

基于 ABAQUS 的变电站 GIL 管廊基坑边坡稳定性分析

孙晓雷, 夏 强, 申 政

(山东送变电工程公司, 济南 250000)

摘要: 气体绝缘金属封闭输电线路综合管廊工程(gas-insulated metal-enclosed transmission lines, GIL 管廊)以其安全、可靠的优势,广泛应用于城市变电站建设。GIL 管廊安全施工的前提是保证开挖基坑边坡稳定。基于 Mohr-Coulomb 强度准则,采用 ABAQUS 模拟上软下硬地层 GIL 管廊土方开挖边坡地层变形情况,利用地应力平衡法和强度折减法确定边坡安全系数,验证工程支护方案的合理性,进而分析边坡失稳机理,为边坡地层变形预测、支护方案确定提供参考。结果表明,ABAQUS 可以有效模拟强度折减;加固后边坡的最大位移减小 60.5%,地面沉降不再出现,安全系数由原来的 0.987 提高至 1.527,增大 54.7%;上软下硬地层边坡开挖时,上部软弱土层形成按地层分布的多个潜在滑移面,下部岩层会以楔形体滑移模式对坡脚形成挤压作用。

关键词: 变电站 GIL 管廊; 上软下硬地层; 基坑边坡稳定; ABAQUS 数值模拟; 强度折减; 失稳机理

中图分类号: U452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0295-07

目前我国城市地上建设面积十分紧张,GIL 管廊以其运行安全、设备可靠、传输高效等优势,在城市变电站建设中得到了广泛应用^[1]。GIL 管廊安全施工的前提是保证开挖基坑边坡稳定,边坡的地层变形会导致坡面发生横向位移,坡顶发生地面沉降,严重的会导致土坡整体滑移失稳,严重影响施工安全^[2-3]。而合理有效的坡面支护是控制地层变形的关键,因此有必要对 GIL 管廊土方开挖工程进行边坡稳定性分析,同时验证支护方案的合理性。

目前关于 GIL 管廊基坑边坡稳定性分析大多通过数值模拟进行,通过强度折减法确定边坡的安全系数,指导实际工程在不同地层条件和工况下安全施工。陈国军等^[4]、董杰华等^[5]运用 ABAQUS 进行数值模拟计算,采用强度折减法获取边坡安全系数,发现在相同工况下地层黏聚力对边坡稳定性的影响最大。夏梓强和王新^[6]通过 ABAQUS 实例分析发现,认为选择合适边坡材料特征的本构模型,且对边坡失稳区域进行局部强度折减计算得到的安全系数更准确。刘明扬等^[7]利用 ABAQUS 模拟天然状态与暴雨条件下的边坡稳定性,认为坡顶处位移突变和塑性区是否贯通为评价标准时,安全系数与实际工程更加贴合。徐田雨^[9]验证了强度折

减理论在有限元分析软件 ABAQUS 中的适用性,总结了判断边坡破坏的条件。

本文依托某变电站新建工程,针对 GIL 管廊土方开挖工程边坡稳定性问题,采用 ABAQUS 模拟上软下硬地层 GIL 管廊土方开挖边坡地层变形情况,利用地应力平衡法和强度折减法确定边坡安全系数,验证工程支护方案的合理性,进而分析边坡失稳机理,为边坡地层变形预测、支护方案确定提供参考。

1 工程概况

1.1 工程水文地质条件

根据岩土工程勘察报告,在勘察范围内,场地地层自上而下由杂填土、粉质黏土、全风化火山角砾岩、强风化火山角砾岩、中等风化火山角砾岩组成。各岩土层物理力学参数如表 1 所示。

①杂填土:杂色,主要成分为黏性土及风化岩石碎块,层厚为 0.20~2.40 m;②粉质黏土:黄褐色,可塑状态为主,局部硬塑,稍湿,该层局部分布,主要分布在站址区的西侧,层厚为 1.20~2.10 m,层底埋深为 2.50~4.50 m,层底标高为 21.19~23.88 m;③全风化火山角砾岩:黄褐、紫红色,原岩结构全部破坏,呈砂状,该层层厚为 0.30~1.20 m,层底埋深为 1.50~5.25 m,层底标高为 20.44~26.80 m。

收稿日期: 2023-12-28

作者简介: 孙晓雷(1987—),男,河南郑州人,工程师,研究方向为变电站工程建设;夏强(1992—),男,江苏淮安人,硕士,工程师,研究方向为变电站工程建设;申政(1998—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为变电站工程建设、基坑边坡稳定性。

表 1 岩土层物理力学参数

岩土层名称	天然重 度(γ)/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 (c)/ kPa	内摩擦 角(φ)/ ($^{\circ}$)	弹性模 量(E)/ MPa	泊松比 (μ)
杂填土	18	5	15	35	0.35
粉质黏土	19.3	49	11	44	0.35
全风化火山角砾岩	20	10	30	32	0.3
强风化火山角砾岩	21	55	29	85	0.3
中等风化火山角砾岩	25	60	40	100	0.3

④强风化火山角砾岩:紫红、灰黄色,火山角结构,班杂构造,节理发育,呈块状局部泥岩、岩软层,岩石质量指标(rock quality designation, RQD)约为 30%~35%,岩芯采取率约为 75%,该层层厚为 1.10~6.80 m,层底深为 1.50~8.00 m,层底标高为 18.69~30.41 m。⑤中等风化火山角砾岩:紫红、灰黄色,火山角结构班杂构造,节理发育呈块状、短状,局部夹泥岩、砂岩软弱夹层,RQD 指标约为 60%~65%,岩芯采取率约为 85%。本次勘测未穿透该层,最大揭露厚度为 9.50 m。

拟建站址区域地下水类型主要为基岩裂隙水。大气降水为其主要补给来源,蒸发和地下径流为其排泄方式。勘测期间勘探深度范围内未发现地下水,丰水季节会有临时性的上层滞水存在。据调查,历史最高水位埋深大于 10 m。

1.2 施工设计方案

图 1 是某变电站新建 4.5 m×4.2 m(4.5 m×4.8 m)GIL 管廊基坑土方开挖平面布置图,GIL 管廊总长度为 72.5 m,其中 4.5 m×4.2 m 管廊长为 62.5 m,4.5 m×4.8 m 管廊长为 10 m,基坑呈“L”状,开挖深度为 5.1~6.7 m。

图 2 是土方开挖施工剖面布置图,GIL 管廊基坑开挖深度为 5.1~6.7 m,地层复杂,采用自然放坡支护形式,强风化岩层放坡坡率为 1:0.5,全风化岩层和土层放坡坡率为 1:1.0,坡面喷射 80 mm 厚钢筋混凝土面层,挂单层 $\Phi 6.5@250\times 250$ 钢筋网,将是 $\Phi 14$ 钢筋击入土层固定钢筋网,钢筋入土 500 mm,间隔 2 m。

2 模型建立及模拟方案

采用有限元分析软件 ABAQUS 模拟上软下硬地层 GIL 管廊土方开挖工程边坡稳定性,数值计算具体过程如下:①建立地层模型,施加初始应力状态,进行地应力平衡,并获取边坡临空面处的地应力值;②边坡开挖,坡面在地应力释放和自重作用下发生位移;③进行强度折减,记录坡面土体的位移、应力状态以及塑性区;④当出现位移突变、塑性区贯通、计算不

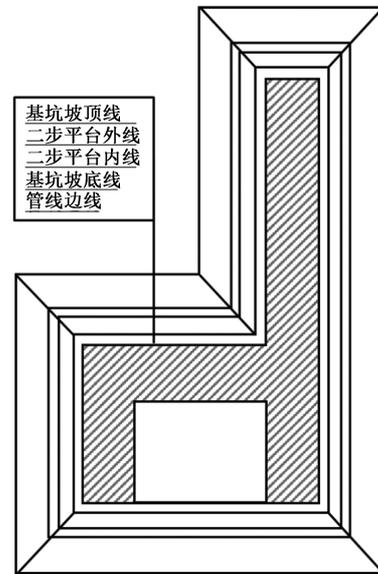


图 1 GIL 管廊基坑开挖平面布置

收敛时,可认为边坡失稳,终止计算^[9-12]。

考虑 GIL 管廊基坑的对称性,取一侧边坡建立三维模型进行模拟,图 3 是后建立的基坑沿线地层及开挖后边坡模型。模型的边界条件均为:上表面为自由边界,下表面为固定约束,四周为法向约束,单元采用八结点线性六面体单元(C3D8)。计算中本构关系遵循 Mohr-Coulomb 强度准则,将边坡特征部位位移突变作为边坡失稳的判据。

通过强度折减法^[13]确定边坡安全系数,计算中将折减后的参数代入模型进行重复计算,直到模型发生极限破坏,从而确定边坡的安全系数 F_s ,折减后抗剪强度参数计算公式为

$$c_m = c/F_r \quad (1)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan\varphi/F_r) \quad (2)$$

式中: c_m 为强度折减后黏聚力,kPa; c 为土体黏聚力,kPa; F_r 为强度折减系数; φ_m 为强度折减后内摩擦角, $^{\circ}$; φ 为土体内摩擦角, $^{\circ}$ 。

3 沿线边坡数值计算结果分析

分别开展不同工况的数值计算,通过地应力平衡模拟开挖时地应力释放,然后进行强度折减,直到出现位移突变中止计算,通过对比加固前后边坡土体位移、应力状态、塑性区贯通情况以及安全系数变化,验证工程施工过程加固方案的合理性。

3.1 未加固工况模拟结果

图 4 是未经加固的沿线坡应力云图,由图 4 可知,在边坡临空面应力下降,这是由于土方开挖导致边坡临空面地应力释放,而在坡角处地方出现应力集中,这是由地层变形相互挤压导致。图 5 是施

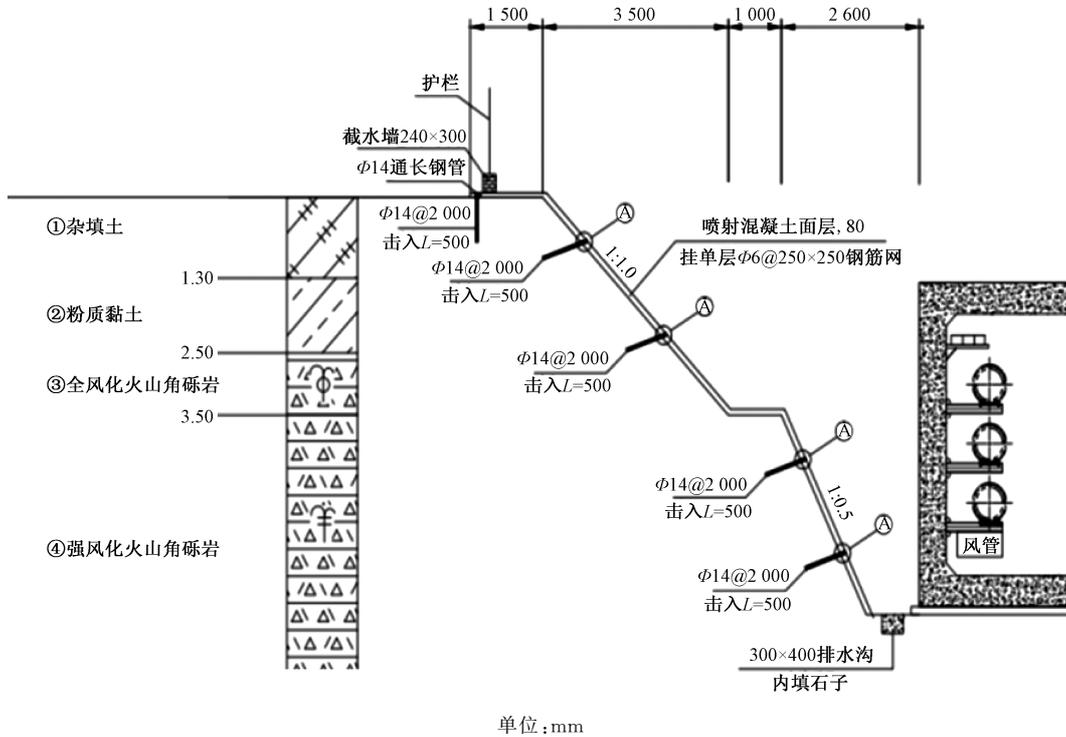


图 2 土方开挖施工剖面布置

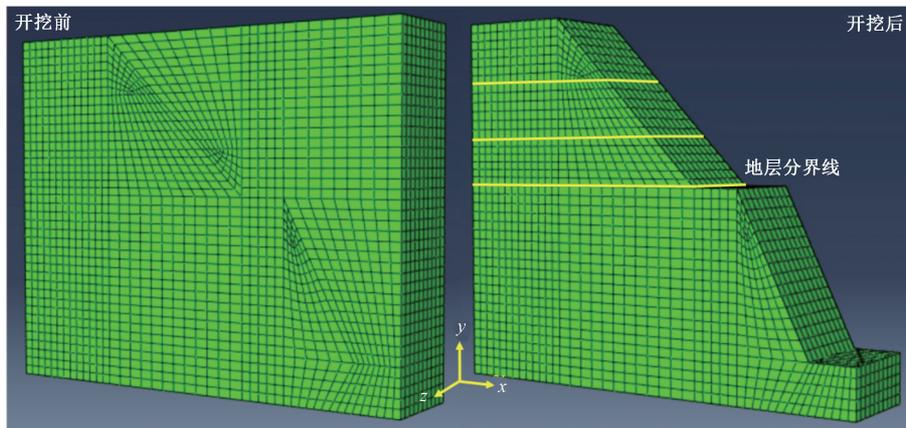


图 3 基坑边坡有限元模型网格划分

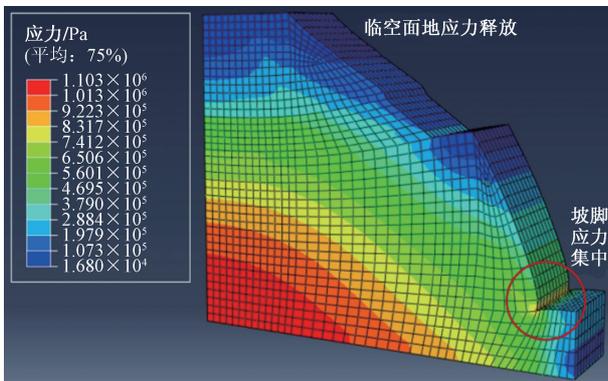


图 4 未加固边坡应力云图

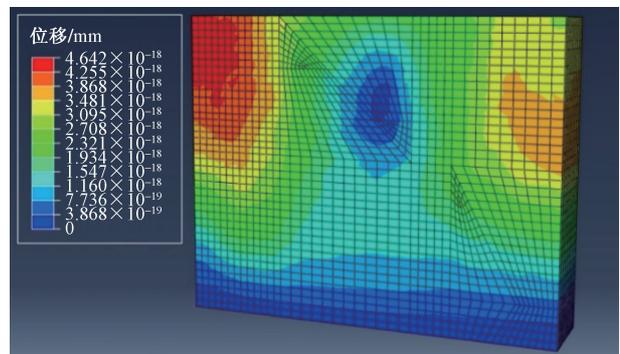


图 5 施加地应力后地层位移云图

施加地应力后地层的位移云图,从图 5 中可以看出,施加地应力对模型的扰动在极小的数量级,因此可以

忽略不计,数值计算结果可靠^[14]。

图 6 是未经加固的沿线坡位移云图,从图中可

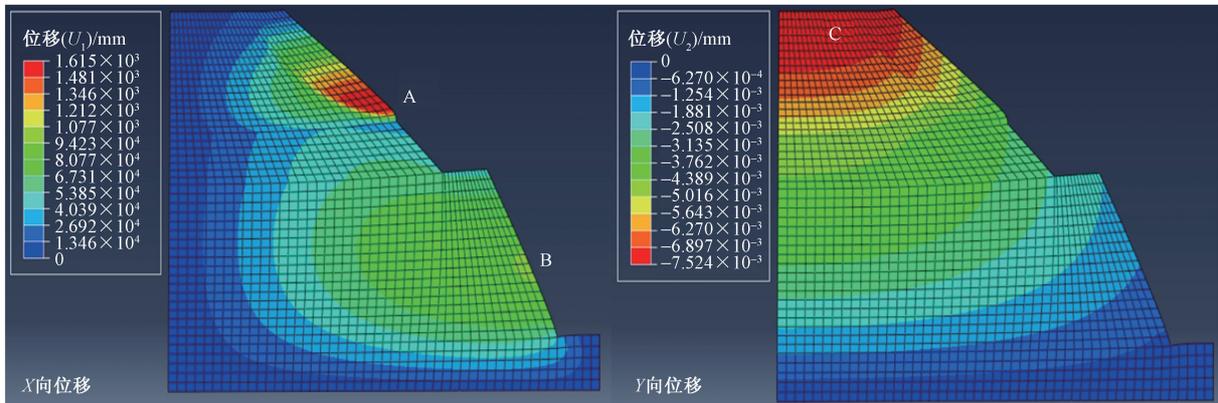


图 6 未加固边坡位移云图

可以看出,第二层粉质黏土处(特征点 A)和最下层坡面中心处(特征点 B)均出现较大的横向位移,同时坡顶面出现了较大的纵向位移,表现为地面沉降,这是由于地应力释放导致地层发生位移,同时在自重影响下,上层软弱土层自承能力差,下层坡脚也出现较大位移,边坡有整体滑移的趋势。而在下层承台处发生较大的 Y 正方向位移,这是由于模型纵深和 Z 方向约束导致单元挤压,实际工程中只有发生整体滑移才会在承台处出现较大向上的竖直位移。

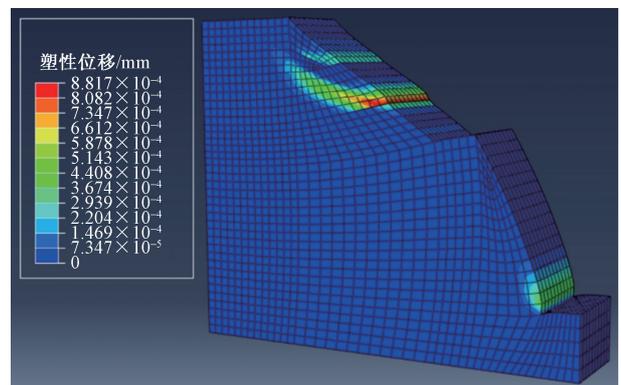


图 7 未加固边坡塑性应变云图

图 7 是未经加固的沿线坡塑性应变云图,从图中可以看出,边坡塑性应变呈现沿地层分布现象,第二层粉质黏土层出现较大的塑性区,贯通至上层杂填土,下层岩质边坡承载能力较好,未出现贯通性破坏面,只在坡角处出现塑性区,变形模式属于弯曲-拉裂^[15]。

3.2 挂钢筋网喷混凝土面层加固工况模拟结果

经过挂钢筋网喷混凝土面层对边坡进行加固,并用土钉固定钢筋网后,边坡稳定性明显提高。图 8 是经过加固的沿线边坡位移云图,相较于未加固

的边坡,边坡位移明显减小,特征点 A 处最大横向位移由 1.62 mm 减小至 0.64 mm,减小 60.5%,由于挂钢筋网喷射混凝土面层和土钉的约束作用,坡顶最大沉降由未加固时的 7.52 mm 不再出现,最大竖直位移出现在表面,可认为是由两种不同材料接触导致。图 9 是经过加固的沿线边坡塑性应变云图,从图中可以看出,加固后的边坡塑性应变大幅下降,塑性区明显减小,呈现散乱分布,不存在整体贯通的塑性区^[16-18]。

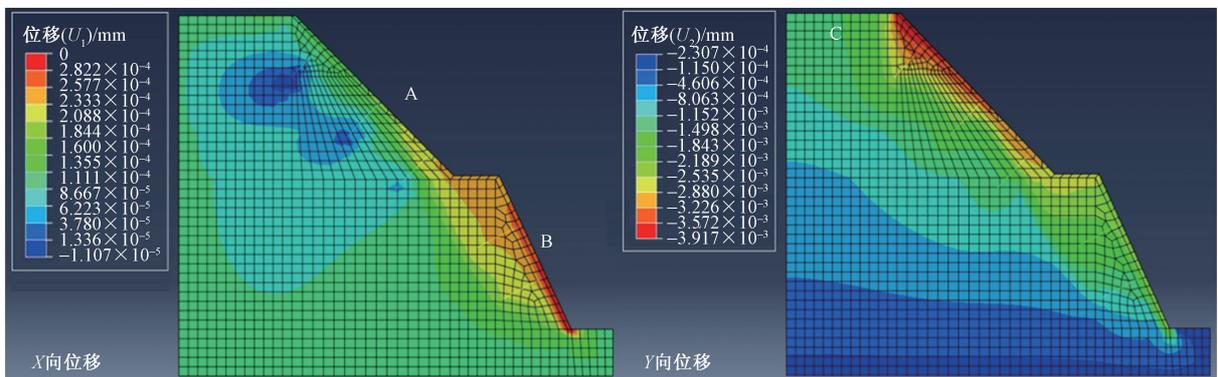


图 8 加固后边坡位移云图

图 10 是通过提取特征点 A 和 B 水平位移和强度折减系数作的关系曲线,其拐点即为边坡的安全系数,从图中可以看出,未加固边坡安全系数 F_s 为 0.987,加固后边坡安全系数 F_s 为 1.527,增大 54.7%,证明施工中采取的挂钢筋网喷混凝土面层加固方案能够有效加固边坡,增加其稳定性。

4 “L”状边坡稳定性数值计算结果

鉴于本工程 GIL 管廊设计的特殊性,单独分析拐角处“L”状边坡的稳定性,以验证支护方案的可行性。图 11 是“L”状边坡有限元模型网格划分、模拟结果应力云图、位移云图和塑性应变云图,从图中可以看出,边坡未出现应力集中点,说明内部没有因较大位移而产生潜在危险点,边坡未出现连续贯通的塑性区,未出现整体滑移,最大位移为 0.681 mm,安全系数为 1.374,满足要求。由此可以验证, GIL 管廊基坑“L”状边坡处于安全稳定状态,因此施工中采取的挂钢筋网喷混凝土面层加固方案合理可行。

5 边坡失稳形成机理分析

随着基坑土方开挖,边坡临空面应力得到释放,

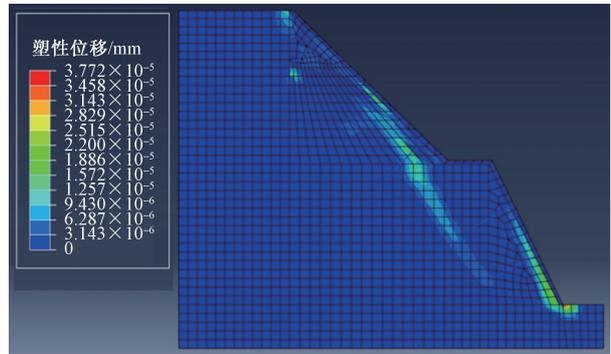


图 9 加固后边坡塑性应变云图

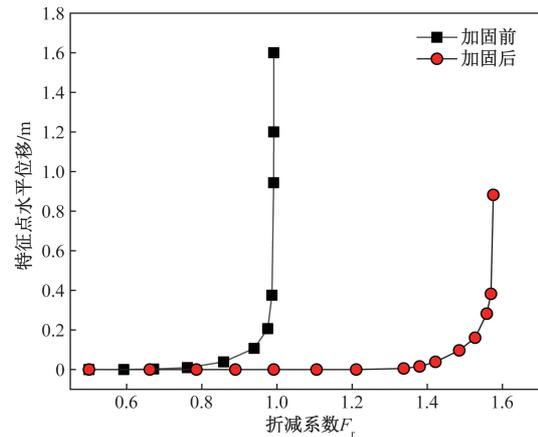


图 10 特征点 A 水平位移随强度折减系数变化

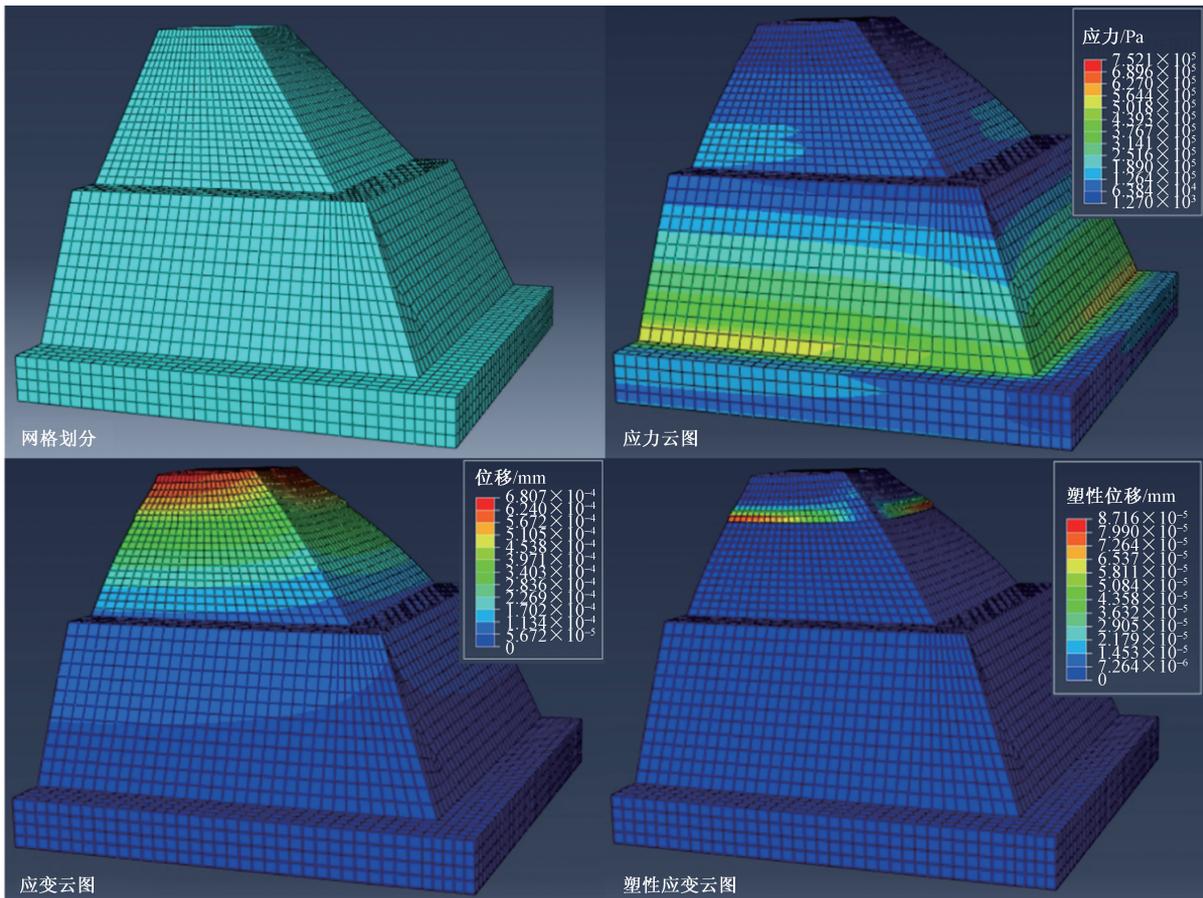


图 11 基坑“L”状边坡稳定性数值计算结果

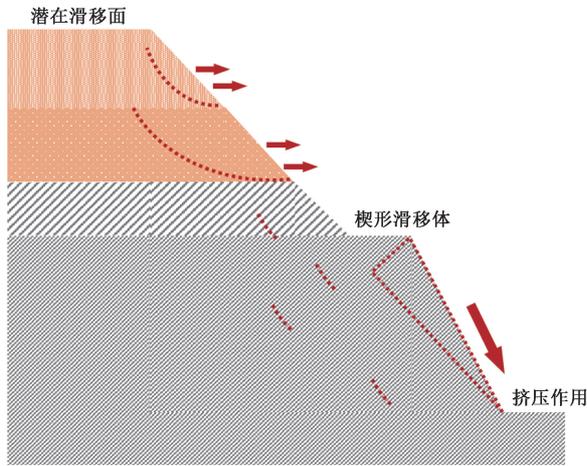


图12 开挖面被动破坏颗粒位移示意图

地层有向临空面位移的趋势,不断被挤压密实,在自重作用下,进而形成潜在滑移体,本工程中地层较为复杂,呈现上软下硬特点。不同地层的物理力学参数不同,导致出现多个不同时间形成、不同规模的潜在滑移体,当多个滑移面相互贯通时,边坡即发生整体失稳。而下部岩层会因地应力释放和重力作用,以楔形体滑移模式对坡脚形成挤压作用,形成应力集中,当坡脚应力超过岩体屈服应力时,边坡出现整体破坏^[19-20]。

6 结论

(1)强度折减法可以通过 ABAQUS 模拟有效实现,通过特征点位移拐点对应的折减系数即为安全系数。

(2)经过加固后,边坡的最大位移减小 60.5%,地面沉降不再出现,安全系数由原来的 0.987 提高至 1.527,增大 54.7%,边坡塑性区明显减少,稳定性显著提高,“L”状坡安全系数为 1.325,加固方案合理有效可行,可以为类似 GIL 管廊基坑边坡工程提供借鉴。

(3)上软下硬地层边坡开挖时,上部软弱土层形成按地层分布的多个潜在滑移面,上部当内部塑性区贯通时,边坡发生整体滑移。而下部岩层会因地应力释放和重力作用,以楔形体滑移模式对坡脚形成挤压作用。

参考文献

[1] 岑文祥,周文斌,钟俊彬.以城市建设区域变电站为核心的综合管廊方案探讨[J].特种结构,2020,37(4):30-34.

- [2] 王轶飞.浅谈城市地下综合管廊的设计及明挖法施工技术应用[J].工程质量,2016,34(S1):154-158.
- [3] 尹鹏,周晋,李喜来.GIL综合管廊工程全过程风险管控技术研究[J].电力勘测设计,2023(4):68-76.
- [4] 陈国军,毛少霞,张雪云,等.基于ABAQUS的倾斜微型桩护坡承载特性研究[J].科技和产业,2023,23(19):145-150.
- [5] 董杰华,黄浩,徐中来,等.基于ABAQUS的坡地边坡稳定性影响因素敏感性分析[J].煤炭技术,2021,40(1):62-65.
- [6] 夏梓强,王新.基于局部强度折减法和本构模型的非均质边坡稳定分析[J].云南水力发电,2022,38(11):64-67.
- [7] 刘明扬,宋顶峰,付晓东,等.降雨作用下土石混合体边坡力学参数弱化规律与稳定性分析[J].科技和产业,2021,21(8):313-318.
- [8] 刘仁兵,许巧.基于ABAQUS数值模拟法降雨条件下的边坡稳定性分析[J].江西建材,2023(7):152-154.
- [9] 徐田雨.土工格室防护边坡稳定性数值分析[D].济南:山东大学,2013.
- [10] 董杰华,黄浩,徐中来,等.基于ABAQUS的坡地边坡稳定性影响因素敏感性分析[J].煤炭技术,2021,40(1):62-65.
- [11] 刘昱君,刘明扬,杜文杰.基于广义Hoek-Brown准则的多参数强度折减法在边坡稳定性分析中的应用[J].科技和产业,2021,21(8):255-261.
- [12] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004(19):3381-3388.
- [13] 祝加欣.基于ABAQUS软件的某基坑项目边坡稳定性分析[J].工程技术研究,2023,8(3):27-29.
- [14] 王家全,常志凯,林桂武,等.地下水对管廊基坑岩质边坡稳定性的影响研究[J].水力发电,2021,47(7):43-47.
- [15] 张海锋,李向阳,柴卓,等.基于ABAQUS的露天矿山边坡稳定性分析与工程应用[J].新疆有色金属,2023,46(5):65-67.
- [16] 王玉成.折线边坡在露天煤矿应用研究[J].煤炭技术,2023,42(6):201-203.
- [17] 邱兵,白慧林.锚杆挡墙加固高陡土质边坡设计探讨——以岗白路K8+290~K8+400段路基边坡为例[J].科技和产业,2023,23(21):221-226.
- [18] 夏艺峰,尹国华,林睿,等.基于模糊综合评判的边坡地质灾害风险评价方法及工程应用[J].科技和产业,2022,22(10):378-382.
- [19] 尹鹏,周晋,李喜来.GIL综合管廊工程全过程风险管控技术研究[J].电力勘测设计,2023(4):68-76.
- [20] 郝艳捧,梁苇,潘锐健,等.输电线路智能带电检修关键技术研究综述[J].电力自动化设备,2022,42(2):163-175.

Stability Analysis of Foundation Pit Slope of GIL Pipe Gallery of Substation Based on ABAQUS

SUN Xiaolei, XIA Qiang, SHEN Zheng

(Shandong Transmission and Distribution Engineering Company, Jinan 250000, China)

Abstract: With its advantages of safety and reliability, GIL pipe gallery is widely used in the construction of urban substations. The premise of the safe construction of the GIL pipe gallery is to ensure the stability of the slope of the excavation foundation pit. Based on the Mohr-Coulomb strength criterion, ABAQUS was used to simulate the deformation of the slope excavated in the GIL pipe gallery of the upper and lower soft and hard strata, and the in-situ stress balance method and the strength reduction method were used to determine the slope safety factor, so as to verify the rationality of the engineering support scheme, and then analyze the slope instability mechanism, which provided a reference for the prediction of slope stratum deformation and the determination of the support scheme. The results are as follows. ABAQUS can effectively simulate the strength reduction. The maximum displacement of the slope after reinforcement is reduced by 60.5%, the land subsidence no longer occurs, and the safety factor is increased from the original 0.987 to 1.527, an increase of 54.7%. When the slope of the upper soft and lower hard strata is excavated, the upper soft soil layer forms a plurality of potential slip surfaces distributed according to the strata, and the lower rock strata will form an extrusion effect on the slope foot in a wedge-shaped slip mode.

Keywords: GIL pipe gallery of substation; soft and hard strata at the top; foundation pit slope stability; ABAQUS numerical simulation; strength reduction; instability mechanism