

岩质边坡开挖对近接杆塔基础影响分析

刘燕平¹, 周文俊¹, 章李刚¹, 王金昌²

(1. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 电力设施中大量的杆塔在边坡地基上, 同时在山区公路建设中的边坡开挖会对近接杆塔基础产生影响。文章采用 Plaxis 有限元软件, 根据霍克布朗经验准则分析了岩体参数敏感性, 研究了不同开挖工况下岩质边坡近场位移分布情况, 并确定了相应的变形影响区, 为边坡开挖稳定性和杆塔基础的变形影响提供了理论依据。

关键词: 边坡开挖; 杆塔基础; 霍克布朗经验准则; 敏感性分析; 变形影响区

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0201-05

Analysis of influence of rock slope excavation on adjacent pole and tower foundation

LIU Yan-ping¹, ZHOU Wen-jun¹, ZHANG Li-gang¹, WANG Jin-chang²

(1. Zhejiang Huayun Electric Power Engineering Design Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture of Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In power facilities, a large number of poles and towers are located on the foundation of slope. However, the slope excavation in mountain road construction affects the foundation of adjacent poles and towers. Using PLAXIS finite element software, the paper analyzes the sensitivity of rock mass parameters according to Hoek-Brown empirical criterion, and studies the near field displacement distribution of rock slope under different excavation conditions. In addition, the corresponding deformation influence zone is determined, which provides a theoretical basis for the stability of slope excavation and the deformation effect of pole and tower foundation.

Key words: slope excavation; pole and tower foundation; Hoek-Brown empirical criterion; sensitivity analysis; deformation affected zone

0 引言

电力是整个国民经济中重要的支撑, 基础作为杆塔和地基之间的连接构件, 是输电线路中重要的组成部分, 其稳定性是输电线路正常、可靠工作的前提, 也关系到整体输电网络的安全。杆塔以线状分布于不同区域, 主要包括平原区和山岭区, 而平原区以表面平整的分布软土地层为主, 而山岭区以倾斜的表面含有坡积层不同风化的岩层为主。

在土地资源紧缺以及环保要求提高的现实状况下, 杆塔建成后不可避免的出现邻近各种工程建设, 譬如开挖、堆填等。新建结构物邻近既有结构物施工, 并可能对既有结构物产生不利影响的工程称为近接工程, 有关近接工程的施工称为近接施工^[1]。针对周边近接新建工程施工对杆塔基础的影

响研究尚不多见。岩土体开挖堆卸载工程施工会扰动周边地层, 引起土体应力场变化, 影响杆塔基础, 从而对杆塔结构安全和正常使用产生影响, 情况严重的甚至会导致结构过早的破坏和失效, 影响电网的安全使用。本文以山区杆塔基础为背景, 研究岩质边坡开挖对杆塔基础的影响。

1 数值模型建立

1.1 计算模型

计算以典型边坡横断面为例, 如图1所示。整体尺寸为宽210m、高125m, 分步开挖, 每次开挖深度8m, 分5次开挖, 边坡底宽62m、顶宽112m。以Plaxis有限元软件为计算平台, 建立数值分析模型, 采用高次插值函数的平面三角形15节点单元

进行网格部分,如图2所示。模型共1153个单元,9738个节点。计算模型采用平面应变,在模型左、右侧和底部边界均施加与之相垂直的约束条件。

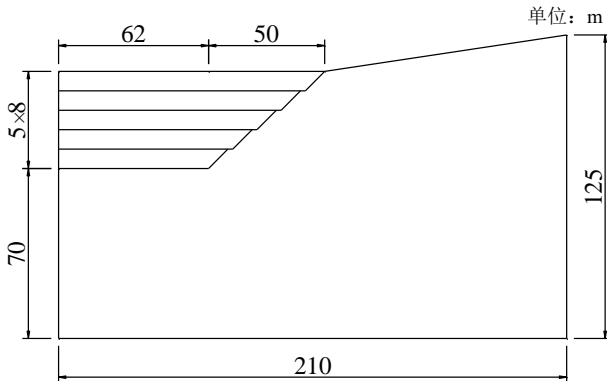


图1 边坡断面的计算示意图

Fig. 1 Calculation diagram of slope section

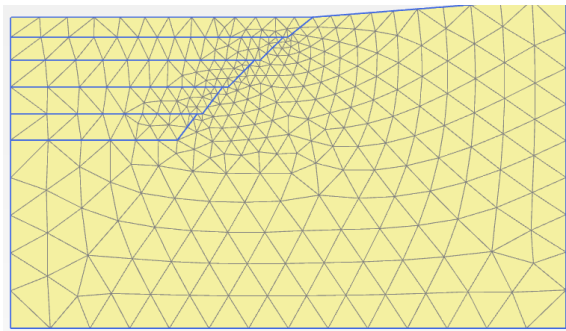


图2 有限元网格模型图

Fig. 2 Finite element mesh model diagram

1.2 本构模型及参数

Plaxis 有限元软件内嵌多种经典及高级岩土体本构模型,能模拟复杂岩土结构和施工过程,在岩土工程研究领域得到广泛应用。计算采用霍克布朗(Hoek-Brown)经验准则对边坡进行计算分析。该经验准则采用最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 的关系式来描述岩体临界受力状态^[2],见式(1)所示:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

式中: m_b 为完整岩石参数 m_i 的折减; s , a 为岩块的材料参数,由地质强度指数 GSI 和扰动因子 D 共同确定。

式(1)中的 s 和 a 可由式(2)~(4)来确定:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2)$$

式中: m_i 可根据岩石的类型进行确定。

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right] \quad (4)$$

岩石的单轴抗压强度 σ_c 可根据完整岩石单轴抗压强度 σ_{ci} 确定:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} s^a \quad (5)$$

由式(1)~(4)可以看出,岩石的Hoek-Brown强度可由 m_i 、 GSI 、 D 和 σ_{ci} 这4个参数进行确定,可以通过查表的方法确定准则中所需的参数^[3]。为简化起见,本文选取常见岩体砾岩作为代表,采用单一土层进行计算分析。砾岩的基本参数如下:重度 $r=25.4 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E_{rm}=3700 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.15$,单轴抗压强度 $\sigma_{ci}=308 \text{ MPa}$,完整岩石参数 $m_i=19$,地质强度指标 $GSI=55$ 。杆塔基础以ZF1660灌注桩单桩进行分析,桩长32m,桩径1m,C30混凝土材料,采用嵌入式梁单元进行模拟。

2 岩体参数敏感性分析

霍克布朗模型虽给出了确定岩体整体抗剪强度的方法,但采用该方法确定的岩石参数存在一定的主观性,尤其是岩体参数 GSI 是一个范围值,且不同地质人员对相同的岩石所得出的 GSI 范围也会出现误差,需要定量分析这些差异对边坡稳定性计算产生的影响。此外模型中的其他3个参数单轴抗压强度 σ_{ci} 、完整岩石参数 m_i 以及扰动因子 D 对稳定性也有影响。完整岩石参数 m_i 为常量,由岩石的具体种类决定^[4]。本文选取砾岩进行研究,对模型的 GSI 、 σ_{ci} 以及 D 进行敏感性分析,采用计算得到的安全系数 F_s 作为指标,通过各曲线的变化趋势判断各参数对边坡开挖稳定性的影响。

根据霍克布朗经验准则,扰动因子 D 取值范围0.7~1, GSI 取值范围10~80。扰动因子 D 反应的是爆破效果,是岩体在爆破开挖过程中所受的扰动情形,其值越小越好,但开挖卸载不可避免会改变原有岩体的应力分布。为简化分析过程,先将 m_i 与 D 设为定值, D 取建议值0.7^[5],即边坡开挖破坏程度较低,调整参数 GSI 与 σ_{ci} 进行参数敏感性分析,然后再对扰动因子 D 进行敏感性分析。

2.1 GSI 与 σ_{ci} 敏感性分析

在霍克布朗模型中,参数 GSI 是描述岩体结构与结构面表面特征的指标,图3为砾岩参数敏感性曲线,可以看出 GSI 越大边坡稳定性越高。 F_s 与 GSI 的变化规律可分为两个部分:当 GSI 为10~50时, F_s - GSI 曲线表现为线性相关,且 F_s 增长趋势较为平缓; GSI 为50~90时, F_s - GSI 曲线表现为指数关系,安全系数 F_s 随 GSI 的增加而急剧增加。 σ_{ci} 为岩

体的单轴抗压强度, 在图 4 的 F_s - σ_{ci} 曲线中可以发现, 安全系数随 σ_{ci} 近似线性增大。但当 $GSI=10$, $\sigma_{ci}<40$ MPa 后, 由于参数整体取值过小导致模型计算失败, 出现部分曲线数据缺失。

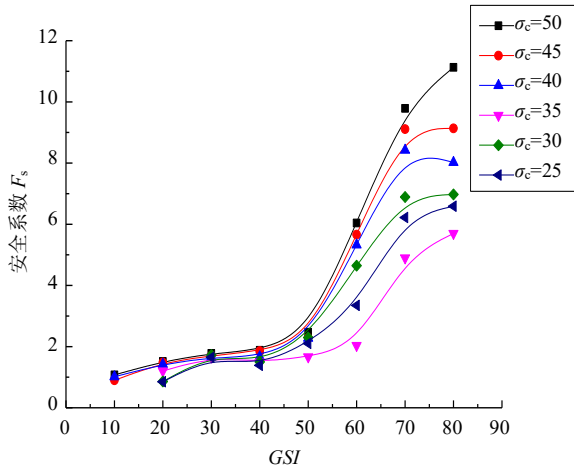


图 3 F_s - GSI 曲线
Fig. 3 F_s - GSI curve

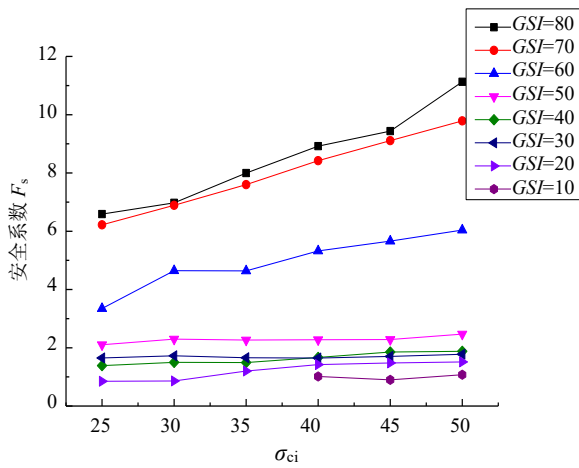


图 4 F_s - σ_{ci} 曲线
Fig. 4 F_s - σ_{ci} curve

2.2 扰动因子 D 敏感性分析

扰动因子 D 反映了边坡开挖对原有岩体的扰动程度, 扰动越小 D 值越小, 边坡安全系数 F_s 越高。图 5 为不同扰动因子下不同的抗压强度 GSI 和 σ_{ci} 对边坡安全系数 F_s 的影响, 从 F_s - D 曲线的整体变化趋势可以看出, 其与 F_s - σ_{ci} 曲线一样呈线性相关, F_s 随 D 的增加而减小。图中 $GSI=10$ 曲线部分数据缺失原因同 2.1 节。

上述参数各自具有不同的物理意义, 为直观判断各参数对边坡稳定性影响的大小, 采用相对误差的方法对数据进行处理。假设系统特性 L 是由 n 个因素 $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 共同决定, 系统模型表述为 $L = f\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 系统特性为 L^* 。各因素的变

动都在各自变动范围内变化, 某因数引起系统特性 L^* 偏离基准状态 L 为 ΔL , 敏感性 $\delta_k(a_k)$ 具体描述为: $\delta_k(a_k) = (|\Delta L|/L) / (|\Delta a_k|/a_k)$ 。 GSI 、 σ_{ci} 和 D 这三个变量分析结果如图 6 所示, 通过求解曲线交点处斜率来判断各参数的敏感性变化。可以发现图中各曲线斜率 $k_{GSI} > k_D > k_{\sigma_{ci}}$, 因此判断敏感性 $GSI > D > \sigma_{ci}$, 安全系数 F_s 对地质参数 GSI 最为敏感。

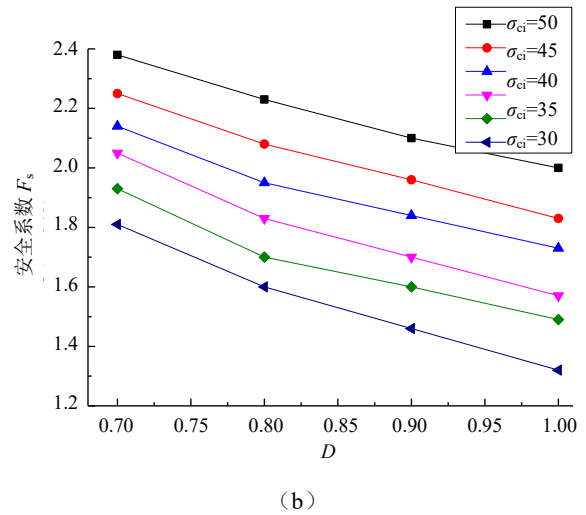
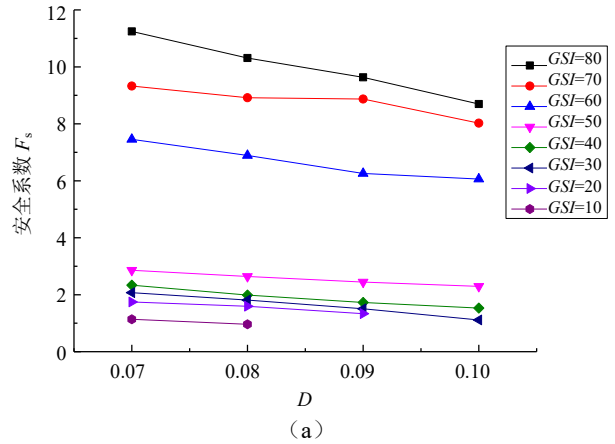


图 5 F_s - D 曲线
Fig. 5 F_s - D curve

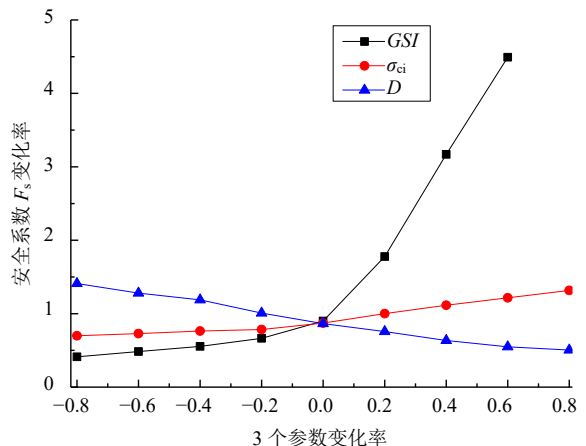
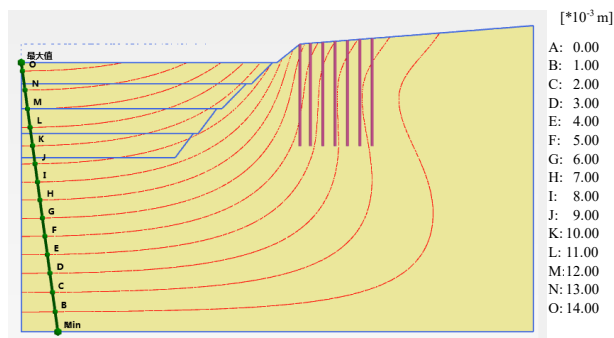


图 6 各参数变化规律
Fig. 6 Variation of each parameter

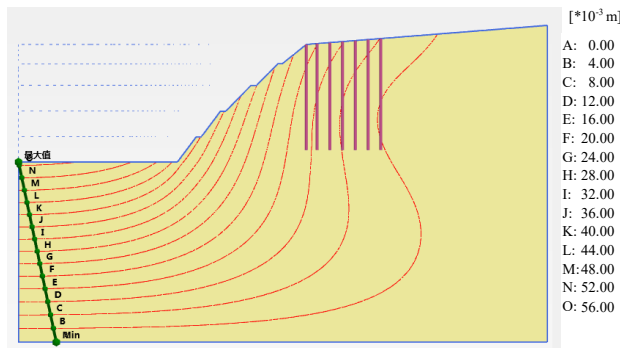
3 开挖对杆塔基础变形及影响区划分

3.1 变形特性分析

开挖过程中不同开挖深度下的位移等值线分布规律总体相似，其中第一次开挖和第五次开挖位移等值线分布如图7所示。随着开挖深度的增加，最大位移逐步增加，并向远场传递。最大位移等值线由开挖的底部向右下方逐步减小，对于不同位置处的杆塔基础位于不同的位移等值线影响范围内，受边坡开挖的影响也有差异。因此在实际工程应用中，应该结合杆塔与坡顶的相对位置划分合理的影响范围，避免杆塔基础产生过大变形。



(a) 第一次开挖



(b) 第五次开挖

图7 不同开挖工况总位移分布图

Fig. 7 Total displacement distribution of different excavation conditions

3.2 位移影响区划分

提取不同开挖工况下坡底及距离坡顶不同位置处（5~30m，间隔5m）的杆塔基础（0~30m，间隔5m）最大位移，见表1所示。由表可知，边坡开挖产生的最大位移在坡底，其最大位移远大于位于坡顶不同距离的杆塔基础的位移；同一工况下距离坡顶水平距离越远，开挖产生的位移越小。

根据上述位移影响分析，参考《架空输电线路杆塔基础设计规范》^[6]第9.6.3条中规定的不同地基土类别下单桩水平位移，以±10mm最大位移为

控制值，±5mm最大位移为警戒值，绘制不同工况下杆塔基础最大位移等值线分布图如图8所示。定义最大位移小于5mm的为弱影响区；最大位移大于5mm且小于10mm的为中影响区，该范围内的杆塔基础虽然位移尚未达到控制值，但应引起高度重视，进行合理的监测，采取有效的防范措施，并制定应急处理方案，防止基础变形继续增加；最大位移大于10mm的为强影响区，其位移超过控制值，在基坑施工过程中必须采取相应措施对杆塔基础进行保护，使位移满足控制要求。

表1 不同位置的最大位移

Table 1 Maximum displacement at different positions

位置	坡底/ mm	距离坡顶的水平距离/m						
		0	5	10	15	20	25	30
工况一	14.4	6.4	5.5	4.7	4.0	3.4	2.9	2.5
工况二	28.3	11.2	9.8	8.4	7.2	6.2	5.3	4.6
工况三	41.6	14.8	13.2	11.4	9.8	8.5	7.3	6.3
工况四	51.1	16.9	15.1	13.1	11.4	9.8	8.5	7.3
工况五	57.0	18.1	16.2	14.0	12.2	10.6	9.1	7.9

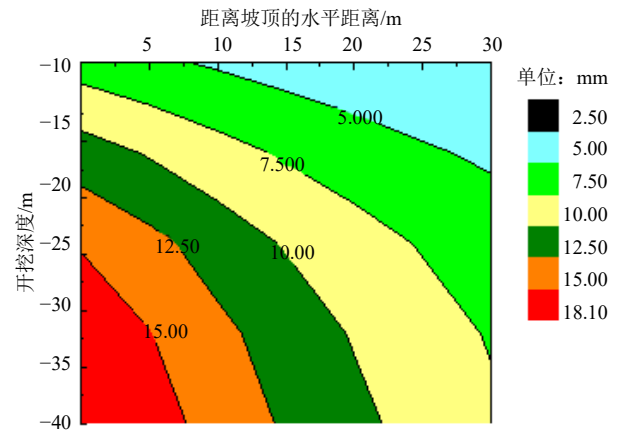


图8 不同开挖工况下杆塔基础最大水平位移等值线分布图

Fig. 8 Isoline of maximum lateral displacement of tower foundation under different excavation conditions

4 结 论

本文基于Plaxis有限元软件建立了典型岩质边坡开挖数值模型，得出以下结论：

(1)对霍克布朗准则进行敏感性分析，从计算结果得出参数敏感性为 $GSI > D > \sigma_{ci}$ 。

(2)岩质边坡开挖时最大位移位于开挖底面处，随着开挖深度的增加，最大位移逐步增加，并向远场传递。

(3)边坡开挖将引起坑外近接杆塔基础产生变形，根据开挖变形特性和杆塔基础的控制标准，

可将开挖变形影响区划分为弱影响区、中影响区和强影响区。

此外, 边坡开挖对杆塔基础的影响不仅与开挖深度、坡顶和塔基的水平距离有关, 还与塔基的桩长等相关, 日后还应继续深入研究。同时, 杆塔基础的存在也会改变岩土体刚度, 影响位移场分布特点, 因此对于边坡开挖对既有杆塔基础的影响, 也应结合具体情况单独分析, 判断对结构的扰动程度, 从而进行针对性保护。

参考文献

- [1] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- QIU Wen-ge. The study on mechanics principle and countermeasure of approaching excavation in underground works[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [2] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI e 2018 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 8(1): 1-19.
- [3] 朱合华, 张琦, 章连洋. Hoek-Brown 强度准则研究进展与应用综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(10): 1945-1963.
- ZHU He-hua, ZHANG Qi, ZHANG Lian-yang. Review of research progresses and applications of Hoek-Brown strength criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 1945-1963.
- [4] 刘立鹏, 姚磊华, 陈洁, 等. 基于 Hoek-Brown 准则的岩质边坡稳定性分析[C]//中国岩石力学与工程学会. 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2010: 297-304.
- LIU Li-peng, YAO Lei-hua, CHEN Jie, et al. Rock slope stability analysis based on Hoek-Brown failure criterion[C]// China Society of Rock Mechanics and Engineering. Proceedings of the 11th National Symposium on Rock Mechanics and Engineering, 2010: 297-304.
- [5] 黄高峰, 李宗利, 牟声远. Hoek-Brown 准则参数在边坡工程中的敏感性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2163-2167.
- HUANG Gao-feng, LI Zong-li, MU Sheng-yuan. Sensitivity analysis of Hoek-Brown failure criterion parameters on slope projects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2163-2167.
- [6] 国家能源局. 架空输电线路基础设计技术规程: DL/T 5219—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.