

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.130

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



隔水帷幕对深基坑降水开挖变形控制的影响

陈凌铜¹, 朱丹², 杨超³, 曾怡婷⁴, 徐长节^{4,5}

- (1. 杭州市水务集团有限公司, 杭州 310009; 2. 杭州市钱江新城建设开发有限公司, 杭州 310020;
3. 杭州市市政设施监管中心, 杭州 310003; 4. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058;
5. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013)

摘要: 依托杭州沿江大道地下综合管廊深基坑工程, 土体采用 HSS 模型进行有限元数值模拟, 分析基坑降水开挖下基坑及邻近管线的变形, 模拟结果与监测结果吻合较好, 验证了有限元计算模型和参数选取的合理性。基于模拟提出隔断式基坑降水优化方案, 并研究稳态渗流下隔水帷幕插入深度不同时基坑及邻近管线的变形响应。结果表明: 随着悬挂式隔水帷幕深度加深, 坑内外水头差线性增大, 围护结构侧移峰值线性增大, 管线竖向位移、坑外地表沉降线性减小; 相较于悬挂式隔水帷幕, 隔断式隔水帷幕对控制基坑降水引起的坑外地表沉降及邻近管线变形均有着显著优势, 但对于围护结构变形控制则不利。

关键词: 降水开挖; 隔水帷幕; 基坑变形; 渗流; HSS 模型

中图分类号: TU46 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0024-09

Influence of waterproof curtain on deformation control of deep foundation pit dewatering and excavation

CHEN Lingtong¹, ZHU Dan², YANG Chao³, ZENG Yiting⁴, XU Changjie^{4,5}

- (1. Hangzhou Water Holding Group Co., Ltd., Hangzhou 310009, P. R. China; 2. Hangzhou CBD Construction Development Co., Ltd., Hangzhou 310020, P. R. China; 3. Hangzhou Municipal Facilities Supervision Center, Hangzhou 310003, P. R. China; 4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China; 5. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: Based on the deep foundation pit project of the utility tunnel of Yanjiang Avenue in Hangzhou, the HSS model was used for finite element numerical simulation to analyze the deformation of the foundation pit and adjacent pipelines under the dewatering excavation of the foundation pit. The simulation

收稿日期: 2020-06-11

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51725802); 国家自然科学基金(51878276); 浙江省自然科学基金委员会-华东院联合基金(LHZ19E080001); 国家自然科学基金-高铁联合基金(U1934208)

作者简介: 陈凌铜(1987-), 男, 主要从事水务排水及市政基础设施研究, E-mail: 252362747@qq.com。

徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: xucj@zju.edu.cn。

Received: 2020-06-11

Foundation items: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); National Natural Science Foundation of China (No. 51878276); Zhejiang Province Natural Science Fund Committee- East China Mutual Funds (No. LHZ19E080001); National Natural Science Foundation of China-High Speed Railway Joint Fund (No. U1934208)

Author brief: CHEN Lingtong (1987-), main research interests: water drainage and municipal infrastructure construction project management, E-mail: 252362747@qq.com.

XU Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: xucj@zju.edu.cn.

results are in good agreement with the monitoring results, which verifies the rationality of the finite element calculation and parameter selection. Based on the results, an optimized plan for dewatering of the partitioned foundation pit has been proposed, and the deformation response of the foundation pit and adjacent pipelines was studied when the penetration depth of the water-insulating curtain was different under steady-state seepage. The research results show that as the depth of the suspended waterproof curtain increases, the head difference of ground water between the inside and outside of the pit and the peak value of the lateral displacement of the retaining structure increases linearly, and the vertical displacement of the pipeline and the surface settlement outside the pit decrease linearly; Compared with the suspended waterproof curtain, the waterproof curtain has significant advantages in controlling the surface settlement outside the pit and the deformation of adjacent pipelines, however it is more unfavorable for the deformation control of the retaining structure.

Keywords: foundation pit excavation and dewatering; waterproof curtain; foundation pit deformation; seepage; HSS model

随着城市地下空间开发利用规模不断扩大,深基坑工程与既有建(构)筑物邻近的情况越发常见,基坑变形控制要求更加严格,工程降水对周边环境的影响也越来越得到重视,因此,基坑及周边环境变形控制研究在深基坑降水及开挖工程中具有重要意义。

徐长节等^[1]运用 PLAXIS 就某基坑施工对邻近隧道的影响及变性控制方法进行了数值研究。陈志伟等^[2]通过模拟分析了紧邻既有地铁隧道的深基坑开挖和降水的渗流场及变形。张治国等^[3]研究了基坑降水及加固等施工措施对基坑开挖过程中地下连续墙水平侧移、坑外地层以及隧道变形的影响规律。谢康和等^[4]和施成华等^[5]推导了考虑渗流作用的基坑降水地表沉降计算公式。周念清等^[6-7]模拟降水期间基坑内外地下水位分布,并研究了地连墙深度对地表沉降的控制作用。张军等^[8]模拟了地连墙墙体厚度不同时的受力和变形特点。Zeng 等^[9-10]基于工程实测及有限元模拟研究了开挖前群井预降水问题,分析了基坑宽度、降水深度等因素对支护墙及周边环境变形的影响规律。Goh 等^[11]通过有限元分析研究了地下水下降作用下影响地基沉降性能的关键参数,并开发人工神经网络模型估计最大地面沉降。周勇等^[12]和李大勇等^[13]对深基坑降水开挖下邻近地下管线的变形进行了数值模拟研究。何绍衡等^[14]建立三维流固耦合模型分析开挖前预降水深度、止水帷幕深度对基坑变形性状的影响。

对于存在邻近管线的基坑降水开挖这一复杂情况,往往采用隔断式基坑降水,隔水帷幕深入不透水

层隔断基坑内外水力联系,但如果地下含水层深厚,由于造价和技术的限制隔水帷幕很难隔断含水层,此时将采用悬挂式隔水帷幕。悬挂式隔水帷幕降水需要考虑坑外水位及地下水渗流作用,现有相关研究仍有待完善。笔者基于邻近既有超大直径污水管线的杭州沿江大道地下综合管廊深基坑工程进行数值模拟分析,提出隔断式基坑降水开挖施工优化方案,并进一步模拟分析了稳态渗流情况下不同隔水帷幕深度的基坑和管线变形规律,可为相似工程的变形控制提供参考。

1 工程概况及模型建立

1.1 工程概况

杭州沿江大道地下综合管廊深基坑工程开挖长度约 3 650 m,一般段基坑开挖宽度 10.3~10.7 m,开挖深度 5.0~16 m,基坑等级为一级。如图 1 所示,基坑附近有 2 根型号 D2400 的预应力钢筒混凝土污水管,需严格控制变形。污水管线埋深 6.4~9 m,与基坑边缘净距约 4.0 m。

场地地处钱塘江冲海积平原,场地地面标高一般 6.50~12.50 m,地下水位平均标高为 4.93 m。基坑涉及土层以杂填土、粉土、粉砂层为主,土体具有高压缩性且部分土层缺失,渗透性好,含水层厚度为 20.0~26.4 m。隔水帷幕进入下部不透水层,采用隔断式基坑降水方法,以减小基坑外地下水,降低对周边环境变形影响。

基坑标准段围护结构主要采用钻孔灌注桩结合三轴水泥搅拌桩止水,本文模拟研究断面选取 $\phi 1\ 000$ mm 钻孔灌注桩围护段,基坑支护横剖面如

图 1 所示。冠梁顶标高 8.3 m, 地下水位标高 5.4 m, 基坑开挖深度为 9 m, 宽度为 10.7 m, 围护结构采用 $\phi 1\ 000 @ 1\ 200$ 钻孔桩, 围护桩长 26 m, 三轴水泥搅拌桩隔水帷幕深入 $\textcircled{6}_1$ 层不透水层超过 2 m。内支撑采用 1 道 $800\ \text{mm} \times 800\ \text{mm} @ 8\ 000$ 钢筋混凝土支撑, 结合 2 道 $\phi 609 \times 16 @ 4\ 000$ 钢管支撑, 第 2、3 道钢支撑分别施加 1 000、800 kN 预应力。基坑坑底两侧 3 m 裙边进行三轴水泥搅拌桩土体加固, 加固深

度为 3 m, 坑底加固与围护桩间隙采用高压旋喷桩注浆。两根既有污水管线位于基坑以南, 走向与基坑基本平行, 外径 2.76 m, 厚度 0.18 m, 管线中心埋深约 6.5 m, 管道中心距为 3.5 m, 管道与基坑净距 4.0 m。坑内降水采用 $\phi 800\ \text{mm}$ 管井, 管井间距 10~15 m, 之字型交错布置, 施工期间地下水位控制在基坑底以下 0.5 m。

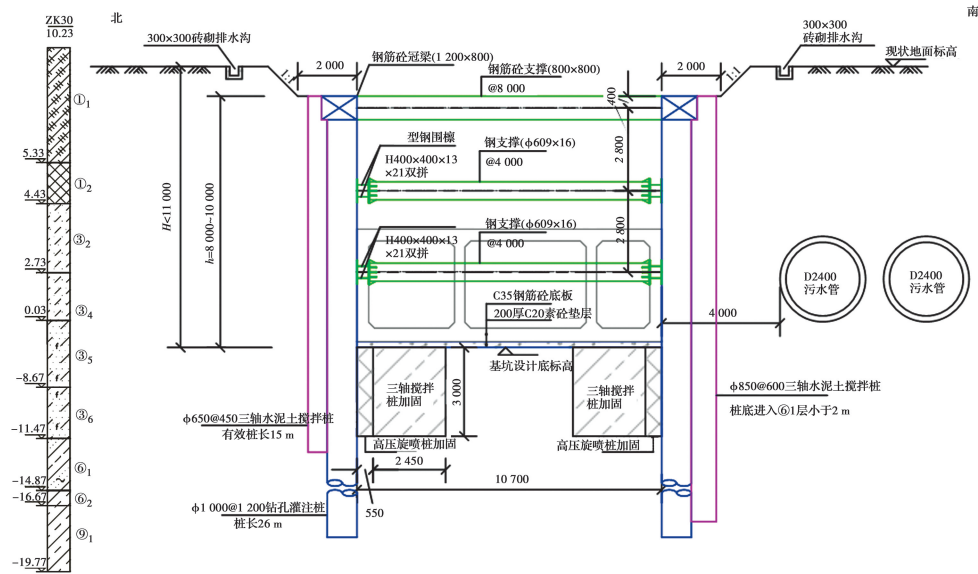


图 1 基坑支护横剖面图

Fig. 1 Profile of retaining structure of foundation pit

1.2 有限元模型尺寸及参数

工程属狭长型基坑, 基坑纵向开挖长度平行于管线方向, 且大于 9 倍的开挖深度, 基坑-管线相互作用达到平面应变状态^[15], 可简化为平面应变问题进行分析, 故采用 PLAXIS 2D 建模分析计算, 土体模型选取 HSS 模型(小应变土体硬化模型)。HSS 模型考虑了土体在加载→卸载→再加载应力路径下刚度的不同, 以及小应变状态下的刚度变化, 适用于敏感环境下土体开挖及挡墙变形控制、隧道建设等问题的分析研究^[16]。为减小边界条件对模拟的影响, 模型水平边界至基坑边缘距离取 5 倍基坑开挖深度, 且该距离超过基坑降水影响半径, 模型深度取 5 倍开挖深度, 所以, 模型尺寸为 $120\ \text{m} \times 50\ \text{m}$, 模型示意图如图 2 所示。模型采用标准固定边界, 即顶面自由, 侧面设置水平约束, 底面设置固定约束。水力边界设置为底部闭合, 左右边界设置为渗流边界。

根据工程地质勘察报告, 并结合已有工程模拟及试验经验^[17-18], 模型土层参数取值如表 1 所示。

γ_{sat} 由式 $\gamma_{\text{sat}} = \gamma_w \frac{e}{1+e} + \frac{\gamma}{1+w}$ 计算得到, 其中 w 为含水率, e 为孔隙比, γ_w 为水重度。 G_0^{ref} 由式 $G_0^{ref} = \rho V_s^2$ 确定, 其中 ρ 为土体密度, V_s 为现场波速测试结果。本文取割线模量减小到 70% 初始值时的剪切应变水平 $\gamma_{0.7} = 0.000\ 2$, 但对于黏土层, 取 $\gamma_{0.7} = 0.000\ 3$ 。其他参数取建议值^[19]: 取卸载-再加载泊松比 $\nu_{ur} = 0.2$, 静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin \phi'$, 破坏比 $R_f = 0.9$, 剪胀角 ψ 取默认值 0。加固区土体采用摩尔库伦模型, 仅考虑加固对土体模量和强度的提升, 不考虑加固区对渗透系数的影响, 加固区模量为初始模量的 3 倍。

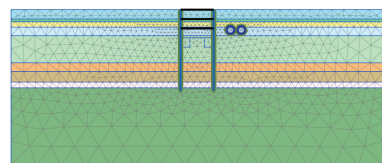


图 2 模型示意图

Fig. 2 Finite element model diagram

表 1 模型土层参数表
Table 1 Soil parameters of model

土层编号	土层名称	深度/m	$\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\gamma_{\text{sat}}/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$E_{\text{st}}^{\text{ref}}/$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/$ kPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/$ kPa	m	$G_0^{\text{ref}}/$ kPa	$c/$ kPa	$\phi/$ ($^{\circ}$)	$k_v/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	$k_h/$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
① ₁	杂填土	0~3.0	18.5	18.5	5 000	5 000	15 000	0.7	56 000	5	10	4.320	4.320
① ₂	素填土	3.0~3.9	18	18	8 000	8 000	24 000	0.7	50 200	5	12	4.320	4.320
③ ₂	砂质粉土	3.9~5.6	19.2	19.3	10 500	10 500	31 500	0.6	80 700	5	26.5	0.259	0.291
③ ₄	砂质粉土	5.6~8.3	19.1	19.2	9 500	9 500	28 500	0.6	95 800	5.5	24	0.288	0.320
③ ₅	粉土夹粉砂	8.3~17.0	19.5	19.6	11 000	11 000	33 000	0.6	107 700	4.7	27	0.299	0.329
③ ₆	粉砂夹粉土	17.0~19.8	19.6	19.7	13 100	13 100	39 300	0.6	98 300	3.5	28.1	0.372	0.409
⑥ ₁	淤泥质粉质黏土夹粉土	19.8~23.2	18.6	18.6	4 500	6 500	11 700	1	49 400	14.8	10.1		
⑥ ₂	淤泥质粉质黏土	23.2~25.0	18	18.1	5 000	6 400	10 500	1	47 200	16.4	8.7		
⑨ ₁	粉质黏土	25.0~50.0	19.9	20	7 600	7 600	22 800	0.8	166 200	37.7	14.6		
	加固区	9~12	20	20						150	40	0.299	0.329

注: γ 为土体自然重度; γ_{sat} 为土体饱和重度; $E_{\text{st}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 G_0^{ref} 分别为对应于参考围压 p^{ref} 的割线模量、固结试验切线模量、卸载-再加载模量、小应变初始剪切模量; m 为反应模量与应力水平相关程度的幂指数; c 为有效黏聚力; ϕ 为有效内摩擦角; k_v 、 k_h 分别为竖向和水平向渗透系数。

土体采用 15 节点三角形平面应变单元模拟,钻孔灌注桩围护结构采用板单元模拟,桩与土体间采用界面单元模拟,隔水帷幕通过设置界面单元透水性模拟其截水性能,内支撑采用锚定杆单元模拟,管道采用板单元模拟。具体参数如表 2、表 3 所示,钻

孔灌注桩按抗弯刚度相等的原则等效成一定厚度连续墙,由 $\frac{bt^3}{12} = \frac{\pi d^4}{64} / 1.2$ 计算得等效厚度 $t = 0.789$ m,其中 b 为地连墙长度,此处取每延米; d 为钻孔灌注桩直径。

表 2 围护结构及管线参数

Table 2 Parameters of foundation pit retaining structure and pipeline

材料名称	单元类型	材料类型	轴向刚度 EA/kN	抗弯刚度 EI/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	等效厚度 t/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	泊松比 ν
围护桩	板	弹性	1.96×10^7	1.23×10^6	0.789	25	0.15
污水管	板	弹性	5.40×10^6	1.46×10^4	0.180	25	0.15

表 3 支撑参数

Table 3 Parameters of foundation pit support

材料名称	单元类型	材料类型	轴向刚度 EA/kN	水平间距 L/m
钢筋混凝土支撑	锚定杆	弹性	1.92×10^7	8
钢支撑	锚定杆	弹性	5.96×10^6	4

模拟工况如表 4 所示,模拟步骤通过激活相应结构或者冻结相关土层实现。模拟不考虑由管线施工产生的变形,故生成既有管线后需进行位移清零,HSS 模型重置位移为零后,会重置模型中土体的应变历史张量,这将使得当前计算阶段重新计算应变。降水模拟可通过设置水头实现,地下水头控制在开挖面以下 0.5 m。算例隔水帷幕深入不透水层超过

2 m,完全切断坑内外的水力联系。通过将坑底 1 m 以上的土体设为干类组,并将坑底 1 m 以下土体水头设为-9.5 m,并将坑底不透水层⑥₁ 的水位设置为内插,以实现坑内降水。由于工程案例不涉及地下水渗流,孔压计算类型选用潜水位。

表 4 模拟施工工况

Table 4 Construction steps of excavation simulation

工况	模拟施工阶段
工况 0	初始地应力平衡,生成管线,位移清零
工况 1	施工钻孔灌注桩和隔水帷幕,坑底土体加固
工况 2	开挖至冠梁底-0.8 m 处
工况 3	坑内降水至-4.1 m
工况 4	施工第一道支撑,开挖至-3.6 m
工况 5	坑内降水至-6.9 m

续表 4

工况	模拟施工阶段
工况 6	施工第二道支撑,并施加预应力 1 000 kN,开挖 -6.4 m 处
工况 7	坑内降水至 -9.5 m
工况 8	施工第三道支撑,并施加预应力 800 kN,开挖 -9 m 处

2 模拟结果验证

为验证模型的可靠性和参数取值的合理性,将模拟结果与现场实测数据进行对比,图 3 所示为围护结构水平位移的模拟值与实测值,模拟得到的曲线与实测曲线基本吻合,且变形形式相同;14 m 以下深度监测值略小于模拟值,但二者差距小于 2 mm,且此处非危险截面,故误差影响可忽略。此外,模拟得到的管线 1、2 变形如图 4 所示,管线 1、2 竖向位移增量分别为 4.41、3.71 mm,管线 1、2 沉降监测的平均值分别为 4.02、3.60 mm,误差均在 10% 以内。此误差在合理范围内,可验证模型的合理性。

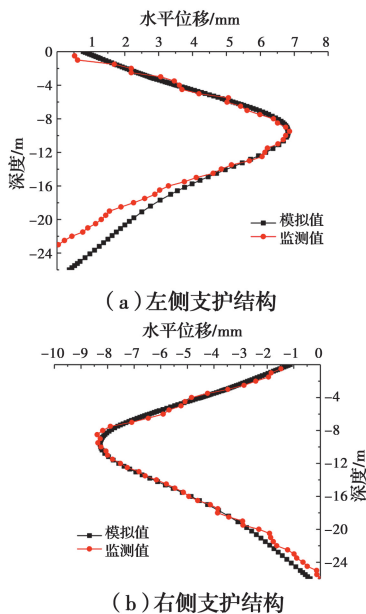


图 3 墙体水平位移模拟值与实测值比较

Fig. 3 Results comparison of retaining structure between numerical simulation and field measurement

3 隔断式基坑降水方案优化

由于隔水帷幕深入不透水层,切断了基坑内外水力联系,隔断式基坑仅需疏干坑内地下水即可。为了优化隔断式基坑降水方案,调整本工程施工工

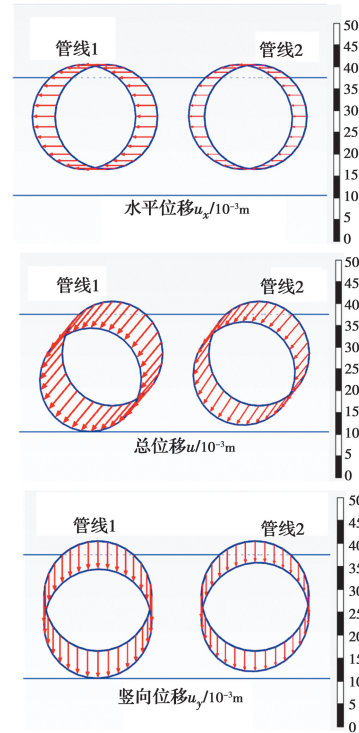


图 4 管线位移

Fig. 4 Pipeline displacement

况进行模拟,对比 3 种施工方案对工程的影响,分别为如表 4 所示的原方案:分级降水开挖;方案 1:先进行一次性坑内降水,再逐级开挖;方案 2:先加第一道支撑,再进行一次性降水,最后逐级开挖。

图 5、图 6 所示为各方案围护结构侧移和地表沉降,3 个方案围护结构变形和地表沉降形式相同,变形峰值所在位置相同;方案 1 围护结构侧移和地表沉降均大于原方案,方案 1 围护结构侧移峰值比原方案大 15.7%,地表沉降峰值比原方案大 23.1%;方案 2 围护结构侧移和地表沉降均与原方案几乎一致。此外,方案 1、2 管线总位移分别为原方案的 1.3 倍和 1 倍。可见隔断式基坑降水方案的差异对周边沉降控制及管线变形仍然具有较大影响,在降水作用下,围护结构由于坑内外的水头差受到侧向水压力,发生侧移,降水前先加支撑可由支撑和土体共同承担侧向水压力,减小开挖前降水的影响。故隔断式基坑降水可考虑先加第一道支撑,随后一次性疏干坑内地下水,再进行开挖的施工方案,既可以减小降水对基坑变形控制的不利影响,又能简化施工过程,节省工期,节约造价。

4 参数分析

为研究隔水帷幕深度对基坑降水开挖变形控制

的影响,分别设置隔水帷幕深度为 10、12、14、16、18 m,分析地下水渗流场,以及围护结构侧移、地表沉降、邻近管线变形响应规律。由于隔水帷幕未切断坑内外水力联系,降水及开挖阶段的孔压计算类型选用稳定渗流分析,通过设定坑内外水头设置基坑降水水力边界条件;通过激活不同深度挡墙界面在渗流分析中的活性,实现不同深度隔水帷幕的设置。

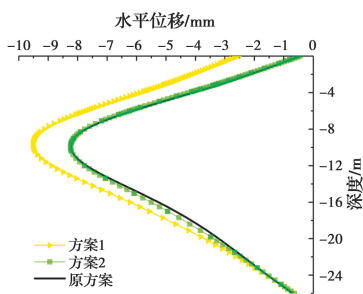


图 5 各方案围护结构水平位移

Fig. 5 Horizontal displacement of retaining structure in each scheme

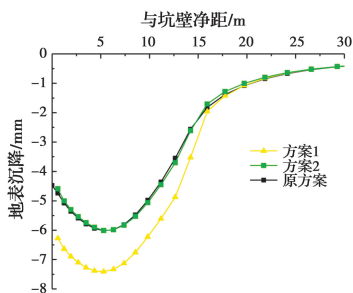


图 6 各方案地表沉降

Fig. 6 Surface settlement of each scheme

4.1 不同深度隔水帷幕稳态渗流场分析

图 7 所示为不同深度隔水帷幕对应稳态渗流场,由图可见流速最快处为坑角,水流在隔水帷幕底部会出现绕流,在管线处也可以观察到绕流现象,流速越大,绕流现象越明显。坑底水位埋深为 9.5 m, 10 m 深度隔水帷幕对坑底降水的坑外补给阻拦作用较小,坑外浅层地下水水平流向基坑,深层地下水斜向上流向基坑;当隔水帷幕深度增大,坑壁外侧地下水流向沿隔水帷幕向下,到了隔水帷幕以下区域,地下水流向基本水平。

4.2 不同深度隔水帷幕对工程变形影响分析

图 8 所示为不同深度隔水帷幕对应的基坑右侧围护结构变形,隔水帷幕深度对围护结构变形分布形式没有影响,但对变形的大小影响较大。隔水帷幕插入深度越深,对应的围护结构变形越大,10~18 m

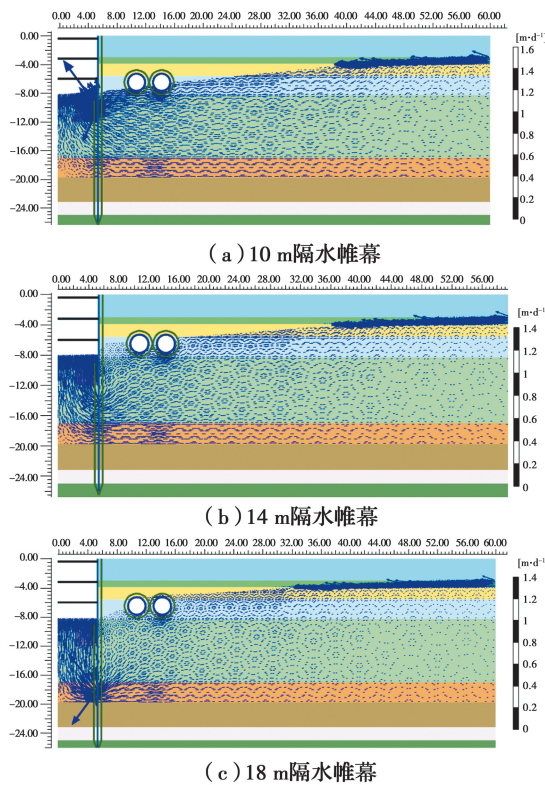


图 7 不同深度隔水帷幕对应渗流场

Fig. 7 Seepage field corresponding to different depths of waterproof curtain

隔水帷幕对应的围护结构变形峰值分别为隔断式隔水帷幕的 70.3%、73.9%、77.4%、81.3%、85.8%,可见,随着隔水帷幕深度加深,围护结构变形峰值基本呈等差增长。隔水帷幕设置越深,坑外水头变化越小,坑内外水头差越大,围护结构受到的侧向水压力越大,且在稳态渗流下围护结构还受到向坑内的渗流力;同时,由于围护结构外侧渗流场向下,土体受到向下的渗流力,重力增大,主动土压力增大,坑内受到向上的渗流力,重力减小,被动土压力减小,对围护结构变形更为不利。不同隔水帷幕深度对应的坑内外水头差如图 9 所示,将 12~18 m 深度隔水帷幕进行线性拟合得到图 9 中的表格, R^2 大于 0.99,可见,坑内外水头差随隔水帷幕加深呈线性减小。但当深度大于 18 m 后,水头差迅速增大,这是由于 20 m 以下为不透水层,当隔水帷幕接近隔水底板时,此线性规律将不再适用。

图 10 所示为不同深度隔水帷幕对应基坑右侧的坑外地表沉降,由图可见,隔水帷幕插入深度越大,地表沉降越小,沉降分布形式及峰值所在位置与隔断式基坑相同。10、18 m 隔水帷幕的地表沉降峰值分别比隔断式基坑大 86.7%、52.1%,这是由于

隔水帷幕深度越大,坑外水位变化越小,由降水引起的附加应力越小,土体沉降越小。虽然坑外地表沉降随着隔水帷幕加深得到有效控制,但在沉降控制要求严格的区域施工,还是选用隔断式隔水帷幕为优。

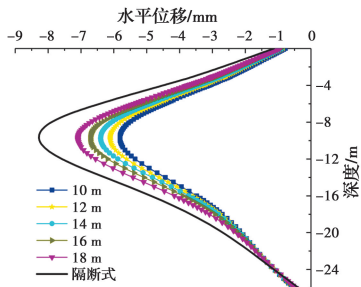


图 8 不同深度隔水帷幕对应围护结构水平位移
Fig. 8 Horizontal displacement of retaining structure corresponding to different depths of waterproof curtain

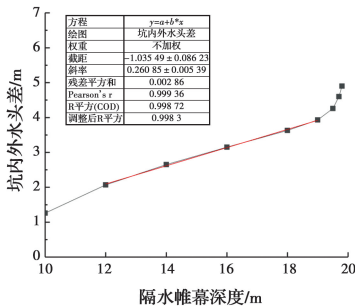


图 9 不同深度隔水帷幕对应坑内外水头差
Fig. 9 Water head difference between inside and outside of pit corresponding to different depths of waterproof curtain

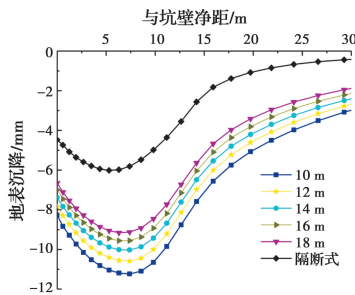


图 10 不同深度隔水帷幕对应地表沉降
Fig. 10 Surface settlement corresponding to different depths of waterproof curtain

图 11 所示为各项位移相对值随隔水帷幕深度变化, w 为不同深度隔水帷幕对应的位移, w_0 为隔断式隔水帷幕对应的位移,可见,各项位移随隔水帷幕深度变化趋势基本呈线性,线性拟合见表 5。各曲线的线性相关数接近于 ± 1 ,说明各项位移与隔水帷幕深度相关性很强,管线竖向位移和地表沉降与隔水帷幕深度呈负相关,其余两项位移与隔水帷幕

深度呈正相关;管线水平位移、地表沉降、围护结构位移拟合方程的 R^2 均大于 0.97,且调整后 R^2 与 R^2 差距小于 0.01,说明线性拟合度非常高;管线竖向位移的调整后 R^2 也接近 0.9,线性拟合度较好,但低于其他 3 条绘图的拟合度,这是由于管线竖向位移与围护结构变形以及地表沉降均有着密切联系,而围护结构变形和地表沉降与隔水帷幕深度之间的相关性相反,所以导致管线竖向位移的线性拟合度稍差。管线水平位移的斜率只有 0.004 48,管线竖向位移斜率为水平位移的 10 倍,可见隔水帷幕深度对管线水平位移的影响可以忽略,对管线竖向位移影响较大,这是因为管线竖向位移与所受竖向附加应力有直接关系,隔水帷幕深度对坑外水位影响较大,从而影响附加应力,而管线水平方向主要受渗透力影响,渗透力较小,往往可忽略。

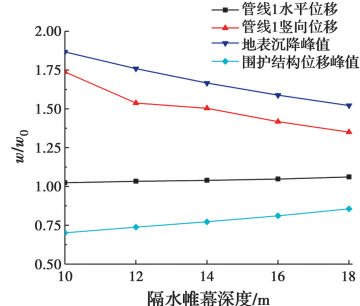


图 11 各项位移相对值随隔水帷幕深度变化
Fig. 11 The relative values of the displacements corresponding to different depths of waterproof curtain

表 5 各项位移相对值线性拟合结果

Table 5 Linear fitting results of relative displacement

绘图	管线 1 水平位移	管线 1 竖向位移	地表沉降 峰值	围护结构 峰值
方程	$y=a+bx$	$y=a+bx$	$y=a+bx$	$y=a+bx$
截距 a	0.979 03	2.137 07	2.284 65	0.508 09
斜率 b	0.004 48	-0.044 8	-0.043 12	0.019 14
相关系数 R	0.989 9	-0.961 15	-0.995 41	0.998 79
R^2	0.979 9	0.923 81	0.990 84	0.997 59
调整后 R^2	0.973 2	0.898 42	0.987 78	0.996 78

5 结论与建议

基于工程实例进行数值模拟分析,提出隔断式基坑降水开挖施工优化方案,并进一步改变隔水帷幕深度进行系列模拟,分析了渗流场分布及坑内外水头差变化规律,并得到隔水帷幕对基坑围护结构

及周边环境变形的影响规律,主要结论如下:

1)采用 PLAXIS 有限元软件进行模拟研究,土体模型采用 HSS 模型,模拟结果与监测结果吻合较好,有限元计算模型和参数选取合理,可为相关工程数值分析提供参考借鉴。

2)隔断式基坑降水可采用先施工第一道支撑,再一次性降水到坑底的施工方案,该方案既可以有效控制降水对基坑及周边构筑物变形的影响,又可以简化施工工序,节省工时,节约造价。

3)采用悬挂式隔水帷幕隔水时,当隔水帷幕远离不透水层时,随着隔水帷幕深度加深,坑内外水头差线性增大,围护结构位移线性增大,邻近管线竖向位移、坑外地表沉降线性减小;切断坑内外水力联系对控制坑外地表沉降及邻近管线变形均有着显著优势,但对于围护结构变形控制更为不利。

参考文献:

- [1] 徐长节,孙凤明,陈金友,等. 基坑相邻地铁隧道变形与应力控制措施[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(Sup1): 75-80.
XU C J, SUN F M, CHEN J Y, et al. Analysis on the deformation and stress control measures of metro tunnel near a foundation pit [J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2013, 35(Sup1): 75-80. (in Chinese)
- [2] 陈志伟, 缪海波. 深基坑开挖和降水对紧邻既有地铁隧道的影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(30): 297-302.
CHEN Z W, MIAO H B. Effect of deep foundation pit excavation and precipitation on adjacent subway tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(30): 297-302. (in Chinese)
- [3] 张治国, 徐晨, 刘明, 等. 考虑基坑降水开挖影响的运营隧道变形分析[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(2): 241-248.
ZHANG Z G, XU C, LIU M, et al. Deformation analysis of metro tunnels considering impacts of dewatering excavation in foundation pit engineering [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 241-248. (in Chinese)
- [4] 谢康和, 柳崇敏, 应宏伟, 等. 成层土中基坑开挖降水引起的地表沉降分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002(3): 239-242, 251.
XIE K H, LIU C M, YING H W, et al. Analysis of settlement induced by dewatering during excavation in layered soil [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002(3): 239-242, 251. (in Chinese)
- [5] 施成华, 彭立敏. 基坑开挖及降水引起的地表沉降预测[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 117-121.
SHI C H, PENG L M. Ground surface settlement caused by foundation pit excavation and dewatering [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 117-121. (in Chinese)
- [6] ZHOU N Q, VERMEER P A, LOU R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence [J]. Engineering Geology, 2010, 114(3/4): 251-260.
- [7] 周念清, 唐益群, 娄荣祥, 等. 徐家汇地铁站深基坑降水数值模拟与沉降控制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1950-1956.
ZHOU N Q, TANG Y Q, LOU R X, et al. Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and land subsidence control of Xujiahui Metro Station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1950-1956. (in Chinese)
- [8] 张军, 冯佳蕊, 翟少磊. 洞庭湖大桥锚定基坑降水及对地连墙影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(Sup1): 256-262.
ZHANG J, FENG J R, ZHAI S L. Dewatering of anchored foundation pit of Dongting Lake Bridge and its influence on diaphragm wall [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Sup1): 256-262. (in Chinese)
- [9] ZENG C F, ZHENG G, ZHOU X F, et al. Behaviours of wall and soil during pre-excavation dewatering under different foundation pit widths [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115: 103169.
- [10] ZENG C F, XUE X L, ZHENG G, et al. Responses of retaining wall and surrounding ground to pre-excavation dewatering in an alternated multi-aquifer-aquitard system [J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 609-626.
- [11] GOH A T C, ZHANG R H, WANG W, et al. Numerical study of the effects of groundwater drawdown on ground settlement for excavation in residual soils [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(5): 1259-1272.
- [12] 周勇, 魏嵩铸, 朱彦鹏. 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(Sup2): 495-499.

- ZHOU Y, WEI S Q, ZHU Y P. Effects of dewatering on adjacent underground pipelines during excavation of deep foundation pit at a metro station in Lanzhou [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (Sup2): 495-499. (in Chinese)
- [13] 李大勇, 龚晓南, 张土乔. 软土地基深基坑周围地下管线保护措施的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23 (6): 736-740.
- LI D Y, GONG X N, ZHANG T Q. Numerical simulation of the buried pipelines protection adjacent to deep excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(6): 736-740. (in Chinese)
- [14] 何绍衡, 夏唐代, 李连祥, 等. 地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019(4): 713-723.
- HE S H, XIA T D, LI L X, et al. Influence of groundwater seepage on deformation of foundation pits with suspended impervious curtains [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019(4): 713-723. (in Chinese)
- [15] SHI J W, NG C W W, CHEN Y H. Three-dimensional numerical parametric study of the influence of basement excavation on existing tunnel [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 146-158.
- [16] 邵羽, 江杰, 陈俊羽, 等. 基于 HSS 模型与 MCC 模型的深基坑降水开挖变形分析[J]. 水利学报, 2015, 46 (Sup1): 231-235.
- SHAO Y, JIANG J, CHEN J Y, et al. Deformation of deep foundation pits due to excavation and dewatering based on HSS model and Modified Cam-Clay Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (Sup1): 231-235. (in Chinese)
- [17] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- WANG W D, WANG H R, XU Z H. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290. (in Chinese)
- [18] 陈仁朋, 叶跃鸿, 王诚杰, 等. 大型地下通道开挖对下卧地铁隧道上浮影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017(7): 1269-1277.
- CHEN R P, YE Y H, WANG C J, et al. Influence of open-cut tunneling on uplift behavior of underlying metro tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017 (7): 1269-1277. (in Chinese)
- [19] BRINKGREVE R B J, KUMARSWAMY S, SWOLFS W M, et al. Plaxis material models manual [M]. Delft: Plaxis Bv, 2018

(编辑 胡玲)