文章编号:1005-0523(2015)06-0082-06

软土基坑宽度效应对坑底隆起的影响

何 超[1],陈 沛[2],周顺华[1]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2. 宏润建设集团股份有限公司,浙江 宁波 315700)

摘要:通过对宽大型软土基坑坑底隆起特性及形成机理分析,将坑底土体划分成强作用区、弱作用区和自由变形区,提出综合考虑基坑开挖深度、围护结构插入比和土体性质的强、弱作用区边界计算方法;根据基坑开挖宽度不同时,坑底隆起作用区的变化情况,提出考虑坑底隆起宽度效应的基坑分类方法:将基坑划分为超大尺度基坑、大尺度基坑、小尺度基坑和沟槽类基坑 4类,并明确各类基坑的宽度范围。最后结合上海某软土基坑工程实例,采用有限元法数值分析对本文提出的理论分类方法的正确性进行了验证。

关键词:基坑工程;宽度效应;坑底隆起;基坑分类

中图分类号:TU 443 文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.06.013

随着城市地下空间开发的规模化和综合化,基坑工程历经了由长条、窄小型基坑向超宽超深、形状各异型基坑的转变。大规模的高层建筑地下室、地下商城和大规模市政工程的建设不断刷新着基坑工程的规模和深度,如上海自然博物馆深大异形基坑[1]开挖深度 17.3 m,最大开挖宽度 100 m,上海中心大厦裙房基坑[2]开挖深度 26.7 m,宽度达 200 m。而一些地铁车站风井、出入口及顶管工作井基坑宽度很窄,其数量也占基坑工程一定比例。这些都迫切需要解决基坑宽度效应对变形的影响问题。

基坑开挖过程中围护结构和周围土体变形随开挖深度的变化规律,因其为各项研究工作的重点,相应的规律已也被揭示得较为清晰[3-5]。而针对基坑宽度效应对基坑变形的影响规律相对研究较少,相关学者研究发现围护墙水平位移和地表沉降随开挖宽度的增大而增大,但它们之间关系呈非线性,当基坑开挖宽度达到一定程度后,再增大开挖宽度对基坑变形影响很小[6-8]。王洪新[9-11]提出了考虑基坑开挖宽度的围护结构水平位移和稳定性计算公式;而针对宽度效应对坑底隆起的影响,普遍分为宽窄两类基坑进行考虑。周顺华[12]通过离心试验研究发现窄基坑坑底隆起表现为中间大、两边小分布。刘国斌[13]结合工程经验也得到类似结论。对于宽基坑,由于围护结构及坑外土体变形增大,导致坑底土体的塑性隆起变大,进而改变了隆起分布规律[12-14]。然而针对坑底隆起特性仅将基坑分为宽窄两类的合理性以及基坑分类的理论依据的研究较少,相关规范在对隆起量估算及稳定性分析时缺乏考虑宽度效应[13,16-17],这也导致目前针对尺度较大基坑时仅根据经验认识采取工程措施,存在盲目性。

为此,本文结合软土基坑的工程实践,对软土基坑宽度效应对坑底隆起的影响进行研究,并依此提出考虑坑底隆起宽度效应的基坑分类方法。为坑底隆起量估算以及稳定性分析提供参考。

1 宽大型软土基坑坑底隆起分析

1.1 宽大型软土基坑坑底隆起特性及分区

图 1 为采用有限元法分析上海某软土基坑开挖引起的位移场。该基坑宽度 140 m,开挖深度为 10 m,围

收稿日期:2015-08-24
基金项目:国家自然科学基金项目(50878151)
作者简介:何超(1990—),男,博士研究生,主要从事岩土工程、地下工程方面研究。
导师简介:周顺华(1964—),男,教授,博士,研究方向为岩土工程与地下铁道工程。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

护结构采用深 22 m，厚 800 mm 的地下连续墙,竖向共设置三道钢支撑。土层物理力学指标见表 1。计算时把基坑剖面看作对称的,故取其一半进行分析,采用 15 节点三角形单元模拟土体,板单元模拟地连墙,地连墙两侧与土的接触面用 10 节点无厚度接触面单元模拟。横向支撑选用锚锭杆单元模拟,模型边界条件为:模型左右两侧仅水平方向位移约束，模型底部水平向和竖直向位移全约束。

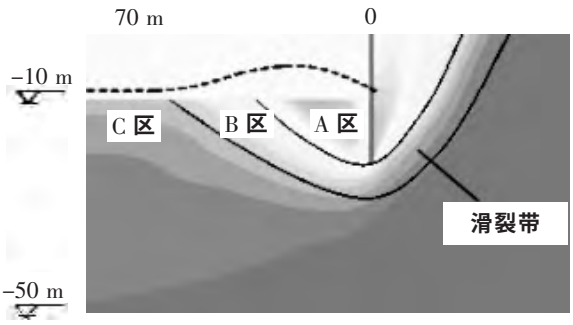


图 1　宽大型基坑坑底隆起特性及分区

Fig.1　Basal heave characteristics of wide excavation

由图 1 可知，基坑坑底隆起除卸载回弹外，还有因围护结构及坑外土体向基坑方向变位挤推造成的隆起，而根据坑底不同部位的隆起特性和形成机理可将坑底土体分为 3 个区域:

A 区位于基坑两侧,直接承受围护结构的挤推作用,为承受开挖引起的不平衡水平力的最主要区域,因此其塑性隆起最大。将其定义为强作用区,又由于围护结构的剪切摩擦作用,使得围护结构临近区域土体隆起受到约束,从而使强作用区形成图 2 所示的隆起峰值。

B 区为强作用区的影响延伸区,为滑移带的坑底部分,该区隆起除回弹变形外还有因坑外土体向坑内移动而产生的塑性变形。因其距离围护结构较远,承受不平衡水平力相对较小,相应的塑性隆起也小于强作用区,本文将其定义为弱作用区。弱作用区隆起量随着与围护结构的距离增加而递减。

C 区则是位于基坑中部,滑移带之外的区域,将其定义为自由变形区。自由变形区内土体不受围护结构及其背侧土体的挤推作用,仅有土体开挖卸载产生的回弹变形;因此在各向同性假设前提下,区域内各点的应力释放量相同,变形形态表现为隆起量一致的平台,且小于基坑两侧强作用区的隆起量。

表 1　土层主要物理力学参数表

Tab.1　Main physical and mechanical parameters of soil layers

土　　层	土层厚度/m	含水率/%	重度/(kN·m^{-2})	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
② 粉质粘土	4.48	31.7	19.1	21	19
③ 淤泥质粉质粘土	3.08	42.3	17.3	12	19
④ 淤泥质粘土	7.58	50.9	16.5	14	11
⑤ 1 淤泥质粉质粘土	10.00	41.8	17.4	14	15
⑤ 2 砂质粉土	8.50	32.4	18.5	4	31
⑤ 3 粉质粘土加粉砂	16.36	32.6	18.1	19	21

1.2　坑底隆起区域边界计算

基坑开挖引起土体滑移的形态主要有圆弧形滑动、直线型滑动、直线和对数螺线组合滑动 3 种。本文的分析采用直线和对数螺线组合滑动形态。

如图 2 所示，Ⅰ区为郎肯主动状态区,Ⅲ区为郎肯被动状态区，Ⅱ区为过渡区,滑裂面符合对数螺旋线方程:$r=r_0\,e^{\theta\tan\varphi}$。Ⅳ区为基坑开挖引起的滑移带,其延伸到地表的边界距围护结构的距离取地表沉降影响范围 d。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

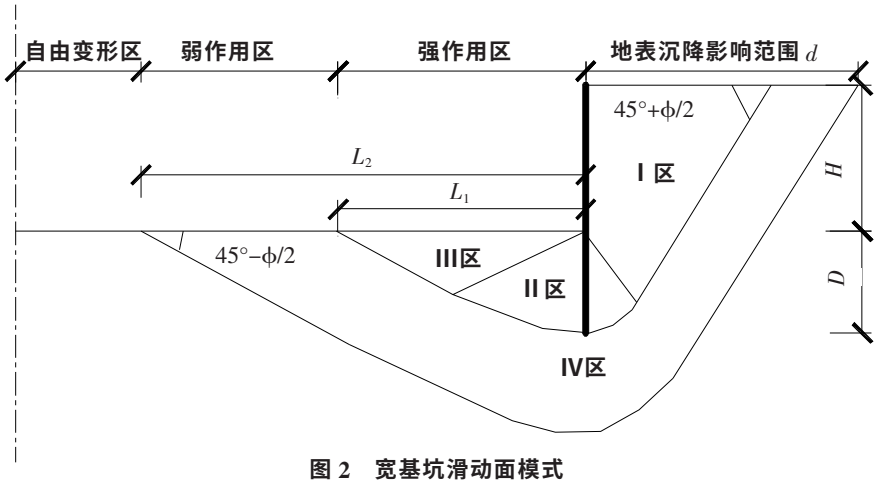


图2 宽基坑滑动面模式

Fig.2 Sliding surface mode of wide excavation

从而根据3大隆起区域的定义便可求得强作用区边界：

$$L_1=2De^{(\frac{\pi-2\varphi}{4})\tan\varphi}\cos(\frac{\pi-2\varphi}{4}) \tag{1}$$

弱作用区边界：

$$L_2=\left(d-H\tan(\frac{\pi+2\varphi}{4})\right)e^{(\frac{\pi}{2})\tan\varphi}\tan(\frac{\pi+2\varphi}{4}) \tag{2}$$

式中：H 为基坑开挖深度；D 为围护结构入土深度；φ 为坑底土体的内摩擦角；d 为地表沉降影响范围，文献[13]通过对国内外相关研究整理发现对于软土基坑一般取2~4 H，本文取其平均值即 d=3 H。

2 考虑坑底隆起宽度效应的软土基坑分类

当基坑宽度变化时，3大隆起区域也将相应发生变化，从而使坑底隆起形态及稳定性发生改变。因此本文根据基坑宽度变化过程中3大隆起区域的演变情况将基坑分为4类：

1）超大尺度基坑。当基坑宽度 $B>2L_2$ 时，坑底保留了3大隆起区域，此后基坑宽度的增加并不会改变坑底的隆起形态，将这类尺度的基坑定义为“超大尺度基坑”，其隆起形态特性如图3(a)所示。基坑两侧强作用区因围护结构挤推作用形成两大隆起峰值，而基坑中部由于回弹变形形成隆起一致的平台，最大隆起量位于基坑两侧的强作用区内。

2）大尺度基坑。当 $2L_1\leqslant B\leqslant 2L_2$ 时，坑底仅保留了强作用区和弱作用区，将这种尺度类型的基坑称为“大尺度基坑”。大尺度基坑隆起形态如图3(b)所示。由于不存在自由变形区，因此基坑中部无隆起量一致的区域，而基坑两侧的强作用区未发生重合，依旧存在两大隆起峰值。弱作用区的重合使得其对两侧强作用区的约束作用增强，因此大尺度基坑稳定性强于超大尺度基坑。

3）小尺度基坑。当基坑宽度进一步减小至 $L_1\leqslant B\leqslant 2L_1$ 时，基坑两侧的强作用区相互重叠、交汇，弱作用区消失，原本位于两侧的隆起峰值在基坑中部重叠。隆起特性为图3(c)所示的中间大、两边小，将这种尺度的基坑称为“小尺度基坑”。此时由于基坑两侧的强作用区发生重叠，相当于基坑一侧对对侧的土体产生超载，不仅限制了坑底的隆起变形，还大大提高了坑底的抗隆起稳定性。

4）沟槽类基坑。而当 $B<L_1$ 时，基坑周边土体已无法形成连通坑内外的贯通滑动面，将这样尺度的基坑统称为“沟槽类基坑”，沟槽类基坑的坑底土体隆起也呈现中间大、两边小形态。且其已不会发生整体性的土体破坏，仅可能发生局部土体涌起等局部破坏状况。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

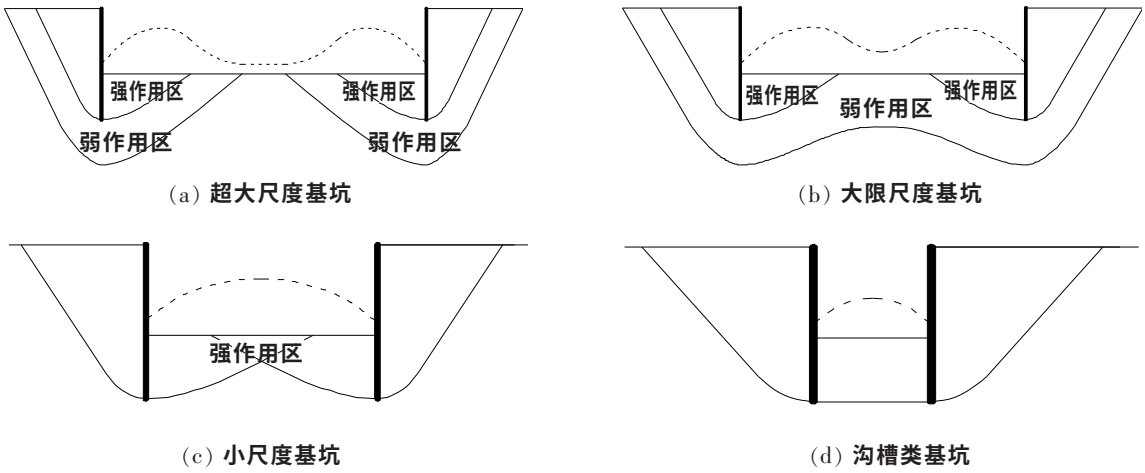


图 3　不同类型基坑隆起形态示意图

Fig.3　Basal heave shape of different kinds of excavation

坑底隆起宽度效应的实质是开挖宽度变化过程中,两侧围护结构及背后土体的挤推影响区域在坑底分布的演变情况,即 3 大隆起区域的变化和重叠使得坑底隆起形态及稳定性发生相应改变。当基坑开挖深度及轮廓一定时,基坑局部平面尺度越小,对确保基坑工程安全和周边环境保护越有利,故实际施工过程中可利用基坑宽度效应来提高基坑工程的安全性并减小对周边环境的影响,如中心岛工法和“盆式开挖+局部逆作”工法等。对比目前一般意义上的宽窄基坑可知,其大致相当于明确了“大尺度基坑”和“小尺度基坑”的划分界限。

3　有限元数值分析验证

结合2.1 节中的软土基坑工程实例,采用有限元数值分析方法计算基坑宽度由 10 m 变化到 140 m 时的坑底隆起情况,对考虑坑底隆起宽度效应分类方法进行验证。

图 4 为基坑宽度 B=10~50 m 时坑底隆起图式,此宽度范围内坑底隆起量随宽度增加明显,而坑底隆起表现为中间大,两边小,最大隆起量位置位于基坑中央,说明此宽度范围基坑两侧强作用区重叠,属于沟槽类基坑和小尺度基坑。但两者的界限,从有限元计算结果中无法分辨。

当基坑宽度位于 60~80 m 时(见图 5),基坑两侧出现隆起峰值,基坑中心的隆起量小于基坑两侧,说明坑底两侧强作用区分离,但基坑中部并未出现隆起一致的平台,说明自由变形区未出现,此宽度范围内的基坑属于大尺度基坑,大尺度基坑坑底隆起量随宽度增加而略有增长。

当基坑宽度大于 90 m 后 (见图 6), 基坑中部在距围护结构 42 m 处开始出现了隆起一致的自由变形区,说明此宽度范围内基坑属于超大尺度基坑,此时,随着基坑宽度的增加,坑底隆起量已趋向收敛。

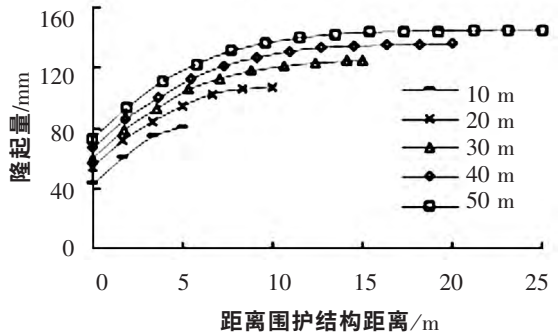


图 4　沟槽类与小尺度基坑坑底隆起曲线(B=10~50m)

Fig.4　Basal heave profile of trenches and small scale excavation

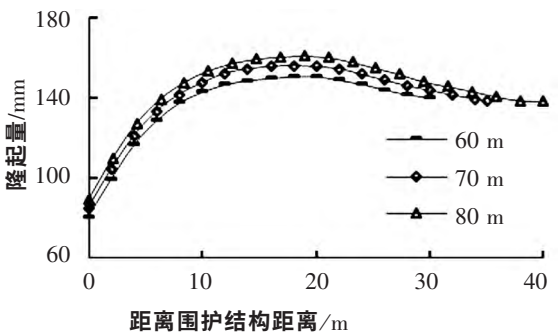


图 5　大尺度基坑坑底隆起曲线(B=50~90m)

Fig.5　Basal heave profile of large scale excavation

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

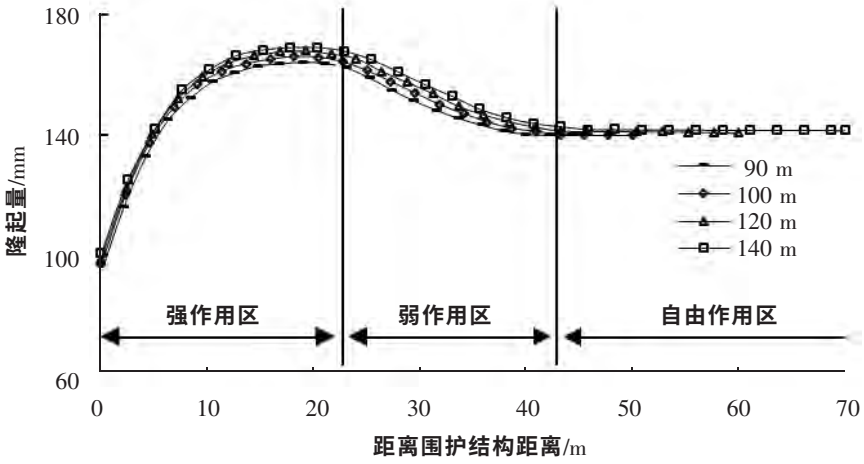


图6 超大尺度基坑坑底隆起曲线(B=100~160 m)

Fig.6 Basal heave profile of extra-large scale excavation

而采用本文提出的公式(1)(2)计算的该软土工程实例中的强作用区边界 L_1=28 m,弱作用区边界 L_2=40 m,计算过程中 H=10 m,D=12 m,φ 取土层的加权综合内摩擦角,参照规范计算方法[18]得 $\varphi_d \approx 20°$。

从而得到本文理论计算的各类基坑宽度范围,如表2所示。对比发现,理论计算所得的小尺度基坑、大尺度基坑和超大尺度基坑的分类标准与有限元计算结果具有很好的吻合性,证明了本文考虑基坑宽度效应的分类方法的正确性。另外本文的理论分析还可区分沟槽类基坑与小尺度基坑的宽度范围。

表2 理论计算与有限元计算结果对比

Tab.2 Comparison of the theoretical computing results and the results of finite element method

基坑类别	理论计算宽度范围/m	有限元计算宽度范围/m
沟槽类基坑	B≤26	B≤50
小尺度基坑	26<B≤56	
大尺度基坑	56<B≤80	60≤B≤84
超大尺度基坑	B>80	B> 84

4 结论

结合上海某软土基坑工程实例,采用有限单元法分析了软土基坑宽度效应对坑底隆起影响,得到如下结论:

1) 根据坑底不同区域隆起特性的不同,将坑底划分为强作用区、弱作用区和自由变形区。强作用区受围护结构挤压作用,为承担开挖引起的不平衡水平力的主要区域;弱作用区受坑外土体的挤推作用;自由变形区位于基坑中部,不受围护结构及坑外土体的挤推作用。

2) 采用直线和对数螺线组合滑动形态,获得了强作用区边界 L_1 和弱作用区边界 L_2 的计算公式,如式(1)和(2)所示,公式能够综合考虑基坑开挖深度、围护结构插入比,土体特性的影响。

3) 根据基坑开挖宽度的变化过程中,强作用区、弱作用区和自由变形区的完备程度,将基坑划分为超大尺度基坑、大尺度基坑、小尺度基坑、沟槽类基坑四类,并明确了各类基坑的坑底隆起特性和宽度范围。

参考文献:

[1] 同济大学. 多重组合式基坑群施工相互影响及应对措施研究[R]. 上海:同济大学,2012.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] 王旭军. 上海中心大厦裙房深大基坑变形特性及盆式开挖技术研究[D]. 上海：同济大学，2014.
[3] 李 淑，张顶立，房倩，等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(1)：189-198.
[4] 李岩松，邹吉聪. 上海自然博物馆基坑地下连续墙变形研究[J]. 华东交通大学学报，2012，29(2)：51-56,107.
[5] 王步翔，曹雪山. 狭长深基坑支护结构设计的有限元分析[J]. 华东交通大学学报，2015，32(1)：65-770.
[6] BOSE S K，SOM N N. Parametric study of a braced cut by finite element method [J]. Computers and Geotechnics，1998，22(2)：91-107.
[7] KUNG G T，JUANG C H，HSIAO E C L，et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2007，133(6)：731-747.
[8] 张雷，刘振宏，钱元运，等. 深基坑宽度对周围建筑影响的有限元分析[J]. 地下空间与工程学报，2009，5(S)：1312-1344.
[9] 王洪新，孙玉永. 考虑基坑开挖宽度的杆系有限元算法及试验研究[J]. 岩土力学，2012，33(9)：2781-2787.
[10] 王洪新，周 松. 基坑设计的杆系-荷载-弹簧模型荷载取值及变形和稳定性分析的若干问题和研究建议[J]. 岩土力学与工程学报，2013，32(11)：2349-2358.
[11] 王洪新. 基坑宽度对围护结构稳定性的影响[J]. 土木工程学报，2011，44(6)：120-126.
[12] 周顺华. 开挖理论[M].北京：中国铁道出版社，1997.
[13] 刘国彬，王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
[14] 夏明耀. 地下连续墙的变形机理与环境问题对策[J] . 同济大学学报，1991，19(1)：59-66.
[15] 贾坚，谢小林. 上海软土地区深大基坑卸荷变形机理[J]. 上海交通大学学报，2009，43(6)：1005-1010.
[16] 汪炳鉴，夏明耀. 地下连续墙的墙体内力及入土深度问题[J]. 岩土工程学报，1983，5(3)：103-114.
[17] 王洪新. 对基坑抗隆起稳定安全系数的改进[J]. 岩土力学，2014，35(S2)：30-36.
[18] 中华人民共和国国家标准. 建筑边坡工程技术规范(GB50330-2002)[S]. 北京：中国建筑工业出版.

Influence of Width Effect of Soft Soil Excavation on Basal Heave

He Chao, Chen Pei, Zhou Shunhua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Through analyzing characteristics and forming mechanism of basal heave of the wide excavation in soft soil, by dividing basal soil mass into strong interacting region, weak interacting region and free deformation region, this paper puts forward a computing method of boundary length for different heave areas considering the excavation depth, embedment depth and soil properties. Then the foundation pits classification method considering the width effect is presented. In terms of transformation of each region in the process of excavation width change, excavation can be classified into extra-large scale excavation, large scale excavation, small scale excavation and trenches, whose width area of different foundation pits is given. The validity of this classification system is verified by FEM method combined with an excavation project in Shanghai.

Key words: excavation engineering; width effect; basal heave; excavation classification

(责任编辑　王建华)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net