

低液限粉土微观结构试验研究

周乔勇, 熊保林*, 杨广庆, 刘伟超

(石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 土的工程性质从本质上来说是取决于其微观结构, 是土体结构单元体性质的综合体现。利用扫描电子显微镜、矿物 X 衍射等设备对低液限粉土的微观结构进行了研究。通过微观结构分析从矿物成分和结构两方面来评价低液限粉土的工程特性。从而得到低液限粉土在不同的压实度状态下呈现不同的结构形式与联结形式, 以及不同的排列状态需要依靠孔隙比由里到外展现出来。这样就可以借助于提高压实度来改变粉土的联结形式和改变粉土颗粒的排列顺序, 进而提高低液限粉土的工程特性。

关键词: 低液限粉土; X 射线衍射试验; 扫描电子显微镜试验; 微观结构; 黏土矿物; 非黏土矿物

中图分类号: TU 441 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)S2 - 0439 - 06

作者简介: 周乔勇(1979 -), 男, 讲师, 工学硕士, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。E-mail: zhouqy_007@163.com。

Microstructure of low liquid limit silt

ZHOU Qiao-yong, XIONG Bao-lin, YANG Guang-qing, LIU Wei-chao

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The engineering property of soils is in substance determined by their microstructure with embodies unit property of soils. Scanning electron microscope equipment and mineral X-ray diffraction equipment are used to study the microstructure of low liquid limit silt. The engineering property of the low liquid limit silt is evaluated from the mineral ingredient and the structure by virtue of microstructure. The low liquid limit silt presents different structural and coupling modes under different compaction degrees. Different arrangements of particles from inside to outside are characterized by the void ratio. So enhancing the compaction degree alters the coupling modes of silt and the arrangement sequence of silt particles so as to increase the engineering property of the low liquid limit silt.

Key words: low liquid limit silt; X-ray diffraction test; scanning electron microscope test; microstructure; clay mineral; non-clay mineral

0 引 言

土的微观结构是指土内颗粒的大小、形状、表面特征, 颗粒之间的连结方式及排列方式。在长期的工程实践中, 人们发现土体的宏观工程性质在很大程度上受到微观结构的系统状态或整体行为的控制, 复杂的物理力学性质是其微观结构特性的集中体现, 任何一种基于适度均匀化处理的连续介质模式都很难准确地表述其结构的复杂性, 难以逾越土体微观结构的多样性和不确定性这一巨大的障碍。在我国, 目前使用较多的微观结构方法有光学显微镜、电子显微镜、X 射线衍射以及压汞法和气体吸附。其中 X 射线衍射实验可以分析土的矿物成分^[1-3]。扫描电子显微镜实验可以观察微观结构基本单元体(凝聚体、叠聚体)内部土粒的大小、形状、排列情况及孔隙发育情况等^[4-6]。

作为一种欠固结土——低液限粉土广泛分布于我

国北方平原地区。该类土塑性指数低, 黏性小, 干时呈粉状, 浸水时易成流体状态。在这些地区修筑的一些高等级公路, 通车二三年后, 经常出现路面开裂等早期破坏现象。经技术分析, 是由于粉土路基的压实不足或压实标准偏低, 导致不均匀沉降, 以及粉土水稳定性差引起冻胀、翻浆, 从而导致路面破坏的^[7-8]。针对该类土在工程应用中出现的问題, 从土自身级配特性以及土体微观结构的研究, 可以认识低液限粉土的许多工程性质的本质, 了解低液限粉土改良的可行性, 尤其为建立正确的低液限粉土的本构关系, 了解土体宏观现象, 研究土的微观结构与宏观力学的关系

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178280); 河北省科技计划项目(11215612D); 河北省交通运输厅科技计划项目(Y-2011001)

收稿日期: 2013 - 06 - 18

*通讯作者

均有极其重要的意义。

1 低液限粉土物理性质

为了研究河北省平原区高速公路沿线典型路基填料——低液限粉土的工程特性,选取了两种低液限粉土进行相关试验研究。土样的级配特征和物理力学性质试验成果见表1和表2。

由表1可见,两种低液限粉土的颗粒分布很相似,颗粒主要集中在0.075~0.005 mm,粉粒含量一般高达90%以上,黏粒含量不到5%。不均匀系数 $C_u < 5$,粒径分布均匀,颗粒大小差别不大;曲率系数 $C_c < 1$,中间粒径颗粒很少,较小粒径颗粒偏多。由于土的粒径分布曲线不能同时满足 $C_u > 5$, $C_c = 1 \sim 3$ 的要求。因此它是以粉粒为主,含黏粒极少的级配不良土。

2 X射线衍射试验研究

2.1 基本原理

X射线是一种电磁波,其波长和晶体中的原子间距为同一数量级,X射线通过晶体时能够产生衍射,所以X射线衍射是研究物质微观结构的一种有效手段。任何一种结晶物质都具有特定的晶体结构。晶体可以作为X射线的空间衍射光栅,即当一束X射线通过晶体时将发生衍射,衍射波叠加的结果使射线的强度在某些方向上加强,在其他方向上减弱。分析在照相底片上得到的衍射花样,便可确定晶体结构。在一定波长的X射线照射下,每种晶体物质都产生自己特有的衍射花样。每一种物质与它的衍射花样都是一一对应的,不可能有两种物质给出完全相同的衍射花样。如果试样中存在两种以上的不同结构的物质时,每种物质所特有的衍射花样不变,多相试样的衍射花样只是由它所含各物质的衍射花样机械叠加而成。

X射线衍射原理的核心公式被称作Bragg定律式,即

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

式中, d 为产生衍射的晶体中平行的原子堆积层的间距(m), θ 为产生衍射峰值时X射线入射角(rad), n 为大于零的整数, λ 为入射X射线的波长(m)。

当X射线以掠角 θ' (入射角的余角)入射到某一点阵晶格间距为 d 的晶面上时,在符合式(1)的条件下,将在反射方向上得到因叠加而加强的衍射线。对土试样进行X射线衍射分析时,一般有两种试样制备方法:定向与非定向方法。环境岩土工程中使用较多的是非定向粉末方法。黏土颗粒几乎可以直接作为试验分析的粉末试样,但对于许多岩石物质中的黏土部分,或者是黏土经过了水泥或石灰加固而形成的有结块的混合土样,则需要破碎、筛分和碾磨。一般程序是取少量自然晾干的土样,轻轻碾碎后过筛,然后将土的粉末置于小玻璃片深为2 mm的凹槽内压实,将装有粉末土样的小玻璃片放进X射线衍射仪中扫描,扫描入射角度一般取 $3^\circ \sim 70^\circ$,这个入射角范围可以保证反映出土中的矿物成分,小于 3° 或大于 70° ,噪音信号增多,导致结果不可靠。有些情况下,为了更迅速准确鉴定矿物,制样时可以应用一些辅助技术,比如使用乙二醇或甘油,使土膨胀而改变矿物结构,或通过适当的热处理来破坏矿物结构,再将土样进行扫描分析。

2.2 试验结果分析

试验仪器采用德国布鲁克(Bruker AXS)公司生产的型号Diffraktometer D8的X射线衍射仪。扫描入射角度为 $5^\circ \sim 70^\circ$,这个入射角范围可以基本保证反映出土中的矿物成分。经过XRD图谱对照分析,图谱中基本上明显的每一个峰值可以对应一种矿物。分别选取了填料1和填料2进行X射线衍射矿物、黏土矿物成分分析。首先对土样进行原生矿物和黏土矿物X射线衍射矿物划分,定出矿物相,然后分离出黏土矿物,并进行黏土矿物组成鉴定。试验研究委托中

表1 土样级配特征

Table 1 Grading properties of soil samples

填料	颗粒组成/%						限制粒径 d_{60}/mm	有效粒径 d_{10}/mm	d_{30} /mm	不均匀系 数 C_u	曲率系数 C_c
	<0.075 mm	<0.075~ 0.05 mm	<0.05~ 0.01 mm	<0.01~ 0.005 mm	<0.005~ 0.002 mm	<0.002 mm					
填料1	0.5	21.3	69.9	4.1	0.6	3.6	0.033	0.012	0.018	2.75	0.8
填料2	5.4	32	52.6	6.1	1.2	2.7	0.048	0.010	0.020	4.8	0.8

表2 土样物理力学性质试验成果

Table 2 Experiment results of physical properties of soil samples

填料	液限 /%	塑限 /%	塑性指数 I_p	最大干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最优含水率 /%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	CBR 值
填料1	32.5	22.2	10.3	1.72	15.6	32.8	26.7	6.7
填料2	30.7	22.0	8.7	1.68	15.9	27.2	28.2	8.4

国地质科学研究院矿产资源研究所进行, 试验结果如表 3 和表 4 所示。从中可以看出该取土场粉土的矿物成分主要是石英、长石、方解石、云母和蒙脱石, 还包括少量的伊利石、高岭石和绿泥石。粉土的矿物组成分析的结果表明, 非黏土矿物含量占了绝大部分, 主要以石英、长石、云母等原生矿物为主, 黏土矿物含量较少, 以蒙脱石、伊利石、高岭石等次生矿物为主, 其余矿物成分含量很少。

表 3 每种矿物含量

填料	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	赤铁矿	角闪石	黏土矿物总量
填料 1	40.8	9.5	16.4	8.6	4.2	0.5	2.2	17.8
填料 2	39.0	6.6	25.4	9.5	4.1	0.5	1.0	13.9

表 4 黏土矿物相对含量

填料	蒙脱石	伊利石/蒙脱石混层	伊利石	高岭石	绿泥石
填料 1	2	71	18	4	5
填料 2	10	62	18	4	6

各种原生矿物及次生矿物的硬度如表 5 所示, 矿物的硬度大小可以从另一方面反映出其抗剪强度的大小。从矿物 X 射线衍射分析结果来看, 填料 1 和填料 2 矿物含量多少依次为石英、长石和黏土矿物总量, 且石英含量较为接近。长石总量分别为 25.9%、32.0%, 所含的黏土矿物总量分别为 17.8%和 13.9%, 因此从土样的细粒组颗粒分析及矿物成分与含量两方面可以判断填料 2 的 CBR 值大于填料 1 的 CBR 值。

表 5 各种矿物相的硬度参考表

矿物相	硬度	矿物相	硬度	矿物相	硬度
石英	7	白云石	3.5-4	高岭石	2~2.5
长石	6~6.5	赤铁矿	6~6.5	伊利石	1.5~2.0
方解石	3	角闪石	5~6	蒙脱石	1.5

非黏土矿物成分在一定程度上影响着粉土的工程性质。石英是粉土的主要矿物成分, 由结合成螺旋式结构的硅氧四面体聚合群组成的, 四面体中所有的氧原子都同硅原子成键, 结构具有很高的稳定性。另外, 四面体的螺旋式聚合群还会形成没有节理面的结构。石英是一种氧化物, 结构中无弱键结合的离子, 矿物具有很高的硬度。石英决定了粉土具有较好的工程性质。长石的含量次之, 长石是一种具有空间框架结构的硅酸盐矿物, 矿物中部分硅原子被铝原子所置换, 产生了多余的负电荷需要一些阳离子来平衡, 由此产生了开放式结构和单元间成键强度的降低, 结果出现

了节理面, 硬度只能达到中等, 并且容易破碎, 在酸性介质条件下转变成高岭石。云母含量最少, 云母是由四面体和八面体单元组成的片状结构, 形成了云母完整的基本节理面, 粉土在卸荷期间会出现高压缩性和很大的膨胀性。此外, 粉土中石英含量越多, 其内摩擦角相对大, 而云母含量越多, 其内摩擦角就会小, 这种影响随着粒度的变小而递减; 云母的含量越高, 其内聚力相对来说会大, 因为片状矿物之间接触基本上都是面面接触, 联结比较紧密。

相对于非黏土矿物而言, 黏土矿物控制了粉土的工程性质。黏土矿物中蒙脱石含量最多, 蒙脱石的晶体结构单元是由两层硅片中间夹一层铝片, 以化学键联结组成的晶胞, 其联结力主要是很弱的范德华力, 结晶格架活动性很大, 容易被极性水分子分开。蒙脱石主要呈细黏粒或胶粒, 表面作用很强, 比表面积很大, 具有很强的亲水性, 粉土浸湿时会发生膨胀和软化, 强度降低, 压缩性增加, 饱和失水时会产生收缩。此外, 粉土中片状矿物含量越多, 则土的含水率越大, 这是由于片状矿物的风化程度较高, 吸附水的能力也较强; 液塑限的大小与伊利石的含量成正比, 与绿泥石含量成反比; 塑性指数的大小与伊利石的含量成反比, 而与绿泥石的含量成正比。粉土的矿物分析结果还表明, 由于粉土中黏土矿物较少, 石灰或粉煤灰改良时, 只能产生有限的胶凝物质, 也就是说从化学反应角度利用石灰改良粉土效果是有限的。

3 扫描电子显微镜试验研究

3.1 基本原理

扫描电子显微镜是用聚焦电子束在试样表面逐点扫描成像(见图 1)。当电子束打在试样上时, 会产生一系列不同种类的信号, 成像信号可以是二次电子、背散射电子或 X 射线。其中二次电子是最主要的成像信号。由电子枪发射的能量为 5~35 keV 的电子, 以其交叉斑作为电子源, 经二级聚光镜及物镜的缩小形成具有一定能量、一定束流强度和束斑直径的微电子束, 在扫描线圈驱动下, 在试样表面按一定时间、空间顺序作栅网式扫描。聚焦电子束与试样相互作用, 产生二次电子发射, 二次电子发射量随着试样表面形貌而变化。二次电子信号被探测器收集转换成电讯号, 经视频放大后输入到显像管栅极, 调制与入射电子束同步扫描的显像管亮度, 得到反映试样表面形貌的二次电子像。仪器将探头送来的信号加以处理并送至显示屏, 即可显示出样品表面各点图像。

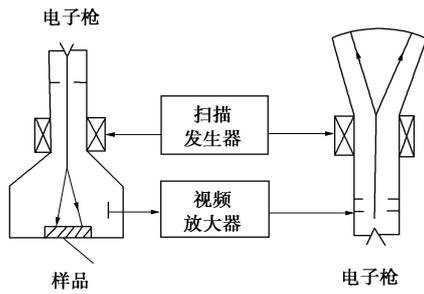
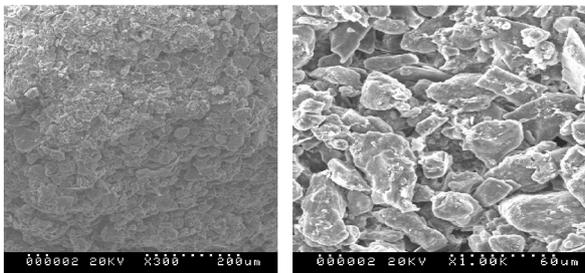


图1 扫描电镜工作原理

Fig. 1 Operation principle of scanning electron microscope

3.2 试验结果分析

观测仪器采用日本日立公司生产的 S570 型扫描电子显微镜, 并采用日立 E1020 型离子溅射仪进行抽真空和喷金处理。为了研究填料 1 和填料 2 在不同压实度下 (90%、93%、96%) 土中土颗粒、粒团及微小孔隙的大小、形状、排列情况及相互关系, 土样用静力压实方法制成试样, 然后将试样风干, 在其中部取长宽约 1 cm 土块, 尽量选择断面较平整的面向上作为观察面, 用导电胶带黏附在扫描电镜观察平台上, 再进行抽真空和喷镀金膜处理, 最后进行扫描电子显微镜观察。放大倍数分别选用 300 倍和 1000 倍。在低倍率 (300 倍) 下观察土样全貌, 在 1000 倍时选择局部区域进行特写 (土粒的联结、形状、排列)。试验结果如图 2~7 所示。



(a) 放大300倍

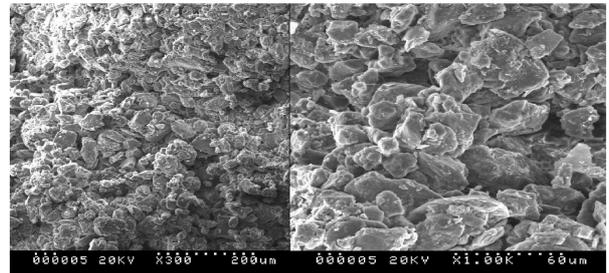
(b) 放大1000倍

图2 压实度为90%粉土填料1微观结构图

Fig. 2 Microcosmic structures of No. 1 silt filling with compaction degree of 90%

由图2可以看出在低倍扫描电镜下, 颗粒多数为片状, 形状不规则, 较为均匀, 黏粒以集体状出现, 排列较疏松, 颗粒间的架空孔隙较多, 单元体间孔隙和单元体内孔隙也较多, 从整体上看呈蜂窝结构。在高倍扫描电镜下, 颗粒呈不规则的六面体或多面体, 大小不一, 但是粒径比较均匀。颗粒间的组合为基本颗粒组合体, 即单个粉粒之间相互作用的简单形式, 局部有颗粒集成体组合, 形成较为明显的“搭积木”式构架。结构联结为分散的片架型, 以面一面接触为主, 联结较为疏松, 颗粒无明显的定向排列特征。黏

土物质分布不均匀, 也不组成连续的基质, 而是局部包裹在粉粒的表面, 结构联结为凝聚型, 以面一面, 面一边接触为主, 联结紧密。



(a) 放大300倍

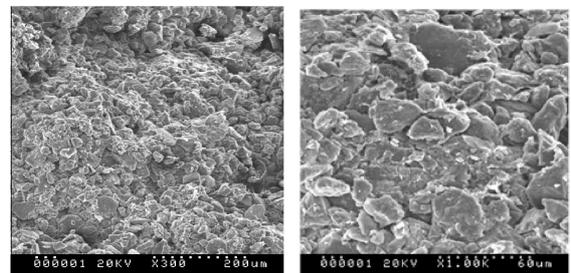
(b) 放大1000倍

图3 压实度为93%粉土填料1微观结构图

Fig. 3 Microcosmic structures of No. 1 silt filling with compaction degree of 93%

从图3可见, 在低倍扫描电镜下, 可见颗粒以团粒结合为主, 排列较紧密, 颗粒间的架空孔隙有所减少, 单元体间孔隙和单元体内孔隙没有明显的减少, 从整体上看呈凝聚结构。在高倍扫描电镜下, 颗粒间以颗粒集成体组合为主, 结构联结为凝聚型, 以面一面接触为主, 联结较为紧密, 颗粒也无明显的定向排列特征。黏土物质在局部分布比较均匀, 不组成连续的基质, 但是部分黏粒已经分布在粉粒间起到一定的联结作用。

从图4可见, 在低倍扫描电镜下, 可见颗粒以整体结合为主, 排列紧密, 颗粒间的架空孔隙很少, 单元体间孔隙和单元体内孔隙有明显的减少, 从整体上看呈紧密的团粒结构。在高倍扫描电镜下, 颗粒间以集体组合为主, 结构联结为集束型, 以面一面, 面一边接触为主, 联结较为紧密, 颗粒具有轻微的定向排列特征。黏土物质分布比较均匀, 组成了连续的基质, 在颗粒表面呈平行密集排列状态。



(a) 放大300倍

(b) 放大1000倍

图4 压实度为96%粉土填料1微观结构图

Fig. 4 Microcosmic structures of No. 1 silt filling with compaction degree of 96%

由图5可以看出在低倍扫描电镜下, 颗粒粒径比较大, 大小比较均匀, 细小颗粒很少, 排列很疏松,

颗粒间的架空孔隙很多, 单元体间孔隙和单元体内孔隙也很多, 从整体上看呈松散的单粒结构。在高倍扫描电镜下, 颗粒呈不规则的块状或椭球状, 粒径很均匀。颗粒间的组合为明显的单粒结构, 即使颗粒间有联结也只是局部很小部分相接触, 形成较为明显的“堆垛”式构架。结构联结以面一面、面一边接触为主, 联结很疏松, 颗粒排列混乱无序。黏土物质很少, 也不组成连续的基质, 只有局部包裹在粉粒的表面, 黏粒的分布很离散, 颗粒间基本上没有联结, 大部分黏粒只是机械的填充在较大的粉粒之间, 没有明显的联结作用。

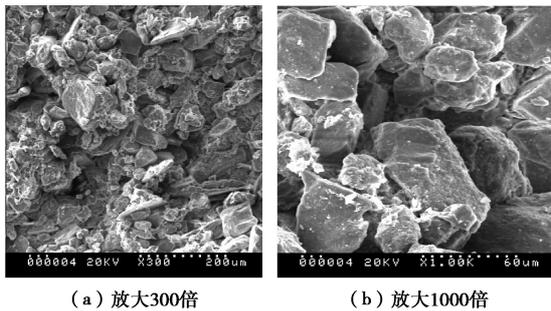


图 5 压实度为 90%粉土填料 2 微观结构图

Fig. 5 Microcosmic structures of No. 2 silt filling with compaction degree of 90%

从图 6 可见, 在低倍扫描电镜下, 可见颗粒以整体结合为主, 排列较紧密, 颗粒间的架空孔隙明显减少, 单元体间孔隙和单元体内孔隙有所减少, 从整体上看呈蜂窝结构。在高倍扫描电镜下, 颗粒间以颗粒集成体组合为主, 结构联结为凝聚型, 以面一面, 面一边接触为主, 联结较为紧密, 颗粒无明显的定向排列特征。黏土物质仍然比较少, 不组成连续的基质, 局部依附在粉粒的表面, 但是部分黏粒已经镶嵌在粉粒间起到一定的联结作用。

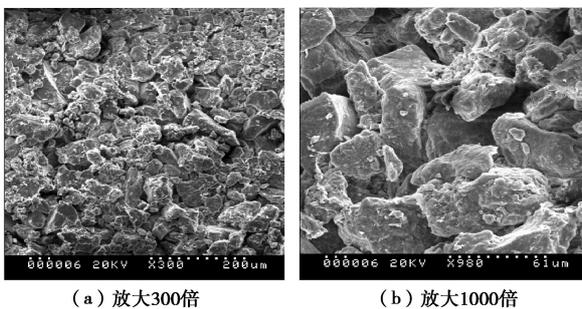


图 6 压实度为 93%粉土填料 2 微观结构图

Fig. 6 Microcosmic structures of No. 2 silt filling with compaction degree of 93%

从图 7 可见, 在低倍扫描电镜下, 可见颗粒极为均匀, 以明显的单粒排列为, 排列紧密, 颗粒间的架空孔隙很少, 单元体间孔隙和单元体内孔隙有所减

少, 但是还是比较多, 从整体上看呈凝聚结构。在高倍扫描电镜下, 颗粒间以集体组合为主, 结构联结为集束型, 以面一面、面一边接触为主, 联结较为紧密, 颗粒具有明显的定向排列特征。细颗粒以集聚体形态出现, 形成微集聚体结构, 在颗粒表面呈平行密集排列状态, 组成了连续的基质, 均匀的包裹在粉粒表面或填充在粉粒之间, 起到明显的联结作用。

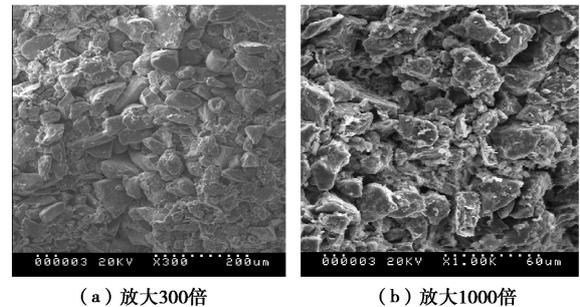


图 7 压实度为 96%粉土填料 2 微观结构图

Fig. 7 Microcosmic structures of No. 2 silt filling with compaction degree of 96%

从上面的分析可得: 粉土在低压实度状态下, 以蜂窝结构或较松散的单粒结构为主, 架空孔隙较大, 单元体间孔隙和单元体内孔隙很多, 颗粒排列混乱没有明显的定向排列特征; 黏粒分布很不均匀, 很难形成明显的联结作用; 而高压实度状态下不同的压实度下, 以紧密的团粒或凝聚结构为主, 架空孔隙明显减小, 单元体间孔隙和单元体内孔隙也有所减少, 但是还是比较多, 颗粒具有轻微的定向排列特征, 黏粒分布趋于均匀, 组成了连续的基质, 比较均匀的包裹在粉粒表面或填充在粉粒之间, 起到明显的联结作用。由此可知, 粉土在不同的压实度状态下呈现不同的结构形式与联结形式, 以及不同的排列状态从而依靠孔隙比由里到外展现出来, 进而影响粉土的工程性质。可以通过提高压实度、改变粉土的联结形式, 改变粉土颗粒的排列顺序来提高粉土的工程特性。

4 结 论

通过 X 衍射试验、扫描电子显微镜试验对低液限粉土的微观结构进行了全面、系统的分析, 得到以下结论:

(1) 低液限粉土的矿物组分由非黏土矿物和黏土矿物组成, 非黏土矿物含量占了绝大部分, 主要以石英、长石、云母等原生矿物为主, 黏土矿物含量较少, 以蒙脱石、伊利石、高岭石等次生矿物为主, 其余矿物成分含量很少。

(2) 低液限粉土在低压实度状态下, 以蜂窝结构或较松散的单粒结构为主, 颗粒排列混乱没有明显的

定向排列特征,黏粒分布不均匀,难以形成明显的联结,结构疏松,孔隙较大;高压实度状态下,以紧密的团粒或凝聚结构为主,颗粒排列具有轻微的定向排列特征,黏粒分布趋于均匀,具有一定的联结作用,结构挤密,孔隙较小。

(3)粉土在不同的压实度状态下呈现不同的结构形式与联结形式,以及不同的排列状态从而依靠孔隙比由里到外展现出来,进而影响粉土的工程性质;同时可以通过提高压实度、改变粉土的联结形式,改变粉土颗粒的排列顺序来提高粉土的工程特性。

参考文献:

- [1] 温淑瑶, 杨德涌, 陈捷. 膨润土及其酸化土、碱处理酸化土的X射线衍射特征及扫描电镜下的表面特征分析[J]. 矿物学报, 2001, **21**(3): 453 - 456. (WEN Shu-yao, YANG De-yong, CHEN Jie. X-ray diffraction characterization of bentonite, acidation bentonite and alkalization bentonite and surface characters under scanning electron microscope[J]. Acta mineralogica sinica, 2001, **21**(3): 453 - 456. (in Chinese))
- [2] 丁佩民, 张其林. 土中矿物的X射线衍射分析及在环境岩土工程中的应用[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2002, **23**(1): 12 - 15. (DING Pei-min, ZHANG Qi-lin. X-ray diffraction analysis of minerals in soil and its applications on geo-environmental engineering[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering, 2002, **23**(1): 12 - 15. (in Chinese))
- [3] 崔德山, 项伟, JOACHIM Rohn. 离子土固化剂加固红黏土的X射线衍射试验[J]. 长江科学院院报, 2009, **26**(9): 39 - 43. (CUI De-shan, XIANG Wei, JOACHIM Rohn. X-ray diffraction analysis of red clay reinforced by ISS[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, **26**(9): 39 - 43. (in Chinese))
- [4] 严春杰, 唐辉明, 孙云志. 利用扫描电镜和X射线衍射仪对滑坡滑带土的研究[J]. 地质科技情报, 2001, **20**(4): 89 - 92. (YAN Chun-jie, TANG Hui-ming, SUN Yun-zhi. Study on the soil of slipping zone in landslides and its significance by scanning electron microscope and X-ray diffractometer[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, **20**(4): 89 - 92. (in Chinese))
- [5] 张小平, 施斌. 石灰膨胀土团聚体微结构的扫描电镜分析[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(5): 654 - 660. (ZHANG Xiao-ping, SHI Bin. SEM analysis of micro-structure of the particle clusters in lime-treated expansive soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(5): 654 - 660. (in Chinese))
- [6] 王宝军, 张明瑞, 施斌. 基于坡度坡向原理的黏性土扫描电镜图像颗粒定向性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊1): 2951 - 2957. (WANG Bao-jun, ZHANG Ming-rui, SHI Bin. Quantitative analysis of orientation distribution of soil grains based on slope-aspect theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 2951 - 2957. (in Chinese))
- [7] 曹卫东, 商庆森, 宋修广. 低液限粉土路基压实机理与性能的研究[J]. 华东公路, 2003, **35**(3): 55 - 57. (CAO Wei-dong, SHANG Qing-sen, SONG Xiu-guang. Compaction mechanism and property research of low liquid limit silt subgrade[J]. East China Highway, 2003, **35**(3): 55 - 57. (in Chinese))
- [8] 唐延钦, 巩喜彪. 低液限粉土压实性状分析[J]. 公路交通科技, 2012, **29**(1): 95 - 99. (TANG Yan-qin, GONG Xi-biao. Compaction property analysis of low liquid limit silt[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, **29**(1): 95 - 99. (in Chinese))

(本文责编 明经平)