

大跨径飞燕式系杆拱桥系杆更换关键技术研究

康孝先¹ 胡江² 彭世恩³ 刘路⁴ 姜山²

(1 绵阳市交通运输局 四川绵阳 621000

2 西南科技大学土木工程与建筑学院 四川绵阳 621000

3 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院 四川成都 610041

4 绵阳市川交公路规划勘察设计有限公司 四川绵阳 621000)

摘要:系杆拱桥在我国上世纪90年代大量修建,目前许多系杆拱桥因系杆锈蚀严重而必须更换系杆。绵阳市涪江三桥为(46+202+46)m飞燕式系杆拱桥,成桥时系杆锚固段内孔道压浆长度长,系杆无法直接更换。以该桥的系杆更换工程为例,研究了系杆更换工程的结构体系转换、临时系杆和临时支撑体系设置等关键技术,介绍了系杆更换工程的施工要点,供同类桥梁工程加固维修时参考。

关键词:系杆拱桥 系杆更换 体系转换 临时系杆 临时支撑

引言

系杆拱桥因受力简单、通过锚固在拱脚或边拱端部的水平拉索平衡主跨的水平推力,具有对场地的适应性强,造型美观等优点,具备较强的跨越能力和较好的美学形象。20世纪90年代,钢管混凝土在桥梁上的应用,解决了拱桥高强度材料应用和施工两大难题,国内涌现出一大批如三山西大桥、绵阳涪江三桥、晴川大桥、丫髻沙大桥等大跨度系杆拱桥,系杆拱桥成为主推桥型之一^[1-4]。但限于建桥时对钢结构的防腐认识和施工设备的局限性,系杆、吊杆等的设计、施工、运营期间如防护不足,在系杆、吊杆等缆索在运营过程中如发生疲劳腐蚀、钢绞线断裂、达到使用年限等病害时,难以对原有桥梁结构系杆病害进行快速有效的处置。

根据国内系杆拱桥、吊杆拱桥事故统计,同类型系杆和吊杆的统计使用寿命约为20a,最新的《公路工程技术标准》(JTG2B1-2014)中,对桥涵的斜拉索、吊杆、系杆等的设计使用年限规定为20a^[5]。迫切需要对原有不可更换系杆的系杆拱桥进行相应的病害治理、系杆更换研究,提出相应的系杆更换理论和更换方法。

对建桥时采用永久式系杆,张拉完成后进行了压浆处理的系杆拱桥,系杆更换的难度大,需将原系杆索力转换到临时系杆,再对原系杆进行拆除,安装可更换的锚具和系杆,将临时系杆索力转换到新系杆,恢复至原桥受力状态,称为等荷置换拆换法。该方法后期更换系杆方便,可以维持原有拱桥形式,保持原桥的美观风格,但施工工序复杂,存在体系的转换和临时系杆施工,工期长,施工风险和造价高,需在枯水期施工,并且需要封闭交通。

既有资料表明^[6-10],系杆拱桥维修系杆时,新增系杆法在国内应用较多,且主要用于下承式系杆拱桥,通过增加系杆提高承载力储备。由于拱脚或者边拱端部的构造限制,增加的锚固端影响原桥受力,新增系杆的受力性能较差,新增系杆往往突出桥面,严重影响美观,但新增系杆法更换过程不需要封闭交通,受到交通流量大的城市所青睐。如广州佛陈大桥、三山西大桥、成都市青龙场立交桥、峨边大渡河桥、沙湾大渡河桥等。更换后的佛陈大桥新系杆上移0.69m,新锚固端与钢管混凝土拱肋之间用钢板焊接在一起;沙湾大渡河桥在墩台顶部新增锚固端,新增系杆

高出桥面0.835m；峨边大渡河桥为下承式刚架系杆拱桥，原系杆锈蚀后，在墩顶增设新系杆锚固端，新增系杆向下移1.46m；三山西大桥为中承式系杆拱桥，原系杆锈蚀后，在上下游各增加一组三段折线式系杆，其水平系杆张拉力为840kN，倾斜段为640kN。

采用可更换系杆或无粘结钢绞线作为系杆的拱桥，可采用原位更换法，将原系杆拔出后，穿入新系杆，在合理的更换方法和监控条件下，可以恢复系杆的性能到原设计状态。武汉晴川大桥系杆断裂后，先在上下游各切断一根系杆，用临时台座上张拉临时索代替切断系杆，进行孔道清洗防腐后，安装张拉新系杆，最终完成全桥系杆更换；北京潮白河大桥系杆为无粘结钢绞线，在原孔位更换系杆，系杆最大拔出力约100t。绵阳市飞来石大桥的锚固长度为4.5m，系杆孔道压浆，单根系杆拔索力高达520t。

采用永久系杆的飞燕式系杆拱桥，跨度大，用以平衡巨大水平推力的系杆在边跨锚固长度

长，系杆更换时，无法拔出原系杆；新增系杆与拱肋连接质量难以保证，新系杆合力偏离边拱拱轴线，增大边拱弯矩，导致边跨拱肋开裂。新增系杆和原位更换均无法解决此类桥梁系杆病害。采用等荷置换拆换法，将原系杆索力转移至拱脚处的临时系杆和边跨临时支撑体系，拆换原系杆及锚固段，经过两次体系转换，工序复杂，施工难度大。本文以四川省绵阳市涪江三桥系杆更换工程为例，介绍了飞燕式系杆拱桥系杆更换过程中的关键技术和施工技术要点，可供同类桥梁工程加固维修时参考。

1 工程概况

绵阳市涪江三桥又称富乐大桥，跨越涪江，位于绵阳市东方红大桥下游1.4km处，于1997年10月建成通车，桥梁全长5443.38m，主桥为飞燕式钢管混凝土系杆拱桥，跨径组合为(46+202+46)m(如图1所示)，桥面总宽26.5m；荷载等级为汽-20，挂-100；人群荷载为3.5kN/m²；设计车速为60km/h。

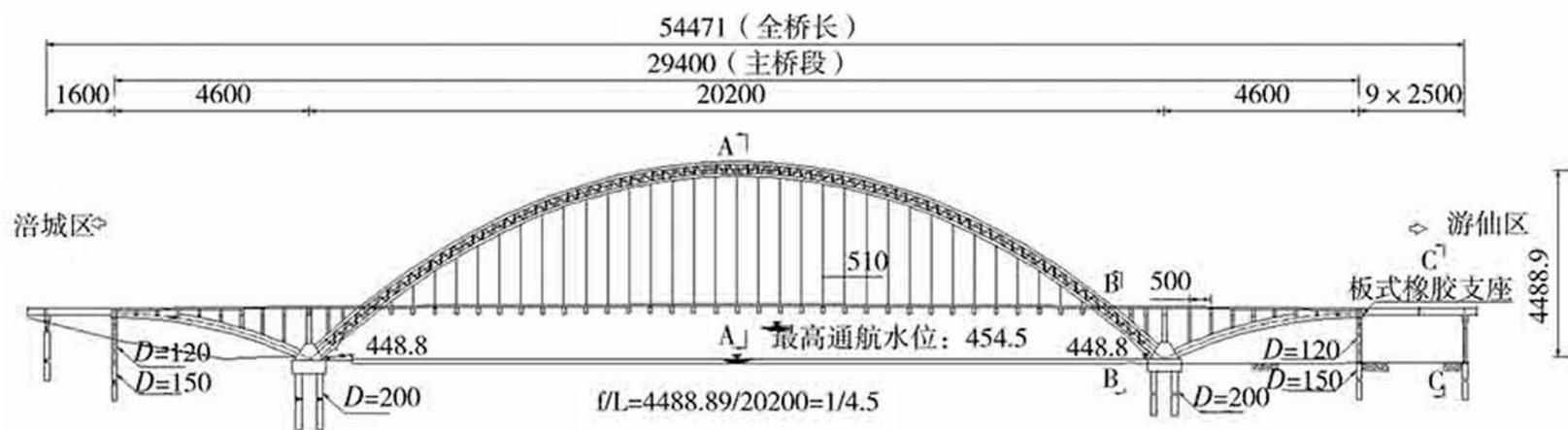


图1 绵阳市涪江三桥桥型布置图(单位:cm)

主拱肋: 4- ϕ 750 钢管混凝土构件, 主拱肋间距17.55m, 拱轴线采用高次抛物线, 矢跨比为 $f/L=1/4.5$ 。

边拱肋: 断面高 \times 宽=2m \times 2.2m的钢筋混凝土构件, 拱轴线为悬链线。

吊杆: 采用高强平行钢丝束, 外套PE防护材料, 纵向间距以5.1m为主。

系杆: 原系杆为不可更换系杆, 每束为高强低松弛预应力钢绞线, 设计强度为1860MPa, 压浆锚固段长度达16.8m(如图2所示); 成桥后,

系杆连同保护钢箱置于桥道板上, 再外包以混凝土, 箱内填以黄油麻絮保护。

2#、3#主墩分部采用8根直径2.0m的桩基础, 其中每个拱肋对应4根桩, 采用冲孔灌注桩, 桩底嵌入弱风化层4.5m深, 为嵌岩桩。

2 主要病害及成因

在长期的运营下, 桥梁各构件已出现不同程度的病害, 特别是水平系杆病害较为严重。一方面由于系杆工作所处的环境复杂, 加快了系杆本身的锈蚀松动及防腐油脂的变质, 主要体现在两

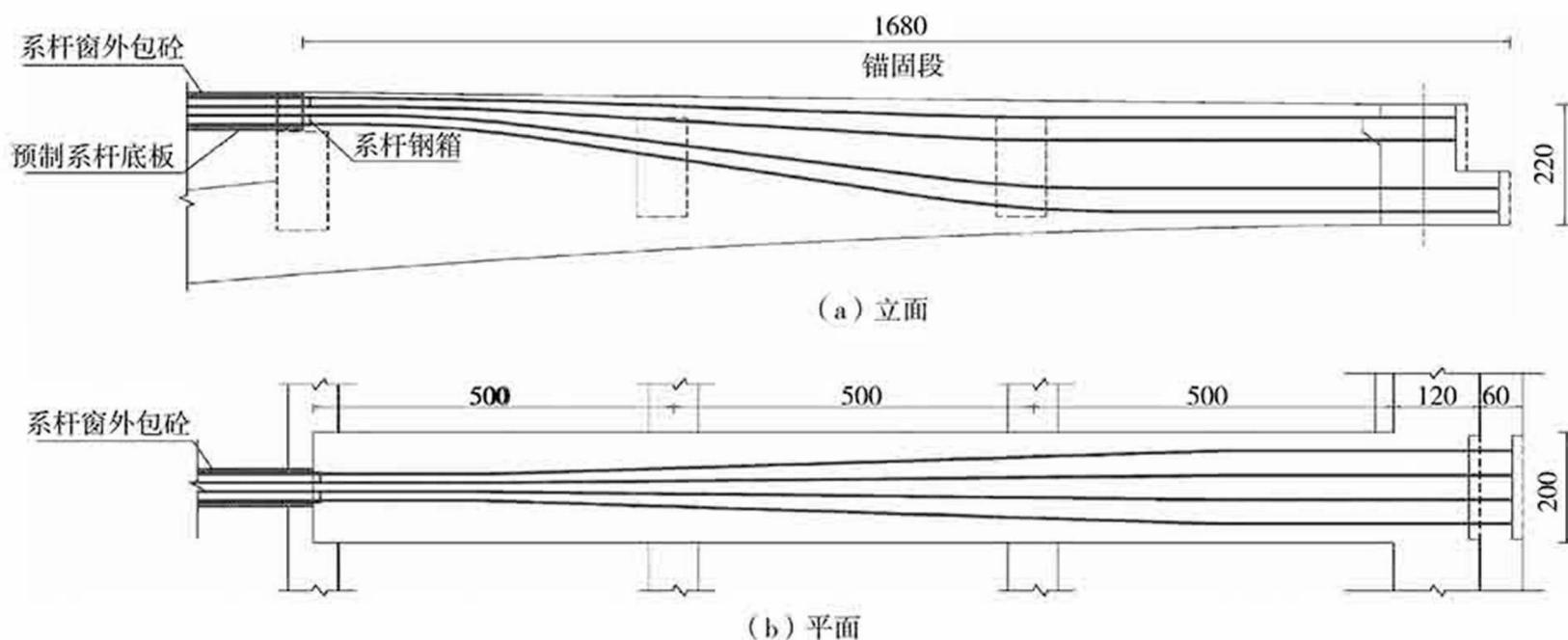


图2 原系杆锚固段一般构造图(单位: cm)

侧边拱位置(最低点)钢箱内大量积水,防腐油脂完全变质,填充度严重不足,填充物呈油水混合状态,并夹杂泥沙;长期受力复杂及潮湿的工作环境导致系杆锈蚀松动,并且在开仓处均能拉动表面一根钢绞线,表明部分钢绞线已经失去作用。系杆在设计时通常考虑2.0的安全系数,部分系杆松弛在结构整体上并未有所反应,但作为本桥结构受力的重要部件,一旦系杆发生整体断裂将直接导致桥梁垮塌。另一方面,随着交通量的增加及车辆大型化,桥梁承担荷载已超过设计荷载,加速了桥梁病害发展,同时系杆的材质及防腐措施限制了系杆的使用年限,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2015),拱桥的吊杆及系杆使用年限为20a,目前该桥系杆已使用19a,接近设计使用年限。

2015年对主桥系杆检测采用开仓检测,全桥开仓10处,开仓检测主要发现系杆病害有:系杆积水2处,钢绞线松散9处,黄油变质8处,锈迹7处,漏油1处,黄油局部散失2处,系杆箱横向裂缝40条,斜向裂缝1条,混凝土剥离1处,被油脂污染30处。系杆病害情况如图3所示。

2015年涪江三桥技术状况评定等级为三类,即较差状态,应组织进行中修。荷载试验结果表明:该桥满足设计荷载标准(汽-20,挂-100,

人群 3.5kN/m^2)荷载等级的使用要求,不满足城-A荷载等级的使用要求。



图3 系杆病害图

3 系杆更换设计

本次系杆更换工程将原系杆更换为可控、可调、可查、可换结构，荷载等级仍维持为汽-20级、挂-100，人群3.5kN/m²，并对本桥所有结构缺陷进行修复或改造，增强结构的安全性和耐久性，延长使用寿命。

3.1 系杆更换流程

原系杆为永久系杆，锚固在边拱肋上，锚固长16.8m，以目前的施工技术无法将系杆整体拔出，需将原桥锚固段全部拆除后重新浇筑。切除原系杆之前，将原系杆作用转换在临时系杆和边拱的临时支撑，在原飞燕拱的锚固位置重新浇筑锚固段、埋植钢管和锚具，最后逐渐将新增的成品系杆张拉替换掉临时系杆，达到最终成桥状态，系杆更换流程如图4所示。

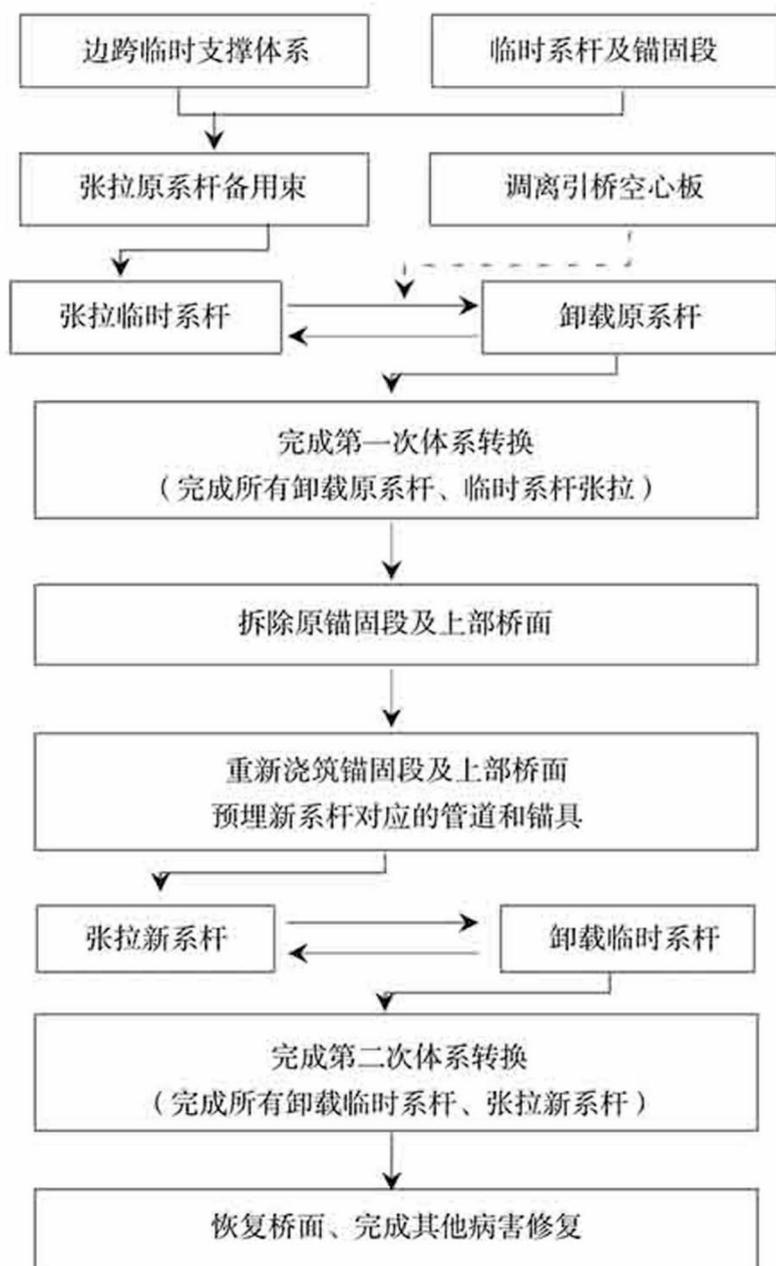


图4 系杆更换流程图

3.2 系杆及锚固段设计

新系杆索体采用XG15-31环氧喷涂钢绞线成品索，钢绞线抗拉强度为1860MPa，破断索力为8072kN，上下游各10束，每束长300m，张拉控制力为2744kN；锚具采用31孔可换索式系杆锚具，型号为XGK15-31，具有锚固可靠，结构尺寸紧凑，更换方便，防腐性能好的特点，新锚头构造如图5所示。

上下游各设置15束临时系杆，每束系杆长210m，采用抗拉强度为1860MPa的低松弛钢绞线，临时系杆锚具采用YM15-15，临时系杆张拉控制力与原系杆对应关系如表1，立面布置见图6所示。

3.3 临时支撑体系设计

边拱肋为钢筋混凝土结构，原系杆卸载前，边跨为压弯构件，整个边拱肋处于受压状态；卸载原系杆后，边拱肋为受弯构件，距交界墩处和根部弯矩增大，拉应力将远远超过混凝土抗拉强度标准值。

在枯水期，设置边拱肋的支撑体系和锚固段支撑体系，如图7所示。在原施工的临时墩（边跨1/3和2/3）处设置钢管桩，并在钢管桩间设置支架，形成边拱肋的支撑体系；在锚固段下设置满堂支架，作为锚固段拆除和浇筑支架。支撑体系应满足支撑上部结构自重强度及刚度要求，拱肋范围的支架应为可调结构，体系转换之前对边拱肋施加一定的支撑力让支撑体系主动受力，保证在体系转换过程中不出现过大变形，在体系转换过程中通过支架顶设置的承托来调整支架顶升力，保证边拱肋不会因变形过大而出现裂缝。

在原临时支墩处开挖表面覆土至原支墩基础，在其表面浇筑混凝土承台，安装钢管桩；支架基础采用扩大基础减小沉降；在拱肋与支撑对应位置设立承托和千斤顶，调节顶升力。

临时系杆安装及使用过程中，设置临时系杆支架，避免临时系杆挠度过大，支架上设置橡胶圈防止系杆磨损。

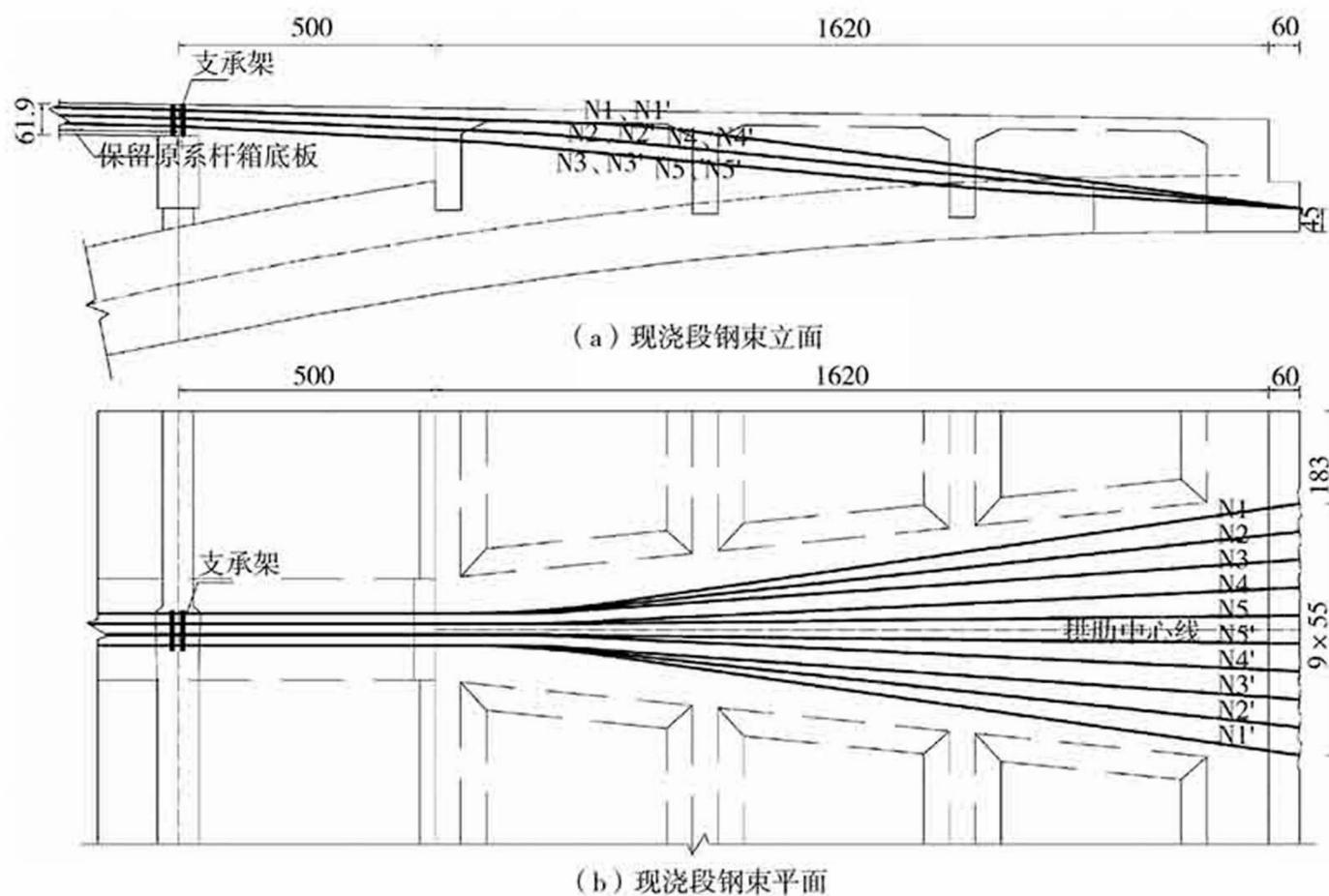


图5 新锚头一般构造图 (单位: cm)

表1 系杆张拉控制力与系杆编号关系

| 临时系杆编号 | 张拉控制力/kN | 对应原系杆编号 | 临时系杆编号 | 张拉控制力/kN | 对应原系杆编号 |
|--------|----------|---------|--------|----------|---------|
| 1号 | 1814 | 15号 | 9号 | 1830 | 7号 |
| 2号 | 1817 | 14号 | 10号 | 1832 | 6号 |
| 3号 | 1818 | 13号 | 11号 | 1835 | 5号 |
| 4号 | 1820 | 12号 | 12号 | 1842 | 4号 |
| 5号 | 1822 | 11号 | 13号 | 1844 | 3号 |
| 6号 | 1824 | 10号 | 14号 | 1845 | 2号 |
| 7号 | 1826 | 9号 | 15号 | 1845 | 1号 |
| 8号 | 1828 | 8号 | | | |



图6 系杆布置示意图

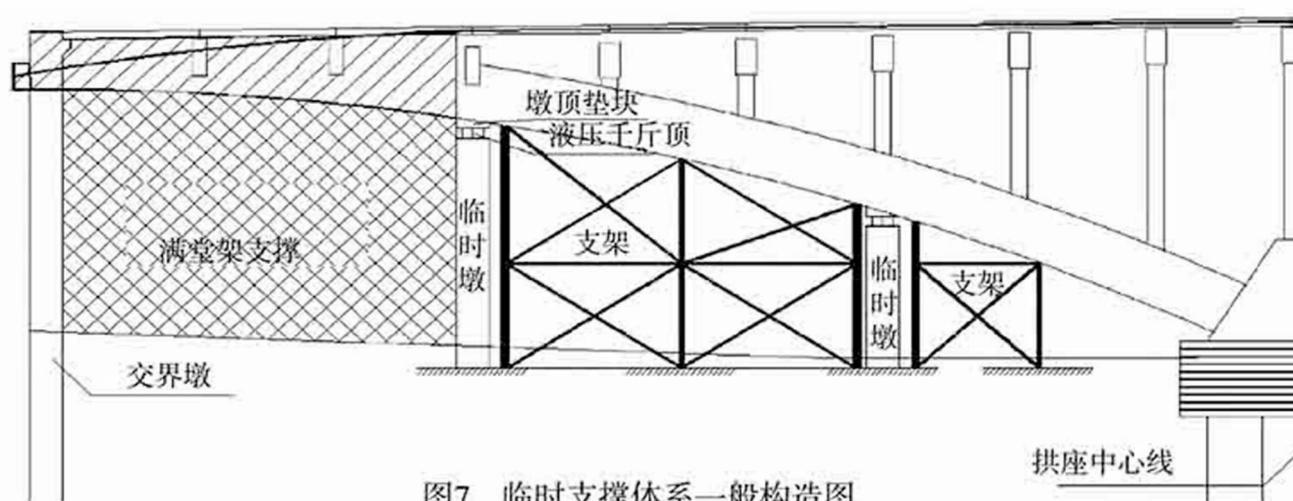


图7 临时支撑体系一般构造图

3.4 临时锚固块设计

在边拱肋或者主跨桥面位置设置临时系杆，均偏离合理拱轴线，增加弯矩，不利于结构受力。应将临时系杆设置于承台处，通过植筋将临时锚固块和承台、拱座连接，使临时锚固块嵌入原承台；在锚固块内预埋管道及锚具，使临时系杆合力中心线与主拱、边拱轴线交点处于同一水平面，临时锚固块构造见图8。

在枯水季节施工临时系杆，采取有效的降水措施，保证植筋质量；新旧混凝土结合面凿毛至钢筋外露，植入钢筋，浇筑临时索锚固块混凝土，减小混凝土收缩和水化热；

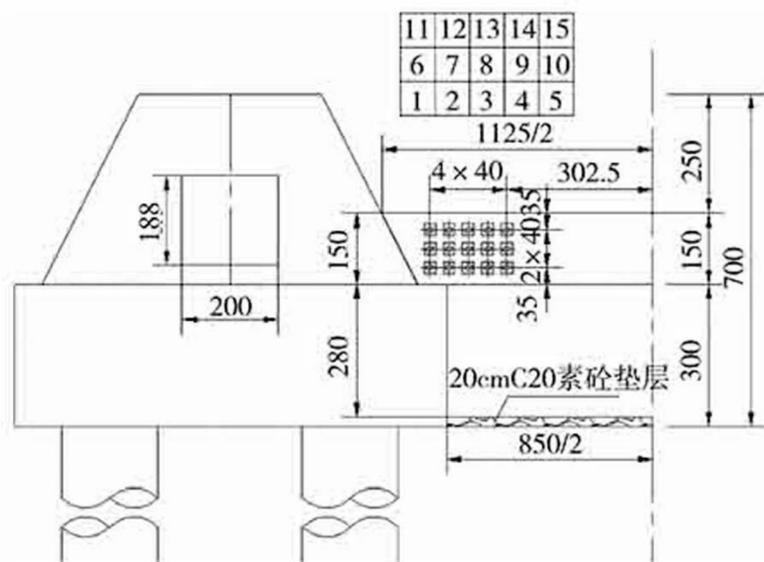


图8 临时锚固块一般构造图

4 等荷置换拆换法施工

4.1 体系转换工序

置换拆换法更换系杆重点在于施工过程中的两次体系转换，系杆力转换过程中应严格做好监控和实时监测，防止主跨和边跨过大变形。

主要施工步骤如下：

Step1 第一次体系转换，将原系杆力转换到临时系杆上。

临时支撑体系和临时锚固块施工完成后，实施第一次体系转换：卸载张拉上下游对称进行，按照编号由小到大进行张拉临时系杆，按照编号由大到小卸载原系杆；卸载16#备用束后，进行1号临时系杆张拉，张拉完成后，再实施15号原系杆的卸载；按照图9所示，每完成一次临时系杆张拉，实施下一次原系杆卸载，直至原系杆索力全部转移至临时系杆。

在体系转换过程后拆除边拱段需重新浇注的桥面板，最后拆除边拱端部18.2m的拱肋。其中相邻跨引桥空心板置于边拱端横梁牛腿之上，体系转换前直接吊离，主桥边支点将出现一定拉力，应在切断13号原系杆后吊离相邻跨空心板。

Step2 第二次体系转换：施工边拱混凝土段，埋设相应的新换成品系杆，边拱段桥面板浇注完成后，进行系杆力的转换张拉。

首先卸载15号临时系杆，再张拉5号新换成品系杆，卸载13号、14号临时系杆后，张拉新换成品系杆，完成一轮二次体系转换；第二轮卸载12号、11号、10号临时系杆，张拉3号临时系杆；第三轮卸载9号、8号、7号临时系杆，张拉4号临时系杆；第四轮卸载6号、5号、4号临时系杆，张拉2号临时系杆；最终卸载3号、2号、1号临时系杆和张拉临时系杆，完成第二次体系转换。

拆除其边拱段的临时支承，并完成其余病害修复，最终恢复至原桥受力状态，体系转换流程图见图9。



图9 体系转换流程图

4.2 系杆安装施工

系杆的安装包括临时系杆和新系杆，在临时锚固体系或锚固段重新浇筑后，即可进行系杆的安装、张拉，张拉过程中逐步替换原系杆或临时系杆。

通过牵引机构将系杆牵引至对岸对应穿索位置，牵引过程中，采用可靠的保护措施防止索体表面的保护套受到损伤。精确测量的系杆两端锚

固的实际长度,剥除两端PE护套,安装好系杆和锚具。在上下游进行同步两端张拉,张拉控制以张拉力控制为主,伸长量控制为辅。

保持锚具清洁,清理影响其锚固性能的附着物质。安装前夹片外锥面或锚板锥孔内壁应均匀涂覆少量退锚灵。锚固时,保证索体与锚具单元孔位对应,夹片与锥孔配合精确,夹片与索体咬合均匀,夹片端面平齐。封锚前用砂轮切割机整齐切除多余索体,不可采用火焰切割。

4.3 带应力断索

原系杆锚固长度超过16m,锚固端混凝土与钢绞线固结太牢,原系杆索力难以卸载,必须采取带应力断索。采用氧割的方式从一根钢丝再到一根钢绞线的顺序断索,上下游拱肋同步对称进行,不可整索一次切断。

切割前,用钢板挡住被割索体两端,并由专人守护,严防索体两端头范围内有人活动;用钢丝绳把索体切割部位的两端各5m范围内径向固定,防止断索后索体往任意的径向方向弹出伤人;用沙袋填满切割部位的两端各15m范围内(越长越好)索体周围空隙,在增大索体回缩摩擦力的同时,约束索体径向的摆动;切割人员在沙袋后面操作。每切割一根钢丝,观察钢丝的回缩情况和应力卸除情况,根据现场的情况再决定下一步是否再继续进行割断。

4.4 锚栓(钢筋)植入

本桥临时锚固块混凝土与拱脚、承台采用植筋连接,植筋面积和数量大,先对照原桥施工图和竣工图,掌握该部分的受力主钢筋和结构钢筋的分布情况,钻孔施工垂直于锚栓部位的结构混凝土,避开原结构受力主筋和结构钢筋。

成孔后,首先检查钻孔深度和直径,用压缩空气和毛刷清理孔壁后进行注胶,注胶过程以防孔内塞有空气,药剂不密实将影响钢筋与混凝土的黏接强度。植入锚栓时,应对准孔洞插入旋转,排除注胶时堵塞在孔内的空气,确保锚栓表面与黏结胶充分结合。严格遵守黏结胶的化学凝固时间,锚栓植入后,不得使植入的锚栓有任何移位,待黏合胶完全固化后进行其它施工操作。

4.5 施工监控

为确保大桥施工期间结构安全,应对大桥主体结构进行施工监控。施工监控主要内容:

- (1) 系杆更换时对主桥桥面标高的监控,使主拱标高变化在设计容许范围之内;
- (2) 施工期间主拱圈、边拱及吊杆横梁应力监测;
- (3) 张拉及放张临时系杆时墩顶水平位移的监测。

5 小结

对飞燕式系杆拱桥进行系杆更换,主要技术难点在等荷置换拆换系杆时体系转换、临时系杆以及边跨临时支撑体系设置,施工过程中的工艺复杂、技术难度较大。

既有系杆拱桥的系杆防腐问题十分重要,应加强对运营10a以上的系杆拱桥的检测,确保防腐措施有效,防止系杆锈蚀、断丝和应力松弛。新建系杆拱桥和更换系杆宜采用可调可换式系杆,系杆采用防腐能力较强的环氧喷涂钢绞线成品束,并预留索力测试装置对系杆索力进行监测,在桥梁运营过程加强对系杆锈蚀的检测、防护,提高系杆和桥梁的使用年限。

参考文献

- [1] 康孝先,刘路,丁洪华.系杆拱桥系杆更换关键技术与施工[J].公路,2015(8):110-114.
- [2] 陈宝春.钢管混凝土拱桥设计与施工[M].北京:人民交通出版社,1999.%
- [3] 陈宝春.钢管混凝土拱桥发展综述[J].桥梁建设,1997(2):8-13,22.
- [4] 钟铁峰.中-下-承式系杆拱桥有限元分析与施工监控[D].重庆:重庆大学博士论文,2006.
- [5] 中华人民共和国行业标准.公路工程技术标准(JTG:B01-2014)[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [6] 杨齐海,季跃华.大跨钢管混凝土系杆拱桥更换系杆施工[J].施工技术,2006,35(3):62-63.
- [7] 王解元,潘德鹏.某拱桥系杆换索设计与施工[J].世界桥梁,2010(2):66-69.
- [8] 黄勇.中承式系杆拱桥系杆加固方案比选[J].公路工程,2010,35(6):66-69,81.
- [9] 吕建根,王荣辉.某钢管混凝土系杆拱桥病害检测及其加固[J].工业建筑,2012.42(8):158-161.
- [10] 廖德鸿,唐建荣,黄艳巧.资阳沱江三桥系杆更换施工技术[J].预应力技术,2015(1):29-32.