

武汉阳逻长江大桥锚碇设计

刘明虎 徐国平 刘化图

(中交公路规划设计院 北京 100010)

摘要: 武汉阳逻长江大桥主桥为主跨1280m悬索桥,北锚碇采用放坡大开挖深埋扩大基础实腹式锚体重力式锚;南锚碇采用支护开挖深埋圆形扩大基础框架式锚体重力式锚,其基坑工程采用外径73m、壁厚1.5m、深61.5m、最大挖深45m的圆形地下连续墙加内衬的支护结构型式;在国内首次采用“无粘结可更换”预应力锚固系统。本文概述了锚碇的总体构造、基坑(基础)工程、锚体及锚固系统的结构设计及技术特点。

关键词: 武汉阳逻长江大桥 锚碇 基坑工程 地下连续墙 锚固系统 设计

1. 概述

武汉阳逻长江大桥是京珠、沪蓉国道主干线武汉绕城公路东北段的跨江工程,是国家“十五”重点建设项目。大桥采用计算行车速度为120km/h平原微丘区六车道高速公路标准,工程全长10km,总投资19.6亿元。主桥采用布跨为250+1280+440 m悬索桥。北锚碇采用重力式深埋扩大基础、实腹式锚体,基坑采用放坡大开挖;南锚碇采用重力式深埋圆形扩大基础、空腹框架式锚体,基坑工程采用外径73m、壁厚1.5m、深61.5m、最大挖深45m的圆形地连墙加内衬的支护结构型式。为从根本上解决了悬索桥生命线工程的使用寿命问题,在国内首次采用“无粘结可更换”预应力锚固系统。

2. 设计条件

2.1 地形地质条件

北锚碇所处地区为一山丘,锚碇坐落在山坳处,坡底地势平坦,平均高程27.2m,山顶标高约47m。锚址区主要为白垩至下第三系东湖群红色砂岩、砂砾岩、砾岩,未发现不良地质现象,场地稳定。上覆第四纪土层厚度0.6~4.1m;全、强风化带主要为粉砂岩,层厚5.7~27.1m,天然单轴极限抗压强度1.6MPa,抗剪强度低,裂隙发育;弱风化顶板高程在14.02~26.16m之间,微风化顶板高程6.8~9.22m,岩体完整性较好。弱~微风化砂岩天然单轴极限抗压强度15.1MPa,饱和单轴极限抗压

强度14.0MPa,吸水率4.75,软化系数0.87。水文地质条件相对简单,地下水水量较小。

南锚碇位于长江南岸的I级阶地,属长江冲积平原的高河漫滩,地势相对平缓。南岸防洪大堤顶高程约29.5m。距基础50m以北,分布有一条倾角75°,走向西北,规模较小的稳定正断层,对南锚碇影响不大。地面标高约21.5m,覆盖层为厚50.4~51.6m的第四系冲积亚粘土、淤泥质亚粘土、亚粘土夹亚砂土、粉砂、细砂、含砾细中砂及圆砾,下伏砾岩、砂岩。强风化砾岩顶板标高为-27.7~-31.5m,强风化砾岩岩性破碎,强度较低;弱风化砾岩顶板标高为-29.2~-44.2m,弱风化砾岩完整性较好,饱和单轴抗压强度在12.8~29.4MPa之间。锚址区水文地质参数如表1。估算水位降深4m时,影响半径154m。地下水埋深上部潜水为0.4~0.6m,下部承压水为1.05~2.5m。基岩裂隙水水量不均,具有一定的承压性。

2.2 上部构造条件

- (1) 上部结构型式: 单跨吊钢箱梁悬索桥
- (2) 吊索横向间距: 35m
- (3) 主缆在散索点处入射角: 北锚碇29.32°, 南锚碇16.10°
- (4) 锚碇处主缆拉力: 北锚碇610000kN, 南锚碇550000kN
- (5) 主缆施工方法: PWS法
- (6) 主缆断面: 每根主缆由162/154(北/南)根平行钢丝索股组成

南锚碇水文地质参数 表1

岩性	导水系数 T (m ² /d)	越流系数 K/m (d ⁻²)	渗透系数K (cm/s)	弹性释 水系数u	压力传导 系数a(m ² /d)
亚砂土			7.52×10^{-4}		
亚粘土			1.74×10^{-4}		
粉砂	565.8	$4.04 \times 10^{-4} \sim 3.08 \times 10^{-3}$	1.49×10^{-2}	2.48×10^{-3}	273689
细砂			1.58×10^{-2}		
圆砾			2.74×10^{-2}		
砂岩			$231 \times 10^3 \sim 1.16 \times 10^4$		
砾岩			$1.16 \times 10^4 \sim 2.54 \times 10^4$		

3. 总体设计

3.1 结构形式

3.1.1 北锚碇

以弱、微风化砂砾岩作为持力层, 基底地基容许承载力要求不小于0.8MPa。为增加锚碇的抗滑动、抗倾覆稳定性, 减小使用阶段地基最大工作应力, 在基础底面设置两个台阶, 第一个台阶底面标高为-0.7m, 第二个台阶底面标高为9.3m, 中间水平距离25m范围设成斜坡。锚碇总体轮廓尺寸长×宽×高为70.5×54×45.7m。基底设置混凝土垫层, 厚30cm。

锚体由锚块、散索鞍支墩、支墩基础、后浇段、前锚室、后锚室等部分组成。对大体积混凝土结构要求进行分层浇筑, 每层混凝土内设置冷却水管进行通水冷却。大体积混凝土设计龄期为60天。锚固系统为前锚式预应力钢绞线锚固系统, 主缆索股散索长度23m, 锚固长度20m, 散索点理论高程42.000m, 折射角48°。

3.1.2 南锚碇

深埋扩大基础以卵石、圆砾层作为基底持力层。基础直径73m、深42m, 采用圆形地连墙增加内衬的支护结构型式形成基坑。在基坑内浇筑钢筋混凝土底板、回填填芯混凝土、最后浇筑顶板形成基础。锚体尾部设置16根直径1.2m的钻孔灌注桩及1.5m厚承台, 以支撑锚块尾部混凝土自重。锚体总体轮廓尺寸长×宽×高为70.4×54×26.5m。

锚体为空腹框架式, 由锚块、散索鞍支墩、鞍部、后浇段、前锚室、后锚室等部分组

成。基础顶板实际也是锚体的一部分, 两者相互融为一体。对大体积混凝土结构要求进行分层浇筑, 每层混凝土内设置冷却水管进行通水冷却。锚固系统为前锚式预应力钢绞线锚固系统, 主缆索股散索长度23m, 锚固长度19m, 散索点理论高程45.500m, 折射角35°。

为满足桥梁运营期间检修需要, 两个锚碇锚体内外均设置了由检修楼梯、平台、检查门、通道构成的通道系统及检修照明、空气除湿系统。

3.2 总体布置

北、南锚碇总体构造见图1、2。

3.3 主要材料

混凝土: 锚体除散索鞍支墩顶部采用40号混凝土外, 其余部位均采用30号混凝土。南锚碇地连墙采用35号水下混凝土, 帽梁及内衬采用30号混凝土, 内衬层间接缝处采用30号自密实混凝土, 导墙采用25号混凝土, 底板采用30号微膨胀混凝土, 顶板采用30号混凝土, 垫层采用20号混凝土, 填芯采用15号混凝土。

预应力材料: 锚固系统梁预应力钢绞线直径15.24mm, 标准强度1860MPa。

钢筋: 除地连墙竖向主筋采用Ⅲ级钢筋外, 其余采用Ⅰ、Ⅱ级钢筋。在锚体外露表面设置了 $\phi 5@10 \times 10$ 的带肋钢筋焊网。

钢材: 锚固系统拉杆采用40CrNiMoA钢, 螺母、垫圈采用40Cr钢, 联接器采用45号钢, 预应力管道采用20号无缝钢管。

数量: 北锚碇混凝土数量为87440m³, 钢筋1750t, 预应力钢绞线126t, 钢材531t (不计定位架)。南锚碇基础混凝土数量为172524m³, 钢筋6648t, 钢材79t。锚体混凝土数量为40259m³, 钢筋1144t, 预应力钢绞线114t, 钢材382t (不计定位架)。

3.4 整体验算

对锚碇整体进行了施工和运营阶段基底应力、抗滑动稳定性、抗倾覆稳定性、沉降及变位验算, 验算结果均满足要求。

地连墙嵌入弱风化砾岩1~2.5m, 至标高-33~-40m, 地连墙总深度54.5~61.5m。地连墙施工完成后, 采用逆筑法施工, 分层开挖土体、分层施工内衬。内衬及土体分层厚度为3m。采用岛式开挖法进行土体开挖, 一层沿圆周分区进行对称开挖及内衬施工。开挖至卵石(圆砾)层表面标高-20.3~-24m后, 浇筑0.3~4m厚的垫层混凝土, 然后浇筑6m厚的钢筋混凝土底板。填芯混凝土施工完成后浇筑8~10m厚的钢筋混凝土顶板。为改善基底应力分布的均匀性, 在基础前半部设置26个空隔仓。支护结构总体布置见图3。

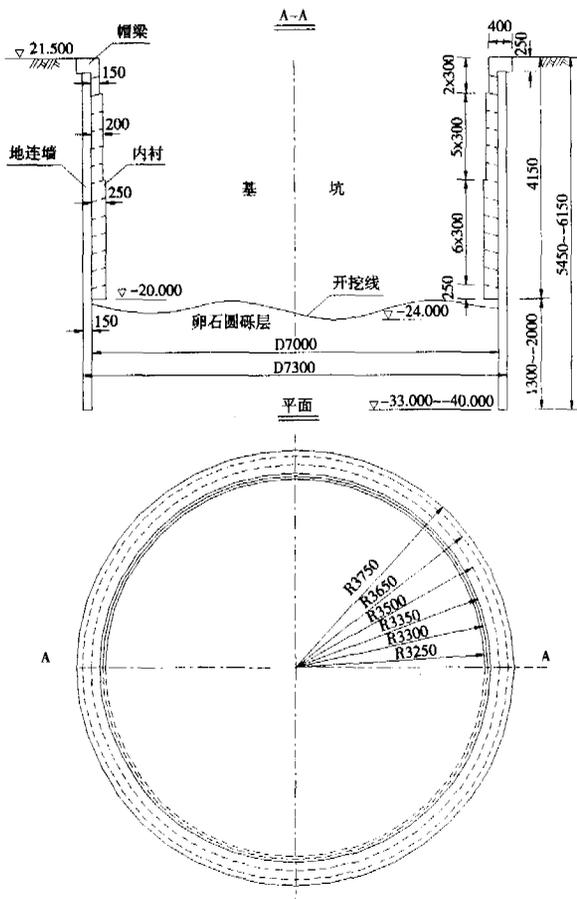


图3 南锚碇支护结构总体布置

5.1.2 地连墙槽段划分、墙段连接形式及嵌岩深度

地连墙施工槽段分I期、II期两种槽段各25个槽段。I期槽段采用三铰成槽, 边孔轴线处长2.8m, 中间孔轴线处长1.08m, 槽段轴线处长6.68m。I期槽段由三个槽段组成, 相邻槽段

通过对五种接头方法进行综合经济技术比较, 确定采用铰接法连接方式。

地连墙嵌岩深度按如下四个原则确定: ①当强风化岩层厚度大于5m时, 地连墙入弱风化岩1m; ②当强风化岩厚度为0~5m时, 地连墙入弱风化岩1.5m; ③当无强风化岩时, 入弱风化岩2.5m; ④地连墙开挖建基面以下入土深度不小于10m。

5.1.3 导墙、帽梁及内衬

导墙及平台顶面标高22.0m, 高出地面0.5m。导墙由两个L形钢筋混凝土墙组成, 墙间距离为1.6m, 墙高1.6m, 墙宽1.7m, 墙厚0.5m。在地连墙两侧, 采用深层搅拌加固淤泥质粘土, 加固深度平均15m, 宽约32cm, 净距为1.6m。导墙的纵向分段与地连墙的分段接头错开。

地连墙顶面设置帽梁, 为钢筋混凝土环形结构, 地连墙顶部伸进帽梁10cm, 帽梁悬出地连墙内侧1.5m, 外侧1m, 帽梁总宽度4m, 高2.5m。

内衬作为地连墙的弹性支撑设置在地连墙内侧。综合考虑地连墙结构受力、减少施工周期和开挖段土体蠕变对地连墙的影响, 内衬施工层高取3m, 厚度1.5~2.5m。各层内衬底面设置成15°的斜坡, 上、下层内衬结合面采用自密实混凝土。为保证内衬与地连墙间的连接质量及共同受力, 在地连墙内设置水平钢筋并预埋直螺纹钢筋连接器, 与内衬钢筋相连。各层内衬之间部分竖向钢筋采用钢筋连接器连接。

5.2 封、降、排水系统设计

本基坑工程规模庞大, 可借鉴经验少, 加上其独特的水文、地质条件, 其防、排水系统成为基坑开挖施工成败的关键环节; 同时, 由于锚址地处长江I级阶地, 前缘以北约150m即为长江防洪大堤武昌保护圈一级堤防, 其防、排水系统也关系到长江主干堤乃至武汉人民生命财产的安全, 作用十分重要。为此, 对基坑工程采取墙下灌浆帷幕、坑外自凝灰浆挡水帷幕、坑内管井降水、砂砾渗井等多项措施, 以

及墙段接缝间高压旋喷注浆处理、坑外管井降水、坑底灌浆封底等防洪风险控制措施及施工预案,以确保基坑施工和大堤防洪安全万无一失。基坑封、降、排水系统总体布置见图4,主要分项工程见表2。

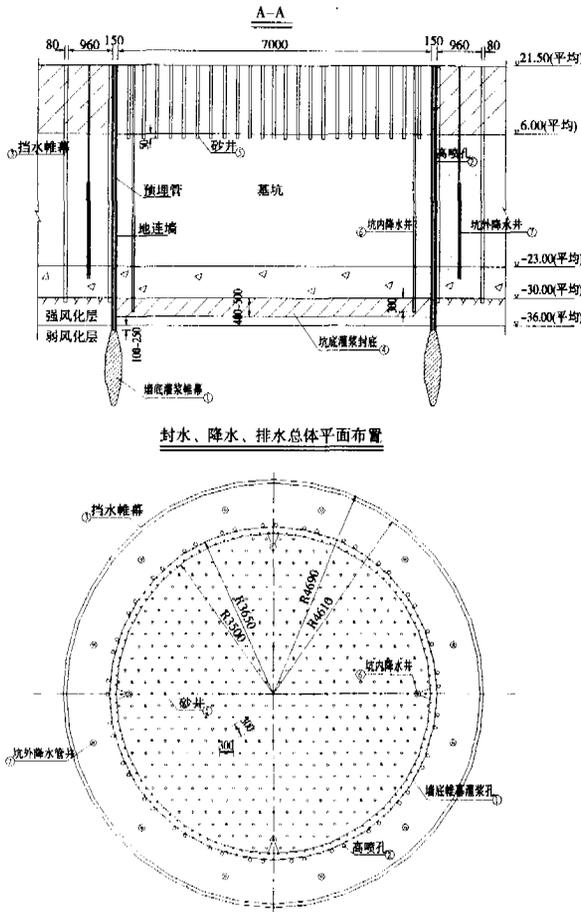


图4 基坑封水、降水、排水系统总体布置

主要分项工程一览表 表2

分类	编号	项目	布置位置	功能	备注
封水	①	墙底灌浆帷幕	地连墙底	墙底基岩内裂隙封水	
	②	墙间接缝外高喷桩	地连墙墙段接缝处外侧	地连墙接头可能存在的缝隙封水	施工预案
	③	外围自凝灰浆挡水帷幕	地连墙外侧10m, 与地连墙为同心圆	截断两侧覆盖层水联系, 确保基坑施工过程中坑内水位不随帷幕外水位变化	防洪风险控制措施
降排水	④	基坑封底灌浆	基坑底强风化层	未按时完成基坑施工情况下汛期施工的基底水平隔水层	防洪风险控制措施 施工预案
	⑤	砂井	基坑内软土(粘性土)层内	排出坑内积水及软土中孔隙水, 加快软土固结	
	⑥	坑内降水管井	坑内	降低坑内地下水位, 保持坑内干作业条件	兼有排水 减压作用
	⑦	坑外降水管井	地连墙与外围帷幕之间	降低坑外水位, 减小支护结构水压力	施工预案

6. 锚固系统设计

采用预应力钢绞线锚固系统。根据国内已建悬索桥锚碇的设计施工经验, 预应力锚固系统通常采用管道内灌注水泥浆的防腐方式, 成为不可更换的永久结构, 而管道压浆施工质量又难于保证, 因此严重影响了预应力钢绞线的防腐耐久性。为了确保锚固系统乃至整个桥梁的安全与耐久性, 因而进行“无粘结可更换”预应力锚固系统的研发和应用。

6.1 布置及构造

两锚碇锚固系统在水平、竖向两个面内均呈辐射形布置。拉杆方向与其对应的索股方向一致, 前、后锚面均为与中心索股垂直的平面, 预应力钢束沿索股发散方向布置。拉杆方向误差用球面垫圈和内球面垫圈予以调整。

锚固系统由索股锚固连接构造和预应力钢束锚固构造组成。索股锚固连接构造由拉杆及其组件、联结器组成; 预应力钢束锚固构造由管道、预应力钢绞线及锚具、防腐油脂、锚头防护帽等组成。拉杆上端与索股锚头上的锚板相连接, 另一端与被预应力钢束锚固于前锚面的联结器相连接。

索股锚固连接构造分单索股和双索股锚固单元两种类型, 分别采用15-16和15-31规格预应力钢束锚固。钢绞线在管道内要求不扭绞, 锚头张拉端不封锚并留有换束工作长度, 管道内充填防腐油脂, 因此钢绞线为无粘结式, 并可更换。在部分锚固单元的锚固连接部位设置压力传感器, 运营期间可随时监测索股受力情况。

锚固系统锚固单元构造见图5。

6.2 构件设计

6.2.1 拉杆组件件

拉杆采用40CrNiMoA, 力学性能: $\sigma_b=980$ MPa, $\sigma_s=835$ MPa, $\delta_5 \geq 12\%$, $\psi \geq 55\%$, 长3.1m, 直径85mm。螺母、垫圈采用40Cr, 力学性能: $\sigma_b=980$ MPa, $\sigma_s=785$ MPa, $\delta_5 \geq 9\%$, $\psi \geq 45\%$ 。

拉杆、螺母的螺纹均采用《军用MJ螺纹标准》, 相对于普通螺纹, 其特点是: 牙底较

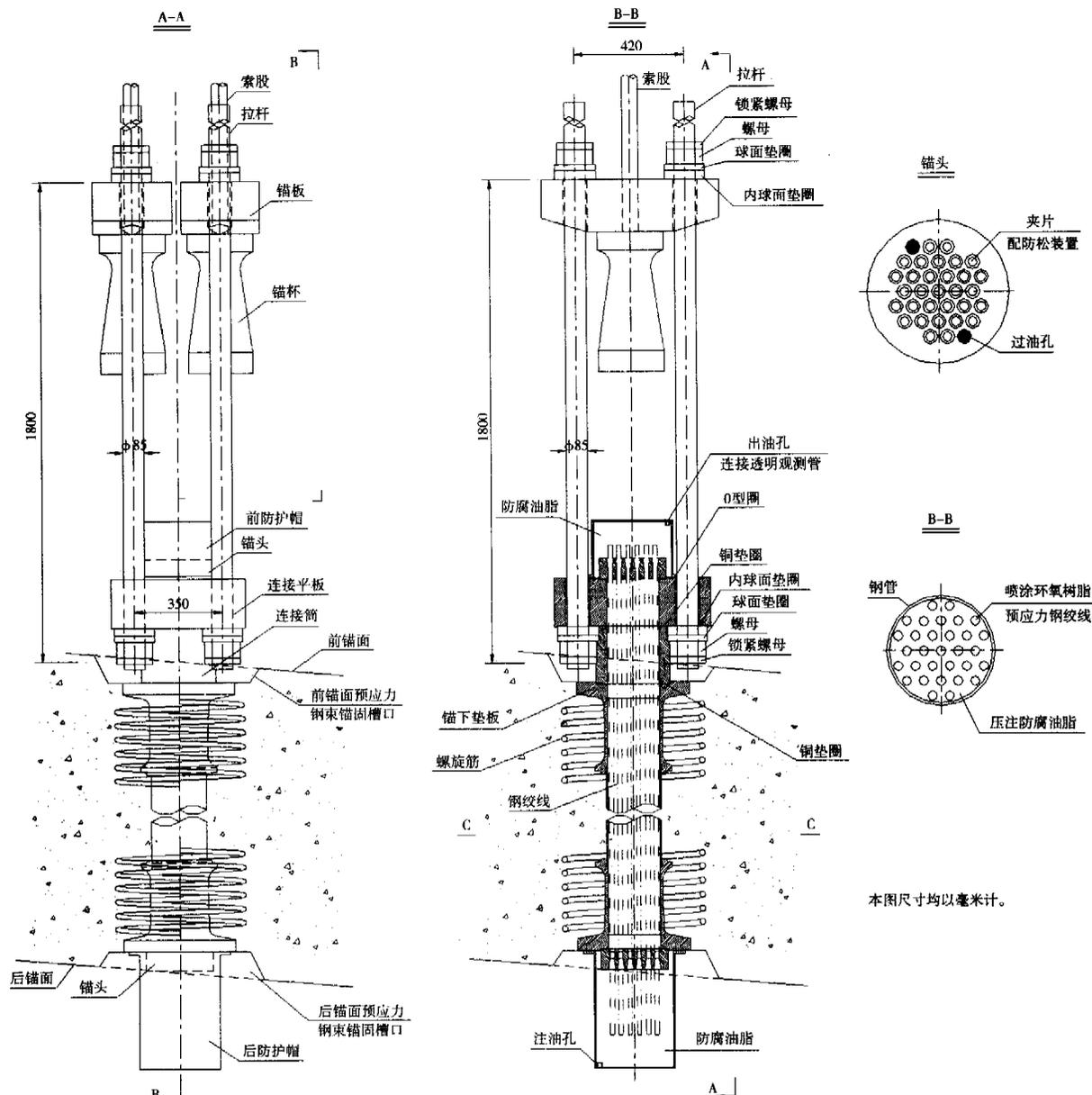


图5 锚固系统锚固单元构造

浅，牙底过渡圆角大，牙高降低，拉杆、螺母、球面螺母的螺纹疲劳强度提高20%~40%；两端采用球面垫圈，可自动调整螺母与垫圈的承力面，保持其有效接触面积，同时能克服因制作、安装误差引起的拉杆角度偏差，避免由于偏载引起拉杆受弯，减少局部应力集中，有效提高螺纹的使用寿命。

索股锚头处的拉杆设计有加长螺纹，以调节主缆索股的制作、安装误差，最大调节量为±900mm。为防止螺母在动载下的松动，设计时加设了锁紧螺母。

6.2.2 联接器

采用45号优质碳素结构钢（锻造），力学性

能： $\sigma_t=600\text{MPa}$ ， $\sigma_s=355\text{MPa}$ ， $\delta_5\geq 16\%$ ， $\psi\geq 35\%$ 。

联结器包括连接平板和连接筒。将联结器设计成分离构造受力明确并方便制作、运输和安装。连接平板的设计除须满足本身的强度和刚度要求外，还须满足拉杆、锚头构造的要求。连接平板既是锚头下的垫板又起连接拉杆作用，其受力比较复杂，设计时除按常规法进行锚头下及内球面垫圈下压应力和剪应力及各主要截面的弯曲、剪切应力的验算外，还采用了三维有限元法进行应力、变形校核计算。

(下转第39页)

b.对粗直径的高强螺栓,其扭矩系数应尽量取小值,且离差越小越好。主要是设计轴力大,对扭矩系数大的螺栓要施拧大扭矩,如 $K=0.15$,对400kN轴力的M30螺栓,其施工扭矩达1800N·m~2000N·m,无论是施工扳手或检查扳手均达到了上限,对设备不利,检查亦费力。

如K值为0.1,则扭矩只需1300N·m(已考虑提高10%),因而,研制小扭矩系数的高强螺栓对施工和检查均是有利的。

c.目前检查手段,先用检查扳手抽查部分螺栓的扭矩,此方法对大吨位的螺栓,检查人员很费力,要四个人才能扳动螺母,而且施工要均匀,慢速、不能突然加荷,螺栓多时应该说是很麻烦的一件事。

当前,世界各国用于检查的方法很多,有超声波,磁损测定法、螺母转角法、扭矩扳手测定法等。象磁损测定法,仅需将接头置于螺栓头上,即可直观地读出轴力数值,非常方便,但精度不高,转角法虽然简单,但不宜用于大吨位螺

栓,否则,将使螺栓处于高应力状态,而易引起延迟断裂,而且很费力。因此,研制一种省力、实用的检测方法(包括仪器)是很有必要的。

d.工程中使用的定扭电动扳手有二种,一种是国产的(1500N·m,1000N·m),一种是进口的(2000N·m),无论是精度,还是使用可靠性均以进口为好。全桥约14万套螺栓,进口了四个扳手,很少发生损坏,而国产扳手经常发生故障,为维持四把进口扳手能够使用,加拧时(扭矩系数值较低,偏差大亦无碍终拧值)用国产扳手,终拧则用进口扳手,看来,研制性能可靠的定扭扳手也应充分考虑。

(6) 关于抗滑系数试验

a.抗滑系数试验是检验节点连接是否满足设计要求的重要手段,按规定,检验试样随节点连接板运到工地现场,与连接板同等条件保存,在构件拼装前,试验室做抗滑移系数试验。

(未完待续)

(上接第8页)

6.2.3 预应力锚固组件

预应力锚固组件由钢绞线、锚具、预埋钢管和防护帽组成。锚具由锚头、夹片、锚下垫板、螺旋筋及密封圈等组成。为方便施工,采取前锚面一端张拉,张拉控制应力为 $0.7R_y^b$ 。张拉完毕后,从后锚面向前锚面方向压注防腐油脂。在后、前防护帽端部设有注油孔和出油孔。

锚具静载锚固效率系数 $\eta_A \geq 95\%$,破断时总应变 $\epsilon_u \geq 2\%$;动载性能通过应力上限为 $0.65\sigma_b$ 、应力幅为130MPa,循环次数均为200万次的疲劳试验。

预应力管道内径为158mm和209mm,管道及锚头孔眼设计应保证钢绞线不弯曲、不扭绞。锚头设有出油孔。锚下垫板及螺旋筋的设计应满足锚下混凝土为30号的受力要求,通过三维有限元锚下应力分析,确定锚下垫板、螺旋筋

的构造及尺寸。由于为无粘结式,为保证安全,锚头夹片后设置防松装置。

6.3 锚固系统的防腐

在锚室内设抽湿设备使锚室内相对湿度不大于40%。

钢绞线采用表面喷涂环氧树脂防腐保护层及预应力管道内灌注防腐油脂的双重防腐体系,在前锚面设置有油脂面观测管,桥梁运营期间根据油面观测结果实施补充灌注。

参考文献

- [1] 刘明虎,悬索桥重力式锚碇设计的基本思路,公路,1999(7)
- [2] 刘明虎,桥梁深大基坑工程方案设计,第五届交通青年学术会议论文集,2003
- [3] 周山水,刘明虎等,厦门海沧大桥锚碇设计,1999年桥梁及结构工程学会论文集
- [4] 润扬长江大桥南汉桥锚碇投标方案及施工图设计文件