

文章编号: 1008-2786(2000)06-0496-06

风化花岗岩崩岗灾害的成因机理

王彦华, 谢先德, 王春云

(中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

摘 要: 测定了广东珠海大镜山剖面 (DJS)、增城剖面 (ZC-1、ZC-2)、阳江飞鹅岭和圆周岭剖面 (FEL、YZL) 的物性指标, 通过建立崩岗数学模型, 设定不同的坡面参数条件, 计算了坡面和稳定临界深度, 当坡度 $< 43^\circ$ 时, 坡体的稳定临界深度 $> 2\text{ m}$ 。根据雨水在花岗岩风化剖面的渗透特点, 计算了一定强度的降雨在不同时间内的湿润前锋, 由临界深度与湿润前锋的对比, 说明了降雨与崩岗的关系。此外, 还结合文献中日本和香港地区崩岗灾害的统计资料结果, 探讨了不同时间的降雨对坡体稳定性的影响。

关键词: 花岗岩; 风化; 崩岗; 机理

中图分类号: P642.21; X43

文献标识码: A

崩岗是广东花岗岩风化残积土地区的一种灾害类型, 是发生在 $> 30^\circ$ 的陡倾斜地形上的坡体垮塌滑落。崩岗的地形因素、活动状况、移动速度和形态特征与滑坡存在着差别, 尤其是受降雨的影响较大, 常发生在一定强度的降雨条件下。研究其成因机理, 对预防崩岗灾害具有重要意义。

1 花岗岩风化剖面的野外分带及取样

本文选择广东珠海、增城、阳江三个地区的五条花岗岩剖面, 采石或公路建设能够完整观察到的风化剖面有珠海大镜山、阳江飞鹅岭和增城 II 号剖面, 但全部剖面都可见到上部的特征风化带。在完整的风化剖面中, 可以看到从新鲜的花岗岩到地表风化完全的变化过程, 从下向上划分出新鲜花岗岩、风化花岗岩、风化土 B、风化土 A 和表层风化土, 虽然由于岩石类型和风化环境造成了五条剖面风化土的颜色存在着一些差别, 但这种划分方式基本能够反映出风化剖面的特点及与之相关的一些性质。在每条剖面中, 依层位进行系统取样, 取样位置是各剖面的顶端到取样点大致的距离, 本文把这种距离视为取样深度, 各剖面的取样位置如图 1 所示。

2 花岗岩风化剖面的物性特征

崩岗受不同条件下花岗岩风化残积土剖面各层位的物理性质变化所控制, 其物理性质指标主要包括粒度组成、密度、含水量和饱和度等, 以上指标是定性及定量评价坡体稳定性必不可少的测试内容。

本文除密度的测定是每个剖面的全样品外, 对粒度、含水量和饱和度等物性指标的测定仅限于取自各风化剖面的土质样品, 而在 5 个剖面中的 4 个剖面所取的土质样品都是 3 个, 另一个剖面的土质样品是 4 个, 虽然每个剖面的样品数较少, 但对取自 5 个剖面的土质样品进行的上述指标测试结果, 也能反映出剖面土体的物性特征 (表 1)。

收稿日期: 1999-08-11; 改回日期: 2000-03-14。

基金项目: 广东省“九五”重大项目“沿海地表地质灾害的矿物动力学机制研究” (编号: 973106)。

作者简介: 王彦华 (1996-), 男 (汉族), 内蒙古赤峰人, 博士。1990 年毕业于兰州大学地质学系, 同年被分配到内蒙古赤峰柴胡栏子金矿工作, 1992 年考入武汉中国地质大学攻读矿物学硕士学位研究生, 1995 年考入中国科学院广州地球化学研究所攻读矿物学博士学位研究生, 现在中国刑事警察学院从事微量物证方面的教学和科研工作。联系地址: 沈阳皇姑区塔湾街 83 号 中国刑警学院法医系 (邮编 110035); Tel. (024) 86785423 (H); E-mail: wwangyan @263.net。

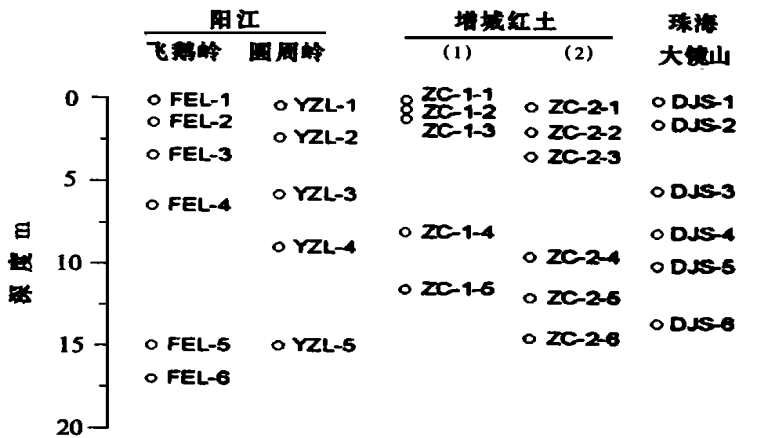


图1 各地花岗岩风化剖面的取样深度示意图

Fig. 1 Sketch map showing sampling depths of weathered granite profiles in various localities

表 1 风化剖面的物性指标

Table 1 Property indicators for weathered profiles

样 品	含水量 <i>W</i>	干密度 <i>γ_d</i>	湿密度 <i>γ</i>	比重 <i>ΔS</i>	饱和度 <i>S_r</i>
ZC-1-1	6.32	1.930	2.052	2.538	48.25
ZC-1-2	7.58	1.743	1.875	2.457	45.46
ZC-1-3	10.46	1.827	2.018	2.615	63.42
ZC-1-4	—	2.345	—	—	—
ZC-1-5	—	2.096	—	—	—
ZC-2-1	8.63	1.637	1.778	2.634	37.32
ZC-2-2	13.34	1.659	1.880	2.652	59.11
ZC-2-3	21.62	1.389	1.689	2.661	62.82
ZC-2-4	—	2.237	—	—	—
ZC-2-5	—	2.25	—	—	—
ZC-2-6	—	2.647	—	—	—
DJS-1	5.85	1.658	1.755	2.650	25.91
DJS-2	7.86	1.928	2.080	2.583	59.76
DJS-3	15.89	1.522	1.764	2.642	57.05
DJS-4	26.82	1.351	1.731	2.721	71.97
DJS-5	—	2.418	—	—	—
DJS-6	—	2.76	—	—	—
YZL-1	9.47	1.891	2.070	2.614	64.75
YZL-2	11.16	1.876	2.085	2.596	75.49
YZL-3	13.70	1.676	1.906	2.603	64.47
YZL-4	—	2.085	—	—	—
YZL-5	—	2.385	—	—	—

3 坡面的稳定性分析

坡体的滑移面有直线形、圆弧形、船形等形状,图 2a 是坡体稳定性分析的常规模型,即把滑落体分割成独立的单元,分析各单元的受力状态,进而对整个滑落体进行稳定性分析。其稳定性公式

$$F = [\tan \varphi \sum_1^n (N_i - U_i) + CL] / \sum_1^n T_i \tag{1}$$

式中 F 表示滑落体的安全率; C 表示滑塌面上土的粘着力 (T/m^2); φ 为滑塌面上土的内磨擦角 ($^\circ$); L 表示滑塌面的长度; N_i 表示各单元垂直作用于滑塌面上的压力, 且 $N_i = A_i \gamma_s \cos \alpha_i$ 。(其是 A_i 为各单元的垂向截面积 (m^2), γ_s 为土体的比重 (t/m^3), α_i 为各单元在滑塌面上的倾角; T_i 为各单元沿滑塌面向下的滑动力, 且 $T_i = A_i \gamma_s \sin \alpha_i$; U_i 是孔隙水压 (t/m^2)。

孔隙水压是指土粒子间隙充满水时产生的压力, 关于孔隙水压对土体稳定性的影响有较多的争论, 测定孔隙水压也比较困难, 目前一般是用关系式 $U_i = \gamma_w h_i \lambda_i$ 求孔隙水压。式中 γ_w 是水的比重 (t/m^3); h_i 是在滑塌面上滑落体单元的地下水位; λ_i 是在滑塌面上滑落体单元的长度。

在运用公式(1)进行稳定性计算和分析时, 要设定滑塌面的角度, 所以, 对滑塌面形状的设定, 不会影响对滑落体的稳定性分析。为了方便建立滑塌面的倾角与滑塌面深度的关系, 假设滑体的走向截面为三角形(图 2b), 则坡长 λ , 坡角 α , 坡长为 γ 处距滑移面的深度 h , 滑移面的角度 θ , 滑移面的长度 L 等参数有下列关系式:

三角形的截面积

$$A = \frac{1}{2} h \lambda \cos \alpha, \quad \cos \theta = l \cos \alpha / L$$

滑移面长

$$L = \sqrt{h^2 + l^2 - 2hl \sin \alpha}, \quad \sin \theta = (l \sin \alpha - h) / L$$

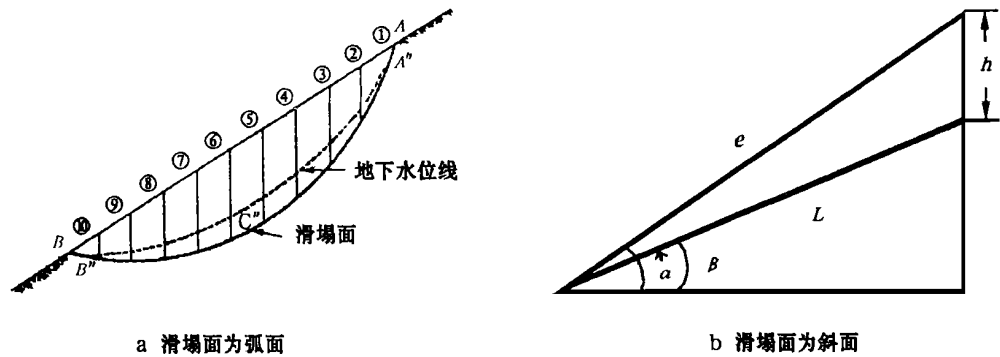


图2 滑落体的模型
Fig. 2 Model of sliding objects

用表 1 的湿密度的平均值表示土的密度 ($\gamma_s = 1.79 \text{ t/m}^3$), 由于孔隙水压的测定比较困难, 有资料显示^[1], 用常用的方法测定的孔隙水压对滑塌面作用力的贡献占滑落体本身贡献的十分之一, 下面分析中将忽略这一项。关于土的内磨擦角和粘着力, 参考有关广东各地花岗岩风化壳的剪切试验结果^[1], 以其平均值作为计算分析中的 C 和 φ ($C = 0.29 \text{ T/m}^2$, $\varphi = 31.8^\circ$)。

根据式(1)简化而成的公式 $F = (N \tan \varphi + CL) / T$ (2)
式中 $N = A \gamma_s \cos \theta = 0.5 h \lambda \gamma_s \cos \theta \cos \alpha$, $T = A \gamma_s \sin \theta = 0.5 h \lambda \gamma_s \sin \theta \cos \alpha$ 。由此推导出下列等式

$$F = \frac{\cos \theta \tan \varphi}{\sin \theta} + \frac{CL}{0.5 h \lambda \gamma_s \cos \alpha \sin \theta} \tag{3}$$

取 $\varphi = 31.8^\circ$, $C = 0.29 \text{ t/m}^2$, 并令 $F = 1$, 求得包括 γ 、 h 和 a 三项参数, 关于 h 的一元二次方程 $(1 + 3.1 \lambda) h^2 + (1.93 \lambda^2 \cos^2 \alpha - 2 \lambda \sin \alpha - 3.1 \lambda^2 \sin \alpha \cos \alpha) h + \lambda^2 = 0$ (4)

设定不同的坡角 α 和坡长 λ , 求出 α 、 λ 与 h 的对应关系(表 2)。

1) 粤西、珠江口、粤东工程地质勘察报告, 广东省第三水文地质勘察大队, 1983。
©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 不同坡长和坡度时的滑移面深度(m)
Table 2 Depths of sliding planes at different slopes and different slope lengths(m)

坡长(m)	35°	38°	40°	43°	45°	50°	55°	60°
10	—	—	—	—	—	—	1.37	1.18
50	—	—	—	2.32	1.87	1.41	1.23	1.16
100	—	4.81	3.11	2.10	1.77	1.38	1.22	1.16
150	—	3.86	2.89	2.05	1.74	1.37	1.22	1.16
200	—	3.63	2.81	2.02	1.73	1.37	1.22	1.16
250	—	3.52	2.76	2.01	1.72	1.37	1.22	1.16
300	—	3.45	2.73	2.00	1.72	1.36	1.22	1.15
350	—	3.41	2.71	1.99	1.72	1.36	1.22	1.15
400	—	3.38	2.70	1.99	1.71	1.36	1.22	1.15
450	10.77	3.35	2.69	1.99	1.71	1.36	1.22	1.15
500	9.52	3.33	2.68	1.98	1.71	1.36	1.22	1.15
600	8.56	3.31	2.67	1.98	1.71	1.36	1.22	1.1

从表 2 可以看出, 随着坡度的增大, 滑塌面的深度越小, 相同坡度不同坡长时, 随坡长的增大, 滑塌面的深度越小。也就是一定坡度和坡长的坡体, 当滑塌面在坡体稳定的临界深度以下时, 坡体就要崩落下滑。雨水的渗透和地下水位抬升是主要的诱导因素, 当连续的降雨渗透到坡体稳定的临界深度, 使土体的剪切强度急剧降低, 坡体就崩落或下滑。水库蓄水等使地下水位抬升, 也是坡体稳定性变化的潜在影响因素, 当有以上两种情况出现时, 要根据坡体的地形地质特征, 做好防治工作。

4 降雨对坡体稳定性的影响

在一定的地质环境中, 降雨对坡体稳定性的影响, 是通过地表水的渗透而起作用。一方面雨水下渗, 坡体的容重增加, 水压力增大; 另一方面深部土体的饱和度达到一定值时, 抗剪强度急剧降低。雨水的湿润前锋通常用下列公式来计算

$$h=\sqrt{Dt}+\frac{kt}{n(S_f-S_0)}$$

式中 k 和 D 分别为渗透系数和扩散系数, 都是关于含水量或饱和度的变量, n 为土体的孔隙度, S_f 和 S_0 分别为土体的初始饱和度和最终饱和度, t 是渗透时间。

在实际的渗透过程中, 只有降雨强度大于雨水的渗透率时, 湿润前锋才会移动, 香港地区风化花岗岩 1950~1959 年降雨强度与湿润前锋研究的资料表明, 只有在降雨强度为 15 mm/h~20 mm/h 时, 才对风化花岗岩产生显著影响, “华南坡地研究” 项目组 1989—08~1990—06 对珠海地区的 9 次降雨监测表明^[3], 达到这个降雨强度的几率将近 50%, 也就是降雨对雨水的渗透有充分的补给, 只要降雨时间足够长, 雨水就能渗透到足够的深度。

采用文献^[3]中的香港地区风化花岗岩的扩散系数($D=1.4\text{ m}^2/\text{h}$)和渗透系数($k=0.018\text{ m/h}$), 根据表 2 的各风化剖面的物性参数值, 计算理论上的湿润前锋(表 3), 由表中的计算结果可以看出, 在风化剖面中, 具有一定强度的降雨, 2 小时内可以渗透 2 m 左右的深度, 这样的降雨时间在广东的雨季是很常见的, 也就是说, 2m 左右是每次降雨的湿润前锋, 在这个深度范围内, 土体呈饱和状态。另外, 从表 3 的时间与湿润前锋的关系来看, 随着降雨时间的增加, 湿润前锋的深度也会增大, 但这是指在一次降雨时间内。而既具有一定的降雨强度, 时间又>2 h 的降雨则较少见, 所以就一次降雨而言, 其湿润前锋的深度不会超过 2 m, 但对于间隔较短的多次降雨来说, 湿润前锋的深度还会增加。因此, 根据表 2 中坡度与临界稳定深度的关系, 可以推测坡度<43°的坡体, 其稳定性就受较大影响, 其滑落的可能性增大。

表 3 不同时间内花岗岩风化剖面的湿润前锋深度(m)

剖面层位	降雨时间(h)			
	1	2	3	4
ZC-1-1	1.4	2.0	2.6	3.1
ZC-1-2	1.3	1.9	2.5	2.9
ZC-1-3	1.4	2.1	2.7	3.3
ZC-2-1	1.3	1.9	2.3	2.7
ZC-2-2	1.3	2.0	2.5	3.0
ZC-2-3	1.3	2.8	2.5	2.9
DJS-1	1.3	1.8	2.3	3.7
DJS-2	1.4	2.2	2.8	3.3
DJS-3	1.3	1.9	2.4	2.9
FEL-1	1.3	1.9	2.4	2.8
FEL-2	1.3	1.9	2.4	2.8
FEL-3	1.6	2.5	3.2	4.0
FEL-4	1.4	2.1	2.6	3.2
YEL-1	1.4	2.2	2.8	3.4
YEL-2	1.6	2.6	3.4	4.2
YEL-3	1.4	2.1	2.6	3.2

一次降雨影响坡度较大坡体的稳定,而多次降雨可导致坡度较小坡体的稳定,图3是日本某地的雨量与坡体灾害的关系图^[3],至两天前的两周内降雨总量与当前雨量共同决定坡体的稳定性。这说明降雨对坡体的作用具有累积效应,前期降雨在坡体中的累积,使得当前降雨的湿润前锋增大,坡体较深部位的含水量达到或接近饱和状态,从而使土体的强度降低,导致体积较大的坡体崩落下滑,一般而言,没有前期降雨的累积效应,坡体崩塌滑落的规模不会太大,而时间间隔较长的降雨,或者强度较小的降雨,以及持续时间较短的降雨,都不会引发崩岗。

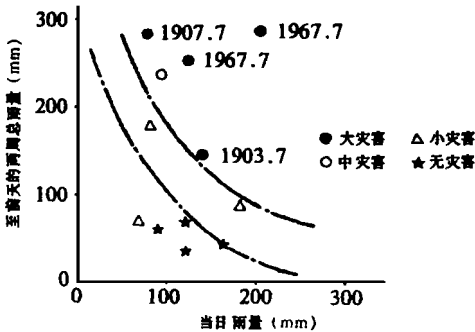


图 3 日本某地降雨与坡面灾害的关系

Fig. 3 Relationship between precipitation in someplaces Japan, and calamities on the hillside slopes

E. W. Brand 等人通过对香港近20 a(1963~1969)有关崩岗(滑坡)的资料分析和研究,提示了记录在案的大多数土体灾害事件几乎都发生在雨势高峰期之后4 h以内,只有约10%的土体灾害发生在16 h以后。这说明雨水对坡体的作用发生在降雨后的4 h以内,降雨后的渗透是没有雨水补充的渗透,应比降雨时的渗透作用弱些,其湿润前锋的增加量,小于相同时间降雨中湿润前锋的增加量,而表3说明4 h降雨的湿润前锋为3 m左右,所以雨后渗透的湿润前锋应小于该值。分析降雨后4 h以内发生土体灾害频率高的原因,一方面是雨水的扩散作用增加了湿润前锋的深度,另一方面,也可能是比较重要的方面,只有经过雨后的段时间,雨水与土体充分作用,土体力学性质

才发生明显的变化,也就是说,一定深度土体性质的变化与雨水渗透到该深度,在时间上存在着滞后效应。

李焯芬等人^[4]根据20 a来有关降雨与土体灾害的资料,认为前期雨量并不是滑坡或崩岗的主要因素,滑坡事件的发生在很大程度上取决于短期降雨强度。本文经过以上分析认为,虽然滑坡或崩岗是在当前降雨之后的一段时间内发生,表面看来,滑坡或崩岗是当前降雨导致的结果,而实际上,若没有前期降雨在土体中的累积效应,一次降雨的湿润前锋很难达到滑坡或崩岗所需要的临界深度。所以说当前降雨之前坡体中的含水量,决定当前降雨的湿润前锋深度,是影响坡体稳定性的重要因素。在对灾害的预测、预报工作中,应该对前期降雨的频率、降雨时间、雨量的大小等降雨特征进行充分的分析,结合

当前降雨的特征, 正确评价坡体的稳定性, 才能对灾害做出及时准确的预报。

6 结论

通过建立花岗岩风化剖面的崩岗物理模型, 对不同坡度条件下的坡体稳定性进行了分析, 结果表明:

1. 在不同的坡度和坡长条件下, 计算出坡体滑动或崩塌面的临界深度值, 坡体临界深度以下土体性质是否变化, 决定坡体的稳定性。
2. 根据降雨在坡面的渗透前锋与降雨时间的关系, 计算出一定强度的降雨在 2 h 内的湿润前锋为 2 m 左右, 结合理论计算的坡体稳定临界深度值, 分析了降雨对坡体稳定性的影响。
3. 基于崩岗发生的资料统计结果, 结合计算出的坡体稳定临界深度和湿润前锋随降雨时间的变化关系, 指出了前期降雨对当前降雨湿润前锋可能存在的影响, 并解释了雨后一定时间内崩岗高频发生的原因。
4. 根据花岗岩风化坡面的特征, 结合当前和前期降雨特点, 可以对坡体的稳定性进行预测, 避免崩岗对生命和财产造成损失。

参考文献:

- [1] 山口真一, 中村三郎. 地すべり・山崩れ—実態と対策[M]. 大明堂发行, 1974.
- [2] 张经纬, 姚清尹. 华南坡地研究[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 藤田崇, 平野昌繁. 地质论集, 第 28 号[R], 日本地质学会, 1986.
- [4] 李焯芬, 陈红. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质工程地质, 1997 (4): 34~38.

FORMATION MECHANISM OF CALAMITIES DUE TO BENGGANG PROCESSES OF WEATHERED GRANITIC ROCKS

WANG Yan-hua, XIE Xian-de and WANG Chun-yun

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640 China)

Abstract: Indices of physical properties for the profiles of weathered granitic rocks in Dajingshan of Zhuhai (DJS), Zengcheng (ZC-1, ZC-2), Feieling (FEL) and Yuanzhouling (YZL) of Yangjiang, Guangdong were measured in this project. The stable critical depth of each slope was calculated through construction of the mathematical model for the *benggang* process and assumption of different parameters for the slope conditions. Results indicate that when the slope is less than 43° , the stable critical depth of a slope's greater than 2m. The damp front within different permeability characteristics of rainfalls into the profile of weathered granitic rocks. Results of comparisons of the critical depth to the damp front influence of precipitation within different periods on slope's stability was also explored in reference to the statistical results of the calamities due to *benggang* processes in Japan and in Hong Kong.

Key words: Granitic rock; weathering; *benggang*; mechanism