

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.013

小尺度井结构基坑墙后土压力的坑角效应

贾敏才^{1,2}, 杨修晗¹, 叶建忠³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092; 3. 浙江省交通规划设计研究院, 杭州 310006)

摘要: 为研究小尺度井结构基坑墙后土压力的坑角效应, 通过对井结构基坑进行室内模型试验及 FLAC^{3d} 数值模拟, 研究了井结构基坑墙后土压力的空间分布和墙后土压力坑角效应对围护结构内力的影响, 分析了基坑尺度对墙后土压力坑角效应的影响规律。结果表明: 1.5H 深度以内墙后土压力分布具有坑角效应, 且不同尺寸井结构基坑坑角效应的影响范围在离坑角 0.2H 以内; 坑角效应使得角部水泥土剪应力较大; 当 L/H (主墙长度与挖深之比) ≤ 1.5 时, 坑角效应主要受 L/H 的影响; L/B (主墙长度与附墙长度之比) 对坑角效应影响不显著。

关键词: 小尺度井结构基坑; 墙后土压力; 坑角效应; 尺度影响

中图分类号: TU432

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)12-0095-08

Corner effect of active earth pressure for small-sized excavation

JIA Mincai^{1,2}, YANG Xiuhuan¹, YE Jianzhong³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China; 3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: To study the corner effect of the earth pressure for small-sized excavation, the spatial distribution of active earth pressure was studied for excavations with different sizes, using laboratory model test and the FLAC^{3d} respectively. The influences of L/H (L is the length of primary wall; H is the excavation depth) and L/B (B is the length of complementary wall) on the significance of corner effect were also analyzed. The results show that: the distribution of active soil pressure displays the effect of corners in the depth of 1.5H; the distance affected by the corner effect is almost the same (within 0.2H from the corner) for different sizes of excavations; the shear stress in cement-stabilised soil is greater on the corner section because of the existence of the corner effect; for relatively small L/H, the significance of corner effect is mainly affected by L/H; the significance of corner effect seems to be independent of L/B.

Keywords: small-sized excavation; active soil pressure; the effect of corners; size effect

在城市电力隧道、输水隧道、过路过河等市政工程中往往需要盾构与顶管技术, 盾构与顶管工作井多采用明挖法基坑开挖施工。而这种基坑往往具有开挖平面尺寸较小而深度相对较大的特点。井结构基坑平面尺寸大多在 10 m 左右, 一般不超过 20 m, 基坑开挖深度在 10~20 m, 相应的基坑宽深比小于 1 或在 1~2 左右。

文献[1-6]表明平面小尺度井结构基坑呈现典型的角部特性。不同于二维平面应变问题, 基坑墙后土压力受挡墙位移的影响具有明显的坑角效应; 不

同于宽大基坑, 基坑性状受基坑尺寸的影响显著。

现有基坑墙后土压力坑角效应的研究, 主要集中在简单条件下的宽大基坑。例如, 叶文武^[7]对悬臂式基坑主动状态土压力的坑角效应及其影响因素(支护刚度、土体参数、长宽比等)进行研究; 徐林^[8]研究了开挖过程中, 支护结构土压力的空间分布情况, 探讨了基坑几何尺寸对基坑支护结构的角部效应、土压力分布的影响; 杨雪强等^[9]对无粘性土进行研究, 理论推导了考虑空间效应的土压力计算公式; 雷明锋等^[10]理论推导了黏性土条件下长大深基坑空间效应系数的简化计算方法; 欧明喜等^[11]建立了考虑卸荷及变形影响的非极限主动、被动土压力计算公式。

对于小尺度井结构基坑研究的相关文献较少。

收稿日期: 2015-07-01

基金项目: 浙江省交通运输厅科研项目(2014H06);

2013 年度上海市科技小巨人工程项目(13HX1189000)

作者简介: 贾敏才(1973—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 贾敏才, mincai_jia@tongji.edu.cn

张雪婵等^[12]以杭州庆春路过江隧道工作井为例,对墙体水平位移、地表沉降、地下水位及支撑轴力进行监测分析;耿亚梅等^[13]研究了环梁厚度、连续墙厚度、支撑截面等因素对盾构工作井支护结构的变形和受力的影响规律。然而,对于井结构基坑墙后土压力坑角效应及尺度影响的研究并不充分。

本文借助室内模型试验及 FLAC^{3d} 数值模拟,研究了井结构基坑墙后土压力的空间分布,分析了基坑平面尺寸对墙后土压力坑角效应的影响规律。

1 室内模型试验

1.1 试验设计

本次试验目的是通过模拟不同平面尺寸的内支撑结构基坑,来研究小尺寸市政井结构基坑的墙后土压力空间分布及基坑尺寸对墙后土压力空间分布的影响规律。

模型箱几何尺寸为 0.8 m (长) × 0.8 m (宽) × 1.1 m (高),前方是 70 cm × 100 cm 的透明钢化玻璃。

考虑到基坑开挖的可行性和试验观测的方便性,本次试验采用 1/4 基坑模型,模型采用几何相似常数 $C_L = L_p/L_m = 30$ 。土样采用普通黄砂,重度为 15 kN/m^3 , $C_\gamma = 1$ 。

围护结构采用 1 cm 厚胶合木板进行模拟(木板弹性模量 $E = 3\,500 \text{ MPa}$),木板与玻璃接触面上做润滑处理。内支撑采用不同直径的细钢筋进行模拟。支护结构原型与模型的对应关系见表 1。木板上预留孔洞,用以安装钢筋支撑。钢筋一端加工螺纹并安装两个紧固螺母,分别位于木板两侧。制样时,拧松内侧螺母,使钢筋自由移动;开挖完成后,拧紧内侧螺母即起到支撑作用。

本次试验共分为 3 组,3 组试验的原型及模型尺寸见表 1,整个模型的布置简图见图 1。

表 1 室内模型试验参数设计

Tab.1 Parameters of laboratory model tests

基坑	围护结构	内支撑 1	内支撑 2	内支撑 3	内支撑 4	开挖深度/m	平面尺寸/m	围护结构高度/m	支撑水平间距/m	支撑竖向间距/m
原型	850SMW 工法桩,密插 700×300H	非对称面	对称面上	非对称面	对称面上	13.12	10×10	25.5	5.00	4.50
		混凝土支撑	混凝土支撑	钢管撑	钢管撑		3.80			
模型	1 cm 厚胶合木板	直径 6 mm 钢筋	直径 4 mm 钢筋	直径 4 mm 钢筋	直径 2 mm 钢筋	0.40	0.3×0.3	0.8	0.15	0.15
		钢筋	钢筋	钢筋	钢筋		0.10			

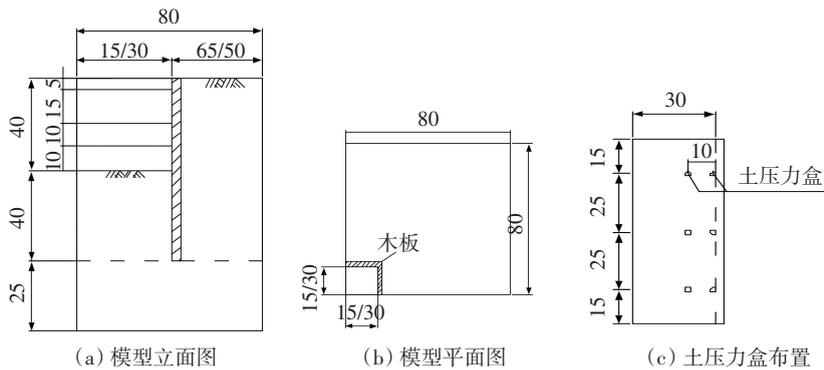


图 1 室内模型布置简图 (cm)

Fig.1 Arrangement diagram of laboratory model (cm)

1.2 试验步骤

1) 土压力盒的布设:共分 2 列,分别在基坑角部和离坑角 10 cm (0.25H) 处,每列 3 个,共 6 个土压力盒,见图 1(c)。土压力盒要求位置固定以便测量水平土压力,故用胶带将土压力盒固定在木板上,使土压力盒紧贴木板;

2) 支护结构安装:拧上内侧螺母,将钢筋插入在木板上的预留孔中,再拧上外侧螺母;

3) 装样时分层填装,先填围护结构外围,再填内侧;每次填装 5 cm,并保证内外高差不超过 5 cm;

4) 共开挖 4 次,第一次开挖 6 cm,第二次开挖 15 cm,第三次开挖 10 cm,第四次开挖 9 cm。每次开挖完成后,拧紧相应钢筋的内侧螺母,待土压力盒读数稳定,进行下次开挖。

1.3 试验结果

为方便表述,文献[1]定义墙后土压力被测量并作为研究对象的一侧墙体为主墙(主墙长度以 L 表示),与主墙垂直的墙体为附墙(附墙长度以 B 表示)。

图 2 为不同 L/H 基坑和不同 L/B 基坑墙后土压曲线。通过对比分析,可以看出:

1) 平面尺寸不同的 3 组室内模型试验, 墙后水平土压力沿深度均逐渐增加。

2) 3 组室内模型试验, 基坑坑角处墙后水平土压力均大于离坑角 0.25H 处墙后水平土压力。表明, 基坑墙后水平土压力分布具有明显的坑角效应, 离坑角越近, 墙后土压力越大。

3) 在坑角处和离坑角 0.25H 处, 不同 L/H 基坑墙后土压力变化不大(图 2(a)); 不同 L/B 基坑墙后土压力也基本相同(图 2(b))。

由于模型试验组数有限, 量测内容有限, 而且模型试验尺寸较小, 仅能大致反应墙后土压力的分布规律, 因此需要借助数值模拟进行更进一步的分析。

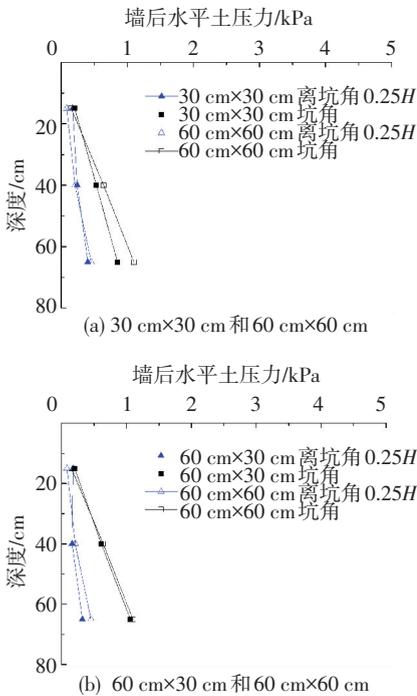


图 2 模型试验中墙后水平土压力对比

Fig.2 Comparison of active earth pressures for models with different sizes

2 FLAC^{3d} 数值模拟

2.1 数值模型的建立

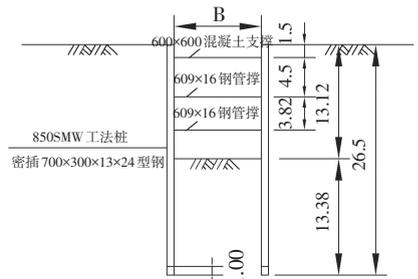
2.1.1 数值模型组况

为研究井结构基坑墙后土压力的坑角效应及平

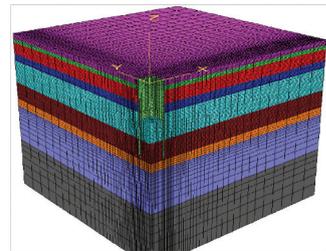
面尺寸的影响, 本节通过 FLAC^{3d} 有限差分软件, 对不同平面尺寸的井结构基坑进行模拟, 共分 5 组, 其平面尺寸分别为: 10 m x 10 m, 20 m x 20 m, 30 m x 30 m, 10 m x 20 m, 10 m x 30 m。此外, 对平面尺寸 100 m x 100 m 的基坑 (其他条件一致) 进行模拟, 以对比井结构基坑墙后土压力空间效应与普通宽大基坑的区别。

2.1.2 数值模型几何尺寸

为减少计算量, 数值模型采用 1/4 模型。模型基坑开挖尺寸、支护形式均与模型试验的原型保持一致, 详见表 1。模型基坑的具体几何尺寸见图 3(a)。鉴于普通基坑开挖的影响宽度一般为开挖深度的 3~4 倍, 影响深度一般为开挖深度的 2~4 倍^[3], 模型左右边缘距相应围护结构净距离取为 80 m, 模型高度取为 65 m。在网格四周边界设置竖向滑动约束, 底部设置完全固定约束, 如图 3(b) 所示。



(a) 模型尺寸



(b) 网格划分

图 3 数值模型布置

Fig.3 Arrangement diagram of numerical model

2.1.3 土层及支护结构

坑内及坑周土体采用实体单元模拟, 土体网格采用摩尔-库伦模型, 具体参数见表 2。

表 2 基坑土层参数

Tab.2 Soil parameters of foundation pit

土层	厚度/m	重度/(kN · m ⁻³)	变形模量/MPa	泊松比	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	2.0	20.0	15	0.40	10	12.0
褐黄-灰黄色粉质粘土	1.5	18.3	21	0.32	17	19.0
灰色淤泥质粉质粘土	4.5	17.4	16	0.35	11	17.0
灰色淤泥质粘土	3.0	16.8	15	0.35	10	13.5
灰色粘土	9.0	17.4	25	0.32	12	13.0
灰色粉质粘土	7.0	18.0	30	0.32	15	19.0
暗绿色粉质粘土层	3.0	19.5	48	0.30	39	20.5
灰绿-草黄色粘质粉土	15.0	18.9	112	0.32	5	33.0
灰色粉质粘土夹砂质粉土	20.0	18.3	66	0.32	12	25.0

SMW 工法桩采用在实体网格中设置桩单元的方法来模拟,内支撑采用梁单元模拟.水土网格采用摩尔-库伦模型,参数见表 3,梁单元及桩单元参数分别见表 4、5.

表 3 水泥土参数表

Tab.3 Parameters of cement-stabilised soil

变形模量/ MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	抗拉强度/ kPa
200	0.2	300	30	150

表 5 桩单元参数

Tab.5 Pile element parameters

弹性模量/GPa	泊松比	截面面积/m ²	极惯性矩/m ⁴	截面惯性矩 I _y /m ⁴	截面惯性矩 I _z /m ⁴	法向刚度/GPa	法向刚度/°	法向刚度/GPa	切向刚度/Pa	切向刚度/°	切向刚度/GPa
200	0.3	2.355×10 ⁻²	2.118×10 ⁻³	2.01×10 ⁻³	1.08×10 ⁻⁴	10	0	2	1×10 ⁴	0	2

在围护墙设置之前的初始平衡计算中,分界面仅仅用来连接两块土体网格,分界面参数取为:法切向刚度 $kn=ks=5.6\times 10^8\text{ N/m}^3$,内聚力 $c=10\text{ kPa}$,摩擦角 $\varphi=15^\circ$.

设置围护墙之后,进行开挖计算时,分界面不仅用来连接围护结构与土体网格,还要模拟围护结构与土体之间的接触作用和分离滑动.分界面参数取为:法向刚度 $kn=5\times 10^7\text{ N/m}^3$,切向刚度 $ks=8\times 10^5\text{ N/m}^3$,内聚力 $c=10\text{ kPa}$,摩擦角 $\varphi=10^\circ$.

2.2 数值模型的验证

为验证数值模型的可靠性,利用本节的数值模型对模型试验中 60 cm×60 cm 的模型进行模拟,并将模拟结果与实测数据进行对比.图 4 是基坑墙后水平土压力的试验值与模拟值对比曲线.模拟值与试验值的变化规律基本一致,表明本文所用模型具有一定的可靠性.

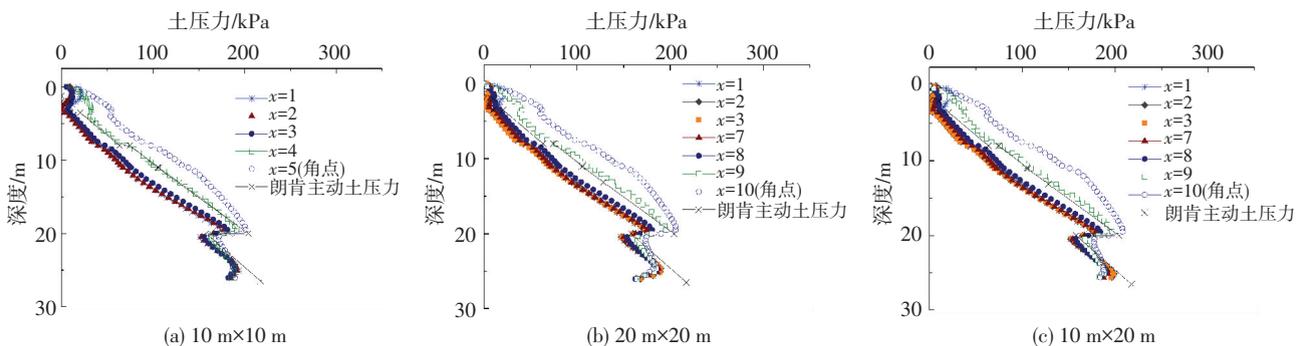


图 5 不同水平位置处墙后土压力沿深度分布曲线

Fig.5 Distribution of active earth pressure along depth at different horizontal positions

由图 5 可知,与模型试验结果类似,各位置处墙后土压力沿深度逐渐增加;但在地表以下 1.5H 处出现突变,这是由于,该深度处为土层分界,上下两层土性质差异较大导致.

表 4 梁单元参数

Tab.4 Beam element parameters

支撑类型	弹性模量/GPa	泊松比	截面面积/m ²	截面惯性矩 (I _y =I _z)/m ⁴	极惯性矩/m ⁴
砼支撑	30	0.2	0.36	1.08×10 ⁻²	2.16×10 ⁻²
钢管支撑	200	0.3	0.03	1.31×10 ⁻³	2.62×10 ⁻³

2.1.4 分界面

分别在坑内、坑外土体与围护结构相接触的外表面以及围护结构的底面上建立分界面单元,用以模拟围护结构与基坑内外土体的相互作用.

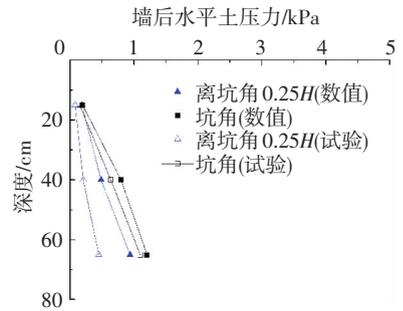


图 4 数值结果与试验结果对比

Fig.4 Comparison between numerical and experimental results

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 墙后土压力的空间分布

图 5 是不同平面尺寸井结构基坑墙后土压力分布曲线.x 为井结构基坑测点的 x 轴坐标(图 3(b)),x=0 处为基坑中部.考虑到支撑作用的影响,测点选取在非支撑位置.

此外,基坑中部墙后土压力小于朗肯主动土压力,坑角处墙后土压力大于朗肯主动土压力.0.8H 深度以下中部墙后土压力增加率增大,角部墙后土压力增加率减小,两处土压力的差值逐渐减少.1.5H 以

下,墙后土压力线性增加,离坑角越近增加率越小.墙脚附近,基坑中部墙后土压力与基坑角部墙后土压力基本相等.

由图 5、6 可看出,与模型试验结果相符,墙后土压分布具有明显的坑角效应.坑角处墙后土压力最大;离坑角越远,墙后土压力越小;离坑角 3 m (0.2H) 以外,墙后土压力除支撑位置处略有波动外基本不变.

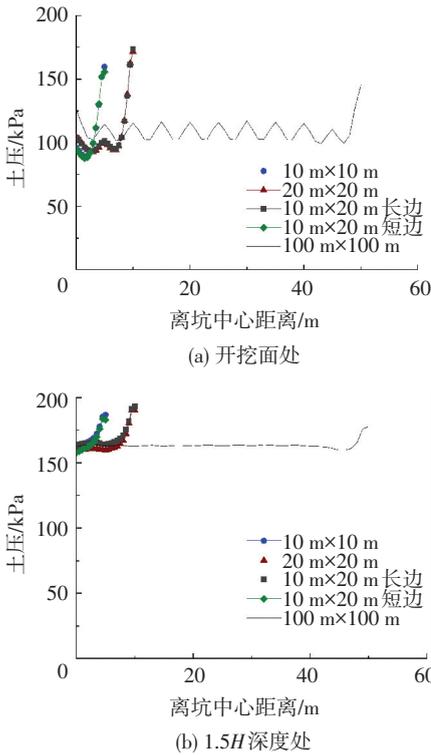


图 6 不同深度处墙后土压力沿水平方向分布曲线

Fig.6 Distribution of active earth pressure along horizontal direction at different depths

对比图6 (a) 和 (b) 可发现,开挖面深度处墙后

土压力坑角效应明显强于地表以下 1.5H 处的坑角效应.可见,不同深度处坑角效应的强度不同,这是由于围护结构的凸肚型位移模式(围护结构底部变形较小)所导致的.

对比井结构基坑与宽大基坑的墙后土压力水平分布,可以看出,坑角效应影响范围(0.2H) 以内井结构基坑墙后土压力大于宽大基坑墙后土压力;0.2H 以外井结构基坑墙后土压力基本等于宽大基坑墙后土压力.表明,井结构基坑墙后土压力的坑角效应明显强于宽大基坑.

2.3.2 围护结构内力

图 7(a) 是 20 m x 20 m 基坑水泥土搅拌墙的剪应力分布图.由图可以看出,除支撑作用点外,水泥土搅拌墙角部剪应力较大,最大值发生在开挖面附近,约是同深度处基坑中部水泥土剪应力的 3 倍.这是由于,基坑坑角效应使得角部墙后土压较大,从而在水泥土非加筋区中引起了较大的局部剪应力^[14].

图 7(b) 和图 7(c) 是 20 m x 20 m 基坑内插 H 型钢的剪力及弯矩图.可以看出,角部型钢内力小于中部型钢,剪力与弯矩最大值均在开挖面附近,其中角部型钢剪力最大值约为中部型钢的 20%,弯矩最大值约为中部型钢的 16%.这是由于坑角部位虽然墙后土压较大,但同时约束也较强,此外,不同于基坑中部支撑,角部约束由垂直向挡墙及坑周土体提供,约束刚度沿深度均匀分布,因此在围护墙角部引起了较小的内力.

综上所述,对于型钢水泥土搅拌墙坑角部位,型钢内力较小,可适当减小型钢截面;水泥土剪应力较大,需保证水泥土抗剪强度,控制水泥土施工质量,着重检查角部墙体质量.

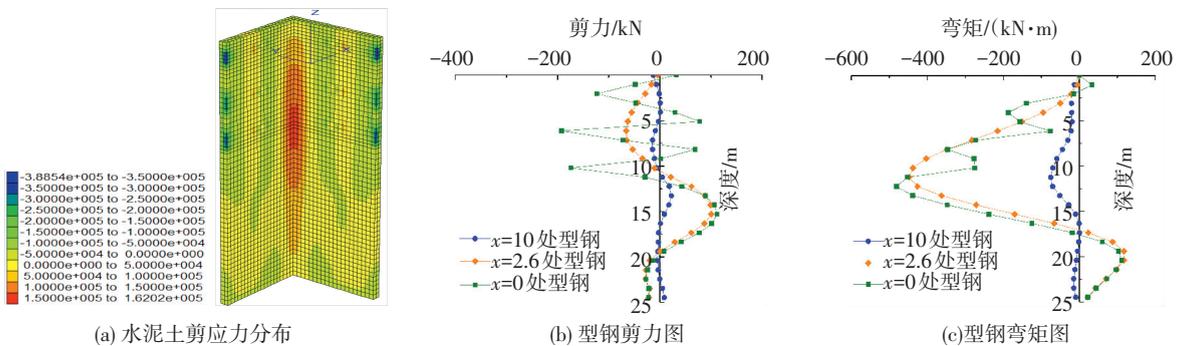


图 7 20 m x 20 m 基坑围护结构内力图

Fig.7 Internal force of the retaining wall for 20 m x 20 m excavation

3 坑角效应定量分析

3.1 墙后土压力坑角效应影响系数

坑角效应对于墙后土压力的影响可以用墙后土压力坑角效应影响系数(下文简称影响系数)表示.

本文中影响系数为同一深度处各位置墙后土压与 x=2 m 处(基坑中部设有支撑,故选取支撑跨中附近位置)墙后土压之比.影响系数越大,表明坑角效应对于墙后土压的影响越大.

图 8 是不同平面尺寸井结构基坑的墙后土压力

坑角效应影响系数的分布曲线.由图可知,离坑角 $0.2H$ 范围内,影响系数沿深度先增加,超过 $0.2H$ 深度后逐渐减小,变化率趋缓, $1.5H$ 以下基本为 1;除支撑位置外,离坑角越近,影响系数越大.

地表下 $0.38H$ 范围以内,影响系数较大,3 种尺寸基坑最大影响系数分别达 14.32、11.78、19.90,可见该范围内坑角效应影响最为明显.表明,工程中若浅层土为粘土,则可能出现墙后土压力坑角效应在

粘土区局部增强的情况.地表下 $0.38H$ 至 $1.5H$ 范围内,影响系数在 $1.0\sim 5.0$ 之间,坑角效应影响相对比较明显;而且随深度增加,坑角效应影响逐渐减弱;直至 $1.5H$ 以下,坑角效应不再有影响.

在基坑中部,影响系数偏大,这是由于,在基坑中部设有对撑,减小了围护结构的水平位移,从而导致墙后土压力偏大.

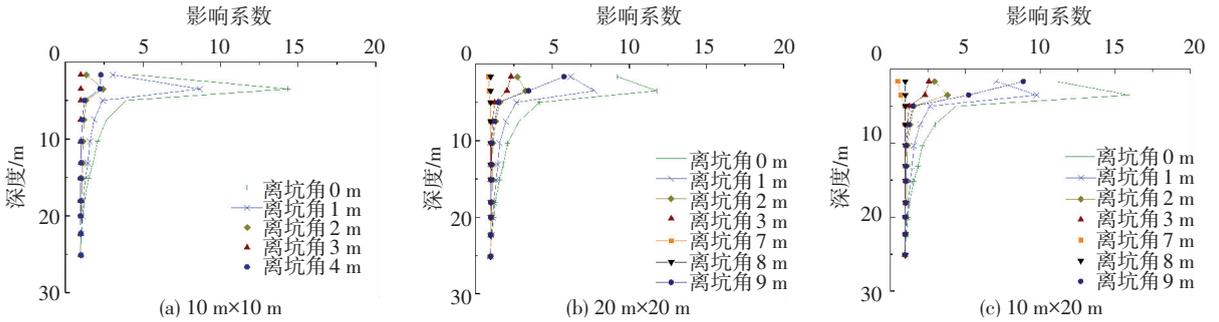


图 8 墙后土压力坑角效应影响系数沿深度分布曲线

Fig.8 Distribution of the coefficient of active earth pressure corner effect along depth

3.2 基坑尺度的影响

由上文可知,坑角效应影响范围主要在离坑角 $0.2H$ 范围内.因此,本节主要针对离坑角 $0.2H$ 以内的影响系数进行分析,以研究基坑主墙长度与开挖深度之比 (L/H) 和主墙长度与附墙长度之比 (L/B) 对抗角效应的影响规律.

3.2.1 L/H 的影响

为研究 L/H 对基坑坑角效应的影响,分析了 $L/B=1, L/H=0.76, 1.52, 2.28$ (即 $10\text{ m}\times 10\text{ m}, 20\text{ m}\times 20\text{ m}, 30\text{ m}\times 30\text{ m}$) 的 3 个基坑,研究结果见图 9.

对比 $L/H=0.76$ 和 $L/H=1.52$ 各位置处影响系数可知:离坑角 $0.2H$ 处, $0.6H$ 深度范围内,影响系数随

L/H 的增加变化较大(约增加了 $10\%\sim 130\%$),且随深度增加,变化逐渐减小, $0.6H$ 深度以下影响系数不随 L/H 变化;离坑角越近,影响系数变化越小,影响范围缩小至 $0.27H$ 深度内.表明,当 $L/H\leq 1.5$ 时, L/H 对抗角效应的影响在 $0.6H$ 深度以内,沿深度逐渐减弱,离坑角越近越弱;该范围内随 L/H 的增加,主墙墙后土压力坑角效应不断加强.

对比 $L/H=1.52$ 和 $L/H=2.28$ 各位置处影响系数可知:影响系数随 L/H 的增加而减小,但变化量较小,且变化仅集中在 $0.27H$ 深度以内.表明:当 $L/H>1.5$ 后, L/H 对主墙墙后土压力坑角效应影响不显著.

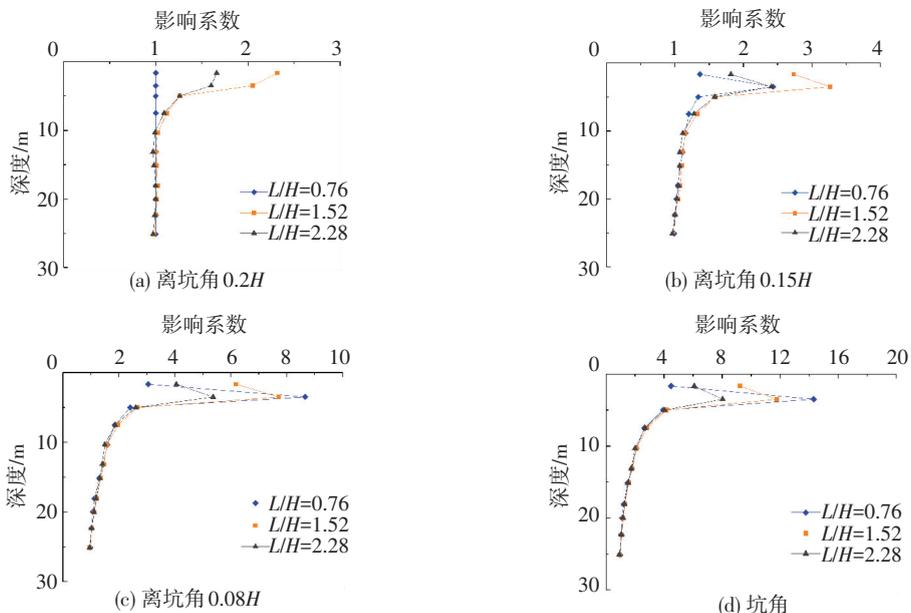


图 9 $L/B=1$,不同 L/H 基坑各位置处影响系数

Fig.9 Coefficient of corner effect at different positions under different L/H ($L/B=1$)

3.2.2 L/B 的影响

为研究 L/B 对基坑坑角效应的影响,选取基

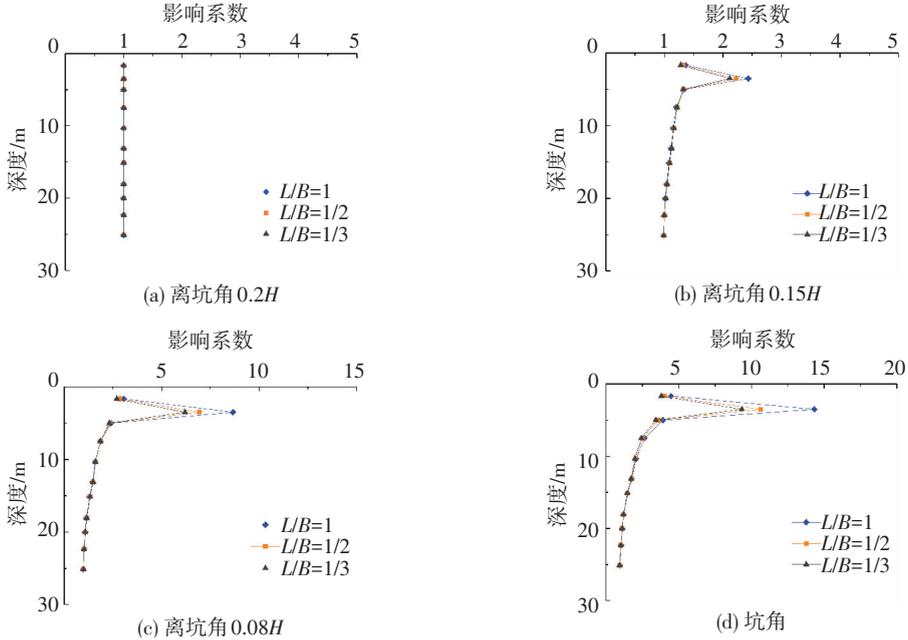


图 10 $L/H=0.76$,不同 L/B 基坑各位置处影响系数

Fig.10 Coefficient of corner effect at different positions under different L/B ($L/H=0.76$)

由图 10 可知, L/H 相同时,随 L/B 减小,影响系数仅在 $0.2H$ 深度附近略有减小.表明, L/B 对主墙墙后土压力坑角效应基本没有影响.综上所述,就基坑尺度而言,对墙后土压力空间分布起控制作用的是 L/H , L/B 的影响不明显.换言之,当其他条件一致时, L/H 相同的墙体墙后土压力空间分布规律基本相同.

4 结 论

文章通过室内模型试验及 FLAC^{3d} 数值模拟,对井结构基坑墙后土压力的空间分布,坑角效应对围护结构内力的影响,以及基坑尺寸对抗角效应的影响进行了分析.得到如下结论:

1) 墙后土压力沿深度逐渐增加,中部墙后土压力小于朗肯主动土压力,角部墙后土压力大于朗肯主动土压力.墙后土压力坑角效应在 $0.38H$ 深度以内最大; $0.38H \sim 1.5H$ 次之,且该范围内坑角效应沿深度减弱; $1.5H$ 以下没有影响.

2) 墙后土压分布具有明显的坑角效应,且坑角效应影响范围约在离坑角 $0.2H$ 以内.井结构基坑墙后土压力坑角效应明显强于宽大基坑.

3) 型钢水泥土搅拌墙,角部型钢剪力约为中部型钢的 20%,弯矩约为中部型钢的 16%;水泥土角部剪应力约为中部的 3 倍.

4) 当 $L/H \leq 1.5$ 时,主墙墙后土压力坑角效应主要受主墙长度与开挖深度的比值 (L/H) 的影响(影响范围为 $0.6H$),随 L/H 增加而不断加强.

坑; $L/H=0.76$, $L/B=1,1/2,1/3$ ($L \times B=10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,
 $10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, $10 \text{ m} \times 30 \text{ m}$)进行分析,结果见图 10.

$L/H > 1.5$ 后,基坑 L/H 对主墙墙后土压力坑角效应影响不显著.

5) 当 L/H 不变时,主墙长度与附墙长度的比值 (L/B) 对主墙墙后土压力坑角效应基本没有影响.

参考文献

- [1] OU C Y, CHIOU D C, WU T S. Three-dimensional finite element analysis of deep excavations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 337-345.
- [2] ZHU Fengbin, MIAO Linchang, GU Huanda, et al. A case study on behaviors of composite soil nailed wall with bored piles in a deep excavation [J]. Journal of Central South University, 2013, 20: 2017-2024. DOI: 10.1007/s11771-013-1703-8.
- [3] 丁勇春, 王建华, 徐斌. 基于 FLAC 3D 的基坑开挖与支护三维数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 976-980. DING Yongchun, WANG Jianhua, XU Bin. Three-dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC3D [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(6): 976-980.
- [4] 方金霞, 汪鹏程, 杨永威. 基坑尺寸及形状效应的三维有限元分析[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2012, 20(6): 15-18. FANG Jinxia, WANG Pengcheng, YANG Yongwei. Three-dimensional finite element analysis of shape and dimensional effects on excavation [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2012, 20(6): 15-18.
- [5] 皮崇斌, 汪勇. 基于三维有限元法的基坑角部效应分析[J]. 土工基础, 2013, 27(4): 121-124, 137. PI Chongbin, WANG Yong. Three-dimensional finite element analysis of corner effects on excavation [J]. Soil Eng. and Foundation, 2013, 27(4): 121-124, 137.
- [6] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 内支撑结构基坑的空间效应及影响因

- 素分析[J].岩土力学,2014,35(8):2293-2298,2306.
- LIU Nianwu, GONG Xiaonan, YU Feng, et al. Analysis of spatial effects in strutted excavation and related influential factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8):2293-2298,2306.
- [7] 叶文武.深基坑转角效应数值模拟[D].南京:河海大学,2007.
YE Wenwu. Numerical simulation of corner effect for deep excavation[D]. Njing:Hohai University,2007.
- [8] 徐林.基坑尺寸效应的有限元分析[D].天津:天津大学,2007.
XU Lin. FEM analysis on dimensional effect of foundation pit[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [9] 杨雪强,刘祖德,何世秀.论深基坑支护的空间效应[J].岩土工程学报,1998,20(2):74-78.
YANG Xueqiang, LIU Zude, He Shixiu. Research about spatial effect of deep pit supporting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998,20(2):74-78.
- [10] 雷明锋,彭立敏,施成华,等.长大深基坑施工空间效应研究[J].岩土力学,2010,31(5):1579-1584,1596.
LEI Mingfeng, PENG Limin, SHI Chenghua, et al. Research on construction spatial effects in large-long-deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5):1579-1584,1596.
- [11] 欧明喜,刘新荣,石建勋.考虑卸荷及变形影响的基坑挡墙土压力[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(2):669-674.
OU Mingxi, LIU Xinrong, SHI Jianxun. Earth pressure applied in retaining wall of deep foundation pit considering influence of unloading and deformation[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2012, 43(2):669-674.
- [12] 张雪婵,龚晓南,尹序源,等.杭州庆春路过江隧道江南工作井监测分析[J].岩土力学,2011,32(增1):488-494,537.
ZHANG Xuechan, GONG Xiaonan, YIN Xuyuan, et al. Monitoring analysis of retaining structures for jiangnan foundation pit of qingchun road river-crossing tunnel in Hangzhou[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1):488-494,537.
- [13] 耿亚梅,陈卫忠,田洪铭,等.软土地层大型盾构工作井合理支护参数研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1435-1444.
GENG Yamei, CHEN Weizhong, TIAN Hongming, et al. Study of Reasonable support parameter for large-scale shield shaft in soft soil area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7):1435-1444.
- [14] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
LIU Guobin, WANG Weidong. Excavation engineering manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.

(编辑 赵丽莹)

住房城乡建设部将于 2017 实施的部分国家标准和行业标准

国家标准《建筑工程施工质量评价标准》GB/T50375—2016,自 2017 年 4 月 1 日起实施.原国家标准《建筑工程施工质量评价标准》GB/T50375—2006 同时废止.

国家标准《民用建筑热工设计规范》GB50176—2016,自 2017 年 4 月 1 日起实施.原《民用建筑热工设计规范》GB50176—93 同时废止.

国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB50287—2016,自 2017 年 4 月 1 日起实施.原国家标准《水力发电工程地质勘察规范》GB50287—2006 同时废止.

国家标准《农业温室结构荷载规范》GB/T51183—2016,自 2017 年 4 月 1 日起实施.

国家标准《火炸药及其制品工厂建筑设计规范》GB51182—2016,自 2017 年 4 月 1 日起实施.

国家标准《高耸结构工程施工质量验收规范》GB51203—2016,自 2017 年 7 月 1 日起实施.

国家标准《冰雪景观建筑技术标准》GB51202—2016,自 2017 年 7 月 1 日起实施.原行业标准《冰雪景观建筑技术规程》JGJ247—2011 同时废止.

行业标准《建筑施工碗扣式钢管脚手架安全技术规范》,编号为 JGJ166—2016,自 2017 年 5 月 1 日起实施.原《建筑施工碗扣式钢管脚手架安全技术规范》JGJ166—2008 同时废止.

行业标准《建筑拆除工程安全技术规范》,编号为 JGJ147—2016,自 2017 年 5 月 1 日起实施.原《建筑拆除工程安全技术规范》JGJ147—2004 同时废止.