

# 大断面公路板岩隧道开挖与支护数值模拟研究

牛泽林<sup>1,2</sup>, 刘朝鹏<sup>3</sup>, 郑 蕾<sup>3</sup>, 吴辉辉<sup>3</sup>, 胡文乐<sup>1,2</sup>, 臧鹏飞<sup>1,2</sup>, 刘 华<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司, 陕西 西安 710100)

**摘要:**为了研究上下台阶法和 CD 法等不同施工工法及不同开挖步距下对大断面板岩隧道开挖围岩受力及变形的影响规律, 基于有限元基本原理对各工况隧道的施工工况进行模拟分析, 得到了隧道开挖过程中软弱围岩的应力场和位移场, 并对隧道围岩稳定性进行了探讨。研究表明:采用两台阶法模拟隧道开挖过程中整个施工过程中应力最大值为 3.550 MPa, 洞周周边的应力影响范围为 5~20 m, 在隧洞跨径的 1.5 倍以内;采用 CD 法模拟隧道施工时洞周发生的位移较小, 拱顶下沉和水平收敛的位移量与两台阶法施工的位移量相比分别减少了 27.8% 和 34.0%;模拟不同开挖步距下隧道拱顶沉降和水平收敛的位移变形大致表现出二次多项式的函数关系, 为隧道施工期的安全稳定及控制技术提供数据支撑及理论依据。

**关键词:**隧道工程;板岩;大断面;数值模拟

**中图分类号:** TU455.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2020)03-0376-08

## Numerical simulation study on excavation and support of slab tunnel in large section highway

NIU ZeLin<sup>1,2</sup>, LIU Chaopeng<sup>3</sup>, ZHENG Lei<sup>3</sup>, WU Huihui<sup>3</sup>, HU Wenle<sup>1,2</sup>, ZANG Pengfei<sup>1,2</sup>, LIU Hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an 710055, China;

3. China Railway Beijing Engineering Bureau Group First Engineering Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different construction methods such as full upper and lower step method and CD method on the stress and deformation of surrounding rock in large fault face rock tunnel excavation under different excavation steps, the construction of each tunnel is analyzed on the basic principle of finite element. The simulation analysis shows the stress field and displacement field of the weak surrounding rock during the tunnel excavation process, and discusses the stability of the tunnel surrounding rock. Results show that the maximum stress during the tunnel excavation process is 3.550 MPa, and the stress around the cavern is 5-20 m, which is within 1.5 times of the span of the tunnel. The CD method is used for simulation, and the displacement of the tunnel is small when the tunnel is constructed. The displacement of the dome sinking and horizontal convergence is reduced by 27.8% and 34.0%, compared with the displacement of the two-step construction. The tunnel vault is simulated under different excavation steps. The displacement deformation of settlement and horizontal convergence generally shows the function relationship of quadratic polynomial, which provides data support and theoretical basis for the safety and stability and control technology of tunnel construction period.

**Key words:** tunnel engineering; slate; large section; numerical simulation

随着我国“八纵八横”战略的规划及东部经济结构的调整, 中西部公路、铁路建设正在不断的布局和实施。然而, 由于中西部地区多以高山、丘陵地带为主, 因此此类工程的建设极有可能遇到大、长隧道。但以往的建设经验表明, 中西部地区的公路、铁路隧道所涉及的工程地质条件较差<sup>[1-2]</sup>, 围岩等级以 V 级为主, 局部区段为 VI 级, 地层呈现“复杂多变、强度低、自承能力差、富水性强”

等软弱与极软弱围岩特征<sup>[3-4]</sup>, 加之隧道断面大, 故而易出现变形量大及变形迅速等特点, 若在施工期间控制不当, 会导致支护结构破坏进而产生变形过大、岩爆、冒顶、坍塌等灾害<sup>[5]</sup>, 不仅严重制约了公路、铁路隧道工程的施工效率和质量, 也严重影响着人民生命财产安全。因此研究板岩隧道围岩的开挖及支护技术, 对类似隧道工程的开挖支护有着重要的工程意义<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2019-12-06

修改稿日期: 2020-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608436); 陕西省自然科学基金项目(2018JQ5003); 陕西省教育厅专项科研项目(18JK0478)

第一作者: 牛泽林(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土隧道与地下结构工程可靠性分析、设计和安全预警等教学服务工作。E-mail: niuzldq@xauat.edu.cn

板岩作为地下工程中经常接触的岩体之一, 近年来穿越板岩的隧道在我国高速公路、铁路和地下工程中大量涌现, 因板岩地处复杂的地质环境中, 常常被工程界定义为软弱围岩, 也是工程师亟需解决的工程问题之一<sup>[7]</sup>. 软弱隧道围岩稳定性历来备受关注, 国内外学者在稳定性分析方法、复杂条件下洞室围岩稳定性分析方面开展了广泛研究<sup>[8]</sup>. Passaris 等<sup>[9]</sup>利用数值分析理论对层状岩体中巷道顶板的稳定性进行研究; Tonon 等<sup>[10]</sup>基于边界元法研究了弹性各向异性对隧道断面收敛的影响, 并对隧道围岩变形收敛公式进行了讨论; 张农等<sup>[11]</sup>对深井三软煤巷道岩层赋存特征及围岩劣化的影响因素进行了分析, 研究得出了锚杆支护技术和帮顶锚固技术的合理性; 安红刚等<sup>[12]</sup>提出了进化有限元方法并对不同的工程软岩置换方案进行了应力分析, 确定出破损区体积最小的软岩置换最优方案; 肖明等<sup>[13-14]</sup>通过三维非线性有限元分析与论证, 为复杂岩体洞室围岩稳定计算分析提供了有效依据. 然而鉴于隧道工程特点和地质条件的复杂多变性, 大断面板岩隧道的建设在力学特性、断面形式、衬砌结构及施工工法等方面提出了新的要求.

鉴于此, 本文对各竜隧道不同施工工法及不同开挖步距下对大断面板岩隧道开挖围岩受力及变形的影响规律进行研究, 据此为类似工程隧道施工期的安全稳定和控制技术提供数据支撑及理论依据.

1 工程概况简介

依托工程为渭武高速各竜隧道, 隧址区跨越甘肃省岷县及宕昌县两个行政区, 隧址区表层为第四系更新世统黄土及全新统坡积层覆盖, 隧道洞身通过的基岩地层主要为三叠系(T2)地层, 岩性为板岩. 隧道主洞为单向单洞断面, 设计为双向四车道高速公路, 净宽 10.86 m, 净高 7.19 m, 内轮廓采用“三心圆”; 紧急停车带净宽 13 m, 内轮廓采用“五心圆”. 隧道全长 2 485 m, 隧道左线最大埋深 187.8 m, 右线最大埋深 192.4 m. 隧道洞身的稳定性影响因素较多, 围岩岩性特征是影响各竜隧道洞身稳定性的主要因素; 此外, 大断面板岩围岩隧道的围岩变形还与区域地质构造情况、围岩自身性质的固有性质、初始地应力场、地下水及隧道埋深等因素有关, 而且还与隧道断面结构的形状和尺寸及施工工法等因素有关<sup>[15]</sup>.

2 计算模型的建立

2.1 模型建立及参数选取

地应力极大地影响着隧道围岩变形, 在隧道

的设计和施工中, 必须积累监控量测数据, 进行统计性分析, 掌握其最大主应力和最小主应力的方向和方位, 特别要重视主应力方向与隧道轴线和节理裂隙之间的夹角: 各隧道进口段斜坡坡度 20~30°, 基本无偏压现象, 开挖时边、仰坡坡率采用 1:0.75~1:1; 出口段斜坡坡度 30~35°, 有一定偏压现象, 洞口开挖时边、仰坡坡率采用 1:0.75~1:1. 根据工程经验, 只有在隧道 3~5D 洞径范围内的围岩才会受到隧道开挖的影响, 为了降低模型边界约束对模型计算的影响, 模型的隧道中心线到左右边界是 5D 的距离, 隧道底部距模型下边界为隧道高度距离的 3 倍, 由于隧道模型的上边界设置为山体自由面, 且模拟开挖过程的隧道埋深为 55~70m 左右, 故这样隧道上覆岩层的作用仅有岩体自重应力场, 模型分析时添加自重荷载即可.

隧道的开挖断面为三心圆+仰拱, 其轮廓图和尺寸大小如图 1 和表 1 所示. 模型的跨度为 100 m, 最大高度为 115 m, 上边界为山体绵延自由面, 隧道的长度取 120 m, 采用上下两台阶法施工, 每次开挖进尺 2 m, 选取混合网格单元划分模型网格, 模型共划分为 29 392 个节点和 28 120 个单元. 隧道围岩、隧道开挖的锚杆支护、喷混和二次衬砌分别采用 3D 实体单元、植入式桁架单元和板单元进行模拟. GTS-NX 分析时是通过“钝化”和“激活”相应单元的功能模拟隧道开挖与支护, 把隧道围岩设置为均质弹塑性材料, 其开挖变形服从 Mohr-Coulomb 准则. 模型的上部为无约束的自由面, 侧面及底部采用边界位移自动约束. 围岩计算模型和隧道锚杆衬砌如图 3 和图 4 所示.

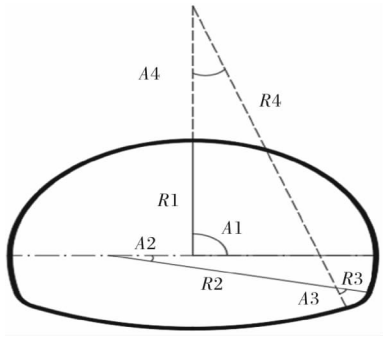


图 1 隧道断面示意图

Fig. 1 Tunnel section

表 1 隧道断面尺寸(三心圆+仰拱)

Tab. 1 Tunnel section size

(three-hearted circle + inverted arch)

R1	A1	R2	A2	R3	A3	R4	A4
5.43 m	90°	7.93 m	90°	1 m	90°	1 500 m	90°

其中,  $R_1$  为隧道拱部半圆的半径;  $R_2$  为隧道边墙大圆弧的半径;  $R_3$  为隧道仰拱与侧墙间小圆弧的半径;  $R_4$  为隧道仰拱的半径.

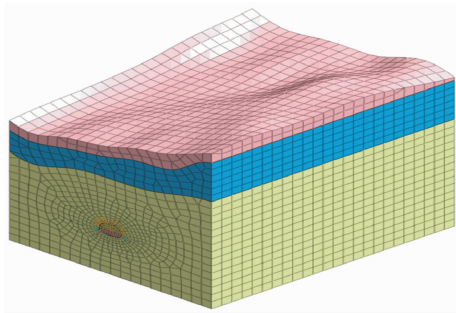


图 2 围岩计算模型

Fig. 2 Calculation model for the surrounding rock

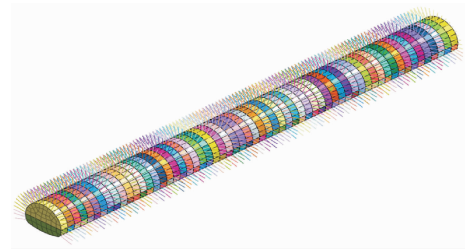


图 3 隧道锚杆初衬

Fig. 3 Particle analysis curve of loess

### 2.2 模型计算参数

复合衬砌的计算参数根据等效刚度法原理换算, 模型上部施加的均布荷载  $q = \gamma h$ . 根据各条隧道的工程勘察资料以及施工设计资料, 综合确定深埋隧道的围岩及支护结构的物理力学参数, 参见表 2.

表 2 围岩及支护材料计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of surrounding rock and supporting materials

材料	弹模 $E/\text{GPa}$	重度 $\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
粉质黏土	0.015	19	0.45	30	30
强风化板岩	5	21	0.4	50	40
中风化板岩	0.2	23	0.26	100	50
隧道锚杆	210	78.5	0.3	—	—
喷混	30	24	0.2	—	—
二次衬砌	29.5	25	0.3	—	—
临时支撑	200	78.5	0.3	—	—

### 2.3 模型分析方案

工程上根据不同的地质地貌、围岩级别大小及地下水发育情况选择不同的隧道施工方法, 为了对比不同的隧道洞室开挖方法对围岩受力及变形的影响, 分别建立两台阶法和 CD 法的隧道开挖模型进行研究, 从理论上寻找出最佳的隧道开挖方法, 同时仅以主隧道洞室的开挖步距为控制变量, 建立开挖步距为 1 m、1.5 m 和 2 m 的隧道开挖模型, 将三种开挖步距下隧道的施工工况保持一致, 对不同开挖步距对隧道变形及受力的影响规律进行了研究.

## 3 不同开挖工法的影响

### 3.1 两台阶开挖分析

从图 4 可以看出, 隧道施工前围岩自身处于应力平衡状态, 从图 4(a)中知, 应力最大值为 2.100 MPa, 最小值为 8.863 kPa. 图 4(b)为上台阶开挖应力图, 隧道掌子面开挖的向前推进, 当上台阶开挖完成后, 上半断面核心土的周围出现应力集中, 最大主应力值为 2.130 MPa, 围岩在拱顶及开挖底边应力释放较多, 由于隧道底部没有做临时支撑结构, 底部的约束比隧道拱顶小, 其应力释放也较小, 几乎为零. 图 4(c)为下台阶开挖应力

图, 随着隧道的进一步开挖, 围岩应力发生一定的释放, 山体等势应力图的间距变大, 而在隧道开挖的上部围岩中出现了塑性区, 特别在隧道上方出现了明显的凹型应力云图. 随着掌子面的继续推进, 隧道上部岩体应力释放的范围继续增大, 同时在隧道拱脚部位的压力影响范围也逐渐增大.

由图 4 可知, 掌子面推进过程中, 应力释放范围进一步扩大, 凹型塑性区也相应扩大并最终保持稳定, 应力最大值为 3.550 MPa, 从图 4(d)的整个洞室开挖完毕并施作二次衬砌后的应力图, 应力最大值为 3.125 MPa, 可见由于二次支护的支撑作用, 加强了隧道结构的整体稳定性, 抑制了围岩的变形, 应力也随之减小. 洞室周边的应力影响范围为 5~20 m, 在隧洞跨径的 1.5 倍以内. 从模拟过程的云图中可以看出, 整个计算区域隧道围岩和支护结构的受力均为压应力, 并未出现拉应力.

图 5 为台阶法拱顶沉降和水平收敛位移模拟变化图, 从图 5 中可以看出, 隧道开挖支护后, 隧洞周边的围岩向开挖洞室方向移动, 竖直方向的位移在隧道的拱顶最大, 水平方向的最大位移发生在上台阶的拱脚处, 拱顶的最大沉降值为 192.50 mm, 拱底向上的隆起值为 194.83 mm, 边墙的位移基本上没有变化. 竖向位移变化较大的区域集中在拱顶和拱底处, 且隧道起拱线上、下两侧位移

的影响范围相当,拱顶上方 16 m,拱底下方 15 m,大致为 1.5D 的范围.收敛位移为 168.10 mm,水平方向位移的影响范围大致为 2D.

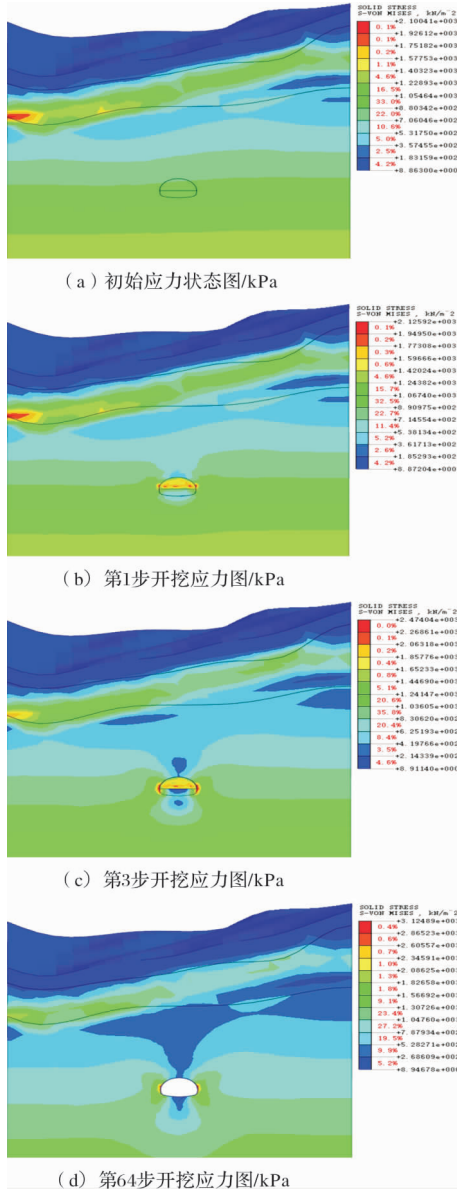


图4 两台阶法隧道开挖过程应力图

Fig. 4 Stress diagram of the two-step tunnel excavation process

图 5(c)和图 5(d)分别为台阶法开挖拱顶沉降和水平收敛的形变位移及位移变化速率随模拟开挖步的变化曲线,从曲线图中能更直观地看出拱顶沉降和水平收敛位移形变量及位移变化速率与每一个开挖步的对应关系.从图中可以看出,前 7 个开挖步的拱顶沉降和水平收敛的形变位移发展较快,从第 7 步至第 10 步位移量缓慢增加,变形速率也不断减小,之后逐渐趋于稳定,拱顶下沉的累计变形量为 192.50 mm,水平收敛的累计变形量为 168.10 mm,而在监测过程中发现上下台阶交界的拱脚处易发生侵限.综合分析,在隧道施工过程中要加强拱顶、拱底和上台阶拱脚部位的监控量测工作,把隧道围岩的变形量控制在允许

的变形量之内,保障隧道的安全施工.

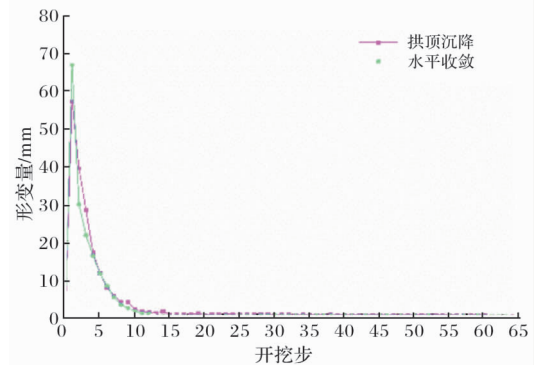
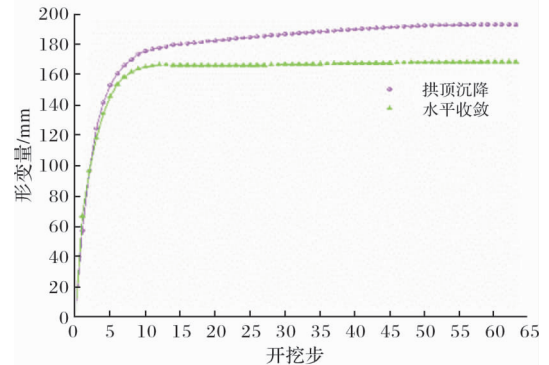
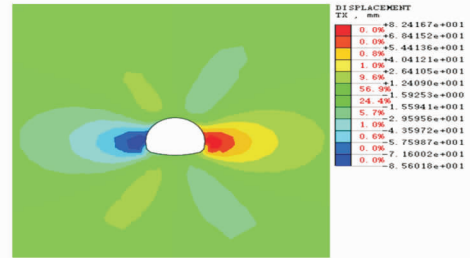
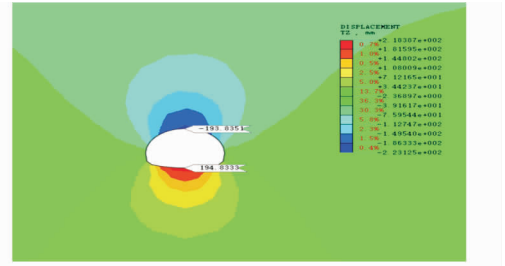


图5 两台阶法拱顶沉降和水平收敛位移模拟变化图

Fig. 5 Simulated change diagram of two-step method vault settlement and horizontal convergence displacement

### 3.2 CD 工法开挖分析

从图 6 可知,隧道施工前围岩处于自身应力平衡状态,从图 6(a)中可以看出,应力最大值为 2.007 MPa,最小值为 8.630 kPa,其应力值的大小与台阶法相当.由于 CD 法是分部的侧壁导坑开挖,其形成的是非对称自重应力场,图 6(b)为分部核心土第 5 步开挖后的应力云图.①当隧道上部左半断面开挖支护后,在开挖面的交界处发生应力集中现象,最大应力为 2.053 MPa,应力集中范



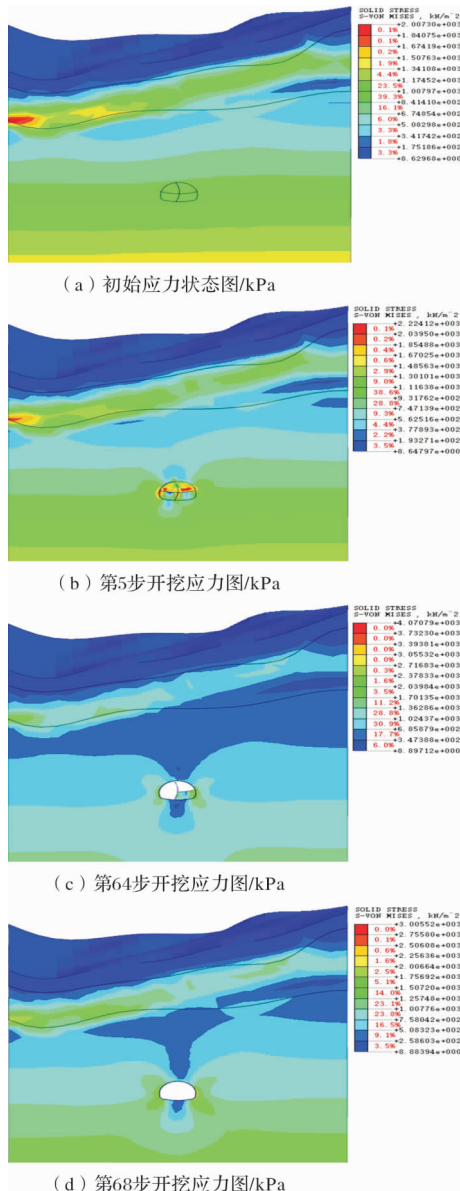


图 6 CD 法隧道开挖过程应力图

围出现在开挖核心土的拱顶处, 隧道围岩及支护结构并未出现拉应力. ②当隧道上部的右半断面开挖支护后, 拱顶处的应力变为均匀受力状态, 拱顶的应力最大值约为 2.089 MPa. ③当隧道的下部左半断面开挖支护后, 应力的最大值为 2.456 MPa, 发生在隧道下部两相邻核心土的交界处. ④当隧道的下部右半断面开挖支护后, 模型的应力场变为对称分部, 隧道洞周支护结构的最大应力值为 2.903 MPa. ⑤当拆除临时钢支撑后, 应力场变化较小, 表明 CD 法分部导坑开挖时围岩的应力已基本释放, 隧道的变形处于稳定状态. CD 法施工过程中临时钢架的支撑作用可以有效的限制水平方向上位移的发展, 整个开挖过程中应力的最大值为 4.070 MPa, 发生在拱脚处, 围岩和支护结构均处于受压状态, 没有出现拉应力.

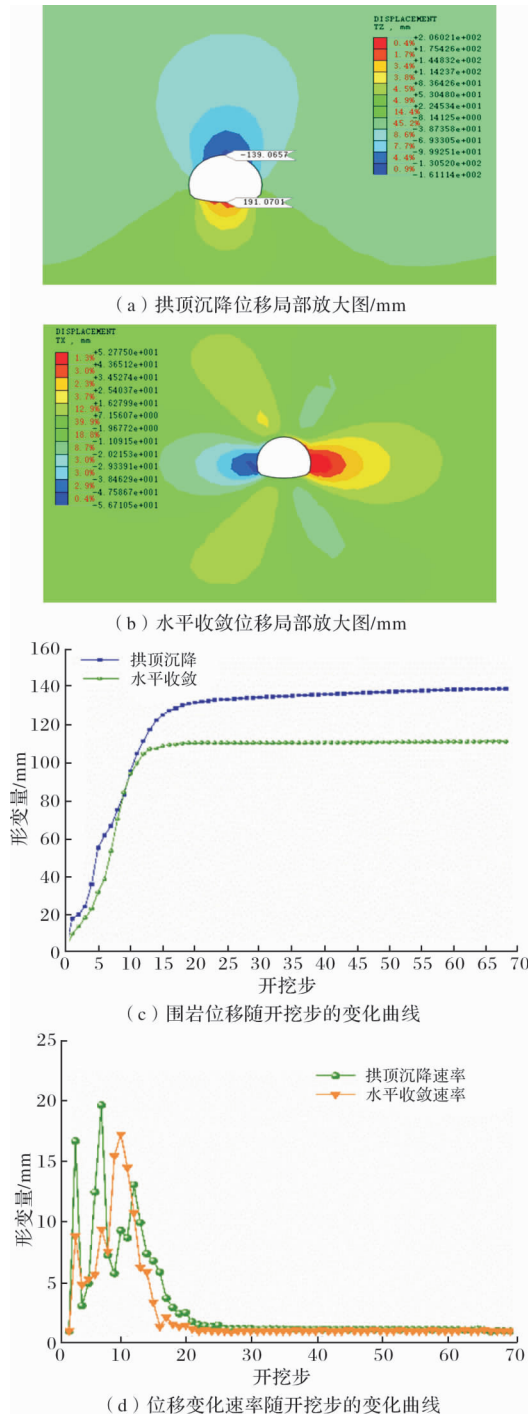


图 7 CD 法拱顶沉降和水平收敛位移模拟变化图

Fig. 7 Simulated changed diagram of CD method vault settlement and horizontal convergence displacement

图 7 为 CD 法拱顶沉降和水平收敛位移模拟变化图, 图 7(a)、(b)为沉降和收敛位移云图, 隧道核心土开挖以后, 隧洞周边的围岩向开挖洞室方向移动, 随着支护结构的施作围岩位移变化的速率被逐渐控制, 最终达到稳定状态. 从图 7 中可知, 竖直方向的位移在隧道的拱顶和拱底最大, 拱顶下沉的最大值为 139.07 mm, 拱底向上的最大隆起值为 191.07 mm. 竖向位移变化较大的区域集中在拱顶和拱底附近, 拱顶上方 23 m, 拱底下

方 9 m, 大致为 0.8~2.1D 的影响范围, 边墙的位移基本上没有变化. 水平方向的位移最大值发生在上部开挖核心土的拱脚处, 水平最大收敛位移为 110.90 mm, 水平方向位移的影响范围大致为 2.5~3.0D, 较重力方向稍大.

图 7(c)和(d)分别为 CD 法开挖拱顶沉降和水平收敛的形变位移及位移变化速率随模拟开挖步的变化曲线, 从图中能更直观地看出拱顶沉降和水平收敛位移形变量及位移变化速率与每一个开挖步的对应关系, 由图可知前 11 个开挖步的拱顶沉降和水平收敛的形变位移发展较快, 从第 12 步至第 17 步位移量缓慢增加, 变形速率也不断减小, 之后逐渐趋于稳定状态, 拱顶下沉的累计变形量为 139.07 mm, 水平收敛的累计变形量为 110.90 mm. 综上分析, 在隧道施工过程中 CD 法能很好地控制大断面隧道围岩的变形, 监测围岩的变形量都控制在允许预留变形量的范围之内, 保障了隧道的安全施工.

3.3 不同开挖工法模拟结果对比分析

对上下台阶法和 CD 法开挖模拟隧道洞室开挖引起围岩扰动后的应力和位移进行对比分析, 见表 3 所示. 从表 3 可知:

(1)采用两台阶法施工, 隧道周围产生的位移较大, 应力的大小与 CD 法相当. 分析表明, 台阶法的开挖工序相对于 CD 法相对简单, 台阶法通过在开挖掌子面后方预留核心土、缩短循环进尺, 使仰拱紧跟掌子面封闭成环, 并设置锁脚锚管, 在浅埋软弱围岩隧道中可以不同程度地控制拱部整体的变形. 但台阶法在开挖过程中对软弱围岩有比较大的扰动, 其控制浅埋隧道沉降变形的能力远不如 CD 法, 尤其是大断面软质板岩隧道的开挖. 因此, 对于大断面软弱围岩隧道的施工, 当可以允许较大的地表沉降时, 选用上下台阶预留核心土工法经济效益要比 CD 法更好, 适用于中等级别围岩隧道的开挖.

(2)CD 法施工, 隧道周围产生的位移较小, 拱顶下沉和水平收敛的位移量与两台阶法施工的位移量相比分别减少了 27.8%和 34.0%. 研究表明, 当隧道跨度很大, 地表沉降要求严格、围岩条件特别差、两台阶法难以控制围岩变形时, 可采用 CD 法施工. 相对台阶法, CD 法多了一道中隔壁临时支撑, 隧道开挖断面被分割成两半, 按先后导坑顺序开挖, 该工法对控制大断面隧道围岩的稳定性较台阶法好. 由于 CD 法没有横向支撑, 它只有在先行导坑支护封闭完成后才能形成较强的整体支护刚度. 在此之前, 中隔壁临时支撑的稳定性容易受洞室开挖的影响, 特别是在承载力较小的软弱隧道围岩中. 因此, CD 法控制净空位

移变形的能力较两台阶法强. 但在软弱围岩的施工中, CD 法先行导坑仰拱必须及时封闭成环. 相对而言, CD 法能够保障施工安全, 但施工速度较慢, 成本较高. 因此, 在先行导坑仰拱及时封闭的情况下, CD 法可适用于高地应力以及隧道埋深大于 1.5D 的软弱隧道围岩中.

表 3 隧道围岩应力和位移对比表  
Tab. 3 Comparison table of stress and displacement of tunnel surrounding rock

开挖工法	Mises 应力/MPa		位移/mm	
两台阶法	最大值	3.55	拱顶沉降	-192.50
	最小值	0.09	水平收敛	168.10
CD 法	最大值	4.07	拱顶沉降	-139.03
	最小值	0.09	水平收敛	110.90

通过以上对比分析, 在软弱围岩隧道施工中, 台阶法施工工艺简单, 作业空间大, 方便大型机械设备的操作, 无需增设和拆除临时支撑, 其施工速度明显优于 CD 法. 因此, 在稳定性较好的Ⅲ、Ⅳ级围岩中, 多采用台阶法施工. 而在稳定性较差的Ⅳ、Ⅴ级围岩软弱围岩中, 要想采用台阶法施工, 则在开挖前必须选择合适的超前支护措施, 才能保证施工的安全.

4 开挖步距对隧道围岩变形及受力的影响

从表 4 可以看出, 随着隧道洞室开挖步距的增大, 拱顶沉降和水平收敛的量值也不断增大, 隧道围岩的等效应力和等效塑性应变也随开挖步距的增加逐渐增大. 故伴随着隧道开挖步距的增加, 围岩的支护刚度逐渐下降, 其稳定性亦不断减弱. 由表中数据可知, 开挖步距从 1.0 m 增大到 2.0 m 时, 隧道拱顶的沉降量值从 160.5 mm 增加到 193.8 mm, 增加了 207.5%, 隧道洞周收敛的量值从 106.2 mm 增加到 168.0 mm, 增加了 58.19%. 可以看出改变隧道的开挖步距对水平收敛变形有更大的影响. 而反映隧道围岩稳定性重要指标的围岩塑性应变则增加到原来的 1.98 倍, 这可以为隧道施工开挖步距的选择提供一定的参考.

图 8、图 9 分别为不同开挖步距下拱顶下沉位移变化曲线及沉降速率变化曲线, 由图中可以看出随着开挖步距的增大, 最终稳定的位移值也逐渐增大, 前五个开挖步内变形急剧增加, 分别占开挖步距 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 稳定值的 58.5%、88.3%和 78.8%, 平均达到了 75.2%; 而图 10、图 11 分别为不同开挖步距下水平收敛位移变化曲线及收敛速率变化曲线, 同样是前五个开挖步内变形急剧增加, 分别占开挖步距 1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 稳定值的 46.6%、63.4%和 86.4%, 平均达到了

65.5%。可见在隧洞开挖过程中要重视开挖前期围岩位移的变化,对于台阶法施工来说,基本上是上台阶核心土的开挖阶段,本阶段要加强围岩变形的监控量测,及时反馈给施工单位,必要的时候采取一定的措施,控制围岩变形在允许变形量之内。

图12和图13为所有模拟计算结果的汇总图,从图中可以看出不同开挖步距下隧道拱顶沉降和水平收敛的位移变形大致表现出二次多项式的函数关系,不同开挖步距下拱顶沉降变形的拟合曲线见式(1),不同开挖步距下水平收敛位移变形的拟合曲线见式(2),因此在一定开挖步距范围内随着开挖步距的增大,变形速率逐渐变小,但位移变形量越来越大,隧道的不稳定性逐渐加大,安全系数逐渐降低,故此在隧道的开挖过程中应采取小步距开挖,加强不稳定段围岩的支护刚度,做好监控量测工作,使位移的变化控制在预留变形量之内,提高隧道施工的安全性。

$$y = -10.771x^2 + 64.786x + 107.22 \quad (1)$$

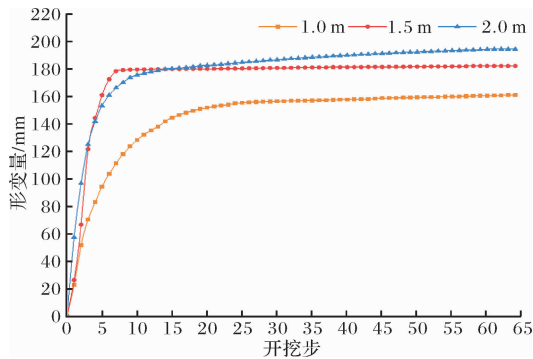


图8 不同开挖步距下拱顶沉降变化曲线

Fig. 8 Curves of settlement of vault under different excavation steps

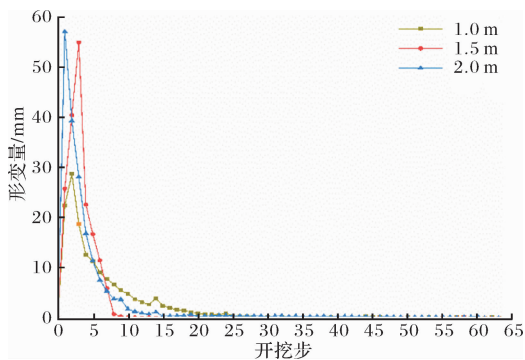


图9 不同开挖步距下拱顶沉降速率曲线

Fig. 9 Settlement rate curve of the vault under different excavation steps

其中,  $R^2 = 0.9956$ ,  $x$  为开挖步距,  $y$  为拱顶沉降位移, mm.

$$y = -17.629x^2 + 113.69x + 8.64 \quad (2)$$

其中,  $R^2 = 0.9952$ ,  $x$  为开挖步距,  $y$  为水平收敛位移, mm.

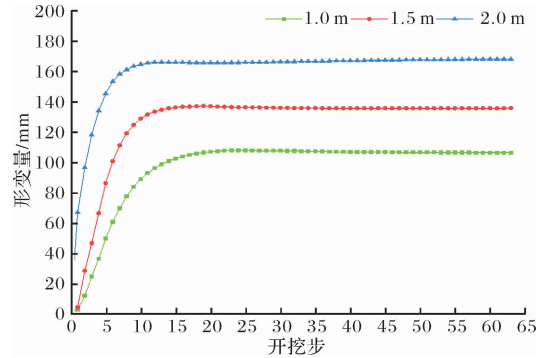


图10 不同开挖步距下水平收敛变化曲线

Fig. 10 Horizontal convergence curve under different excavation steps

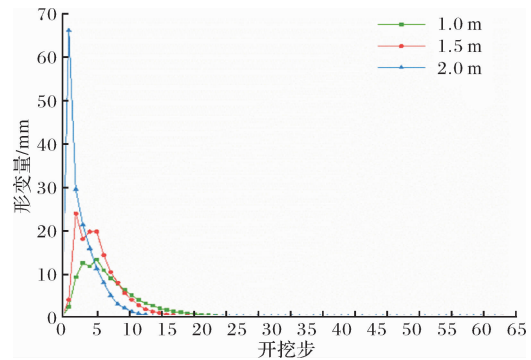


图11 不同开挖步距下水平收敛速率曲线

Fig. 11 Horizontal convergence rate curves under different excavation steps

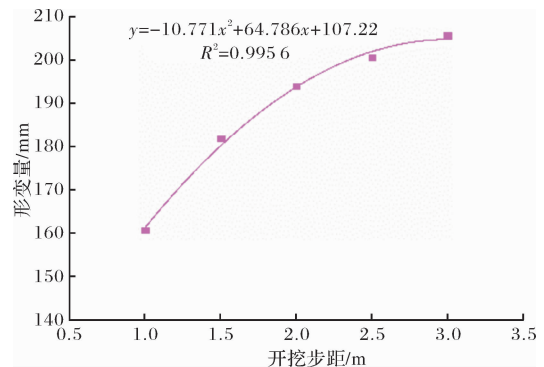


图12 不同开挖步距下拱顶沉降变形曲线

Fig. 12 Deformation curve of the vault under different excavation steps

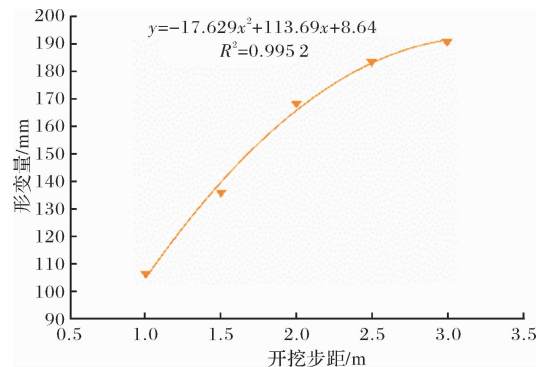


图13 不同开挖步距下水平收敛变形曲线

Fig. 13 Horizontal convergence deformation curve under different excavation steps

表 4 不同开挖步距下隧道围岩变形及受力结果

Tab. 4 Deformation and stress results of tunnel surrounding rock at different excavation steps

	开挖步距/m	最大值	最小值	备注
拱顶沉降值/mm	1.0	160.5	—	最大沉降值均发生在拱顶
	1.5	180.9	—	
	2.0	193.8	—	
水平收敛值/mm	1.0	106.2	—	最大收敛值均发生在拱脚
	1.5	135.8	—	
	2.0	168.0	—	
围岩等效应力/KPa	1.0	4 505.5	63.14	最大应力值均发生在拱脚
	1.5	4 687.6	63.21	
	2.0	4 761.7	63.28	
围岩等效塑性应变	1.0	8.50e-3	—	最大应变值均发生在拱脚
	1.5	1.40e-2	—	
	2.0	1.68e-2	—	

5 结论

(1)采用两台阶法模拟隧道开挖过程中，洞室开挖前围岩处于自身应力平衡状态，应力最大值为 2.100 MPa，最小值为 8.863 kPa；整个施工过程中应力最大值为 3.550 MPa，洞室周边的应力影响范围为 5~20 m，在隧洞跨径的 1.5 倍以内。

(2)采用 CD 法模拟隧道开挖过程中，施工前围岩处于自身应力平衡状态，应力最大值为 2.007 MPa，最小值为 8.630 KPa，其应力值的大小与台阶法相当。整个开挖过程中应力的最大值为 4.070 MPa，发生在拱脚处，围岩和支护结构均处于受压状态，没有出现拉应力。采用 CD 法模拟隧道施工时洞周发生的位移较小，拱顶下沉和水平收敛的位移量与两台阶法施工的位移量相比分别减少了 27.8%和 34.0%。

(3)模拟不同开挖步距下隧道拱顶沉降和水平收敛的位移变形大致表现出二次多项式的函数关系。在隧道的开挖过程中应采取小步距开挖，加强不稳定段围岩的支护刚度，做好监控量测工作，使位移的变化控制在允许预留变形量之内，提高隧道施工的安全性。

参考文献 References

[1] 中国公路学报编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5):1-65.  
Editorial Department of China Highway Journal. A summary of academic research on China tunnel engineering. 2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (5): 1-65.

[2] 张弥, 刘维宁, 秦淞君. 铁路隧道工程的现状和发展[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2):1-7.

ZHANG Mi, LIU Weining, QIN Songjun. Current status and development of railway tunnel engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33 (2): 1-7.

[3] 何振宁. 铁路隧道疑难工程地质问题分析——以 30 多座典型隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2016, 36(6):636-665.  
HE Zhenning. Analysis of difficult engineering geological problems in railway tunnels: Taking more than 30 typical tunnel projects as an example [J]. Tunnel Construction (Chinese and English), 2016, 36 (6): 636-665.

[4] 黄润秋, 王贤能, 唐胜传, 等. 深埋长隧道工程开挖的主要地质灾害问题研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997(1):50-68.  
HUANG Runqiu, WANG Xianneng, TANG Shengchuan, et al. Research on the main geological hazards in the excavation of deep-buried long tunnels [J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 1997 (1): 50-68.

[5] 张广泽, 冯君, 崔建宏. 高速铁路隧道岩溶灾害及防治关键技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 112-117.  
ZHANG Guangze, FENG Jun, CUI Jianhong. Research on Key Technologies of Karst Disaster and Prevention in High-speed Railway Tunnels [J]. Railway Standard Design, 2018.

[6] 朱泽奇, 盛谦, 梅松华, 等. 改进的遍布节理模型及其在层状岩体地下工程中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(10):3115-3121.  
ZHU Zeqi, SHENG Qian, MEI Songhua, et al. Improved spreading joint model and its application in layered rock mass underground engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (10): 3115-3121.



- 验研究[J]. 建筑结构学报, 2013 (18): 86-91.
- XIAO Yan, LI Lei, YANG Ruizhen, et al. Experimental study on creep and loading property of laminated bamboo bridge [J]. Journal of Building Structures, 2013 (18): 86-91.
- [18] MARINKOVI S., RADONJANIN V, MALESEV M., et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete [J]. Waste Management, 2010, 30(11): 2255-2264.
- [19] GONG X, NIE Z, WANG Z, et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing [J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(4): 576-587.
- [20] 王幼松, 杨馨, 闫辉, 等. 基于全生命周期的建筑碳排放测算——以广州某校园办公楼改扩建项目为例[J]. 工程管理学报, 2017, 31(3): 19-24.
- WANG Yousong, YANG Xin, YAN Hui, et al. Carbon emission accounting for buildings based on whole life cycle: a case study of reconstruction project at college in Guangzhou [J]. Journal of Engineering Management, 2017, 31(3): 19-24.
- [21] GAO W, Ariyama T, Ojima T, et al. Energy impacts of recycling disassembly material in residential buildings [J]. Energy and Buildings, 2001, 33(6): 553-562.
- [22] LIU SF, YANG YJ, FORREST J. Grey data analysis: Methods, models and applications. [M]. Singapore: Springer Singapore, 2017.
- [23] PATTON M Q. Qualitative evaluation and research methods, 2nd ed [M]. London: SAGE publications, 2002.
- [24] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- LIU Sifeng, YANG Yingjie, WU Lifeng. Grey Stem theory and its application [M]. Beijing: Science press, 2018.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 383 页)

- [7] 赵少强, 林安宁, 闫小军. 哈达铺隧道直立板岩大变形分析及控制施工技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48 (2): 73-77.
- ZHAO Shaoqiang, LIN Anning, YAN Xiaojun. Large deformation analysis and control construction technology of upright slate in Hadapu tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48 (2): 73-77.
- [8] 徐平, 甘军, 丁秀丽. 三峡工程船闸高边坡岩体长期变形及稳定性有限元分析[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(2): 31-34.
- XU Ping, GAN Jun, DING Xiuli. Finite element analysis of long-term deformation and stability of rock mass in the high slope of ship lock of Three Gorges project [J]. Journal of Yangtze River Academy of Sciences, 1999, 16 (2): 31-34.
- [9] PASSARIS E K S, RAN J Q, MOTTATHED P. Stability of the jointed roof in stratified rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 857-860.
- [10] TONON F, AMADEI B. Effect of elastic anisotropy of tunnel wall displacements behind a tunnel face[J]. International Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(3): 141-160.
- [11] 张农, 侯朝炯, 王培荣. 深井三软煤巷锚杆支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999(4): 69-72.
- ZHANG Nong, HOU Chaojiong, WANG Peirong. Research on bolt support technology for deep soft coal roadway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999(4): 69-72.
- [12] 安红刚, 冯夏庭. 大型洞室群稳定性与优化的进化有限元方法研究[J]. 岩土力学, 2001(4): 373-377.
- AN Honggang, FENG Xiating. Study on evolutionary finite element method for stability and optimization of large cavern groups [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001(4): 373-377.
- [13] 肖明, 龚玉锋, 俞裕泰. 西龙池抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定三维非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000(5): 557-561.
- XIAO Ming, GONG Yufeng, YU Yutai. Three-dimensional nonlinear analysis of surrounding rock stability of underground powerhouse of Xilongchi pumped storage power station [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000(5): 557-561.
- [14] 肖明, 王阳雪. 陡倾角层状岩体中地下厂房洞室围岩稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (B06): 2057-2060.
- XIAO Ming, WANG Yangxue. Stability analysis of surrounding rock of underground powerhouse caverns in steep dip layered rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (B06): 2057-2060.
- [15] 杨会军, 王梦恕. 隧道围岩变形影响因素分析[J]. 铁道学报, 2006, 28(3): 92-96.
- YANG Huijun, WANG Mengshu. Analysis of factors affecting tunnel surrounding rock deformation [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28 (3): 92-96.

(编辑 吴海西 沈 波)