

基于无人机倾斜摄影的高陡岩质边坡数值模拟

王雅南¹ 刘嘉伟¹ 廖小辉¹ 胡或翻²

1 衢州学院 2 衢州市国土空间规划设计研究院

DOI:10.12238/gmsm.v5i2.1370

[摘要] 本文基于无人机倾斜摄影和逆向工程三维建模方法,以具体的工程实例为研究对象,运用FLAC3D等建模软件,建立岩体的有限元模型,并对岩体样本进行密度试验、单轴试验、三轴试验及抗拉强度试验,得到其力学特性,结合岩体三维有限元模型,分析其应力及位移,研究高陡岩质边坡破坏的力学行为,并设计相应的加固措施。分析结果表明:(1)坡面部分受到的最大拉应力,坡脚处容易受到挤压破坏,应重新安装钢丝网防护,并排除潜在的崩塌块体;(2)坡体内部主要受到铅锤方向的压应力作用,体现受压屈服,需要对坡体定期监测,保证边坡的安全;(3)该边坡体在各个方向的位移量均很小,边坡整体处于稳定状态。

[关键词] 无人机倾斜摄影; 数值模拟; 高陡岩质边坡; 稳定性分析; 加固

中图分类号: V279+.2 **文献标识码:** A

Numerical Simulation of High and Steep Rock Slopes Based on UAV Oblique Photography

Yanan Wang¹ Jiawei Liu¹ Xiaohui Liao¹ Yuxuan Hu²

1 Quzhou University 2 Quzhou Institute of Land and Space Planning and Design

[Abstract] Based on UAV oblique photography and reverse engineering 3D modeling methods, this paper takes specific engineering examples as the research object, uses modeling software such as FLAC3D to establish a finite element model of rock mass, and conducts density tests, uniaxial test, triaxial test and tensile strength test on rock mass samples to obtain its mechanical properties, analyzes its stress and displacement in combination with the three-dimensional finite element model of rock mass, studies the mechanical behavior of high and steep rock slope failure, and designs corresponding reinforcement measures. The analysis results show that: (1) the maximum tensile stress is on the slope surface, the slope toe is easily damaged by extrusion, the steel mesh should be re-installed for protection, and the potential collapse blocks should be excluded; (2) the interior of the slope is mainly affected by the compressive stress in the direction of plumb bob, which reflects the yield under compression, and it is necessary to regularly monitor the slope body to ensure the safety of the side slope; (3) the displacement of the slope body in all directions is small, and the slope as a whole is in a stable state.

[Key words] UAV oblique photography; numerical simulation; high and steep rock slopes; stability analysis; reinforcement

引言

我国山地和丘陵地区面积广阔,受地形地貌特征影响,导致公路工程建设形成大量陡峭边坡。由于我国现阶段公路勘察设计工期一般较短,地质现象又具有隐蔽性和不确定性,难以准确地预测高陡岩质边坡开挖后坡体的地质结构特征,使得高陡岩质边坡的稳定性分析

是边坡工程的重难点问题。目前,许多学者对高陡岩质边坡的稳定性进行研究,贾东远^[1]等总结了岩石边坡稳定性的分析方法,并对其进行详细论述;刘红丹, Yingzi Xu等^{[2][3]}均利用有限元分析软件建立岩体的二维简化模型,分析边坡的稳定性。N. Dadashzadeh^[4]等基于响应面法,提出了一种分析岩石边坡稳定

性概率数值模拟的方法。陈云生^[5]等运用midas GTS NX软件,建立了边坡的三维地质模型,模拟边坡开挖与支护。尽管国内外学者均对边坡数值模拟提出了一些理论及方法,但是由于高陡岩质边坡勘测信息难以获取,其建立的模型往往是简化的二维模型或是对影响因素进行分析,无法准确模拟边坡的力学

行为与破坏特征,边坡稳定性分析仍然是一个难题。

近年来,随着无人机技术的发展,多角度测绘的难题得以解决,部分学者将这一技术应用于实际工程中。吴少燕^[6]等利用无人机倾斜摄影技术,绘制了矿山区域的地形图,提高了测量精度;王明,徐岗等^{[7][8]}通过无人机摄影对边坡调查分析,结合多种建模软件,建立出高陡危岩体的三维模型,实现了高效精准的地形形成图和三维建模,这些研究为边坡体的稳定性分析提供了新的思路及方法。本文基于无人机倾斜摄影和逆向工程三维建模方法,结合室内试验,建立精确的岩体三维有限元模型,对高陡岩质边坡进行稳定性分析,并提出该边坡体的处治措施,为高陡岩质边坡的研究与加固提供参考。

2 无人机倾斜摄影及逆向工程数值模拟方法

2.1 三维模型的建立

无人机倾斜摄影技术考虑多方位、多角度采集影像数据,并通过影响质量检查、匀光匀色处理、几何校正、同名点匹配、区域网联合平差等计算和操作,从而测得实际地理坐标,配合三维建模技术,建立三维有限元模型^{[9][12]}。无人机倾斜摄影原理图如图1所示,图中a代表摄像机的倾斜角度,b代表摄像机的可视范围的角度,H代表无人机的拍摄时所在高度,D表示无人机与倾斜影像目标的水平距离最大值,d表示无人机与倾斜影像目标的水平距离最小值。

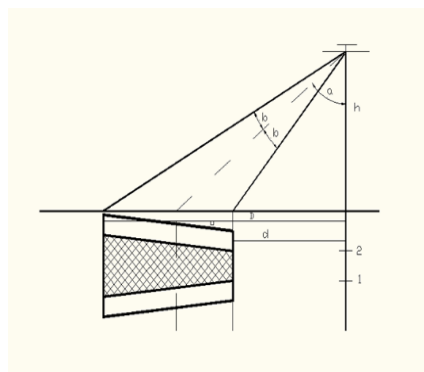


图1 无人机倾斜摄影原理图

本文利用三维建模软件Photoscan进行建模,将无人机拍摄的照片导入

表1 边坡体岩石的天然密度与饱水密度的试验结果

| 岩石名称 | 试样编号 | 试样尺寸(cm) | | 岩石天然密度(g/cm ³) | 饱水密度(g/cm ³) |
|------|------|----------|--------|----------------------------|--------------------------|
| | | 直径平均值 | 高度平均值 | | |
| 边坡 | 1-01 | 5.003 | 10.002 | 2.631 | 2.636 |
| | 1-02 | 5.005 | 9.945 | 2.638 | 2.641 |
| | 1-03 | 5.003 | 9.952 | 2.634 | 2.636 |
| | 1-04 | 5.003 | 10.04 | 2.637 | 2.638 |
| | 1-05 | 5.005 | 10.096 | 2.621 | 2.624 |
| | 1-06 | 5.005 | 9.970 | 2.630 | 2.633 |
| | 1-07 | 5.005 | 10.174 | 2.621 | 2.624 |
| 平均值 | | | | 2.630 | 2.633 |

表2 不同含水状态下的单轴抗压强度试验结果

| 含水状态 | 试验编号 | 单轴抗压强度(MPa) | 弹性模量E(MPa) | 泊松比 |
|------|------|-------------|------------|-------|
| 饱水 | 1-5 | 88.420 | 22357.5 | 0.119 |
| | 1-6 | 84.867 | 21987.5 | 0.089 |
| | 1-7 | 96.070 | 22443.2 | 0.152 |
| | 平均值 | 89.786 | 22262.7 | 0.120 |
| 天然 | 1-12 | 107.359 | 22152.3 | 0.107 |
| | 1-13 | 155.261 | 27838.3 | 0.044 |
| | 1-14 | 172.251 | 28763.9 | 0.207 |
| | 平均值 | 144.957 | 26251.5 | 0.119 |

表3 不同含水状态下岩石的三轴抗压强度试验结果

| 试验结果 | 饱水状态 | | | | | 天然状态 | | | | |
|-----------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 1-05 | 1-01 | 1-02 | 1-03 | 1-04 | 1-12 | 1-08 | 1-09 | 1-10 | 1-11 |
| 试件编号 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 侧向应力(MPa) | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 轴向应力(MPa) | 88.420 | 136.053 | 166.143 | 145.213 | 164.487 | 107.359 | 135.653 | 229.823 | 161.954 | 198.309 |
| 弹性模量(GPa) | 22.358 | 30.767 | 27.662 | 21.713 | 29.490 | 22.131 | 24.783 | 31.450 | 23.548 | 30.402 |
| 泊松比 | 0.161 | 0.161 | 0.228 | 0.183 | 0.258 | 0.109 | 0.261 | 0.249 | 0.251 | 0.219 |
| 粘聚力(MPa) | 30.01 | | | | | 26.75 | | | | |
| 摩擦角 | 31.78 | | | | | 37.79 | | | | |

Photoscan中,将照片对齐拼接完整,建立密集点云,生成三维点云数据。根据实际测量的数据,建立边坡的三维几何模型。

2.2 有限元模型的生成及数值计算

在建立边坡三维几何模型之后,需要对模型进行网格划分,生成有限元模型后进行稳定性分析。本文选取Hypermesh有限元软件划分网格,并导入FLAC3D分析软件中对边坡体进行数值模拟计算。岩体的力学参数是影响数值模拟分析精度的主要因素,因此,在进行数值模拟时,需要选取实际岩体的力学参数进行计算,保证数值模拟的准确性。

3 陡峭边坡稳定性数值分析

3.1 工程概况

某地区节理高陡岩质边坡,边坡体

裸露部分恰好是临空区,风化严重,公路边坡现状如图2所示。该边坡的节理裂隙较多,从而导致经常发生落石事件,尤其是在雨季。边坡垂直高度为42.486m,基岩裸露,岩壁耸立,裂隙的长度大而且长。边坡坡脚的地方风化严重,节理将岩体切割成岩块。



a) 边坡体现场图

图2 高陡岩质边坡地形地貌

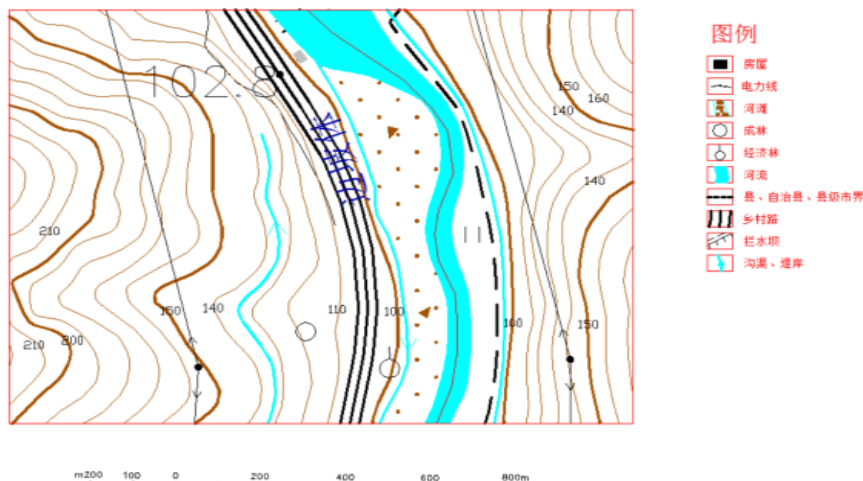


图2 高陡岩质边坡地形地貌

新华夏构造系及其它各种旋转变造、东西向构造体系及由它诱导出来的一组扭裂构成的北东向扭裂带, 走向SW-NE(北50°-60°东)构成的很密线性褶皱带和较多的断裂带^[13]。节理和断裂, 导致岩体的不完整性, 呈现大量的裂隙和结构面。

3.2 边坡体力学特性研究

3.2.1 天然密度及饱水密度

边坡岩体的力学性质需要通过试验来确定, 对边坡体进行钻芯取样, 样本尺寸为 $\varnothing 50\text{mm} \times 100\text{mm}$, 试验共取7组样本进行研究, 对每组样本进行天然密度与饱水密度试验, 试验结果见表1。

由表1可以看出, 此边坡体岩石的天然密度平均为 $2.630\text{g}/\text{cm}^3$, 饱水密度为 $2.630\text{g}/\text{cm}^3$ 。同时, 该地区处于中热带季风气候区, 阳光充足、雨量充沛, 边坡岩体呈现饱水和干燥的交替状态, 因此, 该边坡体的密度受水的影响不是很大。

3.2.2 岩石单轴试验

岩石单轴抗压强度是判断岩石强度的重要指标之一, 本文采用TAW2000岩石力学三轴仪、200吨压力传感器对天然状态及饱水状态下的岩体进行单轴试验, 试验结果见表2。

由表2可知, 天然状态下岩体的抗压强度平均值较高, 饱和含水状态下的强度值比天然含水状态下的强度值减了38.1%。观察岩石的破坏状态, 可以看出饱水状态下试块的顶部有一个破裂角, 裂缝从此处开始, 形成一条有一定倾斜角度的小裂缝一直延伸至试块的底部, 天然状态下岩石的主要裂缝大体上是与饱水状态下单轴试验出现的裂缝一致。其中某试块破碎情况特别严重, 整个试块几乎完全破碎。

为进一步分析该边坡体的单轴压缩力学特性, 根据试验数据绘制出不同含水状态下的岩体的全应力应变曲线, 如图3~图4所示。

由图3~图4可以看出, 饱水状态与天然状态下岩石的单轴压缩应力应变曲线走向基本一致, 纵向应变与体积应变较大, 导致试验过程中出现了贯通整个试件的纵向裂缝。

3.2.3 岩石三轴试验

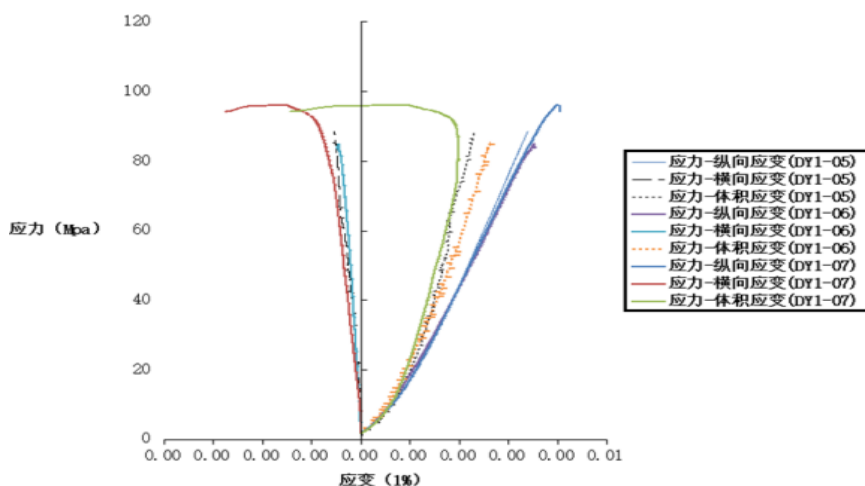


图3 饱水状态单轴压缩应力应变曲线

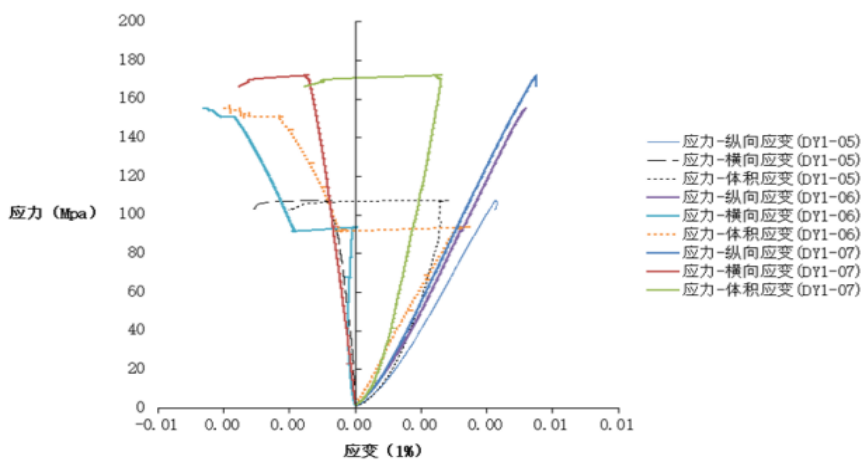
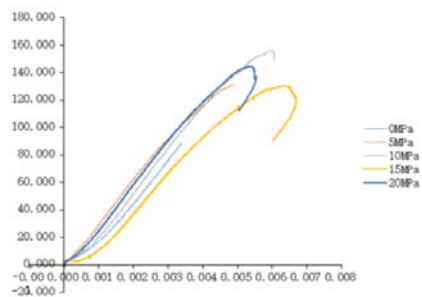


图4 天然状态单轴压缩应力应变曲线

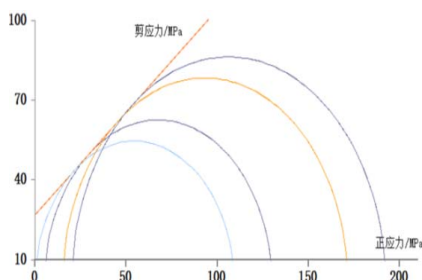
本文研究的坡体位置出露的地层从老到新有元古界的泥岩石和粉

砂岩 (Pt2), 中生界侏罗系的凝灰岩 (J3l, J3h1)。该地区主要为华夏构造系、

为了得到岩石在3向应力条件下的强度及变形特征,通过岩石三轴试验机对岩石强度进行研究,对试块分别施加围压0、5、10、15MPa,得到饱水状态及天然状态下岩石的三轴抗压强度,试验结果见表3,岩石三轴压缩应力-应变曲线如图5所示,不同状态的岩石强度包络线如图6所示。

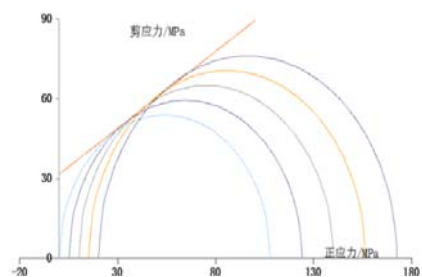


a) 饱水状态

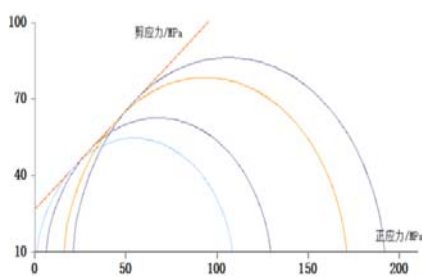


b) 天然状态

图5 不同状态的岩石应力-应变曲线



a) 饱水状态



b) 天然状态

图6 不同状态的岩石强度包络线

表4 不同含水状态下岩石抗拉强度试验结果

| 试样编号 | 含水状态 | 直径 D/(mm) | 高度 H/(mm) | 破坏荷载 (P/KN) | 抗拉强度 t/MPa | 抗拉强度平均值 |
|------|------|-----------|-----------|-------------|------------|---------|
| 1-1 | 饱水 | 50.053 | 25.882 | 21.79 | 10.708 | 12.106 |
| 1-2 | | 50.058 | 26.162 | 18.87 | 9.174 | |
| 1-3 | | 50.042 | 24.004 | 31.01 | 16.435 | |
| 1-4 | 天然 | 49.928 | 24.124 | 27.77 | 14.678 | 14.962 |
| 1-5 | | 50.000 | 26.392 | 31.01 | 14.960 | |
| 1-6 | | 50.047 | 23.934 | 28.69 | 15.248 | |

表5 岩体的物理力学参数

| 岩石名称 | 弹性模量 E (MPa) | 泊松比 μ | 密度 ρ (Kg/cm ³) | 粘聚力 C (MPa) | 内摩擦角 ($^{\circ}$) | 抗拉强度 σ t/MPa |
|------|--------------|-----------|---------------------------------|-------------|---------------------|---------------------|
| - | 26251.5 | 0.119 | 2630 | 26.75 | 37.79 | 14.962 |

由表3可知,在其他条件相同的情况下,岩石的天然状态三轴抗压强度比饱水状态的强度大,围压为10MPa时,两种状态下的轴向应力值相差最大,饱水状态下岩石的轴向应力值较天然状态减少了27.7%;试样在三轴压缩下的破坏跟单轴情况下类似,都是在上部分出现几条微小裂缝,其中一根成一定的角度,继续沿着轴向发展,直至贯穿整个试样。

3.2.4 岩石抗拉强度试验

岩石抗拉强度远远小于抗压强度,是岩石力学特性重要的指标之一,本文对饱水状态及天然状态的岩体进行抗拉试验,试验结果见表4。

由表4可知,试样在天然状态下的抗拉强度为14.962MPa,饱水状态下为12.106MPa,饱水状态的抗拉强度值比天然状态的缩小了19.1%;试样的抗拉强度远远小于其抗压强度,其抗拉强度大约占抗压的1/10。试件破坏时,首先是在端部形成较为细小的裂缝,随着拉力的增大,裂缝越来越大,从而将整个试样沿着直径方向一分为二。

3.3 建立岩体有限元模型

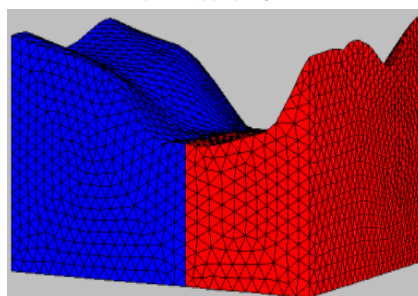


图7 计算模型的整体网格 (GROUP 1)

本文利用FLAC 3D软件,根据边坡体的实际地形地貌情况,模拟出所研究的边坡体。假设边坡体的底部是固定不动,边坡体不会沿着其左右方向产生位移,将沿着公路的一侧看成是自由边界,并根据上节试验结果设置模型参数,保证试验结果的准确性,边坡岩体物理力学参数见表5。Morh-Coulomb三维模型如图7所示,该模型的尺寸为:300m×245m×100m网络单元数总个数为6825个,节点数为30667个。

3.4 数值模拟结果分析

由于坡体为地表部分,地应力模拟仅考虑重力,因此,在坡体稳定性模拟计算中,采用摩尔-库伦模型。为了分析坡体表面的沉降状况,本文对坡体的位移状况进行了分析。以过点(130, 127, 108)做一个边坡的剖面,得到剖面的位移矢量图,如图8所示,最大主应力与最小主应力如图9~图10所示。

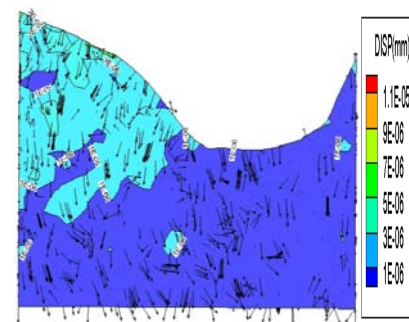


图8 坡体剖面位移矢量图

由于坡体中间低,两侧高,两侧坡体中部受到重力作用,表现出沉降,而坡脚处承受上部坡体重力作用的压力

和两侧坡体的压力,表现出向中间挤压,表明坡体潜在破坏发生在坡脚的挤压破坏。

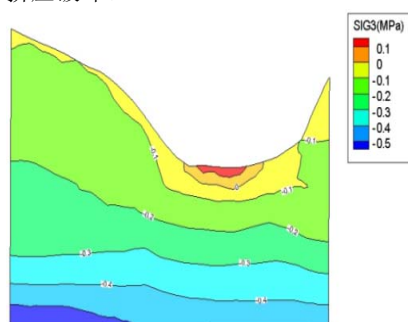


图9 最大主应力等值线

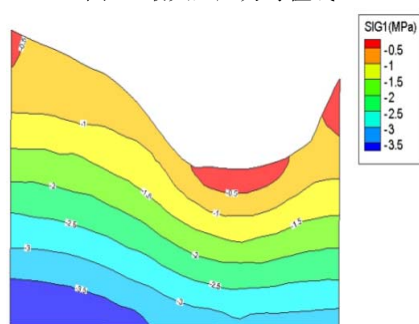


图10 最小主应力等值线

从图9和图10可以看出,坡面部分受到的最大主应力为拉应力,坡体底部受到的最大主应力为压应力;在坡脚处出现应力集中,坡体内部最大、最小主应力沿着坡面平行直至铅垂,表明坡体内部主要受到铅垂方向的压应力作用,体现受压屈服。

4 结论

通过以上分析,主要得到以下几个结论:

(1) 通过对压缩和拉伸试验对比发

现,边坡体岩石的抗压强度较大,而抗拉强度远远小于抗压强度。在现场调研和室内试验发现,边坡体存在着许多节理裂隙,因此,可以认为边坡体的破坏方式为拉伸破坏,水平拉应力对岩体产生重要的破坏作用。(2) 通过单轴和三轴试验对比发现,在其他条件相同的情况下,围压的强度增大,其轴向抗压强度随之增大。(3) 通过饱水状态和天然状态的试验对比发现,水的作用对岩体边坡的强度影响很大,这对边坡体工程具有重要的影响意义。雨水充足的地区,雨季及时排开边坡体的积水,对于边坡体的稳定性起着极大的作用。(4) 通过数值模拟计算可以发现,边坡体在x、y、z方向的位移量很小,而且该边坡体的安全系数1.99,因此,该边坡体整体处于稳定状态。

[参考文献]

- [1] 贾东远,阴可,李艳华.岩石边坡稳定性分析方法[J].地下空间,2004,24(2):250-256.
- [2] 刘红丹,毛朝亮,关永平.边坡稳定性分析方法及数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2010,8(3):101-103.
- [3] Yingzi Xu, Jian Li, Haoran Fan, et al. Stability Analysis of Clastic Rock Slope with Mudstone Interlayer Under Rainfall Infiltration[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2017,35(4):1871-1883.
- [4] N.Dadashzadeh, H. S. B. Duzgun, N.Yesiloglu-Gultekin.Reliability-Base

d Stability Analysis of Rock Slopes Using Numerical Analysis and Response Surface Method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2017,50(8):2119-2133.

[5] 陈云生,孟繁贺.基于三维地质建模的高速公路边坡数值分析[J].路基工程,2018,(1):52-56.

[6] 吴少燕,邹思萌.无人机倾斜摄影技术在矿山测绘中的应用[J].世界有色金属,2019,(11):18-20.

[7] 王明,李丽慧,廖小辉,等.基于无人机航摄的高陡/直立边坡快速地形测及三维数值建模方法[J].工程地质学报,2019,27(5):1000-1009.

[8] 徐岗,裴向军,袁进科.基于无人机摄影技术的高陡危岩体调查分析[J].公路,2019,5(5):175-181.

[9] 王琳,吴正鹏,姜兴钰.无人机倾斜摄影技术在三维城市建模中的应用[J].测绘与空间地理信息,2015,(12):30-32.

[10] 王丙涛,王继.基于倾斜摄影技术的三维建模生产与质量分析[J].城市勘测,2015,(5):80-82.

[11] 朱国强,刘勇,程鹏正.无人机倾斜摄影技术支持下的三维精细模型制作[J].测绘通报,2016,(9):151-152.

[12] 王春祥,李晓,盛庆伟.航空摄影测量学:非摄影测量专业用[M].黄河水利出版社,2011.

[13] 王丙涛,王继.基于倾斜摄影技术的三维建模生产与质量分析[J].城市勘测,2015,(5):80-82.