

# 岩土高边坡破坏模式、预测预警 与防治方法研究

曾宪明<sup>1</sup> 姚鹏远<sup>2</sup> 肖玲<sup>1</sup> 林大路<sup>1</sup> 李世民<sup>1</sup>

(1 总参工程兵科研三所 洛阳 471023 2 罗马第三大学 罗马 意大利)

**摘要:** 本文综合论述了岩土高边坡破坏模式、预测预警与防治方法研究的国内外进展,提出了存在的若干重要问题和解决问题的方法建议。研究强调指出,对人类在该方面的大量研究成果,应慎重加以整理,建立起相应技术咨询系统,以充分地加以利用;而对存在的重点、难点和关键问题,应开展相应的原创性研究,并不断将研究成果补充到已建立的技术咨询系统中,使其更加完备、科学和合理,更好地造福于人类的工程建设。

**关键词:** 边坡破坏模式 滑坡预测预报 防治技术 系统 研究

## 1. 引言

边坡破坏模式是边坡破坏的空间分布形态和造成此形态的机理的抽象。对岩体而言,是指边壁(坡)优势面组合与滑动等的型式;对土体而言,是指一定滑动面的型式,它们的内涵是不稳定体的形态特征和破坏机理。边坡破坏模式是边坡稳定性分析的基础和前提,也是边坡预测预警和有效防治的必要条件之一。人类对边坡破坏模式的研究已有悠久的历史,并已建立起了数十个经典破坏模式。这是人类共同的财富,应充分加以利用。采用这些破坏模式,可以有效地指导岩土高边坡的治理。

搞清楚了岩土高边坡破坏模式,就清楚了它的滑塌形态、滑动方向、规模大小和滑塌机理。但是,它何时才会滑?这就是一个预测预警准则问题。没有准则,就没法预警。这是一个理论技术难度很大的问题。对此,多年来国内外已做了不少研究,但还不统一、有争议,离解决问题还有很远距离。例如,美国人提出以位移(变形)参数指标值作为破坏准则。然而,一个不再发展变化的历史上的位移量就不是至关重要的,甚至是没有多大意义的。因此,相比之下,边坡变形速率更为重要。于是,S. D. Wilson和P. E. Mikkelsen(美国)于1978年又提出以位移速率作为破坏准则。但是,有位移就有位移速率,不是只要存在位移速率边坡

就会发生破坏。研究结果和经验告诉我们,一定边坡介质条件下,只有达到并超过某个临界变形速率值时边坡才会产生破坏。因此,只有临界变形速率才能作为破坏准则之一。迄今为止,我们仅知道有限的几种边坡介质的临界变形速率,更多的尚为未知之数。结合我国高、陡、危边坡工程,既要对各种行之有效的预测预报方法进行归纳总结,建立起预测预报系统,又要进一步开展相应的破坏准则和预测预报研究,这将是十分必要而紧迫的。

我国岩土高边坡的防治,宜采用以锚固类结构为核心的综合技术措施。锚固类结构是指锚索、锚杆、土钉墙、土钉支护、复合土钉支护一类岩土工程加固、支护结构。锚固类结构的先进性无人怀疑,它们对人类工程建设的贡献是巨大的。锚固类结构在岩土工程中的研究与应用已有十余年至一百几十年不等的时,业已提出了许多优秀的研究成果。这些成果对于指导岩土高边坡防治将是卓有成效的。但迄今为止,锚固类结构中仍存在许多问题未得到解决。这些问题直接制约着锚固类结构的应用与发展。例如,锚固类结构都存在一个临界锚固长度问题,超过临界锚固长度的设计不仅不经济,而且存在潜在危险;不同介质中锚固类结构的临界锚固长度不等,具体工程中其临界锚固长度为几何?一般不清楚。又如,一般锚

孔长于10m后,就开始发生偏斜,且偏斜方向带有随机性,因而锚孔轴线不是一根直线,也不是一根平面曲线,而是一根空间曲线。各国对锚孔偏斜率的规定有所不同,我国规定为1/30。这意味着,钻一个30m长的锚孔,偏斜1m是合理的。我国锚索长度最长已达80m,国外已超过100m之多。此时锚孔偏斜的设计允许值是多少?它们的真实偏斜率又是多少?在这种情况下,推送到锚孔中的锚索在重力作用下必与孔壁发生多处接触,尽管设有对中支架,但在大吨位的预应力作用下,对中支架于事无补。于是,与孔壁接触部位的摩阻力就使得设计锚固力变得很不真实。长锚孔轴线空间形态分布规律研究在国内外均为空白,倾斜及水平长锚孔的偏斜率的量测还缺乏有效手段,设计锚固力存在不真实问题,这些都是工程安全的隐患。再如,我国普遍地倾向于使用自由锚索,其原因在于,自由锚索工序简化,施工方便,造价较低,并且在特殊场合便于对预应力进行调整。但自由锚索只适用于工程重要性程度较低的工程,对于重要工程应慎用。其缘盖出于自由锚索外锚头的应力松弛问题难以避免,且在振动条件下更易于产生;耐久性也存在问题;一旦外锚头失效,就意味着整根锚索报废。而二次灌浆锚索可通过第二次注浆将预应力“冻结”在岩体内,即便外锚具失效,锚索仍能照常发挥作用,因此具有双保险功效。由于这里存在很大的误区,结合工程现场进一步进行两种锚索的对比试验而加以证实也是十分必要的。在三峡电站边坡加固方案论证会上,曾就采用二次灌浆锚索还是采用自由锚索问题,在专家学者中引起了长时间的非常激烈的争论,不过最终倾向性的意见主要还是前者。

综上所述知:

①边坡破坏模式是稳定性分析、预测预警和防治的基础和前提,已有的破坏模式研究成果在指导边坡稳定性分析、滑坡预测预报和防治方面将发挥重要作用,但它又不能完全概括各工程现场复杂的地质条件。因此,还必须结

合现场条件开展新型边坡破坏模式的研究。

②边坡预测预警研究,是国际性难题。一方面,对已取得的国内外优秀成果须建立预测预警系统,充分而有效地加以利用;另一方面,还须结合现场情况,进一步深入开展预测预报工作。

③以锚固类结构为核心的滑坡综合防治技术,已有大量成果和成功经验,这对于指导滑坡防治是有益的。但另一方面,锚固类结构还有许多重要问题亟待研究解决。

结合工程的实际情况,研究并解决上述问题不仅具有典型意义,可对岩土高边坡治理提供直接支持,而且还具有重要的科研价值和广阔的应用前景。

## 2. 关于岩土高边坡破坏模式研究的国内外进展

边壁(坡)变形破坏模式是稳定性分析的基本依据,它对方案设计、工法与工程成败具有决定性意义。破坏模式选取不当,再精确的设计,再先进的工法也将黯然失色,难以达到设计施工的预期目的。

人类对岩土高边坡破坏模式的研究已有数十年历史。研究是从简单破坏模式开始的。

1916年, Petterson和Hultin提出了均质软粘土的圆弧破坏模式(单滑式)<sup>[1][2]</sup>; 1953年, Toms和Fukuoka分别提出土坡的复旋滑和粘土的连续单滑破坏模式<sup>[3][4]</sup>。

1946年,新西兰的Benson叙述了倾斜的砂质粘土岩上的玄武岩块的平移块滑破坏模式<sup>[5]</sup>。1953年, Skempton发表了产生于风化粘土或斜坡基岩碎屑上的片滑破坏模式<sup>[6]</sup>。1954年, Henkel和Skempton提出了由初期片滑发展起来的复合平移滑动破坏模式<sup>[7]</sup>。

1953年, Legget和Bartley提出了泥石流破坏模式<sup>[8]</sup>。1955年, Skaven, H. S. 阐述了流滑破坏模式<sup>[9]</sup>。1969年, Skempton和Hutchinson以及Za' ruba和Mencl分别提出土流和岩屑流破坏模式<sup>[10][11]</sup>。

1961年, Bazett等提出了下伏于超固结粘土

层下的纯砂层或粉土层的崩塌破坏模式<sup>[12]</sup>。

1971年，英国岩石力学家E.Hoek经过详细的研究，在前人工作基础上，归纳出岩体边坡的破坏模式主要有4种，即圆弧破坏模式、平面破坏模式、楔形破坏模式和倾倒破坏模式<sup>[13]</sup>。实际上，这些破坏模式的应用范围不仅包括了岩石，也包括一部分土壤介质，如圆弧破坏模式。这一结果此后被各种文献大量引用，并在工程中被大量采用，在国际上具有很大影响，以至于在一定程度上和在一定范围内人们以为边坡破坏模式仅限于这4种。

近十余年来，岩土深基坑高边坡破坏模式研究具有方兴未艾之势，其间，中国工程技术人员也做出了自己的贡献。

1989年，中华人民共和国国家标准《建筑地基基础设计规范（GBJ7-89）》推荐了折线破坏模式<sup>[14]</sup>。

1992年，中国科学院地质研究所工程地质力学开放实验室罗国焜等提出了火成岩地区边坡变形破坏的15种破坏模式<sup>[15]</sup>。不仅对已有的某些破坏模式作了进一步的细分，例如对楔形破坏模式细分为4种类型，对圆弧破坏模式细分为5种类型，对崩塌破坏模式细分为3种类型，而且又增加了岩体松动破坏模式，发展和促进了破坏模式的研究。

1990~2005来，总参工程兵科研三所结合推广岩土深基坑土钉支护法和复合土钉支护法，对软土，强膨胀页岩和填土的破坏形态和机理进行了试验研究，提出了流鼓破坏模式、胀裂破坏模式<sup>[16]</sup>，以及不同类型填土的多个破坏模式。

从上世纪40年代以后，国内外对破坏模式的研究由简单破坏模式进一步发展到了复杂破坏模式，即组合破坏模式（由两种或两种以上简单破坏模式构成）。1932年，海姆（Heim）归纳出了岩崩-碎屑流组合破坏模式<sup>[17]</sup>。1952年，扎留巴（Za' ruba,Q.）归纳了岩石转动-倒塌组合模式<sup>[18]</sup>。1972年，尼姆乔克（Nemcok, A.）、帕谢克（Pask,J.）、里巴尔（Ryba' r,J.）归纳出了岩石滑坡-岩崩组合破坏模式<sup>[19, 20]</sup>。1973年，夏普（Sharp.R.P.）归纳出了转动滑坡-土流组合破坏模式<sup>[21]</sup>。1980年，杜永康、余定生对倾倒-滑动，滑动-倾倒，滑动-倾倒-滑动等组合破坏模式作了深入研究<sup>[22]</sup>。1994年总参工程兵科研三所结合对著名的广州065工程18米深基坑大滑坡机理分析和工程处理设计与施工，提出了圆弧-平面组合破坏模式<sup>[23]</sup>。

笔者总结归纳了九十年来人类对岩土高边坡破坏模式的研究成果，将已有经典破坏模式分类如图1所示。

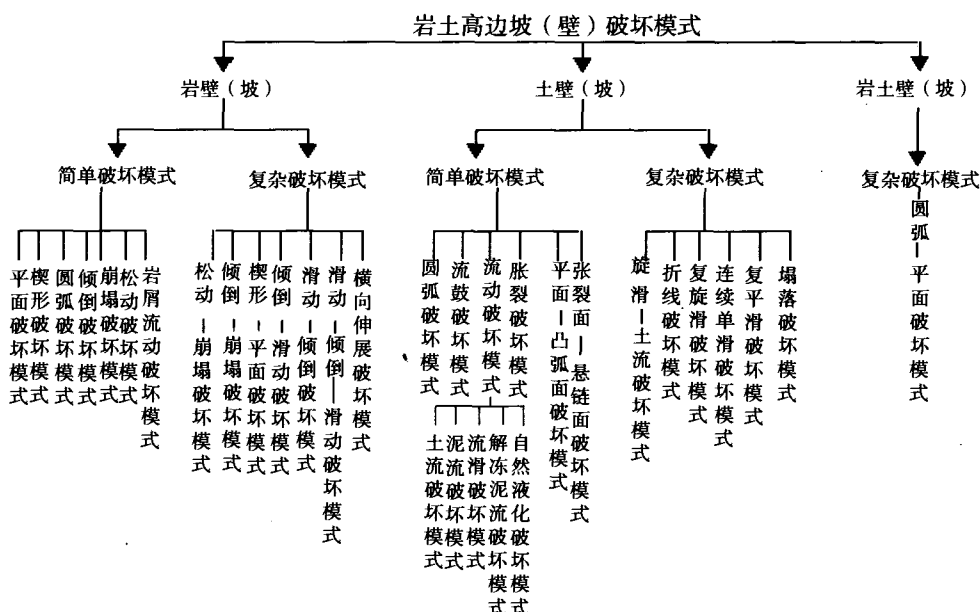


图1 岩土高边坡（壁）破坏模式分类（1916~）

综上所述可知:

①边坡破坏模式是稳定性分析、滑坡预测预报和防治的基础和前提,具有决定性意义。

②对边坡破坏模式的研究已有约90年有据可查的历史,至今仍在发展中。

③许多经典的边坡破坏模式可对岩土高边坡的治理提供卓有成效的指导。

④对已有经典破坏模式所不能概括的岩土高边坡工程,应有针对性地开展新型边坡破坏模式研究。

### 3. 关于岩土高边坡滑塌预测预警研究的国内外现状

关于边坡预测预警研究,是一个国内外岩土工程界和学术界都十分关注、已取得不少成果、仍有大量工作要做、难度甚大的问题。总的来说,对于此项研究,国外起步早于我国,不少成果我国目前仍在借鉴使用。

德国数学-生物学家Verhulst在1837建立了以其名字命名的模型,简称V氏模型。该模式最初是用于生物繁殖随时间发展变化的预测,后来人们通过国内外几个重大滑坡的反演预测研究,认为V氏非线性灰色模型应用于滑坡临滑时间预测具有很好的适用性<sup>[24]</sup>。

上世纪末期,E.П.叶米里杨诺娃就发表了计算稳定系数法<sup>[25]</sup>。其方法为:先分别确定斜坡当前的稳定系数K、周期T内稳定系数可逆动的负差幅度的年平均值 $A_{cp}$ 及其可能的最大值 $A_{max}$ 、斜坡稳定系数不可逆变化的年平均速度 $\Delta K_{cp}$ 及其在周期T内的预报 $\Delta K=f(t)$ ,则预报周期结束时的稳定系数 $K' = K - \sum_{t=1}^T \Delta K$ ,如果 $K' - A_{max} > 1$ ,则滑坡发生的可能性小;如果 $K' - A_{max} < 1$ ,则滑坡可能发生;若 $K' - A_{cp} < 1$ ,则滑坡发生的可能性很大。显然,这一预测结果仅仅是事件发生的一种概率,而且由于各有关系数不可能准确预测,更加大了预测结果的不确定性。在斜坡稳定性计算中,常有 $K > 1$ 时斜坡不稳定, $K < 1$ 时斜坡反而稳定的例子,更何况

是对数年后稳定系数的预测。

斋腾迪孝滑坡预报法是上世纪80年代末提出来的<sup>[26]</sup>,在国际上有较大影响,至今我国仍在研究与应用。斋腾迪孝提出最好在斜坡变形初期依据蠕变曲线第二阶段进行概略预报,接近崩塌时,依据第三阶段蠕变曲线进行临滑预报。当坡体位移进入第三蠕变阶段后,利用简单的图解法常可作出令人满意的预测。

Pearl模型预测法。孙景恒等认为:“边坡失稳破坏的发展过程曲线与描述生物生长规律的生物生长曲线类似,……可以采用预测生物生长的方法对边坡失稳时间进行预报”<sup>[27]</sup>,并对此进行了应用研究,效果尚好。但铁道部科学研究院西北分院徐峻龄则认为,Pearl曲线与表征斜坡破坏的蠕变曲线在形态和含义上完全不同,尤其是后期。后者显示的是愈到后期变化速率愈大,剧滑时间预报就是在该曲线上寻求 $\Delta t \rightarrow 0$ 、 $\Delta s \rightarrow \infty$ 的那一点,物理概念清晰而明确。而前者愈到后期变化速率愈小,利用这一曲线进行剧滑时间预报的物理概念不甚明确<sup>[28]</sup>。

Phillips J D<sup>[29, 30]</sup>深入地研究了混沌现象,并建立了边坡破坏的混沌模式。边坡系统内部各个子系统之间及系统与外界环境因素之间的相互作用、相互制约,使边坡的演化过程表现为确定性与确定的随机性(即混沌)综合运动的特点,滑坡的发生是系统内各要素通过一系列非平衡不稳定产生的空间的、时间的、功能的、结构的自组织过程,从而导致开放系统远离平衡状态,发生一系列的混沌现象。对混沌现象的本质认识,在现代科学技术中起着十分重要的作用,被誉为20世纪第3次科技革命。

Sah N K等<sup>[31]</sup>借助于人工神经网络(Artificial Neural Network)方法,充分利用已有的研究成果,对边坡稳定性预测进行研究,取得了一定的研究成果。

Packard N H和Eckmann等<sup>[32, 33]</sup>研究提出了

相空间重构法，它是混沌时间序列预测的基础。其基本思想是：系统中任一分量的变化都是由与之相互作用着的其他分量所决定，故这些相关分量的信息就隐含在任一分量的发展过程之中，在由一维观测序列及其适当延时值所构成的维度合适的相空间中，系统演化的动力学行为可由此空间中点的演化轨迹无歧义地表达出来。

雨致滑坡是一个国际上延续争论了30多年的问题。争论的焦点究竟是连续降雨导致滑坡，还是强降雨导致滑坡，还是连续降雨后的强降雨导致滑坡？连续降雨或强降雨的何时开始滑坡？其中Kim S K等<sup>[34]</sup>，Pierson T C等<sup>[35]</sup>，Folloni G等<sup>[36]</sup>等做了大量的工作，其研究成果具有一定的代表性。

地理信息系统技术（GIS）的飞速发展，为日益增多的岩土工程问题研究开辟了一条新的途径。Carrara A等，Fritsch D较早地进行了基于GIS的岩土边坡（滑坡）方面的研究工作<sup>[37, 38]</sup>。

基于现场位移量测信息为数值分析提供实用的“计算参数”的反分析方法是从上世纪80年代开始发展，至今已不再是单纯确定计算参数，而是作为工程预测分析的一部分，有着良好的应用前景。反分析的基本思想最先由Kavangh（1973），Gioda和Maier（1980）等人提出。Sakurai（1983）首次给出了均匀地应力与岩体弹性模量的有限元反分析数值解。

滑坡灾害风险评价是滑坡灾害风险管理的基础性工作，是制定各项防灾减灾措施，尤其是非工作防灾减灾措施的重要依据。因此，滑坡灾害风险评价对于减轻滑坡灾害的损失具有重要意义，已引起人们高度重视。H.H.Ensten（1988）<sup>[39]</sup>给出了滑坡灾害评估的框架建议。R.Anbalagan和Bhawani Singh（1996）<sup>[40]</sup>在R.Anbalagan前期在关于山区滑坡灾害风险评价制图和区划制图研究基础上，提出了滑坡灾害风险评价制图的新方法和风险评价矩阵。上述研究对我国的相应研究具有启迪作用。

综上所述，国外关于滑坡预测预报研究具有以下特点：

- ① 研究起步早；
- ② 研究途径多样化；
- ③ 某些研究已较成熟；
- ④ 离全面解决问题还有较远距离。

国内关于滑坡预测预报研究虽然起步晚于国外，但最近十余年间取得了突破性进展。

灰色预测预报在国内已有大量研究和应用。灰色系统理论由我国学者邓聚龙提出。他指出：“灰色系统建立的是微分方程描述的模型，微分方程所揭示的是事物发展的连续的长过程”<sup>[41]</sup>。显然，灰色预测适用于依据位移数据进行滑坡预报。晏同珍<sup>[42]</sup>和梅荣生<sup>[43]</sup>均曾较早采用这种方法进行滑坡预报方面的探讨。后者研究指出，当滑坡处于蠕动阶段时，可用灰色模型进行滑坡变位趋势预测；当滑坡处于滑动阶段时，则可进行剧滑时间预报。

徐峻龄<sup>[28]</sup>回归分析方法。在二维坐标系中，据滑坡位移-时间关系的散点分布趋势，可在二变量间用回归分析方法建立起一个一元二次方程 $y=ax^2+bx+c$ ，通过把表示该方程的曲线适当外延即可对滑坡作出预测预报。此外，如用位移 $s$ 和时间 $t$ 取代上述方程中的变量，二者应符合方程 $t=as^2+bs+c$ ，按求导办法即可确定滑坡剧滑的时刻。

廖小平把塑性力学理论引入滑坡理论，提出了滑体变形功率预报理论，并将其用于黄茨等滑坡的预报，均取得良好效果<sup>[44]</sup>。用这种方法，可依据多个测点的资料预报出一个统一的剧滑时刻。无疑，这是滑坡预报的一个突破性进展。

黄志全等运用现代混沌理论与神经网络方法的基本原理，把混沌理论与神经网络结合起来，建立了边坡稳定性预测的混沌神经网络模型。经对64个典型滑坡实例的研究结果表明，该模型具有较高的精度<sup>[45]</sup>。唐璐等也对混沌和神经网络结合的滑坡预测方法进行了研究<sup>[46]</sup>。

殷坤龙等在滑坡时空预测基本论点的基础上,建立了滑坡时空预测的信息模型和Verhulst灰色模型。经对重庆市和鸡鸣市滑坡灾害的实例分析研究,说明这二种模型是可靠的。

黄志全基于单状态变量摩擦定律,把协同学和分岔理论联系起来,建立了边坡失稳时间预报的协同分岔模型<sup>[47]</sup>。经对新滩滑坡的预报,证明该方法精度较高。

李邵军等将滑坡监测与当前先进的三维可视化及地理信息技术相结合,建立了三维滑坡的监测信息系统,实现了滑坡监测信息与监测场址三维地理信息的综合表达,为滑坡监测方案,设计和监测成果的综合分析提供了一个可视化的信息平台<sup>[48]</sup>。针对滑坡位移复杂的非线性演化问题,结合时间序列分析的基本思想,采用遗传算法确定时间序列模型的结构和参数,从而获得滑坡变形的预测模型。据作者介绍,采用该方法对福宁高速公路八尺门滑坡进行智能预测分析,其结果与灾测结果的相对误差仅为1.25%~4.39%。

谢全敏等从系统理论的观点出发,提出了滑坡灾害复杂大系统的概念。以此为基础,作者探讨了滑坡灾害风险特征及滑坡灾害风险估价的基本内容,提出并系统地阐述了以滑坡危险性分析、承灾体易损性分析,和滑坡灾害破坏损失评估为核心内容的滑坡灾害风险评价的系统理论<sup>[49]</sup>。

廖野澜等提出以“黄金率灰色拓扑选择”建立预报模型的方法,对隔河岩水电站引水隧洞洞群施工期监测得到的收敛位移数据进行了数据列预报,在此基础上,利用时间 $t_1$ 与速率 $v_1$ 的关系,提出了短期塌方预报方法<sup>[50]</sup>。

刘汉东以1985年6月12日凌晨长江三峡新滩滑坡为例进行了工程地质力学白光散斑模型试验<sup>[51]</sup>,用白光散斑照相技术和自动记录仪测量模型表面的位移矢量场,模型试验过程为1410min,破坏前位移量为21.20mm。依据位移-

时间相关关系和边坡模型滑面的抗剪强度,分别用斋藤法,灰色系统预测理论和有限单元法进行了中长期定时预报,预报的失稳时间分别为1395、1435和1415min,与试验模型实际破坏的时间基本一致。

王在泉以隔河岩水电站厂房基坑集水井边坡工程施工过程中的动态稳定预测、变形规律分析及失稳时间预报为例,研究了边坡动态稳定性与边坡发育阶段的关系,据实测资料分析了边坡的稳定状态及趋势,提出了非等间距GM(1,1)-Verhulst灰色联合失稳时间预报模型<sup>[52]</sup>。

张玉祥对岩土工程中的时间序列预报问题进行了研究,认为在该类问题中,灰色建模存在着一定的问题,通过对两个实例的分析,指出神经网络法是解决岩土工程时间序列预报问题的有效方法<sup>[53]</sup>。

许东俊等以多年边坡位移监测资料为基础提出了预测滑坡时间的2种方法。第1种是根据位移-时间曲线从等速蠕变阶段转入加速阶段的位移速率作为滑坡临界速率的方法;第2种是作用序列分析法,即根据前几年位移规律预测后几年位移发展趋势,并用国内外滑坡实例确定的滑坡位移速率作为滑坡判据的方法。用这2种方法,提前一年预报的滑坡时间和滑坡位移速率同实测值吻合较好<sup>[54]</sup>。

唐天国等进行了高边坡安全监测的改进GM模型预测研究<sup>[55]</sup>。由于一般的GM(1,1)预测存在较大的局限性及产生的系统误差,对一般GM(1,1)模型进行了误差来源追踪分析并提出改进方法,得到改进后的GM(1,1)预测模型,并将其用于高边坡安全监测。依据碧口水电站高边坡连续8a的监测数据,建立了碧口水电站高边坡灰色安全监控模型。把改进的GM(1,1)预测模型与一般的GM(1,1)模型、统计模型等预测模型进行了对比,同时还进行了平均误差、相关系数以及最大误差分析对比。研究表明,改进GM(1,1)模型监控精度

较高,预测结果与实际吻合较好。

陈志坚等提出了基于剪切位移的层状岩质边坡稳定性的预测预报模型<sup>[56]</sup>。在阐述了层状岩质边坡的工程特性和控稳因素后,提出了层状岩质边坡内地下水的分布特征。针对包气带裂隙水对边坡稳定性的重要影响,提出了将其概化为经水力折减后的面力的模拟方法,并将包气带水力折减系数作为反演参数,采用三维非线性有限元法和可变容差优化方法,建立了基于潜在滑裂面剪切位移实测值的边坡稳定性预测预报模型,该模型在江阴大桥等工程实践中取得了满意的效果。

杨治林根据地下水作用下复合介质边坡岩体位移的分盆特征,给出了边坡岩体在渐近性破坏过程中的位移计算公式及岩体突发失稳的充分条件。针对地下水主要是通过物理化学作用软化了滑面带岩体的特点和机理,建立了此类边坡剧动式灾变的位移判据<sup>[57]</sup>。

孙星亮等进行了自适应时序模型在地下工程位移预报中的应用研究<sup>[58]</sup>。自适应时序模型的基本原理就是将自适应滤波理论应用于自回归时序AR(n)模型中。该模型在一定程度上根据量测数据和估计结果自行调整模型参数,通过递推算法自动地对模型参数加以修正,使其接近某种最佳值,即便在尚不完全掌握序列特性的情况下也能得到满意的结果。通过对山东龙口洼里煤矿一回采巷道金属支架的收敛位移和北京地铁王-东区间隧道北正线中洞断面收敛位移进行自适应建模,预报结果表明,此方法可行,预报结果也令人满意。将该方法应用于滑坡预测预报也许是可行的。

丁继新等详细研究了三峡地区部分县市的滑坡和降雨历史资料,从滑坡与降雨量、暴雨以及降雨时间三者的关系分析了降雨与降雨型滑坡的关系。在此基础上,提出了降雨因子的概念。同时,还提出了一种预报降雨型滑坡的新方法,量化地描述了降雨型滑坡的易发程

度。按照一定的标准,对每种降雨因子进行分级,通过多因子叠合分析来研究降雨因子与降雨型滑坡之间的关系,并据此预报滑坡的易发程度。通过将这种滑坡预报新方法应用于三峡的万县地区,证明可以比较准确地确定滑坡发生的时间<sup>[59]</sup>。这种滑坡预报方法将为根据历史降雨和滑坡资料来预测降雨型滑坡奠定良好基础。

王旭春对三峡库区滑坡预测预报3S系统的关键问题进行了研究<sup>[60]</sup>。三峡水库的形成将面临着水库的正常运行和现有城镇安全的两大方面问题,并突出表现在岸坡的稳定性上。作者研究确定了滑坡地质信息GIS可视化空间数据库的建立途径与方法,建立了滑坡体GIS地质信息数据库等。

周萃英从斜坡岩体的结构组成、运动特征、岩石力学试验、统计物理学特征及分形几何学等方面研究了斜坡系统的复杂性特征。提出了斜坡系统是开放的复杂的新认识,指出滑坡预测同时应重视确定性知识与非确定性知识的综合运用,且应立足于基于满意原则的预测思想。应以预测过程和结论的“满意解”为原则,不必花费高代价去追求“最优解”<sup>[61]</sup>。

马崇战进行了滑坡机理及其预测预报的力学研究<sup>[62]</sup>。其工作体现在三个方面:①破坏机理与稳定性分析;②滑坡的临界时间预报;③高速滑坡的强度预测。其中②是基于塑性功率的概念<sup>[44]</sup>,并有所改进。

陈益峰等提出了一种最大Lyapunov指数的改进算法<sup>[63]</sup>。这种改进算法不仅对小数据序列较为可靠,而且计算量小。通过对边坡位移历史数据序列进行特征分析,计算出最大Lyapunov指数,并利用最大Lyapunov指数破坏模式进行边坡位移预测。作者认为,这种改进的方法比已有的研究方法更可靠,而且操作起来比较方便。通过对三峡水库高边坡和新滩滑坡实际位移数据进行预测,结果令人满意。

滑坡预报的临界变形速率法<sup>[64, 65, 66]</sup>。国内

外都报导过滑坡预报的位移速率法,笔者也作过探讨,感觉使用时有不方便之处,根本原因是没有一个准则或判据。位移速率为何值时边坡才会发生剧滑?自然界各种介质边坡均存在一个临界变形速率,在临界速率到达之前的速率并不会造成边坡失稳。一定介质边坡在给定条件下的临界速率是一个常数。找到了这个常数也就找到了预测预报的准则或判据。笔者研究确定了三种简单介质的临界变形速率:强膨胀页岩、软土、厚填土。我国地大物博,地质条件千变万化,各种各样的简单介质以及更加复杂的复合介质数不胜数,要确定它们各自的临界变形速率值是极其困难的。但临界变形速率法不失为一种可靠的滑坡预报方法,1991年,它为小浪底水电站某洞脸边坡的开裂变形进行较准确预测预报和加固支护方案提供了依据。

以上概述了我国近十余年间在滑坡预测预报研究与应用方面的主要成果、方法和经验,也提到某些可以用于滑坡预测预报的方法。实际上,滑坡预报在国内外都是一个古老的话题。兹将上述研究总结归纳如下:

① 我国有关滑坡预测预报的研究起步晚于国外,借鉴了国外不少理论与方法。

② 我国最近十余年来关于滑坡预测预报的研究进展较快,有的工作取得了很大突破。将这些成果进行认真、系统的归纳和总结并形成预测预报专家系统,对岩土高边坡的预测预报具有极重要意义。

③ 至今我国离系统、全面、可靠、精确的滑坡预测预报仍有很远距离。因此,结合岩土高边坡工程实际,进一步开展此项研究是十分必要的。

#### 4. 关于岩土高边坡滑塌综合防治方法研究的若干问题

滑坡防治方法多种多样,各有所长,且国内外大致相近。我国同国外的差距,主要体现在材料和工艺上。从大型机械设备到小型仪器

装置工作性能,很多都还存在一定差距。我国目前用国产钻机钻的锚索孔最长为八十米,而国外最长的早已达到一百多米。我国目前还没有自己生产的大型岩石隧道掘进机,而美国第二代产品也早已问世,差距几何不言自明。

滑坡防治技术有土有洋,各有千秋。例如滑坡防水、截水及排水措施;陡坡清方减载;抗滑段填方加载;抗滑桩及抗滑挡土墙;坡面植被防护等,均被证明是可靠、经济而有效的方法,仍应视情加以采用。不过,笔者认为,岩土高边坡的防治,应采用以锚固类结构为主体的综合技术措施,以提高所采取措施的技术含量,推动科学技术的发展与进步。

锚固类结构的技术先进性和可靠性,以及良好的经济效益,在国内外都是公认的。但是,无论是国内还是国外,至少以下重大或重要问题还没有得到很好的解决,或者尚未涉及:

① 锚固类结构第二交结面(锚杆砂浆与孔壁之间界面)上剪应力分布特征研究得还很不充分,实际上理想第二交结面剪应力并未真正测到过,主要还停留在理论分析阶段,而相应规范和教范给出的只是一个平均剪应力公式,不仅不符合剪应力分布的实际情形,而且隐含着不安全因素。关于此问题的国内文献参见[67~76],国外文献参见[77~86]。

② 第一交结面(锚杆(索)体与砂浆之间的界面),第二交结面与第三个破坏面(发生在岩土介质内近似圆锥形的破坏面)的相互作用关系研究基本上还是空白。由经验知,在一定条件下,三者间应存在定量的相关关系,设计准则应由三者来控制,而不是只由其中一个面来控制。目前国内外大多是以第二交结面为主来控制的。尽管有的同时考虑了第二、第一交结面,但不是从它们的相互作用关系角度考虑的,而是分别考虑的。关于此问题的国内文献可参见[87~96],国外文献可参见[97~106]。



③ 剪应力沿垂直于锚固类结构杆体轴线方向的衰减规律研究,所做工作极其有限,国内外限于理论研究的文章也极少。但是这项工作做好了,就有可能揭示第三破坏面产生的机理。

④ 锚固类结构杆体临界锚固长度问题研究得很不充分;关于峰值剪应力和零值剪应力以及锚杆(索)砂浆局部破坏同时向杆体深部发生转移的现象和机理研究,国内外均未涉及。临界锚固长度研究的重要性在于,超过临界锚固长度的设计不仅是不经济的,而且存在潜在危险。自从笔者提出关于锚杆临界锚固长度的概念后,引起一些年青学子的兴趣,近年来有不少文章进行讨论,并且提出了一些设计计算方法。总的来说对此问题的研究尚在起步阶段。至于对上述三个因素“同时转移”问题研究,还有待来者。不过这两个问题之间是有密切联系的;在同时发生转移的峰值剪应力与零值剪应力的对应部位之间,始终是一个常数,这个常数就是临界锚固长度。不同岩土介质中临界锚固长度值不相等。

⑤ 锚孔轴线空间分布形态与最大偏斜率研究,是一个很新很难很重要的问题。由于孔眼偏斜,轴线较长,介质不均匀,使得钻孔轴线远不是一根直线或平面曲线,而是一根很不规则的空间曲线。关于这条空间曲线的分布规律研究,国内外均未见报道。三峡电站试验锚索的偏斜率是用简单方法量测后取得的,一般不会很精确。我国规范移植了国外标准,规定锚孔偏斜率为1/30。如此大的偏斜率,摩擦阻力是多少?设计锚固力在多大程度上是真实的?可以断言,长度超过30m的预应力锚索和锚杆,设计预应力一般都是失真的。这难道不危险吗?尽管规范有明确规定,实际上对绝大多数的锚孔也未进行偏斜率测试,设计锚固力的失真性也基本上未作考虑。

⑥ 锚固类结构高预应力误区问题。锚固类结构尤其是锚索的预应力在国内外均有不断攀

升破记录的情况。过高的预应力吨位会在岩体介质内产生强烈的应力集中现象,也会加速金属杆体应力腐蚀发生,均不利于边坡的长期稳定。

⑦ 重要岩土高边坡加固支护工程中目前采用的自由锚索均宜改为二次灌浆预应力锚索。其原因前已述及。

⑧ 锚固类结构抗动载问题研究还很不深入和充分,与前述静力条件下相对应的动载条件下诸界面剪应力分布问题研究尚为空白。

上述问题除⑦外都是非常前沿、亟待解决、影响锚固类结构进一步发展与应用的问题,也是国内外带有共性的问题。结合岩土高边坡工程现场实际情况,既认真总结归纳以往进行边坡防治的成功经验和有效方法,使之形成方便实用的技术咨询系统,又针对防治技术研究中存在的严重问题,深入开展以锚固类结构为主体的综合防治技术研究,这对促进岩土高边坡工程的建设 and 推动科学技术的发展,都是十分必要的。

## 5. 岩土高边坡破坏模式、预测预警与防治方法研究建议

### 5.1 研究目标

I 建立岩土高边坡破坏模式分析系统(综合集成);结合工程实际情况,针对已有国内外经典破坏模式所不能概括的岩石高边坡问题开展新型破坏模式研究(原始创新)。

II 建立岩土高边坡滑坡预测预报系统(综合集成);结合岩土高边坡工程实际情况,选择具有典型性和量大面广破坏模式,开展滑坡预测预报研究(原始创新)。

III 建立以锚固类结构为核心的边坡综合防治技术咨询系统(综合集成);结合高边坡工程实际,针对国内外尚未深入研究的一系列重大前沿问题有重点地开展研究(原始创新)。

IV 在上述三个系统基础上建立一个统一的“岩土高边坡破坏模式、预测预报与防治方法系统”。

## 5.2 研究内容

### 5.2.1 针对研究目标之 I 的主要研究内容

对人类已有的30余个经典破坏模式进行综合研究。对其破坏形态、破坏机理、破坏特征、时空效应、适用范围和条件进行科学、准确和详细描述,并输入计算机,构成系统以供设计选用。

对已有经典破坏模式所不能概括的高边坡工程,开展破坏模式的创新性研究。

### 5.2.2 针对研究目标之 II 的主要研究内容

目前已有一定影响、在一定程度上已经实践检验的国内外滑坡预测预报方法已有数十个。这些方法是人类的共同财富,系统地对其加以综合、归纳、整理是一件承前启后、十分必要的工作。这一工作从系统性、完整性和很强应用性看,目前国内外未见发表。这是一件集大成的浩大工程。将上述方法的假设条件、应用范围、数学物理模型(编程)等一并输入计算机中,构成能快速反应的预测预报系统,可为现有不稳定边坡的预测预报提供多种方案的比选,使滑坡预报的范围和时间定量化和优化。

在现有工作的基础上进一步开展以实测为基础,以临界变形速率概念为指导的滑坡预测预报研究工作。

最后,将这些具有原创性的方法补充到相应的子系统之中,使之更加完备。

### 5.2.3 针对研究目标之 III 的主要研究内容

对锚杆锚索的研究已有悠久的历史,对土钉墙、土钉支护和复合土钉支护的研究与应用也已取得较丰富的经验。以这些研究成果和经验为基础,建立以锚固类结构为核心的滑坡防治技术咨询系统,显然是一种明智的选择。但其工作量也是浩大的。

锚固类结构尚待研究解决的重大前沿问题尚多(国内外均如此),只能择其要者进行研究。

## 5.3 需解决的关键问题

①岩土高边坡破坏模式分析系统是对人类研究边坡破坏模式有史料记载的约90年工作的系统总结与归纳,这项工作此前国内外无人做过,无从借鉴,缺乏经验,是关键问题之一。

②新型边坡破坏模式的研究必须紧密结合现场实际,并且是在采用已有经典破坏模式无法进行相关分析的条件下进行。建立一个能反映客观实际、为世人所公认的新的边坡破坏模式并非易事。这是关键问题之二。

③现已发表的滑坡预测预报系统一般是以作者所研究提出的方法为主建立起来的。本项研究则是要在工程实践检验的基础上,将国内外所有公认行之有效的方法集成为一体组成一个大系统。这项工作此前未见发表,其工作量巨大,涉及到多领域、多学科的专业知识与经验,难度甚大。这是关键问题之三。

④美国国家科学院和运输研究部门在上世纪50年代就提出滑坡预测预报的位移准则和位移速率准则,20年后又作了补充、修改和完善。实践证明,只有临界变形速率才能作为判别准则之一。但中等以上岩体一般变形量较小,剧滑阶段短而滑速很高,要有效确定并测取其临界变形速率值,不采取特殊、专门措施亦难实现。这是关键问题之四。

⑤锚固类结构研究与应用的历史有的已长达一百数十年,所取得成果及经验极其丰富,国内外相关技术标准数不胜数。但也有一些经验或规定是不尽合理或有争议的,如我国相关技术标准规定的锚杆最小保护层厚度、最小水灰比、锚索的金属对中支架等。取人类研究与应用锚固类结构成果的精华,建立以锚固类结构为核心的综合的滑坡防治技术咨询系统,有许多技术难点需要攻关。目前,国内外未见有类似的系统建立和发表。这是关键问题之五。

⑥锚固类结构发展应用至今,还存在许多重大前沿问题需研究解决,否则将给工程留下安全隐患。但是这些问题解决起来非常困难,例如不同介质中长锚孔轴线空间形态的描述问题,并不是一个纯理论问题,而是一个涉及到设计锚固力在多大程度上是真实的严重问题。研究并解决此问题,无论是采用理论分析还是试验研究的方法,都是非常棘手的。这是关键问题之六。  
(下期待续)