

高液限花岗岩残积土路用特性试验研究

刘冀¹, 邓超², 胡焕校², 陈威²

(1. 中化地质矿山总局湖南地质勘察院, 湖南长沙 410100; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 取湖南某高速公路路基土样进行室内试验, 研究花岗岩残积类高液限土的路用特性。通过 XRF 荧光光谱、XRD 粉晶衍射和薄片鉴定实验, 分析该类高液限土的成分及结构, 发现细粒片状云母等矿物与细粒状的黏土矿物相互作用是其特殊性质的主因。研究击实功、含水率对高液限花岗岩残积土的击实指标、压实度、CBR 强度的影响规律, 并探究泡水 4 d 后土样状态参数的变化。结果表明: 中、低含水率分别与大、小击实功组合, 该类土更密实, 适合直接填筑; 击实功影响下的 CBR 曲线峰值变化与击实曲线相反; 对比泡水 4 d 前后 CBR 强度变化, 建立该类土 CBR 强度损失率与泡水前含水率的关系, 为高液限花岗岩残积土工程应用提供借鉴。

关键词: 高液限土; 花岗岩残积土; 室内试验; 微观结构; CBR 强度; 路用特性

中图分类号: TV223.1; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0194-08

Experimental study on road characteristics of granite residual soil with high liquid limit

LIU Ji¹, DENG Chao², HU Huanxiao², CHEN Wei²

(1. Hunan Geology Exploration Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Changsha 410100, China;

2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to study road characteristics of high liquid limit soil of granite residual, the subgrade soil samples of an expressway in Hunan Province were taken for laboratory tests. Through XRF, XRD and thin section experiments, the mineral composition and basic structure of the soil samples were analyzed. It is found that the interaction between fine-grained/flaky mica and fine-grained clay contribute mostly to the specific properties of this soil. The effects of compaction energy and water content on the compaction index, compaction degree and CBR strength of the granite residual soil were studied and the change of state parameters of the soil samples which have been submerged in water for four days were analyzed. The results reveal that in order to get denser soil for the direct application to subgrade filling, the medium and low water contents have to be matched with large and small compaction energy respectively. The variation of peak values of CBR curve under different compaction energy is contrary to the compaction curve. Furthermore, the relationship between loss rate of CBR strength and water content before the submersion was established based on the comparison and analysis of the changes of its CBR strength before and after four-day submersion in water. This study can provide some reference for the engineering application of high liquid limit granite residual soil.

Key words: high liquid limit soil; granite residual soil; laboratory test; meso-structure; CBR strength; road characteristics

1 研究背景

高液限土具有强度低、液限高、“超压反弹”、水

稳定性差等特点^[1-2], 故其工程性质差。根据不同的土质划分, 高液限土种类繁多, 其中高液限黏土引起了广泛关注, 因此专家学者们对高液限黏土的工

收稿日期: 2020-10-16; 修回日期: 2020-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078494); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017zzts178)

作者简介: 刘冀(1980-), 男, 湖南宁乡人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环境等方面工作及研究。

通讯作者: 邓超(1989-), 男, 湖北广水人, 博士研究生, 主要从事岩土工程等方面的科研工作。

程应用性能及工程性质改良进行了大量研究,并取得了丰硕的成果^[2-11]。如,洪宝宁等^[2]通过对高液限红黏土的系统试验研究,提出了一种高液限黏土路基填筑双指标控制质量的方法;程涛等^[3]研究了干湿循环次数及掺砂量对高液限黏土力学特性的影响规律;刘顺青等^[4]通过高液限黏土的剪切试验得到相关指标进而采用数值模拟方法研究高液限土边坡稳定性及其各影响因素的敏感性;刘鑫等^[5]、段凯^[6]对高液限黏土工程性质和填筑技术进行了较为系统的研究,并提出了可行的方案;刘江等^[7]研究高液限黏土压实性能,认为通过含水率和击实功的适当控制,高液限黏土可用于拟建道路的下路堤填筑;戴良军等^[8]、莫秋旭等^[9]、李秉宜等^[10]、赵英爱等^[11]分别利用水泥、石灰、砂及其混合物等对高液限黏土进行工程性质改良;璩继立等^[12]利用纤维素纤维和石灰改良了上海黏土的低强度、易变性的不良特性。

但在高液限土的诸多类别中,存在这样一类特殊土:由花岗岩风化、残积形成的高液限土,此类土除了具有高液限土的普遍特性外,还具有弱膨胀性、粗粒含量较高、孔隙大、黏性差及保水性好等性质。该类高液限土在我国南方地区尤其是两广、福建、湖南等省份广泛分布,这对于跨度大、土方量需求大的高速公路建设而言,该类土的路用特性研究具有重要意义。

高液限花岗岩残积土作为一类特殊土,其矿物成分、结构等均与其他高液限土类不同,其中陈晓平等^[13]对含粗粒高液限土进行了试验研究,指出应基于粗粒含量的影响来认识其基本特性;余自立等^[14]通过研究高液限花岗岩残积土及其水泥稳定料的性质、施工工艺和关键参数,加深了对该类土的认识;胡焕校等^[15]从粒径组成、击实功、含水率3个方面考虑,对花岗岩残积土路用性能影响因素进行了系统研究。相较而言对此类高液限土的研究较为缺乏,且上述研究对高液限花岗岩残积土水理特性成因的分析略显不足,因此高液限花岗岩残积土的路用特性研究仍待加强。

本文取湖南中北部高液限花岗岩残积土进行试验研究,首先分析其矿物成分及结构,探讨该类土持水性强、含水率高的水理特性成因,然后通过室内系列试验,研究击实功、含水率对该类土击实性能、强度性能的影响,并分析土强度的水敏性,从而加深对高液限花岗岩残积土的认识,为该类土的工程应用提供参考。

2 高液限花岗岩残积土成分及结构

2.1 工程条件

本文课题来自湖南某在建高速公路项目,高液限花岗岩残积土在该条高速公路沿线大量分布,严重影响该公路建设成本和工期。该类土原岩为准铝质花岗岩,矿物成分包括长石、石英、黑云母、白云母、角闪石等。该区域属亚热带季风性湿润气候,年平均降雨量超过1 500 mm,全年降雨充沛,尤以5-8月为甚;严寒期短,暑热期长,地形地貌为典型的丘陵、山岗,水系发育、林灌茂密,气候环境、地质环境均有利于花岗岩的风化、土化,经过长期冲刷和淋滤,花岗岩风化为残积土,其中高液限土占比较高。在调查高液限土分布的基础上,选取埋深1~2 m的代表性土样进行矿物成分、结构分析和室内试验研究。

2.2 化学成分

X射线荧光光谱分析采用光谱仪和探测器,获取样品中元素含量并对物质成分进行分析,表1为土样元素含量分析结果。

表1 土样化学成分

化学成分	氧化物含量/%	单元素含量/%
SiO ₂	55.02	25.68
Al ₂ O ₃	27.02	14.30
Fe ₂ O ₃	5.64	3.95
MgO	0.21	0.13
CaO	0.32	0.23
Na ₂ O	0.19	0.14
K ₂ O	0.84	0.70
P ₂ O ₅	0.03	0.01
TiO ₂	0.82	0.49

由表1可知,除氧元素以外,其他元素含量占比约为45.6%。其中硅、铝、铁3种元素约占绝对比重的43.9%,由于该高液限土的原岩为花岗岩,长石、石英、云母、黏土矿物等混杂,所以硅、铝含量占比大。

以表1中所有非氧元素为基础,分析单元素比例:硅元素56.3%,铝元素31.3%,铁元素8.7%,镁元素0.3%,钙元素0.5%,钠元素0.3%,钾元素1.5%,磷元素0.02%。其中铁元素含量较为突出,土层中铁元素或铁化合物富集,氧化铁胶结作用对黏土性质具有一定影响^[16-17],氧化铁的存在对于该类高液限土的性质有着不可忽视的影响作用。

2.3 矿物成分

取高液限花岗岩残积土土样充分研磨后,采用D/max 2500 X 射线衍射仪对土样成分进行分析,扫描参数为 5.0/80.0/0.02/0.15 (sec), Cu (40kV, 250mA), I(p) = 1 335。其矿物成分如表 2 所示。

由表 2 可知,该高液限土中石英含量较少,仅占 7.7%,其粒径不等,小到细粒、大到砾粒,呈不规则粒、块状,而黏土类矿物(高岭石、叶腊石、地开石、

斜绿泥石)占 61.3%,其中叶腊石、地开石、斜绿泥石均不同程度地以细粒、极细粒鳞片状产出,高岭石以细粒、极细粒粒状产出,这种微观的片状、粒状结构对高液限土水理特性起着至关重要的作用。

2.4 微观结构

对于土样结构的分析,本文采用薄片实验鉴定的方法。实验结果见图 1,其二值化处理结果如图 2 所示。

表 2 土样矿物成分

矿物成分	石英	高岭石	叶腊石	地开石	斜绿泥石	云母
含量/%	7.7	19.5	26.3	11.9	3.6	31.0

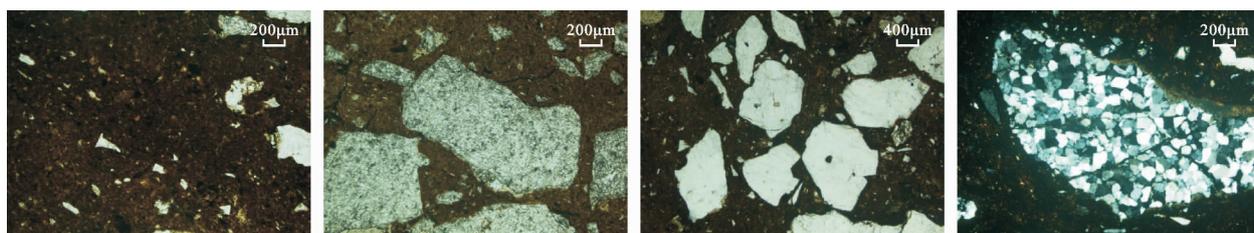


图 1 土样微观结构

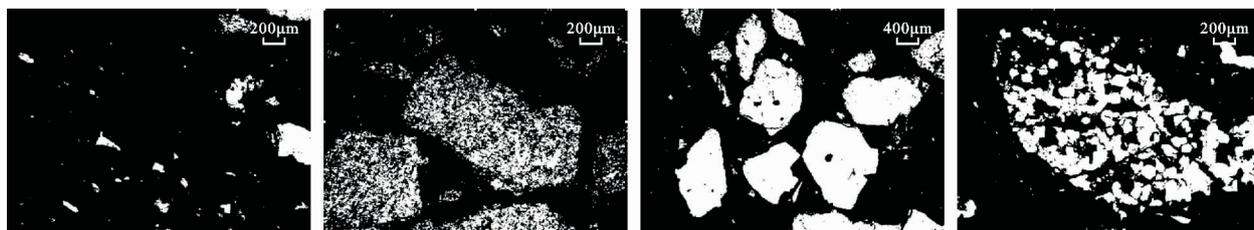


图 2 土样微观结构图像二值化

从薄片扫描结果(图 1)和二值化图像(图 2)中可知:(1)土样中粗颗粒之间接触方式以点接触和不接触为主;(2)细粒土充填在粗粒土之间,微小孔隙较多,分布不均,粗颗粒周围与细颗粒间孔隙大小不一;(3)粗颗粒主要以片状、粒状形式存在,细颗粒主要以细粒、细粒集合体形式存在。

2.5 结构和水理特性

综合分析高液限花岗岩残积土的化学成分、矿物成分、微观结构,并结合其赋存环境,对土样结构特性和水理特性进行阐释。

2.5.1 结构特性 (1)高岭石、绢云母等包裹石英等颗粒形成团聚体;片层状结构的黑云母、白云母、绢云母相互堆叠,其表面附着黏土矿物;绢云母和黏土矿物(高岭石、叶腊石、地开石、斜绿泥石等)混合,3个基本单元构成土的结构;(2)原状土中铁氧化物作为必不可少的因素之一,对土的结构特性^[18]

起到重要作用;(3)微观上,土体中粒径大小不一的各种片状、片状集合体矿物在三维空间不定向分布,细颗粒附着在片状颗粒表面并充填交错堆叠体的缝隙中,当外部荷载较小或尺寸效应较大,压实后回弹较大,表现出“弹簧土”、“橡皮土”的特点,反之,片层被破坏甚至发生破碎,在宏观上表现为强度低、扰动压实后持水性强等特点。

2.5.2 水理特性 (1)云母、黏土矿物等成分所占比重超过 90%,而在晶体结构上,云母和黏土矿物均具有层状结构,不同的是黏土矿物尺寸远小于云母片,黏土矿物自身吸附大量水分,云母片依靠表面张力吸附水分和黏土矿物,持水性良好;(2)未经碾压时,残积土内部孔隙较多。当受碾压时,片状颗粒发生定向排列,孔隙被压缩而无法排除,黏土矿物表面水膜相互靠近,碾压产生侧向挤土、回弹,孔隙比增大,毛细作用增强,这一过程中云母片片状结构和

黏性土起到关键作用;(3)弱膨胀性黏土矿物(高岭石等)较多,即使吸水导致含水率升高,其膨胀性依旧不明显;在碾压作用下,一方面黏土矿物被压密,颗粒间水膜接触,水胶联结增强,另一方面表面张力较大的片状矿物之间线接触、面接触等接触方式增多,形成多层交错堆叠结构,阻碍水分蒸发。

3 高液限花岗岩残积土基本性质及试验设计

3.1 基本性质

根据土工试验规程,进行含水率、筛分、液塑限、击实、承载比等试验,高液限花岗岩残积土基本性质见表3。由表3可看出,该高液限土塑性指数基本小于26%,其最优含水率比天然含水率低10%左右,CBR(California bearing ratio)强度较低,但是满足下路堤3%的要求,线膨胀率较小。

表3 高液限花岗岩残积土基本性质

名称	均值	测试值
w_0 / %	28.5	27.4 ~ 29.8
w_p / %	31.6	28.0 ~ 37.0
w_L / %	54.0	50.0 ~ 58.0
I_p / %	22.4	19.0 ~ 27.0
w_{op} / %	17.1	16.7 ~ 18.2
ρ_{dmax} / ($g \cdot cm^{-3}$)	1.68	1.60 ~ 1.72
砾粒 / %	11.0	7.3 ~ 13.0
砂粒 / %	29.3	26.3 ~ 32.7
细粒 / %	59.7	53.9 ~ 66.4
CBR / %	3.4	2.3 ~ 5.0
膨胀率 / %	3.0	2.1 ~ 4.2

3.2 试验设计

试验所用高液限花岗岩残积土的基本性质为:含砂高液限黏土, $w_0 = 29\%$, $G_s = 2.70$, $w_p = 28\%$, $w_L = 51\%$, $\rho_{dmax} = 1.685 g/cm^3$, $w_{op} = 17.5\%$ 。

击实试验设计:试验所用仪器为全断面重锤9击/循环电动数显击实仪,以含水率和击数为变量,其中击数以标准98击为基准递减,选取单层击数 N 分别为98、71、53、35,各级含水率分别为28.5%、26.0%、24.0%、21.0%、18.5%、16.5%、14.0%。同时,每个独立条件下设1组(3个)平行试验,根据规范^[19]要求进行操作,最后对试验结果进行分析,得到击实性能及其受击实功和含水率的影响。

CBR试验设计:该试验击实部分与击实试验设

计基本相同,在不同含水率下,采用 98×3 、 71×3 、 53×3 、 35×3 的平行试验方法,其泡水试验分为两个部分:一是对 98×3 、 53×3 、 35×3 击实试样泡水4 d,分析其泡水后强度值和膨胀性,并对比泡水前后含水率、干密度、孔隙比、饱和度的变化情况;二是对击数 N 为98、71、53的试样击实后直接进行CBR贯入试验,结果记为UCBR(unsaturated California bearing ratio),对比泡水前后的强度变化,分析其强度水敏性。

3.3 试验结果

根据试验设计和操作规范,得到对应的击实试验结果和CBR试验结果,见表4和5。

4 高液限花岗岩残积土击实试验结果与分析

4.1 击实指标

击实指标:最大干密度(maximum dry density)和最优含水率(optimum moisture content),二者均从击实曲线中得出,不同击数下的击实曲线见图3。由图3可以看出,击实曲线从上到下的顺序是:98击→71击→35击→53击,该结果表明:(1)击实功较大,随着击实功继续增大,干密度增大;(2)对于该类高液限花岗岩残积土,53击击实曲线包于35击击实曲线内部,即35击下干密度大于53击下干密度,从趋势上看,随着击实功增加,干密度先下降后增加。

从击实曲线中得到击实指标,绘制图4。由图4可明显看出,当击数达到约60击时,最大干密度曲线曲率最大,低于60击,干密度增速较大,反之减缓;最优含水率与击数基本呈线性关系。

4.2 压实度

压实度是干密度与标准重锤试验得到的干密度之比的百分数,在路基检测中是一项不可缺少的指标。通过室内调整击数(击实功)得到压实度与击实功的关系,可以从理论上试验得出达到压实度标准下击数(击实功)与含水率的组合。图5为不同含水率土样的击数-压实度关系曲线。

图5表明,当含水率大于24%(或更低值)时,无论击数是多少,压实度均无法满足最低93%^[1]的要求;含水率满足要求后,击实次数需要小于40或者大于60,压实度才能满足要求。总体来看,含水率和击数的双控条件为:

(1)含水率低于24%(或低于更小值);

(2)击实次数小于40或者大于60。当击数超过70以后,压实度随击数变化的幅度较小。

表4 高液限花岗岩残积土击实和 CBR 试验结果

含水率/%		击数 $N \times 3$	干密度/($g \cdot cm^{-3}$)		孔隙比		饱和度		吸水量/ g	膨胀率/ %	CBR/ %
泡水前	泡水后		泡水前	泡水后	泡水前	泡水后	泡水前	泡水后			
	29.5	98 × 3	1.454	1.445	0.86	0.87	0.898	0.917	32	0.63	1.2
28.5	29.9	53 × 3	1.457	1.446	0.85	0.87	0.902	0.929	43	0.78	1.6
	29.9	35 × 3	1.446	1.432	0.87	0.89	0.887	0.912	44	0.97	1.7
	27.1	98 × 3	1.518	1.505	0.78	0.79	0.902	0.921	36	0.88	2.2
26.0	27.1	53 × 3	1.502	1.487	0.80	0.82	0.880	0.896	36	1.04	2.7
	28.2	35 × 3	1.506	1.485	0.79	0.82	0.885	0.931	73	1.42	2.0
	25.9	98 × 3	1.571	1.549	0.72	0.74	0.902	0.942	66	1.43	2.6
24.0	26.0	53 × 3	1.541	1.514	0.75	0.78	0.862	0.897	68	1.79	5.5
	26.3	35 × 3	1.562	1.534	0.73	0.76	0.890	0.934	78	1.83	4.4
	24.5	98 × 3	1.652	1.610	0.63	0.68	0.894	0.976	125	2.60	4.7
21.0	24.9	53 × 3	1.596	1.550	0.69	0.74	0.820	0.908	137	2.94	7.7
	25.8	35 × 3	1.638	1.589	0.65	0.70	0.875	0.996	171	3.10	7.1
	23.2	98 × 3	1.677	1.626	0.61	0.66	0.819	0.951	173	3.10	4.9
18.5	23.9	53 × 3	1.595	1.544	0.69	0.75	0.721	0.864	189	3.30	6.0
	25.2	35 × 3	1.649	1.589	0.64	0.70	0.784	0.972	240	3.78	5.0
	24.0	98 × 3	1.683	1.599	0.60	0.69	0.737	0.939	273	5.27	3.4
16.5	25.2	53 × 3	1.573	1.495	0.72	0.81	0.622	0.845	298	5.18	4.2
	27.1	35 × 3	1.631	1.554	0.66	0.74	0.680	0.992	377	4.98	3.1
	25.5	98 × 3	1.632	1.521	0.65	0.78	0.578	0.888	409	7.32	2.6
14.0	27.0	53 × 3	1.514	1.411	0.78	0.91	0.482	0.797	427	7.27	3.3
	28.0	35 × 3	1.575	1.469	0.71	0.84	0.529	0.902	479	7.19	2.6

表5 高液限花岗岩残积土 CBR 试验与 UCBR 试验结果

含水率/%	击数 $N \times 3$					
	53 × 3		71 × 3		98 × 3	
	CBR/ %	UCBR/ %	CBR/ %	UCBR/ %	CBR/ %	UCBR/ %
28.5	1.6	1.5	1.4	1.5	1.2	1.7
26.0	2.7	4.3	2.3	4.0	2.2	3.4
24.0	5.5	9.5	3.7	7.8	2.6	5.7
21.0	7.7	15.7	6.1	16.8	4.7	17.4
18.5	6.0	19.6	5.3	21.4	4.9	22.4
16.5	4.2	18.9	3.9	21.6	3.4	25.9
14.0	3.3	15.5	3.1	17.3	2.6	22.1

5 高液限花岗岩残积土 CBR 试验结果与分析

5.1 击数、含水率与 CBR 关系

CBR 曲线与击实曲线相似,不同之处在于前者峰值两侧曲线均较陡,而后者一般是左侧相对较缓,

右侧较陡,图6为土样不同击数下的 CBR 曲线。由图6中看出,随着击数增加,CBR 峰值对应的含水率呈逐渐减小趋势,CBR 峰值变化规律与击实曲线最大干密度变化规律不同:35 击曲线中间段的 CBR 值大于 98 击和 71 击,53 击的 CBR 峰值最大,恰好与最大干密度变化情况相反。

CBR 峰值对应的含水率在 21% 左右,低于泡水后含水率 3% ~ 5%,这就意味着有大量的水分进入土体中,部分进入矿物层间,充填部分孔隙或者吸附在土颗粒表面。而较大的击数或者击实功下,土样孔隙较小,土颗粒之间接触更紧密,被水长时间浸泡后水分进入土颗粒必然会使其“拉开距离”,在此条件下,土样强度难以保持;相反,较小的击数或者击实功下,水分进入土样时有较好的通道和空间,从而减少了对土样强度的影响。

5.2 土样泡水前后含水率、干密度、孔隙比、饱和度变化

土样泡水 4 d 后,其含水率增加,干密度降低,孔隙比增大,饱和度增大,具体变化情况见图 7 ~ 10。

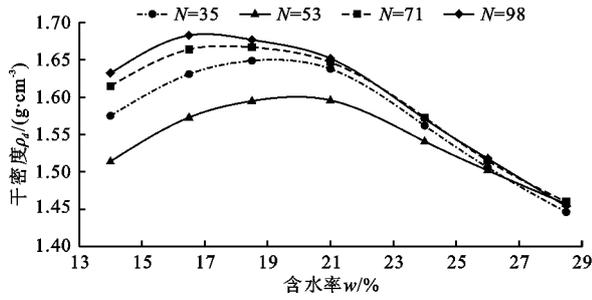


图3 土样不同击数下的击实曲线

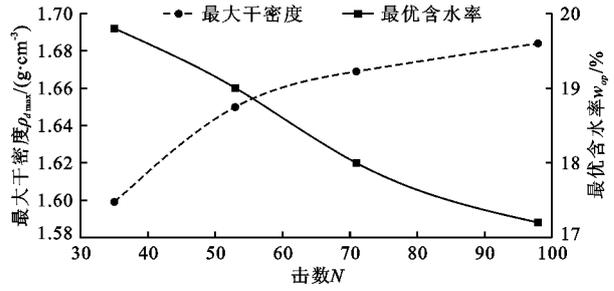


图4 土样的击实指标曲线

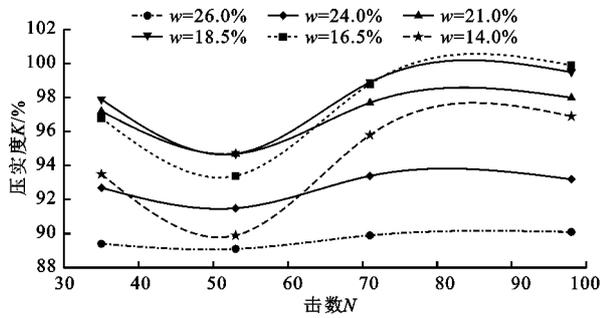


图5 不同含水率土样的击数-压实度关系曲线

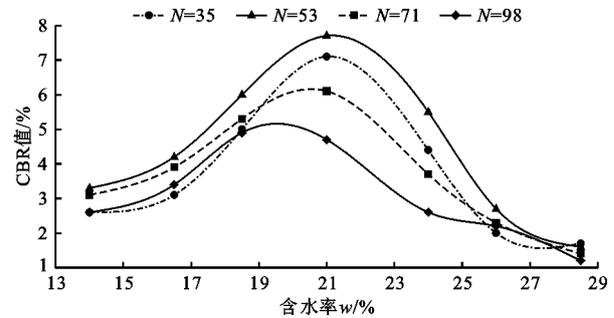


图6 土样不同击数下的CBR曲线

(1)含水率和干密度变化。分析图7可知,泡水后的土样含水率普遍增加,含水率增幅随着泡水前含水率(w_0)的增大而减小,即整体上受泡水前含水率控制。另外,泡水后的含水率极小值出现在泡水前含水率18.5%左右,这与土样在此含水率下密实程度较高有关,土样越密实,孔隙越少,水分越难进入,水分可占据的空间就越少。对比图8中泡水前后干密度变化可知,泡水前含水率越低,击数越少,则泡水前后干密度差值越大;计算各击数下干密度差值与泡水前干密度的百分比得出干密度减小了0.5%~6.8%,表

明土样泡水后密度下降幅度较小。

(2)孔隙比和饱和度变化。由图9、10可看出,泡水后孔隙比和饱和度均有增加。当泡水前含水率不超过16.0%,孔隙比增加了10%以上,饱和度增加了25%以上,其中孔隙比最大增加了17.3%,饱和度最大增加了70.4%。说明该类高液限花岗岩残积土泡水以后,低含水率土样孔隙会被大幅扩张,而且被水分充填;高含水土样孔隙比仅增加1%~4%,饱和度仅增加2%~5%,对泡水不敏感,孔隙比与饱和度之间存在关联性。

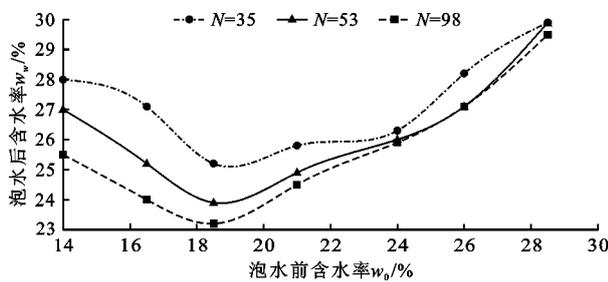


图7 土样不同击数下泡水前后含水率相应变化曲线

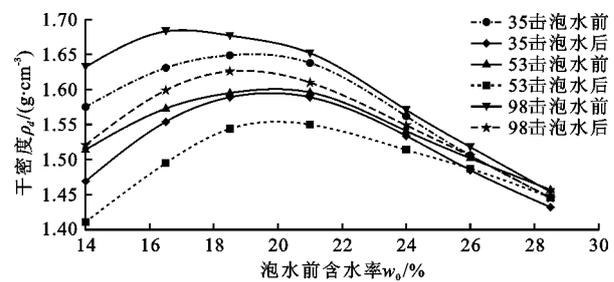


图8 土样不同击数下泡水前后干密度变化曲线

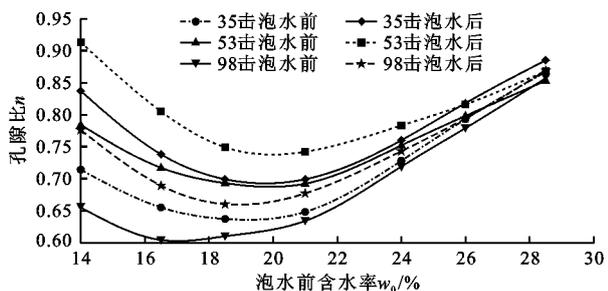


图9 土样不同击数下泡水前后孔隙比变化曲线

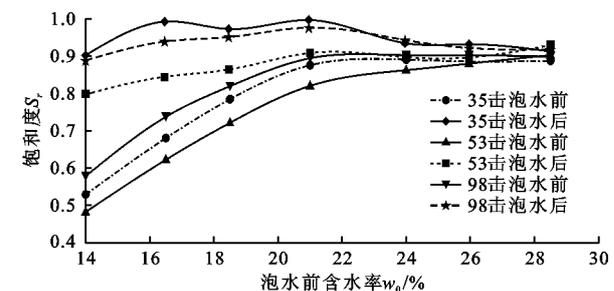


图10 土样不同击数下泡水前后饱和度变化曲线

5.3 高液限土 CBR 强度水敏性

CBR 强度水敏性可以用泡水前后 CBR 强度变化情况来表达。 ΔV_{CBR} 为泡水前 CBR 贯入试验结果值 V_{UCBR} 与泡水后 CBR 贯入试验结果值 V_{CBR} 的差值,另计算 ΔV_{CBR} 与 V_{UCBR} 的百分比值,该值的物理意义是泡水后 CBR 强度值的损失率,记为 k ,则有:

$$k = \frac{V_{UCBR} - V_{CBR}}{V_{UCBR}} \cdot 100\% = \frac{\Delta V_{CBR}}{V_{UCBR}} \cdot 100\% \quad (1)$$

考虑土样特殊性和确定性,忽略次要因素影响,计算得出的 CBR 强度损失率 k 与土样泡水前含水率 w_0 之间存在二次函数拟合关系,土样不同击数下二者的关系曲线见图 11,拟合关系式见表 6。用该关系式来表明高液限花岗岩残积土的 CBR 强度水敏感程度,在工程实践中具有参考意义。

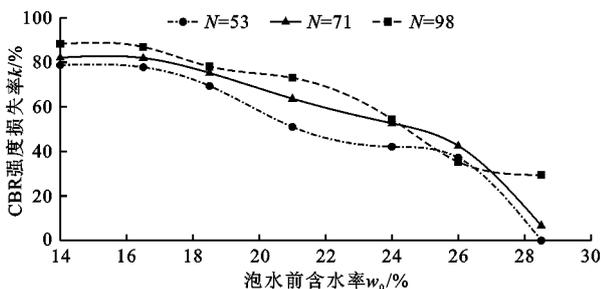


图 11 土样不同击数下 CBR 强度值的损失率 k 与泡水前含水率 w_0 的关系曲线

表 6 土样不同击数下 CBR 强度损失率 k 与泡水前含水率 w_0 的拟合关系式

击数 N	拟合关系式	拟合优度
53	$k = -0.295w_0^2 + 7.459w_0 + 32.139$	$R^2 = 0.956$
71	$k = -0.398w_0^2 + 12.091w_0 - 10.329$	$R^2 = 0.976$
98	$k = -0.201w_0^2 + 4.065w_0 + 72.396$	$R^2 = 0.974$

由图 11 可以看出,泡水前含水率达到 26% 左右时,强度损失率约为 40%,随着泡水前含水率的增大,曲线快速下降,即损失率急剧减小。前述已表明微观的片状、粒状结构对高液限土水理特性起着至关重要的作用,该类高液限土的细粒土充填在粗粒土之间,微小孔隙较多,粗颗粒周围与细颗粒间孔隙大小不一,粗颗粒主要以片状、粒状形式存在,细颗粒主要以细粒、细粒集合体形式存在。土样初始含水率较低时,在击实功作用下其强度较高,低含水率土样泡水后部分孔隙被水填充以及黏粒对水的吸附作用造成土样含水率变化明显,使土样泡水前后强度变化较大,即强度损失率较高。土样初始含水率较高时,在击实功作用下其强度较低,且泡水后

含水率变化不明显,因此土样强度损失率在高含水率时急剧减小。

6 结 论

(1) 在所研究的高液限花岗岩残积土中,云母、黏土矿物等成分所占比重超过 90%,细粒片状云母等矿物与细粒粒状的黏土矿物相互作用,少量粗颗粒掺杂其中,形成特殊的多层交错堆叠结构。综合考虑云母、黏土矿物等的水理性质,残积土内部孔隙较多,受荷时,片状颗粒发生定向排列,孔隙被压缩,黏土矿物表面水膜相互靠近,易侧向挤土、回弹,卸载后孔隙通道增多,毛细作用增强。

(2) 土样击实试验中,当击数约为 60 击时,土样最大干密度曲线的曲率最大;少于 60 击时,土样最大干密度随击数的增速较大,反之减缓,最优含水率与击数基本呈线性关系;土样满足最低压实度要求的含水率和击实次数双控条件为:含水率低于 24% 或者低于更小值,击实次数小于 40 或者大于 60,这对于该类土路基填筑具有指导意义;

(3) 土样 CBR 试验中, CBR 峰值变化规律与击实曲线干密度峰值变化规律相反, CBR 峰值随击数增加先增大后减小;土样泡水后状态参数中,含水率、孔隙比、饱和度变化明显,干密度变化较小,说明密实程度受水影响较小;

(4) 分析高液限花岗岩残积土 CBR 强度的水敏感性,用泡水前后 CBR 强度的损失率作为考量,就该类土建立其与初始含水率(泡水前含水率)的二次函数关系,关系式拟合良好,对工程实践具有参考意义。

参考文献:

- [1] 陈永辉,李秉宜,孔庆东,等. 非饱和高液限土土-水特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(5):1-5.
- [2] 洪宝宁,化君晖,刘鑫,等. 高液限土路堤填筑的双指标控制方法研究[J]. 岩土力学,2016,37(S1):255-262.
- [3] 程涛,洪宝宁,程江涛. 干湿循环下高液限土力学特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2013,45(6):82-86+95.
- [4] 刘顺青,洪宝宁,徐奋强,等. 高液限土边坡稳定性影响因素的敏感性研究[J]. 防灾减灾工程学报,2014,34(5):589-596.
- [5] 刘鑫,洪宝宁. 高液限土工程特性与路堤填筑方案[J]. 淮海大学学报(自然科学版),2011,39(4):436-443.
- [6] 段凯. 高液限黏土的工程性质及其填筑技术研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.

- [7] 刘江,张荣堂,严东方. 高液限粘土压实性能的试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2007,28(3):316-319.
- [8] 戴良军,朱大勇. 高液限土路基填筑技术研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2016,36(1):44-50.
- [9] 莫秋旭,陈家闯,许会生,等. 湛江大道2种高液限土水泥改良试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(7):1728-1733.
- [10] 李秉宜,宣剑裕,郑文斌,等. 改良高液限黏土水稳定性试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):54-60.
- [11] 赵英爱,王远明,吴天前,等. 复合固化高液限黏土的筑堤性能试验[J]. 武汉大学学报(工学版),2019,52(7):581-586.
- [12] 璩继立,孙中明. 纤维素纤维和石灰粉对上海黏土抗压强度的影响[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):211-215.
- [13] 陈晓平,周秋娟,蔡晓英. 高液限花岗岩残积土的物理特性和剪切特性[J]. 岩土工程学报,2011,33(6):902-908.
- [14] 余自立,刘奔江. 高液限花岗岩残积土及水泥稳定土填料的研究[J]. 路基工程,2006,125(2):29-31.
- [15] 胡焕校,孙端阳,周丁. 花岗岩残积土路用性能影响因素研究[J]. 水文地质工程地质,2017,44(5):92-99.
- [16] 周训华,廖义玲. 红粘土颗粒之间结构连结的胶体化学特征[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2004,33(1):26-29.
- [17] 张先伟,孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报,2014,36(1):65-74.
- [18] 汤连生,桑海涛,宋晶,等. 非饱和花岗岩残积土粒间联结作用与脆弹塑性胶结损伤模型研究[J]. 岩土力学,2013,34(10):2877-2888.
- [19] 中华人民共和国交通部. 公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.

(上接第193页)

- [50] 何展翔,胡祖志,王志刚,等. 时频电磁(TFEM)技术:数据联合约束反演[J]. 石油地球物理勘探,2020,55(4):898-905+705.
- [51] 程绍磊. 熊谷组开发出隧道注浆可视化系统[J]. 隧道建设(中英文版),2017,37(11):1416.
- [52] STILLE B, STILLE H, GUNNAR G, et al. Experience with the real time grouting control method [J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2010,2(5):447-459.
- [53] 闫福根,缪正建,李明超,等. 基于三维地质模型的坝基灌浆工程可视化分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(3):567-572.
- [54] 冯晓琳. 基于物联网技术的注浆监控系统设计[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [55] 张民庆,张文强,孙国庆. 注浆效果检查评定技术与应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3909-3918.
- [56] 王德明,张庆松,张霄,等. 隧道及地下工程注浆效果模糊评价方法的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3431-3439.
- [57] 周海强. 高速铁路地基注浆加固效果评价方法研究[J]. 铁道建筑技术,2019(11):117-120+144.
- [58] BAI Huiren, LI Jingjing. Evaluation of grouting effect detection in goaf [J]. Applied Mechanics & Materials, 2013,438-439:1080-1083.
- [59] HUANG Xiaoguang, YANG Xiaolin, FANG Yuzhong. Study on grouting effect evaluation of F4 weathered llot in Xiamen Xiang'an submarine tunnel [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012,256-259:1217-1220.
- [60] ZHU Yushan, WANG Xiaoling, DENG Shaohui, et al. Evaluation of curtain grouting efficiency by cloud model-based fuzzy comprehensive evaluation method [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019,23(7):2852-2866.
- [61] LI Xiaochao, ZHONG Denghua, REN Bingyu, et al. Prediction of curtain grouting efficiency based on ANFIS [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019,78(1):281-309.
- [62] LIN Chunjin, WANG Xintong, LI Yao, et al. Forward modelling and GPR imaging in leakage detection and grouting evaluation in tunnel lining [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020,24(1):278-294.
- [63] ZADHESH J, RASTEGAR F, SHARIFI F, et al. Consolidation grouting quality assessment using artificial neural network (ANN) [J]. Indian Geotechnical Journal, 2015,45(2):136-144.
- [64] 后钱峰,陈颖辉,欧明喜,等. 运营隧道注浆堵漏效果的GRA模糊综合评价[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(5):755-761.