

花岗岩残积土开挖边坡的工程特性

吴能森

(福建农林大学交通学院, 福建 福州 350002)

摘要: 为研究开挖效应对花岗岩残积土工程特性的影响, 进行压缩性和抗剪强度试验, 研究应力卸荷、饱和软化、失水干缩的影响以及注浆加固效果, 然后从几何微结构及其损伤角度, 研究其开挖边坡滑动的微观机理, 主要结果有: 边坡开挖后, 随着临空面的形成和暴露, 失水干缩、应力卸荷及饱和软化等开挖效应将导致土体弱化, 而且当它们共同作用时, 弱化效应叠加; 对花岗岩残积土注水泥浆, 可修复并增强土体的微结构, 减弱开挖效应; 提出的微结构几何模型, 基本反映了花岗岩残积土的微观特征, 可较好地解释开挖效应, 揭示开挖边坡的滑动破坏机理。研究成果可为花岗岩残积土开挖边坡防护的设计、施工及新技术研究提供概念上指导和参考。

关键词: 花岗岩残积土; 开挖边坡; 开挖效应; 微结构; 几何模型; 滑坡机理

中图分类号: P642

文献标识码: A

边坡失稳是仅次于地震的第二大地质灾害, 是工程建设中经常遇到的广泛而严重的问题。花岗岩在我国东南部的分布相当广泛, 其出露面积, 闽、粤两省约占其总面积的 30% ~ 40%, 桂、湘、赣三省约占其总面积的 10% ~ 20%。花岗岩节理发育, 易风化而形成很厚的红色风化壳, 即花岗岩残积土。残积土层厚度在闽粤沿海地区一般为 20~35 m, 最厚逾 70 m, 因此, 花岗岩残积土是开挖边坡经常遇到的主要土体之一。以福建省山区二级公路路堑滑坡为例, 花岗岩残积土路堑滑坡约占 30%。张文华曾对花岗岩残积土失稳边坡进行了调查和统计, 结果是沿原生和次生结构面的滑动分别占 42% 和 37%, 原生和次生结构面对花岗岩残积土的边坡失稳起了决定性作用^[1]。

花岗岩残积土具有显著的结构性^[2], 研究表明: 结构性对土的工程性质具有强烈的影响, 土体强度和变形之宏观现象, 都是土体结构微观改变的统计结果^[3]。为此, 本文首先针对花岗岩残积土边坡的开挖效应, 即开挖引起的应力卸荷、饱和软化、失

水干缩, 以及注浆加固效果进行室内试验研究, 然后根据花岗岩残积土的成因、物质组成及粒度分布特征, 提出花岗岩残积土微结构几何模型, 并从结构性损伤角度, 分析开挖边坡土体的微结构变化和次生结构面的形成与发展, 揭示滑坡的微观机理, 为花岗岩残积土开挖边坡防护的设计、施工及新技术研究提供概念上指导和参考。

1 花岗岩残积土试验

先后结合 2 个工程, 分别取样进行室内压缩性和抗剪强度试验, 研究卸荷、饱和、失水的不利影响及注水泥浆的加固效果。

1.1 压缩性试验

研究开挖后卸荷、饱和、失水对压缩性的影响, 试验仪器为 WG-1 型三联固结仪。

1.1.1 样地及土样

经踏勘, 选择京福高速公路南平连接线 LAN1 合同段上马石大桥附近、西芹至塔前公路旁的坡地

收稿日期 (Received date): 2006-03-01; 改回日期 (Accepted): 2006-05-20.

基金项目 (Foundation item): 福建省高等学校科技项目 (编号: JA03063) 资助。[Supported by the Education Department of Fujian Province (No. JA03063)]

作者简介 (Biography): 吴能森 (1964-), 男, 福建福清人, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学及工程结构研究。E-mail: fufuwn@163.com, 电话: 0591-83789454 [Wu Nengsen (1964-), male, born in Fuqing city, Fujian Province, doctor, associate professor, mainly engaged in research of geo-mechanics and engineering structures]

作为样地,其地貌单元为丘陵坡地,自然坡度约20°,经坑探,表层0.9~1.2 m主要为坡积粘土,以下就是花岗岩残积土,呈浅红棕色,湿,可塑~硬塑,稍可见原岩结构及黑褐色铁锰质侵染。

现场挖一个3 m见方、最小深度1.5 m的探坑,用标准混凝土试模(150 mm×150 mm×150 mm)取样,共取10盒土样,样盒及时用塑料薄膜和透明胶带封闭。经颗粒分析,其粒度组成如下: > 5 mm占1.2%, 5~2 mm占12.6%, 2~0.5 mm占18.5%, 0.5~0.25 mm占8.9%, 0.25~0.074 mm占11.2%, < 0.074 mm占47.6%; 经物理试验,其各项物理性指标为:含水量 $\omega=27.3\%$,天然重度 $\gamma=18.1\text{ kN/m}^3$,土粒比重 $d_s=2.70$,天然孔隙比 $e=0.90$,饱和度和 $S_r=81.9\%$,液限 $\omega_L=41.5\%$,塑限 $\omega_p=25.0\%$,液性指数 $I_L=0.14$,塑性指数 $I_p=16.5$ 。

表 1 压缩试验结果

Table 1 The confined compression test results

组别 试样编号	1			2			3			4		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	4-1	4-2	4-3
$\alpha_{1-2}/(\text{MPa})$	0.19	0.24	0.27	0.21	0.26	0.29	0.31	0.34	0.39	0.37	0.40	0.51

可见,虽然花岗岩残积土具有较高的孔隙比,但在取样和试验操作过程中,当试样的应力卸荷及含水量变化很小时,试验测得的压缩系数较小,属中低压缩性;当有了侧向应力卸荷(拆模)后,随着时间的增加,试样的压缩性增大,而且应力卸荷后第1个48 h的增幅比第2个48 h大。

在应力卸荷的情况下,试样由天然含水量状态变成饱和状态,压缩性增大,这说明应力卸荷和软化效应叠加。厦门嵩屿电厂花岗岩残积土地基浸水后,变形模量降低了将近21%^[5],可见浸水软化效应比较显著。

试样经风干或烘干后,由于干缩拉应力的作用,压缩性增大。失水越多,压缩性越大,且急剧失水比缓慢失水的效应大得多。试样在应力卸荷情况下风干或烘干,压缩性增大最为显著。

1.2 抗剪强度试验

研究饱和软化对土样强度的不利影响和注水泥浆的加固效果,直剪试验仪器为ZJ型应变控制式直剪仪,三轴试验仪器为KTG型全自动三轴仪。

1.2.1 土样情况

1.1.2 试验方案

进行4组侧限压缩试验,每组试样各3个。第1组研究在天然含水量状态下,卸荷对压缩性的影响,3个试样1-1、1-2、1-3的应力卸荷时间分别为0 h、48 h、96 h;第2组研究饱和状态下,卸荷与饱和共同对压缩性的影响,3个试样2-1、2-2、2-3的饱和与应力卸荷时间分别为24 h、72 h、120 h;第3组研究侧限条件下,失水干缩对压缩性的影响,3-1、3-2试样分别自然风干72 h、120 h,3-3试样为烘干;第4组研究卸荷与失水干缩共同对压缩性的影响,4-1、4-2、4-3试样均在应力卸荷状态下,分别自然风干72 h、120 h及烘干。试样制作方法,见文献[4]。

1.1.3 试验结果及分析

试验结果,见表1($e-p$ 曲线略)。

试验土样取自福州市马尾区,结合某工程地质钻探进行试验取样。该场地燕山期花岗岩残积土埋深2.8~3.3 m,厚度7.3~11.2 m,试验取样在邻近的8#和9#2个技术孔进行,为进行三轴压缩试验,在残积层上段采取试样,土样呈褐黄、灰黄色,很湿,软塑~可塑状态。土样的平均粒度组成为:>2 mm占10.7%, 2~0.5 mm占14.6%, 0.5~0.25 mm占10.4%, 0.25~0.074 mm占8.9%, <0.074 mm占55.4%;各物理性指标平均值为: $\omega=32.8\%$, $\gamma=17.68\text{ kN/m}^3$, $d_s=2.72$, $e=1.04$, $S_r=85.7\%$, $\omega_L=37.7\%$, $\omega_p=24.5\%$, $I_L=0.63$, $I_p=13.2$ 。

1.2.2 饱和和软化影响试验

取8#孔5组试样(天然含水量状态和饱和后0 h、24 h、48 h、72 h各1组),进行直接快剪试验,试验仪器为ZJ型应变控制式直剪仪。结果见表2和图1($\tau-\sigma$ 曲线略,下同)。

取9#孔5个试样(天然含水量状态和饱和后0 h、24 h、48 h、72 h各1个),进行三轴固结不排水剪试验,在围压200 kPa下测得试样破坏时的偏应力。结果见表3和图2($(\sigma_1-\sigma_3)\sim\varepsilon$ 曲线略)。

表 2 直接快剪试验结果

Table 2 The direct quick shear test results

土样组别	1		2		3		4		5	
土样状态	天然含水量状态		浸水饱和后 0 h		浸水饱和后 24 h		浸水饱和后 48 h		浸水饱和后 72 h	
$c/(kPa), \varphi(^{\circ})$	24.0	13.9	22.9	13.7	19.6	13.5	18.5	13.4	18.1	13.3

表 3 三轴固结不排水试验结果 (1)

Table 3 No. 1 results of triaxial consolidated-undrained test

试样编号 (图中代号)	S- 1(1)	S- 2(2)	S- 3(3)	S- 4(4)	S- 5(5)
试样状态	天然含水量状态	渍水饱和后 0 h	渍水饱和后 24 h	渍水饱和后 48 h	渍水饱和后 72 h
$\Delta\sigma_y/kPa$	257	253	244	237	233

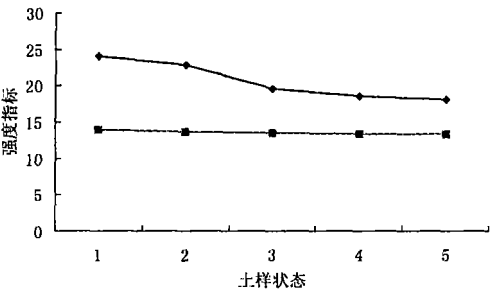


图 1 c, φ 值与土样状态关系

Fig 1 Relationship between c, φ and soil

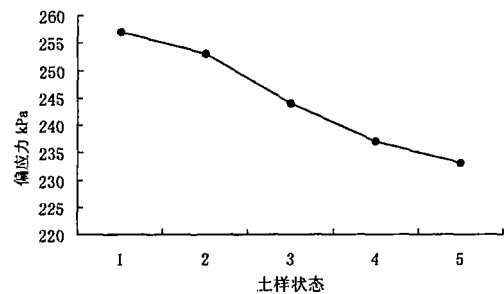


图 2 偏应力与土样渍水状态关系图

Fig 2 Relationship between deviator stress sample states and softened soil sample states

1.2.3 注水泥浆影响试验

取 8#孔土样中 8 个试样进行三轴固结不排水剪试验, 其中第 1 组 4 个土样为天然含水量状态, 第 2 组 4 个为经注浆处理后试样。试验结果见表 4 ($\tau \sim \sigma$ 曲线略)。

再取 9#孔 4 个试样, 分别经注浆处理后养护 3、4、5、6 d 进行三轴剪切固结不排水剪试验, 在围压 200 kPa 测得试样破坏时的偏应力。试验结果见表 5 和图 3 ($(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 曲线略)。

试样的注浆处理方法如下: 土样切削加工后风干 24 h 先用直径约 0.1 mm 的硬钢丝沿土样轴向按间距 6~7 mm 扎孔, 然后用滴管将制备好的水泥浆 (水灰比为 1.0) 向孔内滴注, 并用硬钢丝插捣, 直至水泥浆无法注入为止, 放入恒温保湿箱养护至设定时间。

表 4 三轴固结不排水试验结果 (2)

Table 4 No. 2 results of triaxial consolidated-undrained test

试样状态							
天然含水量				状态水泥浆处理, 养护 3 d			
c_{cu}	φ_{cu}	c'	ϕ'	c_{cu}	φ_{cu}	c'	ϕ'
(kPa)	($^{\circ}$)	(kPa)	($^{\circ}$)	(kPa)	($^{\circ}$)	(kPa)	($^{\circ}$)
25.5	13.2	29.5	16.3	22.0	21.7	26.0	25

表 5 三轴固结不排水试验结果 (3)

Table 5 No. 3 results of triaxial consolidated-undrained test

试样编号 (图中代号)	S- 1(1)	S- 6(2)	S- 7(3)	S- 8(4)	S- 9(5)
试样状态	天然含水量状态	水泥浆处理, 养护 3 d	水泥浆处理, 养护 4 d	水泥浆处理, 养护 5 d	水泥浆处理, 养护 6 d
$\Delta\sigma_y(kPa)$	257	364	395	417	429

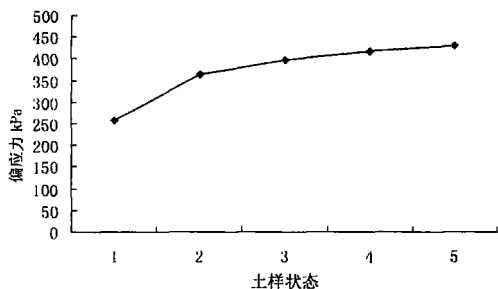


图 3 偏应力与加固土样状态关系图

Fig 3 Relationship between deviator stress and strengthened soil sample states

1.2.4 试验结果分析

直剪试验表明(见图 1),试样饱和后抗剪强度降低,但主要是粘聚力的减小,内摩擦角仅略有减小,几乎可以忽略。这是因为内摩擦角主要取决于粗粒组含量,粗粒组含量(尤其是粗砂以上粒组)愈高,内摩擦角受饱和和软化的影响愈小。应力卸荷和干缩的影响也是如此。刘建生等曾对厦门某工程的粗粒花岗岩残积土,分别进行了原状土的现场直剪试验和扰动、应力卸荷土样的室内直剪试验,结果室内的粘聚力大都远小于现场值,而室内的内摩擦角大于现场值^[5]。这个结果与上述分析是吻合的,至于室内的内摩擦角反而大于现场值,也正是由于土样中粗颗粒的尺寸效应所致。

图 1 表明,试样刚饱和时,粘聚力减小不多,饱和 24 h 后减幅最大,之后随着时间的增加,粘聚力减幅变小。图 2 的偏应力变化规律也是如此,但偏应力的降幅大于粘聚力,这主要是三轴试样制备时应力卸荷时间较长的缘故。由于试样的饱和度较高(天然状态花岗岩残积土通常如此),根据非饱和土理论,刚饱和时因孔隙气压力消失而失去的基质吸力不大,因此强度降低不多。但随着土中起胶结作用的游离氧化物溶解于水,土的抗剪强度显著降低。

图 3 表明,经注浆处理后试样,抗剪强度有较明显的提高,而且抗剪强度随着养护时间的增加而增大,其中前 3 d 强度增幅最大,这与水泥的强度增长特性相符。但强度提高表现为内摩擦角增大,粘聚力反而略有减小,这可能是由于扎孔引起的土样微结构扰动,而无压注浆的渗透范围极小,基本局限在针孔范围内,起不到对土样微结构的修复作用,水泥浆的主要作用是在试样中形成一些强度相对较高的“柱子”而起到加固效果。由此可以预见,压力注浆不仅会使内摩擦角增大,而且将修复并增强土体的

微结构,使粘聚力显著增大,大大提高花岗岩残积土的抗剪强度。

2 花岗岩残积土坡滑动的微观机理

2.1 花岗岩残积土微结构几何模型

研究表明:南方花岗岩残积土经过了强烈的淋滤作用,竖向淋溶大孔隙发育,是含较多胶结物(游离氧化物)、活动性较低的土体。在物化特性上表现为可溶盐和有机质含量均很少, pH 值很低,游离氧化物含量较多,阳离子交换容量较小,比表面积很小^[6,7]。

在粒度构成上,南方花岗岩残积土的粒度分布通常呈“两头多,中间少,粗细均衡”特征,即 $> 0.5 \text{ mm}$ (粗砂以上)和 $< 0.074 \text{ mm}$ 的颗粒含量多,而 $0.5 \sim 0.074 \text{ mm}$ (中、细、粉砂)少;以 0.074 mm 为界,粗、细粒组的总量较接近^[4,8]。

上述的成因、组成及粒度分布特征,决定了花岗岩残积土的微结构:由粗粒(砾粒、粗砂及部分中砂)构成土骨架,粗粒之间主要由游离氧化物包裹及填充实现联结,以及来自原岩矿物晶粒间的残存联结,而填充粗粒骨架的中细砂及粉砂的含量少,孔隙比较大。该组构已得到扫描电镜图像的分析验证^[2]。

在未开挖的半无限体状态时,花岗岩残积土的微结构可以理想地抽象为带侧向约束的多层框架(或剪力墙)结构,见图 4。柱(或墙肢)由砾粒及粗砂胶结搭砌而成,横梁由砾粒或少量的粗、中砂粒胶结嵌固构成。在侧向约束条件下,截面较大的柱(或墙肢)具有较高的抗压和抗剪承载力,相对而言,横梁明显比柱(或墙肢)弱。

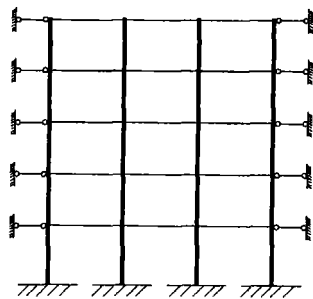


图 4 原状微结构模型

Fig 4 Undisturbed microstructure model

2.2 开挖坡体破坏的微观机理

开挖边坡,即侧向应力卸荷,这对无抗拉能力的

土体来说, 相当于在原侧向约束处施加一个拉力, 在拉力作用下, 横梁首先被拉裂, 导致横梁与柱或墙肢之间的“刚接”关系破坏, 变成“铰接”关系, 见图 5。但这种“铰”无抗拉能力, 实际上就是裂隙, 显然上下“铰”的贯通就形成了所谓的次生结构面。失水干缩及取样、运输及试验操作等扰动的作用效果也是如此。

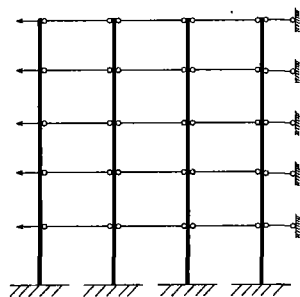


图 5 扰动微结构模型

Fig 5 Disturbed microstructure model

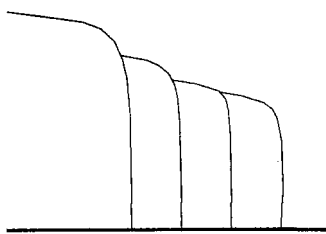


图 6 沿次生结构面破坏

Fig 6 Failure along secondary structural surface

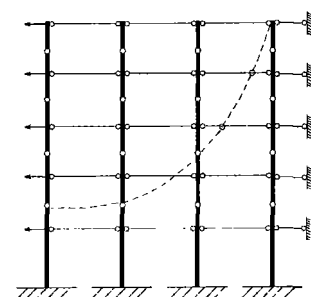


图 7 破坏微结构模型

Fig 7 Failure microstructure model

一方面, 次生结构面不仅使土体的整体性和刚度大为削弱, 减弱柱或墙肢的约束, 使其承载力大大降低, 可能直接导致土体沿次生结构面破坏, 见图 6。另一方面, 次生结构面为雨水、地面水的渗透提供了更直接的通道, 使大量的雨水、地面水快速地在原生结构面积聚, 诱发坡体沿原生结构面滑动。由于

起胶结作用的游离氧化物可溶于水, 因此水的渗透将进一步削弱土体的微结构, 当微结构的所有柱或墙肢中都出现了“铰”, 土体的微结构模型就成为几何可变体系, 土体破坏, 见图 7。

3 结语及探讨

试验研究表明: 花岗岩残积土虽然具有较大孔隙比, 但接近于天然原位状态时, 其压缩性较低、强度较高; 失水干缩、应力卸荷及饱和软化都会导致其压缩性增大、强度降低, 强度降低主要表现为粘聚力的减小。其中, 失水干缩的损伤效应最大, 其次是应力卸荷和饱和软化, 当它们共同作用时, 损伤效应叠加; 急剧失水干缩效应最显著, 应力卸荷的不利影响先大后小; 对花岗岩残积土注水泥浆, 可修复并增强土体的微结构, 使粘聚力显著增大, 并可减弱开挖效应特别是饱和软化效应。

花岗岩残积土边坡开挖, 随着临空面形成和暴露, 上述的各开挖不利效应随之而来, 除应力卸荷的不利影响是先大后小外, 失水干缩和饱和软化不利效应必将随着气候的反复变化而不断累积, 使土体逐渐弱化, 最终导致破坏。文中提出的花岗岩残积土微结构几何模型, 基本能够反映花岗岩残积土的微观特征, 可较好地解释应力卸荷、失水干缩、饱和软化等各种损伤效应, 揭示开挖边坡的次生结构面生成和滑动破坏机理。

花岗岩残积土开挖边坡防护的设计、施工及新技术研究, 必须针对它的工程特性, 尽量充分利用原状土体强度较高的优点, 设法减轻开挖效应的不利影响。基于上述研究结论, 初步提出以下几点看法, 供参考: 应采用主动支护 (如锚杆、土钉支护等), 而不可采用被动支护 (如抗滑桩、重力式挡墙等)。因为主动支护法可最大限度地利用花岗岩残积土较高的天然强度, 而被动支护法不仅做不到这一点, 而且随着土体的弱化, 最终往往要失效; 在开挖前或开挖过程中, 可采用诸如压力注浆等措施, 修复并增强土体的微结构, 恢复甚至进一步提高土的粘聚力, 进而提高土体强度和抵抗失水干缩与饱和软化等损伤效应的能力; 边坡开挖及支护结构的施工, 应尽量减少临空面的形成与暴露时间, 最大限度地减弱开挖效应, 如采取局部开挖、随挖随支、超前支护、逆作法等技术方法及措施。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Wenhua. The shear strength of granite residual soil and stability analysis on soil slope. *Geohydrology and Engineering Geology*, 1994, (3): 41~43 [张文华. 花岗岩残积土的抗剪强度及土质边坡稳定分析[J]. 水文地质工程地质, 1994 (3): 41~43]
- [2] Hu Ruilin. Quantitative Studies of Micro-mechanism on Engineering Characters of Special Soils [Ph. D. Thesis]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, 2000. 55~66 [胡瑞林. 特殊土工程性质的微观机理定量研究[博士后论文][D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2000. 55~66]
- [3] Leroueil S, Vaughan P R. The general and congruent effect of structure in natural soils and weak rocks [J]. *Geotechnique*, 1990, 40: 467~488
- [4] Wu Nengsen. A Study on Characteristics and Some Engineering Problems of Granite Residual Soil With Structural Nature [Ph. D. Thesis]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005. 12~24, 40~67, 81~99 [吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[学位论文][D]. 南京: 南京林业大学, 2005. 12~24, 40~67, 81~99]
- [5] Liu Jiansheng, Wang Xiaoyu, Song Mingdong. A geo-engineering report on the entirely weathered granite in Xiamen Songyu Electricity Plant [A]. In: China Reconnaissance and Design Association. The Geo-engineering Memoir of 5th National Geo-engineering Communion Meeting [C]. Beijing: Weapon Industry Press, 2000. 167~171 [刘建生, 王晓渝, 宋铭栋. 厦门嵩屿电厂全风化花岗岩的岩土工程实录 [A]. 见: 中国勘察设计协会. 第五届奇全国岩土工程实录交流会岩土工程实录集 [C]. 北京: 兵器工业出版社, 2000. 167~171]
- [6] Wang Qing, Tang Daxiong, Zhang Qingyun, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 1991, 21(1): 73~81 [王清, 唐大雄, 张庆云, 等. 中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究 [J]. 长春地质学院学报, 1991, 21(1): 73~81]
- [7] Wu Nengsen, Zhao Chen, Hou Weisheng. Research on the cause of formation, distribution and engineering characteristics of granite residual soil. *Journal of Pingdingshan Institute of Technology*, 2004, 13(4): 1~4 [吴能森, 赵尘, 侯伟生. 花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究 [J]. 平顶山工学院学报, 2004, 13(4): 1~4]
- [8] Zhang Yongbo, Zhang Yun, Chen Ge, et al. The system of engineering category dividing of granite residual soils. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1997, 18(2): 201~204 [张永波, 张云, 陈戈, 等. 花岗岩残积土工程类型划分体系研究 [J]. 地球学报, 1997, 18(2): 201~204]
- [10] Tan Juhong, Yan E'chuan. Influence and implication of water and fissure on slope stability. *Journal of Mountain Science*, 2004, 22(3): 373~377 [谭桔红, 晏鄂川. 水与裂隙对边坡稳定性的影响及工程应用 [J]. 山地学报, 2004, 22(3): 373~377]
- [11] Wu Nengsen, Wu Yuqi, Zhao Chen. Evaluation on the development of bracing techniques and theory on cutting slopes. *Journal of Pingdingshan Institute of Technology*, 2003, 12(3): 62~65 [吴能森, 吴育琦, 赵尘. 路堑边坡支(防)护技术及理论发展评述 [J]. 平顶山工学院学报, 2003, 12(3): 62~65]

Engineering Characteristics of Cutting Slope of Granite Residual Soil

WU Nengsen

(College of Traffic, Fujian Agriculture-forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract In order to study excavation effects to engineering characteristics of the granite residual soil (GRS), some tests on compressibility and shear strength were carried out to study the effects of dried shrinkage, stress unloading, saturation softening and reinforcement of cement grout due to excavation, then the landslide mechanism of its cutting slope was researched from the angles of geometric microstructure and damage. The main results as follow: As the unrestrained surface is formed and exposed after slopes are excavated, dried shrinkage, stress unloading, saturation softening will cause GRS softening, moreover when they coexist, their softening effects will be intensified. When GRS is treated by cement grout, its disturbed microstructure will be restored and reinforced to a certain extent, and the softening effects will be weakened. The advanced microstructure geometric model of GRS accords with its micro-features essentially. Based on the model, the above-mentioned effects can be explained properly and the landslide micro-mechanism of GRS cutting slopes was revealed. The study conclusions will provide conceptual guidance and consult for design, construction and new technique research of the cutting slope protection.

Key words Granite residual soil; cutting slope; excavation effects; microstructure; geometric model; landslide mechanism