

厦门翔安海底隧道衬砌水压力特征研究

程正明

(厦门路桥建设集团有限公司,福建厦门 361009)

[摘要] 合理确定衬砌水压力是海底隧道结构设计的关键所在。采用复变函数和地下水动力学理论,推导了圆形海底隧道衬砌外水压力解析法计算公式,经对比验证,精度高、适用性广。通过海底隧道水压力模型试验研究得到,全封堵防水方式下,衬砌背后水压不能折减;限量排放时,衬砌背后水压力随排水量的增加而减小,建立了限量排放下的水压力计算公式,得到现场实测结果验证。研究成果应用于国内第一条海底隧道——厦门翔安海底隧道,为“以堵为主、限量排放”的支护结构设计和海底风化槽地段注浆堵水方案的制订提供了关键技术参数,现场应用成效良好。相关研究成果对后续海底隧道工程具有一定借鉴意义。

[关键词] 海底隧道;衬砌;水压力;模型试验;限量排放;折减

[中图分类号] U455 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)11-0029-07

1 前言

随着国民经济的快速发展,我国对海底隧道的建设需求将日益增加。对于暗挖海底隧道而言,衬砌水压力是支护结构的主要荷载之一,是确定支护结构设计参数的关键,必须对由围岩、注浆圈和衬砌组成的渗流场进行系统研究,以合理确定衬砌水压力。

目前,有关海底隧道衬砌水压力的研究成果还不多见,设计大都采用经验或半经验法进行计算^[1]。隧道衬砌水压力和渗流场计算主要有解析法、数值分析法、模型试验、现场监测等方法。解析法具有精度高、概念清晰的优点,如 Harr^[2]基于镜像法原理求解了隧道围岩孔隙水压力分布, Bouvard^[3]假定隧道周围径向流动,提出了渗流计算公式,但解析法现有研究成果适用范围有限,还不能很好解决复杂地质条件和复杂结构形式的海底隧道实际工程问题。数值分析法适用范围广,但其对工程实际条件模拟精确度不同将导致计算结果出现偏差,且不好验证。模型试验可以较好地模拟实际工程,特别是可同时考虑水压、土压作用的相似模型试验能够真正模拟渗流场与应力场的共同作用^[4-6],

是研究海底隧道衬砌外水压力的一种有效途径,很多情况下可以较好弥补数模分析的不足,但试验成本也相对较高。现场监测主要是事后性的,且目前针对已建海底隧道衬砌水压力监测的研究成果还很少见,难以指导设计。

厦门翔安海底隧道是国内第一座海底隧道,也是当今世界最大断面钻爆法海底隧道,地质条件十分复杂,隧道穿越海底风化槽地段,围岩承受近70 m水头的海水压力,衬砌水压力如何取值是其支护结构设计中需要解决的关键技术问题。为此,开展了海底隧道衬砌水压力计算理论及模型试验研究和施工现场监测,本文对相关研究成果和工程应用实践经验进行总结。

2 衬砌外水压力解析解

2.1 基本假定

基本假定:围岩和注浆圈为均质各向同性;隧道处于稳定渗流状态;水流符合达西定律;水直接从初期支护表面渗出。

事实上,在施工期间,海底隧道渗水是通过初期支护个别渗水点排出的,二次衬砌封闭后不允许渗水,渗水通过设置在初期支护和二次衬砌之间的排

[收稿日期] 2012-08-25

[作者简介] 程正明(1964—),男,福建莆田市人,高级工程师,研究方向为隧道工程施工管理;E-mail:83101580@qq.com

水系统排出。在这种情况下,可以将初期支护排出的水视为均匀分布到全断面上,用“折合渗透系数”来考虑排水效应^[7]。对于二次衬砌,可将其渗透系数取得很小,基本上为不透水材料。

2.2 围岩内的渗流场

圆形海底隧道围岩内渗流场计算模型如图 1 所示。

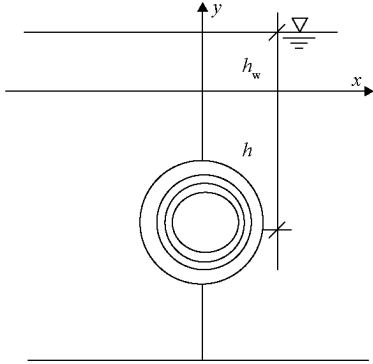


图 1 海底隧道围岩内渗流场计算模型

Fig. 1 Calculation model of inside seepage field of surrounding rocks in subsea tunnel

根据复变函数理论和水动力学原理,每延米隧

$$Q_0 = \frac{2\pi(h_w - H_0)}{\left[\frac{\ln(r_1/r_0)}{k_1} + \frac{\ln(r_c/r_1)}{k_c} + \frac{\ln(r_g/r_c)}{k_g} + \frac{\ln \left| \frac{h}{r_g} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_g}\right)^2 - 1} \right|}{k_r} \right]} \quad (4)$$

将上式代入式(2)和式(3)得

$$H_1 = H_0 + \frac{(h_w - H_0) \ln(r_1/r_0)}{\left[\ln(r_1/r_0) + \frac{k_1}{k_c} \ln(r_c/r_1) + \frac{k_1}{k_g} \ln(r_g/r_c) + \frac{k_1}{k_r} \ln \left| \frac{h}{r_g} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_g}\right)^2 - 1} \right| \right]} \quad (5a)$$

$$H_c = H_0 + \frac{(h_w - H_0) \ln(r_1/r_0)}{\left[\ln(r_1/r_0) + \frac{k_1}{k_c} \ln(r_c/r_1) + \frac{k_1}{k_g} \ln(r_g/r_c) + \frac{k_1}{k_r} \ln \left| \frac{h}{r_g} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_g}\right)^2 - 1} \right| \right]} + \frac{(h_w - H_0) \ln(r_c/r_1)}{\left[\frac{k_c}{k_1} \ln(r_1/r_0) + \ln(r_c/r_1) + \frac{k_c}{k_g} \ln(r_g/r_c) + \frac{k_c}{k_r} \ln \left| \frac{h}{r_g} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_g}\right)^2 - 1} \right| \right]} \quad (5b)$$

以上各式中: Q_0 为每延米隧道渗流量; H_0 为二次衬砌内表面水头; H_1 为二次衬砌背后水头; H_c 为初期支护背后水头; H_g 为注浆圈外表面水头; h 为海床面距隧道中心的距离; h_w 为海平面距海床面的距离; k_r 为围岩渗透系数; k_g 为注浆圈渗透系数; k_1 为二次衬砌渗透系数; k_c 为初期支护渗透系数; r_0 为二次衬砌内半径; r_1 为二次衬砌内半径; r_c 为初期支护外半径; r_g 为注浆圈半径。

道排水量

$$Q_0 = \frac{2\pi(h_w - H_g)k_r}{\ln \left| \frac{h}{r_g} - \sqrt{\left(\frac{h}{r_g}\right)^2 - 1} \right|} \quad (1)$$

2.3 注浆圈及衬砌内的渗流场

根据水动力学原理,每延米隧道排水量

$$Q_0 = \frac{2\pi(H_g - H_0)k_1}{\ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{k_1}{k_c} \ln \frac{r_c}{r_1} + \frac{k_1}{k_g} \ln \frac{r_g}{r_c}} \quad (2)$$

初期支护、二次衬砌和注浆圈外水压力和隧道排水量之间有如下的关系

$$\begin{aligned} H_1 - H_0 &= \frac{Q_0}{2\pi k_1} \ln \left| \frac{r_1}{r_0} \right| \\ H_c - H_1 &= \frac{Q_0}{2\pi k_c} \ln \left| \frac{r_c}{r_1} \right| \\ H_g - H_c &= \frac{Q_0}{2\pi k_g} \ln \left| \frac{r_g}{r_c} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

2.4 暗挖海底隧道渗流场的解析解

根据渗流场连续性原理,式(1)和式(2)两个渗流量 Q_0 应相等,且两者注浆圈外水压力应相等,由此可得

一般来说 h_w 、 h 和 H_0 为已知,可通过式(5a)求出衬砌后水压力和渗流量。将式(5a)略作改动,可以得到仅施工注浆圈、仅施工初期支护等不同施工阶段的水压力分布,即式(5b)。

2.5 解析解验证

鉴于 Harr 解在进行高水压深埋隧道渗流场的计算中具有很高的精度^[2],可作为验证参照。为此,将本文推导的计算公式与 Harr 解进行对比。计

算条件为埋深 $h = 45$ m, 隧道开挖半径 $r = 5$ m, 岩体的渗透系数 $k = 10^{-6}$ m/s, 水位线位于地表, 对比结果如图 2 所示。

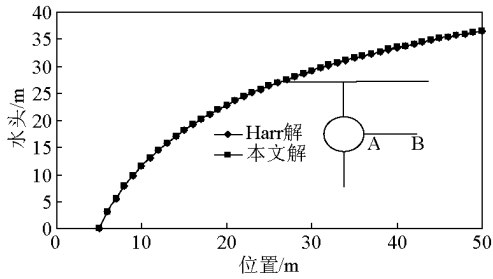


图2 解析解与 Harr 解的对比 (AB 线)

Fig. 2 Comparison of analysis and Harr analysis (AB line)

经过以上对比可知: 在 AB 线上 (隧道中心所在水平线), 本文的解析解和 Harr 解完全吻合。

Harr 解不能考虑水位位于地表以上即水底隧道的情况, 而且对于由围岩、注浆圈、衬砌组成的渗流场不能求解出衬砌外水压力。本文推导得到的公式可弥补 Harr 解的这些不足, 可求解圆形水底隧道不同施工阶段的水压力分布, 适用性更广。

对于非圆形断面隧道、非均质地层、考虑限量排放的复杂水底隧道水压力工程问题, Harr 解和本文推导的公式都尚无法解决。为满足复杂工程实际需要, 因此还研究了海底隧道水压力模型试验。

3 水压力模型试验

3.1 试验概况

厦门翔安海底隧道行车隧道为三车道大断面隧道, 为进行水压力模型试验, 专门研发了可同时加载水压力和围岩压力的大型隧道模型试验系统。台架尺寸为 $260 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 180 \text{ cm}$, 竖向 4 个液压加载千斤顶, 水平方向左右各 2 个液压加载千斤顶, 每个最大加载 500 kN。同时可在上顶面施加 $0 \sim 0.5$ MPa 的水压。液压加载系统与水压加载系统相互独立。

通过建立相应的相似准则, 利用土工试验选取相似材料, 建造模型, 获得不同防排水方式下衬砌背后水压力。水压力测点布置如图 3 所示。

试验过程: 制作隧道结构模型; 安装光纤光栅应变传感器; 安装模型外防排水系统; 在台架内安装隧道模型、回填岩土体及埋设水压测试点; 施加土压力至稳定状态; 施加水压至稳定状态; 测试衬砌背后水

压力、注浆圈外渗透压及结构应变值。

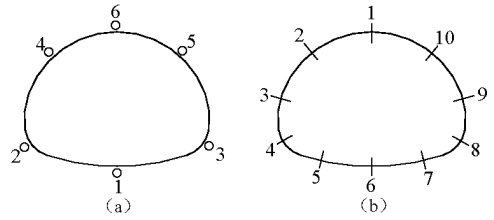


图3 水压(a)及应力(b)测点布置图

Fig. 3 Layout of water pressure (a) and stress monitoring point (b)

施加的水压力: 翔安海底隧道最大拱顶水压力为 0.65 MPa, 拱顶覆土为 $40 \text{ m}^{[7,8]}$; 根据相似理论, 模型拱顶水压为 $0.65/39$ (0.02 MPa, 覆土厚为 $40/39 = 1.0$ m, 根据模型尺寸, 按式(6)计算所需施加千斤顶的液压力

$$F = \gamma h' S = 19 \times 40/39 \times 2.6 \times 1 = 50.8 \text{ kN} \quad (6)$$

则每个千斤顶压力为: $F/4 = 12.7 \text{ kN}$ 。

3.2 不同防排水方式下衬砌水压力分布

1) 全封堵时。全封堵条件下, 考虑到 U 型水银管的测试精度和为了更好地显现在变排量过程中各个测试点的水压变化规律, 在全封堵方式和排导方式下将试验水压调至 0.04 MPa。外水压 0.04 MPa 时注浆圈外及衬砌背后水压分布规律如图 4 所示。

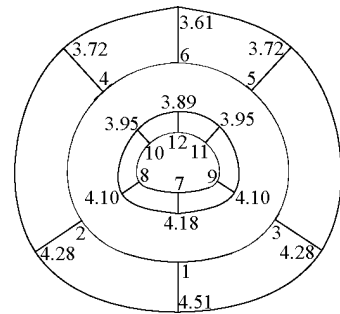


图4 0.04 MPa 时注浆圈外及衬砌背后水压分布 (单位: m)

Fig. 4 The distribution of water pressure behind the lining and grouting when bear 0.04 MPa water pressure (unit: m)

由图 4 可以得出, 隧道衬砌全封堵防水时, 注浆圈外侧和衬砌背后的水压力作用系数基本都等于 1.0, 即衬砌背后水压等于静水压 0.04 MPa。因此, 在衬砌全封堵状态下, 不论围岩、注浆圈渗透系数的大小, 衬砌背后最终承受的水压力都等于静水压力, 不能折减。

2)不同排水量时。试验过程中当水压加载到 0.04 MPa 时,保持进水口水压 0.04 MPa 不变,逐渐增大隧道排水量,当每级排水量稳定后,记录各测点的读数,分别得到 6.85 mL/s、15.26 mL/s、

27.03 mL/s、37.89 mL/s、43.28 mL/s、55.83 mL/s 六种排量下的水压。不同排水量时衬砌背后及注浆圈外水压分布规律如图 5 所示。

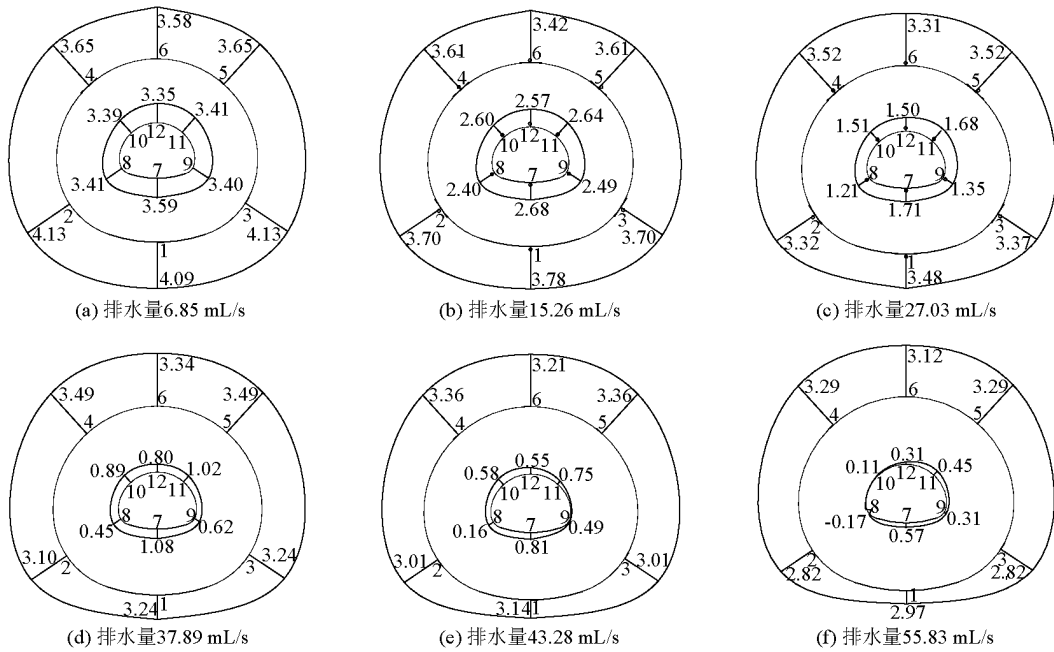


图5 不同排水量时衬砌背后及注浆圈外水压分布(单位:m)

Fig. 5 The distribution of water pressure behind the lining and grouting at different drainage discharge (unit: m)

从上述试验结果,可得出以下规律:排水后衬砌背后各点水压明显减小,随着隧道排水量的增加,注浆圈外渗透压和衬砌背后水压力均逐渐减小;隧道排水量越大,各测点水压力减小的规律越明显,且基本呈直线下降;排水量较小时,排水口处水压减小趋势明显,随着排水量增大,排水口处水压减小程度减弱。

通过对试验结果数据进行回归分析,得出了定水头条件下注浆圈外侧各点的水压力 p_r 、衬砌背后各点的水压力 p_l 与隧道控制排水量 Q_0 关系公式如下

$$p_r = -0.0264Q_0 + 4.3042 \quad (7)$$

$$p_l = -0.0714Q_0 + 3.7571 \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, p_r 、 p_l 为水压力, m; Q_0 为隧道控制排水量, mL/s。

4 现场应用与监测分析

4.1 支护结构及防水设计

基于以上研究成果,翔安海底隧道采取“以堵为主,限量排放”的防排水原则,衬砌设计为限量排

放型,以降低衬砌背后水压力。隧道支护结构及防水体系由以下几部分组成:围岩注浆堵水、初期支护抗渗防水、纵环向盲管排水、无纺布+防水板(仰拱以上)、二次衬砌混凝土自身防水、施工缝(或伸缩缝)防水处理等,如图 6 所示。沿隧道纵向每 10 m 设一分区,进行纵向分段隔离,即分区隔仓防水。

根据模型试验研究成果,综合进行支护结构设计,对于极为软弱的海底风化槽地段,行车隧道围岩注浆圈为开挖轮廓线外 5 m(渗透系数控制为 10^{-5} cm/s 级),初期支护为 22b 工字钢支撑(每榀间距 50 cm),双层 $\phi 8$ mm 钢筋网(间距 20 cm \times 20 cm),30 cm 厚 C25 喷射混凝土,抗渗等级 P8;二次衬砌为 70 cm 厚 C45 钢筋混凝土,布设 $\phi 25$ mm 钢筋(间距 20 cm),抗渗等级 P12。

4.2 水压力现场监测方案

为验证上述水压力研究成果,更好地指导设计和施工,在翔安海底隧道施工现场对初期支护后水压力、围岩压力和初期支护钢拱架内力进行跟踪量测,测试断面选在 ZK11+820、ZK11+810(全、强风化花岗岩地段)和 ZK11+600(强风化花岗岩地段)

共3个断面,这些断面全水头水压均为约0.6 MPa。

监测过程中要测定初期支护后的超孔隙水压力,要求测试设备的感应器可以预埋在结构层内且不易损坏,同时排除固体压力传递的干扰。基于以

上考虑,选用振弦式渗压计,渗压计的形状及埋设方法如图7、图8所示。翔安海底隧道全强风化地层采用交叉中隔墙法(CRD)施工,分4个导坑依次开挖,渗压计布置见图9。

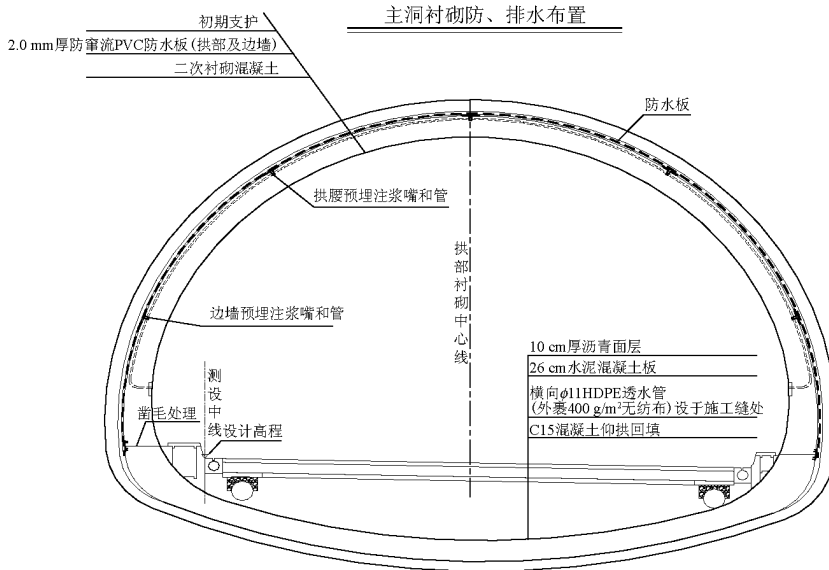


图6 行车隧道防水体系

Fig. 6 Waterproof system of road tunnel



图7 XJS-3型渗压计

Fig. 7 XJS-3 osmometer



图8 现场渗压计布置图

Fig. 8 Arrangement diagram of osmometer

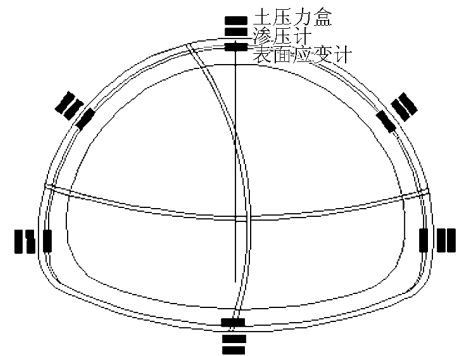


图9 测点布置图

Fig. 9 Layout of water pressure monitoring point

图12所示,最大水压力如表1所示。

表1 各断面最大水压力

Table 1 Maximum water pressure list

监测断面位置	最大水压力/MPa	最大水压力折减系数
K11+820	0.084	0.14
K11+810	0.125	0.21
K11+600	0.143	0.24

4.3 监测结果分析

现场监测初期支护背后水压力曲线如图10~

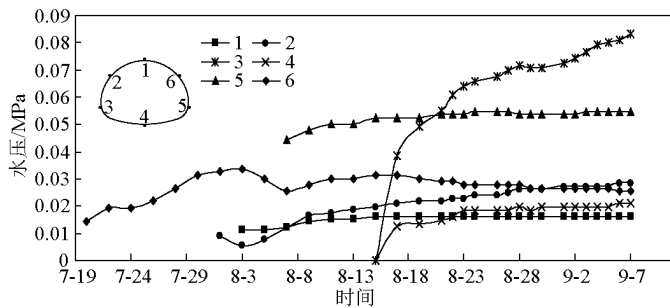


图 10 K11+820 断面水压监测值时程曲线图

Fig. 10 Water pressure monitoring value curve diagram at section K11+820

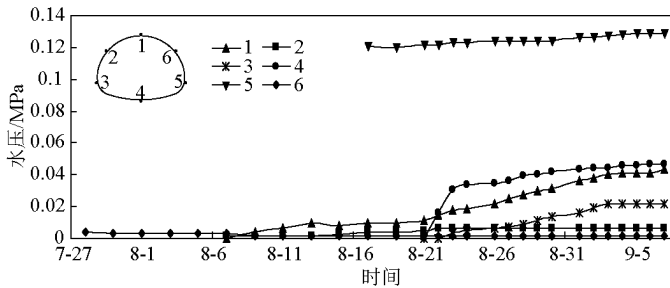


图 11 K11+810 断面水压监测值时程曲线图

Fig. 11 Water pressure monitoring value curve diagram at section K11+810

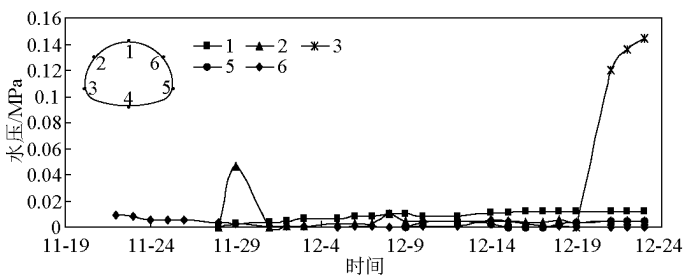


图 12 K11+600 断面水压监测值时程曲线图

Fig. 12 Water pressure monitoring value curve diagram at section K11+600

由现场监测结果可得出以下结论。

1) 孔隙水压力变化分布的特征如下:隧道分 4 个导坑,按右上一左上—右下一左下的顺序开挖,各导坑开挖面处的孔隙水压力为最小值(近似零),近似渗流自由面;随着各导坑初期支护陆续封闭,孔隙水压力逐渐增加,至一定值后趋于稳定,此时距隧道初期支护全断面闭合环约 7~10 d,离最近的导坑开挖面约 10 m。这一规律与模型实验结果相一致。

2) 三个断面的平均最大水压力折减系数为 0.20。根据模型试验所得公式计算(根据设计方案,取注浆圈渗透系数为围岩渗透系数的 1/50),水压力折减系数为 0.24。对比可见,两者基本相符。由此说明,考虑到注浆堵水加固圈保持完整时发挥的作用,初期支护在施工期间按承受 1/3 水压力考虑是比较合适的。

5 结语

1) 利用复变函数和地下水动力学理论,求解了海水、围岩、注浆圈、衬砌混凝土组成的海底隧道渗流场,推导了圆形海底隧道衬砌外水压力计算公式。经对比验证,表明本文的解析解具有较高的精度和更广泛的适用性。

2) 通过模型试验得到:若隧道采用全封堵防水方式,隧道内不排水,则衬砌背后水压不能折减;若隧道采用限量排放的防排水方式,衬砌背后水压力随排水量的增加而减小,建立了限量排放下的水压力计算公式,其准确性得到现场实测结果的验证。

3) 根据模型试验研究成果,厦门翔安海底隧道采取“以堵为主,限量排放”的防排水原则,设计为限量排放型衬砌,经现场实测与模型试验结果对比,

其初期支护在施工期间可按承受 1/3 的水压力考虑。海底风化槽地段堵水方案关键参数如下:注浆圈为开挖轮廓线外 5 m(渗透系数控制为 10^{-5} cm/s 级),初期支护厚度为 30 cm(抗渗等级 P8)。

参考文献

- [1] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范 (JTG D70—2004) [S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] Harr. Groundwater and seepage [M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [3] Bouvard. Aménagement Capivari-Cachoeira: etude du puits en change [M]. Paris: La-Houille Blanche, 1969.
- [4] 周乐凡. 考虑外水荷载作用的铁路隧道衬砌结构设计研究

[D]. 北京:铁道部科学研究院,2003.

- [5] 李仲奎,卢达溶,中山元,等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报,2003,22 (9):1430-1436.
- [6] 李健,谭忠盛,王秀英,等. 海底隧道施工过程中初期支护受力特征试验研究 [J]. 北京交通大学学报, 2012,36(1):30-35.
- [7] 朱光仪. 厦门翔安隧道及两岸接线工程两阶段施工图设计 [R]. 武汉:中交第二公路勘察设计研究院,重庆交通科研设计院. 2005.
- [8] 夏支埃. 厦门东通道工程施工图设计阶段工程地质综合勘察报告 [R]. 武汉:中交第二公路勘察设计研究院,中铁大桥勘测设计院有限公司. 2005.

Study on water pressure characteristics of Xiamen Xiang'an Subsea Tunnel

Cheng Zhengming

(Xiamen Road & Bridge Construction Group Co., Ltd, Xiamen, Fujian 361009, China)

[Abstract] The reasonable water pressure upon lining determination is the key to structure design of subsea tunnel. The analytic method calculation formula of outside pressure upon lining of circular subsea tunnel was derived with complex function and groundwater dynamic theory. It was verified that the calculation formula is high precision and extensive applicability by lots of contrast. Results of model tests showed that under the condition of fully closed, the pressure on lining could not be reduced; the water pressure would significantly reduce if the water of the tunnel was drained, and it would be presented linear decreasing with the increase of the water discharge. Lining external water pressure formula under limited drainage was established, and it was also verified by field tests. The research results were applied in the first subsea tunnel in China, Xiang'an Subsea Tunnel, which is built in Xiamen. And it provided key technique parameter to determination of support structure design and programme of blocking water by grouting, following the principle plugging dominantly and limited drainage. The field application obtained good results. Research results would have certain reference significance to the following subsea tunnel.

[Key words] subsea tunnel; lining; water pressure; model test; limited drainage; reduction