

DOI: 10.11779/CJGE2023S20045

# 开挖及支护方案对隧道围岩稳定性的影响

虞永杰<sup>1</sup>, 张麟<sup>1</sup>, 宋泽仁<sup>2</sup>, 郎晓明<sup>3</sup>, 高沛沛<sup>2</sup>, 苏雅<sup>\*4</sup>

(1. 舟山市交通工程管理中心, 浙江 舟山 316100; 2. 浙江甬舟复线一期高速公路有限公司, 浙江 舟山 316100; 3. 舟山市大桥建设管理中心, 浙江 舟山 316100; 4. 浙江大学建筑工程学院土木工程学系, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 围绕开挖及施工方案对一般质量岩石隧道稳定性的影响展开研究。考虑隧道施工过程中有无支护安装与支护安装不同时机两个因素, 制定施工方案。基于 Hoek-Brown 准则, 进行隧道施工方案的 FLAC3D 数值模拟, 探究基于收敛约束原理的隧道围岩稳定性分析。结果表明, 考虑有无支护安装这一因素对隧道纵向特性曲线的形态及特征有重要影响。在考虑无支护安装条件下, 纵向特性曲线的形态及特征在不同开挖条件下的差异并不明显。考虑有无支护安装与支护安装不同时机, 对围岩安全系数的影响并不大。

**关键词:** 隧道; 开挖; 收敛约束法; 纵向变形曲线; 支护安装时机

中图分类号: TU457; U45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S2-0284-04

作者简介: 虞永杰(1973—), 男, 主要从事交通建设工程质量安全监督工作。E-mail: 1464930681@qq.com。

## Effects of excavation and support schemes on stability of surrounding rock of tunnels

YU Yongjie<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, SONG Zeren<sup>2</sup>, LANG Xiaoming<sup>3</sup>, GAO Peipei<sup>2</sup>, SU Ya<sup>4</sup>

(1. Zhoushan Transportation Engineering Management Center, Zhoushan 316100, China; 2. Zhejiang Yong-Zhou Phase I Expressway Company, Zhoushan 316100, China; 3. Zhoushan Bridge Construction Management Center, Zhoushan 316100, China; 4. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The impact of excavation and construction methods on the stability of tunnels with general quality rock is studied. The construction plans are developed, taking into account two factors during tunnel construction: the installation of support and the time of support installation. Based on the Hoek-Brown criteria, numerical simulations of tunnel construction plans are performed using the FLAC<sup>3D</sup> to investigate the stability of the surrounding rock of tunnels based on the convergence constraint principle. The results indicate that the factor of whether or not support is installed has a significant impact on the shape and characteristics of the longitudinal characteristic curve of the tunnels. Under the condition of considering no support installation, the differences in the shape and characteristics of the longitudinal characteristic curve under different excavation conditions are not significant. Considering the time of support installation and whether or not support is installed does not have a significant impact on the safety factor of the surrounding rock.

**Key words:** tunnel; excavation; convergence confinement method; longitudinal displacement profile; support installation time

## 0 引言

在岩质隧道工程稳定性分析中, 基于收敛约束原理 (CCM) 的三要素, 即围岩特征曲线 (GRC)、支护特征曲线 (SCC) 及纵向变形曲线 (LDP) 之间的相互作用, 结合隧道结构安全系数计算方法, 评判隧道工程结构稳定程度<sup>[1]</sup>。根据经典弹塑性理论得到 GRC, 再根据 LDP 和支护方案得到 SCC 与 GRC 相交, 从而得到围岩与支护结构达到平衡时需要满足的条件。其中, LDP 的精确程度对隧道稳定性分析结果的可信度和准确性起到决定性作用, 对整个工程的开挖

方案与支护设计起关键作用<sup>[2]</sup>。

在 CCM 三要素中, LDP 曲线代表沿隧道轴向的隧道纵剖面拱顶的围岩径向变形和其与掌子面的距离之间的关系<sup>[3]</sup>。在距离掌子面一定范围内, 隧道拱顶变形的增长随着与掌子面距离的增大由快到慢逐渐减缓, 该隧道段受掌子面的影响显著。在这段范围之外, 隧道拱顶变形的增长随着与掌子面距离的增大而逐渐减缓, 直至拱顶变形增长几乎为零, 隧道段受掌子面

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者 (E-mail: suyawork20@163.com)

的影响逐渐减小直至几乎可以忽略不计。LDP 的曲线坡度特征反映了掌子面对不同距离隧道位置的影响程度。因此, 本文主要研究施工方法及支护结构对 LDP 形态特征的影响程度, 以及分析基于 CCM 方法的隧道围岩稳定性。

1 隧道施工方案设计

本文针对国内山区越岭隧道的综合研究分析<sup>[4]</sup>, 选定 Hoek-Brown 准则<sup>[5]</sup>表示岩体力学行为, 隧道环境及围岩相关参数如表 1 所示。初期支护结构设计需要根据隧道开挖断面情况决定, 开挖断面尺寸由内轮廓尺寸、二次衬砌尺寸、初期衬砌尺寸及预留变形组成。其中, 初期支护采用锚杆、喷射混凝土与钢拱架进行组合的结构。各个支护构件的相关参数列于表 2。开挖方法选取基于钻眼爆破的正台阶法。

施工方案设计如表 3 所示。其中, 爆破循环进尺取为 3.0 m 保持不变。考虑三种开挖方法, 即全断面法、二台阶法和三台阶法。考虑台阶长度包含 6.0 m 和 12.0 m。表 3 中, 共计 15 个施工方案, 根据开挖方法、台阶超前距离和支护安装时机等因素综合细分为 5 组。

2 三维数值模型

本文采用有限差分软件 FLAC3D 进行数值建模, 模型网格与几何形状如图 1。模型的整体尺寸, 沿隧道轴向长 300 m, 沿隧道径向的宽高均为 240 m, 半宽为 120 m; 开挖空间的半跨度和高度分别为 6.4 m 和 9.8 m, 隧道断面形状为曲墙拱形, 网格尺寸最小达 0.5 m。模型左右前后四个边界面均设置水平方向约束, 底面设置竖直方向约束, 顶面无约束; 为了模拟上覆荷载, 模型顶面施加均匀分布的竖直方向应力, 模型内部设置水平方向应力并且其大小随重力产生梯度变化。施工模拟过程中, 首先按照既定开挖步骤清除隧洞内单元体, 再添加支护结构单元体, 直至施工过程结束。

表 1 隧道环境及围岩相关参数

Table 1 Parameters related to tunnel and surrounding rock

参数	取值
初始地应力/MPa	28
单轴抗压强度/MPa	50
重度/(MN·m <sup>-2</sup> )	0.026
泊松比	0.25
岩体弹性模量/MPa	7500
岩体质量指标 GSI	48
Hoek-Brown 参数 $m_i$	7
黏聚力/MPa	2.145
剪胀角/(°)	27.05

表 2 支护结构参数

Table 2 Parameters of support structures

混凝土参数		取值	锚杆参数		取值	钢拱架参数		取值
弹性模量/MPa		12300	弹性模量/MPa		210000	弹性模量/MPa		210000
泊松比		0.2	抗剪强度/MPa		310	直径/m		1.0
厚度/m		0.1	直径/m		0.02	厚度/m		0.2
抗压强度/MPa		18.9	长度/m		4.0	抗拉强度/MPa		268
—		—	间距/m		0.5	面积/m <sup>2</sup>		3.5578×10 <sup>-3</sup>

表 3 施工方案设计表

Table 3 Design of construction schemes

组别	方案	台阶高度/m			台阶长度/m	无支护距离/m	锚杆设计				混凝土厚度/m	钢拱架直径/m
		第一层	第二层	第三层			长度/m	直径/m	径向间距/m	环向间距/m		
1	1	9.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	2	9.8	—	—	—	3.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
	3	9.8	—	—	—	6.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
2	4	5.0	4.8	—	6.0	—	—	—	—	—	—	—
	5	5.0	4.8	—	6.0	3.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
	6	5.0	4.8	—	6.0	6.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
3	7	5.0	4.8	—	12.0	—	—	—	—	—	—	—
	8	5.0	4.8	—	12.0	3.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
	9	5.0	4.8	—	12.0	6.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
4	10	5.0	2.8	2.0	6.0	—	—	—	—	—	—	—
	11	5.0	2.8	2.0	6.0	3.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
	12	5.0	2.8	2.0	6.0	6.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
5	13	5.0	2.8	2.0	12.0	—	—	—	—	—	—	—
	14	5.0	2.8	2.0	12.0	3.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0
	15	5.0	2.8	2.0	12.0	6.0	4.0	0.02	0.5	0.5	0.2	1.0

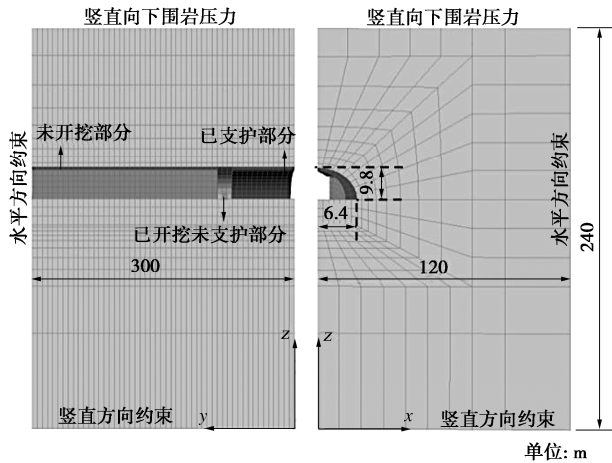


图 1 FLAC<sup>3D</sup> 数值建模图示  
Fig.1 Numerical modelling using FLAC<sup>3D</sup>

### 3 结果分析

#### 3.1 LDP 曲线结果对比

图 2~7 描述了 5 组别的 LDP 形态对比, 其相同点为同时展示组内考虑三种支护安装时机的 LDP, 即不考虑支护安装, 1 个爆破循环后立即支护安装和 2 个爆破循环后立即支护安装, 其不同点为每张图以不同的开挖方法为前提。

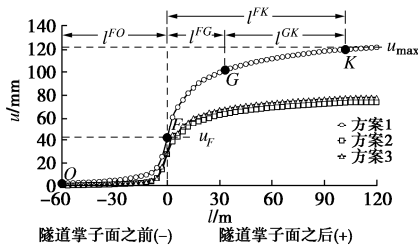


图 2 组别 1 的 LDP 曲线  
Fig. 2 LDPs of group 1

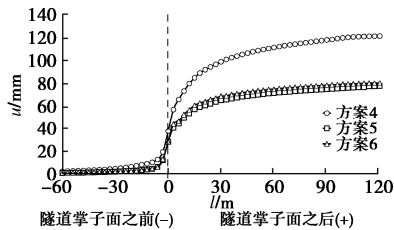


图 3 组别 2 的 LDP 曲线  
Fig. 3 LDPs of group 2

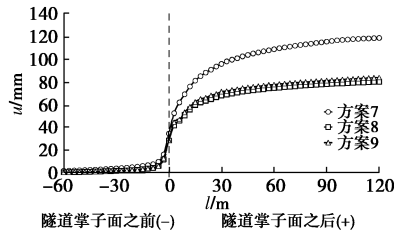


图 4 组别 3 的 LDP 曲线  
Fig. 4 LDPs of group 3

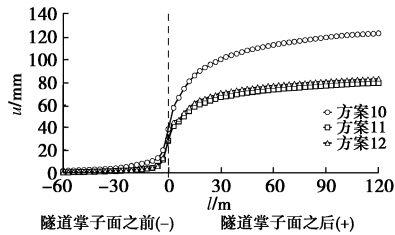


图 5 组别 4 的 LDP 曲线  
Fig. 5 LDPs of group 4

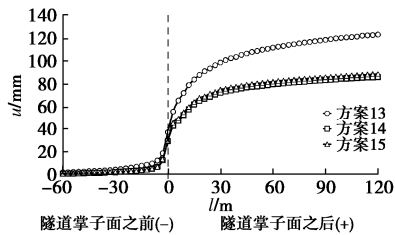


图 6 组别 5 的 LDP 曲线  
Fig. 6 LDPs of group 5

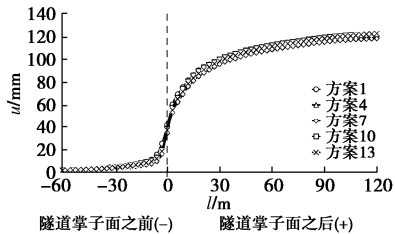


图 7 无支护 LDP 曲线  
Fig. 7 LDPs of unsupported tunnel

由上述各图可知, 考虑无支护安装情况的方案 1, 4, 7, 10, 13 的 LDP 变形值明显超过另外两类考虑有支护安装的 LDP 变形值, 如方案 1, 2 的结果对比中, 方案 1 的 LDP 变形终值超出方案 2 的 LDP 变形终值 66.67 %, 在其余图中, 对比结果最小值就已经大于 42%。考虑 2 个爆破循环后立即支护安装与考虑 1 个爆破循环后立即支护安装的情况对比 (如方案 2, 3 对比), 前者对隧道原生结构的累积扰动影响大于后者。结果对比说明支护结构效应对 LDP 的特征具有非常重要的影响, 且相比于支护结构的影响效应, 支护安装时机的影响程度显然要低得多。此外, 将相同情况下二台阶开挖方法与三台阶开挖方法的结果两两对比, 如方案 4, 10, 可知前者的变形终值略小于后者。因此, 考虑无支护结构安装时, 不同开挖方案条件下的 LDP 整体差异并不大; 而当考虑多台阶开挖方法时, 三台阶开挖方法对隧道原生结构的累积扰动影响效应略微大于二台阶开挖方法带来的影响。

#### 3.2 隧道围岩安全系数对比

隧道围岩安全系数以定量的方式反映隧道承载系统的稳定性和安全性, 可为隧道工程稳定性评估提供参考。本文根据曲线 LDP、GRC 和 SCC 的相互协作

作用, 推算出围岩安全系数, 并进行对比分析围岩稳定性。围岩安全系数  $F_s$  表达式为<sup>[11]</sup>

$$F_s = \frac{\sigma_0 - p_{i,\min}}{\sigma_0 - p_{i,\text{equ}}} \quad , \quad (1)$$

式中,  $\sigma_0$  为初始地应力,  $p_{i,\min}$  为最小支护抗力,  $p_{i,\text{equ}}$  为支护结构安装后与围岩协同作用至平衡时的围岩与支护之间的相互作用力。基于表 1 的围岩参数, 结合式 (1), 计算  $p_{i,\min}$  并推算  $F_s$ , 列于表 4 中。

表 4 中,  $F_s$  在整体上最大差异仅达 0.04。若以相关设计规范提供的安全系数最小值 1.20 和 1.30 作为评价标准, 则 15 个围岩安全系数皆过小, 说明围岩安全储备不足。与此同时, 5 组组内对比, 考虑有支护结构安装且 1 个爆破循环后立即支护的情况对应的  $F_s$  相对最大, 为 1.07; 而考虑无支护结构安装且 2 个爆破循环后立即支护的情况对应的  $F_s$  相对最小, 为 1.03。通过分析可得, 虽然考虑有支护结构安装的情况相对于考虑无支护结构安装的情况, 可提高围岩安全系数, 但是考虑有无支护结构安装对围岩安全系数的变化影响并不大; 同时, 虽然考虑 2 个爆破循环后立即支护的情况相对于大于 1 个爆破循环后立即支护的情况, 反而会降低围岩安全系数, 但是考虑支护结构不同安装时机对围岩安全系数的变化影响微乎其微。

表 4 隧道围岩安全系数

Table 4 Factors of safety of surrounding rock of tunnel

组别	方案	$p_{i,\text{equ}}/\text{MPa}$	$p_{i,\min}/\text{MPa}$	$F_s$
1	1(1)	1.09	0.15	1.04
	1(2)	0.85	0.15	1.03
	2	2.05	0.15	1.07
	3	1.71	0.15	1.06
2	4(1)	1.22	0.15	1.04
	4(2)	0.94	0.15	1.03
	5	1.98	0.15	1.07
	6	1.71	0.15	1.06
3	7(1)	1.38	0.15	1.05
	7(2)	1.04	0.15	1.03
	8	1.93	0.15	1.07
	9	1.64	0.15	1.06
4	10(1)	1.19	0.15	1.04
	10(2)	0.92	0.15	1.03
	11	1.96	0.15	1.07
	12	1.65	0.15	1.06
5	13(1)	1.27	0.15	1.04
	13(2)	0.95	0.15	1.03
	14	1.88	0.15	1.07
	15	1.55	0.15	1.05

4 结 论

本文以一般质量岩石公路道隧道为例, 考虑有无

支护安装与支护不同安装时机, 制定 5 组施工方案, 针对隧道围岩稳定性进行影响因素分析, 具体在如下方面取得了新的认识及进展。

(1) 考虑有无支护安装情况对比可知, 当隧道掌子面前进到参考断面时、及施工方案完成后, 前者的 LDP 拱顶变形终值比后者至少大 21.2%; 同时, 前者关于掌子面对围岩的扰动距离也比后者至少大 60.0%。由此可见, 考虑有无支护安装对 LDP 形态及特征有重要的影响。

(2) 考虑无支护安装作用, LDP 曲线形态及定量指标之间的差异并不明显。由此可知, 如果在隧道工程初期设计阶段不考虑支护安装的效应, 则不同开挖方法条件下的 LDP 曲线形态及特征并无明显差异。

(3) 考虑有支护安装情况, 相对于考虑无支护安装情况可提高围岩安全系数; 同时, 考虑 2 次爆破循环后支护的情况相对于考虑 1 次爆破循环后支护的情况, 将降低原生结构安全系数。整体而言, 考虑有无支护安装与支护不同安装时机, 对围岩安全系数的影响并不大。

参考文献:

[1] CARRANZA-TORRES C, FAIRHURST C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(2): 187-213.

[2] VLACHOPOULOS N, DIEDERICHS M S. Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(2): 131-146

[3] ALEJANO L R, RODRIGUEZ-DONO A, VEIGA M. Plastic radii and longitudinal deformation profiles of tunnels excavated in strain-softening rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30:169-182.

[4] 铁路隧道设计规范: TB10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016. (Code for Design of Railway Tunnel: TB10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016. (in Chinese))

[5] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion: 2002 edition[C]// Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada Conference. Toronto, 2002: 267-273.

(编校: 明经平)