论文

炎热多雨和突降暴雨气候影响下玄武岩残积土的崩解试验研究

张先伟^{①②*}, 孔令伟^①, 陈成^①, 尹松^③^① 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, 武汉 430071;^② 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;^③ 中原工学院建筑工程学院, 郑州 450007

* E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn

收稿日期: 2016-05-01; 接受日期: 2016-08-22; 网络出版日期: 2016-09-27

国家自然科学基金(批准号: 41472292, 41372314)、湖北省自然科学基金(批准号: 2011CDB406)和同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放课题(批准号: KLE-TJGE-B1103)资助项目

摘要 气候环境是影响玄武岩残积土崩解特性的重要因素. 为研究高温湿热与突降暴雨气候影响下玄武岩残积土的崩解特征, 我们开展了反复干湿循环过程后的大气崩解试验与浸水崩解试验, 通过崩解率、崩解速率及崩解物的颗粒组成评价了崩解特性的气候影响控制因素. 研究表明, 高温湿热气候引起的反复干湿交替会破坏颗粒团聚性, 增强土的分散性, 随着干湿循环次数的增加, 崩解率与崩解速率增大, 崩解物由粗颗粒为主逐渐转为细颗粒为主, 气温越高、气候变化越剧烈, 这种影响越显著. 突降暴雨气候会引发玄武岩残积土剧烈的崩解现象, 随着干湿循环次数的增加, 崩解物由碎屑状向泥状过渡, 崩解速率增大, 崩解程度逐渐增强. 研究还发现, 除了气候环境影响, 施工扰动也会促进崩解的发生, 施工中应加强监测气候环境变化对崩解性的影响, 必要时需对玄武岩残积土工程进行保湿、防水措施.

关键词 残积土, 崩解, 气候, 崩解率, 干湿循环

1 引言

我国的雷州半岛与海南岛北部^[1]、美国的夏威夷^[2]、波多黎各^[3]、新西兰的奥克兰^[4,5]、巴西的南部^[6]、非洲的尼日利亚^[7]等地广泛分布着玄武岩地层. 这些地区多属热带气候, 常年高温湿热的气候环境为玄武岩的快速风化分解与红土化提供了必要条件. 由

于特殊的成土环境以及物质构成、结构特征, 玄武岩残积土普遍具有裂隙性, 干硬湿软特征, 其强度与力学行为对水特别敏感, 表现为遇水湿化进而发生崩解的现象^[8].

土的崩解(disintegration)是指黏性土由于浸水发生碎裂、散体的现象. 以往研究表明, 残积类土普遍具有遇水软化的特殊性质, 加之花岗岩与玄武岩广

引用格式: 张先伟, 孔令伟, 陈成, 等. 炎热多雨和突降暴雨气候影响下玄武岩残积土的崩解试验研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 1175–1184
Zhang X W, Kong L W, Chen C, et al. Experimental investigation on relative contribution of hot and humid weather and heavy rainfall in disintegration of basalt residual soil (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 1175–1184, doi: 10.1360/N092016-00156

泛分布的我国东南沿海长期的高温天气,使其裂隙发育明显,频降暴雨导致残积土体产生崩解,由此引发的重大安全事故屡见不鲜^[9~11]。如1995年8月,香港翡翠道柴湾浸信会对面的残积土斜坡,暴雨后发生崩塌滑动,崩滑体掩埋了翡翠道一段90 m长的路面,造成1人死亡、1人受伤^[12]。在基坑工程设计、施工及工程质量监管过程中,残积土的崩解性常常被忽视。2005年7月,广州海珠城广场深基坑发生坍塌,导致3人死亡,4人受伤,其原因就是没有对已经产生崩塌迹象的残积土体足够重视,未采取有效的处理措施所导致的^[13]。在接受这些惨痛教训的同时,人们开始逐渐重视残积土的崩解性,如广州地铁2~6号线部分区间隧道都要穿越残积土土层,施工时部分开挖的车站基坑岩土体已发生软化崩解,虽有一些成功的应对措施,如地面旋喷注浆和全断面帷幕冻结等施工方案^[14],但由于对残积土崩解破坏机理了解不深入,上述方法尚有一定的局限性。由此看来,了解土的崩解性对于评价路堑、路堤、渠道边坡、露天基坑等稳定性有极其重要的意义。此外,在玄武岩残积土区常会出现一种特殊的土壤侵蚀灾害—崩岗^[15],崩岗的形成与发育与残积土的崩解性密切相关,了解残积土的崩解性对区域地质灾害的预防与控制亦具有重要意义。

然而,一方面,不同于其他易崩解软岩^[16,17],残积土的结构疏松,抗水性与抗蚀性差的特点使其崩解特征更明显,导致残积土的崩解特征分析无法借鉴岩石崩解的相关理论。另一方面,不同母岩形成的残积土土性差别较大,如较同样具有崩解性的花岗岩残积土,玄武岩残积土的颗粒粒度细些,孔隙比大些,亲水矿物更强些,虽然人们对花岗岩残积土的崩解性已有一定认识^[18,19],但对玄武岩残积土的崩解性研究仍处初步探索阶段。这些导致人们对残积土崩解性的认知仍存在阙疑,无法将崩解性的相关指标用于指导工程实践。究其原因,主要是对于残积土的崩解研究存在以下不足:① 针对黏土岩、页岩等软岩已经制定了崩解试验标准^[20],但对于土的崩解试验尤其是定量测试尚无统一标准,早期研究多是将不同尺寸土块浸入水中观察崩解现象,这显然无法达到定量的测试效果,虽然一些学者设计了不同的试验装置与方法,但仍存在测试精度不高的缺陷^[18,21];② 残积土是母岩长期淋滤风化产物,气候环境是其岩土本性与水稳定的重要影响因素,新鲜的原状土与风化程

度不同的土的崩解特征明显不同^[16],现有研究较少考虑气候因素对土的崩解性影响,所得到的结论与实际情况存在一定差异;③ 残积土的崩解性受控于母岩类型、物质构成、结构特性等多种因素,其机理非常复杂,虽然人们从非饱和土理论^[22]、物质成分影响^[23]、分形理论^[18]等多种角度对这一问题研究,但并未形成统一认识,因此,对于玄武岩残积土的崩解评价方法与机理分析仍需进一步探索。

基于以上认识,针对雷州半岛某地玄武岩残积土,考虑当地高温湿热与频降暴雨的气候影响,设计室内模拟土的崩解试验,建立反映气候影响的干湿循环过程与崩解率、崩解速率的相互关系,评价气候影响下残积土的崩解特征与控制因素,为指导玄武岩残积土区的工程建设提供一定理论支持。

2 试样与试验方法

2.1 试样的基本性质

试样取自雷州半岛西南部的广东省雷州市龙门林场(地理坐标为110°02'03"N, 21°41'53"E),为第四系全新统玄武岩风化残积土(Q₄^{el})。采用人工挖取坑槽的取样方法,取样深度为1.5~2.5 m。该区年平均气温23℃,年平均降水量1400~1700 mm,有明显干湿季之分,多雷暴雨。

筛分试验结果表明(图1),玄武岩残积土颗粒存在“假粉粒”现象,加入分散剂化学分散后粒径 $d < 0.002$ mm的黏粒含量由42.1%增至56.5%,在此基础上无论煮沸还是超声波振荡土的颗粒构成未见明显变化,而去除游离氧化铁后,黏粒含量增高至80.5%。

图1 (网络版彩图)玄武岩残积土的颗粒分布曲线

说明游离氧化铁对该土的颗粒团聚具有很强的胶结黏聚作用, 并且该物质对气候环境变化十分敏感, 在反复干湿循环作用下会导致胶结作用的减弱与损失^[24,25]. 玄武岩残积土天然含水率为 38.09%(表 1), 具有较大的比重和孔隙比以及较高的液限值, 属高液限黏土. 天然状态下土的膨胀性不高, 但具有较强的收缩性, 含水率等于液限的重塑土体缩率可达 27.67%. 虽然该土富含黏粒, 但由于含有裂隙, 该土的渗透系数数量级为 $10^{-6}\sim 10^{-5}$ cm/s. 玄武岩残积土的一个显著特点是对水敏感, 具有湿化特性, 原状土饱水后的黏聚力 c_{cu} 可减少 25%.

2.2 试验方法

为模拟高温湿热与突降暴雨气候对玄武岩残积土的崩解性影响, 设计反复干湿循环过程后的大气崩解试验与浸水崩解试验. 试验方法如下.

首先, 利用高 40 mm, 内径 61.8 mm 的容重环刀切取体积 120 cm³ 的原状土样, 放在托盘中. 将试样分别放置室外模拟日照下风干与利用人工气候箱分别在 40 与 110℃ 下模拟极端高温气候下烘干. 风干条件下试样质量变化小于 0.1 g/d、烘干条件下试样质量变化小于 0.02 g/h 时, 干燥过程结束. 利用喷雾器每隔 2 h 向试样喷洒蒸馏水, 当试样达到无法吸水质量恒定时, 加湿过程结束. 上述过程为 1 次干湿循环过程, 进行多次干湿循环直至崩解稳定或完全崩解后结束. 每次干湿循环后用 10, 7.5, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1 mm 规格筛子筛分崩解物, 记录颗粒级别, 重点观察较小颗粒级别的变化. 利用崩解率来评价玄武岩残积土的崩解性, 崩解率可表示为

$$A_n = \frac{M_n}{M_0} \times 100\%, \tag{1}$$

式中, A_n 为高温湿热气候影响下第 n 次干湿循环后的

土的崩解率(%); M_n 与 M_0 分别为第 n 次干湿循环后的崩解物的质量(g)与初始试样的质量(g). 则第 n 次干湿循环后的累计崩解率 B_n 为

$$B_n = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{M_0} \times 100\%. \tag{2}$$

然后, 采用前述试验相同尺寸的原状样与重塑样, 抽气饱和后, 进行日照风干, 计为 1 次干湿循环; 利用喷雾器让干燥试样充分吸水, 再进行日照风干, 计为第 2 次干湿循环, 以此类推, 进行多次干湿循环, 加湿与干燥的设定标准与前述崩解试验相同. 因干湿循环会造成残积土的部分崩解, 进行干湿循环时保留外部环刀. 对干燥后的原状样与重塑样以及不同干湿循环次数后的干燥样进行浸水崩解试验, 仪器为图 2 所示的崩解仪. 其中, 浮筒为盛有一定水量的塑料瓶, 用以平衡试样, 防止侧翻. 金属网尺寸为 10 cm×10 cm, 网眼大小 10 mm×10 mm. 试验时, 将试样浸入水中以模拟突降暴雨造成的土体迅速饱和过程. 试样崩解时, 测力计读数为试样所受重力和浮力的合力, 根据阿基米德定律与受力平衡原理可知测力计测得数据与崩解的土体质量成正比, 由此获得土体崩解率变化.

浸水过程中土的崩解率 C_t 可表示为

$$C_t = \left(\frac{F_1 - F_t}{F_1 - F_e} \right) \times 100\%, \tag{3}$$

式中, C_t 为试样在浸水过程中 t 时刻的崩解率(%); F_1 为试样全部浸入水中的瞬时的测力计的读数(N), 由于试样浸水可能立即崩解, 可采用先蜡封试样单独测试; F_t 为试样浸入水中在时间 t 时测力计的读数(N); F_e 为金属网和铜丝以空载方式浸入水中时测力计的读数(N), 为了提高数据准确度, 采用多次空载方式测试取平均值率定.

表 1 玄武岩残积土的物理性质平均值指标

天然含水率	天然密度	干密度	比重	孔隙比 e	液限	塑限	液性指数 I_L	塑性指数 I_p	饱和度	自由膨胀率	50 kPa 膨胀率
$w(\%)$	$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho_d \text{ (g/cm}^3\text{)}$	G_s		$w_L(\%)$	$w_p(\%)$			$S_r(\%)$	$\delta_{er}(\%)$	率 $\delta_{cp}(\%)$
38.09	1.64	1.18	2.80	1.37	58.01	31.10	0.27	26.91	78.48	35.47	接近 0
渗透系数		原状土(天然含水率)			重塑土(含水率等于液限)			三轴固结不排水剪切强度指标(CU)			
$K \text{ (} \times 10^{-6} \text{ cm/s)}$								天然状态		饱和状态	
室内试验	现场注水	线缩率	体缩率	收缩	线缩率	体缩率	收缩	c_{cu}	φ_{cu}	c_{cu}	φ_{cu}
(20℃)		$\delta_s(\%)$	$\delta_v(\%)$	系数 c_{sl}	$\delta_s(\%)$	$\delta_v(\%)$	系数 c_{sl}	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
5.83	77.70	5.71	10.06	5.71	15.36	27.67	0.66	43.30	21.55	32.5	20.66

试验时发现, 水由裂隙、孔隙浸入土体内部导致孔隙气逸出(图 3), 这部分孔隙气会影响试样所受的浮力, 测得的崩解率与实际值相比较低。

为避免该误差影响, 参考张抒和唐辉明^[18]提出的方法, 首先, 通过平行试样率定一个读数 F_1 , 然后将一隔水塑料板放在金属网上, 再对另一相同试样试验, 崩解后崩解物会落在隔水塑料板上, 崩解结束时测力计读数为 F_0 。忽略试样的化学成分溶解于水中对水的密度的改变, 假设土中气体逸出过程是匀速的, 试样崩解共历时 T_t , 则某一时刻 t , 气体逸出量在测力计上表现的读数为 $(F_0 - F_1) \cdot t / T_t$ 。由此, 考虑土中气体逸出的崩解率的修正公式可表示为

$$C'_t = \left(\frac{F_1 - F_t + (F_0 - F_1) \cdot t / T_t}{F_1 - F_e + (F_0 - F_1) \cdot t / T_t} \right) \times 100\% \quad (4)$$

值得说明的是, 以往测量土的崩解量的试验装置多采用浮筒上标注刻度^[18,21], 利用崩解过程中浮筒上移的变化来换算崩解量, 这需要人为判断浮筒是否稳定, 同时, 如果浮筒直径较大, 浮筒无法反映较小的崩解量, 导致试验结果精度不高, 而采用测力计直接测量崩解过程中的崩解量, 较大地提高了试验结果的准确度。

3 结果与分析

3.1 炎热多雨气候影响下玄武岩残积土的崩解特征

模拟高温湿热气候影响的残积土崩解试验结果见图 4 和 5。由于雷州半岛玄武岩残积土具有明显的收缩潜能, 在日照风干这种缓慢失水过程中表现为土样体积整体缩小(图 5(a)), 仅在加湿过程有少量土块掉落, 未见明显崩解现象, 第 1 次干湿循环后崩解率仅为 3.4%(图 4)。但随着干湿循环次数增加, 土样裂缝产生并扩大(图 5(b)和(c)), 崩解率逐渐增高, 第 9 次干湿循环后的崩解率升至 18%。这反映出受高温湿热气候影响, 周期性的反复干湿交替会加剧崩解性发展。

相对于日照条件, 在 40 与 110℃烘干反映的是气温升高和极端高温对崩解的影响。从图 4 可见, 日照风干与 40、110℃下烘干条件下, 试样完全崩解所需干湿循环次数为 9 次(86 d)、6 次(16 d)、4 次(12 d)。这说明气温升高、气候变化剧烈会导致崩解现象变得更加明显, 反映在图 4 中, 相同干湿循环次数下, 高温环境下, 崩解率与累积崩解率都明显增大, 且崩解率与累积崩解率随时间变化曲线斜率增大, 即崩解速率增大。同时, 在 3 种模拟气候影响下, 随着干湿循环次数的增加, 每次试样崩解率也逐渐增大, 如 110℃下烘干条件下, 第 4 次干湿循环后试样的崩解率达到 40%, 接近于第 1 次干湿循环后试样崩解率的 4 倍。

为了研究崩解物的颗粒特征, 统计不同气候影响下的崩解物的颗粒分布(图 6)。3 种气候影响下, 随着干湿循环次数的增加, 崩解物的颗粒组成变化表现基本一致, 即粗颗粒逐渐减少, 细颗粒逐渐增多。

图2 (网络版彩图)自制崩解仪示意图

图3 (网络版彩图)崩解试验时土样中逸出的气体

图 4 (网络版彩图)不同干湿循环影响下的崩解率与累积崩解率变化

如日照风干条件下(图 6(a)), 第 1 次干湿循环后粒径 $d < 0.1 \text{ mm}$ 的崩解物仅占总崩解物的 3.6%, 第 9 次干湿循环后增大到 40%; 而第 8 次干湿循环后, $d > 10 \text{ mm}$ 的崩解物已经消失. 这说明周期性的反复干湿过程会使玄武岩残积土的崩解性加剧的同时, 也会破坏土的团聚性, 土的分散性加强, 崩解物由崩解初期的粗颗粒为主逐渐变为细颗粒为主. 另外, 气温升高和剧烈气候变化也会促进这种现象发生. 对比图 5(d) 与 (e) 也可看到, 温度的增大导致土中胶结的破坏, 110°C 烘干条件下, 试验土块中已看不到较大颗粒的存在. 从图 6 中也可看到, 相同的干湿循环次数后, 随着气温升高, 粗颗粒的含量逐渐减小, 而细颗粒的含量逐渐增大, 如第 1 次干湿循环后, 日照风干条件下, $d < 0.1 \text{ mm}$ 的崩解物占总崩解物的 3.6%; 110°C 烘干条件下, 达到 12.3%.

为进一步评价崩解物的颗粒特征, 借鉴颗粒级配曲线的衍生指标不均匀系数 C_u 与曲率系数 C_c 判断崩解物的均匀程度与颗粒分布(图 7). 3 种环境影响下, 随着干湿循环次数增加, C_u 都呈上升趋势, 且 C_u 值普遍偏高. 相应地, 随着干湿循环次数增加, C_c 都呈减小趋势. 一般地, C_u 值越大表明崩解物的粒度组成越

分散; $C_c < 1$ 时, C_c 越小, 说明崩解物缺少某种中间粒径的颗粒. 上述结果说明反复的干湿交替气候影响会导致崩解物的颗粒分布不均匀, 级配不连续. 根据图 6 的分析可知, 产生这种现象的原因主要是随着干湿循环次数的增加, 崩解物以粗颗粒为主转为以细颗粒为主, 且分散性增强.

Erguler 与 Shakoor^[16]曾比较干湿循环次数为 20 次与 50 次的黏土岩与泥岩的崩解特征, 发现这两种岩石都表现出与本文试验结果相似的结论, 即随着干湿循环次数的增加, 崩解物的粉碎程度增加. 这些研究肯定了气候变化对岩土体崩解特性的贡献影响.

3.2 突降暴雨气候影响下玄武岩残积土的崩解特征

对干湿循环后土样浸水模拟因突降暴雨导致的土体快速饱和过程中的崩解特征. 图 8 所示的崩解曲线(C'_{i+1-t} 曲线)基本呈 S 型. 其中, AB 段为水通过微裂隙浸入孔隙, 孔隙气被排出过程, 崩解特征不明显, 崩解速率缓慢; BC 段为稳定崩解阶段, 是崩解发生的主要阶段, 崩解剧烈, 崩解速率稳定且快速; CD 段为崩解基本完成, 土块在水的浸泡下剩余部分寻找水下稳定角, 少量土散落, 崩解速率较小. 多次干湿循环后的土样由于崩解速度快, CD 段崩解曲线没有体现, 如曲线 IV~IX.

反复干湿循环以及受扰动后的土体崩解特征是不同的(图 9). 玄武岩残积土在风化、淋滤过程中形成规模各异的原生裂隙, 这为水的浸入提供了有利条件. 随伴着水的浸入, 裂隙逐渐扩大、贯通, 崩解时会伴有大块土体突然崩落(图 9(a)), 反映在图 8 中稳定崩解阶段呈“阶梯型”(曲线 I, II). 干燥后的原状土的崩解并不剧烈, 速度缓慢, 浸水 24 h 后仍有 20%~25% 土块未崩解. 高温湿热气候影响的反复干湿过程会加剧残积土的崩解, 表现在图 8 的曲线 IV,

图 5 (网络版彩图)不同环境影响下崩解过程照片

(a) 日照, 1 次干湿循环; (b) 日照, 3 次干湿循环; (c) 日照, 4 次干湿循环; (d) 40°C 烘干, 1 次干湿循环; (e) 110°C 烘干, 1 次干湿循环

图 6 不同条件影响下崩解物的颗粒级配的变化

(a) 日照风干; (b) 40℃烘干; (c) 110℃烘干

图 7 (网络版彩图)崩解物的不均匀系数、曲率系数随干湿循环次数变化

(a) 不均匀系数; (b) 曲率系数

V, VI, VII的斜率依次增大。干湿循环1~2次后,土块浸水后表面有气泡逸出,土块由外层向内崩解,崩解物成碎屑状,崩解程度剧烈,在30 min内可全部崩解(图9(c))。干湿循环4次后,土块浸水后,伴随着大量气泡逸出,在5 min之内,崩解物成粉末状、絮状快速崩落,崩解物为泥状,周围水质浑浊,崩解程度非

常剧烈(图9(d))。从图8与9分析还可知,由于扰动重塑破坏了玄武岩残积土成土过程中的胶结联结与原始结构,结构强度下降,增强了残积土的崩解性,干湿循环1次后的重塑土浸水完全崩解仅需7 min,崩解时间接近于干湿循环4次的原状土(图8曲线IX)。这说明除了环境气候因素,人类工程活动同样也会

图 8 (网络版彩图)崩解率随时间变化曲线

图 9 (网络版彩图)浸水崩解过程照片

(a1)~(a5) 干燥后的原状土; (b1)~(b5) 重塑土, 干湿循环 1 次; (c1)~(c5) 原状土, 干湿循环 2 次; (d1)~(d5) 原状土, 干湿循环 4 次

加剧玄武岩残积土的崩解性, 实际工程中应尽可能减小施工扰动对土体强度带来的劣化效应。

为进一步定量评价玄武岩残积土的浸水崩解速度, 引入崩解速率 V_t , 表示为

图 10 (网络版彩图)原状土、重塑土及干湿循环后的崩解速率

$$V_i = \frac{C'_{i+1} - C'_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (5)$$

式中, V_i 为某个时间段 $t_i \sim t_{i+1}$ 的崩解速率(min^{-1}), $t_i \sim t_{i+1}$ 可取稳定崩解阶段(图 8 中的 BC 段); C'_i , C'_{i+1} 分别为时刻 t_i 和时刻 t_{i+1} 对应的崩解率(%). V_i 并不是实际上的崩解速率, 而是针对崩解率而言的一个代表崩解快慢的量, 可反映土的抗蚀性. 从图 10 可见, 干燥后的原状土的 $V_i \approx 1 \text{ min}^{-1}$, 干湿循环 1 次后 $V_i \approx 2.7 \text{ min}^{-1}$, 干湿循环 4 次升至 17.1 min^{-1} , 增大了 6.3 倍, 再次说明干湿循环过程会降低玄武岩残积土的抗蚀性, 增强崩解性.

根据上述分析及试验过程中观察的崩解现象可知, 依据崩解特征、崩解物形态将玄武岩残积土可能发生的崩解类型分为 3 类(表 2), 整体而言, 天然状态下土体浸水崩解特征为 I 类, 崩解物为碎块与碎片状, 随着干湿循环效应加强, 由 II 类向 III 类过渡, 崩解物由碎屑状向泥状过渡. 干湿循环效应导致的崩解物由粗变细的现象与前述模拟高温湿热气候影响的

崩解试验结果是一致的.

玄武岩残积土崩解现象引起的工程问题多集中于与暴露于大气中的路堑、路堤、渠道边坡及露天基坑, 高温引起的大气蒸腾作用以及降水入渗加剧了玄武岩残积土的崩解性, 尤其是在突降暴雨时, 土体崩解现象非常剧烈, 极易引发土体崩塌、基坑垮塌等工程灾害. 因此, 施工中应重点加强监测气候环境变化对土性的影响, 必要时需对玄武岩残积土土体工程进行防水、保湿措施.

4 结论

(1) 高温湿热气候会加剧玄武岩残积土的崩解特性. 玄武岩残积土颗粒存在“假粉粒”现象, 周期性的反复干湿交替会破坏颗粒团聚性, 增强土的分散性, 随着干湿循环次数的增加, 崩解物由粗颗粒为主逐渐转为细颗粒为主, 且气温越高、气候变化越剧烈这种影响更显著.

(2) 突降暴雨气候会引发玄武岩残积土剧烈的崩解现象. 依据崩解特征与崩解物形态, 玄武岩残积土浸水崩解类型可分为 3 类, 天然状态下土体崩解特征为 I 类, 崩解物为碎块与碎片状, 随着干湿循环效应加强, 由 II 类向 III 类过渡, 崩解物由碎屑状向泥状过渡.

(3) 引发玄武岩残积土因崩解性产生的工程问题主要因素有人类工程活动和环境气候两个因素, 施工中应加强监测气候环境变化对崩解性的影响, 必要时需对玄武岩残积土土体工程进行防水、保湿措施.

(4) 本文浸水试验采用的接近完全干燥的试样, 实际上, 发生崩解的残积土可能为持有较小含水率

表 2 崩解特征与分类

崩解分类	崩解物形态	崩解特征	说明	崩解速度	崩解程度
I	碎块状、碎片状	浸水后土块微裂隙处有气泡产生, 在数小时内, 崩解物呈碎块状崩裂、塌落或呈碎片状开裂	发生于干燥后的原状土	缓慢	不剧烈
II	碎屑状	浸水后土体表面有气泡产生, 在数分钟至 30 min 内, 由外层向内崩解, 成碎屑状崩落, 崩解物手搓后仍为泥状	发生于干燥后的重塑土、1 次干湿循环后的重塑土、1~2 次干湿循环后的原状土	快速	剧烈
III	泥状	浸水后土样表面大量气泡产生, 在 5 min 之内, 崩解物成粉末状、絮状崩落, 崩解物为泥状, 崩解物周围水质浑浊	发生于 2 次干湿循环后的重塑土、3~4 次干湿循环后的原状土	非常快	非常剧烈

的非饱和土, 土的初始干密度与含水率对崩解特性具有重要影响, 因此, 后续研究应建立这些影响因素

与崩解性的相互关系, 并针对玄武岩残积土的崩解性提出合理的工程控制措施.

参考文献

- 唐大雄, 王清, 张庆云, 等. 雷琼地区玄武岩残积红土的工程地质研究. 长春地质学院学报, 1992, 22: 317–323
- Lohnes R A, Demirel T. Geotechnical properties of residual tropical soils. In: Proc. ASCE Convention, Huston, Texas, 1983. 150–166
- Tuncer E R, Lohnes R A. An engineering classification for certain basalt-derived lateritic soils. Eng Geol, 1977, 11: 319–339
- Carr R G, Rodgers K A, Black P M. The chemical and mineralogical changes accompanying the laterization of basalt at Kerikeri, North Auckland. J Roy Soc New Zeal, 1980, 10: 247–258
- Moon V, Jayawardane J. Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. Eng Geol, 2004, 74: 57–72
- Gutierrez N H, Nóbrega M T, Vilar O M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil. Bull Eng Geol Environ, 2009, 68: 107–116
- Osinubi K J, Nwaiwu C M O. Desiccation-induced shrinkage in compacted lateritic soils. Geotech Geol Eng, 2008, 26: 603–611
- 张先伟, 孔令伟, 臧濛. 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究. 岩土工程学报, 2014, 36: 855–863
- Abad S V A N K, Tugrul A, Gokceoglu C, et al. Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design. Eng Geol, 2016, 200: 94–103
- Pradhan A M S, Kim Y T. Application and comparison of shallow landslide susceptibility models in weathered granite soil under extreme rainfall events. Environ Earth Sci, 2015, 73: 5761–5771
- 邱路阳, 刘毓氟, 李大勇. 高填方残积土路堤降雨滑塌机理与治理对策. 岩土力学, 2007, 28: 2161–2166
- 李焯芬, 陈虹. 香港滑坡泥石流成因及治理. 地理学报, 1997, 1(增刊): 114–120
- 杨光华. 广东深基坑支护工程的发展及新挑战. 岩石力学与工程学报, 2012, 31: 2276–2284
- 竺维彬, 鞠世健, 张弥, 等. 广州地铁二号线盾构穿越珠江的工程难题及对策. 土木工程学报, 2004, 37: 56–60
- 匡耀求, 孙大中. 雷州半岛第四纪台地区的崩岗侵蚀地貌——一种后果严重的水土流失现象. 热带地理, 1998, 18: 42–49
- Erguler Z A, Shakoor A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks. Eng Geol, 2009, 108: 36–42
- Erguler Z A, Ulusay R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks. Int J Rock Mech Min Sci, 2009, 46: 355–370
- 张抒, 唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究. 岩土力学, 2013, 34: 1668–1674
- Kim C K, Kim T H. Behavior of unsaturated weathered residual granite soil with initial water contents. Eng Geol, 2010, 113: 1–10
- American Society for Testing and Materials. D 5313-04. Standard test method for evaluation of durability of rock erosion control under wetting and drying conditions. Designation. ASTM, West Conshohocken, 2004
- 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究. 岩石力学与工程学报, 2009, 28: 3207–3213
- Camacho P, Deleris S, Geauquey V, et al. A comparative study between mechanical, thermal and oxidative disintegration techniques of waste activated sludge. Water Sci Tech, 2002, 46: 79–87
- Zhao M H, Zou X J, Zou P X. Disintegration characteristics of red sandstone and its filling methods for highway roadbed and embankment. J Mater Civ Eng, 2007, 19: 404–410
- 张先伟, 李晶晶, 李峻, 等. 雷州半岛玄武岩残积土的物质成分与结构特征. 工程地质学报, 2014, 22: 1–7
- Zhang X W, Kong L W, Cui X L, et al. Occurrence characteristics of free iron oxides in soil microstructure: Evidence from XRD, SEM and EDS. Bull Eng Geol Environ, 2015, doi: 10.1007/s10064-015-0781-2

Experimental investigation on relative contribution of hot and humid weather and heavy rainfall in disintegration of basalt residual soil

ZHANG XianWei^{1,2}, KONG LingWei¹, CHEN Cheng¹ & YIN Song³

¹ State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

² Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

³ School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China

Basalt residual soil presents strong disintegration phenomenon by climatic influence. In order to understand the relative contribution on hot and humid weather and frequent heavy rainfall in disintegration of basalt residual soil, basalt residual soils were first subjected to wetting-drying cycles, and then were used for disintegration test in atmosphere and in soaking to simulate the effect of the climate change, based on a series of indexes such as disintegration rate, disintegration velocity and disintegrative deposits characteristics. The results showed that hot and humid weather could damage the aggregation between particles and facilitated the dispersibility of soil, and the majority of disintegrative deposits translate from coarse to fine, which in turn may lead to severe disintegration. While sudden heavy rain contributed to more severe disintegration, and with the increment of wetting-drying cycles, disintegrative deposits turn from lump or fragment to powder, and translate to mud, disintegration velocity increases and disintegration tends to a more severe extent. Based on the experimental findings, a disintegration classification for basalt residual soil is suggested in order to determine and evaluate disintegration characteristics according to the laboratory test results.

residual soil, disintegration, weather, disintegration rate, drying-wetting cycle

doi: 10.1360/N092016-00156