

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908019

混合土物理性质试验研究*

高梦颖, 王恒, 张煌, 丁诚, 丁建文

(东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 210096)

摘要: 土体的物理性质与力学性状之间存在一定的联系, 研究不同混合比例的混合土的物理性状变化, 对于快速测定混合土体的力学参数有很大的帮助。通过对两种原始黏土及人工配制的五种不同混合比例的混合土的物理性质进行研究, 探讨混合土的颗粒粒径分布、土粒密度、液限以及塑性指数随混合比例的变化规律。研究表明: 原始土的性质对混合土体的基本物理性质产生重要的影响。混合土的颗粒粒径分布和土粒密度按混合比例成比例的变化, 随着混合土中膨润土百分含量的增加, 其黏粒含量线性增加, 粉粒含量线性减小, 砂粒含量线性减小; 混合土的液限与塑性指数的变化规律一致, 以非线性的方式随着混合土混合比例的变化而变化, 其中在混合土中含有膨润土的情况下, 这种变化趋势更加明显。

关键词: 混合土; 膨润土; 颗粒粒径分布; 土粒密度; 液限; 塑性指数

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1287-08

Experimental Study on the Physical Properties of Mixed Clays

GAO Mengying, WANG Heng, ZHANG Huang, DING Cheng, DING Jianwen

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: It is well known that there is a certain relationship between the physical properties and mechanical properties of soils, so it is of great significance to study the physical properties of mixed clays with different mixing ratios for quickly determining the mechanical parameters of mixed clays. Research on the physical properties of two kinds of original clays and five kinds of mixed clays with different mixing ratios was carried out, the change laws of the particle size distribution, soil density, liquid limit and plasticity index of mixed clays with mixing ratios were revealed. The results show that the physical properties of the two original clays have an important influence on the physical properties of the mixed clays. The particle size distribution and soil particle density of the mixed clays change in proportion to the mixing ratios. With the increase of the percentage of bentonite in mixed clays, the clay content increases linearly, the silt content decreases linearly, and the sand content decreases linearly. The change of liquid limit of mixed clays is consistent with plasticity index. They change in a non-linear manner with the mixing ratios of the mixed clays, which is more obvious when the mixed clays contain bentonite.

Keywords: mixed clays; particle size distribution; soil particle density; liquid limit; plasticity index

* 收稿日期: 2019-08-06; 修回日期: 2019-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977243)资助

作者简介: 高梦颖(1993—), 女, 硕士研究生。主要从事流态疏浚泥的压缩-渗透性状试验研究。Email: gmydndx@163.com

引言

工程实践中不时遇到不同土类的混合工况,例如来源于不同沉积环境河道底泥的堆场疏浚泥^[1]、堆场不同位置的颗粒分选后疏浚泥^[2-4]、作为垂直防渗帷幕材料的天然土与膨润土的混合料^[5]、填埋场黏土垫层^[6]等,混合土的力学性状变化是工程中最关注的问题之一,掌握土的物理性状是评价其力学性状的重要研究手段^[7-11]。

目前已有很多研究者对于土的力学参数与物理参数之间的定量关系开展了研究,并得到广泛认可。例如:M.S.Youssef^[12]分析了重塑土的压缩指数与塑性指数以及土粒密度的关系;C.P.Wroth等^[13]、S.Leroueil等^[14]和J.Locat等^[15]构建了重塑土不排水剪切强度与液性指数的经验关系式;H.B.Nagaraj等^[16]、B.C.O'Kelly等^[17]建立了 Atterberg 数值与强度之间的联系;Zh.Sh.Hong等^[18]提出液限和初始含水率为影响重塑土压缩性状的关键因素;曾玲玲等^[19]基于重塑土固有压缩理论,构建了与应力水平、初始含水率和液限相关的重塑土渗透系数的经验关系式。M.Omar等^[20]、Z.Wu等^[21]提出通过物理参数可对土体压缩性进行预测,同时与有限元结合可对沉降问题进行预测。V.N.Georgiannou等^[22]研究了塑型不同土体的压缩和强度特性问题。

另一方面,传统上通过测定土的物理性质对土体进行分类,例如由 Casagrande 提出的塑性图分类方法就是利用液限、塑性指数等物理指标对土体进行分类^[23-25]。因此,对于不同混合比例的混合土的物理性状变化开展研究,具有重要的工程应用价值。

对于混合土工况,H.B.Seed等^[26]分析了混合土的液塑限以及塑性指数与黏土矿物的类型和数量的关系;X.S.Shi等^[27]开展了混合土液限变化与其强度关系的相关研究;L.L.Zeng等^[28]研究了掺加不可溶有机质的混合土颗粒粒径分布与颗粒密度分布

规律。然而已有研究成果多集中于分析特定工况下混合土力学性质与物理指标的定性变化规律,极少关注混合土混合后颗粒之间是否会发生化学反应,并且不同混合比例对混合土物理性状的影响规律仍未明确。

本文以南京土和钙基膨润土两种原始土为研究对象,配置不同混合比例的混合土进行物理实验,对混合土的物理性质随两者混合比例的变化规律进行研究,探讨混合土的界限含水率的变化机理。

1 试样和试验方案

1.1 试验材料

试验所用两种原始土为南京土和钙基膨润土,其中,南京土通过人工取自江苏省南京市江宁区,钙基膨润土通过商业购买获得。通过 XRD 试验分析出南京土的主要黏土矿物成分为高岭石和伊利石,钙基膨润土的主要黏土矿物成分为蒙脱石。通过室内常规物理试验得到南京土和钙基膨润土的基本物理力学指标见表 1,实验按照《土工试验方法标准》^[29]执行,其中采用干法过筛处理土样,将天然含水率土样进行风干,过 0.5 mm 筛后进行各种基本物理试验。液限试验采用碟式液限仪进行测定,塑限试验采用搓条法测定,颗分采用密度计法测定,比重采用比重瓶法测定。由表 1 可知,两种原始土均属于高液限黏土,南京土的黏粒含量低于钙基膨润土的黏粒含量。

1.2 试验方案

本文混合土样的制备步骤如下:首先,取足量的风干南京土样和钙基膨润土样分别过 0.5 mm 筛,分别放入桶 A 和桶 B;其次,两桶内分别加入足量的蒸馏水,通过搅拌器将两种干土初次搅拌均匀。已有研究^[30]表明干土和水混合后在一到两天内达到平衡,目的是使混合土充分吸水达到平衡,因此将

表 1 试验土样基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of original clays

试验土样	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
					(>0.075 mm)	(0.075~0.005 mm)	(<0.005 mm)
南京土	45.9	15.5	30.4	2.73	12	38	50
膨润土	225.5	30.0	195.5	2.60	4	36	60

土水混合物进行密封并放置两天。最后,继续用搅拌机将两桶内的土水混合物分别搅拌均匀,测量含水率,通过计算获得南京土和钙基膨润土的干重,从而按表2两者的混合比例进行混合,进一步搅拌均匀,获得不同混合比例情况下的目标含水率。

混合土的试验方案见表2,将两种原始土按照干重比例进行混合,在试验过程中通过添加蒸馏水的方式获得所需的含水率。为方便叙述,南京土表述为N,钙基膨润土表述为B。混合比例定义为混合土中某一种土的干重占混合土总干重的百分比,例如N(60%)B(40%)表示混合土中南京土干重占总干重的60%,钙基膨润土的干重占总干重的40%。

表2 试验方案

Table2 Test plan for mixed clays with different mixing ratios

试验土样	混合比例/%	
	原土1(南京土)	原土2(膨润土)
N	100	0
N(72%)B(28%)	72	28
N(60%)B(40%)	60	40
N(50%)B(50%)	50	50
N(40%)B(60%)	40	60
N(20%)B(80%)	20	80
B	0	100

2 试验结果分析

2.1 混合土颗粒粒径分布规律

土体的颗粒粒径分布可以很好的反映混合土体的均匀性、连续性等情况,土体中的各粒径含量对混合土体的基本物理性质产生一定的影响。图1为混合土颗粒粒径分布曲线,南京土的颗粒粒径分布曲线位于最下方,钙基膨润土的颗粒粒径分布曲线位于最上方,混合土的颗粒粒径分布曲线位于两种原始土南京土和钙基膨润土之间。需要注意的是,膨润土含量多的曲线位于膨润土含量少的上方。

为了进行混合土颗粒粒径试验值与计算值比较,利用公式(1)~(4)计算,其中计算值是按相应混合比例计算的每种混合土的粒径含量。将混合土的颗粒粒径含量的预测值与实测值的对比绘于图2。

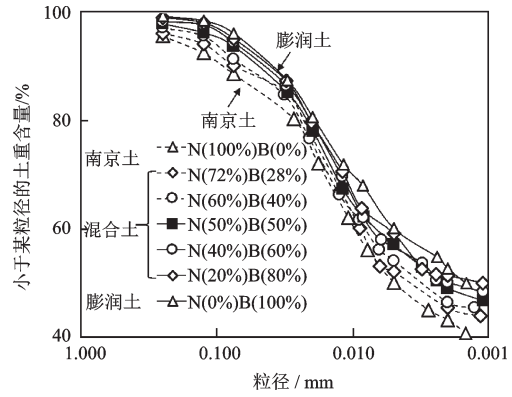


图1 混合土颗粒粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of mixed clays

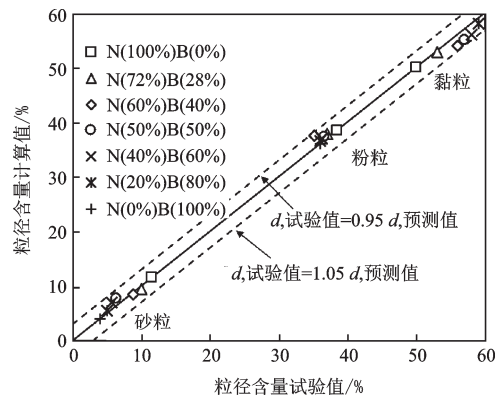


图2 混合土颗粒粒径试验值与计算值比较

Fig.2 Comparison between experimental and calculated particle size contents of mixed clays

$$CS = CS_1c_1 + CS_2c_2 + \dots + CS_nc_n \quad (1)$$

$$CM = CM_1c_1 + CM_2c_2 + \dots + CM_nc_n \quad (2)$$

$$CF = CF_1c_1 + CF_2c_2 + \dots + CF_nc_n \quad (3)$$

$$c_1 + c_2 + \dots + c_n = 1 \quad (4)$$

式中, n 为混合土中土体的种类; CS_n 为混合土中 n 土的砂粒含量,%; CM_n 为混合土中 n 土的粉粒含量,%; CF_n 为混合土中 n 土的黏粒含量,%; CS 为混合土的砂粒含量,%; CM 为混合土的粉粒含量,%; CF 为混合土的黏粒含量,%; c_n 为混合土中 n 土的百分含量,%。

从图2中可以看出混合土中黏粒含量最高,粉粒含量次之,砂粒含量最少。还可以发现随着混合土中膨润土所占的百分比逐渐增大,混合土中砂粒的含量逐渐减少,粉粒的含量逐渐减少,但减少的不明显,黏粒的含量逐渐增加。图2进一步表明按照计算公式得到的混合土颗粒粒径含量的计算值与试验值的误差在 $\pm 5\%$ 内变化,即认为混合土颗粒粒径含量的试验值和计算值基本一致,因此,两

种原始土按一定的干重比例混合时,其在混合过程中没有发生化学反应,固体颗粒基本没有发生分散和聚集,土体的固相仅仅是两种原始土中固体颗粒的简单混合^[27-28],混合土的颗粒粒径分布可以认定为两种原始土按一定的比例进行混合。

2.2 混合土土粒密度分布规律

土粒比重(土粒相对密度)为土粒的质量与同体积纯蒸馏水在4℃时的质量之比^[31],表达式如(5)所示。同时,由表达式(6)可知,在4℃时,纯蒸馏水的密度为1g/cm³,因此土粒比重(土粒相对密度)在数值上与土粒密度相等,而土粒密度定义为单位体积土颗粒的质量,表达式如(7)所示。本文对混合土的土粒密度进行进一步的研究。混合土中含有膨润土,由于膨润土具有吸水膨胀的特点,在进行土粒密度测定时直接用中性液体代替脱气水,本文采用的中性液体为脱气煤油。

$$G_s = m_s / V_s(\rho_w^{4^\circ\text{C}}) = \rho_s / \rho_w^{4^\circ\text{C}} \quad (5)$$

$$\rho_w^{4^\circ\text{C}} = 1.0 \text{ g/cm}^3 \quad (6)$$

$$\rho_s = m_s / V_s \quad (7)$$

式中, G_s 为土粒比重(土粒相对密度); m_s 为土粒质量,g; $V_s(\rho_w^{4^\circ\text{C}})$ 为土粒体积,即4℃纯蒸馏水的体积,两者体积相等,cm³; V_s 为土粒体积,cm³; $\rho_w^{4^\circ\text{C}}$ 为4℃纯蒸馏水的密度,g/cm³; ρ_s 为土粒密度,即土粒单位体积的质量,g/cm³。

图3为混合土的土粒密度随膨润土混合比例的变化曲线,由图3可见,混合土的土粒密度位于南京土和钙基膨润土的土粒密度之间,结合表1可知南京土的土粒密度为2.73 g/cm³,钙基膨润土的土粒密度为2.60 g/cm³,进一步发现混合土的土粒密度随膨润土百分含量的增加逐渐减小。

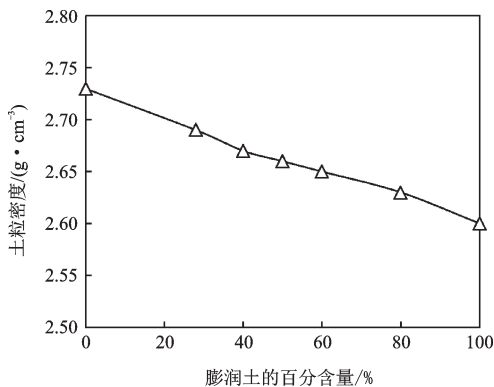


图3 混合土土粒密度随混合比例的变化关系曲线

Fig.3 The variation curve of soil particle density with mixing ratios of mixed clays

图4为混合土的土粒密度试验值与计算值比较,其中计算值是通过公式(4)、(8)按相应的混合比例计算获得。图4表明随膨润土百分含量的增加,混合土的土粒密度逐渐减小,图中虚线为混合土的土粒密度实测值和预测值对比曲线 $y=x$,其相关系数 $R^2=0.99$,进一步证明两种原始土按一定的干重比例混合时,混合土的土粒密度按相应的混合比例变化。从而表明混合土在混合过程没有发生化学反应,混合土的固体颗粒仅仅是两种原始土中固体颗粒的简单混合,混合土的土粒密度可以认为两种原始土按一定的比例进行混合,与Zeng等^[28]结论一致。由于土粒比重(土粒相对密度)在数值上与土粒密度相等,因此土粒比重(土粒相对密度)具有同样的性质。

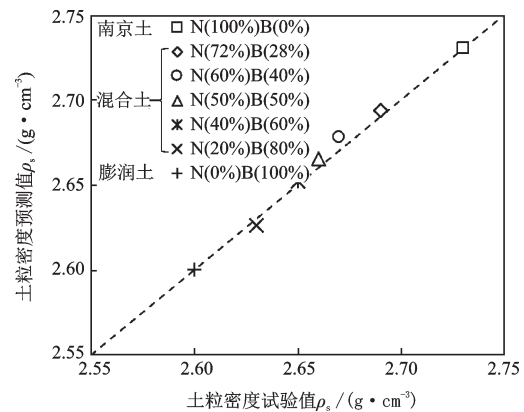


图4 混合土的土粒密度试验值和计算值比较

Fig.4 Comparison between experimental and calculated soil particle density of mixed clays

$$\rho_s = \rho_1 c_1 + \rho_2 c_2 + \dots + \rho_n c_n \quad (8)$$

式中, ρ_s 为混合土的土粒密度,g/cm³; ρ_n 为混合土中n土的土粒密度,g/cm³。

2.3 混合土界限含水率的变化情况

界限含水率包括液限、塑限、缩限等。无论对土体进行分类还是将土体的物理性质与力学性质紧密相联,均与界限含水率有密切的联系。为进一步明确混合比例对混合土界限含水率的影响,收集已有文献中的试验结果与本文的实测数据进行比较。已有文献中的数据见表3,其中,混合土中原始土2的比例为混合土中原始土2的干重占混合土总干重的比值,其取值为0~100%,表3中将混合土体进行分类也是为了下文的描述更加清晰、明确。

表3 收集的有关界限含水率数据库

Table3 Collected database on boundary water contents

原始土1	原始土2	原始土2 比例/%	参考文献
南京土	膨润土	28,40,50,60,80	本文
有机酸	膨润土	70,79,88	[28]
砂土	膨润土	15,30,45,60,75	[32]
黏土B	黏土A	5,10,20,40,60, 78.5	[27]
Happisburg 黏土	London黏土	25,50,75	[32]

2.3.1 混合土液限的变化

已有研究表明^[15],液限是影响土的力学性质的重要指标,图5为混合土液限随混合土中原始土2百分含量的变化关系曲线,由图可知,混合土的液限位于两种原始土的液限数值之间,以非线性的方式随原始土2百分含量的增加而增大。进一步可以发现在本文、L.L.Zeng等^[28]、J.F.Lupini等^[32]混合土中含有膨润土的情况下,混合土的液限随着原始土2(膨润土)百分含量的增加而增加的较快,并且这种非线性的趋势更加明显。而X.S.Shi等^[27]、J.F.Lupini等^[32]混合土中没有膨润土的情况下,这种变化较为缓慢,非线性的变化趋势不明显。由此可知,原始土体的液限对混合土的液限产生重要的影响。在混合土中含有膨润土的情况下,随着原始土2(膨润土)百分含量的增加,其液限增加的较快,并且非线性的趋势更加明显;在混合土中不含有膨润土的情况下,混合土液限随着原始土2百分含量的增加而增加的较为缓慢。

土体的液限主要与黏土矿物的类型及数量有

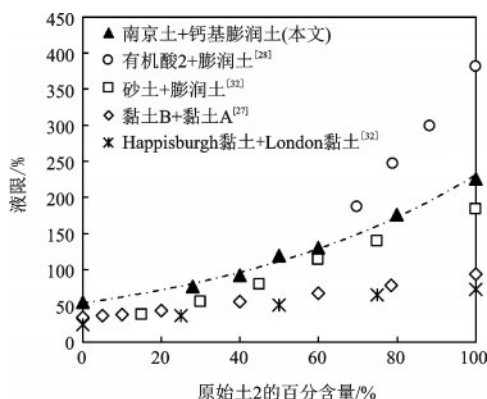


图5 混合土液限随混合比例的变化关系曲线

Fig.5 The variation curve of liquid limit with mixing ratios on mixed clays

关。通过XRD试验可知南京土的主要黏土矿物成分为伊利石、高岭石,膨润土的黏土矿物以蒙脱石为主,而土的活性指数表明不同的黏土矿物吸附结合水的能力有一定差异。蒙脱石与伊利石、高岭石,因黏土矿物种类不同吸附结合水的能力差异较大,伊利石、高岭石的活性指数较低,其吸附结合水的能力较低,蒙脱石的活性指数较高,吸附结合水的能力较高。因此,同样的黏土矿物数量,高岭石、伊利石的减少使得混合土吸附结合水的能力减弱程度减小,蒙脱石含量的增加,使得吸附结合水的能力增加的程度加强,因此混合土的液限增加。图5中,在混合土中含有膨润土的情况下,由于蒙脱石的存在,使得混合土体的液限增加的较快。Dolar等^[33]表明在混合土中存在膨润土的情况下,混合土的液限受到粒间水和层间水的共用影响,进一步证明了在混合土中含有膨润土的情况下,随着膨润土百分含量的增加,液限增加较明显。

混合土的液限同样受到颗粒大小的影响。Muhunthan^[34]表明土颗粒比表面积越大,颗粒之间的吸引力越强,液限越高。通过颗粒粒径分布试验可知,混合土的颗粒粒径分布随混合土的混合比例成比例的变化。由表1可知,南京土的黏粒含量为50%,钙基膨润土的黏粒含量为60%,随着原始土2百分含量的增加,使得混合土黏粒含量增加的同时,黏土矿物的数量也发生着变化。在图5中,随着混合土中原始土2百分含量的增加,颗粒的比表面积越大,颗粒之间的吸引力却强,混合土液限逐渐增加。

原始土体的液限对混合土液限产生重要的影响。随原始土2百分含量的增加,一方面使得混合土黏粒含量增加,细颗粒增加,比表面积增加,使得土体的液限增加;另一方面使得矿物成分的数量发生变化,从而使得液限增加明显。由于黏土矿物的颗粒粒径大小、排列方式的差异以及比表面积的大小不同,使得这种变化成为一种非线性的变化趋势。这一规律与已有的研究成果一致^[27-28,32],进一步说明混合土的液限不受混合土混合比例线性规律控制,液限不仅仅是一种物理性质的体现。

2.3.2 混合土塑性指数的变化

塑性指数通常作为细粒土分类的依据,其定义为液限和塑限的差值,同时表示细颗粒土体在可塑的情况下,含水率变化的最大区间,即塑性指数越大,表明吸附结合水越多。图6为混合土的塑性指

数随原始土2百分含量的变化关系曲线,可以发现混合土的塑性指数在两种原始土的塑性指数之间变化,随着混合土中原始土2百分含量的增加,混合土的塑性指数以非线性的方式增加。原始土体的塑性指数对混合土的塑性指数产生很大的影响。由于混合土中膨润土的存在,使得混合土的塑性指数增加的较快,且这种非线性的变化趋势更为明显。

塑性指数表示土体处于可塑状态的含水量的变化范围,即塑性指数的大小与结合水的含量有关。图6中随着原始土2百分含量的增加,混合土的塑性指数逐渐增加。一方面,混合土的黏粒含量增加。随着原始土2百分含量的增加,混合土中黏粒含量增加,细颗粒增加,颗粒的比表面积增加,使得混合土体中的一部分自由水转变为具有类似固体性质的结合水,从而使得结合水的含量增加,从而使得塑性指数增加。

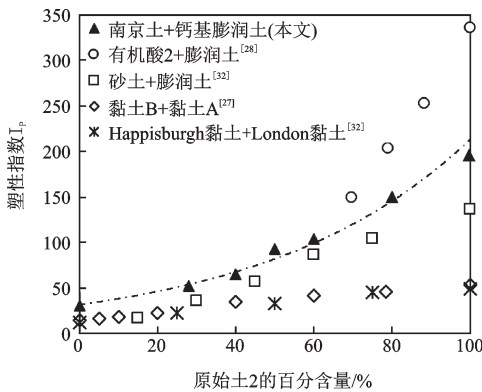


图6 混合土塑性指数随混合比例的变化关系曲线

Fig.6 The variation curve of plasticity index with mixing ratios of mixed clays

另一方面,混合土中黏土矿物的数量增加。随着原始土2百分含量的增加,混合土中黏土矿物数量增加,使得混合土吸附结合水的数量增加,从而使得混合土的液限增加。由于塑限变化较小,假定塑限不变,因此使得塑性指数增加。假定混合土中黏土矿物数量相同,在混合土中含有膨润土的情况下,粒间水和层间水共同决定混合土体的液限。随着蒙脱石含量的增加,高岭石、伊利石含量的减小,使得黏土矿物吸附结合水的能力增强,从而使得液限增加。因此,在混合土中含有膨润土的情况下,膨胀性黏土矿物数量的增加,使得混合土塑性指数增加的更为明显。

混合土的塑性指数与原始土体种类、矿物成分

种类及数量、颗粒大小均有很大关系^[35-36],在不含有膨胀性黏土矿物的情况下,土体的塑性指数主要受到黏土矿物的颗粒形状和大小的影响,在含有膨胀性黏土矿物的情况下,土体的塑性指数主要受到黏土矿物的种类和数量的影响。随着混合土中黏粒含量以及黏土矿物种类及数量的增加,水化作用越激烈,从而使得混合土的塑性指数越大。由于黏土矿物粒径大小、比表面积、排列方式的差异使得混合土的塑性指数并没有按照混合比例成线性变化,而是以非线性的方式发生变化。这与液限随混合土混合比例变化的规律相一致。

3 结论

对于混合土而言,原始土体的性质对混合土体的基本物理性质(颗粒粒径分布、土粒密度、界限含水率)产生重要的影响。本文中两种原始土(南京土和钙基膨润土)均为高液限黏土,其中一种为含有膨胀性黏土矿物的钙基膨润土,通过对7种混合土的研究,得出下述结论:

(1)两种原始土(南京土和钙基膨润土)按一定干重比例混合时,混合土体颗粒间基本没有发生化学反应,同时也没有发生颗粒的分散和聚集,混合土体颗粒粒径含量以及土粒密度按混合土的混合比例发生相应的变化。

(2)在南京土和钙基膨润土的混合土中,随着膨润土百分含量的增加,其黏粒含量线性增加,粉粒含量线性减小,砂粒含量线性减小。

(3)原始土体的液限、塑性指数对混合土的液限、塑性指数产生重要的影响。混合土的液限、塑性指数均以非线性的方式随混合土混合比例的变化而变化。

(4)混合土中含有膨润土时,在混合土的液限、塑性指数随混合土的混合比例变化较快的同时,使得液限、塑性指数与混合比例间的非线性的变化趋势表现的更加明显。

参考文献:

[1] Xu G Zh, Gao Y F, Xu C. Permeability behavior of high-moisture content dredged slurries[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33(4): 348-355.
 [2] 中国水利部水规划设计总院. 南水北调东线江苏段项目可行性研究报告[R]. 南京: 中国水利规划与设计,

- 2005.
- General Institute of Water Planning and Design, Ministry of Water Resource. Feasibility study report of Jiangsu section of the east route of south-to-north water transfer project[R]. Nanjing: China Institute of Water Resources Planning and Design, 2005.(in Chinese)
- [3] 吉锋.高含水率疏浚泥堆场存储能力试验研究与计算模型[D].南京:东南大学,2012.
- Ji F. Experiment study and modelling on capacity of dredged slurry ponds[D]. Nanjing: Southeast University, 2012. (in Chinese)
- [4] 徐桂中.疏浚泥堆场颗粒分选及其对工程特性影响规律试验研究[D].南京:河海大学,2013.
- Xu G Zh. Grain sorting behavior of dredged slurries in reclaimed land and its effects on engineering properties [D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese)
- [5] 徐浩青,朱伟,吕一彦,等.疏浚淤泥-膨润土混合土的渗透性研究[C]//中国水利学会2015学术年会论文集(下册).南京:中国水利学会,2015:528-533.
- Xu H Q, Zhu W, Lyu Y Y, et al. Study on permeability of dredged mud-bentonite mixed soil [C]//Papers Collection of the 2015 Annual Academic Conference of China Water Conservancy Society (Volume 2). Nanjing: China Water Conservancy Society, 2015:528-533. (in Chinese)
- [6] 唐晓武,史成江,林廷松,等.混合粉质粘土和疏浚土填埋场防渗垫层的环境土工特性研究[J].岩土工程学报, 2005, 27(6): 626-631.
- Tang X W, Shi Ch J, Lin Y S, et al. Geoenvironmental properties of silty soil mixed with dredged soil applied as clay liner of landfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 626-631. (in Chinese)
- [7] Hong Zh Sh, Yin J, Cui Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents [J]. Géotechnique, 2010, 60(9): 691-700.
- [8] Zeng L L, Hong Zh Sh, Cui Y J. Determining the virgin compression lines of reconstituted clays at different initial water contents [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(9): 1408-1415.
- [9] Butterfield R, Marchi M. The compressibility of natural and reconstituted marine clays [J]. Geotechnical Research, 2017, 4(3): 172-177.
- [10] Zeng L L, Hong Zh Sh, Gao Y F. Practical estimation of compression behaviour of dredged clays with three physical parameters. Engineering geology, 2017, 217: 102-109.
- [11] Zeng L L, Cai Y Q, Cui Y J, et al. Hydraulic conductivity of reconstituted clays based on intrinsic compression[J]. Géotechnique, 2020, 70(3):268-275.
- [12] Youssef M S. Relationships between shear strength, consolidation, liquid limit, and plastic limit for remoulded clays[C]. Tronto Univ.press, 1965.
- [13] Wroth C P, Wood D M. The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(2): 137-145.
- [14] Leroueil S, Tavenas F, Le B. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 681-705.
- [15] Locat J, Viscosity Demers D. Stressyield, strengthremolded, and liquidity index relationships for sensitive clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(4): 799-806.
- [16] Nagaraj H B, Sridharan A, Mallikarjuna H M. Re-examination of undrained strength at Atterberg limits water contents[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, 30(4): 727-736.
- [17] O'Kelly B C. Atterberg limits and remolded shear strength - Water content relationships [J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(6): 939-947.
- [18] Hong Zh Sh, Liu H L, Negami T. Remolded undrained strength of soils [J]. China Ocean Engineering, 2003, 17(1):133-142.
- [19] 曾玲玲,洪振舜,陈福全.压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J].岩土力学, 2012, 33(5): 1286-1292.
- Zeng L L, Hong Zh Sh, Chen F Q. A law of change in permeability coefficient during compression of remolded clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1286-1292. (in Chinese)
- [20] Omar M, Shanableh A, Mughieda O, et al. Advanced mathematical models and their comparison to predict compaction properties of fine-grained soils from various physical properties[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(6): 1383-1399.
- [21] Wu Z, Ji H, Yu C, et al. EPR-RCGA-based modelling of compression index and RMSE-AIC-BIC-based model selection for Chinese marine clays and their engineering application[J]. Journal of Zhejiang University-SCI-ENCA, 2018, 19(3): 211-224.
- [22] Georgiannou V N, Coop M R, Altuhafi F N, et al. Compression and strength characteristics of two silts of low and high plasticity [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(7): 04018041.

- [23] Alawaji H A. Swell and compressibility characteristics of sand-bentonite mixtures inundated with liquids [J]. *Applied Clay Science*, 1999, 15(3/4): 411-430.
- [24] Gurtug Y. Prediction of the compressibility behavior of highly plastic clays under high stresses [J]. *Applied Clay Science*, 2011, 51(3): 295-299.
- [25] Han J. Principles and practice of ground improvement [M]. Nanjing: John Wiley & Sons, 2015.
- [26] Seed H B, Woodward R J, Lundgren R. Fundamental aspects of the Atterberg limits[J]. *Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division*, 1964, 90(6):75-106.
- [27] Shi X S, Herle I. Compression and undrained shear strength of remoulded clay mixtures [J]. *Geotechnique Letters*, 2015, 5(2): 62-67.
- [28] Zeng L L, Hong Zh Sh, Wang C, et al. Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 132: 660-667.
- [29] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [30] Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis [M]. Boca Raton: Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, 2007.
- [31] 岩土工程基本术语标准:GB 50279—2014 [S].北京:中国计划出版社,2014.
- Standards for basic terminology of geotechnical engineering: GB 50279—2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.(in Chinese)
- [32] Lupini J F, Skinner A E, Vaughan P R. The drained residual strength of cohesive soils [J]. *Géotechnique*, 1981, 31(2): 181-213.
- [33] Dolinar B, Trauner L. Liquid limit and specific surface of clay particles [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2004, 27(6): 580-584.
- [34] Muhunthan B. Liquid limit and surface area of clays [J]. *Géotechnique*, 1991, 41(1): 135-138.
- [35] Skempton A W. Selected papers on soil mechanics [M]. [S.l.:s.n.], 1984.
- [36] Veniale F. Consolidamento e stabilizzazione dei terreni argillosi mediante diffusione di sali (KCl) [J]. *Ingegneria Ferroviaria*, 1983(6): 1-19.
- (本文责编:苏泽云)



(上接第 1278 页)

- [6] 高婧,葛继平,林铁良.干接缝节段拼装桥墩拟静力试验研究[J].*振动与冲击*, 2011, 30(4): 211-216.
- Gao J, G J P, Lin T L. Pseudo static test for pre-cast segmental bridge columns with dry joints [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(4): 211-216. (in Chinese)
- [7] Hung H H, Sung Y C, Lin K C, et al. Experimental study and numerical simulation of precast segmental bridge columns with semi-rigid connections [J]. *Engineering Structures*, 2017, 136: 12-25.
- [8] Tziavos N I, Hemida H, Metje N, et al. Grouted connections on offshore wind turbines; a review [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics*, 2016, 169(4):1-13.
- [9] Lotsberg D I I, Serechnicki A, Lervik A, et al. Design of grouted connections for, monopile offshore structures: Results from two joint industry projects [J]. *Stahlbau*, 2012, 81(9):695-704.
- [10] Lotsberg I. Structural mechanics for design of grouted connections in monopile wind turbine structures [J]. *Marine Structures*, 2013, 32(7):113-135.
- [11] Lamport W B, Jirsa J O, Yura J A. Strength and behavior of grouted pile-to-sleeve connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(8):2477-2498.
- [12] 王志强,葛继平,魏红一,等.节段拼装桥墩抗震性能研究进展 [J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(4): 147-154.
- Wang Zh Q, Ge J P, Wei H Y, et al. Recent development in seismic research of segmental bridge columns [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(4): 147-154. (in Chinese)
- [13] Kim K D, Plodpradit P, Kim B J, et al. Interface behavior of grouted connection on monopile wind turbine offshore structure [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2014, 14(3): 439-446.
- [14] Wang G Q, Chen F, Wang Z Y, et al. Research on bearing capacity of grouted connections under axial compression loads [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 438-439: 514-518.
- [15] Fehling E, Leutbecher T, Schmidt M, et al. Grouted connections for offshore wind turbine structures [J]. *Steel Construction*, 2013, 6(3): 216-228.
- [16] Chen T, Wang X, Yuan G, et al. Fatigue bending test on grouted connections for monopile offshore wind turbines [J]. *Marine Structures*, 2018, 60: 52-71.