

浅谈广东省公路隧道岩爆段内轮廓型式及隧道净距的选择

谢卓雄¹, 聂玉文¹, 刘柯良²

¹广东省交通规划设计研究院股份有限公司, 广东 广州

²西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都

Email: 740476199@qq.com

收稿日期: 2020年11月23日; 录用日期: 2020年12月10日; 发布日期: 2020年12月17日

摘 要

近年来, 随着穿越大埋深、高地应力条件下的特长隧道逐年增多, 我国地下工程中岩爆现象频发。本文以广东省大(埔)丰(顺)(五)华高速公路丰顺至五华段鸿图嶂特长隧道为依托, 结合广东省设计特点, 以隧道洞周切向应力为岩爆主要控制因素为基础, 通过数值计算分析, 得到了不同隧道轮廓形式、不同侧压力系数及不同隧道净距对洞周切向应力及岩爆发生状况的影响, 为广东省岩爆隧道设计提供依据。

关键词

岩爆, 洞周切向应力, 隧道内轮廓, 净距

A Brief Talk on the Selection of Inner Contour Type and Tunnel Clear Interval of Rockburst Section of Highway Tunnel in Guangdong Province

Zhuoxiong Xie¹, Yuwen Nie¹, Kelian Liu²

¹Guangdong Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²The Ministry of Education Key Laboratory of Traffic Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: 740476199@qq.com

Received: Nov. 23rd, 2020; accepted: Dec. 10th, 2020; published: Dec. 17th, 2020

Abstract

In recent years, with the passage of great depths, high crustal stress conditions of the long tunnel increasing year by year, the phenomenon of rock burst in underground engineering was a frequent trend in our country. This article relying on Hongtuzhang tunnel in Feng Shun to Wuhua section of Da (Pu) Feng (Shun) (Wu) Hua Highway in Guangdong Province, combined with the design features of Guangdong Province, regarding the tunnel circumferential tangential stress as the main controlling factor of rockburst, based on numerical analysis, gets a conclusion of the influence from different form of tunnel profile, different side pressure coefficients and different tunnel net distance to the hole circumferential tangential stress and the impact of rock explosion condition, providing basis for Guangdong Province rock burst tunnel design.

Keywords

Rock Burst, Peri-Hole Tangential Stress, Internal Tunnel Profile, Clear Spacing

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着穿越大埋深、高地应力条件下的特长隧道逐年增多,我国地下工程中岩爆现象频发。国内深埋隧道在建设过程中大多发生过不同等级的岩爆事件,如2001年竣工的最大埋深748 m的318国道二郎山公路隧道,先后发生200次岩爆,连续发生岩爆的段落有8段,每段长60~355 m不等,岩爆长度占隧道总长的1/3 [1] [2]。2007年通车的雪峰山公路隧道最大埋深约850 m,施工中多次发生岩爆现象,危及施工安全[3]。2008年竣工的苍岭特长公路隧道,最大埋深约780 m,施工中也是岩爆频发[4] [5]。岩爆发生时的现象如下图1所示。



Figure 1. The phenomena of rock burst

图1. 岩爆现象图

隧道结构稳定是保障隧道施工与运营安全的基本条件,维持隧道结构稳定是隧道工程需要重点关注的问题之一[6]。岩爆是地下洞室开挖过程中因周边约束解除后造成岩石在高应力条件下发生的一种脆性破坏现象,其产生烈度等级与隧道开挖后周边围岩二次甚至三次应力场的调整结果直接相关,而隧道开挖过程中,周边围岩应力状态的受到施工工法、支护措施、轮廓形式、甚至两隧道间净距的大小等诸多

因素的影响。目前国内外针对隧道岩爆已有大量的研究[7] [8] [9] [10] [11], 但其内容主要集中于岩爆发生机理、岩爆分级、岩爆支护措施及快速施工等[8] [9] [10] [11], 但对隧道的内轮廓形式及合理净距影响却未见深入讨论, 本文以广东省大(埔)丰(顺)(五)华高速公路丰顺至五华段鸿图嶂特长隧道为依托, 针对隧道内轮廓及隧道净距对隧道岩爆的影响进行初步的探讨。

2. 依托工程概况[12]

鸿图嶂隧道位于广东省丰顺县及五华县境内, 是大(埔)丰(顺)(五)华高速公路的控制性工程, 隧道穿越中低山地貌区, 地面标高 243~1037 m, 相对高差约 794 m, 山体植被发育。隧道设计为双向分离式, 双线中心间距约 40 m, 隧道全长 6175 m, 隧底标高 239~358 m, 隧道最大埋深约 740 m。

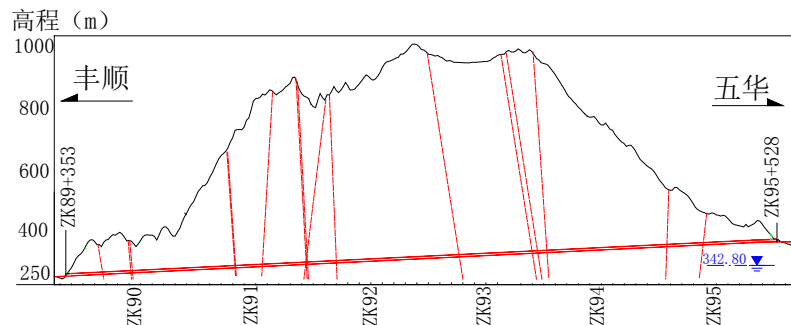


Figure 2. Longitudinal profile of Hongtuzhang tunnel
图 2. 鸿图嶂隧道纵断面图

据如图 2 的纵断面图及地质勘查资料可知, 隧址区岩性以花岗岩为主, 岩体完整性好, 强度高。受区域构造影响, 隧址区原始应力场以构造应力场为主, 为探清隧址区地应力的分布, 于初步设计阶段在洞身布设钻探深孔, 并通过水压致裂法获得了隧道洞身地应力的分布情况如表 1 所示。根据地应力测试成果, 最大应力 σ_{hmax} 为 23.2 MPa, 应力方向 N62°E, 与隧道轴线夹角约为 43°, 垂直隧道轴线水平应力 σ_{max} 为 19.1 MPa。钻孔结果表明洞身岩体为微风化花岗岩, 结合岩石抗压试验成果, 得出围岩饱和单轴抗压强度为 80~90 MPa, 将结果按公路隧道设计规范计算得 R_c/σ_{max} 在 4~7 之间, 判断隧道围岩初始应力属于高应力。深埋段岩体因受高围压作用, 隧道开挖会引起洞周应力重分布, 其可能产生的轻微至中等强度岩爆将危及洞内施工人员及设备的安全。因此, 为降低隧道岩爆造成的危害, 探究合理的鸿图嶂隧道断面轮廓及双洞净距尺寸将具有重要的工程的指导意义。

Table 1. Ground stress measurement
表 1. 地应力测试情况一览表

孔深	最大水平主应力 MPa	最小水平主应力 MPa	铅直应力 MPa	最大水平主应力方向	隧道轴线方向	夹角	隧道轴线方向水平应力 MPa	垂直隧道轴线方向水平应力 MPa	侧压力系数
374	14.1	9.4	8.8	74°	105	31	12.9	10.6	1.2
504	22.9	14.8	11.8	N74°E	105	31	20.8	16.9	1.4
606.2	18.9	11.9	14.2	N67°E	105	38	16.2	14.6	1.0
680.5	20.3	13	16.0	65°	105	40	17.3	16	1.0
703.8	23.2	15.5	16.5	N62°E	105	43	19.6	19.1	1.2

注: 1、破裂压力、重张压力及关闭压力为测点孔口压力值; 垂直应力取容重为 2350 kN/m³ 进行计算; 2、稳定水位约在孔深 228 m 处。

3. 高地应力岩爆段内轮廓型式及隧道净距的适宜性探讨

3.1. 概述

如上文所述，隧道岩爆的发生受到多种因素的影响，但其中影响最为显著的因素无疑是隧道开挖后的岩体应力，而其中开挖洞周切向正应力(下称洞周切向应力)的分布情况最受关注。目前大部分岩爆预判准则均以洞周切向应力作为核心评判依据，因此通过研究洞周切向应力的分布情况，可以初步分析隧道岩爆程度。由隧道力学理论可知，隧道开挖后岩体应力分布与隧道轮廓形式及左右线隧道净距有关，不同的轮廓形式及隧道净距对隧道施工后形成的最终应力场有着显著的影响。本文基于上述的思路，以依托工程鸿图嶂隧道的地应力及围岩情况为基础，采用有限元数值仿真手段比较不同隧道轮廓形式，多种地应力场及多种隧道净距条件下的洞周切向应力分布情况，分析并总结不同内轮廓及隧道净距对隧道岩爆的影响情况。

3.2. 计算方案与工况地制定

1) 内轮廓形式

据研究，断面形状影响围岩岩体开挖后形成的应力重分布圈，对岩壁的应力集中有明显的影[13]。确定隧道内轮廓时在满足建筑限界及洞内机电设备的布设要求的同时，还需考虑当前行业的施工情况，结合地方特点，优先选用主流的设计断面。广东省自 2012 年起开始推行标准化设计，因此在设计阶段优先采用了如下图的广东省通用图的隧道内轮廓[14]。同时与现行隧规[15]推荐的内轮廓进行比较。二者规范见下图 3。

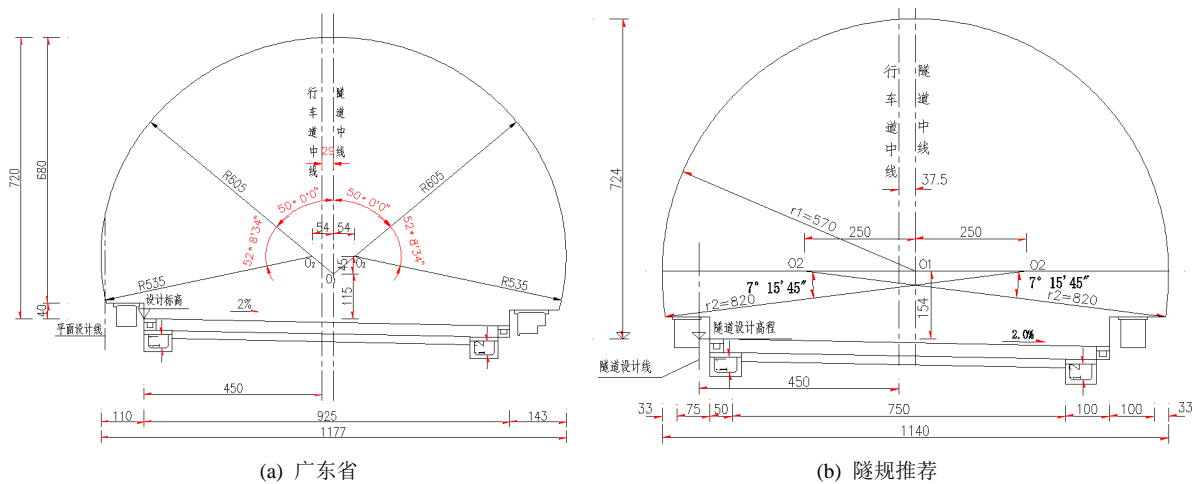


Figure 3. Inner outline of two-lane tunnel
图 3. 两车道隧道内轮廓图(100 km/h)

2) 地应力场

在实际工程中，岩土体具有比较复杂的特性，为更接近模拟实际过程，对其中的参数进行简化假设处理[16]。考虑到隧道埋深较大，最大埋深近 740 m，隧道横断面内因重力引起的应力变化相比总应力是不明显的，因此计算时采用了均匀应力场作为初始应力场。另外从实测地应力情况可以看出，侧压力系数普遍分布在 1.0~1.2 之间，同时考虑到隧道岩爆一般发生在侧压力较大的情况，本次计算选取了侧压力系数为 0.8、1.0、1.2 三种应力场进行对比。

3) 隧道净距

据调研岩爆发生的地段，隧道围岩一般为 II、III 级，现行隧规 III 级围岩双洞分离隧道与小净距隧道的分界净距为 $2.0D$ ，因此本次计算隧道最大净距取 $2.0D$ ，同时将 $0.75D$ 、 $1.0D$ 及 $1.5D$ 三种情况考虑在内进行对比。

4) 计算工况的制定及模型

根据上述分析及数值选取，制定计算工况如下表 2 所示。

Table 2. Numerical calculation clusters

表 2. 计算分组表

轮廓形式	隧道净距 侧压力系数(λ)	$0.75D$	$1.0D$	$1.5D$	$2.0D$
省标	0.8	✓	✓	✓	✓
	1	✓	✓	✓	✓
	1.2	✓	✓	✓	✓
隧规	0.8	✓	✓	✓	✓
	1	✓	✓	✓	✓
	1.2	✓	✓	✓	✓

注： D 为隧道跨度。

以鸿图嶂隧道为原型，建立平面弹性有限元计算模型如图 4 所示，模型建立时围岩采用平面 4 节点等参单元进行模拟，岩体物理力学参数结合鸿图嶂隧道地勘报告取值，具体如表 3 所示。

Table 3. Mechanical parameters of surrounding rock

表 3. 围岩力学参数表

重度 γ (kN/m ³)	弹模 E (Gpa)	泊松比 ν	岩石饱和单轴抗压强度 R_b (Mpa)
23.5	54	0.26	90

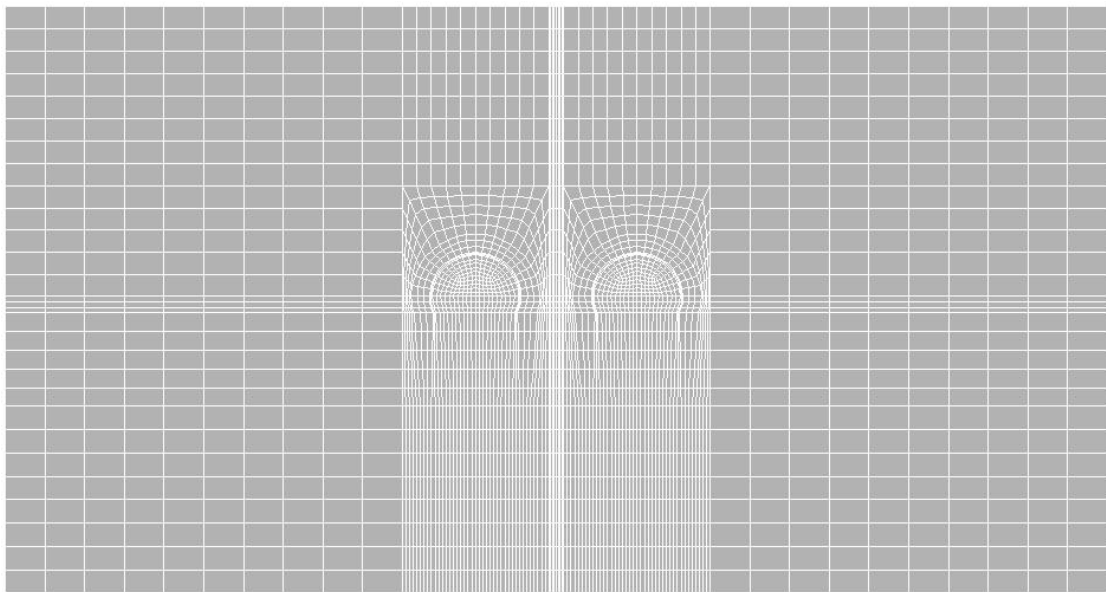


Figure 4. Numerical calculation model

图 4. 计算模型

3.3. 计算结果分析

1) 应力场分布特征分析

计算结果得到不同断面轮廓极坐标下 σ_θ 云图如图 5 所示, 从图中可以看出, 洞周 σ_θ 成环状分布, 两个拱脚位置存在较大的应力集中, 由于不设仰拱, 开挖断面底部较平, 存在应力卸载区, 由此可见, 从应力分布上考虑, 隧道底部发生岩爆的可能性较低。拱部及边墙应力分布连续, 在拱顶或者最大跨位置出现极值, 因此可以取拱顶及边墙最大跨处的切向应力作为洞周切向应力的控制点。

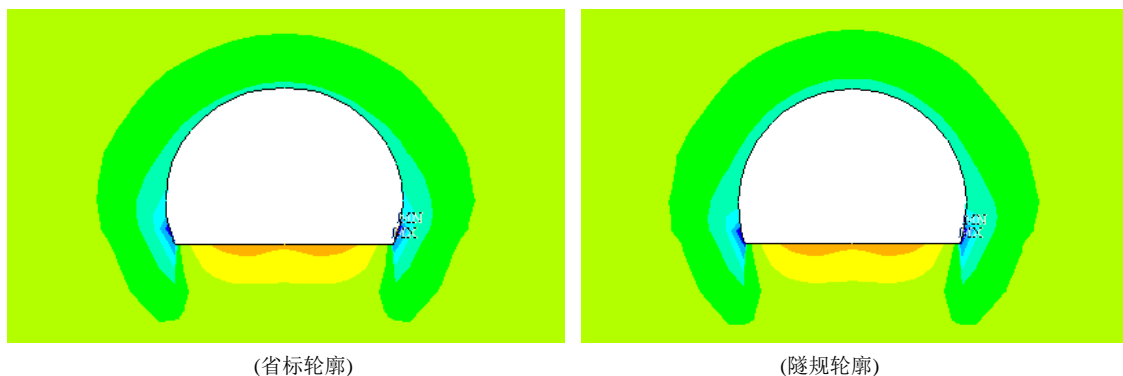


Figure 5. σ_θ Stress map of single hole ($\lambda = 1.0$)
图 5. 单洞 σ_θ 应力分布图($\lambda = 1.0$)

2) 轮廓形式对洞周切向应力分布的影响

从洞周切向应力分布来看, 省标轮廓拱顶切向应力相比稍小, 边墙切向应力相比稍大。切向应力最大差别约 10% 左右。说明就洞周切向应力而言两种轮廓对应力影响并不显著, 在实际设计中完全可根据实际需要选择。

根据文献[15]均匀应力场线弹性体椭圆洞室长、短轴顶点切向正应力计算公式如下:

$$\sigma_\theta = \sigma_v (\alpha + \beta \lambda)$$

式中: σ_θ 、 σ_v 、 λ —— 计算点切向正应力、均匀应力场竖向应力、侧压力系数;

α 、 β —— 椭圆顶点应力计算参数, 与椭圆长、短轴之比及计算顶点位置有关, 具体取值如下表 4。

Table 4. The parameters of elliptic vertex
表 4. 椭圆顶点应力计算参数表

顶点位置	应力系数		简图
	α	β	
A	-1	$2a/b + 1$	
B	$2b/a + 1$	-1	

通过比较椭圆洞室拱顶及最大跨处的应力理论值得到不同轮廓形式的洞周控制点应力如表 5 所示, 发现控制点数值计算结果与 $a = h$, $b = D/2$ 时的理论计算结果十分接近, 说明采用这种方式确定的椭圆隧

道理论值完全可以作为估算切向应力的近似公式，这对施工中快速确定洞周切向应力分布具有极大的价值。

Table 5. Cavernous control point stresses of different contours type
表 5. 不同轮廓形式的洞周控制点应力

轮廓形式	侧压力系数 λ	洞周切向应力 σ_θ (Mpa)		差异比		与椭圆隧道理论拱顶及边墙应力[17]相比			
		拱顶	边墙	拱顶	边墙	拱顶/ $((2a/b+1)\lambda-1)\sigma_v$		边墙/ $(-1\lambda+(2b/a+1))\sigma_v$	
						$a=H, b=D$	$a=h, b=D/2$	$a=H, b=D$	$a=h, b=D/2$
省标	0.8	20.6	38	-4.4%	7.9%	1.46	0.94	0.72	1.01
隧规		21.5	35						
省标	1	29.3	35.2	-3.4%	8.8%	1.35	0.93	0.71	1.02
隧规		30.3	32.1						
省标	1.2	37.9	32.4	-4.2%	10.2%	1.29	0.93	0.70	1.04
隧规		39.5	29.1						

注： H 为轮廓总高度， h 为最大跨以上部分高度， D 为隧道最大跨度。

3) 侧压力系数的影响

地下洞室所处理深位置和地质构造不同，会导致洞室围岩侧压力有所不同，不同侧压系数下的岩体能量的积聚与释放方式也随之改变[18]。无论是省标轮廓还是隧规推荐的轮廓，从其应力分布情况均可以发现侧压力系数对控制点的应力影响是显著的，尤其是对拱顶位置的切向应力。侧压力系数由 0.8 变化至 1.2，其拱顶切向应力增大了 1 倍，虽然边墙的切向应力也发生较为明显的变化，但是变化的幅度远不及拱顶应力。

据此作不同侧压力系数下洞周 σ_θ 应力分布图如图 6，得出如下结论：

- ① 如果假定洞周切向应力确实是岩爆发生的主要控制因素，那么侧墙是否发生岩爆与侧压力系数关系不大，而基本是由原应力场的竖向应力决定；
- ② 拱顶侧随侧压力系数的增大，岩爆发生的可能性也大幅增加，再加上侧压力系数增大的同时边墙的切向应力在减少，说明实际上侧压力系数的增加将变相使岩爆由边墙逐步向拱顶集中。

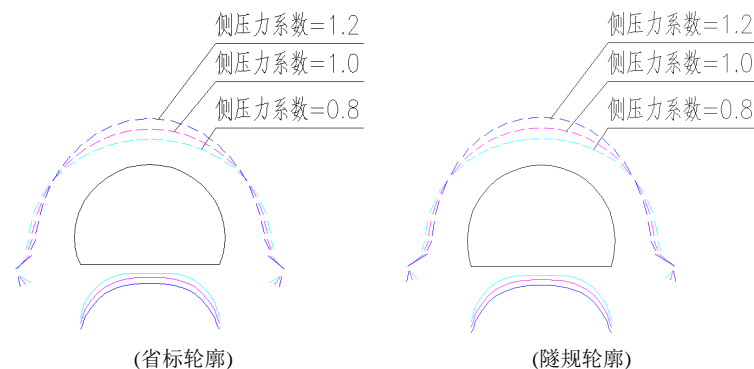


Figure 6. Cavernous σ_θ stress in different lateral pressure coefficient
图 6. 不同侧压力系数下洞周 σ_θ 应力分布图

4) 隧道净距对洞周切向应力分布的影响

从计算结果上作不同净距、侧压力系数条件下洞周 σ_θ 应力分布图如图 7 所示，发现无论是省标轮廓

还是隧规推荐轮廓，其洞周切向应力对隧道净距的变化都是不敏感的，只有当净距小于 $0.75D$ 时洞周切向应力才发生向中岩柱一侧集中的情况。由此说明从隧道切向应力方面分析双线隧道岩爆，隧道净距并不会起主要控制作用，在设计时可按一般隧道考虑隧道线间距而无需因岩爆而特意加宽。

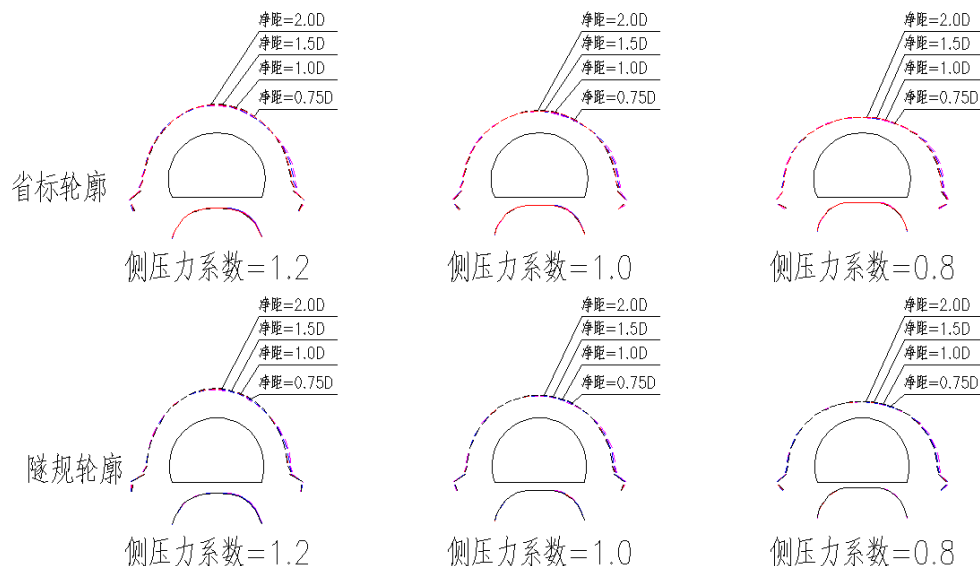


Figure 7. Cavernous σ_{θ} stress in different lateral pressure coefficient and clear spacing
图 7. 不同净距、侧压力系数条件下洞周 σ_{θ} 应力分布图

4. 结论

本文依托大丰华高速公路鸿图嶂隧道，通过平面弹性数值计算分析了广东省常用的单洞四车道隧道轮廓、不同侧压力系数及隧道净距对洞周切向应力的影响，可以得到以下结论：

- 1) 切向应力成环状分布，隧道底部存在卸载区，发生岩爆的可能性较拱顶及边墙小；
- 2) 两种轮廓对洞周切向应力分布影响并不显著，设计中可以根据实际需要灵活选择；
- 3) 拱顶及侧墙的切向应力可以作为洞周切向应力的控制点，现场实测应力时可优先选择这两点进行应力监测，以反映全洞周的切向应力情况；
- 4) 当 $a =$ 最大跨以上部分高度， $b =$ 最大跨度的一半时，按椭圆隧道应力计算公式所得应力值与实际马蹄形隧道计算所得应力基本接近，可作为现场估算洞周切向应力的有效方法；
- 5) 侧压力系数对洞周切向应力的影响是显著的，尤其是拱顶处的切向应力，将随侧压力系数的增大而大幅增加，如果认为洞周切向应力是岩爆的主导因素，则可以认为侧压力系数的增大，逐步把岩爆向拱顶方向集中；
- 6) 隧道净距对洞周切向应力影响不大，因此不必因岩爆而特意增大隧道间距，可按一般隧道设计情况选择合理净距。一般来说对于两车道隧道而言建议按净距取 $30\sim 40$ m，这主要是考虑两侧隧道放炮作业引起的冲击效应的影响以及岩体塑性变形的所引起的附加应力集中效应。

参考文献

- [1] 王兰生, 李天斌, 徐进, 等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级[J]. 公路, 1999, 28(2): 41-45.
- [2] 徐林生. 二郎山公路隧道岩爆特征与防治措施的研究[J]. 长江科学院院报, 2004, 37(1): 61-64.
- [3] 张志龙, 李天斌, 王兰生, 等. 雪峰山隧道岩爆问题预测研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(1): 58-61.

- [4] 吴德兴, 杨健. 苍岭特长公路隧道岩爆预测和工程对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3965-3971.
- [5] 汪波, 何川, 吴德兴, 等. 基于岩爆破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 811-817.
- [6] 刘太平. 浅埋偏压小净距隧道开挖及支护技术研究[J]. 交通节能与环保, 2017, 13(3): 82-84.
- [7] Senfaute, G., Chambon, C., Bigarre, P., *et al.* (1997) Spatial Distribution of Mining Tremors and the Relationship to Rockburst Hazard. *Pure and Applied Geophysics*, **150**, 1451-4591. <https://doi.org/10.1007/s000240050087>
- [8] 彭祝, 王元汉, 李廷芥. Griffith 理论与岩爆的判别准则[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(S1): 491-495.
- [9] 杜子建, 许梦国, 刘振平. 岩爆动力源分析及岩爆防治原则探讨[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(3): 8-9.
- [10] 刘思好, 徐则民. 基于动-静应力耦合的深埋隧道岩爆灾害控制[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 177-183.
- [11] 王斌, 李夕兵, 马春德, 等. 岩爆灾害控制的动静组合支护原理及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1169-1178.
- [12] 大(埔)丰(顺)(五)华高速公路丰顺至五华段 A 标段两阶段初步设计[Z]. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司.
- [13] 孙旭宁, 赵国斌, 张国泉. 岩爆的影响因素分析与预测[J]. 施工技术, 2012(12): 65-68.
- [14] 广东省交通运输厅. 广东省高速公路工程设计标准化[S]. 隧道通用图, 2015年5月版, 广州: 广东省交通运输厅, 2014.
- [15] 中华人民共和国行业标准. JTG D70-2004. 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [16] 王渭, 房顺涛. 公路隧道软弱围岩施工开挖受力特性研究[J]. 交通节能与环保, 2019, 15(2): 120-123.
- [17] 张倬元, 王世天, 王兰生. 工程地质分析原理[S]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [18] 李占海, 朱万成, 冯夏庭, 等. 侧压力系数对马蹄形隧道损伤破坏的影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 434-441+461.