

DOI: 10.7672/sgjs2025220022

基于3DEC的砂泥岩顺层边坡破坏及处治分析*

张玉龙¹, 吴肖嫒², 李世文¹, 李增源¹, 李源亮³

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530000; 2. 广西云瓌电力工程设计有限责任公司, 广西 南宁 530000; 3. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530000)

[摘要] 为了研究桂西北软弱砂泥岩顺层边坡的主要破坏模式和影响因素, 结合桂西北大方量顺层滑坡工程实例, 考虑岩层厚度、断层和支护方式的影响, 通过离散元软件3DEC建立多种顺层边坡的数值模型, 对上述因素开展分析。研究表明: 强风化顺层边坡稳定性较差, 软弱结构面对边坡的位移影响显著, 开挖后滑动体本身保持相对完整, 但其整体位移极大; 岩层厚度对顺层边坡的稳定性影响显著, 在嵌挤作用下, 相同强度顺层边坡层厚越薄反而稳定性越高; 在处治顺层边坡时, 采用“坡顶短锚杆+坡面长锚索+坡脚抗滑桩”的支护形式, 能够最大程度地抵抗顺层边坡的滑动。

[关键词] 边坡; 破坏模式; 支护; 数值模拟

[中图分类号] U457

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0022-05

Failure and Treatment Analysis of Bedding Slope of Sandy Mudstone Based on 3DEC

ZHANG Yulong¹, WU Xiaoman², LI Shiwen¹, LI Zengyuan¹, LI Yuanliang³

(1. Guangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China;

2. Guangxi Yunjing Power Engineering Design Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China;

3. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: In order to study the main failure modes and influencing factors of soft sandstone and mudstone bedding slopes in northwest Guangxi, combined with the engineering example of the Quantity bedding landslide in northwest Guangxi, considering the influence of rock thickness, faults, and support methods, multiple numerical models of bedding slopes were established using the discrete element software 3DEC to analyze the above factors. The research results indicate that the stability of strongly weathered bedding slopes is poor, and weak structures have a significant impact on the displacement of slopes. After excavation, the sliding body itself remains relatively intact, but its overall displacement is extremely large. The thickness of rock layers has a significant impact on the stability of bedding slopes. Under the squeezing effect, the thinner the thickness of bedding slopes with the same strength, the higher the stability. When treating layered slopes, the support form of “short anchor rods at the top of the slope+ long anchor cables on the slope surface+anti slip piles at the foot of the slope” can resist the sliding of layered slopes to the greatest extent.

Keywords: slope; destructive mode; support; simulation

0 引言

桂西北主要分布的岩层为砂岩、泥岩和灰岩, 其中灰岩的性质比较稳定, 一般形成的边坡在极为陡峭的情况下能够保持稳定, 而砂泥岩为二叠纪动

水往复作用下产生的岩层, 往往具有明显的层理结构, 在长期风化和地质构造作用下形成的软弱砂泥岩边坡往往稳定性较差。

对于岩土性质较复杂的边坡, 基于经验和定性分析的方法往往无法满足分析和判定边坡稳定性的要求。在合理选择计算参数和分析方式的情况下, 通过计算岩体力学的方法能够更有效地评判软

* 国家自然科学基金(51708042)

[作者简介] 张玉龙, 硕士, 工程师, E-mail: 837137687@qq.com

[收稿日期] 2025-05-15

弱边坡,特别是对具有明显层理和软弱结构面的砂泥岩边坡,可以选择岩土专用离散元软件3DEC对边坡模式和处治方式进行分析 and 研究^[1-2]。许多学者利用3DEC对岩质边坡开展了图像识别、逆层倾倒、三角体稳定性等方面的研究^[3-4],但关于软弱砂泥岩顺层边坡的研究不多。本文结合桂西北大方量软弱砂泥岩滑坡的工程实例,通过3DEC对影响顺层边坡的关键影响因素进行分析,并探讨其合理的支护形式,以期为类似工程参考。

1 工程概况

桂西北具有典型的砂泥岩互层地质,叠加历史上极为复杂的构造运动,地质环境复杂多变,边坡施工难度较大(见图1)。顺层边坡位于某项目互通区主线范围内,原设计为三级边坡,边坡长160m、高36m,第1级坡率为1:1,第2,3级坡率为1:1.25,第1级设挡墙进行固脚,第1,2级边坡坡面防护为锚索格梁+绿化,第3级坡面防护为挂网喷播。坡体范围内主要为T1强风化粉砂质泥岩。在勘察区内测得为岩层产状 $289^{\circ}\text{NE}\angle 10^{\circ}$,2组主要的节理产状为 $347^{\circ}\text{NE}\angle 10^{\circ}$, $10^{\circ}\text{NW}\angle 87^{\circ}$ 。

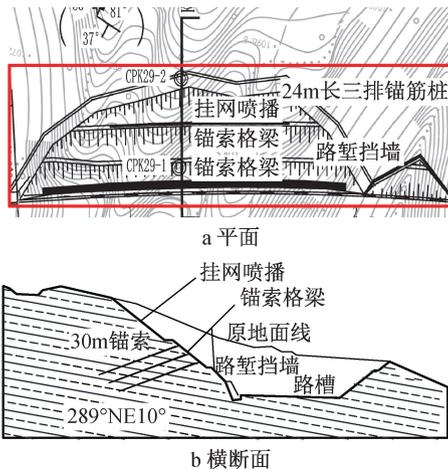


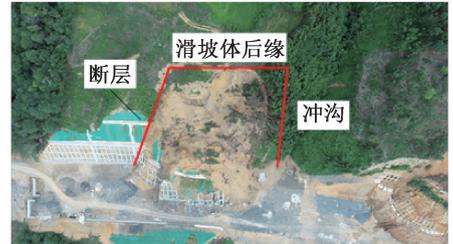
图1 顺层边坡原设计

Fig. 1 Original design of bedding slope

施工中,按照原设计和“开挖一级,防护一级”开挖支护,开挖至第1级边坡后遭遇强降水,该边坡随后突然发生严重滑塌,该顺层边坡山体整体向外滑出,滑坡体沿路线方向长约80m,沿滑动方向宽100m,该滑坡总计约24万 m^3 ,拉槽口长约30m,格梁被整体剪断,锚索被拉脱坡面(见图2)。由图2可知,该边坡构造具有明显的层理,且风化程度较高,边坡在滑动后,其表面上的框格梁仍附着在边坡上,并未发生显著的坡面滑动,据此推测该边坡为沿软弱结构面的深层整体滑动,在降水前边坡已处于临时破坏状态。



a 滑坡体后缘拉槽口



b 边坡垮塌后

图2 边坡地质情况

Fig. 2 Slope geological conditions

2 模型建立与参数选取

影响顺层边坡滑动破坏的主要因素有路堑开挖程度、岩层厚度、断层分布、岩体风化程度、降水和支护方式。采用离散元数值软件3DEC进行逐一分析。根据原设计确定边坡的建模范围,模型长160m、宽195m、高75m,采用3DEC内置建模命令建立近似边坡模型,利用block cut命令根据需要切出所需的层理和裂缝。根据地质勘察报告选用计算所需的岩土体参数(见表1),岩层结构参数为:切向刚度2GPa,倾角 10° ,在后续计算中,根据研究目标对参数进行适当调整。

表1 粉砂质泥岩参数

Table 1 Parameters of silty mudstone

参数指标	中风化岩层	强风化岩层
密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 670	2 670
弹性模量/GPa	10	2
泊松比	0.30	0.35
内摩擦角/ $(^{\circ})$	9	35
黏聚力/kPa	100	500

3 顺层边坡破坏模式与处治分析

3.1 中风化中厚岩层无支护状态

中风化岩层与强风化岩层的差异主要是岩石强度和岩层结构面的胶结类型。中风化中厚岩层路堑部分开挖后的边坡位移情况如图3所示,由图3可知,边坡处于稳定状态,最大位移为1.38dm,位于坡脚处,边坡整体位移呈“核状”,由坡脚以垂直于坡面的方向向内扩展。坡脚处的位移方向以水平向外为主,并有上升趋势,路床位移以竖直向上为主,坡顶位移极小。路堑全部开挖后,边坡最大位移为1.44dm。路堑部分开挖和全部开挖的边坡

位移分布模式相近,均应重点防护 1/2 坡面以下的部分。但在路床位移分布模式上有所差异,路堑完全开挖后,其接近坡脚处的位移有所增加,这部分路床的向上位移有所增大,说明路床能对坡脚形成一定的支撑作用。

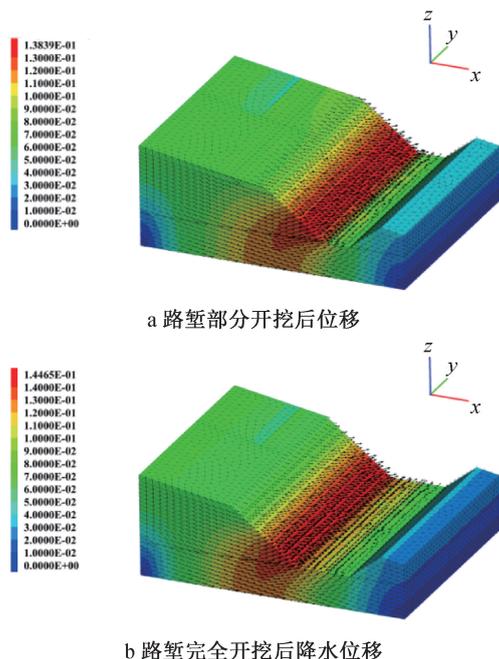


图3 中风化中厚岩层路堑开挖后边坡位移云图(单位:m)

Fig.3 Cloud map of slope displacement after excavation of moderately weathered and thick rock layers cutting(unit:m)

3.2 强风化中厚岩层无支护状态

通过削弱岩层和结构面的参数,强风化岩层部分开挖后的位移如图4所示。此时边坡最大位移为9.05m,已处于失稳状态。边坡中断层的倾角约 70° ,方向为负y轴方向,位于路堑中段,断层前后出现错动,边坡向外滑动,并拉出槽口,槽口宽度即边坡的最大位移,出现最大位移的位置也从坡脚转到坡顶。对比图3可知,软弱结构面对边坡位移影响显著,滑动体本身保持相对完整,但整体位移极大。

进一步考虑降水对边坡变形的影响,采用3DEC内置的block apply pore-pressure命令给结构面施加正向的孔隙水压力,孔隙水压力取20kPa。此时边坡变形进一步加剧,最大位移达12.5m,相当于降水前的1.38倍。因此,降水会加剧顺层边坡的位移,特别是渗入岩体结构面的孔隙水会对层状岩体产生一定的抬升作用。因此,坡面需做好截排水工程,减小降水造成的不利影响。

路堑边坡完全开挖后降水前后的位移如图5所示。对比图4a可以发现路堑开挖面的大小对强风

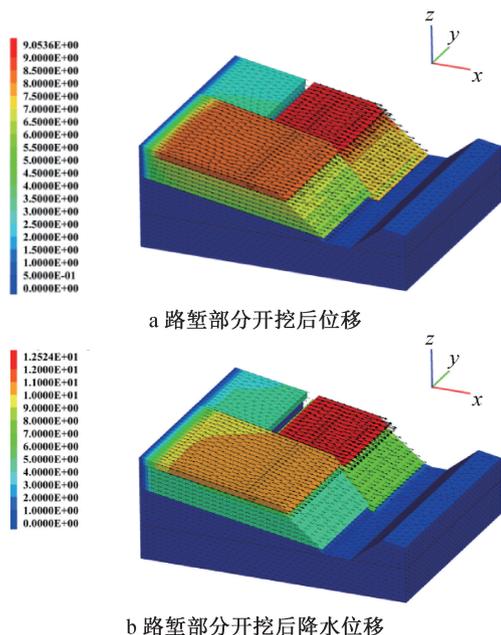


图4 强风化中厚岩层路堑部分开挖后边坡位移云图(单位:m)
Fig.4 Cloud map of slope displacement after excavation of partially weathered medium thick rock layers cutting(unit:m)

化顺层边坡的影响极为显著,该种工况下坡顶拉槽口的最大位移为31.5m,断层前后坡体出现极为明显的错位,这种破坏模式与第1节中的工程实例极为相似,说明工程实例中的破坏是以软弱结构面、断层和大开挖主导的“刚体推移式”破坏。对比发现降水后边坡位移进一步加剧,拉槽口的最大位移为47.3m,约为降雨前的1.5倍,其滑动模式为坡顶覆盖层和主滑坡体的双层滑动,覆盖层的滑动位移远大于主滑坡体,表现为浅层和深层双重滑坡。

3.3 强风化薄岩层无支护状态

边坡岩层越薄,块体数量越多,计算复杂度越高,为了考虑岩层厚度对边坡的影响,选择层厚1m的岩层进行计算分析。降水前后强风化薄层边坡的位移如图6所示。由图6可知,边坡最大位移为1.9m,坡脚处位移较小,约为1.1m,降水前的边坡变形显著降低。降水后边坡的最大位移是降水前的2倍,岩层变形主要集中在坡顶处。对比图5,6可知,降水对薄层边坡的影响大于厚层边坡。综上所述,随着岩层变薄,边坡自然稳定性显著增大,位移显著降低,这主要是因为岩层变薄层体之间的嵌挤作用增强,不利于整体滑动。

3.4 锚索支护效果分析

为了分析支护的作用,选择变形较大的中厚岩层进行边坡破坏分析,考虑原设计中的30m锚杆建模。降水前后顺层边坡的变形云图如图7所示。对比没有支护的自然边坡,可以发现边坡变形显著降

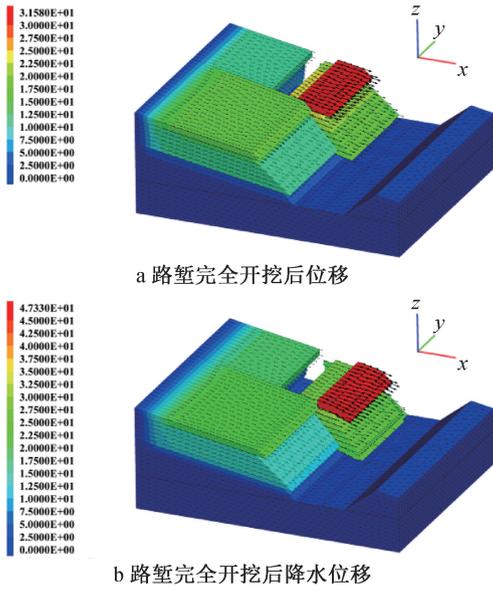


图5 强风化中厚岩层路堑完全开挖后边坡位移云图(单位:m)

Fig. 5 Cloud map of slope displacement after complete excavation of strongly weathered medium thick rock layers cutting(unit:m)

部也已经失效。

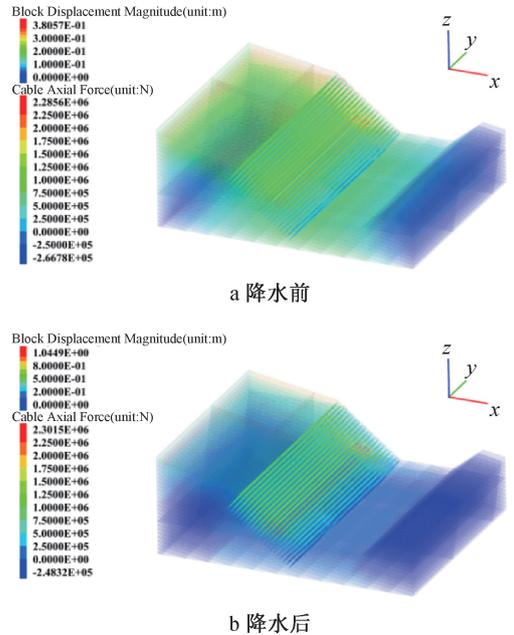


图7 强风化中厚岩层锚杆支护后边坡位移及锚索受力云图

Fig. 7 Cloud map of slope displacement and anchor force after anchor rod support in strongly weathered medium thick rock layers

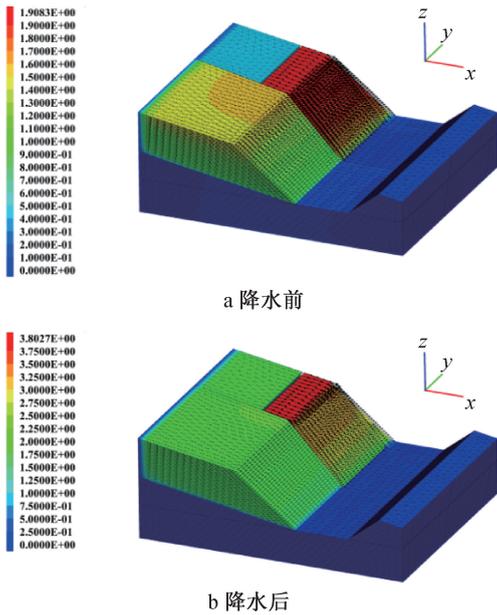


图6 强风化薄岩层路堑完全开挖后边坡位移云图(单位:m)

Fig. 6 Cloud map of slope displacement after complete excavation of strongly weathered thin rock layer cutting(unit:m)

低,最大位移由 31.5m 降低到 0.38m,这主要是位移极大的浅层滑坡体被锁住的原因,也说明锚索支护对顺层边坡作用显著,能够抑制边坡滑动。边坡降水后,即使存在锚索约束,边坡位移也会增大,最大为 1.04m,是降水前的 2.7 倍。随着岩体的变形加剧,锚索的最大拉力增加至 2 305kN,许多锚索端

3.5 抗滑桩支护效果分析

在上述具有破坏趋势的边坡中截取 20m 长度段进行抗滑桩作用分析。抗滑桩支护后边坡滑动后的结果如图 8 所示。该种工况下边坡的上层部分已沿软弱节理面下滑至路堑上方,产生的最大拉槽位移为 33m,边坡坡脚处的抗滑桩能够对边坡产生一定的支撑作用,但由于主滑动面发生在抗滑桩顶部,即使施作抗滑桩也无法避免上层边坡滑塌。

在上层滑坡体的冲击作用下,抗滑桩桩头产生 14cm 的位移,在实际工程中桩头可能发生破坏。因此对于这类顺层滑动规模较大的边坡,单独采用抗滑桩方案进行处治也无法完全消除边坡滑动的风险。

3.6 锚索+抗滑桩支护效果分析

对于顺层大方量滑坡,采用抗滑桩可以很好地对坡脚进行加固,但由于顺层边坡滑动面位置不确定,有可能出现在桩头以上,直接越顶,也有可能出现在桩头以下,造成抗滑桩被剪断。锚索+抗滑桩可以充分利用其悬挂、加固和组合梁的作用,将上层容易滑动的岩体与底部稳定岩体锁定,大大降低滑动力。

采用锚索联合抗滑桩进行加固后的结果如图 9 所示。边坡最大位移为 0.21m,加固后边坡整体稳

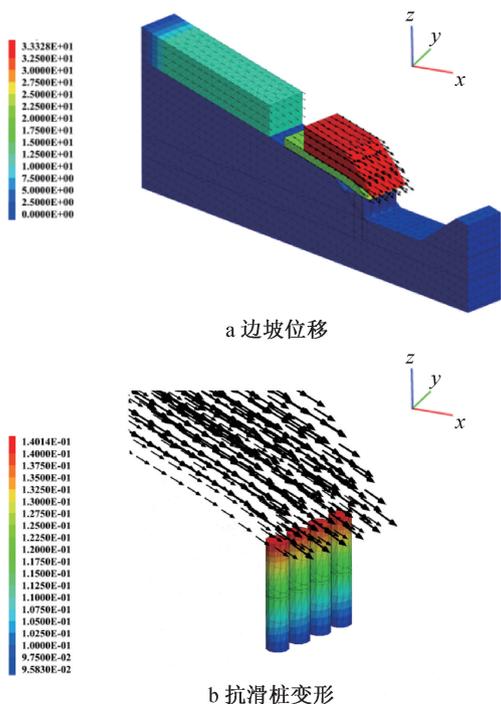


图8 强风化中厚岩层抗滑桩支护后边坡位移云图(单位:m)

Fig. 8 Cloud map of slope displacement behind antislip pile support in strongly weathered medium thick rock layers (unit: m)

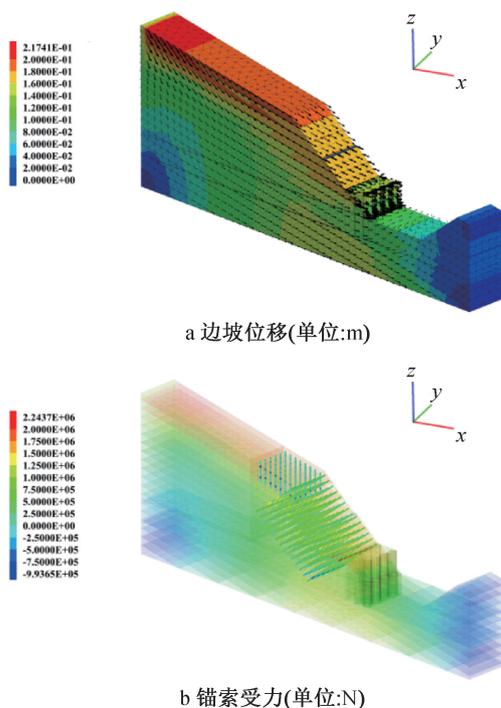


图9 强风化中厚岩层锚索+抗滑桩支护后边坡计算云图

Fig. 9 Cloud map of slope calculation after anchor cable and antislip pile support in strongly weathered medium thick rock layers

定,但其地表覆盖层由于缺乏锚索拉力仍有轻微滑动。为了保证地表的稳定性可以采用锚杆进行地表注浆加固。锚索的计算最大拉力为2243kN,出现在桩顶处,在实际工程中也可能出现局部锚索拉断的情况,因此在对这类边坡加固时需着重加强桩顶部位。

综上所述,地表锚杆和边坡锚索能够大幅度降低边坡的下滑力,降低顺层边坡浅层滑动的可能性,抗滑桩能够有效地加固坡脚,降低深层滑坡的可能性,两者组合应用对顺层边坡的防护而言合理有效。

4 结语

1) 中风化顺层边坡较稳定,开挖后边坡整体位移呈“核状”由坡脚以垂直于坡面的方向向内扩展;强风化顺层边坡稳定性较差,软弱结构面对边坡的位移影响显著,开挖后滑动体本身保持相对完整,但其整体位移极大。

2) 降水对顺层边坡的影响与路堑开挖面的大小有关,边坡开挖面越大降水造成的不利影响越大。岩层厚度对于顺层边坡的稳定性影响显著,在嵌挤作用下,相同强度顺层边坡越薄反而稳定性越高。

3) 在处治顺层边坡时单独锚索加固和单独抗滑桩加固均不能发挥其最佳效果,采用“坡顶短锚

杆+坡面长锚索+坡脚抗滑桩”的支护形式能抵抗顺层边坡的滑动。

参考文献:

- [1] 倪勇,王述红. 基于3DEC对岩质高边坡的稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 206-210.
NI Y, WANG S H. Stability analysis of high rock slope based on 3DEC [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2017, 15(6): 206-210.
- [2] 臧浩,陈鹏,赵盾,等. 基于3DEC的岩质边坡安全系数影响因素敏感性研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(8): 71-77.
ZANG H, CHEN P, ZHAO D, et al. Sensitivity study on influencing factors of safety coefficient of rock slope based on 3DEC [J]. Shandong land and resources, 2021, 37(8): 71-77.
- [3] 沙鹏,孔德珩,王绍亮,等. 高陡边坡岩体结构信息无人识别与离散元数值模拟[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1658-1668.
SHA P, KONG D H, WANG S L, et al. UAV identification and discrete element numerical simulation of rock mass structure information of high and steep slope [J]. Journal of engineering geology, 2022, 30(5): 1658-1668.
- [4] 吴传杰,陈志坚. 基于3DEC的岩质高边坡三角体稳定性分析[J]. 甘肃科学学报, 2019, 31(6): 24-29.
WU C J, CHEN Z J. Analysis of the stability of rock high slope triangles based on 3DEC [J]. Journal of Gansu sciences, 2019, 31(6): 24-29.