

长时间停工条件下炭质板岩地层隧道围岩变形及支护结构补强研究

钟扬¹, 高超², 张海太³

(1. 湖南省机场管理集团有限公司, 湖南 长沙 410137; 2. 中南大学; 3. 云南丽香高速公路投资开发有限公司)

摘要:通过现场调查、围岩变形测试、支护结构图像全景展开技术,分析了不同时间隧道停工导致的围岩变形,同时对停工后支护结构质量进行了评价。研究表明:炭质板岩地层隧道长时间停工后围岩变形加剧,且停工时间越长,停工所导致的围岩变形越大,停工所导致的围岩变形在围岩总变形中占较大比例;停工初期,停工所导致的围岩变形速率较大,且复工后隧道再次开挖扰动易引发围岩变形加剧;停工后初支混凝土脱落严重,钢拱架压弯扭曲。根据研究结果,提出了适用于香丽高速公路炭质板岩隧道停工后支护结构补强加固措施。

关键词:隧道; 炭质板岩; 停工; 支护结构; 补强加固

炭质板岩具有抗剪强度低、节理裂隙发育,遇水易软化等特点,隧道在穿越炭质板岩地层时易出现围岩大变形、初支混凝土开裂、剥落、钢拱架扭曲变形。在复杂地质、地形和施工环境中,不可避免出现由于多种原因导致不同时间的停工,停工期间围岩变形将进一步加剧。因此研究停工情况下围岩变形特征以及支护结构补强加固措施具有实际意义。

对于停工情况下隧道围岩变形,谢桐潜等基于云模型理论,建立了长时间停工隧道初期支护质量评价指标体系。炭质板岩地层隧道常发生围岩大变形,长时间停工隧道围岩变形对后续隧道施工影响很大,目前这方面研究成果少见。该文以香丽高速公路典型炭质板岩地层隧道为工程背景,通过现场调查、围岩变形测试,分析隧道长时间停工围岩变形,对停工后支护结构质量进行评价,并提出支护结构补强加固措施,可为后续工程施工以及类似工程提供参考。

1 工程概况

云南省香格里拉至丽江(香丽)高速公路白岩子隧道、海巴洛隧道、洼里别隧道穿越典型的炭质板岩地层;隧址区地质构造复杂,覆盖层主要分布第四系残坡积层含砾粉质黏土、碎石土夹板岩碎石;下部基岩主要分布三叠系下统灰色、褐色炭质板岩。根据现场揭露,隧道穿越地层为灰、黑色强风化、全风化炭质板岩,强

度较低,薄层状结构,岩层倾角为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$,层理、节理发育,岩体受层理、节理切割后完整性较差,层间黏结力差,遇水易软化、崩解,自稳性极差。

香丽高速公路典型炭质板岩隧道围岩为V级,采用复合式衬砌,具体支护参数为4 m长 $\phi 42\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 注浆小导管,C25喷射混凝土厚27 cm, $\phi 8$ 钢筋网20 cm $\times 20\text{ cm}$,I20a钢拱架,间距60 cm,预留变形量根据围岩情况为20、30、50 cm,二次衬砌采用C30钢筋混凝土,厚度为60 cm。V级围岩衬砌结构断面图如图1所示。

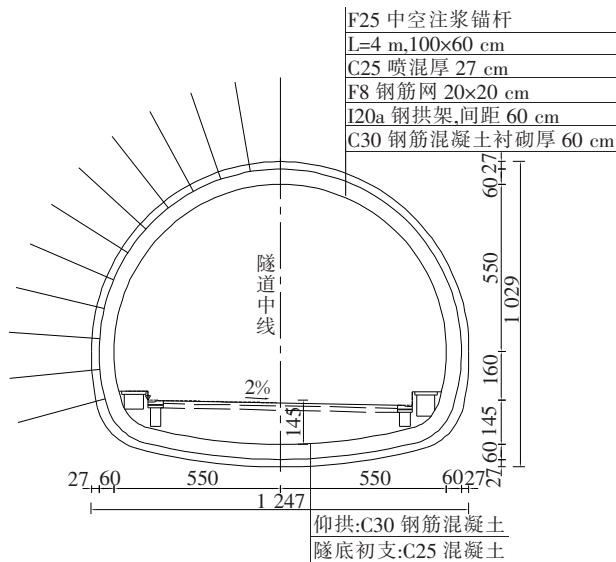


图1 V级围岩衬砌结构断面图(单位:cm)

香丽高速公路白岩子隧道、海巴洛隧道、洼里别隧道主要采用三台阶(预留核心土)法施工:①上台阶采用弧形导坑开挖预留核心土,并施做拱部初期支护;②中台阶开挖,并施做中台阶初期支护;③下台阶开挖,并施做下台阶初期支护;④仰拱开挖,并施做仰拱初期支护及仰拱填充;⑤二衬施工。施工工序图如图2所示,三台阶预留核心土开挖如图3所示。

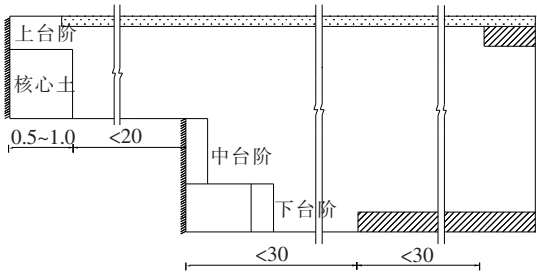


图2 三台阶法开挖工序图(单位:m)

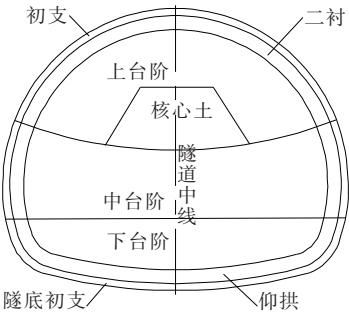


图3 三台阶开挖断面示意图

2 长时间停工条件下隧道围岩变形分析

2.1 隧道施工停工状况调查

香丽高速公路白岩子隧道、洼里别隧道、海巴洛隧道自2016年开工至2020年建成期间,在施工过程中,因各种原因不同程度的停工时有发生。经统计,3座隧道在2017年1月至2018年12月的停工段里程、停工时间、停工时段产生的围岩位移最大值如表1所示。

由表1可知:白岩子隧道、洼里别隧道、海巴洛隧道多处存在不同程度停工,停工时间最短为32 d,最长为108 d。白岩子隧道YK62+625~YK62+655段停工97 d内围岩位移最大为82.4 mm,洼里别隧道ZK64+420~ZK64+450段停工108 d内围岩位移最大为80.4 mm,海巴洛隧道ZK65+800~ZK65+830段停工32 d内围岩位移最大为49.1 mm,停工时间越长,停工时段内发生的围岩变形越大。由于停工期间引发的围岩变形量较大,易对围岩稳定性、结构安全性产生较大影响,因此开展停工段的围岩变形监测,进而分析停工阶段内的围岩变形规律十分必要。

2.2 典型区段隧道施工围岩变形测试

针对香丽高速公路隧道不同停工情况,对隧道停工段位移进行围岩变形监测(包括拱顶沉降和水平收敛),围岩变形监测测点布置如图4所示。根据围岩监

表1 香丽高速公路典型隧道施工停工情况统计

序号	隧道名称	停工段里程桩号	停工时间/d	停工时段围岩位移最大值/mm
1	白岩子隧道	YK62+330~YK62+360	44	62.4
2	白岩子隧道	YK62+625~YK62+655	97	82.4
3	白岩子隧道	YK63+230~YK63+260	36	49.5
4	洼里别隧道	YK64+075~YK64+105	39	50.7
5	洼里别隧道	YK64+400~YK64+445	95	79.3
6	洼里别隧道	YK64+865~YK64+895	33	40.4
7	洼里别隧道	ZK64+420~ZK64+450	108	80.4
8	海巴洛隧道	ZK65+800~ZK65+830	32	49.1
9	海巴洛隧道	ZK66+140~ZK66+175	44	68.1
10	海巴洛隧道	YK66+225~YK66+255	67	73.3

测结果,选取香丽高速公路典型停工段断面围岩变形情况进行分析,典型断面围岩变形监测结果如图5~10所示(图中拱顶位移以沉降为正,水平位移以收敛

为正)。
分析图5~10中典型停工断面围岩变形时程曲线,得出以下结论:

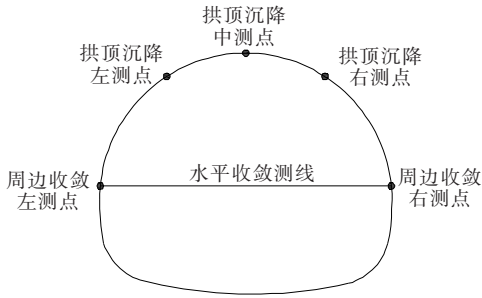


图 4 围岩变形监测测点布置示意图

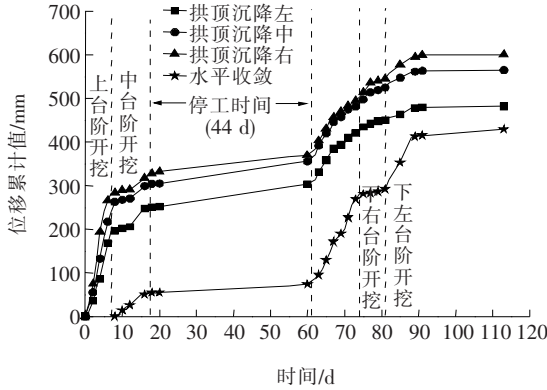


图 5 白岩子隧道 YK62+350 断面围岩变形时程曲线图

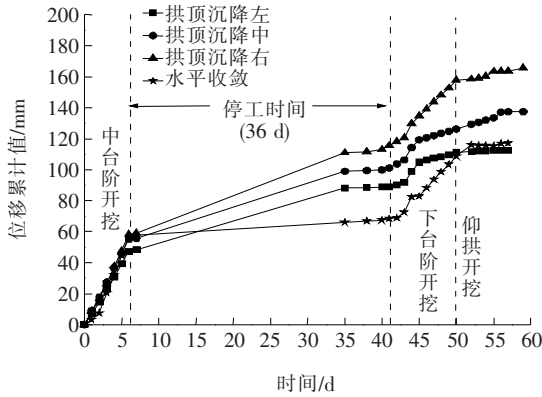


图 6 白岩子隧道 YK63+230 断面围岩变形时程曲线图

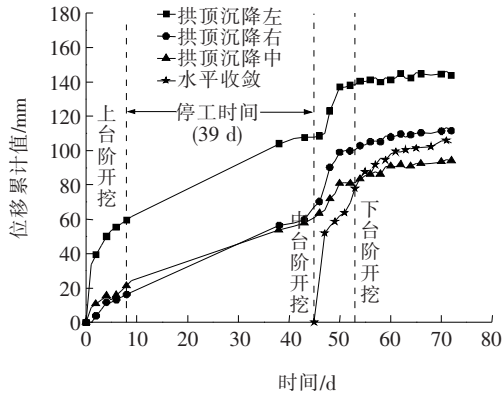


图 7 洼里别隧道 YK64+105 断面围岩变形时程曲线图

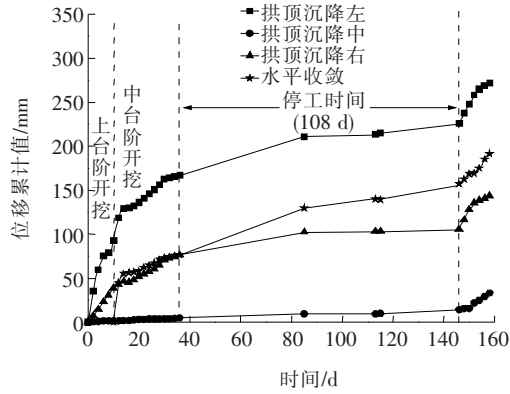


图 8 洼里别隧道 ZK64+440 断面围岩变形时程曲线图

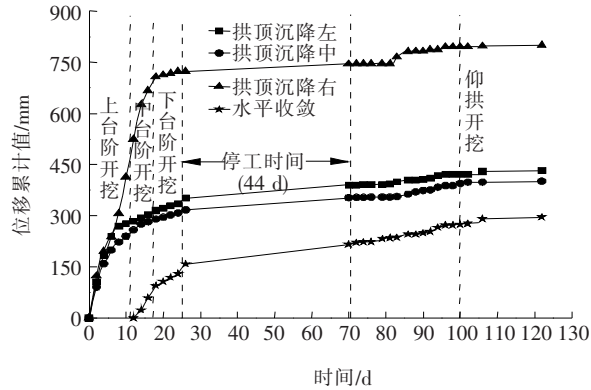


图 9 海巴洛隧道 ZK66+156 断面围岩变形时程曲线图

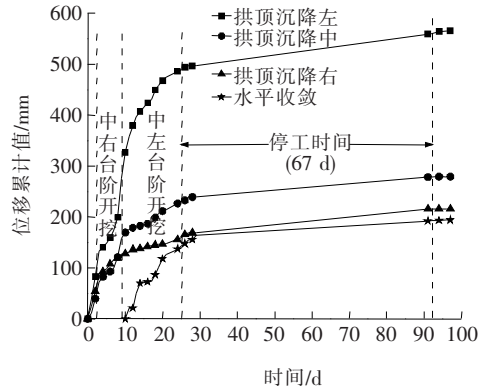


图 10 海巴洛隧道 YK66+245 断面围岩变形时程曲线图

(1) 拱顶沉降及水平收敛时程曲线整体上呈上升趋势,在停工阶段,围岩变形持续增加,且拱顶沉降值及水平收敛值均有增加。停工时段内产生的拱顶沉降值最大达 73.3 mm,停工时段内产生的水平收敛值最大达 80.4 mm。

(2) 通过计算停工时段内产生的围岩位移占围岩总位移的比例可知:白岩子隧道 YK63+230 断面停工时段内所产生的围岩位移占该断面围岩总位移的 38%;洼里别隧道 YK64+105 断面停工时段内所产生

的围岩位移占该断面围岩总位移的45.7%;海巴洛隧道YK66+245断面停工时段内所产生的围岩位移占该断面围岩总位移的23.5%。

(3) 由图6~8可知:停工时段内围岩变形随时间呈非线性增长,停工初期围岩变形速率较大,可达2.8 mm/d,之后围岩变形速率逐渐减小,停工后期围岩变形速率减小为0.95 mm/d。

(4) 由图6、8可知:白岩子隧道YK63+230断面停工时间为36 d,停工时段内围岩位移最大值达49.5 mm;洼里别隧道ZK64+440断面停工时间为108 d,停工时段内围岩位移最大值达80.4 mm。随着停工时间的延长,停工时段内导致的围岩位移最大值也随之增大。

(5) 对比隧道在不同施工阶段停工情况下拱顶沉降时程曲线可知:停工发生在上台阶段施工后,停工段产生的位移最大,最大达57.4 mm;停工发生在中台阶段施工后,停工段产生的位移有所减小,最大达50.3 mm;停工发生在下台阶段施工后,停工段产生的位移进一步减小,最大达39.4 mm。

(6) 在复工后,由于进行隧道开挖支护等施工,对围岩产生扰动,拱顶沉降及水平收敛速率进一步增大,围岩变形增大。

2.3 长时间停工隧道围岩变形特征分析

结合香丽高速公路炭质板岩地层隧道典型停工段围岩变形监测结果以及现场施工情况,分析炭质板岩地层隧道长时间停工围岩变形特征如下:

(1) 停工阶段,围岩变形持续增加,且拱顶沉降及水平收敛均有较大增加。原因为停工后,随着时间的推移,地下水逐渐侵蚀初期支护以及初支混凝土掉块后钢拱架裸露,使得钢拱架逐渐锈蚀,围岩浸水软化,初期支护及围岩强度降低,导致围岩变形持续增大。

(2) 在围岩总位移中,停工时段内所产生的围岩位移占较大比例。因此,长时间停工期间围岩变形应引起重视,并采取相应的处治措施。

(3) 停工时间越长,停工期间的围岩变形越大,且停工期间的围岩变形随时间呈现出非线性增长。停工初期,围岩变形速率较大,较长时间停工后,围岩变形速率逐渐减小。

(4) 不同施工阶段停工,停工后围岩变形不同。上台阶段施工后,停工期间围岩变形较大;下台阶段施工后,停工期间围岩变形减小。原因为上台阶段施工后,围岩应力调整,且初支因锁脚锚杆施工质量不佳、初支悬空等原因,使得围岩变形较大,下台阶段施工后,围岩应

力已释放较多,因此围岩变形较小。

(5) 复工后,进行隧道开挖支护,导致围岩变形迅速增加。原因为复工后进行开挖支护,对应力调整已趋于稳定的围岩再次扰动,导致围岩应力再次调整,围岩变形速率增大,变形进一步加剧。

3 支护结构质量评价及补强加固

3.1 支护结构质量评价

支护结构表现是支护结构质量的重要反映,可以直观地反映出支护结构存在的问题,通过隧道衬砌展开影像生成器软件对香丽高速公路炭质板岩隧道典型停工段支护结构停工区域采集影像进行特征点提取、图像匹配、模型识别、图像展开与拼接处理,获得隧道停工段支护结构全景展开图像。

以洼里别隧道ZK64+422~ZK64+430段为例,该段停工时间为2018年1月31日,复工时间为2018年5月19日,共停工108 d。截至复工时,该段围岩最大累计位移可达213 mm,停工时段内所产生的位移最大达73.2 mm。图11为停工79 d时初支展开图。

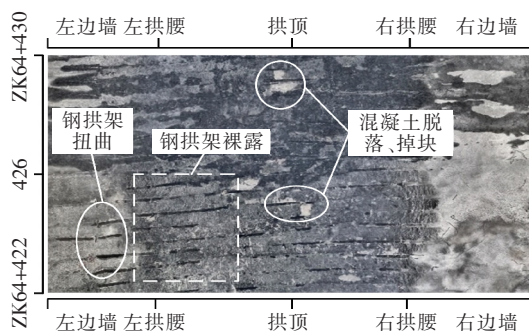


图11 洼里别隧道ZK64+422~ZK64+430段停工79 d支护结构展开图

从图11中可以看出:拱顶及拱腰多处存在初支混凝土脱落、掉块现象,且掉块面积较大,初支表面不平整;左拱腰、拱顶、右拱腰处钢拱架裸露、喷射混凝土未覆盖钢拱架;左边墙钢拱架连接处,钢拱架压弯扭曲变形;钢拱架竖向明显倾斜且倾斜度大于2°。

根据JTG F80/1—2017《公路工程质量检验评定标准》中相关规定,喷射混凝土支护应与围岩紧密黏结,喷射混凝土表面应平整且应无漏喷、钢架外露;钢拱架应垂直于隧道中线,竖向不倾斜、平面不错位、不扭曲,钢架倾斜度应小于2°。洼里别隧道停工段(ZK64+422~ZK64+430)初支混凝土脱落、掉块、表面不平整,钢拱架裸露,钢拱架倾斜且扭曲变形,不符

合相关规定,初支质量较差,应采取相应的处治措施。

3.2 停工期间支护结构质量问题原因分析

(1) 围岩特性。炭质板岩层间黏结力差,遇水易软化、崩解。炭质板岩地层在开挖后,围岩应力释放,围岩压力逐步转移到初期支护上,其因为炭质板岩层间黏结力差,围岩松动导致的。当隧道停工时,初期支护未封闭成环抵抗围岩压力,初支支护处于不断变形中,围岩松动范围扩大,加剧围岩变形,导致初支钢拱架压弯扭曲。

(2) 地下水影响。停工段常伴有地下水渗出,炭质板岩遇水易软化,加剧了围岩变形,同时地下水对初支混凝土及钢拱架的侵蚀,且钢拱架多处裸露,未包裹在喷射混凝土中,钢拱架锈蚀,降低了初期支护的强度,停工时间越长,侵蚀程度越高,初期支护强度越低,停工期间引起的围岩变形越大。

(3) 施工原因。停工时,开挖段初期支护处于未封闭状态,上台阶开挖施做初期支护后,未及时施做锁脚锚杆,且多处初期支护因下一台阶开挖后未及时回填,导致初期支护钢拱架悬空时间较长,从而减弱了初期支护抵抗围岩压力的能力,加剧了围岩变形,导致钢拱架压弯扭曲。

施工现场排水沟不通畅,施工废水经常汇集在下台阶较低洼处,停工期间隧底长时间浸泡在水中,使得隧底围岩软化,导致围岩变形加剧。

3.3 长时间停工后支护结构补强措施

针对香丽高速公路典型炭质板岩地层隧道在长时间停工期间围岩变形加剧、初支变形侵限、钢架扭曲变形等问题,提出相应的处治措施:

(1) 及时施做初期支护。台阶开挖后,及时施做各台阶初期支护,避免停工阶段,因中台阶开挖后,未及时施做初期支护,导致上台阶初期支护钢拱架悬空时间较长,不利于初期支护及围岩稳定。

(2) 及时封闭初期支护。合理控制台阶长度,及时将初期支护封闭成环。在围岩变形较大且因各种原因需停工时,需及时施做仰拱初支,在台阶较长时,需施做临时仰拱或临时横撑将初期支护封闭成环。

(3) 保证锁脚锚杆质量。加强锁脚锚杆施工质量控制。在锁脚锚杆施工时,保证锁脚锚杆打设角度、打设长度,在锁脚锚杆与钢拱架连接时,保证锁脚锚杆与钢拱架的连接面积,使得锁脚锚杆对钢拱架起到约束作用,提高初期支护整体性能。

(4) 减少超挖。架设钢拱架及钢筋网片时,使钢筋网片尽量顶紧密贴掌子面,使得前伸钢筋网片与后

面的初期支护形成整体,保证掌子面的稳定并减少超挖。对超挖部分,回填密实,并使围岩与初期支护密贴,使得初期支护发挥作用,减少围岩变形。

(5) 做好排水措施。做好施工废水、地下水排放措施,保证施工现场无积水,避免因积水导致基底浸水软化,影响围岩稳定性。

4 结 论

以香丽高速公路炭质板岩地层隧道为工程背景,现场调查了典型炭质板岩隧道停工情况,并对停工段围岩变形进行了测试,分析了隧道长时间停工围岩变形特征,并通过隧道支护结构全景展开图,评价了支护结构表观质量,提出了相应的支护结构补强加固措施,得出以下主要结论:

(1) 通过现场调查及围岩变形测试,炭质板岩地层隧道在停工后,围岩变形加剧。停工时间越长,停工所导致的围岩变形越大,且停工初期围岩变形速率较大,停工达到一定时间后,围岩变形速率逐渐减小;停工所导致的围岩位移在围岩总位移中占较大比例。

(2) 通过对隧道支护结构全景展开图像分析,停工后初期支护易出现混凝土掉块、钢拱架连接处压弯扭曲、拱顶处易发生钢拱架压弯等问题。

(3) 在炭质板岩地层隧道停工段,可采取及时施做初期支护并封闭成环、保证锁脚锚杆施工质量、减少超挖、回填密实、加强排水等措施对长时间停工段支护结构进行补强加固。

参考文献:

- [1] 宋勇军,雷胜友,毛正君,等.干燥和饱水状态下炭质板岩力学特性试验[J].煤炭科学技术,2014(10).
- [2] 郭健,阳军生,陈维,等.基于现场实测的炭质板岩隧道围岩大变形与衬砌受力特征研究[J].岩石力学与工程学报,2019(4).
- [3] 方星桦,刘澍,陈维,等.软岩隧道围岩变形季节性特征与防控措施研究[J].防灾减灾工程学报,2020(5).
- [4] 谢桐潜,黄仁东,彭怀德.基于云模型的长时停工隧道初期支护质量评价[J].安全与环境学报,2018(1).
- [5] 云南省交通规划设计研究院.国家高速公路网 G0613 云南省香格里拉至丽江高速公路第 7 标段两阶段施工图设计,第四册《隧道》[Z],2015.
- [6] 彭斌,祝志恒,阳军生,等.基于全景展开图像的隧道衬砌渗漏水数字化识别方法研究[J].现代隧道技术,2019(3).
- [7] JTG F80/1—2017 公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程[S].