

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.03.034

短龄期玻璃纤维水泥土的三轴力学特性研究

王伟,戴梦丹,俞文杰

(绍兴文理学院 土木工程学院,浙江 绍兴 312000)

摘要:为了评价纤维对水泥土脆性破坏的改善作用,对养护龄期为7 d、玻璃纤维(GF)质量分数分别为0、2%、4%、6%和8%的玻璃纤维水泥土(GCS)进行三轴不固结不排水(UU)试验。结果表明:① GCS保留了水泥土原有的应变软化特性;② 对于相同质量分数的GF,GCS试样的峰值应力、峰值应变和残余强度随着围压的增加而逐渐增加,但脆性指数 I_b 逐渐减小;③ 当围压一定时,GCS试样的峰值应力、峰值应变、残余强度以及脆性指数在GF质量分数为4%时达到最佳;④ 最佳纤维掺量的改性水泥土较素水泥土的内摩擦角和黏聚力分别提高了8%和50%,说明玻璃纤维对水泥土的改性主要通过提高黏聚力来实现。研究表明:采用适量的玻璃纤维改性滨海水泥土以改善其脆性破坏是可行的。

关键词:玻璃纤维水泥土;三轴UU试验;力学性能;抗剪强度参数;脆性指数

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

近年来,滨海地区在实际工程中经常会遇到高压缩性、高孔隙比、低强度的软土路基。这些路基的力学性能往往不能满足工程实际需求,需要采取一定的改良措施,以免对地基基础乃至上层路面结构造成严重破坏^[1-2]。

水泥土作为地基改良技术的一种,由于其具有低渗透性、低压缩性、可塑性好等优点,并且与原滨海软土相比,其抗压强度、抗剪强度以及弹性模量等力学性能更好,而被广泛应用于各类路基工程中^[3-8]。但众多学者的试验表明^[9-12]:随着水泥掺量的增加,这些力学性能的增强效果和经济效益达不到预期设想,且水泥土存在抗拉强度低、脆性大、刚度大等缺陷,并不能较好地适用于各类路基工程。针对上述问题,诸多学者结合不同材料提出了多种改良方法^[13-17],发现纤维加筋技术具有较好的土体改善效果^[18-20]。

近年来的研究表明^[21-24],在水泥土中掺入一定量的纤维对水泥土的抗压、抗拉强度以及抗折强度的提高是有利的,同时还会在一定程度上改善水泥土

的脆性。Estabragh等^[25]通过无侧限抗压强度试验和劈裂试验对不同质量分数和长度的聚丙烯纤维水泥土进行研究,发现纤维的掺入明显提高了水泥土的抗压强度和抗拉强度,纤维长度对其没有显著影响,但纤维含量并不是越多效果越好;鹿群等^[26]研究了纤维取向的随机性对水泥土抗压强度的影响,研究过程中考虑了两种类型的纤维,即聚丙烯纤维和玄武岩纤维,发现这两种纤维水泥土强度的增长幅度随纤维掺入比的增大而变小,这表明在一定范围内,纤维质量分数存在一个最佳值。过多的纤维含量甚至会导致强度降低;Ateş等^[27]通过无侧限抗压强度试验,对不同GF掺量的水泥土进行研究发现,当GF质量分数为3%时,其抗压强度达到最大值,而继续增加GF掺量,其强度降低;殷勇等^[28-29]对不同质量分数的GCS进行的无侧限压缩、三轴压缩以及劈裂拉伸试验表明,当GF质量分数在3%时,GCS抗压强度最大,但其降低水泥土脆性效果并不明显,而当GF质量分数为2%时,可以有效地降低其脆性。不同种类的纤维,其最佳质量分数是不同的;Tran等^[30]对不同质量分数的玉米丝纤维水泥土进行了无侧限抗压强度试验,研究表明,其最佳纤维掺量为2.5%~

收稿日期:2021-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41772311)

作者简介:王伟,男,博士.E-mail:wangweiusx@163.com

5‰;Ayeldeen等^[31]对不同质量分数的聚丙烯纤维水泥土进行了无侧限抗压强度试验,结果表明:其抗压强度随着纤维质量分数的增加呈先增后减的趋势,纤维含量为5‰时,抗压强度达到最大值。同种纤维材料,在不同试验类型中,其最佳掺量也是不同的;Wang等^[32]对不同聚丙烯纤维质量分数的水泥土进行了三轴UU试验,结果表明:当聚丙烯纤维质量分数为6‰时,其水泥土的改性效果最佳。上述研究表明:纤维加筋是一种加固土体的好方法。而上述研究中对GF质量分数的选取均大于1%,有学者指出^[33],当纤维含量增加到1%时,纤维会缠绕在一起,从而导致其在土体内分布不均匀。因此,本文将GF的质量分数控制为0~8‰。并且,在实际工程中,由于改善土层往往处于地面以下,有时埋深会高达30 m,甚至更深。当处于这种情况时,需要考虑围压对水泥土的影响。

本文进行了一系列不同围压的三轴不固结不排水(UU)试验。重点分析了在短龄期7 d下,不同围压以及不同纤维掺量对水泥土的改性效果,以期为玻璃纤维水泥土(GCS)应用于实际工程提供参考。

1 试验方案

1.1 试验材料与设备

本试验的滨海软土土样取自浙江省绍兴市滨海新区,具体物理性质指标如表1所示。试验选用M32.5水泥,主要技术指标如表2所示。根据前人的研究^[34-35],玻璃纤维的最佳长度为6 mm、9 mm,本试验采用长度为6 mm的玻璃纤维(GF),该纤维化学稳定性好,与水泥滨海软土表面握裹力强,抗拉强度高,详细技术指标如表3所示。试验仪器为全自动三轴仪TKA-TTS-3S。

表1 滨海软土的物理性质指标

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙 比	含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	液性 指数	塑性 指数
1.65	1.64	30.0	46.2	26.4	0.18	19.8

表2 M32.5水泥的主要技术指标

凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗弯强度/MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
≥60	≤720	≥2.5	≥5.5	≥10	≥32.5

表3 玻璃纤维的主要技术指标

纤维类型	纤维平均 直径/ μm	纤维长 度/mm	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	耐酸 碱性	分散 性
束状单丝	18	6	>427	>4.1	极强	极好

1.2 试验方案

本试验以滨海软土为基本土样,按照工程实际背景,将试验分为5组,每组4个试样。试验样品的含水率、水泥含量、纤维含量、围压 σ_3 和养护时间如表4所示。

表4 试验样品组成和测试条件

含水率/ %	水泥含量/ %	纤维含量/ ‰	纤维 种类	围压 σ_3 / kPa	龄期/ d
30	20	0、2、4、6、8	GF	100	7
				200	
				300	
				400	

1.3 试样制备

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)和设计试验方案^[36],三轴UU试验的试件制作过程可分为以下几个步骤:

(1) 将滨海软土样置于105℃恒温烤箱中烘烤24 h,干燥后粉碎。

(2) 压碎的滨海软土过2 mm筛子,除去大颗粒和石头等杂质。

(3) 将过筛的滨海软土、水泥、玻璃纤维、水等适量称量,搅拌均匀后得到质量为195 g的混合料。按土工试验规范,用千斤顶压制成高度80 mm、直径39.1 mm的试样,密度为 2.03 g/cm^3 。

(4) 试样制备后,将所有试样放入养护箱中进行标准养护,养护时间为7 d。

2 数据分析

2.1 应力-应变曲线

图1显示了GCS试样的偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 与轴向应变 ϵ (以下简称“应力-应变曲线”)之间的关系。可以看出:试样的偏应力-应变曲线关系均呈软化型。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的相关规定^[36],若试样的应力-应变曲线呈软化型,则最大轴向应变应取略大于破坏应变的3%~5%或当偏应

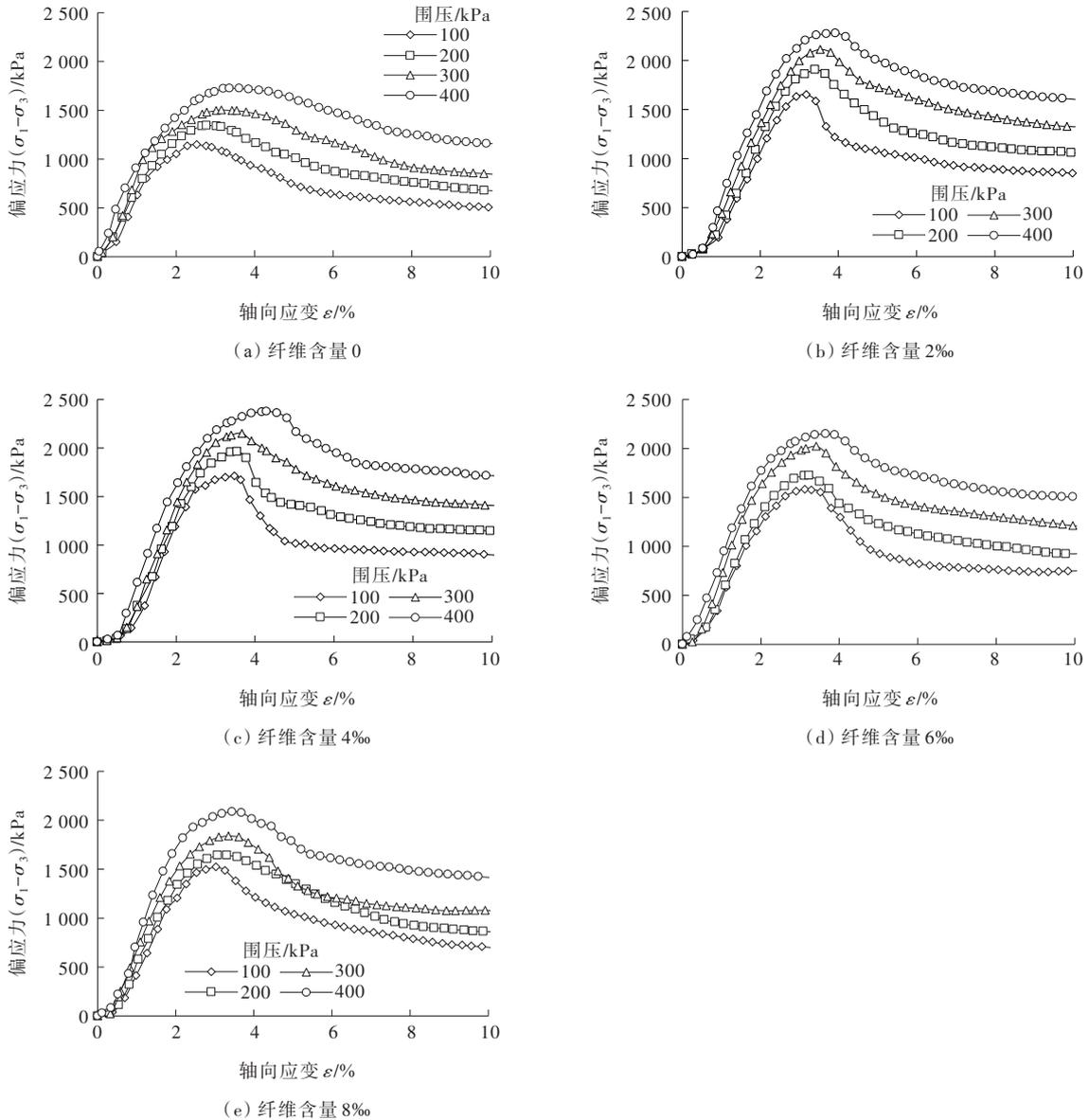


图1 不同纤维含量下GCS试样的应力-应变曲线

力趋于稳定时的轴向应变,本研究视10%为最大轴向应变。

2.2 峰值应力和峰值应变

不同GF质量分数下相对应的GCS试样的峰值应力 $(\sigma_1-\sigma_3)_{max}$ 和其峰值应力下的应变 ϵ_{max} (简称“峰值应变”)如图2、3所示。

从图2、3可以看出:在GF质量分数不变的情况下,随着围压的增大,GCS试样的峰值应力和峰值应变逐渐增大。此外,在相同围压下,随着纤维含量的增加,GCS试样的峰值应力先升高后降低,其峰值应变的变化与峰值应力相同。这种变化是由于纤维增强对剪切强度的作用存在上限值。当纤维含量为4%,峰值应力和峰值应变最大。与纤维含量为0的

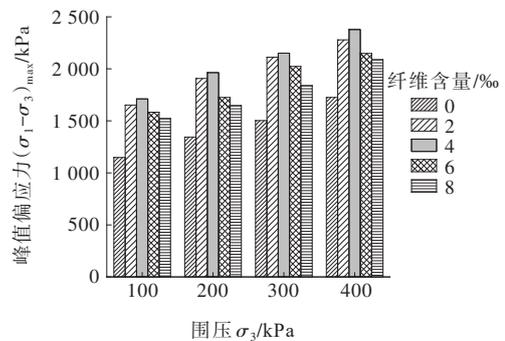


图2 GCS的峰值偏应力

试样相比,随着围压的变化,峰值应力在38%~49%范围内提高,峰值应力处的应变在16%~38%范围内增加。而继续增加纤维掺量,其峰值应力和峰值应变明显降低,这是因为当纤维含量较高时,容易引

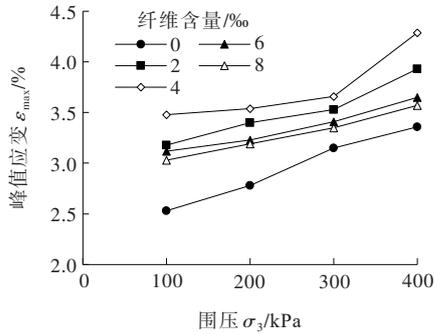


图3 GCS峰值应变

起纤维的偏析和缠结,损害了纤维与土壤颗粒间的有效相互作用。

与此同时,当纤维含量为4‰时,与纤维含量为0的GCS试样相比,在100 kPa围压下,其峰值应力提高了49%,而当围压增加到400 kPa时,其峰值应力仅提高了38%。这主要是低围压下,纤维对强度提高的贡献较大,而随着围压的增加,纤维对强度的提高贡献减小。这与Suchit等^[37]的研究结果一致,对于纤维加固土而言,其强度提高率在低围压下较高,随着围压的增加,强度提高率逐渐降低,表明纤维加固在低围压下更有利。

2.3 残余强度

分析图1可知,GCS试样的应力-应变曲线在达到峰值应力之后,随着轴向应变的增加,应力逐渐降低,且均大于0。意味着在达到峰值应力后,试样仍具有一定的强度来抵抗破坏。轴向应变为10%的应力用 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{0.1}$ 来表示,并简称为“残余强度”。根据图1得到残余强度随围压变化的关系如图4所示。

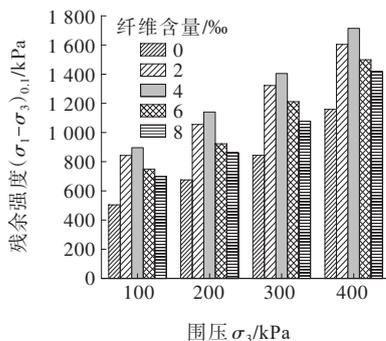


图4 不同围压下的残余强度

由图4可知:当GF质量分数一定时,GCS残余强度随围压的增加而增加。而当围压相同时,随着纤维掺量的增加,其残余强度变化趋势同峰值应力一致,均为先升高后降低,并在纤维含量为4‰时,达

到最大值。当纤维含量为4‰时,与纤维含量为0的GCS试样相比,在100 kPa围压下,其残余强度提高了78%,而当围压达到400 kPa时,只提高了48%,出现这种现象的原因与上述峰值应力提高率受高围压的影响一致。但总体来说,纤维的掺入对水泥土的破坏强度是有所提高的。

2.4 强度曲线和抗剪强度参数

为了绘制GCS试样的强度包络图,将图1应力-应变曲线中的峰值视为失效点;以法向应力 σ 为横坐标,以剪应力 τ 为纵坐标,以 $(\sigma_{1f} + \sigma_{3f})/2$ 为圆心,以 $(\sigma_{1f} - \sigma_{3f})/2$ 为半径(f 表示破坏时的值),在 $\tau - \sigma$ 应力平面图上绘制不同GF质量分数下的极限应力莫尔圆,4个不同围压下的莫尔圆公切线,即为极限应力莫尔圆的强度包络线,如图5所示。

在进行饱和软土的三轴UU试验过程中,孔隙水压力会随着围压的增加而等量增加,二者相互抵消,以致于UU试验中的强度包络线理论上是水平线(即内摩擦角为 0°)^[38]。但对于水泥土而言,由于其内部存在封闭气体,这打破了孔隙水压力与围压之间的平衡,从而导致水泥土的强度包络线为斜线^[39]。

纤维加固土的抗剪强度参数(即内摩擦角 φ 和黏聚力 c)取决于GF的质量分数。可以根据图5中的强度包络线得到不同质量分数的GCS相应的 φ 和 c 值,如表5所示。

根据表5绘制不同质量分数下GCS试样的 φ 和 c 变化图,如图6所示。结果表明:直到纤维含量达到4‰, φ 和 c 均随纤维含量的增加而线性增加。之后随着纤维含量的继续增加,观察到其 φ 和 c 均有所减小,但仍大于未用纤维处理过的水泥土。当纤维含量为4‰时, φ 和 c 达到最大值,其纤维加筋试样的 φ_{\max} 和 c_{\max} 分别为未加筋试样的1.08倍和1.50倍。可以通过考虑GCS试样中纤维的影响来证明最佳纤维含量的存在。在水泥水化过程中,纤维与周围的基质能够很好地结合在一起。由于纤维本身具有优异的抗张强度,如果水泥浆可以覆盖到每一根纤维上,则该试样的抗剪强度会大大提高。当纤维含量较低时,容易满足该条件。但随着纤维含量的增加,纤维容易出现“缠结”现象,导致水泥浆无法将纤维与其周围的基质充分结合在一起。此外,纤维的偏析和缠结甚至可能破坏水泥的水化过程。因此,当纤维含量过多时,GCS试样的强度参数呈现下降的趋势,

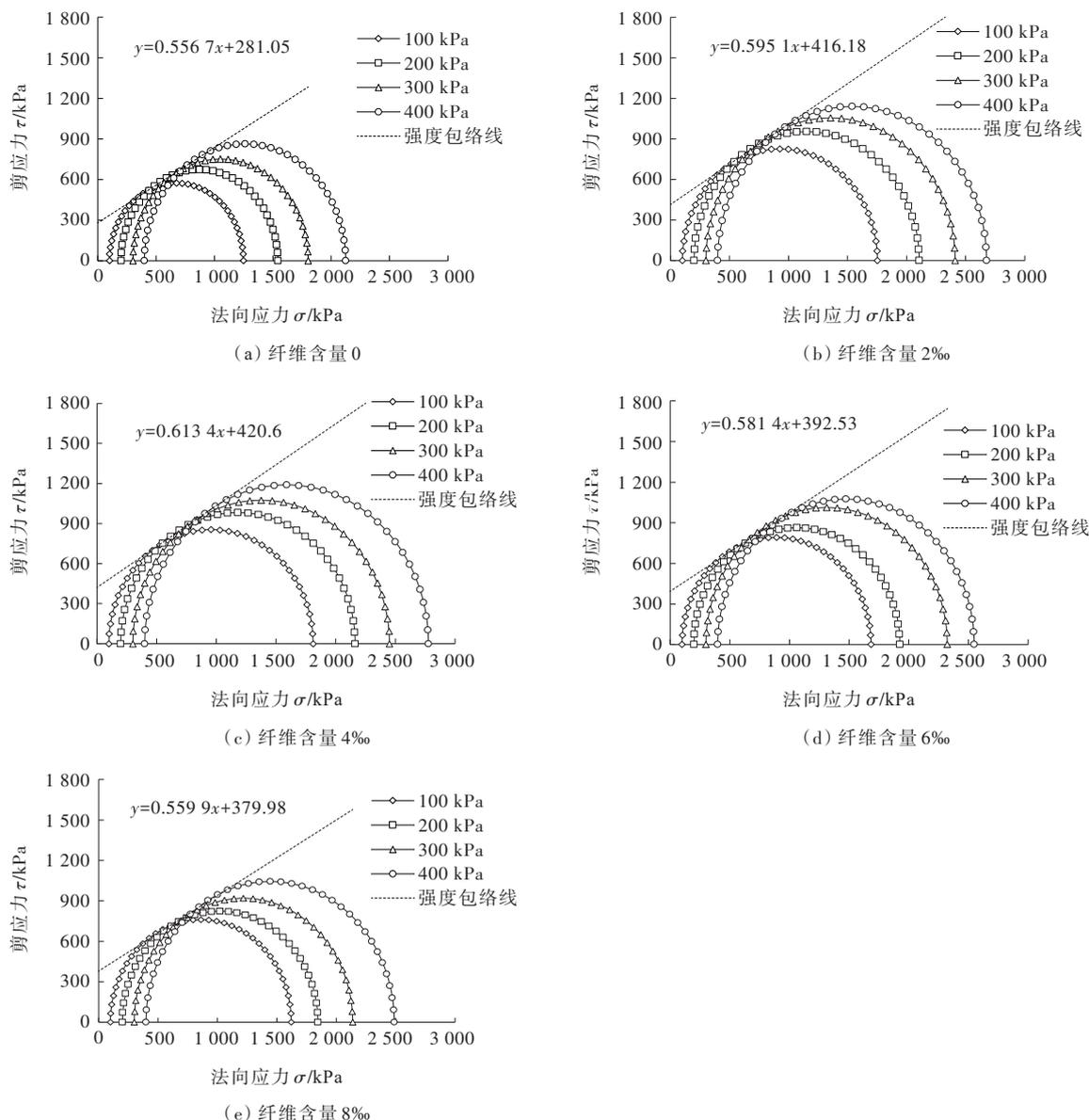


图5 不同纤维含量GCS试样莫尔应力图

表5 抗剪强度参数

纤维含量/%	强度包络线	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
0	$\tau=0.5567\sigma+281.05$	29.11	281.05
2	$\tau=0.5951\sigma+416.18$	30.76	416.18
4	$\tau=0.6134\sigma+420.60$	31.53	420.60
6	$\tau=0.5814\sigma+392.53$	30.18	392.53
8	$\tau=0.5599\sigma+379.98$	29.24	379.98

从而导致抗剪强度的降低。如图6所示,当纤维含量从4%增加到8%时,对应的GCS试样的 φ 和 c 值均出现下降现象。研究中,发现GF最佳质量分数为4%。文献[40]报道了类似的现象,该文献对小麦秸

秆纤维增强石灰稳定土进行了三轴UU试验,研究表明:小麦秸秆纤维掺量在4%时,其抗剪强度达到最大值,并将4%视为小麦秸秆纤维最佳掺量。

本研究中的玻璃纤维水泥土在玻璃纤维质量分数为4%时,其抗剪强度参数达到最佳,相较于未用纤维增强的水泥土,其黏聚力和内摩擦角分别提高了50%和8%。Wang等^[32]通过三轴UU试验对聚丙烯纤维改性水泥土进行研究,结果表明,聚丙烯纤维水泥土的抗剪强度参数在6%时达到最优,较未用纤维改性的水泥土,其黏聚力和内摩擦角分别提高了26%和7%。由此可以看出,本研究中的玻璃纤维对水泥土的改性效果要优于聚丙烯纤维,这主要与玻璃纤维本身具有较高的弹性模量有关。

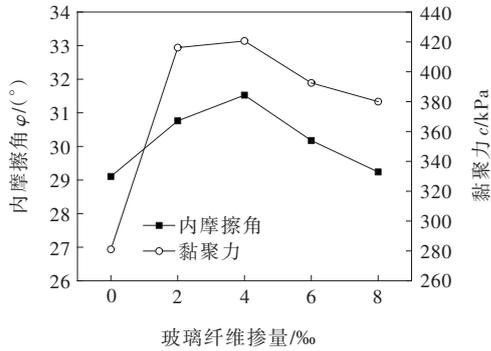


图6 不同玻璃纤维掺量的GCS试样抗剪强度参数

纤维加筋土的峰值应力和残余强度之所以会发生变化,主要与 φ 和 c 有关。由表5和图6可知:与未用纤维处理过的水泥土相比,玻璃纤维加筋水泥土,其内摩擦角和黏聚力均有所提高,并且可以很明显地看出其黏聚力提升幅度较大,但其内摩擦角的变化不大。因此,本研究的玻璃纤维水泥土,其峰值应力和残余强度之所以提高,主要跟黏聚力有关。

3 试样破坏特征

3.1 GCS试样的脆性指数

为了研究试样在破坏过程中的脆性特征,Liu等^[41]进行了试验研究,并提出了脆性指数 I_B 作为评价标准,如式(1)所示:

$$I_B = 100\% \cdot (\tau_p - \tau_{mov}) / \tau_p \quad (1)$$

式中: τ_p 和 τ_{mov} 分别为峰值应力和轴向应变为10%时的应力。

GCS试样的脆性指数可以通过将图1中的相关数据代入式(1)得到,计算结果见表6。

表6 GCS试样在不同围压下的 I_B 值

GF含量/ %	不同围压(kPa)下的 I_B /%			
	100	200	300	400
0	56	50	44	33
2	49	45	37	30
4	48	42	35	28
6	53	47	40	30
8	54	48	41	32

从表6可以看出:未用纤维处理过的水泥土,其 I_B 较大,表明素水泥土的结构性能较强,并具有脆性。在一定围压下,往水泥土中掺入GF,结果发现,随着

GF含量的增加,GCS试样的 I_B 值先减小后增大。当GF含量为4%时, I_B 达到最小值。与纤维含量为0%的GCS试样相比,随着围压的变化, I_B 在14%~20%范围内减小。这表明掺入GF可以改善试样的脆性破坏。之后继续增加GF的质量分数, I_B 有所减小,但仍略低于未用纤维处理过的水泥土。因此,较高含量的GF对降低水泥土试样的脆性效果不明显。这与殷勇等^[28-29]的研究结果一致,当纤维含量较高时,其降低水泥土脆性效果并不显著。

当GF含量一定时, I_B 随着围压的增加而减小,这表明GCS试样的延展性得到了显著提高。当GF质量分数为4%时,与100 kPa围压下的 I_B 值相比,400 kPa围压下的 I_B 值减小了42%,这主要是由于GCS试样的脆性破坏在较高围压下受到了抑制。对比GF含量和围压两个因素对水泥土脆性破坏的改善效果表明,通过提高围压来改善水泥土的脆性破坏,其效果要优于掺加GF的水泥土。

3.2 试样的破坏形态

图7比较了三轴UU试验完成后试样的破坏形态,包括未用纤维处理过的水泥土[图7(a)]和0.4%纤维增强的水泥土[图7(b)]。其中0.4%为纤维的最佳掺量。



图7 GCS试样破坏形态

研究表明:未用纤维处理过的水泥土和0.4%纤维增强的水泥土的破坏具有相似的形态,其中均观察到有明显的剪切带。尽管都有类似的破坏形态,但可以明显发现未用纤维处理过的水泥土在发生剪切破坏后,其试样是分成两半,并发生剥落现象,意味着素水泥土的脆性破坏较明显。而0.4%纤维增强的水泥土试样在发生剪切破坏后,仍然是黏结在

一起,并且其试样高度有所下降,这表明在掺入 GF 后,GCS 试样的脆性得到了改善,且其破坏形态从脆性破坏转变成了延性破坏。这是因为纤维具有“桥接”作用,可以将水泥土中的基质相互黏结在一起,有助于提高水泥土的延性。Liu 等^[42]的研究中提到了掺入纤维的试样通常会出现明显的延性破坏,与本文研究结果一致。

4 结 论

进行了常规的三轴 UU 试验,研究了 GF 对水泥土力学性能的影响。得到以下结论:

(1) 玻璃纤维改性水泥土保留了水泥土原有的应变软化特性。即使添加少量的 GF,也大大改善了水泥土的应变软化。

(2) 在同一围压下,随着 GF 含量的增加,GCS 试样的峰值应力、峰值应变和残余强度均表现为先提高后降低的趋势。当 GF 质量分数为 4% 时,改性效果最佳。与此同时,玻璃纤维的掺入对试样的黏聚力提升效果显著,但对内摩擦角的影响不大。

(3) 在相同围压下,随着 GF 含量的增加,GCS 试样的 I_B 值先减小后增大。当 GF 含量为 4% 时, I_B 达到最小值。从 GCS 试样破坏形态可以看出,不管试样中是否掺有纤维,其破坏形态均可观察到有明显的剪切带。与未用纤维处理过的水泥土相比,纤维增强过的水泥土试样在发生剪切破坏后,仍然黏结在一起,并且其试样高度有所下降,这表明在掺入 GF 后,GCS 试样的破坏形态从脆性破坏转变成了延性破坏。

本文研究的是在短龄期 7 d 下纤维掺量小于 1% 的纤维水泥土的力学特性,长龄期下纤维掺量小于 1% 的纤维水泥土的力学特性有待进一步研究。由于试验设备的局限性,当前的研究仅考虑了小尺寸的土样和围压对土样的影响。而在实际工程中,土样是处于三维复杂应力状态。本研究未考虑中主应力对土样的影响和土样尺寸的影响,这将是进一步的研究方向。

参 考 文 献:

[1] WANG W, LI N, ZHANG F, et al. Experimental and mathematical investigations on unconfined compressive

behaviour of coastal soft soil under complicated freezing processes[J]. Polish Maritime Research, 2016, 23(4): 112-116.

[2] LI N, ZHU Q Y, WANG W, et al. Compression characteristics and microscopic mechanism of coastal soil modified with cement and fly ash[J]. Materials, 2019, 12(19): 3182.

[3] 梁仁旺,张明,白晓红. 水泥土的力学性能试验研究[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 211-213.

[4] 陈四利,史建军,于涛,等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 343-349.

[5] 曹智国,章定文. 水泥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(S1): 3446-3454.

[6] LIU Y, LEE F H, QUEK S T, et al. Effect of spatial variation of strength and modulus on the lateral compression response of cement-admixed clay slab[J]. Géotechnique, 2015, 65(10): 851-865.

[7] LIU Y, HE L Q, JIANG Y J, et al. Effect of in situ water content variation on the spatial variation of strength of deep cement-mixed clay[J]. Géotechnique, 2019, 69(5): 391-405.

[8] YAO K, LI N, CHEN D H, et al. Generalized hyperbolic formula capturing curing period effect on strength and stiffness of cemented clay[J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 63-71.

[9] CONSOLI N C, VENDRUSCOLO M A, FONINI A, et al. Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(3): 196-203.

[10] PHAM V N, TURNER B, HUANG J S, et al. Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(4): 645-654.

[11] MENGUE E, MROUEH H, LANCELOT L, et al. Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement[J]. Soils and Foundations, 2017, 57(1): 60-79.

[12] XING H F, XIONG F, ZHOU F. Improvement for the strength of salt-rich soft soil reinforced by cement[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2018, 36(1): 38-42.

[13] 唐朝生,施斌,蔡奕,等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1796-1800.

[14] 唐朝生,顾凯. 聚丙烯纤维和水泥加固软土的强度特性[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S2): 5-8.

[15] YAO K, WANG W, LI N, et al. Investigation on strength and microstructure characteristics of nano-MgO admixed with cemented soft soil[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 160-168.

[16] YAO K, AN D L, WANG W, et al. Effect of nano-MgO on mechanical performance of cement stabilized silty clay[J].

- Marine Georesources & Geotechnology,2020,38(2):250-255.
- [17] WANG W,ZHANG C,LI N,et al.Characterisation of nano magnesia-cement-reinforced seashore soft soil by direct-shear test[J].Marine Georesources & Geotechnology, 2019,37(8):989-998.
- [18] 姚燕,贺祖浩.不同种类纤维对水泥土力学性质影响试验研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2016,38(1):41-44.
- [19] 阮波,邓林飞,马超,等.纤维水泥土抗折强度的正交试验研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2524-2528.
- [20] 李丽华,万畅,梅利芳,等.玻璃纤维水泥土无侧限抗压强度特性研究[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(3): 252-256.
- [21] 李云峰,李志国,郑刚.纤维水泥土力学性能试验研究[J].建筑科学,2004,20(6):56-60.
- [22] 陈峰.玄武岩纤维水泥土抗压强度试验研究[J].福州大学学报(自然科学版),2017,45(2):212-215.
- [23] 梁仕华,牛九格,刘思涌,等.聚丙烯纤维掺量对水泥土强度特性的影响研究[J].建筑科学,2018,34(3):90-96.
- [24] 黄敏建.玻璃纤维水泥土劈裂抗拉强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(4):938-942.
- [25] ESTABRAGH A R,RANJBARI S,JAVADI A A.Properties of clay soil and soil cement reinforced with polypropylene fibers[J].ACI Materials Journal,2017,114(2):195-205.
- [26] 鹿群,郭少龙,王闵闵,等.纤维水泥土力学性能的试验研究[J].岩土力学,2016,37(S2):421-426.
- [27] ATEŞ A L. Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC)[J]. Composites Part B:Engineering, 2016, 96: 295-304.
- [28] YIN Y, YU X J, YIN Y, et al. Research on applying glass fiber cement soil to strengthen soft soil subgrade[C]//GeoHunan International Conference 2009.Changsha,Hunan, China.Reston,VA,USA:American Society of Civil Engineers, 2009: 7-13.
- [29] YIN Y, YU X J. Research on triaxial shear properties of glass fiber cement soil[J]. Instrumentation, Testing, and Modeling of Soil and Rock Behavior,2011:179-185.
- [29] YIN Y, YU X J, YIN Y, et al. Research on triaxial shear properties of glass fiber cement soil[C]//GeoHunan International Conference 2011. Hunan, China. Reston, VA, USA:American Society of Civil Engineers,2011:179-185.
- [30] 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.
- [31] AYELDEEN M, KITAZUME M. Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay[J].Geotextiles and Geomembranes,2017,45(6):592-602.
- [32] WANG W, ZHANG C, GUO J, et al. Investigation on the triaxial mechanical characteristics of cement-treated subgrade soil admixed with polypropylene fiber[J]. Applied Sciences,2019,9(21):4557.
- [33] PATEL S K, SINGH B. Shear strength and deformation behaviour of glass fibre-reinforced cohesive soil with varying dry unit weight[J].Indian Geotechnical Society,2019, 49(3):241-254.
- [34] 姜恒超,李青林,杨志勇,等.玻璃纤维水泥改良土劈裂抗拉强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(11): 2742-2747.
- [35] 阮波,邓林飞,马超,等.纤维水泥土无侧限抗压强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(7):1415-1419.
- [36] 水利部水利水电规划设计总院,南京水利科学研究院.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [37] SUCHIT K P, BALESHWAR S. Experimental investigation on strength aspects of glass fiber-reinforced fine grained soil [J].International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2016,9(3):32-39.
- [38] 缪林昌.软土力学特性与工程实践[M].北京:科学出版社,2012.
- [39] 宋新江.基于常规三轴仪测定水泥土渗透系数方法研究[J].江淮水利科技,2010(6):19-21,25.
- [40] WANG Y X, GUO P P, LI X, et al. Behavior of fiber-reinforced and lime-stabilized clayey soil in triaxial tests[J]. Applied Sciences,2019,9(5):900.
- [41] 刘恩龙,沈珠江.岩土材料的脆性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):3449-3453.
- [42] LIU J, BAI Y X, SONG Z Z, et al. Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer[J]. Construction and Building Materials,2020,253:119164.