

推移式滑坡演化过程模型试验与数值模拟研究

雍 睿, 胡新丽, 唐辉明, 李长冬, 马俊伟, 宋友建

(中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 利用 MTS 电液伺服加载与控制系统对推移式滑坡物理模型后缘进行了分级推力加载, 完成了推移式滑坡演化全过程的模拟。基于三维激光扫描技术对滑体表面的位移和变形进行了高精度、全方位、非连续性监测。采用多重分形基本理论对监测点云数据进行了系统分析, 从试验的角度探讨了推移式滑坡演化过程中位移多重分形维数的变化特征。模型试验结果表明: 推移式滑坡变形破坏以沿滑带发生的整体滑移为主, 并表现出明显的演化阶段性特征, 大致可划分为 3 个阶段: (1) 后缘压缩阶段: 滑坡模型表面变形体现为后缘土体的局部前移与隆起, 整体变形小, 多重分形维数成降维的特征, 降维过程中未发生突变、有序性好; (2) 匀速变形阶段: 滑坡模型表面产生了明显的位移, 变形不断向前和向两侧发展, 前缘、中部滑体发生隆起现象, 多重分形维数表现出先减后增的趋势; (3) 加速变形阶段: 滑坡模型表面体现出持续、快速、变化鲜明的整体变形特征, 伴随出现滑坡模型中前部隆起带及横向、纵向的隆胀裂缝, 多重分形维数成增维趋势。基于模型试验, 利用 FLAC^{3D} 进行了推移式滑坡演化过程的动态数值模拟, 验证了滑坡演化的阶段性特征, 揭示了推移式滑坡演化过程中稳定性系数非线性递减的规律。

关 键 词: 滑坡; 模型试验; 演化; 多重分维数; 三维激光扫描

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

Model testing and numerical simulation study of evolutionary process of thrust load caused landslide

YONG Rui, HU Xin-li, TANG Hui-ming, LI Chang-dong, MA Jun-wei, SONG You-jian

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A physical model has been developed to study the whole evolutionary process of thrust load caused landslide under the multi-stage loading of MTS electro-hydraulic servo loading and analysis system. The displacement and deformation of the thrust load caused landslide model's top surface are non-consecutively monitored with advanced 3D laser scanning technology. On the basis of multi-fractal theory, the variation of multi-fractal dimension of displacement in the evolutionary process of thrust load caused landslide is studied through the experiment. The experimental results show that the deformation and failure mode of thrust load caused landslide are dominated by general shear failure and it presents explicit developing phased characteristics. When the slope is in margin compressing stage, the deformation on the surface of the landslide is formed as some parts moving forward and uplift on the margin of the landslide, and the multi-fractal dimensions of displacement are decreasing orderly. When the slope is in uniform deformation stage, obvious displacement can be seen on the surface of the landslide model and the deformation keeps spreading to the front and sides of it. Uplift phenomenon can be seen in some parts in the front and center. During this stage, the multi-fractal dimensions of displacement decrease firstly, and then increase. When the slope is in accelerating deformation stage, landslide model surface presents sustained, rapid and obvious deformation associated with horizontal, vertical expansion cracks in the front and center part of it. During this stage, the multi-fractal dimensions of displacement are increasing gradually. Based on the landslide physical model test, FLAC^{3D} numerical software is used to simulate the evolutionary process of thrust load caused landslide. It is verified that evolutionary process of landslide can be divided into the above three stages. Also the simulation discloses that the attenuation of the stability coefficient of landslide is nonlinear and the attenuation rate is decreasing.

Key words: landslide; model test; evolution; multi-fractal dimension; 3D laser scanning

收稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目资助 (No. 2011CB710604); 国家自然科学基金项目 (No. 41230637, No. 41202198); 中国地质大学 (武汉) 教学实验室开放基金项目 (No. skj2012139)。

第一作者简介: 雍睿, 男, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事岩土体力学试验研究方面的工作。E-mail: yongruicug@gmail.com

通信作者: 胡新丽, 女, 1968 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程稳定性评价、地质灾害防治设计教学与科研工作。E-mail: huxli2000@163.com

1 引言

滑坡的地质演化过程包含从孕育、发展直至消亡的整个周期活动。开展滑坡演化过程研究对滑坡不同时期地质改造作用的认知、发展变化趋势的预测预报及治理工程措施的设计均具有着重要意义^[1]。滑坡演化过程是一个随时间发展的连续、整体行为,表现出极其复杂的非线性演化特征^[2-3],一直是目前滑坡灾害预测与防治领域亟待解决的难点与关键问题。

滑坡发育过程具有鲜明的阶段性特点已被大多数国内外工程地质研究人员所认同。Zerathe 等^[1]将大型深层滑坡的演化阶段划分为 3 个演化阶段,重现了其运动学特征。许强等^[4]根据斜坡变形破坏时间演化规律,将滑坡在重力作用下具体划分为 5 个变形演化阶段,并提出了完整配套的裂缝体系。孔纪名^[5]认为,滑坡的阶段性特征完全决定于岩(土)体的力学性质,反映了不同性质岩(土)体在重力作用下发生的变形过程。然而,对于推移式滑坡而言,其变形过程除受岩(土)体的力学性质影响外,主要受滑坡外力条件变化的控制。例如地震作用、滑坡后缘周期性堆载作用、库水位升降作用等均可能控制推移式滑坡的演化进程^[6-10]。

目前,研究滑坡演化过程的主要方法包含基于现场监测数据与野外地质现象定性分析的工程地质推演法、构建理想数学模型进行定量计算的数值分析法^[11]、基于抽象滑坡地质模型的数值模拟分析法以及模型模拟试验法。但前人研究多注重于采用不同方法探讨某个特定滑坡的演化过程和形成机制^[12-18],针对不同力学机制条件下滑坡演化过程的研究尚未详细开展。滑坡体具有“很强的个性特征”^[4],除滑坡所处的环境因素和地质结构外,不同的受力特征决定了滑坡演化行为,且可按滑坡体受力情况分为推移式滑坡和牵引式滑坡。开展推移式滑坡演化过程研究,是针对因边坡上方加载所引起,上部先动推动下部一起滑动的这一类滑坡演化过程的探讨与总结。

滑坡物理模型试验法作为研究滑坡变形和破坏机制的有效方法,能在室内条件下、中短期时间内重复模拟野外难以观测的滑坡演化全过程。鉴于此,国内外学者已经开展了一些模型试验研究^[19-22],物理模型试验法在滑坡演化过程研究方面体现出了强大的适用性。此外,动态数值模拟是定量化再现滑坡演化过程的有利手段^[13, 22]。相比滑坡物理模型试验,数值模拟试验克服了模型制备劳动强度大、试

验过程人为不确定因素多、试验监测手段受限等缺陷。

综上所述,通过室内物理模型试验和数值模拟方法,开展不同力学机制下滑坡演化过程及阶段性特征研究具有重要的理论和实践意义。根据室内物理模型试验法模拟了推移式滑坡的演化过程,基于滑体表面水平位移实测数据分析了滑坡演化过程的空间变形破坏特征和滑坡位移的多重分维数演化规律。采用数值模拟方法验证了推移式滑坡演化过程的阶段性特征,探讨了稳定性系数动态变化规律。这为研究推移式滑坡演化过程的普遍规律提供了科学依据。

2 推移式滑坡物理模型试验设计

2.1 推移式滑坡概化模型

推移式滑坡的滑动面一般呈前缓后陡的形态特点,滑坡中、前段为阻滑段,后段为下滑段,促使斜坡变形破坏的“力源”主要来自于滑坡后缘的下滑段^[4]。推移式滑坡触发因素主要是由于自然或人为因素造成斜坡上方不恰当地加载。

推移式滑坡后缘常出现在陡壁附近,受构造作用控制,滑坡后缘岩体节理裂隙发育、岩体结构破碎,为滑坡失稳提供了有利的物源和边界条件。滑坡后缘陡崖在自重作用下持续发生周期性崩塌作用,崩坡积物加载于滑坡后缘堆积体上,达到一定厚度后引起滑坡下滑力的不断增加。滑坡中、上部岩体产生了大量位错、滑移、变位和坠覆,前缘松散堆积体将在强大的推力作用下发生变形,最终因滑动面贯通产生大规模的变形破坏。例如,三峡库区新滩滑坡^[8]、清江茅坪滑坡^[9]、西南地区大塘子松散堆积体滑坡^[10]的活动性均与滑坡后缘坍塌加载关系密切。

根据推移式滑坡的显著特征,建立了后缘崩塌堆积加载的理想推移式滑坡模型,如图 1 所示。在外部地质营力作用下,滑坡后部危岩体持续性的发生自然崩塌,造成滑坡后缘区域 A 竖直向荷载不断增加。依据刚体极限平衡理论,在不考虑滑坡岩土体物理力学性质变化的前提下,推移式滑坡后缘不断的自然崩塌加载作用的最终表现形式可简化等效为滑坡后缘剩余推力的增加,即滑坡后缘崩滑坡积物对滑坡体所产生的作用可反映为由条块 A 传递的剩余推力 E_A 对条块 B 的作用,条块 B 的受力状态如图 1 所示。若条块 A 和条块 B 滑面倾角接近,即倾角 α_A 、 α_B 近似相等,剩余推力 E_A 的作用力方向则可概化为沿条块 B 的滑动面向下。本次物理模型

试验中, 假设外力地质作用条件下滑坡模型后部剩余推力成逐级增加, 将这种推力作用通过向滑坡后缘分级施加平行于滑带的推力进行概化。

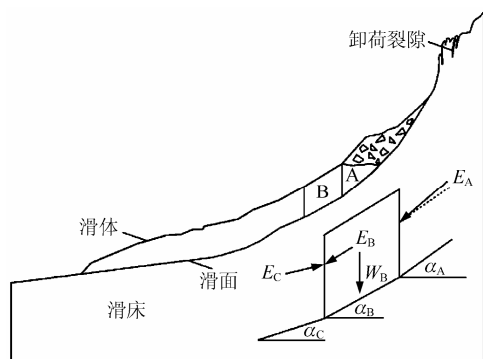


图1 推移式滑坡概化模型

Fig.1 Idealized model of thrust load caused landslide

2.2 推移式滑坡试验模型

本次试验所采用的滑坡物理模型主要由滑体、滑床和滑带构成。模型长为 200 cm, 宽为 90 cm, 后部高度为 125 cm, 后部滑体厚度为 35.2 cm, 滑面倾角约 15°, 如图 2 所示。

滑床基岩稳定, 采用砖石砌体进行构筑, 并以砂浆抹面、辅以石膏薄层构筑坚固、光滑且透水性较弱的表面, 这种构筑基岩的方式简单、易于实现^[23]。

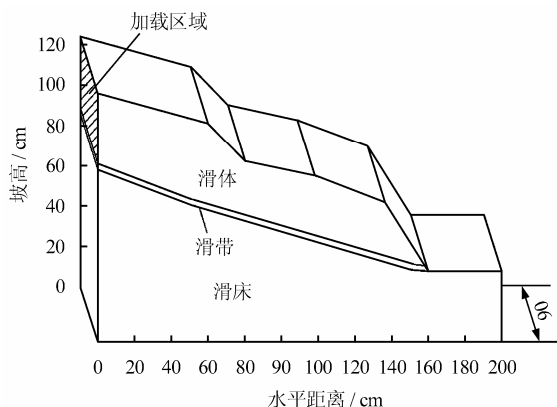


图2 室内滑坡物理模型

Fig.2 Laboratory model of landslide

滑体配比材料主要由 39% 的江砂 (过 2 mm 筛分)、49.1% 的滑体土 (过 2 mm 筛分)、11% 的自来水、0.9% 的膨润土构成。其中, 江砂主要用来增加内摩擦角和渗透系数, 对水起到很好的吸附作用, 易于滑体成型; 滑体土则用来增加黏聚力、减小渗透系数; 膨润土起到减小内摩擦角和变形模量的作用。

滑带的黏聚力和内摩擦角相比滑体要小, 采用

玻璃珠 (过 4 mm 筛分) 和滑体土的混合材料来模拟滑带。该材料既能模拟出滑带的透水性质, 又能模拟滑带较弱的抗剪强度, 符合滑带的基本物理力学性质。滑带配比方案确定为 60% 的玻璃珠、32% 的滑体土、8% 的自来水。

所配制的滑体、滑带材料主要物理力学性质指标如表 1 所示。

表1 模型试验中岩土体物理力学参数取值表

Table 1 Mechanical parameters of model test

材料	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	天然密度 / (g/cm ³)	渗透系数 / (cm/s)	弹性模量 / MPa
滑体	11.2	18.91	1.92	3.25×10^{-5}	2.4
滑带	9.86	18.10	1.68	2.02×10^{-5}	2.2

2.3 推移式滑坡模型加载方法

室内推移式滑坡物理模型试验的推力加载过程采用 MTS-505.60 电液伺服加载与控制系统对滑坡模型后缘进行精确的加载控制, 如图 3 所示, 仪器作动缸最大行程为 500 mm, 控制精度小于 0.5%。MTS 做动器所施加的推力经加载钢板作用到滑坡物理模型的后缘。

推移式滑坡在后缘推力作用下逐渐发生变形并最终破坏, 期间共在滑坡模型后缘分级施加了 11 级平行于滑带的恒定推力。为使推力荷载充分作用于滑体、受力和变形趋于稳定, 各级荷载的持续时间为 1 h, 相邻不同等级荷载增量大小为 300 N。

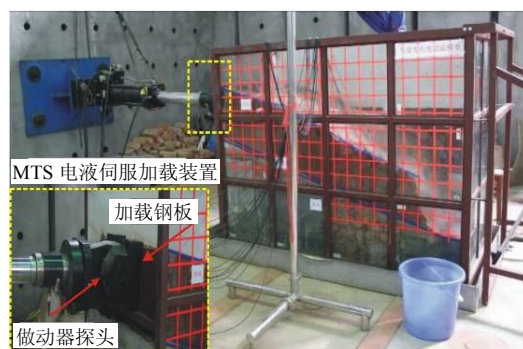


图3 滑坡物理模型与加载系统

Fig.3 Landslide model and loading system

3 推移式滑坡空间演化规律

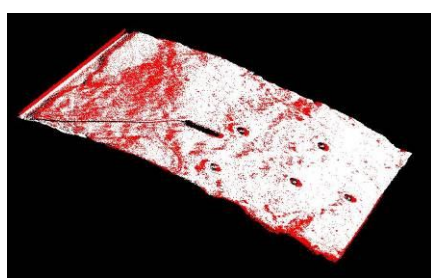
试验中采用 RIEGL VZ-400 三维激光扫描仪对推移式滑坡模型表面点云空间坐标信息进行采集。该技术克服了传统位移监测方法精度低、局部细微变形观测难度大的缺点, 实现了高精度、高密度、高速度和免棱镜对滑坡表面位移的测定。它还具有

高时间分辨率、高空间分辨率和测量精度均匀等优点,能详细了解滑坡演化过程中的细节变形和整体变化^[24]。

试验中每隔 5 min 采用三维激光扫描仪对滑坡模型进行一次扫描。经过消除粗差和裁剪无效点云数据后,每次扫描获取的滑坡模型表面点云坐标信息均由 148 万多个离散点的空间坐标数据集合而成,测试精度为 1 mm。滑坡表面的点云空间坐标数据叠加显示了滑坡模型加载前期、中期和后期 3 组空间位置对比信息,如图 4 所示。白色点云表示的是推力加载作用下实际滑坡模型表面几何形态点云,红色为加载前滑坡模型的基准点云。



(a) 第 2 级推力加载



(b) 第 5 级推力加载



(c) 第 10 级推力加载

图 4 滑坡模型坡表变形迹象对比

Fig.4 Deformation contrast of landslide model surface

如图 4(a)所示,第 2 级荷载作用下,推移式滑坡模型坡表点云与基准点云呈现出随机、均匀分布的特点,说明此时滑坡模型表面与加载前滑坡模型表面的几何形态几乎重合。滑坡模型坡表监测孔洞的位置没有发生改变,说明试验初始阶段滑坡模型

中部与前缘没有发生明显位移,滑坡模型基本稳定。坡表变形主要表现为后缘土体的局部前移与隆起,整体变形非常小。

第 5 级荷载作用下,推移式滑坡模型表面点云与基准点云已经出现了明显的分离,点云具有向前、向上的运动趋势,说明试验中期滑坡模型坡表已经产生了较大位移,滑体变形不断向前和两侧发展,且滑坡前缘、中部隆起现象明显,如图 4(b)所示。此外,从滑坡模型坡表监测孔洞位置对比可知,滑坡模型中部与前缘已经发生明显位移。随着推移式滑坡模型后缘加载推力的不断增大,在加载钢板的水平推力作用与模型前部土体的抗滑作用下,滑坡模型后缘土体变形调整,竖直向位移显著增加而水平位移变化较小,牵引坡表土体沿滑动方向运动的拉应力大于土体的抗拉强度,因而产生了张拉裂缝。在推移式滑坡物理模型后缘右侧边界 17 cm 距离加载钢板 8 cm 处产生了长 19 cm,大致沿模型宽度方向展布的张拉裂缝。同时,在距模型后缘左侧边界 32 cm 处也出现沿宽度方向延伸 11 cm 的张拉裂缝。此外,在中后部滑坡模型框架的钢化玻璃面板上观察到明显的滑体前移擦痕。

随着后缘推力加载等级的增大,在第 10 级荷载作用下,处于试验后期的滑坡模型已临近失稳。推移式滑坡模型表面体现出持续、快速、变化鲜明的整体变形特征,如图 4(c)所示。此时,滑坡模型中前部滑体在后缘滑体推挤作用下产生隆起带,出现了横向、纵向的隆胀裂缝,如图 5 所示。

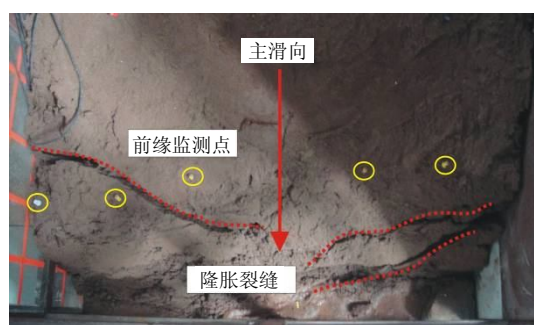


图 5 滑坡模型前缘隆胀裂缝

Fig.5 Swelling cracks on the front of landslide model surface

总体而言,在滑坡后缘分级推力加载作用下,推移式滑坡模型稳定性逐渐降低,先后发育形成了滑坡后缘的张拉裂缝、滑坡前缘的鼓胀裂缝。除此之外,滑坡模型没有规模较大的局部破坏现象,因而可推断推移式滑坡模型的破坏方式为沿滑带发生的整体滑移破坏。

4 推移式滑坡位移多重分形特征

滑坡破坏过程是一个复杂的非线性动力系统,而位移是滑坡演化过程中所反馈出的重要信息之一^[2, 25]。分形理论为揭示滑坡演化特征提供了有效的研究方法。由于滑坡位移数据常具有复杂、多变、不确定等演化特征,单分形维数难以描述滑坡演化过程的多层次性,因此,可建立滑坡位移多重分维数演化规律与滑坡演化趋势之间的联系^[26]。

4.1 滑坡模型位移多重分维数计算方法

研究滑坡模型位移多重分形维数的分布特点,采用广义关联维方法,分析物理模型试验中 N 组位移数据,定义局部密度函数和广义关联积分^[26]:

$$C_i(\varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{i \neq j} \theta(\varepsilon - |x_i - x_j|), (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$C_q(\varepsilon) = \left(\frac{1}{N} \sum_i [C_i(\varepsilon)]^{q-1} \right)^{\frac{1}{q-1}} \quad (2)$$

$$\theta = \begin{cases} 1 & \varepsilon - |x_i - x_j| > 0 \\ 0 & \varepsilon - |x_i - x_j| \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C_i(\varepsilon)$ 为局部密度函数; $C_q(\varepsilon)$ 为广义关联积分; x_i 与 x_j 分别为滑坡模型在不同监测时间 i 、 j 的累积水平位移量。 ε 的取值大小是根据 $x_i - x_j$ 的差值范围确定,即满足

$$|x_i - x_j|_{\min} \leq \varepsilon \leq |x_i - x_j|_{\max}$$

并且满足

$$C_q(\varepsilon) \propto \varepsilon^{D_q} \quad (4)$$

式中: q 为阶矩,取整数。 D_q 为滑坡模型位移的多重分形维数,通过 $C_q(\varepsilon)$ 与 ε 的幂函数拟合得到。在多重分形研究中,当 $q < 0$ 时, D_q 偏离了线性关系, D_0 常是分维数演化的奇异点,因此,仅考虑 $q \geq 1$ 的分维值。当 $q = 1$ 时,采用定义信息维的方法确定 D_1 。

4.2 演化阶段判识与多重分维数变化特征

在滑坡模型表面设置若干排沿滑坡走向等间距布设的监测点,采用无合作目标的三维激光扫描测量方式,依据“重心法”^[24]对试验数据进行处理。即以该监测点“点群”作为计算单位,将扫描点的水平坐标加权平均值作为位移监测点的中心坐标。

滑坡物理模型监测面及监测点布置如图 6 所示,监测点水平位移累计曲线清晰地反映了推移式滑坡演化过程的 3 个阶段(见图 7)。第 1 阶段为滑坡模型后缘压缩阶段,属于滑坡模型变形初期,变

形从无到有,位移曲线总体斜率相对较小。第 2 阶段为滑坡模型匀速变形阶段,在初始变形的基础上,持续加大滑坡后缘推力致使滑体以几乎相同的速率继续变形。虽然,不同加载等级的过渡过程会对变形有细微的扰动和影响,但该阶段的整体变形总趋势为一倾斜直线,宏观变形速率保持不变。当滑坡模型变形发展到一定程度后,滑坡模型演化进入了第 3 阶段,加速变形阶段,滑坡变形速率急剧增加,失稳时水平位移曲线近乎直立。

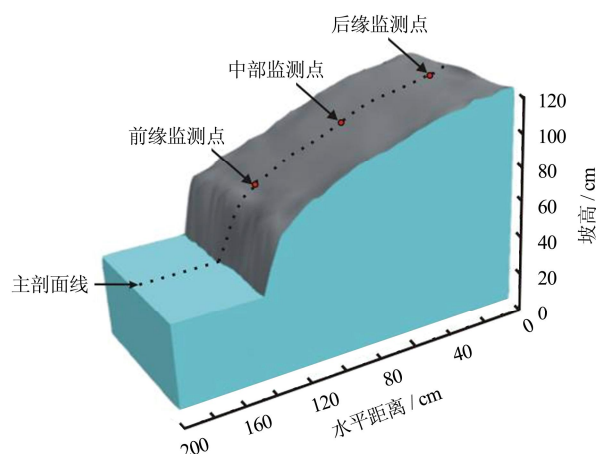


图 6 滑坡模型位移监测点

Fig.6 Displacement monitoring points of landslide model

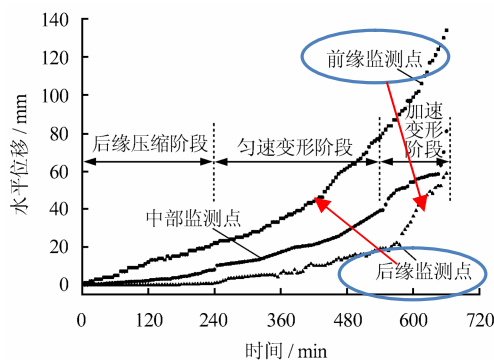


图 7 监测点水平位移累计曲线

Fig.7 Horizontal displacements of monitoring points

考虑到滑坡后缘存在应力集中,滑坡侧壁位移受边界效应影响,为不失一般性,选取滑坡中部监测点的水平累计位移量作为多重分形研究对象。

第 1~4 级荷载作用过程中,滑坡模型中部监测点位移处于缓慢增长阶段,滑坡模型变形以后缘压缩变形为主、中部监测点变形较小,最大变形量为 8.1 mm,该阶段为滑坡后缘压缩阶段。由于该阶段滑坡模型处于稳定状态,监测点位移量非常小,不便于统计,因此,直接利用发生明显位移量的第 4

级荷载计算滑坡位移的多重分维数（见图 8）。后缘压缩阶段的多重分维数特征为 $D_1 > D_2 > \dots > D_\infty$ ，此时多重分维数呈现出降维的特征，降维过程没有突变、有序性好。 D_∞ 分形维数趋于 0.82，滑坡水平位移增加量具有明显的随机性，说明该阶段滑坡模型系统稳定，变形对外部激励的依赖性较小。虽然该过程中滑坡位移有缓慢增加，但滑坡趋于相对稳定的状态。

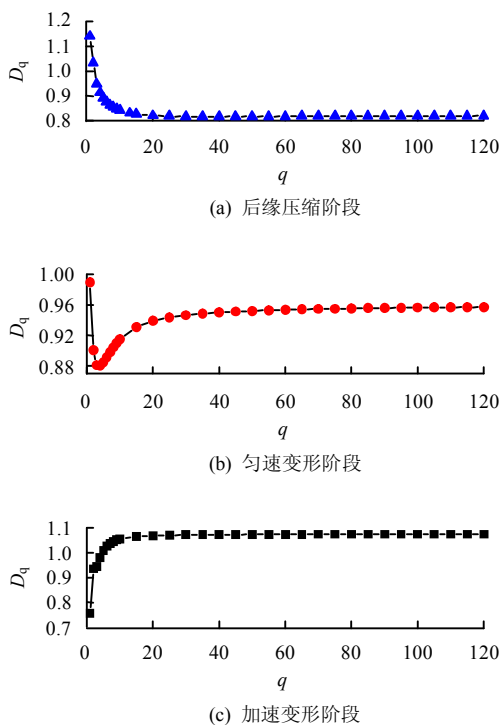


图 8 推移式滑坡物理模型多重分维数演化特征
Fig.8 Multi-fractal dimension features of physical model of thrust load caused landslide

在第 5~9 级荷载作用下，滑坡模型中部监测点水平位移显著增大，位移量呈线性增长的趋势，但滑坡整体仍处于相对稳定的状态，该阶段为滑坡匀速变形阶段。该阶段多重分位数体现出的特征为 $D_1 > \dots > D_n < D_{n+1} < \dots < D_\infty$ ，出现了一个拐点，整体出现分维数先减后增的趋势。该阶段 $C_q(\varepsilon)$ 不再是 q 的单调递减函数，与 ε 的取值范围有关，当 q 较小时，位移多重分维数仍为递减趋势。当 $q > 5$ 时，多重分形维数增大效应明显，说明滑坡向不稳定的状态演化。

第 10、11 级荷载作用下，滑坡模型中部监测点位移急剧增加，处于加速变形阶段，在该阶段后期水平位移产生突变，滑坡模型发生破坏。从图 8 中多重分维数的变化特征可以看出，加速变形阶段多重分维数表现出增维趋势，即体现的特征为 $D_1 <$

$D_2 < \dots < D_\infty$ ， $D_\infty = 1$ 是滑坡位移状态演化的临界点。此时 $D_\infty > 1$ ，说明后缘推力增大的刺激导致了滑坡变形是趋向规律，滑坡变形对外部激励依赖性较大，随着位移增加，滑坡发生剧滑并失稳破坏。

5 推移式滑坡数值模拟试验

5.1 计算模型与计算过程说明

根据推移式滑坡物理模型试验，建立与滑坡模型一致的 FLAC^{3D} 计算模型（见图 9），滑坡模型的计算参数见表 2。通过改变滑坡体后缘的应力边界条件的方法，模拟滑坡后缘分级加载条件下滑坡物理模型的演化过程。

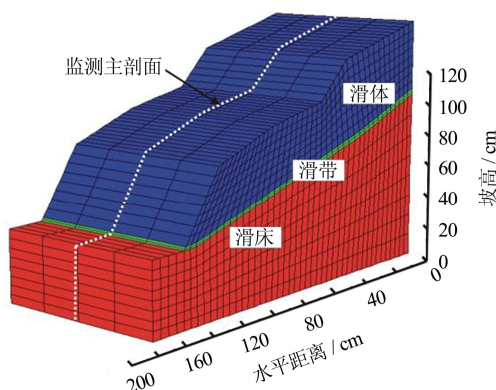


图 9 推移式滑坡 FLAC^{3D} 计算模型
Fig.9 The Numerical model of FLAC^{3D} for thrust load caused landslide

表 2 数值模拟中岩土体物理力学参数取值表

材料	黏聚力 / Pa	内摩擦角 / (°)	天然密度 / (g/cm ³)	体积模量 / Pa	剪切模量 / Pa
滑体	1.12×10^4	18.91	1.92	2.00×10^6	9.20×10^5
滑带	9.86×10^3	18.10	1.68	1.67×10^6	7.69×10^5
滑床	5.00×10^6	35.00	3.00	1.00×10^{15}	1.00×10^{15}

计算过程如下：

(1) 依据弹性求解法，利用弹性模型计算初始地应力，并以不平衡力与典型应力的比值小于 1×10^{-5} 作为收敛条件。此时，该计算模型侧面和底面设为固定边界，并固定模型边界所有点的 y 方向速度。

(2) 释放滑坡模型后部的固定边界，重新设定固定边界为滑坡后部的非加载区域。输入滑坡模型的计算参数，利用 Mohr-Coulomb 模型计算含地应力的模型，计算完成后将速度场和位移场归零。

(3) 运用 FLAC^{3D} 内置 FISH 语言编程改变滑坡模型后缘的应力边界条件，实现滑坡模型后缘分级

加载过程,设置每级荷载作用下计算步为20 000步,保证不平衡力收敛时足够小,使滑坡模型内部应力状态充分调整,并分别计算各级荷载作用下的稳定性系数。

5.2 结果分析

选取滑坡物理模型主剖面(见图9)为研究对象,在滑坡前缘、中部和后缘监测点的布置见图10。

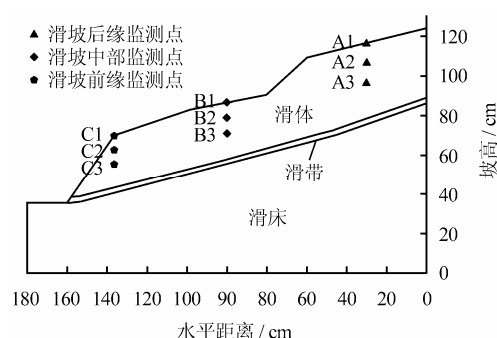


图10 滑坡数值模型监测点布置图
Fig.10 The test point arrangements of landslide numerical model

以滑坡后缘监测点数据为例,如图11所示,A1、A2、A3监测点的水平位移变化趋势相同,在相同等级推力条件下监测点水平位移量具有沿滑体埋深方向呈递减趋势,滑体表面位移与内部位移极具相似性。这说明分析滑坡表面水平位移数据有很强的代表性,能通过其变化趋势揭示滑体内部水平位移的变化规律。这也说明针对滑坡物理模型坡表位移监测数据分析的重要性和代表性。

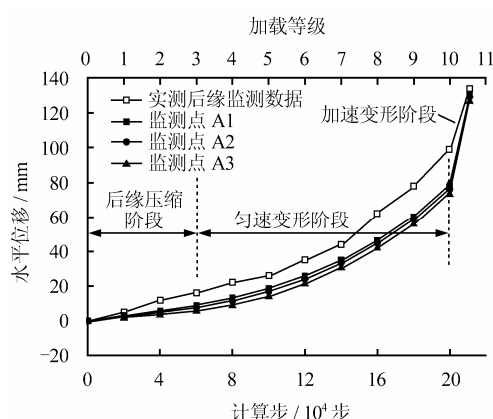


图11 滑坡数值模型后缘监测点水平位移曲线
Fig.11 Horizontal displacements of monitoring points at the back of landslide numerical model

在逐级推力作用下监测点水平位移总体呈非线性递增,各级荷载下水平位移增长速率持续增大趋势,与滑坡物理模型试验后缘监测数据规律一致(见

图11)。第11级荷载作用下监测点水平位移发生突变,后缘坡表监测点A1的水平位移达13.05 cm,模型试验滑坡后缘监测点实测水平位移为13.40 cm,两者结果吻合。

对比滑坡模型主剖面前缘、中部和后缘坡表监测点的水平位移(见图12),滑坡后缘监测点A1水平方向的位移量较大,中部监测点B1的水平位移量次之,滑坡前缘监测点C1水平方向发生的位移量最小。破坏时,后缘坡表监测点的水平位移达到13.05 cm,滑坡模型中部坡表监测点的水平位移量为9.45 cm,滑坡模型前缘坡表位移为7.32 cm。

滑体表面的位移数据具有很好的同步性,坡表的整体变形趋势相同。滑坡模型变形破坏模式为沿滑带发生的整体滑动,与室内物理模型试验现象一致。

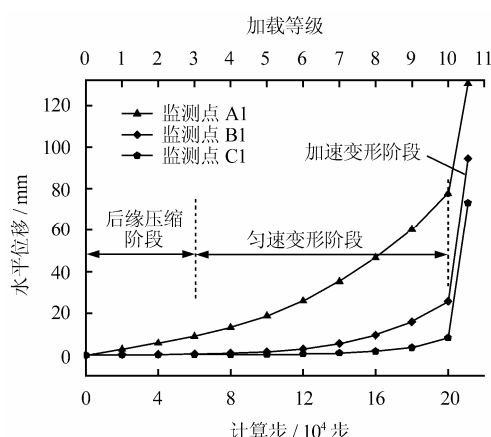


图12 滑坡数值模型坡表监测点水平位移曲线
Fig.12 Horizontal displacements of monitoring points on the surface of landslide numerical model

对比计算时步与变形量之间的关系(见图12),滑坡模型在加载过程中具有明显的阶段性,验证了推移式滑坡演化过程中后缘压缩、匀速变形、加速变形3阶段特征。第1~4级推力加载过程中滑坡模型位移量较小,滑坡模型中部及前缘的水平位移量基本只有细微的增长。第5~9级加载过程中,水平位移量呈线性增长趋势。第10级荷载作用下,位移变化速度明显增大。第11级荷载时,滑坡模型临近失稳时,滑坡模型位移显现出非线性增加的特征,位移量急剧增大。滑坡表面监测点水平位移变化规律与模型试验中反映的规律一致。

推移式滑坡演化过程中,稳定性系数呈非线性递减的趋势(见图13)。其多项式拟合公式为

$$F_s = -0.110 8F^3 + 0.840 1F^2 - 2.402 3F + 3.704 9 \quad (5)$$

式中: F_s 为滑坡模型稳定性系数; F 为滑坡模型后缘推力大小。由函数表达式可知, 该方程是单调递减的凹函数。加载初期, 滑坡模型稳定性系数对后缘推力作用最为敏感, 稳定性系数迅速降低。随着后缘推力不断增加, 稳定性系数衰减速率呈逐渐降低的趋势。第 10 级荷载作用下, 稳定性系数为 1.04, 接近临界状态。第 11 级荷载作用下, 滑坡稳定性为 0.98, 滑坡已处于失稳状态, 与室内物理模型试验结果完全一致。

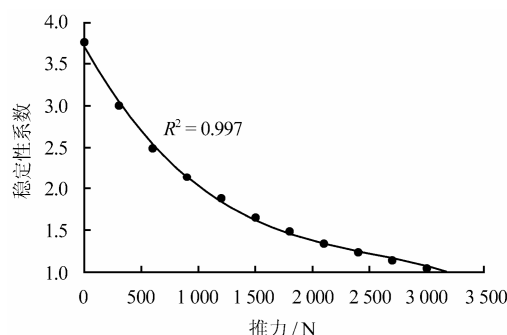


图 13 滑坡模型稳定性系数变化规律
Fig.13 Stability coefficient variation of landslide model

6 结 论

(1) 从滑坡力学机制出发, 概化了推移式滑坡的触发因素, 将滑坡后缘因周期性崩塌造成的加载作用等效为滑坡后缘下滑力逐渐增大的过程, 并通过室内滑坡物理模型试验分级推力加载的方法实现了推移式滑坡演化全过程模拟。

(2) 基于三维激光扫描点云数据与三维地质建模软件, 分析了推移式滑坡的空间演化规律。试验初期, 滑坡模型表面变形主要为后缘土体的局部前移与隆起, 整体变形小; 试验中期, 滑坡模型表面产生了明显的位移, 滑体变形不断向前和两侧发展, 前缘、中部均发生隆起现象; 滑坡模型临近失稳时, 滑坡模型表面体现出持续、快速、变化鲜明的整体变形特征, 伴随出现滑坡模型中、前部隆起带及横向、纵向的隆胀裂缝。推移式滑坡变形破坏模式为沿滑带发生整体滑移破坏, 破坏过程历时短、突发性强。

(3) 滑坡物理模型试验揭示了推移式滑坡演化过程的 3 个阶段: 后缘压缩阶段、匀速变形阶段、加速变形阶段。后缘压缩阶段的多重分维数特征为 $D_1 > D_2 > \dots > D_\infty$, 多重分维数成降维的特征, 降维过程没有突变、有序性好。匀速变形阶段多重分位数的特征为 $D_1 > \dots > D_n < D_{n+1} < \dots < D_\infty$, 整体出

现分维数先减后增的趋势。加速变形阶段多重分位数表现出增维趋势, 即 $D_1 < D_2 < \dots < D_\infty$, $D_\infty > 1$, 说明滑坡模型剧滑并发生失稳破坏。

(4) 以推移式滑坡物理模型试验为基础, 建立数值模拟计算模型, 运用显式有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D} 为计算引擎, 再现了推移式滑坡的演化过程。计算结果与模型试验中推移式滑坡物理模型的变形特征吻合较好。通过监测点位移数据的对比分析, 验证了推移式滑坡演化过程 3 个阶段, 揭示了滑坡稳定性系数非线性衰减趋势。

致谢: 感谢中国地质大学(武汉)工程学院的苏云研究员对滑坡物理模型试验给予的支持与帮助。感谢中国地质大学(武汉)工程学院的杨裕云教授对本文概化地质模型的建立提出了宝贵建议。感谢西南科技大学的樊晓一教授在滑坡多重分形理论方面的悉心指导!

参 考 文 献

- [1] ZERATHE S, LEBOURG T. Evolution stages of large deep-seated landslides at the front of a subalpine meridional chain (Maritime-Alps, France)[J]. *Geomorphology*, 2012, 138: 390—403.
- [2] 杨成祥, 冯夏庭. 滑坡非线性演化行为的自组织进化识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 911—914.
YANG Cheng-xiang, FENG Xia-ting. Evolutionary self-organizing identification of nonlinear dynamics of landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 911—914.
- [3] 童志怡, 陈从新, 肖国峰. 滑坡演化的迭代遗传模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 206—212.
TONG Zhi-yi, CHEN Cong-xin, XIAO Guo-feng. Stepwise inherited model of landslide evolvement[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 206—212.
- [4] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 6: 1104—1112.
XU Qiang, TANG Ming-gao, XU Kai-xiang, et al. Research on space-time evolution laws and early warning-prediction of landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1104—1112.
- [5] 孔纪名. 滑坡发育的阶段特征与观测[J]. 山地学报, 2004, 22(6): 725—729.
KONG Ji-ming. The stage feature of landslide growth and observation[J]. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(6): 725—729.

- [6] 肖诗荣, 刘德富, 胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡高速滑动机制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3531—3536.
XIAO Shi-rong, LIU De-fu, HU Zhi-yu. Study of high speed slide mechanism of Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3531—3536.
- [7] 白永健, 郑万模, 李明辉, 等. 川藏公路茶树山滑坡特征及成因机制分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 862—867.
BAI Yong-jian, ZHENG Wan-mo, LI Ming-hui, et al. Characteristics and formation mechanism of Chashushan landslide on Sichuan-Tibet Highway[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(6): 862—867.
- [8] 张保军, 李振作, 程俊祥, 等. 茅坪与新滩滑坡体变形机制类比研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1): 40—43.
ZHANG Bao-jun, LI Zhen-zuo, CHENG Jun-xiang, et al. Comparison of deformation mechanisms of Maoping and Xintang landslides[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2008, 25(1): 40—43.
- [9] 李守定, 李晓, 刘艳辉. 清江茅坪滑坡形成演化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 377—384.
LEE Sou-ting, LI Xiao, LIU Yan-hui. Study on generation and evolution of Maoping landslide on Qingjiang river[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 377—384.
- [10] 刘衡秋, 胡瑞林, 周宏磊, 等. 云南虎跳峡大塘子松散堆积体滑坡形成演化机制分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 37—41.
LIU Heng-qiu, HU Rui-lin, ZHOU Hong-lei, et al. Analysis of forming evolution mechanism of Datazi loose congeries landslide at Tiger-Leaping Gorge in Yunnan Province[J]. **Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)**, 2010, 32(2): 37—41.
- [11] QIN S, JIAO J J, WANG S J. A nonlinear dynamical model of landslide evolution[J]. **Geomorphology**, 2002, 43: 77—85.
- [12] 黄天均, 田美霞, 黄达. 四川彭州市灯杆坡滑坡变形特征及稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(3): 24—28.
HUANG Tian-jun, TIAN Mei-xia, HUANG Da. Analysis on deformation characteristics and stability of Denganpo landslide in Pengzhou city, Sichuan province[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2010, 21(3): 24—28.
- [13] 肖诗荣, 刘德富, 胡志宇. 三峡库区千将坪滑坡地质力学模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1459—1464.
XIAO Shi-rong, LIU De-fu, HU Zhi-yu. Study on geotechnical model of Qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1459—1464.
- [14] 王志强, 刘高, 韩文峰. 兰临高速公路袁家湾滑坡演化机制[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2224—2228.
WANG Zhi-qiang, LIU Gao, HAN Wen-feng. Evolution mechanism of Yuanjiawan landslide in Lanzhou-Lintao expressway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2224—2228.
- [15] 项伟, 江泊涓, 唐辉明, 等. 洞坪库区瞿家湾滑坡群地质演化分析及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 775—783.
XIANG Wei, JIANG Ji-wei, TANG Hui-ming, et al. Geological evolution analysis and numerical simulation of Qujiawan landslide group in Dongping reservoir[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 775—783.
- [16] 李秀珍, 孔纪名, 王震宇. 石榴树包滑坡变形监测及演化趋势分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(3): 320—326.
LI Xiu-zhen, KONG Ji-ming, WANG Zhen-yu. Deformation monitoring and development of Shiliushubao landslide on Three Gorges of Yangtze River[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2006, 14(3): 320—326.
- [17] HSIEH M L, LAI L S, LIN C D, et al. Late quaternary landscape evolution and genesis of the 2009 catastrophic in the Hsiaolin area, southwestern Taiwan[J]. **Geomorphology**, 2012, 179: 225—239.
- [18] WESTEN C J, GETAHUM F L. Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models[J]. **Geomorphology**, 2003, 54: 77—89.
- [19] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水位作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2476—2483.
LUO Xian-qi, LIU De-fu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(14): 2476—2483.
- [20] LOURENÇO S D N, SASSA K, FUKUOKA H. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides[J]. **Geomorphology**, 2006, 73: 115—130.
- [21] JIA G W, ZHAN L T, CHEN Y M, et al. Performance of a

large-scale model subjected to rising and lowering water levels[J]. **Engineering Geology**, 2009, 73: 92—103.

- [22] GUGLIELMI Y, CAPPAL F. Regional-scale relief evolution and large landslides: Insights from geo-mechanical analyses in the Tinée Valley (Southern French Alps)[J]. **Geomorphology**, 2010, 117: 121—129.

- [23] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 1—8.

- [24] 徐进军, 王海城, 罗喻真, 等. 基于三维激光扫描仪的滑坡变形监测与数据处理[J]. **岩土力学**, 2010, 7: 2188—2196.

XU Jin-jun, WANG Hai-cheng, LUO Yu-zhen, et al. Deformation monitoring and data processing of landslide based on 3D laser scanning[J]. **Rock and Soil Mechanics**,

2010, 7: 2188—2196.

- [25] 贺可强, 孙林娜, 王思敬. 滑坡位移分形参数 Hurst 指数及其在堆积层滑坡预报中的应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(6): 1107—1115.

HE Ke-qiang, SUN Lin-na, WANG Si-jing. Displacement fractal parameter Hurst index and its application to prediction of debris landslides[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(6): 1107—1115.

- [26] 樊晓一. 滑坡位移多重分形特征与滑坡演化预测[J]. **岩土力学**, 2011, 6: 1831—1837.

FAN Xiao-yi. Landslide displacement multifractal and its application to prediction of evolvement trend[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1831—1837.

上接第 2944 页

参 考 文 献

- [1] TANG Y Q, CUI Z D, ZHANG X, et al. Dynamic response and pore pressure model of the saturated soft clay around the tunnel under vibration loading of Shanghai subway[J]. **Engineering Geology**, 2008, 98(3-4): 126—132.

- [2] 姚兆明, 张明慧, 陈军浩. 饱和软黏土循环累积孔压模型及地铁隧道路基长期沉降计算[J]. **铁道学报**, 2012, 34(9): 87—92.

YAO Zhao-ming, ZHANG Min-hui, CHEN Jun-hao. Cyclic accumulative pore pressure explicit model of saturated soft clay and long-term settlement calculation of subway tunnel roadbed[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2012, 34(9): 87—92.

- [3] CHAN F W K, BROWN S F. Significance of principal stress rotation in pavements[C]//Proc., 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. New Delhi: [s. n.], 1994: 1823—1826.

- [4] BROWN S F. The effects of shear stress reversal on the accumulation of plastic strain in granular materials under cyclic loading[C]//Design and Construction of Pavements and Rail Tracks. [S. l.]: Taylor & Francis, 2007: 89—109.

- [5] GRABE P J, CLAYTON C R I. Effects of principal stress rotation on accumulative deformation in rail track foundations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2009, 135(4): 555—565.

- [6] ISHIKAWA T, SEKINE E, MIURA S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving wheel loads[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(5): 691—703.

- [7] 沈扬. 考虑主应力方向变化的原状软黏土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

- [8] 聂影. 复杂应力条件下饱和重塑黏土动力特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

- [9] 姚兆明, 黄茂松, 曹杰. 主应力轴循环旋转下饱和软黏土的累积变形[J]. **岩土工程学报**, 2012, 34(6): 1005—1012.

YAO Zhao-min, HUANG Mao-Song, CAO Jie. Cumulative deformation of saturated soft clay subjected to cyclic rotation of principal stress axis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(6): 1005—1012.

- [10] POWRIE W, YANG L A, CLAYTON C R I. Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. [S. l.]: [s. n.], 2007.

- [11] HSU C C, VUCETIC M. Volumetric threshold shear strain for cyclic settlement[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(1): 58—70.

- [12] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. **Geotechnique**, 1983, 33(4): 355—383.

- [13] 刘建坤, 肖军华, 杨献永, 等. 提速条件下粉土铁路路基动态稳定性研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(2): 399—405.
- LIU Jian-kun, XIAO Jun-hua, YANG Xian-yong, et al. Study on dynamic stability of silt subgrade subjected to train moving loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(2): 399—405.