

基于土体损伤的深基坑支护地表沉降量计算^{*}

徐志彪

(杨凌职业技术学院 杨凌 712100)

摘要: 目前深基坑外部地表沉降量计算均假定土体是理想的原状土,与工程实际不符,不能很好地表征深基坑外部地表沉降,针对此问题,提出了一种改进的深基坑支护地表沉降计算方法。首先,基于损伤土体力学理论,建立了土体损伤模型;然后,基于损伤条件下的土体演变和本构关系,构造了土体损伤条件下的基坑支护地表沉降计算模型。实验测试结果表明,该模型能够很好地描述深基坑工程中支护地表的沉降过程,与工程实践监测结果相符,且证明了土体损伤和地表超载均对基坑支护地表有较大影响。

关键词: 深基坑;支护结构;土体损伤;地表沉降

中图分类号: TU445; TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.4099

Calculation method of ground settlement of deep foundation pit support based on soil damage

Xu Zhibiao

(Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China)

Abstract: At present, the calculation of the external surface settlement of the deep foundation pit is based on the premise that the soil is an ideal undisturbed soil. This does not match the actual project. The external surface settlement of deep foundation pits cannot be well characterized. Aiming at this problem, an improved calculation method for ground settlement of deep foundation pit support is proposed. Firstly, based on the theory of damage soil mechanics, a soil damage model is established. Then, using the soil evolution and constitutive relation under the damage condition, the calculation model of ground settlement supported by the foundation pit is constructed. The experimental results show that the model can well describe the settlement process of the supporting ground surface in deep foundation pit engineering, which is consistent with the engineering practice monitoring results. The experimental results also prove that soil damage and surface overload have a great impact on the foundation pit support.

Keywords: deep foundation pit; supporting structure; soil damage; surface subsidence

0 引言

我国城镇化进程稳步推进,城市可用之地越来越少,各个城市在工程建设项目中均已经加大了对地下空间的开发利用。此外,城镇化进程对高大建筑的需求不断增加,基坑工程的深度不断增加,并且这些深基坑工程又往往需要在城市中心施工,使得施工环境十分复杂,增加了施工的安全风险控制难度^[1-4]。

深基坑支护结构变形控制是基坑工程研究的重点方向。基坑外部地表沉降又是基坑变形的重中之重,也是国内外学者研究的重点问题^[5-7]。目前,在工程实践中应用较多的有两种,一种是1969年Peck通过工程实测数据统计

得出的与土体性质及开挖深度有关的地表沉降估算方法;另一种是我国的侯学渊教授提出的基于三角形沉降公式的思路所提出的地层损失法^[8]。但是,这些方法均是建立在传统土体力学的基础上的,其应用的前提均是基坑土体不存在损伤,即土体全部为理想原状土。然而,工程实践和试验研究表明,基坑开挖过程中的土体损伤会对地表沉降产生较大影响,利用理想原状土不能很好地描述基坑地表的沉降过程,单纯用原状土模型计算地表沉降会出现较大偏差^[9-11]。

基于此,本文依据损伤土体力学原理,构建了深基坑土体损伤模型,求解了土体损伤条件下的基坑支护地表沉降量,并且讨论了无地表超载现象和有地表超载现象下的地

表沉降。最后,将计算结果与实际工程监测数据进行对比分析,验证了本文提出的地表沉降计算方法的有效性。

1 桩锚支护工作机理

桩锚支护结构主要包括护坡桩、锚杆、冠梁及腰梁 4 个部分,支护结构如图 1 所示。深基坑土体与桩直接由桩锚支护结构相连,锚杆通过稳固于土层中施加预应力,达成主动受力的态势。桩锚支护结构的各个部分之间相互影响、互相作用,形成一个有机的支护体系^[12]。

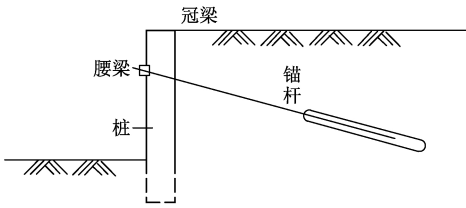


图 1 桩锚支护结构

2 深基坑土体损伤模型

随着基坑开挖的不断加深,会出现很强的环境效应。在基坑开挖面的土体侧面载荷力的共同作用下,坑外土体的应力场就会发生变化。基坑支护结构两侧就会出现压力差,致使基坑支护结构出现侧向移动,最终导致基坑周围的土体发生沉降变形。

由损伤力学理论可知,土体沉降过程是一个伴随着基坑开挖的土体损伤过程。沉降后的基坑土体包括原状土和损伤土两部分,土体沉降过程可以建模为原状土向着损伤土的渐进转变过程。因此,土体应力、弹性模量结合应变可以等效性假设为:

$$\sigma = (1 - d)\sigma_i + d\sigma_d \quad (1)$$

$$E = (1 - d)E_i + dE_d \quad (2)$$

$$\sigma = [(1 - d)E_i + dE_d]\epsilon \quad (3)$$

式中: d 表示基坑土体的损伤变量; σ_d 和 E_d 分别表示损伤土的应力及弹性模量; σ_i 和 E_i 分别表示原状土的应力及弹性模量。

基坑损伤变形可以分为两部分:弹性和塑性。损伤变量 d 定义为基坑土体损伤部分所占的比重。土体特性参数可表达为二者的加权平均值:

$$S = (1 - d)S_i + dS_d \quad (4)$$

式中: S_i 和 S_d 分别表示原状土和损伤土的同一特性指标。

土体损伤过程是一个非线性过程,将土体的表观应力表达式扩展为张量形式为:

$$\{\sigma\} = (1 - d)\{\sigma_i\} + d\{\sigma_d\} \quad (5)$$

基于应变等效性假设,原状土及损伤土应力张量的增量形式可分别表示为:

$$\{\Delta\sigma_i\} = [D_i]\{\Delta\epsilon\} \quad (6)$$

$$\{\Delta\sigma_d\} = [D_d]\{\Delta\epsilon\} \quad (7)$$

式中: $[D_i]$ 和 $[D_d]$ 分别为原状土与损伤土的切线刚度矩阵。

3 坑外地表沉降量计算

目前,计算深基坑地表沉降的方法的假设过于理想,都是在假设基坑外地面不存在超载或者基坑周边没有原有建筑物及构筑物的前提下进行的。在实际的城市深基坑施工过程中,基坑的场地狭窄、环境复杂,且周边存在原有建筑物和构筑物,时常出现基坑外部地面超载的现象。在计算深基坑支护结构地表沉降的过程中,必须要考虑由邻近建筑物或构筑物引发的地面超载。

本文基于地层损失法原理建立了考虑邻近建筑物或构筑物引起的地面超载条件下的基坑地表沉降计算公式,首先,做出下列几点假定。

1)假设基坑外部地表沉降包括两部分:无超载现象时的地表沉降量 δ_{v1} 和由超载引发的附加地表沉降量 δ_{v2} 。

2)假定基坑外部地面在无超载现象时的地表沉降符合偏态分布曲线形态,基坑外部地表任意一点的沉降量的计算公式为^[13-14]:

$$\delta_{v1}(x) = \frac{S_w}{\sqrt{2\pi}\omega x} e^{-\frac{[\ln\frac{x}{x_m}]^2}{2\omega^2}} \quad (8)$$

式中: S_w 表示沉降曲线包络面积; x 表示沉降位置与基坑边缘的距离; x_m 为沉降最大值对应地表位置与基坑边缘的距离; ω 为可调节的经验系数(例如软土基坑经验系数 ω 可取值为 0.60~0.70)。

3)假定基坑外部地面因为建筑物超载引起的附加地表沉降量的计算公式如下:

$$\delta_{v2}(x) = k \left(1 - \frac{z_0}{(1 + \eta)H}\right) (\beta h - x) \left(1 + \frac{\rho}{\gamma z_0}\right) \quad (9)$$

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; η 为基坑开挖影响深度系数; H 为支护结构嵌固端埋深; β 分别为开挖面及支护结构最底端水平位移; h 为支护结构总高度; x 表示沉降位置与基坑边缘的距离; γ 为各土层土体重度; z_0 为超载埋深。

4)假定基坑开挖后地表沉降范围为 $x_0 = \Psi H$, 其中 Ψ 位经验系数。深基坑支护结构的变位曲线面积为:

$$S_p = \sum_{i=1}^n \delta_{ui} \Delta h \quad (10)$$

式中: δ_{ui} 为基坑开挖范围内支护结构任一位置处水平位移; Δh 表示微段长度。

基坑外部地表的沉降曲线包络面积为:

$$S_w = m S_p \quad (11)$$

式中: m 为面积相关经验系数,不同类型的基坑取值不同。例如,对于一个较深基坑(>6 m),基坑暴露时间较长(10个月左右),土层为粉质沙土,并且是井点降水,回填土的土质较好,夯实质量较高,此时系数 m 可以 2.0,系数 m 的具体取值可以参考文献[15]。

存在地面超载现象时的基坑支护地表沉降量计算公式为:

$$\delta_v(x) = \delta_{v_1}(x) + \delta_{v_2}(x) \quad (12)$$

4 实例验证和分析

某市高层建筑的深基坑工程地处该市繁华地段。基坑周边环境复杂,北侧紧邻主干道,其人行道边距离基坑支护结构约 8.0 m 左右;基坑西侧距离马路较远,之间为绿化草坪;南侧基坑顶为街道道路且距离基坑边约 11.0 m 处存在原有建筑物;东侧紧邻原有建筑物(11层)。

该高层建筑主楼地上 34 层,地下 3 层,基坑开挖深度为 19.3 m,基坑长度约为 130 m,宽度约为 80 m。基坑开挖深度影响范围内主要分布有杂填土、卵石、风化砂岩,土体相关参数如表 1 所示。场地区域内地下水丰富且埋深较浅,约为 -11 m,基坑开挖前应进行降水。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。

表 1 土层物理学参数

土层名称	杂填土	卵石	砂岩
层厚/m	3.4	8.2	11
天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17.0	21.1	22.3
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	20.0	40.0	32.0
粘聚力 c/kPa	11.0	0.0	33.0
初始弹性/MPa	24	178	208
泊松比 μ	0.21	0.32	0.34

基于土体损伤深基坑支护结构地表沉降的建模,结合土体参数,分别对不考虑土体损伤、考虑土体损伤以及考虑土体损伤时坑外无超载及有超载作用下坑外地表沉降进行计算,并结合工程实际监测数据,对模拟结果进行对比分析。

1) 不考虑土体损伤与考虑土体损伤坑外地表沉降计算结果对比,对比结果如图 2 所示。

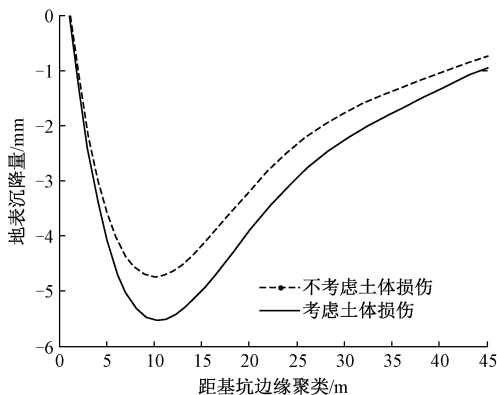


图 2 沉降量计算结果

实验结果表明,不考虑土体损伤的基坑支护地表沉降量小于考虑土体损伤的情况。例如,不考虑土体损伤时,基坑支护地表最大沉降量约为 4.9 mm,而考虑了土体损伤后,基坑支护地表最大沉降量约为 5.7 mm。考虑土体损伤后,基坑支护地表最大沉降量增大了约 17%。实验结果说明,土体损伤对基坑支护地表沉降的影响较大,在实际施工过程中要充分考虑到土体损伤对基坑支护地表沉降的影响,做好对应的防范措施。

2) 考虑土体损伤条件下,基坑外部无超载现象和有超载现象时的地表沉降对比,计算结果如图 3 所示。

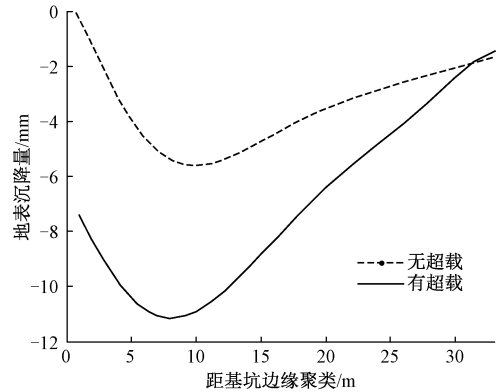


图 3 沉降量计算结果(考虑土体损伤)

实验结果表明,无超载现象时基坑支护地表沉降远小于有超载现象时基坑支护地表的沉降。在考虑了土体损伤后,无超载现象时基坑支护地表的沉降量约为 5.7 mm,有超载现象时基坑支护地表的沉降量约为 11 mm,增加了 5.4 mm,增幅约为 49%。由图 3 可以得出,有超载现象时地表最大沉降点距基坑边缘的距离约为 8 m,无超载现象时地表最大沉降点距基坑边缘的距离约为 10 m,这说明超载不但会增加地表沉降量,还会使地表最大沉降点向基坑方向移动。

3) 考虑土体损伤且基坑支护外部存在超载现象时,基坑支护地表沉降量计算结果与实际监测结果对比,结果如图 4 所示。

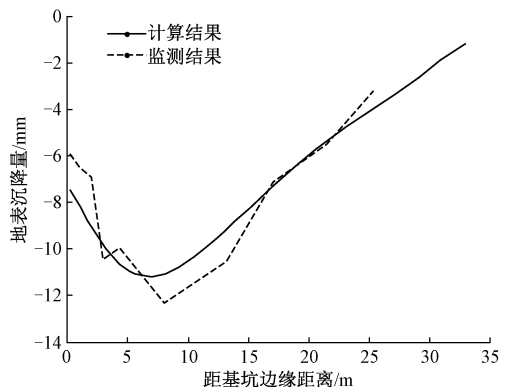


图 4 沉降量计算结果与监测结果对比

实验结果表明,考虑土体损伤和超载现象的基坑支护地表沉降量曲线与实际监测数值的拟合程度较高,充分说明了本文模型建立的有效性。理论计算结果中地表最大沉降点距基坑边缘的距离约为 8 m,而实际监测结果中基坑支护地表最大沉降量出现的位置为距离基坑边缘 7.0~12.0 m,与计算结果相符。此外,计算结果比实际监测结果小了 1.5 mm。进一步统计分析计算结果和实际监测结果可知,二者之间的整体相差约为 12%,计算结果较为理想,能够为实际工程施工提供较为准确的参考。

5 结 论

本文研究了深基坑桩锚支护结构中的地面沉降计算问题。在深基坑外地表沉降量计算中考虑了土体损伤的影响,并计算土体损伤条件下的深基坑桩锚支护结构地表沉降。结果表明,深基坑开挖过程中伴随着土体损伤的发生,土体损伤对坑外地表沉降的影响较为明显,使得土体沉降量增大且向基坑方向移动。研究成果为工程实践中得到合理、可靠、更加符合实际的基坑地表沉降提供了一种新的方法。

参考文献

- [1] 罗战友,李超,邹宝平.软土地区城市深基坑加固方案设计 with 效果分析[J].科技通报,2017,33(2):173-176
- [2] 吴伟.固定式基坑测斜系统研制[J].电子测量技术,2016,39(4):27-30.
- [3] WHITTLE A J, HASHASH Y M A, WHITMAN R V. Analysis of deep excavation in Boston[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 119(1):69-90.
- [4] 安博,王龙康.坑中坑基坑变形规律相似实验与数值模拟研究[J].煤炭工程,2018,50(9):132-135.
- [5] LIYANAPATHIRANA D S, NISHANTHAN R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles [J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2016(52):168-181.
- [6] 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(2):479-482.
- [7] 郑杰明,谢玖琪,杨平,等.深基坑开挖支护结构水平变形对地表沉降影响的数值模拟[J].现代隧道技术,2013,50(2):102-108.
- [8] HUNG N K, PHIENWEJ N. Practice and experience in deep excavations in soft soil of Ho Chi Minh City, Vietnam[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2016, 20(6):2221-2234.
- [9] 陈云敏,胡琦,陈仁朋.杭州地铁湘湖车站基坑坍塌引起的基底土深层扰动与沉降分析[J].土木工程学报,2014,47(7):110-117.
- [10] LI Y J, WANG C, QI S, et al. Influence of subway deep foundation excavation on surrounding ground settlement [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2017, 36(4):387-390.
- [11] JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [12] YE GB, XU Y, ZHANG Z, et al. Calculation method of ground settlement under large-area load based on gibson model[J]. Construction Technology, 2016, 45(19):61-65.
- [13] 周勇,李康.基于开挖过程的深基坑桩锚支护结构位移的数值模拟分析[J].兰州理工大学学报,2018,44(5):132-136.
- [14] 曾晓晓,郑七振,龙莉波,等.软土地区逆作法深基坑变形特性研究[J].施工技术,2018,47(19):66-69.

作者简介

徐志彪,硕士,讲师,主要研究方向为建筑结构工程,为深基坑支护结构。

E-mail:liyuanx88@163.com