

文章编号: 1000-7598 (2010) 08-2465-06

水底隧道饱水地层衬砌作用荷载研究

张志强, 何本国, 何 川

(西南交通大学 土木工程学院地下工程系, 成都 610031)

摘 要: 与山岭隧道所不同, 采用矿山法修建水底隧道, 二次衬砌将承受很大外水压力, 特别是穿越饱水破碎地层时, 具有很大的施工风险。以厦门翔安海底隧道为工程背景, 针对 F_4 风化深槽地层, 研究不同水位条件下, 衬砌荷载与排放流量及排放方式之间相关关系。研究得出: 当控制排放量为全排条件流量 1/3 左右时, 可卸掉 80% 外水压力; 从环境和经济角度考虑, 可将出现拐点折减系数 0.2 作为水底隧道限量排放的设计基准值; 从支护结构体系组成考虑, 对于 F_4 强风化深槽破碎围岩, 必须施作注浆圈, 才可以保证在水压、土压共同作用下衬砌结构安全, 结果显示施作注浆圈能够减少衬砌作用荷载 30%~40%, 提高安全系数几乎一倍; 从主体结构受力特征看, 水底隧道最不利受力位置在墙脚和仰拱, 因此, 无论是防水型还是排水型隧道, 均应对仰拱形式及支护参数加强设计。

关 键 词: 水底隧道; 饱水地层; 衬砌作用荷载; 限量排放

中图分类号: TU 453

文献标识码: A

Study of load of lining under condition of saturated stratum for underwater tunnels

ZHANG Zhi-qiang, HE Ben-guo, HE Chuan

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Being different from general mountain tunnel by NATM, the lining of underwater tunnels built by mining method may be sustained heavy external water pressure; and underwater tunnels are more affected geological uncertainties and risks, particularly when passing through the saturated stratum such as the weathering deep slot stratum F_4 in Xiamen undersea tunnel. Based on fluid-mechanical interaction model for saturated ground conditions, the three dimensional numerical analyses are conducted to investigate the relationships between the pressure behind the lining and the discharge water inflow for different drainage conditions. The results show that the water pressure trapped behind the support depends on the discharge capacity of the drainage system relative to the water inflow from the ground, even the reduction of 80% external water pressure is obtained while the discharge water flow being controlled about one-third of the full water inflow from the ground. From the view of reasonable design of seismic water loads behind the lining, the reduction coefficient of 0.2 is regarded as the acceptable level for controlled drainage underwater tunnel. The emphasis is placed on introduction of grouting circle in support system for weathering deep slot stratum F_4 , but if competent ground conditions are anticipated to be encountered during underwater tunnel construction; then grouting circle may not necessarily be required. In view of the disadvantageous distribution of deformation and internal forces occurred in the invert, particularly in the corner position of invert connected with the side-wall; therefore, whether it is waterproof-type tunnel or drainage-type tunnel, more attention is paid on design of invert form and support.

Key words: underwater tunnel; saturated stratum; load of lining; controlled drainage

1 引 言

海底隧道深埋于海水之下, 水压高, 水源充足, 又无天然出口, 加上勘探工作的不确定性, 使得海

底隧道的渗水问题远比陆地隧道严重得多, 处理起来也困难得多。可见, 对于海底隧道而言, 结构防水系统的合理性和可靠性是海底隧道成功修建的关键, 也是控制运营费用的主要部分。大量的工程

收稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家重点基础研究发展 973 计划(No. 2010CB732105); 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-10-0667); 中央高校基本科研业务费专项资金科技创新项目(No. SWJTU09CX006)。

第一作者简介: 张志强, 男, 1968 年生, 出站博士后, 教授(博导), 主要从事隧道工程和岩土工程方面研究与教学工作。E-mail: clarkchang68@163.com

经验和研究表明,在隧道防排水设计中采用“以堵为主,限量排放”准则,既减少了作用在衬砌背后水压力,又不致因大量无限制排水对地下及地表环境造成难以弥补的破坏^[1-13]。目前,“铁路隧道设计规范”和“公路隧道设计规范”在确定衬砌结构外水压力时,对地下水从“以排为主”的原则出发,不考虑水压力^[14-15]。但对于具有稳定水头海底隧道,如何确定作用在衬砌结构上的水压力,是一个复杂的问题,使得分析结果难以得出合理的衬砌结构安全度。论文以钻爆法施工的厦门海底隧道穿越强风化深槽饱水地层为背景,通过对衬砌作用荷载与地下水排放流量及排放方式之间的相关关系研究,提出水底隧道限量排放的设计基准值,并对水底隧道主体结构的受力特征、注浆圈对不同饱水破碎地层设置的必要性等涉及水底隧道结构设计的关键技术问题展开研究讨论,以期对今后国内类似工程提供参考。

2 流固耦合原理

厦门海底隧道 F_4 风化槽破碎岩体强度低、自稳能力差,具有很强的透水性,易发生渗透破坏,地下水在破碎岩体介质中的流动,基本服从达西定律。采用 FLAC^{3D} 模拟流固耦合作用^[16-17]时,流体在孔隙介质中的流动遵循 Darcy 定律,同时满足 Biot 方程,可以方便设置流体边界条件,并考虑渗流场的历史变化过程。

2.1 流动方程

对于多孔连续介质, Darcy 定律可表达如下:

$$q_i = -k_{ij} \hat{k}(s) [p - \rho_f x_j g_j]_{,i} \quad (1)$$

式中: q_i 为渗流矢量(m/s); p 为孔隙压力; k 为孔隙介质的固有渗透系数张量 ($\text{m}^2/(\text{p}_a \cdot \text{s})$); $\hat{k}(s)$ 为相对渗透系数,它是饱和度的函数, $\hat{k}(s) = s^2(3-2s)$; ρ_f 为流体密度 (m/s^2); g_i 是重力加速度矢量的 3 个分量,其中 ($i=1, 2, 3$)。

2.2 平衡方程

对于小变形而言,流体平衡可以表述如下:

$$-q_{i,i} + q_v = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2)$$

式中: q_v 是体积流源强度 (1/s); ζ 是孔隙介质单位体积的流体体积变化。

流体流量的改变与孔隙压力 p 、饱和度 s 、及固体体积应变 ε 的改变有关,相应的方程表述如下:

$$\frac{1}{M} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{n}{s} \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{s} \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3)$$

式中: M 为 Biot 模量,单位为 N/m^2 ; n 为孔隙率; α 为 Biot 系数。

动量平衡方程可表述为以下形式:

$$\sigma_{ij,j} + \rho g_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (4)$$

式中: $\rho = (1-n)\rho_s + ns\rho_w$ 是容积密度, ρ_s 和 ρ_w 分别为固相和液相的密度。 $(1-n)\rho_s$ 与固体的干密度 ρ_d 是相同的。

2.3 本构方程

体积应变的改变引起流体孔隙压力的变化,反过来,孔隙压力的变化也会导致体积应变的发生。孔隙介质本构方程的增量形式为

$$\Delta \sigma_{ij} + \alpha \Delta p \delta_{ij} = H_{ij} (\sigma_{ij}, \Delta \xi_{ij}) \quad (5)$$

式中: σ_{ij} 为应力增量率, Δp 为孔隙水压力增量, δ_{ij} 为 Kronecher 因子, H_{ij} 为给定函数, $\Delta \xi_{ij}$ 为总应变增量。

2.4 相容方程

应变速率与速度梯度之间的相互关系为

$$\xi_{ij} = \frac{1}{2} [v_{i,j} + v_{j,i}] \quad (6)$$

式中 v_i 是介质中节点的速度。

通过式 (1) ~ (5) 反复迭代直到满足水压和应力的求解精度。可以看出:渗透系数 k 不是常数,而是随着应力场变化而变化的,而且从渗透性来看,隧道围岩体为非均值的;隧道水压力也非常数,亦随着应力场变化而变化的。

3 饱水地层衬砌作用荷载分析

厦门翔安海底隧道为我国大陆第一座采用矿山法修建的大断面水底隧道,总长 5 950 m,双向 6 车道,其中跨越海底总长 4 200 m,穿越强风化深槽地段,规模大,水头高,是海底隧道设计和施工的重点地段。主隧道横断面等价圆半径为 7.15 m,计算模型如图 1 所示,取强风化深槽典型断面覆盖层厚度 22.0 m,帷幕注浆圈厚度 4 m。

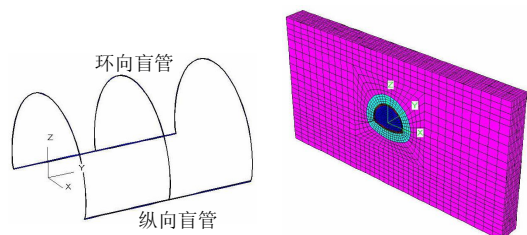


图 1 三维计算模型

Fig.1 Three-dimensional computational model

根据地质勘察单位和设计院提供的参数分析报告, F_4 风化深槽段渗透系数取各层加权平均值为 0.0408 m/d , 具体围岩及支护物理力学参数见表 1、2。由于海水有潮涨潮落, 最大水深 65 m , 分别采用 30 、 50 、 70 m 水位, 在初期支护与二次衬砌之间通常设计有盲管、透水垫层和一层 PVC 防水板组成排水系统。

表 1 围岩及支护计算参数

Table 1 Computational parameters of surrounding rock and support

类别	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	黏聚力 c/MPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
F_4 风化深槽地层	1.0	0.40	19	0.3	30.0
注浆圈	1.2	0.40	19	0.36	36.0
初衬及垫层	23.0	0.30	22	—	—
二次衬砌	30.0	0.20	23	—	—

表 2 支护渗透系数(单位 m/d)

Table 2 Support permeability coefficient

类 别	注浆圈 (K_2)	初期衬砌 (K_1)	环向盲管 之间垫层	仰拱部分 垫层	环向盲管
渗透系数	8.18×10^{-4}	1.0×10^{-5}	0.00864	1.0×10^{-5}	86.4

3.1 限量排放条件下衬砌作用荷载分析

3.1.1 衬砌外水压力、排放量与水位之间关系

在帷幕注浆“限排减压”条件下, 重点研究地下水不同水压力与水位、排放方式及限排流量之间的相关关系, 排水量与衬砌外水压力呈非线性关系如图 2 所示。随着排水量的减小, 水位的升高 (30 、 50 、 70 m), 衬砌背后外水压力增大, 并且增加的幅度较大。因此, 不同水位要对应应有相应的控制排水量控制标准, 才能保证二次衬砌结构安全性, 尤其是墙脚和仰拱满足承载要求。

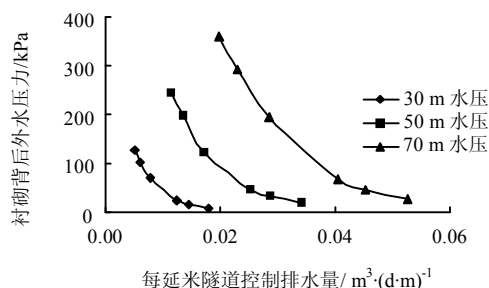


图 2 衬砌外水压力与控制排水量的关系

Fig.2 Relationships between water pressure of lining and controlled water discharge

从图 2 中看出, 当水位 30 m , 控制排水量从 $0.018 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 降低到 $0.005 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 时, 相应的衬

砌外水压力从 9.42 kPa 上升到 127.29 kPa ; 当水位 50 m , 控制排水量从 0.034 降低到 $0.012 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 时, 相应衬砌外水压力从 17.61 kPa 上升到 243 kPa ; 当水位 70 m , 控制排水量从 $0.053 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 降低到 $0.020 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ 时, 相应的衬砌外水压力从 25.80 kPa 上升到 358.88 kPa 。

3.1.2 外水压力折减系数设计基准

借助水工隧道外水压力概念, 即采用地下水位线以下水柱高乘以相应折减系数的方法, 估算作用在衬砌外缘水压力。限量程度可用限排量占全排量的百分比表示, 即限排百分比。衬砌外水压力折减系数与限量百分比关系如图 3 所示。

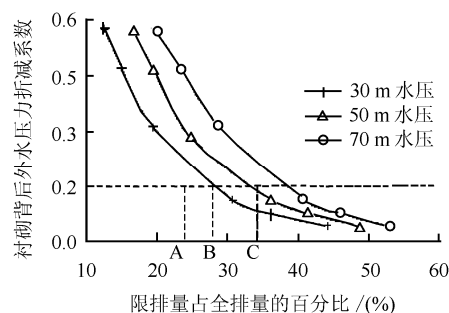


图 3 外水压力折减系数与限排百分比的关系

Fig.3 Relationships between discount coefficient of water pressure and controlled water discharge

限量百分比与衬砌外水压力折减系数关系呈现双曲线形状, 限量百分比越小, 水位越高, 衬砌外水压力折减系数越大。当水位 30 m , 限量百分比从 12.51% 增加到 44.24% 时, 相应的衬砌外水压力折减系数从 0.579 下降到 0.043 ; 当水位 50 m , 限量百分比从 16.50% 增加到 49.06% 时, 相应的衬砌外水压力折减系数从 0.579 下降到 0.042 ; 当水位 70 m , 限量百分比从 19.89% 增加到 53.24% 时, 相应的衬砌外水压力折减系数从 0.579 下降到 0.042 。

衬砌背后外水压力折减系数变化规律表现为: 由线性等速变化向非线性加速变化阶段发展。当限排百分比不断增加时, 衬砌背后外水压力折减系数不断减小, 其力学状态趋于有利, 当限排百分比增加到一定程度时, 则外水压力折减系数线型出现拐点, 其位置可以用来推定隧道的最佳排水百分比。

从曲线分析来看, 曲线的拐点都分布在限量百分比 30% 左右 (A , B , C 点), 表明外水压力折减系数达到 0.2 时将发生质的转变。

从最优化原理出发, 以较小的排水百分比, 获得较小的衬砌外水压力折减系数, 如图中简化拐点

所示, 当外水压力折减系数降到 0.2 时, 30 m 水头的限排百分比为 24%; 50 m 水头的为 28%; 70 m 水头的为 34%。

3.2 全排条件下衬砌作用荷载

3.2.1 单场解析解与耦合数值解比较

假定四周水压是均布的, 随着水位增高、隧道直径变小, 拱顶与隧底静水压力差值可忽略不计, 根据地下水力学理论, 可推导出隧道排水量计算理论公式^[18-19], 模型示意如图 4 所示。

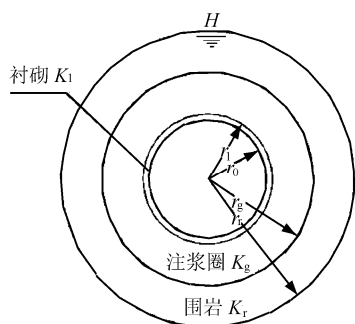


图 4 隧道模型示意图

Fig.4 Map of tunnel model

$$Q = \frac{2\pi H k_r}{\ln \frac{H}{r_g} + \frac{k_r}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_1} + \frac{k_r}{k_1} \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (7)$$

式中: Q 为隧道流量; H 为隧道围岩水头; k_1 为衬砌渗透系数; k_g 为注浆圈渗透系数; k_r 为围岩渗透系数; r_0 、 r_1 、 r_g 为衬砌内径、外径、注浆圈半径。

其计算物理参数同数值法一致, 采用单场解析与耦合数值分析分别计算每延米隧道排水量, 结果如表 3 所示。

表 3 排水量与水位关系表 (单位: $\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1}$)
Table 3 Relationships between discharge and water level

计算方法	水位/m		
	30	50	70
流固耦合	0.041	0.069	0.097
单场解析法	0.051	0.082	0.110
误差 (%)	22.7	16.8	11.4

流固耦合计算比较慢, 也比较困难, 但是从表 3 中可以看出: 理论公式和流固耦合计算结果存在较大误差, 水位越高, 误差越小, 即高水位情况下理论公式解析解才接近于流固耦合计算结果。因此, 解析解应用是有条件的, 对于水位有限的水底隧道, 只有采用流固耦合方法分析, 才能得出合理的结论。

3.2.2 衬砌作用荷载

有、无注浆圈条件下隧道衬砌竖向作用荷载与水位关系如图 5 所示。

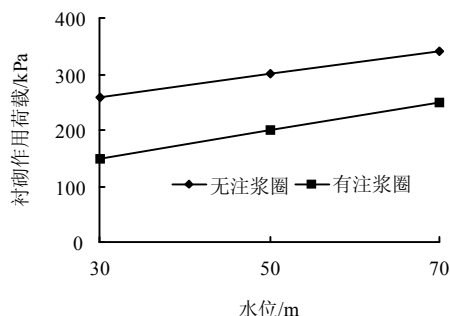


图 5 衬砌作用荷载与水位高度关系

Fig.5 Relationship between load of lining and water level

从图 5 中看出, 无注浆圈时, 随着水位升高 (30、50、70 m), 二次衬砌拱顶竖向荷载依次为 258、302、341 kPa; 有注浆圈时, 随着水位的升高 (30、50、70 m), 竖向荷载依次为 148、201、250 kPa。可以明显看出注浆圈的设置可以有效降低隧道作用荷载约 30%~40%。

3.3 全排条件下衬砌结构受力特点

3.3.1 不同水位下结构安全性研究

比较了不同水位 (30、50、70 m) 横断面衬砌关键点的结构受力, 随着水位增高, 弯矩减小, 轴力增大, 并且安全系数在拱顶、墙脚和仰拱处相对于其他位置较小, 并且有注浆圈条件下结构安全系数数值大于无注浆圈段。因此本文仅以拱顶、墙脚和仰拱关键控制点安全性为例开展研究。

(1) 拱顶安全性分析

如图 6 所示, 有、无注浆圈段隧道二次衬砌拱顶安全系数与水位关系曲线。从中可知, 注浆圈的施设增大了二次衬砌拱顶部位安全系数, 且随着水位升高 (30、50、70 m), 二次衬砌拱顶部位的安全系数逐渐减小。当无注浆圈时, 随着水位升高, 二次衬砌拱顶部位安全系数依次为 8.60、7.38、6.59; 有注浆圈时, 随着水位升高, 拱顶部位安全系数依次为 19.29、15.20、12.00。有注浆圈比无注浆圈对二次衬砌拱顶部位的安全系数普遍提高近一倍。

(2) 仰拱安全性分析

如图 7 所示, 有、无注浆圈隧道段二次衬砌仰拱安全系数与水位关系曲线。当无注浆圈时, 随着水位的升高, 二次衬砌仰拱部位安全系数依次为 6.37、5.60、3.44; 有注浆圈时, 仰拱部位安全系数依次为 10.97、9.83、8.17。注浆圈对二次衬砌仰拱部位的安全系数普遍提高了 75% 以上。

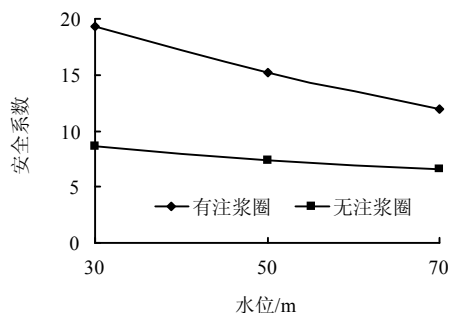


图 6 不同水位下拱顶安全系数变化

Fig.6 Curves of safety factors of crown under different water levels

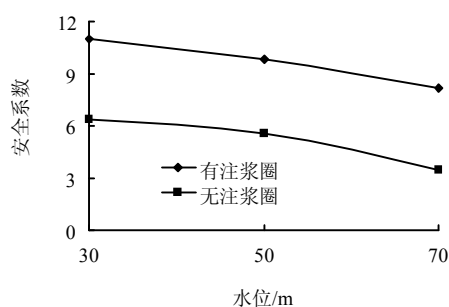


图 7 不同水位下仰拱安全系数变化

Fig.7 Curves of safety factors of invert under different water levels

(3) 墙脚安全性分析

如图 8 示,二次衬砌墙脚安全系数与水位关系曲线。随着水位升高,无注浆圈时,墙脚部位安全系数依次为 1.87、1.67、1.10;有注浆圈时,墙脚部位安全系数依次为 4.45、4.05、2.90,注浆圈对二次衬砌墙脚安全系数普遍提高了约 140%。因此,必须设置注浆圈才能保证墙脚的安全。

3.3.2 注浆圈作用与设置

随着注浆圈厚度增加,渗透系数减小,排水量越小。在不同水位条件下,有无帷幕注浆圈时排水量有显著差别,以水位 60 m 为例,有注浆圈时的排水量 $0.613 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,无注浆圈时为 $7.23 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m})$,因此,注浆圈设置可以明显减小控制排水量。

注浆圈可以实现地下水“限量排放”,减小动水压力以及衬砌作用荷载,并有效地提高隧道结构安全性。但在水底隧道支护体系中,对于所穿越任何饱水风化地层,是否都需要设置注浆圈,在认识上并不统一。

通过对比厦门海底隧道穿越强风化深槽和相对完整的微风化两种不同饱水破碎地层,研究注浆圈设置的必要性。

由表 4 可知,对于 F_4 风化深槽饱水地层,没有

注浆圈时墙脚在各种水位条件下,都不满足隧道规范安全系数要求,其中在水位 70 m 时,衬砌最小安全系数仅为 1.1,从长期运营看,安全储备是不够的。注浆后安全系数大幅度增长,衬砌最小安全系数 2.9,已达到结构安全要求,并有一定安全储备。可见对于 F_4 强风化深槽破碎围岩,根据地质勘察和设计院提供的参数分析报告,施作帷幕注浆圈厚度 4 m,渗透系数 $8.18 \times 10^{-4} (\text{m/d})$ 才可保证在动水压与土压共同作用下衬砌结构安全。

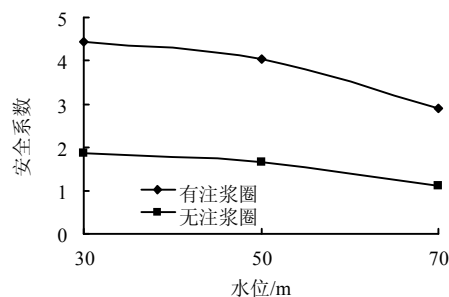


图 8 不同水位下墙脚安全系数变化

Fig.8 Curves of safety factors of wall corner under different water levels

表 4 注浆圈对衬砌结构安全性影响分析

Table 4 The safety influence on lining induced by grouting circle

岩体种类	水位 /m	有无 注浆圈	控制点			最不利位置 安全系数变化
			拱顶	墙脚	仰拱	
F_4 风化深槽饱水地层	30	无	8.60	1.87	6.37	不安全→安全
		有	19.29	4.45	10.97	
	50	无	7.38	1.67	5.60	不安全→安全
		有	15.20	4.05	9.83	
	70	无	6.59	1.10	3.44	不安全→安全
		有	12.00	2.90	8.17	
微风化饱水地层	30	无	35.38	6.83	100.17	安全→提高 8.05%
		有	43.41	7.38	154.00	
	50	无	30.88	6.33	85.05	安全→提高 8.21%
		有	37.40	6.85	136.80	
	70	无	27.29	5.91	72.73	安全→提高 8.12%
		有	32.78	6.39	114.00	

对于微风化破碎地层,没有注浆圈时在各种水位条件下,衬砌各部位均已完全满足规范安全系数要求,且具有很大的安全储备;注浆圈只是相对提高了截面安全系数,因此,可以不考虑设置注浆圈。

4 结论及建议

结合厦门翔安水底隧道穿越强风化深槽饱水破碎岩体工程地质特点,研究衬砌作用荷载与水位、排放方式及限排流量之间相关关系,得出以下结论:

(1) 对于饱水风化深槽水底隧道,限量排放条

件下, 当控制排放量为全排条件流量 1/3 左右时, 可卸掉 80% 外水压力; 从环境和经济角度考虑, 可将折减系数 $\beta=0.2$ 作为水底隧道限量排放的设计基准值;

(2) 比较单场解析与耦合数值分析结果, 得出解析解应用是有条件的, 对于水位有限的水底隧道, 须采用流固耦合方法分析才能得出合理的结论;

(3) 施作注浆圈可实现地下水“限量排放”, 减小动水压力以及衬砌作用荷载, 对于 F_4 强风化深槽饱水破碎地层, 无注浆圈时衬砌最小安全系数 1.1, 是不安全的, 设置注浆圈后最小安全系数 2.9, 已达到结构安全要求, 并降低衬砌作用荷载 30%~40%;

(4) 从水底隧道支护体系设计考虑, 对于 F_4 风化深槽饱水地层, 须施作注浆圈, 而对于饱水微风化破碎地层, 可以不考虑设置注浆圈;

(5) 从水底隧道主体受力结构特征看, 最不利位置在墙脚和仰拱, 明显区别于普通山岭隧道, 因此, 无论是防水型还是排水型隧道, 均应对仰拱形式及支护参数加强设计。

参 考 文 献

- [1] 孙钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (8) .
Sun Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 25(8): 1513—1521.
- [2] 王梦恕, 皇甫明. 海底隧道修建中的关键问题[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 1—4.
WANG Meng-shu, PU Huang-ming. Key problems on subsea tunnel construction [J]. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, 2005, 22(4): 1—4.
- [3] 李廷春, 李术才, 陈卫忠, 等. 厦门海底隧道的流固耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (3) : 397—401.
LI Ting-chun, LI Shu-cai, CHEN Wei-zhong, et al. Coupled fluid-mechanical analysis of Xiamen subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(3): 397—401.
- [4] 张有天. 岩石隧道衬砌外水压问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 1—4.
ZHANG You-tian. Discussion on external hydraulic pressure upon rock tunnel lining[J]. **Railway Construction Technology**, 2003, 40(3): 1—4.
- [5] 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 Mengshu, et al. Analysis of mechanical character of surrounding rock with controlled drainage in mountain tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 75—80.
- [6] 张志强, 关宝树, 仇文革, 等. 圆梁山隧道在高水位条件下支护结构体系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 763—769.
ZHANG Zhi-qiang, GUAN Bao-shu, QIU Wen-ge, et al. Research on supporting structure system of Yuanliangshan railway tunnel under high water head[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(5): 763—769.
- [7] 吉小明. 孔隙裂隙岩体中渗流场与应力场耦合分析[博士学位论文 D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学所 2002.
- [8] 张有天. 岩体水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [9] 杨立中, 仇文革, 王建秀. 圆梁山特长隧道涌水量及衬砌水荷载预测研究报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2000.
- [10] 黄涛, 杨立中. 渗流-应力-温度耦合下裂隙围岩隧道涌水量的预测[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(5): 554—559.
HUANG Tao, YANG Li-zhong. A Prediction of water gush yield in fractured tunnels under coupling among seepage, stress and temperature[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 1999, 34(5): 554—559.
- [11] Seok-Woo Nam, Antonio Bobet. Liner stresses in deep tunnels below the water table[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2006, (21): 626—635.
- [12] 仵彦卿. 岩体裂隙系统渗流场与应力场耦合模型[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 1: 31—34.
WU Yan-qing. The coupled stress-groundwater flow model for jointed rock mass[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1996, 7(1): 31—34.
- [13] LUO Zu-jiang, ZHANG Ying-ying, WU Yong-xia. Finite element numerical simulation of Three-Dimensional Seepage control for deep foundation pit dewatering [J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2008, 20(5): 596—602.
- [14] 中华人民共和国铁道部. TB10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JTGD70-2004 公路隧道设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 52—53.
- [16] 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力荷载[J]. 现代隧道技术, 2008, (2): 1—6.
WANG Jian-yu. Problems on external water pressure on tunnel lining[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2008(2): 1—6.
- [17] Itasca Consulting Group, Inc. Fluid-mechanical interaction[M]. [S.l.]:[s.n.], 1999.
- [18] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 成都: 人民交通出版社, 2003.

- [19] 关宝树译. 青函隧道土压研究报告—第八章隧道衬砌上的压力[J]. 隧道译丛, 1980, 10: 38—50.