

厦门翔安海底隧道防排水技术初步应用经验

瞿守信

(厦门东通道翔安隧道工程现场指挥部, 福建 厦门 361009)

摘要: 厦门翔安隧道陆域段多为回填土、砂土和强风化岩土地段, 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。翔安隧道地下水和海水总水头为 50~70 m, 拱顶最大静水压力为 0.65 MPa, 防水问题十分突出。综合考虑地质条件、水头高度、涌水量、地下水对结构的腐蚀情况以及结构形式等因素, 翔安隧道采用复合式衬砌, 按“以堵为主, 限量排放, 多道防水, 刚柔结合”的永久防排水原则, 设计采用“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, 现场施工初步实践经验表明, 翔安隧道防排水系统的设计和施工效果比较好, 可供类似工程参考。

关键词: 海底隧道; 防排水技术; 设计方案

中图分类号: U 459.5

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)11 - 2247 - 06

PRIMARY APPLICATION EXPERIENCES OF WATERPROOF TECHNIQUE IN XIAMEN XIANG'AN SUBSEA TUNNEL

QU Shouxin

(Site Headquarter of Xiamen East Passageway Xiang'an Subsea Tunnel, Xiamen, Fujian 361009, China)

Abstract: Xiamen Xiang'an subsea tunnel is the first subsea tunnel in China. The geological conditions of land parts of this tunnel are mostly backfill soil, sandy soil or complete weathered rock. Moreover, underground water has strong seepage characteristic. Sandy layer is enriched in water and four weathered grooves under sea directly connect with the seawater. The total water head of groundwater and seawater is between 50 m and 70 m; and the hydrostatic pressure acting on the tunnel arch crown is 0.65 MPa. Therefore, the lining waterproof is a very prominent issue. Considering the geological factors, such as water level, gushing water, erosion of framework and formation of framework, composite lining structure is adopted in Xiamen Xiang'an subsea tunnel, and the long-time waterproof principle is main shutoff, limited discharge, multilayer proofing and rigidity-flexibility combination. Therefore, the waterproof project is set as part total-closure and limited discharge. For example, the total-closure waterproof is adopted in the parts of main tunnel, which is enriched in water; and the limited discharge project is adopted in the other parts of main tunnel where the surrounding rock is favorable. The total-closure waterproof is adopted in the service tunnel because of its little circle section. Waterproof can be reinforced through injecting pulp. Moreover, construction quality can ensure waterproof system of Xiamen Xiang'an subsea tunnel. In fact, the waterproof design of Xiamen Xiang'an subsea tunnel and construction effect is

收稿日期: 2007 - 06 - 17; **修回日期:** 2007 - 08 - 13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA11Z119)

作者简介: 瞿守信(1939 -), 男, 1965 年毕业于兰州铁道学院隧道及地下工程专业, 现任厦门翔安隧道副总监理工程师, 主要从事隧道工程建设方面的研究工作。E-mail: qushuoxin@xmlq.com.cn

very well accepted. The achieved experiences can provide some references to similar projects.

Key words: subsea tunnel; waterproof technique; design scheme

1 引言

隧道工程在施工和使用过程中，时刻都受到地下水的危害。因设计或施工处理不当，隧道发生渗漏，影响使用甚至威胁到结构安全的教训也不少见。多年来，国内隧道界在山岭隧道和地铁工程建设中逐渐总结出根据水文地质条件，因地制宜地采取“以排为主，防、排、截、堵相结合，多道设防，综合治理”的原则。近年来，随着大量隧道和地铁工程的陆续建设，隧道防排水技术和材料的发展十分迅速，积累了不少工程经验。海底隧道需穿越海底地层，尤其是海底断层破碎地段，与海水直接连通，防排水问题更加突出^[1]，也是修建海底隧道的关键技术^[2~4]，外水压力的设计也引起了广泛关注^[5~7]。国外采用钻爆法修建的海底隧道，一般采用“全封闭式防水衬砌”或“排导式衬砌”^[8~10]。海底隧道防排水设计直接关系到支护结构设计、施工方法及运营期排水能力要求和经济性，如采用全封闭式防水，则必须设计为全水压衬砌。国外海底隧道也有防排水设计不尽成功的例子，如日本青函海底隧道就发生较大的渗漏需要进行修复处理。目前，国内还没有已建海底隧道防排水的工程实例。海底隧道是“以排为主”还是“以堵为主”需要详细研究，防排水的一些细节技术问题也需要探讨和明确。本文结合我国防排水设计的规范和国内第一条海底隧道厦门翔安海底隧道的防排水设计与施工实践^[11~15]，探讨海底隧道防水技术。

2 工程概况

厦门翔安海底隧道位于厦门岛东部，连接岛内五通和对岸翔安大陆架，隧道长 6.05 km，跨越海域宽约 4.2 km。设计采用三孔隧道方式，两侧为行车隧道各设 3 车道，中孔为服务隧道，横断面如图 1 所示。行车隧道建筑内轮廓净宽约 14 m，净高约 11 m，隧道最大纵坡为 3%，最深处位于海平面下约 70 m，海域最大水深约 30 m。

工程场区以燕山早期花岗岩及中粗粒黑云母花岗岩闪长岩为主，穿插辉绿岩、二长岩、闪长玢岩等喜山期岩脉，隧道海域段需穿越 4 处全强风化深槽

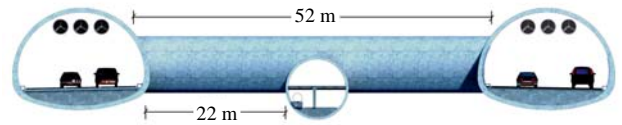


图 1 翔安海底隧道横断面布置图

Fig.1 Cross-section layout of Xiang'an subsea tunnel

破碎带。翔安海底隧道工程纵断面图(左线)如图 2 所示。场区内地下水可分为陆域地下水和海域地下水，陆域地下水赋存于风化残积土层中，接受大气降水的补给，属于潜水。海域地下水主要受海水垂直入渗补给，水量受构造控制，浅滩段透水砂层和海底段风化槽破碎带与海水有直接水力联系。

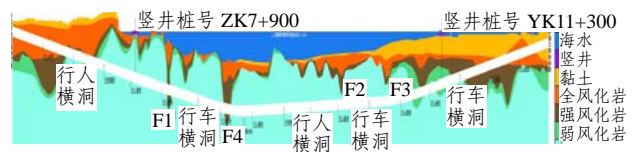


图 2 翔安海底隧道工程纵断面图(左线)

Fig.2 Vertical section of Xiang'an subsea tunnel(left line)

3 防水体系设计与施工

3.1 防水体系设计

厦门翔安隧道防排水要求高，技术难度大。隧道陆域段多为回填土、砂土和强风化岩土地段，地下水位高，地下水丰富，富水砂层约为 450 m，直接与海水连通；海域段 4 个风化深槽(囊)直接与海水连通，防水问题特别突出。翔安隧道地下水和海水总水头为 50~70 m，从选择地下水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 2 种方式都是可行的。根据国外隧道的实际情况，采用全封堵方式的隧道，地下水位一般小于 30 m，从技术上可以将 60 m 作为临界值。而采用排导方式的最大优点是基本上不考虑(不是完全不考虑)衬砌的水压力荷载，从而可以使衬砌结构更经济合理。

翔安隧道衬砌结构方案主要从地质情况、水头高度、涌水量、地下水对结构的腐蚀情况以及结构形式等多方面综合考虑，采用复合式衬砌。为减少二次钢筋混凝土水压力荷载，翔安海底隧道按“以

堵为主, 限量排放, 多道防水, 刚柔结合”的永久防排水原则, 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、断层破碎带地段采用全封闭方案, 如图 3 所示; 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, 如图 4 所示。服务隧道由

于断面较小, 且根据布置要求, 下部设置水及电通道, 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。

3.1.1 注浆堵水

首先通过超前地质预报系统分析前方地质情况,

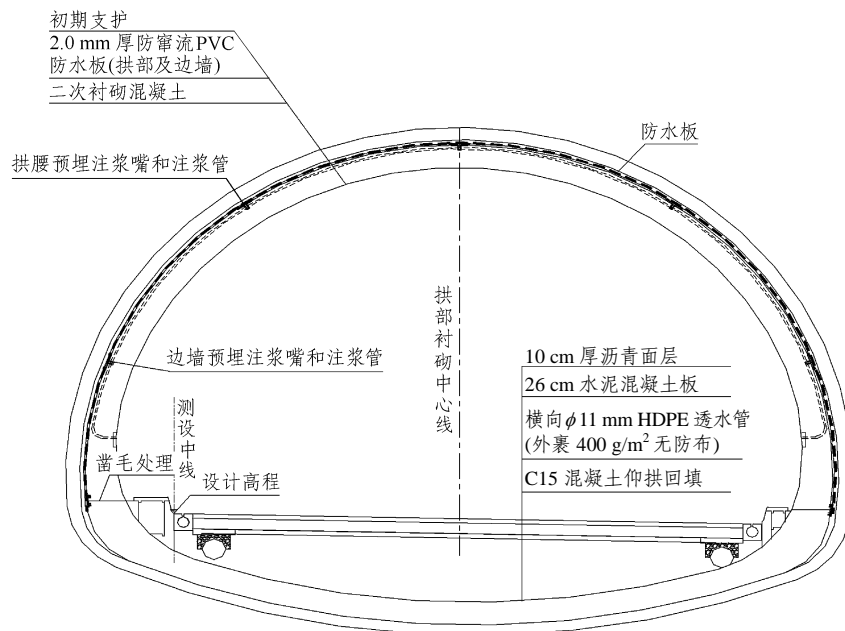
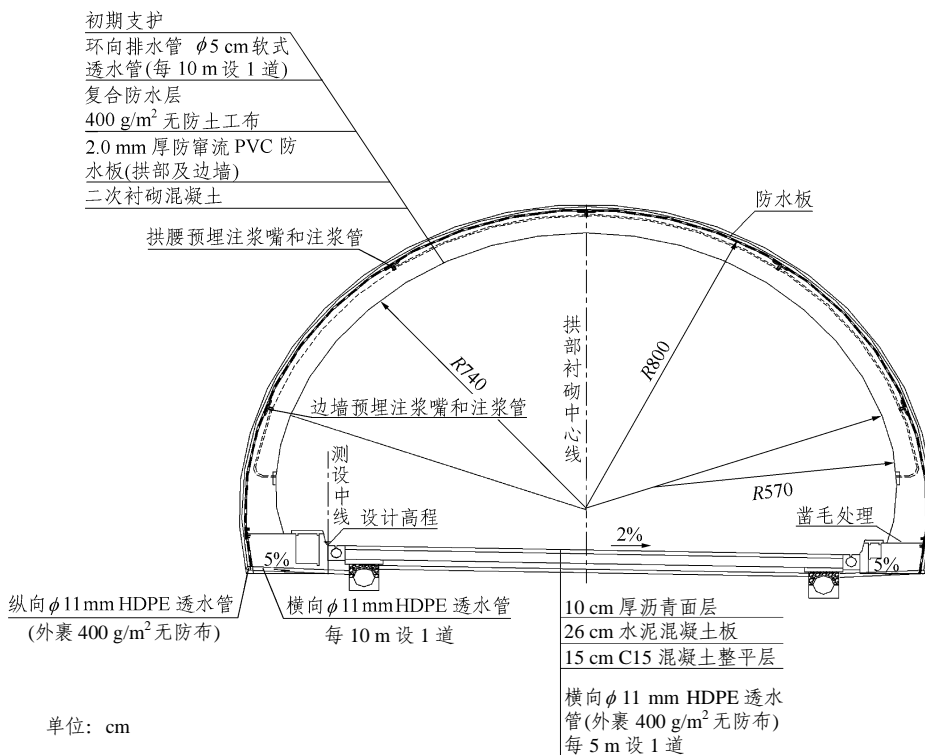


图 3 全封闭衬砌(适合有仰拱地段)

Fig.3 Schematic diagram of total-closure lining structure(suitable for inverted arch sections)



单位: cm

图 4 局部限量排导衬砌(适合 S2a, S1 无仰拱衬砌段)

Fig.4 Schematic diagram of local limited drainage lining structure(suitable for lining types of S2a, S1 without inverted arch)

对于破碎带尤其是海底风化槽地段，采用径向注浆或全断面注浆方式，这样可降低隧道周围地层渗透性，减少将隧道开挖面周围的涌水或渗水。

3.1.2 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 和 ECB 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) 施工缝及沉降缝的细部防水。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(如图 5 所示)，在二次衬砌混凝土断面中部设带注浆管的橡胶遇水膨胀止水条，在二次衬砌混凝土表面 3.8 cm，深 2.5 cm 宽设水泥基渗透结晶型防水涂料。在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 遇水膨胀液型密封胶。② 关于变形缝防水：本隧道尽量少设变形缝(或沉降缝)。现只在明洞与暗洞交界处设了变形缝，对变形缝的防水，除在靠防水板侧设带注浆管的背贴式止水带之外，在二次衬砌混凝土中部设带注浆管的中埋式橡胶止水带，并在环向变形缝与纵向施工缝处设 P201 淤水膨胀单液型密封胶。在二次衬砌混凝土表面 3.8 cm×2.5 cm (深×宽)设水泥基渗透结晶型防水涂料，如图 6, 7 所示。

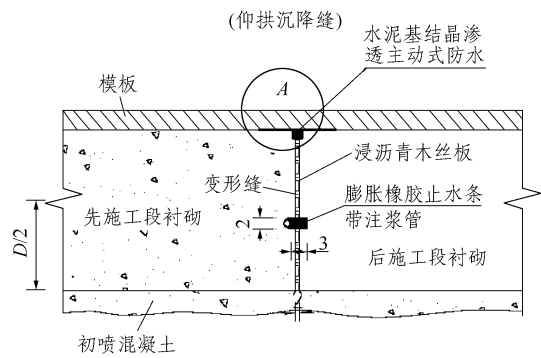


图 6 仰拱沉降缝(单位: cm)

Fig.6 Settlement joints of inverted arch(unit: cm)

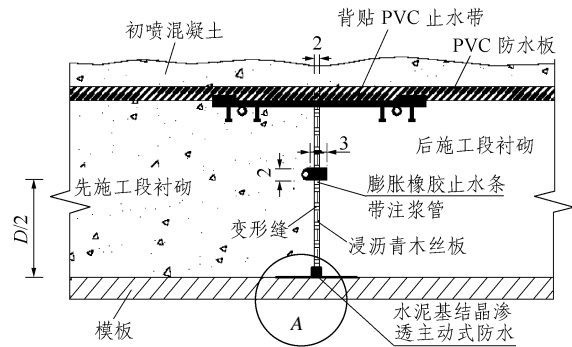


图 7 拱部及边墙沉降缝(单位: cm)

Fig.7 Settlement joints in arch crown and side wall(unit: cm)

3.1.3 采取分区防水

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)。在主洞每 10 m 为一防水分区，在二次衬砌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 8, 9 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。在注浆管端头有注浆咀，该注

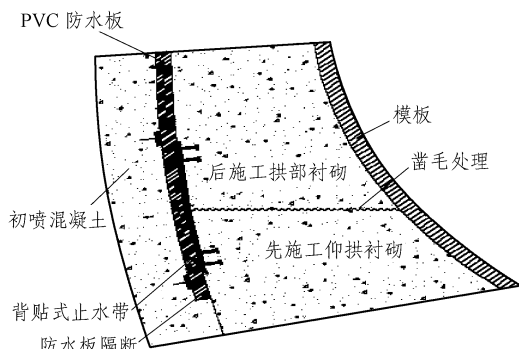


图 5 背贴式止水带

Fig.5 Water stop tie with back stickness method

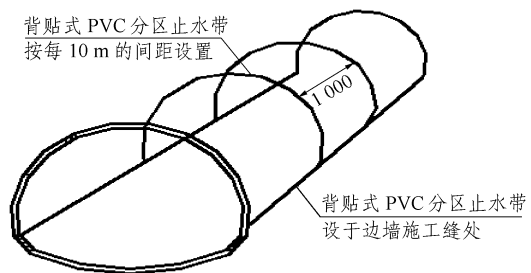


图 8 分区防水图(单位: mm)

Fig.8 Detailed part of water proof structure(unit: mm)

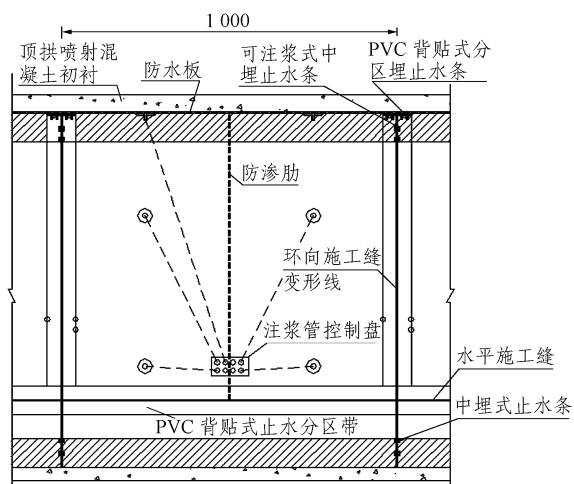


图 9 分区防水平面示意图(单位: cm)

Fig.9 Schematic diagram of partition water-proof structure (unit: cm)

浆咀与圆盘连接,该圆盘用胶黏带临时封贴在防水板上,以防浇注二次衬砌混凝土时砂浆堵塞注浆管。

3.2 防水板铺设

在施作防水板之前对初期支护有开裂渗漏的地方必须进行补充注浆,作到初期支护表面平顺,不允许有尖锐之物。经过断面净空量测,无超欠挖满足净空要求的情况下,再进行无纺布铺设和防水板的铺设。首先将无纺布用水泥钉和垫圈固定在初期支护上,按设计和规范要求纵向固定间距为 40~100 cm,环向固定间距为 80 cm,然后将防水板焊接在垫圈上。本隧道无纺布选用 400 g/m²。防水板搭接长度按规范和设计要求为 10~12 cm。在绑扎钢筋和浇注二次衬砌混凝土之前对防水板施工进行检查。防水板在钢筋施工中受到破坏的地方要进行修补,确保防水板铺设平顺、完整,搭接符合要求,并要对搭接双焊缝进行气密性试验检测满足要求后才能进行下道工序施工。仰拱不铺设防水板。在海域 4 个风化深槽段为全包防水,仰拱也铺设防水板。

4 排水体系

海底隧道与山岭隧道最大的区别之一就是排水问题。海底隧道纵向为“V”字型坡度,洞口在陆域段标高比洞内高,渗漏水沿隧道向洞内流。需要完善的排水系统。

4.1 施工期排水

在施工期,隧道各工作面尤其是渗水量大的海底风化槽施工地段,都配备足够容量的排水设备,

并在洞口设三级沉淀池,保证排放功率要求和水质标准。

4.2 永久排水系统

4.2.1 初期支护与防水板之间的排水

初期支护在施工中虽然进行喷射混凝土和初期支护拱墙背后的注浆加固堵水,要求在作防水板和二次衬砌之前初期支护表面不开裂、不渗漏水。但随着时间的延长,天长日久,地下水的腐蚀和海水的腐蚀,仍会有地下水和海水进行渗流,对无纺土工布,防水板造成侵蚀,对二次衬砌混凝土造成压力,甚至侵蚀。因此,对初期支护和防水板之间渗漏水要有排水措施。翔安海底隧道设计经过计算,确定在隧道环向和纵向设置排水盲管。纵向在边墙底部设纵向排水盲管,采用内径 $\phi 11$ cm 的 HDPE 双壁打孔波纹管,打孔大小 3×30 mm,要求机械打孔,外裹一层无纺土工布,以防止砂、土(混凝土)流入管内;环向每 10 m 设一内径 $\phi 11$ cm 的 HDPE 双壁不打孔波纹管,在与边墙底部纵向排水盲管连接处采用三通连接,将渗流水直接引入隧道底部排水侧沟内。

4.2.2 防水板与二次衬砌混凝土之间的排水

考虑防水板在施工过程中可能有损坏,二次衬砌施工完成后,初期支护和防水板之间的少量水,可能渗流到防水板和二次衬砌混凝土之间,这部分渗出流水虽然数量不大,处理不好也可能对二次衬砌混凝土造成水压力或引起二次衬砌的局部渗漏。为了解决该少量的渗水问题,在二次衬砌混凝土边墙底部埋设泄水管,将防水板与二次衬砌之间的渗流水引入隧道侧排水沟中。

4.2.3 抽水系统

在隧道海底最低标高处设一集水池和排水泵房,在两岸洞口各设截水池和雨水泵房一座,运营期排水能力按富裕 50% 设计,可保证排出隧道容许的渗水、雨水、清洁用水、消防用水以及供水管道破裂等意外水量。将水抽排到洞外污水处理池,沉淀处理后排入下水管道。

5 结论

翔安海底隧道开工建设已将近 2 a,隧道开挖工程量已完成约 45%,从目前已经实施的里程看,防水效果比较好。已施作的二次衬砌段达到不开裂、拱墙以上没有湿迹,干燥无水、内实外光;海底风化槽破碎地段目前还处在注浆和开挖阶段,这还有

待考验。

翔安海底隧道拱顶最大静水压力为 0.65 MPa, 按“以堵为主, 限量排放, 多道防水, 刚柔结合”的永久防排水原则, 设计采用“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。现场施工初步实践经验表明, 翔安隧道防排水系统的设计和施工效果比较好, 可供类似工程参考。

海底隧道防水是一项系统工程, 涉及材料、设计、施工、管理等各个方面, 需要从事这项工作的有关人员及管理决策部门齐心协力, 并吸收国外先进技术与管理经验, 把海底隧道防排水作好。

参考文献(References):

- [1] 吕明, GRØVE, NILSEN B, 等. 挪威海底隧道经验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(LU Ming, GRØVE, NILSEN B, et al. Norwegian experience in subsea tunnelling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4 219 - 4 225.(in Chinese))
- [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 Mengshu, HUANGFU Ming. Key problems on subsea tunnel construction[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 1 - 4.(in Chinese))
- [3] 王梦恕. 蓬勃发展的中国水底隧道[R]. 北京: 北京交通大学, 2005.(WANG Mengshu. Vigorous development of underwater tunnel in China[R]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2005.(in Chinese))
- [4] 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): 1 513 - 1 521.(SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 513 - 1 521.(in Chinese))
- [5] 李术才, 徐帮树, 李树忱. 海底隧道衬砌结构选型及参数优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3 894 - 3 902.(LI Shucai, XU Bangshu, LI Shuchen. Lining structure type of subsea tunnel and its support parameters optimizing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3 894 - 3 902.(in Chinese))
- [6] 王建宇. 再谈隧道衬砌水压力[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(3): 5 - 10.(WANG Jianyu. Re-discussion on hydraulic pressure upon lining[J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(3): 5 - 10.(in Chinese))
- [7] 王秀英, 王梦恕, 张弥. 计算隧道排水量及衬砌外水压力的一种简化方法[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 8 - 10.(WANG Xiuying, WANG Mengshu, ZHANG Mi. A simple method to calculate tunnel discharge and external water pressure on lining[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(1): 8 - 10.(in Chinese))
- [8] KITAMURA A. Technical development for the Seikan Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1986, 11(3/4): 341 - 349.
- [9] DAHLØT S, NILSEN B. Stability and rock cover of hard rock subsea tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 151 - 158.
- [10] PALMSTRÖM A. The challenge of subsea tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 145 - 150.
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. JTJ042 - 94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTJ042 - 94 Technical code for construction of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 1994.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10204 - 2002, J163 - 2002 铁路隧道施工规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10204 - 2002, J163 - 2002 Code for construction of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. TB10108 - 2002, J159 - 2002 铁路隧道喷锚衬砌法技术规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. TB10108 - 2002, J159 - 2002. Code for shotcrete-bolt construction method of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [14] 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有限公司, 重庆交通科研设计院, 2005.(ZHU Guangyi. Detailed design of two-stage construction drawing of Xiamen Xiang'an tunnel[R]. Wuhan: CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Chongqing Communications Research and Design Institute, 2005.(in Chinese))
- [15] 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.(XIA Zhiai. Geological reconnaissance report of detailed design phase for Xiamen East Passageway tunnel[R]. Wuhan: CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., China Zhongtie Major Bridge Reconnaissance and Design Institute Co., Ltd., 2005.(in Chinese))