

# 海相淤泥水泥土强度与变形特性试验及相互关系研究

邓武<sup>1</sup>,刘维正<sup>2\*</sup>,陈铁<sup>3</sup>,葛孟源<sup>2</sup>

(1.长沙市轨道交通集团有限公司,湖南长沙 410019;2.中南大学土木工程学院,湖南长沙 410075;  
3.中建五局土木工程有限公司,湖南长沙 410004)

**摘要:**为研究海相淤泥水泥土抗压抗折抗剪强度与变形特性,通过开展水泥土系列室内配合比试验,测试不同固化剂掺量、龄期和水灰比下水泥土无侧限抗压强度 $f_{cu}$ 、抗折强度 $f_f$ 、归一化抗剪强度 $\tau_{qg}$ 、归一化主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ 及压缩模量 $E_s$ 等参数的变化规律,并对不同参数之间的相互关系进行了研究。结果表明:相同掺量下,水泥与石灰组合改良试样的性能比单掺水泥高2%~17%;水泥土强度与固化剂掺量和龄期成正比,与水灰比成反比,强度主要形成于成型早期阶段,且水灰比越小,早期的强度增长越快,大部分参数14 d龄期的结果已超过90 d的50%,28 d的强度则已达到70%;水灰比为0.5时,各项指标最优;此外,不同参数之间存在明显的线性关系,其中 $f_f$ 、 $\tau_{qg}$ 、 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ 、 $E_s$ 分别为 $f_{cu}$ 的0.33~0.35、0.35~0.37、9.58~10.31、17.27~17.66倍。

**关键词:**道路工程;水泥土;抗压强度;抗剪强度;抗折强度;压缩模量;相关性

中图分类号:U445.55+1

文献标志码:A

## Experiment on Strength and Deformation Characteristics of Marine Silt Cement Soil and Their Relationship

DENG Wu<sup>1</sup>, LIU Weizheng<sup>2\*</sup>, CHEN Tie<sup>3</sup>, GE Mengyuan<sup>2</sup>

(1.Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410019,China;2.School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;3.CCFCD Civil Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410004,China)

**Abstract:** In order to study the compressive, flexural, and shear strength and deformation characteristics of marine silt cement soil, a series of laboratory mix ratio tests were carried out, so as to test the changes in unconfined compressive strength  $f_{cu}$ , flexural strength  $f_f$ , normalized shear strength  $\tau_{qg}$ , normalized principal stress difference  $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ , and compression modulus  $E_s$  under different dosage of curing agents, curing ages, and cement-to-lime ratios. In addition, the correlation between different parameters was investigated. The results show that the performance of the improved samples with cement and lime is 2%–17% higher than that with cement alone under the same dosage. The strength of cement soil is proportional to the dosage and age of the curing agents and inversely proportional to the cement-to-lime ratio. The strength is mainly formed in the early stage of molding, and the growth rate of the strength at the early stage accelerates with the decrease in the cement-to-lime ratio. The strength of most parameters at a curing age of 14 d has exceeded 50% of those at a curing age of 90 d, and the strength at a curing age of 28 d has exceeded 70%. When the cement-to-lime is 0.5, the above indexes are the best. In addition, there is an obvious linear relationship between different parameters, with  $f_f$ ,  $\tau_{qg}$ ,  $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ , and  $E_s$  being 0.33–0.35, 0.35–0.37, 9.58–10.31, and 17.27–17.66 times of  $f_{cu}$ , respectively.

**Keywords:** road engineering; cement soil; compressive strength; shear strength; flexural strength; compression modulus; parameter correlation

收稿日期:2024-01-20(修改稿)

基金项目:湖南省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(编号:KY202108)

作者简介:邓武,男,大学本科,高级工程师.E-mail:dengwu159@163.com

\*通信作者:刘维正,男,博士,副教授.E-mail:liuwz2011@csu.edu.cn

## 0 引言

随着国家经济快速发展和城镇化深入推进,在沿海淤泥等软弱地基上的基础设施以及深大基坑的建造越来越多,软弱地基的不均匀沉降会严重影响道路的正常使用寿命<sup>[1-2]</sup>。水泥土搅拌桩因强度高、抗渗透性能优良以及SMW(Soil Mixed Wall)工法桩具有使用范围广、工期短、造价低、绿色环保等优点,广泛应用于软土地基处理<sup>[3-5]</sup>。但由于软土具有较强的区域性,而工程设计时水泥土力学参数往往根据经验取值,使得软土深基坑和路基变形较大甚至发生失稳现象。考虑水泥土的工程特性与桩体承载变形直接相关<sup>[6]</sup>,尤其是水泥土的抗压抗剪抗折强度对桩基和支护结构的变形与稳定性有较大的影响。因此,系统地研究水泥土强度与变形特性,对提高软土地区水泥搅拌桩及SMW工法桩的应用具有指导意义。

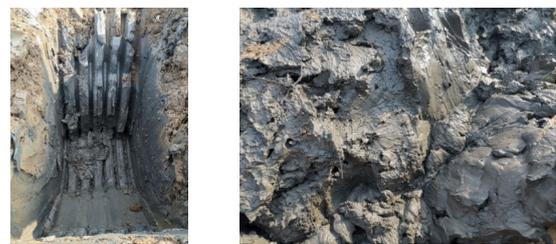
国内外学者针对水泥土的工程特性开展了大量的室内试验研究<sup>[7-9]</sup>。通过对水泥土的无侧限抗压强度与固化剂掺量、龄期和水灰比之间的关系进行研究<sup>[10-12]</sup>,发现影响水泥土无侧限抗压强度的因素主要有土体性质、含水率、水泥型号、固化剂掺量、龄期和拌和方式等<sup>[13]</sup>;对于抗折强度,朱崇辉等<sup>[14]</sup>和江国龙等<sup>[15]</sup>分别采用直接拉伸试验和劈裂试验测定水泥土的抗拉强度,并得出了抗拉强度随固化剂掺量和龄期之间的变化规律。对于抗剪强度,基于直接剪切试验、三轴不固结不排水系列试验拟合得到的水泥土强度、 $c$ 和 $\varphi$ 之间的线性关系,及其相应的强度评估模型<sup>[16]</sup>,发现水泥土的黏聚力和内摩擦角均随着固化剂掺量和龄期的增加而增加<sup>[17]</sup>,黏聚力和内摩擦角分别与固化剂掺量呈现正相关和负相关,且黏聚力受其影响更大<sup>[18]</sup>。对于水泥土的压缩性能,通过抗压强度和抗拉强度、抗剪强度、变形模量等参数之间的拟合关系<sup>[19-20]</sup>,发现水泥土试样的无侧限抗压强度和黏聚力都会随水泥掺量的增加而增加,且无侧限抗压强度和黏聚力呈线性关系<sup>[21]</sup>。虽然现有文献

中对于水泥土的力学特性研究较多,但多数研究仅针对无侧限抗压强度和直剪抗剪强度。由于三轴剪切与抗折试验为非常规试验,工程实践中常根据已有经验取值,缺少对水泥土真实三轴应力状态下的抗剪强度、抗折强度、压缩模量以及区域性各参数之间相互关系的研究。

综上,本文以沿海某枢纽区块SMW工法桩深基坑工程为背景,通过水泥土系列室内配合比试验,分析不同固化剂掺量、龄期和水灰比下水泥土的无侧限抗压强度、抗折强度、剪切强度(直接剪切、三轴不固结不排水剪切)、压缩模量以及应力-应变曲线的变化规律,并以室内常规试验得到的无侧限抗压强度为基准,建立其余参数与无侧限抗压强度的经验关系,为软土地区水泥搅拌桩及SMW工法桩设计参数取值提供依据。

## 1 试验材料及方法

试验用土取自工程建设现场,共选取5处深度2.5~3.5 m的代表性淤泥土样(图1)。通过对取回土样进行常规物理性质指标测试,得到软土物理力学特性如表1所示。通过试验结果可以看出:土体的天然含水量较高, $I_L$ 大于1, $I_p$ 大于17,土体呈流塑状黏性土。有机质含量较低,平均有机质含量为2.2%。土样中0.005~0.075 mm之间的粉粒土含量最高,占比42.6%;其次为黏粒土,平均占比37.6%;胶粒含量相对较少,为5.4%。



(a) 挖机取土坑

(b) 试验所用淤泥

图1 现场淤泥土样

Figure 1 Field silt soil sample

表1 软土物理力学特性指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soft soil

$w/\%$	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w_L/\%$	$w_P/\%$	$I_p$	$e$	有机质/ %	不同细粒(mm)含量/%			粗粒含量/ ( $>0.075\text{ mm}$ )
							胶粒( $<0.002$ )	黏粒( $0.002\sim 0.005$ )	粉粒( $0.005\sim 0.075$ )	
64.1	1.8	54.6	29.5	25.1	2.02	2.2	5.4	37.6	42.6	14.4

试验水泥型号为P.O42.5,石灰为普通生石灰,试验用水为纯水。水泥土试样制备采用湿拌法,水泥土工程特性试验所用的试验试样均根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)中的规定进行制样。其中无侧限抗压强度试验试样均为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方体试件,抗折强度试验试样为40 mm×40 mm×160 mm长条形试样,三轴剪切试验的试件为直径39.1 mm、高度80 mm的圆柱体,直接剪切试验和压缩试验的试件为直径61.8 mm、高度20 mm的圆柱体,不同试验试样实物如图2所示。海相淤泥水泥土配合比试验方案如表2所示,试验主要进行单掺水泥改良和水泥与石灰组合改良试样的研究,其中水泥与石灰组合改良试样的水泥和石灰用量分别占固化剂用量的95%和5%。



图2 水泥土抗压抗剪抗折试样

Figure2 Samples for compressive, shear, and flexural strength of cement soil

表2 海相淤泥水泥土配合比试验方案

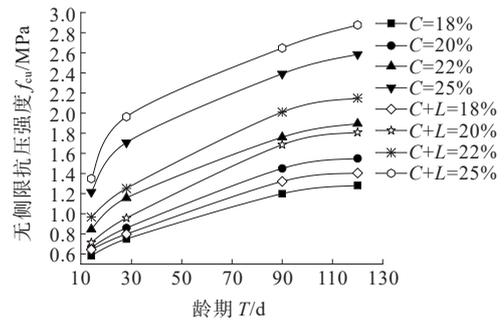
试验序号	水泥掺量 C/%	石灰掺量 L/%	试验工况	备注
1	18.00	0	C=18%	水泥占比100%
2	20.00	0	C=20%	
3	22.00	0	C=22%	
4	25.00	0	C=25%	
5	17.10	0.90	C+L=18%	水泥占比95%+ 石灰占比5%
6	19.00	1.00	C+L=20%	
7	20.90	1.10	C+L=22%	
8	23.75	1.25	C+L=25%	

## 2 水泥土强度与变形特性

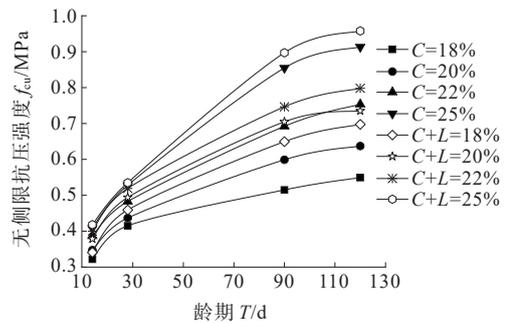
### 2.1 无侧限抗压强度

不同水灰比条件下抗压强度随龄期的变化曲线见图3。由图3可知:水泥与石灰组合改良试样抗压强度比单掺水泥试样高2%~28%。对比图3(a)、(b)可得:抗压强度随固化剂掺量的增加而增加,且

水灰比越小,受固化剂掺量的影响就越大。说明在水灰比较小时,随着固化剂掺量提高,抗压强度也不断提高。分析不同龄期条件下强度的增长速率,14~28 d内无侧限抗压强度的增加速率要明显快于28~90 d之间的增加速率,并且14 d龄期条件下抗压强度已经超过90 d的50%,而在28 d龄期条件下,这一比例仅为70%,通过将图3中每条曲线划分为14~28 d和28~90 d两部分,可以得到两部分的曲线斜率,由曲线斜率分析可知:14~28 d的斜率比28~90 d的斜率小1.5倍。通过回归分析方法补充了龄期120 d的试验结果,水泥土无侧限抗压强度与龄期呈对数关系。可以发现在90~120 d这个阶段水泥土抗压强度增长缓慢,较多试验组结果趋于平缓,或已不再增加。说明水泥土抗压强度主要形成在早期,且早期的强度增长速率也相对较快。



(a) W/C=1.0



(b) W/C=2.0

图3 不同水灰比条件下无侧限抗压强度 $f_{cu}$ 随龄期变化曲线

Figure 3 Variation of  $f_{cu}$  with curing age under different cement-to-lime ratios

图4为不同龄期条件下,水泥土无侧限抗压强度随水灰比变化曲线。由图4可知:无侧限抗压强度与水灰比的变化关系呈负相关。当水灰比较低时( $W/C=0.5、1.0$ ),水灰比的增大使无侧限抗压强度急剧减小;当水灰比较大时( $W/C=1.5、2.0$ ),无侧限抗压强度则随着水灰比的增大变化较弱。并且,随着固化剂掺量的提高,无侧限抗压强度对水灰比的变化越敏感。

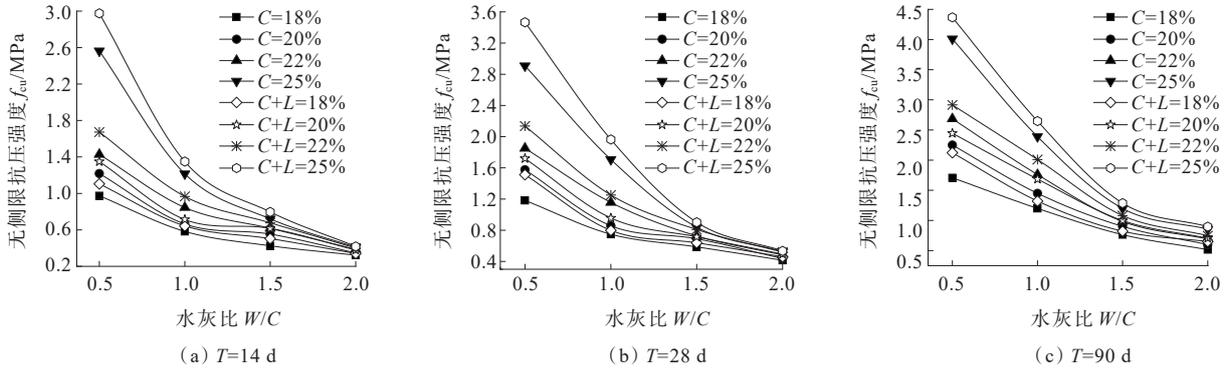


图4 不同龄期条件下无侧限抗压强度 $f_{cu}$ 随水灰比变化曲线

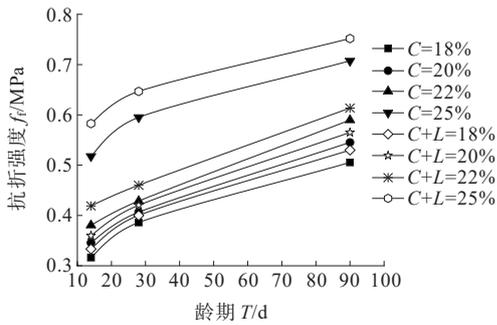
Figure 4 Variation of  $f_{cu}$  with cement-to-lime ratio under different curing ages

2.2 抗折强度

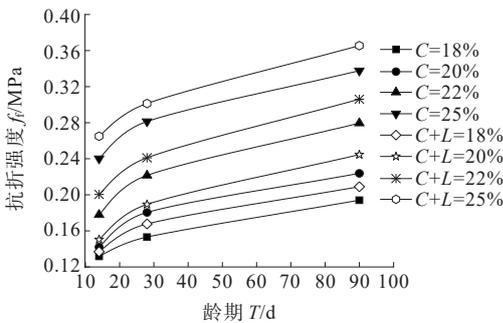
图5为水泥土抗折强度随龄期的变化曲线。由图5可知:水泥与石灰组合改良试样的水泥土抗折强度比单掺水泥试样略大2%~17%。固化剂掺量与水泥土抗折强度呈正相关,且变化幅度随着水灰比的增加而逐渐减小。此外,对比不同龄期条件下抗折强度可知:14~28 d范围内抗折强度随龄期的增长速率要明显高于28~90 d之间的增加速率,且14 d对应的抗折强度已经超过了90 d的60%,而28 d的抗

折强度则基本超过80%,说明抗折强度主要形成于试样成型早期。

图6为不同固化剂掺量条件下,水泥土抗折强度随水灰比的变化曲线。由图6可知:水泥土抗折强度衰减速率随水灰比的增加表现出先快后慢的趋势。其中水灰比由0.5增大到1.0时,衰减幅度最大,如 $T=90\text{ d}$ 、 $C+L=25\%$ 工况下抗折强度衰减了36.4%;而水灰比由1.5增大到2.0时,抗折强度衰减量为20.2%。此外,对比不同固化剂掺量条件下,水泥土抗折强度随水灰比的变化趋势发现,当固化剂掺量为25%时,水泥土的强度变化速率受水灰比的影响比较明显,而固化剂掺量为18%、20%、22%时,抗折强度受到水灰比的影响则相对较弱。



(a)  $W/C=1.0$



(b)  $W/C=2.0$

图5 不同水灰比条件下抗折强度 $f_t$ 随龄期变化曲线

Figure 5 Variation of  $f_t$  with curing age under different cement-to-lime ratios

2.3 抗剪强度

2.3.1 直接剪切试验

图7为归一化抗剪强度(抗剪强度与对应垂直压力之比)随龄期的变化曲线,由图7可得:水泥与石灰组合改良试样的抗剪强度比单掺水泥试样的抗剪强度高2.5%~16%,说明在水泥土中加入一定比例的生石灰能够使抗剪强度性能更加优异。分析固化剂掺量和水灰比对抗剪强度的影响,可得抗剪强度与固化剂掺量变化成正比,与水灰比成反比。水灰比越小,抗剪强度受到掺量的影响就越大,反之,固化剂掺量对抗剪强度的影响就越小。 $W/C=1.0$ 和 $2.0$ 时,固化剂掺量由 $C+L=18\%$ 提升到 $C+L=25\%$ 时,水泥土抗剪强度的提升幅度分别为48.5%和34.1%。说明在低水灰比条件下增加固化剂掺量对于提升水泥土抗剪强度才有显著的作用。此外,14~28 d龄期内的抗剪强度增长速率高于28~90 d龄期内的试样抗剪强度,且14 d

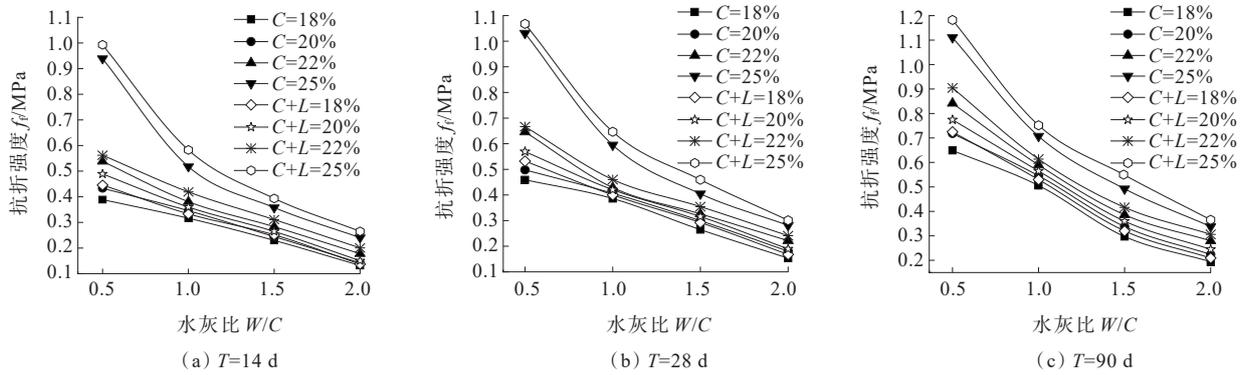


图6 不同龄期条件下抗折强度 $f_t$ 随水灰比变化曲线

Figure 6 Variation of  $f_t$  with cement-to-lime ratio under different curing ages

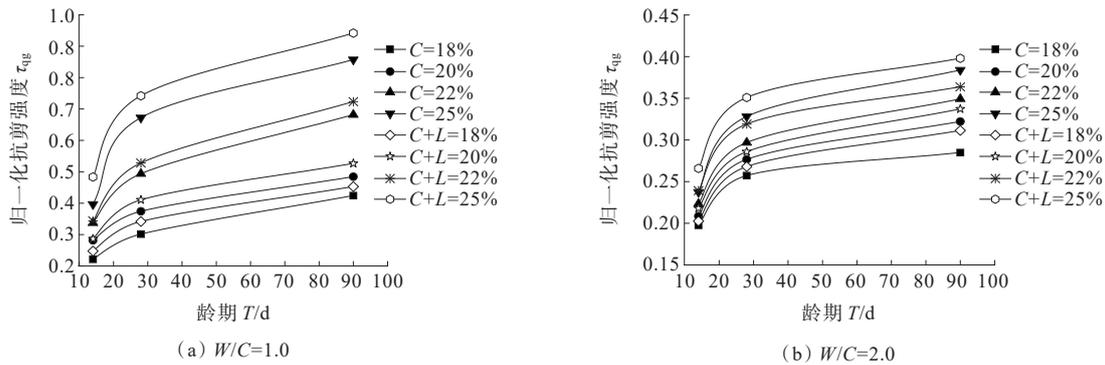


图7 不同水灰比条件下归一化抗剪强度 $\tau_{qg}$ 随龄期变化曲线

Figure 7 Variation of  $\tau_{qg}$  with curing age under different cement-to-lime ratios

对应的抗剪强度已超过 90 d 的 50%，在龄期为 28 d 时试样抗剪强度已达到 60%，说明抗剪强度主要形成在试样成型早期。

图8为不同固化剂掺量情况下,水泥土归一化抗剪强度随着水灰比的变化情况,从衰减的幅度来看,水灰比由 0.5 增大到 1.0 时,抗剪强度衰减幅度最大,

平均衰减幅度约 30%，而当水灰比大于 1.0 后,水泥土抗剪强度随水灰比的增加表现出的衰减幅度逐渐减小。此外,掺量较大的水泥土其受到水灰比的影响就较大,如  $T=14$  d 时,当  $W/C$  由 0.5 增大到 1.0 时,掺量  $C+L=18\%$  时水泥土抗剪强度衰减了 45.1%，而  $C+L=25\%$  时衰减 50.4%。

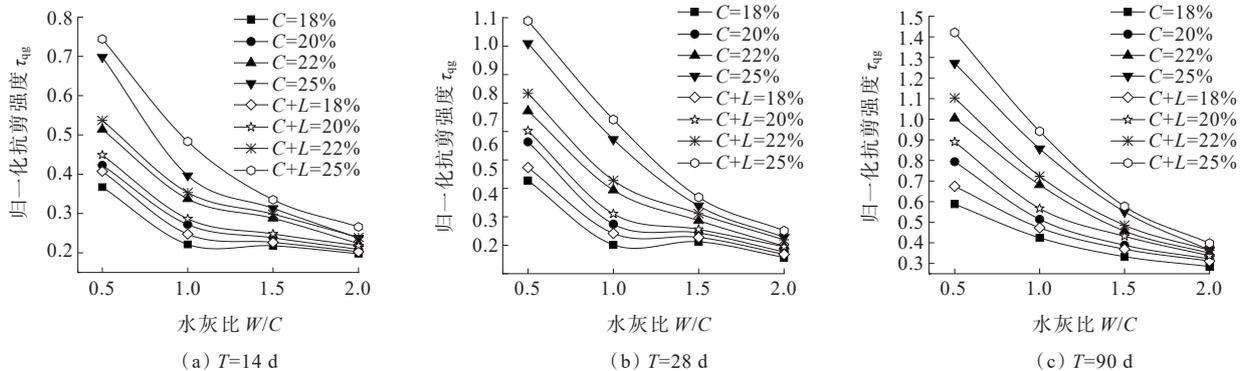


图8 不同龄期条件下 $\tau_{qg}$ 随水灰比变化曲线

Figure 8 Variation of  $\tau_{qg}$  with cement-to-lime ratio under different curing ages

### 2.3.2 不固结不排水剪切试验

#### (1) 应力-应变分析

图9、10分别为不同固化剂掺量及龄期条件下,应力-应变曲线的变化情况。由图9、10可知:在围压

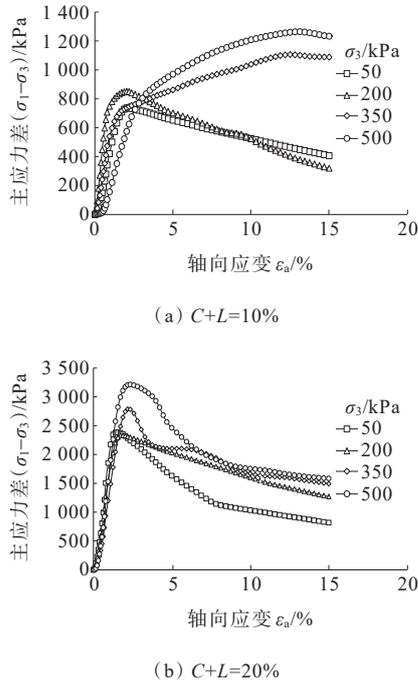


图9 典型固化剂掺量时应力-应变曲线( $T=28\text{ d}$ ,  $W/C=0.5$ )

Figure 9 Stress-strain curve with typical dosage of curing agent ( $T=28\text{ d}$ ,  $W/C=0.5$ )

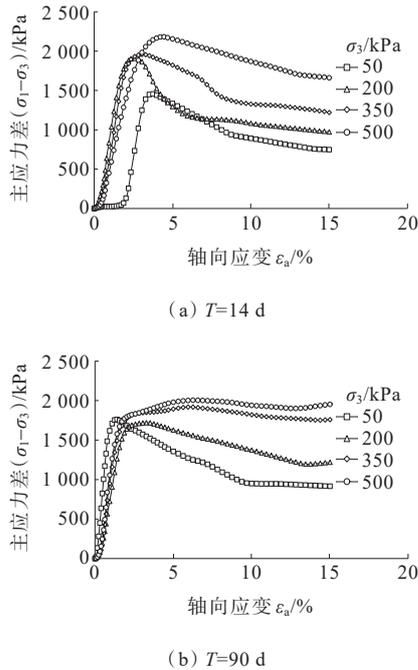


图10 不同龄期时应力-应变曲线( $W/C=0.5$ ,  $C=18\%$ )

Figure 10 Stress-strain curve under different curing ages ( $W/C=0.5$ ,  $C=18\%$ )

相同时,随着固化剂掺量和龄期的增加,水泥土试件的应力-应变关系曲线出现整体上移趋势,峰值升高,进入屈服阶段较晚。由图9可知:随着水泥掺量的增加,低围压(50 kPa和200 kPa)下应力-应变曲线

从硬化型转变为软化型;同一掺量(10%)下,应力-应变曲线随着围压增大从软化型转变为硬化型;水泥或水泥+石灰掺量超过10%、围压低于200 kPa时,应力应变曲线通常表现出软化现象。

图11为不同水灰比条件下应力-应变曲线的变化情况。

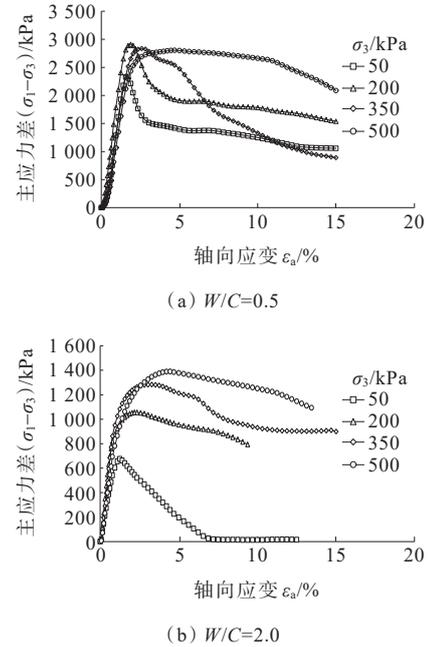


图11 不同水灰比时应力-应变曲线( $T=28\text{ d}$ ,  $C+L=25\%$ )

Figure 11 Stress-strain curve under different cement-to-lime ratios( $T=28\text{ d}$ ,  $C+L=25\%$ )

从图11可知:随着水灰比的升高,峰值强度呈现整体下移趋势。因此,随着龄期的延长、固化剂掺量的提高、水灰比的降低,土体的屈服应力逐渐提高。对比图9~11中不同围压条件下的应力-应变曲线可知:随着围压的提高,不同配比的水泥土试件的破坏应力与破坏应变均逐渐增加。当围压较低时,试件的应力-应变曲线具有明显的峰值强度,在达到峰值强度后,应力迅速降低,应力-应变曲线呈强应变软化型;反之,当围压较高时,应力-应变曲线为弱应变软化型,同时围压提升,水泥土破坏后的残余强度也明显增大。

## (2) 破坏形式分析

在三轴不固结不排水试验(UU)中,试样的破坏形式主要为塑性剪切破坏与脆性剪切破坏。随着龄期、固化剂掺量的增加以及水灰比的减小,水泥土的强度逐渐提升,试样破坏形式由塑性破坏逐渐转变为脆性破坏。发生脆性破坏时,试样会产生贯穿斜

裂纹,破坏面与水平方向大致呈60°。当发生塑性破坏时,试样无明显的剪切面,常常呈鼓胀破坏。

(3) 影响因素分析

通过分析三轴不固结不排水剪切试验所得的归一化主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ [主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 与对应围压 $\sigma_3$ 之比]的变化情况,来反映水泥土不固结不排水抗剪强度随固化剂掺量、龄期和水泥灰比的变化规律。图12为归一化主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ 随龄期的变化曲线。分析可知:水泥与石灰组合改良试样的试验结果比单掺水泥试样偏大2%~16%。水泥土不固结不排水抗剪强度随固化剂掺量的升高而明显增加。且随着养护龄期的增加,抗剪强度的增长速率呈现先快后慢的变化趋势,如0~14 d、14~28 d和

28~90 d龄期内的归一化主应力差的增长速率分别为0.71/d、0.13/d、0.05/d,可以看出早期强度的增长速率较快,而晚期速率明显放缓。说明水泥土的不固结不排水抗剪强度主要形成于试样成型早期。

图13为归一化主应力差随水灰比的变化曲线。由图13可知:在水灰比从0.5增加到1.5的过程中,水泥土的抗剪强度存在明显的下降趋势,而当水灰比由1.5增加到2.0时,抗剪强度的衰减幅度则相对较小。此外,对比不同固化剂掺量条件下水泥土抗剪强度随水灰比的变化情况可得,固化剂掺量越高,抗剪强度随水灰比增加的衰减幅度就越大。因此,水泥土不固结不排水抗剪强度与水灰比的变化呈负相关,且固化剂掺量越高,抗剪强度对水灰比的相互变化关系越强。

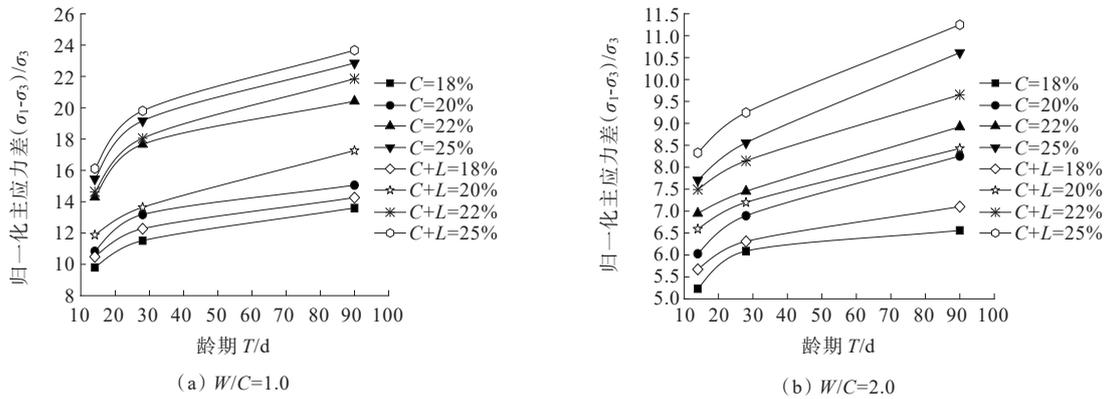


图12 不同水灰比条件下 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ 随龄期变化曲线

Figure 12 Variation of  $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$  with curing age under different cement-to-lime ratios

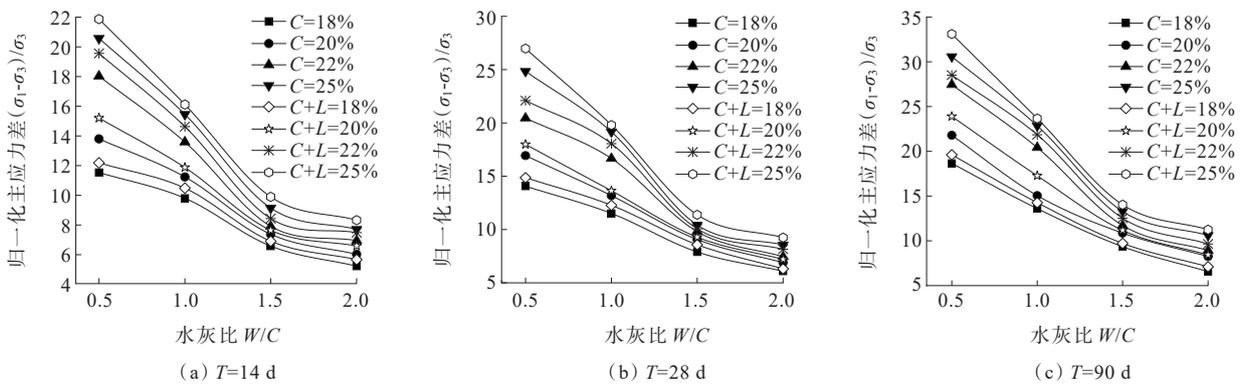


图13 不同龄期条件下 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ 随水灰比变化曲线

Figure 13 Variation of  $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$  with cement-to-lime ratio under different curing ages

2.4 压缩模量

图14为压缩模量随龄期变化曲线。对比两种配比组合条件下压缩模量可得,水泥与石灰组合改良试样所得的压缩模量比单掺水泥试样普遍大1.5%~10%。压缩模量随固化剂掺量的增加而增加。对比

不同龄期下的压缩模量变化情况可得,在14~28 d龄期范围内,压缩模量的增长速率要明显快于28~90 d龄期范围。14 d龄期时固化土的压缩模量大部分已达到90 d龄期时的60%以上,28 d龄期时大部分已经达到80%,说明水泥土早期压缩模量增长较快。此外,

水灰比的增加对压缩模量的增长具有明显的降低作用,且对早期压缩模量的降低作用更明显,说明水灰比的增大能够延缓压缩模量早期强度的形成。

图 15 为压缩模量随水灰比的变化曲线,对比不

同水灰比时压缩模量衰减幅度发现,当水灰比由 0.5 增大到 1.0 时,压缩模量的衰减幅度最大,而水灰比大于 1.0 时,衰减幅度则相对较小,说明水灰比对于压缩模量的影响具有一定的边界效应。

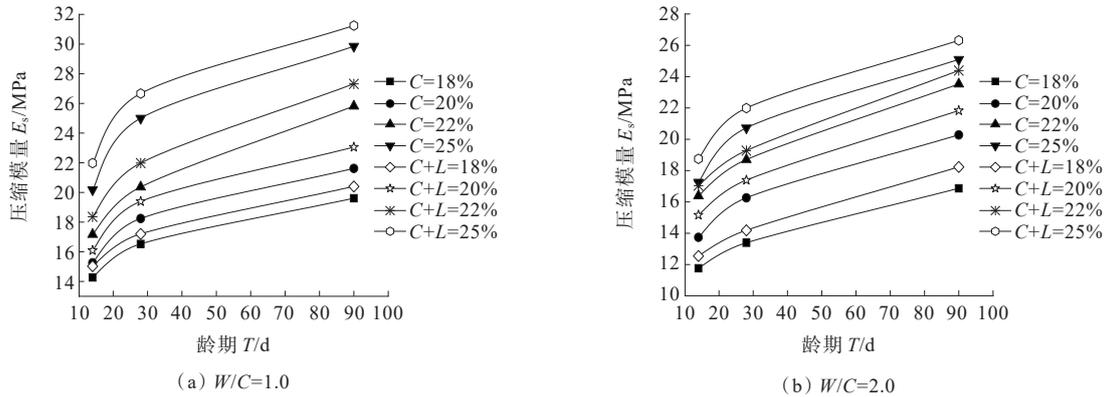


图 14 不同水灰比条件下压缩模量  $E_s$  随龄期变化曲线

Figure 14 Variation of  $E_s$  with curing age under different cement-to-lime ratios

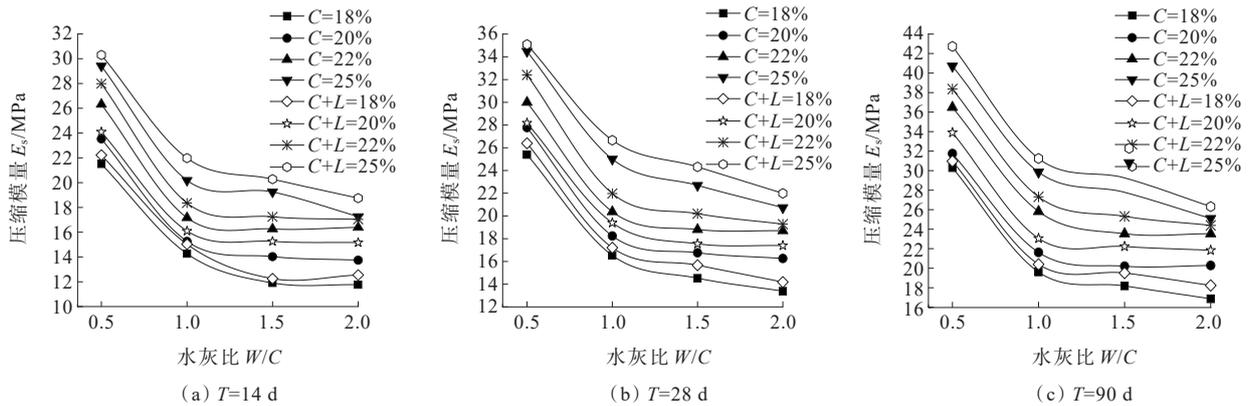


图 15 不同龄期条件下压缩模量  $E_s$  随水灰比变化曲线

Figure 15 Variation of  $E_s$  with cement-to-lime ratio under different curing ages

### 3 不同参数相关性分析

#### 3.1 无侧限抗压强度与抗折强度关系

水泥石无侧限抗压强度与抗折强度的关系曲线如图 16 所示。由图 16 可知:水泥石的抗折强度随着无侧限抗压强度的增大而增大,抗压强度越大,这一规律越明显。采用回归分析方法得到无侧限抗压强度与抗折强度呈线性关系,可以看出数据散点分布在拟合直线的两侧,拟合精度  $R^2=0.97$ ,拟合效果较为理想。

#### 3.2 抗压强度与归一化抗剪强度关系

图 17 为水泥石无侧限抗压强度与归一化抗剪强度的关系曲线。由图 17 可知:水泥石的归一化抗剪

强度总体上随着无侧限抗压强度的增大而增大,采用回归分析方法得到无侧限抗压强度与归一化抗剪强度呈线性关系,拟合精度  $R^2=0.96\sim 0.97$ 。当无侧限抗压强度为  $0.5\sim 2.5$  MPa 时,抗压强度与归一化抗剪强度相关性较高,可为结构稳定性设计取值提供经验系数。

#### 3.3 抗压强度与归一化主应力差关系

水泥石无侧限抗压强度与归一化主应力差的关系曲线如图 18 所示。由图 18 可知:单掺水泥试样的水泥石归一化主应力差与无侧限抗压强度相关性比水泥与石灰组合改良试样的水泥石离散程度低,水泥与石灰组合改良的水泥石随着无侧限抗压强度的增加,归一化主应力差不再是明显增长,存在一定的

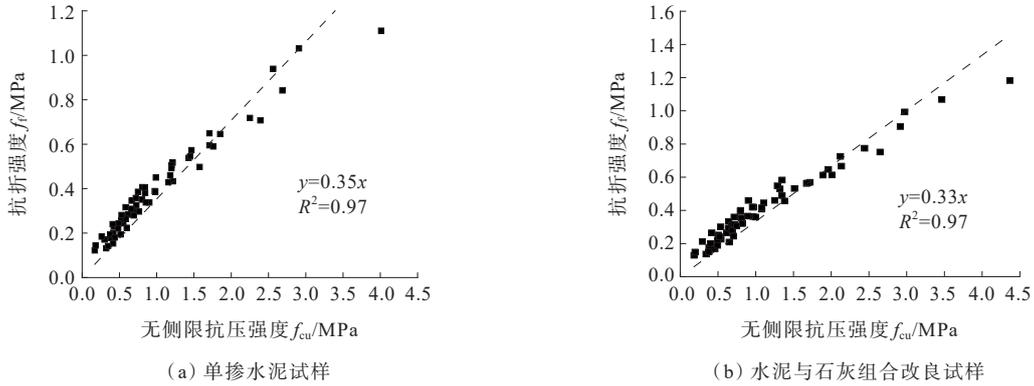


图 16 不同水泥土无侧限抗压强度与抗折强度的线性关系

Figure 16 Linear relationship between  $f_{cu}$  and  $f_t$  of different cement soil

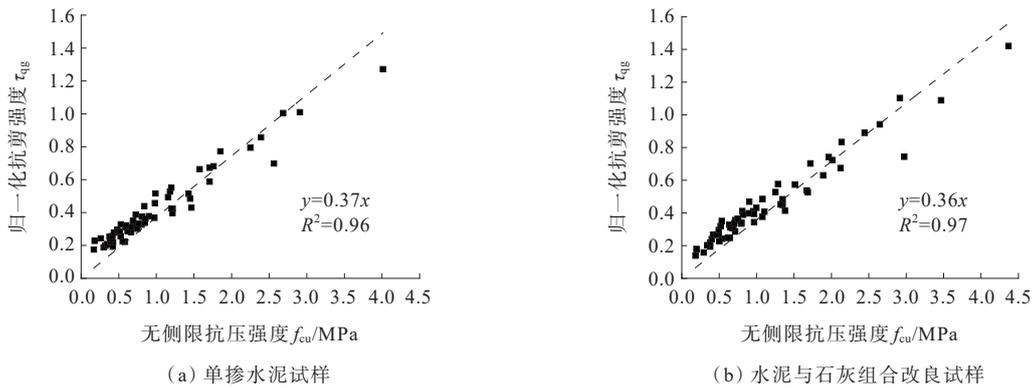


图 17 不同水泥土抗压强度与归一化抗剪强度的线性关系

Figure 17 Linear relationship between  $f_{cu}$  and  $\tau_{qg}$  of different cement soil

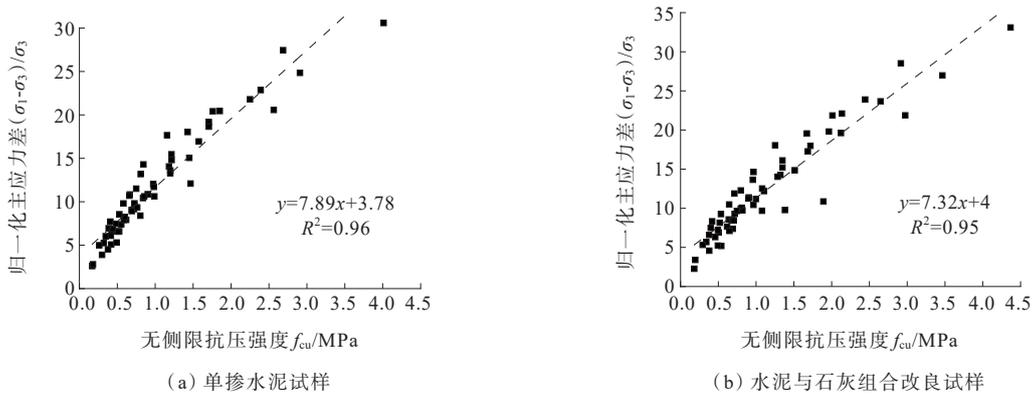


图 18 不同水泥土抗压强度与归一化主应力差的线性关系

Figure 18 Linear relationship between  $f_{cu}$  and  $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_3$  of different cement soil

分散性。采用回归分析方法得到无侧限抗压强度与归一化主应力差呈线性关系,拟合精度  $R^2=0.95$ ,表明总体上拟合程度较好。

### 3.4 抗压强度与压缩模量相互关系

水泥土无侧限抗压强度与压缩模量的关系曲线如图 19 所示。由图 19 可知:水泥土的压缩模量随着无侧限抗压强度的增大而增大,采用回归分析方法

得到无侧限抗压强度与压缩模量呈线性关系,拟合精度  $R^2=0.90$ ,表明拟合程度较好。可以发现,当无侧限抗压强度小于 1.5 MPa 时,单掺水泥试样的水泥土与掺量为水泥与石灰组合改良试样的水泥土压缩模量处于拟合曲线上方,当无侧限抗压强度大于 1.5 MPa 时,压缩模量处于拟合曲线下方。因此,在工程设计时,当无侧限抗压强度小于 1.5 MPa 时,水泥土的压缩

模量可取规范要求的较大值,而当无侧限抗压强度大于 1.5 MPa 时,水泥土的压缩模量取值需相对保守。

### 3.5 不固结不排水黏聚力与直剪黏聚力关系

图 20 为通过直接剪切试验和三轴不固结不排水剪切试验所得到的两种黏聚力之间的线性拟合关系图。从图 20 可以看出:不固结不排水黏聚力  $c_{un}$  普遍比直接剪切试验所得的黏聚力  $c_q$  要大,具体关系如下:① 单掺水泥试样所得到的相关性规律为: $c_{un} =$

$1.76c_q, R^2=0.98$ ;② 水泥与石灰组合改良试样所得到的相关性规律为: $c_{un} = 1.87c_q, R^2=0.99$ 。

### 3.6 抗折强度与抗剪强度的关系

水泥土抗折强度与归一化抗剪强度的关系曲线如图 21 所示。由图 21 可知:水泥土的抗折强度随着与归一化抗剪强度的增大而增大,并趋于线性关系。对比图 21(a)、(b)可知,随着石灰的加入,水泥和石灰粉末与土颗粒和水之间发生了一系列化学反应,

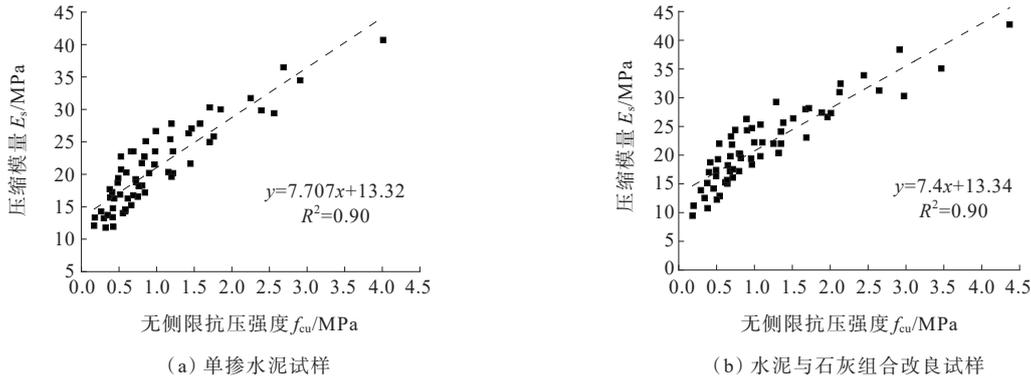


图 19 不同水泥土抗压强度与压缩模量的线性关系

Figure 19 Linear relationship between  $f_{cu}$  and  $E_s$  of different cement soil

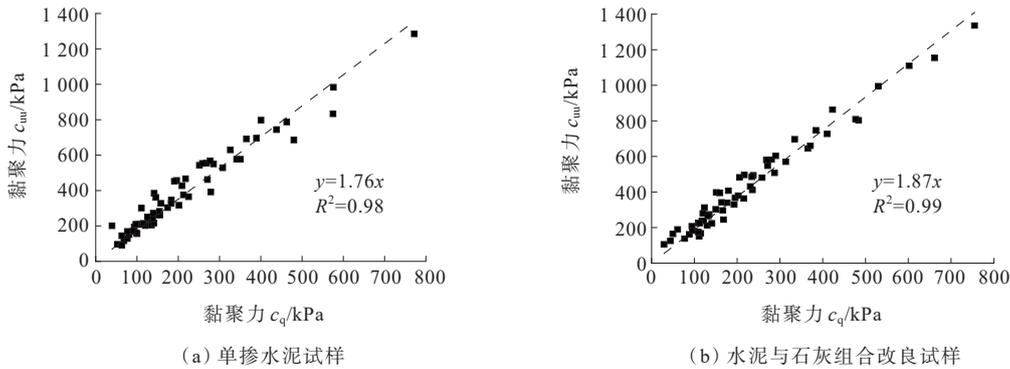


图 20 不同水泥土  $c_q$  与  $c_{un}$  的线性关系

Figure 20 Linear relationship between  $c_q$  and  $c_{un}$  of different cement soil

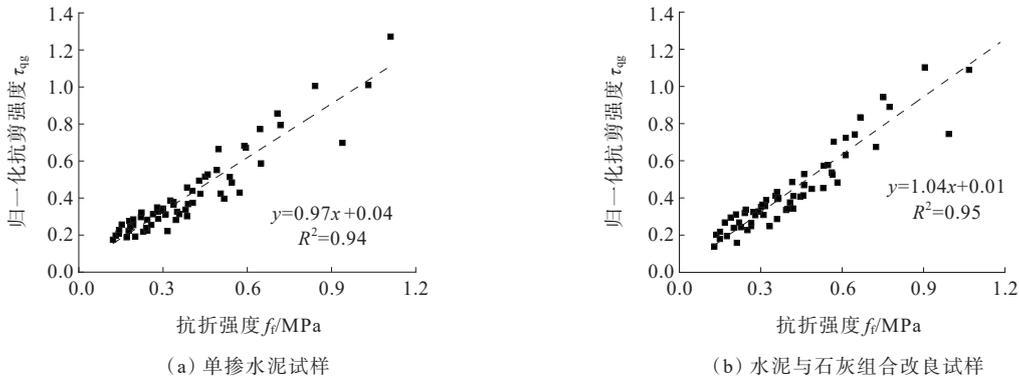


图 21 水泥土抗折强度与归一化抗剪强度的关系

Figure 21 Relationships between  $f_r$  and  $\tau_{qg}$  of different cement soil

水泥和石灰粉末沉积在土孔隙中,增加了颗粒之间的相互黏结力,使试样抗折以及抗剪强度得到提升。结果表明:添加一定量的石灰对水泥土抗折和抗剪强度之间的关系存在一定的影响,石灰使得线性关系更加明显。

综上所述,通过将单掺水泥试样和水泥与石灰组合改良试样两种固化剂掺量条件下不同参数的试验结果之间的线性关系进行拟合,得到如表3所示的线性关系汇总表。由表3可知:水泥土的无侧限抗压强度与抗折强度、归一化抗剪强度、归一化主应力差及压缩模量 $E_s$ 之间均具有较强的线性关系。

表3 不同水泥土参数线性关系汇总

Table 3 Linear relationship between parameters of different cement soil

类别	参数	拟合公式
单掺水泥试样	$f_i$	$f_i=0.35f_{cu}, R^2=0.97$
	$\tau_{qg}$	$\tau_{qg}=0.37f_{cu}, R^2=0.96$
	$(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$	$(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3=7.89f_{cu}+3.78, R^2=0.96$
	$E_s$	$E_s=7.707f_{cu}+13.32, R^2=0.90$
水泥与石灰组合改良试样	$f_i$	$f_i=0.33f_{cu}, R^2=0.97$
	$\tau_{qg}$	$\tau_{qg}=0.36f_{cu}, R^2=0.97$
	$(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$	$(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3=7.32f_{cu}+4, R^2=0.95$
	$E_s$	$E_s=7.4f_{cu}+13.34, R^2=0.90$

## 4 结论

(1) 抗压与抗折强度随固化剂掺量的增加而增加,且水灰比越小,受固化剂掺量的影响就越大;14 d的抗压强度已达到90 d强度的50%;水泥与石灰组合改良试样的配比所得到的强度比单掺水泥试样的高2%~17%。

(2) 水泥与石灰组合改良试样的抗剪强度比单掺水泥试样的抗剪强度高2.5%~16%;水灰比由0.5增大到1.0时,平均衰减幅度约30%;水泥或水泥+石灰掺量超过10%、围压低于200 kPa时,应力-应变曲线通常表现出软化现象。

(3) 压缩模量随固化剂掺量的增加而增加,随水灰比的增加而减小。水泥与石灰组合改良试样的压缩模量相对单掺水泥试样高1.5%~10%。 $W/C=0.5$ 时,14 d和28 d龄期时压缩模量平均值为90 d的80%和93%,而水灰比增大后,该比例分别减小为

70%和85% ( $W/C=1.0$ )、68%和81% ( $W/C=1.5$ )、60%和87% ( $W/C=2.0$ )。

(4) 建立了水泥土无侧限抗压强度 $f_{cu}$ 与抗折强度 $f_i$ 、归一化抗剪强度 $\tau_{qg}$ 、归一化主应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)/\sigma_3$ 及压缩模量 $E_s$ 的线性经验关系,可为工程实践合理确定水泥土抗折和抗剪强度提供依据。

## 参考文献:

### References:

- [1] 裘友强,宫玉明,刘军勇.地基路路面协同沉降变形一体化设计方法研究[J].中外公路,2022,42(2):57-61.  
QIU Youqiang, GONG Yuming, LIU Junyong. Research on integrated design method of cooperative settlement deformation of foundation and subgrade[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 57-61.
- [2] 董倩,吕耀志,程少锋,等.机场刚性道面基层顶面模量转换关系研究[J].中外公路,2022,42(2):62-67.  
DONG Qian, LYU Yaozhi, CHENG Shaofeng, et al. Study on conversion relationship about modulus of subgrade in airport rigid pavements[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 62-67.
- [3] MIAO X D, ZHANG M, WANG Y M, et al. Mechanical characteristics and optimum design of SMW construction method for a comprehensive pipe gallery in a water-rich weak stratum[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2020, 14(4): 59-69.
- [4] 匡一成,杨铠波,尹平保,等.吹填人工岛软基处理及围堰变形监测分析[J].中外公路,2023,43(6):21-26.  
KUANG Yicheng, YANG Kaibo, YIN Pingbao, et al. Cofferdam deformation monitoring and soft foundation treatment for hydraulic reclamation artificial island[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6): 21-26.
- [5] 王艳萍,孙庆楠,陈昊若.美标水泥搅拌桩设计方法研究[J].中外公路,2022,42(5):19-23.  
WANG Yanping, SUN Qingnan, CHEN Haoruo. Research on design method of cement mixing piles under american standards[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 19-23.
- [6] 秦世伟,陆小锋,张国军.水泥土搅拌法加固淤泥质黏土的试验研究[J].中外公路,2019,39(5):256-260.  
QIN Shiwei, LU Xiaofeng, ZHANG Guojun. Experimental study on mucky clay strengthened by cement-soil mixed

- method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(5):256-260.
- [7] 赵百超,陈四利,侯芮.冻融循环与疲劳荷载作用下水泥土力学特性试验研究[J].中外公路,2021,41(4):362-365.  
ZHAO Baichao, CHEN Sili, HOU Rui. Experimental study on mechanical properties of cement-soil under freeze-thaw cycle and fatigue load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4):362-365.
- [8] 黄凯,张明义,杨淑娟,等.基坑水泥土墙内微型钢管桩承载特性试验研究[J].工业建筑,2018,48(2):134-138,168.  
HUANG Kai, ZHANG Mingyi, YANG Shujuan, et al. Experimental research on bearing capacity of micro-steel pile embedded in cement-soil wall in deep excavation[J]. Industrial Construction, 2018, 48(2):134-138, 168.
- [9] 陈柯,梁爽,赵振国,等.水泥土抗裂性能的影响因素分析[J].中外公路,2023,43(5):194-197.  
CHEN Ke, LIANG Shuang, ZHAO Zhenguo, et al. Analysis of influencing factors on cracking resistance of soil-cement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5):194-197.
- [10] 郑少辉,赖汉江,章荣军,等.不同水灰比水泥固化黏土的强度特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(6):1281-1284,1292.  
ZHENG Shaohui, LAI Hanjiang, ZHANG Rongjun, et al. Experimental research on strength characteristics of cement-stabilized clay with different water-cement ratio[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6):1281-1284, 1292.
- [11] SHARMA L K, SINGH T N. Regression-based models for the prediction of unconfined compressive strength of artificially structured soil[J]. Engineering with Computers, 2018, 34(1):175-186.
- [12] 杨智慧,李珊花.基于PFC<sup>2D</sup>的水泥土单轴压缩试验及微观数值模拟[J].中外公路,2023,43(1):189-193.  
YANG Zhihui, LI Shanhua. Uniaxial shear test and mesoscopic numerical simulation of cemental soil based on PFC<sup>2D</sup> method[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(1):189-193.
- [13] 刘松玉,周建,章定文,等.地基处理技术进展[J].土木工程学报,2020,53(4):93-110.  
LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4):93-110.
- [14] 朱崇辉,王增红.水泥土单轴抗拉强度试验研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(6):1239-1242.  
ZHU Chonghui, WANG Zenghong. Research on the cement soil uniaxial tensile strength test[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2013, 37(6):1239-1242.
- [15] 江国龙,陈四利,毛学文,等.水泥土劈裂抗拉强度试验研究[J].公路交通科技,2017,34(8):29-33,56.  
JIANG Guolong, CHEN Sili, MAO Xuewen, et al. Experimental study on splitting tensile strength of cement-soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(8):29-33, 56.
- [16] 赵百超,陈四利,董凯赫.基于膨润土、粉煤灰的水泥复合土抗剪强度研究[J].硅酸盐通报,2019,38(9):2882-2889.  
ZHAO Baichao, CHEN Sili, DONG Kaihe. Shear strength of cement composite soil based on bentonite and fly ash[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9):2882-2889.
- [17] 赵春彦,黄启友,郎锋,等.单因素和多因素作用下的水泥土强度评估模型试验研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(11):2788-2795.  
ZHAO Chunyan, HUANG Qiyu, LANG Feng, et al. Experimental study on strength evaluation model of cement soil under single factor and multi factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11):2788-2795.
- [18] 陈四利,侯芮,倪春雷,等.基于三轴压缩试验的水泥土力学特性研究[J].硅酸盐通报,2018,37(12):4012-4017.  
CHEN Sili, HOU Rui, NI Chunlei, et al. Research on the mechanical properties of cemented soil based on triaxial compression tests[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(12):4012-4017.
- [19] TRAN K Q, SATOMI T, TAKAHASHI H. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178:204-210.
- [20] ZHANG R, WU S M, CAO Y P, et al. Research on prediction of cement-soil cohesion based on strength test[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 781(2):022096.
- [21] 陈晓静,王保田,左晋宇,等.水泥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.