

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.046

# 水平砂泥岩隧道锚杆支护变形和受力特性研究

张帅军<sup>1</sup>, 种玉配<sup>1</sup>, 齐燕军<sup>2</sup>, 刘书奎<sup>2</sup>

(1. 中铁隧道局集团有限公司勘察设计研究院, 广东 广州 511400; 2. 中国矿业大学 力学与土木工程学院)

**摘要:**为了分析水平砂泥岩隧道锚杆支护效果,以段家坪隧道为例,通过数值模拟和现场监测,对隧道拱顶沉降、锚杆轴力和初期支护与围岩接触压力进行研究。结果表明:锚杆长度达到3 m,锚杆间距达到1.5 m后,继续增加锚杆长度和减少锚杆间距对于隧道拱顶沉降的控制作用不再明显;隧道拱部锚杆轴力较大,隧道拱腰和拱脚处锚杆受力较小;随着水平砂泥岩隧道围岩强度的降低,拱部锚杆轴力不断增大。围岩强度越低,锚杆能够更好发挥控制围岩变形的作用。

**关键词:**水平砂泥岩; 锚杆支护; 数值模拟; 现场监测; 受力

隧道开挖导致应力重分布,容易致使隧道围岩发生变形和破坏。水平层状岩体是隧道施工过程中常见的一种地质情况,层面和节理的存在使得围岩的不连续性和各向异性十分显著,同时使得隧道围岩破坏具有比较特殊的形态,例如拱部平拱、拱顶弯折和离层。锚杆支护是目前隧道施工过程中一种比较常见的支护手段。曹兴松等针对陡倾小交角层状围岩隧道采取非对称非均长布置锚杆,有效地防止围岩发生顺层破坏,控制围岩变形;腾俊洋等提出锚固区范围越大,锚杆对

裂纹的止裂效果越好,锚杆对裂纹的止裂效果与锚固区范围大小有关;常伟针对大梁岭隧道提出锚杆设置范围宜为拱部160°,锚杆长度3.5 m;韩昌瑞等分析了层状岩体顺层偏压的破坏形式和破坏部位,在破坏部位增加锚杆长度以提高衬砌支护强度,改善拱肩部位的剪切破坏情况;胡雄玉等通过相似模型试验得出在层状围岩隧道中,联合支护中的锚杆长度和间距存在最优值,超过最优值之后的锚杆加固效果不再明显。

该文针对段家坪隧道,对水平砂泥岩隧道锚杆支

道影响的数值分析[J]. 铁道建筑,2014(9).

[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016[J]. 中国公路学报,2016(6).

[3] 薛晖,付兵先. 地铁盾构区间下穿广深高速公路立交桥施工技术[J]. 铁道建筑,2013(2).

[4] 毛远凤,沈宇鹏,马建南,等. 地铁盾构下穿高速公路的路面变形特征分析[J]. 铁道标准设计,2013(8).

[5] 张晓军. 盾构隧道浅埋下穿高速公路三维模拟分析研究[J]. 现代交通技术,2016(2).

[6] 毛新颖,陈保国,蒋承轩,等. 盾构下穿近接公路隧道影响规律研究[J]. 公路,2018(4).

[7] 罗刚,潘少康,张玉龙,等. 双线盾构隧道下穿机场高速沉降及变形规律[J]. 长安大学学报(自然科学版),2019(4).

[8] 樊保平. 龙城高速公路湿陷性黄土地基处理技术应用研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文,2013.

[9] 巫裕斌,张梦楠,漆泰岳,等. 高铁列车移动荷载对下穿隧

[10] GB 50090—2006 中华人民共和国国家标准:铁路线路设计规范[S].

[11] 孔祥兵,赵淑萍,穆彦虎,等. 列车荷载作用下冻土路基中的动应力计算研究[J]. 冰川冻土,2013(6).

[12] 潘昌实,谢正光. 地铁区间隧道列车振动测试与分析[J]. 土木工程学报,1990(2).

[13] 潘昌实, G. N. Pande. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报,1984(4).

[14] 张玉娥,白宝鸿. 地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J]. 振动与冲击,2000(3).

[15] 王祥秋,杨林德,周治国. 列车振动荷载作用下隧道衬砌结构动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006(7).

[16] 黄博,丁浩,陈云敏. 高速列车荷载作用的动三轴试验模拟[J]. 岩土工程学报,2011(2).

收稿日期:2020-10-21(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51608520);中铁隧道局集团有限公司科技创新计划项目(编号:2015-13)

作者简介:张帅军,男,大学本科,高级工程师. E-mail:22914955@qq.com

护下隧道围岩变形、锚杆轴力和初期支护与围岩接触压力进行分析,为现场锚杆支护参数动态设计提供一定的指导。

## 1 工程概况

蒙华铁路北起内蒙古浩勒报吉站,终点为江西省吉安市,规划设计输送能力为2亿t/年。段家坪隧道位于蒙华铁路第九标段,位于陕西省延安市宜川县境内,隧道进口里程为DK446+664.02,出口里程为DK457+387.00,隧道全长10722.98m,为单洞双线隧道,最大埋深450m,两处浅埋处最小覆土分别为3.5、14m。隧道洞身围岩以三叠系上统厚层砂岩夹薄层泥岩为主,岩层产状为 $270^{\circ}\angle 2^{\circ}$ ,砂岩层厚30cm,除砂岩以外夹杂的两层薄层泥岩层厚均为10cm,两层薄层泥岩分别分布在隧道拱腰和拱脚位置。

## 2 数值计算

### 2.1 计算模型与参数

采用3DEC建立模型,模型宽100m,高70m。隧道开挖总的宽度为14m,开挖总高度为11m。岩体和初支采用理想弹塑性模型,破坏准则为Mohr-Coulomb准则,初支厚度30cm,锚杆采用CABLE单元。模型前后左右及下边界采用零位移约束条件,上边界设为自由边界。建立的隧道模型见图1。

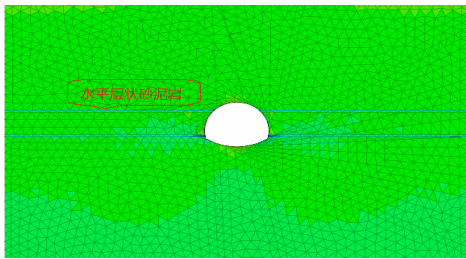


图1 隧道计算模型

计算中通过等效方法考虑钢拱架的参数,围岩、喷射混凝土和锚杆材料参数如表1所示。

表1 隧道围岩及支护材料参数

材料类型	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
砂岩	28	32.00	0.16	13.27	39
泥岩	25	6.10	0.39	1.98	33
$\phi 22$ 锚杆	78	210.00	0.30	—	—
喷射混凝土	24	30.45	0.30	—	—

### 2.2 数值模拟工况

首先把锚杆在隧道拱部 $180^{\circ}$ 内布置,锚杆的间距设为1.5m,只改变锚杆的长度进行模拟,分析了锚杆的长度与隧道围岩稳定之间的联系;同理只改变锚杆的间距,分析锚杆间距与隧道围岩稳定之间的联系。具体模拟工况见表2。

表2 计算工况

计算 工况	锚杆布设 长度/m	间距/ m	计算 工况	锚杆布设 长度/m	间距/ m
1	2.0	1.5	6	3	1.0
2	2.5	1.5	7	3	1.2
3	3.0	1.5	8	3	1.5
4	3.5	1.5	9	3	1.8
5	4.0	1.5	10	3	2.0

### 2.3 计算结果分析

分别统计工况1~5和工况6~10数值模拟中隧道围岩拱顶沉降数据,如图2、3所示。

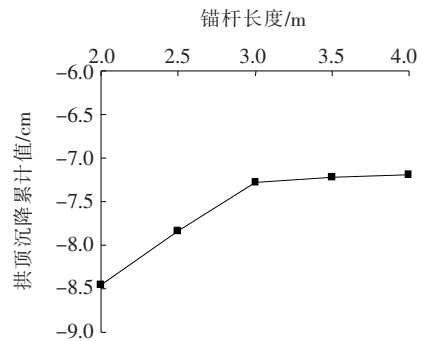


图2 锚杆长度与拱顶沉降关系图

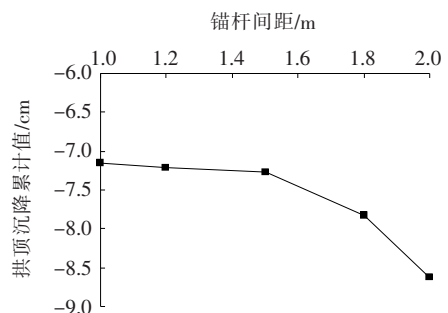


图3 锚杆间距与拱顶沉降关系图

从图2可知:锚杆长度从2m增加到3m过程中,隧道拱顶沉降累计值迅速减小;当锚杆长度达到3m以后随着锚杆长度的增加,隧道拱顶沉降累计值的减小量变得非常小,说明锚杆增加的部分起到的作用很小,即采用3m长的锚杆比较合理。

从图3可知:锚杆间距从2m减少到1.5m过程

中,隧道拱顶沉降累计值迅速减小;当锚杆间距达到 1.5 m 以后随着锚杆间距的减少,隧道拱顶沉降累计值的减小量变得非常小,说明继续减少锚杆间距对于拱顶沉降的控制作用很小,即采用锚杆间距 1.5 m 比较合理。

### 3 现场试验

#### 3.1 现场监测状况

在监测断面布置 9 根锚杆,每根锚杆上设置 3 个轴力计,同时在每一根锚杆位置处理设压力盒,锚杆和压力盒布置如图 4 所示。分别进行有、无锚杆支护,不同锚杆长度支护和不同等级围岩锚杆支护下锚杆轴力和初期支护与围岩接触压力监测。

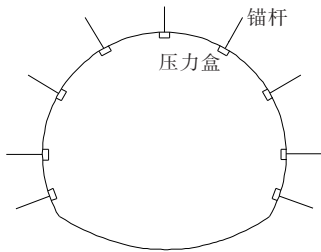


图 4 锚杆与压力盒布置示意图

#### 3.2 监测结果与分析

统计分析设置 3 m 长度锚杆和不设置锚杆情况下的初期支护与围岩接触压力,结果如图 5 所示。

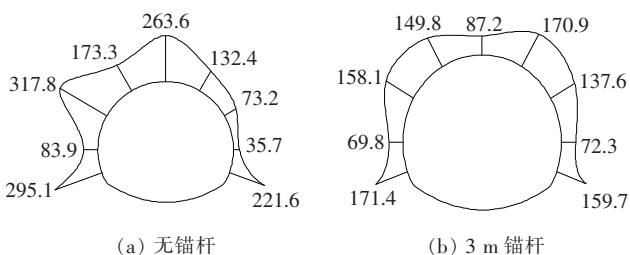


图 5 初期支护与围岩接触压力图(单位:kPa)

从图 5 可知:水平砂泥岩隧道初期支护与围岩接触压力在拱部和拱脚较大,在拱腰部位较小。从接触压力数值上看,在有、无锚杆的情况下围岩与初期支护接触压力有大有小,总体上看,无锚杆试验断面围岩与初期支护接触压力略大。设置 3 m 锚杆下,在水平砂泥岩隧道拱部围岩与初期支护的接触压力明显较无锚杆减小,说明锚杆在拱部承受了一定的荷载,分担了部分围岩压力。

统计分析锚杆长度分别为 2、3 和 4 m 长度下的锚杆轴力,结果如图 6 所示。

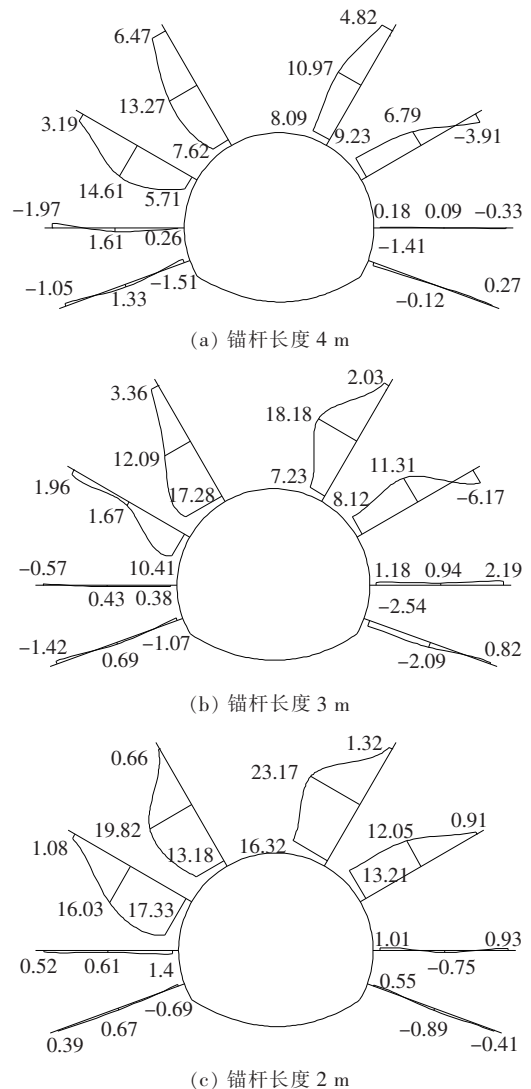


图 6 不同长度锚杆轴力图(单位:kN)

从图 6 可知:水平砂泥岩隧道拱部锚杆均受拉,但受到的拉力均不大,最大值为 23.17 kN,锚杆的最大轴力基本上都在隧道拱部附近,拱腰和拱脚部位锚杆受到的拉力较小,在 1 kN 左右。锚杆个别测力点受压,可能是由于围岩的应力集中引起。2 m 锚杆内端部的拉力较 3、4 m 锚杆少很多,2 m 锚杆对水平砂泥岩隧道围岩的加固作用不明显。

统计分析不同等级围岩下锚杆轴力结果如图 7 所示。

从图 7 可知:水平砂泥岩隧道不同围岩级别下,隧道拱部锚杆拉力较大,拱腰和拱脚部位锚杆受力相对很小,拱腰和拱脚部位锚杆作用相对较弱。Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩拱部锚杆轴力最大值分别为 13.18、18.13、21.97 kN,可见随着围岩强度的降低,锚杆的轴力越来越大,说明围岩强度越低,其自稳能力越差,锚杆对

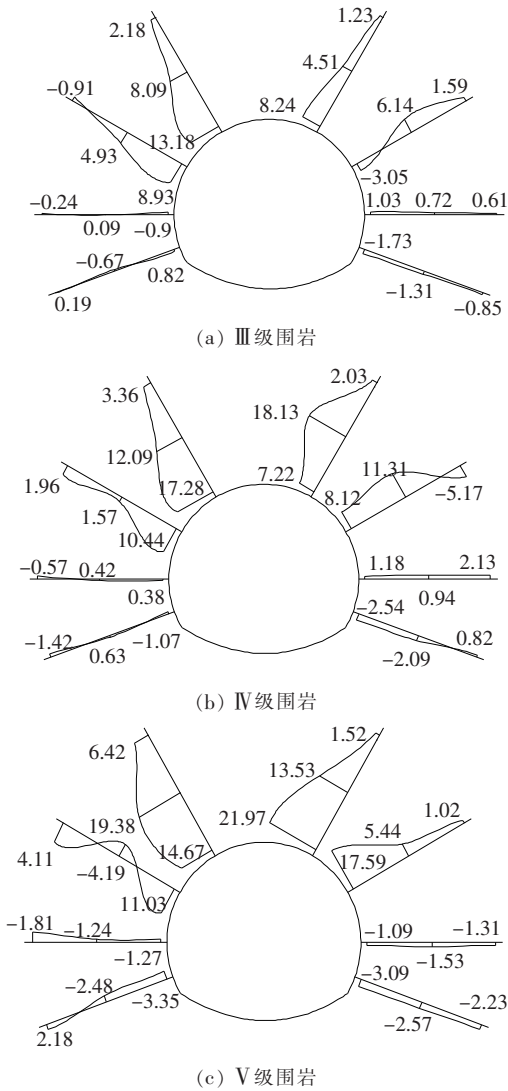


图7 不同围岩级别下锚杆轴力图(单位:kN)

围岩变形发挥的控制作用越大。

## 4 结论

通过对水平砂泥岩隧道开挖数值模拟和现场锚杆轴力和初期支护与围岩接触压力的监测,得到了隧道拱顶沉降随着锚杆长度和间距的变化规律,以及不同锚杆长度及不同围岩下锚杆轴力,主要结论如下:

(1) 随着锚杆长度的增加和锚杆间距的减少,隧道拱顶沉降不断减少。锚杆长度达到3 m,锚杆间距

达到1.5 m后,继续增加锚杆长度和减少锚杆间距对于隧道拱顶沉降的控制作用较小。

(2) 水平砂泥岩隧道拱部锚杆轴力较大,拱部锚杆能够承受一定的荷载,分担部分围岩压力。隧道拱腰和拱脚处锚杆受力较小,在施工中,可以对拱腰和拱脚处锚杆进行优化,少设置或者不设置锚杆。

(3) 随着水平砂泥岩隧道围岩强度的降低,拱部锚杆轴力不断增大。围岩强度越低,锚杆能够更好发挥控制围岩变形的作用。

## 参考文献:

- [1] 黄书岭,王继敏,丁秀丽,等.基于层状岩体卸荷演化的锦屏I级地下厂房洞室群稳定性与调控[J].岩石力学与工程学报,2011(11).
- [2] 李利平,李木才,赵勇,等.超大断面隧道软弱破碎围岩空间变形机制与荷载释放演化规律[J].岩石力学与工程学报,2012(10).
- [3] 张涛,王腊梅.软弱地层中浅埋隧道不同工法开挖的力学特性研究[J].中外公路,2018(4).
- [4] 夏彬伟,陈果,康勇,等.层状岩体围岩变形破坏特征及稳定性评价[J].水文地质工程地质,2010(4).
- [5] 徐国,王猛,高峰,等.大断面地铁车站隧道初期支护参数优化研究[J].中外公路,2019(4).
- [6] 朱训国,陈卓立,赵德深.深埋分区破裂隧道锚杆支护力学机制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2018(4).
- [7] 曹兴松,周德培,刘国强,等.陡倾小交角层状围岩浅埋隧道锚杆支护优化研究[J].地下空间与工程学报,2013(S2).
- [8] 腾俊洋,唐建新,陈宇龙,等.支护结构对层状及软弱岩体隧道支护作用机制[J].岩石力学与工程学报,2018(S2).
- [9] 常伟.高速公路隧道水平层状围岩锚杆支护参数优化研究[J].国防交通工程与技术,2013(2).
- [10] 韩昌瑞,白世伟,王玉朋,等.层状岩体深埋长隧道锚杆支护优化设计[J].岩土力学,2016(S1).
- [11] 胡雄玉,何川,吴迪,等.层状围岩管片衬砌配合陶粒与锚杆的联合支护技术研究[J].岩土工程学报,2018(6).
- [12] 刘银涛,李治国,种玉配,等.深埋碳质板岩隧道采用不同开挖方法时围岩及初期支护变形特征[J].铁道建筑,2019(2).