维普资讯 http://www.cqvip.com

Journal of Engineering Geology 工程地质学报 1004-9665/2007/15(02)-0179-07

斜坡地质灾害的空间预测问题*

陈喜昌 石胜伟 胡时友
(中国地质调查局地质灾害防治技术中心 成都 610081)

摘 要 结合典型实例阐明斜坡地质灾害的空间预测是灾害防治工作的前提条件与成败关键。继而讨论了"斜坡地质灾害空间预测"的内涵与工作程序,以及与斜坡稳定性评价预测相关的斜坡破坏型式,斜坡结构类型,斜坡破坏的环境条件和人类活动的影响等问题。在斜坡地质灾害空间预测的定义中,笔者将预测时段仅限于"工程年代"之内,且前提是保持现有斜坡结构和环境条件,以及可预料的人类活动影响;预测程序是先进行斜坡稳定性预测,然后再对稳定性差或较差的坡段进行灾害危险性(度)预测。关于斜坡破坏型式的划分,一是从它的影响范围和"量"与"质"的关系看都需重视其单次规模;二是要与斜坡的成因结构类型相结合,才能对现场地质调查与研究具有指导意义。为了展示斜坡的成因结构类型对稳定性的控制意义,本文提供了长江三峡工程库区和西部大开发中总结出来的碎屑岩和副变质岩斜坡的新类型系统,并对三类土质斜坡的典型结构特征和稳定性进行了简要比较。关于环境条件对斜坡稳定性影响的量化研究,笔者更看重多个非自体(非本坡段)天然模型观测和滑坡反算的成果。同时建议在全面准确的现场调研的基础上建立确定性地质模型并应用基础学科的相关原理进行单要素的量化分析和单元分析,以便进一步揭示斜坡变形破坏机理。

关键词 斜坡 地质灾害 空间预测
中图分类号:TD824.7 **文献标识码**:A

ON PREDICTION OF SPATIAL DISTRIBUTIONS OF SLOPE FAILURES AND ASSOCIATED GEO-HAZARDS

CHEN Xichang SHI Shengwei HU Shiyou
(*Institute of Exploration Technology of CAGS, Chengdu* 610081)

Abstract This paper argues that prediction capability of spatial distributions of geologic hazards on slopes is the prerequisite and the successful key for controlling, monitoring and warning of geologic hazards in mountainous regions. It then discusses the problems on the connotation and working procedures of the prediction of slope geologic hazard, failure types of the slopes, structural types of the slopes, environment condition and effect of human action. In the definition of slope geologic hazard, the prediction period is limited within the " time period of engineering guarantee quality". And the prerequisite is to keep the existing slope structures, the environment conditions, as well as the effect of foreseeable human actions no change. First the procedure is to predict slope stability, and then to predict the hazard danger for slopes with bad or potential instability. Classification of failure types of slopes should take scale at a time seriously and combine the formation cause and structural types of slope. This has the guiding meaning for geological investigation and research. To show control sense of the formation cause and structural type to stability, the paper provides new type systems of clastic rock and parametamorphic rock slopes in the Three Gorge Project in Yangtze River and western region of China, and simply compares the typical textural characteristics and stability for three types of soil slopes. About the quantified research on environment effect for slope sta-

* 收稿日期: 2006-08-04;收到修改稿日期:2006-11-20.
第一作者简介:陈喜昌(1939-),男,教授级高工,水文地质工程地质专业. Email:cxc@cgiet.com

维普资讯 http://www.cqvip.com

bility, the authors value natural mode observations and landslide inverse computation of many non - self - slopes. In addition the authors suggest to establish the definite geological modes based on the accurate field investigation, and to make quantification analysis of factors at a time and cell analysis using correlation principles of basic subjects, in order to expose more the mechanism of deformation and failure of slopes.

Key words Slope, Geological hazard, Spatial prediction

1 引 言

在丘陵山区,随着人类工程—经济活动的日益频繁与强烈,滑坡、崩塌和泥石流等斜坡地质灾害的数量与规模也呈快速上升的趋势,并已成为威胁人民生命财产安全和建设成败的关键问题之一。然而,对于斜坡地质灾害的空间预测这一前期性、基础性工作的重要性及其理论与方法问题,工程地质、岩土力学等部门及其相关学术界的认识尚不够统一,在有些理论与方法上还存在着明显的分歧。为推动斜坡地质灾害防治工作的健康快速发展,本文将重点讨论斜坡地质灾害的宏观预测理论与方法,既为现场快速鉴定提供失稳判据,也利于寻求进一步量化研究的正确途径和准确边界。

在我国"十一五"期间,国家将"加强地质调查评价"工作。按笔者理解,对斜坡地质灾害防治工作而言,首先就应当加快斜坡地质灾害的空间预测工作并大幅度提高其准确性。若这项工作没做好,防治方案的制定和防治措施的选择都根本无从谈起。近年来,一些地方出现的"盲目支护"、"过度支护"、"二次搬迁"以及监测网点布置不当和监测资料得不到合理解释等现象,便大多与空间预测不准确有关。如作为三峡库区移民搬迁试点的巴东县城,便因新城选址勘查过程中未能识别出古滑坡群而为新城建设埋下了重大隐患,增加了巨额的治坡费用[1]。但在同一年代,却也有令国内外同行称道的成功例子。如1985年6月12日凌晨,长江新滩发生2000~3000×10^4 m^3的特大型滑坡,新滩镇被全部摧毁,但由于进行了准确预报和及时撤离,全镇无一人伤亡。这次之所以能预报成功,首先就在于它的空间预测工作十分准确和具有说服力,故而使长达11a年的监测工作能在经费紧张、仪器不够先进和工作生活都非常艰苦的条件下坚持下来[2]。又如2004年8月12日,重庆南川市金佛山甄子崖的50×10^4 m^3危岩体轰然崩塌,但由于其下150户居民撤离及时而未造成任何人畜伤亡和财产损失。此次也是对灾害有了准确的空间预测之后,仅用经纬仪和人工变形测量手段即获得了监测预报的成功[3]。而不少拥有大量精密监测仪器的发达国家却从未取得如此业绩。由此可见,空间预测是做好整个地质灾害防治工作(包括充分发挥精密监测仪器作用)的必要前提。

斜坡是长期地质历史演化所形成,并处于受多种内外营力作用的地质环境之中。各处斜坡的地质结构条件和环境条件差异很大,十分复杂。因而,只有在准确的地质历史分析的基础上,进一步的量化研究才有获得重大成果的可能性。如果在调查评价的过程中只是简单地按照规范和技术要求去完成工作定额,则难以提出具有实用价值的防治对策和措施建议;甚至还可能得出错误结论,造成重大损失。

2 "空间预测"的内涵与程序

斜坡地质灾害的空间预测是对可能发生斜坡地质灾害的空间位置进行判断。而这里所要判断的斜坡地质灾害,则仅指在工程年代内保持现有斜坡结构与自然环境条件以及可预料的人类活动的影响下,因斜坡的变形破坏或破坏后脱离(原有)斜坡的岩土体的运动与堆积所造成的人员伤亡、财产损失或环境破坏的事件。所以,要预测斜坡地质灾害,首先便必须了解产生斜坡变形破坏的内在原因和外部条件,以便对斜坡可能产生的破坏形式、规模、影响范围及复发频率等等作出有地质依据的准确判断。这实际上就是常说的斜坡稳定性的评价预测工作。在有了斜坡稳定性的正确评价与预测之后,对于那些稳定性差和较差的坡段,还要结合斜坡变形破坏和失稳的可能影响范围内的自然环境条件和人类生活生产状况(包括人口数量和各类设施的位置、规模与重要性等等)才能对这些斜坡的变形破坏可造成的危害程度(危险度)进行预测。例如,发生在浅水河岸与深水库岸的同规模滑坡所造成的灾害是不相同的。河岸滑坡可能造成堵江之害,而库岸滑坡则可能导致涌浪之灾。低等级公路与高速公路边坡之相同大小落石的成灾几率、危害范围和危害程度也是不同的。低等级公路边坡落石现象可能危害不

维普资讯 http://www.cqvip.com

大,而高速公路或铁路边坡的单块落石便可酿成重大车祸。失稳斜坡下有无集中的居民点更是灾害预测工作时必须考虑的。所以,对不同的斜坡自然环境和人类活动状况,其灾害空间预测的方法也不相同。

3 斜坡破坏型式与稳定性预测

所有斜坡地质灾害均始于斜坡岩土体之变形破坏。然而,任何斜坡(包括岸坡与边坡),自形成之时起直至消亡,其形态、成分、结构和应力状态等均处于不断地变化之中。但绝非所有的变形破坏都会给人类造成威胁与灾难。因此,只有正确认识斜坡的破坏型式才能正确评价和预测斜坡的稳定性及其地质灾害发生的可能性,合理地开发与保护斜坡。譬如岩质斜坡的风化剥落这种破坏型式,便因其单次规模很小,一般不会直接威胁人类安全或造成直接经济损失。集中堆积的风化砂或粘土还可成为有用的建材矿[4]。而单次规模较大、且通常是急剧发生的岩质滑坡与崩塌,则极易造成灾害。所以,在作斜坡稳定性的定性评价预测时,其稳定性等级就是根据已经发生和可能发生的破坏型式及其几率来加以确定的。此外,对不同的破坏型式,其防治方法也要有所不同。这是一个需要首先讨论的问题。

目前国内外对斜坡破坏型式的分类甚多,但因各自的工作经验和认识事物的观点方法有别,其分类原则也不相同。有的学者把运动型式放在首位[5],有的强调造成破坏的应力性质[6],而另一些著名的工程地质学家则早已注意到岩性结构条件的控制作用[7~12]。由于不同成因与规模的破坏型式的岩土体可表现出一些相同的运动形式,而每次破坏的运动形式往往也并非一种,且对于"斜坡运动",尤其是大型和特大型斜坡破坏后的岩土体运动的过程,每位学者一生能直接观察和确切了解到的实例是不多的[13];至于斜坡破坏时的应力性质,在大多数调研场合,判别和测试也会有很多困难,更何况在整个变形破坏过程中,应力场也是随时空而不断变化的。故而降低了这些分类的可操作性和应用价值。然而,所有斜坡破坏的单次规模及该坡段的岩性结构特征与地质环境条件等涉及斜坡破坏成因的重大要素都是可以查明和量化研究的。笔者等根据大量调研资料,将岩质斜坡的基本破坏型式划分为剥落、落石、崩塌和滑坡4种。现对其成生条件略加说明,以供参考(表1)[14~15]。

表1 岩质斜坡的基本破坏型式与特征

Table 1 Basic failure types of the rocky slope

破坏型式	单次规模/m^3	斜坡结构特征	主要动力地质作用	破坏后的岩土运动形式	发生周期
剥落(风化剥落)	$<10^{-5}m^3$	在火成岩或泥、页岩等易风化岩体组成的缓坡表面,细微的原生节理、片理或劈理较发育。	风化剥蚀	坠落、滚动或滑动	经常
落石(扩离落石)	一般$<10m^3$,大者可达$100\sim1000m^3$	在不易风化的硬脆岩体组成的陡崖或陡坡岩体中,仅有裂隙而无外倾贯通面发育。	差异性风化,地下水压力,泥劈、石劈、冻胀、潜蚀等	滑移、坠落、滚动	多为1~5a
崩塌	一般$>1000m^3$,大者可$>10^8m^3$	在硬脆岩体组成的陡峻斜坡中,伴随着岩体的压裂与折断和构造裂隙的串通而新生成一向外陡倾的贯通面,此结构形成之瞬间,崩塌将立即发生。	溶蚀、冻胀、雪崩、侵蚀、地震、人工开挖爆破等	倾倒、滚动	一般>50a
滑坡	一般$>1000m^3$,大者可$>10^8m^3$	斜坡岩体中除裂隙外还具有向外缓倾且倾角略小于其综合内摩擦角的潜在贯通面,随着综合内摩擦角下降至小于贯通面倾角后,滑坡即可发生。	地下水、地震、人类活动等	滑动为主	一般>100a

注:贯通面——贯通性间断面(Penetrative discontinuities)之简称,系岩体中超裂隙系统之间断面,如层面、不整合面、断层或风化层(带)界面都可以发展成为贯通面。

剥落(spalling),即风化剥落(weathering - spalling)是由风化作用使斜坡表层物质成分与结构破坏成砂、土或碎屑脱落的一种破坏型式。单次规模极小,但却无坡不在,且其长期累积效果不可忽视。它既可是泥石流的主要物质来源,也可构成土质滑坡的重要组成部分。砂、泥岩相间的斜坡常因泥岩风

维普资讯 http://www.cqvip.com

化速度较快且边风化边剥落而导致上部砂岩落石成灾。

落石(rock dropping),亦称扩离落石(rock leaving - dropping)。有人将其称之为小崩塌(free falling),但它形成的结构条件与崩塌明显不同。它是仅限于(裂)隙间岩块在地下水、泥楔或差异性风化等作用下的向外滑移(扩离)与坠落,故而单次规模较小,然其分布却十分广泛。且在某些斜坡的有利位置,其堆积物经过长期积累可形成相当大的总体规模,常被误定为大型"古滑坡"或崩塌堆积。它的边缘新生滑坡则被作为"古滑坡"复活的证据,为此经常引起争议[16]。

崩塌(fall, rockfall)亦称岩崩或山崩(rock avalanches),与落石不同的是,它是沿着一个新生(通常是将原有多条裂隙串通)的,超裂隙系统的向外陡倾的贯通面(penetrative discontinuities)发生。此新生贯通面与坡面间所围限的全部岩体即为其单次规模,故较大。这一新生贯通面的形成多为下部人工挖掘或强烈侵蚀(局部地区受地震和雪崩作用)致使上部岩体进行应力调整,经压裂与折断部分岩体而将原有裂隙串通。当新生贯通面形成之瞬间,崩塌立即发生。

滑坡(landslids),与崩塌不同的是在它发生前即具有(潜在)向外缓倾的贯通面(如层面、不整合面、断层或风化层(带)界面),这里的"缓倾"是指贯通面倾角略低于综合内摩檫角而无绝对值限定。在各种环境因素的作用下,随着某一贯通面之综合内摩檫角逐渐降低到小于贯通面倾角,或前缘支撑条件发生重大改变时滑坡将会发生,该贯通面便成为滑面。

笔者在对破坏型式进行划分时之所以首先考虑了破坏的单次规模,并将其放在表 1 的首项。这是因为不同单次规模的斜坡破坏,其直接影响范围不同。同时,任何事物都存在着量与质之间的变化规律,斜坡破坏也不例外。如果不考虑单次规模,将可能把具有实质性差异的破坏型式混在一起,这对于斜坡稳定性评价、预测和灾害防治显然都是十分不利的。

此外,在野外调查中还会见到许多过渡型式和复合型式。一般说来,在对岩质斜坡总体稳定性进行分级评价时,把主要表现为剥落和落石破坏型式的坡段定为稳定性好或较好的坡段,而把以滑坡、崩塌为主的坡段定为稳定性差或较差的坡段。这也是进行稳定性预测的分级标准。

4 斜坡结构与稳定性预测

从上面的讨论已可看出,斜坡的破坏型式及其变形破坏机理都受到斜坡结构的控制。反之,要预测斜坡破坏及其可能造成的灾害,便应从能看见、可量测的斜坡结构的调查研究着手。所谓斜坡结构是指斜坡岩土体结构及其与坡形间的组合关系。由于这些岩土体都曾经过长期内、外营力的作用,故而所有斜坡都是由非均质各向异性的不连续体组成。没有断裂和孔隙的斜坡岩土体是不存在的。从以往的大量调查资料显示,正是这些斜坡岩土体内部结构及其与坡面的组合关系与斜坡的破坏型式及其发生几率有着非常明显的对应关系[17]。并且,这种对应关系还可以通过地质分析和力学计算来进行合理的解释[18,19]。所以在野外调查的基础上通过对斜坡结构类型的划分来建立对斜坡稳定性的评价预测系统,并通过再实践的检验修正而渐趋精确。这里将经过近年来长江三峡工程和西部大开发中的新资料修正的碎屑岩及副变质岩斜坡类型与稳定性的关系列出作为例证(表 2)。其中的"易崩角" φ_t 和"易滑角" φ_c 是主要根据多个非自体天然模型观测和滑坡反算资料获得的。φ_t 是崩塌发生时的新生贯通面倾角,φ_c 便是滑坡发生时滑面的综合内摩擦角。它已包含了各种外部影响要素在内而非单纯表征贯通面或滑面的岩土力学性质。

需要注意的是,表 2 所反映的只是无覆盖层条件下的岩质斜坡类型与稳定性的关系,在有覆盖层的情况下,其下伏岩质斜坡的稳定性必然要受到覆盖层的影响。土质斜坡是岩质斜坡破坏后的物质经过搬运和堆积(或沉积)形成的。它的结构特征和稳定性与其成因类型有着密切关系。例如,由岩质滑坡残体形成的土质斜坡,其内部结构(块径)相对比较均匀,若滑体尚未完全脱离原有滑床,在后缘加载时便极易"复活"。崩塌堆积形成的土质斜坡,虽然坡面倾角往往较大,但由于其内部结构是前粗后细且经过强烈挤压与充填的"反滤结构",前面的大块石堆积相当于反滤层前的排水挡墙,故其总体稳定性常常是相当不错的,如 1933 年四川叠溪地震时崩塌形成之阻断岷江的天然坝,至今已 70 多年,其总体稳定性仍然很好,并准备通过人工加固加高来扩大库容和发电。而落石堆积形成的土质斜坡,则具有前细后粗的结构特征,它不太怕后缘加载,但若因前缘开挖导致中上部积存的地下水外渗,便可造成

维普资讯 http://www.cqvip.com

后退式滑坡和泥石流等严重后果[16]。此外,还有冲积、洪积、冰川、冰水堆积和泥石流堆积等都各具不同的结构特征和稳定性,由此可见,正确划分与鉴别斜坡的结构类型和成因类型对于斜坡的稳定性预测是多么重要。同时,通过对各种成因结构类型保持稳定的边界条件(或失稳判据)的量化研究来建立起斜坡稳定性的快速评价预测系统。

表 2 碎屑岩及副变质岩斜坡类型与稳定性

Table 2 Types and stabilities of clastic rocks and parametamorphic rocks slopes

代号	斜坡类型	主要破坏型式	稳定性
Ⅱ_1	平缓层状斜坡($I<10°$)	剥落,落石	好
Ⅱ_2	横向坡		
Ⅱ_2^1	缓倾贯通面横向坡($I<\varphi_c$)	剥落,落石,	好
Ⅱ_2^2	陡倾贯通面横向坡($I>\varphi_c$)	落石,局部可形成小崩滑	较好-较差
Ⅱ_3	顺向坡		
Ⅱ_3^1	伏倾坡($\frac{S}{I}<1;I<\varphi_t$)	剥落及少量落石	好
Ⅱ_3^2	陡立伏倾坡($\frac{S}{I}<1;I<\varphi_t$)	崩塌	差
Ⅱ_3^3	缓倾角等倾坡($\frac{S}{I}\approx1;I<\varphi_c$)	落石,剥落	较好
Ⅱ_3^4	陡倾角等倾坡($\frac{S}{I}\approx1;I>\varphi_c$)	崩滑(溃曲破坏)	较差
Ⅱ_3^5	缓倾角超倾坡($\frac{S}{I}>1;I<\varphi_c$)	落石,剥落	较好
Ⅱ_3^6	陡倾角超倾坡($\frac{S}{I}>1;I>\varphi_c$)	滑坡	差
Ⅱ_3^7	椅状顺向坡(上部$\frac{S}{I}<1$;下部$\frac{S}{I}>1$)	落石,滑坡	较好-较差
Ⅱ_4	反向坡		
Ⅱ_4^1	完整性好,层面倾角较缓的反向坡($I<45°$)	剥落,落石	好
Ⅱ_4^2	软弱底座或层面倾角较陡的反向坡($I>45°$)	落石,剥落	较好
Ⅱ_5	斜向坡		
Ⅱ_5^1	趋优结构斜向坡*(接近Ⅱ_2、Ⅱ_3^1、Ⅱ_3^3、Ⅱ_3^5、Ⅱ_4^1) $I>\varphi_c$	剥落,落石	好
	$I<\varphi_c$	落石,风化剥落	较好
Ⅱ_5^2	趋劣结构斜向坡(接近Ⅱ_2^2、Ⅱ_3^4、Ⅱ_3^6、Ⅱ_4^2、Ⅱ_6^1、Ⅱ_6^2) $\varphi_c<I<45°$	小崩滑,落石	较差
	$I>45°$	小-中型崩滑发育	差
Ⅱ_6	特殊结构斜坡		
Ⅱ_6^1	裂隙密集带斜坡	落石,小滑坡	较差
Ⅱ_6^2	断层发育带斜坡	滑坡,崩塌	差

注:S. 坡角;I. 岩层倾角;φ_t. 易崩角;φ_c. 易滑角。

5 斜坡的环境条件与稳定性预测

斜坡环境条件也是一个非常复杂的问题。因其包含了从气象、水文到人类活动等诸多方面的影响因素,而且因地而异,因时而异,需要具体分析与研究[20,21]。许多学者都注意到暴雨可以诱发滑坡,有人甚至仅以暴雨量来预报滑坡。但大量事实证明这种作法相当不准确[22]。因为即便是在同一暴雨区内,也并非到处都在发生滑坡,所以首先需要弄清楚的是暴雨在什么地方可以诱发滑坡,而在什么地方则不会诱发滑坡?暴雨是通过降到地面成为面流后对斜坡前缘进行集中冲刷而诱发滑坡呢?还是渗入地下后,改变了潜在贯通面的性质和增大地下水的动静水压力甚至造成渗透破坏而导致滑坡?或者是由多种因素的综合作用造成的等等。这些都需要结合斜坡的地质结构进行分门别类地定性和量化研究之后才能得到规律性的认识。换言之,规律性的认识须通过大量的调查研究方能达到。

对碎屑岩顺向坡所进行的小类划分中所使用的易滑角(φ_c),主要是以多个非自体天然模型观测和滑坡反算(而不是以本坡段的"变形"观测反算)来确定的,它实质上已包含了环境因素的影响。实践证明,这种量化研究比之于靠样品试验(包括"原位试验")和室内模型试验再加上岩土力学公式和数学推演的办法更加简便实用。但是,它尚未根据野外调查所提供的启示进行更深入的机理方面的研究,只能算是斜坡稳定性空间预测问题量化研究的过渡性办法。所以,还需继续应用地质学(尤其是工程地质力学)和物理学(尤其是流体力学)的相关原理,对导致斜坡破坏的环境条件进行单因素的量化分析和单元分析,深入探索斜坡的变形破坏机理。但无论是宏观的定性分析或是相对微观的单元量化分析,均须以现场地质条件的准确判断为前提。须知,"工程地质数字模拟不是简单的'运算'过程,…它的可靠性和准确性在很大程度上取决于对地质原型认识的正确性"[23~25]。现在国内外有相当数量的斜坡稳定性定量评价预测方法之所以经不起实践检验,不是它的数学推导和运算有误而往往是由于对地质规律的认识出了问题。所以,在进行环境因素影响的量化分析前,一定要把斜坡结构等边界条件和变化规律调查清楚。

维普资讯 http://www.cqvip.com

6 关于人类活动影响

虽然将人类工程-经济活动纳入影响斜坡稳定性的"环境条件"之中,但它毕竟不属于自然条件并有其完全不同的特性。首先,人类活动对所有斜坡稳定性的影响都可以是双向的,而且随着科技发展和人类行为的理性化,正面影响将会不断提高。第二,今天人类活动对斜坡稳定性的影响的强度已非常之大,他不但可以改变斜坡的自然环境条件,而且可以改变斜坡的结构类型,并制造出任何一种斜坡破坏型式。当今不少大型崩塌、滑坡和泥石流都与人类活动有关,甚至是其形成的主要因素。如1980年6月的湖北盐池河崩塌,1988年元月四川巫溪的中阳村崩塌和1988年5月四川万源的白沙崩塌,以及1994年4月的乌江鸡冠岭崩塌,都是发生在原本稳定性较好的平缓岩层斜坡和反向坡上,却因其下之采矿活动而导致新生贯通面的形成和大型岩崩的发生。由于公路、铁路或露天矿的边坡放炮开挖而将稳定性较好的等倾坡或稳定性很好的伏倾坡改造成稳定性极差的超倾坡,继而引起崩塌或滑坡的例子更是屡见不鲜。

关于人类活动对边坡稳定性的影响问题早已引起工程界和岩土力学界的高度重视并进行了较多的研究。但鉴于问题本身的复杂性和研究工作往往囿于岩土力学计算而在与斜坡地质结构及地质环境的结合还比较薄弱,故其成果一般尚不够理想。所以,对此问题的研究,工程地质界应更加积极的参与和发挥更多的作用。

7 结 语

斜坡地质灾害的空间预测是一个相当复杂的问题,需要借助于许多基础学科(如前面所说的地质学和物理学等等)的理论与方法,对斜坡发育史,斜坡结构和斜坡地质环境的正确认识仍然是空间预测成功的关键,量化研究也应从这3个基础条件开始,否则单靠数学模拟和物理模型试验等等方法上的改进都无法获得准确的空间预测成果。

致 谢 衷心感谢刘广润院士、孙广忠教授和张倬元教授对本文初稿进行了审阅并提出了非常重要的修改意见。

参 考 文 献

[1] 钟立勋,殷跃平,唐灿. 三峡库区拟迁建城市巴东县新城址环境地质研究[A]. 地质矿产部环境地质研究所论文集(1)[C]. 北京:地质出版社,1992,41~53.
Zhong Lixun, Yin Yueping, Tang Can. Environmental geologic study of Badong new city in reservoir area of the Three Gorge Project. Bulletin of the Institute of Environmental Geology MGMR (Volume 1). Beijing: Geologic Press, 1992, 41~53.

[2] 陆业海,等. 新滩滑坡征兆及其成功的监测预报[A]. 长江西陵峡新滩岩崩区地质灾害研究论文集[C]. 武汉:武汉工业大学出版社,1995,1~9.
Lu Yehai, et al.. Xintan landslide's precursor and successful prediction. Study on Geological Hazard in Xintan Rockfall and landslide Area of Xiling Gorge in Yangtze River. Wuhan: Wuhan Industrial University Press, 1995,1~9.

[3] 任幼蓉,张军,陈鹏. 重庆市金佛山甄子岩危岩的动态监测与预警预报[A]. 地质灾害调查与监测技术方法论文集[C]. 北京:中国大地出版社,2005,213~218.
Ren Yourong, Zhang Jun, Chen Peng. Monitoring and forecasting of Zhenziyan rockfall in Chongqing Jinfo mountain. The Memoir of Investigating and Monitoring Technology Methods on Geological Hazard. Beijing: Chinese Dadi Press, 2005, 213~218.

[4] T. Y. Irfan. Characterization of weathered volcanic rocks in Hong Kong[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, The Geological Society of London,1999,**32**(4):317~348.

[5] Varnes, D. J. Slope movements types and processes[C]. In: R. L. Schuster &R. J. Krixed (eds) Landslides Analysis and Control [M]. National Academy of Sciences Washington, D. C.,1978, 8~39.

[6] 张咸恭,王思敬,张倬元,等. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000,18~191.
Zhang Xiangong, Wang Sijing, Zhang Zhuoyuan, et al.. Chinese engineering geology. Beijing: Science Press, 2000,189~191.

[7] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社,1979,290~295.
Gu Dezhen. Bases of engineering geologic mechanics of the rock mass. Beijing: Science Press, 1997, 290~295.

[8] 刘广润,等. 山区铁路工程地质[M]. 北京:地质出版社,1977.
Liu Guangrun, et al.. Railway engineering geology in mountainous Area. Beijing: Geologic Press, 1977.

[9] 刘广润,等. 长江三峡水库地区斜坡稳定性研究[A]. 西南、西北崩滑灾害山区斜坡稳定性研究[M]. 北京:地质出版社,1986.
Liu Guangrun, et al.. Study of slope stability in reservoir area of the Three Gorge in Yangtze River. Study of slope stability in fall and landslide mountainous area of southwest and northwest China. Beijing: Geologic Press, 1996.

[10] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京:科学出版社,1988.
Sun Guangzhong, Un Yi. Mechanics of rock mass structures. Beijing: Science Press, 1988.

维普资讯 http://www.cqvip.com

[11] D. M. Cruden. Rock slope movements in the Canadian Rockies. Proceedings of the international symposium on engineering geological environment in mountainous areas. Geological Society of China, 1988.

[12] 晏同珍.水文工程地质与环境保护[M].武汉:中国地质大学出版社,1994.
Yan Tongzhen. Hydro - engineering and enviroment protection. Wuhan: Geologic University Press of China,1994.

[13] 陈喜昌,等.跨越"斜坡运动"[J].中国地质灾害与防治学报,2005,**16**(50):82~86.
Chen Xichang, et al.. Beyond "slope movement". The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005,**16**(50): 82~86.

[14] 陈喜昌.川东北地区河谷岸坡破坏型式与分布规律[J].西南地质科技情报,1989,**54**(4): 7~11.
Chen Xichang. Failure types and distribution law of river bank - slope in northeast of Sichuan province. Geologic Science and Tech Information of Southwest China, 1989,**54**(4): 7~11.

[15] 陈喜昌等.长江三峡工程库岸类型与稳定性[M].成都:四川科学技术出版社,1993.
Chen Xichang, et al. Type and stability of the reservoir banks of the Three Gorge Project in Yangtze River. Chengdu: Sichuan Technology and Science Press, 1993.

[16] 陈喜昌等.落石堆积的结构特征与斜坡破坏型式之转换[J].中国地质灾害与防治学报,2004,**15**(1): 5~9.
Chen Xichang, et al. Structural characteristics of rock - drop accumulations and transformation type of slopes failure. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004,**15**(1): 5~9.

[17] 陈喜昌.河谷岸坡类型的划分原则与方法[J].西南地质科技情报,1989,**53**(2): 25~30.
Chen Xichang. Classification principle and method of river bank - slopes. Geologic Science and Tech Information of Southwest China, 1989,**53**(2): 25~30.

[18] D. M. Cruden. Thresholds for catastrophic instabilities in sedimentary rock slopes, some examples from the Canadian Rockies [C]. Gebrüder Borntrager, Berlin, Stuttgart, 1988.

[19] D. M. Cruden. The limits to common toppling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**(2): 737~742.

[20] Michel J. Crozir. Landslides Causes, consequences and environment [M]. Printed and bound in Gerent Britain by Biddies ltd, Guildford and King's Lynn,1986.

[21] Ngecu W M, Lchang D W. The environmental impact of landslides on the population living on the eastern foot slopes of the Aberdare ranges in Kenya: a case study of Maringa village landslide [J]. Environmental Geology, 1999, **38**(3): 259~264.

[22] 伍法权.三峡工程库区影响135m水位蓄水的滑坡地质灾害治理工程及若干技术问题[J].岩土工程界,2002,**5**(6):15~16.
Wu Faquan. Control Projects of landslide hazard with relation to storing water up 135m level and some technical problems in reservoir area of the Three Gorge. Geotechnical Engineering Circle, 2002,**5**(6): 15~16.

[23] 晏鄂川,唐辉明.工程岩体稳定性评价与利用[M].武汉:中国地质大学出版社,2002,11~12.
Yan Echan, Tang Huiming. Stability evaluation and utilization of engineering rock mass. Wuhan: Geologic University Press of China, 2002,11~12.

[24] 殷跃平.三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J].工程地质学报,2005,**13**(2):145~152.
Yin Yueping. Human - cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges Reservoir. Journal of Engineering Geology, 2005,**13**(2):145~152.

[25] 陈剑,李晓,杨志法.三峡库区滑坡的时空分布特征与成因探讨[J].工程地质学报,2005,**13**(3):305~309.
Chen Jian, Li Xiao, Yang Zhifa. On the distribution and mechanism of landslides in the Three Gorges reservoir area. Journal of Engineering Geology, 2005,**13**(3):305~309.