

基于沉积环境与工程地质特征的湖相软土分类研究

——以鄱阳湖流域四种典型软土为例

甘建军¹⁾, 万胜²⁾, 李荐华²⁾, 唐春¹⁾, 杨涛¹⁾, 罗藏青排¹⁾

1) 南昌工程学院鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验, 南昌, 330099;

2) 江西省水利规划设计研究院, 江西省水利工程中心, 南昌, 330029

内容提要: 在内陆地区的淡水湖区域, 地质低洼, 软土广泛分布, 主要有河床相、湖沼相、三角洲相和沼泽相等第四系以来新近沉积的软土。这些软土埋藏厚度变化大、压缩性大、非均质性强、含水率高、强度低, 极易发生变形沉降甚至工程事故。本文以中国面积最大淡水湖鄱阳湖流域四种典型软土为例, 综合利用衍射仪、SEM 扫描、GDS 高级试验系统等仪器, 对区内 132 个软土试样的矿物组成和工程地质特征开展了研究, 并基于沉积环境、软土组构及其工程特性对软土类型进行了分类。结果表明: 以软土沉积的地质环境、宏观结构和微观组成及工程特性进行柔性分类, 有利于建立湖相软土的可搜索的数据库, 有利于长江经济带软土工程地质问题的科学解决。

关键词: 软土; 地质成因; 工程地质; 成因类型; 鄱阳湖

在地球内陆地区淡水湖流域广泛存在第四纪河湖相软土, 主要是指淤泥和淤泥质土。这些软土由于地质成因的不同, 导致埋藏深厚变化大, 非均质性较强, 土体的力学参数往往随着地质环境的变化而改变, 因此不同类型软土成因和参数的获取仍然是工程师的重要挑战之一。例如固结系数, Terzaghi (1943) 与 Barron (1948) 的固结理论认为是一个常数, 但在河湖相软土地质工程实践中并不是一个常数。它的值受到了地质成因、应力历史、过固结比、土体结构、物质组成甚至测试方法的影响, 准确的工程判断取决于对软土的成因类型判断及类似软土工程地质问题的经验 (Balasubramaniam et al., 2010)。再如, 根据 Terzaghi 的固结理论, 软土的渗透率一个数量级的误差会导致在同一软土固结沉降变形量所需时间预测会出现同样数量级的误差, 渗透率则与软土的地质成因、颗粒组构紧密关联。因此, 进行湖泊相软土地质调查, 根据沉积环境和工程地质特性对分布广泛的软土进行地质成因分类, 可以为湖相软土的规范化、标准化建设提供参考。

许多学者在利用沉积环境和工程特性进行湖泊相软土分类研究方面, 开展了诸多尝试, 并取得了一

些进展。如: Troels-Smith (1955) 提出以硅质、钙质、有机质等含量多少对湖泊相软土进行分类, 该分类主要被欧洲的生态地质学家应用, 很少用于工程实践; 尹明泉等 (1993) 鲁北平原黄河三角洲的 231 个软土样进行分析, 将其分为陆相、浅海相及过渡相三种成因类型; 符必昌等 (2000) 考虑地质环境因素和物理力学指标, 将昆明地区浅层软土分为湖相、沼泽相、河滩相等三种大类和五种亚类 Schnurrenberger 等 (2003) 基于全球湖泊钻探计划 (GLAD) 提出了颜色+基岩构造+主要物质成分+主体+次要成分的湖泊相分类方法; 阎长虹 (2007) 等对连云港、南京、吴江、盱眙等地软土开展了较系统的研究, 将江苏省域内软土分为四种类型。这些分类方法或专注于宏观, 或专注科研, 而兼顾软土工程特性有利于工程实践的湖泊相软土分类还需要进一步研究。

鄱阳湖面积随着气候及降雨变化, 面积约在 3000~4200 km²。湖区软土埋藏厚度变化大 (5 cm~55 m), 受区域地质成因、埋藏深度、水域面积、地形地貌、水化学特征、流域环境、区域气候等多因素的影响, 软土成因类型多样, 其工程地质特性及湖相软

注: 本文为江西省水利科技项目 (编号: KT201635)、江西省水工程安全中心开放基金重点项目 (编号: OF201603)、江西省教育厅科技研究项目 (编号: GJJ151124)、江西省科技厅第一批科技计划项目 (编号: 20161BBG70051)、国家自然科学基金应急管理项目 (编号: 41641023)、2017 年国家大学生创新创业项目 (编号: 201705) 以及南昌工程学院第十六届挑战杯项目的成果。

收稿日期: 2018-09-05; 改回日期: 2019-06-03; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.014

作者简介: 甘建军, 男, 1975 年生, 博士, 讲师, 主要从事软土工程地质特性和岩土工程的科研与教学工作, Email: ganjianjun@nit.edu.cn。

土分布比较典型,对于研究类似湖泊相软土具有明显的代表性(金振奎等,2014;贾铁飞等,2015)。为此,本文通过现场调查、原位测试、物理力学试验和对 132 份区域内堤防、采沙、水利、桥梁勘察报告进行工程地质分析,探索性地提出从地质沉积环境、微观结构和工程特性相结合的湖泊相软土分类方法,以期对湖相软土分类、规范化、标准化建设提供参考。

1 地质环境及宏观分类

鄱阳湖区位于江西省北部,地势表现为布袋形,袋口朝北,四周环山,其中西北高、东南低,多湿地,河流密集,湖水由湖口县汇入长江。地形由南向北倾呈阶梯状倾斜,区内有高山、中低山、丘陵、平原、河湖圩区等多种地貌,有“五江”:修河、赣江、抚河、信江、饶河五大河流汇入湖内,形成了相类多样的软土沉积地貌。鄱阳湖区土体形成于早白垩世河谷沉积阶段,其软土主要形成于新近纪至第四纪盆地河流湖泊相沉积阶段。不同地质历史、气候水文、物质来源造成了沉积环境的变化,从而导致研究区软土的埋深、厚度、形态、物质成分、结构特征和工程地质特性差异很大(张春晖等,1996;霍雨等,2011)。

早白垩世河谷沉积阶段:这一阶段相当于鄱阳湖盆地沉陷早期,沉积了一套巨厚的火山凝灰和火山灰碎屑物,为扬子地台上的山间地槽环境形成的冷水坞组拉分盆地河流谷地相沉积,呈不整合构造于基岩之上,经搬运沉积形成了鄱阳湖盆地软土的下伏层。

晚白垩至古近纪鄱阳湖盆地冲洪积期间:该阶段鄱阳湖地台以升降作用为主,形成规模不等的拗陷和隆起。受干热气候影响,盆地被洪水反复冲积和淹没,后期盆地持续凹陷,水位上升,导致湖底土体由洪泛型和河道冲积型向湖泊沉积型转变。岩性主要以砂砾石、中粗砂、粉细砂和夹杂有机物的河湖沉积为主,并具有交错层理,局部具辫状河流相及滨湖相沉积特征。

新近纪至第四纪赣鄱盆地河流湖泊相沉积期间:该阶段受东西向新构造运动影响,盆地东侧隆起,河流深切形成洼,在 4 次冷暖交替气候影响下,湖水倒灌,积水成湖,加之上游来沙在水流分选作用下,带入湖中,形成了洪泛冲积扇、牛轭湖、三角洲、江心滩、湖心岛等湖相沉积体系,主要岩性为淤泥、淤泥质土、粉细砂、粉土、粉质黏土、中粗砂、卵石等。

根据沉积环境,在鄱阳湖区内主要有河床相、湖

沼相、三角洲相、沼泽相等四种软土,分布区域概况见图 1。

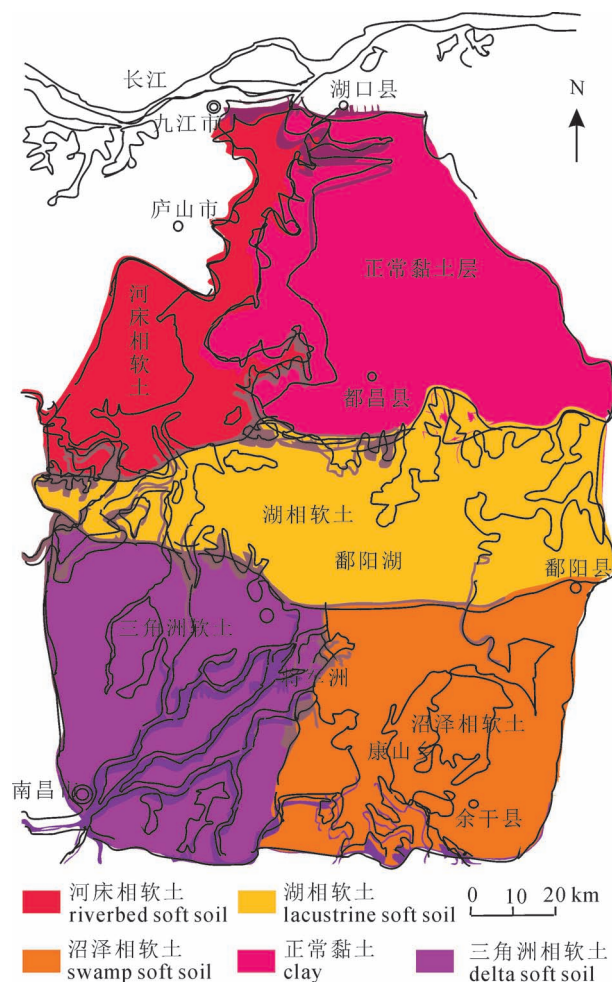


图 1 鄱阳湖软土分布概况

Fig. 1 Distribution diagram of soft soil in Poyang lake

1.1 庐山—湖口河床相软土

这类土体形成于距今约 12 ka 之后,分布在湖口县—九江市—庐山市—都昌县之间条带状的北鄱阳湖区域,主要沉积环境特点为:①鄱阳湖地堑经过晚更新世的冲积扇沉积后,为狭长的通江水道,底部凹凸不平,湖地遍布沟谷、江心岛、洼地,水道长约 40 km,深 8~18 m,宽 3~7 km;②河道谷底古地形为早期赣江古冲刷河道,河床坡度由早期较大坡度(大于 2°)被泥沙淤积变为(小于 1°),早期为辫状河流沉积,近期为曲流河床沉积,表现出以河床相沉积为主,冲积相沉积为辅;③区内软土受长江水倒灌、赣江水冲刷沉积的反复作用,水道中轴软土层一般超过 20 m,出露水面软土之上覆 20~120 cm 黄色粉细砂或粉质黏土,其软土层厚度较大;④软土层主要为灰色—灰褐色淤泥质黏土和淤泥,赋存于距地

表 52 m 之内,顶板埋深 1~5 m,层厚 50 cm~21 m,流塑—软塑状(图 2a)。

该类软土有机质含量较高(约 30%),具团聚状、纤维状,含少量动物软壳和腐殖根系,有机物纤维平均约 8%;软土孔隙比 e 平均值为 1.5,最大液

性指数值超过 2.0,饱和度 99% 以上,松散欠固结,具高压缩性,干缩后强度迅速提高,饱和后又变松散。软土中夹粉(细)砂透镜体,呈灰色,饱和,松散状,含少量黏粒,与软土呈互层状展布,厚度较大的细(粉)砂夹层底部可见相变为中砂现象。局部粉

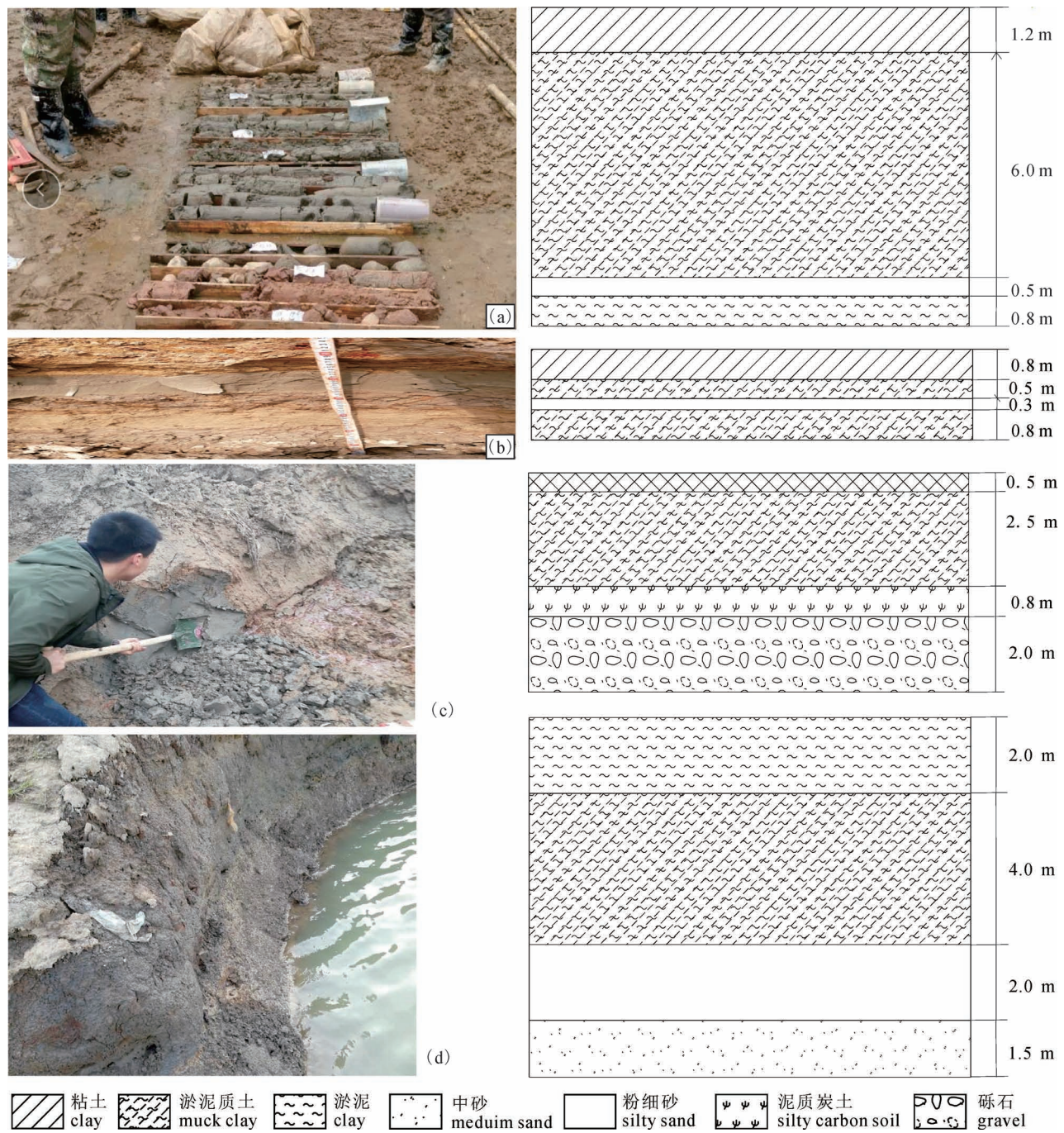


图 2 鄱阳湖软土四种主要成因类型特征

Fig. 2 Four main genetic types of soft soil in Poyang lake

(a) 庐山湖口河床相软土; (b) 吴城—鄱阳县湖相软土; (c) 赣江南支三角洲相软土; (d) 余干沼泽相软土

(a) riverbed soft soil in Lushan—Hukou; (b) lacustrine soft soil in Wucheng; (c) delta soft soil

in Gangjiangnanzhi; (d) swamp soft soil in Yugang

细砂呈透镜状分布在淤泥或淤泥质土。图 2a 为该
类软土典型地质剖面。

1.2 吴城—鄱阳县湖相软土

该类软土形成于 4.1 ka 之后,主要分布在永修
县吴城镇—鄱阳县—余干县之间湖面被水淹没的广
大区域,主要的沉积环境特征为:①鄱阳湖西侧为
赣江、修河、饶河冲积扇沉积,东侧主要为信江的冲
积扇沉积,北侧主要为饶河冲积扇沉积,沉积物由上
至下依次为灰黄色淤泥/淤泥质土、细(粉)砂、砂
(中、粗砂)、含砾砂、砾等。一般由细到粗沉积,受
季节变化和湖水涨落的影响,软土、砂土呈现交替韵
律,砂和淤泥质土的厚度随着气象水文的变化而发生
改变(图 2b);②该类软土赋存区域雨季为大水面,
宽 50~70 km,长约 90 km,水深 3~9 m,早期为
“五江”的河道两侧,后经冲积扇水道冲刷发育沉积
形成,反应出典型辫状河流沉积特征;③软土厚度比
较均匀,但范围面积大小分布不一,在平缓地带呈连
片分布,软土层倾角平缓(小于 1°),在低洼地带呈
透镜体分布。该类软土交替赋存于黏性土或粉细砂
当中,顶板埋深 0.6~8.0 m,层厚 0.1~9.4 m。

该类软土多为夹粉细砂淤泥质土,含砂量 12%
~30%,具有明显的层理特征(图 2b),灰色—灰黄
色,揭露埋深 0.6~19.8 m,含水率 40%左右,呈软
塑—流塑状,干涸后呈硬塑状。如图 3b 所示,该类
软土具千层饼状层理特征,而且厚度间杂比较均匀,
这是与河床相软土的明显区别。

1.3 赣江南支三角洲相软土

该类软土形成于距今约 1.7 ka 之后,主要分布
于鄱阳湖以西南昌以东的赣江三角洲区域,其中以
将军洲—千步洲一带的软土比较典型,包括蒋巷联
圩、红旗联圩、长乐联圩等数个万亩联圩的所在区
域,主要沉积环境为:①区内海拔 11~45 m,地貌上
整体呈盆地地形,水系密布,水流由东、南、西三个方
向注入鄱阳湖,枯水期洲滩河道出露,汛期洲滩被淹
没,湖洼罗布,为典型的侵蚀丘岗阜及湖滨堆积地
貌;②软土赋存于冲积三角洲的中前缘及古河道两
侧,岩性为淤泥、淤泥质土和有机质土,下伏地层由
砾石层,地形坡度稍陡(大于 2°);③顶部多为深灰
色的黏土层,顶板厚 0.5~2.0 m,软土埋深 5.4~
21.0 m,层厚 0.4~14.5 m,局部有泥炭质土,呈深灰
色—碳黑色,层理特征不明显。该软土亲水性较强,
有机质含量 15%左右,孔隙比平均值为 1.2,含水量
多超过 45%,呈软塑—硬塑状。图 2c 展示的该区河
侧软土的剖面,层理界面不明显,颗粒含黏性物质较

多,间杂 0.3~15.0 cm 的粉土或粉细砂。

1.4 余干沼泽相软土

该类型软土形成于距今 250 a 之后,主要赋存
于赣江、信江、抚河等三角洲平原的全封闭或半封闭
废弃河道中,主要沉积环境为:①牛轭湖形状大小
各异,多为月牙形,多为河流的摆动和变迁发育形
成,一般水深 1~3 m,古河道沉积上再受洪泛淤泥沉
积,软土厚度变化大,无明显层理,与前述软土不同
的是,表层多揭露淤泥、淤泥质土,下卧层多为粉细
砂、中砂;②该类软土形成于地势低洼处,海拔
17.59~23.40 m,在汛期低于鄱阳湖水面,广泛接受
河流洪冲积作用,近地表沉积地层多为灰黑色、有腥
臭味的淤泥,软塑—流塑状,厚度 0.1~4.8 m,揭露
埋深 0.9~9.3 m。

图 2d 为余干县康山沼泽相软土的照片和剖面
示意图,图中地层由上至下分别为 2.5~4.3 m 厚的
淤泥质黏土淤泥,局部夹粉细砂,具微透水性,高压
缩性,物理力学性质差。

2 软土的工程地质特性

鄱阳湖区内不同沉积环境形成的软土,其矿物
成分、颗粒结构及工程地质特性也大有不同(陈艺
南等,2001;陈炳贵等,2007;李西斌等,2013;曹洋
等,2014;杨晓东,2016)。

2.1 不同类型软土的矿物成分

软土的矿物成分既能反映软土的沉积环境,又
对软土的工程地质特性有着较大的影响(郑军等,
2011;周晖等,2014)。为了研究软土的矿物成分,选
择了 132 组的软土试样,采用 DMAX-3C(CuKα, Ni
滤光)进行衍射分析,试验结果见表 1。

表 1 鄱阳湖区典型软土试样 DMAX-3C 衍射成果表(%)
Table 1 DMAX-3C results of typical soil sample(%)

取样地点	碎屑矿物	伊利石	绢云母	绿泥石	高岭石
庐山市	52.08	24.84	-	10.6	12.48
吴城镇	46.0	-	48.5	5.95	-
将军洲	43.6	-	50.2	6.1	-
余干康山	75.0	-	21.7	-	3.25

注:数据为软土试样平均数,碎屑矿物含石英、长石,未含云母

从表 1 可以看出,四种软土均以石英、长石等碎
屑矿物为主,其中余干的牛轭相碎屑矿物(原生矿
物)最多,反映了该沼泽内软土的形成历史比较短,
而将军洲一带碎屑矿物最少(黏土矿物多),反映其
碎屑矿物被流水作用冲走。九江—庐山—都昌一带

河床相的软土含有伊利石含量较其他三个取样地点高,笔者认为可能是受长江水流倒灌的影响,或鄱阳湖北端水流汇聚物质不同所造成的。碎屑矿物含量多的沼泽相软土由于颗粒细,易溶性物质多,更容易受到水的作用,成分易发生较大变化;而碎屑矿物(由石英、长石等)由原生矿物风化而成,在短时间饱水作用下成分变化不大。

根据以上述矿物成份分析结果可将鄱阳湖软土分为三种类型:庐山市河床相软土碎屑矿物比黏土矿物(伊利石、绿泥石、高岭石)含量多,即为黏土—碎屑型软土;吴城镇湖泊相、赣江南支三角洲相软土成份主要为绢云母和碎屑矿物,即定名为碎屑—绢云母型软土;余干县康山钼钼湖相软土主要成份为碎屑和绢云母,定名为绢云母—碎屑型软土。

2.2 软土的颗粒结构

软土的颗粒结构对其工程地质特性影响较大。为研究其颗粒结构组成及不同工况下的变化规律,以湖泊相软土为研究对象,采用激光粒度仪、高倍电子显微镜和微观扫描方法对鄱阳湖软土的颗粒结构及组成开展了初步研究。

由于湖相土样粒径小于 0.075 mm 的颗粒含量较高,采用常规筛分方法很难划分出细粒的具体含量,为此,本次研究对于细小粒径采用 BT-9300H 型激光粒度仪对试样颗粒粒径进行分析表明,软土粒径范围主要在 50 μm 以下,含量占 76.05%,其中 10~50 μm 约占 43.47%,5~10 μm 的约占 13.63%,2~5 μm 占 12.51%,小于 2 μm 占 6.44%。说明整个软土以细颗粒为主。

分别从四种软土中取试样放在高倍电子显微镜中观察,其颗粒结构具体如下特征:①河床相软土颗粒比较松散,多为单个的矿物颗粒,粒径 2~50 μm,呈鳞片、薄片状、不规则六边形,有白、黄、褐、黑各种颜色,矿物成分多样;②湖泊相软土显微结构多呈团聚状,基质充满各矿物颗粒之间,常见片状透明云母薄片掺杂其中,颗粒粒径 0.1~20 μm,黄—褐黄色黏粒含量较多;③三角洲相软土微观结构多絮

状,颗粒多粘结在一起,粒径 0.3~3.0 μm;④沼泽相软土胶结物多为黑色,结构较为均匀,基质有白色透明呈不规则状的云母片,基质粒径 2~12 μm,常见长 5~45 μm 的纤维状有机质。(图 3)。

通过对用 GDS 高级固结仪施压 1440 min 后的试样,进行不同固结压力后的软土冷冻切片进行 SEM 试验分析,图 4 分别是 0 kPa/原始土、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa 固结压力的软土 SEM 扫描照片,结果表明:原状土微观结构较为松散,天然孔隙不均,以片状、针状碎屑矿物为主,呈絮状团聚特征;随着施加固结压力/(P_1-P_2)的增大,颗粒发生固化联结,絮状结构、针状结构被挤压破坏;当压力壮大到 200 kPa 后,软土颗粒团聚特征越明显,密实度越大,孔隙度越小,团聚颗粒的直径由大变小,形状由针状变为粒状,最后全部形成块状。

2.3 各类软土的物理力学特性

软土的物理性质指标是软土分类的重要依据。鄱阳湖软土属于欠固结土,我们采用固结试验、直剪试验、三轴剪切试验等,分别对四种类型软土分别开展室内试验,得出了鄱阳湖典型软土的天然含水量、容重、孔隙比、压缩系数、抗剪强度等物理力学指标(庄迎春等,2005;周建等,2014;甘建军等,2018;表 2)。

从表 2 试验结果中可看出,鄱阳湖区软土含水量 30.5%~79.3%,天然容重 15.2~18.9 kN/m³,天然孔隙比 1.07~1.63,液限指数 0.58~2.63,塑限指数 10.1~32.7,压缩系数 $a_{1-2}=0.76\sim2.32\text{ MPa}^{-1}$,固结快剪摩擦角范围为 0~15.2°,剪切强度范围为 1.5~30.8 kPa。

表中软土样重度相对较低,是由于湖泊相软土颗粒细,孔隙比大,结构较松散。四种软土的孔隙比均大于 1.0,基中河床相软土孔隙比最大,而赣江南支三角洲相软土孔隙比最小,主要跟固结历史和含水量有。对比其矿物成份与塑性指数,发现黏粒(如伊利石、高岭石)含量越高,塑性指数越大,其中庐山河床相软土塑性指数超过 25,说明其黏土矿物

表 2 鄱阳湖区软土主要物理力学指标分布范围

Table 2 Distribution range of main parameters of typical soft soil in Boyang Lake area

类型	ω (%)	γ (kN/m ³)	e	ω_L (%)	I_p	I_L	a_{1-2} (MPa ⁻¹)	快剪 φ (°)	快剪 c (kPa)
庐山河床相	35.1~79.3	15.2~17.5	1.34~1.63	42.6~47.3	25.1~32.7	1.10~2.63	1.16~2.32	0~15.2	1.8~20.4
吴城湖相	36.5~68.9	17.5~18.9	1.16~1.32	37.4~43.4	12.8~28.2	0.73~1.57	0.80~1.33	0~14.4	1.5~18.0
三角洲相	30.5~75.6	16.7~18.7	1.07~1.21	34.1~38.0	10.1~25.8	0.58~1.72	1.08~2.15	0~15.2	3.2~30.8
沼泽相	38.1~67.3	16.8~18.2	1.26~1.45	36.7~39.5	11.6~28.6	1.12~1.85	0.76~1.85	0~14.2	1.5~22.8

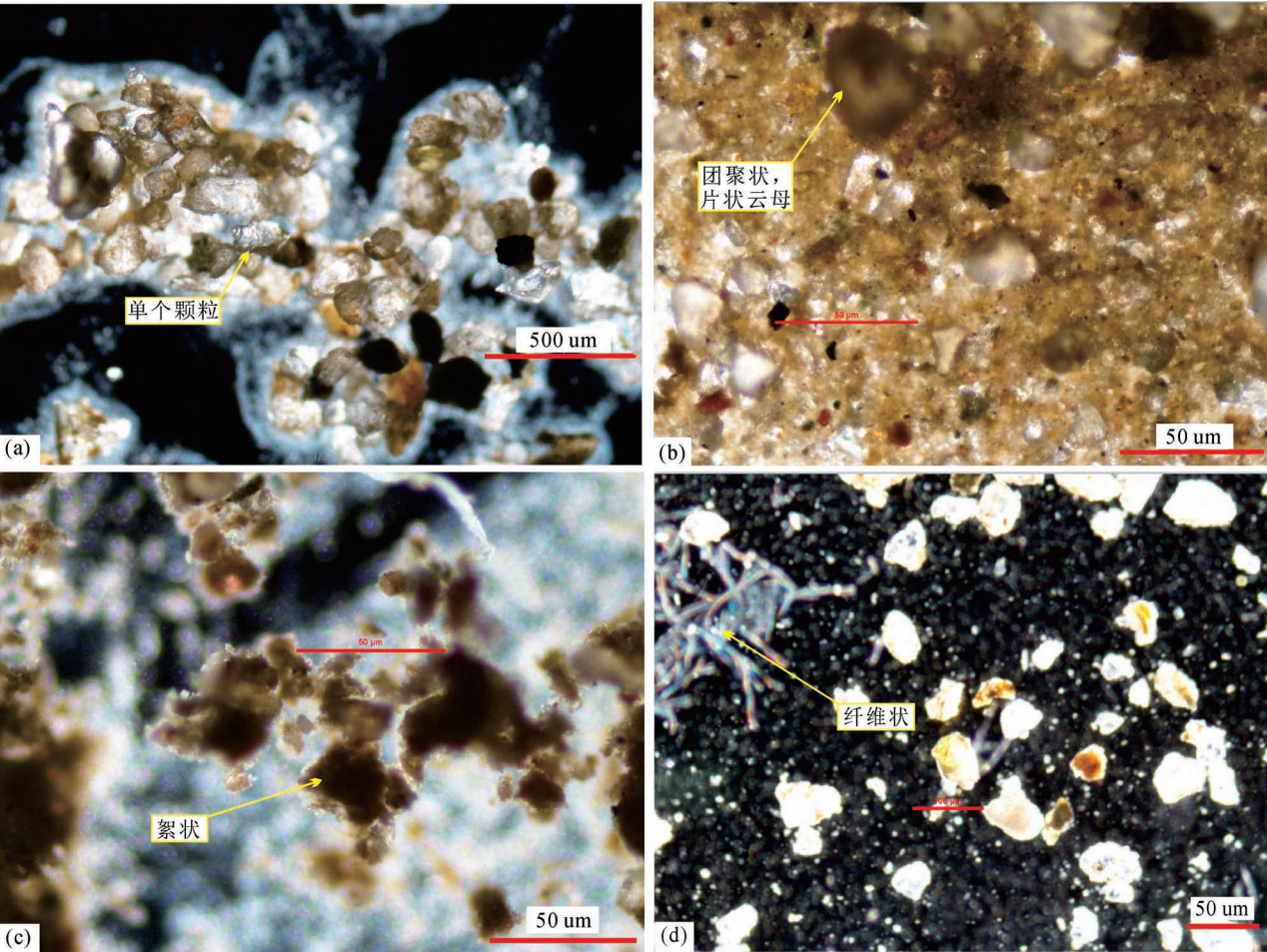


图 3 鄱阳湖区高倍显微镜下四种类型软土颗粒典型结构特征

Fig. 3 Four types of soft soil particles under high power microscope

(a) 庐山湖口河床相软土; (b) 吴城湖泊相软土; (c) 赣江南支三角洲相软土; (d) 余干沼泽相软土
(a) riverbed soft soil in Lushan—Hukou; (b) lacustrine soft soil in Wucheng; (c) delta soft soil in Ganjiangnanzhi;
(d) swamp lacustrine soft soil in Yugan

含量较高。河床相软土及沼泽相软土的液限均大于 1.0,处于流塑状,其余两种类型的软土液性指数变化范围相对较大,反映其具有干缩效应。

从上述物理力学参数可,河床相软土厚度大,孔隙比大,且溺谷谷底地势不平,极易产生不均沉降、上部构筑物开裂等工程地质问题;湖相软土含水量大,孔隙比高,强度低,含砂量大,极易产生液化现象,特别是管桩在波流、上部荷载、地震等作用下极易发生弹性变形或振动,导致湖相软土强度劣化并发生位移,其邻近的粉细砂会自上而下发生液化;三角洲相软土一般由于沉积历史短,结构松散,泡水后软化由硬塑变为软塑甚至流塑状态,且下伏粉细尖,极易发生软基堤防滑移、流土或涌砂等工程灾害;沼泽相软土有机含量高,颗粒细,强度低,渗透系数低,

掩埋后不易排水固结,具有高触变性,湖区沼泽相软土往往与粉土形成二元混合结构,极易造成管桩刺穿、沉降量过大等工程地质灾害。

3 湖泊相软土的分类

目前对软土的分类依据不一,《公路软土地基路堤设计规范》(DB33/T-2013)依据地质成因把软土分为:滨海、湖沼、谷地、河滩沉积型四种类型,其中滨海相沉积型又细分为滨海相、泻湖相、溺谷相和三角洲相四种,河滩相沉积又细为河漫滩相和牛轭相(孟庆山等,2005)。这种分类未对湖沼相和河滩相沉积型进行细分,为此,本文结合沉积环境、工程特性和国际湖沼相分类标准,对鄱阳湖区湖泊相软土进行分类,以期为我国内陆型软土的分类标准细

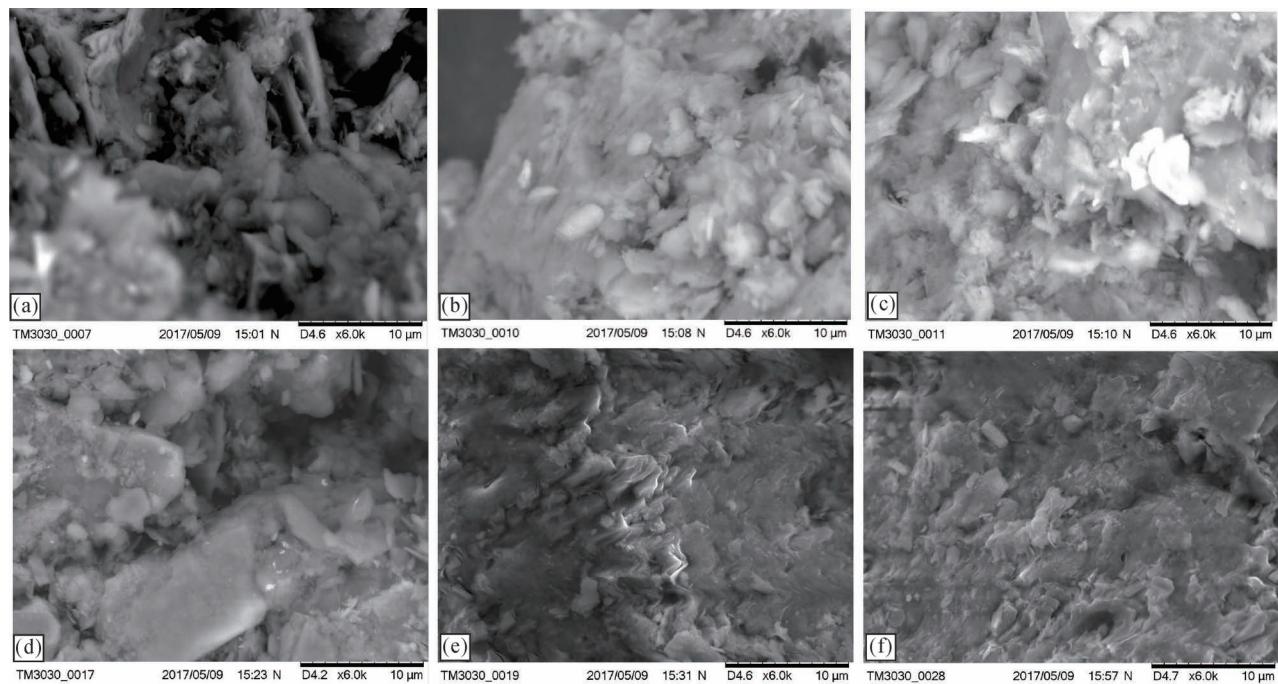


图 4 不同工况条件下软土 SEM 扫描结果

Fig. 4 Results of SEM scanning of of soft soil with different consolidation pressure undisturbed soil
(a) 原状土;(b) 50 kPa 压力;(c) 100 kPa 压力;(d) 150 kPa 压力;(e) 200 kPa 压力;(f) 300 kPa 压力
(a) $P=0$ kPa;(b) $P=50$ kPa;(c) $P=100$ kPa;(d) $P=150$ kPa;(e) $P=200$ kPa;(f) $P=300$ kPa

表 3 鄱阳湖区湖泊相软土特征及分类

Table 3 Characteristics and classification of lake facies soft soil in Poyang lake area				
生成类型		沉积环境及沉积特征	主要工程地质特征	分布区域
内陆平原湖泊相	河床相沉积	古曲流河道,河床宽 3~7 km, 软土滞留沉积于湖、江连通的过水通道;水文环境比较复杂,受上游水流冲积与下游水流倒灌双重影响;沉积层理不明显,层面起伏不平	主要为灰色—灰褐色淤泥质土和淤泥,黏土—碎屑型软土;埋深 1~5 m,上覆黏土或粉细砂,颗粒上细下粗,常见软土与粉细砂互层或透镜体。软土厚度 0.5~21 m;表层硬壳多为粉细砂/细砂; 0~2 m;天然容重: 15.2~17.5 kN/m ³ ;孔隙比: 1.34~1.63;含水量: 35.1%~79.3%;快剪黏聚力: 1.8~20.4 kPa;内摩擦角: 0~15.2°;压缩系数: 1.16~2.32 MPa ⁻¹	鄱阳湖北端九江—湖口—都昌一带狭长的过水河道
	湖沼相沉积	古地堑盆地,坡度小于 1°,后期辫状河沉积为主,湖面宽 50~70 km;水平层理,具有年层理的特征,河层冲积砂、软土具交替韵律,厚度较均匀	主要为灰黄色夹粉细砂淤泥/淤泥质土,碎屑—绢云母型软土;埋深 0.8~8 m,上覆粉细砂,颗粒粗细交替,软土厚度 0.1~9.4 m;出露表层硬壳多为黏土: 0~3 m;天然容重: 17.5~18.9 kN/m ³ ;孔隙比: 1.16~1.32;含水量: 36.5%~68.9%;快剪黏聚力: 1.5~18 kPa;内摩擦角: 0~14.4°;压缩系数: 0.80~1.33 MPa ⁻¹ .	鄱阳湖中部吴城—余干—鄱阳一带广阔湖域
	三角洲相沉积	“五江”入湖前的冲积三角扇中前缘部分和古河道两侧,坡度大于 2°,洪泛冲积沉积占优势,属辫状水道和漫流沉积;无明显层理,上细下粗	主要为深灰色、灰黑色淤泥、淤泥质土和有机质土,碎屑—绢云母型软土;上覆 0.5~8 m 的壤土或粉质黏土,下伏地层由砾石层,埋深上覆粉细砂,颗粒粗细交替,软土厚度 0.4~14.5 m;天然容重: 16.7~18.7 kN/m ³ ;孔隙比: 1.07~1.21;含水量: 30.5%~75.6%;快剪黏聚力: 3.2~30.8 kPa;内摩擦角: 0~15.2°;压缩系数: 1.08~2.15MPa ⁻¹	鄱阳湖周围赣江、抚河、饶河、信江、修河入湖冲积扇中前缘区域
	沼泽湖相沉积	“五江”入湖前的封闭或半封闭废弃河道中,层理不明显,属推移质和悬移质新近沉积	主要为灰黑色淤泥,上层悬移质淤泥有腥臭味,流塑—软塑状,分选性差,结构不稳定带有交错的粉砂薄层层理,水平渗透性较好;下层软土厚度 0.1~4.8 m;天然容重: 16.8~18.2 kN/m ³ ;孔隙比: 1.26~1.45;含水量: 38.1%~67.3%;快剪黏聚力: 1.5~22.8 kPa;内摩擦角: 0~14.2°;压缩系数: 0.76~1.85 MPa ⁻¹	鄱阳湖南、西、东“五江”冲积扇中前缘围湖与沼泽

化提供参考和补充(表 3)。

4 结 论

鄱阳湖软土为内陆淡水湖泊相沉积软土,根据其沉积环境和工程地质特征可以初步分为河床相、湖沼相、三角洲相、沼泽相沉积四种沉积类型,具有典型湖相沉积特征:

(1)软土的沉积环境是软土分类的主控因素,主要受构造历史、地形地貌、水文地质的影响,河床相沉积主要分布于鄱阳湖的北端溺谷形河道,湖沼相沉积主要位于鄱阳湖中部的宽广湖域,三角洲相沉积主要位于鄱阳湖西的赣江冲积三角洲平原,沼泽相沉积主要分布于冲积扇之间的废弃河道。

(2)河床相沉积为黏土—碎屑型软土,其碎屑矿物含量多,黏土矿物次之,埋藏厚度多达 20 m,多为灰色—灰褐色淤泥质土和淤泥,含水量大,孔隙比大,黏聚力低,在工程建设时要注意其不均匀沉降问题。

(3)湖沼相软土为碎屑—绢云母型软土,具明显年度变化的水平层理特征,含砂量高,软土与砂分布具有交替韵律,孔隙比大,饱和后黏聚力低,工程建设时要注意其多层地基的渗透及变形问题。

(4)三角洲相沉积软土也是碎屑—绢云母型,但其层理不明显,孔隙比大,具有上细下粗的特点,抗剪强度相对较高;沼泽相具二元沉积特征,即上层为推移质淤泥,有机质含量高,有腥臭味,下层为含砂量高的淤泥质土,抗剪强度极低,若开展工程建设必须进行软土处理。

(5)鉴于长江经济带流域湖泊软土分布面积广,类型多,易于造成工程地质灾害的特点,建议开展内陆湖泊相软土的统一工程分类和地基处理勘察设计标准化研究,为长江经济带建设提供科学依据。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹洋, 周建, 严佳佳. 2014. 考虑循环应力比和频率影响的动载荷下软土微观结构研究. 岩土力学, 35(3): 735~744.

陈炳贵, 欧阳平, 黄梅. 2007. 3S 技术支持下鄱阳湖区地质构造调查分析. 地球物理学学报, 22(5): 1666~1672.

陈艺南, 谈清, 殷红岩, 潘华良. 2001. 江苏连云港地区滨海相软土地质特性研究. 江苏地质, 25(2): 106~111.

符必昌, 黄英, 李琴书, 付君隼. 2000. 昆明盆地浅层软土成因及工程地质分类研究. 昆明理工大学学报, 25(5): 22~26.

甘建军, 李荐华. 2018. 鄱阳湖湖相深厚软土工程地质特性研究. 南昌工程学院学报, 33(3): 12~18.

霍雨. 2011. 鄱阳湖形态特征及其对流域水沙变化响应研究. 导师: 王腊春. 南京大学地理与海洋科学学院博士论文: 1~120.

贾铁飞, 王峰, 袁世飞. 2015. 长江中游沿江牛轭湖沉积及其环境意义——以长江荆江段天鹅洲、中洲子为例. 地理研究, 34(5): 861~871.

金振奎, 李燕, 高白水, 宋宝全, 何宇航, 石良, 李桂仔. 2014. 现代缓坡三角洲沉积模式——以鄱阳湖赣江三角洲为例. 沉积学报, 32(4): 710~723.

李西斌, 谢康和, 陈福全. 2013. 考虑软土流变特性和应力历史的一维固结与渗透试验. 水利学报, 44(1): 18~25.

孟庆山, 汪稔, 刘观仕. 2005. 动力固结后饱和软土三轴剪切性状的试验研究. 岩石力学与工程学报, 24(22): 4025~4030.

阎长虹, 夏文俊, 董平, 郑军, 詹启伟, 张睿, 崔大伟, 周欣, 朱文彬, 王吉刚. 2007. 长江中下游地区软土工程地质特征及其成因类型分析. 工程地质学报, 15(2): 142~146.

杨晓东, 吴中海, 张海军. 2016. 鄱阳湖盆地的地质演化、新构造运动及其成因机制探讨. 地质力学学报, 22(3): 667~1685.

杨顺安, 冯晓腊, 张聪辰著. 2000. 软土理论与工程. 北京: 地质出版社: 1~45.

尹明泉, 韩淑萍. 1993. 黄河三角洲软土的初步研究. 山东地质, 9(2): 12~19.

郑军, 阎长虹, 夏文俊, 张睿, 陈明珠, 詹启伟. 2011. 江苏盱眙特殊软土的工程地质特性研究. 地质论评, 54(1): 134~138.

周晖, 房营光, 李勇. 2009. 珠三角软土微观结构试验分析. 科学技术与工程, 9(18): 5397~54.

张春晖, 陈庆松. 1996. 全新世鄱阳湖沉积环境及沉积特征. 江汉石油学院学报, 18(1): 24~29.

庄迎春. 2005. 软土非单调压缩固结试验与理论研究. 导师: 谢康和, 浙江大学岩土工程研究所博士论文: 1~112.

周晖. 2014. 珠江三角洲软土分布特征及成因的地质与水文环境分析. 广东土木与建筑, 7: 36~40.

周建, 邓以亮, 曹洋, 严佳佳. 2014. 杭州饱和软土固结过程微观结构试验研究. 中南大学学报(自然科学版), 45(6): 1998~2006.

Barron A. 1948. Consolidation of fine grained soils by drains wells, Americal Society of Civil Engineers. Journal of Soil Mechanics, 73: 718~743.

Balasubramaniam A S, Cai H, Zhu D. 2010. Settlements of embankments in soft soils. Geotechnical Engineering, 41(2): 1~19.

Barron R A. 1948. Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions of The American Society of Civil Engineers, 113: 718~742.

Cao Yang, Zhou Jian, Yan Jiajia. 2014&. Study of microstructures of soft clay under dynamic loading considering effect of cyclic stress ratio and frequency. Rock and Soil Mechanics, 35(3): 735~744.

Chen Bingui, Ouyang Ping, Huang Mei. 2007&. Analysis and survey for geological structure in Poyang lake area based on “3S” technology. Progress in Geophysics, 22(5): 1666~1672.

Chen Yinag, Tan Qin, Yin Hongyan, Pan Hualiang. 2001&. Study on the geological characteristics of soft soil in littoral facies, Lianyungang, Jiangsu. Geology of Jiangsu, 25(2): 106~110.

Caicedo B, Mendoza C, Lopez F, Lizcano A. 2018. Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 10(2): 367~379.

Fu Bichang, Huang Ying, Li Qinshu, Fu Junqu. 2000&. Research of cause and classification of the shallow layer soft soil for Kunming basin. Journal of Kunming University of Science and Technology, 25(5): 22~26.

Gan Jianjun, Li Jianhua. 2018&. Analysis of geological characteristics of

deep soft soil project in Poyang Lake. Journal of Nanchang Institute of Technology, 37(3): 12~19.

Huo Yu. 2011#. Morphological characteristics of poyang lake and its response to water and sediment changes in the watershed. Supervisor, wang lachun. Doctoral dissertation, school of geography and Marine science, Nanjing University; 1~120.

Jia Tiefei, Wangfeng, Yuan Shifei. 2015#. Oxbow lake sedimentary characteristics and their environmental significance in Tianezhou and Zhongzhouzi lakes in the middle Yangtze River. Geographical Research, 34(5): 861~871.

Jin Zhenkui, Li Yan, Gao Baishui, Song Baoquan, He Yuhang, Shi Liang, Li Guizi. 2014#. Depositional model of modern gentle-slope Ddelta: a case study from Ganjiang Delta in Poyang Lake. Acta Sedimentologica Sinica, 32(4): 710~723.

Li Xibin, Xie Kanghe, Chen Fuquan. 2013#. One dimensional consolidation and permeability tests considering stress history and rheological characteristic of soft soil. Shuli Xuebao, 44(1): 18~25.

Meng Qinshang, Wangnian, Liu Guanshi. 2005#. Experimental study on behavior of triaxial shear test of saturated soft clay treating with dynamic consolidation. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(22): 4025~4030.

Schnurrenberger D, Russell J, Kelts K. 2003. Clasification of lacustrine sediments based on sedimentary components. Journal of Paleolimnology, 29(2): 141~154.

Terzaghi K. 1943. Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Troels-Smith J. 1955. Karakterisering af løse jordarter Danmarks Geologiske Undersøgelse Series IV, 3(10): 73.

Yan Changhong, Xia Wenjun, Dong Ping, Zheng Jun, Zhan Qiwei, Zhang Rui, Cui Dawei, Zhou Xin, Zhu Wenbin, Wang Jigang. 2007#. Engineering geological characteristics and genetic types of soft soils in the middle and lower reaches of the Yangtze river. Chinese Journal of Engineering Geology, 15(2): 142 ~ 146.

Yang Xiaodong, Wu Zhonghai, Zhang Haijun. 2016#. Geological Evolution, neotectonics and genetic mechanism of the Poyang lake basin. Journal of Geomechanics, 22(3): 667~1685.

Yang Shun'an, Feng Xiaona, Zhang Congchen. 2000#. Soft Soil Theory and Engineering. Beijing: Geology Press of China: 1~45.

Yin Mingquan, HanShuping. 1993#. Preliminary study on the soft soil in the Yellow River delta. Shandong Geology, 9(2): 12~19.

Zheng Jun, Yan Changhong, Xia Wenjun, Zhang Rui, Chen Mingzhu, Zhan Qiwei. 2011#. Study on engineering geological characteristics of the special soft soil in Xuyi, Jiangsu Province. Geology Review, 54(1): 134 ~ 138.

Zhou Hui, Fang Ying Guang, Li Yong. 2009#. Analysis on micro-structural characteristics of soft soil in PRD during consolidation test. Science Technology and Engineering, 9(18): 5397~54.

Zhang Chunhui, Chen Qingsong. 1996#. Holocene sedimentary environment and characteristics in the Poyang lake. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 18(1): 24~29.

Zhuang Yingchun. 2005#. Nonmonotonic compression consolidation test and theoretical research on soft soil. Supervisor: Xie Kanghe, Ph.D. Dissertation, institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang university: 1~112.

Zhou Jian, Deng Yiliang, Cao Yang, Yan Jiajia. 2014#. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process. Journal of Central South University (Science and Technology), 45(6): 1998~2006.

Classification of lacustrine soft soil based on sedimentary environment and engineering characteristics

—— A case study of four typical soft soil in Poyang Lake basin

GAN Jianjun¹⁾, WAN Sheng²⁾, LI Jianhua²⁾, TANG Chun¹⁾, YANG Tao¹⁾, LUOZANG Qingpai¹⁾

- 1) National—Local Joint Engineering Laboratory of Water Engineering Safety and Efficient Utilization of Resources in Poyang Lake Watershed, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi, 330099;
- 2) Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang, Jiangxi, 330029

Objectives: The soft soil is widespread in the Poyang lake area, east China, and there exist different sub-type of the soft soil in this largest freshwater lake area in China. These soft soils have great changes in burial thickness, high compressibility, strong heterogeneity, high moisture content and low strength, and are prone to deformation, subsidence and even engineering accidents.

Methods: This article focused on the mineral composition and structure of the soft soil, physical and mechanical properties, and the correlation of the essential indexes in Poyang lake basin, Jiangxi province, based on a series of laboratory test: utilization of diffraction, SEM scanning, GDS advanced test analysis results divided the soft soil into 4 sub-classifications, the riverbed facies, the lacustrine facies, the delta facies and the swamp lacustrine facies, respectively, which determined by the sedimentary environment and engineering characteristics.

Results: The research result shows that the sedimentary environment of soft soil is essential factor of soft soil classification. According to mineral composition analysis and geological sedimentary structure, the riverbed facies was deposited as clay—clastic soft soil, and the soft soil of lacustrine facies is clastic — sericite type soft soil, deltaic sedimentary soft soil is also clastic sericite type.

Conclusions: Based on the Field investigation and lab test of the soft soil in Poyang lake area ,combining with the regional distribution ,the mineral composition and the geochemical characteristics of the newly deposited since the Quaternary system in largest fresh water lake of the China ,detailed comparative analysis between the edimentary environment and sedimentary characteristics and the main engineering geological characteristics in Poyang lake region ,the 4 sub-classification distribution area was proposed , and result show the the flexible classification based on the geological environment , macrostructure , microstructure and engineering characteristics of soft soil deposits is conducive to the establishment of a searchable database of lake soft.

Keywords: geological formation ; soft soil ; engineering geology ; genetic type ; Poyang Lake

Acknowledgements: This research is supported by Jiangxi Province water conservancy science and technology project (No. KT201635) , water project security center open fund key projects in Jiangxi Province (No. OF201603) , Jiangxi Province education department of science and technology research projects (No. GJJ151124) , Jiangxi Province department of the first batch of science and technology plan projects (No. 20161-BBG70051) , emergency management of National Natural Science Fund project (No. 41641023) , 2017 National college students’ innovative entrepreneurial project (No. 201705) , Nanchang engineering college the findings of the 16th challenge cup project

First author: GAN Jianjun , male , born in 1975 , doctor , lecturer , mainly engaged in research and teaching of soft soil engineering geological characteristics and geotechnical engineering , Email : ganjianjun @ nit.edu.cn

Manuscript received on : 2018-09-05 ; Accepted on : 2019-06-03 ; Edited by : LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.014

《王思恩文集》评介

高林志

中国地质科学院地质研究所,北京,100037

《王思恩文集》(上、下卷). 2019. 北京:地质出版社. 上卷 504 页,下卷 608 页。李廷栋院士、莫宣学院士、侯增谦院士和柳永清研究员分别作序,另有 18 篇纪念文章,上、下卷各有前言,并附有年表、附录和王思恩先生生平照片。定价 380 元。

《王思恩文集》(上、下卷)能及时整理出版,是古生物学界一大幸事,是一部重要的经典专著,其中囊括了古生物学的叶肢介分类,也包括了中国侏罗纪、白垩纪和三叠纪地层区划和地层对比。王思恩先生的夫人孙桂英研究员,作为非古生物专业的学者,耗时三年对王思恩的学术研究进行了系统整理和资料追索,特别是将新属、新种的描述与正型标本进行了逐件对应,确定了王先生在该学科研究的系统性和完整性。

该专著能顺利出版还得益于两个方面:一是王先生平生的日记、专题研究的卡片和系统的学术研究记录;二是完整的正型化石标本和未定种标本的保存(该批化石几经磨难,如:文革搬家、中国地质科学院大院内部装修和历年标本库的清理和变迁等)。孙老师通过系统整理,为中国地质科学院地质研究所留下了第一份系统的叶肢介化石分类清单和第一套实体化石标本,特别是附有历年野外记录本和工作日记的清单;为建国后老一辈古生物学家(如孙云铸院士等)建立的古生物室留下一份珍贵的系统资料,特别是为当代和后人关于化石留存提供了一个典范,为国内外学者提供了原始

化石研究的实物标本和野外记录。

《王思恩文集》中可以追索到中国近 50 年来地学研究的足迹。

《王思恩文集》(上、下卷)在字里行间体现了新中国成立后中国知识分子特有品质;纪念文章表述了王先生一生淡泊名利,学业有成,教子有方的中国学者高尚品德。

上卷中包括三大部分:① 王思恩工作和部分科研成果的回顾,体现了科研的认识过程;② 王思恩先生所建叶肢介新科、新属和新种目录,是一份重要的化石标本清单;③ 王思恩年表,与中国科技复兴和国家科技进步休戚相关,是一份不可多得的历史记录。本卷中摘选了 39 篇论文汇编成册,有利于专家、学者阅读。

下卷包括四大部分:① 中国侏罗纪地层区域地层划分和陆相生物区系特征;② 中国陆相地层含煤与聚煤规律的讨论;③ 三叠纪地层的划分依据;④ 叶肢介化石描述和新科的建立。

四篇序言高度评价了王思恩文集(上、下卷)的出版,指出,这是对王思恩先生毕生科学成就和贡献的展现。

(章雨旭 编辑)

GAO Linzhi: A review on the book *The Collected Works of Prof. WANG Si'en*

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.022