

强震作用下碎石土边坡动力响应离心机试验研究

徐泽龙

广东深马建筑工程有限公司 广东深圳

【摘要】本文基于离心机试验,研究了强震作用下碎石土边坡的动力响应特性。通过模拟不同震级和边坡角度,分析了碎石土在强震条件下的变形、加速度及应力变化。试验结果表明,震动频率、震动幅度和边坡稳定性之间存在显著关系。随着震动的增强,边坡变形显著增加,破坏模式呈现出与土体粒径、密实度等因素密切相关的特征。试验结果为优化碎石土边坡的抗震设计提供了理论依据,同时为灾后恢复工作提供了实验数据支持。

【关键词】碎石土;边坡;强震作用;离心机试验;动力响应

【收稿日期】2025年5月14日

【出刊日期】2025年6月20日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250067

Experimental study on dynamic response of rock and soil slope under strong earthquake action

Zelong Xu

Guangdong Shenma Construction Engineering Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong

【Abstract】 This study investigates the dynamic response characteristics of gravel soil slopes under strong seismic loads through centrifuge tests. By simulating different earthquake magnitudes and slope angles, we analyzed deformation, acceleration, and stress variations in gravel soil under intense seismic conditions. Experimental results demonstrate a significant correlation between vibration frequency, amplitude, and slope stability. As seismic intensity increases, slope deformation becomes more pronounced, with failure modes closely related to soil particle size and density. These findings provide theoretical foundations for optimizing seismic-resistant design of gravel soil slopes and offer experimental data support for post-disaster reconstruction efforts.

【Keywords】 Crushed stone soil; Slope; Strong earthquake action; Centrifuge test; Dynamic response

引言

碎石土边坡的稳定性对工程建设尤其是交通、能源等基础设施的安全至关重要。在强震作用下,边坡的稳定性面临着严峻挑战,尤其是在地震震级增大时,碎石土的动力响应变化会对边坡造成不可忽视的影响。通过离心机试验模拟震动条件,能够更精确地分析边坡在地震作用下的力学行为及变形规律,为实际工程中碎石土边坡的抗震设计提供重要参考。实验室试验为了解强震作用下的碎石土边坡提供了宝贵的数据支持,进一步深化了对复杂地震条件下土体动力学特性的认识。

1 强震作用下碎石土边坡稳定性的研究背景与问题提出

强震作用下的碎石土边坡稳定性问题一直是土木工程领域中的研究热点。碎石土作为一种典型的

颗粒材料,在强震作用下,表现出的力学特性与其他土体类型有所不同。碎石土在地震波的作用下,其颗粒之间的相对运动会引起土体的变形和应力集中,进而影响边坡的稳定性。尤其是在地震强度较高时,边坡的变形速度和变形量显著增加,极大地增加了土体滑坡或崩塌的风险^[1]。研究碎石土边坡在强震作用下的响应特性,不仅能为边坡设计提供理论依据,还能为地震灾后恢复和安全预警提供数据支持。以往的研究大多侧重于静态条件下的边坡稳定性分析,而对于强震作用下碎石土边坡的动力响应研究相对较少,现有的研究成果大多基于简化假设,忽略了土体的颗粒组成、震动频率等关键因素。

为了填补这一研究空白,本文通过离心机试验模拟强震作用下碎石土边坡的动力响应,探讨震动频率、震动幅度、边坡角度等因素对碎石土边坡稳定性的影

响。离心机试验能够在模拟的地震条件下更为真实地再现碎石土边坡的实际响应，尤其是在试验过程中，能够精确控制各项实验参数，如震动幅度、频率和土体密实度等，为研究边坡在不同震动条件下的力学行为提供了可靠的实验基础。通过对实验数据的分析，能够进一步揭示在强震作用下，碎石土边坡的失稳机理，并为实际工程提供可操作的改进方案。

碎石土边坡稳定性问题不仅仅局限于单一的地震条件，而是需要考虑多种复杂因素的交互作用。地震波的传播特性、土体的剪切强度、粒径分布以及边坡的几何形态等都在一定程度上影响着边坡的动力响应。在强震作用下，碎石土的颗粒结构可能发生显著变化，导致土体在地震波的作用下出现不均匀的应力分布，进而影响边坡的稳定性^[2]。研究碎石土边坡的动力响应，需要综合考虑多方面的因素，并通过精细的实验设计和数据分析，逐步揭示这些因素对边坡稳定性的具体影响。通过这种深入的研究，不仅能为边坡设计提供更为科学的依据，还能为抗震工程提供更为精准的指导。

2 离心机试验方法及其对碎石土边坡动力响应的模拟研究

离心机试验是一种通过模拟重力加速度来加快物理模型试验过程的方法，在土木工程领域中被广泛应用于研究土体、边坡等结构在各种力学作用下的响应。对于碎石土边坡的动力响应研究，离心机试验提供了一个高效且逼近实际条件的实验平台。通过改变离心机的旋转速率，可以模拟不同强度的地震加速度，从而获得碎石土边坡在强震作用下的真实动力响应^[3]。与传统的实验方法相比，离心机试验具有较高的精度和可靠性，尤其在研究高加速度作用下土体的动力特性时，具有不可替代的优势。

在离心机试验中，碎石土边坡的模型通常由具有不同粒径分布和密实度的碎石土组成，试验的主要目标是研究不同地震条件下边坡的变形和破坏特征。通过控制震动频率、震动幅度和边坡角度等实验参数，能够详细观察到在强震作用下，碎石土边坡在不同震动条件下的力学响应及变形特性。试验过程中，采用加速度计、位移计等测量工具，实时记录模型的加速度、位移及应力变化。通过这些数据的分析，可以清楚地揭示出在强震作用下，碎石土边坡的力学行为以及其稳定性变化。

离心机试验不仅能有效模拟实际工程中遇到的

复杂震动环境，还可以通过控制变量法，研究不同因素对碎石土边坡稳定性的影响。研究发现，在震动频率较高时，碎石土颗粒间的相对运动增加，导致土体内部的应力集中，进而影响边坡的整体稳定性。试验还表明，震动幅度对边坡的破坏模式有显著影响，随着震动幅度的增加，边坡的变形量显著增大，甚至出现滑坡等破坏现象^[4]。边坡角度对碎石土边坡的动力响应也起到了关键作用，较陡的边坡角度容易导致更强的地震响应。通过离心机试验模拟不同震动条件下的碎石土边坡响应，不仅可以验证不同设计方案的抗震效果，还能为边坡稳定性分析提供更多的实验依据。

3 强震条件下碎石土边坡的动力响应特征与影响因素分析

在强震作用下，碎石土边坡的动力响应特征表现出明显的非线性和复杂性，主要表现在土体的变形、加速度和应力的变化上。随着震动强度的增加，碎石土边坡的应力分布不再均匀，土体的颗粒之间产生相对滑动和摩擦，导致土体的内聚力和抗剪强度下降，边坡的变形逐渐增大^[5]。在强震作用下，碎石土边坡的变形模式表现为不规则的形态，边坡表面出现裂缝、滑带等现象，甚至可能发生滑坡等破坏性事件。通过离心机试验获得的数据表明，在震动频率较低时，边坡的响应相对较为平缓，但随着震动频率和振幅的增加，碎石土颗粒间的动力学行为趋于激烈，导致边坡的稳定性迅速降低。

多个因素对强震条件下碎石土边坡的动力响应产生显著影响。震动频率是影响边坡响应的重要因素，频率较高的地震波会引发碎石土颗粒间更为剧烈的相对位移，从而增加土体内部的应力集中，造成边坡的局部失稳。震动幅度的增大则直接提高了土体的变形量，使得碎石土边坡在强震作用下更容易发生滑坡等灾害性破坏。在实验中，随着震动幅度的增加，边坡表面出现了更明显的变形和裂缝，这些现象对土体的强度和稳定性产生了不利影响，尤其在较陡的边坡上，表现得更加突出。碎石土的粒径分布和密实度等土体特性也对边坡的动力响应产生重要影响。密实度较高的碎石土具有较强的抗震能力，而颗粒较粗的碎石土则更容易受到地震波的影响，导致边坡变形增大。

边坡角度的变化同样对碎石土边坡的动力响应特性具有重要作用。在强震作用下，较陡的边坡角度使得碎石土的抗震能力下降，导致土体发生更大范

围的变形或滑移。实验结果表明,较缓的边坡角度能够在一定程度上减少震动对土体的影响,延缓边坡失稳的发生^[6]。在强震作用下,边坡的稳定性不仅取决于地震波的强度,还与土体的内在特性、几何形态密切相关。针对强震条件下碎石土边坡的动力响应特征,必须综合考虑震动频率、震动幅度、土体特性以及边坡的几何形态等多个因素,以确保边坡的安全性和稳定性。

4 强震作用下碎石土边坡稳定性提升策略及工程应用探讨

在强震作用下,提高碎石土边坡的稳定性是确保工程安全的关键。针对强震条件下碎石土边坡的稳定性问题,采用改良土体结构、优化边坡设计以及加强震后监测等手段,能够有效增强边坡的抗震能力^[7]。通过在碎石土中加入稳定剂或改善土体的密实度,可以显著提高土体的剪切强度,减少地震波对边坡的影响。稳定剂如水泥、石灰等能够增强土体的结构性,使土颗粒之间的黏结力增加,从而提高其在地震作用下的抗剪强度。改善碎石土的密实度也能有效减少地震波的传播速度,从而降低边坡的变形幅度和破坏风险。

边坡几何形态的优化设计同样是提高边坡稳定性的有效策略。在边坡设计中,通过合理控制边坡角度,选择合适的坡度与土体类型,可以有效降低强震下的边坡变形量。较缓的坡度能够减缓震动的传播,减少震动对边坡的破坏。设置合理的排水系统也是提升边坡稳定性的一个重要措施。在强震作用下,边坡的水压力可能会增加,进而导致土体的滑动或坍塌。通过有效的排水设计,能够减少水分对土体的影响,增强土体的稳定性。尤其是在湿润环境中,排水措施能够避免土体因水分积聚而发生液化或滑坡现象,从而提高边坡的整体抗震能力。

在工程应用中,强化震后监测和实时评估是确保边坡长期稳定性的有效途径。地震发生后,边坡的稳定性可能会发生变化,实时监测能够及时发现潜在的失稳风险。通过安装加速度计、位移计、应变计等监测设备,可以实时获取边坡的动力响应数据,及时进行评估和调整^[8]。定期进行土体测试与评估,结合实际地震资料,可以为边坡的维护和加固提供科学依据。现代技术如遥感监测和无人机航拍等也可以帮助对边坡进行高效的动态评估,为工程建设和

灾后恢复提供重要支持。这些措施不仅能提升边坡的抗震能力,还能在地震发生后第一时间进行评估和修复,确保工程的安全和稳定。

5 结语

强震作用下碎石土边坡的稳定性研究揭示了多个关键因素对边坡动力响应的影响,尤其是在震动频率、震动幅度以及土体特性等方面的作用。离心机试验为实际工程提供了重要的数据支持,并展示了震后边坡稳定性评估和改进策略的有效性。改良土体结构、优化边坡设计和加强震后监测等策略,为提升碎石土边坡的抗震能力提供了可行的解决方案。在实际应用中,结合这些策略不仅可以提高边坡的稳定性,还能有效减少地震灾害的风险。未来的研究将进一步深化这些方法的应用,并推动边坡抗震设计和灾后恢复工作的进步。

参考文献

- [1] 胡亚会,潘志平.尾矿库区碎石土边坡稳定性及加固分析[J].工程技术研究,2024,9(14):32-34.
- [2] 拜亚南,武博强,张葆永,等.区域碎石土边坡稳定性影响因素分析讨论[J].中外公路,2021,41(S2):29-33.
- [3] 鲁松林.多断层褶皱叠合区碎石土陡坡的边坡稳定性评价分析[J].建筑技术开发,2024,51(10):139-141.
- [4] 陆烨,黄越川.基于 DIC 分析的含石量对碎石土边坡稳定性影响[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(04):49-57.
- [5] 王代兵.碎石土库岸边坡稳定性及影响因素分析[J].水利科技与经济,2022,28(12):67-71+78.
- [6] 拜亚南,武博强,张葆永,等.区域碎石土边坡稳定性影响因素分析讨论[J].中外公路,2021,41(S2):29-33.
- [7] 武博强,张葆永,冯军强,等.降雨入渗对碎石土高路堤边坡稳定性的影响研究[J].地质灾害与环境保护,2022,33(01):63-70.
- [8] 汪伟伟,丁祖德,任志华,等.库区碎石土边坡稳定性及其参数敏感性分析 [J].贵州大学学报(自然科学版),2021,38(01):71-78.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS