

# 偏压状态下非对称连拱隧道有限元分析

王佳欣<sup>1</sup>, 陈振邦<sup>2</sup>, 徐 燕<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 镇江新区管委会, 江苏 镇江 212000)

**摘要:**非对称连拱隧道是一种特殊隧道,具有几何不对称、结构不对称等复杂的力学特征。而非对称连拱隧道的修筑不可避免要穿越偏压地形,偏压地形又会对隧道的受力状态产生较大的影响。采用有限元单元法对偏压地形条件下非对称连拱隧道进行数值模拟分析,根据大洞径隧洞和小洞径隧洞的左右位置不同的情况下围岩及衬砌结构受力变形特点,得出在偏压状态下非对称连拱隧道中的小隧道应设计在埋深大一侧的结论,为隧道的设计提供了一定的理论依据。

**关键词:**非对称隧道;偏压状态;连拱隧道;数值模拟

**中图分类号:**U451 **文献标识码:**A **文章编号:**1672 - 7428(2017)12 - 0088 - 03

**Finite Element Analysis on Asymmetrical Multi-arch Tunnel under Bias Condition/WANG Jia-xin<sup>1</sup>, CHEN Zhen-bang<sup>2</sup>, XU Yan<sup>1</sup>**(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Zhenjiang New District Administration Committee, Zhenjiang Jiangsu 212000, China)

**Abstract:** Asymmetrical multi-arch tunnel is a special kind of tunnel, which has complicated mechanical characteristics of geometric asymmetry and structural asymmetry. In the asymmetrical multi-arch tunnel construction, it is inevitable to pass through the bias terrain, and the bias has great impact on the stress state of the tunnel. The finite element method is used to make numerical simulation analysis on the asymmetrical multi arch tunnel under bias terrain condition. According to the forced deformation characteristics of surrounding rocks and lining structures of the tunnels with large and small diameters in the left or right, it is concluded that the small one of the asymmetric twin-arch tunnel should be designed at the deeply-lying side in the biased state, which provides a theoretical basis for the design of the tunnel.

**Key words:** asymmetric tunnel; bias condition; multi-arch tunnel; numerical simulation

## 0 引言

连拱隧道因具有占地面积小、空间利用率高的优点,广泛应用于地形狭窄地段。非对称连拱公路隧道作为一种复杂的连拱隧道结构型式,虽然数量不多,但已有相关研究。汪海滨<sup>[1]</sup>等结合实例,根据现场监测数据反分析,利用模拟试验,对非对称开挖后位移变化进行研究;朱合华<sup>[2]</sup>等利用平面有限元方法对非对称连拱隧道进行数值模拟分析,研究其在施工过程中的应力应变情况;于海洋<sup>[3]</sup>等利用有限元软件对非对称连拱隧道施工方法、加固效果进行了二维数值模拟分析,揭示了施工过程中不同施工方法和注浆措施对隧道周边变形和初期支护结构的影响;胡学兵<sup>[4]</sup>等结合具体实例,对非对称隧道结构的力学机理进行研究;陈秋男<sup>[5]</sup>等对中国公路连拱隧道的设计、施工研究作了一些综述;翁其能<sup>[6]</sup>等用三维软件对双连拱隧道开挖进行仿真模拟分析。

受线路位置和地形条件的限制,非对称连拱隧道的修筑将不可避免地穿越偏压地形,偏压地形条件下非对称连拱隧道具有几何不对称、结构不对称和左右荷载不对称等复杂的力学特征<sup>[7-8]</sup>,目前对偏压条件下连拱隧道非对称支护结构受力特征研究较少。非对称连拱隧道两个洞径大小不一,在偏压隧道中就出现 2 种情况:一种是小洞径处于埋深小的一侧(下文简称“工况 1”),一种是小洞径隧道处于埋深大的一侧(下文简称“工况 2”),本文针对偏压状态下的非对称连拱隧道两种工况,进行围岩和衬砌结构受力和变形有限元数值模拟,研究两种工况下围岩及衬砌结构受力及变形特征,从而为隧道的设计提供一定的理论依据。

## 1 模型建立及参数设定

采用平面应变模型,岩体为理想弹塑性材料,仅

收稿日期:2017 - 07 - 05; 修回日期:2017 - 09 - 19

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目“乾安泥林土的工程地质特性对泥林潜蚀作用影响机制研究”(编号:41702300)、“爆生气体作用下岩石裂纹的力学行为及扩展模型研究”(编号:41502270)

作者简介:王佳欣,男,汉族,1991 年生,硕士研究生在读,从事地质工程和岩土工程方面的研究,吉林省长春市西民主大街 938 号,418338590@qq.com。

考虑自重应力的作用。小隧道洞宽 11.368 m,洞高 7.848 m,大隧道洞宽 14.21 m,洞高 9.81 m。考虑隧道开挖的影响范围大于 3 倍洞跨,隧道底边距模型下边界 42 m,隧道两侧距模型左右边界各取 42 m。偏压坡度比为 1: 2,最小覆盖层厚度为 12 m,属于浅埋偏压隧道(图 1、图 2)。本模型左、右和下边界均施加法向约束,上部为自由边界<sup>[9]</sup>,隧道采取全断面开挖形式。

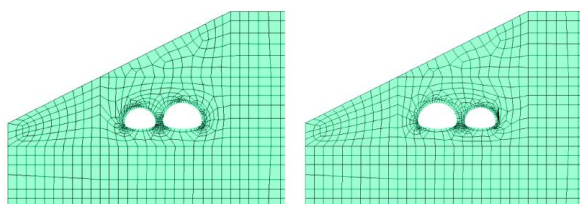


图 1 工况 1 隧道网格模型 图 2 工况 2 隧道网格模型

隧道围岩选取 V 级围岩,其围岩弹性模量、泊松比、重度、内摩擦角以及粘聚力根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)表 A.0.4-1 V 级围岩指标值确定,锚杆的加固效果采用提高围岩的物理力学参数进行模拟,具体方法为将锚杆加固范围的围岩等级提高一级<sup>[10]</sup>,加固厚度为 1.1 m,衬砌结构采用钢筋混凝土材料,厚度为 40 cm(表 1)。

表 1 围岩和衬砌物理力学参数

名称	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E$ /GPa	泊松 比 $\nu$	内摩擦角 $\varphi$ / ( $^\circ$ )	粘聚力 $c$ /MPa
V 级围岩	180	1.60	0.37	25	0.20
C25 衬砌	2500	29.50	0.15	54	2.42
加固圈围岩	2600	25.00	0.20	55	2.00

## 2 数值模拟分析

利用 ANSYS 软件分别对图 1 和图 2 所示隧道进行数值仿真模拟,分析其开挖支护后围岩总位移、围岩主应力值及衬砌内力。

### 2.1 围岩总位移分析

图 3、图 4 表示隧道经全开挖后围岩的总位移情况。图 3 所示围岩最大位移为 113.12 mm,图 4 所示围岩最大位移为 112.89 mm,两种工况位移量都很小,且相差不大。

### 2.2 围岩主应力

为描述不同偏压条件下隧道洞室的稳定性和衬砌结构的受力变化特性,引入偏压系数  $\lambda$ 。偏压系数计算公式为:

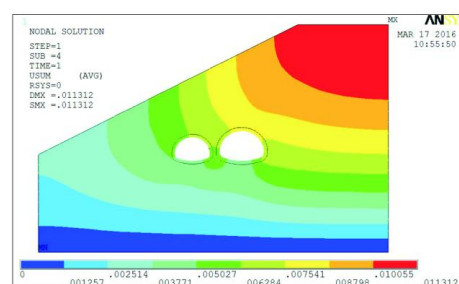


图 3 工况 1 总位移(单位:m)

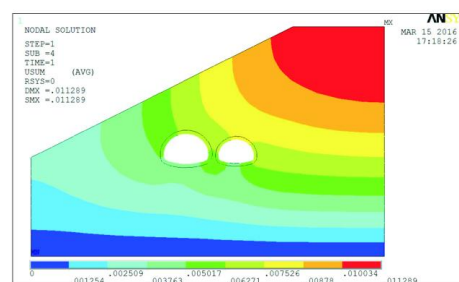


图 4 工况 2 总位移(单位:m)

$$\lambda = 1 + |(\sigma_{\text{左}} - \sigma_{\text{右}}) / \sigma_0| \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\text{左}}$ 、 $\sigma_{\text{右}}$ ——分别为左侧、右侧特征点围岩应力值,kPa; $\sigma_0$ ——平均围岩应力值,kPa。

通过软件模拟分析,得到各个特征点围岩的最大、最小主应力值。根据得到的最大、最小主应力值,通过式(1)计算出偏压系数,其数值如表 2、表 3 所示。表中主应力正值为拉应力,负值为压应力。

表 2 各特征点围岩最小主应力

位置	工况 1		工况 2	
	小隧道 (左洞)	大隧道 (右洞)	大隧道 (左洞)	小隧道 (右洞)
拱顶/kPa	-95.008	-39.64	-63.287	-100.56
拱腰				
左/kPa	-201.073	-168.52	-119.929	-169.328
右/kPa	-79.415	-87.732	-87.916	-47.852
偏压系数	1.87	2.62	1.31	2.12
拱脚				
左/kPa	-288.089	321.116	-181.914	409.646
右/kPa	635.571	886.612	422.386	1052.134
偏压系数	1.75	1.94	1.79	1.89

表 3 各特征点围岩最大主应力

位置	工况 1		工况 2	
	小隧道 (左洞)	大隧道 (右洞)	大隧道 (左洞)	小隧道 (右洞)
拱顶/kPa	-1090.00	-310.21	-727.094	-663.536
拱腰				
左/kPa	-2290.00	-2500.00	-2170.00	-2370.00
右/kPa	-1270.00	-1210.00	-1170.00	-903.698
偏压系数	1.57	1.70	1.60	1.89
拱脚				
左/kPa	-2170.00	2610.00	-1470.00	1700.00
右/kPa	5350.00	4850.00	3160.00	3820.00
偏压系数	1.85	1.60	1.73	1.77

分析表2、表3可知:

(1)从最大、最小主应力可以看出,不管是工况1还是工况2所示隧道,其浅埋一侧的隧道在拱腰、拱脚处应力值要小于深埋一侧的隧道应力值,但是拱顶处浅埋一侧应力值大于深埋一侧,这是因为开挖前后地层遭到扰动,此时主要以应力释放和沉降变形为主,随着变形增大,深埋侧地表开始出现拉应力,应力增大,拱顶上部浅埋地层会出现拉裂破坏。显然在本例中只在深埋侧地段出现了拉应力,抵消了一部分压应力,故深埋段拱顶压应力小于浅埋段拱顶压应力。

(2)从偏压系数的角度出发,工况1出现的偏压系数数值大普遍大于工况2,说明工况1的隧道围岩受力更不均匀。

### 2.3 衬砌内力

衬砌弯矩图和轴力图见图5~图8。

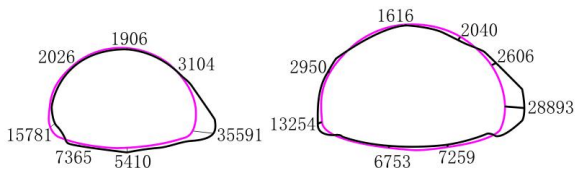


图5 工况1弯矩图(单位:kN·m)

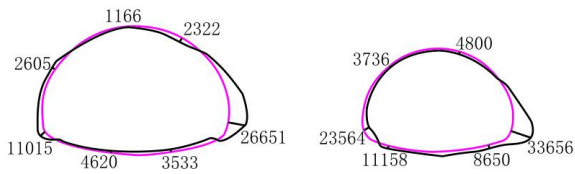


图6 工况2弯矩图(单位:kN·m)

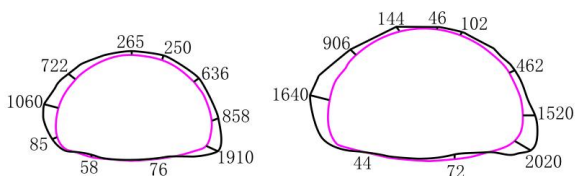


图7 工况1轴力图(单位:kN)

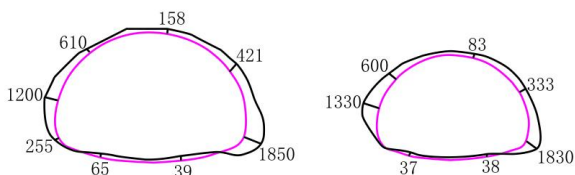


图8 工况2轴力图(单位:kN)

分析图5~图8可知:

(1)从弯矩图可以看出,2种工况拱脚两侧弯矩值较大,且深埋一侧弯矩值达到最大。所以应加强

拱脚的刚度,比如设置锁脚旋喷桩。

(2)从轴力图可以看出,深埋一侧拱脚处轴力值达到最大,拱底处出现拉应力。

### 3 结论

(1)非对称连拱隧道在偏压状态下受力复杂,不同于一般的隧道。围岩、衬砌内力处于非对称状态,且在同一个非对称连拱隧道中,大洞径隧道所受内力明显大于小洞径隧道,这是由于围岩受到扰动,围岩压力发生重分布,隧道围岩、衬砌内力也随之变化,大洞径隧道所受扰动大,围岩释放的应力大,所以其内力值就更大。

(2)综合分析围岩应力、衬砌内力,对比非对称连拱隧道的两种方案结果,可以得出这样一个结论:在偏压状态下,非对称连拱隧道中的小隧道应设计在埋深大的一侧。这样设计一方面可以减小由于偏压效应所导致的剪切破坏,另一方面可以减小压应力对隧道结构的破坏。

(3)在结构设计时,应对围岩受力不利的一侧适当加强支护,对围岩受力较好的一侧适当减小支护,即进行非对称结构设计。

### 参考文献:

- [1] 汪海滨,李小春,高波,等.城市浅埋大跨连拱隧道非对称开挖地表沉降偏态性研究及其对策[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S1):3203-3209.
- [2] 王亚琼,张少兵,谢永利,等.浅埋偏压连拱隧道非对称支护结构受力性状分析[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):3265-3272.
- [3] 朱合华,叶斌.大跨度非对称连拱隧道施工力学研究[C]//中国岩石力学与工程学会.岩石力学新进展与西部开发中的岩土工程问题:中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集,2002.
- [4] 胡学兵,肖博,吴胜忠.非对称连拱隧道设计技术研究[J].公路交通技术,2013,(1):91-96.
- [5] 陈秋南,张永兴,刘新荣,等.连拱隧道的设计理论与动态施工力学研究[J].地下空间与工程学报,2005,1(1):156-160.
- [6] 翁其能,袁勇,杜国平,等.双连拱隧道开挖整体性态三维数值仿真分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):96-100.
- [7] 柳雁玲,傅磊,刘永平.和龙沿江公路傍山隧道偏压特征分析[J].吉林大学学报:地球科学版,2006,36(2):240-244.
- [8] 安鹏程,陈剑平,邱道宏.偏压连拱隧道围岩稳定性分析与现场监控量测[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(2):285-289.
- [9] 李权.ANSYS在土木工程中的应用[M].北京:人民邮电出版社,2005.
- [10] 李围.隧道及地下工程ANSYS实例分析[M].北京:中国水利水电出版社,2008.