

单面索矮塔斜拉桥索力敏感性分析

施秀山¹, 杨海洋², 杨文彬³

(1. 红河州地方公路管理处, 云南蒙自 651100; 2. 红河红发交通投资有限公司, 云南蒙自 651100;
3. 云南广众工程咨询有限公司, 云南蒙自 651100)

摘要: 为研究矮塔斜拉桥不同结构设计参数对索力的影响程度, 以实际工程为背景, 建立 Midas-civil 有限元模型, 选取边中跨比、主梁刚度、中跨无索区长度的不同取值, 分析对斜拉索索力的敏感性, 并探究了索力降低对结构的影响。结果发现: 当边中跨比和中跨无索区长度增大时, 边跨和中跨的索力都会增大; 当主梁刚度增大时, 两侧的索力会减小; 当索力降低后, 会使主梁的竖向挠度增大, 同时使桥塔的轴向应力减小。

关键词: 矮塔斜拉桥; 设计参数; 斜拉索; 敏感性

中图分类号: U442.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 06—0155—03

矮塔斜拉桥也被称为部分斜拉桥, 其结合了常规斜拉桥和梁桥 (刚构桥) 的优势, 具备主梁质量轻、承载能力强、跨度大的特点, 是一种“刚柔并济”的新型桥梁, 近年来在公路和铁路桥梁中的应用越来越广泛^[1-2]。由于矮塔斜拉桥的荷载由主梁和斜拉索共同承担, 且拉索承担比例低于主梁, 其受力特点与常规斜拉桥有明显的不同, 但目前对该桥型索力方面的研究较少, 需要我们在实践中不断探索^[3]。基于此, 本文以一座双塔单面索矮塔斜拉桥为背景, 改变相关结构参数, 探究对矮塔斜拉桥索力的影响程度, 同时研究了索力降低对结构的影响。

1 工程背景及建模

云南某单索面双塔三跨的矮塔斜拉桥全长 422 m, 桥面宽 25.5 m, 桥跨布置形式为 110+202+110 m; 主梁采用预应力混凝土变截面箱梁 (单箱三室), 桥塔高 30 m, 墩高 51 m, 梁塔墩分别使用 C60、C50、C40 混凝土, 三者固结连接; 斜拉索布置在中央分隔带内, 规格分为 31 Φ 15.24 和 37 Φ 15.24 两种, 拉索材料为高强度环氧树脂喷涂钢绞线, 弹性模量 $E_p=1.95 \times 10^5$ Mpa, 桥塔每侧 12 束斜拉索, 全桥共 48 束。桥型布置图如图 1 所示。

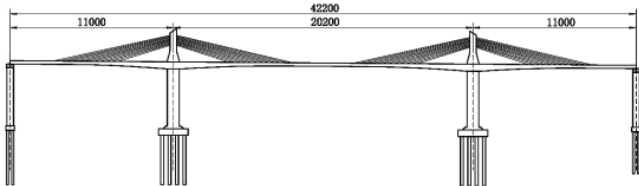


图 1 桥型立面布置图 (单位: cm)

使用桥梁有限元软件 Midas-civil 对该桥建立整体空间模型, 如图 2 所示。主梁、桥塔、桥墩和承台均采

用空间梁单元模拟^[4], 不考虑桩基的作用, 因此未对桩基建模; 将斜拉索视为线弹性材料, 使用仅受拉的桁架单元进行模拟, 即只考虑初拉力, 忽略垂度的折减效应。桥塔与主梁、斜拉索与主梁、主梁与桥墩的连接均使用弹性连接中的刚性进行模拟, 桥墩与承台采用刚性连接, 边跨支座位置使用一般支承, 承台底固结。静力荷载主要有结构自重、钢束预应力和二期恒载。此模型共有 241 个节点、190 个梁单元和 48 个桁架单元。

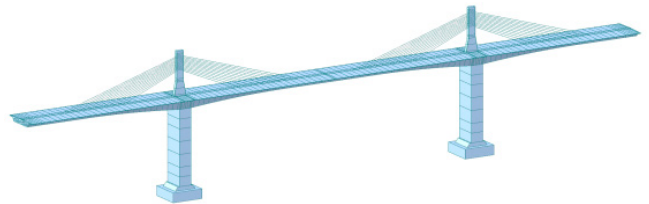


图 2 桥梁模型图

2 结构参数对索力的影响

2.1 边中跨比

边中跨比的合理选取是多跨桥梁设计中的重要步骤, 其对主梁内力、变形、支座的选用均有影响。若边中跨比较小, 虽能降低边跨的弯矩和变形, 但会使整桥受力不均匀, 而且让过渡墩位置产生负支反力^[5]; 若边中跨比过大, 将会增加边梁的自重, 边跨侧的挠度、弯矩也由此增大, 则需要更大的斜拉索索力和主梁预应力。因此, 除了因地势情况而确定边中跨比外, 在条件允许下, 应使边中跨比满足受力性能好、经济、美观的原则。

背景桥梁设计的边跨长 110 m, 中跨长 202 m, 边中跨比为 0.544, 现保持其他参数不变, 适当减小和增大边跨长度, 范围为 101 m~117.16 m, 边中跨比随之变化为 0.5~0.58, 分析对斜拉索最大索力的影响, 结果如

表 1 所示。

表 1 边中跨比对索力的影响

边中跨比	0.50	0.52	0.544	0.56	0.58
边跨长度/m	101	105.04	110	113.12	117.16
中跨侧最大索力/kN	7096.84	7105.57	7113.78	7132.13	7195.48
边跨侧最大索力/kN	6963.71	6969.85	6972.45	6979.36	7004.92

从表 1 可以发现，随着边中跨比的增大，中跨侧和边跨侧的斜拉索索力均随之增大，但边跨侧的增量比中跨侧略小，这是由于边跨仅增加了长度，拉索的位置并未改变，对索力影响较小。

2.2 主梁刚度

依据桥梁的整体刚度，可以将桥梁分为柔性桥梁和刚性桥梁。而对于矮塔斜拉桥，斜拉索属于柔性，主梁为刚性，故此类桥梁的刚度主要由主梁控制。维持原设计的其他参数不变，通过 Midas-Civil 的调整刚度系数功能，修改主梁 Iyy 实现刚度的变化^[6]。主梁刚度比为改变后的主梁刚度与原主梁刚度的比值，原设计的刚度比为 1，分别减小和增大刚度比为 0.2~1.8，引起索力的变化如表 2 所示。

表 2 主梁刚度对索力的影响

主梁刚度比	0.2	0.6	1	1.4	1.8
中跨侧最大索力/kN	7268.10	7175.97	7113.78	7065.56	7038.88
边跨侧最大索力/kN	7028.63	6964.04	6972.45	6681.35	6873.64

根据表 2 可知，中跨侧的索力随主梁刚度的增大而减小，因为刚度大的主梁可承担更多荷载，减少了拉索的受力，而边跨侧与中跨相反，随着刚度增大，但增幅较小。

2.3 中跨无索区长度

存在无索区梁段是矮塔斜拉桥独有的特点，由于斜拉索只承担部分荷载，因此矮塔斜拉桥斜拉索没有覆盖整个加劲梁，包括中跨、边跨、塔底旁梁段都存在无索区^[7]。斜拉索可以根据受力情况灵活布置，通过调整主梁无索区的长度，能有效避免主梁弯矩和主塔处墩顶负弯矩过大的情况，同时结合主梁的预应力钢束对整体受力进行优化^[8]。

通过改变斜拉索与桥塔的角度和距离，设置不同的中跨无索区长度，分别为 30 m、35 m、40 m（原设计）、45 m 和 50 m，斜拉索根数、主梁截面形式等原设计参数均不变，同时保持边跨侧和中跨侧斜拉索对称。分析

不同中跨无索区长度对斜拉索索力的影响，如表 3 所示。

表 3 中跨无索区长度对索力的影响

中跨无索区长度/m	30	35	40	45	50
中跨侧最大索力/kN	6909.21	7105.82	7113.78	7296.86	7388.32
边跨侧最大索力/kN	6730.50	6970.59	6972.45	7061.41	7237.10

根据表 3 可以发现，两侧斜拉索索力都随着中跨无索区长度的增大而增大，由于两侧斜拉索对称，边跨无索区也会随中跨无索区的长度增大，进而引起边跨索力变化。

2.4 参数敏感性比较

为了更加细致地了解各设计参数对该矮塔斜拉桥索力、主梁挠度和弯矩的影响，计算出各参数的响应值变化率，即（不同参数响应值 - 原设计响应值）/ 原设计响应值 × 100%，按变化率绝对值大小排序，绝对值越大的证明对结构影响的敏感性越大，取排序前 5 的设计参数见表 4。

根据表 4 发现，中跨无索区长度 50 m 对中跨侧最大索力影响最大，使索力增加 3.86%；主梁刚度比 1.4 对边跨侧最大索力的影响最大，使索力降低了 4.18%。同时，中跨无索区长度对索力的敏感性较高，中、边跨侧的排序前 5 中均占了 3 次，刚度比次之，边中跨比对索力的影响最小；综合以上可得，分析的三个参数对该桥梁索力影响的敏感性排序为：中跨无索区长度 > 主梁刚度比 > 边中跨比。

表 4 索力敏感性前 5 的设计参数

排序	中跨侧最大索力		边跨侧最大索力	
	设计参数	变化率	设计参数	变化率
1	中跨无索区长度 50 m	3.86%	主梁刚度比 1.4	-4.18%
2	中跨无索区长度 30 m	-2.88%	中跨无索区长度 50 m	3.80%
3	中跨无索区长度 45 m	2.57%	中跨无索区长度 30 m	-3.47%
4	主梁刚度比 0.2	2.17%	主梁刚度比 1.8	-1.42%
5	边中跨比 0.58	1.15%	中跨无索区长度 45 m	1.28%

3 索力降低对结构的影响

桥梁在长期运营后，斜拉索受温度作用、拉索强度降低、混凝土收缩徐变等因素影响，会出现斜拉索松弛、索力降低的现象，甚至出现索力失效，会严重影响桥梁结构稳定和安全运营^[9]。为探究索力降低对矮塔斜拉桥

的影响,本文以中期运营索力减少5%、长期运营索力减少10%为分析工况,对比减少前后的主梁竖向挠度和桥塔轴向应力变化,探究对矮塔斜拉桥结构的影响。变化趋势分别如图3和图4所示,因该桥结构沿跨中对称,仅展示半桥线形。

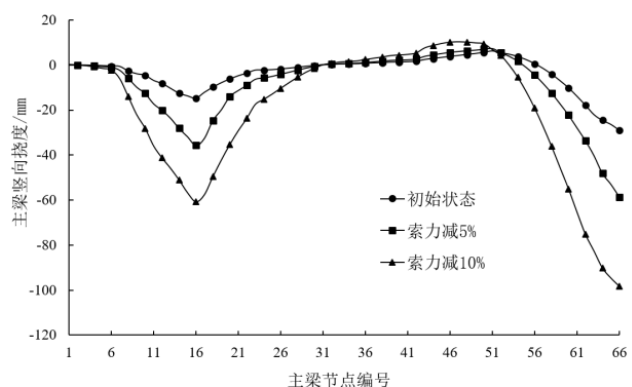


图3 主梁竖向挠度 (半桥)

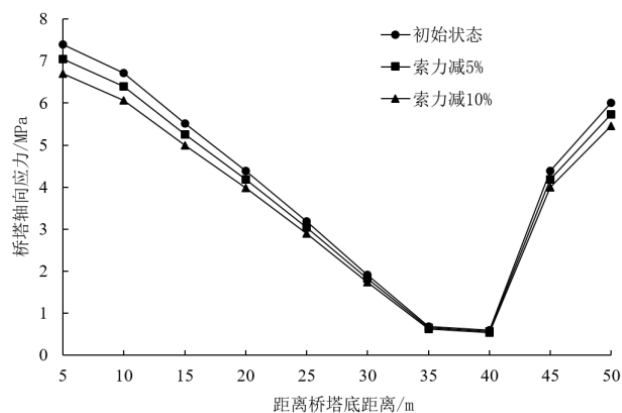


图4 桥塔轴向应力 (左塔)

根据图3可以发现:随着索力不同程度的下降,主梁边跨和中跨的挠度都会随着增大,极大地改变了主梁线形。其中索力对中跨挠度的影响大于边跨,当索力降低10%时,中跨最大挠度为98.6mm,边跨最大挠度为61.8mm。这是由于中跨比边跨长,减弱了拉索提供的竖向支承,其跨中弯矩和挠度都会受较大影响。

根据图4可知:索力降低会使桥塔的轴向应力减小,但对塔梁结合处的影响较小,桥塔应力从塔底到塔顶呈现先减小后增大的趋势。索力的降低减小了索对桥塔的轴向压力,因此使应力发生变化。

4 结论

本文以云南某矮塔斜拉桥为背景,选取边中跨比、主梁刚度比、中跨无索区长度三个结构设计参数,分析参数的不同取值对斜拉索索力改变的敏感性,并研究了

索力降低对桥梁的影响,主要结论如下:

(1) 随着边中跨比增大,边跨和中跨的斜拉索索力均会随之增大,但边跨的增幅较小。主梁刚度能改善桥梁结构的受力,当主梁刚度增大时,两侧的索力均会减小,中、边跨梁的减小趋势接近。中跨无索区长度增大时,因边、中跨侧斜拉索对称,会使两侧的索力都增大,同时,主梁的弯矩和挠度也会随之增大,但中跨的增长速率大于边跨。

(2) 对以上三个参数进行索力敏感性比较发现:中跨无索区长度50 m对中跨索力的敏感性最高,1.4的主梁刚度比对边跨索力的敏感性最高,在设计时应慎重选择;边中跨比对索力的敏感性最低,但也不宜设置较大的边中跨比。

(3) 该桥的索力降低后,会增大主梁的挠度,但对中跨的影响大于边跨,对梁塔结合处的影响较小;同时索力降低会减小对桥塔的竖向分力,从而使桥塔的轴向应力减小,虽然改善了桥塔受力,但对整体结构稳定性是不利的。

参考文献:

- [1] 赵启华.矮塔斜拉桥设计参数敏感性分析研究[J].四川建筑,2020,40(05):235-237.
- [2] 鲍英基,蒋斌松,李文斌.PC矮塔斜拉桥运营阶段参数敏感性分析[J].公路,2020,65(08):216-222.
- [3] 周勇军,吴领领,刘将,李畅畅,丁伟慧.预应力混凝土矮塔斜拉桥线形敏感参数研究[J].公路,2020,65(03):86-91.
- [4] 杨东,董福民,宁晓骏,陈茂.矮塔斜拉桥单侧断索和双侧对称断索影响效应分析[J].工业安全与环保,2022,48(01):33-36.
- [5] 陈怀智.城际轨道交通大跨度矮塔斜拉桥设计关键参数研究[J].铁道建筑,2019,59(12):6-10.
- [6] 程敏超,虞庐松,李子奇,曹发源,张耀万.铁路矮塔斜拉桥结构参数敏感性分析[J].兰州交通大学学报,2019,38(02):26-31.
- [7] 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(04):324-329.
- [8] 张清旭,宁晓骏,陈旭,刘兴顺,李启萌,周兴林,韩朝辉.上承式拱桥设计方案对比分析[J].工业安全与环保,2020,46(09):52-54.
- [9] 王彬.结构参数对矮塔斜拉桥结构受力性能的影响分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2015,28(04):16-21.