

地质灾害过程模拟与过程控制*

——基于变形理论的地质灾害评价及治理设计理论纲要

黄润秋 许 强

(成都理工学院, 成都 610059)

摘要 传统的边坡及其相关的崩滑地质灾害评价与治理设计均以强度稳定性理论及基于静力学的规范设计为依据,这一体系的应用在工程界已有近百年的历史.但是,近20年的研究表明,边坡作为地质体,其稳定性状况与治理工程设计,在更多的情况下,取决于边坡的变形特性.根据作者近10年来致力于变形理论及相关的模拟技术在地质灾害评价与防治方面的应用,提出了基于变形理论的边坡地质灾害治理工程设计理论纲要.这一新的理论框架尽管还有诸多有待进一步完善之处,但近年来的实践表明,它对指导边坡地质灾害的评价与治理设计工作是成功的,并且可望逐渐成为取代传统理论的新的边坡地质灾害评价与设计理论.

关键词 地质灾害 边坡 变形理论 过程模拟 灾害控制

边坡是人类工程和生活活动最为普通的地质环境.边坡岩土体以崩塌、滑坡、泥石流等形式失稳破坏给人民生命和国家财产造成了巨大的损失.我国是一个地质环境极其复杂和特殊的国家,尤其是西南地区,由于青藏高原的隆升,使得该地区不但有极其复杂的地形地貌条件,而且存在着一系列活跃的动力地质作用,加之伴随经济快速发展的大规模工程建设和资源开发在一定程度上不规范性与盲目性,从而导致地质灾害频繁发生.据初步统计,80年代以来,这一地区所发生的一次性死亡人数在200人以上或直接经济损失在千万元以上的灾难性崩滑事件就有10余起,伤亡千余人,直接经济损失近数亿元.由于灾害发生中断水、陆交通而造成的社会影响和间接损失更是难以估量.直接由工程建设所诱发的崩滑灾害事件也屡见不鲜.据资料统计,近10年来,我国由于大型工程修建或人类活动诱发崩滑灾害所带来工程处理费用单项上千万元的事件就有10余起.因此,地质灾害已成为制约我国经济及社会持续发展的一个主要环境地质问题.地质灾害的防治是一个复杂的系统工程问题,涉及灾害的勘察、评价、预测、治理等诸多方面.目前,国内外在地质灾害的发生机理及灾害的预测、评价方面都作了大量工作.但是,传统的边坡及其相关的崩滑地质灾害评价与治理设计均以强度稳定性理论及基于静力学的规范设计为依据^[1,2],这一体系的应用在工程界已有近百年的历史,其理论基础还是100年前的“Lanking”、“Columbu”土压力理论或“推力传递”理论.其设计思想与实际地质情况相差甚远,存在以下明显的不足:(1)其基本出发点是土力学的极限平衡理论,考虑均匀介质的简单破坏模式,这与大多数边坡受岩土体结构或结构面控制的实际情况相差甚远^[3];(2)作为设计依据的岩土压

1998-06-19 收稿,1998-09-29 收修改稿

* 国家杰出青年科学基金资助(批准号:49525204)

力的产生是岩土体变形与支挡结构相互作用的结果,因此,岩土压力的计算应该基于岩土体的变形(弹塑性、蠕变等)及其与支挡结构的相互作用理论,而不是传统的设定破坏面理论.由于上述理论的缺陷,从而造成设计方案的保守和财力浪费,或错误的设计导致治理失败的例子已屡见不鲜.因此,克服上述弊端,构建基于变形理论的地质灾害治理工程理论已成为地质工程领域一个急待解决的问题.

近20年的研究表明,边坡作为地质体,其稳定性状况与治理工程设计在更多的情况下,取决于边坡的变形特性.本文根据作者近10年来致力于变形理论及相关的模拟技术在地质灾害评价与防治方面的应用,提出了基于变形理论的边坡地质灾害治理工程设计理论纲要.这一新的理论框架尽管还有诸多需完善之处,但近年来的实践证明,它对指导边坡地质灾害的评价与治理设计工作是成功的,并且可望逐渐成为取代传统理论的边坡地质灾害评价与设计理论.

1 基于变形理论地质灾害治理设计的基本观点

边坡岩土体由于自然因素的作用(如河谷的不断下切)或人类工程活动的影响(如人工开挖),将随着时间的推移从局部的小变形发展到整体的大变形直至最后的成灾破坏,这是一个动态演化过程.在此过程中,地质体作为一个开放体系,无时无刻都在和其周围环境进行着物质和能量交换,这就导致地质体在各个不同的演化阶段有其各自不同的特点.因此,针对一个具有上述“动态”特征的体系,作者认为地质灾害治理工程设计必须围绕地质体的变形理论和地质体与支护结构的相互作用理论进行.这两方面理论可通过作者所倡导的地质灾害“过程模拟与过程控制”技术来实现,因此,基于变形理论的地质灾害治理设计中心思想可通过图1的框图来体现,这一基本思想的要点如下:

(1)地质灾害的发生是地质体演化到一定阶段的必然产物.地质灾害的防治,实质上是通过人工的手段使已处于不平衡或临界平衡状态的地质体重新回到一种新的平衡状态,因此,地质灾害防治是人们对地质体演化行为的控制;

(2)地质灾害治理工程设计的基础是对灾害形成的动态地质过程分析,也就是灾害形成的地质-力学机制.通过这样的分析,把握地质体变形破坏的发育阶段、内部作用过程和潜在破坏面发育状况,据此确定治理方案;

(3)地质灾害治理工程设计的理论是关于岩土体变形-破坏过程描述和地质体与治理工程结构的相互作用理论;

(4)灾害治理工程设计实现的关键技术是地质灾害的过程模拟与过程控制技术;

(5)利用施工期间的监控与反馈实现灾害治理工程设计的动态优化.

2 基于变形理论地质灾害治理设计的关键理论与技术

2.1 基于变形理论地质灾害治理设计的理论基础

2.1.1 相互作用理论

在地质灾害治理设计中,现行基于规范的静力学设计存在着如前所述的缺陷,而不能充分考虑地质体的变形破坏机制和地质灾害孕育的动态过程.例如,对于建筑开挖基坑的支护,目前主要的设计依据还是基于主动(或被动)土压力理论.事实上,无论是Columbu土压力理论还是Lanking土压力理论,大量实例证明,其仅适用于软土的支护设计,对固结程度较高的土体或岩体来说,上述理论所假定的土体破坏形式及土压力往往与实际情况大相径庭.例如,在重庆地

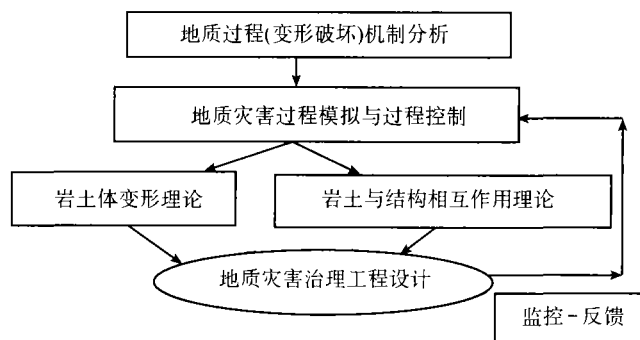


图1 基于变形理论地质灾害治理设计理论基本思想

区,岩层主要为近水平的砂岩泥岩所组成的互层结构,现场调研结果表明,该地区的建筑开挖边坡的变形破坏形式主要为边坡顶部首先发生拉张破坏,形成规模不等的基本平行于临空面的拉裂缝,并由此而逐渐导致整个坡体的破坏。对于此类边坡,加固的重点理所当然地应放在边坡的中上部,而不是传统土压力理论的设计结果。同时,理论计算和实践已经证明,若按照土压力理论来加固此类边坡,将造成极大的浪费。

为了克服上述现行设计方法的不足,基于变形理论地质灾害治理工程设计强调岩土体与治理工程结构的相互作用,通过对相互作用过程的研究,获得实际作用于治理工程结构上的岩土压力,以此作为设计依据,这就是地质灾害治理工程设计的相互作用理论。实际上,地质灾害治理工程是通过支、挡、锚、喷等方式人为地将地质体的变形长时期地控制在一定的尺度内,以避免地质体突发性破坏形成灾害。因此,只要地质体和治理工程结构之间能在工程年限内能“和平共处”,便达到了治理地质灾害的目的。这里的“和平共处”是指地质体和治理工程结构间通过相互协调、相互作用,使两者长期地处于平衡状态。因此,查明地质体与支挡结构间的相互作用方式以及各个部位、各个不同的演化阶段相互作用力的大小就成了地质灾害防治方案设计的基本依据。但是,影响地质体与支挡结构间相互作用的因素很多,它不但与地质体本身的结构特征、岩土体的力学性质以及地质体的变形破坏方式和变形破坏机理有关,而且还受控于治理工程结构的类型、具体形态以及结构本身的力学特性。例如,在挡土墙设计时,必须考虑土体可能施加于挡土墙上土压力的大小、方向、分布情况及作用点等;而挡土墙上土压力的大小,不但与墙的结构形式、高度、材料的物理力学性质有关,而且还与岩土体的结构、物理力学特性、墙和地基的弹塑性及其位移变化等情况有关。要全面考虑如此复杂的影响因素,现行的土压力理论和一般的解析方法显然是无能为力的,必须借助于现代数值模拟技术。

2.1.2 过程控制理论

“控制”一词首先来源于 Wiener 的控制论。按 Wiener 的定义,控制是在获取、加工和使用信息的基础上,控制主体使被控客体进行合乎目的的行为^[4]。因此,行为、目的和信息是控制论中3个重要的概念。对于地质灾害而言,如果我们把可能发生灾害的地质体作为被控系统,则控制的目的主要表现为两个:一方面,当系统已处于所需要的状态时(如斜坡、地下洞室围岩等地质体处于不变形或小变形的稳定状态),就力图保持系统原始稳定状态;另一方面,当系统不是处于所需的状态(即大变形或即将失稳)时,则引导系统由现有状态稳定地变到一种预期的状态。因此,通俗地讲,控制地质灾害的目的是使被研究的地质体的演化行为朝着对人类工程和生活活动有利的方向发展。信息在控制过程中的作用也表现在两方面:一是要明确控制是否达到目

的(即灾害防治措施是否有效),就必须对系统的状态信息(如变形信息、地下水变化信息等)有所获取;二是要到达这种目的,就要了解环境变化信息(如降雨量、工程荷载等)以及系统偏离目标的信息.显然,对于地质灾害防治而言,信息主要指地质体在发展演化过程中的各种资料,此信息一般可通过对地质体和周围环境的实时监测和观察得到.

地质体往往是一个内部结构非常复杂的开放系统,内部结构的复杂性和不可视性以及外界影响因素的动态性和不确定性,从而导致地质体的演化行为具有很大的不确定和不可预见性.也就是说,地质体往往都可作为一个黑箱对待^[5].针对这种“黑箱”问题,我们除了需采用常规的思路首先尽量研究其内部结构和外界影响因素之外,还可换一种角度和思路,即通过对系统的输入输出关系来研究,即反馈控制^[6].所谓反馈,是指系统输出的全部或一部分通过一定的通道反送到系统的输入端,从而对系统的输入和再输出施加影响的过程.对于地质灾害而言,若将所研究的对象作为一个与外界环境不断进行物质和能量交换,但其内部结构又不是太清楚的“黑箱”系统,将各种外界作用力(如地下水、爆破乃至地震等)和人类工程荷载(如开挖所释放的荷载、修建建筑物所增加的荷载以及锚杆、抗滑桩等支护结构对地质体的作用力等)作为系统的输入,将系统对这些输入的响应(如地质体的变形信息、应力场变化信息等)作为系统的输出,如果我们根据部分或全部输出信息来决定下一次的输入,则这些输出信息可称为反馈.

例如,对于一个滑坡灾害的治理工程,我们可以首先采用常规的力学计算和分析,设计出治理该滑坡的初步方案(比如为预应力锚索方案)^[7,8].但是,在设计这个初步治理方案的过程中,可能会(实际上是必然会)因对滑坡发生机制认识与实际不符合、滑面的位置判断不够准确、滑坡边界与实际情况有出入、滑动面力学参数的取值偏高或偏低等一系列因素而导致该初步设计方案过于保守或根本达不到处理滑坡的要求,解决这一问题的最好的办法就是监控——反馈设计.监控——反馈设计的基本思想就是根据施工过程中的监测资料来修正补充原设计方案.

2.1.3 最优化理论

任何一个地质灾害的治理,其方案都可能有多种,但其中肯定有一种方案从防止效果、施工难易程度、工程造价等多方面考虑是最优的.由于是多因素,甚至是多目标决策问题,采用常规的数学方法很难解决此问题,而最优化理论则适于处理这类问题.

2.2 基于变形理论地质灾害评价与治理设计的技术方法

地质体一般都因不能脱离所处环境以及资金问题而不能进行大量的现场试验,因此在对地质灾害系统进行系统辨识时很难直接获得其输入、输出信息,更谈不上反馈控制了.解决这一问题的最好办法是功能模拟,即根据模型与原型之间的相似性,通过模型来间接地研究原型的规律性.模型一般可分为3类:物理模型(如大型物理模拟试验、底摩擦试验以及离心模拟试验等模型)、计算机数值模拟模型(如有限元、离散元以及流形元等)以及数学模型.已有的研究成果表明,较好的计算机模拟已经可部分甚至全部地取代物理模拟.因此,在对一个地质灾害进行防治处理之前,先在考虑各种有利和不利因素的情况下作大量的“计算机试验”,并对各种条件下的灾害控制方案进行模拟分析,以便在施工过程中遇到这些问题时“处变不惊”,并能及时处理和解决.

2.2.1 地质灾害形成的全过程仿真模拟技术^[9,10]

地质体和物质世界中其它事物一样,也有一个诞生、发展壮大以及最后消亡的演化历史,也即地质灾害的孕育具有动态性、历史性和阶段性.同时,岩土体的变形破坏方式不仅受控于岩土体本身的内部结构和物理力学性质,还与外界因素的作用有关,岩土体正是在这种双重因素的

作用下,以一定的方式发展演化的^[11,12].不同的地质体其变形破坏机理可能不同;即使是同一地质体,在不同的演化阶段其变形破坏方式也不相同,当然其稳定性程度就不一样.因此,地质灾害治理工程设计的前提是必须首先查明地质体变形破坏机理和各个不同演化阶段的变形破坏方式及稳定性程度.为此,我们提出了地质灾害形成全过程模拟的概念.

所谓全过程模拟,就是在对地质体变形破坏演化机制的“概念模型”研究的基础上,采用现代数值模拟理论,模拟地质体在内部结构及外在因素双重作用下,再现地质体演化的全过程.其一方面可以验证“概念模型”的正确性和合理性;从理论上、整体上和内部作用过程上获得对地质体演化机理更深入的认识;同时,通过对地质体已有变形表现特征的“拟合”和对模型进一步的时间延拓,可获得对地质体不同演化阶段的稳定性状况及未来发展趋势和失稳破坏方式的全面认识.

一般而言,地质体变形破坏及运动过程的模拟是一个全过程的动态数值模拟问题,而地质体从微小变形发展演化到破坏、运动,是一个复杂的动态力学过程,是一个变形量从量变的积累到质变的发生过程.量变的积累是一个小变形过程,而质变发生后的破坏、运动则是大变形过程,这两个过程目前还不能完全用统一的数学力学模型(本构关系)来表达.对于小变形的描述可采用基于弹塑性和粘弹塑性理论本构方程的有限单元法等数值分析方法求解;而大变形的描述则可采用基于刚性块体模型或可变形块体模型的离散单元法(DEM 和 UDEC 等)以及非连续变形理论(DDA).特别是近年来发展起来的快速 Lagrange 差分分析(FLAC)更是能模拟岩土体从小变形到大变形以及破坏全过程,是一种更为有效的数值模拟手段.

2.2.2 地质体与支挡结构间相互作用模拟技术

在地质灾害控制的初步设计阶段,一般只能依据现行规范和静力学原理进行计算和设计,因此是一个静态方案,其显然不能考虑支挡结构与岩土体本身的相互作用力.事实上,地质灾害的控制从本质上讲就是依靠支挡结构与岩土体本身的相互作用力来改变地质灾害系统的演化状态,维持系统的动态平衡.因此,要真正达到对地质灾害的有效控制,在进行控制方案设计时必须考虑支挡结构与岩土体之间的相互作用力.而这种相互作用力是相当复杂的,它不仅取决于控制方案,而且与施工步骤、施工顺序等因素有关,只有通过数值模拟技术才能了解这种相互作用力.在对地质灾害控制的方案设计时,通过计算各支挡结构与岩土体间的相互作用力(如锚杆的轴力,抗滑桩的轴力、剪力和弯矩等),可以反过来检验初步设计方案中支挡结构形式及布置的合理性,从而对设计方案进行优化.

2.2.3 初步设计方案的有效性模拟

通过对经过加固处理(控制)后的地质灾害系统进行数值模拟,一方面可进一步掌握地质体经过处理后的变形演化行为,同时,通过对被监测部位的控制量与控制目标相比较,可预先判断出此控制方案的控制效果,为下一步的优化设计提供重要资料.

3 基于变形理论地质灾害治理工程设计的实现

基于以上理论与关键技术,我们提出实现基于变形理论地质灾害治理工程设计的具体过程如图 2 所示,要点如下:

- (1)通过野外现场调研和试验测试,查明地质体的工程地质、岩土力学环境条件;
- (2)以现场调查,现象研究和相关测试为主要手段,研究并提出边坡变形破坏及地质灾害形成机制的“概念模型”;

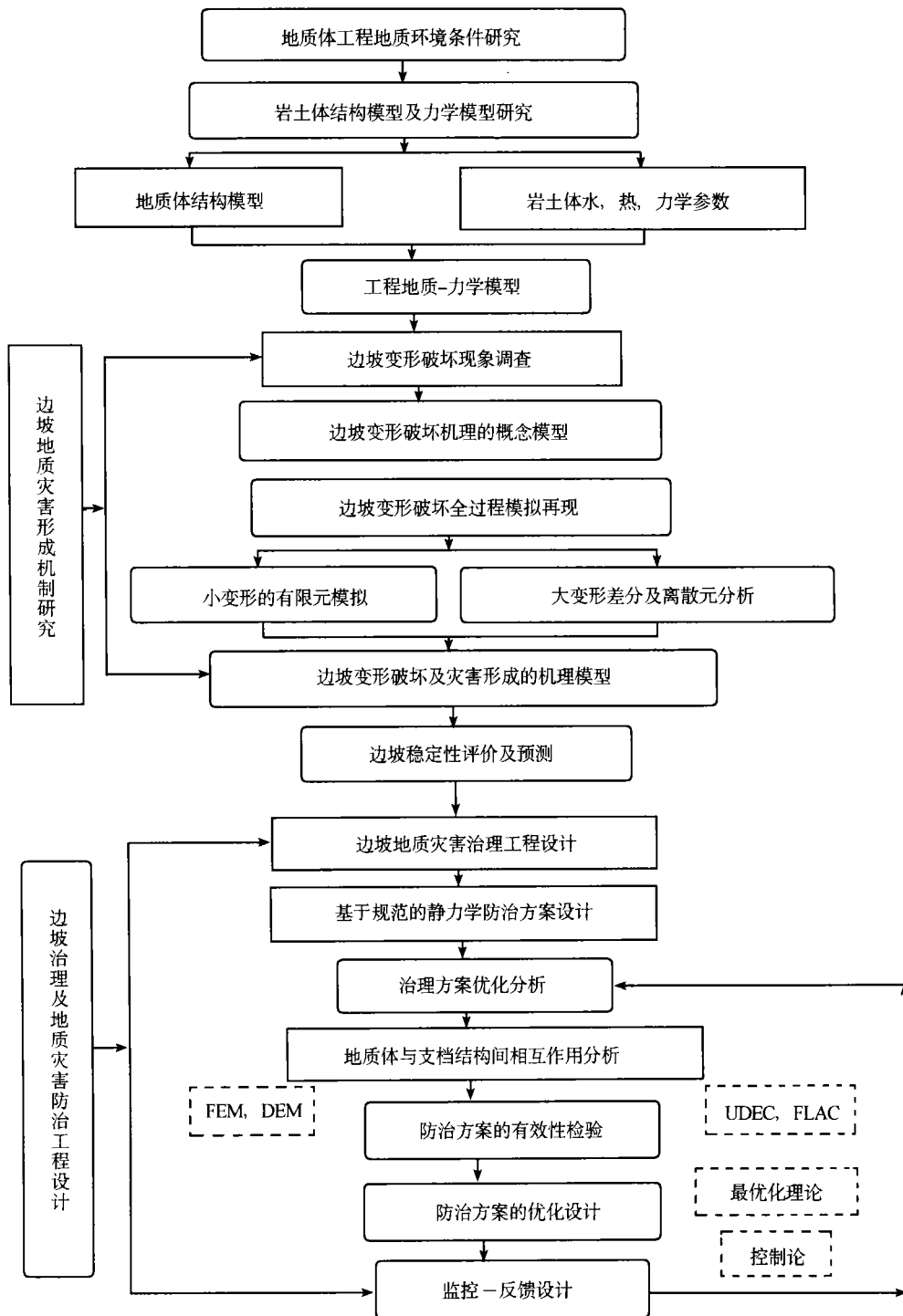


图2 基于变形理论的地质灾害治理工程设计技术路线

(3)运用过程模拟技术,对边坡变形破坏及灾害地质过程进行模拟再现,一方面验证概念模型;另一方面,获得对地质过程内部作用机理深入的认识,从而对边坡稳定性及其灾害的发展趋势

势作出评价和预测;

(4)根据地质体目前所处的演化阶段和其变形破坏机理,选定治理方案,并根据规范进行初步的静力学设计;

(5)应用灾害控制模拟技术,首先进行方案的对比优化模拟,选择最佳的治理方案;

(6)对确定的治理方案,进一步考虑地质体和治理工程结构之间的相互作用,运用模拟手段,研究地质体和治理工程结构之间的相互作用,并根据相互作用特点进行方案优化和设计;

(7)在条件允许的情况下,对施工过程进行监测,然后利用反馈结果调整优化设计。

4 结束语

崩滑地质灾害对国民经济建设和人民生命财产的安全具有重大的威胁.伴随我国经济发展所带来的大规模基础设施建设、资源开发和城镇都市化进程,可以预见,这一问题的严重性还将持续相当长一段时间.减轻和防治地质灾害、保护地质环境和提高环境质量仍将是工程地质和环境地质领域为社会和经济可持续发展服务的重大主题.因此,推动这一领域的技术进步具有重要的理论及现实意义.近年来,应用地质灾害过程模拟与过程控制理论,我们先后完成了四川溪口滑坡、重庆建筑开挖边坡、澜沧江小湾水电站高边坡及其它10余个边坡及崩滑地质灾害的评价、预测和治理工作.实践表明,这一理论可大大提高灾害评价和防治方案优化决策的科学性,具有重要的发展和应用前景.

参 考 文 献

- 1 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理.第二版.北京:地质出版社,1992
- 2 黄润秋,张倬元,王士天.高边坡稳定性的系统工程地质研究.成都:成都科技大学出版社,1991
- 3 周维垣,孙 钧.高等岩石力学.北京:水利电力出版社,1990
- 4 魏宏森,宋永华.开创复杂性研究的新学科——系统科学纵览.成都:四川教育出版社,1991
- 5 Yan Ming, Wang Shitian, Huang Runqiu. Deformation mechanism of Mabukan high slope, China. In: Proc of 7th Inter Congr. of IAEG, Amsterdam, 1994, Rotterdam: Balkema A A, 1994, 4 389
- 6 Huang R Q, Li Y G. Logical message model of slope stability prediction in Three Gorges area. In: Proc of 6th Inter Symp. on Landslides, New Zealand, 1992, Rotterdam: Balkema A A, 1992, 977
- 7 Huang R Q. Studies of the geological model and formation mechanism of Xikou land-slide. In: Proc of 7th Inter Symp on Landslides, Trondheim, 1994, Rotterdam: Balkema A A, 1996, 853
- 8 Huang R Q. Full-course numerical simulation of hazardous landslides and falls. In: Proc of 7th Inter Symp on Landslides, Trondheim, 1994, Rotterdam: Balkema A A, 1996, 371
- 9 尚岳全,黄润秋编著.工程地质研究中的数值分析方法.成都:成都科技大学出版社,1992
- 10 黄润秋,邓荣贵著.高边坡物质运动的全过程模拟.成都:成都科技大学出版社,1993
- 11 黄润秋,许 强.工程地质广义系统科学分析原理及应用.北京:地质出版社,1997
- 12 Huang R Q, Zhang Z Y. Engineering geological study of a large creep rock slope. In: proc of 7th Inter Congr of IAEG, Amsterdam, 1994, Rotterdam: Balkema AA, 1994, 1401