

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.03.020

基于滑带土强度特性的水库蓄水诱发滑坡研究综述

陈晓平

(暨南大学理工学院,广东 广州 510632)

摘要 :针对滑带土强度特性及对库岸滑坡的影响 ,通过回顾国内外一些代表性的成果 ,归纳和总结滑带土残余强度、强度的应变软化规律、边坡涉水后强度的水软化规律、边坡渐进性破坏等方面的研究现状 ,并对水位变动条件下库岸滑坡的研究手段和技术路径进行探讨。

关键词 滑带土 ;残余强度 ;水库蓄水 ;库岸滑坡 ;土强度软化

中图分类号 :TV697 ;TU43 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)03-0077-07

Overview of landslides due to reservoir impoundment based on shear strength properties of sliding zone soils//CHEN Xiao-ping(College of Science and Engineering , Jinan University , Guangzhou 510632 , China)

Abstract :Based on the strength properties of sliding zone soils as well as their influences on bank landslides , the worldwide representative achievements were reviewed. The current research status of the residual strength of sliding zone soils , the strain and softening rules of drained shear strength , the strength drop of soil slopes due to reservoir impoundment and the progressive failure of bank slopes was summarized and introduced. Moreover , the study means and technical path for bank landslide due to fluctuating reservoir water levels were discussed.

Key words :sliding zone soil ; residual strength ; reservoir impoundment ; bank landslide ; softening of soil strength

我国有丰富的水力资源 ,随着水利开发战略的逐步实施 ,陆续建设了各类水库工程 ,由人类活动产生的特殊营力在某些情况下已超过自然营力 ,在造福一方的同时必将产生相应的环境问题 ,其中一个重要的负面影响就是可能诱发库区古滑坡的复活或部分复活 ,也可能沿软弱地质带产生新的滑坡。

水库型滑坡 90% 左右与水有关 ,其中与库水位变动有关的滑坡比例非常高。Jones 等调查了 Roosevelt 湖附近 1941—1953 年发生的一些滑坡 ,49% 发生在 1941—1942 年的蓄水初期 ,30% 发生在水位骤降 10 ~ 20 m 的情况 ;日本 40% 滑坡发生在水位上升期(包括蓄水初期) ,60% 发生在水位骤降期^[1] ,我国也有统计资料表明 ,库岸失稳破坏发生在库水位上升期约占 40% ~ 49% ,发生在水位消落期约占 30%^[2]。另外如美国大古力水库在 1942—1953 年间的约 500 处岸坡失稳、奥地利 Cepatsch 坝蓄水及水库运行初期 1965—1969 年间的古滑坡变形 ,以及国内黄龙滩水库在 1974—1985 年间的 73 处滑坡^[2] ,三峡库区在 175 m 水位范围内的 1 000 多个大大小小的滑坡等^[3] ,无一不与水库蓄水、库水位变

动、降雨等水环境变化有关。给世人留下极为深刻教训的意大利 Vajont 水库滑坡和湖南拓溪水库塘岩光滑坡更是以惨重的生命代价和巨大的财产损失证实了不利的地貌和地质环境再叠加水库蓄水影响是导致滑坡的重要因素^[4]。另外 ,据国际大坝委员会(ICOLD)2002 年对 6 个国家 50 座水库的 105 个滑坡事件的统计 ,在各类滑坡中有 75% 的滑坡为古滑坡复活。

水库蓄水诱发滑坡的诸多原因中 ,含滑动带高边坡中滑带土强度特性及在水库蓄水期间涉水滑带土强度软化是一项重要的控制因素 ,与滑带土残余强度、从峰值强度到残余强度的衰减规律以及滑坡体前缘浸水后的强度软化等有关。在水库型滑坡的众多研究中 ,从降雨入渗方面 ,或从渗透稳定方面的研究一直被广泛关注 ,而从滑带土强度特性方面的研究相对较少 ,散见的成果不仅离深刻揭示这一问题还有较大距离 ,更重要的是获得成果的研究手段和技术路径本身也还值得研究。

滑带土是滑坡的重要组成部分 ,从某种意义上说 ,滑带土的剪切破坏机理就是滑坡的孕育和复活

基金项目 广东省水利科技创新项目(ysk2009-01)
作者简介 陈晓平(1957—)男,山东青岛人,教授,博士,从事土力学教学与研究工作。E-mail :chenxp@jnu.edu.cn

机理,从这一角度研究水库型滑坡对于边坡理论的完善、实际工程的预测预报以及水库控制运行都是很有意义的。本文从滑带土残余强度、强度随应变的降低规律、土体浸水后强度下降特征,以及含滑动带的库岸边坡由于水库蓄水导致的渐进性破坏等几个方面对国内外主要研究现状进行归纳和总结,并对水位变动条件下库岸滑坡的研究手段和技术路径进行探讨。

1 滑带土残余强度研究

土体残余强度及对土质边坡长期稳定性影响的研究从 Skempton^[5]针对伦敦黏土提出以来一直没有间断,研究成果可从 3 个方面分类:残余强度的确定方法、残余强度的影响因素以及残余强度的发挥机理。

1.1 残余强度的确定方法

残余强度的确定方法包括室内试验方法、原位试验方法、反分析法以及微结构检测方法等。其中反分析法基于极限平衡原理,比较适用于古滑坡体评价和正在缓慢滑动的斜坡预测,但分析过程需给定安全系数,所获结果有较大的不确定性^[6-8]。

微结构检测手段主要有 X 射线衍射、电镜扫描、压汞等,由于黏土矿物之间、黏土矿物和孔隙水之间具有复杂的化学作用机理^[9-10],因而研究结果在定量揭示微观与宏观关系上一直未取得突破性进展^[11]。

室内试验是研究残余强度的重要及常用手段,所用试验仪器主要有反复直剪仪、环剪仪和三轴剪切仪等,其中反复直剪试验是我国试验标准中规定的方法,在国内应用最多,但该试验方法除了直剪试验本身的缺陷外,针对含砂粒较多的细粒土很难顺利进行,也很难获得理想结果,另外,由于试验时要剔除粒径大于 2 mm 的颗粒,所以对于含砾细粒土,试验结果与实际残余强度有较大的差异。环剪试验在确定残余强度时其剪切性状比反复直剪试验更合理^[12-14],试验仪器也在不断的改进中逐渐完善,但在针对含砂(砾)粒较多的细粒土进行试验时存在与直剪试验同样的问题,所以一般不能反映含粗粒细粒土的强度。此外,该仪器在国外发达国家应用较多,但在国内实际工程中的应用远不如反复直剪仪普遍。三轴剪切试验测试残余强度在岩石材料中应用较多^[15],针对土体采用较少,有学者通过切面剪的方法将其应用于土体残余强度的确定^[16],由于试样制备比较困难,一直很少作为工程试验的主要手段。

在所有的确定残余强度方法中,原位试验无疑是最接近真实条件的,可以直接反映现场滑带土的

情况,但较高的试验成本使得研究数量非常有限,目前所获得的成果大多是结合具体工程^[17-20],其中依托三峡工程大型滑坡体所进行的多个滑带土原位剪切试验获得了最为丰富的成果^[11]。

1.2 残余强度的影响因素

残余强度的影响因素比较集中于表征土的水理性质指标,如黏粒含量、塑性指数、矿物比表面积等,同时现有的理论与试验结果都证明残余强度与应力历史和初始结构无关^[12,21],所以确定残余强度可用扰动土试样进行。研究表明,细粒土残余强度随着黏粒含量增加而降低,随着塑性指数增加而降低,随着比表面积增加而降低,反映这些水理性质量化影响的单因素或多因素经验公式相继被研究者提出^[22-30]。由于工程背景和土体的多样性,通过残余强度研究建立的经验关系和量化阈值的普适性一般都不高^[25],即使是同一种土,由于试样制备和试验过程的差异都会对经验关系产生影响^[31]。所以,对于残余强度影响因素的研究,标准试验方法的确定比经验公式更为有效。

1.3 残余强度的发挥机理

滑带土残余强度的发挥机理与土的三相组成和剪切速率有关。

Gibo 等^[27]通过环剪试验发现粉粒和砂粒含量较高的滑带土当效法向应力较低时强度有明显的恢复,任光明等^[32]发现滑带土再生结构强度与含水量有关,Lupini 等^[24]认为黏性土残余强度的发挥机理和剪切性状都是由黏粒含量和黏土矿物颗粒形状控制,Skempton^[6]发现黏粒含量超过 50% 后土体残余强度基本由黏土矿物间的摩擦产生。

剪切速率对残余强度的影响主要体现在剪切速率大于 0.01 mm/min 的情况^[6],Lemos^[33]通过改变剪切速率观察到了快速剪切对残余强度的影响,Tika 等^[34-35]通过环剪试验对残余强度的剪切速度效应进行了非常细致的研究,认为由于土体在快速剪切过程中剪切面的剪胀效应和结构破坏特征,快速剪切的速度影响效应可分为正速度效应、负速度效应以及介于它们之间的中速度效应 3 种不同情况,产生的影响分别为快剪残余强度大于慢剪、快剪残余强度小于慢剪和快剪残余强度基本等于慢剪,并通过瓦依昂水库滑带土的环剪试验发现在 100 mm/min 的剪切速率下最小快剪强度值仅为慢剪强度值的 60%,Wang 等^[36]针对干将坪古滑坡复活条件下滑带土的环剪试验得出了剪切速率对强度的影响在剪切速率高于某值时不能忽略的结论,但这个值到底是多少却与土类及滑带土所处位置有关,一般在 10 mm/s 以上,等等。

1.4 含粗粒细粒土残余强度

目前有关残余强度的研究,特别是室内试验研究,大多是针对细粒土,通过细粒土试验反复验证的对残余强度有明显影响的因素如黏粒含量、塑限指数等虽然获得了共识,但并不表明完全适用于含有较多粗颗粒的滑带土。我国铁道部科学研究院西北研究所1979年曾研究过粗粒含量对残余强度的影响^[37],发现当含水量大于塑限、粗粒含量大于30%时对残余强度有明显影响。近年来,李远耀等^[38]结合三峡工程资料对库区3000多组滑带土抗剪强度参数进行了分析和统计,证明粗颗粒含量对残余强度的影响是不可忽视的。Wen等^[11]通过翔实的数据比较了三峡滑坡区域滑带土室内反复剪试验结果和现场直剪试验结果,发现对于含砾细粒土来说,室内外残余强度试验结果有很大的不一致:室内反复剪试验结果由于在试样制备中剔除了砾粒,所以残余强度摩擦角呈现的规律与以往有关细粒土的研究结果一致;而现场直剪试验却揭示残余强度摩擦角与粒径分布密切相关,随着粗粒含量增加而增加,随着细粒含量增加而降低,与塑性指数相关性反而很低;另外还发现残余强度与细粒土的关系其实与细粒土,即黏粒和砂粒含量的总体相关性很高,并非与黏粒或砂粒的某一种含量有关。

我国库岸边坡中的滑带土很多都属于含粗粒土的细粒土,这与国外一些学者所研究的完全由黏土矿物组成的滑动带对象有很大的不同,如Skempton^[6]研究的伦敦黏土、Mesri等^[31]研究的英国石灰岩黏土、Tiwari等^[30]研究的日本第三纪泥岩。针对粗粒含量较高的滑带土的残余强度研究一直没有引起足够重视的原因,除了许多研究主要是在延续和验证早期的一些经典成果外,还因为目前室内试验的一些局限及已有的试验方法标准只能针对细粒土。

2 滑带土强度的软化规律研究

2.1 滑带土强度的应变软化

滑带土随着剪切应变的发展从峰值强度降低到残余强度的软化规律是滑带土剪切特性的另一项重要特征。由于黏性土或泥化夹层经历很小的初始位移即可达到残余强度,所以在古滑带和滑坡存在一定蠕变变形的情况下,进行整体稳定分析时一般可直接采用残余强度。但对于粗粒含量较高的细粒土及斜坡的渐进破坏而言,在滑坡的不同发育阶段以及不同部位的滑带土可能具有不同的强度性状,即滑动带一般不会同时或全部达到残余强度,而应是处于与剪切变形有关的、以峰值强度和残余强度作

为边界值之间的某种强度。因而,基于滑带土强度特性的边坡稳定分析除了需要确定残余强度外,还应该确定强度与剪切应变的关系及衰减至最小强度的过程,即强度的应变软化规律。

针对土体从峰值强度到残余强度的过程,Skempton^[6]通过超固结原状土剪切性状研究定义了一个软化强度,认为该强度产生于超固结土中的膨胀作用,对滑坡启动有一定控制影响。王恭先^[39-40]认为峰值强度后的剪切过程将导致土体结构破坏和膨胀吸水软化,所形成的软化强度在数值上相当于结构破坏后重塑土正常固结的峰值强度。Timothy等^[41]通过针对裂隙硬黏土滑坡研究后认为完全软化强度与液限、黏粒含量等有关,另外当强度衰减至完全软化强度后随着剪切位移的增加还存在一个滑动启动强度,数值上比较接近软化强度与残余强度均值。Mesri等^[42]通过黏性土滑坡实测资料的反分析指出,滑动启动强度其实更取决于经验判断,可以定义为峰值强度的某一折减 η ,比如对于高塑性硬黏土可取到40%以下。由此可见,从峰值强度到残余强度之间的软化规律虽然可以从边坡滑动机理上得到合理解释,但在实际应用中却很难量化确定,现有研究成果能互相验证并能指导实际工程的很少。这也表明了滑带土剪切特性除了具有土体单元的一般力学机理外,还会因边坡的蠕变变形及滑动带各部位逐渐达到破坏这一过程而使得描述比较复杂。

2.2 滑带土强度的水软化

对于库岸边坡来说,滑动带处于地下水营力最活跃部位,特别是水库蓄水后将形成大量涉水岸坡,水对滑带土强度的影响是构成滑带土剪切特性的又一重要因素。水库蓄水对滑带土剪切强度的影响主要表现在2个方面:一是直接影响,即滑带土浸水后强度下降;另一是间接影响,即水位上升造成浸水滑面上有效应力减少或抗滑阻力减少导致蠕滑复活或加速过程中滑带土强度随剪切变形产生的变化。

滑带土强度遇水将降低可以从机理上得到合理解释,但是量化分析却比较困难。根据Skempton^[6]对伦敦黏土的环剪试验结果,滑带土的残余强度是与含水量无关的,这表明环剪过程中真正做到了充分排水。如果采用直接剪切慢剪试验,由于试验中很难保证充分排水,所以一般会得出残余强度与含水量有关的认识^[43-45]。黄润秋等^[46]曾针对雅砻江上游某滑带土进行了三轴试验和直剪试验,发现强度的水敏感性是很明显的。另外,王思敬^[47]通过直剪试验对比了浸水10d和干燥状态下的抗剪强度,发现 $\tan\varphi$ 下降15%~20%, c 值下降35%~75%;陈晓平等^[48]针对全风化泥质粉砂岩进行了残余强

度试验,然后再浸水 15 d,测得强度相对于残余强度摩擦角进一步降低了 7%。这些研究成果比较零散,缺乏进一步的验证,不仅不能很好地揭示滑带土强度在水作用下的软化规律,也没有提出确定的、可以相互参照的试验方法。

水库蓄水对滑带土强度的间接影响有更加复杂的机制,水位上升造成浸水滑动面上有效应力减少、强度降低和抗滑阻力减少,如果坡体在这种影响下产生蠕滑或滑动加速,则必定导致未浸水部分滑带土强度产生与剪切变形有关的变化,直到随着剪应变的发展全部达到残余强度。有研究通过室内剪切试验证明^[49],只有当滑带土的剪应力、含水量、干密度完全不变时,滑体下滑过程才可能不对滑带土强度参数产生影响,但是这种条件在实际蓄水工程的涉水边坡中是不可能满足的。所以,水库蓄水对滑带土剪切特性的影响应考虑应变软化和水软化的耦合效应。

目前针对水库蓄水或水位上升对边坡稳定的影响从渗流角度进行的研究非常多,而基于滑带土强度衰减综合规律的研究较少。

2.3 边坡的渐进性破坏

虽然滑带土强度的软化规律及量化描述还有待于进一步研究,但除了缺乏胶结的松散颗粒外,在大位移排水剪切条件下土体都会表现出一定的应变软化现象却是不容置疑的^[50],这种软化特性是导致渐进型滑坡的主要机理,也是含滑动带的水库型滑坡的主要形式。渐进性破坏的概念最早由 Terzaghi 等于 1948 年提出,Rowe^[51]对这一过程进行了试验验证,Bjerrum^[52]建立了有关的简化模型,Hoeg^[53]提出了有限元数值计算方法。之后更多学者对斜坡土体应变软化模型和边坡渐进性破坏规律进行了研究,如 Herber^[54]研究了残余强度与滑坡的定量关系;王赓赓^[55]、刘忠玉等^[56]研究了软土和残积土边坡的渐进性破坏规律;Zhang 等^[57]针对应变软化边坡提出了一种简化分析方法,等等。应提及的是,这些研究较少针对滑带土,并且所建立的软化模型一般只是针对应力-应变关系,没有在此基础上进一步考虑强度-应变关系,并将此关系应用于水位变化条件下库岸边坡渐进性破坏分析,同时在计算成果上没有注重将边坡的变形与整体稳定安全评价相结合。

Potts 研究小组对强度参数与累计塑性应变不变量的关系进行了系列研究^[58-61],基于 M-C 准则建立了可以描述强度随剪应变软化的弹塑性模型,并对建于黏土地基的 Carsington 大坝滑坡进行了模拟;Troncone^[62]在 Potts 研究成果基础上进一步考虑了滑动带不同部位由于剪应变不同而导致强度不同步的

问题,借助土性中与时间有关的黏滞函数概念发展了 Potts 模型,建立了基于 M-C 准则的强度随剪应变软化的黏弹塑性模型来描述滑动带不同部位的强度软化特征,并成功应用于意大利南部建于含砂(砾)细粒土上、由于坡脚开挖导致的 Senise 滑坡的数值模拟。Potts 模型和 Troncone 模型最与众不同的是基于土的本构关系建立了描述土体强度随应变降低的模型,并将其应用于斜坡渐进性破坏分析,但这些研究均没有考虑地下水或坡体外水位变动的影响,因而用于涉水边坡的分析还有待于进一步完善。

3 水库蓄水诱发滑坡研究的技术手段

针对水库蓄水诱发滑坡的研究,无论是从渗透稳定角度,还是从滑带土剪切强度角度,目前采用最多的是土工试验与数值模拟相结合的技术手段,即通过土工试验确定有关土性参数,然后采用数值分析技术进行边坡变形分析和整体稳定分析,如极限平衡法、有限元法、强度折减法^[63-65]等,这些数值分析方法虽然有各自突出的特点和被广泛应用的理由,但每种方法都存在目前还没有克服的不足,如极限平衡法需事先给出滑动面形状,一般有限元法不能获得整体稳定安全系数,强度折减有限元法在获得整体稳定安全系数和最危险滑裂面的同时不能将边坡的变形特征一并考虑进来,等等。另外,对于新建大型蓄水工程来说,数值分析结果的可靠性也由于实测资料的缺乏而存在问题。

土工离心模型试验是迄今为止相似性最好的研究手段,不仅可较为真实地模拟现场条件,而且可根据需要调整各种控制参数,再现原型的应力状态和变形过程,以及塑性区发展过程。基于其在反映重力场方面的突出优点,土工离心模型试验在边坡稳定分析中得到了有效且广泛的应用,特别是在降雨入渗边坡稳定分析方面^[66]。水库蓄水对岸坡稳定的影响机理比较复杂^[67],离心模型试验不仅需对坡外水库水位变动情况进行模拟,还需比较真实地反映库岸边坡的非均质性,因而试验难度大于开挖、降雨入渗等常见模型,可供利用的资料非常有限。张利民等^[68-69]针对水库水位的涨落,研制了一种可以在离心机上使用的供排水装置系统,并用于瀑布沟水电站高堆石坝在水库蓄水、稳定渗流和快速退水 3 种情况的模拟试验;Timpong 等^[70]针对坡体内地下水位改变对边坡稳定的影响进行了研究;李绍军等^[71]基于三峡库区典型滑坡的工程地质特征进行了水位变动条件下土坡失稳的离心模型试验研究。上述试验较少考虑边坡岩土体的成层特征,针对含滑带土的高库岸边坡的研究更是鲜见报道。

4 展 望

基于滑带土剪切特性的水库蓄水诱发滑坡的研究,随着土力学理论与试验手段的发展而具备了获得更多研究成果的可能,同时随着大型蓄水工程的需要而成为必要,无论是在研究数量还是在研究质量方面都存在大幅度提高的空间。

4.1 滑动带含粗粒细粒土的残余强度研究

粗粒含量对滑带土强度的影响研究虽然进行得不多,但反映的问题却是不容置疑的,即现有的室内残余强度试验方法和试验标准不适合含粗粒土的细粒土。针对现在工程中应用最广泛的反复直剪试验存在的缺陷,改进相应的试验方法,确定粗粒含量及粒径分布对残余强度的影响,对于在边坡稳定分析中 φ 值相差 $2^\circ \sim 3^\circ$ 推力就可能成倍增长的实际工程来说是有重要意义的,无论研究理论和计算手段如何先进,提供正确的强度指标都是库岸边坡稳定分析的前提。

4.2 滑带土应力-应变-强度软化模型及边坡渐进性破坏研究

针对浸水软化问题对岩石材料进行的研究较多,水理敏感性更高的滑带土体反而由于试验难以操作、试验条件不确定以及统一试验标准的缺乏而没有进行系统的研究。对于滑带土而言,水与土的物理作用不仅表现为强度与含水量的关系,更表现为强度的应变软化特性和水软化特性的耦合,所以所建立的软化模型不仅需要描述具有软化特征的应力-应变关系,还需要在数学形式上将强度参数随剪应变增加而衰减的规律表示出来,同时考虑水致弱化的影响。另外,在边坡渐进性破坏分析中应将基于应力-应变关系的变形分析与基于强度准则的整体稳定分析结合起来,即通过应力-应变分析确定坡体的应变特征,然后通过强度参数和应变的关系确定相应的整体稳定安全系数,使得在掌握边坡变形规律的同时获得边坡整体稳定安全性评价。

4.3 水位变动条件下含滑动带的库岸边坡稳定研究方法

对于新建水库边坡进行数值模拟除了各种数值分析方法本身的技术问题外,一个共同问题就是结果的验证问题,因为新建蓄水工程在水位变动下的滑坡实测数据是不可能被提供的。而土工离心模型试验除了固有的由粒径效应、边界效应等带来的系统误差外,目前还存在的最大不足是量测设备有限和试验方案有限,所以所采集的数据相对于数值模拟来说是非常少的,这也是该方法本身很难克服的不足。所以,针对数值分析和离心模型试验各自的

优势和不足,在研究手段上将2种方法互补,使离心模型试验目的不仅仅是为了获得有限方案接近原型的结果,也是为了验证并调整数值计算模型和参数,然后采用验证后的数值模型作为离心模型试验的补充进行多方案对比模拟,这种将2种方法相结合的研究手段应该是目前乃至很长一个时间段内最好的研究方法。

基于滑带土剪切特性对新建大型蓄水工程建成初期含滑动带的库岸边坡稳定进行研究,将涉水边坡稳定分析与坡体材料特性的揭示紧密联系在一起,对于水库诱发滑坡的防灾减灾、库区环境保护是有明显科学意义的,此项工作将随着水库控制运行水平的不断提高而被更多关注。

参考文献:

- [1] 中村浩之.论水库滑坡[J].水土保持通报,1990,10(1):53-65.
- [2] 王士天,刘汉超,张倬元,等.大型水域水岩相互作用及其环境效应研究[J].地质灾害与环境保护,1997,8(1):69-89.
- [3] 莫伟伟,徐平,丁秀丽.库水位涨落对滑坡稳定性影响研究进展[J].地下空间与工程学报,2006,2(6):997-1002.
- [4] 钟力勋.意大利瓦依昂水库滑坡事件的启示[J].中国地质灾害与防治学报,1994,5(2):77-84.
- [5] SKEMPTON A W. Long term stability of clay slopes[J]. Geotechnique,1964,14(2):77-102.
- [6] SKEMPTON A W. Residual strength of clays in landslides folded strata and the laboratory[J]. Geotechnique,1985,35(1):3-18.
- [7] 郑明新.论滑带土强度特征及强度参数的反算法[J].岩土力学,2003,24(4):528-532.
- [8] 陈松,陈国金.公路滑坡滑带土力学参数分析[J].公路,2008(4):20-23.
- [9] MOORE R. The chemical and mineralogical controls upon residual strength of pure and natural clays[J]. Geotechnique,1991,41(1):35-47.
- [10] ANSON R W W, HAWKINS A B. The effect of calcium ions in pore water on residual shear strength of kaolinite and sodium montmorillonite[J]. Geotechnique,1998,48(6):787-800.
- [11] WEN B P, AYDIN A, DUZGOREN-AYDIN N S, et al. Residual strength of slip zones of large landslides in the Three Gorges area, China[J]. Engineering Geology, 2007,93:82-98.
- [12] BISHOP A W, GREEN G E, GARGA V K, et al. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength[J]. Geotechnique,1971,21(4):273-328.
- [13] 戴福初,王思敬,李焯芬.香港大屿山残坡积土的残余

- 强度试验研究[J].工程地质学报,1998,13(3):223-229.
- [14] MANDAR M, DEWOOLKAR A M, ROBERT J, et al. Drained residual shear strength of some claystones from front range, Colorado [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12):1543-1551.
- [15] GURO G, BJØRN N, ROLF S. Shear strength estimation for Åknes sliding area in western Norway [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(3):479-488.
- [16] 黄志芳. 常规三轴试验测定土的残余强度[J]. 矿产与地质, 1999, 13(2):117-121.
- [17] 李会中, 潘玉珍, 王复兴. 三峡库区奉节县新城去滑坡带土抗剪参数试验研究[J]. 湖北地矿, 2002, 16(4):28-32.
- [18] 张昆, 郭菊彬. 滑带土残余强度参数试验研究[J]. 铁道工程学报, 2007(8):13-26.
- [19] 程圣国, 傅又群, 罗先启. 滑坡滑带土原位直剪试验应用研究[J]. 路基工程, 2008, 2:10-11.
- [20] 张玉成, 杨光华等. 土质边坡土体抗剪强度室内外试验研究[J]. 湖南科技大学学报:自然科学版, 2007, 22(3):45-49.
- [21] TOWNSEND F C, GILBERT P A. Tests to measure residual strength of some clay shales [J]. Geotechnique, 1973, 23(2):267-271.
- [22] KENNEY T C. The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils [C]//Proc Geotechnical Conf. Oslo [s.n.], 1967:123-129.
- [23] WESLEY L D. Some basic engineering properties of halloysite and allophone clays in Java, Indonesia [J]. Geotechnique, 1973, 23(4):471-479.
- [24] LUPINI J F, SKINNER A E, VAUGHAN P R. Drained residual strength of cohesive soil [J]. Geotechnique, 1981, 31(2):181-213.
- [25] WESLEY L D. Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits [J]. Geotechnique, 2003, 23(7):669-672.
- [26] 李妥德. 滑坡滑带土抗剪强度的确定方法[J]. 山地学报, 1984(1):27-32.
- [27] GIBO S, EGASHIRA K, OHTSUBO M. Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose landslide in Japan [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4):456-461.
- [28] COLOTTA T, CANTONI R, PAVESI U, et al. Correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils [J]. Geotechnique, 1989, 39(2):343-348.
- [29] VOIGHT B. Correlation between atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils [J]. Geotechnique, 1973, 23(2):265-267.
- [30] TIWARI B, MARUI H. A new method for the correlation of residual strength of the soil with mineralogical composition [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(9):1139-1150.
- [31] MESRI G, SHAHIEN M. Residual shear strength mobilized in first-time slope failures [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(1):12-31.
- [32] 任光明, 聂德新. 大型滑坡滑带土结构强度再生特征及其机理探讨[J]. 水文地质工程地质, 1997(3):28-31.
- [33] LEMOS L J. The effect of rate on the residual strength of soil [D]. London:University of London, 1986.
- [34] TIKA T E, VAUGHAN P R, LEMOS L. Fast shearing of pre-existing shear zones in soil [J]. Geotechnique, 1996, 46(2):197-233.
- [35] TIKA T E, HUTCHINSON J N. Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface [J]. Geotechnique, 1999, 49(1):59-74.
- [36] WANG Fa-wu, ZHANG Ye-ming, HUO Zhi-tao, et al. Mechanism for the rapid motion of the Qianjiangping landslide during reactivation by the first impoundment of the Three Gorges Dam Reservoir, China [J]. Landslide, 2008(5):379-386.
- [37] 周平根. 滑带土强度参数的估算方法[J]. 水文地质工程地质, 1998(6):21-24.
- [38] 李远耀, 殷坤龙, 柴波, 等. 三峡库区滑带土抗剪强度参数的统计规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5):1419-1426.
- [39] 王恭先. 滑坡防治中两个关键技术的研究 [C]//中国土木工程学会. 海峡两岸土力学及基础工程、土工技术学术研讨论文集. 西安:陕西科学技术出版社, 1994:336-343.
- [40] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21):3818-3827.
- [41] TIMOTHY D S, HISHAM T E. Slope stability analysis in stiff fissured clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4):335-343.
- [42] MESRI G, ABDEL-GHAFFA M. Cohesion intercept in effective stress-stability analysis [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(8):1229-1249.
- [43] 相建南. 水对软弱夹层力学特性影响的探讨 [C]//《水文地质工程地质》编辑部. 水文地质工程地质论丛. 北京:地质出版社, 1986.
- [44] 郭爱侠. 双层滑面土体残余抗剪强度试验研究[J]. 中国水运, 2008, 8(8):184-189.
- [45] MAIO C D. The influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clayey soil [C]//Proc 7th Int Symp on Landslides. Trondheim, Norway:Balkema, 1996:189-194.
- [46] 黄润秋, 徐则民, 许模. 地下水的致灾效应及异常地下水诱发地质灾害[J]. 地球与环境, 2005, 33(3):1-9.
- [47] 王思敬. 水库地区的水岩作用及其地质环境影响[J]. 工程地质学报, 1996, 4(3):1-9.
- [48] 陈晓平, 茜平一, 梁志松, 等. 泥质软岩高边坡湿化稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5):543-547.

[49] 白俊光 ,吕生第 ,韩建设 .李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J].岩土力学 ,2008 ,29(7) :1723-1732 .

[50] 陈守义 .试论土的应力应变模式与滑坡发育过程的关系[J].岩土力学 ,1996 ,17(3) 21-26 .

[51] ROWE P W . Progressive failure and strength of a sand mass [C]//Proc 7th Int Conf Soil Mech Found Engng . Mexico City [s .n .] ,1969 341-349 .

[52] BJERRUM L . Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clays and clay shale[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division , ASCE ,1967 93(5) 3-49 .

[53] HOEG K . Finite element analysis of strain softening clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ,ASCE , 1972 78(1) 43-59 .

[54] HERBERT L N . Residual strength and landslides in clay and shale[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ,ASCE ,1973 79(SM9) 705-719 .

[55] 王赓荪 .边坡的渐进破坏及稳定分析[J].岩石力学与工程学报 ,2000 ,19(1) 29-33 .

[56] 刘忠玉 陈少伟 .应变软化土质边坡渐进破坏的演化模型[J].郑州大学学报 ,2002 23(2) 37-41 .

[57] ZHANG Ga ,ZHANG Jian-min . Simplified method of stability evaluation for strain-softening slopes[J]. Mechanics Research Communications .2007 34 444-450 .

[58] DOUNIAS G T , POTTS D M , VAUGHAN P R . Finite element analysis of progressive failure : two case studies[J]. Comput Geotech ,1988(6) :155-175 .

[59] DOUNIAS G T , POTTS D M , VAUGHAN P R . Analysis of progressive failure and cracking in old British dams[J]. Geotechnique ,1996 46(4) :621-640 .

[60] POTTS D M , DOUNAS G T , VAUGHAN P R . Finite element analysis of progressive failure of Carsinton embankment[J]. Geotechnique ,1990 40(1) 79-101 .

[61] POTTS D M , KOVACEVIC N , VAUGHAN P R . Delayed collapse of cut slopes in stiff clay[J]. Geotechnique ,1997 47(5) 953-982 .

[62] TRONCONE A . Numerical analysis of a landslide in soils with strain-softening behaviour[J]. Geotechnique ,2005 55(8) : 585-596 .

[63] DAWSON E M , ROTH W H , DRESCHER A . Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique , 1999 49(6) 835-840 .

[64] MATSUO M , SAN K C . Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique [J]. Soil and Foundations ,1992 32 59-70 .

[65] LI Shao-jun , FENG Xian-gting , KNAPPETT J A . Numerical analysis of slope stability influenced by varying water conditions in the reservoir area of the Three Gorges ,China [C]//CHEN Zu-yu . Proceedings of the Tenth International Symposium on Landslides and Engineered Slopes . Beijing [s . n .] ,2008 803-807 .

[66] 姚裕春 姚令侃 王元勋 ,等 .水入渗条件下边坡破坏离心模型试验研究[J].自然灾害学报 ,2004 ,13(2) :149-154 .

[67] 王明华 晏鄂川 .水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J].岩土力学 ,2007 28(12) 2722-2725 .

[68] 张利民 胡定 .瀑布沟高土石坝离心模型试验研究[J].水利学报 ,1990(9) 60-65 .

[69] 张利民 胡定 .高重力场中离心模型试验的水流控制设备[J].成都科技大学学报 ,1989 45(3) 93-97 .

[70] TIMPONG S , ITOH K , TOYOSAWA Y . Geotechnical centrifuge modelling of slope failure induced by ground water table change[C]//Landslides and Climate Change . London : [s .n .] 2007 :107-112 .

[71] 李绍军 ,KNAPPETT J A ,冯夏庭 .库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报 , 2008 27(8) :1586-1593 .

(收稿日期 2009-06-25 编辑 高建群)

· 简讯 ·

河海大学举办大跨径桥梁维护新技术国际学术研讨会

2010 年 5 月 20 日 ,由河海大学、日本名城大学和王宽城教育基金会共同主办的大跨径桥梁维护新技术国际学术研讨会在河海大学召开 ,来自国内外高校和科研院所的专家代表等 60 多人参加了会议。本次会议包括以下 4 个议题 :① 缆索支承桥梁维护及管理关键技术 ;② 大跨径桥梁抗震、损伤预测及灾后修复技术 ;③ 桥梁加固、评估新技术 ;④ 桥梁抗风。日本名城大学葛汉彬教授、日本新日本制铜株式会社本间宏二部长、日本名古屋高速道路工团技术总监前野裕文博士、湖南大学桥梁风工程研究中心陈政清教授、同济大学桥梁工程研究所刘玉擎教授、东南大学桥梁工程系黄侨教授、东南大学桥梁工程系刘钊教授、江苏省交通科学研究院副总工程师张建东等分别做大会报告。报告内容涉及大跨桥梁的抗震、抗风、维护管理、组合结构桥梁以及钢纤维混凝土和高性能钢材在桥梁中的工程应用等。

(本刊编辑部供稿)