

# 大型滑坡滑带土剪切流变特性研究<sup>\*</sup>

韩爱果<sup>①</sup> 聂德新<sup>①</sup> 任光明<sup>①</sup> 韩坤立<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>成都理工学院工程地质研究所 成都 610059) (<sup>②</sup>天津市地质工程勘察院 天津 300191)

**摘 要** 利用重力压密原理制样,采用“陈氏加载法”对某大型滑坡滑带土剪切流变特性进行研究。选择伯格粘弹性本构模型描述滑带土的流变性状,获得了滑带土的长期强度值,并论述了长期强度在滑坡稳定性研究中的意义。

**关键词** 滑带土 流变特性 伯格本构模型 长期强度

中图分类号 P642.22 P642.11<sup>+</sup>.6 文献标识码 A

## STUDY ON SHEAR RHEOLOGIC BEHAVIORS OF SOIL IN SLIP ZONE OF A LARGE - SCALE LANDSLIDE

HAN Aiguo<sup>①</sup> NIE Dexin<sup>①</sup> REN Guangming<sup>①</sup> HAN Kunli<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

(<sup>②</sup>Tianjin Geological Engineering Investigation Institute, Tianjin 300191)

**Abstract** The shear rheologic behaviors of soil in slip zone of a large - scale landslide are studied in this paper. The samples are prepared in accordance with the gravity compaction principles and by Chen Zongli's the loading method. The rheologic behaviors of soil in slip zone are described by the Burgers visco - elastic Model. From the test results, the long - term strength parameters are obtained, and it's significance in study of the stability of landslide is also discussed.

**Key words** Slip zone soil, Rheologic behaviors, Burgers constitutive model, Long - term strength.

### 1 引 言

某大型滑坡自 1981 年开始监测以来,一直在变形。尤其在水库初期蓄水期间,位移量较大,并在滑体上产生多条长大拉裂缝,但并未随库水位的上升发生剧滑。因此,有必要论证滑体蠕滑的问题。岩土流变研究最早的试验为 Pfaff、Adams、Nicolson 于 1901 年利用灰岩进行静水压力作用下的变形与破坏观测,其后,人们逐步认识到岩土体长期变形与时效强度的重要性,使岩土力学从一般强度与变形研究推进到流变学的时效研究。在我国,以陈宗基教

授为代表的流变力学学派,从 50 年代开始,先后在一些重大工程中进行了剪切流变和三轴流变试验。由他提出并由他的学生发展的一种新的试验方法——“陈氏加载法”在国内外的岩土流变学研究中得到越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。该方法可以使流变试验从单一试样采用适当的加载程序得到更多的试验资料。无疑,这对试验周期长,且价格昂贵的岩土流变性质研究具有重要的实际意义。

### 2 滑带土剪切流变试验

<sup>\*</sup> 收稿日期 2000 - 12 - 04,收到修改稿日期 2001 - 03 - 20.  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号 49672166).  
第一作者简介:韩爱果(1975 - ),女,汉,在读博士,地质工程专业,Email: hagg750529@263.net

2.1 试验方法及条件

为了尽可能使试验结果符合现场实际,制样时采用重力压密原理<sup>[2]</sup>,使试样的含水率( $w$ )、密度( $\rho$ )等指标与滑带土天然状态下的值接近( $w = 15.21\%$ ,  $\rho = 2.23\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )。此外,为初步确定不同正应力下滑带土的峰值抗剪强度,从而合理设计各级剪切荷载,首先进行直剪试验, $\tau - \sigma$ 关系曲线见图1。抗剪强度参数 $f$ 、 $c$ 分别为 $0.320$ ( $\varphi = 17.7^\circ$ )及 $0.077\text{MPa}$ 。剪切流变试验分别在 $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.4\text{MPa}$ 的正应力下进行,采用“陈氏加载法”,每级剪切荷载的增量为 $P/11 \sim P/8$ , $P$ 为各级正应力下的直剪峰值强度。各级剪切荷载持续5天,共进行了近两个月时间。试验室温度保持在 $18^\circ\text{C}$ 左右。

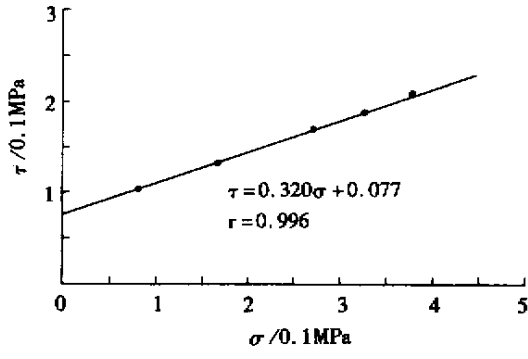


图1 滑带土直剪试验  $\tau - \sigma$  关系曲线  
Fig.1 Shear strength - normal stress curve of soil from slip zone in direct shear test

2.2 剪切流变试验资料整理

根据试验资料,绘制不同正应力条件下的剪切历时曲线,从图2( $\sigma = 0.2\text{MPa}$ )可看出:当剪应力较小时,试样的剪切位移以瞬时位移为主,随着时间的增长其蠕变量增加很小,在2天左右就趋于稳定;随剪应力的增大,蠕变量有所提高,特别是破坏前的1~2级剪切荷载最明显;并且随着时间的延续,变形以一恒定的蠕变速率增加,即处于等速蠕变阶段。随着剪应力的继续增加,试样逐渐由等速蠕变向加速蠕变过渡,最终发生破坏。据 Boltzman 叠加原理<sup>[1]</sup>,可得各级剪应力作用下的总变形量随时间变化关系,将不同时刻的变形换算为应变值,作出的应变 - 时间关系代表性曲线如图3。

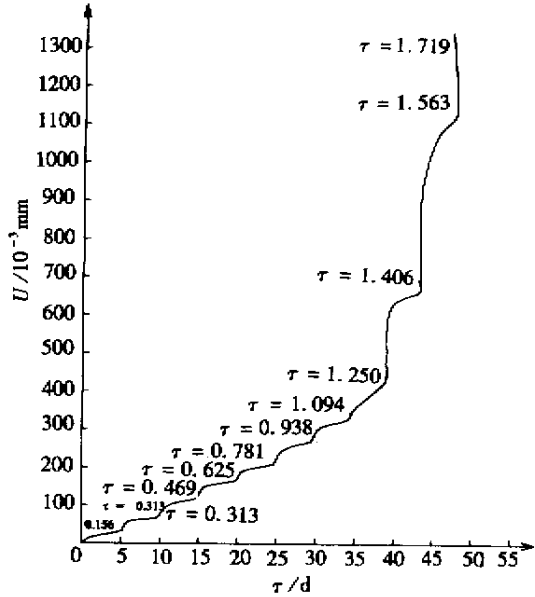


图2  $\sigma = 0.2\text{MPa}$  条件下剪切历时曲线  
Fig.2 Shear stress - displacement - time curves of soil from slip zone ( $\sigma = 0.2\text{MPa}$ )  
 $\tau$  单位为  $0.1\text{MPa}$

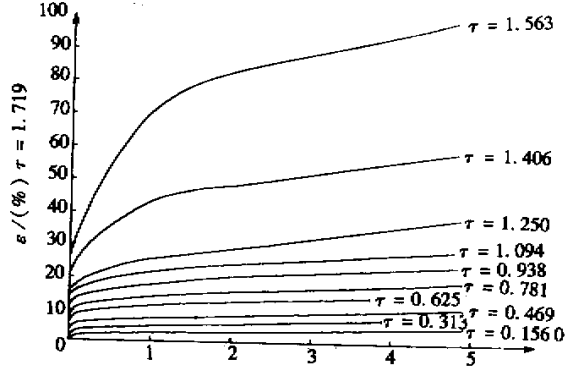


图3  $\sigma = 0.2\text{MPa}$  条件下剪应变 - 时间曲线  
Fig.3 Shear strain - time curves of soil from lip zone ( $\sigma = 0.2\text{MPa}$ )  $\tau$  单位为  $0.1\text{MPa}$

3 滑带土流变模型的选择及流变力学参数的确定

选择恰当的流变模型,必须有完整的试验资料,但仅凭蠕变数据选择模型,有可能出现几种模型都能描述试验资料的情形,因此有必要对流变模型进行识别<sup>[3]</sup>。本次选择三种模型——马克斯韦尔模型、中村模型和伯格模型进行模型识别,从中筛选出伯格模型作为描述本次试验的理论模型。伯格模型

是由马克斯韦尔体( M )与开尔文体( K )串联而成的四参数粘弹性模型 ,其本构方程为 :

$$\sigma + (\frac{\eta_M}{E_M} + \frac{\eta_M + \eta_K}{E_K}) \dot{\sigma} + \frac{\eta_M \eta_K}{E_M E_K} \ddot{\sigma} = \eta_M \dot{\epsilon} + \frac{\eta_M \eta_K}{E_K} \ddot{\epsilon}$$

当  $\sigma = \sigma_0 = \text{常数}$  时 ,解此本构方程 ,可得到伯格体的蠕变方程为 :

$$\epsilon(t) = \sigma_0 [\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K} (1 - e^{-(E_K/\eta_K)t})]$$

表 1 滑带土剪切流变试验确定的流变参数( 据伯格模型 )

Table 1 Rheologic parameters of soil from slip zone determined by shear rheologic tes( Burgers Model )

试样号	正应力/ MPa	剪应力/ MPa	$E_M$ / MPa	$E_K$ / MPa	$\eta_M$ / Pa·s	$\eta_K$ / Pa·s
1	0.1	0.0625	0.279	4.851	$4.050 \times 10^{11}$	$1.587 \times 10^{11}$
		0.075	0.255	2.686	$1.984 \times 10^{11}$	$4.466 \times 10^{10}$
		0.0875	0.203	1.276	$2.205 \times 10^{11}$	$3.592 \times 10^{10}$
		0.1	0.183	0.714	$1.825 \times 10^{11}$	$2.871 \times 10^{10}$
2	0.2	0.078125	0.537	2.939	$7.956 \times 10^{11}$	$1.697 \times 10^{11}$
		0.09375	0.491	2.435	$7.423 \times 10^{11}$	$1.506 \times 10^{11}$
		0.109375	0.460	1.770	$7.088 \times 10^{11}$	$6.982 \times 10^{10}$
		0.125	0.442	0.973	$3.600 \times 10^{11}$	$5.526 \times 10^{10}$
		0.140625	0.375	0.726	$3.548 \times 10^{11}$	$2.027 \times 10^{10}$
3	0.3	0.116563	1.665	10.508	$4.281 \times 10^{12}$	$4.935 \times 10^{11}$
		0.139875	1.189	4.573	$2.283 \times 10^{12}$	$3.589 \times 10^{11}$
		0.163188	0.806	1.840	$1.892 \times 10^{12}$	$1.558 \times 10^{11}$
		0.1865	0.593	0.988	$1.643 \times 10^{12}$	$8.961 \times 10^{10}$
4	0.4	0.125	0.929	3.159	$2.299 \times 10^{12}$	$1.247 \times 10^{11}$
		0.15625	0.709	2.182	$2.122 \times 10^{12}$	$8.756 \times 10^{10}$
		0.1875	0.591	0.993	$1.753 \times 10^{12}$	$2.664 \times 10^{10}$
		0.21875	0.422	0.413	$1.620 \times 10^{12}$	$8.673 \times 10^9$

系数  $\eta_M$  随正应力的增加有所增大 ,而在正应力固定的情况下 ,粘滞系数随剪应力增加变化幅度不大 ,基本上在同一数量级范围内。因此 ,合理确定作用在滑动面上的有效法向应力和切向应力值对了解滑带土的流变特性具有非常重要的意义<sup>[ 4 ]</sup>。

4 滑带土长期强度的确定

据前苏联学者 C. C. 维亚洛夫的研究<sup>[ 5 ]</sup> ,当剪应力  $\tau$  小于某一临界值时 ,位移 - 时间曲线表现为衰减蠕变特性 ,而当剪应力超过这一临界值时 ,位移 - 时间曲线即表现为非衰减蠕变 ,反映到双对数坐标中的应力 - 变形曲线上就会出现拐点 ,拐点处对应的剪应力值即为长期抗剪强度值(  $\tau_\infty$  )。

利用剪切流变试验结果及伯格模型求参原理 ,获得的流变参数见表 1。从表 1 可看出 ,在本次试验设计的正应力、剪应力条件下 ,滑带土瞬时弹模  $E_M$  较小 ,基本上在 1MPa 以内 ; $E_M$ 、 $E_K$  均随剪应力的增大而减小 ,这反映了割线弹性模量的特征 ,粘滞

据试验资料绘制不同正应力下的剪应力 - 剪位移双对数坐标曲线见图 4 ,由图 4 可以得出各级正应力下的长期抗剪强度值(  $\tau_\infty$  ) ,根据这些长期抗剪强度值作  $\tau_\infty - \sigma$  关系曲线( 图 5 ) ,滑带土内摩擦角和内聚力的长期值为 : $\varphi_\infty = 9.2^\circ$  , $c_\infty = 0.017\text{MPa}$  ,分别降低为直剪试验结果的 52% 和 23%。因此 ,对于可能发生蠕滑的坡体 ,评价其稳定性时必须考虑滑带土因流变而产生的强度降低 ,稳定性计算时须采用长期抗剪强度参数 ,而不应该用瞬时强度参数。实际工作中常忽略这一点。国内外都出现过因未考虑岩土体流变强度降低最终导致工程事故的情况 ,如巴拿马运河滑坡区的片状粘土 ,在运河边坡完工几年后突然崩塌 ,就是由于土体流变 ,强度降低所致<sup>[ 5 ]</sup>。

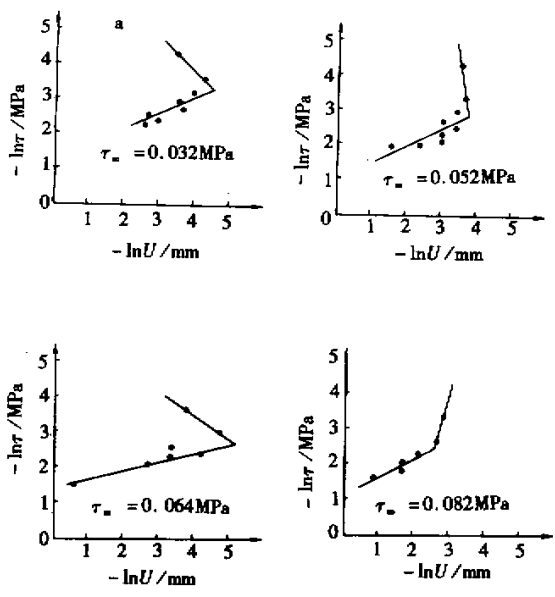


图4 不同正应力下剪应力(  $-\ln\tau$  )-剪位移(  $-\ln U$  )曲线

Fig.4 Shear stress - shear displacement curves of soil from slip zone at different normal stress levels  
a.  $\sigma = 0.1\text{MPa}$  ; b.  $\sigma = 0.2\text{MPa}$  ;  
c.  $\sigma = 0.3\text{MPa}$  ; d.  $\sigma = 0.4\text{MPa}$ .

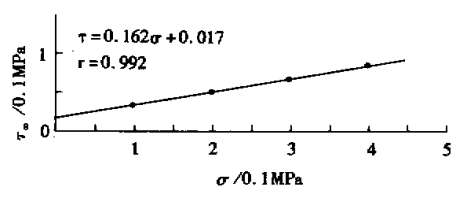


图5 滑带土  $\tau_s - \sigma$  关系曲线

Fig.5 Rheologic shear strength - normal stress curve of soil from slip zone

5 结语

(1) 流变是岩土体重要的力学特性之一 ,室内试验结果是描述岩土体流变属性不可缺少的重要资料 ,虽然据试验结果所确定的流变参数与野外宏观地质体可能存在一定的差异 ,但基本规律是一致的。

(2) 滑带土粘滞系数随正应力的增加有所增大 ,而在正应力固定的情况下 ,剪应力水平对其影响较小。因此 ,合理确定作用在滑动面上的有效法向应力和切向应力值对了解滑带土的流变特性具有非常重要的意义。

(3) 滑带土的长期强度与发生流变前的抗剪强度相比 ,降低幅度较大 ,因此 ,计算坡体稳定性时应采用长期抗剪强度参数 ,而不应用瞬时强度参数。另外 ,还应充分考虑暴雨、库水位升降、地震等因素的影响。

(4) 一旦坡体蠕变发展到一定程度 ,在各种诱发因素作用下 ,容易向加速蠕变转化 ,应加强滑坡深、表部变形监测工作。

参 考 文 献

[ 1 ] 刘雄.岩石流变学概论[ M ].北京:地质出版社,1994,112~123.  
Liu Xiong. An Introduction to Rock Rheology. Beijing: Geological Press, 1994, 112~123.

[ 2 ] 任光明, 聂德新, 米德才. 软弱层带夹泥物理力学特征的仿真研究[ J ]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 65~71.  
Ren Guangming, Nie Dexin, Mi Decai. The Simulation Study of Physical - Mechanical Properties of Intercalated Gouge in Weak - layer Zones. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(1): 65~71.

[ 3 ] 吴玉山, 陈尤雯. 不良岩层现场大型三轴压缩流变试验及流变模拟分析[ J ]. 岩土力学, 1992, 13(1): 21~29.  
Wu Yushan, Chen Youwen. Rheologic Test and Simulation Analysis of Large Scale In - situ Triaxial Compression on Defective Strata Behavior. Rock and Soil Mechanics, 1992, 13(1): 21~29.

[ 4 ] 聂德新, 张咸恭. 天然地应力及渗流环境下软弱层带工程特性研究[ J ]. 工程地质学报, 2000, 8(增刊): 327~329.  
Nie Dexin, Zhang Xiangong. The Study on Engineering Characteristic of Weak Interbed under the Conditions of Natural Geostress and Filtration. Journal of Engineering Geology, 2000, 8( Suppl. ): 327~329.

[ 5 ] C. C. 维亚洛夫. 土力学的流变原理[ M ] (杜余培译). 北京: 科学出版社, 1987, 297~342.  
C. C. Вьялов. Rheologic Theory of Soil Mechanics( translated by Du Yupei ). Beijing Science Press, 1987, 297~342.

# 大型滑坡滑带土剪切流变特性研究

作者：[韩爱果](#)，[聂德新](#)，[任光明](#)，[韩坤立](#)  
作者单位：[韩爱果,聂德新,任光明\(成都理工学院工程地质研究所,\)](#)，[韩坤立\(天津市地质工程勘察院,\)](#)  
刊名：[工程地质学报](#)[ISTIC](#)[PKU](#)  
英文刊名：[JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY](#)  
年，卷(期)：2001，9(4)  
引用次数：23次

## 参考文献(5条)

1. [刘雄](#) [岩石流变学概论](#) 1994
2. [任光明](#),[聂德新](#),[米德才](#) [软弱层带夹泥物理力学特征的仿真研究](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#) 1999(01)
3. [吴玉山](#),[陈尤雯](#) [不良岩层现场大型三轴压缩流变试验及流变模拟分析](#) 1992(01)
4. [聂德新](#),[张咸基](#) [天然地应力及渗流环境下软弱层带工程特性研究](#) 2000(z1)
5. [C C 维亚洛夫](#),[杜余培](#) [土力学的流变原理](#) 1987

## 相似文献(8条)

1. 学位论文 [陈晶晶](#) [滑带土的流变特性试验研究](#) 2005

滑带是滑坡最重要的结构要素之一，其中记录了与滑坡发生和发展过程密切相关的物质变化和动力学演化信息。滑带土作为滑动过程中形成的一种特殊岩土体，其流变行为及其特征不仅是滑带动力学过程反应，而且是评价、预测和预报滑坡的重要依据。因此，通过先进的实验技术和当今的流变理论，确定滑带土的流变特性，建立其流变模型，进而对滑带演化趋势进行分析，具有重要的理论意义和应用价值。这是本文选题的主要出发点所在。

本文共分五部分，约4万字，各章内容简述如下：

第一章包括三部分：一是在大量查阅国内外资料的基础上，对土的流变和滑坡稳定性分析方面的研究进展进行了系统总结和分析；二是阐述了本研究的科学意义和应用价值，并针对解决本研究的主要问题和难题，提出了应当采用的技术理论和方法途径；三是对土流变学的发展进行了展望，认为当前在土的微观结构和非线性流变研究方面存在薄弱环节，将会成为今后该领域两个重要的研究方向。

第二章从基本流变元件和流变模型等方面，概述了土的流变模型理论。介绍了欧几里德刚体、帕斯卡液体、虎克弹性体、牛顿粘滞体、圣维南塑性体等5种流变元件的流变方程，以及基本和复合元件、普通元件两种流变模型。

第三章是本文的核心部分，特别在Mesri模型修正方面和非饱和流变试验与饱和试验结果比较具有创新性。在近两年半时间中，作者对清江库区水布垭滑坡滑带土样开展了常规土工实验和三轴流变试验。根据试验数据，建立了古树包滑带土的Singh-Mitchell流变模型和Mesri流变模型，并给出了相应参数。比较认为，这两种模型与试验数据的变化趋势接近，但在等速蠕变阶段应变速率明显比试验值偏大，由此看来，两个模型对滑带土流变规律的拟合能力欠佳。针对这一不足，本文提出了分段拟合的思想，并修正Mesri应力—应变—时间关系。新建立的模型从机理上反映了岩土流变过程表现为衰减蠕变、等速蠕变、稳定蠕变或急剧破坏三阶段型的基本定性规律，实现了对Mesri模型的拓广，原Mesri模型实质上是修正Meiri模型的一个特例。据此，通过对流变试验数据分段拟合，建立了古树包滑带土的修正Mesri应力—应变—时间关系。与试数据的对比表明，新模型的模拟能力和可靠性较原Mesri模型明显提高。对参数的分析还可以看出，新模型同样适合对加速蠕变阶段模拟。最后通过做非饱和和流变试验，着重对在饱和和非饱和情况下滑带土的流变特性进行比较。

第四章，提出了有限元方法分析滑坡流变问题的思路和步骤，针对清江水布垭库区古树包滑坡，提出了采用非线性有限元方法对滑坡稳定性进行分析的初步构想。

第五章是结论及今后有待进一步研究的问题。

2. 学位论文 [王志俭](#) [万州区红层岩土流变特性及近水平地层滑坡成因机理研究](#) 2008

川江河段(即现今三峡库区)一直是中国地质灾害多发区和重灾区之一，随着近期三峡移民建设工程的大规模展开，库区地质灾害防治工程所进行的滑坡工程地质勘探揭示：三峡库区一些复杂地质环境中(例如巫山、万州、奉节等)古滑坡的成因及规模等要比早期的工程地质勘察和研究结论反映的问题复杂。

万州地区岩层倾向一般在3°-5°，有的滑动面甚至出现反倾现象，最陡也不超过10°。在这样平缓岩层分布区却发育了一系列大型顺层岩质滑坡。这在三峡工程库岸其它平缓岩层地区并不多见。滑坡机理研究是滑坡学的核心内容之一，对于万州地区的近水平地层滑坡的成因机理，是滑坡领域的一个疑难问题。由于滑坡滑床接近水平，而滑带土的内摩擦角远远大于滑床的倾向，这类滑坡的失稳必然有特殊的有利条件，对其成因存在截然不同的认识。万州近水平地层滑坡的成因对该地区防治工程成败尤为重要。这是一个十分严峻而又不可回避的非常现实的问题，亟待研究和解决。因此，本文近水平岩质滑坡的成因机制研究具有重要的现实意义。本文研究内容共分八章。

第一章“绪论”，本章介绍了本论题的背景以及研究现状，根据目前的研究进展和具有争议问题，提出了研究的方法和内容。近水平地层滑坡的成因机理的主要观点是降雨造成滑坡后缘裂隙水头异常抬升，并推动滑坡沿层面平移，故此类滑坡也常被称为“平推式”滑坡，但该观点主要从诱发因素考虑，而且对后缘裂隙的产生原因没有进行解释。本文认为，滑坡孕育过程经历了漫长的地质年代，必须考虑岩土体的流变特性。因而提出在认识红层岩土流变特性的基础上，从流变力学的角度对近水平岩质滑坡的成因机理进行研究的思路。

第二章“万州地区区域地质条件地层岩性和降雨特征”，本章从万州区的区域构造，地层岩性以及气象水文等方面论述了万州地区易发生滑坡灾害的原因。无论在自然条件下，还是人类工程活动，滑坡的产生和分布取决于岩性、构造、地貌和地下水这四个地质条件的变化，降雨和人类活动可能改变这些地质条件而导致滑坡的发生。本章通过对万州地区区域地质条件，地层岩性和降雨特征的研究，了解万州区的地质背景和近水平地层滑坡所处的环境。万州地处川东褶皱束万县复向斜北东段近轴部，在逆冲推覆作用下，下盘断坪以上的地层全部卷入了层间的滑移运动，形成了大量的层间剪切带，为滑坡发育创造了有利条件。万州地区出露地层为侏罗系中统上沙溪庙组第二、第三段(J2s2、J2s3)和上统遂宁组(J3s)，属红层地层，红层岩土固结时间短，在内外地质作用影响下，容易逆变而泥化，大量钻孔资料表明，沿泥岩顶面普遍泥化，成为斜坡体变形破坏的主要控制面。万州地区处于三峡库区的暴雨中心，多年平均降水量1250mm以上，一日最大降水量在200毫米以上，充沛的降雨是滑坡的重要诱因。

第三章“万州区典型岩土物理力学特性试验研究”，本章对万州地层的长石石英砂岩、泥质粉砂岩和安乐寺滑带土进行了矿物成分分析和物理力学性质研究。对安乐寺滑带土进行了固结排水剪切试验，滑带土的内摩擦角为15°~16°远大于安乐寺滑坡滑床倾角，应力应变曲线接近双曲线，采用了邓肯-张模型对其应力应变进行了描述。对长石石英砂岩进行了单轴抗压以及三轴抗压试验，获得了全应力应变曲线，试验表明长石石英砂岩的峰值强度及残余强度都服从莫尔库伦强度理论，根据试验结果确定了长石石英砂岩的强度指标。对泥质粉砂岩进行了单轴试验、变角板试验和点荷载试验，根据试验结果确定了泥质粉砂岩的强度指标，矿物分析结果表明，泥岩含粘土矿物达40%，该泥岩具有极强的亲水性，遇水后易崩解。采用点荷载试验确定了其平行层理面和垂直层理面单轴抗压强度和抗拉强度，试验结果表明，该泥岩各向异性特征不是很明显。

第四章“红层长石石英砂岩流变特性试验研究”，本章对长石石英砂岩进行了流变试验，试验获得了该砂岩完整的流变曲线。蠕变曲线具有明显的蠕变第一阶段“衰减蠕变阶段”，蠕变第二阶段“匀速蠕变阶段”和蠕变第三阶段“加速蠕变阶段”。试验表明，砂岩的长期强度只有瞬时强度的0.4倍，试

样蠕变破坏的过程与近水平地层滑坡的破坏过程具有相似之处，可见近水平地层滑坡的破坏存在岩石蠕变破坏。在试验数据处理中采用了Boltzmann叠加原理，并对Boltzmann叠加原理在实际应用中的技术问题进行了讨论，并对目前常用的“坐标平移法”作了改进，使每级荷载作用下的瞬时变形量和蠕变变形量可以区分开，每级的蠕变变形都随时间变化而变化，叠加时瞬时变形在初始时刻就进入下级荷载的变形中，而蠕变变形随时间增长逐渐叠加到下级荷载作用的变形中。处理后的数据表明该砂岩的应力应变关系接近线性，并采用Burgers模型对试验曲线进行了识别，确定了模型参数，通过对试验数据的对比表明，Burgers模型可以较好的模拟蠕变的第一阶段和第二阶段。由于Burgers模型不能描述岩石加速阶段的蠕变，本章对岩石加速阶段的蠕变进行了讨论，并提出了可描述岩石非线性蠕变的NBurgers模型。经模型曲线和试验数据比较，该模型可以非常准确的描述蠕变加速阶段，该模型在衰减蠕变阶段和匀速蠕变阶段可退化到Burgers模型，相比Burgers模型只增加了一个参数，参数易于确定和使用，物理意义明确，具有一定的推广价值。基于NBurgers模型，进一步讨论了更一般的非线性模型，称为广义NBurgers模型，理论上这个模型对加速阶段流变具有很强的适用性。

第五章“安乐寺滑坡滑带土蠕变试验研究”，本章对安乐寺滑坡的Y1和Y2滑带土进行了蠕变试验研究，试验在排水条件下进行。蠕变试验曲线具有明显的蠕变第一阶段“衰减蠕变阶段”和第二阶段“匀速蠕变阶段”，但未见蠕变第三阶段“加速蠕变阶段”。分别采用了Burgers模型、Singh-Mitchell模型和Mesri模型对滑带土流变性质进行描述，取得了模型的参数。通过对模型参数的分析，认识到各种模型都是一种对岩土流变的一种近似。将各种模型进行了比较并与实测试验数据进行了对比。结果表明，Burgers模型可以描述应力作用下的瞬时应变响应，而经验模型忽略了瞬时应变响应。Singh-Mitchell模型在偏差应力水平20%~80%范围内可以较好描述土的应力应变关系，但超出这个范围的应力条件误差较大，而Mesri模型没有这个限制。

第六章“安乐寺滑坡滑带土的松弛试验研究”，本章对安乐寺滑坡的Y1滑带土进行了松弛试验研究。松弛和蠕变是岩土流变性的两种不同的宏观表现，在滑坡中松弛和蠕变是同时存在的，由于松弛试验难度较大，目前对松弛特性的研究较少。根据本章试验结果，提出了基于松弛试验的流变本构模型。该流变模型可以较好的描述土的松弛过程，与试验数据相比在规律上基本吻合，数值上的误差也在工程许可范围内。根据推导的松弛型流变本构模型，安乐寺滑坡滑带土为完全松弛型土，偏差应力可以持续松弛到零，这对滑坡的机理研究和防治具有重要意义。

第七章“近水平顺层岩质滑坡成因机制研究”，本章首先采用FLAC3D商用软件，对典型的近水平顺层岩质滑坡—安乐寺滑坡进行了数值模拟，对安乐寺的应力变形以及塑性区的分布和变化规律进行了分析，并从岩土流变学角度和滑坡学角度对该类滑坡的成因机制进行了探讨。根据安乐寺滑坡的数值计算结果和大量的滑坡变形特征，本章对该类滑坡的成因提出了新的观点，认为该类滑坡失稳不是由于滑带土强度不足引起的，而是滑带土强度不能充分发挥引起的。此类滑坡属于牵引式滑坡。这一观点可比较合理解释滑坡体后缘张拉破坏陷落带的产生以及滑坡体上的张拉裂隙来源，也合理解释了为何在滑带土强度远大于滑动带倾角的条件滑坡仍可滑动的的原因，而且按此机理产生的滑坡破坏与现场及勘察资料反映的滑坡破坏变形的特征也基本一致。在对滑坡机理认识的基础上提出了近水平顺层岩质滑坡孕育的三个条件，(1)滑坡体具有上硬下软的砂泥岩互层结构；(2)具备宽阔舒展的河谷地形；(3)具备多个临空面地形条件。根据该类型滑坡的破坏机理，该类型滑坡初次快速滑动后，将处于稳定或蠕变状态，只有在极端特殊条件下，如地震条件下，才可能出现失稳或快速滑动。

第八章“结论与展望”，本章总结了本论文的研究结论，并对进一步认识红层岩土流变特性和近水平地层滑坡机理的研究内容提出了建议。

本论文以试验为基础，对万州地区红层岩土的流变性质进行了研究，并采用数值模拟方法结合滑坡现场的变形特征从岩土流变力学的角度，对近水平岩质滑坡的成因机理做了探讨，提出了近水平地层滑坡的流变力学成因机理。

3. 学位论文 [郑建华 考虑流变特性的滑坡稳定性分析](#) 2007

滑坡是一种严重的地质灾害，会给经济建设和人民生命财产造成巨大的损失，并呈逐年上升趋势。流变是指岩土体的变形及强度不仅决定于外力的大小，而且受到时间的影响。流变是岩土材料的重要特性之一，许多滑坡在破坏前都表现出明显的流变特性，研究岩土材料的流变特性对滑坡进行稳定性分析和滑坡预报具有重要意义。

本文以清江古树包滑坡滑带土为研究对象，以滑带土的3组松弛试验数据和16组三轴蠕变试验数据为基础，所作的主要工作和内容如下：

- 1) 通过滑带土的松弛试验，建立了滑带土的松弛模型，为预测滑带土的长期强度提供了理论依据，并将模型用于古树包滑坡的稳定性分析计算；
- 2) 对三轴蠕变试验数据的整理，构造了非线性元件的改进Burgers模型；
- 3) 绘制蠕变的应力应变的等时曲线发现，应力水平 $p \leq 0.5$ 的试样处于弹性流变阶段，即仅仅发生弹性和粘弹性应变， $D > 0.5$ 的试样发生弹塑性流变，由此构造了非线性流变元件经验模型；
- 4) 整理出蠕变速率与时间呈对数直线关系，由此构造了改进Singh-Mitchell模型；
- 5) 推导了非线性流变元件模型的有限元求解方法和过程，编制非线性流变有限元数值仿真程序，并应用于滑坡工程实例计算，将其结果与理想弹塑性有限元计算结果相比较，发现考虑流变计算得到的滑坡稳定性系数要偏小。

4. 期刊论文 [汪斌, 朱杰兵, 唐辉明, 项伟, WANG Bin, ZHU Jie-bin, TANG Hui-ming, XIANG Wei 黄土坡滑坡滑带土的蠕变特性研究—长江科学院院报](#)2008, 25(1)

为了研究黄土坡滑坡滑带土的蠕变特性和长期强度,进行了室内流变试验.试验表明,滑带土具有较强的流变特性.基于非线性Boltzmann迭加原理处理的蠕变曲线就具有很好的相似性.并根据蠕变试验成果,建立了反映滑带土蠕变特性的Burger's蠕变模型,进行了定常Burger's蠕变模型的参数辨识.最后,比较了滑带土的长期强度包线与峰值强度包线,结果表明,长期强度要比相应的应力状态下的峰值强度减少30%左右.

5. 学位论文 [郑俊 某滑坡滑带土流变模型构建及FLAC<sup>3D</sup>二次开发](#) 2009

流变现象是岩土材料的重要力学特性之一。滑坡变形随时间变化的特征表明研究滑坡问题时必须考虑岩土材料的流变特性，流变是影响滑坡变形及稳定性的重要因素。对滑坡进行长期稳定性评价以及预测滑坡变形趋势，都有必要考虑岩土体的流变效应。本文以某滑坡为研究对象，在三轴蠕变试验基础上研究滑坡滑带土的流变特性及流变模型。结合三轴蠕变试验数据对FLAC3D 中内置流变模型进行改进，并采用C++语言编写自定义本构模型。在验证模型编写正确的基础上，对滑坡进行流变分析，预测滑坡变形趋势，研究考虑岩土流变特性的滑坡稳定性。

论文主要研究内容及成果如下：

- (1) 了解流变力学研究现状、流变学在滑坡问题中的应用以及流变模型二次开发的研究现状。
- (2) 推导一维标准线行体流变模型到三维形式，并提出将一维流变模型推广到三维形式的一般方法，根据这个方法将一维伯格模型推广到三维形式，并利用三轴蠕变试验数据拟合三维伯格模型的参数。
- (3) 根据滑带土的三轴蠕变试验数据，改进伯格模型以及推导改进伯格模型的三维形式，并通过三轴蠕变试验数据拟合三维模型的参数。
- (4) 推导改进伯格粘弹性模型的三维有限差分形式，并基于C++编写用户自定义本构模型，在改进伯格粘弹性模型的基础上结合岩土体的塑性流动特性，编写改进伯格粘塑性模型，并检验模型编写的正确性。
- (5) 利用FLAC3D 有限差程序，采用改进伯格粘塑性自定义本构模型对滑坡进行流变计算，得出滑坡中关键点蠕变曲线与三轴流变试验的蠕变曲线相似，考虑流变特性的水平向位移是弹性分析时的两倍左右。
- (6) 将弹塑性强度折减法应用于流变计算中，研究了考虑流变特性时滑坡稳定系数，提出了考虑流变特性的强度折减法确定滑坡稳定系数的方法，并与利用弹塑性强度折减计算的结果进行比较，结果：考虑流变特性时的稳定系数比不考虑流变时要小，说明岩土材料的流变特性对坡稳定性具有不利影响，在确定滑坡稳定系数时应考虑滑坡流变特性。

6. 学位论文 [汪斌 库水作用下滑坡流固耦合作用及变形研究](#) 2007

三峡库区是滑坡等地质灾害多发地带。自 2003 年 135m 蓄水伊始，到2006年156m蓄水位以来，绝大多数滑坡经受到了库水位作用的考验没有复活。但库水位波动对滑坡的稳定性和变形破坏失稳的影响机制仍为迫切需要解决的重要应用课题之一。论文选取三峡库区三大滑坡之一的巴东县黄土坡滑坡前缘临江崩滑堆积体及深部滑带土作为研究对象。在流变试验的基础上，对滑带土的流变特性和长期强度进行了研究，建立了应力—应变—时间三者关系的蠕变方程，为滑坡的建模和稳定数值计算奠定力学基础；另外，将前缘崩滑堆积体作为渗流场以及其与应力场耦合分析的工程实例，建立了三峡库区典型的地质—渗流场—应力场三位一体的耦合计算的概化模型，对不同工况下的滑坡的流固耦合作用进行了理论上和数值模拟分析。

总之，滑坡滑带土的流变性以及滑坡渗流场与应力场耦合作用的研究是当前岩土工程和工程地质界研究的热点。本文正是建立在这一内在因素和外在因素分析基础之上，进行了以下主要内容的研究：

- 1. 滑坡区的工程地质特征是研究滑坡的形成、变形、破坏机制的基础，也是建立地质—渗流场—应力场三位一体的耦合计算的概化模型的基本前提。重点研究了黄土坡滑坡区的工程地质条件，以及前缘临江崩滑堆积体的空间组成结构、软弱层的物质成分及物理力学性质等。
- 2. 三峡库区一些滑坡的变形与复活的控制因素在于滑带土的力学特性强度损伤积累和时间效应，这一内在的地质力学机理与外在的地面变形演化过程彼此呼应。因此，影响滑坡稳定性的一个重要因素在于滑动带土的长期蠕变效应。对滑坡滑带土的蠕变特性进行研究并建立适合该滑坡蠕变特性的应力、



应变和时间三者关系的方程就显得十分必要。研究了黄土坡滑坡 1# 崩滑体 TP3 平阔处的深部滑带土的长期蠕变特性，建立适合该滑坡的蠕变特性的 Burger’ s 方程，并对参数进行了无约束非线性回归辨识。基于滑带土的常规试验和蠕变试验研究，得到了瞬时强度与残余强度破坏包络线，滑带土的峰值强度包线与长期强度包线。

3. 推导了多孔介质饱和-非饱和、稳定-非稳定渗流问题的微分方程以及方程的有限元格式，用有限元分析程序对库水位变化下引起含泥化夹层(软弱带)的斜坡的饱和—非饱和渗流场进行了全面的分析，包括水位波动的动态自由面的变化特征和坡体内孔隙水压力(基质吸力)、体积含水量、稳定性系数等的变化规律，最后应用到黄土坡滑坡前缘的非饱和渗流场的研究中。主要成果有：①库水位上升或是下降，不同水力特征的层状岸坡内在开始前几个时步内总形成一个楔形的非饱和区(位于相对弱透水层与坡面相交部位)和两个渗流自由面。这与RuIon和Freeze(1985)用类似结构砂坡来研究降雨入渗时在坡体内形成的双自由面相似。②岩土体的饱和渗透系数、土水-特征函数以及坡体的结构特征等共同决定了水位升降过程中岸坡内孔隙水压力和浸润线的分布。模拟结果可作为对库岸尤其对于含弱透水层边坡的稳定性评价及岸坡的排水加固提供参考依据。4. 根据库水位波动对滑坡产生的力学作用，总结出库水位下降引起的三种类型孔隙水压力。据不同的水文地质条件，归纳并分析了地下水对斜坡稳定性影响的力学机制的三种模式：潜水含水层模式、纯承压含水层模式和承压水与潜水含水层的混合模式。阐述了非饱和土力学理论，将其应用于滑坡的稳定分析中。对传统极限平衡分析方法进行延拓，将考虑基质吸力对抗剪强度贡献的 Morgenstern-Price 条分法应用到岸坡的稳定性计算中。结果表明：在库水位下降过程中，稳定性系数总体变化趋势是先减然后递增，然后趋于达到一个稳定的常数；总存在一个最小的稳定性系数，它对应一个最危险水位，一般发生在库水位开始下降后10~15米左右。通过比较考虑基质吸力与不考虑基质吸力对滑动面的抗剪贡献所计算的稳定性系数，前者计算的稳定性系数稍大，一般要大0.5%左右。

5. 阐述并严格地推导了 Terzaghi 准三维固结和Biot三维固结微分方程，并对其进行比较分析。对基于虚功原理的渗流场和应力场的微分方程进行空间域及时间域离散，充分考虑双场耦合作用，推导出以位移增量和孔隙水压力增量为方程域变量的饱和—非饱和岩土体耦合固结控制方程。

6. 基于滑坡区的工程地质特征，考虑不同岩性物理特性及水力学参数在空间上的差异性，建立了三峡库区典型的地质—渗流场—应力场的耦合计算概化模型。通过对五种典型工况下的黄土坡滑坡1#崩滑堆积体的应力场与渗流场耦合的FEM模拟分析，得出以下几点结论：①蓄水前，仅在前缘浅层极小区域出现塑性区，说明总体上，浅层与深层滑坡均稳定。在库水位蓄水过程中，前缘的最大剪应力随库水位上升而变大，方向几乎与滑动面倾向一致，而且剪应力集中带有向浅层滑坡体后缘扩展的趋势。位移场及变形集中分布在高应变梯度带的滑动面上，且呈前缘位移大的牵引式变形，塑性区有沿浅层滑带向后缘扩展趋势。当库水位175m时，模拟成果表明，塑性区有向后缘深处发展贯通趋势，已对深部滑体的稳定性产生了影响；②由于耦合计算充分考虑了库水位作用下的应力边界和水头边界的变化，崩滑堆积体的体积力以及坡外的库水压力，在快速蓄水和泄水工程中，模拟结果表现出不同于单场计算的孔压场，具有明显的 Cryer 效应；③通过工况五的数值模拟以及基于极限平衡法的稳定性计算，得出的滑坡的位移场、塑性区扩展趋势以及稳定性变化趋势。得出影响滑坡稳定性变化趋势的主要力学机制：库水位下降前期，作用在滑带上的有效应力的增加以及基质吸力对抗剪强度增加对滑坡稳定性的有利影响小于渗透力和超孔压力对滑坡的不利影响，而后期(本例中 $t \geq 6d$ )前者对滑坡稳定性的有利影响大于后者对滑坡的不利影响。这正是影响滑坡稳定性变化趋势的主要力学机制。

7. 期刊论文 [严绍军. 项伟. 唐辉明. 满作武. 徐瑞春. YAN Shao-jun. XIANG Wei. TANG Hui-ming. MAN Zuo-wu. XU Rui-chun 大岩淌滑坡滑带土蠕变性质研究 -岩土力学2008, 29 \(1\)](#)

通过对大岩淌滑坡滑带土在固结压力为300, 500, 625, 800, 1 000 kPa下进行蠕变试验,得到了各级压力和剪切力的蠕变曲线.采用Burger模型来模拟流变过程,介绍了该模型参数的求取方法,并得到了模型的所有参数.通过等时曲线法确定该滑带土的长期强度.在上述结果基础上,对该滑带土的流变特性进行了分析,讨论了Burger参数同剪切力与固结压力关系,并得出长期强度约为慢剪结果的0.76~0.77倍的结论.

8. 学位论文 [严福章 水库滑坡复活机理及其发展趋势预测研究 2004](#)

国内外水库工程尤其是大型水库工程,库岸常常分布有数量和规模不等的古滑坡,在水库蓄水及运行过程中,部分古滑坡发生了复活,给人民生命财产造成了不同程度的损失,有些甚至是灾难性的。然而,国内外对水库古滑坡复活的内部作用机理及发展趋势预测方面的系统研究很少。

本文在调查国内外水库古滑坡复活现象及存在问题的基础上,通过对大量的工程地质勘察、科学试验和研究成果的分析,结合国内外大型水库工程的水库滑坡防治实践,对水库古滑坡的野外地质鉴别、蓄水后的复活机理、发展趋势预测及防灾治理等进行了系统研究,得出了一系列重要的研究成果。

1. 在水库滑坡的分布规律、成因机制研究基础上,总结了一套科学的库岸古滑坡的野外鉴别方法,提出了层序分析法在滑坡野外鉴别中的作用和意义。

2. 在调查分析了国内外大量水库古滑坡复活现象和规律的基础上,通过模型分析、稳定计算、试验成果和工程实例,从库水产生的水力学效应及材料强度效应两个方面详细研究了水库诱发的古滑坡复活机理。在水库对滑坡的水力学作用研究方面,着重分析了不同滑面形态的滑坡的稳定性随库水位变化的规律,分析了滑坡的透水性、天然含水状态及库水位上升或下降的速率对滑坡稳定性的影响;在库水对滑坡的强度效应研究方面,着重研究了滑带的抗剪强度遇水弱化的规律和滑带的粒度成份、矿物成分、密实度、浸水时间等因素对弱化的影响。对影响古滑坡复活因素进行了敏感性分析,提出了水库滑坡敏感因素分析的新方法。

3. 通过建立降雨触发滑坡模型,分析了降雨与库水联合作用的触发机理及过程。

4. 通过对滑带土的流变特征研究,分析了滑坡变形动态过程产生的内在机理。

5. 根据对大量水库古滑坡复活的调查结果,对水库滑坡的反应类型及变形发展趋势进行了分类;采用定量与定性以及计算与内部机理分析相结合的综合集成原则,对滑坡复活趋势预测方法进行了研究,提出了根据滑带流变特性和所受应力状态对滑坡的发展进行预测的方法,并在工程实践中得到了应用。

6. 在水库滑坡的防灾和治理中,风险决策具有十分重要的工程和经济意义。本文根据国内外水库滑坡防灾治理的实践,提出了水库滑坡防灾决策的思想、方法及步骤,并在实践中得到了应用;通过工程实例总结了国内外水库滑坡治理的原则、方法及技术路线。

7. 以湖北清江隔河岩水库茅坪古滑坡为实例,详细研究了其野外鉴别特征,复活特征及机理,对其变形发展趋势进行了综合预测,采用风险决策方法对其处理对策进行了研究。

引证文献(23条)

1. 张国明. 张彬. 李亚玲. 朱春明 [江外南各统滑坡滑带土力学参数的确定](#)[期刊论文]-[西安科技大学学报](#) 2009(4)
2. 李瑞娥. 徐郝明. 王娟娟 [黄土滑坡滑带土的特点——以天水椒树湾滑坡为例](#)[期刊论文]-[煤田地质与勘探](#) 2009(1)
3. 张先伟. 王常明. 王钢城. 陈多才. 马栋和 [黄石淤泥质土的剪切蠕变特性及模型研究](#)[期刊论文]-[吉林大学学报（地球科学版）](#) 2009(1)
4. 白海涛 [边坡的变形和破坏类型分析](#)[期刊论文]-[科技信息（科学·教研）](#) 2008(12)
5. 朱宝龙. 胡厚田. 姚勇 [类软土单轴剪切蠕变特性研究](#)[期刊论文]-[西南科技大学学报](#) 2006(2)
6. 徐世光. 王明珠. 王云晓. 李长才. 王小晶. 喻江 [地下水在引发边坡病害中的作用](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2006(5)
7. 杨重存 [国道212线（兰州——重庆）甘肃段工程地质问题研究](#)[学位论文]博士后 2006
8. 徐则民. 黄润秋. 唐正光. 王苏达 [粘土矿物与斜坡失稳](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005(5)

9. [姜峰林](#) [考虑黄土流变特性的边坡稳定性研究](#)[学位论文]硕士 2005
10. [李鹏](#) [高填石路堤蠕变模型与参数反演分析及其应用研究](#)[学位论文]硕士 2005
11. [祝传兵](#) [边坡稳定性分析与评价——以元磨高速公路边坡为例](#)[学位论文]硕士 2005
12. [龙建辉](#) [黄土滑坡勘测与监测技术研究](#)[学位论文]硕士 2005
13. [董艳辉](#) [滑带土强度参数随机分布特性研究](#)[学位论文]硕士 2005
14. [陈浩](#) [双层反翘型滑坡变形破坏力学模型的建立](#)[学位论文]硕士 2005
15. [蔡羽](#) [湛江强结构性粘土力学性状的时间效应研究](#)[学位论文]硕士 2005
16. [刘小丽](#) [三峡库区泄滩滑坡滑带土抗剪强度特性与稳定性评价](#)[学位论文]博士后 2005
17. [朱宝龙](#) [类软土滑坡工程特性及钢管压力注浆型抗滑挡墙的理论研究](#)[学位论文]博士 2005
18. [孙红月](#) [含碎石粘性土滑坡的成因机理与防治对策](#)[学位论文]博士 2005
19. [刘小丽](#), [邓建辉](#), [李广涛](#) [滑带土强度特性研究现状](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2004(11)
20. [赵明华](#), [肖燕](#), [陈昌富](#) [软土流变特性的室内试验与改进的西原模型](#)[期刊论文]-[湖南大学学报\(自然科学版\)](#) 2004(1)
21. [严福章](#) [水库滑坡复活机理及其发展趋势预测研究](#)[学位论文]博士 2004
22. [晏鄂川](#), [刘汉超](#), [唐辉明](#) [滑带土动力学性质试验研究](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#) 2003(3)
23. [严福章](#), [王思敬](#), [徐瑞春](#) [清江隔河岩水库蓄水后茅坪滑坡的变形机理及其发展趋势研究](#)[期刊论文]-[工程地质学报](#) 2003(1)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gcdzxb200104002.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gcdzxb200104002.aspx)

下载时间: 2010年6月1日