

软弱围岩隧道塑性区注浆效果研究

刘猛¹, 胡焕校¹, 吴高权¹, 沈增辉²

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

2. 浙江省工程勘察院, 浙江宁波 315500)

摘要: 根据李家冲隧道的地质情况, 采用 FLAC^{3D} 软件对软弱围岩条件下隧道的注浆效果进行了研究。分析了注浆前后围岩塑性区的变化情况以及隧道施工过程中围岩深部位移元随时间的变化情况。数值分析和实际监测的结果皆表明: 围岩预注浆能缩小塑性区范围, 改善围岩的物理力学性质, 可以有效控制围岩的深部位移, 且两者结果相差不大。说明可以运用 FLAC^{3D} 软件对隧道围岩注浆效果进行分析研究。

关键词: 隧道; 注浆; 塑性区; 深部位移; 数值模拟

中图分类号: TV543.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)05-0201-05

Research on grouting effect of plastic zone of tunnel with soft and weak rock

LIU Meng¹, HU Huanxiao¹, WU Gaoquan¹, SHEN Zenghui²

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Zhejiang Engineering Investigation Institute, Ningbo 315500, China)

Abstract: According to the geological situation of Lijiachong tunnel, the paper studied the grouting effect of tunnel with soft and weak surrounding rock by use of FLAC^{3D} software, analyzed the change of plastic zones of surrounding rock before and after grouting and the change of deep displacements with time during the construction of tunnel. The results indicated that pre-grouting can narrow the range of plastic zone, improve the physical and mechanical properties of surrounding rock and also effectively control the deep displacements of surrounding rock. The difference of the results gotten by numerical analysis and practical monitoring is not great. The FLAC^{3D} software can be used to study the grouting effect of surrounding rock.

Key words: tunnel; grouting; plastic zone; deep displacement; numerical simulation

穿越围岩破碎区的浅埋隧道, 由于围岩本身破碎松散的性质, 决定了本身自承能力差的特点^[1], 隧道在这种条件下开挖往往会引起较大的位移。为了减小引起的位移可以通过采取围岩注浆预加固技术, 改善围岩性质, 减小施工过程中产生的深部位移, 保证施工过程中的安全。陈兰云等^[2]采用注浆技术加固隧道围岩后, 从注浆理论出发, 建立了注浆围岩的力学模型并进行数学分析, 同时给出了隧道注浆控制方法和检测结果。刘长武等^[3]通过实验室测试分析和现场工业性试验研究, 其结果表明浆液在岩体结构面中凝结后对结构面进行充填加固, 提高了结构面的粘结力和内摩擦角, 增强了工程岩体抵抗外力破坏的能力。罗平等^[4]通过建立空间岩体裂隙模型, 并利用数值模拟程序分析研究了裂隙网络的注浆情况。安刘生^[5]研究表明通过地

表预加固措施, 可改善围岩物理力学性能, 提高围岩的自稳性, 缩小围岩松弛区范围; 超前注浆可加固充填坍塌体, 封堵地表水下渗通道。由于注浆的效果直接关系到隧道开挖过程中的安全与围岩的稳定与否, 本文通过 FLAC^{3D} 软件进行数值模拟^[6-7], 结合监测结果, 对注浆前后隧道围岩的稳定性、物理力学性质及深部位移进行了研究。

1 工程概况

李家冲隧道位于长沙市岳麓区莲花镇, 全线均为浅埋, 最大埋深左线位于 ZK147 + 100 处, 埋深 35.69 m, 右线位于 YK147 + 120 处, 埋深 39.68 m。隧道经过区域上方有一 500 kV 高压电线塔, 塔高 27 m, 塔基中心线位于隧道 ZK147 + 103 左 13 m。铁塔至隧道区域出露的地层自上而下为第四系粉质

收稿日期: 2013-04-16; 修回日期: 2013-05-03

作者简介: 刘猛(1991-), 男, 河南南阳人, 硕士, 从事岩土工程、地质勘测方面的研究工作。

通讯作者: 胡焕校(1968-), 男, 浙江慈溪人, 教授, 博士后, 从事地质工程、土木工程等方面教学科研工作。

粘土(厚约 50 cm),板溪群五强溪组变质砂岩夹砂岩板岩,岩体破碎,节理较发育,其中整座隧道主要位于板溪群五强溪组岩层中,围岩类别为 V 级围岩。

计算结果表明,隧道开挖对铁塔基础有影响,塔基基础底部会因开挖而分布有塑性区。又由于地层的复杂性,难以用公式确定浆液扩散半径^[8],所以通过现场注浆试验,对各参数进行调整,确定扩散半径为 1.5 m。本次采用水泥-水玻璃双液注浆,水泥为 42.5 普通硅酸盐袋装水泥。注浆时水玻璃主要作为速凝剂使用。注浆材料及参数如表 1。

表 1 注浆材料及参数

%, MPa

水玻璃			水灰比			灌浆压力	
水泥用量百分比	浓度	模数				过程压力	终止压力
5.00	35Be	2.4	1:1	0.8:1	0.6:1	0.5~1.0	1.5~2.0

注: 1. 水灰比按先稀后浓的规律逐渐变化; 2. 设计注入率为 10%, 单孔注浆量 $Q = 0.38 \text{ m}^3/\text{m}$; 3. 注浆时采用自上而下, 压入式分段注浆; 按先外圈后内圈、分序注浆的原则进行施工。

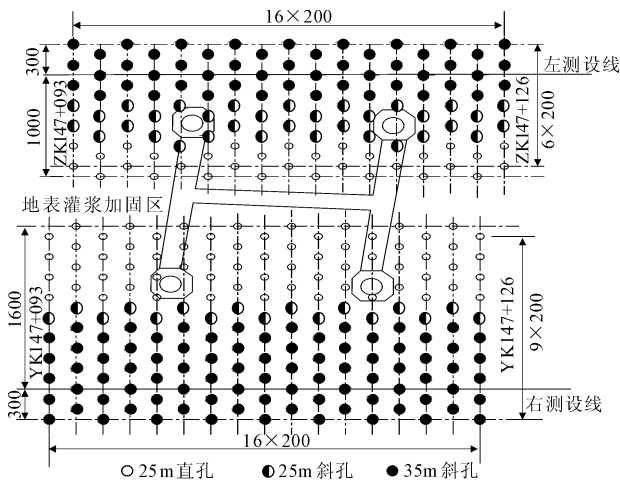


图 1 隧道注浆平面示意图

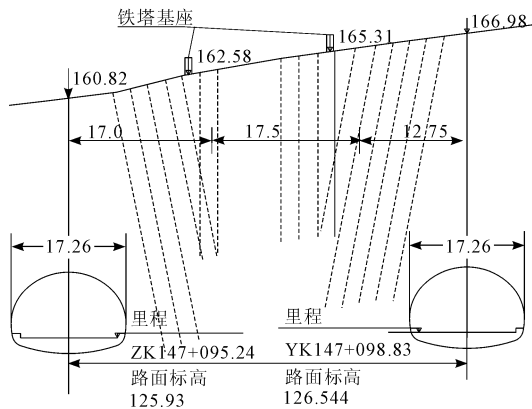


图 2 隧道注浆剖面示意图

因为计算的结果显示塑性区范围较广,所以为了减小塑性区范围,且保证隧道施工过程中的安全及围岩的稳定,因此在确定了注浆材料及参数的基础上,选取高压铁塔 4 个塔基围成的矩形区域进行注浆加固处理。注浆分左右洞 2 个区进行,左右两洞横向宽度均为 19 m,纵向长度均为 33 m,注浆孔按 $2.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 梅花形布置,孔深根据隧道围岩覆盖层厚相应调整,以控制注浆总量及注浆管不深入隧道开挖轮廓为准。隧道注浆平面及剖面示意图见图 1 和图 2。

分析软件进行模拟,计算模型选取高压铁塔中心所在的隧道横断面。整个模型长 176 m,左边高 87 m 和右边高 95 m,宽度取单位宽度 1 m,划分网格后总单元为 1 912 个。围岩材料模型采用 Mohr - Coulomb 弹塑性模型;隧道的衬砌均采用弹性本构模型;注浆后的地层采用提高岩土体弹性模量及 c 、 φ 值后的 Mohr - Coulomb 弹塑性模型来模拟。塔基采用桩单元模拟,考虑最不利组合情况结合工程设计资料得到单桩最大下压力为 $P = 360 \text{ kN}$ 。根据之前的研究其材料力学参数^[9]如表 2 所示。

表 2 材料力学参数 GPa, kg/m^3 , kPa, ($^\circ$)

材料	E	ρ	μ	c	φ
围岩	0.8	2000	0.3	160	30
注浆后围岩	1.2	2100	0.4	500	40
初衬混凝土	28.0	2200	0.2		
二衬混凝土	18.0	2500	0.2		
铁塔桩基础	30.0	2500	0.2		

为了使计算结果更合理可靠,左右边界取距隧道两洞均大于 3 倍洞跨的距离,底部边界取距隧道底部仰拱大于 3 倍洞径的距离。模型边界上,两侧位移边界条件按水平方向固定,限制水平移动;下侧位移边界为固定边界,限制水平移动和垂直移动;上侧取为自由边界。隧道及周边围岩选用六面体渐变放射状网格,地表岩层为楔形体网格,其它则为六面体网格。数值模拟网格划分见图 3,塔基桩单元模拟见图 4。

数值模拟分两部分进行:第一部分,岩体在天然

2 数值计算分析

采用基于三维显式有限差分法的 FLAC^{3D} 数值

稳定状态下对其进行隧道开挖,达到平衡时对围岩塑性区及围岩位移进行数值分析;第二部分,对岩体进行注浆处理达到预期效果后对其进行隧道开挖,达到平衡时对围岩塑性区及围岩位移进行数值分析。

数值分析结果如下:注浆前围岩的塑性区分布

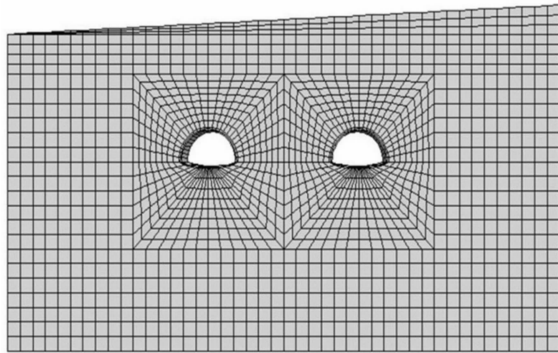


图 3 数值分析网格划分图

面积明显较大,而注浆后,部分塑性区消失,成为弹性区域,说明注浆对于改善围岩的物理力学性质起到了一定作用,能减少隧道施工对围岩位移的影响,可以提高铁塔塔基的稳定性。如图 5 和 6 所示。围岩注浆前后,隧道开挖所引起水平位移变化如图 7 和 8 所示。

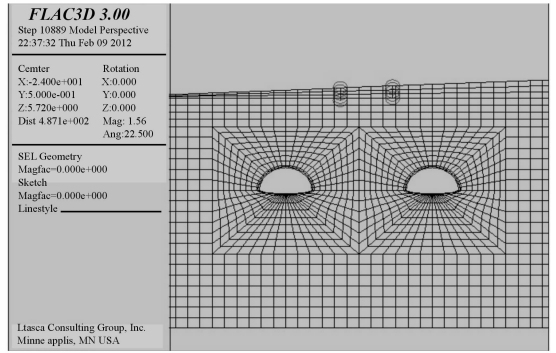


图 4 塔基桩单元模拟图

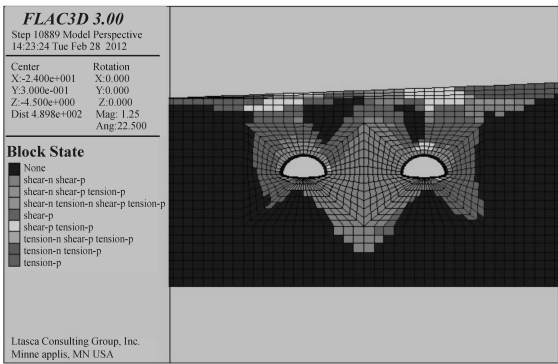


图 5 注浆前围岩塑性区分布图

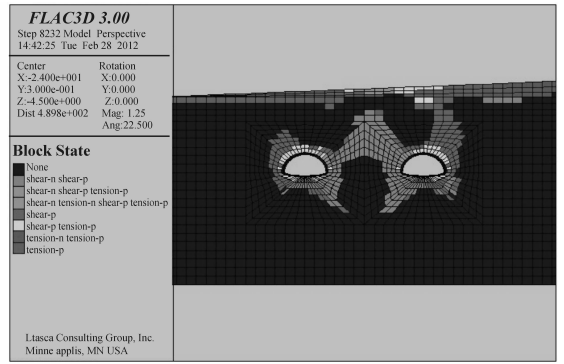


图 6 注浆后围岩塑性区分布图

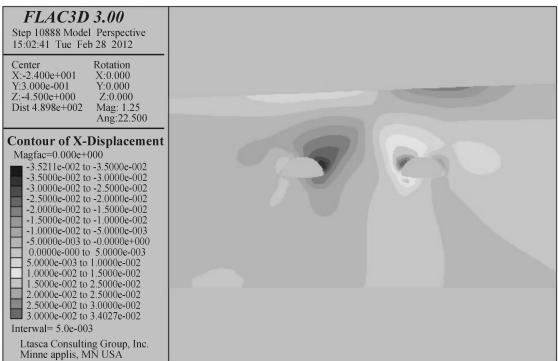


图 7 注浆前隧道围岩水平位移云图

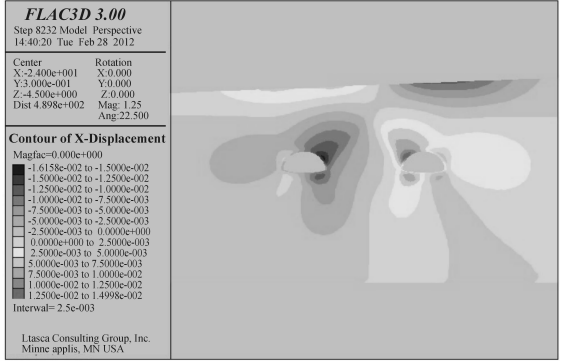


图 8 注浆后隧道围岩水平位移云图

从注浆前后围岩的水平位移变化云图可以看出,两个洞室左侧和右侧的水平位移方向相反,左侧水平位移方向向右,右侧水平位移方向向左。隧道左右两侧的水平位移要明显大于左侧,右洞左侧的水平位移要明显大于右侧,隧道两侧的最大位移未注浆时分别为 3.52、3.40 cm,注浆后则分别为 1.61、1.49 cm,相

比之下分别减少了 54.2% 和 56.2%。由此可见,围岩进行注浆处理可以很大程度上改善岩体性质,提高隧道开挖过程中岩体的稳定性。

对隧道断面周边位移进行监测。在隧道左右两洞断面设置监测点,每一百步记录一次数据,计算终止条件采用 FLAC^{3D} 默认收敛标准进行位移监测,位

移随时变化曲线见图9、10。从两图中可以看出,用FLAC^{3D}软件模拟隧道周边位移收敛情况,前期周边位移收敛情况变化较大,后期逐渐趋于稳定状态。图9表明,围岩注浆前,隧道两洞的周边位移累计分别达

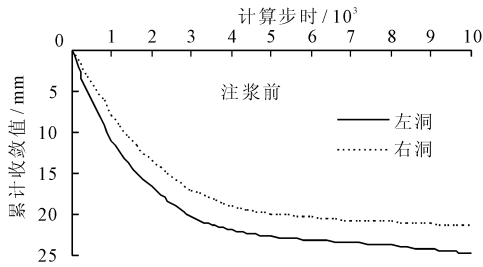


图9 注浆前周边位移时程曲线

到了左洞 24.81 mm,右洞 21.51 mm;图10表明,注浆后累计水平位移值分别为左洞 15.71 mm,右洞 14.63 mm;注浆前后效果提升了左洞 36.7%、右洞 32.0%,可见注浆后围岩稳定性得到了很大的提高。

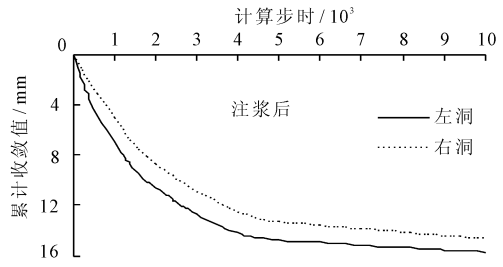


图10 注浆后周边位移时程曲线

3 实际工程监测

隧道监控量测的目的是掌握围岩的实时动态,对围岩稳定性作出正确评价,为工程的信息化工建设提供依据,确保工程安全高效地进行。隧道开挖前,运用声波测试对围岩的加固效果进行了检测。本次声波检测采用跨孔声波测试法,在注浆区靠近铁塔处设置两组4个声波测试孔,测试孔孔深25 m,孔距2.3 m,按十字形布置。检测时接收器需水平同步提升,每0.2 m纪录一次数据,通过比较注浆前后声波数值变化,进行注浆效果分析。该区域注浆前后各检测孔的声波曲线如图11、12所示。

从图中可知,岩体在注浆前后,波速曲线的起伏状态基本相同,声波数据没有明显缺失,在整个孔段都比较完整,说明浆液已经有效地填充于岩体的孔隙和裂隙。注浆后岩体的声波速度较注浆前有显著提高。A组注浆前声波速度平均值为2 177 m/s,而

注浆后为2 506 m/s,较注浆前提高了15.1%;B组注浆前声波速度平均值为2 214 m/s,而注浆后为2 567 m/s,较注浆前提高了15.9%;表明围岩预注浆能很好的改善软弱围岩的物理力学性质。

隧道开挖过程中,对围岩的深部水平位移进行了观测。观测判定标准如下:当位移速率大于1 mm/d时,此时的围岩处于急剧变形状态,隧道在施工时应加强支护;当速率在0.2~1.0 mm/d之间变化时,需加强对围岩的监测,并做好加强支护的准备;当速率小于0.2 mm/d时,表面围岩基本处于稳定状态。如果遇到高地应力,岩溶地层或者挤压地层等不良地质环境,则需要具体情况具体分析,制定合适的判别标准。

本次观测选用的仪器为JMZX7000综合测试仪,分别在铁塔的左右侧设置2个监测孔,孔深分别为I号孔32 m和II号孔35 m,具体监测数值(X方向)如图13、14所示。

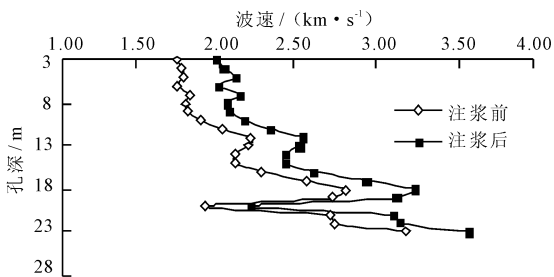


图11 A组声波测试曲线图

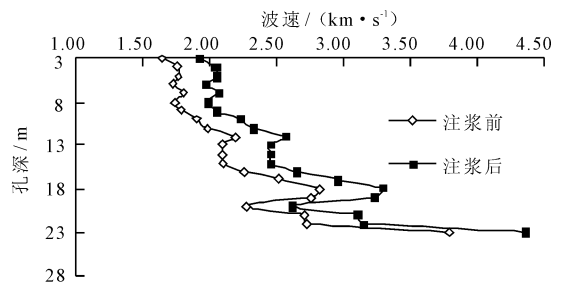


图12 B组声波测试曲线图

从图中可知,I号孔和II号孔的最大累计水平位移量分别为4.05、3.90 mm,孔口段位移相对较大,随着孔深而减小。围岩累计水平位移量大部分产生在2010年11月至12月份,造成这一现象的原因可能为隧道在开挖时,围岩没有完全固结,在自重应力作用下产生的。2011年1月至4月,累计水平

位移量不足1.5 mm;2011年5月至6月累计水平位移量仅为0.5 mm,说明在隧道施工期间,岩体是稳定的,施工过程中的安全性能得到保证。

对隧道周边位移的观测,本次采用隧道收敛计监测,监测断面的周边位移时程曲线如图15、16。

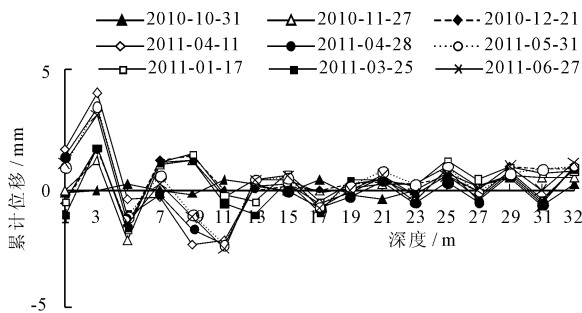


图 13 I 号孔 X 方向累计位移 - 深度曲线图

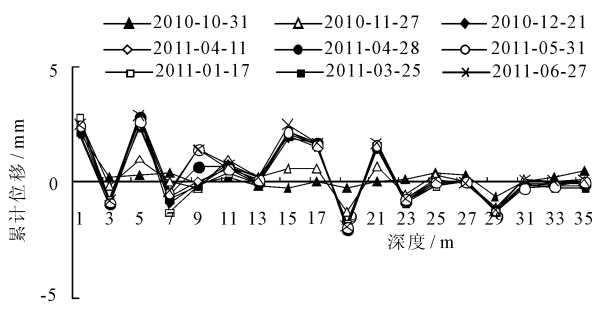


图 14 II 号孔 X 方向累计位移 - 深度曲线图

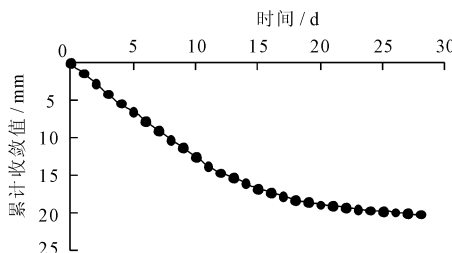


图 15 ZK147 - 110 周边位移时程曲线

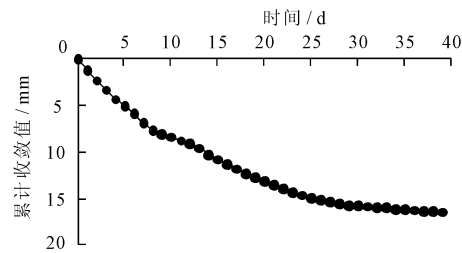


图 16 YK147 - 140 周边位移时程曲线

由图中可知,两断面周边位移的变化趋势大致相同,隧道右洞累积周边位移值要小于左洞,左洞收敛值为 20.11 mm,右洞收敛值为 16.39 mm。前期围岩位移变化值较大,左洞在第 21 d 位移变化速率为 0.19 mm/d,小于 0.2 mm/d,表面围岩处于稳定状态,右洞周边位移则在第 27 d 趋于稳定。对比数值模拟计算结果,可以发现数值模拟在注浆前后周边收敛值前期变化很大,到后期变化很小基本趋于稳定状态,而实际监测结果显示隧道前期周边收敛值的变化曲线相对数值模拟的要平缓些,且隧道周边位移收敛模拟值左洞为 15.71 mm,右洞为 14.63 mm,模拟值比实际值要小。不过模拟显示,注浆后的周边位移收敛值明显减小与实际情况相吻合,可见用 FLAC^{3D}模拟隧道周边位移收敛是具有一定的可行性的。

4 结 语

- (1)对即将开挖的隧道进行围岩预注浆,能有效地改善围岩物理力学性质。
- (2)隧道在开挖过程,由于围岩应力的释放会使岩体内部产生位移,对围岩深部的位移监测是不可避免的;可以采用 JMZX7000 综合测试仪等仪器进行监测,并采用与隧道周边位移监测相结合的手段。
- (3)通过对围岩深部位移的监测,可以为信息施工提供必要的依据,有助于施工过程的安全控制,可以预防不必要的安全事故。

(4)FLAC^{3D}软件应用于隧道围岩注浆效果分析,其模拟结果和实际情况相吻合,对于隧道围岩注浆后的设计和施工具有指导意义。

参考文献:

- [1] 余 健,何 川. 软弱围岩段隧道施工过程中围岩位移的三维弹塑性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):623 - 629.
- [2] 陈兰云,胥月稳,王 杰,等. 注浆技术加固滑坡区隧道围岩的分析研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2761 - 2765.
- [3] 刘长武,陆士良. 水泥注浆加固对工程岩体的作用与影响[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(5):454 - 458.
- [4] 罗平平,朱岳明,赵咏梅,等. 岩体灌浆的数值模拟[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):918 - 921.
- [5] 安刘生. 隧道洞口施工地表预加固技术及应用[J]. 北京工业大学学报,2007,33(3):278 - 282.
- [6] 闫春岭,丁德馨,崔振东,等. FLAC 在铁山坪隧道围岩稳定性分析中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(3):499 - 503.
- [7] 刘 波,韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2005:5 - 25.
- [8] 任永胜,张志耕. 隧道浅埋破碎带地表注浆预加固技术[J]. 内蒙古公路与运输,2009(4):35 - 37.
- [9] 胡焕校,吴高权,沈增辉. 浅埋大跨隧道穿高压铁塔的注浆效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):85 - 88.