文章编号:2096-5052(2026)03-0089-13　　DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.03.09

黄河中下游粉质黏土地层超大直径盾构工作井空间效应研究

翟彬[1],刘燕[2,3*],刘峻廷[4],袁鹏[5],孙峰[5],王伟[1],张亮亮[5],陈方岩[2]
(1. 济南城市建设集团有限公司, 山东 济南 250031;
2. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022;
3. 山东省城市地下工程支护及风险监控工程技术研究中心, 山东 济南 250022;
4. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100;
5. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘要:为研究黄河流域典型粉质黏土地层中超大直径盾构工作井的复杂三维空间效应,依托黄河流域济南境内某盾构工作井深基坑,采用数值模拟和现场实测,系统研究不同长宽比及环框梁竖向设置位置对基坑空间效应的影响,揭示了盾构工作井围护墙变形及地表沉降规律。结果表明:当工作井长宽比 $L/B \leqslant 2$ 时,围护墙体最大水平位移和地表沉降变化最显著;当工作井长宽比 $L/B>2$ 时,变形趋于稳定,最大水平位移基本不随长边尺寸增大而增加。相对于施工期,服役期间环框梁位置对于基坑的影响更大。将最下道环框梁设置于围护墙最大变形区域附近,可有效提升整体变形控制效果。研究成果可为类似地质条件下盾构工作井的设计与施工提供理论依据与实践参考。

关键词:盾构井;基坑变形;空间效应;数值计算;服役稳定性
中图分类号:U45; TU921　　**文献标志码**:A

引用格式:翟彬,刘燕,刘峻廷,等. 黄河中下游粉质黏土地层超大直径盾构工作井空间效应研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(3):89-101. Zhai Bin, Liu Yan, Liu Junting, et al. Lifecycle spatial effects of super-large diameter shield working shafts in silty clay strata in the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(3):89-101.

Lifecycle spatial effects of super-large diameter shield working shafts in silty clay strata in the middle and lower reaches of the Yellow River

Zhai Bin[1], Liu Yan[2,3*], Liu Junting[4], Yuan Peng[5], Sun Feng[5],
Wang Wei[1], Zhang Liangliang[5], Chen Fangyan[2]
(1. Jinan City Construction Group, Jinan 250031, Shandong, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, Shandong, China;
3. Engineering Technology Research Center on Urban Underground Engineering Support and Risk Monitoring of Shandong Province, Jinan 250022, Shandong, China;
4. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Co., Ltd., Jinan 250100, Shandong, China;
5. China Railway SiYuan Surevy and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: To investigate the complex three-dimensional spatial effects of super large diameter shield working shafts in typical silty clay strata of the Yellow River basin, a deep foundation pit of a shield working shaft in Jinan along the Yellow River basin was taken as the engineering background. Numerical simulation and field monitoring were adopted to systematically study the influences of different length-to-width ratios and vertical installation positions of ring frame

收稿日期:2026-04-20;**修回日期**:2026-05-20;**接受日期**:2026-05-24;**出版日期**:2026-09-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51979122);山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME042)
第一作者简介:翟彬(1969—),男,山东济南人,高级工程师,主要研究方向为岩土工程。E-mail:fzfz10086@163.com
*通信作者简介:刘燕(1978—),女,山东德州人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为基坑工程。E-mail:liuyan322@163.com

beams on the spatial effects of the foundation pit. The deformation characteristics of retaining walls and ground settlement patterns of the shield working shaft were revealed. The results show that the maximum horizontal displacement of retaining walls and ground settlement vary most significantly when the length-to-width ratio L/B of the working shaft is less than or equal to 2. When $L/B>2$, the deformations tend to be stable, and the maximum horizontal displacement hardly increases with the enlargement of the long-side dimension. Compared with the construction period, the position of the ring frame beam exerts a greater influence on the foundation pit during the service period. Installing the bottommost ring frame beam near the maximum deformation zone of the retaining wall can effectively improve the overall deformation control performance. The research findings can provide a theoretical basis and practical references for the design and construction of shield working shafts under similar geological conditions.

Keywords: shield shaft; foundation pit deformation; spatial effect; numerical calculation; service stability
Received: 2026-04-20; **Revised**: 2026-05-20; **Accepted**: 2026-05-24; **Published**: 2026-09-20

0 引言

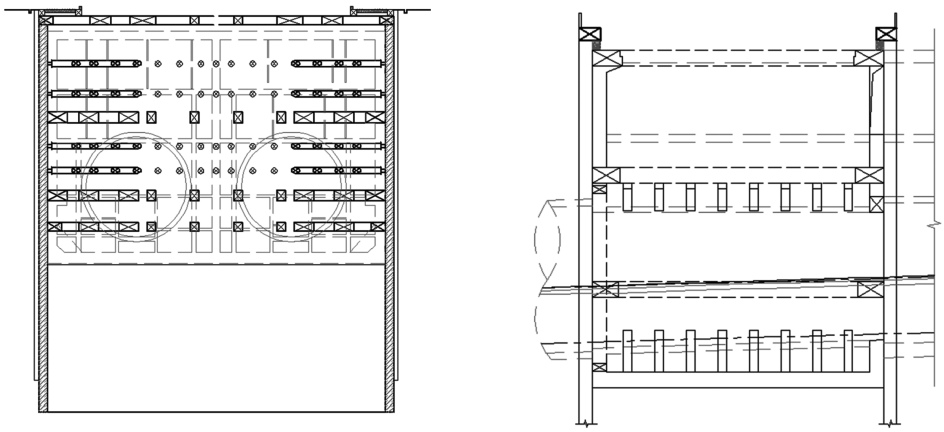
深基坑工程作为一个复杂的三维空间力学问题,伴随基坑平面尺寸的减小和开挖深度的增加,三维空间约束效应愈发显著,成为影响基坑力学行为的关键因素[1-5]。大量工程实测数据表明,基坑壁中部的土压力及相应位移通常大于邻近端部区域的观测结果,其主要归因于基坑两端边界区域所呈现的显著三维空间效应(基坑的变形、支护结构内力,同时受基坑平面尺寸、开挖深度、边角位置、长宽比、开挖形态三维几何条件影响,并非简单按二维平面应变计算的现象),有效约束了邻近区域土体的变形发展,从而抑制了土压力与位移的增大[6-10]。

随着研究的不断深入,诸多学者在此领域取得了丰富的研究成果[11-14]。刘念武等[15]通过系统分析监测数据发现,在邻近浅基础建筑及桩基础建筑均受到空间效应影响下,当 x/H 值(x 为平行连续墙方向上与端部的距离,H 为开挖深度)小于 1.5 时,空间效应较为显著;当 x/H 值大于 2.0 时,邻近建筑及围护结构邻近土体变形接近平面应变状态。郝大为等[16]针对狭长深基坑展开研究,指出基坑中间部分的变形大于端部,坑外地表最大沉降稳定后控制在 3.4‰H 以内,且最大沉降点位于距地连墙 15~20 m(约 0.55~0.59 H)处。顾正瑞等[17]在研究复杂软土基坑群时发现,基坑群围护墙的最大侧移量与各分坑的边长之间存在着较强的线性关系,表明通过控制分坑边长可有效抑制围护墙变形。孙政波等[18]则针对软土深基坑分坑设计提出,当选用 700 mm 厚地中壁,嵌入比达到 0.33 时,即可发挥大部分空间效应,且地中壁道数越多空间效应越强。

上述研究论述了基坑空间效应与基坑长度、宽度、开挖深度、支撑刚度以及坑角效应之间的密切关联。除此之外,地层的地质条件同样是影响基坑空间效应的重要因素。黄河流域济南境内广泛分布深厚粉黏土地层,其土体由黄河冲积形成,颗粒细小均匀,渗透性差,且具有结构性强的特点,在开挖、振动等外界扰动下易发生强度显著衰减。然而,现有研究多集中于软土或一般黏土地层[19],针对黄河流域典型粉质黏土地层中超大直径盾构工作井的施工至结构竣工阶段空间效应研究尚鲜见报道。粉质黏土的流变特性可能加剧施工、服役期的变形叠加效应,若直接套用现有基于其他地层的空间效应设计经验,可能导致变形控制不足或支护结构冗余。因此,本研究以黄河流域济南地区某超大直径隧道工作井深基坑为研究对象,结合数值模拟与现场监测手段,在探讨基坑长宽比影响的基础上,系统分析中隔墙与环框梁的设置对基坑空间效应的影响,相关研究可为基坑工程设计和施工提供参考依据。

1 试验方案及设计

黄河流域济南境内某超大直径隧道工作井基坑,长约 49.0 m,宽约 29.8 m,底板埋深约 35.2 m。围护墙体采用地下连续墙与主体结构侧墙结合的复合墙形式,其中地下连续墙为 1.2 m 厚 C35 钢筋混凝土。工作井基础施工期间围护结构采用地连墙+内支撑形式,基坑深度范围内设置四道砼支撑+四道钢支撑,其中第一道、第四道、第七道砼围檩兼作主体结构环框梁,拆除支撑后保留,截面尺寸为 2.5 m×1.5 m。主体结构侧墙厚 1.4 m,中隔墙厚 1.2 m,采用 C40 防水钢筋混凝土,如图 1 所示。工作井开挖深度范围内主要地层为黏质粉土和粉质黏土。场区附近地下水丰富,地下水类型为孔隙潜水,地下水埋深在 1.02~1.60 m 之间。



(a) 施工期围护结构横剖图　　(b) 服役期主体结构纵剖图

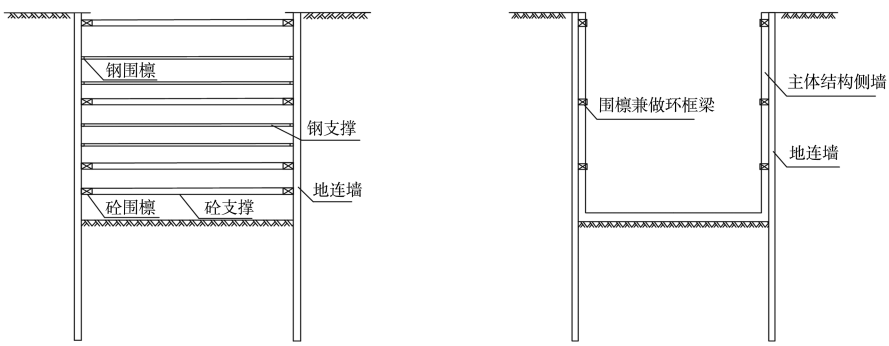
图 1　黄河中下游超大直径盾构工作井施工全过程剖面图

Fig.1　Cross-section of the whole construction process of super-large-diameter shield working shaft in the middle-lower reaches of the Yellow River

盾构工作井在整个周期中可以分为施工期与服役期两部分,结构示意图如图 2 所示。图 2(a)为施工期,期间盾构井基坑开挖至坑底,主体结构尚未施作。这一时期地连墙作为工作井的围护墙体,基坑开挖及支撑架是导致基坑变形的主要原因。图 2(b)为服役期,主体结构侧墙、环框梁施工完成。工作井内需拆除全部内支撑,为盾构设备的吊装做准备。这一时期采用地连墙与主体结构侧墙两墙合一的形式作为工作井的围护墙体,其中围护墙体的变形在施工过程两阶段中存在叠加效应。此外,环框梁在施工过程两阶段中作用不同,在施工期间作为支护体系的临时围檩使用,而在服役期间作为主体结构的一部分,起到提高结构整体性的作用。

1.1　模型建立

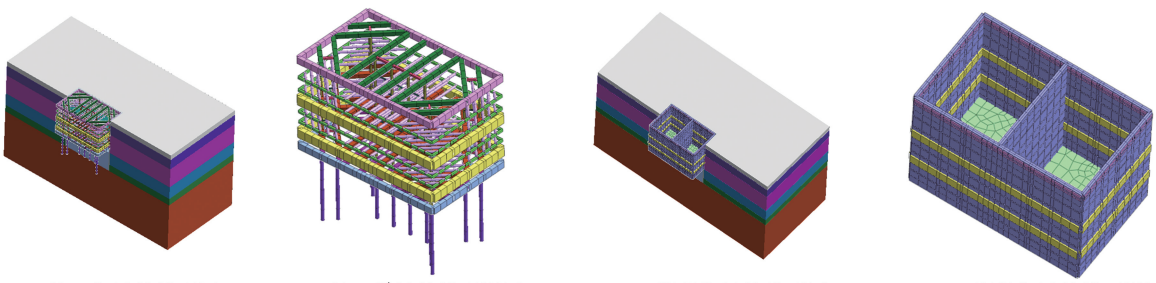
基于该超大直径隧道工作井基坑,首先采用 MIDAS GTS (NX 2023)有限元软件建立三维空间模型。该模型采用易收敛、不易发散、适用于大型工程的摩尔-库伦(Mohr-Coulomb)本构模型。由于基坑开挖产生的影响范围通常约为基坑深度的 3~5 倍[20],因此本研究模型所取土体范围为 170 m×180 m×120 m(x×y×z),三维模型整体及细部结构如图 3 所示。



(a) 施工期　　(b) 服役期

图 2　盾构工作井施工-服役周期结构示意图

Fig.2　Schematic of shield working-shaft structure over the construction-to-service cycle



(a) 施工期计算模型图　(b) 施工期计算模型详图　(c) 服役期计算模型图　(d) 服役期计算模型详图

图 3　盾构工作井施工-服役周期三维有限元数值模型图

Fig.3　3D finite-element numerical model of shield working shaft for construction-service cycle

工作井开挖施工期间,第一、四、七、八道撑采用混凝土支撑,第二、三、五、六道撑选用直径 800 mm,厚度 20 mm 的钢管支撑。各地层、材料物理力学参数见表 1、表 2;施工工况参见表 3。

表 1 岩土力学参数表

Table 1 Geomechanical properties of soils

土层名称	厚度/m	密度/(g·cm^{-3})	泊松比	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
杂填土	2.4	1.84	0.40	5.32	18.4	34.0
粉质黏土	7.8	1.86	0.39	6.30	23.0	18.0
粉质黏土	6.0	1.97	0.34	7.20	24.0	18.5
粉质黏土	6.2	2.00	0.29	8.29	45.0	32.0
辉长岩	69.1	2.20	0.25		10.0	38.0

表 2 主要结构构件参数表

Table 2 Parameters of main structural components

结构名称	材料	密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
地连墙 砼支撑 砼围檩	C35 混凝土	2.5	31.5	0.2
主体结构 环框梁	C40 混凝土	2.5	32.5	0.2
钢支撑 钢围檩	钢材		206.0	0.3

对模型四周仅约束其水平位移,对底边同时约束水平和竖向位移。在施工过程中,施工工况如下:本工程工作井施工全过程划分为 17 个施工工况,遵循先围护、分层开挖、分层支护、后主体结构施工、最后拆撑收尾的总体施工顺序。工况一首先开展立柱与地下连续墙施工,完成基坑围护结构基础施工。工况二将基坑开挖至 2.1 m 深度,同步施工冠梁并架设第一道混凝土支撑,初步形成基坑支护体系。后续采用分层开挖、随挖随撑的施工方式,依次完成各层土方开挖与支护作业:工况三开挖至 8.4 m,施工第二道钢围檩并架设钢支撑;工况四开挖至 12.6 m,完成第三道钢围檩施工及钢支撑架设;工况五开挖至 15.7 m,施工第四道混凝土围檩并架设混凝土支撑;工况六开挖至 19.8 m,施工第五道钢围檩并架设钢支撑;工况七开挖至 23.3 m,施工第六道钢围檩并架设钢支撑;工况八开挖至 27 m,施工第七道混凝土围檩并架设混凝土支撑;工况九开挖至31 m,施工第八道混凝土围檩并架设混凝土支撑。工况十继续开挖土方至 35.4 m,完成基坑坑底开挖作业。基坑开挖完成后,工况十一开展垫层及工作井底板施工,为主体结构施工奠定基础。底板施工完成后,自上而下分段施作工作井主体结构侧墙与中隔墙,并同步开展拆撑作业:工况十二将主体结构施工至第六道钢支撑位置,拆除对应第六道钢支撑及钢围檩;工况十三将主体结构施工至第五道钢支撑位置,拆除第五道钢支撑及钢围檩;工况十四将主体结构施工至第七道混凝土支撑位置,拆除第三道钢支撑及钢围檩;工况十五将主体结构施工至第二道钢支撑位置,拆除第六道钢支撑及钢围檩;工况十六持续施工主体结构侧墙与中隔墙,直至工作井顶部结构施工完成。最后进入工况十七,统一拆除第一道、第四道、第七道、第八道混凝土支撑及第八道混凝土围檩,同时拆除钢格构立柱,至此工作井整体主体结构施工全部完成。

在现场布设监测点,主要包括:地表沉降、墙顶水平位移、墙顶竖向位移、墙体深层水平位移等。主要监测点布置图如图 4 所示。

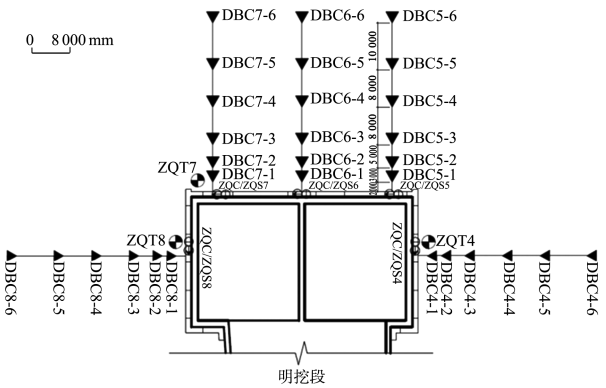


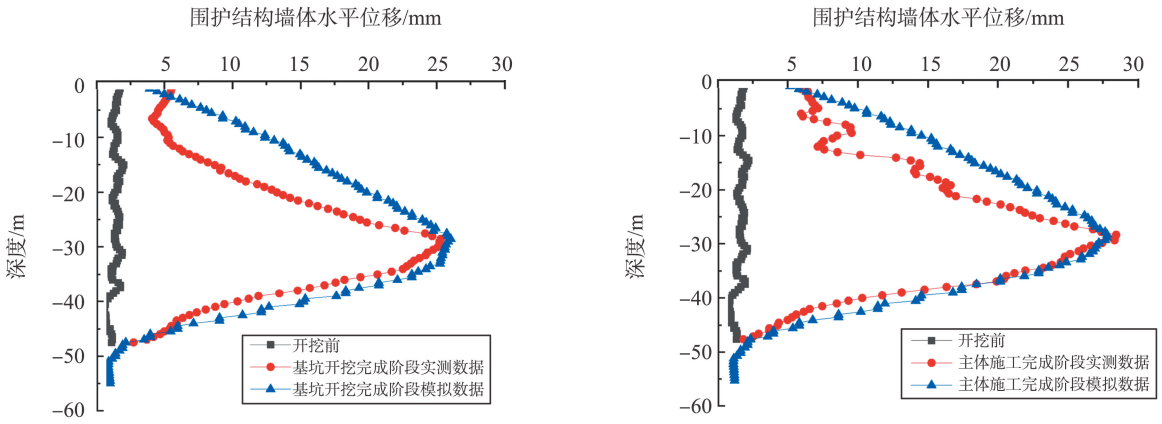
图 4 济南黄河隧道南岸工作井施工监测点平面布置图

Fig.4 Layout of construction-monitoring points for the south-bank working shaft of Jinan Yellow River Tunnel

1.2 模型验证

为探究该模型的有效性,分别以围护结构墙体变形曲线、地表沉降曲线为例,将数值模拟的结果与现场实测数据对比分析,如图 5、6 所示。

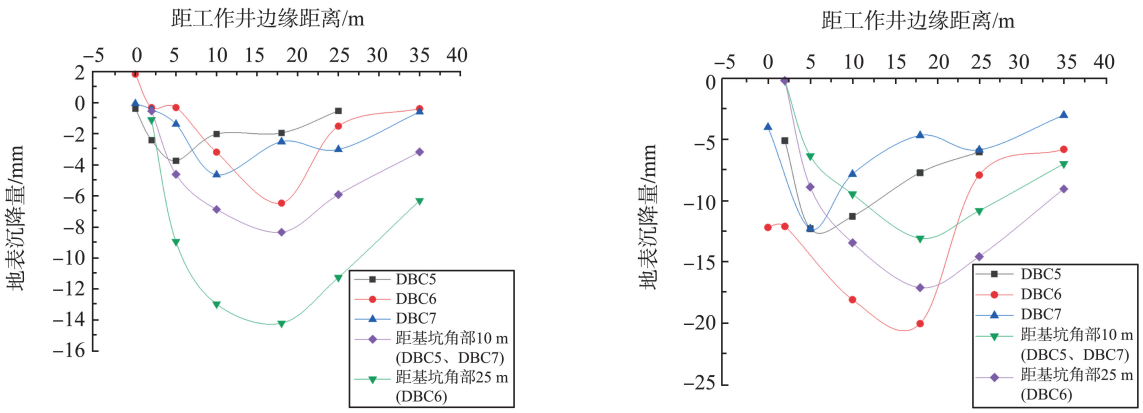
基坑开挖完成后,通过监测点(DBC6-1)得到围护结构墙体沿深度的水平位移分布曲线如图 5 所示。通过对比“基坑开挖完成阶段”的实测数据与数值模拟曲线可知,二者在位移发展趋势和量值上均展现出较高的一致性。模拟曲线准确复现了墙体变形的基本模态:在开挖(-28 m)处位移最大,并沿深度向上及向下递减。尽管在局部深度可能存在微小偏差,但模型成功捕捉了墙体变形的总体形态和最大位移发生的关键区域。



(a) 施工期基坑开挖完成阶段　　(b) 服役期主体施工完成阶段

图 5　工作井施工全过程围护结构位移模拟与实测对比图

Fig.5　Comparison between simulated and measured displacements of retaining structure of working shaft during whole construction process



(a) 施工期基坑开挖完成阶段　　(b) 服役期主体施工完成阶段

图 6　工作井周边地表沉降模拟与实测对比图

Fig.6　Comparison between simulated and measured surface settlements around the working shaft

基坑周边不同位置(测点 DBC5、DBC6、DBC7)的地表沉降情况如图 6 所示。由图 6 可知:数值模拟得到的沉降曲线与现场实测数据在空间分布规律上吻合良好。位于距基坑角部 10 m 范围内的测点 DBC5 与 DBC7,其沉降值明显大于距角部 25 m 的测点 DBC6。沉降量随着与基坑边缘距离的增加而逐渐减小。该对比结果证实了本模型能够合理预测基坑开挖对周边土体产生的扰动影响范围及沉降量级。

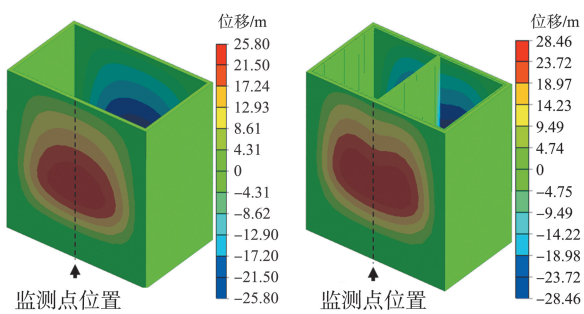
2　结果分析

基于已验证的数值模型,本研究首先对比分析了施工期与服役期内,围护墙变形与地表沉降的时空分布特征。在此基础上,重点揭示了基坑长宽比、中隔墙及环框梁等设计参数对空间效应的作用机制。

2.1　工作井的空间位移场

2.1.1　围护墙体水平位移

工作井结构施工完成后围护墙体的水平位移云图和变形曲线,分别如图 7、8 所示。



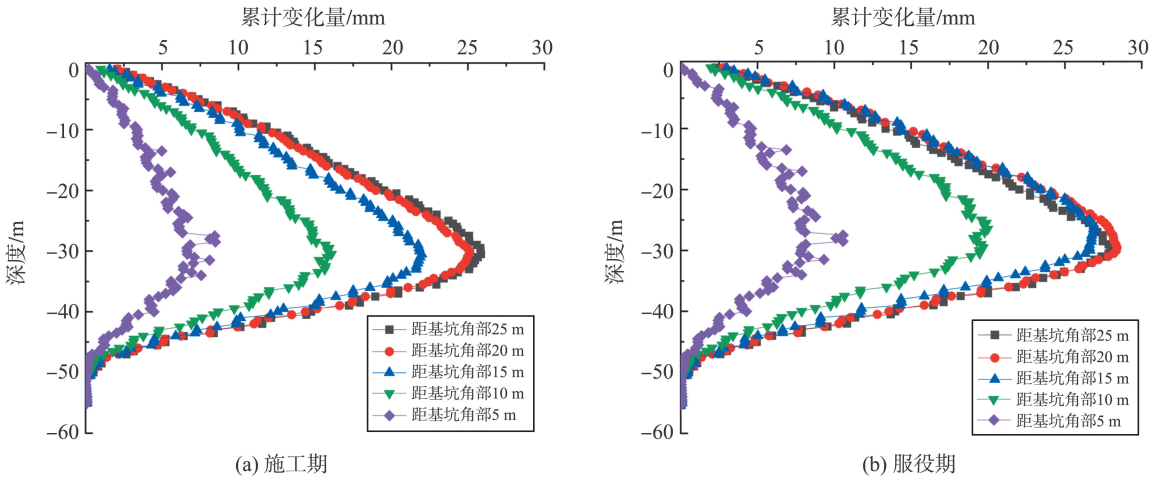
(a) 施工期　　(b) 服役期

图 7　围护墙体变形云图

Fig.7　Contour of retaining-wall deformation

由图 7、8 可知:在基坑开挖施工期阶段,围护墙体的最大位移出现在基坑的中部位置。随着基坑开

挖深度的不断增加,其水平位移也在不断增加,且出现最大变形的深度位置逐步下移,开挖完成时最大变形位置约在坑底以上 5 m 处。在服役期(主体回筑)阶段,随着支撑拆除以及主体结构的回筑,其水平位移在不断增加,但出现最大变形的深度位置基本不变,约在坑底以上 5 m 处。

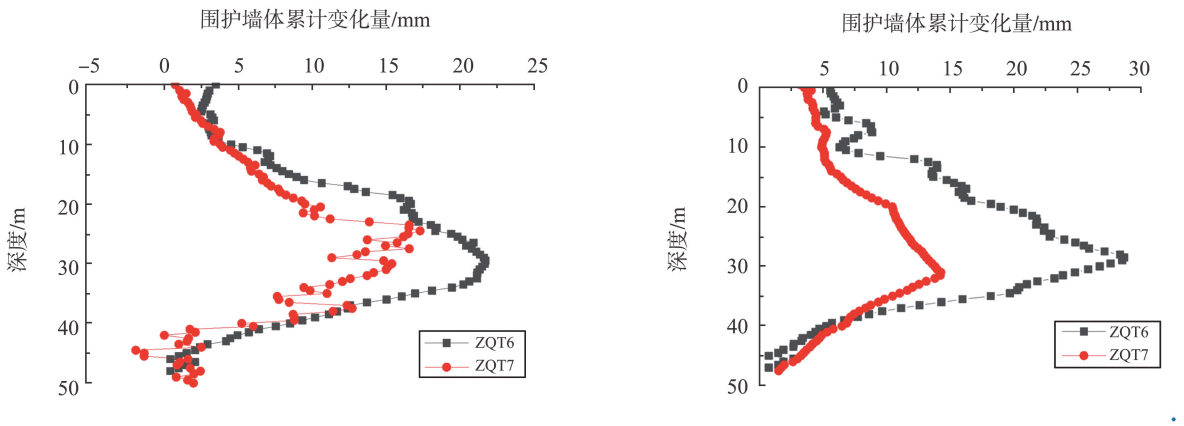


(a) 施工期 (b) 服役期

图 8 围护墙体变形曲线

Fig.8 Deformation curves of retaining wall

施工全过程中基坑围护结构墙体深层水平位移图如图 9 所示。由图 9 可知:在施工期,随着基坑的开挖,墙体深层水平位移变化量增长较快;在服役期,随着底板浇筑的完成,墙体深层水平位移变化量逐渐减小并趋于稳定;这是因为随着基坑的开挖,土体应力逐步释放,导致墙体深层水平位移变化速率较快;后期随着主体结构回筑,围护墙体形成地连墙与主体结构墙共同受力的模式,结构刚度大大增加,因此变化速率逐渐变小。



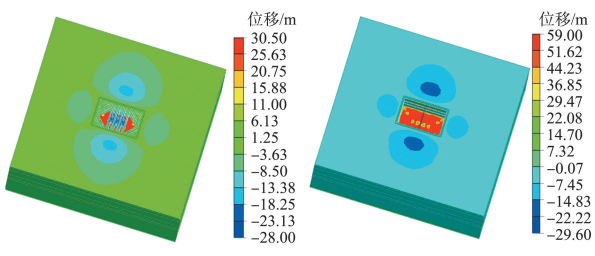
(a) 施工期:开挖至坑底围护墙体累计变化量 (b) 服役期:主体施工完成围护墙体累计变化量

图 9 工作井长边不同位置处围护墙深层水平位移图

Fig.9 Deep horizontal displacements of retaining wall at different positions along the long side of the working shaft

2.1.2 地表沉降

施工期、服役期地表沉降云图和变形曲线,分别如图 10、11 所示,由图 10、11 可知:地表沉降最大值出现在工作井长边中部地表位置处,沉降范围从中心呈椭圆形向外扩散;地表沉降整体变形趋势及最大沉降变形的位置在施工全过程中基本不变;在工作井短边方向上,空间效应较强,地表沉降影响范围较长边影响范围小,且在施工全过程中变化不大。



(a) 施工期 (b) 服役期

图 10 地表沉降云图

Fig.10 Contour of ground surface settlement

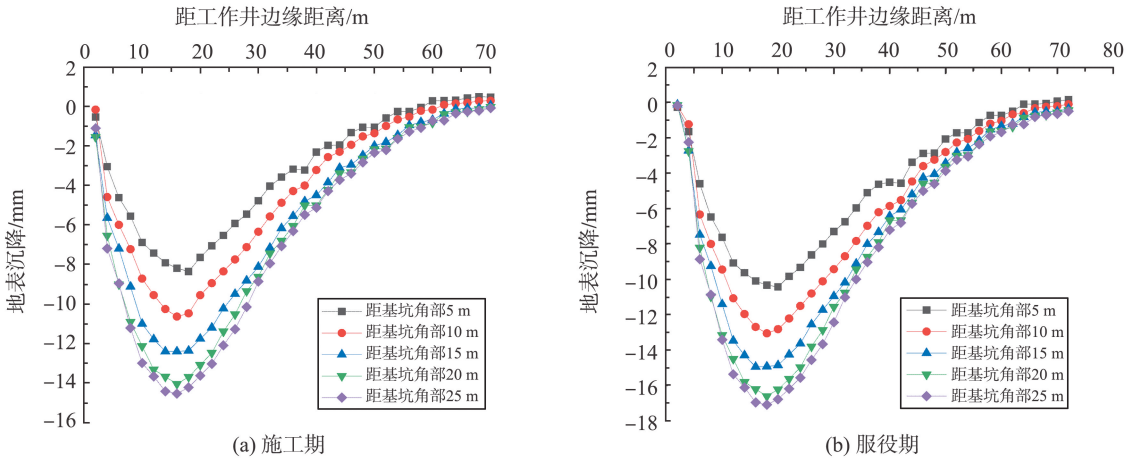


图 11　地表沉降曲线图

Fig.11　Curves of ground-surface settlement

根据现场监测点布置情况,选取有代表性的 3 个剖面 DBC-5、DBC-6、DBC-7,其中 DBC-5 较 DBC-7 更靠近角部。3 个剖面在施工期、服役期的地表沉降对比图如图 12 所示。

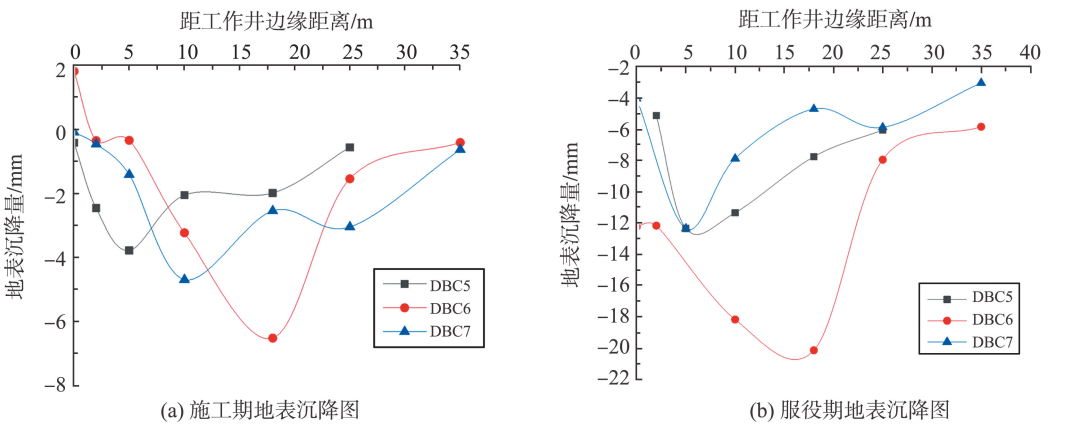


图 12　施工全过程不同位置处地表沉降变形对比

Fig.12　Comparison of surface-settlement deformations at different positions throughout the whole construction process

由图 12 可知:基坑的地表沉降在施工两阶段中表现出明显的空间效应。整体上沉降曲线呈抛物线形,但因空间位置的不同沉降曲线有所不同,当距离角部越近时,地表出现最大沉降的位置离工作井边缘越近。

施工期与服役期两阶段地表沉降曲线整体变形大致相同,整体呈中部大两端小的变形形式。但沉降量有所增加,最大沉降增量约为 15 mm。这是因为支撑拆除后,工作井处于近乎无内支撑状态,墙后土体重分布引起墙体侧向变形,周围土体也随之移动,导致工作井周围土体沉降量增加。

2.2　长宽比对墙体水平位移和地表沉降的影响

设工作井长为 L,宽为 B,长宽比为 L/B。为单独研究长宽比的影响,遵循单一变量原则,保持模型整体边界尺寸及宽度 $B=30$ m 恒定,仅改变长边 L 为 30、45、60、90 m。依据文献[21]及黄河中下游粉质黏土地层工程经验,该类地层深基坑水平影响范围为开挖深度的 1~2 倍,深度方向为 3~5 倍。本工程开挖深度 35.2 m,各工况下基坑短边至边界距离 70.0 m(约 2 倍开挖深度),长边最大时至边界距离 45.0 m(约 1.3 倍开挖深度),深度方向至边界距离 84.8 m(约 2.4 倍开挖深度),均满足影响范围要求。

2.2.1　长宽比对墙体水平位移的影响

(1)施工期围护墙体水平位移

工作井施工期基坑开挖至坑底设计标高,在不同长宽比下围护墙体最大水平位移随工作井长边距离的变化图如图 13 所示。由图 13 可知:当长宽比 $L/B<2$ 时,围护墙体最大水平位移值随距角部距离变化较快,曲线还未出现平直段;当长宽比 $L/B\geqslant 2$ 时,最大水平位移变化减缓,曲线开始出现平直段。且随着工作井长宽比的增大,平直段的长度也逐渐增加。平直段位置处的围护墙体可近似认为处于平面应变状态,水平位移最大值基本不再随长边尺寸的增加而增加。工作井角部刚度较大,空间效应较明显,在各长宽比条件下变形都较为微弱。

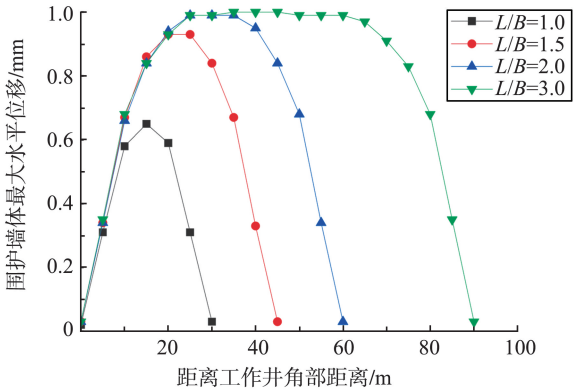


图 13 施工期不同长宽比工作井长边围护墙体最大水平位移变化图

Fig.13 Variation of maximum horizontal displacement of retaining wall on long-side of working shaft with different length-width ratios during construction period

(2)服役期围护墙体水平位移

工作井服役期主体结构回筑完成并拆除全部内撑后,在不同长宽比下围护墙体最大水平位移随工作井长边距离的变化图如图 14 所示。根据图 14 可知:从整体上来看,长宽比越大,中隔墙提供的空间效应效果越明显。当长宽比 $L/B<1.5$ 时,工作井围护墙体水平位移最大值仍在中部位置,整体呈中间大两端小的趋势。当长宽比 $1.5<L/B<2$ 时,围护墙体最大水平位移位置逐渐偏离工作井中部;当长宽比 $2<L/B$ 时,围护墙体变形趋势呈两侧对称分布,最大水平位移位置大约出现在基坑长边 1/3 处。服役期围护墙体发生较大变形的区域随长宽比增加逐渐偏离工作井中部位置,整体变形趋势呈左右对称的双峰形。在服役期工作井长边中部位置施作了中隔墙,中隔墙提供了较强的支撑作用,施作中隔墙在一定程度上使得围护墙体长边尺寸减小,增强了工作井的空间效应。

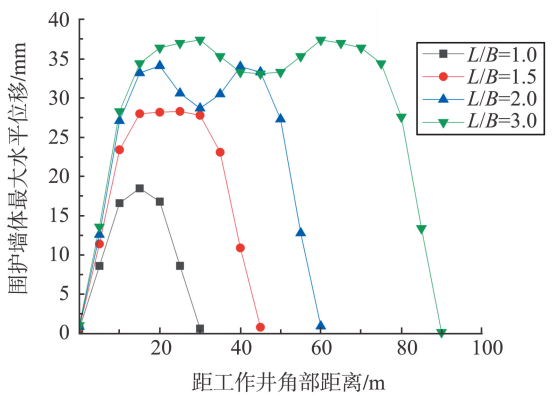


图 14 服役期不同长宽比工作井长边围护墙体最大水平位移变化图

Fig.14 Variation of maximum horizontal displacement of retaining wall on long-side of working shaft with different length-width ratios during service period

2.2.2 长宽比对地表沉降的影响

(1)施工期地表沉降

基坑开挖完成阶段不同长宽比的工作井地表沉降的变形云图如图 15 所示。当 $L/B<1.5$ 时,工作井地表沉降变形不存在平直段;当 $L/B>2$ 时,在工作井长边中部区域开始出现平直段。可知,随着工作井长宽比的增加,长边地表沉降量的增值比短边大,这是因为短边尺寸小,受到两端角部空间效应影响较大的原因。

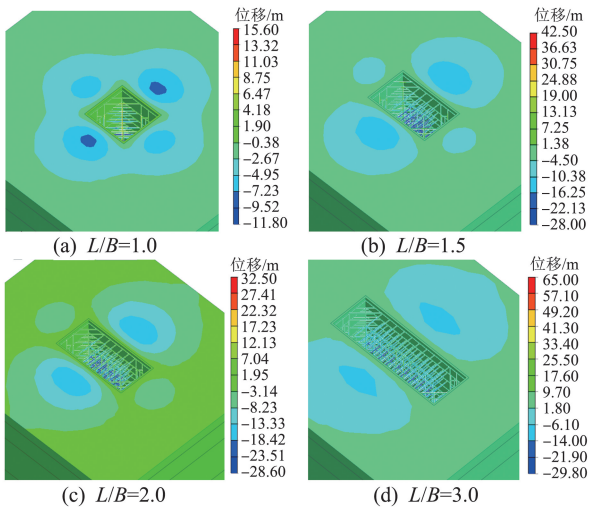


图 15 基坑开挖完成后各长宽比地表沉降云图(施工期)

Fig.15 Contour plots of surface settlement for various length-width ratios after foundation pit excavation (construction period)

(2)服役期地表沉降

服役期主体结构完成阶段不同长宽比的工作井地表沉降的变形云图如图 16 所示。

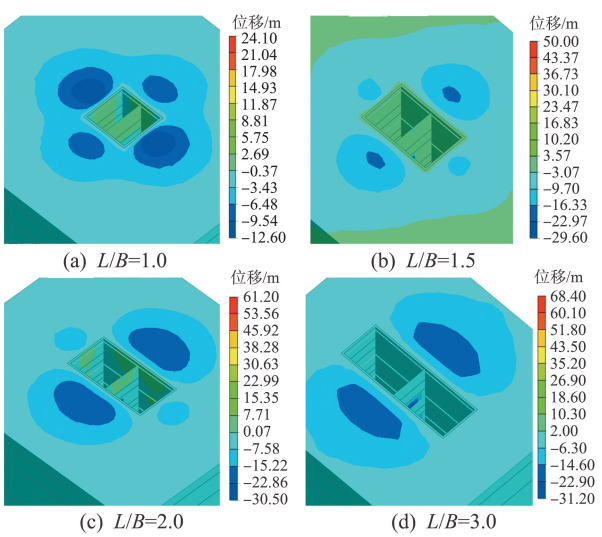


图 16 基坑开挖完成后各长宽比地表沉降云图(服役期)

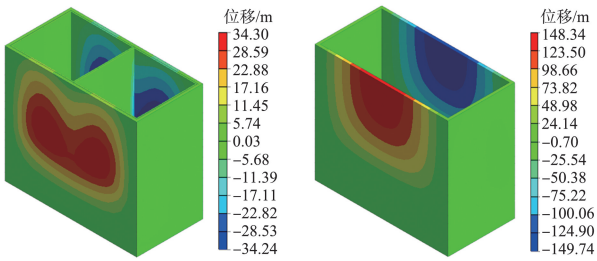
Fig.16 Contour plots of surface settlement for various length-width ratios after foundation pit excavation (service period)

由图 16 可知,地表沉降量与长宽比呈正相关。与施工期相比,服役期地表沉降量有一定的增长。这是由于服役期逐步拆除内支撑,最终工作井处于无内

支撑的状态,围护墙体外侧土压力重新分布导致墙体向工作井内侧位移,进而引起地表土体的沉降变形。

2.3　中隔墙对围护墙体水平位移的影响

施作中隔墙将对工作井的空间效应产生较大的影响。故选取工作井尺寸为长宽比 $L/B=2$,保持其余各项参数设置不变,模拟施作与不施作中隔墙两种情况下围护墙体变形的对比,如图 17。



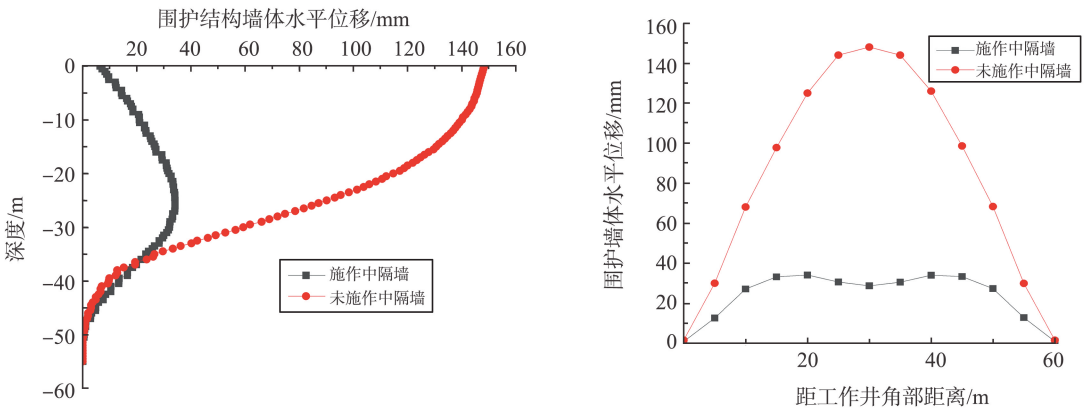
(a) 施作中隔墙　　(b) 未施作中隔墙

图 17　工作井服役期施作与未施作中隔墙变形对比云图

Fig.17　Contour plots of deformation comparison for the working shaft with and without middle partition wall constructed in service period

由图 17 可知:施作与不施作中隔墙两种情况下,工作井围护墙体的变形有明显差异。施作中隔墙时,水平方向上,位移最大值偏离工作井中部发生在中隔墙与外墙之间的区域。竖直方向上,变形呈中部大两端小的“鼓肚形”;未施作中隔墙时,水平方向上,位移最大值往往发生在工作井中部位置处。竖直方向上,变形呈上部较大,下部较小的“悬臂形”。

针对服役期工作井长边的围护墙体,分别提取其施作中隔墙与未施作中隔墙的数据,进行对比分析如图 18 所示。由图 18(a)可知:从整体上来看,当在围护墙体长边中部位置施作中隔墙后改变了围护墙体的变形模式,显著减小了工作井顶部的位移。由图 18(b)可知:当未施作中隔墙时,其水平位移的变化规律与施工期基本类似,在距离角部 27 m 左右时,达到稳定状态。而施作中隔墙明显抑制了围护墙体水平位移随距工作井角部的距离增大而增大的趋势。



(a) 沿深度方向围护墙体变形　　(b) 沿水平方向围护墙体变形

图 18　工作井服役期长边围护墙体变形对比图

Fig.18　Comparison of deformations of long-side retaining wall of working shaft during service period

2.4　环框梁竖向位置对工作井空间效应的影响

模拟中仅保留第一道、第四道、第七道砼围檩兼做环框梁。经研究,相对于第一道环框梁,位于工作井中下部的第四道、第七道环框梁对控制围护墙体变形的作用尤为突出。所以,通过改变其第四、第七环框梁的竖向位置来研究围护结构体系的变形规律。

工况一:保持第一道、第七道环框梁竖向位置不变,第四道环框梁上移 1 m,并保持二、三道钢撑之间间距不变。

工况二:保持第一道、第四道环框梁竖向位置不变,第七道环框梁上移 1 m,并保持五、六道钢撑之间间距不变。

工况三:保持第一道、第四道环框梁竖向位置不变,第七道环框梁下移 1 m,并保持与第六道钢撑之间间距不变。

其余控制模型各项参数不变,如表 3 所示。

表 3　各支撑竖向位置

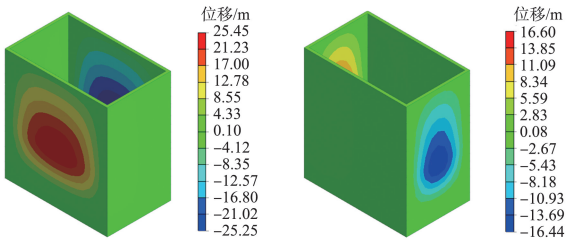
Table 3　Vertical positions of each support

工况	支撑 1 标高(环框梁)/m	支撑 2 标高/m	支撑 3 标高/m	支撑 4 标高(环框梁)/m	支撑 5 标高/m	支撑 6 标高/m	支撑 7 标高(环框梁)/m	支撑 8 标高/m
一	−1.5	−6.5	−10.7	−13.9	−18.9	−22.3	−25.8	−30.1
二	−1.5	−7.5	−11.7	−14.9	−17.9	−21.3	−24.8	−30.1
三	−1.5	−7.5	−11.7	−14.9	−18.9	−23.3	−26.8	−30.1

2.4.1 环框梁位置变化的影响(施工期)

(1)施工期工况一

上调第四道环框梁位置后施工期工作井变形云图如图 19 所示,调整位置前后围护墙体水平位移的对比图如图 20 所示。经图 19、20 对比可知,环框梁上移后,第四道环框梁以上的围护墙体最大水平位移由 14.8 mm 减小到 14.5 mm。这主要是因为环框梁上移,支撑间距减小,增大了对工作井上部的位移限制。但从整体上看工作井施工期的水平位移没有明显变化,仅最大水平位移出现的位置有一定程度的上移。这说明第四道环框梁对控制工作井上部围护墙体的变形影响较大。



(a) 围护墙y方向水平位移云图 (b) 围护墙x方向水平位移云图

图 19 调整环框梁位置后施工期工作井变形云图

Fig.19 Contour plots of working-shaft deformation during construction period after adjusting the position of the ring-frame beam

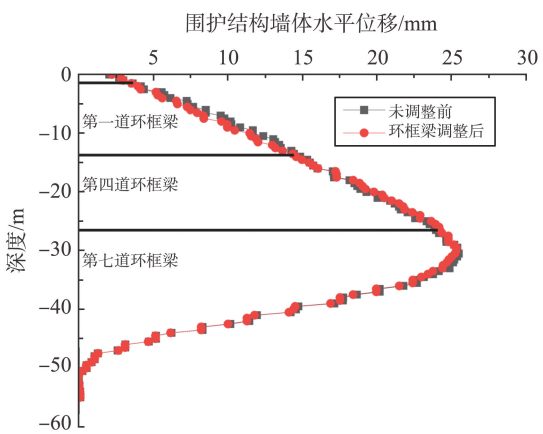
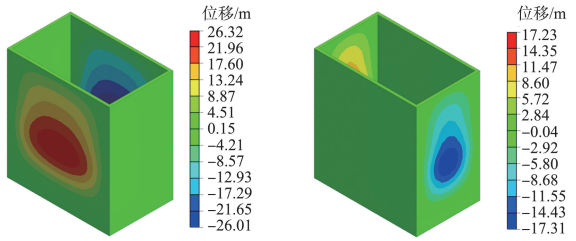


图 20 调整环框梁位置后施工期工作井变形对比曲线

Fig.20 Comparison curves of working-shaft deformation during construction period after adjusting the position of the ring-frame beam

(2)施工期工况二

上调第七道环框梁位置后施工期工作井变形云图如图 21 所示,调整位置前后围护墙体水平位移的对比图如图 22 所示。由图 21、22 对比可知:环框梁上移后,围护墙体的最大位移由 25.4 mm 增大到 26.3 mm。据研究,围护墙体水平位移最大值出现在第七道环框梁下部 3 m 左右位置,当环框梁上调时远离最大变形处,因此围护墙体水平位移有所增加,但围护墙体顶部水平位移没有明显变化。说明第七道环框梁对工作井围护墙体水平位移的影响较大。



(a) 围护墙y方向水平位移云图 (b) 围护墙x方向水平位移云图

图 21 上调第七道环框梁后施工期工作井变形云图

Fig.21 Contour plots of working-shaft deformation during construction period after uplifting the seventh ring-frame beam

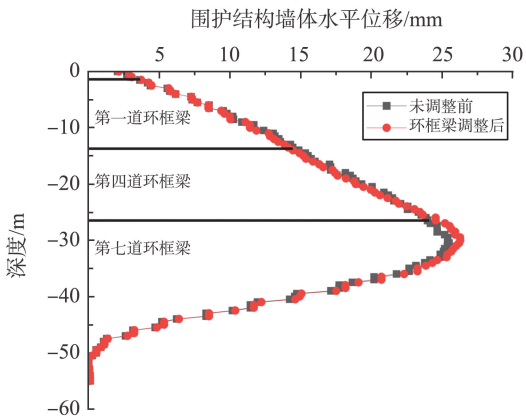
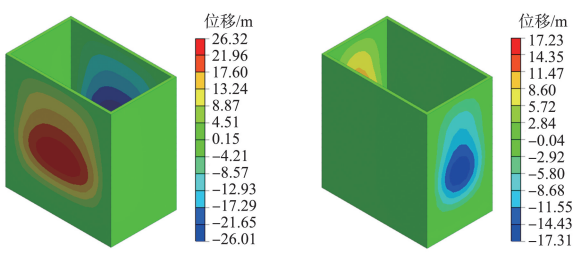


图 22 上调第七道环框梁后施工期工作井变形对比曲线

Fig.22 Comparison curves of working-shaft deformation during construction period after raising the seventh ring-frame beam and adjusting ring-frame beam positions

(3)施工期工况三

下调第七道环框梁位置后施工期工作井变形云图如图 23 所示,调整位置前后围护墙体水平位移的对比图如图 24 所示。由图 23、24 对比可知:环框梁下移后围护墙体的最大位移由 25.5 mm 减小到25.3 mm。因为环框梁下调时更接近围护墙体最大变形位置,因此能够提供更好的围护作用。



(a) 围护墙y方向水平位移云图 (b) 围护墙x方向水平位移云图

图 23 下调第七道环框梁后施工期工作井变形云图

Fig.23 Contour plots of working-shaft deformation during construction period after lowering the seventh ring-frame beam

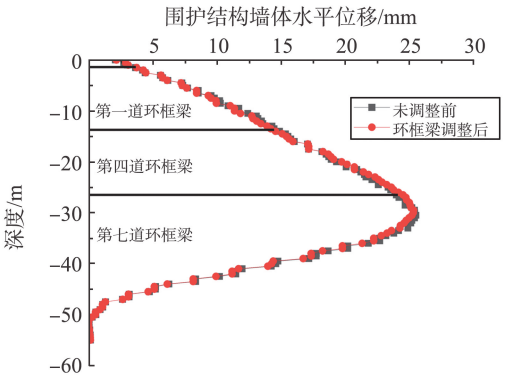


图 24　下调第七道环框梁后施工期工作井变形对比曲线

Fig.24　Comparison curves of working-shaft deformation during construction period after lowering the seventh ring-frame beam

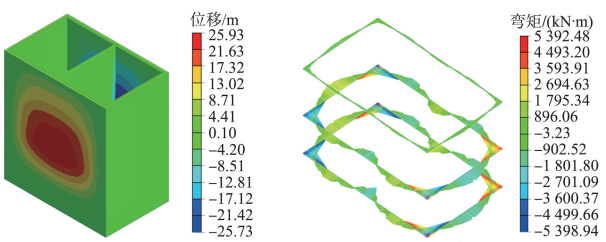
从整体上来看,第七道环框梁位置对施工期工作井围护墙体的变形影响较大。仅从墙体水平位移的角度考虑,工况三的环框梁布置更合理。因此适当将第七道环框梁位置下移,对施工期工作井的稳定是有利的。

2.4.2　环框梁位置变化的影响(服役期)

根据表 3 设置的 3 种工况调整工作井环框梁的位置并进行施工全过程的数值模拟。

(1) 服役期工况一

上调第四道环框梁位置后服役期工作井变形云图如图 25 所示,调整位置前后围护墙体水平位移的对比图如图 26 所示。



(a) 围护墙y方向水平位移云图　　(b) 环框梁弯矩

图 25　上调第四道环框梁后服役期工作井响应云图

Fig.25　Contour plots of working-shaft response in service period after raising the fourth ring-frame beam

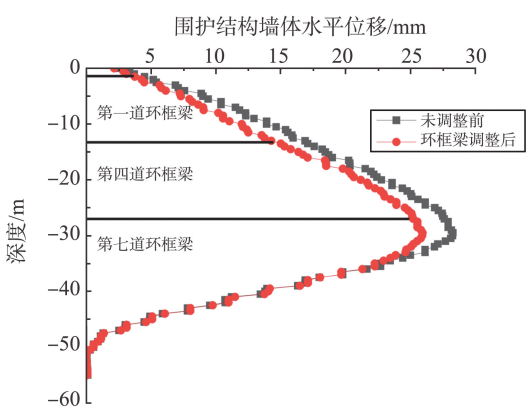


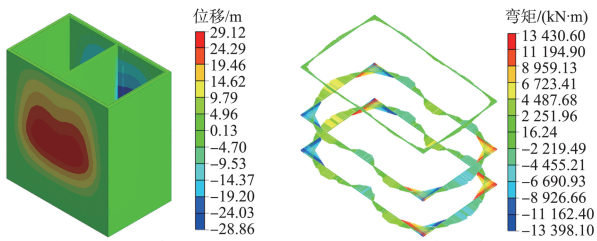
图 26　上调第四道环框梁后服役期工作井变形对比曲线

Fig.26　Comparison curves of working-shaft deformation during service period after raising the fourth ring-frame beam

由图 25、26 对比可知:环框梁上移后,工作井围护墙体的最大水平位移由 28.2 mm 减小到 25.9 mm。这主要是因为环框梁的上移使得上部环框梁间距减小,因此能有效控制围护墙体的变形。在环框梁内力方面,当第四道环框梁上移后,环框梁的弯矩有所减小。这主要是因为第四道环框梁的上移,减小了工作井围护墙体的应力释放。

(2) 服役期工况二

上调第七道环框梁位置后服役期工作井变形云图如图 27 所示,调整位置前后围护墙体水平位移的对比图如图 28 所示。由图 27、28 可知:环框梁上移后,围护墙体的最大位移由 28.2 mm 增大到 28.6 mm。这是因为当环框梁上调使得第七道环框梁远离最大变形处,因此围护墙体水平位移有所增加。在环框梁内力方面,当第七道环框梁上移后,环框梁的弯矩有一定的减小。这主要是因为第四道环框梁的上移减小了工作井围护墙体的应力释放。



(a) 围护墙y方向水平位移云图　　(b) 环框梁弯矩

图 27　上调第七道环框梁后服役期工作井响应云图

Fig.27　Contour plots of working-shaft response in service period after raising the seventh ring-frame beam

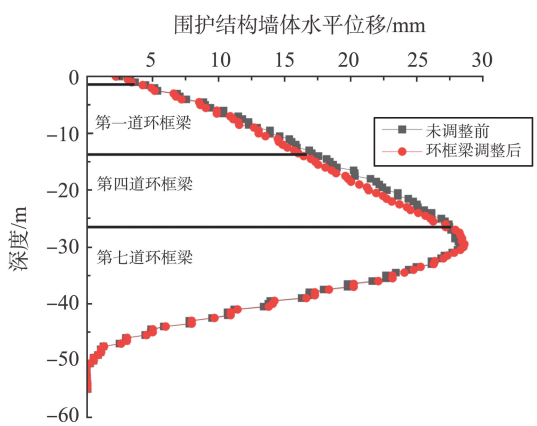


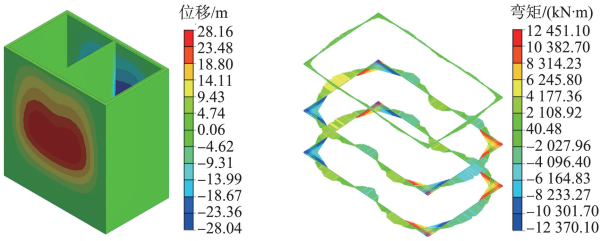
图 28　上调第七道环框梁后服役期工作井变形对比曲线

Fig.28　Comparison curves of working-shaft deformation during service period after raising the seventh ring-frame beam

(3) 服役期工况三

下调第七道环框梁位置后服役期工作井响应云图如图 29 所示,调整位置前后围护墙体水平位移的对比图如图 30 所示。由图 29、30 可知:环框梁下移后围护墙体的最大位移由 28.2 mm 减小到

27.4 mm。这是因为当环框梁下调时更接近最大变形位置,因此能够提供更好的变形控制作用。在环框梁内力方面,第七道环框梁下移后,第一道、第四道环框梁的弯矩减小,第七道环框梁的弯矩增大。这是因为第七道环框梁的下移,更接近工作井变形最大处,从而引起了环框梁内力的增大。



(a) 围护墙y方向水平位移云图 (b) 环框梁弯矩

图 29 下调第七道环框梁后服役期工作井响应云图

Fig.29 Contour plots of working-shaft response in service period after lowering the seventh ring-frame beam

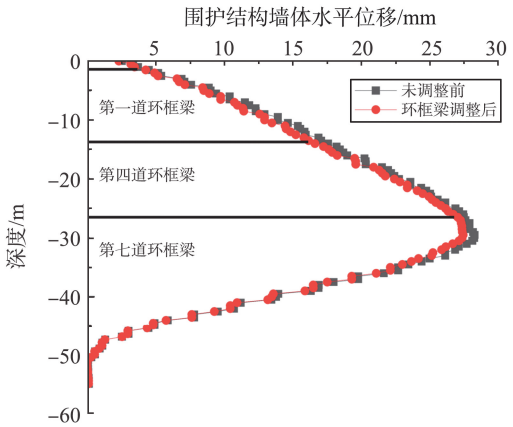


图 30 下调第七道环框梁后服役期工作井变形对比

Fig.30 Comparison of working-shaft deformation during service period after lowering the seventh ring-frame beam

3 结论

(1) 通过对工作井施工全过程的空间效应分析可知,围护墙体变形与其平面尺寸密切相关。工作井尺寸越小,空间效应的影响越显著。当长宽比满足 $1<L/B<1.5$ 时,围护墙最大变形主要受基坑长边尺寸控制;当 $1.5<L/B<2$ 时,长边尺寸的影响逐渐减弱;而当 $L/B>2$ 时,基坑变形趋于稳定,围护墙水平位移最大值基本不再随长边尺寸增大而增加。

(2) 设置中隔墙对服役期围护墙变形具有显著影响,一方面能够有效抑制墙体变形量,另一方面可改变其变形形态。与施工期相比,工作井在服役期所受空间效应的影响更为突出。

(3) 环框梁竖向位置对工作井变形影响的研究表明,其在服役期的影响较施工期更为显著。当最下道环框梁设置于围护墙最大变形区域附近时,整体变形控制效果最佳。因此,在不影响主体结构施工的前提下,可适当优化环框梁的竖向布置。

(4) 采用数值模拟与现场实测相结合的方法,对工作井施工全过程进行综合分析,结果表明二者所揭示的围护结构变形规律基本一致,且数值偏差较小,验证了本研究所建数值模型适用于工作井施工全过程的变形预测与分析。

参考文献:

[1]《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J].中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China′s tunnel engineering research: 2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5): 1-65.

[2] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007: 1-22.
Xu Zhonghua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007: 1-22.

[3] 徐杰, 张振光, 李海祥. 考虑空间土拱效应的非饱和地层圆形基坑围护结构侧向土压力计算方法[J]. 岩土力学, 2026, 47(1): 245-254.
Xu Jie, Zhang Zhenguang, Li Haixiang. Calculation methods of lateral earth pressure on retaining structures for a circular foundation pit in unsaturated soils considering the spatial soil arching effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2026, 47(1): 245-254.

[4] 饶秋琛, 李琦, 王倩. 空间效应下长条形基坑分段地下连续墙支护特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 1): 104-108.
Rao Qiuchen, Li Qi, Wang Qian. Supporting characteristics of segmental diaphragm walls in strip foundation pits under spatial effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S1): 104-108.

[5] 李泽文, 谭勇, 廖少明, 等. 上海超深基坑地下连续墙的空间变形特性实测分析[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(11): 2380-2390.
Li Zewen, Tan Yong, Liao Shaoming, et al. Field tests on performance of diaphragm wall for an ultra-deep excavation in Shanghai soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(11): 2380-2390.

[6] 赵泳皓, 甄洁, 栗晴瀚, 等. 软土地区超深基坑对既有地铁变形影响分析[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(增刊 2): 205-211.
Zhao Yonghao, Zhen Jie, Li Qinghan, et al. Analysis of

influence of ultra-deep foundation pit on deformation of existing subway in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(S2): 205-211.

[7] 黄生根, 张义, 霍昊, 等. 软土地区深基坑支护工程格构柱变形规律研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(增刊 1): 533-538.
Huang Shenggen, Zhang Yi, Huo Hao, et al. Study on deformation law of lattice columns in deep foundation pits in soft soil area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 533-538.

[8] 杨雪强, 刘祖德, 何世秀. 论深基坑支护的空间效应[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 74-78.
Yang Xueqiang, Liu Zude, HeShixiu. Research about spatial effect of deep pit supporting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 74-78.

[9] 郑刚, 曾超峰. 基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12): 2153-2163.
Zheng Gang, Zeng Chaofeng. Lateral displacement of diaphragm wall by dewatering of phreatic water before excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12): 2153-2163.

[10] 张志强. 黄土地区桩锚支护深基坑受力分析与变形控制[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(4): 88-94.
Zhang Zhiqiang. Stress analysis and deformation control of pile-anchored support in deep foundation excavations in loess area[J]. Construction Technology, 2025, 54(4): 88-94.

[11] 雷明锋, 彭立敏, 施成华, 等. 长大深基坑施工空间效应研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1579-1584.
Lei Mingfeng, Peng Limin, Shi Chenghua, et al. Research on construction spatial effects in large-long-deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1579-1584.

[12] 聂庆科, 胡建敏, 吴刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3089-3094.
Nie Qingke, Hu Jianmin, Wu Gang. Deformation and earth pressure of a double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3089-3094.

[13] 吴刚, 白冰, 聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2753-2758.
Wu Gang, Bai Bing, Nie Qingke. Research on calculation method of double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2753-2758.

[14] 王文正, 张艳秋, 李栋, 等. 考虑空间效应的深基坑变形特性研究[J]. 山西建筑, 2024, 50(10): 1-5.
Wang Wenzheng, Zhang Yanqiu, Li Dong, et al. Research on deformation characteristics of deep foundation pit considering spatial effects[J]. Shanxi Architecture, 2024, 50(10): 1-5.

[15] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525.
Liu Nianwu, Chen Yitian, Gong Xiaonan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1525.

[16] 郝大为, 江政律, 黄威然, 等. 狭长深基坑空间效应特征研究: 以深圳白石洲地铁站为例[J]. 铁道勘察, 2025, 51(5): 51-57.
Hao Dawei, Jiang Zhenglü, Huang Weiran, et al. Study on the characteristics of spatial effects in long and narrow deep excavations: a case study of Shenzhenbaishizhou metro station[J]. Railway Investigation and Surveying, 2025, 51(5): 51-57.

[17] 顾正瑞, 徐中华, 杨涛. 基于小应变本构模型的深基坑受力与变形性状三维有限元分析[J]. 施工技术, 2021, 50(1): 42-48.
Gu Zhengrui, Xu Zhonghua, Yang Tao. Three dimensional finite element analysis of the behavior of deep foundation excavation using small strain constitutive model[J]. Construction Technology, 2021, 50(1): 42-48.

[18] 孙政波, 张文涛, 赵俊键, 等. 软土地区超深基坑分坑及地中壁空间效应研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2025, 50(4): 770-785.
Sun Zhengbo, Zhang Wentao, Zhao Junjian, et al. Sub-pit and cross wall spatial effect analysis for ultra-deep foundation pit in soft soil[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2025, 50(4): 770-785.

[19] The Editorial Team. Smart underground engineering: Innovation and sustainable development[J]. Smart Underground Engineering, 2025, 1(1): 2.

[20] 王成华, 王晓旋. 深筒形基坑空间效应的定量化研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(5): 1-8.
Wang Chenghua, Wang Xiaoxuan. A quantitative study on spatial effect of deep-cylindrical foundation pit[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(5): 1-8.

[21] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].

(编辑:张延欢)