

# 三峡库区黄土坡临江滑坡体水岩（土）相互作用机理

江泊洧<sup>1,2,3</sup>, 项伟<sup>1</sup>, 曾雯<sup>1</sup>, JOACHIM Rohn<sup>3</sup>, 姚远<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 3. Department of Applied Geology, University Erlangen-Nuremberg Erlangen 91054, Germany)

**摘要:** 水岩（土）相互作用与滑坡地质灾害的形成密切相关。选取仍处于变形阶段的三峡库区黄土坡临江滑坡体为研究对象, 以从滑坡不同部位采集的8类滑坡不良地质体（包括滑带土、软弱层、软岩等）为研究样本, 追踪测试各样本的矿物类型及含量、化学组分及颗粒级配等指标。经分析, 各类不良地质体之间具有明显的同源性特征, 在水岩（土）相互作用下, 主要滑坡不良地质体的成因及转化过程得以清晰呈现。随后, 另取主滑带附近垂直方向上的岩土体样本为例, 结合试验数据, 深入分析并直观展现了水岩（土）相互作用对岩土体微观结构和力学性能弱化的影响。本研究深入探讨了黄土坡临江滑坡体中的水岩（土）相互作用机理, 研究成果对于了解相似滑坡灾害的形成过程和有针对性制定滑坡防治方案具有重要参考价值。

**关键词:** 三峡库区; 水岩（土）相互作用; 滑坡不良地质体; 黏土矿物; 同源性

**中图分类号:** TU431      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2012)07-1209-08

**作者简介:** 江泊洧(1984-), 男, 湖北赤壁人, 博士, 主要从事岩土体工程性质的数值分析和滑坡机理方面的研究。

E-mail: jiangjw1023@163.com。

## Water-rock (soil) interaction mechanism of Huangtupo riverside landslide in Three Gorges Reservoir

JIANG Ji-wei<sup>1,2,3</sup>, XIANG Wei<sup>1</sup>, ZENG Wen<sup>1</sup>, JOACHIM Rohn<sup>3</sup>, YAO Yuan<sup>1</sup>

(1. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2.

Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute,

Wuhan 430010, China; 3. Department of Applied Geology, University Erlangen-Nuremberg, Erlangen 91054, Germany)

**Abstract:** The water-rock (soil) interaction is closely related to the formation of landslides hazards. Huangtupo riverside landslide, which locates in the district of Three Gorges Reservoir, and is still in the process of intense deformation, is chosen as the research landslide. 8 kinds of unfavorable geologic bodies (including soft rock layer, sliding soil and weak intercalation) are collected from different parts of the landslide, and these samples are employed to track and test the mineral type and content, chemical composition and particle size distribution and other indicators. After analysis, 8 kinds of unfavorable geologic bodies have an obvious homeology; and in the water-rock (soil) interaction, the formation and transformation processes of the main unfavorable geologic elements can be clearly presented. Afterward, based on a number of rock and soil samples collected near the main slip zone along the vertical direction and combined with test data, in-depth analysis and visual display of how the water-rock (soil) interaction affects rock and soil microstructure and weakens the mechanical properties are performed. The water-rock (soil) interaction mechanism of Huangtupo riverside landslide is studied in depth, and it can provide important references for finding out the formation process of similar landslide hazards and preparing landslide prevention programs.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; water-rock (soil) interaction; unfavorable geologic body; clay mineral; homeology

## 0 引言

在地下水活动较为发育的滑坡中, 水岩（土）相互作用将促进对滑坡稳定起控制作用的滑带、软弱带等不良地质体发展<sup>[1]</sup>, 对滑坡灾害发展趋势产生较大影响。沈照理等<sup>[2]</sup>曾提出应当重视对地质体中水岩相

互作用的研究; 徐则民等<sup>[3-4]</sup>根据水-岩（土）物理、化学相互作用研究认为黏土矿物具有润滑效应, 甚至

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC47B0X); 国家自然科学基金资助项目(40972185)

收稿日期: 2011-06-28

可被认为是斜坡破坏的关键因素; SHUZUI 等<sup>[5]</sup>经过研究认为地下水的活动可促进黏土矿物形成、富集, 从而降低土体强度; Wen B P 等<sup>[6-7]</sup>对比研究了滑带土与其周围岩土矿物成分差异及其变化规律, 认为在水的作用下, 富含黏土矿物的滑带及软弱泥化带受其润滑作用极易失稳; 李守定等<sup>[8-9]</sup>认为滑带演化历程为原生软岩-剪切错动带-滑带, 并研究了水土作用与滑带演化的关系; 严春杰等<sup>[10]</sup>研究认为滑带土矿物成分中若水敏感性较强的蒙脱石、蛭石等含量较高将对滑坡产生不良影响; 唐良琴等<sup>[11]</sup>研究了黏土矿物含量对滑带土强度的影响, 认为当黏土矿物含量超过30%便能控制滑带土整体强度。此外, 水-岩化学作用还可对岩体强度造成较大损伤<sup>[12]</sup>。

本文以三峡库区巴东黄土坡临江滑坡体为研究对象, 将滑坡视为一个系统, 从地表露头、滑坡深部试验隧洞以及平硐内等部位有针对性的采集了滑坡体中赋存于相近层位的、可能具有关联的若干滑坡不良地质体样本(主要包括滑带土、软弱带和软岩, 后同), 基于样本的同源性, 研究滑坡体中不良地质体水岩(土)相互作用机理。目前, 通过该技术路线研究滑坡体水岩(土)内在相互作用的文献很少。研究深入探讨了滑坡中水岩(土)相互作用机理, 可为制定该滑坡体及库区相似滑坡灾害的防治方案提供参考。

## 1 黄土坡临江滑坡体地质概况

### 1.1 滑坡概况

临江滑坡体被三道沟分隔为两部分: 靠长江上游部位为临江<sup>#1</sup>滑坡体, 滑坡后缘高程250~290 m, 前缘直抵长江, 高程70~90 m。滑体平均厚度约为69.40 m, 最大厚度95.27 m, 最小厚度31.66 m, 平面面积 $32.50 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 方量约 $2255.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 靠长江下游部分为临江<sup>#2</sup>滑坡体, 滑坡后缘高程210~250 m, 而滑坡前缘高程在50~80 m。滑体平均厚度为61.11 m, 最大厚度91.84 m, 最小厚度35.44 m, 平面面积 $32 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 方量约 $1992 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

滑坡体物质成分以块裂岩为主, 次为散裂岩夹杂黏土, 此外为呈透镜状分布的软弱泥化层以及呈条带状分布的滑带土等, 三者体积比约为6:3:1。滑体前缘较陡, 因滑体结构松散, 历史上曾发生多次崩滑。目前, 临江<sup>#1</sup>滑坡体仍有较强烈变形。

### 1.2 滑坡构造

滑坡体下覆基岩为三叠系中统巴东组第二—三段( $T_2b^{2-3}$ )泥灰岩、泥质灰岩夹灰岩, 表现出软-硬相间岩性特征。同时, 滑坡位于官渡口复向斜核部附近, 受构造挤压和长江河谷下切作用, 剥理发育良好的岩

体在卸荷作用下有向临空面变形的趋势。该灾害体看似大型基岩顺层滑坡, 实际上受构造作用, 浅层岩体结构已基本破坏。据邓清禄<sup>[13]</sup>的研究, 该滑坡变形应当描述为松散岩体沿深层软岩发生的蠕变, 过程大致分为坠覆-滑坡-改造。因此, 笔者认为称之为构造型松散体滑坡较为合适。

## 2 研究样本的采集和选取原则

本文研究滑坡体水-岩(土)相互作用机理是以对滑坡稳定性起控制作用的滑坡不良地质体为研究载体的。将滑坡视为一个系统进行研究时, 必须保证采集的样本能较全面的反映滑坡不良地质体的种类; 同时, 为后续定量分析不同部位主要滑坡不良地质体物质的同源性, 样本应采自相近的地质层位。

据现有钻孔数据及对滑坡周边岩性和构造界线的踏勘, 得出变形较强烈的临江<sup>#1</sup>滑坡体典型地质剖面(如图1底图所示)。据此剖面, 根据层位追踪以及样本表观的相似性, 从地表露头、滑坡深部试验隧洞和平硐内采集了相近层位的滑坡不良地质体样本共计8类, 并在图1中标注了各样本采集部位及其照片。

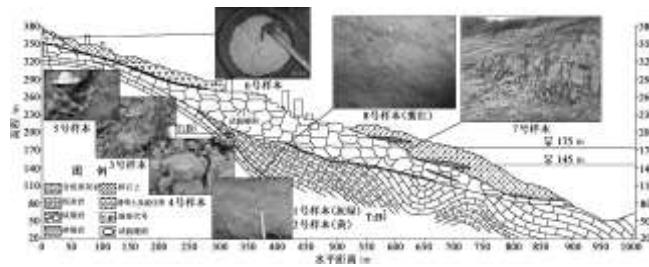


图1 滑坡典型地质剖面、样本采集部位及其照片

Fig. 1 Typical geological section of Huangtupo landslide, collection site of samples and photos

样本描述如下: 样本1, 2采自试验平硐, 其位于滑坡主滑带中, 动力痕迹明显, 灰绿色与黄色滑带土呈现紊流状分布; 样本3, 4采自试验隧洞深部, 分别为饱和状灰绿色软弱泥化带和黄色泥灰岩, 溶蚀作用强烈, 结构松散、泥质含量高; 样本5, 6采自临江<sup>#1</sup>滑坡体后部, 前者为灰绿色泥灰岩软弱层, 含水率高, 铁铲即可采集, 后者为干燥团聚状灰绿色土体; 样本7为前部倾倒状岩体构造裂隙中充填碎石土, 构造裂隙在向斜构造力和长江河谷下切共同作用下形成, 裂隙较宽且延伸性好, 填充物含水率高, 据巴东组地层的特点, 样本7为已剥蚀的上覆巴东组第四段( $T_2b^4$ )紫红色泥质砂岩风化溶蚀产物; 样本8为滑坡主滑带中零散分布的紫红色黏性土, 与样本1, 2基本处于同一部位, 据其性状初步判断与样本7存在关联。

### 3 滑坡不良地质体的同源性分析

文献[8, 9]中提到滑带演化经历原生软岩-剪切错动带-滑带的过程。此过程实质上反映了滑坡物质的同源性转化特征。同源性分析可清晰呈现滑坡不良地质体的成因及转化过程, 是动态分析若干样本间转化机理的必要条件。以下从矿物类型及含量、化学组分及颗粒级配等指标, 分析上节 8 类样本的内在关联。

#### 3.1 样本矿物及化学全组分测试

各样本矿物类型及含量由 X 衍射试验测试。为满足研究需求, X 衍射试验选用两种测试尺度:

(1) 粉晶样 (粒径<0.075 mm): 用于测试样本矿物全组分, 土样碾细直接过 0.075 mm 土工筛获取, 岩样则先用玻璃棒粗略捣碎而后采用橡皮棒仔细碾磨并过筛。

(2) 定向滴片样 (粒径<2 μm): 专门进行黏土矿物成分分析, 依照斯托克斯沉降公式, 经温度与水的黏滞系数校正, 采用虹吸法提取粒径<2 μm 黏粒。为区分部分衍射峰重叠黏土矿物 (如蒙脱石和绿泥石等), 进行甘油蒸汽饱和得到最终测试样本。

X 衍射矿物测试成果见表 1。

表 1 各样本矿物含量 X 衍射测试成果表

Table 1 XRD mineral composition test results for various samples

样品 编号	粒状矿物/%			黏土矿物/%			
	石英	方解石	长石	蒙脱石	绿泥石	伊利石	
1	25	25	2	14	5	29	0
2	25	20	2	18	3	30	2
3	25	30	5	10	6	24	0
4	10	45	5	2	6	28	4
5	25	35	5	4	5	26	0
6	25	30	5	14	4	22	0
7	25	25	0	22	0	25	3
8	25	20	2	25	3	23	2

相同矿物若其成因不同, 化学成分有很大差异, 如钙-蒙脱石和钠-蒙脱石等。为提保证后续分析的严谨性, 对样本进行化学全组分测试是必要的。上述样本的粉晶样化学全组分测试数据如表 2 所示。

#### 3.2 样本矿物及化学全组分的同源性分析

##### (1) 样本同源性线索的判断

根据样本的矿物及化学全组分测试数据, 结合样本颜色以及采样部位, 初步判断存在以下 3 条同源性演化路径:

###### a) 样本 5, 6, 3, 1

从表 1 看出, 样本中黏土矿物含量普遍是很高的, 同时含量波动也是最为明显的。文献[3, 4]中提到黏土矿物对斜坡破坏的关键作用, 且黏土矿物类型也具有重要的指示性。

图 2 为样本 5, 6, 3, 1 黏粒的 XRD 图谱。从图中衍射峰分布看出, 这 4 个样本黏土矿物种类高度相似, 主要成分黏土矿物为伊利石, 结合图 1 来看, 滑

面附近的样本, 空间上从上至下 (样本 5→3→1) 黏土矿物含量逐步增加, 蒙脱石含量上升显著, 方解石含量逐步下降, 其余矿物含量较为稳定; 此外据样本性状, 与 5 号样相比, 6 号风化程度更高, 结构完整性明显较差。

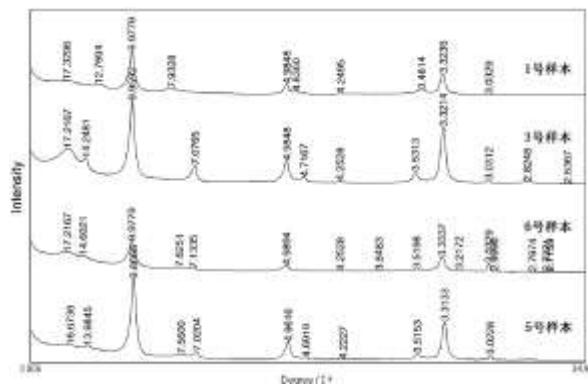


Fig. 2 Clay particle XRD spectra for samples No. 5, 6, 3 and 1

##### b) 样本 4, 2

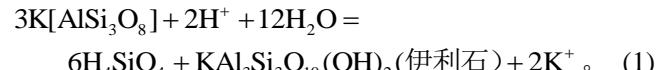
样本 4, 2 的黏土矿物种类也是完全一致, 处于空间分布下方的 2 号样本黏土矿物总含量较 4 号样本高约 10%, 特别是蒙脱石含量提升显著, 此外, 2 号样本的方解石含量显著低于 4 号样本。

##### c) 样本 7, 8

样本 7, 8 与的关系比上述 2 条简单和直接。样本 7 已经是  $T_2b^4$  紫红色泥质砂岩风化作用较为完全的产物, 而根据对滑坡平硐内岩体结构的调查, 图 1 中 7 号样本赋存的那一组与岩层近垂直关系的深大卸荷裂隙一直延伸到滑面, 样本 7, 8 矿物及化学组分的高度相似直接反映出土体沿裂隙面向深部迁移的作用。

##### (2) 基于同源性分析黏土矿物水岩(土)作用

所有样本中, 伊利石均占据黏土矿物最主要成分。据文献[14], 伊利石  $[K_{2-x}Al_4(Al_{2-x}Si_{6+x}O_{20})(OH)_4]$  是弱碱性环境和干燥气候条件下, 由钾长石在强物理风化和弱淋滤作用下风化而成, 是一种较稳定的矿物, 风化程度比较低。反应式为



该过程应在官渡口向斜形成和长江河谷下切过程中完成。泥灰岩及钙质泥岩作为相对隔水层, 早期斜坡体淋滤作用和渗透性较弱, 为式(1)反应创造了条件。

在对中国地质大学(武汉)巴东野外试验场 1 号临江崩滑体 17 个钻孔进行的压水试验发现, 仅有 5 个钻孔起压, 表明该滑坡体具有很强的透水性。在这种地下水活动剧烈的环境下, 黏土矿物类型及含量对

于滑坡稳定具有控制作用。

研究区地下水 pH 为 8.05~8.5, 呈弱碱性。根据目

表 2 各样本化学全量测试成果表 (百分含量)

Table 2 Chemical composition test results for various samples (percentage content)

样本编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	H <sup>2</sup> O <sup>-</sup>	烧失量
1	44.84	11.04	3.90	1.69	16.34	0.12	2.60	0.51	0.12	0.06	1.38	17.41
2	50.52	12.20	5.54	1.22	11.06	0.07	3.31	0.67	0.19	0.03	1.52	13.68
3	36.30	11.69	3.55	2.19	20.83	0.07	2.97	0.48	0.10	0.04	1.22	20.56
4	24.45	8.67	8.19	1.17	27.90	0.07	2.36	0.04	0.09	0.13	0.97	25.97
5	43.81	9.53	3.15	1.78	19.86	0.45	2.23	0.50	0.11	0.03	0.42	18.13
6	35.47	8.15	2.83	1.40	25.41	0.21	1.69	0.43	0.08	0.03	0.91	23.39
7	40.80	16.43	6.59	3.00	11.89	0.09	2.75	0.61	0.08	0.06	4.17	13.53
8	37.78	19.61	7.05	2.21	10.42	0.1	2.88	0.67	0.11	0.04	1.99	17.14

表 3 分析黏土矿物演化或迁移所需的数据

Table 3 Available data for analyzing migration and evolution of clay minerals

编号	蒙+绿+高 /%	伊利石 /%	(蒙+绿+高) /伊	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	K <sub>2</sub> O /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /K <sub>2</sub> O	方解石中 CaO 当量 /%	CaO /%
1	19	29	0.66	11.04	2.6	4.25	10	16.34
2	21	30	0.70	12.2	3.31	3.69	8	11.06
3	16	24	0.67	11.69	2.97	3.94	14	20.83
4	12	28	0.43	8.67	2.36	3.67	18	27.9
5	9	26	0.35	9.53	2.23	4.27	14	19.86
6	18	22	0.82	8.15	1.69	4.82	14	25.41

\*注: “蒙+绿+高”为蒙脱石、绿泥石和高岭石含量之和。

前的研究现状, 伊利石矿物在此环境中发生演化, 主要有两种观点: ①在弱碱性水的长期作用下, 伊利石结构逐渐蜕变, 形成膨胀层, 脱 K<sup>+</sup>向蒙脱石方向转变<sup>[16]</sup> (简称脱 K<sup>+</sup>型); ②受伊蒙混层及阳离子交换吸附作用影响, 在 HCO<sub>3</sub>—Ca 型地下水环境中, 交换能力更强的 Ca<sup>2+</sup>交换出混层矿物层间的 K<sup>+</sup>, 使伊利石向蒙脱石转化<sup>[9]</sup> (简称交换型)。两种观点的最终结果都是黏土矿物中 K<sup>+</sup>下降, 但不同在于黏土矿物中吸附的 Ca<sup>2+</sup>是否变化。而若是滑体中黏土矿物以迁移作用为主, 则不同部位样本各离子含量的动态变化将错综复杂。

为较定量地分析黏土矿物的活动趋势, 从表 1, 2 中选择部分数据处理后进行分析。根据黏土矿物化学成分来看, K 主要源自伊利石 (含伊-蒙混层), 而 Al 是黏土矿物普遍含有的主要金属元素。因此, 对本文研究样本, 若是黏土矿物发生演化, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O 的变化趋势可较好反映伊利石含量的变化趋势。同时, 方解石中 CaO 当量与 CaO 总含量之间的关系可判断黏土矿物中阳离子是否发生明显交换吸附。长石化学组成复杂多变, 但所有样本中其含量均小于 5%, 因此本处不考虑长石的影响。具体数据见表 3。

按照前文所述将样本 5, 6, 3, 1 (A 组) 和样本 4, 2 (B 组) 分别编组分析 (样本 7, 8 明显表现为物

质运移, 不再赘述)。A 组中, 首先看样本 5, 6, 这两个样本均采自临江滑坡体后部, 渗透性较低, 地下水作用较弱。对于 5→6 过程, 蒙脱石含量显著提升, 伊利石含量下降较明显, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O 值变大, 变量关系符合伊利石→蒙脱石的演化; 同时, 根据方解石中 CaO 当量和样本总 CaO 的关系分析发现, 黏土矿物中的 CaO 提升较多 (来源于地下水中的 Ca<sup>2+</sup>), 表明阳离子交换较活跃, 黏土矿物主要呈交换型方式演化。

样本 3, 1 位于滑坡体主滑带附近, 地下水作用剧烈。对于 5→3→1 过程, 黏土矿物含量逐步提高, 其中蒙脱石含量由约 4% 提高到约 14%, 伊利石含量呈小幅波动, “Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>O”值与“(蒙+绿+高)/伊”值关系紊乱, 表明黏土矿物应以迁移、富集作用为主; 且因地下水作用剧烈, CaO 总量呈下降趋势, 地下水自身 K<sup>+</sup>含量较高, 以上条件均不利于伊利石发生交换型演化, 方解石中 CaO 和样本 CaO 总含量变化速率接近进行了应验。

综上, 5→6 过程偏重黏土矿物交换型演化; 5→3→1 过程表明黏土矿物应以迁移、富集作用为主, 其牵涉到对滑坡发展其控制作用的不良地质单元, 是重点关注的研究线索。样本 4→2 的过程与 5→3→1 过程可用类似方式分析, 不再赘述。

### 3.3 从颗粒级配分析样本的同源性特征

滑带土以及具有明显剪切作用痕迹的软弱泥化带, 其颗粒级配不仅表征了不同部位滑坡动力作用的强弱(具体指滑坡体在变形调整过程中, 源于自重等形成的总动力, 在克服滑动阻力后剩余的滑坡动力), 对于这种动力成因的特殊地质体, 其颗粒级配也应当保留有源头物质的部分特征, 值得深入研究。

基于前文同源性分析的结论, 选择主滑带土(样本1, 2混合体)、灰绿色软弱泥化带(样本3)和灰绿色泥灰岩软弱层(样本5)进行颗粒级配分析。它们还分别代表着空间上处于上、中、下位置的不良地质体的颗粒级配情况。

鉴于样本中粗粒成分较多, 为尽量避免人为因素的影响并准确反映样本颗粒分布, 主滑带土和灰绿色软弱泥化带分别称取20.3 kg和12.8 kg进行测试; 样本5为泥化软弱岩, 称取1.3 kg样本泡水后采用水筛进行分析, 颗粒级配曲线见图3。

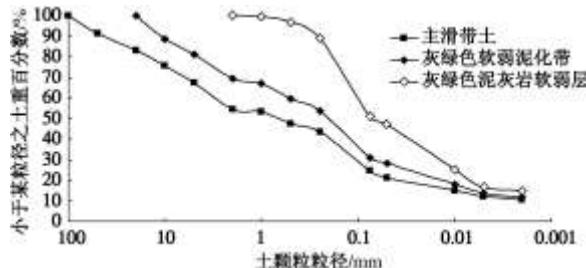


图3 研究样本颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves of samples

据图3分析得出以下结论:

(1) 从上往下滑带物质粗颗粒含量显著提升, 中下部动力改造作用更为强烈, 掺杂了较多碎块石物质。

(2) 能够明显看出, 对于中下部的主滑带土和灰绿色软弱泥化带, 粒径2 mm具有明显的土-石阈值特征, 1~2 mm的组分很少, 对比灰绿色泥灰岩软弱带的级配曲线不难发现, 灰绿色泥灰岩中颗粒粒径均小于2 mm, 且小于1 mm占据99.42%, 这一点, 3类样本是较为一致的, 说明2 mm粒径以下颗粒才是源于原岩的颗粒物质。图4特别绘制了3类样本2 mm粒径以下颗粒的级配曲线, 更加明显的看出样本5→3→1在颗粒级配特征上的共性特征, 特别是中下部的主滑带土和灰绿色软弱泥化带, 因为风化都较为彻底, 且同样遭受了前文提到的较为强烈的水岩(土)相互作用, 矿物成分愈发相近, 其2 mm以下颗粒级配曲线吻合较好。

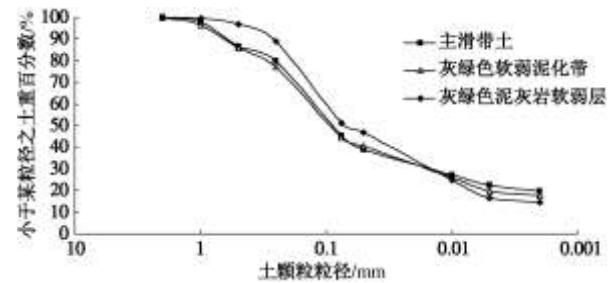


图4 研究样本粒径2 mm以下部分颗粒的级配曲线

Fig. 4 Particle size distribution curves of samples (for particle size less than 2 mm only)

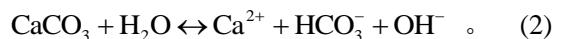
(3) 主滑带土、灰绿色软弱泥化带以及灰绿色泥灰岩软弱层中黏粒( $<2 \mu\text{m}$ )含量占粒径0.075 mm以下颗粒比例分别为43.6%、37.5%和28.9%, 与前文X衍射测试结果分析得到的黏土矿物含量较为一致, 也从直观上验证了样本5→3→1这条同源性线索下, 黏土矿物含量从上向下是依次明显递增的, 黏土矿物向下迁移、富集作用明显。

通过本节分析认为, 在黄土坡滑坡临江滑坡体中, 主要不良地质体空间上不同部位遭受了水岩(土)相互作用, 特别是黏土矿物迁移、富集作用较为活跃, 并从研究样本矿物类型及含量、化学全组分特征以及颗粒级配特性等方面推导了样本间的同源性特征。

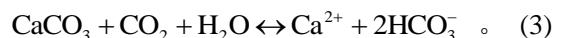
## 4 滑坡水岩(土)作用机理分析

### 4.1 地下水对岩体结构的影响

根据对主滑带附近地下水水质的分析来看, 水中主要阳离子为 $\text{Ca}^{2+}$  75.2%、 $\text{K}^{+}$  18.2%; 主要阴离子为 $\text{HCO}_3^-$  60.3%、 $\text{SO}_4^{2-}$  27.9%, 水分类属水 $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Ca}$ 型, 其中含侵蚀型 $\text{CO}_2$ , 水体总矿化度349.4 mg/L。表1典型测试土样中, 碳酸钙的含量为20%~45%, 据文献[15], 碳酸钙含量较高的黏土中, 其pH值由碳酸钙的水解决定,



同时, 据文宝萍等<sup>[6]</sup>对该滑坡地下水溶液的研究发现, 地下水中 $\text{Ca}^{2+}$ 尚未达到饱和状态。则在侵蚀型 $\text{CO}_2$ 和地下水缓慢径流下, 可对巴东组第三段泥灰岩、钙质泥岩产生较强溶蚀:



式(2)、(3)分别反映了排水条件相对通畅和不通畅环境下滑体中碳酸钙的化学变化过程。在岩体贯通裂隙、滑带附近存在较为通畅的地下水通道, 以式

(2)正反应为主; 滑带上部附近岩体为巴东组第三段泥灰岩、钙质泥岩, 黏粒含量较高, 为相对隔水单元, 水岩作用充分, 以式(3)正反应为主, 若地下水流通遇阻, 局部 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度上升, 式(3)将发生逆反应。

据图5, 初始阶段, 黄色泥灰岩中填充的方解石晶脉结构完整、致密, 泥灰岩颗粒结构较为紧密; 据

图 6 (a), 作为相对透水界面的方解石晶脉与泥灰岩界面处, 原生结晶良好的方解石已完全溶蚀, 晶脉中部的原生方解石晶体也遭受了较强溶蚀, 基本形成贯通裂隙面, 已成为岩体中的渗透通道 (反应机理主要为式 2 正反应); 原晶脉与泥灰岩界面附近被新结晶析出的  $\text{CaCO}_3$  附着 (图 6 (b)), 作用机理为高浓度地下水析出所致 (化学机理为式 (2)、(3) 逆反应), 同时, 泥灰岩中颗粒水岩作用充分, 结构变得松散 (反应机理主要为式 (3) 正反应), 胶结度明显下降; 岩体经进一步溶蚀, 呈现出图 6 (c) 所示结构, 原晶脉中部方解石晶体被溶蚀掏空, 泥灰岩中也形成了明显的溶蚀孔洞 (图中黑点)。

以上现象的动态作用机理可概化为管道中水的层流模型进行解释。微裂隙两侧泥灰岩为相对隔水层, 其附近水流速度为零, 地下水中富含  $\text{Ca}^{2+}$  及  $\text{HCO}_3^-$ , 若流速小于一定值, 同时加上泥灰岩中缓慢渗出的高浓度溶蚀液的不断补给, 式 (2)、(3) 发生逆反应使  $\text{CaCO}_3$  析出; 中间部位流速超过一定值, 溶蚀作用占主导, 方解石被溶蚀 (图 7)。



图 5 黄色弱溶蚀泥灰岩及岩体中方解石晶脉构造(80X)

Fig. 5 Samples of yellow weak corrosion marl and calcite crystal vein conformation in rock mass (80X)

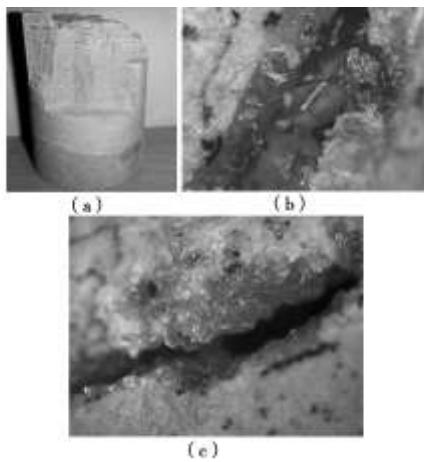


图 6 样本 4 及微裂隙中的方解石晶脉(80X)

Fig. 6 Sample No. 4 and calcite crystal in micro-fracture (80X)

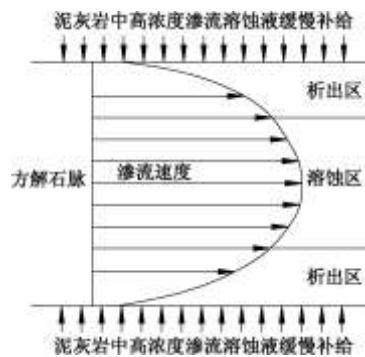


图 7 方解石脉中水岩作用示意图

Fig. 7 Sketch map of water-rock interaction in calcite vein

以上水岩作用对滑坡稳定性的影响极为不利。图 8 所示为样本 4 扫描电镜图。在图 8 (a) (600 倍率) 中, 很明显, 上部泥灰岩遭受了强烈溶蚀, 孔隙密布, 岩体骨架松散 (机理为式 (3) 正反应); 下部为沿界面析出的碳酸钙 (机理为式 (2)、(3) 逆反应)。图 8 (b) (5000 倍率) 为强烈水岩作用后泥灰岩的结构特性, 部分孔洞已溶蚀殆尽, 方解石晶体呈悬空状排列, 其与黏土矿物的胶结程度基本丧失。

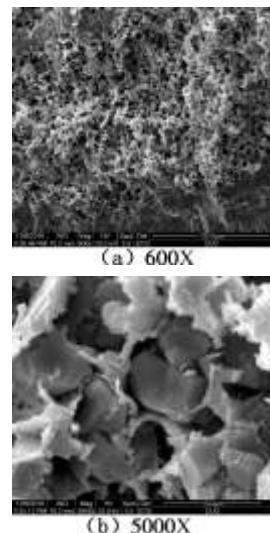


图 8 样本 4 扫描电镜图

Fig. 8 SEM pictures for sample No. 4

岩土力学性能的改变是研究滑坡灾害直接关心的问题, 特选取主滑带附近层位垂直方向上的 4 类岩土体样本: 弱溶蚀泥灰岩 (样本 4 的原岩, 采自试验隧洞, 如图 5)、强溶蚀泥灰岩 (样本 4)、黄色泥化带 (图 9, 采自试验隧洞, 采样高程较样本 4 稍低) 以及采自下部试验平硐的黄色主滑带土 (样本 2)。对其进行了基本物理性质测试、波速测试以及单轴抗压强度测试 (如表 4 所示)。

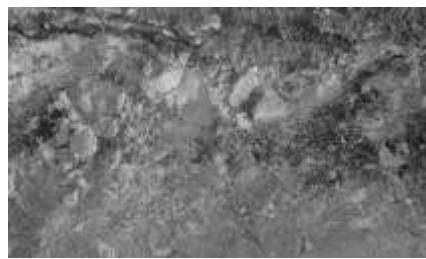


图9 黄色泥化带赋存实际状态

Fig. 9 Actual occurrence state of yellow argillation soil

表4 相关测试样本的物理力学指标

Table 4 Physical and mechanical properties of samples

样本名称	干密度 (g cm <sup>-3</sup> )	饱和密度 (g cm <sup>-3</sup> )	波速 (m s <sup>-1</sup> )	单轴 抗压 /MPa
弱溶蚀泥灰岩	2.47	—	3913(干燥)	50.37
强溶蚀泥灰岩	2.05	—	1900(干燥)	9.68
黄色泥化带	1.68	2.02	1167(天然)	—
黄色主滑带土	1.99	2.30	—	—

据表4数据分析, 滑带上部附近黄色泥灰岩受水岩作用, 其密度由2.47 g/cm<sup>3</sup>衰减至泥化状态(图9)的约1.68 g/cm<sup>3</sup>左右, 密度损失约30%; 单轴抗压强度劣化80%左右, 波速的大幅降低也表明了岩体内部结构胶结程度逐步向松散蜕变。图10为黄色泥化带扫描电镜图, 对比图8(b)可知, 泥化带空隙中基本无完整的方解石晶体, 同时, 黏土矿物结构经一定程度动力改造, 变得相对密实。至此, 巴东组第三段( $T_2b^3$ )黄色泥灰岩经过水岩(土)相互作用逐步转化为泥化软弱带, 后续泥化带受动力改造作用, 土体被继续压实并掺入碎石演化为滑带土。

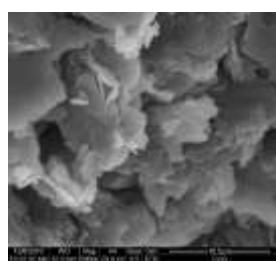


图10 黄色泥化带扫描电镜图(5000X)

Fig. 10 SEM picture of yellow argillation soil (5000X)

#### 4.2 水岩(土)作用下黏土矿物对滑坡体的影响

前文中, 地下水对岩体结构的影响, 一方面破坏了岩体结构、降低了岩体力学强度; 另一方面, 在溶蚀了大量方解石晶体后, 导致黏土矿物含量的相对提高, 更为通畅的地下水流通路径也加剧了第3节同源性分析中各种样本间, 黏土矿物的迁移和富集作用。据唐良琴等<sup>[11]</sup>, 当黏粒(文中指颗粒粒径<5  $\mu\text{m}$ , 不同行业规范有所区别)含量达到30%便能完全控制土的整体强度。照此标准, 本研究中主滑带土、灰绿色软弱泥化带和图9所示黄色泥化带中, 黏粒占土体总质量分别为12.18%, 13.60%和24.10%。

对于黄色泥化带, 其强度几乎完全受黏土矿物控制。据文献[17, 18]的研究, 在粗颗粒(土-石)阀值以上, 本文粗颗粒应为2 mm)含量30%左右的土石混合体中, 对于这种特殊土体系而言细组构(土)能基本反映混合体的强度特性, 特别是级配不良的土体单元。

据图3, 灰绿色软弱泥化带中粗颗粒约为30.4%, 其强度特性受控于细组构(粒径<1 mm); 主滑带土粗颗粒比率为45.5%, 但根据采样部位及颗粒分析测试的实际情况, 少数2~3块大粒径块石作为“悬石”存在于滑带中, 占据了颗粒分析总质量的12%以上(约2.5 kg), 其对滑带土整体强度的控制是很有限的, 实际有效的粗颗粒比率应为35%左右, 其强度特性也主要受控于细组构。

在细组构(粒径<1 mm)中, 计算出主滑带土、灰绿色软弱泥化带中黏粒含量分别为20.2%和17.4%, 且由表1知, 对强度影响最大的伊利石和蒙脱石含量很高, 这对于斜坡发展趋势的控制作用将不容忽略。

对于这种滑带层位附近黏土矿物以迁移、富集为主的现象, SHUZUI<sup>[5]</sup>的研究指出: 滑带历史变形越大, 黏土矿物含量越高。据此并结合前文水岩(土)耦合作用对滑坡造成影响的分析, 滑坡体前部不良地质体中黏土矿物显著高于后部这种现象使得滑坡体前部存在更大的失稳风险, 须重点监测。

## 5 结 论

(1) 基于矿物成分、化学成分和颗粒级配等方面对样本的同源性分析, 搜寻到了主要不良地质体在滑坡中形成-发展-演化的路径, 清晰展现了黄土坡临江滑坡体中主要不良地质体的形成和发展的3条线索。

(2) 水岩相互作用主要表现在地下水对含钙质岩体的强烈溶蚀作用, 重点以黄色泥灰岩为例, 将整个溶蚀发展过程分为4步, 分析了水岩作用对岩体结构影响的内在机理, 并定量化了溶蚀作用下, 不同阶段岩土体物理力学性质的劣化趋势。

(3) 水岩(土)相互作用加剧了不良地质体中黏土矿物的迁移、富集。滑坡前部不良地质体中黏土矿物含量较高, 对于滑坡的控制作用不容忽略。

本文研究滑坡体水-岩(土)相互作用机理是以对滑坡稳定性起控制作用的滑坡不良地质体为研究载体的。研究成果对于根据监测资料合理分析滑坡变形特性和有针对性的展开灾害防治工作具有一定的工程参考价值。

## 参考文献:

- [1] 王恭先, 徐峻岭, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007. (WANG Gong-xian, XU Jun-ling, LIU Guang-dai, et al. Landslidology and landslide control technique[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007. (in Chinese))
- [2] 沈照理, 王焰新. 水-岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2002, 27(2): 127-133. (SHEN Zhao-li, WANG Yan-xin. Review and outlook of water-rock interaction studies[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 127-133. (in Chinese))
- [3] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 黏土矿物与斜坡失稳[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. (in Chinese))
- [4] 徐则民, 黄润秋, 范柱国. 滑坡灾害孕育—激发过程中的水-岩相互作用[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(1): 1-9. (XU Ze-min, HUANG Run-qiu, FAN Zhu-guo. Water-rock interaction in process of landslide preparing and triggering[J]. Journal of natural disasters, 2005, 14(1): 1-9. (in Chinese))
- [5] SHUZUI H. Process of slip-surface development and formation of slip-surface clay in landslides in Tertiary volcanic rocks, Japan[J]. Engineering Geology, 2001, 61(4): 199-219.
- [6] 文宝萍, 陈海洋. 矿物成分、特征地球化学组分对水在滑带形成中作用的指示意义: 以三峡库区大型滑坡为例[J]. 地学前缘, 2007, 14(6): 98-106. (WEN Bao-ping, CHEN Hai-ying. Mineral compositions and elements concentrations as indicators for the role of groundwater in the development of landslide slip zones: a case study of large-scale landslides in the Three Gorges area in China[J]. Earth Science Frontier, 2007, 14(6): 98-106. (in Chinese))
- [7] WEN B P, AYDIN A. Mechanism of a rainfall-induced slide-debris flow: constraints from microstructure of its slip zone[J]. Engineering Geology, 2005, 78(1/2): 69-88.
- [8] 李守定, 李晓, 吴疆, 等. 大型基岩顺层滑坡滑带形成演化过程与模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2373-2480. (LI Shou-ding, LI Xiao, WU Jiang, et al. Evolution process and pattern of sliding zone in large consequent bedding rock landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2373-2480. (in Chinese))
- [9] 李守定, 李晓, 张年学, 等. 三峡库区宝塔滑坡泥化夹层泥化过程的水岩作用[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1841-1846. (LI Shou-ding, LI Xiao, ZHANG Nian-xue, et al. Water-rock interaction of clay gouged intercalation sludging process of baota landslides in Three Gorges reservoir area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1841-1846. (in Chinese))
- [10] 严春杰, 唐辉明, 陈洁渝, 等. 三峡库区典型滑坡滑带土微结构和物质组分研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊): 23-26. (YAN Chun-jie, TANG Hui-ming, CHEN Jie-yu, et al. Studies of soil in microstructures and compositions slipping zone in reservoir district of Three Gorges Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S): 23-26. (in Chinese))
- [11] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱夹层黏粒含量与抗剪强度参数的关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 56-60. (TANG Liang-qin, NIE De-xin, REN Guang-ming. The relational analysis between the clay grain content and strength characteristics of weak intercalated layer[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(2): 56-60. (in Chinese))
- [12] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302. (LIU Xin-rong, FU Yan, WANG Yong-xin, et al. Deterioration rules of shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298-1302. (in Chinese))
- [13] 邓清禄. 斜坡变形构造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000. (DENG Qing-lu. Slope deformation structure[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2000. (in Chinese))
- [14] 隆浩, 王晨华, 刘勇平, 等. 黏土矿物在过去环境变化研究中的应用[J]. 盐湖研究, 2007, 15(2): 21-26. (LONG Hao, WANG Chen-hua, LIU Yong-ping, et al. Application of clay minerals in paleoenvironment research[J]. Journal of Saltlake Research, 2007, 15(2): 21-26. (in Chinese))
- [15] 熊毅, 许冀泉. 中国土壤中黏粒矿物的分布规律[J]. 土壤学报, 1964, 12(3): 266-274. (HSEUNG Y, HSU C C. Frequency distribution of clay minerals in the soils of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1964, 12(3): 266-274. (in Chinese))
- [16] SEODON J, EBERL D D. Illite[J]. Reviews in Mineralogy, 1989, 13: 495-544.
- [17] 江泊洧, 项伟, 张雪杨. 基于 CT 扫描和仿真试验研究黄土坡滑坡原状滑带土力学参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(5): 1025-1033. (JIANG Ji-wei, XIANG Wei,

- ZHANG Xue-yang. Research on mechanical parameters of intact sliding zone soils of Huangtupo landslide based on ct scanning and simulation tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(5): 1025 – 1033. (in Chinese))
- [18] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦. 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. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, YUE Zhong-qi. Development of random mesostructure generating system of soil-rock mixture and study of its mesostructural mechanics based on numerical test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(8): 1652 – 1665. (in Chinese))