

掺砂高液限土加州承载比影响因素试验

卢自立¹,曹亮宏¹,程涛^{2,3}

(1. 广东省长大公路工程有限公司,广东 广州 510620;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
3. 河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要:为确定云罗高速公路沿线的高液限土改良方案,通过不同掺砂比例的颗粒分析试验、相对密度试验、液塑限试验、击实试验和室内加州承载比(CBR)试验,对掺砂前后高液限土的颗粒级配分布,掺砂高液限粉土和高液限黏土的承载比影响因素,如掺砂量、浸水时间对 CBR 值的影响规律等进行了试验研究。结果表明:粗颗粒质量分数越高,摩擦力越大,黏聚力越小,水敏感性越差;影响土体 CBR 值的主要因素是粗颗粒质量分数,其次为浸水时间。

关键词:高液限土;掺砂改良;加州承载比;掺砂量;浸水时间

中图分类号:TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)05-0065-04

Influence factors of California bearing ratio test for high liquid limit soil mixed with sand//LU Zili¹, CAO Lianghong¹, CHENG Tao^{2,3} (1. Guangdong Provincial Changda Highway Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to determine the improvement scheme of high liquid limit soil along the Yunluo expressway, the particle size distributions of the high liquid limit soil with or without sand were analyzed based on the grain size analysis tests, relative density tests, liquid and plastic limits tests, compaction and indoor California bearing ratio(CBR) tests for different sand proportions. The impact factors with obvious regional features for the bearing ratios of high liquid limit silt mixed with sand and high liquid limit clay were investigated. The influences of sand content and immersion time on the CBR values were summarized and some useful conclusions were drawn in the study. With a greater mass fraction of coarse particles, the friction force and the cohesion force were found to be increased and decreased respectively, and the water sensitivity became poor. The mass fraction of coarse particles is the main impact factor on CBR values, and the immersion time is the secondary.

Key words: high liquid limit soil; soil improvement with sand; California bearing ratio; sand content; immersion time

广东地区已建、在建、拟建的高速公路在路基工程中或多或少地遇到了高液限土的处理问题。这些高液限土除具有弱膨胀性、裂隙性和崩解性等共性外,还由于工程性质的特殊性,导致其作为高速公路路堤填料具有透水性差,不易压实,干时坚硬不易挖掘,毛细现象显著,承载力较小,稳定性差等工程特性。JTGF 10—2006《公路路基施工技术规范》^[1]规定液限大于 50%、塑性指数大于 26、含水率不满足直接压实要求的细粒土不得直接作为路堤填料。

云罗(云浮—罗定)高速公路地处广东省西部山地丘陵地区,沿线分布着大量的高液限土,若不加改良直接用于路基填筑,将会诱发诸多质量隐患和病害,如沉降不均匀、开裂、局部滑塌、水稳定性差、

压实困难等问题^[2];若将其全部作为弃方处理显然不经济,而且对环境影响较大。在对各种改良方案进行技术经济比较后,将掺砂改良方案作为首先方案,该方案经济性较好,技术上可行,对环境影响较小^[3]。在方案实施前,有必要对衡量路用性能的指标加州承载比(CBR)的影响因素进行深入分析,找出影响规律,以确定最佳的掺砂量和具体的施工工艺。

评价高液限土改良效果的指标有液限、塑限、细颗粒质量分数、CBR、压缩系数等^[4],其中 CBR 是能否用作路基填料的重要评判指标之一。CBR 试验是 1928 年美国加州公路局在进行沥青路面破坏调查时为比较材料强度而提出^[5],其指标现已用于评定路基土和路面材料的强度。影响高液限土 CBR 的

因素有掺砂量、含水率等,因此本文依托在建的广东省云罗高速公路工程,通过试验得出不同掺砂量高液限土在不同浸水时间的 CBR 值,并分析其影响因素。

1 试验材料

1.1 试验土样

根据云罗高速公路沿线土的工程地质特性,选取多组土样进行室内液塑限试验,根据细颗粒质量分数及塑性指数是否大于 0.73(w_l-20)将土样分类(w_l 为液限),取其中有代表性的高液限粉土和高液限黏土各 1 组。

在掺砂比例分别为 0%、15%、20%、25% 时,进行了一系列的颗粒分析试验、相对密度试验、液塑限试验、击实试验和室内 CBR 试验。各土样物理性质试验结果见表 1。从试验结果看,高液限土具有细颗粒质量分数高、天然含水量大、液限较大的特点。掺砂改良后,其粗粒质量分数增大,含水率减小,液限降低,最优含水量减小,最大干密度增大。

1.2 试验用砂

广东地区水系较发达,根据施工现场就近取材原则,本试验所用砂均采自珠江流域。优质的改良材料是保证改良试验成功的重要因素之一。图 1 为试验用砂颗粒分布曲线^[6],试验数据为 3 组平行颗粒分析试验的平均值。从试验结果来看,珠江流域河砂属于中粗砂,级配合理,不均匀系数 $C_u=7.8>5$, $C_c=2.1$,在 1~3 之间,结果表明,试验用砂的级配良好。

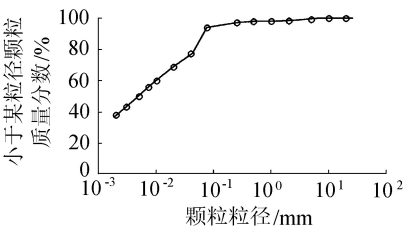


图 1 试验用砂颗粒分布曲线

2 试验原理及内容

2.1 颗粒级配对 CBR 值的影响试验

CBR 值反映了土体局部抵抗剪切破坏的能力,

而土体的抗剪强度主要由黏聚力和摩擦力组成。对于细颗粒质量分数较高的高液限土,抗剪强度主要由黏聚力承担;而掺砂改良后土体粗颗粒含量增大,抗剪强度逐渐转变为由黏聚力和摩擦力共同承担。因此,掺砂量对高液限土的 CBR 值影响较大。黏土与粉土质量比较大的高液限黏土的抗剪强度主要由黏聚力组成,其 CBR 值一般较小;对于粗颗粒质量分数较低的高液限粉土,由于比表面积减小,造成黏聚力下降。同时由于粉土颗粒质量分数的增加,粉土颗粒周围结合水膜厚度减小,摩擦力增大。因此高液限粉土的抗剪强度以黏聚力为主,摩擦力为辅,其 CBR 值较高液限黏土有所增强;掺砂改良后,其颗粒级配得到明显改良,因胶结作用形成的黏性团粒数量较少,不足以包裹粗颗粒,土体的摩擦力进一步增大,故掺砂后的高液限土的抗剪强度主要以摩擦力为主、黏聚力为辅。因此高液限土的 CBR 值受土体颗粒级配影响:粗颗粒质量分数越高,摩擦力越大,黏聚力越小;粗颗粒质量分数越低,摩擦力越小,黏聚力越大。

本试验将高液限黏土、高液限粉土分别掺 0%、15%、20%、25% 砂,经配料、养护 24 h,击实、浸水 4 d 后测定土体的 CBR 值^[7]。

2.2 浸水天数对 CBR 值的影响试验

土体的黏聚力受颗粒间的水膜联结和胶结作用所控制。随着含水量的增加,颗粒间结合水膜逐渐变厚,距离逐渐增大,固水膜联结作用逐渐减小,直到土体饱和水膜联结作用完全丧失;同时颗粒间的胶结物因含水量的增加逐渐溶解,胶结作用逐渐减弱,因此黏聚力随含水量的增加而逐渐减小;土体的摩擦力通过起润滑作用的水膜间摩擦力承担,含水量越高,结合水膜厚度越大,颗粒间摩擦力越小。因此含水率对高液限土 CBR 值的影响较大^[8]。广东地区雨水较多,地下水位较高,土体中的含水率在地表水的渗透和地下水的毛细管作用下变化幅度较大,填筑后的高液限土随含水率的增加,结合水膜厚度增厚,土体之间的摩擦力和黏聚力均逐渐变小。

试验将烘干后的高液限土按不同掺砂量制样,加

表 1 不同掺砂量下的高液限土物理性质试验结果

土样	掺砂比例/%	粗粒质量分数/%	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	相对密度	最优含水率/%	最大干密度/(g·m ⁻³)
高液限黏土	0	5.6	26.4	63.1	28.3	34.8	2.793	18.3	1.698
	15	17.6	24.8	52.3	30.1	22.2	2.737	16.8	1.755
	20	21.0	23.2	48.2	30.8	17.4	2.823	16.0	1.803
	25	34.0	21.4	47.0	31.1	15.9	2.726	15.6	1.833
高液限粉土	0	13.7	27.1	53.0	25.4	27.6	2.738	17.6	1.758
	15	24.7	25.1	42.8	27.1	15.7	2.819	16.1	1.829
	20	33.7	23.5	42.3	27.8	14.5	2.754	15.1	1.847
	25	30.6	20.9	41.8	28.1	13.7	2.713	14.6	1.862

入不同质量的水,水量按不同掺砂量所对应的最优含水率计算得到,拌和均匀并闷料 24 h 后击实,分别在浸水 0 d、1 d、2 d、3 d、4 d、5 d 后测得它们的 CBR 值。

3 试验结果及分析

3.1 掺砂量对 CBR 值的影响

图 2 和图 3 分别为不同掺砂量下高液限黏土和高液限粉土的颗粒级配曲线, CBR 值随掺砂量的变化见图 4。从图 2~4 可以看出, 掺砂改良后, 粗颗粒质量分数明显增大。掺砂 20% 后, 高液限黏土的细颗粒(粒径小于 0.074 mm 的颗粒) 质量分数由 94.4% 降低到 79.0%, 高液限粉土细颗粒质量分数由 86.3% 降低到 72.3%; 而高液限黏土的 CBR 值由 3.1% 增大到 3.8%, 高液限粉土的 CBR 值由 3.2% 增大到 5.7%。由此可知, 高液限土的 CBR 值随掺砂量的增加而逐渐增大。

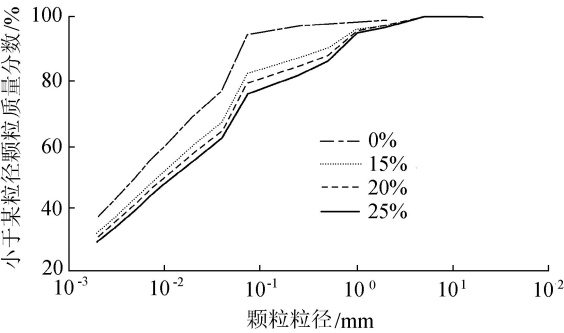


图 2 不同掺砂比例高液限黏土颗粒级配曲线

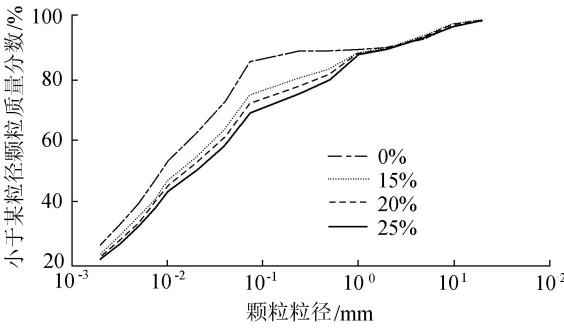


图 3 不同掺砂比例高液限粉土颗粒级配曲线

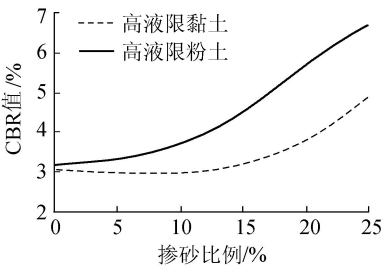


图 4 CBR 值随掺砂量的变化

由试验结果分析可知: 掺砂 25% 的高液限黏土和掺砂 15% 的高液限粉土的粗颗粒(粒径大于 0.074 mm 的颗粒) 质量分数相差不大, 分别为

24.1% 和 24.7%, 而两者的 CBR 值相差较大, 分别为 4.9% 和 4.5%。分析原因为: 掺砂 15% 的高液限粉土中的粉粒质量分数较大, 细颗粒通过胶结作用联结成团粒结构, 包裹在粉颗粒周围, 其润滑作用得到发挥, 而黏粒本身的胶结作用又不足以使粗颗粒胶结在一起, 故掺砂使摩擦力增大较小; 同时, 因粗颗粒质量分数增加, 颗粒间距离增大, 胶结力逐渐减小, 造成黏聚力减小^[9]。掺砂 15% 的高液限黏土和不掺砂的高液限粉土的粗颗粒质量分数分别为 17.6% 和 14.7%, 相差较大, 但两者的 CBR 值均为 3.2%。基于以上原理不能合理解释 CBR 值相等的原因。由于影响 CBR 值的因素较多, 在其他条件相同的情况下, 可能与浸水天数等试验条件有关。

3.2 浸水天数对 CBR 值的影响

图 5 和图 6 分别为不同掺砂比例的高液限粉土和高液限黏土在不同浸水天数后的 CBR 值。表 2 为高液限土在未浸水时的 CBR 值。由表 2、图 5 和图 6 可以看出, ①高液限粉土在未浸水时 CBR 值很大, 随着掺砂量的增加, CBR 值增加幅度较大。当掺砂量为 25% 时, 相对于未掺砂时的 CBR 值增加了 222%。②浸水后 CBR 值减小幅度较大, 一般为未浸水时 CBR 值的 10% 左右。③随着浸水天数的增加, CBR 值先逐渐减小, 而后小量增加。当掺砂量

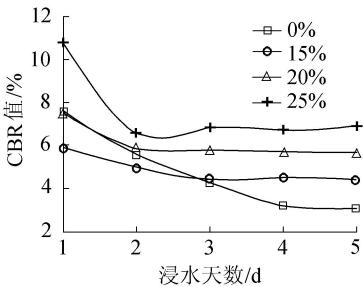


图 5 不同掺砂比例的高液限粉土在不同浸水天数后的 CBR 值

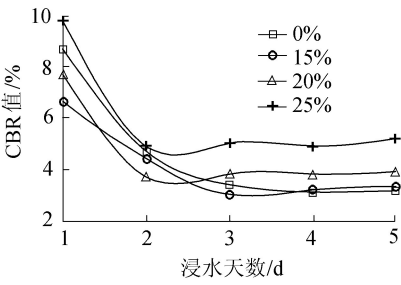


图 6 不同掺砂比例的高液限黏土在不同浸水天数后的 CBR 值

表 2 高液限土在未浸水时的 CBR 值

土 样	不同掺砂比例的 CBR 值/%			
	0%	15%	20%	25%
高液限黏土	50.2	91.7	114.8	155.2
高液限粉土	44.6	82.9	103.2	143.7

为0%时,CBR 值一般在浸水4 d后趋于稳定;当掺砂量为15%时,CBR 值一般在浸水3 d后趋于稳定;当掺砂量为20%、25%时,CBR 值一般在浸水2 d后就趋于稳定。④浸水1 d和2 d时,虽然掺砂15%的高液限土粗颗粒质量分数明显高于未掺砂的高液限土,但未掺砂高液限土 CBR 值高于掺砂15%的高液限土。在浸水第3天,两值趋于相等,第4天后,掺砂15%的 CBR 值明显大于未掺砂改良时的 CBR 值。

分析原因:当高液限土未浸水时,颗粒之间土的抗剪强度主要由黏聚力和摩擦力共同承担,此时土体含水量较小,土颗粒周围的吸着水膜较薄,颗粒之间的距离较小,水膜的水胶联结作用较强,而在较小的含水量下,有机物质的胶结作用使得细颗粒胶结在一起,因此土体的黏聚力较大^[10],从而 CBR 值较大。随着掺砂量的增加,土体粗颗粒质量分数逐渐增加,比表面积减小,颗粒之间距离增大,颗粒之间的水胶结作用减小,黏聚力减小。但由于粗颗粒质量分数的增加,造成摩擦力增加的幅度大于黏聚力减小的幅度,因此土体抗剪强度的增加幅度明显。

浸水后,由于土体含水量显著增加,土体间的胶结水膜厚度增厚,颗粒之间距离增大,颗粒间的联结力减小;同时,由于含水量增大,土中有机物进一步溶解,胶结作用减小,从而造成土体黏聚力减小;而因水膜厚度增加,颗粒之间的摩擦力减小,从而造成 CBR 值减小幅度较大。由于高液限土细颗粒质量分数较小,颗粒间的空隙较小,随着浸水天数的增加,水逐渐进入颗粒之间。而掺砂量增加造成细颗粒质量分数减小,颗粒之间的空隙增大,较未掺砂改良时水体浸入掺砂改良后土体的速度明显增大,因此,在浸水天数较小时,CBR 值的减小幅度随掺砂量的增大而增大。虽然未掺砂的高液限土粗颗粒质量分数较少,但在浸水1d时因含水量增加,黏聚力减小造成的 CBR 值减小值还是小于因掺砂量的小幅增加而造成的 CBR 值增大值,故未改良的高液限土 CBR 值还是高于掺砂15%时的 CBR 值;CBR 值稳定所需要的时间随着掺砂量的增加逐渐减小。一般在浸水一定天数后,土体的空隙之间已经完全充满水,此时土中的 CBR 值最小,随着浸水天数的增加,土体 CBR 值略有提高,分析认为土体击实时结构遭到破坏,击实后扰动停止,土的结构逐步恢复,强度也有所恢复。

4 结 论

a. 粗颗粒质量分数越高,摩擦力越大,黏聚力越小,水敏感性越差;细颗粒质量分数越高,黏聚力越大,摩擦力越小,水敏感性越强。

b. 随着浸水天数的增加,CBR 值先逐渐减小,

然后趋于稳定,最后小量增加。CBR 值趋于稳定所需的天数随着掺砂量的增加而逐渐减小。

c. 在试验条件相同的情况下,影响土体 CBR 值的主要因素是粗颗粒质量分数,其次为浸水天数。

参考文献:

[1] JTGF 10—2006 公路路基施工技术规范[S].

[2] 满玉,西丙辰.高液限土在路堤填筑中的改良应用[J].黑龙江交通科技,2008,2(1):18-19. (MAN Yu, XI Bingchen. The improvement application of high liquid soil in embankment construction [J]. Communications Science and Technology in Heilongjiang, 2008, 2(1): 18-19. (in Chinese))

[3] 朱冬梅,邓百洪,洪宝宁,等.广东云浮高液限土路堤填料改良方案试验研究[J].公路交通技术,2010,4(2):5-10. (ZHU Dongmei, DENG Baihong, HONG Baoning, et al. Test and study on filling improvement programs for Guangdong Yunfu high liquid limit soil embankment [J]. Technology of Highway and Transport, 2010, 4(2): 5-10. (in Chinese))

[4] 吴立坚,钟发林,吴昌兴,等.高液限土的路用特性研究[J].岩土工程学报,2003,25(2):193-195. (WU Lijian, ZHONG Falin, WU Changxing, et al. Study on road made by high liquid limit soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 193-195. (in Chinese))

[5] 朱志铎,郝建新,黄立平. CBR 试验影响因素及在工程中应注意的几个问题[J].岩土力学,2006,27(9):1593-1596. (ZHU Zhize, HAO Jianxin, HUANG Liping. Influential factors in CBR test and several problems to be noticed in engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1593-1596. (in Chinese))

[6] 席文勇.改性高液限黏土填筑高速公路路基的试验研究[D].南京:河海大学,2007.

[7] GB/T 10123—1999 土工试验方法标准[S].

[8] 杨广庆,高民欢,张新宇.高速公路路基填料承载比影响因素研究[J].岩土工程学报,2006,28(1):97-100. (YANG Guangqing, GAO Minhuan, ZHANG Xinyu. Study on influence factors of California bearing ratio (CBR) of expressway subgrade materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 97-100. (in Chinese))

[9] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:水利电力出版社,1996.

[10] 程涛,洪宝宁,刘顺青,等.高液限土最佳掺水泥比的确 定[J].四川大学学报:工程科学版,2012,44(2):64-70. (CHENG Tao, HONG Baoning, LIU Shunqing, et al. Determine the best ratio of cement for improving high liquid limit soil [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(2): 64-70. (in Chinese))

(收稿日期:2012-09-29 编辑:骆超)