

DOI: 10.11779/CJGE2017S2054

浅基础框架建筑受邻近基坑开挖影响简化分析

张治国^{1, 2, 3}, 杨 轩¹, 赵其华⁴, 费思异¹, 贾延臣¹

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350002;

3. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 4. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 基于 Winkler 地基模型, 将框架结构、条形基础、地基的共同作用简化为弹性地基上的剪弯梁模型, 研究了不同施工距离等影响因素下, 基坑开挖对邻近建筑基础沉降变形和内力的影响。算例结果表明: 随着建筑物与基坑开挖面距离的增大, 建筑基础梁的相对挠曲将依次呈现为下凹形态、“ ∞ ”形态以及上凸形态。当基础梁跨越坑外土体沉降槽最低点和上凸挠曲率最大点位置时, 基础梁下凹和上凸形态的相对挠曲, 以及其正、负弯矩、剪力均达到峰值。
关键词: 基坑工程; 浅基础框架建筑物; 简化分析; 弯矩; 剪力; 相对挠曲变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S2-0224-04

作者简介: 张治国(1978-), 男, 博士, 博士后, 副教授, 主要从事地下工程施工对周边环境影响控制方面的研究工作。E-mail: zgzhang@usst.edu.cn。

Simplified analysis of frame buildings with shallow foundation induced by excavation of adjacent foundation pit

ZHANG Zhi-guo^{1, 2, 3}, YANG Xuan¹, ZHAO Qi-hua⁴, FEI Si-yi¹, JIA Yan-chen¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Key

Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources, Fuzhou 350002, China; 3. Guangxi Key

Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. College of

Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Based on the Winkler foundation model, the interactions of the frame structure, strip basement and soil foundation are simplified as a shear-flexural beam on elastic foundation. The different construction distances are considered to obtain the settlements and internal forces of frame building beam induced by excavation of foundation pit. The results show that the sagging deformation, " ∞ " form of deformation and hogging deformation will occur for the relative deflection of foundation beam when the relative distance between the building and the excavation increases. When the building is located over the lowest point and the hogging zone of the settlement trough, the sagging and hogging deformations are the most obvious. At the same time, the positive, negative bending moments and shear forces also reach their maximum values.

Key words: foundation pit engineering; frame building with shallow foundation; simplified analysis; bending moment; shear force; relative deflection

0 引 言

城市现代化建设使得基坑施工地点难免位于繁华市区内,其施工过程将导致基坑外部土体位移场改变,使得邻近建筑自身内部应力重新分布,有些建筑物可能产生较大的变形甚至局部开裂,进而导致建筑结构安全可靠度显著降低。目前,国内外学者的研究主要集中于基坑开挖时坑外天然地表沉降规律这一问题上,对邻近建筑物受基坑开挖影响变形分析的研究较少,现有计算理论多采用有限元数值模拟方法,而采用理论解析方法还不多见。因此,通过简化解析的方法研究邻近历史建筑受基坑施工的影响变形具有一定

理论意义。

邻近建(构)筑物受基坑施工的影响分析实际上是基坑施工所诱发的坑外土体变形与建筑结构的相互作用问题。目前针对该问题的研究,以两种方法为主,第一种方法是数值模拟方法^[1-7],第二种方法是基于土体自由位移场理论^[8]的两阶段分析法^[9-10]。两阶段分析法即将邻近建(构)筑物受基坑施工的影响分析分成两个阶段:第1阶段主要研究无建筑时,基坑施工所

基金项目: 上海自然科学基金项目(15ZR1429400); 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室课题(2015K005); 广西岩土力学与工程重点实验室项目(15-KF-07)

收稿日期: 2017-08-02

诱发的坑外土体位移场位移; 第 2 阶段将建筑上部结构、基础、地基的共同作用简化为弹性地基上的剪切或剪弯梁模型, 通过把第 1 阶段的土体位移场位移施加于建(构)筑基础梁上, 进而分析建(构)筑相应的附加变形及内力。

本文将框架结构、条形基础、地基的共同作用简化为弹性地基上的剪弯梁模型, 把基坑开挖所引起的地层损失作为引起坑外土体沉降变形的主要因素, 采用两阶段法, 推导出建筑物与地基相互作用的解析解公式, 针对建筑物距围护墙不同距离敏感性因素进行分析, 研究了基坑施工时建筑基础弯矩、剪力、相对挠曲变化规律。

1 地基-基础-上部结构相互作用模型

分别建立建筑物与天然地表所对应的两个沉降坐标系统, 地表沉降坐标系统为 $w_0(j)-O_0-j$, 原点 O_0 建立在基坑围护结构顶部位置处, 横坐标 j 轴指向代表坑外地表逐渐远离基坑开挖面, 纵坐标 $w_0(j)$ 为 j 点处基坑施工所诱发的天然地表沉降; 建筑物沉降坐标系统为 $w(x)-O-x$, 原点 O 建立在基坑邻近建筑物的基础左端位置处, O 与 O_0 的距离为 D , 两个坐标系统横坐标指向一致, 坐标系统如图 1 所示。

以 Hsieh 等^[8]根据实测数据统计得到的沉降曲线为基础, 张陈蓉等^[5]提出基坑开挖时坑外地表土体自由位移沉降的预测曲线公式如下:

$$w_0(x, 0) = \begin{cases} w_{0,\max}(j/H + 0.5) & (0 \leq j \leq 0.5H) \\ w_{0,\max}(-0.6j/H + 1.3) & (0.5H \leq j \leq 2H) \\ w_{0,\max}(-0.05j/H + 0.2) & (2H \leq j \leq 4H) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $w_{0,\max}$ 为基坑施工时坑外地表沉降峰值, j 为沿基坑横向坑外地表任意一点的横坐标, H 为基坑开挖深度。

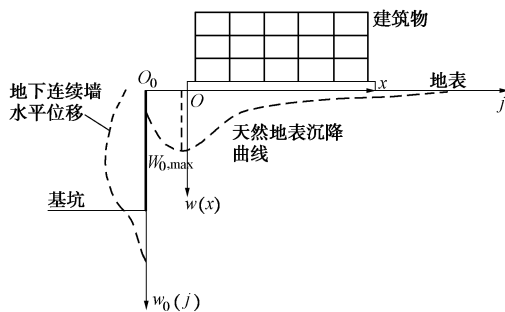


图 1 基坑-建筑相互作用坐标系

Fig. 1 Excavation-building interaction coordinate

受竖向力作用, 框架相邻柱间将产生相对错动, 进而产生竖向变形, 其变形主要表现为剪切变形, 而条形基础受地表沉降影响所引起的弯矩作用亦不可忽略, 因此通过对框架结构进行连续化处理, 将条基转化成受框架结构约束的位于弹性地基上的剪弯梁, 其

挠曲微分方程如下:

$$EJ \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - (GF + g) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = q(x) - p(x), \quad (2)$$

式中, EJ 和 GF 分别为基础的抗弯刚度和上部结构的抗剪刚度, $q(x)$ 为建筑物作用于地基的竖向线荷载, g 为框架底层各柱对应的约束线刚度, $p(x)$ 为基坑施工时地基对邻近建筑基础上任意一点的反力。

由 Winkler 弹性地基理论可推导出建筑沉降与天然地表沉降的差值和 $p(x)$ 存在正比关系, $p(x)$ 公式如下:

$$p(x) = k[w(x) - w_0(j + x)], \quad (3)$$

式中, k 为地基基床系数。另外, $GF = \frac{12}{d \left(\frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_c} \right)}$,

$K_b = \frac{\sum EI_b}{d}$, $K_c = \frac{\sum EI_c}{h}$, $g = \frac{6K_{cl}}{d}$ 。式中, K_{cl} 为框架底层柱的线刚度; d 为框架相邻两柱间距, 楼层层高为 h ; $\sum EI_c$ 为框架结构相同柱所对应的各层柱总的抗弯刚度; $\sum EI_b$ 为框架结构相同开间所对应的各层梁总的抗弯刚度。

将基坑施工所引起的坑外土体自移场沉降公式 (1), 代入剪弯梁挠曲微分方程式 (2) 可得

$$\left. \begin{aligned} EJ \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - (GF + g) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + kw(x) &= q + kw_{0,\max}[(x + D)/H + 0.5] & (0 \leq x \leq 0.5H), \\ EJ \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - (GF + g) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + kw(x) &= q + kw_{0,\max}[-0.6(x + D)/H + 1.3] & (0.5H \leq x \leq 2H), \\ EJ \frac{d^4 w(x)}{dx^4} - (GF + g) \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + kw(x) &= q + kw_{0,\max}[-0.05(x + D)/H + 0.2] & (2H \leq x \leq 4H). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

通过剪弯梁挠曲微分方程, 结合建筑物基础梁的边界条件, 采用有限元差分法可以计算得到基础的沉降位移 w 。其中基础梁有限差分数值解法如下:

将基础划分为相等的 n 个单元, 单元长度为 $h=L/n$, 从基础左端到右端单元节点编号依次为 $0, 1, \dots, i-1, i$ 。在计算时分别在基础梁两端各增加两个虚拟节点 $-2, -1, i+1, i+2$, 可得

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{dw}{dx} \right)_i &= \frac{w_{i+1} - w_{i-1}}{2h}, \\ \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)_i &= \frac{w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}}{h^2}, \\ \left(\frac{d^3 w}{dx^3} \right)_i &= \frac{w_{i+2} - 2w_{i+1} + 2w_{i-1} - w_{i-2}}{2h^3}, \\ \left(\frac{d^4 w}{dx^4} \right)_i &= \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{h^4}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可写成差分的形式为

$$\alpha w_{i-2} + \beta w_{i-1} + \gamma w_i + \beta w_{i+1} + \alpha w_{i+2} = p_i \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -4 & -1 & 0 \\ 6 & 2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \{A\}, \\ \{A\} = \left\{ \frac{1}{h^4}, \frac{GF+g}{EJh^2}, \frac{k}{EJ} \right\}^T, \\ p_i = \frac{q + [w_0(D+x)]_i}{EJ}. \end{cases} \quad (7)$$

$$p_i = \frac{q + [w_0(D+x)]_i}{EJ}. \quad (8)$$

基础梁边界条件公式为

$$\begin{cases} EJ \frac{d^3 w(x)}{dx^3} = 0 \quad (x=0, L), \\ EJ \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = 0 \quad (x=0, L), \end{cases} \quad (9)$$

式中, L 为基础梁长度。

基础梁转角、弯矩、剪力可分别表示为

$$\begin{cases} \theta_i = \left(\frac{dw}{dx} \right)_i = \frac{1}{2h} (w_{i-1} - w_{i+1}), \\ M_i = EJ \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)_i = \frac{EJ}{h^2} (w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}), \\ Q_i = EJ \left(\frac{d^3 w}{dx^3} \right)_i = \frac{EJ}{2h^3} (w_{i-2} - 2w_{i-1} + 2w_{i+1} - w_{i+2}), \end{cases} \quad (10)$$

其中弯矩以使梁上缘受拉为正。

结合边界公式(9)可得

$$\begin{cases} w_{-1} - 2w_0 + w_1 = 0, \\ w_{-2} - 2w_{-1} + 2w_1 - w_2 = 0, \\ w_{n-2} - 2w_{n-1} + 2w_{n+1} - w_{n+2} = 0, \\ w_{n-1} - 2w_n + w_{n+1} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

联立式(6)和(11), 消去基础梁上的虚拟节点, 得到基础梁的位移方程:

$$\{W\}_{(n+1) \times 1} = [K]_{(n+1) \times (n+1)}^{-1} \cdot \{P\}_{(n+1) \times 1}, \quad (12)$$

其中,

$$[K] = \begin{bmatrix} \gamma + 2\beta + 4\alpha & -4\alpha & 2\alpha & & & & \\ \beta + 2\alpha & \gamma - \alpha & \beta & \alpha & & & \\ \alpha & \beta & \gamma & \beta & \alpha & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & \alpha & \beta & \gamma & \beta & \alpha \\ & & & \alpha & \beta & \gamma - \alpha & \beta + 2\alpha \\ & & & & 2\alpha & -4\alpha & \gamma + 2\beta + 4\alpha \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\{W\} = \{w_0, w_1, \dots, w_{n-1}, w_n\}^T, \{P\} = \{p_0, p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}^T, p_i \text{ 的取值参照式(8)}.$$

2 算例分析

条形浅基础框架结构建筑采用C30混凝土浇筑,

楼层为3层, 层高为3 m, 沿基坑横向为五开间, 间距为4.5 m, 条形基础截面尺寸为700 mm×800 mm, 柱截面尺寸500 mm×500 mm, 由底层至最高层梁截面尺寸分别为300 mm×700 mm, 300 mm×550 mm, 250 mm×600 mm。地基基床系数 $k=7000 \text{ kN/m}^3$, 上部结构传来的竖向荷载 $q=150 \text{ kN/m}$ 。基坑开挖深度为15 m, 基坑施工所引起坑外天然地表沉降值最大值 $w_{0,\max} = 25 \text{ mm}$ 。

为研究不同施工距离 D 条件下基坑开挖对邻近浅基础框架建筑物的变形影响, 距离 D 依次取1, 3, 5, 9, 12, 18 m。基础弹模 $E=10000 \text{ MPa}$, 上部结构弹模 $E=30000 \text{ MPa}$ 。

图2(a)为不同施工距离条件下基础梁的沉降曲线。由图可知, 由于建筑刚度对其变形的约束、协调作用, 使得基坑开挖时建筑基础梁的沉降挠曲趋势明显减小, 但与坑外土体位移场变化趋势大致相同。当建筑跨越基坑外部土体沉降峰值两侧时, 其基础沉降曲线呈现明显下凹形态。当建筑跨越坑外土体上凸区域曲率最大值位置处时最大, 其基础沉降曲线呈现明显的上凸形态。

图2(b)为不同施工距离条件下基础梁相对挠曲变化规律。由相对挠曲变形曲线可知, 当 $D=1 \text{ m}$ 和 $D=3 \text{ m}$ 时, 基础相对挠曲变形呈现为下凹形态, 相对挠曲最大值出现在 $D=1 \text{ m}$ 处, 其峰值为3.8 mm。当 $D=5 \text{ m}$ 时, 基础相对挠曲呈现“∞”形态, 其特点为下凹形态的相对挠曲发生在建筑邻近基坑开挖面一侧, 上凸相对挠曲发生在建筑远离基坑开挖面一侧, 其下凹、上凸相对挠曲峰值分别为0.37, 0.29 mm。施工距离 D 的增大使得基础梁的相对挠曲由“∞”形态转变为上凸形态。当 $D=12 \text{ m}$ 时, 建筑物基础中心位于基坑开挖面外部土体上凸曲率最大值位置, 此时纵墙上凸形态的相对挠曲最大, 其相对挠曲峰值为2.1 mm。

图2(c)为不同施工距离条件下基础梁弯矩变化规律。由图可知, 当 $D=1 \text{ m}$ 和 $D=3 \text{ m}$ 时, 基础以负弯矩为主, 且 $D=1 \text{ m}$ 时, 负弯矩最大, 其峰值为-39.6 kN·m。当 $D=5 \text{ m}$ 时, 基础弯矩呈现“∞”形态, 其特点为: 基础梁的负、正弯矩分别位于基础近基坑端和远基坑端。当 $D \geq 9 \text{ m}$ 时, 基础弯矩均为正值, 且 $D=12 \text{ m}$ 时正弯矩最大, 其峰值为17.4 kN·m。

图2(d)为不同施工距离条件下基础梁剪力变化规律。由图可知, 当 $D=1 \text{ m}$ 时, 基础剪力呈现倒“∞”形态分布, 其特点为: 基础近基坑侧产生正剪力, 而远基坑侧产生负剪力, 正、负剪力最大值分别为10.1, -5.3 kN。当 $D=3 \text{ m}$ 和 $D=5 \text{ m}$ 时, 基础两端均产生正

剪力, 而基础中部产生负剪力, 最大正、负剪力出现在 $D=3\text{ m}$, 其值为 $10, -3.5\text{ kN}$ 。当 $D\geq 9\text{ m}$ 时, 基础剪力呈现“ ∞ ”形态分布, 即基础近基坑侧产生负剪力, 而远基坑侧产生正剪力。

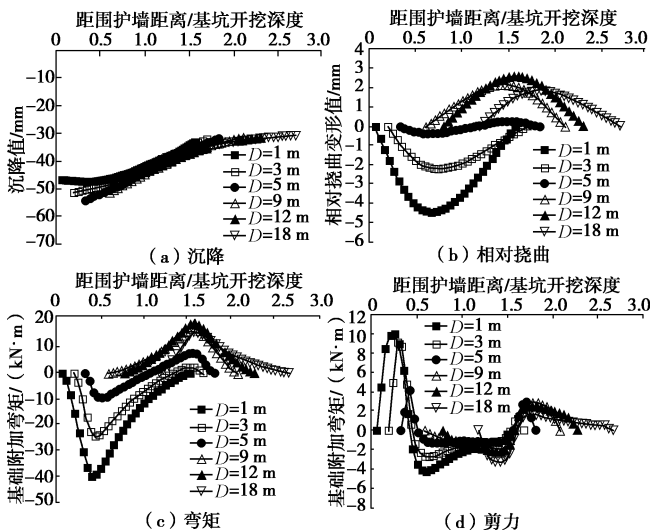


图 2 基础各量值变化曲线

Fig. 2 Variation curves of parameters of foundation

3 结 语

为获取框架建筑基础抗弯刚度和上部结构抗剪刚度的影响, 本文基于 Winkler 地基模型, 采用两阶段分析法, 推导出基坑开挖时框架结构、条形基础、地基相互作用的解析公式; 在此基础上针对不同施工距离敏感性因素进行分析, 研究了邻近建筑基础梁的沉降和内力变化规律。

本文研究的特点为: 在第一阶段采用了简单明确的基坑开挖地表沉降自由曲线公式; 此外本文基础梁的变形和内力计算体现了框架建筑上部刚度的影响。

参考文献:

- [1] BRYSON L, KOTHEIMER M. Cracking in walls of a building adjacent to a deep excavation[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2011, **25**(6): 491 - 503.
- [2] SON M, CORDING E J. Responses of buildings with different structural types to excavation-induced ground settlements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, **137**(4): 323 - 333.
- [3] SON M, CORDING E J. Numerical model tests of building response to excavation-induced ground movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(11): 1611 - 1621.
- [4] 王浩然, 王卫东, 徐中华. 基坑开挖对邻近建筑物影响的三维有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(增刊 2): 1512 - 1517. (WANG Hao-ran, WANG Wei-dong, XU Zhong-hua. Three dimensional analysis of the influence of deep excavation on adjacent building[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(S2): 1512 - 1517. (in Chinese))
- [5] 张陈蓉, 蔡建鹏, 黄茂松. 基坑开挖对邻近地埋管线的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 2): 154 - 157. (ZHANG Chen-rong, CAI Jian-peng, HUANG Mao-song. Influence of deep excavation on adjacent underground pipelines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S2): 154 - 157. (in Chinese))
- [6] 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研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 2305 - 2312. (HANG Mao-song, ZHU Xiao-yu, ZHANG Chen-rong. Deformation controlling criterion for excavation based on bearing capacity of adjacent buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 2305 - 2312. (in Chinese))
- [7] 郑 刚, 李志伟. 基坑开挖对邻近任意角度建筑物影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 615 - 624. (ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Finite element analysis of response of the building with arbitrary angle adjacent to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 615 - 624. (in Chinese))
- [8] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004 - 1017.
- [9] 谭志祥, 邓喀中. 采动地区建筑物地基、基础和结构协同作用模型[J]. 中国矿业大学学报, 2004, **33**(3): 264 - 267. (TAN Zhi-xiang, DENG Ka-zhong. Coordinating work model of ground, foundation and structure of building in mining area[J]. Journal of China University of Mining Technology, 2004, **33**(3): 264 - 267. (in Chinese))
- [10] 夏军武, 袁迎曙, 董正筑. 采动区地基、条形基础与框架结构共同作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 537 - 541. (XIA Jun-wu, YUAN Ying-shu, DONG Zheng-zhu. Mechanism study on subsoil-strap footing-framework interaction in mining subsidence area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 537 - 541. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)