

全风化花岗岩化学及矿物成份 在全土和粘粒中的不同表征*

尚彦军¹ 岳中琦² 王思敬¹ 涂新斌¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室 北京 100029; 2. 香港大学土木工程系 香港)

摘要 对全风化花岗岩化学和矿物成份的测试常用全土和粘粒部分(粒径 $<2\ \mu\text{m}$)分别进行。业已发现两者由于物质组成和结构特征差异,对土工程地质性质所起作用不同。本文给出了6个全风化花岗岩样品的全土和粘粒部分筛分法和移液管法测定粒度成份,用X-荧光光谱仪做全量化学分析,及XRD矿物学分析的结果。对比这两部分数据发现,属于含砾土的这些样品化学成份的变化同矿物一致,尤其是同粘土矿物成份含量变化很一致。同全岩相比,粘粒化学成份中的 SiO_2 减少了近50%, K_2O 含量也降低,而 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 H_2O^+ 都明显升高。粘粒中氧化物相对含量升高者居多;全岩矿物成份以石英、粘土矿物和长石为主,粘粒中埃洛石和高岭石占大多数,其次为伊利石;粒度成份、化学成份和矿物含量相关性比较明显的是:石英和角砾正相关,和砂粒负相关,长石和砂粒正相关,粘土矿物含量和 Al_2O_3 、烧失量(LOI)和埃洛石含量正相关。

关键词 全风化花岗岩 全土 粘粒 化学成份 粘土矿物

中图分类号: P512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0563-5020(2005)01-0095-10

1 样品采集和实验方法

在东南沿海(尤其是山高坡陡的香港)地区广布的全风化花岗岩,既是很多高层建筑的地基,也是滑坡和碎屑流等地质灾害发生的物质基础,所以将全土和粘粒两者结果进行对比分析对阐明其工程地质性质、深入理解地质灾害发生机理有重要实际意义。

6个样品采自香港九龙石硤尾和观塘两地人工边坡上部,为晚中生代花岗岩(Strange and Shaw, 1986)的全风化土。

石硤尾(skm)边坡出露的基岩为红褐色中-粗粒黑云花岗岩。全风化花岗岩探坑中见陡接触蚀变带。全风化土体中残留缓倾原生冷凝面、中等倾斜剪节理。前者呈灰黑色条带,后者呈褐黄色条斑结构。样品开挖容易,风干后成散土状。观塘(kt)所采为褐黄色细粒全风化花岗岩,夹有粗大钾长石斑晶条块。探坑中见有一组剪节理和一组张节理。样品不易切削,易沿着陡倾节理面张开。

依据土木工程实验规范(中华人民共和国水利部,1999),粒度分析用筛析法及移液管法分别测定0.105 mm以上和以下的粒组,上、下界分别测定至5 mm和0.002 mm(即

* 香港大学边坡信息资讯中心资助项目(No. 1)部分成果。

尚彦军,男,1967年8月生,副研究员,水文工程地质专业。

2003-07-29 收稿,2003-10-16 改回。

粉-粘粒界限)。为保证样品均匀代表性,样品处理上采用了4分法和蒸馏水浸泡等措施。对粘粒的提取采用移液管法。

用于全量化学分析的制样设备是 TR-1000S Automatic Bead Fusion Furnace (SHIMADZU)。制样采用玻璃片法,稀释比1:5,试样 1.2 g,熔剂 ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 无水,高纯) 6.0 g, 100 °C 熔融 10 min。采用 X-射线荧光光谱仪 (XRD-1500 Sequential X-ray) 进行样品测定。分析采用标准曲线法(经验系数法)。程序名称:Rock-major。标样:中国国家一级岩石标准样 GBW07101-07114 等 18 个和日本地质调查所岩石标样 JSY-1 共 19 个。基体校正的数学模型为 DJ 公式。用灼烧法测定样品的烧失量(LOI)。此次分析随机抽取样品做平行样,测试过程中多次使用相关含量范围的标准样品进行质量监控,在标准曲线回归时采用 30 余个国内外标样及管理样进行线性回归。

用于矿物成份分析的样品,按照较成熟的分析程序(张乃娴等,1980,1990),全岩样品 XRD 分析先通过常规机械研磨获得 325 目 ($<0.05 \text{ mm}$) 粉末样品,将全部样品制成非定向样品片,在 DMAX2400 型 X-射线衍射仪上摄取 XRD 图谱。提纯的粘粒样品分别制成 3 个定向片(原样定向片、乙二醇处理定向片和加热处理定向片),在 X-射线衍射仪上摄取 XRD 图谱,对其进行分析和计算。工作条件:Cu 靶,电压 40 kV,电流 40 mA,扫描速度 $3^\circ/\text{min}$,发散狭缝 1° ,接收狭缝 0.3 mm,防散射狭缝 1° ,室温 25°C ,湿度 46%。扫描范围:全土样品 $3^\circ \sim 65^\circ$,粘粒样品 $3^\circ \sim 40^\circ$ 。

本次 XRD 定量分析测定矿物成份主要采用基体清洗法(即 K 值法,Chung, 1974a) 和自清洗法(即绝热法,Chung, 1974b) 两种方法结合完成。

2 测试结果

样品等分和标准化处理后,测得 6 个样全土和粘粒粒度成份、全量化学和矿物含量。

(1) 粒度成份

从粒度成份累积曲线(图 1)求得两处边坡土样不均匀系数 $C_u = 6 \sim 100$, 曲率系数 $C_c = 1 \sim 3$, 为良好级配的土,即不均粒土(唐大雄等,1987)。它们的粘粒含量基本不超过 10%。在角砾-砂粒-粉粘粒三端元组份图中样品基本都落在了含砾土范围,只有 skm1-3 为砾石土(唐大雄等,1987)(图 2,角砾粒径 $> 2 \text{ mm}$,砂粒粒径 $2 \sim 0.05 \text{ mm}$,粉粘粒粒径 $< 0.05 \text{ mm}$)。这点同 Irfan (1996) 给出的有关全风化花岗岩在三角投影图中的位置有一定差别,或许反映了原岩结构影响较大,这点也可从 skm 和 kt 样品的曲线形状差别看出(图 1)。

(2) 化学成份

同全土比较,粘粒中重量百分比变化较明显的氧化物是: Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 H_2O^+ 和烧失量(LOI)等升高, SiO_2 和 K_2O 降低(图 3)。LOI 是 H_2O^+ 、 H_2O^- 和挥发分之和,这里为突出表示这一能较好反映风化的指标,也将其同其它成份并列表示于图中。按 Doyné 红土分类标准,6 个样品粘粒的硅铝分子数比(SA)数值为 1.7~2,属于红土性红土,而其全土的值 7~10,属非红土性风化土。

为分析全土和粘粒中氧化物含量的关系,将各样品粘粒和全土两部分对应成份含量分别作为 X 和 Y 值,投影在双对数坐标图(图 4,两张图分别表示 skm 和 kt 样品的结果)

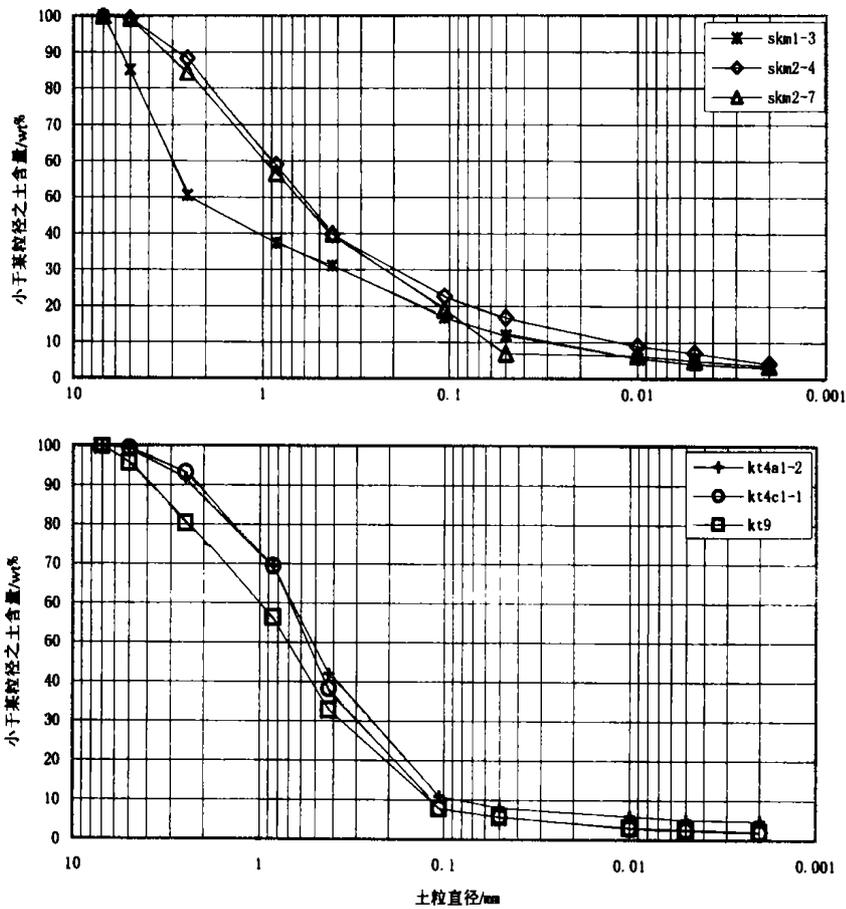


图 1 样品粒度成份累积曲线

Fig. 1 Cumulative curves of particle size distribution of CDG

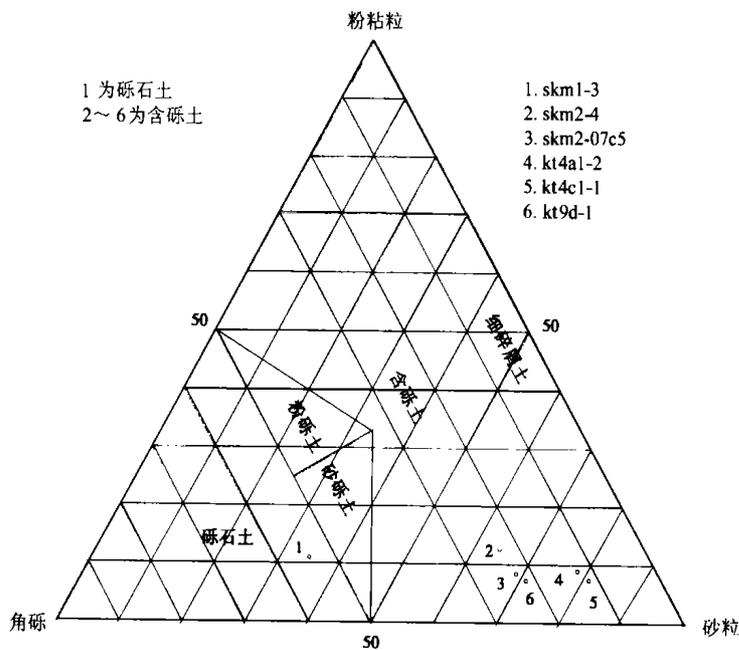


图 2 样品在角砾-砂粒-粉粘粒三角投影图中的位置

Fig. 2 Gravels-sands-silts and clays triangle with spots of CDG

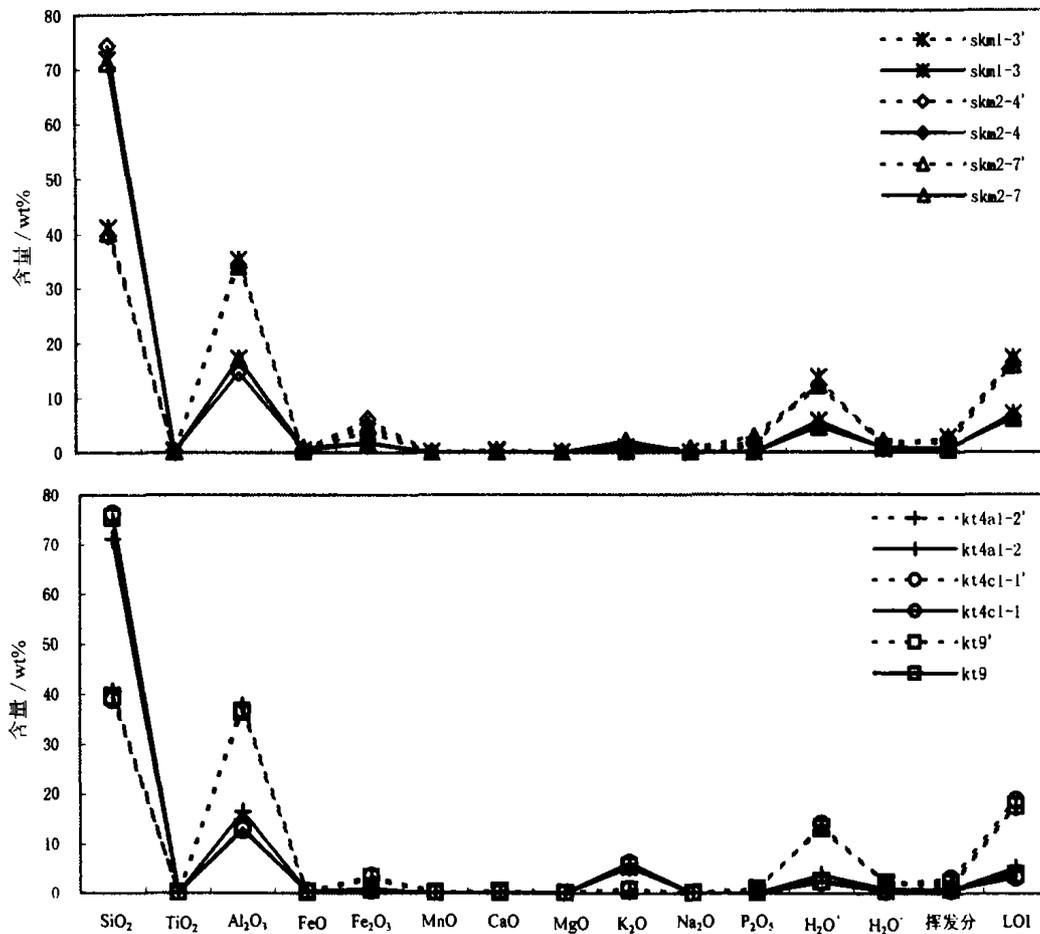


图3 全土和粘粒中化学成份变化对比

图中实线表示全土,虚线表示粘粒

Fig. 3 Chemical component contents in mass and in clay portions

上。从图中可以看出,两部分数值对应点在等对角线两侧摆动,高含量的 SiO_2 在粘粒中变少,而其它很多低含量的氧化物却增多,这或许与后者的挥发分相对含量增多有关。

(3) 矿物成份

全土矿物成份以石英居多(40%~60%),其次是粘土矿物和长石(图5)。而粘粒中埃洛石和高岭石占大多数(70%~90%)。对于含黑云母较多的 skm 样品,云母/蛭石占一定比重,而含钾长石斑晶较多的 kt 样品,伊利石、伊/蒙混层矿物和绿泥石含量较高。

3 数据相关性分析

全土和粘粒的粒度、化学和矿物成份间存在一定相关性。矿物成份在 XRD 分析中虽然给出的是半定量结果,但其在细化全风化土风化级别和分析土工程地质性质和土体改良中意义重大,这里着重分析它和化学、粒度成份间的相关性。

唐大雄等(1987)曾以消长图的形式描述了矿物成份同粒度成份的关系。本文结果分析反映出这两者相关性大小和性质有较大差别。比较明显的是,石英和角砾含量成正相关,和砂粒含量成负相关(图6a),而长石和砂粒呈正相关(图6b),粘土矿物同粉粒以

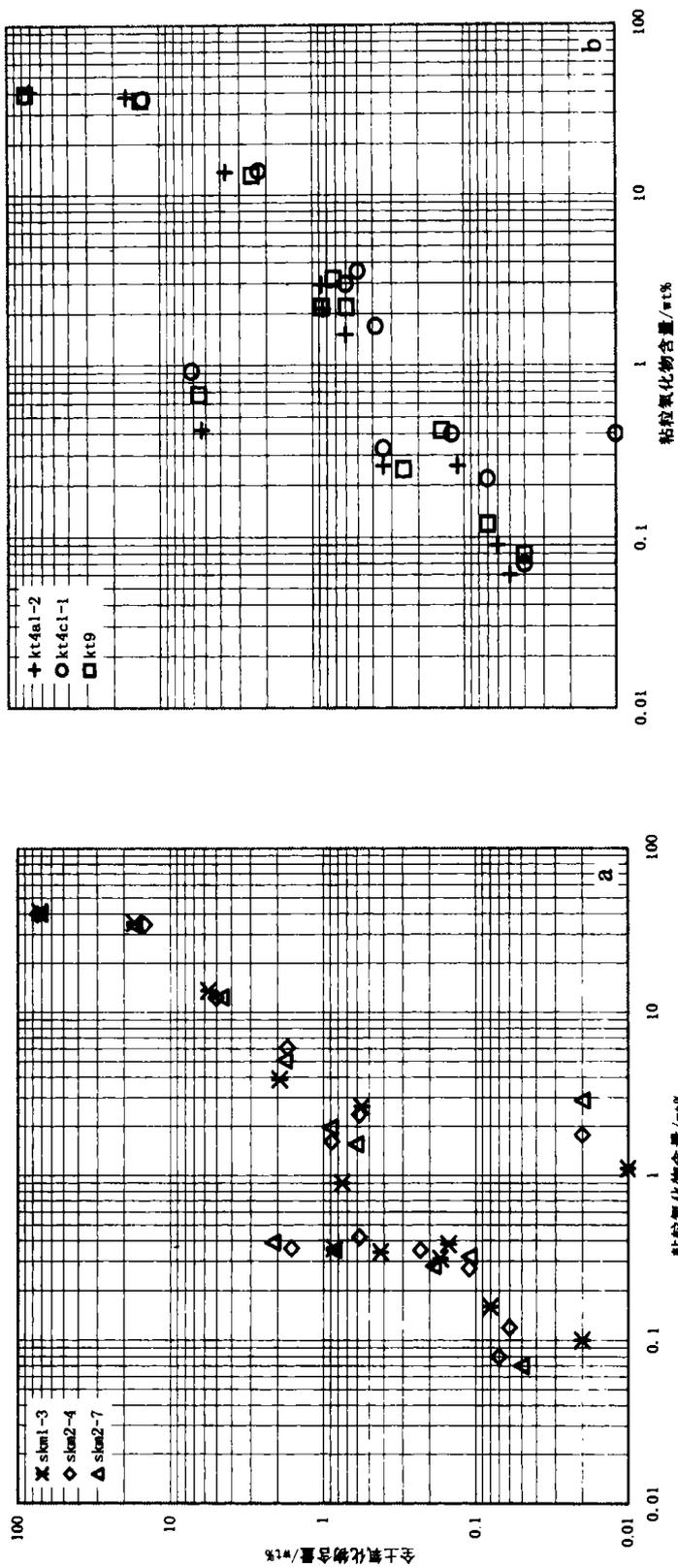


图 4 全土和粘粒对应氧化物成份含量关系图

a. skm 样品; b. kt 样品

Fig. 4 Chemical component contents in mass versus those in clays

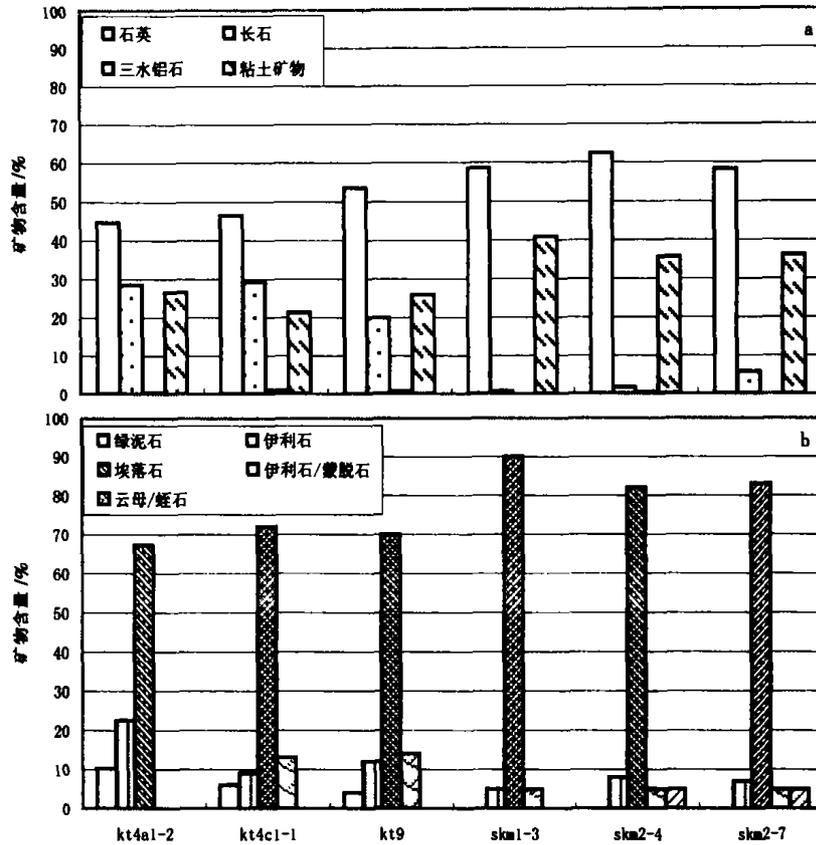


图 5 全土样品 (a) 和粘粒样品 (b) 矿物成份含量变化

Fig. 5 Mineral contents in the mass (a) and in the clay (b) portions

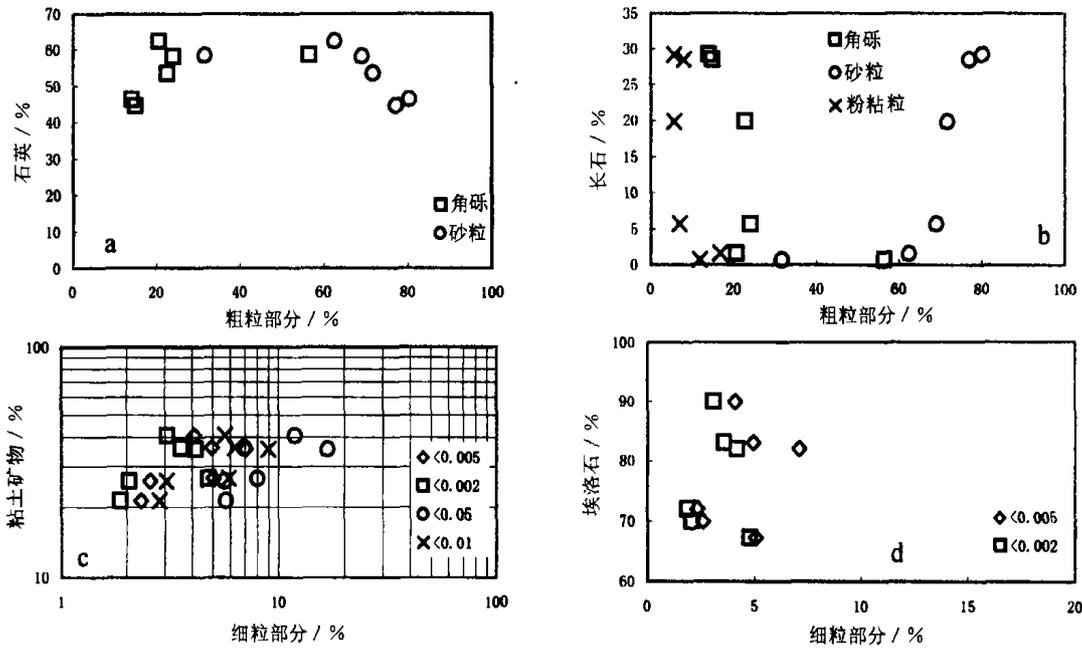


图 6 全土和粘粒中矿物与粒度成份相关关系

a. 石英与粗粒成份; b. 长石与粗粒成份; c. 粘土矿物和细粒成份; d. 埃洛石与粘粒含量

Fig. 6 Correlations of mineral contents with particle size distributions in the mass and in clays

下(粒径 <0.05 mm)和细粉粒以下(粒径 <0.01 mm)的粒组含量都呈正相关(图 6c)。粘粒中居多数的埃洛石同粘粒(我国规范为粘粒 <0.005 mm,国际通用为 <0.002 mm)成份的高低都呈弱正相关(图 6d)。

从矿物成份含量同化学成份间的关系看,石英和 SiO₂ 关系不固定,当 SiO₂ 含量低时两者呈正相关,当 SiO₂ 含量 >74% 时则呈负相关(图 7a);长石与 K₂O 呈正相关(图 7b);粘土矿物含量和 Al₂O₃ 及 LOI 都呈正相关(图 7c);对粘粒中的矿物,伊利石和 K₂O 基本呈正相关(图 7d);而埃洛石含量和 Al₂O₃、H₂O⁺ 及 LOI 关系都不明显(图 7e)。另外,粘粒中埃洛石的含量和全土中粘土矿物含量也呈正相关(图 8)。

4 讨论和结论

地质样品化学和矿物学分析常对全岩(土)和粘粒(粒径 <2 μm)分别进行(王清等,1991)。曲永新等(2002)曾将膨胀土粘粒中粘土矿物相对含量乘以粘粒百分比换算为其在全土中的绝对含量。在分析全风化花岗岩时发现有必要对这两部分测试结果关系开展对比研究,原因在于:1)全风化花岗岩既有粗粒石英,也有细粉砂粒和粘土,往往构成一种特色的含砾土(唐大雄等,1987),其它细粒样品分析经验难直接借鉴;2)平行测试的两部分结果常有相当大差别,其间关系不清楚;

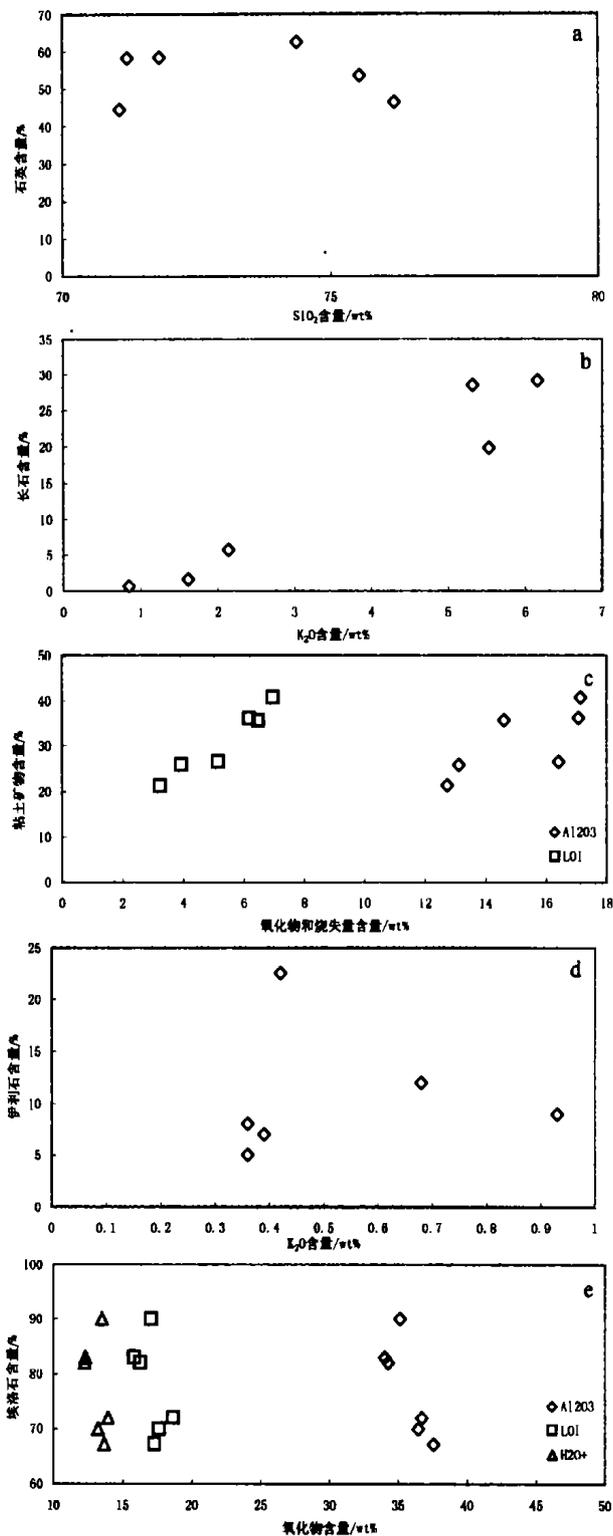


图 7 全土和粘粒中矿物与化学成份含量相关关系
 a. 石英和 SiO₂; b. 长石与 K₂O; c. 粘土矿物和 Al₂O₃ 及 LOI;
 d. 伊利石和 K₂O; e. 埃洛石和 Al₂O₃、H₂O⁺ 及 LOI
 Fig. 7 Correlations of mineral components with chemical constituents
 percents in the mass and in clays

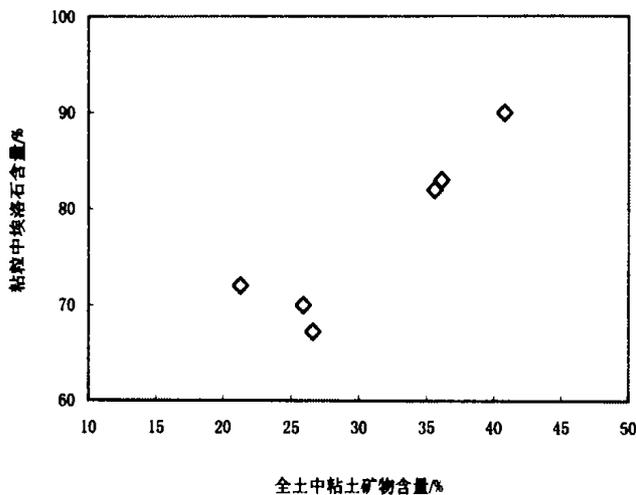


图8 全土粘土矿物和粘粒中埃洛石含量相关关系

Fig. 8 Correlations of clay mineral contents in the mass with halloysite content in clay portions

3)它们具有不同的物质成份和结构,对土工程地质性质影响作用不一样。粘粒部分基本上为不同类型的粘土矿物组成,富含游离氧化物,很大程度上决定着全风化土内聚力(高国瑞,1985;罗鸿禧,1987;谭罗荣,1991)。全土反映着样品整体物质成份,但含量较高的石英和 SiO_2 影响往往导致含量低的粘土矿物种类难以区分,结果值也存在较大偏差。

不同地点和深度全风化花岗岩样品物质成份在一定范围内变化(Irfan, 1996; 尚彦军等,2001)。作者从采样开始就注意了样品代表性和结果可比性,即对每组样品

全土和粘粒分别进行粒度成份、化学成份和矿物成份分析。其结果一定程度上揭示了这些样品全土和粘粒两部分物质成份变化及其相关关系,为解释和检验 XRD 矿物分析结果提供了有效途径。

虽然 Irfan (1996)给出了由全量化学分析结果计算矿物成份的方法,但考虑到其多解性及多种假定,以及风化过程中化学成份和矿物成份变化的复杂性,本文未采用该方法。从全风化花岗岩粒度、化学成份和矿物成份含量之间存在一定相关性可看出,长石和粘土矿物含量在风化中互为消长关系,在全土和粘粒部分化学成份变化中有明显表现。例如由全土到粘粒, K_2O 含量降低, Al_2O_3 及 LOI 含量升高;相应地,长石减少而粘土矿物含量增多。这也是 Irfan (1996)曾提出 Ip 矿物风化指标,并得到应用(尚彦军等,2001)的依据所在。但问题是,从长石到粘土矿物之间存在很多过渡态,这部分怎么处理有待解决。

从 XRD 矿物分析得到的为半定量结果,化学成份及其相关分析则提供了一个检测其结果合理性的有效途径。本研究对化学—矿物成份相关图(图7)中个别奇异点的化学和矿物成份分别进行复测,及时校正了奇异点数据。

由于本次实验仅6个全风化花岗岩样品,其结果代表性和有关认识的可靠性有待更多实验结果检验。

本文给出了全风化花岗岩全土和粘粒部分的粒度、化学成份和矿物成份含量分析结果对比和相关性分析。通过上述研究,得到以下结论。

(1)从全土到粘粒,化学成份中的 SiO_2 减少了近50%, K_2O 含量也降低,而 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 H_2O^+ 都明显升高。从氧化物种类上看,相对含量升高者居多。

(2)矿物成份上,全土以石英、粘土矿物和长石为主,粘粒中埃洛石和高岭石占大多数,次为伊利石。

(3) 粒度与化学成份和矿物含量之间相关性比较明显的是:石英和角砾正相关,和砂粒负相关。长石和砂粒及 K_2O 含量正相关,粘土矿物含量和 Al_2O_3 、烧失量(LOI)正相关。全土中粘土矿物含量和粘粒中埃落石含量正相关。

(4) 本文结果为工程实践中同时在全土和粘粒两部分结果间搭起了桥梁,便于实际对照和应用。

致谢 粒度和化学成份分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成,XRD 测试在北京石油勘探开发研究院进行,在此向参加实验工作的曹杰高级实验师和林西生高级工程师表示感谢。同张乃娴研究员的讨论和审稿人的修改建议都使我们受益非浅。

参 考 文 献

- 高国瑞. 1985. 中国红土的微结构和工程性质. 岩土工程学报, 7(5):10—21.
- Gao Guorui. 1985. The micro-structure and engineering property of red soil in China. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 7(5):10—21.
- 罗鸿禧. 1987. 游离氧化铁对红色粘土工程性质的影响. 岩土力学, 8(2):29—36.
- Luo Hongxi. 1987. Effect of free ferric oxide on engineering properties of laterite. *Rock and Soil Mechanics*, 8(2):29—36.
- 曲永新, 张永双, 冯玉勇, 张加桂. 2002. 中国膨胀性粘土矿物组成的定量研究. 工程地质学报, 10(增刊):416—422.
- Qu Yongxin, Zhang Yongshuang, Feng Yuyong and Zhang Jiagui. 2002. Quantitative study on the clay mineral composition of expansive soils in China. *Journal of Engineering Geology*, 10(Suppl.):416—422.
- 尚彦军, 吴宏伟, 曲永新. 2001. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比——以香港九龙地区为例. 地质科学, 36(3):279—294.
- Shang Yanjun, Wu Hongwei and Qu Yongxin. 2001. Comparison of chemical indices and micro-properties of weathering degrees of granitic rocks—a case study from Kowloon, Hong Kong. *Chinese Jour. Geol.*, 36(3):279—294.
- 谭罗荣. 1991. 红土有关问题的讨论. 见:余培厚, 曲永新, 唐大雄主编, 第2届全国红土工程地质研讨会论文集. 贵阳:贵州科技出版社. 1—10.
- Tan Luorong. 1991. Discussion for problem of red soil. in: Yu Peihou, Qu Yongxin and Tang Daxiong, eds. *Proceedings of the 2nd Conference on Engineering Geology of Red Soils*. Guiyang: Guizhou Science and Technique Press. 1—10.
- 唐大雄, 孙懋文(主编). 1987. 工程岩土学. 北京:地质出版社. 12—22.
- Tang Daxiong and Sun Suwen (eds.). 1987. *Science of Geotechnical Engineering*. Beijing: Geological Publ. House. 12—22.
- 王 清, 唐大雄, 张庆云, 赵继增. 1991. 中国东部花岗岩残积土物质成份和结构特征的研究. 长春地质学院学报, 21(1):73—81.
- Wang Qing, Tang Daxiong, Zhang Qingyun and Zhao Jizeng. 1991. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(1):73—81.
- 张乃娴, 付景春. 1980. 用 X 射线衍射仪定量分析粘土矿物的实验研究. 石油勘探与开发, 6:12—20.
- Zhang Naixian and Fu Jingchun. 1980. Quantity study on clay mineral by X-ray diffraction(XRD). *Petroleum Exploration and Development*, 6:12—20.
- 张乃娴, 李幼琴, 赵慧敏, 姬素荣. 1990. 粘土矿物研究方法. 北京:科学出版社. 4—95.
- Zhang Naixian, Li Youqin, Zhao Huimin and Ji Surong. 1990. *Investigation Method of Clay Minerals*. Beijing: Science Press. 4—95.
- 中华人民共和国水利部. 1999. 土工试验方法标准 GB/T 50123-1999[S]. 北京:中国计划出版社. 28—37.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 1999. Standard for the Soil Test Method. GB/T 50123-1999 [S]. Beijing: Chinese Plan Press. 28—37.
- Chung F H. 1974a. Quantitative of X-ray diffraction patterns of mixtures, I. Matrix-Flushing Method for quantitative multi-

- component analysis. *Journal of Applied Crystallography*, 7:519—525.
- Chung F H. 1974b. Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures, II. Adiabatic principle of X-ray diffraction analysis of mixtures. *Journal of Applied Crystallography*, 7:526—531.
- Irfan T Y. 1996. Mineralogy and fabric characterization and classification of weathered granitic rocks in Hong Kong. GEO Report No. 41. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, 29:5—35.
- Strange P J and Shaw R. 1986. Geology of Hong Kong Island and Kowloon. 1: 20 000 Sheets 11 & 15, Hong Kong Geological Survey Memoir No. 2. Hong Kong: Geotechnical Control Office, Civil Engineering Department.

DISTINCTIVE FEATURES OF CHEMICAL COMPONENTS AND MINERALS IN MASS AND CLAY PORTIONS OF COMPLETELY DECOMPOSED GRANITE

Shang Yanjun¹ Yue Zhongqi² Wang Sijing¹ Tu Xinbin¹

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2. Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong)

Abstract

In chemical and mineral tests on the completely decomposed granite, the mass specimen and the clay portion (particle diameter < 2 μm) were to be undertaken. It was well known that the two parts played different roles in soil engineering geological behaviors because of their distinctive material constituents and microstructures. The correlation of the two parts was seldom clarified in previous studies. With the purpose of identification of weathering grades in detail, comparison of mineral components, chemical constituents in the two parts and analysis of their relationships, tests on the mass and the clay portions of the 6 completely decomposed granites were carried out, which included sieve analysis and sampling pipette on the particle size distribution, X-ray fluorescence spectrum of sequence-type on chemical components, and X-ray diffraction on mineral constituents. By comparison, it was found that for these gravel-bearing soils, the content variation of chemical components was closely concordant with that of mineral proportions, especially those of clay minerals. When compared with those in the mass, it was disclosed that the content of SiO_2 in clays decreased nearly 50%, K_2O was also lessened, while the contents of Al_2O_3 , Fe_2O_3 and H_2O^+ had an obvious increasing. For these chemical components, most of them increased. In mineral components, the quartz, clay minerals and feldspar account for the majority in the mass, and the halloysite and kaolinite were dominant in clays, the next being illite. Among the correlations of particle size, chemical contents and mineral proportions, the significant relations existed between quartz and gravel with positive relation, quartz and sands with negative relation, feldspar and sands with positive relation, clay minerals and Al_2O_3 , loss of ignition (LOI) with positive relations, respectively. The halloysite in clays and clay minerals in the mass were positively related with each other.

Key Words Completely decomposed granite, The mass, Clay portions, Chemical components, Clay minerals