

密索体系地锚式斜拉桥组合式换索顺序研究

孙仕¹, 张谢东¹, 吕利芹¹, 秦川²

(1.武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2.湖北交通规划设计院 十堰分院)

摘要: 为研究地锚式斜拉桥合理的换索施工顺序,结合某换索工程实例,建立该桥有限元杆系模型并进行数值计算。结合5种换索工况,讨论不同工况下换索顺序和换索数目对索力重分布及主梁、主塔线形的影响,由此提出一种安全、有序且高效的组合式换索方案。结果表明:地锚的存在大幅提高了换索时边跨拉索的安全性,中跨长索的更换对结构影响较大,根据拉索长短采用不同的换索顺序组合可以提高换索效率。

关键词: 地锚式斜拉桥; 换索顺序; 换索数目; 索力重分布; 线形控制

随着新材料的发展与建造工艺的不断革新,国内斜拉桥建设飞速发展。作为斜拉桥的主要承力构件,拉索连接着主梁与主塔,起着重要的传力作用。由于与主梁呈不同角度倾斜,拉索不仅会提供竖向的拉力,还提供了强大的轴向压力,这对于主梁抵抗弯矩是有利的。然而,布置在梁体外部且长期处于高应力状态下的拉索,直接受到环境荷载(温度、湿度等)影响,很容易受到不同程度的侵蚀而损坏甚至断裂。尽管合理的防护可以延长拉索的使用寿命,但实际效果却往往不尽如人意。对于运营多年的老桥,换索成为解决拉索锈蚀问题的唯一方法。换索包括卸除旧索和安装新索两个步骤,如果任意一根拉索的索力发生变化,则其他拉索的索力会重新分布直至一个新的平衡状态,从而导致整个结构的内力线形都会发生相应的改变,尤其是对于刚度较小的主梁变化更为明显。一般而言,拉索的设计安全系数较大,卸索引起的索力增大不足以达到拉索的承载极限,但对于整体锈蚀严重的拉索,索力的突然增大可能会引起自身断裂甚至产生连锁效

应导致桥梁垮塌。合理的换索顺序可以规避这一风险。目前国内外已有多座斜拉桥实施了换索,该文结合一地锚式斜拉桥换索实例,通过建立该桥有限元杆系模型,从换索顺序及数目的选择讨论不同换索工况下索力重分布与结构线形变化,并针对地锚式斜拉桥这一特殊桥型提出一种不同工序组合式换索方案。

1 换索顺序与数目选择

对于换索方案的确定,主要考虑两点:

(1) 整体换索顺序的确定。按照秦顺全提出的无应力状态控制法,结构单元的无应力状态与结构体系及外荷载无关,拉索无应力索长只能由张拉改变。在保证体系安全的前提下,更换的拉索只要张拉到设计成桥状态的无应力索长,在全桥换索完成后即为目标成桥状态而不用二次调索。因此在理论上拉索的更换顺序是任意的。为便于施工组织,换索工程一般按顺序进行,对于锈蚀严重的拉索采取优先更换。史国刚

- *****
- [4] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014(3).
 - [5] 王德辉,史才军,吴林妹.超高性能混凝土在中国的研究和应用[J].硅酸盐通报,2016(1).
 - [6] 冯乃谦.高性能混凝土与超高性能混凝土的发展和应用[J].施工技术,2009(4).
 - [7] 周磊,周建庭,黄灿,等.复合主拱圈加固石拱桥关键技术研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011(4).
 - [8] 周建庭,黎小刚,屈建强,等.复合主拱圈加固石拱桥力学

- 性态分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2010(6).
- [9] 黄海东,向中富,刘剑锋,等.基于组合截面内力分配的拱桥加固内力计算方法[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008(2).
- [10] JTG D61-2005 公路圬工桥涵设计规范[S].
- [11] JTG/T J21-2011 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].
- [12] JTG/T H21-2011 公路桥梁技术状况评定标准[S].

收稿日期:2018-11-02

作者简介:孙仕,男,硕士研究生,E-mail:sunshi@whut.edu.cn

等以弯曲应变能最小为桥梁状态指标,提出相比较短索,卸除长索后弯曲应变能的改变较大,故先卸除短索可以使桥梁拥有更大的安全储备。但两种换索顺序在实际施工中都有使用。

(2) 单次换索数目的选择。由于斜拉索直接锚固在主塔上,每根拉索都会在主塔锚固端对主塔产生很大的水平分力,而一般斜拉桥索面往往是对称布置的,这样可以抵消巨大的水平力。如果一次只卸除 1 根索,则会打破这一平衡并且使主塔受到局部水平力与巨大的塔底弯矩。故从主塔结构安全考虑,一般都采取单塔对称更换一对索的方式。若为双塔或多塔斜拉桥,还可以结合具体工程考虑多塔同时换索方案。

2 工程背景

2.1 工程概况

湖北郧县汉江大桥为中国国内首座预应力混凝土地锚式斜拉桥,1994 年建成通车,跨度布置为(86+414+86)m,双塔双索面,为 209 国道重点桥梁工程。经过多年服役,全桥拉索锈蚀受损严重,为保证桥梁运营安全,目前正对全桥 200 根拉索进行更换。部分桥

梁工程参数如表 1 所示。

表 1 部分桥梁参数

结构	材料	备注
主梁、主塔和锚固桥台	C50 混凝土	参考旧规范 JTJ 023—85
拉索	$\phi 5$ 低松弛预应力高强钢丝	
预应力主筋	24 $\phi 5$ 高强碳素钢丝束	参考旧规范 JTJ 041—89

注:资料来源于《郧阳汉江公路大桥修改施工图》。

2.2 全桥拉索布置

全桥对称布置拉索 200 根,其中南主北塔边跨各有 42 根边跨索锚固在地锚上。

该文按如下方式对全桥总计 200 根索进行编号:参照图 1,第一个字母区分主塔,十堰南塔记为 S,郧县北塔记为 Y;第二个字母区分中边跨,中跨索记为 M,边跨索记为 S;数字为序号,沿主塔向两侧由 1 递增至 25;最后小写字母表示上下游,分别记为 a、b。如郧县中跨上游第 20 号索记为 YM20a。

为便于分析,对于同索面的拉索,索号简记为中边跨+序号。

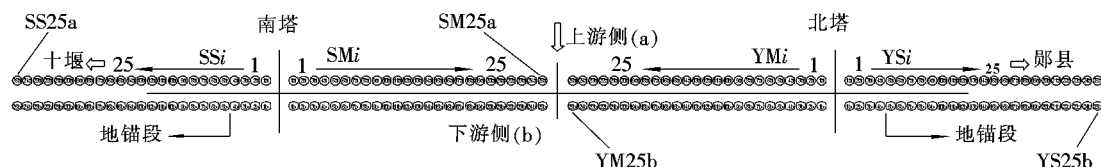


图 1 全桥拉索布置

3 多工况索力重分布与结构线形分析

参照结构设计参数,通过有限元软件 Midas/Civil 建立全桥杆系模型,不断调整索力以达到目标成桥状态,所建有限元模型如图 2 所示。考虑全桥拉索数目较多,下面以卸除南塔上游侧拉索为例,讨论 5 种换索工况下该索面索力重分布与结构线形变化,在卸除单侧拉索时,由于拉索数目较多且分布较密,索力重分布

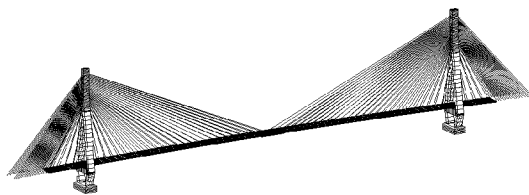


图 2 全桥有限元模型

后在各截面产生的附加扭矩较小,而梁截面本身具有较大的抗扭刚度,故后续分析对于横桥向线形不作讨论,主要分析纵桥向线形变化,并由此提出一种合理的换索方案。

3.1 工况 1: 单塔卸除 1 根索

尽管在实际施工中,为了主塔受力平衡,一般采取单塔对称更换的方法,但对于受损严重的索应考虑单独更换,故将卸除 1 根索的工况也考虑在内。对于地锚式斜拉桥这一特殊结构,其部分边跨索一端锚固在地锚上,而中跨索则直接锚固于主梁,故卸除边跨索与中跨索对邻索的索力分布影响也不同。图 3(a)、(b)为分别卸除最长边跨索(S25)与最长中跨索(M25)对邻索的索力增量对比。卸除边跨 25 号索时,邻索索力最大增加 164.49 kN(S24),相比原索力增大 4.41%。中跨长索有不同程度索力下降,最大减小 47.03 kN

(M25),相比原索力下降 1.47%。卸除中跨 25 号索时,邻索索力最大增加 266.54 kN(M24),相比原索力增大 8.93%,而边跨拉索索力均呈下降趋势,最大减小 93.43 kN,相比原索力下降 2.50%。可以看出:卸除中跨长索时其他拉索索力波动较大。分析原因可能是因为中跨索锚固在主梁上,在卸索后直接对主梁和主塔产生影响,柔度较大的主梁发生轻微挠动便会使拉索索力产生较大波动;而边跨索一端锚在地锚上,卸索后直接影响的机构只有主塔,而主塔刚度较大,故对主梁的间接作用相对较小。

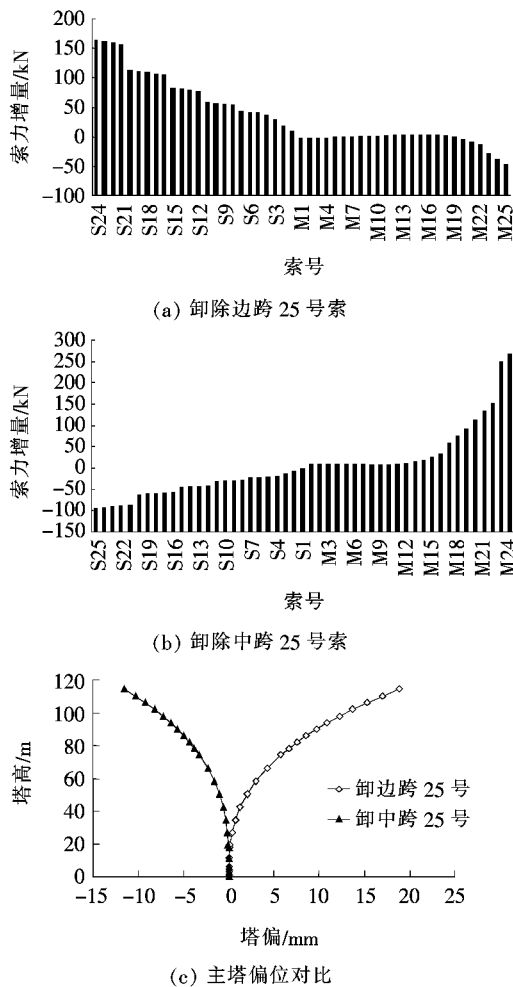


图 3 单塔卸除 1 根索索力增量变化及主塔偏位情况

由于水平力的不平衡,卸除 1 根拉索对主塔偏位会产生影响,故也对两种情况下的主塔偏位进行对比,如图 3(c)所示。可以看出在卸除边跨长索时塔顶向中跨方向偏移 18.8 mm,而在卸除中跨长索时塔顶向边跨方向偏移 11.5 mm,这也可用前述分析解释:卸边跨索时主塔为主要受力结构,而卸中跨索时不平衡力由主梁与主塔共同承担,故前者主塔偏位较大。从整体来看,卸 1 根索不会对主塔产生明显影响,可以认为

主塔是安全的,以下工况均采用单塔对称更换,不再对塔偏进行讨论。实际施工对于单索更换,建议优先更换边跨索。

3.2 工况 2:单塔卸除同索面两根索

该工况为对称卸除单塔同索面一对长索(S25、M25),对于索力较大的长索,为了保证施工安全,会考虑两塔轮流更换,图 4 为卸除南塔上游侧一对长索对邻索索力增量影响。

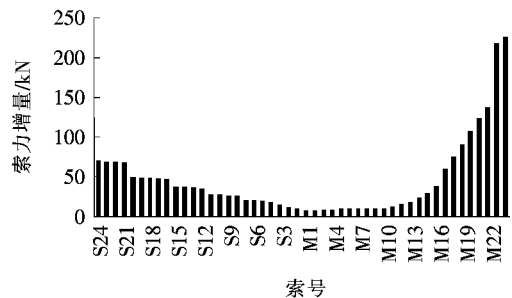


图 4 卸除同索面 25 号 2 根索索力增量变化

不同于工况 1,当同时卸除两根长索时,其余拉索索力均增大,但增幅相对较小。边跨邻索 S24 索力增加 70.08 kN,相比原索力增大 1.88%,中跨邻索 M24 索力增加 226.06 kN,相比原索力增大 7.58%。故对称卸索比单独卸 1 根索引起的索力增量更小。

3.3 工况 3:双塔对称卸除 4 根索

为加快换索施工进度,在保证施工安全的前提下,可以考虑双塔同时更换。该工况为双塔对称卸除同索面同序号 4 根索(SS25a、SM25a、YM25a、YS25a),相比工况 2,同时卸除 4 根索显然会引起更大的索力波动,边跨邻索 S24 索力增加 145.58 kN,相比原索力增大 3.90%,中跨邻索 M24 索力增加 434.51 kN,相比原索力增大 14.56%。远端拉索索力增量值随距离增大而递减,短索受影响较小(图 5)。

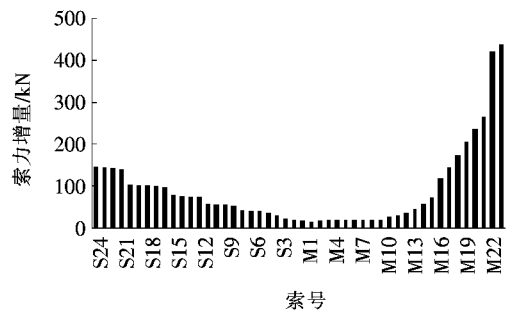
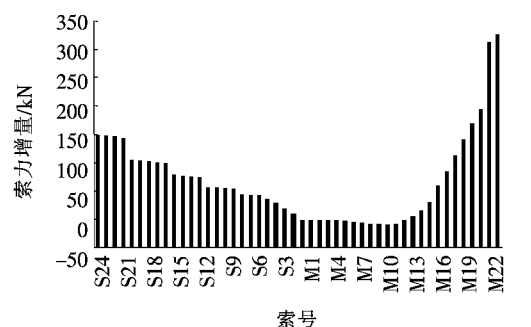


图 5 双塔对称卸除同索面 25 号 4 根索索力增量变化

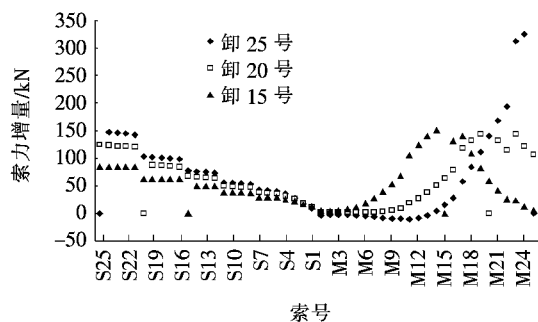
3.4 工况 4:双塔反对称卸除 4 根索

该工况为双塔反对称卸除不同索面同序号 4 根索

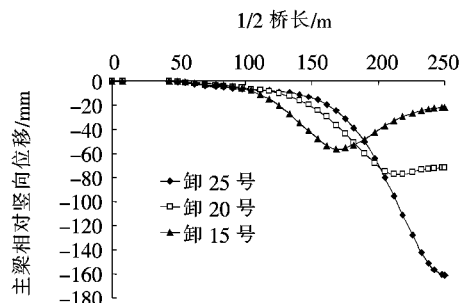
(SS25a、SM25a、YM25b、YS25b),由图 6(a)可知:索力增量分布整体趋势同工况 3,但数值有所不同:边跨邻索 S24 索力增加 147.38 kN,相比原索力增大 3.95%,中跨邻索 M24 索力增加 325.61 kN,相比原索力增大 10.91%。可见双塔换索正对称与反对称两种方式对边跨索索力影响不大,原因可能在于地锚的存在约束了边跨索的变形;而对比中跨索的索力增量,反对称更具优势。文献[5]对这一现象的解释是卸索对同索面拉索的索力增量影响较大,故反对称更换不同索面拉索会产生较小的索力增量。对于双塔更换 4 根索建议采用反对称卸除。



(a) 反对称卸除不同索面 25 号 4 根索



(b) 反对称卸不同索索力增量对比



(c) 反对称卸不同索主梁线形对比

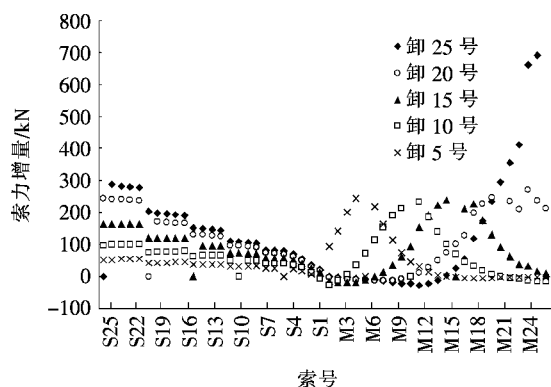
图 6 双塔反对称卸除 4 根索

从卸 25 号 4 根索对比中发现,即使采用反对称法中跨邻索的索力增量依然很大,考虑长索自身索力较大,且主梁较大的竖向位移会对跨中无轴力铰结构造

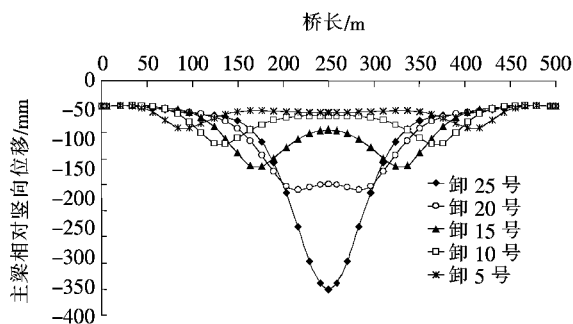
成破坏,一次更换 4 根长索是存在安全风险的。故对反对称卸除 25、20、15 号 4 根索引起的索力增量与主梁线形变化进行对比,由图 6(b)可知:卸 20 号索时的最大索力增量 143.03 kN 已远小于卸 25 号索时的 325.61 kN,其余长索的索力增量也均在 100 kN 左右;卸 15 号索时最大索力增量为 150.64 kN,而中跨长索索力增量显著减小。对比图 6(c),随着序号的减小,主梁线形越趋平缓,且到卸 15 号索时主梁跨中竖向位移较小。综合分析对于序号小于 15 的索采用反对称法换 4 根是可行的。

3.5 工况 5:双塔卸除 8 根索

工况 5 为双塔同时卸除同序号 8 根索,对于一次更换 8 根索,实际工程应用中较为罕见。主要原因在于一次卸除过多拉索会对全桥索力及主梁线形产生较大影响。考虑到此例全桥拉索数目较多,且拉索安全系数较大,故对卸 8 根索方案进行讨论。下面对卸 25、20、15、10、5 号索时的索力增量和主梁线形变化作对比分析:由图 7(a),卸序号小于 15 的索时,中跨长索的索力增量数值很小且趋于平稳,邻索的最大索力增量均不超过 300 kN,对于自身索力较小且安全系数较大的短索是安全的;由图 7(b),卸 8 根长索对主梁线形影响非常大,随着序号减小,线形波动趋于平缓,



(a) 索力增量对比



(b) 主梁线形对比

图 7 卸不同序号 8 根索

卸10号索时,主梁跨中竖向位移很小,可以认为主梁是安全的。综合分析在更换序号小于10的索时可以考虑一次换8根。

3.6 组合式换索方案与监测措施

综合以上讨论,提出一种针对该桥的换索参考方案;并结合各换索工况计算结果,给出相应的监测建议:

考虑到该桥是一座服役超过20年的老桥,且目前运营状态良好,换索施工应尽可能还原桥梁的初始受力状态。在换索施工前应对全桥索力与线形进行通测,记录桥梁换索前初始状态。整体更换顺序从长索换至短索,不选择从短索换至长索是为了保证在多索更换时长索与跨中主梁具有足够的安全性;对于锈蚀严重的索采用“优先更换”原则,先边跨后中跨,期间对邻近至少8根索的索力进行定时监测,并在拉索下锚端对应位置布置测点观测挠度变化;对于25~16号索,采用“双塔先后反对称、单塔对称”方式,一次更换同索面同序号两根索,期间对邻近6~8根索的索力与对应位置的挠度进行监测;对于15~11号索,采用“双塔反对称、单塔对称”方式,一次更换不同索面同序号4根索,期间对邻近10~14根索的索力与对应位置的挠度进行监测;对于10~1号索,采用“双塔对称、单塔对称”方式,一次更换同序号全部8根索,期间对邻近8~12根索的索力与对应位置的挠度进行监测。由于中跨跨中无轴力铰的受力对主梁线形变化较为敏感,应在该部位额外添加挠度测点,在全桥换索施工中密切观测其挠度变化,保证无轴力铰的受力安全。换索完成后对全桥索力与线形再一次进行通测,对比初始状态,对部分索力偏差较大的拉索进行微调。

4 结论

通过5种换索工况下索力增量与结构线形对比,得到以下结论:

(1) 对于地锚式斜拉桥,由于地锚这一特殊结构存在,换索时边跨的索力增量与主梁线形分布较中跨表现出更大的安全性。

(2) 一般而言,卸除1根索会对临近8~10根索

及其锚端主梁线形产生较大影响。相比短索,自身索力更大的长索在卸除后会引引起邻索较大的索力变化,在实际换索施工时应格外注重长索索力及主梁跨中内力线形的监控。

(3) 对于8索更换方式,由于卸索数目多而工程应用少,对不同桥例应作特定方案,建议在更换短索时考虑。多种换索顺序组合,可以在保证安全的前提下使换索施工更为高效。该文提出的针对该地锚式斜拉桥的组合式换索方案,配合组织严密的施工监测,可以实现高效有序的换索。对于类似的其他斜拉桥尤其是密索体系桥换索,该方式利于施工效率的提高及施工组织。

参考文献:

- [1] 乔长江.预应力混凝土斜拉桥换索技术研究[D].华中科技大学硕士学位论文,2010.
- [2] 秦顺全.分阶段施工桥梁的无应力状态控制法[J].桥梁建设,2008(1).
- [3] 吴运宏,黄晓航.重庆李渡长江大桥斜拉桥施工监控计算[J].桥梁建设,2006(A2).
- [4] 张武,吴运宏,王戒躁.斜拉桥快速换索施工技术[J].世界桥梁,2014(5).
- [5] 史国刚,孙洪滨,吉伯海,等.基于灵敏度分析的斜拉桥拉索更换顺序研究[J].防灾减灾工程学报,2011(5).
- [6] 甘林坤.涪陵长江大桥换索顺序研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2013.
- [7] Fu Z, Ji B, Yang M, et al. Cable Replacement Method for Cable-Stayed Bridges Based on Sensitivity Analysis[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2015, 29(3): 04014085.
- [8] Yao W J, Yang W, Liu X Y. Analysis the Cable Replacement Method of Tianjin Yonghe Bridge[J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 71-78: 1 383-1 387.
- [9] Rucheng, Xiao. Optimization of Dead Load State in Earth-Anchored Cable-Stayed Bridges[J]. 哈尔滨工业大学学报:英文版, 2015(3).
- [10] Zhang L W, Xiao R C, Xia R J. Mechanical Analysis and Study on Structural Parameter of Partially Earth-Anchored Cable-Stayed Bridge Part I: Mechanical Analysis[J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 44-47: 1 898-1 905.