

湛江湾跨海隧道工程盾构工作井结构设计及应力分析

庞治星

(广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510000)

摘 要:湛江湾海底隧道盾构的工作井地面至基底开挖最大深度约47m,开挖深度较深,深挖竖井结构深埋于全水头砂层中,围护结构主要由连续墙及变截面的内衬组成,本文主要分析竖井工程的结构及应力设计,连续墙及内衬受力较为复杂,需考虑坑底流沙地质及工作井内外侧水头差较大对基坑支护稳定性的影响,采用封底+减压井方案在坑内设置减压井,通过一系列的井口把水引出排走,既安全又经济,其经验可为今后沿海高水头深挖竖井的设计提供参考。

关键词:湛江湾;高水头深挖竖井;竖井结构;应力分析

中图分类号:U45 **文献标识码:**B **文章编号:**1004-4701(2019)03-0185-06

0 引言

鉴江供水枢纽工程是鉴江下游最后一级水资源综合利用工程,主要任务是蓄淡供水,兼顾挡潮、改善灌溉条件等。湛江湾跨海盾构隧道工程是鉴江供水枢纽工程的一部分,位于湛江湾最窄处,隧道长2 750.00m,盾构隧道的布置主要由盾构始发井、跨海隧道、盾构接收井3部分组成,由东海岛盾构工作井始发,横穿海底,到达南三岛盾构接收井解体吊出。为保证高压条件下隧道施工及运行安全,隧道最小埋深除满足抗浮安全要求外,还应满足隧道结构的稳定要求,即最小埋深宜大于隧道直径的2倍^[1],隧道地下埋深17.00~22.00m,水下埋深21.00m~38.00m,掘进地层主要为中细砂层、砂砾粘土层、全断面粘土层,部分地层透水性较大,与海水直接连通。

湛江湾跨海隧道工程盾构始发井位于东海岛北部东简镇蔚菴村,临近于湛江湾海岸,距离海边约130m,所处位置现状为连片虾塘,场地内高程起伏较大,接收井位于南三岛,现状周边为鱼虾塘,始发井和接收井均为圆形竖井结构,其中围护结构采用地下连续墙与旋

喷桩相结合的围护结构形式。始发井和接收井开挖深度较深,竖井平面尺寸较大,其中始发井开挖深度约28.5m,竖井内直径为16.50m,接收井开挖深度约47.0m,竖井内直径为16.00m。此外,盾构隧道埋深较大,其中始发井出洞盾构隧道中心为29.50m深,接收井进洞盾构隧道中心为41.00m深,始发井和接收井围护结构需承受较大的侧向水土压力,底板结构需承受较大的向上的水压力,竖井基底需承受较大的抗浮力,为此,需对盾构始发井和接收井围护结构、底板结构和加固土体厚度进行受力分析和安全评估。

1 工程背景

1.1 工程概况

湛江湾跨海隧道工程盾构始发井壁为双层结构,外壁为地下连续墙,内径19.50m,厚度1.00m,墙深34.50m;内壁为现浇混凝土整体衬砌,深28.50m,经计算高程(1956年黄海高程系,下同)7.50~-4.50m,内衬厚度为1.00m;高程-4.50~-8.50m,内衬厚度为1.20m;高程-8.50~-19.00m,内衬厚度为1.50m;衬后最小直径16.50m,采用逆作法分9段施工,底部、后背墙及出洞

表 1 湛江湾跨海盾构隧道地层主要物理力学指标建议值表

层号	岩土名称	状态	固结不排水三轴试验				饱和快剪 强度参数		固结快剪 强度参数		压缩系数	压缩 模量	地基承 载力特 征值	渗透 系数	钻孔桩侧 摩阻力特 征值
			总应力		有效应力										
			c_{cu}/kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	c_{sq}/kPa	$\varphi_{sq}/(^{\circ})$	C_{cq}/kPa	$\varphi_{cq}/(^{\circ})$	$a_v/(1/\text{MPa})$	E_s/MPa	f_{ak}/kPa	$k/(\text{cm/s})$	q_{sa}/kPa
③-1	中细砂、 细砂	松散-中密											100~120	4×10^{-2}	8~12
③-2	中细砂、中 粗砂,含泥 和少量砾	稍密-中密											150~250	4×10^{-2}	15~35
⑤	中细砂,局 部夹粗砂, 含少量砾	稍密-中密											140~160	2×10^{-2}	10~30
⑥		局部软塑											70~100		8~15
	粘土		24~26	14~15	26~28	16~18	17~22	10~12	21~23	12~14	0.3~0.5	5~7		3×10^{-7}	
		可塑											160~200		20~35
	中粗砂夹 细砂,含少 量砾	中密-密实											180~300	5×10^{-3}	30~50

程》的 6.2.3 条规定(假定有偏压),按下式计算:

$$\begin{cases} \text{轴力: } N_A = p_A r_c (1 + 0.7854 \omega') \\ \text{轴力: } N_B = p_A r_c (1 + 0.5 \omega') \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{弯矩: } M_A = -0.1488 p_A r_c^2 \omega' \\ \text{弯矩: } M_B = -0.1366 p_A r_c^2 \omega' \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega' = p_B / p_A - 1 \quad (4)$$

式中: N_A 为 A 截面上的轴力, kN/m; r_c 为沉井井壁的中心半径, m; N_B 为 B 截面上的轴力, kN/m; M_A 为 A 截面上的弯矩, (kN·m)/m, 以井壁外侧受拉取负值; M_B 为 B 截面上的弯矩, (kN·m)/m; p_A 、 p_B 为井壁外侧 A、B 点的水平向土压力, kN/m²。

(3) 始发井在推力作用下, 壁板后土抗力最大值和各点内力参考《给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》的 6.2.7 条规定, 按下式计算:

$$q_{A\max} = \frac{4P_t}{3\pi r_c h_f} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} P_t = \gamma_p P_{tk} = \gamma_p F_0 \\ M_A = -0.307 q_A r_c^2 \\ M_B = 0.068 q_A r_c^2 \\ M_C = -0.057 q_A r_c^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} N_A = -0.375 q_A r_c \\ N_B = 0 \\ N_C = -0.125 q_A r_c \end{cases} \quad (7)$$

式中: $q_{A\max}$ 为壁板后土抗力的最大值, kN/m²; P_t 为顶管力设计值, kN; r_c 为工作井中心半径, m; h_f 为顶推力至桩端的距离, m; γ_p 为顶管力分项系数, 取 1.3; P_{tk} 为顶管力标准值, kN, 根据本规程第 4.3.6 条确定; q_A 为任意高度上 A 点的土抗力, kN/m², F_0 为总推力标准值, kN。

(4) 始发井在推力的作用下, 后背土体的稳定参考《给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》的 6.2.8 条规定:

$$P_{tk} \leq \xi (0.8 E_{pk} - E_{ep,k}) \quad (8)$$

式中: P_{tk} 为顶管力标准值, kN; ξ 为考虑顶管力与土压力合力作用点可能不一致的折减系数; E_{pk} 为沉井后方被动土压力合力标准值, kN; $E_{ep,k}$ 为沉井前方主动土压力合力标准值, kN;

(5) 工作井底板在均布荷载作用下的弯矩参考《给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》的 6.2.9 条规定:

$$\begin{cases} \text{径向弯矩} & Mr = k_r q r_c^2 \\ \text{切向弯矩} & Mt = k_t q r_c^2 \end{cases} \quad (9)$$

表 2 施工期工作井受力计算结果表

结构		始发井			接收井		
		水平向轴力/kN	环向弯矩/(kN·m)	竖向弯矩/(kN·m)	水平向轴力/kN	环向弯矩/(kN·m)	竖向弯矩/(kN·m)
连续墙	截面 A	6 174.3	0	-1 031.2/515.6	7 579.5	-1 404.2	-1 284.8/642.4
	截面 B	5 940.7	0		7 310.2	-1 289.1	
内衬	截面 A	5 421.3	-962.3	/	6 632.1	-1 075.1	/
	截面 B	5 216.2	-883.4		6 396.4	-987.0	

注:轴力“+”为压应力,“-”为拉应力,弯矩“+”为井壁内侧受拉,“-”为井壁外侧受拉。

式中: k_r 为径向内力系数, k_t 为切向内力系数; r_c 为工作井中心半径,m; q 为基底反力,kN/m²。

2.2 工作井围护结构受力计算及分析

根据上述方法和原理分析,并参照类似工程经验,拟定井壁为双层结构,外壁为地下连续墙,内壁为现浇钢筋砼整体内衬结构(采用逆作法施工),底部、后背墙及出洞口采用旋喷加固。

(1) 井壁受力分析

工作井施工期和工作期受力分析计算成果如下:

施工期受力计算结果见表 2 (表中数据为井底高程计算结果),其中地下连续墙水平向轴力最大值为 7 579.5kN,竖向弯矩最大值为 1 284.8kN·m。

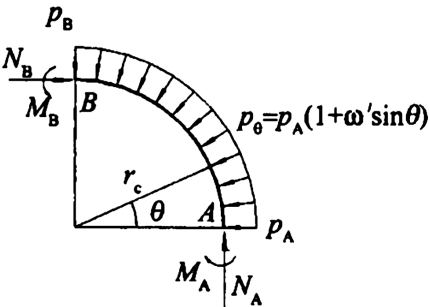


图 3 工作井受力分析示意图

工作期受力分析计算结果如下:

经计算最大推力约为 20 964kN,按后背土体稳定计算:

$$P_{tk}=20\,964\text{kN}\leqslant \xi(0.8E_{pk}-E_{ep,k})=31\,825\text{kN}$$

经验算满足后背土体稳定的要求。

本工程背洞口侧采用井外土体加固措施,采用高压旋喷桩形成井背加固体^[4],始发井在推力和土抗力作

表 3 始发井推力和土抗力作用下内力计算结果表

结构		始发井		
		水平向轴力/kN	环向弯矩/(kN·m)	竖向弯矩/(kN·m)
内衬+连续墙	截面 A	-619.6	-4 565.5	
	截面 B	0	1 011.3	
	截面 C	-206.5	-847.7	

注:轴力“+”为压应力,“-”为拉应力,弯矩“+”为井壁内侧受拉,“-”为井壁外侧受拉。

表 4 工作期始发井内力计算结果表

结构		始发井		
		水平向轴力/kN	环向弯矩/(kN·m)	竖向弯矩/(kN·m)
内衬+连续墙	截面 A	4 801.4	-5 527.8	
	截面 B	5 216.2	127.9	
	截面 C	5 214.8	-1810	

注:轴力“+”为压应力,“-”为拉应力,弯矩“+”为井壁内侧受拉,“-”为井壁外侧受拉。

用下的内力计算结果见表 3,始发井工作期内力(推力、土抗力和井周水土压力叠加)计算结果见表 4,其中“内衬+连续墙”水平向轴力最大值为 5 216.2kN,环向弯矩最大值为-5 527.8kN.m。

从计算结果分析可知,工作井不同厚度情况下,内力相差不大,主要为配筋变化,经比选:

① 地下连续墙厚 0.80m 时配筋率偏大,墙厚 1.20m 时偏小,故推荐选用配筋率较为适中的 1.00m 厚

表 5 施工期工作井配筋计算结果表

结构	始发井				接收井			
	环向配筋 /(mm ²)	环向配筋 率/%	竖向配筋 /(mm ²)	竖向配筋 率/%	环向配筋 /(mm ²)	环向配筋 率/%	竖向配筋 /(mm ²)	竖向配筋 率/%
连续墙	A 2 000(φ25@200)	0.20	外 3 856(φ25@125)	外 0.39	2 000(φ25@200)	0.20	外 4 875(φ25@100)	外 0.48
	B 2 000(φ25@200)	0.20	内 2 000(φ25@200)	内 0.20	2 000(φ25@200)	0.20	内 2 352(φ25@200)	内 0.23
内衬	A 3 000(φ25@150)	0.20	3 000(φ25@150)	0.20	3 000(φ25@150)	0.20	3 000(φ25@150)	0.20
	B 3 000(φ25@150)	0.20			3 000(φ25@150)	0.20		

表 6 工作期始发井配筋计算结果表

结构	始发井			
	环向配筋 /(mm ²)	环向配筋 率/%	竖向配筋 /(mm ²)	竖向配筋 率/%
内衬+ 连续墙	A 1 1181(φ32@70)	0.75	3 000 (φ25@150)	0.20
	B 3 000(φ25@150)	0.20		
	C 3 000(φ25@150)	0.20		

表 7 底板受力计算结果表

结构	始发井		接收井	
	径向弯矩	切向弯矩	径向弯矩	切向弯矩
底板	板中心 -2 037.4	-2 037.4	-2 615.8	-2 615.8
	板边 3 493.5	581.3	4 485.3	746.3

表 8 底板配筋计算结果表

结构	始发井				接收井			
	径向配筋 /mm ²	配筋率/%	切向配筋 /mm ²	配筋率/%	径向配筋 /mm ²	配筋率/%	切向配筋 /mm ²	配筋率/%
底板	板中心 4 000(φ25@100)	0.20	4 000(φ25@100)	0.20	4 633(φ25@100)	0.32	4 633(φ25@100)	0.32
	板边 6 258(φ25@80)	0.31	4 000(φ25@100)	0.20	8 136(φ32@90)	0.41	4 000(φ25@100)	0.20

地下连续墙。

② 同理,内衬根据井深不同位置,拟分别采用 1.00m,1.20m 和 1.50m 厚现浇钢筋砼,配筋计算结果见表 5 和表 6。

(2) 底板受力分析

底板受力分析及配筋计算结果见表 7、表 8,表中“-”表示顶面受拉。

2.3 竖井井底土体加固方案

湛江湾盾构隧道始发井和接收井围护结构均采用地下连续墙+内衬混凝土组合结构,因基底存在流沙地质及工作井内外侧水头差较大情况,如不采取适当措施,在如此高水头差作用下,必将发生基底浮托、导致坑底土体严重扰动,影响地下连续墙结构的稳定性等

一系列问题。目前国内外多采用基底加固法^[5],而坑内深井自流排水法较少使用。坑底地基加固法安全可靠,但费用较高;坑内深井(减压井)排水法属自流式排水,通过一系列的井口把水引出排走。据此,本工程采取的措施为封底+减压井方案,即在基坑内设置减压井,通过合理布置减压井位置、数量及孔口高程,适当降低水头,同时,在基坑底面以下一定范围打设旋喷桩,使基坑既满足抗浮要求,又不至于因为水头降低过多导致减压井涌水过大,而造成施工困难。

3 结 语

通过对湛江湾跨海隧道深挖圆形竖井结构进行结

构设计及应力分析,反映位于高水位砂层中的沿海深基坑竖井采用地下连续墙、混凝土内衬的组合围护结构是比较安全、稳定的结构形式,竖井井底土体加固方案采用封底+减压井,可有效避免因基底存在流沙地质及工作井内外侧水头差较大情况导致的不利影响,其设计经验可为今后沿海高水头深挖竖井的设计提供参考。

参考文献:

- [1] JGJ120-2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 周景星,等. 基础工程[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [4] 陈仲颐,等. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
- [5] 夏明耀. 地下工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.

编辑:张绍付

Structural design and stress analysis of shield work shaft in Zhanjiang Bay cross-sea tunnel project

PANG Zhixing

(Guangdong Provincial Water Resources Electricity Survey and Design Institute, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The maximum excavation depth from the ground to the base of the working well of Zhanjiang Bay subsea tunnel shield is about 47m, and the excavation depth is relatively deep. The deep-dug shaft structure is deeply buried in the full-head sand layer. The enclosure structure mainly consists of continuous wall and variable cross-section lining. This paper mainly analyzes the structure and stress design of the shaft project. The stress on the continuous wall and the inner village is relatively complex. It is necessary to consider the influence of quicksand geology at the bottom of the pit and large head difference between the inner and outer sides of the working well on the stability of foundation pit support. It is safe and economical to install relief wells in the pit by adopting the scheme of back sealing-relief wells, and drain water out through a series of wellhead. The experience can provide a reference for the design of deep excavation shafts with high water head along the coast in the future.

Key words: Zhanjiang Bay; High head deep excavation shaft; Shaft structure; Stress analysis

翻译:庞治星