

隧道浅埋段预加固实施方案

田社利

陕西公路交通工程监理咨询有限公司

摘要：高速公路、地方公路等大断面隧道在穿过浅埋段、软岩、破碎带等不良地质时，易出现初期支护刚度不足、地下水软化围岩、围岩发生整体或局部变形、支护封闭成环不及时和二衬不能紧跟施作等原因造成掌子面附近失稳，出现塌方，一种采取洞内超前管棚预加固和洞外预注浆的支护方法可以保证浅埋段、软岩等地段安全顺利通过。

关键词：隧道；浅埋段预加固；施工

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.14.030

一、工程概况

某高速公路石白山隧道浅埋段右线里程YK11+724~YK11+745，左线里程ZK11+715~740段。隧址区洞室围岩为沙泥岩互层，节理裂隙发育，岩体较破碎，呈碎裂块状镶嵌结构，围岩整体稳定性差，洞顶易坍塌，处理不当会出现大的坍塌，侧壁经常出现小坍塌；其次，线路穿越冲沟，洞室拱顶最小浅埋大约为5.5米左右，开挖易冒顶坍塌，地表冲沟发育径流，洞室位于地下水位以下，根据抽水试验，钻孔涌水现象严重，隧道开挖会出现涌水突水现象。为消除冲沟径流在洞室开挖工程中涌入洞内和浅埋段洞内塌方后发生安全事故，通过对专项施工方案进行充分论证，认为有必要对该浅埋段采取洞内外预加固措施保证浅埋段安全顺利通过。

二、施工方案

(一) 地表注浆加固

石白山隧道浅埋段地表注浆加固，右线纵向里程YK11+724~YK11+745、左线ZK11+715~ZK11+740，横向：隧道中心线左侧15m，右侧15m。施工前，测量人员根据设计，测量浅埋段需要注浆的范围，然后清理地表杂草，平整，测量钻孔位置及原地面高程并标记，在场地四周开挖截水沟。

钻孔注浆时，采用间隔法施工，钻孔间距2m×2m，梅花形布置，钻孔深度在隧道外侧达到路面设计高程，隧道范围内钻孔深度达到开挖轮廓面，钻孔至设计高程后，及时进行注浆。

浅埋段注浆要求采用Φ76*6PVC袖阀管分段注浆(@=2*2m)，注浆管长度达到设计标高。浆液采用1:1水泥浆，初始压力0.5~1.0MPa，终止压力为2.0~3.0MPa，注浆压力根据现场试验进行调整。注浆时，由孔底开始注，当孔内冒出水泥浆后，对孔四周进行封堵，然后继续注浆，直至注浆压力达到终止压力后，停止注浆，等待10min，然后进行二次补压。注浆过程中，注意注浆压力，压力突然增大，须暂停，防止注浆管堵塞。注浆后应使地基承载力不小于360Kpa。注浆结束后，沿地表施作水沟，水沟采用M10浆砌片石，厚度30cm，水沟深度不小于1m。施工时应时刻注意，若该方案控制不住围岩变形，应立即改暂停开挖，封闭掌子

面，并联系设计、监理单位进行处理。

(二) 洞内施工

1. 径向注浆

管棚工作室增加径向注浆加固围岩，段落按照ZK11+745~+753/YK11+745~+753执行。初支施作后及时进行径向注浆加固，采用Φ76×6钢管，长度6m，每环25根，间距1m×1m。

(1) 施工程序：钻孔→注浆→注浆验收。

(2) 施工工艺

施工准备：孔口管、注浆材料等施工材料的采购；钻孔、注浆等设备的选用与采购；材料的试验，配合比的设计；水、风、电的设置；其他辅助措施的准备；对径向注浆的施工里程进行施工测量和放样。初期支护施作完成且混凝土强度达到设计强度要求。

钻孔：根据放样将小导管的孔位用红油漆标出，孔位按浆液扩散半径1.5m设计，并采用梅花型布置，每环25孔，间距1m*1m；可利用施工台架人工手持风钻钻孔，孔径80mm，钻孔的方向垂直于初支断面，孔深5m，钻至设计孔深后，用吹管将碎渣吹出，避免塌孔。

安装注浆管：需要严格把控钻孔完成后孔位是否符合要求，若符合要求，将安装钢管进入注浆孔，然后用锚固剂封堵孔口管与喷砼间得空隙，以防注浆过程中出现漏浆。

注浆：采用普通纯水泥浆液注浆，水泥浆水灰比1:1，水泥采用P·042.5普通硅酸盐水泥，拌合用水采用饮用水源。注浆前加工需连接止浆阀用的丝扣管及变径接头，由下向上、由少水处到多水处注浆，注浆初始压力0.5~1MPa，终压2MPa注浆结束后清洗管路。

注浆顺序：沿隧道轴线由低到高、由下往上、先注边墙，再注隧道拱部，最后注底板孔；由少水处到多水孔，先注无水孔，后注有水孔；在股水处或流量大的地方，先四周后中间。

注意事项：

钻进过程中若遇涌水或孔内岩体破碎造成卡钻，应停止钻进，进行注浆，扫孔后再行钻进；注浆过程中，若压力上升过快或过高，应停止注浆，检查管路是否被堵塞、浆液是否过浓，再行注浆；注浆压力长时间不上升，需要根据被加固体的性质来调整浆液配合比。地层中含水量大时，浆液很容易被稀释，胶凝时间变长，注浆压力可能长时间不上升，需要减小水灰比达到缩短凝胶时间，快速上压的目的；地层中含水量变小时应增大浆液水灰配比、延长凝胶时间，以达到规定的扩散范围。注浆过程中，注意观察初期支护的变形情况及喷砼表面情况变化，随着注浆压力的升高，由于喷射砼的不密实喷砼表面可能开裂、漏浆，这种情况下需要填塞麻丝和锚固剂将裂缝封堵再继续注浆，或换注胶凝时间短的浆液堵漏后再继续注浆，必要时采取间歇式注浆，以

减小浆液流失，保证浆液有效的注入岩层中。

2. 管棚工作室

右线YK12+745~YK12+753/左线ZK12+745~ZK12+753施工管棚工作室，在原设计开挖半径6.61米基础上外扩1.2m（不包含预留12cm变形量），施工时注意C25喷射混凝土回填应密实。

3. 洞内长管棚

右线YK12+745~YK12+715/左线ZK12+745~ZK12+715施工30m长管棚，导向墙采用C30混凝土，截面尺寸为0.55m*2m（高×长），导向墙内设4榀I20a工字型钢，钢架外缘设Φ133*4mm导向钢管，钢管与钢架之间采用Φ25固定钢筋焊接。钢架各单元由连接钢板焊接成型，单元间由高强螺栓连接，接头处焊缝应严格按照钢结构的有关要求进行。

(1) 管棚参数

钢管规格：热轧无缝钢管，外径为Φ108mm，壁厚6mm，长度为35m，（有效长度30m）用长3m、6m的热轧无缝钢管以丝扣连接而成。钢管内同一截面内的接头数不超过管数的50%，相邻钢管的接头至少需错开1m。

管距：环向间距40cm；钢花管上钻注浆孔：孔径10mm，孔间距150mm，呈梅花形布置，尾部留不钻孔的止浆段200cm。

(2) 管棚导向墙

施作长管棚前，需对导向管进行放样，安装导向墙的内模，然后绑扎钢筋，再安装外模。模板采用木模，同时采用Φ133*4mm钢管作导向管，精确定位与固定，后浇注导向墙混凝土。

(3) 管棚钻机就位

采用1台履带式潜孔钻机，分别从低孔位向高孔位对称进行，钻机要求与管棚处已设定好的孔口管方向一致，必须精确核定钻机位置，反复调整，确保钻机钻杆轴线与孔口管轴线相吻合。

(4) 管棚钻孔

钻头直径采用Φ130mm。钻进采用无水干钻，并严格控制钻进的速度，防止钻孔出现偏斜、扭曲或变径。钻机开钻时，应低速低压，待成孔10m后可根据地质实际情况来调整钻速及风压。

(5) 管棚孔清孔检查

用潜孔钻头来回扫孔，采用高压风从孔底向孔口将钻渣吹出，确保孔径、孔深符合要求、防止堵孔。用地质罗盘仪检测管棚孔倾角。

(6) 安装管棚钢管

钢管在专用的管床上加工好丝扣，导管四周钻设孔径10~16mm注浆孔（靠孔口2m处的棚管不钻孔），孔间距15cm，呈梅花型布置，管头加工成圆锥形，便于入孔。成孔后及时安设管棚，防止塌孔。管棚利用管棚钻机的冲击力和推力顶管。钢管丝扣应拧紧，相邻钢管的接头应前后错开。同一横断面内的接头数不大于50%。

(7) 管棚注浆

采用KBY50注浆机将1:1水泥砂浆注入管棚钢管内，初压0.5MPa~1.0MPa，终压2MPa，持压15min后压力值不降压，停止注浆。注浆量不小于钻孔圆柱体的

1.5倍，如果注浆量超限，未达到压力要求，应调整浆液浓度继续注浆，确保钻孔周围岩体与钢管周围孔隙均为浆液充填，方可终止注浆。注浆结束后用M30水泥砂浆充填钢管，增强管棚的刚度和强度。

(三) 监控量测

1. 地表沉降监测

地表注浆完成后，按照设计要求，在地表取几个监测断面，注意地表沉降量测线、周边位移和拱顶下沉量测线位置应在同一断面，每个断面上埋设11个沉降观测点，地表下沉采用水准仪、塔尺量测，测试精度为1mm；隧道浅埋段开挖之前必须先对地表下沉量测，测量原始地面高程；浅埋段施工时，根据设计要求的频率，进行测量，监测范围在隧道开挖影响范围以外。

地表下沉量测在洞内外预加固之前开始，直到衬砌结构封闭、下沉基本停止时为止。

2. 隧道内周边位移及拱顶沉降监测

(1) 监测断面间距

净空变化量测包括周边收敛和拱顶下沉，采用全站仪无尺量测及自动监测相结合。浅埋段为V级围岩，间距不大于5m，现场按5m间距设置拱顶下沉和净空变化的量测断面并布置监测点。

(2) 量测频率

普遍来说，量测频率由测线位移速率、距工作面距离来进行确定。如果出现测值异常或者地质条件变差这些情况，则必须加大量测频率，严重的时候可以2-5小时进行一次量测。等变形处于稳定情况的时候，则可以对量测频率进行适当的降低调整。如果同一断面内各测线出现不同的变形速度，全断面的量测频率就要以产生最大变形速度的测线来进行确定。

(3) 测线布置

测线布置和数量一般地质条件、开挖方法、位移速度等有关。可按照大拱脚台阶法或三台阶七步法施工的实际情况布置不少于5条。

三、隧道浅埋段施工

浅埋段隧道施工中对开挖方案的选择尤为重要，做到“弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”，其中监控量测是一项必不可少的工作环节，通过对监测数据的及时分析，判断围岩及初期支护的变形情况，合理指导施工安全。

(一) 超前地质预报

采用地质雷达相邻两侧探测搭接长度不小于5m、3孔超前水平钻探，钻孔长度30米，钻孔起始里程K11+753进一步探明掌子面前方的工程地质、水文地质活动态势等情况，指导现场施工。

(二) 超前支护

采用SC-2、SC-3型超前支护。

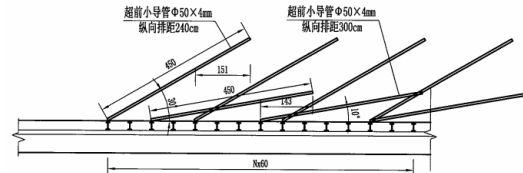


图2-1 SC-2型超前支护表

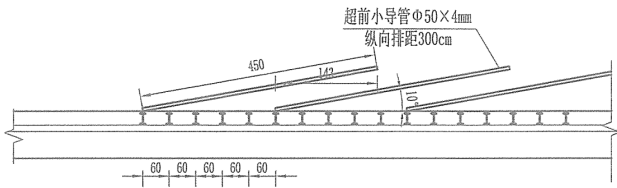


图2-2 SC-3型超前支护表

(三) 隧道开挖

开挖施工过程中严格按照“管超前、严注浆、弱爆破、强支护、勤量测、早封闭”的原则，根据浅埋段的地质实际情况，可采用台阶开挖法。

(四) 隧道支护

隧道采用分部开挖，每部分开挖完成后，对开挖面排险后，及时喷射混凝土封闭开挖面，进行钢拱架安装、喷锚、挂网及锁脚锚杆施工。

(1) 钢筋网

钢筋网片采用焊机加固，采用人工沿开挖岩面环向铺设，钢筋网片之间用搭接连接，其搭接长度不小于30d，钢筋网与锚杆等一般采用多点连接，可减少喷射混凝土时发生的网筋“晃动”现象。

钢筋网在岩面初喷后铺设；拱部从拱脚往拱顶安装，边墙从墙顶到墙脚自上而下安装。喷射混凝土采用湿喷机械手施工，人工配合。

(2) 钢拱架安装

钢拱架在钢构厂集中加工，检查尺寸符合要求后，运至现场进项安装。安装过程：现场拼装→测量定位→螺栓紧固→纵向连接。

浅埋段初支钢拱架参数表

衬砌类型	钢架型号	钢架间距 (cm)	纵向连接筋	纵向连接筋环向间距 (m)	备注
V-1	I20a	60	Φ22	1	

①工字钢拱架在钢筋加工厂用自制冷弯机加工，分段根据开挖施工情况合理调整，保持工字钢钢架分段于开挖分块相适应，通过连接钢板连接。钢架要事先制作加工，并在大样台上试拼，直至符合设计要求。

②按设计首先测定出隧道中线，确定高程，然后再测定钢拱架的纵向位置，设计间距60cm，确保钢拱架平面与隧道中线垂直；安设钢拱架时，必须准确定位，拱脚处虚渣清理干净，在拱脚处支垫混凝土预制块；拱架组合时，其间的连接板要对齐密贴，连接板用M20*100高强螺栓连接紧固。为确保钢架的整体受力和稳定，使用纵向连接钢筋，环向间距1m，将各榀钢架连成一体。

(3) 锁脚锚杆/锚管

锁脚锚管采用Φ50*4mm热轧无缝钢管，单根长3.5m，在上、下台阶两侧拱脚处设置，每处2根。立架后即时进行锁脚锚管施工，钻孔前先标识出需钻孔的位置，钻孔角度与竖向方位呈夹角30°~45°进行钻孔，钻孔深度大于锚管锚固长度的95%，但超长值不大于10cm。

HPB300 Φ20U型卡筋与钢拱架和锚管焊接固定。

(4) 喷射混凝土施工

初期支护采用湿喷工艺施工，以降低粉尘含量。喷射前检查隧道断面，并对欠挖部分及有开裂、出水点、崩解的破损岩石进行处置，清除浮石和墙角虚渣，并用

高压水或风冲洗岩面。

喷射混凝土作业采取先喷拱架与轮廓的间隙，再喷拱架周围，然后喷拱架之间，自下而上进行。喷嘴垂直于岩面做反复螺旋形运动，喷枪头到受喷面的距离为0.6~1.5m，以保证混凝土喷射密实。同时掌握风压、流量及喷射距离，减少回弹量。喷浆机工作压力根据混凝土坍落度、喷射距离、喷射部位确定，先在0.2~0.7MPa之间选择，并根据现场试喷效果调整。

一次喷射厚度应据设计厚度和喷射部位确定，初喷厚度宜控制在2~5cm，复喷一次喷射混凝土厚度拱顶不宜大于10cm，边墙不宜大于15cm。

(5) 锚杆施工；浅埋段V级围岩，系统锚杆采用Φ22钢筋，28.5根/环，单根长度4m。环向间距1.0m，纵向间距1.0m梅花型布置。

①施工准备：根据设计要求，锚杆杆体、锚垫板在钢筋加工棚内集中加工，锚杆采用砂轮切割机下料，尾部套丝，套丝长度6cm，并与22螺母配套使用。锚杆存放时，套丝部分戴保护套，防止损伤丝扣。

②钻孔：按设计要求准确测量放出锚杆孔位，系统锚杆实际放样时允许偏差为±5cm。采用风动钻岩机钻孔，钻孔完成后，检查孔深，要求不小于锚杆长度。

③清孔：利用高压风清孔，清孔完成后需检查孔径、孔深、孔道倾斜度。

④注浆：采用单管注浆，将注浆管插入锚杆孔位的孔底，反复将注浆管向孔底送入，让砂浆将孔内多余的水挤压出孔外，随后边注浆边拔出注浆管，准备插杆。

⑤插杆：注浆后需要及时插入锚杆，锚杆放入后视需要及时补注浆。锚杆孔注满浆后，将锚杆钢筋插入锚杆孔内，安装止浆塞。

⑥安装垫板：安装时，先要确保垫板与锚杆轴线垂直，并与混凝土紧密接触。当锚杆孔的轴线与孔口平面不垂直时，常采用：螺帽下部采用斜垫圈；采用角形板调整，采用球面的钟形垫板；在垫板后用砂浆或混凝土调整这四种方法之一。

⑦锚杆质量检查和验收

检查锚杆的孔位、孔径、孔深、清孔质量等项目，并按规范要求抽样进行拉拔力试验。

开挖后及时喷射砼，并尽快封闭初期支护，开挖过程中应密切注意观察锚杆施作后岩体周围注浆效果以及喷射砼层的开裂、起鼓及拱架变形等情况，以掌握围岩动态，及时调整开挖及支护参数。

结束语

本公路隧道通过以上洞内外预加固措施实施，后续通过量测数据反馈隧道整体稳定，该方案的实施彻底消除了洞身开挖通过浅埋段可能发生的涌水和塌方冒顶现象，产生了较高社会效益和经济效益，可以作为同类型隧道以后制定施工方案的参考。

参考文献

[1] 邱坚, 杨勋, 陈羽凯, 张启宏, 谢艳波. 隧道浅埋段预加固措施研究与应用[J]. 交通世界, 2021 (22): 137-140.
 [2] 高云龙. 高原铁路隧道洞口浅埋段施工技术研究[J]. 价值工程, 2022, 41 (35): 80-82.