

地震荷载作用下松散体边坡的渐进破坏机理分析

邱懿¹, 尚羽²

(1. 贵州高速公路集团有限公司, 贵州 贵阳 550009; 2. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:松散体边坡是一种特殊的岩质边坡,其物质组成具有非线性、非均质以及非连续性等特点,而中国又是地震高发国家,松散体边坡的稳定性问题尤为突出。该文结合现场调研情况,运用颗粒流程序 PFC 对雅康高速公路的实际松散体边坡 MK0+455 进行数值模拟,分析研究其在地震荷载作用下的力学行为和动力特性,揭示出松散体边坡的渐进破坏机理。结果表明:在地震动力荷载下,松散体边坡的渐进破坏主要分为松散体堆积层的松动和滑坡以及基岩层的黏结破坏和裂隙发展;松散体边坡内黏结状态和裂隙分布的渐进发展过程具有一定的时间性和空间性;并通过对空隙率、应变率以及动能等时程变化的分析,初步总结了松散体边坡的渐进破坏特性。

关键词:松散体边坡; PFC; 地震荷载; 动力特性; 渐进破坏

中图分类号: U416.1+4

文献标志码: A

松散体边坡是高速公路沿途两侧比较常见的边坡体类型,作为一种特殊的岩质边坡,其物质的组成成分具有非线性、非均质以及非连续性^[1-2]等特点,因此其稳定性和破坏机理难以通过现有的土力学和岩石力学理论解释分析。尤其在中国区域性地震高发区更易出现松散体边坡的山体崩塌、滑坡、滚石、泥石流等一系列灾害的发生^[3-5]。

松散体边坡引起了众多学者的广泛关注^[6-7]。West 从细观角度出发,指出当松散体边坡中含有少量的大块石时,可能发生 3 种形式的破坏:穿过块石、偏离块石以及破坏区变宽^[8];Medley 和 Rehmann 发

现块石含量是影响松散体边坡安全系数的一个重要参数^[9];Murakami T 用离散元研究了地震荷载作用下顺坡向裂隙边坡的破坏过程^[10];董志高、吴继敏等采用有限元法并结合考虑地震作用的反应谱法分析了崩塌堆积体边坡的稳定性^[11];杨庆华、姚令侃等以拟静力离心模型试验原理为基础,利用砂堆离心试验来模拟松散体斜坡在地震荷载作用下的动力特性^[12];倪卫达、唐辉明等克服了传统极限平衡法难以考虑边坡材料动力特性的问题,运用动力矢量法分析了岩质边坡中楔形体的动力稳定性^[13]。

该文拟结合对雅康高速公路的实际松散体边坡

- *****
- [13] 程树斌,关彤军,张春会,等. 海绵城市道路种植土一碎石绿化带的雨水入渗[J]. 中外公路,2018,38(2):13-19.
- [14] 程树斌,张春会,关彤军,等. 种植土一碎石绿化带雨水入渗的数值分析[J]. 河北科技大学学报,2019,40(1):79-85.
- [15] 关彤军,张春会,王雯,等. 石家庄市道路径流雨水污染特征调查[J]. 河北科技大学学报,2017,38(6):591-599.
- [16] 侯培强,任玉芬,王效科,等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. 环境科学,2012,33(1):71-75.
- [17] 王书吉,姚兰,孙红. 城市道路雨水污染物浓度随产流过程变化规律研究[J]. 水科学与工程,2006(5):13-15.
- [18] 张琼华,王倩,王晓昌,等. 典型城市道路雨水径流污染解析和利用标准探讨[J]. 环境工程学报,2016,10(7):3 451-3 456.
- [19] 申丽勤,车伍,李海燕,等. 我国城市道路雨水径流污染状况及控制措施[J]. 中国给水排水,2009,25(4):23-28.
- [20] 彭亮,魏桃员. 武汉市路面径流特征及道路雨水利用分析[J]. 给水排水工程,2013,31(1):77-79.
- [21] 程树斌,关彤军,张春会,等. 种植土绿化带净化道路径流雨水的试验[J]. 中外公路,2020,40(6):53-57.
- [22] MARSILY,GHISLAIN de. Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers[M]. Academic Press,1986:267-269.
- [23] 陈如海. 污染液在地基土体中迁移及控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

收稿日期:2020-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51568007)

作者简介:邱懿,男,硕士,高级工程师. E-mail:qiu12yi3@163.com

MK0+455 的现场调研,运用颗粒流程序 PFC 从细观层面对实际松散体边坡进行数值模拟,分析其在地震荷载作用下的宏观力学行为和动力特性,以揭示松散体边坡的渐进破坏机理。

1 松散体边坡模型

1.1 自然地理条件

图 1 所示为雅安至康定高速公路新沟互通 MK0+



(a) 边坡平面位置



(b) 边坡岩层

图 1 松散体边坡

415~MK0+475 段典型的松散体边坡照片,其位于天全县两路乡新沟村附近,国道 G318 旁。该地区属于山地亚热带湿润季风气候区,气候温暖湿润,植被较发育,场区抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度 $0.2g$,地震动反应谱特征周期 0.40 s ^[14],地形地貌较复杂,基岩起伏变化较大,且不良地质发育。2008 汶川大地震时该处烈度为Ⅷ度,边坡发生轻微的破坏,局部出现落石滚落堆积于坡脚。

其中, MK0+455 松散体边坡坡长 200 m ,高 105.39 m ,边坡坡角 $40^\circ\sim 50^\circ$ 。边坡所处地层上覆第四系全新统崩坡积层,以碎石土和块石土为主,风化较严重,下伏基岩为三叠系上统须家河组,主要成分均为泥质岩、砂岩和花岗岩。松散体堆积层较厚,最大厚度约 18.35 m ,对周边环境和设施存在一定的潜在威胁。

1.2 松散体边坡模型的建立

根据 MK0+455 实际边坡尺寸,建立以 $1:1$ 为比例的离散元边坡模型,模型长 200.0 m ,高 105.39

m ,共分为 3 层,分别是基岩层、中风化层和松散体堆积层,相应采用不同颜色、不同属性的颗粒来进行区分,如图 2 所示。颗粒总数为 $4\,708$ 个,最大半径 1.0 m ,最小半径 0.6 m ,其空隙率为 0.19 。边坡颗粒间的接触模型为 PFC^{2D} 离散元软件中的线性接触模型,其中基岩层和微风化层的颗粒连接模型采用了平行连接模型,它类似于在两个颗粒之间存在一种柔性胶体黏结,可以抗拉与抗剪,还能承受弯矩荷载,较好地模拟了岩体材料的黏聚力^[15]。通过对 PFC 中的颗粒进行数值试验双轴试验和巴西劈裂试验(图 3)来确定松散体边坡模型颗粒的各个细观参数,结果见表 1。其中,双轴试验本质上是平面应变模式,是在 PFC 中进行参数识别时最常用的数值试验模式^[16-17]。根据现场实测的土体试验参数结合申志福^[16]和崔洋洋^[17]等的方法确定土体参数见表 1。

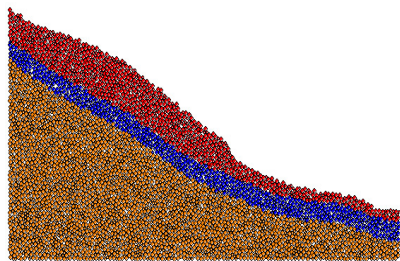


图 2 松散体边坡初始模型

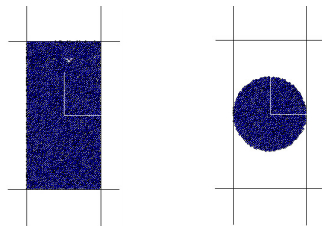


图 3 双轴试验和巴西劈裂试验

1.3 松散体岩石的形成

为更切合实际地模拟松散体岩石,采用 PFC 中的 cluster,每个 cluster 中的颗粒被黏结为一个整体,它们之间存在黏结力和相对运动,当一个颗粒所受到的外力大于 cluster 的黏结强度时,相应的黏结就会被破坏,该颗粒便会脱离这个 cluster,这样能比较真实地体现出松散体岩石在崩落过程中的碎裂特点^[16]。将颗粒组合成 5 种不同的 cluster,见图 4,以此来模拟实际边坡中含量较高的 5 种不规则形状松散体岩石块体:片状和长条状、大块体凸多边形、三角形、规则四边形以及不规则四边形。然后根据实际松散体的颗粒级配,用随机替换的方式取代边坡模型中松散体堆积层

表 1 松散体边坡模型颗粒细观参数

岩(土) 层类型	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦 系数	法向接 触刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向接 触刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行黏结 法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行黏结 切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行黏 结法向 强度/N	平行黏 结切向 强度/N	平行黏 结半 径/m	接触黏 结法向 强度/N	接触黏 结切向 强度/N
基岩层	2 650	0.5	1.8×10^{10}	1.8×10^{10}	2.8×10^{10}	2.8×10^{10}	4.5×10^7	4.5×10^7	1.0	—	—
中风化层	2 650	0.5	1.8×10^{10}	1.8×10^{10}	1.9×10^{10}	1.9×10^{10}	3.2×10^7	3.2×10^7	1.0	—	—
松散体 堆积层	2 650	0.3	1.8×10^{10}	1.8×10^{10}	—	—	—	—	—	1×10^5	1×10^5

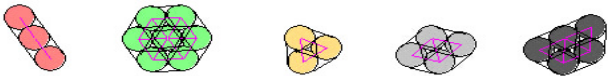


图 4 不同形状的松散体岩石模型

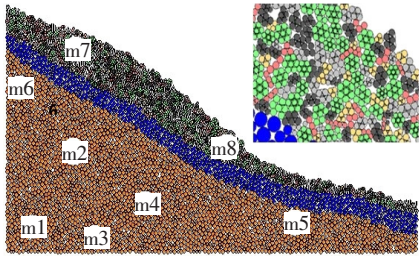


图 5 松散体边坡模型

中的原有颗粒,如图 5 所示。现场调研过程中发现松散体堆积层中一定含量的土会使松散体岩石胶结在一起,即土体能给松散体岩石提供黏聚力。鉴于研究主体是松散体岩石,而土体含量又相对较少,因此在建立松散体堆积层模型的过程中,并未生成土体颗粒,仅赋予松散体岩石之间一定的黏聚力来模拟土体的胶结作用。在全部替换松散体之后再次平衡松散体边坡模型,并赋予松散堆积层中的 cluster 与 cluster 之间以接触黏结法向与切向强度,即采用 PFC 中的接触黏结模型,可以承受拉力和剪力而不能承受弯矩,松散体岩石模型颗粒(cluster)的细观参数见表 2。

表 2 松散体岩石模型颗粒(cluster)细观参数

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦 系数	法向接触 刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向接 触刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行黏结 法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行黏结 切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	平行黏 结法向 强度/N	平行黏 结切向 强度/N	平行 黏结半 径/m	接触黏 结法向 强度/N	接触黏 结切向 强度/N	颗粒 紧密 系数
2 650	0.3	1.8×10^{10}	1.8×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^{10}	1.5×10^7	1.5×10^7	1.0	1.5×10^7	1.5×10^7	0.99

2 松散体边坡渐进破坏过程

2.1 地震荷载的施加

为了研究地震荷载对松散体边坡的作用机理,截取汶川地震的一部分加速度时程曲线,如图 6 所示,并利用 PFC 内置语言 FISH 的编程功能,将其转化为相应的速度时程施加于松散体边坡模型的侧面和底面。在 PFC 中,对模型边界条件的定义主要有对墙单元或颗粒单元施加边界条件两种方式。而对于地震作用等动力荷载的输入,可以通过给墙单元或边缘颗粒单元直接指定相应变化的速度来实现。该文采用墙单元的速度施加方式^[17],将加速度时程数据计算得到的速度时程数据赋值给松散体边坡模型边界上的墙体单元。然后墙单元速度的变化则是通过接触力的变化传递给相邻颗粒单元,接触力作用于颗粒后使其产生不平衡

而开始振动,如此不断地从边缘向边坡内部传递振动以致实现地震波的加载。

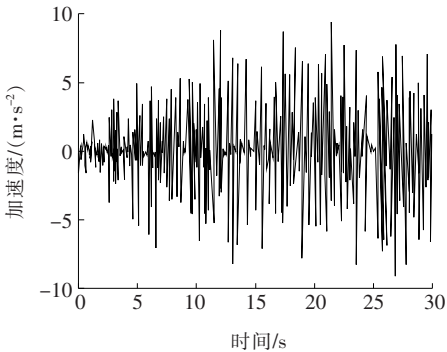


图 6 汶川地震加速度时程曲线

2.2 计算结果的分析

分别记录了初始平衡状态以及地震荷载施加后 2、5、10、15、20、30、35 s 时松散体边坡的位移矢量、接

触力以及黏结等状态,同时导入 PFC 中的裂隙函数,打开裂隙追踪选项,对边坡中裂隙的萌生、发展、积累和破坏过程进行实时显示(设置压裂隙呈现红色、拉裂隙为蓝色),如图 7~10 所示,以便能够较好地显示松散体边坡在地震荷载作用下的渐进破坏过程。

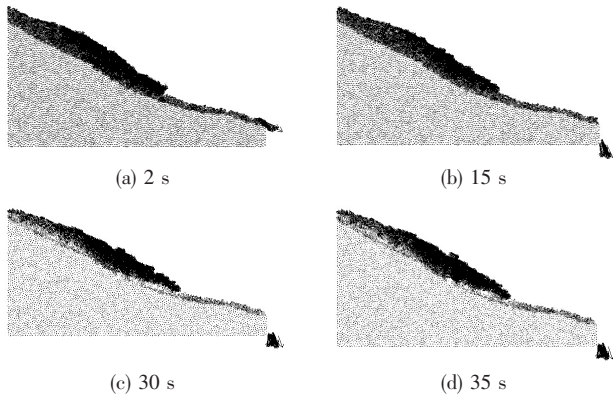


图 7 松散体边坡位移矢量渐进过程

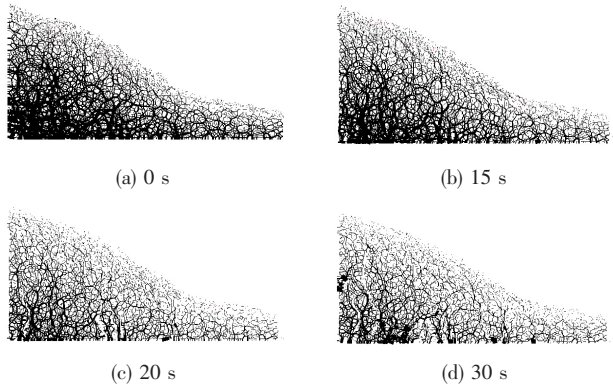


图 8 松散体边坡接触力场渐进变化过程

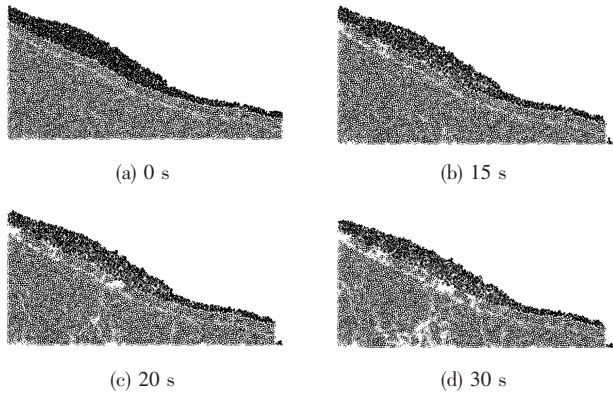


图 9 松散体边坡黏结状态渐进破坏过程

松散体边坡在自重作用下已经达到平衡而稳定,但在强烈的地震荷载作用下,震动自边界墙单元经过基岩内部向边坡表面传播,松散体堆积层底部和中上部的岩石瞬间就开始松动,松散体石块间的黏结很快

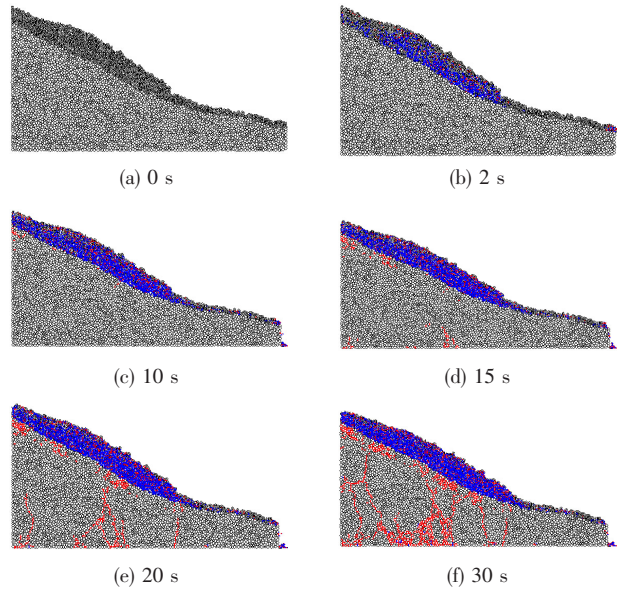


图 10 松散体边坡裂隙分布渐进发展过程

被破坏,颗粒间出现裂缝(以拉裂缝为主),而且出现的位置处于堆积层的内部,然后迅速向边坡表面扩展,直至裂缝充满松散体堆积层。与此同时,由于中上部松散体堆积较厚,边坡倾角也比较大,松散体已具有一定的速度,首先发生失稳,在坡脚处也有部分失稳的情况,颗粒均有逐渐向外滑动的趋势,松散体滑动面基本形成,为之后的失稳下滑提供了必要条件。

地震荷载作用约 10 s 时,松散体边坡的中分化层顶部也开始出现少许裂隙,与松散体堆积层有所不同的是,中风化层中的裂隙均为红色的压裂缝。紧接着,基岩层底部处局部颗粒的黏结力也逐渐丧失,同样有压裂缝的出现。而松散体岩石也在下滑过程中不断加速,形成碎屑流开始呈现出流态化运动。随着地震波的持续作用,坡体内的薄弱面继续被压坏,裂缝不仅随之增大和增多并开始相互贯通。从图 8 松散体边坡的接触力分布示意图可以看出,松散体边坡底部的接触力出现了明显的变化,接触力减小的同时也分布得更加均匀。

地震作用 20 s 之后,下滑的松散体已具有大量的动能,再加上本身的高势能,岩石之间的碰撞、摩擦、挤压,过大的外力作用使得大量岩块发生解体、碎裂。观察松散体边坡的黏结示意图(图 9),3 个岩层均有不同程度的破坏,以外侧的松散体堆积层最为严重。基岩层内多处黏结已发生破坏,呈现出明显的断裂面,数条已贯通的压裂缝纵向分布于边坡内部,并主要集中在边坡的内侧。

地震加载结束后(即 30 s 之后),松散体边坡内部

运动明显减弱,接触力、黏结状态以及裂缝的扩展基本都趋于稳定,主要体现在松散体堆积层中,虽然高速运动的松散体在下滑过程中有众多的碰撞和摩擦,但这都不足以完全消耗碎屑流的动能,松散体仍呈现出高速倾泻运动。总体来说,在地震荷载作用下,松散体边坡的渐进破坏主要分为两个部分:松散体堆积层的开裂滑坡以及基岩层的黏结破坏和裂隙发展。

图9所示的黏结状态渐进破坏过程和图10所示的裂隙分布渐进发展过程与现场观察到的边坡发生轻微破坏是相一致的,而且从图中可以合理推断当震级加大或者地震持续时间增长时,边坡发生下滑是极有可能的。

3 地震荷载作用机理分析

为了更好地了解地震荷载对松散体边坡的作用机理,在松散体边坡的不同位置布置了相应的测量圆来监测岩石空隙率和应变率的变化过程,监测点布置位置如图5所示,依次标记为m1~m8。并利用PFC离散元软件中的裂隙追踪函数和能量追踪函数来记录相关变量的时程变化,以揭示出松散体边坡在地震荷载作用下的渐进破坏准则。

3.1 黏结状态和裂隙分布规律

从图9、10中黏结状态和裂隙分布的渐进过程可以看出,在地震荷载作用下,松散体边坡的黏结破坏和裂隙产生具有明显的时间性和空间性。时间性主要体现在两个方面:松散体边坡先出现黏结破坏,继而产生裂隙并随之增加和贯通,这两者发生有先后顺序但发生的时间差却又非常短,即黏结破坏后马上就有裂隙的出现,而且裂隙发展的位置正是边坡中黏结发生破坏的地方;黏结破坏和裂隙产生先是出现在最外侧的松散体堆积层,然后经中风化层逐渐向内部的基岩层发展。

空间性也具有3个特点:随着地震的持续加载,松散体边坡各个岩层均会出现不同程度的黏结破坏和裂隙,由于最外层的松散体堆积层岩石强度较低,土体所提供的黏聚力较弱,它的损伤破坏也最为严重;在裂隙分布示意图中,蓝色表示拉裂隙,红色表示压裂隙,对比后可以发现:松散体堆积层中,拉裂隙和压裂隙都有产生,但以拉裂隙为主,而内部的中风化层和基岩层则主要是压裂隙,几乎没有拉裂隙的产生,说明在地震作用过程中,松散体堆积层受拉,内部岩层受压;地震加载结束后,边坡体内出现明显的断裂面和多条已贯通

的压裂缝,这些裂缝基本呈竖向排列,分布于基岩层内侧。

图11为松散体边坡的裂隙数目时程曲线,其中,图11(a)裂隙总数目记录的是整个松散体边坡在地震荷载作用下所产生的裂隙总数,主要包括图11(b)、(c)中的接触黏结裂隙数目和平行黏结裂隙数目。从图中可以看出:裂隙总数目随加载时间呈对数形式增长,在地震作用初始阶段有一个突变。如前文所述,由于接触黏结强度较低,故相应的破坏也较为严重,裂隙数量较多。不仅如此,接触黏结以切向破坏为主,而平行黏结则以法向破坏为主。

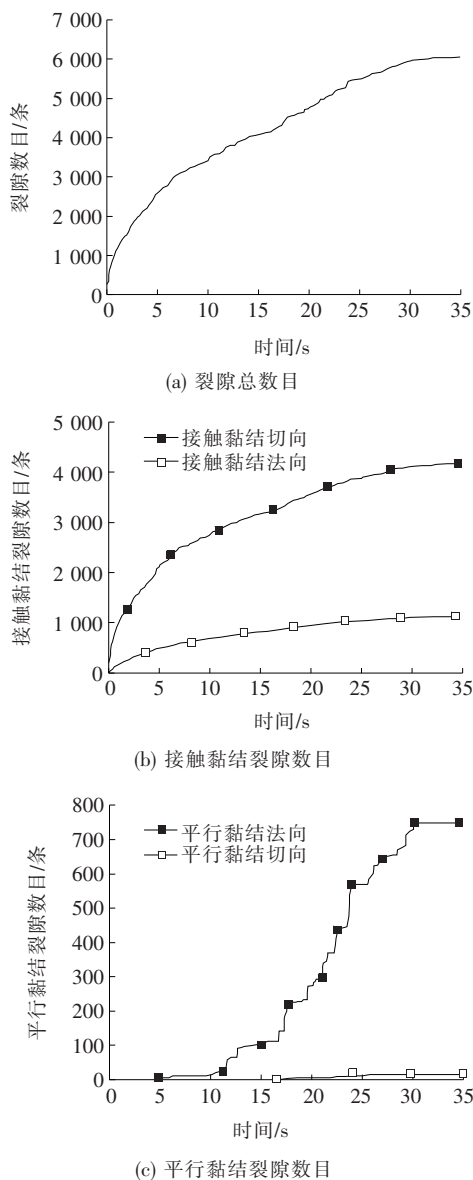


图11 裂隙数目时程曲线

3.2 动力特性

松散体边坡不同监测点处空隙率的时程曲线如图

12 所示,它可以反映岩体在地震荷载作用下受扰动的程度^[19]。

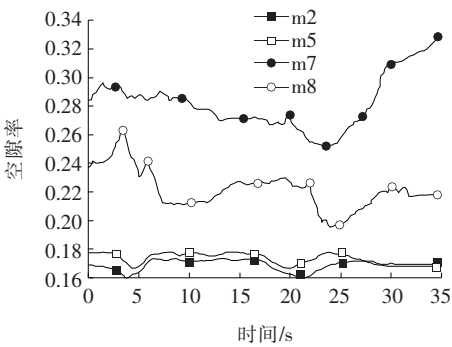


图 12 不同监测点处空隙率时程曲线

从图 12 可以看出:边坡内部的空隙率变化幅度较小,地震加载结束后更是趋于稳定;松散体堆积层的则波动较大,监测点 m7 处的空隙率在 30 s 后仍呈现显

著上升的趋势,说明该处松散体在地震作用后发生滑坡,逐渐形成一个临空面,而监测点 m8 恰好位于松散体边坡的中部,在滑坡的同时也有上部松散体岩石滑落至此,再加上破碎小石块的填充,使得它的空隙率比初始空隙率有所下降。

应变率表示单位时间内应变的变化,它是对材料变形速度的一种度量。研究应变率的变化规律可以进一步了解松散体边坡在地震作用下动态力学性能的剧烈程度。从图 13 可知:应变率随地震时程的增加而发生强烈的跌宕起伏,不同的是,内部监测点处(监测点 m1 和 m4)的应变率呈现出正负对称型的上下振动,地震之后则立刻稳定于 0,说明此时边坡内不再有剧烈的运动;而松散体堆积层中(监测点 m7 和 m8)的则不太一样,它们的应变率时程曲线是无规律的锯齿状振荡,加载结束后,松散体还处于高速倾泻运动阶段,应变率的变化仍在继续。

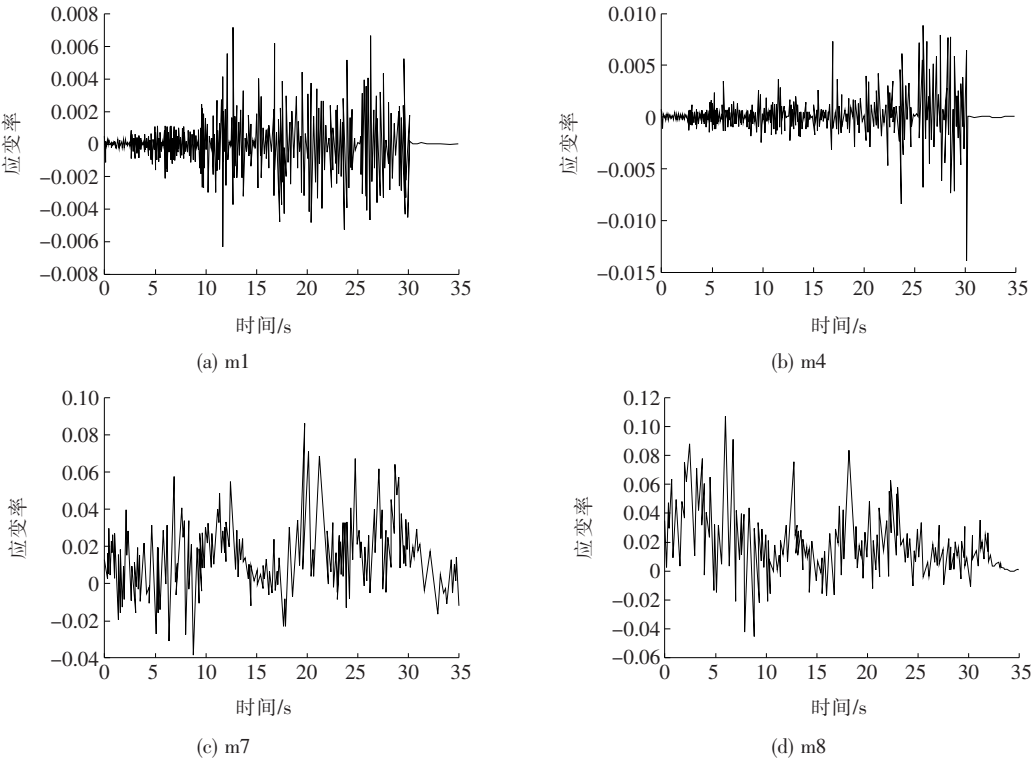


图 13 不同监测点处应变率时程曲线

从图 14 动能时程曲线和图 15 应变能时程曲线可以看出:在整个运动过程,动能的变化比较大,地震加载结束后,边坡内部活动大大减弱,主要表现为松散体的崩落下滑,又考虑到在下滑过程中松散体之间碰撞和摩擦对能量的损耗,相应的动能便也减小很多。但松散体边坡的应变能只是变得更加稳定,逐渐趋于一

稳定值,并未有所减小。说明松散体堆积层中的岩石依旧存在较强的运动。

4 结 论

(1) 在地震荷载作用下,松散体边坡的渐进破坏

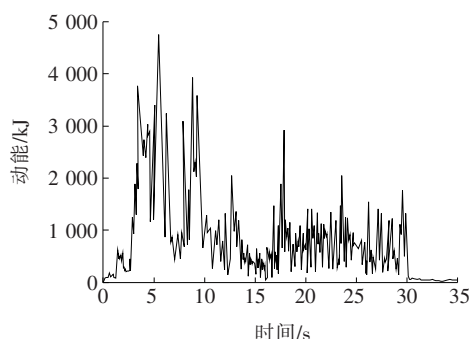


图14 动能时程曲线

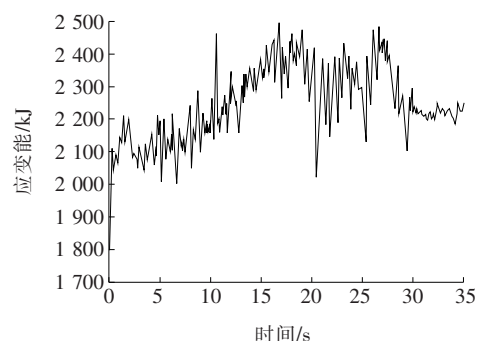


图15 应变能时程曲线

主要分为松散体堆积层的滑坡以及基岩层的黏结破坏和裂隙发展,而松散体堆积层的滑坡又包括失稳一下滑一倾泻3个阶段。

(2) 松散体边坡内黏结状态和裂隙分布的渐进过程具有一定的时间性和空间性:黏结破坏和裂隙发展的先后性,发生位置的不同性,内外裂隙产生原因的差异性和裂隙形成后的规律性。

(3) 通过分析空隙率、应变率、动能及应变能的时程变化,初步揭示了松散体边坡的渐进破坏特性,地震荷载加载结束后,边坡内部运动明显减弱。

参考文献:

- [1] WU J H, LIN J S, CHEN C S. Dynamic Discrete Analysis of an Earthquake-Included Large-Scale Landslide[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46: 397—407.
- [2] 王保林, 何忠明, 胡庆国, 等. 降雨工况下不同软弱夹层出露面对黏性土坡稳定性影响分析[J]. 中外公路, 2017, 37(6): 15—19.
- [3] KEEFER D K. Landslides Caused by Earthquake[J]. Bulletin of Geological Society of American, 1984, 95(4): 406—421.
- [4] 抗兴培, 孟凡成, 曾超, 等. 强降雨条件下弃土场边坡稳定性历程分析[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 34—39.
- [5] 魏东旭, 李广景, 刘正银, 等. 粤北山区煤系地层滑坡机理分析与病害处治研究[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 23—27.
- [6] 袁从华, 吴振君. 坡积松散体稳定性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 121—126.
- [7] 詹永祥, 姚海林, 等. 松散体滑坡抗滑桩加固的土拱效应分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1372—1376.
- [8] WEST L. J., HENCHAR S. R.. Assessing the Stability of Slopes in Heterogeneous Soils[C]. Proceedings of 6th International Symposium on Landslides, 1991: 591—595.
- [9] MEDLEY E, REHERMANN S. Characterization of Bim-rocks (Rock/Soil Mixtures) with Application to Slope Stability Problems [J]. Proceedings: Eurock 2004 53rd Geomechanics Colloquium Salzburg, Australia, 2004.
- [10] MURAKAMI T, MURAKAMI A. A Discrete Element Approach to Slope Failure[J]. Proceedings of the International Symposium on Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media-Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media, 2006: 237—240.
- [11] 董志高, 吴继敏, 王文远. 地震作用崩塌堆积体边坡稳定性分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(5): 37—40.
- [12] 杨庆华, 姚令侃, 等. 地震作用下松散体斜坡崩塌动力学特性离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 369—373.
- [13] NI W D, TANG H M, et al. Dynamic Stability Analysis of Wedge in Rock Slope Based on Kinetic Vector Method [J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(4): 749—756.
- [14] 中国地震局地球物理研究所, 中国地震灾害防御中心, 中国地震局工程力学研究所, 等. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 李进昭, 徐金明, 黄大勇. 考虑细观组分实际分布的花岗岩变形破坏过程颗粒流模拟[J]. 工程地质学报, 2015, 23(S1): 84—89.
- [16] 申志福, 蒋明镜, 朱方园, 等. 离散元微观参数对砂土宏观参数的影响[J]. 西北地震学报, 2011, 33(1): 160—165.
- [17] 崔洋洋, 张军徽, 佟安, 等. 砂土类材料离散元细观参数的自动识别[J]. 力学与实践, 2019, 41(3): 300—307.
- [18] 魏云杰, 张波, 等. 崩塌体运动的全过程模拟及工程应用研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(6): 655—659.
- [19] 石崇, 徐卫亚. 颗粒流数值模拟技巧与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.