

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230140

基于 HS-Small 模型临江深基坑降水变形特性分析

黄建华^{a,b}, 李 瑞^a

(福建理工大学 a. 土木工程学院; b. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 临江深基坑工程地下水随江水位变化呈现长期水位低、汛期水位高的动态特征,坑内降水导致周围地层渗流场趋于复杂,易引发围护结构破坏、坑底管涌和基坑失稳等工程事故。为此,采用基于 HS-Small 本构模型对深基坑工程的开挖—降水过程进行模拟,分析了降水影响因素(降水深度、方式、速率和止水帷幕)对周围环境变形的敏感性及其相互之间的关系,并将分析结果与实测结果进行对比验证。结果表明,随临江深基坑土方开挖和降水进行,基坑坡顶、坑外土体和周边建筑物沉降变形逐渐增大,其中降水对基坑变形影响更明显;分次降水能有效降低周围建筑物和地表的沉降变形;降水深度建议控制在底板以下 0.5~2.0 m;降水速率对周围环境沉降总量影响相对较小,但对沉降速率影响较大,当降水速率达到最优值时对基坑稳定性控制有益;止水帷幕嵌入深度超过 30 m 后对控制周围建筑沉降效果不明显。研究结果可为类似临江深基坑降水工程设计施工提供借鉴和参考。

关键词: 临江工程; HS-Small 本构模型; 开挖降水; 沉降机理; 软土地区

中图分类号: TU753

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0116-05

1 概况

拟建场地西侧和南侧是在建的# 12、# 45 与# 46 楼及其附属商业楼,地下室边线北侧邻大桥辅路,东侧邻路堤,具体见图 1。该场地可简化为二元地层结构,其地下水通过强透水层与临江直接联系,使得建筑物处的地下水随季节变化,且强透水层中通常含有承压水。该基坑宽约 66 m,长约 105 m,开挖深度约 16.50 m(局部承台开挖深度约 18.30 m)。基坑的支护形式为灌注桩、锚索和内支撑,且在搅拌桩和灌注桩之间采用高压

旋喷桩止水。部分剖面见图 2。工程降水采用疏干井排干中细砂层中的地下水,减压井抽取中粗砂承压水。降水周期为 8 月 25 日~10 月 28 日。降水井布置图见图 3,其中 JS 为疏干井,JSW 为坑外降水井,JY 为减压井,SW 为观测井。设计水位降深见表 1。基坑监测点布置在坡顶的共 25 个,编号为 J1~J25;深层土体水平位移监测点共 12 个,编号 C1~C12;周边建筑物沉降监测点共 30 个,编号 1~30;水位监测点共 6 个,编号 SW1~SW6。具体监测点点位分布见图 4。临江二元地层地下水随江水位变化而变化,导致地基



图 1 拟建场地平面布置图

Fig. 1 Layout of the proposed project

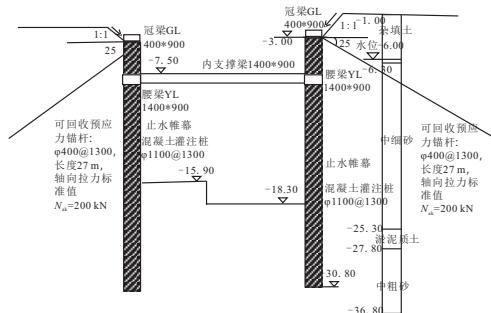


图 2 基坑支护与止水剖面图

Fig. 2 Section of foundation pit support and water stop curtain

收稿日期: 2023-02-06, 修回日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678153);福建省自然科学基金项目(2021J011064)

作者简介: 黄建华(1969-),男,博士后、教授,研究方向为岩土与地下结构工程、特殊土力学, E-mail: huangjh@fjut.

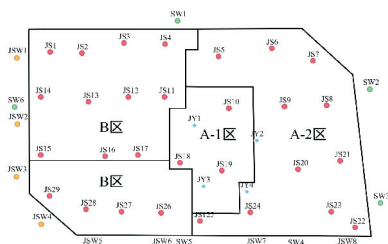


图 3 降水井布置图

Fig. 3 Layout of dewatering wells

表 1 设计水位降深

Tab. 1 The design water level m

区域	基底相	初始水	设计降水	设计水
	对标高	位标高	水位标高	位降深
A-1 区	-18.3	-6.0	-18.8	13.8
A-2 区	-18.2	-6.0	-18.7	13.7
B 区	-15.9	-6.0	-16.4	11.4

型的边界条件中侧面采用水平方向的约束,底部采用固定约束,上表面自由。水力边界为底部封闭不透水,四周为定水头边界,水头值为-6 m。模型共划分 78 927 个单元,125 218 个节点,见图 5。

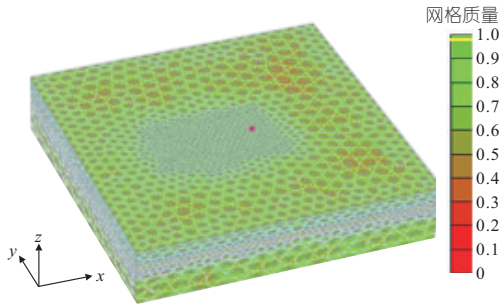


图 5 基坑网格划分图

Fig. 5 Foundation pit grid division

2.2 土体本构模型参数及其他参数

HSS 模型是基于 HS 模型提出的,且多 2 个小应变参数,即小应变刚度试验的参考初始模量 G_0^{ref} 和割线剪切模量衰减到初始剪切模量 70% 时所对应的剪应变 $\gamma_{0.7}$ [4]。国内在深基坑工程数据勘探期间因动力三轴试验的繁琐不会给出这两个参数取值,故需根据经验公式选取参数:

$$G_0^{ref} = 33(2.97 - e_0)^2 / (1 + e_0) \quad (1)$$

$$\gamma_{0.7} = \frac{1}{9G_0} [2c'(1 + \cos 2\varphi') - \sigma'_1(1 + k_0)\sin 2\varphi'] \quad (2)$$

其中 $G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi' - \sigma'_3 \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{ref} \sin \varphi'} \right)^m \quad (3)$

式中, e_0 为土体的初始孔隙比; σ'_1 为土体的竖向有效应力; σ'_3 为土体的侧向应力; m 为与模量应力水平相关的幂指数,对粘性土, m 取 0.5~1,对砂土和粉土 m 取 0.5。

HSS 与 HS 相同的 11 个参数,其中三轴固结排水剪切试验的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、固结试验的参考切线模量 E_{oed}^{ref} 、三轴固结排水卸载再加载模量 E_{ur}^{ref} 3 个参数根据王卫东等 [5] 的研究,满足 $E_{50}^{ref} = (0.9 \sim 1.1) E_{SI-2}^{ref}$ 、 $E_{oed}^{ref} = (0.9 \sim 1) E_{50}^{ref}$ 、 $E_{ur}^{ref} = (3 \sim 10) E_{50}^{ref}$ 。剩余的 7 个参数重度 γ 、饱和重度 γ_{sat} 、孔隙比 e_0 、渗透参数 k 、压缩模量 E_{SI-2} 、有效粘聚力 c' 及有效内摩擦角 φ' 均可由勘察报告给出。根据勘察报告和经验公式推导出具体土层参数见表 2。

该基坑的止水帷幕是由三轴搅拌桩和高压旋喷桩组成,可简化为板桩墙,按线弹性板单元模拟。即:

$$(D + t)d^3 / 12 = \pi D^4 / 64 \quad (4)$$

式中, D 为桩的直径; t 为两桩间距; d 为等效板的厚度。

和基础工程周围的渗流场变得更为复杂,对基坑变形和稳定性影响不利,因此地下水位高的工程应采取降水措施保证施工安全,抽取地下水会改变地下水渗流场的平衡状态 [1]。对此研究已较多 [2],但主要集中于基坑降水的模型本构及其典型土层参数分析,而针对滨海区临江深基坑降水工程特点,鲜有采用 HSS 本构模型分析的成果。为此,本文采用 PLAXIS 3D 基于 HSS 本构模型研究了临江深基坑开挖—降水过程力学特性和变形机制,分析了降水影响因素(降水深度、方式、速率和止水帷幕)对周围环境变形的敏感性及其相互之间的关系,并将分析结果与现场实测结果进行验证对比,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

2 三维数值分析模型

2.1 边界条件和网格的划分

基坑开挖的影响深度为开挖深度的 2~5 倍,影响宽度为开挖深度的 3~6 倍,因此当深基坑模型宽度超过约 3.5 倍深基坑开挖深度时,基本可消除模型的边界效应影响 [3],故在 PLAXIS 3D 中将模型设置为 220 m×180 m×-80.7 m。模

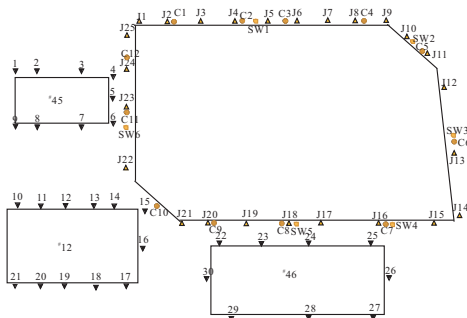


图 4 基坑监测点布置图

Fig. 4 Layout of foundation pit monitoring points

表 2 模型土体参数

Tab. 2 Model soil parameters

土体	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	c' /kPa	φ' /($^\circ$)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	G_0^{ref} /kPa	$\gamma_{0.7}$	渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	e
杂填土	17.5	8	12	40	40	120	92.94	1.00×10^{-4}	8.64	0.750
中细砂	18.5	3	25	70	70	210	103.00	2.00×10^{-4}	18.60	0.680
淤泥质土	16.5	12.8	4.3	37	49.43	111	46.25	1.00×10^{-4}	0.001	1.515
中粗砂	19.0	11.7	18	135	135	405	168.80	2.00×10^{-4}	32	0.550
残积粘土	18.0	16.8	17.3	50	50	150	62.50	2.00×10^{-4}	0.01	1.083

则模型中板桩墙的参数见表 3。

表 3 板单元参数

Tab. 3 Parameters of plate

名称	厚度 /m	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	E_1 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比
板桩墙	0.831 5	8	3.25×10^7	0.15
底板(-15.9 m)	0.300 0	25	3.00×10^7	0.15
底板(-18.3 m)	0.300 0	25	3.00×10^7	0.15

混凝土支撑和腰梁截面尺寸均为 $1.4 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ ，冠梁截面尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ ，均采用 C40 混凝土。内支撑、腰梁和冠梁均用梁单元模拟，参数见表 4。预应力锚索可用点对点锚杆模拟自由段，用 Embedded 桩单元模拟锚固段，锚索参数见表 5、6。

表 4 梁单元材料参数

Tab. 4 Parameters of beam

名称	截面面积 A/m^2	重度 γ	行为	弹性	惯性矩	惯性矩
			类型	模量 E	I_3/m^4	I_2/m^4
内支撑	1.26	0	线弹性	3.25×10^7	0.055 5	0.146
腰梁	1.26	0	线弹性	3.25×10^7	0.055 5	0.146
冠梁	0.36	0	线弹性	3.25×10^7	0.055 5	0.146

注：重度 γ 、弹性模量 E 单位分别为 kN/m^3 、 kN/m^2 。

表 5 点对点锚杆参数

Tab. 5 Parameters of node-to-node anchor

名称	入射角 /($^\circ$)	自由段 长度/m	自由段 EA/kN	锚固段 长度/m	预应力 值/kN
取值	25	20	3.171×10^6	7	200

表 6 Embedded 桩(锚固端)材料参数

Tab. 6 Parameters of embedded pile (anchor end)

E /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	桩类型	直径 /m	$T_{\text{top}} \sim T_{\text{bot}}$ /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	桩底极限 反力/kN
3.25×10^7	0	大直径预 定义圆柱	0.4	0~200	0

2.3 基坑施工阶段模拟

模型中施工工况根据实际情况进行模拟，该基坑地下水位开挖前为 -6 m ，在放坡开挖时无需提前降水，之后每层开挖前均须先进行坑内降水，每次降水降到开挖面以下 0.5 m 处开挖结束后立即增设支撑，其中 A-1、A-2 区底板相差不到 0.5 m ，为简化计算将两个底标高均设为 -18.3 m 。开挖过程共设计 11 个施工工序，见表 7。

表 7 基坑模拟降水开挖施工工况

Tab. 7 Construction condition of foundation pit simulation and precipitation excavation

工况	内容
初始阶段	初始地应力，位移清零
阶段 1	放坡开挖至 -4 m
阶段 2	施工止水帷幕和冠梁
阶段 3	设置预应力锚杆
阶段 4	第一次降水至 -9 m
阶段 5	土方第二次开挖到腰梁底标高 -8.5 m
阶段 6	施工混凝土内支撑
阶段 7	降水至 -16.4 m
阶段 8	土方第三次开挖到底标高 -15.9 m
阶段 9	降水至 -18.8 m
阶段 10	A 区开挖到底标高 -18.3 m
阶段 11	施工 -18.3 m 处的底板

3 基坑开挖降水变形特性分析

在开挖产生的应力位移与降水引起的渗流场耦合作用下，土体产生固结沉降，土体中的孔隙水状态的改变也加剧了土体的位移，同时在应力场的作用下出现距离基坑边缘一定距离处土体向上隆起变形较大，边缘的变形较小。

该工程坡顶累计报警值为 20 mm ，周边建筑沉降监测累计报警值为 25 mm ，深层土体水平位移累计报警值为 30 mm 。图 6 为基坑坡顶沉降量对比图。由图 6 可知，坡顶累计最大沉降量出现在基坑临江侧监测点 J13，最大值为 34.35

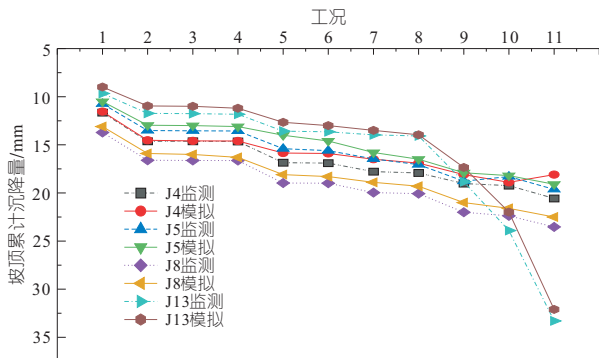


图 6 基坑坡顶沉降量对比图

Fig. 6 Comparison diagram of top settlement of foundation pit slope

mm, 超过累计报警值约 14 mm, 需对边坡进行加固, 否则会造成土体坍塌影响基坑后续的施工。临江侧监测点 J13 处的坡顶累计沉降量相比其他监测点要大, 该侧地下水的季节性动态变化导致周围的渗流场变得更为复杂, 进而导致坡顶沉降较为明显。

图 7 为深层土体及围护结构水平位移。由图 7(a)可知, 基坑从开挖到降水再到开挖整个施工过程中的实际工况与数值模拟变化相似, 临江侧 C6 处深层土体水平位移均呈现两头小中间大的抛物线型, 因基坑的内支撑存在阻止了上部土体的位移, 同时板桩墙有足够的刚度限制了墙底土体的位移。处于地面以下 13 m 处的土体水平位移较大, 主动区的土体侧压力较大则该处的围护结构的变形也会较大, 围护结构最大变形部位与地形最大变形区是一致的。由图 7(b)、(c)可知, 临江侧止水帷幕最大值约 24~26 mm, 止水帷幕中间向基坑内侧偏移较大。

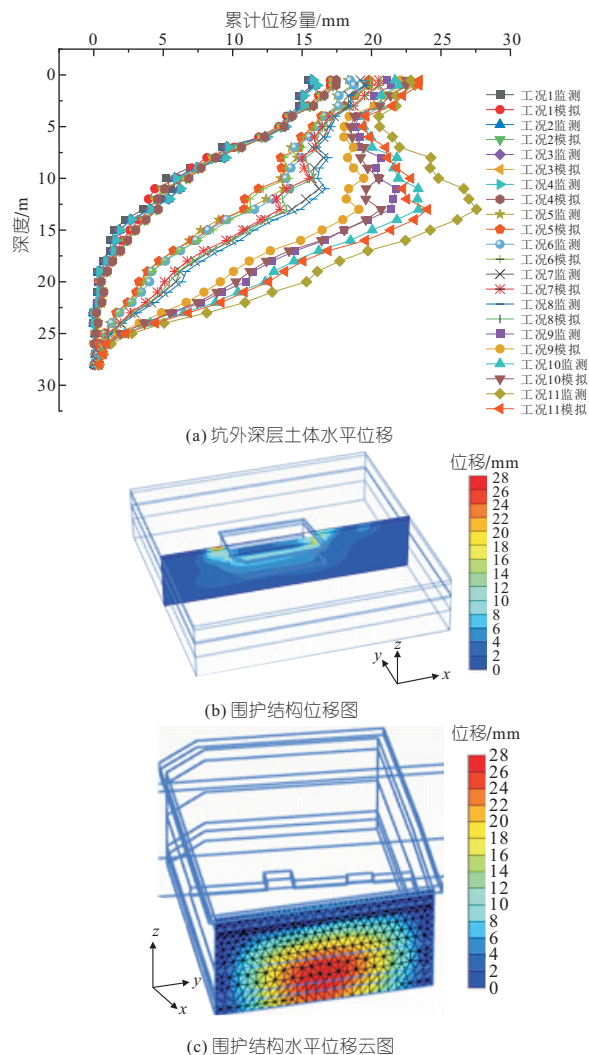


图 7 深层土体及围护结构水平位移
Fig. 7 Horizontal displacement of the deep soil mass and enclosure structure

综上所述, 基坑坡顶和坑外深层土体水平位移(临江侧 C6 监测点)的模拟结果与监测数据吻合度较好, 验证了 HSS 本构模型和通过设置节点水头的高度来模拟基坑降水对该工程的适用性。

4 降水影响因素分析

4.1 坑内降水速率影响

为满足降水设计要求, 实际降水时经过陆续换泵后的降水速率从小到大依次为 8 月 25 日、9 月 7 日、9 月 8 日、9 月 17 日、9 月 20 日、10 月 3 日、10 月 8 日。

图 8 为不同降水速率下坡顶、周边建筑物沉降量和沉降速率。由图 8 可知, 当止水帷幕嵌入土体深度一定并采用分次降水至 -18.8 m, 随着降水速率的增加, 基坑坡顶累计沉降量变化速率也在不断增加。降水速率对周围环境沉降变形总量相关性较小, 但与其沉降变形速率相关性较大。因淤泥质土层的透水性较差, 会产生降水疏干滞后效应, 土层固结稳定时间较长, 在快速降水的情况下, 周边建筑物沉降速率不断减小, 一定时间后趋于稳定。通过提高降水速率控制周围建筑物和基坑本身的变形影响是有限的, 存在最优的降水速率。止水帷幕与土体交界处的侧摩阻力对土体沉降有约束作用, 使得周围环境沉降受降水速率的影响明显小于基坑本身。

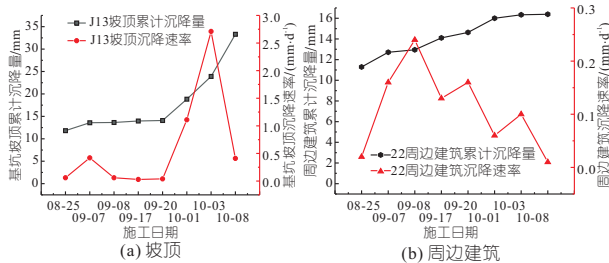


图 8 不同降水速率下坡顶、周边建筑物沉降量和沉降速率
Fig. 8 Top and nearby building settlement amount and settlement rate under different precipitation rates

4.2 坑内降水深度影响

图 9 为不同降水深度下周边建筑沉降量。由图 9 可知, 当坑内地下水从 -18.8 m 降到 -22.8 m 时, 周边环境最大累计沉降量出现在监测点 4 处, 并非离基坑越近产生的沉降就越大。最大沉降量周边建筑沉降量与坑内降水深度呈正比。坑内降水每增加 1 m, 周边建筑累计最大沉降量增加约 1.8 mm, 建筑累计沉降量会随降水深度加深, 沉降量最大值也接近于线性增长。为避免基坑周围建筑沉降过大, 建议基坑降水深度不宜超过 20.8 m, 否则周边建筑最大累计沉降量将超

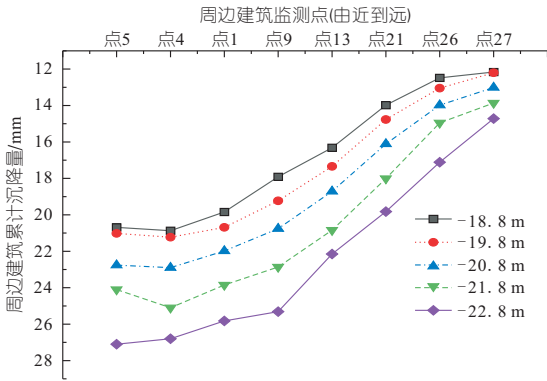


图9 不同降水深度下周边建筑物沉降量

Fig. 9 The settlement amount of surrounding buildings under different precipitation depths

过 25 mm。

4.3 坑内降水方式的影响

坑内降水方式可分为一次性降水和分次降水,在保持降水速度为 36 240 m³/d 降水至 -18.8 m 条件下,将降水方式设置为:一次性降水至 -18.8 m;分次降水至 -9、-16.4、-18.8 m,共三次降水。图 10 为不同降水方式下周边建筑物沉降量。由图 10 可知,分次降水时周围建筑物的沉降量较小。

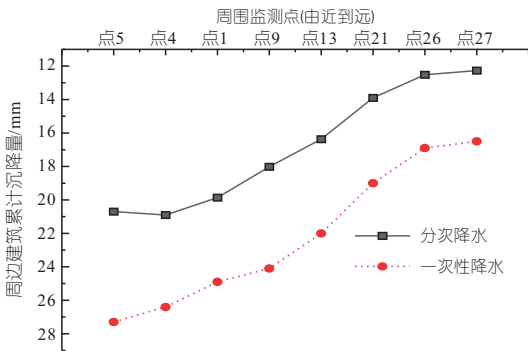


图 10 不同降水方式下周边建筑物沉降量

Fig. 10 Settlement amount of surrounding buildings under different precipitation modes

4.4 止水帷幕深度的影响

止水帷幕增加地下水渗流路径长度,减小了水力梯度,控制坑外水向坑内流动,减小土层水头损失有效控制周边建筑的沉降变形。取止水帷幕嵌入深度分别为 0 m 即不设置止水帷幕、20 m 为超过地下水位约 1 m 的深度、30.8 m 为实际工程深度、40、45 m 为底部嵌入隔水层。图 11 为不同止水帷幕深度下周边建筑物沉降量。由图 11 可知,止水帷幕嵌入深度越深建筑物沉降越小,一定深度后趋于稳定,在嵌入深度超过 30 m 对有效控制建筑物变形效果不明显,周围建筑累计沉降量应控制在 30 mm 内为宜,此时要求止水帷幕嵌入深度超过 30 m。

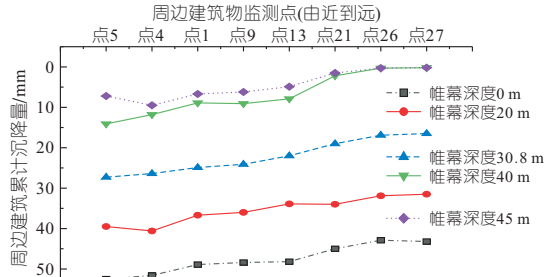


图 11 不同止水帷幕深度下周边建筑物沉降量

Fig. 11 Settlement amount of surrounding buildings under different water-proof curtain depths

5 结论

- a. 在基坑降水开挖的过程中,降水引起的沉降占比较开挖大,控制地面沉降应主要控制地下水。
- b. 降水速率与周围建筑物沉降变形总量相关性小,与其沉降变形速率相关性大。在快速降水的情况下,周边建筑物沉降速率不断减小,一定时间后趋于稳定。基坑降水速率存在最优值,该值对基坑自身和周围建筑物稳定性控制有一定积极作用。
- c. 周围建筑物沉降量最大值与基坑内降水深度呈线性关系。建议基坑降水深度在底板以下 0.5~2.5 m。分次降水方式较一次性降水能有效减小周围建筑物沉降。
- d. 止水帷幕的嵌入深度与控制周边建筑物沉降有着较为直接的关系,其嵌入深度越深控制周边地表沉降效果越明显,但在该工程中当深度超过 30 m 后,再继续增加嵌入深度,控制地表变形不明显。

参考文献:

[1] 章丽莎. 滨海地区地下水位变化对地基及基坑渗流特性的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.

[2] 李连祥,刘嘉典,李克金,等. 济南典型地层 HSS 参数选取及适用性研究[J]. 岩土力学,2019,40(10): 4021-4029.

[3] 黄传胜,张家生. 地铁深基坑三维有限元模型尺寸效应分析[J]. 铁道科学与工程学报,2011,8(2): 59-63.

[4] 吴海亮,邢琳,张戊晨,等. 非均匀地基变桩长沉降控制三维有限元协同分析[J]. 建筑结构,2022,52(8):124-130,65.

[5] 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.

道的安全。

4 结论

对于高扬程输水泵站,如果水泵出口不设置防护措施,当阀门关闭时间 $T_g < T_d$ 时,泵后最大降压值相等,随着阀门关闭的速率增大,泵后瞬时降压速率增大,出水池向前保护的距離增长,有利于输水管道的安全;当阀门关闭时间 $T_g > T_d$ 时,随着阀门关闭速率的增加,泵后降压值也增加,输水管道负压段的长度变长,管道沿线最大压力变大,最小压力变小,不利于输水管道的安全。因此,高扬程输水泵站水泵抽水断电后泵后阀门的最佳关闭时间为 $T_g = T_d$ 。

参考文献:

- [1] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435.
- [2] 石林, 张健, 倪尉翔, 等. 具有特殊地形条件的长距离供水工程水锤防护[J]. 水力发电学报, 2019, 38

- (5): 81-88.
- [3] STOKES Y M, MILLER A, HOCKING G. Pressure drop in pipelines due to pump trip event[J]. Anziam journal, 2015, 57: 163-204.
- [4] BERGANT A, SIMPSON A R, TIJSSELING A S. Water hammer with column separation: a historical review[J]. Journal of fluids and structures, 2006, 22 (2): 135-171.
- [5] 杨辉琴, 金波. 泵站止回阀关闭特征和条件的研究探讨[J]. 水利水电技术, 2016, 47(3): 106-108.
- [6] 刘芳, 张健, 石林, 等. 泵后球阀兼作泄压阀的水锤防护研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(9): 184-187, 119.
- [7] 赵立杨, 冯梦雪, 李昊, 等. 气垫调压室联合单向塔的停泵水锤防护研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41 (5): 81-84, 47.
- [8] LIN SHI, JIAN ZHANG, XIAODONG YU, et al. Water hammer protection for diversion systems in front of pumps in long-distance water supply projects[J]. Water science and engineering, 2023, 16 (2): 211-218.

Research on Closing Law of Check Valve in High-lift Water Supply Systems

ZHAN Gui-quan, SHI Xiang-rong

(Zhejiang Jiuzhou Water-Control Technology Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: For water supply systems with high-lift, the pump-stopping water hammer caused by the power failure is usually greater than the direct water hammer caused by the check valve closing. Based on the Joukovsky equation and the pressure drop law behind the pump, the influence of the check valve closing law on the pressure along the pipeline was studied, and the theoretical value of the optimal closing time (i. e., $T_g = T_d$) was obtained when a pump trip occurred. The theoretical value was verified by numerical simulation through a practical project. The results show that for high-lift water supply projects, the theoretical closing time of the check valve can minimize the pressure drop along the pipeline when the pump trip occurred.

Key words: high-lift; water supply project; valve closing law; water hammer

(上接第 120 页)

Analysis of Deformation Characteristics of Deep Foundation Pit Dewatering Closes to the River Based on HS-Small Model

HUANG Jian-hua^{a,b}, LI Rui^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Underground Engineering, Fujian Province University, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The groundwater level in the deep foundation pit project close to the river shows a dynamic characteristic of long-term low water level but high water level during flood season. Foundation pit dewatering leads to the complexity of the seepage field in the surrounding stratum environment, destruction of enclosure structures, accidents include piping and instability at the bottom of the pit. Therefore, this paper simulated the excavation-precipitation process of deep foundation pit project based on the HS-Small constitutive model, analyzed the sensitivity of precipitation influencing factors (precipitation depth, mode, rate and water stop curtain) to the surrounding environment deformation and their relationship. Compared the analysis results with the measured results, it can be found that the settlement of the top of the foundation pit, the soil outside the pit and the surrounding buildings gradually increases, and the dewatering has a more obvious influence on the deformation during the excavation and dewatering of the foundation pit; Fractional precipitation can effectively reduce the settlement deformation of surrounding buildings and ground surface; It is recommended that the dewatering depth of foundation pit should be controlled within 0.5-2.0 m below the bottom plate; The precipitation rate has a relatively small impact on the total settlement of the surrounding environment, but has a great impact on the settlement rate. When the precipitation rate reaches the optimal value, it is beneficial to the stability control of the foundation pit. The embedded depth of water-proof curtain in this project is more than 30 m, which has no obvious effect on controlling the settlement of surrounding buildings. The research results can provide reference for the dewatering design and construction of similar deep foundation pit projects closed to the river.

Key words: projects closed to the river; HS-Small constitutive model; dewatering excavation; settlement mechanism; soft soil area