

文章编号:1005-0523(2019)03-0024-08

## 合肥轨道交通沿线新老黏土特性比较分析

陈翔<sup>1,2</sup>,周仕波<sup>3</sup>,杨新安<sup>1,2</sup>,黄彬<sup>1,2</sup>

(1.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2.同济大学交通运输工程学院,上海 201804;  
3.合肥城市轨道交通有限公司建设分公司,安徽 合肥 230001)

**摘要:**合肥轨道交通 1~5 号线浅埋暗挖隧道穿越地层黏土主要是全新世黏土和晚更新世黏土,根据形成年代的早晚可以称之为新黏土和老黏土,两种黏土的工程特性存在差异,主要表现为老黏土具有膨胀性而新黏土不具有膨胀性,为了更深入地了解造成两种黏土特性差异的原因,依据合肥轨道交通沿线勘察资料,统计了两种黏土的物理力学参数,并对两种黏土的物理力学参数特征进行了比较分析,得到了两种黏土特性存在差异的初步结论;分别对两种黏土的物理力学参数进行了相关性分析;从微观角度揭示了新、老黏土结构的特点和差异,解释了两种黏土的微观结构对其工程性质的影响。得出结论:合肥地区新、老黏土在亲水性、压缩性和抗剪强度等物理指标上存在明显差异,以及新、老黏土微观结构不同,是造成两种黏土工程特性差异性的原因。

**关键词:**浅埋暗挖隧道;黏土;物理力学参数;膨胀性;微观结构

**中图分类号:**U455

**文献标志码:**A

合肥市轨道交通 1~5 号线沿线浅埋暗挖隧道穿越的地层主要是全新统地层和晚更新统地层,地层主要成分为黏土,两种黏土由于形成年代的早晚不同而分别称为新黏土和老黏土,新、老黏土在工程特性上存在差异性,主要表现为新黏土不具有膨胀性而老黏土具有膨胀性,与一般土相比,膨胀土具有吸水膨胀、失水收缩的特点,在膨胀和收缩过程中会产生膨胀力,对工程安全产生不良影响,为了更深入地了解两种黏土差异性产生的原因,减小合肥地区膨胀土对暗挖隧道工程可能产生的影响,进行这方面的研究是很有必要的。

国内外很多学者以多种方式对黏土的物理力学性质进行了研究。姚华彦<sup>[1]</sup>选用合肥地铁 1 号线太湖路车站工程段膨胀土,进行击实土样的无荷膨胀率试验,研究了膨胀土膨胀特性的影响因素;郭兆清<sup>[2]</sup>结合合肥轨道交通 1 号线所经过地区的地质环境条件,分析总结了工程地质的特性;张万涛<sup>[3]</sup>定性描述和定量分析了合肥地区区域地形、地貌和工程地质条件,总结了合肥地区下更新统粘性土层及白垩纪砂岩工程特性,并着重分析了各地层的物理力学特性;王康<sup>[4]</sup>通过直剪试验分析了含水率对红黏土物理力学性质的影响。另外还有学者对黏土的物理力学参数进行统计分析,并取得了一些成果<sup>[5-8]</sup>。

Delage Pierre<sup>[9]</sup>从微观结构特性角度解释了通过吸力控制试验获取的高压实膨润土的试验数据,认为水分滞留和迁移特性,以及吸力变化下的膨胀反应都与微观机理相关。研究土的微观结构对于了解控制黏土工程性质的内在因素,探讨其膨胀机理具有极其重要的意义<sup>[10-12]</sup>。

黏性土的工程性质与土的沉积年代和成因有密切的关系,不同年代和成因的黏性土,尽管其物理指标相近,但工程性质可能相差悬殊,本文先后从两种黏土的物理力学性质和微观结构的角度进行比较,分析了两种黏土工程性质的差异和产生差异的原因,为合肥地区地下工程的施工提供一定的参考。

收稿日期:2018-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51178336)

作者简介:陈翔(1995—),男,硕士研究生,研究方向为隧道与地下工程。

通讯作者:杨新安(1964—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为隧道与地下工程。

## 1 新、老黏土物理力学性质统计分析

土体含水量、孔隙比、压缩系数、粘聚力及其它物理力学指标是岩土工程勘察设计中重要的参数,土体的物理、力学指标之间是相互关联、相互影响的,本文对合肥地铁 1~5 号线沿线第四纪全新世黏土和第四纪晚更新世黏土进行物理力学参数的统计;土的物理力学性质也反映在物理力学指标之间的相关性,本文在对其物理力学参数进行统计分析的前提下,分别拟合了两类黏土物理指标间的相关性和物理力学指标相关性。

根据合肥轨道交通 1~5 号线勘察资料的统计结果,为了便于比较分析,将合肥市新、老黏土的物理力学性质指标放在同一表格当中,如表 1 所示。

表 1 新、老黏土物理力学指标统计结果对比

Tab.1 Comparison of statistical results of physical and mechanical indexes between neo-clay and old clay

物理力学指标	样本容量		分布区间		平均值	
	新	老	新	老	新	老
含水率 $w/\%$	25	35	27.8~30.1	20.9~25.6	29.1	23.3
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^3)$	25	35	1.90~2.02	1.89~2.75	1.96	2.32
孔隙比 $e$	25	34	0.68~0.73	0.67~0.8	0.71	0.73
液限 $w_l/\%$	15	26	30.6~35.6	39.5~47.9	33.2	44.1
塑限 $w_p/\%$	15	26	10.1~12.5	20.3~23.8	11.6	22.45
液性指数 $I_L$	20	35	0.03~0.18	-0.05~0.21	0.12	0.04
塑性指数 $I_p$	20	35	19.5~24.2	19.2~24.6	22.4	22.0
压缩模量 $E/\text{MPa}$	15	35	9.6~13	12.8~18.7	10.8	14.2
压缩系数 $a/\text{MPa}^{-1}$	25	35	0.2~0.26	0.1~0.2	0.24	0.15
黏聚力 $c_q/\text{kPa}$	25	35	35~45	58~90	41.1	73.2
摩擦角 $\varphi_q/(\circ)$	25	35	10~12	14~17.2	11.0	15.0

根据对合肥市黏土的室内试验和大量工程实践,将两种黏土的物理力学指标统计进行对比,得到如下初步结论:

### 1.1 新黏土比老黏土亲水性更强

两种黏土的天然含水率都比较均匀,新黏土含水率集中在 27.8%~30.1%之间,平均值为 29.1%;老黏土含水率集中在 20.9%~25.6%之间,平均值为 23.3%,新黏土平均含水率高于老黏土。新黏土平均含水率大于塑限而小于液限,而老黏土平均含水率小于塑限,这说明新黏土在可塑性方面强于老黏土,在外力作用下容易发生塑性变形。新黏土液限变化值在 30.6%~35.6%之间,平均值 33.2%;老黏土液限变化值在 39.5%~47.9%之间,平均值 44.1%,可见要达到可流动状态,老黏土需要更多的水。

新黏土的液性指数平均值为 0.12,老黏土的液性指数平均值为 0.04,可见新黏土的含水量更多,亲水性也更强。

### 1.2 老黏土压缩性大于新黏土

新黏土压缩系数  $a$  的范围为 0.2~0.26  $\text{MPa}^{-1}$ ,平均值为 0.24  $\text{MPa}^{-1}$ ;老黏土压缩系数的范围为 0.1~0.2  $\text{MPa}^{-1}$ ,平均值为 0.15  $\text{MPa}^{-1}$ ,由压缩系数为  $e-p$  压缩曲线的割线斜率的定义可知新黏土压缩性小于老黏土,压缩系数往往随孔隙比、含水率和液限的增高而增高,这也与统计数据相符合;新黏土压缩模量范围为 9.6~13  $\text{MPa}$ ,平均值为 10.8  $\text{MPa}$ ,老黏土压缩模量范围为 12.8~18.7  $\text{MPa}$ ,平均值为 14.2  $\text{MPa}$ ,可以看出

老黏土压缩模量更大,老黏土的压缩性要大于新黏土。

### 1.3 老黏土密度大于新黏土,但孔隙比差别不大

新黏土密度变化范围为 1.90~2.02 kg/m<sup>3</sup>,平均密度为 1.96 kg/m<sup>3</sup>,老黏土密度变化范围为 1.89~2.75 kg/m<sup>3</sup>,平均密度为 2.32 kg/m<sup>3</sup>,整体来看老黏土密度大于新黏土。

对于新黏土,孔隙比变化范围为 0.68~0.73,平均值为 0.71;对于老黏土,孔隙比变化范围为 0.67~0.8,平均值为 0.73,两种黏土的孔隙比差别不大。

### 1.4 老黏土抗剪强度强于新黏土

通过室内直剪实验结果可得两种黏土抗剪强度高低,新黏土粘聚力为 35~45 MPa,平均值为 41.1 MPa,摩擦角变化范围为 10°~12°,平均值为 11.0°;老黏土粘聚力为 58~90 MPa,平均值为 73.2 MPa,摩擦角变化范围为 14°~17.2°,平均值为 15.0°。由黏土抗剪强度计算公式  $\tau=\sigma\tan\varphi+c$  可知老黏土抗剪强度要大于新黏土。

以上 4 条初步结论从宏观上揭示了相比于老黏土,新黏土具有膨胀性的原因。

## 2 新、老黏土物理力学指标相关性分析

### 2.1 相关性方程拟合的原理

采用数理统计的方法可以验证土的各物理力学指标之间的相互关系和数据的合理性,分析方法主要采用数理统计中的一元线性回归和指数非线性回归方法,利用最小二乘法的思想来拟合曲线。

一元拟合方法,即对于一组大致符合线性关系  $y=ax+b$  的数据,利用适当的方法确定参数  $a,b$  的值,得到最理想的拟合曲线。具体原理为:对于一组包含  $n$  对且大致符合线性关系  $y=ax+b$  的数据  $(x_i,y_i),i=1,2,\dots,n$ ,在自变量取  $x_i$  时,观测值与理论值的误差为

$$d_i=y_i-(ax_i+b_i) \quad i=1,2,\dots,n \quad (1)$$

按照最小二乘准则,误差平方和为

$$s=\sum_{i=1}^n d_i^2=\sum_{i=1}^n (y_i-ax_i-b_i)^2 \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

将  $s$  对  $a,b$  分别求一阶偏导,得

$$\frac{\partial s}{\partial a}=2\sum_{i=1}^n (bx_i-y_ix_i+ax_i^2) \quad (3)$$

$$\frac{\partial s}{\partial b}=2\sum_{i=1}^n (ax_i-y_i+b) \quad (4)$$

令  $\frac{\partial s}{\partial a}=0, \frac{\partial s}{\partial b}=0$  得到方程组

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (bx_i-y_ix_i+ax_i^2)=0 \\ \sum_{i=1}^n (ax_i-y_i+b)=0 \end{cases} \quad (5)$$

求解此方程组即可得到  $a,b$ ,从而确定线性条件下的拟合曲线。

对于非线性条件,可通过变量代换将非线性关系转换为线性关系,再按上述线性拟合的方法求出参数值,称之为线性化方法。

### 2.2 新黏土物理力学指标相关性

合肥地区新黏土物理力学指标相关性分析拟合方程见表 2,部分相关性较好的指标如图 1 所示。合肥新黏土孔隙比  $e$  和  $w$  含水率之间具有良好的线性关系,回归方程可表示为  $e=0.022w+0.066$ ,相关系数  $r=0.97$ ,如图 1(a)所示。

天然密度-孔隙比( $\rho-e$ )也具有良好的线性关系,拟合方程为 $e=0.39\rho-0.05$ ,相关系数为0.97,说明土的密度对土的含水率有一定的影响。而土的密度与土的粘聚力、摩擦角之间相关度并不明显,表明该土的强度指标受其物理性质影响不大。

新黏土的液限 $w_L$ 和塑性指数 $I_p$ 呈现良好的线性关系,回归方程可表示为 $I_p=0.91w_L-8.44$ ,相关系数 $r=0.93$ ,如图1(b)所示。随着液限的增大,塑性指数也呈现增大的趋势,两者相关性较好,这说明对于新黏土,液限的增幅大于塑限的增幅。

表2 新黏土物理力学指标拟合方程  
Tab.2 Fitting equation for physical and mechanical indexes of neo-clay

参数	回归方程	相关系数 $r$
$e-w$	$e=0.022w+0.066$	0.97
$\rho-w$	$\rho=0.06w+0.22$	0.93
$\rho-e$	$e=0.39\rho-0.05$	0.97
$I_p-w_L$	$I_p=0.91w_L-8.44$	0.93
$E_s-a$	$a=1.79E_s^{-0.84}$	0.81

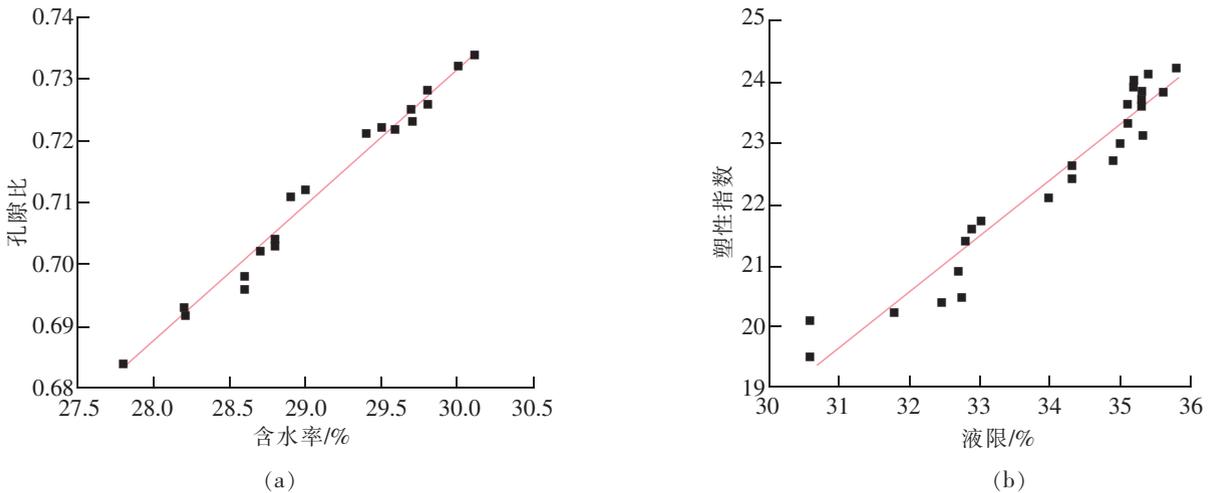


图1 新黏土物理力学指标拟合曲线  
Fig.1 Fitting curves of physical and mechanical indexes of neo-clay

### 2.3 老黏土物理力学指标相关性

合肥地区老黏土物理力学指标相关性分析拟合方程见表3,部分相关性较好的图像如图2所示。合肥晚更新世黏土天然含水率和孔隙比之间存在良好的线性关系,回归方程可表示为 $e=0.027w+0.091$ ,相关系数 $r=0.96$ ,如图2(a)所示。

天然密度-孔隙比( $\rho-e$ )具有良好的线性关系,可表示为 $e=0.11\rho+0.48$ ,相关系数为0.90,如图2(b)所示,说明土的孔隙比与土的密度之间有一定的关系。土的密度与土的粘聚力、摩擦角之间相关度较全新世黏土要明显。

老黏土的压缩系数和压缩模量呈现良好的幂函数关系,随着压缩模量的增大,压缩系数逐渐减小。随着液限的增大,塑性指数也呈现增大的趋势,两者相关性较好,这说明对于老黏土,液限的增幅也大于塑限的增幅。

表3 老黏土物理力学指标拟合方程  
Tab.3 Fitting equation for physical and mechanical indexes of old clay

参数	回归方程	相关系数
$e-w$	$e=0.027w+0.091$	0.96
$\rho-w$	$\rho=0.24w-3.28$	0.93
$\rho-e$	$e=0.11\rho+0.48$	0.90
$I_p-w_L$	$I_p=0.57w_L-4.18$	0.95
$E_s-a$	$a=48E_s^{-2.2}$	0.86

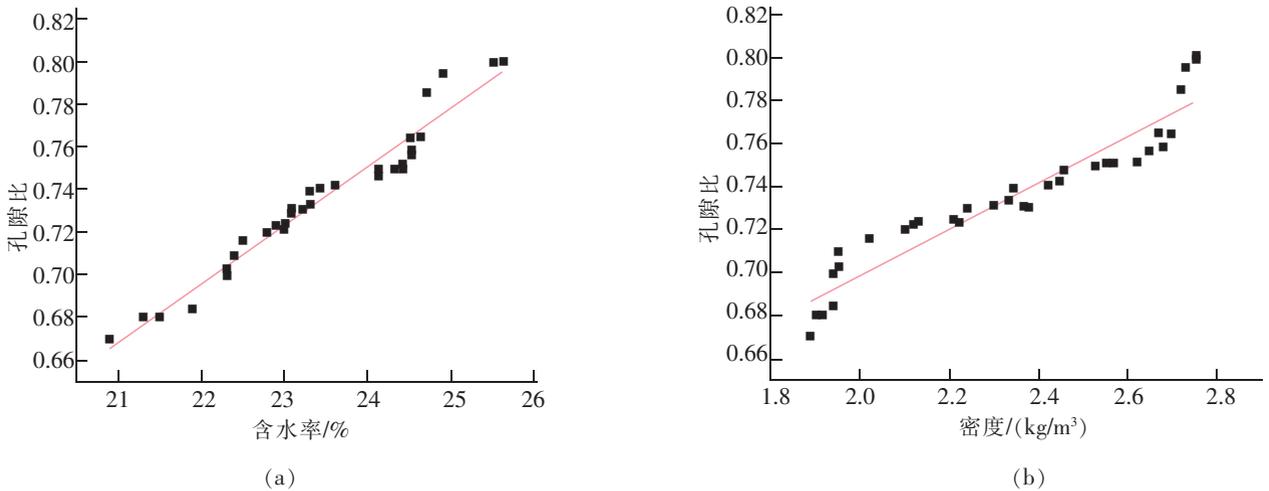


图2 老黏土物理力学指标拟合曲线  
Fig.2 Fitting curves of physical and mechanical indexes of old clay

由上述分析可知,合肥地区新黏土和老黏土物理性质指标间的相关关系形式符合各参数定义之间的规律,且相关度较好,验证了新、老黏土的统计数据的合理性。

### 3 微观结构对黏土膨胀性的影响

土的微观结构是指土在一定地质环境和条件下土粒和土团的排列方式,微孔隙和微裂隙的大小、形状、数量及其空间分布与充填情况,接触与连结方式等所构成的微观结构特征。微观结构一方面反映黏土的形成条件,另一方面也是决定黏土物理力学及其它性质的重要影响因素。研究土的微观结构不仅可以帮助了解控制黏土工程性质的内在因素,对于研究黏土的膨胀机理也很有帮助。

#### 3.1 黏土的微观结构

微观试验用土为合肥地铁5号线贵阳路站施工现场采集的第四纪全新统地层和第四纪晚更新统地层的土样,土样呈黄褐色,天然含水率较低,全新统地层土样呈可塑和硬塑状,中更新统地层土样呈硬塑状,第四纪全新统地层形成年代较晚,按照年代划分的原则,为新黏土,主要分布在一级阶地和河漫滩;第四纪中更新统底层的土样形成年代较早,为老黏土,主要分布在二级阶地,为了探究黏土微观结构对土体物理力学性质的影响,采用扫描电镜法分别对两种土样进行了微观尺度试验。

试验采用的是FEI Quanta 200II场发射扫描电子显微镜,样品放入仪器前进行风干,切割成长度为10 mm,厚度3 mm的方形薄片,以暴露出受扰动影响较小的新鲜表面供观察,再对试样表面进行喷金镀膜,样品观察采用的放大倍数为5 000和50 000倍,以电镜照片的形式记录,见图3。

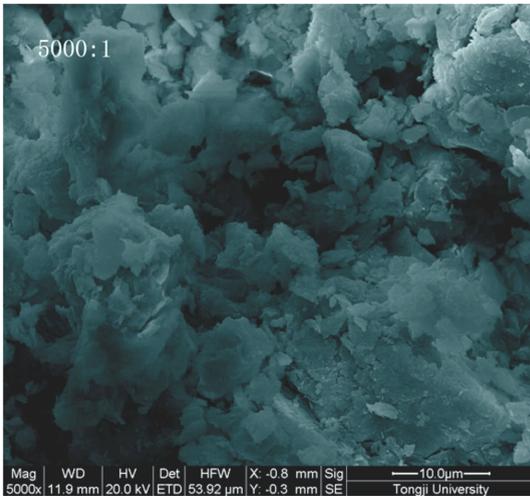
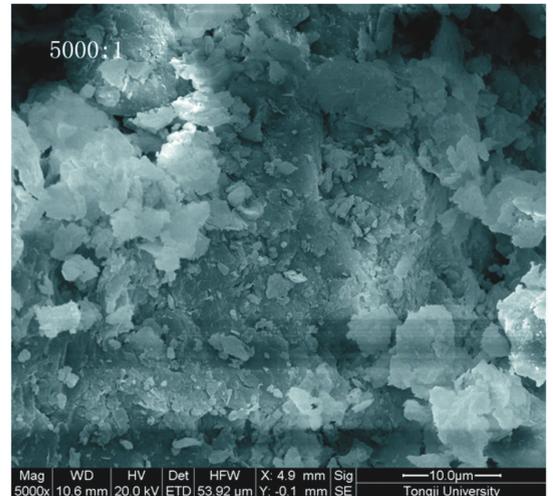
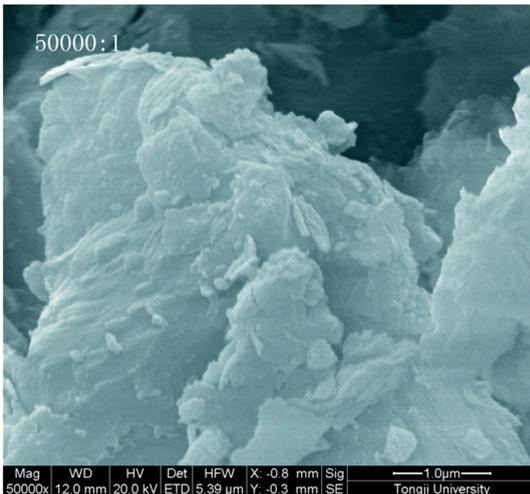
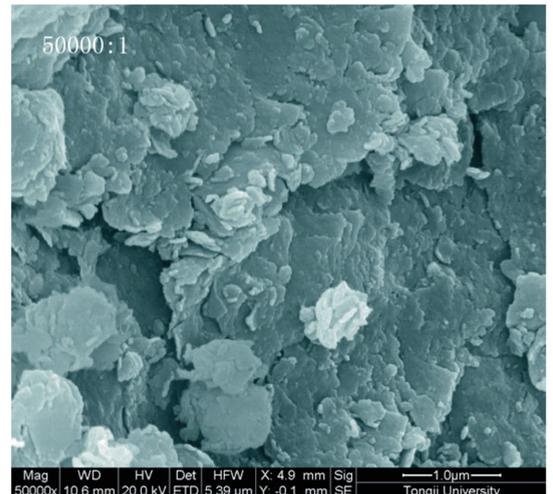
(a) 新黏土( $\times 5\ 000$ )(b) 老黏土( $\times 5\ 000$ )(c) 新黏土( $\times 50\ 000$ )(d) 老黏土( $\times 50\ 000$ )

图3 两种黏土的微观结构特征

Fig.3 Microstructure characteristics of two kinds of clay

### 3.2 黏土微观结构对工程特性的影响

黏土在成土过程中,由于温度、湿度和压力等作用的不同和不均匀胀缩效应引起的体积变化,以及土内复杂的物理化学变化所引起的力学效应,导致了黏土微观结构存在差异性,典型的黏土微观结构面为致密结构面(如图3(d))和裂隙结构面(如图3(c))。

试验观察得知,老黏土微观结构更为致密,致密结构面和裂隙组合成的裂隙结构体构成细观结构特征,薄片状黏土矿物形成面-面接触,相互贴附形成大的集合体,究其原因老黏土形成年代较为久远,形成过程中经历压密作用较多导致黏土颗粒更为紧凑;新黏土裂隙结构体中的微裂隙呈网状结构,纵横交错,裂面粗糙,分布较为杂乱,粒径差异较小,连接也较为疏松,究其原因新黏土形成过程中胀缩效应所形成的不均匀水平应力产生的水平应力差导致了复杂交错的裂隙结构。

相比于老黏土,新黏土中发育有较多的微孔隙和微裂隙,孔隙偶尔以贯通组合孔隙的形式出现,具有不连续性,微孔隙和微裂隙的存在有利于水的渗透与排出,为团聚体的胀缩提供了必要条件,也在很大程度上

导致了这种黏土的膨胀性。

另一方面,黏土由各种基本颗粒排列组合而成,基本颗粒包括基质、团聚体和连结物。基质是一种三维空间组合物,例如颗粒与颗粒结合而成的颗粒状基质、紊流或层流黏土形成的黏土基质;团聚体是单个或多颗粒作用的组合,内部可嵌入粉粒、砂粒,团粒结构。联结、稳定性和团粒内伴生孔隙在黏土收缩和膨胀中具有重要作用;连结物则是把粉砂粒、砂粒或团聚体搭接起来的组合,为紊流黏土基质排列和胶结物。三种基本颗粒的占比很大程度上决定了黏土的工程性质。对于新黏土,基质和连结物含量明显多于老黏土,而团聚体含量则较少,在荷载作用下,随着水的浸进,活性黏土包围颗粒,形成新的团聚体而膨胀,这也造成了新黏土具有膨胀性而老黏土不具有膨胀性。

## 4 结论

本文利用最小二乘法对合肥地区新黏土和老黏土的物理力学指标统计结果进行了分析,分别研究了两种黏土的物理力学性质间的相关性,并通过扫描电镜观察研究了两种黏土的结构特征,从微观角度分析了两种黏土工程性质存在差异性的原因,得出以下结论:

1) 合肥地区老黏土和新黏土物理性质指标存在差异,表现为新黏土的亲水性强于老黏土,压缩性小于老黏土,老黏土抗剪强度强于新黏土,宏观上揭示了新黏土相对于老黏土存在膨胀性的原因。

2) 经过对合肥地区晚更新世黏土和全新世黏土的物理力学指标的拟合,发现新、老黏土的各参数之间相关关系符合规律,相关度较高,一定程度上验证了统计数据的合理性。

3) 形成年代和应力环境的不同造成了新黏土与老黏土在微观结构上存在差异,新黏土微裂隙发育,颗粒较为破碎,细密呈网状;老黏土颗粒之间接触更为紧密,多为片状黏土面-面接触且颗粒相互贴附形成的较大的集合体。

4) 新黏土普遍发育有微裂缝,微裂缝和微裂隙的存在有利于水的渗入和排出,造成了土体的水分迁移,导致了新黏土具有膨胀性,造成了两种黏土工程性质的不同。

5) 新、老黏土基本颗粒含量不同,新黏土基质与连结物含量较多,老黏土团聚体含量较多,遇水后新黏土更易形成团聚体导致体积膨胀。

## 参考文献:

- [1] 姚华彦. 合肥膨胀土的膨胀特性试验研究[J]. 工业建筑, 2015(S1):5.
- [2] 郭兆清,刘毅. 合肥轨道交通1号线沿线的工程地质特性分析[J]. 工程与建设, 2014, 28(2):173-175.
- [3] 张万涛. 合肥地区粘性土及白垩纪砂岩工程特性分析[J]. 山西建筑, 2013, 39(22):57-58.
- [4] 王康,孙熔正,杨新安. 充填型浅层岩溶隧道溶洞处理技术研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(3):23-28.
- [5] 屈若枫,徐光黎,王金峰,等. 武汉地区典型软土物理力学指标间的相关性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2):113-119.
- [6] 吴礼年,谢巧勤,方玉友. 合肥地区粘性土物理力学指标的相关性分析[J]. 水文地质工程地质, 2002(4):43-45.
- [7] 张先伟,孔令伟,郭爱国,等. 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4):447-454.
- [8] 于沉香,程江涛. 细粒尾矿物理力学参数统计分析[J]. 路基工程, 2015(4):95-100.
- [9] DELAGE P. 微观结构对用于工程屏障的高压实膨胀黏土性状的一些作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(4):721-732.
- [10] 周晖. 珠江三角洲软土显微结构与渗流固结机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
- [11] 戴张俊,陈善雄,罗红明,等. 南水北调中线膨胀土/岩微观特征及其性质研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5):948-954.
- [12] 祝卫东. 温州软土与台州软土工程特性及其比较分析[D]. 杭州:浙江大学, 2003.

# Comparative Analysis of Characteristics of New and Old Clay along Hefei Rail Transit

Chen Xiang<sup>1,2</sup>, Zhou Shibo<sup>3</sup>, Yang Xinan<sup>1,2</sup>, Huang Bin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory for Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

3. Construction Company of Hefei Urban Rail Transit Co., Ltd., Hefei 230001, China)

**Abstract:** The clay of the strata along shallow-buried tunnels of Hefei Rail Transit Line 1-5 mainly consists of Holocene clay and Late Pleistocene clay, which can be called neo-clay and old clay respectively according to their formation age. The engineering characteristics of the two kinds of clay are different mainly in that the neo-clay is expansive while the old clay is not. In order to better understand the causes for the differences between the two clays, the physical and mechanical parameters of these two kinds of clays were analyzed on the basis of data from the geological examination along Hefei Rail Transit Line 1-5, and preliminary conclusions of the differences between the two kinds of clay were made. Besides, the correlation between the physical and mechanical parameters of the two kinds of clay was explored. This paper also studied the characteristics of both clay and their existing variances through the lens of microscope, explained the influence of microstructure of the two kinds of clay on their engineering properties. It concluded that the obvious differences in physical indexes such as hydrophily, compressibility and shear strength between neo-clay and old clay in Hefei area, and the differences of their variant microstructures led to their different soil engineering characteristics.

**Key words:** shallow-buried tunnel; clay; physical and mechanical property; expansibility; microstructure