

基坑坑角角度对空间效应影响研究

高 幸^{1,2}, 贾金青², 朱彦鹏³, 王旭春⁴, 陈进杰⁵, 程良奎⁶

(1. 河北建科唐秦建筑科技有限公司, 河北 唐山 063009;

2. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

4. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033;

5. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 河北 石家庄 050043;

6. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘 要: 现今空间效应的研究多围绕基坑的长、宽、深进行, 而忽略了基坑坑角的角度对空间效应的影响。为分析坑角角度与空间效应之间的关联, 采用 FLAC^{3D} 有限差分软件模拟不同坑角角度的基坑开挖, 研究发现: 任何坑角角度下, 空间效应影响系数与坑角距离之间皆呈指数函数关系; 当坑角距离与坑边长度的比值大于等于 0.3 时, 任何坑角角度下的空间效应影响系数均大于 0.9, 其变形接近平面应变状态; 当坑角距离与坑边长度的比值小于 0.3 时, 坑角角度与空间效应影响系数呈指数函数关系; 最后推导出了空间效应影响系数、坑角距离和坑角角度之间的函数关系, 并通过工程实例对其研究结果的合理性进行验证。

关键词: 基坑; 空间效应; 函数关系; 有限差分软件; 坑角角度; 空间效应影响系数

中图分类号: TU94⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0036—05

Influences of Foundation Pit Angle on Spatial Effects

GAO Xing^{1,2}, JIA Jinqing², ZHU Yanpeng³, WANG Xuchun⁴, CHEN Jinjie⁵, CHENG Liangkui⁶

(1. Hebei Jian Ke Tang Qin Building Science and Technology Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063009, China;

2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

3. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

4. School of Civil Engineering, Qingdao Technology University, Qingdao, Shandong 266033, China;

5. School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

6. Central Research Institute of Building and Construction, MCC Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: At present, the research of spatial effect mainly focuses on the length, width and depth of foundation pit, which ignores the influence of the degree of foundation pit angle on spatial effects. In order to analyze the correlation between pit Angle and space effect, FLAC^{3D} finite difference software was adopted to simulate pit excavation with different degree of pit angle. It is found that at any degree of pit angle, the relationship between the influence coefficient of space effect and the distance of the pit angle is exponential. When the ratio between the distance of pit angle and the length of pit edge is greater than or equal to 0.3, the influence coefficient of spatial effect under any degree of pit angle is greater than 0.9. Its deformation is close to the plane strain state. When the ratio between the distance of pit angle

收稿日期: 2019-08-21

修稿日期: 2019-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678112); 国家重点研发计划项目(2018YFC1505300-2); 河北省科技厅项目(162176486)

作者简介: 高 幸(1992—), 男, 河北秦皇岛人, 工程师, 主要从事深基坑、边坡支护结构设计研究工作。

E-mail: gaoping_19921025@163.com

通讯作者: 贾金青(1962—), 男, 河北沧州人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程、岩土工程及工程新材料的研究和开发应用方面的工作。E-mail: keyknown@163.net

and the length of pit edge is less than 0.3, the relationship between the degree of pit angle and the influence coefficient of spatial effect is exponential. Finally, the function relation between the influence coefficient of spatial effects, the distance of the pit angle and the degree of pit angle is deduced. The rationality of the result is verified by an engineering example.

Keywords: foundation pit; spatial effect; functional relationship; finite difference software; the degree of pit angle; spatial effect coefficient

基坑作为一个具有长、宽、深的三维空间体系,势必存在空间效应。现今已有大量学者对基坑空间问题进行研究^[1],申海平等^[2]提出了平面应变计算结果与空间效应影响系数的乘积可得空间变形的计算方法。郑诚等^[3]、刘念武等^[4]、任彦君等^[5]、李浩等^[6]对基坑阴角效应影响范围进行研究,提出了阴角效应影响范围与开挖深度之间的比例关系。高幸等^[7-8]根据坡顶水平位移反算作用于悬臂支护结构的土压力发挥系数及土压力分布,并以此提出基坑设计优化方法。深入研究后又提出了基坑深度、坑角距离与坑角效应影响系数之间的函数关系。王成华等^[9]、冯勇等^[10]、胡勇等^[11]、贾涛等^[12]、周勇等^[13]通过数值模拟和工程监测等方式证实了基坑工程中空间效应的存在。楼春晖等^[14]、李镜培等^[15]研究发现软土基坑同样存在明显的坑角效应。现今的空间效应主要围绕空间效应影响范围、基坑开挖深度及基坑边长的关系进行研究,而从未涉及基坑坑角角度变化对空间效应的影响。本文依托FLAC^{3D}数值模拟软件^[16]分析了基坑变角度(60°~140°)对基坑空间效应的作用,提出了基坑空间效应影响系数与基坑坑角角度、坑角距离之间的函数关系,并通过工程实例对其研究结果的合理性进行验证。

1 建立数值模型

本文主要研究基坑坑角角度变化对空间效应的影响,为确保所测基坑中部处于最大变形状态(平面应变状态),基坑开挖深度取 10 m,基坑一边取固定边长 140 m^[17],坑角角度在 60°~140°范围内递增变化。

依托石家庄某基坑工程勘察成果建立土体模型,由于所建基坑模型对称,土体模型取原模型1/4,长为 200 m,宽为 100 m,高度为 30 m,模型尺寸涵盖基坑开挖影响的所有区域^[15]。为避免支护结构对空间效应分析造成干扰,所建模型不施加任何支护。模拟过程中,选择 Mohr - Coulomb 模型当作土体的本构模型,并对各土层的重度、黏聚力和内摩擦

角加权平均,进行计算。模型的土层力学参数,如表 1 所示。基坑坑角角度变化示意图如图 1 所示。

表 1 土层力学参数

土层名称	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	土层厚度 /m
杂填土	17.0	10.0	10.0	0.7
黄土状粉质黏土	19.7	26.2	15.2	5.2
黄土状粉土	18.4	15.7	24.4	6.8
细砂	19.1	0.0	33.0	5.7
粉质黏土	19.7	25.6	15.1	3.4
中砂	19.5	0.0	35.0	8.2

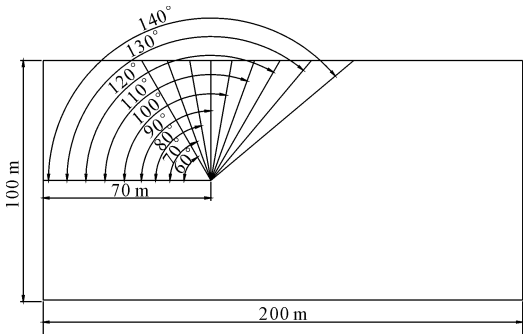


图 1 基坑坑角角度变化示意图

2 坑角角度对空间效应影响分析

为量化分析空间效应的影响,提出空间效应影响系数概念,定义空间效应影响系数: $K = w/w_{\text{plane}}$

其中, K 为空间效应影响系数; w 为坑边任意部位的顶部水平位移; w_{plane} 为平面应变问题对应的顶部水平位移。

为方便分析,本文对坑角距离和坑角角度无量纲化,转化为对 x/L 和 $\alpha/180^\circ$ 进行研究。其中, x 为坑角距离, L 为基坑坑边长度, α 为基坑的坑角角度。当 α 在 60°~140°范围内变化时, K 随 x/L 的增大而增大, K 增大到一定程度时,不再随 x/L 的增大而继续增大,其变化曲线与指数函数变化曲线相似。

当 $\alpha/180^\circ =$ 任意常数时,采用指数函数进行拟合:

$$K_1 = A_1 \exp(-\zeta/t_1) + w_1 \tag{1}$$

$\zeta = x/L$ (无量纲) 即坑角距离与基坑坑边长度的比值, $\zeta = [0,1]$, K_1 为空间效应影响系数,拟合

曲线如图 2 所示。

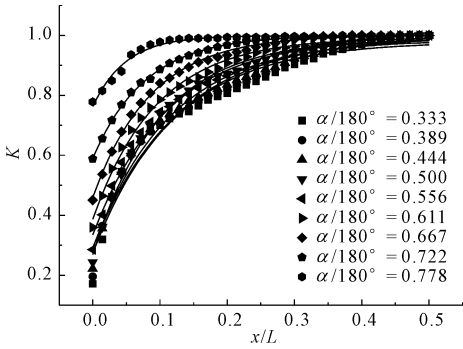


图 2 不同 $\alpha/180^\circ$ 下 K 与 x/L 拟合曲线

图 3 为 K 拟合值的相关系数随 $\alpha/180^\circ$ 的变化曲线,其中相关系数越接近 1 表示拟合准确程度越高。从图中可以看出,所有拟合曲线的相关系数均大于 0.96,拟合程度较高,说明坑角角度的变化不会改变 K 与 x/L 的指数函数关系。当 $\alpha/180^\circ$ 在 0.5 ~ 0.7(坑角角度为 $90^\circ \sim 130^\circ$) 时,指数函数拟合程度更高,相关系数大于 0.988。

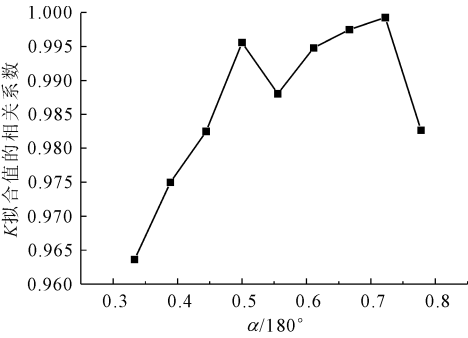


图 3 相关系数与 $\alpha/180^\circ$ 的关系曲线

图 4 为 K 随 $\alpha/180^\circ$ 的变化曲线,即基坑坑角角度与空间效应影响系数的相互关系曲线。不同 x/L 下, K 随 $\alpha/180^\circ$ 的变化特征存在明显差异。当 $x/L \geq 0.3$ 时,无论 $\alpha/180^\circ$ 为何值, K 均大于 0.9, 基坑变形几乎处于平面应变状态。

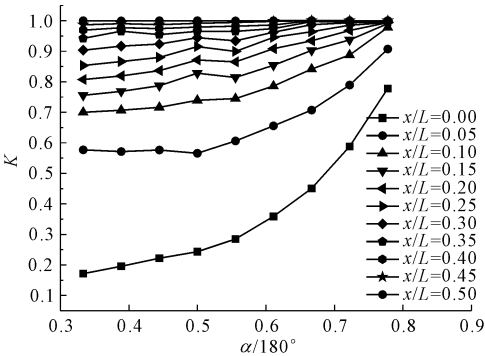


图 4 不同 x/L 下 K 随 $\alpha/180^\circ$ 的变化曲线

当 $x/L < 0.3$ 时,发现 K 随 $\alpha/180^\circ$ 变化关系亦呈指数函数形式,采用指数函数拟合:

$$K_2 = A_2 \exp(-\zeta/t_2) + w_2 \quad (2)$$

$\zeta = \alpha/180^\circ$ (无量纲) 即坑角角度与 180° 的比值, $\zeta \in [0, 1]$, K_2 为空间效应系数。拟合曲线如图 5 所示,相关系数均大于 0.95, 曲线拟合度高,满足指数函数关系。

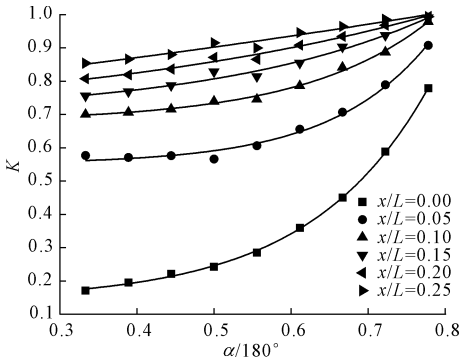


图 5 不同 x/L 下的 K 随 $\alpha/180^\circ$ 拟合曲线

由此可得到坑角角度与空间效应影响系数关系:当 $x/L \geq 0.3$ 时,无论 $\alpha/180^\circ$ 为何值, K 均大于 0.9, 基坑变形几乎处于平面应变状态。当 $x/L < 0.3$ 时, K 随 $\alpha/180^\circ$ 变化关系呈指数函数形式。

图 6 为 K 、 x/L 和 $\alpha/180^\circ$ 的关系曲线,从图 6 可见,任何一组 x/L 与 $\alpha/180^\circ$ 均对应唯一的空间效应影响系数,由此可根据坑角度数,得出基坑坡顶任意位置的空间影响系数。由前文可知, K 随 x/L 变化关系呈指数函数形式;当 $x/L \geq 0.3$ 时, $\alpha/180^\circ$ 的取值对 K 基本无影响;当 $x/L < 0.3$ 时, K 随 $\alpha/180^\circ$ 变化关系呈指数函数形式。由此推导出 x/L 、 $\alpha/180^\circ$ 与 K 的关系。推导过程如下:

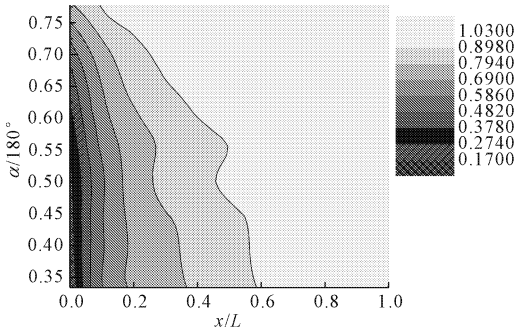


图 6 K 、 x/L 和 $\alpha/180^\circ$ 的关系云图

设 $x/L = X$ 、 $\alpha/180^\circ = Y$, K 为空间影响系数

$$f(X) = A_1 \exp(-X/t_1) + w_1 \quad (3)$$

$$f(Y) = A_2 \exp(-Y/t_2) + w_2 \quad (4)$$

$$K = f(Y)f(X) \quad (5)$$

根据式(5)推导出

$$K = C_1 \exp[(-X/t_1) + (-Y/t_2)] + C_2 \exp(-Y/t_2) + C_3 \exp(-X/t_1) + C_4 \quad (6)$$

其中, $C_1 = A_1 A_2$ 、 $C_2 = A_2 w_1$ 、 $C_3 = A_1 w_2$ 、 $C_4 = w_1 w_2$ 。

对函数采用麦夸特法(Levenberg - Marquardt) + 通用全局优化法拟合,拟合结果如图 7 所示,相关系数大于 0.99,曲线拟合度高,说明公式(6)可作为 K 、 x/L 和 $\alpha/180^\circ$ 之间的函数方程。

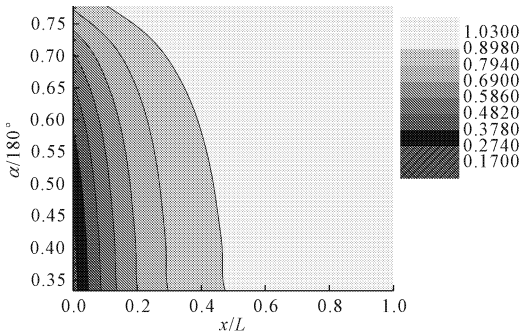


图 7 K 、 x/L 和 $\alpha/180^\circ$ 的拟合关系云图

3 坑角角度对空间效应影响工程实例

该基坑位于石家庄市长安区翟营北大街与和光华路交叉口东南角。基坑支护设计采用护坡桩加锚索加止水帷幕形式支护。土层参数如表 1 所示,基坑尺寸平面图如图 8 所示。

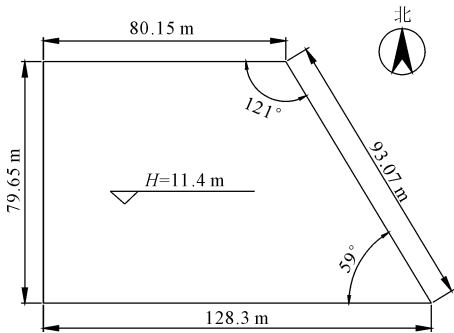


图 8 基坑尺寸平面图

根据基坑监测数据计算空间效应影响系数,同时采用指数函数公式对基坑空间效应影响系数进行预测,对比监测所得空间效应影响系数与预测所得空间效应影响系数的关系。图 9 为基坑南侧东半边空间效应影响系数的实测值和预测值对比曲线,图 10 为基坑北侧东半边空间效应影响系数的实测值和预测值对比曲线。

从图 9、图 10 中发现,不同坑角角度下空间效应影响系数预测值曲线与实测值曲线的变化趋势一

致并且高度吻合。表明不同坑角角度下,基坑空间效应影响系数与 x/L 的关系,都可用指数函数公式进行预测。预测过程中,坑角角度为 59° 的预测平均误差为 0.0357,坑角角度为 121° 的预测平均误差为 0.0153, α 为 121° 预测的 K 值比 α 为 59° 预测的 K 值更为准确,证实了当 $\alpha/180^\circ$ 在 0.5 ~ 0.7 (坑角为 $90^\circ \sim 130^\circ$) 时,指数函数拟合程度更高。

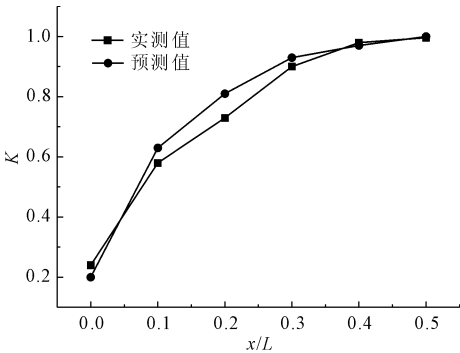


图 9 基坑南侧空间效应影响系数的实测值和预测值对比曲线

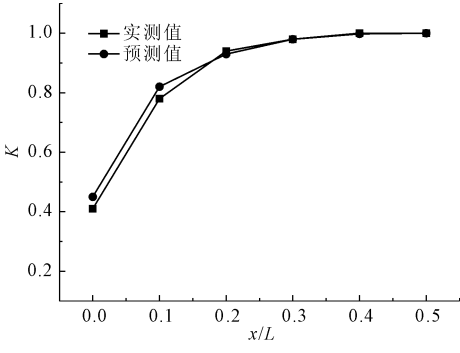


图 10 基坑北侧空间效应影响系数的实测值和预测值对比曲线

图 11 为不同 x/L 下, K 随 $\alpha/180^\circ$ 的变化曲线。由于本工程实例中基坑的坑角角度只涉及 59° 、 90° 、 121° ,现对这三个角度下的空间效应影响系数进行研究。

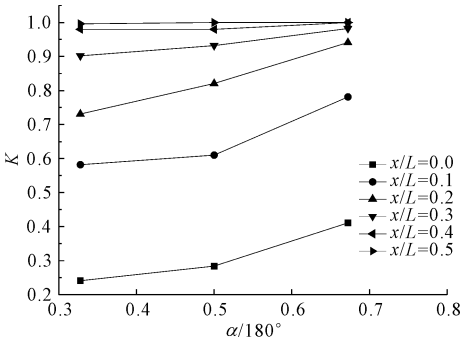


图 11 不同 x/L 下的 K 随坑角角度变化曲线

从图 11 中可以看出,当 $x/L \geq 0.3$, 坑角为 59° 、 90° 、 121° 的空间效应影响系数分别在 0.902, 0.932, 0.982 以上, α 变化对 K 基本无影响。当 $x/L < 0.3$, K 随 $\alpha/180^\circ$ 的增大而增大, 且增大速率持续增大。由于数据有限, 无法进行拟合, 但其变化规律依然符合指数函数形式。

4 结 论

(1) 任何基坑坑角角度下, 空间效应影响系数与坑角距离之间皆呈指数函数关系, 且当坑角角度与 180° 的比值在 0.5 ~ 0.7 (坑角为 $90^\circ \sim 130^\circ$) 时, 函数拟合程度更高。

(2) 当坑角距离与坑边长度的比值大于等于 0.3 时, 任何坑角角度下的空间效应影响系数均大于 0.9 且接近平面应变状态, 当坑角距离与坑边长度的比值小于 0.3 时, 坑角角度与空间效应影响系数之间呈指数函数关系。

(3) 根据空间效应影响系数和坑角距离的函数关系, 空间效应影响系数和坑角角度的函数关系, 推导出了空间效应影响系数、坑角距离和坑角角度三者之间的函数关系, 并通过麦夸特法 + 通用全局优化法进行拟合, 证实该函数关系的正确性。

参考文献:

- [1] 付红梅, 张岩岩. 深基坑空间效应研究综述[J]. 土工基础, 2019, 33(4): 465-470.
- [2] 申海平, 彭文祥, 郝 玉, 等. 深基坑桩锚支护结构变形的坑角效应分析[J]. 土工基础, 2016, 30(1): 73-76, 82.
- [3] 郑 诚, 郑作刚. 考虑坑角效应的深基坑围护体系分析和研究[J]. 能源与环保, 2017, 39(4): 212-217, 222.
- [4] 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.
- [5] 任彦华, 李 军, 樊继良, 等. 深基坑工程中空间效应的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 177-182.
- [6] 李 浩, 宋园园, 周 军, 等. 深基坑桩锚支护结构受力与变形特性现场试验[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 264-270.
- [7] 高 幸. 基于嵌固稳定安全系数的悬臂结构优化设计[C]//中国力学学会结构工程专业委员会、华东交通大学、中国力学学会《工程力学》编委会. 第 28 届全国结构工程学术会议论文集(第 I 册). 中国力学学会结构工程专业委员会、华东交通大学、中国力学学会《工程力学》编委会:《工程力学》杂志社, 2019: 410-415.
- [8] Gao X. Study on Space Effect Coefficient of Deep Foundation Pit [C]// Advanced Science and Industry Research Center. Proceedings of 2018 4th International Conference on Green Materials and Environmental Engineering (GMEE 2018). Advanced Science and Industry Research Center; Science and Engineering Research Center, 2018: 242-247.
- [9] 王成华, 王 泽. 柔性挡土结构空间土压力性状的三维有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 33-40.
- [10] 冯 勇, 李 平, 姜春艳. FLAC3D 在深基坑工程开挖中的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 17-20, 27.
- [11] 胡 勇, 李云安, 李 波, 等. 承压水位变动下深大基坑空间效应离心试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 1999-2007.
- [12] 贾 涛, 郝 顺, 邢江朋. 郑州某深基坑桩锚支护监测与分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 77-81.
- [13] 周 勇, 严登平, 任永忠. 明挖地铁车站对临近桩基的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 81-85.
- [14] 楼春晖, 夏唐代, 刘念武. 软土地区基坑对周边环境空间效应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 249-252.
- [15] 李镜培, 陈浩华, 李 林, 等. 软土基坑开挖深度与空间效应实测研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 208-217.
- [16] 买买提明·艾尼, 热合买提江·依明. 现代数值模拟方法与工程实际应用[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 11-18.
- [17] 冯晓腊, 熊宗海, 莫 云, 等. 复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 330-336.