

松散堆积地层隧道锁脚锚管参数优化研究

唐和青¹,江锡山¹,杨鹏²

(1.中交三航局南京分公司,江苏 南京 210011;2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:为使松散堆积体隧道的锁脚锚管可以充分发挥支护作用,有必要获得锁脚锚管的最优施工参数。该文依托云南华坪—丽江高速公路上的某隧道工程,对其进行数值模拟与现场测试分析,通过对比锁脚锚管以不同参数施工时,支护结构的拱顶下沉与水平收敛情况,探究施工参数对锁脚效果的影响特征与原因。结果表明:在松散堆积体地层中打设锁脚锚管能够有效减小支护结构变形,隧道的拱顶下沉与水平收敛显著减小;在锁脚锚管施工参数中,锚管的打设角度与长度对锁脚效果的影响较明显,打设高度的影响较小。并将研究结论与工程应用相结合,考虑可操作性与经济性,提出了适用于该类地层的最优施工参数。

关键词:隧道工程;松散堆积体;锁脚锚管;施工参数;数值模拟;现场测试

中图分类号:U455

文献标志码:A

0 引言

近年来,随着隧道工程建设的迅猛发展,隧道穿越松散堆积体围岩的情况越来越多。修建于该类围岩中的隧道,由于围岩呈散体结构,成分复杂,稳定性及力学性能很差,受开挖扰动的影响也更明显^[1-4],因此多采用台阶法开挖^[5-8]。在上台阶架设钢拱架后,为避免由于拱脚地基承载力不足或下台阶开挖而出现拱脚过度下沉,常在上台阶拱脚处设置锁脚锚管,并与拱架牢固焊接。锁脚锚管在加固拱脚、减小支护变形方面的有效性,已被多次验证^[9-11]。

然而,由于对锁脚锚杆的承载特性和力学机理方面的研究较少,且不够深入和系统,导致目前锁脚锚管的理论滞后于实际工程,设计时对锁脚锚管的长度、直径、壁厚和下插角等参数的选择,几乎完全依靠经验,其经济性和安全性不得而知。以常见的打设角度为例,不同研究者给出的锁脚锚管下插角的建议值差别较大:有的建议值过小,甚至有悖于工程经验^[12-13];有的建议值为一个较大的范围^[14-15],指导意义较小;有的认为收敛和沉降对应的合理下插角不同,并未真正给出合理值^[16-17]。造成这一现象的

原因是,解析推导采用了不同计算假定,从而得到有差异的计算模型;而数值模拟则由于依托工程的不同(包括围岩、隧道形式、开挖方法等)得出了不同的结果。

松散堆积体地层工程特性较差,锁脚锚管打设方法与参数有别于其他地层,因此有必要针对松散堆积体隧道锁脚锚管施工参数展开研究。本文依托云南华坪—丽江高速公路上某松散堆积体隧道工程,结合数值模拟与现场测试,探究锚管施工参数对锁脚效果的影响规律,并在充分考虑现场可实施的情况下,提出适用于这类围岩的锁脚锚管支护参数与施工方案。

1 工程概况

云南华坪—丽江高速公路沿线广泛分布玄武岩风化坡积体,由于山体风化、冲刷、搬运等作用,松散体堆积在山脚。其中某分离式公路隧道全长2 800 m,有约300 m范围内穿越玄武岩风化坡积体,隧道围岩以稍密状碎、块石及强风化玄武岩为主,节理裂隙发育,岩体破碎,含有数量较多的大体积孤石,属于典型的松散堆积体围岩。隧道开挖采用三台阶分

收稿日期:2021-12-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51778637)

作者简介:唐和青,男,高级工程师.E-mail:2017900682@qq.com

部开挖法,其支护结构如图1所示。

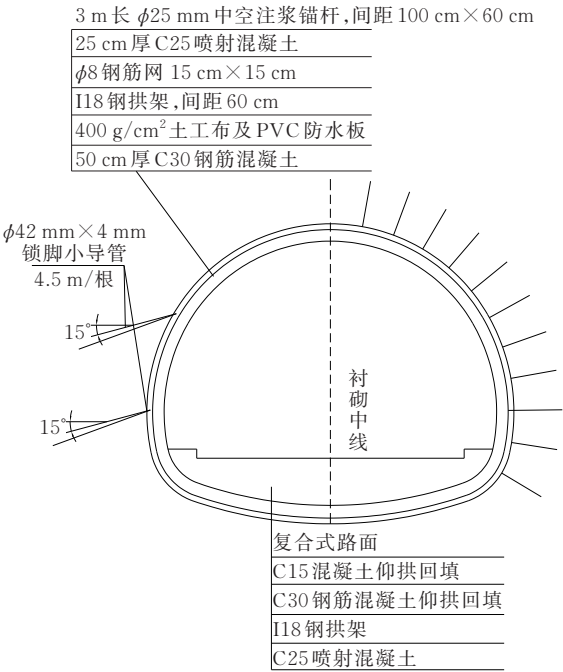


图1 隧道支护结构设计图

2 数值模拟分析

2.1 计算模型

为探究松散堆积体围岩中修建隧道时,锁脚锚管施工参数对其支护效果的影响,采用有限差分软件FLAC进行数值分析,将模型简化为平面应变模型。模拟的目标断面里程为K106+757.9,埋深约为36 m,隧道穿越以强风化玄武岩为主的松散堆积地层。隧道开挖最大跨度为12 m,考虑施工影响范围为该数值的4~5倍,将模型水平方向的长度取为120 m,竖直方向高度为90 m,模型底部边界距隧道底部约45 m。模型的上边界为自由边界,其他边界施加法向位移约束,计算模型如图2所示。

为体现锁脚锚管与普通径向系统锚杆作用的差别,采用FLAC^{3D}中的梁单元模拟锁脚锚管,考虑锁脚锚管的抗弯与抗剪性能,锁脚锚管的弹性模量选取管体与管内水泥砂浆等效后的参数。按抗弯刚度等效时,有:

$$E_m = \frac{E_1 I_1 + E_2 I_2}{I_e} \quad (1)$$

式中: E_m 为按抗弯刚度等效后的弹性模量; E_1 与 E_2 分别为锚管管体和注浆体的弹性模量; I_1 与 I_2 分别为锚管管体与注浆体的截面惯性矩。

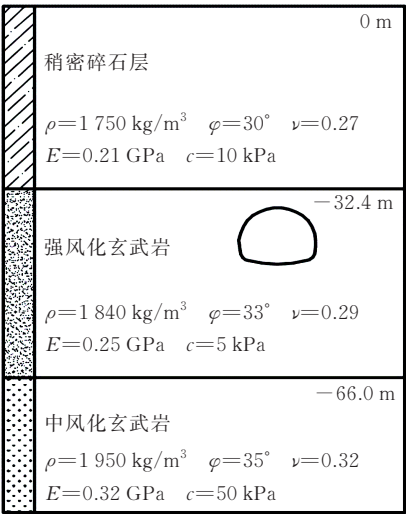


图2 模拟断面的地层参数

计算中采用实体单元模拟隧道初支与二衬,模拟初期支护时将钢拱架与混凝土按刚度折算为等效混凝土,折算方式可参考式(1)。此外,在拱顶120°范围内设有注浆加固区,通过提高加固区土体的力学参数模拟开挖前的超前加固措施。

数值模拟中地层与结构的力学参数分别如图2与表1所示。

表1 数值模拟中的结构参数

支护类型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
折算后初期支护	35	0.3	2 500
二次衬砌	33	0.3	2 500
锁脚锚管	81	0.3	3 900

2.2 计算结果验证

在分析锁脚锚管施工参数对其支护效果的影响前,首先验证该数值模型结果的准确性。按原设计参数设置锁脚锚管,即在每榀钢架距离脚部50 cm处打入2对共4根长4.5 m的热轧无缝钢管,锁脚锚管以15°打入。将计算得到的隧道拱顶沉降、洞室收敛值与按原设计参数设置锁脚锚管的现场实测数据进行对比,结果如表2所示。

表2 数值模拟与现场监测结果对比

项目	拱顶下沉/mm	水平收敛(上)/mm	水平收敛(中)/mm
数值计算	39.50	26.58	34.22
现场监测	49.00	24.50	35.50

由表2可以看出:数值计算得到的拱顶下沉值与现场监测的数据较为吻合,其中拱顶下沉监测值与计算值误差在10 mm以内,水平收敛计算值与监测

值误差均在 10% 以内,一定程度上验证了数值计算的正确性。

3 施工参数研究

3.1 模拟工况

锁脚锚管的设计参数不仅与地层有关,还与隧道断面大小、支护参数、上覆土体厚度等有关。而在某一具体工程中,采用锁脚锚管的尺寸往往是确定的,因此可能影响其支护效果的施工参数主要包括:① 打设高度 h ,如图 3 所示,即锁脚锚管高出钢拱架拱脚的距离,用锚管与拱脚间的拱架弧长衡量;② 打设角度(下插角) θ 即锁脚锚管轴线与水平线的夹角;应注意的是,尽管不同台阶处钢拱架与水平面夹角不同,但根据设计方案及实际施工的情况,各台阶的锚管都以相同方式打设,且锚管打入围岩时与水平面的夹角是影响其承载作用的关键,故计算中将各台阶锚管与水平面的夹角设为相同值;③ 打设长度 L ,即锁脚锚管打入围岩的长度,这里近似看作锁脚锚管的自身长度;④ 打设数量 n ,即打设在钢拱架每侧拱脚的锚管数量。

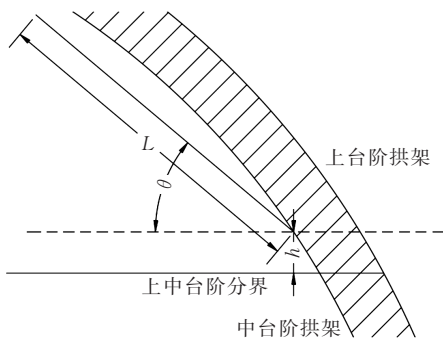


图 3 施工参数示意图

为探究上述参数对锁脚锚管支护效果的影响规律。以设计参数为基础,计算时仅改变某一参数进行分析,工况设置如表 3 所示。考虑到实际工程中,锁脚锚管的数量较为固定,调整时也往往伴随着长度的调整,因此计算时将两参数($n \times L$)同时考虑,设置了 3 种工况。

表 3 数值模拟分析工况

h/m	$\theta/(^\circ)$	L/m	$n \times L/(根 \times m)$
0.25, 0.4, 0.55, 0.7, 0.85	5, 15, 20, 30, 40	1.5, 2.0, 3.0, 4.5	$2 \times 4.5, 3 \times 3.0, 4 \times 2.0$

注:基础工况: $h=0.25\text{ m}$, $\theta=15^\circ$, $n \times L=2\text{ 根} \times 4.5\text{ m}$,基础工况参数为该隧道的设计参数。

3.2 结果分析

(1) 打设高度的影响

图 4 为隧道沉降与收敛随锁脚锚管打设高度的变化情况,水平收敛 1 与收敛 2 分别为隧道上台阶与中台阶拱脚处的收敛值(下同)。

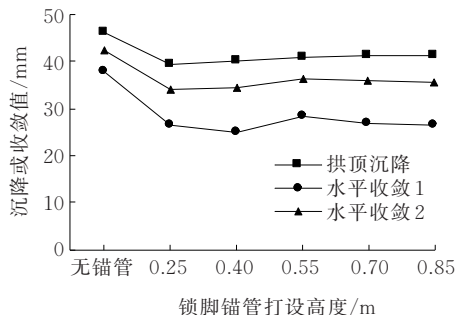


图 4 打设高度对隧道沉降与收敛的影响

由图 4 可知:当锁脚锚管的打设高度为 0.25~0.85 m 时,水平收敛值在一定范围内波动,拱顶下沉值虽有增加的趋势,但最大值与最小值仅相差 1.9 mm。因此打设高度对锁脚锚管的支护效果影响很小,与文献[10]得到了相似的结果。

(2) 打设角度的影响

图 5 为锁脚锚管不同打设角度下隧道的拱顶下沉与水平收敛值。

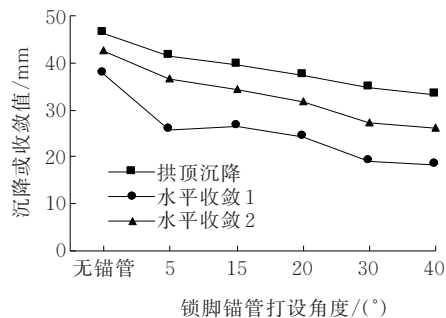


图 5 打设角度对隧道沉降与收敛的影响

由图 5 可知:锁脚锚管的打设角度越大,对隧道的拱顶下沉和水平收敛的控制效果越好。以 40° 打设锁脚锚管时,隧道的拱顶下沉与水平收敛明显小于其他角度。

(3) 打设长度的影响

图 6 为采用不同长度的锁脚锚管时,隧道的拱顶下沉与水平收敛值。

由图 6 可知:当锁脚锚管长度较小时(1.5 m、2 m),锁脚锚管对隧道沉降的控制作用并不明显,当其长度达到 3 m 时,拱顶下沉值已经明显减小,水平收

敛值亦小于前两种工况。当采用4.5 m锁脚锚管时,对隧道变形的改善效果却未明显提升,反而增加了施工难度。总体来看,隧道沉降与收敛随锁脚锚管打设长度增加而减小。但此特征在锁脚锚管长度大于3 m后不明显。

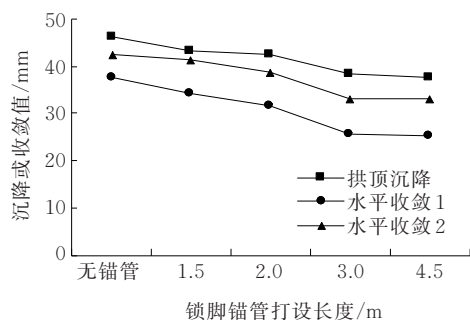


图6 打设长度对隧道沉降与收敛的影响

(4) 数量与长度的影响

根据现场观察,该隧道所处围岩属于松散堆积体地层,围岩中含有较多大体积的孤石,导致锁脚锚管钻进困难,采用较长锚管的施工效率与打设质量都不高。因此尝试在原基础上对其进行改进,实施方案为:将锁脚锚管长度改为3 m,每侧打设3根,或进一步将长度减为2 m,每侧打设4根。

图7为不同施工工况下隧道的拱顶下沉与水平收敛值。

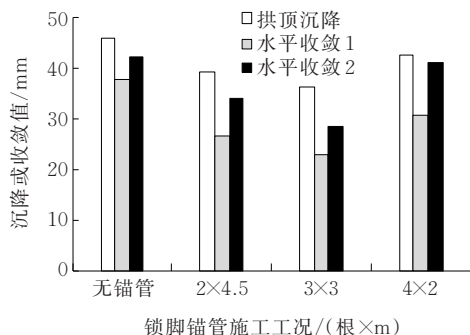


图7 不同施工方案锚管支护效果对比

由图7可知:3根×3 m施工方案对隧道的变形控制好于基础方案2根×4.5 m。如上文分析,打设数量都为2根时,3 m的锁脚锚管效果略好于4.5 m的锁脚锚管,在此基础上增设了1根锁脚锚管,对隧道沉降的控制进一步提升。相比之下,4根×2 m的隧道沉降与水平收敛则略大于基础方案,这是由于长度为2 m(或更短)的锁脚锚管本身对隧道结构变形的控制效果不明显,在该长度下单纯增加打设数量也难以提升支护效果。

4 施工参数优化

了解各类施工参数对锁脚锚管支护效果的影响后,结合现场施工的可操作性,对该隧道的锁脚锚管进行施工参数优化。

4.1 打设角度优化

计算结果显示,支护效果与下插角度有正相关性,锁脚锚管在下插角度为40°时效果最佳。但事实上,若在实际施工中采用40°(或以上)的打设角度存在许多问题,如图8所示。

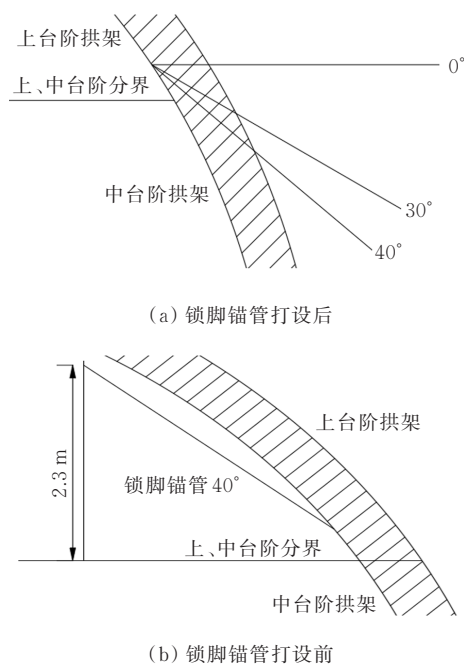


图8 锁脚锚管打设角度过大示意图

由图8可以看出:① 该角度几乎是施工所能实现的最大角度,锁脚锚管的轴线与中台阶边墙处的拱架十分接近。后续使用机械手段开挖时,极易触碰甚至破坏锁脚锚管;② 对于三台阶法开挖的隧道,上台阶的施工空间有限。过大的角度也容易受到上台阶拱架的影响;③ 即使不考虑施工空间而采用40°的下插角,以3 m长的锚管为例[图8(b)],开始打设时需要操作人员在2.3 m的高度上操作凿岩机,非常麻烦。可见,在充分考虑可实施性的情况下,欲使锁脚锚管达到最优角度,可将合理打设角度取30°。

4.2 打设高度优化

由数值计算与现场实施结果可知,锁脚锚管的打设高度对其支护效果影响很小。因此确定高度时

应重点考虑现场实施的难易程度,锁脚锚管位置过高或过低都不利于施工。但根据 3.2 节中对打设角度与高度的分析,打设角度越大,打设高度不宜过大,否则开始打设锚管时操作人员需在较高的位置操作[图 8(b)]。因此该处将打设锁脚锚管的合适高度设为拱脚上方 0.4 m 附近。

4.3 数量与长度优化

如前文所述,锁脚锚管的长度并非越长越好,当打设数量都为每侧 2 根时,4.5 m 长的锁脚锚管不仅支护效果开始降低,且施工难度大、不经济。长度为 3 m 的锁脚锚管对该隧道的支护效果最好,在此基础上将打设数量增加为 3 根时,可保证在不增加钢材消耗的同时获得良好的支护效果。

5 效果验证

5.1 监测方案

通过数值模拟与现场测试,初步获得了适用于该松散堆积体隧道的锁脚锚管施工参数,即在拱架脚部以上 0.4 m 处附近,以 30° 在每侧打设 3 根 3 m 长的锁脚锚管。

为验证上述参数的实施效果,进而提出更合适的施工方案,选取 K106+793.3~K106+813.7(共 20.4 m, 34 个开挖循环)的前半段作为优化段,按优化后的参数设置锁脚锚管,并设置 4 个监测断面,记为断面 1~4。后半段作为对比段,按原设计设置锁脚锚管,设置 4 个监测断面,记为断面 5~8。监测内容为拱顶下沉与水平收敛(包括上、中台阶的拱脚),测量仪器为全站仪,测点布置如图 9 所示。对于每个监测断面,监测至二衬施作前或变形稳定,一般为 25~28 d。这里设置多个监测断面是为了尽可能地减小误差。

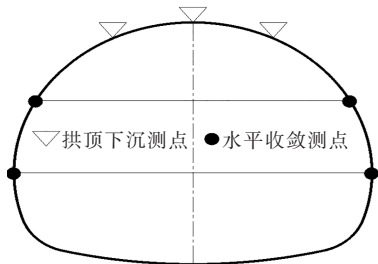


图 9 变形测点布置

5.2 支护效果对比

将优化段与对比段的监测数据整理如图 10~12

所示。其中,拱顶下沉值取 3 个拱顶测点的平均值,中台阶拱脚处的水平收敛测点布设于中台阶左、右部都开挖后,水平收敛值取左、右对称测点平均值。

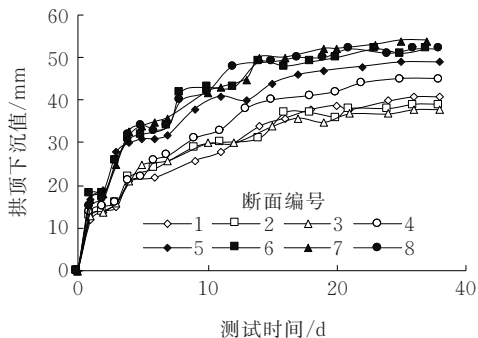


图 10 拱顶下沉时程曲线

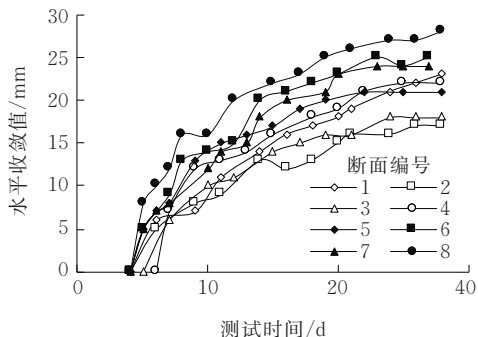


图 11 水平收敛时程曲线(上台阶拱脚)

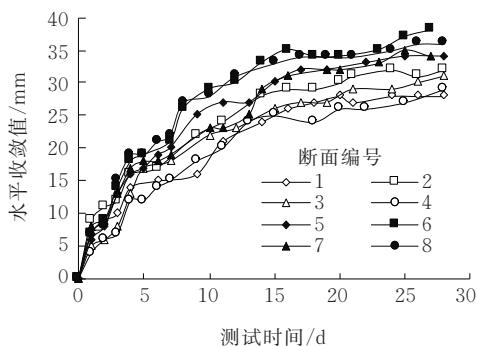


图 12 水平收敛时程曲线(中台阶拱脚)

由图 10 可知:优化段的拱顶下沉值普遍小于对比段。此外,对比断面 5~8 的时程曲线,有若干次明显的增长,而试验断面 1~4 的时程曲线则更平滑,这是由于后续的中、下台阶开挖时,试验断面的下沉幅度更小,说明施工参数优化后的锁脚锚管控制隧道下沉的效果更好。

由图 11、12 可知:按照两组不同参数设置锁脚锚管时,优化断面的收敛程度小于对比断面。但其差距小于图 10 中拱顶下沉曲线的差距,断面 5 中台阶拱脚处的水平收敛量甚至小于断面 1 与断面 4。

为更直观地比较两种施工方案的优劣,将监测

断面沉降与收敛的最终数据集中对比,并分别取各断面的平均值,整理如表 4 所示。

表 4 两种施工方案的支护效果对比

项目	拱顶下沉值/ mm	水平收敛值/mm	
		上台阶拱脚	中台阶拱脚
对比段	51.8	35.5	24.5
优化段	40.8	30.0	20.0
降低幅度/%	21.2	15.5	18.4

由表 4 可知:针对锁脚锚管施工参数的优化有效地减小了初支结构的变形,且由于设置了多个监测断面,降低了施工中其他不确定因素(开挖质量、超前注浆效果等)带来的偶然性,使结论更加可靠。

6 结论

依托某松散堆积体隧道工程,采用数值模拟与现场测试相结合的方式,研究锁脚锚管各施工参数对其支护效果的影响,并优化原有方案,得到如下结论:

(1) 打设高度 h 对锁脚锚管支护效果影响很小,不同工况下拱顶下沉与水平收敛很小。打设角度 θ 则与其支护效果存在明显的正相关关系,当角度达到 40° 时,隧道的变形明显小于其他工况。打设长度 L 对支护效果的影响有如下规律:锁脚锚管长度不大于 3 m 时,支护效果逐渐增加,但并非越长越好。锚管较短时支护效果欠佳,仅增加其数量难以达到满意的效果。

(2) 基于研究结果,结合实际施工的可操作性,提出适用于松散堆积地层隧道的锁脚锚管优化施工参数:在拱架脚部以上 0.4 m 处附近,每侧打设 3 根 3 m 长的锁脚锚管,下插角度为 30° 。采用此方案施工后,隧道拱顶沉降较之前降低了 21.2%,水平收敛降低了 15.5%~18.4%。说明本文提供的优化方案在该工程中行之有效,可在其他类似隧道工程中采用。

(3) 优化除获得了适用于此类工程的锁脚锚管施工参数外,对锚管施工参数的优化方法还可进一步推广至其他类型的矿山法隧道:先通过数值模拟研究,总结出锁脚锚管各施工参数的最优值,并将其组合用于施工优化,再通过监测数据验证其合理性。

参考文献:

[1] 肖建章,戴福初,闵弘,等.松散堆积体围岩隧道施工方

案对比分析[J].沈阳工业大学学报,2014,36(1):106-113.

[2] 胥文博,赖金星,张玉伟,等.松散堆积体围岩隧道围岩空间位移特征分析[J].解放军理工大学学报,2017,18(3):270-276.

[3] 李军.软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术研究[J].中外公路,2020,40(2):174-179.

[4] 周宇.锁脚锚管和仰拱注浆对控制大断面海底隧道位移的有效性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S2):3830-3834.

[5] CUI Y, KISHIDA K, KIMURA M. Analytical study on the control of ground subsidence arising from the phenomenon of accompanied settlement using foot reinforcement side pile[C]//Shanghai, China: Geoshanghai International Conference, 2010:307-312.

[6] FAHIMIFAR A, SOROUGH H. A theoretical approach for analysis of the interaction between grouted rockbolts and rock masses[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2005, 20(4):333-343.

[7] MALMGREN L, NORDLUND E. Interaction of shotcrete with rock and rock bolts—A numerical study[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45(4):538-553.

[8] 杨志强.大断面隧道中三台阶五步法的数值模拟分析与监控量测研究[J].中外公路,2020,40(1):191-195.

[9] 罗彦斌,陈建勋.软弱围岩隧道锁脚锚杆受力特性及其力学计算模型[J].岩土工程学报,2013,35(8):1519-1525.

[10] 张涛.软弱围岩隧道锁脚锚管(杆)支护特性研究[D].西安:长安大学,2011.

[11] 徐晨.软弱围岩隧道中锁脚锚杆支护效果研究[D].西安:长安大学,2010.

[12] 陈建勋,姜久纯,王梦恕.黄土隧道网喷支护结构中锚杆的作用[J].中国公路学报,2007,20(3):71-75.

[13] 陈水和.松散堆积体塌方带穿越施工技术研究[J].西部探矿工程,2014,26(8):283-285.

[14] 郭吉平.软弱碎裂岩体中隧道锚杆支护优化分析[J].中外公路,2016,36(6):188-192.

[15] 胥文博,赖金星,张玉伟,等.松散堆积体围岩隧道围岩空间位移特征分析[J].解放军理工大学学报,2017,18(3):270-276.

[16] YOO C H, SHIN H. Deformation behaviour of tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory and numerical investigation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(4):303-319.

[17] 陈建勋,王超,罗彦斌,等.高含水量土质隧道不设系统锚杆的试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(5):815-820.