

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.01.007

外掺剂影响水泥加固有机质软土效果研究

李杨, 王坛华

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 以福州地区软土作为研究对象,在测试与分析土样的基本物理性质、易溶盐含量、阳离子交换容量和有机质含量等基本参数的基础上,通过对4种外掺剂方案加固后土样无侧限抗压强度值进行测试,研究了不同外掺剂方案下水泥加固软土的效果。研究表明:福州地区有机质土样的有机质含量较高。成分以富里酸为主,胡敏酸次之;为了达到更好的加固效果,应选取对富里酸和胡敏酸都有抑制作用的外掺剂,本次试验中选取的硫酸钙效果最好;对福州及沿海地区的高黏性、高有机质含量的软土,在采用水泥作为固化剂时,应结合其粒度成分、易溶盐、有机质总量和分量综合考虑,选择合适的外掺剂。

关键词: 外掺剂; 有机质; 软土

中图分类号: TU752; TU411.92 **文献标志码:** A

文章编号: 1672-4348(2020)01-0035-05

Study on the effects of additives on cement-reinforced organic soft soil

LI Yang, WANG Tanhua

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350018, China)

Abstract: The effects of additives on cement-reinforced organic soft soil was studied with soft soil in Fuzhou area selected as the research object. Basic parameters such as basic physical properties, soluble salt content, cation exchange capacity, and organic matter content of the soil samples were tested and analyzed. The effects of cement reinforced soft soil under different admixture schemes were studied by testing the unconfined compressive strength values of soil samples after adding four types of additives. Results show that the content of organic matter in the organic soft soil in Fuzhou area is relatively high, with fulvic acid as the major ingredient, which is followed by humic acid. Therefore, in order to achieve a better reinforcement effect, an additive that inhibits both fulvic acid and humic acid should be selected and the calcium sulfate selected in this experiment works the best. For the high-viscosity, high-organic-content soft soils in Fuzhou and even the coastal areas, suitable additives should be selected according to their particle size composition, soluble salts, the total amount and weight of organic matter, when using cement as a curing agent.

Keywords: additives; organic matter; soft soil

福建省广泛分布软土地层,其总面积可达2 500 km²。随着对软土开发和利用的不断增加,以及软土的特殊性,在许多工程中会遇到软土工程问题。

软土工程地基处理技术多种多样。其中,深层搅拌与旋喷是一种得到广泛应用的软土地基加

固方法,且已取得了一定的成果。但在应用中发现某些工程加固效果不理想,甚至出现加固失败的问题^[1]。之所以出现这样的问题,是因为此类软土中含有一定数量的有机质,这些有机质影响了水泥的水化反应,阻碍了水泥土强度的形成。因此,水泥加固有机质软土时掺入一定的外掺剂

收稿日期: 2019-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672278)

第一作者简介: 李杨(1981-),女,黑龙江五大连池人,讲师,博士,研究方向:工程地质、土体。

以改良加固效果成为一种选择。

国内外许多学者对外掺挤改良水泥加固有机质软土过程的影响已经进行了大量研究。荀勇^[2]研究了粉煤灰和磷石膏组合加固一般性质软土的加固效果,发现可以得到较好的加固作用。潘林有^[3]考虑有机质主要成分之一富里酸的影响,选用以早强型为主的外掺挤,以抵抗富里酸的侵蚀并可以调节水泥水硬化速度。刘毅等^[4]利用磷石膏与水泥配合加固软土地基,发现不同的土质加固效果差异很大,因此需采用合适的固化剂配合比及施工工艺来加固软土地基。李琦等^[5]研究了深圳地区的软土特征,对加固软土地基时采用不同的添加剂、添加量进行了加固土、无侧限抗压强度的对比研究。陈慧娥^[6]选用不同的外掺剂加固高有机质含量的软土,并对加固效果的差异进行了分析。李雪刚等^[7]选取了 6 种外掺剂对比其对水泥加固软土效果的影响。刘子铭^[8]认为富里酸严重阻碍水泥的水化反应,研究了基于钙矾石填充固化有机质土的可行性,并对固化剂配比进行了研究,得到了优化配比。在实际工程中,加固高有机质含量的软土时,通常各地区只根据经验来选择外掺剂的种类和掺入量,导致浪费并且土强度的加固不是很明显。

基于以上原因,本研究选取福州地区有机质软土作为研究对象,研究不同外掺挤对水泥加固有机质软土的改良效果。通过室内试验,以物理化学的观点为指导,选取几种典型的外掺挤,测试不同外掺挤下水泥加固的有机质软土力学性质,从而根据研究成果建立一套针对福州地区高有机质含量软土特征的水泥加固效果改良方案体系,以减少工程中的盲目性和随机性,为工程建设提供理论依据。

1 原样基本性质

1.1 粒度成分

选取福州地区两个土样,分别编号为福州 1、福州 2。

采用筛分法及沉降分析法对福州地区两个土样进行筛分试验,得到各土样的粒度成分见表 1 及图 1。由表 1 和图 1 可看出,福州 1 和福州 2 在未加分散剂时都是以粉粒为主,黏粒次之,二者的总量占总质量的 95%以上。而加入分散剂之后,由于原来的部分粉粒团被打散,故两个土样粉粒

含量均有所减少,黏粒含量有所增加。但仍然是以粉粒为主,黏粒次之。

表 1 原样粒度成分统计表

Tab.1 Granularity statistics of original sample

粒径/mm	福州 1		福州 2	
	$w_{不加分散剂} / \%$	$w_{加分散剂} / \%$	$w_{不加分散剂} / \%$	$w_{加分散剂} / \%$
<0.005	30.4	43.1	28.6	41.2
0.005~0.075	66.4	53.7	68.5	55.9
0.075~0.10	1.9	1.9	1.7	1.7
0.10~0.25	0.6	0.6	0.6	0.6
0.25~0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
0.5~2	0.2	0.2	0.2	0.2
>2	0	0	0	0

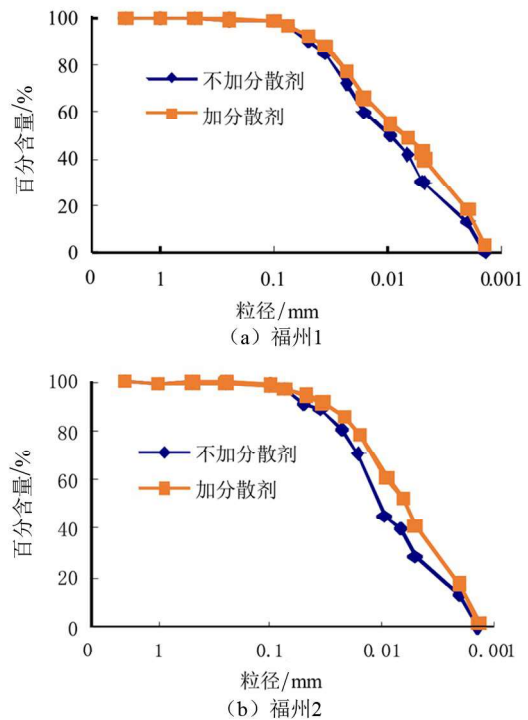


图 1 原样颗粒分析累积曲线
Fig.1 Cumulative curve of particle analysis of the original sample

1.2 塑性

采用液塑限联合测定仪测定土样的塑性。得到数值见表 2。

从表 2 可看出,两个土样 I_p 都大于 17,属于黏土。进一步说明了土样的结合水含量较大,含有一定的黏土矿物,且反离子层中低价的阳离

子含量较高。

表 2 原样塑性表

Tab.2 Plasticity of the original sample

土样	液限 ω_L	塑限 ω_p	塑性指数 I_p 指标
福州 1	42.7	23.9	18.8
福州 2	40.3	21.8	18.5

1.3 易溶盐

土粒表面常带负电荷,可以吸附阳离子,这些阳离子与易溶盐溶解于孔隙溶液中的阳离子相互置换,并处于动平衡状态。因此,土粒表面扩散双电层的性状和结构连结的特性受易溶盐的含量、成分及其变化影响较大,从而土的物理力学性质也会发生相应的变化。当土中易溶盐含量较高且孔隙溶液的电解质浓度较大时,土粒表面的双电层厚度可受其影响,使土粒间斥力减弱,引力增大,土粒相互凝聚并使结构连结加强,因此土具有较高的力学强度。反之,则斥力增加,结构连结减弱,并趋于分散,则会导致土的力学强度降低。

对各土样中的易溶盐含量进行测试,结果见表 3。从表 3 可看出,两个土样的易溶盐阴离子均为 Cl^- 含量最高, SO_4^{2-} 离子次之,而阳离子中 Na^+ 含量较多, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 也均有一定含量。

表 3 原样易溶盐含量测试成果

Tab.3 Soluble salt content of the original sample

土样	$w_{易溶盐}$						
	Cl^-	HCO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	K^+	Na^+
福州 1	0.699	0.009	0.033	0.056	0.332	0.002	0.057
福州 2	0.684	0.016	0.011	0.027	0.247	0.003	0.038

1.4 阳离子交换容量及 pH 值

采用醋酸铵淋滤法^[9]对试样的阳离子交换容量进行测定,结果见表 4。从表 4 可以看出,福州 1 比福州 2 阳离子交换容量略大,但总量差别不大。因为,一定量土中黏粒含量与交换容量呈正比关系,从颗粒分析数据也可以看出,福州 1 比福州 2 黏粒含量略高。根据实验结果,阳离子交换能力的大小为 $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$,所以从易溶盐结果也可以看出,虽然福州 1 K^+ 含量要小于福州 2,但是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 含量都高于福州

2,所以福州 1 的阳离子交换容量要大于福州 2。

从表 4 中也可以得知,福州地区两个土样溶液 pH 均呈弱碱性;土样黏粒的矿物成分基本是伊利石、蒙脱石以及可溶盐类,特别是易溶盐,溶液的 pH 与这些矿物的等电 pH 值相差较大,所以有较厚的扩散层,同时易溶盐中 Na^+ 的存在也使扩散层增厚,这使得土的工程地质性质变差。

表 4 原样阳离子交换容量及 pH 值测试结果

Tab.4 Cation exchange capacity and pH of the original sample

土样	阳离子交换量/($mmol \cdot 100g^{-1}$)	pH 值
福州 1	12.18	7.15
福州 2	11.39	7.13

1.5 有机质

土体有机质是土体固相的一个重要组成部分,它是土层中的动植物残骸在微生物的作用下分解而形成的。一种是分解不完全的植物残骸,形成疏松多孔的泥炭;另一种则是完全分解的腐殖质。有机质因为其特殊的结构,因此具有很强的亲水性,故对土体性质影响很大。

土体有机质的主体是腐殖质,它是土壤中的有机质在水分、空气、动物、微生物等的作用下,经过腐殖化作用,即微生物的深刻改造后生成的一类特殊的高分子含氮有机质。腐殖质大多与土中无机成分相结合,以复合体的形式存在于土体中。按其溶解程度及溶剂不同可以 3 种状态存在,即松结态腐殖质、稳结态腐殖质和紧结态腐殖质,其活动强度由强到弱^[10]。

土体有机质由多种成分组成,胡敏酸、富里酸和胡敏素是最具有代表性的 3 种。其中胡敏素为紧结腐殖质的物质组成,而胡敏酸与富里酸则存在于松结态与稳结态腐殖质中。

采用《土壤农业化学分析方法》中的试验方法对试样中的有机质含量进行测试,结果见表 5。

由表 5 可看出,福州 1 的有机质总量要大于福州 2 的有机质总量,两个土样有机质的主要成分都是富里酸,胡敏酸其次,胡敏素最少。因为有机质中胡敏酸和富里酸对水泥加固软土效果的影响较大,所以可以忽略胡敏素的影响。对土矿物质破坏更强的富里酸中,松结态占大多数,故对土

的影响更大。

表 5 原样有机质含量

Tab.5 Organic matter content of the original sample

土样	$w_{\text{富里酸}}$			$w_{\text{胡敏酸}}$			$w_{\text{胡敏素}}$	有机质总量
	稳结态	松结态	总和	稳结态	松结态	总和		
福州 1	2.52	4.86	7.38	1.49	1.28	2.77	1.30	12.16
福州 2	2.51	3.43	5.94	1.67	1.67	3.34	1.76	11.59

富里酸可以与铝生成络合物,而这些络合物被接触矿物吸收会形成一层吸附膜层,阻碍水泥的水化。而且富里酸对铝铁硅酸盐矿物具有分解能力,可以分解水泥水化过程中已生成的水化铝酸钙、水化硫铝酸钙及水化铁铝酸钙晶体,破坏水泥土结构的形成^[13]。胡敏酸会与水泥水化中产生的大量钙离子相作用,生成不溶物质,从而阻碍结晶物质的形成,影响水泥土的强度。

2 加固后土样力学性质

2.1 外掺剂选取

水泥加固软土地基时,水泥的水化、硬化过程是一系列的物理、化学反应,可以使软土地基强度增长。当土中含有一定数量的有机质时,其就会与水泥水化产物产生相互作用。而有机质的特殊结构决定了它必然会阻碍和延缓水泥水化产物的形成,同时也会影响水泥水化产物与黏土颗粒间的作用,最终导致软土地基加固效果不理想。当有机质含量过高时,水泥加固甚至会失去作用。

因此,进行软土地基加固时,如果软土中含有一定数量的有机质,就必须加入一业的外掺剂来抵消有机质的消极影响。现有的水泥外掺剂种类繁多,常用的有早强剂、减水剂、缓凝剂、引气剂等。

本实验选用硫酸钠及兼有缓凝和早强作用的硫酸钙。由于富里酸容易与含铝多的矿物质颗粒结合,形成吸附层可以延缓水泥水化的进程。而且,富里酸的分解作用使水化产物解体,从而破坏水泥土结构的形成^[14]。故为了减少这种影响,再选用硫酸铝。3种早强剂的掺入比皆为1%。由于过多地加入氯盐,会对建筑物产生一定的腐蚀,影响加固效果,所以没有选取氯化物。减水剂则选取了工程中常用的 UNF 减水剂,其主要成分为 β -萘磺酸盐,掺入比为0.8%。

2.2 试样制备

试验所用土样来自福州地区,均属于滨海沉积相软土。将土风干后粉碎,过 2 mm 筛。参考福州地区软土和淤泥类土的情况,按 60 % 的含水率将水分别加到各土样中,浸泡 24 h 后,按 15 % 的掺入比加入水泥,然后加入不同的外掺剂,在控制容重大致相同的情况下(测得密度为 1.66 g/cm³),采用机械搅拌、人工振捣,制作成边长为 7.07 cm 的标准立方试件,成型 24 h 后放入标准养护室中养护,标准养护室的温度为 (20±3)℃,相对湿度 100 %。试样养护到 28 d 龄期后进行无侧限抗压强度试验,取 3 个平行试样测试结果的平均值作为该组试样的无侧限抗压强度值。

2.3 加固后力学性质

对福州 1 及福州 2 不同外掺剂加固后强度测试结果见表 6。

表 6 加固后试样强度测试结果

Tab.6 Test results for sample strength after reinforcement

土样	无侧限抗压强度/kPa				
	水泥	水泥+ UNF-5	水泥+ UNF-5+ 硫酸钙	水泥+ UNF-5+ 硫酸铝	水泥+ UNF-5+ 硫酸钠
福州 1	875	900	925	910	907
福州 2	935	955	1010	991	980

从表 6 可以看出,福州 1 和福州 2 在不同外掺剂下加固后的强度呈现相似的规律。即当仅用水泥进行加固时,强度相对较低。而添加一定外掺剂后,强度有所提高。但是不同的外掺剂下,强度提高的程度不一样。首先,同时添加早强剂与减水剂的试样无侧限抗压强度要高于只添加减水剂的。其次,对于同时添加早强剂与减水剂的试样,早强剂种类不同,强度提高的程度也不相同。就本次实验来看,添加硫酸钙的试样,强度提高最

大,硫酸铝次之。

出现这样结果的原因分析如下:

根据实验结果,福州 1 福州 2 都含有一定量的有机质和易溶盐,其对水泥加固土样的效果产生了很大的影响。有机质中主要的成分为富里酸和胡敏酸,会与水泥水化产物形成络合物,阻碍水泥水化。而当以硫酸铝与硫酸钙作为早强剂时,不仅可以促进早期强度,还可以补充一定量的铝离子与钙离子,以弥补富里酸、胡敏酸对钙离子与铝离子的消耗,从而水泥水化及硬化等反应可以正常进行,进而提高水泥加固土强度。

从表 6 还可以发现,对于硫酸钙和硫酸铝两种早强剂,硫酸钙加固的土样无侧限抗压强度要高于硫酸铝加固的。比较富里酸和胡敏酸,两种物质都对水泥水化有很大的影响,但是与富里酸不同的是,胡敏酸仅对钙离子有很强的化学亲合势,因此选取硫酸铝作为早强剂时,对胡敏酸的影响较少,因此水泥加固土的强度相对硫酸钙的较低。而加入硫酸钙时,为水土体系补充了钙离子,这样不仅减弱了富里酸的影响,也减弱了胡敏酸的影响,因此水泥土加固土强度更高。

对比福州 1、福州 2 相同外掺剂方案的试验结果,福州 2 的单轴抗压强度稍高。综合分析,首先福州 2 的黏粒含量、易溶盐含量及阳离子交换量都略低于福州 1,原样性质相对较好。其次,福州 2 有机质含量总量略少,尤其是起重要破坏作

用的富里酸含量相对比较少,因此对水泥水化的进程延缓程度低,对水泥土结构和强度的形成破坏小。因此,强度会稍高。

3 结论

1) 福州地区软土属于黏土,粉粒为主,黏粒含量较高;土中含有一定量的易溶盐;具有一定的阳离子交换能力。

2) 福州地区软土有机质含量较高。有机质成分以富里酸为主,胡敏酸次之,还有少量的胡敏素。其中富里酸又以松结态为主,而胡敏酸松结态和稳结态相差不多。

3) 对于福州地区土样,当采用减水剂和不同的早强剂作为外掺剂时,单轴抗压强度相对于仅用水泥加固的都有所提高,其中以硫酸钙作为早强剂的试样强度提高最多,硫酸铝次之,硫酸钠提高的最少;这就说明对于有机质土,其中含有的大量富里酸和胡敏酸影响了土的加固效果,应选取对富里酸和胡敏酸同样都有抑制作用的外掺剂。

4) 黏粒含量越多,易溶盐含量越大,土的程度越低。说明影响水泥加固效果的因素很多,除有机质的含量外,还包括土样的粒度成分、易溶盐、阳离子交换容量等等。因此,对于福州及沿海地区的高黏性、高有机质含量的软土,在采用水泥作为固化剂时,应结合其粒度成分、易溶盐、有机质总量和分量综合考虑,选择合适的外掺剂。

参考文献:

- [1] 徐醒华, 杨涛. 土壤有机质含量对深层搅拌桩成桩质量的影响[J]. 广东土木与建筑, 2004(10): 41-42.
- [2] 苟勇, 李玉寿. 水泥粉煤灰磷石膏加固土室内试验研究[J]. 吉林化工学院学报, 1999, 16(4): 29-33.
- [3] 潘林有. 特殊区域淤泥质软土水泥搅拌桩加固探索[J]. 四川建筑科学研究, 2001, 27(4): 58-59.
- [4] 刘毅, 黄新. 利用磷石膏加固软土地基的工程实例[J]. 建筑技术, 2002, 33(3): 171-173.
- [5] 李琦. 深圳地区海相淤泥质软土强度特性的研究[D]. 北京: 铁道科学研究院, 2005.
- [6] 陈慧娥. 有机质影响水泥加固软土效果的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [7] 李雪刚, 徐日庆, 畅帅, 等. 响应面法优化有机质软土复合固化剂配方[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(5): 843-849.
- [8] 刘子铭. 基于钙矾石填充的有机质土加固试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [9] 中华人民共和国水利部电力工业部. 土工试验规程 SDS01-97(第二分册)[M]. 北京: 水利出版社, 1981.
- [10] 代静玉. 酸性二甲基亚砷和碱液混液提取土壤胡敏酸效率及其特性的研究[J]. 土壤学报, 2004, 26(3): 310-313
- [11] B.B. 波诺马廖娃, T.A. 帕洛特尼柯娃. 腐殖质和土壤形成[M]. 魏开泽, 译. 北京: 农业出版社, 1987.
- [12] B.A. 柯达夫. 土壤学原理: 上册[M]. 陆宝树, 周礼恺, 吴珊眉, 等. 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [13] 李建, 张松洪, 刘宝举. 水泥土力学性能试验研究[J]. 铁道建筑, 2001(8): 31-33.
- [14] 熊田恭一. 土壤有机化学[M]. 李庆荣, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 80-95.

(责任编辑: 陈 雯)