

水泥-纤维固化风积砂劈裂特性跨尺度研究

张向东,庞 帅,李文亮,李 军,梁立东

(辽宁工程技术大学土木工程学院,辽宁 阜新 123000)

摘 要 目的 研究水泥掺量、纤维掺量和纤维长度对固化风积砂劈裂强度的影响规律,揭示添加剂掺量、纤维赋存形态及长度对水泥-纤维固化风积砂劈裂强度的影响机理。方法 将水泥、玻璃纤维作为添加剂掺入风积砂中,采用劈裂试验测定试样的劈裂强度,采用 CT 断层扫描技术,获取水泥-纤维固化风积砂不同层位平扫切片,并借助 Avizo 图像处理软件对 CT 平扫切片进行内部形态三维重构。结果 在掺量为 0.3% 的 6 mm 纤维及水泥掺量 10% 的组合条件下,试样劈裂强度达到最大值;当纤维掺量控制在 0.3% 时,纤维可均匀地赋存在试件内部,形成交错网状的三维结构;采用 CT 三维重构方法从细观证实了当纤维在试样内部达到理想赋存形态时,纤维对水泥-纤维固化风积砂的劈裂强度起到增益效果。结论 掺入适量的水泥和纤维可改善风积砂的工程力学特性,研究成果可为水泥-纤维固化风积砂路基病害防治提供科学依据。

关键词 固化风积砂;玻璃纤维;劈裂强度;抗拉性能;CT 三维重构

中图分类号 TU528;U231.1⁺5

文献标志码 A

Cross-scale Study on Splitting Characteristics of Cement-fiber Solidified Aeolian Sand

ZHANG Xiangdong, PANG Shuai, LI Wenliang, LI Jun, LIANG Lidong

(School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, China, 123000)

Abstract: The influence of cement content, fiber content and fiber length on the splitting strength of solidified aeolian sand was studied. The influence mechanism of additive content, fiber occurrence form and length on the splitting strength of cement-fiber solidified aeolian sand was revealed. Cement and glass fiber were added into aeolian sand as additives, and the splitting strength of the sample was measured by splitting test. The plain CT slices of different layers of cement-fiber solidified aeolian sand were obtained by CT scanning technology, and the 3D reconstruction of internal morphology of plain CT slices was carried out by Avizo image processing software. Under the combination of 6mm glass fiber content of 0.3% and 10% cement

收稿日期:2021-09-25

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52104132)

作者简介:张向东(1962—),男,教授,博士,主要从事岩土工程方面研究。

content, the splitting strength of the sample reaches the maximum; When the fiber content is controlled at 0.3%, the fiber can be evenly distributed within the specimen, forming a three-dimensional staggered network structure; The CT three-dimensional reconstruction method was used to confirm that when the fiber reaches the ideal occurrence form in the sample, The fiber has a gain effect on the splitting strength of cement-fiber solidified aeolian sand. Appropriate amount of cement and fiber can improve the engineering mechanical properties of aeolian sand; The research results can provide scientific basis for disease prevention and control of cement-fiber solidified aeolian sand subgrade.

Key words: solidified aeolian sand; fiber glass; cleavage strength; tensile property; CT 3D reconstruction

风积砂在辽西地区分布广泛,在路基填筑时被广泛使用,但是天然风积砂结构松散、抗剪强度低,即使水泥加固后被作为路基填料,仍存在抗拉强度低,易产生裂缝等缺点。玻璃纤维具有抗拉强度高、延伸率大等优点,因此,纤维加固技术引起了国内外研究人员的关注^[1-4]。阮波等^[5]发现随着纤维掺量的增大,纤维加筋水泥搅拌土劈裂强度增大。M. E. Orakoglu 等^[6]在冻土循环中的纤维增强土壤的动态行为中发现剪切模量随着剪切应变的增加而减少。S. K. Patel 等^[7]发现纤维加筋效果与土体含水率、干密度密切相关。许巍等^[8]发现玻璃纤维长度为 6 mm 或 12 mm,掺量为 0.3% 时对水泥土的加筋效果最好。佟钰等^[9]发现掺入聚丙烯纤维能大幅提高水泥土的韧性。鹿群等^[10]得出添加纤维能减缓裂缝的开展,增强水泥土力学性能。以上研究方法仅限于玻璃纤维土的宏观力学特性,无法揭示其内部结构变化规律。

近年来,计算机断层扫描技术在土木工程领域成功应用^[11],Zheng Di 等^[12]研究发现玻璃纤维对裂缝的抑制作用优于聚丙烯和聚丙烯酸酯纤维。焦华喆等^[13]借助 CT 扫描对玄武岩纤维喷射混凝土进行可视化分析,揭示了纤维增强微细观机理。目前,对纤维加筋水泥风积砂劈裂性能的研究很少。鉴于此,笔者以风积砂填筑路基为工程背景,借鉴纤维增韧混凝土的研究成果,以辽宁彰武地区的风积砂为研究对象,采用宏观劈裂力

学试验与 CT 断层扫描技术相结合的宏观跨尺度研究方法,揭示添加剂(玻璃纤维、水泥)掺量,纤维长度对水泥-纤维固化风积砂劈裂强度及纤维赋存形态的影响规律。

1 试验方案设计

1.1 试验材料

试验所用的风积砂取自辽宁彰武天然风积砂,粒径主要集中在 0.63 ~ 0.92 mm; 不均匀系数 $C_u = 3.74 < 5$; 曲率系数 $C_c = 0.82 < 1$ ^[14]。按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)的测试方法,测得风积砂最大干密度为 $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、黏聚力为 16.4 kPa、内摩擦角为 31.2° 。固砂所用的水泥为普通硅酸盐水泥 P. O 42.5。纤维由江西某新材料公司生产,密度为 $2.5 \sim 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、直径为 $9.3 \text{ } \mu\text{m}$ 、抗拉强度为 280 ~ 310 MPa、弹性模量为 3 000 ~ 3 600 MPa。

1.2 试验方案

1.2.1 击实试验

试验前将所用风积砂全部烘干,按预先拟定的含水率分别将水泥、风积砂拌合,然后分层装入击实筒中,每铺 1 层(共 5 层)后均用击实锤按相同的落距锤击拌合物 20 次,最后将压实的拌合物填满击实筒。根据式(1)可计算出干密度 ρ_d ,并绘制击实曲线,如图 1 所示。

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \omega} \quad (1)$$

式中: ρ 和 ω 分别为密度和含水率。

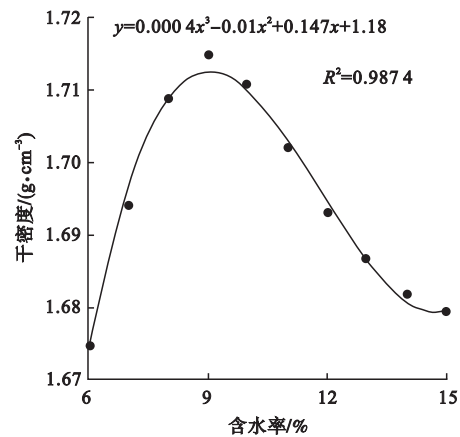


图1 水泥风积砂击实曲线图

Fig.1 The compaction curve diagram of cement aeolian sand

由图1可知,水泥风积砂的最优含水率为9%,最大干密度为1.718 g/cm³。

1.2.2 试样制备

笔者主要研究添加剂(纤维、水泥)掺量及纤维长度对水泥-纤维固化风积砂劈裂强度的影响。在文献[5]基础上,将纤维掺量分别设置为风积砂质量的0.2%、0.3%、0.4%和0.6%,纤维长度分别设置3 mm、4.5 mm和6 mm,水泥掺量的选取在已有研究^[5,16]基础上,选取风积砂质量的6%、8%和10%,含水率为9%。试件制备过程如图2所示。

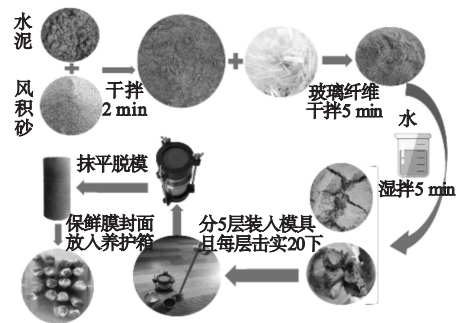


图2 试样制作流程

Fig.2 The preparation process of samples

试验过程中,定性分析时采用正交试验方法,试验方案见表1;进行定量分析时采用控制变量法,试验方案见表2;每组配比制备

3个平行试样,共60个试样。

表1 正交试验方案

Table 1 The orthogonal test scheme			
试样编号	纤维掺量/%	纤维长度/mm	水泥掺量/%
A11	0.3	3	6
A12	0.3	4.5	8
A13	0.3	6	10
A21	0.6	3	8
A22	0.6	4.5	10
A23	0.6	6	6
A31	0.9	3	10
A32	0.9	4.5	6
A33	0.9	6	8

表2 控制变量试验方案

Table 2 The test plan of control variables			
试样编号	水泥掺量/%	纤维掺量/%	纤维长度/mm
B11	10	0.2	3
B12	10	0.3	3
B13	10	0.4	3
B14	10	0.6	3
B21	10	0.2	4.5
B22	10	0.3	4.5
B23	10	0.4	4.5
A22	10	0.6	4.5
B31	10	0.2	6
A13	10	0.3	6
B32	10	0.4	6
B33	10	0.6	6
B41	10	0	0

将制备好的试样用保鲜膜包裹,放入标准养护箱中养护,根据文献[5]得出的养护龄期对玻璃纤维水泥改良土劈裂抗拉强度的影响结论,14 d 以后的劈裂抗拉强度增长速

率骤降,并趋于平缓。因此本试验选取养护龄期为 14 d,温度为20 ℃左右,湿度为 90% 左右,制备好的试样如图 3(a)所示。本试验采用 TAW-2000 型电液伺服岩石三轴仪对试样进行劈裂加载,如图 3(b)所示,加载速率控制在 0.5 mm/min,记录试样破坏时的最大压力值 P 。试验结束后,采用东芝 64 排 128 层 CT 机对试样进行平扫,如图 3(c)所示。扫描过程的参数:电压 120 kV,电流 150 mA,空间分辨率0.50 mm³。

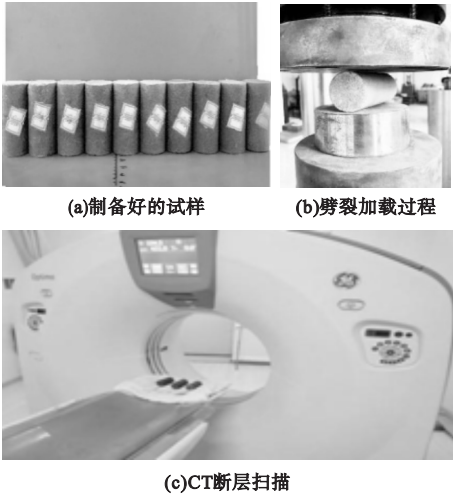


图 3 试样制备及测试过程

Fig. 3 The sample preparation and test process

2 劈裂试验结果与分析

2.1 试验结果

正交试验结果见表 3,极差分析结果见

表 4,得出对劈裂强度影响的主次顺序为:水泥掺量→纤维长度→纤维掺量。

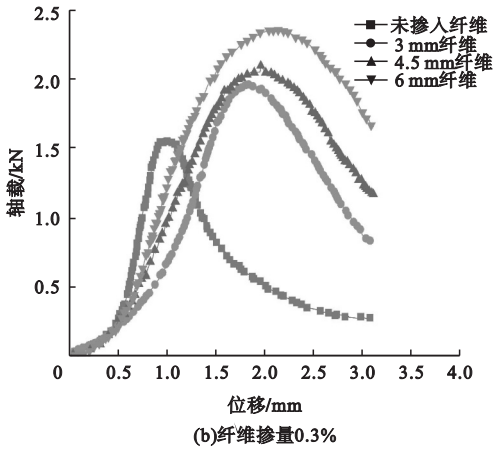
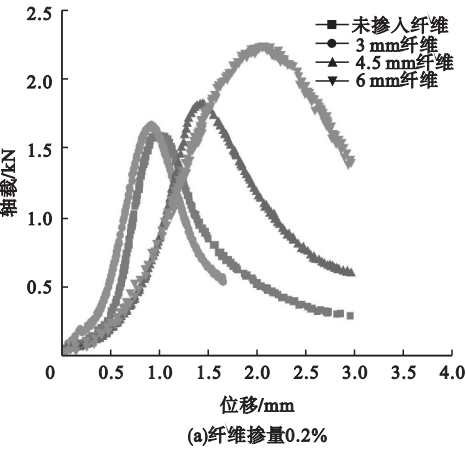
表 3 正交试验结果

Table 3 The results of orthogonal test				
试样编号	纤维掺量/%	纤维长度/mm	水泥掺量/%	劈裂强度/MPa
A11	0.3	3	6	0.15
A12	0.3	4.5	8	0.30
A13	0.3	6	10	0.48
A21	0.6	3	8	0.18
A22	0.6	4.5	10	0.28
A23	0.6	6	6	0.23
A31	0.9	3	10	0.21
A32	0.9	4.5	6	0.16
A33	0.9	6	8	0.19

表 4 极差分析表

Table 4 The range analysis table			
极差	劈裂强度/MPa		
	水泥掺量	纤维长度	纤维掺量
K1	0.18	0.18	0.29
K2	0.21	0.23	0.23
K3	0.32	0.30	0.19
R	0.14	0.12	0.10

在水泥掺量为 10% 的基础上,不同纤维掺量及不同纤维长度的试样劈裂试验过程曲线如图 4 所示。



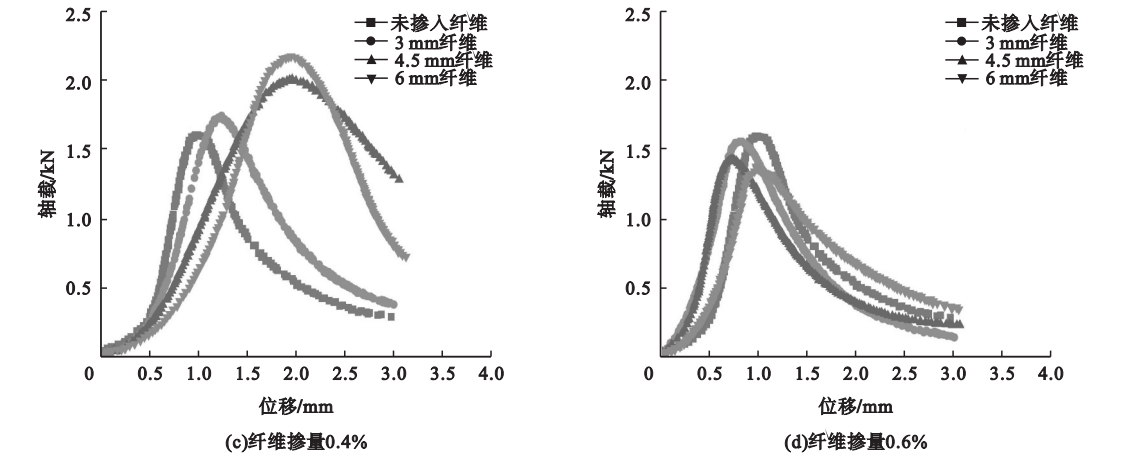


图 4 不同纤维掺量及纤维长度试样的劈裂加载曲线

Fig. 4 The splitting loading curves of specimens with different fiber content and fiber length

将劈裂加载曲线的峰值点所对应的荷载作为试样所能承受的最大劈裂荷载 P_{\max} , 根据弹性力学基本理论, 可按照式(2)的方法确定圆柱试样的劈裂强度 σ_t 。

$$\sigma_t = \frac{2\rho_{\max}}{\pi ld} \quad (2)$$

式中: l 、 d 分别为试样的厚度和直径。

不同纤维掺量和不同纤维长度下水泥风积砂的劈裂强度试验结果见表 5。

表 5 试样平均劈裂强度结果

Table 5 Test results of average splitting strength of specimens

纤维长度/mm	劈裂强度/MPa				
	纤维掺量 0	纤维掺量 0.2%	纤维掺量 0.3%	纤维掺量 0.4%	纤维掺量 0.6%
3	0.32	0.34	0.39	0.35	0.31
4.5	0.32	0.35	0.43	0.37	0.28
6	0.32	0.46	0.48	0.45	0.29

2.2 破坏形态分析

采用 IPP 数字图像处理技术对劈裂加载后的试样裂隙进行提取, 并测得试样截面裂隙面积(见表 6)。整体上, 在施加相同压力时, 纤维掺入前与掺入后试样在劈裂破坏形式上差别不大, 试样破坏后的裂隙形态如图 5 所示。

表 6 试样截面裂隙面积

Table 6 The fracture area of specimen section

试样编号	裂隙面积/mm ²
B41	24.380
B12	21.488
B22	18.835
A13	14.116
A31	15.116
B32	16.769
B33	28.762

图 5(a) 为未掺纤维的试样在劈裂试验中破坏时的形态, 达到破坏的时间较短, 裂缝扩展迅速, 破坏后中间出现一条显著的贯穿裂缝, 表现出明显的脆性破坏特征; 图 5(b) ~ (g) 为掺入纤维的试样在劈裂试验加载后的破坏形态, 当纤维长度为 6 mm 时, 试样截面裂隙面积随着纤维掺量的增加而减小; 当纤维掺量为 0.3% 时, 试样截面裂隙面积随着纤维长度减小而增大, 掺入 0.3% 的 6 mm 纤维时, 裂隙面积达到最小。图 5(h) 给出了破坏后掀开试样的内部形态, 可明显地看出, 破坏面上均匀地分布着纤维。

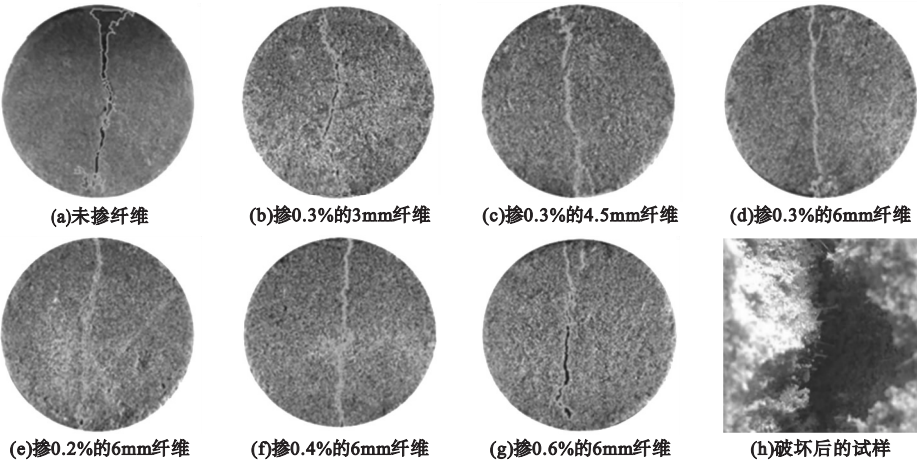


图 5 试样破坏形态

Fig. 5 The failure mode of specimens

2.3 劈裂强度影响因素分析

试样的劈裂强度平均值、标准差与纤维掺量、长度的关系如图 6 所示。

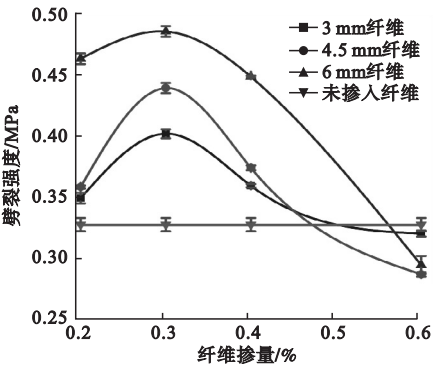


图 6 劈裂强度随纤维变化情况

Fig. 6 The curves of splitting strength changing with fiber

由图 6 可看出,当纤维掺量控制在 0.3% 以内时,试样的劈裂强度随着纤维掺量增加而不断升高。未掺纤维试样的平均劈裂强度为 0.32 MPa,掺入 0.3% 的 6 mm 纤维后,试样的平均为 0.48 MPa,提升幅度约为 50%。这是因为在水泥固化风积砂中掺入一定量的纤维后,试样内部的水泥发生水化反应产生的水化物将风积砂颗粒与纤维胶结在一起,形成统一的整体。对劈裂加载后的试样采用超眼显微镜进行拍照,然后采用 IPP 进行处理,如图 7 所示。

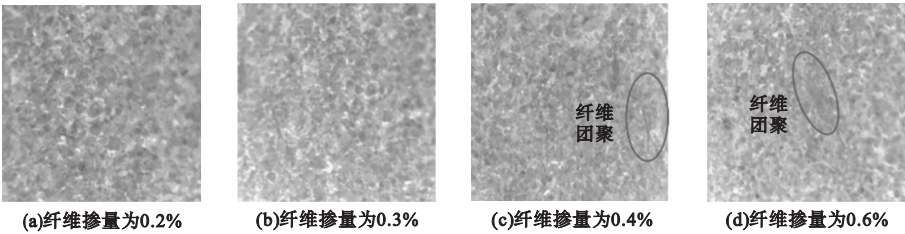


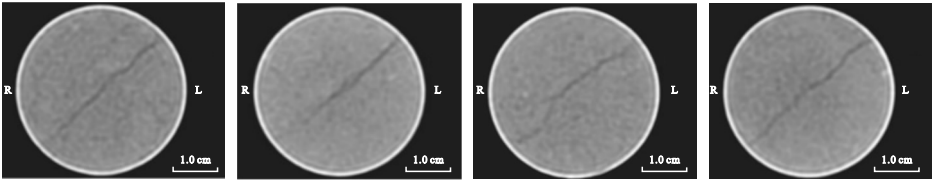
图 7 不同掺量的 6mm 纤维赋存形态

Fig. 7 The occurrence forms of 6mm fiber with different content

当纤维掺入量控制合理时,纤维可在试样中均匀分布,形成一种相互交织的空间网状结构(见图 7(a)、(b))。由图 6 可看出,当纤维掺量大于 0.3% 时,随着纤维掺量增加,试样的劈裂强度逐渐降低,这是由于纤维

掺量过量时,纤维在试样内部出现团聚现象(见图 7(c)~(d)),团聚纤维不能被胶结在风积砂内部,无法完全发挥其抗拉作用,反而削弱风积砂颗粒与纤维之间的握裹力,导致试样整体劈裂强度降低。当纤维掺量较少

(0.2%、0.3% 和 0.4%) 时,劈裂强度随着纤维长度增加而提高;当纤维掺量较多时(0.6%),劈裂强度随着纤维长度增加而降低。在纤维掺量为 0.3%,长度为 6 mm 的条件下,劈裂强度达到了最大值(0.48 MPa),相对未掺入纤维的试样砂劈裂强度(0.32 MPa)提高了约 50%,而纤维长度为 3 mm 和 4.5 mm 的试样相对于未掺纤维的试样劈裂强度分别提高了约 23.15% 和 34.81%。



(a)掺0.3%的6mm纤维IM1 (b)掺0.3%的6mm纤维IM6 (c)掺0.3%的6mm纤维IM11 (d)掺0.3%的6mm纤维IM16
图 8 不同层位原始 CT 断层扫描切片

Fig. 8 The original CT slices of different layer

分水岭变换是一种基于拓扑理论的数学形态学的图像处理算法,它把图像视为大地测量学中的地形地貌^[15],图像中的每一个点像素的灰度值表示该点的海拔高度,每个局部最小值及其影响区域称为集水盆地,集水盆地的边界形成分水岭。在真实图像中,鉴于噪声点或者其他干扰因素的存在,使用分水岭算法往往存在过度分割的现象,笔者基于距离变换算法^[16]获得的图像来制作分水岭的掩膜标记^[17],具体表现为将形态学处理后的图像与距离图像二值化结果做差值运算,然后遍历差值后的图像像素,找出非零像素,并在连通区域标记图对应位置做上标记,即得到分水岭掩膜标记。通常距离图像都是在某一个区域定义了一些灰度层级,在这个区域的水淹没过程中,水平面都是从定义的

3 纤维空间赋存形态分析

3.1 CT 图像三维重构与纤维提取

原始 CT 扫描图像只能从平面的视角反映纤维的分布情况,将螺旋 CT 扫描后的切片(见图 8)导入 Avizo 图像处理软件中,采用数字图像距离变换算法与分水岭算法结合处理,将二维切片进行叠加建立试样三维模型,研究纤维三维形态以及空间分布特征。

高度开始的,这样可以避免一些很小的噪声极值区域的分割,从而很好地抑制了分水岭算法的过度分割现象。

试样三维重构及纤维提取过程如图 9 所示,按此方法确定的不同纤维掺量条件下的纤维空间分布规律如图 10 所示。

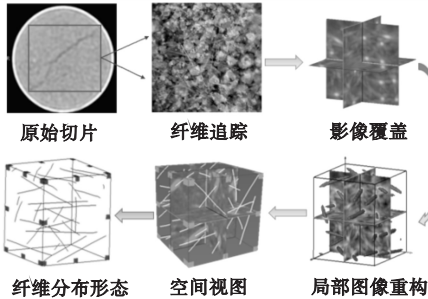


图 9 纤维提取过程

Fig. 9 The fiber extraction process

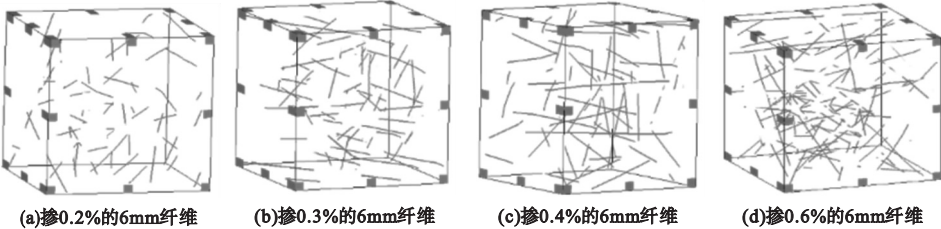


图 10 试样中纤维空间分布规律

Fig. 10 The spatial distribution law of fiber

3.2 纤维分布情况

由图 10 可知,当纤维掺量控制合理时(掺量小于 0.3%),纤维可在试样中分布比较均匀,纤维之间存在较多的交叉点,在试样内部交叉点处受到外力作用产生相对移动时,相互交叉的其他纤维可以在一定程度延缓试样内部微裂缝的萌生与发展;当纤维掺量超过最优掺量 0.3% 时,纤维在试样中分布的均匀度逐渐下降,发生团聚,间接降低了纤维与风积砂颗粒的有效接触,导致试件劈裂特性进一步弱化。根据文献[18]的有关纤维在砂浆内部分布规律的研究成果,可利用式(3)计算出纤维的平均间距 S 。

$$S=13.8d_f\frac{1}{\sqrt{P}}.$$

(3)

式中: d_f 为纤维的直径; P 为纤维体积率,即试样中纤维的体积与试样的体积之比。

纤维平均间距与纤维掺量的关系如图 11 所示。当纤维掺量为 0.2% 时,纤维在试样内部随机分布,纤维的平均间距约为 0.91 mm;当纤维掺量为 0.3% 时,试样内部纤维分布较为均匀,纤维间距适中,约为 0.77 mm;当纤维掺量为 0.4% 和 0.6% 时,纤维开始出现团聚的现象。由此可知,试样中均匀分布的纤维能够形成良好的纤维网状骨架结构,试样内部的水泥水化产物使风积砂颗粒与纤维之间形成黏聚力,利用纤维抗

拉性能优越的特点,使水泥固化风积砂与纤维共同承受劈裂荷载,抵抗裂隙的萌生与发展,提高整体抗劈裂强度。

3.3 纤维加筋作用模型分析

纤维作用机理如图 12 所示。水泥水化产物在纤维与风积砂颗粒间形成有效的黏结作用,在两者的接触界面产生黏聚力,掺入适量的纤维可在试样内部分布均匀,形成稳定的三维交织的网状结构。在加载初期,微裂隙在试样内部出现时,纤维桥接于裂缝两侧,抵抗裂隙在横向上扩展,可有效提升试样的断裂韧性。随着试样变形的发展,纤维从颗粒间逐渐被拉出或被拉断,此时试样发生整体失稳破坏。当掺入过量的纤维时,试样内部出现纤维交错团聚现象,降低了试样密实度,纤维在试样中并未有效发挥增韧作用,反而削减了试样的劈裂强度。由此可知,适量的纤维才能有效提高水泥风积砂的韧性和劈裂强度。

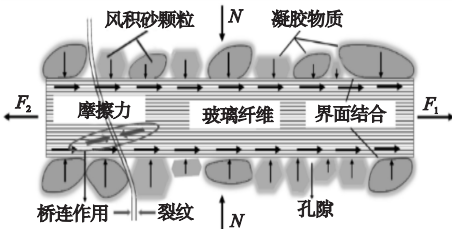


图 12 水泥 - 纤维固化风积砂机理

Fig. 12 The mechanism of cement-fiber curing aeolian sand

4 结 论

- (1)掺入适量纤维可以有效地提高水泥风积砂的劈裂强度,掺量为 0.3%,掺入长度 6 mm 纤维时的效果最佳。
- (2)掺入纤维可有效抑制裂隙在横向扩展,进而增强试样的断裂韧性,且随着玻维掺量增加,其劈裂强度先增强后减弱。
- (3)采用 CT 三维重构方法建立的纤维三维形态比较真实的反映出纤维在水泥风积砂内部的分布规律,从细观证实了纤维掺量在 0.3% 时,纤维在试样内部赋存形态较为理想,对水泥 - 纤维固化风积砂的劈裂强度

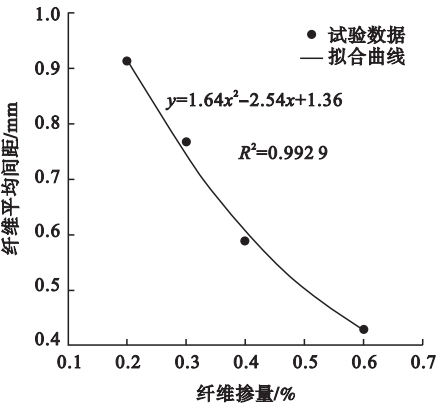


图 11 不同掺量下 6 mm 纤维平均间距

Fig. 11 The average spacing of 6 mm fibers with different contents

起到增益效果。

参考文献

- [1] 宋金岩,孙红,葛修润,等.玻璃纤维加筋土强度特征试验研究[J].中外公路,2012,32(5):261-264.
(SONG Jinyan, SUN Hong, GE Xiurun, et al. Study on strength characteristics of glass fiber reinforced soil [J]. Journal of China & foreign highway, 2012, 32(5): 261-264.)
- [2] BENESSALAH I, ARAB A, VILLARD P, et al. Laboratory study on shear strength behaviour of reinforced sandy soil; effect of glass-fibre content and other parameters [J]. Arabian journal for science and engineering, 2016, 41(4): 1343-1353.
- [3] KRAVCHENKO E, LIU J, NIU W, et al. Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles [J]. Cold regions science and technology, 2018, 153: 18-24.
- [4] 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.
(CHEN Feng. Experimental study on tensile properties of basalt fiber cement soil [J]. Journal of Shenzhen university (science and engineering), 2016, 33(2): 188-193.)
- [5] 阮波,阮晨希,邓林飞,等.聚丙烯纤维加筋水泥搅拌土拉压性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):95-103.
(RUAN Bo, RUAN Chenxi, DENG Linfei, et al. Experimental study on tensile and compressive properties of polypropylene fiber reinforced cement mixed soil [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(1): 95-103.)
- [6] ORAKOGLU M E, LIU J, NIU F, et al. Dynamic behavior of fiber-reinforced soil under freeze-thaw cycles [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2017, 101: 269-284.
- [7] PATEL S K, SINGH B. Strength and deformation behavior of fiber-reinforced cohesive soil under varying moisture and compaction states [J]. Geotechnical and geological engineering, 2017, 35(4): 1767-1781.
- [8] 许巍,刘军忠,张俊.玻璃纤维加筋水泥土耐久性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(1):104-111.
(XU Wei, LIU Junzhong, ZHANG Jun. Experimental study on durability of glass fiber reinforced cement soil [J]. Journal of railway science and engineering, 2021, 18(1): 104-111.)
- [9] 佟钰,刘阳,罗超,等.聚丙烯纤维改性水泥土的力学性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):507-513.
(TONG Yu, LIU Yang, LUO Chao, et al. Study on mechanical properties of polypropylene fiber modified cement soil [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 507-513.)
- [10] 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(增刊2):421-426.
(LU Qun, GUO Shaolong, WANG Minmin, et al. Experimental study on mechanical properties of fiber cement soil [J]. Rock and soil mechanics, 2016, 37(S2): 421-426.)
- [11] 毛灵涛,刘永亮,薛茹.混凝土三维细观数值模拟与CT试验研究[J].混凝土,2015(11):7-11.
(MAO Lingtao, LIU Yongliang, XUE Ru. Three-dimensional numerical simulation and CT test of concrete [J]. Concrete, 2015(11): 7-11.)
- [12] ZHENG Di, SONG Weidong, FU Jianxin, et al. Research on mechanical characteristics, fractal dimension and internal structure of fiber reinforced concrete under uniaxial compression [J]. Construction and building materials, 2020, 258: 120351. 1-120351. 11.
- [13] 焦华喆,吴亚闯,陈峰宾,等.基于可视化分析的玄武岩纤维喷射混凝土微观结构研究[J].土木工程学报,2020,53(增刊1):371-377.
(JIAO Huazhe, WU Yachuang, CHEN Fengbin, et al. Research on microstructure of basalt fiber shotcrete based on visual analysis [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(S1): 371-377.)
- [14] 张向东,李军,孙琦,等.水泥改良风积砂负温动力性能与流变特征研究[J].岩土力学,2018,39(12):4395-4403.
(ZHANG Xiangdong, LI Jun, SUN Qi, et al. Study on negative temperature dynamic performance and rheological characteristics of cement-improved aeolian sand [J]. Geotechnical mechanics, 2018, 39(12): 4395-4403.)
- [15] 李云红,张秋铭,周小计,等.基于形态学及区域合并的分水岭图像分割算法[J].计算机工程与应用,2020,56(2):190-195.
(LI Yunhong, ZHANG Qiuming, ZHOU Xiaojie, et al. Watershed image segmentation algorithm based on morphology and region merging [J]. Computer engineering and applications, 2020, 56(2): 190-195.)
- [16] 韩巧玲,赵玥,赵燕东,等.基于细化法的土壤孔隙骨架提取算法研究[J].农业机械学报,2019,50(9):229-234.
(HAN Qiaoling, ZHAO Yue, ZHAO Yandong, et al. Research on soil pore skeleton extraction algorithm based on refinement method [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(9): 229-234.)
- [17] 张文飞,韩建海,郭冰菁,等.改进的分水岭算法在粘连图像分割中的应用[J].计算机应用与软件,2021,38(6):243-248.
(ZHANG Wenfei, HAN Jianhai, GUO Bingjing, et al. Application of improved watershed algorithm in adhesion image segmentation [J]. Computer application and software, 2021, 38(6): 243-248.)
- [18] EIK M, PUTTONEN J, HERRMANN H. An orthotropic material model for steel fibre reinforced concrete based on the orientation distribution of fibres [J]. Composite structures, 2015, 121: 324-336.
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)