

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.050

高边墙断面隧道锚杆作用的分析与研究

钱文斐,石竟成

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:传统矿山法隧道通常采用扁平率在 0.6~0.75 范围的“矮胖”断面形式,但单洞双层隧道采用“瘦高”断面形式的扁平率往往大于 1.0,超出了现行规范^[1-2]的适用条件。针对高边墙断面隧道的围岩变形与支护内力进行了分析研究,得出高边墙范围内锚杆的受力及作用如下:(1)可以有效降低高边墙范围的围岩塑性区分布范围,提高围岩的稳定性;(2)可以有效减小高边墙范围围岩的水平位移及喷射混凝土支护的弯矩;(3)高边墙中部锚杆拉力值最大,两端朝着拱顶及仰拱方向的锚杆拉力值呈现逐渐降低的趋势。通过现场监测反馈的数据进行相互印证。由此可得出如下结论:通过在高边墙范围内设置长短相间的锚杆,可以对隧道围岩形成有效的“约束”,提升隧道的整体稳定性及安全性。这些成果为高边墙断面隧道的设计和施工提供了借鉴意义。

关键词:高边墙隧道;扁平率;塑性区;围岩变形;支护内力;锚杆

中图分类号:U455.7+1

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)12-0238-05

0 引言

随着土地开发利用率越来越高,留给市政工程建设空间越来越受限。以华南地区某工程为例,采用矿山法隧道形式穿越山岭段后需接入现状道路,道路红线宽度仅约 18 m,两侧为居民小区和学校,为避免拆迁,隧道只能采用单洞双层的高边墙断面形式(断面扁平率大于 1.0),超出现行设计规范中断面扁平率为 0.60~0.75 的适用范围。为此,笔者查阅了目前国内部分学者的相关文献^[3-11]。李帆等^[3]提出洞室区初始最大主应力平行于洞室轴向且应力值达到一定程度时是高边墙隧洞产生劈裂破坏的重要条件。何少云等^[4]通过模拟开挖时不同部位围岩应力变化情况,提出高边墙围岩的稳定性是施工期安全控制的重点。杨瑞莲等^[9]提出了压力型预应力锚索技术是解决高边墙地下洞室工程安全的一种手段。

本文以具体工程案例为依托,对高边墙断面隧道围岩变形及支护内力开展研究,通过有限元模拟并结合现场监控量测数据进行对比分析,得出的相关结论可以更好地指导设计与施工。

1 工程案例

某隧道位于华南地区,其内轮廓见图 1,扁平率

为 1.70。洞身围岩主要为砾质黏性土,其物理力学参数见表 1。为方便分析,初期支护参数暂定为:(1)C25 喷射混凝土厚度为 28 cm。(2) $\phi 8$ 钢筋网间距为 20 mm \times 20 cm。(3)锚杆类型为 $\phi 22$ 砂浆锚杆,其中起拱线以上锚杆长度 3.5 m,高边墙采用 3.5、6.0 m 两种锚杆长度相间布置。锚杆纵向间距为 0.8 m,环向间距为 1.0 m。(4)I22a 钢架纵向间距为 0.8 m。

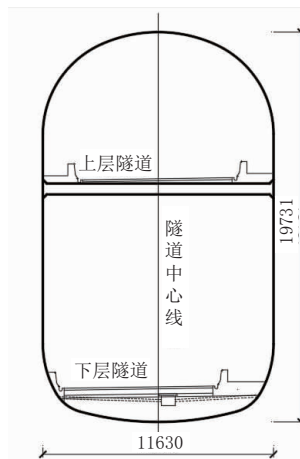


图 1 高边墙断面隧道内轮廓(单位:mm)

表 1 围岩主要物理学参数一览

天然重度 / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)	弹性模量 / MPa	泊松比
18.42	20.3	22.8	54.05	0.43

采用 MIGAS GTS 有限元分析软件进行模拟分析,其中 I22a 钢架及 $\phi 8$ 钢筋网根据抗压刚度相等的

收稿日期:2024-06-12

作者简介:钱文斐(1977—),男,硕士,正高级工程师,从事隧道及地下工程设计与研究工作。

原则, 将其弹性模量折算入 C25 喷射混凝土中, $\phi 22$ 砂浆锚杆采用植入式桁架进行模拟。支护参数见表 2。

表 2 支护参数一览

材料	弹性模量 / GPa	泊松比	重度 / (kN·m ⁻³)
C25 混凝土	23	0.2	22
$\phi 22$ 砂浆锚杆	210	0.3	77

为方便研究, 选取的主要关键点位置为拱顶(位置 A)、起拱点(位置 B)、高边墙中(位置 C)、隅角(位置 D)、仰拱(位置 E), 详见图 2。

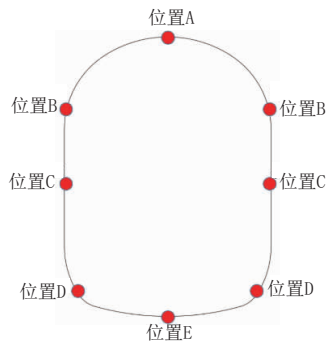


图 2 关键位置分布

2 围岩变形性能

2.1 塑性区分布

围岩塑性区分布范围即围岩变形较大甚至出现失稳的范围。由图 3 可以看出, 在仅考虑喷射混凝土作用下隧道开挖后围岩塑性区主要分布在点 B~点 D 的高边墙范围。由图 4 可以看出, 在考虑喷射混凝土及锚杆作用下围岩的塑性区仅分布在点 B、点 D 附近。

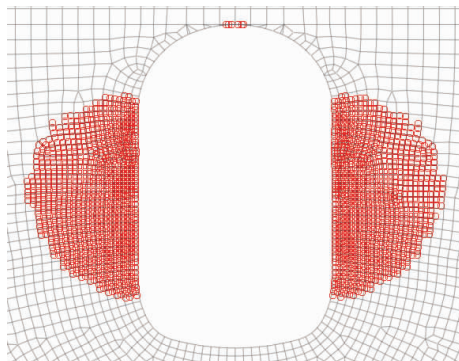


图 3 仅考虑喷射混凝土作用的围岩塑性区分布

通过图 4 与图 3 进行比较可以看出, 通过设置锚杆, 可以大大减小高边墙的围岩塑性区分布范围, 提升围岩的稳定性。

2.2 围岩变形

图 5、图 6 分别为仅考虑喷射混凝土作用时围岩的水平向和竖向位移云纹图。图 7、图 8 分别为考虑

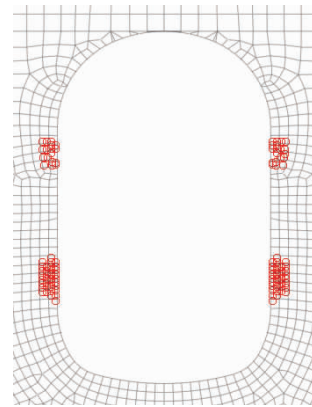


图 4 考虑喷射混凝土及锚杆作用的围岩塑性区分布
喷射混凝土及锚杆作用时围岩的水平向和竖向位移云纹图。

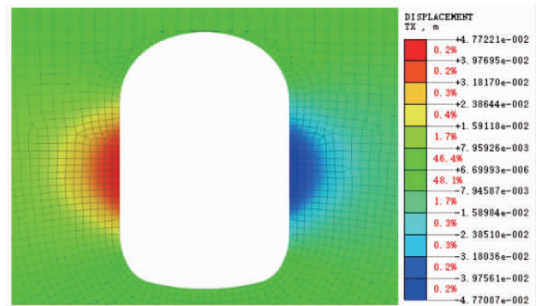


图 5 仅考虑喷射混凝土作用的围岩水平位移云纹图

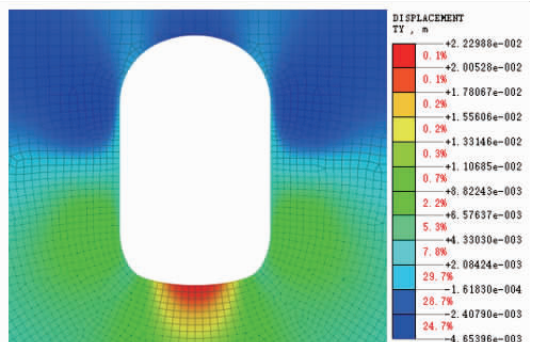


图 6 仅考虑喷射混凝土作用的围岩竖向位移云纹图

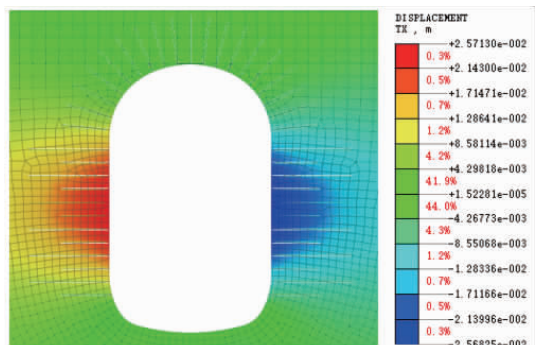


图 7 考虑喷射混凝土及锚杆作用的围岩水平位移云纹图

经过统计汇总后, 围岩位移情况见表 3。

由表 3 可以得出: (1) 仅考虑喷射混凝土作用时, 点 B~点 D 的高边墙范围围岩水平位移较大, 呈现出外凸“鼓肚子”形状。而考虑喷射混凝土及锚杆作用时, 围岩水平位移值可以减小 40%~50%。(2) 对于

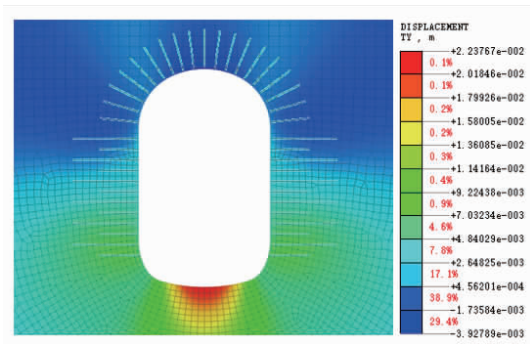


图8 考虑喷射混凝土及锚杆作用的围岩竖向位移云纹图

表3 围岩位移情况汇总 单位:mm

位置	仅考虑喷射混凝土作用	考虑喷射混凝土及锚杆作用
A(竖向位移)	4.0	3.6
B(水平位移)	18.1	11.2
C(水平位移)	47.7	25.7
D(水平位移)	18.9	11.8
E(竖向位移)	22.3	22.3

点A、点E即拱部、仰拱位置而言,是否考虑锚杆作用对于竖向位移的影响不大。

3 支护受力性能

3.1 喷射混凝土内力

图9、图10为仅考虑喷射混凝土作用时喷射混凝土的弯矩及轴力分布图。图11、图12为考虑喷射混凝土及锚杆作用时喷射混凝土的弯矩及轴力分布图。

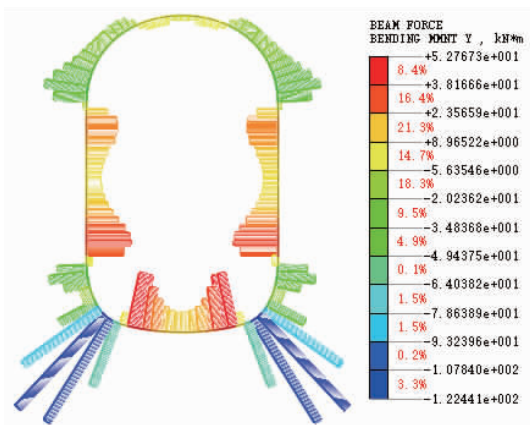


图9 仅考虑喷射混凝土作用的弯矩图

经过统计汇总,喷射混凝土弯矩及轴力情况见表4。

由表4可以看出:(1)仅考虑喷射混凝土作用时,点B~点D的高边墙范围内喷射混凝土的弯矩值较大。考虑喷射混凝土及锚杆作用时,喷射混凝土的弯矩值可减小20%~40%。(2)考虑锚杆作用时虽可降

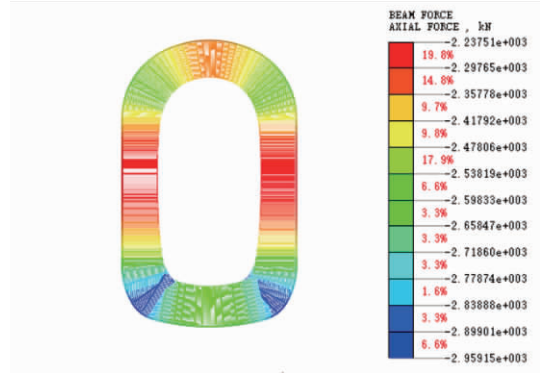


图10 仅考虑喷射混凝土作用的轴力

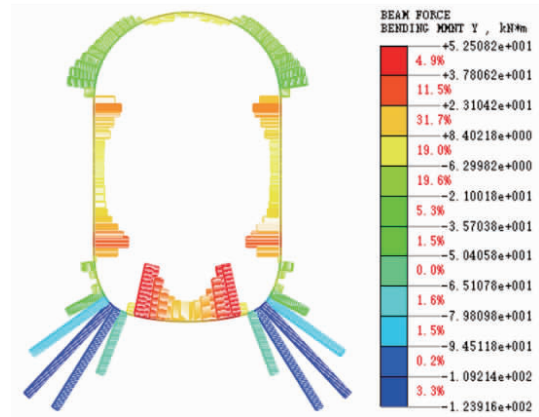


图11 考虑喷射混凝土及锚杆作用的弯矩

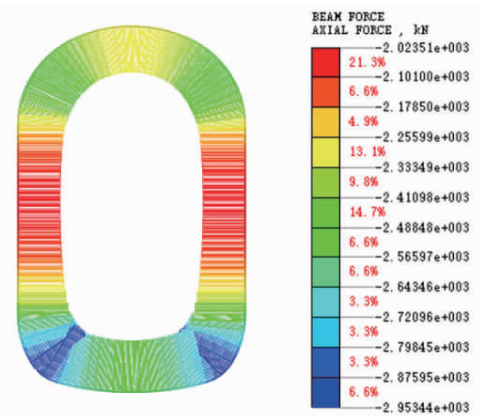


图12 考虑喷射混凝土及锚杆作用的轴力

表4 不同位置处喷射混凝土弯矩及轴力一览

工况	仅考虑喷射混凝土作用时		考虑喷射混凝土及锚杆作用时		
	位置	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN
A		3.9	2 307.5	3.7	2 256.7
B		44.3	2 460.5	26.9	2 347.7
C		44.2	2 428.4	34.2	2 312.7
D		122.2	2 958.9	121.8	2 953.3
E		18.7	2 524.1	18.7	2 527.4

低喷射混凝土轴力值,但降低幅度仅在5%以内,影响不大。(3)对于点A、点E即拱部、仰拱位置而言,是否考虑锚杆作用对于喷射混凝土弯矩值的影响不大。

3.2 锚杆作用分析

由以上分析可知,锚杆在减小围岩塑性区分布范围、围岩水平向位移及喷射混凝土弯矩值方面起到了重要作用,因此有必要了解锚杆轴力值大小及分布,具体情况见图13。

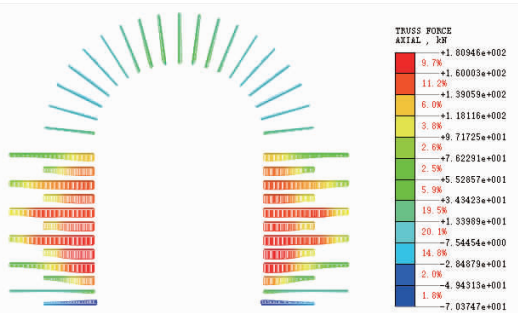


图13 锚杆轴力

由图13可以看出:(1)拱顶中心附近锚杆轴向拉力值较小,拱肩附近锚杆出现了轴向压力值,这说明锚杆发挥的作用很小。经分析认为,起拱线以上(点B位置以上)围岩形成了良好的承载拱,自稳能力强。这与图4揭示的拱顶处围岩几乎未出现塑性区、图8揭示的拱顶处围岩竖向位移小、图11揭示的拱顶处喷射混凝土弯矩值小的结论正好相互吻合与印证。(2)高边墙中部点C位置处锚杆拉力值最大,并向两侧(即点B、点D方向)呈现逐渐降低的趋势,这说明在高边墙范围内的锚杆充分发挥了作用。经分析认为,高边墙围岩在侧向水平围岩压力的作用下向隧道内发生水平位移,这与图3揭示的边墙围岩出现大范围塑性区、图7揭示的边墙处围岩较大的水平向位移、图11揭示的边墙处喷射混凝土较大弯矩值的结论相互吻合与印证。

4 现场监测

为进一步验证有限元分析结果,针对工程案例开展了现场监控量测工作,并将两者的结论进行对比分析。

4.1 围岩塑性区及位移

围岩塑性区范围可以通过多点位移计测得的位移情况间接判断,即位移值较大说明所在位置位于围岩松动区,即潜在的塑性区。为此选取的高边墙点B、点C、点D处测量的围岩内部位移情况见图14。

由图14可以看出,围岩内部位移值自围岩表面向内部呈现逐渐减小的趋势,其中边墙中部C点围岩表面位移值为20.3 mm,位移影响深度范围为5.2 m。两侧B点、D点的围岩表面位移值分别为9.7、10.6 mm,位移影响深度范围分别为3.7、3.9 m。

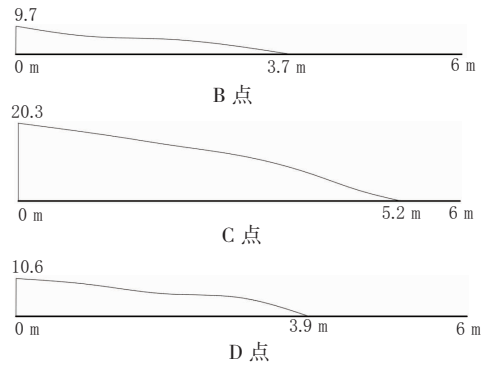


图14 现场监测下围岩内部位移(单位:mm)

以上与数值模拟计算中图3反映的围岩塑性区分布存在着相似性。

围岩位移及水平收敛情况见表5(点位置详见图2)。

表5 围岩位移及水平收敛情况

位置	位移/mm
A(竖向位移)	4.5
B(水平收敛)	19.4
C(水平收敛)	40.6
D(水平收敛)	21.2

通过对比现场实测值表5、数值模拟分析表3可以看出:(1)点A拱顶处的实测竖向位移是有限元计算结果的1.25倍。(2)点B、点C、点D实测水平收敛值的一半即各个点的水平向位移值分别是有限元计算结果的87%、79%、90%。现场实测与数值模拟分析均表明高边墙同样呈现出外凸“鼓肚子”形状,且趋势上是一致的。

4.2 锚杆轴力

现场对高边墙点B、点C、点D点开展了锚杆轴力的测量,具体情况见图15。

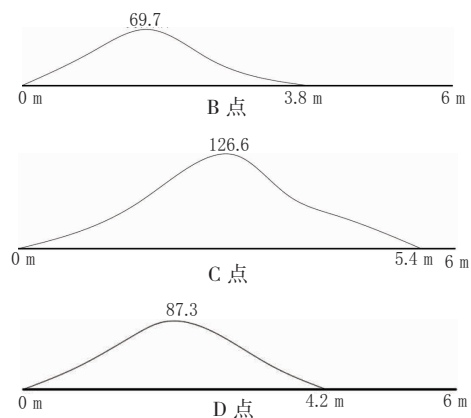


图15 现场监测下锚杆轴力(单位:kN)

将图15与图13进行对比,点B、点C、点D现场监测轴力值约为有限元分析结果的70%、65%、

63%,二者在趋势方面是一致的,即边墙中部C点轴向拉力值最大,向两侧B点、D点逐步减小。

4.3 小结

现场监测数据与有限元分析结果之间存在着一些差异,经分析主要是以下原因:有限元模型中对于围岩假定是均匀的弹-塑性模型,无法模拟围岩复杂的离散性。另外,锚杆与围岩间的接触面单元参数是均匀的,这与锚杆与围岩间摩擦力沿锚杆长度不均匀是存在差异的。但不能否认有限元分析结果得到的趋势是值得借鉴的。因此,尚需通过现场监测进行反馈和修正。

C点锚杆轴力最大值位于锚杆长度中部附近,说明锚杆长度较为合理,而B点、D点锚杆轴力最大值位于锚杆长度中部靠左,说明锚杆长度偏长,尚有优化的余地。

对比图14、图15可以得出,围岩内部位移与锚杆有效长度及轴力值存在如下联系:围岩内部位移越大,则锚杆有效长度越大,轴力越大;围岩内部位移趋近于零时,锚杆轴力趋近于零,锚杆有效长度为锚杆轴力“零点”位置。

5 结论与展望

通过数据模拟和现场监测数据反馈,可以得出如下结论:

(1)高边墙隧道起拱线以上的拱部位置及隅角以下的仰拱位置由于内轮廓形状的“自成拱”效应较好,因此围岩塑性区范围较小,围岩的自稳性较强,这与扁平形式“马蹄”形隧道断面的情况基本一致。

(2)高边墙位置是高边墙断面隧道的“核心”。从高边墙围岩塑性区分布范围较大、围岩水平位移较

大、喷射混凝土弯矩较大等方面可得出这个结论。

(3)高边墙处设置长锚杆可以有效降低高边墙围岩的水平位移,从而提升围岩的整体稳定性。

(4)较之通常采用的扁平式“马蹄”形断面,设计中需增加高边墙位置的预留变形量,施工中加强边墙部位水平收敛及锚杆轴力的监测。

以上结论可作为高边墙断面隧道工程在设计、施工中的一些指导性建议。但是关于锚杆的最优布置间距(如水平间距和竖向间距)、长短锚杆的最优长度组合尚需进一步进行研究,从而达到经济、合理的目的。

参考文献:

- [1] JTG 3370.1—2018,公路隧道设计规范第一册 土建工程[S].
- [2] JTG/T D70—2010,公路隧道设计细则[S].
- [3] 李帆,张强勇,向文,等.高边墙洞室劈裂破坏机制的试验与理论及计算分析研究[J].岩石力学与工程学报,2023(7):1662-1679.
- [4] 何少云,胡紫航,李永林,等.地下厂房围岩应力场特征分析[J].公路,2021(11):271-274.
- [5] 陈敬军.超浅埋暗挖双层隧道下穿城市主干道设计[J].地下空间与工程学报,2021(6):825-833.
- [6] 张军,吴树元,程勇,等.长距离曲线管幕冻结浅埋暗挖隧道工程——港珠澳大桥拱北隧道[J].隧道建设,2019(1):164-171.
- [7] 王勇,王国欣,李金会,等.城市超小净距大断面叠层隧道群施工过程动态模拟与分析[J].现代隧道技术(增刊2),2018(11):1210-1217.
- [8] 吴涛,万利,李振江.大城市道路特大断面双层隧道设计关键技术研究[J].铁道科学与工程学报,2016(7):1372-1378.
- [9] 杨瑞莲,刘文.大型地下洞室高边墙围岩固壁预应力锚固新技术研究[J].隧道建设,2010(8):439-445.
- [10] 谢应坤.地下立交隧道交叉段稳定性模拟研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [11] 邱美君,杨贵源.压力型预应力锚索在大跨度高边墙地下洞室中的应用[J].隧道建设,2007(6):62-64.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com