

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.11.068

矩形顶管始发井结构分析

董 鼎

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 顶管工作井永久框架在施工过程中会经历多种不同的受力阶段,在土压力、水压力、顶推力等组合作用下处于复杂的受力环境,准确分析框架在不同阶段时的受力特点和内力分布是设计环节中的重点。利用有限元计算软件 Robot Structural Analysis 建立顶管始发井的三维模型进行受力分析计算,并对工作井永久框架在全过程设计中的受力情况进行了小结与探讨。分析表明,框架内力包络值主要由开挖阶段和拆撑阶段控制,研究结果对实际工程中顶管工作井的设计提供有效的参考。

关键词: 顶管工作井;有限元;框架;全过程;Robot Structural Analysis

中图分类号: U445.47

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0297-05

0 引言

顶管法是一种能应用在地下管道或隧道的非开挖技术,当前国内外使用顶管工法施作城市隧道已有了许多成功经验,如上海^[1-2]、广州^[3,6]、郑州^[4]、江苏^[5]等多个城市已有多条使用顶管法施作的城市隧道。顶管顶进需要设置始发工作井,工作井内的永久框架受力条件复杂,在结构全过程设计中,需要在不同的设计工况下[7]建立不同的受力体系,对于工作井永久框架的结构设计,国内尚未建立完备的理论体系。

本文结合工程实例,利用有限元计算软件 Robot Structural Analysis(以下简称 Robot 软件)建立顶管始发井的三维模型进行受力分析计算,并对工作井永久框架在基坑开挖阶段、顶管顶进阶段以及正常使用阶段的全过程设计进行小结与探讨,为顶管工作井设计提供有益的参考,对完善顶管施工设计理论具有指导意义。

1 工程概况

1.1 工程简介

上海市某隧道工程过河段采用矩形顶管施工工艺,顶管隧道段长度约 110 m,为双管隧道,矩形顶

管断面尺寸为 10.06 m(宽)×5.26 m(高),管节厚度为 0.7 m,顶管横向净距为 5 m,断面如图 1 所示。

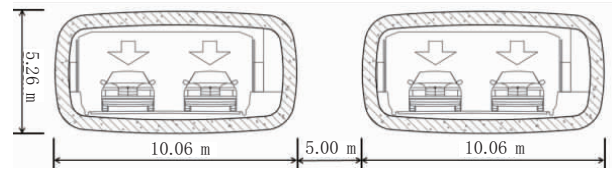
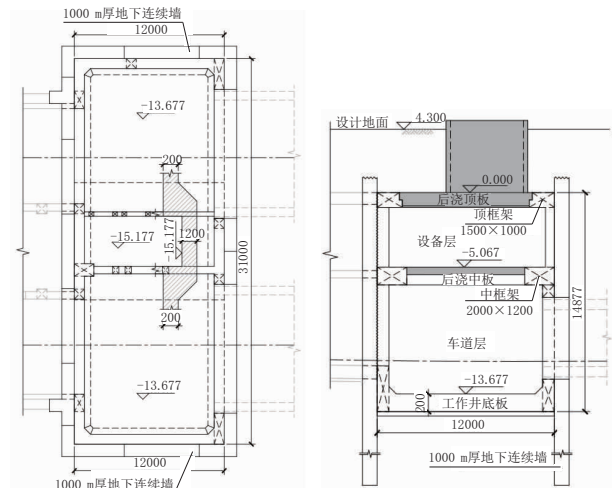


图 1 矩形顶管断面示意图(单位:m)

管始发工作井结构外边尺寸为 31 m(长)×12 m(宽),底板埋深约 19.2 m,局部落深处底板埋深约 20.7 m,净高为 12.8 m,为双层结构,下层为车道层,上层为设备层。始发井侧墙采用叠合墙的形式,地墙厚度为 1 m,上层内衬 0.6 m,下层内衬 0.8 m。始发井平面和纵断面图如图 2 所示。



(a)平面图

(b)纵剖面图

图 2 顶管始发工作井(单位:尺寸 mm,标高 m)

收稿日期: 2023-10-20

基金项目: 上海市政总院科研项目(K2020K107A)

作者简介: 董鼎(1992—),男,硕士,工程师,从事结构设计工作。

始发井基坑深度约 19.2 m, 局部落深处基坑深度约 20.7 m, 采用 1 m 地下连续墙 + 四道混凝土支撑的围护形式, 其中第二、第三道混凝土围檩兼作永久结构框架, 顶框架尺寸为 1.5 m × 1.0 m, 中框架尺寸为 2.0 m × 1.2 m。地基加固包括进出洞加固、后靠加固以及坑内加固三部分, 均采用 $\phi 850@600$ 三轴搅拌桩。

顶管机由始发井始发, 到达接收井后, 转场返回始发井后再进行第二根顶管顶进。始发井后侧为远期实施的明挖暗埋段, 总体实施顺序, 一是始发井施工; 二是顶管隧道顶进, 接收井同步施工; 三是工作井封井; 四是远期实施明挖暗埋段。

1.2 工程地质条件

基坑开挖影响范围内的土层主要有: ①₁ 层杂填土、②层灰黄色黏土、③层灰色淤泥质粉质黏土、④层灰色淤泥质黏土、⑤₁ 层灰色黏土、⑤₃ 层灰色粉质黏土夹粉性土、⑤₄ 层暗绿色粉质黏土、⑦₁ 层灰绿~灰黄色砂质粉土。基坑坑底位于⑤₁ 层黏土中, 围护桩底位于⑦₁ 层砂质粉土中。基坑计算地质参数见表 1。潜水水位取地面下 0.5 m; ⑦层中含承压水, 埋深取地面下 3 m。

表 1 基坑计算地质参数表

编号	地层名称	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	m 值
① ₁	填土	18	8	10	2
②	粉质黏土	18.6	20	16	3
③	淤泥质粉质黏土	17.7	11	16	2.5
④	淤泥质粉质黏土	16.7	11	11	2.5
⑤ ₁	黏土	17.4	15	13	2.5
⑤ ₃	粉质粘土夹粉土	18.3	15	23.5	3
⑤ ₄	粉质黏土	19.7	41	21.5	5.5
⑦ ₁	砂质粉土	18.9	4	34.5	6
⑦ ₂	粉砂	19.1	2	36	10
	加固土	19	60	16	6

2 永久框架全过程设计

对于本例中的工作井框架, 可以按以下 4 个阶段进行受力分析, 第一阶段基坑开挖阶段; 第二阶段拆撑及顶管顶进阶段; 第三阶段临时使用阶段; 第四阶段永久使用阶段。

2.1 基坑开挖阶段

在本阶段中, 框架仅承担地墙外侧的水土压力和自重, 计算时可在 Robot 软件中按二维框架计算。框架周边设置单向受压弹簧, 模拟土体抗力, 弹簧刚度的大小为对应地层的地基弹簧刚度与该层框架竖

向管辖范围的乘积, 如图 3 所示。

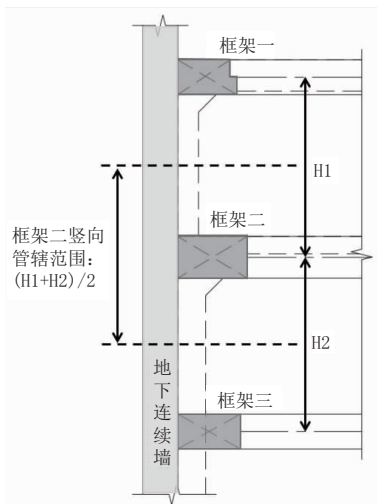
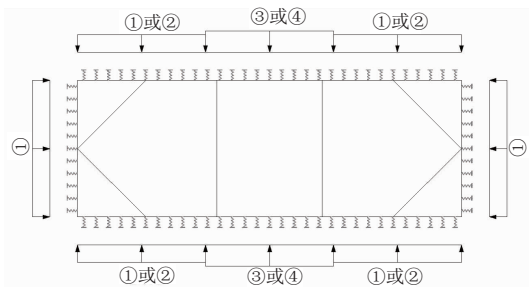


图 3 框架竖向管辖范围示意图

框架周边所施加的水土压力可由剖面计算获得。剖面计算可用同济启明星、理正深基坑等设计软件进行计算, 本例中可分为两个区域, 一是标准区, 外侧为原状土, 采用主动土压力计算, 水土分算; 二是加固区, 外侧为加固土, 采用经验土压力计算, 侧压力系数取 0.55, 水土合算。二维框架计算模型简图如图 4 所示。



注: ①标准区 19.2 m 坑深剖面支撑轴力最大值; ②加固区 19.2 m 坑深剖面支撑轴力最大值; ③标准区 20.7 m 坑深支撑轴力最大值; ④加固区 20.7 m 坑深支撑轴力最大值。

图 4 二维框架计算模型简图

2.2 拆撑及顶管顶进阶段

本阶段工作井结构已部分回筑, 顶板、中板部分实施, 利用底板、内衬、中隔墙和两道永久框架形成空间受力体系。根据实际施工流程, 本阶段又可分为三个工况。

工况一: 内衬和中隔墙施作完毕, 中板、顶板在不影响顶管机吊装的前提下仅部分实施, 支撑已拆除, 洞口未开启。

工况二: 一侧洞口打开, 后背对应位置施加顶推力。

工况三: 另一侧洞口打开, 后背对应位置施加顶推力。

利用 Robot 软件中的壳模块建立工作井的三维

模型,需要注意的是,在建模过程中,需要考虑地墙接缝的影响,目前有以下几种方式:

方式一是建模时采用各向异性板对地墙及地墙+内衬进行模拟,假定地墙无法沿水平向传递内力,在设置板件的水平刚度时对其进行折减;

方式二是考虑到地墙接缝处无法受拉,但可以受压,因此先进行试算,根据试算结果将侧墙区分为受拉区和受压区,受拉区按方式一中的方法调整板件水平刚度,受压区采用各向同性板即可;

方式三在模型中直接将墙缝建立出来,将侧墙建成“凹”形,接缝处厚度为内衬厚度,如图5所示。

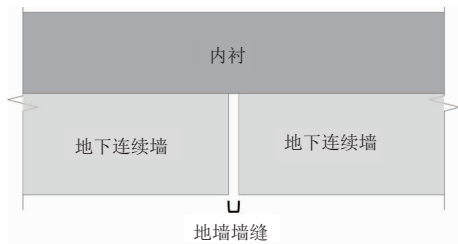


图5 “凹”形墙缝示意图

以上三种方式各有利弊,计算结果也不尽相同,但差距不大,本算例中采用方式一,建模时最为简便。三种工况的计算模型如图6所示。需要注意的是,加固区与未加固区的地基弹簧刚度和水土压力取值不同,顶面超载也要根据具体施工情况进行调整,本算例中工作井短边超载限值为42 kPa,长边超载限值为20 kPa。

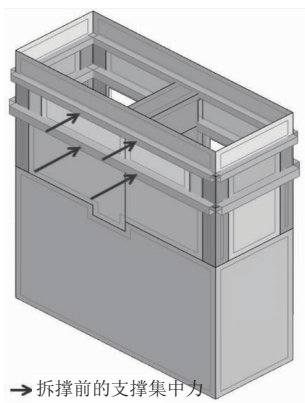


图6 拆撑轴力施加示意图

另外,在工况一即拆撑工况中,采用增量法分两步计算框架内力:

第一步,先利用 Robot 软件的二维框架计算模型,获得各道框架和支撑在支撑拆除施工步前的内力,本步与基坑开挖阶段的框架计算类似,区别在施加于框架外侧的荷载不同;

第二步,在工作井的三维模型中,将第一步中获得的支撑轴力以集中力的形式施加于支撑所在位

置,以代替侧向水土压力,如图6所示。

将第一步和第二步中的框架内力进行叠加,即可获得工况一下的框架内力。

2.3 临时使用阶段和永久使用阶段

根据本工程的总体施工流程,顶管顶进完成后,施作工作井中板与顶板,顶板上覆土至设计地面。按正常使用阶段施加荷载,可获得临时使用阶段的框架内力,计算模型如图7所示。

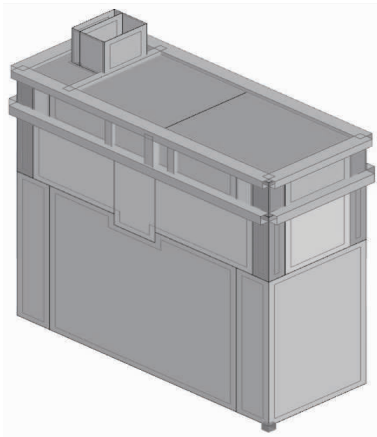


图7 临时使用阶段计算模型

在本工程中,始发井后侧为远期实施的明挖暗埋段,明挖暗埋段基坑开挖至坑底时,开挖侧地墙随挖随凿,各道框架在开挖侧的约束条件发生变化;待明挖暗埋段结构施工完毕并覆土至设计地面后,本工程正式进入永久使用阶段。上述两种工况的计算模型如图8所示。

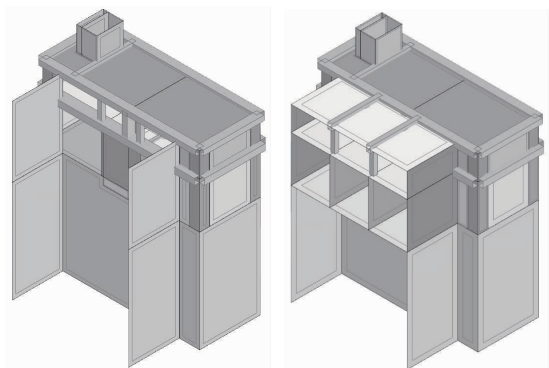


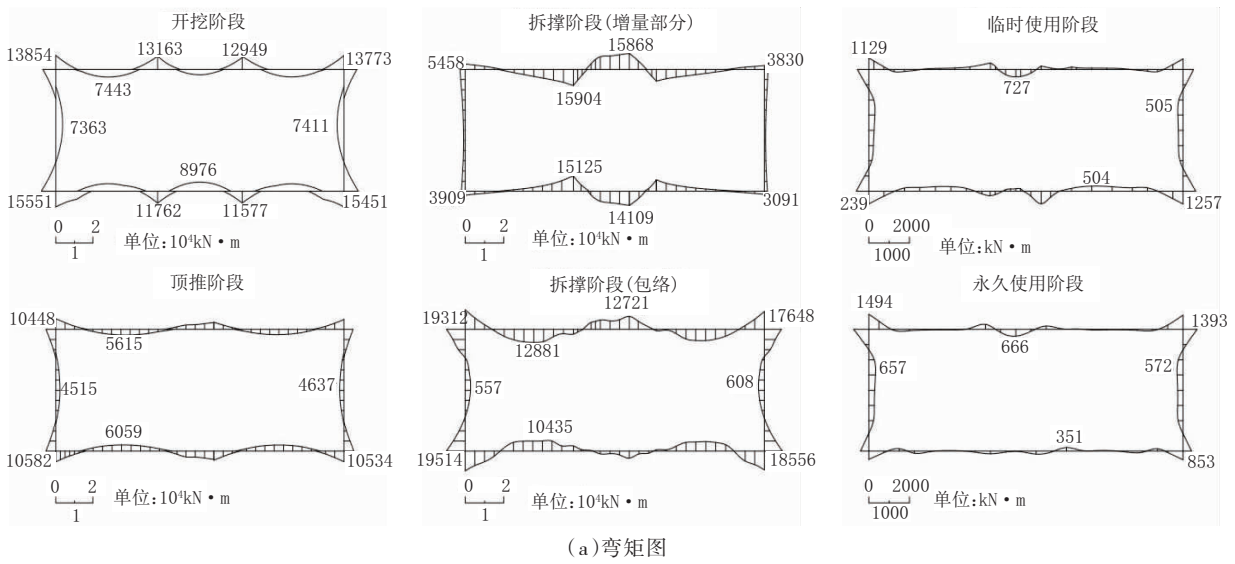
图8 永久使用阶段计算模型

3 计算结果分析

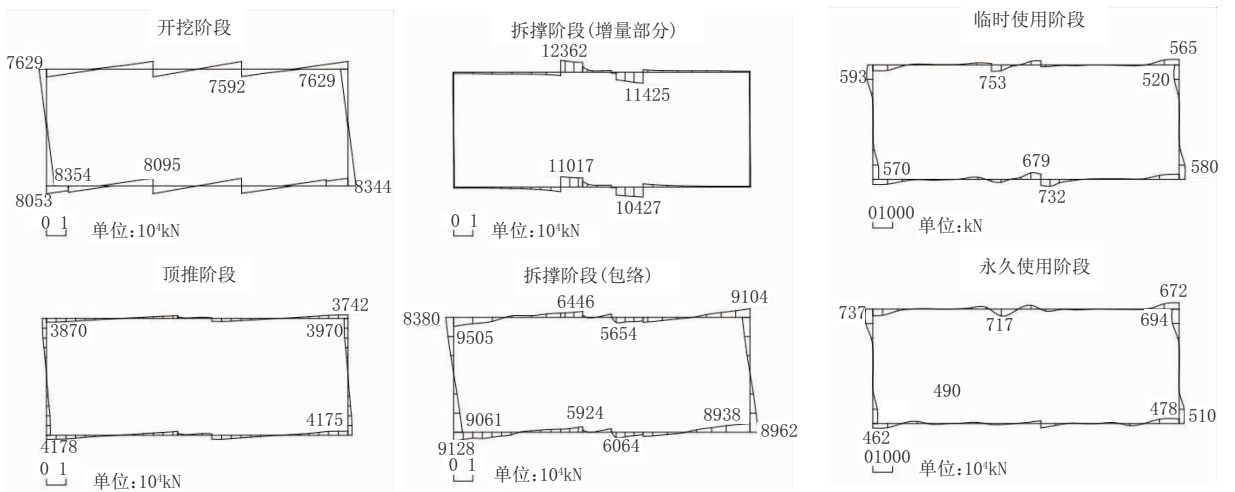
将上述各个阶段下所有工况的框架内力进行包络,可获得设计全过程下的框架内力,以中框架为例,各阶段内力计算结果如图9所示,全阶段内力包络计算结果如图10所示。

根据上述计算结果,可获得以下结论:

- (1) 开挖阶段时,由于混凝土支撑的存在,框架



(a)弯矩图



(b)剪力图

图9 各阶段内力计算结果

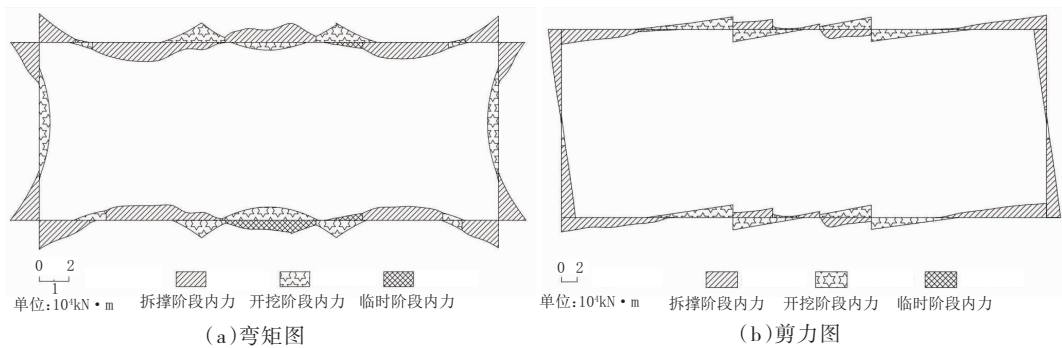


图10 全阶段内力包络计算结果

支座弯矩主要分布于四个角点以及支撑外侧,跨中弯矩分布于各支座间;待工作井内衬、中隔墙及部分中板施作完成并拆除支撑后,框架支座弯矩由支撑处转移至中隔墙及部分完成的中板外侧;顶推阶段时,由拆撑集中力引起的内力畸变逐渐趋于平滑;随着中板和顶板的施作完成,在使用阶段中,框架与结构墙板共同抵抗外部荷载,框架内力明显减小。

(2)内力包络值主要由开挖阶段和拆撑阶段控

制。顶推阶段可看作是拆撑阶段的延续,两者内力分布形状类似,拆撑集中力引起的局部内力极大值在这个阶段逐渐扩散,顶推力对框架内力影响较小,仅对顶推侧框架中间支座处的支座弯矩包络值起控制作用。使用阶段由于工作井内中、顶板均已完成,框架内力明显小于其余阶段。

(3)拆撑阶段中,框架角点处,开挖至坑底时的框架弯矩与拆撑集中力引起的弯矩方向相同,相互

叠加;支撑及支撑间的位置处,两者弯矩方向相反,且拆撑集中力引起的弯矩起主导作用。拆撑集中力引起的剪力主要分布于支撑及支撑间,方向与开挖至坑底时的框架剪力相反。

(4)根据图 10 全阶段内力包络的计算结果,在框架的实际设计过程中,一是角点的支座弯矩和长边的跨中弯矩包络值主要由拆撑阶段控制;二是支撑和支撑间的支座弯矩包络值主要由开挖阶段和顶推阶段控制;三是短边的跨中弯矩包络值主要由开挖阶段控制;四是角点的剪力包络值由拆撑阶段控制;五是支撑处的剪力包络值由开挖阶段控制。

4 结 语

本文以实际工程的始发井框架设计为例,利用 Robot 有限元计算软件对永久框架在不同阶段和不同工况下的全过程设计进行了分析和小结。研究表明:

(1)框架内力包络值主要由开挖阶段和拆撑阶

段控制;

(2)拆撑阶段控制角点支座弯矩、长边跨中弯矩和角点剪力;

(3)开挖阶段控制支撑和支撑间支座弯矩、短边跨中弯矩和支撑处剪力。

参考文献:

[1] 徐正良,邵理中.地下连续墙法建造大深度顶管工作井[J].特种结构,1997(4):21-24.

[2] 汤翔.软土地区暗挖车站工作井结构设计[J].城市道桥与防洪,2019(5):294-297.

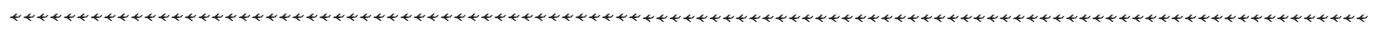
[3] 刘思南.顶管工作井钻孔灌注桩围护结构破洞施工有限元分析[J].广东建材,2018,34(10):56-58.

[4] 黄章君,杨艳玲,汤东桑,等.大尺寸矩形顶管始发井反力墙数值模拟与监测[J].隧道建设(中英文),2020,40(7):972-980.

[5] 王宇强.基于土水平反力系数法的矩形顶管工作井有限元分析[J].市政技术,2021,39(7):84-88.

[6] 李大为,白蓉,马海彬.基于 MIDAS 对顶管工作井的开挖及顶进稳定性数值分析[J].滁州学院学报,2022,24(2):76-80,85.

[7] 张豪.顶管工作井开挖支护及顶进过程的数值模拟分析[D].石家庄:石家庄经济学院,2015.



《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

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