

# 扁平率对超宽断面隧道结构受力的影响分析

曹光晔, 钱文斐, 姜 炯

[上海市市政工程设计研究(总院)集团有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 城市化进程加速背景下,超宽断面隧道因适应交通功能的需求成为地下工程发展的重要方向。因此,对超宽断面隧道的围岩变形及支护受力性能的研究具有重要意义。以广东某暗挖隧道工程为依托,采用有限元软件GTS建立二维有限元模型,通过对周边土体位移以及支护结构受力进行分析,研究不同扁平率下超宽断面隧道的结构受力特点,进而总结出超宽断面隧道最佳扁平率。分析结果表明:(1)隧道拱顶土体竖向位移随着扁平率的增加而降低,在扁平率为0.5~0.6区间降幅较大,0.6~0.7区间降幅较小;(2)整体而言,在扁平率为0.60~0.65区间,隧道初支轴力和弯矩较小;(3)扁平率在0.50~0.55区间时,隧道初支与临时支撑交接处弯矩较大,而在0.60~0.65区间,该处弯矩显著减小;(4)对于强风化花岗岩地层中的超宽断面隧道的建议设计扁平率为0.60~0.65。

**关键词:** 超宽断面隧道;扁平率;土体位移;支护结构受力特点

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0116-06

## Analysis of Effect of Flatness Ratio on Stress of Ultra-wide Cross-section Tunnel Structures

CAO Guangye, QIAN Wenfei, JIANG Jiong

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

**Abstract:** With the accelerated urbanization process, the ultra-wide cross-section tunnels have become an important direction for the development of underground engineering due to their adaptation to the demands of transportation functions. Consequently, the research on the deformation of surrounding rock and the mechanical behavior of support for the ultra-wide cross-section tunnels is of paramount importance. Relying on a bored tunnel project in Guangdong, the finite element software GTS is used to establish a 2D finite element model. By analyzing the displacement of surrounding soil and the stress of support structure, the stress characteristics of ultra-wide cross-section tunnel structures under the different flatness ratios are studied so as to summarize the optimal flatness ratio of ultra-wide cross-section tunnel. The analysis results indicate that (1) The vertical displacement of tunnel vault soil reduces with the increase of flatness ratio. The decrease is relatively large in the flatness ratio range of 0.5~0.6, and relatively small in the range of 0.6~0.7. (2) As a whole, in the range of flatness ratio 0.6~0.65, the axial force and bending moment of the initial support of the tunnel are relatively small. (3) When the flatness ratio is within the range of 0.5~0.55, the bending moment at the connection of the initial support and the temporary support of the tunnel is relatively large, and within the range of 0.6~0.65, the bending moment at this location is significantly reduced. (4) The recommended design flatness ratio for ultra-wide cross-section tunnels in strongly weathered granite strata is 0.60~0.65.

**Keywords:** ultra-wide cross-section tunnel; flatness ratio; soil displacement; mechanical characteristics of support structures

## 0 引言

在城市化进程中,为缓解高密度路网交通压力,城市隧道常采用“主线+多级立体式匝道”结构,隧道断面在主线与匝道分离处变的超宽。据《中国城市

地下空间发展蓝皮书(2023)》预测,至2030年,我国城市隧道中超宽断面占比将突破35%。

大断面隧道建设最先始于经济发达国家,如日本第二东明公路隧道,其断面面积最大达230 m<sup>2</sup>,开挖宽度为23 m;英法海峡隧道最大开挖宽度达21.2 m,开挖高度达15.4 m,开挖面积为252 m<sup>2</sup>。

我国大断面公路隧道于20世纪80年代开始建设,现在已经修建完成超大断面公路隧道有:贵州凯

收稿日期: 2025-02-28

作者简介: 曹光晔(1994—),男,硕士,工程师,从事结构设计工作。

里市大阁山隧道,最大开挖宽度 21.04 m;广州江鹤高速公路莲花山隧道,最大开挖宽度 23.4 m;沈大高速公路韩家岭隧道,最大开挖跨度 22.482 m;湖北漆树槽隧道,最大开挖宽度 24.7 m;山西拍盘隧道,最大开挖宽度 25.77 m,厦门万石山隧道,最大开挖宽度 26.4 m。

施有志,曲海锋等<sup>[1-3]</sup>通过现场监测数据、模型实验及是指模拟等多种手段对四车道公路隧道围岩与结构位移、应力、应变及破坏区等的分布与发展规律进行了研究;王希宝,袁松,蒋长伟等<sup>[4]</sup>通过数值模拟,研究了两车道隧道和三车道隧道在高地应力地层中的合理内轮廓形式;陈卫忠,王辉,田洪铭等<sup>[5]</sup>通过有限元软件,对 5 种扁平率下 18.65 m 宽隧道结构的稳定性和变形破坏情况进行研究,得到其最优扁平率;曾中林,曾宜江等<sup>[6-7]</sup>对扁平率对四车道断面隧道围岩位移、塑性区分布和最大剪切应变率进行了分析;郭新新,汪波,王永琪等<sup>[8]</sup>对Ⅲ级围岩条件下,开挖宽度为 16 m 和 18 m 的隧道最优扁平率区间进行了研究;王昆,王育平等<sup>[10]</sup>对开挖跨度更大的 18、20、22 m 的大跨度隧道在不同扁平率下的拱顶沉降及塑性区分布特点进行了研究。

综上所述,当前国内外学者就超宽断面隧道的受力特点以及不同扁平率对超宽断面隧道的影响已进行了一定的研究,但大部分研究成果局限于四车道断面隧道,少数研究者对最大开挖宽度为 22 m 的超宽断面隧道进行了研究。但对目前工程应用中更宽断面的隧道研究较少。本文基于前人研究基础上,以广东某隧道工程为例,通过数值模拟分析,对更大的超宽断面隧道在强风化花岗岩层中的结构受力进行研究分析。

1 工程概况

某隧道工程位于广东地区。隧道采用钻爆法施工,在主线与匝道分合流处存在 2 种超宽断面隧道,隧道开挖宽度分别达 23.101、25.855 m,隧道开挖高度分别为 14.685、16.799 m。隧道断面开挖轮廓尺寸见图 1、图 2。

本文依托工程超宽断面隧道大部分位于强风化花岗岩地层,因此本文以强风化花岗岩层为工程地质条件,对超宽断面隧道的周边土体位移和支护结构受力特点进行研究分析。

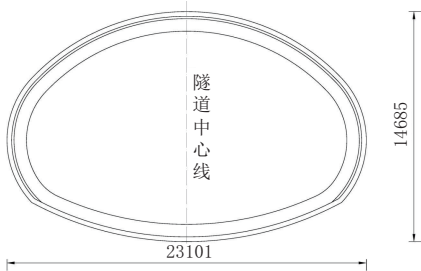


图 1 断面 1(开挖宽度 23.101 m)(单位:mm)

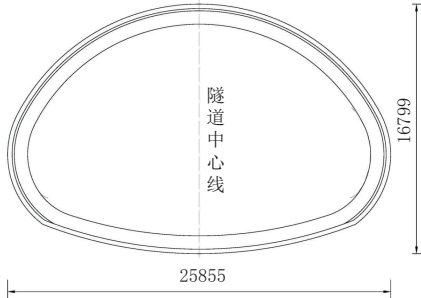


图 2 断面 2(开挖宽度 25.855 m)(单位:mm)

2 模型建立

2.1 有限元模型

采用 MIDAS GTS 有限元计算软件,建立二维平面应变模型进行计算分析,见图 3。土体单元采用平面应变单元模拟,初支、二衬及临时支撑采用梁单元模拟,土体采用摩尔库伦模型模拟。模型底部为固定约束边界,两侧为水平方向约束边界。

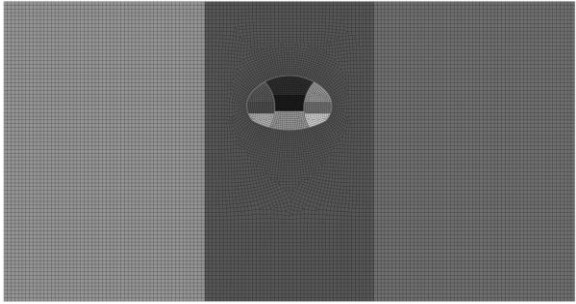


图 3 有限元计算模型图

根据地质勘察资料确定土层密度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角等土层参数,见表 1。

表 1 土体物理力学参数表

| 土层     | 弹性模量/MPa | 泊松比 | 重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 黏聚力 $c/\text{kPa}$ | 摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$ |
|--------|----------|-----|---------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|
| 强风化花岗岩 | 282      | 0.4 | 20                                          | 26                 | 29                            |

各隧道断面衬砌结构设计参数及结构材料参数见表 2。

2.2 开挖工法

暗挖隧道常用开挖工法有台阶法、CD 法、双侧壁导坑法。其中,双侧壁导坑法通过双侧导坑先行

| 表2 隧道衬砌结构设计参数表 |          |          |          |
|----------------|----------|----------|----------|
| 断面类型           | 初支       | 二衬       | 临时支撑     |
| 断面1            | 300 mm   | 800 mm   | 220 mm   |
|                | C25喷射混凝土 | C35钢筋混凝土 | C25喷射混凝土 |
| 断面2            | 300 mm   | 900 mm   | 220 mm   |
|                | C25喷射混凝土 | C35钢筋混凝土 | C25喷射混凝土 |

开挖,中间核心土跟进,形成“眼镜”状分块,利用两侧导坑初期支护作为支撑结构,控制围岩变形。与台阶法和CD法相比,双侧壁导坑法将隧道断面分为多个小导坑,通过分块开挖降低单次开挖对围岩的扰动,有效减少围岩变形,避免全断面或大范围暴露,降低塌方风险。

本文研究对象为超宽断面隧道,采用双侧壁导坑法开挖,各导洞施工顺序见图4。

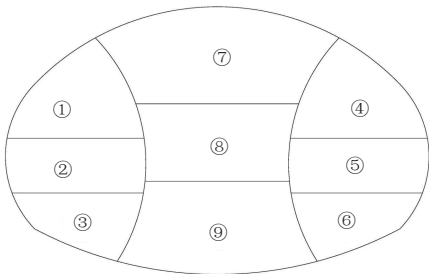


图4 双侧壁导坑法开挖步序示意图

先开挖左侧导洞①②③部分并施工左导洞初期支护和竖向临时支护,再开挖右侧导洞④⑤⑥部分并施工右侧导洞初期支护和竖向临时支护,最后施工中导洞⑦⑧⑨部分并施工顶部和仰拱初期支护。待初期支护封闭成环后拆除两道竖向临时支撑。

2.3 结构扁平率

扁平率(H/B)指隧道开挖高度(H)与开挖宽度(B)的比值,是评价隧道结构稳定性和经济性的重要指标。扁平率越小,隧道断面越扁平,反之则越接近圆形或高拱形。扁平率越大,结构受力越有利。但从经济性角度看,扁平率越大,意味着隧道开挖面积越大,相应支护结构范围亦增加,同时隧道的有效利用面积越低,经济性越差。

本文依托工程中超宽断面隧道的扁平率分别为;0.63(断面1)和0.65(断面2)。为研究不同扁平率的影响,同时保持开挖宽度不变,对扁平率分别为0.5、0.55、0.6、0.7情况下的隧道周边土体位移和支护结构受力特点进行分析。具体计算工况见表3。

3 结果分析

3.1 周边土体竖向位移

(1)断面1

| 表3 计算工况表 |      |      |
|----------|------|------|
| 计算工况     | 断面类型 | 扁平率  |
| J1-0.5   | 断面1  | 0.50 |
| J1-0.55  | 断面1  | 0.55 |
| J1-0.6   | 断面1  | 0.60 |
| J1-0.63  | 断面1  | 0.63 |
| J1-0.7   | 断面1  | 0.70 |
| J2-0.5   | 断面2  | 0.50 |
| J2-0.55  | 断面2  | 0.55 |
| J2-0.6   | 断面2  | 0.60 |
| J2-0.65  | 断面2  | 0.65 |
| J2-0.7   | 断面2  | 0.70 |

由图5可看出,从分布来看,随着隧道断面扁平率的增加,土体竖向位移分布逐步均匀。扁平率较低时,土体竖向位移较大区域集中分布在隧道拱部中间位置,而扁平率较高时,以J1-0.7工况为例,土体竖向位移较大分域分布在拱顶及拱腰部位,分布范围更宽。主要原因和隧道断面拱顶弧度有关,拱顶弧度越大,土体竖向位移较大区域分布范围越广,拱顶弧度越小,土体竖向位移较大区域分布范围越窄。

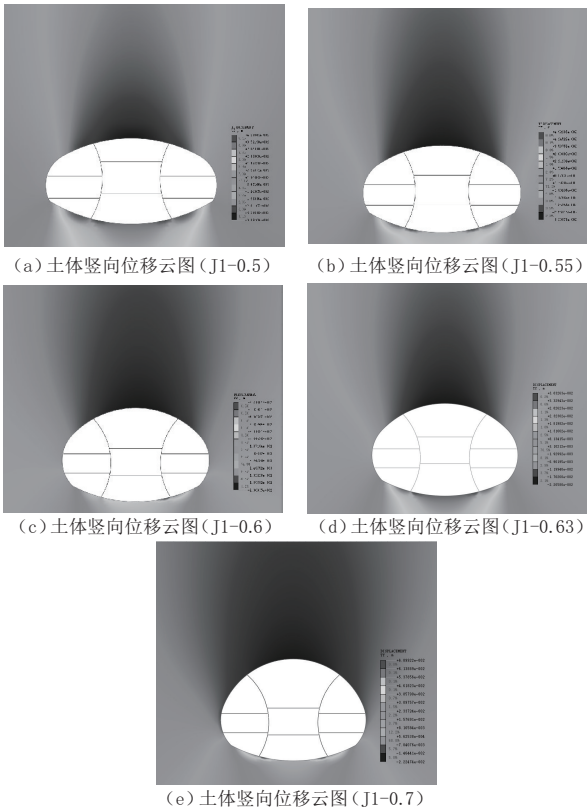


图5 不同扁平率土体竖向位移云图(断面1)

由表4中数据可看出,从数值来看,随着扁平率的增加,隧道拱顶处土体竖向位移呈降低的趋势,地表处土体竖向沉降也相对应减小;但是在扁平率为0.5~0.6区间,土体竖向位移降低较为显著,隧道拱顶



处竖向位移由 39.7 mm 降低至 23.7 mm,降低了 16 mm,降幅达 40%;而在扁平率为 0.6~0.7 区间内,土体竖向位移降低不显著,隧道拱顶处竖向位移由 23.7 mm 降低至 21.7 mm,降低了 2 mm,降幅仅 8.4%。

表 4 断面 1 土体竖向位移对比表 单位:mm

| 计算工况    | 拱顶处  | 地表处  |
|---------|------|------|
| J1-0.5  | 39.7 | 21.3 |
| J1-0.55 | 32.1 | 19.3 |
| J1-0.6  | 23.7 | 15.1 |
| J1-0.63 | 22.1 | 14.0 |
| J1-0.7  | 21.7 | 14.3 |

(2)断面 2

由图 6 可看出,从分布来看,与断面 1 相同,随着隧道断面扁平率的增加,土体竖向位移分布逐步均匀。扁平率较低时,土体竖向位移较大区域集中分布在隧道拱部中间位置,而扁平率较高时,以土体竖向位移较大分域分布在拱顶及拱腰部位,分布范围更宽。

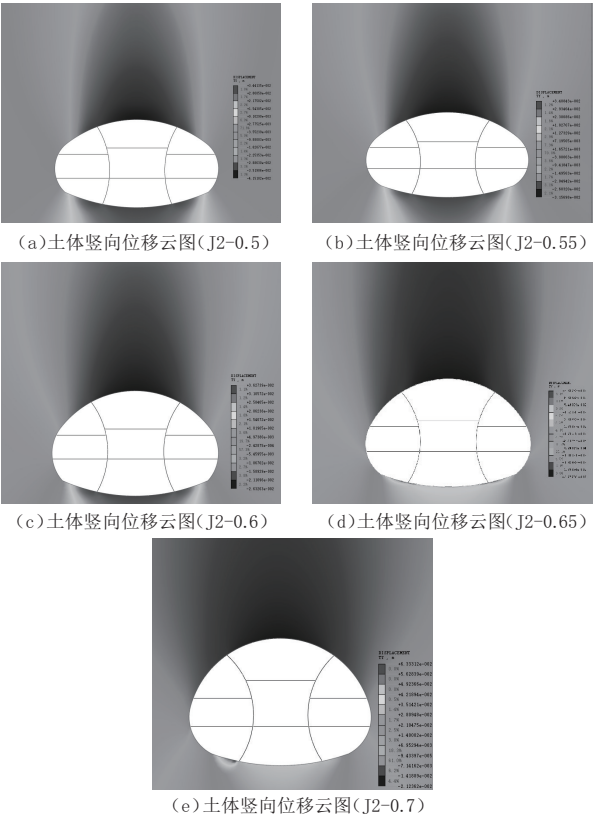


图 6 不同扁平率土体竖向位移云图(断面 2)

由表 5 可看出,从数值来看,随着扁平率的增加,隧道拱顶处土体竖向位移呈降低的趋势,地表处土体竖向沉降也相对应减小;但是在扁平率为 0.5~0.6 区间,土体竖向位移降低较为显著,隧道拱顶处竖向位移由 41.5 mm 降低至 26.5 mm,降低了 15 mm,降幅达 36%;而在扁平率为 0.6~0.7 区间内,土体竖向

位移降低不显著,隧道拱顶处竖向位移由 26.5 mm 降低至 21.1 mm,降低了 5.4 mm,降幅为 20.3%。

表 5 断面 2 土体竖向位移对比表 单位:mm

| 计算工况    | 拱顶处  | 地表处  |
|---------|------|------|
| J2-0.5  | 41.5 | 26.0 |
| J2-0.55 | 31.6 | 20.6 |
| J2-0.6  | 26.5 | 17.3 |
| J2-0.65 | 23.2 | 15.3 |
| J2-0.7  | 21.1 | 13.8 |

从图 7 可以看出,在扁平率为 0.5~0.6 区间内,拱顶土体竖向位移随着扁平率的增加线性降低,而在扁平率为 0.6~0.7 区间,拱顶土体竖向位移降幅不明显。

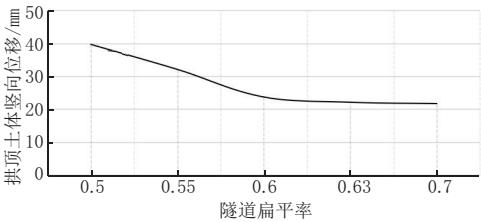


图 7 拱顶土体竖向位移与扁平率关系图

(3)对比分析

a. 从土体竖向位移分布来看,随着扁平率增加,土体竖向位移分布逐步均匀。扁平率较低时,土体竖向位移较大区域集中分布在隧道拱部中间位置,而扁平率较高时,土体竖向位移较大分域分布在拱顶及拱腰部位,分布范围更宽。

b. 从土体竖向位移数值来看,随着扁平率的增加,隧道拱顶土体竖向位移随之减小,但扁平率 0.6 以上,土体竖向位移降低幅度较小。

3.2 支护结构内力

(1)断面 1

由图 8 可看出,从弯矩分布来看,不同扁平率下的初支弯矩分布存在共同点,也存在一定差异。共同点:拱顶处弯矩均较小。差异:对于扁平率较小的工况,如 J1-0.5 和 J1-0.55,初支弯矩较大处在拱肩及初支与临时支撑相交处;而对于扁平率较大的工况,初支弯矩较大处分布在拱腰处,且初支与临时支撑相交处弯矩值较小。

由表 6 可看出,从数值来看,随着扁平率的增加,隧道初支弯矩整体呈减小的趋势,但是在 J2-0.7 工况下,拱顶(初支与临时支撑交接处)、拱腰、仰拱弯矩不降反增。此外,在扁平率为 0.5~0.6 区间,随着扁平率的增加,初支弯矩降低较为显著,以初支与临时支撑交接处为例,由 132.2 kN·m 降低至 56.3 kN·m,

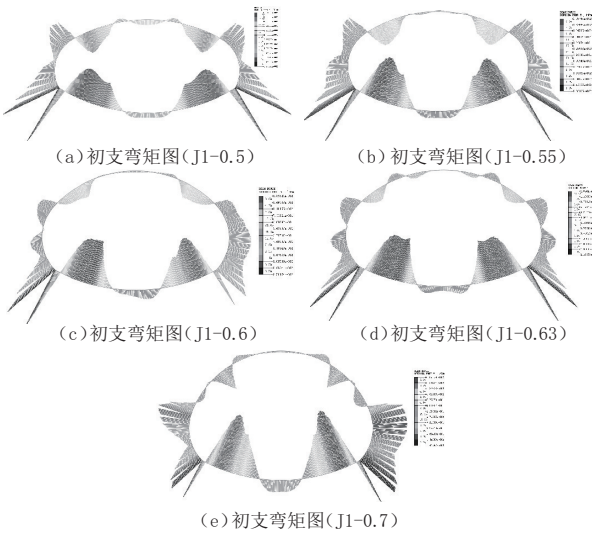


图8 不同扁平率初支弯矩图(断面1)

降低了 75.9 kN·m,降幅达 57.4%;在 0.6~0.63 区间,虽然初支弯矩仍然随着扁平率的增加而减小,但总体而言,减小幅度低,以初支与临时支撑交接处为例,由 56.3 kN·m 降低至 40.7 kN·m,降低了 15.6 kN·m。

表6 断面1初支弯矩对比表 单位:kN·m

| 计算工况    | 拱顶<br>(初支与临时支撑交接处) | 拱顶   | 拱腰    | 拱脚    | 仰拱    |
|---------|--------------------|------|-------|-------|-------|
| J1-0.5  | 132.2              | 32.4 | 148.6 | 397.1 | 201.9 |
| J1-0.55 | 98.9               | 8.8  | 103.8 | 286.4 | 206.8 |
| J1-0.6  | 56.3               | 5.5  | 56.5  | 258.2 | 183.8 |
| J1-0.63 | 40.7               | 17.9 | 52.8  | 228.4 | 162.4 |
| J1-0.7  | 66.7               | 15.8 | 101.3 | 141.8 | 187.1 |

此外,随着隧道扁平率的增加,拱顶(初支与临时支撑交接处)、拱腰、拱脚处弯矩降低最为显著,分别减小了 57.4%、62%、35%;而仰拱处弯矩降低不明显,仅降低了 9%。

由表 7 可看出,从数值来看,随着扁平率的增加,隧道临时中隔壁支撑弯矩整体呈减小的趋势。

表7 临时中隔壁支撑弯矩对比表 单位:kN·m

| 计算工况    | 中部    | 与初支交接处 |
|---------|-------|--------|
| J1-0.5  | 235.1 | 438.1  |
| J1-0.55 | 205.0 | 391.7  |
| J1-0.6  | 143.4 | 286.0  |
| J1-0.63 | 138.2 | 278.6  |
| J1-0.7  | 126.8 | 260.6  |

由图 9 可看出,从轴力分布来看,不同扁平率下的初支轴力分布基本相似,并无显著差异:(a)拱腰处轴力大;(b)仰拱处轴力值最小。

由表 8 可看出,从数值来看,随着扁平率的增加,隧道初支轴力整体呈减小的趋势,但总体而言,减小的幅度不大。以拱顶处为例,J1-0.7 工况与 J1-

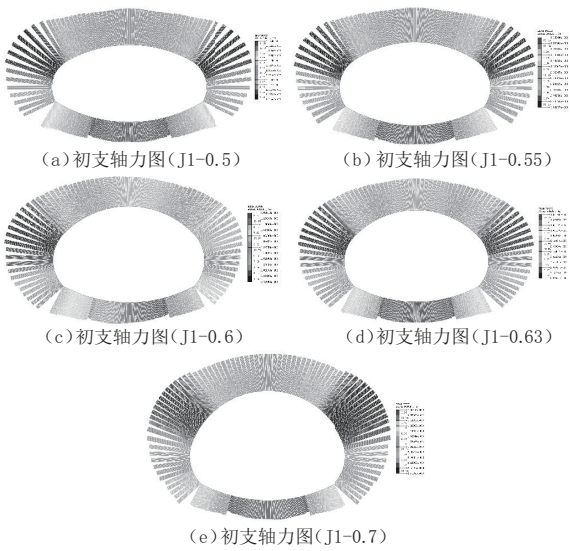


图9 不同扁平率初支轴力图(断面1)

0.5 相比,初支轴力由 2231kN 降低为 1910kN,仅降低了 321kN,降幅约 14.4%。

表8 断面1初支轴力对比表 单位:kN

| 计算工况    | 拱顶    | 拱腰    | 拱脚    | 仰拱    |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| J1-0.5  | 2 231 | 3 214 | 2 122 | 1 767 |
| J1-0.55 | 2 093 | 3 114 | 1 979 | 1 590 |
| J1-0.6  | 1 966 | 3 393 | 2 250 | 1 498 |
| J1-0.63 | 1 936 | 2 968 | 1 797 | 1 457 |
| J1-0.7  | 1 910 | 2 734 | 1 521 | 1 251 |

(2)断面2

由图 10 可看出,从弯矩分布来看,与断面 1 相似:(a)拱顶处弯矩均较小;(b)对于扁平率较小的工况,如 J2-0.5 和 J2-0.55,初支弯矩较大处在拱肩及初支与临时支撑相交处;而对于扁平率较大的工况,初支弯矩较大处分布在拱腰处,且初支与临时支撑相交处弯矩值较小。

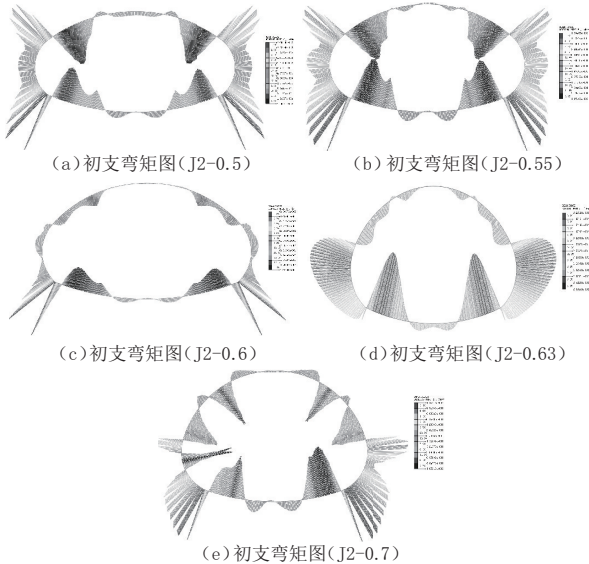


图10 不同扁平率初支弯矩图(断面2)

由表 9 可看出,从数值来看,随着扁平率的增加,隧道初支弯矩整体呈减小的趋势,但是在 J2-0.7 工况下,拱顶(初支与临时支撑交接处)、拱腰弯矩不降反增。此外,在扁平率为 0.5~0.6 区间,随着扁平率的增加,初支弯矩降低较为显著,以初支与临时支撑交接处为例,由 158 kN·m 降低至 76 kN·m,降低了 82 kN·m,降幅达 51.9%;在 0.60~0.65 区间,虽然初支弯矩仍然随着扁平率的增加而减小,但总体而言,减小幅度低,以初支与临时支撑交接处为例,由 76 kN·m 降低至 44.5 kN·m,降低了 31.5 kN·m。

| 表 9 断面 2 初支弯矩对比表 |              |      |      |       |       |
|------------------|--------------|------|------|-------|-------|
| 计算<br>工况         | 拱顶           | 拱顶   | 拱腰   | 拱脚    | 仰拱    |
|                  | (初支与临时支撑交接处) |      |      |       |       |
| J2-0.5           | 158          | 14.9 | 120  | 246   | 139.5 |
| J2-0.55          | 101          | 4.2  | 117  | 150   | 115   |
| J2-0.6           | 76           | 4.4  | 47   | 390   | 142   |
| J2-0.65          | 44.5         | 1.4  | 33.9 | 79.8  | 297.5 |
| J2-0.7           | 92           | 2.5  | 88.6 | 117.9 | 102.8 |

此外,随着隧道扁平率的增加,拱顶(初支与临时支撑交接处)、拱腰、拱脚处弯矩降低最为显著;而仰拱处弯矩降低不明显。

从数值来看,同断面 1 相似,随着扁平率的增加,隧道临时中隔壁支撑弯矩整体呈减小的趋势,见表 10。

| 表 10 临时中隔壁支撑弯矩对比表 |       |        |
|-------------------|-------|--------|
| 计算工况              | 中部    | 与初支交接处 |
| J2-0.5            | 278.6 | 539.5  |
| J2-0.55           | 236.4 | 462.4  |
| J2-0.6            | 208.3 | 407.2  |
| J2-0.65           | 152.3 | 310.6  |
| J2-0.7            | 133.4 | 244.3  |

由图 11 可看出,从轴力分布来看,不同扁平率下的初支轴力分布基本相似,并无显著差异:(a)拱腰处轴力大;(b)仰拱处轴力值最小。

由表 11 可看出,从数值来看,拱顶处初支轴力呈现出先减后增的趋势。在扁平率为 0.50~0.65 区间,随着扁平率的增加,隧道拱顶处初支轴力整体呈减小的趋势,但总体而言,减小的幅度不大,J2-0.65 与 J2-0.5 工况相比,初支轴力由 2 521 kN 降低至 2 036 kN,降低了 485 kN,降幅约 19.2%;在扁平率为 0.65~0.70 区间,随着扁平率的增加,隧道拱顶处初支轴力整体呈增加的趋势。

在扁平率为 0.5~0.6 区间,随着扁平率的增加,拱腰、拱脚、仰拱处初支轴力随之增加。但在扁平率为

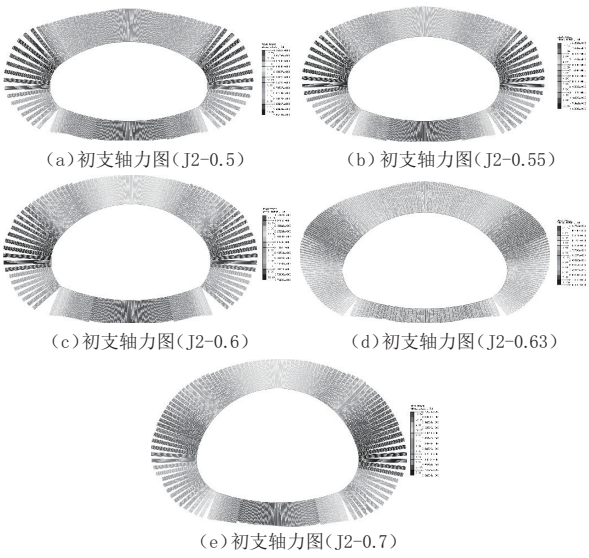


图 11 不同扁平率初支轴力图(断面 2)

| 表 11 断面 1 初支轴力对比表 |       |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| 计算工况              | 拱顶    | 拱腰    | 拱脚    | 仰拱    |
| J2-0.5            | 2 521 | 3 647 | 2 284 | 1 972 |
| J2-0.55           | 2 362 | 3 687 | 2 360 | 2 124 |
| J2-0.6            | 2 238 | 3 765 | 2 738 | 2 372 |
| J2-0.65           | 2 036 | 2 964 | 1 516 | 1 263 |
| J2-0.7            | 2 363 | 3 945 | 2 360 | 2 395 |

0.65 工况中,轴力迅速减小。

(3)对比分析

a. 弯矩方面,从分布来看,扁平率较小,在 0.5~0.55 区间时,初支弯矩较大处在拱肩及初支与临时支撑相交处;而扁平率较大,在 0.6~0.7 区间时,初支弯矩较大处分布在拱腰处。

b. 弯矩方面,从数值来看,总体而言,在扁平率为 0.50~0.65 区间,初支弯矩整体呈减小的趋势,在扁平率为 0.65~0.70 区间,初支弯矩整体呈增加的趋势。此外,在扁平率为 0.60~0.65 区间时,初支与临时支撑相交处弯矩值显著减小。

c. 轴力方面,从分布来看,不同扁平率下的初支轴力分布基本相似,并无显著差异。

d. 轴力方面,从数值来看,整体而言,扁平率在 0.60~0.65 区间时,初支轴力较小。

4 结 语

本文通过建立二维有限元模型,对不同扁平率下超宽断面隧道的周边土体变形及支护结构受力进行分析,得到以下结论。

(1)从控制土体竖向位移变形和隧道支护结构受力特点来看,对于强风化花岗岩地层中的超宽断面隧道的建议设计扁平率为 0.60~0.65;

(下转第 127 页)