双线异形暗挖隧道下穿有砟轨面铁轨加固技术探讨

吕壮

中铁二十四局集团有限公司北京分公司

摘　要：采用浅埋暗挖法施工下穿电气化铁路的双线异形隧道时，容易引发地表沉降和钢轨沉降问题。为减少地层沉降，避免轨面变形，通过分析束轨梁不同加固范围对梁挠度变化的影响，结合工程具体的情况对沉降控制标准作出调整，有助于保证隧道开挖期间的行车安全，减少事故风险，使得暗挖作业能够有序平稳、按照既定目标不断推进下去。

关键词：暗挖隧道；有砟轨面；铁轨加固

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.21.051

一、前言

目前采用浅埋暗挖法施工大部分运用在城市地下地铁隧道以及电力、热力隧道中，在今后随着地下轨道交通发展的不断完善，浅埋暗挖法隧道施工的应用也会越来越完善。但由于复杂的地质条件以及施工条件的限制，在进行隧道浅埋暗挖法施工时不可避免的会对周围的土层产生影响从而引起地层发生变形，而当隧道在下穿构（建）筑物时，也会使得下穿段上部的构（建）筑物产生一定程度的变形[1]，而这种变形一旦过大，就容易产生一定的破坏作用，从而影响构（建）筑物的正长使用，甚至产生毁灭性的破坏。因此，科学进行浅埋暗挖施工时的轨道加固设计，确保轨面的沉降满足设计及规范要求，对于行车安全至关重要。

二、工程概况

丰益110千伏变电站外电源工程（穿越铁路段），位于北京市丰台区。为配合丰益110kV输变电工程电缆敷设，本工程为下穿铁路电力隧道，隧道拟采用浅埋暗挖法施工，其断面为2.0×2.3m与2.6×2.9m双孔复合衬砌结构。新建隧道自北向南依次穿越穿永丰上、下行线，京沪上、下行线与冷库专用线。下穿处铁路情况：永丰上、下行线为双线电气化铁路，60kg/m轨。普通线路、混凝土枕。京沪上、下行线均为双线电气化铁路，60kg/m轨，无缝线路、混凝土枕。冷库专用线为电气化铁路，50kg/m轨，普通线路、混凝土枕。路基面较自然地面高1m左右。本设计防护结构采用2.0+2.6m暗挖隧道，隧道总长为123m，隧道埋深在铁路轨底以下6.8-7.7m。暗挖隧道按铁路荷载进行施工。隧道埋深较浅，且为双线异形隧道，周边施工条件复杂，上覆多条铁路干线，对沉降要求控制严格，技术难度高。隧道开挖期间，采用了一种铁路扣轨保护范围的设计方法对上覆铁路进行扣轨加固，以在不影响车辆通行的情况下进行工程施工。

三、施工工艺流程

（一）施工工艺流程

详见图3.1。

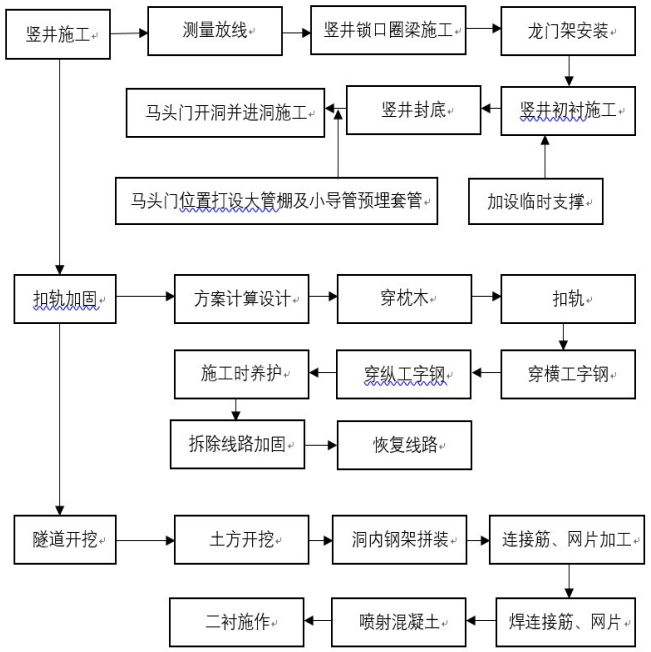

图3.1 双线异形暗挖隧道下穿有砟轨面施工工艺流程

（二）操作要点

1.竖井施工

施工竖井采用倒挂井壁法施工。设置井口圈梁，井口圈梁为钢筋混凝土结构，混凝土采用C30商品混凝土；初期支护为格栅钢架+钢筋网+C20喷射混凝土结构。

竖井锁口圈梁混凝土强度达到设计要求，且竖井龙门架安装完毕后，开始井身开挖。土方开挖采用分层对角开挖（分块开挖），每部分都应首先开挖中部土体，在临近竖井侧壁四周暂时预留不小于0.5m的台阶，待中部土体开挖完成后再开挖预留台阶及初支轮廓部分土体，开挖步序见下图。竖井井身自上而下边开挖边支护，开挖一榀架设一榀格栅钢架，每个循环包括土方开挖及清底、格栅及竖向连接筋安装、喷射混凝土、安装相应位置竖井支撑等环节，施工严格按照设计要求及规范进行。

竖井施工采取分层开挖分层支护的方法进行施工，每层开挖的步距为0.5m，每层土体开挖分块进行，先挖竖井中部土方Ⅰ区以利周边井壁土方开挖，再对称逐步开挖短边土方Ⅱ区、Ⅲ区并及时施作该层初村结构，后对称逐步开挖长边Ⅳ区、Ⅴ区土方并施作该层的初衬结构，当开挖至设计支撑位置后，及时加设支撑，加设焊接完之后再开挖土方。防止变形收敛，保证基坑的稳定性，在开挖过程中要观查土体的稳定情况，必要时缩短开挖长度，打设锁脚锚杆进行加固支撑。

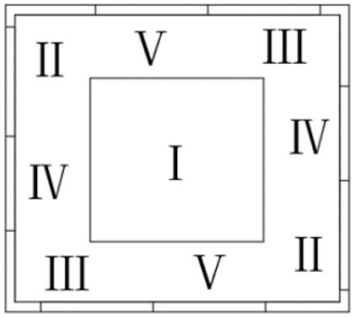

图3.2.1 开挖区域示意图

竖井应随开挖、随支护；初期支护应尽快封闭成环，按设计要求做好钢格栅架的竖向连接，井壁钢格栅竖向连接应锚入锁口圈梁内。

出土、部分大件料均需由竖井口进入，提升方式采用龙门架方式，提升井架立柱I32工字钢，井口的四根立柱与锁口圈预埋铁焊牢，其他立柱灌注混凝土基础，龙门架高7m，横梁为I32工字钢，横梁之下为2道行走梁（I32工字钢），每道行走梁设1台QH6型电动葫芦。弃土斗提至地面后通过电葫芦吊运将土方卸入碴土槽，此提升系统操作简便，稳定可靠

2.竖井初期支护

（1）格栅加工

钢榀架由4根Φ25受力筋，其间用HRB400Φ14“之”字型加强筋、“U”字型加强筋焊接而成。由于竖井尺寸较大，钢榀架由12个制作段组成。各段之间用连接钢板加4套M22螺栓连接，并使用Φ25帮焊筋进行加强连接，帮焊筋与主筋进行10d单面焊接。

（2）格栅安装

竖井应随开挖、随支护；初期支护应尽快封闭成环，按设计要求做好钢格栅架的竖向连接，井壁钢格栅竖向连接应锚入锁口圈梁内。

（3）喷射混凝土施工

喷射砼就是按照配合比，把喷射砼用的原材料拌制成砼，送入喷射机料斗，喷射机活塞将砼送入混合室，与压缩空气混合后进入喷射管，料束从喷嘴射到受喷面。

（4）施工支撑

竖井施工期间采取HW250型钢作为临时支撑，支撑设置沿竖向每四榀钢格栅布置一层，每层每角位布置两道，支撑两端与初衬拱架采用焊接牢。临时支撑的施工跟随竖井初衬施工同步，支撑安装完毕后方可进行下一层初衬施工。

（5）竖井施工封底

竖井开挖支护至竖井底标高以上30cm时，人工清底找平。封底采用模铸钢筋混凝土，封底厚度为300mm。

竖井开挖至设计标高后，铺设上下双层Φ25钢筋，钢筋间距200×200mm，封底钢筋与格栅钢架、连接筋焊接连接，最后浇筑c20混凝土。待封底混凝土达到强度后方可进行隧道开挖作业。

在竖井封底完成后，在竖井底部设置0.8×0.8×1m集水坑一座，为后续施工积水抽排做准备。竖井底施做钢平台，钢平台高度2.05m，平台与隧道初衬顶面齐平，使用HW250型钢与架子管搭设支撑框架，使用2.5cm钢板作为平台工作面，钢板与支撑框架及竖井井壁进行焊接牢固。

3.铁轨加固范围设计

通过铁轨加固结果的特征值K并结合下式即可对铁轨加固范围进行设计计算。

$$\begin{cases} \omega_{max} \le [\omega] \\ r_0 = f(h,\ T) \\ K = f(r_0,\ s,\ r), \\ \omega_{max} = f(K,\ q,\ v) \end{cases} \quad \text{（公式1）}$$

其中，r_0为沉降槽最大影响范围半径；s，r分别为X向和Y向所布梁的根数；K为横纵梁结构的计算特征值；q和v分别是铁轨所受列车荷载和列车运行速度；h为下穿隧道的埋深；T为隧道的施工因素，包括注浆范围，开挖顺序等；[ω]为铁轨沉降控制值。

按铁路“中-活载”取值对线路加固体系进行安全验算，动力系数取：1+μ。

荷载取值按铁路“中-活载”的最大机车轴重220kN进行计算。考虑轴重荷载受基本轨、扣轨梁的分散作用，按每对机车轴重作用于2根横抬梁上[2]。在列车限速45km/h时，荷载冲击系数μ=1+28/（40+5.4）×0.75×45/60=1.35。F=220×1.35=297kN。

在丰益110千伏变电站外电源工程（穿越铁路及地铁段）的施工条件下（即先施工大跨径隧道），地基沉降槽的影响半径r_0约为30m，束轨梁在3扣轨时，扣轨刚度约1.9×10^4kN·m^2；5扣轨时，扣轨刚度约2.9×10^4kN·m^2；根据现场实际施工，式中s，r取24，带入可得铁轨轨面最大变形处$\omega_{max}\approx2.4mm$。说明该加固方案可以满足沉降标准要求。

4.线路加固流程

标点→穿设枕木→安装3-5-3扣轨→安装穿入横梁（横梁隔六穿一）→安装工字钢纵梁→线路保养配合隧道初衬暗挖施工→拆除工字钢纵梁→拆除3-5-3吊轨梁→抽出横梁工字钢及高差调节垫板并捣固整修线路→整修线路达到标准。

（1）标点：采用红、黄、蓝等不同颜色的油漆对穿横梁点、枕木点及原有的轨枕位置进行标识。

（2）穿枕木：加固范围内加设3.2m长木枕，利用列车慢行间隔，穿插3.2m×0.22m×0.16m的木枕，使用道钉进行固定，为架设扣轨提供基础。两木枕间需预留

图1 现场枕木穿设图

出空位，为整修线路提供作业面。

（4）扣轨：扣轨采用43kg/m轨型，扣轨与已穿入木枕利用预制卡子与扣板进行组合连接，扣轨时顺线路中心线方向接头错开1.0m，每组扣轨的端头设置木梭头。抬运钢轨过线时，抬轨人员必须听从专人统一指挥，一致通过，严防联电[3]。扣轨及拆除在封闭点内进行。

（5）穿工字钢横梁：为保证线路安全，穿工字钢时严格执行隔六穿一的要求，工字钢与主轨之间垫通长木板以调节股道间高差。每穿一根工字钢横梁，立即用压机将横梁结构与轨底密贴，再利用枕木头将梁底垫实，随后填入石碴捣固密实，每完成一道，进行质量验收并记录，合格后方可进行下一道施工。同时横钢穿线路时做好防联电措施。

（6）安装工字钢纵梁：沿线路方向在线路两侧、线路中间采用I45b工字钢纵梁，两根一束布置，置于横梁上。纵梁工字钢与横梁工字钢用Φ22U型螺栓联结在一起，纵梁两端置于枕木垛上，在抬运工字钢跨越线路时，必须顺线路过，不得与线路斜交，防止联电，抬钢时必须统一指挥，严防联电。安装及拆除纵梁在封闭点内进行。

5.隧道施工

竖井初支结构施工时，在隧道拱部大管棚及小导管位置处按要求预埋套管，待马头门开洞前打设Φ108mm大管棚支护、打设Φ42mm无缝钢管，然后注入水泥浆加固土体。大管棚长度5m，环向间距300mm，水平仰角1°～2°；小导管水平倾角10°～15°，环向间距300mm，长2.5m，纵向搭接1m，大管棚及小导管后端应与井室支护钢格栅焊接牢固。

为保证马头门施工安全，按照设计要求对马头门位置两侧进行加密布置竖向连接筋。马头门上拱范围内打设大管播及超前小导管，环向间距300mm并注水泥浆液加固土体。

分部破除马头门处竖井初期支护混凝土，首先破除马头门上台阶初支结构（只凿除格栅环向和施工人员工作面，预留核心部分）；上台阶进尺3m后，破除上台阶核心土及隧道下台阶范围内竖井初支结构；在截断的竖井初期支护格栅处采用同格栅主筋规格的L型筋与新架立钢格栅帮焊连接，焊缝长度和宽度符合规范要求。

破除竖井马头门范围内上台阶井壁砼，切除钢筋。环形开挖上台阶土方，预留核心土，前三榀格栅连架，第一榀格栅布置于竖井井壁内。破除竖井马头门范围内下台阶井壁砼，切除钢筋。开挖下台阶土方，施工侧墙及底板初衬，封闭成环；上下台阶保持3m间距向前掘进。

6.特殊部位施工

（1）特殊地段加固地层施工

铁路段穿越铁路范围全断面帷幕注浆：浆液采取AB/AC双浆液。

1）加固范围

下穿铁路段隧道在穿越铁路路基时采取全断面帷幕注浆措施加固土体，加固范围为铁路两侧各15m、隧道开挖轮廓线外2.5m范围，纵向长度54.3m。

2）浆液选择

浆液	规格	配合比
水泥浆	P.O 42.5	水泥：水=1：1～1：0.8（重量比）
水玻璃溶液	39～41 Be’	水玻璃：水=2：1～3：1（体积比）
混合液		水泥浆：水玻璃溶液=1：0.8～1：1（体积比）
外加剂		根据不同地层要求调节胶凝时间

3）注浆段长度及压力

根据设计要求，采用Φ48×3.5mm（内径×壁厚）普通注浆钢管，一次打入长度为12m。浆压力控制在1Mpa左右。

（2）铁路段隧道拐点施工

1）隧道转角部位超前支护采用小导管注浆措施，注浆范围应适当扩大，注浆管角度应随隧道转角同步，小导管注浆液选择水泥浆液。

2）本工程转弯角度为30.9°两处，19.7°一处，施工至转弯段时，内侧格栅间距加密布置。

3）隧道钢格栅平面应垂直水平面安装，钢格栅安装前应在围岩中安装定位筋固定位置，每榀钢格栅两底脚标高应一致。

（3）二次衬砌混凝土施工

隧道二衬施工安排遵循以下原则：因地制宜，根据隧道不同断面结构形式安排不同的二衬施工方法和顺序；二衬应由下向上灌注，应先施工底板，后施工墙体及顶拱，以形成整洁的场地，运输道路平整、坚实、提高运输速度，加快生产进度，提高工程质量，改善作业环境，实现文明施工；二衬的每段长度根据隧道结构确定，一般控制在20m；隧道的衬砌采用隧道组合模板衬砌。

在本次下穿铁路的双线暗挖隧道施工中，利用公式1可以通过铁轨沉降的控制值计算得到束轨梁的加固范围，对扣轨范围的设计提供了理论依据，很好地解决了暗挖隧道下穿铁路沉降的问题，为丰益110千伏变电站外电源工程加固方法及顺序提供了保障依据，确保了工程于2020年6月8日顺利穿越了铁路地段。

结束语

该电力隧道下穿铁路工程通过研究的扣轨加固设计方法，在隧道开挖前中采用足够强度和刚度的横纵梁将施工段轨道架空，确保铁轨即使路面发生较大沉降的时候也能保证变形在可控范围内，有效减小了隧道下穿铁路施工过程中铁轨的沉降变形。保证了隧道开挖过程中铁轨运行的安全，得到了业主、设计单位、地勘单位和监理单位的一致好评，取得了一定的经济效益和社会效益。

参考文献

[1]彭彤.盾构隧道下穿铁路路基沉降规律及控制标准研究[D].华东交通大学，2019.

[2]魏亚茹.大跨度框架下穿多股道顶进施工时铁路线路加固技术研究[J].价值工程，2019，（19）：162-165.

[3]毛新宇.论北京地铁十号线下穿京沪线、永丰线工程线路防护及监测管理[J].建筑工程技术与设计，2017，（12）：2641-2641，2183.