

隧道三台阶开挖锁脚锚管倾角优化研究

杨志刚¹, 肖伯强¹, 陈培帅^{1,2}, 杨钊¹, 田洪铭³

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 跨度大、扁平率高的隧道在施工过程中拱顶沉降等控制要求十分严格, 台阶法因其施工效率高、控制隧道变形能力较强等优点而被广泛采用。工程实际中若支护结构封闭较晚, 隧道变形则较难控制, 打设锁脚锚管是控制隧道变形的有效手段, 然而目前关于锁脚锚管施工和设计方面的研究较少。以新疆石人子沟隧道为例, 开展了锁脚锚管倾角优化分析。分析认为, 上台阶锁脚锚管是施工控制的关键, 锁脚锚管最优倾角范围为上台阶 $0^\circ \sim 45^\circ$ 、中台阶 $0^\circ \sim 56^\circ$ 、下台阶 $10^\circ \sim 60^\circ$; 且从控制隧道变形的角度考虑, 倾角在所述范围内应尽可能大, 这与诸多现场经验结论较为吻合, 相关成果可以为类似工程提供参考。

关键词: 锁脚锚管; 三台阶法; 钢拱架; 倾角; 隧道施工

中图分类号: U455

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.16.013

1 研究背景

隧道施工过程中, 由于初支封闭较晚, 极易导致隧道变形过大, 造成严重的工程事故^[1-2]。CD法、CRD法等是实现隧道临时封闭成环的有效施工手段, 然而由于施工效率等方面的影响, 施工过程中更多采用三台阶法, 为预防隧道发生较大变形, 一般采用打设锁脚锚管等方法实现初支临时半闭合, 锁脚钢管具有刚度大、效果好、施工速度快等优点, 在工程中得到了广泛应用^[3-4]。然而关于锁脚锚管适用条件、长度、外径、壁厚和下插角等参数的选择, 几乎是研究空白, 完全依靠施工经验确定。

大量学者通过理论和计算分析, 认为从控制隧道变形角度出发, 锁脚锚管下插角应尽可能小。伍毅敏忽略钢拱架与锁脚锚管的整体结构效应, 将拱架对锁脚锚管的荷载简化为锚管端部的竖向集中力, 通过有限元计算, 认为锁脚钢管的合理下插角应小于 5° ^[5]。张涛通过数值计算, 也得出隧道拱顶下沉和净空收敛均随锁脚锚管下插角度的增大而增大的结论^[6]。雷权有认为从限制围岩变形的角度的出发, 打入角度宜

取 0° , 从支护结构内力的发挥角度出发, 打入角度宜取 30° ^[7]。然而大量隧道工程实践表明, 锁脚锚管倾角越大, 其控制隧道变形尤其是拱顶沉降的效果越显著^[8-9]。

综上所述, 研究学者对于锁脚锚管倾角看法不一, 甚至较多研究成果与施工实践经验背离。本文拟基于有限元数值分析手段, 通过锁脚锚管多倾角工况模拟, 研究隧道变形随锁脚锚管倾角调整的变化规律, 提出设计与施工中锁脚锚管倾角设置的原则, 推动行业对锁脚锚管倾角的认识。

2 工程概况

新疆石人子沟隧道设计为双洞分离式隧道, 左右测设线间距为35 m, 为双线6车道隧道, 隧道围岩为V级。初期支护体系为工字钢拱架, 径向系统锚管, 钢筋网及喷射混凝土。钢拱架之间用纵向钢筋连接, 并与径向锚管及钢筋网焊为一体, 与围岩密贴, 形成承载结构^[10-11]。

本文以左洞为研究对象, 对锁脚锚管倾角进行优化, 左洞地层分布情况如图1所示。施工过程中, 洞口

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 国家重点基础研究发展“973”计划项目(2015CB057906)

作者简介: 杨志刚, 男, 高级工程师, 主要从事隧道桥梁工程施工及管理工作。E-mail: chenpeishuai@foxmail.com

浅埋段采用双侧壁导坑法施工,后续转为 CD 法施工,施工方在后续标段掘进时,拟逐渐由 CD 法向三台阶法过渡。锁脚锚管在稳定钢拱架、控制隧道变形方面非常重要,设计施工图中锁脚锚管打设角度统一为 45°,为方便施工,实际施工过程中拟对锁脚锚管角度进行调整,由 45° 倾角改为 25°。本文依托该工程,对锁脚锚管倾角设置原则进行探讨。

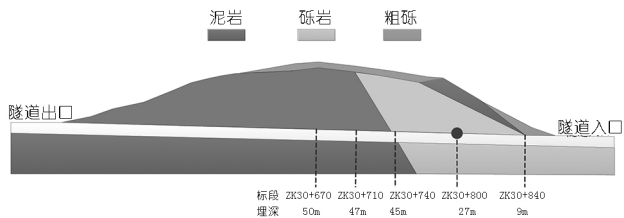


图 1 左洞地层分布

3 锁脚锚管倾角优化分析

以左洞 ZK30 + 740 为例进行优化分析计算,该标段埋深 45 m。计算模型中上覆岩层厚度为 10 m,同时上部施加 35 m 的土重力荷载,线荷载取 770 kN/m。掘进岩层为砾岩,弹性模量取反演值 0.76 GPa。采用 Midas - GTS 软件进行计算分析,岩体采用摩尔库伦本构模型,考虑较为理想的施工条件,注浆锁脚锚管与岩体接触采用嵌入式单元,考虑拱架与锚管牢固焊接,取锚杆与钢拱架节点共用。

对上中下 3 个台阶锁脚锚管倾角进行优化,如图 2~3 所示,计算工况分别选取 11 个锁脚锚管倾角,其中最小倾角取 0°(见表 1),最大倾角为锚杆与钢拱架拱脚相切。

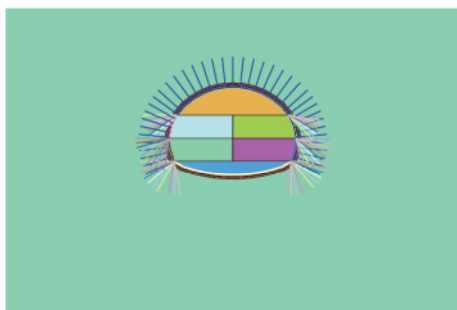


图 2 计算模型



图 3 锁脚锚管倾角工况

表 1 上台阶锚管倾角计算分析

角度/(°)	拱顶沉降/水平收敛/		角度/(°)	拱顶沉降/水平收敛/	
	mm	mm		mm	mm
0	23.869	6.282	30	23.439	6.524
5	23.821	6.310	35	23.345	6.588
10	23.756	6.346	40	23.271	6.640
15	23.682	6.390	45	23.213	6.660
20	23.605	6.432	50	23.115	6.594
25	23.532	6.470			

3.1 上台阶锁脚锚管倾角优化

上台阶分析时,不考虑中台阶和下台阶的锁脚锚管。计算结果如图 4~5 所示,随着锚管倾角的增大,拱顶沉降逐渐减小,水平收敛值先增大后减小(转折点为 45°);隧道拱顶沉降极差为 0.754 mm,水平收敛极差为 0.318 mm;从隧道沉降和水平收敛角度综合考虑,锚管角度在 0°~45° 范围内应尽可能大。

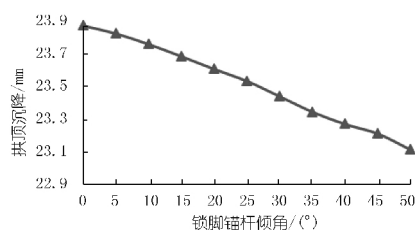


图 4 拱顶沉降随锁脚锚管倾角变化

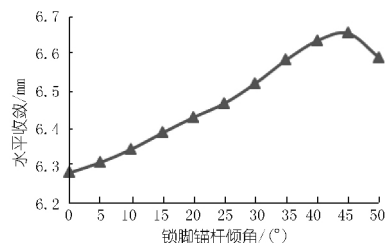


图 5 水平收敛随锁脚锚管倾角变化

3.2 中台阶锁脚锚管倾角优化

中台阶分析时,上台阶锁脚锚管采用 30° 倾角,不考虑下台阶的锁脚锚管。计算结果如表 2 所示,施加中部锁脚锚管后,隧道位移减小;随着锚管倾角的增大,拱顶沉降逐渐减小,水平收敛值先减小后增大(转折点为 56°);拱顶沉降极差为 0.365 mm,隧道水平收敛极差为 0.38 mm;锚管角度在 0°~56° 范围内应尽可能大。

表 2 中台阶锚管倾角计算分析

角度/(°)	拱顶沉降/水平收敛/		角度/(°)	拱顶沉降/水平收敛/	
	mm	mm		mm	mm
0	23.409	6.250	48	23.172	5.874
8	23.384	6.154	56	23.134	5.870
16	23.351	6.060	64	23.084	5.882
24	23.307	5.966	72	23.055	5.950
32	23.265	5.912	80	23.044	6.102
40	23.217	5.882			

3.3 下台阶锁脚锚管角度优化

下台阶分析时,上台阶锁脚锚管采用 30° 倾角,中台阶锁脚锚管采用 48° 倾角。

计算结果如表 3 所示,随着锚管倾角的增大,隧道拱顶沉降逐渐减小,隧道水平收敛先减小后增大(转折点 60°);相对于不设置下台阶锁脚锚管,锚管角度大于 60° 时,锁脚锚管增加了水平收敛;相对于不设置下台阶锁脚锚管,锚管角度小于 10° 时,锁脚锚管增加了拱顶沉降;隧道拱顶沉降值极差为 0.152 mm,水平收敛极差为 0.008 mm;从安全角度分析,锁脚锚管角度应设置为 10° ~ 60°,且倾角应尽可能大。

表 3 下台阶锚管角度计算分析

角度/(°)	拱顶沉降/水平收敛/mm		角度/(°)	拱顶沉降/水平收敛/mm	
	mm	mm		mm	mm
0	23.183	5.864	60	23.093	5.856
10	23.175	5.858	70	23.070	5.878
20	23.163	5.852	80	23.055	5.910
30	23.149	5.846	90	23.042	5.946
40	23.134	5.844	100	23.031	5.984
50	23.113	5.856			

4 锁脚锚管倾角分析结果

由极差分析结果可知:上台阶锁脚锚管倾角对拱顶沉降影响最大,中台阶其次,下台阶最小;中台阶锁脚锚管倾角对水平收敛影响最大,上台阶其次,下台阶最小。考虑到公路隧道跨度较大,拱顶沉降控制为隧道变形控制的关键,且上台阶对拱顶沉降影响最大(见表 4)。因而认为,在施工中应严格保证上台阶 45° 倾角,中台阶和下台阶可以考虑施工方便,适当减小。

表 4 锁脚锚管度计算分析

台阶	拱顶沉降	水平收敛	建议倾角
	极差/mm	极差/mm	
上台阶	0.754	0.318	严格保证 45° 倾角,大致与拱架相切
中台阶	0.365	0.380	可考虑施工方便程度,在 0° ~ 56° 范围取合理值
下台阶	0.152	0.008	可考虑施工方便程度,在 0° ~ 60° 范围取合理值

如图 6 ~ 7 所示,采用锁脚锚管倾角优化值,得出左洞 ZK30 + 740 计算结果为:拱顶沉降值为 23.099 mm,水平收敛值为 6.044 mm。

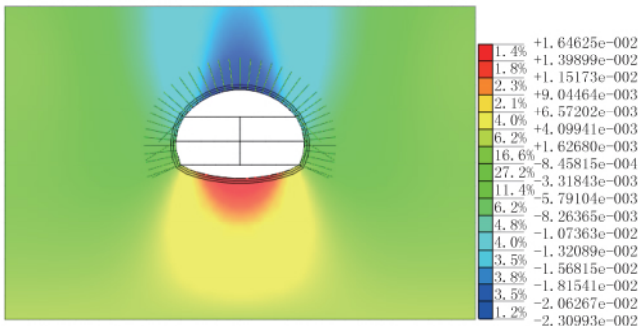


图 6 ZK30 + 710 竖向位移云图(单位: m)

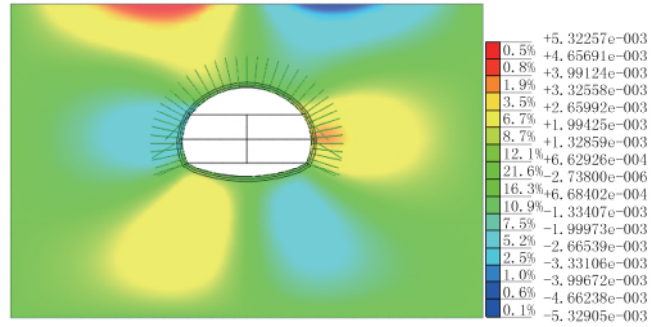


图 7 ZK30 + 710 水平位移云图(单位: m)

5 结论

采用有限元计算分析手段,通过多工况数值计算分析,开展三台阶开挖工法的锁脚锚管倾角优化分析,得出了隧道变形随锁脚锚管倾角调整的变化规律。

(1) 上台阶锁脚锚管角度对拱顶沉降影响最大,中台阶其次,下台阶最小;中台阶锁脚锚管对水平收敛影响最大,上台阶其次,下台阶最小。

(2) 大跨度公路隧道变形控制的关键为拱顶沉降,隧道拱顶沉降随倾角的增大而减小,最优倾角为与拱架相切,但从钻机施工空间角度考虑,可适当减小倾角。

(3) 上台阶锁脚锚管倾角对拱顶沉降影响最大,因而应重点保证上台阶锚管倾角为最优角度,一般应取 45° 或与拱架相切。

参考文献:

- [1] 来弘鹏, 遆甲峰, 张宏光, 等. 浅埋大断面土质隧道下穿明长城施工安全控制技术[J]. 现代隧道技术, 2015(1): 190 - 196.
- [2] 高文学, 孙文龙. 浅埋偏压隧道开挖数值模拟与监测分析[J]. 施工技术, 2011, 3(40): 48 - 50.
- [3] Kontogianni V, PaPantonoPoulos C. Failure at the messioehora tunnel greece[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(3): 232 - 240
- [4] 曾超. 大断面海底隧道异常变形控制措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2170 - 2175.
- [5] 伍毅敏, 吕康成, 徐岳. 软弱地基隧道锁脚钢管承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009(12): 71 - 79.
- [6] 张涛. 软弱围岩隧道锁脚锚杆(管)支护特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [7] 雷权有. 黄土覆盖土、岩接触地层中隧道围岩变形特征及支护技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [8] 黄彬. 大断面黄土隧道土石分界段施工技术[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 139 - 142.
- [9] 丁维利, 赵永明, 初厚永, 等. 浅埋大断面黄土隧道下穿既有铁路施工技术[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(6): 76 - 81.

(下转第 72 页)

Performance evaluation of shotcrete cast by small scale wet spraying machine

NING Fengwei¹, SU Anshuang¹, DING Jiantong², BAI Yin¹, YANG Sen²

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Sinohydro Bureau 7 Corporation Limited, Chengdu 611730, China)

Abstract: To obtain an indoor casting technology of shotcrete that has the closest performance with that of in-situ large scale wet spraying, 9 kinds of fiber reinforced shotcrete of C40 were taken as an example, and the properties of concrete including rebound rate, build-up thickness, setting time, density, compressive strength, flexural toughness and drying shrinkage were tested to compare the two casting methods, the vibrating-molding process and small scale wet spraying. The results indicate that the setting time, density and compressive strength of the specimens prepared through small scale wet spraying were more close to those of in-situ spraying construction compared with vibrating-molding. And the rebound rate and build-up thickness can be tested by small scale wet spraying test, which can be used to represent the shootability of shotcrete.

Key words: shotcrete; small scale wet spraying; vibrating-molding; large scale wet spraying

(上接第 62 页)

[10] 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(8): 46-52. 2004.

(编辑: 胡旭东)

[11] JTG D7-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社,

Dip angle optimization of feet-lock bolt in tunnel constructed by three steps excavation

YANG Zhigang¹, XIAO Boqiang¹, CHEN Peishuai^{1,2}, YANG Zhao², TIAN Hongming³

(1. Technology Center of CCCC Second Harbour Engineering Co., Wuhan 430040, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Highway tunnel has the characteristics of large span and flat rate, so the crown settlement control is demanding in the construction process. The three-step excavation is widely used in tunnel construction because of its high construction efficiency and strong tunnel deformation control capability. If the supporting structure closed late in construction, the tunnel deformation would be difficult to control, and the feet-lock bolt is an effective way to restrain the deformation. However the research on feet-lock bolt is almost blank at present. Taking the Shirenzigou tunnel in Xinjiang as a case, the optimization of dip angle of feet-lock bolt was carried out. The analysis results indicate that the key of construction control is the feet-lock bolt construction in upper step, and the optimal angle range is 0~45° for the upper step, 0~56° for the second step, and 0~60° for the bottom step. In the above angle range, the angle should be as large as possible in view of controlling tunnel deformation, which is in good agreement with many field experiences.

Key words: feet-lock bolt; three steps excavation; steel arch; dip angle; tunnel excavation