

文章编号: 1008-2786-(2017)2-179-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000210

宽级配弱固结土体内细颗粒迁移规律研究评述

郭朝旭^{1,2}, 崔鹏^{1,3*}

1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京, 100049; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心

摘 要: 宽级配弱固结土体中细颗粒的迁移是导致滑坡和泥石流的一个重要原因。本文总结了宽级配弱固结土和细颗粒分界粒径的基本概念, 以及细颗粒迁移特性, 并总结了现有细颗粒迁移在各学科研究的实验方法、数值模拟方法以及研究成果。现有研究表明在宏观尺度上, 宽级配土体内细颗粒在水动力条件下的迁移, 会导致土体孔隙堵塞, 是土体渗透性的降低、发生滑坡泥石流的重要原因; 同时亦影响水利科学中土石坝运行, 甚至造成管涌破坏。在细观尺度上, 相关成果仍旧不完善, 亟待在今后进行深入研究。未来建议重点发展微观数值模拟技术, 高精度的试验监测手段, 并考虑孔隙结构和颗粒级配变化、细观-微观-宏观多尺度转换以及气、固、流多相流耦合条件下的细颗粒迁移规律。

关键词: 宽级配弱固结土; 细颗粒迁移; 滑坡泥石流;

中图分类号: TU4

文献标志码: A

细颗粒在多孔介质中的迁移是一个众多学科关注的科学问题, 是石油行业^[1] (细颗粒迁移堵塞渗油通道)、环境学科^[2-3] (1. 胶体在饱和、非饱和土体内运移规律; 2. 气体中悬浮颗粒在多孔介质中的运移规律)、水利学科^[4] (砂土液化或细颗粒悬浮运移导致管涌) 和岩土学科^[5-9] (细颗粒迁移堵塞孔隙通道导致渗透降低和滑坡泥石流灾害的形成) 的科学研究热点。在环境科学领域, 从宏观和细观尺度, 针对多孔介质中细颗粒的迁移已经完成了大量的观测、试验与数值模拟研究, 取得了丰硕的成果。然而, 在岩土学科, 宽级配弱固结土体中细颗粒迁移机理和过程的研究, 处于宏观观测和科学假定阶段, 研究深度有限。

宽级配松散土体在降雨冲蚀作用下, 细颗粒发

生内部迁移被认为是滑坡泥石流形成的重要成因。例如, 细颗粒在大孔隙中运动产生水膜^[9]; 细颗粒堵塞渗流通道, 形成滞水面^[7]; 细颗粒迁移导致局部孔压上升, 继而产生滑坡并转化为泥石流^[5-6]。然而, 这些描述性的机制还缺乏有效的监测手段进行证明。定量描述细颗粒的运移, 并解释土体破坏和滑坡泥石流形成过程, 是滑坡泥石流起动机理研究的关键, 并为滑坡泥石流防灾减灾提供重要的理论支持。

本文参阅大量科学文献, 总结了宽级配弱固结土的基本概念、细颗粒的分界粒径及迁移基本特性, 并尝试从试验和数值模拟方法的角度对国内外的研究现状进行评述, 并建议了未来研究方向。

收稿日期(Received date): 2014-12-15; 修改日期(Accepted date): 2015-04-22。

基金项目(Foundation item): 中科院国际合作局对外合作重点项目(131551KYSB20160002); 国家科技支撑项目(2014BAL05B01); 国际(地区)合作与交流项目(41520104002)。[International Partnership Program(131551KYSB20160002); National Key Technology Support Program(2014BAL05B01); Major International (Regional) Joint Research Project(41520104002)。]

作者简介(Biography): 郭朝旭(1987—), 男, 博士, 主要从事山地灾害研究。[Guo Chaoxu (1987—), male, Ph. D., research on mountain disaster] E-mail: guochaoxu177@163.com。

* 通信作者(Corresponding author): 崔鹏(1957—), 男, 陕西西安人, 研究员, 主要从事山地灾害研究。[Cui Peng (1957—), male, born in Xi'an, Shanxi Province, mainly engaged in mountain disaster.] E-mail: pengcui@imde.ac.cn

1 基本概念与定义

1.1 宽级配弱固结土的定义

“宽级配弱固结土”是泥石流学者针对形成泥石流的土源条件而约定俗成的提法。在宽级配方面,它的颗粒级配范围包括 10^{-6} m 到 10^1 m, 包含粒径直径大于数米的巨石,或小于 0.005 mm 的粘粒,在结构上大块石和粗颗粒形成骨架,砂土等细颗粒充填空隙,粘土颗粒包裹细颗粒,从而形成胶结程度低,甚至无固结的一种混杂堆积土。

在弱固结性方面,本文定义的宽级配弱固结土特指基于地震成因的、由于二次搬运和风化形成的新近沉积土体。它的上覆土压力等于自重应力,属于正常固结。由于固结时间相对较短,基本未发生成壤作用,也没有形成相对稳定的土壤结构。在淋溶作用下,该类土体极易在重力流作用下,内部细颗粒发生流失。这类土体中形成的孔隙结构和其固结状态是在不断变化的,为了反映该类土在固结过程中孔隙结构不断变化,结构松散的性质,利用“弱固结”的概念作定性描述。

1.2 细颗粒的分界粒径及运移特性

1.2.1 细颗粒的分界粒径

研究宽级配弱固结土中细颗粒的运移规律,首先需要确定细颗粒的分界粒径,其对于物质组成的分类及定量化研究具有重要意义。

(1) 工程界的分类

根据沉积学术语,黏粒粒径为 <0.005 mm。岩土工程界中定义黏粒为 <0.002 mm。在胶体化学学科中定义黏粒为 <0.001 mm 的颗粒。

对于宽级配土体,在工程上定义为粗粒土。在各个国家和不同行业,这类土体关于粗细颗粒粒径的定义现在还是不完善(如图 1 所示)。比如,美国陆军工程师兵团、垦务局、材料试验学会把 $d >$

0.075 mm,质量百分含量大于 50% 的土称为粗粒土;而美国公路工作者协会把 $76.2 \text{ mm} > d > 0.075 \text{ mm}$,质量百分含量大于 50% 的土称为粗粒土。我国水利部行业标准和国家标准把 $60 \text{ mm} > d > 0.075 \text{ mm}$,含量大于 50% 的土划分为粗粒土^[11]。

(2) 泥石流学者的分类

崔鹏^[12-13]将“泥石流细粒物质和粗大碎屑物质之间的分界值定义为 1 mm”,粒径小于 1 mm 的颗粒为细颗粒,大于 1 mm 的颗粒称之为粗颗粒;康志成^[14]在研究了蒋家沟泥石流颗粒级配发现,小于 2 mm 的固体物质是泥石流体的浆体组成部分,大于 2 mm 的固体物质是泥石流的搬运物质;随后余斌^[15]和陈宁生^[16]以粘粒(0.005 mm)作为细颗粒物质,均是包含在小于 2 mm 范围内的,粘粒含量的多少主要用于确定泥石流体的类型和特征^[15-16]。

(3) 本文建议的分类

细颗粒的定义应与研究尺度有关,应该根据实验目的与现象,及各种颗粒的影响因素对其进行划分。如果颗粒的最大粒径超过 100 mm,10 mm 可算细颗粒。对于泥石流不同过程的研究,其所需要考虑的细颗粒的分界粒径可有不同,即使对于泥石流流动过程而言,其粗细分界粒径也随泥石流浆体容重而变化。因此,泥石流源区松散土体的粗细分界粒径不是一个固定值,视研究的具体对象与过程而定。鉴于泥石流实验水槽及渗透仪的尺寸限制,最大颗粒粒径为 60 mm,能代表泥石流液体颗粒的主要粒径,同时考虑实验的可操作性和数据的可分析性,宜采用 2 mm 作为粗细颗粒的分界粒径。

1.2.2 宽级配弱固结土中细颗粒的运移

宽级配弱固结土中由于新近沉积,结构疏松,细颗粒成分,特别是粉、砂和粘粒,极易水流作用下发生迁移。细颗粒运移一方面会导致土体内部局部孔隙堵塞渗透性降低;另一方面可能发生土体颗粒粗化,稳定性降低。

一些实验结果证实了细颗粒被冲蚀流走的现象^[5-6]:砾石土中的细粒运移与积聚改变了土体结构和内部充填,渗流路径受阻造成局部孔隙水压力增加。王功辉^[17]等认为,细颗粒在降雨作用下吸收水分并膨胀,填充土体孔隙,导致孔隙的减小,细颗粒的含量影响土体的结构并导致孔压的变化是土体破坏的重要原因。

总结目前国内学者对细颗粒变化对泥石流起动的研究,有以下结论:(1)砾石土中的细粒与泥石

美国材料与试验协会	砾石				粉土	粘土
	粗	中	细			
	4.75	2	4.25×10^{-1}	7.5×10^{-2}		
美国农业部的分类	砾石				粉土	粘土
	2		5×10^{-2}	2×10^{-2}		
美国土壤局和公路管理局的分类	砾石				粉土	粘土
	粗	中	细			
	2	0.25	5×10^{-2}	5×10^{-2}		
国际土壤科学协会的分类	砾石				粉土	粘土
	粗	中	细			
	2	2×10^{-1}	2×10^{-2}	2×10^{-2}		

图 1 美国及国际土体粗细颗粒分界粒径

Fig. 1 Critical size between coarse and fine particles in USA and international standard

流的形成启动相关,不同细颗粒含量引起泥石流启动的难易程度不同;(2)土体细颗粒的迁移、富集将会引起土体结构和充填变化,从而导致土体力学性质改变;(3)土体失稳破坏是泥石流启动的前提条件。

2 细颗粒运移研究现状

2.1 试验方法

(1) 水槽试验及野外源地试验

鲁晓兵、周小军^[8,18-19]等利用水槽试验,利用砂土实验,发现:随着降雨入渗,细颗粒逐渐汇集到土体下部和土坡坡角,降低局部土体渗透性,孔压上升,形成滑动面,最后导致滑坡泥石流。陈宁生^[16]从不同黏粒含量角度进行人工降雨试验研究后认为,细颗粒的运移堵塞影响土体的孔隙结构,从而会导致孔隙水压力的变化,最终导致土体内应力的重新分布,产生不同的破坏机理。

陈晓清^[5-6]等,利用泥石流源地和堆积体的人工降雨试验分析了滑坡转向泥石流的启动试验,降雨渗透导致土体中细颗粒沿渗流路径重新分布,即水进入部位出现粗化,水出流部位细化。这些都证实了在宽级配砾石土体中水的渗流具有携带细颗粒土体的能力。

(2) 土柱渗透性试验

王志兵^[20]等利用向下和向上入渗的方式研究细颗粒对土体的渗透性的影响。研究结果表明:雨水挟带了细颗粒入渗土体,对表层土体渗透性的影响明显,能显著降低土体的渗透系数,并影响斜坡的稳定性。颗粒的运移堵塞作用通过改变土体的渗透性而有利于泥石流的启动、不利于斜坡土体的稳定。陈星欣^[21-22]通过大量的室内土柱试验,得到的结论为:悬浮颗粒大小是影响其迁移的重要因素,在同一渗流速度条件下,颗粒粒径越大,其浓度峰值越小。

(3) 稀土元素追踪、核素追踪

稀土元素(Rare Earth Elements—REE)是土壤侵蚀和团聚效应的理想示踪剂。稀土元素性质稳定,与土壤有较高的亲和力,植物富集有限,淋溶迁移不明显,对环境无放射性危害,有较低的土壤背景值,中子活化检测其具有灵敏度高,并可人工同时施放多种稀土元素示踪等特点。通过分析示踪元素含量的分布差异来研究土壤侵蚀的发生和分布规律,可以定量监测土壤侵蚀的时空变化。

雷廷武^[23]采用8 m土槽,分区段施用10种不同的稀土元素进行示踪试验。结果表明,REE示踪法可以示踪细沟土壤侵蚀的动态过程,且可保证一定的精度要求。

由于环境中某些放射性核素具有独特的地球化学特征,并且它们具有已知的输入函数和衰变关系,其中尤以¹³⁷Cs技术的理论研究最为成熟,应用也最为广泛^[24-25]。然而对于短周期或室内试验来说,该方法则难以满足需要。

(4) 染色示踪

颗粒荧光示踪法可定量分析细颗粒运动轨迹^[26]。韦斯布罗德(Weisbrod)^[27-29]采用两种追踪剂(1 μm的荧光微球及钠基蒙脱石胶体颗粒,粒径为1.34 μm)。试验结果表明胶体颗粒的密度是影响其在裂隙中运移的主要因素,并且把悬浮的胶体颗粒作为追踪剂时需要谨慎才能保持精度。

综上所述,现有对细颗粒迁移宏观方法难以实现对细颗粒的精确轨道观测,只能获取试验前后细颗粒的变化情况,对于细颗粒的迁移过程仍旧不能获取。利用微观的探测手段,以及原状土的试验和野外微观观察是未来的发展方向,如何提高观测精度及尺度转换问题是迫切需要解决的一个课题。

2.2 数值方法

(1) 孔隙网络模型

库西(Coussy)^[30-31]对孔隙结构的变形及溶质运移方程进行了探索和总结,其考虑多种介质耦合的同时考虑多孔介质的变形及其他机制,其中将孔隙网络抽象为管道网络,而流体在管道里满足一定的水动力特性,同时考虑细颗粒的分布以及在水动力作用的运动机制。萨希米(Sahimi)^[32-33]利用对流弥散方程来计算不同浓度的溶质在多孔介质中的运移,对于污染物的迁移有较好的结果。现有的地层伤害理论(formation damage,石油科学名词,地层伤害是由于钻井液、完井液等侵入地层,造成的井底附近渗透率降低的现象)的最新专著详细描述了细颗粒运移并且造成地层伤害的进程,受力机制;给出了渗透修正模型,描述细颗粒的移动、迁移和沉积机制^[1]。

(2) 逾渗理论

逾渗理论是属于概率论的一个分支,其所研究的模型是处理强无序随机几何结构的重要模型,逾渗现象是一种相变,如孔隙介质由于细颗粒的迁移导致可渗透介质变为不可渗透,在这些相变的过程

中存在一个临界点,也称为逾渗阈值^[31,34-37],是研究细颗粒迁移导致堵塞阈值的重要方法。

(3) 格子 Boltzmann 方法

格子 Boltzmann (Lattice Boltzmann Method—LBM) 方法是一种与传统数值方法完全不同的方法。传统的数值模拟是从偏微分方程(组)出发,如 N-S 方程,然后用有限差分、有限体积、有限元或谱方法离散,再用标准的数值方法求解常微分方程组或代数方程组,这是“top—down”方法。而格子气元胞自动机方法(Lattice Gas Automaton—LGA)和 LBM 是“bottom—up”方法,它们的出发点是一个离散的微观动力模型,通过这些模型可以构造得到所需要的宏观守恒量如密度、速度和压力。对特定的宏观方程用 LBM 要构造恰当的微观动力模型这非常重要,这样才能用多尺度分析从微观动力模型恢复出我们所求解的宏观方程。由于它具有几何灵活、并行本性、易于编程、精度较高等特点,得到了充分的发展和广泛的应用,尤其在复杂边界和复杂流场的模拟中取得巨大成功,如多孔介质流、悬浮颗粒在流场中的运动、结晶过程等^[38-41]。

(4) 大孔隙流,优先流的模拟

多孔介质中细粒的运输是靠大孔隙中水体的流动所带动的,并且大孔隙对于土体的入渗深度、渗流起着关键作用。弗劳瑞(Flurry)^[42]通过不同土体,不同初始含水率(相当于前期降雨)条件下对比影

响大孔隙流的影响因素,结果表明初始含水率影响较小,结构性土更易产生扰流、脉冲分流现象。格克(Gerke)和简尼特(Genuchten)^[43]在1993年详细讲述了双孔隙度模型描述优先流及溶质运移的模型,该模型从机理上模拟了大孔隙流的情况。斯琴维斯(Steenhuis)^[44]在1988年讨论了在浅层坡体中优先流影响排水性能的机理,并对坡体的排水设计提出了自己的建议,是讨论优先流机理的最早文献。

(5) PFC + CFD 方法

周健^[45-46]等利用 PFC2D/3D 颗粒流软件分别与 CFD(流体力学计算模块)耦合模拟土石坝中细颗粒的流失及管涌现象,由于 PFC2D 程序中流固耦合模块计算本身的局限性,当大颗粒和小颗粒的粒径差别在3~5倍以上的时候,流固耦合计算很难收敛。因此,经过多方面试验可以通过7个球组成的 cluster 单元代替一个大的骨架球,7个球组成的 cluster 的等效直径等于其替代的大球的直径,这个过程通过编制 Fish 函数来实现。除了 PFC 软件,还有 EDEM 软件,还提供了非常强大的后处理功能。EDEM 还可以与 CFD、FEA 和 MBD 工具耦合,以获得颗粒和流体、结构相互作用的结果。目前, EDEM 已经拥有了与 Fluent、Ansys 和 Adams 的无缝耦合接口^[47]。

针对土石坝的反滤机制,需要考虑砾石土在土石坝中的反渗设计,Zou^[48]利用有限元、颗粒流

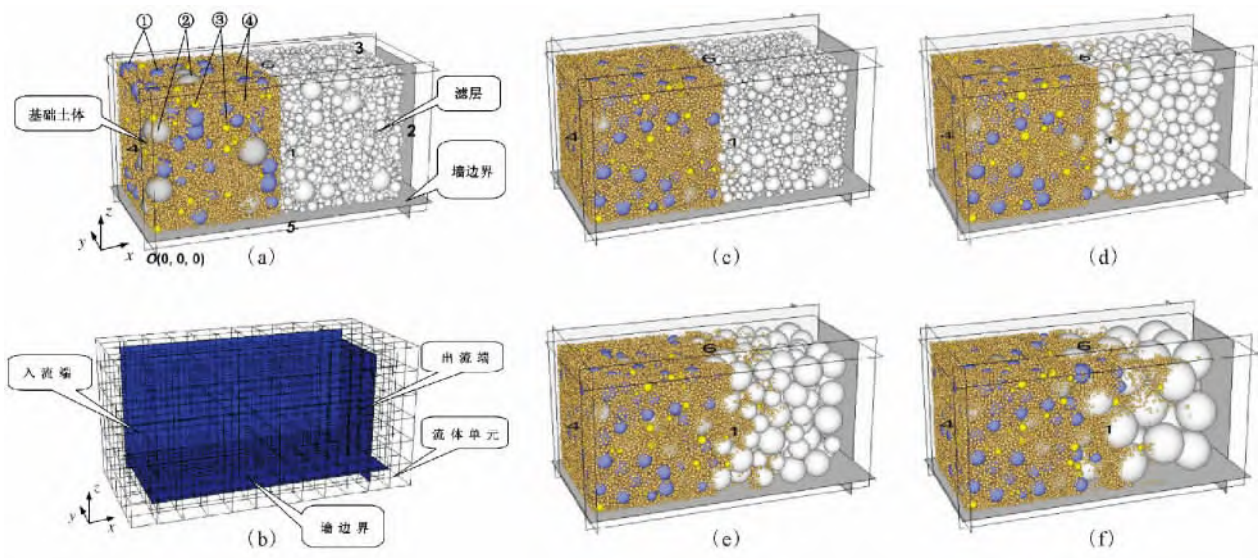


图2 砾石土中细颗粒迁移模拟:(a)数值模型;(b)墙体边界和流体单元;(c)~(f)分别为 $D_{50} = 5.5, 8.5, 15, 20$ mm 的滤层条件下细颗粒迁移情况^[48](图片源自文献[48])

Fig.2 Fine particle migrating process with numerical simulation:

(a) numerical model; (b) wall boundary and fluid cell; (c) ~ (f) respectively illustrate the fine migration with different filters $D_{50} = 5.5, 8.5, 15, 20$ mm (Zou 2013)

(PFC) 与流体力学的耦合分析来计算细颗粒的运移(如图2所示),防止细颗粒的流失模拟设计,通过数值模拟,可以指导实践中选择不同的粗细颗粒配比,进一步指导土石坝的反滤层设计果。

(6) 基于孔隙结构的数值分析方法

鲁晓兵^[9,49]利用数值方法分析了细颗粒堵塞运移效应,发现,水膜形成的机理主要为砂土的液化,孔隙水压力及颗粒运移堵塞的结果,一旦这种临界状态变化,水膜便不会产生。他认为,土体中水膜的连通形成了滑坡的滑面,从而引起了土体的破坏。另外在很多工业领域(油气精炼、造纸、食品加工、浆体输送、和废水处理)中对液固混合物(悬浮物)的模拟也均属于本文所述细颗粒迁移的模拟范畴,在这些领域已经发展了几种不同的模拟方法,从离散的、基于细颗粒尺度的方法到宏观的、半经验两相流描述。

2.3 研究成果

细颗粒迁移影响土体渗透性和稳定性,在宏细观实验及数值分析方法两方面,主要有以下研究结论:

(1) 细颗粒的运移对影响土体渗透性

细颗粒在降雨作用下吸收水分并膨胀,填充土体孔隙,减小孔隙,增长了水流路径,加大了土体与水的接触面积,增强了对水流的粘滞作用,从而导致土体的渗透性下降。

(2) 细颗粒运移堵塞导致土体破坏

细颗粒的运移堵塞虽然不能通过宏观实验直接观察,通过实验前后级配对比分析,在降雨及渗透过程中细颗粒发生了迁移,渗透减小说明了细颗粒运移过程中导致了水流流通不畅,局部形成了较大的孔隙水压力,土体的强度减小;另一方面,土体内部细颗粒的堵塞形成一个滞水薄层,为滑面的形成创造了条件。

(3) 细颗粒运移与反滤设计的关系

细颗粒的运移虽然在斜坡上可能导致土体破坏,然而在土石坝的反滤层设计方面,细颗粒的运移还可能导致水土流失,甚至管涌,因此细颗粒的含量对反滤层的设计有重要的意义。

在宏观实验方面,渗透实验和水槽实验观察到以上实验现象,然而其结论往往难以在细观上证实。虽然宏观上可以进行数值计算,作为实验方面的补充,然而宏观方面的数值实验仍然是将土体看作一个整体进行分析,并不能得到细颗粒运移过程。

在细观尺度上,现有大量的数值实验表明,当固体颗粒数量有限时,基于粒子的方法是合适的。另一方面,当存在很多粒子时,使用宏观的、或平均的模型追踪相的体积比会更好^[50]

3 未来发展方向

自上个世纪90年代以来,涉及细颗粒运移的研究在宏观方面取得了进展,然而在微观方面停滞不前。随着科学技术的发展,会有更多的研究方法来提高当前的实验条件。在未来,对于细颗粒运移的研究,可能需要围绕以下几个方面:

(1) 微观数值模拟取代不能宏观监测的细观实验

微观数值模拟的低成本和高效性,可以取代高成本与低效率的宏观实验。然而,数值模拟的前提是需要对细颗粒的运移规律有深入的认识。

(2) 发展高精度的试验监测手段

发展高精度的,可视化的监测设备,对细颗粒的运移进行实时的追踪和可视化,从而掌握细颗粒运移的规律。

(3) 考虑孔隙结构及土体颗粒级配变化条件下的细颗粒迁移规律

细颗粒的运移是动态过程,需要结合多学科的理论,特别是结合流体力学和土力学进行综合分析。

(4) 多尺度的转换与模拟

尺度的转换是当前科技界的一个重要课题。如何从细观-微观-宏观的多尺度转换,并且能够反映其相互的影响结果,仍旧是未来的重大课题^[51~52]。

(5) 真实的探测岩土体的孔隙结构,进行气、固、流多相流耦合分析

宽级配弱固结土中细颗粒运移是是气体、固体和流体多相耦合的物理过程,当前的实验和数值手段对此问题的研究仍旧简单和粗糙,需要深入的探讨和分析。

参考文献(References)

- [1] CIVAN F. Reservoir formation damage[M]. Burlington, USA: Gulf Professional Publishing, 2011: 1~9.
- [2] WEISBROD N, NIEMET M R, ROCKHOLD M L et al. Migration of saline solutions in variably saturated porous media[J]. Journal of contaminant hydrology, 2004, 72(1): 109~133.
- [3] ARMATAS G S, KANATZIDIS M G. Mesosstructured germanium

- with cubic pore symmetry [J]. *Nature* 2006 **441** (7097): 1122 – 1125.
- [4] 罗玉龙, 速宝玉, 盛金昌, 等. 对管涌机理的新认识[J]. *岩土工程学报* 2011 **33** (12): 1895 – 1902 [LUO Yulong, SU Bao-yu, SHENG Jinchang, et al. New understandings on piping mechanism [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2011 **33** (12): 1895 – 1902]
- [5] 陈晓清, 崔鹏, 冯自立, 等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J]. *岩石力学与工程学报* 2006 **25** (1): 106 – 116 [CHEN Xiaqing, CUI Peng, FENG Zili, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2006 **25** (1): 106 – 116.]
- [6] 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: 98 – 103 [CHEN Xiaqing. The research on landslide translation to debris flow [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University 2006: 98 – 103]
- [7] 胡明鉴, 汪稔, 张平仑. 斜坡稳定性及降雨条件下激发滑坡的试验研究[J]. *岩土工程学报* 2001 **23** (4): 454 – 457 [HU Mingjian, WANG Ren, ZHANG Pingcang. Primary research on the effect of rainfall on landslide [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 2001 **23** (4): 454 – 457]
- [8] 矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 土体降雨滑坡中细颗粒迁移及效应[J]. *地下空间与工程学报* 2005 **1** (7): 1014 – 1016. [JIAO Bin tian, LU Xiaobing, WANG Shuyun, et al. The movement of fine grains and its effects on the landslide and debris flow caused by raining [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering* , 2005 **1** (7): 1014 – 1016.]
- [9] LU X B, CUI P, HU K, et al. Initiation and development of water film by seepage [J]. *Journal of Mountain Science* 2010 **7** (4): 361 – 366.
- [10] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 岩土工程基本术语标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998: 21 – 22 [General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Basic terminology standards of geotechnical engineering [S]. Beijing: China Planning Press, 1998: 21 – 22]
- [11] 朱崇辉, 王增红, 刘俊民. 粗粒土的渗透破坏坡降与颗粒级配的关系研究[J]. *中国农村水利水电* 2006 (3): 72 – 74 [ZHU Chonghui, WANG Zenghong, LIU Junmin. Study on the relation between the permeation damage slope and the grain composition of coarse-grained soil [J]. *China Rural Water and Hydropower* 2006 (3): 72 – 74.]
- [12] 崔鹏. 泥石流起动条件及机理的实验研究[J]. *科学通报* , 1991 **36** (21): 1650 – 1652 [CUI Peng. Experiment study on the debris flow triggering conditions and mechanisms [J]. *Chinese Science Bulletin* 1991 **36** (21): 1650 – 1652]
- [13] 崔鹏, 关君蔚. 泥石流起动的突变学特征[J]. *自然灾害学报* , 1993 **2** (1): 53 – 61 [CUI Peng, GUAN Junwei. The sudden change properties of debris flow initiation [J]. *Journal of Natural Disasters* 1993 **2** (1): 53 – 61]
- [14] 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 [WU Jishan, KANG Zhicheng, TIAN Lianquan, et al. Research on the observation data in Jiangjia Gully debris flow in Yunnan province [M]. Beijing: Science Press, 1990: 69 – 70]
- [15] 余斌, 赵惠林. 粘性泥石流运动模型的实验研究[J]. *自然灾害学报* 1999 **8** (2): 81 – 87 [YU Bin, ZHAO Huilin. Research on movement model of viscous debris flow by rheological experiments [J]. *Journal of Natural Disasters* 1999 **8** (2): 81 – 87]
- [16] CHEN N S, ZHOU W, YANG C L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content [J]. *Geomorphology* 2010 **121** (3): 222 – 230.
- [17] WANG G, SASSA K. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content [J]. *Engineering geology* 2003 **69** (1): 109 – 125.
- [18] 周小军, 崔鹏, 贾世涛, 等. 基于正交设计的土体细颗粒迁移模拟水槽实验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)* 2012, (S1): 83 – 88 [ZHOU Xiaojun, CUI Peng, JIA Shitao, et al. Flume test study on the movement of fine grains based on orthogonal design [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science edition)* 2012 (S1): 83 – 88]
- [19] 周小军, 崔鹏, 李战鲁. 泥石流源区砾石土渗透沉降综合测试设备研制及应用[J]. *岩石力学与工程学报* 2012 **31** (6): 1281 – 1289 [ZHOU Xiaojun, CUI Peng, LI Zhanlu. Development and application of integrated test equipment for permeability and settlement of gravelly soil in triggering area of debris flow [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2012 **31** (6): 1281 – 1289.]
- [20] 王志兵. 泥石流源区土体颗粒迁移堵塞效应及其斜坡破坏模式[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所 2011: 78 – 82 [WANG Zhibing. Fine migrating leading to blocking and different failure modes with debris flow source soil [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences 2011: 78 – 82]
- [21] 陈星欣, 白冰, 于涛, 等. 粒径和渗流速度对多孔介质中悬浮颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J]. *岩石力学与工程学报* , 2012 **31** (S2): 4248 – 4253 [CHEN Xingxin, BAI Bing, YU Tao, et al. Coupled effects of particle size and flow rate on characteristics of particle transportation and deposition in porous media [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2012 **31** (S2): 4248 – 4253]
- [22] 陈星欣, 白冰. 重力对饱和多孔介质中颗粒输运特性的影响[J]. *岩土工程学报* 2012 **34** (9): 1661 – 1667 [CHEN Xingxin, BAI Bing. Effect of gravity on transport of particles in saturated porous media [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* , 2012 **34** (9): 1661 – 1667]
- [23] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 144 – 158 [LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, YAN Lijuan. Physical models of rill erosion [M]. Beijing: Science Press. 2009: 144 – 158]
- [24] 李俊杰. 应用于土壤侵蚀的环境放射性核素示踪技术方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究

- 所 2008: 61 – 95 [LI Junjie. Study for tracing technique and methods using environmental radionuclides applied to soil erosion [D]. Beijing: Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008: 61 – 95]
- [25] 王静慧, 沙占江, 马涛, 等. 放射性核素 ^{137}Cs 在示踪土壤侵蚀研究中的应用[J]. 盐湖研究 2012 **20**(002): 59 – 65 [WANG Jinghui, SHA Zhanjiang, MA Tao, et al. Radioactive fallout ^{137}Cs as a tracer to study soil erosion[J]. Journal of Salt Lake Research, 2012 **20**(002): 59 – 65]
- [26] 曲志捷. 流化颗粒显示的新方法——颗粒荧光示踪法[J]. 应用化学 1984 **3**: 77 – 78 [QU Zhijie. A new method to trace fluidized particles (Fluorescent tracer particle method) [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry 1984 **3**: 77 – 78.]
- [27] WEISBROD N, NIEMET M R, ROCKHOLD M L, et al. Migration of saline solutions in variably saturated porous media[J]. Journal of contaminant hydrology 2004 **72**(1): 109 – 133.
- [28] ZVIKELSKY O, WEISBROD N. Impact of particle size on colloid transport in discrete fractures[J]. Water resources research 2006, **42**(12): 1 – 8.
- [29] ZVIKELSKY O, WEISBROD N, DODY A. A comparison of clay colloid and artificial microsphere transport in natural discrete fractures[J]. Journal of colloid and interface science 2008 **323**(2): 286 – 292.
- [30] COUSSY O. Poromechanics[M]. West Sussex, England: John Wiley & Sons 2004: 1 – 17.
- [31] JANSSEN H K, TÄUBER U C. The field theory approach to percolation processes[J]. Annals of Physics 2005 **315**(1): 147 – 192.
- [32] SAHIMI M, GAVALAS G R, TSOTSIS T T. Statistical and continuum models of fluid-solid reactions in porous media[J]. Chemical Engineering Science 1990 **45**(6): 1443 – 1502.
- [33] SAHIMI M. Flow and transport in porous media and fractured rock: from classical methods to modern approaches [M]. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons 2012: 15 – 37, 179 – 212.
- [34] STAUFFER D, AHARONY A. Introduction to percolation theory [M]. London: Taylor and Francis 1991: 1 – 13.
- [35] GOLDEN K M. Percolation models for porous media [M]. New York: Springer 1997: 27 – 43.
- [36] 吕兆兴. 孔隙裂隙双重介质逾渗理论及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学 2008: 73 – 98 [LYU Zhaoxing. The theory and its application of percolation in pore and fracture double-medium[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology 2008: 73 – 98]
- [37] HUNT A, EWING R. Percolation theory for flow in porous media [M]. Heidelberg, Germany: Springer 2009: 1 – 34.
- [38] SUCCI S. The Lattice-Boltzmann Equation [M]. Oxford: Oxford University Press 2001: 1 – 73.
- [39] 郭照立, 郝楚光, 李青, 等. 流体动力学的格子 Boltzmann 方法 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社 2002: 29 – 50 [GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang, LI Qing, et al. Lattice Boltzmann method for hydrodynamics [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2002: 29 – 50.]
- [40] SUKOP M C, THORNE D T. Lattice Boltzmann modeling: an introduction for geoscientists and engineers [M]. Berlin: Springer, 2007: 1 – 11.
- [41] 段雅丽. 格子 Boltzmann 方法及其在流体动力学上的一些应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学数学系 2007: 71 – 78 [DUAN Yali. Lattice Boltzmann method and some application to hydrodynamics [D]. Hefei University of Science and Technology of China, 2007: 71 – 78]
- [42] FLURY M, FLÜHLER H, JURY W A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study[J]. Water resources research 1994 **30**(7): 1945 – 1954.
- [43] GERKE H H, GENUCHTEN M T. A dual porosity model for simulating the preferential movement of water and solutes in structured porous media[J]. Water Resources Research 1993 **29**(2): 305 – 319.
- [44] STEENHUIS T S, RICHARD T L, PARLANGE M B, et al. Preferential flow influences on drainage of shallow sloping soils[J]. Agricultural water management 1988 **14**(1): 137 – 151.
- [45] 曾远. 土体破坏微观机理及颗粒流数值模拟 [D]. 上海: 同济大学 2006: 123 – 142 [ZENG Yuan. Microscopic mechanics of soil failure and PFC numerical simulation [D]. Shanghai: Tongji University 2006: 123 – 142]
- [46] 周健, 贾敏才. 土工细观模型试验与数值模拟 [M]. 北京: 科学出版社 2008: 1 – 20 [ZHOU Jian, JIA Mincai. Soil meso-scale model test and numerical simulation [M]. Beijing: Science Press, 2008: 1 – 20]
- [47] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践 [M]. 西安: 西北工业大学出版社 2010: 2 – 10 [WANG Guo-qiang, HAO Wanjun, WANG Jixin. Discrete Element method and its application on EDEM [M]. Xi'an, Northwestern Polytechnical University Press 2010: 2 – 10]
- [48] ZOU Y H, CHEN Q, CHEN X Q, et al. Discrete numerical modeling of particle transport in granular filters [J]. Computers and Geotechnics 2013 **47**: 48 – 56.
- [49] LU X B, CUI P. A study on water film in saturated sand[J]. International Journal of Sediment Research 2010 **25**(3): 221 – 232.
- [50] COMSOL A B. COMSOL multiphysics user's guide [OL]. Sweden: 2005(9): <http://www.comsol.com/>.
- [51] BLUNT M J, BIJELJIC B, DONG H, et al. Pore-scale imaging and modelling[J]. Advances in Water Resources 2013 **51**: 197 – 216.
- [52] SAMOUELIAN A, VOGEL H J, IPPISCH O. Upscaling hydraulic conductivity based on the topology of the sub-scale structure [J]. Advances in water resources 2007 **30**(5): 1179 – 1189.

Fine Particle Migration in Wide Grading and Poorly Consolidated Soil : An Overview

GUO Chaoxu^{1 2}, CUI Peng^{1 3*}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610044, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences)

Abstract: Fine particle migration in the wide grading unconsolidated(loose) soil(WGLS) is an important factor for triggering landslide and debris flow. The basic definition of WGLS and the characteristics of fine particles migration were firstly introduced in this study, then research methods and the latest progress of concern were summarized. It suggested that fine particle migration can lead to soil pore blocked, pore water pressure increasing, then permeability reducing and slope failure in the end, even piping disaster in earth-rock dam in a macro scale. However, there were some unknowns unsolved as yet in the micro-level. Research expectation about fine particle migration was proposed, including developing micro-scale simulation technology, high-precision testing method, considering the influence of pore structure change and migration with varied sizes of grains, developing the conversion method from micro-scale to macro-scale or macro-scale to micro-scale and improving coupled-field analysis.

Key words: wide grading and poorly unconsolidated soil; fine migration; landslide and debris flow