

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430033

基于连续-非连续方法的地震边坡失稳垮塌研究*

孟维庆^{1,2}, 尹超^{2,3}, 郑永香^{2,3}, 赵高辉², 王伟^{2,3}

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
3. 石家庄铁道大学道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 我国西南地区构造活动强烈, 地震频发, 由地震引发的边坡失稳垮塌现象严重危害居民的正常生产生活。为了更加高效地分析地震诱发边坡失稳垮塌的规律, 在通用有限元软件ABAQUS中首次实施了连续-非连续的地震边坡计算方法, 并通过室内物理试验和数值试验验证了方法的有效性。对2008年汶川地震引起的大光包滑坡的整体破坏过程进行分析, 结果表明: 在30 s强震作用下大光包滑坡的垮塌从坡顶后缘伊始, 滑坡失稳滑裂面逐步贯通, 在冲破坡脚的约束后, 滑坡整体沿滑裂面向黄洞子沟滑动, 并在黄洞子沟发生堆积。因此, 该方法可为地震诱发边坡的垮塌计算提供参考和依据。

关键词: 连续-非连续方法; 失稳垮塌; 地震作用; 边坡; 数值模拟

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1397-14

Research on Instability and Collapse of Seismic Slopes Based on Continuous-discontinuous Method

MENG Weiqing^{1,2}, YIN Chao^{2,3}, ZHENG Yongxiang^{2,3}, ZHAO Gaohui², WANG Wei^{2,3}

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 10024, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education of Roads and Railway Engineering Safety Control, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In southwestern China, intense tectonic activity and frequent earthquakes occur, and slope instability and collapse triggered by earthquakes severely threaten the normal production and daily lives of residents. To more efficiently analyze the patterns of earthquake-induced slope instability and collapse, a continuous-discontinuous seismic slope calculation method was implemented for the first time in the general finite element software ABAQUS. The effectiveness of this method was validated through laboratory physical experiments and numerical tests. The analysis of the overall failure process of the Daguangbao landslide induced by the 2008 Wenchuan earthquake revealed that under 30 seconds of strong seismic action, the collapse of the Daguangbao landslide began at the rear edge of the slope top. The sliding surface of the landslide gradually became fully connected. After breaking through the constraints at the slope toe, the entire landslide slid along the sliding surface toward

* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(52308511)资助

作者简介: 孟维庆(2000—), 女, 博士研究生。主要从事地震工程相关研究。E-mail: 1202201006@student.stdu.edu.cn

通信作者: 尹超(1989—), 男, 副教授, 硕导, 博士。主要从事地震工程相关研究。E-mail: robinyc@stdu.edu.cn

Huangdongzi gully, where it eventually deposited. Therefore, this method can provide a reference and basis for the calculation of earthquake-induced slope collapse.

Keywords: continuous-discontinuous method; instability and collapse; seismic action; slope; numerical simulation

0 引言

我国地域广袤,幅员辽阔,地势起伏巨大,且山地、高原和丘陵约占陆地面积的三分之二,大片山区地形崎岖,山峰与山谷相间,大量的山体和巨大的地势落差造就了数量庞大的自然边坡。伴随着中国现代化建设的推进,公路、铁路等交通基础设施建设大规模开展,在山区修建道路时,为了满足线路的坡度要求和穿越地形的需要,不可避免地要开挖山体或者填方筑路,从而又形成大量的人工边坡。而边坡作为常见的地质环境及工程结构,其抗震问题已经成为岩土工程界的经典问题。

从整个世界范围来看,滑坡是由地震引发的次生灾害中最频发且最严重的。中国位于环太平洋地震带和欧亚地震带之间,尤其中西部地区地震振幅大、频率高,含有巨大破坏性的强震在此区域广泛分布。我国历史上记载着众多地震诱发山体滑坡造成毁灭性后果的案例。例如,2008年5月12日发生的汶川地震触发了197 481个滑坡^[1],造成将近9万人伤亡,其中25%~30%的人员伤亡是由地震引发的滑坡所致。此外,中国特殊的台阶状地质构造(以青藏高原、黄土高原、华北平原等为主要特征)加剧了地震能量的释放和传播,对地震作用下滑坡的发生起着重要的控制作用。其原因为台阶之间往往分布着大规模的断裂带(如青藏高原东缘的龙门山断裂带),剧烈的断裂活动会引发地表强烈振动,并且台阶边坡多覆盖厚层风化物或堆积物,使边坡结构更易受冲击而失稳。同时,各阶梯边界常表现为高陡边坡(如青藏高原与四川盆地之间的过渡带),地震波在此易形成反射与干涉,导致振动放大效应而诱发滑坡。

目前,对于地震作用下边坡动力响应研究的方法主要有模型试验、理论分析和数值模拟等。三种分析方法有其各自的优缺点:模型试验不受随机地震事件发生的时空限制,通过缩尺模型可以真实且直观地展现地面以下的自由振动模式,有效还原地面运动导致的边坡变形和破裂过程,但是在动力作

用下边界效应的影响尚未能很好解决^[2-4];理论分析方法经过了严格的数学推导,在程序化后计算效率高,易形成科学、简便的地震边坡稳定性分析方法,但是在数学模型的推导过程中进行了诸多假设,导致其与实际情况并不相符,因此对于复杂的实际情况并不适用^[5-8];而数值模拟方法适用性较高,能够考虑复杂的本构关系,并且可以在计算模型中获取任意时刻、任意位置的应力、应变和位移等信息,但是数值模型中材料参数的选择对计算结果影响很大^[9-13]。随着计算机性能的提升,目前越来越多的研究采用数值方法对地震诱发边坡的失稳垮塌开展研究,如何建立可以模拟真实情况的数值模型仍然是关键问题。

在地震作用下,岩土体易沿结构面滑移,进而发生局部大变形,此时连续分析方法受小变形假设的限制而难以适用,而非连续分析方法在模拟边坡失稳以及滑动的全过程中具有突出优势,但是他们对于裂纹、应力、应变的表征不够直观^[14]。因此众学者开始采用连续-非连续分析方法进行边坡失稳即滑动的全过程研究。应用连续-非连续分析方法,即对小变形区域采用连续分析方法,对破坏的大变形区域采用非连续分析方法,以实现分区耦合数值模拟,既能够提高计算效率,又能够有效解决边坡工程中岩土体的变形问题^[15]。A.Munjiza等^[16]首次建立连续-非连续模型并对岩石的破碎过程进行了研究;A.Vyazmensky等^[17]采用连续-非连续分析方法研究了斜坡块体崩落的破坏路径和主要断裂过程;P.Giovanna等^[18]应用连续-非连续分析方法模拟了位于意大利西北部的奥斯塔山谷的滑坡,证明了此方法在研究滑坡破坏机理以及预测滑坡不稳定面方向具有一定可行性;俞邵秋等^[19]在连续-非联系分析方法中引入了单一裂纹和弥散裂纹的综合模型作为节理单元的应力应变关系和破坏准则以模拟岩体裂纹的萌生和扩展,分析了强降雨和地震作用下边坡的破坏机理;李祥龙^[20]采用连续-非连续分析方法模拟了地震作用下含非完全贯通面岩质边坡的局部破坏过程;Z.Y.Feng等^[21]利用连续-非连续分析方法对小林滑坡进行模拟,分析地震信号相关

参数时发现复杂滑坡运动类型中的地形和过渡将使得地震信号产生一定改变;K.Q.Liu等^[22]应用连续-非连续分析方法研究了地震诱导岩土混合堆积体的破坏机理和滑动特性,分析了堆积体的参数敏感性,指出在地震作用下堆积体中岩石滑动的平均速度、位移以及所受动能等都大于土体;C.Y.Xu等^[23]利用连续-非连续方法模拟了节理岩体边坡在地震作用下裂缝开始到不稳定断裂的整个过程,得到边坡在地震荷载下具有明显的渐进性破坏特征的结论。

综上,目前常采用的PFC+FLAC所建立的连续-非连续建模过程中需要在各自软件中进行多次交互,且耦合过程中需进行初始平衡操作,而PFC中的墙体在平衡过程中会产生部分收缩或舒张,故在初始平衡后还需对耦合区域节点的坐标进行对应更改,且整个计算过程建模流程相对复杂,计算效率相对较低。因此,本文首次在通用有限元软件ABAQUS中建立了连续-非连续计算分析方法,并基于波动理论输入方法对大光包滑坡的失稳规律进行再次研究和计算分析。

1 地震波动理论与验证

1.1 地震波动理论

数值分析方法是验证近场非线性波动问题的有效手段。在数值分析过程中,合理确定地震动输入形式以及地震动输入方法是计算地震边坡破坏特征的前提和基础。在近场波动问题的数值模型分析中,需要从半无限介质中截取有限研究区域进行计算,并在截断边界处设置精确吸收或透过外行散射波的人工边界。黏弹性边界是一种通过在边界设置弹簧和阻尼元件来消除边界效应的高精度人工边界^[24]。

人工边界的刚度系数和阻尼系数分别为:

法向边界:

$$K_N = \frac{\lambda + 2G}{R} \cdot \frac{1}{1 + A}, C_N = \rho c_p \cdot B \quad (1)$$

切向边界:

$$K_T = \frac{G}{R} \cdot \frac{1}{1 + A}, C_T = \rho c_s \cdot B \quad (2)$$

式中, C 、 K 分别为阻尼系数和弹簧刚度系数;下标N为法向、T为切向; ρ 为密度; R 为散射波源至人工边界的距离; A 为边界节点所代表的面积; λ 为拉梅

常数; G 为剪切模量; α_N 与 α_T 分别为法向与切向的修正系数,取值参考文献[25]; c_p 和 c_s 与分别为P波和S波波速。

近场地震动数值模拟的重点和难点在于如何准确模拟原始地震记录,特别是在人工边界处设置了截断边界的情况下。因此,使用时域整体分析方法来处理人工边界处的集中质量有限元总波场运动方程为:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = A\sigma \quad (3)$$

波场可以分为自由场(上标f表示)和散射场(上标s表示)两部分,进而得到考虑无限辐射阻尼和地震波输入条件的人工边界节点有限元运动方程为:

$$m\ddot{u} + (c + AC)\dot{u} + (k + AK)u = A\sigma + Ku^f + C\dot{u}^f \quad (4)$$

等式右侧的前两项表示内行场需要对抗人工边界物理元件施加的节点力,最后一项表示内行场需要对抗近场介质施加的节点力。因此,在数值模拟地震波入射过程时,必须考虑人工边界对结果的影响。

1.2 波动理论验证

为验证采用的SV波三维输入方法模拟精度,分析平面SV波斜入射条件下三维均匀弹性半空间的动力反映问题。半空间介质的密度为2000 kg/m³,弹性模量为1000 MPa,泊松比为0.2。有限元分析时,采用400 m×400 m×300 m的长方体有限区域,网格尺寸为5 m×5 m,有限元模型如图1所示。

在有限元模型的侧面和底面施加黏弹性边界,有限元方程的时间积分步长为0.005 s。入射的SV

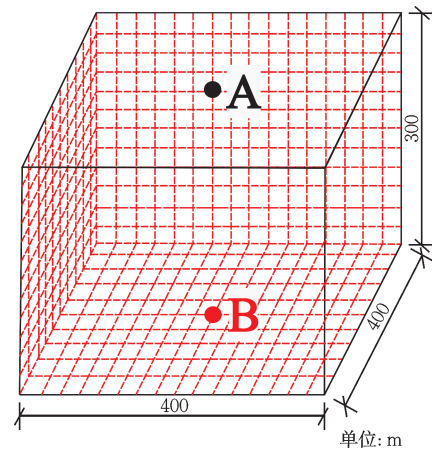


图1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

波脉冲为 Heaviside 脉冲, 峰值为 1 m, 时间跨度为 0.25 s。SV 波入射的方向向量为 $(\tan 15^\circ, 1, 0)$ 。SV 波在 $(\tan 15^\circ, 1, 0)$ 入射方向情况下的半空间位移场云图如图 2 所示。

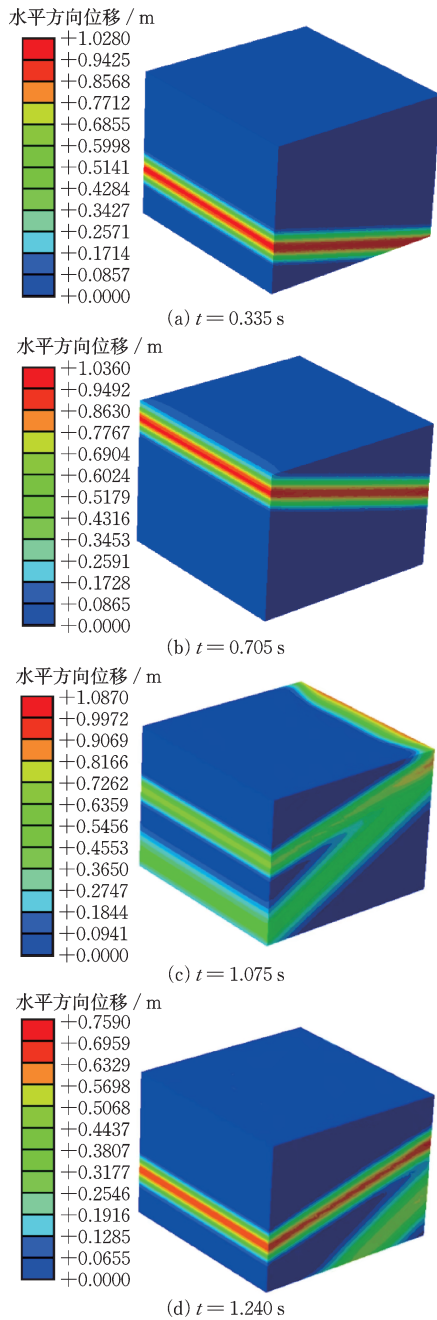


图 2 SV 波斜入射式半空间位移场云图

Fig.2 Contour maps of displacement field in half-space under oblique incidence of SV waves

由图 2 可知, 采用的 SV 波输入方法可以很好地模拟 SV 波在半空间的传播过程。图 3 给出了 SV 波在 $(\tan 15^\circ, 1, 0)$ 入射方向情况下表面中心点 A 和底面中心点 B 的水平位移 (U_x) 时程曲线。由图 3

可知, 数值解与解析解吻合较好, 说明本文采取的方法具有良好的模拟精度。

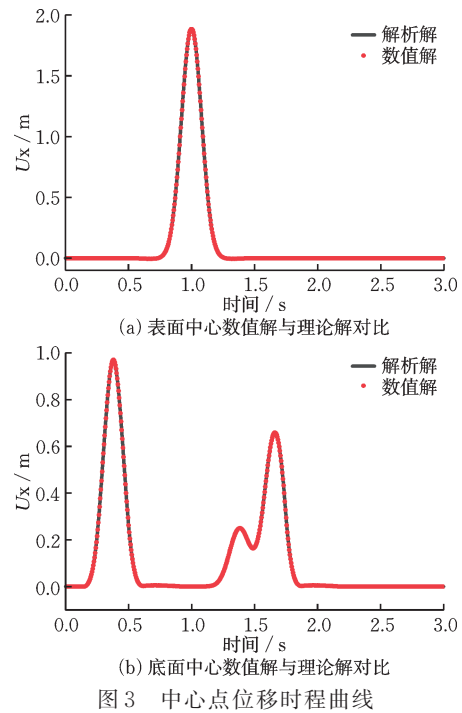


图 3 中心点位移时程曲线

Fig.3 Time-history curves of displacement at central point

2 连续-非连续接触理论与验证

风化层边坡自身特性是复杂的, 其结构既具有连续介质的部分特性, 又存在着因风化作用产生的各种不连续面, 如裂隙、节理等。而连续-非连续方法能根据风化层边坡独特的地质结构, 精确地对其进行分析进而适应这种复杂的中间状态: 对于连续的部分, 它可以用连续介质力学的理论来描述应力应变关系; 对于那些非连续的裂隙等结构, 又能精准地分析其在地震作用下的张拉、错动等行为。此外, 地震力会改变边坡内部的应力分布, 使得原本的应力关系变得更加复杂, 连续-非连续方法可以同时考虑到连续介质中的应力传递以及非连续界面处的相互作用, 从而全面地分析地震力对风化层边坡稳定性的影响。同时, 风化层边坡在地震中的破坏形式多种多样, 包括整体滑动、局部崩塌、块体分离等不同形式, 连续-非连续方法既能够分析连续部分的整体变形趋势, 又能深入探究非连续部分的块体运动规律, 有助于准确预测在地震作用下风化层边坡可能出现的破坏模式。因此, 采用连续-非连续方法分析其地震动力响应, 能够提供更准确的边坡

变形、应力分布等信息,为工程的设计、加固以及风险评估提供可靠的依据。

2.1 非连续计算方法

风化层是边坡中受外界作用较大的地质结构,其通常由破碎的岩体或松散的土体组成,组成颗粒间通过接触力维持稳定,但其力学行为因内部裂隙发育具有显著的不连续性。故而连续方法难以分析风化层边坡因裂隙界面或颗粒接触处不再稳定而表现出的局部滑移、崩塌或颗粒流失行为。非连续方法将风化层视作由离散颗粒或裂隙网络构成,通过定义颗粒接触力学或裂隙间的交互关系,真实地模拟裂隙扩展、颗粒滑动等现象。此外,传统的连续方法(如有限元法)在处理大变形问题时,通常会因网格畸变而失效。非连续方法通过跟踪颗粒或块体的运动使分析不受网格限制以模拟风化层的大变形过程。因此,采用非连续方法(如离散元法、颗粒流方法等)对风化层进行模拟,可以更真实地反映风化层的复杂力学特性和边坡在外力作用下的动力响应行为。

非连续计算的关键部分是通过设置颗粒接触模型来计算颗粒-颗粒和颗粒-几何边界之间的接触力以实现颗粒间接触关系的模拟^[26]。非连续颗粒单元接触关系如图4所示。根据颗粒的弹性、塑性、摩擦等物理性质可将接触模型分为线弹性模型和非线弹性模型。

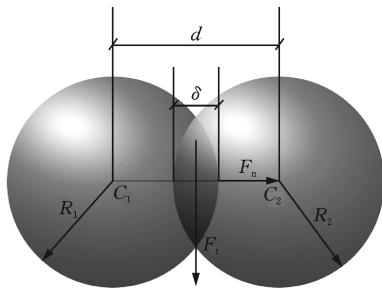


图4 颗粒接触模型示意

Fig.4 Schematic diagram of particle contact model

线弹性模型是基础模型,可简化为弹簧,力与位移呈线性关系,颗粒-颗粒之间的接触力随着位移量的增加而增加。线弹性模型的线性关系由以下方程表示:

$$F_N = -K_N \delta_N \quad (5)$$

$$F_T = -K_T \delta_T \quad (6)$$

式中, F 表示颗粒间接触力; K 表示弹簧常数; δ 表示

位移; N 代表法向; T 表示切向。

线弹性模型假定两个颗粒间的接触由弹簧连接。在计算过程中,线弹性接触模型的能量不会产生耗散,始终保持弹性。然而在实际边坡滑动过程中,会产生塑性变形,部分动能会转化成其他形式的能量散失而产生一定误差。因此,线弹性模型并不适用于滑坡研究。

ABAQUS中非线性弹性模型为典型的Hertz接触模型,该模型法向接触力与位移之间的非线性关系如图5所示。当半径为 R_1 和 R_2 的两个颗粒之间距离 d 小于接触距离 $R_1 + R_2$ 时,两个颗粒之间的法向接触力 F 根据杨氏模量 E 、泊松比 ν 、颗粒半径以及位移 δ 由式(7)计算:

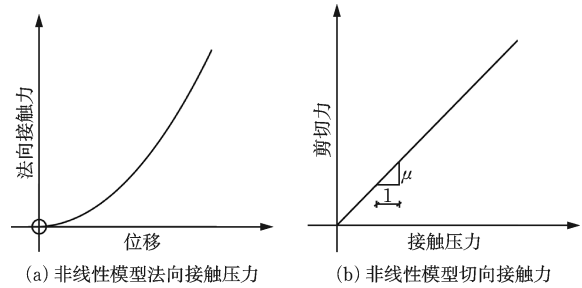


图5 非线性模型接触力

Fig.5 Contact force of nonlinear model

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R} \sqrt{\delta^3} \quad (7)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (8)$$

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (9)$$

对于切向接触,如图5(b)所示,颗粒-颗粒之间接触关系为摩擦力模式。ABAQUS采用罚函数(Penalty)算法,即在某一节点检测到接触距离以内的其他节点之间定义罚刚度,进而迭代计算接触力,在每个时间步中首先检查各从节点是否与主面发生穿透,如果没有穿透,则进入下一个时间步;如果发生穿透,则在该从节点与被穿透主面之间引入罚刚度,并引入一个较大的界面接触力,其大小与穿透深度、主面的刚度成正比。采用Penalty时,计算的摩擦力为接触界面间允许滑动的最大剪应力,见式(10):

$$\tau = \mu F \quad (10)$$

式中, μ 为摩擦系数。

基于ABAQUS非连续方法的运算为显示计算,在研究过程中为了保证颗粒运算的稳定性^[27],

时间步长需要控制在一定范围内：

$$\Delta t = \frac{\pi r \sqrt{\rho/G}}{0.163 1\nu + 0.876 6} \quad (11)$$

式中, ρ 为颗粒密度; r 为颗粒半径; G 为剪切模量; ν 为泊松比。

2.2 非连续计算方法验证

对重力作用下非连续介质边坡进行数值模拟, 数值模型尺寸为 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 坡比为 1:1。颗粒接触参数、单元参数以及宏观岩石力学参数根据文献[28-30]综合确定。滑坡体离散单元颗粒直径为 5 mm, 其弹性模量为 2 GPa, 泊松比为 0.2。根据 2.3.1 节提出颗粒间接触算法, 非连续介质边坡的法向接触力为 0、0.07、0.20 kN, 切向摩擦系数设定为 0.35。

为了验证非连续单元接触关系的可行性以及该接触算法的有效性, 采用自行设计的重力作用下非连续边坡试验模型进行模拟试验。试验装置和材料包括由亚克力板和砂纸组合而成的试验盒、电镀磨砂钢珠、结构光三维扫描仪和高清摄像机等, 试验模型如图 6 所示。

试验所使用的箱体长宽高为 $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 整体由热熔胶进行加固, 底板设置凹槽以安装侧板, 同时铺设砂纸以增大摩擦力, 于侧板内部 200 mm 处设置 45° 凹槽以安装挡板, 外部粘贴刻度尺以测量小球位移, 精度为 1 mm。钢珠直径 5 mm, 密度 7800 kg/m^3 , 钢珠间摩擦系数为 0.3, 钢珠与砂纸之间摩擦系数为 0.5。试验开始前, 将钢珠堆积成 $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的坡体。开始后撤去挡板, 使小球在自重作用下滑落, 使用高清摄像机采集标记小球 A 位移, 采样间隔 0.1 s。

结构光三维扫描仪用于试验开始前和结束后采集模型整体形态, 并计算标记钢珠的位移, 其结果与刻度尺数据相互修正, 单次试验结果取二者平均, 试验重复三次以减小误差。试验模型采用与数值模拟 1:1 还原的模型, 对试验后的坡体应用结构光 3D 扫描仪(图 6)进行扫描, 通过与基于 CAD 内核构建扫描原生算法的 Geomagic Control X 数字成像软件相结合呈现试验结果, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 在重力作用下倾角为 45° 的松散无黏性边坡并不能够保持稳定, 受到颗粒间摩擦作用以及颗粒与基岩间摩擦作用的影响, 最终堆积成一个能够在自然状态下保持稳定的新边坡, 其边坡坡

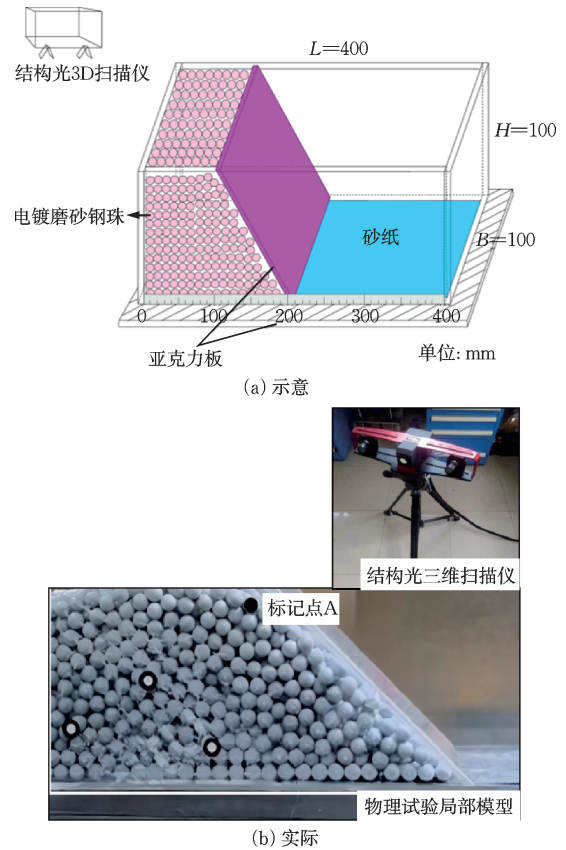


图 6 重力作用下非连续介质边坡试验观测模型

Fig.6 Experimental observation model of discontinuous slope under gravity

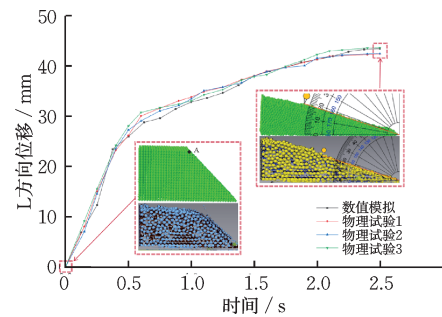


图 7 重力作用下边坡位移

Fig.7 Displacement of slope under gravity

角明显小于开始滑动的滑动角。对比上述数值模型与物理试验结果发现, 数值模拟结果与点云模型二者呈现的最终堆积形态一致, 数值模拟与物理试验垮塌形成的边坡坡角均为 18° , 数值模拟中标记小球 A 的最终位移为 43 mm, 三次试验测得的标记小球位移平均值为 42 mm, 误差小于 3%, 证明了本文非连续单元间接触关系的可行性以及接触算法的有效性。

2.3 连续-非连续计算理论

在本文研究分析中,大变形区域采用非连续单元模拟,其余部分采用连续单元模拟。对于连续和非连续单元的接触计算问题^[31],重点在于保证连接节点的力和位移连续条件,即在连续单元计算的同一时步中或者动态调节时步中保证非连续单元和连续单元传力和位移的误差固定在一定范围内。因此,需要将连续区域边界节点力作为非连续区域的力边界条件并对非连续区域进行计算,非连续单元的位移将会反作用于连续单元节点,在不断地迭代过程中保证两者的计算误差不超过规定界限,继续下一步计算直至计算结束,非连续单元与连续单元接触面的相互作用如图8所示。

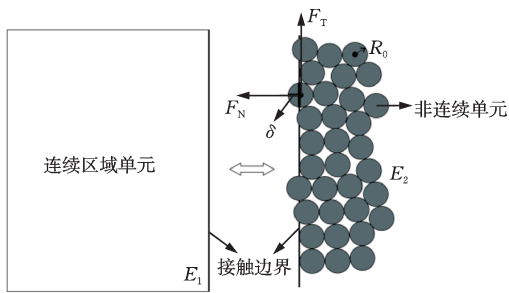


图8 连续-非连续接触关系示意

Fig.8 Schematic diagram of continuous-discontinuous contact relationship

注: F_N 为法向接触力; F_T 为切向接触力; R_0 为颗粒半径; E_1 、 E_2 分别为连续单元和非连续单元的弹性模量

连续-非连续计算方法的基本思路为:

(1)对于连续单元和非连续单元之间的计算,首先要进行接触检测。连续单元通常基于连续体假设,有着规则的网格划分,而非连续单元则更关注颗粒个体的行为。因此,需根据设定的搜索算法在计算的每个增量步中检查连续单元表面和非连续单元之间是否有接近或相互穿透的情况,即检查非连续单元的节点是否进入了连续单元的表面范围内。

(2)检测到连续单元与非连续单元之间发生接触后根据接触面上的法向和切向行为计算接触力。其中:对于法向接触力采用Hertz接触算法,当有穿透时根据穿透量来计算接触力;对于切向接触力,通常会考虑摩擦的影响,因为摩擦力会阻止它们相对滑动。

(3)准确地对接触界面进行建模是连续单元和非连续单元接触的关键。可以直接定义连续单元与非连续单元表面的接触对,明确指定主面和从

面。主面通常是刚度较大、网格较粗的表面,而从面则是相对更易变形或者更精细的表面。同时,还可以对接触界面的属性进行详细设置,如接触刚度、摩擦系数等。综上,该方法在理论上是可行的。

连续-非连续模型具体计算流程详见图9,具体如下:

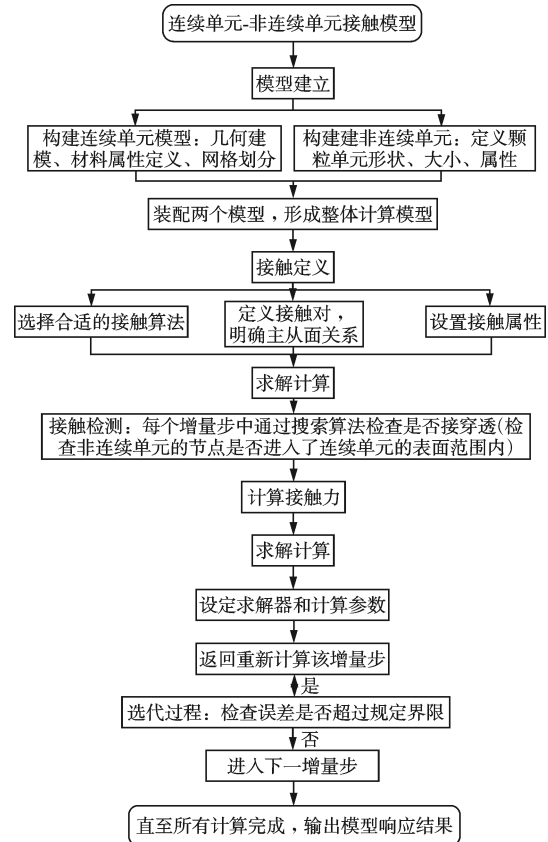


图9 连续-非连续单元接触计算流程

Fig.9 Flowchart of contact calculation for continuous-discontinuous elements

(1)建立模型。分别建立连续和非连续模型,对于连续单元模型,需要进行几何建模、材料属性定义、网格划分等常规步骤;对于非连续单元模型,则要定义颗粒的形状、大小、材料属性等。然后,将两个模型进行装配。

(2)定义接触。确定合适的接触算法,根据实际问题设置接触属性,如接触刚度、摩擦系数等,这些属性控制着连续单元和非连续单元在接触过程中的行为。

(3)计算求解。根据设定的求解器和计算参数,逐步计算每个增量步中的接触情况。连续单元和非连续单元的计算、接触力的计算等协同工作,最终得到整个模型的响应结果。

2.4 连续-非连续计算方法验证

为了验证连续-非连续接触关系的有效性和精确性,本文参考Z.Y.Feng等^[21]建立的计算模型,模拟了2009年台湾地震作用下小林滑坡的全过程,材料参数的选取见表1。

表1 小林滑坡参数表

Table 1 Parameters of landslide in Xiaolin

	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦系数
滑坡体	2 600	-	-	0.08
基岩	2 600	4.8	0.33	0.5

小林滑坡的整体滑塌过程见图10(a),将计算过程中不同时间段滑坡体的堆积情况汇总在表2中。从图10中可以看到:在地震发生后的10 s内,滑坡体A沿滑裂面向B滑动,地震发生后10~30 s,滑坡体A和B相接并共同向滑坡体C滑动,地震发生后30~50 s,滑坡体A和B滑动到C区域,并且和滑坡体C相接,受地形影响滑坡体A、B、C发生堆积并保持稳定,在历经50 s地震的作用下,滑坡体都经历了滑动、结合、继续滑动、再次结合直至滑坡体堆积的全过程,通过图10(a)和图10(b)的对比证明了本文提出的连续-非连续方法可以很好地模拟地震诱发边坡失稳垮塌的过程。

此外,从表2中各区域的堆积范围对比可知,整

表2 两种数值模拟方法下不同时间段滑坡体堆积范围

Table 2 Accumulation ranges of landslide at different time periods under two numerical simulation methods

模拟方法	堆积区域	10 s	20 s	30 s	40 s	50 s
ABAQUS	A	2 520~3 850 m	1 950~3 680 m	1 950~3 260 m		
	B	1 950~2 400 m			700~2 600 m	700~2 420 m
	C	700~1 060 m	700~1 060 m	700~1 060 m		
PFC-FLA C	A	2 650~3 900 m	1 990~3 650 m	1 900~3 170 m		
	B	1 990~2 415 m			720~2 600 m	720~2 400 m
	C	720~1 060 m	720~1 060 m	720~1 060 m		
相对误差	A	6.40%	4.22%	3.15%		
	B	6.25%			1.06%	2.38%
	C	6.06%	6.06%	6.06%		

3 大光包滑坡失稳垮塌规律分析

本文采用黏弹性人工边界结合等效地震荷载作为地震波的输入手段,以此为基础截取不同切片

个滑动过程中滑坡体堆积范围误差(堆积区域长度)最大为6.40%,最小为1.06%,整体平均误差(滑动过程中堆积区域长度的叠加总和)小于3.65%。在计算效率方面,本文提出的计算方法由于在一个软件中进行,相较于PFC+FLAC的整体计算效率略高。综上,本文提出的连续-非连续地震边坡数值分析方法具有较好的精度、较高的计算效率和良好的收敛性。

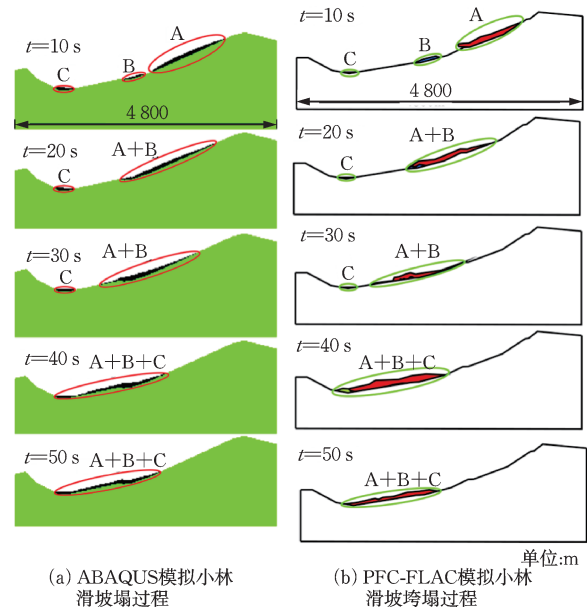


图10 数值模拟位移对比结果

Fig.10 Comparison results of displacement in numerical simulation

的大光包滑坡建立三维连续-非连续数值计算分析模型,并对其失稳垮塌规律进行分析。

3.1 大光包滑坡数值模型建立

本文模拟大光包滑坡数值模型及监测点位置

如图 11 所示,高 2 900 m,宽 6 000 m,滑坡体颗粒之间的摩擦系数 μ_1 为 0.3,滑坡体颗粒与基岩之间的摩擦系数 μ_2 为 0.35,颗粒半径参考文献[28]选取,综合考虑计算效率和实际岩土体情况,最终确定模型颗粒数量区间为 15~20 万个,其余岩体参数见表 3,边坡体的模型固有频率为 1.47 Hz。

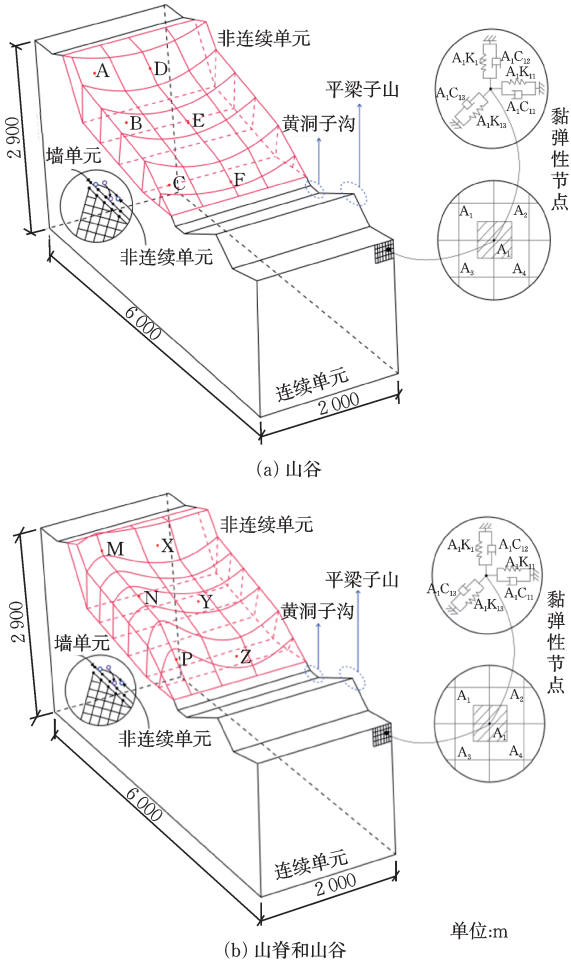


图 11 大光包滑坡数值模型

Fig.11 Numerical model of Daguangbao landslide

表 3 大光包滑坡物理力学参数表

Table 3 Physical and mechanical parameters of Daguangbao landslide

	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
滑坡体	2 600	-	-
基岩	2 300	15	0.24

模型设置边坡基底和侧面为黏弹性人工边界,将地震波通过等效节点力方法施加在基底和侧面边界节点上,节点上的等效节点力可通过以下公式计算:

$$m\ddot{u} + (c + AC)\dot{u} + (k + AK)u = A\sigma + Ku^f + C\dot{u}^f \quad (12)$$

式中, C 为阻尼系数; K 为弹簧刚度系数; A 为边界节点所代表的面积;上标 f 表示自由场; \ddot{u} 为地震波加速度时程; \dot{u} 为地震波速度时程; u 为地震波位移时程。

本次仿真过程采用人工波作为地震荷载,加载时间为 30 s,输入地震波曲线如图 12 所示,该人工波主频为 6.03 Hz。

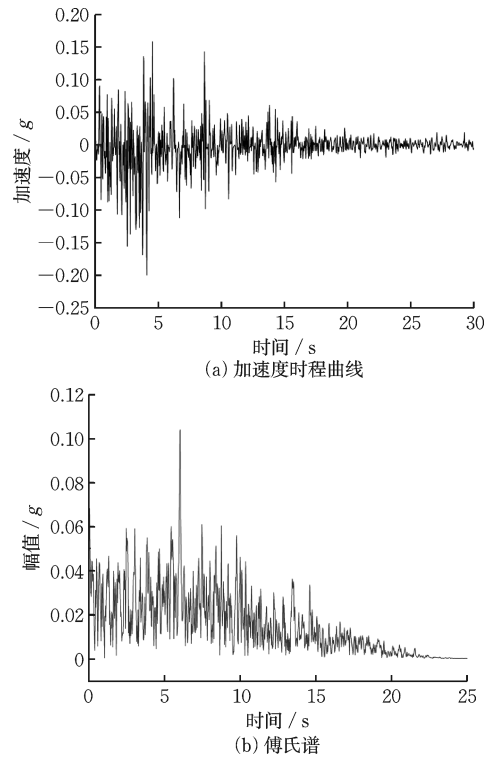


图 12 人工波时程曲线和相应的傅氏谱

Fig.12 Time-history curve of artificial wave and corresponding Fourier spectrum

3.2 大光包滑坡失稳垮塌规律

地震作用下大光包滑坡的破坏过程失稳垮塌过程如图 13 所示(所示云图中位移单位为 10^{-1} m)。

当地震波抵达连续介质与非连续介质界面时,会产生界面反射并折返至地层内部,模型通过设置的人工边界对反射波进行吸收,因此地震反射波不会引起滑坡。大光包滑坡在地震作用下发生滑坡的最主要因素为连续介质与非连续介质在分界面处的动力特性差异,由于产生的振动不协调,从而诱发界面的损伤和破坏。

由图 13 以不包含山脊的大光包滑坡为例说明:边坡在地震加载的 30 s 内,滑塌过程大致分为启动加速、高速运动、速度放缓三个阶段。

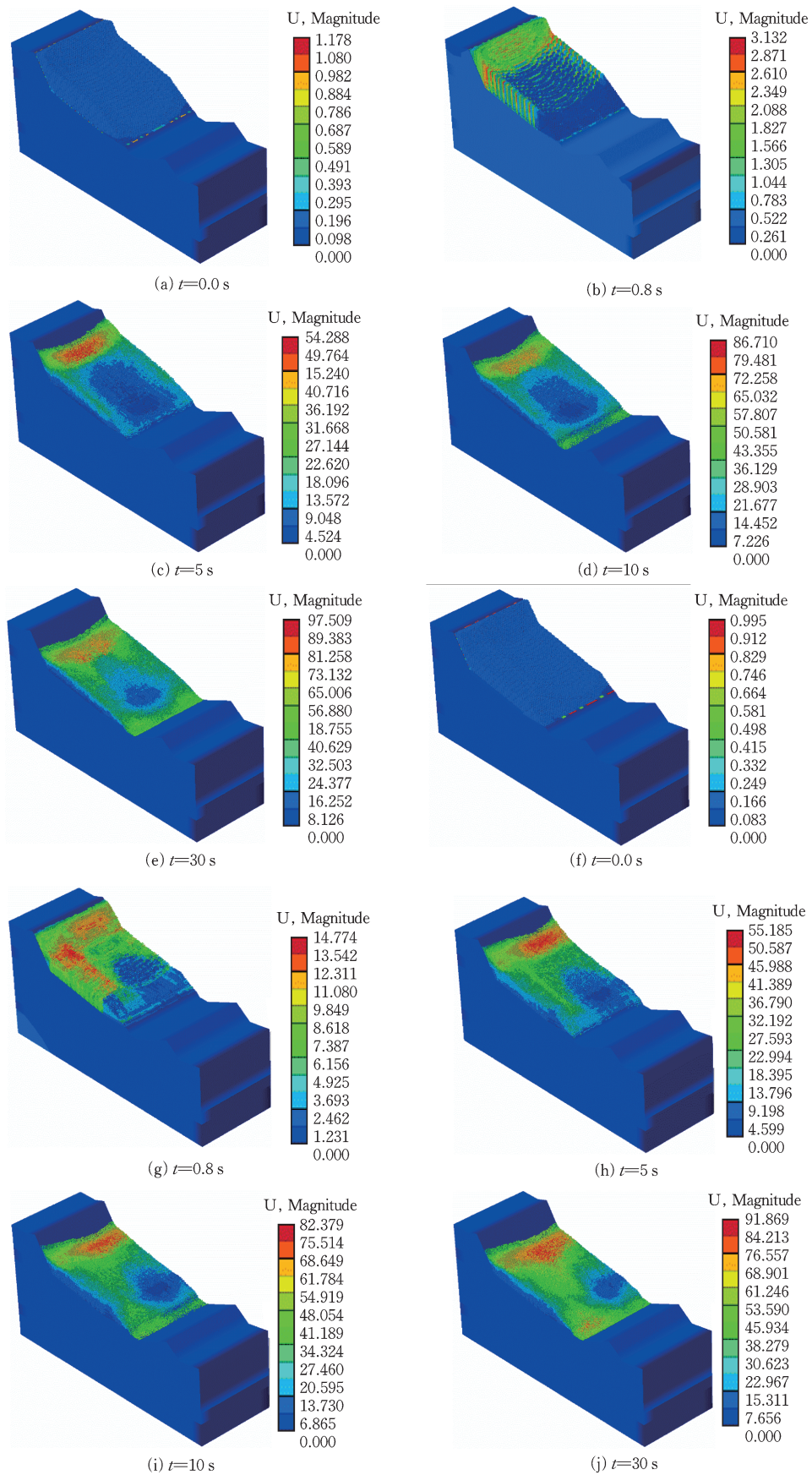


图 13 大光包滑坡滑动过程
Fig.13 Sliding process of Daguangbao landslide

启动加速阶段(0 s~0.8 s):自重和地震荷载的矢量叠加作用令滑坡体后缘顶端发生剪切位移并产生张拉裂缝,使得裂缝下部颗粒所受合力方向逐渐倾向于潜在滑裂面切线方向,坡顶靠近坡面处表面颗粒开始向下运动并由后方颗粒碰撞而获得更多能量,大光包滑坡开始启动并迅速加速。

高速运动阶段(0.8~10 s):在地震持续作用下张拉裂缝进一步扩展,坡顶靠近坡面处表面颗粒沿高度方向不均匀的高速向下方滑落,5 s时坡顶大部分粒子进入高速运动状态,且坡脚处颗粒冲破制约作用向黄洞子沟滑动,10 s时黄洞子沟底部开始有颗粒堆积,此时边坡最大位移增长至 867.10 m,阶段平均速度为 79.5 m/s。

速度放缓阶段(10~30 s):由于边坡坡度随顶部颗粒在下方的堆积而逐渐减小,颗粒所受合力垂直于滑裂面的荷载分量增大,导致颗粒与颗粒间、颗粒与基岩间摩擦作用增强,同时坡脚的制约作用也随坡度减小而增强,使边坡整体稳定性逐渐好转,滑坡速度逐渐放缓,至 30 s 加载结束时最大位移为 975.09 m,此阶段平均速度为 5.4 m/s。

对比图 13 可知,包含山脊与不包含山脊的大光包滑坡在滑坡速度方面规律一致,区别在于:包含山脊的大光包滑坡在启动加速阶段,山脊高位颗粒与山谷坡度颗粒同步开始向下运动,在高速运动阶段先于山谷处在坡脚处出现颗粒堆积情况,并于速度放缓阶段在坡脚处的堆积数量远多于山谷侧。

3.3 大光包滑坡动力响应规律

提取大光包滑坡不同监测点的位移和速度列于图 14 中。

从图 14 中可以看到,在地震前 0.8 s 内,整体滑坡位移较小,主要是因为此时的滑坡体整体处于稳定状态,滑坡体与基岩之间刚开始发生张拉剪切作用,但是彼此之间还处于相互咬合状态。此后,滑坡体与基岩发生断裂,滑坡体进入高速运动阶段,滑坡体的速度和位移均迅速增大。在地震发生 20 s 后,滑坡体在黄洞子沟发生堆积,此时进入平稳阶段,速度较低。依托大光包滑坡数值模型中“山脊-山谷”监测区域(M、N、P、X、Y、Z),提取不同时刻颗粒的平均速度时程数据(如图 14(d)所示),结合颗粒密度(滑坡体密度 $2\ 600\ \text{kg/m}^3$)与离散单元颗粒质量,通过动能公式 $E_k = 1/2\ mv^2$,计算颗粒在不同阶段(启动加速期 0~0.8 s、高速运动期 0.8~

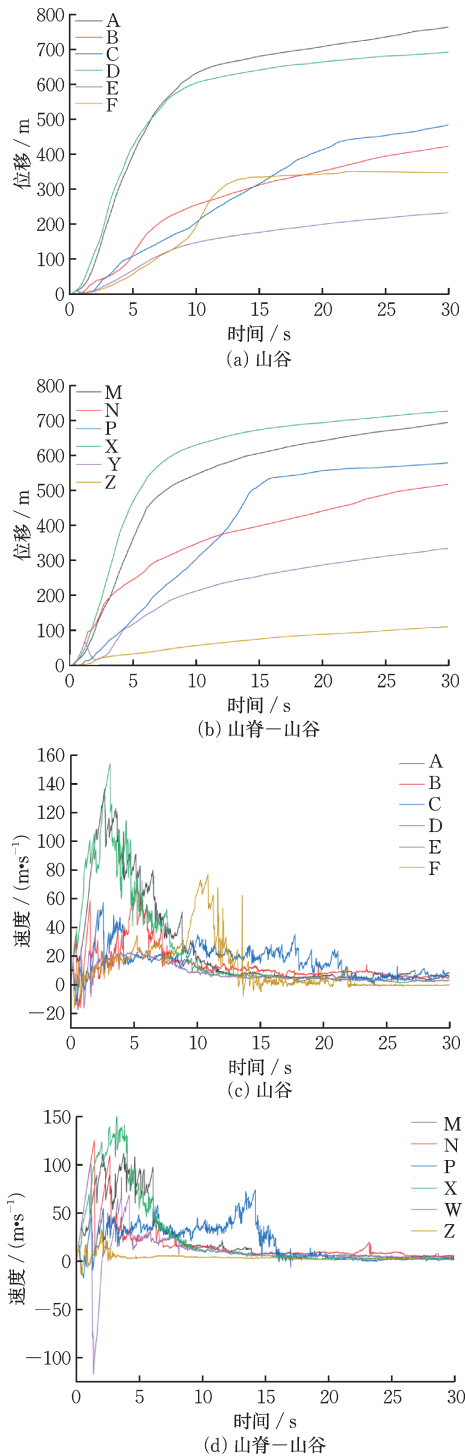


图 14 大光包滑动特征曲线

Fig.14 Sliding characteristic curves of Daguangbao landslide

10 s、速度放缓期 10~30 s)的平均动能可知:

启动阶段(0~0.8 s):山脊高位颗粒(如监测点 M)与山谷颗粒(如监测点 A)同步启动,但山脊颗粒因初始高程更高(模型中山脊相对山谷高差约 1 100 m),重力势能转化为动能的效率更高。数据显示,0.8 s 时山脊颗粒平均动能较山谷颗粒高 12%~15%,且最大动能颗粒集中在山脊顶端,验证

了“高位颗粒优先获得运动能量”的规律。

高速运动阶段(0.8~10 s):山脊颗粒运动路径更长,受地形阻碍更小,动能衰减速率较山谷颗粒低8%~10%。10 s时山脊颗粒累计动能总量为山谷颗粒的1.2倍,且坡脚堆积区山脊颗粒动能占比达62%,直接导致山脊侧堆积数量显著多于山谷侧。

速度放缓阶段(10~30 s):山脊颗粒因前期动能消耗更大,30 s时剩余动能仅为山谷颗粒的0.7倍,反映地形对动能耗散的加速作用。

此外,根据监测点A、D、M和X运动曲线可知:滑坡体顶部加速启动较早,在地震作用前5 s速度较大,此后收到滑坡体下端颗粒的阻碍作用,速度逐渐放缓;而根据监测点C、F、P和Z运动曲线可知:地震发生5 s之后,坡脚处滑坡体突破制约作用,受地震与重力双重作用下,滑动速度增加,整体沿滑裂面向黄洞子沟快速滑动,此后受到平梁子山的阻碍作用,滑坡体在黄洞子沟发生堆积,运动状态趋于稳定。

4 结论与展望

(1) 本文基于通用有限元数值模拟软件ABAQUS建立了连续-非连续方法的地震作用下边坡数值计算模型,通过物理试验和数值试验证明了本文采用的连续-非连续方法接触关系的有效性和精确性;与常用的连续-非连续方法(通常为PFC-FLAC)相比,本文所提出方法建模过程更为便捷高效。

(2) 对地震作用下大光包滑坡的失稳机理和滑动特性进行分析,发现滑坡体垮塌由顶部后缘伊始,发生剪切位移产生裂缝,滑坡体突破坡角制约作用后,整体沿滑裂面滑动,受到平梁子山的阻碍作用,滑坡体在黄洞子沟发生堆积,运动状态趋于稳定。

(3) 地震诱发边坡的失稳垮塌是一个复杂的力学过程,不同地质条件和地貌条件下垮塌规律必然不同,本文提出的连续-非连续计算分析方法可为今后相关研究领域提供技术指导,未来将以此为基础进一步探究颗粒形状、数量以及排列方式等对边坡失稳垮塌规律的影响。

参考文献:

[1] 许冲,徐锡伟,吴熙彦,等.2008年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析[J].工程地质学报,2013,21

(1): 25-44.

Xu C, Xu X W, Wu X Y, et al. Detailed catalog of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 25-44. (in Chinese)

[2] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等.边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(3):624-632.

Xu G X, Yao L K, Gao Z N, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic response of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624-632. (in Chinese)

[3] 杨长卫,郭雪岩,刘阳,等.基于振动台试验的含软弱夹层堆积体边坡动力响应规律与失稳破坏现象研究[J].工程科学与技术,2021,53(3):43-52.

Yang C W, Guo X Y, Liu Y, et al. Research on dynamic response and instability failure phenomenon of deposit slope with weak interlayer based on shaking table test[J]. Engineering Science and Technology, 2021, 53(3):43-52. (in Chinese)

[4] 万金侠,施艳秋,陈小云.基于动土压力响应特性的黄土滑坡振动台试验研究[J].防灾减灾工程学报,2021,41(3):586-593.

Wan J X, Shi Y Q, Chen X Y. Shaking table experiment of loess landslide based on dynamic earth pressure response characteristics[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 586-593. (in Chinese)

[5] 傅杨攀,刘勇健,陈贡发,等.基于CSMR和卷积神经网络的岩质边坡稳定性分析[J].自然灾害学报,2023,32(1):114-121.

Fu Y P, Liu Y J, Chen G F, et al. Stability analysis of rock slope based on CSMR and convolution neural network[J]. Journal of natural disasters, 2023, 32(1): 114-121. (in Chinese)

[6] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. Géotechnique, 1965, 15(2): 139-160.

[7] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等.边坡地震稳定性分析探讨[J].地震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.

Zheng Y R, Ye H L, Huang R Q, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173-180. (in Chinese)

[8] 王龙,陈国兴,胡伟,等.基于拟动力法抗滑桩加固非饱和土边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1386-1394.

- Wang L, Chen G X, Hu W, et al. Seismic stability of unsaturated soil slopes stabilized by anti-slide piles based on pseudo-dynamic approach[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(6): 1386-1394. (in Chinese)
- [9] 崔铁军, 李莎莎. 长期矿震作用对露天矿边坡岩体状态的影响研究[J]. *自然灾害学报*, 2023, 32(5): 218-225.
Cui T J, Li S S. Study on the influence of long term mine earthquake on rock mass state of open pit slope [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(5): 218-225. (in Chinese)
- [10] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(8): 1714-1723.
Zheng Y R, Ye H L, Huang R Q. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(8): 1714-1723. (in Chinese)
- [11] 李均益, 罗永红, 周赞, 等. 青川刨地里地震滑坡发育特征及其成因机制探讨[J]. *地震学报*, 2024, 46(3): 514-525.
Li J Y, Luo Y H, Zhou Z, et al. Analysis of characteristics and failure mechanism of Paodili seismic landslide in Qingchuan County [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2024, 46(3): 514-525. (in Chinese)
- [12] 刘洪波, 梁崇旭, 刘飞禹. 考虑含水率影响的花岗岩残积土边坡地震响应分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(2): 342-350.
Liu H B, Liang C X, Liu F Y. Seismic response analysis of granite residual soil slopes considering the effect of water content [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(2): 342-350. (in Chinese)
- [13] 惠红军, 杨家英, 赵永红, 等. 断层边坡地震动载效应的数值模拟[J]. *地震学报*, 2023, 45(4): 695-705.
Hui H J, Yang J Y, Zhao Y H, et al. Numerical simulation of seismic dynamic load effect of fault slope [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2023, 45(4): 695-705. (in Chinese)
- [14] 王叶. 基于连续-离散耦合分析方法的边坡滑动及堰塞体形成过程研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
Wang Y. Research on slope sliding and landslide dam formation process based on continuous-discrete coupled analysis method [D]. Wuhan: Wuhan University, 2018. (in Chinese)
- [15] 刘毛毛, 石振明, 李博, 等. 基于DEM-FDM耦合的顺层岩质边坡强震动力响应及破坏模式分析[J]. *地球科学*, 2024, 49(8): 2799-2812.
Liu M M, Shi Z M, Li B, et al. Analysis of dynamic response and failure mode of bedding rock slopes subject to strong earthquakes based on DEM-FDM coupling [J]. *Earth Science*, 2024, 49(8): 2799-2812. (in Chinese)
- [16] Munjiza A, Bangash T, John N W M. The combined finite-discrete element method for structural failure and collapse. *Journal [J]. Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(4): 469-483.
- [17] Vyazmensky A, Stead D, Elmo D, et al. Numerical analysis of block caving-instability in large open pit slopes: a finite element/discrete element approach [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(1): 21-39.
- [18] Giovanna P, Francesco A, Marco B, et al. Continuum-discontinuum modelling of failure and evolution mechanisms of deep seated landslides [C]//6th Int. Conf. on Discrete Element Method. Golden, CO, USA: Colorado School of Mines, 2013: 295-300.
- [19] 俞韶秋, 汤华. 有限元/离散元耦合分析方法及其工程应用 [J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(10): 1611-1615.
Yu S Q, Tang H. Coupling analysis of FEM/DEM for whole failure process of rock slope and its engineering application [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2013, 47(10): 1611-1615. (in Chinese)
- [20] 李祥龙. 层状节理岩体高边坡地震动力破坏机理研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
Li X L. Research of the seismic-induced failure mechanism of layered rock high slope [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese)
- [21] Feng Z Y, Lo C M, Lin Q F. The characteristics of the seismic signals induced by landslides using a coupling of discrete element and finite difference methods [J]. *Landslides*, 2017, 14(2): 661-674.
- [22] Liu K Q, Liu H Y. Simulation of the earthquake-induced soil-rock mixed accumulation body sliding movement using discrete-continuous coupled approach [J]. *Natural Hazards*, 2022, 114(2): 2081-2108.
- [23] Xu C Y, Liu Q S, Tang X H, et al. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the combined finite-discrete element method (FDEM) [J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 160: 105556.
- [24] 尹超, 李伟华, 赵成刚. SV波斜入射下坡体地形放大效应的研究 [J]. *振动工程学报*, 2020, 33(5): 971-984.
Yin C, Li W H, Zhao C G. Study on the topographic amplification effect of slope under oblique incident SV wave [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33

- (5): 971-984.(in Chinese)
- [25] 杜修力,赵密,王进廷.近场波动模拟的人工应力边界条件[J].力学学报,2006,38(1):49-56.
Du X L, Zhao M, Wang J T. Artificial stress boundary condition for simulation of near field fluctuation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56.(in Chinese)
- [26] Li Y, Yong X, Thornton C. A comparison of discrete element simulations and experiments for 'sandpiles' composed of spherical particles [J]. Powder Technology, 2005, 160(3): 219-228.
- [27] 费康,彭劼.ABAQUS岩土工程实例详解[M].北京:人民邮电出版社,2017.
- [28] 贺续文,刘忠,廖彪,等.基于离散元法的节理岩体边坡稳定性分析[J].岩土力学,2011,32(7):2199-2204.
He X W, Liu Z, Liao B, et al. Stability analysis of jointed rock slopes based on discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2199-2204.(in Chinese)
- [29] Camones L A M, Vargas E D A Jr, de Figueiredo R P, et al. Application of the discrete element method for modeling of rock crack propagation and coalescence in the step-path failure mechanism. Journal [J]. Engineering Geology, 2013, 153(3):80-94.
- [30] 岑夺丰,黄达,黄润秋.块裂反倾巨厚层状岩质边坡变形破坏颗粒流模拟及稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(3):984-993.
Cen D F, Huang D, Huang R Q. Simulation of deformation and failure for blocky anti-dip thick-layered rock slopes using particle flow code and analysis on its stability [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 984-993.(in Chinese)
- [31] 郑祖美.基于GPU并行的DEM-FEM方法研究及其在越野轮胎沙地行驶性能分析中的应用[D].广州:华南理工大学,2018.
Zheng Z M. The GPU based DEM-FEM and its application on travel performance analysis of off-road tires on granular sand [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.(in Chinese)
- (本文编辑:张艺)