

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.007

开挖前降水作用下基坑围挡结构-地层相互作用机制

薛秀丽^{1,2}, 李淼坤^{1,2}, 曾超峰^{1,2}
(1. 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 依托天津地铁 3 号线某车站基坑实测资料, 建立二维流固耦合有限元数值模型, 研究不同基坑宽度和开挖前降水深度条件下被动区土压力、地基土水平向基床系数等参数沿深度的分布规律, 并将数值分析结果与传统基坑设计中基于 m 法得到的结果进行对比和分析。结果表明, 基坑开挖前降水时, 降水深度范围内的地基土水平向基床系数相较于 m 法确定的值有较大幅度减小, 并且基坑宽度和降水深度越大, 地基土水平向基床系数就越小。这是由于降水过程中降水井旁渗流力的作用导致被动区土体发生背离围挡结构的水平位移, 并进一步引起复杂的围挡结构-土相互作用。利用弹性地基梁法进行开挖前降水引发基坑围挡结构变形预测时, 若采用 m 法来确定地基土水平向基床系数, 将会低估开挖前降水引发的围挡结构变形。
关键词: 深基坑; 开挖前降水; 水平向基床系数; 土压力; 有限元分析; m 法; 基坑宽度; 降水深度
中图分类号: TU46⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0440-07

Interaction mechanism between retaining wall and soil under pre-excitation dewatering

XUE Xiuli^{1,2}, LI Miaokun^{1,2}, ZENG Chaofeng^{1,2}
(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In this study, a 2D fluid-solid-coupled numerical model was established based on the investigation data of a station of Tianjin metro line 3, and a series of numerical simulations were carried out to investigate the distribution of horizontal foundation modulus along the depth under conditions of different foundation pit width and dewatering depth. The numerical results are compared with those computed by the m method, which is a traditional design method of foundation pit recommended in the Chinese Code. The results indicate that under the common conditions of pre-excitation dewatering (PED), the horizontal foundation modulus decreases greatly compared with the values determined by the m method, and the larger the pit width and dewatering depth, the greater the decrease extent. When using the elastic foundation beam method to predict the PED-induced deformation of a retaining structure, the obtained deformation will be underestimated, if the m method is used to determine the horizontal foundation modulus.

Key words: deep foundation pit; pre-excitation dewatering; horizontal foundation modulus; earth pressure; finite element analysis; m method; foundation pit width; dewatering depth

基金项目: 国家自然科学基金(51708206, 51978261); 中国博士后科学基金(2019T120797, 2018M633297); 广西博士后专项基金(BH2018054)
作者简介: 薛秀丽(1986—), 女, 讲师, 博士, 主要从事力学与岩土工程研究工作。E-mail: xlxue@hnust.edu.cn
通信作者: 曾超峰, 副教授。E-mail: cfzeng@hnust.edu.cn
引用本文: 薛秀丽, 李淼坤, 曾超峰. 开挖前降水作用下基坑围挡结构-地层相互作用机制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 440-446.
XUE Xiuli, LI Miaokun, ZENG Chaofeng. Interaction mechanism between retaining wall and soil under pre-excitation dewatering[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 440-446.

近年来,我国高铁、地铁建设及城镇化发展进入新的高潮,城市环境中出现大批深基坑工程。对于富水地区的深基坑工程来说,其施工全过程主要包括开挖前和开挖后共 6 个阶段:基坑围挡施工、基坑开挖前降水、基坑土方分层开挖与分层降水、支撑体系或楼板系统施工、基坑支撑拆除与土体回填、地下水位恢复^[1],其中基坑开挖前降水是开挖前检测降水井成井质量必不可少的施工阶段(即测试降水井的流量及水位降低量是否能满足设计要求)^[2]。考虑到基坑围挡结构在降水之前已经存在,因此开挖前降水会造成围挡结构变形。

郑刚等^[3]通过工程实测发现基坑开挖前降水所引起的围挡结构侧移可达到厘米级。曾超峰等^[4-7]发现开挖前降水引发的围挡结构变形规律受基坑宽度、降水深度等的影响,且不同条件下的变形模式差异较大。然而,目前的基坑设计、施工与研究主要关注土方开挖过程引起的变形,常认为开挖前围挡结构变形为零,并以此来计算后续施工过程中围挡结构累计变形^[8-16],显然,这将导致基坑施工环境效应被低估。

目前,我国基坑规范^[17]推荐采用弹性支点法计算土方开挖过程所引起的围挡结构受力与变形,并建议采用 m 法计算地基土水平向基床系数,然而规范并未提及如何分析基坑开挖前降水引发的围挡结构变形,若仍采用弹性支点法,开挖前降水条件下地基土水平向基床系数如何计算则缺乏理论指导,这给基坑设计带来一定困惑和盲目性。

为此,笔者依托某地铁基坑工程,建立了二维流固耦合有限元数值模型,并将数值模型计算结果与文献^[3]实测结果进行对比验证,然后,通过一系列参数分析研究了不同基坑宽度和降水深度条件下,被动区土压力、地基土水平向基床系数等参数沿深度的分布规律,以期揭示开挖前降水条件下基坑围挡结构-地层相互作用机制。

1 工程背景

天津地铁 3 号线某车站基坑平面长 198 m、宽 20 m,开挖深度为 17.6 ~ 19.1 m,车站主体基坑分为 A 段基坑和 B 段基坑两部分。地下连续墙深度 33 ~ 42 m,厚度 0.8 ~ 1.0 m;该工程允许的最大墙体侧移约 27 mm。基坑平面布置如图 1 所示。基坑场地埋深 50 m 范围内为天津典型的粉质黏土-粉土互层的地质条件,地下水位在地面下 1 ~ 2 m,关于该工程地质信息的详细介绍见文献^[3]。A 段基坑和 B 段基坑分别布置 9 口(S1 ~ S9)和 10 口(S10 ~ S19)降水井,降水井过滤管位于地面以下 2 m 至坑底以下 3 m。2 段基坑在开挖前均进行了降水施工,施工过程中均监测到地下连续墙发生了侧移,其中,A 段基坑开挖前降水 10 d 导致了最大约 10 mm 的地下连续墙侧移^[3],该侧移量达到该基坑施工全过程地下连续墙最大允许侧移的 37.6%。这表明,基坑开挖前的降水施工已经引起围挡结构发生了明显的初始变形,显然工程设计中应当考虑这部分变形。为了能用弹性支点法计算这部分变形,需明确该过程中围挡结构-地层相互作用规律。为此,下文将建立数值模型来分析这一问题。

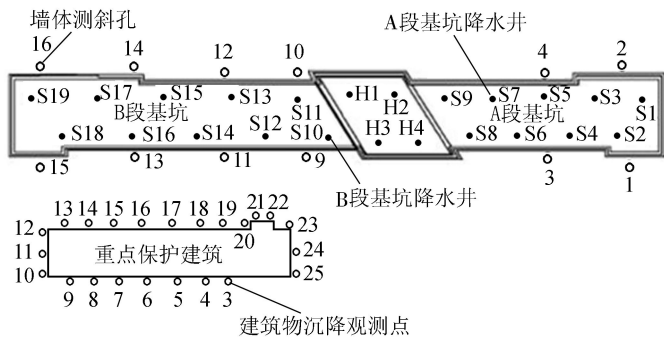


图 1 基坑周边环境平面布置^[3]

Fig.1 Layout of surrounding environment of the foundation pit^[3]

2 数值模型建立与验证

以第 1 节所述实际工程为依托建立了二维有限元数值模型,并通过对比实测地下连续墙侧移与模拟计算结果来校核所建模型。

2.1 土体、地下连续墙及降水井的建立

为计算方便,本文采用1/2模型进行计算。基坑宽度为20 m的数值模型网格划分如图2所示。

模型土体采用修正剑桥模型模拟。土体总厚50 m,并划分为9层,各土层分布及物理力学参数见表1,剑桥模型参数(κ 、 λ 、 M)、有效内摩擦角及黏聚力(φ' 和 c')根据三轴试验得出,土层渗透系数(K_v 和 K_h)根据抽水试验通过数值模型参数反演得到,地下连续墙深度范围内的水平向基床系数的比例系数 m 参照天津市建筑基坑工程技术规程并结合地区取值经验得出^[17]。所建模型坑外一侧土体竖向边界与地下连续墙距离为100 m(大于4.6倍降水深度),处于采用Sichardt公式^[18]计算的抽水影响范围之外,因此可以认为该边界将不会发生由于基坑抽水而引起的变形,对其设置竖向和水平向的变形约束,同时对其设置水位在地面的常水头补给边界;模型对称面及模型底部分别设置水平及竖向约束,并将该两处边界设置为不透水边界。

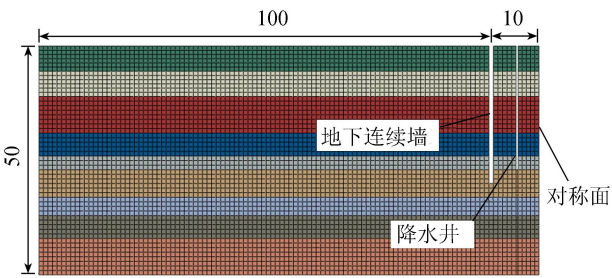


图2 基坑宽度20 m时的数值模型(单位:m)

Fig.2 Finite element model of the foundation pit with a width of 20 m(units:m)

表1 数值模型中土层分布及物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil layers and soil distribution in numerical model

土性	埋深/m	$K_v/(m \cdot d^{-1})$	$K_h/(m \cdot d^{-1})$	κ	λ	M	$\varphi'/(^{\circ})$	c'/kPa	$m/(MN \cdot m^{-4})$
粉质黏土	0~5.5	0.1	0.1	0.0065	0.0553	0.979	20	18	4.5
黏质粉土	5.5~11	0.5	0.5	0.0036	0.0312	1.192	26	15	7.0
粉质黏土	11~19	1×10^{-4}	5×10^{-4}	0.0052	0.0445	0.979	21	20	6.0
砂质粉土	19~24	1	1	0.0034	0.0293	1.202	27	16	8.0
黏土	24~27	1×10^{-5}	5×10^{-5}	0.0046	0.0397	0.800	15	25	6.5
砂质粉土	27~33	0.7	1	0.0033	0.0283	1.202	27	14	10.0
粉质黏土	33~37	3×10^{-4}	5×10^{-4}	0.0037	0.0320	0.900	19	24	
粉、细砂	37~42	1.5	2.5	0.0022	0.0191	1.382	37	8	
粉质黏土	42~50	2×10^{-4}	5×10^{-4}	0.0035	0.0305	0.900	23	17	

注: K_v 为竖直方向渗透系数, K_h 为水平方向的渗透系数, κ 为剑桥模型回弹系数, λ 为剑桥模型压缩系数, M 为临界状态应力比。

模型地下连续墙厚1 m,埋深33 m,降水井深27 m,模型假定地下连续墙与降水井的力学行为均服从弹性理论。墙与井之间距离为10 m。模型中构件(墙、井)与土之间摩擦服从Coulomb摩擦定律。参照文献[19],墙、井的杨氏模量分别为30 MP、210 MPa,泊松比均为0.2,极限剪切滑移量均为5 mm,摩擦系数均为0.3。极限剪切滑移量,摩擦系数均指构件(墙、井)与土之间的作用。

2.2 降水过程模拟

对于如何准确地模拟实际降水过程,文献[3]中提出通过在降水井过滤段处设置 drainage-only flow 渗流边界条件,以达到模拟降水的效果。本文根据文献[3]实测抽水量数据得到了模拟抽水边界条件的渗流参数,实现了对实际抽水过程的模拟。

2.3 模型验证

通过对基坑抽水试验的模拟,计算得出预降水引起的地下连续墙侧移,图3为实测地下连续墙3号测斜孔侧移沿深度分布与模型计算值对比曲线(测斜孔布置见图1)。从图3可以看出,本文模型计算得到的不同降水时间的地下连续墙侧移分布接近于工程实测结果^[3],这说明本文模型大致可反映基坑降水过程中的围护结构受力变形特性,因此利用本文模型进一步探究降水作用下基坑围挡结构-地层相互作用机制是合理的。

2.4 计算工况

为得到常见开挖前降水工况条件下围护结构受力、变形规律,本文将分别建立不同基坑宽度 b 和开挖前降水深度 H_d 的数值模型,计算工况如表2所示,各工况下降水时间统一设置为21 d。

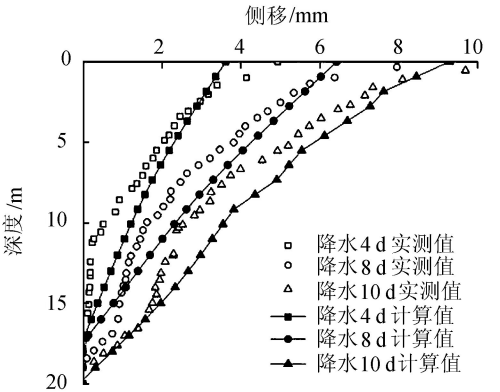


图3 地下连续墙侧移实测与计算值对比
Fig.3 Calculated values vs. monitoring data of wall deflection

3 水平向基床系数分布模式

根据弹性地基梁理论,将坑内侧土体视为土弹簧。降水之前,围挡结构两侧土体处于静止土压力状态,此时土弹簧未发生变形,因此不受力。降水后,围挡结构将发生指向坑内的侧移,坑内侧土弹簧将发生变形从而承担围挡结构传来的压力 p_t ,根据文克勒地基梁模型, p_t 的计算公式为

$$p_t = k_h \delta_s \tag{1}$$

式中: k_h ——地基土水平向基床系数(根据我国基坑规范^[20]有 $k_h = mz$); δ_s ——土弹簧的压缩变形。

根据变形协调, δ_s 与围挡结构在土弹簧位置处的侧移 δ_w 相等,即

$$\delta_w = \delta_s \tag{2}$$

开挖前降水过程中坑内侧总的土压力 p_s 为

$$p_s = p_t + p_{s0} \tag{3}$$

式中: p_{s0} ——围挡结构变形前基坑内侧初始压力(可按静止土压力计算)。

联立式(1)~(3),即可得

$$p_s = k_h \delta_w + p_{s0} \tag{4}$$

将数值计算得到的 p_s 和 δ_w 以及根据土压力计算理论得到的 p_{s0} 代入式(4)即可得到地基土水平向基床系数的分布规律。

3.1 基坑宽度对 p_s 及 k_h 的影响

图4为不同条件开挖前降水结束后被动区土压力随深度的分布情况。由图4可知,在 H_d 范围内,不同宽度基坑被动区土压力均大于相同位置的初始土压力,这是由于降水使孔隙水压力减小,土的有效应力增大;深度超出降水深度之后,被动区的土压力随深度增长的规律发生改变,这是由于降水深度范围以下受降水影响小,孔隙水压力减小少,有效应力增量减少。

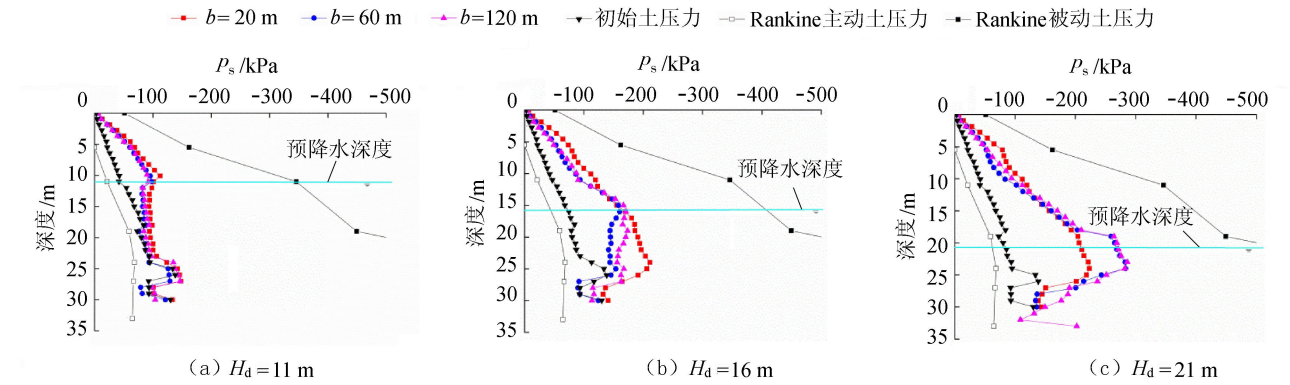


图 4 不同条件开挖前降水结束后被动区土压力随深度分布规律

Fig. 4 Distribution of passive earth pressure with depth after pre-excitation dewatering under different conditions

此外,根据朗肯土压力理论计算出坑内墙侧主动土压力及被动土压力,并绘入图4中以方便比较。由图4可知,虽然开挖前降水过程中坑内侧土压力增大,但是并未达到被动极限状态。

图5为降水结束后被动区 k_h 随深度分布曲线。图中“ m 法计算值”对应的曲线是根据 $k_h = mz$ 计算得到。由图5可知,开挖前降水条件下被动区地基土水平向基床系数远小于规范 m 法所求得的结果。这是由于开挖前降水过程中,坑内地下水向井点汇聚时对坑内土体产生了渗流力作用,基坑围挡结构与降水井间土体因而发生背离围挡结构水平位移,围挡结构因此将随土体变形而同步发生水平位移,发展过程如图6所示。开挖前降水引起的基坑围挡结构变形从机理上讲是坑内土体先主动发生侧向移动,然后导致围挡结构-地层相互作用,进而引起的围挡结构变形。从这个角度来说,若把被动区土体视为土弹簧,可以认为预降水会减弱土弹簧对围挡结构支撑效果,这样一来就不难理解图5结果了。在上述分析基础之上可知,在采用弹性地基梁法进行开挖前降水引发围挡结构变形分析时,若通过 m 法来确定地基土水平向基床系数将会低估

降水引发的围挡结构变形。此外,从图5还可看出,在降水深度范围内,基坑宽度越大,地基土水平向基床系数就越小,超出降水深度范围后的基床系数分布较凌乱,这表明开挖前降水引起了较复杂的围挡结构-地层相互作用。

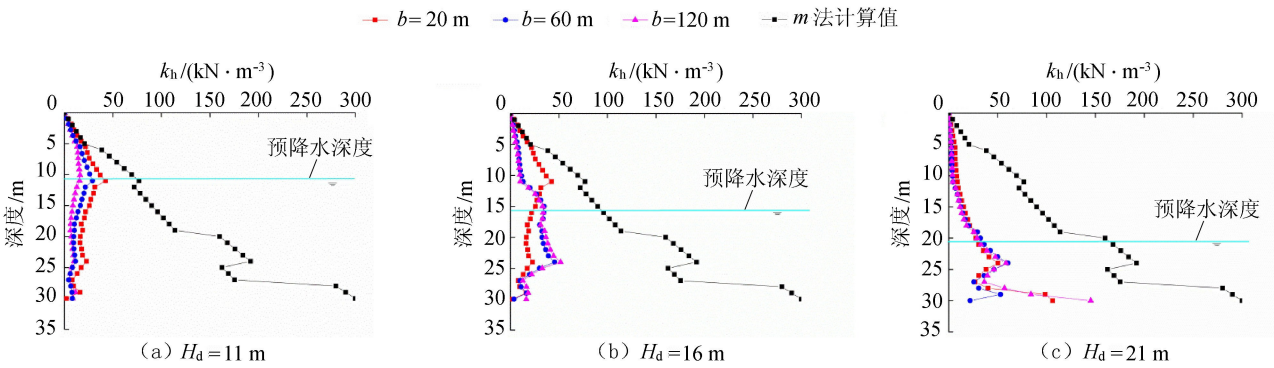


图5 降水结束后被动区 k_h 随深度分布

Fig. 5 Distribution of k_h with depth after pre-excitation dewatering

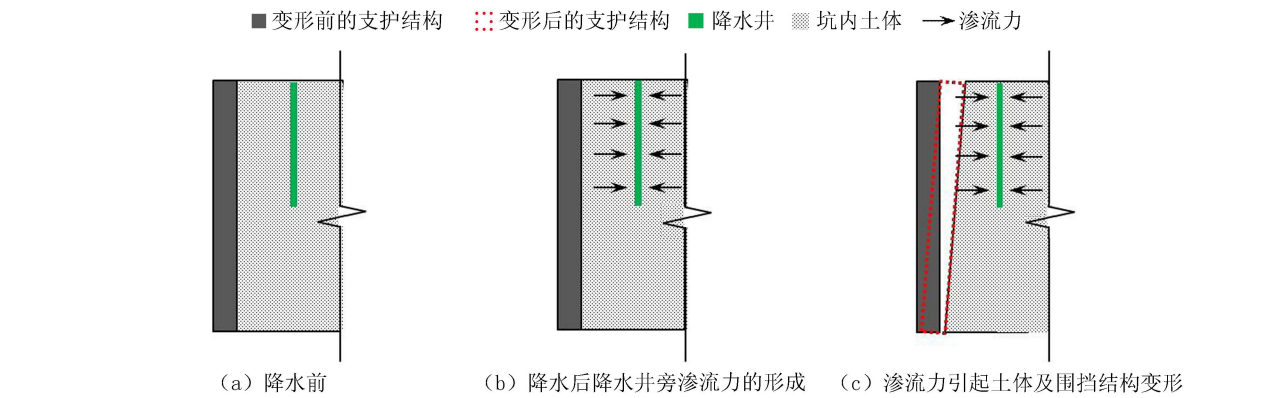


图6 降水井旁渗流力及围挡结构变形的发展过程

Fig. 6 Seepage force and development of wall deflection

3.2 降水深度对 p_s 及 k_h 的影响

由图7可知,在开挖前降水条件下,对于同一 b ,不同降水深度的基坑被动区土压力均大于相同条件下的初始土压力。同时,在降水深度范围以下的土压力逐渐趋向初始土压力,这是由于超出降水深度之后,受到降水的影响减少,导致相应区域土体应力条件慢慢接近初始条件。

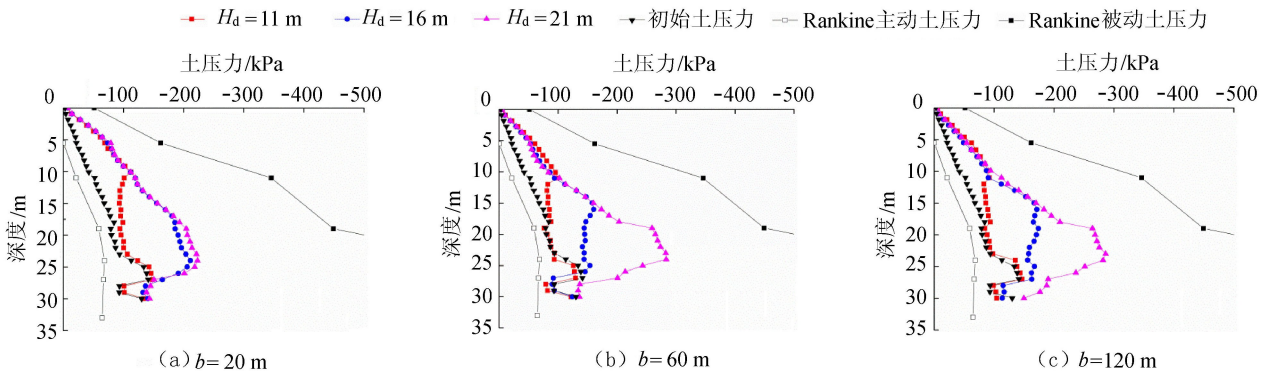


图7 不同降水深度条件下开挖前降水结束后被动区土压力随深度分布规律

Fig. 7 Distribution of passive earth pressure with depth after dewatering under different dewatering depths

此外,本文根据朗肯土压力理论计算出坑内墙侧主动土压力、被动土压力,并绘入图7。由图7可知,在不同降水深度条件下,虽然开挖前降水过程中坑内侧土压力增大,但是仍未达到被动极限状态。

图8为降水结束后被动区 k_h 随深度分布。由图8可得,开挖前降水条件下 k_h 并不随深度的增加而线性

增加,其值小于 m 法所得结果。在大致 15 m 埋深范围内, k_h 会随着降水深度加深而减小,土弹簧对围挡结构的支撑效果减小。

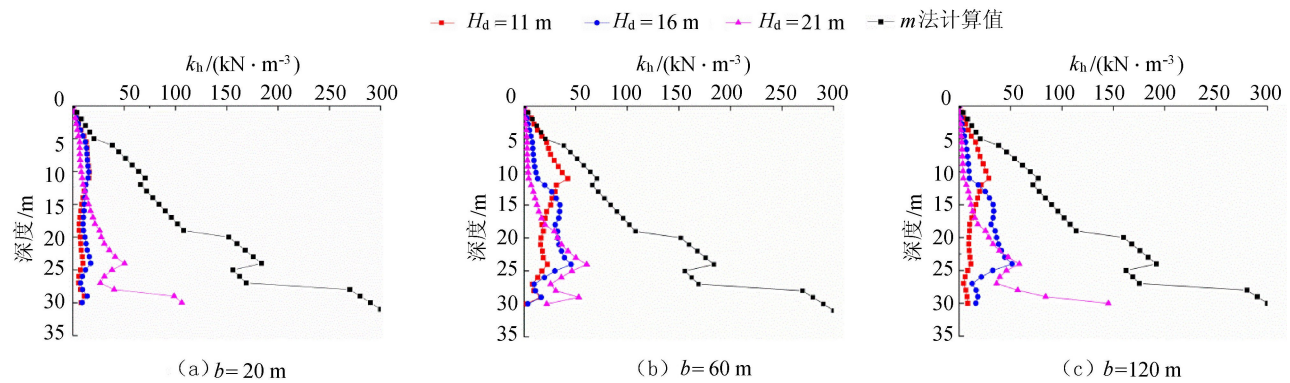


图 8 降水结束后被动区地基土水平向基床系数 k_h 随深度分布规律

Fig. 8 Distribution of k_h with depth in passive zone after dewatering

4 结 论

- a. 在基坑开挖前降水条件下,被动区地基土水平向基床系数相比于 m 法确定的值有明显降低。因此,用弹性地基梁法来分析开挖前降水引发的围挡结构变形时,如采用 m 法确定地基土水平向基床系数将导致得到的围挡结构变形被低估。
- b. 基坑宽度与降水深度对基床系数沿深度的分布有较大影响,一般而言,基坑宽度和降水深度越大,地基土水平向基床系数越小。

参考文献:

[1] ZENG Chaofeng, XUE Xiuli, ZHENG Gang, 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.

[2] 姚天强, 石振华, 曹惠宾. 基坑降水手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[3] 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. (in Chinese))

[4] 曾超峰, 郑刚, 薛秀丽. 大面积基坑开挖前预降水对支护墙变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1012-1021. (ZENG Chaofeng, ZHENG Gang, XUE Xiuli. Wall deflection induced by pre-excavation dewatering in large-scale excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1012-1021. (in Chinese))

[5] 曾超峰, 薛秀丽, 郑刚. 软土区基坑预降水引起支护墙侧移的典型参数影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3295-3303, 3318. (ZENG Chaofeng, XUE Xiuli, ZHENG Gang. A parametric study of lateral displacement of support wall induced by foundation pre-dewatering in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 38(11): 3295-3303, 3318. (in Chinese))

[6] 曾超峰, 薛秀丽, 郑刚. 软土地基渗透性条件对基坑预降水过程中支护墙侧移的影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3039-3047. (ZENG Chaofeng, XUE Xiuli, ZHENG Gang. Effect of soil permeability on wall deflection during pre-excavation dewatering in soft ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 3039-3047. (in Chinese))

[7] 曾超峰, 胡义, 薛秀丽. 不同施工条件下基坑预降水对地连墙侧移影响研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增刊2): 112-115. (ZENG Chaofeng, HU Yi, XUE Xiuli. Wall deflection induced by pre-excavation dewatering under different construction conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup2): 112-115. (in Chinese))

[8] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(5): 1243-1254.

[9] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30-36.

[10] 廖少明, 魏仕锋, 谭勇, 等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458-469.

(LIAO Shaoming,WEI Shifeng,TAN Yong, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2015,37(3):458-469. (in Chinese))

[11] 徐长节,成守泽,蔡袁强,等. 非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1929-1934. (XU Changjie,CHENG Shouze, CAI Yuanqiang, et al. Deformation characteristic analysis of foundation pit under asymmetric excavation condition[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(7):1929-1934. (in Chinese))

[12] TAN Yong, LU Ye, WANG Dalong. Deep excavation of the gate of the orient in suzhou stiff clay: composite earth-retaining systems and dewatering plans[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(3): 05017009.

[13] GOH A T C, ZHANG F, ZHANG W G, et al. A simple estimation model for 3D braced excavation wall deflection[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 83:106-113.

[14] ZHANG R, ZHANG W,GOHATC, et al. A simple model for ground surface settlement induced by braced excavation subjected to a significant groundwater drawdown[J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 16(6): 635-642.

[15] ZHANG W, WANG W, ZHOU D, et al. Influence of groundwater drawdown on excavation responses E;a case history in Bukit Timah granitic residual soils[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(5): 856-864.

[16] ZHANG W G, GOH A T C, GOH K H, et al. Performance of braced excavation in residual soil with groundwater drawdown[J]. Underground Space, 2018,3(2): 150-165.

[17] 天津市城乡建设和交通委员会. 建筑基坑工程技术规程;DB 29-202—2010[S]. 天津:天津市城乡建设和交通委员会, 2010.

[18] CASHMAN P M, PREENE M. Groundwater lowering in construction: a practical guide to dewatering[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

[19] ZHENG Gang, ZENG Chaofeng, DIAO Yu, et al. Test and numerical research on wall deflections induced by pre-excavation dewatering[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 62:244-256.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护规程;JGJ 120—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

(收稿日期:2019-03-22 编辑:刘晓艳)

• 简讯 •

第九届全国水力学与水利信息学大会将在南京市召开

由中国水利学会水力学专委会、中国水力发电工程学会水工水力学专委会和国际水利与环境工程学会中国分会共同发起,河海大学承办的第九届全国水力学与水利信息学大会将于2019年11月上旬在南京召开。

会议议题包括:工程水力学、环境水力学、生态水力学、水利信息学。为了进一步提高国内学者的英语表达及交流能力,提高英文论文质量,会议将设置英语交流分会。同时,会议将正式出版有ISBN书号的论文集,并选择质量上乘的论文推荐到国内外水利核心学术期刊上发表。此外,会议将进行优秀青年论文评奖。

(本刊编辑部供稿)