

深基坑开挖诱发临近建筑物地表开裂的机理研究

余天智¹, 彭冰², 陈杰³, 任禹鑫¹, 马佳兵¹

(1. 华北水利水电大学 岩土工程与水工结构研究院, 河南 郑州 450046;

2. 陕西省矿产资源调查评审指导中心, 陕西 西安 710082;

3. 中水珠江勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510610)

摘要: 为了研究郑州市一处深基坑施工中自身结构稳定, 但临近建筑物地表严重开裂的工程问题, 对其监测数据的分布特征进行研究, 对后续数值计算的精度进行验证, 由此得到深基坑开挖过程中土体及围护结构的特殊变形分布规律, 为进一步研究其破坏机理, 以放大效应对模型进行处理。结果表明, 由于护坡桩水平变形, 引发基坑土体变形, 经锚索加固的土体, 随着距基坑距离增加而变形, 但在锚索锚固端附近变形却急剧增大, 远远大于周围土体变形; 水平方向变形不均匀进而引发竖直方向不均匀沉降, 在土体及上部建筑自重作用下, 竖向不均匀沉降继续发展, 当不均匀沉降过大, 必然出现拉张裂缝。

关键词: 基坑开挖; 不均匀沉降; 桩锚支护; 开裂; 数值模拟分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)01-0091-05

Deformation Mechanism of Ground Cracking of Adjacent Buildings Induced by Deep Foundation Pit Excavation

YU Tianzhi¹, PENG Bing², CHEN Jie³, REN Yuxin¹, MA Jiabing¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering and Hydraulic Structure, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China;

2. Shaanxi Mineral Resources Investigation and Evaluation Guidance Center, Xi'an, Shaanxi 710082, China;

3. China Water Resources Pearl River Planning Surveying and Designing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: In order to analyze the structure stability of a deep foundation pit construction in Zhengzhou and the engineering problems such as adjacent building surface cracks, the monitoring data was adopted to develop a model of the distribution characteristics, which is then verified by numerical calculation, the resulting soil in the process of deep foundation pit excavation and retaining structures of special distribution regularity of deformation. The failure mechanism is further discussed to test the amplification effect of the model. The results show that the horizontal deformation of soils behind the pile is caused by piles, which reduces with the length of founding pit, but it greatly increases near the anchorage end of the anchor cables, because the soils are much strengthened by the cables, while the other soils still keep the same mechanical properties. If the cables were not so long enough that the horizontal deformation would be very much. So the vertical differential settlement will occur.

Keywords: excavation of foundation pit; different settlement; pile - anchor support; cracks; numerical modeling analysis

随着基础工程的建设增多, 新建基坑诱发临近建筑物的变形问题也日渐复杂。基坑开挖的研究工作主要集中在其自身的安全稳定问题上, 如基坑土体变形规律、安全与稳定^[1-2]以及围护结构变形^[3]

等。该问题研究已取得相对满意的结果, 但对于基坑开挖诱发临近建筑物变形^[4-6]、临近道路裂缝^[7]以及诱发周围环境产生的其他影响问题^[8-10], 尤其是基坑开挖诱发临近建筑物的变形问题, 研究还不

够完善。潘军刚等^[11]针对青岛凯悦大厦附近基坑支护设计方案,结合 FLAC^{3D}软件,重点分析了风荷载作用下基坑开挖支护对临近建筑物造成的影响及其变形机理;黄茂松等^[12]结合上海地区板式支护结构体系基坑变形规律,采用基坑开挖对临近建筑物影响的位移控制有限元方法(DCFEM)与离心机模型试验,提出基于周边建筑物承载能力的基坑变形控制标准;李兵等^[13]以沈阳地铁十号线北大营街站深基坑工程为例,采用 MIDAS/GTS 软件建立基坑开挖的三维数值计算模型,并用实测数据验证其计算结果,据此提出了基坑开挖引起的建筑物沉降变形规律;王志杰等^[14]综合利用现场监测数据、板壳理论和数值模拟方法,对锦城广场三车站的单侧基坑卸载对既有车站的影响展开了深入的研究。

尽管对临近有建筑物的深基坑开挖工程已进行了深入细致的研究,但研究主要关注临近建筑物的沉降,对基坑开挖诱发临近建筑物附近地表开裂的变形机理尚未完全阐明。为此,针对郑州市一处深基坑在开挖过程中,基坑变形较小,但临近建筑物地表开裂的工程事故,本文依据现场监测结果,利用有限差分软件 FLAC^{3D}分析方法,研究了该类工程事故产生的变形机理,为后续工程建设提供技术支持,对类似工程建设提供借鉴和参考。

1 深基坑工程概况

1.1 工程特点

工程位于郑州市城区,南侧 15 m 外有六层居民楼小区,西、北、东侧均距离城市道路路边线 20 m ~ 30 m,基坑开挖深度 12 m ~ 14 m。施工场地较狭窄,开挖施工、弃土堆放等对周围环境及建筑物影响较大。

工程地貌单元属于黄河冲积平原。根据钻探揭露及室内土工试验,该工程场地内的地层主要为厚层粉土(或粉细砂)与粉质黏土互层分布,具体情况如下所述:

(1) 粉土:褐黄色,稍密—中密,黏粒含量低,层厚 0.6 m ~ 2.6 m,层底埋深 0.6 m ~ 2.6 m。

(2) 粉质黏土:灰—灰黄色,以软塑为主,局部可塑或流塑,层厚 0.8 m ~ 3.4 m,层底埋深 2.2 m ~ 5.2 m。

(3) 粉土:黄褐色,湿,稍密,局部中密,偶见淡水田螺外壳,黏粒含量高,局部夹粉质黏土薄层,层厚 1.4 m ~ 4.7 m,层底埋深 5.4 m ~ 7.4 m。

(4) 粉质黏土:灰—灰黄色,以软塑为主,局部

可塑或流塑,层间偶夹有粉土夹层或透镜体,呈松散状态,层厚 1.1 m ~ 5.0 m,层底埋深 8.0 m ~ 10.8 m。

(5) 粉土:黄褐色,湿,中密,局部稍密,层厚 1.6 m ~ 5.2 m,层底埋深 10.2 m ~ 14.0 m。

(6) 粉质黏土:黄褐—灰绿色,可塑,层厚 3.0 m ~ 7.8 m,层底埋深 15.0 m ~ 20.0 m。

(7) 细砂:褐黄色,湿,中密—密实,其成份以长石和石英为主,局部夹有粉砂、粉土薄层或透镜体,层厚 9.6 m ~ 13.4 m,层底埋深 26.8 m ~ 30.0 m。

工程场区内勘探揭示有地下水,水位埋深 10.0 m,类型为孔隙潜水。根据郑州市区域资料,地下水位年变幅 2.0 m ~ 3.0 m。对此在施工中采用“止水帷幕 + 井点降水 + 明沟”的排水措施。

1.2 支护结构形式

工程总体采用“土钉墙 + 桩锚”支护结构形式,现选取临近基坑 15 m 外有建筑物的南侧基坑进行分析。具体情况如图 1 所示。

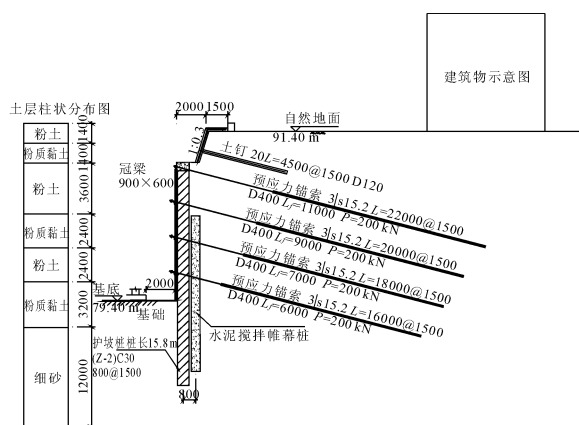


图 1 南侧基坑剖面图

基坑上部采用 1.0: 0.3 放坡,并做有一排土钉墙对其进行支护,土钉成孔孔径 130 mm,横向间距 1.5 m,成孔俯角 15°。下部为桩锚支护结构,护坡桩桩长 15.8 m,直径 800 mm,桩中心距 1.5 m;桩上设置有冠梁,冠梁高 900 mm,宽 600 mm,采用与护坡桩混凝土一致的 C30 混凝土;桩间采用主筋为 (2-3) ϕ s15.2-1860 级预应力钢绞线的高压旋喷锚索,锁定预应力 200 kN,其自由段旋喷推进孔径约 150 mm,锚固段旋喷扩孔直径不小于 400 mm,锚索横向间距 1.5 m;桩后为水泥搅拌帷幕桩,距护坡桩桩心距 800 mm。

2 实测数据分析

工程施工由东向西进行,部分测点随施工进度

设立,其中坡顶位移监测点距离基坑坡顶 0.5 m,测点基座埋深大于 0.5 m,与坡顶翻边适当隔离;临近基坑 15 m 外建筑物监测点布置在墙角位置。根据设计认为,锚索端部已接近建筑物底部基础。随着施工的推进,在施工完第二排锚索时,建筑物前端地表已产生细微裂缝。裂缝灌浆后,在施工第三排锚索时位移发生较大变化,暂停施工,此时开挖深度为 8 m。

监测点设计方案及剖面具体的位置、建筑物测点沉降监测见图 2。结果表明,建筑物两端测点 J1 和 J2 的沉降随基坑开挖深度增加而增加,开挖初期(15 d)两个测点沉降值基本相当,之后,临近基坑方向的测点 J1 沉降大于其后方测点 J2,表明随着基坑开挖,建筑物地基变形有均匀沉降向基坑侧方向倾斜的趋势。

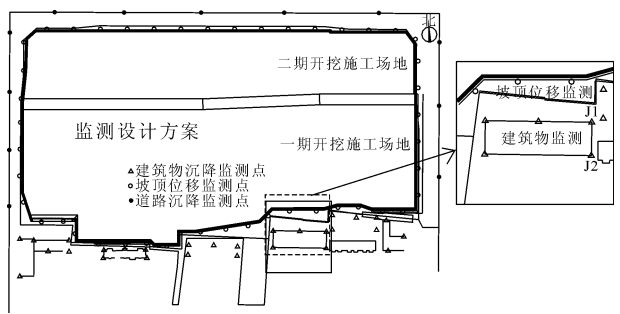


图 2 监测设计方案及剖面位置

3 变形机理分析

3.1 数值计算模型

针对临近有建筑物的南侧基坑,利用有限差分软件 FLAC^{3D} 进行数值计算。考虑到模型开挖影响范围,而将长×宽×高取为 77 m×60 m×24 m,最终生成单元 63 840 个,节点 68 757 个。计算模型的桩体及冠梁材料,采用 Isotropic Elastic 材料模拟,并按照等效刚度原则简化为混凝土墙体,简化方法与文献[15]和文献[16]一致。土钉及锚杆使用结构单元 cable 进行模拟。另外,对模型坡顶 2 m 外施加 20 kPa 均布荷载;临近建筑物处每层取均布荷载 15 kPa。计算时将临近建筑物荷载直接施加在其地基对应地面位置,即基坑外侧 15 m~25 m 范围内。

未开挖基坑前施加土体及邻近建筑物自重,初始平衡后,位移清零,得到建筑物荷载作用下的初始应力场;然后模拟基坑分步开挖。全部开挖后模型如图 3 所示。

3.2 计算参数

岩土体参数主要根据工程地质勘察报告,其他

参数则根据区域经验、土力学相关知识、相关规范计算等得到。参数详情如表 1 所示。

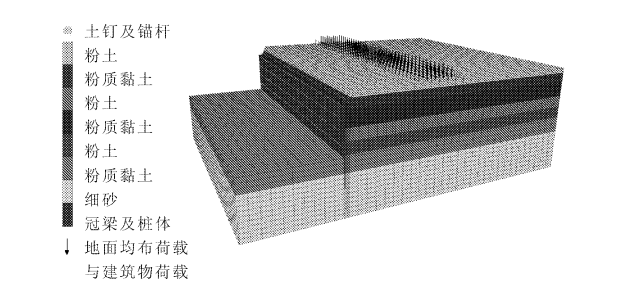


图 3 基坑完全开挖后模型

表 1 土层物理力学参数

土层	重度 /(kN·m ⁻³)	压缩模量 /MPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	泊松比
粉土	18.2	6.2	15.6	7.1	0.25
粉质黏土	18.4	3.5	8.6	12.4	0.28
粉土	18.7	5.5	14.8	11.6	0.28
粉质黏土	18.6	4.0	8.0	14.5	0.27
粉土	19.1	10.2	22.3	12.6	0.25
粉质黏土	19.2	5.2	11.2	18.5	0.28
细砂	19.7	22.0	28.0	4.0	0.30

3.3 施工工况

由于基坑围护结构采用止水帷幕插入基坑底部隔水层,而每层施工开挖前,地下水位已降至影响范围以外,基坑内外基本无水力联系,故本次模拟中不再考虑地下水影响,具体思路与文献[17]一致。模拟计算具体施工工况如下:

- (1) 工况 1:放坡开挖 2.2 m 至冠梁顶位置,施加土钉,激活桩体材料属性,开挖 0.8 m 至锚杆工作平面。
- (2) 工况 2:施加第一排锚索,激活冠梁结构,开挖 2.5 m 至第二排锚索工作平面。
- (3) 工况 3:施加第二排锚索,开挖 2.5 m 至第三排锚索工作平面。
- (4) 工况 4:施加第三排锚索,开挖 2.5 m 至第四排锚索工作平面。
- (5) 工况 5:施加第四排锚索,开挖至基坑设计底部。

3.4 模拟验证

数值计算结果与实测数据对比见图 4(以测点 J1 为例)。模拟结果与实测数据基本一致,在开挖深度 8.0 m 下,计算与实测结果均为 5.2 mm 左右,其沉降曲线与实测曲线也基本相同,表明数值分析结果与实际土体变形状态基本相同,计算结果符合实际。

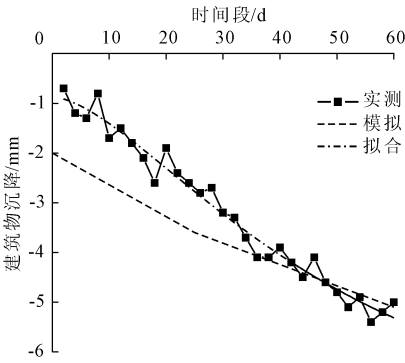


图 4 建筑物测点 J1 沉降

3.5 模拟结果分析

基坑开挖至 8.0 m (工况 3) 时水平位移特征见图 5 和图 6。

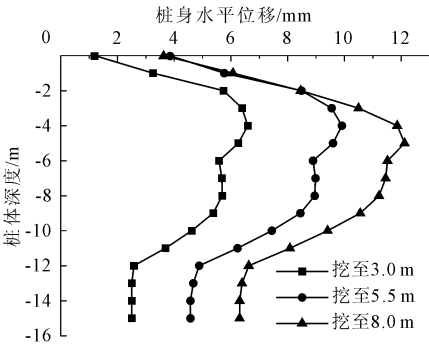


图 5 桩身水平位移

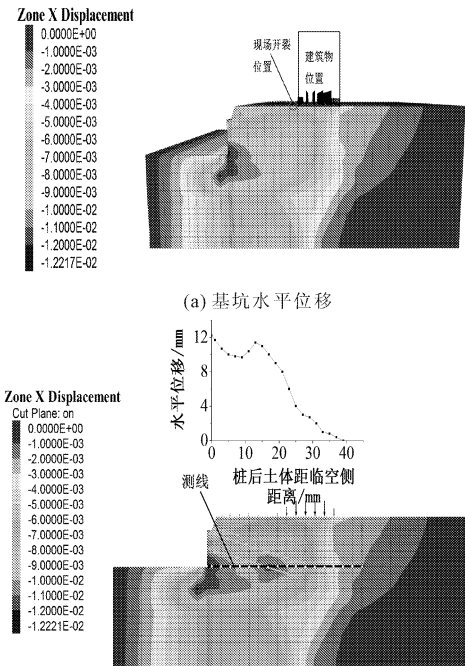


图 6 基坑水平位移

计算结果表明,基坑水平位移主要受桩体变形

控制,随着逐层开挖,基坑深度增加,变形逐步增加,大约在开挖深度 4 m ~ 6 m 变形最大,最大值约 12.12 mm,而后缓慢下降,在开挖底部约为 11.66 mm,之后快速下降。

基坑后部土体变形见图 6(b),结果表明,基坑后部土体随着桩体向基坑的变形而变形,加固后土体变形随着基坑距离的增加而减小,但在锚索的锚固段前端附近,受预应力张拉作用显著,变形反而开始急剧增大,至 11.4 mm 后,在未加固土体中变形快速降低。

基坑开挖至 8.0 m (工况 3) 时竖直位移特征见图 7。计算结果表明,基坑后侧沉降主要分布建筑物的附近,以建筑物地基沉降最大,两侧相应减小。建筑物地表前端沉降为 5.2 mm 左右,与实测值一致。沉降最大值为 9.87 mm,基本位于建筑物中部。在建筑物外侧,沉降快速减小,距离远至基坑侧 35.0 m 外,即基坑开挖深度 3 倍范围外时,土体位移基本不再受到基坑开挖卸荷的影响。

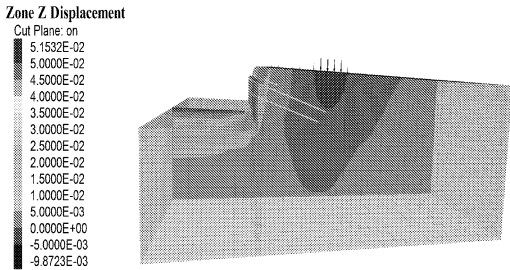


图 7 基坑竖向位移

3.6 变形机理分析

计算分析表明,基坑在目前的开挖工况中整体处于稳定状态,但内部土体可能受施工影响,进而诱发上覆土体产生较大位移,致使地表开裂。

为了观察锚索锚固端变形的放大效应,将锚索长度减小,将首排锚索端部打至深部土体最大变形影响范围内,后排锚杆按原间距依次缩短后(三排锚索的长度分别为 19 m、18 m 和 16 m),计算得到如图 8 所示的基坑及桩后深部土体水平位移云图。结果表明,基坑后部土体水平变形随着桩体向基坑距离的增大而减小,但在锚索的锚固端附近,变形反而开始急剧增大,其变形值约为 18 mm,超出了基坑最大水平变形(其值约为 12 mm),之后在未加固土体中变形快速降低。

计算结果表明,随着基坑开挖,支护桩体产生水平变形,上部变形小,中下部变形大,基坑后部土体随着桩体变形而变形;由于受到锚索预紧力的施加,

及其自身的加固作用,使变形随着距离基坑距离增加而减小。但在锚索锚固端附近及其后土体,由于锚索加固后土体力学性能显著增强,远远大于未加固土体,如果锚索长度设计不足,致使该部位土体变形反而急剧增大,其值均大于周围土体;如果锚索长度满足要求,锚索锚固端变形虽然也比周围土体大,但其值略大,变形较小,满足稳定要求。

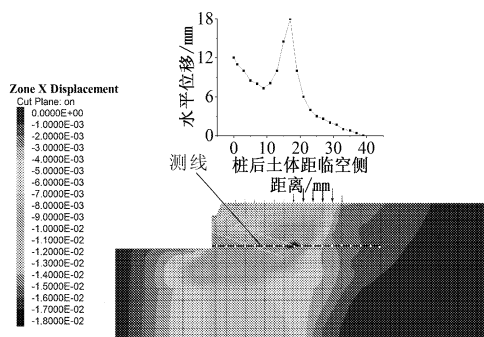


图8 基坑水平位移

在锚索设计长度不足时,由于基坑后部土体水平变形较大值集中在锚索的锚固端附近,造成土体水平变形不均匀;土体水平方向不均匀变形进而诱发竖直方向不均匀沉降,在土体及上部建筑自重作用下,竖向沉降不均匀继续发展,当不均匀沉降过大,必然出现拉张裂缝。

4 结 论

基坑开挖后,由于护坡桩水平变形,引发基坑土体水平变形,经锚索加固土体随着远离基坑而变形减小,但在锚索锚固端附近变形,由于未得到锚索强力支护作用,却急剧增大,之后迅速减小;水平方向变形不均匀进而引发竖直方向沉降不均匀,在土体及上部建筑自重作用下,竖向沉降不均匀继续发展,当不均匀沉降过大,必然出现拉张裂缝。

采用锚索加固基坑时,经过加固土体的力学性能得以显著增强,远远大于未加固的土体;当锚索设计长度不足时,反而在锚固端附近土体变形会急剧增大,远远大于周围土体的变形,由此可能诱发地表开裂,严重时诱发滑动。

参考文献:

[1] 李国栋,刘文丽,杨洪娜,等. 基于数值计算分析方法的地铁车站深基坑施工变形规律研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):221-224,255.

[2] 彭超,余建民. 高压旋喷锚索与灌注桩支护结构三维数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(1):194-197,206.

[3] 文建鹏,赵笑鹏,姜晓迪. 珠海某混凝土内撑式支护结构深基坑监测与分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):99-103.

[4] 宋慧军. 临近既有建筑物的基坑开挖施工控制技术[J]. 建筑技术,2017,48(6):636-638.

[5] 閻超,刘秀珍. 某深基坑安全开挖引起临近建筑物较大沉降的实例分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):479-482.

[6] 李军军,朱传明,刘兆瑞,等. 基坑开挖对周边建筑物的影响鉴定[J]. 建筑结构,2020,50(S1):1025-1027.

[7] 叶任寒,单华峰,王显椿,等. 软土地区深基坑开挖变形监测[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(S1):306-311.

[8] 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.

[9] 王涛,余建民. 基坑开挖对邻近既有下穿顶管隧道的变形影响分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):200-204.

[10] 刘波. 上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析[J]. 岩土工程学报,2018,40(10):1950-1958.

[11] 潘军刚,李大勇,赵少飞. 风载作用下深基坑开挖对邻近高层建筑物的变形影响[J]. 岩土工程学报,2006(S1):1870-1873.

[12] 黄茂松,朱晓宇,张陈蓉. 基于周边既有建筑物承载能力的基坑变形控制标准[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2305-2311.

[13] 李兵,孙小飞,于忠诚,等. 地铁深基坑施工与邻近建筑的关联效应研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(1):86-93.

[14] 王志杰,周飞聪,周平,等. 基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(10):2131-2147.

[15] 谢康和,周建. 岩土工程有限元分析理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:293-301.

[16] 刘滨霞,吴旭. 外有堆载的深基坑桩锚支护结构性状[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(5):488-492.

[17] 李进军,王卫东,邸国恩,等. 基坑工程对邻近建筑物附加变形影响的分析[J]. 岩土力学,2007,28(S1):623-629.