

DOI: [10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-14](https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-14)

石灰改良高液限土强度特性的函数模型研究

胡宏坤^{1,2}, 邵珠山^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:针对广西荔玉高速公路基沿线产生的大量高液限土弃方问题,采用生石灰对高液限土进行改良处理。选取弃土场的高液限土,分别配制不同初始含水率、不同石灰掺量的试样进行侧限压缩试验和快剪试验,采用基本初等数学函数模型拟合不同饱和状态、不同初始含水率下石灰掺量对试件压缩特性和抗剪强度影响。结果表明:(1)高液限土的压缩系数随石灰掺量增加呈指数形式减小;(2)不同饱和状态试件的黏聚力和内摩擦角随石灰掺量增加呈二次函数形式变化;(3)高液限土具有水敏性,饱和素土试件最大抗剪强度对应的含水率较击实试验最大干密度对应的含水率高3%~6%;(4)当初始含水率不高于26.73%时,建议石灰掺量不低于6%,否则改良高液限土的石灰掺量不低于8%,可在满足经济性的前提下达到较好的改良效果。

关键词:高液限土; 石灰掺量; 压缩特性; 抗剪强度; 数学模型

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0109-09

Research on function model of lime-improved high liquid limit soil strength characteristics

HU Hongkun^{1,2}, SHAO Zhushan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;
2. Shaanxi Key Laboratory for Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: In view of the large number of high liquid limit soil abandonment problems along the roadbed of the Liyu Expressway in Guangxi, quick lime was used to improve the high-liquid limit soil. The high-liquid limit soil samples with different initial water content and different lime content from the spoil field were used to conduct lateral compression test and fast shear test, and the basic elementary mathematical function model was used to fit different saturation states and different initial water content. The effect of lower lime content on the compression characteristics and shear strength of the specimen is tested. The results show that: (1) The compression coefficient of high liquid limit soil decreases exponentially with the increase of lime content; (2) the cohesion and internal friction angle of the specimens in different saturated states change with the increase of lime content in the form of quadratic function; (3) High liquid limit soil has water sensitivity. The moisture content corresponding to the shear strength is 3%~6% higher than the moisture content corresponding to the maximum dry density of the compaction test; (4) When the initial moisture content is lower than 26.73%, it is recommended that the lime content is not less than 6%, otherwise the lime content of the modified high liquid limit soil is not less than 8%, which can be achieved under the premise of meeting economics and better improvement effect.

Keywords: high liquid limit soil; lime content; compression characteristics; shear strength; mathematical model

收稿日期: 2020-06-04; 修订日期: 2020-07-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11872287); 陕西科技统筹创新工程计划项目(2015TZC-G-8-9)

第一作者: 胡宏坤(1994-), 男, 湖北襄阳人, 硕士, 主要从事特殊土改良处理工作和研究。E-mail: hongk@xauat.edu.cn

0 引言

高液限土是广西地区基建活动中最常遇见的一种特殊土。由于高液限土天然含水率、孔隙比和液塑限高,碾压时不易降到最佳含水率范围内,因而很难达到路基规范要求的压实度且未经处理的高液限土的强度通常较低,不适宜直接作为路基填料。此外,高液限土水稳定性较差^[1-2],当含水率改变时,路基强度急剧降低,发生沉降和边坡溜塌等灾害。

为了得到符合规范要求的路基填料,广大学者对高液限土的物理力学性质^[3]及改良特性进行研究。相较于在高液限土中掺入砂^[4]、碎石^[5]、纤维^[6]等材料改变颗粒组成的物理改良方式,石灰改良不仅可以改变高液限土的含水率和结构^[7],而且能降低膨胀势^[8-9]、提高水稳定性^[10-11]。因其改良效果好,成本低廉易于推广使用,引起了广大国内外学者关注。BELL^[12]研究了养护龄期、温度对石灰改良黏土的强度、线缩率的影响,达到最佳强度的石灰掺量为4.5%~8%。KHEMISSE等^[13]研究表明掺入4%的石灰对粘土液塑限指数、CBR以及剪切强度的改良效果最佳,得到高塑性、高膨胀黏土的工程特性最好。SHARMA等^[14]研究表明石灰的加入会导致黏土塑性指数降低,处理后的土黏聚力提高5%,内摩擦角增加。PAULA等^[15]通过直剪试验研究石灰改良沉

积物样品并进行了元素分析,表明Al、Si、Ca、K元素与黏聚力有很强的相关性。刘鑫等^[16]采用石灰对广梧高速沿线高液限粉土进行改良,建议掺用5%的石灰。

以上学者研究了不同地区、不同石灰掺量对高液限土无侧限抗压强度、抗剪强度、水稳定性以及加州承载比的影响,给出了石灰改良高液限土掺量的范围为4%~8%,但定量研究石灰掺量对高液限土压缩特性和抗剪强度的文献相对较少。何群等^[17]分析了固结度对软土抗剪强度的影响,给出抗剪强度指标的函数模型。闫小庆等^[18]认为深圳软土的压缩模量随孔隙体积含量、尺度大小和孔隙连通量呈负幂函数变化。因而本文针对广西蒙山荔玉高速沿线的高液限土,通过现场取样、室内直剪和侧限压缩试验,结合初等数学函数模型分析了不同初始含水率下石灰掺量对高液限抗剪强度和压缩特性的影响,确定不同初始含水率下最优石灰掺量,为实际工程提高经济效益。

1 研究内容

1.1 高液限土性质

根据广西荔玉高速公路第四标段《工程地质勘察报告》以及《施工图设计》显示,该段路基沿线高液限土分布如图1所示,标段全长14.545 km,桥隧比为21.57%,沿线高液限土段占路基全线27.25%。

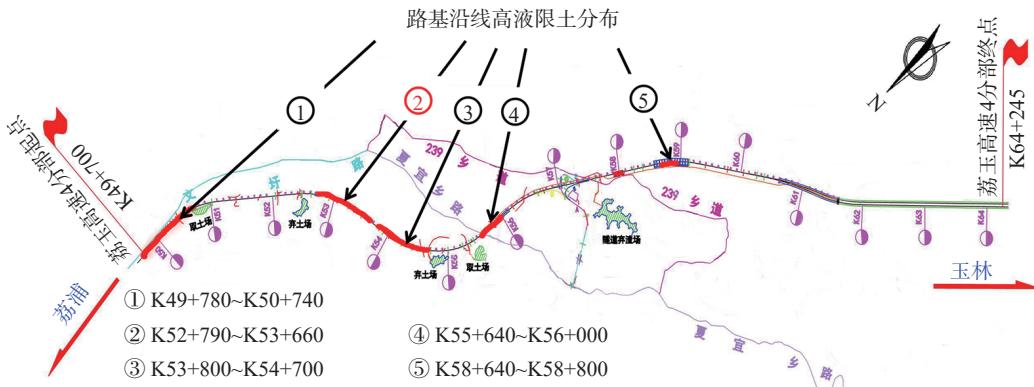


图1 路基沿线高液限土分布示意图

Fig. 1 Distribution of high liquid limit soil along the subgrade

地勘资料显示该标段高液限土物理力学性质几乎相同,尤以K52+790—K53+660段文圩镇内最长,达960 m,占沿线高液限土方量的30%左右,取该段高液限土作为试验材料具有很好的代表性。依据《公路土工试验规程》,对弃土场高液限土进行比重、液塑限以及击实试验。最佳含水率为20.84%,最大干密度为1.60 g/cm³。高液限土物理力学性质指标见表1。

表1 弃方段高液限土参数指标

Table 1 Parameters of high liquid limit soil of spoil

样品状态	取样深度/m	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	土粒比重
原状土	2.1~2.3	31.30	53.30	28.50	2.76
原状土	6.5~6.7	36.30	52.10	33.70	2.74
扰动土	1.3~1.5	33.43	51.93	22.46	2.79

1.2 研究方法

改良广西荔玉高速沿线弃土场的高液限土初含水

率为 21%~36%, 石灰掺量为高液限土质量的 2%~8%, 且以 2% 的变化量递增。按照击实试验确定的最大干密度, 采用静压法制样。对不同饱和状态、不同初始含水率以及不同石灰掺量的试件进行侧限压缩和直剪试验。在不同饱和状态下, 试样有 6 种不同初始含水率、5 种不同石灰掺量, 共 30 个样本, 符合统计学中大样本的要求^[19], 其含水率变化范围从最佳含水率到天然最大含水率, 石灰掺量覆盖推荐最佳掺量 4%~8%, 可以代表该改良土的变化规律, 在合理抽样的前提下, 可以由样本推测出总体情况。根据试件压缩特性和抗剪强度随石灰掺量的变化趋势, 选择基本初等数学函数模型拟合, 确定石灰掺量对试件压缩特性和抗剪强度的函数模型。在已知初始含水率和石灰掺量的条件下, 准确预测改良土的压缩系数和抗剪强度, 确定最经济合理的石灰掺量, 指导路基施工。

2 改良土的压缩特性

压缩系数是评价路基填料的重要指标之一, 采用南京土壤仪器厂 GZQ-1 型全自动气压固结仪对试件进行压缩试验, 试件尺寸为 61.8 mm×20 mm, 加压盖板周围用湿棉围住, 保持试件含水率, 在平衡自重后即开始试验。试件加压稳定标准采用 0.01 mm 的变形量进行控制, 加荷顺序为 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa。随着石灰掺量的增加试件的压缩系数如图 2 所示。

在不同初始含水率下, 随着上负荷载增加, 试件逐渐压密, 压缩系数随石灰掺量的增加逐渐减小, 最终趋于稳定, 符合指数函数形式变化, 数学函数模型如式(1)所示:

表 2 试件压缩系数与石灰掺量的指数模型拟合结果

Table 2 Fitting results of exponential model between compression coefficient and lime content

数学模型	$\alpha_{1-2}=A+Be^{(-\chi/C)}$					
初始含水率	20.84%	23.68%	26.73%	29.71%	33.75%	34.93%
A	0.04±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00	0.05±0.00	0.08±0.00	0.07±0.00
B	0.10±0.00	0.13±0.00	0.16±0.00	0.20±0.00	0.25±0.00	0.29±0.00
C	2.26±0.07	2.59±0.11	2.67±0.20	2.88±0.14	2.46±0.07	3.24±0.05
R ²	0.999 8	0.999 6	0.998 9	0.999 6	0.999 8	1.000 0
Adj.R ²	0.999 6	0.999 2	0.997 7	0.999 1	0.999 7	0.999 9

注: R² 为相关系数平方; Adj.R² 为调整后相关系数平方。

3 改良土的抗剪强度

为研究初始含水率和石灰掺量对高液限土抗剪强度的影响, 采用 6 种不同初始含水率, 5 种不同石灰掺量共 30×2 组试样进行快剪试验。其中一组试件进行抽

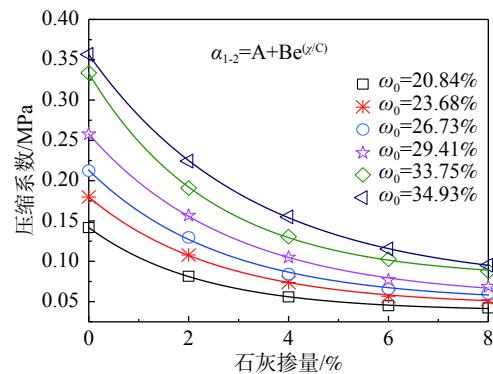


图 2 压缩系数指数模型拟合

Fig. 2 Fitting of the compression coefficient exponential model

$$\alpha_{1-2}=A+Be^{(-\chi/C)} \quad (1)$$

式中: α_{1-2} ——试件上负荷载在 100~200 kPa 间的压缩系数;

χ ——石灰掺量;

A、B、C——拟合参数。

试件压缩系数随石灰掺量关系的拟合结果见表 2。

在相同石灰掺量下, 不同初始含水率试件压缩系数改变率(掺灰试件相较素土试件压缩系数的改变量/素土试件压缩系数)相差较小, 低掺量(2%)压缩系数改变率为 40%, 压缩系数降低到 60%; 当石灰掺量超过 4% 时, 压缩系数减小很少, 压缩系数改变率为 60%; 高掺量(8%)下, 压缩系数降低到 30%。由图 2 可知: 所有试件的压缩系数均小于 0.5 MPa⁻¹, 表明试样为中等压缩性土, 可作为公路路基设计规范 6 m 以下路基填料。如若路基填筑高度达 15 m, 则路基填料的压缩系数不大于 0.1 MPa⁻¹, 当含水率不高于 26.73% 时, 石灰掺量不低于 4%, 否则石灰掺量不低于 8%, 可达到高填方路基填料对压缩性的要求。

真空饱和。采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪, 试样尺寸为 61.8 mm×20 mm, 剪切速率为 0.8 mm/min, 荷载加载序列分别为 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 400 kPa, 剪切量为 6 mm。

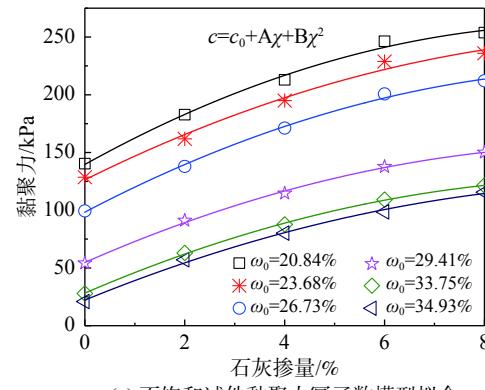
3.1 不同饱和状态试件黏聚力结果分析

根据直剪试验结果,绘制不同初始含水率下,黏聚力随石灰掺量变化情况。试件黏聚力随石灰掺量的模型拟合效果分别如图3(a)、3(b)所示。

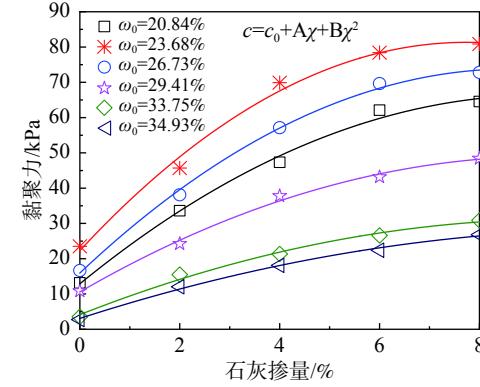
在图3(a)中,对于不饱和试件,初始含水率越高,相同掺量的石灰对高液限土黏聚力提升越明显。相比较素土试件,少量石灰掺量(2%)对高液限土黏聚力改良效果明显,黏聚力提升达28%~170%;加入大量石灰(8%)改良后,黏聚力可提高80%~450%。在图3(b)中,对于饱和试件,石灰可以增加高液限土的水稳定性。相较于未经饱和试件的黏聚力,饱和后的素土试件黏聚力降低80%~90%,而改良试件随着石灰掺量增加,黏聚力降低率(饱和前后黏聚力的变化量/不饱和试件的黏聚力)由72%~81%减小到66%~77%;掺入石灰改良的试件,黏聚力降低率减小6%~18%;初始含水率23.68%和26.73%的素土试件较最佳含水率(20.84%)素土试件的黏聚力高,表明高液限土具有水敏性,遇水后不同初始含水率的素土试件强度衰减不同。由于高液限土具有水敏性,高于最佳含水率3%~6%的高液限土在遇水后强度衰减更小,具有较好的水稳定性^[20~21]。

SHARMA等^[14]研究表明,石灰的掺入会使黏聚力增加,进一步添加石灰时,黏聚力有降低的趋势。由于石灰本身没有黏性,因而改良高液限土黏聚力存在最佳的石灰掺量。当初始含水率不高于26.73%且石灰掺量为6%时,黏聚力增长幅度趋缓;而当初始含水率高于26.73%时,由于初始含水率较高,达到最大黏聚力消耗的石灰增多,石灰掺量为8%时,黏聚力仍有上升趋势,建议改良石灰掺量不低于8%。对于不同状态和初始含水率的试件,随着石灰掺量增加,黏聚力呈幂函数形式变化,且数学函数模型如式(2)所示:

$$c = c_0 + A\chi + B\chi^2 \quad (2)$$



(a) 不饱和试件黏聚力幂函数模型拟合



(b) 饱和试件黏聚力幂函数模型拟合

图3 试件黏聚力的模型拟合

Fig. 3 Model fitting of cohesion of the samples

式中:
c——试件黏聚力;

c_0 ——不同饱和状态素土试件黏聚力;

χ ——石灰掺量;

A、B——拟合参数。

拟合结果见表3。

3.2 不同状态试件内摩擦角结果分析

绘制不同初始含水率下,未经饱和试件内摩擦角随石灰掺量变化情况,模型拟合结果如图4所示。

表3 不同状态试件黏聚力幂函数模型拟合结果

Table 3 Fitting results of power function model for cohesion of specimens in different states

试件状态	数学模型	$c = c_0 + A\chi + B\chi^2$					
		初始含水率	20.84%	23.68%	26.73%	29.71%	33.75%
未饱和	c_0	139.62±4.55	126.32±6.07	98.34±3.01	54.77±1.94	28.24±1.05	22.19±2.48
	A	24.06±2.69	21.46±3.59	22.70±1.78	19.02±1.15	18.65±0.62	17.65±1.74
	B	-1.19±0.32	-0.92±0.43	-1.04±0.21	-0.89±0.14	-0.87±0.07	-0.76±0.18
	R^2	0.9947	0.9899	0.9976	0.9986	0.9996	0.9975
	Adj. R^2	0.9894	0.9798	0.9952	0.9971	0.9991	0.9949
	c_0	12.89±2.05	22.30±2.76	15.94±1.47	10.58±1.32	4.14±1.17	3.08±0.71
饱和	A	11.56±1.21	15.26±1.63	13.36±0.87	8.20±0.78	5.57±0.69	4.57±0.42
	B	-0.62±0.15	-0.99±0.20	-0.77±0.10	-0.44±0.09	-0.29±0.08	-0.21±0.05
	R^2	0.9948	0.9929	0.9978	0.9958	0.9932	0.9968
	Adj. R^2	0.9896	0.9857	0.9956	0.9916	0.9863	0.9936

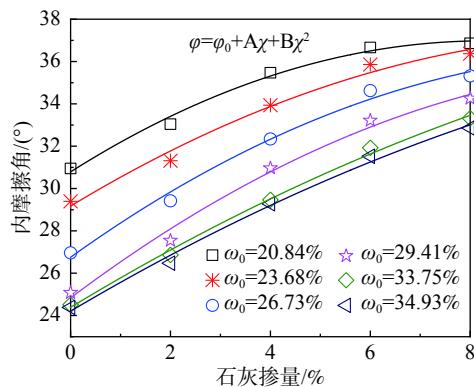


图 4 未饱和试件内摩擦角幂指数模型拟合

Fig. 4 Power index model fitting of internal friction angle of unsaturated specimen

在图 4 中, 不同初始含水率的高液限土试件, 随着石灰掺量的增加, 内摩擦角呈上升趋势。相较于素土试件, 少量石灰掺量(2%)对高液限土内摩擦角改良效果不明显, 内摩擦角仅提高6%~10%; 加入大量石灰

(8%)改良后, 内摩擦角可提高19%~36%; 对于不同初始含水率的高液限土, 相同石灰掺量对初始含水率高的试件内摩擦角改良效果更好; 由于石灰土发生絮凝与团聚反应, 导致黏土粒径颗粒团化, 因而土的内摩擦角增加。而石灰本身没有明显的摩擦力, 过量的石灰会导致内摩擦角降低, 当石灰掺量为6%时, 初始含水率不高于26.73%的试件内摩擦角增长趋于平缓; 当初始含水率高于26.73%时, 石灰掺量高于6%时, 内摩擦角仍小幅增长, 满足幂函数的变化规律, 采用二次函数模型进行拟合如式(3)所示:

$$\varphi = \varphi_0 + A\chi + B\chi^2 \quad (3)$$

式中: φ —试件内摩擦角;

φ_0 —素土试件内摩擦角;

χ —石灰掺量;

A 、 B —拟合参数。

拟合结果如表4所示。

表 4 未经饱和试件内摩擦角的幂函数模型拟合结果

Table 4 Fitting results of power function model for internal friction angle of unsaturated specimen

函数模型	$\varphi = \varphi_0 + A\chi + B\chi^2$					
初始含水率	20.84%	23.68%	26.73%	29.71%	33.75%	34.93%
φ_0	30.79±0.32	29.17±0.45	26.75±0.43	24.83±0.49	24.39±0.28	24.21±0.35
A	1.49±0.19	1.43±0.27	1.69±0.26	1.77±0.26	1.43±0.17	1.40±0.21
B	-0.09±0.02	-0.06±0.03	-0.07±0.03	-0.07±0.03	-0.04±0.02	-0.04±0.02
R^2	0.991 3	0.987 2	0.991 5	0.991 0	0.996 6	0.994 3
Adj. R^2	0.982 7	0.974 5	0.983 0	0.982 1	0.993 2	0.988 7

根据直剪试验结果, 分别采用幂函数、指数函数、对数函数模型对饱和试件的内摩擦角与石灰掺量的关系进行研究, 三种初等函数模型均能拟合成功。将不同拟合结果进行模型效果比较, 无论采用AIC(赤池信息准则, 衡量模型拟合优良性标准, AIC越小, 模型拟合效果越好)或是BIC(贝叶斯信息准则, BIC越小, 模型拟合效果越好)比较法, 幂函数和指数函数模型较对数函数模型能达到更好的拟合效果。其中图5(a)为采用幂函数模型拟合, 图5(b)为采用指数函数模型进行拟合。

对于饱和素土试件, 初始含水率越低, 内摩擦角小率(不同状态试件内摩擦角变化量/不饱和试件的内摩擦角)越大。相较于素土试件, 不同初始含水率的改良试件内摩擦角提高约14%~30%。掺灰后, 试件的内摩擦角增加率((掺灰试件与素土试件内摩擦角的增量/素土试件内摩擦角)为12%~32%。初始含水率在20.84%~26.73%范围内, 随着石灰掺量的增加, 内摩擦角趋于稳定; 而初始含水率在29.71%~34.93%范围

内, 当石灰掺量高于8%时, 内摩擦角有减小的趋势。因而采用AIC、BIC以及F检验法比较幂函数和指数函数模型的拟合效果时, 却没有得到推荐模型。当石灰掺量大于8%时, 饱和试件内摩擦角是趋于稳定还是减小还有待试验验证。由于高掺量的石灰在改良低含水率的高液限土中是不经济的, 因此, 增加部分高初始含水率、高石灰掺量的饱和试件抗剪强度试验进行验证是很有必要的。试验设计方案见表5。

根据表5结果, 采用赤池信息准则以及贝叶斯信息准则对幂函数和指数模型进行拟合结果进行分析: 幂函数模型的AIC值为20.60<指数函数AIC值为58.61; 幂函数模型的BIC值为0.39<指数函数BIC值为38.39, 由于AIC值、BIC值较小能更好反映模型拟合的优良性, 因而对于饱和试件的黏聚力随掺石灰掺量的增加呈幂函数形式变化, 模型拟合结果见表6。

3.3 试件抗剪强度包线变化分析

绘制不同饱和状态、不同初始含水率下石灰掺量

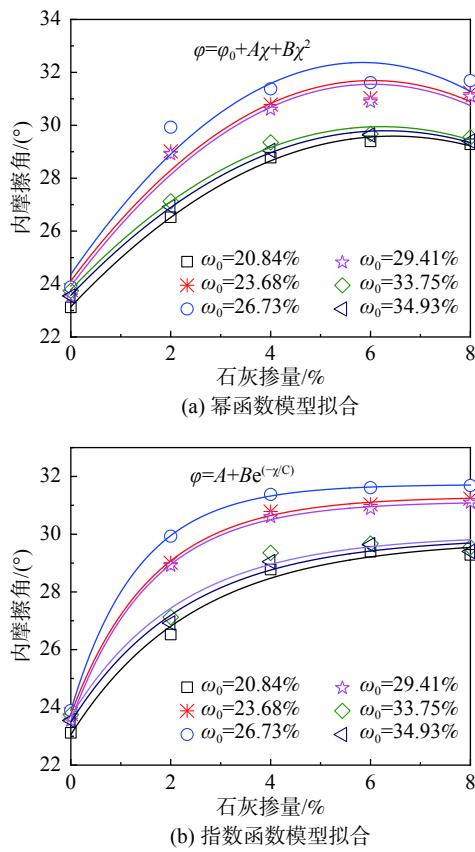


图 5 内摩擦角的模型拟合

Fig. 5 Model fitting of friction angle

对高液限土抗剪强度的影响如图 6, 图 7 所示。图例 A、B, A、B 分别为初始含水率和石灰掺量。如 20.84-0 代表初始含水率 20.84%, 石灰掺量 0% 的试件对应的抗剪强度包线, 将最佳含水率的素土试件 (20.84-0) 对应的强度包线, 称为标准强度包线。

在图 6 中, 对于未经饱和试件, 试件抗剪强度随含水率升高而降低。根据标准强度包线在图中位置, 随着初始含水率的升高, 高液限土需消耗更多的石灰才能达到标准强度。当初始含水率不高于 26.73%, 石灰掺量在 6% 范围内时, 试件抗剪强度增加明显; 当含水率高于 26.73% 时, 建议石灰掺量不低于 8%, 此时改良土的

表 5 试验设计方案
Table 5 Experimental design scheme

初始含水率/%	石灰掺量/%	黏聚力	内摩擦角	R	Adj. R ²
29.71	10	51.85	31.10	1.000	0.999
	12	47.45	31.78	0.998	0.996
	10	32.20	29.87	0.998	0.996
	12	33.5	29.89	0.998	0.995
34.93	10	26.5	29.56	0.999	0.997
	12	30.25	30.29	0.994	0.989

抗剪强度仍有明显增加。根据标准强度包线在不同石灰掺量强度包线中的位置结合石灰掺量对抗剪强度增长变化率的影响, 建议初始含水率不高于 26.73% 时, 石灰掺量为总质量分数的 6%; 当含水率高于 26.73% 时, 石灰掺量不低于为总质量分数的 8%, 此时改良试件抗剪强度不仅能达到标准强度, 且不会造成石灰的浪费。

在图 7 中, 相同初始含水率下, 饱和试样的抗剪强度随石灰掺量增加而增大, 且相邻两强度包线间增加幅度逐渐减小; 当石灰掺量高于 6% 时, 随着石灰掺量增加, 试件抗剪强度增长较小。

由于高液限土具有水敏性, 吸水后不同初始含水率试件的强度衰减不同。初始含水率为 23.68% 和 26.73% 的饱和素土试件的抗剪强度均较最佳含水率 20.84% 对应的标准抗剪强度高, 表明浸水后的高液限土水稳定性最佳时对应的含水率较击实试验对应的最佳含水率高 3%~6%, 因此在进行高液限土路基填筑时, 建议路基填料含水率比最佳含水率高 3%~6%。由于高液限土的击实曲线与 CBR 曲线是不重合的双驼峰曲线^[22~23], 即最大 CBR 值对应的含水率比最大干密度对应的含水率高, 这对于高液限土抗剪强度也适用。若采用饱和素土试件中的最大抗剪强度作为标准强度包线 (23.68-0), 则很少掺量的石灰 (2%) 会对试件的抗剪强度有很大提升, 可以达到标准抗剪强度。

4 结论

对于广西荔玉高速沿线高液限土, 分析了饱和状

表 6 饱和试件内摩擦角拟合结果

Table 6 Fitting results of internal friction angle of saturated specimen

函数模型	方程		$\varphi = \varphi_0 + A\chi + B\chi^2$				
	初始含水率	20.84%	23.68%	26.73%	29.71%	33.75%	34.93%
幂函数	φ_0	23.14±0.14	24.12±0.72	24.36±0.95	23.92±0.76	23.79±0.23	23.58±0.12
	A	2.00±0.08	2.51±0.43	2.74±0.56	2.53±0.45	1.98±0.14	1.97±0.07
	B	-0.15±0.01	-0.21±0.05	-0.23±0.07	-0.21±0.05	-0.16±0.02	-0.16±0.01
	R ²	0.998 4	0.970 2	0.953 9	0.967 2	0.995 4	0.998 8
	Adj. R ²	0.996 8	0.940 4	0.907 8	0.934 5	0.990 8	0.997 5

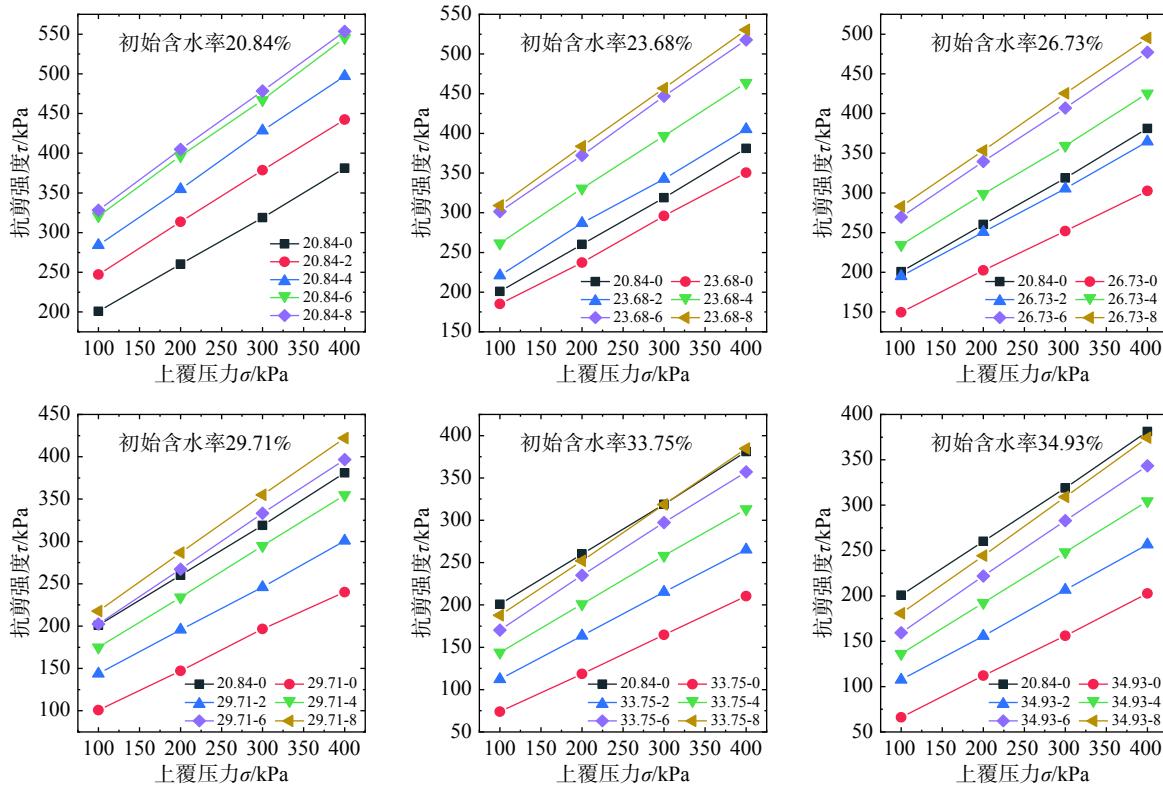


图 6 未经饱和试样抗剪强度包线

Fig. 6 Shear strength envelope of unsaturated specimen

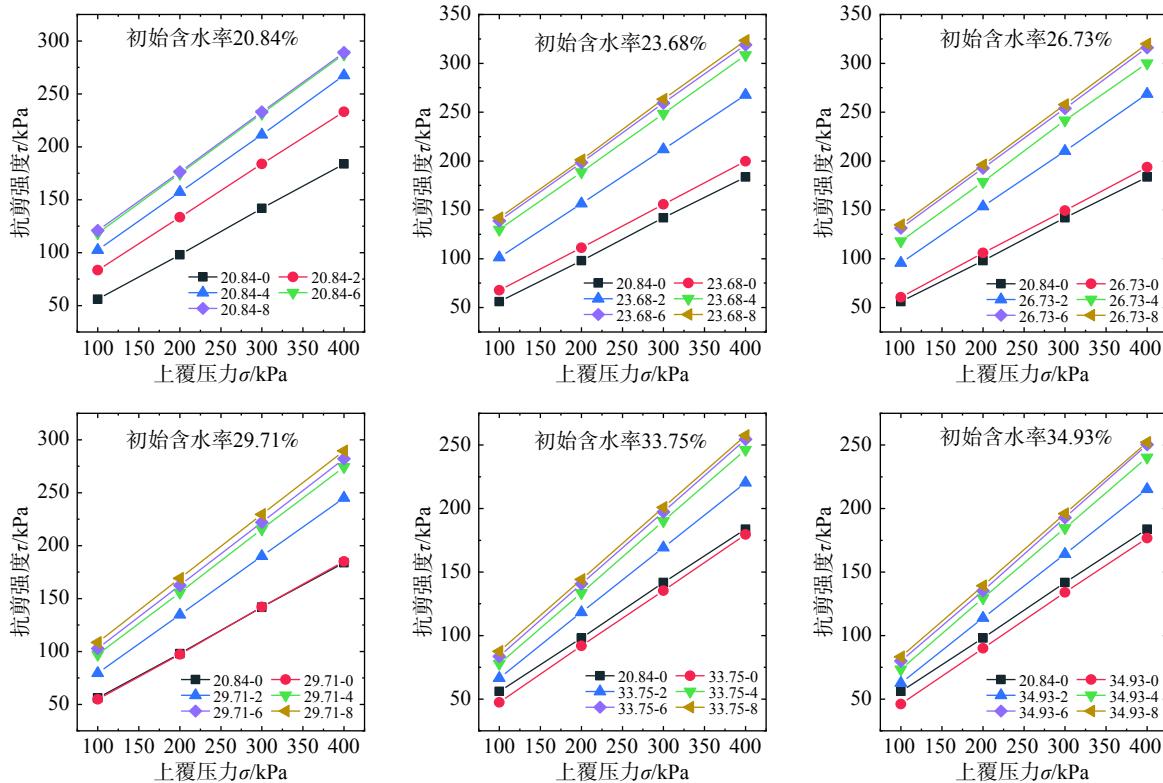


图 7 饱和试样抗剪强度包线

Fig. 7 Shear strength envelope of saturated specimen

态、初始含水率、石灰掺量对试件侧限压缩特性和抗剪强度的影响，并采用基本初等数学函数模型进行拟合。通过测初始含水率、石灰掺量，确定改良土的压缩特性和抗剪强度。

(1) 初始含水率越高的高液限土，改良所需的石灰越多。随着石灰掺量的增加，压缩系数呈指数函数形式减小直至稳定。当石灰掺量为2%时，压缩系数减小幅度高达40%，即较少的石灰掺量可以明显改善高液限土的压缩特性。

(2) 初始含水率越高，试件抗剪强度越小。对于不同饱和试件黏聚力和内摩擦角随石灰掺量的增加呈二次函数形式增加，过量的石灰会造成试件抗剪强度的下降。

(3) 高液限土具有水敏性，浸水后不同初始含水率的素土试件强度衰减不同。对于饱和素土试件，最大抗剪强度对应的含水率较击实试验获得最大干密度对应的含水率高3%~6%，而掺加石灰可以增加高液限土水稳定性。在路基填筑中，填料的含水率要高于最佳含水率3%~6%，此时即具有较高的水稳定性，又能达到路基压实度。

(4) 改良不同初始含水率的广西荔玉高速沿线高液限土，存在最经济的石灰掺量。石灰的掺入主要提高试件的黏聚力而对内摩擦角影响较小。当含水率不高于26.73%时，建议石灰掺量不低于6%，否则石灰掺量不低于8%。

参考文献 (References) :

- [1] 曾庆建, 刘宝臣, 张炳晖, 等. 红黏土崩解特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 93–97. [ZENG Qingjian, LIU Baochen, ZHANG Binghui, et al. An experimental study of the disintegration characteristics of red clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 93–97. (in Chinese with English abstract)]]
- [2] 孙德安, 李培, 高游, 等. 红黏土浸水变形特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 74–78. [SUN Dean, LI Pei, GAO You, et al. An experimental study of deformation characteristics of lateritic clay due to wetting [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 74–78. (in Chinese with English abstract)]]
- [3] 李健, 孙德安, 陈波, 等. 浙西饱和红黏土的物理力学特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 51–57. [LI Jian, SUN Dean, CHEN Bo, et al. An experimental study of the physical and mechanical behavior of the saturated lateritic clay in western Zhejiang [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 51–57. (in Chinese with English abstract)]]
- [4] 徐奋强, 洪宝宁, 孟云梅. 高液限土路基掺沙改良路用特性试验 [J]. 水利水电科技进展, 2014(6): 76–81. [XU Fenqiang, HONG Baoning, MENG Yunmei. Experimental study on road properties of high liquid limit soil improvement by mixing sand [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014(6): 76–81. (in Chinese with English abstract)]]
- [5] 吴帅峰, 蔡红, 魏迎奇, 等. 土石混合料剪切机理及抗剪强度分量特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(z2): 230–234. [WU Shuaifeng, CAI Hong, WEI Yingqi, et al. Shear mechanism and shear strength component characteristics of soil-stone mixtures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(z2): 230–234. (in Chinese with English abstract)]]
- [6] 阮波, 彭学先, 米娟娟, 等. 聚丙烯纤维加筋红黏土抗剪强度特性试验研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 705–710. [RUAN Bo, PENG Xuexian, MI Juanjuan, et al. Experimental study on shear strength of polypropylene fiber reinforced red clay [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(4): 705–710. (in Chinese with English abstract)]]
- [7] EL SHINAWI A. Instability improvement of the subgrade soils by lime addition at Borg El-Arab, Alexandria, Egypt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 130: 195–201.
- [8] 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 & Environment, 2005, 40(5): 681–687.
- [9] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改性膨胀土施工最佳含水率确定方法探讨 [J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 517–521. [GUO Aiguo, KONG Lingwei, HU Mingjian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 517–521. (in Chinese with English abstract)]]
- [10] 刘顺青, 洪宝宁, 方庆军, 等. 高液限土和红黏土的水敏感性研究 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2013, 30(1): 78–83. [LIU Shunqing, HONG Baoning, FANG Qingjun, et al. Study on the water sensitivity of high liquid limit soil and red clay [J]. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2013, 30(1): 78–83. (in Chinese with English abstract)]]
- [11] 梁伟, 欧孝夺. 南宁高液限土路基石灰改良试验研究 [J]. 建筑科学, 2008, 24(7): 57–60. [LIANG Wei, OU Xiaoduo. Experimental study on high liquid limit soil roadbed improved with lime in Nanning [J]. Building Science, 2008, 24(7): 57–60. (in Chinese with English abstract)]]
- [12] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J].

- [13] KHEMISSE M, MAHAMEDI A. Cement and lime mixture stabilization of an expansive overconsolidated clay [J]. *Applied Clay Science*, 2014, 95: 104–110.
- [14] SHARMA L K, SIRDESAI N N, SHARMA K M, et al. Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study [J]. *Applied Clay Science*, 2018, 152: 183–195.
- [15] PAULA F A, ANDRY R, HARIFIDY R, et al. Shear strength performance of marine sediments stabilized using cement, lime and fly ash [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 184: 454–463.
- [16] 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 with English abstract)]
- [17] 何群, 冷伍明, 魏丽敏. 软土抗剪强度与固结度关系的试验研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2005, 2(2): 51–55. [HE Qun, LENG Wuming, WEI Limin. Experimental study on relationship between soft soil's shear strength and degree of consolidation [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2005, 2(2): 51–55. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 闫小庆, 周翠英, 房营光, 等. 荷载作用下软土压缩模量与孔隙结构关系研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2018, 57(5): 57–63. [YAN Xiaoqing, ZHOU Cuiying, FANG Yingguang, et al. Research on relationship between compression modulus of soft soil under loading and its pore structure [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2018, 57(5): 57–63. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 谢里阳, 刘建中. 样本信息聚集原理与P-S-N曲线拟合方法 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(15): 96–104. [XIE Liyang, LIU Jianzhong. Principle of sample polymerization and method of P-S-N curve fitting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(15): 96–104. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 陈开圣. 干湿循环下红黏土裂隙演化规律及对抗剪强度影响 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 89–95. [CHEN Kaisheng. Fracture evolution and shear strength of red clay under dry wet cycles [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(1): 89–95. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 张祖莲, 梁谏杰, 黄英, 等. 干湿循环作用下红土抗剪强度与微结构关系研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(3): 78–85. [ZHANG Zulian, LIANG Jianjie, HUANG Ying, et al. A study of the relationship between shear strength and microstructure of laterite under drying and wetting cycles [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 78–85. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王林峰, 田耘, 曾表, 等. 高液限红黏土的压实特性与路基填筑方案 [J]. *材料导报*, 2019, 33(10): 1666–1670. [WANG Linfeng, TIAN Yun, ZENG Biao, et al. Compaction characteristics of high liquid limit red clay and subgrade filling scheme [J]. *Materials Review*, 2019, 33(10): 1666–1670. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张燕清, 吴立坚, 宋常军. 高液限土的最大CBR强度与试验方法 [J]. *公路交通科技*, 2016, 33(10): 53–59. [ZHANG Yanqing, WU Lijian, SONG Changjun. Maximum CBR strength of high liquid limit soil and test method [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016, 33(10): 53–59. (in Chinese with English abstract)]