

近海淤泥地层超大直径盾构工作井设计

杨上清

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 随着城市建设的推进,超大直径盾构隧道逐渐涌现于各种重大工程之中,而大尺寸、超深工作井也得到了应用。如何更好地对工作井的围护及结构进行设计,成为超大直径盾构研究的重点之一。以珠海某近海淤泥地层超大直径盾构工作井为例,通过启明星软件对其围护结构的安全性及侧移进行了分析计算。同时采用 Midas Civil 软件建立三维模型,计算其结构弯矩及剪力。结果表明,该工作井方案能满足各规范的要求,可为类似工程提供借鉴。

关键词: 盾构;工作井;基坑

中图分类号: U452

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)12-0254-05

0 引言

近年来,随着我国经济的不断发展,城市内的隧道工程也逐渐增加。盾构隧道作为一种常用的隧道形式,被国内各个重大工程广泛采用。而伴随着道路规模及车道宽度的不断扩大,盾构隧道的直径和工作井的尺寸、深度也在不断提升。在此背景下,复杂地质条件下盾构隧道工作井的结构及围护设计成为各个大直径盾构项目的难点。

为保证盾构工作井的安全性,国内学者已经进行了一些研究^[1]。李志刚^[2]分析了软土地区隧道始发工作井的设计,从构造、基坑支护、工作井结构和后靠背系统等方面对工作井的设计方案进行了论述。姚广亮等^[3]针对超深大直径工作井内衬结构的受力和变形进行了分析。温竹茵^[4]以上海新建路项目为依托,介绍了上海市越江盾构工作井的主要围护及结构设计。

以上学者对大直径盾构工作井的围护和结构均做了一定的研究,但是对近海淤泥地层的工作井涉及较少。本文以珠海某 14.5 m 外径的超大直径盾构隧道为例,介绍了其围护及结构设计,同时对其淤泥层的处理进行了探讨,以期类似工程提供借鉴。

1 工程概况

珠海地处粤港澳都市圈中心地带,是珠江口西岸的核心城市和交通枢纽。为加强珠海市内各区的

联系,拟建一条穿越近海水道的双向六车道隧道。盾构段长度 960 m,采用两个 14.5 m 超大直径盾构平行布置,盾构分为南、北两个工作井。

北岸工作井基坑内尺寸 46.6 m × 27.6 m(地墙内净尺寸),基坑计算整平标高为 2 m,基坑深度 25.9 m,采用 1.2 m 厚地下连续墙,插入深度 25.1 m(地墙总深 51 m)。

南岸工作井基坑内尺寸 45.1 m × 27.6 m(地墙内净尺寸),基坑计算整平标高为 4.4 m,基坑深度约 26 m,采用 1.2 m 厚地下连续墙,插入深度 58 m(地墙总深 84 m)。

2 地质条件

经本次勘察揭露,线路沿线第四系覆盖层较厚,拟建项目场区第四系覆盖层主要为人工填土层(Qml)、海陆交互相沉积的淤泥、淤泥质土、黏土层(Q4mc)、砂岩残积土(Q4el)和下伏的全风化、强风化砂岩(D)。土层从上往下依次为:①₂杂填土、①₃素填土、①₅冲填土、②_{1a}浮泥、②₁淤泥、②₂黏土、②₃粉质黏土、②₄淤泥质黏土、④碎石质粉质黏土、⑤₁全风化砂岩、⑤₂强风化砂岩。工程涉及的主要土层物理力学参数见表 1。

3 工作井围护设计

3.1 围护形式

对于深度较大的基坑工程,一般采用地下墙围护明挖法来实施。地下连续墙技术具有如下优点:工程施工时对环境的影响小,墙体刚度大、整体性好,结构和

收稿日期:2023-02-12

作者简介:杨上清(1991—),男,硕士,工程师,从事结构设计工作。

表 1 土层物理力学参数

土层名称	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi /(^{\circ})$	K_0	K 基床系数 $/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	f_{ak} 地基承载力特征值 $/\text{kPa}$
① ₃ 素填土	18.3	8.0	5.5	0.50	1.8	55
① ₅ 冲填土	17.9	—	25.0	0.43	1.86	60
② ₁ 淤泥	16.5	10.5	14.1	0.70	2	40
② ₂ 黏土	18.3	25.2	17.9	0.50	29.6	180
② ₃ 粉质黏土	18.4	26.0	18.9	0.40	22.8	170
② ₄ 淤泥质黏土	17.7	14.0	14.0	0.60	6	55
④ 碎石质粉质黏土	18.8	38.0	25.0	0.40	40.6	240
⑤ ₁ 全风化砂岩	19.0	44.0	26.0	0.40	78	420
⑤ ₂ 强风化砂岩	19	48.0	27.0	0.30	122	610

地基变形较小,既可适用于超深基坑围护结构,也可与内衬形成复合结构整体受力。在国内几条已建盾构法隧道工作井中,如珠海市马骝州隧道、上海市新建路越江隧道、上海市迎宾三路隧道,都运用了“地下连续墙围护明挖法+钢混凝土支撑”的基坑支护方案。

本工程同样采用 1.2 m 厚地下连续墙作为围护结构。为减少造价,采取“两墙合一”的方案。根据地质勘察资料揭露,工作井所处地质环境对混凝土内钢筋具有中腐蚀性,且地下连续墙后期将作为永久结构,因此混凝土等级确定为 C45。

3.2 围护计算

采用同济启明星基坑支护专用软件 FRWS 进行工作井围护安全性计算。启明星软件采用弹性地基梁模式,取每延米围护墙进行分析,支撑以弹性支座模拟,开挖面以下土抗力以水平弹簧模拟,根据分层开挖的原则模拟实际工况。计算结果如图 1、图 2 所示。

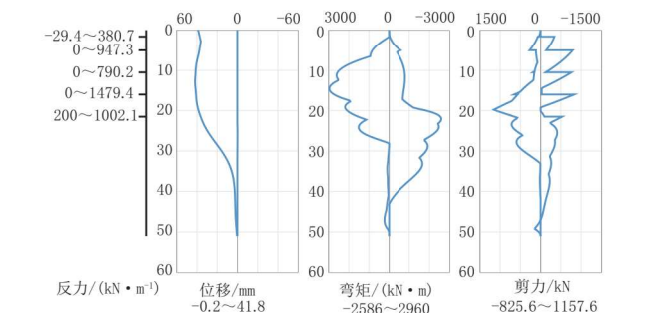


图 1 北岸工作井地连墙内力位移计算结果

根据广东省规范《建筑基坑工程技术规程》^[5],基坑安全等级定义为一级,重要性系数 1.1,环境等级为二级。基坑不仅需要达到结构稳定性要求,还需要通过既有的计算理论,将侧移限制在规定的范围内。其基坑计算结果见表 2 和表 3。从表 2 和表 3 可以看出,本工程工作井的基坑安全性和侧移均满足

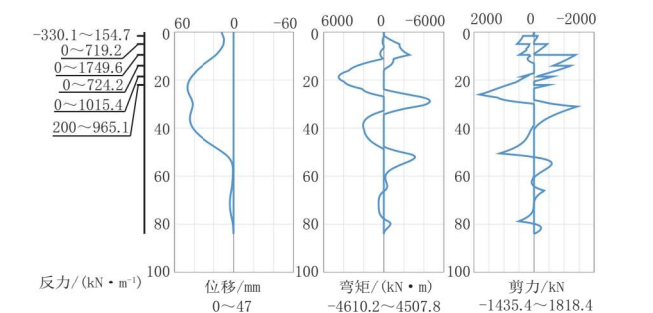


图 2 南岸工作井地连墙内力位移计算结果

位置	表 2 基坑稳定性计算结果				
	整体稳定系数	墙底抗隆起稳定系数	绕最下道内支撑整体稳定系数	抗倾覆稳定系数	抗渗流稳定系数
南岸工作井	2.57	8.70	2.80	1.46	3.3
北岸工作井	1.71	6.36	1.89	1.60	2.62
规范值	1.3	1.8	1.76	1.32	1.65

表 3 支护结构水平位移计算结果			单位: mm
位置	南岸工作井	北岸工作井	
支护结构水平位移值	47	41.8	
规范值	50	50	

3.3 淤泥质土处理方案

工作井围护结构采用 1.2 m 厚地下连续墙。考虑到地下连续墙在②₁ 淤泥层范围内存在成槽质量不佳的风险,采用三轴搅拌桩对与工作井主体结构两墙合一段的地下连续墙段进行槽壁加固。槽壁加固范围为自地表至坑底以下 2 m^[6]。

工作井坑底位于②₁ 淤泥软弱土层。该土层在坑底下方厚度达 24.7 m,含水量高,孔隙比大,压缩性高,抗剪强度、承载力低,灵敏度高,在上部荷载或振动作用下易产生固结变形和不均匀沉降。在基坑开挖期间,②₁ 层淤泥不能提供有效的水平抗力,坑底

易发生隆起变形。考虑到基坑开挖期间的变形稳定和隧道的运营安全,对工作井进行坑底加固处理。拟采用 $\phi 850@600$ 三轴搅拌桩对坑底进行格栅加固,加固深度为坑底以下5 m(见图3)。

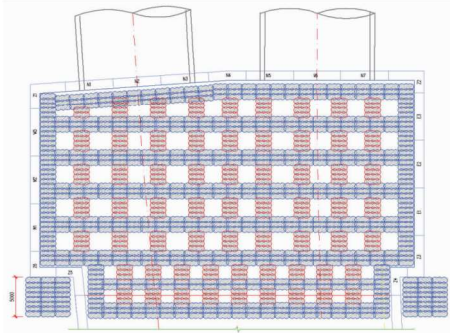


图3 工作井基坑加固平面布置

4 工作井结构设计

4.1 结构形式

盾构施工阶段,工作井作为盾构的始发井和接收井。使用阶段根据车辆运行的空间要求及设备布置要求,工作井内分层设置了车道层、设备用房层、雨废水泵房层等。

工作井采用平面矩形框架结构,在盾构侧井壁开有两个直径15.4 m的盾构孔。在满足工作井内盾构施工要求的前提下,考虑工作井使用阶段的功能要求,并结合工作井围护支撑体系的布置,在工作井顶板处布置顶部水平框架,在中板处布置中部水平框架。在盾构施工阶段,顶框架、中框架、井壁和底板等形成稳定的箱形空间受力体系(见图4)。

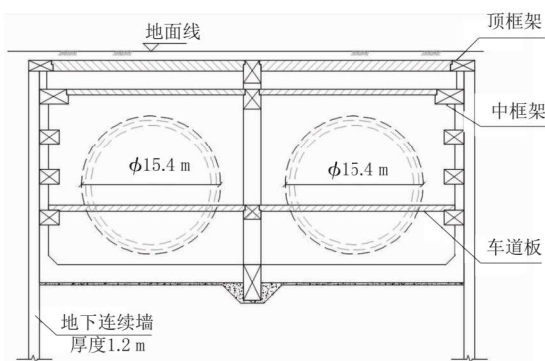


图4 盾构工作井结构剖面图

4.2 荷载工况

结构恒载分项系数取 $\gamma_G = 1.3$,活载分项系数 $\gamma_Q = 1.5$ 。结构安全等级一级,重要性系数取 $\gamma_0 = 1.1$,结构实际使用年限的荷载调整系数取 $\gamma_L = 1.1$ (按100 a考虑)。

根据盾构施工工序及实际使用情况,工作井分为施工阶段和运营阶段两个工况分别进行分析,并

最终采取两者弯矩、剪力包络值进行结构配筋和裂缝计算。计算工况如下:

4.2.1 盾构施工阶段

内衬墙、各道水平框架回筑完成,盾构推进。荷载主要包括结构自重、水土压力、地面超载引起的附加压力、盾构机架荷载等。其中,渗透性强的土按水土分算,渗透性弱的土按水土合算。考虑到地面管片堆载、吊装设备自重及施工车辆等因素的影响,地面超载取70 kPa。施工阶段荷载如下:

(1)恒载-结构自重(结构重度25 kN/m³)。

(2)恒载-水土压力:

土加权平均重度=17 kN/m³。

水土侧压力:采用水土合算,加权平均侧压力系数0.61。

工作井顶板 $p_{21} = 0.61 \times 1.6 \times 17 = 16.592$ kPa。

工作井底板 $p_{22} = 0.61 \times 24.7 \times 17 = 256.139$ kPa。

车架段顶板 $p_{23} = 0.61 \times 2.6 \times 17 = 26.962$ kPa。

车架段底板 $p_{24} = 0.61 \times 21.7 \times 17 = 225.029$ kPa。

(3)活载-地面超载侧压力。

超载侧压力 $p_3 = 0.61 \times 70 = 42.7$ kPa。

(4)恒载-水浮力:

工作井底板水浮力 $p_{41} = 10 \times (\text{设计地面高程} - \text{底板底高程} - 0.5) = 10 \times (26 - 0.5) = 255$ kPa。

车架段底板水浮力 $p_{42} = 10 \times (\text{设计地面高程} - \text{底板底高程} - 0.5) = 10 \times (23 - 0.5) = 225$ kPa。

(5)活载-框架及底板上活载 $p_5 = 4$ kPa。

4.2.2 隧道运营阶段

井内顶板、设备层板、车道板等,以及上部结构逐步完成。荷载主要包括结构自重(框架、侧墙、各层板),以及顶板覆土、水浮力、吊顶、地面活载、设备及行车活载等。其中,渗透性强的土按水土分算,渗透性弱的土按水土合算,地面超载取20 kPa。运营阶段荷载如下:

(1)恒载-结构自重(结构重度25 kN/m³)。

(2)恒载-水土压力

土加权平均重度=17.0 kN/m³。

水土侧压力:采用水土合算,加权平均侧压力系数0.61。

工作井顶板 $p_{21} = 0.61 \times 1.6 \times 17 = 16.592$ kPa。

工作井底板 $p_{22} = 0.61 \times 24.7 \times 17 = 256.139$ kPa。

车架段顶板 $p_{23} = 0.61 \times 2.6 \times 17 = 26.962$ kPa。

车架段底板 $p_{24} = 0.61 \times 21.7 \times 17 = 225.029$ kPa。

(3)恒载-顶板覆土自重

- 工作井顶板覆土自重 $p_{31}=1 \times 20=20 \text{ kPa}$ 。
- 车架段顶板覆土自重 $p_{31}=2 \times 20=40 \text{ kPa}$ 。
- (4)活载 - 顶板上活载 $p_4=20 \text{ kPa}$ 。
- (5)活载 - 地面超载 $p_5=20 \text{ kPa}$ 。
- (6)活载 - 地面超载附加压力 $p_6=0.61 \times 20=12.2 \text{ kPa}$ 。
- (7)恒载 - 水浮力
- 工作井底板水浮力 $p_{41}=10 \times (\text{设计地面高程} - \text{底板底高程} - 0.5)=10 \times (26-0.5)=255 \text{ kPa}$ 。
- 车架段底板水浮力 $p_{42}=10 \times (\text{设计地面高程} - \text{底板底高程} - 0.5)=10 \times (23-0.5)=225 \text{ kPa}$ 。
- (8)活载 - 框架及结构板上活载
- 车道板 $p_{8-1}=20 \text{ kPa}$ 。
- 底板 $p_{8-3}=10 \text{ kPa}$ 。
- 车架段设备板 $p_{8-4}=10 \text{ kPa}$ 。
- 车架段车道板 $p_{8-4}=20 \text{ kPa}$ 。
- 车架段底板 $p_{8-6}=10 \text{ kPa}$ 。

4.3 土层参数

根据地勘结果,采用南岸工作井处 ZK83 钻孔作为模型土层条件,其地质剖面图如图 5 所示,土层参数详见表 1。

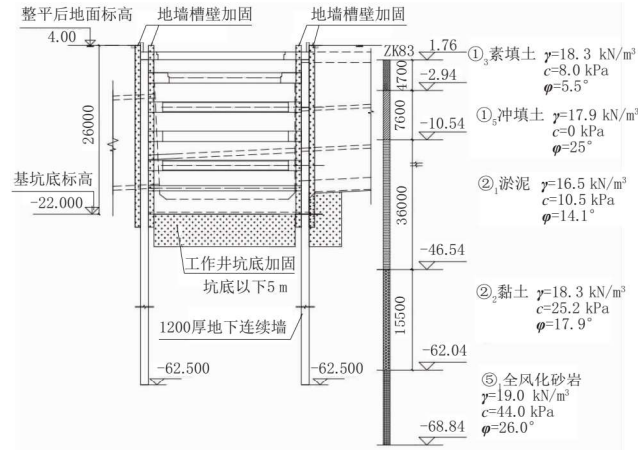


图 5 盾构工作井围护剖面图

4.4 计算模型

通过 Midas Civil 建立工作井的三维空间模型 (见图 6),工作井结构及地墙混凝土强度等级为 C45,采用板壳单元模拟复合墙和底板、三维梁单元模拟工作井内的两道水平框架。在工作井底板、侧墙设置只能承受压力的单向弹簧来模拟周围土体的支撑作用。在工作井与暗埋段交接处的井壁设置轴向弹簧来模拟暗埋段结构对工作井的轴向支撑作用。

4.5 边界条件

土体对结构约束作用的模拟对计算结果至关重要。工作井穿越经三轴搅拌桩加固后的②₁淤泥软弱

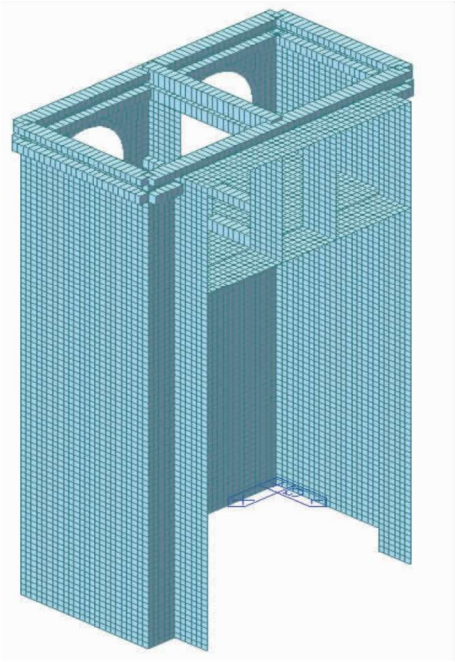


图 6 盾构工作井计算模型

土层,同时坑底也进行了三轴搅拌桩的加固。因此,当模型结构单元与加固土体直接接触时,单向弹簧刚度应根据加固后土层确定。而在未加固土层中,则采用地勘提供的土体抗侧刚度进行模拟。

根据工作井的受力特点及地勘中各土层性质,确定边界条件如下:

- (1)底板地基土:设竖向单向弹簧, $K_1=4500 \text{ kN/m}^3$ 。
- (2)底板上钻孔灌注桩采用双向弹簧模拟:竖向双向弹簧, $K_2=30\,000 \text{ kN/m}^3$ 。
- (3)地墙(底板以下):
 - a.坑底加固区,设水平单向弹簧, $K_3=5\,000 \text{ kN/m}^3$;
 - b.非坑底加固区,设水平单向弹簧,②₁淤泥层 $K_4=2\,000 \text{ kN/m}^3$,②₂黏土层 $K_5=30\,000 \text{ kN/m}^3$,②₃粉质黏土 $K_6=23\,000 \text{ kN/m}^3$,②₄淤泥质黏土层 $K_7=6\,000 \text{ kN/m}^3$,④碎石质粉质黏土层 $K_8=41\,000 \text{ kN/m}^3$,⑤₁全风化砂岩层 $K_9=78\,000 \text{ kN/m}^3$ 。
- c.地墙底部固定竖向约束。接车架段顶、底板、侧墙的纵向约束作用:设单向弹簧, $K_{10}=1\,000\,000 \text{ kN/m}^3$ 。
- (4)模型中的地墙底部采用固定竖向约束。

4.6 计算结果

通过施工阶段及运营阶段的计算,得到工作井各个构件的最大弯矩值(见图 7)。主要构件在施工阶段及运营阶段的计算结果见表 4。

从表 4 中可以看出,底板施工阶段与运营阶段弯矩差距在 20%左右,施工阶段底板的支座弯矩及跨中弯矩均大于运营阶段。而运营阶段的底板中隔墙处支座弯矩大于施工阶段。侧墙、第一道框架梁、

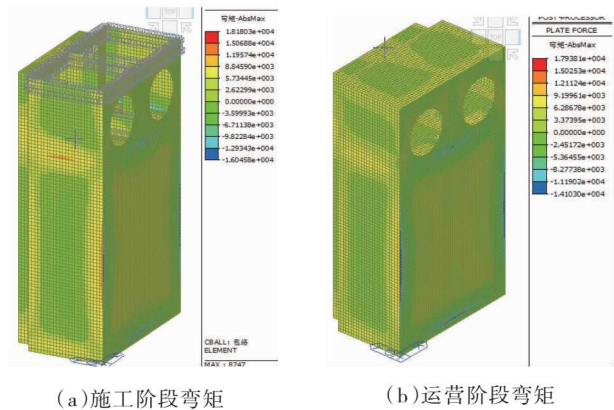


图7 工作井弯矩计算结果

第二道框架梁的弯矩,在施工阶段均大于运营阶段,且局部区域差值较大(第一道框架梁施工阶段弯矩是运营阶段弯矩的12.7倍)。因此,在设计中应充分考虑施工阶段荷载,并取施工阶段及运营阶段的弯矩包络值作为结构配筋设计依据,方能保证工作井在施工和运营期间的安全性。

5 结 论

盾构隧道已在我国有较长时间的发展,近几年来大直径及超大直径的盾构隧道逐渐兴起,其工作井尺寸及深度也逐渐增大。如何对超大直径盾构工作井进行设计,成了研究的重点。

本文以珠海某超大直径盾构隧道为例,介绍了近海淤泥质土层工作井的结构和围护设计。同时对淤泥质土中地墙的槽壁加固及坑底加固进行了介绍,以期类似工程提供借鉴。

参考文献:

[1] 由广明,等. 周家嘴路越江隧道新建工程设计综述[C]// 袁大军.第七届中国盾构技术交流会议论文集.北京:人民交通出版社,2013:447-453.
[2] 李志刚. 软土地区超长距离矩形顶管隧道始发工作井设计[J]. 特种结构,2022,39(3):115-120.

表4 工作井主要构件弯矩计算结果 单位:kN·m

序号	构件	部位	施工阶段 包络弯矩	运营阶段 包络弯矩	最大 弯矩
1	底板	侧墙处支座(外侧)	6 700	5 600	6 700
		跨中(内侧)	5 100	5 000	5 100
		中墙处支座(外侧)	5 300	6 600	6 600
2	车道板	侧墙处支座(外侧)	—	1 340	1 340
		跨中(内侧)	—	900	900
		中墙处支座(外侧)	—	1 340	1 340
3	B1板	侧墙处支座(外侧)	—	810	810
		跨中(内侧)	—	350	350
		中墙处支座(外侧)	—	470	470
4	B2板	侧墙处支座(外侧)	—	950	950
		跨中(内侧)	—	630	630
		中墙处支座(外侧)	—	950	950
5	顶板	侧墙处支座(外侧)	—	1 400	1 400
		跨中(内侧)	—	850	850
		中墙处支座(外侧)	—	1 600	1 600
7	侧墙	底板处支座(外侧)	11 200	9 600	11 200
		跨中(内侧)	2 700	1 500	2 700
		顶板处支座(外侧)	2 950	500	2 950
8	第一道 框架梁 2.5 m × 1.2 m	跨中弯矩	3 810	300	3 810
		端部弯矩	8 000	700	8 000
9	第二道 框架梁 3 m × 1.6 m	跨中弯矩	8 800	2 700	8 800
		端部弯矩	15 000	2 000	15 000

[3] 姚广亮,陈小云,李支令,等.超深大直径工作井内衬结构受力分析[J].广东水利水电,2022(5):1-12.
[4] 温竹茵.上海新建路越江盾构隧道工作井设计浅析[J].特种结构,2012,29(1):68-72.
[5] DBJ/T 15-20—2016,建筑基坑工程技术规程[S].
[6] 宋棋龙,祁文睿,等.滨海软土地层浅埋超大直径盾构隧道开挖面破坏机理及加固范围研究[J].建筑科学与工程学报,2021(6):155-162.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com