

碎石土斜坡优先流渗流特征试验

沈 辉^{1,2}, 罗先启¹, 李显平³

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 九江学院土木与城建学院, 江西 九江 332005; 3. 中冶集团武汉勘察研究院有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要: 为研究碎石土斜坡在雨水作用下的渗流特性, 以 2 种不同级配的碎石土为坡体模型材料, 利用自行设计的模型槽开展雨水作用下优先流渗流特征的试验研究。试验模拟降雨入渗及地下水变化, 在碎石土斜坡内部生成浅层孔隙及深层管道网络, 采用染色示踪技术结合图像处理分析碎石土斜坡内部大孔隙流、管流以及漏斗流的渗流特征及成因。试验结果表明, 采用室内试验方法模拟降雨及地下水变化, 对于展现坡体内部与外界水分动态交换过程, 研究优先流非均匀流动特性是一种非常有效的手段。

关键词 碎石土斜坡; 优先流; 渗流特征; 试验研究

中图分类号: TV139.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2012)02-0057-05

Experimental study on seepage characteristics of preferential flow in the gravel soil slope//SHEN Hui^{1,2}, LUO Xian-qi¹, LI Xian-pin³ (1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 3. Wuhan Surveying-Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Wuhan 430080, China)

Abstract: In order to study the seepage characteristics of gravel soil slope under the action of rainwater, a self-designed model slot is applied to carry out the seepage experiment, taking two different gradations of gravel soils as model materials of the slope. The percolation properties of preferential flow and underground water change under the action of rainwater are simulated in the experiment, which successfully generate shallow pore and deep tunnel net inside the gravel slope. The dye tracing technology combined with image treatment are adopted to analysis the seepage characteristics and causes of the internal macropore low, pipe flow and funnel flow of the gravel slope. Test results show that carrying out laboratory tests to simulate rainfall infiltration and underground water change is an effective approach to disclose the dynamic exchange process of internal and external water of the gravel soil slope and to discuss the non-uniform percolation properties of preferential flow.

Key words: gravel soil slope; preferential flow; seepage characteristic; experimental study

碎石土是一种非连续、非均质的结构性材料, 在我国及世界范围内分布广泛, 尤其在在我国西南砂岩、砂页岩地区分布更为广泛^[1-4]。据统计^[1-2], 三峡水库蓄水后, 由崩塌堆积体和第四系松散堆积体组成且前缘高程低于 175 m 的崩塌体共有 1 190 处, 总面积约为 135.9 km², 约占水库面积的 12.5%, 体积约为 34 亿 m³, 约占总库容的 8.7%, 库区碎石土中碎、砾石最高可达 70%。在国外, 美国阿巴拉契山脉地区分布有大量的崩积层滑坡, 其碎石质量分数在 10% ~ 30%, 美国肯塔基州东部煤田有 77 处露天矿的废土石边坡属于碎石土边坡, 砂砾、漂石均有分布^[5]。近年来, 随着我国大型水电工程、铁路、公路

等项目的建设, 碎石土的研究再次成为焦点。碎石土斜坡主要成因包括坡积、冰积及人工堆积等, 其颗粒组成和结构状态十分复杂, 物理力学性质与均质的岩土体存在较大差别, 有学者基于碎石土细观结构和物理力学性质, 从传统岩土体分类体系中提出“土石混合体”的概念, 对其结构模型、综合性定量化评价指标、力学性能、渗透性能等方面展开研究。

在碎石土结构模型研究方面, Lanaro 等^[6]使用激光扫描技术获得砾石的三维图像, 并利用傅立叶以及几何分析方法获得了砾石块体的具体参数。Yue 等^[7]对数码照片进行灰度处理, 建立了土石混合体的平面几何模型。Lebourg 等^[8]通过数字图像

处理对冰碛物内部块石的形态及结构特征进行定量研究,并运用多维统计分析方法建立冰碛物内摩擦角与块石形态特征参数的关系。李晓等^[9]基于对土石混合体结构特征的野外统计分析,指出其力学性质主要受土体内部结构的控制。油新华^[10]利用随机模拟方法提出了考虑砾石块体空间位置、大小、方位3个随机变量的随机结构模型的自动生成技术。众多学者^[11-13]通过原位剪切、原位水平推剪试验等手段对不同含石量、含水状态的土石混合体的力学性质进行了研究。在渗透性能方面,徐文杰等^[14]基于自主开发的土石混合体细观结构随机生成系统,从土石混合体的含石量、空间分布、粒度组成等细观结构特征出发,运用数值试验方法研究了土石混合体的细观渗流场特征、渗透破坏机理及宏观渗透系数与细观结构的定量关系。周中等^[15]利用自制的常水头渗透仪测定了不同含砾量时土石混合体的渗透系数,研究不同因素对土石混合体渗透系数的影响。徐扬等^[16]通过现场试坑试验方法,研究渗透系数与平均粒径、非均匀度的关系。邱贤德等^[17]试验研究了颗粒质量分数与渗透系数的关系。

优先流最早是由土壤学家针对土壤平衡入渗流而提出的^[18-19]。在岩土工程领域,针对这种非平衡流的研究也早已展开。吴永锋等^[20]通过大量的勘察实践表明,三峡库区大多数滑坡中的地下水具有管道流或脉状流的特征,但在勘察成果中一般概化为层状地下水。黄晏等^[21]通过降雨试验研究发现,在饱和状态下雨水可以迅速补充地下水供给,由于地形、地质条件的原因,降雨结束后裂缝多的地区仍会存在地下径流增大的可能性。尚岳全等^[22]在现场勘察和试验中观察到含碎石黏性土边坡和碎石土边坡中地下水通常具有管网状渗流特性。以上研究均表明斜坡内存在某种能使水分快速运移到土体深部和地下水的优先流路径。

本文通过模拟降雨入渗及地下水变化,研究碎石土斜坡优先流路径形成过程,采用染色示踪及数字图像处理技术观察碎石土斜坡浅部及深层优先流渗流特征。试验结果表明,采用室内模型试验有利于深入研究碎石土斜坡优先流的流动机理,是建立优先流渗流模型的有效手段。

1 试验设计

1.1 试验设备

试验采用自制的室内模型试验系统,主要由模型槽、地下水模拟装置、降雨器、试验数据采集设备等组成。模型槽尺寸为150 cm × 30 cm × 80 cm(长 × 宽 × 高)。地下水模拟装置利用连通器原理设计,水

分从渗流管孔内流出。降雨器采用针头式和孔管喷洒式(管网式)相结合的方式,即在排管上装置医用针头(孔径1 mm,横向间距10 cm,纵向间距6 cm)形成管网针头式降雨装置。试验数据采集设备主要包括测压管、孔隙水压力传感器、集渗管、翻斗式流量计等,模型设计剖面如图1所示。观测项目主要包括优先流渗流特征、孔隙水压力、地表径流、出流泥沙含量等。优先流试验采用染色示踪技术,染色示踪剂选用亚甲基蓝,其在干燥状态下呈古铜色,溶于水稀释后呈蓝色。

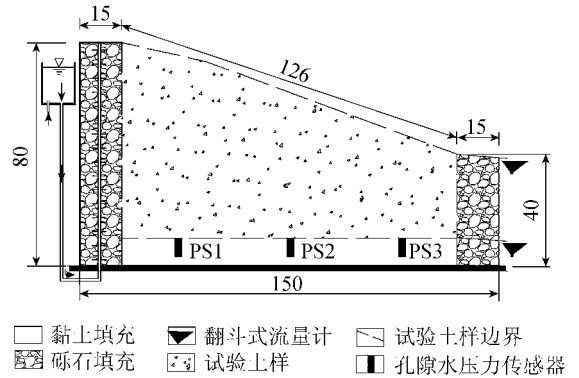


图1 模型设计剖面(单位:cm)

1.2 试验材料

我国 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》及《工程地质手册》对碎石土的定义为粒径大于2 mm的颗粒质量分数超过50%的土。工程上将5 mm作为分界粒径,小于5 mm的颗粒称为细料,大于5 mm的颗粒称为粗料。郭庆国^[23]通过试验发现粗粒质量分数增加到30%~40%后渗透系数增大明显。徐文杰等^[24]通过对云南省虎跳峡龙蟠右岸天然状态下碎石土粒度分布的分形结构分析,将20 mm作为研究尺度内土石混合体的特征值。综合考虑以上研究成果,将粒径大于或等于2 mm,5 mm及20 mm的颗粒质量分数 P_2 、 P_5 、 P_{20} 作为试验材料特征粒径。试验土样有TY1($P_2 = 64%$, $P_5 = 50%$, $P_{20} = 15%$)和TY2($P_2 = 50%$, $P_5 = 30%$, $P_{20} = 10%$)2种。表1为试验土样粒径分布及级配参数,由表1可知,TY1土样3个特征粒径的质量分数均高于TY2土样。

1.3 试验流程

按土样控制干密度分7次制作土样,按照各粒组质量分数称取土样并充分混合。土样分层填筑,每层厚10 cm,水平均匀填土后采用4.5 kg击锤击实,落距45 cm,底板垫木质垫块,同一位置锤击5次,层间接触面用钢刷处理。

为了在常规试验条件下能够较好地观察到碎石土优先流在降雨及地下水作用下的渗流特征,将试验过程分为2个阶段:第1阶段为碎石土斜坡优先

表 1 试验土样粒径分布及级配参数

土样	小于某粒径颗粒的质量分数/%										
	< 40 mm	< 30 mm	< 20 mm	< 10 mm	< 5 mm	< 2 mm	< 1 mm	< 0.5 mm	< 0.25 mm	< 0.1 mm	< 0.074 mm
TY1	100	93	85	63	50	36	21.5	14.4	9.6	6.4	4.8
TY2	100	95	90	82	70	50	29.8	20.0	13.4	8.9	6.6

土样	特征粒径			C_c	C_u	Φ /%
	d_{10} /mm	d_{30} /mm	d_{60} /mm			
TY1	0.25	1.5	8.3	1.08	33.20	8.4
TY2	0.12	1.0	3.1	2.69	25.83	10.0

注： d_{10} , d_{30} , d_{60} 分别为颗粒质量分数占 10%、30%、60%的粒径； C_c 为曲率系数； C_u 为不均匀系数； Φ 为质量含水率。

流路径形成模拟,分为 4 个步骤(表 2);第 2 阶段为染色示踪试验。

表 2 第 1 阶段试验步骤及控制条件

试验步骤	试验内容	降雨强度/ (mm·d ⁻¹)	降雨量/ mm	后缘地下水 水头/cm	试验 历时/h
1	模拟第 1 次 雨水淋滤作用	50	50.0	0	24
		100	50.0	0	12
		200	50.0	0	6
		200	50.0	0	6
		100	25.0	0	6
		50	12.5	0	6
2	模拟 地下水作用	0	0	21.5	36
		0	0	40.0	36
		0	0	60.0	72
		0	0	21.5	72
3	模拟坡面 表层土脱水	0	0	21.5	144
4	模拟第 2 次 雨水淋滤作用	50	50.0	21.5	24
		100	50.0	21.5	12
		200	50.0	21.5	6
		200	50.0	21.5	6
		100	25.0	21.5	6
		200	100.0	21.5	12

试验第 1 阶段的步骤 1 模拟第 1 次雨水淋滤作用,试验时间为 6 d,采用间歇性降雨方式,试验模拟降雨前 3 d 日降雨量均为 50.0 mm,后 3 d 降雨历时均为 6 h,6 d 累积降雨量为 237.5 mm。步骤 2 模拟地下水作用,试验历时 216 h,通过水分水平渗透使坡体内部生成管道网络,水头保持 21.5 cm 直至试验结束。其后进行为期 6 d 的坡面表层土脱水试验(步骤 3),采用 PTC 陶瓷发热管(功率 1100 W)在距坡体表面 30 cm 处每天加热 6 h,待土层表面裂隙形成后再次模拟降雨入渗过程。

第 1 阶段试验结束后待模型自然干燥 6 d 后进行第 2 阶段示踪试验。在降雨器内部及后部水箱(水头 21.5 cm)里添加染色剂,降雨强度为 20 mm/d,降雨历时为 24 h,再次自然干燥 6 d 后观察土样优先流特征。

2 试验结果与分析

2.1 碎石土优先流路径形成

优先流路径的成因和过程非常复杂,植物根系

穿插、动物活动、土壤季节性干湿和冻融交替,地下水的运移波动成为深层土体中形成流动管道的重要成因。针对降雨及地下水变化作用因素,通过优先流路径形成前后孔隙水压力传感器的响应特征对比,结合土体表面、内部径流量及泥沙量,综合判定优先流路径的形成。

图 2 为 TY1 土样初次降雨压力水头响应曲线, TY1 土样降雨开始后降雨传感器反应平缓,试验历时 84 h 后大幅增加,并连续出现 4 个明显峰值,出现峰值的时间间隔逐渐缩短,且峰值逐步减小。TY1 土样粒径大于或等于 2 mm 的粗粒及砾石质量分数均高于 TY2 土样,水流弯曲度随碎石增大而增加,过水断面减小。降雨初期雨水入渗量及渗流速度较小,孔隙内水分连通后,孔隙水压快速增长,随着细颗粒的流失,孔隙内水分快速排出,孔隙水压快速下降。TY2 土样黏粒含量较多,排水能力弱,首个压力水头峰值为 11 cm,随着水分持续入渗,孔隙水压呈台阶形升高,降雨结束后仍保持较高孔隙水压,见图 3。图 3 孔隙水压力传感器 PS1 反应明显滞后于 PS2 和 PS3,主要因为 PS1 上部土层较厚,填土过密实。

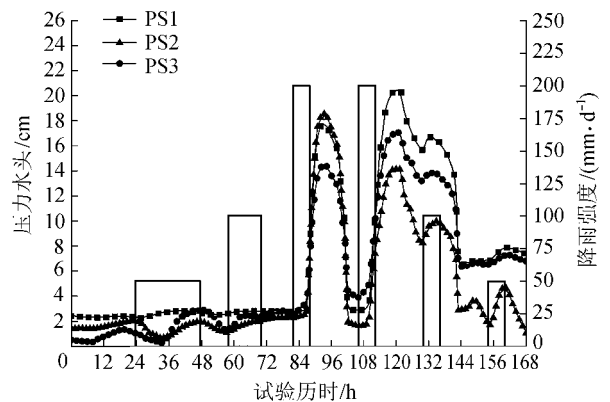


图 2 TY1 土样初次降雨压力水头响应曲线

试验利用模型后部水箱补水,采用逐步提升水头的方式使水分在试验土样内水平渗透,从而在坡体内部生成管道网络。补给水头维持 21.5 cm,历时 36 h,维持水头 40.0 cm,历时 36 h,维持水头 60.0 cm,历时 72 h,最后补给水头回落至 21.5 cm,历时 72 h,

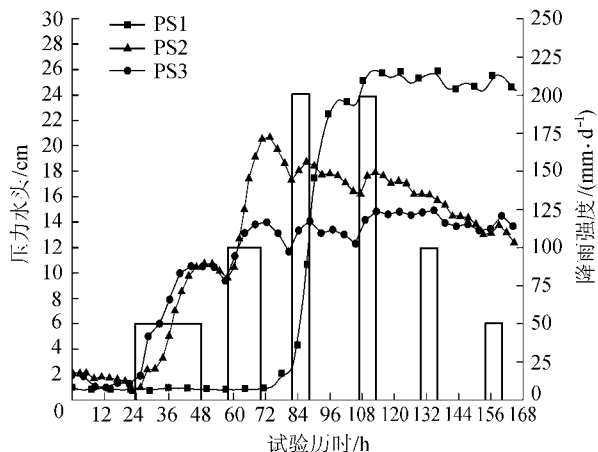


图3 TY2土样初次降雨压力水头响应曲线

见表2。图4为地下水变化时TY2土样压力水头响应曲线,由图4可看出,水平渗透作用使得土样内部孔隙内颗粒被大量带出,水头变化时孔隙水压力响应迅速,当水头回落至21.5cm时,土样内水分同时快速排出,孔隙水压快速下降。图5为TY2土样第2次降雨压力水头响应曲线。对比图3及图5可以看出,TY2土样在经过初次降雨淋滤及地下水的长时间作用后,地表入渗通道及地下管道网络连通。第2次降雨时孔隙水压的响应速度及规律与初次降雨过程相似,水分入渗及排出保持平衡。

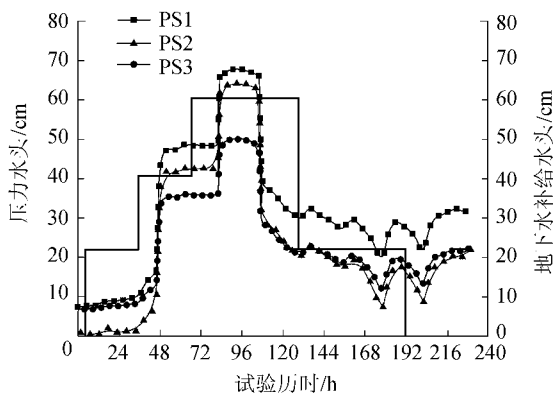


图4 地下水变化时TY2土样压力水头响应曲线

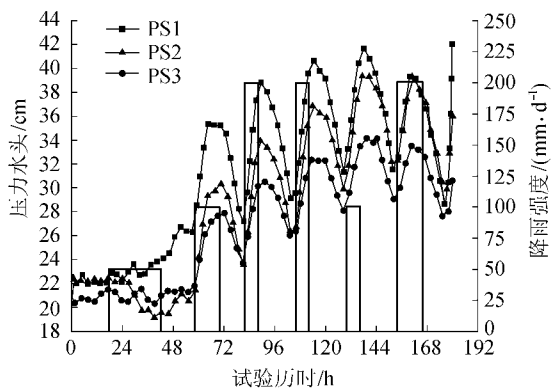


图5 TY2土样第2次降雨压力水头响应曲线

表3为TY1土样初次降雨特性及土体入渗特

性。TY1降雨入渗初期降雨强度为50mm/d,降雨历时为24h,土样表面较干燥。随着降雨强度及历时的增加,土样平均入渗率逐渐增大,而后土样表面逐渐饱和,平均入渗率又出现逐渐减小的趋势。坡体表面受到雨水冲刷,浅部土层受到淋滤侵蚀作用,泥沙被排出坡体外,形成浅部连通孔隙。

表3 TY1土样初次降雨特性及土体入渗特性

降雨强度/ (mm·d ⁻¹)	降雨 历时/h	坡面 径流量/L	入渗 量/L	平均入渗率/ (mm·h ⁻¹)	泥沙量
50	24	2.40	14.10	1.63	少
100	12	6.10	10.40	2.41	多
200	6	7.95	8.55	3.95	极多
200	6	7.45	9.05	4.19	多
100	6	3.15	5.10	2.36	较多
50	6	1.00	3.10	1.44	极少

注 泥沙量通过观察出流水浑浊程度及沉淀情况估算。

TY1及TY2土样模拟地下水作用过程中后箱水头与坡体内部径流量的关系见表4。由表4可以看出,模型后箱水头变化时,TY1土样的坡内径流量远大于TY2土样的径流量。这主要是由于TY1土样孔隙内细颗粒被快速带走后,坡体内部流量基本稳定。同等水头情况下,随着渗透时间的增长,TY1土样坡内径流量有所减小,主要是因为细颗粒在坡底附近富集,堵塞部分通道。TY2土样在补给水头提高后,内部径流量增长四五倍,同时泥沙量也有大幅度增长。由此看出地下水的水平向渗透侵蚀使得坡体内部形成渗流管路,产生优先流路径。

表4 后箱水头与坡体内部径流量的关系

土样	后箱水头/cm	试验历时/h	坡内径流量/L
TY1	21.5	12	58.9
	21.5	24	67.6
	21.5	36	79.5
	40.0	12	45.7
	40.0	24	42.7
	40.0	36	41.3
TY2	21.5	12	1.9
	21.5	24	1.9
	21.5	36	1.4
	40.0	12	8.5
	40.0	24	8.0
	40.0	36	7.6

2.2 碎石土优先流渗流特征

试验采用染色示踪技术,使用高分辨率的CCD相机采集图像,将染色区域与未染色区域图像分割转化成二值图像。图6为TY2土样整体染色特征,土样内部水平方向渗透通道与地表垂直方向渗流通道局部连通,雨水通过地表快速入渗到坡体深部,通过深部水平管道系统在坡体前端快速排出,这与图5中压力水头响应曲线的特征非常吻合。

图7为局部区域染色特征,图中黑色区域代表

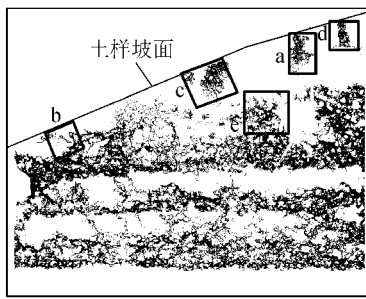


图6 TY2 土样整体染色特征

优先流路径。降雨淋滤作用造成地表出现不同程度的内部侵蚀,由图 7(a)~(c)可知土样表层渗流通道深度及密集程度存在差异;由图 7(d)可知垂直孔隙与水平孔隙相交时,水分会迅速向侧向扩散,如在水平侧向扩散过程中与其他垂直孔隙贯通,则会形成“U”形的连通孔隙,水分越过周边土体,加速入渗到坡体内部;图 7(e)展示了坡体内部染色特征,土样表层以下 20 cm 处呈倒置漏斗状,在漏斗尖处存在大量砾石堆积体,孔隙水沿砾石表面流动,在砾石堆底部富集。富集水分在重力作用下朝土体内部倒置漏斗状处扩散。

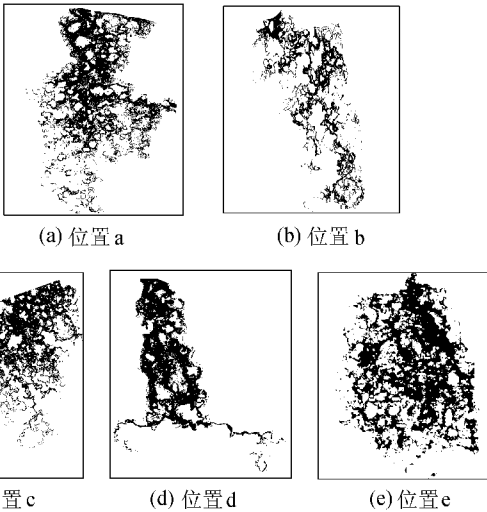


图7 局部区域染色特征

3 结论

a. 在同等降雨强度下,砾石含量高的碎石土过水断面小,降雨初期入渗量及渗流速度较小,随着累计入渗量的增加,地表附近土体逐渐饱和,平均入渗率减小。雨水淋滤作用使得地表及坡体内部细颗粒被带出,易于形成优先流路径。

b. 优先流路径的形成是一个孕育发展、趋于稳定、逐渐破坏的循环过程。整个过程受到生物因素、环境因素特别是降雨因素的影响,使得坡体内部与外界保持着水分动态交换,整体保持平衡状态。地表浅层优先流使大气降水能够快速进入坡体内部,

地下水位大幅度上升,造成坡体稳定性降低,而坡体深层的优先流管道网络使水分能够快速排出,有利于坡体稳定,因而坡体存在着自我平衡调节的功能。

c. 染色示踪试验能够较好地表现碎石土斜坡中优先流的渗流特征,这种可以重复进行的模型试验可以避免野外田间试验土样随机的的问题。因而,对于碎石土斜坡内优先流综合量化描述及判定、斜坡内水分非均匀流动模型等的建立是一种非常有效的手段。

参考文献:

- [1] 廖秋林,李晓,郝钊,等.土石混合体的研究现状及研究展望[J].工程地质学报,2006,14(6):800-807.
- [2] 刘文平,时卫民,孔位学,等.水对三峡库区碎石土的弱化作用[J].岩土力学,2005,26(11):1857-1861.
- [3] 尚彦军,杨志法,廖秋林,等.雅鲁藏布江大拐弯北段地质灾害分布规律及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(4):30-40.
- [4] 许建聪.碎石土滑坡变形解体破坏机理及稳定性研究[D].杭州:浙江大学,2005.
- [5] 徐文杰,胡瑞林,曾如意.水下土石混合体的原位大型水平推剪试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(7):814-818.
- [6] LANARO F, TOLPPANEN P. 3D characterization of coarse aggregate[J]. Engineering Geology, 2002, 65(1):17-30.
- [7] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(5):375-397.
- [8] LEBOURG T, RISS J, PIRARD E. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis[J]. Engineering Geology, 2004, 73(1):37-50.
- [9] 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.
- [10] 油新华.土石混合体的随机结构模型及其应用研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(11):1748.
- [11] 吴硕,李晓,赫建明.土石混合体原位水平推剪试验[J].岩土工程技术,2007,21(4):184-189.
- [12] 李维树,丁秀丽,邵爱清,等.蓄水对三峡库区土石混合体直剪强度参数的弱化程度研究[J].岩土力学,2007,28(7):1338-1342.
- [13] 冯俊德,李建国,汪稔,等.云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试验研究[J].岩土力学,2008,29(12):3205-3210.
- [14] 徐文杰,胡瑞林,岳中崎.土-石混合体随机细观结构生成系统的研发及其细观结构力学数值试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1652-1665.

(下转第 88 页)