

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.047

浅埋段软岩隧道施工工法优化模拟应用分析

李忠¹, 王伟^{1,2*}, 林玉刚^{1,3}, 沈学军^{1,3}, 翟世鸿^{1,4}, 李赤谋^{1,5}, 毛永强^{1,5}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心; 4. 长大桥梁建设施工技术交通行业
重点实验室; 5. 中交文山高速公路建设发展有限公司)

摘要:隧道洞口浅埋段施工易受地表水及不良地质条件影响,隧道大变形或掌子面溜塌事故频发,施工安全风险极高。为解决洞口浅埋段软岩隧道变形控制难题,建立三维数值模型,对不同施工工法的围岩变形及其优缺点进行对比分析,确定采用三台阶临时仰拱法,并通过现场应用验证了优化工法的可行性。结果表明:该工法可在中、下台阶增设临时仰拱,隧道初期支护及时封闭成环,支护结构受力得到改善,对变形控制效果较好。虽相比CRD法在控制隧道变形方面略有不足,但综合各方面因素,优先考虑选择该工法,并采取了分阶段支护参数加强措施。经现场施工实践验证,采用该工法配合分阶段补强支护措施,初期支护变形增长速率很快减小并趋于稳定,可有效控制隧道初支大变形,保证施工安全和进度。

关键词:隧道工程; 洞口浅埋段; 工法优化; 三台阶临时仰拱法; 分阶段控制措施; 现场应用验证

近几十年来随着交通建设的发展,中国铁路和公路隧道工程建设取得了令世人瞩目的成就,无论是建设规模、建设速度,还是已经投入运营的工程数量皆为世界第一。目前,不同长度、不同类型的山岭隧道大量涌现,难免会遇到地质条件复杂及穿越不良地质带的情况。其中隧道进口浅埋段软岩大变形灾害较为常见,严重影响施工安全与进度,也增加工程经济负担。而有关软岩隧道大变形控制技术的研究颇受关注,也取得了一定研究成果。汪波等依托杜家山公路隧道从围岩变形能释放及优化支护结构受力等方面提出了让压支护结构系统,改善了软岩隧道支护结构受力特性;谭杰依托三亚隧道对穿越全风化石英富水软弱地层段施工技术进行研究,提出了水平旋喷预加固处治方案;赵志刚等依托大变形隧道事故案例,结合地质及围岩特点研究了软岩隧道变形及破坏特征和原因,提出了合理有效的变形控制技术 & 施工工艺;戴永浩等依托大梁隧道工程对开挖后的围岩变形进行监测分析,提出“拱架+锚杆+钢筋网”协同联合支护方案,成功解决软弱围岩支护难题;张龙生等依托莲花山隧道穿越富水软岩塌方过程中的围岩及支护应力、位移及渗流

场进行分析,提出塌方综合治理措施;赵伟等通过理论和数值模拟计算研究了让压预应力锚索在隧道大变形中的应用,解决了高地应力、高流变性软岩大变形控制难题;李贤等依托某中和村隧道对大变形软岩隧道的变形规律进行研究,得出了隧道二衬最佳支护时机。

综上所述,软岩大变形是国内外隧道施工中面临的共同核心难题,但由于隧道工程地质条件的复杂性,大变形问题在理论和实践方面的研究还不够,设计和施工企业也没有形成行之有效的变形控制技术方案。基于此,该文依托在建大法郎隧道工程,对软岩隧道洞口浅埋段变形特征及原因进行分析,并进行不同施工工法下的数值模拟研究,提出适合于该隧道的施工工法。

1 依托工程概况

在建大法郎隧道位于云南省西畴县莲花塘乡,为分离式单洞两车道隧道,左线隧道总长 3 390 m,右线隧道总长 3 375 m,属于特长公路隧道,隧道最大埋深约 206.5 m。隧道进口段受不良地质影响,总体进度缓慢,单洞平均进尺为 11.5 m/月,隧道初支侵限与掌

收稿日期:2021-02-10(修改稿)

基金项目:云南省交通运输厅科技创新示范项目(编号:云交科教[2019]15号)

作者简介:李忠,男,大学本科,工程师。E-mail:283969223@qq.com

*通信作者:王伟,男,硕士,工程师。E-mail:wangw2018@foxmail.com

子面溜塌事故频发,施工安全风险极高。根据地质补勘揭露显示,隧道进口位于一松散堆积体内,堆积体厚为3~50 m,坡体物质以板岩、炭质页岩风化残留形成的粉质黏土、含砾粉质黏土、碎石、块石为主,土中粗颗粒成分含量约为55%。该隧道进口段围岩松散破碎,受地表水及持续性的降雨影响,进洞段围岩渗水严重,围岩遇水软化成泥,强度降低,基本丧失自稳能力,严重影响围岩稳定性和初支支护效果。

2 现场大变形特征及原因

隧道施工过程中掌子面经常出现溜塌、掉块及地表塌陷等破坏现象。初支大变形特征主要表现为以下几点:

(1) 围岩变形量大、变形速率快

YK42+495~YK42+515 围岩段累计拱顶沉降量较大,达612~631 mm,累计周边收敛为225~397 mm,因此该围岩段初期支护侵限。其中典型断面YK42+460最大沉降速率为96.0 mm/d,现场及时采取补强措施后,变形速率衰减较快,但由于局部收敛变形过大,导致拱腰塑形挤出现象。

(2) 掌子面挤出变形、拱架扭曲

通过纵向挤出位移对比分析得出:掌子面纵向挤出位移普遍较大,最大达到134.6 mm,掌子面出现鼓出。右拱肩至拱腰位置测点纵向挤出位移明显大于左拱肩至拱腰位置测点,边墙位置次之,拱顶位置测点最小,所以导致在拱腰偏下位置型钢扭曲严重。

(3) 变形易受开挖扰动

典型断面YK42+400变形速率波动性较大,表明围岩变形受施工开挖扰动影响显著,尤其是上台阶、中台阶开挖引起的变形最大,占总变形量的80.41%,仰拱施作占5.10%,主要是由于采用环形台阶预留核心土法,上、中、下台阶左右侧均需错开施工,工序衔接不当导致开挖步距较长,初支闭合所需时间长,因此,该工法不利于软弱围岩隧道变形控制。而根据各施工阶段围岩变形分析可知,上、中台阶开挖是围岩变形控制的关键工序,选择合理的施工工法缩短上中台阶长度,及时初支闭合成环,将有利于控制围岩整体变形,因此提出对现场施工工法进行优化。

3 工法优化数值分析

3.1 数值模型建立

考虑隧道开挖的影响范围,在减少“边界效应”的

前提下,模型建立时选取3~5倍洞径(3D~5D)的计算范围,整个模型尺寸为80 m(长)×24 m(宽)×85 m(高)。其中,上边界取至地表,隧道埋深约为35 m,隧道周边围岩为均质,模型单元全部采用三维Solid单元,初期支护采用Shell单元,锚杆采用Liner单元。假设沿隧道开挖轴线方向为Y方向,竖直向上为Z方向,隧道掘进方向右侧为X方向,整个模型上部地表为自由边界,其余边界均施加法向约束。为了保证计算精度和速度,将开挖区域的单元网格进行加密,远离开挖区域的网格相对稀疏。模型自上而下依次为:粉质黏土、含砾石粉质黏土、全风化页岩、强风化页岩。

3.2 计算参数选取

应用数值计算软件反演分析确定符合现有变形特征及支护参数下的地层参数(图1),进而开展4种不同工况下的数值模拟分析,以确定合理的施工工法。参照隧道设计支护参数及规范,钢拱架的支护作用采用等效刚度的方法计算,即将钢拱架的弹性模量折算到初支混凝土中。具体计算方法为:

$$E_c = E_0 + \frac{A_s E_s}{A_c} \quad (1)$$

式中: E_c 为折算后混凝土弹性模量(MPa); E_0 为原混凝土弹性模量(MPa); A_s 为钢拱架截面面积(cm^2); E_s 为钢材弹性模量(MPa); A_c 为混凝土截面面积(cm^2)。模型计算参数如表1所示。

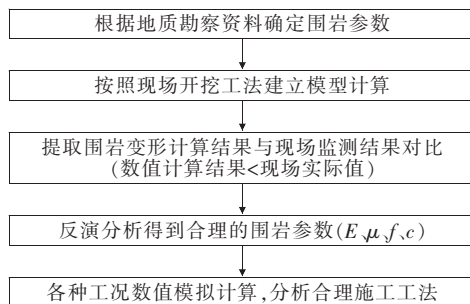


图1 地层参数反演分析流程

表1 计算模型参数

| 材料 | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/($^\circ$) |
|-------|-------------------|------|--|---------|-------------------|
| 粉质黏土 | 6.5×10^1 | 0.38 | 1 800 | 20.0 | 40.0 |
| 粉质黏土 | 8.0×10^1 | 0.26 | 1 980 | 53.5 | 35.0 |
| 夹碎石角砾 | | | | | |
| 全风化页岩 | 2.7×10^2 | 0.24 | 2 050 | 120.0 | 28.0 |
| 强风化页岩 | 1.0×10^3 | 0.20 | 2 200 | 300.0 | 16.7 |
| 锚杆 | 2.0×10^5 | 0.30 | 7 800 | — | — |
| 初期支护 | 2.6×10^4 | 0.25 | 2 200 | — | — |

3.3 数值模拟工况

开展 4 种不同开挖工况下的数值模拟研究,分别为:工况 1 为三台阶预留核心土法(模拟现场实际工法)、工况 2 为三台阶临时仰拱法、工况 3 为 CD 法、工况 4 为 CRD 法,如图 2 所示。其中,环形台阶预留核心土法施工过程模拟为上台阶开挖进尺为 0.6 m,上台阶高度为 3.5 m,长度为 5 m,核心土高 2 m,宽 4 m;中台阶和下台阶开挖进尺为 1.2 m,中台阶高度为 3.5 m,长度为 6 m,中台阶左右侧间隔 3 m;下台阶高度为 3.5 m,长度为 6 m,下台阶左右侧间隔 3 m,仰拱一次进尺开挖长度为 3 m,相应初期支护及时封闭成环。其他工况模拟均参照工况 1 进行调整,开挖进尺均为 0.6 m,相应各台阶步距与之相对应。

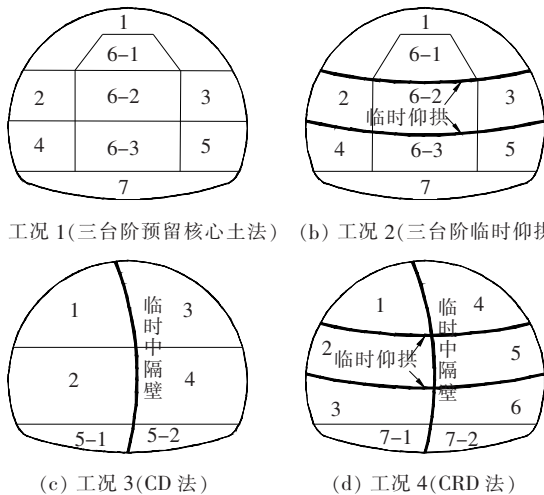


图 2 4 种模拟工况示意

3.4 计算结果分析

3.4.1 地表沉降分析

图 3 为不同施工工况下的地表沉降曲线。

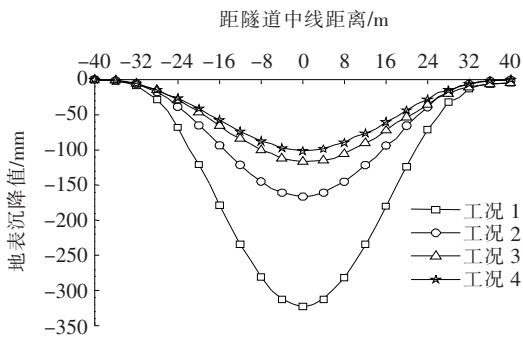


图 3 地表沉降曲线

由图 3 可得:隧道开挖施工引起的地表沉降呈现典型的“凹”形沉降槽,沉降量变化趋势较一致,且沉降槽宽度较大,地表中心线处沉降量最大,向两侧逐渐减

小,减小速率较慢。工况 1 采用环形台阶预留核心土法施工时,地表最大沉降为 323.07 mm,而工况 2、3、4 地表最大沉降值相比较小,分别为工况 1 的 51.54%、36.17%及 31.36%,说明工况 2、3、4 控制地表沉降效果均比工况 1 好。

3.4.2 洞内周边位移分析

(1) 竖向位移和水平位移

图 4 为 4 种工况下隧道开挖完成后围岩竖向位移和水平位移(左图为竖向位移,右图为水平位移)。

从图 4 可以看出:隧道开挖引起的围岩变形整体表现为拱顶沉降较为明显,下部仰拱产生地层隆起,围岩变形基本上关于隧道中心线呈对称分布状态,沉降量由两边向中间逐渐增大。而水平位移最大值主要出现在隧道两侧拱腰及拱脚位置,呈现“X”形分布。

图 5、6 分别为不同工况下竖向位移和水平位移随施工步变化曲线及占比。

从图 5、6 可以看出:隧道洞内变形随施工步呈“厂”字形分布。并且水平位移随施工步的变化规律与竖向位移规律相似,但先期水平位移普遍比竖向位移大,说明松散软岩隧道开挖初期围岩应力释放时,前方围岩水平初始地应力较大,但总体上还是竖向位移大于水平位移,也体现出了松散软弱围岩隧道最大位移与最大主应力方向正交的规律。另外,与 CRD 法相比,三台阶临时仰拱法在上台阶开挖时位移占比较大,而在下台阶、中台阶及仰拱施作时均比 CRD 法小,表明采用三台阶临时仰拱法,上台阶开挖后增加临时仰拱,及时封闭初期支护后变形增长速率逐渐减小并趋于稳定,也进一步表明初支及时封闭对围岩变形控制具有重要作用。而 CRD 法工序繁多、围岩扰动频繁,初支闭合时间长,初支封闭台阶长度长,所以各施工阶段围岩变形减小缓慢,但总体变形较小。

(2) 掌子面挤出位移

图 7 为不同工况下掌子面挤出位移云图。

从图 7 可以看出:不同工况下掌子面挤出变形主要集中在掌子面临空面,其中各工况上台阶断面挤出位移最大,由断面中心向四周逐渐减小,而下台阶掌子面挤出位移量总体小于上台阶,但分布规律类似,主要由于上台阶开挖时相当于围岩超前应力释放,所以导致下台阶上部围岩应力减小,故下部分挤出位移相比较小。此外,工况 4 掌子面挤出位移最小,工况 1 掌子面挤出位移最大,而工况 2 比工况 1 减小了 8.49%,因此,在控制掌子面挤出位移方面,三台阶临时仰拱法由于临时仰拱改善了支护结构受力,掌子面挤出变形

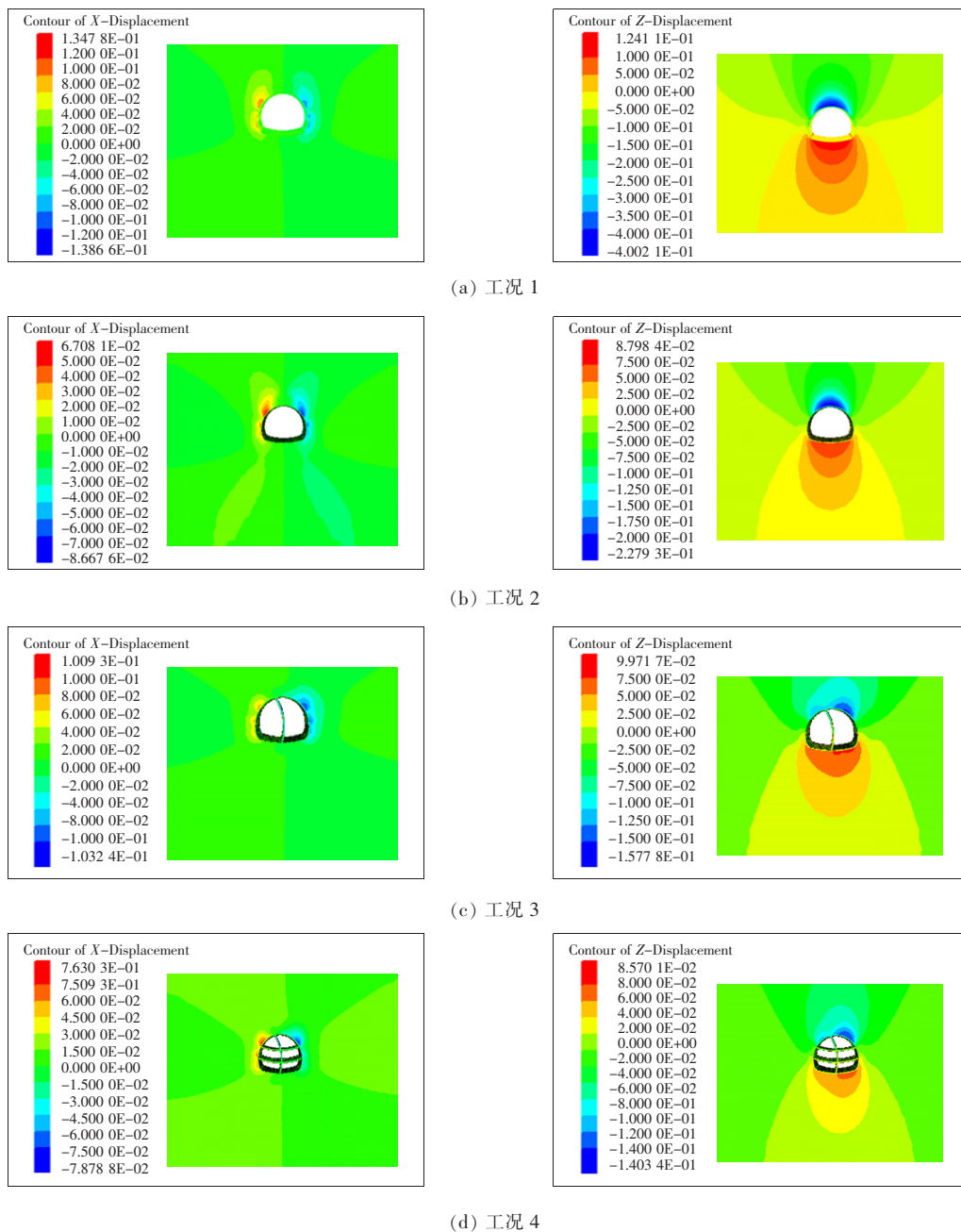


图 4 4种不同工况下竖向位移和水平位移(单位:m)

也相应较小。

3.4.3 对比分析

表 2 为各工况竖向位移与水平位移对比。

从表 2 可知:不同工况下的竖向位移大小关系为:工况 1>工况 2>工况 3>工况 4;不同工况下的水平位移大小关系为:工况 1>工况 3>工况 2>工况 4;不同工况下的掌子面挤出位移大小关系为:工况 1>工况 2>工况 3>工况 4;因此,工况 4—CRD 法在围岩变形控制方面有着良好的优势,而三台阶临时仰拱法在控制变形方面亦有较好的优势,综合考虑工期、施工

工序及技术经济效益等方面,在允许围岩产生一定变形的情况下,优先考虑选择三台阶临时仰拱法。为了进一步保证优化开挖工法对围岩大变形的控制,同时也采取了相应支护参数加强措施。

4 现场应用及效果

4.1 现场应用措施

三台阶临时仰拱法具体施工工艺流程为:① 上导洞开挖与支护;② 上断面核心土开挖,并施作上台阶

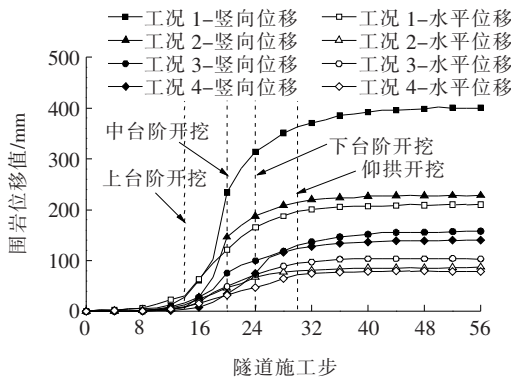


图 5 不同工况下围岩位移随施工步变化曲线

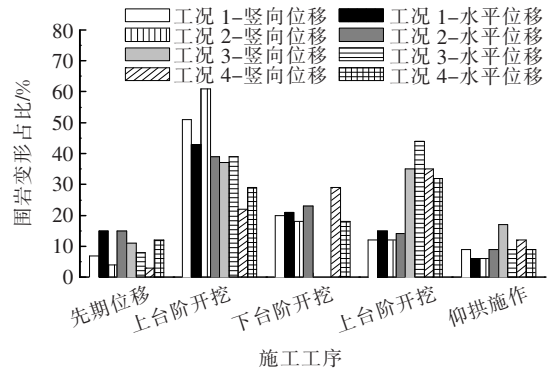
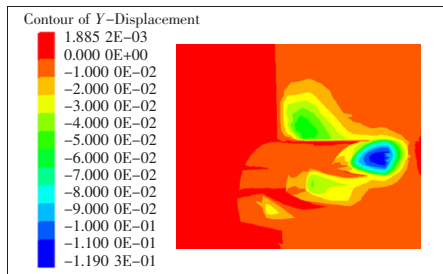
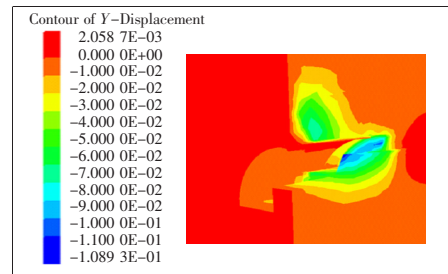


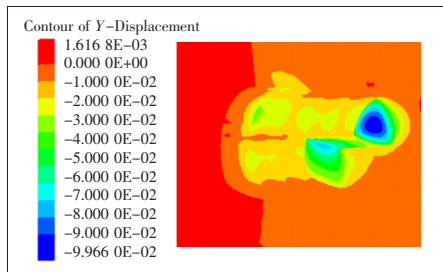
图 6 不同工况下围岩变形占比



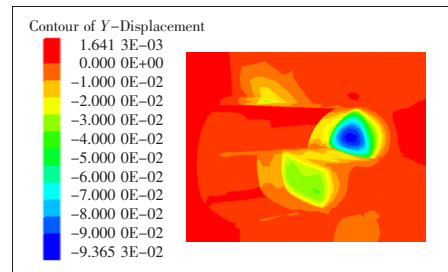
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 4

图 7 不同工况下掌子面挤出位移(单位:m)

表 2 各工况位移及优缺点对比

| 工况 | 最大竖向位移/mm | 最大水平位移/mm | 最大挤出位移/mm | 优点 | 缺点 |
|----|-----------|-----------|-----------|------------------------------------|----------------------------|
| 1 | 400.21 | 138.66 | 119.03 | 核心土能够稳定隧道掌子面 | 预留核心土干扰施工,开挖次数多,初支闭合时间长 |
| 2 | 227.93 | 86.68 | 108.93 | 工法灵活、适应性强,能及时闭合成环,有利于控制水平位移,工序相对简单 | 上下台阶作业存在干扰,需额外增加临时仰拱作业 |
| 3 | 157.93 | 103.24 | 99.66 | 有利于控制竖向位移 | 作业空间相对较小,工序相对复杂化,成本高,施工进度慢 |
| 4 | 140.38 | 78.79 | 93.65 | 控制隧道变形较严格 | 作业面狭窄,工序复杂繁多,相互干扰,施工进度慢 |

临时仰拱,不得少于 4 榀;③ 根据监控测量数据,拆除上台阶后两榀临时仰拱,中导坑左右侧开挖与支护;④ 施作中台阶临时仰拱,不得少于 4 榀;⑤ 根据监控测

量数据,拆除中台阶后两榀临时仰拱,下导坑开挖与支护;⑥ 仰拱开挖与支护(按 3m 每循环开挖支护);⑦ 施作仰拱;⑧ 仰拱填充;⑨ 二次衬砌浇筑。

现场施工控制技术要点主要包括3个方面,分别为:设计方面要求施作临时仰拱时需设置合理矢拱高,提高支护抗变形能力;施作时机方面要求临时仰拱应及时、逐榀跟进,逐榀拆除,有效仰拱不少于4榀,施作灵活,可根据现场监控量测数据确定施作位置(可上台阶、可中台阶);现场施工要求清理台阶下虚渣及杂物,各节临时仰拱在全环封闭之前置于稳固的基础上,并保证足够的承载力,临时仰拱连接位置采用预留钢板螺栓连接牢固,并保证纵向连接的稳定性。

同时现场也根据围岩预留变形量及不同施工阶段采取了补强加固措施,如图8所示。在上台阶施工完成后增加上台阶临时套拱和斜撑(与原初支拱架同型号),临时斜撑角度为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$;在中台阶施工时预留套管,当中台阶变形过大,可增加 $\phi 76$ mm长度为6~8 m的中管棚进行围岩深部注浆补强,从而起到主动加固围岩,控制围岩塑性区发展等作用,有效控制了围岩大变形;在上、下台阶施工时采用每榀拱架两侧增加2根长度5.0 m的 $\phi 42$ mm锁脚锚管进行加固,以防止拱脚落空下沉。此外,拱架连接板位置采用22号槽钢作为纵向连接,其他位置采用10号槽钢,形成一个受力整体抵抗围岩纵向变形,防止拱架扭曲变形。

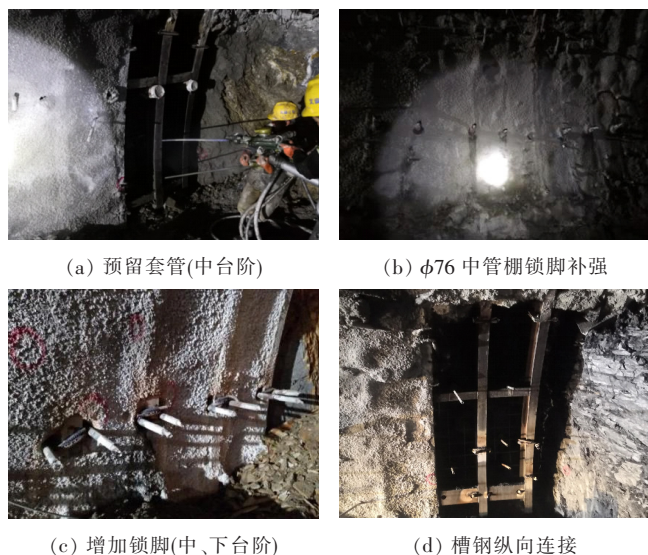


图8 现场支护加强措施

4.2 现场应用效果

图9为拱顶沉降曲线对比分析图。

从图9可以看出:典型断面YK42+470大变形段,最大累计沉降为661.9 mm,隧道开挖前期围岩变形速率较大,最大达到59.8 mm/d,远大于规范5 mm/d的要求;而采取优化工法及加强施工措施后典型断面YK42+528最大累计沉降为296.6 mm,最大

沉降速率明显减小,围岩变形很快趋于稳定,最终累计变形量小于预留变形量值,初支局部挤出现象明显改善,初支圆顺光滑,可避免出现初支侵限现象。

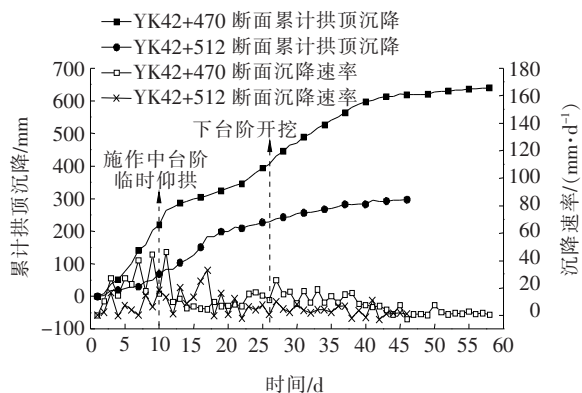


图9 拱顶沉降曲线对比分析

5 结论

(1) 洞口浅埋段软岩隧道受地层岩性及地表水等因素影响,总体表现出围岩变形量大、变形速率快,掌子面挤出、拱架扭曲变形,变形易受开挖扰动等特点;而初支变形破坏过程主要为:围岩变形量增加→初支出现裂缝、掉块→拱架发生扭曲→初支开裂、掉块加剧→溜塌或冒顶塌方。受施工工法影响及工序衔接不紧密,初期支护封闭不及时,导致上、中台阶开挖引起的围岩变形较大,因此,上、中台阶施工是围岩变形控制的关键阶段。

(2) 对隧道施工工法优化数值模拟分析结果表明:采用三台阶临时仰拱法施工,上台阶开挖后增加临时仰拱,及时封闭初期支护使变形增长速率明显减小并趋于稳定,总体变形控制较CRD法存在劣势,但综合考虑工期、施工衔接及技术经济效益,优先考虑选择三台阶临时仰拱法。采用三台阶临时仰拱法施工时,为更好发挥临时仰拱的作用,同时从设计、施作时机及施工等3个方面提出了相应的控制要点。

(3) 将三台阶临时仰拱法应用于现场实践中,可在上台阶、中台阶或上中台阶施作临时仰拱,施作位置较灵活,并根据围岩变形情况,合理选择不同支护加强措施,围岩变形速率及累计变形量明显减小,围岩变形很快趋于稳定状态,防止了隧道初支侵限的发生。

参考文献:

- [1] 汪波,王杰,吴德兴,等. 让压支护体系在软岩大变形公路隧道中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016(10).