

软土地区深基坑开挖坑底隆起的有限元分析

曹力桥

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 软土地区深基坑施工, 会涉及到降低地下水的问题。传统深基坑设计常用弹性抗力法在计算基坑回弹变形, 并未考虑降水的影响。本文在考虑渗流固结耦合的基础上, 应用有限元软件 ABAQUS 建立存在工程桩和不存在工程桩的开挖与降水开挖三维基坑模型。通过对比分析, 总结出基坑开挖降水过程中基坑坑底隆起的基本规律, 分析深基坑坑底隆起变形及其影响因素, 得出工程降水对深基坑土体的压密作用、基坑出现塑性隆起现象以及降水对基坑稳定有利的结论, 并得出软土深基坑开挖过程中工程桩对坑底隆起变形有明显的抑制作用的结论。

关键词: 坑底隆起变形; 降水开挖; 渗流固结耦合; 压密; 抑制作用

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2013)S2 - 0819 - 06

作者简介: 曹力桥(1982 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事轨道交通与地下空间结构、隧道、地基处理及基坑工程等方面设计与研究。E-mail: caoliqiao52025@163.com.cn。

Finite element method analysis of bottom upheaval of deep foundation pits in soft-clay ground due to excavation

CAO Li-qiao

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The construction of deep foundation pits in soft-clay ground relates to dewatering problem. In the traditional design, the elastic resistance method is commonly used to calculate their rebound deformation without considering the effect of dewatering. A three-dimensional finite element model is established to simulate the excavation processes of deep foundation pits with or without considering engineering piles on the basis of seepage consolidation coupling by means of ABAQUS. Through comparison and analysis, the basic upheaval rules of pit bottom are summarized. The influencing factors for the bottom upheaval of deep foundation pits are analyzed. The conclusions are drawn as follows: the soils are compacted during dewatering; the foundation pit exhibits plastic upheaval; the dewatering is in favor of the stability of the foundation pits; the engineering piles in the foundation pit in soft-clay ground play an obvious role in inhibiting its bottom upheaval.

Key words: upheaval deformation of pit bottom; excavation and dewatering; seepage consolidation coupling; compaction; inhibition effect

0 引 言

随着中国的城市建设迅速发展, 涌现出了大量的深基坑工程。近年来, 软土地区深基坑开挖深度已超过 40 m, 开挖深度 20~40 m 的深基坑和超深基坑越来越多。例如, 上海地铁 4 号线修复工程深基坑开挖深度接近 41 m, 上海世博地下变电站基坑开挖深度接近 34 m。

深基坑工程开挖深度大, 被动区卸土量多, 引起围护前后的竖向压差。较大的竖向压差及地面荷载作用会引起基底隆起。当压差大于地基承载力时会发生坑底隆起破坏。抗隆起验算是基坑设计重要的内容, 软土地区深基坑中尤为重要。

传统基坑设计中支护体系强度和变形控制, 基底和挡土结构后土体、周围建(构)筑物、地下管线的安全和变形控制, 地下水的治理等为设计的重点。软土地区较高的地下水为导致深基坑工程事故的重大隐患, 基坑内大量降水引起基坑周边不均匀沉降, 周围建筑物倾斜, 道路及地下水管线等设施开裂、下沉、甚至破坏^[1-3]。

基坑降水开挖过程中渗流与固结变形同时存在相互影响, 土体的渗流导致孔隙水压力及有效应力的改变, 引起土体变形而致使渗透系数改变, 影响土体应

力应变状态。因此软土地区必须考虑基坑开挖降水的渗流固结耦合效应^[4-9]。

本文以某基坑为例,通过4个不同有限元模型,模拟不同施工过程基坑降水开挖对基坑坑底隆起变形的影响,为今后类似工程的设计与施工提供一定的参考和借鉴。

1 基坑坑底隆起变形

基坑隆起是较复杂的课题,隆起过程有弹性回弹和塑性隆起(如图1)。每个基坑开挖都有不同程度的隆起,基坑隆起量达到一定程度就可能引起基坑周围地面的沉降而使基坑失稳^[6-8]。

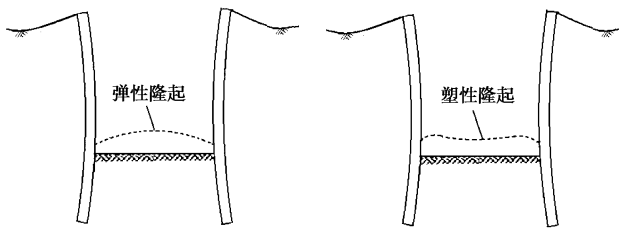


图1 基坑坑底隆起分类

Fig. 1 Classification of bottom upheaval of foundation pit

基坑开挖过程是开挖面卸荷的过程,坑底隆起是垂直向卸荷改变坑底土体原始应力状态的反应。在开挖深度不大时,坑底土体在卸荷后发生垂直向弹性隆起。围护结构随土体回弹而抬高,坑底弹性隆起的特征为坑底中心部位隆起最高,而且坑底隆起在开挖停止后很快停止。这种坑底隆起基本不会引起基坑周围地层的移动。随着开挖深度增加,基坑内外的高差不断增大,当开挖到一定深度,竖向压差和地面各种超载的作用就会使围护结构外侧土体向基坑内移动,使基坑坑底产生向上的塑性隆起。同时在基坑周围产生较大的塑性区,并引起地面沉降,墙体向基坑内移动,造成基底隆起。

根据以往的事故教训,基坑隆起概括起来有以下原因:

(1) 基坑开挖后,原土体中平衡的应力场受到破坏,卸荷后基坑底部要回弹。

(2) 基底土受回弹后土体的松弛与蠕变的影响加大了隆起。

(3) 挡墙在侧水压力作用下,墙角与内外土体发生塑性变形而上涌。

(4) 黏性土基坑积水,即使暴露时间短也会因黏性土吸水使土的体积增大而隆起。

此外基坑的隆起还与基坑内是否有桩、基底是否

加固、基底土体的残余应力等密切相关^[3-7]。

2 基坑开挖的有限元模拟

采用有限元方法计算基坑开挖,通常根据开挖过程和步序分为若干工况分布计算,一般计算步骤如下:

(1) 计算基坑开挖前的初始应力场 $\{\sigma_0\}$ 和初始位移场 $\{\delta_0\}$ 。考虑土体在开挖前已经经历长期固结过程,认为初始位移场 $\{\delta_0\}=0$;

(2) 计算下一次开挖由于卸荷与结构变化而引起的应力场 $\{\Delta\sigma_i\}$ 和位移场 $\{\Delta\delta_i\}$;

(3) 开挖后的应力场 $\{\sigma_i\}$ 和位移场 $\{\delta_i\}$ 为

$$\begin{cases} \{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \{\Delta\sigma_i\}, \\ \{\delta_i\} = \{\delta_{i-1}\} + \{\Delta\delta_i\}; \end{cases} \quad (1)$$

(4) 根据基坑开挖步骤,重复(2)、(3)的计算,直至开挖结束。开挖结束时的最终应力场和位移场为

$$\begin{cases} \{\sigma\} = \{\sigma_0\} + \sum \{\Delta\sigma_i\}, \\ \{\delta\} = \{\delta_0\} + \sum \{\Delta\delta_i\}. \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)中应力场和位移场进行离散,可以得出基坑开挖的有限元方程。

不考虑降水的基坑开挖是采用总应力法分析,机理比较简单,考虑渗流固结的数值方法是采用有效应力分析,考虑孔隙水压力的影响。因此模拟深基坑降水开挖的过程,可以简化为卸荷条件下的土体侧向约束卸除时的固结变形过程,且变形过程中渗流是存在的。渗流对透水性较强的粉砂、砂土及粉质黏土有较大影响,有时会危及工程的安全,所以在建立渗流存在的固结方程对基坑开挖过程中土体的变形分析具有重要的现实意义。采用Biot固结理论有限元方法模拟施工过程,其饱和土体中任一点孔隙水应力的变化必须满足运动平衡方程3和水流连续方程4。将两式联系起来,即得Biot固结方程。

$$\left. \begin{aligned} -G\nabla^2 \bar{u} + \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \\ -G\nabla^2 \bar{v} + \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} &= 0, \\ -G\nabla^2 \bar{w} + \frac{G}{1-2\mu} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma_w} (K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (4)$$

考虑渗流固结耦合的有限元模拟方法,是在Biot固结方程的基础上离散得到以节点的应力、位移和孔压为基本未知量的单元矩阵,建立渗流、固结两场的全耦合方程。

3 基坑坑底隆起的有限元分析

基坑的隆起与基坑本身特点有关外,还与工程桩等基坑外的因素密切相关。为更好的模拟实际基坑工程的隆起现象,建模时要考虑基坑降水引起的渗流固结以及工程桩对基坑隆起的影响。

3.1 工程概况及模型概述

某地下空间基坑开挖深度内主要以软黏土及粉质黏土为主,开挖深度为 17.15 m。该基坑施工难度高、环境保护要求高。本工程采用地下连续墙作为围护结构,以尽量减小基坑变形。地下连续墙厚 1 m,长为 35.0 m。设置 3 道钢筋混凝土支撑。坑内桩长为 30.0 m,直径 1 m (图 2)。

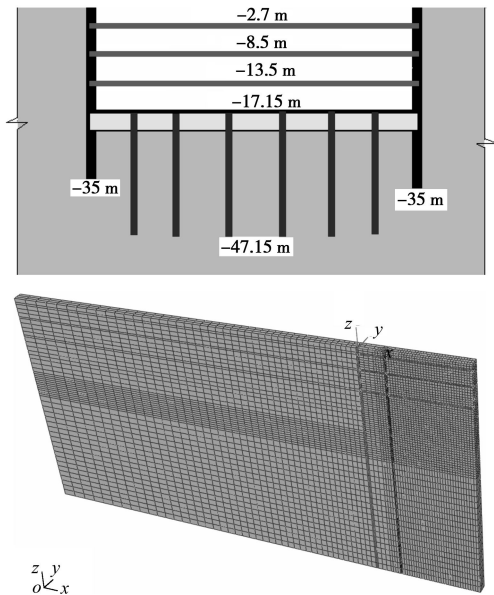


图 2 基坑及有限元计算模型

Fig. 2 Sketch of foundation pit and FEM analysis model

此基坑采用 ABAQUS 有限元软件模拟,其三维有限元模型考虑了土层的分层情况、开挖的工况等。由于基坑为较为规则的方形基坑,为了简化计算,取基坑的宽度的一半模拟,为考虑工程桩取其影响宽度范围内围护结构进行模拟,模型大小为 200 m×100 m×4 m,取距离地连墙 10.5 m 处一颗工程桩进行模拟。

为了将存在工程桩和不存在工程桩的开挖与降水开挖三维基坑模型结果与进行对比,本文建立 4 个模型:模型 A 采用总应力法不考虑降水和工程桩的作用。模型 B 采用渗流固结耦合理论考虑渗流固结的影响,但不考虑坑底工程桩;模型 C 考虑基坑内的工程桩但不考虑降水,模型 D 考虑工程桩,同时考虑基坑降水的渗流固结的作用。土体的本构模型采用修正剑桥模型,计算参数如表 1 所示。为模拟土和地连墙之间的相互作用,模型采用扩充后的面面接触的莫尔-库仑

滑动摩擦准则。

表 1 基坑土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of foundation pit

土层	层厚 /m	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	e_0	λ	κ	M	ν	k /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
①	1.78	18.8	0.91	0.08	0.006	1.3	0.3	1×10^{-7}
②	7.45	18.8	0.91	0.08	0.006	1.3	0.3	1×10^{-7}
④	8.85	17.2	1.38	0.11	0.009	1.0	0.35	3×10^{-9}
⑤	6.60	18.5	0.98	0.11	0.009	1.2	0.3	1×10^{-8}
⑥	3.70	20.0	0.68	0.07	0.006	1.2	0.3	1×10^{-6}
⑦ ₁	4.70	18.9	0.86	0.06	0.005	1.3	0.3	4×10^{-6}
⑦ ₂	16.92	19.2	0.77	0.04	0.003	1.4	0.3	1×10^{-6}

3.2 模型的建立

仅考虑开挖的有限元模拟过程的基本步骤见表 2,考虑渗流固结耦合的降水开挖的有限元模拟过程的基本施工步骤为在表 2 施工工况基础上每次开挖前需将水位降至开挖面以下 1 m。

表 2 基坑开挖施工工序模拟步骤

Table 2 Steps of excavation construction of foundation pit

工况	模拟内容
Stage0	设置地连墙和支撑,进行地应力平衡
Stage1	挖至-2.7 m,施工第一道水平支撑
Stage2	分层挖至-8.5 m,施工第二道水平支撑
Stage3	分层挖至-13.5 m,施工第三道水平支撑
Stage4	分层挖至-17.15 m

基坑降水开挖模拟时,通过 ABAQUS 良好非线性及流体渗透/应力耦合分析性能进行计算分析。当基坑之间产生压力水头差,水就会流向基坑,基坑周围地层的水被疏干,渗流就会停止,能较真实的模拟基坑降水的过程。

3.3 模拟结果分析

(1) 模型 A: 无工程桩且不考虑降水

不考虑工程桩且不降水情况下基坑坑底隆起曲线如图 3 所示。

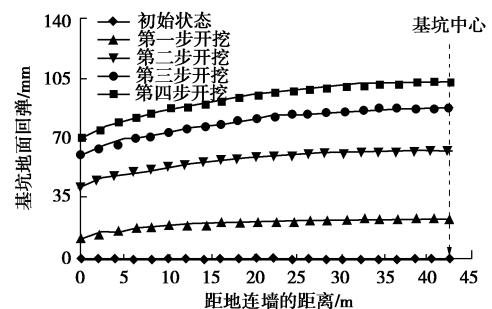


图 3 模型 A 基坑坑底隆起曲线

Fig. 3 Curves of pit bottom upheaval in model A

从图 3 可以看出,不考虑降水的基坑坑底隆起与

弹性理论分析坑底弹性隆起特征是一致的，即坑底中心部位隆起最高。各步开挖后基坑中心处的变形量分别为 23.1, 63.1, 88.5, 103.7 mm。距离地连墙 10.5 m 处的变形量分别为 19.4, 53.5, 74.2, 86.8 mm。

(2) 模型 B: 无工程桩考虑降水

不考虑工程桩，考虑降水的情况下基坑坑底隆起曲线如图 4 所示。

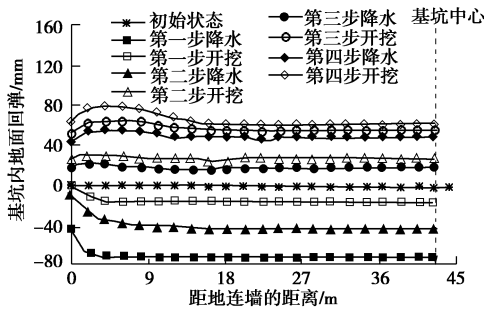


图 4 模型 B 基坑坑底隆起曲线

Fig. 4 Curves of pit bottom upheaval in model B

从图 4 中可以看出降水对基坑坑底的土体有明显压密作用。考虑降水的基坑坑底隆起与弹性理论分析的坑底弹性隆起的特征有一定差异，基坑坑底隆起量的最大值不在基坑中心，而是在靠近地连墙较近处。各步降水、开挖后基坑中心处的变形量分别为-70.6, -15.1, -41.6, 27.7, 19.0, 56.0, 50.0, 61.2 mm。距离地连墙 10.5m 处的变形量分别为-70.4, -14.6, -39.6, 27.5, 17.6, 55.0, 52.0, 72.8 m。

最大隆起处距离地连墙约 4.0 m，其变形量为-68.7, -13.1, -32.8, 31.2, 22.0, 66.0, 56.6, 80.2 mm。

(3) 模型 C: 考虑工程桩但不考虑降水

不考虑基坑降水，当距离地下连续墙 10.5 m 处存在一颗桩径为 1 m 的工程桩时，基坑坑底隆起曲线如图 5 所示。各步开挖后基坑中心处的变形量分别为 18.7, 53.4, 76.9, 92.2 mm。

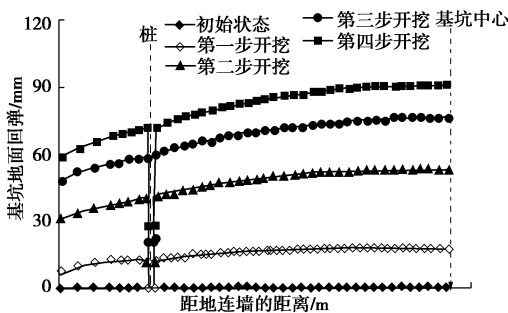


图 5 模型 C 基坑坑底隆起曲线

Fig. 5 Curves of pit bottom upheaval in model C

距离地连墙 10.5 m 处桩体附近的变形量分别为 8.2, 32.3, 51.5, 69.4 mm。

由以上分析得出桩对坑底隆起变形有约束作用。

(4) 模型 D: 存在工程桩且考虑降水

当存在工程桩且考虑降水的情况下基坑坑底隆起曲线如图 6 所示。

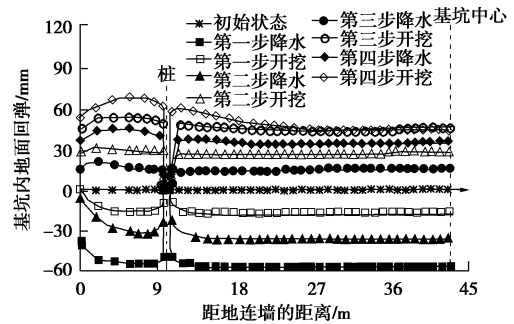


图 6 模型 C 基坑坑底隆起曲线

Fig. 6 Curves of pit bottom upheaval in model D

各施工工序下降水、开挖后基坑中心处的隆起量分别为-55.6, -16.1, -36.6, 27.2, 16.0, 46.0, 35.0, 44.7 mm。

距离地连墙 10.5 m 处的变形量分别为-49.7, -14.3, -31.0, 27.5, 14.3, 49.2, 38.1, 60.4 m。

最大隆起处距离地连墙约为 5.5 m，此处的各工序下降水、开挖后变形量分别为-54.1, -15.7, -31.2, 29.4, 17.2, 55.3, 44.6, 68.5 mm。

对照图 3~6，可以看出在不考虑水只开挖时基坑内的回弹隆起要远远大于考虑渗流固结耦合时的隆起量。降水开挖过程基坑内的土体是一次压密—卸荷回弹的过程，在只开挖的情况下，基坑底部的最大隆起量为 103.7 mm，出现在基坑的中部；在降水开挖的情况下，基坑底部的最大隆起量为 80.2 mm，出现在基坑距离地连墙 4 m 处；不考虑降水的基坑，当存在工程桩时，开挖后基坑中心处的回弹量为 92.2 mm，距离地连墙 10.5 m 处桩体附近的回弹量分别为 69.4 mm；考虑降水的基坑，当存在工程桩时，基坑底部的最大隆起量为 68.5 mm，出现在基坑距离地连墙 5.5 m 处，距离地连墙 10.5 m 处桩体附近的回弹量分别为 60.4 mm。可见工程桩的存在，对基坑坑底隆起有一定约束作用，特别在桩周围的约束作用较明显。

降水开挖最大隆起量位置不在基坑中心的原因因为深基坑底部由于主要受开挖卸荷、侧移挤压和向上的动水压力作用以及地连墙的下沉引起的，可以视为塑性的隆起，这与实际工程中观测的现象是相近的。基坑降水对基坑的稳定是有利的，故在地下水丰富地带，深基坑坑周沉降应考虑降水作用的影响。

基坑内工程桩通常是在基坑开挖以前施工完成的，因此这些工程桩不可避免的会对基坑开挖的性状产生一定的影响。由于桩的强度和刚度比较大，因此也在一定程度上提高了坑底土的整体力学性能，从而减小了地连墙的位移。当基坑开挖引起基底隆起时，

由于受到工程桩的约束, 桩与土之间存在摩阻力, 工程桩对被动区土体具有一定的拉锚作用, 有利于控制基底隆起, 从而提高了抗隆起稳定性。

3.4 基坑不同位置隆起量对比

图7为坑底存在工程桩不降水情况情况下基坑开挖坑底隆起量沿深度变化关系曲线。

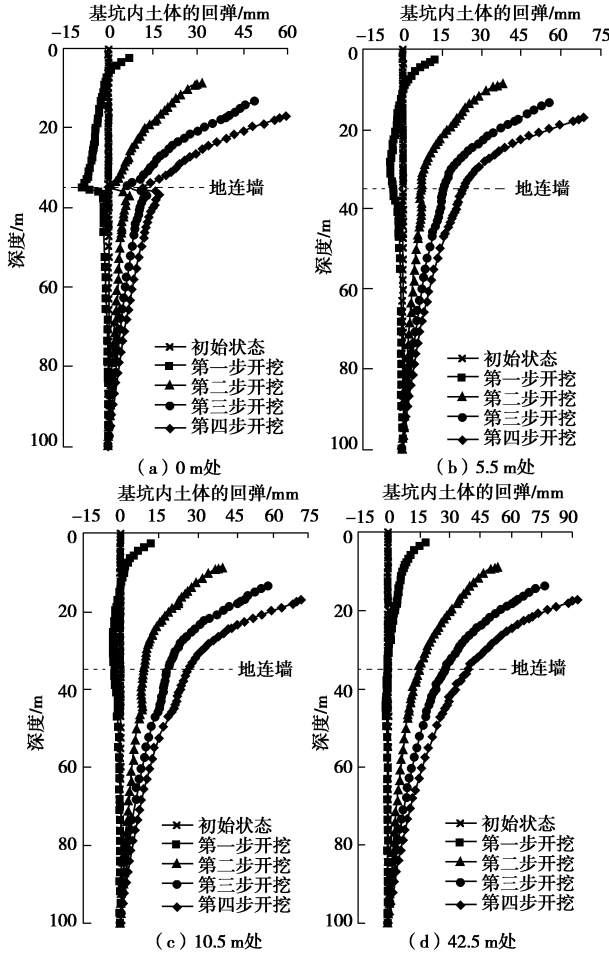


图7 坑底存在工程桩不降水坑底隆起量沿深度变化曲线
Fig. 7 Variation of bottom upheaval of foundation pit with engineering piles with depth due to excavation

图8为坑底存在工程桩情况下基坑降水开挖坑底隆起量沿深度变化关系曲线。

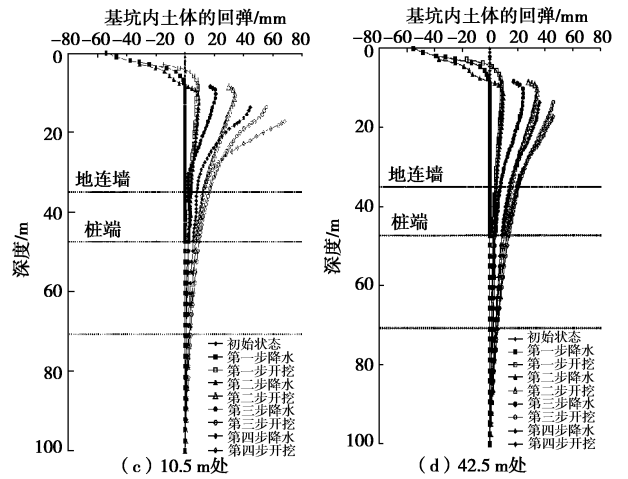
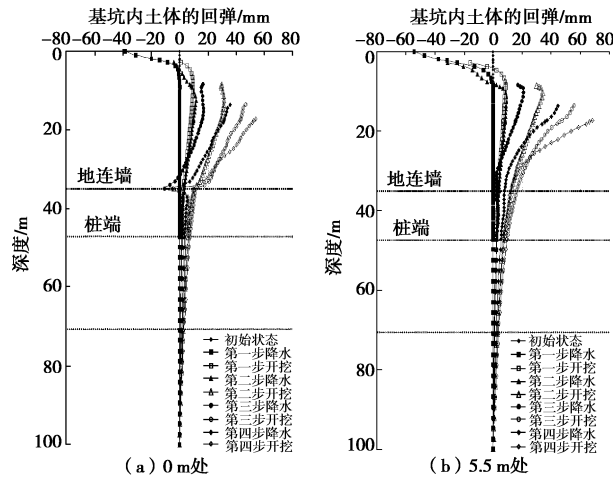


图8 存在工程桩基坑降水开挖时坑底隆起量沿深度变化曲线
Fig. 8 Variation of bottom upheaval of foundation pit with engineering piles with depth due to excavation and dewatering

对照图7, 8坑内地面隆起的结果可以看出基坑不同位置隆起沿深度变化趋势大致相同, 在地连墙和工程桩处, 隆起量沿深度变化较大。基坑开挖引起的回弹影响深度为3~4倍的基坑开挖深度; 降水开挖的影响深度较小, 为2倍的基坑开挖深度。工程桩桩长深度范围内隆起量逐渐递减为工程可接受的范围。

4 结 论

通过软土区某基坑开挖考虑工程桩与不考虑工程桩, 在考虑降水与不考虑降水的工况下的有限元分析, 可得到如下结论:

(1) 修正的剑桥模型反映了土的剪缩性及剪胀性, 能较真实地反映了基坑开挖隆起回弹的性状。ABAQUS良好非线性、岩土力学分析(流体渗透/应力耦合分析)及渗流分析使渗流固结耦合分析得以实现;

(2) 随着开挖深度的增加, 隆起位移随之增大, 不考虑降水时基坑中部的位移值最大, 而紧靠墙体隆起位移较小, 这是由于土体向临空面移动以及地连墙向开挖方向转动挤压附近的土体造成的。降水开挖过程中, 基坑内出现塑像隆起现象, 使得基坑距离地连墙较近位置处的隆起位移最大, 因此应在基坑开挖过程采取有效措施, 尽量减少土体隆起;

(3) 降水对基坑内土体有压密作用, 使得基坑内的隆起量有明显的减小, 基坑内的工程桩对抗底隆起由一定的抑制作用。基坑降水开挖渗流固结耦合效应对基底隆起的抑制作用略强于工程桩的影响作用, 施工时能降低基坑水位时尽量降低地下水位, 同时工程桩、基底加固等措施在一定程度上也可降低坑底的隆起变形量。

参考文献:

- [1] 王卫东, 王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Design, analysis and case histories of deep excavations supported by permanent structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 李玉岐, 魏 婕, 谢康和. 负孔压消散对坑底的回弹影响研究[J]. 长江科学院院报, 2005, **22**(4): 52 - 55. (LI Yu-qi, WEI Jie, XIE Kang-he. Study on influence of dissipation of negative pore water pressure on heave of pit base[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, **22**(4): 52 - 55. (in Chinese))
- [3] 徐中华, 王卫东, 王建华. 上海软土地区上海银行大厦深基坑工程的实测与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(增刊 1): 4639 - 4644. (XU Zhong-hua, WANG Wei-dong, WANG Jian-hua. Monitoring and Analysis of deep foundation pit of Shanghai bank building in soft ground in Shanghai[J]. Rock Mechanical and Engineering, 2004, **23**(S1): 4639 - 4644. (in Chinese))
- [4] 胡其志, 何世秀, 杨雪强. 基坑开挖基底隆起的估算[J]. 土工基础, 2001, **15**(2): 29 - 30. (HU Qi-zhi, HE Shi-xiu, YANG Xue-qiang. Estimation of the upheaval of foundation pit bottom during excavation[J]. Soil Engineering and Foundation, 2001, **15**(2): 29 - 30. (in Chinese))
- [5] GOH A T C. Estimating basal-heave stability for braced excavations in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(8): 1430 - 1436.
- [6] SAKAI K, MITSUO J, TANAKA T. Rebound prediction of excavated ground using anisotropic elastic finite element analysis[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1997, **12**(1): 59 - 66.
- [7] GOH A T C, KULHAWY F H, WONG K S. Reliability assessment of basal-heave stability for braced excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(2): 145 - 153.
- [8] 姜洪伟, 赵锡宏, 张保良. 各向异性条件下软土深基坑抗隆起稳定分析[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(1): 1 - 7. (JIANG Hong-wei, ZHAO Xi-hong, ZHANG Bao-liang. Analysis of heave-resistant stability for deep braced excavation in soft clay under anisotropic condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [9] 徐 彪, 刘 佳. 对深基坑坑底隆起问题的探讨[J]. 广西工学院学报, 2001, **15**(1): 66 - 69. (XU Biao, LIU Jia. An inquiry into the problem of upheaval in the bottom of the deep foundation pit[J]. Journal of Guangxi Institute of Technology, 2001, **15**(1): 66 - 69. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)