

水泥土搅拌法加固冲填土软土地基的微观试验

黄雨^{1,2}, 周子舟¹, 柏炯^{3,4}, 陈企奋³

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063; 4. 中建国际设计顾问有限公司, 上海 200235)

摘要: 针对某工程冲填土软土地基水泥土搅拌法处理过程中的冲填土与自然软土加固效果差异问题, 从化学成分与物理结构等微观角度出发, 分别对冲填土和自然软土的原状样、加固样进行了 X 射线衍射试验和扫描电镜试验两种微结构试验, 对比分析了导致这种加固效果差异的微观机理及其形成原因。研究发现, 物理微结构对冲填土软土地基的水泥土搅拌法加固效果存在重要的影响。虽然水泥土搅拌法加固冲填土与自然软土的化学反应是类似的, 但加固后的土体在物理微结构特征上却差异显著, 并导致加固土体宏观强度表现上的不同。因此, 应采取相应的施工措施, 改良冲填土的微观结构特征, 优化地基加固效果。

关键词: 水泥土; 水化产物; 物理微结构; X 射线衍射试验; 扫描电镜试验

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Micro-experiments in Cement-mixed Soils on a Dredger Fill of Soft Ground

HUANG Yu^{1,2}, ZHOU Zizhou¹, BAI Jiong^{3,4}, CHEN Qifen³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. The Ninth Design & Research Institute of CSSC, Shanghai 200063, China; 4. China Construction Design International, Shanghai 200235, China)

Abstract: To investigate the different effectiveness between dredger fill and natural soft soil in the cement-mixed improvement processes of an engineering case, two kinds of micro-experiments on dredger fill and natural soft soil before and after cement-mixed processes were carried out by using X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM) tests in the view of chemical and physical microstructures. It is found that the physical microstructures have an important effect on the reinforcement performance of cement-mixed soils. Although the chemical reactions of

cement-mixed processes are similar in both dredger fill and nature soft soil, there are significant differences in the microstructures of treated soils, which can affect the macro-scale strength directly. Therefore, in order to optimize the improvement in soft ground engineering, proper construction measures should be taken to improve the microstructures and mechanical properties of the dredger fill.

Key words: cement-soil; hydration products; physical microstructure; X-ray diffraction; scanning electron microscope

冲填土系由水力冲填泥砂形成的填土, 在我国沿海地区常见; 软土一般指主要由细粒土组成的孔隙比大、天然含水量高、压缩性高、强度低和具有灵敏结构性的土层^[1]。土的微观特性主要包括物质成分与结构特征两个方面, 前者是土的物质基础, 后者是土的存在形式, 二者相结合, 便能全面地描述土的特性。一些学者已经从这两个方面出发, 针对许多对象, 包括粘土矿物、长石矿物、水泥等进行了一系列细致的研究工作^[2-4], 重点集中在土体化学成分(矿物)组成的测定及其与宏观力学性质之间的关系上。土的物理微结构研究工作自 20 世纪 80 年代中后期开始进行, 许多学者在这方面进行了卓有成效的尝试与探索^[5-11], 研究方法主要包括 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、微观结构图像处理以及分形理论等。

水泥土搅拌法一般是以水泥作为固化剂, 利用水泥与软土之间发生的一系列物理、物理化学、化学反应, 使软土硬结为具有一定强度和水稳定性的水泥土的方法^[12]。水泥搅拌法加固土(简称加固土)的强度由水泥水硬化的胶结作用、硬凝反应、原状土强度和土的物理改良等部分构成。前两者属化学反应的范畴, 后者则为物理结构的改变。这两个方面的变化, 使得加固土的微观结构与加固前原状土相

比有了本质上的不同,致使加固土的物理力学特性相对原状土有了极大的改变(主要表现在强度的提高和变形模量的增大).因此,从微观角度探究水泥加固土的反应机理及结构特征是解释其宏观强度特性的有效方法和途径.

迄今,国内外学者在加固土的微观结构方面的研究比较有限.Tomac 等^[6]主要运用扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)方法,针对水泥土搅拌法处理的海边自然沉积粘土宏观强度的不同,根据其微观结构上的特征,解释造成这种差异的原因;周积元、胡鸣皋^[13]通过 SEM 分析了粉喷桩加固土物化反应及其反应产物的生成序列,简要研究了加固土结构与原状土结构的关系.然而,这些工作均以原状土与加固土物理微观结构的改变为研究重点,即使分析了土样处理前后化学成分的不同,也局限于对某些元素含量差异的观察.研究对象也较为单一,以粘土及其加固土为主.笔者以广州龙穴地区某水泥土搅拌法冲填土软基处理工程为依托,从土体微观结构的角度入手,结合 XRD 和 SEM 两种分析手段,详细对比了冲填土与自然软土及二者水泥加固土在化学矿物成分及物理微观结构上的区别.以此为依据,研究和评估了冲填土与自然软土处理效果的不同,并对实际工程施工方法提出了优化建议.

1 工程背景

本研究基于广州龙穴地区某软基处理工程,天然地基场地主要为鱼塘,属剥蚀残山、河床、河口三角洲地貌类型.场地平整度不好,处理地基时先以淤泥冲填.冲填后表层土质极软,人员行走困难.所形成的冲填土质以粘土为主,与其下层淤泥质软粘土均呈流塑-软塑状,含水量高、孔隙比大、渗透性差,为高压缩性、低强度土,不易排水固结,在自重作用下尚未固结稳定,承载力极低,且工后沉降较大.

冲填处理后的软基场地表层有平均厚度为 5 m 的冲填土层,其下是平均厚度为 8 m 的自然沉积软土层(淤泥质粘土).综合考虑该大型工程的实际情况,设计单位拟选用水泥土搅拌法作为加固方案,并进行了相应的现场小面积土体加固试验.有关试验结果发现:在相同的水泥土搅拌法施工条件下,地基上部加固冲填土体的强度普遍低于下部加固土体,且加固冲填土较为松散、易破碎,对本地基处理工程的加固效果可能产生不利影响.因此,需要对水泥土搅拌法加固冲填土软土地基的微观机理进行必要研

究,解释其强度差异的形成原因和机理,并据此对后续的大面积全面施工方案进行必要的优化调整.

微观试验的研究对象主要有两个,一是原状冲填土及其处理后所得水泥加固土(下文称加固冲填土),二是原状自然软土及其处理后所得水泥加固土(下文称加固软土).所用水泥加固土土样取自现场试验区的搅拌桩体,水泥掺量(质量分数,后同)为 15%,水灰比为 0.55,未添加外加剂.原状土土样取自临近桩体且深度相近的天然地基.原状冲填土和原状自然软土的基本物理力学性质参见表 1.

表 1 冲填土与原状软土物理力学性质

Tab.1 Physical and mechanical properties of dredger fill and natural soft soil

土名	含水量 $w/\%$	孔隙比 e	粘聚力 c/kPa	摩擦角 $\phi/^\circ$	压缩模量 ¹⁾ E/MPa
原状冲填土	63.9	1.73	5.7	4.7	1.69
原状自然软土	50.3	1.43	10.6	9.9	2.20

注:1)此系 0.1~0.2 MPa 压力作用时的压缩模量.

为对比研究两种土样加固前后在化学成分和物理结构两方面微观结构的差异,共进行了两类微观试验:XRD 和 SEM. XRD 是指通过对材料进行 X 射线衍射,分析其衍射图谱,获得材料的成分、材料内部原子或分子的结构或形态等信息的研究手段,目前已在许多领域得到广泛的应用. SEM 是现代科学领域研究表面微观世界的一种全能电子光学试验方法,是目前研究土体微结构形态最主要的手段. XRD 仪器为 Dmax-MSAL-12 kW 高功率粉末衍射仪, SEM 仪器为 XL-30 ESEM 环境扫描电子显微镜,配备 EDAX 公司的 phoenix 系列能谱仪.

2 XRD 试验及结果分析

对冲填土及自然软土的原状和加固土土样进行了 XRD 全矿物定量分析,分析结果见表 2. 下面从水泥的水解和水化反应、粘土颗粒与水泥水化物的作用(包括离子交换和团粒化作用、凝硬反应)和碳酸化作用几个方面,对试验结果进行解读.

2.1 水泥的水解和水化反应

加固土中生成了原状粘土中没有的氢氧化钙石($\text{Ca}(\text{OH})_2$). 氢氧化钙石不仅是水泥水化产物,还会作为反应物与加固土中其他化合物发生反应. 它的出现,表明加固土中已发生水泥的水解和水化反应^[13]. 另外可以观察到,加固土中水铝矿($\text{Al}(\text{OH})_3$)、高岭石等偏软的矿物含量较原状土大为降低,而较硬的石英

(SiO_2)含量升高.这是因为原状粘土中的水铝矿、高岭石($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)等在水泥水化反应中,分解生成了水化产物中的 Al_2O_3 和 SiO_2 等化合物.

表2 XRD全矿物分析结果

Tab.2 Results of XRD quantitative phase analysis

土名	各矿物的质量分数											
	石英	钠长石	钾长石	伊利石	高岭石	蒙脱石	绿泥石	方解石	白云石	角闪石	氢氧化钙	水铝矿
原状冲填土	36	4	12	21	20	7	—	1	—	—	—	—
加固冲填土	63	1	5	5	2	<1	—	14	2	3	4	—
原状自然软土	45	6	11	19	12	—	3	1	—	—	—	3
加固软土	61	1	5	3	—	<1	—	20	<1	2	7	—

2.2 离子交换和团粒化作用

加固土中钠长石、伊利石等矿物的含量较原状土明显降低.土中含量最多的 SiO_2 遇水后,形成硅酸胶体微粒,其表面带有钠离子 Na^+ 或钾离子 K^+ ,它们能和水泥水化生成的氢氧化钙中的钙离子 Ca^{2+} 进行当量吸附交换,使较小的土颗粒形成较大的土团粒,从而使土体强度提高.由此可知,加固土中的钠长石、伊利石等矿物含量较原状土降低,是因为其中所含有的 Na^+ 、 K^+ 等通过离子交换作用,与水泥水化后所生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 中的 Ca^{2+} 发生了等当量交换,从而形成水泥蜂窝状的团粒结构,使土体单元之间坚固紧密地联结在一起.

2.3 碳酸化作用

表2显示,两种加固土中都出现了大量原状土中含量极少的方解石(CaCO_3).这是因为水泥水化物中游离的氢氧化钙吸收水中和空气中的二氧化碳,发生碳酸化反应,生成了不溶于水的碳酸钙,即所谓的碳酸化作用^[13-14].方解石坚硬且不溶于水,可使软土固化,从而进一步提高了加固土的强度.

2.4 加固后冲填土与自然软土成分对比

无论是冲填土还是软土,加固后都生成了氢氧化钙和方解石,钠长石、高岭石等矿物含量都减少了.这说明加固过程中所发生化学反应的类型是一致的.而加固软土中氢氧化钙和方解石的含量要高一些,说明加固软土中的水泥水解和水化反应更充

分.但由于这种差异不明显,不能据此就轻易推断加固软土强度一定优于加固冲填土.

从化学矿物成分方面看,并未观察到加固冲填土和加固软土存在明显不同.因此,要确定造成二者强度特征差异的机理,还需要依靠 SEM 试验研究其物理微结构特性.

3 SEM 试验及结果分析

土体微结构是土体物理力学性质的微观基础,是沉积环境、土颗粒性质、表面力,以及沉积后各种外力等多种因素综合作用的最终产物.土的强度及变形在很大程度上取决于其结构.故对原状冲填土和自然软土及其加固土进行 SEM 试验,以研究其物理微结构特性,从而解释其宏观强度差异的机理.

3.1 自然软土加固效果分析

首先分别观察原状土与加固土微结构中基本单元体的接触状态.图1a,b分别给出了粘土单元在水平和垂直两个方向上的分布情况,即结构形式.通过对比,可以发现这两种结构形式的特点.而图2中的加固土单元接触情况在这两个方向上并无太大差异,具有较为一致的分布特性.

从图1a可以看出,原状自然软土由叠聚体、粘土颗粒和粘土絮凝体等组成,大量的片状体排列成基质结构,少量粒状体相对独立,且互相接触并不紧

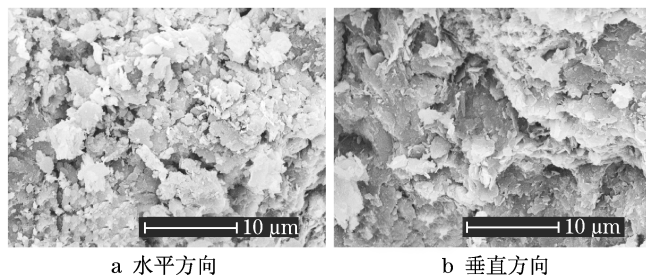


图1 放大8 000倍的原状自然软土微结构图像

Fig.1 Scanning electron micrograph of natural soft soil(8 000 times)

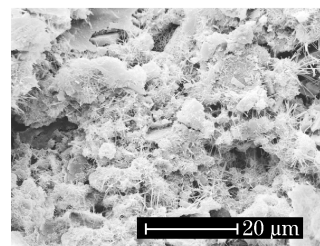


图2 放大4 000倍的加固软土微结构图像

Fig.2 Scanning electron micrograph of cement-mixed soft soil(4 000 times)

密,悬浮在土样横截面上.这种结构体系的性质取决于片状基质的性质.大量的低强度叠聚体相对松散地排列在一起,颗粒彼此之间呈堆积接触状态,接触面微小,在外力的作用下容易变形与错动.从图 1b 可以看出,软土微结构垂直方向上的片状体成面一面接触,相互之间没有胶结物使其联结,同样容易沿接触面发生相对错动.而图 2 所示的加固土中,颗粒表面及粒间普遍存在着不同程度的浅色硅酸盐水化物,原本较为独立和微小的粘土颗粒、叠聚体及絮凝体在这些纤维状或针状凝胶水泥水化物的包裹下,组成了大体积的团状凝聚体及网状联结.这些由附着在颗粒表面的纤维状凝胶物质,就是化学分析中描述的水化硅酸钙、水化硫铝酸钙等.它们附着在粘土颗粒周围,牢牢地把颗粒连结成为整体,形成极强的联结结构.这种结构具有很好的强度和很高的承载力,正如加固土的宏观强度所展现的一样.

再观察原状自然软土和加固软土微结构中基本单元和孔隙的形状和大小.图 3a, b 显示,原状软土颗粒单元多呈片状,而加固土颗粒单元多为块状且远大于原状粘土颗粒单元.这是因为加固土颗粒由许多粘土颗粒胶结而成.原状粘土颗粒之间孔隙仅有极少量胶结物填充,故而比较松散;而在加固土中,水泥水化后形成的硅酸盐水化物填充了其包裹的粘土颗粒团间孔隙,从而使加固土变得密实.随着时间的推移,水泥水化愈加充分,水化物凝胶物质还会逐渐不断生成,进一步增加加固土的密实度.

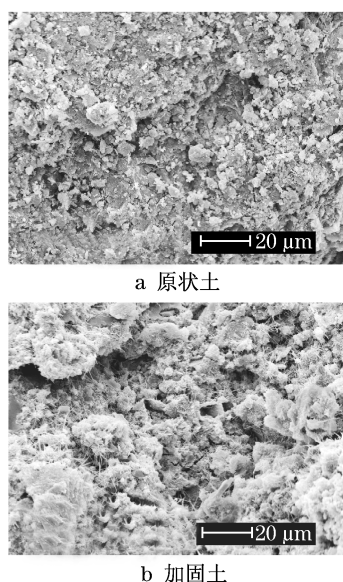


图 3 放大 2 000 倍的软土微结构图像
Fig.3 Scanning electron micrograph of soft soil(2 000 times)

3.2 冲填土加固效果分析

从 XRD 试验结果来看,原状冲填土及其加固土

在化学物质组成及含量比例上与下层原状软土及其加固土较为类似.但根据 SEM 试验结果,很容易发现加固冲填土在物理微观结构方面的特殊性.

图 4a, b 是原状冲填土微结构照片.同原状自然软土相比,原状冲填土的单元接触状态和联结形式更松散,片状大体积单元颗粒较多,单元之间孔隙较大.此外无明显差异.但是,加固冲填土微结构特征与加固软土明显不同.图 5a, b 是加固冲填土微结构照片.同加固自然软土相比,加固冲填土中水泥水化形成的纤维状或针状凝胶物质发育相对不完全.这主要表现在纤维或针状结晶很细,呈离散状态,分布较为稀少,裸露的冲填土单元零散地镶嵌在稀疏难辨的纤维状或针状结晶中,彼此之间形成的有力联结组织较少.由于水泥水化物未能够大面积地将冲填土颗粒包裹成团,在其微结构照片中仍然可以发现部分独立的原状冲填土单元颗粒.这种形式的物理微结构造成加固冲填土的宏观强度较加固软土差. XRD 试验结果显示,加固冲填土中氢氧化钙和碳酸钙的含量较低,也说明其水泥水解水化反应不如加固软土彻底.因此,施工打设水泥土搅拌桩时,应针对此情况采取一些措施,以求促进冲填土层中水泥的水解水化反应,达到改善其微观结构、增加强度的目的.采用在地基表面冲填土层增加搅拌次数、增加输浆次数的方式,能使冲填土层水泥水化反应更加充分;在加固冲填土层时,针对冲填土特性加入适当的外掺剂,亦能够增强冲填土加固土的强度.事实上,笔者也研究了水泥土搅拌桩添加石膏(质量比为 1%)的情况,发现加入适量的外加剂后,水泥加固土的微观结构得到改善,含

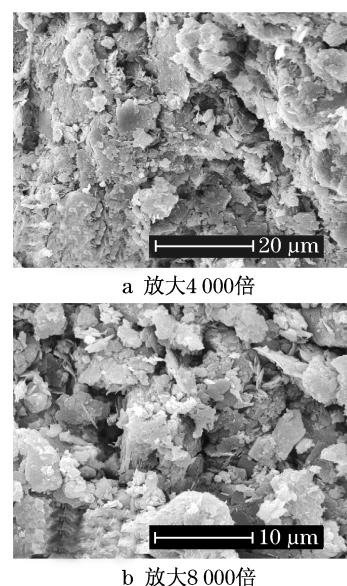


图 4 原状冲填土微结构放大图像
Fig.4 Scanning electron micrograph of dredger fill

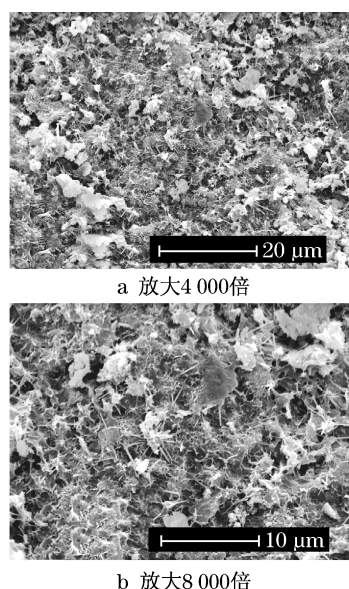


图5 加固冲填土微结构放大图像

Fig.5 Scanning electron micrograph of cement-mixed dredger fill

石膏添加剂的水泥土搅拌桩强度较高.有关详情可参见文献[15].

4 结论

(1) XRD 试验结果显示,原状冲填土和原状自然软土在水泥土搅拌法加固过程中的化学反应类型和程度大致相似.从二者所得加固土中氢氧钙石和碳酸钙的含量上判断,软土比冲填土反应更完全.

(2) SEM 试验结果显示,同加固自然软土相比,加固冲填土的水泥水解水化反应不彻底,形成的纤维状和针状凝胶物质发育相对不完全,因而形成的物理微结构远不如加固自然软土密实.

(3) 原状冲填土和原状自然软土在化学反应方面不存在明显区别,但二者加固土的物理微结构存在明显不同,直接导致其在宏观强度上的明显差异.这说明,物理微结构特性对水泥加固土的强度存在重要影响.在施工过程中,应该采取一些措施以求促进冲填土层中水泥的水解水化反应,达到改善其微观结构、提高强度的目的.

参考文献:

- [1] 岩土工程手册编委会.岩土工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1994.
Geotechnical Engineering Handbook Committee. Geotechnical engineering handbook [M]. Beijing: China Architecture and Building Press,1988.
- [2] Gi Y J, Ho I Y, Seung Y L. Chemistry and microstructures of clay particles in smectite-rich shelf sediments, South Shetland

- Islands, Antarctica[J]. Marine Geology, 2004(209):19.
- [3] Lee M R, Hodson M E, Parsons I. The role of intragranular microtextures and microstructures in chemical and mechanical weathering, direct comparisons of experimentally and naturally weathered alkali feldspars [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, 62(16):2771.
- [4] Taher M A. Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 52:28.
- [5] Phenrat T, Marhaba T F, Rachakornkij M. A SEM and X-ray study for investigation of solidified/stabilized arsenic-iron hydroxide sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005 (118):185.
- [6] Tomac I, Van Impe W F, Flores R D V, et al. Binder-soil interaction in cement deep mixing through SEM analysis[C]// Proceedings of the 16th International Conference on Soil mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam: Millpress Science Publishers, 2005:1265-1268.
- [7] 吴义祥.工程粘性土微观结构的定量评价[J].中国地质科学院院报, 1991(2):143.
WU Yixiang. Quantitative approach on micro-structure of engineering clay [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1991(2):143.
- [8] Tovey N K, Kinsley D H. Mapping of the orientation of fine-grained minerals in soils and sediments [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1992, 46(10):93.
- [9] Tovey N K. A digital computer technique for orientation analysis of micrographs soil fabric[J]. Journal of Microscopy, 1990, 120(12):303.
- [10] Shi B, Li S L. Quantitative approach on SEM images of microstructure of clay soils [J]. Science in China: Series B, 1995, 38(6):741.
- [11] 胡瑞林, 官国琳, 李向全, 等.粘性土微结构定量模型及其工程地质特征研究[M].北京:地质出版社, 1995.
HU Ruilin, GUAN Guolin, LI Xiangquan, et al. Microstructure quantitative models for cohesive soil and study of their engineering geology characteristics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1988.
- [12] 施斌.粘性土微观结构简易定量分析法[J].水文地质工程地质, 1997, 24(1):7.
SHI Bin. A simple quantitative analysis method for microstructure of clayey soil [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(1):7.
- [13] 周积元, 胡鸣皋.水泥土的微观结构及其水化产物[J].同济大学学报:自然科学版, 1998, 26(增刊):6.
ZHOU Jiyuan, HU Minghao. Microstructure and its hydrate of cement-soil [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(S1):6.
- [14] 地基处理手册编委会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社, 1988.
Manual of Ground Treatment Committee. Manual of ground treatment [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1988.
- [15] 周子舟.大面积吹填场地浅层及深层地基处理的试验及数值模拟[D].上海:同济大学土木工程学院, 2009.
ZHOU Zizhou. Experimental and numerical study on shallow and deep improvements of a large dredger fill soft ground [D]. Shanghai: Tongji University. School of Civil Engineering, 2009.