

渐变大拱段结构受力影响分析*

张建昆¹, 傅鹤林², 张加兵¹, 孙明国²

(1.中铁五局, 湖南 长沙 410007; 2.中南大学, 湖南 长沙 410075)

摘要:壁板坡隧道是沪昆高铁上的第一特长隧道,采用分岔结构设计,其中渐变大拱段受力较为复杂。文中分析认为分岔隧道渐变大拱段力学特性的影响因素主要为开挖面积和扁平率,并分别分析了不同开挖面积和扁平率对渐变大拱段隧道围岩位移、应力、塑性区、初期支护轴力及弯矩的影响。

关键词:隧道;渐变大拱段;结构受力;开挖面积;扁平率

中图分类号:U451

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)02-0161-04

随着隧道建设的发展,铁路网中出现了大量长大山岭隧道。受地形条件和工程造价的限制,国内外对分岔式隧道的设计和施工尚未进行全面、系统的研究。该文结合“艰难山区特长铁路隧道分岔修建关键技术研究”课题,针对沪昆客运专线云南段壁板坡隧道,从开挖面积及扁平率角度对渐变大拱段隧道结构受力进行分析,为隧道设计、施工提供理论支持。

1 分岔隧道渐变大拱段力学特性影响因素

分岔隧道在左右洞分离之前有一段台阶变截面过渡段,即渐变大拱段,壁板坡隧道在该过渡段内断面的开挖宽度和高度经过了4次增大,依次为图1中的B段、C段、D段及E段。由于隧道开挖宽度比高度增加较多,隧道断面的扁平率逐渐减小。

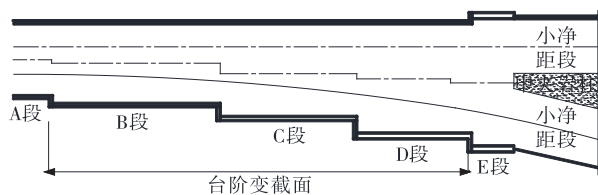


图1 壁板坡隧道变截面平面示意图

分岔隧道渐变大拱段与普通双线隧道最明显的区别在于其开挖面积逐渐增大、扁平率逐渐减小,在隧道施工中围岩会产生应力重分布,当应力集中过大时,岩体会进入塑性状态进而发生破坏。因此,可把隧道稳定性问题归结为分析其应力集中对围岩特性的影响,而扁平率很大程度上影响着围岩的应力

集中。壁板坡隧道渐变大拱段最大开挖面积 $S = 338 \text{ m}^2$,最大开挖断面处扁平率为0.64(25.34 m宽 \times 16.28 m高)。下面分析开挖面积和扁平率对分岔隧道渐变大拱段力学特性的影响。

2 开挖面积对渐变大拱段结构受力的影响

为分析开挖面积对分岔隧道大拱段力学特性的影响,控制断面扁平率0.64不变,开挖面积分别取0.25S、0.5S、0.64S、0.8S、S(即84.5、169、216、270、338 m^2)进行数值模拟,计算参数见表1中Ⅳ级围岩,对比分析在毛洞开挖情况下隧道围岩的位移及应力情况,结果见表2、表3和图2、图3。

表1 各级围岩的物理力学参数

围岩级别	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ($^\circ$)	计算摩擦角/ ($^\circ$)	粘聚力/ MPa
Ⅲ级	24	10	0.30	42	62	0.8
Ⅳ级	23	4	0.35	37	57	0.3

表2 隧道在不同开挖面积下的位移值

开挖面积/ m^2	拱顶沉降/ cm	拱底隆起/ cm	侧墙水平 位移/cm
84.5	11.79	7.19	8.63
169.0	14.23	8.69	10.89
216.0	18.52	10.84	14.07
270.0	20.13	11.46	15.56
338.0	23.26	12.84	17.84

由图2、图3可看出:保持隧道断面的扁平率不变,只单纯改变开挖断面的面积,对隧道围岩位移有

* 基金项目:铁道部课题“艰难山区特长铁路隧道分岔修建关键技术研究”

表3 隧道在不同开挖面积下的主应力值

开挖面积/ m ²	拱顶应力/MPa		拱脚应力/MPa	
	第一	第三	第一	第三
	主应力	主应力	主应力	主应力
84.5	-1.28	-0.035	-3.14	-0.495
169.0	-1.29	-0.032	-3.13	-0.487
216.0	-1.26	-0.030	-3.10	-0.485
270.0	-1.27	-0.031	-3.13	-0.490
338.0	-1.27	-0.030	-3.11	-0.491

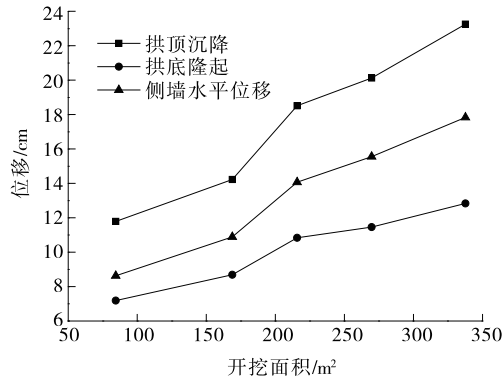


图2 隧道位移随开挖面积的变化

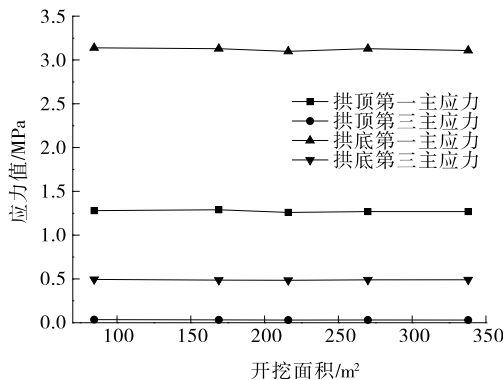


图3 围岩应力随开挖面积的变化

较大影响,围岩位移随开挖面积的增大而逐渐增大,塑性区也有所增大;但围岩主应力受开挖面积的影响较小,当开挖面积逐渐增大时,围岩主应力基本保持不变。隧道稳定性问题可归结为分析其应力集中及应力集中对围岩特性和支护结构的影响,单纯增加开挖断面的面积,不改变断面的形状即扁平率,对隧道支护结构稳定性的影响有限。

3 扁平率对渐变拱段结构受力的影响

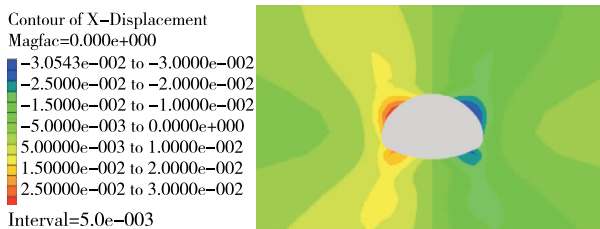
取图1中A段、C段、E段处的扁平率及扁平率1进行数值模拟,分析围岩应力及支护结构内力随扁平率的变化。A段、C段、E段的尺寸见表4,围岩计算参数见表1中IV级围岩,模拟开挖时采用锚喷支护。

表4 所取断面的尺寸及扁平率

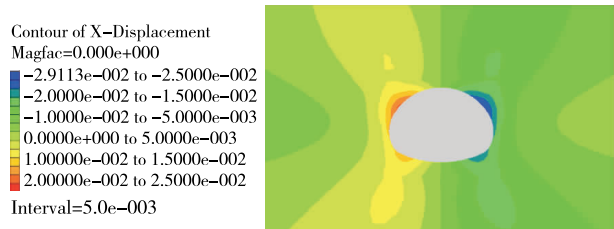
断面位置	宽度/m	高度/m	扁平率
A段	14.80	12.40	0.84
C段	19.10	13.62	0.71
E段	25.34	16.28	0.64

3.1 扁平率对围岩位移的影响

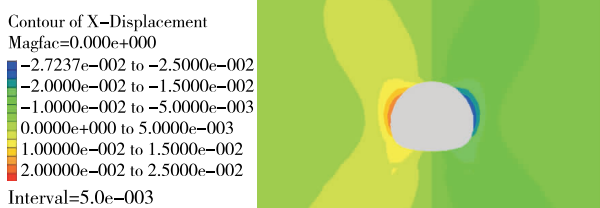
围岩稳定性最直观的表现就是围岩变形。4种扁平率断面隧道开挖后的围岩竖向位移云图相似,仅大小有所区别,而围岩水平位移云图有较明显的变化,因此仅列出围岩的水平位移云图(见图4)。从图4可看出:随着扁平率的减小,围岩水平位移最大值逐渐增大,且水平位移最大区域逐渐由侧墙部位向拱肩和拱脚部位移动。



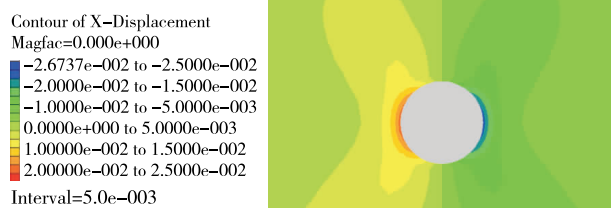
(a) 扁平率0.64



(b) 扁平率0.71



(c) 扁平率0.84



(d) 扁平率1.0

图4 不同扁平率下隧道水平位移云图(单位:m)

提取隧道拱顶、拱底、拱脚、拱肩及侧墙处节点的位移(见表 5),并绘制隧道关键点位移随扁平率的变化曲线(见图 5)。

表 5 不同扁平率下隧道位移值

扁平率	拱顶竖向位移/cm	拱底竖向位移/cm	侧墙水平位移/cm	拱肩水平位移/cm	拱脚水平位移/cm
0.64	-9.59	8.22	1.52	2.49	2.11
0.71	-9.39	7.63	1.56	2.46	1.77
0.84	-7.77	6.69	2.27	2.08	1.67
1.00	-7.54	5.69	2.72	2.02	1.21

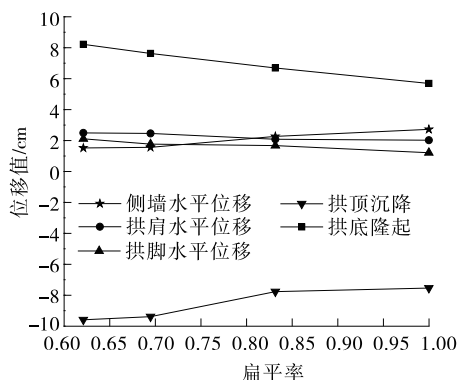


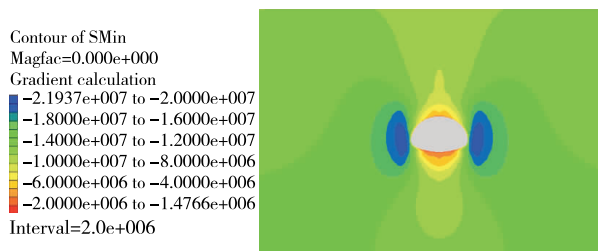
图 5 隧道位移值随扁平率的变化

由表 5 和图 5 可看出:随着扁平率的减小,拱顶、拱底竖向位移和拱脚、拱肩水平位移都逐渐增大,但侧墙水平位移逐渐减小,说明隧道围岩水平位移最大区域随着扁平率的减小逐渐由侧墙部位向拱肩和拱脚部位移动,扁平率为 1 时水平位移最大区域处于侧墙附近,扁平率减小至 0.64 时水平位移最大区域移至拱肩和拱脚附近,与围岩位移云图所描述的规律相符。

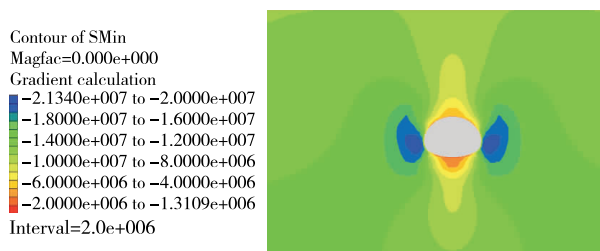
3.2 扁平率对围岩应力的影响

图 6 为 4 种扁平率下隧道开挖的第一主应力云图。从图 6 可看出:随着扁平率的减小,隧道围岩的应力集中逐渐增大;扁平率为 1 时围岩的第一主应力最大值约为 1.99×10^7 Pa,扁平率为 0.64 时第一主应力最大值约为 2.19×10^7 Pa,增加约 10%。扁平率为 0.64 时第一主应力最大值发生在隧道拱脚部位,随着扁平率的增加,第一主应力最大值逐渐向侧墙部位移动,扁平率为 1 时移动至隧道侧墙中间部位,说明隧道扁平率过小会在拱脚附近产生明显的应力集中现象。

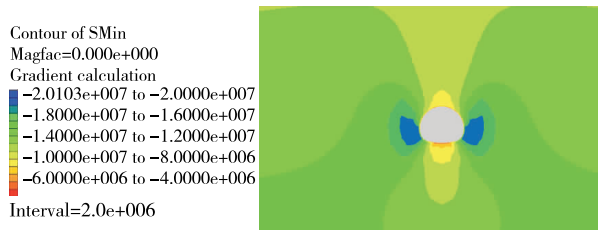
提取隧道拱顶、拱底及拱脚处单元的应力值(见



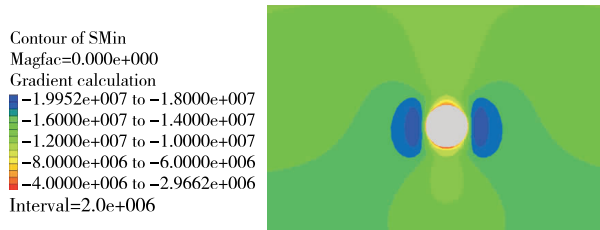
(a) 扁平率 0.64



(b) 扁平率 0.71



(c) 扁平率 0.84



(d) 扁平率 1.0

图 6 不同扁平率下隧道第一主应力云图(单位:Pa)

表 6),并绘制各单元围岩主应力随扁平率的变化曲线(见图 7)。

由表 6 和图 7 可看出:1) 随着隧道断面扁平率的减小,隧道拱顶和拱底的主应力值逐渐减小,隧道开挖时所引起的松弛荷载随之增大,致使隧道拱顶趋于受拉状态。2) 随着隧道断面扁平率的减小,隧

道拱脚附近应力集中越来越明显。3) 扁平率为 1 时,隧道拱脚处第一主应力值为 12.03 MPa,与图 6 所示整个隧道围岩第一主应力最大值 19.9 MPa 相差较大,这是因为扁平率为 1 时隧道围岩应力集中区域在侧墙附近而不是拱脚处;扁平率为 0.64 时,隧道拱脚处第一主应力值为 19.535 MPa,接近图 6

表6 不同扁平率下隧道的主应力值

扁平率	拱顶应力/MPa		拱底应力/MPa		拱脚应力/MPa	
	S_{\max}	S_{\min}	S_{\max}	S_{\min}	S_{\max}	S_{\min}
0.64	-1.030	-3.931	-0.569	-2.593	-5.602	-19.535
0.71	-1.058	-4.562	-0.571	-2.867	-4.321	-17.952
0.84	-1.220	-4.685	-0.725	-3.012	-4.244	-16.210
1.00	-1.302	-5.173	-1.270	-4.949	-2.745	-12.031

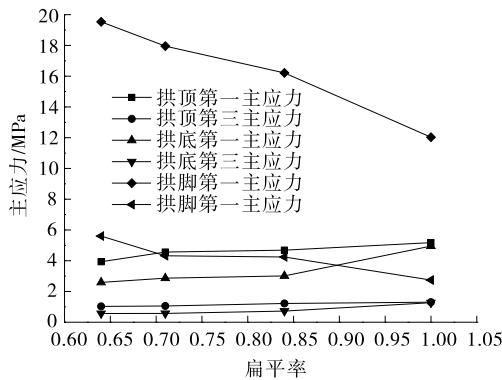


图7 隧道第一主应力随扁平率的变化

所示整个隧道围岩第一主应力最大值 21.9 MPa,说明随着隧道断面扁平率的减小,隧道应力集中的区域会向拱脚处发展。

3.3 扁平率对围岩塑性区的影响

图8是4种扁平率下隧道开挖的塑性区云图。从图8可看出:随着扁平率的减小,隧道围岩塑性区范围逐渐扩大,且隧道拱脚及拱肩处围岩塑性区增加较明显,说明随着扁平率的减小,隧道拱脚及拱肩处的围岩较容易进入不稳定状态,在设计及施作支护结构时应着重考虑并采取加强措施。

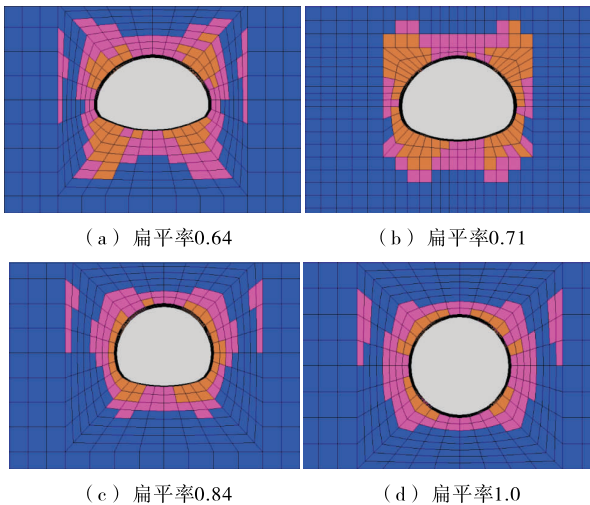


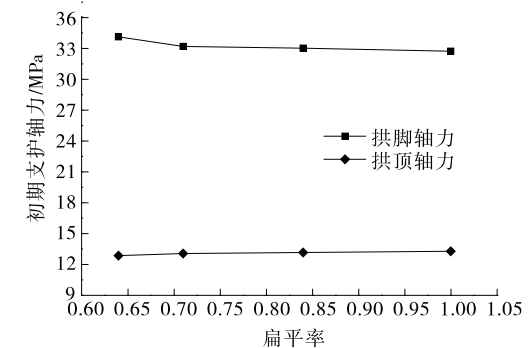
图8 不同扁平率下隧道塑性区云图

3.4 扁平率对初期支护轴力及弯矩的影响

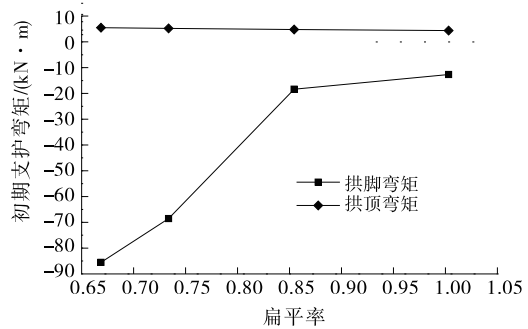
4种扁平率断面隧道开挖支护后初期支护拱顶及拱脚处的轴力、弯矩见表7,支护结构内力随扁平率的变化见图9。

表7 不同扁平率下隧道支护结构的内力

扁平率	轴力/MPa		弯矩/(kN·m)	
	初期支护 拱顶	初期支护 拱脚	初期支护 拱顶	初期支护 拱脚
0.64	-12.86	-34.13	5.53	-85.54
0.71	-13.06	-33.19	5.24	-68.54
0.84	-13.16	-33.02	4.83	-18.35
1.00	-13.28	-32.73	4.41	-12.65



(a) 轴力



(b) 弯矩

图9 支护结构内力随扁平率的变化

由图9可知:1) 随着断面扁平率的减小,拱顶轴力逐渐减小,呈现由受压向受拉转变的趋势;拱脚

(下转第169页)

一致,安装时应根据始发井大小、钢套筒长度、洞门标高等确定水平位置和标高。

反力架的支撑:反力架上下均布4根工字钢并与中板和底板顶紧,两侧分别均布4根钢管并与洞口墙体顶紧。将支撑斜撑与底板预埋件焊接牢固,确保无夹渣、虚焊等隐患。

4.4 安装钢套筒上半圆

钢套筒上半圆安装好后进行压紧螺栓调整。检查各部连接处,确保连接完好;对于钢套筒上下半圆和节与节之间的连接,还要检查过渡连接板与洞门环板之间是否存在脱开现象,发现隐患及时处理。

4.5 预加反力

上半圆安装完成后进行环梁预加压力千斤顶调整,每个千斤顶的预压力为30 t,总计反力架的预加压力约为600 t。预压过程中检查反力架各支撑及钢套筒连接螺栓是否松动,出现异常及时处理。

4.6 钢套筒内填料

在钢套筒与盾构之间的间隙内填砂,填充过程中适当加水,保证砂的密实。

4.7 钢套筒压力测试

渗漏检测:从加水孔向钢套筒内加水至加满后,检查压力,如果压力能达到0.3 MPa,则停止加水,并维持压力稳定,检查各连接部分(包括洞门连接板、钢套筒环向与纵向连接位置、钢套筒与反力架连接处)有无漏水。加压检测过程中若发现有漏水或

焊缝脱落情况,马上进行卸压并及时处理,上紧螺栓或重新焊接。完成后再进行加压,直至压力稳定在0.3 MPa且没有漏点。

参考文献:

- [1] 贾世平,李伍平.城市地下空间资源评估研究综述[J].地下空间与工程学报,2008,4(3).
- [2] Jaakko Y.Spatial planning in subsurface architecture [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1989,4(1).
- [3] Boivin D J.Underground space use and planning in the quebec city area[J].Tunneling and Underground Space Technology,1990,5(1).
- [4] 吴韬.大型盾构进出洞技术及加固土体受力机理分析[D].上海:同济大学,2006.
- [5] 郑石,鞠世健.泥水平衡盾构到达钢套筒辅助接收施工技术[J].现代隧道技术,2010,47(6).
- [6] 逯建栋.盾构到达钢套筒接收施工技术[J].广东土木与建筑,2011(10).
- [7] 赵立峰.土压平衡盾构到达钢套筒辅助施工接收技术[J].铁道标准设计,2013(8).
- [8] 贲志江,杨平,张旭辉,等.地铁过江隧道大型泥水盾构接收方式研究[J].铁道建筑,2014(11).
- [9] 傅鹤林,李亮,郑刚强,等.基于周边收敛的初始地应力场反分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(2).

收稿日期:2016—09—30

(上接第164页)

轴力远大于拱顶轴力,且变化规律与拱顶相反,随断面扁平率的减小而逐渐增大。2) 拱顶弯矩为正,且随断面扁平率的减小而逐渐增大,但变化幅度不大;拱脚弯矩为负,其值远大于拱顶,且随断面扁平率的减小而逐渐增大,变化幅度比拱顶明显。3) 由于隧道拱脚处存在较大应力集中,支护结构拱脚处的内力较大,在施作支护时应采取加强措施。

4 结论

(1) 分岔隧道渐变拱段的稳定性问题可归结为分析其应力集中及应力集中对围岩特性的影响。

(2) 单纯增加开挖断面面积对围岩应力集中影响较小,而扁平率的减小则会引起支护结构轴力、弯矩及围岩应力的显著变化。相对于开挖面积,扁平率是影响渐变拱段稳定性的重要因素。

参考文献:

- [1] 傅鹤林,韩汝才,朱汉华.破碎围岩中单拱隧道荷载计算的理论解[J].中南大学学报:自然科学版,2004,35(3).
- [2] 黄朱林.扁平率对大跨隧道围岩及支护稳定性影响分析[J].西部探矿工程,2008(11).
- [3] 曲海锋,朱合华,蔡永昌.扁平大跨度公路隧道松动荷载计算方法探讨[J].岩土力学,2008,29(4).
- [4] 王明年,郭军,罗禄森,等.高速铁路大断面深埋黄土隧道围岩压力计算方法[J].中国铁道科学,2009,30(5).
- [5] 曲海锋.扁平特大断面公路隧道荷载模式及应用研究[D].上海:同济大学,2007.
- [6] 孙正兵.大跨公路隧道围岩力学参数反演及动态施工力学数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [7] 王松周.基于卸荷减跨理论大断面水下隧道开挖的工序优化技术研究[D].长沙:中南大学,2012.

收稿日期:2016—09—30