

DOI: 10.11779/CJGE201405007

# 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究

张先伟<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 臧濛<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土学与工程国家重点实验室, 湖北 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)

**摘要:** 雷州半岛玄武岩残积土属于区域性特殊土, 全面系统地评价玄武岩残积土的工程地质特性对于该地区建设、地质工程勘察具有重要指导意义。玄武岩残积土是由玄武岩经过长期缓慢的风化分解与红土化作用形成, 土层分布具有上细下粗的结构特征。黏土矿物以高岭石类为主, 含有较多的游离氧化铁、铝。微观结构以凝块和絮凝结构为主, 粒径小于 1 μm 的微孔占总孔隙 70% 以上。特殊的物质构成与结构形态导致其具有高孔隙率、低密度、高液限的物理特性, 但强度较高的力学特征。该土的膨胀性小, 但收缩性较大, 夯击压实效果差, 抗水性差, 浸水饱和后力学性质劣化明显, 同时对温度与湿度等环境因素敏感, 在炎热多雨的气候影响下, 颗粒间胶质容易发生脱水老化, 导致结构强度减损, 微观尺度上结构扰动、破坏, 遇水产生严重的崩解现象与较大的湿陷变形, 实际工程应关注强收缩势与降雨积水引发的工程灾害。

**关键词:** 雷州半岛; 玄武岩残积土; 工程特性; 微观结构; 矿物成分

中图分类号: TU446 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)05-0855-09

**作者简介:** 张先伟 (1982-), 男, 黑龙江省龙江人, 博士, 助理研究员, 从事特殊土的力学特性研究。E-mail: xwzhang@whrsm.ac.cn.

## Engineering geological characteristics of basalt residual soils in Leizhou Peninsula

ZHANG Xian-wei<sup>1,2</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, ZANG Meng<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** The basalt residual soil in Leizhou Peninsula is special regional soil. Comprehensive and systematic evaluation of engineering geological characteristics of the basalt residual soil can provide a certain theoretical support for its engineering investigation and construction. It is formed from the basalt by a long period of weathering and laterization, and the soil particles in the upper layer are smaller than those in the lower layer. Its clay mineral is mainly kaolin, furthermore, it contains more free iron oxide and free aluminium oxide. Its microstructure is mainly clot and flocculation structure, and the pores with a size of greater than 1 μm are more than 70% of the total porosity. The basalt residual soil has poor physical properties of high porosity, low density, high liquid limit and possesses better mechanical properties of high strength because of special composition and microstructure. The basalt residual soil has small expansibility, great shrinkage, insignificant tamping compatibility, and poor water resistance, and its mechanical properties are deteriorated significantly after immersion in water. And the basalt residual soil is more sensitive to the environmental factors such as temperature and humidity. The cementing materials of skeleton will dehydrate and exhibit aging in hot and wet climate, and thus their structural strength is weakened and microstructure is disturbed and damaged. The soils after immersion show serious disintegration and large collapsible deformation. Therefore, geotechnical engineers should pay close attention to engineering disasters due to strong shrinkage and meteoric water.

**Key words:** Leizhou Peninsula; basalt residual soil; engineering characteristic; microstructure; mineral composition

## 0 引 言

中国的雷州半岛及海南岛北部广泛分布着第四系喷发的玄武岩(图1), 雷州半岛玄武岩发育在喜马拉雅构造运动雷琼断陷中, 形成时期可划分为早晚两期, 早期为中更新世(石砾岭组Q<sub>2s</sub>); 晚期为晚更新世(湖

光岩组Q<sub>3h</sub>)<sup>[1]</sup>。该区气候属温暖潮湿, 干湿季节变化明显的热带季风气候, 这为玄武岩快速风化分解及红

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2011CDB406); 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学)开放课题(KLE-TJGE-B1103)  
收稿日期: 2013-09-23

土化, 进而形成残积红土提供了有利条件。

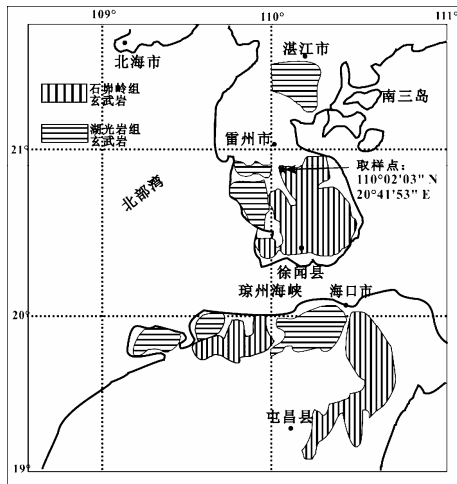


图1 雷琼地区玄武岩分布图

Fig. 1 Distribution of basalt in Leiqiong region

雷州半岛玄武岩残积土是当地大量建(构)筑物的浅基础持力层。该类土具有特殊的成分构成与结构特征,天然状态下表现为高液限、高孔隙比的较差的物理特性和高强度的较优力学特性的异常组合,同时具有干硬湿软、易湿化崩解特性,土的基本性质与一般流水沉积的黏性土有明显差别,一些特征指标甚至超出当前一些规范、规程对一般黏性土界定的取值范围。如对此类残积土的特殊性质阙疑或采取工程措施不合理,则有可能对土的强度与变形特性做出错误的判断和给设计基础方案的实施造成阻碍。

国内外学者对于残积土的形成<sup>[2-3]</sup>、物理力学指标<sup>[3-5]</sup>、渗透性<sup>[6]</sup>、强度<sup>[7]</sup>、崩解性<sup>[8]</sup>、矿物成分<sup>[9]</sup>、微观结构<sup>[10]</sup>等进行了大量研究,以往研究表明,不同母岩形成的残积土土性差别较大,如同属广东省广泛分布的花岗岩残积土与玄武岩残积土<sup>[1, 5, 11-12]</sup>,前者一般比后者的粒度粗些,孔隙比小些,矿物亲水性弱些。此外,玄武岩残积土的风化程度、厚度及性质与气候、地形、新构造运动和水文地质条件等因素有关,这也造成雷州半岛玄武岩残积土土性明显不同于其他地区的玄武岩残积土<sup>[13-16]</sup>。由此看来,雷州半岛玄武岩残积土具有明显的区域工程地质特性,勘察工作中宜按特殊土类评价,但以往对其研究并不多见,特别是缺乏其特殊土性的本质机理的认识,这也造成当地工程的勘察设计几乎无章可循,除原位载荷试验以外,以现行规范允许采用的物理力学指标查算残积土的承载力存在较大困难;以理论公式计算承载力又因土的力学指标离散度大而结果不理想的事实。

鉴于以上现状,本文对雷州半岛某地玄武岩残积土的工程地质特性进行系统分析评价,以土力学和土质学结合的研究方法,从地质形成环境、矿物成分、物化组成、微结构特征阐述其本质,为指导该地区工程建设、工程地质勘察提供一定理论支持。

## 1 玄武岩残积土的地质特性

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 $110^{\circ}02'03''N$ ,  $21^{\circ}41'53''E$ (图1)。地貌类型为坡地地貌,在27 m的长度范围钻探,获得最大揭露深度为20 m的4个地层鉴别孔。根据地质年代、成因类型及物理力学性质自上而下共分6层:第四系全新统坡残积层( $Q_4^{dl}$ ),褐红色,局部黄褐色,湿,可塑,浸水易湿化变软。做8次标准贯入试验,校正后击数 $N=8.3\sim 9.6$ 击,平均9.0击;第四系全新统风化残积层( $Q_4^{el}$ ),褐红色,湿,硬塑为主,局部可塑,浸水易崩解,偶见中风化玄武岩孤石,切面粗糙。做8次标准贯入试验, $N=10.1\sim 16.7$ 击,平均14.3击,根据以往工程经验,该层地基承载力特征值一般为160~190 kPa;第四系中更新世石峁岭组强风化玄武岩( $Q_{2s}$ ),灰褐色,岩芯呈块状或短柱状,易击碎;中风化玄武岩( $Q_{2s}$ ),灰褐色,结构致密,岩芯呈块状或短柱状,岩质较坚硬;下部为强风化与新鲜玄武岩,颜色由上至下由深灰色变为灰黑色,新鲜玄武岩有大气孔发育。

取样场地的玄武岩风化壳风化带发育较全,具有明显的分带性。残积土及风化玄武岩颜色变化明显,反映了淋滤作用、母岩矿物风化蚀变及黏土化程度由浅入深呈逐渐减弱趋势。本区地层剖面属典型的玄武岩风化地层,示意图如图2所示,残积土剖面由上至下,其坚硬状态从可塑向坚硬过渡,强度升高,地基承载力逐渐增大,具有明显的“上细下粗”的结构特征,这与某些地区碳酸盐类母岩形成的红黏土呈“上硬下软”的现象相反<sup>[17]</sup>。

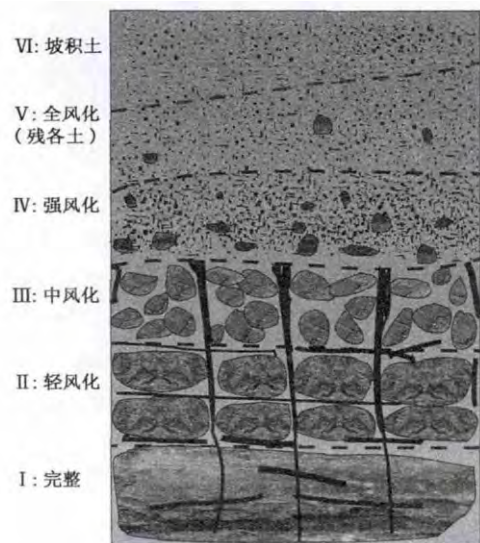


图2 玄武岩风化地层示意图

Fig. 2 Schematic diagram of weathering of basalt rock soil profiles

坡残积土扰动样(取样深度0.80~1.20 m)用铁锹挖出后装入直径10 cm,高30 cm的铁皮样筒,用胶

带绑紧, 蜡封; 风化残积土原状样 (1.50 ~ 2.50 m) 采用铁钎挖出边长约 15 cm, 深 40 cm 的坑槽, 用铲刀铲出土坯后, 用削土刀削成直径 10 mm, 高 30 mm 的土柱, 放入铁皮样筒内, 用胶带绑紧, 蜡封。为减少土样在运输途中扰动, 采用航空运输, 运至实验室后立即进行相关试验。

## 2 玄武岩残积土的物质成分

差热分析与 X 射线衍射测试结果 (表 1) 表明, 玄武岩残积土中黏土矿物以高岭石为主, 其次为三水铝石、伊利石以及赤铁矿, 还有不到 5% 的蒙脱石。该土的硅铝比 < 1.9, 大量高岭石成分出现标志着该区经历过强烈的风化阶段, 反映了残积土形成过程的富铝化过程, 这从土化学分析 (表 2) 中的硅铝比也可反映。该土的化学成分以 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主, 与母质玄武岩比较可见, 玄武岩残积土发育过程经历了明显的富铝化、铁富集与盐淋失过程, 表现为 SiO<sub>2</sub> 大量淋失, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 大量累积, FeO 受风化、氧化作用大量减少, MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O 被淋失达 90% 以上。

玄武岩残积土 pH 约为 5.0 (表 3), 有机质含量较低, 可溶盐含量亦较低, 这与本区淋滤作用强烈是相吻合的。该土外比表面积大于 50 m<sup>2</sup>/g, 较大的外表面积说明该土颗粒具有大量的小孔隙。但该土的总比表面积并不是很大, 为 113 ~ 129 m<sup>2</sup>/g, 阳离子交换量 14.63 ~ 13.25 meq/100g, 含有较多的游离氧化铁、铝成分 (表 4), 这导致该土的活性收到限制, 活性性 A<sub>d</sub> 为 0.43 ~ 0.64, 属于低活性土。

## 3 玄武岩残积土的结构特征

从图 3 (a) 的 SEM 照片可以看到, 强风化玄武岩为致密的块体构造, 表面附着星星点点的氧化铁胶体, 有明显的溶蚀孔。玄武岩残积土的结构基本以凝块和絮凝结构为主 (图 3 (b) ~ 3 (d)), 偶见骨架结构。土的基本结构单元被游离氧化物或黏土中起胶结作用的物质所覆盖 (经能谱测试, 胶结物质为 Fe、Al) 构成次级结构单元, 外表似团粒状, 可以清楚地看到粒状物展布着很多微小孔隙。这些团粒彼此又以边—面的镶嵌接触方式, 构成开放式的胶质联结的絮凝结构。这种结构与海相软土的絮凝结构有些类似,

表 1 X 射线矿物成分分析结果 (全土)

Table 1 Results of material phase of basalt residual soils (total soils)

土样	埋深/m	矿物相对含量/%					
		Qtz	Ill	Mnt	Kln	Gbs	Hem
龙门残积土	1.50 ~ 2.00	15.53	12.33	4.07	49.53	14.33	6.96
	2.00 ~ 2.50	17.59	10.72	4.83	46.79	10.63	6.71

注: Qtz 为石英; Ill 为伊利石; Mnt 为蒙脱石; Kln 为高岭石; Gbs 为三水铝石; Hem 为赤铁矿。

表 2 玄武岩残积土的化学成分

Table 2 Chemical compositions of basalt residual soils

土样	埋深/m	相对含量 ω(B)/%										烧失量/%	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub> /R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
		SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O			
龙门残积土	1.50 ~ 2.00	33.00	17.85	0.98	30.52	1.75	0.11	0.21	0.17	0.09	0.05	15.25	1.84	1.39
	2.00 ~ 2.50	32.34	17.76	0.95	30.02	1.75	0.09	0.15	0.10	0.10	0.10	16.62	1.83	1.33
龙门玄武岩	15.00	60.30	4.90	6.60	16.45	0.40	痕量	3.25	4.36	1.30	1.40	1.00	6.23	5.23

表 3 玄武岩残积土的化学分析结果

Table 3 Analytical results of chemical compositions of basalt residual soils

土样	埋深	pH 值	有机质/%	阳离子交换量 (CEC) meq/100g	易溶盐/%	中溶盐/%	难溶盐/%	总表面积/(m <sup>2</sup> /g)	外表面积/(m <sup>2</sup> /g)
龙门残积土	1.50 ~ 2.00	5.0	0.34	14.63	0.02	0.13	0.06	129	56.22
	2.00 ~ 2.50	5.1	0.15	13.25	0.05	0.09	0.06	113	52.20

表 4 玄武岩残积土的氧化物含量

Table 4 Oxygenates content of basalt residual soils

土样	埋深/m	游离氧化物/%				无定形铁/%	游离度 (Fed/Fet) %	活化度
		游离氧化铁	游离氧化铝	游离氧化硅	总量			
龙门残积土	1.50 ~ 2.00	10.69	4.36	1.36	16.41	1.02	56.77	9.54
	2.00 ~ 2.50	11.03	5.23	1.45	17.71	1.36	58.95	12.33

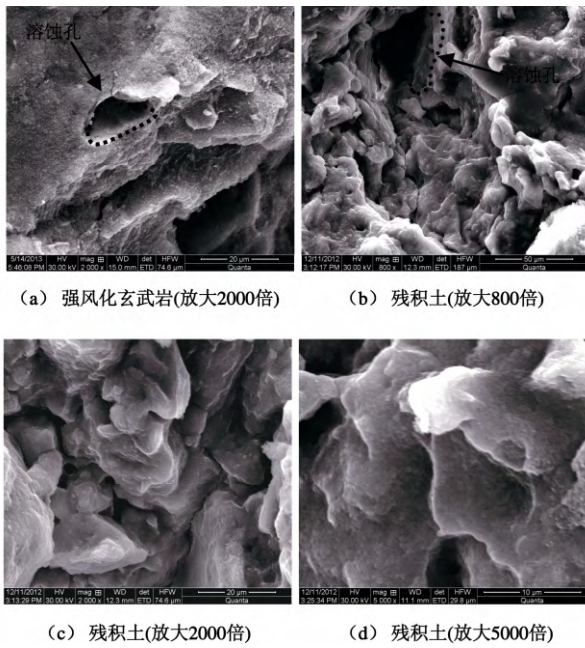


图3 玄武岩残积土的电镜照片

Fig. 3 SEM photos of basalt residual soils

表现为结构疏松，有大孔隙存在，但不同的是结构具较高强度，一方面是因为风化淋溶后，松散结构间还存有剩余的化学键强度，另一方面风化淋溶出的胶体氧化物在微粒间产生胶结作用。较大放大倍数下（图3（d））可以看到，颗粒的基本单元体其实是平片状的高岭石类矿物颗粒，彼此面一面接触构成迭聚体，这类迭聚体与膨胀土中有卷平状的蒙脱石矿物构成的迭聚体是不同的，它们不是颗粒堆迭定向造成，而是由长石和云母在酸性环境下逐步转化为高岭石的风化溶淋的结果，还保留原矿物内部构造的特征<sup>[18]</sup>。

从压汞试验结果可以看到玄武岩残积土的孔径  $d < 0.1 \mu\text{m}$  的微孔在孔隙分布中占有绝对优势，占总孔隙体积的70%以上，表现图4（a）中有突出的尖锐峰，

表5 玄武岩残积土的物理性质指标统计表

Table 5 Indexes of physical properties of basalt residual soils

土样	取值	天然含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	比重 $G_s$	孔隙比 $e$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	液性指数 $I_L$	塑性指数 $I_p$	饱和度 $S_r/\%$
龙门坡残积土	最小值	36.12	1.60	1.13	2.77	1.33	57.00	29.30	0.19	25.00	74.16
	最大值	41.36	1.63	1.19	2.79	1.51	65.00	32.00	0.31	35.70	79.15
	平均值	37.50	1.62	1.17	2.774	1.36	61.93	30.5	0.22	31.43	76.42
龙门残积土	最小值	37.00	1.62	1.17	2.78	1.31	52.00	28.00	0.07	21.00	76.32
	最大值	42.10	1.66	1.21	2.84	1.43	64.00	37.00	0.42	31.6	79.43
	平均值	38.09	1.64	1.18	2.80	1.37	58.01	31.10	0.27	26.91	78.48
土样	取值	渗透系数 $k/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$		自由膨胀率 $\delta_{ep}/\%$	50 kPa 膨胀率 $\delta_{cp}/\%$	原状土 (天然含水率)			扰动土 (含水率等于液限)		
		室内试验(20)	现场注			线缩率 $\delta_s/\%$	体缩率 $\delta_v/\%$	收缩系数 $c_{sl}$	线缩率 $\delta_s/\%$	体缩率 $\delta_v/\%$	收缩系数 $c_{sl}$
龙门残积土	最小值	2.30	45.00	30.60	接近0	5.20	9.60	5.20	14.36	26.00	0.60
	最大值	9.00	90.00	41.00		6.32	10.8	6.32	16.35	31.00	0.71
	平均值	5.83	77.70	35.47		5.71	10.06	5.71	15.36	27.67	0.66

注：：每类试验数目5组；：现场用环刀法测得；：每类试验数目10组；：每类试验数目5组。

这类孔隙虽然个体的体积小，但数量多，总体积较大，表现在图4（b）累积孔隙体积曲线中  $d < 0.1 \mu\text{m}$  后曲线斜率迅速增大。玄武岩残积土中的团粒及絮凝体在静电力和强胶结联结的作用下结构稳定强，这导致含有的微孔呈现“惰性”孔隙特征，这使得该土的物理性质与大孔隙率的分散土相似，而力学性质又与包含惰性孔隙的粒团尺寸相当的粒状土相似。

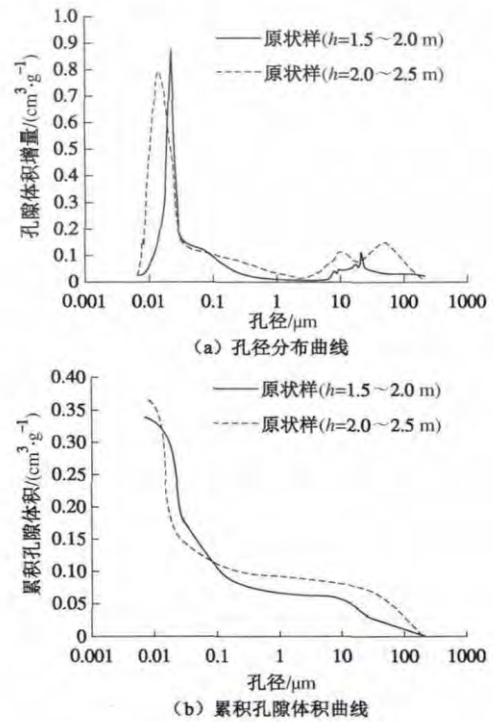


图4 玄武岩残积土的孔径分布曲线

Fig. 4 Pore size distribution curves of basalt residual soils

#### 4 玄武岩残积土的物理特性

玄武岩残积土的物理指标如表5所示。本区的玄武岩残积土含水率普遍较高，天然密度较小，孔隙比

较大,天然状态下常处于硬塑—可塑状态。由于含较高的铁质成分,比重较高,Hawaii 的残积土甚至达到 3.0<sup>[15]</sup>。值得说明的是,比较本区多个勘察报告发现,雷州半岛玄武岩残积土性质空间变化较大,土质是不均匀的,甚至在单个场地上也常出现无序性,物理、力学指标变异系数较高。因此,对于残积土,勘察工作中应重点查明土体在不同地貌单元、不同地点分布的均匀性与垂直风化程度。

雷州半岛玄武岩次积土的孔径分布曲线如图 4 所示。雷州半岛玄武岩残积土的塑性指数  $I_p$  变化范围较大,按  $I_p$  分类属黏土。液限范围为 52% ~ 64%,在图 5 所示塑性图中位于 A 线上部,属高液限黏土。其他地区残积土普遍位于 A 线以下,为粉质黏土,这正是玄武岩残积土的假粉性引起的。筛分试验中加入分散剂后(图 6),粒径  $d < 0.002 \text{ mm}$  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%,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。

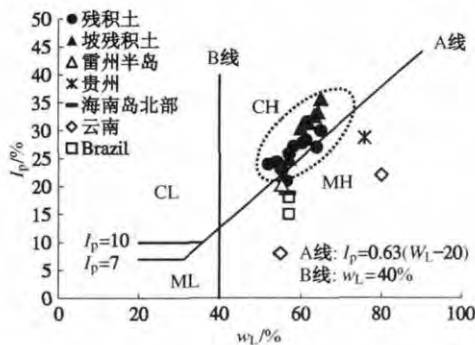


图 5 玄武岩残积土的塑性图分布

Fig. 5 Plasticity chart of basalt residual soils

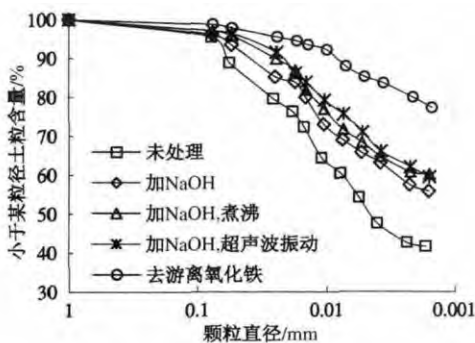


图 6 玄武岩残积土的颗粒分布曲线

Fig. 6 Grain-size distribution curves of basalt residual soils

根据室内试验结果,雷州半岛玄武岩残积土的渗透系数  $k$  平均值为  $5.83 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ ,现场注水试验得到  $k$  的评价值为  $7.77 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ,综合分析,该土在天然状态下具有弱透水性。

根据击实试验得到该土的最优含水率  $w_{opt} = 20.5\% \sim 23.0\%$ ,最大干密度  $\rho_{dmax} = 1.44 \sim 1.47 \text{ g/cm}^3$ 。图 7 所示的 2 条压实曲线皆表现为“左缓右陡”,也就是说当含水率  $w > w_{opt}$ ,含水率的增大会导致击实效果迅速降低,特别是  $w > w_p$  时,击实效果下降明显。

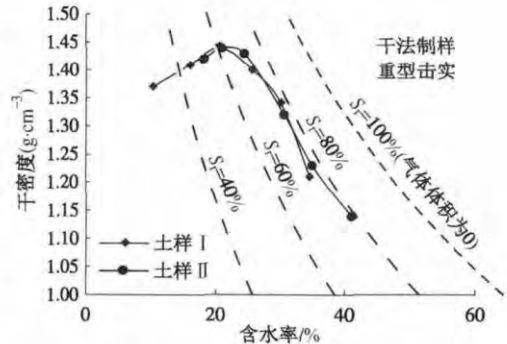


图 7 玄武岩残积土的击实曲线

Fig. 7 Curves of compaction tests on basalt residual soils

玄武岩残积土的胀缩性与碳酸盐岩类风化残积红黏土有所不同,这与其矿物组成与结构形态相关。从表 5 中可见,玄武岩残积土  $\delta_{cr} = 30.60\% \sim 41.00\%$ ,50 kPa 压力作用下,基本无膨胀性。但天然原状土的  $\delta_s$  为 5.20% ~ 9.60%, $\delta_v$  为 6.32% ~ 10.8%,扰动土在含水率为液限时,分别增大至 14.36% ~ 26.00%,16.35% ~ 31.00%,表明该土具有较强的收缩性。这主要是因为玄武岩残积土中的黏土矿物以 1-1 型的高岭石类矿物为主,亲水性较弱,脱水相对较快,而吸水相对较慢。虽然该土含有少量的 2-1 型蒙脱石成分,但是团粒中强胶结特性会抑制其膨胀性。因其天然含水率一般较高,又具有较强收缩性,导致该区旱季地表龟裂、纵向裂缝现象时有发生,结构刚度差,施工质量不好的建筑物往往容易造成轻度破坏,因此,实际工程中应考虑强收缩性带来的不利影响。

### 5 玄武岩残积土的力学特性

从表 6 所列的玄武岩残积土力学指标中可知,雷州半岛玄武岩残积土压缩系数  $a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$ ,属中等压缩性土。抗剪强度指标具有与黏性土相似的高黏聚力以及与粉质土相似的大内摩擦角。雷州半岛玄武岩残积土的固结不排水强度  $c_{cu} = 43.30 \text{ kPa}$ , $\varphi_{cu} = 21.55^\circ$ ,无侧限抗压强度  $q_u = 87.69 \text{ kPa}$ ,说明天然状态下,虽然土的结构疏松,但土颗粒间的联结力仍较强,具有较优的力学特性。然而,玄武岩残积土普遍具有遇水湿化进而导致土性劣化的特征。从室内试验也可以看到(表 6),饱和的原状土  $q_u, c_{cu}, \varphi_{cu}$  较天然状态下土的相应值减少了 22.5%,24.9%,4.1%。比较饱和前后的玄武岩残积土,强度指标变化,黏聚力变化幅度明显

大于内摩擦角,反映了该土遇水土性劣化的主因应是颗粒的凝聚力减弱引起的。在无侧限抗压强度试验中,天然土的破坏状态为明显的剪切带破坏,而饱和试样没有出现剪切破坏现象,反映在图8中天然土的应力-应变曲线为明显凸峰曲线,而饱和试样的应力-应变曲线呈双曲线型,剪切破坏强度明显降低。

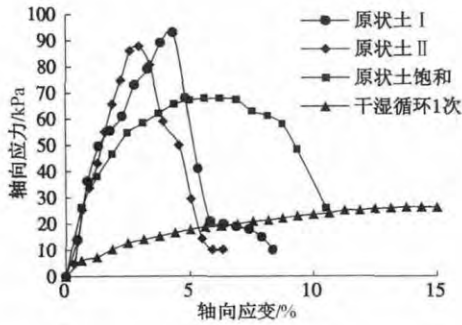


图8 无侧限抗压强度试验曲线

Fig. 8 Curves of unconfined compression strength tests

玄武岩残积土较差的抗水性也导致其在某种状态下具有严重的崩解性。采用直径 61.8 mm,高 40 mm 的试样进行室内崩解试验。天然状态下玄武岩残积土在数分钟内开始局部隐微裂隙张开,随着裂隙发展扩大出现块体崩裂或片状体开裂,在 24 h 时崩解率为 75%~80% (见图 9),崩解物为碎块状;经过干湿循环后的土样浸入水中立即有絮状、粉末状颗粒崩落,数十分钟土样崩解完毕,崩解物为粒状、手搓为泥,且随着干湿循环次数增高,崩解速率增大,干湿循环 3 次后,崩解时间为 10 min,崩解物为细小粉末,悬浮于水中;原状样重塑后的全部崩解完为 720 min,

表 6 玄武岩残积土的力学性质指标

Table 6 Mechanical indexes of basalt residual soils

土样	标准贯入 击数/ $N_{63.5}$	压缩系数 $a_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$	无侧限抗压强度		三轴固结不排水 (CU) 剪切强度							
				$q_u/\text{kPa}$		天然状态				饱和状态			
				天然状态	饱和状态	$c_{cu}$ /kPa	$\varphi_{cu}$ /( $^\circ$ )	$c'_{cu}$ /kPa	$\varphi'_{cu}$ /( $^\circ$ )	$c_{cu}$ /kPa	$\varphi_{cu}$ /( $^\circ$ )	$c'_{cu}$ /kPa	$\varphi'_{cu}$ /( $^\circ$ )
残积土	平均14.3击	0.39	6.06	87.69	68.00	43.3	21.55	58.3	21.25	32.5	20.66	47.7	20.67

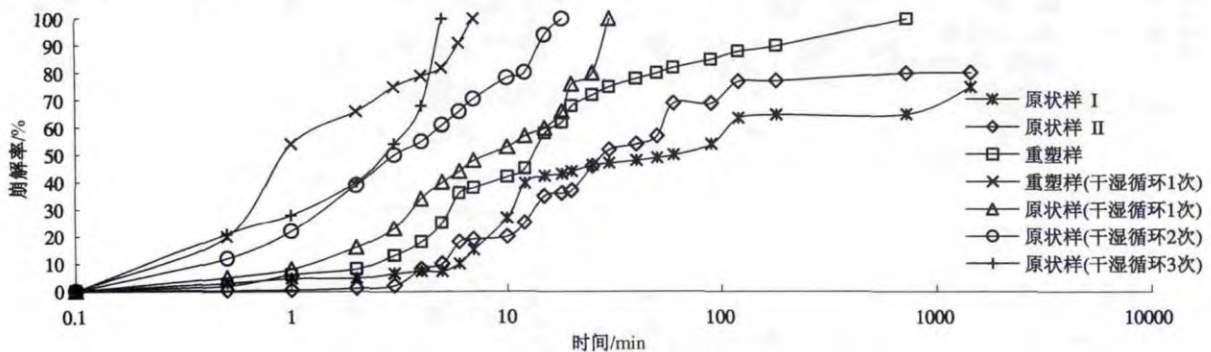


图9 不同状态下玄武岩残积土的崩解曲线

Fig. 9 Disintegrating curves of basalt residual soils under different conditions

崩解物为碎屑状。试验结果表明,扰动会扩大崩解程度与崩解速率,而温度、湿度循环作用亦会加速崩解,即含水率的交替变化对玄武岩残积土崩解性有重要影响。

一般而言,黏质土或黏土岩的崩解是由土样表面吸水发生水化膨胀,结构遭到破坏而造成的<sup>[19]</sup>,但雷州半岛玄武岩残积土中矿物多为亲水水性差,膨胀性微弱的高岭石类矿物为主,矿物成分不应是这类土崩解的主要原因。笔者认为不同状态玄武岩残积土的崩解主要因素并不相同。天然状态下土的崩解为裂隙扩张崩解,由于土中较多的细微孔比表面积大,吸附效应强,土体裂隙及结构缺陷中的空气被浸入的水压迫产生超张应力,使原结构缺陷发生扩容从而引发崩解现象。张抒等<sup>[20]</sup>也认为非饱和花岗岩残积土的崩解本质上是由于气体空洞产生的斥力超过颗粒间的吸力造成的,即非饱和土崩解性的主要控制因素为土中孔隙气压和基质吸力。谭罗荣<sup>[19]</sup>则认为黏土岩的泥化崩解过程,实际上是岩体结构不断受到宏观破坏、扰动逐步过渡到微观破坏、扰动的过程。由于残积类土对干湿循环过程敏感,在干燥环境下脱水,颗粒联结的胶结物质发生脱水硬化<sup>[21]</sup>,虽然可能在某种情况下变为准晶态或晶态氧化铁以“包膜”形式覆盖团聚体表面,增强团聚程度,但结构整体转为散性结构,结构联结强度减弱,同时一定浓度的胶态氧化铁抑制黏土颗粒之间的表面静电斥力减弱,再次湿化时,已经硬化的凝结泡水不能恢复到原来状态,造成颗粒间胶结性能减弱,结构强度降低,当水浸入时,促使微观尺度

上的土体结构扰动、破坏, 发生强烈的崩解现象, 因此, 重塑土与干湿循环后土的崩解都为分散性崩解。

玄武岩残积土具有大孔隙比, 水敏感性强烈, 抗水性差等性质, 但对于这种土是否具有湿陷性这一问题尚未形成统一结论。依据标准 ASTM (D 5333—92)<sup>[22]</sup> 进行湿陷性试验, 定义潜在湿陷率  $I_c(\%)$  为

$$I_c = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

式中,  $\Delta h, \Delta e$  分别为浸水前后试样的高度和孔隙比变化量;  $h_0, e_0$  分别为试样初始高度与初始孔隙比。根据中国对黄土湿陷性的评价标准<sup>[23]</sup>,  $I_c$  在数值上为湿陷系数  $\delta$  的 100 倍。表 7 给出了玄武岩残积土的湿陷性评价结果。

表 7 玄武岩残积土的湿陷性评价

Table 7 Evaluation of collapse of basalt residual soils

试样	国外标准 <sup>[22]</sup>		中国标准 <sup>[23]</sup>	
	潜在湿陷率 /%	湿陷程度	湿陷系数	湿陷程度
原状样	1.75	Slight	0.0175	轻微
重塑样	3.45	Moderate	0.0345	中等
1 次干湿循环	6.15	Moderately severe	0.0615	中等
2 次干湿循环	7.35	Moderately severe	0.0735	强烈

从图 10 中可以看到, 在固结压力 200 kPa 对试样浸水, 原状样、重塑样与原状土经干湿循环后土样发生不同程度的湿陷变形。以  $I_c$  和  $\delta$  为评价标准, 雷州半岛玄武岩残积土具有轻微湿陷性, 但强烈扰动后湿陷性增强, 特别是经过多次干湿循环后湿陷性变为强烈。雷州半岛属炎热多雨气候, 残积土层开挖后如逢丰水期可向基坑渗流集中形成积水, 因此, 若以玄武岩残积土层为持力层时, 应避开降雨天气施工基坑, 避免地基出现较大的湿陷变形。

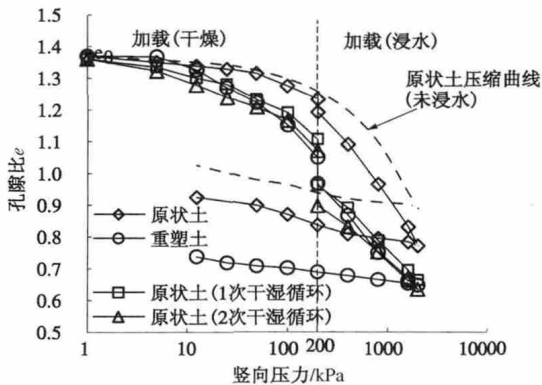


图 10 玄武岩残积土的一维湿陷试验曲线

Fig. 10 Collapse of basalt residual soils by oedometric tests

如图 11 所示, 岩土体产生的湿陷变形的原因从微观层次上可分为<sup>[24]</sup>: 骨架联结破坏, 如黄土; 颗粒破碎, 如含有较多钙质的砂土; 结构调整, 如含

骨架结构的粉质土; 软化, 如裂隙性黏土。笔者认为玄武岩残积土的湿陷机理是上述 4 种微观变化的综合。观察风干后的玄武岩残积土, 结构极其疏松, 微孔密布, 形成又轻又碎的团块, 手指轻轻一捏形成铁锈状粉末, 这是因为干燥过程中, 由于温度与湿度影响, 构成颗粒联结的胶凝物质脱水老化, 结构强度明显减弱。虽然在某荷载作用下结构处于准稳定状态, 一旦遇水后, 水迅速通过孔隙入渗, 增大土体内部的孔隙水压力, 土体软化现象凸显, 另一方面溶解颗粒间的部分胶结物, 颗粒单元在压力作用下偏转、移位, 定向程度增强, 部分结构松软的团粒还可能被压破、挤密, 宏观上表现为明显的湿陷变形。

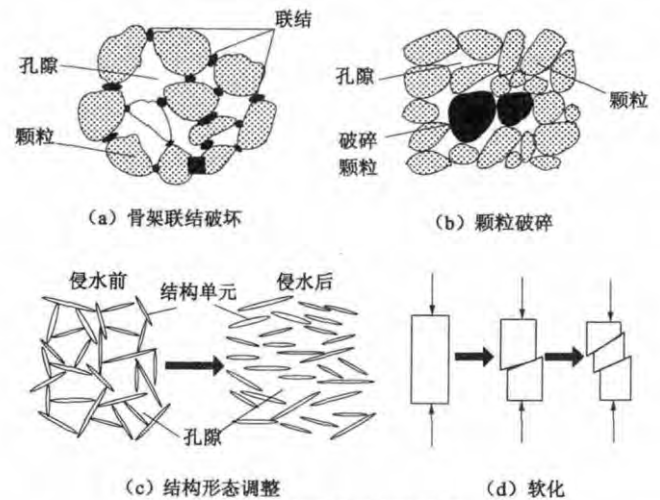


图 11 土的湿陷微观机理

Fig. 11 Classification of micro-mechanism of soils

## 6 结 论

(1) 雷州半岛玄武岩残积土属一种特殊的区域性土, 具有较差的物理特性 (高孔隙率、低密度、高液限) 和较优的力学特性 (高强度) 的异常组合。压实性差, 夯击效果差。膨胀性较小, 但收缩性较大, 实际工程中应考虑强收缩势对工程的危害。

(2) 雷州半岛玄武岩残积土的特殊性质与其物质成分和结构形态密切相关。黏土矿物以高岭石类为主, 含有大量的游离氧化铁、铝。结构特征保留了母岩晶体构造的残存形态, 以凝块和絮凝结构为主, 孔隙以团粒和絮凝体内的  $d < 0.1 \mu\text{m}$  的微孔居多。结构强度主要来源于氧化铁、铝的强胶结力以及残存或新生的化学键力。

(3) 雷州半岛玄武岩残积土具有对水敏感, 抗水性差特点, 浸水饱和后其力学性质劣化明显。这也导致该土具有一定的崩解性与湿陷性, 特别是当结构扰动和干湿循环后, 崩解性与湿陷性明显增强。雷州半岛地处炎热多雨气候带, 施工中应重点关注降雨引发的工程灾害。

(4) 目前对于玄武岩残积土地基承载力的评价多以现场标准贯入试验或室内试验方法进行经验评价, 缺乏相应参考标准, 勘察报告中提供的地基承载力实际值多数偏低且差异性较大。因此, 在玄武岩残积土地区应重视原位试验工作, 同时尽快建立此类土的工程特性指标与地基承载力的关系, 为该地区的工程勘察与设计提供可靠的技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 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[J]. 长春地质学院学报, 1992, **22**(3): 317–323. (TANG Da-xiong, WANG Qing, ZHANG Qing-yun, et al. Engineering geological study of residual laterite soil of basalt in Lei-qiong region[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1992, **22**(3): 317–323. (in Chinese))
- [2] SINGH H, HUAT B B K. Origin, formation and occurrence of tropical residual soils[M]// HUAT B B K, SEE-SEW G, ALI F H, eds. Tropical Residual Soils Engineering. London: Taylor & Francis, 2004.
- [3] RAHARDJOA H, AUNG K K, LEONG E C, et al. Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering[J]. Engineering Geology, 2004, **73**(1): 157–169.
- [4] VAUHGAN P R, MACCARINI M, MOKHTAR S M. Indexing the engineering properties of residual soil[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1988, **21**: 69–84.
- [5] 王国华, 陈海明. 雷州半岛玄武岩残积土工程特性试验[J]. 华北水利水电学院学报, 2011, **32**(3): 67–71. (WANG Guo-hua, CHEN Hai-ming. Experimental study on engineering properties of residual soil of basalt in Leizhou Peninsula[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2011, **32**(3): 67–71. (in Chinese))
- [6] OLA S A. Permeability of three compacted tropical soils[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology, 1980, **13**(2): 87–95.
- [7] LOGANATHAN N, SURAJ D S, THURAIRAJAH A. Strength correlation factor for residual soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **118**(4): 593–610.
- [8] RAO S M, REVANASIDDAPPA K. Influence of cyclic wetting drying on collapse behaviour of compacted residual soil[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2006, **24**(3): 725–734.
- [9] OLIVEIRA M T G D, FORMOSO M L L, TRESCASES J J, et al. Clay mineral facies and lateritization in basalts of the southeastern Parana Basin, Brazil[J]. Journal of South American Earth Sciences, 1998, **11**(4): 365–377.
- [10] WESLEY L D. Influence of Structure and Composition on Residual Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(4): 589–603.
- [11] 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. (WANG Qing, TANG Da-xiong, ZHANG Qing-yun, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China[J]. Journal of Changchun University of Earth Science, 1991, **21**(1): 73–81. (in Chinese))
- [12] LAN H X, HU R L, YUE Z Q, et al. Engineering and geological characteristics of granite weathering profiles in South China[J]. Journal of Asian Earth Science, 2003, **21**(4): 353–364.
- [13] 王参松, 雷学文, 孟庆山, 等. 贵州红棕色玄武岩风化土强度试验研究[J]. 工程勘察, 2012, **40**(1): 12–15. (WANG Can-song, LEI Xue-wen, MENG Wing-shan, et al. Testing study on strength of red-brown soil of weathered basalt soil in Guizhou[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012, **40**(1): 12–15. (in Chinese))
- [14] 劳国利. 海南岛土类的分布概况及物理力学特性[J]. 岩土力学, 1988, **9**(4): 51–61. (LAO Guo-li. Distribution survey of soils in the Hainan Island and their physic-mechanical properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 1988, **9**(4): 51–61. (in Chinese))
- [15] LOHNES R A, DEMIREL T. Geotechnical properties of residual tropical soils[C]// Proceeding of ASCE Convention. Huston, 1983: 150–166.
- [16] GUTIERREZ N H, NOBREGA M T, VILAR O M. Influence of the microstructure in the collapse of a residual clayey tropical soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, **68**(1): 107–116.
- [17] 秦刚, 廖义玲. 红黏土的“反剖面”特征及其形成条件分析[J]. 贵州地质, 1994, **11**(1): 89–93. (QIN Gang, LIAO Yi-ling. ‘Reverse profile’ of adamic earth and the conditions for its formation[J]. Guizhou Geology, 1994, **11**(1): 89–93. (in Chinese))
- [18] 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质[J]. 岩土工程学报, 1985, **7**(5): 10–21. (GAO Guo-rui. The microstructures and engineering properties of red soil in China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **7**(5): 10–21. (in Chinese))
- [19] 谭罗荣. 关于黏土岩崩解、泥化机理的讨论[J]. 岩土力学,



- 2001, 22(1): 1-5. (TAN Luo-rong. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 1-5. (in Chinese))
- [20] 张 抒, 唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1668-1674. (ZHANG Shu, TANG Hui-ming. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1668-1674. (in Chinese))
- [21] 杨荫华, 柏树田. 红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(4): 104-113. (YANG Yin-hua, BAI Shu-tian. The influence of irreversibility of desiccation of lateritic soils on their physic-mechanical properties[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(4): 104-113. (in Chinese))
- [22] ASTM D 5333-92. Standard test method for measurement of collapse potential of soils[S]. West Conshohocken, PA, 2002: 1197-1199.
- [23] GB 50025-2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 2004. (GB 50025-2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. 2004. (in Chinese))
- [24] FEDA J. Mechanisms of collapse of soil structure[M]// DERBYSHIRE E, ed. Genesis and properties of collapsible soils, NATO Series C: Mathematical and Physical Sciences. Dordrecht: Kluwer. 1994, 468: 149-172.

**第三届国际华人岩土工程师协会岩土与地震工程国际会议  
第二十八届国际华人交通运输协会年会  
一号通知  
2015年5月14日至16日, 美国洛杉矶**

主办承办单位: 国际华人岩土工程师协会(IACGE); 中国《岩石力学与岩土工程学报》; 国际华人交通运输协会(ICTPA)。

The International Association of Chinese Geotechnical Engineers (IACGE) 是在美国注册的由全球从事岩土工程研究及应用的、以海内外华人为主的国际性学术团体。IACGE岩土与地震工程国际会议每两年举办一次, 主题为“岩土与地震工程理论与实践中的挑战和最新进展”。上一届会议由IACGE和中国工程院土木、水利和建筑工程学部联合于2013年10月在中国成都主办。西南交通大学等多家单位承办和协办。国际华人交通运输学会是由从事交通运输研究及实务工作的华人专业人士所共同组成的国际性学术团体。成立至今已经有27年的历史。年会主题聚焦在交通运输工程的永续发展规划, 设计, 施工与管理等相关议题。第27届年会由ICTPA和中国首都世界城市顺畅交通协同创新中心联合于2014年5月25-17日在中国北京主办。北京工业大学等多家单位承办和协办。会议将接收学术论文及工程实例PowerPoint报告。会议论文选15至20篇发表在英文版《Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》学报上; 其余将于美国国会图书馆颁发的ISBN出版号CD-ROM出版。PowerPoint报告将收编到IACGE和ICTPA网站上。

IACGE2015 与ICTPA2015会议议题——岩土及地震工程方面

岩石力学及地质工程; 土动力学及地震工程; 基础工程及桩基测试; 深基坑开挖及临时支护; 路堤及支挡结构; 隧洞及地下建筑; 水坝及堤坝; 边坡稳定及滑坡; 膨胀土及黄土; 地基处理及加固; 岩土数值分析与计算; 施工岩土保障技术。

IACGE 与ICTPA2015会议议题——交通运输工程方面

交通运输规划和系统发展: 可持续多运具一体化交通运输系统; 可持续发展对策; 高效城市和区域运输规划与土地使用; 低碳排放和节能交通; 交通安全和管理; 都市运输; 航空和海洋运输; 货运运输系统; 环境冲击影响研究。

交通运输基础设施建设: 交通基础设施设计标准; 公路基础设施; 地铁及轨道交通规划设计; 智能交通系统; 山区城市桥梁与隧道工程规划设计与施工技术; 桥梁工程耐久性桥梁服役状态监测与评估; 交通运输安全; 航空和港口运输设施设计。

交通系统管理和维护: 项目实施方法: 工程设计、招标等; 交通设施生命周期成本分析; 道路系统维护; Work Zone Safety/施工路段安全。

论文摘要提交: 论文摘要要在www.iacge.org 网站上提交。论文摘要最多不超过500个字, 中英文均可, 以英文为主。但收集到《Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》学报上的论文必须是英文。英文论文按照《Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》学报规格提交。只做工程实例PowerPoint报告且不提交论文者, 需要提交不超过500个字的报告摘要和大会前提交PowerPoint文件。

重要日期: Abstract due July 1, 2014; Notify authors of accepted abstracts: August 1, 2014; Draft full paper submittal: November 1, 2014; Notify authors of accepted papers: January 1, 2015; Final paper submittal: February 1, 2015; Early-bird registration: March 14, 2015; Conference Dates: May 14-16, 2015.

会议场所: HOTEL IRVINE JAMBOREE CENTER (former name: Hyatt Regency Hotel Irvine), 17900 Jamboree Road Irvine, California, USA, 92614, Phone: +1.888.230.4452.