

【水利水电工程】

石灰固化泥液塑限及不排水剪切强度试验研究

肖昭然, 王红星

(河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:针对某港口海相淤泥试样进行了室内落锥试验和十字板试验等,开展了确定液、塑限及不排水剪切强度的试验研究。结合试验结果分析了石灰掺入对阿太堡界限的影响,并对比了落锥试验和十字板试验确定的剪切强度。结果表明:对于原状淤泥,石灰掺入引起液限明显增大,但随着石灰掺量的增加,固化泥液液限逐渐减小;落锥法测定固化泥液液限总体上高于碟式仪测定的液限值;石灰掺入导致淤泥塑限明显增大,且固化泥塑限随石灰掺量的增加而逐渐增大;传统搓条法测定的塑限值低于落锥法测定的塑限值;石灰固化泥的塑性指数随石灰掺量的增加而减小;对比落锥法和十字板剪切法,两者在淤泥塑限附近的不排水剪切强度较为一致,而液限附近对应的不排水剪切强度相差较大。

关 键 词:海相淤泥;液限;塑限;落锥试验;十字板剪切试验;剪切强度

中图分类号: TU411.2 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1000-1379.2013.03.043

Experimental Study on Atterberg Limits and Undrained Shear Strength for Lime-Solidified Sediments

XIAO Zhao-ran, WANG Hong-xing

(College of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An experimental study on Atterberg limits and undrained shear strengths had been carried out by using fall cone tests and vane shear tests on certain marine sediments. The effect of lime content on Atterberg limits was studied, and the shear strengths determined by fall cone and vane shear tests were compared. The results show that: for raw sediments, liquid limit increases due to lime addition but decreases with an increase in lime content; liquid limits determined by fall cone are generally higher than those determined by Casagrande apparatus; lime addition leads to an increase in plastic limit, and then plastic limit increases with lime content; plastic limits determined by thread rolling method are lower than those determined by fall cone tests; plasticity index of lime-based sediments decreases with an increase in lime content; the undrained shear strengths measured by fall cone tests and vane shear tests are comparable at plastic limits, but they are greatly different at liquid limits.

Key words: marine sediment; liquid limit; plastic limit; fall cone test; vane shear test; shear strength

航道疏浚、港口清淤等工程建设中将不可避免地产生大量淤泥,其主要特点是高含水量、高孔隙比和低强度。因此,很难将高流态淤泥直接应用于实际工程,需要利用固化稳定化技术将淤泥转化为土工材料。在固化淤泥应用过程中,必须首先研究其剪切强度、压缩性和膨胀性等工程性质,而这些工程性质与著名的阿太堡界限存在一定联系,许多学者对此进行了深入研究^[1-3]。阿太堡界限又称界限含水量、稠度界限,由瑞典农业学家 Atterberg^[4]提出,经 Terzaghi 等^[5]完善后引入土力学领域。为测定土体液限, Casagrande^[6]于 1932 年设计了 Casagrande 碟式液限仪。为克服碟式仪受人 为因素的干扰,以及碟式仪的质量和刀型对试验结果影响大等缺点, Sherwood 等^[7]提出利用落锥法确定土体液限。之后,基于土体在界限含水量时剪切强度的唯一性, Wroth 等^[2]建议利用落锥法同时测定土体的液限和塑限。目前,确定土体液限、塑限的室内试验主要分为两类:①落锥仪试验,即液、塑限联合测定法测定液限和塑限;②碟式仪或锥式仪测定液限,搓条法确定塑限。作为国家

标准和行业标准^[8-10]规定的试验方法,落锥法因操作简单、受人为因素影响小而广泛应用于美国、日本、加拿大和部分欧洲国家。

国内外许多学者^[11-14]对采用落锥法联合测定液限和塑限进行了比较系统的研究,并得出了许多有益的成果。利用落锥仪测定液、塑限,我国学者是基于圆锥入土深度与对应含水量在双对数坐标系中呈直线关系,利用规范中规定的锥入深度确定相应含水量,从而得出土的阿太堡界限。Feng 等^[11-13]关于锥入深度与含水量之间双对数直线性的研究结论与我国国家标准及行业标准中的相关规定一致。然而,对于某些特殊土,双对数坐标系中圆锥入土深度与对应含水量呈非线性关系,因此无法依据线性关系确定土的液、塑限^[14]。

收稿日期:2012-09-20

作者简介:肖昭然(1958—),男,山东烟台人,教授,主要从事岩土方面的教学及研究工作。

通信作者:王红星(1986—),男,河南西华人,硕士研究生,研究方向为土力学。
E-mail: ytgwhx@126.com

对于界限含水量与不排水剪切强度的关系,许多研究^[2,15-18]侧重于探索土液限所对应的不排水剪切强度值。有关试验结果表明^[2],土在塑限状态时对应的唯一强度值是液限状态时对应强度值的100倍。Skempton等^[15]的试验结果表明,塑限状态对应土的不排水剪切强度约是液限状态对应不排水剪切强度的100倍。该结论不但提供了计算塑限状态对应不排水剪切强度的快捷方法,而且可以确定液、塑限对应锥入深度的比值。Skempton等利用十字板剪切试验得出4种不同塑性指数土的液限对应剪切强度为0.70~1.75 kPa。Skopek等^[18]认为Casagrande液限仪确定某种土液限所对应剪切强度为1~3 kPa。值得注意的是,Wroth等^[2]通过分析不同种类土液限对应的强度值,得出重塑土不排水强度值约为1.7 kPa,这与Youssef等^[17]得到的大量不同液限重塑黏土的剪切强度平均值约为1.7 kPa完全一致。基于室内十字板剪切试验和三轴压缩试验所确定剪切强度相同的假设,土液限对应剪切强度平均值为1.7 kPa被认为是最合适的剪切强度估算值^[2]。

对于石灰固化土液、塑限变化趋势,尽管其塑限变化规律十分一致,但是许多学者^[19-24]认为不同固化土的液限变化规律不尽相同。有些学者^[20,22]认为土的液限随石灰含量的增加而增大,而部分学者^[19,21]认为土的液限随石灰含量的增加而减小。尽管在土的液限变化趋势方面存在争议,但研究者均认为土的塑限随石灰掺量的增加而增大。因此,对于盐分和有机物含量相对较高的海相淤泥,研究其液、塑限随石灰掺量的变化规律是有必要的。

笔者着眼于研究石灰改性淤泥的物理及强度特征,重点通过室内落锥试验及十字板试验分析石灰掺量对淤泥阿太堡界限与不排水剪切强度的影响。对于石灰固化泥,研究旨在揭示其液限、塑限及塑性指数随石灰掺量的变化规律。对比落锥试验和十字板试验两种方法确定的剪切强度,着重研究液限、塑限状态对应的不排水剪切强度。

1 试验材料与试样制备

1.1 疏浚淤泥情况

试验所用淤泥取自某海港,为海相沉积淤泥。该淤泥呈黑色,发臭,含较多盐分和腐殖质,流塑状。X射线衍射结果表明,海相淤泥主要矿物成分为石英、方解石和岩盐,并含伊利石和高岭石等黏土矿物。X衍射荧光分析表明,淤泥中除含硅、氧、钙等主要元素外,还含有氯、钠、铁、镁等。试验用泥的基本物理性质指标见表1。

表1 淤泥基本物理性质指标

容重/ (kN·m ⁻³)	相对体 积质量	小于2 μm黏 粒含量/%	液限/ %	塑限/ %	有机质 含量/%	pH值
13.5	2.6	14.5	51.4	25.6	4.4	7.8

1.2 石灰

试验所用改性材料石灰中CaO含量大于90%,有害成分MgO含量小于2%。在初始时刻及均匀搅拌6h和24h后,固液比为1:5的石灰-淤泥混合料pH值变化曲线见图1。其中,石灰掺量为石灰干重与淤泥干重之比。对于均匀搅拌6h和24h的混合料,当石灰掺量为2%~3%时,混合料pH值趋

于稳定;石灰掺量大于3%时,混合料pH值几乎不变。因此,将淤泥中石灰掺量确定为0.3%、6%、9%,相应淤泥-石灰混合料简称为SD、SD3L、SD6L、SD9L。

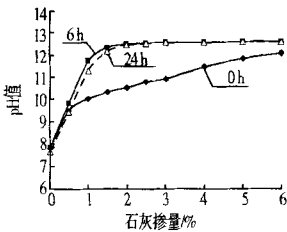


图1 石灰-淤泥的pH值曲线

1.3 试样制备

将长时间均匀搅拌后的典型淤泥试样过400 μm滤筛,剔除尺寸大于400 μm的贝壳、碎屑等杂质,并将筛后试样等分为4份,分别进行原状淤泥和均匀搅拌后石灰固化泥的液、塑限测定。试验过程中除进行落锥试验外,还进行了卡萨格兰德碟式仪液限试验和十字板剪切试验,并且在每个含水量状态重复试验操作3次。

2 液、塑限标准选定的讨论

不同国家所用圆锥及液限确定标准不同,见表2。不同国家落锥仪的最主要差别在于仪器结构、圆锥质量和液限对应锥入深度。分析可知:各个国家所用圆锥规格不尽相同;即使部分国家圆锥规格相同,其液限确定标准也并非完全相同。笔者采用圆锥规格为锥角30°、圆锥质量80 g,同时采用锥入深度17、20 mm两种液限标准。

表2 不同国家所用圆锥规格

国家	锥角/(°)	圆锥质量/g	锥入深度/mm	时间/s
中国	30	76	10、17、20	5
法国	30	80	17	5
英国	30	80	20	5
美国	30	76	10	5
瑞典	60	60	10	5
印度	31	148	25	5
加拿大	60	60	10	5
俄罗斯	30	76	10	5

对于塑限选定标准,许多国家仍保留采用传统搓条法测定土的塑限。关于落锥法,通常采用圆锥入土深度为2 mm时对应的含水量为塑限^[8-11]。Hansbo^[11]经大量试验总结出土的不排水剪切强度 τ 与圆锥锥入深度 d 之间的关系为

$$\tau = KQ/d^2 \tag{1}$$

式中: K 的取值依赖于锥角度数和剪切速率等; Q 为圆锥质量。

对于特定规格的圆锥,式(1)中 K 和 Q 恒定,加之塑限对应不排水剪切强度为液限对应不排水剪切强度100倍的假定,可推导出液限对应锥入深度为塑限对应锥入深度的10倍。因此,若采用17、20 mm液限标准,利用落锥法确定塑限对应锥入深度为1.7、2.0 mm。

3 试验结果及分析

3.1 液限变化规律

对于落锥法17、20 mm液限标准,不同石灰掺量固化泥对

应的液限见表3。无论对于17 mm液限标准还是20 mm液限标准,石灰掺入均导致液限明显增大,但随着石灰掺量的增加,石灰固化泥液限值逐渐减小,这与已有的研究结论一致^[19-21]。其主要原因是,淤泥中掺入石灰后,CaO与水反应生成的Ca(OH)₂发生离子分解,Ca²⁺与黏土表面的N⁺、K⁺等低价阳离子发生阳离子交换反应,进而引起颗粒团聚和聚集,从而减小了黏粒含量和土颗粒比表面积。值得注意的是,17 mm与20 mm两种不同标准确定的液限值相差较大。

表3 液限W_L随石灰掺量变化规律

锥入深度/ mm	液限 W _L /%			
	石灰掺量为0	石灰掺量为3%	石灰掺量为6%	石灰掺量为9%
17	50.8	56.7	56.1	55.3
20	55.4	61.9	61.0	60.1

为了对比不同试验方法测定液限的差异,基于淤泥试样进行了卡萨格兰德碟式仪液限试验。碟式仪法与落锥法测定液限对比见图2。可以看出,锥入深度为17、20 mm,落锥法测定的固化淤泥液限值总体上高于碟式仪法测定的液限值。研究结果与Leflaive等^[25-27]的试验结果吻合。

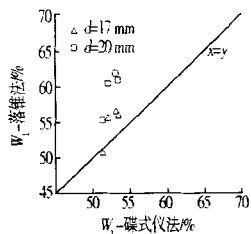


图2 两种方法测定的液限对比

3.2 塑限变化规律

落锥法1.7、2.0 mm锥入深度对应的淤泥塑限见表4。试验结果表明,石灰掺入后,淤泥塑限明显增大,且随着石灰掺量增加固化泥的塑限逐渐增大。这与学者普遍承认的研究结论一致^[19-24]。淤泥塑限增大,主要是石灰掺入导致黏土颗粒含量及黏土颗粒周围吸附水膜变化所致。对于同一种固化泥,1.7、2.0 mm两种塑限标准测定的塑限值相差较小。也就是说,锥入深度在1.7~2.0 mm变化时,并不能引起塑限值的明显变化。

表4 塑限W_p随石灰掺量变化规律

锥入深度/ mm	塑限 W _p /%			
	石灰掺量为0	石灰掺量为3%	石灰掺量为6%	石灰掺量为9%
1.7	27.0	30.0	31.1	32.4
2.0	27.5	30.5	31.6	32.9

为了对比落锥法与传统搓条法的差异,利用搓条法测定淤泥的塑限。两种方法试验结果见图3,可以看出,对于试验用泥,落锥法确定的塑限值要高于传统搓条法确定的塑限值。

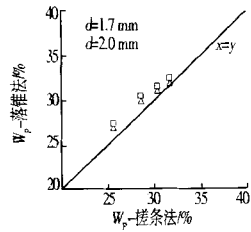


图3 两种方法测定的塑限对比

3.3 塑性指数变化规律

塑性指数为液限与塑限之差,因此可得到淤泥塑性指数随石灰掺量的变化规律。利用落锥法两种锥入深度及联合法(碟式仪法和搓条法配合)3种方法测定塑性指数,结果见表5。石灰掺量从0增至3%,引起基于落锥法的两种标准确定的塑性指数增大,但基于联合法确定的塑性指数减小。之后,当石灰掺量从3%增至9%时,3种方法确定的塑性指数持续减小。对于石灰固化泥,液限减小与塑限增大必然导致塑性指数减小。

表5 不同方法确定的塑性指数对比

锥入深度/ mm	塑性指数/%			
	石灰掺量为0	石灰掺量为3%	石灰掺量为6%	石灰掺量为9%
17、1.7	23.8	26.7	25.0	22.9
20、2.0	27.9	31.4	29.4	27.2
联合法	25.8	24.5	23.0	20.4

3.4 落锥法与十字板法剪切强度对比

十字板试验可直接测定剪切强度,而落锥法通过经验公式间接确定剪切强度。两种方法测定的不排水剪切强度对比见图4。对于基于经验公式的落锥法,1.7、2.0 mm塑限对应的不排水剪切强度为1.6~2.4 kPa,而17、20 mm液限对应剪切强度为74~103 kPa。此时,淤泥液、塑限对应的不排水剪切强度比值为36~55。由此可见,不同试验手段和不同标准得到的液、塑限对应不排水剪切强度比值是不同的。由图4可知,无论落锥法还是十字板法,两者在塑限附近的不排水剪切强度较为一致,而在液限附近的不排水剪切强度相差较大。

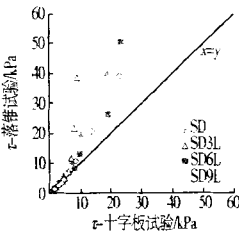


图4 两种方法测定的剪切强度对比

4 结 论

针对某港口海相淤泥试样进行了室内落锥试验和十字板试验等,开展了确定液、塑限及不排水剪切强度的研究。结合试验结果分析了石灰掺入对阿太堡界限的影响,并研究了剪切强度、含水量及锥入深度之间的关系。得出以下几点结论:①对于原状淤泥,石灰掺入引起液限明显增大,但随着石灰掺量的增加,固化泥液限值逐渐减小;落锥法测定固化泥液限值总体上高于碟式仪测定的液限值。②石灰掺入导致淤泥塑限明显增大,且固化泥塑限随石灰掺量的增加而逐渐增大;传统搓条法测定的塑限值低于落锥法测定的塑限值;石灰固化泥的塑性指数随石灰掺量的增加而减小。③对比落锥法和十字板剪切法,两者在淤泥塑限附近的不排水剪切强度较为一致,而液限附近对应的不排水剪切强度相差较大。以上结论是根据某海港疏浚淤泥的室内试验结果初步得到的,还需要进一步试验研究。

参考文献:

[1] Hansbo S. A New Approach to the Determination of the Shear Strength of Clay

- by the Fall - cone Test[G]//Stockholm: Royal Swedish Geotechnical Institute, 1957:14.
- [2] Wroth C P, Wood D M. The Correlation of Index Properties with Some Basic Engineering Properties of Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(2): 137 - 145.
- [3] Yilmaz I. Indirect Estimation of the Swelling Percent and a New Classification of Soils Depending on Liquid Limit and Cation Exchange Capacity[J]. Engineering Geology, 2006, 85(2): 295 - 301.
- [4] Atterberg A. Lorornas Forhallande Till Vatten, Deras Plasticitets - granser och Plastitesgrader[J]. Kungliga Lantbruksakademiens Handlingar och Tidskrift, 1911, 50(2): 132 - 158.
- [5] Terzaghi K, Peck R B. Soil Mechanics in Engineering Practice[M]. New York: Wiley - Interscience, 1948.
- [6] Casagrande A. Research on the Atterberg Limits of Soils[J]. Public Roads, 1932(13): 121 - 136.
- [7] Sherwood P T, Ryley M D. An Investigation of a Cone - penetrometer Method for the Determination of the Liquid Limit[J]. Géotechnique, 1970, 20(2): 203 - 208.
- [8] 南京水利科学研究院. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [9] 交通部公路科学研究所. JTJ051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [10] 南京水利科学研究院. SL237—1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [11] Feng T W. Fall - cone Penetration and Water Content Relationship of Clays[J]. Géotechnique, 2000, 50(2): 181 - 187.
- [12] Feng T W. A Linear Logd - logw Model for the Determination of Consistency Limits of Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1335 - 1342.
- [13] Kodikara J, Seneviratne H N, Wijayakulasooriya C V. Discussion of “Using a Small Ring and a Fall - cone to Determine the Plastic Limit” by Tao - wei Feng[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(2): 276 - 278.
- [14] 郭莹, 王琦. 落锥法确定粉土液限和塑限的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2569 - 2574.
- [15] Skempton A W, Northey R D. The Sensitivity of Clays[J]. Géotechnique, 1953, 3(1): 30 - 53.
- [16] Norman L E J. A Comparison of Values of Liquid Limit Determined with Apparatus Having Bases of Different Hardness[J]. Géotechnique, 1958, 8(2): 79 - 83.
- [17] Youssef M S, Ramli A H, El Demery M. Relationships Between Shear Strength, Consolidation, Liquid Limit, and Plastic Limit for Remolded Clays[G]//Montreal: Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1965: 126 - 129.
- [18] Skopek J, Ter - stepanian G. Comparison of Liquid Limit Values Determined According to Casagrande and Vasilev[J]. Géotechnique, 1975, 25(1): 135 - 136.
- [19] Balogun L A. Influence of Geological Origin on the Geotechnical Properties of Lime - stabilized Laterals[G]//Harare: In 8th Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1984: 355 - 362.
- [20] Attoh - okine B. Stabilising Effect of Locally Produced Lime on Selected Lateritic Soils[J]. Construction and Building Materials, 1990, 4(2): 86 - 91.
- [21] Osula D O A. Lime Modification of Problem Laterite[J]. Engineering Geology, 1991, 30(3): 141 - 154.
- [22] Ola S A. The Potentials of Lime Stabilization of Lateritic Soils[J]. Engineering Geology, 1997(11): 305 - 317.
- [23] Al - rawas A A, Hago A W, Al - sarmi H. Effect of Lime, Cement and Sarooj (Artificial Pozzolan) on the Swelling Potential of an Expansive Soil from Oman[J]. Building and Environment, 2005, 40(6): 681 - 687.
- [24] Manasseh J, Olufemi A I. Effect of Lime on some Geotechnical Properties of Igumale Shale[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 13(6): 1 - 12.
- [25] Leflaive E. Les Limites d' Atterberg Et Le PEnEtromEtre a Cone[J]. Bulletin De Liaison Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées, 1972, 50(6): 123 - 131.
- [26] Leroueil S, Le Bihan J P. Liquid Limits and Fall Cones[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(5): 793 - 798.
- [27] Prakash K, Sridharan A. A Critical Appraisal of the Cone Penetration Method of Determining Soil Plasticity[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(8): 884 - 888.

【责任编辑 吕艳梅】

(上接第 126 页)

- [21] 王秀彦, 王智, 焦敬品, 等. 超声导波在管中传播的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 11 - 15.
- [22] 何存富, 李隆涛, 吴斌. 超声导波在管道中传播的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(2): 129 - 133.
- [23] 刘增华, 吴斌, 何存富, 等. 超声导波扭转模态在粘弹性包覆层管道中传播特性研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(3): 291 - 299.
- [24] Rose J L, Zhao X. Flexural Mode Tuning for Pipe Elbow Testing[J]. Material, 2001, 59(5): 621 - 624.
- [25] 他得安, 王威琪, 余建国, 等. 弯曲模式 $F(1,3)$ 在管材中的位移分布[J]. 声学技术, 2003, 22(2): 282 - 284.
- [26] 郑圣强. 长输管道应力波特性研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2009.
- [27] 他得安, 刘镇清. 超声导波在管材中的传播特性[J]. 声学技术, 2000, 20(3): 131 - 134.
- [28] 顾军. 超声导波在管中的频散特性及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [29] 宋振华, 王志华, 黄世清, 等. 基于纵向超声导波信号特性的管道损伤检测研究[J]. 机械强度, 2011, 33(1): 55 - 61.
- [30] 刘增华, 何存富, 杨士明, 等. 充水管道中纵向超声导波传播特性的理论分析与试验研究[J]. 机械工程学报, 2006, 42(3): 171 - 178.
- [31] 刘增华, 吴斌, 何存富, 等. 充水管道导波检测中纵向模式选取的实验研究[C]//中国力学学会学术大会论文摘要集. 北京: 中国力学学会, 2005: 1510.
- [32] 初文杰. 管道震击破坏检测与定位[D]. 济南: 济南大学, 2008.
- [33] 李隆涛, 何存富, 吴斌. 管道长距离超声导波模态频散现象的抑制方法研究[J]. 数据采集与处理, 2004, 19(3): 297 - 301.
- [34] 宋振华, 王志华, 马宏伟. 基于小波分析的超声导波管道裂纹检测方法研究[J]. 固体力学学报, 2009, 30(4): 368 - 375.
- [35] 张伟伟, 王志华, 马宏伟. 含缺陷管道超声导波检测信号的相关性分析[J]. 暨南大学学报: 自然科学版, 2009, 30(3): 269 - 272.
- [36] 陈建云, 马宏伟. 小波去噪方法在管道应力波检测中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2006(1): 60 - 63.

【责任编辑 张智民】