

小半径曲线铁路桥双T构转体施工技术研究

路艳松 李元鸿

云南省铁路集团有限公司

摘要:近年来,随着桥梁平转技术的不断成熟与创新,采取平转法设计施工的立交桥越来越多。本文以云南祥云铁路专用线茨坪村特大桥同时上跨既有铁路、高速公路桥梁双T构转体施工工程为例,对大纵坡、小半径曲线铁路桥梁双T构转体施工技术进行研究应用,为后续同类项目施工提供帮助。

关键词:铁路桥梁;小半径;连续梁;T构转体;施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.16.061

一、前言

转体桥即采用转体法施工的桥梁,其相比悬浇等施工工艺,具有更显著的优越性,特别在既有线施工中应用转体技术能很好地解决施工桥涵对既有铁路的运输干扰,确保了既有线的安全和施工安全,极大地缩短了铁路天窗时间、节约了时间和资源,经济效果显著、功效明显得到提高^[1]。目前,根据相关规定,上跨铁路干线、繁忙干线以及开行动车组列车的线路立交桥应优先采用转体方案。

二、工程概况

云南祥云财富工业园区铁路专用线项目茨坪村特大桥设计全长931.4m,其中19#~22#墩为一联(48+88+48)m预应力连续梁,主跨同时上跨既有广大铁路和楚大高速公路,连续梁以20#和21#墩为转体主墩,分别平行铁路(39m+39mT构)、公路(43m+43mT构)采用满堂支架分段现浇后转体上跨广大铁路和楚大高速公路,20#墩沿逆时针转体60.85°转体重量3341.5t,21#墩沿逆时针转体70.38°,转体重量3329.1t;采用直径1.75m,高度190mm,4000t转体支座。

三、工程难点分析

(1)茨坪村特大桥位于R=500m的左转曲线上,该半径属于II级铁路的极限半径,转体T构设计为预应力混凝土箱梁(单箱单室),桥面宽度7.07m,受接轨点标高影响,设计时采用最大的加力坡,桥梁纵坡达10.95%,桥梁施工技术复杂、控制精度要求极其严格。同时,因其上跨的广大铁路属于电气化铁路,受接触网影响,桥下净空采用极限净空7.25m,在现浇时的线形控制、预拱度控制和转体过程的标高控制都是毫米级。

(2)20#墩(铁路侧)受接触网杆影响,采用支架法现浇0~4节段,5#节段转体后采用挂篮现浇,施工中需采用贝雷梁与型钢组拼挂篮,转体前将挂篮提升0.6米,转体后将挂篮就位浇筑5#节段,并利用该挂篮浇筑合龙段。21#墩(公路侧)采用支架法现浇0~5节段,形成20#墩39+39mT构,21#墩43+43mT构后双转体施工。

(3)转体支座安装精度要求高

本桥转体支座为4000t转体支座,精度要求误差为2mm,球铰垫石钢筋必须在第二次混凝土浇筑前预埋安装完成,同时将下球铰的预埋螺栓孔精确定位于球铰垫石钢筋中。由于预埋螺栓孔的位置决定了球铰的位置,因此必须利用坐标系统精确放样。

(4)本桥20#-21#墩跨越广大铁路、楚大高速公路,行车密度较大,干扰较大,保证铁路、公路的行车安全是施工中的重点。

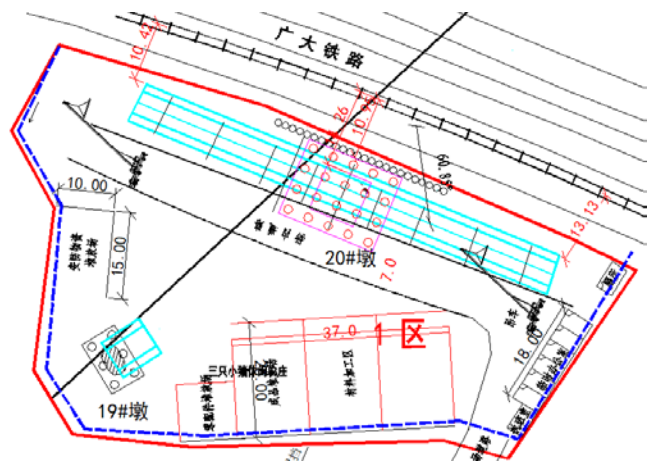


图1 转体施工与铁路位置关系图

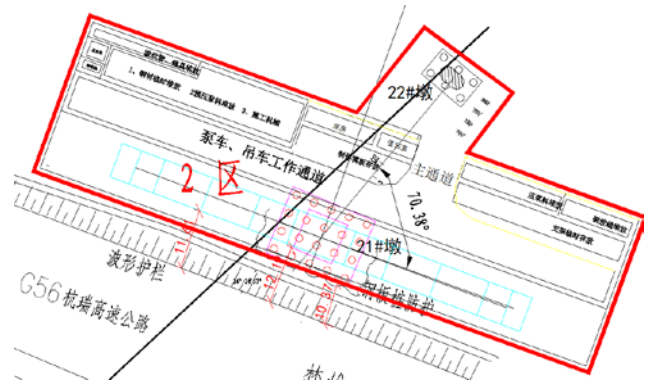


图2 转体施工与公路位置关系图

四、转体施工工艺

在转体桥承台开挖前铁路侧进行钻孔排桩的施工防护,公路侧进行钢板桩防护,现场必须加强施工管控,做好定期观测等工作,确保安全防护到位。

(一)转体系统施工

(1)浇筑下承台第一次混凝土:主桥下承台为长17.5m、宽13.9m、高4.5m的矩形结构,施工分两次浇筑,第一次需要预留5~10cm安装滑道,预埋转体支座、滑道定位骨架。

(2)滑道及滑道骨架安装:在下承台上精确放样出转体支座的中心位置,采用25t汽车吊将滑道及滑道

支承架吊装至基坑预定放样准确位置。安装完成后测量高程，通过调节螺栓进行精调，确保高程偏差1mm以内，固定调节螺栓；最后板与板之间接缝进行平整度检测、采用电子水平进行平整度检测。

(2) 浇筑下承台第二次混凝土：在砼的浇筑过程中要充分考虑到已安装的滑道的冲击力，浇筑砼时应尽可能地从中向滑道方向缓慢放料，振捣时应避免振捣器碰撞滑道以及其固定支架，下承台浇筑完成后依次进行垫石、千斤顶反力座以及牵引反力座混凝土浇筑。

(3) 安装转体支座：由于球铰安装就位后，与垫石间有30mm的间隙需要填充环氧树脂砂浆（或用高强无收缩灌浆料进行充填），并保证填充密实，因此在混凝土浇筑前，在球铰支座四个等分点上预埋四根不小于 $\Phi 20$ 的钢筋，高出垫石面不小于50mm，以用作球铰落位的支点以及精确控制转体支座高程。

(4) 安装撑脚、砂箱：撑脚是转体过程中防止出现不平衡或外力作用下倾覆的一种保险措施，本桥设8组撑脚，撑脚内灌注强度等级为C50的微膨胀混凝土。撑脚施工的控制关键点在于与滑道平面之间的间隙，设计为18mm（允许误差1mm），施工时必须严格控制。同时，转体前采用砂箱作为临时支撑，砂箱上部预埋钢板，防止混凝土直接挤压砂箱顶部砂箱内的石英砂必须经过千斤顶压实并且高度必须与转台底面至滑道顶面的高度一致，否则会失去作用。

(5) 圆形转台施工：圆形上转盘设计直径8.3m，高度0.7m，牵引索为21束牵引钢绞线，预埋于转盘内，埋入转盘长度5m以上，采用P锚固定。

(二) 牵引系统

(1) 转体参数：本桥转体重量20#墩为3341.5t，21#墩为3329.1t，经计算转动过程所需最大牵引力为139.2kN，启动时所需最大牵引力为232.0kN。

(2) 转体牵引系统：由主从随动控制液压提升千斤顶（两套4台，型号LSD-200）、50t微调千斤顶（4台）、YTB液压系统、QWIT16控制系统构成、钢绞束（2束，提前预埋于转台里，每束15— $\Phi 15.2$ mm钢绞线）、牵引反力座及微调反力座构成。

(三) 平衡系统

平衡系统主要由撑脚、滑道、四氟滑板、桥面的配重、大吨位千斤顶以及梁体结构本身构成。本桥梁体本身的结构设计转体支座中心向曲线内侧偏心20cm，以0#节段中心线向曲线内侧偏移20cm为中线的理论平衡。但由于桥梁线型设计存在纵坡以及施工误差的因素影响，梁体本身是不平衡的，需要用外力来辅助，消除部分不平衡力矩。

(1) 撑脚：又称“转体保险脚”，也是平衡系统中的一个重要构件。转体时8只撑脚必须确保其中一只要落地，撑于滑道上，与球铰一同形成两个转动支撑点，可以确保桥梁转体的平稳性。

(2) 滑道：本身是一个支撑平台，主要撑到转体时撑脚的荷载。

(3) 四氟滑板：是一个较小动摩擦力的辅助构件，转体时置于撑脚下方，随撑脚一同滑动。

(4) 大吨位千斤顶：是桥梁称重设备，主要是通过测量得出桥梁结构本身的不平衡力矩，以确定配重的数量和位置。

(5) 配重：是转体平衡系统的外部加载构件，作用是减小桥梁的不平衡力矩，以减小转体时撑脚的摩擦力。

五、转体施工准备

(一) 转体前上跨铁路前安全措施

(1) 完成方案报批，签订施工安全配合协议，并按铁路局的要求设置驻站防护、现场防护。确保施工期间行车安全。

(2) 转体前清除梁面杂物，完成梁体两侧防撞护栏施工，并按设计要求完成防抛网设置，防抛网高2.2m。

(3) 制定防护人员的进出通道。封锁端两侧的防护员均从东侧铁路位置进入，到达指定封锁点位置，解除封锁点后同样从该位置撤离。

(二) 转体前上跨高速公路安全措施

(1) 编制连续梁转体施工上跨高速公路保通方案，报高速公路管理部门审批后，批准公路施工作业；按照《道路交通安全法》的规定，通过多作方式发布信息，提前向社会公告。

(2) 成立保通领导小组，施工前与交警、路政、管理处、项目业主单位、监理单位成立信息联动工作小组，确保上路施工时的信息畅通工作；

(3) 根据施工要求设置标志牌，邀请管理处、交警、路政等部门对现场标志标牌进行验收，如有不完善的情况及时进行调整、增加、完善。

(三) 转体称重前的准备

(1) 完成上部防护和附属等工程，拆除箱梁现浇支架，解除全部临时荷载，使球铰的受力恢复到设计重量。同时，为便于就位后调整桥梁姿态，须在解除临时锁定前在T构梁端及0#节段横桥向断面设置标高观测点。

(2) 分两组对称拆除砂箱，清理滑道并铺设四氟乙烯滑板，之后在其下表面涂抹硅脂油。

(3) 解除上下球铰的锁定装置，顺序如下：先解除沿桥梁纵向轴线小里程端的约束，再解除沿桥梁纵向轴线大里程端的约束，之后解除横桥梁向左侧的约束，最后解除横桥梁向右侧的约束，每次解除是均需对下球铰、撑脚进行应力测试，同时也要对梁端位移进行应力测试。

(四) 称重及配重

通过称重和配重使梁体实际重心向大里程一侧偏移50mm，使转体前进端（大里程）一侧保持14mm的上扬，小里程一侧对应位置的撑脚“着地”，即与滑道接触，产生稳定力矩，保证转体的稳定性。施工时要在理论计算的基础上，结合现场实测数据情况，通过最终确定的参数计算平衡配重，确保转体安全完成。

六、试转

试转前按方案完成转体牵引系统安装调试；同时，安装超转限位装置，防止由于转动体的惯性难以控制，

会造成转体角度超过设计角度。

（一）试转目的

在正式转体前要进行试转，借以验证整个转动体系和指挥系统的运作情况，以便发现问题及时处理。其主要目的一是要观察转体设备的运行情况是否正常；二是发现转体设备运行过程中的人员配合及实际运行的情况，平稳性；三是测得转动惯性制动距，以便于转体时可以较准确地判断梁体制动距离^[2]。

（二）试转程序

试转要按照正式转体的程序进行。试转的角度、距离根据现场情况而定，一般试转至不影响行车安全的临界位置。试转的步骤与正式转体相同，要进行启动（自动）、点动两个阶段的测试。试转前卸除砂箱，并确保撑脚下部无杂物；同时打磨滑道，清理滑道面上所有物件，打磨至露出新面。

（三）时间推算

考虑连续梁T构转体的平稳和安全，根据规范规定，设计角速度为不大于 $0.02\text{rad}/\text{min}$ （ $1.15^\circ/\text{min}$ ）。核定转动角度和梁端转动距离，是为更好的确定转动时间，为封锁铁路要点、公路交通管制提供依据。20#墩设计转体角度为 60.85° ，理论转体时间为52.91分钟；21#墩设计转体角度为 70.38° ，理论转体时间为61.20分钟。

（四）试转施工

（1）申请试转体天窗时间60分钟，主要完成试转、检查设备、试转后临时锁定等，天窗时间内接触网不停电。

（2）第一阶段：自动，完成 5° 逆时针转动，大里程悬臂端向铁路侧移动3.4m，试转结束后20#墩39mT构梁端与铁路线路中心距离为9.91m，距铁路左侧围栏5.98m；21#墩43mT构距公路波形护栏11.08m。

（3）第二阶段：点动（3次），测得两端的惯性制动距离，点动的步幅是1度，每1度预用时4分钟，总共用时12分钟。

七、正式转体

正式转体与试转程序一致，以20#墩为例，推算转动时间为67分52秒，预留登销记、清理杂物、检查设备和解除封锁预留时间33分钟，转体到位后墩底临时焊接20分钟，转体天窗时间总计120分钟，正式转体天窗时间内接触网停电。

（一）结构纠偏及精度控制

转体施工精度控制主要包括箱梁的纵轴线、标高及横坡，分初控和精确调整两个阶段予以控制。初控重点控制纵轴线，通过观测转体角度变化控制。精确调整由于本桥悬臂端有39m长，根据第三方模拟计算，预应力张拉后悬臂端上挠值为15mm，施工中综合各种因素影响，上挠值会有所误差。转体T构就位并稳定后，进行精确调整。

（1）纵坡精调：先利用两台YDC400t千斤顶置于重心偏移的一侧，桥面两个端头分别安排一个水平测量组。启动千斤顶进行顶升，顶升时加载以5MPa每次，避免顶力过大造成重心转移至对面。每加载一次，两个测量组

同时读取标高值，并与设计值作对照，持续调整，直至桥面纵坡符合设计值，允许偏差 $\pm 5\text{mm}$ ，完成纵轴线调整。迅速利用限位I20工字钢贴紧两对撑脚，将工字钢焊接在滑道上，完成平面位置固定。再在滑道与撑脚之间加垫钢楔板，将纵向撑脚与滑道间的间隙楔紧，确保纵向撑脚不再发生竖向位移。

（2）横坡精调：横坡的调节方法与纵坡调节方法相同。区别在于当纵坡撑脚固定之后，纵向已消除自由状态，会带来横向调整时顶力会加大，因此要备4台YDC400t千斤顶，两台千斤顶顶力不足时临时加备用千斤顶进行顶升。横坡调整完后，8组撑脚下方的钢楔板再次进行楔紧，加焊水平限位工字钢，将整个转体系统进行临时固定。最后将上下承台之间的预留钢筋在最短的时间内焊接完成，确保转体系统不会再产生任何方向的位移。

（二）转体就位

（1）转体就位采用全站仪中线校正，允许中线偏差不得大于2cm，同时对高程进行复测。

（2）转体就位后及时用楔形钢垫块将撑脚底部楔紧，并用电焊将撑脚、楔铁和滑道焊接，同时将上、下承台连接钢筋进行对称焊接。之后，采用浇筑混凝土封固完成转盘结构固结，使上下承台连成一体^[3]。

（三）悬浇段及合龙段

转体完成后，20#墩（铁路侧）下放挂篮就位，完成5#节段挂篮现浇，并利用该挂篮浇筑中跨合龙段。挂篮施工跨越既有铁路时影响既有线行车的主要危险来自于高空坠物，为保证不影响既有线行车安全，挂篮施工前要对跨越的线路搭设铁路防电棚进行防护，同时对挂篮进行兜底防护，保证既有线行车安全。边跨现浇段合龙采取满堂支架两边对称进行。

八、第三方监测预警联动措施

第三方监测单位可在转体姿态控制、主梁线形控制、施工安全和质量评估等方面为施工决策提供可靠依据，动态指导连续牵引过程，实现转体的精准控制。故转体前要与监测单位统一数据报送方式。转体过程中，监测单位的协调工作统一纳入转体指挥体系中。所有的启动和停止指令的发布权归集总指挥一人，由总指挥向转体组组长发出唯一指令。

结束语

施工中针对大纵坡，小曲线半径桥梁转体施工技术研究，并在过程中采取严格地控制措施，顺利地完成了全国首座同时上跨既有铁路、高速公路的小半径曲线铁路桥梁双T构转体施工任务，并为今后同类型工程提供参考。

参考文献

- [1] 曹艳芳，转体桥建设新技术[M].北京：中国铁道出版社，2019.
- [2] 韦庆武，上跨郑万高铁超宽不对称T构转体施工技术研究[J].铁道建筑技术，2020，04：69-71.
- [3] 李良钊，铁路T构连续梁转体桥施工关键技术[J].科学技术创新，2022，08：129-132.