

# 大跨径飞燕式系杆拱桥系杆更换关键技术研究

康孝先<sup>1</sup> 胡江<sup>2</sup> 彭世恩<sup>3</sup> 刘路<sup>4</sup> 姜山<sup>2</sup>

(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<sup>[1-4]</sup>。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<sup>[5]</sup>。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<sup>[6-10]</sup>,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/m<sup>2</sup>；设计车速为60km/h。

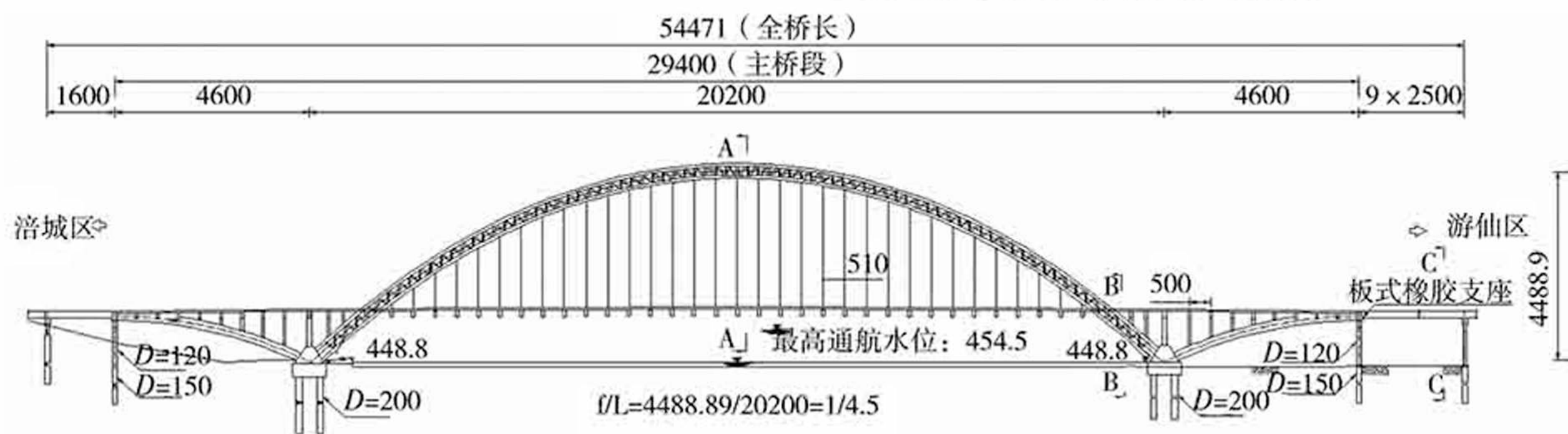


图1 绵阳市涪江三桥桥型布置图(单位:cm)

主拱肋: 4- $\phi$ 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

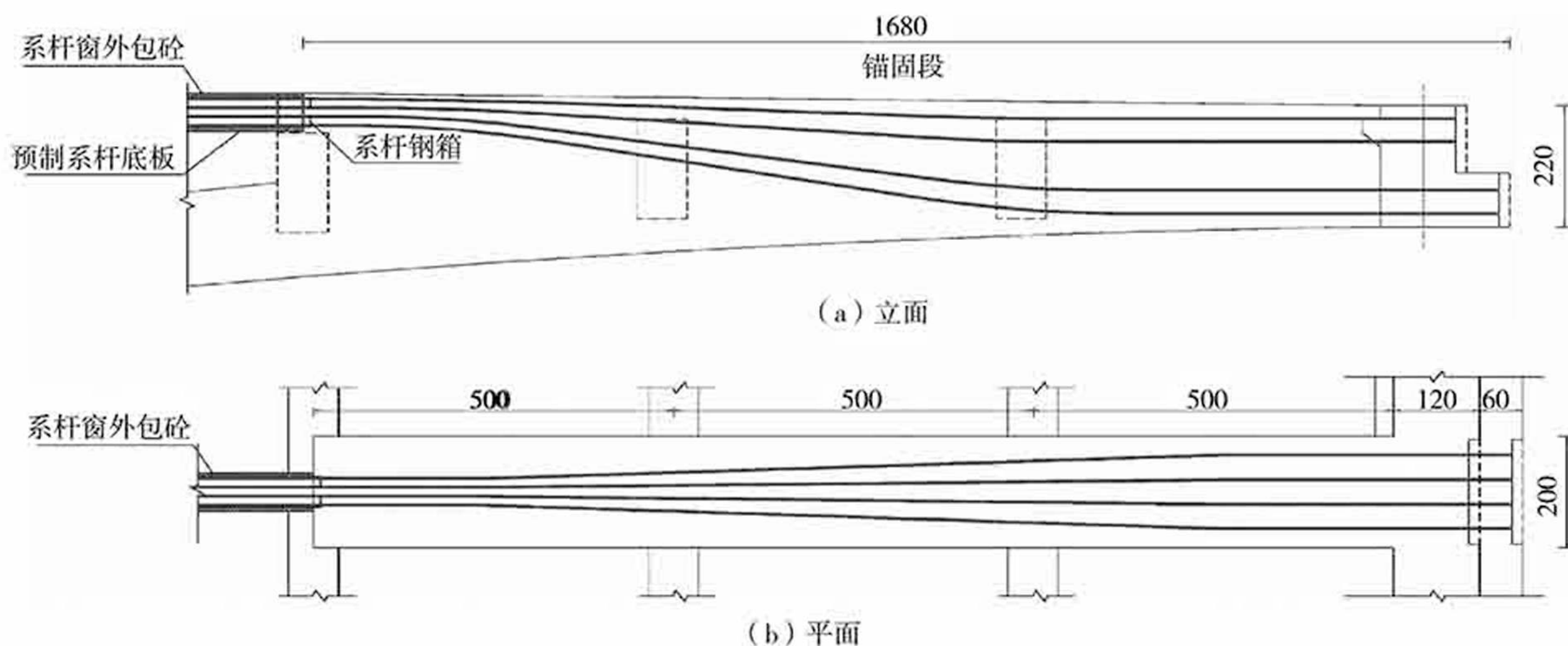


图2 原系杆锚固段一般构造图(单位: cm)

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 $3.5\text{kN/m}^2$ )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/m<sup>2</sup>，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。

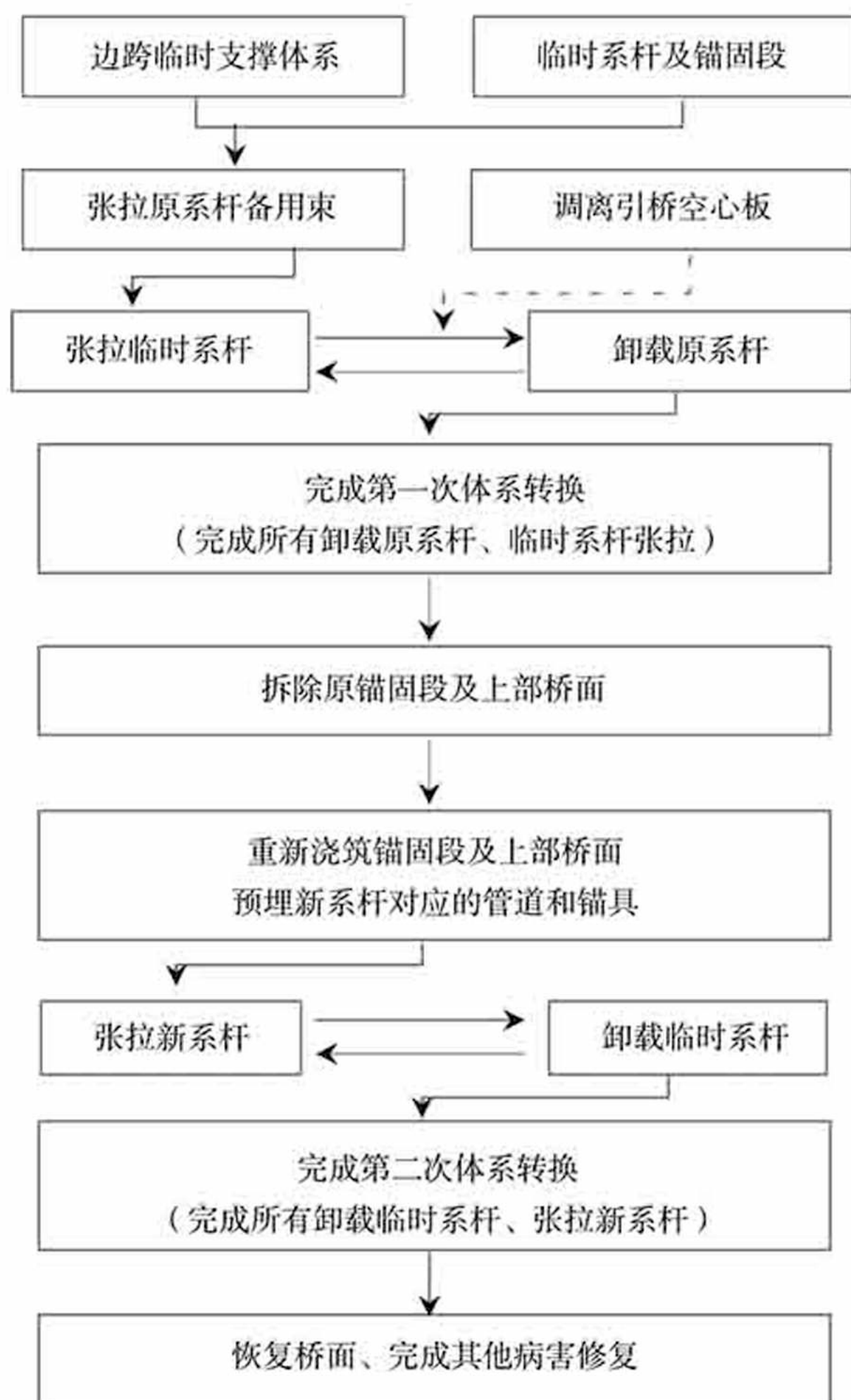


图4 系杆更换流程图

#### 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。

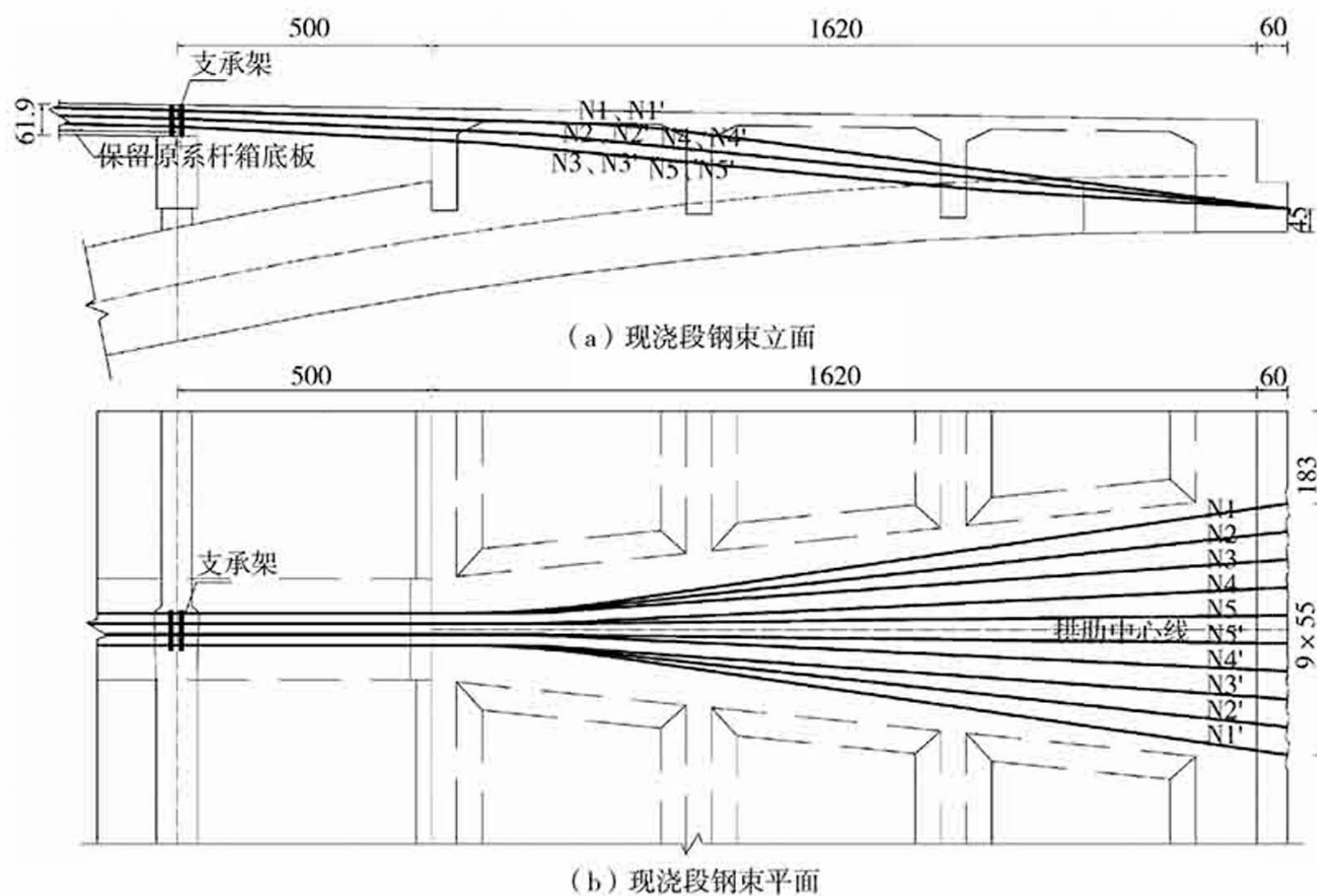


图5 新锚头一般构造图 (单位: cm)

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

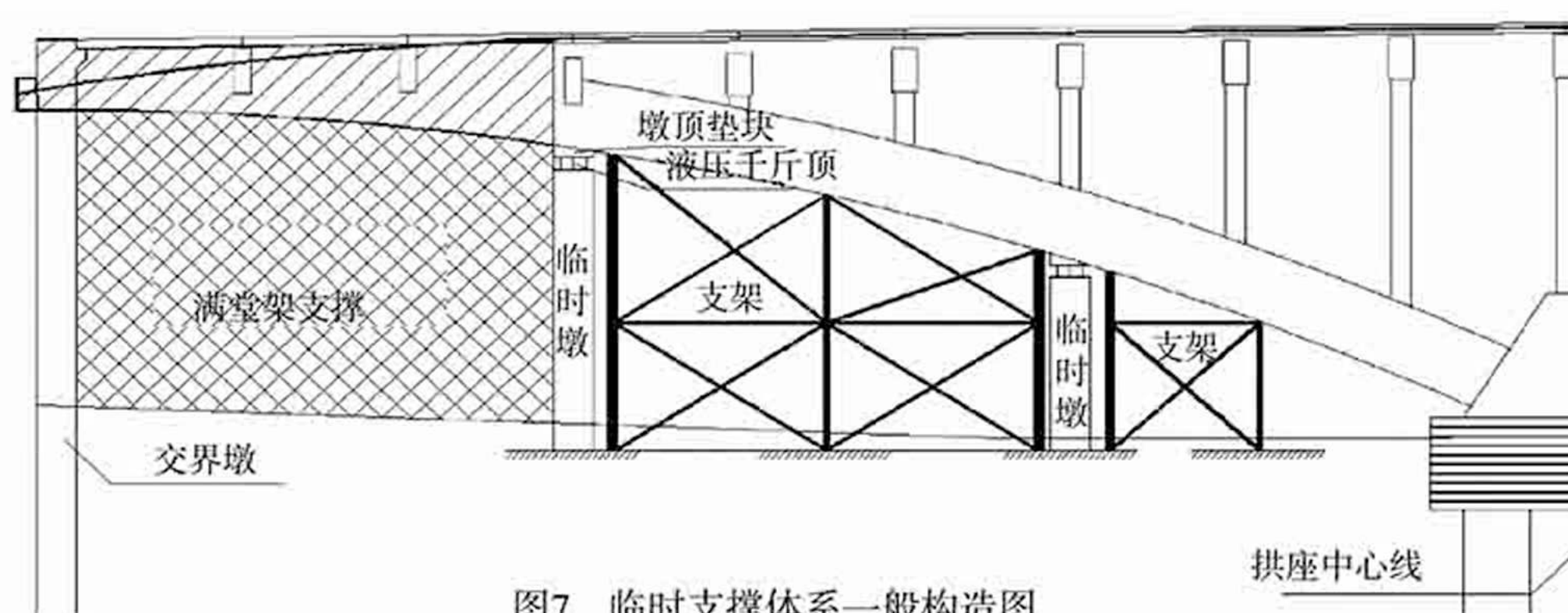


图7 临时支撑体系一般构造图

### 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；

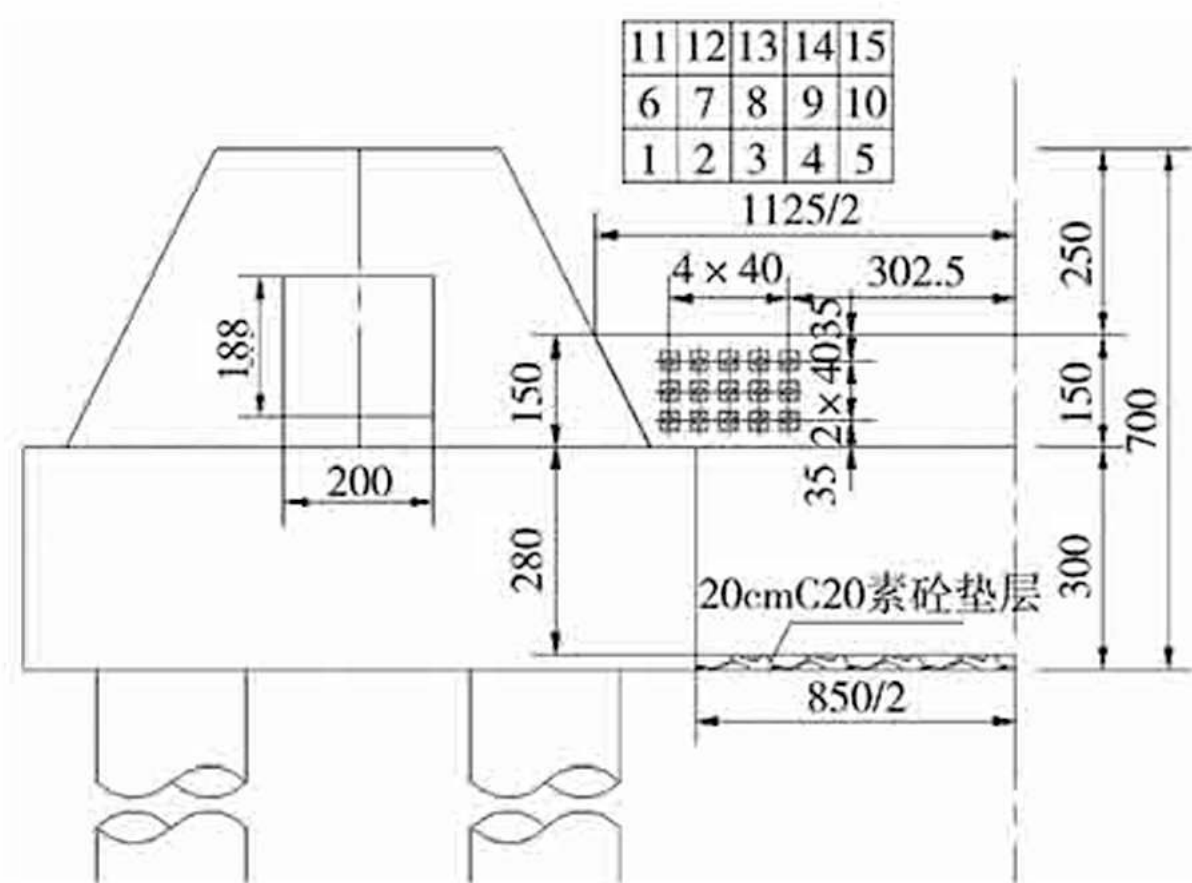


图8 临时锚固块一般构造图

## 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.