

蒋家沟泥石流源区土壤团聚体微结构与结构性

王志兵, 汪稔, 郑郢, 吕士展

(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, 430071, 武汉)

摘要 云南东川蒋家沟泥石流源区的土壤是团聚体结构性很强的特殊土壤, 孔隙比高, 液限低, 并有强烈的分散性, 在环境扫描电镜下的微观结构表明: 原状土壤团聚体具有 3 种孔隙类型, 沿着孔隙溶蚀现象明显, 骨架颗粒之间普遍存在架空结构, 胶结物联结强度较弱。通过对土壤团聚体在原状、饱和、重塑 3 种状态下进行室内压缩试验, 并引入综合结构势, 分析土壤团聚体的结构性。结构性参数曲线在加载初期下降显著, 在加载后期则变得十分平缓, 表明蒋家沟泥石流源区土壤团聚体具有较强的结构性, 容易发生结构失稳。因此, 微观结构特性与结构性对土壤团聚体的稳定性有重要的作用。

关键词 泥石流; 土壤团聚体; 微观结构; 压缩试验; 结构性; 结构性参数

Microstructure and structural character of soil aggregates in triggering area of Jiangjiagou torrent stream, Yunnan Province

Wang Zhibing, Wang Ren, Zheng Yun, L. Shizhan

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

Abstract There are widely distributed soil aggregates in triggering area of debris flow from Jiangjiagou torrent stream, Yunnan Province. The soil aggregate is a strongly structured special soil with high void ratio, low liquid limit and very high dispersibility. The environmental scanning electron microscope (ESEM) images show that there are three types of pore in soil aggregates. Obvious dissolution along pore space and void structure between soil particles also commonly exist in soil aggregate. In order to apply the comprehensive structure potential parameter of the stress, compression tests are conducted respectively on intact, saturated and remoulded state soil aggregate. The descending velocity of the structural parameter curve is higher at the stage of lower stresses, but the curve become more gentle at the stage of higher stresses. The soil aggregates exhibit great collapsibility and unstable structure. The results indicate that the microstructure and structural character play an important role in the stability of soil aggregates.

Key words debris flow; soil aggregates; microstructure; compression test; structural character; structural parameter

土壤团聚体是土壤的重要组成部分, 也是土壤结构的基本单位, 其形成和稳定主要是通过土壤中各种胶结物质(有机质、黏粒与铁铝氧化物)的胶结

作用实现的。土壤团聚体的稳定性是指土壤团聚体抵抗各种破坏力作用或外部环境变化而保持其原有形态的能力, 包括水稳定性、力学稳定性、化学稳定

收稿日期: 2010-09-14 修回日期: 2010-10-28

项目名称: 国家自然科学基金“局地泥石流物源逐级汇集灾变机制与择级控制理论研究”(40672193); 国家自然科学基金青年基金“泥石流崩滑体自组织临界状态及稳态偏离灾变机理”(50709035)

第一作者简介: 王志兵(1982—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 特殊土土力学及边坡稳定。E-mail: willit@qq.com

- 责任作者简介: 汪稔(1955—), 男, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 海洋土、泥石流、冻土等领域的工程特性与灾害防治。E-mail: nwang@whrsm.ac.cn

性、酸碱稳定性和生物稳定性^[1-2]。以往研究重点集中于土壤团聚体在抗侵蚀过程的稳定性等方面,目的是研究其对土壤肥力与质量、土壤的可持续利用及水土流失的影响^[2-4]。

泥石流通常起源于滑坡,以往的研究表明,导致岩土体发生软化并破坏的主要原因是土体在剪切变形中孔隙比与孔隙水压力的耦合作用。而土体具备剪缩性质时,这种理由更具有充分性,即剪缩更能使饱和土体中的孔隙水压力增加,从而在剪切过程中降低土体的摩擦强度^[5]。此外,陡峭的地形是泥石流发生的要素之一,同时形成泥石流的松散固体物质的有效内摩擦角一般要小于斜坡坡角,能够在旱季保持稳定状态的可能原因之一是由于这些松散固体物质仍存在一定的黏聚性^[6],而土壤中的团聚体则是松散固体物质具有黏聚性的表现形式之一。

在泥石流等地质灾害研究过程中,鲜有文献关注土壤团聚体的特性及稳定性对泥石流形成的贡献。笔者以云南省东川蒋家沟流域泥石流源区土壤团聚体为研究对象,通过对其基本物理力学性质、分散性测试、在环境扫描电镜下的微观结构观察,以及在原状、饱和、重塑 3 种状态下的室内压缩试验等的研究,确定土壤团聚体的微观结构特征及结构性等特点,以期为滑坡和泥石流的形成机制及防治工作等提供理论基础。

1 研究区域及土体

位于云贵高原的小江流域,是世界著名的暴雨型泥石流沟频发区域,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泥石流暴发最频繁、规模最大、危害最大的一条泥石流沟,对其影响区域人们的人身及财产安全造成了严

重威胁,给当地带来了严重的经济损失^[7]。

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,是泥石流暴发的重要固体物源。根据这些松散固体物质的成因,可将其分为残积层、坡积层及堆积层。研究所用试样分别取自于残积与坡积成因的土层。

2 土壤团聚体的物理化学性质

所取的 2 种土壤团聚体呈棕红色 (RS1) 与青灰色 (RS2) (图 1),黏聚性较好,含少量母岩溶蚀残余物,棕红色土壤团聚体仅含微量的植物根系,青灰色团聚体基本不含有机质。

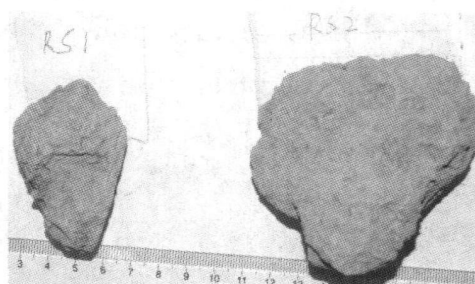


图 1 棕红色 (RS1) 与青灰色 (RS2) 土壤团聚体样品

Fig 1 Samples of soil aggregate RS1 and RS2

2 种土壤团聚体的基本物理化学性质见表 1,由于取样在旱季末,所以土壤团聚体的含水量偏低。2 种土壤团聚体孔隙比较高,液限较低,在塑性图上十分靠近或就处于典型湿陷性黄土和分散性土位置^[6],液限较低说明土壤团聚体在含水量较低的情况下就可以呈现出流动状态。2 种土壤团聚体的 pH 值都较高,表明蒋家沟泥石流源区土壤呈强碱性。

表 1 土壤团聚体的物理化学性质和主要黏土矿物

Tab 1 Physical and chemical properties and main clay minerals of soil aggregates

样品 编号	天然含 水量 %	土粒密度 $g\ cm^{-3}$	天然密度 $g\ cm^{-3}$	孔隙 比	液限 %	塑限 %	塑性 指数	pH 值 (水溶液)	主要黏土矿物			
									CEC $cmol\ kg^{-1}$	Na^+ $mol\ kg^{-1}$	ESP %	
RS1	5.64	2.81	1.74	0.71	34.8	28.1	6.7	9.13	2.616	1.036	39.6	伊利石、绿泥石、高岭石
RS2	0.89	2.79	1.84	0.53	21.6	18.4	3.2	8.64	3.409	1.102	32.3	伊利石、绿泥石

土壤团聚体的抗冲蚀能力与其分散性具有显著的正相关性,具有分散性的土体遇(纯)水后,土体团聚体内的颗粒联结就会发生破坏。分散性测试是采用测定交换性钠离子比例(ESP),即交换性钠离子占总阳离子交换总量(CEC)的比例。从表 1 可看

出,2 种土壤团聚体的 ESP 值都大于 15%,表明土壤团聚体都具有强分散性,遇水极易分散,在孔隙中易形成高浓度的细粒悬浮液。

土壤团聚体的主要黏土矿物为伊利石与绿泥石,RS1 样品中还含有一定的高岭石。其中伊利石

的存在可能是土壤团聚体具有高分散性的原因之一 [8]。

3 土壤团聚体的微观特征

取土壤团聚体的低含水量的原状样, 用荷兰 FEI 公司生产的环境扫描电子显微镜 (Quanta 200)

从细-微观角度观测土壤团聚体微观结构与微观形貌特征。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, 在低倍放大下观察样品的全貌, 并对有代表性的部位作进一步的放大观察。电镜扫描结果如图 2 和图 3 所示。

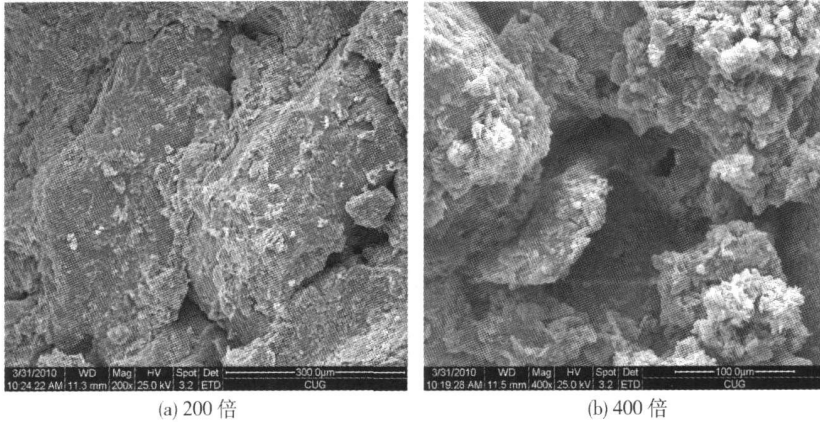


图 2 低倍放大下土壤团聚体的形貌特征

Fig 2 Morphology features of soil aggregates under low magnification

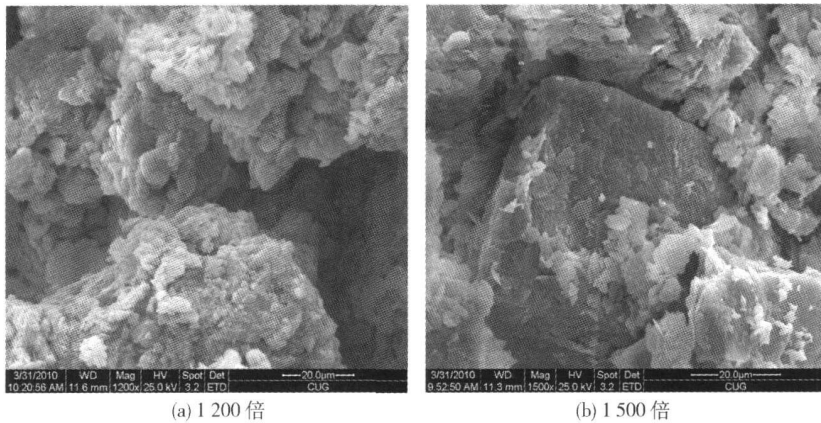


图 3 高倍放大下土壤团聚体的形貌特征

Fig 3 Morphology features soil aggregates under high magnification

图 2 为在低倍放大 (分别放大 200 与 400 倍) 条件下土壤团聚体的细观形貌特征, 可见土壤团聚体的典型微观结构, 大颗粒被定向性差的黏土矿物、无定形的非晶质物质和碎片物质包围, 二者之间存在明显的裂纹, 同时, 裂缝处溶蚀现象明显, 较大的不规则孔隙或裂隙发育, 可能是经历了长期的淋滤和溶蚀作用。

蒋家沟泥石流源区土壤团聚体中有 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~ 150 μm 之间。大粒团 (或大颗粒) 之间形成的架空结构也比较明显, 面孔隙率较高。

图 3 为局部高倍放大 (分别放大 1 200 与 1 500 倍) 条件下土壤团聚体的形貌, 单元粒团内通过胶

结物质相互黏聚而形成的絮凝堆叠结构, 大粒团间存在桥式胶结结构与架空结构, 且架空结构较普遍。可以看出, 粒团间的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薄片状、板状、鳞片状、管状等, 胶结物类型与数量都较多, 且含有一定的黏土矿物, 呈絮凝和凝块结构。此外, 还可见原生碎屑矿物, 大多被黏土土物质包裹呈分散状分布, 二者之间的联结并不紧凑, 孔隙率较高。

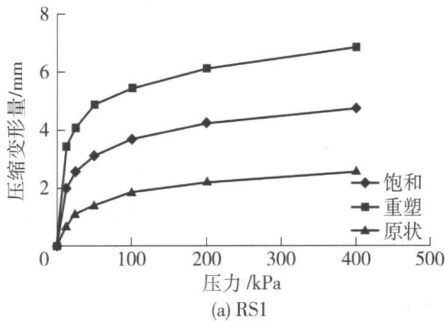
从表 1 可知, 土壤团聚体中主要的黏土矿物为伊利石和绿泥石, 而对有机质不高的土壤团聚体, 土壤团聚体的形成主要靠黏粒的内聚力及铁铝氧化物的胶结作用 [9], 土壤团聚体 RS1 和 RS2 的胶结强度

主要取决伊利石等黏土矿物,但由于 2种土壤都具有较高的分散性,水稳定性很差。

土体团聚体中的桥式胶结与架空结构造成了土壤孔隙比较大,且孔隙之间的连通性好,因此,在降雨期间,雨水容易入渗土体内;此外,土壤团聚体中粒团间的桥式胶结与架空结构在外部因素(外力和降雨等)作用下易发生破坏,容易在剪切过程中发生坍塌,不仅降低土壤团聚体的强度,而且影响土壤团聚体的孔隙比,从而影响斜坡土体中孔隙水压力的分布状态。

4 土壤团聚体的室内压缩试验

试验采用的仪器为普通杆杆式固结压缩仪,环刀试样内径 61.8 mm,高度 20 mm,压缩试验的分级荷载为 12.5 25 50 100 200 400 kPa共 6级压力,



各级压力下的压缩试验进行 24 h。饱和环刀试样为原状土样在真空饱和装置中先抽气 1 h 将真空饱和装置抽成真空,然后在真空状态下注水饱和 24 h 制备而成。重塑试样经风干、碾碎后,按规定的干密度及含水量配制而成,然后压制环刀试样。将制备完成的原状、饱和、重塑环刀试样装入养护缸保湿养护,直到开始压缩试验为此。

从图 4(a)和图 4(b)可以看出,在同级荷载作用下,2种土壤团聚体在原状状态下的压缩变形量最小,重塑状态下的压缩变形量最大,与文献 [10-11]中花岗岩残积土具有类似的结果,即外部因素能显著影响土壤团聚体的结构性。同时,在 3种不同的状态下,压缩变形量都集中在初始较低荷载下,说明泥石流源区的土壤团聚体在较低的应力状态下就可以完成绝大部分的压缩变形。

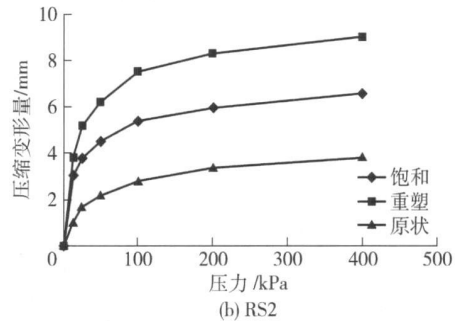


图 4 2种土壤团聚体在饱和、重塑、原状状态下的压缩曲线

Fig 4 Compression curves of soil aggregates for saturated, disturbed and intact soil

可根据文献 [12-13]提出的应力综合结构势的概念,即假设某一压力 p 下原状土的压缩应变为 S_o ,饱和原状土的压缩应变为 S_s ,扰动重塑土的压缩应变为 S_r ,则土的综合结构性参数 m_p 可表达为

$$m_p = S_s S_r / S_o^2$$

式中: m_p 为所定义的土结构性参数,又称应力综合结构势; S_o , S_s , S_r 分别为压力 p 下原状土、饱和原状土、重塑土的压缩变形量。

将土壤团聚体 RS1 与 RS2的压缩试验结果整理得到如图 5所示的结构性参数曲线。可以看出,结构性参数 m_p 的变化范围较大,2种土壤团聚体的结构性参数曲线都呈现相同的规律,即在加载初期(在 100 kPa级荷载前),结构性参数曲线下落相当快,说明试样在加载的前期,随着荷载的增加,土壤团聚体的原生结构逐渐被破坏,而在加载后期,其次生结构逐渐形成。同时,土壤团聚体的结构性参数曲线与前文对土壤团聚体微结构的观测结果相吻合,表明土壤团聚体中普遍存在的桥式胶结的胶结

强度与架空结构的结构强度薄弱,在外部因素作用下易发生破坏。

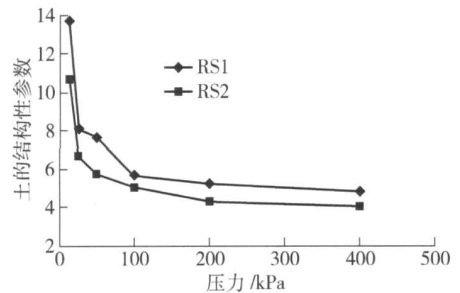


图 5 2种土壤团聚体的结构性参数曲线

Fig 5 Structural parameter curve of soil aggregates

综合前面土壤团聚体在环境扫描电镜下的微观结构形态可以看出,由于土壤团聚体中普遍存在架空结构,大粒团之间的胶结作用也比较微弱,在较小的外力作用下就会完成较大的变形,这与剪缩型土体在剪切过程中孔隙水压力显著增大控制的斜坡破坏机制相一致。

5 结论

1) 蒋家沟泥石流源区土壤团聚体孔隙比大, 分散性强, 液限低, 属于强碱性土壤。主要的黏土矿物为伊利石和绿泥石。

2) 环境扫描电镜下观察的土壤团聚体微观形态特征表明, 土壤团聚体孔隙发育, 孔隙类型全面, 孔隙间连通性好, 面孔隙率高。土壤团聚体中桥式胶结与架空普遍存在, 但结构强度薄弱, 在外部因素作用下易发生破坏。

3) 土壤团聚体的结构性参数曲线在加载初期显著下降, 在加载后期则变得平缓, 可知蒋家沟泥石流源区土壤团聚体是结构性很强的土体。

4) 从试验结果可以看出, 应力综合结构性参数 m_p 能很好地与土壤团聚体的微观结构特征对应起来, 能反映土壤团聚体在孔隙特征、颗粒排列、胶结结构方面的特征。

6 参考文献

- [1] 唐益群, 张晓晖, 余恬钰, 等. 贵州石漠化地区棕黄色粘性土团聚体稳定性研究. 工程地质学报, 2009, 17(6): 817-822
- [2] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421
- [3] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. 土壤通报, 2001, 38(1): 49-

53

- [4] 廖超林, 何毓蓉, 徐佩. 泥石流源地土壤团聚体抗蚀特征研究: 以蒋家沟为例. 地球与环境, 2005, 33(4): 64-69
- [5] Iverson N R, Mann J E, Iverson R M. Effects of soil aggregates on debris-flow mobilization: results from ring-shear experiments. Engineering Geology, 2010 (114): 84-92
- [6] 王志兵, 汪稔, 胡明鉴, 等. 蒋家沟砾石土的特性及其对斜坡失稳的意义. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 206-211
- [7] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究. 北京: 科学出版社, 1980
- [8] 李振, 邢义川, 樊恒辉. 防渗土料物理化学性质及分散性试验研究. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(增刊): 123-125
- [9] 李小刚. 甘肃景电灌区土壤团聚体特征研究. 土壤学报, 2000, 37(2): 263-270
- [10] 高广运, 戴继, 刘小敏. 受压花岗岩砂质粘性土结构性的试验及研究. 建筑科学, 2009, 25(1): 59-61
- [11] 戴继, 王铁宏, 高广运, 等. 由压缩试验分析砾质花岗岩残积土的结构特性. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 675-679
- [12] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化研究的新途径. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656
- [13] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系. 水利学报, 1999(10): 1-6

(责任编辑: 宋如华)