

深埋软弱围岩隧道锚杆参数优化数值模拟

胡建敏¹, 尹清锋², 白冰²

(1. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:基于乌鞘岭隧道几种典型断面优化的结果,运用有限差分程序 FLAC^{3D},对支护结构的锚杆参数进一步进行优化,包括锚杆的最优长度、横向间距和纵向间距等。研究表明,隧道的拱顶下沉量随锚杆长度的增加而逐渐减小。隧道的拱顶下沉量和墙腰收敛值随锚杆横向间距或者纵向间距的增加而增大,而且当锚杆横向间距超过 0.8 m 或者纵向间距超过 1 m 后,锚杆的作用就不明显了。

关键词:软弱围岩;锚杆;参数优化;隧道;数值模拟

中图分类号:U45 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2008)05-0072-05

Optimized Numerical Simulation on Anchor Parameters of Deep-buried Tunnel in Soft Rock Mass/HU Jian-min¹, YIN Qing-feng², BAI Bing² (1. Hebei Research Institute of Construction and Geotechnical Investigation Co., Ltd, Shijiazhuang 050031, China; 2. School of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the optimized cross-section shapes of Wushaoling tunnel, the optimization parameters of anchor are analyzed by the finite difference procedure of FLAC^{3D}. These parameters include the optimized length of anchor and the spacing between anchors in length and width of the tunnel. Studies show that the settlement at the arch top of the tunnel decreases with the increase of the lengths of anchors, the settlement at the arch top and horizontal displacement at the side of the tunnel increases with the increase of the spacing between anchors in length and width. Furthermore, the effects of anchor would be destructed when the spacing is greater than 0.8m in width and 1m in length.

Key words: soft rock mass; anchor; parameter optimization; tunnel; numerical simulation

0 引言

锚杆支护是岩土工程和隧道工程中广泛应用的支护形式之一^[1]。锚杆的作用加强了岩体的整体性,提高了岩体的整体刚度,从而也增强了岩体的抗变形能力^[2]。锚杆的作用还会改善锚固区岩土体的力学性状,提高围岩的内摩擦角和粘聚力。即使对于较大的围岩变形,或者锚杆完全处于破碎岩层内,锚杆和破碎岩体仍可形成具有一定承载能力的承载圈。但是,在实际工程应用中,对于不同围岩条件下锚杆支护形式和支护参数的选取,一直是设计和施工中的一大难题。实际上,锚杆支护形式和参数的选取是支护设计的关键因素,是关系到锚杆支护工程质量的优劣和是否安全可靠的重要问题。运用数值计算方法对锚杆支护形式和参数进行优化分析是一种十分有效的方法^[3]。

乌鞘岭特长隧道岭脊地段长 6300 m,最大埋深约 1160 m,岩质软弱。随着施工向岭脊的不断推进,隧道埋深加大,高地应力对隧道的影响也将加剧。隧道开挖后很可能会出现新的软岩流变及由此

引起的隧道变形和大塌方。因此,有必要对隧道深埋地层软弱围岩在高地应力条件下的变形进行研究,以确定在此复杂应力条件下的衬砌结构形式、设计支护参数以及合理的施工步序。

关于乌鞘岭隧道典型断面形状和施工步序的优化分析,已进行了较多的工作^[4]。本文在此基础上,进一步运用有限差分程序 FLAC^{3D}对锚杆长度、锚杆横向间距以及纵向间距进行优化分析^[5~7],并对施工中正面掌子面设置超前锚杆或者喷射混凝土的稳定效应进行研究。

1 计算模型

1.1 工程概况

乌鞘岭隧道为两座单线隧道,隧道长 20.05 km,为我国最长的铁路隧道之一。两座单线隧道线间距为 40 m,纵坡主要为 11‰的下坡。隧道进口高程 2663 m,出口高程 2447 m。

乌鞘岭隧道经过地层主要有第四系、第三系、白垩系、三叠系、志留系、奥陶系,并伴有加里东晚期的

收稿日期:2007-08-22

作者简介:胡建敏(1969-),男(汉族),河北石家庄人,河北建设勘察研究院有限公司高级工程师,地质勘探专业,硕士,从事岩土工程设计、施工及理论分析研究工作,河北省石家庄市建华南大街 58 号, hbkchjm@vip.sina.com。

侵入。岭脊地段地质条件十分复杂,洞身穿越 4 条区域性大断层带。其中,F4 断层为主带,围岩以断层泥砾和角砾为主,角砾的成分主要是砂岩,以安山岩的碎裂岩为主要成分。F7 断层破碎带由泥砾及碎裂岩组成。9 号斜井区段隧道穿越志留系的板岩夹千枚岩。本段软岩种类多、岩性复杂,其主要地质特征表现为:岩体软弱破碎,埋深较大,最大埋深近 1160 m。经综合评估,F4 断层带和 9 号斜井区段侧压力系数为 0.75,F7 断层带侧压力系数为 1.1。在施工过程中,隧道辅助坑道和正洞,特别在 F4、F7 断层带以及 9 号斜井工区正洞志留系千枚岩地层中,初期支护均发生不同程度的挤压破坏,表现为拱顶下沉开裂,拱脚收敛压溃,拱腰内鼓开裂等特征。

与其它岩体相比,乌鞘岭隧道岭脊地段岩体的地质特点如下:(1)地应力高;(2)岩体软弱,岩石单

轴抗压强度 R_c 小,岩体级别较低,一般为 II 级,少数为 III 级;(3)地层侧压力系数接近 1 或大于 1;(4)变形量大(洞壁位移达数十厘米,甚至 100 多厘米);(5)变形时间长,塑性区范围大。

1.2 计算模型

根据典型断面形状优化分析结果,锚杆参数优化计算以 D-9 断面(圆形断面)为例。该断面设计初期支护为网喷 C20 混凝土 20 cm,钢架为 I 16,按 3 榀/2 m 布置,系统锚杆长 4 m,间距为 0.8 m,布置形式为梅花形。二次衬砌为 C25 钢筋混凝土 50 cm。中间预留变形量 10 cm。断面结构形式如图 1 所示。计算模型一共有 6240 个实体单元,7371 个实体单元节点和 4860 个结构单元,5322 个结构单元节点。

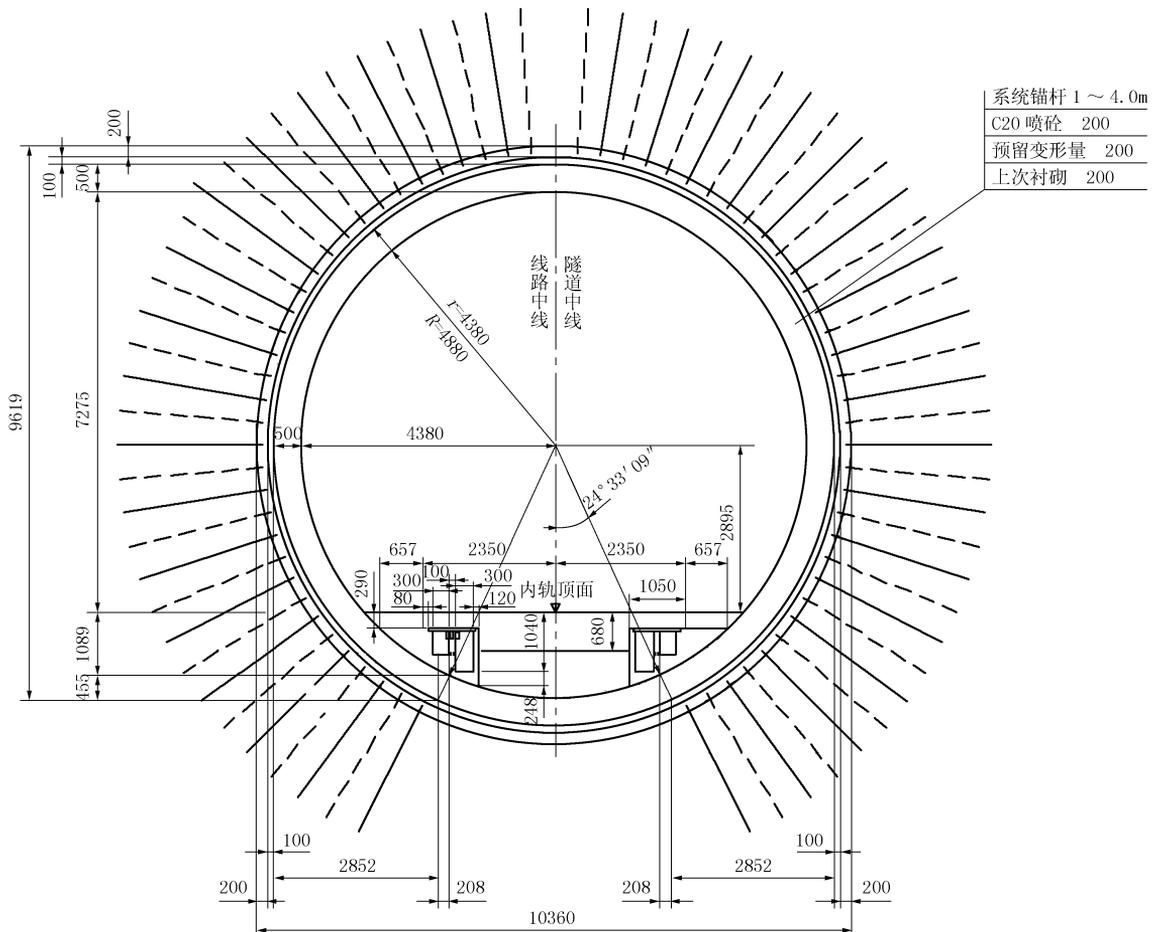


图 1 D-9 断面结构形式

考虑高地应力的影响,模型计算范围顶部取到地面,即 450 m,左右两侧和底部各取 60 m,沿隧道轴线方向取 12 m。

将围岩看作是均质各向同性的弹塑性体,并采用 Drucker - Prager(DP)本构模型。锚杆为弹性体,

并考虑锚杆与围岩之间的接触效应。围岩力学参数为:重度 24.79 kN/m^3 ,粘聚力 60 kPa,内摩擦角 25° ,泊松比 0.33,弹性模量 1100 MPa。锚杆特性参数为:直径 22 mm,弹性模量 210000 MPa,抗拉强度 240 MPa。锚杆与围岩之间的水泥砂浆粘聚力 0.8

MPa,刚度 15 MPa,厚度 15 mm。

D-9 断面数值模拟过程中采用上、下台阶法开挖,台阶长度为 4 m,开挖循环进尺为 2 m,隧道开挖与支护方式见图 2。施工工序如下:上断面开挖,上断面拱墙先施作系统锚杆,长度 4 m,间距 0.8 m × 0.8 m,梅花形布置,再施作 C20 喷砼 20 cm;下断面开挖,下断面边墙施作系统锚杆,长度 4 m,间距 0.8 m × 0.8 m,梅花形布置,再施作 C20 喷砼 20 cm;最后施作 C25 钢筋混凝土 50 cm。

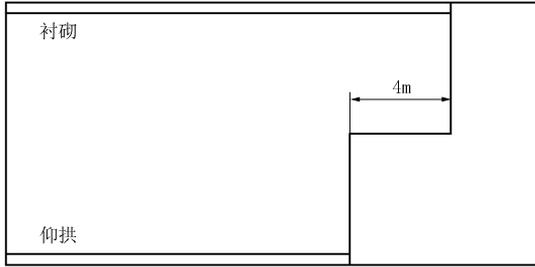


图2 断面开挖方式

2 锚杆参数优化分析

2.1 锚杆长度的优化

对不同锚杆设置长度(如从 1~7 m)的隧道进行了计算,计算结果包括隧道开挖和支护每个阶段的竖向位移、水平向位移、塑性区发展范围以及应力分布特征等。本文重点给出拱顶下沉量以及墙腰收敛值与锚杆设置长度的关系(如图 3 和图 4)。

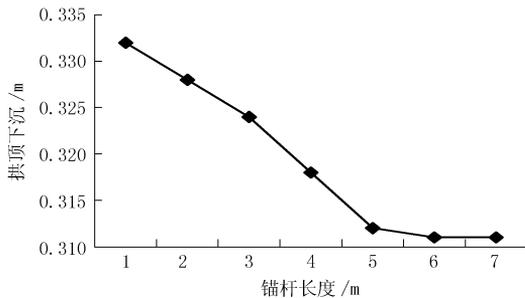


图3 拱顶下沉随锚杆长度变化曲线

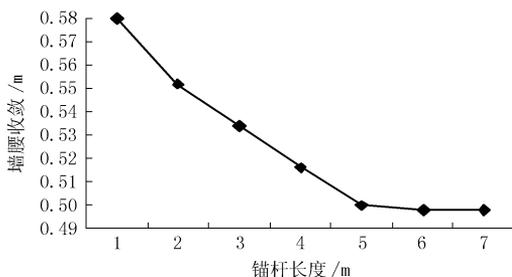


图4 墙腰收敛随锚杆长度变化曲线

图 3 和图 4 表明,隧道的拱顶下沉量随锚杆长

度的增加而逐渐减小。当锚杆的长度超过 5 m 后,锚杆长度的增加对拱顶下沉和墙腰收敛的减小作用已经很小了。计算表明,隧道的围岩塑性区发展范围随锚杆长度增加(如从 1 m 增至 7 m)的变化不是很大,但是塑性区的形状有一定变化。综合围岩位移、应力和塑性区分析结果,锚杆设计长度可取 4~5 m。表 1 给出锚杆长度为 5 m 时,拱顶下沉、墙腰收敛值以及塑性区发展范围的计算结果。

表 1 位移和塑性区计算结果

拱顶下沉 /mm	墙腰水平收敛/mm	拱部塑性区范围/m	边墙塑性区范围/m	仰拱塑性区范围/m
312	500	5.8~6.5	5.8~6.5	5.8~6.5

2.2 横向间距的优化

锚杆横向间距的确定是设计中的一个重要参数。本节选定 0.4~0.2 m 范围内的锚杆横向间距进行计算。图 5 和图 6 给出了拱顶下沉量和墙腰收敛值与锚杆横向间距之间的关系。

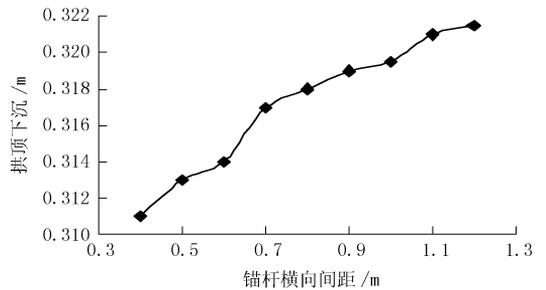


图5 拱顶下沉随锚杆横向间距变化曲线

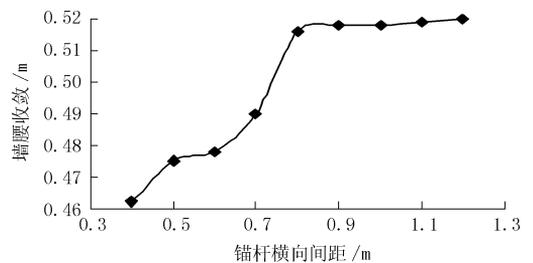


图6 墙腰收敛随锚杆横向间距变化曲线

图 5 和图 6 表明,隧道的拱顶下沉量随锚杆横向间距的增加而逐渐变大。但是,随着横向间距的继续增大,变形增长速率却渐趋平缓,即其变形量趋于某一常数。同样,隧道的墙腰处收敛值也随锚杆横向间距的增大而逐渐变大,增长速率也渐趋平缓。当锚杆横向间距超过 0.8 m 后,再继续增大锚杆横向间距对拱顶下沉量和墙腰水平收敛的减小作用就很小了。计算表明,隧道围岩的塑性区发展范围随锚杆横向间距的增大(如从 0.4 m 增至 1.2 m)变化不大,而塑性区的形状有一定的变化。

根据拱顶下沉量和墙腰收敛值随锚杆横向间距的变化可以看出,锚杆横向设计间距可取 0.7~0.9 m。

2.3 锚杆纵向间距的优化

对不同的锚杆纵向间距(如从 0.4~1.2 m)的隧道支护体系进行了数值模拟计算。图 7 和图 8 给出拱顶下沉量和墙腰收敛值与锚杆纵向间距之间的关系。

图 7 和图 8 表明,隧道的拱顶下沉量随锚杆纵向间距的增大而逐渐变大,当锚杆纵向间距超过 0.9 m 后,拱顶下沉量不再增加。同样,隧道的墙腰收敛也随锚杆纵向间距的增加而逐渐变大。当锚杆纵向间距超过 1 m 后,墙腰收敛值也不再增加,说明

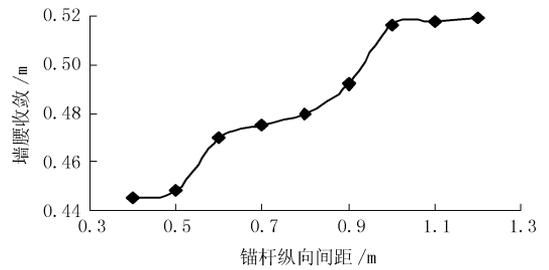


图 8 墙腰收敛随锚杆纵向间距变化曲线

此时的锚杆加固作用已经很小了。可以看出,锚杆纵向间距设计值不宜太大,可取 0.8~1.0 m。

3 超前锚杆对掌子面稳定的影响

3.1 计算断面支护形式

以 D-7-6 断面(椭圆形断面)为例,针对掌子面设置超前锚杆、掌子面喷射混凝土和掌子面未加固 3 种情况,对隧道开挖过程中的掌子面稳定效应进行比较研究。D-7-6 断面结构形式如图 9 所示。模型计算范围顶部取到地面(即 860 m),左右两侧和底部各取 60 m,沿隧道轴线方向取 12 m。计算模型一共有 10800 个实体单元,12621 个实体单元节点和 9124 个结构单元,9758 个结构单元节点。

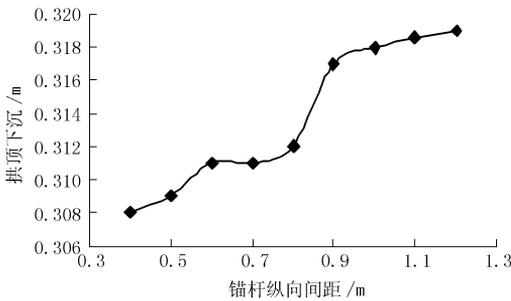


图 7 拱顶下沉随锚杆纵向间距变化曲线

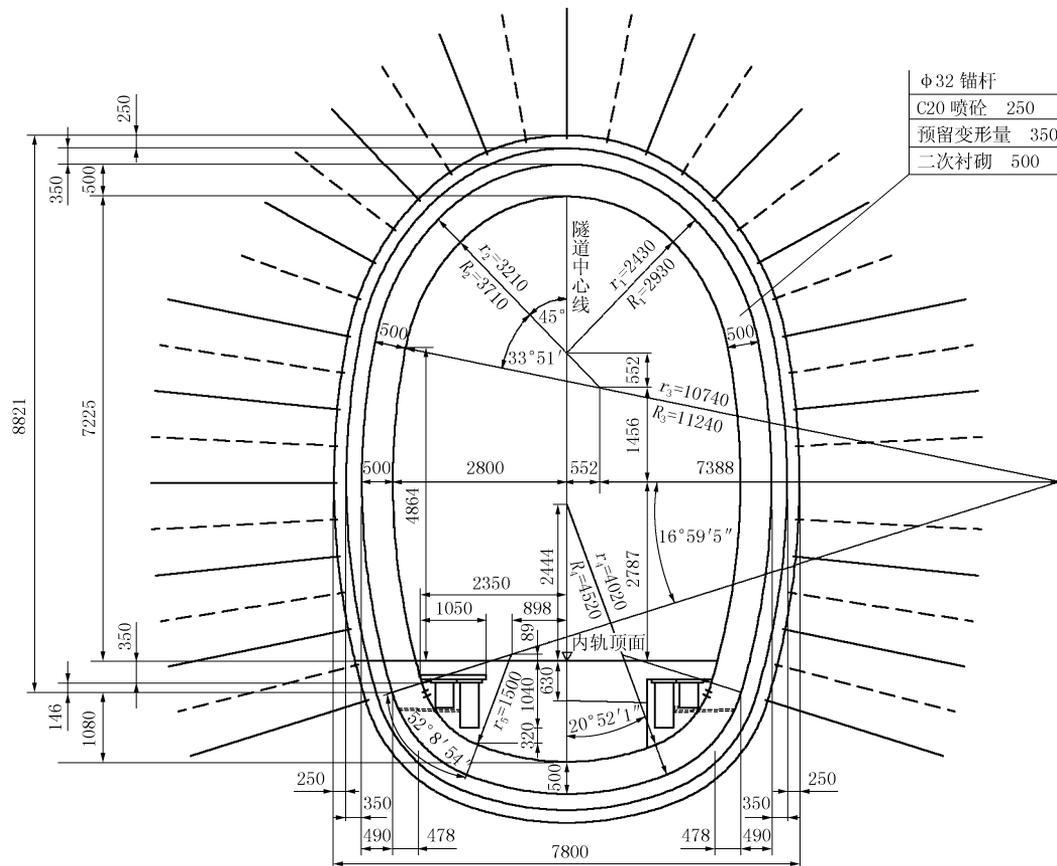


图 9 D-7-6 断面结构形式

D-7-6 断面设计初期支护为网喷 C20 混凝土 25 cm,拱墙设置系统锚杆,直径 32 mm,拱部锚杆长 4 m,边墙锚杆长 6 m,间距为 0.8 m×0.8 m,梅花形布置。拱墙设 Ø8 mm 钢筋网,网格间距为 25 cm×25 cm。全断面设置 1 榀/0.8 m 的 H175 型钢钢架。二次衬砌为 C25 钢筋混凝土 50 cm。中间预留变形量为 35 cm。

D-7-6 断面数值模拟过程采用上、中、下台阶法开挖,台阶长度为 4 m,开挖循环进尺为 2 m。施工工序为:上台阶开挖,上部断面拱部先施作系统锚杆,长 4 m,间距 0.8 m×0.8 m(梅花形布置),再施作 C20 喷砼 25 cm;中台阶开挖,中间断面边墙先施作系统锚杆,长 6 m,间距 0.8 m×0.8 m(梅花形布置),再施作 C20 喷砼 25 cm;下台阶开挖,下部断面边墙先施做系统锚杆,长 6 m,间距 0.8 m×0.8 m(梅花形布置),再施作 C20 喷砼 25 cm;最后施作 C25 钢筋混凝土 50 cm。

3.2 掌子面加固方案优化

对掌子面设置超前锚杆、掌子面喷射混凝土和掌子面未加固 3 种方案进行比较计算。其中,当设置超前锚杆时,锚杆长度为 16 m,间距为 2 m;当用喷射混凝土进行掌子面加固时,混凝土的喷射厚度为 100 mm。表 2 给出了 3 种方案下的计算结果。

表 2 加固方案的比较

加固方案	拱顶下沉/mm	墙腰水平收敛/mm	拱部塑性区范围/m	边墙塑性区范围/m	仰拱塑性区范围/m
未加固	206	920	5.1~5.8	6.2~9.1	5.0~6.5
设置超前锚杆	121	570	4.0~4.9	5.8~8.0	4.9~5.7
喷射混凝土	99.5	374	5.1~5.8	5.8~8.0	4.9~6.5

由表 2 可见,隧道掌子面在加固后(掌子面喷射混凝土、设置超前锚杆),其拱顶下沉量和墙腰水平收敛值比隧道掌子面未加固时要小得多。计算表明,变形趋于稳定的速度也要快很多,而且此时所设置的径向系统锚杆的最大轴力和塑性区发展范围也较小。可以看出,掌子面喷射混凝土的加固效果比掌子面设置超前锚杆的加固效果要好。当然,在具

体加固设计时,还可以通过改变锚杆参数(如长度、直径和间距等)或者改变喷射混凝土的厚度来进一步优化。

4 结论

(1)隧道的拱顶下沉量随锚杆长度的增加而逐渐减小。当锚杆长度超过 5 m 后,再继续增加锚杆的长度对拱顶下沉量和墙腰收敛值的影响已很小。锚杆设计长度可取 4~5 m。

(2)隧道的拱顶下沉量和墙腰收敛值随锚杆横向间距的增加而逐渐变大,但是其增长速率趋于平缓。当锚杆横向间距超过 0.8 m 后,锚杆对拱顶下沉量和墙腰收敛值的减小作用就很小了。锚杆横向设计间距可取 0.7~0.9 m。

(3)隧道的拱顶下沉量和墙腰收敛值随锚杆纵向间距的增大而逐渐变大。当锚杆纵向间距超过 1 m 后,锚杆对拱顶下沉和墙腰收敛的减小作用就很小了。因此,锚杆纵向设计间距可取 0.8~1.0 m。

(4)隧道掌子面在加固后(设置超前锚杆、掌子面喷射混凝土),隧道拱顶下沉量和墙腰水平收敛值比隧道掌子面未加固时要小得多。同时,隧道变形趋于稳定的速度也相对较快,而此时所设置的径向系统锚杆的最大轴力和塑性区发展范围也较小。

参考文献:

- [1] 吴礼舟,黄润秋. 锚杆框架梁加固膨胀土边坡的数值模拟及优化[J]. 岩土力学,2006,27(4):605-608.
- [2] 朱宝龙,杨明,胡厚田,等. 类土质边坡锚固特性的试验研究[J]. 岩土力学,2004,25(12):1923-1927.
- [3] 张友葩,高永涛,吴顺川. 预应力锚杆锚固段长度的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):980-986.
- [4] 尹清锋,白冰. FLAC^{3D}及其在地下空间开挖分析中的一些问题[J]. 西部探矿工程,2005,17(11):1-3.
- [5] 梅松华,李文秀,盛谦. FLAC^{3D}在岩土工程参数反演中的应用[J]. 矿冶工程,2000,20(4):23-26.
- [6] 胡斌,张倬元,黄润秋,等. FLAC^{3D}前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(9):1387-1391.
- [7] 寇晓东,周维坦,杨若琼. FLAC^{3D}进行三峡船闸高边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(1):6-10.

河南地勘 2008 年主打攻深找盲

中国地质调查局网站消息 2008 年,河南地矿局将围绕煤、铝、铁、铜、金、铅、锌等重点矿种和豫西南地区、豫东平原等重要成矿区带,开展“排查摸底,攻深找盲”工作,开拓第二找矿空间;重点加强河南省优势矿种——金、煤、铝土矿、铜及共(伴)生矿的综合调查评价工作,深入研究矿产加工提取技术。

据了解,2007 年,河南省地矿局承担国家地质大调查、危机矿山接替资源勘查和省“两权”价款勘查等项目 374 个。

这个局在老矿山深部及外围开展勘查工作,新发现大型以上煤矿产地 7 处,在 1500 m 以浅新增煤资源量 15 亿 t 以上,储量升级 10 亿 t;许昌泉店铁矿普查、新蔡铁矿预查项目新增铁矿石资源量 7000 万 t 以上,升级铁矿石资源量 5000 万 t 以上;新安县郁山新增铝土矿资源量 2000 万 t 以上。