

Influence of Excavation Depth of Foundation Pit on Adjacent Buildings

Jing Zhu^{1*}, Shiwei Qin²

¹Shanghai XiangCe Civil Engineering Technology Co., LTD, Shanghai

²Shanghai University, Shanghai

Email: 340046874@qq.com

Received: Aug. 29th, 2015; accepted: Sep. 11th, 2015; published: Sep. 16th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Combining with the measured data of bund tunnel project, the effect of excavation depth on the adjacent buildings is studied by using the three-dimensional fast Lagrange analysis program—FLAC3D. In the process of numerical analysis, the excavation of foundation pit is carried out by the way of sub layer, and the supporting role of vertical support structure is realized by improving the parameters of surrounding soil. By numerical simulation results, the deformation law of building settlement caused by excavation depth is obtained, which can be based on the allowable deformation value of the foundation pit to evaluate the influence of foundation pit excavation on the building.

Keywords

FLAC^{3D}, Pit Excavation, Surface Deformation, Building Deformation

基坑开挖深度对邻近建筑物的影响

朱 静^{1*}, 秦世伟²

¹上海祥测土木工程技术有限公司, 上海

²上海大学, 上海

Email: 340046874@qq.com

收稿日期: 2015年8月29日; 录用日期: 2015年9月11日; 发布日期: 2015年9月16日

*通讯作者。

摘要

结合外滩隧道工程实测数据, 运用三维快速拉格朗日分析程序FLAC3D研究了基坑不同开挖深度对邻近建筑物的影响。在数值分析过程中, 基坑开挖采用分段分层的方式进行, 开挖时竖向围护结构的支撑作用通过提高周围土体参数来实现; 水平支撑的作用则通过施加定点水平集中力来模拟。由数值模拟结果得到基坑开挖深度引起建筑物沉降的变形规律, 据此可根据建筑物允许变形值评估基坑开挖对建筑物的影响程度。

关键词

FLAC^{3D}, 基坑开挖, 地表变形, 建筑物变形

1. 引言

外滩隧道(Bund Tunnel), 是位于上海外滩地下的城市快速路。南起中山南路老太平弄, 沿中山南路、中山东二路、中山东一路、吴淞路至海宁路, 全长 3.3 公里, 外滩隧道南端使用开挖结合盖挖法施工。由于沿线的 33 幢历史保护建筑物, 是上海的标志性建筑, 工程施工过程中不允许有丝毫的损害。隧道南段尽管采用的是开挖结合盖挖的方法, 但是仍需要考虑工程对于沿线华夏银行、东风饭店的影响。如此近距离的施工, 对于施工工艺和技术来说, 要求精确度极高。

Skempton & MacDonald [1]通过对同类型的项目进行总结, 认为深基坑施工过程中对近邻建筑物结构的损害主要是地表沉降曲率, 跟建筑物的整体变形角没有关系, 但地表沉降曲率半径难以测量, 因此把变形角的变化作为建筑物的损害标准。E. J. Cording [2]等人经过研究得出结论: 以柔性地基为基础的建筑物变形与变形角有直接的关系, 变形角与沉降曲线的斜率和地表的水平应变有关。俞建霖, 赵荣欣, 龚晓南[3]用有限元法对软土地基基坑周围地表最大沉降量的几个影响因素进行了分析; 还对软土地基加固区的深度和宽度变化对基坑变形的影响展开分析, 为类似工程施工提供指导。张尚根、曹继勇[4]等对软土地区深基坑支护结构变形引起的地表沉降进行分析, 提出用正太分布密度函数计算地表沉降的公式, 对预测地表沉降具有实用性, 同时也给出了减少地表沉降量的具体措施。刘宝琛[5]等应用随机介质理论, 研究土体开挖引起的地表移动及变形问题。侯学渊[6]等参考盾构法隧道地表沉降的 Peck 和 Schmidt 公式, 借鉴了三角形沉降公式的思路提出了基坑地层损失法的概念, 采用相关原理, 依照墙体变形和地面沉降二者的地层移动面积相关原理, 计算地面垂直位移即地面沉降, 此法已在沿海软土地区逐步普及, 加上恰当经验系数后, 与测量的结果较好的吻合。邹积亭, 刘运明[7]采用时间序列方法对建筑物沉降数据进行分析处理, 建立了建筑物动态沉降预测模型, 并对其沉降趋势进行预测, 应用于实例中表明 AR(P)模型来进行建筑物的沉降趋势的预测在某些情况下是符合要求的。刘兴旺等[8]结合杭州、上海软土地区 15 个成功基坑工程的监测资料对基坑开挖所产生的围护结构的最大侧向变形、最大侧向变形位置、邻近建筑物的沉降以及变形的时间效应等进行了分析研究。

基坑开挖对周边环境的影响以往学者进行了大量研究, 其中包括支护方式、开挖方式、土质等因素的影响。然而, 基坑的开挖深度直接影响着支护的方式、开挖的方式, 因此基坑开挖深度也是对周围环境的重要影响因素。本文结合外滩隧道工程明挖段即福州路至十六铺区段, 运用三维快速拉格朗日分析程序 FLAC^{3D} 研究了基坑开挖深度对邻近建筑物的影响, 并对基坑开挖引起的建筑物沉降变形进行了数值模拟, 得到了邻近建筑物的竖向位移, 最后总结了不同开挖深度的基坑引起的建筑物沉降变形的规律。

2. 数值模拟方法

岩土工程结构的数值解是在满足基本方程和边界条件下推导的, 由于基本方程和边界条件多以微分方程的形式出现, 因此, 将基本方程近似地改用差分方程(代数方程)表示, 把求解微分方程问题变为求解代数方程问题, 即差分法。

FLAC3D 是基于显式差分法进行工程模拟的软件。差分法的思想是用差分网格离散求解域, 用差分公式将科学问题的控制方程(常微分方程或偏微分方程)转化为差分方程, 然后结合初始及边界条件, 求解线性代数方程组。FLAC3D 分析在求解中使用如下 3 种计算方法:

- 1) 离散模型方法。连续介质被离散为若干六面体单元, 作用力均被集中在节点上。
- 2) 有限差分方法。变量关于空间和时间的一阶导数均用有限差分来近似表达。
- 3) 动态松弛方法。由质点运动方程求解, 通过阻尼使系统运动方程衰减至平衡状态。

陈滋雄[9]以重庆市长寿区新市镇某小区基坑为工程背景, 采用理论分析、和 FLAC3D 数值模拟相结合的方法研究了基坑开挖岩土体的变形规律及其受力特征和对附近已有建筑物的影响。通过计算分析可知, 基坑开挖引起的土体位移对邻近桩基有着明显的作用。随着开挖的进行, 作用在桩上的土体位移不断变大。由于桩周土和桩的相互作用, 桩身的变形不断变大, 桩身弯矩不断变大; 此外, 基坑开挖引起的土体位移对邻近桩基有着明显的作用。随着开挖的进行, 作用在桩上的土体位移不断变大。由于桩周土和桩的相互作用, 桩身的变形不断变大, 桩身弯矩不断变大。由此也可以看出, 利用数值模拟基坑开挖与对邻近建筑物的影响是可行的。

在基坑开挖过程中, 对岩土体的扰动与很多因素有关, 其中基坑开挖深度决定了基坑的开挖方式、支护方式, 从而直接影响着周围土体的运动, 本文将对基坑开挖深度对周边建筑物的影响运用 FLAC3D 有限差分软件进行探讨。

3. 基坑开挖深度对邻近建筑物的影响

首先, 针对华夏银行区段在外滩隧道开挖过程中的变形建立数值模型, 并与实际监测数据进行对比, 验证数值模型的可靠性。然后利用该模型, 对不同开挖深度的基坑分别讨论其对邻近建筑物的影响。

3.1. 模型几何尺寸

基坑模型平面尺寸取 $30\text{ m} \times 10\text{ m}$, 深度 z 分别取 $1\text{ m}, 2\text{ m}, 3\text{ m}, 4\text{ m}, \dots, 30\text{ m}$ 。邻近建筑物条形基础尺寸取为 $20\text{ m} \times 18\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。考虑到基础的长度和基坑的宽度, 取周围土体的尺寸为 $60\text{ m} \times 50\text{ m} \times 50\text{ m}$ (见图 1, 图 2)。

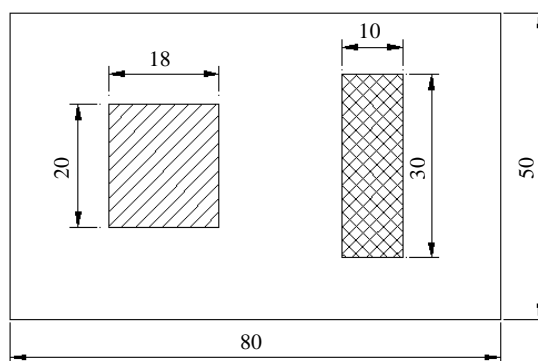


Figure 1. Pit plan
图 1. 基坑平面位置图

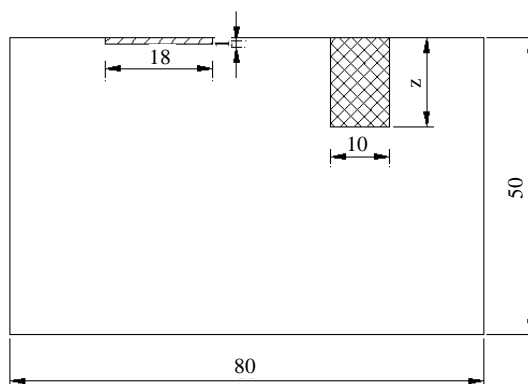


Figure 2. Pit profile
图 2. 基坑剖面图

3.2. 土层参数

为更好地模拟施工的影响, 采用外滩隧道工程地质勘察报告的土体参数, 且土层分布如表 1 所示。条形基础为 C30 混凝土, 力学参数设置如表 2。

在 FLAC^{3D} 中, 由于土体模型采用的是摩尔-库伦模型[10], 而该模型涉及到的是土体的体积模量和切变模量, 故需将土体压缩模量转为弹性体积模量 K 和切变模量 G , 按下式进行转换:

$$E = E_s \left(1 - \frac{2 \cdot \nu^2}{1 - \nu} \right)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

上式中 E 为杨氏模量, ν 为泊松比。

3.3. 基坑开挖过程模拟

基坑施工流程为: 由上至下进行开挖, 进深为 1 m, 直至开挖深度为 z , 基坑断面和开挖顺序如图 3 所示。基坑施工采用分段分层法[11] [12]进行开挖, 开挖过程中竖向支撑的作用, 通过采用提高周围土体参数的方法[13]来进行模拟, 水平支撑的作用通过在固定位置施加定向水平荷载来实现。在建模时将基坑周边维护部分建立厚度为 500 mm 的实体单元, 以便基坑开挖前提高其参数来模拟竖向支撑的作用。当基坑开挖到水平支撑位置时, 施加相应水平力模拟水平支撑的作用, 水平力大小根据开挖深度土压力来计算得到。

4. 计算结果与分析

4.1. 华夏银行沉降结果对比

运用上述几何模型和参数对紧邻华夏银行区段的基坑进行开挖, 并实时记录银行随着开挖施工的进程, 沉降位移的变化规律, 其中观测记录点为银行基础的四个角观测点。开挖工况如图 3 所示, 首先, 提高开挖范围外 0.5 m 的土体参数, 以便模拟维护结构的作用, 然后由上至下, 分层连续开挖, 进深为 1 m, 直至设计标高。最后将数值模拟结果与实际监测数据进行对比, 其结果如图 4 所示。

Table 1. Mechanical parameters of soil physics
表 1. 土体物理力学参数

层号	土层名称	E_s/MPa^{-1}	c/kPa	$\varphi/^\circ$	K/MPa	G/MPa
② ₀	填土	6.85	11	22.0	22.83	2.54
② ₃₋₁	灰色淤泥质粉质粘土	8.04	10	25.0	26.8	2.98
② ₃₋₂	灰色黏质粉土夹粉质黏土	9.03	7	28.5	30.1	3.34
④	灰色粉质黏土	2.41	14	9.5	8.03	0.89
⑤ ₁	灰色黏土	3.85	17	13.0	12.83	1.43
⑤ ₃	灰色粉质黏土	4.94	17	17.0	16.17	1.83
⑤ ₃₁	灰色粉质黏土夹黏质粉土	5.19	14	18.0	17.3	1.92

Table 2. Mechanical parameters of concrete
表 2. 混凝土力学参数

E/MPa	μ	K/MPa	G/MPa
3.0×10^4	0.20	1.67×10^4	1.25×10^4

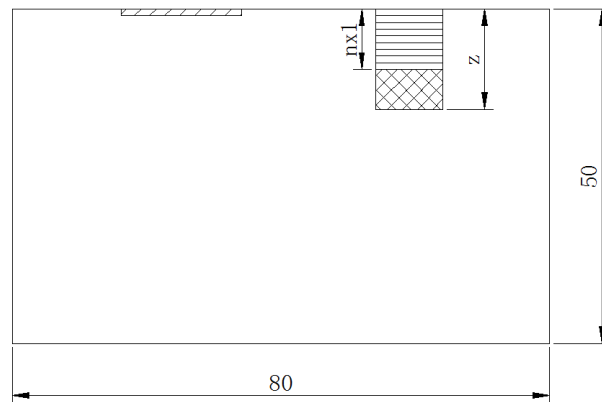


Figure 3. Pit sequence of underpass
图 3. 基坑断面和开挖顺序

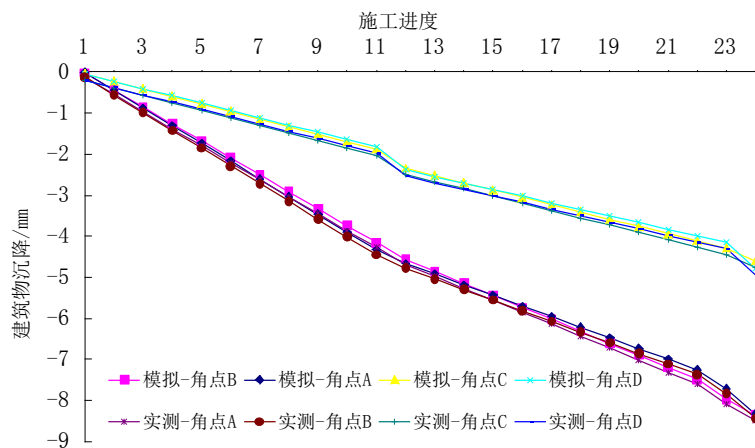


Figure 4. Comparison of settlement data of Huaxia Bank
图 4. 华夏银行沉降数据对比

由图4可以看出,随着基坑施工的逐步展开,建筑物沉降随着基坑开挖进度(深度)的变化而持续增加。且通过数值模拟所得沉降值与实际监测数据的变化趋势基本吻合,由此也可看出采用FLAC3D进行基坑开挖过程模拟是可靠的。将建筑物四个角点最大沉降值数值模拟结果和实际监测结果绘成柱状图如图5所示。

由以上对比结果可以看出,运用3.3节数值模型对该工程进行数值模拟与实际监测所得数据具有较好的匹配度,数值模拟结果与实际监测结果的差异均在20%以内,可以满足工程精度要求。

4.2. 不同开挖深度基坑引起建筑沉降沉降

在实际工程中,由于基坑开挖深度的不同,采用的支护方式、施工顺序等都有所不同,由此直接导致了在基坑开挖过程中,对土体扰动的差异性。为了探讨基坑开挖深度变化对周围土体和建筑物的影响规律,运用上述几何模型对基坑不同开挖深度时引起邻近建筑沉降进行了数值模拟,得到建筑沉降如图6所示。

由图6可以看到,随着基坑开挖深度的增加,邻近建筑物的最大沉降值也随之增大,然而当基坑开挖深度为10m左右时,建筑物的沉降速率将发生较大变化,随着开挖深度的继续增加,建筑物沉降速率将有所下降。当开挖深度超过25m时,建筑物最大沉降值增加量仅为0.5mm以内。

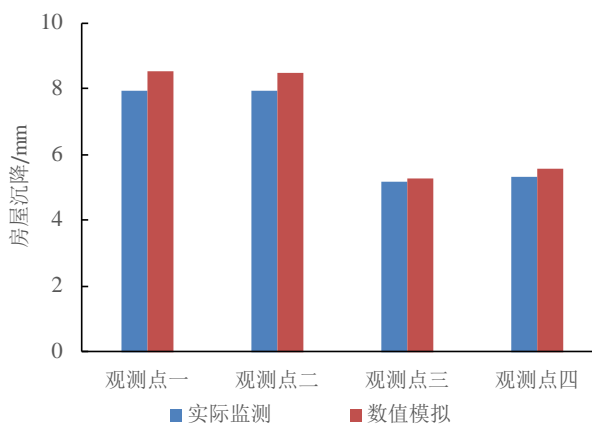


Figure 5. Comparison of max settlement data of Huaxia Bank
图5. 华夏银行最大沉降值对比

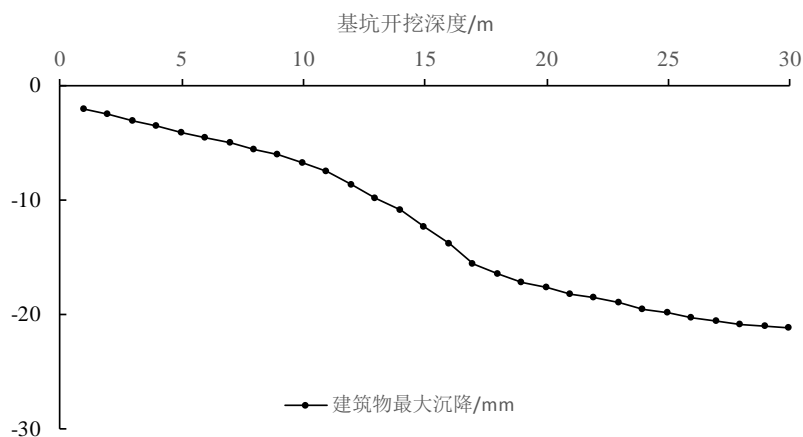


Figure 6. Building maximum settlement curve chart
图6. 建筑物最大沉降曲线图

在基坑开挖过程中, 由于围护收到周围土体的挤压产生收缩变形, 导致了揭开那个周围土体向开挖空间运动, 从而引起地表沉降[14] [15]。随着基坑开挖深度的增加, 围护结构收到的侧向土压力也相应增加, 围护结构变形加剧, 从而导致地表沉降增加。此外由于基坑的开挖势必会引起地下水位的变化, 随着通道开挖的进行, 地下水朝着开挖空间运动, 由此也带来的地表的沉降。

5. 结论

通过上述计算与分析可知, 随着基坑开挖深度的增加, 建筑物沉降值也相应增加。在开挖深度达到 10 m 左右时, 建筑物的沉降速率发生了较大变化, 随着基坑开挖深度的继续增加, 邻近建筑物沉降速率有所减缓, 然后最终沉降量依然逐渐增大。此外, 土质越软、地下水位越高, 由于基坑施工引起地下水向基坑内流动, 土体中孔隙水压力消散, 土体的变形加剧, 从而引起建筑物更大的沉降。因此在实际的基坑工程中, 为了尽量减少对邻近建筑物的影响, 我们应该根据基坑开挖深度选择合理的支护方式和施工方法。若基坑开挖深度超过 10 米时, 尤其应实时监测基坑在施工过程中的变形规律, 采取有效措施防止基坑变形过大, 避免造成对周围环境的破坏。

参考文献 (References)

- [1] Skempton, A.W. and MacDonald, D.H. (1956) Allowable settlements of building. *Institution of Civil Engineer*, **13**, 19-32. <http://dx.doi.org/10.1680/ipeds.1956.12202>
- [2] Cording, E.J., O'Rourke, T.D. and Boscardin, M.D. (1978) Ground movements and damage to structures. *Proceedings of the ASCE Conference on Evaluation and Prediction of Subsidence*, Florida, 516-537.
- [3] 余志成, 施文华 (1977) 深基坑支护设计与施工. 中国建筑工业出版社, 北京, 31-47, 95-98, 196-212.
- [4] 张尚根, 陈志龙, 曹继勇 (1999) 深基坑周围地表沉降分析. *岩土工程技术*, **4**, 1-7.
- [5] 刘宝琛, 张家生 (1995) 近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法. *岩土力学与工程学报*, **7**, 289-296.
- [6] 侯学渊, 廖少明 (1993) 盾构隧道沉降预估. *地下工程与隧道*, **4**, 24-32.
- [7] 邹积亭, 刘运明 (2008) 时间序列在建筑物沉降监测数据分析中的应用. 《测绘通报》测绘科学前沿技术论坛论文集, 测绘出版社, 北京, 1-7.
- [8] 刘兴旺, 施祖元, 益德清, 等 (1999) 软土地区基坑开挖变形性状研究. *岩土工程学报*, **4**, 456-460.
- [9] 陈滋雄 (2012) 基坑开挖对邻近建筑物的影响研究. 硕士论文, 重庆大学, 重庆.
- [10] 阳军生, 刘宝琛 (2002) 城市隧道施工引起的地表移动及变形. 中国铁道出版社, 北京.
- [11] Loganathan, N., Poulos, H.G. and Stewart, D.P. (2000) Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations. *Geotechnique*, **50**, 283-294. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2000.50.3.283>
- [12] 陈育民, 徐鼎平 (2011) FLAC/FLAC3D 基础与工程实例. 中国水利水电出版社, 北京.
- [13] 王梦茹 (2004) 地下工程浅埋暗挖技术通论. 安徽教育出版社, 合肥.
- [14] 蔡小林, 赵德安 (2004) 隧道计算中提高围岩参数模拟锚杆作用的探讨. *兰州交通大学学报*, **1**.
- [15] 彭文斌 (2011) FLAC 3D 实用教程. 机械工业出版社, 北京.