

单向四车道特大断面公路隧道断面优化研究

张玉凤¹, 赵瑞传², 张素磊^{1,*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100010)

摘要:随着我国城市化进程的高速发展,传统单向两车道隧道已满足不了现有交通运输需求,特大断面隧道建设规模日渐增大。依托山东省某单向四车道特大断面隧道工程,利用 ABAQUS 进行数值模拟,研究并得出了 8 组不同扁平率下隧道围岩变形和支护结构受力变化规律,确定出隧道合理扁平率范围。研究结果得出当扁平率为 0.66~0.70 时,隧道断面受力较均衡,支护结构稳定性较好,并且隧道开挖费用较低。本特大断面隧道断面优化方法可为今后同等条件下公路隧道内轮廓设计提供参考。

关键词:隧道工程;断面优化;数值模拟;扁平率;二次衬砌;特大断面

中图分类号:U459.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)04-0016-08

Study on section optimization of single-hole four-lane highway tunnel with extra-large section

ZHANG Yufeng¹, ZHAO Ruichuan², ZHANG Sulei^{1,*}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. CCCG Highway Consultants Co. Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: With the rapid development of China's urbanization process, the traditional unidirectional two-lane highway tunnel cannot meet the existing transportation demands, and the construction scale of tunnel with extra-large section is increasing day by day. Based on the project of a single-hole four-lane highway tunnel with extra-large section in Shandong Province, this paper obtains the change regulations of tunnel surrounding rock deformation and supporting structure under 8 different groups of flat ratios and determines the reasonable flat ratios range of the tunnel. The results show that when the flat ratio is located at 0.66—0.70, the force of tunnel section is more balanced, the supporting structure is more stable, and the tunnel excavation cost is lower. In this paper, the optimization method of tunnel with extra-large section can provide references for the internal profile design of highway tunnel under the same conditions.

Key words: tunnel engineering; section optimization; numerical simulation; flat ratio; secondary lining; extra-large section

收稿日期:2023-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978356)

作者简介:张玉凤(1999—),女,山东临沂人。硕士,研究方向为隧道及地下工程。E-mail:1291487346@qq.com。

*通信作者:张素磊(1983—),男,山东临朐人。博士(后),教授,主要从事隧道工程方面的研究。E-mail:zhangsulei@126.com。

随着我国经济迅速发展,城市交通运输量逐年增加,传统单向两车道、三车道公路隧道逐渐不能满足现有的交通运输需求,亟需修建超大、特大断面公路隧道来缓解交通压力。因此,特大断面公路隧道建设将成为未来隧道发展的主要趋势。与传统公路隧道相比,特大断面公路隧道具有车道数目多、跨度大、扁平率低、围岩成拱能力差、围岩应力重分布复杂、空间利用率低、工程造价高等特点^[1]。合理的特大断面公路隧道扁平率可以提高断面空间利用率,增强隧道结构稳定性,降低工程建设费用。因此,如何选择出合理扁平率是特大断面公路隧道设计中需要解决的难题之一,此研究对隧道建设具有重要意义。

特大断面隧道建设于20世纪70、80年代在一些国家率先开展,如日本修建东名改建隧道、韩国修建 Sapaesan 隧道等。我国在21世纪初开始修建特大断面公路隧道,如贵州凯里大阁山隧道、广州龙头山隧道等。现阶段,我国特大断面公路隧道建设已经进入发展快车道,特大断面公路隧道建设规模迅速扩大。近年来,国内外学者对特大断面隧道合理扁平率选取展开了相关研究,如NO等^[2]对 Korea-Sapaesan Tunnel 进行设计优化,缩短10个多月工期;朱彦鹏等^[3]、卿伟宸等^[4]和韩艳红等^[5]对特大跨度隧道支护结构进行研究,得出了其受力特性变化规律;雷建海等^[6]、王昆等^[7]展开隧道扁平率对围岩稳定性的影响规律研究,以确定合理扁平率;王仁杰等^[8]、蒋坤等^[9]和马连友^[10]利用有限元软件研究不同扁平率下大跨度隧道的初期支护位移和衬砌结构受力,优化了隧道结构形式;张粒等^[11]研究了不同施工方法下特大断面隧道的支护结构及围岩位移变化规律,为今后类似工程提供了参考;陈卫忠等^[12]、武明静^[13]、金星亮等^[14]、林志军等^[15]、李凌志等^[16]采用层次分析法对特大跨度隧道扁平率进行研究,选出了特定条件下的最佳断面。

本文以山东省某特大断面公路隧道工程为背景,通过 ABAQUS 进行数值模拟,分析8组扁平率下隧道围岩变形和支护结构受力变化规律,通过比较分析给出了该工程背景下特大断面公路隧道的合理扁平率范围,可为今后类似工程建设提供参考。

1 工程背景

本文依托工程为山东省某单向四车道公路隧道工程,设计速度为100 km/h。隧道左线长2010 m,右线长1995 m,最大埋深约118.5 m。工程隧址区海拔高程344.3~488.4 m,相对高差约144.1 m,坡角为19~35°,整体较陡。隧址区位于剥蚀低山丘陵地貌区,地表植被较发育,相对高度超过100 m,大部分区域基岩埋深较浅,隧址区顶部基岩直接出露。

数值模拟采用断面在依托工程中位于 ZK105+940 处,隧道埋深为20 m,围岩等级为V级,断面跨度为21 m,高度为14.2 m,形状较为扁平。断面开挖面积为237 m²,采用双侧壁导坑法进行开挖。隧道断面支护采用复合式衬砌结构,其中初期支护厚度为40 cm,二次衬砌厚度为60 cm,具体支护参数详见表1。

表1 隧道断面支护参数

支护	项目	参数
初期支护	Φ25 中空注浆锚杆	L=4.5 m,100 cm(环)×75 cm(纵)
	C25 喷射混凝土	厚 40 cm
	型钢拱架	H200 mm×200 mm
二次衬砌	C30 模筑混凝土	厚 60 cm,抗渗等级为 P8
	钢筋	HRB400,2640 kg/m

2 ABAQUS 数值计算

2.1 计算假定

计算假定如下:

- 1) 围岩岩体变形为各向同性;
- 2) 施工工法采用双侧壁导坑法;
- 3) 不考虑时间效应,开挖后立即支护;
- 4) 不考虑空间效应,采用二维平面应变模型;
- 5) 该隧道埋深较浅,故不考虑构造应力,采用自重地应力平衡法;

6) 围岩采用 Mohr-Coulomb 强度破坏准则,其余结构均采用弹性本构关系。

2.2 计算工况

隧道断面采用三心圆(含仰拱)曲墙拱结构形式(图 1),在满足隧道基本建筑限界条件下,保持隧道跨度不变,为 21 m,改变隧道高度,共设计 8 组扁平率进行建模计算,各模拟断面设计尺寸详见表 2。

2.3 计算模型

为方便叙述,以扁平率为 0.68 时的隧道模型为例进行介绍。模型采用“地层-结构”模型,整体尺寸为 150 m×90 m,其中围岩采用 Mohr-Coulomb 强度破坏准则,网格划分技术以结构划分为主,网格划分见图 2。除围岩外,其余结构均为弹性本构关系,锚杆和二衬使用 liner 单元模拟。围岩及混凝土参数选取参考《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTJ 3370.1—2018)^[17],根据抗压刚度守恒原理,对钢筋混凝土弹性模量 E 进行折算,围岩和支护结构基本力学参数详见表 3。

为降低边界效应影响,以模型中起拱线中点为原点,隧道左右两侧距边界距离分别为 64.5 m,隧道拱底与边界底部距离为 56 m,隧道顶部埋深为 20 m。模型左右边界施加水平约束,底部施加水平和竖向约束,顶部为自由边界,二维计算模型边界条件施加情况见图 3。

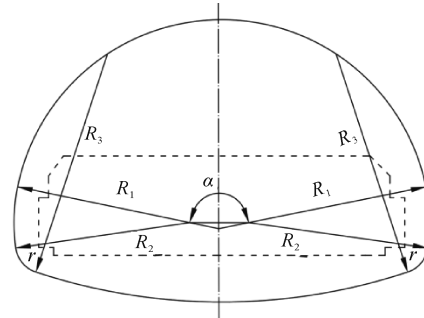


图 1 隧道横断面示意

表 2 三心圆断面设计参数

工况	扁平率	R_1/m	R_2/m	R_3/m	r/m	$\alpha/(\circ)$
C1	0.55	14.1	6.5	30	1.5	63
C2	0.60	12.3	7.5	30	1.5	78
C3	0.62	12.5	8.5	30	1.5	61
C4	0.64	11.5	9.0	30	1.5	73
C5	0.66	10.6	8.5	30	1.5	137
C6	0.68	10.5	9.0	30	1.5	157
C7	0.70	11.2	11.0	30	1.5	45
C8	0.75	9.7	12.5	30	1.5	90

注: R_1 、 R_2 、 R_3 分别为三心圆曲率半径; r 为拱脚曲率半径; α 为隧道上圆角度范围。

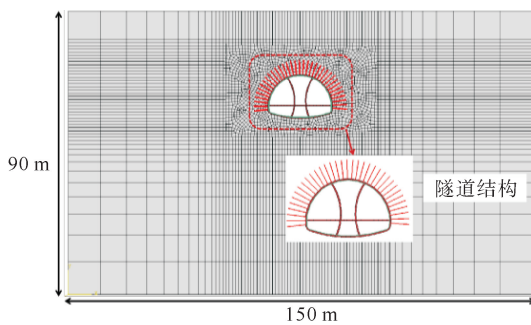


图 2 隧道模型网格划分示意

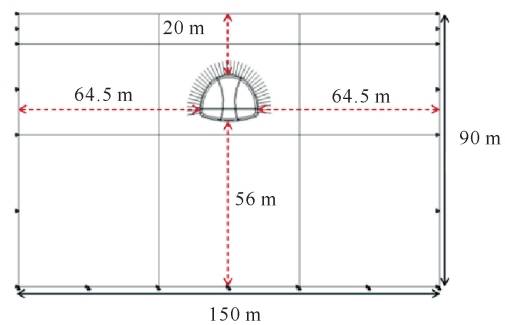


图 3 隧道边界条件示意

表 3 隧道围岩和支护结构基本力学参数

围岩结构	本构模型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 $E/10^9 \text{Pa}$	泊松比 μ	内摩擦角 $\Phi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa
V 级围岩	Mohr-Coulomb	2000	1.1	0.36	35	500
锚杆	线弹性	7700	210.0	0.20	—	—
C25 钢筋混凝土	线弹性	2450	30.0	0.20	—	—
C30 钢筋混凝土	线弹性	2550	33.0	0.20	—	—

3 计算结果分析

本文通过 ABAQUS 软件进行不同扁平率下特大断面公路隧道开挖数值模拟计算,选取 8 处特征位置进行监测,获取不同工况下围岩变形与支护结构受力参数。

3.1 不同扁平率下围岩变形分析

隧道施工会对地表造成一定的影响,如何降低隧道开挖引起的地表沉降是控制地层变形亟待解决的问题之一。提取各工况下地表沉降数据(表 4),并绘制地表沉降槽曲线(图 4)。由表 4 及图 4 可知,地表沉降随扁平率变化呈现出非线性变化,但总体趋势表现为随扁平率减小而增大,最大沉降值位于隧道中心线处。扁平率为 0.55 时地表竖向变形为 7.332 mm,较扁平率为 0.75 时地表沉降值增加了 7.303%。由此可见,当隧道跨度不变,高度降低时,地表沉降值逐渐增加,隧道开挖对地表造成的扰动逐渐增大。

表 4 不同扁平率隧道开挖优化目标函数值

扁平率	开挖面积/m ²	地表沉降/mm	拱顶下沉/mm	拱底隆起/mm	水平收敛/mm
0.55	196	7.332	10.837	6.883	0.307
0.60	210	6.972	10.309	6.994	0.645
0.62	220	7.159	10.575	7.392	0.809
0.64	227	7.085	10.467	7.536	0.900
0.66	230	6.978	10.271	7.650	0.912
0.68	237	6.949	10.258	7.762	1.096
0.70	247	6.953	10.223	7.938	1.358
0.75	261	6.833	10.084	8.228	1.637

3.2 不同扁平率下二衬变形分析

提取出二衬拱顶下沉、拱底隆起和水平收敛数据(表 4),并绘制不同扁平率下位移矢量变化图(图 5)。由图 5 可知,不同扁平率下二次衬砌变形规律大体一致,具体表现为拱顶处位移以向下沉降为主,拱底处位移以向上隆起为主,两侧拱腰以向洞内水平收敛为主。

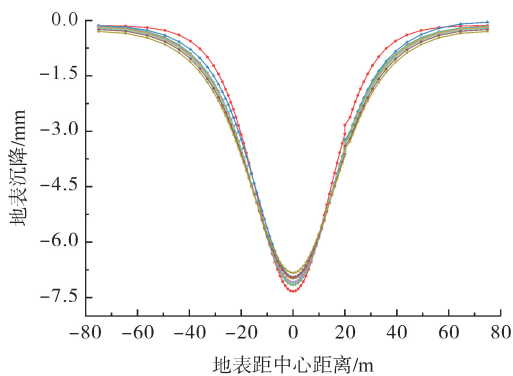


图 4 地表沉降槽曲线

—●— 扁平率0.55; —▲— 扁平率0.60; —▼— 扁平率0.62;
—◆— 扁平率0.64; —■— 扁平率0.66; —◇— 扁平率0.68;
—○— 扁平率0.70; —☆— 扁平率0.75

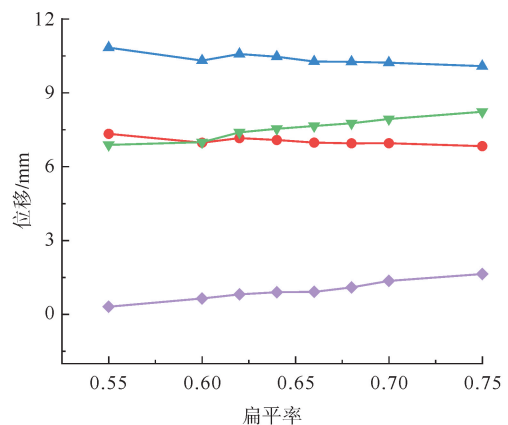


图 5 不同扁平率下位移矢量变化

—●— 地表沉降; —▲— 拱顶下沉; —▼— 拱底隆起; —◆— 水平收敛

拱顶下沉变化趋势分为两个阶段。当扁平率处于 0.55~0.60 和 0.62~0.75 时,拱顶下沉量随扁平率增加而减小,减小幅度不足 1 mm,且在第二阶段减小速度变缓。当扁平率为 0.55 时,拱顶沉降最大,达到 10.837 mm,当扁平率为 0.75 时,拱顶沉降最小,达到 10.084 mm,较扁平率为 0.55 时的拱顶沉降减小了 6.95%。

拱底隆起和水平收敛的变化规律一致,与拱顶下沉变化规律相反,即随着隧道扁平率增加,二者数值越来越大,且增大速度呈现出加速趋势。当扁平率为 0.75 时,拱底隆起和水平收敛达到最大值,量值分别为 8.228 和 1.637 mm,较扁平率为 0.55 时增幅分别为 19.54% 和 433.22%,其中水平收敛受扁平率影响较明显。原因为当隧道跨度不变时,增大扁平率,断面高度会越来越大,两侧边墙曲线弧度逐渐趋于直墙式断面,在拱腰处极易出现应力集中现象。

从围岩变形角度来说,当扁平率小于 0.62 时,围岩位移变化速度较快,施工过程中不利于控制围岩变形。当扁平率位于 0.66~0.70 范围内时,围岩变形幅度较小,结构稳定性更好,更有利于进行隧道开挖。

3.3 不同扁平率下二衬受力分析

由于结构受力对称,故提取拱顶、左拱肩、左拱腰、左拱脚、拱底处的内力进行分析,并计算上述监测点的安全系数,以研究特大断面隧道扁平率对二衬截面内力及安全系数的影响。

3.3.1 扁平率对二衬内力的影响

从数值模拟计算结果来看,8 种工况下的隧道围岩变形及支护结构受力形式大体相同,故以扁平率为 0.68 时的二衬内力结果为例进行分析,内力云图见图 6。从图 6(a)可以看出,弯矩自拱顶向拱腰发生由内侧受拉向外侧受拉的演变,最大正弯矩(外侧受拉)发生在两侧拱腰处,最大负弯矩(内侧受拉)发生在拱脚附近;图 6(b)中除仰拱轴力为正值(受拉)外,衬砌其余处所受轴力均为压力,衬砌最大负轴力(受压)分布在两侧拱腰处。

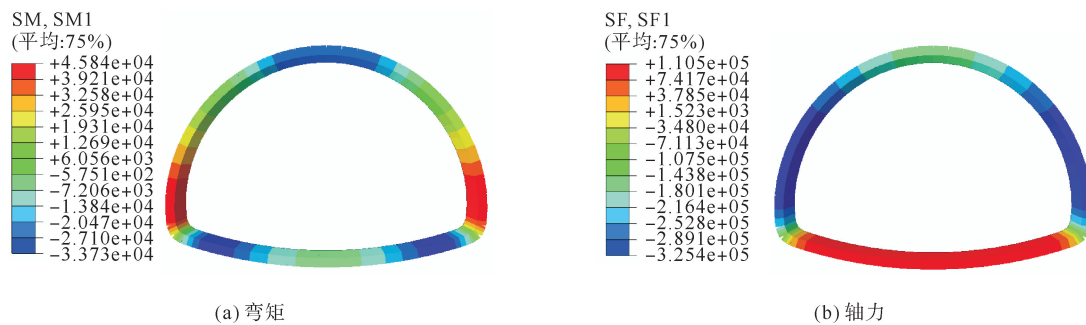


图 6 二衬内力云图(扁平率为 0.68 时)

由图 7 可知,随着断面扁平率的增大,拱顶、拱腰及拱肩所受轴力呈现增大趋势,拱脚所受轴力随扁平率增大由拉力演变为压力,拱底处轴力基本保持不变,拱肩处轴力在扁平率为 0.55 时取得最小值,其中,扁平率为 0.75 时的拱腰处轴力为 -334.23 kN,比扁平率为 0.55 时隧道模型的拱腰轴力值增大了 14.2%。

由图 8 可知,随着断面扁平率增大,除拱腰及拱底部位外,其余各处弯矩呈现出非线性变化,但总体表现为逐渐减小,拱顶及拱底处弯矩变化幅度很小,变化值未超过 5 kN·m,弯矩值在拱腰处达到最大。当

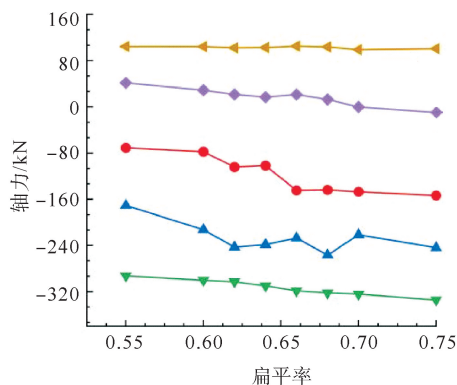


图 7 不同工况下二衬各监测点轴力

● 拱顶; ▲ 拱肩; ▼ 拱腰; ◆ 拱脚; ◆ 拱底

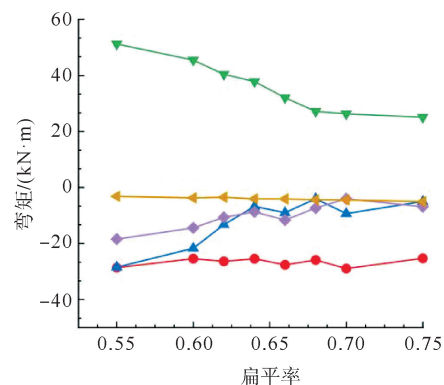


图 8 不同工况下二衬各监测点弯矩

● 拱顶; ▲ 拱肩; ▼ 拱腰; ◆ 拱脚; ◆ 拱底

扁平率小于 0.66 时,拱肩及拱脚处弯矩变化幅度较大,结构受力不稳定,且拱肩及拱脚处弯矩在扁平率 0.66~0.70 时较小。

由图 7 及图 8 可以看出,各扁平率下衬砌轴力值、弯矩值由拱顶向拱腰发生显著增大,均在拱腰处达到最大值,因此需加强拱腰部位的支护,如增大喷射混凝土厚度或提高混凝土强度等级,防止拱腰处产生破坏。

3.3.2 扁平率对安全系数的影响

根据《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)^[17]中相关规定来计算二次衬砌中各截面安全系数 K 。截面安全系数 K 的计算分为 2 种情况。

1) $e_0 \leq 0.2h$, 抗压安全系数:

$$K = \frac{\varphi \cdot \alpha \cdot R_a \cdot b \cdot h}{N} \quad (1)$$

偏心影响系数:

$$\alpha = 1 + 0.648 \frac{e_0}{h} - 12.569 \left(\frac{e_0}{h}\right)^2 + 15.444 \left(\frac{e_0}{h}\right)^3 \quad (2)$$

2) $e_0 > 0.2h$, 抗拉安全系数:

$$K = \frac{1.75 \cdot R_1 \cdot b \cdot h}{N \left(\frac{6e_0}{h} - 1\right)} \quad (3)$$

式中: K 为安全系数; φ 为构件纵向弯曲系数,取 $\varphi = 1$; α 为轴力的偏心影响系数,按式(2)进行计算; R_a 为混凝土或砌体的抗压极限强度,MPa; N 为轴力,kN; R_1 为混凝土或砌体的抗拉极限强度,MPa; b 为截面宽度,m; h 为截面厚度,m; e_0 为轴力偏心距, $e_0 = M/N$, M 为弯矩。

通过数值模拟提取出不同扁平率下二衬各关键截面的内力,其中 $b = 1 \text{ m}$, $h = 0.6 \text{ m}$, $R_a = 22.5 \text{ MPa}$, $R_1 = 2.2 \text{ MPa}$,并按照式(1)—(3)求出不同扁平率下各监测点对应的安全系数,绘制不同扁平率下各监测点安全系数(图 9)。

由图 9 可知,当扁平率为 0.70 时,二衬拱肩、拱脚及拱底达到最大值,去除该点,随着扁平率增大,衬砌拱顶和拱腰处截面安全系数总体呈现出增大趋势,表示隧道结构拱顶及拱腰处安全性逐渐升高。

以扁平率为 0.68 时断面各监测点所求出的安全系数为例进行研究,具体数据见图 10。由图 10 可知,两侧拱腰处安全系数最小,为隧道最不利位置,应着重加强边墙处支护,提高混凝土强度或增加混凝土厚度。由图 9 可知,当扁平率小于 0.66 时,安全系数均不满足《公路隧道设计规范 第一册 土建工程》(JTG 3370.1—2018)中混凝土达到极限抗拉强度时安全系数要求。由此可知,当隧道扁平率介于 0.66~0.70 时,二衬结构受力更均衡,安全性更高。

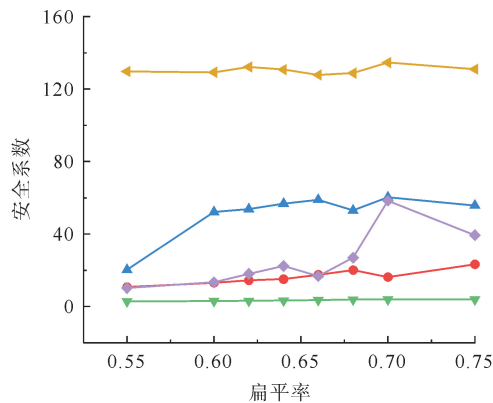


图 9 不同扁平率下二衬安全系数

—●— 拱顶; —▲— 拱肩; —▼— 拱腰; —◆— 拱脚; —◀— 拱底

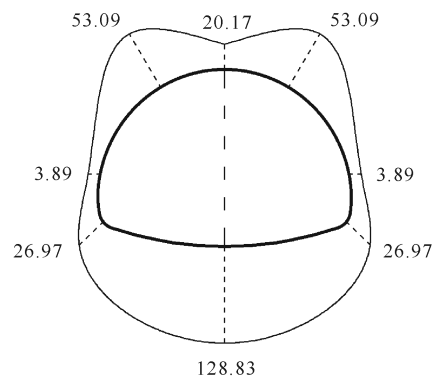


图 10 二衬安全系数(扁平率为 0.68 时)

3.4 不同扁平率下隧道每延米开挖支护工程量分析

本文主要针对不同扁平率下特大断面公路隧道的开挖和支护进行研究,未考虑隧道超前地质预报、施工监控量测、通风及消防施工成本,仅考虑隧道洞身开挖、初期支护、二次衬砌等工程项目总费用。由表5可知,随着扁平率不断增大,隧道开挖断面面积、土方开挖量、支护材料用量都随之增加,人工成本和施工成本相应增加。为降低工程造价,需在保证隧道施工安全的前提下,尽可能地使隧道变得扁平,减小断面开挖面积。但隧道扁平率过低时,围岩应力重分布复杂,不利于施工安全,易发生工程事故;当扁平率过大时,空间断面利用率低,造成空间浪费,增加开挖支护费用。综合考虑,当断面扁平率位于0.66~0.70时,既能够保证施工安全,又可以提高经济效益。

表5 不同扁平率下隧道主体工程每延米工程数量

扁平率	开挖面积/m ²	土方量/m ³	锚杆/m	喷射混凝土/m ³	钢拱架/kg	二次衬砌/m ³
0.55	196	199.69	153.82	14.13	3616.12	28.83
0.60	210	213.93	164.80	15.14	3874.11	30.89
0.62	220	219.94	172.61	15.86	4057.75	32.35
0.64	227	231.32	178.19	16.37	4188.93	33.40
0.66	230	234.33	180.51	16.59	4243.43	33.83
0.68	237	241.46	186.00	17.09	4372.58	34.86
0.70	247	251.65	193.84	17.81	4557.08	36.33
0.75	261	265.91	204.84	18.82	4815.37	38.39

4 结论

本文依托山东省某单向四车道公路隧道工程,通过 ABAQUS 有限元软件对跨度相同扁平率不同条件下特大断面单向四车道公路隧道进行数值模拟计算,得到以下结论:

1) 从围岩变形角度考虑,随着扁平率减小,地表沉降逐渐增大,并呈现出加速增大的趋势。为尽可能地降低隧道开挖对地面造成的扰动,需控制扁平率不宜过小。

2) 从二衬变形角度考虑,随着扁平率减小,衬砌拱顶处围岩松弛应力逐渐增大,造成拱顶下沉及拱底隆起越来越严重。水平收敛随着扁平率增大而增大。当扁平率位于0.66~0.70时,二衬变形幅度较小,更有利于在施工过程中控制结构变形,保证施工安全性。

3) 从二衬受力及安全性角度考虑,随着扁平率增大,拱顶、拱腰和拱底的弯矩及轴力均存在一定程度的减小。轴力值及弯矩值由拱顶向拱腰显著增大,均在拱腰处达到最大值,且拱腰存在应力集中现象。拱腰处安全系数最小,为结构最不利位置。当扁平率小于0.66时结构受力十分不利,为保证结构安全,建议将扁平率设计在0.66~0.70范围内,平均扁平率为0.68。

4) 从开挖与支护费用角度考虑,随着扁平率降低,隧道工程量减少,相应的开挖支护费用降低,但扁平率过低时,隧道受力变差,不利于施工安全;扁平率过高时,造成断面空间浪费,经济效益低。因此,当断面扁平率位于0.66~0.70时,既能够保证施工安全,又可以提高经济效益。

结合本文特大断面隧道数值分析结果以及现有研究,得出该隧道扁平率在0.66~0.70时较为合理,但是该合理扁平率范围是在满足特定工程条件下得到的,具有一定的局限性。本文所提供特大断面公路隧道断面优化方法可为今后类似工程提供参考。

参考文献(References):

- [1] 曲海锋. 扁平特大断面隧道修筑及研究概述[J]. 隧道建设, 2009, 29(2): 166-171.
 QU Haifeng. Summary of construction and research of large flat section tunnel[J]. Tunnel Construction, 2009, 29(2): 166-171.

- [2] NO S L, NOH S H, LEE S P, et al. Construction of long and large twin tube tunnel in Korea-Sapaesan Tunnel[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology*, 2006, 21(3/4): 393.
- [3] 朱彦鹏, 宋晓蕊, 李忠. 大断面公路隧道扁平率及围岩状况受力分析[J]. *甘肃科学学报*, 2014, 26(3): 129-133.
ZHU Yanpeng, SONG Xiaorui, LI Zhong. Flattening rate of large section highway tunnel and stress analysis of surrounding rock condition[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2014, 26(3): 129-133.
- [4] 卿伟宸, 高杨, 章慧健. 大跨度四线铁路车站隧道内轮廓研究[J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(2): 116-122.
QIN Weichen, GAO Yang, ZHANG Huijian. Research on inner contour of large-span four-track railway-station tunnel[J]. *Railway Standard Design*, 2018, 62(2): 116-122.
- [5] 韩艳红, 赵智, 张良. 扁平率对大跨度隧道二衬结构力学特性的影响分析[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020(9): 49-52.
HAN Yanhong, ZHAO Zhi, ZHANG Liang. Analysis of the influence of flattening rate on mechanical properties of long-span tunnel lining structure[J]. *Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition)*, 2020(9): 49-52.
- [6] 雷建海, 高伟, 莫晨聪, 等. III级围岩下大断面市政隧道最优扁平率的确定[J]. *中外公路*, 2017, 37(6): 222-226.
LEI Jianhai, GAO Wei, MO Chencong, et al. Determination of optimal flattening rate of large section municipal tunnel under class III surrounding rock[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017, 37(6): 222-226.
- [7] 王昆, 王育平. 扁平率对浅埋大跨度隧道围岩稳定性的影响[J]. *土木工程与管理学报*, 2019, 36(6): 150-155.
WANG Kun, WANG Yuping. Influence of flat ratio on the surrounding rock stability of shallow long-span tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 36(6): 150-155.
- [8] 王仁杰, 刘志强, 刘阳, 等. 挤压性围岩大跨隧道扁平率优化研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(S1): 713-720.
WANG Renjie, LIU Zhiqiang, LIU Yang, et al. Study on flat rate optimization of long span tunnel with extruded surrounding rock[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(S1): 713-720.
- [9] 蒋坤, 张兵兵. 超大断面隧道扁平率优化分析[J]. *城市道桥与防洪*, 2019(8): 291-294.
JIANG Kun, ZHANG Bingbing. Optimization analysis of flattening rate of super large section tunnel[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2019(8): 291-294.
- [10] 马连友. 基于调研工程对隧道超大断面扁平率的拟定[J]. *特种结构*, 2021, 38(4): 42-46.
MA Lianyou. The formulation of flat rate of tunnel super large section based on research project[J]. *Special Structures*, 2021, 38(4): 42-46.
- [11] 张粒, 杨文波, 曾文浩, 等. 特大断面城市道路隧道力学特性与变形规律研究[J]. *公路*, 2023, 68(1): 416-425.
ZHANG Li, YANG Wenbo, ZENG Wenhao, et al. Study on mechanical characteristics and deformation law of urban road tunnel with large section[J]. *Highway*, 2023, 68(1): 416-425.
- [12] 陈卫忠, 王辉, 田洪铭. 浅埋破碎岩体中大跨隧道断面扁平率优化研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(7): 1389-1395.
CHEN Weizhong, WANG Hui, TIAN Hongming. Study of flat ratio optimization of large-span tunnel section in shallow broken rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(7): 1389-1395.
- [13] 武明静. 基于层次分析法的浅埋大跨城市隧道扁平率优化研究[J]. *施工技术*, 2017, 46(11): 77-81.
WU Mingjing. Flat rate optimization of shallow buried long span urban tunnel based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Construction Technology*, 2017, 46(11): 77-81.
- [14] 金星亮, 梁斌, 焦雷, 等. 浅埋扁平超大断面隧道断面优化设计研究[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2017, 49(4): 112-118.
JIN Xingliang, LIANG Bin, JIAO Lei, et al. Research on section optimization design of shallow buried flat super large section tunnel[J]. *Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition)*, 2017, 49(4): 112-118.
- [15] 林志军, 李顺达. 城市大跨度交通隧道施工模拟分析与断面优化研究[J]. *西部探矿工程*, 2019, 31(11): 203-207.
LIN Zhijun, LI Shunda. Construction simulation analysis and section optimization of large-span traffic tunnel in city[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2019, 31(11): 203-207.
- [16] 李凌志, 周骏, 滕鸣翰, 等. 基于层次分析法的超大隧道断面多准则优化分析[J]. *交通科技*, 2022(4): 119-124.
LI Lingzhi, ZHOU Jun, TENG Minghan, et al. Multi-criteria optimization analysis of super large tunnel section based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Transportation Science & Technology*, 2022(4): 119-124.
- [17] JTG 3370. 1—2018, 公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].
JTG 3370. 1—2018, Specifications for design of highway tunnels Section 1 Civil engineering[S].

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)