

**Theory and application
of model test on landslide**

滑坡模型试验理论 及其应用

罗先启 葛修润 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

滑坡模型试验理论 及其应用

罗先启 葛修润 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书在阐述与回顾经典的量纲分析与相似定理的基础上,结合滑坡模型试验自身的特点,阐述了滑坡模型试验相似理论和相似判据的确定方法,并提出了滑坡模型畸变修正方法与畸变模型设计理论;研究并开发了考虑水库水位变化和大气降雨作用下的滑坡物理模型试验系统,该系统包括模型试验平台起降、室内人工降雨、水库水位变化控制、多物理量测试、非接触位移光学测试和 γ 射线透射法土壤水分测试六大系统,具有自动化程度与测试精度高等特点;在滑坡相似材料配制和评价方面提出并建立了基于模糊评判理论的滑坡模型试验相似材料择优方法,使相似材料的选择和配制更加快捷、准确;利用滑坡模型试验理论和研发的滑坡物理模型试验系统对三峡库区千将坪滑坡形成机制进行深入研究,获得了部分具有一定理论与应用价值的研究成果,进而揭示三峡库区滑坡在降雨与库水耦合作用下的形成机制。

本书的内容既有理论研究,又有实践应用,对滑坡模型试验理论的完善与试验技术的发展具有重要意义,对滑坡机理研究及滑坡治理工程具有较高的参考价值和指导作用。本书可供从事边坡工程、滑坡治理工程的广大工程技术人员借鉴,也可供相关大专院校师生和科研院所的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡模型试验理论及其应用/罗先启,葛修润编著.

北京:中国水利水电出版社,2008

ISBN 978-7-5084-6062-8

I. 滑… II. ①罗…②葛… III. 滑坡—水工模型试验
IV. P642.22 TV131.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第177576号

书 名	滑坡模型试验理论及其应用
作 者	罗先启 葛修润 编著
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	170mm×235mm 16开本 11印张 191千字
版 次	2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷
印 数	0001—1600册
定 价	25.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



滑坡模型试验理论及其应用

序

现时对山体滑坡机理的研究工作主要可归结为：现场勘察与试验、现场监测、理论分析与数值计算，以及物理模型试验等方法。因滑坡形成的复杂性，使上述的物理模型试验已成为再现滑坡发生的重要研究手段之一。

滑坡模型试验属于地质力学模型试验的范畴，其理论源自于结构模型试验。滑坡模型试验是地质力学模型试验中针对滑坡这一特定研究对象的试验技术，其发展经历了框架式模型试验、底面摩擦模型试验、现场三维及足尺模型试验、渗水力模型试验、土工离心模型试验等试验阶段，目前国内外常用的地质力学模型试验多数是框架式模型试验和离心模型试验两种形式。

地质力学模型试验，不论是离心模型还是其他的普通小比尺模型，都能帮助人们认识和探讨岩土工程物理现象中的内在规律，推动基础研究工作的开展。框架式模型试验由于简便又直接，古老而经典，并且随着相似理论、模型相似材料、模型成型工艺、测量技术等方面水平的提高已获得了长足的进步，取得了很多具有理论意义与应用价值的研究成果，至今仍为人们乐于采用。

罗先启教授和葛修润院士在对三峡库区水库滑坡模型试验的研究过程中，形成了一套完整的滑坡模型试验的理论与方法，并倾注了大量心血撰写了《滑坡模型试验理论及其应用》这本学术专著。本书在阐述

与回顾经典的量纲分析与相似定理的基础上,结合滑坡模型试验自身的特点,深入阐述了滑坡模型试验相似理论及其相似判据的确定方法,并提出了此类滑坡模型的畸变修正方法与畸变模型设计理论,进而形成了较为完善的滑坡物理模型试验理论。书中还研究并开发了考虑水库蓄水和大气降雨作用下的滑坡物理模型试验系统,该系统涵盖了模型试验平台起降、室内人工降雨、水库水位变化控制、多物理量测试、位移的非接触法光学测试和 γ 射线透射法土壤水分测试等系统,具有自动化程度与测试精度高等特点。在滑坡相似材料的配制和评价方面,书中提出并建立了基于模糊评判理论的滑坡模型试验相似材料择优方法,使相似材料的选择和配制更加快捷而准确。本书利用滑坡模型试验理论和所研发的试验系统对三峡库区千将坪滑坡的形成机制进行了深入研究,揭示了三峡库区滑坡在降雨与库水耦合作用下的孕育与发生机制规律;提出了以模型试验位移—时间曲线作为滑坡预测曲线的新方法;以物理模型试验位移—时间曲线为基础,采用畸变模型修正方法修正该曲线,并使之与实际监测位移曲线对比,表明该两条曲线具有较好的一致性。

本书对滑坡模型试验的研究已经取得了不少有价值的成果,实在可喜可贺,当然由于相似材料自身的复杂多变和相似理论的“苛刻性”,在滑坡模型试验领域今后仍有许多问题需要进一步深入研究。本书的出版对完善模型试验相似理论,提高模型试验测试技术,促进相似材料研制等方面,无疑将起到有力的推动作用。

我有机会粗习了全书,自感受益匪浅,相信本书的付梓问世,必将使广大同行和青年岩土科技工作者从中汲取教益,有助于该子学科领域学术水平的提高,这是可以预期的。为此,我写述了上面的一点文字,是为序。

孙 钧

中国科学院院士

戊子年残秋佳日

于同济园



滑坡模型试验理论及其应用

前言

滑坡模型试验属于地质力学模型试验的范畴，其理论起源于结构模型试验。从 20 世纪初，西欧一些国家就开始进行结构模型试验，并逐渐建立了相似理论。20 世纪 60 年代意大利的瓦意昂（Vajont）双曲拱坝溃坝事件促使了地质力学模型试验的诞生，以富马加利（E. Fumagalli）为首的专家在意大利结构和模型试验研究所（ISMES）以瓦意昂双曲拱坝为背景开展了大比尺三维模型破坏试验研究，试验研究范围从弹性到塑性直至最终破坏阶段，取得较好的效果，翻开了地质力学模型试验技术的第一页。

滑坡模型试验是地质力学模型试验中针对滑坡这种特定的研究对象的力学试验，其发展经历了框架式模型试验、底面摩擦模型试验、现场三维模型及足尺模型试验、渗水力模型试验、土工离心模型试验等试验阶段，目前国内外常用的地质力学模型试验主要有框架式模型试验和离心模型试验两种形式。

框架式模型试验，将模型按几何相似原则缩小 n 倍，同时将附加荷载也相应地缩小 n 倍后，在 $1g$ 重力场中进行模拟试验。然而现在还难以实现在保持其原有物理、力学性质条件下，将其自重应力水平转化为 $1/n$ 。因此，模型试验只是部分满足了物理模型与原型间的几何相似和力学相似，而不能反映原型的整体特征。

土工离心模型试验是法国人菲利普斯 (E. Phillips) 在 1869 年首先提出来的, 发展迄今, 已逾百年。初始提出时期的默默无闻, 而今天世界各国竞相发展土工离心模型试验并使之逐渐成为岩土力学学科研究的重要手段, 离心机数量的急剧增加和大型化、专业化的发展趋势, 使世界上逐渐形成了数个专门的离心模型试验中心, 并形成了各自的特色。但该方法同样也存在着无法避免的技术难题, 如处于高速旋转的离心机庖头中的土体内, 各质点处的离心力的大小随该质点所处的位置至旋转轴心的距离的增加而增大, 其实质是各质点的离心力是彼此不平行的、非均匀的, 与原型铅直、均匀作用于土体的重力速度 ($1g$) 存在着明显的差异; 还有模型材料粒径效应与模型几何尺寸效应的问题, 都给模型试验的结果带来误差。

离心模型试验代表着模型试验的最新发展和最新水平。目前地质力学模型试验研究的新模式主要集中在场的模拟方面, 清华大学曾经探讨了利用水流渗透所产生的拖曳力来增加土体的容重, 其原理是利用重力场和渗透力场的叠加来模拟重力场, 并取得了一定的成果。作者提出了一种以电磁力为基础的新型地质力学模型试验方法, 该方法借鉴利用外力场模拟重力场的原理, 利用场相似理论对地质力学模型试验技术开展更加深入的研究与探讨, 寻求更先进的手段和技术对地质力学模型试验理论的发展起一定的作用。

地质力学模型试验, 不管是离心模型还是其他普通小比尺模型, 都能帮助人们认识和探讨岩土工程中物理现象的内在规律, 推进基础研究工作地开展。框架式模型试验由于简便直接、古老经典, 并且随着相似理论、模型相似材料、模型成型工艺、测量等方面技术的多年发展, 积累了很多具有理论意义与应用价值的研究成果, 至今仍被广泛采用。滑坡模型试验经历多年的发展, 已逐渐由定性发展到定量的研究阶段。但滑坡模型试验结果如何更好地指导工程实际是需要进一步研究的问题。本书在阐述与回顾经典的量纲分析与相似定理基础上, 结合滑坡模型试验自身的特点, 阐述了滑坡模型试验相似理论和相似判据的确定方法, 并提出了滑坡模型畸变修正

方法与畸变模型设计理论；研究并开发了考虑水库水位变化和大气降雨作用下的滑坡物理模型试验系统，该系统包括模型试验平台起降、室内人工降雨、水库水位变化控制、多物理量测试、非接触位移光学测试和 γ 射线透射法土壤水分测试六大系统，具有自动化程度高与测试精度高等特点；在滑坡相似材料配制和评价方面提出并建立了基于模糊评判理论的滑坡模型试验相似材料择优方法，使相似材料的选择和配制更加快捷、准确；利用滑坡模型试验理论和研发的滑坡物理模型试验系统对三峡库区千将坪滑坡形成机制进行深入研究，获得了部分具有一定理论与应用价值的研究成果，进而揭示三峡库区滑坡在降雨与库水耦合作用下的形成机制规律。

本书的出版得到国家自然科学基金（批准号：50679037）和三峡库区地质灾害教育部重点实验室基金的资助。全文由程圣国博士、吴剑博士、张振华博士校核，中国水利水电出版社对本书的问世给予了大力支持，作者在此一并致谢。

模型试验技术是既古老又年轻的技术，本书只能起到抛砖引玉的作用，如能对从事滑坡模型试验研究工作的工程师和科学工作者们有所裨益，我们将感到十分欣慰。限于我们知识水平，书中如有疏漏之处敬请批评指正。

作 者

2008 年秋于上海

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 滑坡模型试验技术的发展历程	1
1.1.1 框架式模型试验	2
1.1.2 底面摩擦模型试验	2
1.1.3 现场三维模型及足尺模型试验	3
1.1.4 渗水力模型试验	3
1.1.5 土工离心模型试验	3
1.2 滑坡模型试验技术的发展现状及趋势	4
1.2.1 滑坡模型试验相似理论	4
1.2.2 滑坡模型试验相似材料	4
1.2.3 滑坡模型试验测试技术	5
2 滑坡模型试验理论	7
2.1 概述	7
2.2 量纲理论	8
2.2.1 量纲的基本概念	8
2.2.2 量纲分析	11
2.3 相似理论与相似定理	16
2.3.1 相似现象与相似性质	16
2.3.2 相似第一定理	19
2.3.3 相似第二定理	21
2.3.4 相似第三定理	25
2.3.5 三个相似定理的相互关系	26
2.3.6 相似准则的导出方法	27
2.4 滑坡模型试验的特点	29

2.4.1	滑坡模型试验的相似性质	29
2.4.2	滑坡模型试验存在的主要问题	31
2.5	滑坡模型试验相似判据	32
2.5.1	参量选择	32
2.5.2	参量分析	32
2.5.3	π 方程的建立及相似判据的导出	33
2.6	畸变模型及畸变修正方法	35
2.6.1	畸变模型的概念	35
2.6.2	畸变模型补偿设计理论	36
2.6.3	模型畸变的修正方法	38
3	滑坡模型试验系统	44
3.1	试验平台起降控制系统	44
3.2	室内人工降雨控制系统	44
3.2.1	模拟降雨装置的降雨参数	46
3.2.2	模拟降雨装置的总体设计	49
3.2.3	喷洒系统	49
3.3	水库水位控制系统	54
3.4	多物理量测试系统	54
3.5	基于光学原理的非接触式位移测量系统	55
3.5.1	数据采集系统组成	56
3.5.2	数据处理流程及原理	57
3.5.3	非接触式光学测量精度	62
3.6	γ 射线透射法水分测试系统	62
3.6.1	测量原理	62
3.6.2	参数的确定	68
3.6.3	γ 射线放射源的安全管理与使用	74
4	滑坡模型试验相似材料	76
4.1	相似材料试验设计理论及评价方法	76
4.1.1	相似材料试验设计理论	76
4.1.2	相似材料试验数据处理方法	77
4.1.3	相似材料择优理论及评价	83

4.2	常用相似材料及其特性	84
4.2.1	纯石膏材料及其特性	85
4.2.2	石膏混合材料及其特性	86
4.2.3	以石蜡为粘结剂的相似材料及其特性	87
4.2.4	以机油为粘结剂的相似材料及其特性	88
4.3	国内外几种用于地质力学模型试验的相似材料	88
4.3.1	MIB 材料	88
4.3.2	NIOS 地质力学模型材料	88
4.3.3	硅橡胶重晶石粉相似材料	89
4.3.4	其他种类相似材料	89
4.4	滑坡模型相似材料选择及配比	90
4.4.1	配重材料的选择	90
4.4.2	粘结剂的选择	90
4.4.3	容重的敏感材料	90
4.4.4	黏聚力的敏感材料	90
4.4.5	内摩擦角的敏感材料	91
4.4.6	渗透系数的敏感材料	91
4.4.7	弹性模量和泊松比的敏感材料	91
4.4.8	三峡库区滑坡模型试验相似材料物理力学性质	92
5	滑坡模型试验相似环境	93
5.1	滑坡发生的主要动力条件	93
5.2	三峡水库蓄水、运行特征及其与滑坡的关系	93
5.2.1	三峡水库蓄水情况	94
5.2.2	三峡水库运行情况	96
5.2.3	三峡水库风浪对库岸形态的改变	97
5.2.4	三峡水库水流对库岸的冲刷与淤积	97
5.2.5	三峡水库诱发地震	97
5.3	三峡库区降雨特征及其与崩塌滑坡的关系	98
5.3.1	三峡库区降雨特征分析	98
5.3.2	三峡库区湖北段诱发地质灾害的降雨分析	103
5.4	水库滑坡主要动力条件的模拟	104

6 千将坪滑坡模型试验研究 105

6.1 千将坪滑坡模型试验方案 105

6.1.1 模型概化及其参数确定 105

6.1.2 模型成形 110

6.1.3 试验方案 115

6.1.4 测点布置 116

6.2 千将坪滑坡模型试验成果 118

6.2.1 数据采集 118

6.2.2 成果分析 118

6.3 千将坪滑坡模型畸变修正 144

6.3.1 模型畸变原因分析 144

6.3.2 模型畸变的修正方法 145

6.3.3 畸变修正模型的数值分析 147

6.4 千将坪滑坡模型实验结论与讨论 152

7 结论与展望 156

7.1 结论 156

7.2 展望 156

参考文献 158

1 绪论

我国是滑坡、泥石流等地质灾害多发国家，据中国地质灾害调查资料表明，在 2004 年统计的各类地质灾害中，滑坡所占的比例高达 68%。滑坡灾害常常中断交通、堵塞河道、掩埋村镇、摧毁工厂、破坏农田，给人民的生命财产造成巨大损失，给工程建设带来严重影响。

滑坡的发生是斜坡自身稳定状态自然调整的过程，而影响其稳定状态的作用因素有自然因素和人类活动因素。就自然因素而言，降雨、水库水位变化和地震是其中的三个主要因素。就人类活动因素而言主要包括不合理的工程活动导致或诱发新的滑坡发生。同时，滑坡的发生又是其本身的地质构造、地形地貌、岩土体物理力学特性在特定的触发因素综合作用下产生的。正是这种多因素作用导致滑坡的形成与发生是一种非常复杂的自然现象，用数学模型描述将十分困难。目前国内外众多研究者试图利用试验方法来探求滑坡形成机制，其中物理模型试验是对滑坡发生规律进行研究的有效手段之一。

1.1 滑坡模型试验技术的发展历程

滑坡模型试验属于地质力学模型试验的范畴，其理论起源于结构模型试验。从 20 世纪初，西欧一些国家就开始进行结构模型试验，并逐渐建立了相似理论。20 世纪 60 年代意大利的瓦意昂（Vajont）双曲拱坝溃坝事件促使了地质力学模型试验的诞生，以富马加利（E. Fumagalli）为首的专家在意大利结构模型试验所（ISMES）以瓦意昂双曲拱坝为背景开展了大比尺（ $C_L = 35$ ）三维模型破坏试验研究，试验研究范围从弹性到塑性直至最终破坏阶段，取得了较好的效果，翻开了地质力学模型试验技术史的第一页。随后葡萄牙、前苏联、法国、德国、英国和日本等国也开展了这方面的研究。在国内，从 70 年代开始，长江科学院、清华大学、河海大学、中国水利水电科学研究院、华北水利水电学院、武汉水利电力大学、四川大学等单位，结合大型水利工程中坝基或坝肩稳定问题先后开展了试验研究，如对葛洲坝、龙羊峡、三峡、铜街子、构皮滩、二滩、沙牌、锦屏一级等工程出现的抗滑稳定问题进行了大量的



试验工作,取得了一大批研究成果。

滑坡模型试验是地质力学模型试验中针对滑坡这种特定的研究对象的试验技术,其发展经历了框架式模型试验、底面摩擦模型试验、现场三维模型及足尺模型试验、渗水力模型试验、土工离心模型试验等阶段,目前国内外常用的地质力学模型试验主要有框架式模型试验和离心模型试验两种形式。

1.1.1 框架式模型试验

框架式模型试验是在通常重力场内 ($1g$),通过在框架模型槽内采用满足相似判据的相似材料制作模型,并在模型满足边界条件相似情况下量测其变形、应力等因素,进而揭示原型滑坡的形成机制。国内外众多学者在该领域开展了试验研究。在国内,1984年水电部西北水科所开展了龙羊峡水电站2480m高程平面地质力学模型试验,并制作了一台可倾斜 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 模拟地震力效应的 $5m\times 7m$ 大型钢架模型台,研究了不同弹模的岩体及软弱夹层材料的性能,还研制了一台可以制作试件的专用加压成型机,开展了黄河上游李家峡水电站三圆心拱坝(高165m)的工程地质力学问题研究;刘光代在贵昆线大海哨2号滑坡治理研究中采用灌铅铁丝混凝土作为滑体、油泥作为滑带来研究岩质滑坡滑带土的破坏模式;李明华以击实成都黏土为滑体、含水量大于塑限的软黏土为滑带、密实黏土为滑床,研究了土质滑坡的破坏模式;其后宋克强(1991)、丁多文(1996)、文宝萍(1997)、陈洪凯(2002)、靳德武(2004)、罗先启(2005)、胡修文(2005)相继开展了研究,以黄土地区孟家山滑坡、三峡库区石榴树包、泄滩、千将坪、赵树岭等滑坡为背景,深入研究了特定滑坡的孕育形成机制,取得了部分研究成果,对滑坡地质灾害防治、预测起到指导性作用。在国外,日本在这方面投入的精力最多,其模型比例尺达到了 $1:50$,具有仿真性强、规模大等特点。

1.1.2 底面摩擦模型试验

1969年英国帝国工学院发表了一位作者的论文首先提出了底面摩擦模型试验的基本思想,它的原理是用作用在模型底部的拖力来代替重力,主要用来模拟二维物理模型,应用到边坡主要方法如下:边坡模型平置于无缝皮带上,皮带以一个速度向前运动,借助于摩擦力,皮带拖动模型以同样的速度运动,由于皮带上方的挡板的阻挡,模型又不能运动,这时皮带给模型一个拖力 F ,挡板给模型一个反力 F' ,在皮带拖力作用下模型发生变形和破坏。国内李书吉(1986)、陈诗才(1988)以抚顺西露天矿十三段站的滑坡为背景,利用该



方法研究其形成机理, 获得了较好的效果, 但该方法无法定量研究滑坡的应力应变及位移特性。

1.1.3 现场三维模型及足尺模型试验

现场三维模型试验是目前滑坡研究领域的新的发展方向, 陈善雄等在湖北襄荆高速公路膨胀土堑坡试验段开展了人工降雨诱发滑坡试验, 用数码相机记录了降雨诱发土坡浅层滑动的过程。胡明鉴(2002)等在研究云南东川蒋家沟滑坡泥石流形成机理时进行了现场砾质土斜坡人工降雨试验, 发现试验条件下有明显的滑坡与泥石流共生现象。实验室足尺模型试验与现场三维模型试验具有共同的特征, 即均为大比尺三维模型试验。美国科罗拉多(Colorado)大学开展了足尺加筋土挡土墙的试验研究, 建成高 3.05m、宽 1.22m、长 2.08m 的 1:1 试验模型, 对黏性土和砂土填料开展研究, 其成果很好地指导了其设计工作; 德国柏林大学对浅基础开展了大量的足尺试验研究, 特别是单桩试验研究取得了大量的成果, 该方法虽具有试验结果准确的优势, 但人力物力耗资巨大, 影响其广泛应用。

1.1.4 渗水力模型试验

渗水力模型试验方法是 ng 模型试验方法的一种, 原理是用水在土中向下的渗透力模拟重力, 从而使模型尺寸缩小 n 倍, 但土中应力应变与原型一致。丁金粟(1994)、黄锋(1998)等采用该方法开展了桩基、浅基础问题研究, 试验表明, 该方法因其设备为静态而对 ng 条件下的沉桩等试验研究比较方便, 但其只能开展饱和土体试验, 且土渗透系数过大或过小都会影响试验精度。

1.1.5 土工离心模型试验

土工离心模型试验作为一种可再现原型特性的试验方法, 正越来越受到岩土工程界的关注。其主要根据离心力场和重力场等价的原理, 并考虑到土工材料的非线性和自重应力对土工结构物的影响, 把经过 $1/n$ 缩尺的原型结构物置于 n 倍 g 的离心力场中, 使模型和原型相应点的应力应变达到相同、变形相似、破坏机理相同, 从而再现原型特性, 为理论和数值分析方法提供真实可靠的参考依据。土工离心模型试验是法国人菲利普斯(E. Phillips)在 1869 年首先提出来的, 发展迄今已逾百年, 从初始提出时期的默默无闻, 到今天世界各国竞相发展土工离心模型试验并使之逐渐成为岩土力学学科研究的重要组成部分。离心机数量的急剧增加和大型化、专业化的发展趋势, 使世界上逐渐形成



了数个专门的离心模型试验中心，并形成了各自的特色。土工离心模型试验对挡土墙、土或者土与结构物间相互作用、岩土高边坡、堤坝路基等填土工程、地下结构和基坑开挖、浅基础、桩基础和深基础等问题有独特效果，最近利用土工离心机模拟地震、爆破等动力问题得到很大重视和发展，许多离心机都装置了振动台用以研究岩土工程的地震反应。

1.2 滑坡模型试验技术的发展现状及趋势

滑坡模型试验的理论基础为相似理论，并根据相似理论所确定相似判据制作模型与研制相似材料，将测试结果按照相似判据反推到原型滑坡，揭示其机制、指导其防治与预测预报。模型试验技术是随着相似材料、测试技术的发展而发展的。

1.2.1 滑坡模型试验相似理论

作为仿真技术的基础，在“ π 定理”和 M. B. 基尔比契夫的“相似三原理”的指导下，近 20 年来相似理论研究获得了迅速的发展，但对“ π 定理”和“相似三原理”理论本身的认识程度特别是在具体实际中应用还比较有限。20 世纪末期，国内外开始了滑坡模型相似理论的研究，对弹性相似理论的认识已趋于一致；近几年来，随着非饱和土力学的发展，国内外学者对降雨型滑坡相似理论的研究开始起步，但还没有形成系统的、获得国内外学者公认的理论体系。对于滑坡模型相似理论及相似判据问题，目前常采用的方法为量纲分析法和方程分析法，量纲分析推导具有更强的实用性，方程推导则物理意义更明晰。总体上说目前滑坡模型试验相似判据的推导从理论上说已经趋于成熟，但由于模型和原型之间的差异及尺寸效应的存在使相似理论的参数相似比的选择不能完全依靠相似理论推导的结果，其中时间相似比因蠕变等因素影响致使其未有明确的解答，这也对滑坡模型试验指导原型滑坡的时间预测造成较大影响。

1.2.2 滑坡模型试验相似材料

通常保证模型与原型之间的相似是通过相似材料的配制来实现的。相似材料的选择及有关参数的确定则是模型试验成功的重要一环，直接关系到试验数据的价值大小。目前，对岩体相似材料特性的试验研究已取得了较好的成果，韩伯鲤（1994）等人对影响地质力学模型材料的各种因素加以分析，提出研制高容重、低弹模、低强度材料的基本原则，并介绍了一种新型地质力学模型材



料,取名为MIB。龚召熊、郭春茂、高大水(1984)等人参考意大利结构和模型试验研究所资料,改进原来的浇铸成型为压模成型,较全面地研究了用无水石膏为胶凝剂的模型材料的力学变形性能,包括单轴和三维应力条件下的各种参数。同时,还对意大利结构及模型试验研究所(ISMES)目前应用的模型材料进行了验证性试验。沈泰(1988)等人也在文献中介绍了长江水利水电科学研究院地质力学模型材料研究的情况,列举了七类不同性能的模型材料,并对试验中遇到的若干模型试验技术,如模型材料各向异性问题、基础结构层面的剪切刚度、粘结力和渗透水压力的模拟、三维模型内部相对位移的量测等问题进行了讨论,最后就地质力学模型试验的发展趋势作了简单的评述,并提出了在离心机内进行地质力学模型试验方法的构想。意大利等国家的科研单位采用的地质力学模型材料主要有两类:一类是采用铅氧化物(PbO 或 Pb_3O_4)和石膏的混合物为主料,以沙子或小圆石作为辅助材料;另一类模型材料主要以环氧树脂、重晶石粉和甘油为组分,其强度和弹模均高于第一类模型材料,但是需要高温固化,其固化过程中散发的有毒气体也会危害人体的健康。上述模型材料中,采用铅氧化物和石膏混合物的模型材料,可以达到较大的容重,但是价格比较昂贵,其中的铅氧化物有毒,对工作人员的健康不利,并且容易污染环境;采用重晶石、石膏、沙子等材料制作的相似模型,其容重最大只能达到 $21.4\sim 21.5\text{kN/m}^3$,因此很难模拟高容重的材料。由加膜铁粉和重晶石作为骨料制作相似模型,可以满足高容重材料的要求,但由于增加了加膜的工艺使得制作成本增加,而且膜一旦脱落铁粉很容易生锈,从而影响材料性质的稳定性,容易导致试验失败。采用铜粉也可以满足高容重材料的要求,且不会像铁粉那样容易生锈,但很难找到合适的原料,而且成本过高。为了克服上述模型材料无法模拟高容重材料、性质不稳定、容易生锈及成本过高的缺陷,清华大学水利系水电站课题组经过上千次试验,研制成功一种新型地质力学模型材料——NIOS地质力学模型材料。另外,崔希民、王素华等也都对地质力学模型试验相似材料问题做了研究。在岩石等脆性材料的滑坡模型相似材料研究方面,随着石膏系材料特性研究的成熟而走向成熟,而在土体特别是软土的相似材料研究方面存在较大困难。滑坡模型试验中结构物软弱夹层的模拟常采用锡箔、聚酯薄膜、电化铝或各种纸张等薄片成形材料,或者采用各种润滑剂和重晶石粉或石灰石粉等粉体材料混合来模拟。

1.2.3 滑坡模型试验测试技术

滑坡模型试验技术中发展最快的领域是量测和数据采集技术,每一项新的