

边坡开挖支护三维变形监测与数值模拟研究

彭仪普¹,李 剑¹,黄 毅²,汤致远¹,李子超¹

(1.中南大学土木工程学院,湖南 长沙 410075;2.广西交投集团有限公司,广西 南宁 530007)

摘 要 目的 研究边坡开挖对边坡失稳的破坏,对边坡开挖及桩锚支护过程进行数值模拟分析,确保边坡处于安全施工之中。方法 以长沙市月华街南段道路 K0+090 边坡为案例,使用二次开发下的 TCA2003 全站仪对边坡冠梁上 P1~P7 的 7 个监测点进行对支护结构水平与竖直方向位移监测;使用天宝 DINI03 高精度数字水准仪对坡顶建筑上 W1~W4 的 4 个监测点进行对坡顶建筑物沉降监测;使用测斜仪对 CX1、CX2 两根侧斜管进行土体及支护结构的深层水平位移监测;采用 ABAQUS 有限元软件对道路 K0+090 段边坡的开挖及桩锚支护过程进行三维数值模拟分析,以确定该段边坡在 4 种工况下的支护桩及冠梁位移与坡顶建筑物沉降变化;结果 现场测量出的 P1~P7 监测点 X、Y 和 Z 方向坐标与初始坐标最大差值的绝对值分别为 0.3 mm、0.2 mm、0.2 mm;数值模拟结果表明:边坡开挖及支护过程中坡顶建筑物的沉降值远小于累积报警值 10 mm;现场监测与数值模拟在支护桩及冠梁 X 方向水平位移最大值差值为 0.79 mm;在坡顶建筑物竖向位移最大值差值为 0.50 mm。结论 边坡土体及支护结构呈现出朝坡外倾斜的趋势,且水平位移由上到下不断的减小,数值模拟结果与现场监测数据均表明边坡施工处于稳定安全状态。

关键词 边坡开挖支护;变形监测;数值模拟;稳定性分析

中图分类号 TU 997;U416.1⁺4

文献标志码 A

Three-dimensional Deformation Monitoring and Numerical Simulation on Slope Excavation and Support

PENG Yipu¹, LI Jian¹, HUANG Yi², TANG Zhiyuan¹, LI Zichao¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, China, 410075; 2. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co. Ltd., Nanning, China, 510007)

Abstract: To study the effects of slope excavation on slope instability, numerical simulation analysis was conducted on the excavation and support processes of the slope, ensuring safe construction practices. Taking the slope at K0+090 of Yuehua street, Changsha city as a case study, the TCA2003 total station, which was customized, was used to monitor the horizontal and

收稿日期:2023-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(52078499,52378424)

作者简介:彭仪普(1970—),男,副教授,博士,主要从事边坡稳定性分析与变形监测等方面研究。

vertical displacements of seven monitoring points (P1 ~ P7) on the slope's crown beam. The DINI03 high-precision digital level was used to monitor the settlement of four monitoring points (W1 ~ W4) on the top of the slope structure. Inclinometers were used to monitor the deep horizontal displacements of the soil and support structure in two inclined pipes (CX1, CX2). The ABAQUS finite element software was employed to perform three-dimensional numerical simulation analysis of the excavation and support processes of the slope at K0 + 090, in order to determine the displacements of the supporting piles and the crown beam, as well as the settlement changes of the slope's top structure under four different working conditions. The maximum absolute differences between the measured coordinates (X, Y, Z) of the P1 ~ P7 monitoring points and their initial coordinates were found to be 0.3 mm, 0.2 mm, and 0.2 mm, respectively. The numerical simulation results indicated that the settlement of the top structure during the slope excavation and support processes was far below the cumulative alarm value of 10 mm. The maximum difference between the on-site monitoring and numerical simulation results for the horizontal displacement of the support piles and crown beam in the X direction was 0.79 mm, while for the vertical displacement of the top structure, it was 0.50 mm. The slope soil and support structure exhibited a tendency to lean outward, and the horizontal displacement decreased from top to bottom. Both the numerical simulation results and the on-site monitoring data indicated that the slope construction was in a stable and safe state.

Key words: slope excavation support; deformation monitoring; numerical simulation; stability analysis

在边坡的开挖与支护过程中,土体会发生一定的变形,需要对土体的变形监测与数值模拟,以保证边坡在安全的条件下正常施工。边坡开挖是岩土体的卸荷过程,会导致边坡土体应力场发生变化与重新分布,增加边坡失稳的风险,可能会带来经济损失与人员伤亡。殷德胜等^[1]提出了三维岩质边坡开挖过程动态模拟有限单元法,有限元网格只需要考虑结构面与复杂地形,大大减少了前处理的工作量;但是动态有限元的计算成果需要自己开发软件去处理,在现实生活中存在着较大难度去实施。段钊等^[2]采用离散元模拟技术建立边坡模型,对大黄公路1号滑坡开挖前后2个阶段离散元模拟;结果表明:边坡开挖引起的以水平方向为主的牵引式滑坡,如果发生失稳将对公路产生的最大威胁距离为41.3 m,滑坡的堆积体 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,严重影响公路正常进行。林同立等^[3]提出了台阶型截面开挖与抗滑桩+锚索预加固开挖两种施工方式,并用FLAC^{3D}软件对两种方式的结果进行数值模拟;结果表

明:两种施工方法都能满足坡顶竖向位移沉降的规范要求,抗滑桩+锚索预加固方法对边坡坡顶竖向位移沉降量小,适合边坡周围复杂的环境。虽然不少学者对边坡开挖进行了研究,随着计算机技术发展,理论研究也与各类有限元建模分析相结合,但是在不少工程中,针对边坡开挖计算分析的结果如边坡安全系数、土体变形以及应力应变等,仍与实际结果存在较大的差别,因此边坡开挖仍是工程领域的研究重点。

对边坡进行支护能够提高边坡的安全性与稳定性,常用的边坡支护形式有挡墙支护、抗滑桩支护、桩锚支护以及土钉墙支护等。王德华等^[4]以四川省风池山某多级组合支护边坡为研究背景,建立了支护结构与未支护结构的振动台试验模型;结果表明:加固结构增强边坡整体的刚度,加速度放大系数在边坡表面呈线性分布趋势,可以有效防止边坡滑体的整体变形。闫强等^[5]以柳州至南宁高速K1456+800处左侧改扩建边坡为研究对象,采用ANSYS建立了有限元数值模

型,选择未及时支护与及时支护两种方法模拟分析改扩建工程中边坡的测点位移与主应力;结果表明:及时支护能有效降低边坡的剪切应力与整体应力水平,显著提高边坡安全系数与稳定性。赵川等^[6]以锦屏水电站缆机平台高陡边坡为工程案例,采用有限元法对其分级开挖支护过程进行数值模拟;结果表明:单级开挖高度对岩性较差的边坡位移与安全系数影响较大,同时及时支护相比于滞后一级支护能更好提高边坡安全系数,单级开挖 15 m 比 10 m 支护效果更明显。

目前我国边坡监测的技术手段是常规表面位移监测技术,如经纬仪、水准仪、全站仪测量^[7-9];全球定位系统(GPS)测量、近景摄影测量技术、三维激光扫描技术等^[10-12]。为提高边坡变形监测的精度,最大限度的保障城市道路边坡及邻近建筑物在施工过程的安全性,笔者对边坡变形监测 TCA2003 的监测程序做了二次开发;针对长沙市月华街南段道路项目边坡开挖及支护施工过程,采用 ABAQUS 有限元软件对道路 K0+090 段边坡的开挖及桩锚支护过程进行三维数值模拟,与实际现场监测的边坡变形结果做对比分析;研究表明:边坡支护结构和坡顶建筑物在施工的过程中处于安全范围之内。

1 边坡变形监测方案

1.1 监测案例

以月华街南段道路 K0+090 处左侧道路边坡为研究对象,边坡高度 $H=11\text{ m}$,坡底倾角 $\beta=60^\circ$;同时 K0+090 处边坡坡顶坐落有一浅基础宿舍楼。K0+090 处边坡简图如图 1 所示。

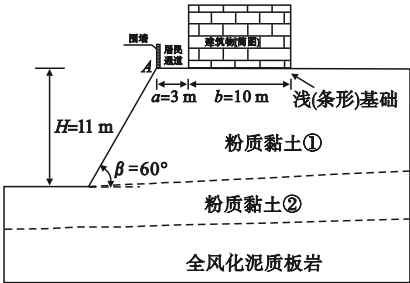


图 1 月华街南段道路 K0+090 边坡简图

Fig. 1 The slope diagram of K0+090 on the south of Yuehua street

1.2 监测点位布设

根据边坡监测方案以及结合现场的实际施工状况,边坡冠梁上共布设 7 个三维位移监测点(P1~P7),用来监测支护结构水平方向和竖直方向的位移大小;坡顶建筑物上共布设 4 个沉降监测点(W1~W4);边坡支护桩中选取两根桩埋置测斜管,分别为 CX1、CX2,目的是监测土体及支护结构的深层水平位移。具体监测点位布设如图 2 所示。

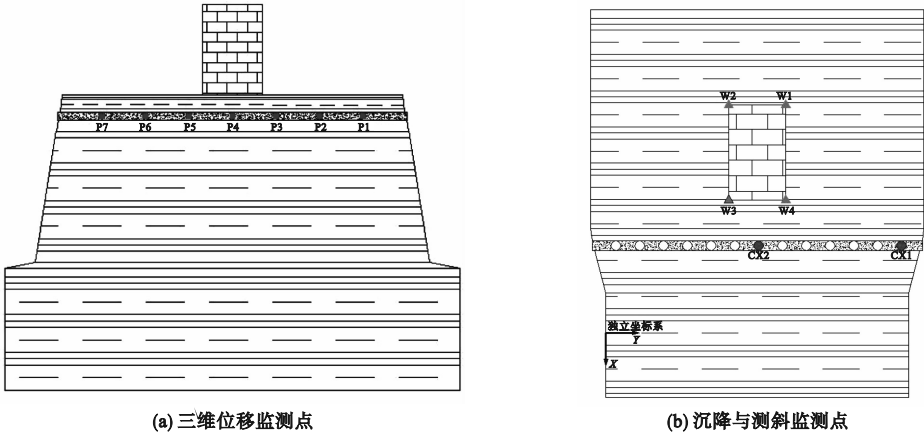


图 2 三维位移沉降与测斜监测点

Fig. 2 The three-dimensional displacement settlement and inclination monitoring points

2 边坡变形监测方法

2.1 边坡支护结构三维位移监测

测量机器人即 TCA2003 能够自动且精确地代替人工对监测点进行测量并获得三维位移坐标^[13-14]。本次项目监测中使用的测量机器人如图 3 所示。



图 3 测量机器人
Fig. 3 The survey robot

在本次的边坡三维变形监测中,为节约人力物力以及提高监测的效率,采用 GeoCOM 接口技术和 Microsoft Access 数据库技术在 Visual Basic 6.0 开发环境下对测量机器人即 TCA2003 全站仪自动化监测程序进行二次开发,程序如下:

```
VB_COM_Init();  
VB_COM_OpenConnection(ComPort,  
Baudrate,1);  
VB_COM_SetTimeOut;  
VB_COM_SetComFormat(Protocol);  
VB_TMC-SetInclineSwitch(ON-);  
VB_TMC-SetAtmCorr(AtmCorr);  
VB_TMC-SetPrismCorr(PrismCorr);  
VB_TMC-SetRefractiveCorr(Refractive);  
VB_TMC-SetStation(NullStation);  
VB_TMC_SetOrientation();  
VB_TMC_SetHeight(NewHeight);  
VB_AUT_MakePositioning4;  
VB_AUT_SetATRStatus(ON_);  
VB _ AUT _ FineAdjust3 ( 0.05, 0.05,  
False);  
VB_AUT_SetLockStatus(ON_);  
VB_AUT_LockIn;
```

```
VB_TMC_DoMeasure;  
VB_TMC_SetAngSwitch(SwCorr);  
VB_BAP_MeasDistanceAngle(dH,dV,  
dDistance);  
VB_TMC_DoMeasure(TMC_AUTO_  
INC);  
VB_TMC_GetCoordinate1;  
VB_AUT_SetLockStatus(OFF_);  
VB_AUT_SetATRStatus(OFF_);  
VB _ AUT _ ChangeFace4 (AUT_  
PRECISE,AUT_POSITION,False);  
VB_BAP_MeasDistanceAngle(BAP_  
CLEAR_DIST,dH,dV,dDistance);  
VB_COM_CloseConnection();  
VB_COM_End;  
VB_COM_SwitchOffTPS(0);
```

2.2 坡顶周边建筑物沉降监测

边坡坡顶建筑物沉降监测采用天宝 DINI 03 高精度数字水准仪,在首次测量前需要在离建筑物较远位置的稳定地面上布设 1~2 个水准基点,而沉降监测点则分别布设在建筑物的四个墙角处。

2.3 土体及支护结构深层水平位移监测

土体及支护结构深层水平位移需采用测斜仪来进行测量,当传感器探头由上逐段放入测斜管内时,探头会测出每一深度段 L 处的测斜角变化的大小,再根据相应公式求出测斜管不同高程处的水平方向的位移变化量^[15],其计算式为

$$\Delta_i = L\sin\theta_i. \tag{1}$$

由底部向上累加计算,则某一高程处的水平位移可表示为

$$S_j = \sum_{i=1}^j \Delta_i. \tag{2}$$

3 监测数据分析

边坡支护结构及坡顶建筑物的监测点布设完成后,根据相关规范以及监测方案的要求,边坡在施工期间的监测频率为每 2 天一

次,监测时长为6个月,X方向水平位移正值为沿边坡外侧方向。为方便对监测数据进行整理分析以及预测结构物的变形趋势,取间隔14天/期的监测数据绘制相应的位移及沉降趋势图。

3.1 边坡支护结构三维位移数据分析

在边坡施工期间,支护结构冠梁上P1~P7监测点X、Y、Z三个方向位移累计变化量分别如图4所示。

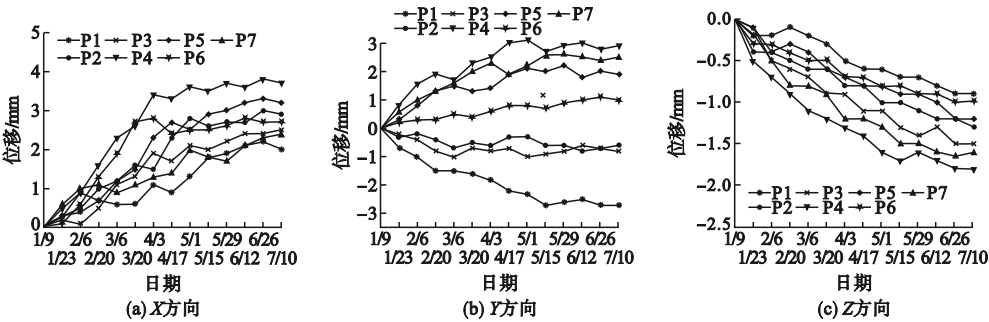


图4 P1~P7监测点X、Y、Z方向竖向位移累计变化量

Fig. 4 The cumulative variations of vertical displacements in X、Y、Z directions at P1 ~ P7 monitoring points

为方便对监测数据进行整理与分析,将各监测点三维位移最终累计变化量统计于表1。

表1 P1~P7监测点三维位移累计变化量

Table 1 The cumulative variations of three-dimensional displacement at P1 ~ P7 monitoring points

方向	不同监测点的三维位移累计变化量/mm						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
X	2.0	2.9	2.5	3.7	3.2	2.7	2.4
Y	-2.7	-0.6	-0.8	2.9	1.9	1.0	2.5
Z	-0.9	-1.3	-1.5	-1.8	-1.2	-1.0	-1.6

由表1可发现,随着边坡施工的进行,P1~P7监测点X方向水平位移逐渐增大而后趋于稳定,这是因为边坡开挖会造成支护结构坡外一侧形成临空面,开挖深度越深,临空面越大,支护结构后的土压力对其造成的X方向水平位移也越大,而边坡开挖完成后,X方向的变形则逐渐趋于稳定。

对于Y方向的位移,P1~P3监测点Y方向的位移累计变化量均为负值,而P4~P7监测点Y方向的位移累计变化量均为正值,即在边坡施工过程中,冠梁P1~P3段主要产生沿Y轴负向的变形,P4~P7段主要产生沿Y轴正向的变形。

再对比分析P1~P7监测点Z方向的竖向位移累计变化量,可以看到冠梁中部P4监测点的竖向位移累计变化量最大,为

1.8 mm。但是相比X方向与Y方向的水平位移累计变化量,P1~P7监测点的竖向位移累计变化量均小于2 mm,因此可以确定本次开挖对边坡支护结构竖直方向位移造成的影响并不大。

3.2 边坡坡顶周边建筑物沉降数据分析

在支护桩及冠梁施工平台开挖前,需要完成坡顶建筑物沉降监测点的布设并测得各监测点位的初始高程^[16],坡顶建筑物W1~W4监测点的沉降累积变化量如图5所示。

由图5可知,靠近边坡开挖面的两个监测点W3与W4的沉降值均大于监测点W1与W2的沉降值,这与实际工程中边坡开挖坡顶建筑物的沉降变形规律是吻合的。4个监测点的最大沉降累积变化量为2.38 mm,说明坡顶建筑物在边坡施工期间是安全稳定的。

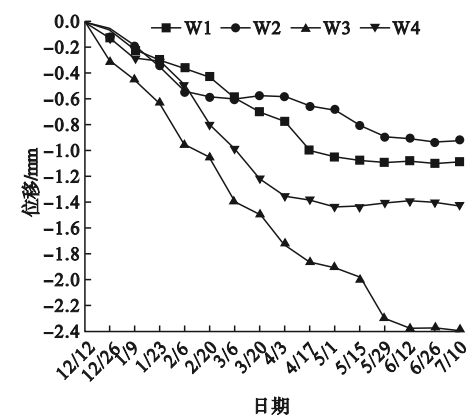


图5 W1~W4 监测点沉降累计变化量

Fig.5 The cumulative variations of settlements at W1~W4 monitoring points

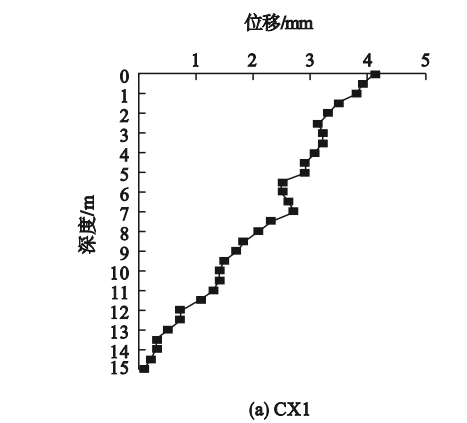


图6 土体及支护结构深层水平位移累计变化量

Fig.6 The cumulative variation of deep horizontal displacement of soil and supporting structure

现 P4 监测点 X 方向水平位移最终累计变化量为 3.7 mm,而 CX2 监测点顶部最大水平位移为4.1 mm,验证了本次监测的准确性。

4 边坡开挖及支护施工研究

边坡支护桩采用人工挖孔灌注桩,单桩直径为 1 m,两桩的中心间距为 2.5 m;支护桩内置钢筋笼,桩身混凝土强度等级为 C30;本段边坡开挖及支护采用由上至下的施工工艺,具体施工工况如表 2 所示。

4.1 边坡开挖及支护模型建立

建立边坡开挖及支护各个工况模型,如图 7 所示。

3.3 土体及支护结构深层水平位移数据分析

CX1、CX2 监测点的深层水平位移累积变化量如图 6 所示。

由图 6 可知,随着边坡不断的向下开挖,边坡土体及支护结构呈现出朝坡外倾斜的趋势,且水平位移由上到下不断的减小。而靠近坡顶建筑物的 CX2 监测点,由于在坡顶建筑物重力作用的影响下,其水平位移最大累积变化量明显小于 CX1 监测点的水平位移最大累积变化量。对比同样位于冠梁中部位

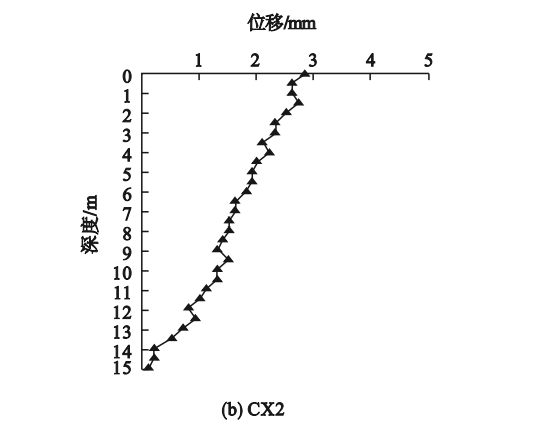


表2 边坡开挖及支护施工工况

Table 2 The slope excavation and support construction condition

工况	开挖深度/m	施工内容
一	3.0	开挖施工平台,并对上部坡面进行削坡处理;人工开挖桩孔,支护桩及冠梁施工
二	3.0	边坡开挖至第一排锚杆标高以下 0.5 m 位置,第一排锚杆及腰梁施工
三	2.5	边坡开挖至第二排锚杆标高以下 0.5 m 位置,第二排锚杆及腰梁施工
四	2.5	开挖边坡剩余土体

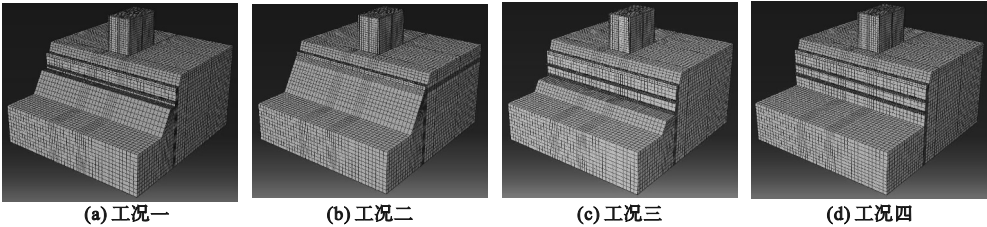


图7 边坡开挖及支护各个工况模型

Fig. 7 The models of slope excavation and support in different working condition

边坡支护桩单桩长度为15 m,两桩中心间距为2.5 m;锚杆长度为12 m,水平倾角为15°;冠梁与腰梁沿道路方向的长度均为35 m。桩锚支护结构的三维模型图如图8所示。

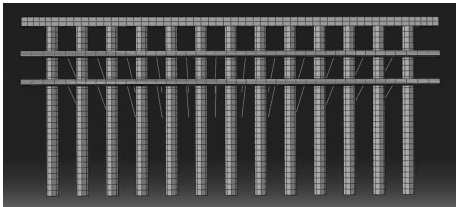


图8 桩锚支护结构三维模型

Fig. 8 The three-dimensional model of pile-anchor supporting structure

4.2 支护结构及坡顶建筑物位移分析

边坡在开挖及支护时,土体的变形受到外界因素的扰动较大,所以无法通过土体的

变形大小准确的判断边坡在施工过程中的稳定性,而边坡支护桩及冠梁由于为混凝土结构且部分桩身深埋于地层之中,其变形受到外界因素的扰动较小,因此在边坡施工中可通过支护桩及冠梁水平方向与竖直方向的变形大小来判断边坡在开挖过程中是否存在失稳的风险。

4.2.1 支护桩及冠梁位移分析

由于边坡工况一的施工不涉及支护桩及冠梁的变形,因此笔者仅给出工况二、工况三以及工况四边坡支护桩及冠梁水平方向与竖直方向的位移云(见图9)。图中,X方向位移负值代表变形沿边坡外侧方向),由于Y、Z方向位移变化不明显,这里只给出X方向的变化趋势图。

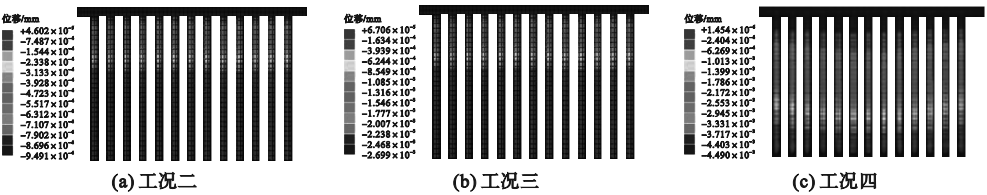


图9 支护桩及冠梁X方向水平位移图

Fig. 9 The horizontal displacement diagram of supporting pile and crown beam in X direction

由图9可知,由于在边坡施工过程中,支护桩及冠梁主要受到桩后土压力的作用,所以使得X方向的位移大于其余两个方向的位移。同时可以看到随着施工工况的进行,支护桩和冠梁X方向的水平位移也变得越来越来大,这是因为边坡土体开挖会造成支护桩一侧形成临空面,土体开挖越深,临空面越大,桩后土压力对其造成的位移也越大,所以

导致支护结构的位移逐渐增加,而且由于边坡土体开挖顺序为从上往下施工,因此顶部冠梁X方向产生的位移最大。

4.2.2 边坡坡顶建筑物沉降分析

四个工况建筑物的竖向位移如图10所示。由图10可知,四个工况的坡顶建筑物最大沉降点都位于靠近开挖边坡的一侧,并且距离边坡越远的位置,其沉降值也越小。虽

然建筑物与坡顶最左侧边沿的距离很近,仅为 3 m,但本次的边坡施工对其造成的沉降远小于本项目监测方案中的建筑物沉降监测

累积报警值 10 mm,因此可判断坡顶建筑物在施工过程中是安全的^[17]。

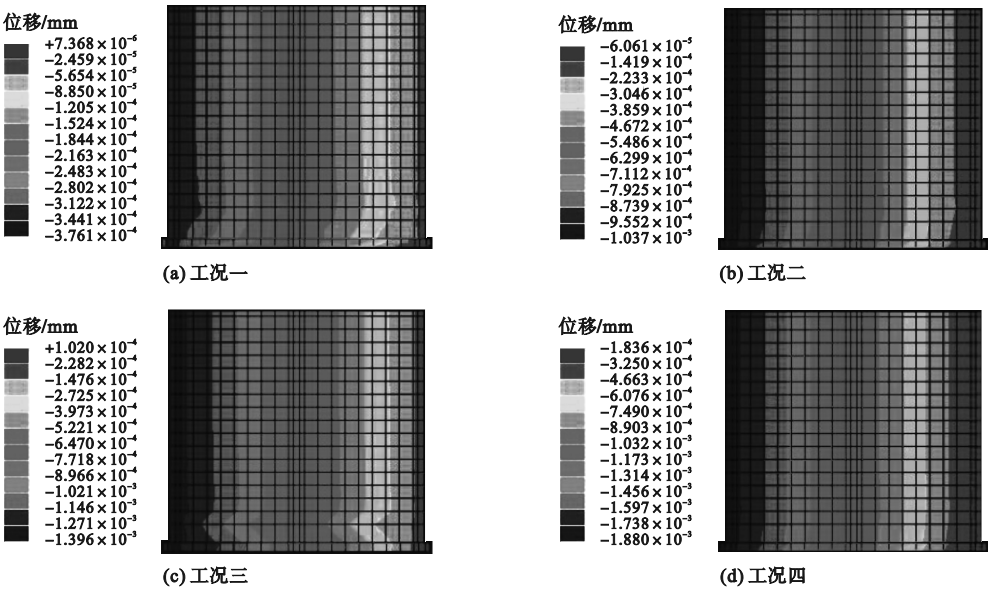


图 10 坡顶建筑物竖向位移图

Fig. 10 The vertical displacement diagram of building on slope top

4.2.3 监测数据与数值模拟结果对比分析

在现场监测中,边坡支护结构 X 方向水平位移的最大值与坡顶建筑物竖向位移的最大值是判断两者稳定性与安全性的最重要参考依据。将支护桩及冠梁 X 方向水平位移最大值与坡顶建筑物竖向位移最大值的数值模拟结果与边坡施工现场的实际监测值统计于表 3。

表 3 监测数据与数值模拟结果对照表

Table 3 The comparison of monitoring data and numerical simulation results

项目	支护桩及冠梁 X 方向水平	坡顶建筑物竖向
	位移最大值/mm	位移最大值/mm
现场实测	3.70	2.38
数值模拟	4.49	1.88
差值	0.79	0.50

从表 3 中可以看出,坡顶建筑物竖向位移最大值与数值模拟相差 0.5 mm、支护桩及冠梁 X 方向水平位移最大值与数值模拟相差 0.79 mm,均小于 1,符合《建筑边坡工程技术规范》(GB50300—2013)要求。由于边

坡支护结构与坡顶建筑物的变形会受到施工过程中很多外界因素的影响,如降雨、坡顶推载以及土体开挖顺序等,所以会导致采用数值模拟软件计算得到的各项位移数据与项目现场的实际监测结果并不完全吻合。

5 结 论

(1)通过采用自动化监测和人工监测的方式对 P1 ~ P7 监测点的初始坐标进行复测,发现基于本次项目边坡而进行二次开发的测量机器人自动化监测程序的实测精度与人工测量的精度差别不大,其测量出的 P1 ~ P7 监测点 X、Y 和 Z 方向坐标与初始坐标最大差值的绝对值分别为 0.3 mm、0.2 mm、0.2 mm。

(2)CX1 与 CX2 监测点的水平位移曲线变化规律显示,随着边坡不断的向下开挖,边坡土体及支护结构呈现出朝坡外倾斜的趋势,且水平位移由上到下不断的减小。

(3)数值模拟结果与现场监测数据均表明:边坡支护结构与坡顶建筑物在施工过程

中的变形都未超出报警值。

参考文献

- [1] 殷德胜,汪卫明,陈胜宏. 岩质边坡开挖过程模拟的动态有限单元法[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(11):2217-2224.
(YIN Desheng, WANG Weiming, CHEN Shenghong. Dynamic finite element method for excavation process simulation of rock slope [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(11): 2217-2224.)
- [2] 段钊,唐皓,党琪,等. 边坡开挖诱发滑坡离散元模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(5):49-55.
(DUAN Zhao, TANG Hao, DANG Qi, et al. Discrete element simulation of landslide induced by slope excavation [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2014, 34(5): 49-55.)
- [3] 林同立,何忠明,蔡军. 改扩建高速公路路堑边坡拓宽方案对比分析[J]. 矿冶工程,2014,34(6):18-21.
(LIN Tongli, HE Zhongming, CAI Jun. Analysis and comparison of embankment widening schemes in highway renovation and expansion project [J]. Mining and metallurgy engineering, 2014, 34(6): 18-21.)
- [4] 王德华,吴祚菊,张建经,等. 多级组合支护结构对非均质高边坡抗震性能影响分析[J]. 振动工程学报,2019,32(3):404-414.
(WANG Dehua, WU Zuoju, ZHANG Jianjing, et al. Analysis of antiseismic effect of anisotropic high slopes reinforced by multi-frame retaining structure [J]. Journal of vibration engineering 2019, 32(3): 404-414.)
- [5] 闫强,廉向东,凌建明. 边坡开挖支护时序有限元分析[J]. 交通运输工程学报,2020,20(3):61-71.
(YAN Qiang, LIAN Xiangdong, LING Jianming. Time series finite element analysis of support of slope excavation [J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2020, 20(3): 61-71.)
- [6] 赵川,付成华,何欢,等. 锦屏水电站缆机平台高陡边坡开挖支护数值模拟[J]. 长江科学院院报,2015,32(8):94-98.
(ZHAO Chuan, FU Chenghua, HE Huan, et al. Numerical simulation on the excavation and support of high and steep slope of cable-crane platform of Jinping hydropower station [J]. Journal of changjiang river scientific research institute, 2015, 32(8): 94-98.)
- [7] ERDELYI J, KOPACIK A, KYRINOVIC P. Spatial data analysis for deformation monitoring of bridge structures [J]. Applied sciences, 2020, 10(23): 8731.
- [8] WANG X, ZHAO Q, XI R, et al. Review of bridge structural health monitoring based on GNSS: from displacement monitoring to dynamic characteristic identification [J]. IEEE access, 2021, 9: 80043-80065.
- [9] 罗彦斌,陈建勋,翟宇辉. 全站仪 RDM 法与 3D 量测法量测隧道变形精度对比[J]. 交通运输工程学报,2017,17(3):56-64.
(LUO Yanbin, CHEN Jianxun, ZHAI Yuhui. Comparison of measuring accuracies of tunnel displacements with RDM method and 3D measurement method based on total station [J]. Journal of traffic and transportation engineering 2017, 17(3): 56-64.)
- [10] 袁丹丹,李新华,易文俊,等. 基于 GPS/地磁组合弹体滚转姿态测量方法[J]. 系统工程与电子技术,2018,40(11):2512-2518.
(YUAN Dandan, LI Xinhua, YI Wenjun, et al. Method of roll attitude determination based on GPS and magneto-resistive sensor [J]. System engineering and electronics, 2018, 40(11): 2512-2518.)
- [11] RASHIDI M, MOHAMMADI M, SADEGHLOU K S, et al. A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: review and future directions [J]. Remote sensing, 2020, 12(22): 3796.
- [12] POPESCU C, TALJSTEN B, BLANKSVARD T, et al. 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods [J]. Structure and infrastructure engineering, 2019, 15(7): 912-924.
- [13] 刘丽,马国庆,高艺,等. 三维形貌测量机器人的轨迹规划技术[J]. 中国激光,2019,46(2):118-125.
(LIU Li, MA Guoqing, GAO Yi, et al. Trajectory planning technology of three-dimensional shape measurement robots [J]. Chinese journal of lasers, 2019, 46(2): 118-125.)
- [14] 黄善琪,段志钦,吴玖荣,等. 联合卫星定位和测量机器人的超高层建造过程水平位移监测[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(1):138-146.
(HUANG Shanqi, DUAN Zhiqin, WU Jiurong, et al. Monitoring of horizontal displacement of a super-tall structure during construction based on navigation satellite and robotic total station [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2022, 50(1): 138-146.)
- [15] ZHANG X, CHEN L, ZHOU C. Deformation monitoring and trend analysis of reservoir bank landslides by combining time-series InSAR and hurst index [J]. Remote sensing, 2023, 15(3): 619.
- [16] ORELLANA F, MORENO M, YANEZ G. High-resolution deformation monitoring from DInSAR: implications for geohazards and ground stability in the metropolitan area of Santiago, Chile [J]. Remote sensing, 2022, 14(23): 6115.
- [17] ACHARYA A, KOGURE T. Application of novel distributed fibre-optic sensing for slope deformation monitoring: a comprehensive review [J]. International journal of environmental science and technology, 2023, 20(7): 8217-8240.
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)