

真空预压联合石灰稳定法改良淤泥土试验研究

王建勋^{1,2}, 王保田^{1,2}

(1. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘要: 在工程用土资源越来越紧张和环境日益恶化的情况下淤泥资源化利用成为一个亟待解决的问题。通过向河底淤泥中掺入一定量的生石灰, 再用真空预压结合外加剂木质素磺酸钙来改善土体的渗透、强度和变形等特性, 总结并分析了掺木量对稳定排水量、稳定沉降量、强度、孔隙等的影响以及真空预压后石灰稳定土龄期下土体强度的变化规律。试验结果表明, 抽真空后改良土具有较低含水率, 土体强度增长较大, 孔隙较小, 后期沉降较小, 加固土体以满足填筑用土要求, 经济性分析表明该法是可以接受的。

关键词: 淤泥; 石灰; 真空预压; 木质素磺酸钙

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental study of vacuum preloading of lime stabilized sludge

WANG Jian-xun^{1,2}, WANG Bao-tian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai university, Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: when environment is deteriorating continually, and the fitting soils soil for engineering are short and become more expensive. Technique for converting soft sludge to fitting engineering soil with content strength is very important and urgent. By mixing an extent lime to sludge dredged from riverway, and then, carrying on vacuum preloading added calcium lignosulfonate, serials of quality have been improved, including coefficient of permeability, unconfined compression strength and settlement deformation etc., at one time, the relationships of dosages of calcium lignosulfonate and stable drainage-water volume and stable settlement and unconfined compression strength and void ratio would be studied and analyzed. The test results show that the strength is growing more quickly, hole volume of soil is being squeezed to a smaller, and subsequent settlement is becoming more little under lower water content situation after vacuum preloading. The soil will be consolidated to satisfy the standard qualification of fill. At last, through economical analysis, it is shown that this way could be accepted.

Key words: sludge; lime; vacuum preloading; calcium lignosulfonate

1 引言

有机质含量较高时河底淤泥又脏又臭, 是造成河道淤积的首要元凶, 淤积作用造成河床抬高、通航能力下降、行洪能力减弱、调蓄能力降低、水体严重污染。为了疏浚河道湖泊, 改善水环境, 国家每年都要投入大量的人力、财力和物力。随着陆地可耕面积的不断减少, 淤泥处理再利用越来越被人们所重视。

目前大量河道清淤淤泥主要被抛弃和吹填等处理, 堆积的淤泥再利用耗时长, 强度低, 且后期需

要昂贵的费用进行地基处理^[1-3], 因此淤泥作为工程材料的应用还是不能大范围推广利用。在公路工程中, 往往由于工期、经济性、后期收益率以及一些人为因素等原因, 对于含有淤泥、淤泥质土层处理时采用换填方式进行处理, 进一步限制了淤泥工程应用的发展, 因此淤泥处理作为工程材料研究还处于初步阶段。淤泥处理技术主要有物理方法和化学方法两大类: 物理方法主要以干燥脱水为手段, 如通过离心机进行脱水, 但脱水一次性投资较高, 经过脱水处理后仍需要进行2次处理才能满足工程要求。化学方法主要通过添加水泥、矿渣、粉煤灰

石灰等无机胶凝材料来固化土体。其中水泥的水化反应激烈,水化产物多,硬凝能力快,持续时间长等特点,以水泥为固化剂主料的研究较充分和全面。范昭平^[4]、冯志超^[5]、李磊等^[6]研究了含水率、重金属、黏粒含量、有机质等因素对水泥改良淤泥性质的影响,但处理时要强度明显提高,水泥掺量大,特别在淤泥初始含水率较高时,往往效果不理想。本文主要通过在高含水率(100%左右)的淤泥中添加5%(按湿土质量)的生石灰,待含水率稳定之后,再添加一定量的木质素磺酸钙,用真空预压装置进行真空预压,使土体排水固结,研究预压后土体的渗透、强度、变形等特性。

2 试验概述

2.1 试验用土

本试验用土取自南京秦淮河草场门桥附近区域,祛除表面杂质,静置7d。素土主要物理参数见表1。

表1 素土基本物理指标

Table 1 Physical properties indexes of sludge

含水率 $W/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_P/\%$	塑性指数 I_P	比重 G_s	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e
98.5	53.4	27	26	2.63	14.11	3.62

2.2 试验仪器

试验仪器设备主要有真空预压装置, XC-J 型袖珍触探仪等。

2.2.1 真空预压装置

真空预压装置主要有以下几部分组成:(1)真空泵:本次试验中所使用的真空泵为2XZ-1型直联双级旋片式真空泵,主要用来为模型试验提供真空压力。(2)储压及水气分离装置:主要是起到稳定系统的真空压力作用,真空压力的大小是通过与真空泵相连的电接点真空表来控制。(3)模型容器:模型容器用有机玻璃制成圆筒形,其大小为内径为14cm,高度为20cm,壁厚1cm,在模型的顶部和底部各打设有孔洞,用以与抽真空系统和真空表相连,达到为模型中土提供真空压力和抽真空过程中测量试样底部(顶部)的孔压值的目的。

2.2.2 XC-J 型袖珍触探仪

该仪器主要由量表、探杆和锥头组成,可以测量土样的无侧限抗压强度和排水剪强度等。

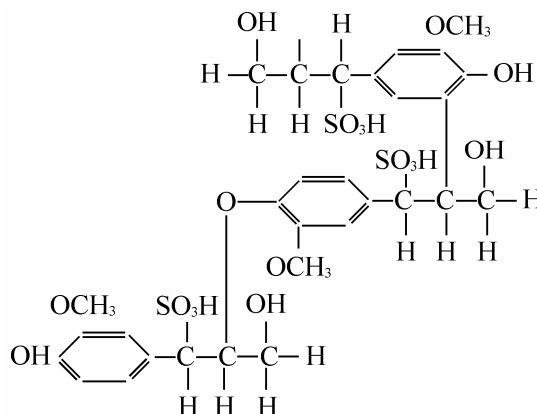
2.3 试验方案

在淤泥中土添加5%的生石灰,静置7d后且待含水率稳定至77.31%,再用真空预压使其进一

步排水固结。然后,通过在每份5kg的石灰土中分别以按湿土质量的0.05%,0.1%,0.2%,0.4%的掺量掺入木质素磺酸钙(以下简称掺木)进行真空预压。同时,为了考虑木质素磺酸钙吸附水的程度,将掺木后的土分别静置1,3d和7d后再在模型容器中填至高18cm处,在真空度60kPa下进行真空预压,预压稳定后取土进行渗透、强度和变形试验。

3 试验原理

木质素磺酸钙(简称木钙)是纸浆工业得到的木质素衍生物之一,是一种混凝土普通减水剂,具有缓凝性,如果过量使用,将产生离析现象^[7]。木钙分子结构基本保留了木质素的结构特征,即苯丙烷单元结构和大量醚键连接结构,其侧链上还引入了大量的磺酸盐基团^[8],分子式如下:



木质素磺酸钙是一种阴离子表面活性剂,阴离子表面活性剂是表面活性剂中产量最大的一类,其分子溶于水发生电离后与亲油基相连的亲水基是带阴电荷的表面活性剂。当木钙遇水时分解成为大分子阴离子和钙离子,最终获得相对分子质量分别为小于5000万,5000~1万,1~3万和3~5万等4个级别的大分子阴离子^[9],大分子阴离子定向吸附于水表面,形成水分子负离子团,与土体产生排斥作用,使得在真空预压过程中土中水更容易排出。

4 试验结果研究

4.1 不同掺木量下抽真空排水体积变化试验结果

在添加木质素磺酸钙后,分别等待 $t=1, 3$ d和7d的间隔时间,填置预定高度为18cm,自固结1d,然后在真空度为60kPa下进行真空预压,结果如下图1所示,图中素土为添加5%生石灰而未添加木钙的土。

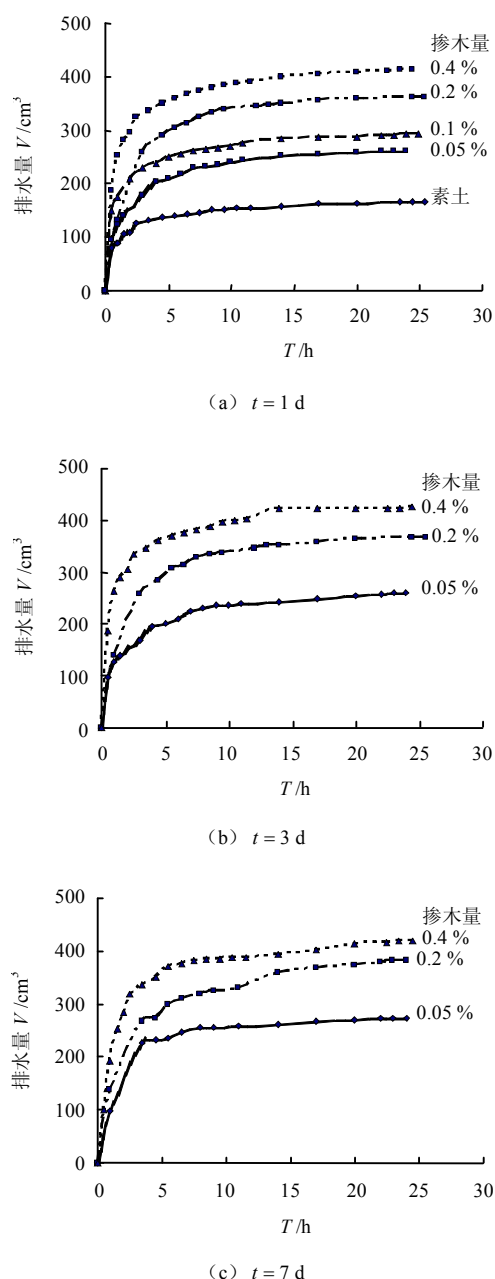


图1 不同掺木量下的排水量与时间关系图
Fig.1 Drainage water volume-time curves of different dosages of calcium lignosulfonate

由图1可知,在 $t=1, 3, 7$ d时3组图中排水量随着掺木量的增加而增加,在 $t=1$ d和 $t=3$ d这2组图中可以很明显的看出,在抽真空的前5 h内,排水速率随着掺木量的增加而增加。

本试验以《公路路基施工技术规范》^[10]作为参考依据,当每小时沉降小于0.02 mm时,即可停止抽真空,认为土体在抽真空后土体处于稳定状态。此时土体的排水量为稳定排水量,沉降量为稳定沉降量。

图2为添加木质素磺酸钙后真空预压间隔等待

时间为1 d和7 d时的稳定排水量与掺木量之间的关系图。从图2可以看出,不同掺木量和稳定排水量呈双曲线关系,拟合相关系数为0.98。当掺木量到达0.4%时,土体的稳定排水量不再增多,呈平缓或下滑趋势,并且7 d比1 d稳定排水量更加多。当 $t=1$ d时,根据土中掺木量由低到高的顺序,稳定排水量和固结时间依次为165 cm³和17 h, 259 cm³和20 h, 289 cm³和22 h, 356 cm³和17 h, 412 cm³和22.5 h,可见在掺了木钙后的稳定排水量依次为未掺木钙的1.57, 1.75, 2.15倍和2.5倍。

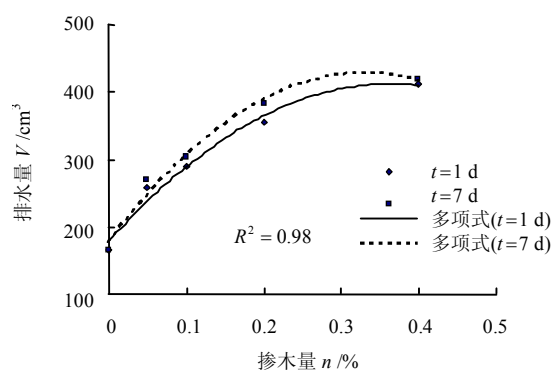


图2 不同掺木量对稳定排水量的影响
Fig.2 Effects on stable drainage water volume under different dosages of calcium lignosulfonate

为了更好的直观地说明在同一掺木量下不同间隔等待时间的排水量随时间变化关系。图3为不同掺木量下的不同间隔时间的排水量与时间关系图。可以看出,这3组图中,等待1 d和3 d后抽真空排水量基本无差别,有时3 d还偏小。在掺木量 $n=0.05\%$ 和 $n=0.2\%$ 这2组图中,可以看出7 d的排水量 v 明显多于1 d和3 d,其中在 $n=0.05\%$ 组图中1 d的稳定排水量 $v=259$ cm³, 7 d的稳定排水量为272 cm³,在 $n=0.2\%$ 组图中1 d的稳定排水量为356 cm³, 7 d的稳定排水量为380 cm³,增长比例分别为5%和6.8%,而在 $n=0.4\%$ 中1, 3 d和7 d变化不明显。

3.2 不同掺木量下抽真空沉降量变化试验结果

本节主要列出在上节相同的掺木量和间隔抽真空时间为1 d和7 d的沉降试验观测结果,如图4所示。从图中可以看出,随着掺木量的增加,土体的稳定沉降值变大,尤其素土和掺了木钙的土的稳定沉降差值较大,而掺木后的土体稳定沉降变化幅度较小。可以看出,对掺木钙和未掺木钙的土真空

预压, 稳定排水量与稳定体积变化量相差较大, 而掺后的土二者之间差值较小, 这是由于在掺木钙之后土体变得更加易于流动, 真空模型容器中填土时存在的裂缝等空隙被压引起。

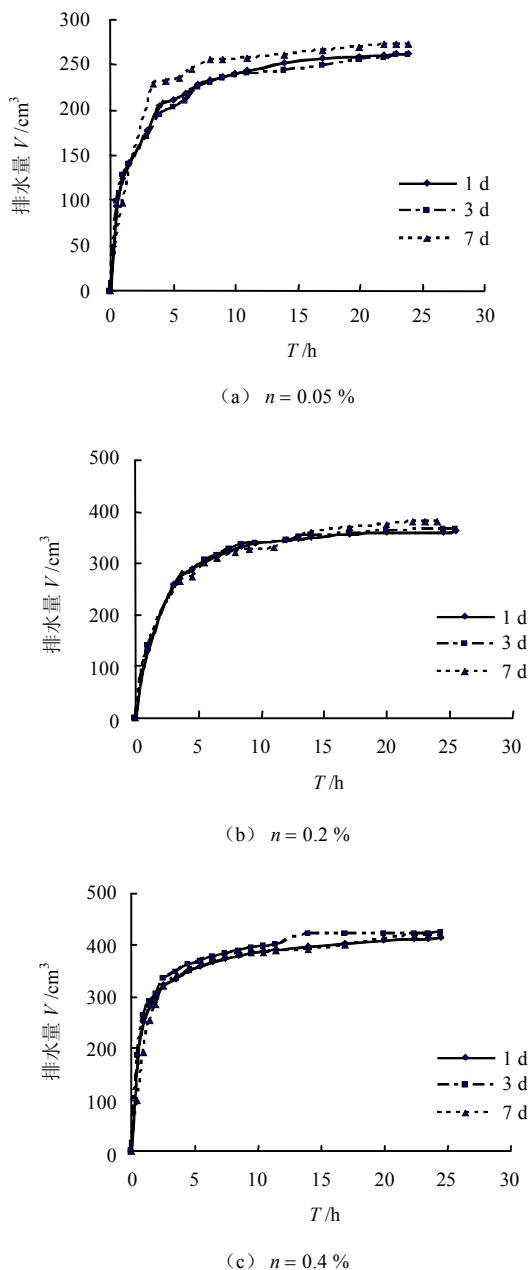


图3 不同掺木量下排水量与时间关系图

Fig.3 Drainage water volume-time curves of different dosages of calcium lignosulfonate

图5为稳定沉降量与掺木量关系。可以看出, 稳定沉降量和掺木量呈现双曲线关系, 当 $t=1$ d时曲线相关系数为0.94, 7 d的曲线相关系数为0.94; 当掺木量到达0.4%时, 土体的稳定沉降量不再增多, 呈平缓下滑趋势, 并且7 d比1 d稳定排水量更加多。这一趋势和排水规律存在一致性。

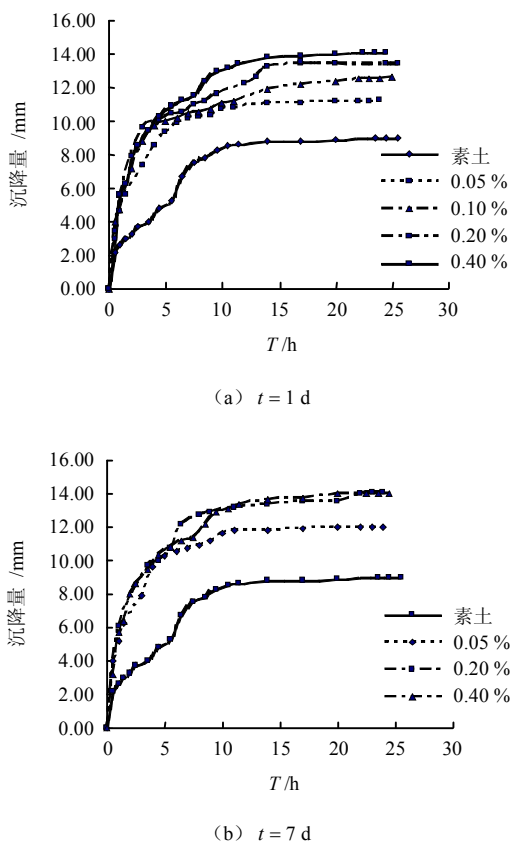


图4 不同掺木量下沉降变形与时间关系图

Fig.4 Settlement-time curves of different dosages of calcium lignosulfonate

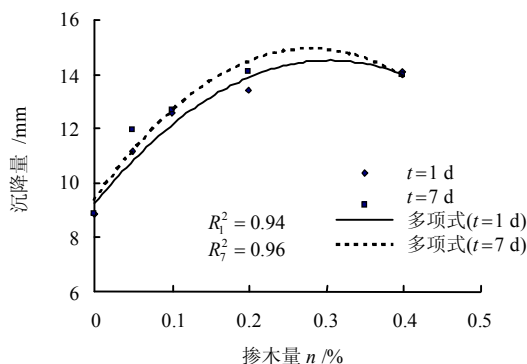


图5 不同掺木量对稳定沉降的影响

Fig.5 Effects on stable settlement under different dosages of calcium lignosulfonate

4.3 不同掺木量下抽真空渗透性试验结果

为了更好的了解土体中抽真空前后的土体密度, 孔隙的变化, 观测了土体在抽真空前后的渗透系数。在抽真空之前土体的渗透系数约为 8.36×10^{-6} cm/s, 而在添加了不同木钙后土体的渗透系数发生了明显的变化, 见表2。

从表2可以看出, 素土在抽真空之前渗透系数减小了1.15倍, 而添加木质素磺酸钙时渗透系数增

加分别增加了 7.88, 8.41, 10.15 倍和 13.08 倍。

表 2 掺木量对抽真空后渗透系数的影响

Table 2 Effects on coefficient of permeability under dosages of calcium lignosulfonate after vacuum preloading

掺木量 n /%	素土	0.05 %	0.1 %	0.2 %	0.4 %
渗透系数 $k/(10^{-6} \text{ cm/s})$	7.26	1.06	0.994	0.823	0.639

4.4 不同掺木量下抽真空强度试验结果

通过掺入木钙, 使得土体产生憎水性, 结合真空预压, 使得土体排水速率变大, 排水量变大, 沉降量增大, 从而使得土体含水率下降, 土体更加密实, 从而使得土体后期变形变小, 土体强度增加。表 3 为无侧限抗压强度试验记录表。

表 3 无侧限抗压强度试验记录表

Table 3 Effects on unconfined compress strength under dosages of calcium lignosulfonate after vacuum preloading

掺木量 n /%	无侧限抗压强度 /kPa		
	1 d	3 d	7 d
素土	40.02		
0.05	44.85	43.21	46.23
0.1	45.31	46.71	50.15
0.2	47.61	48.42	51.55
0.4	45.21	43.96	45.67

注: 上述取值为去掉最高值的土体的土体平均强度。

由表 3 可以看出, 在添加木质素磺酸钙的情况下强度有所增长, 添加后强度在 43.21~51.55 kPa 范围内强度增长比例为 7.9 %~28.81 %。其次可以看出, 当掺木量超过 0.4 % 时强度降低, 因此存在一极限掺木量为 0.2 %。由于石灰为气硬性胶凝材料, 在含水率越低的情况下土体强度随时间增长速度较快, 通过观测在掺木量为 0.2 %, 间隔抽真空时间为 7 d 时抽真空后不同龄期的强度的变化情况, 见表 4。

表 4 龄期对无侧限抗压强度的影响

Table 4 Effects on unconfined compress strength by different interval vacuum preloading time

龄期 /d	1	7	14	30
无侧限抗压强度 /kPa	51.55	56.32	67.54	80

5 结 论

通过上述试验成果和观测数据, 主要得出以下结论:

(1) 随着掺木量的增加, 真空预压后土体的强度增加, 提高强度具有显著效果。但随着掺木量的

增加, 强度不是一直增加, 存在极限掺木量为 0.2 %。

(2) 石灰与真空预压相得益彰, 使得土体在抽真空后土体的强度增长较快。在 60 kPa 下进行真空预压, 在抽真空后 30 d 龄期下无侧限达到 80 kPa, 预期 90 d 完全满足路基填筑要求。

(3) 掺木量和稳定排水量呈双曲线关系, 1 d 和 7 d 拟合相关系数都为 0.98, 当掺木量到达 0.4 % 时, 土体的稳定排水量不再增多, 呈平缓下滑趋势, 并且 7 d 比 1 d 稳定排水量更加多。

(4) 掺木量和稳定沉降量呈现双曲线关系, $t = 1 \text{ d}$ 的曲线相关系数为 0.94, 7 d 的曲线相关系数为 0.94。当掺木量到达 0.4 % 时, 土体的稳定沉降量不再增多, 呈平缓下滑趋势, 7 d 比 1 d 稳定排水量更多。

(5) 随着掺木量的增加, 土体越来越紧密, 这是由于木质素磺酸钙使得土体产生憎水性, 不仅起到土体排水作用, 也起到土体润滑作用。

参 考 文 献

- [1] 朱伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, (4): 39—41, 50.
- [2] 杨永获, 汤怡新. 疏浚土的固化处理技术[J]. 水运工程, 2001, (4): 12—15.
- [3] 张成良, 洪振舜, 邓永锋. 淤泥吹填处理及其研究进展[J]. 路基工程, 2007, (1): 12—14.
- [4] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 327—1 330, 1 334.
- [5] 冯志超, 朱伟, 张春雷, 等. 黏粒含量对固化淤泥力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 052—3 057.
- [6] 李磊. 污泥固化处理技术及重金属污染控制研究[硕士学位论文 D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [7] 李国卫. 使用木质素磺酸钙应控制掺量[J]. 建筑工人, 1999, (7): 9—9.
- [8] 赵斌元, 胡克鳌, 范永忠. 木质素磺酸钙热行为初步研究[J]. 纤维素科学与技术, 2000, 8(1): 33—37.
- [9] 庞煌霞, 邱学青, 杨东杰, 等. 木质素磺酸钙对硬化水泥抗压强度的影响[J]. 精细化工, 2006, 23(5): 502—505, 513.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG F10 2006 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.