

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.020

## 三峡库区某滑坡滑带土剪切 变形特性及控滑机理

易庆林<sup>1,2</sup>, 赵能浩<sup>1,2</sup>, 孟召平<sup>2</sup>, 胡大儒<sup>2</sup>, 关倪<sup>2</sup>

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;  
2. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**滑带土的力学特性对滑坡的稳定性具有控制作用,为了研究其控制机理,对三峡库区秭归县某滑坡滑带土取样,通过进行多组固结快剪和固结排水反复剪等直接剪切试验,研究了其应变硬化的特性,揭示了应变硬化型滑带土在滑坡变形过程中的作用机理。研究表明,该滑带土从塑性变形到剪切破坏过程中,所需的剪应力不断增大。经过反复剪切之后,其抗剪强度有所增加,内摩擦角对其抗剪强度的影响占主导作用,且正应力越大增加得越明显。通过滑坡实地勘测及数值模拟计算,研究了应变硬化型滑带土对滑坡稳定性的影响。分析认为,在滑坡滑动过程中,由于应变硬化型滑带土经剪切之后摩擦强度增大,消耗了滑坡的动能,对滑坡的作用在宏观上表现为,滑坡经短距离滑动之后出现暂时稳定状态。

**关键词:**滑带土;应变硬化;抗剪强度;滑坡;稳定性

中图分类号:TU432 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)05-0125-06

## Shear Deformation Properties of Sliding Zone Soil and Its Effect on Sliding Mechanism of a Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

Yi Qinglin<sup>1,2</sup>, Zhao Nenghao<sup>1,2</sup>, Meng Zhaoping<sup>2</sup>, Hu Daru<sup>2</sup>, Guan Ni<sup>2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment  
in Three Gorges Area, Yichang 443002, Hubei, P. R. China;

2. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River,  
China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** The mechanical properties of slip soil play a key role in landslide stability. In order to study this control mechanism, multigroup experiments on the slip soil of a landslide were conducted in the Three Gorges reservoir in Zigui county involving consolidated quick direct shear test and consolidated drained direct shear test, through which the strain hardening property of this slip soil has been studied as well as mechanism of landslide deformation resulting from the strain hardening slip soil. The results show that from plastic deformation to shear failure, the shear stress applied to this slip soil increases all the way. After repeated shearing, its shear strength increases, and the greater the normal stress, the more the shear strength increases, in which process the angle of internal friction contributes the most to its shear strength variation. Through the field investigation and numerical modeling, how the strain hardening slip soil affects

收稿日期:2014-03-11

基金项目:水利部公益行业科研专项(201401029);国家自然科学基金(41372163,41172145)

作者简介:易庆林(1966-),男,教授级高工,主要从事地质灾害研究,(E-mail) yiqinglin@ctgu.edu.cn.

the landslide stability was studied. In the process of sliding, the frictional strength of the strain hardening slip soil increases after being shearing, leading to the consumption of the landslide's kinetic energy, following the phenomenon that a temporary steady state occurs after a short distance sliding.

**Key words:** slip soil; strain hardening; shear strength; landslide; stability

根据岩土应力应变曲线特征,可将其分为应变硬化型和应变软化型。研究表明,对于正常固结土,塑性应变增加了土对继续变形的阻力,当土体受到剪切进入屈服阶段后,不是应力保持不变,而是能够承受更大的应力,屈服点的位置不断提高,表现为应变硬化<sup>[1]</sup>。对于应变硬化型的岩土,许多学者相继提出了能够描述其应力应变关系的数学模型。Duncan等<sup>[2]</sup>在1970年根据Kondner<sup>[3]</sup>等的研究,建立了以广义胡克定律为基础的非线性弹性模型,称之为邓肯张双曲线模型,它可以反映土体变形的非线性特征,通过弹性参数近似的考虑了土体的塑性变形,但该模型不能反映土体的剪胀特性。Schanz等<sup>[4]</sup>在1999年提出了Hardening Soil(HS)模型,该模型与邓肯张模型较为相似,也是假设剪应力 $\tau$ 与轴向应变 $\epsilon$ 成双曲线关系,但HS模型采用的是弹塑性理论,可以同时考虑剪切硬化和压缩硬化,并采用Mohr-Coulomb破坏准则。徐明等<sup>[5]</sup>在Mohr-Coulomb模型的基础上,提出一个针对粗粒土剪切特征的应变硬化模型。该模型考虑了土体强度、刚度和体积变化特征均随应力水平而变化的特性。何利军等<sup>[6]</sup>等提出了一种能同时描述应变硬化型曲线和应变软化型曲线的模型,并讨论了该模型拟合应变硬化型曲线时的简化形式,通过调整其中一个参数可以表达出不同的曲线形式,体现了土体应力应变关系的多样性。孟召平等<sup>[7-8]</sup>研究了不同侧压条件下砂岩的破坏机制,提出了成岩作用程度较弱的岩石应力-应变曲线随着围压的增高由应变软化性态向近似应变硬化性态过渡的观点。Andrés等<sup>[9]</sup>提出了一种形状硬化函数,它可以提高粘性土边界曲面的预测能力,特别是对于超固结粘性土。

尽管学者们对岩土应变硬化进行了大量理论研究,由于滑坡滑带土取样困难和资料相对较少,使人们对滑带土力学特性研究受到一定限制。前人多是运用土体的应变软化理论来解释滑动规模较大、滑动程度较剧烈的滑坡的运动机理<sup>[10-15]</sup>,而对于渐趋稳定型滑坡的作用机制尚缺乏较为系统的解释。本文以三峡库区某滑坡为例,通过直剪试验发现了滑坡滑带土应变硬化的规律,并将其用于滑坡变形预测,揭示了该类型滑坡变形破坏机理。

## 1 滑带土颗粒组分特征

滑带土来自三峡库区秭归县某滑坡。为了研究该滑坡的变形机理及滑带土对该滑坡的控制机制,利用滑坡出现大变形后,后缘滑带出露的机会,地质人员及时在滑坡后缘出露的新鲜滑带土中进行了取样,该土样为粉质粘土,夹有少量碎石土,呈红褐色,表面有较为明显的滑痕(图1)。密封保存后,并于当天带回室内,对其进行了颗粒分析试验和直剪试验。



图1 滑带土取样点

土的颗粒组分对其物理力学性质具有重要影响<sup>[16-18]</sup>,因此通过颗粒分析试验研究了该滑带土颗粒组分特征。试验依据为《土工试验规程》(SL237—006—1999),采用筛析法和密度计法联合测定。对于粒径大于0.075 mm的土样采用筛析法测定,粒径小于0.075 mm的土样采用甲种密度计法测定,绘制粒径大小分布曲线。土的粒组按《土工试验规程》(SL237—001—1999)中规定的土颗粒粒径范围划分。仪器设备:PB602-N电子精密天平、TM85型土壤密度计。

结果表明(表1),土样中砾石含量为17.9%,砂粒含量为30.4%,粉粒含量为29.7%,粘粒含量为22.0%。不均匀系数 $C_u = 100$ ,曲率系数 $C_c = 0.3$ ,为不连续级配土,属级配不良,级配曲线见图2。房莹光等<sup>[19-20]</sup>提出了土体介质强度尺度效应理论,将粒径小于粉粒部分称为基体颗粒,粒径大于粉粒部分称为加强颗粒,其研究表明,土体的屈服应力随加强颗粒粒径的减小而增加且与加强颗粒含量之间呈线性关系。本文所研究的滑带土中基体颗粒含

量仅 22.0%, 而加强颗粒含量达 48.3%, 由此可知, 该滑带土的屈服应力较大。

表 1 土样颗粒组分

指标	粒径/mm	含量/%
粘粒	$\leq 0.005$	22.0
粉粒	0.005~0.075	29.7
砂粒	0.075~2	30.4
砾粒	2~60	17.9

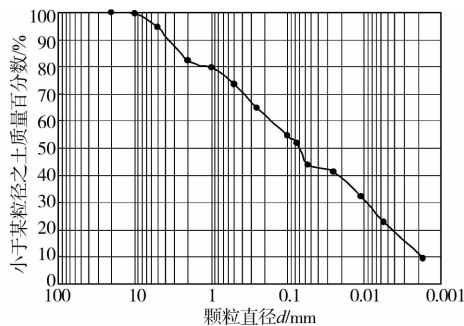


图 2 土样颗粒级配曲线

## 2 滑带土剪切变形特性

### 2.1 不同正应力下的剪切变形特性

为了研究该滑带土的剪切破坏规律, 对土样进行了直接剪切试验。试验依据为《土工试验规程》(SL237-021-1999), 试样为扰动土, 采用击样法制

备土样。试验设备 SD-2 型电动四联等应变直剪仪。采用固结不排水快剪和固结排水反复剪两种试验方法, 分别以 0.8、0.02 mm/min 的速率剪切。每组试验取 4 个试样, 分别在 100、200、300、400 kPa 等 4 级垂直压力下进行剪切试验。

试验结果表明(图 3(a)~(g)), 土样在固结快剪和固结排水剪两种破坏方式的作用下, 其剪应力-变形曲线均呈增长趋势, 直至土样最终发生剪切破坏。此过程中并无出现峰值点, 表现出明显的应变硬化特性。由于土样中粗颗粒含量较多, 孔隙率较大, 在受剪切力发生变形的过程中, 剪切面上的颗粒重新排列, 使得颗粒间的空隙减小, 颗粒之间咬合得更为紧密, 故在破坏过程中其剪应力是不断增大的。对于固结不排水快剪试验(图 3(a)), 其土样的剪应力-变形曲线的增长速率变化得比较均匀, 没有出现较明显的转折点。而对于固结排水剪试验(图 3(b)~(g)), 其剪应力-变形曲线的增长速率的变化出现了明显的转折点, 整体表现为, 在弹性变形阶段曲线增长速率较大, 在变形破坏阶段曲线增长速率较小。且正应力越大, 剪应力-变形曲线在转折点处的曲率也越大。这是由于在较大的正应力作用下, 土体的刚性较强, 当塑性变形累积到一定程度时, 突然发生剪切破坏; 而当作用于土体上的正应力较小时, 土体表现为较强的塑性, 即在整个剪切过程中, 剪应力是不断增加的, 直至土体发生剪切破坏。

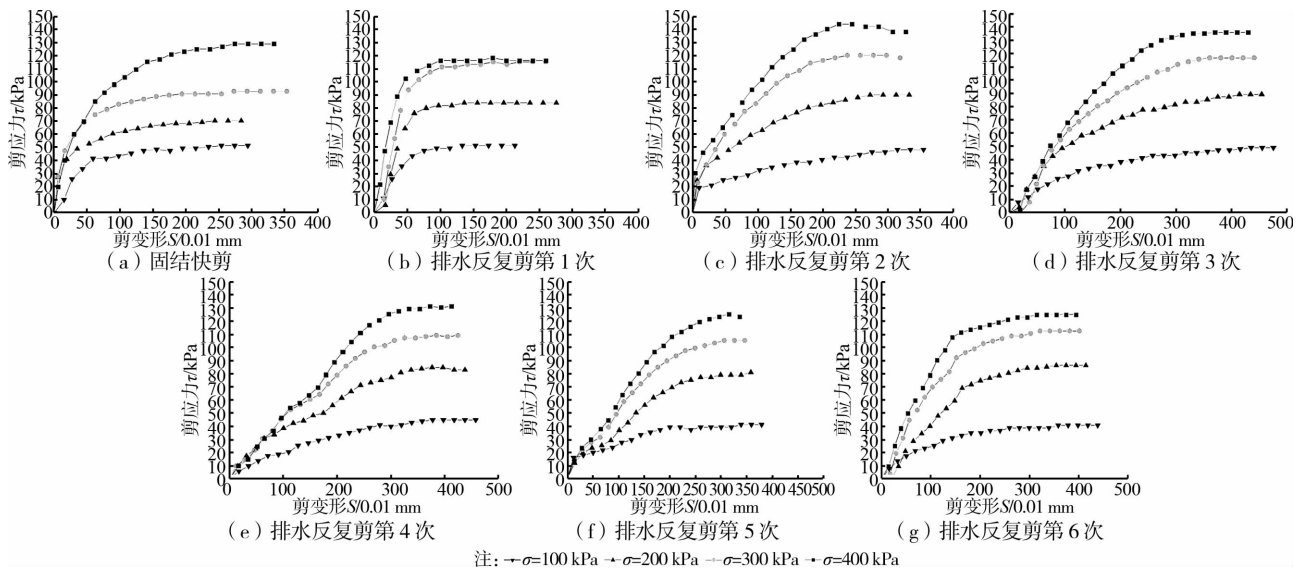


图 3 土样应力-应变曲线图

### 2.2 抗剪强度随剪切次数的变化

在固结排水反复剪切试验中, 土样抗剪强度随剪切次数的变化见图(4)。

试验结果表明, 该土样抗剪强度随剪切次数的变化规律与施加的正应力大小有关。当正应力为 100 kPa 时, 土样的抗剪强度随剪切次数的增加而

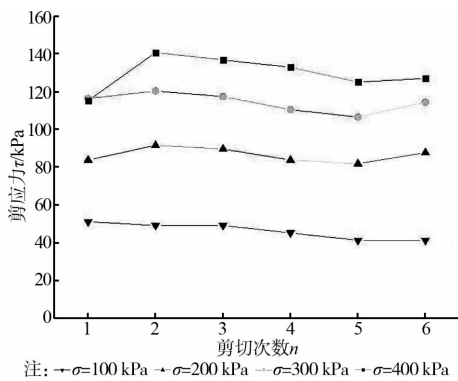


图 4 反复剪抗剪强度对比分析

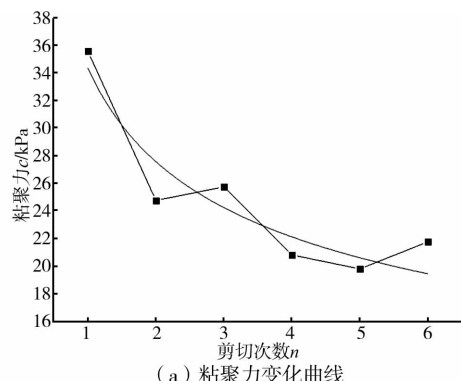
逐渐减小。当正应力为 200、300 kPa 时,土样抗剪强度随剪切次数的变化曲线基本呈水平状,在正应力为 200 kPa 时,第 1 次剪切和第 6 次剪切的抗剪强度分别为 83.89、87.79 kPa,第 6 次比第 1 次增加 3.9 kPa,在正应力为 300 kPa 时,第 1 次剪切和第 6 次剪切的抗剪强度分别为 116.47、114.49 kPa,第 6 次比第 1 次减小 1.98 kPa,前后均变化不大。当正应力为 400 kPa 时,第 2~6 次剪切的抗剪强度整体高于第 1 次剪切,第 1 次剪切和第 6 次剪切的抗剪强度分别为 115.35、127.08 kPa,后者较前者增加了 11.73 kPa。

为了进一步探明土样抗剪强度随剪切次数的变化规律,分别计算出了抗剪强度参数粘聚力和内摩擦角随剪切次数的变化情况(图 5(a)~(b))。结果表明,随着剪切次数的增加,内聚力整体呈减小趋势,内摩擦角整体呈增大趋势。土体在剪切的过程中,粗颗粒运动的幅度要比细颗粒大,因此原本填充于粗颗粒之间的细颗粒在相邻粗颗粒的挤压作用下向四周移动,反复剪切之后,导致剪切面上粗颗粒之间的细颗粒填充量不断减少(图 6),致使土体在剪切过程中起主要作用的是砾石和砂粒等粗颗粒,其间的粘聚力较小,而咬合摩擦强度较大,故土体在反复剪切之后表现为粘聚力降低而内摩擦角增大。

其次,对比图 4 和图 5(b),不难发现,该土样内摩擦角随剪切次数的变化趋势与在正压力为 200、300、400 kPa 时抗剪强度随剪切次数的变化趋势较为吻合,即第 2 次在第 1 次的基础上有较大幅度的增大,第 3、4、5 次均有小幅度减小,第 6 次又有所增大。即在剪切过程中土颗粒间的摩擦力占主导作用,内摩擦角对该土样抗剪强度的敏感性较强。

### 3 滑带土的剪切变形特性对滑坡稳定性的影响

前文已通过一系列试验研究了该滑坡滑带土的



(a) 粘聚力变化曲线

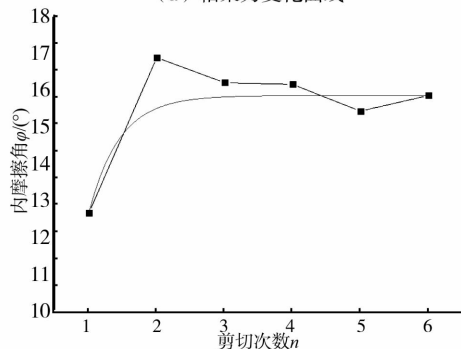
(b) 内摩擦角变化曲线  
注: ■—试验结果 —拟合曲线

图 5 抗剪强度参数随剪切次数变化规律

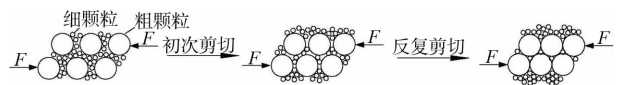
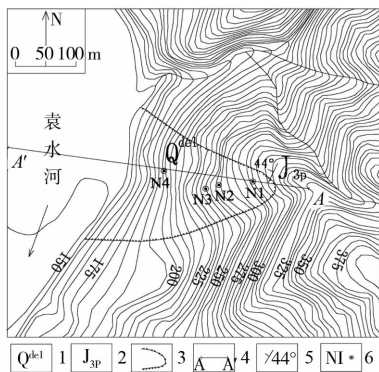


图 6 滑带土剪切过程示意图

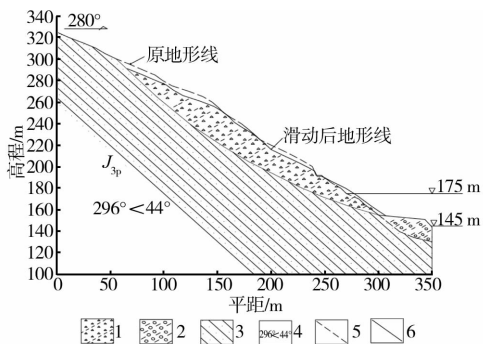
力学强度特性,为了进一步探究该滑带土的剪切变形特性对滑坡稳定性及其发展过程的影响,本文对该滑坡滑动之前和滑动之后的稳定性状况进行了计算分析。

该滑坡最近一次滑动的主变形区是其中北部区域,后缘宽 25~30 m,前缘宽 100 m,滑坡前缘高程 150 m,后缘高程 300 m,纵长 300 m,体积约 50 万  $\text{m}^3$ ,该区为主滑区,南侧为滑坡牵引区(图 7)。取滑坡主剖面 A-A' 剖面(图 8)为研究对象,运用 Geoslope 软件建立滑坡滑动前后的地质模型。模型由滑体、滑带、滑床 3 部分组成(图 9(a)~(b)),其中滑带的力学参数在滑动前后的取值,分别依据固结反复剪试验中第 1 次和第 6 次的强度参数,即分别取值为:  $c = 35.5, \phi = 12.7$  和  $c = 21.8, \phi = 15.8$ 。边界条件按照该滑坡当时滑动时的外界条件,即库水位为 172 m。计算结果为:滑坡滑动前的稳定性系数  $F_s = 0.923$ ,滑动后的稳定性系数  $F_s = 1.024$ 。计算结果表明,该滑坡滑动之前处于不稳定状态,滑动之后处于欠稳定状态;滑动之后,其稳定性有所提高。



1.第四系堆积物; 2.侏罗系香溪组地层; 3.滑坡边界; 4.剖面线及编号; 5.岩层产状; 6.监测点及编号

图 7 滑坡工程地质平面图



1.崩坡积碎石土; 2.冲洪积卵砾石土; 3.石英砂岩; 4.岩层产状; 5.原地形线; 6.滑动后地形线

图 8 滑坡滑动前后 A-A' 剖面图

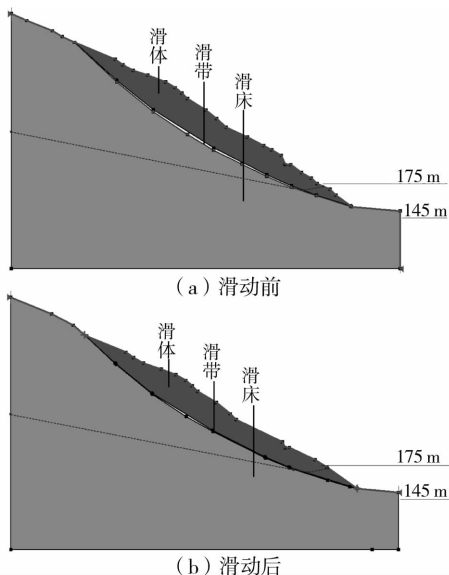


图 9 滑坡滑动前后地质模型

滑坡滑动之后,其稳定性增加,一方面是滑坡体及滑床的地形地貌的作用结果,另一方面则是由于滑带土的物理力学强度发生了变化。为了探究该滑坡滑动前后滑面处滑带土的力学性能的变化情况,

利用前文的数值计算结果,将滑动前后滑带土的抗剪强度进行了对比(图 10),结果表明,在距离滑坡模型左端点 100~200 m 范围内的滑面上,滑带土在滑动之后的抗剪强度较滑动之前有明显的增大,且在该范围内滑带土所受的正应力在整个滑面上是最大的。这正好验证了前文剪切试验的结果,即作用于土样上的正应力越大,经过反复剪切之后其抗剪强度反而有所增大。由此可见,滑带中正应力较大的部位,在滑坡变形过程中表现出明显的应变硬化特性,从而使得滑坡在经过小规模变形后,其整体稳定性有所提高。

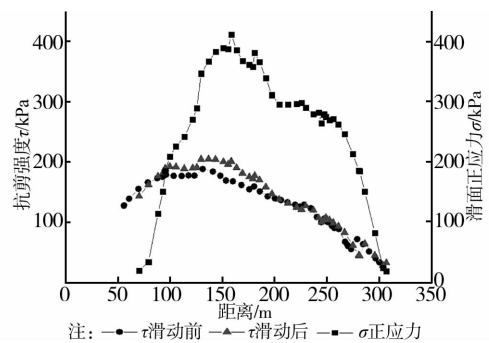


图 10 滑坡滑动前后滑面抗剪强度

### 4 结 论

通过对三峡库区某滑坡滑带土进行直剪试验,研究了其应变硬化的力学特性,并分析了其对滑坡稳定性的影响。

1)该滑坡滑带土在剪切变形的过程中表现为应变硬化的特点,即土样从弹塑性变形到剪切破坏的整个过程中,所需的剪应力不断增加。其主要原因是在剪切过程中,土样颗粒间的空隙率不断减小,颗粒间的咬合摩擦强度增加,致使其抗剪强度增强。

2)对于粗颗粒含量较多的粉质粘土,经过多次剪切之后,其抗剪强度在一定范围内有所增加,且内摩擦角对其抗剪强度的影响占主导作用。正应力越大,反复剪后抗剪强度增加得越明显。

3)滑带土的剪切变形特性对滑坡的稳定性具有重要影响,相较于应变软化型滑带土,应变硬化型滑带土的抗滑能力在同等正应力作用下更强,且经过滑动之后,滑带土的抗滑能力会有一定程度的增加。在宏观上表现为,滑坡经过短距离滑动后出现暂时稳定状态,在外界条件改变后又发生滑动。受该类型滑带土的影响,这种暂时稳定状态往往多次重复出现。且此类型滑坡产生大规模高速滑动的几率较小。



## 参考文献:

- [1] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [2] Duncan J M, Chang C. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96 (SM5): 1629-1653.
- [3] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response; Cohesive soils [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1963, 89(1): 115-143.
- [4] Schanz T, Vermeer P A, Bonnier P G. The hardening soil model: Formulation and verification [J]. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam, 1999: 281-297.
- [5] 徐明,宋二祥. 粗粒土的一种应变硬化模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2967-2972.  
Xu M, Song E X. A strain hardening model for rockfills [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2967-2986.
- [6] 何利军,孔令伟. 土的应力-应变关系的一种描述模式[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 900-905.  
He L J, Kong L W. Uniform expression of stress-strain relationship of soil [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 900-905.
- [7] 孟召平,彭苏萍,张慎河. 不同成岩作用程度砂岩物理力学性质三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 140-143.  
Meng Z P, Peng S P, Zhang S H. Triaxial test on physical and mechanical properties of sandstone for different diagenesis degree [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 140-143.
- [8] 孟召平,王保玉,谢晓彤,等. 煤岩变形力学特性及其对渗透性的控制[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1342-1347.  
Meng Z P, Wang B Y, Xie X T. Mechanical properties of coal deformation and its influence on permeability [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1342-1347.
- [9] Andrés N L, Victor N K. Improved shape hardening function for bounding surface model for cohesive soils [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014: 1-10.
- [10] 李守定,李晓,吴疆,等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2473-2480.  
Li S D, Li X, Wu J. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2473-2480.
- [11] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.  
Huang R Q. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20<sup>th</sup> century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- [12] 廖秋林,李晓,李守定,等. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3146-3153.  
Liao Q L, Li X, Li S D, et al. Occurrence, geology and geomorphology characteristics and origin of qianjiangping landslide in Three Gorges Reservoir Area and study on ancient landslide criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3146-3153.
- [13] Massey C I, Petley D N. Patterns of movement in reactivated landslides [J]. Engineering Geology, 2013, 159: 1-19.
- [14] Miao H B, Wang G H. Mechanism of the slow-moving landslides in jurassic red-strata in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Engineering Geology, 2014, 171: 59-69.
- [15] di Maio C. Plastic and viscous shear displacements of a deep and very slow landslide in stiff clay formation [J]. Engineering Geology, 2013, 162: 53-66.
- [16] 赵晓菊,凌华,傅华,等. 级配堆石料颗粒破碎及力学特性的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2013(4): 175-178.  
Zhao X J, Ling H, Fu H. Effect of grain size composition on particle breakage and mechanical properties of rock-fill materials [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013(4): 175-178.
- [17] Luo H Y, William L C. Effects of particle size and moisture on the compressive behavior of dense Eglin sand under confinement at high strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 40-55.
- [18] Sadrekarimi A. Influence of fines content on liquefied strength of silty sands [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2013, 55: 108-119.
- [19] 房莹光. 土体强度与变形尺度特性的理论与试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 41-47.  
Fang Y G. Theoretical and experimental investigation on size effect characteristic of strength and deformation of soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(1): 41-47.
- [20] 房莹光,冯德鑫,马文旭,等. 土体介质强度尺度效应的理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2359-2367.  
Fang Y G, Feng D L, Ma W X. Theoretical and experimental study of size effect of soil strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2359-2367.