

文章编号: 1000-7598 (2010) 07-2197-05

# 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响分析

陈中学, 汪 稔, 胡明鉴, 王志兵, 徐东升

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要:** 黏土颗粒在泥石流中的含量并不大, 但却显著地影响着泥石流的启动。在室内通过筛分配成 9 种不同黏粒含量级配的土体, 在自行设计的模型槽内以  $1.64 \text{ g/cm}^3$  (松散干密度),  $1.79$ 、 $1.94 \text{ g/cm}^3$  (天然干密度) 3 种干密度堆成边坡模型, 在雨强为  $85 \text{ mm/h}$  下进行人工降雨试验, 初步探讨了黏土颗粒含量对泥石流启动的影响, 得到: 黏粒含量在  $5\% \sim 18\%$  时可以形成泥石流, 其中黏粒含量  $10\%$  时所需时间最短, 低于  $5\%$  或大于  $18\%$  难以形成泥石流, 黏粒含量具有临界性; 填筑干密度越大, 泥石流启动越困难, 表现在启动时间长、深度浅、规模小、且填筑干密度不改变黏粒含量临界性; 降雨条件下土体入渗率越高, 泥石流越容易启动产流。通过试验的研究, 可以深入揭示泥石流形成的内在机制, 黏粒含量临界性为泥石流预测、预报提供了新思路。

**关 键 词:** 泥石流; 黏粒含量; 启动产流; 临界性; 持水能力

中图分类号: TV 144

文献标识码: A

## Study of content of clay particles for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine

CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, WANG Zhi-bing, XU Dong-sheng

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Content of clay particles in debris flow is not much, but it significantly affects the occurrence of debris flow. Indoor artificial rainfall experiments are carried out in self-designed model with nine different graded soils, three different dry densities ( $1.64 \text{ g/cm}^3$  (loosely accumulation dry density),  $1.79 \text{ g/cm}^3$ ,  $1.94 \text{ g/cm}^3$  (natural dry density)), rainfall intensity  $85 \text{ mm/h}$ , impact which content of clay particles on debris flow occurrence is preliminarily studied. As a result, it's found that debris flow can occur when content of clay particles is between  $5\%$  and  $18\%$ , it needs shorter time when content of clay particles is  $10\%$  than others; clay content has criticality. The greater the dry density of accumulation, the more difficult debris flows to occur with long start-up time, shallow depth and small scale, but accumulation dry density does not change the criticality of clay content. Under the condition of rainfall, the higher the soil infiltration rate of soil, the stronger the water-holding capacity of soil, the easier debris flow to occur. The internal mechanism of forming debris flows can be revealed deeply through above experiments; it also develops new ideas on debris flow forecasting.

**Key words:** debris flow; content of clay particles; start of runoff; criticality; moisture holding capacity

## 1 引 言

蒋家沟泥石流土体属宽级配砾石土, 粒径大小相差悬殊, 大者可达数米, 小者则低于  $10^{-6} \text{ m}$ 。黏粒是指粒径小于  $0.005 \text{ mm}$  的颗粒 (欧美定义为粒径为小于  $0.002 \text{ mm}$  颗粒)。云南蒋家沟泥石流土体的黏粒含量大都在  $8\% \sim 10\%$ <sup>[1]</sup>, 虽然黏土颗粒的含量并不大, 但却是影响泥石流尤其是黏性泥石流启动产流的一个重要因素。

前苏联学者伏列斯曼指出:  $1 \text{ m}^3$  的泥浆中的  $10\%$  的黏粒表面积比  $90\%$  的沙颗粒的表面积大 100 倍。黏土颗粒由于它的巨大表面积和亲水性, 与水与沙粒组成高浓度浆体, 使其具有宾汉流体的特性。因此, 黏土颗粒在泥石流形成和运动中起着十分积极和重要的作用<sup>[1]</sup>。

通过研究发现, 泥石流体的黏粒含量与泥石流的形成、运动过程息息相关<sup>[2-3]</sup>, 一定的黏粒含量有利于减少泥石流阻力。Pierson<sup>[4]</sup>和 Ellen<sup>[5]</sup>发现泥

收稿日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40672193); 国家自然科学基金青年基金项目 (No. 50709035) 资助。

第一作者简介: 陈中学, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩土工程与地质灾害研究。E-mail: chenxzwhyts@yahoo.cn

泥石流的运动需要一个基础黏粒含量。Takahashi<sup>[6]</sup>, 崔鹏<sup>[7-8]</sup>在建立泥石流形成的土力类和水力类泥石流启动动力学模型中考虑了黏粒颗粒的含量。

国内外学者们的研究成果表明：黏土颗粒含量对泥石流启动产流有着明显的影响<sup>[9-12]</sup>，但对此展开的研究相对较少，特别是定量研究鲜见报道。本文采用机动灵活、参数可调、试验条件易于控制的室内试验，用各种级配的重塑土堆成边坡模型，在室内进行人工降雨试验，从而考察黏土颗粒含量对泥石流启动的影响。

## 2 试验设备及材料指标

### 2.1 试验设备

试验设置采用人工降雨系统试验和模型槽。人工降雨系统包括抽水机、水表、喷头、喷水管、支架和管线。模型槽长为 3 m，宽为 0.75 m，高为 1 m，其骨架采用角钢和工字钢焊接，两侧采用有机玻璃，便于从侧面观察试验现象（见图 1）。模型槽一端封闭，另一端敞开；模型槽一端设三角架，并用手拉葫芦起调模型槽一端，调整到试验要求坡度。为增大摩擦，减小边界效应，模拟现场土体之间的接触，槽底部用水泥砂浆抹灰 2 cm，并刨毛（见图 2）。

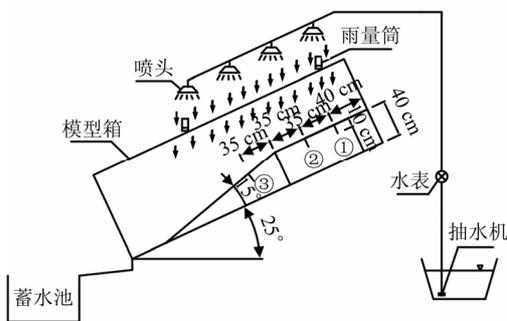


图 1 试验布置图  
Fig.1 Test layout



图 2 模型槽底边界处理  
Fig.2 Boundary treatment for model groove bottom surface

### 2.2 试验材料指标

本次试验所用材料选择云南东川蒋家沟大凹子沟右岸支沟泥石流源区变质板岩坡积物作为试验土体，通过人工降雨激发产流，根据不同黏粒含量配置相应级配土体，填筑在模型槽内，研究黏粒含量、填筑密度对泥石流启动难易程度的影响。

#### 2.2.1 黏粒含量的选择

根据蒋家沟泥石流典型的 42 条沟泥石流沟的颗粒分析曲线，其黏粒含量在 1%~18%之间，并且在 1%~8%的范围内分布较为密集。此外我国以蒋家沟为代表的多数大规模黏性泥石流的黏粒含量大部分介于 5%~10%。因此，本次试验选择黏粒含量分别为 1%、3%、5%、8.87%、10%、13%、15%、18%、20%共 9 组砾石土，其中最大土粒径为 40 mm，8.9%组为原始级配。

#### 2.2.2 试验土体的坡度

大部分情况下泥石流的启动是在较大坡度下发生的，众多的坡面泥石流启动的源区坡度大多在 25°~40°之间，考虑到试验用土为重塑土，其结构性被破坏，在模型槽内填筑边坡模型时土体中加少量水，填筑好后静置 3 d，使土体结构性部分恢复，同时坡脚选用较小坡角（25°），以减少结构性破坏带来的影响，更接近现场实际情况。

#### 2.2.3 降雨强度

从世界范围内典型的泥石流记录可以知，泥石流的暴发雨强大都大于 30 mm/h<sup>[9]</sup>，本试验人工降雨采用抽水机进行均匀持续供水，采用日本喷涂系统株式会社产 GG 型小流量标准全喷喷头，孔径为 1 mm，调整水压，使雨强达到 85 mm/h，试验之前预测 3 次实测平均雨强为 84.7 mm/h，以此数值作为试验的雨强。试验证明，这一数值可以激发泥石流启动产流。

### 2.3 试验土体的性质

#### 2.3.1 颗粒组成

将试验土体充分晾干，用孔径 2 mm 筛将土体分为粗颗粒组和细颗粒组，分别进行颗分试验获得粗细颗粒的级配，取不同数量粗颗粒和细颗粒按不同的黏粒含量的要求配成泥石流试验的土体（见图 3）。

#### 2.3.2 黏土矿物成分

选取试验土体过 0.075 mm 筛，对筛下土体用 X 射线衍射仪进行黏土矿物成分分析得到：蒋家沟泥石流流体黏土矿物成分以伊利石为主，其次为绿泥石，蒙脱石含量较少。见表 1。

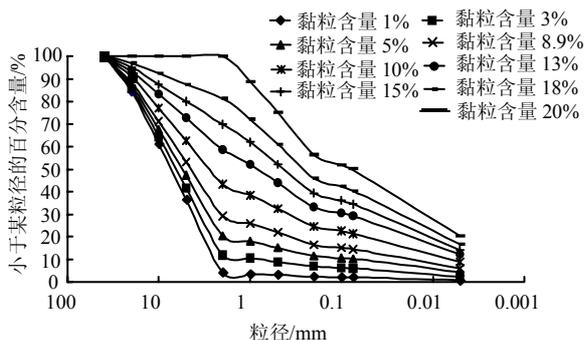


图 3 试验土体级配曲线

Fig.3 Grain size distribution curves of soil samples

表 1 S2 主要矿物成分

Table 1 The main mineral composite of sample S2

样品	百分含量/%			
编号	石英	伊利石	绿泥石	蒙脱石
S2	34	30	20	2

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 泥石流启动过程中的黏粒含量临界性

通过试验研究发现，当黏粒含量为 1%、雨强 85mm/h、坡度为 25° 时，由于细颗粒颗粒含量少，孔隙比大，当降雨开始后，雨水直接入渗到土体内部，形成地下径流，然后直接从坡脚排出，粗颗粒之间相互咬合，内摩擦角大，土体持水能力差，渗透性强，部分黏粒和粉粒被水携带出边坡，从而更增加了土体的透水性，降低了其持水性能，因此，土体无法启动形成泥石流，增加降雨强度至 120、270 mm/h，仍然无法形成泥石流。

当黏粒含量为 3%、雨强 85mm/h、坡度为 25° 时，降雨过程中土体会产生裂缝，但无法产生泥石流，增加降雨强度至 120、270 mm/h，仍然无法形成泥石流。说明黏粒的含量增加，使得坡体向形成泥石流的趋势靠近，对泥石流的产生起了促进作用。

当黏粒含量为 5%、雨强 85mm/h、坡度为 25° 时，形成了泥石流。随着黏粒含量的增加，泥石流形成的黏粒临界含量下限为 5%。当黏粒含量超过 18% 时，由于雨水难以渗透到土体内部，很难形成泥石流。泥石流形成的时间随黏粒含量的变化情况如图 4~6。

#### 3.2 泥石流启动时间与黏粒含量的关系

从图 4~6 可知，随黏粒含量的增加，泥石流启动所需时间先减小后增大，说明黏粒含量过多或过少均不利于泥石流的启动，中等黏粒含量（10% 左右）时，土体最容易滑动和启动产流。黏粒含量较低时，土体渗透性强，不易形成高的的孔隙水压

力而触变液化，需要经过较长时间降雨渗流，使土体重度增加，在重力作用下土体压密，孔隙比减小；另外土体中含有少量膨胀性矿物（表 1）蒙脱石，降雨后，蒙脱石吸水膨胀，使土体孔隙比减小，从而渗透性变小，易形成较高孔压而使土体液化启动产流。而当黏粒含量中等时，渗透系数较小，不需要等到降雨土体变形和蒙脱石膨胀孔隙减小就可以启动产流，因此，泥石流启动时间短。而当黏粒含量较高时，土体渗透系数小，需要较长时间，土才能渗透到土体内部形成泥石流，且深度浅、规模较小。

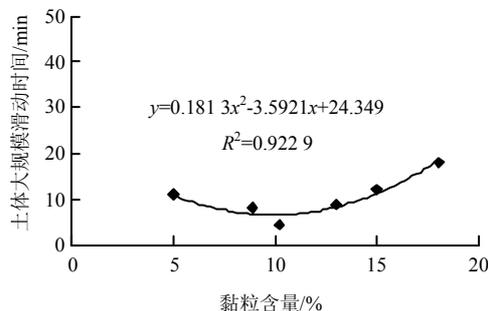


图 4 土体滑动时间与黏粒含量关系曲线 (松散堆积干密度  $\rho_d = 1.64 \text{ g/cm}^3$ )

Fig.4 Relationship between soil-sliding time and content of clay particles

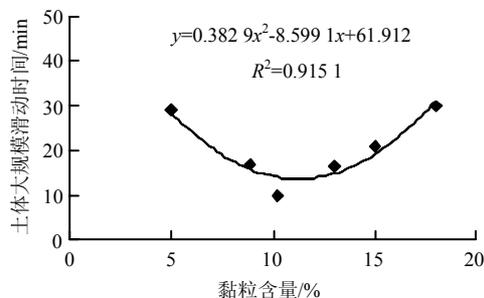


图 5 土体滑动时间与黏粒含量关系曲线 ( $\rho_d = 1.79 \text{ g/cm}^3$ )

Fig.5 Relationship between soil-sliding time and content of clay particles

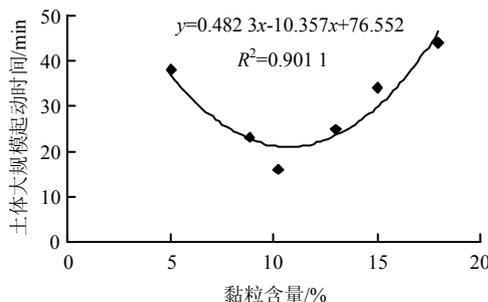


图 6 土体滑动时间与黏粒含量关系曲线 (天然干密度  $\rho_d = 1.94 \text{ g/cm}^3$ )

Fig.6 Relationship between soil-sliding time and content of clay particles

对比图 4~6 发现, 随填筑干密度增加, 土体启动时间增加, 曲线由松散堆积时的平坦曲线向 U 形曲线发展, 干密度对黏粒含量的临界性几乎没有影响。

将黏粒含量与启动时间通过 2 次多项式拟合得到两者之间的关系式见图 4~6 中。

### 3.3 不同填筑干密度 (1.64、1.79、1.94 g/cm<sup>3</sup>) 对同一级配土体启动时间影响

从图 7 可知: 填筑密度对越大, 泥石流启动越困难, 且密度对黏粒含量 5%~18% 两端级配土体影响更大。从本次试验现象来看, 泥石流的启动发生在土坡浅层 5~8 cm, 从蒋家沟泥石流现场的情况也可以发现类似的现象, 除表层土体有位置优势, 其含水率更易达到临界含水率外, 表层土体密度比深层土体小, 抗剪强度低, 易启动, 也是造成该现象的一个原因。

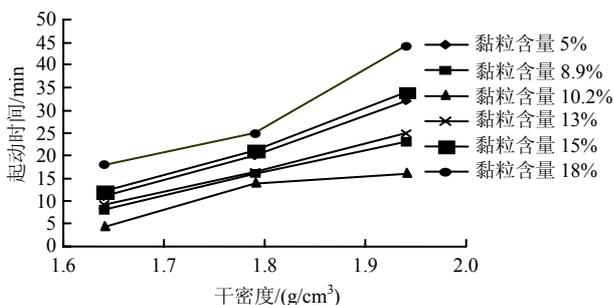


图 7 填筑干密度与启动时间关系曲线  
Fig.7 Relationships between dry density and soil-sliding time

### 3.4 土体入渗率与黏粒含量关系

土体的入渗率是指被土体吸收的雨水质量占总降雨量质量的百分比。可以反映土体在降雨条件下的持水能力, 统计降雨时间对入渗率影响较大, 本次试验统计 0.5 h 和 1 h 降雨入渗率, 如图 8、9 所示。

从图可知: 各级配下的土体入渗率随黏粒含量变化趋势均为先增大后减小, 在黏粒含量 10% 时达到最大, 说明土体的持水能力随着黏粒含量的增加先增加, 到 10% 时达最大, 之后慢慢下降。这与图 4 黏粒含量 10% 时土体启动时间最短正好吻合, 说明降雨条件下持水能力强的级配更易启动产流。

填筑密度越大, 渗透性越差, 雨水更容易在坡面形成地表径流而流走, 使得入渗率低。

对比图 8、9 说明, 统计时间对比较松散土体的入渗率影响较大, 随统计时间增加, 不同干密度

的土体入渗率差别变小, 至 1 h, 差别很小。

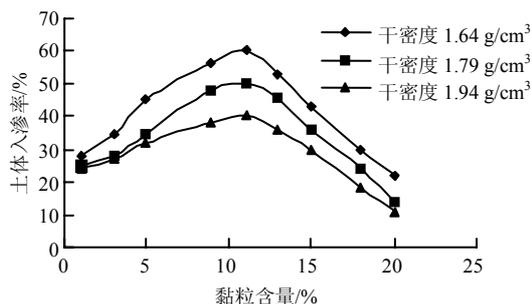


图 8 黏粒含量与土体入渗率关系曲线 (0.5 h)  
Fig.8 Relationships between content of clay particles and infiltration rate (half hour rainfall)

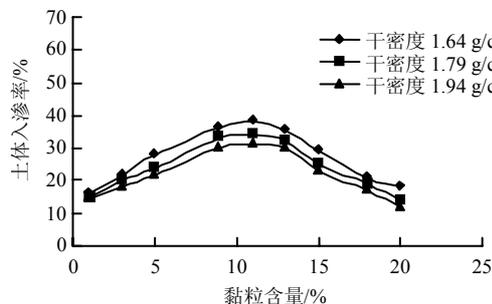


图 9 黏粒含量与土体入渗率关系曲线 (1 h)  
Fig.9 Relationships between content of clay particles and infiltration rate (one hour rainfall)

## 4 结 论

(1) 蒋家沟泥石流的启动过程中黏土颗粒含量具有临界性, 当黏粒含量少于 5% 或大于 18% 时, 难以形成泥石流。

(2) 当黏粒含量在 5%~18% 时, 随黏粒含量的增加, 泥石流启动所需时间先减小后增加, 黏粒含量 10% 时所需时间最短, 说明在黏粒含量 10% 左右时泥石流最容易启动产流。

(3) 填筑干密度影响着泥石流的启动, 其值越大泥石流的启动越困难, 表现在滑动时间延长, 深度浅、规模小, 特别是对黏粒含量为两端的影响明显高于中间部分。填筑干密度对黏粒含量的临界性几乎没有影响。

(4) 降雨条件下土体的持水能力与泥石流启动难易程度有一定的相关性, 持水能力强的级配土体 (黏粒含量 10% 左右) 更容易启动产流。填筑密度越大, 入渗率越低; 统计时间越长, 入渗率越低。

致谢: 中国科学院成都山地所东川泥石流观测站在本次试验取样中给予了大力帮助, 在此深表感谢!

## 参考文献

- [1] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 69—70.
- [2] 陈宁生, 崔鹏, 陈瑞, 等. 中尼公路泥石流的分布规律与基本特征[J]. 地质灾害与防治学报, 2002, 13(1): 44—48.  
CHEN Ning-sheng, CUI Peng, CHEN Rui, et al. Debris flow distribution and basic characteristics of China-Nepal Highway[J]. **Journal of Geological Hazards and Prevention**, 2002, 13(1): 44—48.
- [3] 陈宁生, 高延超, 李东风. 四川丹巴“2003-07-11 泥石流”灾害考察报告[J]. 山地学报, 2003, 21(5): 632.  
CHEN Ning-sheng, GAO Yan-chao, LI Dong-feng. Disaster investigation report of Danba debris flow which happened in Sichuan on July 11, 2003[J]. **Mountain Journal**, 2003, 21(5): 632.
- [4] PIERSON T C. Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt. Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility[J]. **Sedimentology**, 1981, 28:49—60.
- [5] ANDERSON S A, SITAR N. Analysis of rainfall-induced debris flows[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1995, 121(7): 544—552.
- [6] OKURA Y, MAJOR J J. Fluidization in dry landslides[J]. **Engineering Geology**, 2000, 56(8): 347—360.
- [7] CUI P. Studies on condition and mechanism of debris flow initiation by means of experiment[J]. **Chinese Science Bulletin**, 1992, 37(9): 759—763.
- [8] 崔鹏. 泥石流启动的突变学特征[J]. 自然灾害学, 1993, 2(1): 53—61.  
CUI Peng. Mutation characteristic for debris flow start-up[J]. **Natural Disaster Science**, 1993, 2(1): 53—61.
- [9] 陈宁生. 2003 年中国西南山区典型灾害性暴雨泥石流运动堆积特征[J]. 地理科学, 2006, 26(6): 1—8.  
CHEN Ning-sheng. Kinematic packing characteristics for typical rainstorm debris flow in southwest China mountain in 2003[J]. **Geographical Sciences**, 2006, 26(6): 1—8.
- [10] IVERSON R M, LAHUSE R G. Dynamic pore-pressure fluctuations in rapidly shearing granular materials[J]. **Science**, 1989, 246: 796—799.
- [11] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟泥石流形成内因初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3053—3056.  
CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Primarily study on intrinsic factor for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3053—3056.
- [12] 魏厚振, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土不同粗粒含量直剪强度特征[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 48—51.  
WEI Hou-zhen, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Strength behaviour of gravelly soil with different coarse-grained contents in Jiangjiagou Ravine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 48—51.
- [21] MARTIN G R, FINN W D L, SEED H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1975, 101(5): 423—438.
- [22] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 5—88.
- [23] 秦大河. 中国西部环境演变评估(综合卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 45—55.
- [24] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, ZHANG Jian-ming, et al. Experimental and numerical investigation on temperature characteristics of in-cuts roadbed in Qinghai-Tibetan railway[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2006, 46: 113—124.
- [25] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, LIU Zhi-qiang, et al. Nonlinear analysis for the cooling effect of Qinghai-Tibet railway embankment with different structures in permafrost regions[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2005, 42: 237—249.
- [26] LAI Yuan-ming, WANG Qiu-sheng, NIU Fu-jun, et al. Three-dimensional nonlinear analysis for temperature characteristic of ventilated embankment in permafrost regions[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2004, 38: 165—184.
- [27] LAI Yuan-ming, ZHANG Shu-juan, ZHANG Lu-xin, et al. Adjusting temperature distribution under the south and north slopes of embankment in permafrost regions by the ripped-rock revetment[J]. **Cold Regions Science and Technology**, 2004, 39: 67—79.
- [28] 吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.
- [29] 李双洋. 多年冻土区铁路路基热-力稳定性数值仿真研究[博士学位论文 D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [30] 马小杰, 张建明, 常小晓, 等. 高温-高含冰量冻结黏土强度试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2498—2502.  
MA Xiao-jie, ZHANG Jian-ming, CHANG Xiao-xiao, et al. Experimental research on strength of warm and ice-rich frozen clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(9): 2498—2502.
- [31] 童立元, 王斌, 刘义怀, 等. 地震液化条件下地面的大变形三维数值分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2226—2231.  
TONG Li-yuan, WANG Bing, LIU Yi-huai, et al. 3D numerical simulation of large ground displacement caused by seismic liquefaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2226—2231.

上接第 2187 页