

高含水区改性土压剪特性试验研究

陈其帆¹, 杨阳², 姜玉荣³, 刘桂海³, 刘百明³, 于宪涛³

1. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357;

2. 东营市铁路港航发展中心, 山东 东营 257100; 3. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014

摘要:为改善高含水区土体的压剪特性,分别采用水泥、石灰为胶凝材料改性高含水区原位土,通过试验方法研究高含水区域改性土养护龄期、改性胶凝材料与干土的质量比、土体压实度、水与干土和胶凝材料的质量比、围压强度等因素对改性土无侧限抗压强度和抗剪强度的影响,获得改性土早期压剪性能随不同影响因素的变化规律,建立抗剪强度随压实度和围压强度变化的回归模型。结果表明:胶凝材料与干土的质量比是影响水泥改性土抗压抗剪强度、石灰改性土抗剪强度的最大因素;压实度是影响石灰改性土抗压强度的最大因素,可通过调整改性土胶凝材料与干土的质量比改善土体的抗压、抗剪特性。

关键词:水泥改性土;石灰改性土;无侧限抗压强度;黏聚力;摩擦角;抗剪强度

中图分类号:U414;TU435

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)03-0078-09

引用格式:陈其帆,杨阳,姜玉荣,等.高含水区改性土压剪特性试验研究[J].山东交通学院学报,2022,30(3):78-86.

CHEN Qifan, YANG Yang, JIANG Yurong, et al. Experimental study on compression shear characteristics of modified soil in high water bearing area[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(3): 78-86.

0 引言

影响改性土压剪性能的因素较多,包括土体物理性质和级配、胶凝材料的品质和掺量、压实度、水与干土和胶凝材料的质量比、围压强度等^[1-4]。在原位土中掺入少量胶凝材料可大幅提高土体的抗压抗剪能力^[5-8],技术较成熟,成本较低,在国内外软土地基处理中应用广泛。Do等^[9]采用无侧限抗压强度试验,研究水泥与干土的质量比和养护龄期等对水泥改性土无侧限抗压强度的影响,得到抗压强度随水泥质量分数和养护龄期变化的回归方程。薛勇刚^[10]研究低剂量石灰稳定土路用性能及其合理配合比,探讨石灰稳定土的无侧限抗压强度和抗压回弹模量等随影响因素的变化规律。曲振鹏^[11]对水泥改性土与素土进行直接剪切试验,分析水泥与干土的质量比和养护龄期对水泥改性土抗剪强度的影响。孙希望^[12]采用静三轴试验研究石灰改性土的应力-应变关系及抗剪强度特征,得到了不同石灰掺比对石灰改性土抗剪强度指标变化的影响规律。阮波等^[13]采用三轴不固结不排水试验(unconsolidated undrained test, UU),研究水泥掺比和养护龄期影响下抗剪强度参数的变化规律。

目前,对改性土的研究大多集中在胶凝材料与干土的质量比例和养护龄期对改性土无侧限抗压强度的影响。改性土对水敏感,以往未能研究早期改性土中水与干土和胶凝材料的质量比例较高环境下土体抗压强度的发展,及较高围压环境下改性土的抗剪强度变化。本文以济南港章丘港区改性粉土为研究对象,对水泥改性土和石灰改性土进行击实试验、无侧限抗压试验和静三轴试验,针对码头工程墙后回填水与干土和胶凝材料的质量比较高、围压较高情况下,耦合压实度、胶凝材料与干土的质量比、水与干土和

收稿日期:2021-12-16

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE274);山东省重点研发计划(软科学)项目(2020RKB01602);山东省交通运输厅科技计划(2020B93)

第一作者简介:陈其帆(1997—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设, E-mail: 1518639615@qq.com。

胶凝材料的质量比等因素对抗压强度和抗剪强度的影响规律,为相关工程提供理论参考。

1 改性土压剪性能试验研究

1.1 试验材料

从小清河济南港章丘港区一期工程拌和站东侧取土场采集试验土,取土深度为0.8 m,土体物理性质如表1所示。改性胶凝材料选用消石灰和强度等级为42.5的普通硅酸盐水泥,试验用水为普通自来水。

表1 章丘港区粉土的物理性质

密度/(kg·m ⁻³)	液限 W _L /%	塑限 W _p /%	塑性指数 I _p	天然水与干土和		天然密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)
				胶凝材料的质量比 ω/%				
2580	23.8	14.6	9.2	16.1		1806	10.2	23.8

1.2 试验步骤

1.2.1 试件制备

根据文献[14-15]规定制备试件,抗压、抗剪试件分别制作为Φ100 mm×100 mm和Φ39.1 mm×80 mm的圆柱体,制备流程为:按要求的水与干土和胶凝材料的质量比,取素土加水闷料静置24 h,加入与干土的质量比不同的胶凝材料,将拌和均匀的混合料装填入模,在100 kN压力试验机静压成型试件,静置4 h后脱模,装入塑料袋养护室分别标准养护7、28 d。

1.2.2 抗压、抗剪特性试验

为研究试件的抗压特性,共制作64个试件。在养护龄期和胶凝材料相同时,每组试验考虑压实度(因素1)、胶凝材料与干土的质量比α(因素2)和水与干土和胶凝材料的质量比β(因素3)3个影响因素,采用抗压正交试验分析影响因素对试件抗压特性的影响,如表2所示。为研究β较大时对改性土抗压、抗剪强度的破坏情况,以水的最佳质量比为起点设置β因素,依次递增2%。抗压正交试验各水平组合设计如表3所示,为提高试验分析的精确性,在正交设计表中设置误差列,在后续数据分析中验证误差大小是否影响试验的可靠性。

表2 抗压正交试验影响因素表

项目	压实度/%	α/%	β/%
水平1	90	4	水的最佳质量比
水平2	93	6	水的最佳质量比+2%
水平3	96	8	水的最佳质量比+4%
水平4	99	10	水的最佳质量比+6%

表3 抗压正交试验各水平组合设计表

因素1	因素2	因素3	误差列	因素1	因素2	因素3	误差列	因素1	因素2	因素3	误差列
1	1	1	1	2	3	4	1	3	4	2	1
1	2	2	2	2	4	3	2	4	1	4	2
1	3	3	3	3	1	3	4	4	2	3	1
1	4	4	4	3	2	4	3	4	3	2	4
2	1	2	3	3	3	1	2	4	4	1	3
2	2	1	4								

注:误差列由正交表上的空白列计算得到,包含试验和交互作用的综合误差,反映随机因素引起的误差。

为研究试件的抗剪特性,相同养护龄期和胶凝材料条件下,每组试验考虑3个压实度、3个围压和4

种 α , 压实度分别为 90%、93%、96%, 围压分别为 100、300、500 kPa, α 分别为 4%、6%、8%、10%, 按水的最佳质量比制备试件, 采用三轴试验方案, 共制作 144 个试件。

1.2.3 试验仪器及步骤

采用 MTS 万能材料试验机进行无侧限抗压试验, 试验步骤为: 将试件放置在 MTS 力学室的上下压头中心; 预加 50 N 的荷载, 观察压头与试件是否接触; 位移计调零, 以变形变化速度 1 mm/min 控制加载至试件破坏。

采用全自动三轴仪进行固结不排水试验 (consolidated undrained test, CU), 试验步骤为: 将试件放置在三轴仪压力室的上下压头中心, 压力室冲水并关闭排气阀; 设置围压, 试件排水固结测定空隙水压力; 测力计、位移计调 0, 以剪切应变速度为 0.5%/min 进行剪切至破坏。

2 试验结果分析

2.1 改性土的物理性质

试验采用水泥和石灰 2 种胶凝材料, 按照水泥、石灰分别与干土的质量比 α_1 、 α_2 依次为 4%、6%、8%、10% 进行击实试验, 得到 α 不同时改性土中水的最佳质量比和最大干密度的变化关系, 如图 1 所示。

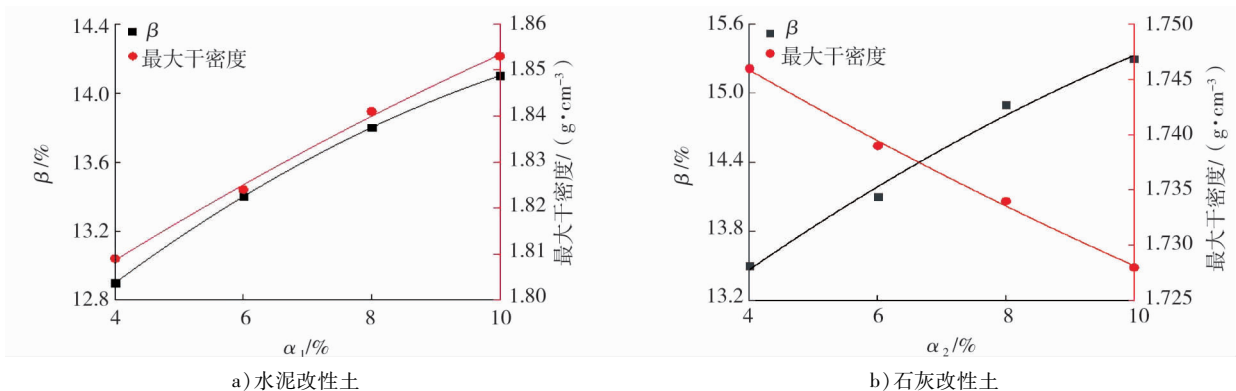


图 1 α 不同时改性土中水的最佳质量比、最大干密度的变化关系

由图 1 可知: α_1 、 α_2 由 4% 增至 10% 时, 水泥改性土中水的最佳质量比提高了 1.2%, 最大干密度增加 $0.044 g/cm^3$; 石灰改性土中水的最佳质量比提高了 1.8%, 最大干密度降低了 $0.018 g/cm^3$ 。2 种胶凝材料改良章丘港粉土的最大干密度出现不同变化趋势, 原因是水泥、章丘港粉土、石灰的密度依次递减, 且 α 越大, 最大干密度变化斜率越小。

2.2 改性土抗压特性

按照表 3 的正交试验设计, 对水泥改性土、石灰改性土进行无侧限抗压试验, 结果如图 2~4 所示。

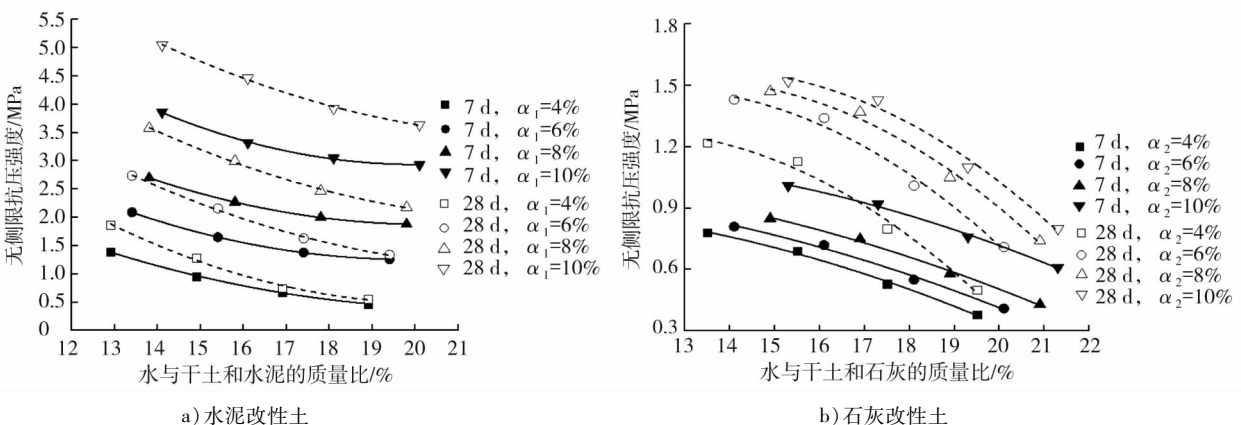


图 2 不同 α 下水泥、石灰改性土无侧限抗压强度与 β 的关系曲线

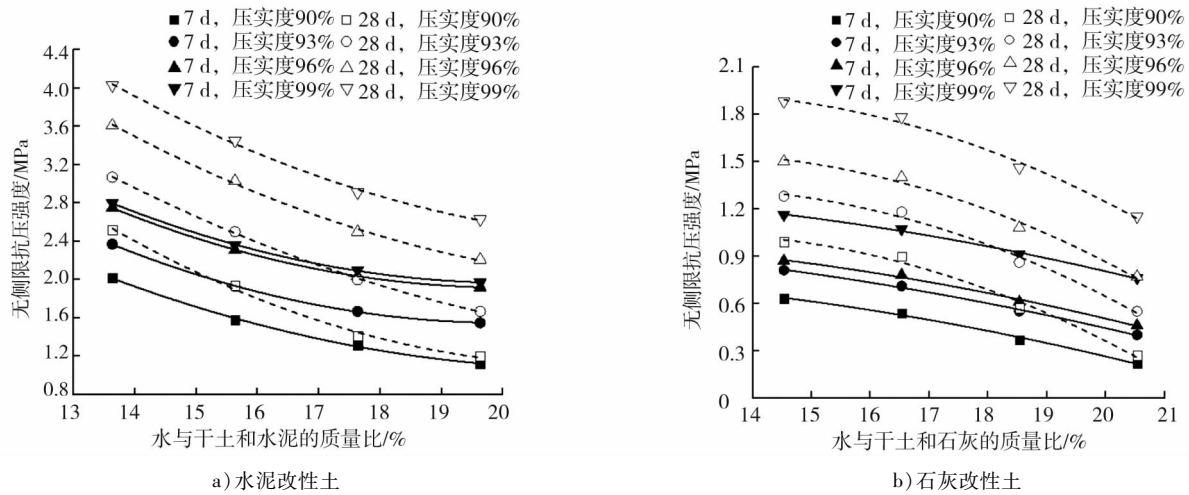


图3 不同压实度下水泥、石灰改性土无侧限抗压强度与 β 的关系曲线

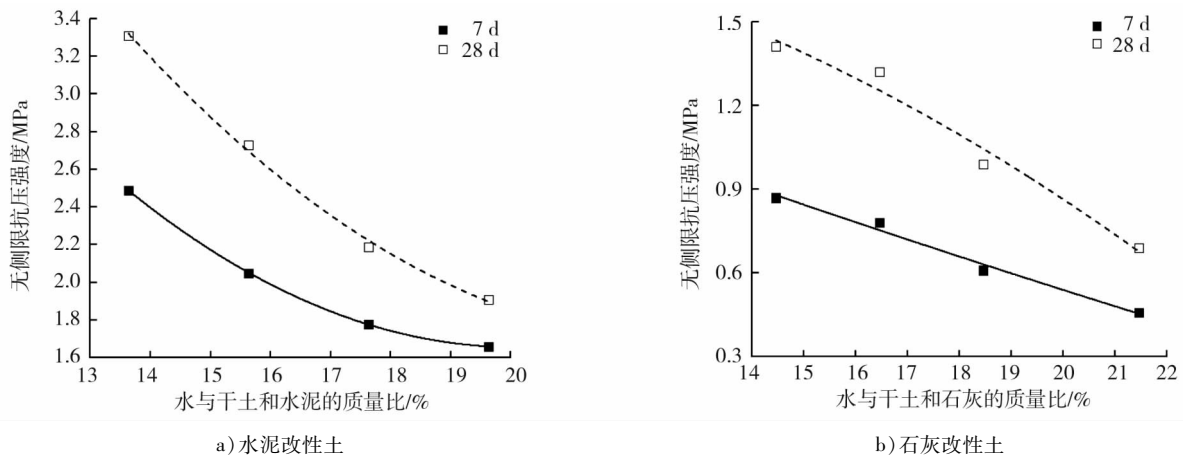


图4 不同养护龄期下水泥、石灰改性土无侧限抗压强度与 β 的关系曲线

由图2~4可知:压实度、 α 与改性土的无侧限抗压强度正相关, β 与改性土的无侧限抗压强度负相关。

采用极差分析方法分析7、28 d改性土无侧限抗压强度试验数据,得到对强度影响大小的因素顺序相同,以28 d改性土无侧限抗压强度数据为例进行极差分析,如表4、5所示。其中 $T_i(i=1,2,3,4)$ 为该因素第*i*个水平所有无侧限抗压强度之和,*i*为影响该因素的水平数, t_i 为平均水平数,即 $t_i=T_i/4$; R_i 为极差,即该因素影响因子的最大值与最小值之差, R_i 越大,表明该因素对改性土无侧限抗压强度的影响越明显。由表5、6可知:按 R_i 从大到小排序,水泥改性土各因素依次为 R_2 、 R_1 、 R_3 ;石灰改性土各因素依次为 R_1 、 R_3 、 R_2 ,表明影响水泥改性土无侧限抗压强度的因素中, α 是主要因素,压实度次之, β 影响最小;影响石灰改性土无侧限抗压强度的因素中,压实度是主要因素, β 次之, α 影响最小。其中误差列的极差最小说明试验产生的随机误差较小。

由表4、5可知:为明确各因素对高含水改性土抗压特性的影响,固定2个因素,比较分析单一因素的影响程度。当压实度和 β 相同时, α 对水泥改性土的无侧限抗压强度影响更大,当 α 从4%增至10%,水泥改性土的无侧限抗压强度增加275%~300%,石灰改性土的无侧限抗压强度仅增加35%~65%;当 α 和压实度相同时, β 越大对改性土无侧限抗压强度的破坏越显著,水的最佳质量比每超出1%,水泥改性土、石灰改性土的无侧限抗压强度分别损失5%、7%;当 α 、 β 相同时,压实度对水泥改性土、石灰改性土无侧限抗压强度影响呈线性分布,且对石灰改性土无侧限抗压强度影响更大,自压实度为90%开始,压实度每提高1%,水泥改性土、石灰改性土的无侧限抗压强度分别增加10%、25%。

表4 水泥改性土 28 d 极差分析

项目	因素 1	因素 2	因素 3	误差列
T_1	6.99	4.37	13.24	10.13
T_2	9.19	7.87	10.91	10.09
T_3	11.35	11.23	8.77	11.28
T_4	13.02	17.08	7.63	9.05
t_1	1.75	1.09	3.31	2.53
t_2	2.30	1.97	2.73	2.52
t_3	2.84	2.81	2.19	2.82
t_4	3.26	4.27	1.91	2.26
R_i	1.51	3.18	1.40	0.56

表5 石灰改性土 28 d 极差分析

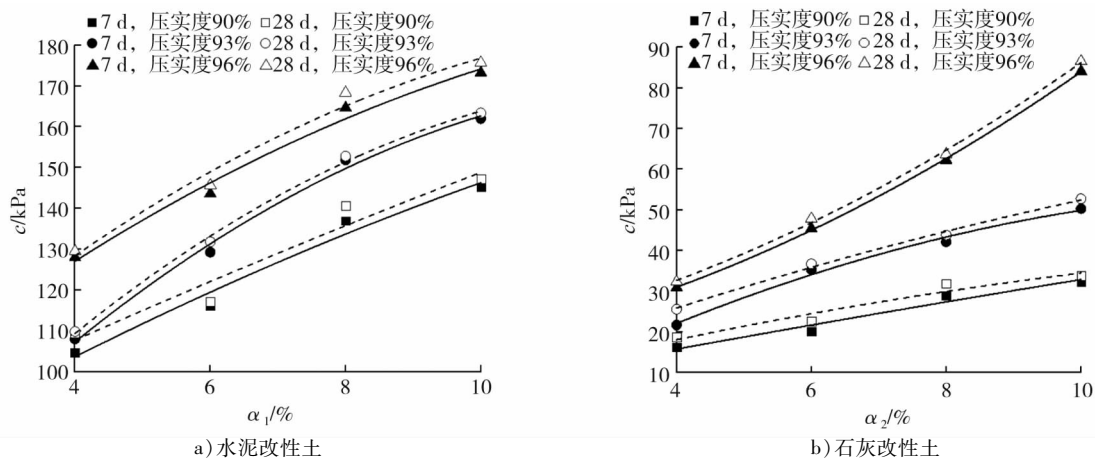
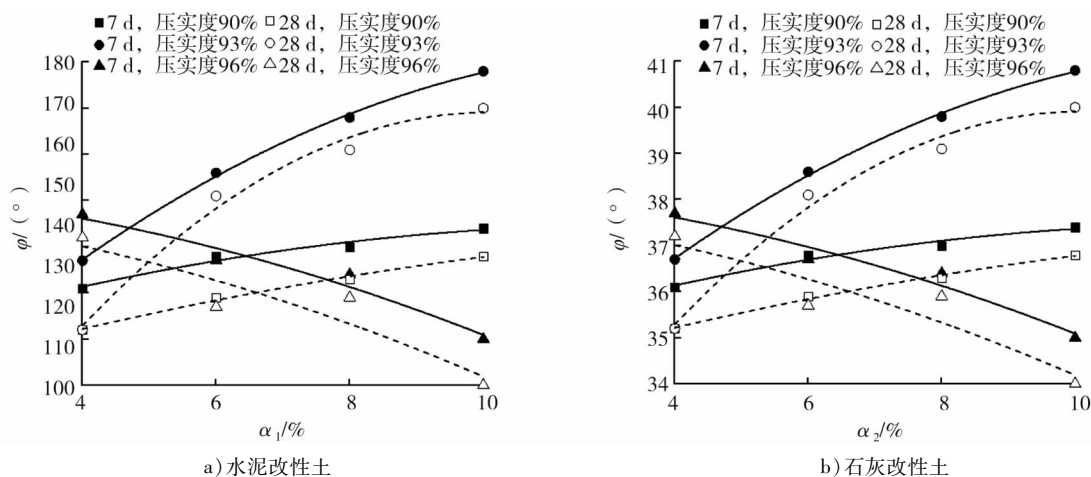
项目	因素 1	因素 2	因素 3	误差列
T_1	2.73	3.65	5.65	4.73
T_2	3.88	4.49	5.26	4.30
T_3	4.75	4.63	3.97	4.26
T_4	6.26	4.85	2.74	4.33
t_1	0.68	0.91	1.41	1.18
t_2	0.97	1.12	1.32	1.08
t_3	1.19	1.16	0.99	1.07
t_4	1.57	1.21	0.69	1.08
R_i	0.88	0.30	0.73	0.12

2.3 改性土抗剪特性

2.3.1 抗剪参数

在剪应力-正应力平面上绘制摩尔应力圆获得抗剪强度指标的黏聚力 c 和摩擦角 φ 。各因素变化下,水泥、石灰改性土 c 和 φ 与 α 的变化曲线如图 5~7 所示。

由图 5~7 可知:加入水泥对粉土的 c 改良效果更为明显,与素土的 c 相比,水泥改性土 c 增大 10~17 倍,石灰改性土仅增长 2~8 倍。2 种改性土的 φ 仅提升 1.5~2.0 倍,说明水泥改性土的早期抗剪强度比石灰改性土更高,原因是改性土的 φ 增长较小, c 对抗剪强度影响更大。

图5 不同压实度、养护龄期下改性土的 c 与 α 的变化关系曲线图6 不同压实度、养护龄期下改性土的 φ 与 α 的变化关系曲线

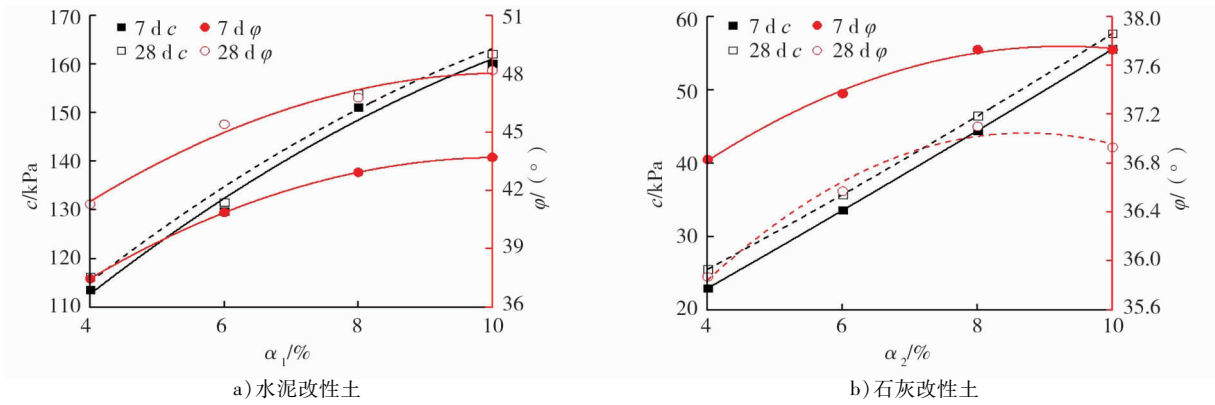


图7 不同养护龄期下改性土的c、φ与α的变化关系曲线

压实度为96%时,7、28 d养护的石灰改性土 φ 与 α₁ 负相关;其他情况下,7、28 d 养护龄期下水泥改性土的 c 与 α₁ 和压实度正相关,石灰改性土的 c 与 α₂ 和压实度正相关。

2.3.2 改性土抗剪强度

按照图7的c和φ参数,根据三轴仪中莫尔-库仑剪切模型得到改性土的抗剪强度

$$\tau = c + \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin\phi \right) \tan\phi ,$$

式中 σ₁、σ₃ 为极限平衡状态下轴向主应力和围压应力。

围压为100、300、500 kPa时,改性土 τ 与 α、养护龄期和压实度的关系如图8~10所示。

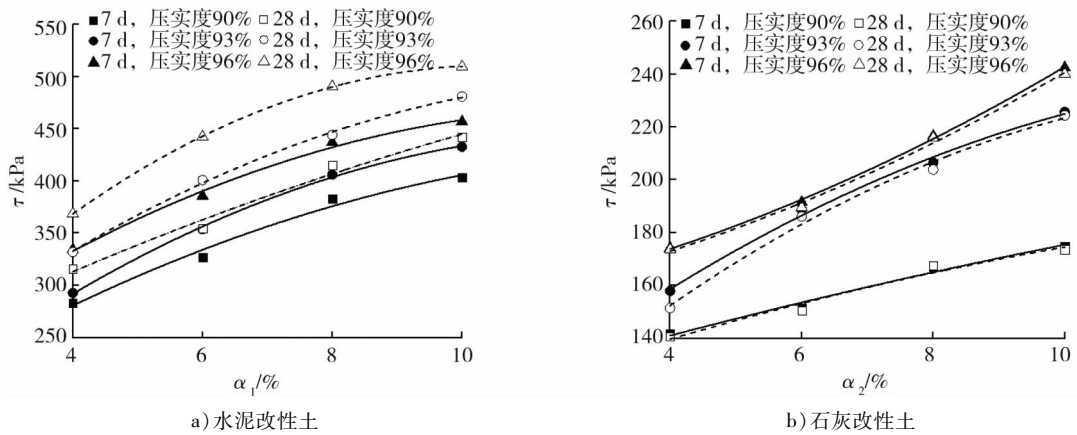


图8 围压为100 kPa时不同龄期和压实度下α与改性土τ的关系曲线

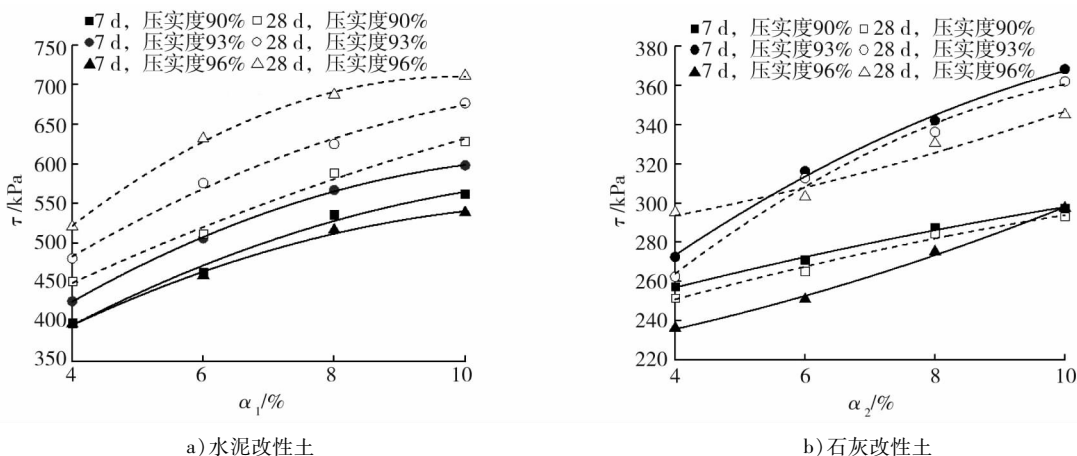


图9 围压为300 kPa时不同龄期和压实度下α与改性土τ的关系曲线

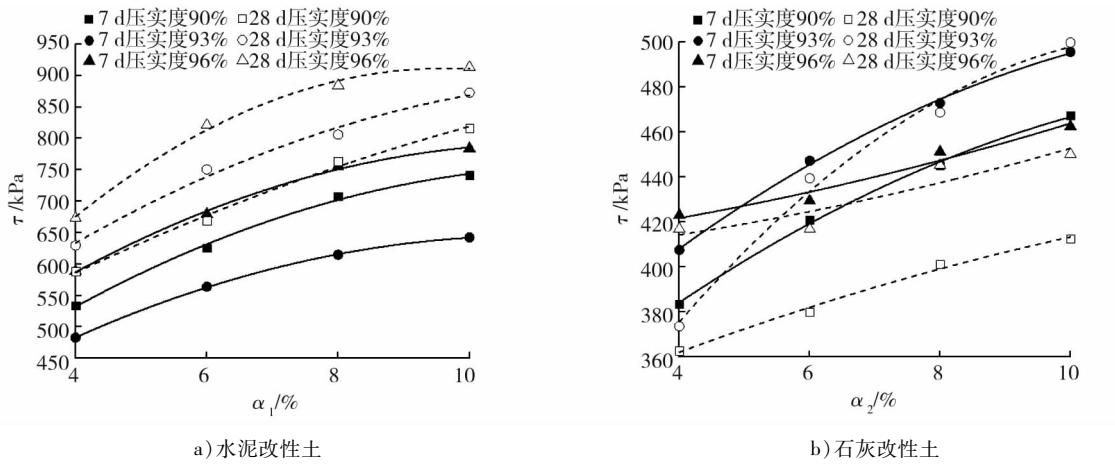


图 10 围压为 500 kPa 时不同龄期和压实度 α 与改性土 τ 的关系曲线

由图 8~10 可知:在相同养护龄期、压实度、围压强度和 α 条件下,水泥改性土获得的 τ 比石灰改性土高 1 倍;在相同养护龄期下,比较 2 种改性土受 3 个因素的影响程度, α 对 τ 影响更大。

由图 8~10 可知:比较 7、28 d 养护龄期的改性土 τ ,水泥改性土的 τ 平均增长 12%,石灰改性土的 τ 平均减弱 1%;围压强度和压实度相同条件下, α 每增加 1%,水泥改性土、石灰改性土的 τ 分别增长 6%、4%; α 和围压强度相同条件下,压实度每增加 1%,7、28 d 养护龄期水泥改性土的 τ 分别增长 0.9%、2.8%,7、28 d 养护龄期石灰改性土的抗剪强度分别增长 1.5%、2.7%; α 和压实度相同条件下,围压强度每增加 1 kPa,水泥改性土、石灰改性土的 τ 分别增长 0.8%、1.3%。

在养护龄期、压实度和 α 相同的条件下,2 种改性土试件的 τ 均随围压强度增大而增大。7 d 养护龄期改性土 τ 变化曲线的斜率随围压强度增长而增大,28 d 养护龄期的改性土围压强度与 τ 增长成线性关系。从得到的数据可以发现,在工程实践中确定 α 后,可将改性土的压实度和围压强度作为变量,采用多元线性函数拟合不同 α 下 τ 的回归方程相对可靠,相关系数 $R^2 > 0.97$,多元线性回归模型为

$$\tau = Am + Bn + C,$$

式中: m 为改性土的压实度; n 为围压强度, kPa; A 、 B 、 C 为拟合得到的参数。

计算后, α 与改性土的 τ 拟合结果如表 6 所示。

表 6 α 与改性土的 τ 拟合结果

养护龄期/d	$\alpha/^\circ$	水泥				石灰			
		A_1	B_1	C_1	R_1^2	A_2	B_2	C_2	R_2^2
7	4	5.84	1.27	-374.8	0.97	2.83	1.21	-233.34	0.97
	6	3.19	1.10	-59.6	0.97	1.56	1.27	-103.66	0.97
	8	4.62	1.60	-188.7	0.98	2.42	1.31	-167.63	0.97
	10	4.02	1.66	-118.1	0.99	3.49	1.33	-251.66	0.97
28	4	11.40	1.46	-886.8	0.99	7.25	1.15	-633.99	0.99
	6	19.98	1.74	-1 632.3	0.99	6.32	1.18	-530.56	0.98
	8	16.36	1.65	-1 255.6	0.99	7.69	1.12	-640.65	0.99
	10	13.71	1.95	-992.5	0.99	9.66	1.21	-713.55	0.97

注: A_1 、 B_1 、 C_1 、 R_1^2 分别为水泥做胶凝材料时多元线性函数拟合得到的参数和相关系数, A_2 、 B_2 、 C_2 、 R_2^2 为分别为石灰做胶凝材料时多元线性函数拟合得到的参数和相关系数。

由表6可知:养护28 d的改性土 τ 与压实度和围压的拟合相关系数比养护7 d的改性土更好。

3 结论

1)研究章丘港区改性粉土的压剪特性,获得了高含水区域改性土的压剪特性规律。在7 d养护龄期改性土无侧限抗压强度的影响因素中,胶凝材料与干土的质量比对水泥改性土影响最大,其次是压实度、水与干土和胶凝材料的质量比;压实度对石灰改性土的影响最大,其次是水与干土和胶凝材料的质量比、胶凝材料与干土的质量比;水与干土和胶凝材料的质量比较大时,水泥改性土抗压强度更高。

2)随胶凝材料与干土的质量比和压实度的增大,水泥对章丘港区粉土黏聚力的改良效果比石灰好,水泥改性土的黏聚力增大10~17倍,石灰改性土的黏聚力仅提升2~8倍;改性土摩擦角仅提升1.5~2.0倍;其他试验参数相同时,水泥改性土的抗剪强度更高。

3)在高含水区域改性土抗剪强度的影响因素中,胶凝材料与干土的质量比是水泥改性土的最主要影响因素,且随养护龄期的增长,改性土的抗剪强度增大;胶凝材料与干土的质量比是石灰改性土的最主要影响因素;随养护龄期的增长,改性土抗剪强度小幅减小,2种改性土的抗剪强度与围压强度的增长成线性关系。

本文未分析抗压、抗剪强度的相关性,可进一步研究相同因素影响下改性土抗压、抗剪强度的近似关系,建立抗压、抗剪强度随多因素变化的回归方程和回归曲面。

参考文献:

- [1] 陈晓静,王保田,左晋宇,等.水泥改性土抗压抗剪强度及相关性研究[J].水运工程,2021(8):169-175.
CHEN Xiaojing, WANG Baotian, ZUO Jinyu, et al. Study on compressive and shear strength of cement-mixed soil and correlation[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(8):169-175.
- [2] 曹智国,章定文.水泥改性土无侧限抗压强度表征参数研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(增刊1):3446-3454.
CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen. Key parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(Suppl. 1):3446-3454.
- [3] 王维涛.石灰改性土在旧路改扩建工程中的应用研究[J].山东交通科技,2016(2):92-95.
WANG Weitao. Engineering application of calcareous soil in highway widening and rebuilding[J]. Shandong Transportation Technology, 2016(2):92-95.
- [4] 张卫兵,莫剑鹏,容贤沂,等.基于三轴压缩试验的黏土抗剪强度影响因素研究[J].西部交通科技,2021(8):60-62.
- [5] 许淼.水泥改性土无侧限抗压强度影响因素研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2015.
XU Miao. Study on influence factors of unconfined compressive strength of cement-soil[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2015.
- [6] 吴亚明.两种改性水泥改性土的制备与力学性能研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
WU Yaming. Study on preparation and mechanical properties of two types of modified cemented soil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [7] 王惠芬,周鹏.石灰改性土早期强度的影响因素试验研究[J].路基工程,2010(2):73-75.
WANG Huifen, ZHOU Peng. Experimental study on influencing factors of lime soil early strength[J]. Subgrade Engineering, 2010(2):73-75.
- [8] 薛慧君,申向东,邹春霞,等.水泥改性土早期力学性能影响因素分析[J].硅酸盐通报,2014,33(8):2056-2062.
XUE Huijun, SHEN Xiangdong, ZOU Chunxia, et al. Analysis of the factors affecting the early mechanical properties of cement soil[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014,33(8):2056-2062.
- [9] DO H D, PHAM V N, NGUYEN H H, et al. Prediction of unconfined compressive strength and flexural strength of cement-stabilized sandy soils: a case study in vietnam[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021,39(7):1-16.
- [10] 薛勇刚.低剂量石灰稳定土的路用性能及其应用研究[D].郑州:郑州大学,2012.
XUE Yonggang. Pavement performance of lime-stabilized soil with small limecontent and its application[D]. Zhengzhou:

Zhengzhou University, 2012.

[11] 曲振鹏. 水泥改良盐渍土直剪试验及路基边坡稳定性影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.

QU Zhenpeng. Direct shear test of cement-improved saline soil and the influence of roadbed slope stability[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.

[12] 孙希望. 石灰改性土填料抗剪强度试验研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2011, 20(1): 13-18.

SUN Xiwang. Experimental study on shear strength of fillings treated with lime[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science), 2011, 20(1): 13-18.

[13] 阮波, 彭学先, 邓林飞. 水泥改性土抗剪强度参数试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 662-668.

RUAN Bo, PENG Xuexian, DENG Linfei. Experimental study on shear strength parameters of cement-soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(4): 662-668.

[14] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程(附条文说明): JTJ 057—1994[S]. 北京: 人民交通出版社, 1995.

[15] 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

Experimental study on compression shear characteristics of modified soil in high water bearing area

*CHEN Qifan¹, YANG Yang², JIANG Yurong³,
LIU Guihai³, LIU Baiming³, YU Xiantao³*

1. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Dongying Railway Port and Shipping Development Center, Dongying 257100, China;

3. Shandong Road and Bridge Group Co., Ltd., Jinan 250014, China

Abstract: In order to improve the compression and shear properties of soil in high water bearing area, cement and lime are respectively used as cementitious materials to modify the in-situ soil in high water cut area. The effects of curing age, mass fraction of modified cementitious body to dry ground, soil compactness, mass fraction of water and confining pressure of modified soil in high water bearing area on the unconfined compressive strength and shear strength of modified soil are studied by experimental method. The variation law of early compression and shear properties of modified soil with different influencing factors is obtained. The regression model of shear strength with compactness and confining pressure strength is established. The results show that the mass fraction of modified cementitious materials to dry ground is the biggest factor affecting the compressive and shear strength of cement modified soil and lime modified soil. The degree of compaction is the biggest factor affecting the compressive strength of lime modified soil. The compressive and shear properties of the drawing can be improved by adjusting the mass fraction of modified soil cementitious material to dry soil.

Keywords: cement modified soil; lime modified soil; unconfined compressive strength; cohesion; friction angle; shear strength

(责任编辑:王惠)