

聚丙烯纤维改性水泥土的力学性能研究

佟钰¹,刘阳¹,罗超²,丁向群¹

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁沈阳110168;2. 中铁九局集团工程检测试验有限公司,辽宁沈阳110025)

摘要 目的 研究聚丙烯纤维对水泥土的增强增韧作用,对比聚丙烯纤维掺量对水泥净浆及水泥土力学性能的影响规律和作用机制,提高水泥土的力学性能. 方法 在活性矿粉改性水泥土的优化配比基础上,将适量聚丙烯纤维掺入至水泥净浆和水泥土,测定其立方体抗压强度及圆柱体劈裂抗拉强度,同时利用扫描电子显微镜观察试件的断面形貌. 结果 随纤维体积掺量由0逐步提高至2%,水泥净浆的抗压强度和劈裂抗拉强度均明显增大,在2%纤维掺量情况下,7 d、28 d抗压强度分别提高了62.69%和50.28%,抗拉强度提高122.28%和57.30%,7 d和28 d拉压比也分别提高至0.13和0.10. 聚丙烯纤维在水泥土中表现出更为显著的增强作用,0.5%体积掺量下的28 d抗压强度提高了60.23%,但纤维掺量进一步提高反而导致强度的下降;水泥土的抗压强度随胶凝材料掺量的提高而不断增大. 结论 聚丙烯纤维的引入可明显提高水泥基材料如水泥土的力学性能,尤其是早期的抗拉强度和拉压比即断裂韧性,但以水泥为基本功能组分的胶凝材料仍是水泥土力学性能的基本保证.

关键词 水泥土;聚丙烯纤维;超细矿粉;强度;拉压比

中图分类号 TU521 文献标志码 A

Mechanical Properties of Cement Soil Enhanced by Polypropylene Fiber

TONG Yu¹, LIU Yang¹, LUO Chao², DING Xiangqun¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Railway Express No. 9 Bureau Testing Co. Ltd., Shenyang, China, 110025)

Abstract: In order to explore the strengthening and toughening effect of polypropylene fiber, to compare the influence rule and serving mechanism of polypropylene fibers upon the mechanical properties of cement paste and cementing soil, and to improve the mechanical properties of cement soil, polypropylene fibers was introduced into the cement soil. Based on the cementing soil optimized with ultrafine slag powder, the compressive strength on cubic pieces and splitting tensile

收稿日期:2020-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51678374);辽宁省自然科学基金项目(20180550092)

作者简介:佟钰(1972—),男,副教授,博士,主要从事新型建筑材料等方面研究.

strength on cylinder pieces were investigated simultaneously, as well as the microscopic characterization of the fracture surface investigated on scanning electron microscope (SEM). The contribution of polypropylene fiber content to the mechanical strength and the strength ratio of tension-to-compression of cement paste at the age of 7 d and 28 d was investigated and discussed in detail, while the compressive strength of cement soil was analyzed with the respects of fiber content and the amount of cementing materials. It was found that with the increasing of fiber content from 0 to 2%, the compressive and splitting tensile strength of the cement paste gradually increased, giving rise of an improvement of 62.69% to the compressive strength at 7 d and 50.28% at 28d, while the 7 d and 28 d tensile strength increased by a rate of 122.28% and 57.30%, respectively. In the meanwhile, the strength ratio of tension-to-compression also enhanced to 0.13 and 0.10, respectively at 7 d and 28 d. In the case cementing soil, the involvement of polypropylene fiber aroused a much more remarkable enhancement to the compressive strength of cementing soil, i.e. the 28d compressive strength increased by 60.23% at the fiber content of 0.5%, but further increasing of fiber content resulted in a relative low compressive strength. It is also identified that the compressive strength of cementing soil increased linearly with the increasing content of cementitious materials. Accordingly, the introduction of polypropylene fibers must make an evident contribution to the mechanical properties of cement-based composites including cementing soil, especially the tensile strength and the strength ratio of tension-to-compression at early age, as well as the fractural toughness, by the existence of cementitious matrix being mainly composed of Portland cement must be the most fundamental to realize a reasonable mechanical strength for cementing soil.

Key words: cementing soil; polypropylene fibers; ultrafine slag powder; strength; strength ratio of tension-to-compression

水泥石是水泥、土以及其他组分按适当比例混合、拌制并经硬化而成的材料,具有硬度高、水稳定性好、压缩性低、渗透性小、施工方便等优点,广泛应用于地基处理^[1]、基坑围护^[2]、边坡加固^[3]、渠道防渗^[4]等工程领域。但水泥石本质上仍属于脆性材料,其抗拉强度和抗折强度较低,易开裂,限制了水泥石的进一步应用推广。目前研究与应用中,纤维材料由于其较高的抗拉强度和耐久性,适合于改善水泥基建筑材料的工程性质,可有效提高试样的韧性和拉伸性能^[5-7]。考虑到水泥石强度要求不高,可选用弹性好、强度适中、耐腐蚀、

成本低廉的聚丙烯纤维实现水泥石的增强增韧^[8-10]。采用活性矿粉部分取代普通硅酸盐水泥的方法,在水泥土力学性能改善方面取得了较好的技术经济效果^[11]。在此基础上,笔者通过聚丙烯纤维的引入来进一步改善水泥石的力学性能,为水泥石力学性能的研制和施工提供试验支持和理论指导。

1 试验

1.1 原材料

(1)粉质黏土:取自沈阳市某施工现场,其物理参数见表1。

表1 粉质黏土的物理参数

Table 1 Physical properties of silty clay

| 密度/(g·cm ⁻³) | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | 含水率/% | 土的分类 |
|--------------------------|------|------|------|-------|---------|
| 1.90 | 34.5 | 17.9 | 16.6 | 20.6 | 低液限粉质黏土 |

(2)水泥:冀东水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥(P. O 42.5)。

(3)水:城市自来水。

(4)氢氧化钙:天津市致远化学试剂有限公司生产,分析纯。

(5)矿粉:比表面积 520 m²/kg,其主要

化学成分见表2。

表2 超细矿粉的化学组成

Table 2 Chemical composition of ultrafine slag powder

%

| $w(\text{SiO}_2)$ | $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ | $w(\text{CaO})$ | $w(\text{MgO})$ | $w(\text{SO}_3)$ | $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ | $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ | $w(\text{TiO}_2)$ |
|-------------------|----------------------------|-----------------|-----------------|------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------|
| 31.19 | 13.83 | 44.12 | 4.03 | 2.78 | 1.47 | 0.10 | 0.76 |

(6) 聚丙烯纤维: 吸水性小、电/热绝缘性好、无毒环保、易于分散, 主要物理力学性能见表3。

表3 聚丙烯纤维物理力学指标

Table 3 Physical and mechanical properties of polypropylene fiber

| 类型 | 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 单丝直径/ mm | 长度/mm | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/MPa | 熔点/ $^{\circ}\text{C}$ | 燃点/ $^{\circ}\text{C}$ | 耐酸碱性 | 分散性 |
|------|--|-------------|-------|------------|---------------|------------------------|------------------------|------|-----|
| 束状单丝 | 0.91 | 0.045 | 9 | ≥ 350 | $\geq 3\ 500$ | 165 ~ 175 | 590 | 极高 | 极好 |

1.2 试验方法

(1) 水泥净浆试样. 粉料配比水泥质量分数为65%、矿粉质量分数30%、氢氧化钙质量分数5%; 水胶比0.37. 纤维的引入采用外掺法, 掺入量为粉料总体积的0%、0.5%、1.0%、2%。

(2) 水泥土试样. 保持聚丙烯纤维掺量为胶凝材料总体积的1.0%不变, 设定胶凝材料掺量为水泥土总质量的0%、10%、15%、20%; 保持胶凝材料掺量为水泥土总质量的15%, 设定纤维掺量为水泥土总体积的0%、0.5%、1%进行试验。

1.3 试样制备

(1) 水泥净浆试样. 将原材料按照配合比称量放入容器, 按体积比加入聚丙烯纤维, 然后分批加水搅拌, 最后将搅拌好的水泥净浆放入模具中振捣密实. 抗压强度试件为立方体, 长宽高均为20 mm; 劈裂抗拉强度试件为圆柱体, 直径、高度均为20 mm. 每组试验做3个样品以减少误差. 成型后试件在湿度95%、温度(20±2) $^{\circ}\text{C}$ 条件下标准养护, 龄期为7 d、28 d。

(2) 水泥土试样. 将土样风干碾碎后过5 mm筛, 按照试验所需称量并分份依次放入容器. 试验时按配合比称量水泥、矿粉、氢氧化钙与混合好的纤维, 加水搅拌均匀. 成型

时, 先填满模具的1/3, 然后以1 kN的压力进行压实, 再填入模具的2/3, 压实成型. 试样为圆柱体, 直径、高度均为50 mm. 每组试验做3个样品以减少误差. 成型后样品置于湿度95%、温度(20±2) $^{\circ}\text{C}$ 条件下标准养护。

1.4 力学强度测定

(1) 抗压强度. 从养护室取出的试件置于压力试验机上, 记录试件被压坏时的极限荷载, 将其换算成为抗压强度, 结果取3个试样的平均值。

(2) 劈裂抗拉强度. 养护后试件平放在压力机上, 沿圆柱直径方向施加荷载, 记录压坏试件时的极限荷载值将其换算为劈裂抗拉强度。

1.5 微观分析

利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, Hitachi S-4800)观察试样的断面形貌。

2 试验结果与分析

为解析聚丙烯纤维对活性矿粉水泥土的增强增韧效果及其作用机制, 笔者将聚丙烯纤维分别加入至水泥净浆试件和水泥土中, 对比考察聚丙烯纤维对水泥净浆和水泥土的增强增韧效果。

2.1 聚丙烯纤维改性水泥净浆的力学性能

图1为聚丙烯纤维掺量对水泥净浆抗压

强度的影响规律曲线.可以看出,随纤维体积掺量的提高,水泥净浆的28 d抗压强度快速增长并在纤维掺量1%时趋近最大值42.53 MPa,而后纤维掺量的继续提高反而导致试块强度出现稍许下降,但强度增幅仍维持在50.28%,这与大掺量情况下纤维分散均匀性下降有关^[8,10].比较而言,水泥净浆在7d龄期的抗压强度则随纤维掺量的提高表现为近乎线性上升的趋势,在2%纤维掺量时的强度增幅达到62.69%.水泥水化早期的水化产物相对较少,而且多是以结晶度较差的C-S-H凝胶形式存在,因此在受力时会产生较大的变形,更有利于纤维材料增强作用的发挥.

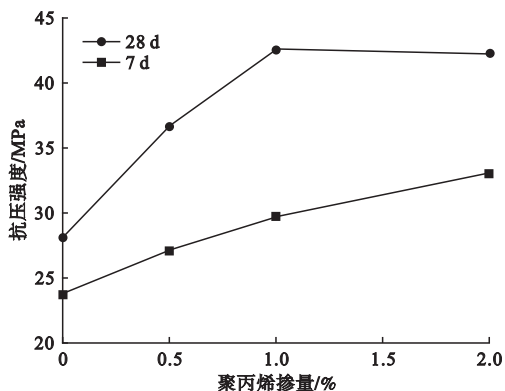


图1 聚丙烯纤维掺量对水泥净浆抗压强度的影响

Fig.1 Effect of polypropylene content on the compressive strength of cement paste

类似现象也出现在纤维掺量对水泥净浆抗拉强度的影响.图2为聚丙烯纤维掺量与水泥净浆劈裂抗拉强度之间的关系曲线,可以看出,随纤维掺量的提高,水泥净浆的7 d劈裂抗拉强度显著增大,在2.0%掺量下已经接近净浆试块的28 d龄期劈裂抗拉强度,显示出聚丙烯纤维对水泥净浆抗拉强度特别是早期抗拉强度的显著改善作用.数据对比还可以发现,同等纤维引入情况下,如2%纤维掺量,水泥净浆的7 d、28 d抗拉强度分别提高了122.28%和57.30%,明显高于相同龄期抗压强度的增幅;类似研究结果也出现在王来贵^[12]、黄伟^[13]等的研究中.

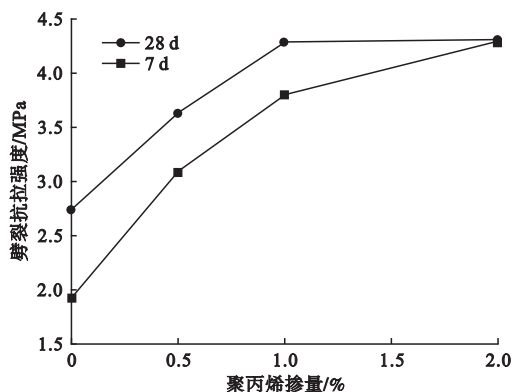


图2 聚丙烯掺量对水泥净浆劈裂抗拉强度的影响

Fig.2 Effect of polypropylene content on the splitting tensile strength of cement paste

拉压强度比,简称拉压比,可以作为评价材料断裂韧性的间接指标之一.图3为聚丙烯纤维掺量对水泥净浆拉压比的影响规律曲线,可以看到,聚丙烯纤维的引入使得水泥净浆试块的28 d拉压比有一定提高,由0.09增长至0.10,且不受纤维掺量的显著影响;7 d拉压比则表现出对纤维存在更为显著的敏感性,在0~1.0%体积掺量内,7 d拉压比随纤维掺量的提高而显著增大至0.13左右,而后趋于平稳.从试验结果可以看出,聚丙烯纤维的引入明显改善了水泥净浆的断裂韧性,特别是早期韧性.

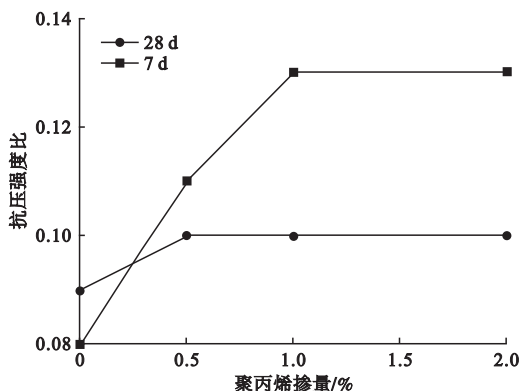


图3 聚丙烯掺量对水泥净浆拉压比的影响

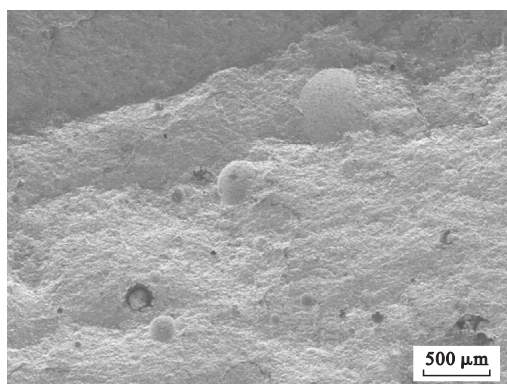
Fig.3 Effect of polypropylene content on the ratio of tension-to-compression of cement paste

作为一种典型的脆性材料,水泥混凝土在受力破坏时通常表现为脆性断裂的形式.

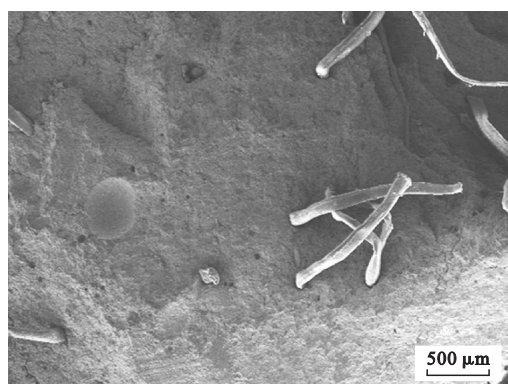
但引入适量聚丙烯纤维后,水泥净浆试块受力破坏过程首先是在试块表面出现些许的剥落现象,而后逐渐出现裂纹,裂纹缓慢扩展并最终贯穿整个试件,导致试块的完全破坏,但破坏后的水泥试块仍基本保持原来的形状,展现出明显的“裂而不断”的韧性特征.更为细致的证据则出现在水泥净浆的微观结构上.

图4为试块断裂表面的扫描电子显微镜SEM图像,可以看出,纯水泥净浆的断裂表面光滑,呈贝壳状.从图4(a)可以看出,属典型的脆性破坏.适量引入的聚丙烯纤维则均匀分散于胶凝材料基体中,随着水化过程的

进行,水泥石与聚丙烯纤维之间产生一定的附着力;水泥石强度越高,附着力也越大.在外力作用下发生形变时,纤维帮助承担拉伸应力的作用,直至纤维被拔出,在水泥石表面上留下孔洞或纤维头部,试样断面的粗糙度也有一定提高.从图4(b)可以看出,当裂缝出现后,部分纤维承担了破坏部位的全部荷载,通过内聚力将应力传递到水泥石中,使试块保持一定的残余强度,从而保持基本的试块外形.因此,适量聚丙烯纤维可以延缓水泥净浆微裂纹的扩展,提高水泥的强度和抗裂性.



(a) 纤维掺量0



(b) 纤维掺量1%

图4 水泥净浆断裂表面的SEM微观结构

Fig. 4 SEM morphologies of the cement paste with and without the involvement of polypropylene fibers

2.2 聚丙烯纤维改性水泥土的力学性能

水泥土是由土、水泥、水组成的三相体系.其中水泥掺量一般不超过总量的20%,但对水泥土的力学强度、耐久性 etc 起到决定性作用.为改善水泥土的强度和耐水性,前期工作中采用活性矿粉部分取代水泥,取得了较好的经济技术效果^[11].笔者利用聚丙烯纤维的引入对活性矿粉水泥土的力学性能进行持续改善.

图5为聚丙烯纤维掺量对水泥土抗压强度的影响规律曲线.从图5可以看出,加入聚丙烯纤维后,水泥土抗压强度有明显的提高.在纤维掺量增加到0.5%时,水泥土的抗压强度达到最大值,而后强度反而出现明显下降,即水泥土中聚丙烯纤维的最佳掺量为

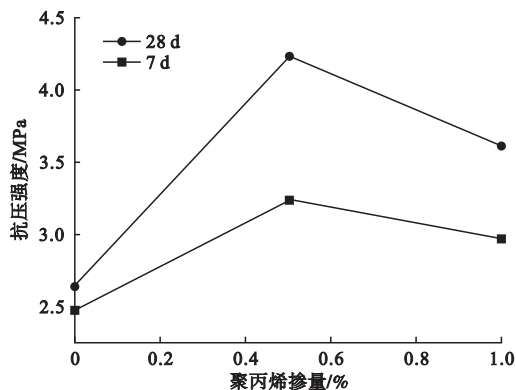


图5 聚丙烯掺量对水泥土抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of polypropylene content on the compressive strength of cementing soil
0.5%.分析认为,聚丙烯纤维的强度和弹性模量适中,受力变形较大,因此对水泥、混凝土类脆性材料的强度提升有限.图1中聚丙

烯纤维的引入仅使水泥净浆28 d抗压强度提升了62.30%。对于水泥土来说,其土质部分所占体积比达70%甚至更高,因此受力变形大、强度低,更适合聚丙烯纤维增强增韧作用的发挥。纤维作用可使水泥土28 d抗压强度提高60%以上,7 d抗压强度也有明显提升,但纤维掺量不宜过高,否则反而导致水泥土力学强度的降低。

笔者研究了胶凝材料总量(水泥+矿粉+氢氧化钙)对纤维改性水泥土力学强度的影响规律。图6为胶凝材料掺量与水泥土抗压强度的关系曲线,可以看出,在标准养护下,随着胶凝材料掺量的提高,水泥土的抗压强度近乎呈线性增长。当胶凝材料掺量为20%时,28 d的水泥土抗压强度可达6.28 MPa,而无胶凝材料仅使用纤维的水泥土试块强度仅为0.19 MPa。对于聚丙烯纤维改性的活性矿粉水泥土来说,胶凝材料的存在仍是保证水泥土力学强度的基本要素,承担着握裹纤维、传递应力的重要作用^[16-19]。

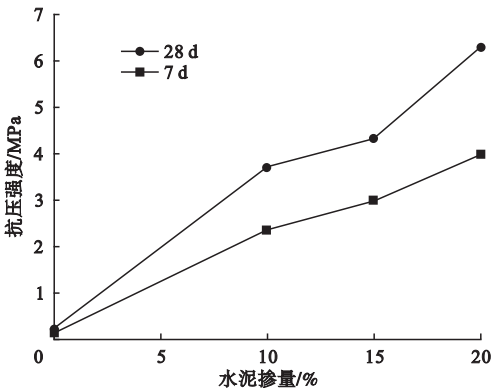


图6 胶凝材料掺量对水泥土抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of cement contenting on compressive strength of cementing soil

在胶凝材料和纤维的共同作用下,水泥土试块在压缩外力作用下的典型破坏形式为塑形压缩变形,直至水泥土侧面出现竖向裂缝;在裂缝处有纤维断裂或拉出的情况,而水泥土本身基本保持圆柱状。

3 结论

(1) 适量聚丙烯纤维的引入可有效提高

水泥净浆的力学强度,特别是早期劈裂抗拉强度增幅更为显著。聚丙烯纤维体积掺量为1%时,水泥净浆的综合力学强度最好。

(2) 聚丙烯纤维掺量的提高使得水泥净浆的7 d拉压比明显增大,28 d拉压比也有一定改善,表明聚丙烯纤维可大幅改善水泥基材料的断裂韧性和抗裂性。

(3) 在一定掺量下,掺入聚丙烯纤维的活性矿粉水泥土抗压强度先增大后减小,在聚丙烯纤维掺量为0.5%时,水泥土的7 d和28 d抗压强度达到最大值。

(4) 以水泥为主的胶凝材料对聚丙烯纤维起到固结作用,具体表现为聚丙烯纤维改性水泥土的力学强度随胶凝材料掺量的提高而显著增大。

参考文献

- [1] 周世宗,梁仕华,戴君. 矿渣和粉煤灰固化南沙软土试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 76-79.
(ZHOU Shizong, LIANG Shihua, DAI Jun. Experimental research of Nansha soft soil reinforced by slag and fly ash[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2015, 13(4): 76-79.)
- [2] 陶铸,范钦建,宋德鑫. 旋喷加筋水泥土桩锚支护技术在深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(3): 158-162.
(TAO Zhu, FAN Qinjian, SONG Dexin. Application of jet grouting reinforced cement-soil pile-anchor support technology in deep foundation pit engineering[J]. Geotechnical engineering technique, 2015, 29(3): 158-162.)
- [3] 朱艳薇. 水泥土搅拌桩在河道边坡稳定中的应用[J]. 工程建设, 2017, 49(5): 49-51.
(ZHU Yanwei. Application of deepmixing cement-soil piles in stability of the river[J]. Engineering construction, 2017, 49(5): 49-51.)
- [4] 陈富,李海涛. 黄骅港地区深层水泥土搅拌桩施工工艺研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 150-160.
(CHEN Fu, LI Haitao. Construction technology of cement deep mixing piles in Huanghua port region[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(S1): 150-160.)
- [5] 叶之琳,郭宁,孟剑桥,等. 纤维水泥土力学性能研究[J]. 施工技术, 2016(增刊1): 76-78.
(YE Zhilin, GUO Ning, MENG Jianqiao, et al. Research of mechanical properties of fiber cement soil[J]. Construction technology, 2016(S1): 76-78.)

- [6] DIVYA P V, VISWANADHAM B V S, GOURC J P. Evaluation of tensile strength-strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests [J]. Journal of materials in civil engineering, 2014, 26(1): 14-23.
- [7] TAESOOON P, ANN T S. Enhanced performance of reinforced soilwalls by the inclusion of short fiber[J]. Geotextiles and geomembranes, 2005, 23(4): 348-361.
- [8] 胡建林, 裴国陆, 王楠. 聚丙烯纤维对水泥土抗拉性能探究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017, 35(1): 58-62.
(HU Jianlin, PEI Guolu, WANG Nan. Study on tensile properties of polypropylene fiber on cement soil [J]. Journal of Hebei institute of architectural engineering, 2017, 35(1): 58-62.)
- [9] 刘卫涛, 胡建林, 王盼盼. 聚丙烯纤维对水泥土力学性能的影响效应探究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2018, 36(2): 25-31.
(LIU Weitao, HU Jianlin, WANG Panpan. Effect of polypropylene fiber on mechanical properties of cement soil [J]. Journal of Hebei institute of architectural engineering, 2018, 36(2): 25-31.)
- [10] 张雷, 张振, 曹吉庆, 等. 聚丙烯纤维对水泥土力学性能的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(增刊1): 1129-1131.
(ZHANG Lei, ZHANG Zhen, CAO Jiqing, et al. Effects of polypropylene fiber on the compressive strength and elastic modules of soil-cement mixtures [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2005, 1(S1): 1129-1131.)
- [11] 丁向群, 周向荣, 罗超. 超细矿粉对水泥土力学性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 899-905.
(DING Xiangqun, ZHOU Xiangrong, LUO Chao. The Influence of superfine mineral powder on mechanical properties of cement soil [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 899-905.)
- [12] 王来贵, 陈强, 潘纪伟, 等. 聚丙烯纤维增强水泥砂浆力学性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(3): 871-877.
(WANG Laigui, CHEN Qiang, PAN Jiwei, et al. Experimental study on mechanical properties of cement mortar reinforced by polypropylene fiber [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(3): 871-877.)
- [13] 黄伟. 聚丙烯纤维增强补偿收缩砂浆力学性能试验[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 17(7): 100-103.
(HUANG Wei. Experiments of the mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced shrinkage-compensating mortar [J]. Journal of yangtze university (natural science), 2019, 17(7): 100-103.)
- [14] 周伏良, 赵俊逸, 杨果林, 等. 橡胶粉掺入量对混凝土基本性能的影响研究[J]. 混凝土, 2018(1): 72-75.
(ZHOU Fuliang, ZHAO Junyi, YANG Guolin, et al. Research of rubber powder content impact on basic properties of concrete [J]. Concrete, 2018(1): 72-75.)
- [15] 赵毅, 马盼盼, 刘雷明. 不同粒径废玻璃粉水泥胶砂力学性能试验研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(7): 86-89.
(ZHAO Yi, MA Panpan, LIU Leiming. Experimental study on mechanical properties of cement mortar mixed with different diameter-waste glass powder [J]. Building science, 2019, 35(7): 86-89.)
- [16] 涂帆, 常方强. 水泥土无侧限抗压强度影响因素的室内试验研究[J]. 工程勘察, 2005, (3): 8-10.
(TU Fan, CHANG Fangqiang. Laboratory experimental study on influencing factors of unconfined compressive strength of cement soil [J]. Geotechnical investigation and surveying, 2005, (3): 8-10.)
- [17] 赵光鹏, 马楠. 水泥土性能及其影响因素的分析[J]. 山西建筑, 2008, 34(13): 179-180.
(ZHAO Guangpeng, MA Nan. Analysis the cement-stabilized soil performance and its influencing factor [J]. Shanxi architecture, 2008, 34(13): 179-180.)
- [18] 王海龙, 申向东. 水泥掺量对固化土早期结构形成的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(2): 469-473.
(WANG Hailong, SHEN Xiangdong. Effect of cement content on the early structural formation of stabilized soil [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2011, 30(2): 469-473.)
- [19] KARPISZ I, PYDA J, CICHY L. Study of the effect of cement amount on the soil-cement sample strength [J]. IOP conference series: materials science and engineering, 2018, 365(4): 2063-2067.
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)