

石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究*

杨爱武^{①②} 王 韬^① 许再良^③

(^①天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300384)

(^②中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

(^③铁道第三勘察设计院集团有限公司 天津 300142)

摘 要 天津滨海软土力学性质较差,不能直接满足工程需要,在软土中加入固化剂能有效提高软土的工程力学性能,但在固化剂中再添加适量外加剂,又能再次提高固化土的强度。本文以石灰作为主剂,水泥、石膏作为辅剂改良天津滨海软土,以无侧限抗压强度作为固化效果判断标准,同时进行相应的微观结构测试,并对破坏后的试样进行抗压试验。试验结果表明:水泥的最佳掺量仅随石灰掺量不同而变化,如12%的石灰固化土中,水泥掺量不超过3%可以最好地提高石灰固化土强度;石膏则不能改善土体强度,并且会使土体水稳定性差,遇水开裂。纯石灰固化土及掺外加剂的石灰固化土都是低压缩性土,各种力学性质都得到明显提高,其破坏形式为脆性破坏,破坏后强度很低且不能恢复,在实践中值得重视。微观结构分析表明:固化土中有C—S—H网状胶凝(水化硅酸钙)、针状钙矾石、无定形文石(CaCO_3)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等能够填充孔隙、胶结颗粒的物质生成,有效、适量的生成物有利于固化土强度的提高。土体中总孔隙个数及总颗粒个数都随荷载的增加而增多,孔隙面积、孔隙等效直径及颗粒等效直径都随荷载的增加而减少。

关键词 软土加固 石灰固化土 无侧限抗压强度 二次抗压强度 微观结构

中图分类号: P631.3 文献标识码: A

EXPERIMENTAL STUDY ON LIME AND ITS ADDITIONAL AGENT TO CURE TIANJIN MARINE SOFT SOIL

YANG Aiwu^{①②} WANG Tao^① XU Zailiang^③

(^①Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384)

(^②State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(^③The 3rd Railway Survey & Design Institute group co., LTD, Tianjin 300142)

Abstract The mechanical behavior of Tianjin marine soft soil can't meet the requirement of engineering construction, but it can be enhanced effectively by curing agents. Moreover when curing agents and additional agent are added in the soft soil together, the strength of the stabilized soil can be improved further. For this reason, the method of combing lime and cement or gypsum is proposed in this paper. In the test the unconfined compressive strength of solidified soil is used as a criterion to identify the solidifying effect. Meanwhile, sample microstructure is analyzed with SEM and the unconfined compressive strength of destroyed and re-cured samples is measured and

* 收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-10-14.

基金项目: 国家自然科学基金(41372291, 51179186) 天津市科技计划项目(15JCZDJC40600, 15ZCIDSF00220) 资助.

第一作者简介: 杨爱武(1971-), 男, 博士, 教授, 从事软土地基处理及土体微观结构研究. Email: tulilab@163.com

recorded. Test and analysis results indicate that the optimum content of cement only changes with the different dosage of lime. For example, if the content of cement in stabilized soil adding 12% lime is less than 3%, the effect of solidification is the best. Gypsum can't improve the soil strength. It even makes the water stability of soil badly and causes the soil crack under the influence of water. Although the compressibility of both lime stabilized soil with and without additional agent is low, their various mechanical properties can be improved obviously. Their failure mode is the brittle failure. The strength of destroyed soil is very low and can't recovery, to which attention should be given in practice. Microstructure analysis shows that the C-S-H (hydrated calcium silicate), acicular ettringite, CaCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ crystal formed in soil can fill pores and cement particles. Effective and proper product is beneficial to improve the strength of stabilized soil. The total of pores and particles in solidified soil increases with the augment of the pressure, however, area of pore, equivalent diameter of both pores and particles decreases with the augment of pressure.

Key words Soft soil improvement, Lime solidified soil, Unconfined compressive strength, Unconfined compressive strength of destroyed and re-cured soil, Microstructure

0 引言

由于经济发展的需要,天津滨海软土的开发与利用越来越广泛。为了使软土满足相应的工程需要,就必须采取相应的加固措施。目前,一般采取在素土中添加水泥、石灰的固化方法(王宝勋,2008;杨爱武等,2010)。迄今为止,对软土的加固已取得了许多重要成果。如:杨爱武等(2007,2013)研究了水泥及其外加剂对该地区软土的加固效果,指出外加适量的NaOH可以进一步提高酸性水泥土的强度。Jo et al.(2011),Bai et al.(2006),林彤等(2003),王梅等(2001)从宏观和微观的角度分析研究了粉煤灰与生石灰对软土的加固机理及效果。刘科等(2012),贾尚华等(2011)通过对石灰水泥混合土的强度增强机制的探讨,发现水泥和生石灰双掺固化效果,要优于单一水泥或生石灰的固化效果。除此之外,有学者研究发现在石灰固化土和水泥土中添加聚丙烯纤维(唐朝生,2007,2011a,2011b)或植物纤维(Prabakar et al.,2002)可以改善土的抗裂性,改变了其脆性破坏形式。本文在上述研究成果的基础上,以天津滨海软土为研究对象,在其中添加以石灰为主剂,水泥、石膏为辅剂的固化剂,对固

化土进行力学性能分析,并对其破坏后再养护的无侧限抗压强度测试。同时通过微观结构测试对固化土中的微结构参数进行定性、定量统计分析,结合能谱测试结果,从本质上揭示石灰及其外加剂固化软土的作用机理,为软土固化提供理论支持。

1 室内试验

1.1 土的基本性质

在塘沽现场钻探取样,取样深度分别为3.3~3.5m及4.8~5.0m,其土质以灰色淤泥质黏土为主,颗粒较细。室内试验试样直径为39.1mm,高度为80.0mm。

在室内进行原状土的各项基本物理性质试验,统计结果如表1所示。

从表1可以看出,天津滨海软土为典型的软土,具有含水率高、压缩性高、承载力低等特点,工程实用性差,需对其进行加固处理才能满足工程需要。

1.2 试验方案

试验前,先通过单掺法进行大量试验,最终确定在试验中采用素土按质量比掺入10%、12%、14%、16%的石灰,再通过正交试验比较,最终选用12%的

表1 软土的物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical indices of soft soil samples

取样地点	取样深度/m	天然密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	含水率 /%	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	孔隙比 e	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	无侧限抗压强度 /kPa
塘沽	3.3~3.5	1.78	47.7	46.5	21.6	24.6	1.06	1.422	2.21	1.096	5.0	5.2	27.5
塘沽	4.8~5.0	1.78	48.7	46.5	21.6	24.9	1.09	1.413	2.38	1.014	5.2	5.4	27.8

表中土的凝聚力及摩擦角均为直剪试验结果

石灰固化土掺入 2%、3%、4% 的水泥或 1%、2%、3% 的石膏等外加剂。按上述配比制作试样,进行下述各项试验。击实试验:测定不同石灰掺量下的改良土的最大干密度及最佳含水量;无侧限抗压强度试验:对于纯石灰固化土,试样成型后潮湿状态下养护 7d、14d、28d、90d 做无侧限抗压强度试验;对于掺外加剂的石灰固化土,用最佳含水量下干密度最大的试样做无侧限抗压强度试验,试验前均需将试样浸水 24h;二次抗压强度试验:对养护 7d、14d、28d 的试样无侧限压坏后进行自然养护 7d,再进行无侧限抗压强度试验,试验前均无需浸水;微结构试验:对养护 28d 的纯石灰固化土以及外掺 3% 水泥、外掺 2% 石膏的石灰固化土做不同固结压力下的微结构试验。

2 宏观力学试验结果分析

2.1 最大干密度与最佳含水量

根据上述的制样及养护方法,测得原状土、纯石灰固化及土掺水泥、石膏的石灰固化土最大干密度和最佳含水量(表 2)。

表 2 最大干密度与最佳含水量
Table 2 Maximum dry density and optimum water content of samples

混合料名称	外加剂掺量 /%	最大干密度 /g·cm ⁻³	最佳含水量 /%
原状土	无	1.70	20.2
石灰固化土	10	1.55	22.0
	12	1.54	21.4
	14	1.54	21.3
	16	1.53	21.5
12% 石灰固化土	外掺 2% 水泥	1.54	22.3
	外掺 3% 水泥	1.54	22.6
	外掺 4% 水泥	1.55	22.9
12% 石灰固化土	外掺 1% 石膏	1.54	22.6
	外掺 2% 石膏	1.54	22.8
	外掺 3% 石膏	1.54	22.8

由表 2 知:石灰固化土的最大干密度小于原状土的最大干密度,最佳含水量比原状土的最佳含水量高 1%~2%。随石灰含量的增加,固化土最大干密度逐渐减小,最佳含水量基本无变化。添加水泥、石膏的石灰固化土最大干密度与纯石灰固化土相近,原因是外加剂掺量少,对干密度的影响小,但其最佳含水量有所增加,高出后者 6% 左右。

2.2 无侧限抗压强度试验研究

纯石灰固化土及掺入不同量水泥或石膏的石灰固化土在不同龄期下试样的无侧限抗压强度(图 1 表 3)。

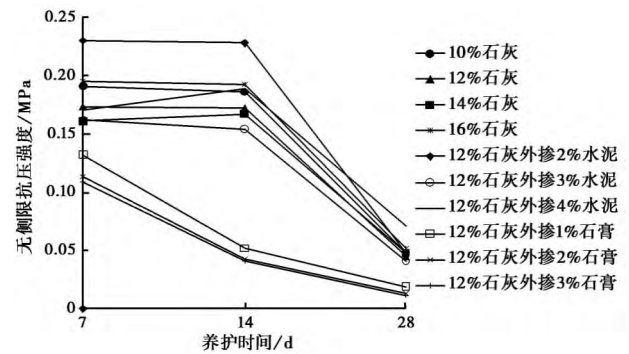


图 1 二次抗压强度值

Fig. 1 Unconfined compressive strength of destroyed and re-cured soil, changing with age and admixture amount

表 3 表明:石灰固化土的无侧限抗压强度随石灰掺量的增加增长缓慢,石灰掺量不超过 12% 为宜。水泥作为石灰固化土的外加剂,可以提高石灰固化土的强度,但其有最佳掺量,不超过 3% 为宜。石膏作为石灰固化土的外加剂,不能提高土体的强度,而且水稳定性差,遇水开裂。随着养护时间的增长,石灰固化土及外掺水泥的石灰固化土的无侧限抗压强度增长较快,而加入石膏的石灰固化土强度在初期大幅下降,后期几乎不变化。

2.3 二次抗压强度试验研究

二次抗压强度是试样无侧限压坏后进行自然养护,再进行无侧限抗压试验的强度值。养护 7d、14d 及 28d 试样二次抗压强度值统计(图 1)。

对比分析表 3 与图 1 数据发现:石灰固化土及掺外加剂的石灰固化土破坏后,不能恢复先前的抗压能力。固化土二次抗压强度值都呈现随石灰或外加剂掺量增加而降低的趋势;石灰固化土外掺水泥二次抗压强度较纯石灰固化土有所提高,加入石膏强度则大幅降低,与表 3 中强度值规律一致。随着养护时间的增加,固化土二次抗压强度有降低的趋势,并且越到后期其降低的幅度越大,最后几乎不再有抗压能力。在实际工程应用中,固化土破坏后不能再恢复其强度,原因是这几种固化土都是靠胶结作用形成强度,胶结越强破坏后土体越不容易恢复强度。

表 3 无侧限抗压强度值

Table 3 Unconfined compressive strength of solidified soil, changing with age and admixture amount

混合料名称	无侧限抗压强度/MPa			
	7d	14d	28d	90d
10%石灰	0.359	0.413	0.507	0.894
12%石灰	0.287	0.425	0.522	0.987
14%石灰	0.261	0.422	0.501	1.056
16%石灰	0.344	0.432	0.512	1.052
12%石灰外掺2%水泥	0.389	0.425	0.604	1.102
12%石灰外掺3%水泥	0.501	0.445	0.563	1.143
12%石灰外掺4%水泥	0.451	0.517	0.601	1.067
12%石灰外掺1%石膏	0.64	0.183	0.216	0.148
12%石灰外掺2%石膏	0.811	0.177	0.167	0.191
12%石灰外掺3%石膏	0.702	0.137	0.167	0.161

2.4 吸水量试验研究

纯石灰固化土及添外加剂的石灰固化土吸水量随时间变化(图2)。

图2数据说明:石灰固化土的吸水量随石灰及外加剂含量增加有增大的趋势,随养护时间的增长,而呈现减小的趋势。对于12%的石灰固化土,加入水泥后其吸水量减少,并且随水泥含量的增加而呈现减小趋势,因为石灰和水泥经过一系列化学作用生成充填物和包裹物,使土体的孔隙明显减少,从而

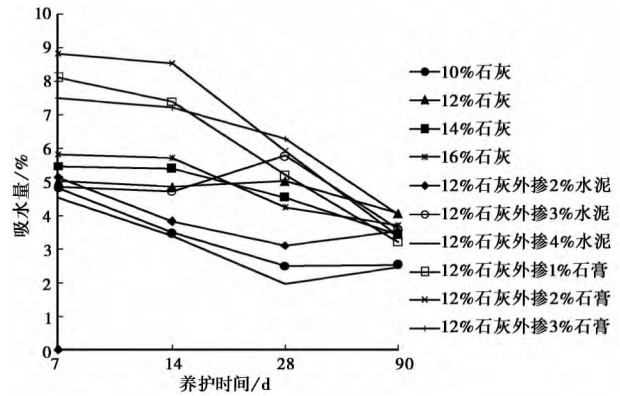


图 2 吸水量

Fig. 2 Water-absorptivity of sample, changing with age

减少其吸水量;而在石灰固化土中加入石膏其吸水量增加,且随石膏含量增加有增多趋势,主要是由于石膏的吸水能力大于土体的吸水能力。吸水量过大会使固化土的水稳定性降低,这也是石灰固化土中不能掺石膏的主要原因之一。

3 微观结构试验研究

3.1 扫描电镜图片分析

为了更好地研究石灰及其外加剂对滨海软土的固化机理,本文选取原状软土及养护28d的12%纯石灰固化土、12%石灰固化土外掺3%水泥及12%石

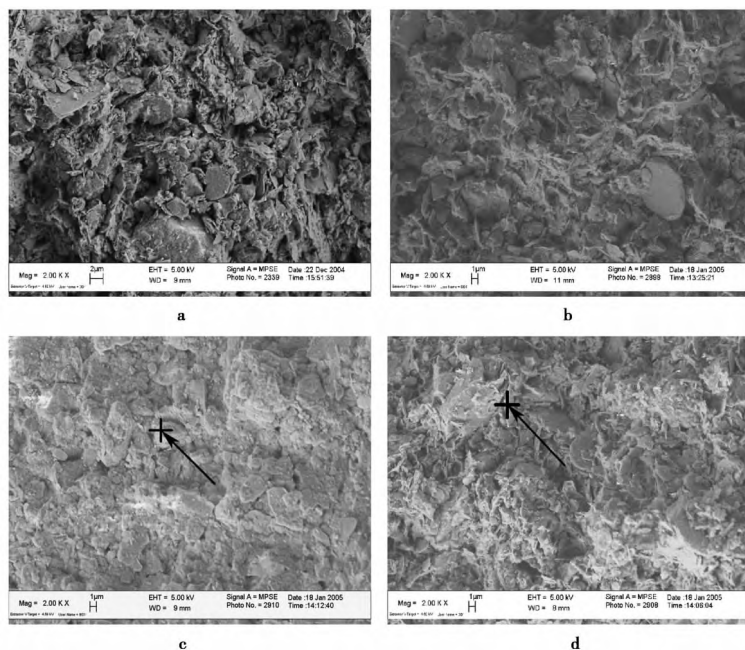


图 3 不同压力下原状软土 SEM 图像

Fig. 3 SEM photos of undisturbed soil under different pressures

a. 0 压力; b. 100kPa; c. 200kPa; d. 400kPa

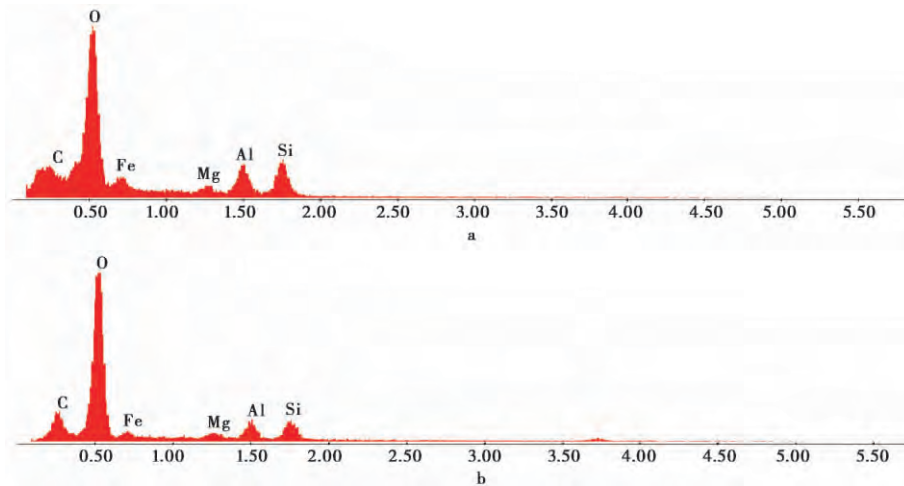


图4 “十”点能谱分析

Fig. 4 Energy spectrum analysis of the points in Fig. 3
a. 200kPa; b. 400kPa

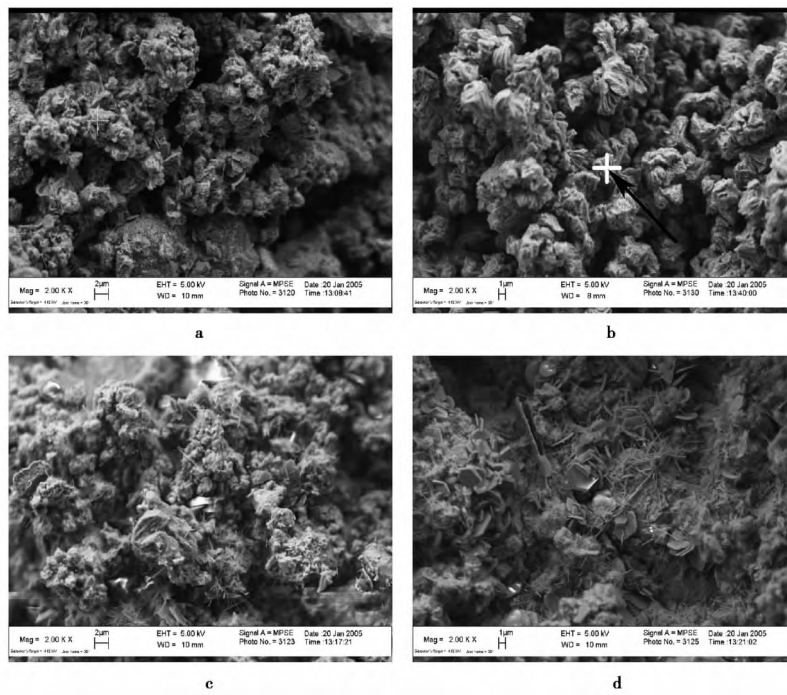


图5 不同压力下12%石灰固化土SEM图像

Fig. 5 SEM photos of 12%lime stabilized soil under different pressures
a. 0 压力; b. 100kPa; c. 200kPa; d. 400kPa

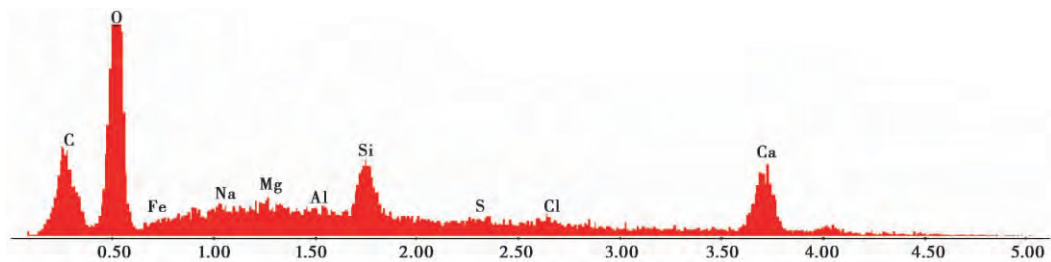


图6 “十”点能谱分析

Fig. 6 Energy spectrum analysis of the point in Fig. 5

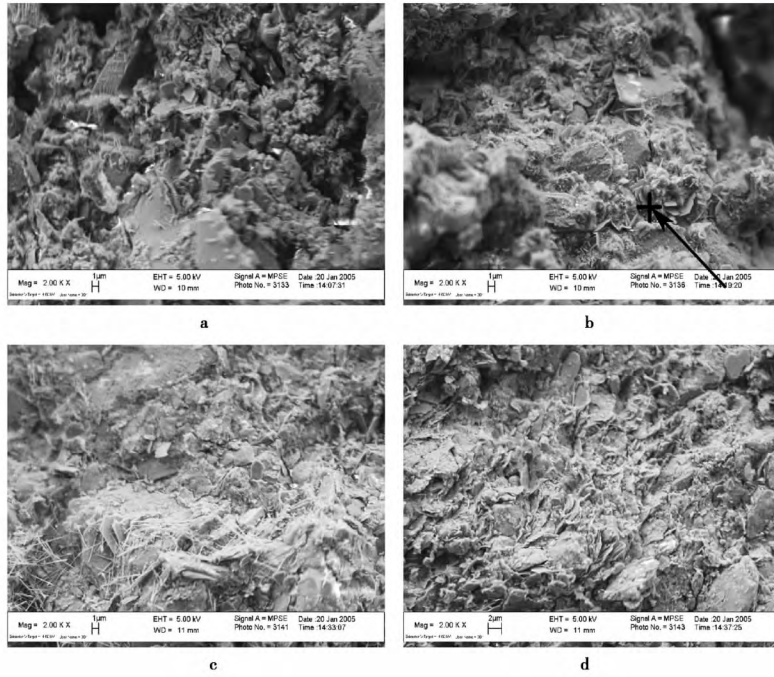


图 7 不同压力下 12%石灰固化土外掺 3%水泥 SEM 图像

Fig. 7 SEM photos of 12% lime stabilized soil adding 3% cement under different pressures
a. 0 压力; b. 100kPa; c. 200kPa; d. 400kPa

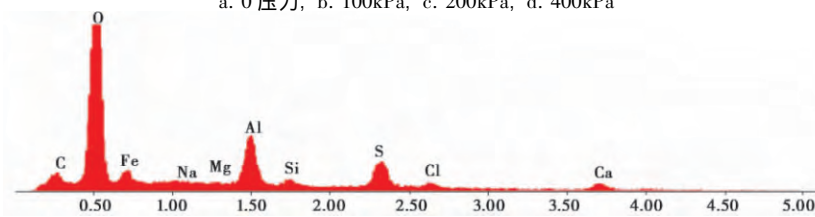


图 8 “十”点能谱分析

Fig. 8 Energy spectrum analysis of the point in Fig. 7

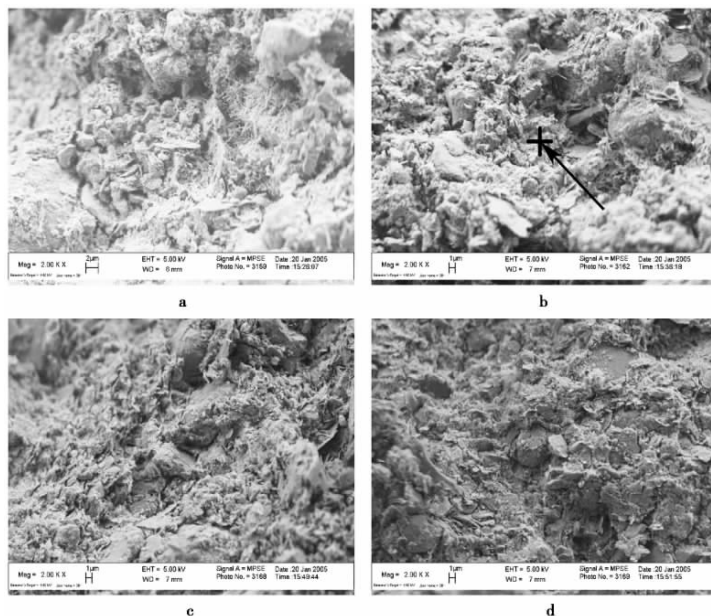


图 9 不同压力下 12%石灰固化土外加 2%石膏 SEM 图像

Fig. 9 SEM photos of 12%lime stabilized soil adding 2% gypsum under different pressures
a. 0 压力; b. 100kPa; c. 200kPa; d. 400kPa

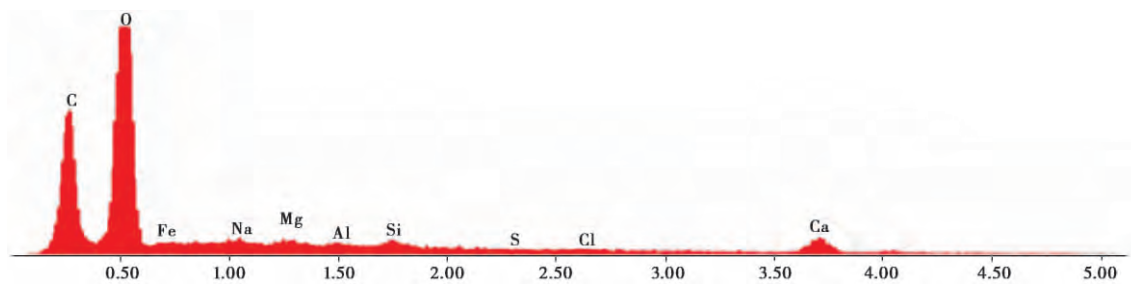


图 10 “十”点能谱分析

Fig. 10 Energy spectrum analysis of the point in Fig 9

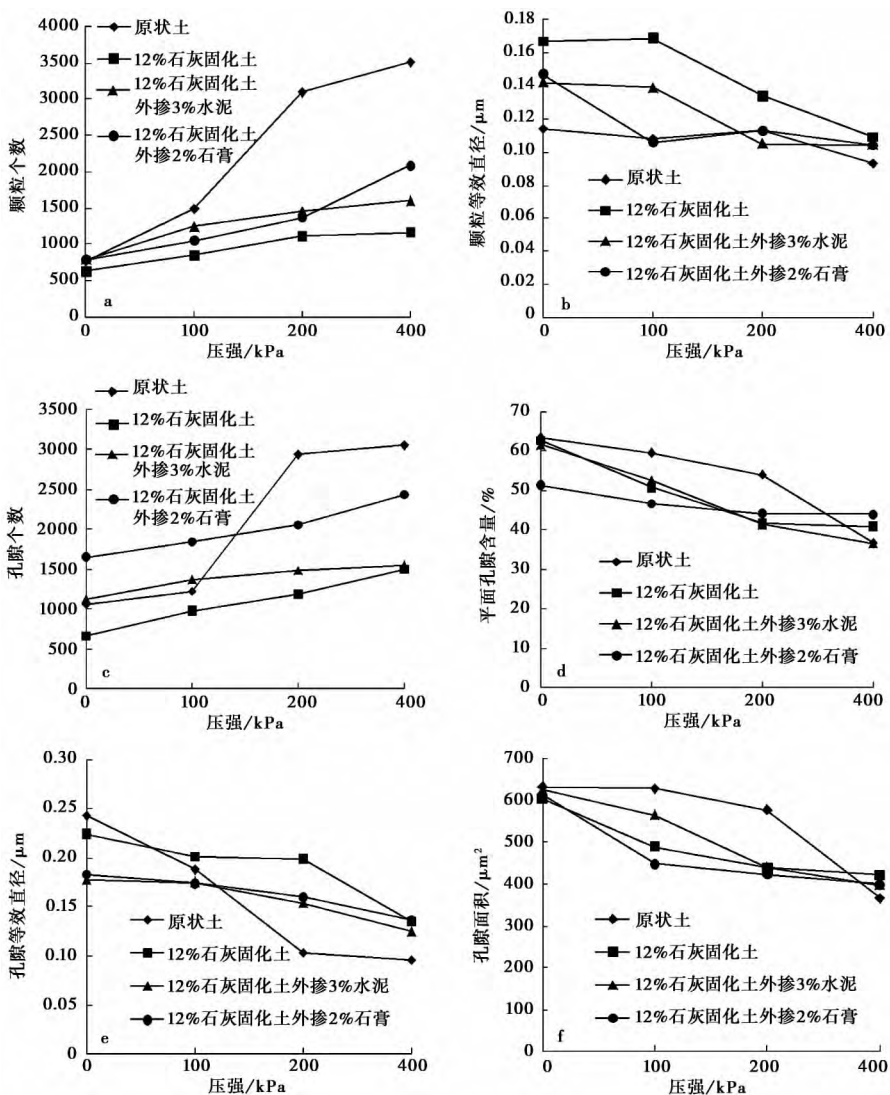


图 11 微观结构定量分析

Fig. 11 Quantitative analysis of microstructure

a. 颗粒个数; b. 颗粒等效直径; c. 孔隙个数; d. 平面孔隙含量; e. 孔隙等效直径; f. 孔隙面积

灰固化土外掺 2%石膏进行微观结构分析,并对其局部进行了能谱分析。试样在不同压力下的扫描电镜图像及能谱分析结果如图 3~图 10 所示。

由图 3可知,天津滨海软土主要矿物为假六方片状的高岭石及呈不规则弯曲薄片、杂乱分布的弯曲褶皱片状、花朵状集合体的蒙脱石。

由能谱分析图4可以看出,天津滨海软土(淤泥质黏土)的主要成分为硅、铝、镁、铁等元素,与矿物构成一致。

图5中发现石灰固化土中有板状氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)晶体、无定形文石、少量的C—S—H网络状凝胶(水化硅酸钙)生成,构成开放式微孔隙系统。

从能谱分析图6可以看出:石灰固化土中的矿物元素主要为硅、钙、铝、镁、钠、铁、钾、氯、硫,其中钠、氯很大部分为土中盐矿物,与照片中反应的生成物主要为无定形文石相吻合。

图7表明掺水泥石灰固化土中有六方状晶体($\text{Ca}(\text{OH})_2$)、针状钙矾石、无定形文石(CaCO_3)出现。这几种物质共同构成开放的孔隙系统。

图8可以看出12%石灰固化土外掺3%水泥的生成物的主要元素为铝、硫、镁、硅、铁、钠、钙、钾、氯。

图9说明掺石膏石灰固化土中有C—S—H网络状凝胶(水化硅酸钙)、无定形文石(CaCO_3)、六方状晶体($\text{Ca}(\text{OH})_2$)及针状钙矾石生成。

图10表明12%石灰固化土外掺2%石膏的生成物的主要元素为钙、镁、铝、钠、硅、铁、硫、氯。

由图5、图7及图9对比分析可知:与纯石灰固化土相比,外加3%水泥的石灰固化土中几乎没有网络状的水化硅酸钙生成,但针状钙矾石晶体增多;外加2%石膏的石灰固化土中针状钙矾石晶体生成量较外加水泥时少很多,有网络状水化硅酸钙生成但比纯石灰固化土中的要少。从能谱图上也能看出外加水泥后固化土中钙、硅元素有所减少,铝、硫元素有所增加;加入石膏后,固化土中的铝、硅、硫、钙等元素含量都有所减少,与SEM图分析一致。

3.2 定量分析

原状土及各种固化土的微观结构定量分析成果统计如图11所示。

分析结果表明:原状土中的孔隙数量、孔隙面积及颗粒数量都大于石灰及其掺外加剂的固化土,而且掺外加剂的固化土中的孔隙个数多于纯石灰固化土中的孔隙个数。对于不同的石灰及外加剂的掺量,固化土中的平均孔隙含量变化很大,孔隙总面积、颗粒数量变化不大。在石灰及外加剂掺量不变的情况下,随着压力的增大,固化土的平面孔隙含量、孔隙面积都减小,但是土体中的孔隙个数、颗粒个数都增多,孔隙等效直径、颗粒等效直径都减小,

是因为在高压下较大土颗粒被压碎,较大孔隙也被压分成多个。混合料强度并不能完全由孔隙含量多少决定,还与混合料最终生成物有关。

4 固化微观机理探讨

固化土的强度主要由土的固有结构与组成、物理改良、化学作用组成,其中物理化学作用在不断进行,直到石灰中的活性氧化钙、活性氧化镁等反应完毕为止。当在土体中添加石灰及其外加剂时,土体中的孔隙数量及颗粒数量都减少,颗粒等效直径增大,孔隙等效直径减小。主要是因为软土中添加固化剂后,固化剂与土中物质经过一系列的反应生成C—S—H网状胶凝(水化硅酸钙)、针状钙矾石、无定形文石(CaCO_3)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等物质。水化硅酸钙能胶结土颗粒使其团粒化,将颗粒松散的软土胶结成为整体,使土体更加密实,增加其强度;钙矾石其固相体积增长较大,能高效地填充软土孔隙,并且针状钙矾石在孔隙中相互交叉与C—S—H构成空间网架结构,支撑孔隙从而进一步提高固化土的强度。在一定时间范围内,随着龄期的增长,这些生成物继续增多,使固化土的整体性越来越好,强度越来越高。

5 结论

通过对石灰固化土及掺外加剂的石灰固化土宏观力学性质及微观特性的研究,可以得出以下结论:

(1) 对于天津滨海软土,当石灰掺量为12%时固化效果最佳。在石灰固化土中加入水泥等外加剂,能进一步改善土体的力学性质,但有其最佳掺量。以12%的石灰固化土为例,水泥掺量不宜超过3%,土体强度可以提高10%~20%。但是,在石灰土中加入石膏不能提高土体强度。石灰固化土及掺外加剂的石灰固化土,其吸水量都有随着时间的增长而减少,随石灰及外加剂(石膏、水泥)的增加而增加的趋势。

(2) 石灰固化土及掺外加剂的石灰固化土都为低压缩性土,各种力学性质都比原状土有明显提高,并且随着石灰含量的增加,强度有增加的趋势,但在石灰含量超过14%以后,强度增加不再明显。固化土的破坏形式主要表现为脆性破坏,破坏后残余强度很低。二次抗压强度试验表明:土体破坏后,其强度不能恢复,只有前期的10%左右,而且土体被改

良的时间越长,破坏后强度越低,这在工程实践中值得重视。

(3) 纯石灰固化土及掺水泥的石灰固化土,有C—S—H网状胶凝(水化硅酸钙)、针状钙矾石、无定形文石(CaCO_3)、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等能够填充孔隙、胶结颗粒的物质生成,适量的生成物填充了土体孔隙,使土体强度得到提升;在微观上主要都表现为平面孔隙含量随压力的增大而减少,土体中总孔隙个数及总颗粒个数都随荷载的增加而增多,孔隙面积、孔隙等效直径及颗粒等效直径都随荷载的增加而减少。

参 考 文 献

- Bai S G, Hou Y F. 2006. Study on properties of cement Lime-fly-ash soil[J]. Key Engineering Materials (302~303): 457~461.
- Jia S G, Shen X D, Xie G L. 2011. Reinforcement mechanism of lime-cement soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 32(S1): 382~387.
- Jo A N, Hafez M A, Norbaya S. 2011. Study of bearing capacity of lime-cement columns with pulverized fuel ash for soil stabilization using laboratory model[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 16: 1595~1605.
- Lin T, Liu Z D. 2003. Study on indoor tests of fly ash and quick lime improving soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 24(6): 1049~1052.
- Liu K, Shen Y, Liu H L. 2012. Experimental study on unconfined compressive strength of hydraulic fill on consolidated by adding cement and lime[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 29(3): 94~98.
- Prabakar J, Sridhar R S. 2002. Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil[J]. Construction and Building Materials, 16(2): 123~131.
- Tang C S, Gu K. 2011a. Strength behavior of polypropylene fiber reinforced cement stabilized soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 44(S2): 5~8.
- Tang C S, Shi B, Cai Y, et al. 2007. Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 28(9): 1796~1800.
- Tang C S, Shi B, Gu K. 2011. Microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil[J]. Journal of Engineering Geology, 19(4): 610~614.
- Wang B X. 2008. Study on mechanical characteristics and new solidifying technology for marine soft soil[Doctorate Thesis][D]. Changsha: Central South University.
- Wang M, Bai X H, Liang R W, et al. 2001. Microstudy on soft foundations reinforcement with lime-fly ash piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 22(1): 67~70.
- Yang A W, Du D J, Zhao R B, et al. 2007. Experimental study on cement and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 28(9): 1823~1827.
- Yang A W, Yan S W, Du D J, et al. 2010. Experimental study of alkaline environment effects on the strength of cement soil of Tianjin marine soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(9): 2930~2934.
- Yang A W, Zhou J, Kong L W. 2013. Experimental study of solidification of soft dredger fill in Tianjin Binhai New Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 34(9): 2442~2448.
- 贾尚华,申向东,解国梁. 2011. 石灰-水泥复合土增强机制研究[J]. 岩土力学, 32(增1): 382~387.
- 林彤,刘祖德. 2003. 粉煤灰与生石灰加固软土的室内试验研究[J]. 岩土力学, 24(6): 1049~1052.
- 刘科,沈扬,刘汉龙. 2012. 水泥-生石灰固化吹填土无侧限抗压强度试验研究[J]. 土木工程与管理学报, 29(3): 94~98.
- 唐朝生,顾凯. 2011a. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. 土木工程学报, 44(增2): 5~8.
- 唐朝生,施斌,蔡奕,等. 2007. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学, 28(9): 1796~1800.
- 唐朝生,施斌,顾凯. 2011b. 纤维加筋土中筋/土界面相互作用的微观研究[J]. 工程地质学报, 19(4): 610~614.
- 王宝勋. 2008. 海积软土力学特征与固化新技术研究[博士学位论文][D]. 长沙:中南大学.
- 王梅,白晓红,梁仁旺,等. 2001. 生石灰与粉煤灰桩加固软土地基的微观分析[J]. 岩土力学, 22(1): 67~70.
- 杨爱武,杜冬菊,赵瑞斌,等. 2007. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. 岩土力学, 28(9): 1823~1827.
- 杨爱武,闫澍旺,杜东菊,等. 2010. 碱性环境对固化天津海积软土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 31(9): 2930~2934.
- 杨爱武,周金,孔令伟. 2013. 天津滨海新区吹填软土固化研究试验[J]. 岩土力学, 34(9): 2442~2448.