

# MgO—纤维水泥土变形模量的正交试验研究

胡其志<sup>1,2</sup>, 余杨<sup>1</sup>, 马强<sup>1</sup>, 庄心善<sup>1,2</sup>

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北省桥梁安全监控技术及装备技术工程中心, 湖北 武汉 430068)

**摘要:**合适掺量的 MgO 和纤维可以提高水泥土的抗压强度。为了对 MgO—纤维水泥土的力学性质做进一步研究,通过 Minitab 软件设计正交试验方法,进行敏感性分析和影响作用分析,研究 MgO 掺量、纤维掺量、纤维长度 3 个因素在 3 个不同水平下的变形模量变化规律;利用 Matlab 软件对试验数据进行处理,得到 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度与水泥土变形模量之间的回归方程;对试样进行扫描电镜试验结合 ImageJ 软件对图片进行处理,分析微观结构的变化。结果表明:对 MgO—纤维水泥土变形模量影响程度大小的顺序依次为 MgO 掺量、纤维长度、纤维掺量;在试验范围内其最佳配合比为 MgO 掺量 1.5%、纤维长度 6 mm、纤维掺量 0.5%。得到 MgO—纤维水泥土的变形模量回归方程,验证了其准确性。SEM 试验观察与 ImageJ 软件分析得到 MgO 和纤维的掺入可以改善土体的孔隙结构,增强结构之间的连接作用,从而达到改善水泥土相关力学性质的目的。

**关键词:**MgO—纤维水泥土;变形模量;正交试验;回归方程;扫描电镜

**中图分类号:** U414 **文献标志码:** A

在软基处理过程中通常用水泥作为固化剂来提高软土的承载能力以及抗渗性能<sup>[1]</sup>,但是由于存在水泥土的强度提高作用有限,而有时工后沉降较大等不足,所以一直制约着工程建设的发展<sup>[2-3]</sup>,因此对水泥土材料的性能进行合理改良具有重要的实际意义。

近年来国内外许多学者对水泥土的性能展开了广泛研究。如陈峰等<sup>[3]</sup>对玄武岩纤维水泥土的抗剪强度进行了试验;鹿群等<sup>[4]</sup>研究了加入纤维对水泥土力学性能的影响;唐朝生等<sup>[5]</sup>分析了聚丙烯纤维水泥土的强度变化规律和作用机理;王立峰等<sup>[6]</sup>探讨了纳米硅水泥土的强度特性,建立了预测水泥土强度的关系模型;王伟等<sup>[7]</sup>通过一维固结试验研究了 MgO 对水泥土的改性效果;宋爱苹等<sup>[8]</sup>探讨了在冻融循环条件下的粉煤灰水泥土的强度变化规律;叶青等<sup>[9]</sup>研究了纳米 MgO 对水泥硬化浆体的抗压强度和膨胀性的作用效果;Kolias 等<sup>[10]</sup>在黏土中掺入不同掺量的水泥和粉煤灰进行固化试验研究;Farouk 等<sup>[11]</sup>对不同水泥掺量和不同水灰比的样品展开无侧限抗压强度试验。

通过以上文献可知,MgO 作为活性材料可以减少水泥土的膨胀应变和收缩变形,而纤维可以增强水泥土的稳定性。由于针对 MgO 和纤维共同对水泥土作用的研究还相对较少,因此试验结合 MgO 和纤维的

特点,通过无侧限抗压强度试验,对应力—应变曲线进行分析,研究不同 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度对水泥土变形模量的影响规律;确定 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度与水泥土变形模量之间的回归方程,并通过电镜扫描试验,分析其结构的微观变化和作用机理。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

试验所用水泥为 P. O42.5 级普通硅酸盐水泥,黏土取自广西贵港高速公路工地,取土深度为地下 5 m 左右,其物理力学性能指标见表 1。MgO 选取纯净的纳米 MgO 粉末,而作为掺入水泥土中的纤维,其种类有聚丙烯纤维、玄武岩纤维、钢纤维和玻璃纤维等<sup>[12-13]</sup>,其中玄武岩纤维具有较好的力学性能和化学稳定性<sup>[14]</sup>,其主要性能指标见表 2。

表 1 黏土的基本物理指标

天然密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	含水 率/%	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	空隙率
2.035	25	46.8	23.5	23.3	0.584

收稿日期:2022-06-02(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51609081)

作者简介:胡其志,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:hqz0716@163.com

表 2 玄武岩纤维的物理力学性能

纤维密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	单丝直 径/ $\mu\text{m}$	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/MPa	伸长 率/%
2.65	17	80~120	4 100~4 700	3.1

1.2 试验内容

试验配合比设计参考 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》，规范要求为了降低成本，建议水泥掺量为 12%~20%；相关学者<sup>[15]</sup>研究发现按照水泥掺量不同，水泥固化土可以分为非反应区、反应区和惰性区 3 个阶段，当水泥掺量过低时强度增长缓慢，过高时水泥得不到有效利用<sup>[16]</sup>；而且在实际情况中考虑经济性和实用性的要求<sup>[17-19]</sup>，水泥掺量多取 15%；因此试验结合具体情况固定水泥的掺量为 15%。对于纳米材料，当掺量小于 0.5% 时，加固效果较弱，当掺量大于 0.5% 时，改良土强度显著提高<sup>[20]</sup>，试验设计纳米 MgO 最低掺量为 0.5%。纤维掺量参考文献[21]，设计等步增量(0.5%)的玄武岩纤维掺量。

采用正交试验设计方法，考虑 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度 3 个因素，每个因素设置 3 个水平，其中各因素的设置水平见表 3。采用  $L_9(3^3)$  的正交表，设计 9 组试验，每组试验 3 个平行试样，总共 27 个试样。

表 3 正交试验因素水平

水平	纤维掺量/%	纤维长度/mm	MgO 掺量/%
1	0.5	3	0.5
2	1.0	6	1.0
3	1.5	9	1.5

1.3 试验方法

首先将黏土放在室内风干并过 2 mm 筛，按照最优含水率计算水的质量，然后根据设计的配比依次称取黏土、水泥、水、玄武岩纤维和 MgO，分别进行装袋后密封备用，按照试样制作日期安排，将各组试样的材料加入容器内进行搅拌约 10 min，直至形成均匀的 MgO—纤维水泥土配料。将配料分 3 次装入三瓣模中，分层击实制成尺寸为  $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  的圆柱体，且每次装入模具中的配料应进行称重并记录，以控制每个 MgO—纤维水泥土样的总质量相等，其制样过程如图 1 所示。将试样带模静置 24 h 后再脱模，并用塑料袋密封放入养护室中养护，其养护温度为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，湿度  $>95\%$ ，试样的养护方式如图 2 所示，养护 28 d 后取出试样进行无侧限抗压强度试验。



图 1 试样的制作



图 2 试样的养护

2 试验结果与分析

试验所用仪器为 YYW—II 型无侧限压力仪，应变速率为 3 mm/min。

按照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》，每隔 0.5% 应变记录读数一次，当测力计读数出现最大值时，再进行 3%~5% 的应变后结束试验，取每组试样数据的平均值为试验结果，得到试样的应力—应变曲线关系如图 3 所示。

通过图 3 的应力—应变关系曲线，取应力峰值的 50% 对应的割线模量为水泥土变形模量的大小。变形模量反映的是试样产生变形的难易程度，其值越大，表明在相同变形条件下试样破坏的可能性越小，无侧限抗压强度和变形模量试验结果如表 4 所示。

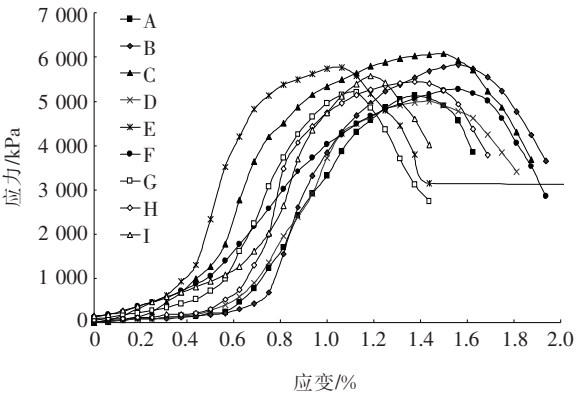


图 3 MgO—纤维水泥土的应力—应变曲线

表 4 正交试验结果

试验组号	纤维掺量/%	纤维长度/mm	MgO 掺量/%	抗压强度/kPa	变形模量/kPa
A	0.5	3	0.5	5 129.81	287 236
B	0.5	6	1.0	5 829.47	323 202
C	0.5	9	1.5	6 080.08	471 821
D	1.0	3	1.0	5 003.03	281 683
E	1.0	6	1.5	5 766.08	545 210
F	1.0	9	0.5	5 274.28	347 875
G	1.5	3	1.5	5 204.78	364 233
H	1.5	6	0.5	5 438.84	348 388
I	1.5	9	1.0	5 573.02	339 370

2.1 各因素敏感性分析

敏感性是指试验因素对试验结果影响程度的大小,敏感性越强,表示该因素对试验结果的影响作用越大。利用极差分析以及 Minitab 软件进行方差分析,得到极差分析表和方差分析表。

2.1.1 极差分析

极差分析表中 $\beta_i(i=1,2,3)$ 指每个因素分别在第 $i$ 个水平下的所有变形模量的指标之和,并且求出 $\beta_i$ 的平均值,极差为 $\beta_i$ 均值的最大值与最小值之差,其极差越大则说明该因素对变形模量的敏感性越强。极差分析结果如表 5 所示。

表 5 变形模量的极差分析结果

项目	不同配比试样的变形模量/kPa		
	纤维掺量	纤维长度	MgO 掺量
$\beta_1$	1 082 259	983 499	983 499
$\beta_2$	1 174 768	1 216 800	944 255
$\beta_3$	1 051 991	1 159 066	1 381 265
$\beta_1$ 均值	360 753	327 833	327 833
$\beta_2$ 均值	391 589	405 600	314 752
$\beta_3$ 均值	350 664	386 355	460 421
极差	40 925	77 767	145 669

由表 5 可以看出:MgO 掺量对试样的变形模量影响程度最为明显,而纤维掺量对水泥土的变形模量影响作用不够显著,说明水泥土对纤维掺量不够敏感。综合各个因素对水泥土的变形模量敏感性程度大小顺序依次为:MgO 掺量、纤维长度和纤维掺量。

2.1.2 方差分析

方差分析可以进一步验证其因素与试验指标之间

的联系,分析其因素的显著性效果,并且得到各个因素的最优掺量配比,为类似试验提供参考。利用试验数据,通过 Minitab 对其进行方差分析,得到变形模量的方差分析结果如表 6 所示,其中 $P$ 为显著性概率, $F$ 为统计量, $A_{SS}$ 为调整后的偏差平方和, $A_{MS}$ 为调整后、平均后的偏差平方和, $F$ 值越大表示显著性越明显。

表 6 变形模量的方差分析结果

项目	自由度	$A_{SS}$	$A_{MS}$	$F$ 值	$P$ 值
纤维掺量	2	2 727 584 293	1 363 792 146	0.88	0.532
纤维长度	2	14 980 726 451	7 490 363 225	4.82	0.172
MgO 掺量	2	38 970 439 205	19 485 219 602	12.55	0.074
误差	2	3 106 268 504	1 553 134 252		
合计	8	59 785 018 452			

由表 6 可以看出:对于水泥土变形模量影响程度大小的排序依次为:MgO 掺量、纤维长度、纤维掺量,方差分析结果与极差分析的结果一致;其中 MgO 掺量和纤维长度对水泥土的变形模量影响效果显著,而纤维掺量对水泥土的变形模量影响效果很小。

2.2 各因素影响作用分析

为进一步研究各因素对水泥土变形模量的影响规律,在试验数据的基础上,利用 Minitab 软件对试验数据进行处理,从数学角度分析各因素的影响作用,其中包括交互作用分析和主效应分析。

2.2.1 交互作用分析

交互作用是指在多因素共同作用的试验中,当其中某一因素保持不变时,另一因素作用的均值图,表现的是多因素之间相互作用的程度。在交互作用图中,当各个因素的曲线不平行时,即表示两种因素之间存在交互作用,其相交趋势越明显,说明交互作用越强,反之平行时,则说明因素之间不存在交互作用。

通过 Minitab 软件对试验数据进行处理,得到影响水泥土变形模量的各因素之间的交互作用图(图 4)。

从图 4 可知:在纤维长度和纤维掺量的交互作用图中,当纤维长度小于 6 mm 时,纤维长度和纤维掺量对水泥土的变形模量之间的交互作用不明显,当纤维长度大于 6 mm 时,纤维长度和纤维掺量之间的交互作用显著;在纤维长度和 MgO 掺量的交互作用图中,纤维长度与 MgO 掺量之间几乎不存在交互作用;在纤维掺量和 MgO 掺量之间的交互作用图中,纤维掺量与 MgO 掺量之间的交互作用显著。

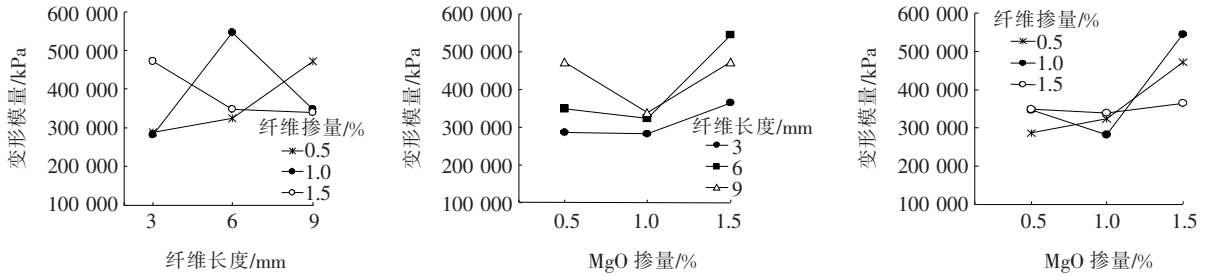


图 4 无侧限抗压强度的交互作用图

2.2.2 主效应分析

为进一步研究各因素对试验结果的影响规律,利用 Minitab 软件分析试验数据得到主效应图,它是表示各因素在不同水平下得到的均值图,反映的是各因素对试验指标影响程度的规律,其水泥土的变形模量主效应图如图 5 所示。

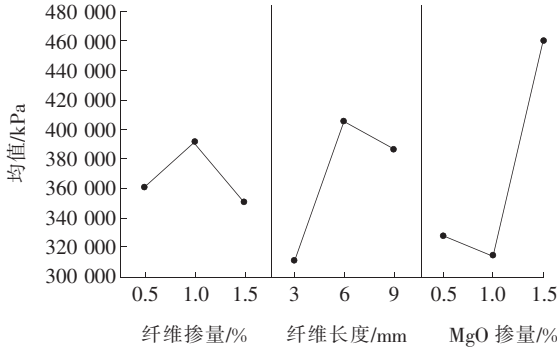


图 5 水泥土变形模量的主效应图

从图 5 可以看出:随着纤维掺量的增加,水泥土的变形模量出现先增大后减小的趋势,但是总体影响程度较弱;而随着纤维长度的增加,水泥土变形模量先增大后减小,说明纤维长度过长会对水泥土的稳定性造成破坏。结合极差分析和方差分析结论可知:水泥土的变形模量影响程度大小顺序依次为 MgO 掺量、纤维长度、纤维掺量,从经济性和成本性考虑,其最佳配合比为纤维掺量 0.5%、纤维长度为 6 mm、MgO 为 1.5%。

3 回归模型的建立和检验

3.1 回归模型的建立

为更好地预测水泥土的变形模量与 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度之间的关系,建立其回归模型为:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_2x_3 + a_6x_1x_3 + a_7x_1^2 + a_8x_2^2 + a_9x_3^2 + a_{10}x_1^3 + a_{11}x_2^3 + a_{12}x_3^3 \quad (1)$$

式中:  $y$  为水泥土的变形模量(kPa);  $x_1$  为纤维掺量(%);  $x_2$  为纤维长度(mm)、 $x_3$  为 MgO 掺量(%);  $a_0 \sim a_{12}$  为回归系数。

通过 Matlab 分析软件对表 4 试验结果的变形模量数据进行处理,得到变形模量的回归方程为:

$$y = 278\,777.99 + 44\,859.23x_1x_2 - 15\,792.36x_2 \cdot x_3 - 189\,649.36x_1x_3 - 34\,670.54x_1^3 - 208.45x_2^3 + 149\,121.22x_3^3 \quad (2)$$

式中:回归方程相关系数  $R$  为 0.999,因此关于变形模量的回归方程是可靠的。

3.2 回归模型的检验

为验证回归模型的准确性,将试验数据与回归方程的理论值进行比较,对比结果见图 6。

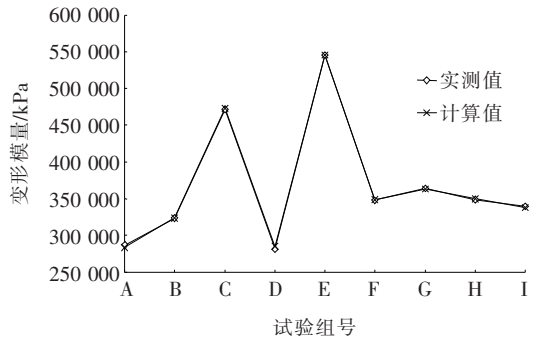


图 6 变形模量实测值与计算值对比

从图 6 可知:变形模量的实际值与理论值基本接近,平均误差只有 0.43%,对于水泥土材料来说,此回归方程符合准确性要求。

4 微观结构分析

为了深入研究 MgO—纤维水泥土在不同外掺剂掺量条件下,其微观结构的变化,采集无侧限抗压试验破坏后的样品,进行电镜扫描试验。

4.1 微观试验设备

扫描电镜试验采用日本 Hitachi SU8010 型高分



辨冷场发射扫描电子显微镜,在 SEM 试验前应提前将样品进行真空干燥处理,然后利用喷金仪在样品表面喷镀金膜,以增强样品的导电性,最后再进行 SEM 试验。

4.2 SEM 结果分析

根据无侧限抗压强度试验结果,对不同 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度的水泥土,选取最小和最大变形模量的代表性试样,即纤维掺量为 1.0%、纤维长度为 3 mm、MgO 掺量为 1.0% 的 D 号试验组和纤维掺量为 1.0%、纤维长度为 6 mm、MgO 掺量为 1.5% 的 E 号试验组进行 SEM 试验分析,放大 3 000 倍后的微观结构如图 7 所示。

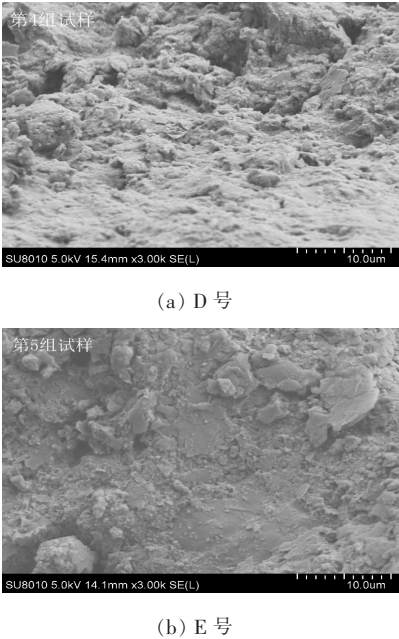


图 7 不同配比的 MgO—纤维水泥土扫描电镜图

从图 7 可以看出:在相同的放大倍数下,E 号试验组比 D 号试验组的微观结构更加致密,孔隙明显较少,材料之间的相互连接更加紧凑,因此结构稳定,变形模量较大。

为了进一步观察分析 E 号试验组的微观结构,将试样再放大 500 倍和 8 000 倍后进行观察,电镜扫描图片如图 8 所示。

从图 8 可以看出:玄武岩纤维在土体中随机存在,与土体材料黏结紧密,形成牢固的整体;活性 MgO 具有微膨胀性,填充水泥土硬化收缩过程中的孔隙结构,使材料表面变得密实和比较光滑,因此结构密实且稳定,所以变形模量可以大幅度提高。

4.3 微观结构的定量分析

为了对 D 号和 E 号试验组的 MgO—纤维水泥土

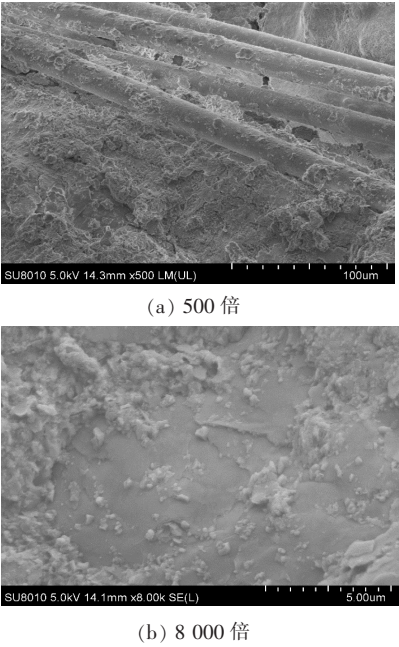


图 8 第 E 组 MgO—纤维水泥土的电镜图片

的电镜图进一步进行定量分析,采用 ImageJ 图像处理软件对图 7 原图进行处理。首先要让图片真实反映试样实际情况,因此要设置图片的比例尺相同,再将图片转为 8 位灰度图片,提高对比度,为避免电镜图片上比例尺的部分影响分析结果,应当裁去,最后进行二值化处理调节阈值,使图片的孔隙结果都能被选中,最后进行软件计算,得到孔隙面积占整个图片面积的比率,即空隙率。其电镜图片二值化后的效果如图 9 所示,空隙率计算结果如表 7 所示。

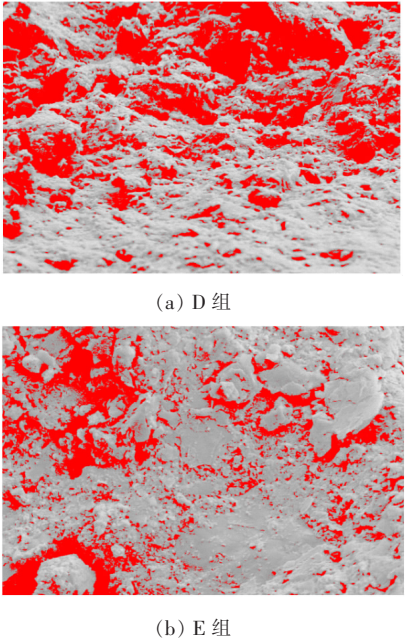


图 9 不同配比的 MgO—纤维水泥土二值化图像

表 7 空隙率结果

组别	面积/ $\mu\text{m}^2$	平均 值/ $\mu\text{m}$	标准 差/ $\mu\text{m}$	最小 值/ $\mu\text{m}$	最大 值/ $\mu\text{m}$	周长/ $\mu\text{m}$	空隙 率/%
D	420.86	114.44	19.62	50	137	4 334	33.81
E	259.14	141.20	6.78	120	150	4 336	20.88

由表 7 可知:第 D 组和第 E 组孔隙结构的空隙率分别为 33.81%和 20.88%,说明第 E 组 MgO—纤维水泥土的结构中,纤维的掺入限制了土体结构的变形,而 MgO 作为一种活性物质,增加了结构之间胶结作用,在水泥土早期硬化收缩过程中,由于 MgO 的微膨胀性,使得孔隙结构被填充,因此结构变得更加密实,和之前的观察结果一致。

5 结论

通过对不同纤维掺量、纤维长度和 MgO 掺量的水泥土进行无侧限抗压强度试验,结合软件分析,电镜扫描试验,研究了试样的变形模量变化规律和微观结构变化,得到如下结论:

(1) 通过 Minitab 软件分析了纤维掺量、纤维长度和 MgO 掺量对 MgO—水泥土变形模量的影响规律和交互作用关系。对变形模量影响程度大小的顺序依次为:MgO 掺量、纤维长度、纤维掺量。并且得到了各外掺剂的最优掺入比为:纤维掺量 0.5%、纤维长度为 6 mm、MgO 为 1.5%。

(2) 通过 Matlab 软件得到了水泥土的变形模量与 MgO 掺量、纤维掺量和纤维长度之间的回归模型,对预测试验的变形模量具有参考意义。

(3) 利用 SEM 试验观察结合 ImageJ 软件分析具有代表性的试样的微观结构,发现在合适的掺量条件下,水泥土的微观孔隙结构减少,结构变得更加致密,从而增强了水泥土的稳定性。

参考文献:

[1] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(2):127—146.

[2] 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.

[3] 陈峰,简文彬.玄武岩纤维水泥土三轴试验研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2016,52(6):741—745.

[4] 鹿群,郭少龙,王闪闪,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.

[5] 唐朝生,施斌,高玮.聚丙烯纤维和水泥对粘性土强度的影响及机理研究[J]. 工程地质学报,2007,15(1):108—113.

[6] 王立峰,翟惠云.纳米硅水泥土抗压强度的正交试验和多元线性回归分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(S1):452—457.

[7] 王伟,张帅,张芳,等.纳米氧化镁改性水泥土—维固结压缩试验研究[J]. 水利学报,2015,46(S1):84—89.

[8] 宋爱苹,张亚飞.冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J]. 中外公路,2017,37(3):221—223.

[9] 叶青,俞升华,张泽南,等.纳米 MgO 对水泥硬化浆体膨胀和强度的影响[J]. 建筑材料学报,2017,20(5):765—769.

[10] KOLIAS S,KASSELOURI-RIGOPOULOU V,KARAHALIOS A. Stabilisation of Clayey Soils with High Calcium Fly Ash and Cement[J]. Cement & Concrete Composites,2005,27(2):301—313.

[11] FAROUK A, SHAHIEN M M. Ground Improvement Using Soil-Cement Columns: Experimental Investigation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2013, 52(4): 733—740.

[12] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报,2006,39(3):24—37.

[13] 张洁. 聚丙烯纤维水泥土抗压强度及干湿循环耐久性能试验研究[J]. 中外公路,2018,38(6):235—238.

[14] 崔毅华. 玄武岩连续纤维的基本特性[J]. 纺织学报, 2005,26(5):120—121.

[15] 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):3 446—3 454.

[16] 杨爱武,杜东菊,赵瑞斌,等. 水泥及其外加剂固化天津海积软土的试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(9):1 823—1 827.

[17] 陈维超,杨伟军. 水泥改良砂土无侧限抗压强度试验研究[J]. 中外公路,2019,39(6):188—196.

[18] 王林浩. 煤系偏高岭土复合水泥土工程特性及相关机理研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.

[19] 马芹永,高常辉. 玄武岩纤维和砂对水泥土微观结构及拉压强度的影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2020, 28(1):148—159.

[20] 王文军,朱向荣. 纳米硅粉水泥土的强度特性及固化机理研究[J]. 岩土力学,2004,25(6):922—926.

[21] 陈峰. 玄武岩纤维水泥土抗拉性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版),2016,33(2):188—193.