

Study on High Liquid Limit Clay Composite Stabilizer Based on Orthogonal Test

Chunsheng Liu¹, Hui Sun², Bo Song³, Liang Xu⁴, Sihan Chen⁵, Hongguang Jiang^{5*}

¹Qilu Transportation Development Group-Jining Branch, Jining Shandong

²Qilu Transportation Development Group, Jinan Shandong

³Shandong Transportation Engineering Consultation Company Limited, Jinan Shandong

⁴The Second Construction Limited Company of China Construction Engineering Division, Jinan Shandong

⁵School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

Received: Nov. 6th, 2019; accepted: Nov. 21st, 2019; published: Nov. 28th, 2019

Abstract

Aiming at high-liquid limit clay in Yellow River flood plain of Shandong province, a composite high liquid limit clay stabilizer—CGM stabilizer, was prepared by using quick lime, industrial solid waste materials desulfurization gypsum and pulping white mud as raw materials. The content of each component in the stabilizer was 0, 2% and 4%, respectively. To confirm the optimum dosage of each component, the variation of the limit moisture content and unconfined compressive strength of each group was analyzed by orthogonal test. The range analysis clearly indicates that the influence degree of the three factors on limit moisture content is in such an order: desulfurization gypsum, quick lime and pulping white, and on unconfined compressive strength is in another order: quick lime, desulfurization gypsum and pulping white. Considering the modification effect comprehensively, the ratio of stabilizer was set as quick lime:desulfurization gypsum:pulping white mud = 40:40:20, and the optimal content of CGM stabilizer was set as 10%.

Keywords

High Liquid Limit Clay, Composite Stabilizer, Limit Moisture Content, Unconfined Compressive Strength, Orthogonal Test

基于正交试验的高液限黏土复合改性剂研究

柳春生¹, 孙辉², 宋波³, 许亮⁴, 陈思涵⁵, 蒋红光^{5*}

¹齐鲁交通发展集团济宁分公司, 山东 济宁

²齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

³山东省交通工程监理咨询有限公司, 山东 济南

*通讯作者。

⁴中建八局第二建设有限公司, 山东 济南

⁵山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

Email: hongguang_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2019年11月6日; 录用日期: 2019年11月21日; 发布日期: 2019年11月28日

摘要

针对山东省黄泛区湖淤积高液限黏土, 采用低纯度生石灰和固废材料脱硫石膏、制浆白泥为原材料, 制备了一种复合高液限黏土改性剂——CGM改性剂。改性剂中各组分的掺量分别选取0%、2%和4%, 采用正交试验的方法, 对各组改性土的界限含水率 and 无侧限抗压强度变化规律进行分析, 探究各组分的最佳掺量。分析结果表明, 3个因素对界限含水率的影响程度由大到小为: 脱硫石膏 > 生石灰 > 制浆白泥; 对无侧限抗压强度的影响程度由大到小为: 生石灰 > 脱硫石膏 > 制浆白泥。综合考虑改性效果, 将改性剂的配比定为生石灰: 脱硫石膏: 制浆白泥 = 40:40:20, CGM改性剂的最佳掺量定为10%。

关键词

高液限黏土, 复合改性剂, 界限含水率, 无侧限抗压强度, 正交试验

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高速公路建设工程的蓬勃发展, 土地资源紧张、取土困难等问题逐渐凸显。一些不良土质被迫用作路基填料, 这些土具有天然含水量高、膨胀性大、保水性强等缺点, 导致施工困难且路基承载力不足。为改善该类不良土质的路用特性, 土壤改性剂在实际工程中得到了大量的应用。采用土壤改性剂可以充分利用弃土, 同时还可以解决水泥、石灰等高能耗土壤加固材料的缺陷, 如水泥干缩性差、石灰早期强度形成缓慢等。

国内外学者对多种土壤改性剂的组分和效果进行了探索和研究。李沛等[1]对比了几种主要固化剂对土壤的加固效果, 明确了各种土壤固化剂之间的联系、区别及适用范围, 提出了土壤固化剂后续研发的重点。Tian 等[2]研制了新型土壤固化剂 Q2, 并检验了 Q2 固化土在寒冷条件下的耐冻融效果。Zhao 等[3]通过正交试验的方法, 对不同固化剂掺量、养护时间、级配粗细和压实度对无侧限抗压强度的影响进行了分析, 研究表明只有固化剂掺量对强度影响显著。王银梅等[4]利用新型高分子材料 SH 对黄土进行改性, SH 材料通过与黄土颗粒发生交联, 形成具有膜性能的网络, 改性后的黄土长期强度高, 耐水耐低温性能好。薛颖慎[5]采用不同种类、不同掺量的固化剂, 对改性后的滨海淤泥的物理力学指标进行了检测, 建立了固化淤泥 CBR 值、无侧限抗压强度值随固化剂掺量变化的回归关系式, 确定了固化剂的最佳配比和最佳掺量。王朝晖等[6]采用蛭石、水泥和生石灰制备了一种新型 CVC 固化剂, 通过研究不同固化剂组分含量对固化淤泥的收缩性能、耐水性能、抗冻融性能和抗弯拉能力的影响规律, 确定了各组分的最佳掺比。徐日庆等[7]研究表明, 以粉煤灰和生石灰为基础固化材料, 硅酸钠、硫酸钙、氯化钙为添加剂的固化剂能够显著提高固化土的早期强度, 通过修改配比, 得到了不同龄期下的强度, 同时从反应机理

和微观形态进行分析,综合分析得到最优的添加剂配比。刘瑾等[8]使用有机高分子固化剂 OPS 对砂土进行改良,对改良机理、改良土的渗透系数、抗压强度、内摩擦角和抗拉强度进行了研究。孙家瑛和沈建生[9]利用工业废渣脱硫石膏、钢渣和矿渣制备了复合胶凝材料 GSC 固化软土,研究表明当 GSC 掺量高于水泥掺量 3% 时, GSC 固化土强度高于水泥土强度。郭乾等[10]采用 NaOH 溶液、偏高岭土和水泥制备了新型碱激发胶凝材料 AMC,并对 AMC 固化高液限黏土的效果进行探究,通过无侧限抗压强度、MIP 压汞和 SEM 扫描电镜试验对固化土的强度和孔隙变化特征进行了分析。刘清秉[11]等采用离子型土固化剂 ISS 对膨胀土进行改性,试验表明膨胀土经 ISS 改性处理后,吸湿持水能力下降,膨胀能力变弱,层间水合度降低,土颗粒间连接力增强,结合水膜厚度减薄。祝学勇等[12]对黄泛区湖淤积高液限黏土进行了改性试验,通过添加石灰、粉煤灰对土体进行改性,确定了最优的改性剂掺量和效果。

山东省内因黄河下游冲淤积作用,形成了较为广阔的黄泛区湖淤积高液限黏土,目前大多采用传统的石灰和水泥进行处治。随着石灰、水泥和砂砾石等原材料价格逐渐提高,造成了高液限黏土改性的综合成本攀升。因此,针对高液限黏土的工程特性,并综合考虑山东省内现存的大宗固废材料,研究一种新型的高液限黏土改性剂势在必行。本文采用低纯度生石灰(C)、脱硫石膏(G)和制浆白泥(M),制备了一种基于固废材料的 CGM 高液限黏土改性剂。采用正交试验的方法,确定了各组分最佳掺量。CGM 改性剂可以有效地改善土体的界限含水率,提高土体的无侧限抗压强度。

2. 试验材料与方案

2.1. 试验用原材料

试验选用黄泛区高液限黏土取自山东省济宁市梁山县宁梁高速沿线,土样的基本物理性质如表 1 所示。

Table 1. Physical properties of testing soil

表 1. 试验土样物理性质

天然含水量%	土粒比重	液限 ω_L /%	塑限 ω_P /%	塑性指数 I_P	最大干密度 g/cm^3	最佳含水率%
39.16	2.73	50.83	24.14	26.69	1.83	16.87

土样液限为 50.83%,塑性指数为 26.69,属于高液限黏土的范围。天然含水率为 39.16%,远超土体塑限,土体处于高含水率状态。土样中粉粒与黏粒含量占 99.7%,其中粉粒高达 76.2%,黏粒占 23.5%。

试验用生石灰购买自江西惠灰石灰厂,脱硫石膏取自邹城电厂,制浆白泥取自济宁造纸厂,化学成分如表 2 所示。其中,生石灰主要成分为 CaO,有效含量较低,占总质量的 56.4%,另外还含有 5.7%的 MgO;脱硫石膏以 CaO 和 SO₃ 为主,分别占 31.6%和 36.1%;制浆白泥主要成分为 CaCO₃,占总质量的 44.8%,另外含有 15.3%的 SiO₂和 15.8%的 Al₂O₃。

Table 2. Chemical compositions of used materials

表 2. 试验原材料化学成分占比(%)

材料	CaO	SO ₃	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaCO ₃
脱硫石膏	31.6	36.1	2.3	2.7	0.8	0.7	6.7
生石灰	56.4	0	0	5.7	0	0	5.9
制浆白泥	4.3	0.9	15.3	13.8	15.8	4.6	44.8

CGM 改性剂中的钙离子、铝离子等高价阳离子置换出黏土中的钠、钾离子,降低土粒双电层的厚度,从而使黏土胶状颗粒发生凝聚,形成较大的土团,黏土胶粒的亲水性减弱。 Ca^{2+} 可减薄土体扩散层的厚度,降低电动电位,促使胶体凝聚,从而形成结构较强的微团粒,使分子的分散度减小,塑性降低,从而提高水稳定性。制浆白泥中的 Al_2O_3 可以与脱硫石膏、生石灰中的 CaO 等反应生成双重盐——含水硫铝酸钙(钙矾石),钙矾石可以聚集成膜,沉积于孔隙之中,从而加快了成型过程。钙矾石硬化过程中体积不断膨胀,从而起到补偿收缩,防止开裂等作用,从而提高土体的强度。

2.2. 试验方案设计

为了将黄泛区高液限黏土应用于路基施工中,满足《公路路基设计规范》对于路基填土的要求,制备一种新型的 CGM 高液限黏土改性剂。通过正交试验,以生石灰、脱硫石膏和制浆白泥的掺量作为 3 个因素,每个因素取 3 个水平设计 $L_9(3^3)$ 正交试验表,分析各因素对液塑限和无侧限抗压强度的改性效果。三种原材料的掺量水平分别定为 0%、2% 和 4%。因此,按照正交表安排 9 组试验,各组工况如表 3 所示。

Table 3. Orthogonal test scheme

表 3. 正交试验方案

序号	脱硫石膏掺量(%)	生石灰掺量(%)	制浆白泥掺量(%)
1	0	0	0
2	0	2	2
3	0	4	4
4	2	0	2
5	2	2	4
6	2	4	0
7	4	0	4
8	4	2	0
9	4	4	2

2.3. 试样制备与检测

我国《公路路基设计规范》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。因此,改性剂对于高液限黏土界限含水率的改性效果是评价改性剂效果的重要指标。依据《公路土工试验规程》(JTG E40-2007)开展界限含水率试验。取 0.5 mm 筛下土样 200 g,掺入配制好的改性剂后拌合均匀,分开放入 3 个盛土皿中,加入不同量的水,土样含水率分别控制在液限、略大于塑限和二者中间状态。拌匀后置入模具中,分别测试锥入深度,计算液塑限值。

无侧限抗压强度是指试样在无侧向压力情况下,抵抗轴向压力的极限强度。公路路基填土的无侧限抗压强度是路基路面设计的重要参数。试件的制备工艺分为以下 4 个阶段。(1) 将风干的土体破碎后过 1 mm 筛,称取 9 组土样,每组 2000 g。(2) 按照每组方案设计的改性剂各组分的掺量,将准确称量好的生石灰、脱硫石膏和制浆白泥加入预先备好的土中,将干料拌合均匀。(3) 按照 20% 含水率称取一定质量的水加入拌合均匀的干料中,将水拌合均匀后放入密封袋内,焖料 24 h。(4) 按照 94% 压实度称取一定质量的湿土置入试模中,采用静压成型的方式制件,将试件脱模后置入密封袋内,存放在标准养护室中养护。养护 7 d 后,采用路面材料强度测定仪对试件的无侧限抗压强度进行检测。

3. 试验结果分析

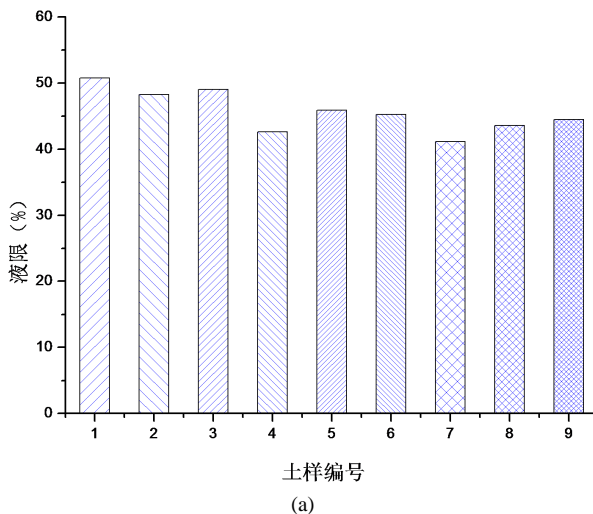
3.1. 液塑限试验

9组土样的液限值如图1(a)所示, 改性剂中3种组分对高液限黏土液限降低的效果如图2(a)所示。由图1(a)可知, 掺入改性剂后, 各组土样液限值均有所降低, 满足规范中对于路基填土液限的要求。对3种组分对液限的改性效果进行分析, 由图2(a)可知, 脱硫石膏改性效果最为明显, 且随着脱硫石膏掺量由0增大至2%、4%, 液限值由49.37%降低至44.59%、43.09%。对于生石灰和制浆白泥, 随着掺量的增加, 液限值均呈先降低后升高的趋势。生石灰和制浆白泥的掺量分别为2%时达到最佳掺量, 其液限值分别为44.51%和45.13%。由图2(b), 对3种组分对塑限的改性效果进行排序: 生石灰 > 脱硫石膏 > 制浆白泥。对于生石灰和脱硫石膏, 塑限值均随掺量的增加而升高。生石灰掺量为0时, 塑限值仅为26.19%; 掺量为2%时, 塑限值可提高至30.25%。脱硫石膏掺量由0增大至4%时, 塑限值由28.13%增大至30.77%。对于制浆白泥, 随着其掺量的增加, 塑限值呈先升高后降低的趋势, 当达到最佳掺量2%时, 塑限值为29.67%。塑性指数综合地反映了黏土可塑性的大小, 是黏性土最基本的物理指标之一, 塑性指数越大, 土的可塑性就越大, 会给路基填筑施工带来一定的困难。由图2(c), 根据极差值 R_j 可对3种组分对塑性指数的影响程度进行排序: 脱硫石膏 > 生石灰 > 制浆白泥。随着脱硫石膏和生石灰掺量的增加, 塑性指数有所降低。脱硫石膏掺量由0增大至2%、4%, 塑性指数值由21.24降低至14.81、12.32。对于生石灰, 其掺量由0增大至2%、4%, 塑性指数由20.09降低至14.26、13.89。随着制浆白泥掺量的增加, 塑性指数呈先降低后升高的趋势, 当其掺量达到最佳掺量2%时, 塑性指数为15.46。这是由于脱硫石膏和生石灰中的 Ca^{2+} 可减薄土体扩散层的厚度, 降低电动电位, 促使胶体凝聚, 从而形成结构较强的微团粒, 使分子的分散度减小, 塑性指数降低。因此, 脱硫石膏和生石灰对土体的界限含水率改性效果显著。

3.2. 无侧限抗压强度试验

对养护7d后的试件进行无侧限抗压强度试验, 获得各组改性土对应的7d无侧限抗压强度, 并对其进行分析, 数据及分析结果如表4所示。通过极差分析, 可以得到以下结论: (1) 各因素的重要性; (2) 各因素不同水平对评价指标的影响规律。不同改性材料改性后的土体无侧限抗压强度及其权重分析如图3和图4所示。

表4中, I_j 、 II_j 和 III_j 分别表示水平1、2、3对应的无侧限抗压强度值的总和, R_j 表示该因素下无侧限抗压强度最大值与最小值的差值。



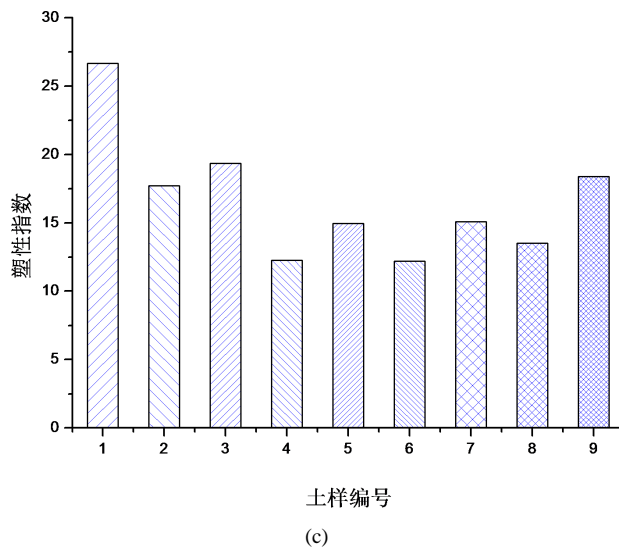
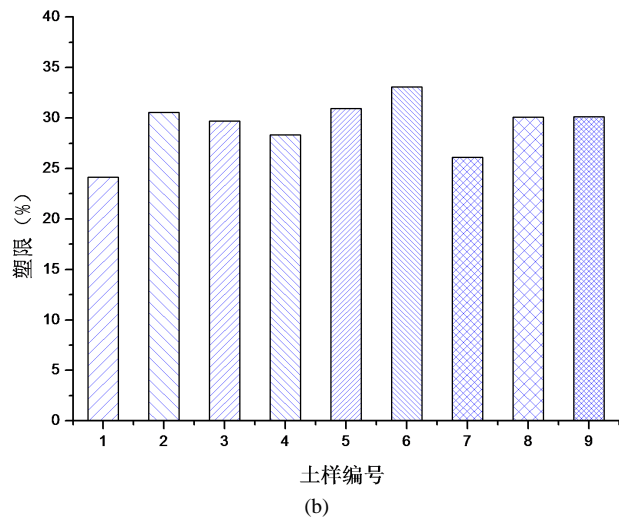
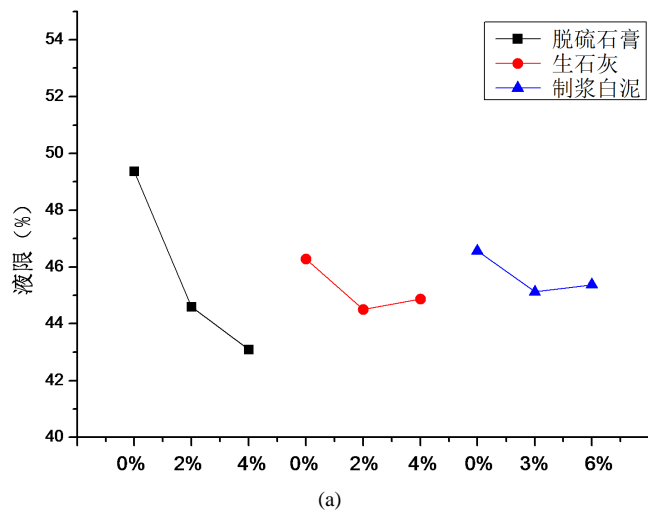


Figure 1. Modified results of limit moisture contents

图 1. 界限含水率改性结果



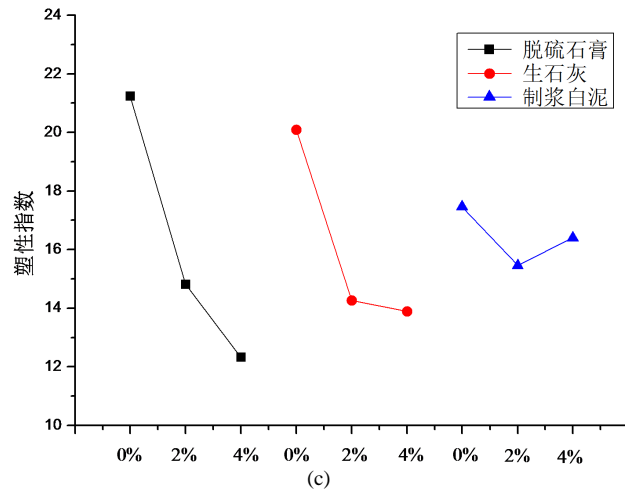
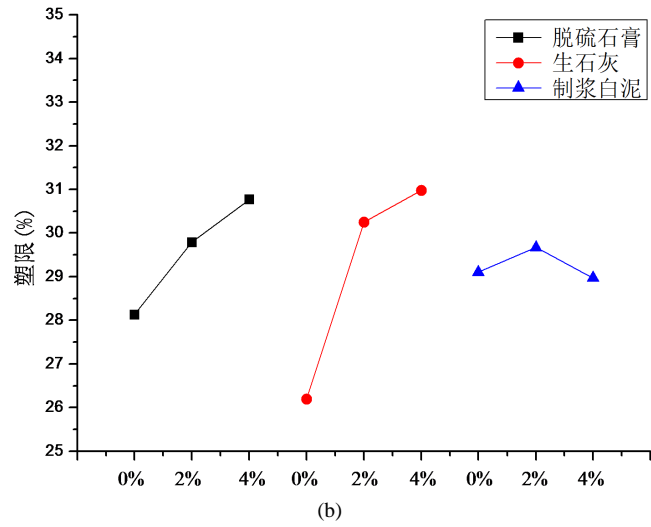


Figure 2. Analysis of limit moisture contents
图 2. 界限含水率数据分析

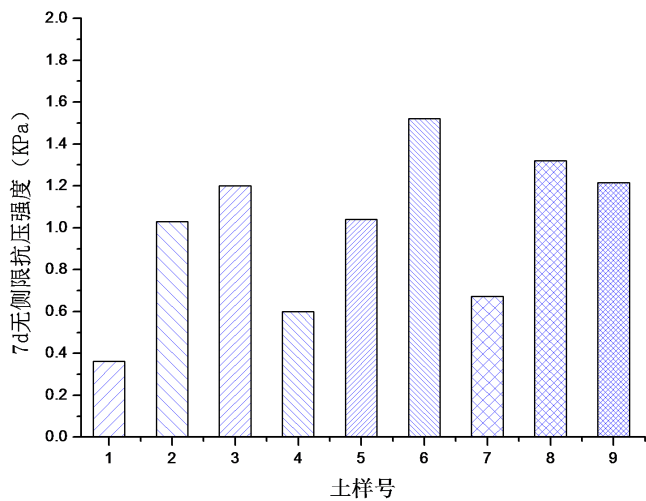


Figure 3. Modified results of unconfined compressive strength
图 3. 无侧限抗压强度改性结果

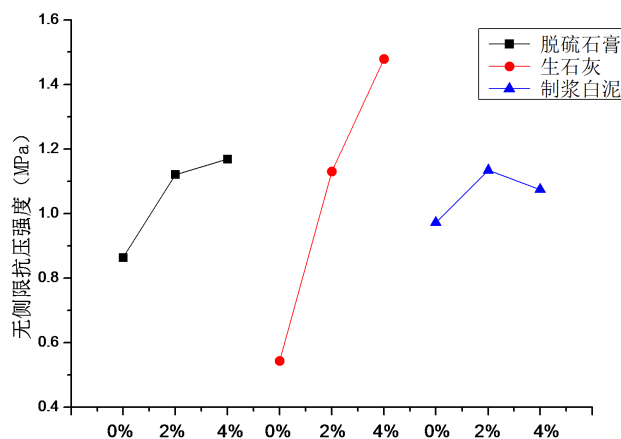


Figure 4. Analysis of unconfined compressive strength

图 4. 无侧限抗压强度数据分析

Table 4. Range analysis of orthogonal test

表 4. 正交试验极差分析

序号	脱硫石膏掺量(%)	生石灰掺量(%)	制浆白泥掺量(%)	无侧限抗压强度(MPa)
1	0	0	0	0.362
2	0	2	2	1.029
3	0	4	4	1.202
4	2	0	2	0.598
5	2	2	4	1.042
6	2	4	0	1.521
7	4	0	4	0.672
8	4	2	0	1.319
9	4	4	2	1.215
I _j /3	0.864	0.544	0.972	
II _j /3	1.120	1.129	1.134	
III _j /3	1.169	1.479	1.074	
R _j	0.305	0.935	0.162	

R_j 代表了数据的波动程度,因此,可以根据 R_j 值对 3 种组分对无侧限抗压强度的影响程度进行排序: 生石灰 > 脱硫石膏 > 制浆白泥。因此,为保证强度满足要求,必须确保足够的生石灰掺量。除需要确定各因素的影响程度顺序外,还需要了解各因素水平变化对强度的影响。由表 4 可知,当生石灰的掺量发生变化时,改性土的无侧限抗压强度产生显著变化,当生石灰掺量从 0 增大至 4% 时,7 d 无侧限抗压强度从 0.544 MPa 增大至 1.479 MPa。随着脱硫石膏掺量的提高,7 d 无侧限抗压强度也有所提高。脱硫石膏掺量由 0 增大至 2%、4% 时,7 d 无侧限抗压强度由 0.864 MPa 增大至 1.120 MPa、1.169 MPa。然而,制浆白泥对无侧限抗压强度的影响并不明显,3 个因素水平的极差值仅为 0.162 MPa。且随着其掺量的增加,7 d 无侧限抗压强度呈先增大后减小的趋势,随掺量由 0 增大至 2%、4%,7 d 无侧限抗压强度由 0.972 MPa 增大至 1.134 MPa 后,降低至 1.074 MPa。生石灰水化产生的氢氧化钙与脱硫石膏和制浆白泥中的 SiO_2 、 Al_2O_3 反应生成硅酸钙和铝酸钙,因此,生石灰对无侧限抗压强度的影响最为显著。脱硫石膏中的 CaSO_4 会与铝酸钙反应生成含水硫铝酸钙(钙矾石),改性土中针柱状钙矾石晶体周围的无定型水化硅酸钙和水化铝酸

钙凝胶更多,生成的胶凝物质几乎完全将针柱状钙矾石结晶包裹起来,形成了密实的镶嵌结构,并通过胶凝物质将网状结构细化变成团聚状结构,将土颗粒更为紧密地胶结起来,提高了改性土的承载力。

在本文的正交试验中,共有3个因素和3个不同水平确定的 $L_9(3^3)$ 正交试验表。对3个因素的影响进行方差分析[13][14],结果如表5、表6所示。

Table 5. Variance result of orthogonal test

表 5. 正交试验方差结果

序号	脱硫石膏掺量(%)	生石灰掺量(%)	制浆白泥掺量(%)	无侧限抗压强度(MPa)	x_i^2
1	0	0	0	0.362	0.131
2	0	2	2	1.029	1.059
3	0	4	4	1.202	1.445
4	2	0	2	0.598	0.358
5	2	2	4	1.042	1.086
6	2	4	0	1.521	2.313
7	4	0	4	0.672	0.452
8	4	2	0	1.319	1.740
9	4	4	2	1.215	1.476
I_j	2.592	1.632	2.916	$K = 9.515$	$W = 11.472$
II_j	3.360	3.387	3.402		
III_j	3.507	4.437	3.222		
U	$U_A = 10.102$	$U_B = 11.274$	$U_C = 10.153$	$P = 10.059$	
Q	$Q_A = 0.043$	$Q_B = 1.215$	$Q_C = 0.094$		

Table 6. Variance analysis of orthogonal test

表 6. 正交试验方差分析

·	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F 值
A	$Q_A = 0.043$	2	$S_A^2 = 0.0215$	$F_A = 0.705$
B	$Q_B = 1.215$	2	$S_B^2 = 0.6075$	$F_B = 19.918$
C	$Q_C = 0.094$	2	$S_C^2 = 0.047$	$F_C = 1.541$
e(误差)	$Q_e = 0.061$	2	$S_e^2 = 0.0305$	
总和	$Q_T = 1.413$	8		

在本试验中,由于 $F_A = 0.705$, $F_B = 19.918$, $F_C = 0.68$,在水平 $\alpha = 0.05$ 的条件下, $F_{0.05}(2, 2) = 19$ 。因此,生石灰掺量对无侧限抗压强度影响显著,脱硫石膏和制浆白泥掺量对无侧限抗压强度的影响并不显著。综合考虑改性效果,将改性剂的配比定为生石灰:脱硫石膏:制浆白泥 = 40:40:20,CGM 改性剂的最佳掺量定为 10%。

4. 结论

- (1) 提出了固废基的高液限黏土复合改性剂,主要组分为生石灰、脱硫石膏和制浆白泥。

(2) 基于界限含水率试验, 3 种组分的掺量对界限含水率的影响程度由大到小为: 脱硫石膏 > 生石灰 > 制浆白泥; 基于无侧限抗压强度试验, 3 种组分的掺量对无侧限抗压强度的影响程度由大到小为: 生石灰 > 脱硫石膏 > 制浆白泥。

(3) 通过对无侧限抗压强度试验结果进行极差和方差分析, 可知生石灰掺量对无侧限抗压强度影响显著, 脱硫石膏和制浆白泥掺量影响并不大。

(4) 综合考虑改性效果, 将改性剂的配比定为生石灰: 脱硫石膏: 制浆白泥 = 40:40:20, CGM 改性剂的最佳掺量定为 10%。

基金项目

软弱土与环境土工教育部重点实验室(浙江大学)开放基金(2017P01), 山东省交通厅科技发展计划(2011Y16, 2016B21), 教育部博士后科学基金(2016M590636), 山东大学青年学者未来计划资助。

参考文献

- [1] 李沛, 杨武, 邓永锋, 等. 土壤固化剂发展现状和趋势[J]. 路基工程, 2014(3): 1-8.
- [2] Peng, T., Tang, C.L., Chen, Q., *et al.* (2015) Application of New-Type Soil Stabilizer Q2 in Subgrade Construction. *Agricultural Engineering and Agricultural Machinery*, **16**, 384-390.
- [3] Zhao, Y.L., Gao, Y., Zhang, Y.L., *et al.* (2017) Analysis of Influence Factors of Unconfined Compressive Strength for Composite Soil Stabilizer-Stabilized Gravel Soil. *Journal of Southeast University (English Edition)*, **33**, 484-489.
- [4] 王银梅, 韩文峰, 谏文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1761-1765.
- [5] 薛颖慎. 滨海淤泥固化填筑路基应用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [6] 王朝辉, 刘志胜, 王晓华, 等. 应用新型 CVC 固化剂固化淤泥路用性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(5): 1-6.
- [7] 徐日庆, 王旭, 文嘉毅, 等. 浅层淤泥质土固化剂[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(7): 805-811.
- [8] 刘瑾, 白玉霞, 宋泽卓, 等. OPS 型固化剂改良砂土工程特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 495-501.
- [9] 孙家瑛, 沈建生. 新型固化剂 GSC 固化软土的力学性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 20-25.
- [10] 郭乾, 魏明俐, 杜广印, 等. AMC 固化高液限黏土的强度及孔隙特征研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 838-845.
- [11] 刘清秉, 项伟, 崔德山, 等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(4): 648-654.
- [12] 祝学勇, 刘海威, 马晓燕, 等. 黄泛区湖淤积高液限黏土的改性研究[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(1): 83-90.
- [13] 梅长林, 周家良. 实用统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.