

DOI: 10.7672/sgjs2026040104

多临空面空间效应对高边坡稳定性的影响研究*

杨俊毅^{1,2}, 苏沐², 汪磊¹, 陈登峰¹, 黄彪³

(1. 百色枢纽通航投资有限公司, 广西 百色 533000; 2. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510000)

[摘要] 以广西某水利工程人工开挖形成的复合高边坡为研究对象, 该边坡具有多临空面、土层条件复杂及空间效应显著等特点。为揭示不同临空面条件下几何参数对边坡稳定性的影响, 采用 Midas 有限元软件计算对比分析了考虑空间效应时边坡的二维和三维计算结果。研究表明: 在单一临空面且边坡长高比(L/H) ≤ 5 下, 二维与三维模型的破坏模式相似, 但二维结果偏保守; 当在多个临空面条件下, 三维模型的破坏模式与二维模型存在明显差异, 且安全系数更低。几何参数中, 临空面倾角 θ 起主导作用, 对安全系数和破坏模式影响显著, 建议设计中倾角宜 $>27^\circ$ 、相邻临空面夹角宜 $>120^\circ$ 。结合广西实际工程案例的分析发现, 多临空面边坡的空间效应会显著影响其破坏模式和安全系数, 二维模型会高估边坡安全系数, 且破坏模式与实际工程不符, 三维模型所得安全系数较二维模型降低了9%, 其破坏模式更符合实际观测。

[关键词] 边坡; 有限单元法; 稳定性分析; 空间效应

[中图分类号] U213.13

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0104-07

Study on Impact of Multi-free-face Spatial Effects on the Stability of High Slopes

YANG Junyi^{1,2}, SU Mu², WANG Lei¹, CHEN Dengfeng¹, HUANG Biao³(1. Baise Hub Navigation Investment Co., Ltd., Baise, Guangxi 533000, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. CCCC Fourth Navigation Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China)

Abstract: Taking the composite high slope formed by artificial excavation in a water conservancy project in Guangxi as the research object, this slope is characterized by multiple free faces, complex soil conditions, and significant spatial effects. To reveal the influence of geometric parameters on slope stability under different free face conditions, Midas finite element software was used to calculate and compare the two-dimensional and three-dimensional calculation results of the slope considering spatial effects. The research results show that under the condition of a single free face and a slope length-to-height ratio (L/H) ≤ 5 , the failure modes of the two-dimensional and three-dimensional models are similar, with the two-dimensional results being more conservative. When there are multiple free faces, the failure mode of the three-dimensional model differs significantly from that of the two-dimensional model, and the safety factor is lower. Among the geometric parameters, the inclination angle (θ) of the free face plays a dominant role, significantly affecting the safety factor and failure mode. It is recommended that the inclination angle should be greater than 27° , and the angle between adjacent free faces should be greater than 120° . Based on the analysis of actual engineering cases in Guangxi, it is found that the spatial effects of slopes with multiple free faces significantly affect their failure modes and safety factors. The two-dimensional model overestimates the slope safety factor, and the failure mode does not match the actual engineering situation. The safety factor obtained from the three-dimensional model is 9% lower than that of the two-dimensional model, and its failure mode is more consistent with actual

* 广西交通科技示范工程: 百色枢纽通航工程复合高边坡稳定性耦合机理及生态防护技术研究(2022-10)

[作者简介] 杨俊毅, 正高级工程师, E-mail: 281877859@qq.com

[收稿日期] 2025-10-25

observations.

Keywords: slope; finite element method; stability analysis; spatial effect

0 引言

在边坡稳定性分析中,边坡通常被简化为平面应变问题,并采用二维极限平衡法或有限元法进行计算,这是因为二维模型能够显著简化计算量,同时由于忽略了滑动面上侧向边界的约束作用,从而导致计算的安全系数较三维模型偏低,具有一定的保守性,有利于工程设计。这一结论适用于大部分边坡工程^[1-4]。然而,对于地质条件复杂,空间效应显著的边坡,简化的二维模型是否仍然能满足安全需求,已有不少学者对此展开了深入研究。Gens等^[5]通过建立均质、各向同性的黏性土边坡的三维模型,假设滑动面中间为圆柱形且两端为弯曲面,计算结果表明,三维边坡的安全系数普遍比二维计算高3%~30%。卢坤林等^[6]基于滑面正应力修正模式的极限平衡法,研究了二维与三维安全系数比值,发现该比值随着长高比(L/H)、内摩擦角和坡比的增大逐渐减小,但随着黏聚力的增大逐渐增大。谭文辉等^[7]对我国最大的露天铁矿-水厂铁矿高边坡进行了二维和三维的稳定性分析,考虑了自重、地震、水等多因素作用,结果表明二维模型分析偏保守,有利于边坡稳定性,但也会增加工程成本。Farzaneh等^[8]、Zhang等^[9]、陈传胜等^[10]、刘红帅等^[11]也在不同土体参数,如长高比、坡度、地震和降雨等条件下,进行了边坡二维和三维稳定性分析结果的对比研究。然而,上述研究主要针对路基或单一临空面边坡等长高比或宽高比较大的情况,在这种边坡中,水平方向上的几何变化相对均匀,横向效应不显著,使得滑动面上的应力和位移主要集中在二维剖面上。但在实际工程中,许多边坡因人工开挖或复杂地形特征而呈现出多个临空面,滑动面可能沿多个方向延伸。二维模型难以全面反映这些复杂特征,可能导致对边坡稳定性的误判。因此,采用三维模型分析多临空面边坡的空间效应更为合理,这种方法能够更准确地计算出应力和位移场的分布情况,从而提高稳定性分析的精确性。多临空面边坡的稳定性分析属于典型的三维空间问题,边坡破坏往往呈现出复杂的三维几何形态,三维效应对高边坡的应力分布和位移场有显著影响^[12-15]。尤其是临空面的存在对边坡稳定性的影响不可忽视。Baker等^[16]采用变分方法得出:圆形凸坡的稳定性随着圆形凸坡半径(R)/坡高(H)的增大而降低, R/H 趋向于无穷大时,与平面应变的

计算结果相同,但其分析采用一般的三维滑动模式,即假定滑动体只向某一方向发生滑动。Rassam等^[17]研究了矿山废石堆形态对边坡稳定性的影响,对于凸型边坡(多临空面边坡),稳定坡角比单一临空面要小。卢坤林等^[18]统计了大量坡面形态,认为凸型边坡稳定性较差,造成稳定性差异的直观原因在于其两端约束较平坡弱。黄少平等^[19]采用离散元方法探讨了不同数量临空面对边坡变形的影响,结果表明,当临空面数量增加至3个时,边坡变形最大。王亮清等^[20]基于运动学分析确定了双临空面的4种破坏模式,提出了双临空面边坡最大安全开挖坡角的确定方法及边坡设计原则。然而,上述研究多采用离散单元法,通过所得的位移、应力分布及塑性区反映边坡状态,当前仍缺乏有效的方法来准确确定复杂土质边坡的滑动面形状及安全系数。因此,进一步研究基于有限元三维模型的多临空面边坡稳定性分析,将有助于提高边坡稳定性评估的科学性和准确性。

本文利用Midas有限元软件对具有单一和多临空面几何特征的边坡进行稳定性分析,对比不同临空面条件下边坡二维和三维分析计算结果,以揭示多临空面边坡的破坏机理。以广西某水利工程人工开挖形成的复合高边坡为例,开展二维与三维稳定性分析,验证三维分析在多临空面边坡稳定性评估中的科学性和有效性。

1 数值模拟

1.1 模型建立

为研究临空面数量及几何特征参数对边坡稳定性二维与三维计算结果差异的影响机制,本文基于Midas有限元软件建立了相应的二维与三维边坡简化数值模型(见图1),并通过强度折减法对边坡进行稳定性分析^[21]。在实际工程中,边坡稳定性受几何形状、地震、降雨等多种内外因素共同影响。本文聚焦于几何特征参数的作用,重点探讨临空面条件的影响。对于三维边坡模型,在坡高 H 、边坡倾角 α 的基础上,引入多临空面条件后增加了侧向临空面与垂直平面的夹角 θ (简称临空面倾角),以及相邻临空面之间的夹角 ω (简称临空面夹角)。三面临空的边坡使其稳定性分析更为复杂。

为提高计算精度,模型采用合理的网格划分方案:整体平均网格尺寸设为5m,并对临空面区域进行局部加密,将该处单元尺寸细化至0.5m,以更准

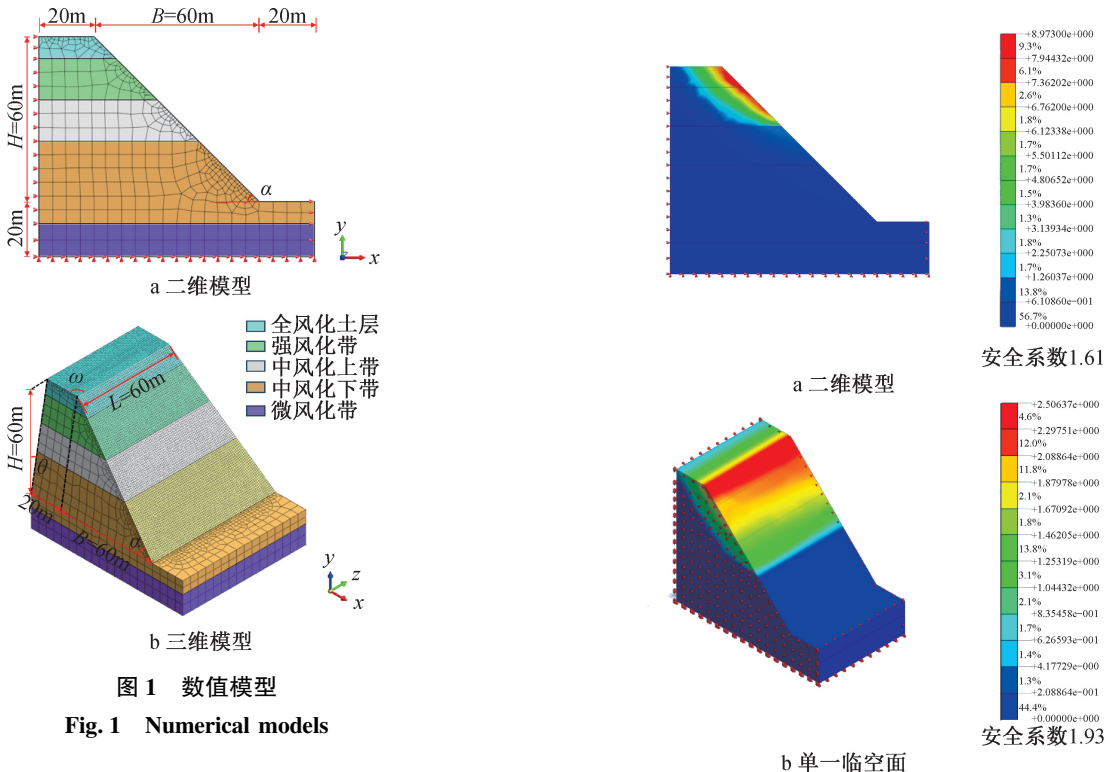


图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical models

确地捕捉坡体关键部位的应力变化。模型初始条件设置如下:二维模型前后端(垂直于 x 轴平面)施加水平方向的位移约束,底部施加固定约束以防止竖向位移;三维模型约束前后端与底部约束与二维一致,两侧(垂直于 z 轴平面)施加垂直于该平面的水平约束,以模拟实际边坡的边界效应。

1.2 参数选择

材料块体单元采用莫尔-库仑弹塑性模型,流动法则采用非关联流动法则,其材料参数基于广西边坡现场勘探、取样室内试验及数值反演结果。各层材料的详细参数如表 1 所示。

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil layer

土层	弹性模量/MPa	重度/($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)
全风化土层	100	14.70	20	14.03
强风化带	500	23.52	50	19.08
中风化上带	800	22.15	100	21.80
中风化下带	2 000	24.01	200	28.86
微风化带	5 000	24.98	350	35.00

2 结果对比分析

采用 Midas 有限元分析软件构建典型边坡数值模型,设置 3 组对照模型:二维边坡、单一临空面三维边坡和多临空面三维边坡($\theta = 10^{\circ}$, $\omega = 90^{\circ}$)。不同临空面条件下边坡变形位移云图如图 2 所示。

当使用三维模型分析单一临空面边坡时,变形主要发生在前缘临空面坡体中上部。对于单一临空面边坡。三维边坡沿中部剖面简化为二维模型

图 2 不同临空面条件下边坡变形位移云图(单位:m)
Fig. 2 Displacement cloud maps of slope deformation under different open surface conditions(unit: m)

后,变形仍主要发生在前缘临空面坡体中上部,形成典型的圆弧滑裂面,主要滑动区域出现在全风化土层与强风化土层。进一步对比发现,二维模型计算得出的安全系数为 1.61,较三维模型减小了 16.6%,这一结果与已有研究结论相符,表明二维模型因未能考虑三维边坡滑体端部的约束效应,使得计算结果相对偏保守。

进一步考虑多临空面及其空间效应的情况下,由于边坡两侧缺乏相应边界约束,当两侧临空较为陡峭时,可能首先在侧面形成最危险滑裂面,其破坏优先级高于主临空面,边坡更容易沿侧向临空面发生失稳破坏,形成圆弧状断面,变形集中在 2 个临空面交汇处,呈扇形分布。此时与二维模型相比,

安全系数减少 26.7%,表明多临空面边坡不仅破坏模式与单一临空面边坡及其简化的二维模型存在显著差异,且由于未能充分考虑三维空间效应,实际安全系数也低于二维计算结果,无法真实反映边坡的稳定性,工程设计将存在安全隐患。因此,在分析复杂空间效应边坡的稳定性时,采用三维数值模型进行模拟更合理。

2.1 临空面倾角

在分析临空面倾角 θ 对边坡稳定性的影响时,保持其他参数不变 ($\alpha = 45^\circ$, $L = 60\text{m}$, $H = 60\text{m}$, $\omega = 90^\circ/105^\circ/120^\circ$)。在此基础上,建立不同临空面倾角 θ 的简化边坡模型,并记录安全系数变化情况,如图 3 所示。

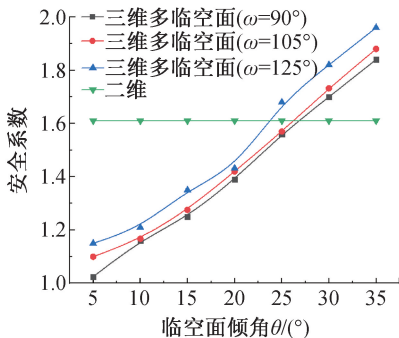


图 3 临空面倾角与边坡安全系数关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between the free face inclination angle and the slope safety factor

当临空面倾角 θ 由 5° 增加至 35° 时,两侧边坡几何形态显著改善,边坡整体稳定系数(FOS)随之持续提升。不同 ω 值工况下,FOS 随 θ 的变化趋势始终保持增长。同时,当 ω 由 90° 提至 120° 时,三维多临空面计算出的 FOS 与二维 FOS 的交点对应的倾角 θ 由 27° 减小至 23.8° ,说明临空面夹角的增大能够有效提高两侧临空面的稳定性。

以 $\omega = 90^\circ$ 为例量化分析,当 θ 由 5° 增加至 35° 时,FOS 呈单调递增特性,由 1.02 显著提升至 1.86,增幅达 82.3%。特别需要指出的是,当 $\theta < 27^\circ$ 时,二维模型计算的 FOS 高于三维模型,意味着传统二维极限平衡法可能低估边坡实际失稳风险,难以准确表征复杂三维应力场的渐进破坏机制。反之,当 $\theta > 27^\circ$ 时,二维模型计算的 FOS 低于三维模型,反映出在缓倾临空面条件下二维分析存在过度保守倾向,可能导致工程支护方案冗余度偏高。随着侧向临空面坡度趋缓,潜在滑动面逐渐从侧向剪切破坏转向主临空面牵引破坏,其运动学特征与单一临空面边坡相似,此时三维模型的 FOS 优势源于侧向临空面提供的空间约束效应。

综上所述,在边坡施工设计中,临空面倾角 θ 是影响边坡稳定性的关键参数。为确保边坡在满足施工要求的同时具备合理的稳定性,应充分考虑临空面倾角的影响,并通过优化设计提高边坡的自然稳定性,以实现安全性与经济性的平衡。

2.2 临空面夹角

选择临空面倾角 $\theta = 15^\circ, 25^\circ$ 和 35° 作为代表性临空面倾角,其他参数不变,即坡脚 $\alpha = 45^\circ$ 、边坡长 60m、高 60m。相邻临空面之间夹角对边坡稳定性的影响如图 4 所示。

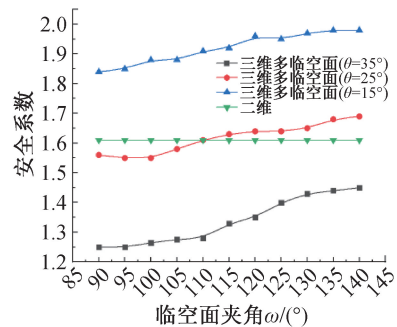


图 4 临空面夹角与边坡安全系数关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between the free face angle and the slope safety factor

FOS 随 ω 的增大而增大,在三维多临空面倾角为 15° 时,FOS 最高增幅达 13.8%。进一步分析 $\theta = 25^\circ$ 时的曲线分析可知,此时二维与三维模型计算的 FOS 结果较为接近。当 ω 处于 $90^\circ \sim 110^\circ$ 时,三维多临空面模型计算的 FOS 低于二维计算值,表明在此范围内三维空间效应可降低边坡的稳定性,二维计算高估边坡的安全系数导致设计偏不安全。而当 ω 接近 110° 时,三维计算的 FOS 趋近于二维结果。当 $\omega > 110^\circ$,三维模型计算出的安全系数超过了二维模型的结果,且随着夹角增大,边坡稳定性逐步提升,此时二维设计偏保守。

在边坡设计过程中,相较于临空面倾角 θ ,临空面夹角 ω 对稳定性的影响较小,但仍不可忽视。建议尽量避免相邻临空面夹角 $< 110^\circ$,以降低三维空间效应导致的稳定性风险。此外,为提高边坡的稳定性和设计的可靠性,建议夹角控制在 120° 以上。

3 工程案例验证

3.1 工程概况

广西省某水利工程形成了超百米的 12 座人工开挖复合高边坡群,选取典型多临空面边坡-升上坡作为研究对象。该边坡地形连续性较好,山坡表面坡度 $35^\circ \sim 45^\circ$,顶部较为平缓,坡度 $5^\circ \sim 10^\circ$,山顶高程为 323.000m,自然边坡的高度约 78m,相对高差

在 50~125m。经过人工开挖后,形成了 3 个临空面,使该边坡具备了多临空面的复杂性。

升上坡开挖三维模型如图 5 所示,所建模型区域位于桩号下 2+570—2+816,整个三维模型长 375m、宽 246m。根据设计,目前已开挖至高程 253.700m。开挖深度范围内,表层为残积土和全风化层,下部依次为强风化、中风化上带、中风化下带及微风化带,主要岩性为泥质粉砂岩、粉细砂岩及粉砂质泥岩互层。

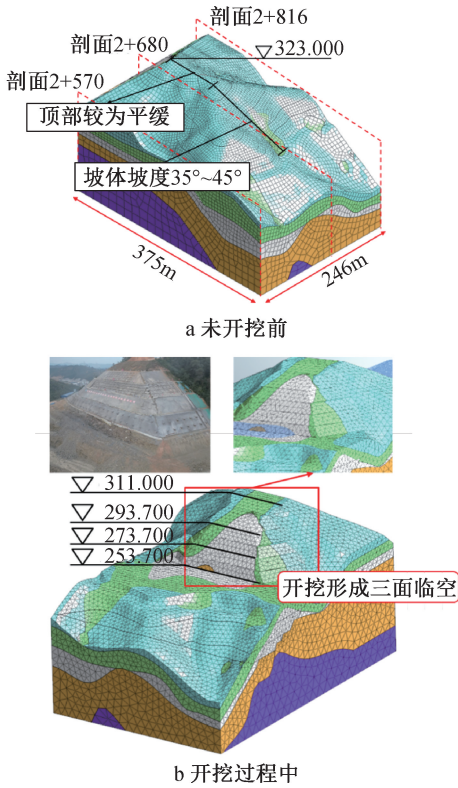


图 5 开挖前和开挖过程中三维模型

Fig. 5 Three-dimensional model before and during excavation

3.2 开挖与支护方案

将开挖土层①~③记为第 1 次施工,此时施工至 263.700m 高程时(已开挖约 45m),坡顶出现裂缝,随后坡面发生局部坍塌。后进行削坡放缓处理,开挖土层④~⑥,记为第 2 次施工,如图 6 所示。

具体变更方案如下。263.700~273.700m 高程边坡开挖坡比由 1:0.5 调整为 1:1,273.700~283.700m 高程边坡开挖坡比由 1:0.75 调整为 1:1,283.700~293.700m 高程边坡开挖坡比由 1:0.75 调整为 1:1.25,293.700~306.000m 高程边坡开挖坡比由 1:0.75 调整为 1:1.92,坡顶 306.000m 高程设置 6.35m 宽度平台,平台后方以坡比 1:4.8 放坡衔接至 311.000m 高程,削除该高程以上土层,形成山顶临时观察平台。

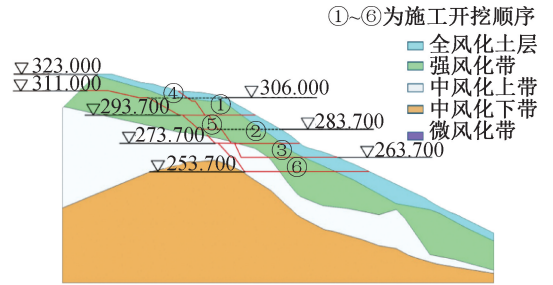


图 6 剖面 2+680 施工顺序

Fig. 6 Construction sequence of section 2+680

3.3 边坡开挖及支护模型建立

边坡开挖及支护各个工况下的模型如图 7 所示。

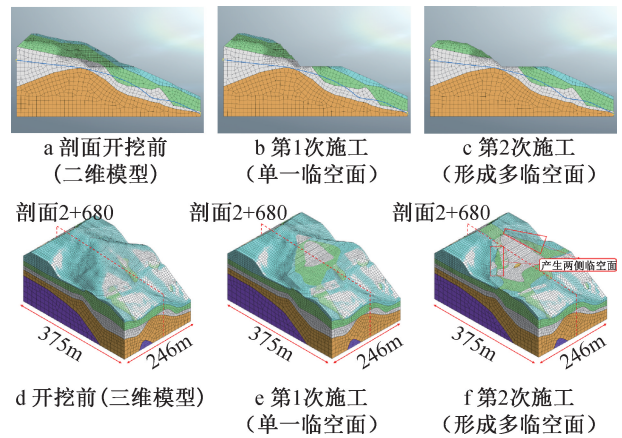


图 7 施工二维与三维模型

Fig. 7 Construction 2D and 3D models

3.4 单一临空面工况分析

第 1 次施工后,二维和三维边坡稳定性分析结果如图 8 所示。根据 SL 386—2007《水利水电工程边坡设计规范》,将升上坡的级别定为 2 级,此时正常运行条件的安全系数不应低于 1.25。二维模型和三维模型计算的安全系数分别为 1.12,1.2,都不满足规范要求。在边坡存在单一临空面情况下,数值模拟与现场实际滑动区域大致相同,但三维模型所得的安全系数较二维模型高 7.1%,二维模型结果偏保守,均集中在坡体临空面中部,经强度折减分析,认为存在 1 条深 2~3m 的潜在滑裂面,其位置大致与强风化土层与中风化上带交接处相切。相较之下,三维模型真实地反映了实际土体的滑动趋势,如图 9 所示,现场滑动主要发生在坡体表面,推测原因是表层土体较松散,尤其是两侧以全风化带与强风化带为主,这些区域更易发生滑动。

3.5 多临空面工况分析

在第 1 次施工后,边坡出现表层滑坡后对边坡进行削坡处理,且在第 2 次施工时,边坡开挖后形成 3 个临空面,如图 10 所示。二维模型和三维模型计

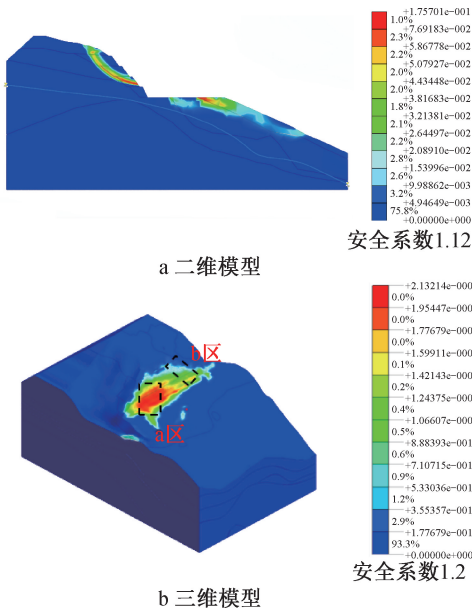


图 8 第 1 次施工有效塑性应变云图

Fig. 8 Cloud map of effective plastic strain after the first construction

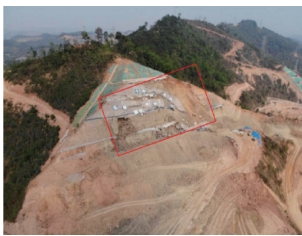


图 9 第 1 次施工边坡现场

Fig. 9 Site of the slope after the first construction

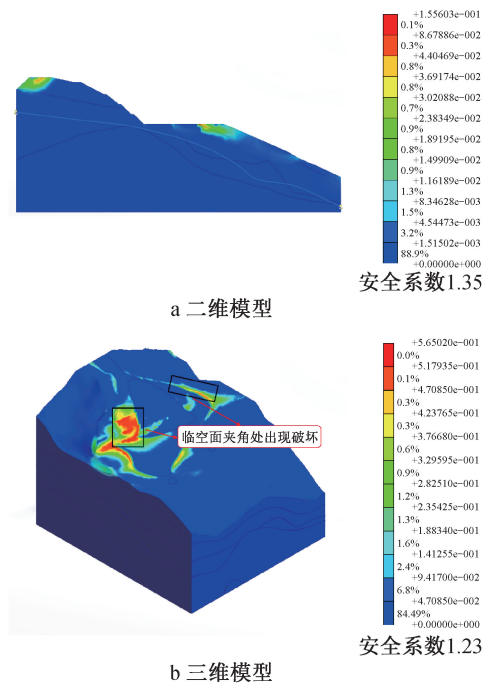


图 10 第 2 次施工有效塑性应变云图

Fig. 10 Cloud map of effective plastic strain after the second construction

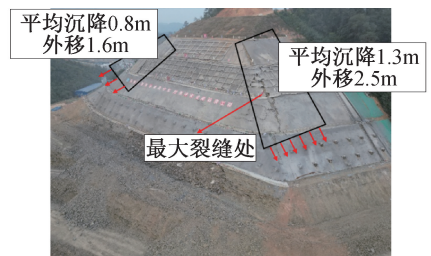


图 11 第 2 次施工边坡现场

Fig. 11 Site of the slope after the second construction

算的安全系数分别 1.35, 1.23。在存在多临空面条件下, 三维模型所得安全系数较二维模型降低了 9%, 所得结论与单一临空面情况正好相反。削坡放缓后, 地表全风化带土体被移除, 坡体台阶处未出现明显滑裂面, 而在坡顶处位于强风化带土体内出现塑性破坏区。二维模型计算的安全系数由 1.12 提高至 1.35, 增加了 20.5%。

第 2 次施工后, 边坡两侧形成新的临空面, 临空面对边坡安全系数及破坏模式均有较大影响。由三维模型可知, 坡体中部(剖面 2+680 附近)未出现塑性破坏区, 而在两侧临空面处出现较大塑性应变, 其中左侧临空面窄而陡, 形态弯折较多, 右侧临空面宽且缓, 左侧产生的有效塑性应变大于右侧, 更易发生失稳。三维模型中, 破坏发生在相邻临空面交界处。同时上述破坏模式也与现场观测到的破坏情况一致, 如图 11 所示。

对比三维模型计算结果可知, 经第 2 次施工削坡放缓后, 三维模型计算的安全系数由 1.20 提高至

1.23, 增幅为 2.5%, 远低于二维模型算出的 20.5%。这是由于在三维模型中, 新增的临空面在坡体两侧出现新的滑动面, 部分抵消了削坡对安全系数的提高作用。三维计算所得安全系数 1.23 较二维 FOS 低约 9%, 说明三维分析更保守, 仅考虑二维分析可能无法评估判断边坡安全性。

4 结语

1) 当边坡存在单一临空面且边坡长高比 $L/H \leq 5$ 时, 二维与三维模型破坏模式相似, 变形主要发生在边坡前缘临空面坡体中部, 二维模型计算出的安全系数相较于三维模型偏保守, 设计安全, 但会增加工程成本和资源浪费。

2) 当边坡存在多临空面时, 三维模型由于临空面土体缺乏侧面约束, 在重力作用下受到拉张, 导致边坡表面土体向两侧滑动, 形成对称的滑移面, 二维模型计算出的安全系数较三维临空面模型偏大, 此时以二维模型为设计依据偏不安全, 需要考

考虑三维临空面模型对边坡稳定性的影响。

3) 临空面倾角 θ 是控制边坡稳定性和破坏模式的主导因素, 相邻临空面夹角 ω 属于次要影响但不可忽视的影响因素。设计时临空面倾角宜大于 27° , 夹角宜 $>120^\circ$ 。

4) 实际工程案例表明, 三维分析能更准确地揭示破坏发生于相邻临空面交界处的机制, 与现场观测现象吻合。因此, 在涉及复杂临空面条件的边坡工程中, 三维稳定性分析对于准确判断安全状态、揭示破坏机制具有不可替代的价值。

参考文献:

- [1] EID H T, ELLEBOUDY A M, ELMARSAFAWI H G, et al. Stability analysis and charts for slopes susceptible to translational failure [J]. Canadian geotechnical journal, 2006, 43 (12): 1374-1388.
- [2] 邵龙潭, 唐洪祥, 韩国城. 有限元边坡稳定分析方法及其应用 [J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 81-87.
SHAO L T, TANG H X, HAN G C. Finite element method for slope stability analysis with its applications [J]. Chinese journal of computational mechanics, 2001, 18(1): 81-87.
- [3] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes [J]. Journal of geotechnical engineering, 1996, 122(7): 577-596.
- [4] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Géotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [5] GENS A, HUTCHINSON J N, CAVOUNIDIS S. Three-dimensional analysis of slides in cohesive soils [J]. Géotechnique, 1988, 38(1): 1-23.
- [6] 卢坤林, 朱大勇, 杨扬. 二维与三维边坡稳定性分析结果的比较与分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 150-154, 161.
LU K L, ZHU D Y, YANG Y. Comparison and analysis of 2D and 3D slope stability analysis results [J]. Rock and soil mechanics, 2012, 33(S2): 150-154, 161.
- [7] 谭文辉, 谢谟文, 蔡美峰. 复杂边坡稳定性的二维与三维分析 [J]. 岩土力学, 2005, 26(S2): 49-51.
TAN W H, XIE M W, CAI M F. Two-dimensional and three-dimensional limit equilibrium analyses of complex slope stability [J]. Rock and soil mechanics, 2005, 26(S2): 49-51.
- [8] FARZANEH O, ASKARI F, GANJIAN N. Three-dimensional stability analysis of convex slopes in plan view [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2008, 134(8): 1192-1200.
- [9] ZHANG K, CAO P, LIU Z Y, et al. Simulation analysis on three-dimensional slope failure under different conditions [J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2011, 21(11): 2490-2502.
- [10] 陈传胜, 蒋欣. 三维与二维滑坡稳定分析的比较研究 [J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 194-198.
CHEN C S, JIANG X. Comparative study of 3D and 2D landslide stability analyses [J]. Journal of natural disasters, 2009, 18(1): 194-198.
- [11] 刘红帅, 年廷凯, 万少石. 三维边坡稳定性分析中的边界约束效应 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(3): 638-644.
LIU H S, NIAN T K, WAN S S. Effect of boundary constraint condition on the stability analysis of 3D slope [J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2010, 40(3): 638-644.
- [12] 刘华丽, 朱大勇, 钱七虎, 等. 边坡三维端部形状对安全系数影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 576-580.
LIU H L, ZHU D Y, QIAN Q H, et al. Impact of three-dimensional end's shape of slopes on factor of safety [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2011, 7(3): 576-580.
- [13] 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 Z Y, MI H L, WANG X G. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2001, 23(5): 525-529.
- [14] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977, 103(9): 971-986.
- [15] BALIGH M M, AZZOUZ A S. End effects on stability of cohesive slopes [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1975, 101(11): 1105-1117.
- [16] BAKER R, LESHCHINSKY D. Stability analysis of conical heaps [J]. Soils and foundations, 1987, 27(4): 99-110.
- [17] RASSAM D W, WILLIAMS D J. 3-Dimensional effects on slope stability of high waste rock dumps [J]. International journal of surface mining, reclamation and environment, 1999, 13(1): 19-24.
- [18] 卢坤林, 朱大勇. 坡面形态对边坡稳定性影响的理论与试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 35-42.
LU K L, ZHU D Y. Theoretical and experimental study of effect of slope topography on its stability [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2014, 33(1): 35-42.
- [19] 黄少平, 晏鄂川, 尹晓萌, 等. 不同临空条件的层状反倾岩质边坡倾角变形几何特征参数影响规律 [J]. 地质科技通报, 2021, 40(1): 159-165.
HUANG S P, YAN E C, YIN X M, et al. Action law of geometrical characteristic parameters in the anti-dip rock slopes under different free face condition [J]. Bulletin of geological science and technology, 2021, 40(1): 159-165.
- [20] 王亮清, P. H. S. W. Kulatilake, 唐辉明, 等. 双临空面岩质边坡滑动与倾角破坏的运动学分析 [J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 72-77.
WANG L Q, KULATILAKE P H S W, TANG H M, et al. Kinematic analyses of sliding and toppling failure of double free face rock mass slopes [J]. Rock and soil mechanics, 2011, 32(S1): 72-77.
- [21] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346.
ZHAO S Y, ZHENG Y R, SHI W M, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2002, 24(3): 343-346.