

南昆铁路清水河大桥预应力连续刚构主桥 施工设计

马庭林 陈克坚 徐 勇

(铁道第二勘察设计院 610031)

摘 要:介绍了南昆铁路清水河大桥主桥预应力混凝土连续刚构箱梁、墩梁结合部和空心高墩柱的构造,对主桥刚构梁体预应力体系设计中所考虑的一些问题进行了讨论。

关键词:南昆铁路 清水河大桥 预应力混凝土连续刚构 施工设计

1. 概述

南昆铁路清水河大桥位于贵州省黔西南州的兴义市与兴仁县、普安县一市两县交界处,地处云贵高原峰丛峡谷地区,清水河为南盘江支流,属山区剧烈下切河流,河谷深切呈V型。桥址处谷槽两壁陡峭,坡度约 80° ,深达百米。桥位处山高谷深,地形相对高差达430余米。东岸(南宁端)上部较缓,有宽度数十米厚度约25m的石灰华构成的平台;西岸(昆明端)坡高约100余米,边坡陡峻,自然坡约 $60^\circ - 80^\circ$,上方岩体受两组共轭“X”垂直节理切割,由于受长期的风化、溶蚀及卸荷等作用,地表岩体大都被切割,脱离母体,形成分布于西岸坡的危石。桥址处除南宁岸深谷陡崖顶部为石灰华覆盖以外,其余大部分白云岩夹泥质白云岩裸露,以薄层为主,夹中厚层。石质坚硬,岩层倾角平缓,基本承载力为0.9~1.0MPa。

线路轨底标高 $h=1\ 188.57\text{m}$,由于线路较高,桥梁工程不受水文影响。桥址所处贵州兴义地区属亚热带季风气候,多年平均气温 16.6°C ,极端最高气温 35.7°C ,极端最低气温 -4.9°C ,最大风速约 20m/s 。雨季在4~10月,旱季为11月~次年3月,多年平均降雨量为 1287.8mm 。

桥址附近地震基本烈度小于六度。

本桥按单线电化铁路设计,桥上为直线平坡,设计荷载为中一活载。

清水河大桥总体布置为 $2\times 32\text{m}$ 预应力混凝土简支梁+(72+128+72)m预应力混凝土连续刚构,设4墩2台。1号墩为矩形实体墩,2,3,4号为变截面矩形空心墩;0号台为双孔带洞T形台,5号台为挖方桥台,在2号墩及5号台各设置2个4000kN盆式橡胶支座(PTZ24000-ZX-100)。大桥从谷底至桥面高达183m,是目前我国最高的铁路桥梁,主跨128m是目前我国干线铁路上同类型桥梁的最大跨度,其4号墩柱从基顶至梁底100m为铁路桥梁最高墩。其全桥立面布置如图1。

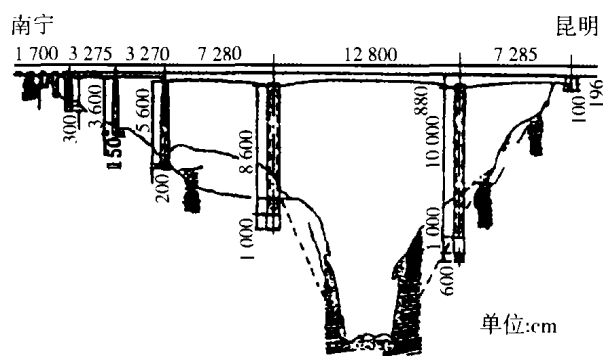


图1 清水河大桥立面布置图

清水河大桥主桥于1995年2月16日开工,1996年5月24日中跨合拢,6月6日全桥合拢,8月26日全桥铺轨架梁顺利通过。

2. 主梁结构设计

2.1 主梁构造及节段划分

主梁采用单箱单室。变高度、变截面结构,其几何尺寸的确定由梁的横、竖向刚度及某些构

造因素控制。本桥主跨128m，箱宽设计按主跨的1/20考虑，在布束计算后确定箱梁底宽6.10m，顶宽8.10m。对于主梁的高度参照国内已建成的铁路连续梁桥和国内外连续刚构桥的高跨比，初拟定梁高为8.4（0号段）~4.8m（跨中），经布束计算在0号段梁顶板布束比较困难，后将0号段梁高改为8.8m（高跨比1/14.5），中跨跨中4.4m（高跨比1/29.1）。根据有关资料的分析，连续梁桥的跨中与支点处的梁高比，一般公路桥 $h_1/h_0 < 0.5$ ，而铁路桥 $h_1/h_0 > 0.5$ ，对悬灌施工的连续刚构桥来讲，活载的跨中正弯矩较连续梁小，本桥采用 $h_1/h_0 = 0.5$ 应认为是比较合适的。顶板厚度除梁端附近区段外均为50cm，主要由预应力钢束孔道构造控置，底板厚度为40~90cm，腹板厚度为40~70cm，主要由强度及构造控制。全联在端部和支墩处共设6道横隔板，横隔板开孔洞供人行通过，主梁支墩处及跨中截面尺寸见图2。梁体下缘除中跨中部的34m和边跨端部各25.7m为4.4m的等高直线段外，其余为四曲线。圆曲线半径 $R=212.314m$ 。梁体全长273.4m。梁体采用C48混凝土。

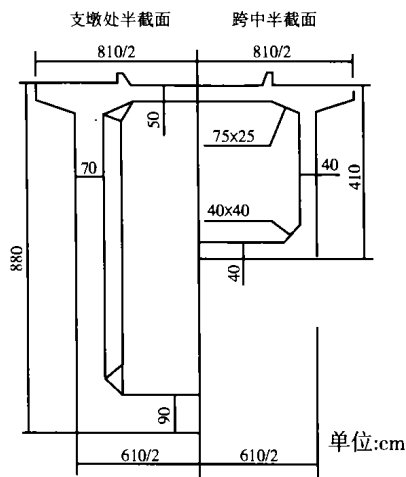


图2 主梁支墩处及跨中截面图

在考虑全梁节段的划分时，根据一般悬灌施工节段长度控制在4m以下、各节段重量不宜相差太大、且节段长度分类不宜太多的原则，悬灌节段长度分为3.0m、3.5m和4.0m三种，最重的悬灌节段重147t，最轻的悬灌节段重103t。0号段长度考虑挂篮所需的长度等因素，节段长为12m；边

跨端部节段长3.7m；合拢段为2.0m。全桥共分为73个节段，除2个墩梁连接部的0号段外，边跨19个节段，中跨33个节段，梁体的节段划分见图3。

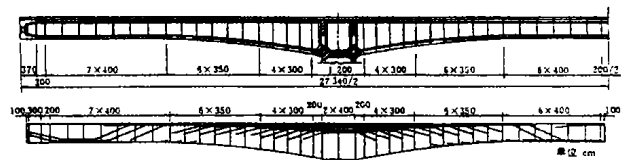


图3 梁体分段及纵向预应力束布置示意图

2.2 墩梁结合部设计

连续刚构桥是通过梁与墩的刚性连接将梁体的各种力传至墩柱，其构造与受力最复杂又最关键的部位是墩梁结合部。从目前查阅到的文献资料，国内外的连续刚构桥多以双壁墩支撑梁体，两墩壁上延伸入梁体内成为梁内横隔板。此种结构形式的墩梁结合部主要表现为由两个双壁墩在竖向传递一对梁上的反力，此种形式的墩梁结合部传力路线明确，相对墩梁结合部混凝土应力分布研究会容易一些。

经综合考虑，主墩柱采用变截面矩形空心墩（本桥的墩型选择将在下面论述），墩梁结合部设计为两个矩形箱体的正交：纵向两墩壁上延至箱体内成为两横隔板，横向两墩壁与腹板联接。该部构造如图4所示。

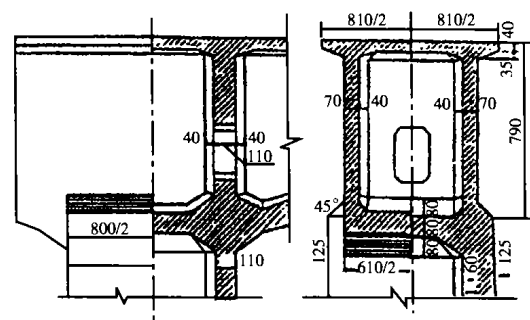


图4 墩梁结合部构造图

在墩梁结合部设计中，本桥在梁体以下的墩顶部未设实体段，因该部是两箱体的正交，梁体的各种力通过横隔板和腹板传至矩形空心墩柱的四壁，不设实体段既可使传力路线直接又最短，又减小了高墩柱顶部的质量集合，既节省了巧工又对全桥的横向刚度有利。

为了弄清墩梁结合部在施工及运营中的应力状况,应用SAP84程序采用8-21结点等参单元对该部做了在各种工况下的应力分析,同时又委托大桥局桥研院对该部做了《墩梁连结部位及部分梁体的模型试验及应力分析》,对于这部分的研究成果将做另外的专题论述。

根据计算分析和科研试验成果进行了墩梁结合部的结构设计,对一些局部应力集中区域做了构造上的处理,对在某些工况下应力较大的部位增布了钢筋或施加了预应力。

2.3 梁体预应力体系

连续刚构梁体按全预应力设计,考虑箱梁较高、较宽以及铁路活载较大等因素,通过计算决定对梁体采用三向预应力布置。

在进行纵向预应力设计时,考虑箱梁顶、底板不至于因布束困难而增大厚度,并考虑在箱梁节段划分较多的情况下,悬灌时每一节段张拉束数以及钢束在顶、底板的布置和锚固构造要求等,其纵向预应力钢束选用12-7 ϕ 5高强度、低松弛钢绞线($R_y=1860\text{MPa}$),共计240束。其中顶板束134束,底板束50束,腹板下弯束40束,边跨及跨中腹板上弯束16束。最长束长126m,最短束长12m。为防止意外,顶板预留6束备用孔道,底板在中跨预留4个备用孔道,边跨留有2个备用孔道。这样,箱梁顶、底板都可只布两排预应力钢束,顶板厚度控制为50cm,底板最小厚度为40cm。纵向预应力钢束均采用金属波纹管(内径90mm,外径97mm)成孔,两端张拉,OVM15-12型锚具锚固。设计张拉控制应力为 $0.7R_y$ 。在实际施工中由于加载龄期与设计不符,曾对部分纵向钢束张拉控制应力做了一些调整。连续刚构梁体纵向预应力钢束布置见图3。

在纵向预应力钢束布束设计时,充分考虑了施工的方便以保证施工质量。在腹板下弯束布束时,尽量考虑一根束的曲线部分分布在一个悬灌节段内,且节段之间管道连接均为直线。

由于箱梁较宽,活载在顶板中部产生较大的正弯矩,两块腹板顶与顶板固接,在此处顶板弯矩被传到腹板上,其最大值也出现在此处,适当

的布置横向预应力筋和竖向预应力钢筋均可改善此处弯矩。在顶板设置横向预应力筋能加强箱体的横向联系,可以大大减小顶板跨中和悬臂根部的弯矩,从而降低板厚。为此,在梁体顶板每0.5m设一束横向预应力筋。考虑不因横向预应力筋的布置而增大顶板厚度及施工便利,横向顶应力钢束选用与纵向预应力钢束同样的高强度、低松弛钢绞线,每束为4根7 ϕ 5,用扁形金属波纹管(内宽70mm,高19mm)成孔,张拉端与固定端沿桥纵向交替设置,单端交替张拉,扁形OVM15B-4形锚具锚固。管道采用曲线布置,如图5所示。钢绞线连同管道在绑扎顶板钢筋时安放就位。由于目前没有专门用于扁锚体系的张拉设备,本桥的横向预应力束均采用YC-20型千斤顶单根张拉。针对单根张拉时钢绞线之间由于相互挤压,其摩阻损失较大的特点,在施工中加强了编束和张拉的工艺管理,张拉时一束中的钢绞线的伸长量基本一致,达到了预期的要求。

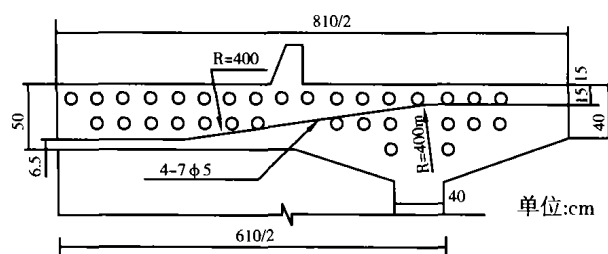


图5 横向预应力钢束布置图

横向预应力钢束的张拉控制应力为 $0.65R_y$ ($R_y=1860\text{MPa}$)。经计算分析结果表明张拉了横向预应力钢束以后,顶板,腹板及底板的内力均有所改善,特别在顶板跨中位置和腹板顶部位置改善较大,如图6所示。

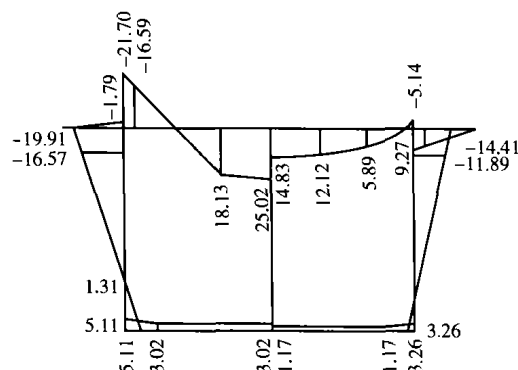


图6 箱梁顶板设横向预应力筋横框弯矩比较图

梁体腹板中采用双排冷拉Ⅳ级 $\phi 25$ 粗钢筋作为竖向预应力筋,在梁上间距为40~50cm。考虑到腹板根部的负弯矩,两排竖向预应力筋的重心布置偏向外侧。竖向预应力筋用内径35mm波纹管成孔,轧丝锚螺母顶板锚固。在施工中两排波纹管底部连通成为压浆回路,压浆管与冒浆管都布置在桥面,方便了施工。

本桥竖向预应力筋在0号段伸入墩壁3m以加强梁体与墩柱的联结。

另外,在墩梁结合部的梁体底板及局部纵向墩壁上,用冷拉Ⅳ级 $\phi 25$ 粗钢筋作为横向预应力筋对该部施加横向预应力。

2.4 梁体施工顺序

梁体施工顺序为先在3、4号墩顶搭设托架立模灌筑0号段,安装挂篮,然后用挂篮对称悬臂灌筑第1~16节段,形成两个T构,先合拢中跨,再灌筑边跨第17节段,在2号墩及5号台侧搭设托架。在托架上灌筑3.7m长的19号段,最后合拢边跨。

在中跨合拢段施工时,采用体外刚性支撑加张拉临时钢束进行锁定。中跨合拢施工在1996年5月下旬,当时夜间最低气温在26℃左右,高于设计温度。为了弥补合拢温度与设计温度差和补偿梁体后期的收缩,在锁定前,采用了顶梁措施;用两台YC60千斤顶在合拢段钢筋绑扎后将已灌梁体向外顶开,设计顶力2X500kN,顶开距离1.2cm。在最后锁定前,又用钢楔打入刚性撑杆与顶座的间隙,又撑开约0.2cm,在凌晨1时气温较低时锁定,随即灌注合拢段混凝土。

在边跨合拢并完成梁体的全部预应力束张拉后,在边跨支座处进行了竖向顶梁以测定支座反力,测定值与设计值基本吻合。

3. 主墩及基础结构设计

3.1 主墩墩型选择

由于线路较高,且受峡谷两岸陡壁稳定性的控制,连续刚构两主墩墩身高度分别为86m(3号墩)和100m(4号墩)。墩与梁的相对刚度决定两者的弯矩分配,且梁体的收缩、徐变及温度应力也与刚构墩柱抗推刚度直接相关,既要满足全桥的纵向刚度,又要尽可能地改善梁体内力分

布,因此,选择合适的墩柱纵向刚度是连续刚构设计的一个重要内容。

在确定清水河大桥主墩柱形式时,曾考虑采用双壁墩,但由于墩柱较高,其纵向刚度较小,在纵向水平力作用下,纵向位移将增大。若加大墩柱尺寸将使圬工增大,且百米高的双壁墩施工的线形控制也较难;若在5号台设固定支座,将使刚构梁体的温度跨度增加,带来一些设计上的困难,经计算分析发现:象本桥这样高的桥墩,为达到规范限制的纵向位移,双壁墩柱截面尺寸较大,其单壁纵向厚度将达4.2m,桥墩外形欠佳,基础也难做。参照国外桥梁相关资料,认为有必要进行单墩、双壁墩比较,比较结果如表1所示。

表1 单墩与双壁墩比较

项目	墩顶	墩顶	墩底	墩底	墩顶梁	墩顶	工程量 (m ³)
	最大 弯矩 (kN·m)	相应 轴向力 (kN)	最大 弯矩 (kN·m)	相应 轴向力 (kN)	最大 弯矩 (kN)	纵向 位移 (mm)	
单墩	129 770	50 970	-329 140	193 630	237 790	26	10 872
双壁墩	47 250	4 040	90 900	94 390	199 000	43	12 088

从上表可以看出,本桥采用单墩方案与双壁墩方案相比,优点在于:

(1) 墩顶偏心矩远小于双壁墩;改善了墩身控制截面的受力条件,避免了墩顶密集的钢筋;

(2) 提高了桥墩的纵向刚度,增加了悬臂灌注施工时的安全度;

(3) 增大墩侧壁到岸壁临空面的距离,有利于主墩在岸坡上的稳定;

(4) 节约工程量约11.2%;

(5) 单墩施工模板用量小,无需临时支撑,施工简便;

(6) 本桥桥址位于清水河峡谷,局部风力较大,单墩矩形空心截面抗扭能力强,有利于抵抗风力,确保悬臂施工,尤其是最大悬臂时的施工安全。

由于温度变化的影响,单墩梁体根部弯矩比双壁墩大,但考虑到单墩纵向宽度8m,弯矩峰值折减至少应在10%以上,可认为无论单墩还是双壁墩,相应梁体实际弯矩相差不大。同时,由于桥墩较高,单墩墩身外观虽显粗大,但其力学性

能仍表现为较柔，如单墩温度变化产生的内力，虽然其绝对值较双壁墩大，但其所占全部内力的比重仍较小；墩身控制截面处仅占其全部内力的8%。本桥单墩不利之处在于墩底弯矩较大，对基础地质要求较高。

综合以上因素，决定采用单墩，即矩形空心墩。大跨度连续刚构桥单墩的采用为我国同类型桥梁的桥墩设计提供了新的思路；

3.2 单墩优化

悬臂法施工的单墩连续刚构，国内尚未见报道，没有现成的经验可以借鉴，本着经济，合理的原则，有必要对单墩的设计进行比选和优化，比选和优化内容：墩顶横向宽度8.52m、8.40m、7.60m；墩身纵向宽度8m、7m；墩身横向外坡采用1:40、1:25（梁底以下30m）及1:40（基顶至梁底以下30m）的分段双坡；墩身横向内坡1:100、1:60；墩身纵向内坡1:100、0:1；墩身顶部设3m实体段或不设；墩身上延段是否延伸至箱梁顶板。经全桥结构分析、墩梁连接部位空间有限元分析及模型试验，可得出以下几点结论：

（1）本桥桥墩设计的控制要索是桥梁纵、横向刚度；

（2）桥墩上部及桥墩空心内侧壁混凝土对横向刚度的贡献相对较小；

（3）墩身外坡设置双坡可提高混凝土对横向刚度的利用率；

（4）墩身纵向内坡采用直坡，避免了因墩身纵横向内坡放坡方向不一致而给墩身施工立模、拆模所带来的困难；

（5）墩顶不设实体段，使墩身上延段仅延伸至箱梁底板，节省圬工，降低上部建筑质量，有利于主桥的横向刚度，

（6）墩身纵向宽度采用8m对抵抗悬臂施工时的不平衡弯矩更为有利。

在最后桥墩施工设计中采用如下：墩顶横向宽度7.60m；墩身纵向宽度8m；墩身横向外坡采用1:25（梁底以下30m）及1:40（基顶至梁底以下30m）的分段双坡；墩身横向内坡1:60；墩身纵向内坡0:1；墩梁连接采用两空间箱体正交连接。这样，墩身混凝土得以充分发挥效用，节约了圬工，降低了工程造价。在预应力连续刚构桥中墩

梁连接部采用两空间箱体正交连接，在国内少见报导。

3.3 主墩基础类型选择

由前面单墩、双壁墩比较可知，单墩墩底弯矩较大，若简单采用扩大基础，基础最大应力达2.94MPa，地基容许应力难以满足设计要求，故选择了地基容许承载力大，便于施工的嵌固基础，3、4号墩地基容许承载力分别达到了390 000kN、410000kN。4号墩鉴于岸坡陡峻以及实际地质情况，为了将力传至更深的岩层，以嵌岩基础作为承台，下设6根2.0mX2.0m。长6m的挖孔方桩。

3.4 主墩基础埋置深度的确定

主墩基础埋置深度受两方面因素制约：一是陡壁岸坡稳定线；二是嵌固基础距岩石陡壁外侧的距离。根据地质提供的资料，3号墩陡壁岸坡稳定线倾角为65°，4号墩陡壁岸坡稳定线倾角为60°，基础需置于陡壁岸坡稳定线以下；同时根据嵌固基础具有水平推力的特点，经计算，嵌固基础顶面距岩石陡壁的距离需大于20m。依此确定3号墩基底标高为1084.05m，4号墩基底标高为1064.08m，确保了基础结构安全。

3.5 横向刚度问题的讨论

本桥主墩墩高分别为86m、100m，其中百米高墩为目前世界上最高的铁路桥墩。控制墩身设计的要素除结构本身的强度、稳定性需要外，横向刚度控制值的选取，在一定程度上决定了墩身设计的经济性，根据铁道部有关文件规定：本桥横向刚度用横向自振周期控制，横向自振周期 $T \leq 0.011(s)$ ， L 为一联长，以m计，且 $T \leq 1.7s$ ，本桥横向自振周期 $T=1.68s$ ，满足这一要求。横向刚度用什么指标控制，国内尚无统一标准，已建成的桥梁控制指标也各不相同，对于本桥这样的高墩大跨连续刚构桥梁，用某些传统的横向刚度控制指标是否恰当？钢结构与混凝土结构的材料振动阻尼不一样，两种结构是否应有不同的标准？这些问题都值得进一步深入探讨。横向刚度问题的实质是车桥共同作用的动力问题，它与结构尺寸，约束条件、质量分布、行车条件等多种因素密切相关。保证横向刚度指标的目的在于保证行车平稳，舒适，仅仅依靠线下结构来解决横向刚度问题，可能是不经济的；能否在行车条件方

（下转第12页）

模式为空间多曲型预应力钢索的预应力摩擦损失计算模式。

3.3 正式张拉阶段钢索应力测试

为了测取正式张拉时各钢索的预应力摩擦损失和锚固损失的大小,并将正式张拉阶段长钢索的预应力损失与计算值相比较,本次试验选取了 N^{12}_i ($i=1, 2, 3$)和 N^{11}_i ($i=4, 5$)共五根钢索在正式张拉时做现场测试,该五根钢索弯曲形式相同,计算长度基本相同,贴片位置在跨中即第II截面,控制张拉力 Q_1 为1091.79kN。上节已提到根据计算, N^{11}_i 在两端张拉时跨中截面预应力损失系数计算值为 $\beta=24.3\%$, N^{12}_i 在两端张拉时跨中截面预应力损失系数计算值为 $\beta=26.06\%$,现将该五根钢索正式张拉时的有关数据列于表13。其中 Q_2 为钢索两张拉端拉力均达到控制拉力时该钢索跨中截面处由读数算得的拉力,预应力摩擦损失系数测量值 $\beta'=(Q_1-Q_2)/Q_1$, Q_3 为锚固结束五分钟锚固损失完成后应变片读数稳定时由读数算得的钢索跨中截面处拉力。锚固损失系数 $\beta_m=(Q_2-Q_3)/Q_2$ 。

表13 正式张拉时五钢索有关数据

序号	Q_1 (kN)	Q_2 (kN)	β' (%)	β (%)	Q_3 (kN)	β_m (%)
N^{12}_1	1091.79	844	22.7	24.3	826	2.1
N^{12}_2		861	21.1		844	2.0
N^{12}_3		829	24.1		815	1.7
N^{11}_4		821	24.8	26.06	792	3.5
N^{11}_5		817	25.2		801	2.0

从上表中可以看出,锚固损失较小,平均为2.26%,在正式张拉时,跨中截面处预应力摩擦损失系数测量值与计算值相比符合较好。实测 β' 比正式张拉前实测的 β 略有偏小,这是由于试验钢索在正式张拉前已做过一次试验张拉,使得管道内受阻状况有了改善而引起的。

3.4 结论

3.4.1通过现场张拉测试,推算得钢索在张拉阶段预应力摩擦损失计算参数 $k=0.0045$, $\mu=0.53$ 。

3.4.2工程中的空间多曲型钢索在张拉阶段的

预应力摩擦损失计算可采用本文推荐的分段求取空间曲线的空间曲率半径和空间转角,逐段累加计算预应力摩擦损失的计算模式,用这种计算模式求得的结果与实测值符合较好。

3.4.3在正式张拉阶段,由张拉钢索上所贴应变片的数据分析,最长钢索在主跨跨中的预应力摩擦损失为张拉控制应力的25.2%,所测五根的平均值为23.58%,最大锚固损失为3.5%,平均为2.26%。

(上接第17页)

面有所突破,可能是合理选择横向刚度控制指标,促使墩身设计更经济的一个思路。随着铁路大跨度桥梁的进一步发展,铁路桥梁的横向刚度问题将成为新型高墩、大跨桥发展的制约条件,因此,也会引起工程界的重视。

4. 结语

清水河大桥集深基,高墩,大跨于一体,是西南山区铁路桥梁的典型代表。从河底至桥面高达183m,是目前我国最高的铁路桥梁;4号主墩柱高100m,为目前铁路桥的最高墩;主跨128m是目前我国干线铁路上同类型桥梁的最大跨度。在一定范围内反映了我国90年代铁路桥梁的建筑水平。清水河大桥的建成使我们对铁路高墩大跨度桥梁有了新的认识,给西南山区铁路选线也提供了较大的自由度,使人们在深谷、高山、宽壑面前不再绕行,钢梁也不再是铁路大跨桥梁的唯一选择。

清水河大桥是铁道部在南昆铁路结合工点的重点科技攻关项目,由铁二院设计并实施以设计为主体的工程总承包。桥的建成是众多科技工作者与桥梁建设者智慧与辛勤劳动的结晶,在此特向参加本桥各科研子项目的同志表示感谢;在大桥的各个设计阶段,得到了许多桥梁前辈与同仁的指导和帮助,在此也向他们致以衷心的感谢。

清水河大桥主桥是在不到16个月的时间里建成的,在建桥的过程中铁十六局五处的桥梁建设者们创造了多项桥梁建设纪录;大桥局桥研院主管的武汉桥梁建筑工程监理公司(建设部甲级)担任本桥的建设监理,在建桥过程中也付出了辛勤劳动;另外,我们还得到铁道部领导、南昆指挥部领导和南昆铁路“四桥”专家组的指导与帮助,也在此表示衷心的感谢。