

Hu
Jiqi

Lixue texing
Zhong De Yingyong Yanjiu

黄土流变力学特性及其在 滑坡分析预报中的应用研究

闫芙蓉 著



中国矿业大学出版社

黄土流变力学特性及其在滑坡 分析预报中的应用研究

闫芙蓉 著



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是一本有关黄土宏微观流变力学特性及其在滑坡动态发展趋势分析预报中的应用研究专著。主要内容包括三部分:黄土的宏微观流变力学特性研究;考虑流变效应的黄土滑坡稳定性分析评价;滑坡动态发展的趋势预报(时间预报)。

本书可供从事岩土工程、地质工程专业的科研、设计和施工的科技人员参考,也可作为相关专业研究生和教师的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

黄土流变力学特性及其在滑坡分析预报中的应用研究 /

闫芙蓉著. — 徐州:中国矿业大学出版社, 2017.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3557 - 2

I. ①黄… II. ①闫… III. ①黄土—岩体流变学—研究②黄土—岩质滑坡—研究 IV. ①TU444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 128582 号

书 名 黄土流变力学特性及其在滑坡分析预报中的应用研究

著 者 闫芙蓉

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印刷科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 8 字数 220 千字

版次印次 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

我国黄土分布广泛,滑坡类型十分典型,从理论上探讨其形成、运动机理可以为地质灾害相关部门、管理决策机构科学地确定成灾范围和预报时间提供技术支持,规避滑坡风险,能更有效地防灾减灾,保障人民生命财产安全,不仅对黄土地区的滑坡监测、治理建设而且对其他重大工程建设都具有普遍的理论价值和现实意义。

另外,无论学科如何发展,依据于黏弹塑性力学的岩土体蠕变(流变)理论是滑坡滑动时间预报的基础。根据岩土体蠕变理论,滑坡的变形破坏是其内部应力和岩土体强度随时间不断变化的结果,位移、应变及其他是这种变化的直接或间接反映。因此,岩土体蠕变理论揭示了滑坡变形破坏的本质,描述了滑坡应力、强度、应变、位移随时间变化的内在规律。因而,以岩土体蠕变理论为基础,研究滑坡变形过程中应力、强度、应变、位移、应变(位移)速率等随时间的变化规律,进而预测滑坡滑动时间,对揭示滑坡过程的实质和预测其稳定有实际意义,对深化和丰富黄土边坡的预测理论研究和促进滑坡研究的发展,也有重要的理论价值。

全书以国内外学者的有关研究成果和作者的研究为依据,介绍了流变理论及其在滑坡分析预报中的应用。通过文献收集、野外调查取样、室内试验、理论分析等手段对陕北延安市地区广泛分布的黄土进行了物理、力学特性和流变力学特性的系统试验研究,并在此基础上进行了黄土滑坡的黏弹塑性流变数值模拟,以研究长期强度作用下的土质边坡变形破坏机理。另外,根据黄土滑坡的流变特性,研究滑坡发生发展过程中的动态参数、应力变化和时间之间的相互关系,进一步探讨了滑坡时间预报的分级预报模式。

通过常规三轴试验研究了土体的破坏形式,具有明显的塑性破坏特征,主要变形形式为在低含水量和低围压情况下表现为轴向变形,土样变形初期呈轴对称形状,随着塑性变形的开始和增大,土样侧向鼓出,发生剪切破坏。

通过黄土的宏观蠕变特性试验研究了黄土的流变特性并建立了相应的弹塑性本构模型。低应力水平时,黄土的蠕变表现为衰减蠕变过程,高应力时表现为非衰减蠕变过程,整个蠕变过程由三个阶段组成:衰减蠕变阶段、等速蠕变阶段和加速蠕变阶段;当黄土的蠕变应力 σ 小于屈服应力 σ_s 时,黄土蠕变表现

出线性黏弹性特点,当黄土的蠕变应力 σ 大于黄土的屈服应力 σ_s 时,黄土的蠕变表现出线性黏塑性特点,通过模型理论分析认为可以建立这样的本构模型,即用两个 Kelvin 模型组成的五元件的广义 Kelvin 模型和与一个滑块并联的 Maxwell 模型来描述黄土的黏弹塑性特性。对黄土的流变特性进行了不同加载条件下的微观结构分析,之所以会出现蠕变三阶段及黄土流变表现为衰减蠕变,因为应力增加和黏滞阻力减少,土颗粒骨架由破碎挤密到重新组合定向排列的过程。

通过有限元数值模拟分析了塑性区变形的扩展,天然状态下滑坡塑性屈服区仅出现在数量有限、面积甚小的局部范围内,而流变分析塑性区扩展范围明显大于弹塑性分析的范围,但未形成贯通屈服面,说明长期强度作用下的应力场、位移场和塑性区扩展范围均大于未考虑流变特性的弹塑性分析数值,从另一侧面说明了在进行滑坡稳定分析和变形破坏机理研究时必须考虑土体蠕变的影响。

根据流变特性试验结果,将滑坡时间预报模式分为三级:趋势预报、 t_r 预报和 t_c 预报,根据 $\Delta\tau$ 与 τ_∞ 的比较,得出趋势预报;根据流变试验结果,推出 t_c 预报计算公式;滑坡加速运动的加速度,推导出 t_r 预报公式。

本书是对黄土地区考虑流变效应的滑坡稳定性分析及动态发展趋势预测预报研究的总结,涉及的部分研究内容得到长安大学范文教授、李同录教授的指导,得到邓龙胜博士、熊炜博士的帮助,研究生胡雪源参与了书中文字校对和部分插图工作,作者在此谨表示诚挚的谢意。另外,在成书过程中,参考了书末所列的著作和论文,在此对这些著作和论文的作者表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在疏漏或不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 选题依据与研究意义	1
1.1.1 选题依据	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 土体流变力学特性研究	3
1.2.2 黄土滑坡变形破坏机理及预测预报研究	7
1.2.3 土体流变及在滑坡分析中的应用研究	11
1.3 主要研究内容	11
1.4 研究思路及技术路线	13
1.4.1 研究思路	13
1.4.2 采用的技术路线	13
第 2 章 黄土滑坡发育的地质环境、类型及分布特征	15
2.1 研究区地质环境背景	15
2.1.1 自然地理概况	15
2.1.2 地质构造	17
2.1.3 地形地貌条件	18
2.1.4 地层岩性	19
2.1.5 水文地质条件	20
2.2 研究区黄土滑坡的主要类型	22
2.2.1 黄土—基岩滑坡	22
2.2.2 黄土滑坡	23
2.3 黄土滑坡的形成影响因素	24
2.3.1 地形地貌条件	24
2.3.2 滑坡地层岩性和斜坡结构类型	26
2.3.3 地质构造	26
2.3.4 水的控制作用	28
2.3.5 人类工程活动对地质环境的影响	29
2.4 发育分布特征及变形破坏模式	30
2.5 小结	31

第3章 黄土物理力学特性试验研究	33
3.1 黄土基本物理特性试验	33
3.2 黄土反复剪切试验	33
3.2.1 试验方法	34
3.2.2 试验成果整理	34
3.3 非饱和黄土直接剪切试验	37
3.3.1 理论概述	37
3.3.2 试验设备及方法	38
3.3.3 试验结果整理	40
3.4 常规三轴压缩试验	46
3.4.1 黄土的应力应变特征	47
3.4.2 黄土的强度特性	51
3.5 小结	52
第4章 黄土的流变特性研究	54
4.1 土的流变概述	54
4.2 土的典型蠕变特性	55
4.3 黄土蠕变试验及蠕变特性	56
4.3.1 试验概述	56
4.3.2 试验方案	60
4.3.3 试验结果整理	61
4.4 黄土流变本构模型的建立	69
4.4.1 黄土的蠕变经验本构模型	69
4.4.2 黄土的非线性流变本构模型	71
4.5 黄土的长期强度特性	74
4.5.1 长期强度曲线	74
4.5.2 土的长期破坏准则	75
4.5.3 长期强度特性	76
4.6 流变的微观变形机理研究	78
4.7 小结	83
第5章 考虑流变效应的黄土滑坡变形破坏数值模拟	85
5.1 有限元软件简介	85
5.2 弹塑性分析和流变分析本构方程的选取	85
5.2.1 弹塑性模型本构方程	85
5.2.2 流变模型分析	86
5.3 边坡失稳破坏的判据	88

5.4 地质模型的建立	89
5.5 计算参数的选取	89
5.5.1 弹塑性计算参数的选取	89
5.5.2 流变计算参数	89
5.6 数值计算结果及其分析	90
5.6.1 位移场分析	90
5.6.2 剪应变分析	92
5.6.3 应力场分析	92
5.7 小结	94
 第6章 滑坡动态发展的趋势预报(时间预报模式)	96
6.1 概述	96
6.2 滑坡的动态类型及其运动机制分析	97
6.2.1 不平衡剪应力分析	97
6.2.2 滑坡的动态类型	97
6.2.3 滑坡运动机制分析	98
6.3 土的流变特性与滑坡时间预报	100
6.3.1 分级预报模式及预报参数和标准	100
6.3.2 流变特性与趋势预报	100
6.3.3 流变特性与 t_c 预报	101
6.3.4 流变特性与 t_r 预报	101
6.4 工程实例分析	102
6.4.1 滑带土的基本特性参数	103
6.4.2 分级预报及模式	105
6.5 小结	107
 第7章 结论与展望	108
7.1 主要研究成果与结论	108
7.2 本书主要创新点	109
7.3 进一步研究展望	110
 参考文献	111

第1章 绪 论

1.1 选题依据与研究意义

1.1.1 选题依据

黄土在西北地区广泛分布,其干旱半干旱的地表特征以及黄土自身的大孔隙架空结构和对水的结构敏感性决定了黄土力学特性研究在黄土地区工程实践中的重要地位^[1-5]。

随着各类工程建设规模的扩大以及对黄土体及其工程特性认识的深入,认识到黄土不仅具有弹塑性,而且还具有黏滞性,是一种黏弹塑性体,在描述和处理黄土力学性能方面,只沿用弹性或弹塑性理论将存在明显的缺陷,必须考虑其性能的时间效应或流变性质,这样在土的本构方程里就不仅仅包含应力应变,应该还包括时间。

在许多情况下,土的蠕变强度对于土工问题有着重要意义,例如土坡的稳定问题,破坏可能从土体的局部高应力水平区开始,向外逐步扩展,达到土体剪切破坏即发生滑坡。土体的深层蠕变可经历很长时间,甚至几年,所以在进行边坡或滑坡稳定研究时必须考虑土体的流变效应。

滑坡是近几年来频繁发生的一种严重的地质灾害,尤其是在外界因素发生突然改变(如地震、强降雨等)情况下,往往会发生大的滑坡,摧毁建筑,堵塞交通,对人民生命财产造成相当巨大的损失。我国是一个多山国家,滑坡相当频繁,三峡库区较大规模的崩滑体就有2 490个,1981年雨季宝成铁路发生滑坡289次,中断行车两个月;中国宁夏海源及秘鲁Yungay特大滑坡灾害,伤亡人数均以万计;意大利的瓦伊昂滑坡、爪哇1919年泥石流均造成数千人的死亡;日本同类灾害的经济损失为15亿美元/年(N. Ohhira,1982);意大利在20世纪70年代的滑坡损失为11.4亿美元/年(Arnould,1982);印度因交通干线滑坡所造成的滑坡损失达10亿美元/年(Mathur,1982)^[6]。如果能够准确分析滑坡的稳定性并进行预测预报,则可以提前采取相应的防灾减灾措施,以便将这类灾害造成的损失降低到最低限度。另外,滑坡的稳定性还关系到工程建设和运行期间的安全和经济效益,因此开展滑坡的稳定性分析和预测预报研究,具有非常重要的经济价值和工程实践意义。

滑坡是一种性质复杂的坡体病害,它受地质条件、水文条件和岩土性质等环境因素与内部条件的影响和制约很大。因此,滑坡的预报研究必须是以每一个具体滑坡的发生、发展条件和动态、力学规律的深入研究与清楚认识为基础。像滑体、滑带岩土工程性质,发生发展机制,动态规律和力学条件等,是能否准确预报滑坡的关键所在^[7]。

根据滑坡岩土的流变特性,滑带土强度衰减规律和滑坡渐进破坏规律研究的力学与动

态模型试验相结合,建立滑坡发生发展过程中动态参数、应力状态和时间之间的相关关系,并据此提出滑坡分级预报模式。根据岩土体的流变特征与滑坡分级预报的关系,提出具体的分级预报模式。

综合运用流变力学的长期强度特征、流动特性和蠕变特性,对滑坡进行时间预报,才真正考虑了力与变形间的实质问题。将受力状态与动态规律相结合是解决滑坡时间预报的一个关键。

滑带土的长期强度特征对滑坡的发生发展趋势起决定作用,是流变特性作为滑坡破坏时间预报的一个重要强度标准。

土的蠕变变形根据恒定荷载的大小不同可分为两种基本方式:

① 衰减蠕变[图 1-1(a)]——在较小恒定荷载作用下,土体蠕变速率逐渐减少,最后趋近于零,而蠕变变形趋于一个稳定的极限值,不会导致土体发生破坏。

② 非衰减蠕变(不稳定蠕变)[图 1-1(b)]——当土体所受恒定荷载超过某一极限值时,变形随时间不断增长而最终导致破坏。根据应变速率的不同,其蠕变过程可分为三个阶段:

a. 第一蠕变阶段 AB 段——此阶段土的蠕变曲线斜率逐渐变小,蠕变速率随时间而衰减,当达到 B 点时,应变率处于蠕变过程的最小值,因此又称为衰减蠕变阶段或初始蠕变阶段。

b. 第二蠕变阶段 BC 段——蠕变曲线近似为一倾斜直线,应变速率大体保持恒定不变,一直随时间发展持续到 C 点,又称等速蠕变阶段。

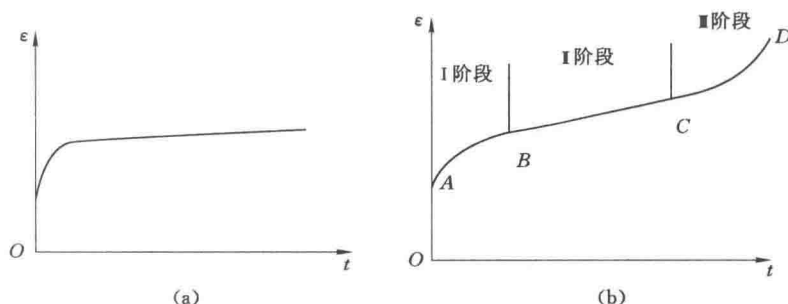


图 1-1 不同荷载条件下的土体蠕变变形曲线

(a) 衰减蠕变; (b) 非衰减蠕变

c. 第三蠕变阶段 CD 段——为加速蠕变阶段,应变速率由 C 点开始迅速增加,最终导致土体的破坏,因此又称为加速蠕变阶段或破坏阶段。

岩土材料蠕变变形的发展趋势取决于剪应力值与长期强度间的关系,土的长期强度曲线见图 1-2。当剪应力达到长期强度时,岩土材料向破坏方向发展,曲线规律均由线性状态转变为非线性。

① $\tau < \tau_{\infty}$, 为衰减蠕变,变形随时间逐渐减少,最终趋于稳定。

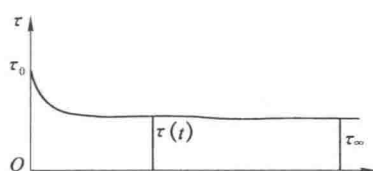


图 1-2 土的长期强度曲线

② $\tau = \tau_{\infty}$, 稳态蠕变, 变形速度保持为常数。

③ $\tau \gg \tau_{\infty}$, 非稳定蠕变, 变形随时间逐渐增大, 速度递增。当略大于 τ_{∞} 时, 等速时间会很长, 远大于 τ_{∞} 时, 等速时间很短, 很快进入破坏状态, 高速滑坡就属于这种情况。

综合以上可以看出, 综合运用流变力学的长期强度特征、流动特性和蠕变特性, 对滑坡进行时间预报, 才真正考虑了力与变形间的实质问题。将受力状态与动态规律相结合是解决滑坡时间预报的一个关键。只要以滑坡动态规律及类型和力学机制分析为基础, 以岩土流变力学的蠕变特征、流动特征和长期强度的有关计算理论和试验方法为手段, 是可以提出滑坡时间预报或趋势性预报途径的, 根据岩土的流变特征与滑坡分级预报的关系, 还可以提出具体的分级预报模式。不过由于滑坡本身的复杂性, 这些方法还有待进一步的研究和完善。

1.1.2 研究意义

土的流变是工程流变学的一个重要分支, 关系到地质灾害防治(如滑坡、泥石流等)和各类大型工程建设(如建筑物的长期沉降、基坑工程、边坡等)的长期安全和稳定性。对揭示滑坡过程的实质和预测其稳定有实际意义, 为滑坡分析预报提供依据, 为边坡稳定性分析提供研究思路, 深化和丰富黄土边坡的预测理论研究, 对促进滑坡研究的发展也有重要的理论价值。

我国黄土分布广泛, 滑坡类型十分典型, 从理论上探讨其形成、运动机理可以为地质灾害相关部门、管理决策机构科学地确定成灾范围和预报时间提供技术支持, 规避滑坡风险, 能更有效地防灾减灾, 保障人民生命财产安全, 不仅对黄土地区的滑坡监测、治理建设, 而且对其他重大工程建设都具有普遍的理论价值和现实意义。

另外, 无论学科如何发展, 依据于黏弹塑性力学的岩土体蠕变(流变)理论是滑坡滑动时间预报的基础。根据岩土体蠕变理论, 滑坡的变形破坏是其内部应力和岩土体强度随时间不断变化的结果, 位移、应变及其他是这种变化的直接或间接反映。因此, 岩土体蠕变理论揭示了滑坡变形破坏的本质, 描述了滑坡应力、强度、应变、位移随时间变化的内在规律。因而, 以岩土体蠕变理论为基础, 研究滑坡变形过程中应力、强度、应变、位移、应变(位移)速率等随时间的变化规律, 进而预测滑坡滑动时间, 应是滑坡滑动时间预测预报研究的有效途径^[9]。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 土体流变力学特性研究

岩土材料是流变体, 在一定的应力条件下, 其流变力学性质就会明显表现出来, 例如隧道开挖后在二次应力场作用下围岩表现出明显的蠕变性; 边坡内软弱材料在地应力作用下的蠕变会逐渐形成滑动面从而形成滑坡等。这些岩土工程问题中, 一个显著的特点就是岩土体材料的应力、变形、强度等力学性质都与时间有关。所以, 土的流变力学特性的研究不

仅关系到地质灾害防治(如滑坡、泥石流等)、各类大型工程建设(如建筑物的长期沉降、基坑工程、边坡等)的稳定性和长期安全,而且具有重要的理论价值和工程实际意义。

古典的弹塑性理论认为物体在加载以后立即产生变形,应变只是应力的函数,而实际上,物体在受力变形过程中还存在与时间有关的变形性质,即流变性质。这就说明土体的函数关系中,应变不应该只是应力的函数,应该是应力和时间两个物理量间的函数关系^[10]。在岩土工程中,挡土墙的位移随时间的发展、斜坡和边坡稳定性随时间的发展破坏、地基土的长期沉降和倾斜、隧道施工时的地表沉降及变形,土石坝的长期沉降等,都说明土体不仅仅具有弹性、塑性,还具有黏滞性,是一种黏弹塑性体^[11-17]。

D. W. Taylor 和 W. Merchant^[18]于 1940 年率先在土体的固结分析中考虑土体的流变性质,实现了计算分析中考虑土体变形的时间效应。随后,在荷兰的 Geuze^[19]和陈宗基等^[20-22]国内外很多学者的努力下,考虑土体流变特性的理论和实践范围不断拓广,认识不断加深,并在岩土工程中发挥了重要作用。

流变性质研究分微观和宏观两方面。前者重点从土的微观结构研究土具有流变性质的原因和影响土流变性质的因素。陈宗基^[20]提出了片架结构理论。在基于速率过程(Rate Process 理论或称分子流动理论)的基础上,国外 J. K. Mitchell, R. G. Campanella, A. Singh^[23]、R. W. Christensen, T. H. Wu^[24]、Z. P. Bazant, K. Ozaydin, B. J. Krizek^[25], 国内施斌^[26,27]对黏性土的应力—应变和应力—应变—时间关系进行了研究。然而,微观结构的研究只能从理论上做定性分析,其发展程度不够,尤其是动态微观试验研究,由于试样制作的要求以及加载条件的限制等,使这方面的研究工作比较困难,其成果也就很难直接应用到工程实践中去。

目前各国学者所做的工作大部分属于宏观流变学的范畴。它假定土是均一体,采用直观的物理流变模型来模拟土的结构和特性,通过模型的数学力学分析,建立有关的公式,以定量分析土的流变性质及其对工程的影响。

下面分别从实验和模型两个方面来进行综述。

1.2.1.1 流变试验研究

土流变试验是了解土流变力学特性的最直观也是最重要的手段,试验的研究成果为流变本构模型研究奠定基础。

(1) 试验方法

土流变试验有两种方法:微观法和宏观法。目前,对土的微观流变试验的研究做的比较少,一般的细微观试验研究仅在于静态方面,即借助光学显微镜或扫描电子显微镜观察土的细微观结构,然后通过分析,提出土流变产生的细微观机理,确定土中导致流变的主要微观结构型式,或者得出一些具有明确物理意义的细微观参数来反映土的流变特性等。陈宗基教授就是通过黏土的微观分析,提出了片架结构理论,认为具有片架结构的黏土流变特征最为明显;葛修润、任建喜^[28]等通过对上海软黏土三轴蠕变过程的 CT 扫描,提出一个基于 CT 数定义的损伤变量,在此基础上建立了软黏土的损伤演化方程和黏弹塑性损伤本构方程。至于对土的流变的“动态”微观试验研究方面,由于受扫描电子显微镜对试样制作的要求以及加载条件等的限制,使这方面的工作较难开展。同济大学的陈冬元^[29]的硕士论

文中在这方面做了些尝试,通过加工制作的简易加载装置,用高倍光学显微镜观察了黏土蠕变的动态过程。王清^[30]从微观结构特征入手,将计算机技术和非线性科学理论有机结合在一起,进行了黏性土的微观结构特征与蠕变变形时效的研究工作。

土的宏观流变试验又包括了现场流变试验和室内流变试验。现场流变试验是在工程中实际监测岩土体的流变数据,如地基、土石坝的长期沉降变形、基坑开挖后侧壁向基坑临空面的位移、边坡的位移等。这方面需要依托实际工程,布置观测仪器进行定时测量。其优点是数据来源可靠,但是工作量比较大、花费时间长、所获取的数据也是有限的。

土室内流变试验是利用一些大型仪器对土样按研究的需要进行蠕变试验,试验仪器包括三轴流变仪、直接剪切流变仪及常规应变控制式三轴仪,试验可进行单轴或三轴的蠕变、应力松弛或者两者的耦合试验,由于蠕变试验较松弛试验更易于实现,因此一般多进行蠕变试验,然后根据蠕变试验的结果建立模型,并外推出其他结果。

由于流变本构模型的建立、模型参数的确定等都需要用到室内流变试验的资料,所以它的应用范围比较广,土的流变在这方面的研究也多,目前国内很多大学和科研机构均在土的流变试验方面做了大量的工作:孙钧^[7]利用三轴蠕变仪、直接剪切蠕变仪、三轴松弛仪等仪器对上海地下工程所遇到的三种典型软土进行了蠕变试验和松弛试验,并对其流变特性进行了总结;詹美礼^[31]将常规应变式三轴剪切仪改装成了应力式三轴仪,来进行上海软黏土流变特性的试验研究;史玉成^[32]将现有的三轴试验仪进行了改装,用于三轴应力松弛试验研究,取得了很好的效果。

(2) 加载方式

在三轴流变试验中一般有两种加载方式:分别加载和分级加载(陈氏加载法)方式。分别加载(或加应变)必须在野外取得若干完全相同的土样,而且在完全相同的仪器和试验条件、不同的应力(或应变)水平下同时进行试验,最终得到一簇不同应力(或应变)水平下的蠕变(或应力松弛)全过程曲线。分级加载(或加应变)则是在一个土样上施加不同的应力(或应变),在某级应力(或应变)水平下蠕变(或松弛)经历了预定时间或达到稳定后,则施加下一级的应力(或应变)水平,直至土样发生剪切破坏。相比较起来,分别加载方式最符合流变试验的要求,而且能直接得到土流变的全过程曲线,但因为试验过程中时间、仪器条件等难以控制,所以室内试验一般多采用分级加载方式。

在土的流变研究中,采用分别加载(或加应变)方式下得到的流变变形全过程曲线的形式比较方便,而分级加载下的流变曲线(阶梯形曲线)可用性小,所以多采用包尔兹曼(Boltzmann)线性叠加原理将分级加载(或加应变)下得到的流变曲线(阶梯形曲线)转化成分别加载的流变曲线形式。通常采用的方法是坐标平移法,即把每一加载的时刻作为这一级荷载下的蠕变曲线的初始时刻,而之后的时间都从该时刻算起,即时间都往前推,这种方法的根据是假定土体满足线性叠加原理,任一时刻的流变量为前面时刻每级荷载增量在此时刻流变量的总和。

(3) 荷载作用的时间及增量的确定

对于土蠕变试验的分级荷载增量,可预先进行土样的破坏试验,在预定的 σ_3 作用下,施加竖向荷载,假定破坏时的破坏荷载为 F ,预期蠕变试验中分 N 级加荷,则可以取破坏荷载

的 N 等份作为每一级的荷载增量,即 $\Delta F = F/N$;对于应力松弛试验,可取一最大的应变水平,取这一应变水平的 N 等份作为每一级的应变增量,一般在三轴应力松弛试验中可取最大应变水平 15%,直接剪切松弛试验为 10%。对于蠕变试验加下一级荷载的标准为连续 5 d 的总变形量小于 0.01 mm 或等速流动时连续观测 30~60 d;对于应变松弛试验的标准为连续 1 d 内应力值变化小于 0.01 或连续观测 15~40 d^[7]。

1.2.1.2 土体流变本构模型的研究

本构方程是用来描述土的应力、应变和时间关系的方程式,土的流变方程式一方面必须能反映土的流变特性,另一方面还必须考虑实际工程应用的可行性。在长期的研究工作中,人们曾提出许多种对岩土材料适合的流变本构模型。谢宁、孙钧^[33]对上海几种典型软土进行了大量的室内试验,总结了上海地区软土流变的经验模型为 $\epsilon = A_0 + At^k + Bt$;林斌^[34]通过室内单轴蠕变试验,建立了考虑损伤效应的西安 Q₃ 黄土流变本构模型。综合以上内容,可以将这些流变模型大体上归结为四类:元件模型、积分模型、经验模型和半经验半理论模型。

(1) 元件模型

元件模型是通过模型元件(牛顿黏性体 N、胡克弹性体 H 和圣维南塑性体 S)的串联和并联来模拟岩土体的流变行为,属于一维流变模型,其中包括三元件模型(Bingham 体)、西原模型、Burgess 模型、开尔文体、索费尔德模型等。

夏才初^[35]对各种元件模型进行了统一,提出了能描述岩石最复杂流变状态的流变模型,并介绍了以不同应力水平下的蠕变试验加载卸载曲线辨识各种流变模型及其参数的方法。

由于岩土体更多地表现出非线性特性,于是谢宁^[36]、邓荣贵^[37]、金丰年^[38]等提出了各种非线性元件模型,一般是将线性元件用非线性元件代替。

郑榕明^[39]认为仅用单纯的元件模型,通过积分方程或微分方程的表达尚无法全面描述岩土体的流变性质,就提出一个适合当地岩土性质的经验模型。

元件模型都是在单轴应力状态下建立起来的一维流变模型,从而只有一维流变模型才能用具体物理元件组合而成。而实际工程问题的受力状况一般是复杂的三维应力状态,所以元件模型很难用于三维流变微分模型表述。

(2) 积分模型

积分模型一般利用遗传蠕变理论,函数一般采用幂次函数、指数函数、对数函数、双曲线函数等,根据材料的特点,可以分为线性和非线性蠕变。CC 维亚洛夫^[39]曾提出过一个函数能概括上述各种方程。王祥秋^[41]用循环加卸载单轴剪切蠕变试验的方法,对黏土蠕变特性进行了研究,认为黏性土的核函数可用幂函数表示,高应力水平作用下(即当应力水平大于屈服极限时)黏性土的蠕变具有明显的非线性。

(3) 经验模型

相对于元件模型和积分模型来说,经验模型更加适用于软黏土。因为实际中大多数黏土在塑性部分才表现出显著的黏性,所以屈服面流变模型理论认为与弹性部分时间无关,为弹黏塑性模型。根据屈服面的多少,可分为单屈服面模型和双屈服面模型^[42-43];

R. Borja^[44]认为修正剑桥屈服面中硬化参数等向固结应力 p_c , 不仅是塑性应变也是时间的函数, 将流变模型与材料自身的流变特性结合起来, 比元件流变模型的三维形式更符合实际。文献[45-56]针对正常固结土和超固结土, 基于相关联准则和非关联准则, 提出了各种单屈服面模型、双屈服面模型、边界面模型和连续面模型。

(4) 半经验半理论模型

半经验半理论模型主要应用在具体工程中, 流变可以分为线性流变和非线性流变, 土体的线性流变部分可以用模型理论中的线性黏弹塑性问题考虑, 非线性流变部分则可以考虑用特定的经验模型来描述。非线性部分一般用幂次函数表示, 流变的模型很多, 如流变模型参数反演的加速遗传算法^[57, 58]、突变理论^[59, 60]、内蕴时间理论^[61, 62]等。谢星^[63]以模型元件描述线性流变, 以经验模型描述非线性流变, 建立了西安 Q_2 黄土的半理论半经验流变模型。

综上所述, 土体的流变是一个复杂的过程, 特性认识还不是十分清楚, 还有许多的工作需要开展:

① 关于土流变的微细观方面, 无论是试验还是理论都做的不多, 然而土体流变特性是由其内部结构所决定的, 对土体微细观结构尤其是动态特性的研究能很好地揭示和认识土体流变的机理和本质, 最好能将其与宏观流变力学特性相结合起来研究。

② 关于土体的非线性流变方面, 还有待进一步做更深入的研究。土体流变是非线性的, 并不满足线性叠加原理, 所以最终得到的曲线会有一些偏差。而且, 流变试验是一个长时间的过程, 试验过程中由于时间过长可能会引起土体某些性质的改变, 所以需要想办法解决由于流变试验时间较长所引起的一些问题。

③ 目前所进行的流变研究多是针对蠕变问题, 实际工作中土体的非线性流变是个非常复杂的问题, 既存在蠕变现象, 又存在应力松弛现象, 两者是交融在一起的, 而且实际工程中土体所受的荷载是变化的, 会存在加载和卸载, 甚至反复加卸载的情况, 所以应开展土体既有蠕变又有应力松弛作用下的流变特性研究。

1.2.2 黄土滑坡变形破坏机理及预测预报研究

1.2.2.1 黄土滑坡变形破坏机理研究

无论是对滑坡进行稳定性评价和滑坡灾害预测预报, 还是对滑坡进行防治, 都必须以滑坡分布特性、滑坡类型和滑坡形成机制为基础。尽管滑坡形成机理和运动过程是非常复杂的, 至今还不能很完善地对其作出合理的解释, 但目前所取得的研究成果还是很喜人并值得肯定的^[64-70]。

(1) 国外研究现状

太沙基(Terzaghi, 1950)^[71]是从土力学方面研究滑坡机理的开拓者, 他主要从滑带土孔隙水压力的变化来揭示滑坡机理, 同时也注意到了地质条件的控制作用。之后, Haefeli(1965)、Mogensen(1971)、Hvorslev(1951)等定量地研究了孔隙水压力对土体强度的影响。

A. W. Skempton^[72]关于黏性土的残余强度理论和捷尔—斯捷潘尼扬(G. Ter-

Sterpanian)^[73]关于土体蠕变过程的研究把对滑坡机理的研究进一步深入。

(2) 国内研究现状

许多工程地质学家、土力学家以及滑坡防治专家对滑坡形成的条件和作用因素、滑坡的受力状态、滑带土的强度变化规律、滑坡的破坏模式及发育阶段等问题进行了多方面的探索和研究。

徐邦栋^[74]等以滑动带成因和形态为主结合滑动特征,阐述了我国铁路建设中常见的沿已有软弱构造带(面)滑动的滑坡、因下伏软岩挤出形成的错落性滑坡、沿新生弧形面滑动的滑坡、胀缩土滑坡、黄土崩塌性滑坡等的发生机理和变化过程。

晏同珍^[75]根据滑坡发生的初始条件、原因及滑动方式,概括了滑坡形成的八种机理,即流变倾覆、应力释放平移、震动崩落及震动液化平推、潜蚀陷落、地层悬浮一下陷、高位能飞越、孔隙水压浮动、切蚀—加载等。

卢肇钧^[76]从应力状态和应力路径、应变、孔隙水压力、加荷速率受力时间、土体不均匀性等方面阐述了土体的破坏机理。

张倬元、王兰生^[77]等从坡体的地质结构和受力过程出发提出了5种滑坡破坏模式。

胡广韬^[78]提出滑坡滑动的“临床弹性冲动效应”机理。

徐峻岭^[79]提出滑坡滑动的“闸门效应”机理。

王兰生^[80]提出“平卧支撑拱”的作用机制。

王思敬、王效宁^[81]在大型高速滑坡能量分析及其灾害预测一文中,专门分析了高速滑坡运动全过程的能量变化,提出结构释能机理。

陈松^[82]认为巴东黄土坡滑坡是三峡库区构造强烈隆升、河流急剧下切、斜坡重力卸荷等各种作用相伴生的地质过程的结果。

黄润秋^[83]通过对20世纪以来发生在中国内地的典型大型滑坡灾害实例分析认为岩质滑坡和土层滑坡,都涉及复杂的演化机制及过程,其典型的地质—力学模式包括:滑移—拉裂—剪断“三段式”模式、“挡墙溃决”模式、近水平岩层的“平推式”模式、反倾岩层大规模倾倒变形模式、顺倾岩层的蠕滑(弯曲)—剪断模式等。每一类模式都具有其对应的岩体结构条件和特定的变形破坏演变过程。

殷跃平^[84]对武隆鸡尾山滑坡进行了研究,认为斜倾厚层山体滑坡视向滑动应具备5个条件:①层状块裂结构;②山体倾向阻挡;③临空视向剪出;④驱动块体下滑,下滑力逐渐增加;⑤关键块体阻滑。

通常大型岩质滑坡的发生一般都伴随有滑动面,王家鼎^[85]研究了强震作用下低角度黄土斜坡滑移的复合机理、饱和黄土蠕动液化机理、地震、灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理。

虽然有众多的学者在从事滑坡机理研究,但由于种种原因,目前国内外对滑坡机理全面、系统的研究还不够完善。一般情况下,针对特定地区、特定滑坡进行的机理研究成果,不能直接在另一地区的另一滑坡上应用,必须具体问题具体分析。

1.2.2.2 滑坡预测预报研究

进行滑坡地质灾害研究的目的是为了对其发生的可能性做出科学的评价并且对其

发生的时间做出准确的预测,只有在对滑坡分布特性、滑坡类型和滑坡形成机制进行详细分析的基础上,才能进行滑坡的预测预报研究,但由于滑坡形成机制的复杂性以及滑坡灾害的多发性,所以滑坡的预测预报一直和地震的预测预报一样,是一个直到现在也没有得到很好解决的世界性难题。

尽管人类对滑坡的研究已有 100 余年的历史,然而对滑坡的预报研究却起步很晚,在滑坡的专门研究中,日本学者斋藤(M. Satio)在 20 世纪 60 年代就提出了滑坡时间预报经验公式,可以作为滑坡预报研究工作的真正起点^[86]。在此之后,经过广大学者的苦心探索,滑坡的预报理论和方法有了较大的发展。经历了从现象预报、经验预报到统计预报、灰色预报再到非线性预报的历程,目前已进入了系统综合预报、全息预报和实时跟踪动态预报,以及将定性预报、定量预报和现代数值预报技术有机结合的综合预报阶段^[87-93]。

① 20 世纪 60 年代前属于经验判断,被动防灾和避灾阶段;人们利用滑坡的一些变形破坏现象和失稳前的宏观前兆现象,对滑坡失稳进行判断,这仅仅是经验积累的一种直观预报方法,预报精度不高,属于定性预报方法。

② 20 世纪 60~70 年代,进入定性一半定量分析预测预报阶段,在系统监测资料的基础上,判断位移变化的加速阶段,按变化趋势在曲线上找出滑坡失稳时刻作出预报,预报效果和精度取决于位移监测的时间尺度,并依赖于正确的地质分析和经验判断,我国的卧龙寺滑坡(1977 年 5 月 5 日)和新滩滑坡(1985 年 6 月 12 日)就是用此方法作出了成功预报,这种方法仅对临滑预报有效。

③ 到了 20 世纪 80~90 年代,进入了理论方法探索—检验预测预报阶段,随着概率论、数理统计等的诞生和广泛应用,许多研究者尝试以位移为参数,以数理统计理论为基础,建立滑坡位移—时间关系的数学模型,用数学模型来描述滑坡变形规律,进而预报滑坡发生的时间,这一阶段的代表模型为晏同珍(1988)的生物生长模型和秦四清(1993)的突变理论模型,使滑坡预报方法向量化方向迈进了一大步。

④ 到了 20 世纪 90 年代以后,进入了理论方法深化—综合应用预测预报阶段^[94-101],随着系统科学和非线性科学的发展和应用,人们开始认识到滑坡体系是一个开放系统,是一个确定性与随机性,有序与无序对立统一的系统,许多学者开始引用对处理复杂问题有效的非线性科学理论来研究滑坡的预报问题,其中具有代表性的有灰色尖点突变模型(秦四清,1993)和协同预报模型(黄润秋,1997)等,非线性动力学方法将滑坡预报研究从目前的经验预报和统计预报引入到物理预报,这是理论认识上的一次飞跃。此后,人们开始对滑坡预报判据和综合预报模型进行研究,廖小平(1994)依据弹塑性力学原理提出了滑坡预报的功率模型,胡高社等通过对新滩滑坡的研究,建立了新滩滑坡的综合信息预报模型,人们逐渐开始运用系统综合、系统分析、系统模拟的方法对滑坡系统进行识别、模拟及预测预报,地质力学模拟和数值模拟作为一种有效手段,在滑坡动态演变和趋势预报中得到广泛应用,滑坡预报从过去单一的现象研究、模型方法研究进入到综合预报阶段,并逐渐向系统化、实用化迈进。

王念秦^[90]将以上国内外研究现状进行了总结归纳(表 1-1)。