

施工扰动作用下基坑抗隆起稳定性分析

王景春, 徐日庆, 黄 斌

(浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 施工扰动的方式千变万化且错综复杂, 影响到周围土体工程性质的变化。长期以来, 在基坑的开挖理论与分析方法上, 都是以原状土为研究对象的。在前人的研究基础上, 提出了施工扰动度的概念, 建立了施工扰动度的表达式, 并且建立了考虑开挖扰动的基坑抗隆起安全性分析模型, 还给出了计算实例。研究表明, 施工扰动对基坑安全系数有较大的影响, 应采取综合措施控制施工对土体的扰动。

关键词: 岩土力学; 施工扰动; 深基坑; 扰动度; 抗隆起稳定; 控制措施

中图分类号: TU 435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 2 - 5405 - 05

STUDY ON STABILITY AGAINST HEAVE OF DEEP EXCAVATION CONSIDERING CONSTRUCTION DISTURBANCE

WANG Jing-chun, XU Ri-qing, HUANG Bin

(*Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: The construction methods are complex and changeable, which influence the performances of soil around the site. For a long time the excavating theory and stability analysis of deep excavation are based on the original soil. In this paper, on the basis of the previous researches, the concept of construction disturbance is discussed, and an expression of disturbance degree is set up and the calculation model against heave for the stability of deep excavation is established. In additional, the calculation example is also given. The study shows the construction disturbance can exert an obvious effect on the safety factor. And some engineering measures to control the construction disturbance are taken.

Key words: rock and soil mechanics; construction disturbance; deep excavation; degree of disturbance; stability against heave; control measures

1 引言

近年来, 城市基坑边坡失稳及坍塌事故时有发生^[1, 2], 由此引发了地面沉降、基坑围护结构失稳、邻近建筑物破坏、地面隆起等土体环境问题^[3]。这些问题是由多方面的因素造成的, 诸如施工技术、施工管理、原始土层地质资料等。但长期以来, 人们对施工扰动所导致的土体工程性质的问题并未引起足够的重视。施工引起土体扰动的主要类型有:

基坑开挖、打桩或压桩、基坑降水、机械扰动及城市地下隧道掘进等。深基坑的开挖改变了土体的应力状态, 使土体的结构遭到破坏, 如果采用原始应力状态下的土体力学参数进行基坑稳定性分析, 就显得不尽合理。施工对土体的扰动的研究已日益得到各方面的重视^[4, 5], 文[6]讨论了盾构推进对土体的扰动, 文[7]则通过现场试验对受强夯扰动的黄土的工程特性进行了系统研究, 并划分了不同的扰动区域。

本文分析了基坑开挖对土体的扰动, 在前人研

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 07 - 28

作者简介: 王景春(1968 -), 男, 硕士, 1992年毕业于西南交通大学岩土工程研究所岩土工程专业, 现任副教授、博士研究生, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: wjc36295@163.com.

究的基础上定义了扰动度的概念，提出了考虑施工扰动的基坑稳定性分析方法，并给出了一个算例。

2 施工对土体的扰动

由于施工方法错综复杂、千变万化，因此施工扰动引起周围土体影响的研究内容也十分广泛，深基坑施工对土体的扰动影响主要包括：土体的应力 - 应变状态的改变、含水量与孔隙比的变化、土体结构性的破坏、土体化学成分的变化以及加筋、纤维土等广义的施工扰动，这些扰动中，有的为有利的扰动，有的为不利的扰动。文[8]提出的扰动状态概念(disturbed state concept, DSC)为研究施工扰动对土体的影响提供了一种统一模拟方法。近年来，随着研究的不断深入，DSC 理论已较为系统化，并在某些领域逐步得到应用和推广。

2.1 扰动状态的概念

如图 1 所示，DSC 是基于这样一个思想^[8]：变形材料可看成是相对完整(relative intact, RI)和完全调整(fully adjusted, FA)两种基准状态下的混合物。在外界荷载作用之前，材料处于完整状态或无扰动的连续介质状态；由于外界荷载(机械力、热力、环境力)的作用，将引起材料微观结构的扰动，致使材料内部微观结构发生变化。由于这种扰动，材料内部的微观结构从最初的 RI 状态，经过一个连续、随机和“自觉”的调整过程，最终达到 FA 状态。

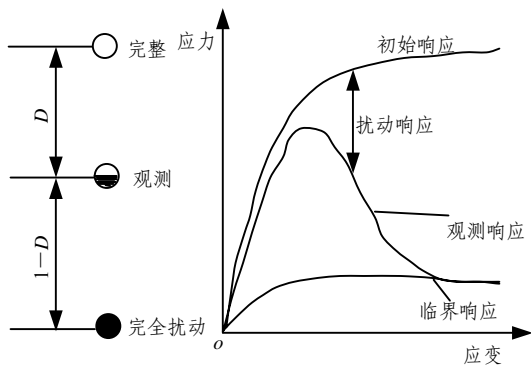


图 1 DSC 模型示意图

Fig.1 Representation of disturbed state concept

这种扰动通过扰动度 D (称为扰动函数)来定义，它表示观测响应、初始响应与临界响应的关系，并用宏观观测量来描述扰动的演化，从而对材料的工程性质进行模拟。故有

$$\sigma_{ij}^c = (1 - D)\sigma_{ij}^0 + D\sigma_{ij}^f \quad (1)$$

式中： D 为扰动度；上标 c , 0 , f 分别表示观测的、

相对完整的状态和完全调整状态的响应。

RI 状态可用线弹性、弹塑性或其他合适的模型来表示，并假定其作为连续介质承受弹性和非弹性的应变以及相关的应力；FA 状态则可用临界状态或其他合适的模型来模拟。

这里借用扰动状态的概念来表示基坑施工对周围土体的扰动，扰动度 D 表示施工对土体的扰动。

2.2 扰动度

根据式(1)，材料的观测响应可根据材料的两种基准状态响应通过扰动度 D 来表达。 D 取决于材料的塑性变形、初始条件、温度以及含水量等，可通过材料的相关参量来描述，如应力 - 应变关系、波速、孔隙水压力、有效应力、孔隙率等，因此 D 具有不同的函数形式^[8, 9]。土体受施工扰动后，其应力状态、密实度、孔隙比、含水量、应力路径、压密与固结状态、压缩系数与压缩模量等发生变化，进而影响土体的强度与变形特性。在这些参数中，土的应力状态、应力路径、密实度与含水量的变化是最重要的因素，决定着压缩系数、变形模量及强度指标等其他参数，因此将土中一点的应力状态、孔隙比、含水量及应力路径作为施工扰动评价的基本因素。

对同一种土，不同的密实度，其变形特性不同，即使相同的密实度，处于不同的固结应力水平，其破坏强度也不同，因此可根据不同含水量、不同的密实度的试验破坏应力与变形数据，在 p - q - e - w 坐标系中建立破坏曲面。该曲面的破坏函数表达式为

$$f(p, q, e, w) = 0 \quad (2)$$

式中： e , w 分别为土体的孔隙比和含水量； $p = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$, σ'_1 , σ'_3 分别为土体破坏时的有效大、小主应力； $q = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 。

在 p - q - e - w 坐标系中，不仅考虑了土体应力状态的改变，而且考虑了应力路径及密实度的改变，因此具有广泛的意义。对同一孔隙比、同一含水量，其退化为破坏条件为

$$f(p, q) = 0 \quad (3)$$

本文重点考察施工扰动引起土体应力状态、应力路径、孔隙比和含水量的变化，如果土体受到扰动后，沿着应力路径、孔隙比及含水量的变化路径达到了破坏曲面，即土体破坏，认为扰动程度最大，扰动度 D 为 1；如果土体根本未受到扰动，则认为扰动度 D 为 0。定义：

$$D = \frac{M_0 - M_c}{M_0 - M_f} = f\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_f}, \frac{\Delta q}{\Delta q_f}, \frac{\Delta e}{\Delta e_f}, \frac{\Delta w}{\Delta w_f}\right) \quad (4)$$

式中： M_0 ， M_c ， M_f 分别为土体的初始状态、施工扰动状态和最终破坏状态(破坏曲面)的响应； Δp ， Δq ， Δe ， Δw 分别为施工扰动引起的 p ， q ， e ， w 值增量； Δp_f ， Δq_f ， Δe_f ， Δw_f 分别为从初始状态到破坏曲面 p ， q ， e ， w 值的增量。注意扰动有有利扰动和不利扰动，这里没有考虑扰动的具体效果。

式(4)为一不确定函数，假定各评价元素对土体性质影响的贡献均等，则可写为

$$D = \frac{M_0 - M_c}{M_0 - M_f} = \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_f} + \frac{\Delta q}{\Delta q_f} + \frac{\Delta e}{\Delta e_f} + \frac{\Delta w}{\Delta w_f}\right) \quad (5)$$

3 考虑开挖扰动的基坑抗隆起稳定性

3.1 基坑抗隆起稳定性分析的简单回顾

基坑稳定性分析是基坑工程设计的重要环节之一，主要包括基坑的整体稳定性分析、围护结构的抗倾覆稳定性或踢脚稳定性以及基坑底部土体的抗隆起稳定性分析，其中后者对保证基坑稳定和控制基坑变形有重要意义，因此以后者为例进行分析^[10]。

验算坑底抗隆起稳定的理论很多，对于一般性粘土，在土体的抗剪强度中应考虑 c ， φ 的因素，对于图 2 所示的计算简图，根据 Prandtl 地基承载力公式有

$$K_s = \frac{\gamma_2 H_1 N_q + c N_c}{\gamma_1 (H + H_1) + q} \quad (6)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} N_q &= \tan^2(45^\circ + \varphi/2) e^{\pi \tan \varphi} \\ N_c &= (N_q - 1) / \tan \varphi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： H_1 为基坑围护墙入土深度(m)； H 为基坑开挖深度(m)； γ_1 ， γ_2 分别为围护墙体外侧及坑底土体的密度(kN/m³)； q 为地面超载(kN/m²)； N_c ， N_q 均为地基承载力系数。

3.2 考虑施工扰动的基坑稳定性分析

由于施工扰动造成了土体的工程性质发生改变，且目前国内外岩土工程界的共识为：在土体工程稳定性评价和分析中，土性指标选取带来的计算

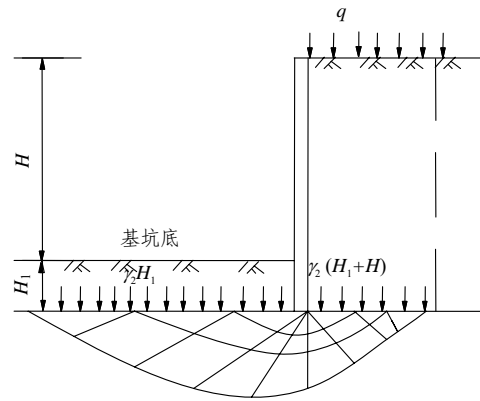


图 2 计算分析简图

Fig.2 Scheme of calculation for stability against heave

误差远远大于本构模型造成的误差。因此，研究施工扰动下基坑稳定性的问题，就归结为研究基坑扰动下土体力学参数的变异对基坑稳定性的影响。

考虑到式(1)及本文第 2 节所述，这里有

$$\varphi_c = (1 - D)\varphi_0 + D\varphi_f \quad (8)$$

$$c_c = (1 - D)c_0 + Dc_f \quad (9)$$

式中：下标 0，c，f 分别为土体的初始状态、施工扰动状态和最终破坏状态。

因此，考虑施工扰动的基坑稳定性分析计算公式有

$$K_s = \frac{\gamma_2 H_1 N_q^c + c_c N_c^c}{\gamma_1 (H + H_1) + q} \quad (10)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} N_q^c &= \tan^2(45^\circ + \varphi_c/2) e^{\pi \tan \varphi_c} \\ N_c^c &= (N_q^c - 1) / \tan \varphi_c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3.3 扰动度 D 以及土体力学参数(c, φ)的选取

扰动度 D 以及土体力学参数(c, φ)的选取严格说来，由于施工扰动的影响，每个土体单元的 D 以及土体力学参数(c, φ)值都不一样。在实际计算时，不可能逐一选取，只能将基坑周围的土体划分为几个主要的扰动区域，认为在同一个扰动区域内的 D 以及土体力学参数(c, φ)值相同，据它们所经历的扰动，通过试验确定每个扰动区域相应的 D 以及土体力学参数(c, φ)值。

3.4 控制基坑施工扰动的方法

影响基坑施工扰动的因素很多，除基坑工程的形状、开挖深度外，还与场地的工程地质条件与水

文地质条件、围护的结构形式、止(降)水措施、基坑土方的开挖施工组织、以及基坑周围的建筑物及地下管线等有关。这就要求控制基坑开挖扰动影响应采用具体问题具体分析的策略,抓住主要矛盾,采取综合措施控制施工扰动的影响。通常采取的方法有合理选用围护的结构形式,优化围护结构设计,特别是按变形控制设计,合理优化施工组织设计,采用信息化动态施工技术。对土体扰动极端的情况可采用回灌地下水、主动区及被动区土体改良、补偿注浆等措施,实质上后者这些工程措施也会带来土体的扰动,只不过是有利扰动。

4 工程实例

本文研究的工程为地上 15 层地下 1 层的多功能大楼,基坑尺寸为 120 m×40 m(长×宽),开挖深度 12 m,采用地下连续墙作为围护结构,土质为灰色粉质粘土夹粘土,地下水位埋深 2.2 m。施工前测得土体的物理力学性质指标为:容重 $\gamma = 17.8 \text{ kN/m}^3$,粘聚力 $c = 15.4 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 13.6^\circ$ 。

假定不考虑施工中降水的作用,即含水量不变,现场取样,根据室内不同密实度的土样的三轴卸荷试验,求得土体完全扰动状态时粘聚力 $c = 15.2 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 10.8^\circ$,这时扰动度最大为 1。此外从这里可以看出,粘聚力对施工扰动不敏感,施工扰动对内摩擦角的影响较大,这一点有待于大量的试验验证。根据式(5)及基坑开挖到底时的取样试验,求得此时的施工扰动度为 0.894。

利用本文所建立的基坑抗隆起的稳定分析公式(式(10), (11)),可求得施工扰动对基坑的抗隆起稳定性的影响,如图 3 所示。

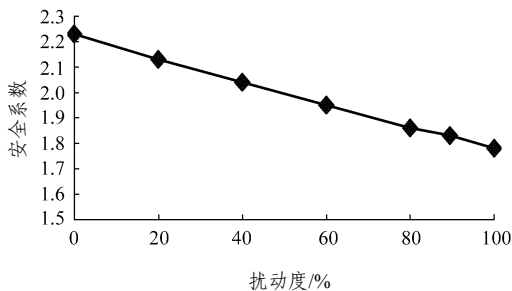


图 3 施工扰动对基坑抗隆起安全系数的影响

Fig.3 Effect of construction disturbance on stability against heave for deep excavation

由图 3 可知,考虑施工对土体的扰动,基坑的抗隆起安全系数从 2.23 降至 1.83,降幅达 18%。该基坑的计算表明,施工扰动对基坑安全性有着不可忽视的影响。在实际施工中应采取切实可行的措施减小施工对周围土体的扰动。

5 结论

(1) 本文初步分析了施工扰动的影响,建立了施工扰动度的定义,在实际工程应用中具有一定的指导意义。但进一步分析施工扰动度需进行大量的试验研究,如何在基坑安全性分析时细致全面地考虑施工扰动的影响,仍是一个需要深入研究的课题。

(2) 在对基坑进行稳定性进行分析时不可忽视施工扰动的影响。

参考文献(References):

[1] 唐业清,李启民. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(Tang Yeqing, Li Qimin. Analysis and Treatment for Accidents of Deep Excavation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))

[2] 李启民,孔永安. 我国深基坑工程事故的综合分析[J]. 科技情报开发与经济, 1999, (2): 55 - 56.(Li Qimin, Kong Yong'an. Comprehensive analysis of engineering accident of deep foundation pit in China[J]. Sci./Tech. Information Development and Economy, 1999, (2): 55 - 56.(in Chinese))

[3] 孙 钧. 环境土工学的若干科学问题——城市工程活动施工安全与环境损伤的智能控制,环境岩土工程理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.(Sun Jun. Several Scientific Problems on Environment Soil Engineering : Construction Safety under Engineering Activities in Urban City Areas and Intelligent Control of Environment Damage , Theory and Practice of Environment Geotechnical Engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2002.(in Chinese))

[4] 周 健,吴世明,徐建平. 环境岩土工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 164 - 229.(Zhou Jian, Wu Shiming, Xu Jianping. Environment Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. 164 - 229.(in Chinese))

[5] 孙 钧,周 健,龚晓南,等. 受施工扰动影响土体环境稳定理论与变形控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10):

- 1 261 - 1 269.(Sun Jun, Zhou Jian, Gong Xiaonan, et al. Theory of soil environment stability and deformation control under influence of construction disturbance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(10): 1 261 - 1 269.(in Chinese))
- [6] 张庆贺, 朱忠隆, 杨俊龙, 等. 盾构推进引起土体扰动理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 699 - 703. (Zhang Qinghe, Zhu Zhonglong, Yang Junlong, et al. Theory analysis and testing study of soil disturbance caused by shield-driven[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 699 - 703.(in Chinese))
- [7] 张孟喜, 王玉玲, 冯建龙. 黄土受强旁扰动的工程特性玉环境公害研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1 903 - 1 909.(Zhang Mengxi, Wang Yuling, Feng Jianlong. Engineering properties of loess disturbed and geo-environmental damage due to dynamics consolidation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1 903 - 1 909.(in Chinese))
- [8] Desai C S, Toth J. Disturbed state constitutive modeling based on stress-strain and nondestructive behavior[J]. International Journal of Solids and Structures, 1996, 33(11): 1 619 - 1 650.
- [9] Katti D R, Desai C S. Modeling and testing of cohesive soil using disturbed-state concept[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(5): 648 - 657.
- [10] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 126 - 131.(Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Handbook of Deep Excavation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. 126 - 131.(in Chinese))