

## 浅埋软弱围岩隧道破坏特征与施工方法研究

蔡书洪

中铁九局集团第一建设有限公司, 江苏 苏州 215299

**[摘要]**浅埋软弱围岩隧道施工极易发生掉块、坍塌等灾害事故, 严重损害工程稳定性和结构耐久性。针对浅埋软弱围岩隧道施工力学行为与围岩稳定性, 文中以安康隧道浅埋段施工为研究对象, 建立了浅埋软弱围岩隧道数值模型, 基于隧道围岩破坏特征的数值模拟结果, 提出了改进的三台阶施工方法, 主要研究结果为: 浅埋软弱围岩隧道开挖卸荷引起围岩应力扰动及重分布, 自重应力作用下浅埋隧道拱顶、地表和拱脚围岩变形与破坏显著, 三台阶法施工对浅埋软弱围岩适应性差; 提出了浅埋软弱围岩隧道三台阶+临时横撑施工工法, 安康隧道现场监测结果验证了改进三台阶法的合理性, 并阐述了临时横撑拆除和施工控制要点, 能够为类似条件下隧道施工方法设计提供有益参考。

**[关键词]**浅埋隧道; 软弱围岩; 围岩破坏; 改进三台阶法

DOI: 10.33142/ec.v6i9.9429

中图分类号: U451.2

文献标识码: A

### Research on the Failure Characteristics and Construction Methods of Shallow Buried Soft Surrounding Rock Tunnel

CAI Shuhong

First Construction Co., Ltd. of China Railway No. 9 Group, Suzhou, Jiangsu, 215299, China

**Abstract:** Shallow buried soft rock tunnel construction is prone to disasters such as falling blocks and collapses, which seriously damage the stability and structural durability of the project. In response to the mechanical behavior and stability of shallow buried weak surrounding rock tunnel construction, a numerical model of shallow buried weak surrounding rock tunnel was established based on the construction of the shallow buried section of Ankang Tunnel. Based on the numerical simulation results of the failure characteristics of the tunnel surrounding rock, an improved three step construction method was proposed. The main research results are: the disturbance and redistribution of surrounding rock stress caused by excavation unloading of shallow buried weak surrounding rock tunnel. Under the action of self weight stress, the deformation and failure of the arch crown, surface, and arch foot surrounding rock of shallow buried tunnels are significant, while the three step method construction has poor adaptability to shallow soft surrounding rock; The construction method of three steps and temporary transverse bracing for shallow buried weak surrounding rock tunnels was proposed. The on-site monitoring results of Ankang Tunnel verified the rationality of the improved three steps method, and elaborated on the key points of temporary transverse bracing removal and construction control, which can provide useful reference for the design of tunnel construction methods under similar conditions.

**Keywords:** shallow buried tunnel; weak surrounding rock; surrounding rock failure; improved three step method

#### 引言

随着我国交通基础设施建设规模和速度不断发展, 隧道建设获得了长足的进步与发展, 设计水平和施工技术不断提升, 尤其是面向复杂地质条件的隧道施工方法研发, 许多高效/安全的施工方法逐渐应用于复杂区域隧道建设中<sup>[1-3]</sup>。隧道开挖和施工对隧道围岩的剧烈扰动, 浅埋软弱围岩隧道段极易产生掉块和塌落, 隧道埋深较浅时, 塌落区容易发展至地表, 造成严重的工程事故<sup>[4-5]</sup>。李鹏飞等认为软弱围岩隧道变形主要由岩体变形和结构变形构成, 隧道设计应优化施工工艺和提高支护体系强度; 张成平等分析浅埋软弱围岩隧道的破坏研究, 得到塌方是浅埋软弱围岩的主要潜在破坏风险, 隧道开挖后地表先于隧道洞周产生裂缝, 并且产生渐进性破坏和突发性塌方; 任育

珍等分析浅埋软弱围岩隧道变形特征, 无论是一次性断面开挖或台阶分步开挖, 均产生严重的软弱隧道掌子面挤出和隧道拱顶下沉和地表沉降; 李同安通过 ABAQUS 软件分析了不同开挖施工条件下浅埋软弱围岩隧道变形特征, 得到分台阶开挖对浅埋软弱围岩隧道变形控制较好; 熊造提出了软弱围岩大断面隧道动态分部施工工法, 与常规三台阶法、CRD 法、CD 法及双侧壁导坑法等工法对比分析, 验证了提出施工工法的可行性; 陈磊分析了 CD 法应用于软弱围岩隧道破坏特征, 得到采用 CD 法施工浅埋软弱围岩隧道, 需要进行围岩超前加固才可确保施工安全<sup>[6-11]</sup>。

浅埋软弱围岩段隧道开挖施工时, 隧道发生坍塌的危险概率较大, 传统的隧道三台阶法难以适应复杂地质环境, 因此, 为更好地保障隧道安全施工, 本文以安康隧道浅埋

软弱围岩段施工为工程背景,建立了安康隧道数值分析模型,分析了浅埋软弱隧道三台阶开挖围岩变形破坏特征。提出了三台阶+临时横撑的改进施工方法,详细阐述了三台阶+临时横撑施工方法的施工步骤和控制要点,通过现场监测数据的分析验证改进施工方法的合理性,研究结果以期类似条件下软弱围岩隧道施工方法设计提供经验借鉴。

## 1 浅埋软弱围岩隧道破坏特征

### 1.1 工程概况

安康隧道起讫里程 DK164+445~DK171+400,长度 45.87m,全长 7001m,为单洞双线隧道,最大埋深 160m,最小埋深 2 米。DK168+550 处设有斜井 1 处/501m (-8.23%/54°),明挖段 1 处/150m (DK170+330-DK170+480),为 I 级高风险隧道。安康隧道围岩分级,如表 1 所示,其中,隧道穿越多个复杂地质区域,尤其是浅埋软弱围岩地区,V 级围岩及更差围岩的长度 2971 m,约占隧道全长的 43.5%。

表 1 安康隧道围岩分级统计表

隧道名称	全长 (m)	围岩级别长度 (m) 及所占比例 (%)			
		III	IV	V	VI
安康隧道	7001	1380	2650	2105	866
占正线比例 (%)		19.7%	37.8%	31.1%	12.4%

### 1.2 数值模型及力学参数

安康隧道跨度约为 15.0m、高度为 12.5m,为消除边界效应的影响,数值模型水平方向尺寸为跨度的 5 倍,竖直方向为隧道高度的 3.6 倍,模型尺寸为 75.0×45.0×10.0m。隧道受力主要以围岩的自重应力为主,埋深为 15.0m。数值分析的边界条件为模型底部固定,侧向施加水平方向位移约束,模型顶部为自由边界,顶面设为自由边界。安康隧道浅埋段围岩质量较差,主要为 IV 级围岩和 V 级围岩,根据《公路隧道设计细则》<sup>[12]</sup>,安康隧道围岩力学参数取值为弹性模量为 1.30GPa、泊松比为 0.30、内摩擦角为 27° 和黏聚力为 0.2MPa。

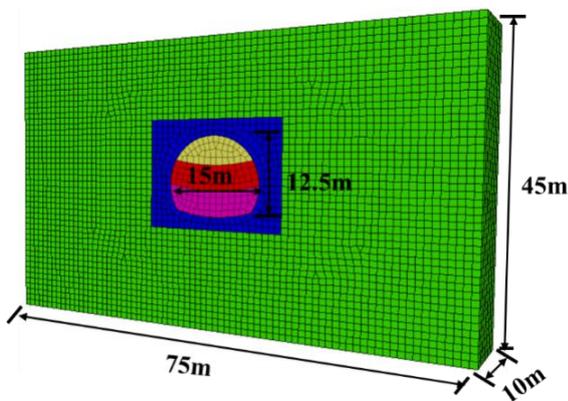
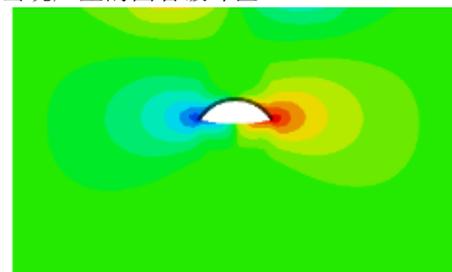


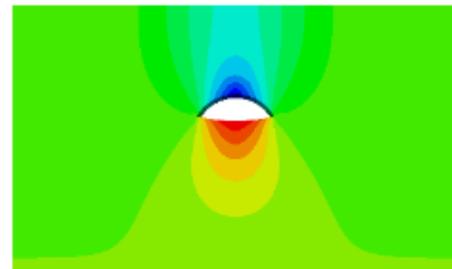
图 1 安康隧道数值模型

### 1.3 数值分析结果

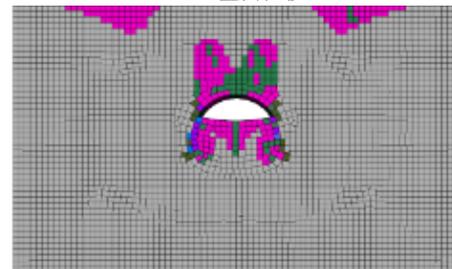
安康隧道数值分析模型按照三台阶法开挖,数值分析结果如图 2 所示,上台阶开挖后,初始应力平衡状态打破,应力扰动引起围岩变形破坏,拱顶处和台阶拱脚处围岩变形较大。拱顶和拱底均出现一定深度的围岩破坏区,并且地表出现裂缝且未与拱顶区域的围岩破坏区贯通。中台阶开挖变形与破坏规律与上台阶基本一致,拱顶和地表破坏区范围逐渐扩大,同时台阶开挖。出现狭长的拱脚处裂缝,下台阶开挖施工,围岩变形与破坏区发育特征与中台阶开挖类似。根据台阶开挖后隧道围岩破坏区分布特征,浅埋软弱围岩隧道采用三台阶法开挖,均出现严重的围岩破坏区。



(a) 水平位移

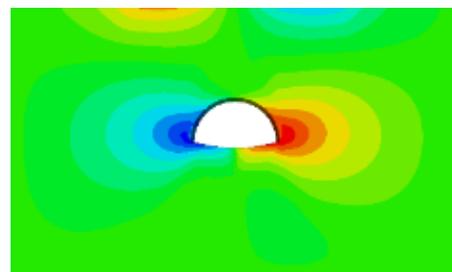


(b) 竖向位移

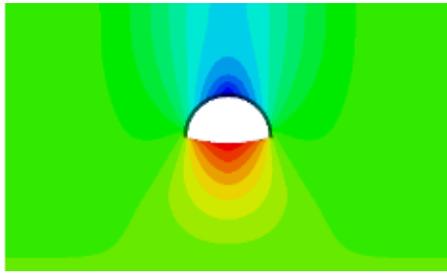


(c) 破坏区

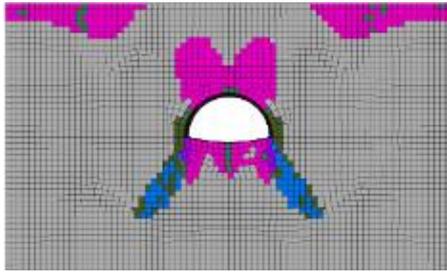
图 2 上台阶开挖围岩变形与破坏区分布图



(a) 水平位移

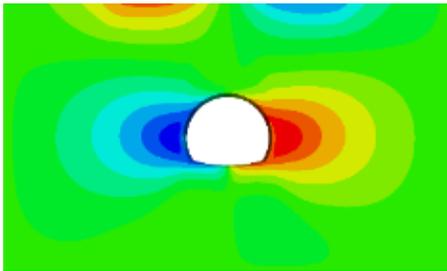


(b) 竖向位移

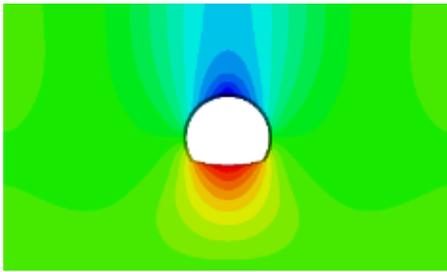


(c) 破坏区

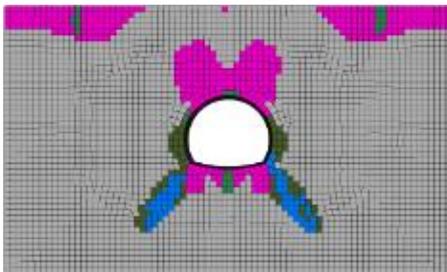
图3 中台阶开挖围岩变形与破坏区分布图



(a) 水平位移



(b) 竖向位移



(c) 破坏区

图4 下台阶开挖围岩变形与破坏区分布图

根据安康隧道数值分析结果,常规的隧道三台阶施工方法对浅埋软弱围岩隧道的适应性差,开挖施工引起围岩显著变形,并且围岩破坏范围较大,因此,从安康隧道具

体实际出发,在传统隧道三台阶施工方法基础上,提出了改进的三台阶施工方法。

## 2 三台阶+临时横撑法

### 2.1 施工工序

浅埋软弱围岩条件下,隧道开挖极易引起上覆土体的垮塌,造成严重的工程灾害事故。通过安康隧道三台阶开挖数值分析结果,三台阶开挖拱顶和拱脚处围岩变形和破坏显著,三台阶法对浅埋软弱围岩适应性差。因此,在隧道三台阶施工方法的基础上,提出了三台阶加临时横撑施工方法,临时横撑能够有效抑制隧道开挖边界围岩向临空面的运动,降低围岩的水平收敛和围岩破坏范围,同时,锁脚锚杆的施加进一步减小拱脚处围岩破坏范围的扩大,保障隧道施工的正常进行。由于超浅埋软弱围岩易破碎,三台阶法加临时横撑采用弱爆破或人工开挖的方式,三台阶加临时横撑施工工艺,如图5所示。

三台阶加临时横撑法开挖上台阶长度不超过 5.0m,上台阶高度约 4.0m,中台阶长度不超过 4.0m,中台阶高度约 4.0m,下台阶高度约 2.5m,仰拱单独开挖。各台阶开挖后及时完成初期支护。立钢架段中、下台阶左右错开开挖,错开距离在两榀钢架以上,并及时完成初期支护,中台阶开挖后应及时施作临时横撑。

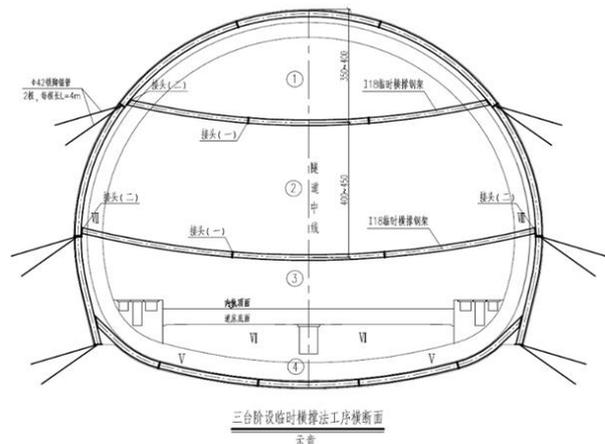


图5 三台阶加临时横撑施工工艺

(1) 开挖①部台阶,同时每循环进尺一次,均应做好超前支护,防止拱顶位置处的坍塌。施作①部洞身结构初期支护及临时支护。钻设系统锚杆后复喷混凝土至设计厚度。施作临时横撑。

(2) 上台阶施工至适当距离后,分侧开挖②部台阶,拆除上台阶临时横撑,分侧接长钢架,施作洞身结构的初期支护,施作中台阶临时横撑,可产靠工序1进行。

(3) 中台阶施工至适当距离后,分侧开挖③部台阶,拆除中台阶临时横撑,分侧接长钢架,施作洞身结构的初期支护,可产靠工序2进行。

(4) 开挖④部台阶,及时封闭初期支护,可参考工

序3进行。灌注该段V部仰拱,第④部台阶开挖后仰拱应紧跟。浇筑该段内VI部隧底填充。

(5)利用衬砌台车一次性灌注VII部二次衬砌。

隧道双向开挖时,工作面小于5倍洞径时,应加强联系并统一指挥;工作面小于3倍洞径时,应采取一端掘进另一端停止作业并撤走人员和机具措施,同时在安全距离处设置禁止入内的警示标识。

## 2.2 临时横撑拆除要点

临时横撑能够有效地预防和降低隧道围岩的变形和破坏区范围发展,但是,其施作和拆除必须严格按照施工工序要求,拆除要点主要包括:首先,临时横撑的拆除需考虑其对后续工序的影响,通过围岩监控量测进行确定。当围岩变形达到设计允许的范围之内,并在严格考证拆除的安全性之后,方可拆除。同时要注意后续作业的及时跟进。围岩量测应该贯穿整个施工工序,根据围岩量测结果调整施工工序和施工方法,必要时要进行加强支护和增加临时横撑。

其次,临时横撑拆除应根据台阶法施工步骤上中下台阶进尺,逐一进行拆除。每台阶长度为3~5m,每次循环进尺1榀,挖除中间道路覆盖支撑的土体后,人工拧开与钢架连接的螺栓,配合机械将横撑拆除。临时横撑每隔一榀间隔安装,因此每两循环拆除1榀,根据围岩级别为每1m或1.2m拆除1榀。

最后,拆除时注意对工字钢,钢板及螺栓孔的保护,以循环利用。拆除横撑后,挖掘机重新平整道路,渣土覆盖未拆除的横撑,进行施工下一循环。

## 3 施工控制要点及效果评价

### 3.1 施工控制要点

为了充分发挥三台阶开挖和临时横撑的作用,施工过程中必须要严格遵守组织管理规定,主要施工要点包括:各台阶平行作业,平行施作初期支护,各分部初期支护应衔接紧密,及时封闭成环;仰拱应紧跟下台阶施作,及时闭合构成稳固的支护体系。

完善洞内临时防排水系统,防止地下水浸泡拱墙脚基础,各台阶底板开挖略微呈凹型。施工过程中应通过监控量测掌握围岩和支护的变形情况,及时调整支护参数和预留变形量,保证施工安全。

V级围岩上、中台阶开挖进尺不超过1榀钢架间距,IV级围岩上、中台阶开挖进尺不超过2榀钢架间距,IV、V级围岩下台阶开挖进尺不超过2榀钢架间距。仰拱开挖前必须完成锁脚锚杆(锁脚锚管),每循环开挖长度不得大于3m,开挖后及时施作仰拱初期支护,完成两个隧底开挖、支护循环后,及时施作仰拱。

### 3.2 效果评价

为分析三台阶临时仰拱法施工的适应效果。以某一断

面三台阶临时仰拱法施工后地表沉降拱顶下沉及周边收敛累计变形速率为评价指标,预警值设置为IV级围岩累计变化值5.0cm及日变化速率小于5.0mm/d。根据现场监测结果可以得到,监测断面的日变化速率均小于5.0mm/d,水平收敛速率小于5mm/d,拱部下沉速率小于5mm/d,均未超过设定的预警值,因此可以认为隧道三台阶临时仰拱法施工围岩稳定,处于安全状态。

## 4 结论

本文以安康隧道浅埋软弱围岩隧道段为工程依托,采用数值分析与现场监测等手段,分析隧道三台阶施工开挖围岩破坏区分布特征。为保证安康隧道施工安全与进度,在隧道三台阶施工方法的基础上,提出了三台阶加临时横撑施工工艺,通过现场监测结果验证施工方法的合理性。

(1)数值分析结果表明:浅埋软弱围岩隧道采用三台阶法施工隧道围岩变形显著且破坏区分布范围较大,三台阶法对浅埋软弱围岩隧道的适应性差,为保证安康隧道施工安全需要改进三台阶法。

(2)在隧道三台阶施工方法的基础上,提出了三台阶加临时横撑施工法,能够有效抑制隧道开挖边界围岩向临空面的运动,考虑超浅埋软弱围岩易破碎,三台阶法加临时横撑采用弱爆破或人工开挖的方式。

(3)详细阐述了三台阶加临时横撑法的施工工序和控制要点,并成功应用于安康隧道浅埋软弱围岩隧道段,确保了安康隧道结构安全与稳定性,能够对将来类似工程施工提供一定的参考、借鉴。

### 【参考文献】

- [1]王东升,寇宝文,王佐,等.山岭隧道浅埋偏压段塌方处治技术分析[J].公路,2022,67(5):244-247.
- [2]陈湘生,徐志豪,包小华,等.中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J].中国公路学报,2020,33(12):1-14.
- [3]洪开荣,冯欢欢.中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J].中国公路学报,2020,33(12):62-76.
- [4]武松,汤华,罗红星,等.浅埋大断面公路隧道渐进破坏规律与安全控制[J].中国公路学报,2019,32(12):205-216.
- [5]李术才,许振浩,黄鑫,等.隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1041-1069.
- [6]李鹏飞,赵勇,刘建友.隧道软弱围岩变形特征与控制方法[J].中国铁道科学,2014,35(5):55-61.
- [7]张成平,韩凯航,张顶立,等.城市软弱围岩隧道塌方特征及演化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(12):2433-2442.
- [8]任育珍,杜俊,张伦华,等.浅埋软弱围岩隧道变形特征

研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 84-95.

[9] 李同安. 浅埋软弱围岩隧道变形特征与施工控制研究——以拱北隧道为例 [J]. 公路工程, 2018, 43(2): 155-161.

[10] 熊造. 基于数值模拟的浅埋软弱围岩大断面隧道施工工法对比研究[J]. 公路工程, 2016, 41(4): 150-170.

[11] 陈磊. 软弱围岩地层 CD 法施工隧道稳定性研究[J].

公路, 2022, 67(12): 424-430.

[12] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路隧道设计细则: JTG/T D70-2010[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

作者简介: 蔡书洪(1976—), 男, 重庆梁平县人, 本科学历, 高级工程师, 主要研究方向: 隧道与地下工程施工与管理。