

小江流域风化物的水理特征差异规律的实验研究

张继^{1,2}, 韦方强^{2,3}, 于苏俊⁴, 谢贤健⁵

(1. 四川省地质矿产勘查开发局 成都水文地质工程地质队, 四川 成都 610072; 2. 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; 3. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 4. 西南交通大学 环境工程学院, 四川 成都 610031; 5. 内江师范学院, 四川 内江 641112)

摘要: 水理性质是风化土体对降雨过程中入渗水的响应性质, 对泥石流起动有着重要影响。以中国泥石流最为发育的小江流域为研究区, 采集流域上、中、下游 5 个流域, 9 种类型岩石的 19 个风化物样品及 5 个典型泥石流沟的泥石流堆积样品, 通过液塑限及渗透实验获取水理特征参数。选择塑限、塑性指数及渗透系数等 3 个指标构建指标体系, 系统分析了不同岩性各指标的差异规律。结果表明, 对于各项指标, 各岩性风化物均差异显著, 且随指标不同, 其水理特征差异规律显著不同。5 个典型流域泥石流堆积物在各项水理特征指标上均具有较好的一致性。塑限、塑性指数及渗透系数所构建的指标体系能较为客观、系统、合理地反映各风化产物的水理性质, 可为泥石流对岩性的敏感性研究提供帮助。

关键词: 岩性; 风化物; 水理特征; 实验研究; 小江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)06—0020—08

中图分类号: P642.23

Experimental Research on Hydrological Characteristics of Weathered Materials of Rocks in Xiaojiang Basin

ZHANG Ji^{1,2}, WEI Fang-qiang^{2,3}, YU Su-jun⁴, XIE Xian-jian⁵

(1. Chengdu Survey Brigade of Hydro-Geology Survey & Engineering Geology, Sichuan Bureau of Exploration & Development of Geology & Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610072, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu,

Sichuan 610041, China; 3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 5. Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641112, China)

Abstract: As the response characteristics to rainfall infiltration into weathered materials of rocks, hydrological properties have important influences on the initiation of debris flow. In this paper, Xiaojiang basin was taken as the study area to investigate the difference of hydrological properties of weathered materials from different kinds of rocks. 19 samples of weathered materials from 9 kinds of rocks with different elevations and 5 samples of debris flow deposition were collected in 5 debris flow valleys in the upper, middle, and lower reaches of Xiaojiang basin. Liquid and plastic limits and permeation experiments were taken to obtain the hydrological characteristics of each sample. Based on the construction of the index system with three indicators of hydrological characteristics, the variation of hydrological characteristics for each indicator were systematically analyzed. Results indicate that for each indicator, there are significant differences in weathered materials. The variation of its hydrological characteristics is significant for different indicators. In addition, for each indicator, there is the good consistency in hydrological characteristics of debris flow deposits in the 5 typical debris flow valleys of Xiaojiang basin. The index system, can reflect the hydrological properties of weathered materials, systematically, objectively, and reasonably. It may be helpful for the susceptibility analysis of debris flow to rocks based on hydrological characteristics of their weathering products.

Key words: debris flow; weathered materials; hydrological characteristic; experimental research; Xiaojiang basin

水理性质是风化土体对降雨过程中入渗水的响应性质, 反应着土体的结构、构造和孔隙发育程度, 亦

即反应着土体吸附水分下渗和水力作用的性能, 决定着泥石流源地土渗透状况和应力特征的改变性质, 对

泥石流的起动有着重要影响^[1-2]。目前,风化土体水理性质的研究多集中在对渗透规律的研究。王裕宜^[3]通过泥石流饱和土体的侵蚀应力特征和渗透规律的观测实验,探讨了土体渗透性能与泥石流始发雨量的关系。吴积善^[4]等通过蒋家沟多年的渗透实验,对同一类型泥石流沟的泥石流形成的始发雨量与物质条件的关系进行了深入研究,认为纵使在同一类型的泥石流沟中,由于物质条件差异,渗透性能不同,泥石流形成所要求的始发雨量亦不同。陈晓清^[5]通过野外原位渗透实验和室内渗透实验,对宽级配砾石土渗透规律进行了研究,认为宽级配砾石土水渗透具有土体内部侵蚀的特征。而对于不同岩性风化土体的水理性质差异的综合研究却很少。本文选择中国泥石流最发育的小江流域为研究区,通过对该区所出露的各种岩性的风化物的液塑限及渗透实验分析,探讨其水理特征差异规律,以期对泥石流对岩性的敏感性分析提供帮助。

1 研究区概况

小江是金沙江右岸的一级支流,位于云南省东北部,地处横断山东部边缘云贵高原与川西南山地的过渡地带,河谷沿小江深大断裂带发育,地质构造复杂、地震活动频繁、沟谷切割强烈,是我国泥石流发育的典型区域。小江流域面积 3 044.4 km²,干流 141.93 km。该流域现已查明的泥石流沟有 140 条,分布在东川(87 条)、会泽(13 条)和寻甸(40 条)的 19 个乡镇,泥石流沟流域面积 1878.58 km²,占小江流域总面积的 61.73%^[6]。流域内地层从元古代至中生代侏罗纪均有出露,出露岩性主要有 9 种。其中前震旦纪昆阳群板岩、千枚岩主要分布于小江中下游;震旦纪灯影组白云岩、寒武纪灰岩、下二叠纪阳新灰岩主要分布于中游地区;下震旦纪澄江砂岩、下寒武纪泥质页岩及板状页岩、石炭纪夹煤层之砂岩与页岩互层、三叠纪与侏罗纪之砂岩和砂质页岩互层主要分布于小江上游和下游地区;下二叠纪峨眉山玄武岩主要分布于水系的发源地和一些高原面上;第四纪及新生代沉积物主要分布于河谷山坡、山麓和沟口。

2 样品采集与实验分析

2.1 样品采集

结合风化作用类型及岩石风化影响因素分析,确定如下采样原则。(1) 严格排除显示出现代剥蚀堆积迹象的采样地点,保证原岩风化;(2) 相同外部环境不同岩性的风化采样尽可能控制在同一流域;(3) 选择典型流域。

根据岩石风化工程地质分类及常见岩石类型风化习性设计采样方案。(1) 采样地分为 3 类。为地势上相对较高的平坦地区;为坡段非剥蚀堆积区;为地势较低的河谷及阶地区。(2) 采样方式。对 A 类及 B 类采样地进行坑探采样,对 C 类(斜坡段)采样地采用剥槽采样,通过相对野外风化程度确定风化带,对剧风化带土、全风化带土和强风化带土进行混和采样。

遵循以上采样原则及采样方案,于沙湾、大白泥沟、大桥河、蒋家沟及大沟等 5 个流域采集共 24 个样品,其中不同岩性的样品 19 组及泥石流堆积样品 5 组(图 1)。

2.2 实验分析

(1) 塑液限实验。选用用 SYS-76 数显塑液限联合测试仪,对所选试样进行塑液限测试,因塑液限表征细粒土料部分的可塑特性,因流域内风化产物均为粗细颗粒混杂的宽级配砾石土,故而,本研究中对试样进行去除 > 5 mm 土料的处理,调制细粒土料。

(2) 渗透实验。对所采集样品的渗透特性,使用 TST70 型渗透仪进行测试。试样选用去除大于 5 mm 的样品,< 2 mm 的颗粒含量保持原试样颗粒级配,而对 > 5 mm 的土料,依据颗分资料,用 5~2 mm 的土料等量替换。

实验操作依据土工规范^[7],采用如表 1 所示控制条件,将风化土分层填实装样后(结果见表 2),使底盘进水口与水头装置连接,待排水管流出的水无气泡后,关排水管夹,水由下向上进入试样。开动秒表,同时用量筒接取经 t 时间由出水管排除的水量(Q),并记录测压管的水头高度(H)及出水口的水温(T)。重复测试 3 次,求其平均值。实验采用控制条件如下表 1~2 所示。

3 实验结果

根据土工规程公式^[7],塑性指数采用公式(1)、渗透系数采用式(2),计算塑限、塑性指数和渗透系数等水理特征指标,得水理性质试验成果(表 3~6)。

$$I_p = W_L - W_p \quad (1)$$

式中: I_p ——塑性指数; W_L ——液限指数; W_p ——塑限指数。

$$K_T = \frac{QL}{AHT} \quad (2)$$

式中: K_T ——渗透系数(10⁻⁵ cm/s); Q —— t 时间内由出水管排出的水量(ml); H ——水头高度(cm); T ——温度(°C); L ——试样的高度(cm); A ——试样的面积(cm²)。

表 1 渗透实验控制条件

| 实验控制参数 | 测压管面积/cm ² | 试样面积/cm ² | 试样高度/cm | 零点水头/cm | 1 刻度读数距离/cm | 平均水温/ |
|--------|-----------------------|----------------------|---------|---------|-------------|-------|
| 参数值 | 1.6 | 30 | 4 | 118.00 | 0.627 | 13 |

表 2 制样结果

| 试样编号 | 环刀号 | 环刀重 | 环刀体积 | 土重 | 湿密度/ (g·cm ⁻³) | 含水量 | 干密度 | 颗粒比重 | 孔隙比 |
|------|----------------|--------|--------|--------|-------------------------------|------|-------|------|-------|
| S—1 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 185.11 | 1.54 | 9.2 | 1.412 | 2.74 | 0.941 |
| S—2 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 237.03 | 1.98 | 22.7 | 1.611 | 2.74 | 0.700 |
| S—3 | S ₃ | 101.72 | 120.30 | 169.01 | 1.40 | 21.3 | 1.158 | 2.74 | 1.366 |
| S—4 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 254.69 | 2.12 | 5.4 | 2.012 | 2.74 | 0.362 |
| D—1 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 217.74 | 1.82 | 8.0 | 1.681 | 2.74 | 0.630 |
| D—2 | S ₃ | 101.90 | 120.30 | 210.13 | 1.75 | 12.7 | 1.550 | 2.74 | 0.768 |
| D—3 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 186.20 | 1.55 | 8.8 | 1.425 | 2.74 | 0.923 |
| D—4 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 210.71 | 1.76 | 6.8 | 1.645 | 2.74 | 0.666 |
| D—5 | S ₃ | 101.90 | 120.30 | 208.05 | 1.73 | 13.6 | 1.523 | 2.74 | 0.799 |
| D—6 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 223.24 | 1.86 | 4.8 | 1.773 | 2.74 | 0.545 |
| DG—1 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 185.45 | 1.55 | 11.1 | 1.392 | 2.74 | 0.969 |
| DG—2 | S ₃ | 101.72 | 120.30 | 183.12 | 1.52 | 19.9 | 1.270 | 2.74 | 1.158 |
| DG—3 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 206.51 | 1.72 | 10.0 | 1.564 | 2.74 | 0.752 |
| DG—4 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 196.48 | 1.64 | 9.4 | 1.497 | 2.74 | 0.830 |
| DG—5 | S ₃ | 101.90 | 120.30 | 182.96 | 1.52 | 6.2 | 1.432 | 2.74 | 0.913 |
| J—1 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 185.90 | 1.55 | 22.2 | 1.267 | 2.74 | 1.163 |
| J—2 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 240.90 | 2.01 | 10.9 | 1.812 | 2.74 | 0.512 |
| J—3 | S ₃ | 101.90 | 120.30 | 250.08 | 2.08 | 9.4 | 1.900 | 2.74 | 0.442 |
| J—4 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 210.36 | 1.75 | 16.8 | 1.500 | 2.74 | 0.827 |
| J—5 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 219.36 | 1.83 | 14.0 | 1.605 | 2.74 | 0.707 |
| J—6 | S ₃ | 101.72 | 120.30 | 201.14 | 1.67 | 22.5 | 1.365 | 2.74 | 1.007 |
| J—7 | S ₁ | 102.89 | 120.12 | 260.68 | 2.17 | 8.5 | 2.000 | 2.74 | 0.370 |
| B—1 | S ₂ | 104.53 | 119.94 | 264.36 | 2.20 | 6.6 | 2.068 | 2.74 | 0.325 |
| B—2 | S ₃ | 101.90 | 120.30 | 244.67 | 2.03 | 5.6 | 1.926 | 2.74 | 0.423 |

表 3 各岩性风化物塑液限实验结果

| 岩性 | 试样编号 | 圆锥下沉深度/mm | 含水率/% | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 |
|----|------|-----------|-------|------|------|------|
| 灰岩 | S—2 | 17.61 | 47.5 | 42.8 | 31.9 | 11.0 |
| | | 10.67 | 43.3 | | | |
| | | 5.95 | 39.0 | | | |
| | D—2 | 20.41 | 44.4 | 40.3 | 32.4 | 7.9 |
| | | 10.69 | 40.8 | | | |
| | | 8.06 | 38.9 | | | |
| 泥岩 | S—1 | 22.03 | 48.8 | 40.9 | 28.5 | 12.4 |
| | | 13.07 | 43.5 | | | |
| | | 10.15 | 40.8 | | | |
| | J—6 | 24.12 | 55.8 | 44.3 | 29.0 | 15.3 |
| | | 17.72 | 49.8 | | | |
| | | 6.30 | 45.2 | | | |

续表 3

| 岩性 | 试样编号 | 圆锥下沉深度/mm | 含水率/% | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 |
|------------|------|-----------|-------|------|------|------|
| 泥岩 | DG—5 | 20.45 | 23.8 | | | |
| | | 13.07 | 20.2 | 19.5 | 12.4 | 7.1 |
| | | 4.75 | 17.8 | | | |
| 白云岩 | D—5 | 20.57 | 42.1 | | | |
| | | 12.42 | 39.7 | 38.2 | 30.6 | 7.6 |
| | | 8.69 | 36.8 | | | |
| | J—1 | 20.56 | 70.8 | | | |
| | | 15.70 | 64.2 | 56.7 | 34.6 | 22.1 |
| | | 8.30 | 56.5 | | | |
| 玄武岩 | S—3 | 20.63 | 69.4 | | | |
| | | 14.68 | 63.4 | 53.3 | 29.6 | 23.7 |
| | | 8.80 | 53.6 | | | |
| | DG—2 | 17.38 | 51.5 | | | |
| | | 11.78 | 47.6 | 46.6 | 34.8 | 11.8 |
| | | 5.59 | 42.9 | | | |
| 砂岩 | D—1 | 8.65 | 19.9 | | | |
| | | 16.54 | 21.7 | 20.1 | 16.0 | 4.2 |
| | | 10.52 | 20.2 | | | |
| | DG—3 | 20.91 | 31.0 | | | |
| | | 12.13 | 27.2 | 26.6 | 19.0 | 7.6 |
| | | 5.97 | 24.9 | | | |
| 粉砂岩 | D—4 | 21.96 | 32.4 | | | |
| | | 14.29 | 29.1 | 26.6 | 17.7 | 8.9 |
| | | 10.20 | 26.6 | | | |
| | DG—1 | 20.37 | 34.3 | | | |
| | | 12.05 | 30.8 | 29.6 | 21.2 | 8.4 |
| | | 9.26 | 29.1 | | | |
| 第四纪 冲洪积 | J—4 | 19.41 | 41.7 | | | |
| | | 16.42 | 39.6 | 34.9 | 22.7 | 12.3 |
| | | 7.73 | 34.1 | | | |
| | J—5 | 19.92 | 40.7 | | | |
| | | 13.90 | 38.4 | 36.0 | 27.0 | 9.0 |
| | | 6.87 | 33.0 | | | |
| 板岩 | J—3 | 23.83 | 21.9 | | | |
| | | 15.55 | 19.2 | 17.4 | 11.4 | 6.0 |
| | | 9.05 | 17.5 | | | |
| | B—1 | 26.03 | 14.3 | | | |
| | | 14.56 | 13.0 | 12.5 | 9.9 | 2.6 |
| | | 6.82 | 12.2 | | | |
| 千枚岩 | D—3 | 19.96 | 32.3 | | | |
| | | 11.11 | 29.1 | 28.9 | 22.2 | 6.7 |
| | | 7.24 | 27.8 | | | |
| | J—2 | 23.22 | 41.6 | | | |
| | | 18.55 | 40.1 | 36.2 | 27.8 | 8.5 |
| | | 9.05 | 35.6 | | | |

表 4 河谷泥石流堆积塑液限实验结果

| 河谷 | 试样编号 | 圆锥下沉深度/mm | 含水率/% | 液限/% | 塑限/% |
|-----|------|-----------|-------|------|------|
| 大桥河 | D—6 | 27.92 | 18.0 | 15.1 | 11.5 |
| | | 17.89 | 16.7 | | |
| | | 10.69 | 15.2 | | |
| 大沟 | DG—4 | 22.35 | 32.8 | 26.7 | 17.6 |
| | | 16.74 | 30.2 | | |
| | | 8.79 | 26.7 | | |
| 蒋家沟 | J—7 | 25.23 | 25.2 | 19.8 | 13.1 |
| | | 16.75 | 22.3 | | |
| | | 7.13 | 19.1 | | |
| 沙湾 | S—4 | 21.44 | 24.0 | 20.8 | 15.2 |
| | | 11.66 | 21.0 | | |
| | | 5.17 | 18.9 | | |
| 大白泥 | B—2 | 20.56 | 14.6 | 11.3 | 6.3 |
| | | 13.99 | 12.6 | | |
| | | 10.46 | 11.7 | | |

4 水理特征差异规律分析

4.1 指标体系构建

考虑对斜坡稳定性和泥石流起动影响的重要性,同时遵循客观性、系统性及易获取性原则,本文选择以下 3 个水理特征参数作为敏感性分析指标,构建指标体系:

(1) 塑限(W_p)。塑限是土体从半固态稠度过渡到稠塑状态的界限含水量,是随着含水量的增加,土体进入可塑状态的最低下限含水量^[8]。

(2) 塑性指数(I_p)。塑限指数反映了土的可塑性,是在外力作用下土保持揉塑成任意形状而粒间链接不被破坏的性能大小^[8],是泥石流形成中的“搅拌”及其具有絮凝网状结构的泥浆形成难易的有效指示参数。

表 5 各岩性渗透实验成果

| 岩性 | 样号 | 测试次数 | 渗透时间/s | 排水量/ml | 水头变化/cm | 垂直渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 平均渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-----|------|------|--------|--------|---------|---|---|
| 灰岩 | S—2 | 1 | 93 660 | 3.8 | 2.38 | 0.01 | 0.010 |
| | | 2 | 97 236 | 7.8 | 4.89 | 0.01 | |
| | | 3 | 3 600 | 0.3 | 0.19 | 0.01 | |
| | D—2 | 1 | 360 | 38.0 | 23.83 | 16.60 | 12.190 |
| | | 2 | 510 | 38.0 | 23.83 | 11.30 | |
| | | 3 | 1 020 | 55.0 | 34.49 | 8.67 | |
| 泥岩 | S—1 | 1 | 8 280 | 14.6 | 9.15 | 0.25 | 0.493 |
| | | 2 | 13 200 | 50.8 | 31.85 | 0.61 | |
| | | 3 | 12 180 | 48.0 | 30.10 | 0.62 | |
| | DG—5 | 1 | 120 | 49.4 | 30.97 | 64.96 | 59.513 |
| | | 2 | 120 | 44.0 | 27.59 | 56.79 | |
| | | 3 | 120 | 44.0 | 27.59 | 56.79 | |
| | J—6 | 1 | 1 335 | 37.0 | 23.20 | 4.19 | 3.520 |
| | | 2 | 1 575 | 34.0 | 21.32 | 3.23 | |
| | | 3 | 1 575 | 33.0 | 20.69 | 3.13 | |
| 白云岩 | D—5 | 1 | 840 | 44.0 | 27.59 | 8.11 | 6.508 |
| | | 2 | 840 | 32.4 | 20.31 | 5.75 | |
| | | 3 | 960 | 36.0 | 22.57 | 5.66 | |
| | J—1 | 1 | 1 145 | 44.0 | 27.59 | 5.95 | 5.510 |
| | | 2 | 1 740 | 57.6 | 36.12 | 5.37 | |
| | | 3 | 1 440 | 47.8 | 29.97 | 5.21 | |
| 玄武岩 | S—3 | 1 | 60 | 35.2 | 22.07 | 88.40 | 87.800 |
| | | 2 | 60 | 35.0 | 21.95 | 87.50 | |
| | | 3 | 60 | 35.0 | 21.95 | 87.50 | |
| | DG—2 | 1 | 120 | 63.8 | 40.00 | 88.50 | 85.203 |
| | | 2 | 120 | 64.0 | 40.13 | 88.50 | |
| | | 3 | 120 | 58.0 | 36.37 | 78.61 | |

续表 5

| 岩性 | 样号 | 测试次数 | 渗透时间/ s | 排水量/ ml | 水头变化/ cm | 垂直渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 平均渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|------------|------|------|------------|------------|-------------|---|---|
| 砂岩 | D—1 | 1 | 30 | 66.0 | 41.38 | 368.40 | 347.700 |
| | | 2 | 30 | 59.0 | 36.99 | 320.70 | |
| | | 3 | 30 | 64.0 | 40.13 | 354.00 | |
| | DG—3 | 1 | 120 | 74.0 | 46.40 | 213.00 | |
| | | 2 | 60 | 52.0 | 32.60 | 137.80 | |
| | | 3 | 60 | 50.0 | 31.35 | 131.40 | |
| 粉砂岩 | D—4 | 1 | 8 160 | 22.2 | 13.92 | 0.33 | 0.338 |
| | | 2 | 7 680 | 28.4 | 17.81 | 0.46 | |
| | | 3 | 14 520 | 27.0 | 16.93 | 0.23 | |
| | DG—1 | 1 | 1 200 | 61.8 | 38.75 | 8.47 | |
| | | 2 | 1 014 | 41.0 | 25.71 | 6.20 | |
| | | 3 | 1 170 | 42.0 | 26.33 | 5.42 | |
| 第四纪 冲洪积 | J—4 | 1 | 60 | 37.0 | 23.20 | 93.31 | 92.413 |
| | | 2 | 60 | 36.0 | 22.57 | 90.62 | |
| | | 3 | 60 | 37.0 | 23.20 | 93.31 | |
| | J—5 | 1 | 4 920 | 8.2 | 5.14 | 0.23 | |
| | | 2 | 2 940 | 4.8 | 3.01 | 0.22 | |
| | | 3 | 3 780 | 6.4 | 4.01 | 0.23 | |
| 板岩 | J—3 | 1 | 1 335 | 40.0 | 25.08 | 4.58 | 4.067 |
| | | 2 | 1 740 | 44.4 | 27.84 | 3.95 | |
| | | 3 | 1 380 | 33.8 | 21.19 | 3.67 | |
| | B—1 | 1 | 126 | 42.0 | 26.33 | 51.18 | |
| | | 2 | 240 | 47.0 | 29.47 | 30.66 | |
| | | 3 | 150 | 42.0 | 26.33 | 42.99 | |
| 千枚岩 | D—3 | 1 | 60 | 62.0 | 38.87 | 170.50 | 175.500 |
| | | 2 | 60 | 64.0 | 40.13 | 177.00 | |
| | | 3 | 60 | 64.6 | 40.50 | 179.00 | |
| | J—2 | 1 | 915 | 17.0 | 10.66 | 2.66 | |
| | | 2 | 1 740 | 27.8 | 17.43 | 2.35 | |
| | | 3 | 1 440 | 20.0 | 12.54 | 1.99 | |

表 6 河谷泥石流堆积渗透实验数成果

| 河谷 | 样号 | 测试次数 | 渗透时间/ s | 排水量/ ml | 水头变化/ cm | 垂直渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 平均渗透系数/ ($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-----|------|------|------------|------------|-------------|---|---|
| 大桥河 | D—6 | 1 | 60 | 47.0 | 29.47 | 122.60 | 143.367 |
| | | 2 | 60 | 53.0 | 33.23 | 140.80 | |
| | | 3 | 60 | 61.0 | 38.25 | 166.70 | |
| 大沟 | DG—4 | 1 | 60 | 39.0 | 24.45 | 99.20 | 97.080 |
| | | 2 | 60 | 38.0 | 23.83 | 96.02 | |
| | | 3 | 60 | 36.0 | 22.57 | 96.02 | |
| 蒋家沟 | J—7 | 1 | 310 | 65.0 | 40.76 | 35.00 | 30.497 |
| | | 2 | 180 | 40.0 | 25.08 | 33.96 | |
| | | 3 | 180 | 27.6 | 17.31 | 22.53 | |
| 沙湾 | S—4 | 1 | 540 | 12.6 | 7.90 | 3.28 | 3.006 |
| | | 2 | 460 | 9.4 | 5.89 | 2.85 | |
| | | 3 | 720 | 14.6 | 9.15 | 2.88 | |
| 大白泥 | B—2 | 1 | 60 | 28.0 | 17.56 | 68.85 | 65.200 |
| | | 2 | 60 | 27.0 | 16.93 | 65.89 | |
| | | 3 | 60 | 25.0 | 15.68 | 60.86 | |

(3) 渗透系数 (K_T)。渗透系数是反应降雨与地形和地表物质等条件在泥石流形成中的组合关系,渗透系数的变化和泥石流起动密切相关,研究沟道内土体入渗规律和发展趋势,就可以利用渗透系数来对泥石流作出预报^[3]。

4.2 各岩性风化物水理特征差异规律

室内共完成 19 组土样的塑液限实验及渗透实验分析,对表 3 和表 5 分岩性逐一采用平均值法进行整理,即可得出小江流域不同岩性风化物水理特征分布(见表 7)。

(1) 塑限 (W_p) 差异规律。由表 1 可知,小江流域各岩性风化产物的塑限在 10.65%~32.60% 之间变化,除板岩仅为 10.65%,小于河谷泥石流堆积外,其余均大于河谷泥石流堆积。表明最易进入塑性状态的岩石为板岩风化物,其次为砂岩、粉砂岩、泥岩,第四纪冲洪积、千枚岩,最难进入塑性状态的为灰岩、玄武岩及白云岩(图 1)。

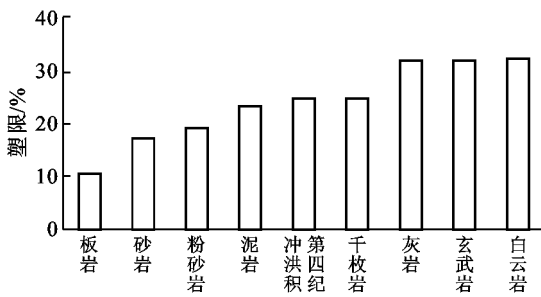


图 1 各岩性塑限排序

(2) 塑性指数 (I_p) 差异规律。小江流域各岩性的塑性指数在 4.30%~17.75% 之间变化。表明岩石风化物在塑性状态区过渡最长的为玄武岩,次为白云岩,再次为泥岩和第四纪冲洪积,过渡范围较小的为灰岩、粉砂岩和千枚岩,最窄的为砂岩和板岩,两者均窄于泥石流堆积的 5.98% (图 2)。

(3) 渗透系数 (K_T) 差异规律。由各岩性风化物渗透系数排序(图 3)可知,小江流域各岩性风化产物的渗透系数在 $3.52 \times 10^{-5} \sim 2.54 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 之间变化。其中渗透性最好的为砂岩风化物,其渗透系数为 $2.54 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,远大于泥石流堆积物的 6.78

$\times 10^{-4} \text{ cm/s}$,次为千枚岩与玄武岩,分别为 8.650×10^{-4} 和 $8.89 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$,且均好于泥石流堆积之渗透性能;第四纪冲洪积、板岩及泥岩的渗透性能较差,最差的为灰岩、白云岩和粉砂岩,换言之,这 3 种岩石风化物在降水渗透时,更易于在风化土层表层形成饱和高渗透压层,导致表层土溜滑。

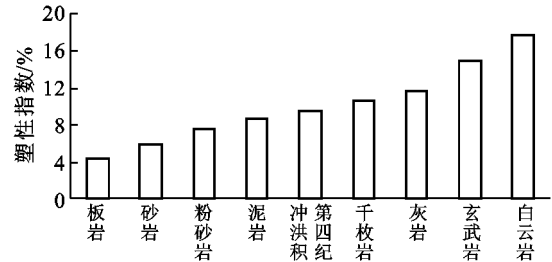


图 2 岩性塑性指数排序

4.3 河谷泥石流堆积水理特征分布规律

室内共完成 5 组泥石流堆积土样的塑液限实验及渗透实验分析,对表 4 和表 6 分岩性逐一采用平均值法进行整理,即可得出小江流域典型泥石流流域泥石流堆积水理特征分布(见表 8)。

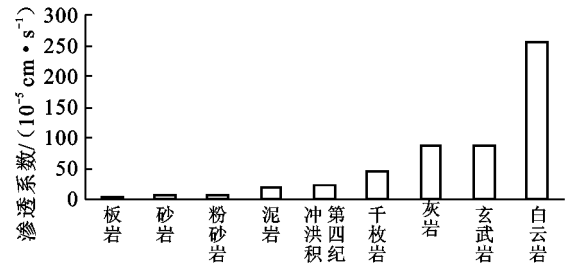


图 3 各岩性渗透系数排序

由表 8 可知,小江流域 5 个典型泥石流流域的塑限变化在 6.30%~17.60% 之间,塑性指数在 3.60%~9.10% 之间变化,渗透系数在 $3.01 \times 10^{-5} \sim 1.43 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 之间变化。三者中塑性指数变化起伏幅度最小,而塑限变化幅度较小,变化幅度最大的为渗透系数。这表明三者中塑性指数一致性最好,塑限一致性次之,渗透系数相对较差,但在渗透系数分布上除了沙湾和大桥有量级差别外,其余沟谷均具有较好的一致性(图 4)。

表 7 小江流域不同岩性风化产物的水理特征

| 岩性 | 灰岩 | 泥岩 | 白云岩 | 玄武岩 | 砂岩 | 粉砂岩 | 第四纪冲洪积 | 板岩 | 千枚岩 |
|--|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| $W_p / \%$ | 32.15 | 23.30 | 32.60 | 32.20 | 17.50 | 19.45 | 24.85 | 10.65 | 25.00 |
| $I_p / \%$ | 9.45 | 11.60 | 14.85 | 17.75 | 5.90 | 8.65 | 10.65 | 4.30 | 7.60 |
| $K_T / (10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 6.10 | 21.18 | 6.01 | 86.50 | 254.22 | 3.52 | 46.32 | 22.84 | 88.92 |

表8 典型泥石流流域泥石流堆积水理特征

| 项目 | 沙湾 | 大桥河 | 蒋家沟 | 大沟 | 大白泥 | 均值 |
|---|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 塑限/% | 15.20 | 11.50 | 13.10 | 17.60 | 6.30 | 12.74 |
| 塑性指数 | 5.50 | 3.60 | 6.80 | 9.10 | 4.90 | 5.98 |
| 渗透系数/($10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 3.01 | 143.37 | 97.08 | 30.50 | 65.20 | 67.83 |

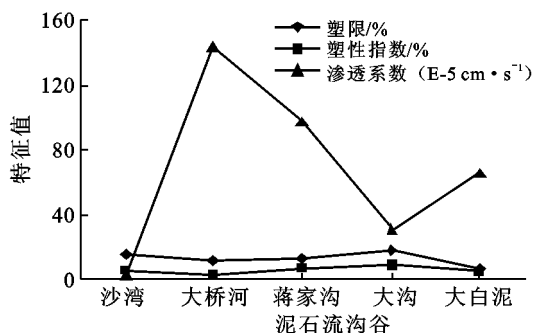


图4 小江流域5典型流域泥石流堆积水理特征分布

5 结论

(1) 小江流域出露岩性在各项水理特征指标上均差异显著,具有很好的区分度;且随指标不同,各岩性风化产物水理特征差异规律显著不同。

(2) 虽然在小江流域的地理位置分布不同,但5个典型流域之泥石流堆积物在各项水理特征指标上均具有较好的一致性,其各项水理特征指标平均值可选用为敏感性欧式距离分析的标准值。

(3) 塑限、塑性指数及渗透系数与泥石流的启动密切相关,能较为客观、系统、合理地反映各风化产物的水理性质,由此3个指标构建的水理特征子系统能为泥石流对岩性的敏感性研究提供可靠的数据支持。

大桥河与沙湾的泥石流堆积在渗透系数上有量级差别,这可能是因本次实验分析泥石流对堆积样品

过少;亦或是受样品采集点局部地形影响,大桥河由于其整治工程影响,样品采集点布置在在岸坡上泥石流堆积出露部位,受后期雨洪冲刷较为强烈,故而其渗透系数偏大。但从以往的泥石流流体渗透分析数据看,小江流域各个子流域泥石流的堆积样品在各个指标上具有较好的一致性,故而扩大样品采集流域,增加样品数量,并综合利用前人资料,则本次实验的不足可望弥补。

[参 考 文 献]

- [1] 王裕宜,邹仁元,刘岫峰. 泥石流启动与渗透系数的相关研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(4):76—82.
- [2] 康志成,马蔼乃. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004:90—93.
- [3] 王裕宜,詹钱登,严碧玉,等. 泥石流流体结构和流变特性[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2001:126—130.
- [4] 吴积善,田连权. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993:85—91.
- [5] 陈晓清. 滑坡转化泥石流起动机理试验研究[D]. 重庆:西南交通大学,2006:67—75.
- [6] 韦方强,刘淑珍,范建容,等. 小江流域生态环境灾害与治理对策[J]. 自然灾害学报,2004,13(4):109—114.
- [7] 水利部. 土工试验规程(SL237—1999)[M]. 北京:水利出版社,1999:120—124.
- [8] 唐大雄,孙懋文. 工程岩土学[M]. 北京:地质出版社,1987:70—74.