

# 高液限红黏土用作路基填料的改良方法研究

刘爱民<sup>1,2,3,4</sup>, 付建宝<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222;  
2. 中交集团岩土工程重点实验室, 天津 300222; 3. 港口岩土工程技术交通行业重点实验室, 天津 300222;  
4. 天津市港口岩土工程技术重点实验室, 天津 300222)

**摘要:**为解决广西玉湛高速公路中高液限红黏土难以作为路基填料的技术难题, 本文对该地区红黏土的物理力学性质进行了试验研究, 并且开展了掺加河砂、山脚砂和消石灰的3种红黏土改良试验研究。研究表明: 随着掺砂量的增大, 掺河砂改良红黏土的液限、塑限、塑性指数和毛细管水上升高度都随之降低, 而加州承载比 CBR 值随之增大; 当掺砂量为 15% 时, 掺河砂改良红黏土的液限和 CBR 值都满足规范要求, 可以作为高速公路下路堤填料, 但是如果作为高速公路上路堤和路床的填料, 则需要进一步提高掺砂量。随着掺砂量的增大, 掺山脚砂改良红黏土的最优含水率、液限、塑限、塑性指数随之降低, 而最大干密度和 CBR 值随之增大; 掺砂量为 30% 时, 掺山脚砂改良红黏土的 CBR 值、液限和塑性指数都满足规范要求, 可以作为路基填料。掺加 4% 消石灰时, 红黏土的 CBR 值、液限和塑性指数虽都满足相关规范关于路基填料的要求, 但是液限已非常接近规范限值, 因此建议消石灰掺量取 6%。现场填筑试验段结果表明, 掺山脚砂或掺加消石灰改良高液限红黏土的方案都是可行的, 改良土的液限、塑限、塑性指数和 CBR 值都有明显的改善, 均可作为高速公路路基的填料。

**关键词:** 红黏土; 液限; CBR; 改良; 路基; 现场试验

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0015-07

## Research on the improvement methods of using high liquid limit red clay as subgrade filler

LIU Ai-min<sup>1,2,3,4</sup>, FU Jian-bao<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering of CCCC, Tianjin 300222, China;  
3. Key Laboratory of Port Geotechnical Engineering Technology and Transportation Industry, Tianjin 300222, China;  
4. Key Laboratory of Tianjin Port Geotechnical Engineering, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** To solve the technical challenges of using high liquid limit red clay as subgrade filler in the Yuzhan Expressway in Guangxi, this paper carried out experimental research on the physical and mechanical properties of the local red clay, and conducted three kinds of red clay improvement experiments by adding river sand, sand at the foot of mountain, and slaked lime. The research results show that as the sand content increases, the liquid limit, plastic limit, plasticity index, and capillary water rising height of the river sand improved red clay all decrease, while the CBR value increases. When the sand content is 15%, both the liquid limit and CBR value of the river sand improved red clay meet the standard requirements, making it suitable as subgrade filler for the lower embankment of the expressway. However, higher sand content is required if used in the upper embankment and subgrade. With the increase of the sand content, the optimal water content, liquid limit, plastic limit, and plasticity index of the red clay improved by sand at the foot of mountain decrease, while the maximum dry density and CBR value increase. When the sand content is 30%, the CBR value, liquid limit, and plasticity index of the red clay improved by sand at the foot of mountain all meet the standard requirements, and the improved red clay can be used as subgrade filling. When 4% slaked lime is added, although the CBR value, liquid limit, and plasticity

index of the improved red clay all meet the standard requirements, the liquid limit is very close to the specification limit, so it is recommended to take the amount of slaked lime as 6%. Field construction tests indicate that the schemes of improving the high liquid limit red clay by adding sand at the foot of mountain or adding slaked lime are feasible. The liquid limit, plastic limit, plasticity index, and CBR value of the improved soil have all been significantly improved. Two kinds of improved red clay can all be used as the filler of expressway subgrade.

**Key words:** red clay; liquid limit; CBR; improvement; subgrade; field test

## 0 引言

红黏土是碳酸盐岩系出露区的岩石,经红土化作用,形成并覆盖于基岩之上,呈棕红色或黄褐色,是一种高塑性、低压缩性、高强度黏土。

红黏土在世界上的分布主要集中在南北回归线之间和附近区域。这些地区年平均降雨量大部分都在 1 000 mm 以上,年平均气温大约为 15~22℃。湿热的气候条件、较高的温度和充足的降水有利于地下水的溶蚀交代以及化学风化的进行<sup>[1-6]</sup>。

我国红黏土主要分布于西南、华南地区,如云南、贵州、广西、湖南、广东等地,广西地区的桂林、柳州、贵港、河池、百色、崇左等地均有红黏土分布,红黏土与当地的工程建设活动息息相关,是当地主要的建筑地基土和建筑材料之一。

广西玉湛高速公路沿线存在大量的高液限红黏土。红黏土的工程性质较为独特:力学性能良好,具有高强度和较低压缩性;但物理性能不良,如高孔隙比、高塑性、高天然含水率等。由于其较为特殊的工程性能,在工程应用中不易把握,从而引起隆起、地基不均匀变形、边坡失稳、路面开裂、建筑物变形等工程病害。

我国的红黏土广泛应用于路基填筑,其相关的研究成果也非常多。谈云志等<sup>[7]</sup>利用某高速公路的红黏土进行了重型击实和承载比试验,试验结果表明红黏土在最优含水率附近具有很强的水敏性,在此基础上结合土体的强度、压缩性、胀缩性、渗透性等指标随压实度变化的规律,确定该处红黏土作为下路堤填料,其压实度可降低 2.5%,填筑含水率控制在 35%左右。刘龙武等<sup>[8]</sup>对未宜高速公路红黏土展开研究后表示,要满足规范中对压实度和承载比的要求,不但要进行改良,而且还要控制其填筑时的含水率,并且需要足够快的施工速度,避免产生明显的收缩裂缝。类似的,曾静等<sup>[9]</sup>、黄俊等<sup>[10]</sup>、张伟华<sup>[11]</sup>等研究者也针对不同地区的红黏土提出了通过采取控制填筑含水率、包边覆盖等填筑施工时的措施,改善红黏土的物理性能,从而尽可能对

当地红黏土不进行改良而直接使用。

为了节省工程造价,节约工程废弃渣土占地面积,玉湛高速项目拟使用高液限红黏土作为路基填筑材料。虽然在《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[12]</sup>、《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019)<sup>[13]</sup>中都提出了高液限红黏土填料路基填筑的相关要求,但未给出高液限红黏土填料的分类标准、适用范围、填料利用处置方法,且未规定在特殊气候、水文条件及环境中,高液限红黏土填料路基的结构设计要求与压实质量控制标准,以及高液限红黏土填料路基防护与排水设计的具体规定。本文对广西玉湛高速公路工程的红黏土性质及改良红黏土开展研究,确定红黏土的改良方法,为类似工程提供重要的参考价值。

## 1 红黏土的基本性质

土的基本物理力学特性是描述土体性状的重要指标,它们表征了土的天然赋存状态、自身颗粒的组成情况、与水相互作用的强弱或者是在特定条件下发生的力学行为等等。这些指标往往是对土样进行分类定名的重要依据。通过这些指标,也可以初步预测该类土在实际应用时可能的工程行为。

### 1.1 物理性质

对玉湛高速公路工程不同深度红黏土的含水率、天然密度、干密度、土粒比重、孔隙比、饱和度、液限、塑限、塑性指数、液性指数共 10 个基本物理参数进行测定。试验依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)<sup>[14]</sup>相关要求执行。红黏土物性指标如表 1 所示。

从试验结果来看,红黏土属于硬塑或坚硬状态,各物性指标变化范围较大、均匀性较差。在 14 个试样中,有 9 个液限大于 50%,液限平均值为 53.8%,为高液限土。《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[12]</sup>规定:液限大于 50%、塑性指数大于 26 的细粒土,不得直接作为路堤填料,因而红黏土不满足规范规定的填料要求。

表 1 红黏土物性指标  
Table 1 Physical properties of red clay

指标	含水率/%	土粒比重	密度/(g/cm <sup>3</sup> )		饱和度/%	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
			天然	干						
平均值	30.0	2.76	1.88	1.45	91.2	0.912	53.9	29.4	24.5	0.03
最大值	43.5	2.77	1.99	1.63	94.1	1.303	67.8	34.5	33.7	0.40
最小值	22.2	2.74	1.77	1.20	86.2	0.700	40.5	23.8	16.1	-0.14

### 1.2 红黏土颗粒级配

常用的颗粒分析试验方法有筛分法和密度计法, 筛分法适用于粒径大于 0.075 mm 的土, 密度计法适用于粒径小于 0.075 mm 的土。结合红黏土的粒径分布, 采用筛分法和密度计法联合应用, 对红黏土试样进行了测量。经过检测, 红黏土级配曲线见图 1。由图 1 可知, 红黏土小于 0.075 mm 的土颗粒占总试样质量的 99.68%, 为黏质土或粉质土。

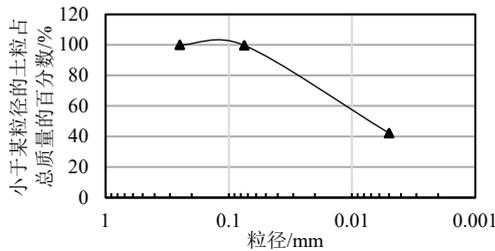


图 1 红黏土级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of red clay

### 1.3 毛细管水上升高度

土的毛细管水上升高度是水在土孔隙中因受毛细管作用而上升的最大高度, 土的毛细管水上升高度和速度与土的孔隙大小、结构、交换性阳离子的组成、温度等有关。土的毛细管水上升高度可以用于估计地下水位升高时路基被浸湿的可能性和浸湿的程度。采用直接观测法对毛细管水上升高度进行测量, 测得的毛细管水上升高度与时间关系曲线和其拟合曲线见图 2。红黏土毛细管水上升高度与时间关系可以用式 (1) 表示:

$$h = 4.582t^{0.475} \quad (1)$$

式中:  $h$  为毛细管水上升高度;  $t$  为时间。

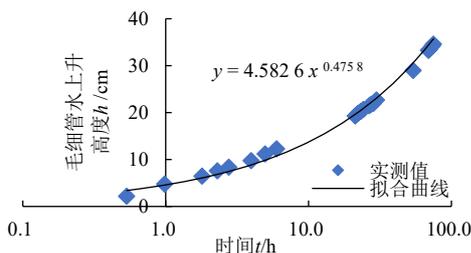


图 2 红黏土毛细管水上升高度试验结果

Fig. 2 Results of capillary water rise height in red clay

### 1.4 无荷膨胀试验

红黏土一般具有一定的膨胀性, 因此需要进行无荷膨胀试验。该试验用于测定试样在无荷载有侧限条件下, 浸水后在高度方向上的单向膨胀与原高度的比值, 这一比值称为膨胀率, 以百分数表示。红黏土膨胀率与时间关系曲线见图 3。由图 3 可知, 红黏土无荷膨胀率约为 4.4%。

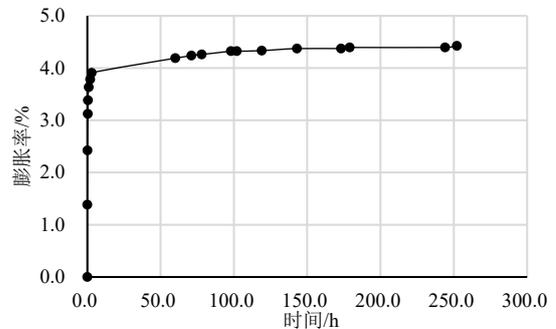


图 3 红黏土膨胀率与时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between expansion rate of red clay and time

### 1.5 红黏土固结试验

固结试验是测定饱和黏性土试样在侧限的条件下加压的压缩试验。将试样在侧限和容许轴向排水的容器中逐渐增加压力, 测定压力和试样变形或孔隙比的关系、变形和时间的关系, 以便计算土的单位沉降量、压缩系数、压缩指数、回弹指数、压缩模量、固结系数及原状土的前期固结压力等。红黏土  $e-p$  关系曲线见图 4。从试验结果来看, 红黏土的压缩模量  $E_{s1-2} = 2.98$ , 压缩系数  $a_{v1-2} = 0.68$ 。

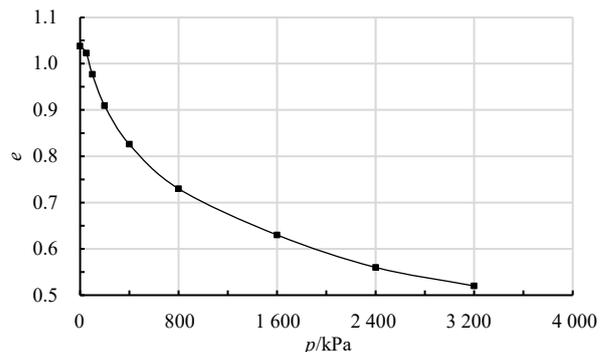


图 4 红黏土 e-p 关系曲线

Fig. 4 e-p curve of red clay

### 1.6 红黏土三轴压缩试验

红黏土抗剪强度包线如图5所示。由图5可知，红黏土的有效黏聚力  $c_d$  为 63.35 kPa，有效内摩擦角  $\varphi_d$  为  $18.1^\circ$ ，相关系数  $r_d$  达到 0.999。

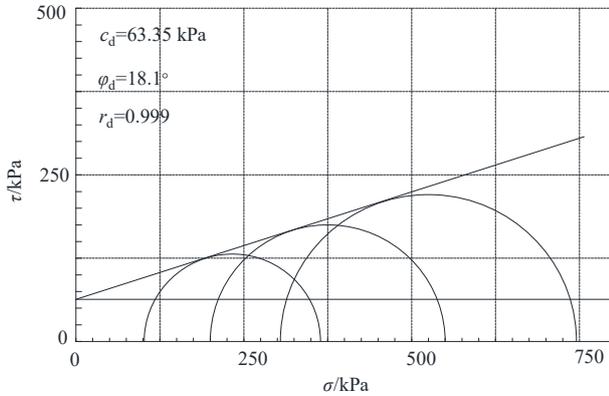


图5 红黏土抗剪强度包线

Fig. 5 Shear strength envelope of red clay

### 1.7 红黏土收缩试验

土收缩是指原状土和击实土在自然风干条件下失水体积收缩的一种现象。失水收缩通常有3个阶段：第一阶段，土体收缩与含水率减少成正比；第二阶段，随着含水率的减少，土体收缩率愈来愈小；第三阶段，含水率继续减小，但土体不再收缩或收缩甚微。

收缩试验是测定原状土和击实土在自然风干条件下的垂直收缩变形，以计算线缩率，绘制线缩率和相应含水率之间的关系曲线，计算收缩系数，确定收缩含水率比例限值和原状土的缩限。原状土的收缩与扰动土的不同，其主要原因是原状土不一定是饱和土，其次原状土具有结构性，故原状土的收缩往往表现为各向异性。红黏土含水率与线缩率的关系曲线见图6。由图6可知，红黏土的线缩率随着含水率的增大而减小，本文红黏土缩限约为5%。

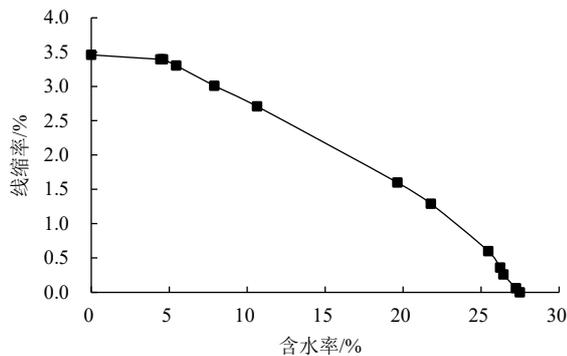


图6 红黏土含水率与线缩率的关系曲线

Fig. 6 Relationship between the water content of red clay and the linear shrinkage rate

### 1.8 红黏土 CBR 试验

CBR 即加州承载比，是用于评定路基土和路面材料强度的指标。在国外多采用 CBR 值作为路面材料和路基土的设计参数。随着国内试验检测技术的完善，CBR 试验越来越被设计单位及施工单位所重视，并已成为设计及施工的参考依据之一。我国在公路工程建设标准《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)<sup>[15]</sup> 和《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)<sup>[12]</sup> 中对高速公路的路基填料压实度和 CBR 值均做出了明确规定。室内试验结果表明，红黏土 CBR 值为 2.24%，不能满足规范中高速公路和一级公路路基填料最小 CBR 值不小于 3% 的要求，无法作为路床和路堤的填筑材料。

## 2 红黏土改良试验

由于现场红黏土液限高、CBR 值低，若用作路床和路堤的填筑材料必须进行改良。部分学者也开展了对红黏土物理力学性能改良的研究。黄俊等<sup>[10]</sup> 针对江西境内的红黏土提出了作为路基填料时的多种方案，并进行了经济性和技术性比较。叶琼瑶等<sup>[16]</sup> 对全州至兴安高速公路的红黏土进行多种方式改良时发现：物理改良的方法（如掺砂）要比化学改良的方法（如掺生石灰、水泥）有效。罗斌等<sup>[17]</sup> 探讨了嘉宁公路红黏土用碎石改良时的最佳配比，针对本项目的实际情况，采用3种方法进行了改良，并进行了试验研究。

### 2.1 掺河砂改良红黏土试验

改良红黏土的河砂样颗粒级配曲线见图7，掺河砂改良试验的掺砂量分别为 15%、30% 和 45%。掺砂量 = 干砂质量 / (干砂质量 + 干土颗粒的质量)。

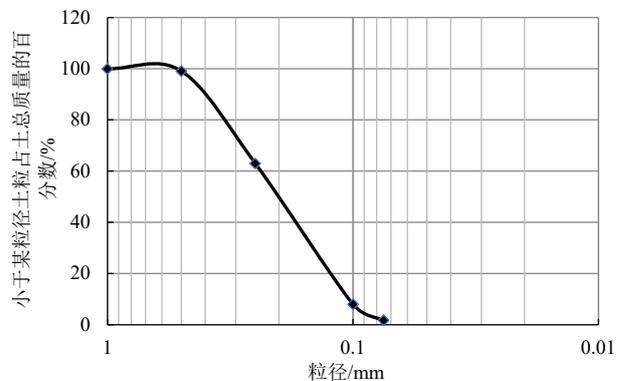


图7 河砂样颗粒级配曲线

Fig. 7 Particle size distribution curve of the river sand sample

对掺河砂的土样进行液限、塑限、毛细管水上升高度、CBR 等一系列相关试验，结果见图8~10。

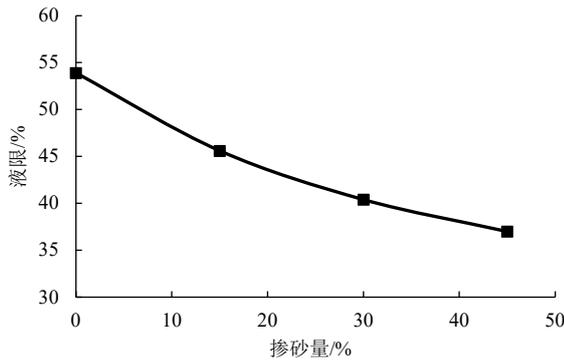


图 8 掺砂量与液限关系曲线

Fig. 8 Relationship between the sand content and the liquid limit

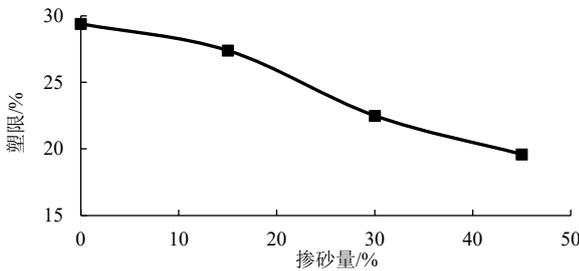


图 9 掺砂量与塑限关系曲线

Fig. 9 Relationship between the sand content and the plastic limit

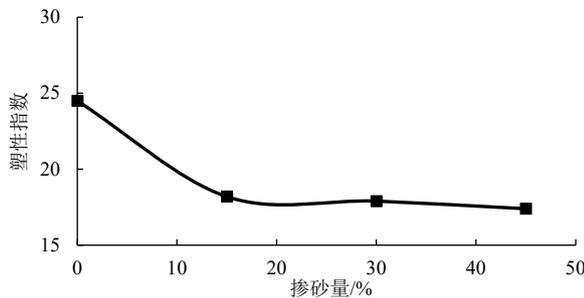


图 10 掺砂量与塑性指数关系曲线

Fig. 10 Relationship between the sand content and the plasticity index

由试验结果可以看出, 随着掺砂量的增大, 液限、塑限和塑性指数都随之降低, 而且当掺砂量为 15% 时, 红黏土试样的液限就降到 45.6%, 小于 50%, 红黏土试样不再属于高液限土。

不同掺砂量时毛细管水上升高度与时间关系曲线见图 11, 由图 11 可知, 随着掺砂量的增大, 红黏土毛细管水的上升高度随之减小。

掺砂量和 CBR 值关系曲线见图 12, 可以看出, 随着掺砂量的增大, CBR 值越来越大。当掺砂量为 15% 时, 红黏土 CBR 值为 3.86%, 满足规范中高速公路下路堤填料要求 (不小于 3%); 当掺砂量为 30% 时, 红黏土 CBR 值为 4.65%, 满足规范中高速公路上路堤的填料要求 (不小于 4%); 当掺砂量为 45% 时, 红黏土 CBR 值为 6.31%, 满足规范中高速公路

下路床和路堤的填料要求 (不小于 5%)。

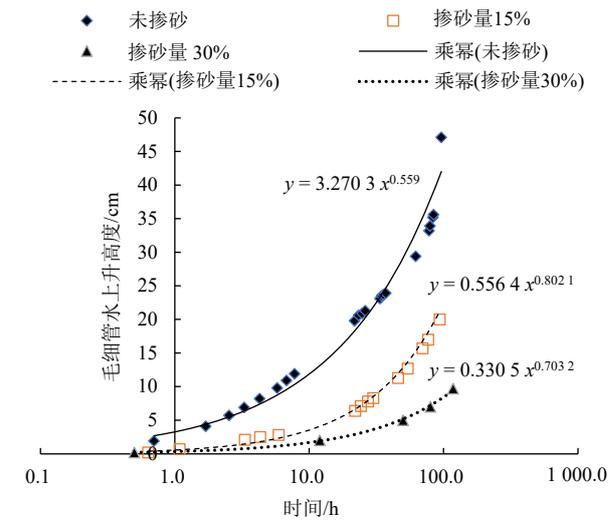


图 11 不同掺砂量时毛细管水上升高度与时间关系曲线

Fig. 11 Relationship between the capillary water rising height and time at different sand content

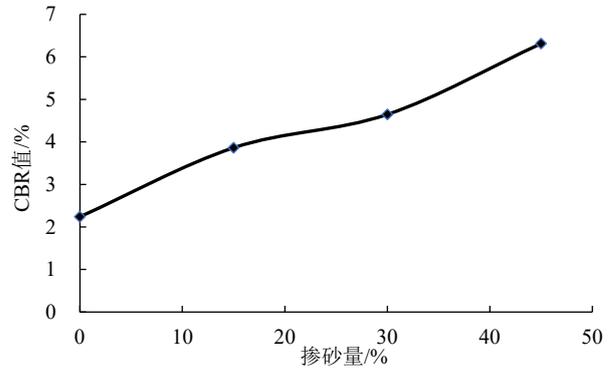


图 12 掺砂量和 CBR 值关系曲线

Fig. 12 Relationship between the sand content and the CBR value

## 2.2 掺山脚砂改良红黏土试验

由于该区域存在大量山脚砂, 如果能够利用山脚砂对红黏土进行改良, 可以大大节省工程成本, 因而进行了山脚砂改良红黏土试验。不同掺砂量的山脚砂改良红黏土性质统计见表 2。

表 2 不同掺砂量的山脚砂改良红黏土性质统计表

Table 2 Statistical table of the properties of the red clay improved by the sand at the foot of mountain with different sand content

掺砂量/ %	最优含 水率/%	最大干密 度/(g/cm <sup>3</sup> )	CBR/%	液限/%	塑限/%	塑性 指数
30	19.8	1.57	18.0	49.4	25.0	24.4
40	18.8	1.62	28.1	45.6	23.8	21.8
50	15.3	1.69	32.9	40.5	21.2	19.3

由表 2 可以看出, 随着掺砂量的增大, 最优含水率、液限、塑限、塑性指数不断降低, 最大干密度和 CBR 值不断增大。《公路路基设计规范》(JTG

D30—2015) [12] 规定上路床填料 CBR 值大于 8%，液限小于 50%，塑性指数小于 26，3 个掺砂量改良红黏土的 CBR 值、液限和塑性指数都满足规范要求，可以作为路基填料。

### 2.3 掺消石灰改良红黏土试验

掺加生石灰也是改良红黏土的一种方法，但是掺加生石灰之后会降低改良土的含水率，当红黏土本身含水率较低时，改良时必须加水，增加了施工难度，因而当红黏土的天然含水率较低时，可以采用掺加消石灰进行改良。为此进行了消石灰改良红黏土试验，不同掺灰量消石灰改良红黏土性质统计见表 3。由表 3 可知，掺加 6% 消石灰时，CBR 值、液限和塑性指数都满足相关规范对于高速公路路基填料的要求；掺加 4% 消石灰时，CBR 值、液限和塑性指数虽都满足规范要求，但是液限非常接近规范限值，因而建议采用 6% 的掺灰量。

表 3 不同掺灰量消石灰改良红黏土性质统计表  
Table 3 Statistical table of the properties of the red clay improved by slaked lime with different lime content

掺灰量/%	最优含水率/%	最大干密度/(g/cm <sup>3</sup> )	CBR/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
4	14.9	1.70	32.5	49.9	27.2	22.6
6	16.2	1.77	31.6	42.1	18.2	23.9

## 3 红黏土填筑试验段试验

为了验证改良红黏土在工程中的实际应用效果，开展了红黏土填筑试验段研究。

### 3.1 掺山脚砂改良红黏土试验段试验

为充分利用当地廉价资源，现场采用掺山脚砂来改良红黏土。现场填筑时的压实度统计见表 4，由表 4 可知，当碾压 5 遍时，所有检测点压实度都大于 93%，但是大部分达不到 94%，而碾压 6 遍时所有检测点压实度都大于 94%。

### 3.2 掺消石灰改良红黏土试验段试验

填料所用的石灰选用 II 级以上新鲜粉灰，使用前 3~5 d，浇水充分消解，消解的石灰应保持一定的湿度，不得产生扬尘，也不得过湿成团。石灰颗粒直径应小于 5 mm，不含未熟化生石灰块及其它杂物，经工地试验室重型击实试验测得 6% 石灰土的最大干密度  $\rho_{dmax}=1.764 \text{ g/cm}^3$ ，最优含水率  $w_0=17.4\%$ 。

现场碾压完成后进行了 16 个点的压实度检测，其平均值为 98.1%，弯沉值平均值为 130，皆满足设计要求。

表 4 现场填筑时的压实度汇总表

Table 4 Summary of field compaction degree

测定/组	压实度/%	
	碾压 5 遍	碾压 6 遍
1	93.60、93.50、	94.60、94.14、
	93.20、93.90	95.70、95.10
2	93.60、94.80、	94.90、94.70、
	93.20、94.60	94.00、95.70
3	93.10、94.60、	96.20、95.20、
	94.30、93.50	95.10、94.30

## 4 结论

通过对广西玉湛高速公路项目采用高液限红黏土作为路基填料的改良技术研究，得到了以下结论：

(1) 该区域红黏土液限大于 50%，为高液限土，CBR 值为 2.24%，不满足规范对高速公路下路堤填料的要求。

(2) 掺河砂改良红黏土时，随着掺砂量的增大，液限、塑限、塑性指数和毛细管水上升高度都随之降低，而 CBR 值随之增大；当掺砂量为 15% 时，红黏土试样的液限就达到 45.6%，不再属于高液限土，其 CBR 值为 3.86%，可以作为高速公路下路堤填料，如果作为高速公路上路堤和路床的填料，需要进一步提高掺砂量。

(3) 掺山脚砂改良红黏土时，随着掺砂量的增大，最优含水率、液限、塑限、塑性指数随之降低，而最大干密度和 CBR 值随之增大；掺山脚砂改良红黏土的掺砂量为 30% 时，CBR 值、液限和塑性指数都满足规范要求，可以作为路基填料。

(4) 掺加 4% 消石灰时，CBR 值、液限和塑性指数虽都满足规范要求，但是液限非常接近规范限值，建议消石灰掺量取 6%。

(5) 经现场试验验证，掺山脚砂或掺消石灰改良高液限红黏土的方案都是可行的，改良土的液限、塑限、塑性指数和 CBR 值都有明显的改善，均可作为高速公路路床和路堤的填料。

## 参考文献

- [1] 蒋文宇. 广西红黏土土质特征及土性改良研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.  
JIANG Wen-yu. Study on soil characteristics and filling performance of Guangxi red clay[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.

- [2] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 中国南方碳酸盐岩上覆红土形成机制研究进展[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 33-40.  
XU Ze-min, HUANG Run-qiu, TANG Zheng-guang, et al. A review of advances and outstanding issues in research on the forming mechanism of laterite in south China[J]. Earth and Environment, 2005, 33(4): 33-40.
- [3] 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 碳酸盐岩酸不溶物作为贵州岩溶区红色风化壳主要物质来源的证据[J]. 矿物学报, 2002, 22(3): 235-242.  
SUN Cheng-xing, WANG Shi-jie, ZHOU De-quan, et al. Insoluble residues of carbonate rocks as source material for red weathering crust in Karst regions of Guizhou province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2002, 22(3): 235-242.
- [4] 屈儒敏, 梅世龙. 红土与红粘土[J]. 水文地质工程地质, 1987(3): 13-17, 34.  
QU Ru-min, MEI Shi-long. Red soil and red clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1987(3): 13-17, 34.
- [5] 李景阳, 朱立军, 王朝富, 等. 碳酸盐岩风化壳及喀斯特成土作用研究[J]. 贵州地质, 1996, 13(2): 139-145.  
LI Jing-yang, ZHU Li-jun, WANG Chao-fu, et al. Weathering crust of carbonate rocks and process of Karst soil formation[J]. Guizhou Geology, 1996, 13(2): 139-145.
- [6] 符必昌, 黄英. 试论碳酸盐岩上覆红土的形成模式及演化趋势[J]. 地质科学, 2003, 38(1): 128-136, 141, 142.  
FU Bi-chang, HUANG Ying. An approach to forming and evolution of laterite overlying carbonate rocks[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(1): 128-136, 141, 142.
- [7] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851-855.  
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 851-855.
- [8] 刘龙武, 杨和平, 康石磊, 等. 红粘土填料的路用性质研究[J]. 公路, 2002(6): 125-128.  
LIU Long-wu, YANG He-ping, KANG Shi-lei, et al. Research on nature of red-clay-filling material used in road[J]. Highway, 2002(6): 125-128.
- [9] 曾静, 邓志斌, 兰霞, 等. 竹城公路高液限土与红粘土路用性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 89-92, 98.  
ZENG Jing, DENG Zhi-bin, LAN Xia, et al. Experimental study on properties of high liquid limit soil and red clay of Zhucheng Highway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 89-92, 98.
- [10] 黄俊, 龚南生, 李晓键. 高等级公路路基红粘土填料试验研究[J]. 路基工程, 2007(3): 30-31.  
HUANG Jun, GONG Nan-sheng, LI Xiao-jian. Experimental study on red clay filling of high-grade highway roadbed[J]. Subgrade Engineering, 2007(3): 30-31.
- [11] 张伟华. 衡枣高速公路高液限粘土的主要工程性质[J]. 湖南交通科技, 2003, 29(2): 39-40.  
ZHANG Wei-hua. The main engineering properties of high liquid limit clay of Hengzao Expressway[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2003, 29(2): 39-40.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基施工技术规范: JTG/T 3610—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specifications for Construction of Highway Subgrades: JTG/T 3610 — 2019[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement: JTG D50 — 2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [16] 叶琼瑶, 陶海燕. 高液限红粘土的改良试验研究[J]. 公路, 2007(1): 148-151.  
YE Qiong-yao, TAO Hai-yan. Experimental study on improved high liquid limit red clay[J]. Highway, 2007(1): 148-151.
- [17] 罗斌, 赵雄. 碎石改良高液限红粘土的试验研究[J]. 公路工程, 2009, 34(2): 131-134.  
LUO Bin, ZHAO Xiong. Test study on improving high liquid limit red clay with crushed stone[J]. Highway Engineering, 2009, 34(2): 131-134.