

厦门翔安海底隧道施工关键技术研究

傅洪贤¹, 刘永胜¹, 郭衍敬², 黄明琦²

(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. 中铁二十二局集团有限公司, 厦门翔安海底隧道项目部, 福建厦门 361102)

[摘要] 厦门翔安海底隧道是我国第一条海底隧道, 陆域浅埋暗挖地段, 其地质条件差, 多为全、强风化花岗岩, 且地下水丰富。前期施工过程中支护结构常发生较大的变形, 为了保证施工安全和进度, 通过现场试验, 得出的一套合理的控制变形措施, 使隧道拱顶下沉、水平收敛得到较好控制。在海底硬岩地段进行了钻爆试验, 得出较好的爆破方案和参数, 并采用声波仪和位移计对围岩损伤范围进行了检测。

[关键词] 厦门翔安海底隧道; 开挖工法; 施工工序; 控制措施; 爆破

[中图分类号] TD235.39 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2009)07-0030-05

1 前言

厦门海底隧道是一项规模宏大的跨海工程, 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, 是我国大陆第一座采用钻爆暗挖法修建的大断面水底隧道。该隧道为三孔隧道, 两侧为行车主洞, 中间为服务隧道, 各洞之间的净间距为 22 m。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, 隧道海域段需穿越四处全强风化深槽破碎带。场区内地下水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。

不同围岩地段应采用不同施工方法, 根据施工实际情况, 隧道采用的施工方法主要为台阶法、CRD (cross diaphragm) 法、双侧壁导坑法。超前支护主

要方法为超前锚杆、超前小管棚、超前帷幕预注浆等。

2 软弱地段施工技术研究

隧道陆域地段围岩为全强风化花岗闪长岩、全强风化黑云母花岗岩、黏性土和砂性土。全强风化花岗岩在未扰动之前坚硬、干燥、自稳能力强, 而暴露于掌子面后遇水膨胀, 迅速软化, 自稳能力迅速下降。为了控制围岩变形过大造成塌方、初期支护变形过大造成侵限, 对施工方法和施工步骤进行了研究。

2.1 施工方法研究

对大断面软弱隧道开挖方法, 通常为 CRD 法和双侧壁法^[1], 分别如图 1 和图 2 所示。五通段右线, 开始使用 CRD 方法开挖, 开挖到 YK6+900 时, 由 CRD 法变为双侧壁法。在 YK6+820 断面和 YK6+900 断面布点进行检测, 两个断面相距 80 m, 地质条件没有发生明显变化。检测结果表明^[2]: YK6+820 断面, CRD1, CRD3, CRD2, CRD4 封闭时的拱顶下沉分别为 31.5 mm, 89.9 mm, 169.6 mm 和 242.2 mm, 该断面拱顶下沉最终为 239 mm; YK6+900 断面, 左导坑、右导坑、中导坑封闭时的拱顶下沉分别为

[收稿日期] 2009-04-10

[作者简介] 傅洪贤 (1966-), 男, 河北南宮市人, 博士, 北京交通大学副研究员, 研究方向为隧道及地下工程、工程爆破;

E-mail: fhlj@163.com

19.0 mm, 85.7 mm 和 121.3 mm, 该断面拱顶下沉最终为 113.3 mm。

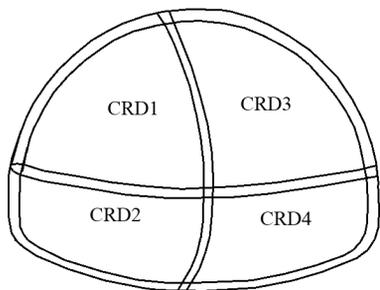


图 1 CRD 法示意图

Fig. 1 CRD method

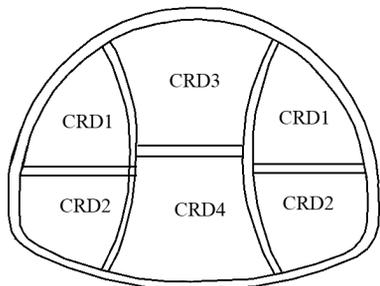


图 2 双侧壁法示意图

Fig. 2 Bith-side drift method

对水平收敛也做了检测, 双侧壁法比 CRD 法收敛有所减小。但是, 双侧壁法的施工进度比 CRD 法慢。原因为双侧壁法施工难度高, 施工工序多, 工序转换复杂, 空间限制小, 挖机不能充分发挥作用, 有些部位只能用人工开挖。

2.2 CRD 法施工工序的研究

采用 CRD 法开挖, 在施工中存在不同施工工序问题。在宝兰二线新曲儿岔双线施工中, 认为 CRD1, CRD2 部超前可以较好控制隧道变形^[3]。在施工洋碰隧道时, 认为 CRD1, CRD3 部超前可以较好控制隧道变形^[4]。厦门海底隧道采用 CRD 法施工时, 对 CRD1, CRD2 超前和 CRD1, CRD3 超前这两种施工工序分别进行了施工并进行了检测, 对两种施工工序各 8 个位移断面各施工部开挖引起 CRD1, CRD3 部拱顶下沉的量测结果进行了统计, 结果表明^[5]: CRD1, CRD2 部超前时的拱顶下沉量明显高于 CRD1, CRD3 部超前时的拱顶下沉量, 前者 CRD1, CRD3 部拱顶下沉量比后者分别高出约 70% 和 45%。

2.3 控制变形的辅助措施的研究

2.3.1 快速封闭

在采用 CRD 法施工时, 临时仰拱对抑制初期结

构的下沉和水平位移起关键作用, 应尽早施作临时仰拱, 形成闭合支护结构。针对厦门海底隧道实际情况, 建议各部自开挖至初支(临时仰拱、仰拱)封闭成环, 不超过 3 d; 全断面初支封闭成环时间不超过 30 d, 永久仰拱距 CRD4 部开挖面不超过 30 m^[6]。

2.3.2 控制台阶长度

隧道在采用 CRD 法施工时, 在 CRD1 部和 CRD3 部均布置了拱顶下沉测点, 拱顶下沉时态曲线模型见图 3^[7]。拱顶下沉由分段曲线组成, 总体呈台阶状上升, 正常情况下最后趋于稳定。每条曲线分布多个反弯点, 每个反弯点和后续施工分部通过该监测断面有关; 曲线中的上反弯点基本出现在分部开挖面到达监测断面前 5 m 左右, 当分部开挖面经过该监测断面 10 m 后曲线呈现明显的收敛趋势, 即下半断面施工部开挖对隧道变形有显著影响的范围一般是该开挖面前方 5 m 至后方 10 m 的范围; 曲线中的下反弯点与开挖分部仰拱闭合相对应, 即仰拱闭合对控制拱顶下沉十分关键。因此, 建议各部之间的距离为 10 ~ 15 m。

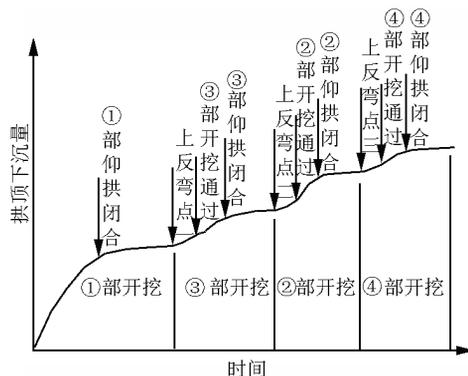


图 3 拱顶下沉时态曲线模型

Fig. 3 Arch-crown subsidence vs. time model

2.3.3 初期支护背后及时径向充填注浆加固

拱部衬砌与地层之间的间隙应及时注浆填充, 进行初期支护背后径向充填注浆加固, 可以改良初支背后围岩, 增强初支与围岩的密贴程度, 提高围岩和初支的承载力和自稳力, 控制沉降和变形, 通常是滞后工作面 3 m 左右, 在拱部左右 45° 处埋设注浆管, 当喷好混凝土 1 d 后即可填充, 否则可能增加 30 ~ 40 mm 的沉降值^[6]。

2.3.4 设置锁脚锚管

每榀工字钢在距离临时仰拱或仰拱 1 m 高处打入两对共 4 根 $\phi 42$ 中空注浆锁脚锚管, 两对锚管上下间距 0.75 m。锁脚锚管以 45° 打入, 中隔墙上的

锚管在后续开挖时拆除,这可以减小开挖中的整体下沉。加锁脚锚管后,1部和3部拱顶下沉分别减小15.9%和17.8%,上部水平收敛略有增大,下部水平收敛减小了12.2%^[2]。这表明采用锁脚锚管可以减小拱顶下沉和下部水平收敛。

2.3.5 及时抽排拱脚积水

对于强风化花岗岩,含水量对于其力学性能有很大影响,一般而言,含水量增加,会由于失去由毛细管应力或弱结合水形成的表面黏聚力,使承载力下降,同时含水量的增加也会使土的内摩擦角减小;含水量增加还使土有效重度减小从而降低了土的承载力。因此,及时抽排拱脚积水,减轻基底浸泡弱化引起沉降量的增加。

2.3.6 钢拱架拱脚设置垫块

为了控制拱顶下沉,在软土隧道施工中通常在钢拱架拱脚增加刚性垫块,以增大拱脚作用面积,分散拱脚集中作用力。拱脚垫块材料通常用混凝土块或方木块。

2.3.7 仰拱注浆

对于支护封闭后出现整体下沉的情况,一般采用注浆加固方法,加固范围一般在仰拱下部1.5m。仰拱注浆后1部和3部拱顶下沉分别减小16%和20.5%^[2],上下部水平收敛变化较小。这表明采用仰拱注浆可以在一定程度上减小拱顶下沉,但对水平收敛影响较小。

3 硬岩地段施工技术研究

硬岩地段,初期计划采用台阶法和全断面导洞超前法。但在实际施工中,由于现场管路、施工人员和设备等情况,硬岩地段均采用台阶法施工,上台阶5.5m,下台阶6.5m。

3.1 硬岩钻爆方法和参数研究

3.1.1 上台阶爆破设计

II级围岩上台阶的炸药单耗、周边孔眼距、线装药密度,分别为1.9 kg/m³,45 cm,0.2 kg/m。炮眼布置见图4,爆破参数见表1。

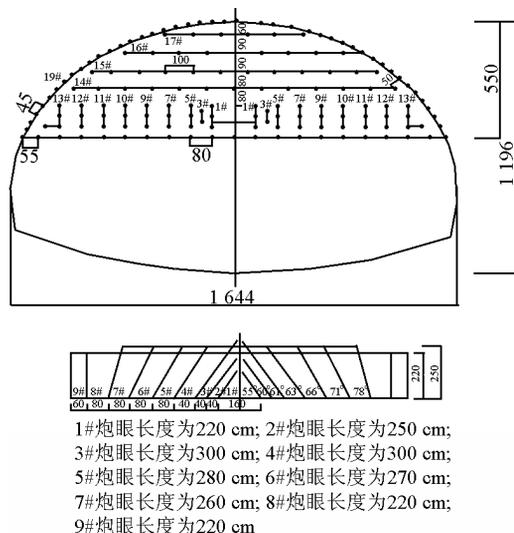


图4 II级围岩上台阶爆破炮眼布置图(单位:cm)
Fig. 4 Sketch of bor-hole layout for upper half cross-section in II wall rock(Unit: cm)

表1 II级围岩上台阶炮眼药量分配

Table 1 Blasting parameters for upper half cross-section in II wall rock

炮眼分类	炮眼数/个	雷管段数/段	炮眼长度/cm	炮眼装药量			备注	
				每孔药卷数/卷	单孔装药量/kg	合计药量/kg		
掏槽眼	6	1	160	6	1.2	7.2		
掏槽眼	4	3	220	8	1.6	6.4		
掏槽眼	6	5	300	10	2.0	12.0		
上台阶	扩槽眼	38	7,9,10,11,13	270~300	8	1.6	60.8	上断面面积为48 m ²
	崩落眼	40	14,15,16	220	5	1.0	40	
	底板眼	21	17,18,19	220	9	1.8	37.8	
	周边眼	44	20	220	2	0.4	17.6	
	合计	159					181.8	

3.1.2 下台阶爆破设计

II级围岩下台阶的炸药单耗、周边孔眼距、线装

药密度,分别为0.6 kg/m³,45 cm,0.2 kg/m。炮眼布置见图5,爆破参数见表2。

表 2 II 级围岩下台阶炮眼药量分配

Tablet 2 Blasting parameters for lower half cross - section in II wall rock

炮眼分类	炮眼数/个	雷管段数/段	炮眼长度/cm	炮眼装药量			备注	
				每孔药卷数/卷	单孔装药量/kg	合计药量/kg		
崩落眼	83	1,3,5,7,9	2.2	5	1.0	83		
下台阶	底板眼	27	15	2.2	8	1.6	43.2	开挖面积
	边墙眼	12	13	2.2	2	0.4	4.8	大约 110 m ²
	合计	122				131		

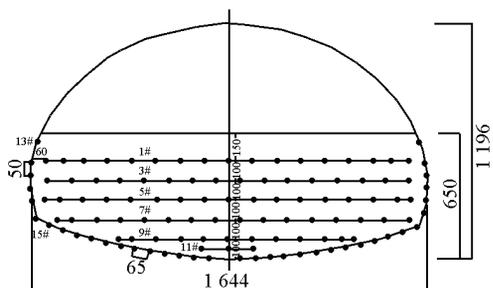


图 5 主洞 III 级围岩下台阶爆破炮眼布置图(单位:cm)

Fig. 5 Sketch of bor-hole layout for lower half cross-section in II wall rock(Unit:cm)

3.2 围岩损伤的研究

在 II 级围岩钻爆施工后,采用 RSM - SY5 声波检测仪进行松动范围的检测,检测结果如图 6 所示。

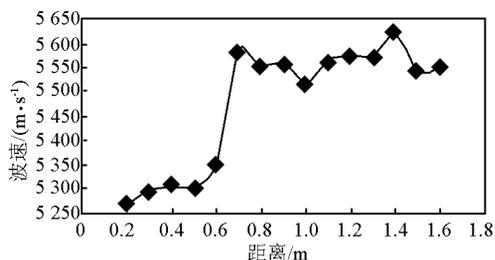


图 6 II 级围岩上台阶曲墙处松动圈大小

Fig. 6 Range of cracking in II wall rock

从声波测试结果可以得出,在 II 级围岩上台阶曲墙处爆破产生的松动范围约为 0.7 m。同样测量了拱顶和底板处松动范围的大小,分别为 0.5 m 和 0.9 m。

在 IV 围岩中,围岩比较破碎,用声波仪测试效果不佳,采用位移计进行了测试,松动范围大约在 1.5 ~ 1.8 m 之间。

4 结语

1)海底隧道陆域地段施工难度较大,施工进度较慢,对整体工程的成本影响较大。

2)在陆域地段,对地面沉降要求不十分严格情况下,建议采用 CRD 法,可以加快施工进度,降低施工成本。在采用 CRD 法时,采用 CRD1,CRD3 部超前比 CRD1,CRD2 部超前能更好地控制拱顶下沉和水平收敛。

3)在陆域地段,穿越建筑物或道路地段,建议采用双侧壁法,该法能较好控制地表下沉,能较好地保护建筑物或路面不受破坏。

4)在海底地段穿越破碎段时,建议采用双侧壁法能较好控制上部覆盖层的沉降,避免使上部不透水层出现错动诱发透水事故。

5)在采用 CRD 法或双侧壁施工中,要采用辅助措施控制拱顶下沉和水平收敛,避免初期支护侵限。

6)在硬岩地段,在采用人工钻研爆破开挖时,可以采用台阶法施工,能取得较快进度。围岩的松动范围为 0.5 ~ 0.9 m。

参考文献

- [1] 王梦恕. 地下工程浅埋暗挖技术通论[M]. 合肥:安徽教育出版社,2004
- [2] 曾超. 大断面海底隧道异常变形控制措施[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(11):2170-2175
- [3] 赵源林,姜玉松. 既有铁路路基下软岩隧道的 CRD 法施工技术[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2005,25(2):29-34
- [4] 徐林生,孙钧,蒋树屏. 洋碱隧道 CRD 工法过程的动态仿真数值模拟研究[J]. 地质灾害与环境保护,2001,12(1):58-67
- [5] 张建国,王明年,刘大刚,等. 海底隧道浅埋暗挖段 CRD 法不同施工工序比较[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(supp. 2):3639-3645
- [6] 黄明琦,付贤伦,李云超. 大断面海底隧道软弱地层 CRD 法施工稳定性控制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(supp. 2):3804-3809
- [7] 张建斌. 厦门翔安海底隧道陆域地段 CRD 法位移检测分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(supp. 2):3653-3658

Study on key construction technologies of Xiamen Xiang'an subsea tunnel

Fu Hongxian¹, Liu Yongsheng¹, Guo Yanjing², Huang Mingqi²

(1. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Xiang'an Subsea Tunnel Project in Xiamen, China Railway 22th Bureau Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361102, China)

[**Abstract**] Xiamen Xiang'an subsea tunnel is the first subsea tunnel in China, whose geological conditions in the land are strongly weathered granite with enriched groundwater, shallow-buried excavation method is adopted. During the tunnel construction, the deformation of tunnel support is great. It is important to seek for a reasonable countermeasure to restrict the large deformation to ensure safety construction and advance through trials in locale. The arch crown settlement and level convergence are controlled effectively. Its subsea geological condition is granite. Drilling hole and blasting parameters trials are carried out through construction, and better blasting plan and parameters are gained. The ranges of rock crush of the tunnels are measured by using ultrasonic instrument and displacement record.

[**Key words**] Xiamen Xiang'an subsea tunnel; excavation method; working procedure; controlling measure; blasting

(上接 29 页)

Preliminary conclusions of construction technology in Xiamen Xiang'an subsea tunnel

Qu Shouxin

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

[**Abstract**] A comparison of the bridge programs and the tunnel programs for the project of across the sea in Chinese Xiamen Xiang'an was given in this paper. And there is a preliminary and brief conclusion for the construction of the Chinese first subsea tunnel, which contains the characteristics and difficulties and disadvantages of the construction.

[**Key words**] Xiamen Xiang'an subsea tunnel; construction technology; preliminary conclusions of experience