

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.10.064

# 浅埋偏压连拱隧道开挖工序的数值模拟

刘俊佳

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 某山体暗挖隧道具有浅埋、偏压、大跨度、双连拱的难点。为了探究该隧道施工过程中初支结构的内力及山体边坡的稳定性变化, 采用 plaxis 2d 岩土有限元软件对施工过程中主要的 15 道开挖支护工序进行数值模拟。通过地层荷载法揭示各个施工步骤中衬砌结构的内力变形规律, 同时基于强度折减法求出安全系数对山体边坡稳定性进行评价。根据此数值模拟结果, 对该隧道结构设计提出指导性的意见。

**关键词:** 浅埋偏压; 连拱隧道; 数值模拟; 边坡稳定

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)10-0255-04

## 0 引言

随着城市建设的发展, 城市道路功能需求的逐渐增加, 对隧道断面的要求也越大<sup>[1]</sup>, 建设中出现了许多大断面以及超大断面隧道, 目前国内已经建成或在建的双向八车道隧道有: 福州金鸡山隧道、大连韩家岭隧道、深圳雅宝隧道, 这些隧道均为双向 8 车道, 隧道内轮廓超过 18 m 的大跨度双连拱隧道。连拱隧道围岩荷载分布和支护力学特性较为复杂, 施工工序多, 岩体和支护结构稳定性差。在二次衬砌施加前, 设计时有必要对开挖工序中的初支结构的强度与稳定性进行分析与验算。

## 1 工程概况

湖南某市政道路需下穿一山体, 道路设计时速 50 km/h, 为双向 8 车道, 左右两侧设置人非车道。由于城市总体规划对山体保护的政策, 设计采用了暗挖法施工。隧道全长约 320 m, 隧道结构设计双连拱隧道, 外加两侧人非洞室, 主洞开挖宽度 18.3 m, 人非洞室开挖宽度 8.5 m, 距离主洞水平距离 6 m。隧道围岩主要为泥质板岩及砂质板岩, 为 IV-V 级围岩。

根据《公路隧道施工技术规范》(JTG 3660—2020)<sup>[2]</sup>, 该隧道主洞属于大跨度隧道( $B \geq 18$  m), 人非隧洞属于小跨度隧道( $B < 9$  m), 隧道属于短隧道( $\leq 500$  m)。

隧道下穿山体平均高度仅有 45~60 m, 隧道平均埋深仅有 20~0 m, 按照隧道深浅埋法<sup>[3]</sup>, 临界埋深为 48 m, 该隧道埋深远小于临界深度, 属于超浅埋。而且隧道所处山体起伏较大, 整个隧道均处于偏压的受力状态。

隧道采用复合式衬砌, 初支为  $\phi 22$  系统锚杆 + 250 mm 厚 C25 混凝土 + 钢筋网片 + 工字钢, 二衬为 700 mm 厚 C30 钢筋混凝土。超前支护形式为  $\phi 42$  的钢管。采用护拱 +  $\phi 108$  大管棚辅助进洞。洞口山脚处设置偏压重力挡墙, 与隧道护拱及二衬结构相连。

隧道进洞口处先行施工护拱及偏压挡墙。进洞后隧道开挖工法采用双侧壁导坑法, 如图 1 所示序号: 中导洞先行贯通—开挖左右主洞上台阶外侧—开挖左右主洞下台阶外侧—开挖左右主洞上台阶内侧—开挖左右主洞下台阶内侧—开挖左右主洞中台阶上、中、下部—开挖人非隧洞—隧道顶部浅埋处回填。

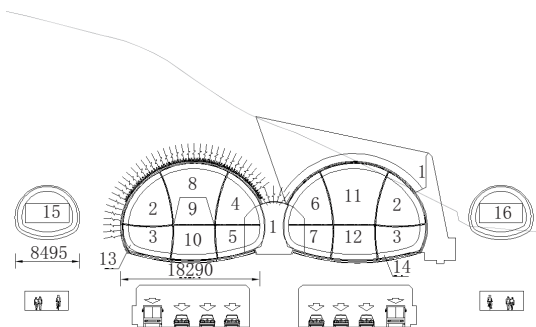


图 1 隧道横断面图(单位:mm)

由于隧道开挖跨度大、开挖工序繁多、结构及山体受力复杂, 按《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)应进行地层荷载法模拟隧道

收稿日期: 2022-01-12

作者简介: 刘俊佳(1996—), 男, 硕士, 工程师, 从事市政工程设计工作。

开挖过程中衬砌内力及位移,同时应采用强度折减法计算开挖过程中山体边坡的稳定性计算。

## 2 反演预测方法及模型建立

### 2.1 模型简介

选取隧道主洞进洞口处偏压最不利的断面计算,该处山体高度45 m,山体自然坡率约1:1.7,主要地层为强风化-中风化板岩,局部含全风化泥化夹层。主洞的覆土高度分别为7 m,1 m,内侧主洞及人非隧洞处存在断层碎裂岩。

采用plaxis 2d有限元软件进行连拱隧道开挖工序的模拟。如图2所示,模型长280 m,高120 m,隧道围岩类型碎裂岩、强风化板岩、中风化板岩,采用平面单元模拟。系统锚杆采用植入式桁架单元、隧道衬砌及偏压挡墙采用板单元模拟。隧道周边网格进行优化加密。

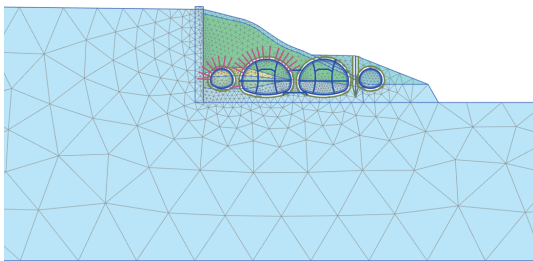


图2 数值计算模型

### 2.2 计算参数及计算工况

计算模型中,岩土体为摩尔库伦本构、支护结构为线弹性本构。材料参数如表1所示。

表1 主要数值模拟计算参数

材料	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
强风化④ <sub>1</sub>	21.3	$4.90 \times 10^4$	38	26
全风化板岩④ <sub>2-a</sub>	19.4	$5.60 \times 10^3$	30	20
中风化泥质板岩④ <sub>2</sub>	23.5	700 000	100	33
碎裂岩⑥	20.3	45 000	30	22
二次衬砌	25	$3.10 \times 10^7$		
人工填土	18.5	5 000		
初支	21.3	$4.90 \times 10^4$		
偏压挡墙	19.4	$5.60 \times 10^3$		
系统锚杆	23.5	700 000		

计算工况应尽可能模拟双侧壁导坑法的开挖支护过程,同时考虑岩土体的时空效应,V级围岩开挖的瞬间释放30%左右的应力,剩下的应力由初支和二衬来承担。本计算为提高衬砌结构的安全富裕度,适当提高支护结构期间荷载释放系数,工况时设置初支和二衬荷载释放系数分别为0.6和0.4,见表2。

表2 主要数值模拟工况

开挖步骤	工况	荷载释放系数
0	初始阶段	0.1
1	开挖中导洞,浇筑中隔墙	
2	开挖左右洞外侧上台阶,施作初期支护	
3	开挖左右洞外侧下台阶,施作初期支护	
4	开挖左洞内侧上台阶,施作初期支护	
5	开挖左洞内侧下台阶,施作初期支护	
6	开挖右洞内侧上台阶,施作初期支护	
7	开挖右洞内侧下台阶,施作初期支护	0.5
8	开挖左洞中部上台阶,施作初期支护	
9	开挖左洞中部中台阶,施作初期支护	
10	开挖左洞中部下台阶,施作初期支护	
11	开挖右洞中部上台阶,施作初期支护	
12	开挖右洞中部下台阶,施作初期支护	
13	施作左洞二衬	0.3
14	施作右洞二衬	
15	左右人非洞室开挖,施作初期支护	0.1

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 山体稳定性

如图3所示,自然状态下边坡的安全系数为1.7,潜在滑动面穿过碎裂岩从中隔墙的位置剪出。如图4所示,偏压挡墙及中隔墙浇筑完成后安全系数略有提高为1.9,潜在滑动面穿过中隔墙基底。中隔墙浇筑完成后,中隔墙的位移模式为整体下移,下移量5.3 mm。左右主洞的外侧上台阶完成初支后安全系数为2.0,左右主洞的外侧上下台阶完成初支后安全系数为2.1,左右主洞的内、外侧完成初支后安全系数为1.8,主洞全部开挖完成初支后安全系数为1.7,如图5所示。隧道完成二次衬砌后,山体的安全系数为2.6,未观测到明显的滑动面。

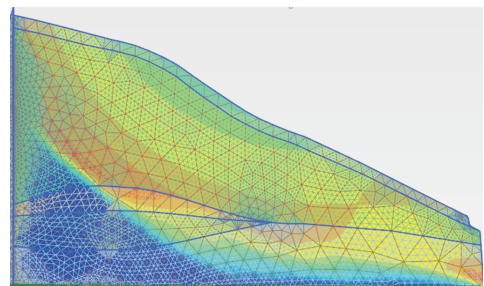


图3 原始山体边坡滑动面云图(安全系数1.7)

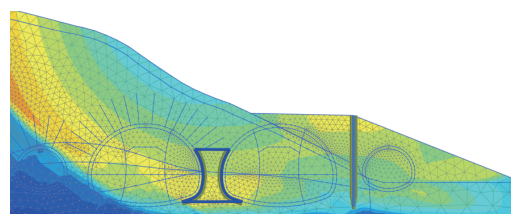


图4 中隔墙浇筑完成后边坡滑动面云图(安全系数1.9)

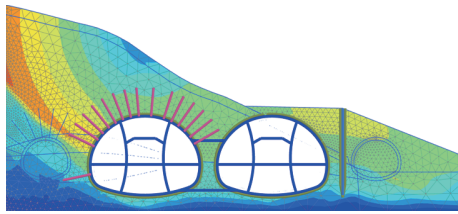


图5 隧道主洞开挖完成后边坡滑动面(安全系数1.7)

在隧道开挖施加初支的过程中,山体边坡的安全系数先增大后降低。初支全部施加完成后,边坡稳定性和原始边坡的安全系数相近,二衬全部施加完成后,山体边坡安全系数大幅度增高,山体处于稳定状态。

### 2.3.2 初支结构内力强度

随着开挖的进行,初支结构上内力和位移逐渐增大,当左右两主洞开挖完成后,初支内力最大。由图6和7可以看出,在开挖过程中左洞初支所受的轴力始终较大,而左洞初支弯矩先是小于右洞,而后大于右洞。当进行到图1所示的开挖工序10时,即左洞内部土被完全挖除之前。右洞所受的轴力较小而弯矩较大,初支结构承受较大的偏心作用,此阶段对右洞的初支结构为不利阶段。随着开挖的进行到第10步之后,右洞左侧的岩土体被完全挖除转而由初支结构替代后,对右洞边坡推力减少,偏压状态得到缓解。尽管左洞承受一定的弯矩,但每步开挖过程中轴压作用明显,与中隔墙、偏压挡墙形成一个整体,偏压状态处于可控的范围内。

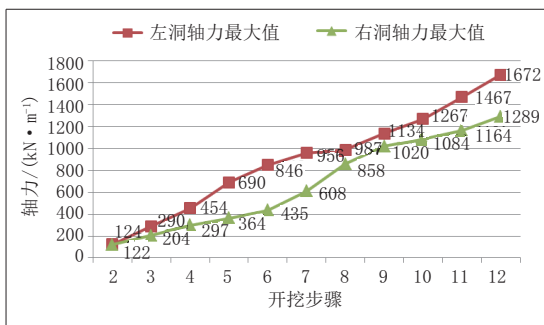


图6 开挖过程中主洞初支轴力最大值

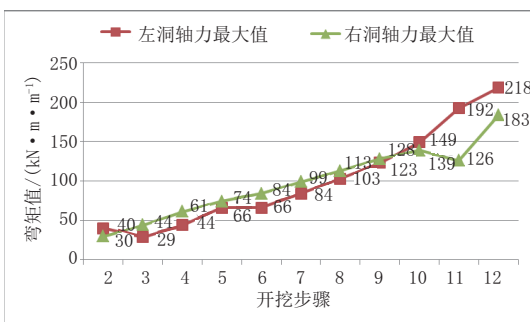


图7 开挖过程中主洞初支弯矩最大值

初支包含系统锚杆、喷射混凝土、钢筋网片及钢拱架。主体受力结构是钢拱架,喷射混凝土分担了轴向压力,系统锚杆可等效成钢拱架梁的弹性支点,从而减小了弯矩。

本计算得到的初支结构内力的分布规律:弯矩和剪力的极值点在左洞左下台阶右端点,弯矩为217.7 kN·m,剪力为-333.3 kN/m,轴力为100.5 kN/m;轴力极值点发生左洞拱顶处轴力为1672 kN/m,弯矩和剪力数值较小,可忽略不计;拱脚处(起拱线)弯矩200 kN·m,剪力300 kN/m,轴力120 kN/m。

初支由喷射混凝土和型钢骨架组成,型钢间距0.5 m,喷射混凝土厚度0.25 m。

取每延米型钢(间距0.5 m)+喷射混凝土的组合截面弯矩设计值  $1.25 \times 217.7 = 272 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,剪力设计值  $1.25 \times 333.3 = 416 \text{ kN}$ ,轴力  $1.25 \times 100.5 = 126 \text{ kN}$ 。由《公路隧道设计细则》(JTG/T D70—2010)<sup>[4]</sup>,喷射混凝土分担较多的轴力,而不承担弯矩。而钢拱架同时承担全部的弯矩,同时与喷射混凝土按抗压刚度分配轴力。如表3所示,喷射混凝土压应力  $111/0.25 = 0.4 \text{ MPa} < 9.6 \text{ MPa}$ ,喷射混凝土强度满足要求。

表3 初支结构内力表

单位长度内截面的轴力 $N/\text{kN}$	126
单位长度内截面的弯矩 $M/(\text{kN}\cdot\text{m})$	272
喷射混凝土计算截面的面积 $A_h/\text{m}^2$	0.25
钢拱架计算截面的面积 $A_g/\text{m}^2$	$4.65 \times 10^{-3}$
喷射混凝土的弹性模量 $E_h/\text{kPa}$	$2.80 \times 10^7$
钢拱架的弹性模量 $E_g/\text{kPa}$	$2.00 \times 10^8$
喷射混凝土承担的轴力 $N_h/\text{kN}$	$1.11 \times 10^2$
钢拱架承担的轴力 $N_g/\text{kN}$	14.8
喷射混凝土承担的弯矩 $M_h/\text{kN}$	0
钢拱架承担的弯矩 $M_g/(\text{kN}\cdot\text{m})$	272

每榀钢拱架(间距0.5 m)弯矩设计值136 kN·m,剪力73 kN,轴力7.4 kN。原设计为工22b钢拱架,建议调整为工25b。钢拱架应力验算如下,计算结果可知,各应力验算均满足要求。

#### (1) 正应力验算

$$\sigma = \frac{N}{A_n} + \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} = \frac{7400}{5354} + \frac{136000000}{1.55 \times 423000} = 208.810 \text{ N/mm}^2$$

$$|\sigma|/f = 208.810/215 = 0.971 \leq 1.0$$

#### (2) 剪应力和平均剪应力验算

$$\tau = V/A = 73000.000/5354.100 = 13.634 \text{ N/mm}^2$$



$$\tau_{\max} = \frac{V_y S_x}{l_x t_w} = \frac{73000 \times 247900}{52799998 \times 10.000} = 34.274 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} / f_v = 34.274 / 125.000 = 0.274 \leq 1.0$$

隧道内部初支全部拆除后,隧道初支的最大变形为 26 mm。根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)第 9.2.15 条,变形允许值取  $l/400=46\ 337/400=115 \text{ mm} > 26 \text{ mm}$ , 满足要求。变形图如图 8 所示,最大变形点发生右洞的拱脚处。此时应尽早施加二衬防止钢拱架失稳。

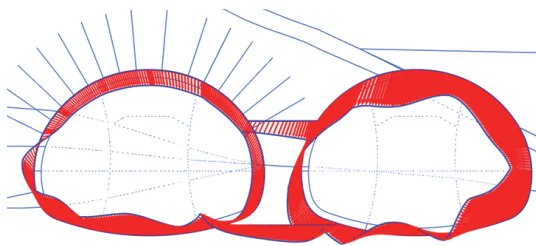


图 8 隧道初支变形图

如图 9 所示,锚杆计算轴力最大值为 38 kN,小于系统锚杆锚固抗拔力设计值为 80 kN,满足要求。

### 3 结 语

(1) 中隔墙浇筑完成后,潜在滑动面通过中隔墙基底,且在开挖的过程中中隔墙会发生倾斜及下沉。因此在设计时中隔墙基底应埋设注浆钢管,形成锚桩基础,防止因偏压状态导致的中隔墙滑动或倾斜。

(2) 在边坡坡脚右侧主洞,隧道偏压状态明显,隧道开挖过程中初支结构会承担较大的弯矩,尤其

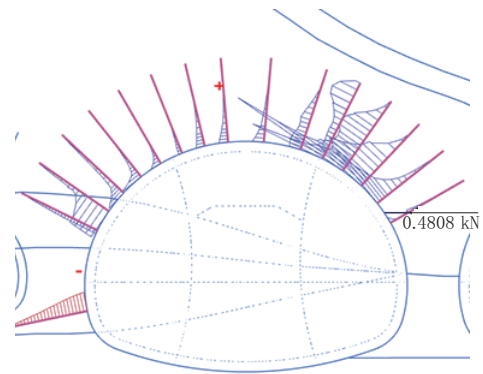


图 9 隧道主洞系统锚杆轴力图

是在边坡坡脚岩土体被移除而初支结构未形成封闭时受力最不利。在设计时应增加右侧主洞钢拱架的强度以增大抗弯能力。

(3) 山体滑动安全系数先增加后减小,隧道外侧洞室的开挖支护引起滑动安全系数增加,随着右洞安全的开挖进行,安全系数减小,潜在滑动剪出面发生在左洞左上台阶处,隧道全部开挖后并施加初支后安全系数与原始山体边坡相近,这说明该开挖工序中的初支结构基本上弥补了挖除岩土体的反力作用。施加二衬后边坡稳定性大幅度增加从而体现了尽早施加二衬的必要性。

#### 参考文献:

- [1] 陈福斌. 超大断面隧道设计计算方法研究[J]. 城市道桥与防洪, 2021(4): 200-203.
- [2] JTG/T D70—2010, 公路隧道设计细则[S].
- [3] JTG 3370.1—2018, 公路隧道设计规范[S].
- [4] JTG 3660—2020, 公路隧道施工技术规范[S].

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)