

文章编号: 1000-7598 (2010)增刊 2-0206-06

蒋家沟砾石土的特性及其对斜坡失稳的意义

王志兵, 汪 稔, 胡明鉴, 陈中学

(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: 云南蒋家沟是世界上著名的由降雨导致泥石流、浅层滑坡频发的沟谷之一。组成蒋家沟斜坡表层的砾石土具有孔隙度高、级配宽、不均匀系数大等特点, 级配曲线为上凹型或双峰型, 为内在不稳定性土。X 射线衍射分析表明, 粒径小于 1 mm 的细粒部分主要由绿泥石和伊利石等黏土矿物及次生石英组成, 黏土矿物会影响砾石土的物理力学性质。在环境电镜扫描中观测了砾石土的微观结构, 发现一种特殊的“桥式”胶结结构, 并在遇水条件下发生断裂, 不仅降低了微弱黏聚力, 而且土颗粒容易分离成粒径为数十微米的散微粒。这与砾石土中黏性部分具有高分散性有关。此外这些散微粒在自滤过程中会能发生运移, 并在孔喉等处积聚而堵塞孔隙, 会降低砾石土的渗透性以及有利于斜坡中暂态上层滞水的积聚。

关键字: 砾石土; 斜坡失稳机理; 泥石流; 微观结构

中图分类号: TU 413.6+2

文献标识码: A

Characteristics of gravelly soil and their implications for slope instability in Jiangjiagou ravine

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

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

Abstract: Jiangjiagou ravine is one of the most world-famous rainfall-induced debris flow or flow-like landslides gully in Southwest China. The surface layers of the slopes are covered by unsaturated weak-cohesion gravelly soil which can be classified as a porous non-plastic soil. Broadly graded gravelly soils have uniformity coefficients much greater than 20, and the grain size distribution curves are up concave or double peak, and they can be as internally unstable soils. The main clay mineral composition of fine fraction (<1 mm) of gravelly soil is chlorite and illite by X-ray diffraction analysis. The microstructure was investigated by environmental scanning electron microscopy; and a particular bonding was found. The bonding of the soil is easily broken by rainfall infiltration, which not only can decrease the soil cohesion, but also detach free particles from the bonding, the diameters of these particles were tens of microns. This is due to high dispersion of the clay part of gravelly soil. In addition, these free particles can be transported and will clog at pore throats during the process of self-filtration in soil. This process will decrease the permeability of gravelly soil, and be favorable to the formation of transient perched water zones in slopes during rainfall; thus can be as pre-failure of the slopes. The results indicate that the characteristics of gravelly soils and the particle detachment, transport and clogging play an important role in the stability of slopes.

Key words: gravelly soil; mechanism of slope instability; debris flow; microstructure

1 引 言

滑坡与泥石流等地质灾害在全球频发, 降雨是最常见、最重要的诱发因素之一。滑坡与泥石流灾害广泛分布于除南极洲外的全球各地, 每年都造成了大量人员伤亡和经济损失, 已成为全球性的地质灾害。中国山区和半山区占总国土面积的 2/3, 而

这些山区往往都是滑坡和泥石流活动最为频繁的区域。其中中国西部山区的地质地貌条件复杂、地震频繁、新构造运动活跃, 而且又是能源、矿产开发及基础设施建设的重点地区, 人类活动频繁, 这些都为滑坡、泥石流的发生提供了条件。不幸的是, 由于极端天气气候事件频发, 特别是强降雨事件增多, 近年来这些灾害发生的频率正不断增加, 使得

收稿日期: 2010-5-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50709035); 中科院院长奖获得者科研启动专项资助。

第一作者简介: 王志兵, 男, 1982 年生, 博士研究生。主要从事特殊土土力学及边坡稳定性方面的研究。E-mail: illite@qq.com

这些地区成为滑坡与泥石流发生的重灾区。

对降雨诱发的泥石流、滑坡等地质灾害的研究在过去的一个多世纪中取得了重要的成就。在滑坡、泥石流等斜坡灾害发生前，土体的力学性能必定会改变，已有的研究也大都集中在研究失稳土体的力学变化过程及强度特征等方面，如戴福初^[1]研究了土体的不同应力应变特性与其对应的不同类型滑坡发生机制之间的关系；魏厚振^[2]通过室内大型直剪仪研究了云南东川蒋家沟泥石流源区砾石土的直剪强度特征；李晓^[3]对三峡库区白衣庵滑坡典型的土石混合体的力学特性进行了原位推剪和压剪试验的原位试验研究；汪发武及 Sassab 等^[4]利用环剪仪研究了发生滑坡的土体的剪切强度。在降雨导致滑坡特别是浅层滑坡、泥石流形成的机制方面，不少学者得到了共识：降雨入渗斜坡土体，随着土体饱和度的逐渐增加，基质吸力会逐渐消失、孔隙水压力逐渐增加或地下水位上升，降低土体的抗剪强度。特别是对降雨导致的由松散粗细粒土体组成的斜坡的失稳破坏机制研究中，静态液化理论是较常见的解释，文献[5]提出了火山岩残积土斜坡的流滑破坏机制，即土体在降雨入渗下饱和度逐渐增加、力学强度衰减、体积塌陷、静态液化以至最终土体完全液化，这样一条与力学有关的明显的链过程。

降雨诱发的斜坡失稳，最重要的特点是土体的饱和度会增加，相应地土体的结构也会发生改变，能够逐渐积聚并保持雨水，这样一个过程可以称为前破坏（pre-failure），此过程对研究降雨诱发的斜坡失稳具有重要意义。本文拟以云南蒋家沟流域为对象，从斜坡砾石土特性、微结构及其遇湿响应方面着手，研究斜坡失稳的影响。

2 砾石土的物理性质及矿物成分

云南省的小江流域，被誉为是“泥石流的天然博物馆”，而蒋家沟又是小江流域诸泥石流沟中爆发最频繁、规模最大、危害最严重的一条泥石流沟，对其影响区域的人们的人身及财产安全造成严重威胁，给当地带来了严重的经济损失^[6]。

蒋家沟流域位于康滇地轴东侧的小江深大断裂带内，新构造运动强烈，地震活动频繁，岩体支离破碎，再加上强烈的风化作用，斜坡表层具有数十米厚的松散固体物质，是泥石流爆发的重要固体物源。根据这些松散固体物质的成因可以分为残积层、坡积层及堆积层。本文针对不同成因的土层分别取样进行测试分析。GS1 取自门前沟一滑坡弧形后缘，为蒋家沟右岸昆阳群变质岩的风化残积物，土体中细粒和黏粒含量较多，黏聚性较好；GS2 为多照沟右岸谷坡坡麓处，主要由砂岩和板岩的风化物组成崩滑堆积体，土体中混杂有少量红壤，结构较为松散，粗粒含量较多。GS3 取自大凹子沟内的老泥石流堆积体，粗粒有一定程度的磨圆。

2.1 砾石土的物理性质

3 个样品的物理性质见表 1，由于取样时间正值旱季末期，且样品位于地下水位之上，砾石土的天然含水率较低，相对密度偏大，这与土中含

表 1 蒋家沟砾石土的物理性质表
Table 1 Physical parameters of gravelly soils in Jiangjia ravine

土样编号	天然含水率/%	相对密度	天然密度/(g/cm ³)	干密度/(g/cm ³)	饱和密度/(g/cm ³)	孔隙比	孔隙率/%
GS1	4.84	2.76	1.59	1.52	1.97	0.82	45.05
GS2	0.89	2.79	1.84	1.82	2.17	0.53	34.59
GS3	7.93	2.73	1.82	1.69	2.07	0.62	38.23

表 2 砾石土的颗粒级配分布及稠度指数

Table 2 Particle size distributions and consistency indices of the three gravelly soil samples

土样编号	颗粒粒度分析 / %					细粒稠度				
	>20	20~2	2~0.075	0.075~0.005	<0.005	C _u	C _c	W _p	W _L	I _p
GS1	3.72	38.79	14.73	21.28	21.48	1219.5	0.02	24.6	33.0	8.4
GS2	14.50	47.41	25.28	7.46	5.35	265.2	3.76	18.4	21.6	3.2
GS3	5.61	51.46	21.44	13.62	7.87	476.4	2.71	20.1	24.6	4.5

有较多的风化程度较低的粗大砾石有关。

从颗粒级配分布（见表 2 和图 1）中可以看出，不同部位的砾石土粒径分布范围非常类似，只是 GS1 样含细粒较多，而 GS2 中粒径大于 20 mm 的颗粒较多。3 种砾石土样都呈现级配宽、中间粒径含量低，不均匀系数 C_u (d₆₀/d₁₀) 大 (>>20) 的

特点，级配曲线呈上凹型，按颗粒组成区间划分 GS1 为双峰土，而这样的特征表明砾石土在渗透稳定性方面是属于内在不稳定性土^[7-8]，在降雨入渗作用下土体结构容易破坏。根据塑性图^[9]对砾石土细粒部分分类，细粒土位于低液限的粉土或低液限的粉土-黏土过渡区域之内，十分靠近或就处于典

型湿陷性黄土和分散性土在塑性图上位置。本文的研究也表明，砾石土同时表现出这两种土的特性，即具有架空结构和中~高分散性。同时液限较低说明砾石土在含水率较低的情况下就可以呈现出流动状态。

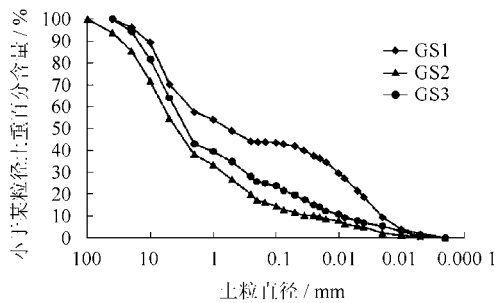


图1 3种土样的颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distributions curves of the three samples

总体而言蒋家沟砾石土风化程度不高，是其母岩早期阶段的风化产物。

2.2 砾石土中黏土矿物与分散性分析

对3种不同地质成因的砾石土中粒径小于1 mm的细粒部分进行X射线衍射分析，半定量分析了矿物含量，试验结果见表3和图1，表明砾石土的细粒部分主要由伊利石和绿泥石等黏土矿物及次生石英组成，同时也含有少量的方解石、白云石及长石，显示出砾石土与原岩（主要为白云岩、砂岩和板岩）物质成分有着密切关系。对砾石土中黏土矿物的含量的初步估计表明，3个样品中GS1样中黏土矿物中含量相对较高，约为27%。黏土矿物(或集合体)具有低渗透性、分散-凝絮性及黏滞性等重

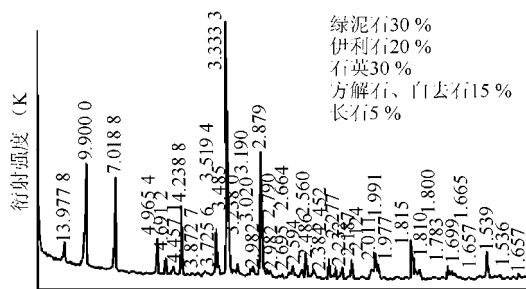


图2 GS1样品中细粒部分的衍射图谱

Fig.2 Diagrams of X-ray diffraction of fines in sample GS1

表3 砾石土中细粒部分的矿物组成

Table 3 The main mineral composition of fines

土样编号	百分含量/%					
	绿泥石	伊利石	石英	方解石	白云石	长石
GS1	30	20	30	2	13	5
GS2	25	25	34	10	3	3
GS3	35	20	30	5	7	3

要的工程性质^[10]，因此，砾石土的物理力学性质及工程特性也将受黏土矿物的影响。

对蒋家沟流域不同分布区域的砾石土细粒部分（粒径<0.5 mm）进行的分散性测试表明，砾石土具有较高的ESP（交换性钠离子百分比）值，属于中~高分散性土^[11]。在降雨入渗作用下，蒋家沟流域斜坡表层砾石土中细粒部分会发生崩解分散。与典型分散性黏土不同的是，蒋家沟砾石土具有黏性部分含量相对较少、孔隙较多、孔径较大的特点，在砾石土中黏土部分在遇水分散时，更易在孔隙中形成浑浊的，浓度较高的细颗粒（胶体量级）悬浮液，这些微粒将在渗流力作用下发生迁移运动，因此，砾石土本身特性及其黏土矿物的分散与再聚集特性将对其斜坡的稳定性产生重要影响。

3 砾石土的微观结构

为了从细-微观角度观测砾石土的结构特点，找出砾石土具有分散与再聚集特性的微观证据，本文取蒋家沟典型斜坡中砾石土残积土与坡积土的低含水率的原状样观察其微观形貌，所用设备为荷兰FEI公司生产的环境扫描电子显微镜（Quanta 200）。为了防止拍摄过程中由于样品受到电子束的轰击而产生放电现象，对样品进行了镀金处理。试验放大倍数选取原则为：在低倍放大下观察全貌，并对典型部位作进一步的放大观察。电镜扫描结果如图3~5所示。

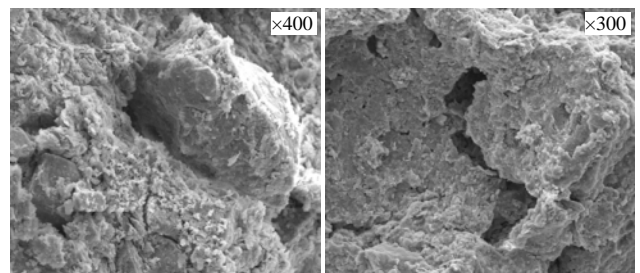


图3 低倍下观察的全貌特征

Fig.3 The morphology features under low magnification

图3为在低倍放大下的形貌特征，可见残积土的典型结构，大颗粒被定向性差的黏土矿物、碎片物质和无定形的非晶质物质包围，但两者之间有明显的裂纹，并在裂缝处发现有溶蚀现象；同时也观测到了较大的不规则孔隙或裂隙，主要有3种孔隙类型：即晶粒间孔隙、晶粒内孔隙及穿晶孔隙，孔隙直径在40 μm至150 μm以上，可能是由于长期的淋滤和溶蚀作用而形成。

图4为局部放大时的形貌，大颗粒之间存在桥

式胶结结构，其胶结物主要由小颗粒、基质及少量原生矿物晶体等组成，总体上呈非均质与非晶质状，且胶结形态大都呈不规则的鳞片状、薄片状、板状、管状等。这种桥式胶结形成了砾石土中的架空结构，在外力作用下易而发生破坏，不仅降低了砾石土强度，而且增强了孔隙之间的连通性，有利于下文中提到的无约束微粒的迁移。

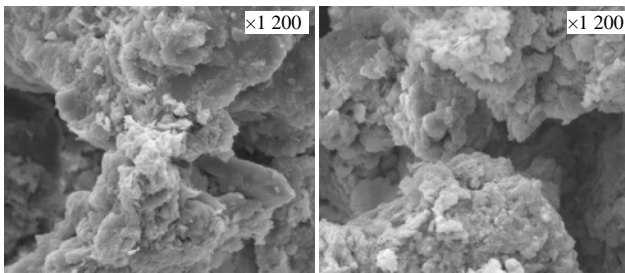


图 4 特殊的胶结结构及其破裂形态

Fig.4 A particular bonding and a broken bonding

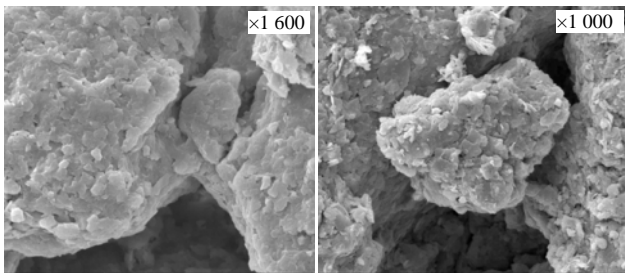


图 5 无约束的细小颗粒

Fig.5 Free small particles

图 5 为捕捉到的粒径较小的散粒，原因是颗粒之间的胶结物质断裂后形成，粒径在几十微米的粒状物在孔隙中成为无约束的自由颗粒，在地下水流的作用下，这些颗粒可以发生迁移。但微小的颗粒在渗流压力作用下进入大孔隙中的同时，由于孔隙中存在相对狭窄的喉道，细小颗粒可以在孔喉处发生堵塞，并将对后来的微颗粒起到拦截作用，最终造成喉道堵塞，降低砾石土的渗透性。

4 砾石土特性对其斜坡失稳的意义

当认为组成斜坡的土体为无黏性土时，并在无外力作用与降雨入渗的条件下，天然斜坡发生破坏只有在坡角超过土体的内摩擦角时才发生。蒋家沟砾石土的有效内摩擦角一般在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间，而蒋家沟沟谷两侧有为数不少坡角超过了 45° 的斜坡，大于土体的有效内摩擦角，在旱季时能够处于暂态稳定状态。因此，有必要讨论砾石土在遇湿条件下的特性及其对斜坡稳定性的影响。

4.1 基质吸力的贡献

事实上蒋家沟砾石土中存在黏聚力 (C)，主要有：①吸力对抗剪强度的贡献；②砾石土中存在的有效黏聚力。近年来的研究主要集中于前者，不饱和状态的土体中存在基质吸力，对其斜坡稳定性起有利作用。Fredlund 等^[12]提出了以非饱和土剪切面上的有效法向应力 ($\sigma - \mu_a$) 及基质吸力 ($\mu_a - \mu_w$) 作为应力状态变量，延伸了 Mohr-Coulomb 抗剪强度准则：

$$\tau_f = c' + (\sigma - \mu_a) \tan \varphi' + (\mu_a - \mu_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中： c' 为有效黏聚力； $(\sigma - \mu_a)$ 为剪切面上的有效法向应力； φ' 为有效内摩擦角； $(\mu_a - \mu_w)$ 为剪切面上的基质吸力； $\tan \varphi^b$ 为非饱和土抗剪强度随基质吸力 ($\mu_a - \mu_w$) 增加的速率，称为基质吸力内摩擦角。当土体接近饱和状态时孔隙气压力趋于 0， φ^b 趋向于 φ' ，则上式转化为饱和土的 Terzaghi 有效应力抗剪强度公式。

在旱季，蒋家沟斜坡表层砾石土的天然含水率较低（见表 1），基质吸力相对较高，对维持具有坡角较大（大于有效内摩擦角），上覆土层较薄的斜坡的稳定性有重要贡献；但砾石土在遇湿条件下，随着饱和度的增加，基质吸力逐渐减小，最终转化为孔隙水压力，对斜坡的稳定性不利。文献[13]研究了意大利火山岩斜坡残积土的持水曲线，当饱和度较低 ($S_r < 40\%$) 时，基质吸力达到 80 kPa 以上，但当饱和度增加到 60% 时，基质吸力就迅速下降至几千帕。

4.2 砾石土的微胶结结构破坏

砾石土中还存在一定的黏聚力，前文中在其微结构观测中也发现颗粒之间也存在微弱的胶结作用，可以提高土体的抗剪强度，对斜坡稳定性起有利作用。但在降雨入渗条件下，砾石土中的黏粒部分会分散或胶结结构断裂或颗粒之间的咬合失效等，损害砾石土的原始结构，必定影响其力学强度。文献[14]在对土石混合体分别在天然与浸水状态下进行的原位大型水平推剪试验证明，土石混合体在遇水后黏聚力会急剧下降，天然状态下黏聚力 c 为 1.36 kPa，但浸水后 c 值仅为 0.57 kPa。

4.3 微颗粒的运移与堵塞效应

可以认为，降雨入渗时砾石土斜坡是土体微结构破坏、细颗粒会发生运移与重新排列的过程。即砾石土中颗粒之间存在的桥式胶结的强度较弱，在外力和雨水的作用下，很容易发生断裂而失效，胶结物逐渐形成可以无约束的细小颗粒，粒径多在十

微米数量级范围内；在渗流力作用下，这些颗粒可以发生迁移，同时也会在孔喉等处发生堵塞，从而降低砾石土的渗透性。假设此过程存在，将会使斜坡非饱和区和区域在降雨期间形成渗透性相对较低的一层土体，有利于雨水形成积聚与保持，乃至形成暂态的上层滞水带，从而土体更易达到完全饱和或过饱和状态，为斜坡失稳破坏及后破坏过程提供有利条件。当斜坡表层土体中形成了暂态的上层滞水带后，斜坡发生流滑破坏的其中一种可能的判别准则就是取决于砾石土的抗渗强度，如图6所示，当上层滞水带中形成很高的水力梯度，超过了斜坡土体的抗渗能力，就会在发生渗透破坏。

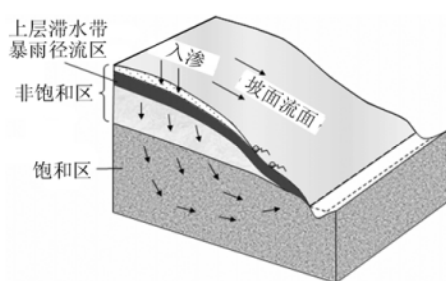


图6 暴雨期间斜坡非饱和区形成的暂态上层滞水带
Fig.6 The formation of a transient perched water table in the unsaturated zone of the slope during rainstorm

降雨入渗下砾石土基质吸力减少及由于微结构破坏而降低黏聚力的这两种效应会降低土体的摩尔-库仑剪切包络线，而微颗粒的运移与堵塞效应则会影响斜坡表层土体中的地下水的渗流状态。以往的研究也集中前2种效应，因此，研究降雨入渗下砾石土斜坡（或松散粗细粒土斜坡）中土体结构在遇湿条件下的破裂、土颗粒在渗流作用下运移与堵塞，可以认为，其是斜坡破坏前的一个重要过程，可降低黏聚力、积聚雨水、增加孔隙水压力等，对斜坡的失稳破坏有重要意义。然而对此过程的研究几乎还是空白，已有的研究也只是对这个现象的描述。前人的研究中也证实了斜坡在降雨期间确实可以形成暂态的上层滞水带。胡明鉴^[15]对蒋家沟流域斜坡表层砾石土在降雨入渗下分别进行了现场和室内模型槽试验研究，表明崩滑体在失稳时伴有大量的细粒物质，伴随有层间水流出，形成浑浊的高沙水流。许建聪^[16]的研究也指出，碎石土斜坡在较长时间降雨作用下，斜坡浅表部土体中的细颗粒会在碎块砾石间移动或流动，同时易引起土体塌落或局部坍塌，从而导致排泄管道发生堵塞或破坏，形成临时滞水面。Okada^[17]对浮石砾与火山灰混合

物组成的斜坡在降雨过程中发现了超孔隙压力，形成的原因可能是火山灰这种细颗粒悬浮在孔隙流体中，不仅增加了有效重度，而且混合物具有低渗透性，在启动过程中产生准不排水剪切变形。

在已经进行的大量室内模型槽试验中发现，降雨入渗下坡面体失稳最表层的土体，水携细土颗粒首先从坡脚开始流出，并形成牵引式的滑动；当此层土体发生流滑时，伴随有大量的积水，其体积含水率可达35%以上，有时甚至形成“土浮水中”的现象，而紧挨破坏面下的土体的含水率就要比滑体小得多，仅在10%左右；发生流滑的土体出现在斜坡各个位置，且当最表层土体滑走后，下面的土体在降雨入渗下可再次发生流滑。出现这种情况的最可能原因是砾石土斜坡的浅表层中形成了上层滞水面，上层滞水的底面或许是潜在的破坏面，且破坏面埋深一般较浅，约为5~20 cm。破坏面埋深与陈晓清^[18]在现场做天然砾石土斜坡破坏在降雨入渗下发生的破坏的试验相吻合。

6 结 语

(1) 蒋家沟砾石土具有级配宽、不均匀系数大，级配曲线呈双峰型或上凹型的特点，砾石土在渗透稳定性方面属于内在不稳定性土。

(2) 砾石土中细粒部分主要由伊利石和绿泥石等黏土矿物及少量原生矿物组成；细粒土处于低液限粉土或低液限黏土-粉土的过渡区域。

(3) 蒋家沟砾石土砾石土风化程度不高，孔隙与裂缝发育，孔隙直径较大，可见晶粒间、晶粒内及穿晶等3种孔隙类型；颗粒之间存在桥式胶结，易于断裂破坏而形成粒径在数十微米的自由微粒。

(4) 降雨入渗下砾石土中的特性及遇湿响应对斜坡稳定性有重要影响，具体表现为：基质吸力消失；胶结结构破坏、有效黏聚力消失；微颗粒的运移堵塞效应。前2种效应会降低土体的摩尔-库仑剪切包络线；第3种效应则影响斜坡表层土体中的地下水的渗流状态，有利于斜坡中上层滞水的形与积聚，满足斜坡破坏机制的静态液化机制解释的必要条件——发生失稳的土体须处于完全饱和状态；但也可能存在另外的机制，即由砾石土中上层滞水带的抗渗强度所控制的失稳方式。

(5) 砾石土的特性及其遇湿响应、颗粒的运移堵塞、上层滞水面的形成可以划分为前破坏过程，对此过程的研究具有重要的意义，量化微颗粒的运动过程及其对土体渗透性的堵塞效应是后续

研究的难点, 同时重点研究斜坡中上层滞水面的形式与各种破坏机制的可能性及其后破坏过程。

参考文献

- [1] 戴福初, 陈守义, 李焯芬. 从土的应力应变特性探讨滑坡发生机理[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 127—130.
DAI Fu-chu, CHEN Shou-yi, LEE Chack-fan. Analysis of landslide initiative mechanism based on stress-strain behavior of soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 127—130.
- [2] 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, 57.
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, 57.
- [3] 李晓, 廖秋林, 赫建明, 等. 土石混合体力学特性的原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2377—2384.
LI Xiao, LIAO Qiu-lin, HE Jian-ming, et al. Study on in-situ tests of mechanical characteristics on soil-rock aggregate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(12): 2 377—2 384.
- [4] WANG F W, WANG G H. Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan[J]. **Engineering Geology**, 2002, (63): 169—185.
- [5] OLIVARES L, DAMIANO E. Post-failure mechanics of landslides: Laboratory investigation of flowslides in pyroclastic soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2007, 133(1): 51—62.
- [6] 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, 1980.
- [7] 刘杰. 土石坝渗流控制理论基础及工程经验教训[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [8] LEE I M, PARK Y J, REDDI L N. Particle transport characteristics and filtration of granitic residual soils from the Korean peninsula[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(2): 472—482.
- [9] 中华人民共和国水利部. GB/T50145-2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [10] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 粘土矿物与斜坡失稳[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 729—740.
XU Ze-min, HUANG Run-qiu, TANG Zheng-guang, et al. Clay minerals and failure of slopes[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(5): 729—740.
- [11] 陈中学, 汪稔, 胡明鉴, 等. 云南东川蒋家沟泥石流形成内因初探[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3053—3056, 3070.
CHEN Zhong-xue, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of internal factors for debris flow occurrence in Jiangjia Ravine, Dongchuan of Yunnan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 3053—3056, 3070.
- [12] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [13] PICARELLI L, OLIVARES L, AVOLIO B. Zoning for flowslide and debris flow in pyroclastic soils of Campania Region based on “infinite slope” analysis[J]. **Engineering Geology**, 2008, (102): 132—141.
- [14] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1270—1277.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate on righe bank of Longpan in Tiger-leaping gorge area[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(6): 1270—1277.
- [15] 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究——以蒋家沟流域滑坡堆积角砾土坡地为例[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 454—457.
HU Ming-jian, WANG Ren, ZHANG Ping-cang. Primary research on the effect of rainfall on landslide—Take the slope piled by old landslide in Jiangjiagou valley as example[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 454—457.
- [16] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264—2271.
XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on bebris landslide stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(11): 2264—2271.
- [17] OKADA Y, OCHIAI H. Flow characteristics of 2-phase granular mass flows from model flume tests[J]. **Engineering Geology**, 2008, 97: 1—14.
- [18] 陈晓清. 滑坡转化泥石流起动机理试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.