

基坑开挖过程中变形监测预警指标的动态确定

周刚¹,张丹²,商兆涛¹,余跃程²,王堡生²,张振华²,卢坤林²

(1. 芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站,安徽芜湖 241000;2. 合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽合肥 230009)

摘要:针对基坑开挖过程中多数城市根据经验或规范给一固定的变形监测预警指标值,提出一种确定基坑开挖过程中变形监测预警动态指标的方法。以芜湖城南过江隧道基坑工程为例,考虑地下水对土体的劣化作用和地下水渗透作用两因素,通过放大两因素对基坑稳定性的影响,采用FLAC^{3D}软件对基坑开挖过程进行模拟,动态分析不同开挖层时的基坑变形值,获得基坑达到临界失稳状态时支护结构最大水平位移和地表最大沉降量,以此作为基坑变形预警动态指标。通过对比芜湖某基坑工程开挖模拟结果、监测值及规范值,验证所提方法的正确性。结果表明:支护结构水平位移累计量和地表最大累计沉降量随开挖过程的增大而增大,实际工程中地表沉降量和支护结构水平位移的预警控制值应随开挖次数的增加而相应变化;采用本文方法可有效确定基坑开挖过程中的动态预警指标,本研究可为该工程及该地区类似基坑工程开挖过程中变形监测预警指标的确定提供参考。

关键词:基坑;变形;模量和强度折减;监测预警动态指标

中图分类号:TU 473.2 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2021.03.015

Deformation Monitoring and Early Warning Indicators During Foundation Pit Excavation Dynamic Determination

ZHOU Gang¹, ZHANG Dan², SHANG Zhaotao¹, YU Yuecheng², WANG Baosheng², ZHANG Zhenhua², LU Kunlin²

(1. Wuhu Rail (Tunnel) Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Wuhu 241000, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the process of foundation pit excavation, most cities give a fixed value of deformation monitoring and early warning index according to experience or specifications. A method was proposed to determine the dynamic indicators of deformation monitoring and early warning during the excavation of foundation pits. Taking the foundation pit project of Wuhu Chengnan River Crossing Tunnel as an example, the degradation of groundwater on the soil and the penetration of groundwater were mainly considered. By amplifying the influence of these two factors on the stability of the foundation pit, FLAC^{3D} software was used to simulate the excavation process of the foundation pit, and the deformation values of the foundation pit in different excavation layers were dynamically analyzed. The maximum horizontal displacement of the supporting structure and the maximum ground settlement were obtained when the foundation pit reached the critical instability state, which were used as the dynamic indexes of the foundation pit deformation early warning. The correctness of the proposed method was verified by comparing

收稿日期:2020-08-01

基金项目:安徽省住房和城乡建设厅研究开发项目(2019YF-018)

作者简介:周刚(1968—),男,安徽阜阳人,正高级工程师,主要研究方向为过江隧道和轨道交通工程。

通信作者:卢坤林(1980—),男,安徽合肥人,博士,副教授,主要研究方向为岩土工程、防震减灾工程、地质工程及交通工程。

引文格式:周刚,张丹,商兆涛,等.基坑开挖过程中变形监测预警指标的动态确定[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2021,38(3):332-339.

the excavation simulation results, monitoring values and specifications of a foundation pit project in Wuhu. The results show that the cumulative horizontal displacement and the maximum cumulative surface settlement increase with the increase of excavation process, and the early warning control value of the surface settlement and the horizontal displacement of the supporting structure should change with the increase of excavation times; The method can effectively determine the dynamic early warning indicators during the excavation process of the foundation pit, which can provide reference for the determination of deformation monitoring and early warning index in the process of excavation of this project and similar foundation pit projects in this area.

Key words: foundation pit; deformation; modulus and strength reduction; dynamic indicators for monitoring and early warning

随着城市地下空间的开发,出现了大量基坑工程。基坑工程在施工过程中,为掌握其稳定性状态,常采用监测预警措施对监测数据进行及时有效地整理和分析,确定其是否安全。目前,对基坑变形监测预警指标的确定,多数城市是根据当地测量的数据给一固定值,如广东、上海、深圳等地区的设计规程和技术规范中给出了其相应的固定值^[1-3];宋建学等^[4]根据国内现行规范并结合区域经验,提出了河南省基坑变形监测的预警指标;喻军等^[5]对杭州地区大量基坑监测数据进行统计分析,得到支护结构变形与地面沉降和变形值,根据基坑的重要性和周围建筑物重要程度分级确定基坑变形的控制值,以此作为基坑监测预警值。但是,根据经验或规范得到的基坑监测预警指标不能反映基坑分层开挖的动态变形破坏特征。此外,每个基坑工程的地层条件、规模以及开挖方式会有所不同,其变形监测预警值应不同,采用经验或规范确定的基坑预警指标不确定性很大。鉴于此,以芜湖城南过江隧道基坑工程为例,综合考虑对基坑变形破坏的影响因素,提出一种确定基坑开挖过程中变形监测预警动态指标的方法,以期为该工程或该地区类似基坑工程监测预警值的确定提供参考。

1 基坑工程概况及其变形破坏关键影响因素

1.1 工程概况

芜湖城南过江隧道江北工作井为盾构始发井,采用明挖顺作法,分5层开挖,合计总长65.5 m,基坑开挖宽度在31.77~43.40 m,深度在22.08~27.20 m。基坑支护结构安全等级为一级,支护方案采用地下连续墙、钢筋砼内支撑、钢管内支撑、钢筋砼顶圈梁、三轴搅拌桩的支护形式。

本区地层结构较复杂,地层上部为人工填土、第四系松散沉积物、下伏白垩系、侏罗系基岩。陆域钻孔揭露的基岩风化起伏较平缓,无为岸(北岸)为白垩系粉砂岩、灰白色石英砂岩,呈互层状分布,第四系松散沉积物无为岸(北岸)为淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉细砂、粉土等,厚度30~50 m;芜湖岸(南岸)为淤泥、淤泥质粉质黏土、粉质黏土等,厚度30~40 m,芜湖岸(南岸)为侏罗系凝灰角砾岩,场区地层分布(见图1)。拟建场地紧临长江北岸,地下水丰富,赋存于粉细砂层中,水位、水量受控于江水补给,近长江处水位随江水位变化明显。

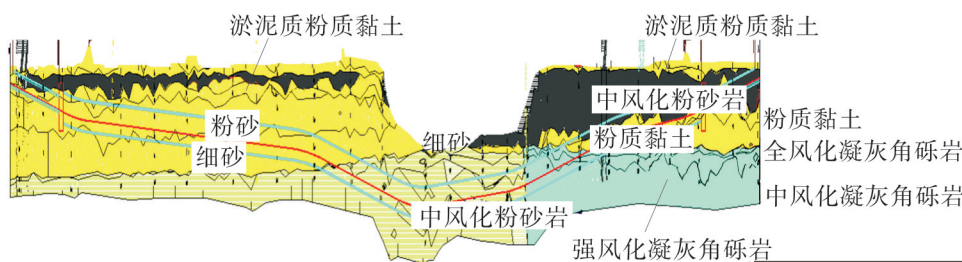


图1 场区地层分布

Fig. 1 Site stratum distribution

1.2 基坑变形破坏关键影响因素

基坑工程所处环境复杂,所受影响因素多。根据对已有基坑工程事故和国内外学者对基坑稳定性的研究,影响基坑变形破坏的主要因素有支护刚度^[6-9]、大气降雨^[10-11]、开挖卸荷^[12-14]、地下水渗流^[15-18]、岩土体强度^[19-20]等。芜湖城南过江隧道基坑工程临近长江,受地下水影响大,地层分布复杂,有淤泥、淤泥质粉质黏土等软土,软土具有较高含水量、大孔隙比、高压缩性、低强度等性质,为不良地层。当地下水水位较高时,基坑周围土体含水率随之增加,导致地层强度劣化,影响基坑周围土体骨架的变形,使基坑的稳定性发生变化;地下水水位变化引起的渗透力作用使基坑周围土体产生一定变形,对基坑的稳定性产生不利影响。因此,地下水对土体的劣化作用和地下水渗透作用是芜湖城南过江隧道基坑开挖工程中重点关注的因素。

2 基坑工程变形控制指标的确定

2.1 室内试验

钻取芜湖城南过江隧道基坑工程场区土样,测得其含水率为7.12%。

2.1.1 X射线衍射试验

采用合肥工业大学分析测试中心的荷兰帕纳科(X'Pert PRO MPD)的X射线衍射仪(X ray diffractometer, XRD)测试工基坑工程场区原状土样的XRD图谱,利用MDI Jade 6软件分析土样的XRD图谱,获得土样的矿物组成成分,结果见图2。由图2可看出,场区土样主要由石英、长石、伊利石以及高岭石连接在一起组成。一方面,芜湖城南隧道基坑工程紧邻长江,土体中的碎屑矿物石英、长石等粗颗粒在水压力作用下会造成一定量的流失,使得土体内摩擦角减小;另一方面,土样中黏土矿物(伊利石、高岭石)表面存在O及OH等亲水集团,能够与外来的水分子结合,发生水化作用,随着水化反应的进行,土样中黏土矿物含量逐渐减少,导致土体黏聚力降低。

2.1.2 不固结不排水试验

对于芜湖城南过江隧道基坑工程场区中的土样,尚缺乏黏聚力和内摩擦角随含水率劣化程度的试验数据,采用其他地区的土体试验数据进行数值模拟会造成较大误差。考虑到芜湖城南过江隧道基坑工程场区地层含水率受地下水位变化较明显,对场区土样进行不固结不排水试验,统计其抗剪强度参数(黏聚力和内摩擦角)随含水率变化的劣化规律,为土体强度折减提供依据。根据土工试验方法标准^[21],制备含水率为4%,10%,13%,16%的非饱和土样,采用抽气饱和法制备饱和土样(含水率为30%),用南京曦土壤仪器有限公司制备的应变控制式三轴仪测试不同含水率土样的应力与应变,绘制不同含水率土样的莫尔圆,得出不同含水率土样的黏聚力和内摩擦角,结果见图3,4。

从图3,4可看出:随土样含水率的增加,土墙的

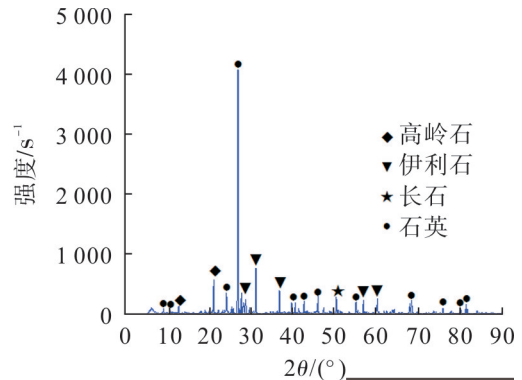


图2 X射线衍射图谱

Fig. 2 X ray diffraction patterns

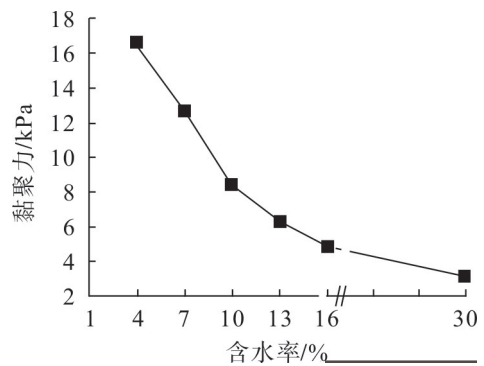


图3 不同含水率土样的黏聚力

Fig. 3 Cohesion of soil samples with different water contents

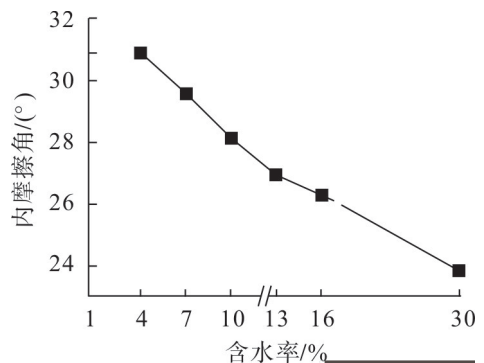


图4 不同含水率土样的内摩擦角

Fig. 4 Internal friction angle of soil samples with different water contents

黏聚力由 16.57 kPa 下降至 3.14 kPa,减小了 81.05%;土体内摩擦角由 31.28°下降至 23.87°,减小了 23.69%。由此可知,含水率对土样的黏聚力影响较大,对内摩擦角的影响较小。根据工程地质手册^[22],含水率的增加会同时降低土体模量。因此,对基坑开挖全过程进行数值模拟分析时,将岩土体力学参数变形模量 E 、黏聚力 c 按一定的折减系数 R 折减后作为模型计算的土体参数。当塑性区扩展较大时,在折减系数 R 的基础上再折减内摩擦角,直到基坑达到临界失稳状态;当基坑达到破坏的临界状态,以此时的地表最大沉降量和支护结构最大水平位移作为基坑的变形预警指标。

2.2 数值模拟条件

为减小边界范围选取过小给计算结果带来的误差,选取基坑工程最大几何尺寸的 3~5 倍确定计算范围。根据基坑几何尺寸,确定端头井基坑的数值计算模型范围为 276 m×200 m×73 m,根据地质勘察资料,选取场区地层岩土参数,具体见表 1。对区间基坑采用八节点的六面体单元和四节点的四面体单元进行划分,共划分 386 880 个单元,389 303 个节点(见图 5,6)。其中基坑周边土体选用理想弹塑性本构模型;支撑、地连墙、止水墙及三轴搅拌桩选用线弹性本构模型。计算模型的上表面为自由边界,4 个侧面和底面为法向约束,地下水位根据监测资料取最不利水位。采用有限差分软件 FLAC^{3D} 计算基坑开挖过程中支护结构变形及地表沉降,其中每个折减系数 R 下的施工工况、土层条件、开挖过程均相同,土层强度和模量根据初始值和折减系数确定,折减系数 R 分别为 1.1, 1.3, 1.6, 1.8, 1.8^①, 1.8^②。(注: $R=1.8$ ^①是在 $R=1.8$ 的基础上折减 5% 的内摩擦角; $R=1.8$ ^②是在 $R=1.8$ 的基础上折减 10% 的内摩擦角。)

表 1 场区地层岩土参数
Tab. 1 Stratum geotechnical parameters

土体	弹性模量 E /MPa	泊松比	密度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
回填土	15	0.35	18.7	8	10
淤泥质粉质黏土	24	0.32	17.1	12	6
粉质黏土	48	0.30	18.4	15	22
粉土	60	0.29	19.5	2	27
粉砂	90	0.28	20.0	3	30
中风化粉砂岩	21 000	0.23	21.9	15 000	38

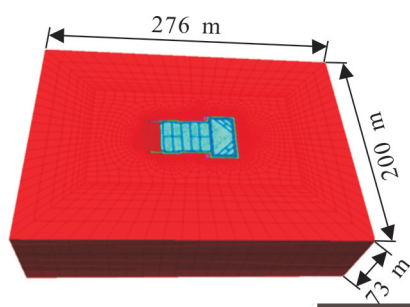


图 5 基坑整体数值模拟网格模型

Fig. 5 Grid model for whole numerical simulation of foundation pit

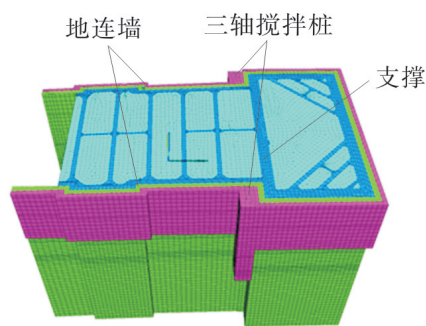


图 6 基坑支护构件

Fig. 6 Foundation pit supporting component

2.3 模拟结果分析

2.3.1 基坑周围地表沉降量

图 7 为基坑不同开挖工况下地表最大沉降量随折减系数的变化曲线。从图 7 可看出:折减系数 $R=1.1\sim 1.6$ 时,基坑周围地表沉降量逐渐增加;折减系数 $R=1.6\sim 1.8$ ^① 时,地表沉降略有减小。这是因为模拟计算时对土体进行了变形模量和强度的折减,变形模量折减使土体开挖卸荷效应比沉降略大,致使周围土体最大沉降量略有减小,但其他点沉降量整体趋势还是在下降。曲线转折点周围的土体沉降量急剧增加,基坑有发生失

稳的危险,对应的地表最大累积沉降量:一次开挖 14.28 mm,二次开挖 16.83 mm,三次开挖 20.13 mm,四次开挖 25.70 mm,五次开挖 25.68 mm。当折减系数 $R=1.8^{①}$ 变化为 $R=1.8^{②}$ 时,基坑周围土体最大沉降量为 106.41 mm,此时土中形成贯通的塑性区(见图 8),土体向坑内滑动,基坑失稳。

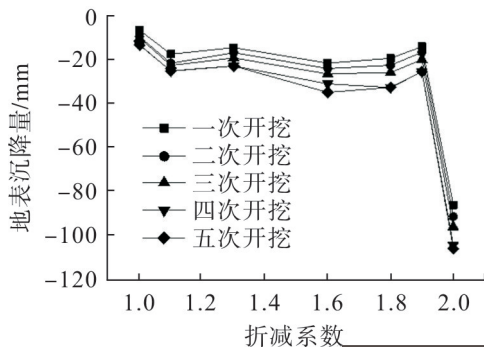


图7 地表最大沉降量随折减系数的变化

Fig. 7 Change of the maximum surface settlement with reduction coefficient

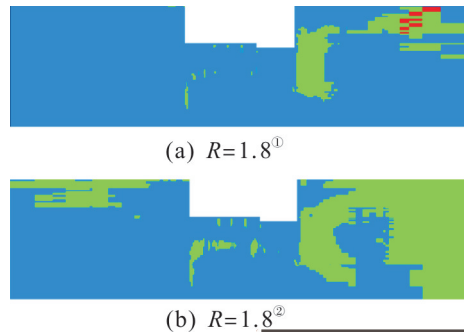


图8 基坑周围土体塑性区变化

Fig. 8 Change in the plastic zone of soil around foundation pit

图9为监测路径DBC2-1~DBC2-6(监测路径见图10)下地表沉降量变化曲线。从图9可看出,基坑周围土体沉降最大值出现在距地连墙 20 m 左右的位置,距离地连墙越远,地表沉降值越小,向外发展逐渐趋于 0。不考虑强度折减的情况下,地表最大沉降为 10.0 mm,随折减系数的增加,地表最大沉降量逐渐增加。折减系数 $R=1.8^{①}$ 时基坑处于安全状态,地表最大沉降量为 25.68 mm; $R=1.8^{②}$ 时,基坑周围土体塑性区急剧贯通,基坑失稳,对应的地表最大沉降量为 106.41 mm。因此折减系数 $R=1.8^{①}$ 为基坑失稳的临界状态。

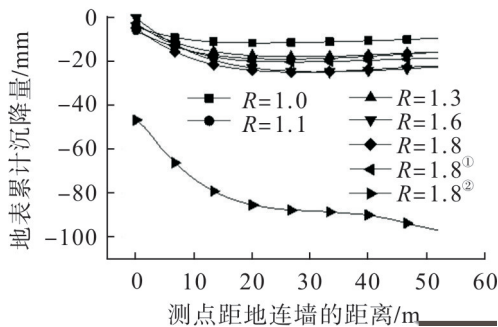


图9 DBC2-1~DBC2-6地表沉降量

Fig. 9 Surface settlement from DBC2-1 to DBC2-6

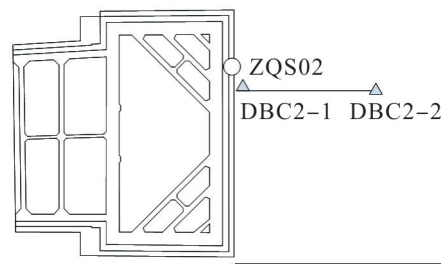
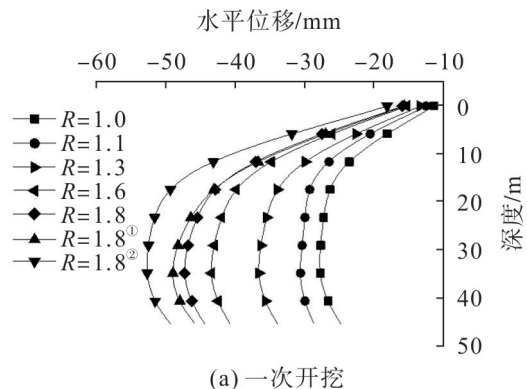


图10 局部监测点布置

Fig. 10 Local monitoring point layout plan

2.3.2 支护结构变形

图 11 为不同开挖工况地连墙水平位移随折减系数的变化曲线。由图 11 可看出:随折减系数 R 的增加,地连墙水平位移增长速率增加;折减系数 $R=1.8^{①}$ 变化为 $R=1.8^{②}$ 时,地连墙水平位移急剧增加,基坑周围土体塑性区急剧贯通(见图 8),基坑周围土体发生剪切破坏,基坑失稳。因此, $R=1.8^{①}$ 为判断基坑失稳的临界状态。基坑处于临界失稳时,一次开挖最大水平位移为 40.39 mm,二次开挖最大水平位移为 47.29 mm,三次开挖最大水平位移为 53.45 mm,四次开挖最大水平位移为 57.61 mm,五次开挖最大水平位移为 57.83 mm。



(a) 一次开挖

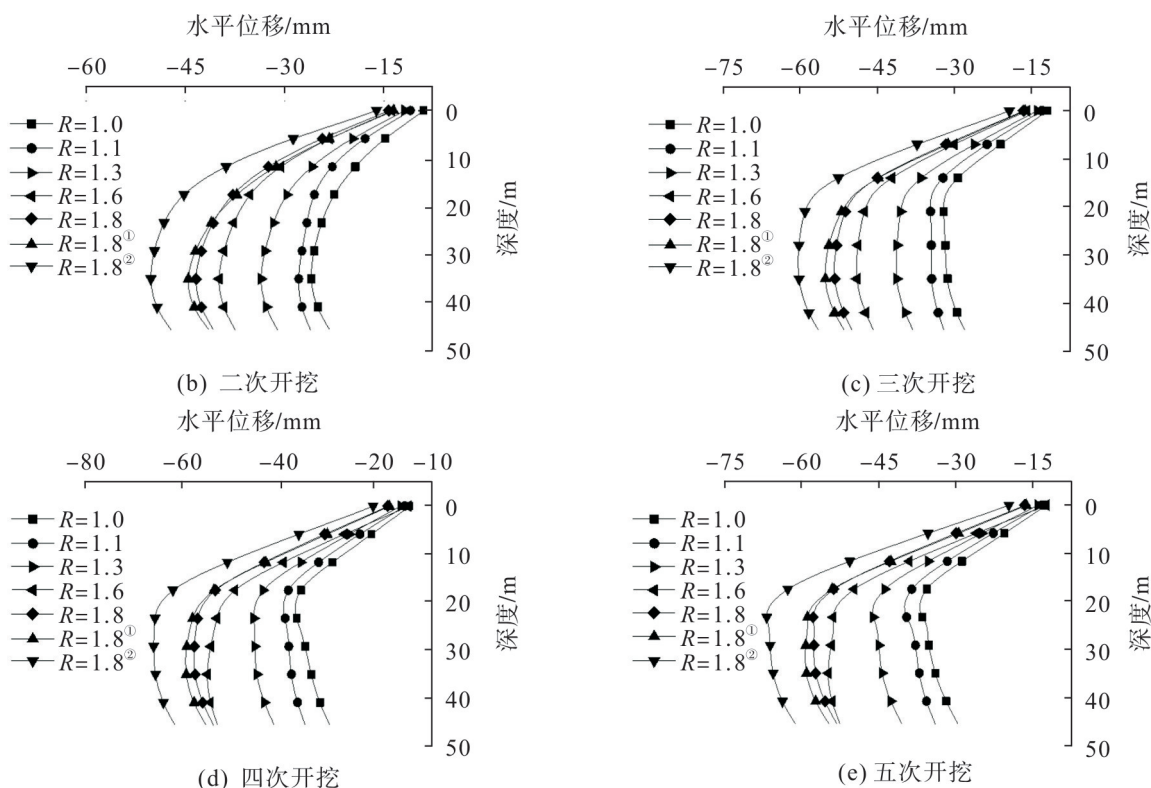


图 11 不同工况下地连墙水平位移随折减系数的变化

Fig. 11 Variation of the horizontal displacement of ground connecting wall with reduction coefficient under different working conditions

图 12 为地连墙顶监测点 ZQS02 水平位移随折减系数 R 的变化关系曲线(监测布置见图 10)。由图 12 可看出:折减系数 $R=1.0\sim 1.3$ 时,监测点 ZQS02 水平位移由 11.75 mm 变化为 10.48 mm,水平位移减小了 1.27 mm;折减系数 $R=1.3\sim 1.8^{①}$ 时,监测点 ZQS02 水平位移由 10.48 mm 变化为 14.53 mm,水平位移增加了 4.05 mm;折减系数由 $R=1.8^{①}$ 变为 $R=1.8^{②}$ 时,线性增加趋势更明显,水平位移由 14.53 mm 突变为 17.30 mm,基坑周围土体塑性区贯通,基坑失稳。

根据文献[23-24],将基坑处于临界失稳状态时的支护结构水平位移和周围地表沉降量用于判断基坑开挖过程中预警值的动态变化。上述分析表明,基坑工程的支护结构水平位移和沉降量随模量和强度折减的增大而增大,其分层开挖基坑变形监测预警指标如表 2。从表 2 可看出,支护结构水平位移累计量和地表最大累计沉降量随开挖过程的增大而逐渐增大。因此实际工程中,地表沉降量和支护结构水平位移的预警控制值应随开挖次数的增加而相应变化。

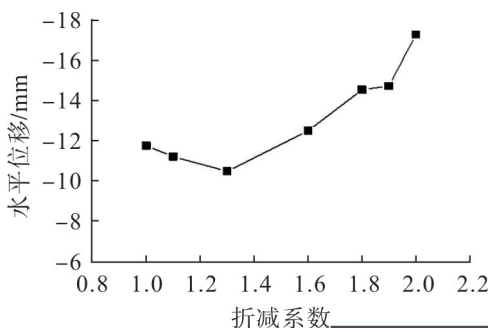


图 12 ZQS02 水平位移随折减系数的变化

Fig. 12 Change of ZQS02 horizontal displacement with reduction coefficient

表 2 分层开挖基坑变形监测预警指标

Tab. 2 Early warning index for deformation monitoring of layered excavation foundation pit

开挖工况	地表最大累计沉降量/mm	支护结构最大水平位移累计量/mm
一次开挖	14.28	43.39
二次开挖	16.83	47.29
三次开挖	20.13	53.45
四次开挖	25.70	57.61
五次开挖	25.68	57.83

3 基坑开挖过程变形与稳定状态判别

目前,芜湖城南过江隧道基坑工程二次开挖结束,受汛期影响,第三次开挖暂停施工。就前两次开挖过程中,现场监测的地表最大沉降量和支护结构最大水平位移累计值与数值模拟确定的变形预警指标进行对比分析(见图13,14)。

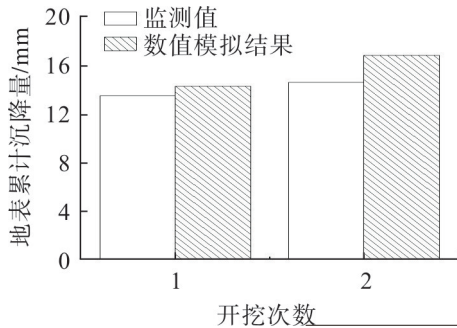


图13 地表累计沉降量对比

Fig. 13 Comparison of cumulative surface settlement

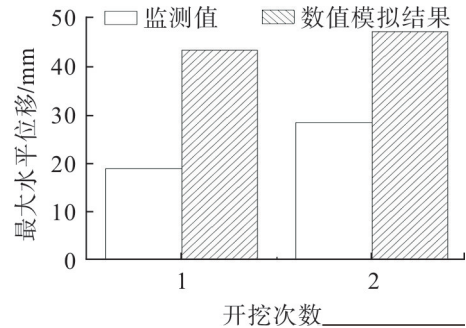


图14 地连墙最大水平位移对比

Fig. 14 Comparison of maximum horizontal displacement of ground wall

数值模拟值是基坑达到临界失稳状态时的结果,此时围护结构水平位移和基坑周围地表沉降量达到最大临界失稳状态。实际工程中,基坑工程处于安全状态时,其支护结构的水平位移和地表沉降量均处在安全范围内。从图13,14可看出,前两次基坑开挖过程中,地表最大累计沉降量和地连墙水平位移均在逐渐增加,且现场监测数据明显小于数值模拟确定的基坑变形监测预警值。表明基坑工程处在监测变形预警指标范围内,基坑在开挖过程中处于稳定状态。

4 结 论

提出一种基坑变形监测预警指标动态确定的方法,以芜湖城南过江隧道基坑工程为例,采用FLAC^{3D}软件对基坑开挖过程进行模拟,动态分析不同开挖层时的基坑变形值,获得基坑达到临界失稳状态时支护结构最大水平位移和地表最大沉降量,以此作为基坑变形预警动态指标,所得主要结论如下:

1) 基坑在前两次开挖过程中地表最大累计沉降量模拟结果为14.28,16.83 mm,现场监测值为13.50,14.60 mm,现场监测值小于数值模拟结果,表明基坑在开挖过程中处于稳定状态。模拟结果显示基坑实际开挖过程中地表最大累计沉降量是在变化的,对比监测日报给出的地表沉降量累计控制值30 mm可看出,若直接采用规范值确定基坑周围地表沉降量的预警指标,危险发生才预报,就会错过补救良机,造成重大损失。

2) 基坑在前两次开挖过程中支护结构水平位移最大累积量模拟结果为40.39,47.29 mm,现场监测值为18.85,28.40 mm,现场监测值在模拟结果范围内,基坑在开挖过程中是安全的。模拟结果显示支护结构水平位移在开挖过程是变化的,当支护结构水平位移超过40 mm时,若直接采用监测日报给出支护结构水平位移累计变量报警值40 mm确定支护结构水平位移预警指标,将安全状态预报为危险状态,则会采取措施或更改方案,增加投资。

因此,在确定基坑变形监测预警值的标准时,不宜简单地按现行规范来限制支护结构的最大水平位移或地表最大沉降量,应对每一个基坑工程的变形监测预警值进行专门研究。

参考文献:

- [1] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 上海市基坑工程技术规范:DG/TJ 08-61-2018[S]. 上海:同济大学出版社,2018:104-112.
- [2] 广东省住房和城乡建设厅. 广东省建筑基坑工程技术规程:DBJ/T 15-20-2016[S]. 北京:中国城市出版社,2016:52-54.
- [3] 深圳市住房和建设局发布. 深圳地区建筑深基坑支护技术规范:SJG 05-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:67-74.
- [4] 宋建学,郑仪,王原嵩. 基坑变形监测及预警技术[J]. 岩土工程学报,2006(S1):1889-1891.
- [5] 喻军,龚晓南,李元海. 基于海量数据的深基坑本体变形特征研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):319-324.
- [6] CUI X, YE M, ZHUANG Y. Performance of a foundation pit supported by bored piles and steel struts: a case study[J]. Soils and

- Foundations, 2018, 58(4):1016-1027.
- [7] 刘美麟,房倩,张顶立,等. 深基坑内撑式支护结构综合刚度研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7):2059-2064.
- [8] 秦会来,张晓春. 支护桩刚度对基坑变形的影响分析[J]. 勘察科学技术, 2017(1):1-6.
- [9] 林刚,徐长节,蔡袁强,等. 不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8):2592-2598.
- [10] 刘洋,周建,王国强. 膨胀土基坑边坡降雨入渗的一维数值模拟[J]. 同济大学学报, 2005, 33(22):128-161.
- [11] 秦禄生,郑健龙. 膨胀土路基边坡雨季失稳破坏机理的应力应变分析[J]. 中国公路学报, 2001(1):27-32.
- [12] 陈昆,闫澍旺,孙立强,等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4):1075-1082.
- [13] 姚爱军,张剑涛,郭海峰,等. 地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7):2318-2326.
- [14] FINNO R J, VOSS J R F T, ROSSOW E, et al. Evaluating damage potential in buildings affected by excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10):1199-1210.
- [15] 何绍衡,夏唐代,李连祥,等. 地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(4):713-723.
- [16] 张小伟,姚笑青. 基坑工程变形的渗流应力耦合有限元分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2):339-344.
- [17] 何应道. 考虑渗流影响的基坑变形规律与稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(1):28-31.
- [18] 何长明,李亮. 基坑变形监测及地下水的处理[J]. 岩土工程界, 2008, 11(4):71-75.
- [19] 张玉成,杨光华,吴舒界,等. 土钉支护结构变形与稳定性关系探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(1):238-247.
- [20] 郑大平,姜睿,郑卫锋. 深基坑预应力锚杆柔性支护技术的稳定与变形研究[J]. 工程勘察, 2007(12):24-28.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社, 2019:4-15.
- [22] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 5版. 北京:中国建筑工业出版社, 2018:145-182.
- [23] 夏琴,石峰,张红彬,等. 某明挖车站基坑开挖过程监测与数值模拟[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2019, 36(4):388-395.
- [24] 孔德森,门燕青,张伟伟,等. 软土深基坑坑底抗隆起稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1):186-190.

责任编辑:闫芳芳