

# 滑坡灾害防治中的几个问题<sup>1)</sup>

李世海 孟祥跃

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 主要介绍了滑坡灾害防治以及地质体力学方面的研究进展, 提出了地质工程中面临的工程问题和相应的科学问题。分析了岩体结构和水对滑坡影响, 并给出了滑坡灾害预测的新方法, 介绍了该方法在实验室、数值模拟以及工程的应用实例。提出了一种新的值模拟方法, 新的方法能够将有限元和离散元有机的结合起来, 模拟材料由连续到非连续的演化过程。基于研究成果, 建议我国滑坡灾害防治新的技术路线。

**关键词** 滑坡, 数值模拟

## 前言

山体滑坡作为一种自然灾害, 其孕育、发生和发展是地质体变形和破坏的力学过程。滑坡研究的介质是地质体, 它不同于一般力学研究的材料。具有非均匀、非连续的特性, 尤其是地质体的“初始”状态是未知的。其主要原因是地质体经过千百万年的演化而来, 它经历了复杂的变形和破坏过程, 而灾害防治工程所关心的问题是滑坡体在当前状态下的进一步变形和破坏。力学在航空航天工程、海洋工程和结构工程中做出了巨大的贡献, 而对地质工程研究仍然处在探索阶段。有限元<sup>[1]</sup>、离散元<sup>[2]</sup>和极限平衡方法<sup>[3]</sup>在研究地质体的变形和破坏都有一定的局限性, 在描述材料由连续到非连续的破坏过程遇到一些困难。李世海<sup>[4]</sup>等提出了块体颗粒模型(BPEC), 试图解决这一问题。研究水对滑坡的影响, 2000年Science发表了研究了均匀渗流条件下土体滑坡中孔隙水压力的影响<sup>[5]</sup>, 但是, 滑坡的灾害发生通常是裂隙渗流的影响。由于地质体的复杂性, 有一系列相关的科学和工程问题有待于解决。

本文分析了滑坡灾害防治面临的工程问题和亟待解决的科学问题。介绍了近年来课题组主要开展的工作, 总结了实验研究了岩体结构、裂隙水对滑坡体稳定的影响。基于数值模拟和实验研究的结果, 给出了一种分析滑坡演化过程新的分析技术; 针对山体滑坡是由连续到非连续的破坏过程, 提出了一种基于连续介质力学模型的离散元方法。建议我国滑坡灾害防治采用新的技术路线。

## 1 滑坡灾害防治中的工程问题和科学问题

目前滑坡治理所面临的主要的工程问题包括:

(1) 山体的稳定性判断: 工程建设中经常遇到建筑工程选址, 铁路、公路选线等一系列问题, 需要对山体的稳定性做出判断。特别指出, 这里所指的稳定性还应当包括由于山体变形导致上覆建筑物的破坏或结构失稳, 从某种意义上讲, 这类情况在三峡库区蓄水后将更为普遍。

<sup>1)</sup> 国家973项目“灾害环境下重大工程的安全性基础研究”和中国科学院重要方向性项目“滑坡灾害中的关键力学问题”资助项目

(2) 滑坡治理的设计依据: 滑坡治理工程是工程问题, 必须要定量化, 否则, 施工无法进行, 过分保守设计浪费资金, 反之, 就要承担设计危险。如果没有对山体内应力场分布较为精确的估算, 工程治理的设计就缺少了基本的依据。

(3) 滑坡发生的预测、预报: 对于那些无法治理和没有必要治理的滑坡, 需要对它的危害做出预测和滑坡发生做出预报, 这是一项十分艰巨的任务。从目前的情况看, 很难给出能够进行预测预报的可靠的理论方法, 而通过监测做出临发性预报应当是最为有效的手段。

(4) 山体力学特性: 无论是稳定性分析、工程设计还是滑坡灾害预测都需要对山体的力学特性有尽可能详细的了解。从我国目前的地质勘察方法来看, 还没有一个令人满意的方法, 需要开展相关的研究。

针对滑坡防治的工程问题, 开展滑坡研究涉及到地学、力学和工程科学多个分支, 滑坡的发生、发展是一个力学过程, 其基本的科学问题可以归结为研究已经破坏的地质体在自然力作用下的变形与破坏规律。

相关的科学问题研究包括: 地质体初始状态的定量化描述方法; 地质体的材料特性的直接或间接的测量方法; 地质体内水渗透的基本规律; 非连续介质力学的基本理论和计算方法。

## 2 结构面是岩体破坏的重要因素 —— 模型实验与数值模拟结果

作为具体的问题, 研究由规则岩块按照不同的岩体结构构成的山体模型临界角度。所谓临界角度是指山体的坡度大于该角时会发生整体破坏, 而低于该角时是稳定的。表 1 给出了不同结构形式下的临界角度。

由表 1 可以看出:

(1) 山体的临界角度与山体的结构有关, 相同的几何形状、不同的结构, 临界角度差别很大。特别是当后方岩体破碎时, 滑坡的物理因素是倾倒破坏导致滑移破坏。

(2) 用离散元方法可以很好的模拟这种离散的结构体。

(3) 当离散元方法按照极限平衡的方法划分块体, 并限定岩体沿底面滑动时能够得到与极限平衡条分法相同的结果, 但是不能给出与试验相同的结果。极限平衡法计算判定是稳定的边坡用离散元判定的结果可能不是稳定的。

含结构岩体的模型试验和数值模拟的结果证明了滑坡体结构对其稳定性有重要的影响, 常规的极限平衡方法(作为离散元、有限元的特例), 不能考虑岩体结构的作用, 滑体沿滑面滑移和刚性假设以及条分技术极大地限定了该方法的适用范围。随着计算力学的发展, 极限平衡方法简便易行已不再是优势, 而该方法不能分析山体变形、地质体结构特性以及山体的破坏过程, 缺陷非常明显。该方法作为我国一些部门当前采用的规范, 需要由新的分析工具取代。

表 1 试验临界角和数值模拟临界破坏角对照表(单位: 角度: °)

试验名称	块体尺寸/mm	结构面连通方式	试验测量临界角度	数值模拟临界角度	底面滑动条分单元	备注
力学所(1)	20×10×10	连通	22.14~24.2	23	26	
力学所(1)	20×10×10	部分不连通	25~26.3	25.5		
力学所(1)	10×10×10	连通	9.8~11.6	10		
力学所(1)	10×10×10	部分不连通	23~24.9	23.5	26	
力学所(1)	20×10×10+5×5×5	部分不连通连通	19.5~21.8	21		
Barla(1995)	9×9×9	连通	9	接近9		UDEC
Lanra(1997)	L×L×L	连通	38	31		UDEC

### 3 降雨能否诱发滑坡取决于滑坡体的结构和状态

人们常说“无水不成滑坡”，那么，到底降雨对山体的稳定性影响有多大？分析重庆市气象局的一份调查研究报告，可以得到比较好的认识：重庆市管辖范围近几十年来的有记录的滑坡中 97.6% 的滑坡发生在降雨以后的 5 d 以内。

水的影响主要包括水对滑坡介质的软化作用和孔隙水压的作用两个方面。对水的软化作用在力学模型中主要是通过降低介质的强度来实现的  $\alpha\beta$ 。车用太<sup>[6]</sup>列举了较多的试验结果，并给出试验参数。孔隙水压的影响，降低了滑面的有效应力，减少了滑坡体的抗滑力。为此，试验组分别开展垂直滑面裂隙水和滑面裂隙水对临界破坏角的影响。

从表 2 可以看出，当裂隙的位置到坡角的距离大于某一值时，裂隙水的压力对破坏角度影响不大。这就是说，垂直滑面的裂隙水压力，可能产生“牵引式”滑坡，不会产生“后推

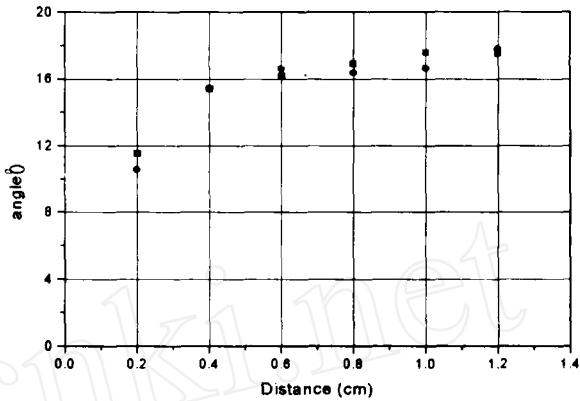


图 1 裂隙位置对临界角的影响

表 2 垂直滑面裂隙位置与临界角度 (水位高度单位: cm, 角度: °)

	无水	第 1 裂隙	第 2 裂隙	第 3 裂隙	第 4 裂隙	第 5 裂隙	第 6 裂隙
1	角度	11.53	17.59	11.53	11.53	17.54	11.53
	水位高度	0.28	0.35	0.28	0.28	0.36	0.28
2	角度	10.55	16.64	10.55	10.55	17.80	10.55
	水位高度	0.27	0.35	0.27	0.27	0.35	0.27

式”滑坡。事实上，裂隙中水的推力与滑面上的摩擦力相比很小时，就可以忽略  $h_w h_s$ 。

图 2 是用于研究滑面水压力对临界角度影响的试验装置示意图。该装置可以用于研究地面上的孔隙水压力单一因素诱发山体滑动的规律。

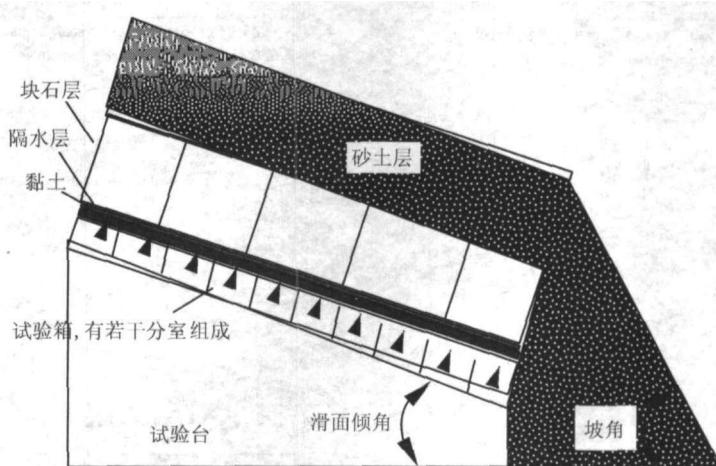


图 2 滑面水压力影响示意图

表 3 给出了临界滑动时的水压力。从表 3 中可以看出，在该试验条件下，当水压力与上浮土的压力的比值达到某一值时，就会发生整体滑移。事实上，山体不可能像模型中那样简单，地面的摩擦力不是均匀的，上浮土的应力分布也不均匀。但是，孔隙水压力引起滑面上的强度降低会影响到表面的位移变化。分析滑坡的状态可以根据这种变形的分布反分析滑坡体地下水的分布场。进一步的工作将建立表面变形与地面孔隙水压力分布之间的联系。

表 3 临界滑动时的水压力值

试验序号	1	2	3	4	5
孔隙水压力折合水柱 $h_w$ (cm)	32.25	30.88	32.38	32.5	31.25
上覆土厚度折合水柱 $h_s$ (cm)	39.47	39.47	39.47	39.47	39.47
$h_w/h_s$	81.7	78.2	82.0	82.3	79.2

#### 4 非均匀材料的破坏准则——应变强度准则和位移预测方法

整体滑坡是长期演化至临界状态后在突发事件的作用下诱发的。因此，相关的研究应该包括两方面的内容：一是判断滑坡是否处在临界状态，二是判断在目前的状态下遇到什么样的突发事件就可能触发灾变。仅仅通过对滑坡历史准确的描述和变形数据的拟合是不可能预报滑坡的。只有准确预报突发事件才能够预报滑坡。

滑坡发生灾变的预测，通过分析土石混合体推剪试验数值模拟和滑坡模型试验作了一些探讨。图 3 中水平轴是推剪试验中的表面位移，垂直轴为达到该位移值的测点数与总测点数的比

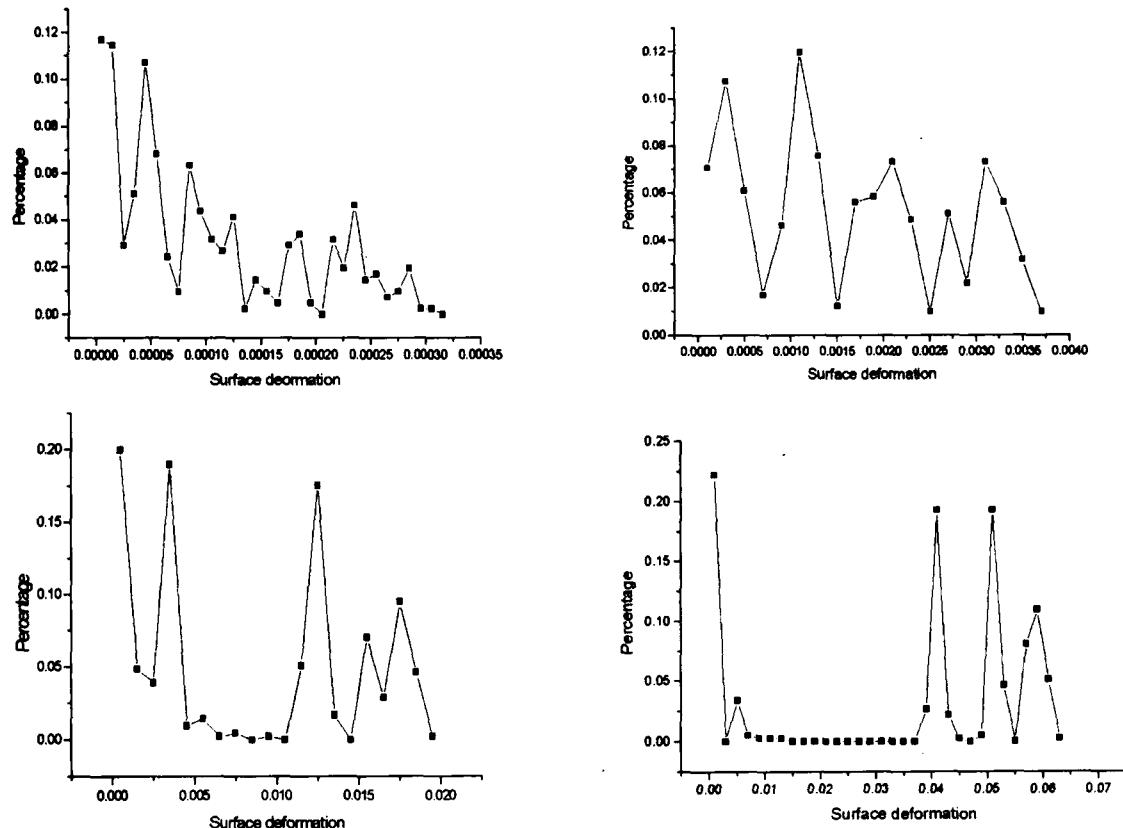


图 3 推剪实验中材料破坏预测曲线

值。图4中水平轴是滑坡表面的位移，垂直轴为达到该位移值的测点数与总测点数的比值。我们称这两组类似的曲线为材料灾变临界状态预测曲线。当曲线出现山谷的形状时，山体的破坏即达到了临界状态。这一结论也是提出高密度测量的表面位移预测滑坡的理论依据之一。

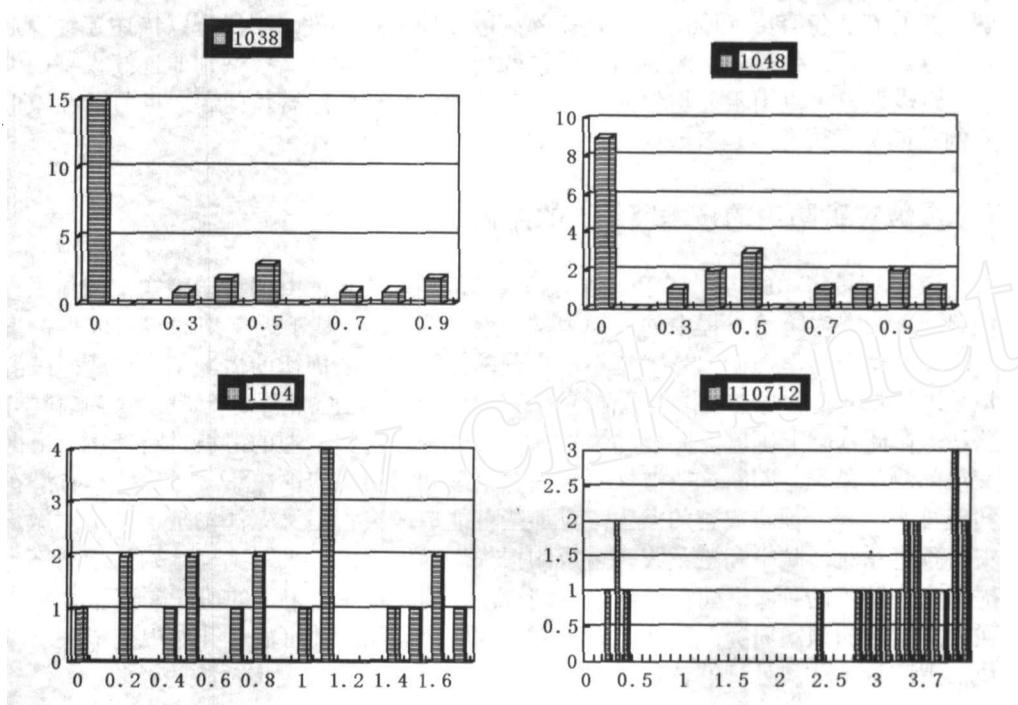


图4 滑坡模型实验失稳预测曲线

## 5 描述地质体由连续到非连续演化的计算方法

模拟地质体的数值方法主要包括两类基于连续介质的算法如：有限元、有限差分等和基于非连续介质的算法：如离散元、DDA等。这些方法各有自己的长处，但是，在描述材料由连续到非连续的演化过程遇到困难。李世海<sup>[7]</sup>等提出了一种新的计算算法——基于连续介质模型的离散元方法 CDEM(Continuum-based Discrete Element Method)。

上述方法的基本原理是将有限元中表征两个节点间广义力和广义位移关系的“点”刚度矩阵( $3 \times 3$ , 有别于单元刚度矩阵)转化为标准矩阵。实矩阵在不同条件下可以转化为4种形式的标准矩阵，其中包括：(1)3个实根其中两个相同，且对应的特征向量线性无关；(2)两个相同特征值对应的特征向量线性相关；(3)3个不同的实根；(4)一个实根和两个共轭复根。矩阵不同的标准形式取决于材料的泊松比。分析表明，对立方体单元第(2)中情况不存在；只有一类弹簧，当泊松比满足

$$\mu < 0.25 - \frac{5}{35}\sqrt{2} \approx 0.027 \quad \text{或者} \quad \mu > 0.25 + \frac{5}{35}\sqrt{2} \approx 0.47$$

时才会出现复根，对一般的弹性材料上述情况基本不存在，因此，特征根为复根的情况只是作为理论的完备性来讨论。不同形式的标准矩阵，对应的特征值和特征方向的物理意义也不同。当特征根为3个实根时，特征值就是连接两点的弹簧的刚度，对应的特征方向即该弹簧的方向，

表明两点之间有 3 个不同方向和刚度大小的弹簧连接。当特征根有一对共轭复根时，表明需要更多的弹簧等效有限元的解，理论分析表明，两个质点间需要有三个方向上的 5 个弹簧，其中两个弹簧变形与其他弹簧的受力有关。无论是 3 个，还是 5 个弹簧，均能在弹簧不断时得到与有限元完全相同的解，包括均匀和非均匀变形，而当个别弹簧断裂后，就可以给出该条件下的离散元解。新的方法将有限元刚度矩阵转化为离散元的弹簧刚度，不仅可以描述连续介质，也可以模拟非连续介质。弹簧逐渐断裂的过程也就是材料由连续介质模型到非连续模型的演化过程。显然，该模型也可以用于非均匀的土石混合体和含结构面的岩体问题，目前已经模拟了一些简单实例，说明了该方法是有效的和可行的。

## 6 关于“滑坡灾害防治的技术路线”的建议

针对国家规划投资 100 多个亿用于防治三峡库区地质灾害，中国科学院知识创新工程重要方向性项目“滑坡灾害防治工程中的关键力学问题”项目组，基于近年来的研究成果提出了一项建议。建议在当今科学理论和技术还不能充分掌握滑坡运动规律的情况下，三峡库区滑坡灾害防治拟采取“滑坡监测为首、排水预防为主、结构治理为辅、加强预案研究、实施科学决策”的技术路线，在此基础上国家首先要尽快投入一部分资金对拟治理的滑坡进行监测，根据一至两个水文年的测量结果，判断这些滑坡是否需要治理并做出相应的决策；对那些具有潜在危险的边坡实施排水工程，预防灾害的发生；对那些可能造成灾害但又无法治理的滑坡，做出预案并布置灾害预警系统，减少和避免灾害造成的损失；尽可能避免采用工程结构治理方案。为了更好地提出灾害防治的预案，建议组织力量调查、分析三峡库区附近的清江隔河岩水库内的滑坡，加强灾害防治的预案研究。此外，清江茅坪滑坡十分危险并可能在几年内造成灾难，建议国家尽快部署防治工作，处理好该滑坡还能够积累三峡库区滑坡灾害预防的经验。

## 7 结 论

在基础理论方面，提出了一种新的计算方法——基于连续介质力学模型的离散元方法 CDEM (Continuum-based Distinct Element Method)。新的方法是将有限元单元刚度矩阵中表示质点之间广义位移与广义力之间的刚度转化为连接两个质点之间的弹簧。与传统方法相比有如下的优点：对于连续介质的部分可以得到与有限元完全相同的结果，无需在块体内部划分网格；当材料破坏后弹簧断裂，材料的非连续特性的计算原理与离散元相同；更为重要的是该方法可以描述材料由连续到非连续的演化过程。新的模型既弥补了有限元描述材料非连续特性困难的不足，又解决了长期困扰离散元中弹簧刚度确定方法的问题，奠定了解决滑坡问题乃至地质力学问题的理论基础。

在实验研究方面，通过室内堆积块体模型试验证明岩体的结构是影响山体稳定性的重要因素，山体内的反倾结构可能诱发滑移破坏，导致临界破坏角度大幅度降低。这一现象不能用常规的极限平衡法解释，极限平衡方法中的滑移面假设限制了其使用价值，得出的结论是偏危险的，离散元块体模型的计算结果支持了这一结论。

基于几年来的研究成果建议我国滑坡灾害防治的新的技术路线：“滑坡监测为首、排水预防为主、结构治理为辅、加强预案研究、实施科学决策”。实施这一技术路线面临着很多困难，也需要做大量的工作。

**致谢** 郑哲敏院士十分关注对本课题的研究进展，并多次指导并帮助解决其中的问题，近 20 年来，作者得到郑先生的教诲和帮助受益匪浅，在此表示深深的谢意。

## 参 考 文 献

- 1 Zienkiewicz O C. *The Finite Element Method*. London: McGraw Hill, 1977
- 2 P A Cundall. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the International Symposium Rock Fracture*, ISRM, Nancy, Paper No. II-8, 1971. 1
- 3 Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes. *J Geotech Engrg*, ASCE, 1996, 122(7): 577~596
- 4 Shihai Li, Manhong Zhao, Yuannian Wang, Ying Rao. A new numerical method for DEM——block and particle model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(sup1): 414~438
- 5 Iverson R M, et al. Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity. *Science*, 2002, 20(290): 513~516
- 6 车用太等. 岩体工程地质力学入门. 北京: 科学出版社, 1983
- 7 Shihai Li, Manhong Zhao, Yuannian Wang, J G Wang. A continuum-based discrete element method for continuous deformation and failure process. 第六届国际计算力学会议, 2004