

DOI: 10.11779/CJGE2018S1028

超载作用下地表沉降偏态分布模式研究

李元勋¹, 朱彦鹏², 叶帅华², 马孝瑞²

(1. 青海大学土木工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 地表沉降计算中, 如何考虑周边环境的影响及确定地表沉降曲线形态是重点问题。现有计算公式大多是在假设坑外没有超载或超载型式单一的前提下得出的, 应用范围有限。因此, 对不同的超载作用进行等效推导, 采用地层损失法原理, 建立考虑基坑周边不同超载型式作用下的地表沉降偏态分布曲线预测计算模型, 并推导计算公式, 以期对地表沉降量得到合理、可靠、更加符合实际的预测计算结果。并结合实际工程, 将文中方法与数值分析软件 Plaxis-2D 模拟计算结果及实测沉降值对比分析。结果表明: 超载作用既使地表沉降量有较大的增加, 又使最大沉降点位置朝基坑明显移动, 计算中正确考虑坑外超载的影响是必要的; 另外, 文中方法所得结果与实测沉降值吻合较好, 计算结果精度较高, 对深基坑地表沉降理论计算方法进行了相应的完善, 可供类似土质地区及支护结构的工程借鉴参考。

关键词: 超载作用; 地表沉降曲线; 偏态分布; Plaxis-2D

中图分类号: TU478

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0171-06

作者简介: 李元勋(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事深基坑支护结构及滑坡泥石流研究方面的工作。E-mail: liyuanxun.521@163.com。

Skewness distribution patterns of surface settlement considering overload effect

LI Yuan-xun¹, ZHU Yan-peng², YE Shuai-hua², MA Xiao-rui²

(1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: How to consider the influences of surrounding environment and determine the patterns of surface settlement curve is the primary problem in the calculation of surface settlement. The existing formulas are mostly obtained under the assumption that the pit is under the premise of no overload or single overload, and their application is limited. Therefore, different effects of the equivalent overloads are derived, and then the prediction model for skewness distribution curve of surface settlement is established considering the surface settlement under different overloading types based on the principles of formation damage method. The relevant formula is derived in order to get reasonable, reliable and satisfactory forecast results of surface settlement. For a practical project, a comparison is made among results by the proposed method, the simulated results of numerical analysis software Plaxis-2D and the measured settlement values. The results show that the effect of overloading is necessary to be considered for the reason that it has induced a greater increase in the surface settlement and also made the maximum settlement point moves significantly toward the foundation pit. In addition, the obtained results are in good agreement with the measured settlement values, and the computational accuracy is higher. The proposed method for surface settlement of deep foundation pits is improved, and it can be helpful for other similar projects.

Key words: overload effect; surface settlement curve; skewness distribution; Plaxis-2D

0 引言

在地表沉降预测计算中, 影响因素众多, 往往需要根据实测地表沉降数据分布来假定地表沉降曲线函数, 进而分析修正得出计算公式。地表的沉降主要有两种基本模式: 三角型及凹槽型。实际深基坑工程中, 坑外地表沉降并非简单地由以上两种模式中的其中一种组成, 而是这两种基本模式的组合。对此, 学者们相继提出用抛物线、正态分布曲线、偏态分布曲线等

来描述地表沉降规律。其中, 正态分布曲线模式已经在工程实践中得到较为广泛的应用^[1-3], 若假定条件的设定合理, 则该方法是一种比较有效的估算地表沉降量的计算方法。但是, 用正态分布曲线拟合深基坑地

基金项目: 青海省科技厅项目(2018-ZJ-933Q); 国家自然科学基金项目(51508256)

收稿日期: 2017-06-11

表沉降的缺点在于最大沉降点两侧沉降值是对称分布的,大量的工程实测资料及数值分析结果表明深基坑坑外地表沉降曲线表现为偏态分布^[4-7],所以用正态分布曲线来描述坑外地表沉降结果并不完全准确。

偏态分布曲线模式是近年来所提出的地表沉降曲线的一种新模式,聂宗泉等^[4]在对大量实测资料和已有研究成果分析处理的基础上,用偏态分布曲线模式对深基坑柔性支护下的坑外地表沉降量分析研究,证明了偏态分布曲线模式的有效性和实用性。刘小丽等^[5]将正态分布曲线模式及偏态分布曲线模式应用于深基坑地表沉降量计算中,计算分析表明偏态分布曲线能更为合理地描述地表沉降。张尚根等^[8]在现场监测数据和基坑数值分析资料的基础上,用偏态分布曲线计算坑外地表沉降量,并结合工程实例进行了验证,计算值与实测值吻合较好,偏态分布曲线模式预测精度较高。另外,地表沉降计算公式大多是假设坑外地面没有超载或者基坑周边不存在原有建筑物及构筑物等的前提下得出的,而实际工程中,基坑周边环境复杂,场地狭小,建筑物及构筑物紧邻基坑边缘,坑外地面超载现象时有发生。

因此,本文试图建立考虑邻近建筑物、构筑物或地面不同超载作用下的地表沉降偏态分布曲线预测计算公式,以期对沉降量能得到合理、可靠、更加符合实际的预测计算。

1 超载作用下地表沉降模型的建立

1.1 基本假定

杨国伟等^[9]研究表明,在邻近建筑物、构筑物或地面超载作用下坑外地表沉降与无超载时相差很大,超载影响下最大地表沉降位置更靠近挡墙,且靠近挡墙一定范围内的地表沉降量均有较大的增加。因此,本文提出以下 4 点假定来建立计算模型。

(1) 假定坑外地表沉降由无超载时的地表沉降量 δ_{v1} 和超载引起附加地表沉降量 δ_{v2} 两部分组成,即

$$\delta_v = \delta_{v1} + \delta_{v2} \quad (1)$$

(2) 假定无超载时坑外地表沉降曲线呈偏态分布曲线形态,函数表达式为

$$\delta_{v1}(x) = \frac{S_w}{(\sqrt{2\pi})wx} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{2x_m}\right]^2}{2w^2}} \quad (2)$$

式中 δ_{v1} 为无超载时坑外任一点地表沉降量 (mm); x 为待求沉降点距坑边的距离 (m); x_m 为最大沉降点距离基坑边的水平距离 (m),对于软土基坑可取 $(0.5 \sim 0.7)h$,对于土质较好的复杂地层 x_m 取值可为^[10] $(0.25 \sim 0.5)h$; S_w 为沉降曲线包络面积 (m·mm); w 为经验

系数,软土基坑可取值为 $0.60 \sim 0.70$ 。对于复杂地层,经验系数可在沉降最大值位置 x_m 已知的条件下,根据式 (2) 直接求解得到,过程如下。

对 $\delta_{v1}(x)$ 求一阶导数,得

$$\delta'_{v1}(x) = e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{2x_m}\right]^2}{2w^2}} \left(-\frac{S_w}{(\sqrt{2\pi})w} \cdot \frac{\frac{1}{w^2} \ln \frac{x}{2x_m} + 1}{x^2} \right) \quad (3)$$

令 $\delta'_{v1}(x) = 0$, 此时 $x = x_m$, 代入式 (3) 得出 $w = 0.83$ 。

(3) 假定超载引起的附加地表沉降量 δ_{v2} 可计算表达为

$$\delta_{v2}(x) = k \left(1 + \frac{p}{\gamma z_0} \right) \left(1 - \frac{z_0}{(1+\eta)H} \right) (\beta h - x) \quad (4)$$

式中 k 为超载作用引起的附加地表沉降量直线分布规律的斜率,可由实测数据反算得到; γ 为各土层土体重度 (kN/m^3); z_0 为超载埋深 (m); η 为基坑开挖影响深度系数,由下式计算:

$$\eta = \frac{h_d \delta_e}{H(\delta_m - \delta_e)} \quad (5)$$

式中 h_d 为支护结构嵌固端埋深 (m); δ_m , δ_e 分别为开挖面及支护结构最底端水平位移 (mm); H 为支护结构总高度 (m); β 为基坑开挖水平影响距离系数,软土地区可取 $2 \sim 4$,复杂稳定地层可取 $1 \sim 2$; h 为基坑的开挖深度 (m); x 为待求沉降点距坑边的距离 (m),且 $x < \beta h$ 。

(4) 假定地表沉降范围 x_0 为

$$x_0 = \psi H \quad (6)$$

式中, ψ 为经验系数,一般可取为 1.8。

1.2 等效超载

以上假定中 p 为坑外所作用的超载值,文献[9]假定在沉降范围内满布荷载,事实上,基坑周边荷载分布并非如此单一,根据其作用位置不同,可分为两类,即地表超载及埋深超载。因此,计算中需分别对两种超载进行如下等效 (如图 1, 2 所示)。

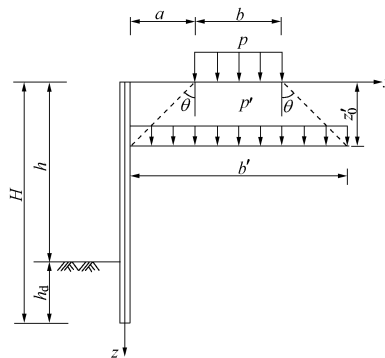


图 1 地表荷载等效

Fig. 1 Equivalent surface load

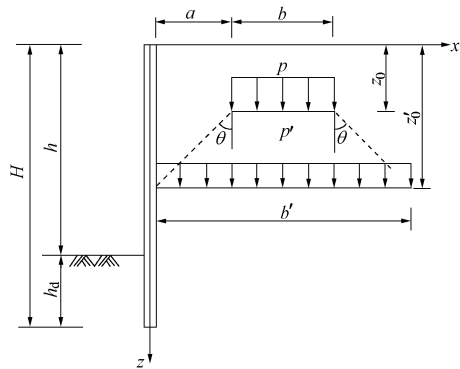


图 2 埋深荷载等效

Fig. 2 Equivalent depth load

图中, a 为支护结构边缘与荷载的水平距离 (m); b 为荷载宽度 (m); θ 为荷载等效的扩散角 ($^{\circ}$), 宜取 $\theta=45^{\circ}$ [11]; p' 为等效超载值 (kPa), 由下式计算:

$$p' = p \frac{b}{b'} = p \frac{b}{2a+b} \quad (7)$$

式中, b' 为等效荷载宽度 (m), z'_0 为等效超载埋深 (m), $z'_0 = z_0 + a$ 。则式 (4) 可改写为

$$\delta_{v2}(x) = k \left(1 + \frac{p'}{\gamma z'_0} \right) \left(1 - \frac{z'_0}{(1+\eta)H} \right) (\beta h - x) \quad (8)$$

1.3 计算模型

基于以上基本假定及超载的等效, 运用地层损失法原理来建立坑外地表沉降量预测计算模型, 给出考虑超载的深基坑地表沉降偏态分布曲线计算简图 (如图 3 所示), 来预测计算深基坑坑外地表沉降。

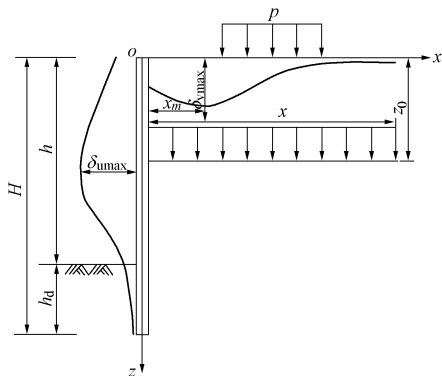


图 3 超载作用下偏态曲线分布模式

Fig. 3 Skewness distribution curve model considering overload effect

2 地表沉降计算过程推导

(1) 计算支护结构变位曲线包络面积 S_p

$$S_p = \sum_{i=1}^n \delta_w \Delta h \quad (9)$$

式中, δ_w 为基坑开挖范围内支护结构任一位置处水平位移 (mm), Δh 为微段长度 (m)。

(2) 坑外地表沉降曲线包络面积 S_w

依据地层损失法基本原理, 地表沉降曲线包络面积 S_w 与支护结构变位曲线包络面积 S_p 存在如下经验关系式:

$$S_w = m S_p \quad (10)$$

式中, m 为面积相关经验系数, 取值如下[12]。

对于嵌固较深的地下连续墙或柱列式灌注桩支护结构, 一般可取 $m=1.0$; 另外根据统计分析结果及经验, 当插入比 $h_d/h \leq 0.5$ 时, 可取 $m=1.0 \sim 1.2$; 当 $h_d/h > 0.5$ 时, 可取 $m=0.8 \sim 1.0$ 。

(3) 地表沉降计算

由式 (1)、(2)、(4) 可得超载作用下坑外地表沉降量计算式为

$$\delta_v(x) = \frac{S_w}{(\sqrt{2\pi})wx} e^{-\frac{\left[\ln \frac{x}{2x_m}\right]^2}{2w^2}} + k \left(1 + \frac{p'}{\gamma z'_0} \right) \left(1 - \frac{z'_0}{(1+\eta)H} \right) (\beta h - x) \quad (11)$$

由上述计算得出各参数取值, 代入式 (11) 便可求得考虑超载影响的深基坑坑外地表沉降量。

3 工程实例

3.1 工程概况

兰州市某深基坑工程, 开挖深度为 15.8 m, 总支护长度约为 297 m。场地局部不规整, 基坑周边环境复杂。基坑支护范围内土层主要有杂填土、卵石、第三系褐红色砂岩等。主要参数指标如表 1 所示。

表 1 土层力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soils						
土层名称	层厚 /m	重度 γ /(kN·m ⁻³)	内摩擦角 φ /(°)	黏聚力 c /kPa	初始弹性模量 E_0 /MPa	泊松比 ν
杂填土	3.1	16	20	10	23	0.20
卵石	8.0	20	40	0	172	0.27
砂岩	>10.0	22	32	33	203	0.31

3.2 支护方案

基坑整体采用“土钉墙+排桩预应力锚杆”支护。由于基坑周边环境复杂, 各侧支护结构有所不同。本工程算例选取周边环境较为复杂的基坑南侧部分支护段进行相关介绍及计算验证。

该支护段距离支护结构 8.7 m 处存在原有 9 层住宅楼 (桩基础), 桩顶埋深 0.8 m, 建筑物超载取值为 90 kPa, 作用宽度为 15 m。地表往下 2.2 m 深度范围内采用土钉墙进行支护, 土钉墙下采用排桩预应力锚杆支护。土钉为花钢管土钉, 规格为 48×3 mm, 横竖向间距均为 1.5m, 呈梅花形布置, 土钉墙采用 HPB300 级双向 $\Phi 6@250 \times 250$ 钢筋网片, 喷射混凝土厚度为 100 mm, 混凝土强度等级为 C30。排桩桩径

800 mm, 间距 2.0 m 布设, 桩间采用钢筋网片+喷射混凝土进行封堵, 桩长 18.6 m, 嵌固端埋深 5.0 m。设置 4 道预应力锚杆, 位置分别为从桩顶向下 2.2, 4.2, 6.8, 9.8 m, 锚杆材料选用 HRB400 级钢筋, 直径为 32 mm, 倾角为 10°, 锚孔孔径为 150 mm, 注浆采用 M20 级水泥浆。锚杆预应力设计值为 120 kN, 其余参数见支护结构剖面图 (图 4)。

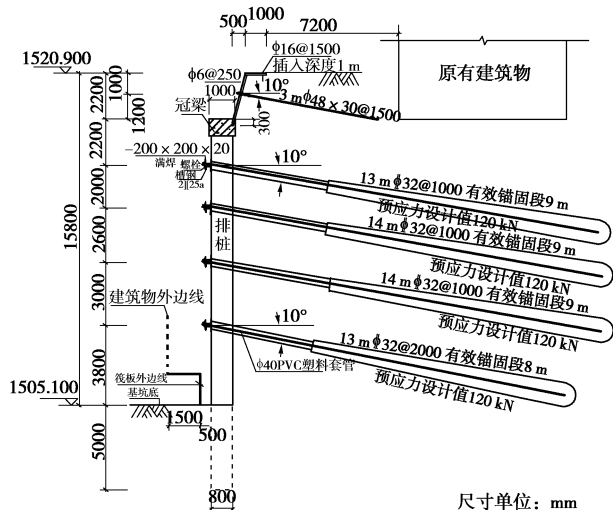


图 4 支护结构剖面图
Fig. 4 Section of supporting structure

4 计算分析

4.1 文中方法计算结果

依据文中所提出方法, 分别对坑外有、无超载作用下地表沉降进行计算, 结果如图 5 所示。

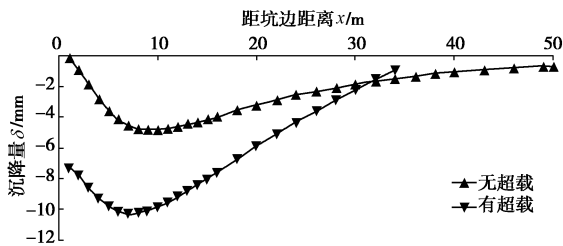


图 5 有、无超载作用下地表沉降量计算结果
Fig. 5 Calculated results of surface settlement with and without overload effect

可看出, 无超载作用时沉降量最大值为 4.8 mm, 超载作用下沉降量最大值为 10.2 mm, 差值 5.4 mm, 增大幅度约为 49%。可见, 坑外超载使得地表沉降量有较大幅度的增加, 不可忽略, 地表沉降量计算中需考虑超载作用。再者, 坑外无超载及有超载作用下最大沉降点距离坑边分别为 10, 8 m, 可知, 超载作用不仅增加了坑外地表沉降量, 而且使最大沉降点朝坑内方向移动。另须注意, 根据工程实例土层土质情况及监测结果, 文中事先假定了超载作用下坑外的地表沉降范围 ($x < \beta h$), 如需计算距离坑边更远范围内的沉降量, 则增大 β 的取值即可, 但意义并不大。

4.2 Plaxis-2D 模拟计算

采用有限元数值分析软件 Plaxis-2D 对选取工程实例进行模拟计算。考虑到该实例基坑整体较规则, 基坑沿宽度方向几何对称, 因此, 选取基坑宽度的一半进行分析, 建立平面应变有限元模型, 采用 15 节点三角形单元模拟土体, 土体本构模型采用 HS 模型。根据此基坑的实际尺寸, 选取土层模型边界宽 70 m, 深 40 m。支护结构与土体之间的相互作用用接触面单元模拟, 并将接触面单元扩展至支护结构下 1.0 m 左右, 这样可允许模型充分发生变形, 得到更为精确的应力分布。同时假定位移边界条件为: 左右边界水平位移为零, 竖直方向允许发生位移, 模型底部边界固定。另外, 本工程在基坑开挖前已按设计要求采取相关措施进行了降水, 地下水位已降至地表以下 16.5 m 处。因此, 在基坑开挖范围内不考虑地下水影响。土层计算参数取值见表 2。

对于桩锚支护结构, 可按刚度相等的原则将桩等效为地下连续墙, 即 $bh^3/12 = \pi D^4/64$ 。如前工程概况所述, 桩径 800 mm, 桩间净距 1.2 m, 则等效厚度 $h = 586$ mm, 桩身钢筋混凝土假设为线弹性材料来考虑。锚杆用点对点锚杆模拟自由段, 用土工格栅模拟锚固段。土钉用土工格栅模拟, 支护结构参数取值见表 3。

根据实际开挖工况, 划分为 10 个及 11 个工况分

表 2 土层计算参数取值

Table 2 Values of soil parameters

土层名称	参考压缩 模量 $E_{\text{ref}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	参考割 线刚度 $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	参考卸荷再 加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	卸载再 加载泊 松比 ν_{ur}	刚度应 力水平 幂指数 m	渗透 系数 $/(m \cdot d^{-1})$	剪胀角 $\psi/(^\circ)$	界面强度 折减因子 R_{inter}	破坏 比 R_f	静止土 压力系 数 K_0
杂填土	8	8	24	0.2	0.5	6	0	0.7	0.9	0.658
卵石	49	49	147	0.2	0.5	55	10	0.8	0.9	0.357
砂岩	58	58	174	0.2	0.5	0.2	2	0.9	0.9	0.470

表 3 支护结构参数取值
Table 3 Values of parameters of supporting structure

支护结构	轴向刚度 $EA/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	抗弯刚度 $EI/(\text{kN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1})$	等效厚度 h/m	重度 $w/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$	泊松比 ν	水平间距 L_s/m
桩	1.758×10^7	5.03×10^5	0.586	2.93	0.25	2
土钉墙	3×10^6	2.5×10^3	0.1	0.9	0.15	—
土钉	1×10^5	—	—	—	—	—
锚杆	2×10^5	—	—	—	—	1 (2)
锚固段	1×10^5	—	—	—	—	—

别对坑外有、无超载作用时的地表沉降量进行模拟计算。网格划分采用中等粗糙程度,对桩、锚杆、土钉周围网格及坑外地表附近和开挖面附近土层网格进行加密。

4.3 对比分析

(1)坑外无超载作用下的模拟结果与文中方法计算结果对比分析

当基坑外无超载作用,模拟计算得开挖完成时坑外无超载作用下网格变形如图 6 所示,位移放大比例为 100 倍,可看出有限元网格划分较为理想,变形分布合理。

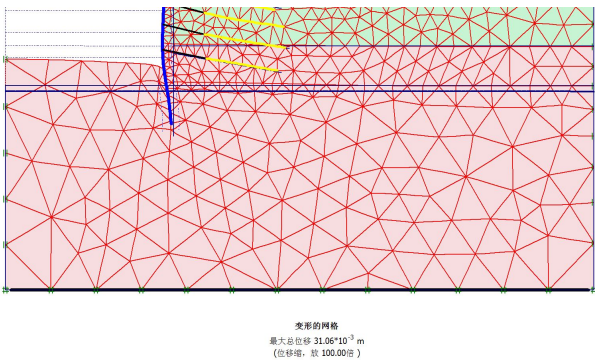


图 6 无超载作用下网格变形

Fig. 6 Mesh deformation without overload effect

进一步提取开挖完成工况所对应地表沉降模拟计算结果,并与文中方法计算结果相对比,如图 7 所示。运用文中方法计算所得地表沉降曲线形态与 Plaxis-2D 软件模拟所得地表沉降曲线形态大体一致,均呈偏态分布曲线模式。

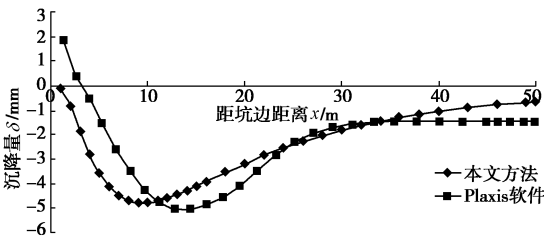


图 7 无超载作用下地表沉降计算值与模拟值

Fig. 7 Calculated and simulated values of surface settlement without overload effect

文中所提出方法及 Plaxis 模拟计算所得最大沉降量分别为 4.8, 5.1 mm, 相差 0.3 mm, 文中方法计算结果相比模拟结果小 6%; 另外, 计算与模拟沉降最大点距离坑边分别为 10, 12.8 m, 计算值相比模拟值向基坑边移动幅度为 22%。计算与模拟所得主要地表沉降范围分别为 0~36, 1.1~32 m, 两者基本一致, 约为 2.1h。

(2) 坑外有超载作用下模拟结果对比分析

基坑周边实际存在超载作用,开挖完成时总变形网格如图 8 所示,位移放大比例为 100 倍,网格变形明显,土体沉降影响深度扩大。

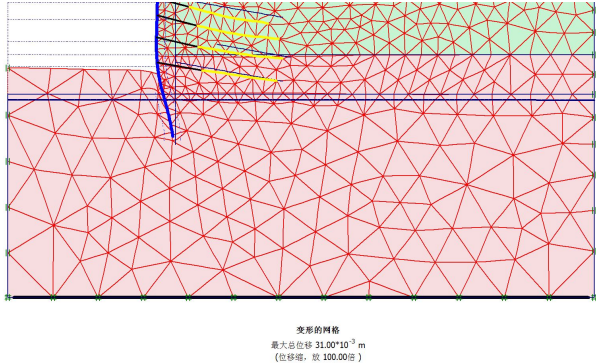


图 8 有超载作用下网格变形

Fig. 8 Mesh deformation with overload effect

分别提取有无超载作用下地表沉降模拟计算结果,绘制曲线如图 9 所示。

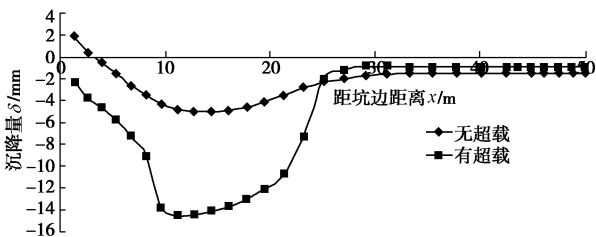


图 9 有无超载作用下地表沉降模拟值

Fig. 9 Simulated values of surface settlement with and without overload effect

从图 9 中可看出,复杂地层深基坑地表沉降曲线形态呈偏态分布;坑外地表存在超载时,超载对地表沉降的影响主要分布在超载作用宽度范围内;超载作

用宽度范围外,超载对沉降的影响整体呈非线性变化,且对邻近基坑侧的影响程度较远离基坑侧的大;超载作用下,远离基坑侧土体产生向上的位移,总沉降量减小;无超载作用时最大沉降点距离坑边约13 m,有超载作用时为11 m,向坑边移动幅度为15%。说明超载作用下,随着超载的不断增大,坑外地表沉降量最大点逐渐向基坑方向移动;无超载作用时,主要沉降范围为距离坑边1.1~32 m,超载作用时地表主要沉降范围为距离坑边0~27 m,约 $(1.7\sim 2.0)h$,说明超载作用使地表沉降区域更加明显。

(3)坑外有超载作用下的模拟结果与文中方法计算结果及监测结果对比分析

提取开挖完成工况所对应超载作用下地表沉降计算结果,并与文中方法计算结果及实际监测结果相对比,如图10所示。实测结果显示,坑外地表最大沉降量出现的位置为距离坑边7.0~12.0 m的范围内,计算结果与之符合 $x_m=8.0$ m,且计算最大沉降量为10.2 mm,实测最大沉降量为12.5 mm,相差2.3 mm,计算值相比实测值小18%。

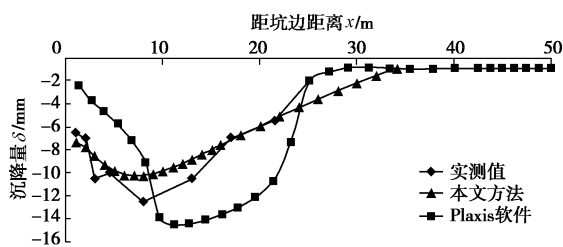


图10 超载作用下地表沉降计算值、模拟值及实测值

Fig. 10 Calculated, simulated and measured values of surface settlement with overload effect

另外,可知有限元计算中突出超载的影响,超载作用范围内地表沉降量增加幅度大,存在明显的位移突变点。本文方法及模拟计算所得坑边沉降量分别为7.3, 2.3 mm,相差很大。究其原因是因为有限元软件计算中突出超载的影响,在支护结构与超载共同作用下,此范围内土体受挤压而产生向上的位移。

再者,从实测值可看出,坑外地表沉降量主要分布于距离坑边约0~28 m的范围内,约为 $1.8h$,这与软土地区地表沉降范围有很大的区别,软土地区地表沉降影响范围可达 $(2\sim 4)h$ 。因此,对于土质较好的复杂土层区域,坑外地表沉降范围及沉降量都有较大的减小。

5 结 论

(1)本文方法、Plaxis模拟计算所得以及实测地表沉降曲线三者都呈偏态分布形态,用偏态分布曲线来预测计算地表沉降能取得更加合理、可靠、符合实

际的结果。

(2)超载对地表沉降有很大的影响,既使坑外地表沉降量有较大的增加,又使最大沉降点位置朝基坑明显移动,则在深基坑地表沉降计算分析中正确考虑坑外超载的影响是必要的。

(3)实测沉降曲线与本文方法计算所得曲线能较好地符合,实测值较为均匀地分布在本文方法计算所得曲线两侧,两者整体吻合程度较好,计算结果精度较高,说明文中所提出的考虑超载作用的地表沉降计算方法是合理的。对深基坑地表沉降理论计算方法进行了相应的完善,可供类似土质地区及支护结构的工程借鉴参考。

参考文献:

- [1] 唐孟雄, 赵锡宏. 深基坑周围地表任意点移动变形计算及应用[J]. 同济大学学报, 1996, 24(3): 238 - 244. (TANG Meng-xiong, ZHAO Xi-hong. Ground settlement and deformation calculation and application in deep excavation[J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(3): 238 - 244. (in Chinese))
- [2] 张尚根, 陈志龙, 曹继勇. 深基坑周围地表沉降分析[J]. 岩土工程技术, 1999(4): 7 - 9. (ZHANG Shang-gen, CHEN Zhi-long, CAO Ji-yong. Analysis of ground settlement around deep foundation-pit[J]. Geotechnical Engineering Technique, 1999(4): 7 - 9. (in Chinese))
- [3] 刘长文, 陈怿凡, 李旭东. 考虑空间效应的深基坑周围地表沉降分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(2): 145 - 147. (LIU Chang-wen, CHEN Yi-fan, LI Xu-dong. Analysis of ground settlement about deep pit considering spatial effect[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2000, 19(2): 145 - 147. (in Chinese))
- [4] 聂宗泉, 张尚根, 孟少平. 软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1218 - 1223. (NIE Zong-quan, ZHANG Shang-gen, MENG Shao-ping. Surface settlement of deep foundation pits by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1218 - 1223. (in Chinese))
- [5] 刘小丽, 周 贺, 张占民. 软土深基坑开挖地表沉降估算方法的分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 90 - 94. (LIU Xiao-li, ZHOU He, ZHANG Zhan-min. Analysis of surface settlement estimation of deep foundation pit excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 90 - 94. (in Chinese))