

# 岩溶发育条件下加筋土工格栅对路基变形的防治效果分析

易清曦<sup>1\*</sup>, 刘泽<sup>1</sup>, 何瑾<sup>2</sup>, 汤中华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖南科技大学, 土木工程学院, 湖南 湘潭

<sup>2</sup>浙江交工国际工程有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年1月4日; 录用日期: 2024年2月20日; 发布日期: 2024年2月29日

## 摘要

采用FLAC<sup>3D</sup>建立岩溶路基模型, 分析了溶洞发育过程中路基的变形规律和采用加筋进行处治的作用与影响因素。结果表明: 溶洞顶板和路基顶面竖向位移会随溶洞跨度的增加而增大, 当溶洞跨度达到一定程度后路基会发生沉陷破坏; 在路基内加筋土工格栅能有效减弱溶洞发育对路面沉降的影响, 且在提高路基稳定性的同时使得路基具有了一定的沉陷预警能力; 筋材宜布置在路基底部, 增加加筋层数和减小加筋间距对控制溶洞发育引起的路面沉降有明显影响。

## 关键词

岩溶路基, 土工格栅, 数值模拟

# The Preventive Effect of Reinforced Geogrids on Roadbed Deformation under Karst Development Conditions

Qingxi Yi<sup>1\*</sup>, Ze Liu<sup>1</sup>, Jin He<sup>2</sup>, Zhonghua Tang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil Engineer, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

<sup>2</sup>Zhejiang Jiaogong International Engineering Co. Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Jan. 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: Feb. 20<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

A karst roadbed model was established using FLAC<sup>3D</sup>, and the deformation law of the roadbed

\*通讯作者。

文章引用: 易清曦, 刘泽, 何瑾, 汤中华. 岩溶发育条件下加筋土工格栅对路基变形的防治效果分析[J]. 土木工程, 2024, 13(2): 190-199. DOI: 10.12677/hjce.2024.132022

during the development of karst caves and the effect and influencing factors of reinforcement treatment were analyzed. The results show that the vertical displacement of the top plate of the karst cave and the top surface of the roadbed will increase with the increase of the karst cave span. When the karst cave span reaches a certain degree, the roadbed will undergo settlement and damage; Reinforcing geogrids inside the roadbed can effectively reduce the impact of karst cave development on road settlement, and improve the stability of the roadbed while giving it a certain degree of settlement warning ability; reinforcement materials should be arranged at the bottom of the roadbed, and increasing the number of reinforcement layers and reducing the spacing between reinforcements have a significant impact on controlling road settlement caused by karst cave development.

## Keywords

Karst Roadbed, Geogrid, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地下溶洞发育是岩溶地区路基面临的最重要安全隐患，如何有效处理溶洞带来的潜在病害、保障道路交通安全是岩溶地区工程建设的重要内容。

土工织物加筋法作为一种常见的加固措施，在路基加固、加宽等工程中已经得到广泛应用[1] [2] [3] [4]，在岩溶地区路基的应用也越来越常见。贾庆荣[5]通过模型试验和数值分析发现，在对岩溶路基采取土工格栅加固后，路面处的竖向位移明显减小，整体变形减小了约 69.57%，可以有效确保了道路的安全。吴迪[6]、李晓[7]、吴建建[8]等通过试验研究了土工织物在岩溶路基防治方面的机理。贺炜[9]等通过模型试验分析了岩溶路基在多层加筋防治时加筋体的变形特征，并提出了相应的设计流程；王洪芳对土工加筋体防治岩溶路基塌陷开展了理论与试验研究，认为合理设定加筋体的加筋层数与加筋间隔可以有效地控制岩溶路基的塌陷与沉降[10]。然而，现有研究主要集中在固定溶洞尺寸条件下，对溶洞发育造成溶洞跨度增大条件下的加筋防治效果研究还非常少。

为了进一步探索加筋土工合成材料在岩溶路基处治中的作用与机理，本文基于 FLAC<sup>3D</sup> 建立岩溶路基模型，通过调整溶洞尺寸以模拟溶洞的发育过程，分析溶洞发育过程中路基的变形失效规律和加筋土工格栅的作用，为今后岩溶区路基工程处治措施的选择提供参考。

## 2. 方案设计

枣庄高新区的地基中存在大量溶洞，这些溶洞大小不一、埋藏深度不均。现有勘探表明，该区域路基下见洞率约为 21%，部分区域见洞率达 50%，多为全充填溶洞及半充填溶洞，而且该地下水较丰富，溶洞在水流作用下极易相互沟通形成大洞，严重影响该地区道路工程的长期安全性。为保证道路工程的品质，避免道路因地下溶洞发育而造成突发性沉陷，工程设计时拟采用土工格栅加筋对该地区的路基进行预防性处治。为了分析这一措施的效果，本文拟以此为背景进行溶洞发育条件下路基的处理技术研究。

以依托工程为基础，采用 FLAC<sup>3D</sup> 构建如图 1 所示的分析模型。模型的尺寸为：20 m × 2 m × 8 m，主要由地基和路基两部分组成，地基中存在一个初始尺寸为 1 m (宽) × 2 m (高) 的土质溶洞，溶洞顶板距地基表面为 2 m；路基部分的厚度为 2 m。计算时，路基和地基均采用摩尔—库伦本构模型，其基本物

理参数见表 1。当采用加筋土工格栅进行处治时，土工格栅设置在路基填土内。土工格栅采用 FLAC<sup>3D</sup> 内置的 Geogrid 单元模拟，其基本参数见表 2。

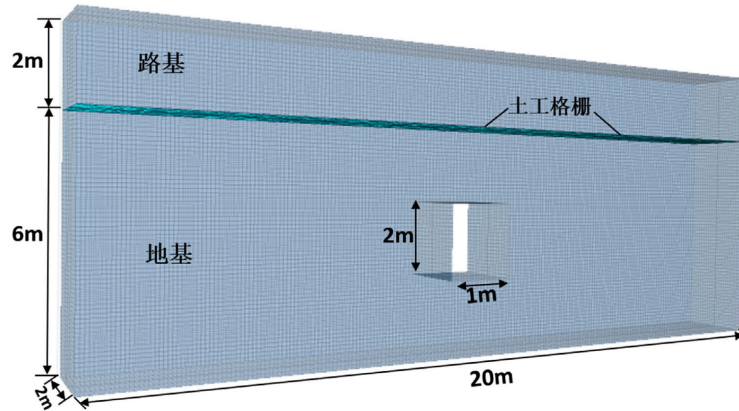


Figure 1. Schematic diagram of roadbed model  
图 1. 路基模型示意图

Table 1. Model calculation parameters  
表 1. 模型计算参数

名称	干密度/(kg/m <sup>3</sup> )	体积模量/kPa	剪切模量/kPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/°
地基	2100	1700	7700	23	25
路基	1900	1400	6400	15	24

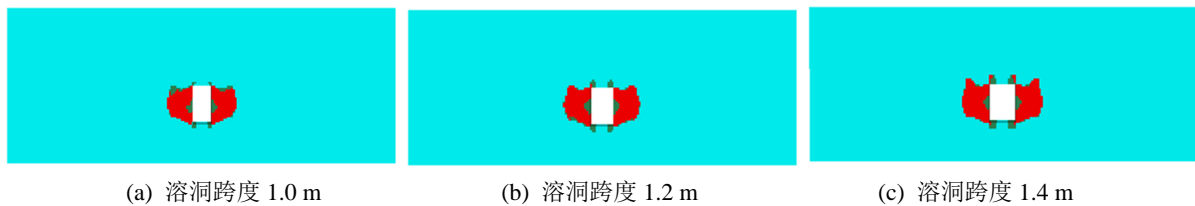
Table 2. Calculation parameters of geotechnical materials  
表 2. 土工材料计算参数

类别	厚度/mm	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量/MPa	界面剪切模量/(MPa/m)	界面摩擦角/°
土工格栅	5	11	0.3	2600	2.36	30

假定溶洞以两侧对称扩大的方式进行发育。计算时，通过循环语句 loop 使溶洞两侧按 0.1 m 的增幅逐渐增大其跨度以模拟溶洞的发育，当计算不收敛时停止溶洞发育模拟。考虑到实际工程中路面通常会有车辆行人等作用，分析时在模型顶面施加 20 kPa 的等效交通荷载。

### 3. 溶洞发育对路基稳定性影响

图 2 为不同溶洞跨度下模型的剪应变增量云图。其中红色区域为正处于剪切屈服状态的区域，绿色区域为曾达到剪切屈服而当前未达到剪切屈服的区域。由图 2(a)中可以看到，当溶洞跨度为 1.2 m 时，模型内的塑性区范围较小且主要分布在溶洞附近；随着溶洞跨度增大，塑性区范围不断增大并逐渐向上发展；当溶洞跨度发育到 2.0 m (图 2(f))时，溶洞周边塑性区开始加速向上发展。当溶洞跨度进一步发育至 3 m 时，溶洞上方的塑性区与路基顶面的塑性区贯通，从而造成溶洞上方土体发生塌陷。



(a) 溶洞跨度 1.0 m

(b) 溶洞跨度 1.2 m

(c) 溶洞跨度 1.4 m

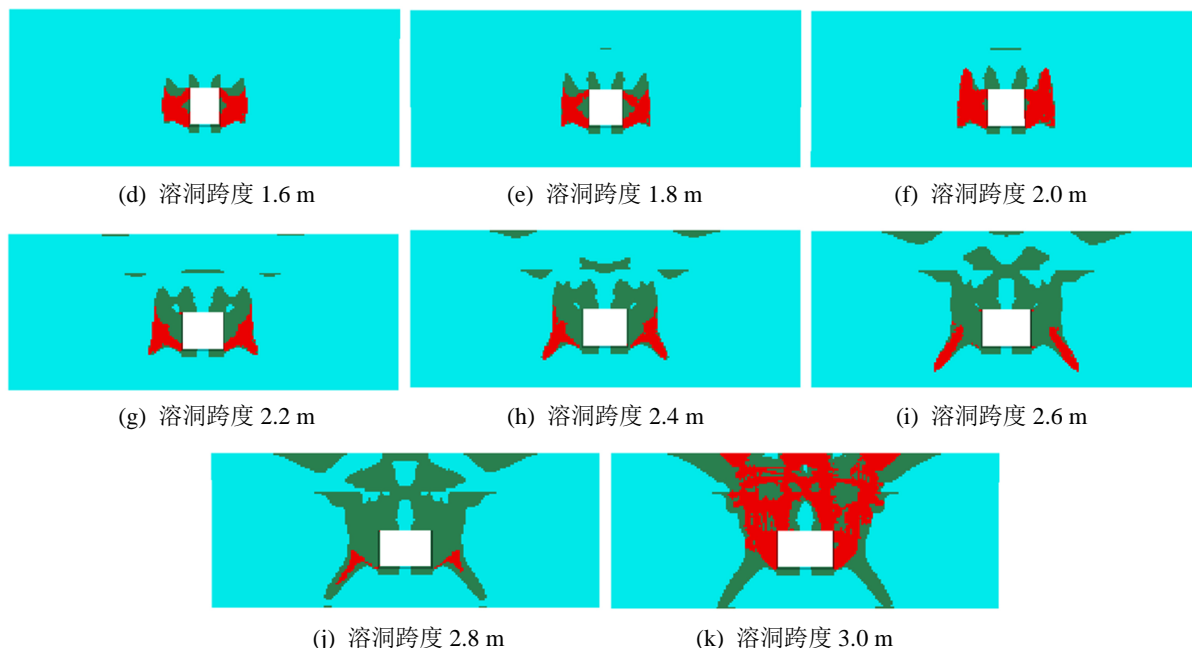


Figure 2. Cloud map of model shear strain increment for different cave spans

图 2. 不同溶洞跨度时模型剪切应变增量云图

受溶洞影响，溶洞顶板和路基顶面均会产生竖向变形(沉降)。图 3 是溶洞顶板最大位移和路基顶面最大位移随溶洞跨度发育的变化图。从图中可以看到，随着溶洞跨度增加，溶洞顶板和路基顶面的位移量随之增大；在溶洞发育过程中，相同跨度下溶洞顶板中心的位移要大于路基顶面位移，且随着溶洞跨度增大两者的差值也增大。当溶洞跨度由 2.6 m 扩大到 2.8 m 时，溶洞顶板和路基顶面竖向位移都产生了明显的骤增，前者由 0.035 m 骤增至 0.058 m，后者由 0.029 m 骤增到 0.048 m，该过程计算最终收敛，模型并未发生完全破坏。但当溶洞的跨度进一步发育到 3.0 m 时，计算不再收敛，模型发生塌陷。

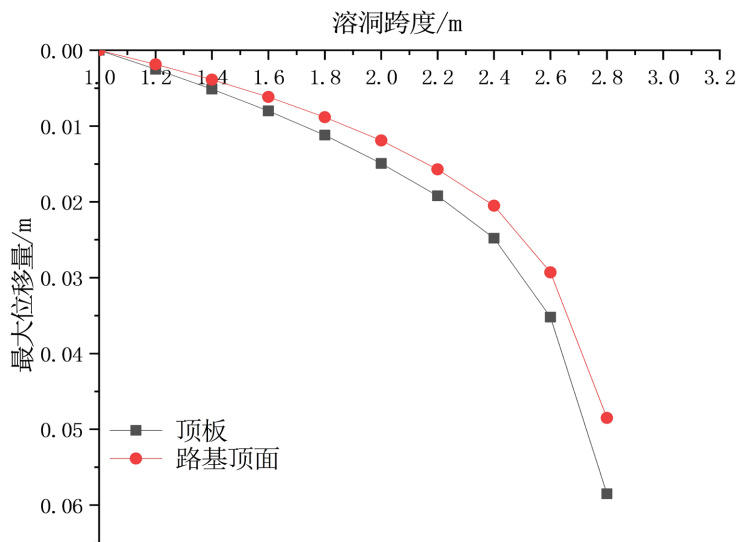


Figure 3. Comparison diagram between displacement of roadbed top surface and displacement of karst cave top plate

图 3. 路基顶面位移与溶洞顶板位移对比图

## 4. 加筋对岩溶路基稳定性的影响

### 4.1. 加筋对岩溶路基变形的控制作用

将 FLAC<sup>3D</sup> 内置的土工格栅单元设置在路基底部，再次进行溶洞发育模拟。图 4 为加筋后路面最大竖向位移量随溶洞跨度增加的变化曲线图。分析可知，加筋后的路基也会随着地基中溶洞的发育而下沉变形，下沉量随溶洞跨度的增加而增大，但当溶洞跨度发育到 3.0 m 时后计算仍收敛，至到跨度为 3.2 m 时路基才发生失稳破坏，相比于未加筋的路基而言，加筋后路基能承受的最大溶洞跨度由 2.8 m 增大到了 3.0 m，增大了 0.2 m，表明路基的稳定性和整体承载力得到了提升。

为了对比，在图 5 中也加入了未加筋路基的沉降曲线。对比两条曲线可知，当溶洞跨度小于 2 m 时，两条曲线基本重合；随着溶洞跨度继续增大，两条曲线开始分离，相同跨度下加筋后的路基顶面最大位移曲线要比未加筋路基小，表明筋材发挥作用了，对路基的沉降变形起到约束作用；当溶洞的跨度由 2.8 m 发育到 3.0 m 时，未加筋的模型失稳破坏，而加筋后的路基最大竖向变形量虽然有了明显的骤增，但路基没有沉陷破坏，路面最大竖向位移量达到了 0.25 m，此时路基顶面(路面)可以看到明显的沉降痕迹，这种变形为道路维护提供明显的病害征兆，可以达到预警效果。

可见，加筋处治措施不仅可以提高岩溶路基的稳定性，还可以使得原本将发生突发性沉陷破坏的路基具有一定的预警性，这对于运营期间路基的安全有着重要意义。

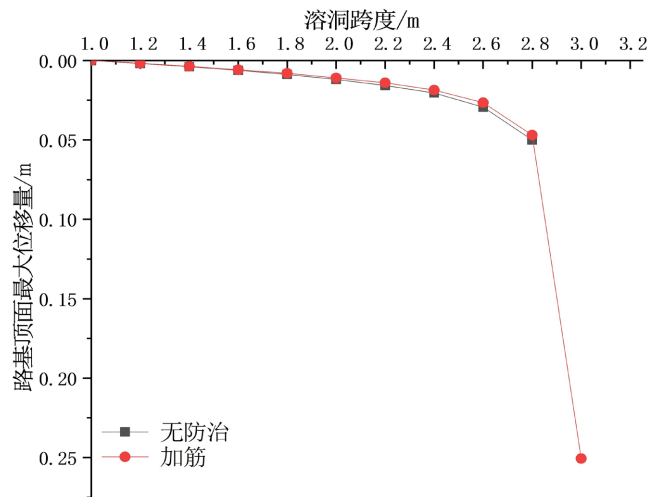


Figure 4. Comparison of maximum displacement of roadbed top before and after reinforcement

图 4. 加筋前后路基顶面最大位移量对比

图 5 为溶洞发育增大过程中土工格栅的变形发展曲线。首先分析土工格栅的竖向位移曲线(图 5(a))。由图可见，由于溶洞的存在，溶洞上方的土体因缺乏支撑而产生下沉，土工格栅则因其两端压住而被土体锚固而发挥类似网兜的作用，减少了上方土体的下沉位移，土工格栅则受土体重力影响而受拉，且随着溶洞跨度增大，溶洞顶板下沉量增大，土工格栅的网兜效应越明显，竖向位移越大，也表明土工格栅受到拉力越大。再分析图 5(b)所示水平位移变化曲线。图中水平位移以向右为正、向左为负。可见，位于溶洞中心线处的节点的位移始终为 0，这是由于模型具有对称性，该点只产生竖向变形，而其土工格栅的其它节点都以溶洞中心线为对称轴，产生指向溶洞的位移，且随着溶洞跨度增加，位移量增大，产生位移的节点增多，表明土工格栅承受的拉应力越来越大，当溶洞跨度达到 3 m 时，土工格栅所有节点均已产生位移，表明土工格栅有被拔出的风险。

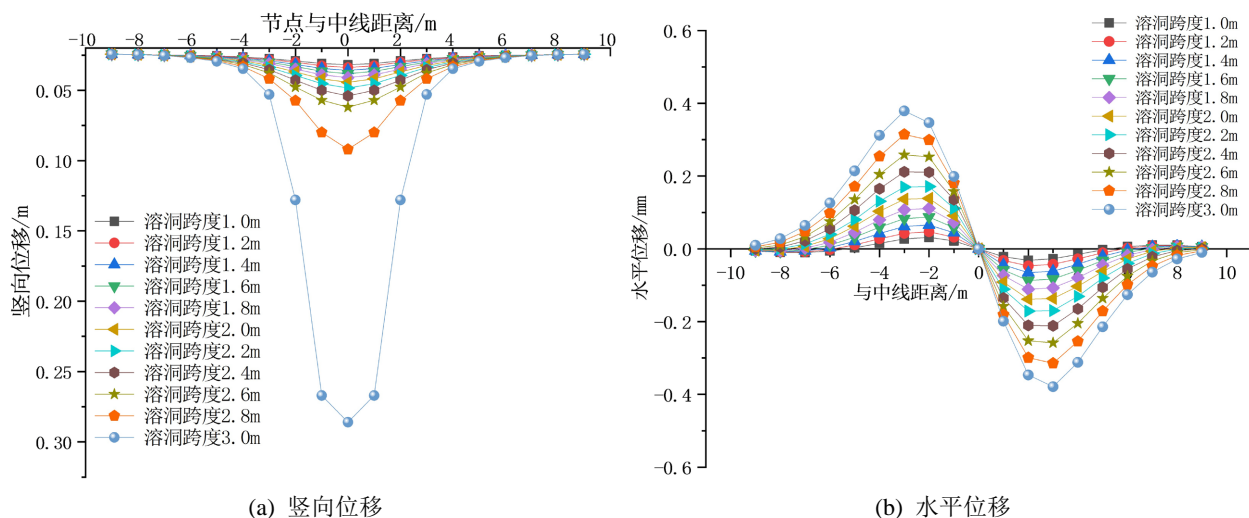


Figure 5. Monitoring of grid nodes during karst cave development  
图 5. 溶洞发育时格栅节点监测

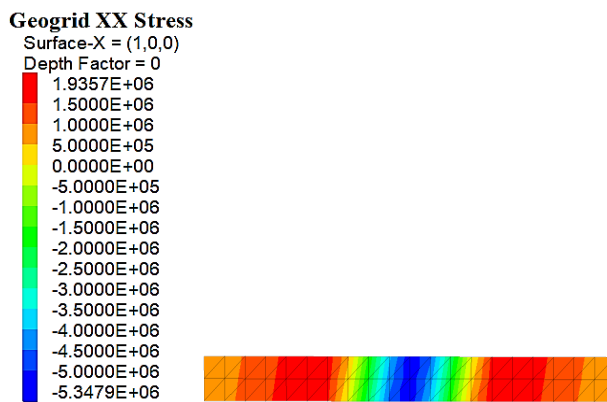
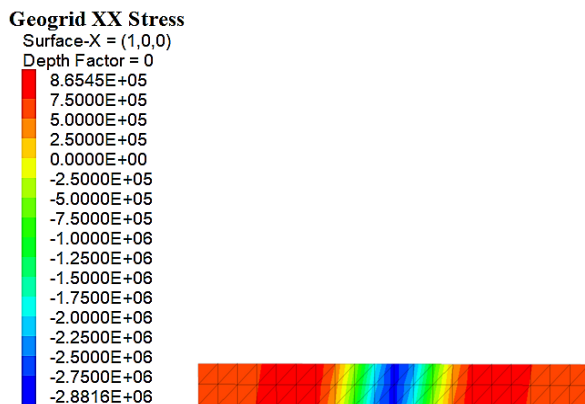


Figure 6. Cloud map of tensile stress distribution in geogrids  
图 6. 土工格栅拉应力分布云图

图 6 为溶洞跨度为 1.2 m 和 3 m 时土工格栅的拉应力分布云图。可以看到，土工格栅的受拉区域主要集中在溶洞正上方的长度范围，随土工格栅节点距溶洞中心线距离的增加，土工格栅上的拉应力逐渐



减小。当溶洞的跨度逐渐发育增大时，格栅上的拉应力逐渐增大，受拉范围也逐渐增大。

图 7 为不同溶洞跨度下土工格栅的最大拉应力发展曲线。随着溶洞跨度的增加，格栅上的最大拉应力逐渐增大，在溶洞跨度为 2.6 m 时，格栅上最大应力达到了 5.8 MPa，当溶洞跨度继续发育到 3.0 m 这一过程中最大拉应力反而呈减小趋势。而由图 5 中可以看到，当溶洞由 2.6 m 发育到 2.8 m 时，靠近溶洞中线位置的土工格栅产生了大幅度的竖向位移增量，而远离溶洞中线的土工格栅单元也有了较大的水平位移增量，表明土工格栅在溶洞上方土体重力作用下有被拔出的风险，从而使得土工格栅受到的拉应力出现减小。

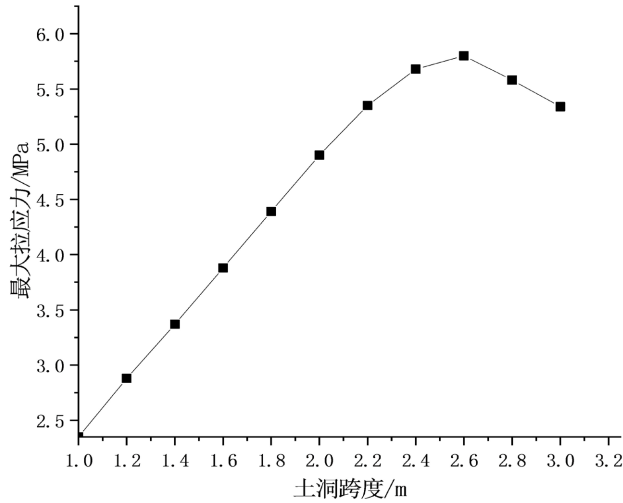


Figure 7. Development curve of maximum tensile stress of geogrid  
图 7. 土工格栅最大拉应力发展曲线

#### 4.2. 加筋参数对位移控制的影响

##### 1) 筋材弹性模量的影响

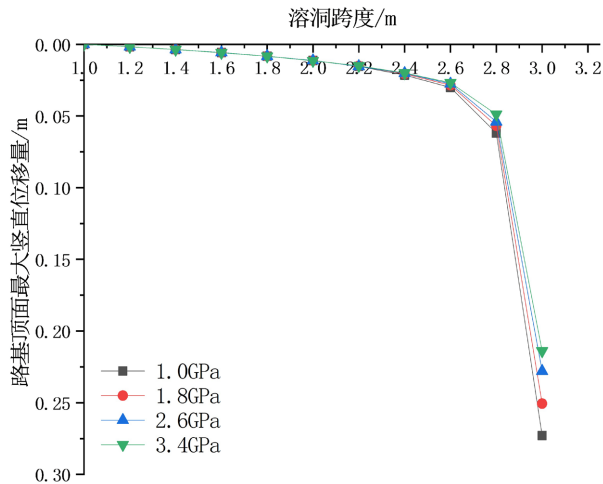


Figure 8. The effect of elastic modulus of reinforcement material  
图 8. 筋材弹性模量的影响

以 4.1 节的数值模型为依据，将土工格栅的弹性模量依次调整为 1 GPa、1.8 GPa、2.6 GPa、3.4 GPa

等再进行计算。计算结果见图 8。分析可知,在溶洞跨度发育到 2.6 m 之前,各条曲线基本重合,当溶洞跨度进一步增大后,曲线开始分离,筋材的弹性模量越大,路基沉降越小,但差值并不是很大。

### 2) 筋材布置位置的影响

再以 4.1 节的模型为基础,将土工格栅布置在路基中的不同位置(分别为距模型顶面 0.2 m、1 m、1.8 m、2 m)再进行数值计算,以研究筋材的布置位置对于路基位移控制效果的影响,计算结果见图 9。可见,在溶洞跨度为 2.6 m 之前,土工格栅的布设位置的影响不明显,但当溶洞跨度达到 2.8 m 时,差异开始体现,筋材位置越靠近路基地底部,效果越明显,尤其当溶洞跨度达到 3.0 时,除筋材布置在底部之外的其它工况的模型计算不收敛,表明路基均发布塌陷失稳。

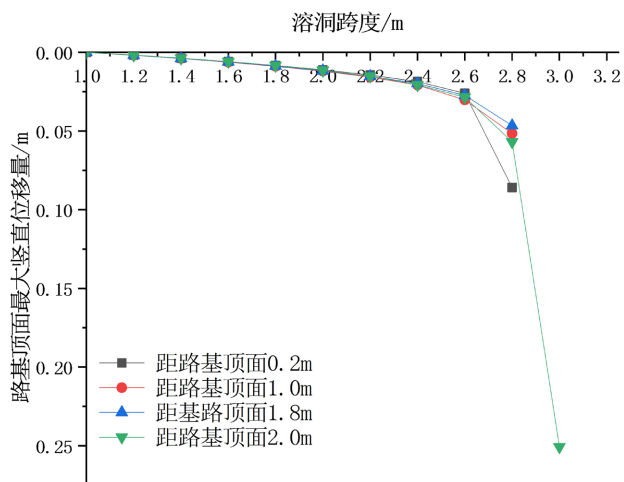


Figure 9. The influence of reinforcement position  
图 9. 筋材位置的影响

### 3) 加筋层数的影响

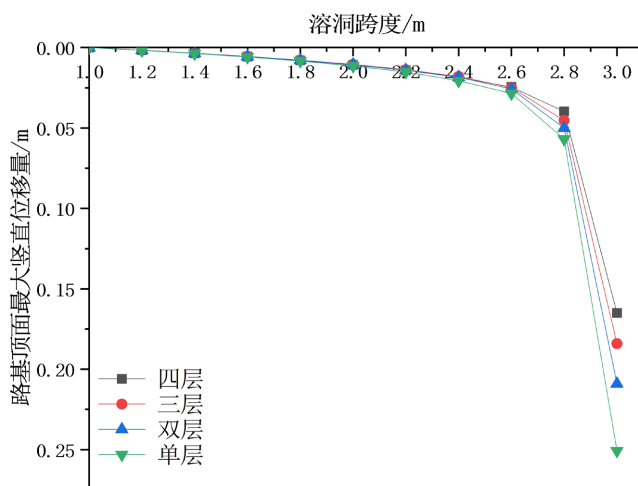


Figure 10. The influence of reinforcement layers  
图 10. 加筋层数的影响

再以 4.1 节的模型为基础,分别在路基内铺设两层、三层、四层土工格栅(间距为 0.1 m)进行计算。计算结果见图 10。可见,当溶洞跨度较小时(小于 2.6 m),加筋层数对路基沉降变形的影响较小,各曲线



基本重合,但当溶洞跨度进一步增加时,增加加筋层数的作用就开始体现,路面沉降随加筋层数的增加而减小,特别是当模型临近破坏时路面最大沉降随加筋层数的增加而明显减小。表明,增加土工格栅的层数可以有效抑制溶洞发育对路基的影响,提高路基的承载能力。

#### 4) 加筋间距的影响

再以上述加筋四层的模型为基础,将加筋间距调整为 0.1 m、0.2 m、0.3 m、0.4 m 后分别计算。不同加筋间距下路基顶面的最大沉降发展曲线见图 11。同样,在溶洞跨度发展到 2.6 m 之前,各曲线基本重合,当溶洞发展到 2.8 m 时,路基顶面的沉降随间距的增加而增大,当溶洞跨度进一步发展 3.0 m 时,四种加筋间距所对应的路面最大沉降值分别为 0.16 m、0.23 m、0.44 m 和 0.75 m,由此可见增加加筋层数可以有效提高路基抗沉陷的能力,但其效果与加筋间距有关。

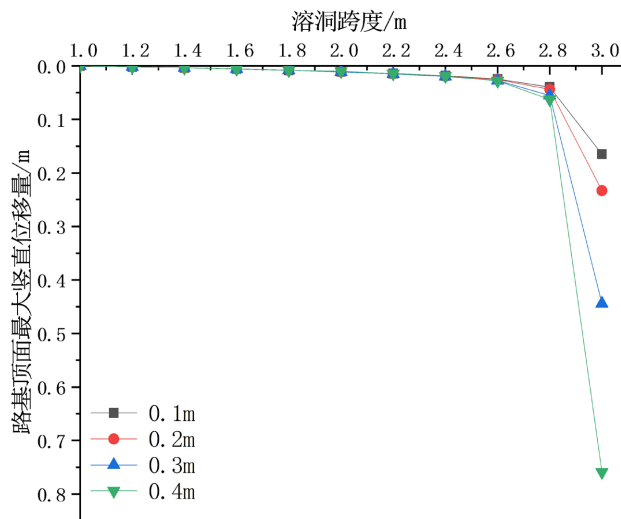


Figure 11. Influence of distance between reinforcement bars  
图 11. 加筋间距的影响

## 5. 结论

1) 随着溶洞跨度的增加,路基顶面和溶洞顶板的竖向位移会随之增大,溶洞周边的塑性区会逐渐增大并向上发展。当溶洞跨度增大到一定程度后将会导致路基塌陷破坏。

2) 在路基底面铺设土工格栅后,土工格栅的抗拉性能可以有效提高路基的稳定性,使路基可以承受更大的溶洞跨度,并在路基突发性破坏前路面出现明显变形迹象,达到预警作用。

3) 加筋间距和加筋层数对溶洞发育引起的路面沉降的控制效果有明显影响。在路基临近突发性破坏前,路基采用的加筋方案加筋间距越小,路面沉降越小;加筋层数越多,路面沉降越小;筋材布置位置越靠近路基底部,对路面位移控制效果就越好。

## 基金项目

湖南省自然科学基金(2022JJ30257),湖南省教育厅重点项目(23A0368),浙江省建筑业创新技术协会科研项目(2021B49)。

## 参考文献

- [1] 郭铭倍. 基于有限元数值分析的土工格栅加筋路堤优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2020.

- 
- [2] 沈立森, 杨广庆, 程和堂, 等. 高速公路路基加宽土工格栅加筋优化技术研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 789-793.
- [3] 钱劲松, 凌建明, 黄琴龙. 土工格栅加筋路堤的三维有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003(12): 1421-1425.
- [4] 雷金昌. 土工格栅在道路改扩建工程中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [5] 贾庆荣. 岩溶发育区路基稳定性及处治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2019.
- [6] 吴迪, 吴建建, 徐超, 等. 土工织物治理岩溶路基塌陷的模型试验研究[J/OL]. 岩土力学, 2020(S2): 1-11. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1689>, 2023-11-06.
- [7] 李晓. 土工织物治理覆盖型岩溶路基塌陷的锚固作用研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022.
- [8] 吴建建. 土工织物治理岩溶路基塌陷加筋机理研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [9] 贺炜, 李昆, 王芳洪. 防岩溶塌陷加筋垫层大比例模型试验及设计理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(5): 980-988.
- [10] 王芳洪. 多层土工加筋体防治岩溶路基潜在塌陷的理论与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.