

海底隧道涌水量与覆岩厚度关系研究

徐帮树^{*,1)} 李树忱^{*} 李术才^{*} 张 芹[†]

^{*}(山东大学土建与水利学院, 济南 250061) [†](山东三箭建设工程股份有限公司, 济南 250100)

摘要 对半无限空间水文地质模型, 分别采用经验解析法和数值模拟法计算海底隧道涌水量, 分析海底隧道涌水量与覆岩厚度的关系. 并根据日本最小涌水量法, 对上述计算结果进行插值, 求出不同海水深度所对应的最小覆岩厚度. 最后, 拟合出海水深度与最小覆岩厚度关系的直线公式.

关键词 海底隧道, 涌水量, 最小覆岩厚度, 数值模拟

THE RELATION BETWEEN SEEPAGE VOLUME AND ROCK COVER THICKNESS IN SUBSEA TUNNEL

XU Bangshu^{*,1)} LI Shuchen^{*} LI Shucan^{*} ZHANG Qin[†]

^{*}(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

[†](Shandong Sanjian Construction Engineering Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract In the subsea tunnel construction, the seepage volume and the minimum rock cover are most important in the drainage design of the tunnel, and in the tunnel route selection. With the hydro-geological model of half infinite space, the seepage water volume is computed both by analytical method and numerical simulation, and the relation between seepage volume and rock cover thickness is analyzed. According to the rock cover thickness determined by the minimum seepage volume, a linear relation between sea depth and rock cover thickness is obtained.

Key words subsea tunnel, seepage volume, rock cover thickness, numerical simulation

前 言

世界发达国家自 20 世纪 30 年代起, 就不断地在修建海底隧道. 迄今有海底隧道的国家主要包括日本、英国、法国、美国、挪威、澳大利亚、丹麦、冰岛等^[1~4]. 中国海峡隧道修建起步较晚, 但发展势头很快. 正在修建的中国第 1 条海底隧道——厦门东通道工程预计 2010 年建成. 项目全长 9 km, 跨海主体工程长约 6 km, 隧道最深在海平面下约 70 m. 第 2 条海底隧道——青岛到黄岛将于 2007 年动工, 全长 5.5 km. 在中俄工程科技研讨会上, 钱七虎院士在就“中国岩石(地下)工程的成就、进展和挑战”作报告时介绍, 最近的 20~30 年内, 中国正考虑建造 5 条跨海隧道.

陆上隧道的涌水量预测研究相关文献较多, 而

海底隧道涌水量研究较少^[5~7]. 海底隧道不同于陆地上的一般山岭隧道, 有其自身的特殊性. 主要在于海底隧道位于相对稳定的海平面下, 通过深水进行海底地质勘测比在地面的地质勘测更困难、造价更高、而且准确性相对较低; 隧道两端高、中间低, 不能采用自然方式排水; 很高的孔隙水压力会降低隧道围岩的有效应力, 造成较低的成拱作用和地层的稳定性. 最小覆岩厚度的确定是海底隧道线路规划的重要依据, 而海底隧道覆岩厚度与涌水量关系紧密. 日本最小涌水量法是被广泛采用的确定最小覆岩厚度方法之一. 这个方法指在给定深度的海水下, 对于特定的地质条件和确定的隧道开挖断面形状, 隧道最小涌水量所对应的覆岩厚度为经济安全的最小覆岩厚度^[2].

隧道涌水量的预测常用经验解析法和数值模拟

2006-02-17 收到第 1 稿, 2006-11-29 收到修改稿.

1) E-mail: xubangshu@163.com

法. 本文对半无限空间的水文地质模型, 分别采用以上两种方法, 分析海底隧道涌水量与覆岩厚度的关系, 并拟合出最小涌水量与最小覆岩厚度的线性回归公式.

1 经验解析法

经验解析法是以地下水动力学理论为基础, 结合工程经验给出的隧道涌水量预测的经验公式. 海底隧道有其特殊性, 覆岩层表面存在稳定的海水压力. 通常采用图 1 的简化模型. 海底隧道涌水量预测常采用的公式有马卡斯特公式和小林芳正公式.

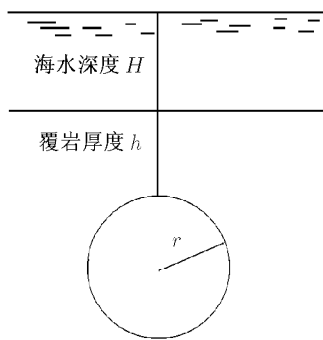


图 1 海底隧道地质剖面图

(1) 马卡斯特公式

日本青函隧道等其它海底隧道涌水量理论估算公式, 常采用英法海峡隧道调查事务所用的马卡斯特公式^[2]

$$Q = 2\pi K \frac{H + h}{\ln(2h/r - 1)} \quad (1)$$

式中, Q 为隧道预测涌水量 (m^3/d); H 为海水深度 (m); h 为覆岩厚度 (隧道顶至海底的覆盖岩层厚度)(m); K 为岩层渗透系数 (m/d); r 为隧道有效开挖半径 (m).

(2) 小林芳正公式

日本小林芳正认为, 式 (1) 将覆盖层厚度作为渗透压力是不合理的, 他认为覆盖层越厚, 按达西定律应该是水头损失越大^[3], 所以他提出了修正公式

$$Q = 2\pi K \frac{H - h_0}{\ln(2h/r)} \quad (2)$$

式中, h_0 为隧道壁面上的水头, 当隧道处于大气压力情况下, $h_0 = 0$; 其它参数同式 (1).

2 数值模拟法

从渗流力学观点来看, 土壤、岩石、混凝土均为

孔隙介质或裂隙介质. 目前模拟孔隙介质中渗流过程的数值软件较多. 本文采用 FLAC^{3D} 软件模拟, FLAC^{3D} 模拟多孔介质中流体流动时, 孔隙流体的模拟独立于力学计算. 其主要通过孔隙水压力的消散引起土体位移的变化, 这一过程包含两种力学效果. 第 1, 孔隙水压力的变化引起结构体中有效应力的变化; 第 2, 孔隙水压力的变化又引起流体区域的变化. 流体在孔隙介质中的流动依据 Darcy 定律, 流固耦合过程满足 Biot 方程.

2.1 工程概况

某海底隧道拟采用钻爆暗挖法施工, 其采用二车道隧道建设方案, 按照二车道高速公路设计标准, 计算行车 100km/h, 根据交通部《公路工程技术标准》(JTJ001-97) 和《公路隧道设计规范》(JTGD70-2004).

隧道建筑限界净宽为

$$0.25 + 0.50 + 3.75 \times 2 + 1.00 + 0.25 = 9.50 \text{ m}$$

隧道建筑限界净高为 5.0 m

隧道两侧不设检修道. 隧道建筑限界以外的空间安装各种通风、照明、监控、通信等设备. 此外, 由于海底隧道防水要求, 全长设置仰拱, 各种通讯管线及城市公用管沟将在隧道内通过, 隧道设计断面如图 2.

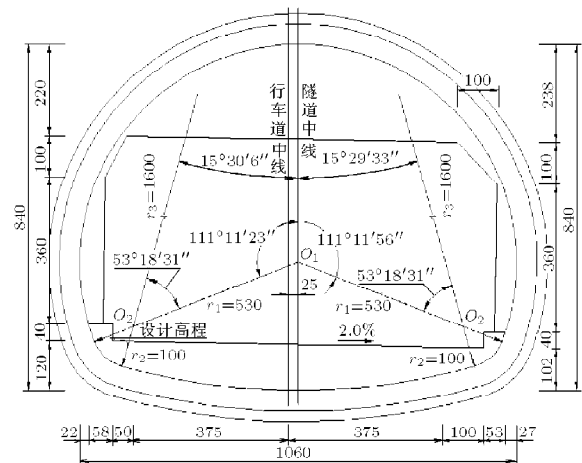


图 2 隧道设计断面示意图

2.2 计算分析

忽略隧道轴线方向渗流, 隧道涌水量计算作为二维问题处理, 计算模型如图 3. 隧道未受开挖扰动之前, 假定围岩孔隙水为静止状态, 孔隙水压力按静水压力梯度分布, 海水深度 30m 时初始水头分布如

图 4, 图中横轴为 x 向坐标, 纵轴为垂直方向高程. 模型左右和上下边界为固定孔隙水压力边界. 隧道开挖后四周围岩表面为临空面, 节点孔隙水压力为零. 给定计算精度为最大不平衡孔隙压力小于 10^{-5} Pa. 选取两种渗透系数 5×10^{-5} cm/s, 1×10^{-5} cm/s, 在给定海水深度情况下, 可以得到覆岩厚度 h 与涌水量 Q 关系, 如表 1~ 表 3. 涌水量 Q , 最小涌水量 Q_{\min} 均指每延米隧道单位时间涌水量.

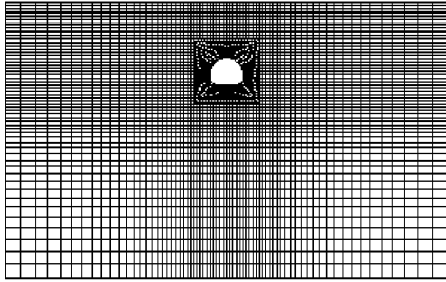


图 3 计算网格

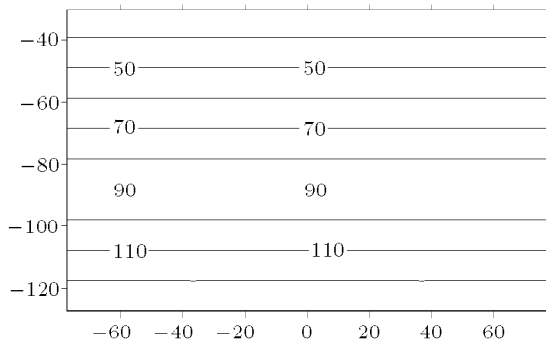


图 4 初始水头分布 (单位: m)

表 1 海水深 30 m 时覆岩厚度与涌水量关系

覆岩厚度 h/m	涌水量 (m^3/d)	
	渗透系数 k	
	$5 \times 10^{-5}/cm \cdot s^{-1}$	$1 \times 10^{-5}/cm \cdot s^{-1}$
10	7.640	1.528
13	7.430	1.486
15	7.376	1.475
16	7.367	1.473
17	7.367	1.473
18	7.375	1.475
20	7.410	1.482
25	7.580	1.517
30	7.840	1.568

表 2 海水深 80 m 时覆岩厚度与涌水量关系

覆岩厚度 h/m	渗透系数 $k/\times 10^{-5}(cm \cdot s^{-1})$	涌水量 $Q/(m^3 \cdot d^{-1})$
10	1	3.243
15	1	2.955
20	1	2.829
25	1	2.778
27	1	2.771
28	1	2.769
30	1	2.770
35	1	2.788
40	1	2.823
50	1	2.931
60	1	3.068
70	1	3.225
80	1	3.395

表 3 海水深 130 m 时覆岩厚度与涌水量关系

覆岩厚度 h/m	渗透系数 $k/\times 10^{-5}/(cm \cdot s^{-1})$	涌水量 $/(m^3 \cdot d^{-1})$
10	1	4.958
15	1	4.435
20	1	4.176
25	1	4.040
30	1	3.972
33	1	3.953
35	1	3.947
40	1	3.950
45	1	3.974
50	1	4.013
60	1	4.123
70	1	4.263
80	1	4.421

由表 1 可知, 在固定海水深下, 隧道涌水量与渗透系统成线性关系, 渗透系数不影响最小涌水量确定的覆岩厚度. 渗透系数为 1×10^{-5} cm/s, 对于不同海水深度, 涌水量与覆岩厚度关系如图 5. 由图 5 可得, 在海水深度不变情况下, 涌水量与覆岩厚度关系曲线呈近似抛物线形, 涌水量随覆岩厚度增大逐渐减小, 达到某个最小值时, 又逐渐增大. 涌水量与覆岩厚度关系曲线的最低点称为拐点. 由图 5 可得, 海水越深, 拐点向右偏移. 也就是说, 最小涌水量对应的覆岩厚度越大. 根据日本最小涌水量法, 在相同海水深度下, 对计算结果进行立方样条插值, 求出对应的最小覆岩厚度 h_n . 对上述 3 组海水深度和最小覆岩厚度进行拟合, 如图 6. 拟合直线

$$h_n = 0.2029H + 11.0847 \quad (3)$$

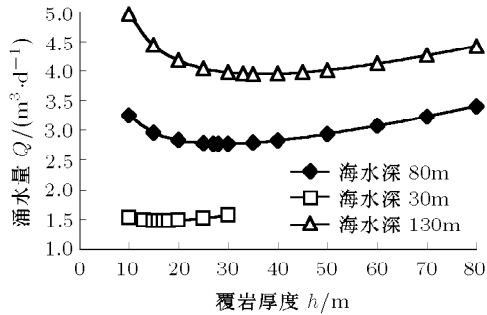


图 5 不同海水深度涌水量与覆岩厚度关系曲线

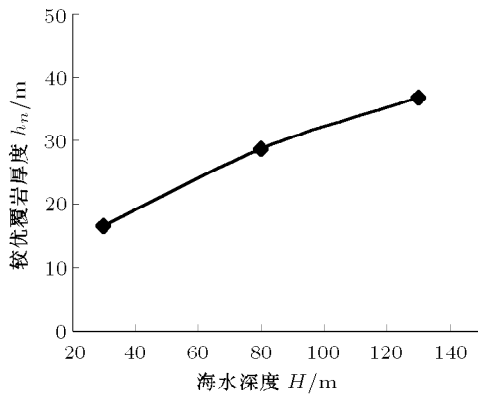


图 6 海水深度与最小覆岩厚度关系曲线

3 经验解析法与数值方法对比分析

利用经验解析法的马卡斯特和小林公式，与数值方法对海底隧道涌水量与覆岩厚度的关系进行对比分析。取海水深度为 80m，渗透系数 $1 \times 10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，隧道断面有效半径 5.64m。通过计算得到的覆岩厚度与涌水量曲线（如图 7）；马卡斯特公式得到的在不同海水深度下，最小涌水量与最小覆岩厚度的关系，如表 4。

由图 7 可知，小林公式由于忽略了覆盖岩石中孔隙水本身静水压力的影响，计算涌水量随覆岩厚度增大而逐渐减小，而数值计算和马卡斯特公式计算结果趋势是一致的，随着覆岩厚度增加，涌水量

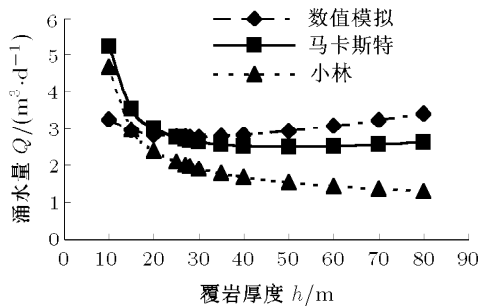


图 7 不同方法求解的涌水量与覆岩厚度关系曲线

表 4 马卡斯特最小涌水量与最小覆岩厚度关系

海水深度 H/m	最小涌水量 $Q_{\min}/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	最小覆岩厚度 h_m/m
20	1.184	24.63
30	1.437	29.29
35	1.556	31.49
40	1.671	33.61
45	1.783	35.67
50	1.892	37.68
60	2.104	41.58
70	2.307	45.33
80	2.504	48.96
90	2.696	52.49
100	2.883	55.93

先减小，后增加，存在某个覆岩厚度对应最小涌水量，但两者计算值仍有差别。在较小覆岩厚度时，马卡斯特计算的涌水量比数值模拟计算的涌水量大；在较大覆岩厚度时，两者相反。在隧道有效半径不变，覆岩厚度较大时，马卡斯特公式计算涌水量比较准确，数值计算得到的涌水量由于受定水压边界的影响，计算值偏大。

通过对表 4 进行曲线拟合，可得马卡斯特公式确定的海水深度与最小覆岩厚度的拟合公式

$$h_m = 0.3874H + 17.8635 \quad (4)$$

把直线公式 (3) 和式 (4) 绘于图 8。由图 8 可得，相同的海水深度，马卡斯特公式确定最小覆岩厚度值比数值计算确定的最小覆岩厚度值要大，两条曲线之间对应的覆岩厚度可作为确定海底隧道最小覆岩厚度参考值。

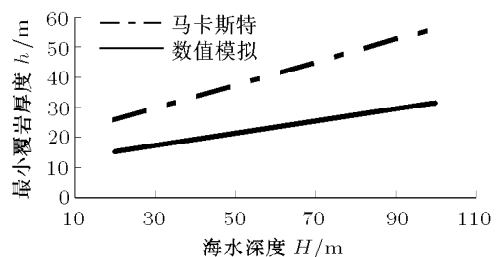


图 8 海水深度与最小覆岩厚度关系曲线

4 结论

对半无限空间水文地质模型，分别采用经验解析法和数值模拟法，计算隧道涌水量，分析不同海水深度下海底隧道涌水量与覆岩厚度的关系，得出如下结论：

(1) 对于海水深度、覆岩厚度和隧道断面形状一定时,海底隧道涌水量与围岩渗透系数成线性关系.

(2) 海底隧道涌水量与覆岩厚度关系呈近似抛物线形,涌水量随覆岩厚度增大而逐渐减小,达到某个最小值时,又逐渐增大.

(3) 根据日本最小涌水量法,分别用马卡斯特公式和数值方法计算隧道涌水量,并差值得到海水深度对应的最小覆岩厚度,得出最小覆岩厚度与海水深度成近似线性关系.

参 考 文 献

- 1 Odgard Anders, Bridges David G, Rostam Steen. Design of the storebelt railway tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 19(3): 293~307
- 2 Eisenstein ZD. Large undersea tunnels and the progress of tunneling technology. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, 9(3): 283~292
- 3 Kitamura Akira. Technical development for the seikan tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1986, 1(3/4): 341~349
- 4 杨家岭, 邱祥波, 陈卫忠等. 海峡海底隧道及其最小覆岩厚度问题. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增 1): 2132~2137(Yang Jialing, Qiu Xiangbo, Chen Weizhong, et al. Subsea tunnel through channel and its minimum rock cover. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(z1): 2132~2137(in Chineses))
- 5 邓英尔, 谢和平等. 低渗透微尺度孔隙气体渗流规律. 力学与实践, 2005, 27(2): 33~35(Deng Ying'er, Xie Heping, et al. Gas flows in micro-scale pore of low permeability porous media. *Mechanics in Engineering*, 2005, 27(2): 33~35(in Chineses))
- 6 王建秀, 朱合华, 叶为. 隧道涌水量的预测及工程应用. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1150~1153 (Wang Jianxiu, Zhu Hehua, Ye Weimin. Forward and inverse analyses of water flow into tunnels. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(7): 1150~1153 (in Chinese))
- 7 董国贤. 水下公路隧道. 北京: 人民交通出版社, 1984, 65~68