

# 基于 Plaxis3D 的大断面、小净距隧道开挖全过程数值分析方法

郭洪雨 钟方杰 孙 飞 李长俊 郑云辉 (浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘 要] 截至目前,浙江省双向八车道小净距公路隧道的设计建造案例并不多,富阳市大盘山隧道出口段(双向八车道,开挖宽度21.3m,开挖高度14.16m,最小净距约10m)作为大断面小净距隧道的典型代表,洞口段又存在较长距离的含砾粉质黏土,因此有必要针对该工程开展断面小净距隧道开挖全过程的数值分析,为工程设计和施工提供重要参考,以期为浙江省同类隧道设计施工提供工程经验积累。

[关键词] 大盘山隧道; 大断面; 小净距; Plaxis; 数值模拟

# 0 引言

由于普通分离式双洞隧道的接线问题以及 连拱隧道在工艺、工期、造价及质量方面显现 出的问题,于是便出现了小净距隧道这种结构 型式。小净距隧道是介于双洞分离式隧道和连 拱隧道之间的一种结构型式。小净距隧道相对 于普通分离式双洞隧道和连拱隧道有以下优点: 第一,其造价和施工工艺同普通分离式双洞隧 道相比相差不大,同连拱隧道相比其造价要低 得多;第二,施工工艺相对简单,工期短;第 三,采用小净距隧道有利于公路整体线形和线 形的优化。

本文依托浙江省富阳市大盘山大断面、小净距公路隧道工程(双向八车道,净宽17.75m,净高5.0m,双洞间净距10~16m),该工程作为富阳市主城区南北向主干路的重要组成部分,出入口均为含砾粉质黏土地层,且均穿越大量民房、高楼等建(构)筑物,施工中必须严格控制隧道围岩及支护变形,保障工程安全并减小对周边环境的不利影响。

#### 1 国内外研究现状

为保证小净距隧道施工状态及运营期的稳定,施工的重点是尽可能维持两个隧道围岩— 衬砌承载体系的完整性,保证中夹岩有足够的 强度及稳定性。国内外针对在小净距隧道施工力学方面开展了大量研究。

Ghaboussi J等<sup>[1]</sup>采用有限元模拟了小净距平行隧道,对地表沉降、轴力、洞周应力和中夹岩柱应力等进行分析。指出小净距平行隧道相互作用影响范围主要为中夹岩柱区域,相互影响程度与隧道净距呈反比。Solim. E<sup>[2]</sup>基于平面应变理论,采用三维有限元进行了小净距隧道开挖施工模拟研究。

Lo K. W 等<sup>[3]</sup>以新加坡某位于回填土、海相粘土硬冲积层中的四孔平行小净距隧道为依托,根据土体水平位移,垂直位移等多项参数的量测结果,开展了多孔小净距隧道相互影响研究。Kuriyama H 等<sup>[4]</sup>运用数值模拟技术,研究了福岗市地铁 3 号线双线小净距隧道的岩柱加固及监控量测技术。Chapman DN 等<sup>[5]</sup>利用室内模型试验,对软岩中近距离多孔隧道施工导致的地层位移进行了研究。

国内朱敬民等<sup>[6]</sup>较早开展双线隧道研究, 采用模型试验的研究方法,提出层状岩体中开 挖洞室时围岩的扰动范围为一椭圆形;复合式 衬砌的破坏亦属剪切破坏,破坏受变形控制; 二次模注衬砌能起到受力结构的作用,其施作 时间以收敛位移稳定为宜;喷锚支护并不能改

收稿日期: 2020-12-08

作者简介:郭洪雨(1981-),男,高级工程师,主要从事隧道工程设计及相关科研工作。

变围岩的受力状态,但却能改善围岩的力学性能,提高其抵抗变形的能力并改变围岩破坏的 突然性等重要结论。

国内外针对大断面小净距隧道的研究已经较为丰富,但大多集中在理论分析领域,且相关数值分析研究大多没有考虑隧道全过程分步开挖的影响。因此,为了更加贴合工程实际,本文依托大盘山隧道工程,开展大断面、小净距隧道全过程施工力学分析,探求双侧壁七步开挖工法下大断面、小净距隧道支护的受力演变过程,并对该隧道工程开展安全性评价。

# 2 模型建立与参数选取

# 2.1 模型建立

采用 Plaxis3D 地层设计模块,根据纵断面地层资料和实际施工情况,建立两层地层,上层为含砾粉质黏土,下层为强风化砂岩,该地层模型未考虑地表坡度,此后的模型将在此基础上考虑地表坡度,做精细化处理。

计算过程中,考虑了开挖引起的应力释放,按照围岩与初期支护共承受80%荷载计算(根据2018版公路隧道结构设计规范条文说明9.2.5,按照保守设计,施工过程二衬未施作时若对初期支护进行验算,围岩与初期支护共同承担的荷载比例范围30%~100%)。

地层模型尺寸为长宽高=140×40×60m,即地层厚度60m,其中埋深按照出口段SB5-JQa衬砌段最大埋深计算约20m;纵向按照双侧壁7步开挖工法考虑,为避免模型边界条件的不利影响,故模型纵向尺寸为40m;地层宽度为避免模型水平方向模型边界的不利影响,隧道左右侧均向两侧扩展3倍洞径,故模型水平尺寸为140m。

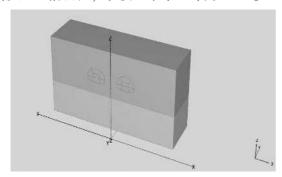


图 1 地层模型

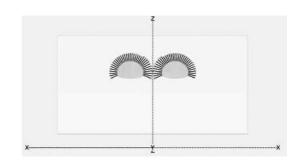


图 2 模型隧道位置及锚杆模型示意图

采用 Plaxis3D 专用的 TunnelDesigner (隧道设计器),对隧道断面形式及支护结构进行建模,隧道断面形式为 SB5-JQa 型衬砌断面,双向八车道,建筑限界净宽 17.75m,净高 5.0m,双洞间净距 10~16m。初期支护厚度 32cm,双侧壁厚度 32cm,系统锚杆直径 25mm,纵环向间距为 50×100cm。初期支护和临时支护均为C25 喷射混凝土+双层钢筋网(直径 6mm,间距15×15cm)+25b号工字钢拱架(间距 50cm),断面尺寸、初期支护、临时支护设计参数如图3、图 4 所示。

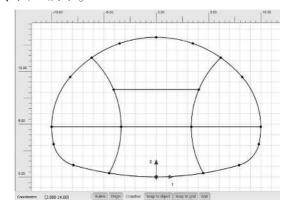


图 3 隧道断面轮廓模型

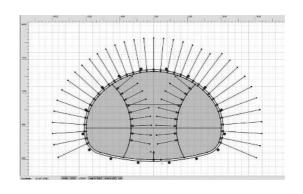


图 4 隧道初期支护、临时支护、锚杆模型

# • 浙江交通科技 •



# 2.2 参数选取

表 1 模型参数选取

类别	重度 (kN/m³)	弹性 模量 (GPa)	内聚力 (kPa)	内摩 擦角 (°)	泊松比	锚固侧 摩阻力 (kN/m)
含砾粉 质黏土	18	0. 02	60	25	0.4	_
强风化砂岩	22	1	100	40	0.35	_
初期支护	26	30	_	_	0.2	_
临时支护	26	30	_	_	0.2	_
中空注浆 锚杆	30	120	_	_	0. 2	35

依据上述隧道设计参数, Plaxis3D 中隧道初期支护采用 SHELL 单元模拟, 双侧壁临时支护也采用 SHELL 单元, 由于锚杆为中空注浆锚杆,

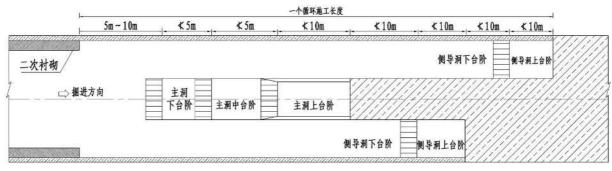
G7-下台阶并闭合初期支护

可同时提供抗弯和摩擦锚固力,因此系统锚杆和临时支护锚杆采用 PILE 单元模拟,左右洞在靠近中夹岩柱一侧的中空注浆锚杆长度为 6m,系统锚杆(中空注浆锚杆)长度为 5m,临时支护处的中空注浆锚杆为 3m。锚固侧摩阻力取35kN/m(参考灌注桩在黏土中的桩侧摩阻力)。

# 2.3 计算步骤

隧道施工工法为双侧壁 7 步开挖,施工工序如下图所示。每个分区开挖的纵向间距为10m,上中下台阶之间纵向间隔距离 6m,先行洞与后行洞之间的纵向距离为 40m,每个开挖进尺为 1m。计算步骤为:地应力平衡→分步开挖(应力释放)→分步支护······

H8-拆除临时支护



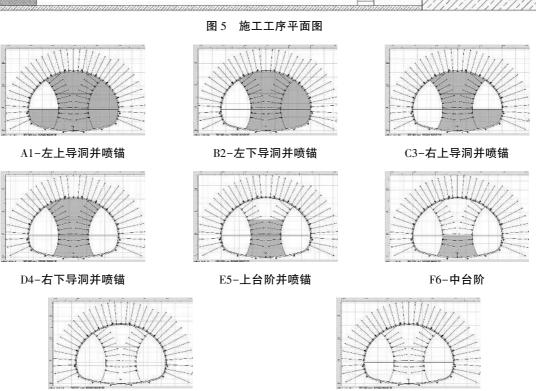
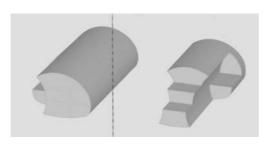
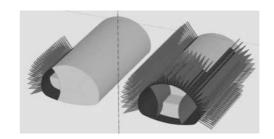


图 6 双侧壁导坑分步施工步骤模拟 (循环进尺)

• 游江交通科技 •





a) 有限元模型分布开挖过程模拟

b) 锚杆及支护施作过程模拟

图 7 双侧壁 7 步开挖模型 (三维视角)

# 3 计算结果分析

# 3.1 围岩变形及塑性区



图 8 右洞两侧导洞开挖后围岩竖向沉降 1.6cm

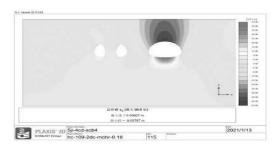
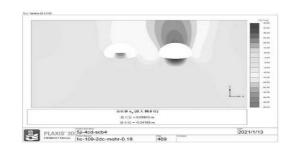


图 9 右洞开挖完成 3.8cm, 左洞双侧导坑开挖后 竖向沉降 1.2cm



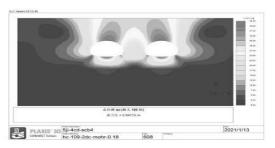


图 10 右洞围岩拱顶沉降 4.2cm, 左洞拱顶沉降 0.2cm 图 11 右洞拱顶沉降 4.1cm, 左洞拱顶沉降 4cm

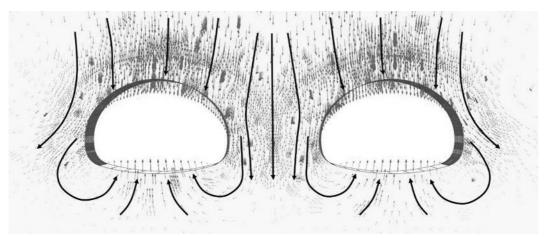


图 12 围岩变形迹线

# • 浙江支篇科技 •

由上图所示, 在隧道开挖进程中, 左、右 洞围岩拱顶下沉位移均逐渐增大,右洞拱顶下 沉最大值为 4.1cm, 左洞拱顶下沉最大值为 4cm, 先行洞(右洞)的变形比后行洞(左洞) 要大。

从围岩变形迹线来看,围岩扰动较为明显 的区域包括隧道洞室四周以及中夹岩柱区域。 其中,洞室上方和下方围岩向内挤压,是支护 结构需要抵抗的主要荷载,同时观察到,中夹 岩柱存在整体向下的位移,约2-3cm左右,中 夹岩柱土体的垂直变形在泊松效应的作用下. 会在水平方向上形成一种将两个洞室分开的趋 势力,这与下文图 14 中隧道初期支护结构水平 位移的分布结果基本一致。

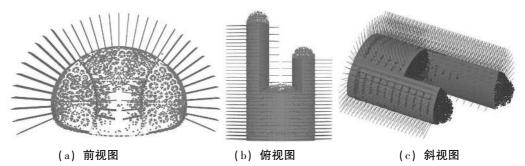


图 13 围岩塑性区分布

曾报告出现过掌子面前方的局部小范围塌方。

由上图可知, 在隧道开挖过程中, 由于隧 道开挖进尺短,中空注浆锚杆设计密集,因此 3.2 初期支护变形及受力分析 中夹岩柱和隧道周围的塑性区并不明显, 围岩 塑性区主要集中在掌子面前方,实际工程中也

# (1) 水平收敛位移

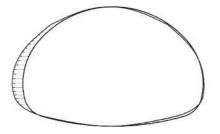


图 14 右洞成洞水平扩大位移+1.3cm, 左洞成洞水平扩大位移+1.1cm

由上图可知, 在开挖过程中, 左右洞的水 平位移逐渐出现非对称特征, 例如右洞右侧水 平扩大位移+1.27cm, 左侧水平扩大位置-3.5mm, 右洞呈现向右的整体变形; 同样的,

左洞也出现向左的整体变形。先行洞 (右洞) 的支护结构水平变形大于后行洞。 (2) 竖向收敛位移

# 表 2 初期支护拱顶竖向位移变化曲线

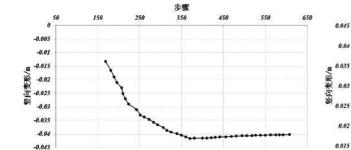


表 3 初期支护仰拱竖向位移变化曲线

治江支盖科技 •

由上图可知,由于隧道开挖、施加支护二者间不可避免的时间间隔,将产生地应力释放,由图中曲线可知,在进行初期支护施工之前,围岩产生了一定的收敛变形,其中,地应力释放引起的拱顶沉降位移为1.33cm,地应力释放引起的仰拱抬升位移为3.16cm。因此在施加初期支护后,拱顶初期支护沉降位移为2.67cm。

在计算模拟过程中,初期支护施加的瞬间位移应为0,但程序没有自动将初期支护的位移清零,因此位移云图中输出的位移量应当减去地应力释放产生的位移,则为支护结构施加后的收敛变形,特此说明。





图 15 右洞成洞后竖向收敛位移 7.1-1.33-3.16=2.61cm







图 16 右洞竖向收敛位移 7.9-1.33-3.16=3.41cm

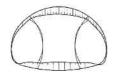




图 17 右洞竖向收敛位移 8.1-1.33-3.16=3.61cm, 左洞竖向收敛位移 6.7-1.33-3.16=2.21cm





图 18 右洞竖向收敛位移 8.1-1.33-3.16=3.61cm, 左洞竖向收敛 7.9-1.33-3.16=3.41cm

由上图可知,隧道开挖过程中初期支护拱顶最大下沉位移为3.6cm,出现在拆除临时支撑的时候;左洞拱顶最大下沉位移为3.41cm,同样出现在拆除临时支护的时候。

# (3) 衬砌内力及安全系数





图 19 右洞轴力最大值 2740kN, 左洞导洞轴力最大值 1255kN





图 20 右洞弯矩最大值 1005kN·m, 左洞导洞弯矩最大值 243kN·m







图 21 右洞轴力最大值 2585kN, 左洞导洞轴力最大值 1292kN







图 22 右洞弯矩最大值 361kN·m, 左洞导洞弯矩最大值 304kN·m





图 23 右洞轴力最大值 3090kN, 左洞轴力最大值 2803kN





图 24 右洞弯矩最大值 380kN·m, 左洞弯矩最大值 660kN·m





图 25 右洞轴力最大值 3256kN, 左洞轴力最大值 3100kN





图 26 右洞弯矩最大值 410kN·m, 左洞弯矩最大值 370kN·m

# • 浙江交通科技 •

# 化cjichuangxin

由上图可知,在隧道分步开挖过程中,隧 道初期支护及临时支护的轴力弯矩均逐渐增大。 整体来看,先行洞的弯矩轴力要大于后行洞, 说明先行洞承担的荷载更多。

此外,在后行洞开挖过程中,两洞结构内力逐渐呈现非对称特征,在两洞中夹岩柱附近的支护结构内力较大(拱脚、墙脚处最为明显),说明小净距条件下中夹岩柱土体的扰动增大了结构荷载。

根据轴力弯矩可计算得到先行洞与后行洞的 安全系数,所有安全系数均满足要求,其中墙脚 处安全系数较小,完整安全系数表详见下表。

由表 4、表 5 可知, 先行洞隧道初期支护安全系数在相同位置上普遍小于后行洞, 即与后行洞相比, 先行隧道衬砌结构受力更加不利; 此外, 无论是先行洞还是后行洞, 安全系数最小值均位于墙脚处, 尤其是先行洞的左墙脚、后行洞的右墙脚, 且左右洞隧道衬砌安全系数分布状态呈反对称现象, 这是由于小净距隧道开挖导致中夹岩柱及其上方的围岩松散荷载更大, 造成左右侧荷载不对称。

# 3.3 锚杆轴力

# (1) 系统锚杆

由于模型部件数量过大,计算机算力不够, 计算缓慢,因此锚杆数量采用一定程度的等效 处理,采用将锚杆直径扩大1倍、减少锚杆单 元密度的方式减少锚杆总数,因此下图中所述 的锚杆轴力,是实际锚杆轴力的两倍。文本表 述过程中已经进行换算处理。

表 4 先行洞(右洞)成洞后初期支护安全系数表

位置	N (kN)	M (kN. m)	判断大小 偏心	安全系数
拱顶	1586	15. 5	小偏心	4. 15
左拱肩	1915	171. 9	小偏心	2. 18
左拱腰	2173	68. 07	小偏心	2. 62
左拱脚	2285	46. 5	小偏心	2. 68
左墙脚	2644	337. 9	小偏心	1. 35
仰拱左侧	1415	222. 1	大偏心	2. 05
仰拱	1219	41. 47	小偏心	4. 60
仰拱右侧	1523	228. 8	大偏心	2. 00
右墙脚	2703	365	大偏心	1. 25
右拱脚	2336	27. 15	小偏心	2. 78
右拱腰	2262	70. 59	小偏心	2. 52
右拱肩	2485	167. 2	小偏心	1. 88

表 5 后行洞 (左洞) 成洞后初期支护安全系数表

 位置	N	M	判断大小	安全系数	
114. 且.	(kN)	(kN. m)	偏心	女王尔奴	
拱顶	1646	14. 78	小偏心	4. 02	
左拱肩	2532	175. 4	小偏心	1. 82	
左拱腰	2319	62. 96	小偏心	2. 52	
左拱脚	2437	12. 83	小偏心	2. 79	
左墙脚	3252	396. 3	小偏心	1. 12	
仰拱左侧	1551	237	大偏心	1. 92	
仰拱	1339	29. 3	小偏心	4. 52	
仰拱右侧	1599	221.7	大偏心	2. 07	
右墙脚	2176	360. 4	大偏心	1. 25	
右拱脚	2323	31. 62	小偏心	2. 76	
右拱腰	2254	68. 51	小偏心	2. 54	
<u>右拱肩</u>	2478	147. 8	小偏心	1. 96	



图 27 右洞锚杆轴力最大值 80kN, 左洞锚杆轴力 87.5kN

• 消江支通科技 •

由上图可知,右洞锚杆轴力小于左洞,右洞锚杆轴力在开挖完成后为80kN,左洞锚杆轴力为87.5kN;隧道分布开挖过程中,随着断面的逐渐增大,隧道高跨比逐渐变小,因此拱顶下沉趋势,拱脚和墙脚呈水平扩大趋势,所以隧道上半部分锚杆受拉,最大值出现在拱顶;而下半部分锚杆受压,最大值出现在墙脚。

# (2) 临时支护锚杆



軟小但 = -22.26 kN (単元 111% 任 节点 238234)

图 28 右洞临时支护锚杆轴力 25.8kN



图 29 左洞临时支护锚杆轴力 26.1kN

由上图可知,隧道分步开挖中施作的临时支护锚杆轴力,先行洞临时锚杆轴力最大值为25.8kN,后行洞临时锚杆轴力为26.1kN,锚杆轴力最大值均分布在导洞最宽处,且先行洞临时支护锚杆轴力要小于后行洞。

#### 4 结论

- (1)大断面、小净距隧道开挖过程中,隧道初期支护随着施工阶段的变化而变化,在施工过程中,先行洞受力更为不利,双侧壁临时支护的弯矩较大,因此,应注意加强对先行洞和双侧壁临时支护的安全性验证工作。
- (2) 由于小净距隧道开挖过程中,中夹岩柱及其上方的围岩松散压力较大,隧道两侧松散压力较小,因此造成隧道荷载不对称,从计算结果来看,左、右洞荷载及安全系数均呈反对称现象。
- (3) 大断面、小净距隧道开挖过程中,不同工程的地应力水平、地层岩性、施工工法等的不同均会影响隧道支护结构的受力情况,本算例仅供参考,为其他类似工程提供借鉴。

#### 参考文献

- Ghaboussi Jamshid, Ranken Randall E, Karshenas Manuchehr, editors. Analysis of Subsidence over Soft-Ground Tunnels.
  Evaluation and Prediction of Subsidence; 1978; ASCE.
- [2] Solim. E, 张佳文. 小间距双线隧道的二维与三维分析 [J]. 探矿工程译丛, 1995 (2): 62-64.
- [3] Lo K. W, Chong L. K, Leung L. F. Field Instrumentation of a Multiple Tunnels Interaction Problem [J]. Tunnels and Tunnelling, 1998, 18: 4-16.
- [4] Kuriyama Hiroshi, Koga Tokuji, Ogata Takaya, NAKAMURA Hidemitsu, KAMBAYASHI Takeshi, editors. The Design and Construction of Pillar Reinforcement at Horizontal Twin Tunnels. Proceedings of Tunnel Engineering, JSCE; 2000; Japan Society of Civil Engineers.
- [5] Chapman DN, Ahn SK, Hunt D VL. Investigating Ground Movements Caused by the Construction of Multiple Tunnels in Soft Ground Using Laboratory Model Tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44 (6): 631-643.
- [6] 朱敬民,王国森.重庆菜袁公路双线隧道模拟研究[J]. 中国土木工程学会隧道及地下工程学会第五届年会论文, 1988.