

关于隧道塌方处理技术措施

文 / 刘 沂 中铁六局太原铁路建设有限公司

摘要: 随着我国交通事业的呈蓬勃发展, 基建能力也迈向了新的台阶, 这使得复杂山岭隧道以及长大隧道的建设项目愈发常见。但不容忽视的是, 受困于不良地质条件等诸多因素的干扰, 塌方问题依然是隧道施工过程中频繁出现的工程难题。隧道塌方主要是因地质条件差以及围岩破碎导致, 隧道施工过程中需进行超前地质预报和围岩变形监测, 针对不同围岩采用对应的开挖工法。隧道一旦发生塌方, 不仅导致工期延误、额外增加工程费用, 还会对施工人员的生命安全构成严重威胁, 倘若对塌方事故处理不善, 那么工程质量也将被蒙上一层阴影, 为后续的使用埋下难以预料的隐患。因此, 在隧道建设中, 应采取合理有效的措施, 对隧道塌方进行预防和防治。现场要对塌方的原因进行分析, 方案要有针对性、可行性, 同时还要兼顾省时、省力、和降低工程费用。本文将围绕某高速公路隧道在施工阶段所遭遇的塌方实际状况、背后的诱发因素以及所采取的处理手段展开详细论述, 为同类型隧道塌方问题提供参考。

关键词: 塌方; 原因分析; 处理措施; 效果

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2025. 06. 035

引言

近年来, 高速公路建设的快速发展推动了复杂山岭隧道、长大隧道的广泛应用, 然而, 受不良地质条件等因素制约, 隧道施工中塌方事故频发, 严重威胁施工人员的生命安全, 并带来设备损坏、工期延误及额外费用增加等众多损失。因此, 隧道塌方的预防与处理显得尤为重要。本文通过分析某高速公路隧道施工期间的塌方案例, 探讨塌方原因及针对性处理方案, 旨在为同类型隧道塌方问题的预防与处理提供参考, 确保施工安全, 降低经济损失, 推动隧道建设行业的可持续发展。

一、工程概况

大阿巴2号隧道位于云南省红河州绿春县大黑山乡石皮巩马村南, 属勐绿高速公路, 设计时速80km/h, 左右洞采用分离式结构, 全长1096m。隧道地处构造剥蚀中山沟谷地貌区, 高程1000~1270m, 最大埋深241.0m。地形起伏大, 坡度20°~30°, 进出口端陡峭, 植被发育。地层岩性主要为第四系残坡积碎石、志留系下统砂岩及中、微风化砂岩。地下水位埋深3.9~128.0m, 以基岩裂隙水为主, 正常涌水量748.9m³/d, 最大涌水量2003m³/d, 受降雨影响较大。

隧道主要为IV、V级围岩, 采用复合式衬砌, 开挖断面高9.88m, 宽12.38m。隧道不同围岩级别支护参数见表1。

二、塌方情况概述

隧道从小里程向大里程单口掘进, 其中K175+968-K175+980段设计为IV级围岩, 采用18工字钢, 间距80cm, 初喷混凝土厚度为24cm。根据地质资料以及超前地质预报描述, 岩体以砂岩为主, 强风化, 隧道前方区间接理裂隙极发育, 岩体极破碎, 软弱夹层较发育围岩整体完整性较差, 自稳能力差, 出水状态可能为淋雨状~小股状出水, 围岩判别为IV级, 与设计一致。

现场采用两台阶法施工, 上台阶每循环2榀钢架, 进尺不超过1.6m。掘进过程中掌子面渗水明显, 拱顶出现塌落及掉块。在K175+995处上台阶开挖时, 发现K175+968-K175+978段右侧初支混凝土面出现裂缝并伴有掉块, 人员和机械立即撤离至安全区域。塌腔稳定后, 长度约10m, 高度约2.5m, 径向最深处5m, 塌方量约240m³, 塌方物质为砂质泥岩碎块石。同时, K175+958-Z1K175+968段拱部钢架严重变形, 局部侵限。

表1 围岩复合衬砌支护设计参数表

项目	IV设计参数	V设计参数
超前支护	Φ42超前小导管, L=4.5m, 环向间距50m, 每环27根, 每4榀钢架设置1环	Φ42超前小导管, L=4.5m, 环向间距30cm, 每环45根, 每5榀钢架设置1环
系统锚杆	Φ22砂浆锚杆 L=300cm, 间距100*80cm	Φ25中空注浆锚杆 L=350cm, 间距100*60cm
钢筋网	Φ8钢筋网, @25cm*25cm	Φ8钢筋网, @15cm*15cm
工字钢	I18工字钢, 间距80cm	I20a工字钢, 间距60cm
喷射混凝土	C25喷射混凝土, 厚24cm	C25喷射混凝土, 厚27cm
仰拱	C30混凝土, 厚45cm	C30混凝土, 厚50cm
二次衬砌	C30混凝土, 厚45cm	C30混凝土, 厚50cm
开挖断面面积	108.49 m ²	103.18 m ²

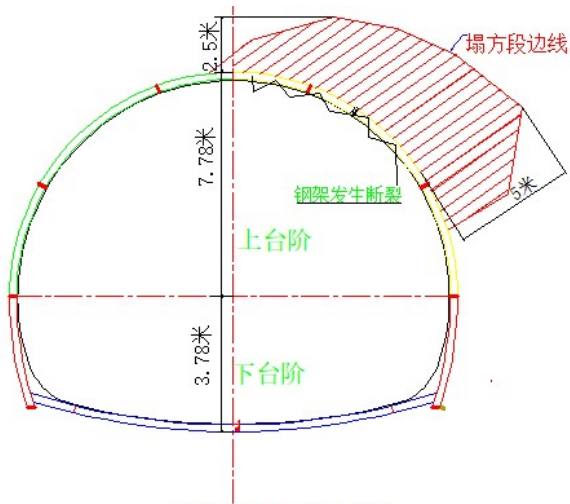


图1 隧洞塌方断面图

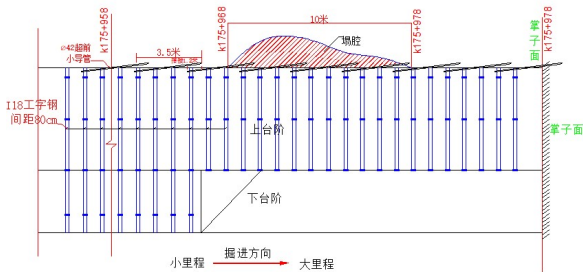


图2 隧洞纵断面图

三、塌方原因分析

隧道塌方主要原因是在隧道开挖过程中，围岩的地质条件发生突变，引起地层松软或地层结构松散，围岩自稳能力较差，因结构支撑体系强度设计不足或超过设计承载能力导致其出现塌方。塌方可以主要归纳为两方面的原因：一是地质的原因，二是施工的原因。地质因素就包括了围岩情况、地质构造变化、地下水位等各种地质因素，而施工原因主要指的是在施工过程中不能严格按照相应的开挖工法和设计规范进行施工。

塌方现场的特征可以总结概括为以下三个方面：

地质条件差：隧道岩体主要为强风化的砂岩，节理裂隙发育，岩体破碎且易风化剥落。虽然开挖后及时进行了初期支护，但由于岩体长期暴露和受力，逐渐出现滑动脱离，最终导致塌方。

支护体系与围岩不匹配：施工中依赖设计图纸和超前地质预报评估围岩等级，但由于施工经验和勘探设备的局限，未能准确判断围岩级别，导致支护参数偏低，支护体系承载能力不足，引发坍塌。

渗水影响围岩软化：岩层透水性较强，上台阶施工时渗水严重，尤其是在坡度和倾角较大的区域，渗水导致岩层松动，围岩内部失衡，进一步加剧了滑动现象。

综上所述，隧道塌方是由地质条件差、支护体系不足以及渗水作用共同导致的。

四、塌方处理方案

(一) 方案制定的原则

塌方处理遵循“先加固、防扩展、后处理、稳通过”的原则，先加固K175+958~K175+968段围岩，加固完成后处理塌方段K175+968~K175+978（上台阶塌方

段），之后顺序处理初支侵限段K175+965.6~K175+968换拱，共计3榀钢架需要换拱，此间衬砌紧跟，完成塌方及初支侵限处理。

(二) 塌方段处理施工准备

(1) 塌方发生时，掌子面施工人员、设备全部安全撤离，塌方体下无其他堆积杂物。

(2) 为稳定围岩，便于塌方处理，需对K175+968~K175+978段进行回填反压，现场采用运土车向洞内拉运弃渣，并将渣土和洞内塌方土体采用机械压实，防止洞顶塌方进一步扩散。

(3) 塌腔岩体自然稳定，短期内顶部无大块岩石脱落，塌腔周边的初支钢架变形基本趋于稳定，喷射混凝土无大面积开裂现象，超前小导管未被砸压脱落。

(三) 施工工艺和方法

1. 塌方后影响段加固处理

为防止隧道进一步塌方并确保作业安全，对K175+958~K175+968段初期支护进行二次加固。该段钢拱架已发生不同程度变形，拱顶初支混凝土开裂、掉块，3榀钢架侵限，需换拱。加固措施如下：

增设I20工字钢：在10m长地段增设I20工字钢，间距1m，沿钢架设置 $\Phi 42$ mm注浆小导管，环向间距1m，长度3.5m，采用1:1水泥浆注浆，注浆压力0.8~1Mpa。

拱脚加固：在拱架底部垫I32工字钢，保证地基稳定；拱脚上端设置两根4.5m长锁脚小导管，与钢架焊接牢固。拱背与原喷射混凝土紧贴，空隙用混凝土填充，相邻两榀钢筋用 $\Phi 20$ 钢筋焊接，环向间距1m。

拱脚回填：利用洞渣对拱脚回填至接近起拱线，防止护拱钢架错动，减少边墙收敛变形。

通过以上措施，增强围岩稳定性，确保后续施工安全。

2. 塌方体加固

由于塌方体较为松散，为防止施工过程中因人员和机械产生的扰动导致继续塌方，需对原塌方体进行注浆加固，加固方法为：首先采用C20喷射混凝土对塌方体表面进行封闭，厚度5~8cm，在混凝土达到设计强度后，在碴体表面垂直打入注浆小导管，对其进行注浆加固，从而提高碴体的固结度，增加对岩壁的反压作用力。现场采用3米长 $\Phi 42$ 小导管径向注浆，间距1m \times 1m梅花形布置，注浆顺序应自下而上，当浆液从孔口溢出后可停止注浆。

3. 塌方段处理

(1) 对已变形破坏的初支钢架和暴露在外的超前小导管进行切割，清除塌壁上危石，对塌腔面喷射C25早强混凝土进行封闭。考虑到塌腔已趋于稳定，塌腔内壁分布不均匀，且操作空间受限，如扰动较大还会造成二次塌方，严重威胁着施工人员生命安全，塌壁上不再设置锚杆和钢筋网。

(2) 分段清除塌碴，塌方段施工采用三台阶进行开挖，由原来的IV级围岩调整为V级围岩支护参数进行施工，在塌方段支立I20型钢钢架支撑，拱架设置预留沉降量30cm，间距0.6m/榀，并与左侧未破坏的钢架焊接牢固，采用锁脚锚杆将钢架固定于左侧稳定的围岩。在I20型钢钢架外焊接 $\Phi 8$ 钢筋网片（@15cm \times 15cm），然后喷射厚度27cm的C25混凝土。

(3) 每次架设一榀钢架，每榀钢架右侧拱脚设4根

中 $\phi 42$ 锁脚导管(L=4.5m)。拱架支立完毕后,沿钢拱架周边打入 $\phi 42$ 径向注浆小导管(L=3.5m),环向间距1m,纵向两榀钢架之间采用中 $\phi 20$ 钢筋连接。对于塌腔深度超过2m的部位,因导管插入深度不足,无法有效注浆,可不施工导管。将钢架与注浆小导管焊接牢固,待初支混凝土封闭成环后进行注浆加固,浆液浓度0.8:1~1:1,注浆压力控制在0.5~0.1MPa。

①小导管加工:

小导管采用 $\phi 42$ 钢管加工,导管管口位置设 $\phi 8$ mm加筋箍;距离管口1.0m范围内不开孔,剩余部分每间隔75mm在环向钻2个注浆孔,孔径8mm,相邻两道孔口方向交错布置;管尖长10cm,先用切割机在端部切除缺口,将其拼接成尖端,并对接缝进行焊接。小导管加工详见图3。

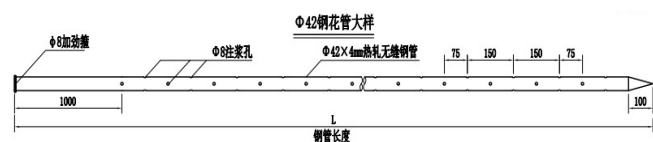


图3 注浆小导管加工图

②钻孔与顶进:

采用YT-28风枪钻孔,施工中采用自制的钻杆连接套进行接长施工。钻头直径比管径大3~5mm,钻孔超钻深度不超过10cm。成孔后将孔内积水和岩粉吹洗干净,采用风钻直接将小导管打入孔中,并用胶泥封堵孔口及周围裂隙封堵严实。

③配制浆液:

水泥浆采用专业搅拌设备进行施工,严格按照配合比进行施工,水泥浆的浓度一般控制在0.5~1。

配置好的浆液存放在由指定的仓桶内,同时要对其进行低速搅拌,防止水泥浆液由于存放时间过长产生离析现象,对注浆效果产生影响。

(4)在塌腔段沿隧道纵向每隔5m在拱顶及右侧方向预埋一根垂直于初支面的 $\phi 108$ 钢管,用做混凝土输送管道,钢管要与初支钢架焊接牢固,防止在泵送混凝土时管口发生松动。同时在拱顶部位预埋两根注浆小导管,其主要作用当泵送塌腔填充混凝土时可作为排气口使用。泵管及注浆小导管埋设深度应超过空腔高度2/3为宜。待初支混凝土强度达到设计强度的80%以上时,对塌腔泵送C15混凝土,泵送混凝土先从下部钢管灌入,待浇筑到管口标高后,在切换至上部管口。为防止拱架因承受混凝土压力过大而发生变形,每次泵送混凝土厚度不超过50cm,浇筑一定高度后,需停滞一段时间待混凝土初凝后继续浇筑。由于塌腔最大高度为5m,坍塌回填混凝土最大厚度控制在3.0m左右,该厚度足以缓冲岩体掉块冲击,塌腔如再回填,会对隧道支护结构造成较大压力,因此无须再进行回填。

(5)塌方段落通过后,塌方段二次衬砌予以加强,由原来的50cm的C30防水混凝土衬砌厚度增加10cm。为防止应初期支护放置时间较长,发生拱顶下沉以及次生灾害,二衬施工要尽快跟进,必要时可进行跳模浇筑,达到快速封闭成环的目的。

4. 施工注意事项

(1)加强进洞人员登记管理,侵限及塌方处理操作人员数量不超过8人,施工过程中由专职安全员进行

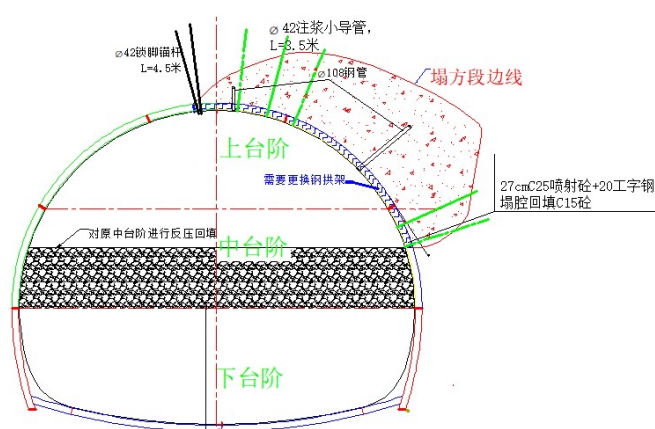


图4 塌方处理方案示意图

盯控,加强瞭望观察,有异响、掉块等现场及时安排人员撤离。

(2)严格按照要求进行监控量测,及时分析监测数据,并形成量测成果,根据实测变形数据将塌方段拱架预留变形量加大30cm;

(3)侵限及塌方处理严格控制换拱进尺、支护措施,逐榀换拱,逐榀支护,每次更换1榀,拆换前做好预加固措施。

(4)对已破损的连接钢架、连接钢筋和钢筋网进行切割时,必须将其全部割断,不得与周边支护结构和岩体有任何联系,防止对原有支护造成扰动。

(5)加强施工过程质量管控,现场技术人员对各工序进行重点盯控,严格执行旁站制度和交接班制度。

(四) 加强监控量测

隧道施工过程中,严格按照要求进行监控量测,及时分析监测数据,并根据预警情况采取强化支护措施或人员设备撤离等措施,做到科学指导现场施工。监控量测能够客观、真实地掌握隧道围岩、支护结构的变形情况,对隧道施工的支护参数进行动态调整,保证隧道结构稳定和施工安全。

在做好隧道内部监测的同时,要加强地表的巡查和监测,重点观察换拱和塌方段对应地表是否有沉降、开裂、变形、地表水渗漏情况等,施工前完善洞顶封水、截水措施,加强地表的巡查和监测,发现异常及时反馈,并应立即采取应急预警措施,以确保施工安全。

结束语

对于隧道塌方的原因可以说是多种因素的综合结果,在方案制定过程中,应审时度势,针对不同情况采取有效的处理措施,贯彻“宁强勿弱,稳扎稳打,步步为营”的原则,再加上施工准备充分,是可以顺利、安全通过的;另外,在处理方案中应考虑隧道永久衬砌结构的加强,以确保隧道的运营安全。

参考文献

[1]《公路隧道加固技术规范》JTG/T 5404-2018.
 [2]《公路隧道施工技术规范》JTG/T 3660-2020.
 [3]王毅才.隧道工程[M].北京:人民交通出版社,2005.
 [4]崔玖江.隧道与地下工程修建技术[M].北京:科学出版社,2005.