

岩土结构稳定性理论 与滑坡预测预报

杨人光 著



地质出版社

岩土结构稳定性理论与 滑坡预测预报

杨人光 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书依据岩土材料蠕变黏-弹性时效模型确立了两个二阶微分方程联立组合形成的稳定性基本方程的基础理论。采用拟合法从具体的岩土试件和自然山体滑坡变形轨迹曲线的稳态与失稳初始时段选取拟合监测点赋值,演绎出两个非线性超越代数方程组,论证其实数根 t_p 和 t_f 存在且唯一,并应用多重二分法数值求解。其中 t_f 即为岩土材料试件破坏和滑坡剧滑时间。揭示出岩土结构稳定性的普遍规律。

本书适用于从事资源开发、交通路桥、港口码头水工建筑、建筑物地基基础工程以及西部地区城镇周边山体等的稳定性评估与预测预报的科技人员参阅。

图书在版编目(CIP)数据

岩土结构稳定性理论与滑坡预测预报 / 杨人光著.

—北京:地质出版社,2010.10

ISBN 978-7-116-06946-6

I. ①岩… II. ①杨… III. ①岩土力学-结构稳定性-研究②滑坡-预测-研究 IV. ①P642.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第202796号

责任编辑:李丛蔚 孙亚芸

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:8.75

字 数:160千字

印 数:1—1300册

版 次:2010年10月第1版

印 次:2010年10月第1次印刷

定 价:32.00元

书 号:ISBN 978-7-116-06946-6

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

滑坡是世界上严重的生态灾害之一。随着全球气候变暖及人类活动加剧，生态灾害（自然生态灾害、工程生态灾害）日益增多，人类的生命财产受到严重威胁。只有以足够的精度预测预报出滑坡的发生时间、规模和发展趋势，给出准确的判据，才能真正达到防灾减灾目的。

中国四海控股有限公司生态灾害测控中心总工程师杨人光同志（原中国科学院研究员）在长期的科学研究与生产实践中，在对诸多理论研究的基础上，锁定了山体滑坡蠕变时效轨迹监测曲线进行研究。他认为滑坡蠕变应分为稳态蠕变和失稳突变两个阶段，前者遵循材料的黏-弹性滞后的开尔文模型；后者选用日本斋藤迪孝以大量试验资料为基础的失稳蠕变时效经验公式，并运用二阶微分方程导出两个独立体系的内在联系，准确描述了岩土体滑坡从流变萌发、蠕变发育到失稳剧滑的时间轨迹。他运用这一方法对国内外几十个不同滑坡案例进行预测并得到了准确验证。至此，可以说，一个完整的岩土结构稳定性数学模型基本建立，这是岩土蠕变学基础理论的重大突破。

我认为：作者继承前人试验研究的成果，以科学的逻辑推理、严谨的数学演绎，建立了完整的数学模型，揭示出岩土结构稳定性基础理论，解决了滑坡预测预报的国际性难题，使人类对自然界的滑坡现象从不可知到可知的认识有了新的飞跃。

中国四海控股有限公司生态灾害测控中心是以杨人光的岩土结构蠕变时效稳定性理论为基础建立的新技术企业，是最先将这一理论应用于科学实践的队伍。我相信，随着生产实践的不断丰富，人类掌握生态灾害的发生规律并对其进行科学防治的目的一定会达到。

高建军

2010年5月

绪 论

滑坡是山体形变的自然现象，它是在恒定重力分量作用下的形变，故称为蠕变形变。山体滑坡是地表的地质灾害之一，国内外众多学者与工程技术人员对它进行了大量室内外监测试验和探索性研究，积累了大量资料，并在滑坡稳定性（胡海涛等，1965；王思敬等，1989）与监测预报的研究中形成了许多科学的概念和思路。

近半个世纪以来，就滑坡体稳定性问题，多数的国内外学者及工程技术人员遵循经典力学思维框架，从滑坡体受力角度或地质力学角度，应用土岩力学中的有限元（张清等，1983）甚至离散元数值分析法，试图揭示出非均质各向异性、非规则分布结构面的土岩体的受力状态，并以微元体主应力分布积分及强度指标，应用极限平衡数值变分法确定滑坡滑动优势面（即圆弧法），导出滑坡稳定性系数 K_{sf} 。无疑， K_{sf} 是滑坡的重要参数之一，但缺乏时间的内涵，欲把它作为滑坡发生的判据，就有商榷的余地。正如崔政权（《系统工程地质导论》作者）（1992）所述，在确定论分析中，指标 $K_{sf} \geq 1$ ，表示边坡处于稳定状态，或者说是安全的，问题是这个安全究竟有多大把握？因此，人们又引用以概率论为基础的置信度或可靠性进行分析等。以纯静态力学分析方法来研究滑体的蠕变运动，将“静不定”问题当作“静定”问题处理，岂能奏效？

在科学技术长足发展的年代，滑坡稳定性（可推广于地块稳定性）的预测预报却一直是个难题。滑坡的发生存在有萌发流变时段，即滑坡优势滑动面的形成过程，其过程是极其复杂与多方面的，如局部地质结构的破坏、地应力的释放，地下水的浸泡和蚀化作用、周边环境的变化（坡脚冲刷、重复性微震动等）以及气候影响等诸多因素。无疑，这些因素可诱发不同类型的滑坡。区分滑坡类型，探求各类滑坡的稳定性系数，给出各类滑坡的稳定性判据，涉及诸多的物理力学参数，必然要采取多项目监测手段，但“未能取得令人满意的效果”（朱瑞赓等，1991；张倬元，1993；王念秦等，2008）。

总之，滑坡体蠕变时效稳定性问题，是岩土结构和材料蠕变的基础性理论课题，并非属于传统经典力学架构里的应用力学范畴，至于是否属于多学科交叉的

边缘学科，不得而知。作者以为任何基础性学科应遵循学科固有的抽象模型和运动规律，这使得作者重新梳理了思路，建立了新的概念模型。

好在国内外已有许多学者走出了经典力学的思维框架，从滑坡监测预测入手，建立了岩土体流变（包括蠕变）的物理数学模型，如马克斯韦尔（C. Maxwell）体、沃伊特（Voigt）和开尔文（Kelvin）体（张倬元等，1985）。马克斯韦尔黏-弹性滞后物理模型和开尔文的数学模型相结合即为岩土体黏-弹性滞后模型。在恒定载荷力作用下，该模型可写为二阶微分方程式，即：

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \xi \frac{dy}{dt} = 0 \quad (1)$$

其中，引进了岩土体黏-弹性滞后系数 $\xi = \frac{E}{\eta}$ ， E 、 η 分别为岩土弹性模量和黏滞性系数。虽然上式可以拟合岩土体稳态蠕变时段，然而，决不能推广于蠕变全过程，因为靠单一渐变线性方程是无法预测（报）失稳突变时间的。因而，这个模型未能推广使用，诸多科技人员根据临滑实测蠕变轨迹曲线，采用回归、多项式方程、梯度-正弦或流变方程等拟合外推来判断滑坡失稳的时间，即拟合法，有人将它称为灰色理论的组成部分（晏同珍，1993）。实际上，把滑坡体初始萌发的流变时段加以拟合外推，带有经验性和揣测性，也是不能准确预测的。

近半个世纪以来，诸多学者作出了大量在拉、压、弯曲、扭转受力状态下施加不同载荷比的岩土试件的滞后形变轨迹曲线，并且指出“滑坡剧滑时间就是在该曲线上寻求时间增量 $\Delta t \rightarrow 0$ 位移增量 $\Delta s \rightarrow \infty$ 的那一点”（郑颖人等，2007），这犹如在灰暗荒原燃起一堆智慧的篝火。

所谓滑坡发生的可预测性是指从形变轨迹曲线求解出岩土体稳态时段的终点，即失稳点，与它贴近的失稳伊始时段监测点赋值，即可预测出时域漫长的失稳时段的滑体剧滑时间 t_f 。因而稳态时段仅为滑坡预测预报内容中不可或缺的组成部分。

1965 年，日本斋藤迪孝等（张倬元等，1985；文宝萍等，1997）在室内沙土盘蠕变时效试验基础上提出了失稳蠕变阶段的数学模型，即

$$\frac{d^2y}{dt^2} = A \left(\frac{dy}{dt} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中： A 、 α 为待定系数。

在此基础上他们提出了岩土体蠕变阶段滑坡发生时间预报的经验公式，但因受限于试验条件，他们忽略了初期的稳态时段或称为线性稳态蠕变时段，导致误差幅值相差十几倍（即 $10^{+0.59}$ ）。即使这样，人们对斋藤迪孝提出的失稳时段的数学模式也缺乏应有的关注。

这就是当前岩土蠕变学理论、滑坡稳定性及其预测预报理论模式研究、探索

的基本成果和认同状况。

作者以为，马克斯韦尔、开尔文、斋藤迪孝等探索出的上述基本成果是卓越的，是开拓性的，是构筑蠕变学或者说岩土结构稳定性理论大厦的基石。

斋藤迪孝以沙土盘室内蠕变时效试验为依据归纳出的二阶微分方程式，作者从中受到极大的启迪，不，是震撼。因为该微分方程数学模型是非线性的，量化了滑坡体从渐变到突变的变化，并且不含有受力状态的显式项，故而该数学模型有望适合于岩土体在各种复合受力状态下失稳蠕变的时效性，具有普遍适用性。他们根据该方程的解，拟合蠕变后期实际监测赋值点，便预测（报）出滑坡体短期或临滑的剧滑时间 t_f ，不失为失稳时段预测预报的有效方法。

马克斯韦尔、开尔文的黏 - 弹性滞后体的数学模型中，恒定载荷力对时间求导后亦不含有载荷项，作者把它改写为二阶微分方程式，如（1）式所示。它描述了前期稳态时段形变时效的规律，引出一个尚待公认的岩体材料的黏 - 弹性滞后体的物性参数，以它来度量岩土材料时效性的强弱。这个物性参数系岩土脆性材料所特有的，即岩土体黏 - 弹性滞后的特性。这个微分方程唯拟合实际监测曲线求解，反馈出岩土材料物性参量 ξ ，它制约着蠕变全过程。这就是规律的可认识性与和谐性。因为严格来说，对岩土体而言，物性参量 ξ 完全相同的岩土块体是不存在的，更何况参与滑坡体蠕变时效的并非滑块自身而是滑动层面的岩土介质。

作者认为要准确预测岩土体的稳定性，首先要解决以下两个关键性的问题：

1) 原本两个孤立量化的岩土材料蠕变时效形变二阶微分方程（1）式和（2）式，作者把它们分别确认为岩土体处于稳态和失稳蠕变时段的数学模型，这两个方程能否拟合在同一条蠕变时效监测轨迹曲线上呢？其联立求解能否相互耦合，是否存在一个唯一的共轭点呢？即在曲线连续的条件下能否求解出轨迹曲线的拐点，即时效共轭点时间 t_p ？

2) 滑体一旦进入由稳态转向失稳的伊始时段，实际监测赋值点（即紧贴着拐点）能否就预测预报出其剧滑时间 t_f ，即赋予微分方程组的可预测预报性？

为此，作者以岩土材料试件在各种受力状态下的实际监测轨迹曲线为依据，采用（1）和（2）微分方程解的拟合，遵循曲线拐点形变量和形变率连续性，导出关于以 t_p 和 t_f 为未知量的二元非线性超越代数方程组，论证如函数方程在 t_p 和 t_f 的时域范围内函数值发生变号，则函数有零解，并应用多重二分法数值程序求解得出实数根 t_p 和 t_f ，最终成功地锁定（1）和（2）微分方程联立确认为岩土蠕变时效微分方程组。该方程组是岩土材料蠕变学理论的基本方程，以揭示岩土材料在恒定施加载荷作用下随时间推移而发生形变的时间效应，暂称为蠕变时效规律。作者以马克斯韦尔、开尔文黏 - 弹性时效性模型和斋藤迪孝非线性微分方程为基础，导出了岩土蠕变的预测方法。

同时应指出,在解决以上两个关键性问题时,蠕变时效载体的变化规律是指岩土整体所呈现出的宏观规律,如同试验中岩土材料试件变化是指试件整体的形变量或者整体位移量的宏观规律。这是岩土体自身的物性参数,虽然各点位微元体的形变无规律性,但整体宏观却呈现出规律性(李四光,1976;杨人光等,1984)。

至此,读者会提出一个深层次的问题:上述(1)和(2)式二阶微分方程均不含有载荷项,如何反映出施加于试件上的载荷比 β ,或者它的倒数(即滑坡稳定性系数 K_{sf}) 在岩土材料蠕变时效规律中的内在联系,或者说能否赋予 K_{sf} 更深刻的内涵?

为此,作者在论证(1)和(2)方程组彼此耦合、并求解蠕变时效共轭点唯一性的同时,就演绎出方程组中各参数和施加载荷比 β 之间独立的相关函数关系的曲线族,并且发现时效失稳指数 α 曲线族重合为一条曲线。 $\alpha-\beta$ 相关函数曲线与岩土试件材料物性参数 ξ 以及受力状态(拉、压、弯曲、剪切、扭转)(维亚洛夫,1987)无关,作者称之为 $\alpha-\beta$ 规律关系曲线。其实 α 为方程(2)式的无量纲指数,故 $\alpha-\beta$ 规律关系与方程(2)式是相和谐的。因而,从任何一个滑坡监测轨迹曲线,演绎出 α 值,就可由 $\alpha-\beta$ 规律关系曲线反查出 β 值,它的倒数即为滑坡稳定性系数 K_{sf} 。因此,蠕变时效方程组赋予了 K_{sf} 稳定时间(年限)的内涵。对于滑坡体而言,严格来说,唯有滑体监测轨迹曲线方可给出有可信度的 K_{sf} 。

滑坡稳定性系数 K_{sf} 概念的确立,不难确认所谓滑坡理论即为滑坡稳定性理论。那么如何更确切地赋予蠕变时效方程组(1)和(2)式以及时效共轭点物理学含义呢?

作者应用量纲分析法,从(1)和(2)二阶微分方程式出发,导出蠕变时效系统的无因量纲,其中唯时效共轭点(t_p, y_p)为组合参数。

$$v_e = \frac{v_0}{\xi y_p}$$

式中: v_0 为稳态初始形变率; y_p 为时效共轭点的位移量。

当 $v_e = 1$ 时,岩土结构处于永久稳定;

当 $v_e > 1$ 时,岩土结构从稳态转向失稳蠕变。

故 v_e 具有判断岩土结构从稳态转向失稳的性质,称 v_e 为结构失稳判据,其共轭点即为失稳点。于是,岩土材料黏-弹性时效模型、稳态时段方程(1)式和失稳非线性时效方程(2)式构成岩土蠕变时效稳定性理论的基本方程组,并揭示出蠕变时效稳定性的一般性原理。滑坡稳定性系为岩土结构稳定的一个最典型的特例。其实,凡在恒定重力场驱动下的地壳板块、区域性地块以及地表上下的

建筑物和构筑物等均涉及蠕变时效稳定性问题。

可通过论述蠕变时效的可预测性、低值载荷比 β 相关函数的分析，导出失稳时段岩土体受力状态“自拟合”的规律与岩土体抗形变极限强度的时效性，由蠕变时效方程组的积分导出蠕变能量累积、储存和瞬息释放机制，并应用现代数值程序模拟试验分析法，探求区域性地块（殷跃平等，2009）巨大能量参数之间的内在联系。

在众多仁人志士的支持下，作者在20年的漫长时间里匍匐于浩如烟海的文献资料里求索、“蕴伟力而静持”写出本书，书中每个字句都凝聚着人类智慧的光辉！

本书所用主要符号说明

y : 蠕变体形变量 (位移或应变)

t : 时间

t_i ($i=1, 2, 3$): 天然滑坡稳态时段或者仅捕获到失稳时段的监测点顺序时间赋值

ξ : 岩土黏-弹性滞后系数, $\xi = \frac{E}{\eta}$

E : 岩土弹性模型

η : 黏滞性系数

$T_e = \frac{1}{\xi}$, 形变率衰减期

A : 失稳蠕变系数

α : 失稳蠕变时效指数

(t_z, y_z) (t_q, y_q): 分别为首、尾序拟合形变监测点时空坐标赋值

(t_p, y_p) : 形变轨迹曲线共轭点时空坐标 (首、尾序拟合形变时空坐标取自失稳时段上任意监测点的赋值)

(t_{ps}, y_{ps}) : 形变轨迹曲线拐点 (即失稳点) 时空坐标 (首、尾序拟合形变时空坐标取自失稳伊始时段上的赋值)

t_f : 试件失稳破坏或滑坡剧滑时间

β : 施加试件或天然滑坡滑移面上的载荷强度和其极限强度之比

$k_{sf} = \frac{1}{\beta}$: 天然滑坡稳定性系数

v : 形变率 $\left(v = y' = \frac{dy}{dt} \text{ 或 } \dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \right)$

v_0 : 稳态初始形变率

v_p : 失稳点形变率

y_∞ : 稳态时效极限形变量

y_e : 岩土试件弹性形变量

σ_c : 岩土材料长期强度

y_{zk}, y_{qk} : 分别为首、尾序拟合位移门槛值

ξt_p : 蠕变时效参数

$v_e = \frac{v_0}{\xi t_{ps}}$: 失稳点判据

$\hat{v}_{er} = \frac{y_p}{v_0 t_p}$: 稳态结构参数

$\hat{A}$: 失稳系数无量纲数 ($\xi > 0$)

k_T : $t_q - t_p / t_z - t_p$ 为首、尾序拟合赋值点时间差之比之倒数

目 录

前 言

绪 论

第 1 章	岩土蠕变时效联立微分方程组的确立	(1)
1.1	滑坡体工程地质及动态宏观特性	(1)
1.1.1	滑坡体宏观形变及失稳破坏形式	(1)
1.1.2	滑坡体萌发流变阶段和马克斯韦尔滞后模型	(2)
1.1.3	滑坡体蠕变时效动态宏观特性	(4)
1.2	蠕变时效联立方程组确立	(5)
1.2.1	蠕变时效研究——载体及宏观整体规律性	(5)
1.2.2	蠕变时效联立微分方程组	(6)
第 2 章	蠕变时效联立方程解暨方程耦合性的论证	(8)
2.1	试件蠕变时效方程解及其参数和拟合赋值点的函数关系	(8)
2.2	蠕变时效联立方程组函数解的耦合性和可预测性的论证	(10)
2.3	共轭点 (t_p, y_p) 的赋值数及时效参数的赋值	(13)
2.3.1	花岗岩试件受拉蠕变时效试验	(13)
2.3.2	砂岩梁弯曲蠕变时效试验	(15)
2.3.3	侏罗纪塑性黏土的扭转剪切试验	(15)
2.3.4	闪石、盐岩和砂岩受压及冻结亚黏土剪切蠕变时效试验	(16)
2.3.5	试件蠕变初始状态和取值原则	(18)
2.4	蠕变时效参数和载荷比 β 的关系	(19)
2.4.1	稳态蠕变初始形变率 v_0 和岩土材料的长期强度 σ_c	(19)
2.4.2	黏 - 弹性滞后系数 ξ	(21)
2.4.3	共轭点时效参数 ξt_p	(23)
2.4.4	失稳蠕变时效稳定性指数 α	(25)
第 3 章	线性稳态转向失稳蠕变联立二阶微分方程组暨临滑近似显式 预测公式	(27)
3.1	等速蠕变形变率 $\dot{\gamma}$ 和破坏时间 t_r 之积守恒式的分析	(27)

3.2	线性稳态转向失稳蠕变联立方程组及其解	(29)
3.3	滑体临滑近似预测公式	(33)
第4章	滑坡逐增速滑动暨失稳蠕变预报方程及其显式预报公式	(36)
4.1	失稳蠕变时段预测代数方程	(36)
4.2	失稳蠕变时段显式预报式及其与拟合赋值点的制约关系	(37)
4.3	预报方程实数根的数值解及其鉴别式	(40)
4.4	处于失稳时段实际滑坡的预测预报分析	(43)
4.4.1	意大利瓦伊昂滑坡	(44)
4.4.2	某露天矿边坡滑坡分析	(46)
4.4.3	金川矿山滑坡	(48)
4.4.4	基辅市斯塔罗纳沃德尼次基滑坡	(48)
4.4.5	链子崖危岩体形变分析	(50)
4.4.6	内蒙古平庄西露天煤矿边坡滑塌	(52)
第5章	蠕变时效稳定性几个问题	(54)
5.1	蠕变时效系统量纲分析	(54)
5.2	时效性参数 v_0 , A 与 β 的函数关系	(56)
5.2.1	共轭点 (t_p, γ_p) 及其 $\xi t_p, v_e$ 的物理力学性质	(56)
5.2.2	失稳时效强度无量纲数 $\hat{A}$ 和 ξt_{ps} 的函数关系	(58)
5.3	蠕变时效的可预测性	(60)
5.4	低值载荷比 β 的相关函数族分析	(62)
5.4.1	试件低值载荷比 β 的相关函数分析	(62)
5.4.2	低值载荷比 β 稳态时段的轨迹曲线特性	(65)
5.5	失稳蠕变时效轨迹曲线的自拟合同规律和材料强度时效性	(66)
5.6	蠕变时效能量密度的累积、储存和释放机制	(69)
5.6.1	稳态蠕变时效动能密度暨转向失稳蠕变的必要条件	(69)
5.6.2	失稳蠕变时效动能密度 $\frac{1}{2}v^2$ 及其时域分布的非线性	(72)
5.6.3	花岗岩受拉能量密度分析	(75)
5.6.4	超巨大规模尺度能量的数值程序模拟试验分析	(77)
第6章	滑坡时间预测预报	(81)
6.1	二元非线性超越方程组的建立	(82)
6.2	滑坡预测(报)方程组实数根求解	(85)
6.2.1	失稳点函数和首序拟合位移门槛值 y_{z_k}	(85)
6.2.2	失稳时段尾序拟合位移门槛值 y_{q_k}	(88)
6.2.3	失稳函数方程有零解拟合赋值点条件	(89)
6.2.4	实数根 t_p 和 t_f 数值求解	(91)

6.3	我国金川倾倒式边坡破坏预测预报分析	(91)
6.3.1	金川倾倒式边坡蠕变曲线 $y_{II.4}$ 预测预报分析	(91)
6.3.2	金川倾倒式边坡蠕变时效曲线 y_{311} 预测预报分析	(92)
6.4	宝成线 K ₁₆ 标段滑坡分析	(93)
6.5	卧龙寺和香港某滑坡预测预报分析	(94)
6.6	天水黄土地区孟家山滑坡	(97)
6.7	长江西陵峡姜家坡滑坡预报分析	(98)
6.8	黄茨大型滑坡实例预报分析	(100)
6.8.1	黄茨滑坡概况	(100)
6.8.2	地面监测网设置和蠕变时效曲线	(100)
6.8.3	滑坡蠕变时效参数和滑坡蠕变预报	(103)
6.9	小结	(106)
第7章	滑坡预测(报)性监测和发展趋势	(107)
7.1	监测点、线网格的设置原则	(108)
7.2	滑坡蠕变时段和型态鉴别	(108)
7.3	滑坡稳定性发展趋势预测	(110)
7.4	古滑坡监测和发展趋势预测	(114)
7.4.1	三峡库区巫山县淌里滑坡监测曲线预测(报)分析	(115)
7.4.2	清江水库茅坪滑坡监测与预测(报)性分析	(117)
结束语		(120)
附录 I	滑坡剧滑预测时间与预报日期换算	(121)
附录 II	流变微分方程数学模式	(124)
主要参考文献		(126)

第1章 岩土蠕变时效联立微分方程组的确立

1.1 滑坡体工程地质及动态宏观特性

造山运动、火山爆发、大气环境蚀化和雨水冲刷等作用共同造就了斜坡岩土体，同时形成了各种类型岩土体的构造特性，例如岩层层面、软弱夹层、各种成因的断裂裂隙，即岩土体的结构面。各结构面中断了岩土体的连续性，其在空间的分布和组合将岩土体切割成不同性状的结构体。再加上成岩的机制不同，每块结构体产状分布以及物理力学性质又不尽相同，因而岩土体微元体的应力分布十分复杂。它不仅与结构体空间几何分布有关，而且和结构体物态特性及所构成的边界条件有关。

然而历经漫长的时间过程，岩土体在以自身恒定重力为主的力的长期作用下，从斜坡山体的弹塑性小应变到逐渐产生大形变，或地表裂隙扩张产生平移和沉陷，或结构面滑移（这是山体工程地质宏观特性所决定的），呈现出明显的、宏观的大形变滑动迹象，便形成了斜坡山体的滑坡、次级滑坡或危岩体，简称为滑坡体。

本节注重阐明滑坡体在自重恒力驱动下大形变的时间效应，即滑坡体时效控制滑移的规律，这是岩土介质物态所特有的性质。

1.1.1 滑坡体宏观形变及失稳破坏形式

将现有工程地质界所认同的岩土体形变和宏观破坏形态归纳整理为5种组合形式，即：蠕滑－拉裂，滑移－压致拉裂，弯曲－拉裂，塑流－拉裂，滑移－弯曲。

具体宏观变形破坏的演变过程可参阅张倬元等编著的《工程地质分析原理》9.4节（1981年12月，第1版），该书已作了详尽描述。

以下为作者分析的上述5种（类）组合形式的共同特性：

1) 在自重应力作用下，岩土斜坡山体坡顶后缘部处于拉伸受力状态，斜坡面发生卸载回弹形变。采用准各向同性弹性模型有限元数值程序模拟计算都会得出

量化结果，称为斜坡效应。倘若山体底部分布有顺坡结构的软弱间断面，则斜坡效应形变包含着局部破裂，甚至产生新的表生破裂面，同时坡面产生卸载回弹滑移。

2) 5 种组合形式中有 4 种是拉裂破坏。这就是说，凡岩土脆性材料，其抗压强度远大于抗拉强度。特别是压致拉裂面自下而上的扩展，更凸显出岩土材料的强度特性，成为斜坡山体萌发流变而进入蠕变形变的前提。

3) 滑坡体的稳定性亦遵循材料稳定性的普遍规律，即取自重下滑力和岩土体极限抗滑力之比为滑坡稳定性系数 K_{sf} ，它决定了滑坡滑动（移）面。众所周知， K_{sf} 反比于自重下滑力，故只有在自重下滑力驱动下才会在斜坡山体一定深度内存在一道最不稳定的滑移主体剖面线，即当 K_{sf} 为最小值时，才会导致滑移面的贯通。“变形体开始明显转动，陡倾的阶状裂面成为剪应力集中带，陡缓转角处的嵌合体逐个被剪切、压碎、并伴有扩容，使坡面微微隆起”（张倬元等，1985）。最终陡倾裂面与平缓滑移面构成一贯通滑移面，倘若侧向非明显受控于结构面的影响，则滑体后缘横向空间形变多呈环向分布，两侧以牵引式扩展为主，形成有限滑体。

4) 滑坡体从以受自重力为主（含有各种营造力）到恒定自重力（作用力等于反作用力）平衡状态下的滞后形变即蠕变时效，最后发生突发性的整体崩塌和剧滑。那么，岩土蠕变滞后性即时效性的物态模式是什么呢？

1.1.2 滑坡体萌发流变阶段和马克斯韦尔滞后模型

上述 5 种基本组合形式，其实就是滑坡体萌发流变阶段的 5 种组合形式。滑坡体在以自重力为主，内外营造力为辅的长期作用下缓慢形变，出现滑动迹象，坡顶后缘已有裂隙扩大，或产生新的表生破裂面，有的伴有发声现象。

如对我国金川矿山倾倒式的滑体监测出的 $y-t$ 曲线，其初期萌发阶段形变量增大，应是地质构造面延伸、爆破裂隙面发展、内应力释放的结果，此过程中滑坡体优势面渐趋形成与发育，最终在恒定自重力驱动下滑体沿优势面（滑移面）进入蠕变状态，详见本书 6.3 节，不论平移还是沉陷均达到米的数量级。

又如 1992 年，三峡库区巫山在连日暴雨下发生大断裂，裂口拉开近 1m 宽，这是因为断裂结构面在雨水渗透下极限强度降低，局部破碎、贯通，但在地应力重组过程中又受制于周边地质条件导致滑坡从萌发返回稳定停歇状态。

由此看出，滑体萌发状态的形变量，远超出了岩土介质在黏 - 弹性范围内的应力应变量，实属大形变，故称之为萌发流变。萌发流变呈现出宏观整体性。

滑坡体稳定性所遵循的规律决定了滑坡体持有有限的体积，并存在一个优势滑动面，其稳定性系数 K_{sf} 为最小值，但 $K_{sf} > 1$ 。在该滑动面上自重下滑力和各种

结构力随时间的推移进行重组，局部发生破碎和拉裂而贯通，造就优势滑动面的形成和滑移，促成滑坡整体宏观的形变。

关键在于在滑坡稳定性系数 $K_{sf} > 1$ 的情况下，岩土体的什么物态特性能导致滑动面持续滑移呢？在 20 世纪中叶，许多学者通过岩土材料试件试验和滑坡形变长观资料分析，提出了很多含有滞后形变的黏 - 弹性滞后的模型。不妨以马克斯韦尔黏 - 弹性滞后数学模型为例，其流变量 y 由弹性形变量 $\frac{\sigma L_v}{E}$ 和滞后形变量 $\frac{\sigma L_v}{\eta} t$ 组合而成，即

$$y = \frac{\sigma L_v}{E} + \frac{\sigma L_v}{\eta} t \quad (1.1)$$

式中： E 和 η 分别为岩体弹性模量和黏滞系数； σ 为载荷应力； L_v 为滑坡体滑动规模长度； t 为时间。

显然，对于滑坡优势滑动面，在漫长的地质年代里有

$$\frac{\sigma t}{\eta} \gg \frac{\sigma}{E} \quad (1.2)$$

故黏性滞后流变量远大于弹性形变量，呈现大变形的流变。

当滑坡体滑动面趋近形成时，必将受控于重力场恒力作用，从萌发流变状态进入整体性蠕变状态。现把 (1.1) 式对时间求导数，得出形变率的表示式，即

$$\dot{y} = \frac{L_v}{E} \cdot \frac{d\sigma}{dt} \left(1 + \frac{E}{\eta} t \right) + \frac{\sigma L_v}{\eta} \quad (1.3)$$

当施加载荷应力 σ 恒等于常数，即 $\frac{d\sigma}{dt} = 0$ 时，则由 (1.3) 式给出滑坡蠕变的初始形变率，即

$$\dot{y} = \frac{\sigma L_v}{\eta} = v_0 \quad (1.4)$$

它反比于滑动材料的黏 - 滞系数 η ，其量纲为 $[\text{MPa} \cdot \text{s}]$ ；正比于下滑力强度 σ ，其量纲为 $[\text{MPa}]$ 。因此 $\frac{\sigma L_v}{\eta}$ 为速度量纲。就蠕变时效而言，马克斯韦尔黏 - 弹性滞后的蠕变数学模式为

$$y = \frac{\sigma L_v}{\eta} t = v_0 t \quad (1.5)$$

这就是说，它从萌发流变以形变率 v_0 形式进入线性蠕变状态，或者说马克斯韦尔黏 - 弹性滞后模式是线性蠕变模式，与突加载荷相等价。

因而，萌发流变过程是滑坡体滑动面的形成过程，必将出现滑动（移）的迹象和端倪，故它是区别斜坡山体和工程边坡的重要标志。萌发流变为滑坡普查以及滑坡预测预报提供了足够长的时间，这就是滑坡可预测预报规律自身所含有的