

# CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究

陈瑞敏<sup>1</sup>, 简文彬<sup>1,2</sup>, 张小芳<sup>1</sup>, 方泽化<sup>1</sup>

(1. 福州大学 岩土与地质工程系, 福建 福州 350108; 2. 福州大学 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350108)

**摘 要:** 为改良淤泥固化土力学特性, 提高其变形稳定性, 提出采用以水泥-矿渣-粉煤灰-石膏 (CSFG, cement-slag-flyash-gypsum) 为材料的新型环保固化剂, 协同纤维加筋 (FR) 作用改良淤泥固化土。通过开展无侧限抗压试验和渗透试验, 对比分析了不同 CSFG 掺量 (10%、20%、30%)、不同纤维长度 (0、3、6、12 mm) 和纤维掺量 (0%、0.2%、0.4%、0.8%) 对试样力学性能和渗透性能的影响。此外, 通过 X 射线衍射 (XRD)、电镜扫描 (SEM) 和核磁共振试验 (NMR) 分析了 CSFG-FR 协同作用的微观机制, 讨论了其协同作用机制。得到如下主要结论: CSFG-FR 试样的力学性能有较为显著的提升, 破坏模式从脆性破坏转变为韧性破坏, 变形性能也得到改善, 但渗透性能改良效果不明显; CSFG-FR 中的纤维存在临界掺量 (0.4%), 当纤维小于临界掺量时发挥积极作用, 超过时则会产生反作用; 纤维通过形成三维纤维网络, 促进水化物分布, 引导水化物在其表面附着生长而发挥 CSFG-FR 协同作用, 最佳纤维掺量为 0.4%, 最佳纤维长度为 12 mm。

**关 键 词:** 淤泥固化; 纤维加筋; CSFG 固化剂; 固化机制; 工程特性

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 04-1020-11

## Experimental study on performance of sludge stabilized by CSFG-FR synergy

CHEN Rui-min<sup>1</sup>, JIAN Wen-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-fang<sup>1</sup>, FANG Ze-hua<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical and Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** To improve the mechanical properties and deformation stability of stabilized sludge, a new type of eco-friendly curing agent with cement, slag, fly-ash and gypsum (CSFG) as materials and fiber reinforcement (FR) is developed. Through the unconfined compression test and permeability test, the effects of different CSFG contents (10%, 20%, 30%), different fiber lengths (0, 3, 6, 12 mm), and different fiber contents (0%, 0.2%, 0.4%, 0.8%) on the mechanical properties and permeability of the samples are compared and further analyzed. In addition, the micro mechanism of the CSFG-FR synergistic effect is analyzed and explored by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and nuclear magnetic resonance (NMR). The main conclusions are as follows: (1) The mechanical properties of CSFG-FR stabilized samples are significantly improved, and the failure mode has changed from brittle failure to ductile failure. Moreover, the deformation properties are improved, while the improvement effect of permeability is inapparent. (2) The fiber has a critical content (0.4%), which plays a positive role on properties improvement when the fiber is less than the critical content and have a side effect by contrary when it exceeds the critical content. (3) Through forming a three-dimensional fiber network, the fiber can promote the distribution of hydrate and guide the hydrate to adhere to its surface, thus exerting the synergistic effect of CSFG-FR. The optimal fiber content is 0.4% and the optimal fiber length is 12 mm.

**Keywords:** sludge stabilization; fiber reinforcement; CSFG curing agent; curing mechanism; engineering properties

## 1 引 言

我国沿海地区软土分布广泛, 城市建设中修建

地下工程、基坑工程、海岸工程等时常常面临大量淤泥, 其处理技术与处置方法一直是备受关注的热点问题<sup>[1]</sup>。随着资源化城市的发展, 淤泥固化逐渐

收稿日期: 2021-07-07

修回日期: 2021-08-24

基金项目: 中交二公局科研项目 (No. X0110002-JSFW-2021-0012); 福州大学 (SRTP) 创新创业项目 (No. S202010386066)。

This work was supported by the Research Project of CCCC Second Highway Engineering Bureau (X0110002-JSFW-2021-0012) and the Student Research Training Program of Fuzhou University (S202010386066).

第一作者简介: 陈瑞敏, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事淤泥固化、边坡工程方向的研究。E-mail: paperandpen@qq.com

通讯作者: 简文彬, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事岩土工程与工程地质方面的研究工作。E-mail: jwb@fzu.edu.cn

成为有效处置大量淤泥的首选方法<sup>[2]</sup>。淤泥固化是指在淤泥中掺入固化材料，通过搅拌混合使固化材料和淤泥发生物理化学反应，从而改善淤泥性质，使其成为可利用的土工材料<sup>[3]</sup>。但传统的固化法常采用水泥作为固化剂，能源消耗大、环境污染严重<sup>[4]</sup>。因此，近年来许多学者开始研发新型的环保固化剂<sup>[5]</sup>，以实现资源高效利用和绿色低碳发展。

同时，我国工业固废年产量大，综合利用率低<sup>[6]</sup>，已有学者考虑将其作为复合固化剂的原料，并开展了一系列的研究。何俊等<sup>[7]</sup>将碱渣、矿渣和水玻璃 3 种材料对高含水率疏浚淤泥进行固化，通过无侧限抗压强度试验和 XRD 试验研究其力学强度性质。徐日庆等<sup>[8]</sup>将石灰、粉煤灰和 TZ-01 应用于固化淤泥质土，通过无侧限抗压强度试验，探究了固化土的力学特性。陈鑫等<sup>[9]</sup>以水泥、钢渣、矿渣和脱硫石膏等作为新型 GS 固化剂，研究了 GS 固化土的力学特性。虽然工业固废用作淤泥固化剂已被证实有一定效果，但如何更为有效地利用固废，使其达到最佳固化效果，仍是当下急需解决的难题。

CSFG 固化剂（cement-slag-flyash-gypsum）是以水泥、矿渣、粉煤灰和石膏按一定比例混合而成的新型复合固化剂<sup>[10]</sup>，当固化剂掺入石膏时，可以有效激发、促进水化物的生成，与水泥共同作用从而增强固化效果<sup>[11]</sup>。当以水泥-矿渣-粉煤灰作为固化剂时，其水化产物越多，固化土的强度越高<sup>[12]</sup>。矿渣与粉煤灰共掺时，粉煤灰水化产物与矿渣活化凝胶 C-S-H、C-A-H 共存于水化体系中<sup>[13]</sup>。水化物的充填、胶结、骨架和加筋作用使整体强度提高，土体结构更为致密<sup>[14]</sup>。

利用固化剂处理后的淤泥固化土一般能够满足强度要求，但仍存在脆性破坏、水稳性差等缺陷，难以满足复杂应力环境下长期的变形和稳定要求<sup>[15]</sup>。为了获得综合性能良好的工程材料，利用化学固化剂和聚合物短纤维的物理加筋作用（FR）共同补强淤泥是一种行之有效的方法<sup>[16]</sup>。为此，本文提出采用 CSFG-FR 协同作用对淤泥进行固化处理，然后开展无侧限抗压试验和变水头渗透试验，研究了 CSFG-FR 淤泥固化土的力学性质及渗透性能，并对比分析了不同 CSFG 掺量、不同纤维长度和纤维掺量对试样力学性能和渗透性能的影响。通过 X 射线衍射试验（XRD）、电镜扫描试验（SEM）和核磁共振试验（NMR）分析了 CSFG-FR 协同作用的微观机制，讨论了其协同作用机制，研究成果对工程建设具有参考意义。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本试验所用淤泥取自福州市江阴港，淤泥呈灰黑色或黑色，流塑状，属典型福建沿海软土，其基本物理性质指标见表 1，颗粒级配见图 1。其中液塑限根据《公路土工试验规程》（JTG E40—2007）<sup>[17]</sup>中的锥式液塑限联合测定仪法测定，最优含水率和最优干密度根据击实法测定，颗粒级配采用激光粒度分析仪测定。在颗粒曲线中，砂粒直径>0.075 mm，粉粒直径 0.075~0.005 mm，黏粒直径<0.005 mm。所用纤维为聚丙烯纤维（PP），其横截面为圆形，表面平滑，长度分别 3、6 mm 和 12 mm，其具体物理力学性质见表 2。

表 1 试验用淤泥土物理性质

| Table 1 Physical properties of silt soil for test |          |       |       |      |          |                              |
|---------------------------------------------------|----------|-------|-------|------|----------|------------------------------|
| 相对密度                                              | 初始含水率 /% | 塑限 /% | 液限 /% | 塑性指数 | 最优含水率 /% | 最大干密度 /(g·cm <sup>-3</sup> ) |
| 2.64                                              | 79.2     | 28.5  | 52.7  | 24.2 | 22.9     | 1.493                        |

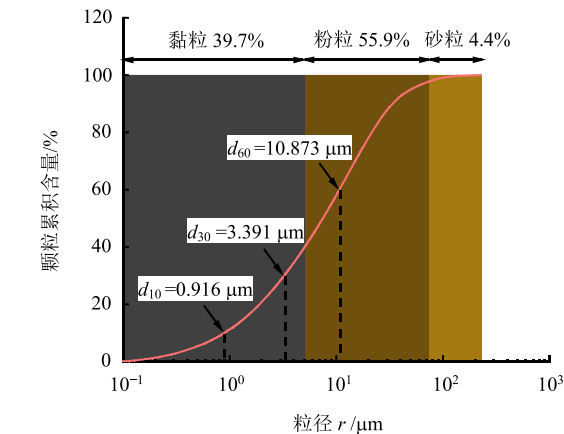


图 1 试验用淤泥颗粒累积曲线  
Fig.1 Accumulation curve of silt particles for test

表 2 试验用聚丙烯纤维物理力学性质

| Table 2 Physical and mechanical properties of polypropylene fiber for test |           |          |      |          |                           |      |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|------|----------|---------------------------|------|
| 直径 /μm                                                                     | 抗拉强度 /MPa | 弹性模量/GPa | 耐酸碱性 | 断裂伸长率 /% | 密度 /(g·cm <sup>-3</sup> ) | 自分散性 |
| 18                                                                         | ≥600      | ≥3.8     | 极强   | ≥15      | 0.91                      | 极好   |

张小芳等<sup>[10]</sup>利用不同配比的 CSFG 固化剂处理福州地区淤泥软土，研究了不同组分配比下的 CSFG 固化土的强度增长规律和水分转化机制，发现当各组分比例 C:S:F:G（水泥:矿渣:粉煤灰:石膏）=2:5:2:1 时，各组分可以充分反应生成更多的

水化物, 后期固化强度最高, 固化性能最好, 因此本试验选定固化剂配比为 C:S:F:G=2:5:2:1。在 CSFG 固化剂成分中, 水泥为 P.O 42.5 普通硅酸盐

水泥, 矿渣为 S95 级粒化高炉渣, 粉煤灰为 II 级粉煤灰, 石膏为工业石膏, 各组分的化学成分分析见表 3。

表 3 固化剂组分化学成分分析表  
Table 3 Analysis table of chemical composition of curing agent components

| 原材料 | 化学成分及含量/% |                                |                                |     |                  |     |                               |                  |                 |     |
|-----|-----------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------|-----|-------------------------------|------------------|-----------------|-----|
|     | CaO       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | SiO <sub>2</sub> | MnO | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | 其他  |
| 淤泥  | 4.7       | 23.6                           | 7.3                            | 2.1 | 57.3             | 0.9 | 0.8                           | 0.3              | 2.1             | 0.9 |
| 矿渣  | 25.7      | 13.8                           | 1.7                            | 5.6 | 46.7             | 0.9 | 0.8                           | 0.6              | 1.7             | 2.5 |
| 粉煤灰 | 7.6       | 31.8                           | 8.4                            | 5.3 | 34.9             | 1.5 | 0.7                           | 0.8              | 8.6             | 0.4 |
| 石膏  | 40.1      | 0.9                            | 0.3                            | 1.2 | 3.8              | 0.4 | 1.6                           | —                | 45.8            | 5.9 |

## 2.2 试验方法

为了探究不同因素对 CSFG-FR 固化试样力学性质等的影响, 共设置了 8 组不同配比参数的试样, 具体见表 4。L (length)、P (PP fiber)、C (CSFG) 分别代表纤维长度、纤维掺量和固化剂掺量对照组, 数字代表试样编号。其中, L2/P2 参数相同, 为同一试样, 可同时作为纤维长度或掺量对照组; C2/L0/P0 同理, 可同时作为纤维空白对照组。

表 4 试样分组及参数设置  
Table 4 Sample grouping and parameter setting

| 试样编号     | CSFG 掺量/% | 纤维长度 <i>l</i> /mm | 纤维掺量 <i>p</i> /% |
|----------|-----------|-------------------|------------------|
| L1       | 20        | 3                 | 0.4              |
| L2,P2    | 20        | 6                 | 0.4              |
| L3       | 20        | 12                | 0.4              |
| P1       | 20        | 6                 | 0.1              |
| P3       | 20        | 6                 | 0.8              |
| C1       | 10        | 0                 | 0.0              |
| C2,L0,P0 | 20        | 0                 | 0.0              |
| C3       | 30        | 0                 | 0.0              |

将相应掺量的纤维预先分散成束状单丝, 再与初始含水率为 79.2% 的淤泥人工搅拌至均匀混合。依据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)<sup>[18]</sup>, 按 1:0.55 的水灰比配制固化剂, 人工搅拌成浆状后加入淤泥试样中。用小型电动搅拌机匀速搅拌 10 min 混合样, 使其充分拌匀以用于装样。装样前在模具内壁均匀涂抹凡士林, 将搅拌好的材料分 3 层装入模具中, 各层均充分振捣压实, 以排出空气。24 h 后进行脱模, 脱模后放入标准养护箱中养护, 养护温度控制在 (20±2)℃, 相对湿度不小于 95%。

单轴无侧限抗压试验采用 WAW-1000D 岩石万能试验机, 试样尺寸是边长为 100 mm 的立方试块,

控制轴向应变速率为 2%/min。在达到 28 d 标准养护龄期时, 对每种纤维长度试样取 3 个平行试样进行无侧限抗压试验, 并取其平均值。

渗透试验依据《公路土工试验规程》<sup>[17]</sup> 中变水头渗透法进行。朱熹文等<sup>[19]</sup> 指出利用 TST-55 变水头渗透仪对淤泥质饱和土进行测量时, 在水力坡降效应和边壁效应影响下, 可能存在一倍甚至一个数量级以上的误差。为提高试验精度, 参照杨德欢等<sup>[20]</sup> 的方法, 对 TST-55 变水头渗透仪进行改进, 利用凡士林对环刀内壁进行防渗处理, 拧紧出水口阀门处螺栓, 加装并挤压氟胶 O 型垫片, 封堵顶盖、底座与环刀样之间的缝隙, 形成密闭腔体。每组试验取 3 个平行样, 取试样的 6 个有效数据的平均值, 并根据规范进行标准温度换算, 以所得结果作为该试样的渗透系数。

电镜扫描试验 (SEM) 取抗压试验后典型破坏样进行烘干, 以试样有平整破坏面为宜, 测试样品大小控制在 5 mm<sup>3</sup> 以内。测试前在干燥断面进行喷金处理, 后送入试验仓扫描电镜成像, 获取微观结构信息, 同时取典型试样进行 X 射线晶体衍射试验 (XRD), 研究不同阶段固化土的矿物生成情况。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 单轴无侧限抗压强度

图 2 给出了试样在不同参数设置下的无侧限抗压强度。从图 2(a) 中可以看出, 试样的无侧限抗压强度随着 CSFG 固化剂掺量的增加逐渐增加, 以 28 d 龄期时为例, CSFG 掺量为 10%、20% 和 30% 时, 试样的无侧限抗压强度分别为 2.34、3.41、3.92 MPa。

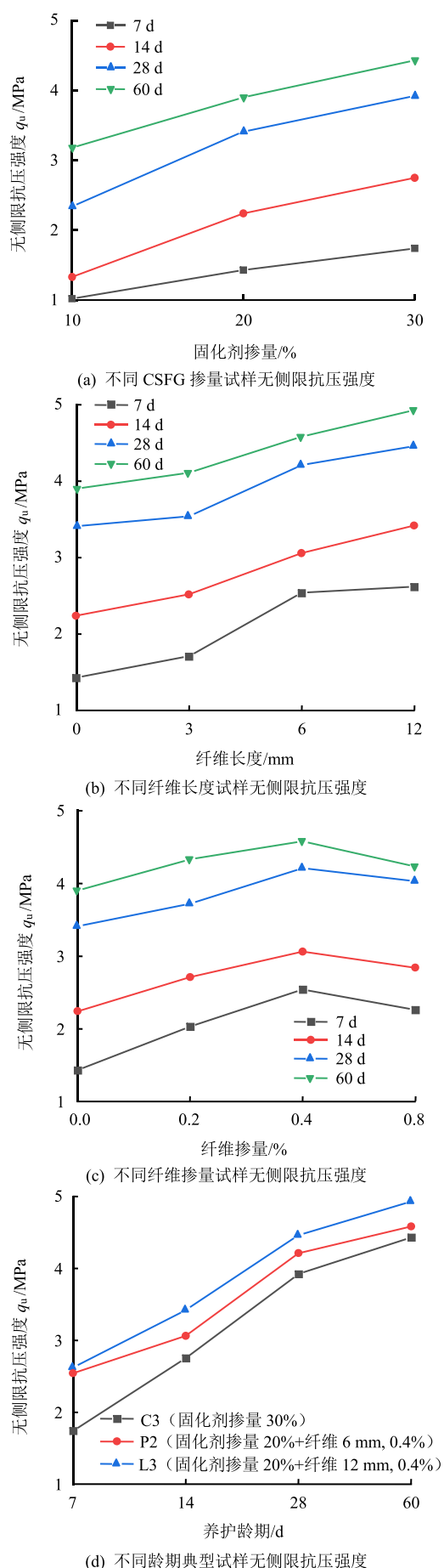


图2 无侧限抗压强度试验结果

Fig.2 Test results of unconfined compressive strength

为了对比在纤维掺入情况下试样的无侧限抗压强度变化情况,图 2(b)、2(c)给出了不同纤维长度  $l$  和纤维掺量  $p$  下的试验结果。从图中可以看出,随着  $l$  增加,试样的无侧限抗压强度也逐渐增加,以 28 d 龄期时为例,  $l$  为 3、6 mm 和 12 mm 时,试样的无侧限抗压强度分别为 3.54、4.21 MPa 和 4.46 MPa。随着  $p$  的增加,试样的无侧限抗压强度先增加后减小,在  $p$  为 0.4% 时强度最大,28 d 龄期时可达 4.21 MPa。由图 2(b)、2(c)还可知,纤维的掺入对试样的无侧限抗压强度均有一定幅度的提升,相对而言,改变掺入纤维的长度对强度的提升更为显著。同时可以发现,纤维并不是加入越多越好,而是存在一个临界值,当掺入超过临界掺量的纤维之后,试样的无侧限抗压强度的提升幅度明显降低,效果反而不如小掺量的好。

从以上分析可知,试验组中的最佳纤维掺量为 0.4%,最佳纤维长度为 12 mm。为了更好地对比不同变量之间的影响,选取典型试样 C3、P2 和 L3 进行分析。图 2(d)给出了不同龄期典型试样的无侧限抗压强度,从中可知:尽管 C3 试样的 CSFG 掺量为 30%,P2、L3 固化剂掺量为 20%,但 C3 试样的抗压强度仍低于 CSFG-FR 协同作用的试样。由此可见,在淤泥固化土中加入适量的纤维,可以明显提高固化效果。

### 3.2 单轴抗压应力-应变

#### 3.2.1 应力-应变曲线

图 3 为试样的无侧限抗压应力-应变曲线,从图中可知,总体上应力-应变过程可分为 3 个阶段:①初始加载阶段,应力水平较低,应力随应变近似呈线性增长,大致符合胡克定律,属于弹性变形阶段;②非线性增长阶段,应力随应变逐渐增大,斜率逐渐减小,当应力达到峰值时,此即试样的无侧限峰值抗压强度,其对应的应变称为破坏应变;③破坏后阶段,应力  $\sigma$  随应变的增加而逐渐减小,此时的曲线表示试样破坏后抵抗外力的残余变形阶段。

图 3(a)为不掺纤维组的试样应力-应变曲线,由图可知,该组试样破坏后阶段曲线陡降明显,呈现出应变硬化型的脆性破坏状态。CSFG 掺量越高,试样脆性越高,其破坏后阶段曲线陡降越明显,破坏越迅速。而在掺入纤维组的试样中,如图 3(b)、3(c)可知,其破坏后阶段曲线缓慢下降,在应力-应变曲线上包含了更多的面积,说明基体开裂后仍具有一定抵抗变形的能力,试样的韧性得到了提升,残余强度相应增加。这表明纤维的掺入显著改变了土体的破坏状态,使其从应变硬化型的脆性破坏转换

为应变软化型的韧性破坏,延性性能得到充分改善。

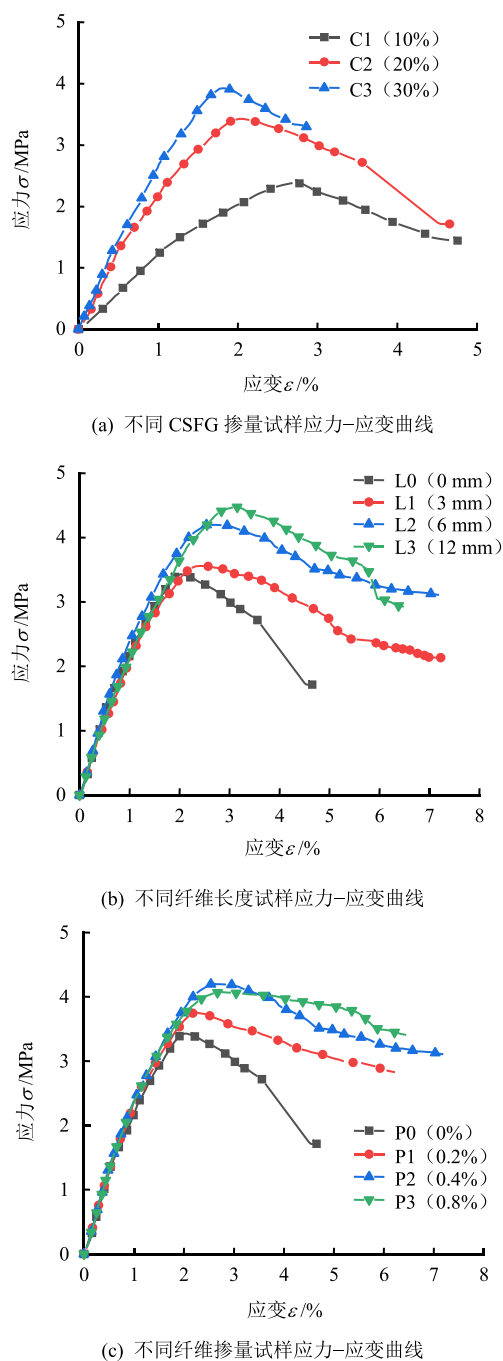


图3 单轴无侧限抗压应力-应变曲线

Fig.3 Stress strain curves of uniaxial unconfined compression

出现上述现象的原因主要是由于纤维的加筋作用是通过自身优良的抗拉和抗拔性能阻碍或延缓了土体的变形破坏。在掺入纤维后,纤维在土中形成三维纤维网络,当土体受外力发生变形破坏时,纤维通过发挥界面摩擦力,阻止了裂缝的发展与延伸,增强了土体抵抗变形的能力,进而改变了破坏模式。此外,应力-应变曲线上还包含着破坏应变、变形模量等力学指标信息,以下就其力学指标的变化展

开具体分析。

### 3.2.2 破坏应变

图4给出了试样在不同参数设置下的破坏应变。从图4(a)、4(b)中可以看出,掺入纤维组的试样相比于不掺纤维组,都呈现不同幅度的提高。在 $p$ 相同的情况下,随着 $l$ 不断增加,破坏应变呈现大幅度提高。以28 d龄期为例,当 $l$ 为分别为3、6 mm和12 mm时,试样的破坏应变分别为2.38%、2.56%和3.12%,对比不掺纤维组,增幅分别为120.2%、129.3%和157.6%;在 $l$ 相同的情况下,随着 $p$ 不断增加,破坏应变相应提高,但增幅较前组

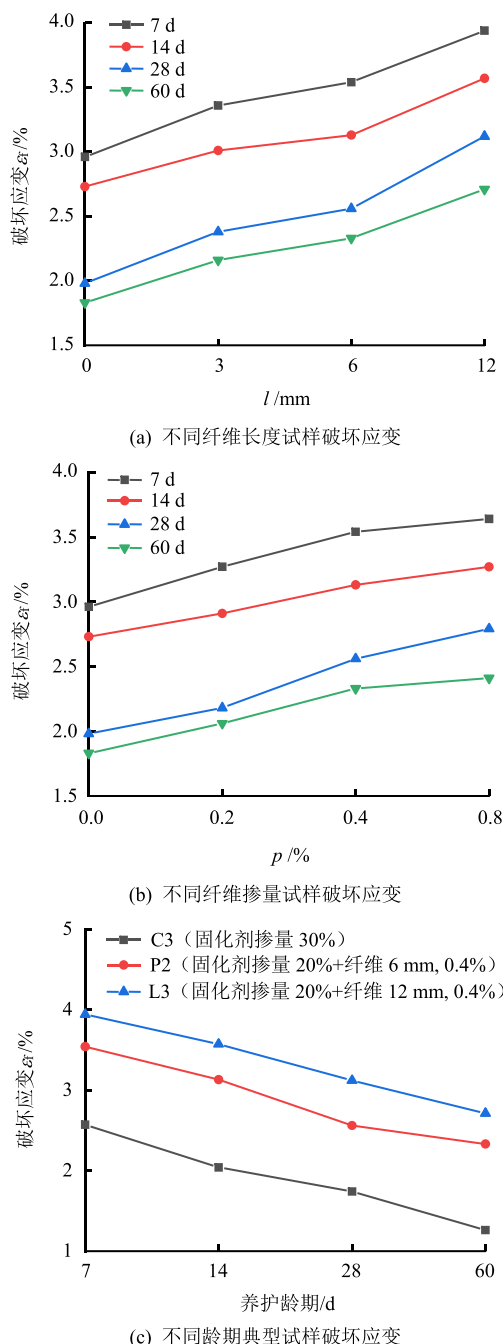


图4 破坏应变 $\varepsilon_f$ 试验结果

Fig.4 Failure strain test results

较小。以 28d 龄期为例, 当  $p$  为分别为 0.2%、0.4% 和 0.8% 时, 试样的破坏应变分别为 2.18%、2.56% 和 2.79%, 对比不掺纤维组, 增幅分别为 110.1%、129.3% 和 140.1%。

可见纤维长度的变化比纤维掺量更能影响试样的破坏应变。这是因为当  $p$  相同时,  $l$  的增加意味着  $p$  的减少, 此时纤维在土中更容易分散, 更易与土体紧密结合, 纤维的抗拔性能整体得到提高; 同时单根纤维的长度越长, 土体与纤维的接触面积越大, 咬合摩擦作用越强, 界面间的摩擦力越大, 在

试样的破坏过程中越能发挥纤维的抗拉性能。

### 3.2.3 变形模量 $E_{50}$

变形模量  $E_{50}$  是评价岩土材料变形特性的重要参数, 计算如下:

$$E_{50} = \frac{2\sigma_{1/2}}{\varepsilon_f} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_f$  为破坏应变;  $\sigma_{1/2}$  为破坏应变达到一半时的应力值, 所以变形模量  $E_{50}$  可视为此时的割线模量。不同参数设置下的变形模量如图 5 所示。

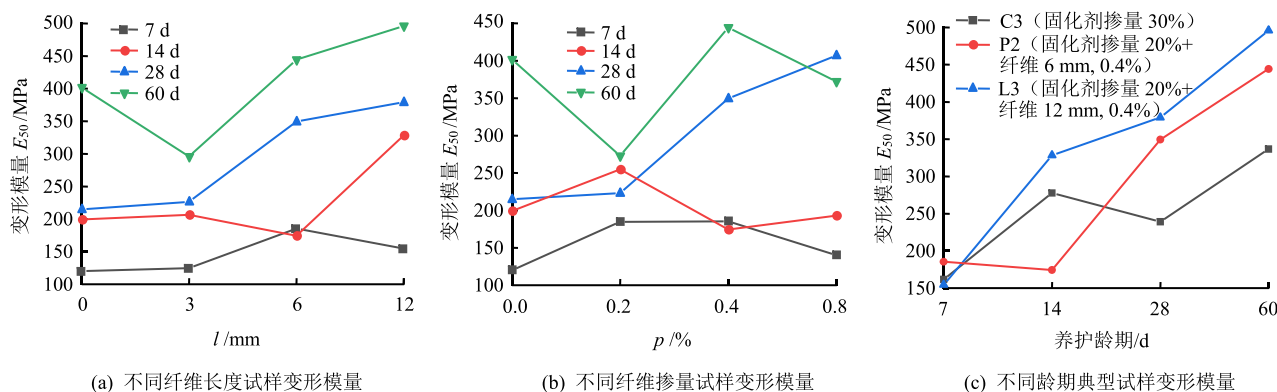


图 5 变形模量  $E_{50}$  试验结果

Fig.5 Deformation modulus test results

蔡光华<sup>[21]</sup>通过无侧限抗压强度试验研究不同因素对活性 MgO 碳化固化土力学强度的影响, 结果表明固化土的变形模量约  $(20 \sim 250)q_u$ 。Wang 等<sup>[22]</sup>研究了水泥、石灰和粉煤灰固化沉积土的应力-应变曲线, 发现变形模量  $E_{50}$  是抗压强度的 47.7~282.6 倍。变形模量和无侧限抗压强度存在一定的线性关系, 将两者绘制在图 6 中, 可以发现 CSFG-FR 协同改良试样的变形模量是抗压强度的 54.3~112.9 倍。

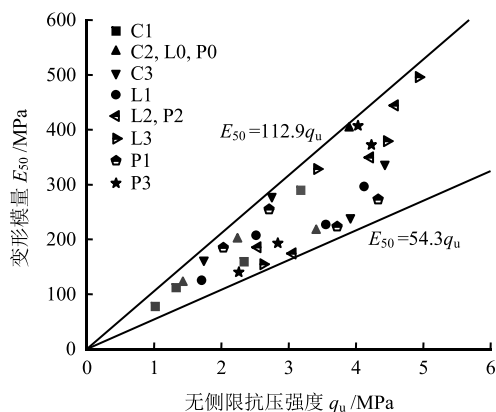


图 6 变形模量与无侧限抗压强度的关系

Fig.6 Relationship between deformation modulus and unconfined compressive strength

### 3.3 变水头渗透试验

渗透系数是表征固化土孔隙结构的宏观参数, 固化土应用于填方工程、道路工程、堤防工程中作为填筑型材料时, 经常要考虑水的渗流问题。变水头试验结果如图 7 所示。

从图 7(a)可知, 随着龄期和 CSFG 掺量的增加, 渗透系数依次减小。原因是试样内部生成了更多的水化物, 胶结和充填作用逐渐增强, 有效孔径和孔隙度逐渐减小, 孔隙的连通性变差, 从而导致水流穿透固化土的阻力增加。

观察图 7(b)、7(c)所示, 发现纤维掺入组在不同工况时均呈现出渗透系数先减小后增大的现象。在纤维掺量相同时, L1 试样 ( $l=3$  mm) 的渗透系数小于 L0 试样 ( $l=0$  mm);  $l>3$  mm 时, L1 ( $l=3$  mm)、L2 ( $l=6$  mm)、L3 ( $l=12$  mm) 试样的渗透系数随长度逐渐增大。可能的原因是: 当  $l$  逐渐增加时, 纤维除了发挥为水化物提供生长区域的正向作用外, 还决定了孔隙的定向排布, 从而使固化土内部更容易形成贯通的导水通道, 一定程度上影响了渗透性能。在  $l$  相同,  $p<0.4\%$  时, 渗透系数随长度减小;  $p>0.4\%$  时, 渗透系数随长度增大。结合前文分析可知, 不管是对于力学性能还是渗透性能而言,

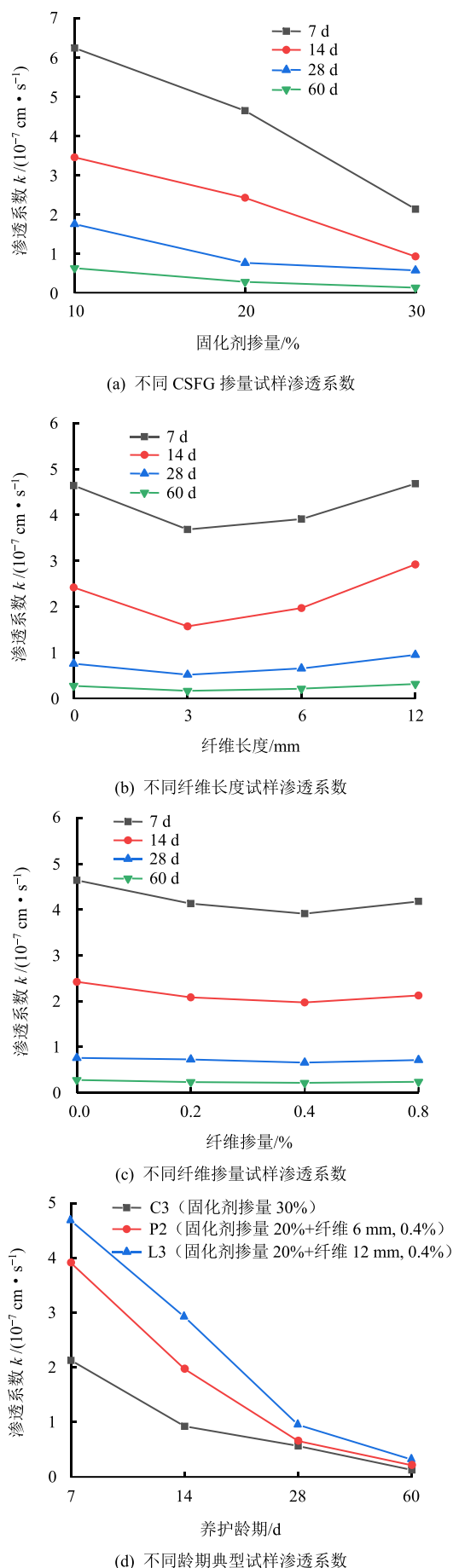


图 7 变水头渗透试验结果  
Fig.7 Results of variable head permeability test

纤维的最佳临界掺量都在 0.4% 左右。当纤维掺量小于临界掺量时, 纤维发挥正向积极作用; 当纤维掺量大于临界掺量时, 过于密集的纤维分布可能导致纤维间存在搭接与杂糅, 割裂了固化土的整体性, 纤维的错综排列反而为较小孔隙的生成提供了环境, 导致其孔隙增多, 性能降低。

由图 7(d) 对比典型试样随龄期的变化情况, 发现养护后期渗透系数的降低幅度比前期更快, 说明养护前期水化物生成更为充分, 后期生成则较为缓慢。在渗透性能的提升方面, 不掺纤维组优于掺入纤维组, 说明纤维的掺入对渗透性能的改善很不明显。

### 3.4 化学分析与微观结构

从 XRD 图谱中可以看出, 淤泥原状样的矿物成分主要为石英、高岭石、伊利石和云母, CSFG 固化剂的主要矿物成分为石英、二水硫酸钙、硅酸钙和碳酸钙。对比 28 d 标准龄期下的 CSFG-FR 固化土, 其云母、伊利石峰消失, 高岭石峰明显减弱, 说明黏土矿物参加反应生成新的水化物, 主要为: 水化铝酸钙 (C-A-H)、水化硅酸钙 (C-S-H)、钙矾石 (Aft) 和水化硅铝酸盐 (C-A-S-H)。关于 CSFG 固化剂加固淤泥的矿物生成机制与文献[10]所描述一致。

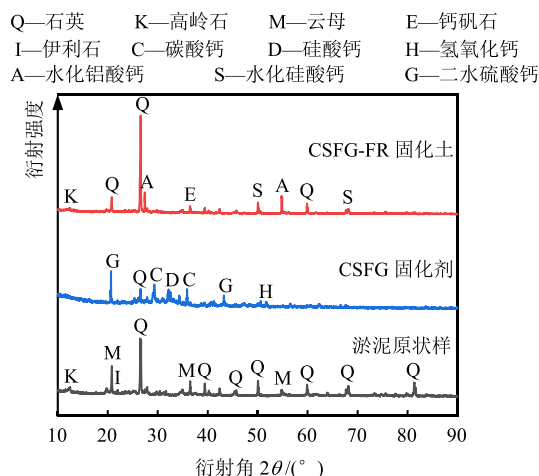
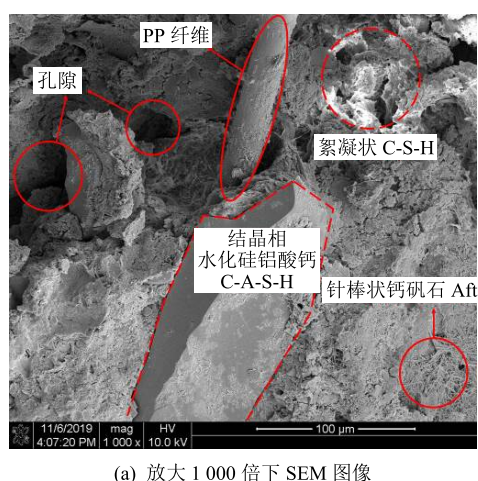


图 8 淤泥原状样、固化剂和固化土的 XRD 图谱  
Fig.8 XRD patterns of undisturbed sludge, solidified agent and solidified soil

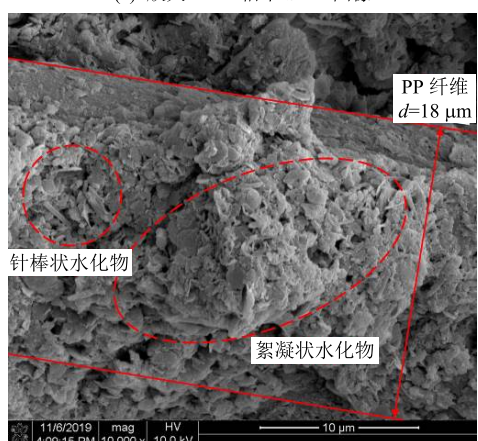
图 9 为 P2 试样 ( $c=20\%$ ,  $l=3$  mm,  $\rho_f=0.4\%$ ) 在 28 d 标准养护龄期时的不同倍数 SEM 图像。从图 9(a) 中可以看出, 在水化反应、火山灰反应为主的一系列复杂化学反应下, CSFG-FR 固化土中生成的水化物主要以针棒状、絮凝状和结晶相的形态存在。水化物在土颗粒中主要起到充填、胶结和骨架

支撑作用。单丝状纤维在土体中三维随机分布,与土中团粒、水化物共同构建起骨架。可见,纤维及水化物通过架接与构造起分散的土颗粒,胶结成为团粒,凝结形成致密的空间网状结构,从而使 CSFG-FR 共同发挥协同作用。

从图 9(b)中可以看出,在纤维表面还附着生长了大量针棒状和絮凝状的水化物,这进一步增加了协同作用的效果。一方面,纤维在固化土中为水化物提供了生长场所,使得更多的水化物可以附着在其表面,从而增加了水化物的生成面积,促进了矿物的生长;另一方面,纤维表面的水化物具有较高的强度和胶结度,这使得纤维骨架与土体基质可以紧密结合,在纤维-基质团粒、纤维-水化物界面间形成很高的摩擦力,当土体遭受破坏时,便可以充分发挥摩擦效应以抵抗外力作用,从而提高整体强度。



(a) 放大 1 000 倍下 SEM 图像



(b) 放大 10 000 倍下 SEM 图像

图 9 CSFG-FR 处理固化土扫描电镜图

Fig.9 SEM of CSFG-FR treated solidified soil

核磁共振  $T_2$  谱能够反映出岩土体等多孔介质内部的孔径分布等微观结构特征,横坐标(横向弛豫时间  $T_2$ )可以表征孔径大小,纵坐标(NMR 信

号幅值)表示对应某孔径的孔隙结构分布集度<sup>[23]</sup>。图 10 给出了 P2 试样在不同龄期下的  $T_2$  谱。从图中可以看出,在 CSFG-FR 协同作用下,  $T_2$  曲线随龄期增加逐渐向左移动,其峰值和积分面积逐渐减小,表明随着养护龄期的增加,水化物借助穿插在孔隙中的纤维,逐渐填充并胶结土中的孔隙,使土中的大孔隙逐渐减少并向小孔隙转化。

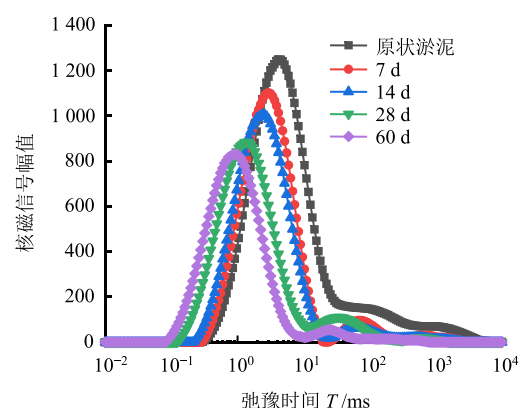


图 10 CSFG-FR 处理固化土核磁共振  $T_2$  谱

Fig.10 NMR  $T_2$  spectra of CSFG-FR treated solidified soil

## 4 讨论

### 4.1 固化机制分析

固化土的强度来源于固化剂的化学加固作用和纤维的物理加固作用。固化剂中 4 种成分发生水化反应、火山灰反应、粉煤灰解离反应、离子吸附交换作用等一系列化学反应。水泥水化反应生成凝胶状水化硅酸钙(C-S-H),而水化铝酸钙(C-A-H)继续与石膏中的二水硫酸钙反应,生成针棒状钙矾石<sup>[24]</sup>。水化反应生成的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  使孔隙水溶液呈碱性,粉煤灰玻璃体则继续析出  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  增强碱性环境<sup>[25]</sup>,淤泥中黏土矿物所含的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  游离出来并与粉煤灰、矿渣发生火山灰反应,生成絮凝状的水化硅铝酸钙(C-A-S-H)。当 Aft 和 C-A-S-H 的生成趋于饱和时,粉煤灰解离反应析出的  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$  与  $\text{OH}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  发生复杂的化学反应<sup>[26]</sup>,生成结晶相的 C-A-S-H。

聚丙烯纤维具有极强的耐酸碱性<sup>[27-28]</sup>,因此在固化土中不参与化学反应。但聚丙烯纤维自分散性好,抗拉强度高,在固化土中随机穿插形成三维网络。当土体受到外力作用时,纤维发挥物理抗拉作用,抵抗土体变形。此外,纤维并不仅仅发挥抗拉作用,如图 11 所示,当水化物在土体中胶结形成团粒时,纤维还为其提供附着生长的区域,并形成支撑骨架,从而发挥与 CSFG 的协同作用,其具体协

同机制将在下一节中展开分析。

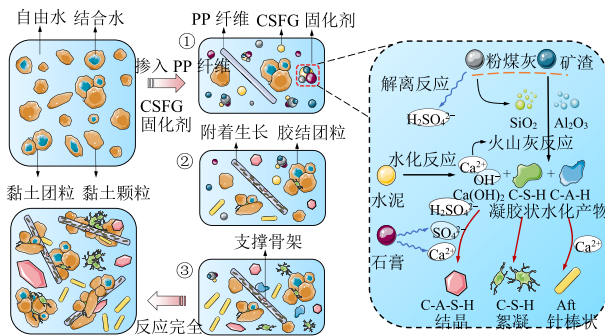


图 11 CSFG-FR 处理固化土微观机制图  
Fig.11 Micro mechanism of CSFG-FR treated solidified soil

#### 4.2 CSFG-FR 协同作用

除了 CSFG 固化剂本身可以发生一系列化学反应生成针棒状钙矾石、水化硅铝酸钙等水化物外, CSFG 还与纤维协同作用发挥固化效果。因为纤维加筋为 CSFG 的水化物提供了新的生长区域(如图 11 所示),使其附着在纤维表面进行水化进程,从而借助穿插分布在孔隙中的纤维将更多的水化物结合在相邻土颗粒间的孔喉处,促进水化物的分布和矿物的生长,增强纤维-土颗粒之间的界面力学强度,从而提高整体强度。结合图 2(d)和图 5(c)可知,最佳纤维掺量和长度下的试样无侧限抗压强度提升了 127.5%和 136.8%,变形模量提升了 119.3%和 131.7%,说明这种 CSFG-FR 协同作用使纤维的效果得到充分发挥,最大限度提高了固化土的力学性能。

此外,纤维自身还发挥了桥梁似的抗拉作用,当纤维在固化土中三维网状分布时,直接限制并约束了土颗粒和团聚体的移动,当土体受到外力破坏后,纤维的桥梁作用能有效抑制破坏面的扩展。结合图 3 可知,纤维的掺入明显改善了固化土的破坏模式,三维纤维网络可以阻止外力作用下裂缝的发展与延伸,加强了固化土抵抗变形的能力,使固化土从应变硬化型的脆性破坏转换为应变软化型的韧性破坏。桥梁作用也与纤维-土界面作用力大小有关,界面作用力越大,纤维的抗拔能力和承担拉应力的能力就越强,对裂隙的抑制作用越好。只有当拉应力超过纤维-土界面剪切强度或者纤维自身的抗拉强度时,断面上的纤维会被拔出或者拉断,从而丧失加筋效果。结合图 4 的试验结果,最佳纤维掺量和长度下的试样破坏应变提升了 129.3%和 157.6%,说明 CSFG-FR 在改变固化土变形特性方

面也具有显著的效果。

在 CSFG-FR 固化土中,固化剂和纤维的掺量并非越多越好。由前文图 2(c)、2(d)的试验结果可知:CSFG 掺量为 30%的 C3 试样的抗压强度小于 CSFG 掺量为 20%的 P2、L3 试样;纤维掺量为 0.8%的 P3 试样的抗压强度小于纤维掺量为 0.4%的 P2 试样。在达到相同改良效果的情况下,优先选用材料用量较少的配比方案,可以在实际应用中减少施工成本。所以当固化剂掺量控制在 20%,纤维掺量控制在 0.4%时,既可以达到减少材料用量,削减经济成本的目的,又能优先达到预期改良效果,满足性能要求。综合考虑协同作用后的力学性能、渗透性能、施工成本等因素后,本试验的 CSFG 固化剂掺量可选取为 20%,最佳纤维掺量为 0.4%,最佳纤维长度为 12 mm。在实际工程中,应选择合适的纤维长度和掺量,使 CSFG-FR 协同作用提升强度的效果发挥到最佳。

## 5 结 论

提出采用 CSFG-FR 协同作用改性淤泥固化土,通过开展无侧限抗压试验和渗透试验,对比分析了不同 CSFG 掺量、不同纤维长度和纤维掺量对试样力学性能和渗透性能的影响。此外,通过 XRD 和 SEM 试验分析了 CSFG-FR 协同作用的微观机制,讨论了其协同作用机制。得到如下主要结论:

(1) 对比 CSFG 试样,CSFG-FR 试样的无侧限抗压强度、变形模量、破坏应变均有较大提升,破坏模式从脆性破坏转变为韧性破坏。力学性能、变形性能改良效果显著,渗透性能改良效果不明显。

(2) CSFG-FR 中的纤维存在临界掺量 ( $\rho_f = 0.4\%$ ),当纤维小于临界掺量时发挥积极作用,超过时则会产生反作用。本试验中综合确定最佳纤维掺量为 0.4%,最佳纤维长度为 12 mm。

(3) CSFG-FR 的协同作用主要体现在 3 个方面:一是通过促进水化物的分布,进而提高强度;二是形成三维纤维网络,发挥摩擦力与抗拔力,阻止裂缝的发展与延伸,增强土体抵抗变形的能力;三是 CSFG 生成的水化物附着在纤维表面,增强纤维-土颗粒之间的界面摩擦力。

## 参 考 文 献

- [1] 孟庆山, 杨超, 雷学文, 等. 武汉东湖淤泥早强固化试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 707-712.  
MENG Qing-shan, YANG Chao, LEI Xue-wen, et al. Experimental study on early strength consolidation of

- Wuhan East Lake silt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 707-712.
- [2] CHEW S, KAMRUZZAMAN A, LEE F. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(7): 696-706.
- [3] JIANG X, HUANG Z, MA F, et al. Analysis of strength development and soil-water characteristics of rice husk ash-lime stabilized soft soil[J]. **Materials**, 2019, 12(23): 3873.
- [4] HORPIBULSUK S, RACHAN R, RAKSACHON Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. **Soils and Foundations**, 2009, 49(1): 85-98.
- [5] 湛文武, 张起勇, 刘宏伟. SH 固土剂在遗址土中的渗透注浆扩散规律[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 429-435.  
CHEN Wen-wu, ZHANG Qi-yong, LIU Hong-wei. Infiltration and grouting diffusion law of SH soil stabilizer in site soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(2): 429-435.
- [6] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 1): 3197-3205.  
WANG Dong-xing, WANG Hong-wei, ZOU Wei-lie, et al. Study on micro mechanism of alkali activated fly ash solidified sludge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl. 1): 3197-3205.
- [7] 何俊, 石小康, 栗志翔. 水玻璃-碱渣-矿渣固化高含水率淤泥的强度性质[J]. 工程地质学报, 2019, 27(4): 729-736.  
HE Jun, SHI Xiao-kang, LI Zhi-xiang. Strength properties of high moisture content silt solidified by sodium silicate alkali slag slag[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2019, 27(4): 729-736.
- [8] 徐日庆, 文嘉毅, 王旭, 等. 台州淤泥质土固化特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 146-153.  
XU Ri-qing, WEN Jia-yi, WANG Xu, et al. Study on solidification characteristics of Taizhou muddy soil[J]. **Journal of Hunan University (Natural Science Edition)**, 2019, 46(11): 146-153.
- [9] 陈鑫, 俞峰, 洪哲明, 等. 新型 GS 固化土与水泥土的力学特性对比研究[J]. 工程地质学报, 2020: 待发表.  
CHEN Xin, YU Feng, HONG Zhe-ming, et al. Comparative study on mechanical properties of new GS solidified soil and cement soil[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020: to be published.
- [10] 张小芳, 陈瑞敏, 简文彬. 水泥-矿渣-粉煤灰固化淤泥的水分转化规律及其固化机理研究[J]. 工程地质学报, 2020: 待发表.  
ZHANG Xiao-fang, CHEN Rui-min, JIAN Wen-bin. Study on the water conversion law and solidification mechanism of cement slag fly ash solidified sludge[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020: to be published.
- [11] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817-2822.  
DING Jian-wen, ZHANG Shuai, HONG Zhen-shun, et al. Experimental study on high water content dredged sludge solidified by cement phosphogypsum[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2817-2822.
- [12] NEDELJKOVIĆ M, GHIASSI B, VAN DER LAAN S, et al. Effect of curing conditions on the pore solution and carbonation resistance of alkali-activated fly ash and slag pastes[J]. **Cement and Concrete Research**, 2019, 116: 146-158.
- [13] NATH S, KUMAR S. Influence of granulated silico-manganese slag on compressive strength and microstructure of ambient cured alkali-activated fly ash binder[J]. **Waste and Biomass Valorization**, 2019, 10(7): 2045-2055.
- [14] 简文彬, 张登, 黄春香. 水泥-水玻璃固化软土的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 632-637.  
JIAN Wen-bin, ZHANG Deng, HUANG Chun-xiang. Study on the microcosmic mechanism of cement water glass solidified soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl. 2): 632-637.
- [15] ESTABRAGH A, NAMDAR P, JAVADI A. Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber[J]. **Geosynthetics International**, 2012, 19(1): 85-92.
- [16] WANG H, TANG C, GU K, et al. Mechanical behavior of fiber-reinforced, chemically stabilized dredged sludge[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2020, 79(2): 629-643.
- [17] 交通部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [18] 福建省建筑科学研究院. JGJ/T 233—2011 水泥土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Fujian Academy of Building Research. JGJ/T 233—2011 Specification for mix proportion design of cement soil[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [19] 朱熹文, 严建明, 王贤奔, 等. 淤泥质饱和土渗透系数

- 的室内实验研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(9): 107-111.
- ZHU Xi-wen, YAN Jian-ming, WANG Xian-ben, et al. Laboratory experimental study on permeability coefficient of muddy saturated soil[J]. **Water Conservancy and Hydropower Technology**, 2014, 45(9): 107-111.
- [20] 杨德欢, 韦昌富, 颜荣涛, 等. 细粒迁移及组构变化对黏土渗透性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2009-2017.
- YANG De-huan, WEI Chang-fu, YAN Rong-tao, et al. Experimental study on the influence of fine-grained migration and structural changes on clay permeability[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(11): 2009-2017.
- [21] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- CAI Guang-hua. Experimental and applied research on carbonation strengthening soft soil with active magnesium oxide[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [22] WANG D, ZENTAR R, ABRIAK N E. Durability and swelling of solidified/stabilized dredged marine soils with class-F fly ash, cement, and lime[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2018, 30(3): 4018013.
- [23] 王士权, 魏明俐, 何星星, 等. 基于核磁共振技术的淤泥固化水分转化机制研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1778-1786.
- WANG Shi-quan, WEI Ming-li, HE Xing-xing, et al. Study on water transformation mechanism of sludge solidification based on nuclear magnetic resonance technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1778-1786.
- [24] GARG M, PUNDIR A. Comprehensive study of fly ash binder developed with fly ash- $\alpha$  gypsum plaster-Portland cement[J]. **Construction and Building Materials**, 2012, 37: 758-765.
- [25] 王宏伟. 活性 MgO/碱-粉煤灰固化淤泥力学特性与微观机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- WANG Hong-wei. Study on mechanical properties and micro mechanism of activated MgO/alkali fly ash solidified sludge[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [26] SAMARAS P, PAPADIMITRIOU C, HARITOU I, et al. Investigation of sewage sludge stabilization potential by the addition of fly ash and lime[J]. **Journal of Hazardous Materials**, 2008, 154(1-3): 1052-1059.
- [27] 张志韬, 陈生水, 吉恩跃, 等. 聚丙烯纤维加筋砾质黏土的拉伸断裂特性研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2713-2721.
- ZHANG Zhi-tao, CHEN Sheng-shui, JIN En-yue, et al. Study on tensile fracture characteristics of polypropylene fiber reinforced gravelly clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(10): 2713-2721.
- [28] 安宁, 晏长根, 王亚冲, 等. 聚丙烯纤维加筋黄土抗侵蚀性能试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 501-510.
- An Ning, YAN Chang-gen, WANG Ya-chong, et al. Experimental study on erosion resistance of polypropylene fiber reinforced loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(2): 501-510.
- [25] LI M H, YIN G Z, XU J, et al. A novel true triaxial apparatus to study the geomechanical and fluid flow aspects of energy exploitations in geological formations[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(12): 4647-4659.
- [26] ZHAO H G, LIU C, HUANG G, et al. Experimental investigation on rockburst process and failure characteristics in trapezoidal tunnel under different lateral stresses[J]. **Construction and Building Materials**, 2020, 259(3): 119530.
- [27] 蒋剑青. 深部隧洞应变型岩爆的真三轴试验与动能预测研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- JIANG Jian-qing. Study on strainburst in tunnel using true-triaxial test and its kinetic energy prediction[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.
- [28] 魏超, 朱维申, 李勇, 等. 岩石倾斜裂隙与水平裂隙扩展贯通试验及数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4533-4542, 4553.
- WEI Chao, ZHU Wei-shen, LI Yong, et al. Experimental study and numerical simulation of inclined flaws and horizontal fissures propagation and coalescence process in rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4533-4542, 4553.
- [29] 吴明洋. 基于分形分叉网络模型的低渗透油藏裂缝多尺度表征及建模方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- WU Ming-yang. Multi-scale fracture characterization and modeling method of low permeability reservoir based on fractal bifurcation network model[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

上接第 980 页