

文章编号:1673-2049(2016)04-0097-06

坑外荷载对软土地区基坑开挖变形性状的影响

李玉岐¹, 周旋¹, 谢康和²

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要:针对基坑开挖时坑外通常存在着建筑材料、车辆和其他荷载的情况, 基于 Biot 三维固结理论开发了可以考虑流固耦合的三维基坑有限元程序, 分别研究了坑外荷载大小、荷载施加时间和荷载施加区域对基坑支护结构水平位移、坑外地表沉降和坑底隆起变形的影响。结果表明: 荷载大小对基坑支护结构的水平位移、地表沉降和坑底隆起变形影响较大; 荷载施加时间和荷载施加区域则仅仅对支护结构水平位移和地表沉降影响较大, 对坑底隆起变形影响较小; 在对基坑进行工程设计时, 应考虑坑边荷载的影响。

关键词: 基坑开挖; 变形; 数值计算; 水平位移; 地表沉降; 软土地区

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A

Influence of Outside Load on Deformation Behavior of Foundation Pit Excavation in Soft Soil Area

LI Yu-qi¹, ZHOU Xuan¹, XIE Kang-he²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: Aimed at building materials, vehicles and other loads usually found near foundation pit excavation, based on Biot's 3D consolidation theory, a 3D finite element program with considering fluid-solid coupling was developed. The influences of loading size, loading time and loading area on the horizontal displacement of supporting structure, ground settlement around the excavation and basal heave of the excavation were studied respectively. The results show that loading size has great influence on the horizontal displacement of supporting structure, ground settlement and basal heave; loading time and loading area have great influence on the horizontal displacement of supporting structure and ground settlement, however have little influence on the heave deformation of pit base. Therefore, the influence of load should be considered when designing an excavation.

Key words: foundation pit excavation; deformation; numerical calculation; horizontal displacement; ground settlement; soft soil area

0 引言

随着城市建设的发展, 深基坑工程项目越来越多, 其相关研究也越来越多^[1-7], 而坑外荷载对基坑

开挖的变形性状研究相对较少。《基坑工程手册》和《建筑基坑支护技术规程》都规定了基坑开挖时基坑周边荷载严禁超过设计荷载, 设计荷载通常根据经验取值不超过 20 kPa。

收稿日期: 2016-01-19

基金项目: 上海高校教师产学研践习计划项目(2012)

作者简介: 李玉岐(1977-), 男, 河南唐河人, 副教授, 工学博士, 博士后, E-mail: liyuqi2000@shu.edu.cn。

在坑外荷载对基坑开挖变形的性状影响研究方面,刘素锦等^[8]采用假定车辆荷载集中分布和等效等厚土层的计算方法,分析了车辆超载对各种基坑支护形式的影响;林刚等^[9]运用 PLAXIS 软件模拟了不平衡堆载下深基坑开挖全过程,分析了不平衡堆载对基坑两侧支护结构内力和位移的影响;徐长节等^[10]则通过一个工程实例,分析了坑边超载以及车辆冲击荷载对既有基坑支护结构内力的不利影响;陈梅等^[11]则采用建立的有限元模型计算了坑顶车辆荷载作用下基坑在开挖与支护过程中坑周土体的变形规律和基坑的失稳特征。

本文采用的程序是在笔者开发的基坑三维有限元程序 3DBCPE3.0^[12]基础上进一步开发的,用于研究坑外荷载大小、荷载施加时间和荷载施加区域对基坑变形的影响,进而有助于优化基坑工程设计方案,提高基坑工程的安全性。

1 Biot 三维固结有限元方程

对 Biot 三维固结方程进行空间离散和时间离散,可得 Biot 三维固结有限元方程^[13]为

$$\mathbf{K}\Delta\mathbf{U}^e=\Delta\mathbf{R}^e$$

(1)

式中: \mathbf{K} 为单元固结矩阵,32×32 阶对称矩阵; $\Delta\mathbf{U}^e$ 为单元节点未知量增量矩阵,32×1 阶; $\Delta\mathbf{R}^e$ 为单元等效节点荷载和流量增量矩阵,32×1 阶。

$$\mathbf{K},\Delta\mathbf{U}^e,\Delta\mathbf{R}^e\text{的子矩阵}\mathbf{K}_{ij},\Delta\mathbf{U}_i,\Delta\mathbf{R}_i\text{分别为}$$

$$\mathbf{K}_{ij}=\begin{bmatrix}\mathbf{K}_{cij}&\mathbf{K}_{cij}\\\mathbf{K}_{cji}&-\theta\Delta t\mathbf{K}_{sij}\end{bmatrix}\quad i,j=1,2,\cdots,8\quad (2)$$

$$\Delta\mathbf{U}_i=[\Delta u_i\quad\Delta v_i\quad\Delta w_i\quad\Delta p_i]^T\quad i=1,2,\cdots,8\quad (3)$$

$$\Delta\mathbf{R}_i=[\Delta R_{xi}\quad\Delta R_{yi}\quad\Delta R_{zi}\quad\Delta R_{pi}]^T\quad i=1,2,\cdots,8\quad (4)$$

式中: θ 为积分常数,取值范围为 0.5~1.0; $\mathbf{K}_{cij},\mathbf{K}_{cji}$ 分别为单元刚度矩阵的子矩阵和单元耦合矩阵的子矩阵; \mathbf{K}_{cij} 和 \mathbf{K}_{cji} 为对称矩阵,具体计算参考文献

[13]; K_{sij} 为单元渗流矩阵的元素; $\Delta u_i,\Delta v_i,\Delta w_i$ 均为单元节点*i*的位移增量; Δp_i 为单元节点*i*的孔压增量; $\Delta R_{xi},\Delta R_{yi},\Delta R_{zi}$ 均为单元节点*i*的等效荷载增量; ΔR_{pi} 为单元节点*i*的流量增量。

用式(3),(4)分析基坑的变形和孔压时无法考虑坑内外水头差变化引起的渗流作用,因此应用位移增量和土水势来进行分析。在忽略溶质势的情况下,饱和土的土水势 P 的表达式(空间坐标 z 向上为正)为

$$P=p+\gamma_wz$$

(5)

式中: p 为压力(静水压力)势和荷载(超静孔隙水压力)势之和,对应于孔隙水压力; γ_wz 为重力势。

用土水势表示时,记时刻 t_{n+1} 时单元节点*i*的土水势为 $P_{i(n+1)}$,时刻 t_n 时单元节点*i*的孔隙水压力为 $P_{i(n)}$,不考虑竖向位移的影响(即重力势 γ_wz 不变),则式(3),(4)变为

$$\Delta\mathbf{U}_i=[\Delta u_i\quad\Delta v_i\quad\Delta w_i\quad P_{i(n+1)}]^T$$

$$i=1,2,\cdots,8\quad (6)$$

$$\Delta\mathbf{R}_i=[\Delta R'_{xi}\quad\Delta R'_{yi}\quad\Delta R'_{zi}\quad\Delta R'_{pi}]^T$$

$$i=1,2,\cdots,8\quad (7)$$

式中: $\Delta R'_{xi}=\Delta R_{xi}+\mathbf{K}_{cij}P_{i(n)}$; $\Delta R'_{yi}=\Delta R_{yi}+\mathbf{K}_{cij}P_{i(n)}$; $\Delta R'_{zi}=\Delta R_{zi}+\mathbf{K}_{cij}P_{i(n)}$; $\Delta R'_{pi}=\Delta R_{pi}-\theta\Delta t\mathbf{K}_{sij}P_{i(n)}$ 。

2 参考算例及有限元模型

2.1 参考算例描述

某基坑工程位于均质各向同性的软土地区。基坑长 50 m,宽 50 m,开挖深度 9 m;支护结构采用 800 mm 厚的地下连续墙,插入坑底以下 9 m;设置 2 层钢筋混凝土支撑,第 1 层支撑中心位于地表下 3 m,截面尺寸为 600 mm×600 mm,第 2 层支撑中心位于地表下 6 m,截面尺寸为 600 mm×700 mm,横向和纵向支撑水平间距均为 8.3 m。坑内外的地下水位面假定分别位于坑内开挖面处和坑外地表处。土体计算参数见表 1。

表 1 土体计算参数

Tab. 1 Calculation Parameters of Soil

K	n	R_f	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	F	G	D	K_{ur}	$k_h/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$k_v/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$\gamma'/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
150	0.7	0.85	15	35	0.15	0.35	3.5	300	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	9

注: γ' 为土的有效重度; k_v 为土的竖向渗透系数; k_h 为土的水平向渗透系数; c',φ' 分别为土体的有效粘聚力和有效内摩擦角; R_f 为破坏比; k,n,F,G,D,K_{ur} 均为三轴试验确定的参数。

基坑开挖分 3 步开挖(每步开挖深度为 3 m),每步又分为 3 层开挖,每层开挖深度为 1 m。每步开挖完成后设置施工间歇期用于混凝土支撑的施工及养护。分步开挖过程的具体描述如表 2 所示。

2.2 有限元模型建立

基坑开挖水平向和竖向影响范围分别按开挖深度的 3 倍~4 倍和 2 倍~4 倍考虑;再根据对称性取基坑的 1/4 结构进行数值分析,计算域取 100 m×

表 2 基坑的分步开挖过程

Tab. 2 Step Excavation Process of Foundation Pit

开挖阶段		开挖厚度/m	基坑深度/m	支撑设置	时间/d
第 1 步	开挖	1.0	1.0	无	1
	开挖	1.0	2.0	无	1
	开挖	1.0	3.0	无	2
	间歇	0.0	3.0	无	8
第 2 步	开挖	1.0	4.0	第 1 层支撑	2
	开挖	1.0	5.0	第 1 层支撑	2
	开挖	1.0	6.0	第 1 层支撑	3
	间歇	0.0	6.0	第 1 层支撑	8
第 3 步	开挖	1.0	7.0	第 2 层支撑	3
	开挖	1.0	8.0	第 2 层支撑	3
	开挖	1.0	9.0	第 2 层支撑	4
	间歇	0.0	9.0	第 2 层支撑	10

100 m×40 m,土体及支护结构的网格剖分如图 1 所示。

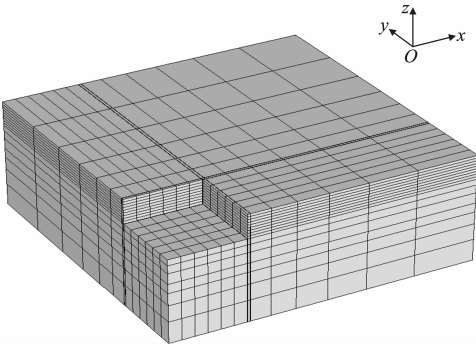


图 1 有限元网格剖分

Fig. 1 Mesh of Finite Elements

本文土体模型采用邓肯-张非线性弹性模型,其计算参数采用文献[4]中的饱和软粘土参数,取值如表 1 所示。接触面采用基于文献[14]模型的三维接触面薄层单元,接触面的外摩擦角和接触面粘聚力分别为 35°和 15 kPa,其他计算参数和土体单元一样;地下连续墙采用线弹性模型,其弹性模量和泊松比分别为 2.5×10^4 MPa 和 0.167;混凝土支撑采用线弹性模型,第 1 层和第 2 层的弹性模量均为 2.3×10^4 MPa。

土体模型的位移边界条件为:基坑长度方向(y 方向)的计算域两边边界面 y 方向位移为 0;基坑宽度方向(x 方向)的计算域两边边界面 x 方向位移为 0;基坑深度方向(z 方向)的计算域底面 x,y,z 方向位移均为 0,而在计算域上表面则(z 方向)自由。

土体模型的排水边界条件为:基坑长度方向(y 方向)和宽度方向(x 方向)的计算域边界面均为不透水边界;基坑深度方向(z 方向)的计算域底面为

不透水边界,在开挖区域以外的上表面和开挖区域以内的开挖面均为排水边界,坑内地下水位面在每步开挖后假定都在坑底开挖面处,而坑外地下水位面假定在地表处不变;基坑支护结构为双面不透水边界。

3 基坑支护结构水平位移

3.1 不同荷载大小的影响

图 2 为 0,10,20,40 kPa 坑外荷载 Q 作用下(加载范围是基坑边到计算域边缘)第 3 步开挖结束时 $x=0$ m 截面(即基坑宽度方向的对称平面,参考图 1)支护结构的水平位移对比。

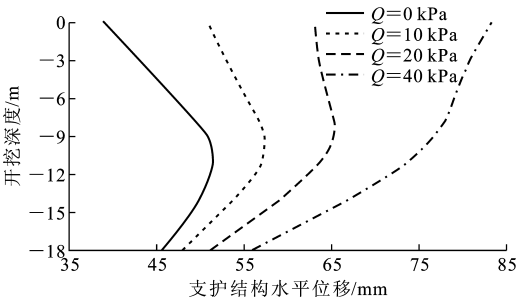


图 2 不同荷载大小时支护结构水平位移对比

Fig. 2 Comparison of Horizontal Displacements of Retaining Structure Under Various Loading Sizes

从图 2 可以看出,坑外荷载越大,支护结构水平位移也越大,没有坑外荷载时,水平位移最小,坑外荷载为 40 kPa 时,水平位移最大,其中 10,20,40 kPa 坑外荷载作用下的墙体最大水平位移分别比无坑外荷载作用时的最大水平位移增加 11%,27%,62%。坑外荷载越大,最大水平位移点离地表越近,没有坑外荷载时最大水平位移点位于开挖面(开挖深度 9 m)下 2 m,10 kPa 坑外荷载时的最大水平位移点位于开挖面处,20 kPa 坑外荷载时的最大水平位移点位于开挖面上 1 m 处,而 40 kPa 坑外荷载时的最大水平位移点位于墙顶处。因而,在进行基坑工程设计时,必须考虑荷载大小对基坑支护结构水平位移和支护结构最大水平位移点的影响。

3.2 不同荷载作用范围的影响

图 3 为 20 kPa 坑外荷载分别施加在距坑边 0,6.68,14.91,25.19 m 到计算域边缘、第 3 步开挖结束时 $x=0$ m 截面的支护结构水平位移对比。从图 3 可以看出,施加荷载的位置对支护结构的水平位移影响较大,20 kPa 坑外荷载分别施加在距坑边 0,6.68,14.91,25.19 m 以外的支护结构最大水平位移分别为 65.4,61.1,58.9,55.6 mm,最大相差近

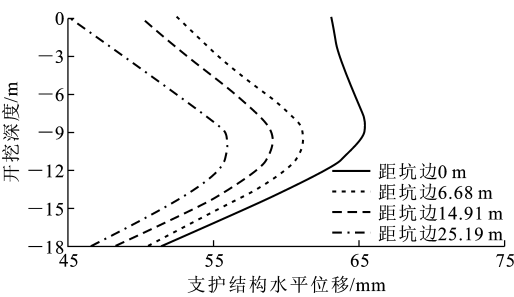


图3 不同荷载位置时支护结构水平位移对比
Fig.3 Comparison of Horizontal Displacements of Retaining Structure Under Various Loading Areas

10 mm,但施加荷载的位置对支护结构最大水平位移点的位置影响不大,基本上都位于开挖面深度处(开挖深度为9 m)附近。

3.3 不同加载时间的影响

图4为无坑外荷载、在第1步开始开挖时、第2步开始开挖时和第3步开始开挖时坑外施加有20 kPa均布荷载情况下在第3步开挖结束时 $x=0$ m截面支护结构的水平位移对比。

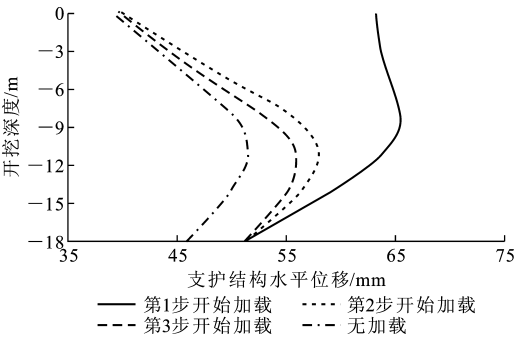


图4 不同加载时间支护结构水平位移对比
Fig.4 Comparison of Horizontal Displacements of Retaining Structure Under Various Loading Time

从图4可以看出,施加荷载的时间越长,支护结构的水平位移越大,分别在第1步开挖时、第2步开挖时和第3步开挖时施加20 kPa荷载的支护结构最大水平位移较无坑外荷载时的支护结构最大水平位移分别增加27%,12%,9%。坑外不施加荷载和从第2步、第3步开挖时加载情况下的最大水平位移点均位于开挖面(开挖深度为9 m)深度下2 m左右,而从第1步开挖就开始加载的最大水平位移点位于开挖面深度附近,且最大水平位移点以上的水平位移也都较大。

4 坑外地表沉降

4.1 不同荷载大小的影响

图5为坑外不同荷载大小情形下第3步开挖结

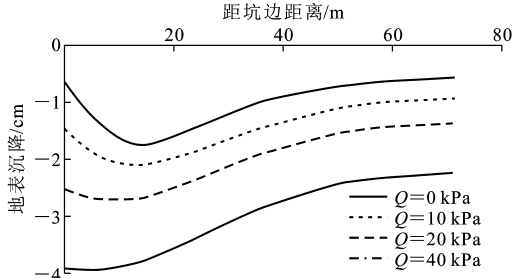


图5 不同荷载大小时坑外地表沉降对比
Fig.5 Comparison of Ground Settlements Under Various Loading Sizes

束时 $x=0$ m截面的基坑周围地表沉降对比。

从图5可知:坑外荷载越大,基坑周围的地表沉降值越大,其中,坑外荷载为0,10,20,40 kPa时的最大地表沉降分别为1.74,2.09,2.68,3.93 cm;荷载越大,最大地表沉降位置越靠近支护结构,0 kPa和10 kPa坑外荷载时的最大沉降点离支护结构距离约为15 m,而20 kPa和40 kPa坑外荷载时的最大沉降点离支护结构距离约为7 m。由于紧邻支护结构的土体,受到支护结构隆起和挤压的影响,土体的沉降较小;稍远离支护结构处地表沉降较大,尤其是离基坑约40 m范围内的地表沉降较大;离基坑40 m范围以外由于受开挖的影响较小,所以地表沉降也较小。

4.2 不同荷载作用范围的影响

图6为20 kPa坑外荷载分别施加在距坑边0,6.68,14.91,25.19 m到计算域边缘、第3步开挖结束时 $x=0$ m截面基坑周围地表沉降对比。从图6可以看出,距坑边一定距离施加面荷载时,施加的荷载距坑边越远,坑边的隆起变形范围越大,这是由于坑边有荷载时限制了坑边土体向上变形的缘故。在距坑边6.68 m和14.91 m以外区域施加面荷载时,在坑外18 m以外的沉降曲线几乎与全部加载的沉降曲线重合;距坑边25.19 m以外区域施加面荷载时,在坑外25 m以外区域的沉降值稍微比其他几种情形偏大。

4.3 不同加载时间的影响

图7为不同荷载作用时间情形下第3步开挖结束时 $x=0$ m截面的基坑周围地表沉降对比。从图7可知,地表沉降值随距坑边距离的增大先增大到最大值然后减小,近似呈凹槽形分布。加载时间越短,基坑周围地表沉降值越小,荷载为0 kPa、第3步开挖时开始加载、第2步开挖时开始加载和第1步开挖时开始加载的最大地表沉降值分别为1.74,2.16,2.18,2.68 cm。

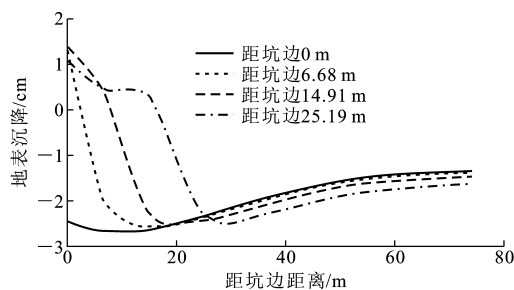


图 6 不同荷载位置时坑外地表沉降对比

Fig. 6 Comparison of Ground Settlements Under Various Loading Areas

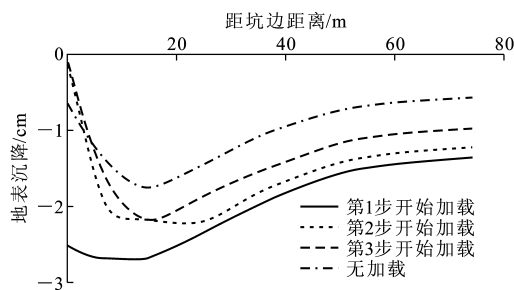


图 7 不同加载时间坑外地表沉降对比

Fig. 7 Comparison of Ground Settlements Under Various Loading Time

5 坑底隆起变形

基坑在坑外荷载的作用下不仅增加了支护结构的水平位移值和坑外地表沉降值,而且也将增加基坑底部的隆起变形值。

5.1 不同荷载大小的影响

图 8 为不同荷载大小情形下第 3 步开挖结束时 $x=0$ m 截面坑底隆起变形对比。从图 8 可以看出,坑外荷载越大,坑底隆起变形越大。在距离基坑中心约 15 m 范围内,由于受支护结构的挤压影响较小,0,10,20,40 kPa 荷载作用下坑底隆起变形值分布比较均匀;在靠近支护结构附近,坑底面以下部分的墙体向基坑方向变形并推挤墙前土体,使得坑底的隆起变形增大,而紧挨支护结构的土体由于受到墙体侧壁向下的摩擦力,导致坑底隆起值急剧减小。

5.2 不同荷载作用范围的影响

图 9 为在离基坑不同距离分布面荷载情况下第 3 步开挖结束时 $x=0$ m 截面坑底隆起变形对比。从图 9 可以看出,荷载作用位置离基坑越近,坑底隆起变形值越大,但整体说来,荷载作用位置对坑底隆起变形影响很小。在距离基坑中心 15 m 范围内,坑底的隆起变形值基本上相同;在靠近支护结构处,土体受到挤压,隆起变形值增加。

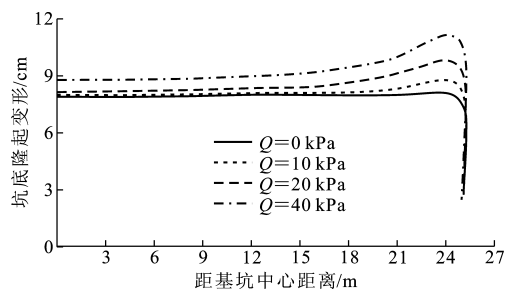


图 8 不同荷载大小时坑底隆起变形对比

Fig. 8 Comparison of Basal Heaves Under Various Loading Sizes

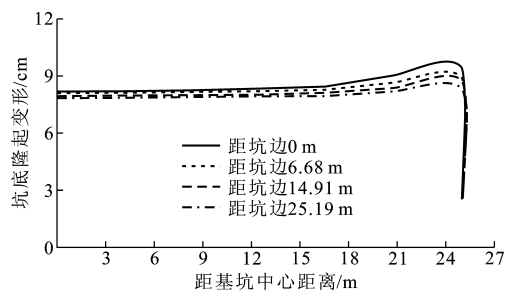


图 9 不同荷载位置时坑底隆起变形对比

Fig. 9 Comparison of Basal Heave Under Various Loading Areas

5.3 不同加载时间的影响

图 10 为不同坑外荷载作用时间情形下第 3 步开挖结束时 $x=0$ m 截面的坑底隆起变形对比。从图 10 可以看出:在距离基坑中心 15 m 范围内,有坑外荷载比没有荷载的坑底隆起变形值稍大,不同的荷载作用时间对最终的坑底隆起变形值影响不大;在靠近支护结构处,有坑外荷载情形的坑底隆起变形值更大,尤其是在第 1 步开挖就存在坑外荷载时,坑底的隆起变形值明显较没有荷载作用和其他时间有坑外荷载作用情形下的隆起变形值大。

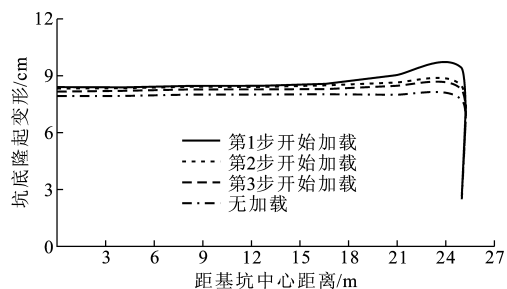


图 10 不同加载时间坑底隆起变形对比

Fig. 10 Comparison of Basal Heaves Under Various Loading Time

6 结 语

(1)荷载大小对基坑支护结构的水平位移、坑外

地表沉降和坑底隆起变形均影响较大。荷载越大,支护结构的水平位移、坑外地表沉降和坑底隆起变形都越大。

(2)荷载作用范围对基坑支护结构的水平位移和坑外地表沉降影响较大,但对坑底隆起变形影响较小。荷载作用范围越大,支护结构的水平位移越大;荷载作用范围越小,靠近支护结构处的坑外地表隆起变形范围越大。

(3)荷载作用时间对基坑支护结构的水平位移和坑外地表沉降影响较大,但对坑底隆起变形影响较小。荷载施加时间越长,支护结构的水平位移越大,坑外地表沉降变形越大。

参考文献:

References:

- [1] BJERRUM L, EIDE O. Stability of Strutted Excavations in Clay[J]. Geotechnique, 1956, 6(1): 32-47.
- [2] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of Ground Surface Settlement During Excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758-767.
- [3] 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.
- [4] LI Y Q, ZHOU J, XIE K H. Environmental Effects Induced by Excavation[J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2008, 9(1): 50-57.
- [5] 应宏伟, 杨永文, 胡安峰, 等. 软土某深基坑开挖的实测性状和环境效应分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增2): 90-93.
YING Hong-wei, YANG Yong-wen, HU An-feng, et al. Analysis on Observed Performance and Environmental Effect of a Deep Excavation in Soft Clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S2): 90-93.
- [6] TAN Y, WANG D. Characteristics of a Large-scale Deep Foundation Pit Excavated by the Central-island Technique in Shanghai Soft Clay. I: Bottom-up Construction of the Central Cylindrical Shaft[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(11): 1875-1893.
- [7] 谢雄耀, 郁宏杰, 王庆国, 等. 基坑开挖引起下卧既有电力隧道变形的控制技术研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 88-97.
XIE Xiong-yao, YU Hong-jie, WANG Qing-guo, et al. Deformation Control of Operating Tunnels Induced by Deep Excavation of Overlying Metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 88-97.
- [8] 刘素锦, 郭明伟, 李兆源, 等. 浅析车辆荷载对深基坑支护结构的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 105-107, 157.
LIU Su-jin, GUO Ming-wei, LI Zhao-yuan, et al. Discussion on the Influences of Vehicle Loads on Supporting Structure of Deep Foundation Pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 105-107, 157.
- [9] 林刚, 徐长节, 蔡袁强. 不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2592-2598.
LIN Gang, XU Chang-jie, CAI Yuan-qiang. Research on Characters of Retaining Structures for Deep Foundation Pit Excavation Under Unbalanced Heaped Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592-2598.
- [10] 徐长节, 陈金友, 郭鲁军, 等. 交通动荷载对基坑围护结构的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 884-887.
XU Chang-jie, CHEN Jin-you, GUO Lu-jun, et al. Influences of Vehicle Loads on Retaining Structure of Excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 884-887.
- [11] 陈梅, 郑坚昭, 莫玮宏, 等. 车辆超载作用下软弱基坑变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 539-546, 565.
CHEN Mei, ZHENG Jian-zhao, MO Wei-hong, et al. Research on Deformation of Foundation Pit in Soft Clay Under Vehicle Overloads[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(3): 539-546, 565.
- [12] 李玉岐. 考虑渗流影响的基坑工程性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
LI Yu-qi. Studies on the Behavior of Foundation Pit with Excavation Considering Seepage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [13] 谢康和, 周健. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
XIE Kang-he, ZHOU Jian. Theory and Application of Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] YIN Z Z, ZHU H, XU G H. A Study of Deformation in the Interface Between Soil and Concrete[J]. Computers and Geotechnics, 1995, 17(1): 75-92.