

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3825-06

基于优势面理论的隧道控水与模拟分析

喻 军, 童立元, 刘松玉, 汤劲松

(东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 利用优势面理论对断层导水进行分析, 并结合降雨渗流的条件进行了数值模拟。探讨了特定条件下围岩中渗流场的分布规律, 模拟了改变围岩注浆圈的厚度和渗透系数的大小对涌水量的影响。结果表明, 改变注浆圈的厚度对涌水量影响小, 注浆圈渗透系数影响很大, 而且在断层处产生汇水作用, 控制注浆圈渗透系数在 10^{-8} m/s 以下可以有效地防水。该控水理论可以为隧道水害的预测与治理提供新思路。

关 键 词: 降雨入渗; 渗流; 防水; 数值模拟; 断层; 隧道; 优势面

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Simulation and analysis of controlling water in tunnel based on preferred plane theory

YU Jun, TONG Li-yuan, LIU Song-yu, TANG Jin-song

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Preferred plane theory is used to analyze fault to lead water; and numerical simulation of seepage for rainfall infiltration is employed to explore distribution of seepage field of surrounding rock under extra condition. It is simulated that water volume is changed with the value of the coverage and permeability index of grouted surrounding rock to control leakage volume. The results show that grouted coverage not almost influenced on result while permeability index largely influenced on it; and it is found that fault has an accumulating water role. As if permeability index of grouting surrounding rock is controlled lower than 10^{-8} m/s, the effect of waterproofing can meet the need of construction and use of the tunnel. The conclusion can present a new idea to predict and cure flood of tunnel.

Key words: rainfall infiltration; seepage; waterproofing; numerical simulation; fault; tunnel; preferred plane

1 引 言

优势结构面理论^[1]是罗国煜教授基于谷德振的岩体结构控制论^[2-3]发展起来的, 并植根于这一理论取得可喜进展。它在隧道围岩控水控稳分析方面有突出的优点, 如降雨后出现涌水, 可以通过寻找导水优势断层, 采取相应的控水措施; 雨水控稳的研究, 主要集中在两方面: 一方面用统计分析寻求降雨与失稳相关性规律; 另一方面研究雨水入渗引发失稳的物理过程并建立定量的分析模型^[4-5]。

对于浅埋隧道而言, 地表土体松散, 岩体破碎, 渗透系数较大, 在暴雨作用下, 涌水量较大, 并且容易失稳, 所以运用优势面理论和数值模拟相结合对隧道涌水和稳定性分析具有重要意义。

2 工程概况

茅山隧道位于江苏省镇江市句容县境内南丘陵山区, 本地气候湿润多雨。茅山断裂横穿其间, 由东隧道和西隧道两部分组成, 设计采用双洞分离式双向 6 车道方案, 平均超过 60 % 穿过 V、IV 级围岩, 岩体破碎, 稳定性差。

茅山东隧道上行和下行全长分别为 245 m 和 268 m; 茅山西隧道上行和下行全长分别为 452 m 和 582 m。隧道上下行线最小净距为 34.35 m。隧道衬砌断面采用三心圆拱圆弧形连接的形式, 衬砌内轮廓净宽为 15.65 m, 净高为 10.48 m; 隧道最大开挖跨度为 17.15 m, 最大开挖高度为 11.98 m, 形状扁平; 而且 80 % 以上的隧道埋深在 50 m 以下, 最

收稿日期: 2008-04-08

基金项目: 江苏省交通科研计划项目资助 (No. 04Y046)。

第一作者简介: 喻军, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事隧道及地下工程的研究工作。E-mail: yujunsunny@163.com

浅处不超过 2 m, 是典型的浅埋隧道。

茅山隧道洞口衬砌结构, 结合地形、地质条件设置明洞, 采用削筑式洞门, 洞身段均按新奥法原理进行设计, 采用复合式衬砌。设计中考虑充分发挥围岩的自承能力, 以锚杆、喷射混凝土(或者聚丙烯纤维混凝土)、钢筋网和型钢拱架等联合组成初期支护, 以保护围岩和提高围岩的自承能力, 允许围岩产生有限的变形, 以便减薄衬砌厚度、保证施工安全。在初期支护与二次衬砌之间敷设土工布加 EVA 防水卷材作为防水层, 防止地下水渗入隧道内。在软弱破碎的 V、IV 级围岩地段, 辅助施工措施采用超前锚杆或超前小导管注浆加固的方式, 稳定地层, 确保施工安全^[7]。

3 基于优势面理论的导水分析

超浅埋段断层与非断层处在强降雨情况下渗涌水量的对比分析表明, 断层破碎带将成为隧道渗涌水的集中通道, 同样土岩交界面或节理裂隙密集带也具有同样效应。但据优势面理论, 并不是所有的断层都是优势的, 只有具备了多种导水优势因素的断裂才是工程中最需要注意的。而且隧道工程实践表明, 绝大多数突水事件往往是原始地质条件下并不富水、也不导水的断裂, 在开挖扰动下变形活化形成“人工活化导水地质优势面”而引起的。

导水(富水)地质优势断裂判定, 首先要进行导水优势特征及其指标分析, 在此基础上进行综合量化分级。优势面理论有时间优势指标、断裂性质优势指标、储水(导水)空间(规模)优势指标、岩体级别优势指标、补给优势指标、第四系覆盖层厚度优势指标。

3.1 时间优势特征

断层破碎带有其自身的演变历史, 在不同阶段, 其活动特点不同。断裂面本身也在不断演化。断裂形成愈早, 其断裂面胶结愈好, 往往“愈合”, 断裂带导水性差; 而断裂形成愈新, 断裂的切割性与连通性愈好, 充填物少, 断裂带胶结差, 导水(富水)性强。根据这一规律, 可以按照构造断裂的形成时间给出相应的分值, 来达到对控水的时间优势特征的量化评价。时间优势指标如表 1。

3.2 断裂性质优势特征

张性断裂一般是导水和富水的; 扭性断裂次之; 而压性断裂一般是不导水。张性断裂一般张开程度较大, 断裂面粗糙不平, 充填物疏松, 空隙发育, 透水性和含水性较强; 压性断裂是受强烈挤压作用形成的, 闭合性好, 破碎带物质多为压碎岩、

强烈片理化和糜棱岩化的粉碎性物质) 易风化断层泥), 透水性和含水性较差; 扭性断裂的情况要复杂一些, 由于扭裂面常较为光滑, 闭合程度高, 充填物受碾磨而较细, 透水性差。然而, 扭性断裂面大多倾向陡立, 且低序次的张性断裂发育较多, 易于接受地表水的补给和地下水的垂直入渗, 经强烈的冲刷和溶蚀作用, 使裂隙张开程度较好。因此, 有时扭性断裂面的导水性能不亚于张性断裂面。另外, 在断裂复合部位, 其导水性增加, 因而, 其突水危险性也大为增加。断裂性质优势指标如表 2。

3.3 储水(导水)空间(规模)优势特征

储水导水空间是三维概念, 与断裂带延展长度、切割深度和破碎带宽度之间有良好的相关关系, 因此, 可用破碎带宽度作为评价指标。断裂储水(导水)空间优势指标如表 2。

表 1 时间优势指标评价
Table 1 Time preferred index value

断层地质年代	胶结状态	时间优势指标值
印支期	很好	0.1
燕山早期	好	0.3
燕山中晚期	一般	0.5
喜山期 (Q ₂ 以前)	差	0.8
喜山期 (Q ₂ 以来)	很差	1.0

表 2 断裂性质及断裂储水(导水)空间优势指标评价
Table 2 Preferred index value of fracture, restoring water(leading water)space

断裂性质	优势指标值	破碎带宽度 / m	R ₁
张性	1.0	0.5~2.0	0.1
张扭	0.8	2.0~5.0	0.3
扭性	0.6	5.0~10.0	0.5
压扭	0.4	10.0~15.0	0.7
压性	0.2	>15	1.0

3.4 岩体级别优势特征

断层两侧的岩石性质直接决定着断层充填物的岩性及结构, 并控制着断层带的宽度、破碎程度及裂隙的发育程度, 从而影响着断层带的导水性和富水性。断层两侧为 I~IV 级脆性或可溶性岩石时, 如中粗砂岩、石灰岩等, 断层带破碎严重, 裂隙发育, 易导水、富水; 两侧为 V、VI 级软弱塑性岩层时, 如泥、页岩, 断层带破碎较少, 充填好, 导水性弱或不导水, 也不含水; 断层两侧一软一硬时, 断层带一般充填较好, 导水性较弱, 坚硬岩层一侧, 往往裂隙较发育, 含水性较强。断层两侧岩体级别 I~II 级优势指标值 R₂ 为 1.0; III 级为 0.8; IV 级为 0.5;

V 级为 0.3；VI 级为 0.1。

3.5 补给优势特征

即使是新构造断裂，且具有规模优势和岩性优势，真正富水与否，还要看其是否具有补给优势：丰沛的补给水量和较高的压力。茅山隧道具有超浅埋的特征，结合其水文地质环境分析，茅山隧道补给优势指标建议如表 3 所示。

表 3 补给优势指标
Table 3 Making up preferred index

补给方式	优势指标值
基岩裂隙水、上层滞水	0.1
强降雨补给	0.3
小洪水补给	0.5
地下承压水补给	0.8
附近河流湖泊等地表水补给	1.0

3.6 第四系覆盖层厚度优势指标

在垂直方向上地下水的赋存可分为入渗带、径流带和滞流带。由于茅山隧道为浅埋～超浅埋隧道，最大埋深不足 50 m，有相当长的段落埋深在 10 m 以内，地下水主要赋存于覆盖层滞流带中内。地下水的埋深优势可用表 4 评价。

表 4 覆盖层厚度优势指标
Table 4 Preferred index of the depth of coverage strata

厚度 / m	覆盖层厚度优势指标
20	0.2
15	0.4
10	0.6
5	0.8
2	1.0

根据对各种优势指标的量化分析，该断裂的导水（富水）程度可用 I_f 量化评价：

$$I_f = \alpha_1 I_1 + \alpha_2 I_2 + \alpha_3 I_3 + \alpha_4 I_4 + \alpha_5 I_5 + \alpha_6 I_6 \quad (1)$$

式中： $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 分别为时间、性质、规模、岩性、补给、埋深优势指标权重因子，分别取 1.3、1.2、0.8、1.0、1.8、0.6。根据 I_f 的估算值，可将断裂的富水程度分为 4 类，如表 5 所示。

根据上述导水优势断层判别方法，对茅山东西隧道洞内各断层破碎带、土岩交界面的控水（导水）优势指标综合值进行了计算，并提出相应的工程对策。计算断层优势指标如表 6 所示。

4 计算模型

在降雨初期，渗流场是一个动态的、随时空变化的场^[4-5]。随着时间推移，逐渐趋于稳定，但降雨初期，隧道内渗漏水较小，为了模型的简化，可以只考虑渗流场趋于稳定时的阶段，降雨强度大于入渗量，即积水模型。

采用理查德（适用于均质土）方程，对实际情况做一定的简化和假设，采用数值解法，控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] = C \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

式中： H 为总水头； t 为时间； C 为比水容； k_x 、 k_y 、 k_z 为 x 、 y 、 z 方向的导水率。用有限元对上式进行离散，有

$$C \frac{dH}{dt} + KH = P \quad (3)$$

其中 $K_{ij} = \sum_e K_{ij}^e$ ， $C_{ij} = \sum_e C_{ij}^e$ ， $P_i = \sum_e P_j^e$ 。

单元对渗流矩阵的贡献为

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) d\Omega \quad (4)$$

式中： Ω 为积分域； N_i 、 N_j 为形函数。

单元对水容矩阵的贡献为

$$C_{ij}^e = \int_{\Omega} c N_i N_j d\Omega \quad (5)$$

单元给定水流边界的载荷项（ q 为入渗强度）

$$P_i^e = \int_{\Gamma} q N_i d\Gamma \quad (\Gamma \text{ 为边界}) \quad (6)$$

时间域用向后差分离散：

$$(C^{(n+1)/2} + \Delta t K^n) H^{n+1} = \Delta t P^n + C^{(n+1)/2} H^n \quad (7)$$

式中 $C^{(n+1)/2}$ 为 $\frac{n+1}{2}$ 时刻的比水容矩阵。

5 概念边界模型

边界条件的确定是正确解决问题的关键之一，与边坡相比，隧道开挖的边界条件更难确定，模型两侧边界条件很难确定，需要假设，即与模型外不发生水交换，如图 1。

表 5 断裂的导水（富水）程度分级
Table 5 Class of the leading water degree in fault

级别	数值	危害程度与工程对策
I 导水(富水)优势断裂	>5.0	原则上以避开为主；若必须穿过，则要坚持“先探后掘”，采用预注浆治水；对探水钻孔的导水危险性要有预案；开挖工作面接近和穿过断层一定距离内，都要对断层面的活动和断裂带内地下水的运动进行专门监测。
II 导水危险性断裂	5.0~3.5	首次揭露该断层时，要坚持“先探后掘”，若工作区内已有揭露，可视揭露情况而定，必要时进行预注浆治水；对于开挖面积很大，尤其当工作面推进方向与断层走向一致时，要对开挖过程中断层面的活动和断裂带内地下水的运动进行专门监测。
III 导水可能性断裂	3.5~1.0	当开挖面积很大，尤其当工作面推进方向与断层走向一致时，要对开挖过程中断层面的活动和断裂带内地下水的运动进行必要的监测。
IV 不导水断裂	<1.0	一般不需采取专门的探测和监测措施。

表 6 茅山东西隧道各结构面控水（导水）优势指标分析
Table 6 Analysis of controlling water(leading water)preferred index of structural planes in east MaoShan tunnel

结构面名称	优势因子						优势指标值	等级	对策
	时间优势指标	性质优势指标	规模优势指标	岩性优势指标	补给优势指标	埋深优势指标			
计算断层	0.30	0.48	0.24	0.80	0.72	0.12	3.326	III	见表 5

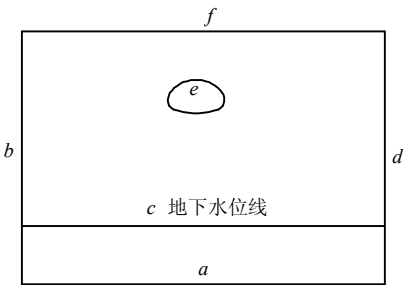


图 1 边界条件的概念模型
Fig.1 The conceptual model of boundary condition

5.1 初始边界条件^[5]

雨水入渗对渗流场比较敏感，需要求解一个稳态的渗流场来获得初始水头值，把稳态渗流场离散，分为水位线上下两个区域，在水位线以下，用水头控制，在水位线以上，为非饱和非稳定流，目前还难以控制，用 0 流量近似处理，对于上边界，无降雨时，边界条件为单位面积蒸发量，

$$k \frac{\partial H}{\partial n} = E \tag{8}$$

式中： E 为单位时间内单位面积的蒸发量； n 为单位外法向矢量。

5.2 上部边界条件

根据降雨强度不同分为两种情况^[8-11]：降雨强度大于地表的入渗能力，地表的总水头维持一个不变值，即 $H = z + h$ ， h 为积水深度；降雨强度小于地表入渗能力，雨水不会形成径流或积水，此时，地表入渗率等于降雨强度，即

$$k \frac{\partial H}{\partial n} = R(t) \cos \alpha \tag{9}$$

式中： R 为降雨强度； α 为斜坡倾角。

5.3 隧道边界条件

隧道开挖边界与应力变化有关，随着应力变化，渗透系数也变化，但在开挖一段时间后基本稳定，可以假设水头边界为 0。

6 计算模型及结果分析

6.1 计算模型

模拟断面为某隧道 Ek25+230~+290，此段为 II 级围岩，断层宽为 2 m，断层平面与隧道轴向成 63.4° 交角。模型边界为：宽为 160 m；高为：隧道向上至地表为 30 m，向下为 80 m；长为 60 m。注浆区域单元边长设为 0.5 m，岩体单元边长设为 8 m，都采用四面体单元。分别模拟了注浆圈厚度 $r = 0、2、4、6、8$ 和渗透系数为 $n = 1、10、100、1\ 000$ （对应断层处 $m = 1、100、1\ 000、10\ 000$ ）。模型示意图如图 2 所示。

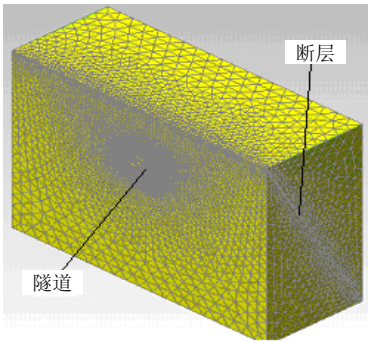


图 2 隧道 EK25+230~+290 断层-隧道-岩土体的位置关系
Fig.2 The relative position between fault, tunnel and rock mass range from EK25+230 to EK25+290

6.2 模型的参数及计算边界条件

模拟计算时假设围岩为单一、均质的连续介质，其力学参数根据工程地质勘察资料和规范确定，注浆效果参考《公路隧道设计规范》^[7]，将黏聚力提高 20 % 处理，模型的力学参数见表 7，岩土体的本构关系采用理想弹塑性模型，服从 Mohr-Coulomb 屈服准则；模型的力学参数如表 7 所示。

模型计算边界条件：上部边界，即地表，为恒水头 0.02 m；左右边界为非逸出边界，没有水流交换，流量为 0 m，设恒水头 5 m；下部边界为非逸出边界，流量为 0 m³/s，隧道开挖边界，为逸出边界，水头为 0 m； n 为岩体与注浆圈渗透系数之比，岩土体的三个方向的渗透系数不一样，为 $K_x = 3.2 \times 10^{-6}$ m/s， $K_y = 6.4 \times 10^{-6}$ m/s， $K_z = 8.0 \times 10^{-6}$ m/s；断层带内渗透系数 3 个方向一样，为 $K = 3.2 \times 10^{-5}$ m/s，详见表 8。

表 7 模型的力学参数

Table 7 Mechanical parameters of fault and surrounding rock

材料	弹性模量 / GPa	泊松比	重度 / (kN/m ³)	黏聚力 / MPa	摩擦角 / (°)
II 类围岩	0.02	0.38	23.0	0.05	35
注浆圈	0.04	0.38	23.5	0.08	35
断层带	0.01	0.42	20.0	0.03	30

表 8 模型计算边界条件

Table 8 Boundary condition of model of fault and surrounding rock

位置	水头或流量	位置	渗透系数
左侧边界	5 m (非逸出边界)	在无限层处，岩体与注浆圈渗透系数之比 n	$n = 1, 10, 100, 1\ 000$
右侧边界	5 m (非逸出边界)	在断层处，岩体与注浆圈渗透系数之比 m	$m = 1, 100, 1\ 000, 10\ 000$
上部边界	0.02 m	岩土体渗透系数(m/s)	$K_x = 3.2 \times 10^{-6}$ $K_y = 6.4 \times 10^{-6}$ $K_z = 8.0 \times 10^{-6}$
下部边界	0 m ³ /s (非逸出边界)	断层带渗透系数(m/s)	$K = 3.2 \times 10^{-5}$
隧道开挖边界	0 m (逸出边界)		

6.3 模拟结果分析

断层处和非断层处隧道涌水量模拟结果分别如图 3、4 所示。

图 3、4 涌水量与渗透系数的关系曲线显示，无论断层处还是非断层处，注浆圈的厚度对涌水量的影响较小，渗透系数对涌水量的影响较大，同时，

相邻岩土体渗透系数差影响较大，断层处的渗透系数比非断层处小 10 倍，涌水量大 25 倍，所以在渗透系数小的断层处有明显的汇水作用。

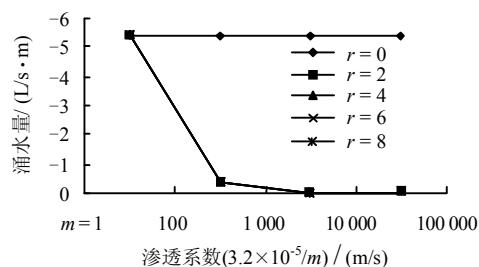


图 3 断层处涌水量随注浆圈渗透系数的变化曲线

Fig.3 Change curves between water volume and permeability index in fault

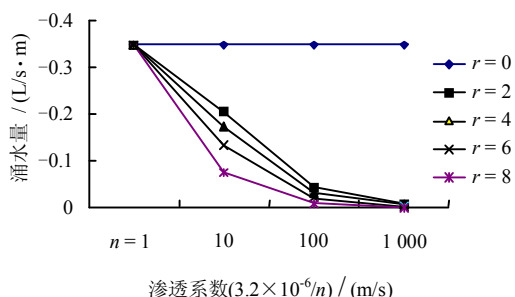


图 4 非断层处涌水量随注浆圈渗透系数的变化曲线

Fig.4 Change curves between water volume and permeability index in no fault

当注浆圈渗透系数为 $n = 10$ 时，涌水量减小较快，平均流量为 -0.015 (L/s·m) 左右，断层处为 -0.375 1 (L/s·m)，非断层处为 -0.0015 (L/s·m)，不能满足要求，所以模拟了注浆厚度 $r = 2.0$ m， $n = 100$ ，平均涌水量在 -0.0162 (L/s·m) 左右，断层处为 -0.0417 (L/s·m)，此时应该以断层处的涌水量为控制标准。

当断层处 $r = 2$ ， $m = 1\ 000$ 和非断层处 $r = 2$ ， $n = 10$ 可单独要求满足，但断层处的水可能转移，造成非断层处涌水，从而进一步模拟 $r = 2$ ， $n = 10$ ， $m = 1\ 000$ 时的断层和非断层处涌水量的情况。从模拟的结果来看，断层处的涌水量为 -0.035 (L/s·m)，而非断层处约为 -0.0047 (L/s·m)，都小于 -0.05787 (L/s·m)，可满足要求。同时在断层处和非断层处交界处产生汇水集中现象，所以断层处注浆范围应沿隧道轴向适当延长。

由图 5 可见，随着注浆圈渗透系数的增大，作用在注浆圈外侧的水压力增大，最大的外水压力 ($r = 8$ m) 为 0.266 MPa，经验证围岩处于安全状态。

在图3~5中, n 为未注浆处理的岩体渗透系数与注浆处理的岩体渗透系数之比; m 为断层处未注浆处理的岩体渗透系数与注浆处理的岩体渗透系数之比。其中 m/s 表示渗透系数的单位, 如图3中横坐标 $m=1$ 时, 断层处的渗透系数为 $3.2 \times 10^{-5} m/s$; 横坐标 $m=100$ 时, 断层处的渗透系数为 $3.2 \times 10^{-7} m/s$; 横坐标 $m=1\ 000$ 时, 断层处的渗透系数为 $3.2 \times 10^{-8} m/s$; 横坐标 $m=10\ 000$ 时, 断层处的渗透系数为 $3.2 \times 10^{-9} m/s$ 。同样, 如图3中横坐标 $n=1$ 时, 岩体的渗透系数为 $3.2 \times 10^{-6} m/s$, ……横坐标 $n=1\ 000$ 时, 岩体的渗透系数为 $3.2 \times 10^{-9} m/s$ 。

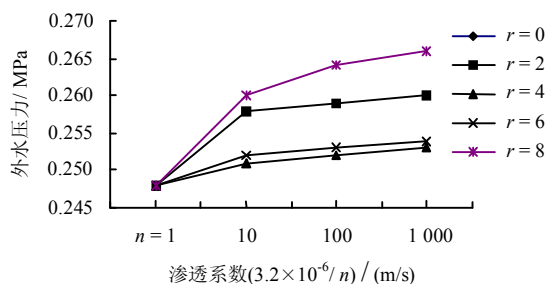


图5 降雨渗流引起注浆圈上外水压力变化曲线
Fig.5 Change curves of water pressure caused by rain seepage

7 结 论

(1) 对于含破碎断层超浅埋段, 断层是渗流的优势通道, 若不经注浆处理, 在断层处会产生较大的涌水量, 所以在施工通过断层段时, 应对导水(富水)优势断裂提前预注浆, 控制涌水量, 提高围岩稳定性。

(2) 根据优势面控稳控水机制的分析及渗流数值模拟, 富水导水优势面(断层、节理裂隙密集带、土岩界面)是防水设计的重点, 也是施工中需要超前探测与监测的重点部位。

(3) 通过数值模拟发现, 注浆圈厚度的改变对涌水量影响很小, 但有利于围岩稳定; 渗透系数的改变影响很大, 所以应注意充分充填围岩空隙及裂隙, 达到防水效果, 这与优势面理论分析的结论一致。

(4) 当岩土体渗透系数存在差异时, 渗透系数大的岩土体具有汇水作用, 并且在岩土体渗透系数变化的交界处, 有汇水发现集中, 所以断层处注浆圈及附近一定范围的渗透系数为 $10^{-8} m/s$ 量级, 非断层处注浆圈的渗透系数为 $10^{-7} m/s$ 量级, 能较好的防水。

参 考 文 献

- [1] 蒋建平, 章杨松, 罗国焜. 优势结构面理论在岩土工程中的应用[J]. 水利学报, 2001, 8: 90—96.
JIANG Jian-ping, ZHANG Yang-song, LUO Guo-yu. The application of preferred plane theory to geotechnical engineering practice[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 8: 90—96.
- [2] 谷德振. 谷德振文集[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 杜时贵. 岩体结构面的工程性质[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
- [4] 谭心, 陈善雄, 杨明. 降雨条件下土坡饱和和非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 381—384.
TAN Xin, CHEN Shan-xiong, YANG Ming. Saturated-unsaturated seepage analysis of slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(3): 381—384.
- [5] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1—14.
WU Hong-wei, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wei. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1999, 20(1): 1—14.
- [6] 汤劲松, 童立元. 低山丘陵区复杂地质条件下浅埋大跨公路隧道施工过程安全稳定分析研究[R]. [S. l.]: [s. n.], 2007.
- [7] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].
- [8] REITSMA S, KUEPER B H. Laboratory measurement of capillary pressure saturation relationships in a rock fracture[J]. *Water Resources Research*, 1994, 30(4): 865—878.
- [9] 李亮, 杜修力. 流体饱和两相多孔介质动力反应计算分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 113—118.
LI Liang, DU Xiu-li. Calculation and analysis of dynamic response of fluid-saturated porous media[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 113—118.
- [10] SALAM A A, CHRYSIKOPOULOS C V. Unsaturated flow in a quasi three dimensional fractured medium with spatially variable aperture[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(6): 1531—1540.
- [11] 汤有光, 郭铁锋. 考虑地表径流与地下渗流耦合的斜坡降雨入渗研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1347—1352.
TANG You-guang, GUO Yi-feng. A preliminary study of rainfall infiltration on slope using a new coupled surface and subsurface flow model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(9): 1347—1352.