

斜拉式混凝土连续桁梁预应力施工

张林光^{*}

(铁道部第十四工程局)

提 要 本文介绍了卫运河特大桥斜拉式混凝土连续桁梁预应力施工技术,对复杂预应力结构的孔道成孔方法、钢绞线张拉顺序的确定、张拉力控制方法、孔道压浆工艺进行了详细论述,提出了预应力施工中有关施工计算的方法,并对卫运河桥桁梁结构施工进行了简要介绍。

主题词 卫运河桥 混凝土连续桁梁 预应力施工

1 工程概况及特点

卫运河特大桥位于山东省临清市东北约 5 km 处,全长 655.11 m,引桥为 32.0 m 预应力混凝土简支梁,主跨为斜拉式预应力混凝土连续桁梁,采用三角形连续桁架结构,是我国铁路桥第一次采用的新结构。在此之前,国内已建成四座同类型的公路桥,但桁架间为铰接或挂梁结构,而卫运河桥采用的是三孔连续结构,孔跨为 32.5 m+65 m+32.5 m。由于采用新结构,而且用在工期相当紧张的京九线上,铁道部将该桥确定为试验桥,同时被列为部科研项目。主桥预应力筋采用 ASTM A416-87a 级高强度低松弛钢绞线,抗拉强度 $f_{PUK} = 1\,860\text{ MPa}$,设计张拉控制应力 $\sigma_k = 0.75f_{PUK}$,锚具类型为 OVM 15- 型。

1.1 主桁构造

主桁由两片桁架及下横梁、上横撑组成,上、下游桁架中心距 10.1 m;桁架由预制杆件拼装而成(主桁结构见图 1)。下弦杆节间长度为 6.5 m,除跨中合拢段和下弦杆节点块为实体矩形截面外,其余为 1.2 m×1.5 m 的箱形截面;上弦杆、拉腹杆及压腹杆为矩形实体截面。下弦杆之间及下弦杆与压腹杆之间用湿接头拼接,其余拼接面均为干接头拼接。全部湿接头采用微膨胀混凝土,干接头采用环氧树脂胶。

桥面为纵横梁分离体系,即纵梁简支于横梁上,横梁与下弦杆采用湿接头相连;上横撑为

^{*} 本文收稿日期:1997-01-24 张林光 工程师 铁道部第十四工程局施工技术处 济南 邮编:250014

1. 2×2.2 m 箱型截面,与立柱以湿接头拼接。

1.2 预应力钢束布置

上弦杆、下弦杆、拉腹杆及横梁均布置 7-7H5 钢绞线束。上弦杆共 20 束,分段束锚固在各节间杆端和立柱顶节点上,通长束穿过立柱顶(曲线半径 $R=4$ m)锚固在梁端和跨中节点。拉腹杆布置 6 根直线束,锚固于上、下弦杆节点处。下弦杆除布置有 2 束通长束外,在梁端和跨中部位分别布置 4 束短束。端横梁布置 2 束,其他横梁为 1 束钢绞线,锚固于下弦节点处;上横撑布置 6 束,锚固于立柱外侧。主桁钢束布置见图 2。

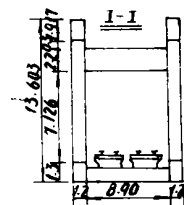
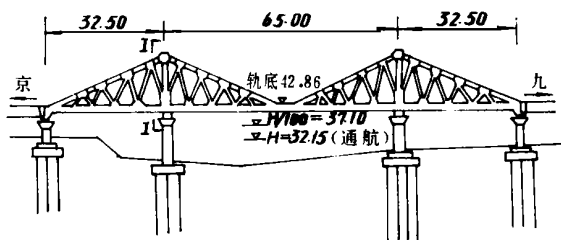


图 1 主桁结构图

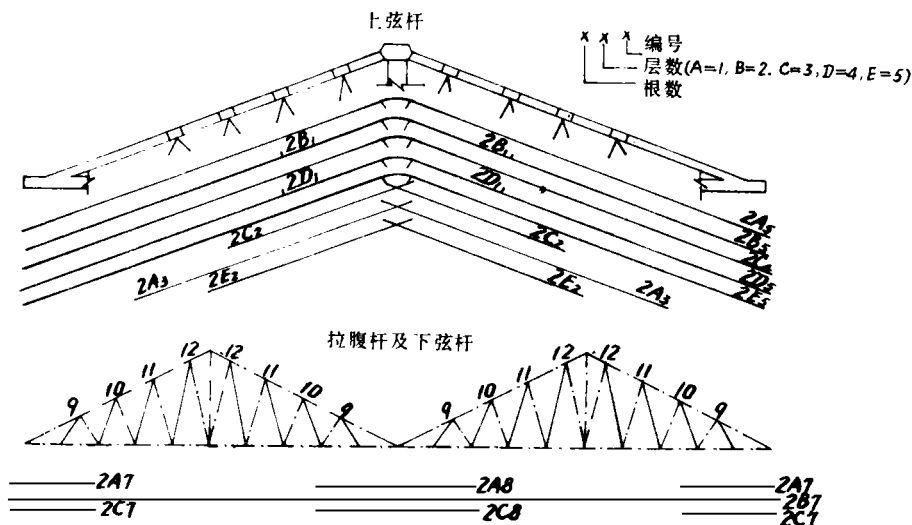


图 2 主桁预应力钢束布置图

1.3 工程特点

该桥与其他预应力桥梁结构相比有一定的特殊性,整个桁梁预应力形成空间结构,单个杆件张拉后在其他杆件易形成次应力,施加预应力后产生的预应力效能较难控制,各束钢绞线的张拉顺序至关重要;张拉吨位大,数量多,孔道长,上弦杆通长束长 73 m,下弦杆通长束 130 余

为保证桁梁达到设计的预应力效能,针对上述特点进行了多项工艺试验研究,并且由铁道部科学研究院对施工过程进行监测,许多施工技术问题经过工艺试验及试张拉监测结果达到预定效果后才进行正式张拉施工。1996年4月完成了桁梁动、静载试验,试验结果表明预应力张拉效能达到了设计要求。

2 结构施工

2.1 杆件预制

根据桁梁结构特点及杆件拼装精度要求,将主桁两片桁架分四个三角桁片整体放样,平卧预制。预制场地硬化后将整个三角桁片按 1: 的比例放样,根据大样制做预制台座,台座顶面用水泥砂浆抹平作为杆件底模。侧模采用酚醛树脂胶合板制作。为保证干接头拼接面杆件尺寸吻合,相互拼接的两个杆件逐杆预制,以先预制的杆件作为后一杆件拼接面处的模板,从而使两杆件拼接后完全密贴。为保证杆件预应力孔道位置正确,根据桁梁预应力孔道特点,不同部位的孔道分别使用了波纹管、抽拔橡胶棒、抽拔钢管、无缝钢管和硬纸筒五种制孔材料。

2.2 杆件拼装

自立柱向两侧对称悬臂拼装。在桥位两侧各设一个拼装栈桥,栈桥上设龙门吊和工作平台,杆件起吊后干接头涂胶、定位、临时固定、穿束张拉、压浆。每个节间的拼装过程如下:下弦杆吊装初定位→吊装压腹杆初定位→吊装上弦杆试拼装,直至符合拼装精度→吊出上弦杆涂胶,再吊装对位→张拉上弦杆钢绞线→浇筑压腹杆湿接头混凝土→下弦杆定位→吊装拉腹杆,试拼符合拼装精度→吊出拉腹杆涂胶,再吊装对位→张拉拉腹杆预应力筋→浇筑下弦杆湿接头混凝土→横梁对位→接头钢筋焊接、立模浇筑接头混凝土→张拉横梁预应力筋→架设上一节间纵梁→移出工作平台,进入下一节间拼装。

3 预应力施工

3.1 预应力孔道成孔方法

预应力孔道设计采用 H65 mm 镀锌波纹管。经工地多次试验和比较波纹管与抽拔橡胶棒的优缺点(波纹管易损坏漏浆,接头连接不易密封;抽拔橡胶棒在孔道密集、重叠交叉时易出现串孔现象),结合各杆件孔道设计位置,拉腹杆及上弦杆采用抽拔橡胶棒,下弦杆与横梁连接处孔道及部分上弦杆孔道采用波纹管;由于立柱顶节点孔道十分密集,且孔道位置准确性要求较高,故顶节点除 2号、3号预应力孔道采用波纹管外,其余均采用埋设预弯钢管。下弦杆除端节点处为曲线孔道外,其余皆为直线孔道,且下弦杆预应力筋长达 130余 m,为保证下弦杆 6号预应力筋孔道拼装后顺直,该孔道直线部分采用抽拔钢管成孔,7号、8号孔道采用波纹管成孔。

3.2 穿束

该桥全部钢绞线均采用人工穿束。对于横梁及较短的上弦杆节段束,可用人力从一端送

入,对于上、下弦通长索,由于孔道阻力较大,在编束时可把中心一根钢绞线加长一倍,用作引线,穿束时先将引线穿入孔道,前端人力拉动引线,后端用力送入。为减少钢绞线与孔道的摩阻力,在钢绞线的端部加圆包头,圆包头采用圆钢加工而成。当用引线穿束时,引线应和其余6根钢绞线及圆包头焊在一起,采用氧气焊较好,不宜将钢绞线熔断,钢绞线下料时适当留出3~4 cm的焊接长度,穿束后将焊接部分切除。

拉腹杆的穿束:由于拉腹杆倾角较大,钢绞线穿入后容易滑落。穿束时可在上弦节点处穿入,下端露出后用小方木顶住,上端安装好锚板、上好夹片,靠夹片将钢绞线固定住,然后取下支顶方木,安装下端锚具。

3.3 张拉顺序

为使杆件在预施应力时对称、均匀、准确地承受预压应力,避免杆件侧向弯曲、扭转或产生次应力等现象发生,对一个杆件上多束钢绞线应合理、有次序地分批张拉。同时为减小孔道摩阻损失,除拉腹杆外,其余杆件均采用两端张拉。经研究,确定各类杆件张位顺序如下:

横梁:横梁布置预应力钢束较多(10~23),大多数为曲线布置,张拉后在梁体上引起较大拉应力,且梁端与桁片固接而引起桁片在立面内扭转。为消除这种不利影响,横梁钢束分三批张拉:第一批在预制场张拉,以承受吊装时梁体自重;第二批当湿接头混凝土强度达设计强度的75%时张拉;第三批在纵梁架设后张拉。

拉腹杆:拉腹杆共6束钢绞线。由于拉腹杆截面面积较小(0.88×0.6 m),6束钢绞线张拉后产生的压力达740多吨,为防止拉腹杆在施工过程中失稳,施加预应力应逐步进行,6束钢绞线分三批张拉,第一批在拉腹杆拼装时张拉2束,第二批当横梁拼装完毕后张拉2束,剩余2束在合拢前张拉。

上弦杆:上弦杆共20束钢绞线,其中10束为节段束,除第一节间上弦杆外,每拼装一根上弦杆张拉一部分。张拉时皆对称于截面轴线进行,以防止杆件产生偏压或扭转。其余10束为通长索,在合拢段和端节点处两端张拉,上弦杆通长束张拉时既要对称于杆件截面,上、下游桁片也要对称进行,同时相对于立柱也对称进行。上、下游侧桁片共40束上弦通长索,为减少设备一次投入量,通过对张拉顺序进行粗略分析和研究,采用6台千斤顶来实现对称张拉施工,具体方法如下:上、下游侧交替进行,每次张拉2束。首先在上游侧8号墩三角桁片端节点及合拢段处各安装两台千斤顶,在7号墩三角桁片上的端节点处安装2台千斤顶,张拉至设计应力的50%,由于7号墩桁片只进行了一端张拉,可利用合拢段处的两台千斤顶于合拢段处张拉至50%,这样,上游侧两束上弦杆通长索张拉应力达到50%。然后将千斤顶移至下游侧,以同样方法张拉两束至设计应力,再返回上游侧将已张拉50%的2束张拉至设计应力,经过一次反复,完成了上、下游侧各2束上弦杆通长索的张拉,经5次上述循环,即可实现上弦杆通长索的对称张拉,且每次张拉的2束钢绞线均对称于上弦杆截面中心进行。

下弦杆:下弦杆7~8号束可采用4台千斤顶对角张拉,每次张拉两束。下弦杆6号通长索每侧2束,张拉时也采用上、下游侧交替进行的方法,将4台千斤顶安装在上游侧的两个端节点处,张拉至设计应力的50%,移至下游侧张拉至设计应力,然后返回上游侧张拉至设计应力。

3.4 张拉

采用 OVM15- 锚具及 YCW150 型千斤顶的张拉程序是: $0 \rightarrow$ 初应力 (作伸长标记) \rightarrow 张拉至控制应力 \rightarrow 静停 5 分钟, 测伸长值 \rightarrow 千斤顶主油缸回油, 锚紧夹片 \rightarrow 千斤顶回程油缸进油, 退出工具锚 \rightarrow 取下千斤顶, 测夹片外露量

张拉方法: 钢绞线张拉采用一次张拉到设计应力和多次 (两次或三次) 张拉达到设计张拉应力两种方法。由于千斤顶活塞最大行程为 20 cm, 当钢绞线总伸长量大于 20 cm 时, 要进行两次或三次张拉。具体张拉步骤如下:

(1) 两端千斤顶主油缸同时进油张拉到初应力, 测千斤顶活塞伸出量。采用两端张拉时应同步进行, 速度一致

(2) 两端同步张拉。若千斤顶活塞行程不够, 当伸出一定值 (19~20 cm) 时, 主缸稳压, 测活塞伸出量, 记录油表读数, 主油缸缓慢回油至油表读数为零, 锚住钢绞线, 将活塞打回, 退出工具锚夹片, 调整千斤顶, 重新安装好千斤顶及工具锚, 两端同时张拉至回油时的读数, 记录活塞伸出量, 继续张拉至设计张拉应力, 测活塞伸出量

(3) 计算钢绞线伸长量, 钢绞线伸长量等于活塞总伸出量减去初始量。若伸长量不足, 应加大张拉力, 使钢绞线伸长值满足计算要求

(4) 传力锚固。先使一端千斤顶主油缸回油, 使夹片锚住钢绞线, 观察另一端油表读数是否下降, 若读数下降, 再行调整张拉力至设计要求后主油缸回油。经测试, 千斤顶回油顶锚时, 回油速度缓慢进行较好, 慢慢回油可减少钢绞线回缩量。经铁道部科学研究院协作, 用钢弦应变仪做了传力锚固过程中应力损失试验, 千斤顶主缸快速回油比缓慢回油时压应力损失增加 0.1~0.2 MPa, 说明快速回油锚固时钢绞线回缩量较大。

(5) 检查数据, 如数据有疑问, 则需重新张拉。正常时可拆移千斤顶, 张拉下一束钢绞线。拆移千斤顶后测夹片外露值, 并观察有无滑丝现象。若无滑丝, 则限位板凹槽深度 (5 mm 或 5.5 mm) 减去夹片外露值即是钢绞线回缩量, 采用 OVM 型锚具, 钢绞线回缩量一般小于 5 mm, 符合设计要求 (设计时钢绞线回缩量按 5 mm 考虑应力损失)。

滑丝、断丝情况及处理: 在张拉过程中, 有时出现个别钢绞线滑丝或断丝现象, 而传力锚固后尚没发现有滑丝情况。张拉过程中滑丝是由于工具锚的夹片齿牙被钢绞线挤平, 致使工具锚卡不住钢绞线而发生滑丝现象 (当发生滑丝时, 可以清楚地听到“咔、咔”的响声, 这说明钢绞线在滑动)。这时必须更换新夹片。若钢绞线滑动量不大, 更换夹片后可继续张拉到设计应力, 七根钢绞线应力状态差别不大, 总应力仍符合设计要求。若滑动量较大时, 钢绞线应力有较大的差别, 这时可将滑丝的夹片取下, 只张拉其余几根钢绞线至设计应力 (要注意这几根钢绞线的控制应力及油表读数按设计应力重新计算), 然后将滑丝的钢绞线重新张拉至设计应力。

断丝一般发生在工具锚夹片处, 经多次断丝情况分析, 是由于夹片制造尺寸不合适或安装不正确造成的, 当钢绞线达到一定应力时, 夹片将钢绞线夹持过紧, 夹片齿牙夹持钢绞线的刻痕较大, 削弱了钢丝截面而造成断丝。断丝较多发生在张拉至设计应力的 70~80% 时, 断丝时可以听到较响的“嘭、嘭”声, 观察钢绞线的端部可见有 1~2 丝弹出 2~3 cm, 破断面均在夹片刻痕处, 并呈 45° 斜面断裂。断丝后工作锚处发生抽丝 (即钢丝滑入孔道) 现象, 滑丝量一般在 10

cm左右

断丝处理:若断丝数量 1~ 2丝,因断丝内滑损失甚少,不影响预应力筋的总应力,这种情况可更换夹片后继续张拉至设计要求的总应力,不再处理;若断丝三根以上时,需更换新束,更换方法是:用氧气乙炔焰沿轴向把锚圈切割开,使锚具失效,在钢绞线应力失效后,从另一端抽出,穿入新束。

3.5 钢绞线张拉力控制及预应力效能分析

影响张拉精度的因素较多,主要有张拉设备的精度、孔道摩阻系数设计值与实测值的偏差、张拉操作方法及相邻钢束张拉先后顺序的影响。为消除张拉设备对张拉精度的影响,张拉设备定期进行校验和标定。千斤顶校验在现场进行,校验时的承力设备为精密加工的丝杠;而孔道摩阻系数的影响应在张拉前进行孔道摩阻系数测定,根据实测系数进行张拉力调整。

3.5.1 杆件孔道摩阻系数测定

为拼装时预应力张拉准备必要的资料,杆件移位前在预制场进行孔道摩阻系数的现场测定。抽拔橡胶棒成孔的摩阻系数测定选在第一节间拉腹杆(二十八号杆)进行,波纹管成孔的孔道摩阻系数在横梁上进行。

(1)正摩阻损失的测定:安装好测试设备后,两端千斤顶同时张拉至设计张拉力,然后回油使油表指针归零,检查设备情况。在千斤顶、传感器、孔道等对中的情况下,使一端为张拉端,另一端为固定端,按张拉力的 $1/4 \sim 1/5$ 为一级,逐级张拉,当张拉端达到某级张拉力时,同时测得张拉端和固定端传感器的力值分别为 P_k 和 P_a ,则正摩阻损失率为:

$$K_L = P_k - P_a \div P_k$$

(2)反摩阻损失的测定:当正摩阻损失测定后,张拉端的油顶回油,使张拉力均匀缓慢下降,当张拉力下降到某一临界值 P_Y 时,固定端传感器张拉力值开始下降的瞬间,两端传感器读数差等于反摩阻损失值,

$$K_Y = P_A - P_Y$$

直线孔道偏差系数 K 由下式求出:

$$K = \frac{\ln(P_k \div P_a)}{X}$$

式中 X — 孔道长度 (m),

$\ln(P_k \div P_a)$ — 各次读数分别计算出 $(P_k \div P_a)$,取平均值,求自然对数。

曲线孔道摩阻系数 μ — 测试结果按下式计算:

$$\mu = [\ln(P_a \div P_k) + K_X] \div \theta$$

式中: θ — 从张拉端至计算截面曲线孔道切线的夹角之和,以弧度计,

K_X — 已测知的直线孔道数据。

测定结果如下:

波纹管孔道: 直线孔道偏差系数 $K = 0.00106$; 曲线孔道摩阻系数 $\mu = 0.328$;

抽拔橡胶棒孔道: 直线孔道偏差系数 $K = 0.004$; 曲线孔道摩阻系数 $\mu = 0.35$

3.5.2 计算钢绞线理论伸长值

本桥预应力筋张拉力控制采取张拉力和钢绞线伸长量双控,张拉前应先计算钢绞线理论伸长值,以张拉力控制为主,钢绞线伸长量作为校核,使理论计算伸长值与实测伸长值相符。为使钢束张拉伸长值真正起到校核预施应力的作用和目的,首先应考虑如何计算出比较正确的理论伸长值。以往采用的是钢束平均应力法,此法计算结果是近似值,而且没考虑钢束在千斤顶内和锚具内的伸长值,该方法对于一般预应力结构进行计算是可以的,而该桥钢束较长,且部分孔道为空间曲线,采用这种方法计算误差较大,为求得精确理论计算值,我们采用如下较精确的计算方法(计算图式见图 3)。

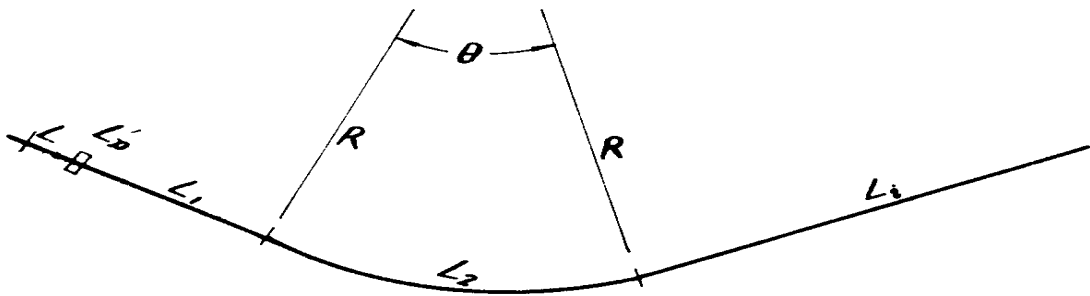


图 3 钢束伸长值计算

(1) 钢绞线在孔道内拉伸值: 钢绞线在孔道内一般分为斜直段、曲线段、平直段,张拉时同时受到张拉力和孔道摩阻力,钢绞线沿孔道长度各点的应力皆不相同,它与孔道长度成函数关系,为计算准确,将整个孔道内钢绞线分段计算。设某段钢绞线长度为 L_i ,锚下控制应力为 σ_1 ,该段钢绞线上任意一点 i 的应力为:

$$\sigma_i = \sigma_1 e^{-(\theta + KL_i)}$$

式中: L_i 为 i 点距孔道起点钢绞线长度 (m),则该段钢绞线在应力 σ_i 作用下的拉伸值为:

$$\begin{aligned} W &= \int L' \frac{\sigma_i}{E_g} dL = \int L' \frac{\sigma_1 e^{-(\theta + KL_i)}}{E_g} dL \\ &= \frac{\sigma_1}{KE_g} [e^{-(\theta + KL_i)} - e^{-(\theta + KL'_i)}] \end{aligned}$$

式中: σ_1 — 锚下控制应力 (MPa);

K — 直线孔道偏差系数;

μ — 孔道摩阻系数;

θ — 第 i 段钢绞线终点至孔道起点转角之和 (rad);

W — 第 i 段钢绞线伸长量;

L — 第 i 段钢绞线起点至孔道起点钢绞线长 (m);

L' — 第 i 段钢绞线终点至孔道起点钢绞线长 (m);

E_g — 钢绞线弹性模量,一般取 $E_g = 190 \sim 200$ GPa

(2) 钢绞线在锚具外的拉伸值: 钢绞线在锚具外不受摩阻力影响,其应力为千斤顶直接施加的拉应力,这段钢绞线的拉伸值为:

$$W_b = \frac{e_o}{E_g} L_o$$

式中: e_o — 钢绞线在锚具外的控制张拉应力 (MPa),

L_o — 千斤顶工具锚至工作锚外钢绞线长 (m),

E_g — 钢绞线弹性模量,一般取 $E_g = 190 \sim 200$ GPa

(3) 钢绞线在锚具内的拉伸值:按下式计算

$$W_o = \frac{1}{2E_g} (e_o + e_i) L'_o$$

式中: σ_i — 锚下控制应力 (σ_K), $\sigma_K = \sigma_o$ — 锚口摩阻损失。

L'_o — 锚具内钢绞线长 (m)

(4) 钢绞线总伸长量:

$$\Delta = \delta_o + \delta'_o + \sum_{i=1}^n \delta_i$$

当两端张拉时, δ_i 从孔道起点计算至钢绞线一半长, Δ 为钢绞线之半伸长量;当一端张拉时, δ_i 从孔道一端逐段计算至另一端,此时钢绞线总伸长量应为:

$$\Delta = 2(\delta_o + \delta'_o) + \sum_{i=1}^n \delta_i$$

3.5.3 张拉力修正

杆件预制时预应力孔道成孔方法有抽拔橡胶棒、波纹管、预埋钢管及抽拔钢管等多种方法,对每种方法形成的孔道都进行孔道摩阻系数的现场测定。上弦杆通长索孔道为多种成孔方法形成的混合孔道,张拉前对上弦 4 号通长束也进行了现场测定。为保证张拉质量,用实测的孔道摩阻系数来修正设计张拉力,修正公式采用下述方法导出:

假定设计张拉应力为 $\sigma_{K\text{设}}$,设计孔道摩阻损失为 $\sigma_{s\text{设}}$,实际发生的孔道摩阻损失为 $\sigma_{s\text{实}}$,则修正孔道摩阻后的实际张拉应力 $\sigma_{K\text{实}}$ 为:

$$\sigma_{K\text{实}} = \sigma_{K\text{设}} - \sigma_{s\text{设}} + \sigma_{s\text{实}} \quad (1)$$

由式 (1)得:

$$\sigma_{K\text{实}} = \sigma_{K\text{设}} - \sigma_{s\text{设}} \left(1 - \frac{\sigma_{s\text{实}}}{\sigma_{s\text{设}}}\right) \quad (2)$$

孔道摩阻损失 σ_s 通常用给定的摩阻系数 U 与张拉应力 σ_K 的乘积计算。但 σ_K 是有效应力与各项应力损失之和,这个值在各项应力损失没有确定之前也不能确定,需要采用逐步逼近的办法,但又太繁杂,为简化计算,并偏于安全方面考虑,在设计书中令:

$\sigma_K = 0.75R_{ly}$ 即假定 σ_K 达到最大控制应力。据此计算的摩阻损失为:

$$\sigma_{s\text{设}} = U_{\text{设}} \cdot \sigma_K = U_{\text{设}} \times 0.75R_{ly}$$

实际上 σ_K 总是小于 $0.75R_{ly}$,故我们在求实际摩阻损失应力 $\sigma_{s\text{实}}$ 时,不再把 $0.75R_{ly}$ 当成 $\sigma_{K\text{实}}$,而是选用更为接近实际的 $\sigma_{K\text{设}}$,

即: $\sigma_{s\text{实}} = U_{\text{实}} \cdot \sigma_{K\text{设}}$,代入 (2)式可得:

$$\sigma_{K\text{实}} = \sigma_{K\text{设}} - \sigma_{s\text{设}} \left(1 - U_{\text{实}} \frac{\sigma_{K\text{设}}}{\sigma_{s\text{设}}}\right) \quad (3)$$

$$\text{令: } (1 - U_{\text{实}} \cdot \frac{\sigma_{\text{K设}}}{\sigma_{\text{S设}}}) = \gamma \quad (4)$$

γ 称为锚下应力修正系数, 则式 (3) 可写为

$$\sigma_{\text{K实}} = \sigma_{\text{K设}} - \gamma \cdot \sigma_{\text{S设}} \quad (5)$$

由式 (5) 可以看出, 实际张拉控制应力等于实际张拉应力减去设计中的孔道摩阻损失应力乘以修正系数。

式 (4) 中的 $U_{\text{实}}$ 实用下式计算:

$$U_{\text{实}} = 1 - e^{-(\theta + KL)}$$

式中: K —实测直线孔道偏差系数;

θ —实测曲线孔道摩阻系数;

L —孔道长度 (m);

θ —孔道曲线转角之和 (以弧度计)。

实际张拉施工时, 经铁科院采用钢弦应变仪测试, 张拉后杆件内压应力与理论计算值很接近, 施加的预应力效能较好。

3.5.4 主桁杆件预应力效能分析

本桥设计为全预应力混凝土结构, 即在主要荷载组合下, 截面混凝土不允许出现拉应力。对于这样一种多根杆件交于一点的超静定杆系结构, 其预应力效应, 是施工过程中十分关注的问题。特别是跨中截面, 需要张拉通过跨中截面的多根预应力钢束, 它们的预应力效应对跨中截面乃至整个结构的安全与可靠有十分重要的影响。

在主桁杆件悬臂拼装过程中, 为了减少拼装时由于张拉预应力钢束而在结构中产生的次内力, 采取了一些特殊措施。在结构合拢前, 张拉上弦杆和拉腹杆预应力钢束所产生的次内力是比较小的, 预应力效能也较好。张拉通过跨中节点的预应力钢束对跨中段杆件内力的影响以及其他杆件的预应力次内力见表 2。

由表 2 可以得到以下结论:

(1) 张拉上弦杆通长束时, 上、下弦杆都受压, 上弦杆的有效预应力为张拉控制力的 80% ~ 90% (除二十一号为 55%) (2) 张拉下弦杆通长索时, 上、下弦杆也都受压, 下弦杆有效预应力为张拉控制力的 90% 左右 (3) 张拉下弦杆跨中局部预应力索时, 九、十号下弦杆有效预应力占张拉控制力的 84% 和 76%。 (4) 合拢后张拉跨中预应力钢索, 对跨中处的上、下统 (十、二十一号杆) 及拉、压腹杆 (三十七、三十八号杆) 内力状态影响较大, 远离跨中的杆件, 其预应力次内力也小 (5) 由于张拉跨中预应力钢索引起的远离跨中杆件杆端次弯矩不大, 而跨中截面却产生很大的预加力付负弯矩。因而, 合理调整合拢后预应力钢索的张拉顺序及设计吨位, 能够得到跨中截面较合理的应力分布。

表 2 张拉预应力钢束引起的杆件内力变化表

项 目	杆件号	张拉吨位 (t)	预应力引起的内力变化			
			$N(t)$	$M(t, m)$	$M(t, m)$	$(7) = \frac{(4)}{(3)}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
张 拉 上 弦 杆 通 长 束	—	……	29. 0	6. 8	32. 1	
	五		18. 5	4. 2	5. 5	
	六		15. 5	7. 7	3. 0	
	十		86. 2	42. 6	— 118. 5	
	十一		205. 2	— 134. 8	— 162. 0	
	十二	210. 050	175. 7	6. 4	5. 2	0. 84
	十三	210. 050	187. 7	0. 3	2. 8	0. 89
	十四	210. 050	186. 7	2. 7	0. 9	0. 89
	十五	210. 050	188. 8	2. 1	— 0. 3	0. 88
	十六	210. 050	184. 1	0. 7	0. 6	0. 86
	十七	210. 050	184. 0	1. 6	0. 5	0. 88
	十八	210. 050	180. 7	0. 1	1. 7	0. 86
	十九	210. 050	177. 4	1. 2	1. 9	0. 84
	二十	210. 050	168. 0	3. 0	— 1. 1	0. 80
	二十一	210. 050	116. 2	13. 0	— 19. 5	0. 55
	二十二	……	13. 5	5. 2	— 1. 7	
	三十八		47. 6	— 8. 2	12. 0	
张 拉 下 弦 杆 通 长 束	—	173. 382	153. 90	— 6. 0	— 16. 5	0. 89
	二	178. 382	156. 7	— 17. 8	— 6. 5	0. 90
	三	178. 382	160. 4	— 7. 9	— 6. 1	0. 93
	四	178. 382	161. 0	— 6. 8	— 4. 4	0. 98
	五	178. 382	161. 5	— 4. 4	— 3. 1	0. 98
	六	178. 382	160. 2	— 5. 6	— 3. 6	0. 90
	七	178. 382	156. 1	— 4. 2	— 5. 7	0. 86
	八	178. 382	149. 4	— 6. 2	— 4. 6	0. 75
	九	178. 382	129. 4	— 3. 7	— 19. 1	0. 61
	十	178. 382	105. 4	— 24. 0	99. 8	
	十一	…	170. 1	118. 7	137. 7	
	二十一		70. 3	— 10. 3	19. 7	
	二十二		— 5. 3	0. 2	— 1. 5	
	三十八		— 33. 1	1. 8	— 3. 3	
张 拉 下 弦 杆 局 部 束	九	397. 762	336. 1	— 4. 1	— 49. 6	0. 84
	十	397. 762	802. 7	— 52. 9	115. 3	0. 76
	十一	…	389. 0	110. 3	165. 5	
	二十一		39. 1	7. 2	— 21. 0	
	二十二		96. 7	— 20. 5	24. 1	
	三十八		— 48. 8	— 1. 5	— 3. 0	

4 孔道压浆

4.1 水泥浆质量标准

制作水泥浆的水泥应使用 52 号硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥,并筛除硬块或杂物。由于火山灰水泥、矿渣水泥及粉煤灰水泥凝固慢、泌水性大,不宜使用。水泥浆的水灰比在 0.4~0.45 之间,由于普通水泥浆凝固后要收缩而脱离孔道,可掺加膨胀剂,一般掺加铝粉效果较好,其掺量由试验确定,控制灰浆膨胀率在 5%~6%。水泥浆中可掺加缓凝、减水作用的外加剂,外加剂掺量由试验确定。为防止对钢绞线的腐蚀,严禁掺各种氯盐(氯化钠、氯化钙等)。

4.2 排气孔的设置

对于立面上有弯曲的纵向孔道,杆件预制时应在最高点设置排气孔。每个上弦杆通长索孔道在顶节点处设置 3 个排气孔,于最高点设置一个并向上引出,距最高点两侧各 1 m 处设置水平引出的排气孔。由于上弦杆通长孔长达 70~73 m,在第二节间上弦杆上各增设一个排气孔并从侧面引出。下弦杆通长孔虽是水平方向的,但由于其长度 130 余 m,应在跨中合拢段处设置排气孔。排气孔在杆件预制时埋设钢管制成,不同孔道的排气孔交错布置并编号,对于上、下重叠的孔道的排气孔,则用弯管引出。所有排气管均高出混凝土表面 3~5 cm,预埋排气管直径为 16 mm,末端车有螺纹,可以与压浆嘴配合,以便必要时由此压浆。

4.3 压浆作业程序

(1) 拌制灰浆:采用 JW180 型灰浆搅拌机拌合,灰浆拌制采用连续生产的方式进行,每次拌合一储浆筒,拌合时间不少于 1 分钟,待储浆筒内灰浆将要用完时,再拌一次。搅拌好的灰浆排放到储浆筒时应通过细筛。每次拌合总量应保证一个孔道能连续压完。

在压浆过程中应不断搅拌储浆筒内的灰浆,防止沉淀。

(2) 压浆作业:所有横梁、下弦杆 7、8 号束及拉腹杆采用一端压浆(拉腹杆由下向上压浆),上弦杆节段束由上弦节点向顶节点压注,通长索在跨中及端节点处同时向顶节点压注。当管路连接好后,打开全部阀门,开动灰浆泵,压力由小到大,根据管道长度增大到稳定压力,直到出口排出空气—水—稀浆—浓浆。

上弦杆通长索用两台灰浆泵同时压注,并观察顶节点处排气孔,当相应侧排气孔出浓浆后关机,用木塞将排气孔堵塞。两侧排气孔都出浓浆时,堵好排气孔,两台灰浆泵同时开动,直至最高点排气孔冒出浓浆后,用木塞堵住,使压力稳定在 1.0~1.5 MPa,保持压力 2~5 分钟,然后停机,同时关闭两端压浆嘴阀门。压浆后等一定时间,当水泥浆流动性消失后,拆除压浆嘴,拆除时先稍微扭开阀门,观察是否有灰浆“反溢”现象,如有灰浆反溢,应推迟拆卸时间,拆卸下的机具应随时冲洗干净,以备下次使用。

下弦杆 6 号束为 130 多 m 长的通长孔道,压浆前应做好充分的准备,压浆设备保持良好工作状态。除合拢段预埋的排气管外,压浆前沿孔道的不同部位又凿开孔道增设了排气管,压浆时以便观察灰浆所到达的位置,当排气管冒浆后立即用木塞堵塞,使灰浆继续前进。两端的进

浆速度保持一致,使灰浆同时到达跨中。

4.4 压浆工艺分析

为防止灰浆沉淀离析,应尽量选用较小的水灰比,一般取 0.40,最大不得超过 0.45,冬季可小于 0.40。在压注上弦杆及下弦杆通长孔道时,水灰比采用的是最大值 0.45。

为使灰浆充满孔道,应保持孔道密闭不漏浆,在压浆前压水冲洗孔道时曾发现杆件胶接缝处个别地方漏水,压浆前用环氧树脂胶堵塞后不再漏浆。压浆的进出浆口也应保持密封状态。本桥所采用的 OVM 15-7 型锚具,夹片处孔隙较大,特别是进浆端压浆时水泥浆沿反向喷出,后用水泥砂浆在压浆前一天将其堵塞,连同外露的钢绞线一起包住,效果效好。

灰浆自进浆口压入到出浆口溢出后,立即将出浆口封闭,再继续压浆使压力达到 0.6~0.8 MPa,长束孔道达到 1.0~1.5 MPa,最后封闭进浆口,这时灰浆将完全充满孔道。采用两端压浆时,当最终排气孔溢浆后,再分别开动两端灰浆泵,每端开机时都有灰浆冒出,说明两侧灰浆都已到达最终排气孔处,然后堵塞排气孔,两侧再同时开机保持一定压力,灰浆即可充满孔道。

由于孔道内灰浆具有压力,就迫使灰浆内的水分逐渐渗入结构混凝土,同时压力也就逐渐降低直至消失。因此灰浆的水灰比将有所降低,有利于阻止灰浆离析。有时灰浆受到扰动而发生离析现象,灰浆受扰动的原因是孔道内灰浆压力突变成局部旋涡而造成的,压浆后将进出浆口都封闭,使灰浆压力缓慢下降,就避免了灰浆遭受扰动。假如压浆后过早地打开进浆口阀门,此时灰浆压力尚未完全消失,就会出现灰浆自进浆口喷出,灰浆突然扰动,端部一小段孔道出现空洞现象,大大地降低了压浆质量。

Prestressed Construction of Beam with Cable-Stayed Concrete Continuous Truss for Weiyun River Extra-Long Bridge of Jing-Jiu Railway

Zhang Linguang

Fourteenth Railway Engineering Bureau, Ministry of Railways

Abstract This paper introduces the prestressed construction technique of the beam of Weiyun River extra-long bridge with cable-stayed concrete continuous truss. The construction methods of prestressed aperture of complex prestressed structures, the determination of the tensional sequence of steel cables, the methods of prestressed force control and the art for grouting prestressed apertures are discussed in detail. Calculating methods on prestressed construction are presented, and the construction works of the structures of the Weiyun River major bridge are described briefly in this paper.

Keywords Bridge of Weiyun River; beam of concrete continuous truss; prestressed construction