

基于土体振动规律的填土边坡地质稳固性勘察技术

Geological Stability Survey Technology for Filled Soil Slope based on Soil Vibration Law

申强利, 田明磊

(河南省地质局生态环境地质服务中心, 郑州 450053)

摘要: 针对三维地质模型勘测填土边坡稳定性敏感度差、稳固性系数计算不准确的问题, 研究基于土体振动规律的建筑场地填土边坡稳固性勘察技术。根据边坡土体振动加速度时程曲线建立模型, 分析振动规律下土体与振动波的动力响应关系和边坡破坏模式, 评价填土边坡稳定性。结果表明: 本文方法所获得的振动波感应、位移勘察检测结果与实际情况一致, 计算边坡稳固性系数为 3.5, 与实际误差不超过 0.5; 边坡稳定性稳固性平均系数为 2.1, 随着振动波次数增加明显下降; 边坡稳固性系数为 1.6, 动波次数达到 2 000 次时降到 0.8, 说明该研究方法对边坡位移及稳固性系数分析更准确, 可行有效。

关键词: 土体振动规律; 填土边坡; 稳固性勘察; PGA 放大系数; 稳固性系数

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 04-0095-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.018

SHEN Qiangli, TIAN Minglei

(Ecological Environment Geological Service Center of Henan Provincial Geological
Bureau, Zhengzhou 450053, China)

Abstract: To address the issues of low sensitivity in stability analysis and inaccurate calculation of stability coefficients for filled soil slopes using three - dimensional geological models, study proposes a site investigation technique for filled soil slope stability based on soil vibration dynamics. By establishing a model derived from the acceleration time - history curve of slope soil vibration, we analyze the dynamic response relationship between the soil and vibration waves under vibrational loading, as well as the slope failure modes, to evaluate the stability of filled soil slopes. The results show that the vibration wave induction and displacement detection results obtained using the proposed method align with actual conditions; The calculated stability coefficient was 3.5, with an error not exceeding 0.5 compared to the actual value; The average stability coefficient was 2.1, showing a significant decrease with increasing vibration wave cycles; When the stability coefficient reached 1.6, it dropped to 0.8 after 2 000 vibration cycles. This demonstrates that the proposed method provides more accurate analysis of slope displacement and stability coefficients, proving it to be feasible and effective.

Key words: soil vibration law; filling slope; stability survey; PGA amplification coefficient; stability coefficient

0 引言

一些边坡施工受到地区环境条件影响, 比如施工区域附近存在公路、铁路、矿山等场所, 当有重型汽车、火车经过或矿山爆破开挖时, 会在地层中形成一定的振动波, 对建筑施工区域的土体产生波动破坏。为了进一步提高建筑施工安全与总体稳定

作者简介: 申强利 (1982—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程、工程地质、水文地质、工程环境影响评价等。

收稿日期: 2023-07-06

岩土力学

性,需加强对场地填土边坡结构稳定性勘测。

近年来,众多学者在边坡稳定性研究方面取得丰富成果。冯治国等^[1]利用地质图像投影分析边坡地形,借助 3D EC 建模,采用极限平衡法分析变形规律并划分等级,为边坡稳定性分析提供直观的图形化方法。唐江涛等^[2]基于边坡二维剖面图,采用 Geobim 软件构建三维模型,模拟分析边坡稳定性,实现从二维到三维的拓展研究。覃欲晓^[3]基于岩土边坡纵向抗剪强度分析边坡稳定性。张雷^[4]提出先解析岩土边坡应力分布,结合抗剪强度勘察模型,为边坡稳定性评估提供量化分析方法。付凯^[5]针对岩土勘察难题,分析关键因素并提出优化方案,提升边坡治理勘察水平。汪超等^[6]结合 BIM、GIS 建模构建三维边坡模型,采用 MPM 方法模拟失稳过程,为边坡稳定性动态分析提供了新的技术手段。张长轩等^[7]基于有限元强度折减法,研究高填方路基不同高度位移与稳定性,揭示了位移随高度变化的规律。耿雪峰^[8]指出边坡稳定性受多重因素影响,填土边坡与天然边坡存在显著差异。王韵等^[9]为评估西电东送枢纽变电站湿陷性黄土高边坡稳定性,布设测线用探地雷达探测,评估特殊地质条件下的边坡稳定性。王攀等^[10]为验证加强超厚填土效果,对光谷八路边坡进行强夯处理并结合参数评估,为超厚填土边坡处理提供实践参考。李怡文等^[11]依托云南富源高填方边坡工程,建立三维加筋边坡模型,研究双因素影响规律并实测验证,为高填方边坡稳定性研究提供模型参考。张健^[12]提出深厚填土高边坡区宜采用组合支挡设计以解决收坡及安全性问题,为高边坡设计提供思路。高咏等^[13]以瑞昌仙姑台段填方边坡为对象,分析其地质等特征并评估边坡稳定性,提出治理措施。

尽管上述研究在边坡稳定性分析方面取得诸多进展,但目前研究未充分考虑土体振动这一因素对边坡稳定性的影响。在实际工程中,施工区域周边的振动源产生的振动波会持续作用于填土边坡,其动态影响不可忽视。基于此,本研究提出基于土体振动规律分析的建筑场地填土边坡地质稳固性勘察与评价技术。通过边坡土体的振动加速度时程曲线建模,提取加速度峰值放大系数以检验土体与振动波的动力响应关系;结合实地勘测参数,推导在振

动规律影响下的边坡破坏模式,并计算边坡稳固性系数,为建筑场地填土边坡的稳固性勘察与评价提供更准确的方法,以保障建筑施工的安全与稳定。

1 建筑场地填土边坡地质稳固性勘察

1.1 填土边坡地质结构特征

建筑施工场地底部岩层结构复杂深厚,分布大量流动型地下水,由下至上为砾石土层、中粗砂填充土层、湿度较大的粉质黏性土层。内部土层分布大量人工填土,由下至上为人工填充土层,主要填充土质为碎石块、砂石、黄土、植物根茎等,填充土层厚度约 5~25 m,其中硬物质含量在 25%~40% 之间。建筑填土区域抗震等级为六级,填土层地震加速值为 0.05g。填埋场地地基加固采用桩基施工工艺,地质结构相对稳定,但填土边坡倾斜度较高,顶部区域容易出现塌陷滑坡等问题。

1.2 边坡地质稳固性分析

土体振动来源具有多样性,不同的振动源对填土边坡的影响机制和程度存在差异。在本研究中,造成土体振动的为邻近交通干道车辆通行产生的振动。振动振幅相对较小,频率较为稳定。当重型车辆的通过会对填土边坡产生持续的动态荷载,长期作用下影响边坡的稳定性。基于土体振动规律数值模型,计算土层各层面参数与土体破坏敏感度之间的关系:

$$M_i = \left| \frac{\Delta N_i}{N_i} \right| \div \left| \frac{\Delta X_i}{X_i} \right| \quad (1)$$

式中: M_i 为第 i 个土层敏感度计算参数的敏感度; N_i 为填土边坡破坏时临界振动次数; ΔN_i 为参数控制后边坡破坏临界振动次数; X_i 为边坡土体动力响应值; ΔX_i 为参数调整后的动力响应值。

根据岩层摩擦角参数,通过数值模型进行振动模拟,代入计算得到振动渐进性摩擦角敏感度,进而计算边坡土体稳定性系数。

$$W = \frac{W \cos \alpha \cdot \tan \beta + \gamma \cdot l}{W \sin \alpha} \quad (2)$$

式中: α 为受到振动渐进影响的倾斜角参数; β 为渐进性摩擦角敏感度参数; γ 为边坡抗滑力矩; l 为边坡表面长度。

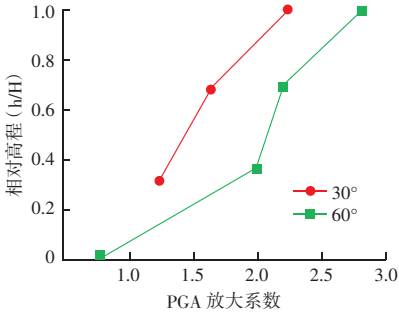
经计算分析，建筑填充土层边坡倾斜角大于 45° 时，受土体振动影响，土层的摩擦角敏感度大于黏聚力敏感度，边坡倾斜角敏感度最小。而填充土层边坡稳固性系数与之相反，摩擦角稳定系数最小，边坡倾斜角稳定系数最大，黏聚力稳定系数次之，对边坡破坏程度的影响力也与之成正比。

1.3 边坡土体稳固性模式分析

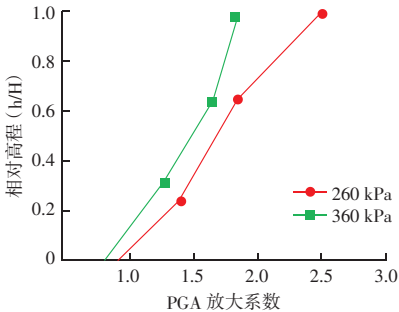
土层边坡的稳固性主要受地质结构影响，因此，勘测获取各监测点强度参数，分析土体振动规律与边坡渐进破坏之间的影响关系。具体数据见表 1。图 1 为倾斜角、黏聚力、摩擦角与 PGA 之间复杂的影响关系。由图 1 可知：

表 1 监测点土层强度参数

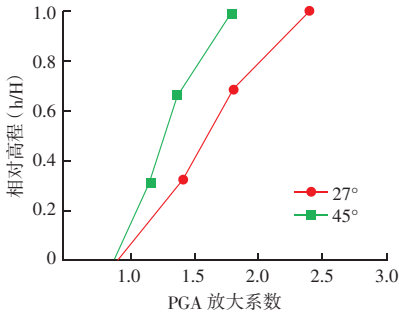
监测点	倾斜角/ $^{\circ}$	黏聚力/kPa	摩擦角/ $^{\circ}$
1	15	256	32
2	30	260	30
3	45	250	30
4	60	260	31
5	30	210	33
6	45	300	30
7	45	350	35
8	30	280	37
9	60	255	45
10	30	260	36



(a) 倾斜角



(b) 黏聚力



(c) 摩擦角

图 1 倾斜角、黏聚力、摩擦角与 PGA 的影响关系
Fig. 1 The influence relationship between inclination angle, cohesion, friction angle and PGA

(1) 倾斜角 通过将数据代入土体振动数值模型，并施加同频率、振幅的振动正弦波，得出不同角度的振动峰值放大系数。在垂直方向上，边坡表面振动峰值放大系数随高度增加而增大，且倾斜角越大，放大系数也越大。这表明，在土体结构振动波影响下，边坡顶部反应更剧烈；边坡倾斜角度越大，顶部结构越不稳定，对振动波破坏反应越强烈。

(2) 黏聚力 土壤黏聚力变化规律与倾斜角变化趋势相似，随垂直方向土体边坡高度增加而递增。同时，黏聚力增大时，对振动波响应力放大系数越小。此外，边坡表面响应程度明显大于坡体内部，这是因为坡内土体结构相对稳定，而边坡表面受外部风力等干扰，土壤含水量低、黏性差，发生振动时易出现土层松散滑坡现象。在垂直方向上，边坡顶部振动波峰值放大系数更高，说明相对高程越高，对波体振动幅度放大越明显，土体振动响应动力越大、时速更快。

(3) 摩擦角 边坡土体摩擦角大小与振动波峰值放大系数呈负相关，岩层摩擦角越小，受振动波影响越大，放大振动反应越剧烈。这是由于岩层间摩擦角越小，地质结构裂缝吸收振动能量越少，作用于边坡土层的振动应力越大。并且，摩擦角影响受边坡高度制约，具有高程效应，边坡越靠近顶部，对振动波动力能量放大越多，越易受土体振动破坏，稳定性越低。

以土体振动数值模型进行边坡稳定性模拟，带入强度参数与振动波响应力变化规律，向数值模型施加一个振动渐进破坏应力，边坡地质稳固性如图 2 所示。

岩土力学

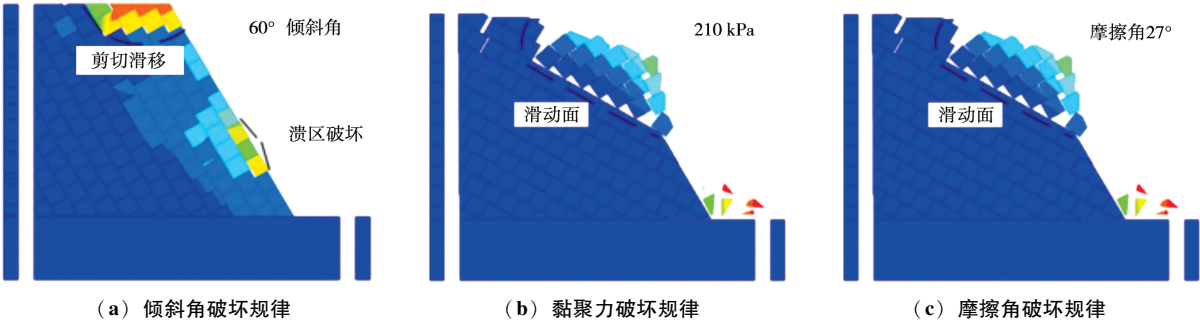


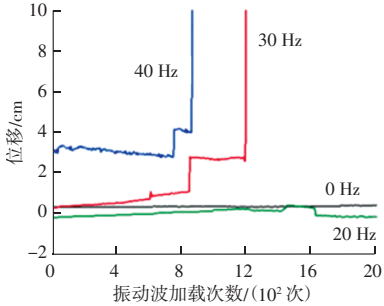
图 2 数值模型稳定性分析
Fig.2 Stability analysis of numerical model

随着边坡倾斜角越大，边坡表面土层会出现溃区破坏模式，边坡顶端稳固性最低，开始破碎滑落，向边坡下方表层土施加压力，造成表面土层脱落滑落。边坡黏聚力越差，会使边坡由外到内损伤范围越大，从边坡顶端开始碎裂，并不断扩大滑动面积，造成土体失稳。土层摩擦角越小边坡稳定性越低，会产生水平向倾斜面较大的土体滑动，并随着向坡内土层内部延伸，滑动趋势越弱，稳定性越强^[20]。

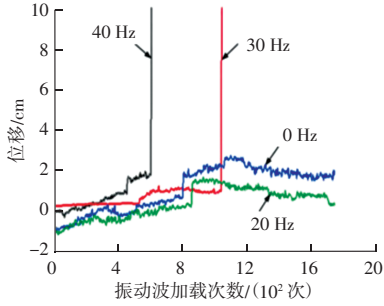
2 结果分析

填土边坡倾斜角为 60°，土层摩擦角为 27°，土壤黏聚力为 260 kPa，向边坡施加 20、30、40 Hz 三种不同振动频率的振动波。采用本文方法与 3D EC 模型边坡稳定性研究方法、三维地质模型稳固性研究方法进行对比，研究不同方法对填土边坡稳固性勘察的有效性。不同方法监测边坡位移结果统计如图 3 所示。

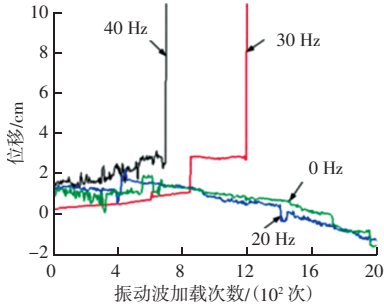
本文方法所得位移结果图像与实测结果图像更加接近，当振动频率为 30 Hz 时，振动波加载次数达到 1 200 次，发生明显位移，位移达到 10 cm。3D EC 模型边坡稳定性研究方法和三维地质模型稳固性研究方法在振动频率达到 30 和 40 Hz 时，针对边坡土



(b) 本文研究方法



(c) 3D EC 模型



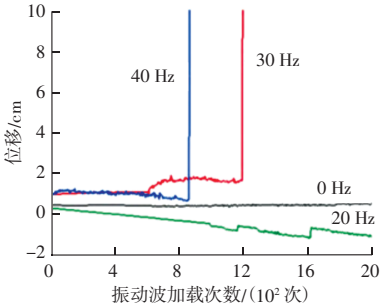
(d) 三维模型

图 3 边坡位移勘察结果

Fig.3 Results of slope displacement survey

体剧烈振动情况下监测数据比较接近实测值，但对频率较低的振动波，监测位移数据波动起伏明显，波动频率快，监测数据明显不准确。

图 4 为三种方法稳固性分析结果。本文方法计算



(a) 实际位移

边坡稳固系数平均为 3.5，与实测参数计算稳固系数误差不超过 0.5，随着振动波频次增加，稳固性系数值降低了 0.6。3D EC 模型边坡稳定性研究方法稳固性系数平均为 2.1，随着振动波次数增加，稳固性系数明显下降；三维地质模型稳固性研究方法稳固性系数约为 1.6，当振动波次数达到 2000 次时，稳定性系数降到 0.8。

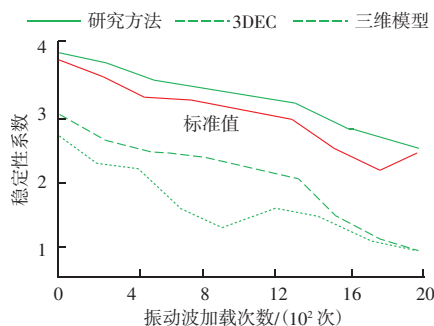


图 4 稳固性系数分析

Fig. 4 Stability coefficient analysis

由此可见，本文方法对边坡土体位移分析勘察结果更具真实性，对土体振动产生的地质结构变化稳固性分析结果更准确，具有良好的可行性与有效性。

3 结束语

针对建筑填土边坡稳定性勘测中存在的对土体振动波感应敏感度差、稳固性系数计算不精确等问题，本研究提出并深入探讨基于土体振动规律的边坡地质稳固性勘察技术，得出以下结论：

(1) 基于所选监测点数据构建的振动数值模型，能够有效模拟土体在实际振动环境下的响应，为后续的分析提供可靠的模型基础。

(2) 结合土体振动规律，得到的敏感度与稳固性系数能够更真实地反映边坡在不同振动频率和次数下的稳定性状况，为边坡稳固性评估提供量化指标。

综上所述，本研究提出的基于土体振动规律的边坡地质稳固性勘察技术，在提高对土体振动波感应敏感度、准确计算稳固性系数等方面具有显著优势，具有良好的可行性与有效性，为建筑填土边坡的稳定性勘测提供了新的思路和方法。

参 考 文 献

- [1] 冯治国, 余颂, 张伟, 等. 高山峡谷区某顺层边坡地质特征及稳定性研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67 (5): 7-19.
- [2] 唐江涛, 邓兆俊, 覃羡安, 等. 基于地质模型快速构建的边坡三维稳定性分析 [J]. 地质与勘探, 2021, 57 (1): 8-16.
- [3] 覃欲晓. 雨水渗透下岩土边坡纵向抗剪强度勘察技术研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43 (1): 10008.
- [4] 张雷. 建筑工程中岩土边坡抗剪强度勘察技术研究 [J]. 中国新技术新产品, 2024 (14): 84-86.
- [5] 付凯. 岩土工程边坡勘察技术难题及优化措施 [J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53 (2): 35-38.
- [6] 汪超, 杜文杰, 付晓东. 基于 BIM + GIS 集成模型的高填方边坡大变形失稳过程分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (27): 11624-11630.
- [7] 张长轩, 陈亮辉, 赵刚刚, 等. 基于强度折减法的高填方路基边坡稳定性分析 [J]. 甘肃水利水电技术, 2024, 60 (6): 41-43.
- [8] 耿雪峰. 基于传递系数法的人工填土边坡稳定性分析 [J]. 土工基础, 2023, 37 (6): 915-919.
- [9] 王韵, 王红雨, 李其星, 等. 探地雷达在湿陷性黄土挖填方高边坡土体性状探测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34 (2): 9.
- [10] 王攀, 钟晓华, 张瑜. 强夯法在超厚填土边坡加固中的应用及效果评价 [J]. 工程与建设, 2024, 38 (3): 570-572.
- [11] 李怡文, 汤伟. 降雨及荷载组合对加筋边坡的影响 [J]. 黑龙江科学, 2024, 15 (22): 48-51.
- [12] 张健. 深层填土高边坡组合支挡结构设计 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (3): 194-196.
- [13] 高咏, 陈晓成, 陆叶. 江西瑞昌某填方边坡稳定性分析及治理工程措施 [J]. 山西建筑, 2024, 50 (17): 82-85.