

斜坡稳定: 方法论

王建锋

(中国科学院力学研究所非线性连续介质力学开放研究实验室, 北京 100080)

摘要 据斜坡及滑坡学科领域国内外研究现状及工程实践, 总结归纳了斜坡稳定研究中应遵循的若干原则, 其中包括了工程地质建模、动态系统、稳定性评价的相对性和绝对性, 以及模型的精确性与可行性等问题。

关键词 斜坡 随机模拟 方法论 稳定

Abstract Several principles on slope or landslide stability study are summarized according to current research situation and engineering experience from home and abroad. The paper is aimed at the application of methodology. It outlines some problems in landslide stability analysis, such as engineering geology model, dynamical system, relative absolute ness in ness and stability assessment, and accuracy and feasibility of model.

Key words slope, random simulation, methodology, stability

1 引言

方法论是各门类学科不可缺的高层次研究内容, 不断总结经验, 并上升为理论, 最终以理论指导实践是一切技术学科遵循的研究思路, 斜坡稳定也不例外。一般认为, 斜坡是指地壳表层由各类地质作用及人类工

程经济活动, 所形成一切具有露天侧向临空面的地质体, 它是人类生存和工程活动最基本的自然地质环境, 在漫长的地质历史时期, 由于各类地质作用包括风化作用、河流作用, 斜坡岩土体依附于其内在软弱结构面(带), 在以重力为主作用下, 失去原有力学平衡而产生以水平位移为主的顺坡移动现象即形成所谓的自然滑坡(natural landslide)。

国家自然科学基金项目和长委会综合勘测局项目联合资助、中国博士后科学基金项目

另一方面, 由于地球上可观的人口增长速度和密度, 人类工程经济活动已成为地球表层系统中重要的

曲线上 $(h_i, 1)$ 点上方存在一突变点 (h_a, K_a) , h_a 即为预警水头值。

对(8)式关于 h_w 求二阶导数, 令所得结果的分子部分为零并化简后得方程:

$$784.1207145h_w^3 - 121796.4376h_w^2 - 9325850.43h_w + 609062866.7 = 0 \quad (9)$$

解之得有意义的实根为: $h_w = 54$, 即 $h_a = 54$ (m)。代入(8)式中得: $K_a = 1.042$ 。以往的位移监测资料显示: 当 h_w 达到53m左右时坡体蠕变速率发生突变。

随水头值的增大稳定性系数的减小表现为加速过程。

(2) 在 $K-h_w$ 曲线上存在一个突变点 (h_a, K_a) , 该点所对应的水头值引起岩坡内部应力状态的急剧变化, 可作为岩坡失稳的预警水头用于滑坡的预测预报。

(3) 当 $K = 1$ 时的水头值 h_i 是岩坡处于极限平衡状态时的水头值, 同样可用于滑坡的预测预报。

本文推导的 K 与 h_w 的关系是建立在平面滑动破坏的概化模型基础之上的, 对于其它类型的破坏可以采用相似的方法。

3 结语

水对岩体结构的作用是滑坡研究的基本理论和应用课题, 应当确立以水—优势面作用为基础的岩坡稳定性分析评价思想。从对顺层岩坡中水对优势面的力学作用的研究和对长江三峡链子崖“五万方”危岩体的稳定性分析中可得出以下几点认识:

(1) 水头值对岩坡稳定性的影响是非线性的关系,

参考文献

- 1 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践. 工程地质学报, Vol 4, No. 4, 1998
- 2 孔宪立. 岩体工程地质及其灾害. 同济大学出版社, 1993
- 3 殷跃平等. 地质工程设计支持系统与链子崖锚固设计. 地质出版社, 1995 (1998年5月收稿)

“地质营力”，这一“地质营力”正以前所未有的速度激发甚或“制造”自然斜坡的失稳破坏，即人工滑坡（artificial landslide）。无论何类斜坡运动现象，从现有科学与技术发展水平来看，对它的研究和控制都不是容易的事情，它有着复杂的形成、长大、衰亡等类似生命的过程，并且这一过程是一复杂的开放系统，有着相当长的时间历程。因此，可以说斜坡稳定研究实质应属多学科的综合研究领域。仅从力学角度而言，它就几乎涉及力学的每一个分枝学科。由于工程建设的推动，这方面的研究成为近年来最为活跃领域之一，尤其表现在工程地质与力学交叉方面。基于这样一些特点，斜坡稳定研究必然要求吸收相关各学科研究方法，并且同时在实践中形成自己的思想方法体系。

从方法论出发，对滑坡和板块构造进行比较，可以认为板块为巨大范围内的岩石滑坡^[1]，两者都是由于物质分布的非均一性和重力的不稳定性导致了位移，移动的相似基础是软弱“导向面”。对岩石滑坡而言即为临界滑面（critical slip surface）或不连续面（discontinuity），而对板块则为低粘滞度的岩流圈，而且在滑坡和海底扩张中流体压力都很重要。近年来星球滑坡的发现^[2,3]、大型海底滑坡研究、沿海、湖岸边的敏感性粘土滑坡研究^[4]等，都促使了比较滑坡学的发展，因此方法论的研究也有着重要的基础理论意义。

2 工程地质：基础

斜坡稳定性评价程序一般为：地质模型—数学力学模型—计算结果分析解释及工程应用。在这一过程中，任一环节导入误差，都可能使得所获结论与实际有某种偏离，当这种偏离过大时极有可能导致结论性错误，最终造成决策失误；或因稳定性估计过低造成不必要的经济浪费，或因稳定性估计过高造成灾害，威胁人类生命财产安全。因此必须从斜坡稳定性评价工作的初始阶段就尽可能避免误差引入，并将这一思想贯彻始终，使每一阶段的认识、分析都尽可能符合实际。

要获得逼真的稳定性评价结论，首要的是建立正确的地质模型，这已是共识。但如何能够建立正确的地质模型则是极为困难的事情。这也是多年来各国工程地质学家致力于解决的课题。究其困难原因，一是自然界斜坡地质体本身组成物质的复杂，这种复杂包括了其成因复杂、成分复杂、物质分布复杂、结构复杂等，其复杂程度是一般力学材料所不能比拟的；二是作用于斜坡地质体因素的复杂多变性和时效性，时效性的本质也许可用微观流变特征（micro-rheological characteristics）加以解释^[5]，这种复杂多变性包括了各类动力因素本身动态过程的复杂性、分布复杂性和作

用于斜坡地质体的时间效应复杂性等。这两类复杂性是绝对的，但在一定时间域内考察时，前者又具有一定的相对性，后者则始终表现出绝对复杂多变性，仅当时间域趋于微量时，才可把后者视为有一定相对性的作用即定常系统。因此这类复杂性的考察必须与所考虑问题的时、空域结合起来。

在探索斜坡地质体复杂性及作用因素效应复杂性时，必须具有地质学观点。当所考虑的问题与工程建设相联系时，则需具有工程地质学观点；当所考察的问题与人类生存环境及生命安全相联系时，则需具有环境地质学观点。这是因为我们所研究的对象首先是一地质体。一般地，哪里有斜坡，哪里就有斜坡移动^[6]，亦即意味着哪里有斜坡地质体，哪里就有斜坡地质体移动，哪里就有斜坡地质作用。从地质学观点分析斜坡地质体成因、组合、性质及发展演化规律这一特点，正是工程地质研究者不同于其它领域研究的一个本质特色。这一独具特色的研究思想和工作方法要求在研究斜坡稳定性问题时，首先要从最基本的工程地质测绘工作开始，并且最好是对已有的滑坡地区进行工程地质测绘，从宏观上把握斜坡稳定性的基本规律，基于此制定战略性的宏观控制措施。这一阶段的研究所带来的实际效益通常是显著的。其次逐步过渡到场地范围斜坡稳定性研究，以及单个具体工程滑坡研究上来。这种强调分层由宏观到具体工程的系统工程地质—岩土工程—地质工程研究观点，是当今该领域研究方法特色的具体体现。

在场地范围及单个具体工程滑坡稳定性研究中，地质模型的建立有几个关键问题必须处理妥当：斜坡地质体组成、结构特征，临界滑动剖面、临界滑动面空间形状和位置等边界条件，斜坡变形破坏机制分析，计算参数的取值等。这些问题认识深刻与否直接影响斜坡稳定性能否正确评价，并且其解决问题的重要基础仍然是基础的地质工作。R. R. Vang-han(1994)曾指出，地质体运动真实行为的理解比精确计算更为重要^[7]。

强调地质基础工作，不意味着可以忽视定量研究方法的意义。恰恰相反，定量的数学力学正是准确地、深刻地认识和评价斜坡稳定性的极为重要的工具，是建立尽可能符合实际的计算模型获得符合实际的结论的桥梁。如通过严格的滑动带强度参数反演理论，在地质分析基础上可以获得较为真实正确的，而实际工作中又不易确定的滑动带抗剪强度参数；通过严格的滑动面随机模拟技术理论，在地质分析基础上可以获得复杂因素（荷载）作用下的较接近实际，而大多数现有勘探方法又不易确定的潜在临界滑动面三维空间分

布;通过严格的斜坡稳定破坏概率理论,在地质分析基础上可以获得多因素概率作用下的较接近自然斜坡负荷状况,而仅靠地质分析难以确定的斜坡稳定性动态发展趋势。另一方面从斜坡运动过程来看,它仍然是一种力学行为,因此定量数学力学研究方法在斜坡稳定研究中是极为重要的,它也是斜坡稳定性的一种描述,但这种描述必须与地质模型的系统研究相结合才具生命力。这方面的研究已出现不少新的发展^[8]。然而必须看到这种结合的完美体现则是非常不易的,还需要一个漫长的过程。

3 斜坡稳定:动态系统

系统是一个由相互区别、相互作用各部分有机地联结在一起,为同一目的完成某种功能的集合体,而斜坡系统系指地壳表层范围内岩石圈、水圈、生物圈和大气圈四部分相互作用界面。在这个界面上由于多种因素长期复杂的物理化学作用,斜坡系统要素组成、演化呈现复杂多样的图像。

受地球形成、演化历史规律控制,在整个地质历史时期,处于全球表层的斜坡系统呈现相应的规律演化:空间上,斜坡系统剧动式演化具有丛集性,即部分区域活动、部分区域平稳的空间选择性;时间上,斜坡系统剧动式演化具有非规则周期性,即活动幕与平稳幕相间出现的时间韵律性。在其整个演化过程中,组成斜坡系统的各圈、层所起作用有主有次,并且主次作用地位可随时间发生互相交替;各圈、层的不同组合,形成具有不同特征的斜坡系统;同时,由于四大圈的层次性,斜坡失稳乃至灾害就具有全球性、区域性、地带性分布规律。目前UNESCO组织进行的世界滑坡登录工作及其它若干重大国际地球科学研究计划,有望从更高层次上揭示全球性滑坡规律及与其它全球动力学现象关系。

系统的界限一般是指该系统的范围,它规定了形成某一特定动态行为所应包含的最小数量的单元。界限内为系统本身,而界限外则为与系统有关的环境。在工程实践中,斜坡系统总是与斜坡形成、发展、演化、消亡联系在一起。斜坡的演化“行为”由斜坡系统产生,由斜坡系统内部诸要素单元相互作用决定,这些相互作用单元如易滑动地层、易滑动构造、易滑动水文地质事件等都包含于规定的斜坡系统范围的界限内。在此界限范围之外即可认为是环境。它的范围是更为广阔的四圈层,与斜坡系统发生着物质能量交换,但通常仅涉及相关的局部环境。斜坡系统的演化行为特征不但取决于其内部结构,更主要地取决于内部结构对环境变化的反馈机制。因此在明确斜坡系统内部结构之后,也

必须对与系统反馈机制密切相关的斜坡环境因素加以深入研究。其中前者取决于斜坡易滑动结构面的确定及其演化;后者取决于易滑动机制(easy-sliding mechanism)的确定及其转化。当两者共同参与系统目标研究时,其间界限并不截然分离,因此可以将其作为易滑动环境系统统一加以研究,必要时也可分别考察之。这种认识论观点本质上强调了系统、整体的哲学观,联系、发展、运动哲学观,顺应、协调的哲学观^[9,10]。

如果进一步从系统动力学考察斜坡环境系统,可以发现,由于其剧动式演化的空间选择性及时间韵律性,斜坡环境系统类似于地槽、地台学说:有易失稳(或称易滑动、易滑坡等)环境系统与平稳(或称为非易滑动、非易滑坡等)环境系统之分。前者因与人类工程、经济活动密切,成为环境地质学、工程地质学研究的主要对象之一。对它的深入研究逐渐发展成为滑坡学科体系^[6]。地质历史时期尤其是近期地质历史重大地质事件研究表明,在易滑动斜坡环境系统中,通常易于发生规模宏大、现象丰富、影响甚深的地质事件,如地质历史时期的大型重力滑动构造、地史滑坡(fossil landslide)、大型推覆体及震积岩、浊积岩、翻卷层理等沉积现象;以及近期地质历史时期,尤其是在人类工程经济活动这种广义上速度快、规模大的“地质作用”下,或反复周期发生的崩塌、滑坡、泥石流、侧向扩展等,或突发性的大型灾难滑塌事件。并且易滑动斜坡环境系统还有几个突出的宏观特征:易滑性,即其内部结构与外部环境存在使系统恶化的不稳定组合关系。丛集性,即易失稳斜坡系统分布严格受四大圈组合特征控制,呈现空间上明显丛集性不连续分布。层次性,即呈现出空间上的层次性,时间上非严格规则的周期性。转换性,即其在内部结构调整及外部环境作用下,尤其是人工干预下可能变为平稳的斜坡环境系统。灾害性,即由于易滑斜坡环境系统与生物圈,尤其是人类社会-经济活动直接发生联系,因而易滑斜坡系统恶化演化一般将产生严重灾害。

在系统动力学看来,广义滑坡可归源于众多非线性因素作用,其结果是往往表现出高阶次复杂的时变系统(time varying system)特征^[11]。许多学者已经证明,斜坡稳定性系数处于不断变化之中。斜坡的稳态本质上是一种概率过程。斜坡稳定存在不确定性,并且这种不确定性主要包括物理不确定性、统计不确定性和模型不确定性。因此在斜坡稳定性研究中,必须从传统的确定论模式走向确定性与随机性相互补充和结合的思维模式及动态研究途径上来。

斜坡稳定是一动态过程的系统论观点,也是系统工程地质学的认识论。一个斜坡失稳,乃是它过去历史

演化的结果,而且目前的动态还会在未来继续发展,并产生新的结果。这也许为遍历性定律(ergodic theorem)控制。对斜坡动态演化这一客观事件研究受二方面随机性影响:一是它的演化受控于各种环境因素,如降雨量及其季节变化,而这些因素都是随机现象;二是人们对斜坡静、动态规律的认识也是随机的。例如人们对一个地质体的认识从概率现象开始,而认识程度则取决于所积累的现象的丰度,从概率论观点来看,就是概率变量与均值间的关系;再如客观事件同人们对它的认识之间总有差异,对同一事件的认识也会因人而异,但所有人的认识共同点就是人们对事件认识中的基本点,即相当于概率论中的均值概念,而分歧点相当于偏离均值的程度。因此作用因素的随机性和人们认识中的随机性,决定了对斜坡发展演化过程的研究,必然要求用动力学和随机理论分析问题、解决问题。这一观点进一步阐释可以由目前正在研究中的三峡库区崩滑体稳定分析方法说明^[9]。

在传统的确定论分析方法中,将影响斜坡稳定实际上是随机变量的所有作用和影响因素均看做是已知的,所以它必然要产生一个确定性结果,不可能有第二个结果。但是所谓的确定性结果仅仅是针对数学力学计算模型而言的,并不意味着自然界客观存在着确定性事件。这样便产生了在稳定分析中如何考虑随机成分的问题,考虑了随机成分影响,即相当于考虑了确定论中稳定性系数 $k_s > 1$ 的把握性问题,亦即可靠度分析。这实际上是静态系统的概率分析,主要是通过研究边界条件与计算参数选择中的随机性,由此得到 k_s 的空间可靠度,最终以总体稳定性评价代替点稳定性评价,克服传统确定性分析点估计的局限性。

这就是研究斜坡稳定时所采取的思维方法之二。

4 稳定性评价:相对性与绝对性

因斜坡稳定是一概率过程,受控于自然界各种作用因素,同时人们对斜坡系统本身的认识及对环境中主控因素判断上还存在片面性与非完整性。因此在斜坡稳定性评价中存在如何考虑这两类主观随机成分问题。目前发展起来的基于随机仿真模拟的破坏概率方法也许能够发挥作用^[12];然而也必须认识到由于自然斜坡环境系统演进的复杂性,目前人们所进行的稳定性评价结果还远不能够达到真正符合实际。

有的学者指出:大部分已经滑移过的和呈现近期滑移迹象的自然边坡,很难找到完全符合数学模型的完整的滑移面,而多数斜坡的失稳破坏并没有统一的滑移面。长江三峡的新滩滑坡就是其中一例:在滑坡发生后曾布了不少钻孔和竖井,但仍然找不到滑移面究

竟在哪里^[9]。再如计算参数的确定迄今仍是公认的难题,参与稳定计算的各随机变量的概率特征迄今仍未能很好确定,如此等等。其结果是稳定性评价结果不可能达到完全符合实际斜坡的稳定性状况,如计算的稳定性系数为1.5,也许真值为1.8或2.0。这就是稳定性评价结果的“相对性”。但这种“相对性”必须在总体上符合斜坡稳定的三大状态:稳定、临界稳定、不稳定,否则这种相对性就失去其存在的意义。

由于斜坡稳定性评价的相对性,就否认斜坡稳定性评价结果的意义也是不可取的。在大多数情况下,不但需要了解这种相对性,即斜坡或已有人工边坡的稳定性状况,而且更需要在此基础上预测目前处于稳定状况的斜坡在未来附加荷载作用下的稳定性发展变化趋势。如果相对性评价结果可靠,那么在此基础上所做的预测,只要参与计算的外荷载作用情况符合实际,计算方法得当,参数选取合理等等,就一定具有较高可信度,可供工程设计使用。这种情况下的预测结果的正确性是具有“绝对性”的。水库区古滑坡目前稳定性状况的相对性及蓄水后稳定性状变化的绝对性评价就是基于这样的辩证认识。

这就是研究斜坡稳定时应采取的思维方法之三。

5 应用:哲学思考

斜坡环境系统是一复杂的静、动态系统,斜坡稳定是一系统工程稳定问题,这一特点决定了课题研究难度之大。在以滑坡现象开始所进行的斜坡稳定研究的近100年历史中,先驱们进行了艰苦细致的理论探索,创立了斜坡稳定性的基本理论,尤其是创立了滑坡学科,为近100年社会历史进程经济快速发展尽到了学科自身的历史作用。但是由于这一环境系统的复杂性,斜坡稳定理论研究的确不是易事。可喜的是,近年来随着日益充分的国际交流和学科交叉以及生产实际的迫切需要,斜坡稳定理论研究得到了蓬勃发展。例如断裂力学方法^[13,14]、耗散结构理论、神经网络方法、人工智能专家系统方法、随机模拟理论^[12,15]、大变形有限元方法^[8,16]及动静分析方法^[17-21]等在斜坡稳定研究领域都取得了一系列成就,对减轻斜坡灾害起到了明显作用。然而也必须看到各种理论探索都只是对实际斜坡环境系统发展演化的一个断面或侧面描述,也还有待进一步发展完善。其中难点仍在于地质体的复杂性。

在处理复杂斜坡地质体时,精确性和可行性之间是存在着矛盾的,这可由“精确方法与逻辑悖论原理”得到证明^[21]。根据这一原理,科学的方法应当是精确性和可行性之综合最优的方法。任何一种方法结果的

精确性常常以方法的复杂性为代价,一种方法精确到难以实际应用的程度,便是无用的东西。因此科学的方法首先应当是能够真实反映对象真实情形的方法。精确数学假定:精确性和有意义性总是一致的,越精确就越有意义。然而对于具有复杂性、灰色性、混沌性的斜坡地质体来说,把复杂事物人为精确化,势必降低所用方法的有意义性,达到一定程度,就将变为理论上十分漂亮,实际上毫无用处的东西。科学技术发展的实践证明,精确性和有意义的统一是有条件的、相对的,越精确不一定就越好。同时,斜坡稳定性理论探索的目的性是非常强的,就是要为工程建设服务、减灾服务,客观现实的快速工程建设也要求研究人员和工程师快速准确并以简明表达方式提供对相关问题的研究计算结果。因此理论上、客观上都要求我们所发展的理论技术方法方便于实际应用;并且为保证工程建设及减灾过程中的经济性,也必须具有优化的观点,即斜坡稳定性评价结果要能为优化设计服务。

这就是研究斜坡稳定时所应采取的思维方法之四。

6 结语

本文侧重于斜坡稳定研究中若干方法论的归纳,未涉及具体理论技术及斜坡变形破坏过程的动态力学方程及其数值仿真技术。而后者将是今后研究工作中极为重要的方向,有待总结。有关动态过程的研究思想观点,可参阅文献^[9, 10, 13, 14, 17~ 21]。须加注意,在斜坡稳定性力学建模计算过程中,即使最简单的实用模型其实现技术也是极为复杂的,故此处不予详述。近 20 年实践证明,斜坡及滑坡学推动了诸多学科,尤其如数值仿真、非连续介质力学、固液耦合等相关学科的发展,并在多学科相关渗透基础上日趋完善。这一趋势仍将是未来的主流。

参考文献

- Jacoby W R. Role of gravity in plate tectonics, *Rock & A valanches* 1978, 1: 707~ 727
- Lucchitta B K. A Large landslide on Mars. *Geol Soc America Bull* 1978, 89: 1601~ 1609
- Shaller P J, Komatsu G. landslide on Mars. *International New sletter: Land slide New s*, 1994, (8): 18~ 33
- Bjerrum L. Stability of natural slopes in quick clay. *Geotechnique* 1955, 5(1): 101~ 119
- Tan Tjong-kie & Kang Wenfa. On the locked in stress, creep and dilatation of rock, and the constitutive equations. *Rock M echanics*, 1980, 13: 5 ~ 22
- 晏同珍著. 水文工程地质与环境保护, 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. 6
- Vaughan P R. A assumption, prediction and reality in geotechnical engineering. *Geotechnique*, 1994, 44 (4): 573~ 609
- Shi Genhua, Manifold method. In: *Proc of the 1st Int Forum on DDA and Simulations of Discontinuous Media*, Bekerley, California, USA, 1996
- 崔政权著. 系统工程地质导论. 北京: 水利水电出版社, 1992. 5
- 黄润秋, 许强著. 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. 9
- Randers J (ed). *Elenents of the system dynamics method*. 1980, Cambridge Mass: The MIT Press
- 王建锋. 斜坡稳定随机模拟技术研究[博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 1997
- Scavia C. A method for the study of crack propagation in rock structures. *Geotechnique*, 1995, 45 (3): 447~ 463
- Scavia C. Fracture mechanics approach to stability analysis of rock slopes. *Engineering Fracture Mech*. 1990, 35: 899~ 910
- Boutrup E, Lovell C W. Searching techniques in slope stability analysis. *Engineering Geology*, Elsevier Scientific Publishing Company, 1980, 16: 51~ 61
- He M C, Chen Z D. Analysis of mining subsidence using the large deformation theory. In: *Proc of 4th Int Sym. on Land Subsidence*, IAHS Publ 1991, 205~ 213
- Chowdhury R N, Tang W H & Sidi I. Reliability model on progressive slope failure. *Geotechnique*, 1987, 37(4): 467~ 481
- Chowdhury R N, A-Grivas D. Probabilistic model of progressive failure of slopes. *J. Geotech. Engng Div. Am. Soc. Civ. Engrs*, 1982, 108 (GT6): 803 ~ 819
- Law K T & Lumb P. A limit equilibrium analysis of progressive failure in the stability of slopes. *Can. Geotech. J.*, 1978, 15 (1): 113~ 122
- Michalowski R L. Slope stability analysis: a kinematical approach. *Geotechnique*, 1995, 45 (2): 283~ 293
- Scavia C, Barla G & Bernaudo V. Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 1990, 27 (6): 465~ 478
- Zadeh, L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Trans Syst, Man, Cyben* 1973, 2

(1998 年 9 月收稿)