间距为 7 m;边跨上斜拉索间距为 7 m,在梁端密集区索距为 4.5 m。地震设防分类为甲类,抗震设防烈度 7 度。边跨设置一个辅助墩,桥梁立面及无索区长度布置如图 1 所示。

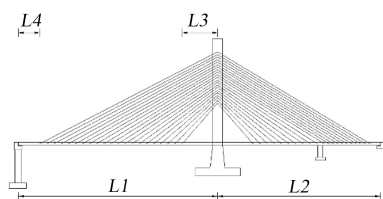


图 1 桥梁立面及无索区布置

2 有限元分析模型

利用有限元分析软件 Midas civil 建立全桥有限元分析模型,全桥共建立 801 个节点,686 个单元,斜拉索采用桁架单元模拟,主梁主塔等采用梁单元模拟。主梁主塔之间采用刚性连接模拟,

斜拉索与主梁、主塔的连接用弹性连接中的刚性模拟,主边跨交界墩以及辅助墩设置支座,支座用弹性连接模拟,所有墩底采用全约束模拟墩底固结。桥梁有限元分析模型如图 2 所示。

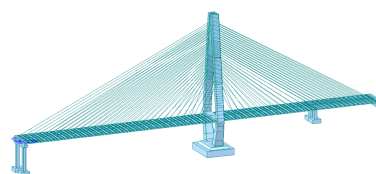


图 2 桥梁有限元分析模型

3 无索区长度影响分析

目前,主要通过增减斜拉索数量或改变斜拉索间距这两种方法来实现无索区长度的变化。其中增减斜拉索的数量对结构整体刚度的扰动较大,而且可能对结构受力的合理性及斜拉索的安全性带来影响,故本文采用改变拉索间距的方法来改变无索区长度。当研究塔根处时,保持梁端最远的拉索位置不变,均匀地增减后面所有拉索的间距,以此来实现无索区长度的变化;同理,研究梁端处时,保持距塔最近的斜拉索位置不变,均匀地增减前面拉索间距。

3.1 塔根处无索区长度影响

为研究塔根处无索区长度对桥梁性能的影响,保持梁端处无索区长度 L_4 、斜拉索初拉力、桥塔高度、塔上索间距不变,将塔根处无索区长度 L_3 以 3 m 为幅从 14 m 增加到 38 m,观察主跨主梁最大挠度和弯矩、边跨主梁最大挠度和弯矩、主跨主梁最大负弯矩、塔顶最大偏移、辅助墩负弯矩及斜拉索最大索力变化情况,结果如图 3~7 所示。

由图 3~7 可知:(1)随着塔根处无索区长度的增加,主跨主梁及边跨主梁的挠度均减少,边跨主梁挠度由 34.8 mm 减少到 21.3 mm,降幅为 38.8%,主跨主梁挠度由 171.7 mm 减少到 87.3 mm,降幅达 49.2%,说明塔根处无索区长度对主跨及边跨主梁挠度均有较大影响,且对主跨挠度的影响更为显著,因此可采取增加塔根处无索区长度的方法来减少主跨及边跨主梁的挠度。(2)随着塔根处无索区长度的增加,主跨主梁最大弯矩先减少后增大,在 32 m 时取最小值,后增大的原因是塔根处无索区长度的增加会使近塔端主梁长度增加,

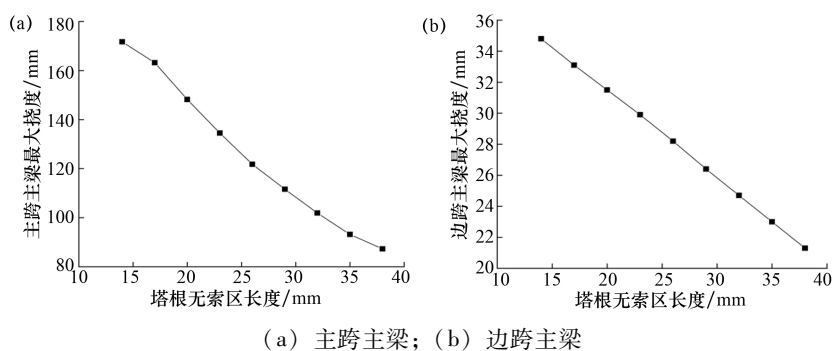


图 3 主跨及边跨主梁最大挠度随塔根无索区长度变化情况

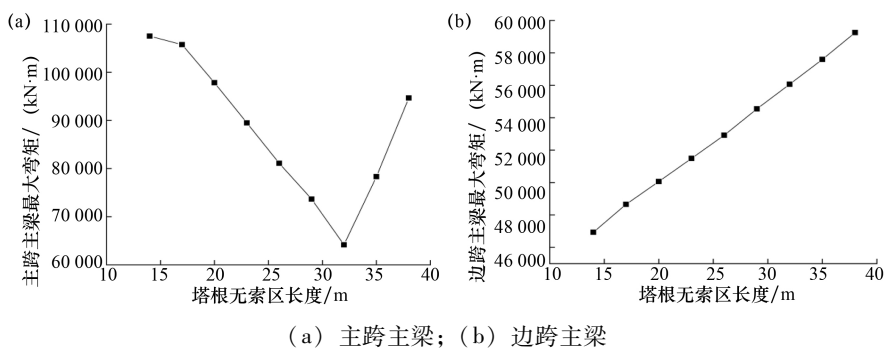


图 4 主跨及边跨主梁最大弯矩随塔根处无索区长度变化情况

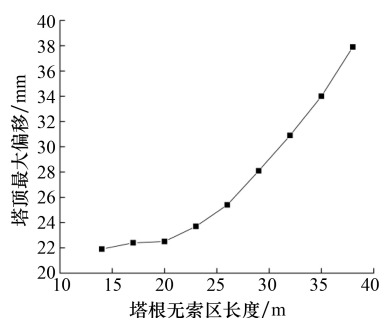


图 5 塔顶最大偏移随塔根无索区长度变化情况

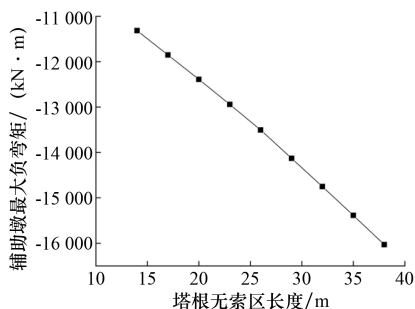


图 6 辅助墩最大负弯矩随塔根无索区长度变化情况

自重作用下的弯矩不断增大并且最后超过主跨远塔端弯矩值,即主跨主梁最大弯矩处截面由主跨远塔端转移到近塔端处。边跨主梁最大弯矩逐渐增加,由 46 937.1 kN·m 增加至 59 252.3 kN·m,增长 26.3%,故塔根处无索区长度的增加在减少主跨主梁弯矩的同时,会造成边跨主梁弯矩的增加。

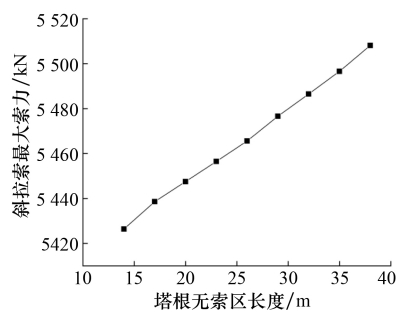


图 7 斜拉索最大索力随塔根无索区长度变化情况

(3) 塔顶最大偏移,辅助墩最大负弯矩,及斜拉索的拉力均随塔根处无索区长度的增加而增大。塔顶最大偏移范围为 14 ~ 20 m 时变化平缓且偏移量适宜,单考虑塔偏时塔根处无索区设置在此区间内最优。辅助墩最大负弯矩从 -11 315.2 kN·m 变化到 -16 031.3 kN·m,变幅高达 41.7%,影响显著。斜拉索最大拉力缓慢增加,由 5 426.4 kN 增加到 5 508.1 kN,变幅为 1.5%,故塔根处无索区对斜拉索最大拉力的影响不大。

3.2 梁端无索区长度影响

当研究梁端无索区长度对桥梁性能影响时,保持塔根处无索区长度 L_3 、斜拉索初拉力、桥塔高度、塔上索间距不变。由于桥梁对梁端处无索区长度敏感,故梁端无索区长度 L_4 取 1 m 为幅,长度从 1 m

增加至8 m,观察梁端无索区长度改变时主跨主梁最大挠度和弯矩、边跨主梁最大挠度和弯矩、主跨主梁

最大负弯矩、塔顶最大偏移、辅助墩负弯矩及斜拉索最大索力变化情况,结果如图8~12所示。

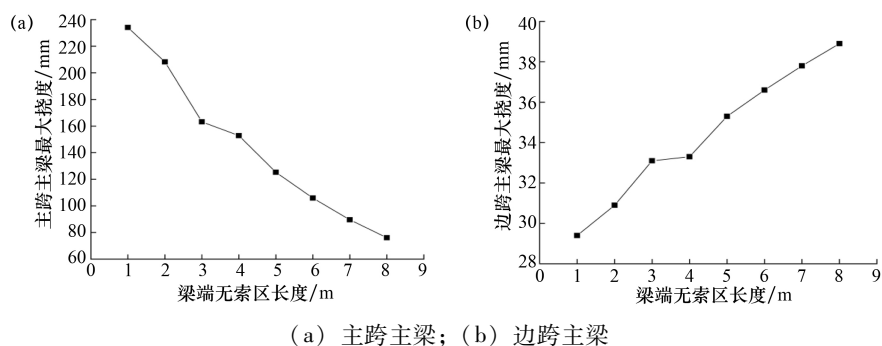


图8 主跨及边跨主梁最大挠度随梁端无索区长度变化情况

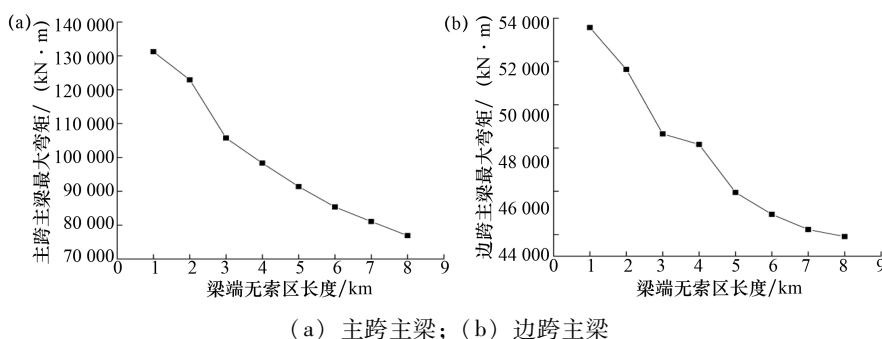


图9 主跨及边跨主梁最大弯矩随梁端无索区长度变化情况

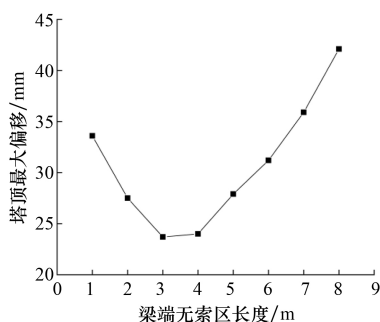


图10 塔顶最大偏移随梁端无索区长度变化情况

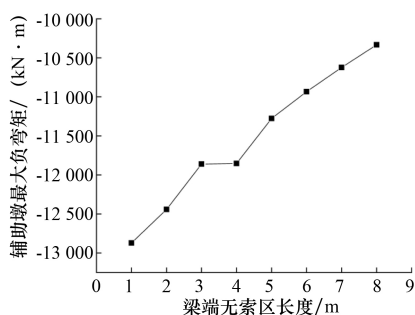


图11 辅助墩最大负弯矩随梁端无索区长度变化情况

由图8~12可知:(1)随着梁端无索区长度的增加,主跨与边跨主梁挠度的变化情况相反,主跨主梁挠度值不断减少,由234.1 mm减少至74.1 mm,减少幅度达68.3%,而边跨主梁挠度值逐渐增加,

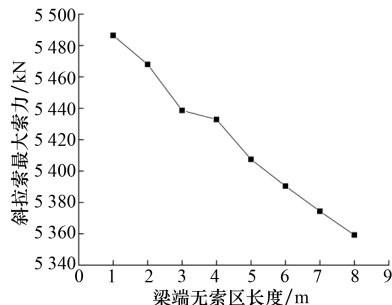


图12 斜拉索最大索力随梁端无索区长度变化情况

由29.4 mm增加至38.9 mm,增幅32.3%。梁端无索区长度的增加虽然能够使得主跨主梁挠度的减少,但也会造成边跨主梁挠度的增加,故在梁端设置无索区长度时需综合考虑。(2)随着无索区长度的增加,主跨及边跨主梁最大弯矩均单调减少,主跨主梁弯矩降低更为明显,由131 234.1 kN·m降至76 914.4 kN·m,降幅达41.4%,边跨主梁弯矩由53 567.2 kN·m减少至43 905.1 kN·m,降幅为18%。故可通过在梁端设置一定长度的无索区来降低主跨及边跨主梁最大弯矩。(3)主塔最大偏移量先下降后增加,在梁端无索区长度范围为3~4 m时取最小值,故梁端无索区长度范围设置为3~4 m最佳。随着梁端无索区长度的增加,辅助墩最大负弯矩逐渐减少,从-12 870.8 kN·m减

少至 $-10\,332.9\text{ kN}\cdot\text{m}$, 降幅为 19.7%。梁端无索区长度增加使斜拉索的最大索力减少, 但影响同样不明显, 斜拉索最大索力由 $5\,486.4\text{ kN}$ 降低至 $5\,359.2\text{ kN}$, 降幅仅为 2.3%。

4 结 论

(1) 无索区长度对桥梁性能的影响显著, 可以通过无索区长度的设置有效调节结构体系的刚度分配, 使得整体受力更为合理。在梁端处设置一定的无索区长度有利于改善整体结构的受力, 同时塔根处无索区长度的设置有利有弊, 应根据具体情况趋利避害。

(2) 梁端及塔根处无索区长度的增加均会使主跨主梁最大挠度及弯矩减少, 但梁端处无索区长度的增加会使得边跨主梁最大挠度增加, 因此想要减少主梁最大弯矩和挠度时建议优先选择调整塔根处无索区的长度。塔根处无索区长度范围宜设置为 $29\sim 35\text{ m}$, 即 $L_3/L_1=0.14\sim 0.18$, 此时结构整体性能及主跨最大挠度和弯矩、边跨最大挠度和弯矩等各项数值均较为适宜。

(3) 塔根与梁端处无索区长度的增加对主塔最大偏移量及辅助墩最大负弯矩的影响趋势不同。塔根处无索区长度的增加会使主塔偏移量单调增加, 而梁端处的无索区长度会使其偏移量先增加后减少, 且范围为 $3\sim 4\text{ m}$ 时取到最小值。梁端处无索区长度增加会使辅助墩最大负弯矩减少, 而塔根处正好相反。当需要改善辅助墩受力及塔顶偏移量时, 可优先考虑调整梁端处无索区的长度。

(4) 塔根及梁端处无索区长度对主跨主梁的影响大于边跨, 优化主跨受力时调整无索区长度是一种行之有效的方法。梁端或塔根处无索区长度的增加虽会使斜拉索的最大拉力单调增加或减少, 但影响程度均很小, 斜拉索最大拉应力的变化量都不超过 5%, 说明斜拉索对无索区长度的变化并不敏感。

参考文献:

- [1] 牟善磊, 苗吉军, 陈礼刚. 斜拉桥主塔施工应变控制优化分析[J]. 工程建设, 2014, 46(1): 43-46.
- [2] 张伟山, 王俊刚. 独塔单索面斜拉桥地震动弹性与弹塑性响应分析[J]. 工程建设, 2016, 48(1): 13-18.
- [3] 陈海兵. 混合梁独塔斜拉桥边跨布置及合理边、中跨比例[J]. 中外公路, 2010, 30(1): 155-158.
- [4] 彭彬, 杨德灿, 李文超. 无索区长度对矮塔斜拉桥活载效应的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 324-329.
- [5] 陈开利. 独塔斜拉桥的建设与展望[J]. 桥梁建设, 1998(3): 35-38.
- [6] 严国敏. 试谈斜拉桥的几个问题[J]. 土木工程学报, 1989(2): 78-87.
- [7] 李晓莉. 独塔斜拉桥的设计理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [8] 戴利民, 石志源. 独塔协作体系斜拉桥设计参数分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2000(1): 34-38.
- [9] 蒲黔辉, 赵虎. 边中跨比及无索区长度对独塔斜拉桥静动力影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 1101-1105.
- [10] 张韬. 独塔非对称矮塔斜拉桥施工控制及结构性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵, 不再另行支付), 对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明, 如有异议请来稿说明, 本刊将作适当处理。