

跨铁路线非对称大跨斜拉桥称重试验研究

郭立军

中铁二十二局集团第一工程有限公司

摘要: 哈西大街打通工程转体斜拉桥跨越哈尔滨南编组站车辆段、哈南I场、哈南VI场,桥梁采用转体法施工,10#转体梁段为非对称斜拉桥,不平衡重量差1300吨、转体重量28000吨。针对该工程转体梁段非对称特点,研究桥梁的称重原理并且开展称重试验,以确定桥梁球铰摩擦矩、球铰摩擦系数、两端的不平衡力矩、偏心距等关键参数,为制定桥梁配重方案和桥梁的顺利转体奠定基础。

关键词: 非对称斜拉桥; 称重; 原理; 试验

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2022.09.033

一、工程概况

哈西大街(绥化路-规划路)打通工程跨越哈尔滨南站,跨越线路均为电气化线路。斜拉桥施工时既要保障铁路运输能力及运营安全,又要确保施工过程中的人身安全和工程质量安全,因此桥梁采用转体施工方案。

桥梁总长度843.561米,跨越铁路采用(118+198+118)m双塔双索面转体斜拉桥,如图1所示。由于哈南站站场布置的限制,设计边主跨比为0.6:1,边跨较常规斜拉桥要大。

桥跨结构采用 π 型梁预应力混凝土结构,设计为双向预应力,设计强度等级C60,中心梁高2.4m,顶板厚度30cm,两肋宽180cm,设置预应力混凝土横梁,横梁厚度42cm,标准间距7m。纵、横向全预应力体系设计,采用 $\Phi 15.20$ 高强度低松弛钢绞线,纵向预应力采用连接器接长。横向预应力布置在横梁内。

主塔采用“门”字形钢筋混凝土塔,设计强度C50,主塔采用箱形截面,塔高73.7m;塔顶设置横梁,横梁为钢桁架结构。

斜拉索采用双索面扇形布置,梁端通过混凝土锚块锚固于主梁侧面,水平索间距为7m;塔端采用混凝土锚块锚固,竖向索间距为2~2.5m。拉索设置内置式高性能阻尼器,提高拉索抗震能力。

由于该桥边跨的跨度较大,9#塔主梁悬臂长(97+99)m,转角 79.31° ;10#塔主梁悬臂长(97+107)m,转角 96.12° ,10#塔两端跨度差距较大,悬臂差17米,理论不平衡重量达1300吨,转体最大重量约28000吨。

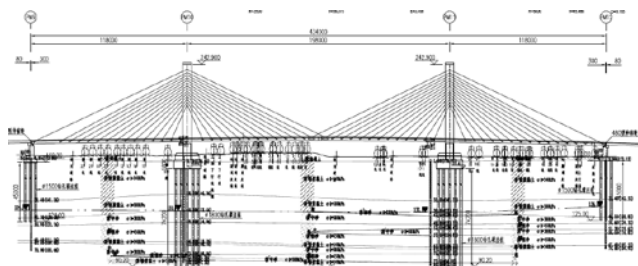


图1 桥型布置图(单位: mm)

二、称重试验

(一) 称重试验目的

转体过程要想安全、稳定,须保证斜拉桥梁段在转体过程中处于稳定状态。理想状态是采用球铰中心轴支撑转动结构,受力部位只在球铰球面。但本桥梁转体两端梁段悬臂差大,转动结构重心的变化受多种因素变化影响较为敏感,特别是转体梁段的悬臂端部,微小的荷载变化甚至是微小的风荷载都会对整个转体结构的重心产生很大的影响。

桥跨结构落架之后,转体之前对转体悬臂构件进行称重试验,用千斤顶称重系统称出转体梁段不平衡重,以获得转体结构的实际偏心数据,通过称重获得转体结构的不平衡力矩以及摩擦系数,制定合理可行的转体配重方案,并合理计算转体启动牵引力。

(二) 工作原理

对于非对称的桥梁,为了保证转体过程中的结构处于稳定状态,确定桥梁的不平衡力矩并施加配重是关键。此外,为了预估牵引力的大小,需要获得球铰的摩擦矩、摩擦系数等关键参数。一般通过承重试验可获得实际的不平衡弯矩、球铰的摩擦力矩和摩擦系数。

转体桥梁处于平衡状态可能出现两种情况:1)拆除转体结构支撑砂箱及主梁现浇架体后,撑脚若未与滑道接触,即球铰摩擦力矩大于转体梁段不平衡力矩,球铰的摩擦力矩抵消了转体梁段的不平衡力矩,则桥梁处于平衡状态;2)拆除转体结构支撑砂箱及主梁现浇架体后,若撑脚与滑道接触,即球铰的摩擦力矩小于转体梁段的不平衡力矩,通过撑脚受力后使转体结构处于平衡状态。

一般显著不对称的桥梁结构,球铰的摩擦力矩是小于转体梁段不平衡力矩。拆除支架后,桥梁重心偏向跨度较大一侧,该侧的撑脚与滑道发生了接触。首先在边跨一侧的下承台上对上转盘施加向上的顶推力 P_2 ,在推力 P_2 由零逐渐增大的过程中,撑脚将会脱离滑道而悬空,同时记录布置在中跨侧位移计的示数,当位移计示数发生较为明显的变化时,说明钢球铰发生了微小的刚体转动,此时转体梁段的力矩平衡为:

$$P_1 L = M_g + M_z \quad (1)$$

式中, P_1 为桥梁边跨侧千斤顶顶推过程中使钢球铰产生微小转动瞬间的顶推力, L 为千斤顶轴心与球铰中心的距离, M_g 是转动结构的不平衡力矩, M_z 是球铰摩擦力矩。

在边跨一侧顶推结束后,将千斤顶缓慢卸荷,同时记录布置在跨中一侧位移计的示数,当位移计示数的变化较为明显时,说明球铰发生了反向微小的刚体转动,此时由梁段纵向的力矩平衡有:

$$P_2 L = M_g - M_z \quad (2)$$

式中, P_2 为千斤顶卸荷过程中钢球铰产生瞬时转动

时顶力。

根据称重试验可获得 P_1 和 P_2 ，根据公式（1）和（2）摩擦矩和不平衡力矩为：

$$M_g = (P_1 L + P_2 L) / 2 \quad (3)$$

$$M_z = (P_1 L - P_2 L) / 2 \quad (4)$$

根据不平衡力矩和转体总重量，可计算转体的偏心距 e ：

$$e = M_g / G \quad (5)$$

式中， R 为球铰球面半径， G 为转体总重量。

钢球铰静摩擦力矩与球铰的结构参数、静摩擦系数等相关。采用如图2所示球坐标系，将球铰间滑动面划分为若干面元，当转体结构绕球心水平轴 Oy 发生转动时，在每个面元内将产生阻碍这种转动趋势的静摩擦力 df ，其与水平轴 Oy 间距离 d 的乘积构成静摩擦阻力矩微元 dM_z ，将 dM_z 沿整个球铰表面所涵盖的面积进行积分即可得到静摩擦阻力矩 M_z 与球面几何参数 R_s 、 R_p 及静摩擦系数 μ_0 之间的关系。具体推导如下所示：

$$dM_z = d \cdot df \quad (6)$$

$$df = \mu_0 \sigma_s dA \quad (7)$$

$$dA = \sqrt{(R_s \cos \theta)^2 + (R_s \sin \theta \cos \varphi)^2} \quad (8)$$

$$dA = R_s \sin \theta d\varphi \cdot R_s d\theta = R_s^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (9)$$

$$\sigma_s dA = \sigma \frac{dA}{\cos^2 \theta} \cos \theta \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{G}{\pi R_p^2} = \frac{G}{\pi R_s^2 \sin^2 \alpha} \quad (11)$$

式中， θ 为球铰表面任意一点至球铰球心的连线与竖直方向 Oz 轴所形成的角度， $\theta \in [0, \alpha]$ ； φ 为球铰表面任意一点至球铰平面中心的连线与水平方向 Ox 轴所形成的角度， $\varphi \in [0, 2\pi]$ ； dA 为球铰表面任意一点处面积微元； df 为静摩擦力微元； dM_z 为静摩擦阻力矩微元； σ 为转体桥对球铰上表面的名义压应力； σ_s 为作用于球铰下表面的压应力； d 为球铰表面任意一点至水平方向 Oy 轴的垂直距离； μ_0 为球铰上、下表面间的静摩擦系数； R_s 为球铰半径； R_p 为球铰平面半径； α 为球铰平面至球心连线与竖直方向 Oz 轴间的夹角； G 为转体桥的总重量。

根据公式（6）～（11）可得：

$$dM_z = \frac{\mu_0 G R_s}{\pi \sin^2 \alpha} \cos \theta \sin \theta \sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \cos^2 \theta} d\varphi d\theta \quad (12)$$

沿表面积分可得：

$$M_z = \frac{\mu_0 G R_s}{\pi \sin^2 \alpha} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \cos \theta \sin \theta \sqrt{\sin^2 \theta \cos^2 \varphi + \cos^2 \theta} d\varphi d\theta \quad (13)$$

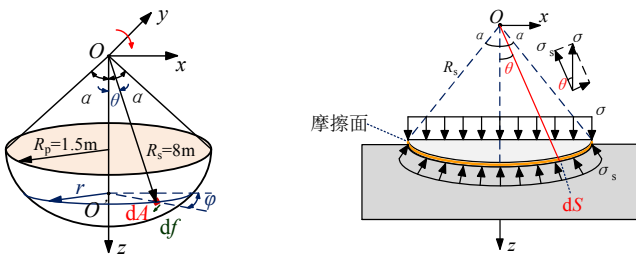


图2 静摩擦阻力矩 M_z 计算示意图

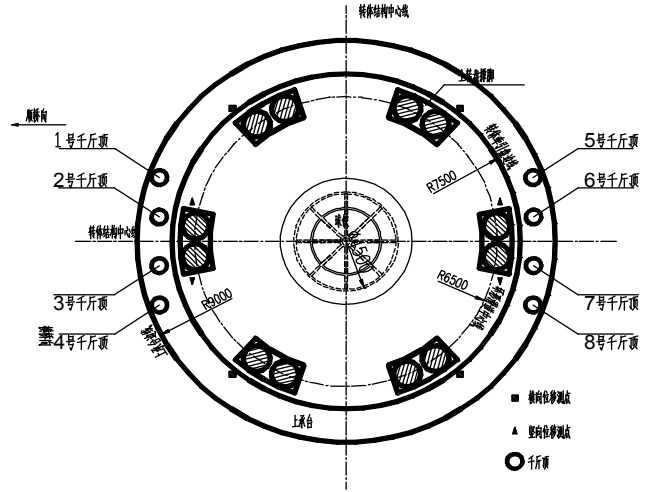


图3 千斤顶和位移计布置图

（三）称重试验

该桥10#塔两侧主梁的跨度（97+107）m差距较大，两侧的理论不平衡重量约1300吨，是该桥转体的难点和关键。

在桥梁转动结构纵向两侧对称布置4台500T千斤顶，用以在称重试验时对转动体进行顶升，实测试验过程中临时支点的反力值。

在两侧撑脚处各布置2个位移传感器，记录每级加载时相应的竖向位移。撑脚横向两侧各布置2个水平向位移传感器，记录每级加载时相应的水平位移，用以综合判断球铰转动的临界状态，合理确定临界力值。千斤顶和位移计的布置如图3所示，称重试验过程中典型图片如图4所示。



（a）千斤顶

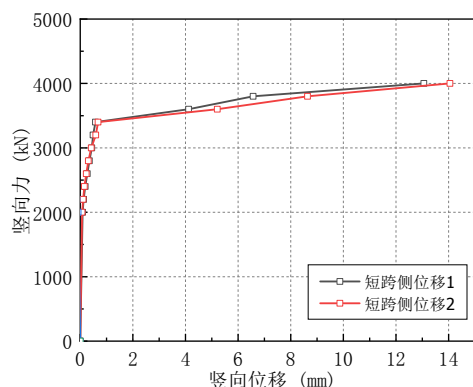


（b）位移计

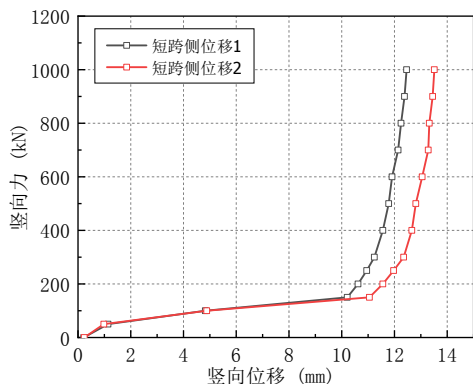
图4 称重试验过程图片

千斤顶顶升、卸载过程中实测的荷载-位移曲线分别如图6 (a) 和 (b) 所示, 可见顶升、卸载过程中的位移突变对应的荷载 P_1 和 P_2 分别为3400kN和150kN。

顶推过程中力臂长度 L 为8m, 桥梁转体总重量 G 为280000kN, 钢球铰球面半径 R_s 为9m, 平面半径 R_p 为4.5m, 根据推导的公式计算得到不平衡力矩 M_g 为14200kNm, 摩擦力矩 M_z 为13000kNm, 偏心距 e 为0.051m, 摩擦系数 μ 为0.52%。



(a) 顶升过程荷载-位移关系



(b) 卸载过程荷载-位移关系

图6 承重试验结果

三、配重方案

现场试验过程正常, 测试出转体梁段各项参数满足转体配重要求, 称重配重均满足规范要求。

根据《桥梁水平转体法施工技术规程》DG/TJ 08-2220-2016规范要求, 转体梁段平衡转体偏心距一般控制在0~5cm, PM9#墩称重试验结果计算得到的偏心距约为0.036m (偏向于中跨侧), 采用梁体平衡配重方案, 满足规范要求, 故不进行配重。

对于10号墩主塔侧转体斜拉桥, 因其接触网迁改等原因, 导致设计桥位下方接触网横联与斜拉桥主梁底面距离过近, 经测量与设计位置梁底面距离约151mm, 若转体过程中对桥梁姿态不能采取稳定有效的控制措施极易发生干涉碰撞, 影响线路运营。针对本工程实际情况, 采用不平衡转体方案, 通过配重使10号墩小里程侧 (中跨侧) 撑脚着地, 大里程侧 (边跨侧) 主梁翘起, 以增大梁体底面与接触网横梁空间。球铰与2组撑脚支撑形成稳定的3点支撑 (图5), 转体过程中桥梁姿态除

水平旋转外始终保持稳定状态, 平转到位后合龙。

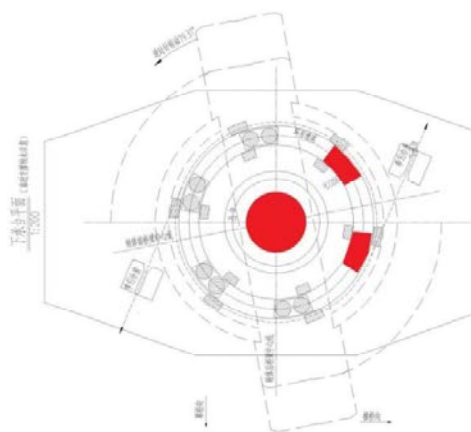


图5 球铰三点支撑示意图

PM10#墩采用梁体倾斜配重方案, 根据规范要求, 偏心距一般控制在5~15cm, 本桥拟在中跨距离桥梁中心线80m处配重20吨, 配重后体系根据以下公式可计算得到新的偏心距约为0.108m (偏向于中跨侧)。

$$e' = \frac{G_1 l + M_g}{G + G_1}$$

式中: e' 为配重后偏心距。

此时边跨侧两对撑脚处于与滑道接触状态, 转体结构形成了球铰中心与两对撑脚三点支撑的稳定体系。

四、结束语

为保证桥梁转体的顺利进行, 理论推导了转体的不平衡力矩、球铰摩擦力矩、摩擦系数等关键参数的计算公式。然后进行了承重试验, 获得了千斤顶顶升和卸载过程中的荷载-位移曲线, 然后通过理论公式, 计算得到转动体的不平衡力矩、球铰摩擦力矩和摩擦系数等关键参数, 为制定桥梁的配重方案和转体施工奠定了基础。

PM10#墩配重后计算得到新的偏心距约为0.108m, 该配重方案中, 转体桥在顺桥向梁轴线有一定偏心, 略呈倾斜态势, 一侧撑脚落地。该方案使转动体形成两点竖向支承, 解决了不平衡转体斜拉桥在确定姿态 (三点支撑体系) 下的安全转体问题。

参考文献

- [1] 张成. 大跨度斜拉桥转体不平衡称重施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48 (11): 41-43.
- [2] 王旭. 菏泽丹阳立交桥转体斜拉桥称重及配重施工[J]. 江西建材, 2017 (9): 218-219.
- [3] 耿会勇. 转体桥梁磨心施工及转动体系摩擦系数测定[J]. 施工技术, 2010, 39 (02): 61-63.
- [4] 车晓军, 周庆华, 关林坤. 转体施工桥梁大吨位球铰径向应力计算方法优化研究[J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2014, 38 (02): 356-358.
- [5] 左敏, 江克斌. 转体桥平转球铰转体过程应力计算方法研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59 (12): 36-39.
- [6] 占有志. 超大吨位非对称曲线梁斜拉桥转体施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48 (11): 54-58.