

欧美的沉管法隧道

俞国青, 傅宗甫

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:简单介绍沉管法隧道的优点和局限性以及欧美建造沉管法隧道的历史. 针对沉管法隧道设计和施工中的关键技术问题, 如结构型式、管身防水、水下基槽开挖和地基处理、管段水下对接和接头防水等, 综述欧美的实践经验和最近进展.

关键词:沉管法隧道; 结构型式; 水下基槽开挖; 地基处理; 管段对接; 接头防水

中图分类号: U455.46

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2000)06-0011-04

1 沉管法隧道

现代交通系统的发展, 在沟通江河湖泊、河口、海湾、海峡两岸陆上交通时, 除了采用建桥跨越外, 还常采用隧道方式进行水下穿越. 目前在构筑水下隧道时, 主要采用三种方法: 矿山法、盾构法和沉管法. 矿山法和盾构法在隧道工程中应用已久, 为广大工程技术人员所熟悉. 应用沉管法构筑水下隧道, 在欧美已有百年历史, 而在我国大陆还只是最近十几年的事.

沉管法是将隧道分段(管段), 以内部毛坯形式在合适的地点预制, 分段两端设临时止水头部, 然后浮运至隧道轴线处水下基槽的上方, 下沉就位, 完成管段间的水下连接, 移去临时止水头部, 回填基槽保护沉管, 铺装隧道内部, 从而形成一个完整的水下通道.

沉管法隧道对地基要求较低, 特别适用于软基、河床或海床较浅易于用水上疏浚设施进行基槽开挖的工程地点. 由于其埋深小, 包括连接段在内的隧道线路总长较矿山法和盾构法隧道显著缩短. 沉管断面形状可圆可方, 选择灵活. 基槽开挖、管段预制、浮运沉放和内部铺装等各工序可平行作业, 彼此干扰较少. 管段预制质量易于控制.

而矿山法要求对隧道沿线的地质情况进行详细的水下钻探, 其困难和成本、在高外水压力下裂隙岩体中进行开挖和衬砌所面临的工程问题以及施工期的通风排水等问题常成为方案比选时的制约因素. 另外, 矿山法和盾构法要求使用大断面的 TBM 机械和盾构机械, 这些机械的制造和供应亦是必须考虑的因素. 盾构法常用预制管片拼装衬砌, 接缝很多,

防渗处理任务繁重, 而沉管法隧道分节长度常在 100 m 左右, 接缝显著减少.

鉴于上述原因, 沉管法隧道在很多情况下占有明显优势, 而成为最经济的水下穿越方案. 自 1896 年美国首次利用沉管法建造穿越波士顿港 Shirley Gut 的输水隧道以来, 利用沉管法, 美国于 1910 年建成穿越底特律河的密歇根中央铁路隧道; 1914 年建成穿越哈莱姆河的纽约地铁隧道; 1928 年建成位于加利福尼亚州奥克兰和阿拉米达之间的第一条混凝土沉管公路隧道; 1930 年建成连接美国底特律和加拿大温特索的公路隧道, 外表呈八边形, 这种体型的钢壳隧道后来流行于北美. 仅美国境内, 在最近 50 年里已建成 20 条钢壳沉管法隧道. 其中最长的是旧金山的穿湾(Trans-bay)隧道, 其沉管基槽最深处位于海平面下 41 m, 沉管段全长 5.8 km; 最大的是巴尔的摩市的福特—麦克亨利隧道, 全宽 53.3 m, 高 12.8 m, 分 4 孔, 总共 8 个车道. 在欧洲, 第一条沉管法隧道(马斯隧道)建成于 1942 年, 这是一条矩形断面混凝土沉管法隧道, 位于荷兰鹿特丹市. 1969 年在比利时安特卫普建成的沉管法隧道宽约 48 m, 高 10 m, 可通行 2 条 3 车道公路, 一条双车道铁路. 自马斯隧道建成至 1986 年底, 欧洲已建成 24 条混凝土沉管法隧道, 其中荷兰就占了一半^[1].

据 1993 年国际隧道协会的统计, 从 1910 年以来, 全世界已建成 91 条沉管法隧道^[2]. 在 1986 年前建成 67 条, 其中 32 条是钢壳沉管法隧道^[1]. 我国香港自 70 年代以来已先后建成 4 条沉管法海底隧道; 台湾于 1984 年在高雄港区内建成 1 条^[3].

90 年代, 我国大陆先后在广州珠江和宁波甬江

各建成1条沉管法越江隧道,前者系公路和地铁合用,后者仅为公路隧道,其断面尺寸分别为宽33 m,高8 m和宽11.9 m,高7.5 m^[3]。

用沉管法建筑水下隧道,对建设地点的水文、泥沙、床面土质和场地有一定的要求,为保证水下基槽成型,水下床面的土质应相对稳定,泥沙条件应至少满足施工期不会在基槽内形成快速淤积,潮汐水域应有足够长的平潮期以便于管段沉放,应有合适的场地用于管段预制和疏浚排出物的处置,此外,为进行水下基础的构筑、管段沉放和水下对接,需要某些专用设备。

随着我国现代化交通建设和城市的发展,预计有更多的越江、越海隧道需要兴建,其中一些工程将用沉管法施工。据悉,上海黄浦江、宁波甬江常洪、京沪高速铁路南京越江隧道和琼州海峡等均在进行水下隧道沉管法建造方案的研究,由于沉管法隧道具有其独特的设计和施工问题,我国在这方面经验不多,本文对沉管法隧道的一些关键技术,介绍欧美的建设经验,以供有关工程技术人员借鉴和参考。

2 沉管法隧道的结构型式

按管身的防水和材料分类,欧美的沉管法隧道分为两类——钢壳隧道和钢筋混凝土隧道,北美多用前者,而后者在欧洲建造较多。

2.1 钢壳沉管

钢壳隧道又分单层钢壳和双层钢壳两种,单层钢壳隧道的钢壳通常采用10 mm厚的钢板焊制,既作为管身的永久防水(通常用阴极保护系统或喷浆防腐)又作为受力构件,钢壳内侧布置加劲系统,施工时钢壳皆作浇捣内衬钢筋混凝土的外模,混凝土浇筑后形成钢-混凝土的组合结构,管顶加混凝土或块石压重,对此种型的结构需特别注意在浮运和沉放作业中的稳定性。美国马里兰州Cove point LNG隧道施工中,曾有一个管段在沉放时因一条钢缆断裂而发生管身上下窜动,双层钢壳隧道的内层钢壳常用8 mm厚的钢板焊接而成,加劲系统布置于内层钢壳的外侧,其内侧再衬以钢筋混凝土,外层钢壳常用6 mm钢板焊制,管顶不封闭,以导管混凝土充填内外层钢壳间的空隙,用以产生必要的压重并保护作为永久防水的内壳不受腐蚀,内壳连同内衬钢筋混凝土形成与单壳隧道类似的钢-混凝土组合结构,由于外壳仅作为模板,不作为永久防水也不加防腐,因此在有些工程中外壳以其它材料代替,例如香港的一条海底隧道使用了木质外模。

钢壳隧道断面内部形状通常为圆形,顶部天花板以上和底部车道板以下的空腔用以排气和通风,

车道较少时用单孔管道,例如美国弗吉尼亚汉普顿的第二隧道(内径11 m),车道较多时则用双孔并联,例如美国旧金山的穿湾隧道(每孔1条地铁线,孔径5.2 m);或多条双孔并联管道并靠,如美国巴尔的摩市的福特—麦克亨利隧道(两条双孔管道并靠共4孔8车道),此外也有用其它体型的,如美国弗吉尼亚州朴次茅斯伊利莎白过河隧道采用城门洞型(内宽10.1 m,高7.5 m),纽约六十三街沉管法隧道则采用矩形断面,内部分隔为上下两层,左右两舱共4个孔,每孔布置1条地铁线(宽均为4.72 m,上下层高分别为4.14 m和4.47 m)。

钢壳隧道管段自重较小,通常在造船厂预制,可长途拖运,如上述伊利莎白过河隧道管段是在美国德克萨斯州制造的,经3000多km海上拖运,至弗吉尼亚州工地,钢壳管段在工厂制造完毕时,应经过严格的水密性试验,除了焊接过程中用肉眼检测,并取一定数量的部位作射线照相、超声波、染色法或磁性探伤以外,所有壳板焊缝在下水前,均在壳外涂肥皂液,并用约2.7个大气压(273.6 kPa)的压缩空气持喷嘴在离板面不大于7.5 cm的距离上于壳内侧施压,或采用真空法检查焊缝的水密性,管段下水前,一般先浇好龙骨混凝土,以增加下水拖运时管段的强度、刚度和稳定性,下水方法通常有端部下水和侧边下水两种,浮运时干舷高度一般控制在30~45 cm,在美国,钢壳沉管法隧道的设计,壳板厚度不是由应力条件控制而是主要按永久防水的要求,兼顾制作时的变形控制,合宜的加劲系统的布置和方便混凝土浇注,钢壳中的最大应力出现在施工阶段,内衬钢筋混凝土的厚度也不是应力条件控制而由抗浮稳定性决定,混凝土开裂与否并不重要,因为管身防水全部依赖于钢壳,下水和拖运时管身的应力必须进行校核,必要时应采用临时结构措施预以加强,管段的内衬钢筋混凝土通常在管段悬浮状态下浇注,此时应控制浇筑顺序,保持对称施工,平衡受力,逐渐增加钢壳上因管段渐次下沉而增加的水压力荷载,注意因不均匀荷载引起的纵向弯曲。

2.2 混凝土沉管^[4]

混凝土沉管法隧道在欧洲建造较多,断面多呈矩形,对4车道以上的公路隧道尤为适用,通风排气孔道常设于管道两侧,以减少基槽的开挖深度。

混凝土沉管一般在接近工地的干坞或临时的预制场内(如土坞)制作,破坞充水使管段上浮,拖运至安装地点沉放,有时会由于预制场地和相应设备的要求,从造价和工期方面考虑,使混凝土沉管方案变为不经济,例如香港的一条海底隧道,原设计为4车道矩形钢筋混凝土沉管,后经过比较改而采用2孔

单层钢壳隧道,节省了几百万美元投资,并缩短了一年半工期.混凝土沉管因其重量较大,对预制场的地基有一定要求.

矩形断面的混凝土沉管的顶板、底板和边墙均为大体积钢筋混凝土结构.结构设计受混凝土抗裂要求、施工温控、收缩和徐变控制.为提高混凝土的不透水性,需对混凝土的用料,如水泥用量、水泥和骨料的品质进行严格的监控.施工时还需采取一些必要的辅助措施,如减少浇筑块内各部分间的温差、跳仓浇筑及设置必要的施工缝等.

混凝土沉管法隧道在欧洲的成功实践主要归功于混凝土裂缝控制,提高混凝土沉管水密性,基础处理和管身沉放等方面的技术进步.荷兰人在这方面积累了丰富的经验,他们认为,只要在混凝土抗裂且达到不透水或设置独立的防水系统两者中有一个达到要求,即可使混凝土沉管法隧道做到不漏水.在设置独立的防水系统方面,他们使用过在底板、边墙外包钢板,顶板以双层沥青外包混凝土或多层纤维织物夹煤焦油沥青的止水,在顶板和边墙用专门的粘结剂粘帖,以氯丁橡胶或维尼龙橡胶制成的塑性薄片或环氧涂层止水等,由于让保护涂层和止水膜层不受机械损伤很困难,自80年代末以来,他们已将混凝土沉管法隧道的防水重点放在加强混凝土裂缝控制,使混凝土成为永久的防水屏障,以及伸缩缝、管身间接缝的处理上.最新的例子是荷兰阿姆斯特丹的Zeeburger混凝土沉管法隧道,矩形断面宽26.7m,高7.2m,分2舱,每舱3车道,管段长112.8m,桩基础.该隧道的新颖之处是消除了外防水系统,在桩头与沉管之间采用了专门的连接装置.

3 基槽开挖和水下地基处理

沉管法隧道的基槽深度应能包容隧道底部铺筑的基层、管道全高及管顶至少1.5m的回填保护层.某些情况下,例如航道以外及两岸附近,允许部分管段凸出于天然河床之上,但管身两侧需筑水下抛石护堤.

基槽边坡取决于当地土质,欧美的做法是根据地质资料确定设计边坡,而后允许承包商施工时视现场情况放陡,承包商在获利的同时必须承担相应的风险.

基槽开挖分粗挖(常全线施工,用水力疏浚,抓斗或铲斗挖泥船)和细挖(挖至最后尺寸,一般有2~3个管段的提前量,以尽量缩短基槽完工至管段沉放的时间间隔)两步.铺筑基层前,检查基槽中的淤积和边坡坍塌情况,必要时应用抓斗或吸泥船予以清除.由于包括回填料的沉管重量与基槽处原土

重量相差不太多,沉管法隧道对基础的承载力要求不高.

沉管基础做法有:①摊铺耙平法(screed),在开挖好的基槽面上铺以60~90cm厚的粗沙或级配良好的砾石,再以重质耙平器耙平;②喷沙法(jetting sand)和沙流法(sandflow),在经定位和临时固定的管段底部和基槽之间的空间中用喷沙门机或沙船泵送机组以水-沙混合物填充.喷沙法始用于1946年的荷兰马斯隧道,此后用于许多隧道的建设.由于喷沙法主要是水上作业,喷沙门机沿管顶的临时桥梁行走,占用航道,对于水上交通繁忙的场所无疑是一个缺点.为此,荷兰人于1969年提出并于1975年在Vlake隧道工程中首次实地运用沙流法,此法将沙船和泵送系统锚泊于岸边,并将输沙管线接到沉管底板上,不占用航道.另外它还具有一大优点——可实现对沙流模式的较好控制,特别是对局部流速高达2m/s的地区.

当隧道下的土质太弱,不足以承受隧道和回填料的重量,或基槽的开挖及换土不经济时,可采用桩基.弱土层可用挤压桩加固,桩头低于基础面30~60cm,再以摊铺耙平法做出基层;或将沉管直接支承于桩顶.荷兰阿姆斯特丹1961年建成的IJ隧道和1990年建成的Zeeburger隧道均采用了桩基.

20多年来,日本人运用注浆法构筑基础.将管段临时支承于千斤顶上,通过隧道底板上预留的注浆孔,将低粘滞性低离析性膨润土浆,以高于当地水压力9.81~19.62kPa的压力注入地基,形成连续基础.施工时以超声波间隙计检测管底与浆液顶面的间隙.一般浆层厚度为50cm.基础边缘设止浆袋,外侧再堆以碎石以阻挡浆液流出基础以外.此法于1976年首先应用于东京港隧道,现已流行于日本.

为确保沉管法隧道在沉放安装和运用期的抗浮稳定性,需对沉管重量进行控制.所浇注的混凝土需经试拌取样测定容重.基槽中泥水的比重必须考虑.在美国德克萨斯的Washburn隧道施工期间,曾发生过洪水一夜之间将淤泥冲进新近沉放但尚未完成回填的管段基槽中,迫使该管段上浮至水面.为确保沉管法隧道的抗浮稳定性,设计时应通过精细的计算.通常采用一定的安全系数,并对施工期不同阶段和运用期选用不同的数值.但荷兰人则是用最大上浮力和最小自重条件下应满足的最小支承反力来控制^[5].

在正常情况下,沉管法隧道对基土沉陷相对不敏感,因其浮重与原基土和邻近的回填土重相差不多.但当隧道沿线土质或荷载分布变化显著时,将产生不均匀沉陷,荷载的重分布将会产生显著的弯矩,

这对于脆性材料的混凝土沉管法隧道,设计时预估沉陷显得特别重要。

当采用喷沙法和沙流法构筑管道基础,在移去管段的临时支撑后,沉管管段可能产生高达 7.5 cm 的初期沉陷,正常条件下平均沉陷为 1 cm^[6],为此在荷兰对混凝土隧道每隔 18~22.5 m 设置一道可传递剪力并允许转动的伸缩缝,使混凝土管道仿佛如一种链式结构,可跟随沙基和基土的组合沉降而不产生纵向弯矩。

钢壳隧道能允许较大的沉陷,美国的汉普顿第二隧道^[7],基土性质变化很大,从粗沙、细沙到淤泥质细沙,施工中曾进行频繁的监测,结果发现平均沉陷 15 cm,最大位移达 25 cm,但没有造成结构和运用方面的问题,巴尔的摩的福特—麦克亨利隧道,有三个管段顶部回填层厚达 15 m(5 万 t 船舶的泊地),施工期最大沉陷达 15 cm,其余 16 条管段平均沉陷 5 cm,同样也没有造成结构和运用方面的问题,而且上述两个工程竣工后没有观察到进一步的沉降。

4 管段水下对接和接头防水

管段沉放和对接应在平潮时候进行,因平潮历时较短,故采用快速正确的定位对接方法显得很重要,在美国通常用双体驳船将管段悬吊起来沉放,所有的受力缆绳和定位控制缆绳均予以锚定,进行水平错位微调时,对采用橡胶止水接缝的管段,利用一组调整楔片放置于水平中心线橡胶止水的两侧,试放后将接头处的水抽干检查定位情况,必要时再将接头处充水,调整楔片至合适位置,整个操作通过水上的液压系统进行,所化时间平均不超过半小时,在荷兰,当基层施工时,对管段采用三点临时支承系统,外端(向水端)用单枢支座,以便于调整定线,减少接缝施工时所需的校准次数。

管段间接缝通常用导管混凝土或橡皮止水封堵,用导管混凝土法时,管段两端设有专门设计的法兰和挡板,在管段定位后以钢销加楔锁定,导管法浇筑接缝处的外环混凝土,焊接接缝两侧的内衬钢板作为连续的止水膜,移去临时止水头和挡板,然后浇筑混凝土内衬;近来有用带 Ω 形橡皮的综合止水系统代替接缝处内衬钢板的焊接,形成止水膜,并实现管段间柔性连接,用橡皮止水法时,以液压千斤顶实现管段端部止水橡皮环的初始压缩,抽干接缝两侧临时止水头部间的积水,借助作用于外端(向水端)的静水压力将止水橡皮压缩一半,然后施工人员可从临时止水头部上的门进入,继而完成接缝处全部处理工作,橡皮止水环有用截面较大的单圈和截面较小的双圈两种,管段接缝处,由于设置多层防水屏

障和精心施工,已建工程中尚未见接缝处严重漏水报道。

沉管法隧道不允许穿过活断层,但对建于地震影响区内的隧道,可通过特殊的接缝构造减少或消除地震波的影响,例如美国旧金山的穿湾隧道采用获得专利的特殊装置,可适应地震引起的伸缩滑移和转动等,接缝处任意方向上相邻结构间的位移差可允许高达 10 cm。

参考文献:

- [1] Culverwell D R. Comparative merits of steel and concrete forms of tunnel[A]. Proceedings of the Immersed Tunnel Techniques Symposium, Manchester, UK, 1989.
- [2] International Tunneling Association Immersed and Floating Tunnels State of the Art Report[R]. Working Group No. 11, Tunneling and Underground Space Technology, Pergamon Press, 1993, Vol. 8, No. 2(April).
- [3] 张永龄. 城市水底交通隧道及其施工技术[J]. 建筑施工, 1998, 20(4): 41~43.
- [4] Gursoy A. "Immersed Tube Tunnels" in Tunnel Engineering Handbook[Z]. John O, et al eds, 1997.
- [5] Kuesel T. Royal Institution of Engineers and The Netherlands Tunnels[A]. Immersed Tunnels Proceedings of Delta Tunneling Symposium, Amsterdam, 1987.
- [6] Rasmussen N, Romhild C J. Settlement of immersed CN tunnels [A]. Proceedings of the Second Symposium on Strait Crossing, Norway, 1990.
- [7] Schmidt B, Grantz W. Settlement of immersed tunnels[J]. Journal of the Geotechnical Division, ASCE, 1979, 105(P): 1031~1048.

(收稿日期: 1999-09-21 编辑: 韩水斌)

• 简讯 •

英国在韦尔河南岸铺设沥青防护层获得成功

赫塞尔伯格水利公司(Hesselburg)完成了一项价值为 72 万美元的加固工程,该工程旨在增强位于英国大雅茅斯附近,布莱顿沃特的韦尔河南岸长 5 km 河段的防洪能力。

该公司在含量低的沥青反滤层上铺设了一层露天石料沥青涂层以保护钢板桩前面的土堤,提高该地区的防洪能力,1.4 万 m² 面积的保护层,使用了约 6000 t 沥青。

1995 年,赫塞尔伯格公司曾在韦尔河下游铺设了露天石料保护层,该设计包括在堤顶开一填土沟槽及在护坡上铺设表土层,这样,一旦建立起植物群,有助于工程与环境的协调。

(张惠英摘自《水力发电与坝工建设》,1999 年第 10 期)