

文章编号:1673-2049(2005)04-0001-04

海底隧道修建中的关键问题

王梦恕,皇甫明

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘 要:结合厦门东通道海底隧道工程,对海底隧道最小岩石覆盖层厚度、水压力设计值的确定,衬砌结构断面优化与防排水方案,穿越海底不良地质段(断层、溶槽)的施工措施及服务隧道设置的必要性问题进行了分析。提出应从围岩稳定性和隧道涌水量的大小综合考虑最小岩石覆盖层厚度;采用限量排放的防排水方案对海底隧道较为适宜;施工中可采用注浆和冻结法穿越海底的不良地质段;设置服务隧道有利于隧道施工和运营管理。

关键词:岩石覆盖层厚度;水压力设计值;衬砌断面优化;防排水设计;服务隧道

中图分类号:U459.5

文献标志码:A

Key problems on subsea tunnel construction

WANG Meng-shu, HUANGFU Ming

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Combined with subsea tunnel engineering at eastern route way in Xiamen, the minimum rock covering thickness of subsea tunnel, water pressure design values, section optimization of lining structure and waterproof and drainage project, construction measures throughout bad subsea geology section, such as fault, solution groove, necessity of service tunnel setting were analyzed. Authors gave the minimum rock covering thickness with comprehensive consideration of stability of surrounding rock and tunnel seepage volume. Authors also put forward that waterproof and drainage project using limitation control was suitable; slip-casting and freezing method could be used throughout bad geology section; service tunnel setting was beneficial to the tunnel construction and running management.

Key words: rock covering thickness; water pressure design value; lining section optimization; waterproof and drainage design; service tunnel

0 引 言

发达国家从 20 世纪 30 年代起,就开始修建海峡海底隧道,现在建成海峡海底隧道的国家有日本、挪威、英国、法国等。目前中国正在规划或建设的海峡隧道有琼州海峡隧道、厦门东通道海底隧道及青岛—黄岛之间的海底隧道等^[1,2]。厦门东通道海底

隧道工程是中国计划建设的第一个用钻爆法修建的海底隧道,1998 年以来厦门市路桥建设投资总公司委托中交第二公路勘察设计研究院承担了该工程的预可行性研究和可行性研究,此外还委托多家科研单位进行了相关专题研究,目前已经取得了一定的成果。笔者结合厦门东通道海底隧道工程,着重对海底隧道修建中的关键问题进行探讨。

1 最小岩石覆盖层厚度的确定

在海底隧道的设计过程中,当线路方案选定后,合理地确定海底隧道拱顶的岩石覆盖层厚度十分重要。如果岩石覆盖层过于薄弱,海底隧道施工过程中就可能发生严重的失稳问题和海水涌入的危险,即使不发生,也会导致辅助工法的投入增大;如果覆盖层厚度太厚,不仅会使作用于衬砌结构上的水压力增大,而且也会使海底隧道的长度增加。由此可见:海底隧道覆盖层厚度的选定不仅是一个安全问题,而且主要是一个经济问题。

不过应该明确的一点是:覆盖层厚度并没有技术上的限制,也就是说不会因为最小岩石覆盖层厚度的问题,在技术上使海底隧道无法修建。无非是采用较高的开挖支护技术和投入较高的费用而已,但这样做工程风险之大是显而易见的。

日本青函海底隧道位于水深 140 m 处,其最小岩石覆盖层厚度为 100 m,该厚度是根据当时日本水下采煤的安全规程确定的,即隧道最小埋深不小于 60 m。鉴于日本水下采煤安全规程并没有考虑水深这一因素,最后为了安全起见,将该隧道最小覆盖层厚度定为 100 m^[3]。而日本关门海底隧道海底地段平均覆盖层厚度仅为 11 m。

挪威是目前世界上采用钻爆法修建海底隧道最多的国家,至今已累计建成 100 多公里。挪威的交通海底隧道大部分位于火成岩和变质岩等比较坚硬的岩层,针对海底隧道最小岩石覆盖层厚度的问题,挪威专家曾经做过专门的研究,提出了一些经验值(表 1)^[4]。1993 年 NILSEN B 对挪威当时已竣工的近 20 多条海底隧道工程的最小岩石覆盖层厚度进行了统计分析,并给出了两条统计经验曲线^[5],如图 1 所示。图 2 为目前各国主要海底隧道最小岩石覆盖层厚度的统计结果。

表 1 挪威海底隧道最小岩石覆盖层厚度经验值
Tab. 1 The minimum rock covering thickness experience values of subsea tunnel in Norway

水深 (至基岩)/m	最小岩石覆盖层厚度/m		最大坡度/%
	好质量围岩	坏质量岩石	
0~25	25	30~35	2.0
25~50	30	35~40	2.6
50~100	35	40~50	3.8
100~200	40	45~60	6.0

此外,英法海峡隧道在施工服务隧道的过程中,曾进行了覆盖层厚度与渗入水量之间的关系研究,如图 3 所示(图 3 中 k 为渗透系数)。研究表明:在一定深(厚)度时,渗入水量会逐渐增加到一个极限。

因而,由此也可以确定一个最佳的覆盖层厚度。显然,在确定最小岩石覆盖层厚度时,应该从围岩稳定性和隧道涌水量的大小两方面综合考虑,文献[6]中在这方面进行了有益探讨。

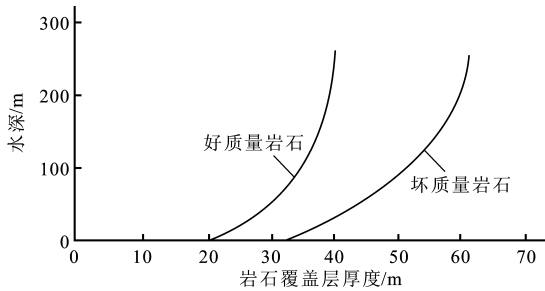


图 1 挪威海底隧道最小岩石覆盖层厚度
Fig. 1 The minimum rock covering thickness of subsea tunnel in Norway

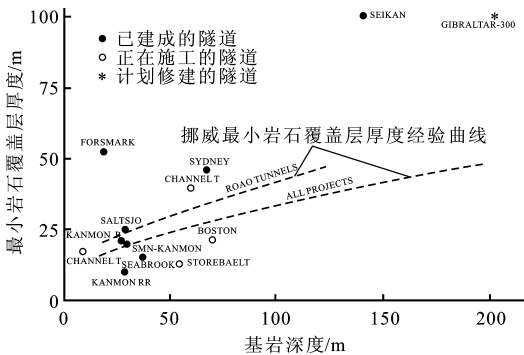


图 2 各国主要海底隧道最小岩石覆盖层厚度
Fig. 2 The minimum rock covering thickness of subsea tunnel in the world

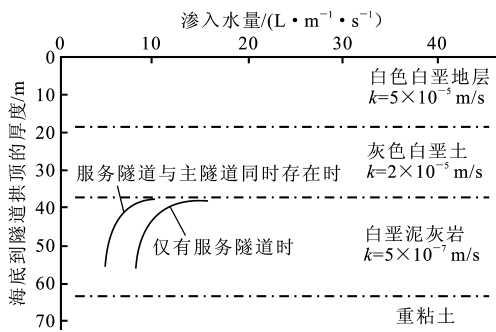


图 3 英法海峡隧道服务隧道覆盖层厚度与渗水量关系
Fig. 3 Relation of seepage volume and rock covering thickness of service tunnel among English-France Channel Tunnel

2 水压力设计值的确定

对于海底隧道而言,支护结构除了承受围岩压力,还会承受很高的水压力。作用于支护结构上的围岩压力可以被地层拱作用降低,而静水压力荷载并不受此影响,不能用任何成拱作用来降低。可以说,海底隧道水压力设计值的大小是决定衬砌结构

强度的关键,水压力设计值大小不仅与水头有关,还与地下水处理方式有关(全封堵方式和排导方式)。

目前,中国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。但对于具有稳定高水头的海底隧道,如何确定作用在衬砌结构上的水压力,是一个复杂的问题。通常是参照水工隧洞设计规范和经验,根据开挖后地下水的渗入情况,采用折减系数的方法计算隧道衬砌的外水压力。但是,水工隧洞仅仅要求围岩的稳定性,并不需要控制地下水的排放量,通常采用隧洞附近的天然排水(溶洞)或人工排水等措施来减小其外水压力;而海底隧道不能自然排水,显然从设计理念上,水工隧洞与海底隧道存在一定差别。

隧道工程中对地下水的处理方式有全封堵方式和排导方式两种。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。在这两种情况下,如何计算衬砌水压力,目前还没有系统地进行研究。厦门东通道海底隧道的地下水和海水总水头在 50~70 m 左右,从技术、经济合理性出发,采用全封堵方式或排导方式都是可行的,故有必要结合海底隧道的特点,对地下水处理方式的选择进行系统深入地研究。

厦门市路桥建设投资总公司委托中铁西南科学研究院等单位,根据厦门东通道隧道工程的地质情况,分别设计了全封堵方案和限量排放方案两种模型试验。试验过程中考虑了地层渗透性的相似、水压的相似、注浆圈大小及其注浆效果对衬砌背后水压力的影响等多方面因素,对海底隧道衬砌水压力的确定进行了研究,结果表明:

(1)若采用全封堵方式防水,则衬砌背后的水压力不能折减,即使采用了注浆加固(防坍塌),水压力也不能折减。

(2)采用排导系统防排水,能有效降低水压力。但如果排水系统中的盲管堵塞时水压力会上升,即使有出水孔也无济于事。因此,排水系统须可维修。

(3)与全封堵的情况不同,对于排水情况,围岩的渗透系数与传递到衬砌上的水压力有密切的关系,在相同的排导系统设计参数下,随着隧道围岩渗透系数的减小,衬砌水压力亦随之减小,即折减系数增大。

(4)与全封堵的情况不同,对于排水情况,在相同的排导系统设计参数下,若对围岩注浆,可以降低

渗透系数,能够起到限量排放的作用,也可减小衬砌的水压力。

(5)假定盲沟全环布置,且长度等于隧道轮廓周长,排水沟设于隧道底。在盲管排水系统的设计参数中,对水压力有显著影响的主要是盲管间距、盲管直径及衬砌中的出水口直径,为了确保排水减压效果,盲管间距应不大于某临界值,盲管直径及衬砌中的出水口直径则应不小于某临界值。

3 衬砌结构断面优化与防排水方案

根据海水深度和隧道最小岩石覆盖层厚度,厦门东通道海底隧道最大水头压力为 0.7 MPa,若采用全封堵方案,水压力对衬砌结构内力的影响最大,并起着控制作用。在这种情况下,从经济的角度考虑,有必要选取一种隧道结构受力合理和开挖面积较小的断面形式。如果采用排导方案,则需要确定出注浆加固圈的厚度及其渗透系数的大小,其结果不仅与隧道结构承受的静水压力大小有关,还和排放量的大小有关;此外,若达不到设计要求时,可能会影响注浆加固圈的稳定性和是否能够控制排放量,最终对隧道安全会很不利。故采用限量排放方式时,应对加固圈的厚度和渗透系数的大小进行专门研究,以便确定出不同静水压力条件下隧道加固圈的最为合理的加固范围。可见,采用限量排放方案,关键与隧道周围围岩的注浆效果和注浆加固圈的厚度等有关,而与二次衬砌的断面形式关系不大,因此注浆加固圈需要进行专门设计。

由于厦门海底隧道水头压力相对不高,建议在具体设计时,衬砌计算考虑全水头水压力;防水体系设计的原则是“以堵为主,限排为辅”,即采用防水板+埋设填料+排水孔,从而达到限量排放的目的。此外,同时也可以考虑用注浆圈。

4 穿越海底不良地质段的施工措施

厦门东通道海底隧道主要位于海底弱、微风化花岗岩中,穿越 3 条强风化基岩深槽和 4 号风化囊,而且微风化风化槽附近存在微风化岩破碎带,地下水具有一定的承压性。开挖扰动后,极易发生涌水、突水的现象,威胁施工的安全。由于水压力较高,水源补给无限,且施工中不具有自然坡排水的条件,一旦发生大的突、涌水,就可能引起严重的后果。日本的青函隧道在施工期间,曾发生了 4 次严重涌水事故,不但影响了工程进度,而且造成了重大安全事故。因此,能否安全穿越软弱不良地质段,是海底隧

道工程施工成败的关键。日本青函隧道海底段施工过程中,采取的方式是探水、注浆、开挖 3 个环节交替进行,而水平超前钻探和注浆被认为是青函隧道最为成功的两项技术。

穿越软弱不良地质段的问题,主要是加固堵水的问题。目前各国经常采用的方法有注浆法、冻结法以及其他辅助方法^[7]。

日本青函海底隧道在施工中根据土质和渗水情况,确定注浆范围,并使注浆带厚度延伸到松弛带外侧,采用全断面帷幕注浆,一般注浆范围为毛洞洞径的 2~3 倍,在海底段为 3 倍。哥伦比亚 GUAVIO 水电站泻水渠穿越溶槽地段(溶槽宽约 80 m,水压高达 2.0 MPa)采用了导坑超前帷幕注浆扩挖法。

冻结法的优点是适应地层条件广,但缺点是可靠程度不高,造价高,周期长,融冻过程对地层破坏严重。因此采用先注浆后冻结的方法可以提高可靠度,降低造价和工期,该方法适于在注浆加固方法不能全部堵住水流的情况下采用,且完全有条件用于海底隧道穿越断层破碎带,尤其对于注浆法不能实现的渗透系数小于 10^{-4} cm/s 的断层泥,可以作为最后手段加以应用,以确保隧道安全可靠地穿越断层破碎带。该方法在中国用于隧道方面的实例很少,并且也有其弱点和使用条件,主要问题是所用设备多,成本较高,对冻结本身的质量和施工准确性要求高;此外,冻结法要求地下水流速不能太大(不宜超过每天 2.0 m),否则土体将难以冻结。

挪威 OSLOFJORD 海峡隧道^[8],在穿越断层破碎带时,通过超前探水发现,上部围岩含有粘土、砂子、卵石和块石等;下部围岩为碎石,并含有粘土,渗透系数较小,水压高达 1.2 MPa。为了确保该工程如期完成,采用迂回式施工法,做了 350 m 长的辅助通道,断面面积为 47 m²。

5 服务隧道设置的必要性

在海底隧道施工阶段,服务隧道的作用有:可以作为平行导坑,能够超前探明地质状况,从而取得不良地质段处理的方法和工艺;可以通过横洞及时沟通左右线正洞,还可开辟多个工作面,加快施工进度;有利于隧道施工通风、排水及施工资源的合理分配;在两条主隧道开挖之前,由服务隧道向主隧道拱部范围进行侧向探测,可做芯心钻探并做压水透水性试验,以验证岩石质量与涌水量;主隧道施工过程中,对于局部不良地质段,可在服务隧道内进行提前注浆,而不影响其余地段的施工。

在海底隧道运营阶段,服务隧道的作用有:作为紧急避难通道,在隧道运营期间突发灾害时,可供人员避难、逃生和救援使用;作为检修通道,其上下空间又可作为管线通道,便于隧道管理人员的日常维护,同时可适当减小主洞断面;服务隧道里可以铺设各种电线、电缆,作为城市公用管道;可作为排水、维修、养护、安全通道等。

6 结 语

(1)应从围岩稳定性和隧道漏水量的大小两方面综合考虑,合理确定海底隧道最小岩石覆盖层厚度。

(2)海底隧道水压力设计值的确定与地下水的处理方式有关,采用限量排放的防排水措施,可有效地降低作用于支护结构上的水压力。

(3)隧道衬砌结构与防排水方式、隧道周围围岩的注浆效果和注浆加固圈的厚度有很大关系。

(4)可采用注浆法、冻结法等方案穿越海底断层、溶槽等地段。

(5)设置服务隧道有利于海底隧道的施工和运营管理。

参考文献:

- [1] 谭忠盛. 琼州海峡铁路隧道可行性研究探讨[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 139—143.
- [2] 王梦恕. 水底隧道在青岛—黄岛之间的应用[J]. 隧道建设, 1992, 12(3): 1—5.
- [3] FUKUCHI G. Seikan tunnel and water[A]. Tunnels and Water [C]. Rotterdam: Balkema, 1989. 1 189—1 194.
- [4] PALMSTROM A. Norwegian experience with subsea rock tunnels[A]. Tunnels and Water [C]. Rotterdam: Balkema, 1989. 927—934.
- [5] PALMSTROM A. The challenge of subsea tunnelling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 145—150.
- [6] 皇甫明. 暗挖海底隧道围岩稳定性及支护结构受力特征的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [7] ESLAVA L F, MARULANDA A, RODRIGUEZ A J. Tunnelling in friable sandstone under high water pressure[A]. Tunnels and Water [C]. Rotterdam: Balkema, 1989. 1 325—1 332.
- [8] BACKER L, BLINDHEIM O T. The Oslofjord subsea road tunnel crossing of a weakness zone under high water pressure by freezing[A]. Challenges for the 21st Century [C]. Rotterdam: Balkema, 1999. 309—316.