

DOI: 10.7672/sgjs2026130085

饱和软黄土深基坑降水开挖施工地表变形 特性与参数分析*

杜孟飞

(中国建筑第四工程局有限公司,广东 广州 510665)

[摘要] 为探究饱和软黄土深基坑降水开挖施工的地表变形特性,以西安某地铁车站竖井工程为背景,结合现场监测与数值模拟,分析了地表沉降历时变化规律及影响因素。结果表明:地表沉降历时曲线可划分为卸荷隆起、降水固结沉降、变形稳定及水位回升回弹 4 个阶段,降水施工期是沉降发展的主要阶段。参数分析表明,地表沉降随土体渗透系数增大而增大、随地下水埋深增大而减小;单次开挖深度建议控制在 1.4m 左右。综合考虑支护效果与经济性,推荐采用 I20a 及 0.8m 布设间距。

[关键词] 深基坑;饱和软黄土;降水;沉降;数值模拟;流固耦合

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0085-08

Analysis of Surface Deformation Characteristics and Parameters During Deep Foundation Excavation Dewatering and Excavation Construction in Saturated Soft Loess

DU Mengfei

(China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510665, China)

Abstract: To investigate the surface deformation characteristics during dewatering and excavation of deep foundation excavations in saturated soft loess, this paper analyzed the temporal variation patterns of surface settlement and their influencing factors based on a shaft project for a subway station in the city of Xi'an, combining field monitoring with numerical simulation. The results indicate that the time-dependent curve of ground settlement can be divided into four stages: unloading heave, dewatering consolidation settlement, deformation stabilization, and rebound due to rising water levels. The dewatering construction period is the primary stage during which settlement occurs. Parametric analysis shows that ground settlement increases with an increase in the soil permeability coefficient and decreases with an increase in the depth of the groundwater table. The recommended single excavation depth should be controlled at around 1.4m. Considering both the support effectiveness and the economic efficiency, the use of I20a with a spacing of 0.8m is recommended.

Keywords: deep foundation excavation; saturated soft loess; dewatering; settlement; simulation; fluid-solid coupling

0 引言

随着我国城市轨道交通建设的快速发展,地铁深基坑工程面临的地质条件日益复杂^[1-2]。饱和软黄土作为一种特殊土体,广泛分布于我国西北地

区,具有天然含水率高、孔隙比大、渗透性较差且结构性强等特点^[3-4]。在深基坑降水开挖过程中,地下水位下降导致土体有效应力增加,加之饱和软黄土特有的失水大变形特性,极易引发显著的地表沉降,对周边建筑物及地下管线的安全构成严重威胁。因此,深入研究饱和软黄土地区深基坑降水开挖施工的地表变形特性及其影响因素,具有重要实践意义。

* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 杜孟飞,高级工程师,E-mail:526743462@qq.com

[收稿日期] 2026-03-27

近年来,国内外学者针对黄土地区深基坑开挖变形问题开展了大量研究。在变形规律方面,孙阳军等^[5]通过对既有转弯区隧道双侧超大深基坑开挖变形规律的分析,发现衬砌结构变形表现出“前部大、后部小”的特征,且基坑侧壁变形以拐角远端顶部为中心呈放射型扩散。在特殊环境条件下,李元勋等^[6]研究了降雪对季冻黄土地区桩锚支护深基坑变位特性的影响,指出冻融循环过程中土体水分发生迁移重分布,导致支护结构位移与坑外地表沉降显著增大。在支护方式对比方面,郭浩天等^[7]针对黄土状粉土地层基坑开挖的研究表明,内支撑结合地下连续墙支护能较好控制地表水平位移,但其周边地表沉降控制能力相对于桩锚支护偏弱,建议采用分区组合支护策略。在饱和软黄土地区工程实践方面,秦杏春^[8]总结了饱和软黄土地区深基坑支护与降水施工技术,强调应优先采用刚度较大的咬合桩止水帷幕,并遵循“分层开挖、分层支护、严禁超挖”的原则。何彦伟等^[9]采用长螺旋钻孔压灌桩后插型钢和高压旋喷桩组合工艺,并结合柔性钢板带腰梁施工技术,有效避免了塌孔缩径等工程问题。张志强^[10]的研究表明,桩锚支护体系能有效控制基坑变形,基坑中部区域位移大于边角区域,反映了空间效应对变形的显著影响。张凤鸣等^[11]以西安地铁 6 号线车站深基坑为背景,指出距基坑边缘 15m 范围内地表沉降变化量最大,良好的支护体系能有效抑制基坑变形。

然而,现有研究多集中于常规土层条件下的基坑变形分析,或侧重某一具体支护技术的应用效果,针对饱和软黄土这一特殊土体在降水与开挖共同作用下的地表沉降演化规律及关键影响因素的系统研究尚不充分。特别是对流固耦合数值模拟与现场监测数据相结合的综合分析,及对土体渗透系数、地下水埋深等关键参数的敏感性分析仍有待深入。

本文以西安某地铁车站竖井深基坑工程为依托,基于现场监测数据,系统分析饱和软黄土地区降水开挖施工过程中地下水位变化特征及地表沉降历时演化规律。在此基础上,建立流固耦合三维数值模型,开展土体渗透系数、地下水埋深、单次开挖深度、钢支撑型号及布设间距等因素对地表沉降影响的参数分析,提出合理的施工控制建议,以期类似工程的设计与施工提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

西安某地铁车站区间自西向东敷设,其中 1 号

施工竖井设置于两车站中部,轴线与区间正线交角约 90°。竖井采用倒挂井壁法施工,锁口圈梁外轮廓尺寸为 10.9m×7.6m,采用 C30 钢筋混凝土,紧贴竖井口四周封闭成环。初期支护采用钢筋网+钢格栅+喷射混凝土+钢支撑体系,双层钢筋网采用 φ8@150×150。钢格栅竖向间距为 750mm 及 500mm;喷射混凝土强度等级为 C25,厚 350mm;采用 I20a 角撑和对撑。超前支护采用 φ42×3.25 锁脚锚管注浆加固,长度为 3.0m,间距 500mm×500mm,呈梅花形布设。

基坑采用大口径管井降水法,共设 24 口降水井和 3 口水位观测井。降水自土方开挖前 20d 进行,至二次衬砌完工后停止,降水井深度从地表算起均为 50m,降水影响半径为 200m。

1.2 水文地质条件

根据地质勘察报告,竖井开挖区域内土层从上至下依次为:素填土、新黄土(水上)、饱和软黄土、古土壤、饱和 Q₂ 软塑黄土、古土壤(水下)及粉质黏土。各土层基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土层基本物理力学参数
Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	层厚/ m	干重度/ (kN·m ⁻³)	含水率/ %	孔隙比	渗透系数/ (m·d ⁻¹)
新黄土(水上)	7.0	13.5	18.5	0.92	2.0
饱和软黄土	20.0	14.4	32.5	0.88	4.0
古土壤	5.5	15.4	24.3	0.76	3.0
饱和 Q ₂ 软塑黄土	10.0	15.3	31.2	0.85	4.0
古土壤(水下)	95.5	15.9	26.8	0.72	3.0

基坑工程附近地下水为孔隙潜水,稳定水位埋深 5.3~11.6m,主要赋存于饱和软黄土、古土壤及粉质黏土层中,含水层厚度>50m。地下水主要受侧向径流及大气降水补给,渗透系数按 4m/d 取值。

1.3 现场监测方案

为全面掌握降水施工对邻近地表的影响,对本工程施工期及工后 170d 进行监测,监测内容包括地下水位升降(SW1~SW3)和地表隆沉(DB1~DB11)。测点平面布置如图 1 所示,监测项目、频率及预警标准如表 2 所示。

1.4 地下水位变化特征

监测期内地下水位变化历时曲线如图 2 所示。由图 2 可知,降水初期水位持续下降,最低可降至初始水位以下 6.9m;之后水位处于稳定变化状态;自开挖后第 130 天起暂停部分降水井,地下水位发生明显上升突变,部分测点超过初始水位。

表 2 监测项目、监测频率及预警标准

Table 2 Monitoring items, monitoring frequency and warning standards

监测项目	监测方法	监测频率	黄色预警累计值/mm	橙色预警累计值/mm
地下水位	电测水位计	1 次/2d	≥425	≥500
地表沉降	水准仪	开挖深度≤5m, 1 次/3d; 5~15m, 1 次/1d; ≥15m, 2 次/1d	≥25. 6	≥30

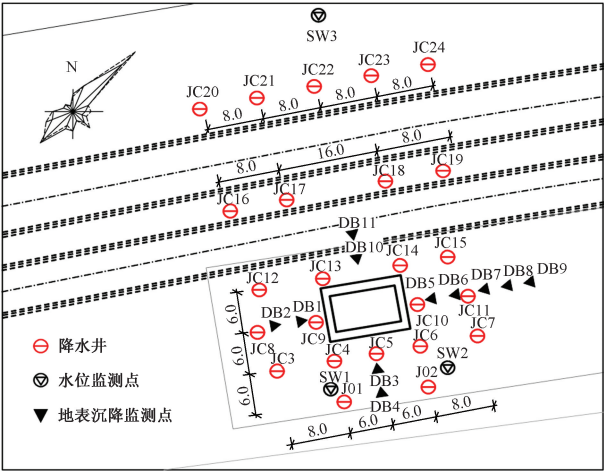


图 1 测点平面布置(单位:m)

Fig. 1 Plane layout of measuring points (unit:m)

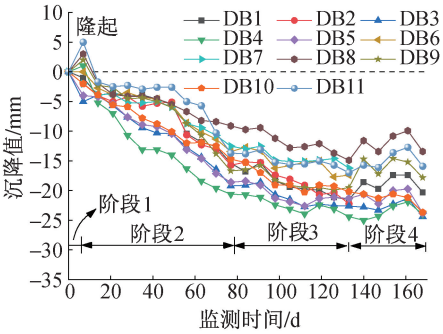


图 3 各测点沉降历时曲线

Fig. 3 Surface settlement duration curve of measuring points

说明降水对地表沉降的影响较为显著。

2 流固耦合数值模拟

为全面了解饱和软黄土地层在深基坑开挖和降水过程中坑外地表的变形规律,采用有限元软件建立流固耦合三维竖井深基坑模型。

2.1 有限元模型建立

竖井开挖深度为 29.5m,长度为 8.4m,宽度为 5.3m。为最大限度地减小模型边界对基坑开挖过程模拟计算的影响,模型整体取为 240m×240m×120m(长×宽×深)。模型顶部为自由边界,四周为法向约束,底部设置为固定约束。开挖初期设置地下水面孔压为 0,通过逐步设置降水面孔压为 0,并设定完成渗流所需时间来模拟降水施工全过程。模型的顶部、底部、对称面的孔压可自由变化,即无水头补给的不透水边界。模型几何尺寸及网格划分如图 4 所示。数值模拟土体采用修正剑桥弹塑性本构模型,该模型能够较好地反映土体的压缩和回弹过程,并能够有效地描述土体在产生破坏之前的非线性变形问题。根据地质勘察报告分析结果,得到基坑开挖范围内土体的修正剑桥参数如表 3 所示^[12],支护结构材料参数如表 4 所示。

2.2 施工步设置

基坑土体分 7 层开挖,每次开挖前将基坑内水位降至坑底以下 1m 位置处。土体开挖采用单元生死技术,降水采用定义地下水位的方式和应力-渗流耦合分析来模拟实际工程中的地下水及降水对基坑开挖的影响。数值模拟分析步如表 5 所示。

2.2.1 地下水位变化特征

水位变化模拟值与监测值对比如图 5 所示。由

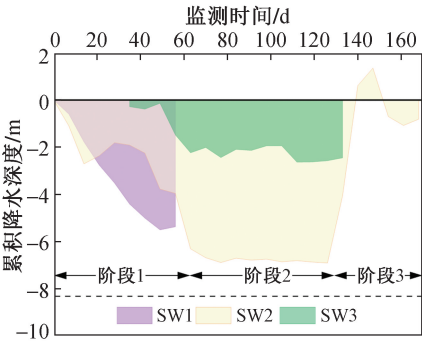


图 2 地下水位变化历时曲线

Fig. 2 Duration curve of groundwater level variation

1.5 地表沉降历时变化规律

选取 11 个典型地表沉降监测点,各测点沉降历时曲线如图 3 所示(正值表示隆起,负值表示沉降)。由图 3 可知,各测点沉降历时曲线变化趋势一致,可划分为 4 个阶段。

1)第 1 阶段(开挖初期):由于土体卸荷,坑底土体回弹带动支护结构变形,地表略微隆起。

2)第 2 阶段(降水施工期):周围土层水位下降,土体有效应力增加导致固结沉降,同时饱和软黄土和饱和 Q₂ 软塑黄土具有的失水大变形特性进一步加剧了地表沉降的发展。

3)第 3 阶段(开挖基本完成):沉降曲线趋于平缓,变形逐渐稳定。

4)第 4 阶段(水位回升期):地表土体受地下水位回升影响,沉降曲线表现出明显的“回弹”现象,

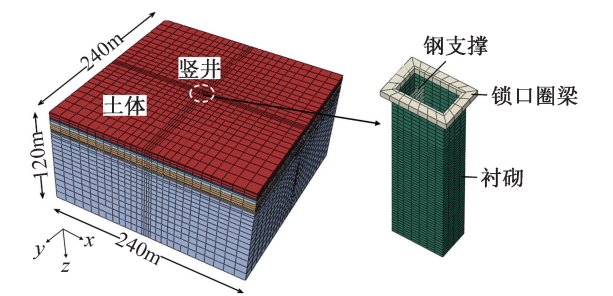


图 4 模型几何尺寸及网格划分

Fig. 4 Model geometric dimensions and grid division

表 3 土体修正剑桥模型物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the soil-modified Cambridge model

土层	层厚/ m	干重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	回弹 指数 κ	压缩 指数 λ	临界状态 应力比 M
新黄土(水上)	7.0	13.5	0.015	0.12	0.787
饱和软黄土	2.0	14.4	0.011	0.10	0.769
古土壤	5.5	15.4	0.008	0.07	0.745
饱和 Q_2 软塑黄土	10.0	15.3	0.007	0.07	0.757
古土壤(水下)	95.5	15.9	0.007	0.07	0.745

表 4 支护结构材料参数

Table 4 Material parameters of supporting structures

支护名称	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
初衬	23	25	0.2
锁口圈梁	25	25	0.2
钢支撑	78	200	0.2

表 5 基坑开挖数值模拟分析步设置

Table 5 Setting of numerical simulation analysis steps for excavation

施工阶段	施工内容
1	地应力平衡,生成初始地应力和孔压
2	开挖锁口圈梁(第 1 次降水)
3	施工锁口圈梁
4	开挖第 1 层土体(第 2 次降水)
5	施作第 1 道衬砌
6	架设第 1 道钢支撑
7	开挖第 2 层土体
...	...
19	开挖第 6 层土体(第 4 次降水)
20	施作第 6 道衬砌
21	架设第 6 道钢支撑

图 5 可知,模拟结果与监测结果差值在-0.3~4m 范围内波动,且随着降水的进行,误差逐渐增大。结合现场实际施工条件分析认为,施工中降水井在饱和 Q_2 软塑黄土层会出现“泥塞”现象,导致水泵出水不连续;同时数值模拟未能考虑地下水径流、大气降水及相邻水源补给等因素,使得模拟值较监测值偏大。但两曲线变化趋势基本一致,可认为数值模拟结果较为准确。

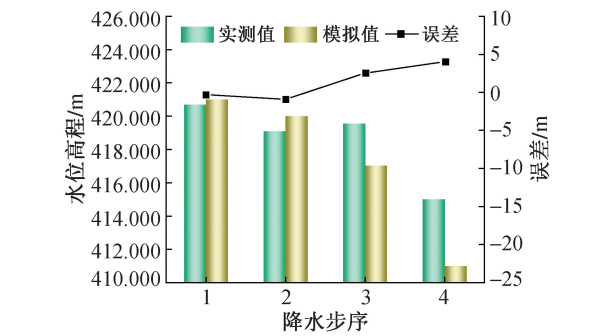


图 5 水位变化监测值与模拟值对比

Fig. 5 Comparison of monitored and simulated water level changes

2.2.2 地表沉降特征

坑外地表沉降分布曲线如图 6 所示。可以看出,地表沉降监测值与模拟值吻合度较好,部分存在偏差。靠近基坑的测点沉降值整体为模拟值偏大,远离基坑则相反。经分析,主要原因包括:监测点数量有限且监测结果具有一定离散性;数值模型对支护结构中锁脚锚杆进行了简化;为明晰地下水下降对饱和软黄土地层的影响,模型增加了地下水的降深,使得降水影响范围内饱和软黄土层的孔隙水压力降低,其自身所具有的大孔隙特征导致土层在降水固结过程中产生较大的沉降量。上述误差在可接受范围之内。

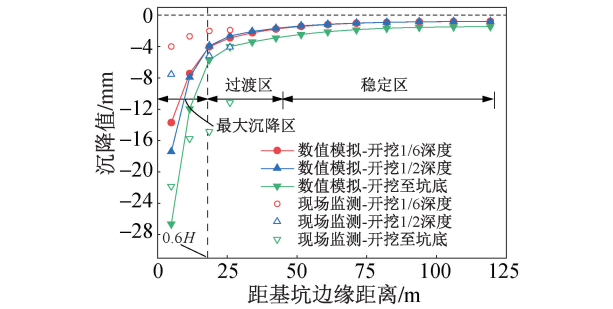


图 6 坑周地表沉降监测值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison of monitored and simulated values of ground surface subsidence around the foundation excavation

3 地表沉降影响因素参数分析

深基坑开挖变形受地质条件、支护参数的影响较大。因此,从竖井深基坑土体条件和支护参数等因素出发,研究土体渗透系数、地下水埋深、单次开挖深度、钢支撑型号及布设间距对地表沉降的影响,以期为类似竖井深基坑设计提供参考。

3.1 土体渗透系数

土体渗透系数与土体固结系数、饱和水排放速率和降水速率等因素密切相关。为分析土体渗透

系数对地表沉降的影响,以竖井开挖范围内各土层原土体渗透系数为基准,选择 0.5 倍、1 倍、2 倍、3 倍、4 倍各土体渗透系数进行数值模拟,得到渗透系数对地表沉降的作用规律如图 7 所示。不同渗透系数下土体最大沉降值如表 6 所示。

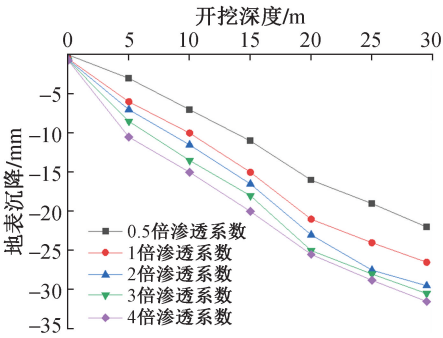


图 7 渗透系数对地表沉降变形的影响曲线

Fig. 7 Curves of the impact of permeability coefficient on surface settlement deformation

表 6 不同渗透系数下土体最大沉降值					
Table 6 Maximum settlement values of soil under different permeability coefficients					
项目	渗透系数与原值比值				
	0.5	1	2	3	4
最大沉降量/mm	-22.0	-26.5	-29.5	-30.5	-31.1
地表最大沉降较 0.5 倍渗透系数的增幅/%	—	20.5	34.1	38.6	41.4
地表沉降较前倍渗透系数的增幅/%	—	—	13.6	4.5	2.8

由图 7 和表 6 可知,在饱和软黄土区,随着竖井深基坑开挖深度的增大,地表沉降不断增加,且地表沉降速率呈先大后小的变化趋势。同一开挖深度条件下,土体渗透系数越大,地表沉降量越大。渗透系数与原渗透系数的比值依次为 0.5,1,2,3,4 时,地表最大沉降量分别为-22.0,-26.5,-29.5,-30.5,-31.1mm。地表沉降较 0.5 倍渗透系数的增幅依次为 20.5%,34.1%,38.6%,41.4%,增幅依次为 13.6%,4.5%,2.8%。

结果说明,地表沉降随渗透系数的增加而增加,但地表沉降速率随渗透系数的增加而减小。当土体渗透系数达到一定值时,土体的沉降增量减小,土体最大沉降趋于稳定。上述分析表明,降水施工后施作止水帷幕以减少施工区土体渗流系数,能够有效减少地表沉降,但也说明降水施工减少土层渗透系数对限制地表沉降的能力有限,需要结合其他措施共同减少竖井深基坑开挖引起的沉降,确保竖井施工安全。分析认为,饱和软黄土由于形成

年代近,土体未能完全压实,降水施工后能恢复部分强度,但由于水的浸泡已丧失较多土体强度,因此降水施工对地表沉降的控制效果有限。

3.2 地下水埋深的影响

对于具体工程而言,地下水的埋深决定了工程降水深度,地下水位埋深越浅则降水量越大。由降水施工引起的地表沉降分析可知,竖井降水时土颗粒间的水排出,土体有效应力增大,土体发生固结变形导致土层产生沉降。

为得到地下水埋深对地表沉降变形的影响规律,在原有限元模型 5m 地下水位埋深的基础上,研究地下水位埋深 10,15,20,25,30m 时的地表沉降规律。不同地下水埋深条件下地表沉降曲线如图 8 所示,不同地下水埋深下地表最大沉降量如表 7 所示。

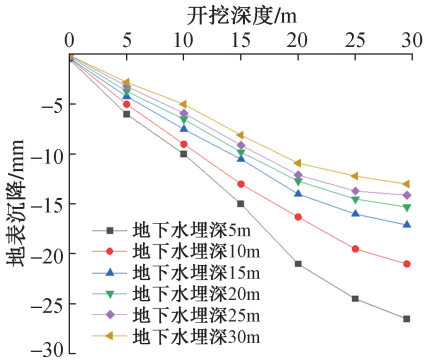


图 8 地下水不同埋深条件下地表沉降曲线

Fig. 8 Surface subsidence curves under different groundwater depths

表 7 不同地下水埋深下地表最大沉降量						
Table 7 Maximum surface subsidence under different groundwater depths						
项目	地下水埋深/m					
	5	10	15	20	25	30
最大沉降量/mm	-26.5	-21.0	-17.1	-15.3	-14.1	-13.0
地表最大沉降较地下水埋深 5m 时降幅/%	—	20.8	35.5	42.3	46.8	50.9
地表最大沉降较前地下水埋深降幅/%	—	—	14.7	6.8	4.5	4.1

由图 8 和表 7 可知,竖井地下水埋深在 5,10,15,20,25,30m 时,地表最大沉降值分别为-26.5,-21.0,-17.1,-15.3,-14.1,-13.0mm。地表沉降较地下水埋深 5m 时降幅依次为 20.8%,35.5%,42.3%,46.8%,50.9%,地表最大沉降较前地下水埋深降幅分别为 14.7%,6.8%,4.5%,4.1%。

以上分析表明地表最大沉降随地下水埋深的增大而减小。分析原因认为,降水对于地表沉降的

影响是一个累积量,随着地下水埋深的增大,降水深度减小,土体总的有效应力叠加量减小,降水对地表沉降的影响范围减小,因此地下水埋深对地表沉降的影响逐渐减弱。

3.3 单次开挖深度的影响

竖井施工时,单次开挖深度会影响地层变形量。若单次开挖深度过小会影响开挖进度,延长施工工期;若单次开挖深度过大,且支护不及时,则会加重基坑开挖引起的环境扰动,增加地表沉降量。本文在原有模型的基础上,设置竖井单次开挖深度分别为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0m,分析 6 种工况下竖井开挖对地表沉降的作用效应。竖井单次开挖深度对地表沉降变形影响曲线如图 9 所示,不同单次开挖深度下地表最大沉降量如表 8 所示。

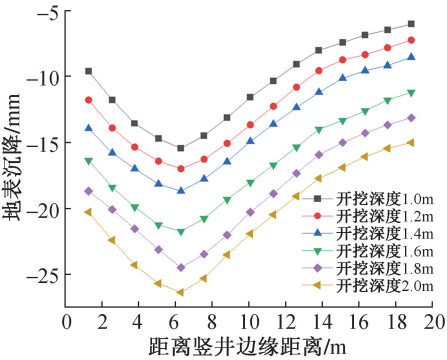


图 9 竖井单次开挖深度对地表沉降变形影响曲线
Fig. 9 Curves of the impact of single excavation depth of shaft on surface settlement deformation

表 8 不同单次开挖深度下地表最大沉降量

Table 8 Maximum ground surface settlement under different single excavation depths						
竖井单次开挖深度/m	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
地表最大沉降量/mm	-15.5	-17.0	-18.7	-21.9	-24.5	-26.4

由图 9 和表 8 可知,竖井单次开挖深度为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0m 时,地表最大沉降量分别为 -15.5、-17.0、-18.7、-21.9、-24.5、-26.4mm。随着竖井开挖深度的增加,地表沉降量随距离基坑边缘距离的增加呈先增大后减小的趋势。分析认为,竖井横向支护和竖向支护体系在基坑周边减小了地表沉降量,而向外延伸时基坑支护作用逐渐减小,地表沉降达到最大,再向外时基坑对地表的扰动减小,因此地表沉降逐渐减小。

综合上述分析,竖井单次开挖深度在 1.4m 时,地表最大沉降量为 -18.7mm;当开挖深度达到 1.6m 时,地表最大沉降量超过 -20mm,施工风险显著增大。因此,在基坑开挖时,竖井单次开挖深度宜控

制在 1.4m 左右,以实现沉降控制与施工进度的良好协调。

3.4 钢支撑型号的影响

由前述分析可知,竖井支护体系能够有效抵抗竖井开挖时产生的环境扰动。本工程水平支撑采用钢支撑以抵抗地表水平和沉降变形。为进一步分析钢支撑对地表变形的控制效果,在原数值模型的基础上,选择 I16、I18、I20a 和 I22a 4 种不同型号的工字钢支撑,分析不同型号钢支撑作用下地表变形规律,如图 10、表 9 所示。

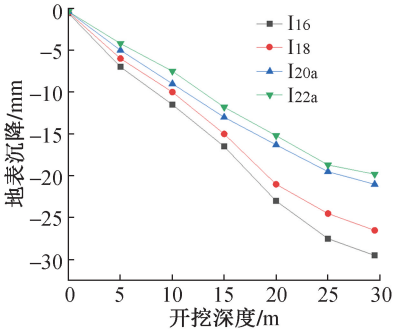


图 10 不同型号钢支撑地表沉降曲线
Fig. 10 Surface subsidence curves under different steel supports models

表 9 不同型号钢支撑地表最大沉降量

Table 9 Maximum ground surface settlement under different steel support models				
钢支撑型号	I16	I18	I20a	I22a
地表最大沉降量/mm	-29.1	-26.8	-21.9	-17.3

由图 10 和表 9 可知,采用 I16、I18、I20a 和 I22a 4 种型号的钢支撑时,地表最大沉降分别为 -29.1、-26.8、-21.9、-17.3mm。随着钢支撑工字钢型号的增大,地表最大沉降量逐渐减小。对比分析 I20a 和 I22a 两种型号下的地表沉降变形可知,钢支撑型号增大对地表最大沉降变形的控制效果有限。虽然增大工字钢型号能够减小竖井开挖应力释放引起的地表沉降变形,但继续增大型号对沉降控制的效果逐渐减弱,而施工成本会显著增加。综合考虑支护效果和施工经济性,本工程选择 I20a 进行支护较为合理。

3.5 钢支撑布设间距的影响

钢支撑能够有效控制基坑沉降变形,除钢支撑型号外,支撑布置间距对地表沉降控制也具有显著影响。为进一步分析钢支撑布设间距对地表沉降变形的控制作用,在钢支撑型号为 I20a 的条件下,调整钢支撑布置间距依次为 0.6、0.8、1.0、1.2m,分析上述条件下不同钢支撑布设间距下地表沉降规

律,如图 11、表 10 所示。

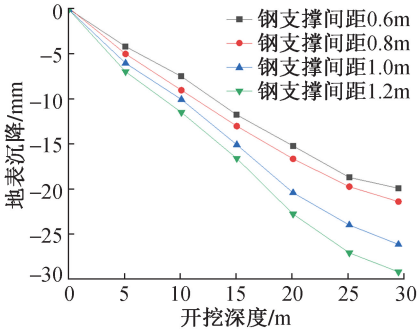


图 11 钢支撑不同布设间距下地表沉降曲线

Fig. 11 Ground surface settlement curves under different steel support spacing arrangements

表 10 不同钢支撑布设间距下地表最大沉降量

Table 10 Maximum ground surface settlement under different steel support spacing arrangements

钢支撑布设间距/m	0.6	0.8	1.0	1.2
地表最大沉降量/mm	-19.9	-21.4	-26.1	-29.2

由图 11 和表 10 可知,随着钢支撑布设间距的减小,地表最大沉降量也不断减小。钢支撑间距为 0.6、0.8、1.0、1.2m 时,地表最大沉降分别为-19.9、-21.4、-26.1、-29.2mm。对比各钢支撑布设间距下的沉降曲线趋势可知,加密钢支撑对地表沉降控制效果有限。相较于钢支撑布设间距为 1.2m 时的地表沉降量,布设间距为 1.0、0.8、0.6m 时地表沉降量分别减小 10.6%、26.7%、31.8%。在一定范围内减小钢支撑布设间距可以有效控制地表沉降,但随着钢支撑间距的进一步减小,钢支撑材料的购置费用和架设费用会显著增加。综合考虑支护效果和经济性,本工程推荐采用 0.8m 的布设间距。

3.6 降水速率的影响

参考同类工程经验及现场降水方案,保持总降水深度相同,设置 0.5、1.0、1.5、2.0m/d 4 种降水速率工况。研究降水速率对沉降发展过程及最终沉降量影响。不同降水速率下地表沉降历时曲线如图 12 所示,不同降水速率下沉降特征参数如表 11 所示。

由图 12 和表 11 分析可知,降水速率从 0.5m/d 增至 2.0m/d 时,地表沉降达到 80% 最终值的时间由 42d 缩短至 18d,沉降发展速率显著加快。说明降水速率越快,土体内孔隙水压力消散越快,固结压缩在更短时间内完成。4 种速率下最终沉降量分别为 -14.2、-15.1、-15.8、-16.3mm, 高速率 (2.0m/d) 较低速率 (0.5m/d) 沉降量增大约 15%。

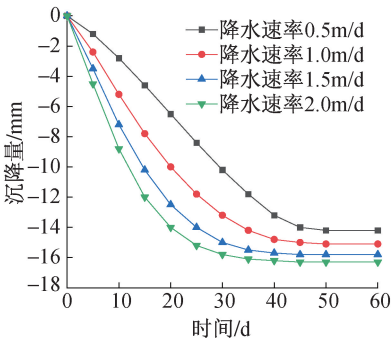


图 12 不同降水速率下地表沉降历时曲线

Fig. 12 The duration curve of surface subsidence under different precipitation rates

表 11 不同降水速率下沉降特征参数

Table 11 Settlement characteristic parameters under different precipitation rates

降水速率/ (m·d ⁻¹)	达到 80% 最终 沉降时间/d	最终沉 降量/mm	沉降槽宽度 (距坑边)/m
0.5	42	-14.2	25
1.0	28	-15.1	27
1.5	22	-15.8	30
2.0	18	-16.3	35

分析认为:降水速率过快时,土体内产生较大的水力梯度,渗流力引起的附加应力增大,同时土体大孔隙结构在快速失水过程中发生更显著的压缩变形。高速率降水导致沉降槽宽度由约 25m 扩展至约 35m。这在实际工程中可能对坑外较远处的建(构)筑物产生不利影响。

综合上述参数分析结果,各因素对地表沉降的影响程度存在明显差异。从影响幅度来看,土体渗透系数和地下水埋深属于地质条件类因素,其变化对地表沉降的影响较为显著,且难以通过工程措施大幅调整;单次开挖深度、钢支撑型号、布设间距及降水速率属于施工与设计参数,可通过优化施工方案进行合理控制。实际工程中,应根据具体地质条件,优先优化可控参数,在保证施工安全的前提下兼顾经济性。

4 结语

本文以西安某地铁车站竖井深基坑工程为背景,基于现场监测数据与流固耦合数值模拟,系统分析了饱和软黄土深基坑降水开挖施工的地表变形特性,并开展了土体渗透系数、地下水埋深、单次开挖深度、钢支撑型号及布设间距等因素对地表沉降影响的参数分析,得到以下主要结论。

1) 饱和软黄土深基坑降水开挖引起的地表沉降历时曲线可划分为 4 个阶段:开挖初期的卸荷隆起、降水施工期的固结沉降、开挖完成后的变形稳

定及水位回升期的回弹。其中,降水施工期是沉降发展的主要阶段,土体渗透系数与地下水埋深等地质条件因素对沉降幅度影响显著,虽然施作止水帷幕等措施可降低土体渗透系数并减小沉降,但受饱和和软黄土自身强度恢复能力有限的影响,仅依靠控制渗透系数难以完全抑制沉降。

2)流固耦合数值模拟结果与现场监测数据吻合较好。参数分析表明:地表沉降随土体渗透系数增大而增大,但增幅逐渐趋缓,随地下水埋深增大而减小;单次开挖深度超过 1.4m 时沉降风险显著增大。建议饱和软黄土地区竖井单次开挖深度控制在 1.4m 左右。

3)钢支撑型号和布设间距对地表沉降具有控制效果,但存在经济性边界。综合考虑支护效果与成本,推荐采用 I20a 及 0.8m 布设间距;实际工程中应优先优化可控参数,在保证施工安全的前提下兼顾经济性。

参考文献:

[1] 孙仁祥,何如,万成,等. 富水砂层异形深基坑监测与变形分析[J]. 科学技术与工程,2026,26(3):1222-1230.
SUN R X, HE R, WAN C, et al. Monitoring and deformation analysis of shaped deep foundation pit in water-rich sand layer [J]. Science technology and engineering, 2026, 26 (3): 1222-1230.

[2] 惠小锋,李发雄. 某地铁车站超深基坑开挖对周边环境的影响分析[J]. 兰州理工大学学报,2026,52(1):149-157.
HUI X F, LI F X. Influence analysis of the ultra-deep foundation pit excavation on the surrounding environment based on a metro station[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2026, 52 (1): 149-157.

[3] 李世雄,张登飞,张小辉,等. 饱和软黄土力学特性的应力路径依存特性及其模拟[J]. 太原理工大学学报,2025,56(5):964-975.
LI S X, ZHANG D F, ZHANG X H, et al. Stress path dependence of mechanical properties of saturated soft loess and its simulation [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2025, 56 (5): 964-975.

[4] 康佐,魏琪. 西安饱和软黄土隧道变形控制及其适用性[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(9):40-45.
KANG Z, WEI Q. Deformation control and applicability of Xi'an saturated soft loess tunnel[J]. Urban mass transit, 2023, 26 (9): 40-45.

[5] 孙阳军,贾飞,李伟杰,等. 既有转弯区隧道双侧超大深基坑开挖变形规律分析[J]. 工业建筑,2025,55(11):195-203.
SUN Y J, JIA F, LI W J, et al. Analysis on deformation law of double side extra large deep foundation pit excavation in existing turning area tunnels[J]. Industrial construction, 2025, 55 (11): 195-203.

[6] 李元勋,石佳根,马川,等. 考虑降雪影响的桩锚支护深基坑变位特性[J]. 科学技术与工程,2025,25(20):8624-8631.
LI Y X, SHI J G, MA C, et al. Displacement characteristics of

deep foundation pit with pile-anchor support considering snowfall [J]. Science technology and engineering, 2025, 25 (20): 8624-8631.

[7] 郭浩天,张浩民,赵环宇. 黄土状粉土地层基坑开挖对周边场地变形的影响[J]. 水利与建筑工程学报,2025,23(3):19-25,77.
GUO H T, ZHANG H M, ZHAO H Y. Influence of foundation pit excavation support on the surrounding environment of loess-like silty soil layer [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2025, 23 (3): 19-25, 77.

[8] 秦杏春. 饱和软黄土地层深基坑支护与降水施工技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(13):115-119.
QIN X C. Construction technology of deep foundation excavation support and dewatering in saturated soft loess stratum [J]. Construction technology, 2024, 53 (13): 115-119.

[9] 何彦伟,黄杰. 饱和软黄土地区深基坑支护施工技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(8):97-102.
HE Y W, HUANG J. Construction technology of deep foundation excavation support in saturated soft loess low area [J]. Construction technology, 2025, 54 (8): 97-102.

[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 Z Q. 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] 张凤鸣,王晓华,贾文彪. 西安地铁车站地下连续墙深基坑开挖变形分析[J]. 工业安全与环保,2022,48(11):27-32.
ZHANG F M, WANG X H, JIA W B. Analysis on the excavation deformation of the deep foundation pit of diaphragm wall in Xi'an metro station[J]. Industrial safety and environmental protection, 2022, 48 (11): 27-32.

[12] MEI Y, KE X, ZHOU D B, et al. Surface settlement analysis of deep pit in soft plastic loess under fluid-solid coupling [J]. Proceedings of the institution of civil engineers, 2026, 179 (1): 43-53.

(上接第 78 页)

[6] 王文灿,仲晓梅,詹学智. 软土地区深基坑逆作法施工下立柱的竖向位移分析[J]. 建筑结构,2010,40(3):49-51.
WANG W C, ZHONG X M, ZHAN X Z. Analysis on vertical displacement of pillars under top-down construction method in soft-soil area[J]. Building structure, 2010, 40 (3): 49-51.

[7] 郑刚,张涛,程雪松,等. 天津地铁车站基坑立柱回弹的实测统计分析[J]. 岩土力学,2017,38(S1):387-394.
ZHENG G, ZHANG T, CHENG X S, et al. Statistical analysis of measured data of center post upheaval in metro station excavations in Tianjin [J]. Rock and soil mechanics, 2017, 38 (S1): 387-394.

[8] 冯虎,高丹盈,徐春蕾. 立柱隆起对深基坑钢支撑受力特性的影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(4):926-932.
FENG H, GAO D Y, XU C L. Analyzing about the impact of column uplift on the loading performance of the foundation pit steel support [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2014, 10 (4): 926-932.