

跨海峡隧道风化槽围岩衬砌防排水技术研究

郭小红^{1,2}, 陈卫忠^{3,4}, 曹俊杰⁴, 梁巍², 于洪丹⁴

(1. 北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056;
3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 4. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室,
湖北 武汉 430071)

摘要: 采用钻爆法修建海底隧道必须采取有效措施预防塌方、涌水、突泥等地质灾害, 海底隧道钻爆法施工时如何安全穿越断层破碎带是工程设计与施工的技术难点。结合厦门跨海峡隧道围岩的特点, 研究钻爆法穿越断层破碎带的注浆加固、防排水技术, 提出不同围岩条件下的隧道防排水和注浆设计方案。并根据实验室三轴试验结果得到强风化花岗岩渗透系数以及反演的围岩力学参数, 分析风化槽隧道衬砌的外水压力分布特点和量值。研究成果为衬砌结构设计以及国内同类型隧道的衬砌防排水和衬砌支护技术设计提供可靠指导。

关键词: 隧道工程; 海底隧道; 风化槽; 衬砌; 外水压力; 数值仿真

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1481 - 08

WATERPROOF AND DRAINAGE TECHNOLOGIES FOR LINING OF SUBSEA TUNNEL IN WEATHERED TROUGH

GUO Xiaohong^{1,2}, CHEN Weizhong^{3,4}, CAO Junjie⁴, LIANG Wei², YU Hongdan⁴

(1. *Engineering Research Center of Tunnel and Underground Engineering, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*; 2. *Second Highway Consultants Co., Ltd., China Communications Construction Corporation, Wuhan, Hubei 430056, China*; 3. *Research Centre of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China*; 4. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China*)

Abstract: Effective measures should be adopted to avoid geologic hazard such as collapse, water gushing and debris flow, when the drill and blast method is used to construct subsea tunnel. In the drill and blast method, the technical difficulty for engineering design and construction is how to ensure the safety of project when the tunnel passes through the fault zone. Combined with the characteristics of surrounding rock in Xiamen subsea tunnel, the grouting reinforcement, waterproof and drainage techniques are studied; and the related design schemes are proposed for tunnel passing through the fault zone with drill and blast method. According to the laboratory triaxial test results, the permeability of highly weathered granite is obtained. And the mechanical parameters of surrounding rock are obtained by back analysis. The distribution of external water pressure on lining of tunnel in weathered trough is obtained by numerical simulation. The achievements obtained in the research will benefit other subsea tunnels in practical engineering.

Key words: tunnelling engineering; subsea tunnel; weathered trough; lining; external water pressure; numerical simulation

收稿日期: 2010 - 01 - 21; **修回日期:** 2010 - 04 - 05

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50720135906); 国家自然科学基金面上项目(40772184); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2009CB724603); 交通运输部行业科技攻关项目资助

作者简介: 郭小红(1966 -), 男, 1989年毕业于同济大学地下建筑工程专业, 现任教授级高级工程师, 主要从事地下工程方面的研究工作。E-mail: wuhangxh@vip.sina.com

1 引言

海(水)底隧道工程施工与运营管理过程中出现的围岩失稳事故与地下水密切相关^[1~4]。地下水对隧道荷载作用是隧道设计中的一个关键问题,对这一问题的争论延续了几十年,迄今仍然是众说纷纭,地下水对衬砌的作用一直被认为是作用在其外缘上的边界荷载,随着隧道设计理论的发展,对地下水的作用也有了新的认识。当衬砌被用作防止围岩坍塌的主动支护时,衬砌的目的是与围岩共同作用,以便充分发挥围岩的自承作用。这时,衬砌的外缘不再是结构的自由边界,而是和围岩共同合成一个整体。当衬砌与围岩接触面之间产生缝隙时,作用于衬砌内的渗流体积力可近似用衬砌外缘的水压力代替。

采用钻爆法修建海底隧道必须采取有效措施预防塌方、涌水、突泥等地质灾害。海底隧道与山岭隧道最大的不同点是直接处于水下作业,险情大,一旦遭遇大塌方和涌水将十分难以处理,甚至成为工程成败关键。在海底岩层中穿越的隧道工程,勘测、定位和选线受限制很大,故其穿越断层破碎带的几率高,数量也多。海底隧道都是处于水系之下,地下水富存,断层破碎带若与其上或其附近的水系相沟通,随时都有可能给工程带来淹没、塌方、涌水或形成泥石流的风险。如日本青函隧道发生过 4 次较大塌方涌水事故,最严重的一次 1976 年 5 月 6 日发生在北海道侧平行导坑内、由凝灰岩断层破碎带内的高压水引起,涌水量高达 70 m³/min,经修挡水墙、压浆堵水封断水源,而后又开挖迂回坑道,用了 5 个月时间才绕过了涌水段。因此,海底隧道钻爆法施工时如何安全穿越断层破碎带是施工难点与技术关键点。目前国内外通常采用的方法是强行穿越法、注浆法、冷冻法和其他辅助方法。这些方法各具特色,在工程实践中为了合理地选用穿越断层破碎带的技术方法,必须综合考虑断层破碎带的规模、断层内构造岩的特色、水文地质条件、破碎带的部位等方面情况,在此基础上进行方案设计。

迄今为止,对于海底隧道,衬砌承受水压力的设计大小取决于防排水方式的设计,有 2 种极端情况:第一,如果衬砌完全不排水,则衬砌承受的水压力为全水头;第二,如果衬砌为全排水,则可以认为衬砌背后不承受水压。一般情况下,海底隧道都设计为限量排放,衬砌背后水压力介于上述 2 种极端

情况之间,水压大小取决于围岩的裂隙发育情况、注浆效果以及排水量的大小。

国外对不排水隧道衬砌外水压力的取值也极不统一,大体有以下 3 种情况:

(1) 折减系数法。澳大利亚、美国及日本根据不同工程,其折减系数为 0.15~0.90。

(2) 全水头法。美国及法国常用此法。

(3) 可能最大水头值。美国、加拿大及巴西经常将隧道衬砌所承担的静水头计算到地表。

张有天^[5]建议,作用于水工隧洞衬砌上的外水压力为

$$P_0 = \beta_1 \beta_2 \beta_3 \gamma h_0 \quad (1)$$

式中: β_1 为初始渗流场隧道轴线处外水压力修正系数,当河床下有缓倾角构造,或有水平卸荷裂隙以及岸坡较陡时, $\beta_1 = 1.05 \sim 1.25$; β_2 为考虑衬砌与围岩渗透系数相对值对外水压力的修正系数; β_3 为考虑排水设施时外水压力的修正系数。

中国大陆第一条跨海隧道厦门翔安隧道所穿越地质中陆域段多为回填土、砂土和全风化软土,地下水发育,渗水量大;其浅滩段富水砂层和海域段 4 个风化深槽均直接与海水连通。设计灵活地运用了以堵为主,PVC 分区防水,配置注浆管的背贴式防水带和中埋式止水带,特殊地段设置防水闸门,全断面帷幕注浆、超前预注浆、周边注浆、局部渗漏处注浆等防水、止水措施。根据结构形式采用全封闭与局部限量排导相结合的防排水方案,主隧道在全、强风化、断层破碎带等渗水量较大的地段采用全封闭方案;在 I、II 级围岩等渗水量小的地段采用限量排导方案,允许少量渗水限量排放。服务隧道为近似圆形的小断面,全部采用全封闭衬砌方案。通过注浆堵水,加强结构的自防水功能,严格控制防水施工质量等措施构建防水体系。

本文根据翔安隧道强风化花岗岩三轴试验得到的渗透性的实验成果和本构力学模型,通过数值仿真的方法研究风化槽隧道衬砌在全堵条件下的隧道衬砌外水压力和应力分布,验证设计参数的合理性,研究成果为国内其他跨海峡隧道工程衬砌设计提供技术借鉴。

2 工程概况

2.1 工程地质概况

根据地质调绘和钻探揭示,厦门海底隧道勘察

场区地层主要为第四系覆盖层及燕山期侵入岩两大类。场区基岩以燕山早期第二次侵入的花岗闪长岩及中粗粒黑云母花岗岩为主, 海域及五通岸为花岗闪长岩分布区, 同安侧潮滩及其以北地带为黑云母花岗岩分布区。其内穿插二长岩、闪长玢岩、辉绿岩(玢岩)等岩脉, 岩脉以辉绿岩最为多见, 多沿本场区最为发育的近 SN 向及 NNE 向高角度裂隙侵入, 脉宽一般不足 1 m, 个别部位宽达 10~20 m; 二长岩脉多分布于 F₁, F₄ 深槽, ZTK17, EXK33, EXK48 钻孔也有揭示, 在五通侧潮滩后缘(初勘 CZK4 孔附近)有所出露, 总体呈 NEE 向展布, 延伸不远, 最宽处约 10 m, 其内原生节理及密闭裂隙很发育; 五通岸 XZK9 孔揭示了微风化的闪长岩, 同安岸钻孔多处揭示了已风化为土状的细粒闪长岩, 连接线(初勘 ZSK11 及 YSK12 孔)还揭示了闪长玢岩脉体。基岩按风化程度可分为全、强、弱、微 4 个风化带。

厦门海底隧道在施工过程中穿越 F₁, F₂, F₃, F₄ 四条断层破碎带, 其洞体围岩软弱、破碎, 为风化破碎类花岗岩, 该类岩石尤其是强风化花岗岩强度低, 压缩性高, 自稳和自承能力差。

2.2 风化槽围岩渗流应力耦合特性

全、强风化花岗岩应力 - 渗流耦合试验通过双联动软岩渗流 - 应力耦合三轴流变仪上进行的^[6-8], 通过全、强风化花岗岩试样固结排水(不排水)试验结果, 花岗岩天然试样的渗透系数为 6×10^{-7} m/s。翔安海底隧道风化槽围岩三轴试验结果如图 1 所示。

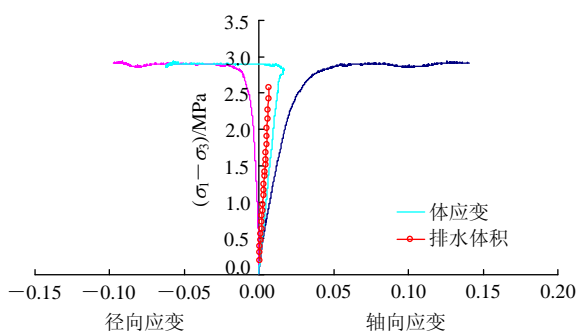


图 1 翔安海底隧道风化槽围岩三轴试验结果

Fig.1 Triaxial test results of surrounding rock in weathered trough of Xiang'an subsea tunnel

根据三轴试验结果, 将强风化花岗岩简化应力 - 应变关系曲线分为 3 个阶段(见图 2):

(1) OA 段, 该段的应力 - 应变曲线基本成直线, 为弹性变形阶段;

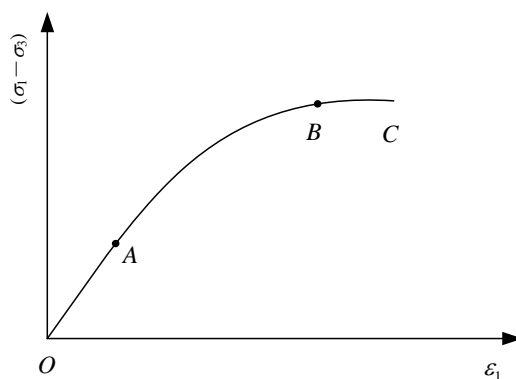


图 2 强风化花岗岩简化应力 - 应变关系曲线

Fig.2 Simplified stress-strain curve of strong weathered granite

(2) AB 段, 为应变硬化阶段, 主应力差与轴向应变之间基本满足双曲线关系;

(3) BC 段, 为理想塑性流动阶段。

为了描述强风化花岗岩复杂的应力 - 应变关系, 可构建如下的弹塑性硬化模型: OA 段采用线弹性模型; 在 AB 段, 硬化现象开始时, 岩体的屈服强度满足 Drucker-Prager 强度准则; 在 BC 段, 理想塑性流动阶段也满足 Drucker-Prager 强度准则。

为了描述强风化花岗岩的塑性硬化行为, 认为黏聚力 c 与等效塑性应变 $\bar{\epsilon}_{pl}$ 的关系满足一阶指数衰减函数, 黏聚力 c 的演化方程为

$$c = c_0 m \eta = c_0 m (A_0 e^{-\bar{\epsilon}_{norm}/t_0} + B_0) \quad (2a)$$

其中,

$$A_0 = \frac{1}{e^{-1/t_0} - 1} \quad (2b)$$

$$B_0 = -\frac{1}{e^{-1/t_0} - 1} \quad (2c)$$

$$\bar{\epsilon}_{norm} = \bar{\epsilon}_{pl} / \max(\bar{\epsilon}_{pl}) \quad (2d)$$

式中: t_0 为待定参数, $0 < t_0 < 1$; m 为待定系数, $m \geq 1$ 。

对风化槽围岩本构参数进行了反演分析。反演程序的收敛容许误差 $eps = 5\%$, 未知参数的反演结果见表 1。

3 风化槽防排水设计

隧道工程对地下水的处治有全封堵和排导 2 种方式。通常情况下, 当水头小于 60 m 时采用全封堵方式; 当水头大于 60 m 时宜采用排导方式, 并通过施做注浆圈来达到限量排放的目的。而厦门翔

表 1 强风化花岗岩本构模型参数反演结果

Table 1 Inversed results of parameters for the constitutive model of weathered granite

弹性模量 <i>E</i> /MPa	泊松比 μ	黏聚力 <i>c</i> /MPa	内摩擦角 ϕ /($^{\circ}$)	剪胀角 ψ /($^{\circ}$)	<i>m</i>	<i>t</i> ₀
300	0.26	0.27	30	15.01	3.56	0.15

安隧道的地下水和海水总水头在 50~70 m 的范围, 从对地下水的处治方式看属于临界状态, 从技术和经济的合理性出发, 采用全封堵和排导二种方式都是可行的^[9~11]。

3.1 地下水处治方案

根据涌水量分析成果, 左、右线裸洞全部排导衬砌最大涌水量分别为 2 530 和 2 685 m³/d, 考虑注浆加固封闭裂隙和初期支护的封堵作用, 隧道建成后稳定涌水量一般仅为正常涌水量的 1/10, 每条隧

道涌水量将很小, 因此部分地段采用排导衬砌方案是合理可行的, 此方案的最大优点是基本上不考虑(并非完全不考虑)衬砌的水压力荷载, 从而使衬砌结构更经济合理。

因此, 主隧道在全、强风化、断层破碎带地段采用全封闭方案; 在 I, II 级围岩地段和横洞等结构交叉地段采用排导方案, 允许少量渗水限量排放(见图 3)。服务隧道由于断面较小, 且根据布置要求, 下部设置水电通道, 上面设置检修通道, 采用似圆形断面布置形式, 断面利用率较高, 且结构受力十分有利, 因此服务隧道全部采用全封闭衬砌结构方案。

3.2 注浆堵水

根据厦门东通道海底隧道在潮间带、断层带、海底风化槽部位地质情况及工程类比, 考虑全断面超前预注浆范围(见图 4)为开挖轮廓线外 5 m, 图 4

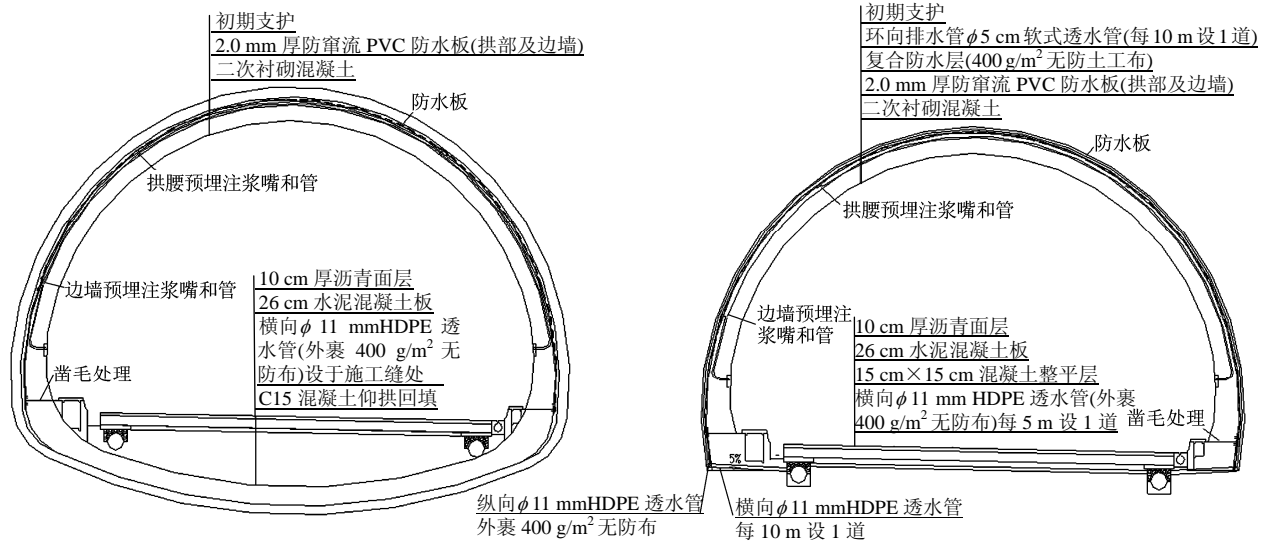


图 3 防排水系统结构断面图

Fig.3 Cross-section of waterproof and drainage system

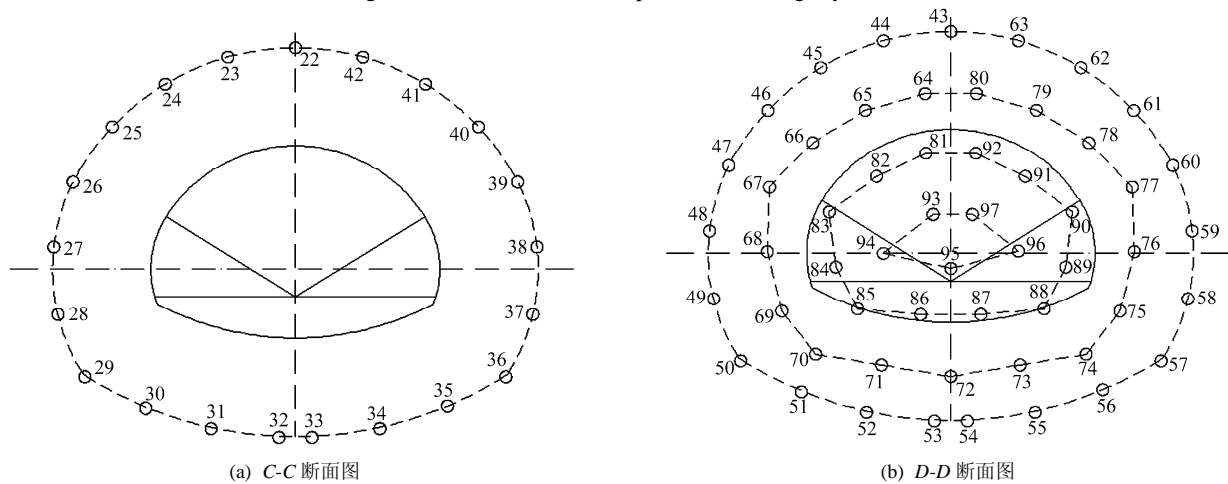


图 4 全断面超前预注浆设计

Fig.4 Full section design of advanced pre-grouting

中数字代表注浆孔编号, 超前小导管注浆加固范围为拱部开挖轮廓线外 1.0~1.5 m。全断面帷幕注浆孔间距一般为注浆扩散半径的 1.50~1.75 倍, 即 $L = (1.50 \sim 1.75)R$, 可根据注浆加固范围、注浆扩散半径均匀布置。小导管沿开挖轮廓线周边布置。小导管为 $\phi 42$ mm 钢花管, 长 3.5 m, 环向间距 0.4 m, 每循环加固 3 m, 开挖 2 m。

3.3 加强结构的自防水功能

加强结构的自防水功能的措施有:

(1) 初期支护防水。初期支护直接与围岩密贴在一起, 直接受地下水和海水的压力和腐蚀, 初期支护采用抗渗等级为 P8 喷射混凝土, 并及时施作回填注浆。

(2) 防水层。初期支护和二次衬砌之间铺设防水层; 采用 2 mm 厚的 PVC 防水板。防水板主要技术指标要求其拉伸强度大于 16.0 MPa, 断裂伸长率大于 250%, 并适当高于有关规范^[12]的要求。

(3) 二次衬砌防水。采用抗渗等级为 P12 的高性能双掺混凝土(掺粉煤灰和矿粉)。

(4) 沉降缝、施工缝设计图见图 5。具体措施为:

① 施工缝防水: 主隧道每 10 m 一个环向施工缝, 服务洞则每 12 m 设一个环向施工缝。主隧道和服务隧道纵向左右边墙与仰拱衔接处各一条纵向施工缝。施工缝在防水板侧设带注浆管的背贴式止水带与防水板焊接, 在二衬混凝土断面中部设带注浆管的橡胶遇水膨胀止水条, 在二衬混凝土表面设深 3.8 cm, 宽 2.5 cm 水泥基渗透结晶型防水涂料。纵向施工缝和环向相交处是容易出现渗漏水的地方, 各在 4 个方向 1.2~1.5 m 范围内涂设日产 P201 遇水膨胀液型密封剂。② 变形缝防水: 在土石分界处、结构

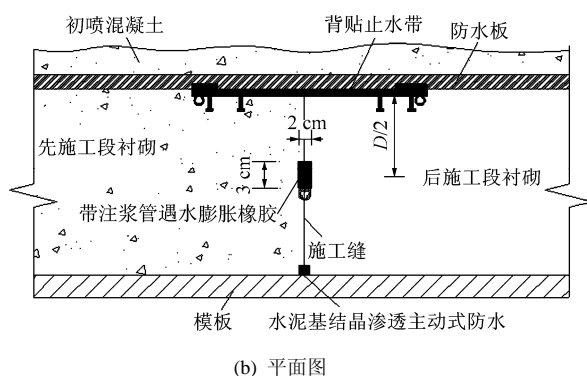


图 5 沉降缝、施工缝设计图

Fig.5 Design of settlement joint and construction joint

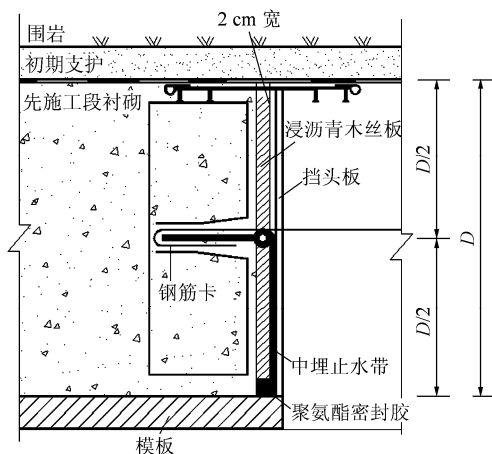
变化处设置变形缝。除在靠防水板侧设带注浆管的背贴式止水带之外, 在二衬混凝土中部设带注浆管的中埋式橡胶止水带, 二衬混凝土表面设不小于 3 cm 深的聚氨酯密封胶。

3.4 分区防水

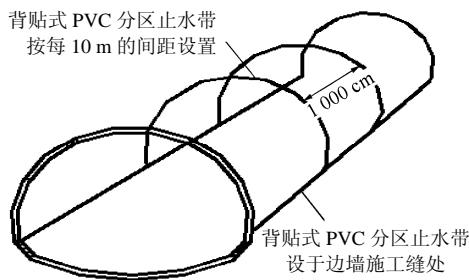
为防止防水板被冲破出现渗流和窜流, 将防水板与二次衬砌之间进行纵向分段隔离, 降低纵向水力联系。分区防水按模板的长度(主洞为 10 m, 服务洞为 12 m)设计。主洞每 10 m 为一防水分区, 在二衬施工缝处设背贴式止水带, 将渗流或窜流水隔开, 并在 10 m 中间设防渗肋条, 如图 6 所示。背贴式止水带、防渗肋条均焊接在防水板上, 每一防水分区在左右边墙下部设注浆管控制盘, 每个控制盘带 5 根注浆管, 并连接于注浆盘, 要求注浆盘用胶带临时封黏于防水板上, 以防浇筑二衬混凝土时砂浆堵塞注浆管。

4 风化槽段衬砌外水压力仿真研究

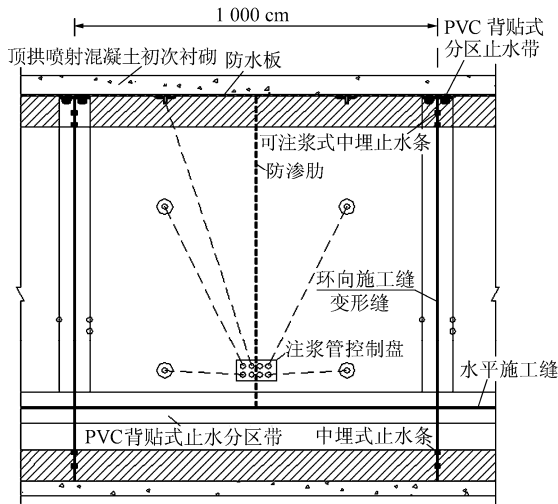
对于海底隧道, 外水压力对结构的影响巨大, 是否折减以及如何折减, 意义重大。本次计算中, 截面位置位于 F₄ 风化槽 ZK8+900 处(见图 7), 模拟了左线行车隧道在风化槽中从超前注浆到 CRD 工法开挖贯通的过程。



(a) 剖面图



(a) 分区防水图



(b) 平面示意图

图6 分区防水图

Fig.6 Water proof design

F₄ 风化槽及其影响带设计地质情况为：以 W₃ 强风化花岗岩为主，夹二长岩岩脉，两侧为弱风化花岗岩(石质)，围岩级别为 IV，V 级，主要组成为弱风化花岗闪长岩(灰白色，中~粗粒结构，块状构造，岩石表面较粗糙，岩芯多呈 10 cm 不规则柱状，岩质硬，裂隙发育)、强风化花岗闪长岩(褐黄色为主，杂少量白斑，岩石风化严重，呈硬塑砂质黏性土状，砂、砾成分主要为石英，且局部含较多高岭土)、强风化二长岩岩脉(褐黄色杂灰白色斑，岩石风化呈硬塑黏性土状含少量风化残块)，其中强风化二长岩脉因高岭土矿物含量较高，具有弱膨胀潜势，其它全、强风化岩不具膨胀性，但不排除局部段因高岭土矿物含量较高而具弱膨胀潜势。

有限元分析模型如图 8 所示，岩体、衬砌均采用平面实体单元，锚杆采用平面梁单元，模型尺寸为 100 m×100 m，隧道拱高 12.5 m，宽 17.5 m，埋深为 35 m，初次衬砌厚 30 cm，预留变形 12 cm，

二次衬砌厚 70 cm，模型共划分 4 112 个单元(围岩和衬砌等由 3 826 个二维实体单元划分模拟，锚杆和钢架支护由 286 个一维杆单元模拟)。

位移边界条件：模型左右两边界施加 X 方向的水平约束；模型底部边界施加 Y 方向的竖向约束；对整个模型施加岩土体自重压力，同时施加上部水压力。

排水边界条件：本文主要模拟隧道长期的稳定性，且强风化槽段岩体渗透系数较大，故模型施工期采用排水边界条件，运行期采用全堵方案。

风化槽地段围岩条件较差，模拟中采用 Drucker-Prager 本构模型，隧道围岩及结构材料基本力学参数见表 2。强风化花岗岩参数见表 1。

图 9 给出了全堵方案下隧道在 CRD 工法开挖完毕拆除了十字支护加上二衬以后的主应力分布云图。从图 9 可以看出，在全堵方案下刚施加的二衬受围岩压力并不是很大，大部分荷载由初衬承担。从图 10(a)可看到，二衬在拱底内侧和侧壁局部区域产生了 0.2~0.3 MPa 的拉应力，其他区域大部分拉应力在 0.1 MPa 以下，而初衬在拱顶、双侧及底部中的局部很小区域产生了大约 1 MPa 的拉应力，最大拉应力值为 1.291 MPa，大部分区域受拉不超过 0.47 MPa；同样在图 10(b)中，二衬大部分区域受到 0.3~0.5 MPa 的压应力，在拱腰外侧和拱肩外侧部分区域受到 0.6 MPa 的压应力，最大压应力值为 0.649 5 MPa，而初衬在拱腰内侧产生了 11~13 MPa 的压应力，最大压应力值为 13.43 MPa，初衬其他大部分区域受到 1.6~9.0 MPa 的压应力。

图 10 给出了全堵方案下二次衬砌的衬砌外水压力分布云图，可以看到在全堵情况下二次衬砌承受着很大的水压力，从隧道顶部的 0.37 MPa 由上到下增长到隧道底部的 0.5 MPa 的水荷载。其量值与经验类比法衬砌水头折算系数为 0.7 得到的水头值

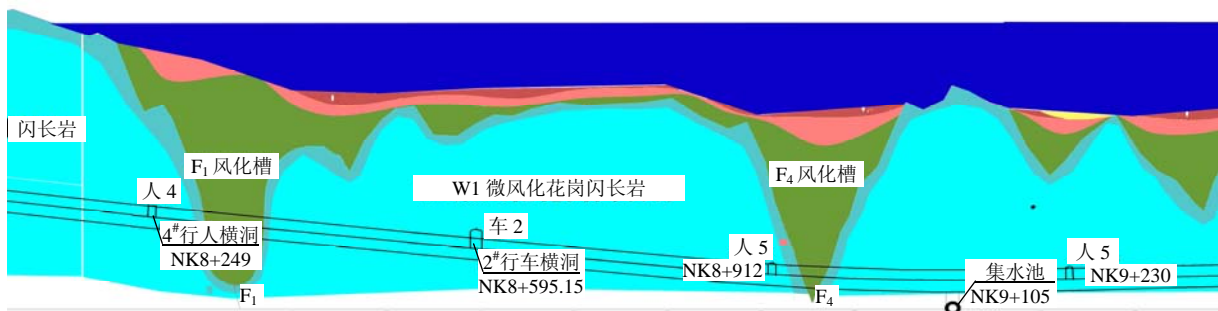


图7 翔安隧道左线风化槽 F₄ 地质剖面图

Fig.7 Geological profile of weathered trough F₄ on the left of Xiang'an subsea tunnel

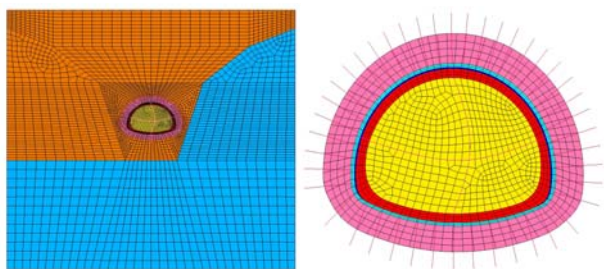


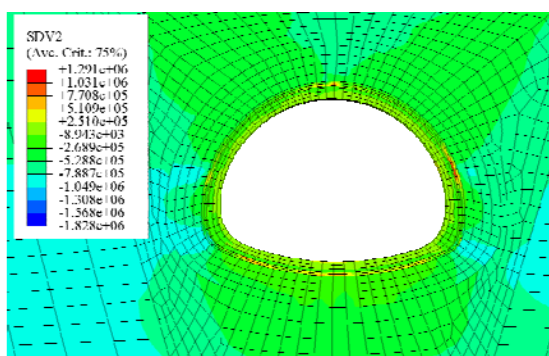
图 8 有限元分析模型

Fig.8 Finite element analysis model

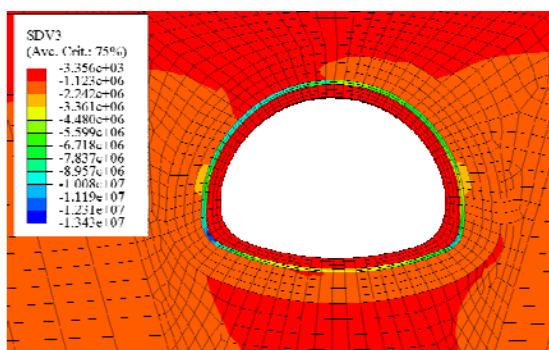
表 2 翔安隧道围岩及结构材料基本物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of surrounding rock and structural materials of Xiang'an subsea tunnel

围岩及结构材料	E/GPa	μ	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c/MPa	$\phi/(\circ)$
微风化花岗岩	15.0	0.29	25	2.40	53
管棚	0.4	0.20	25	3.00	40
初次衬砌	25.0	0.17	25	4.96	48
二次衬砌	35.0	0.20	25	8.45	56
锚杆	104.4	0.20	78	-	-



(a) 最大主应力



(b) 最小主应力

图 9 全堵方案围岩主应力分布云图(单位: Pa)

Fig.9 Nephogram of distribution of principal stresses in surrounding rock for full water ponding design (unit: Pa)

接近。衬砌应力表明目前的支护设计完全可以抵抗这样的水压力。

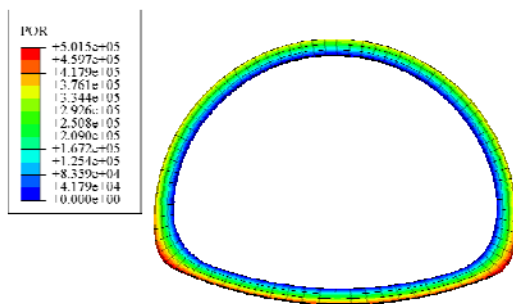


图 10 全堵方案二次衬砌外水压力分布云图(单位: Pa)

Fig.10 Distribution of external water pressure of the secondary lining for full water ponding design (unit: Pa)

5 风化槽段衬砌现场监测

左线台阶上 ZK8+900 处在隧道施工期对拱顶下沉以及水平收敛值等情况进行了跟踪监测, 其时程曲线如图 11, 12 所示, 现场实测结果与计算结果的对比见表 3。

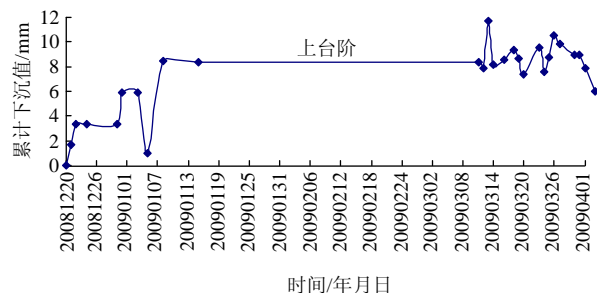


图 11 拱顶累积下沉时程曲线

Fig.11 Cumulative settlement of vault

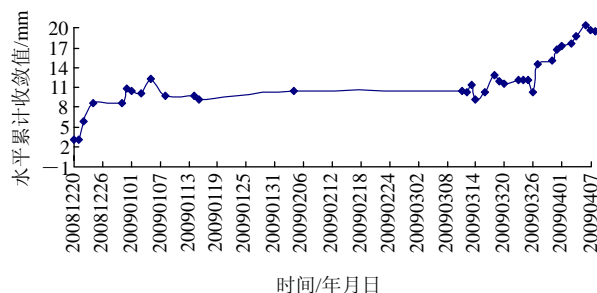


图 12 拱顶水平累积收敛时程曲线

Fig.12 Horizontal cumulative convergence

表 3 位移现场监测成果与计算成果对比图

Table 3 Calculation results and field monitoring results mm

施工步	顶拱下沉值		水平收敛值	
	计算结果	监测结果	计算结果	监测结果
上台阶	8.39	11.8	6.11	6.1
中台阶	11.08	15.9	7.61	7.1

6 结论和建议

厦门海底隧道已经安全贯通, 设计、施工中积累了大量的工程经验。其中, 海底隧道衬砌防排水设计方案将直接影响到工程造价, 海底隧道都设计为限量排放, 通过本工程的实践, 得到以下初步结论:

(1) 针对隧道围岩级别和渗透性, 采用全堵、全排或部分排水的方法开展防排水设计有利于发挥围岩自身的特点, 减小工程造价。

(2) 在全封堵情况下, 注浆加固等技术措施改善隧道围岩的渗透性措施, 一定程度上减小了衬砌外水压力的量值, 衬砌外水压力的量值和经验方法取折减系数 0.7 相当。

(3) 对于海底隧道而言, 隧道排水量的大小主要是根据隧道内抽水系统的排水能力来确定。若采用排堵结合方式, 水压力折减系数应根据海底隧道控制排放量的大小来确定。

参考文献(References):

- [1] 王梦恕. 水底隧道在青岛—黄岛之间的应用[J]. 隧道建设, 1992, (3): 1 - 5.(WANG Mengshu. The application of underwater tunnel between Qingdao and Huangdao[J]. Tunnel Construction, 1992, (3): 1 - 5.(in Chinese))
- [2] 梁巍, 朱光仪, 郭小红. 厦门东通道海底隧道土建工程设计[J]. 中南公路工程, 2006, 31(1): 99 - 102, 130.(LIANG Wei, ZHU Guangyi, GUO Xiaohong. Civil engineering design of Xiamen Dongtongdao subnazine tunnel[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 31(1): 99 - 102, 130.(in Chinese))
- [3] HASHLMOTO K, TANABE Y. Construction of the Seikan undersea tunnel-II. execution of the most difficult sections[J]. Tunelling and Underground Space Technology, 1986, 1(3 - 4): 373 - 379.
- [4] PALMSTROM A. The challenge of subsea tunnelling[J]. Tunelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 45 - 150.
- [5] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.(ZHANG Youtian. Rock hydraulics and engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.(in Chinese))
- [6] 陈卫忠, 于洪丹, 郭小红, 等. 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 873 - 884.(CHEN Weizhong, YU Hongdan, GUO Xiaohong, et al. Research on stabilities of the surrounding rock through the weathered strata for Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 873 - 884.(in Chinese))
- [7] 陈卫忠, 于洪丹, 贾善坡, 等. 双联动软岩渗流 - 应力耦合流变仪的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2 176 - 2 183.(CHEN Weizhong, YU Hongdan, JIA Shanpo, et al. Development of a double linkage triaxial testing machine for hydro-mechanical coupling in soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2176 - 2 183.(in Chinese))
- [8] 于洪丹, 陈卫忠, 郭小红, 等. 潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 1): 2 905 - 2 914.(YU Hongdan, CHEN Weizhong, GUO Xiaohong, et al. Research on the effect of tide to the stabilities of channel tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.1): 2 905 - 2 914.(in Chinese))
- [9] 郭衍敬, 张明聚. 海底隧道穿越风化深槽施工方案[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(6): 520 - 525.(GUO Yangjing, ZHANG Mingju. A construction solution to tunneling through the deep weathered rock trough of subsea tunnels[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(6): 520 - 525.(in Chinese))
- [10] 李光耀, 夏支埃. 厦门东通道海底隧道风化深槽的岩土工程特征研究[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(1): 23 - 28.(LI Guangyao, XIA Zhi'ai. The characteristics of the weathering grooves in the seabed tunnel of the east Xiamen passageway[J]. Resources Environment and Engineering, 2006, 20(1): 23 - 28.(in Chinese))
- [11] 胡文涛. 厦门海底隧道风化深槽全断面帷幕注浆方案设计[J]. 石家庄铁道学院学报, 2007, 20(2): 130 - 134.(HU Wentao. Full face curtain grouting for the weathered ditch in the construction of sea tunnel in Xiamen[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2007, 20(2): 130 - 134.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D70 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D70 - 2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))