

引用本文:刘均利,廖恒彬,张炳辉.基于BIM技术的岩溶发育区岩质高陡边坡稳定性分析[J].建筑科学与工程学报,2022,39(5):274-283.  
LIU Jun-li, LIAO Heng-bin, ZHANG Bing-hui. Numerical Simulation of Stability of High and Steep Rock Slope in Karst Development Region with BIM Technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(5): 274-283.

DOI:10.19815/j.jace.2021.06063

# 基于BIM技术的岩溶发育区岩质高陡边坡稳定性分析

刘均利<sup>1</sup>,廖恒彬<sup>1</sup>,张炳辉<sup>1,2</sup>

(1. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院,广西 桂林 541004;  
2. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室,广西 桂林 541004)

**摘要:**为解决岩溶发育区岩质高陡边坡研究中特殊地质情况无法可视化表达,以及在复杂地质情况下边坡稳定性分析的数值模拟模型与实际情况不匹配、分析结果不够精确等问题,提出了利用BIM技术对岩溶发育区岩质高陡边坡进行建模并通过多种有限元方法进行对比验证及分析的解决方案。以桂林市兴安至阳朔公路延长线工程K5+420~K5+740段为工程背景,通过地质勘察、钻孔电视、赤平投影和取样试验得到岩土体强度参数等数据,采用钻孔建模与剖面建模相结合的混合建模方法,创建该段边坡BIM三维数字地质模型,将精细化的BIM模型通过布尔运算剖切最不利剖面,无损导入有限元分析软件,并通过有限元分析方法以及摩根斯坦-普拉斯法对该段边坡工程从自然工况到支护加固工况的稳定性及失稳过程进行分析,提高了计算效率和精度。分析了边坡在各种工况下的安全系数、位移及应变云图,查明了边坡在自然工况下易失稳破坏的原因,并进行了支护后再验算。结果表明:在复杂地质情况下构建三维地质模型并结合有限元分析方法进行边坡稳定性分析,其安全系数达到稳定标准;该研究提高了边坡工程效率,并为边坡工程的设计及施工提供了技术支持和科学依据。

**关键词:**岩溶发育区;岩质高陡边坡;BIM;有限元分析

中图分类号:U417

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)05-0274-10

## Numerical Simulation of Stability of High and Steep Rock Slope in Karst Development Region with BIM Technology

LIU Jun-li<sup>1</sup>, LIAO Heng-bin<sup>1</sup>, ZHANG Bing-hui<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil and Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that special geological conditions such as high and steep rock slopes in karst development region couldn't be visualized, and the numerical simulation model didn't match the actual situation in the slope stability analysis under complex geological conditions, and the analysis results were not accurate enough, a solution method was proposed to use BIM technology to model the high and steep rock slopes in the karst development area, and to

收稿日期:2021-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(52068016);广西科技计划项目(2020GXNSFAA297118)

作者简介:刘均利(1978-),男,山东泰安人,副教授,工学博士,E-mail:417214056@qq.com.

comparatively verify and analyze by the variety of finite element methods. Taking the K5+420-K5+740 section of the Xing'an-Yangshuo highway extension project in Guilin city as the engineering background, the data such as rock and soil strength parameters were obtained through geological survey, drilling TV, stereographic projection and sampling experiments. The hybrid modeling method combining borehole modeling and profile modeling was adopted to create the BIM three-dimensional digital geological model of the slope. The refined BIM model was cut into the most unfavorable section through Boolean operation, and imported into the finite element analysis software without damage, and through the finite element analysis method and Morgenstern-Price method to analyze the stability and instability process of the section of slope engineering from natural conditions to support and reinforcement conditions. Through the comparison and verification of the two methods, the calculation efficiency and accuracy of the finite element analysis method were improved. At the same time, the safety factor, displacement and strain cloud of the slope under various working conditions were analyzed, the causes of instability and failure of the slope under natural working conditions were found out, and the checking calculation was carried out after support. The results show that by constructing the three-dimensional geological model and combining the finite element analysis method to analyze the slope stability under the complex geological conditions, the safety factor reaches the stability standard. The study improves the efficiency of slope engineering and provides technical support and scientific basis for the design and construction of slope engineering.

**Key words:** karst development region; high and steep rock slope; BIM; finite element analysis

## 0 引言

公路边坡失稳时有发生,严重影响公路的安全运营,尤其是岩溶发育区岩质高陡边坡,岩体溶洞、裂隙强烈发育,地下水丰富,使得岩质边坡的稳定性更为复杂<sup>[1-2]</sup>。

传统二维地质图纸对特殊地质状况的表达不够清晰,数据的遗漏、丢失、存储问题有待解决<sup>[3-4]</sup>。目前地质建模方法大多是由二维平面拓展而成,通过相邻剖面之间对应的轮廓线连接网来模拟地质形态,若是遇到复杂地质情况,相邻剖面之间轮廓线的结合往往会出现剖面“打架”的现象<sup>[5]</sup>。随着工程建筑的大规模发展,边坡工程的空间形态和地质条件越来越复杂,地质勘察的精度和广度受到实际条件的限制,边坡体内的应力状态也存在明显的空间差异性,因此传统的边坡数值模型的稳定性分析结果不足以反映真实情况<sup>[6-8]</sup>。同时地质工程师用软件模拟分析出来的结果又无法以数字化技术存储和传递,极大地降低了地质工程领域的工作效率,不便于实际工程的应用。这些“痛点”问题长期困扰着诸多学者,成为他们迫切攻克的目标<sup>[9-11]</sup>。

通过引入 BIM (Building Information Modeling) 技术,结合地质学、几何学、拓扑学与计算机图

形学等领域的相关理论与技术,形成三维地质建模方法,可更直观、全面地展示地质特征与地质现象,推测未知地质信息。通过岩溶发育区岩质高陡边坡 BIM 模型,既能从宏观上判断工程地质体的特性,又能从微观上揭示地质体的内部构造、空间复杂变化等<sup>[12-13]</sup>。苏学斌等<sup>[14]</sup>采用地层/岩性混合地质建模方法,对含铀砂层非连续发育的砂岩型铀矿床地质结构进行了表达,并与岩性建模方法进行对比,验证了混合地质建模方法能够显著提高建模的精度。该方法是通过算法来实现未知地质情况的表达,算法的精确度还有待校正,而且该模型还难以灵活地修改剖面,导入分析软件步骤繁琐。

BIM 技术与边坡工程的结合主要体现在构建三维数字地质模型。将地质勘察等各类信息整合到三维模型中,可以更加直观、准确、完整地展示地质情况,同时能对该地区地质情况进行全方位剖析,通过对比找到最危险二维地质剖面,实现对地质勘察资料的数据采集、复杂地质的三维可视化建模、分析与设计一体化应用<sup>[15-18]</sup>。陶志刚等<sup>[19]</sup>基于太平矿业长山壕露天金矿,构建复杂地质体高精度耦合的 BIM 模型,并将模型导入 FLAC3D 软件,分析西南采场边坡失稳破坏的原因,并提出以恒阻大变形锚索为核心的边坡加固方案,与原支护方案进行对比

研究,验证了新方案具有良好的加固效果。

本文提出一种岩溶发育区岩质高陡边坡三维地质建模与有限元数值模拟相结合的方法。首先建立岩溶发育区岩质高陡边坡的三维数字地质模型(BIM模型),精确反映复杂地质构造,然后采用布尔运算对BIM模型进行多次剖切,根据赤平投影找到最不利剖切面并建立二维有限元模型,最后采用有限元方法对边坡多种工况下的稳定性进行分析。本研究能够更好地反映地质构造,更准确地进行地质表述,并通过数值模拟分析边坡各工况下的稳定性,为公路工程的安全运营提供保障。

## 1 工程背景

桂林市兴安县至阳朔县公路延长线工程K5+420~K5+740段开挖后形成高65m的边坡,坡度为 $63^{\circ}\sim 73^{\circ}$ ,如图1所示。通过4个工程勘探孔ZK1~ZK4勘察发现,地层从上到下可以分为黏性土、破碎土层、砾岩、灰岩。其中,地表以下5~10m岩体较破碎,以破碎土层和黏性土为主,属较软~较硬岩;地表以下10~20m岩体裂隙中等发育,岩体较完整,以灰岩和砾岩为主,为坚硬~较硬岩。各岩层力学参数如表1所示。

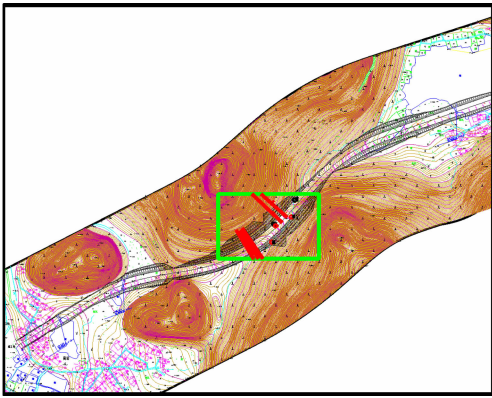


图1 福利路高陡边坡段示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of High and Steep Slope Section of Fuli Road

表1 公路高陡边坡岩土基本参数

Table 1 Basic Geotechnical Parameters of Highway High and Steep Slope

岩层	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$
砾岩	28.0	12 000.00	42.50	62 000	0.20
灰岩	23.5	14 730.00	38.43	32 000	0.25
破碎土层	18.5	37.50	16.00	50 000	0.35
第四系人工堆积层	19.5	32.50	15.00	30 000	0.38

## 2 岩体结构面类型及发育特征

通过钻孔电视勘察,查明各孔内的岩体裂隙发育情况,对4个钻孔内岩体的规模、产状、岩层类型、力学性质等特征进行了详细的调查和研究,如下:

(1)断层:里程K5+620附近发育一条北西走向的挤压断层,倾向北东方向,倾角 $50^{\circ}$ ;断层面埋深1~6m,厚度0.1~0.5m,充填断层泥,其附近分布一定厚度的断层角砾岩。

(2)层间错动面:受断层影响,主断层面附近岩层发生了局部层间错动,错动距离为5~20cm,充填有黏性土或岩土碎块,其岩层产状较陡。

(3)构造裂隙:受断层构造运动影响,地表以下5m范围内岩体破碎;5m以下的构造裂隙一般发育,构造裂隙倾角较陡,一般大于 $65^{\circ}$ ,主要构造裂隙的走向与主断层走向基本一致,为北西方向,产生于断层构造运动的挤压作用,裂隙延伸深度一般在20m左右,局部可达30m。ZK3附近的岩体裂隙为岩溶水通道,受溶蚀影响其张开度较大,除ZK3孔附近外,其余地段的构造裂隙张开度较小,裂隙宽度一般不超过3cm。

(4)岩体溶蚀特征:场地裂隙闭合程度较高,岩层透水性差,岩溶水运动不畅,且地下水位较低,其水位高程一般在140m以下,岩体溶蚀动力主要来源于季节性降雨,故场地岩层溶蚀程度总体不高,5m以下裂隙面的溶蚀作用轻微,裂隙面铁质氧化物渲染较为明显。岩体溶蚀主要发生在岩面和岩溶水通道的裂隙面,偶有小型溶孔溶洞发育于ZK3附近,溶洞发育高度为1.0~1.7m,均为浅层溶洞,充填软塑状黏性土。场地岩溶水通道发育于ZK1孔附近,该处裂隙溶蚀现象明显,如图2所示,其中H为钻孔深度。

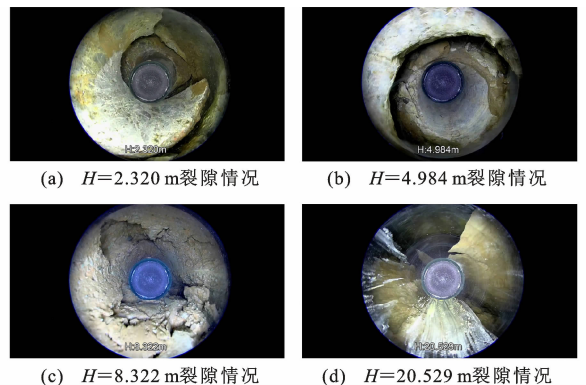


图2 ZK1钻孔电视勘察图

Fig. 2 ZK1 Borehole TV Survey Map

上述地质情况极有可能发生地质灾害,存在极大的安全隐患,因此需要进一步的分析验算。

### 3 BIM 的应用及建模流程

#### 3.1 技术路线

主要技术流程为:①依据 IFC(Industry Foundation Class)标准,通过构件参数约束和逻辑约束建立三维地质信息模型;②以三维模型为载体,运用布尔运算拾取最不利边坡剖面模型;③将边坡模型导入有限元分析软件,在不同工况下检验其稳定性,通过综合分析提出边坡治理方案;④将各阶段的数据上传至数据管理系统,可在不同维度上对成果进行展示,也可嵌入边坡稳定性监测与预警系统用于公路运营阶段边坡失稳预警。技术路线图如图 3 所示。

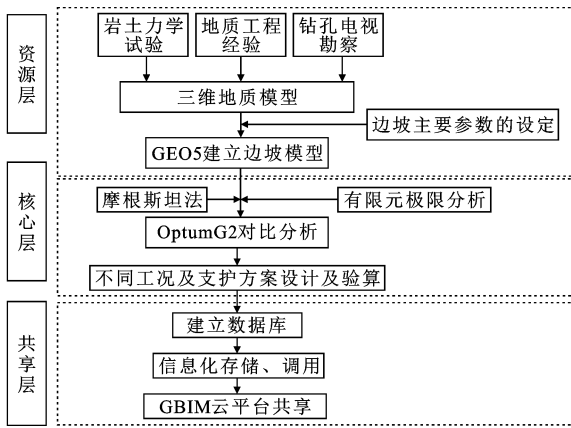


图 3 边坡 BIM 应用流程

Fig. 3 Slope BIM Application Process

#### 3.2 边坡三维数字地质模型的创建

采用 GEO5 进行三维地质建模,如图 4 所示,其过程分成地形建模和地质建模。地形建模是将高程点或等高线数据以 \*. dxf 或 \*. dwg 格式导入,生成地形模型,但该模型不包括岩体结构面及发育特征。

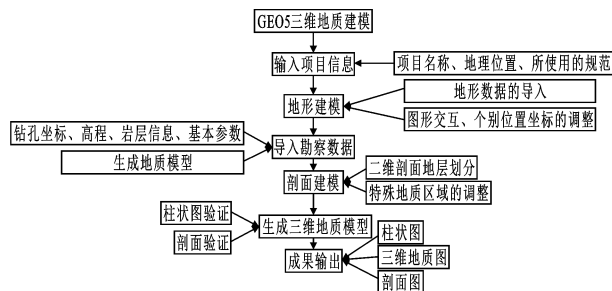


图 4 地质建模流程

Fig. 4 Geological Modeling Process

在地层建模之前需要对钻孔数据进行检查和预

处理,筛选出主要地层进行建模,以消除自动建模逻辑错误造成的不兼容。地层建模的属性信息包括高程点、等高线、坡度、坡向等,在坐标系中将地面形态以及空间位置特征使用数字坐标描述。需要注意的是在剖面建模时地层的深度不宜过小,否则会导致后期网格划分时网格点和网格线距离过小,使分析结果与实际情况有偏差。

地质建模采用钻孔数据和剖面数据混合建模。其中,钻孔数据建模需要将地质勘察数据导入其中,然后设置一个尽可能容纳所有地层的层序控制孔,以便建模时钻孔能够更好地兼容。此外还可添加特征钻孔对未探测位置的地形进行局部精细化设计,然后对其他参与建模的所有钻孔添加虚拟层,使所有钻孔处于激活状态,参与三维建模。剖面建模需要在二维工作界面完成,允许工程师依据工程经验在工作界面自定义地层线和断面线对特殊地质进行表达,使三维地质模型更加精确。决定复杂地质建模精确度的几个关键环节包括:

(1)断层及层间错动:通过软件中地质剖面模块进行表达。将勘察所得具有特殊地质特性的 ZK1 添加至剖面上,由勘察信息确定断层及层间错动的方向、角度、深度、厚度及填充材料,结合地质工程师对实际地质情况的了解,逐一添加地层多段线,并在添加地层面中将多段线定义为断层或层间错动,对未识别多段线的区域,还可以针对区域指定新的地层。

(2)构造裂隙及岩体溶洞溶蚀:通过生成地质模型模块对已知钻孔的连接顺序进行调整,达到兼容状态参与建模。根据钻孔取样试验对裂隙中的填充物进行岩土基本参数的调整,达到能够参与后期有限元分析的要求。特殊地质表达如图 5 所示,最终生成的边坡模型如图 6 所示。

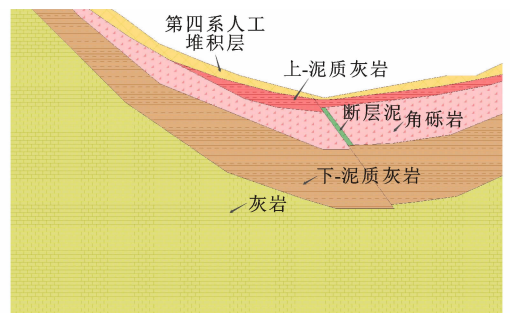


图 5 断层及层间错动

Fig. 5 Faults and Interlayer Dislocation

### 4 有限元分析

根据赤平投影结果对三维数字地质模型研究区

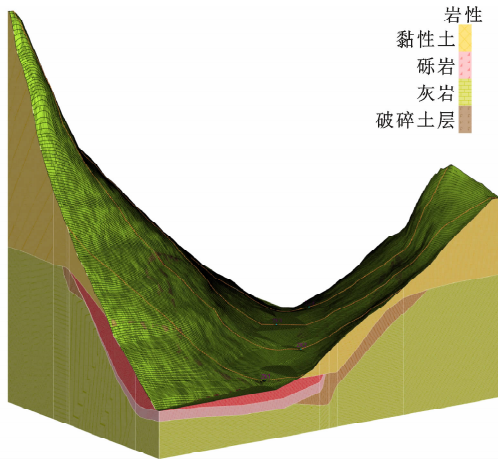


图6 边坡地质模型

Fig. 6 Slope Geological Model

域内的剖面进行剖切,观察剖面的地层分布、岩土属性和连续情况,根据地质工程师经验,选择最不利剖面建立二维边坡模型,如图7所示。分别采用 OptumG2(以下简称 G2)有限元极限分析方法<sup>[20-22]</sup>和摩根斯坦-普拉斯法(Morgenstern-Price 法)<sup>[23-25]</sup>进行对比分析。

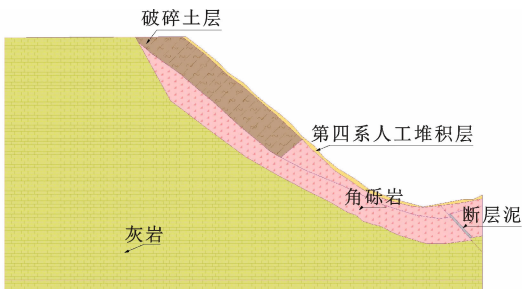


图7 最不利剖面模型

Fig. 7 Most Unfavorable Section Model

#### 4.1 G2 有限元分析方法

有限元极限分析方法采用理想塑性模型,研究材料达到极限状态时的力学关系,通过不断降低材料强度(按照一定的比例降低岩土黏聚力、内摩擦因数)或增大荷载,求出材料的极限荷载或稳定安全系数,同时也能够求解材料中的破坏形态。该方法不需要预先知道潜在滑动面,也不需要知道滑动面上的滑动力与抗滑力,就可以计算出潜在滑动面位置和安全系数。对于实际工程的岩土强度与稳定问题而言,目的就是要求出潜在滑动面位置和安全系数,传统极限分析就能够满足实际工程的计算精度要求,没有必要引入本构关系,从而化繁为简<sup>[26-27]</sup>。

有限元强度折减法的基本原理是将坡体强度参数黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  的正反切值同时除以一个折减系数  $F_{\text{trial}}$ ,得到折减后的  $c'$ 、 $\varphi'$  值[式(1)],然后

作为新的资料参数输入,再进行试算,当计算不收敛时,对应的  $F_{\text{trial}}$  被称为坡体的最小稳定安全系数,此时坡体达到极限状态,发生剪切破坏,同时可得坡体的破坏滑动面位置,以及位移、塑性应力和应变值,能够针对性的分析边坡失稳破坏的原因<sup>[28-31]</sup>。

$$c' = \frac{c}{F_{\text{trial}}}, \varphi' = \arctan\left[\frac{\tan(\varphi)}{F_{\text{trial}}}\right] \quad (1)$$

G2 有限元分析方法是有限元极限分析方法和有限元强度折减法相结合。先进行有限元极限分析,得到材料的极限荷载和安全系数,然后对其进行有限元强度折减迭代计算,当边坡进入失稳状态时停止计算,得到边坡失稳破坏的位移、应变、应力云图。2种方法的结合既能减少计算时间,又能得到边坡破坏的位移、塑性应变和应力值,同时满足实际工程与科学研究的需要。

##### 4.1.1 数值分析设置

将最不利边坡模型导入 G2 后,材料类型采用 Mohr-Coulomb 模型,输入各岩层基本参数,再对模型各地层进行岩层信息的赋予。根据郑颖人边坡与滑坡工程治理<sup>[24]</sup>中对有限元法计算模型的边界界定,取坡脚到左端边界的距离为坡高的 1.5 倍,坡顶到右端边界的距离为坡高的 2.5 倍,且上下边界总高不低于 2 倍坡高,建立有限元模型。根据模型和实际地质条件确定边界条件为:模型左右边界施加水平约束,底部边界施加完全约束,模型顶端及边坡部分为自由边界。采用网格自适应的方法建立三角形单元,并对网格进行平滑处理,如图7所示,单元数量为 11 423,节点数量为 3 861。

对于特殊地质而言,G2 中的裂隙可以表征岩体结构面及土体内部裂隙等,但这并不是岩土体的竖向拉张裂缝。对于断层而言,在 G2 中一般采用剪切节理的方式来模拟,剪切节理是夹在两种材料之间无限薄的另一种材料。对于裂隙而言,在 Mohr-Coulomb 模型中实体模块选择定义 1 个或 2 个面,输入参数。需要注意的是,该步骤的倾角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为从水平面逆时针转向竖直面角度,如图8所示。特殊地质面参数如表2所示。图9为模型自适应网格划分。

##### 4.1.2 分析结果

对结果提取水平向位移云图、竖向位移云图、总位移云图及塑性应变图(图10)进行分析,得到边坡的安全系数为 0.79(小于规范所定的 1.35),可知边坡处于失稳状态。图10中深色区域即为位移发生区域,颜色越深,位移越大。

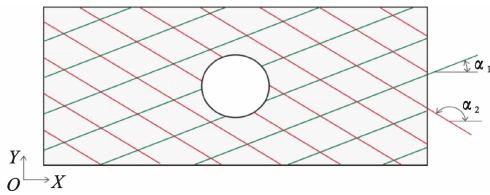


图 8 倾角示意图

Fig. 8 Schematic Diagram of Inclination

表 2 特殊地质岩土基本参数

Table 2 Basic Parameters of Special Geology Rock

岩层	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	倾角 $(\text{°})$
裂隙	10	20	70
断层	0	20	50

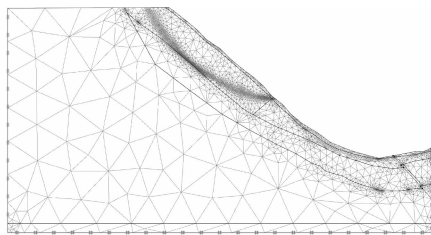


图 9 模型自适应网格划分

Fig. 9 Model Adaptive Mesh Generation

从图 10(a)可以看出,在自重工况下,破坏面形状大致呈圆弧状,最大横向位移出现在距离坡脚 35 m 的位置,最大位移达到 1 m,位移变形集中于边坡的破碎土层堆积处。从图 10(b)可以看出,在 Y 方向上,边坡整体均存在向下移动的趋势,其中竖向位移的最大值出现在坡顶处,为 0.312 m。从图 10(c)可以看出,在 XY 方向上,最大位移达到 1.03 m,而且在破碎土层和黏性土之间出现了贯通的塑性区,有相对滑移的趋势,这是重点关注的支护区域。从图 10(d)可以看出,塑性应变沿破碎土层、黏性土与砾岩层交界面分布,形成局部塑性应变集中带。结合以上分析可知,边坡在破碎土层和黏性土、角砾岩交界处的位移最大,该处边坡失稳破坏主要受到岩体溶蚀、构造裂隙、层间错动的影响较大,极有可能沿着岩层交界处发生剪切-滑出现象。在钻孔附近的断层和裂隙由于处在谷底位置,没有向外发展剪切-滑出破坏的趋势,在自重条件下没有向外发展的趋势,因此对上部边坡的稳定性影响不大。

#### 4.2 摩根斯坦-普拉斯法对比验证

为了验证 G2 有限元分析的准确性,采用摩根斯坦-普拉斯法对该边坡的安全系数进行稳定性验算。

该方法基本流程与 G2 有限元分析近似。在搜索最不利圆弧滑面时,需要在边坡模型上绘制任意

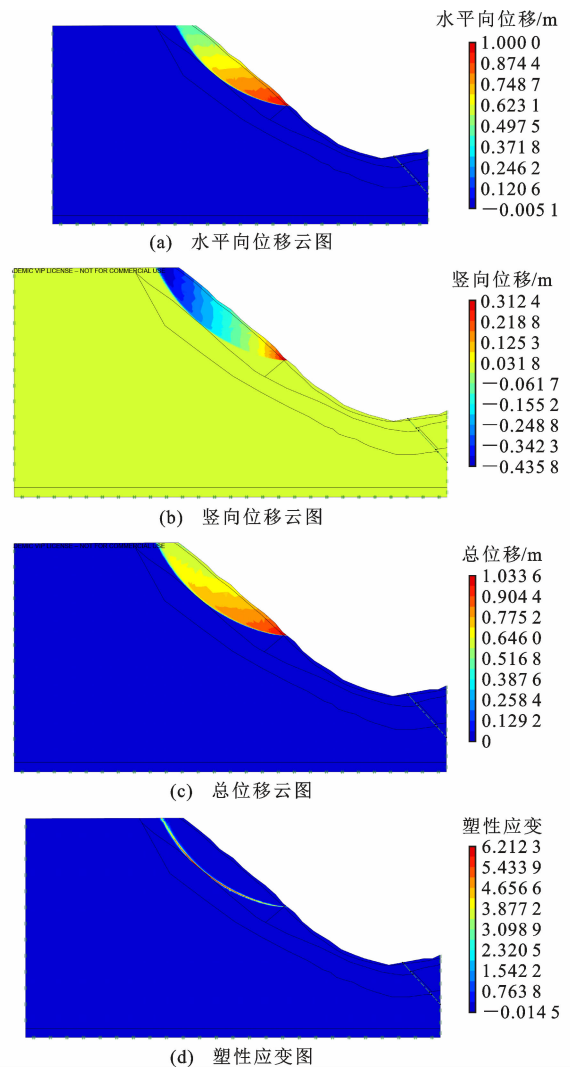


图 10 自然工况下的位移及应变等值云图

Fig. 10 Displacement and Strain Contour Map Under Natural Conditions

曲线滑动面,这里需要注意的是绘制任意滑动面时需要贯穿整个边坡,而且要避免所画圆弧出现反倾。由图 11 可以看出,边坡安全系数为 0.8,不满足要求,且安全系数小于规范所定的 1.35,说明边坡在天然工况下处于不稳定状态,易发生边坡滑移事故。

综上,摩根斯坦-普拉斯法分析结果与G2有限

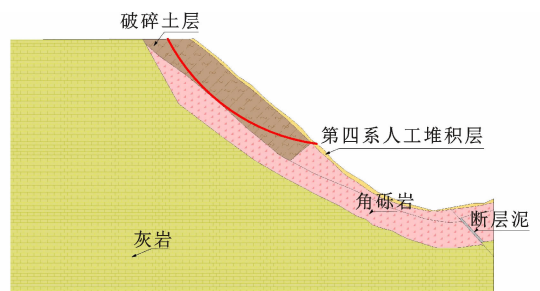


图 11 边坡稳定性分析结果

Fig. 11 Slope Stability Analysis Results

元分析结果近似相等,验证了有限元极限分析方法的准确性。

## 5 边坡治理措施的分析

由上述分析可知,在自然工况下的边坡不稳定需要进行处治。根据地质地形特征,结合项目区域地质灾害特点及工程治理经验,采用削坡和锚杆相结合的方式进行处理。

### 5.1 削坡处理

挖方边坡每 10 m 设置一级平台,平台宽度 1.5 m,挖方路段设置碎落台,碎落台宽度 1.5 m。前三级使用 0.3 的坡率进行放坡,后坡全部采用 0.5 边坡坡率进行放坡。在第一级边坡坡顶处设置被动防护网,用于防治坡面碎石落到行车道上,边坡坡顶处设置被动防护网,用于防治坡顶落石。在距被动防护网 5 m 处设置截水沟,以防止边坡被雨水径流冲刷,确保边坡稳定。

### 5.2 削坡分析结果

削坡后采用有限元极限分析方法得到边坡安全系数为 0.536,仍处于失稳状态,且产生了从第 5 级边坡到坡顶的塑性贯通区域(图 12),有可能发生剪切-滑出破坏,且最大位移出现在第 5 级边坡处,因此对削坡后的边坡采用锚杆支护进行加固。

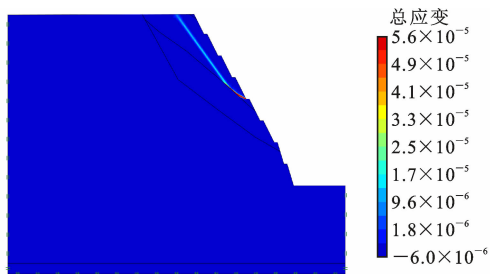


图 12 削坡稳定性分析图

Fig. 12 Stability Analysis Diagram of Cutting Slope

### 5.3 边坡支护方案

根据削坡后的有限元分析结果,采用如下边坡处治方案:①在第 1 级边坡坡顶处设置被动防护网,防止坡面碎石落到行车道上;②在距离被动防护网 5 m 外处设置截水沟,以防止边坡被雨水径流冲刷;③第 5~8 级边坡范围采用锚杆挂网喷混凝土防护措施,锚杆布置为 2.5 m(行距)×2.5 m(排距),呈梅花状布设,单根锚杆长  $L=3\sim 18$  m(具体视开挖后节理裂隙发育特征确定),设计锚孔孔径  $\phi 90$ ,锚杆入射角(俯角)为  $20^\circ$ ,锚筋采用  $\phi 25$  钢筋,锚杆孔内灌注 M30 水泥砂浆或纯水泥浆,钢筋网采用  $\phi 6.5$  钢筋,网度  $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ ,喷射细混凝土厚度为

8 cm,混凝土强度等级为 C20,挂网边缘用  $\phi 18$  钢筋,锚固长度为 1 m,将钢筋网固定;④局部坡面岩石较完整地段采用 C20 素混凝土进行 5 cm 的喷锚防护。

### 5.4 锚杆支护分析结果

支护后的边坡稳定分析结果如图 13 所示,边坡安全系数达到 1.405,满足规范要求。经过支护后边坡的最大 X 方向位移为 0.796 6 m,Y 方向位移为 0.1 m,XY 方向总位移为 0.797 m,但在位移云图中可以看出,边坡位移云图整体颜色较浅,实际边坡整体 X 方向位移只有 0.16 mm,Y 方向位移为 0.38 mm,XY 方向总位移几乎为 0;同时借助该软件对边坡失稳破坏的模拟,发现边坡在支护工况下没有发生剪切-滑出破坏,变形极小,将位移云图的显示范围调至最大发现,最大位移发生在坡面处,对整体边坡稳定性影响不大。

可见,锚杆支护极大地约束了边坡的侧向位移,有效平衡边坡的滑动力,限制了有效塑性区域的发展,提高了边坡的整体稳定性。

## 6 结语

(1)结合 BIM 技术,通过剖面建模与钻孔建模混合方法建立的三维数字地质模型具有以下优势:①该方法是一种新的数据经验融合建模的方法,发挥了有限地质勘察数据的最大价值,弥补了只靠二维剖面或钻孔信息建模的单一性,为地质建模提供了新的思路;同时也解决了传统建模相邻轮廓线之间混乱识别、建模精度等难题;②混合建模方法可以准确表达特殊地质情况,实现对模型任意位置的剖切观察,与传统二维图纸相比,该方法对地质结构的描述及可视化方面都有着巨大的优势,同时也能为三维空间内部信息统一储存、汇总提供了渠道。

(2)三维地质数字模型与有限元数值分析方法结合,使得三维数字地质模型在表达特殊地质情况的同时还能够应用于有限元极限分析,模拟边坡的失稳过程,通过摩根斯坦-普拉斯法验证有限元极限分析的准确性,提高有限元极限分析方法的可靠程度和计算效率,对工程应用具有重要的指导意义。

(3)在未知潜在滑动面的情况下,可以通过 G2 有限元分析方法模拟边坡失稳破坏情况,得到潜在滑动面位置、安全系数、位移及应力应变,分析边坡失稳破坏的原因,提出针对性治理方案。该项目岩溶发育区岩质高陡边坡在自然工况下安全系数为 0.79,削坡工况下安全系数为 0.536,经过支护加固

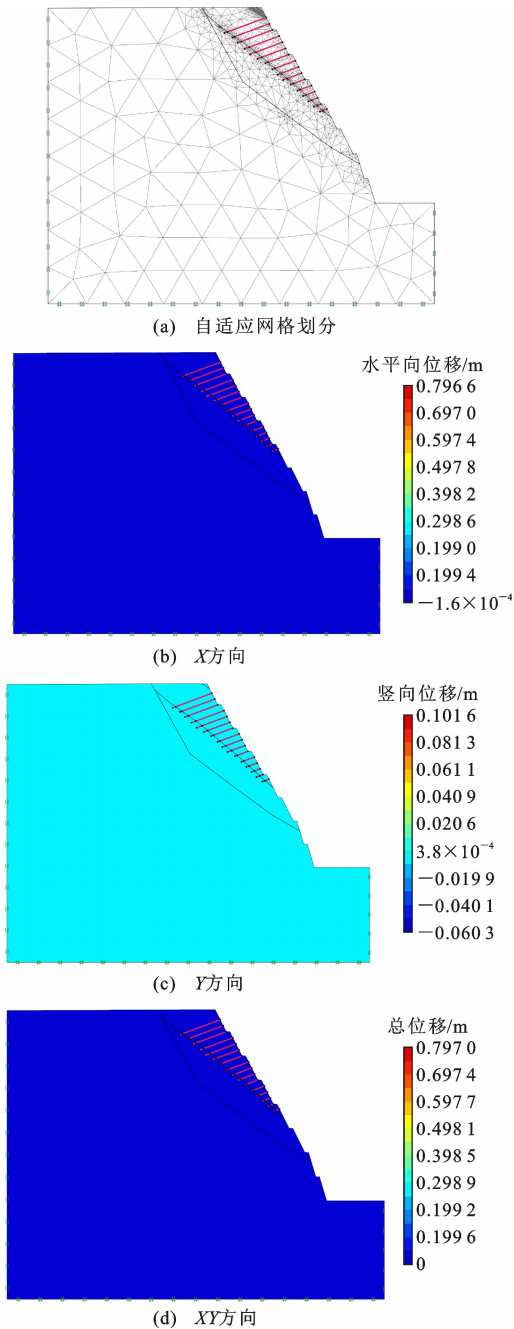


图 13 支护后网格划分及位移云图

Fig. 13 Mesh Generation and Displacement Nephogram After Support

后边坡的安全系数达到 1.405,此时边坡处于稳定状态,位移也由 1.03 m 减小至 0.16 mm,可见此支护方案对边坡稳定性起到显著效果。通过该方法对特殊地质情况的边坡进行分析,提出合理、准确、直观的评价,为边坡设计施工提供了依据,具有广泛的应用前景。

## 参考文献:

## References:

[1] 谢艳华,张炳晖,孙刚臣,等. 桂林阳朔如意峰景区 A4

救生平台基础岩体稳定性分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4):584-591.

XIE Yan-hua, ZHANG Bing-hui, SUN Gang-chen, et al. Stability of Foundation Rock Mass Beneath the A4 Rescue Platform in the Ruyifeng Scenic Spot, Yangshuo, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 584-591.

[2] 刘宝臣,潘宗源,郑金. 桂林市喀斯特危岩体发育特征及稳定性分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 183-189.

LIU Bao-chen, PAN Zong-yuan, ZHENG Jin. Development Characteristics and Stability Analysis of Karst Dangerous Rock Mass in Guilin City[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(1):183-189.

[3] 郑颖人,赵尚毅,孔位学,等. 极限分析有限元法讲座: I 岩土工程极限分析有限元法[J]. 岩土力学, 2005, 26(1):163-168.

ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, KONG Wei-xue, et al. Geotechnical Engineering Limit Analysis Using Finite Element Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1):163-168.

[4] 范文遥,曹梦雪,路来君. 基于 GOCAD 软件的三维地质建模可视化过程[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24):9771-9778.

FAN Wen-yao, CAO Meng-xue, LU Lai-jun. Visualization Process of 3D Geological Modeling Based on GOCAD Software[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24):9771-9778.

[5] 姚翔川,郑俊杰,章荣军,等. 岩土工程 BIM 建模与仿真计算一体化的程序实现[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(5):134-139.

YAO Xiang-chuan, ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, et al. Program Implementation of BIM Modeling and Simulation Integration in Geotechnical Engineering[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(5):134-139.

[6] 陈根深,郭绪磊,刘刚,等. 宜昌长江南岸岩溶流域典型区三维地质建模[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(2):1-8.

CHEN Gen-shen, GUO Xu-lei, LIU Gang, et al. 3D Geological Modeling in Typical Area of Karst Basin on the South Bank of the Yangtze River in Yichang City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26(2):1-8.

[7] 潘炜,刘大安,钟辉亚,等. 三维地质建模以及在边坡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4):597-602.

PAN Wei, LIU Da-an, ZHONG Hui-ya, et al. 3D Geo-

- logical Modeling and Its Application to Slope Engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 597-602.
- [8] 朱瑞, 闫汝华, 任云峰, 等. 基于三维高密度电法的地质 BIM 模型应用研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 31(5): 2264-2273.  
ZHU Rui, YAN Ru-hua, REN Yun-feng, et al. Research of Geological BIM Model Based on 3D Electrical Resistivity Tomography[J]. Progress in Geophysics, 2021, 31(5): 2264-2273.
- [9] 侯恩科, 吴立新, 李建民, 等. 三维地学模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4): 388-392.  
HOU En-ke, WU Li-xin, LI Jian-min, et al. Study on the Coupling of 3D Geoscience Modeling with Numerical Simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4): 388-392.
- [10] 陈东. 某高速公路下边坡稳定性分析及支护方案研究[J]. 公路工程, 2020, 45(1): 114-116, 167.  
CHEN Dong. Study on Stability Analysis and Support Scheme of Lower Slope of a Highway[J]. Highway Engineering, 2020, 45(1): 114-116, 167.
- [11] 翁正平. 复杂地质体三维模型快速构建及更新技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.  
WENG Zheng-ping. Fast Building and Refreshing Three-dimensional Models of Geological Entity[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [12] 孙建诚, 朱双晗, 蒋浩鹏. BIM 技术在公路边坡的应用探究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 63-67.  
SUN Jian-cheng, ZHU Shuang-han, JIANG Hao-peng. Application of BIM Technology to Highway Slope[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(9): 63-67.
- [13] 刘尚蔚, 黄竟颖, 魏群, 等. 山区桥梁工程边坡与基岩 BIM-Dynamo 数据处理方法研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 74-81.  
LIU Shang-wei, HUANG Jing-ying, WEI Qun, et al. Research on BIM-Dynamo Data Processing Method for Slope and Bedrock of Bridge Engineering in Mountainous Area[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 74-81.
- [14] 苏学斌, 祝晓彬, 翁海成, 等. 混合地质建模方法刻画复杂含铀砂层地质结构[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(3): 212-219, 227.  
SU Xue-bin, ZHU Xiao-bin, WENG Hai-cheng, et al. Coupling Geological Modeling for Complicated Sandstone-type Uranium Deposit[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(3): 212-219, 227.
- [15] 吴志春, 郭福生, 张万良, 等. 江西乐安相山火山盆地多源数据融合三维地质建模[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(2): 310-322.  
WU Zhi-chun, GUO Fu-sheng, ZHANG Wan-liang, et al. 3D Geological Modeling Based on Multi-source Data Merging of Xiangshan Volcanic Basin in Le'an of Jiangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2020, 40(2): 310-322.
- [16] 姜逢宇, 黄牧, 熊自明, 等. 基于平面网格求交算法的三维地质模型边界面重构方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1724-1732.  
JIANG Feng-yu, HUANG Mu, XIONG Zi-ming, et al. Method of Boundary Reconstruction of 3D Geological Model Based on the Algorithm for Intersection of Planar Meshes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1724-1732.
- [17] 韩林, 蔡永昌. 基于 ArcGIS 的矿山边坡自动建模稳定性分析研究[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(6): 148-152.  
HAN Lin, CAI Yong-chang. Automatic Numerical Modeling and Stability Analysis of Mining Slope Based on ArcGIS[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(6): 148-152.
- [18] 李庶林, 赵睿鸣, 彭府华, 等. 基于强度折减法的高陡边坡滑坡治理稳定性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 120-126.  
LI Shu-lin, ZHAO Rui-ming, PENG Fu-hua, et al. Stability Analysis of Treatment of High-steep Slope Landslide Based on Strength Reduction Method[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 120-126.
- [19] 陶志刚, 任树林, 庞仕辉, 等. 大型复杂露天矿边坡三维建模方法及加固对策研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(4): 397-408.  
TAO Zhi-gang, REN Shu-lin, PANG Shi-hui, et al. Study on 3D Modeling Method and Reinforcement Scheme of Large and Complex Open-pit Mine[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(4): 397-408.
- [20] 何毅, 余军炎, 袁冉, 等. 考虑坡顶倾角的土质裂隙边坡稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 45-54.  
HE Yi, YU Jun-yan, YUAN Ran, et al. Stability Analysis of the Soil Slope with Cracks Considering the Upper Slope Inclination[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 45-54.

- [21] 韩爱民,李建国,傅国利,等. 基于有限差分强度折减法的多级边坡破坏模式研究[J]. 工程地质学报, 2007,15(6):784-788.  
HAN Ai-min, LI Jian-guo, FU Guo-li, et al. Numerical Analysis of Failure Modes in Slopes with Multi-steps Using Shear Strengthen Reduction FDM[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(6):784-788.
- [22] 彭文哲,赵明华,肖尧,等. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析及最优桩位的确定[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020,47(5):23-30.  
PENG Wen-zhe, ZHAO Ming-hua, XIAO Yao, et al. Stability Analysis of Anti-slide Pile Reinforced Slope and Determination of Optimal Pile Position[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5):23-30.
- [23] 何保,宋帅. 基于GeoStudio的边坡稳定性分析及支护方案选择的理论探讨[J]. 地质与勘探, 2019, 55(5):1329-1335.  
HE Bao, SONG Shuai. Theoretical Analysis of Slope Stability and Support Scheme Selection Based on Software GeoStudio[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5):1329-1335.
- [24] 陈祖煜,弥宏亮,汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001,23(5):525-529.  
CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A Three-dimensional Limit Equilibrium Method for Slope Stability Analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5):525-529.
- [25] 陈昌富,朱剑锋. 基于Morgenstern-Price法边坡三维稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(7):1473-1480.  
CHEN Chang-fu, ZHU Jian-feng. A Three-dimensional Slope Stability Analysis Procedure Based on Morgenstern-Price Method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7):1473-1480.
- [26] 郑颖人. 岩土数值极限分析方法的发展与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(7):1297-1316.  
ZHENG Ying-ren. Development and Application of Numerical Limit Analysis for Geological Materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7):1297-1316.
- [27] 郑颖人,赵尚毅,邓楚键,等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12):39-61,112.  
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Chu-jian, et al. Development of Finite Element Limit Analysis Method and Its Applications in Geotechnical Engineering [J]. Engineering Science, 2006, 8(12):39-61, 112.
- [28] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002,4(10):57-61,78.  
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Slope Stability Analysis by Strength Reduction FEM [J]. Engineering Science, 2002, 4(10):57-61, 78.
- [29] 许江波,郑颖人,赵尚毅,等. 有限元与极限分析法计算桩后推力的分析与比较[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9):1380-1385.  
XU Jiang-bo, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. Comparison and Analysis of Landslide Thrust by Use of Finite Element and Limit Analysis Methods [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9):1380-1385.
- [30] 郑颖人,陈祖煜,王恭先. 边坡与滑坡工程治理[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2010.  
ZHENG Ying-ren, CHEN Zu-yu, WANG Gong-xian. Engineering Treatment of Slope & Landslide [M]. 2nd ed. Beijing:China Communications Press, 2010.
- [31] 蒋德松,胡可馨,赵明华,等. 岩溶区路基承载力有限元极限分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020,40(4):596-605.  
JIANG De-song, HU Ke-xin, ZHAO Ming-hua, et al. Effect of Rotation Angle of Voids on the Bearing Capacity of Subgrade by Using Finite Element Limit Analysis [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4):596-605.