

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1623-06

高水位隧道堵水限排围岩与支护相互作用分析

王秀英, 谭忠盛, 王梦恕, 张 弥

(北京交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘 要: 为了保护环境并尽可能降低衬砌结构所受的水压力, 提出高水位山岭隧道应采取“以堵为主, 限量排放”, 即“堵水限排”的防排水设计原则。但对于堵水限排情况下衬砌结构的设计, 目前尚没有规范可依, 这是目前隧道设计施工亟待解决的问题。在隧道力学和渗流力学的基础上进行理论分析, 研究渗流应力耦合作用下围岩的力学特性, 利用特征曲线法分析了不同排放量下围岩与支护的相互作用, 并与数值方法计算结果进行对比。计算结果表明: 不同排水量下围岩特性曲线不同, 支护阻力也不同, 不同排水条件下围岩有效切向应力和有效径向应力的变化很明显, 排水对围岩应力以及支护体系受力的影响是不容忽视的。另外, 传统隧道设计方法在全排水时完全不考虑水的作用是不安全的。所得结论可为堵水限排衬砌结构设计提供理论依据。

关 键 词: 高水位山岭隧道; 堵水限排; 渗流应力耦合; 围岩与支护相互作用; 特征曲线法

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Analysis of interaction between surrounding rock and lining in high water-level tunnels with controlled drainage

WANG Xiu-ying, TAN Zhong-sheng, WANG Meng-shu, ZHANG Mi

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstracts: To protect the environment and reduce the water pressure on lining as possible, the controlled drainage principle is proposed in high water-level mountain tunnels. But there is no specification for tunnel design with controlled drainage, so it is very urgent for tunnel design and construction. The mechanical character of the surrounding rock under coupling of seepage and stress is studied based on tunnel mechanics and seepage mechanics. The interaction between surrounding rock and lining with different drainages is studied by using character curve method; and the result is compared with numerical method. The result shows that the character curve and the support force are different and the effective tangential and radial stresses vary remarkably with different drainages; so the effect of drainage on the stress of surrounding rock and the support force can't be ignored. Another conclusion is drawn that it is unsafe in traditional tunnel design that action of water is not considered during total drainage. All these conclusions can provide theoretical base for tunnel design with controlled drainage.

Key words: high water-level mountain tunnels; controlled drainage; coupling of seepage and stress; interaction between surrounding rock and lining; convergence-confinement method

1 引 言

随着大规模交通建设的发展, 出现了许多处于高水位地区的深埋山岭隧道。长期以来, 山岭隧道的防排水一直坚持“防、排结合, 以排为主”的设计原则, 在衬砌结构设计中不考虑水压作用。但大量的排水不仅破坏了地表环境, 而且使得衬砌背后围岩裂隙被冲刷形成空洞, 反而对隧道结构受力

非常不利。但高水位山岭隧道又不能采用地铁隧道的全封堵设计, 因此, 既要保护环境, 又要将衬砌背后水压力降到合理的范围。对于高水位山岭隧道, 笔者提出采用“以堵为主, 限量排放”, 即“堵水限排”或“控制排放”的防排水原则^[1,2]。但对于堵水限排情况下衬砌结构的设计, 目前尚没有规范可依, 这是隧道设计施工亟待解决的问题。地下结构与地面结构最大的区别就是地下结构建筑于岩体中, 围岩既

收稿日期: 2006-11-02

基金项目: 北京交通大学研究生创新基金资助项目 (No.48108)。

作者简介: 王秀英, 女, 1970 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道工程方面的教学和科研工作。E-mail: xy98_wang@126.com

是荷载的主要来源, 又是承载的主体, 围岩与支护结构间存在着相互作用。因此, 研究堵水限排围岩与支护相互作用是研究衬砌结构设计的基础, 文献[3]在隧道力学和渗流力学的基础上进行理论分析, 研究渗流应力耦合作用下围岩的力学特性。本文在文献[3]的基础上, 深入研究不同排放量下围岩与支护的相互作用, 以求为堵水限排衬砌结构设计提供依据。

2 围岩与支护相互作用分析

要分析围岩和支护之间的相互作用, 最直观的方法应该是特征曲线法^[4], 自 1978 年法国隧道协会召开专门讨论特征曲线法的会议以来, 该法在支护结构设计方面得到很快应用, Seeber 在设计阿尔贝格隧道第 1 次采用特征曲线法迅速评定施工期间的支护措施以及最终承载力, 取得了很大成功^[4]。在国内, 运用特征曲线法进行隧道支护设计的研究也不少^[5-7]。因此, 本文在前人的研究基础上, 尝试运用特征曲线法分析不同排放量下围岩和支护的相互作用。

2.1 模型建立及理论分析

图 1 为建立的计算模型, 假设: (1) 围岩为均质的各向同性的连续介质; (2) 隧道为深埋隧道;

(3) 地下水位很高, 隧道整个处于地下水包围之中。文献[3]从理论上详细分析了围岩在弹性状态和弹塑性状态情况下的应力、位移, 还考虑了围岩进入塑性区后, 其物理力学参数如凝聚力、内摩擦角、渗透系数的变化对结果的影响。在分析过程中, 考虑衬砌厚度相对于地下水头较小, 衬砌渗透力可以简化为作用在衬砌外缘的表面力, 该表面力取该处的孔隙水压力, 具体推导过程及结果见参考文献[3, 8]。

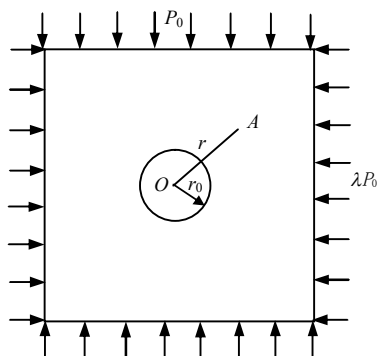


图 1 计算模型

Fig.1 Analysis model

2.2 计算内容及方法

某山岭隧道埋深为 300 m, 隧道开挖半径 r_0 取

6 m, 断面为圆形, 围岩弹性模量 $E=1.6$ GPa, 内摩擦角 $\varphi=35^\circ$, 凝聚力 $c=0.3$ MPa, 泊松比 $\mu=0.25$, 渗透系数 $k=5\times 10^{-5}$ cm/s, 围岩骨架的单位体积压缩系数 $K_s=2.0\times 10^{-5}$ MPa, 围岩弹性抗力系数为 200 MPa/m, 重度 $\gamma=22.0$ kN/m³。 P_0 为隧道中心地段的初始地应力, 取为 6 MPa; λ 为侧压力系数, 取为 1; 初始地下水位距隧道轴线 80 m, 即位于地下 220 m 处且较稳定。为了研究水对围岩和支护作用的影响、不同防排水方式下围岩特性变化以及不同支护刚度时支护受力变化, 选取 3 种支护, 并设支护与围岩密贴, 安设后可以立即承载, 支护结构的安设在开挖后一定时间进行, 取 $\Delta u_0=0.025$ m。选定的 3 种支护依次为: (1) C30 模筑混凝土衬砌, 厚度为 0.6 m; (2) C30 模筑混凝土衬砌, 厚度为 0.4 m; (3) C30 模筑混凝土衬砌, 厚度为 0.8 m。计算的主要目的是绘出不同排水情况下围岩特性曲线。不同排水工况是通过改变洞壁处水压 u_0 值实现的, $u_0=0$ 表示全排工况, 衬砌不承受水压力, 如用 u_r 表示全水压, $u_0=0.2u_r$ (限排)、 $u_0=0.4u_r$ (限排)、 $u_0=0.6u_r$ (限排)、 $u_0=0.8u_r$ 对应不同的限量排放工况, $u_0=1.0u_r$ 代表全封堵工况。从文献[3]推导出的公式可以发现, 要计算弹塑性区的应力, 塑性区半径的求解是关键, 要绘出围岩特性曲线, 除了求取塑性区半径外, 还要求得松弛区半径, 而这两个方程都是超越方程, 求解非常复杂, 因此, 本文利用 Mathematica 软件进行塑性区半径和松弛区半径的计算, 并与编写的 Fortran 程序相互调用, 求得围岩塑性区、松弛区半径, 进而绘出围岩特性曲线 (本文仅绘出变形压力部分的围岩特性曲线)。支护特征曲线通过弹性力学的厚壁圆筒法求得, 并考虑支护的极限承载能力。至于支护力的求取, 由于有水情况下支护力的解析法求取非常困难, 因此, 采用图解法进行^[8]。

2.3 计算结果及分析

2.3.1 围岩特性曲线的绘制和支护阻力的计算

在图 2 和图 3 中, u 为洞壁位移, P' 为隧道有效支护力, u_0 为洞壁水压, u_r 为远场水压, u_0 的变化代表排放量的不同, u_0 越接近 u_r , 表示排放量越小。由图 2 可见, 随着隧道排水量的增加, u_0 减小, 而围岩特性曲线向右移动, 说明围岩发生同等的位移所需的有效支护阻力增大 (当然总的支护阻力可能减小)。为了分析围岩与支护的相互作用, 绘出了不同排水工况下围岩及支护特性曲线如图 3, 并利用图解法求得不同排水量下支护阻力和支护位移见表 1~3。表中围岩 1 指传统隧道设计完全不考虑水

的作用的情况,全排、限排、全堵均针对饱水围岩。 P 、 P' 、 P_a 分别为围岩1隧道支护阻力、饱水岩体中隧道有效支护力及总支护力, $P_a = P' + u_0$, Δu_1 为设置支护后围岩产生的位移。

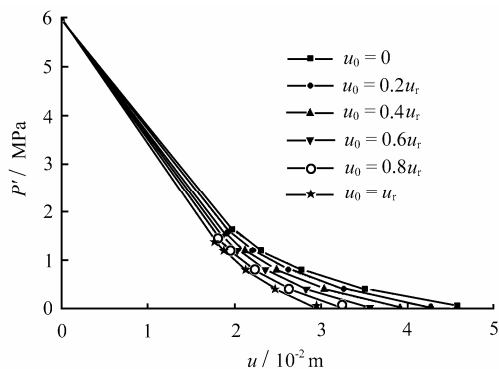


图2 不同排水工况下围岩特性曲线

Fig.2 Ground reaction curves with controlled drainage

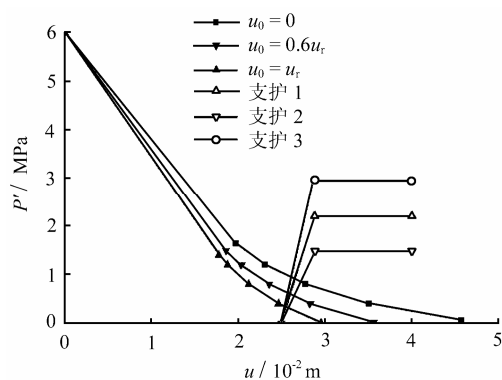


图3 不同排水工况下围岩及支护特性曲线

Fig.3 Ground and support reaction curves with controlled drainage

表1 不同排水量下支护阻力及支护位移(支护1, $t_h=0.6$ m)

Table 1 Support resistance and displacement with controlled drainage (support 1, $t_h=0.6$ m)

围岩中水的 渗流情况	Δu_1 / 10^{-2} m	P 或 P' / MPa	P_a / MPa
围岩 1	0.132 26	0.708 91	0.763 89
$u_0=0$ (全排)	0.158 41	0.919 03	0.919 03
$u_0=0.6u_r$ (限排)	0.103 57	0.596 98	1.076 98
$u_0=u_r$ (全堵)	0.058 8	0.325 98	1.125 98

表2 不同排水量下支护阻力及支护位移(支护2, $t_h=0.4$ m)

Table 2 Support resistance and displacement with controlled drainage (support 2, $t_h=0.4$ m)

围岩中水的 渗流情况	Δu_1 / 10^{-2} m	P 或 P' / MPa	P_a / MPa
围岩 1	0.187 29	0.708 91	0.708 91
$u_0=0$ (全排)	0.225 43	0.848 34	0.848 34
$u_0=0.6u_r$ (限排)	0.144 19	0.553 78	1.033 78
$u_0=u_r$ (全堵)	0.081 23	0.306 34	1.106 34

表3 不同排水量下支护阻力及支护位移(支护3, $t_h=0.8$ m)

Table 3 Support resistance and displacement with controlled drainage (support 3, $t_h=0.8$ m)

围岩中水的 渗流情况	Δu_1 / 10^{-2} m	P 或 P' / MPa	P_a / MPa
围岩 1	0.097 63	0.801 21	0.801 21
$u_0=0$ (全排)	1.117 79	0.942 60	0.942 60
$u_0=0.6u_r$ (限排)	0.075 14	0.616 62	1.096 62
$u_0=u_r$ (全堵)	0.040 62	0.341 69	1.141 69

从表1~3可以看出,在其他条件相同时,不同排水量下支护阻力不同,以表1为例,围岩1支护阻力为0.76389 MPa,全排、限排、全堵情况下支护阻力分别为0.91903, 1.07698, 1.12598 MPa。简单计算可以发现,全排水时支护阻力约为围岩1即完全不考虑地下水作用时的1.20倍,而全堵时支护阻力约为围岩1的1.47倍。在全堵时,根据水土分算原则可以计算得 $P' = 0.32652$ MPa, 此时的支护阻力为 $0.32652 + 0.8$, 即1.12652 MPa, 稍大于表1计算得到的全堵时的1.12598 MPa。由此看来,在传统的隧道支护体系设计中,在全排时全然不考虑水的影响,而按无水围岩来进行设计是不安全的,全堵时考虑全水头作用是足够安全的。Lee (2001年)^[9]在对汉城地铁5号线穿越汉江水下隧道进行数值计算分析时也得出了同样的结论。究其原因,笔者认为可以这样来解释:当全排水时,尽管支护与围岩接触面上的水压为0,但由于排水,水向着隧道运动产生了渗流力,这部分渗流力将作用在支护结构上,从而使隧道结构实际受力与无水围岩情况完全不同;当全堵即完全不排水时,支护与围岩接触面上的水压力将使衬砌产生变形,如果围岩和衬砌能联合工作,则隧道周围岩体将随衬砌变形而变形,因而可以分担一部分荷载。当然,如果复合式衬砌设防水板时,二次衬砌与围岩不可能保持联合工作,这时在全堵时按传统的全水头设计是完全必要的。

2.3.2 围岩内应力分布规律及塑性区半径变化

围岩内应力的分布也是围岩力学特性研究的一个重点,为此,本文计算了围岩切向、径向应力分布,取10倍洞径进行分析。根据计算结果绘制围岩内应力分布规律如图4、图5所示。

由图4、图5可见,考虑渗流作用时围岩内有效切向应力(图5)总小于完全不考虑渗流作用时围岩内切向应力(图4),有效径向应力也有同样规律,而且从图5还可以看出,围岩内切向应力随排水量的变化要较径向应力明显。排水量越大,围岩中的塑性区半径越大,表4也反映了这一情况,这

说明, 由于排水产生的渗流力对于围岩的稳定是不利的。表 4 中, $\rho = K_e / K_p$, K_e 为弹性区渗透系数, K_p 表示塑性区渗透系数, $\rho = 1$ 为不考虑塑性区渗透系数的变化。计算结果还表明, 完全不考虑地下水渗流作用时, 围岩塑性区半径小于全排时围岩塑性区半径, 但大于全堵和限排时围岩塑性区半径。这也清楚地说明, 全排时完全不考虑水的作用的设计是不安全的。

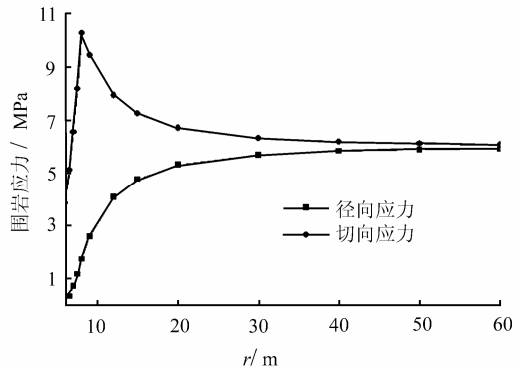


图 4 围岩 1 内应力分布

Fig.4 Stress distribution in surrounding rock No.1

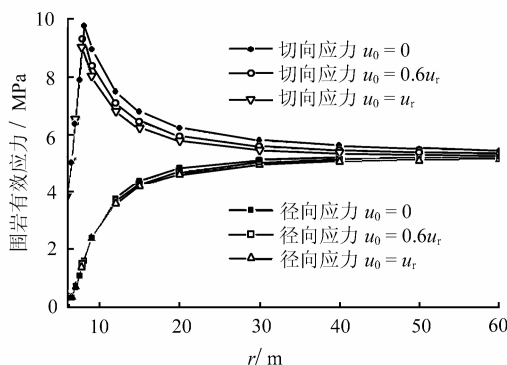


图 5 不同排放量下饱水围岩内应力分布

Fig.5 Stress distribution in saturated surrounding rock with controlled drainage

表 4 不同排水条件下的塑性区半径

Table 4 Radius of plastic zone with controlled drainage

排水情况	$u_0 = 0$	$u_0 = 0.6u_r$	$u_0 = u_r$	围岩 1
塑性区半径/m	8.143 3	7.889 8	7.733 1	8.061 2

以上求围岩内应力分布时未考虑塑性区 c , ϕ , ρ 的变化, 实际上开挖后会导致塑性区力学参数变化^[4,10,11], 普遍认为 c , ϕ 值会减小, ρ 值会增大, 但是这些参数的具体变化规律非常复杂, 直到目前仍没有达成共识。本文将塑性区的力学参数作一定变化, 以比较 c , ϕ , ρ 变化时对于围岩塑性区分布和围岩内应力的影响, 计算结果见图 6。

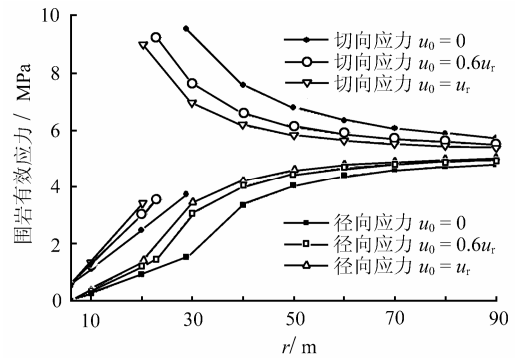


图 6 考虑塑性区力学参数变化时不同排放量下饱水围岩内应力分布

Fig.6 Stress distribution in saturated surrounding rock with controlled drainage when considering parameters variation in the plastic zone

图 6 中塑性区取 $c = 0.1$ MPa, $\phi = 20^\circ$, $\rho = 0.5$, 假设塑性区渗透系数增大为原来的 2 倍。由图 6 可以看出, 若考虑塑性区 c , ϕ , ρ 的降低, 塑性区半径将明显增大, 而且不同排水条件下围岩有效切向应力和有效径向应力的变化也更明显。由此说明, 实际围岩中, 排水对围岩应力以及支护体系受力的影响是不容忽视的。

3 计算结果检验

为了便于与解析法计算结果进行对比, 本文针对前述隧道实例, 利用 PLAXIS 程序进行渗流与应力联合作用下支护结构受力分析, 同时与传统设计方法计算结果进行对比, 以检验解析法结果的正确性。

3.1 数值模型及计算结果

图 7 为 PLAXIS 计算模型, 与前述隧道实例相对照。上边界取到地表, 下边界距隧道中心 O 点 100 m, 地下水位距 O 点 80 m, 左边界距 O 点 200 m, 右边界距 O 点 200 m。隧道毛洞半径为 6 m, 衬砌为支护 1 即厚 0.6 m 模筑混凝土衬砌, 由于 PLAXIS 2D Professional 只能施加上边界自由的位移边界条件, 故在应力边界设置上, 上边界取到地表, 下边界为固定边界, 左、右边界为水平向约束, PLAXIS 设置了 K_0 -procedure, 可以模拟 $\lambda = 1$ 条件。

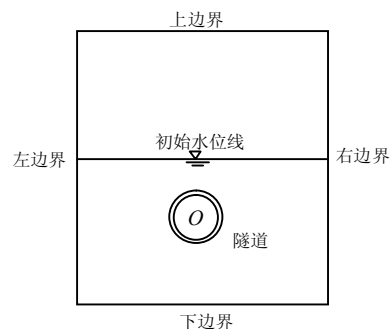


图 7 数值法计算模型

Fig.7 Numerical model

在渗流边界条件设置上,初始水位线为自由水面,左、右边界为定水头边界,定水头与初始水位水头标高相同,下边界为不透水边界,全排、限排和全堵时衬砌上水压分别取 0, 0.48, 0.8 MPa。根据以上模型进行计算,得到全排、限排以及全堵时围岩孔隙水压力分布如图 8。

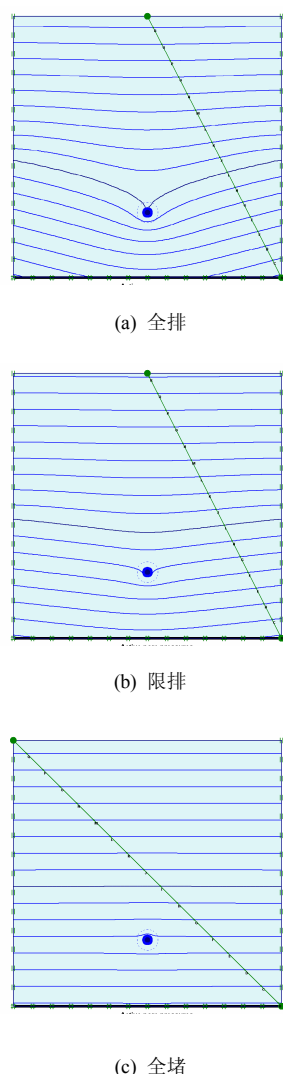
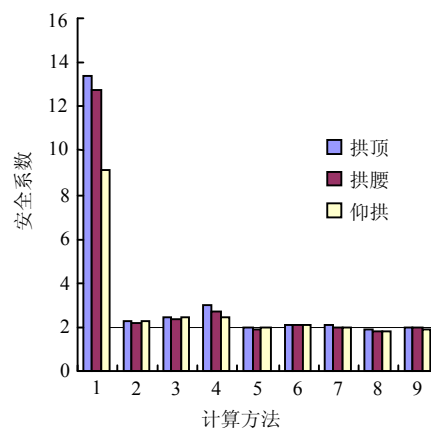


图 8 不同排放方式下围岩各点孔隙水压力等值线图
Fig.8 Contour chart of pore water pressure with controlled drainage

3.2 传统设计方法、解析法以及数值法计算结果对比

传统设计方法在全排时完全不考虑水压力,在全堵时考虑全部水压,限排方式考虑部分水压。为了进一步研究传统设计方法在全排、全堵以及限排方式下设计的可靠性,本文设想按传统设计方法、解析法以及数值法分别对前述隧道进行设计检验,在采用支护 1,即 60 cm 模筑混凝土衬砌的情况下按不同的设计方法计算得衬砌各截面的安全系数,并将不同排放方式下不同计算方法计算所得的衬砌不同截面安全系数绘于图 9 中。



1, 2, 3 分别为全排时传统方法、解析方法、数值方法计算结果;
4, 5, 6 分别为限排时传统方法、解析方法、数值方法计算结果;
7, 8, 9 分别为全堵时传统方法、解析方法、数值方法计算结果。

图 9 不同防排水方式下不同计算方法所得的衬砌不同截面安全系数

Fig.9 Safety factors of different sections of the lining when using different methods with controlled drainage

由图 9 可见,各种方式下解析法计算结果与数值法计算结果都比较接近,因为二者都考虑了渗流和应力的联合作用。解析方法和数值方法计算结果表明,全排和限排时要特别关注拱腰的安全,全堵时要特别关注仰拱的安全,Yoo (2005 年)在文献[12]中也得到了同样的结论。计算结果还表明,在全排方式下传统方法计算出的各截面安全系数要较解析法和数值法大得多,最小安全系数达到 8.6,远远高于破损阶段法设计时隧道设计规范要求的 2.4,可是对于同样支护结构解析法和数值方法计算出的安全系数却满足不了 2.4 的要求,而随着排水量的减小,即在限排和全堵方式下,传统方法、解析法和数值法计算出的衬砌各截面安全系数差别逐渐减小。在全堵方式下,3 种方法计算出的衬砌各截面安全系数非常接近,且都小于 2.4。这再一次说明,在全排方式下,传统方法认为可靠的设计而实际上可能是存在危险的;而在全堵方式下,传统设计方法的可靠性是没有问题的。

4 结 论

本文在隧道力学和渗流力学的基础上进行理论分析,研究渗流应力耦合作用下围岩的力学特性,绘制了不同排水方式下围岩特性曲线和支护特性曲线以分析围岩和支护的相互作用,同时利用图解法得出了不同排水方式下支护阻力。为了验证解析模型的正确性,针对同一隧道采用 PLAXIS 软件进行了计算,并将计算结果与解析法及传统设计方法进行了对比,得出以下结论:

(1) 在其他条件相同时, 不同排水量下围岩特性曲线不同, 支护阻力也不同, 不同排水条件下围岩有效切向应力和有效径向应力的变化很明显, 排水对围岩应力以及支护体系受力的影响是不容忽视的。

(2) 多种计算结果表明, 传统的设计方法在全排水时完全不考虑水的作用是不安全的, 而全堵时则是足够安全的, 也是必要的。

参考文献

- [1] 王建宇. 对隧道工程技术问题的质疑[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(增刊): 11—17.
WANG Jian-yu. Oppugn on problems about tunnelling technology[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2002, 39(Supp.): 11—17.
- [2] 王秀英, 王梦恕, 张弥. 山岭隧道堵水限排衬砌外水压力研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 125—127.
WANG Xiu-ying, WANG Meng-shu, ZHANG Mi. Research on regulating water pressure acting on mountain tunnels by block ground water and limiting discharge[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(1): 125—127.
- [3] 王秀英, 谭忠盛, 王梦恕, 等. 山岭隧道堵水限排围岩力学特性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 75—80.
WANG Xiu-ying, TAN Zhong-sheng, WANG Meng-shu, et al. Analysis of the mechanical character of the surrounding rock with controlled drainage in mountain tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 75—80.
- [4] 关宝树. 隧道力学概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [5] 仇文革. 基于与围岩交互作用机理的格栅支撑特征曲线设计法[J]. 西南交通大学学报, 1996(6): 642—645.
QIU Wen-ge. The characteristic curve design method of lattice girders based on the principle of interaction with surrounding rock[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1996(6): 642—645.
- [6] 陈建勋, 楚锟, 王天林. 用收敛-约束法进行隧道初期支护设计[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, (2): 57—59.
CHEN Jian-xun, CHU Kun, WANG Tian-lin. Supporting design of tunnel at initial stage with convergence confinement method[J]. **Journal of Xi'an Highway University**, 2001, (2): 57—59.
- [7] 张素敏, 朱永全, 景诗庭. 收敛约束原理在隧道围岩稳定性判据中的应用[J]. 铁道标准设计, 2004(8): 38—40.
ZHANG Su-min, ZHU Yong-quan, JING Shi-qing. Application of convergence-confinement theory in judging stability of surrounding rock[J]. **Railway Standard Design**, 2004, (8): 38—40.
- [8] 王秀英. 岩溶隧道堵水限排衬砌外水压力及结构设计研究[博士学位论文 D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [9] LEE IN-MO, NAM SEOK-Woo. The study of seepage forces acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2001, 16(1): 31—40.
- [10] 朱珍德, 张爱军, 徐卫亚. 脆性岩石全应力-应变过程渗流特性试验研究[J]. 岩土力学, 2002(5): 555—563.
ZHU Zhen-de, ZHANG Ai-jun, XU Wei-ya. Experimental research on complete stress-strain process seepage charactenstics of brittle rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, (5): 555—563.
- [11] 徐干成, 白洪才, 郑颖人, 等. 地下工程支护结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [12] CHUNGSIK YOO. Interaction between tunneling and groundwater[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131 (2): 240—250.