

地震作用下工程地质体响应特征及稳定性分析

赵怀宝 耿欣颖

重庆市南江勘测设计有限公司 重庆 401121

摘要：文章深入探讨了地震作用下工程地质体的响应特征及稳定性分析。通过分析不同类型工程地质体在地震中的变形、破坏模式，揭示了其独特的响应特征。同时结合地震参数和地质体特性，进行稳定性评估，提出影响稳定性的关键因素。研究表明，合理的抗震设计、地质灾害风险评估与监测预警、防治工程措施对于提高工程地质体的抗震稳定性至关重要。

关键词：地震作用；工程地质体；响应特征；稳定性分析

1 地震波传播与工程地质体响应机理

1.1 地震波的传播特性

地震波是地下传播的震动，是从震源向四周辐射的弹性波。其传播特性主要包括几个方面：（1）传播速度与介质性质相关。地震波的传播速度取决于地球内部物质的密度和弹性。一般来说，地震波在固体中的传播速度较快，在液体和气体中则相对较慢。例如，纵波（P波）在地壳中的传播速度约为5.5~7千米/秒，而横波（S波）的传播速度则约为3.2~4.0千米/秒。地震波在不同介质界面上会发生折射和反射，传播路径因此变得复杂；（2）波的类型与特性。地震波主要分为体波和面波两大类。体波是在地球内部传播的波，包括纵波和横波。纵波是压缩波，质点振动方向与波的传播方向一致，周期短、振幅小、速度快；横波是剪切波，质点振动方向与波的传播方向垂直，周期长、振幅较大、速度慢。面波则是沿地球表面或分界面传播的波，如瑞利波和乐甫波，它们具有衰减慢、振幅大、速度小、传播远的特点；（3）能量衰减与传播距离。地震波在传播过程中会因介质对能量的吸收而逐渐衰减。衰减的程度与介质的性质、地震波的频率和传播距离等因素有关。一般来说，地震波传播得越远，其能量衰减得越多。

1.2 工程地质体对地震波的响应

工程地质体对地震波的响应是一个复杂的过程，涉及地质体的物理性质、结构特征以及地震波的特性等多个方面。不同类型的岩土体对地震波的响应存在差异，一般来说，软土、松散沉积物等低密度、低弹性模量的岩土体对地震波的响应更为敏感，容易产生较大的变形和破坏。而硬土、基岩等高密度、高弹性模量的岩土体则相对较为稳定^[1]。地质构造对地震波的响应也具有重要影响。例如，断层等地质构造带是地震波传播和反射的敏感区域，容易发生地震波的能量聚集和释放，从而

导致地面震动加剧和破坏程度增加。地形地貌和水文地质条件也会影响工程地质体对地震波的响应。例如，突出、孤立的地形地貌容易形成地震波的聚焦效应，导致局部震动加剧。而地下水位的深浅则会影响岩土体的物理性质和力学特性，从而影响其对地震波的响应。工程地质体对地震波的响应机理主要包括共振效应、剪切破坏、拉伸破坏等。当地震波的频率与岩土体的自振频率相近时，会发生共振效应，导致岩土体产生较大的变形和破坏。此外，地震波还会引起岩土体的剪切破坏和拉伸破坏等模式，这些破坏模式与地震波的特性和岩土体的物理性质密切相关。

2 工程地质体结构类型与地震响应特征

2.1 块状结构地质体的地震响应

块状结构地质体，如花岗岩、石灰岩等，具有整体强度高、材质致密、稳定性好的特点。由于其整体性好，块状结构地质体在地震中的变形特征接近于均质弹性体。这意味着当地震波传播到这类地质体时，它们能够较好地吸收和分散地震波的能量，从而减小地震对地质体本身及其上部建筑物的影响。块状结构地质体的弹性模量较高，这意味着它们能够迅速恢复因地震波作用而产生的变形。这种快速恢复的能力有助于减少地震波在地质体内的传播时间，从而降低地震波的破坏力。块状结构地质体在地震中通常不会发生大规模的失稳破坏，这是因为它们具有良好的整体性和稳定性，能够抵抗地震波产生的应力和变形，需要注意的是，尽管块状结构地质体整体稳定性好，但在地震作用下仍可能发生局部的开裂或损伤，这些损伤可能会随着地震的持续作用而逐渐累积，最终影响地质体的整体稳定性。

2.2 层状结构地质体的地震响应

层状结构地质体，如页岩、板岩等，具有层理发育、各向异性的特点。在地震作用下，这类地质体的响

应特征相对复杂,首先,层状结构地质体在地震中容易沿着层面产生滑动或错动。这是因为地震波在层面之间传播时,会产生剪切应力,当这些剪切应力超过层面之间的抗剪强度时,就会发生滑动或错动。这种滑动或错动可能导致地质体的整体失稳,进而引发地质灾害,如滑坡、崩塌等。其次,层状结构地质体在地震中的响应还受到层面倾角和地震波入射方向的影响。当层面倾角与地震波入射方向一致或接近时,地震波在层面之间产生的剪切应力会更大,从而增加滑动或错动的风险^[2]。相反,当层面倾角与地震波入射方向垂直时,地震波在层面之间产生的剪切应力会相对较小,地质体的稳定性相对较高。另外,层状结构地质体在地震中还可能发生层间分离或层间压缩等现象。这些现象会导致地质体的体积发生变化,进而影响其上部建筑物的稳定性。

2.3 碎裂结构地质体的地震响应

碎裂结构地质体,如破碎带、断层带等,具有整体性差、材质不均匀、孔隙比大的特点。碎裂结构地质体在地震中容易发生松动和崩塌,这是因为地震波在碎裂结构地质体中传播时,会产生强烈的振动和冲击作用,导致地质体内部的颗粒和碎块发生相对位移和重排。这种位移和重排会破坏地质体的内部结构,降低其整体稳定性,从而引发松动和崩塌现象。碎裂结构地质体在地震中的响应还受到地震波频率和振幅的影响,当地震波的频率与地质体内部的颗粒振动频率相近时,会发生共振效应,导致地质体产生更大的变形和破坏,地震波的振幅越大,对地质体的冲击作用越强,从而增加其破坏程度。碎裂结构地质体在地震中还可能发生液化现象,当地震波作用导致地质体内部的孔隙水压力急剧上升时,孔隙水压力会超过地质体颗粒之间的有效应力,从而导致地质体发生液化。液化后的地质体失去了承载能力,容易发生流动和变形,进而引发地质灾害。

3 地震作用下工程地质体的稳定性分析

3.1 稳定性分析方法

在地震作用下,工程地质体的稳定性分析是评估其抵抗地震破坏能力的重要环节。稳定性分析方法主要包括理论计算、数值模拟和现场试验等多种手段。理论计算通常基于力学原理,通过建立地质体的力学模型,分析其在地震作用下的应力、应变和位移等参数,从而判断其稳定性。数值模拟则利用计算机技术和有限元等方法,对地质体在地震作用下的动态响应进行模拟,更直观地展示其稳定性状况。现场试验则是通过在地质体上布置监测设备,实地测量其在地震作用下的各种物理量,为稳定性分析提供第一手数据。这些方法各有优

劣,实际应用中常需结合使用,以获得更准确、全面的稳定性分析结果。

3.2 地震作用下工程地质体的稳定性评估

地震作用下工程地质体的稳定性评估是一个复杂而系统的过程。首先,需要收集地质体的基本资料,包括其类型、结构、物理力学性质等,以及地震的基本参数,如震级、震中距、地震波传播方向等。然后,根据这些资料,选择合适的稳定性分析方法,对地质体在地震作用下的稳定性进行计算或模拟。评估过程中,应重点关注地质体的变形特征、破坏模式以及可能的失稳机制。最后,根据评估结果,对地质体的稳定性进行分级,提出相应的防治措施和建议。稳定性评估的结果对于指导工程设计和施工具有重要意义,是确保工程安全的关键环节。

3.3 稳定性影响因素分析

地震作用下工程地质体的稳定性受多种因素影响,这些因素既包括地质体本身的性质,也包括地震作用的特性以及外部环境条件。地质体的类型、结构、物理力学性质等是其稳定性的内在因素。例如,块状结构地质体整体性强、稳定性好,而碎裂结构地质体则整体性差、易失稳。地震作用的特性,如震级、震中距、地震波传播方向等,对地质体的稳定性也有重要影响^[3]。震级越大,地震波的能量越大,对地质体的破坏作用也越强。震中距越近,地震波对地质体的影响也越直接、越强烈。外部环境条件,如地下水位、地表植被、人类活动等,也可能对地质体的稳定性产生影响。

4 提高工程地质体抗震稳定性的措施与建议

4.1 工程抗震设计优化

提高工程地质体的抗震稳定性,首先应从工程抗震设计入手。在工程设计阶段,应充分考虑地震作用对工程地质体的影响,优化设计方案,确保工程结构在地震作用下能够保持稳定。具体而言,可以采取以下措施:一是选择合适的结构形式,如采用框架结构、剪力墙结构等抗震性能较好的结构形式,避免采用易产生应力集中的结构形式;二是合理布置结构构件,确保构件之间的连接牢固可靠,增强结构的整体性和稳定性;三是进行详细的抗震计算和分析,根据地震烈度、场地条件等因素,确定合理的结构尺寸和配筋率,确保结构在地震作用下具有足够的承载力和变形能力。还应注重工程材料的选择,优先选用抗震性能好、耐久性强的材料,如高强度钢筋、高性能混凝土等,以提高工程的抗震性能。在工程抗震设计优化过程中,还应充分考虑地质体的特性。对于不同类型的工程地质体,应采取针对性的

设计措施。

4.2 针对地震易发区的地质灾害风险评估与监测预警

地震易发区往往伴随着较高的地质灾害风险，如滑坡、崩塌、泥石流等。为了提高工程地质体的抗震稳定性，必须对这些地质灾害进行风险评估和监测预警。应开展详细的地质灾害调查，查明地质灾害的类型、分布范围、危害程度等，为风险评估提供基础数据。利用地质灾害评估模型，对地震易发区的地质灾害风险进行评估，确定高风险区域和重点防范对象。在监测预警方面，应建立完善的地质灾害监测体系，采用遥感、雷达干涉测量（InSAR）、地面监测站等多种手段，对地质灾害进行实时监测。建立地质灾害预警系统，根据监测数据和分析结果，及时发布预警信息，为防灾减灾提供决策支持。还应加强地质灾害应急响应能力建设，制定完善的应急预案和处置流程，确保在地质灾害发生时能够迅速、有效地进行应对。

4.3 地质灾害防治工程的设计与施工建议

针对地震易发区的地质灾害，应采取有效的防治工程措施。在设计阶段，应根据地质灾害的类型和危害程度，制定合理的防治方案。例如，对于滑坡灾害，可以采取抗滑桩、挡土墙等支挡结构进行治理；对于崩塌灾害，则可以采用锚固、挂网喷浆等加固措施进行防护。在施工阶段，应严格按照设计图纸和施工规范进行施工，确保防治工程的质量和效果。在施工过程中，还应注重对施工质量的监控和管理，应建立完善的质量管理体系，对施工过程进行全程监督，确保施工质量和安全。应加强对施工人员的培训和教育，提高其安全意识和操作技能，确保施工过程的顺利进行。还应注重防治工程的后期维护和管理，定期对防治工程进行检查和维修，确保其长期发挥效用。

4.4 加强工程抗震性能的日常监测与维护

提高工程地质体的抗震稳定性，还需要加强工程抗震性能的日常监测与维护。应建立完善的监测体系，对工程结构进行实时监测，及时发现并处理潜在的安全隐患。应定期对工程结构进行检查和维护，如检查结构构件的连接是否牢固、有无裂缝和损伤等，及时进行修复和加固。还应加强对工程周边环境的监测和管理，应定

期对工程周边的地质体进行稳定性评估，及时发现并处理潜在的地质灾害隐患。同时应加强对工程周边地下水的监测和管理，防止地下水对工程结构产生不利影响。通过这些措施的实施，可以有效提高工程抗震性能的稳定性和可靠性。

4.5 提高工程抗震意识与应急响应能力

最后，提高工程地质体的抗震稳定性还需要加强工程抗震意识的普及和应急响应能力的培养。应广泛开展抗震知识宣传和教育活动，提高社会公众对工程抗震重要性的认识和理解。同时加强对工程技术人员和施工管理人员的培训和教育，提高其抗震设计和施工管理能力^[4]。在应急响应方面，应建立完善的应急预案和处置流程，确保在地震发生时能够迅速、有效地进行应对。应定期组织应急演练活动，提高应急救援队伍的实战能力和协同作战能力。同时加强对应急救援物资和设备的储备和管理，确保在地震发生时能够及时提供必要的救援和支持。通过这些措施的实施，可以有效提高社会公众和工程界的抗震意识和应急响应能力，为减轻地震灾害损失和保障人民生命财产安全做出积极贡献。

结束语

本文系统地分析了地震作用下工程地质体的响应特征及稳定性，为工程抗震提供了理论依据和实践指导。未来，应继续深化相关研究，探索更高效的抗震技术和方法，以应对地震灾害的挑战。加强工程抗震意识的普及和应急响应能力的培养，共同构建安全、稳定的工程环境，保障人民生命财产的安全。

参考文献

- [1]郭利召.某隧道工程地质条件特征及稳定性研究[J].有色金属设计,2022,49(04):90-94.
- [2]张庆飞,冯宇淞,吕改杰,席英伟.基于数值模拟的含软弱夹层高边坡稳定性分析[J].山西建筑,2021,47(21):9-11+17.
- [3]郝勇,许汉华,秦勇光,刘江波,安家金.某边坡稳定性分析及预防和治理措施[J].江西建材,2021,(01):119-120.
- [4]朱才,李通.岩质边坡岩土工程勘察稳定性分析评价方法及运用[J].云南地质,2023,42(3):340-345.