

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.011

云罗高速公路沿线高液限土承载比影响因素分析

程涛^{1,2},洪宝宁^{1,2},程江涛³

(1. 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;
2. 河海大学岩土工程研究所,江苏 南京 210098; 3. 安徽省质量技术监督局,安徽 合肥 230051)

摘要:以云罗高速公路工程中的高液限土改良方案为背景,通过试验研究颗粒级配和矿物成分对具有明显地区特征的掺砂高液限粉土和高液限黏土承载比的影响。结果表明:亲水性矿物成分是影响高液限土水敏性、膨胀率、加州承载比 C_{CBR} 的主要原因之一;细颗粒含量越高,水敏性越强, C_{CBR} 越小;影响土体 C_{CBR} 的主要因素是亲水性矿物含量,其次为黏粒组颗粒曲线分布情况及黏粉比;黏粉比越小, C_{CBR} 越大。

关键词:高液限土;掺砂改良;承载比;颗粒级配;矿物成分;土样室内试验;云罗高速公路沿线

中图分类号:TU431 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2013)05-0434-05

Analysis of factors influencing California bearing ratio of high-liquid limit soil along Yunluo Expressway

CHENG Tao^{1, 2}, HONG Baoning^{1, 2}, CHENG Jiangtao³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Anhui Bureau of Quality and Technical Supervision, Hefei 230051, China)

Abstract: Based on an improving scheme for the high-limit liquid soil along the Yunluo Expressway, the influence of particle gradation and mineral composition on the C_{CBR} of high-liquid limit clay and soil mixed with sand with obvious regional characteristics was studied through experiments. The results show that the water sensitivity, inflation rate, and C_{CBR} of high-liquid limit soil were mainly affected by hydrophilic minerals; the C_{CBR} value decreased and the water sensitivity became stronger with the increase of the fine particle content; the main influencing factor of C_{CBR} was the content of hydrophilic minerals, followed by the distribution of clay particles and the clay-silt ratio; and the C_{CBR} value increased with the decrease of the clay-silt ratio.

Key words: high-liquid limit soil; mixing sand improvement; California bearing ratio; particle gradation; mineral composition; indoor test of soil sample; Yunluo Expressway

云罗高速公路(云浮至罗定)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,这些高液限土除具有弱膨胀性、裂隙性和崩解性等共性外,还有着明显的地区特点,反映在工程特性方面为:透水性差、不易压实、干时坚硬不易挖掘,毛细现象显著,浸水后能较长时间保持水分,承载力小,稳定性差^[1]。若不加以改良就直接用于路基填筑,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^[2];将其全部作为弃方处理显然不经济,而且对环境影响较大,不符合基本国策。在对各种改良方案进行技术经济比较后认为掺砂改良方案系首先方案,它经济性较好、技术性可行、对环境影响较小^[3]。在方案实施前,有必要对衡量路用性能评价指标(加州承载比) C_{CBR} 的影响因素进行深入分析,找出影响规

律,以便确定最佳掺砂量和具体的施工工艺。

1 试 验 材 料

1.1 土体

选取云罗高速公路沿线多组土样进行室内液塑限试验,根据塑性指数和细颗粒含量进行土样分类^[4]。取其中代表性的高液限粉土和高液限黏土各一处。本文将高液限黏土和高液限粉土分别表示为 G1, G2;掺砂量(质量分数,下同)15%,20%,25%,30% 分别表示为 P1,P2,P3,P4。G1P2 即表示高液限黏土掺砂 20%。

1.1.1 土体的矿物成分

无机矿物是土中的主要成分,按照成因和性质不同可将土中的无机矿物分成原生矿物、次生矿物、水溶盐、有机质等。土中的原生矿物主要有石英、长石、云母等。这些矿物的化学成分较稳定,具有较强的抗水性和抗分化能力,亲水性弱或较弱。次生矿物主要有黏土矿物、含水氧化物、次生二氧化硅。黏土矿物是次生矿物中数量最多的矿物,主要由各种硅酸盐类矿物分解形成的含水铝硅酸盐组成,一般粒径小于 5 μm,比表面积较大,是构成土中黏粒的主要矿物成分^[5]。它在土中的相对含量即使不大,对土的工程性质却有较大影响。黏土矿物的主要类型有高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石等。

X 射线衍射分析法是研究结晶构造和鉴定黏土矿物最常用的一种方法。本试验即通过此种方法分析土体的各黏土矿物成分含量。

通过试验发现,广东省云浮地区高液限土矿物成分主要有高岭石、石英、长石、蛭石、伊利石、针铁矿、蒙脱石。其中高岭石含量最高,其他均有少量分布。且 G2 的高岭石含量大于 G1 的高岭石含量,而 G1 的蛭石含量明显高于 G2 的蛭石含量(表 1)。

表 1 高液限土矿物成分(质量分数)
Table 1 Mass fraction of mineral composition of high-liquid limit soil %

土类	石英	长石	蛭石	伊利石	高岭石	针铁矿	蒙脱石
G1	8	8	18	3	55	10	0
G2	11	6	3	0	61	11	6

1.1.2 土体的物理性质

在掺砂 0%,15%,20%,25% 时,分别进行了一系列的颗粒分析试验、相对密度试验、液塑限试验、击实和室内加州承载比试验^[6]。各土样性能参数试验结果见表 2。

表 2 不同掺砂量下的高液限土性能参数试验结果

Table 2 Test results of high-liquid limit soil mixed with different contents of sand

土类	掺砂量/ %	粗粒质量 分数/%	粉粒质量 分数/%	黏粒质量 分数/%	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	相对密度 G_s	最优 含水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
G1	0	5.6	44.4	50.0	63.1	28.3	34.8	2.793	18.3	1.698
	15	17.6	38.8	43.6	52.3	30.1	22.2	2.737	16.8	1.755
	20	21.0	37.2	41.8	48.2	30.8	17.4	2.823	16.0	1.803
	25	34.0	35.8	40.2	47.0	31.1	15.9	2.726	15.6	1.833
G2	0	13.7	47.1	39.2	53.0	25.4	27.6	2.738	17.6	1.758
	15	24.7	41.1	34.2	42.8	27.1	15.7	2.819	16.1	1.829
	20	33.7	33.5	32.8	42.3	27.8	14.5	2.754	15.1	1.847
	25	30.6	37.9	31.5	41.8	28.1	13.7	2.713	14.6	1.862

从试验结果看,高液限土具有细颗粒含量高、液限大、 C_{CBR} 小的特点。掺砂改良后,其粗粒含量增加、液限降低、最优含水率减小、最大干密度增加。

1.2 砂

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 为试验用砂颗粒分析试验曲线^[7]。从试验结果来看,珠江流域河沙级配良好,不均匀系数 $C_u=7.8$, $C_c=2.1$ 。

2 试验原理及方法

加州承载比试验是 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的强度而提出的,该

指标现已用于评定路基土和路面材料的强度^[8]。影响高液限土 C_{CBR} 的因素有矿物成分、颗粒级配等。本文依托在建的广东省云罗高速公路工程,通过试验研究高液限土在不同掺砂比例时的 C_{CBR} ,分析土粒的矿物成分及其含量和颗粒级配对高液限土 C_{CBR} 的影响。

2.1 颗粒级配对 C_{CBR} 影响分析

C_{CBR} 的大小可反映土体局部抗剪切破坏的能力,而土体的抗剪强度主要由黏聚力和摩擦力组成^[9]。对于粗颗粒含量很少的高液限黏土,土中含水时黏粒间产生不同厚度的结合水膜,其厚度取决于土体的含水量和黏聚力,当土体发生剪切位移时摩擦力主要由通过起润滑作用的水膜间的相互摩擦提供。水膜越厚,摩擦力越小。因此黏粉比较大的高液限黏土的抗剪强度主要由黏聚力组成,其 C_{CBR} 值一般较小;对于粗颗粒含量较少的高液限粉土,由于比表面积减小而造成黏聚力下降。此外,由于粉粒含量增加,粉粒周围结合水膜厚度减小,摩擦力得到增强。因此,高液限粉土的抗剪强度以黏聚力为主、摩擦力为辅,其 C_{CBR} 比高液限黏土有所增强。掺砂改良后,颗粒级配得到改良,因胶结作用形成的黏性团粒数量较少,不足以包裹粗颗粒,摩擦力进一步增大,所以掺砂高液限土的抗剪强度主要以摩擦力为主、黏聚力为辅。以上分析表明:粗颗粒含量越高,摩擦力越大,黏聚力越小;粗颗粒含量越低,摩擦力越小,黏聚力越大。

本试验将 G1 和 G2 土样分别掺砂 0%、15%、20%、25% 后,经配料、养护 24 h、击实、浸水 4 d,测定土体的 C_{CBR} 值。

2.2 矿物成分对 C_{CBR} 值影响分析

高岭石晶胞之间由较强的氢键连接,性质较稳定,水分子不易进入晶胞而发生膨胀,故水稳定性较好,可塑性低,压缩性低,亲水性差。蒙脱石分子之间是靠范德华力相互连接,连接力较差,水分子容易进入晶胞之间,亲水性较强。因此蒙脱石具有强胀缩性、高塑性、高压缩性、低强度及低渗透性、高液限性等。伊利石由于晶格结构差异和同像置换造成吸水能力高于高岭石而低于蒙脱石,其力学性质介于高岭石和蒙脱石之间。蛭石与蒙脱石具有相似的晶体结构,这两种矿物的晶层之间均为水和阳离子,层间距离相对较大,晶层间易随含水量的变化而发生胀缩;高岭石和伊利石则与之相反,高岭石晶层之间以氢键连接,间距小,强度高。伊利石晶层之间以钾离子键为主,晶层间距较小,强度高。

3 试验结果及分析

3.1 颗粒级配对 C_{CBR} 值影响

从图 2、表 1 可以看出,掺砂改良后,粗颗粒含量明显增大。当掺砂 20% 后,G1 细颗粒含量由 94.4% 降低到 79.0%,G2 细颗粒含量由 86.3% 降低到 72.3%;而 G1 的 C_{CBR} 由 3.1 增加到 3.8,G2 的 C_{CBR} 由 3.2 增加到 5.7。因此,高液限土的 C_{CBR} 随着掺砂量的增加而逐渐增大。

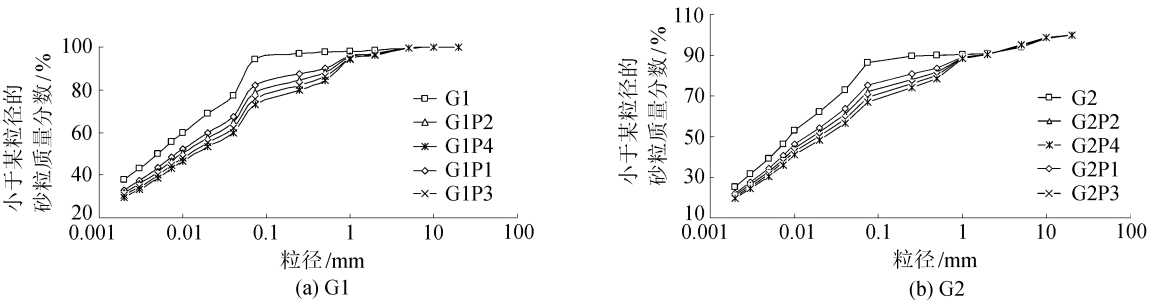


图 2 不同掺砂比例高液限土的颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle gradation curves of high-liquid limit soil with different sand contents

从图 3 可以看出:随着黏粉比的增加,G1 和 G2 的 C_{CBR} 总体呈减小趋势,但变化趋势具有明显差异^[10]。G2 的 C_{CBR} 与黏粉比成线性关系:

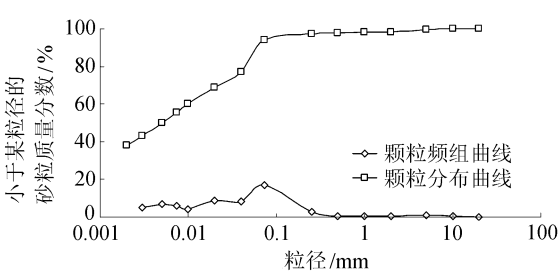


图 1 试验用砂颗粒分析曲线

Fig. 1 Particle analysis curve of sand used in test

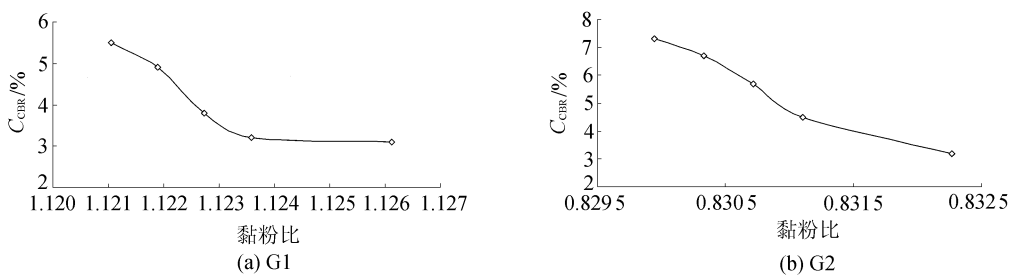


图 3 高液限土 C_{CBR} 随黏粉比的变化关系

Fig. 3 C_{CBR} vs. clay-silt ratio for high-liquid limit soil

$$C_{CBR2.5} = -1.1817x + 1515.4$$

(1)

而 G1 的 C_{CBR} 与黏粉比具有明显的分段性,可表示为

$$C_{CBR2.5} = \begin{cases} 165\,087x^2 - 371\,488x + 208\,988 & x \leq 1.124 \\ C_2 & x > 1.124 \end{cases}$$

(2)

从表 3、图 4 可以看出:随着粗颗粒含量的增加,G1 和 G2 的 C_{CBR} 总体呈增加趋势,但变化趋势具有明显差异。

表 3 黏粉比随掺砂量的变化关系

Table 3 Clay-silt ratio vs. different contents of sand

掺砂比例/%	黏粉比	
	G1	G2
0	1.1262	0.8324
15	1.1245	0.8317
20	1.1234	0.8312
25	1.1226	0.8306
30	1.1218	0.8301

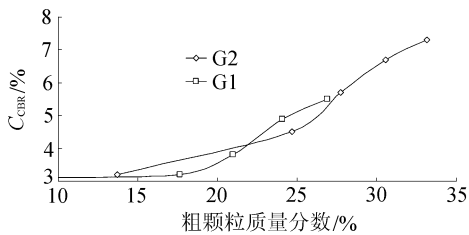


图 4 C_{CBR} 随粗颗粒质量分数的变化关系

Fig. 4 C_{CBR} vs. coarse particle content

G2 的 C_{CBR} 与粗颗粒含量的指数幂成线性关系:

$$C_{CBR2.5} = 1.7e^{0.0435x}$$

(3)

G1 的 C_{CBR} 与粗颗粒含量具有明显的分段性,可表示为

$$C_{CBR2.5} = \begin{cases} C_1 & X \leq 17 \\ 0.2587x - 1.4466 & X > 17 \end{cases}$$

(4)

由试验结果可知:G1 在掺砂 20% 和 25% 时的粗颗粒含量相差较大,分别为 21.0% 和 24.1%,但 2 种土样的黏粉比分别为 1.123 和 1.122,相差不大,而两者的 C_{CBR} 相差较大,分别为 3.8 和 4.9。分析原因为:含量很高的 G1 细颗粒通过胶结作用连结成团粒结构,包裹在粗颗粒周围,其润滑作用得到发挥,黏粒本身的胶结作用又不足以使粗颗粒胶结在一起,其摩擦力增加较少;由于粗颗粒含量的增加,颗粒之间距离增大,黏聚力减小。因此,掺砂 G1 的 C_{CBR} 小于 G2 的 C_{CBR} 。G1 在掺砂 25% 时和 G2 在掺砂 20% 时的粗颗粒含量分别为 26.9% 和 27.7%,相差不大,且 2 种土样的黏粉比分别为 1.121 和 0.831,相差较大,但两者的 C_{CBR} 相差不大,分别为 4.9 和 5.7。以上结果说明在标准的试验方法和相同的试验条件下,影响 C_{CBR} 的主要因素为粗颗粒含量,其次为细颗粒中的黏粉比。

3.2 矿物成分对 C_{CBR} 的影响

从表 1 可以看出,广东省云浮地区高液限土矿物成分主要有高岭石、石英、长石、蛭石、伊利石、针铁矿、蒙脱石。其中高岭石含量最高,其他均有少量分布。由于 G1 含亲水性矿物蛭石和蒙脱石含量较高,与 G2 相比,其吸水能力较强,而脱水速率较慢。因此,土的矿物成分及含量显著影响干湿过程土中含水量、膨胀率、抗剪强度,这也很好地解释了高液限土的力学行为。根据 G1 和 G2 的定义,黏土的塑性指数高、细颗粒含量高、比表面积大、亲水性矿物含量高,因此黏土的水敏性高、水稳定性差,需掺砂改良^[11]。而砂粒以石英为主要矿物成分、不含亲水性矿物。高液限土掺砂改良后,其亲水性矿物比例下降,颗粒级配得到改良,水敏性降低,渗透性增加,膨胀率减小,水稳定性得到改良,抗剪强度显著提高^[12]。

4 结 论

- a. 粗颗粒含量越高,摩擦力越大,黏聚力越小,水敏感性越差;细颗粒含量越高,黏聚力越大,摩擦力越小,水敏感性越强。
- b. 由于土体中含有较多的亲水性矿物蛭石和蒙脱石,因此土体水敏性较强,膨胀率较大, C_{CBR} 较小。掺以石英为主要矿物成分的砂粒后,亲水性矿物比例有所降低。因此,随着掺砂量的增加,土体的水敏感性降低,膨胀率减弱, C_{CBR} 增加。
- c. 在试验条件相同的情况下,影响土体 C_{CBR} 的主要因素是粗颗粒含量,其次为黏粒组颗粒曲线分布情况及黏粉比。
- d. 黏粉比是评价土体 C_{CBR} 的一个重要参考指标,黏粉比越小, C_{CBR} 越大。

参考文献:

[1] ALLAM M M. Effect of wetting and drying in shear strength[J]. Geoteeh Engrg Div, ASCE, 1981, 107(4):681-687.

[2] AL-HOMOUD A S. Cyclic swelling behavior of clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering. 1955, 7:562-565.

[3] 朱冬梅, 邓百洪. 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. 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] JTJ-E 40—2007 公路土工试验规程[S].

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

[6] 李书华. 高液限土填筑及压实控制标准研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.

[7] 刘鑫,洪宝宁. 高液限土工程特性与路堤填筑方案[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):436-443. (LIU Xin, HONG Baoning. Engineering characteristics and construction schemes of high liquid limit soil in embankment filling[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(4):436-443. (In Chinese))

[8] 陈柏年,朱凤艳,韩勤. CBR 试验内在机理研究及影响因素的分析[J]. 标准化工作,2001(1):28-30. (CHEN Bainian, ZHU Fengyuan, HAN Qin. Study on mechanism and influencing factor in CBR test[J]. Communications Standardization, 2001 (1):28-30. (In Chinese))

[9] 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 Zhiduo, 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))

[10] 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))

[11] 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))

[12] 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: Endineering Sciences, 2012,44(2):64-70. (in Chinese))