

剑麻纤维加筋水泥土力学性能试验

王凤池¹,王昱宁²,张晨阳³,孙畅²,许罡²

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 中冶沈勘工程技术有限公司, 辽宁 沈阳 110169)

摘要 目的 研究纤维掺量、纤维长度及养护龄期对剑麻纤维加筋水泥土无侧限抗压强度及巴西劈裂抗拉强度的影响规律。方法 设置纤维掺量为0~0.8%,加筋长度为7~19 mm,养护龄期为7 d、28 d及90 d,对不同影响因素下剑麻纤维加筋水泥土进行无侧限抗压强度试验及巴西劈裂试验。结果 剑麻纤维的掺入提升了水泥土的无侧限抗压强度及巴西劈裂抗拉强度,随着纤维掺量及加筋长度的增加呈现出先增大后减小的规律;当加筋长度为11 mm、纤维掺量为0.4%时,加筋效果最显著,无侧限抗压强度提高幅度达30.2%;剑麻纤维加筋水泥土的抗拉强度、拉压比与纤维掺量呈线性关系。结论 剑麻纤维的掺入改善了水泥土的脆性,提高了水泥土的破坏韧性;采用幂函数对试验数据进行拟合,得到了养护龄期与纤维掺量共同作用下剑麻纤维加筋水泥土无侧限抗压强度的预测模型,可以为实际工程提供参考。

关键词 剑麻纤维;纤维掺量;无侧限抗压强度;劈裂抗拉强度;预测模型

中图分类号 TU411.3

文献标志码 A

引用格式:王凤池,王昱宁,张晨阳,等.剑麻纤维加筋水泥土力学性能试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):313-321. (WANG Fengchi, WANG Yuning, ZHANG Chenyang, et al. Research on engineering characteristics of magnesium phosphate cement solidified copper contaminated soil[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 313-321.)

Research on Engineering Characteristics of Magnesium Phosphate Cement Solidified Copper Contaminated Soil

WANG Fengchi¹, WANG Yuning², ZHANG Chenyang³, SUN Chang², XU Gang²

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;
2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Shen Kan Engineering and Technology Corporation, Shenyang, China, 110169)

收稿日期:2023-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52108235);辽宁省中央引导地方科技发展资金计划项目(2023JH6/100100018);福建省中青年教育科研项目(JAT231177);大学生创新训练项目(202312993003)

作者简介:王凤池(1970—),男,教授,博士,主要从事固体废弃物在土木工程中应用等方面研究。

Abstract: The purpose of this paper is to explore the effects of fiber content, length and curing age on unconfined compressive strength and Brazilian splitting tensile strength of sisal fiber cemented soil. The fiber content was 0 ~ 0.8%, the reinforced length was 7 ~ 19 mm and the curing age were 7, 28 and 90 days. The unconfined compressive strength and Brazilian splitting test of fiber reinforced cemented-soil were conducted under these various factors respectively. The results show that the incorporation of sisal fiber improves the unconfined compressive strength and splitting tensile strength of cemented-soil. When the reinforcement length was 11 mm and fiber content was 0.4%, the reinforcement effect is the most significant, and the unconfined compressive strength increases by 30.2%. The tensile strength and tension compression ratio of sisal fiber cemented soil exhibit a linear relationship with fiber content. The addition of sisal fiber can improve the brittleness and toughness of cemented soil. The power function was used to fit the test data, and the prediction model of unconfined compressive strength of sisal fiber cemented soil was obtained under the both effect of curing age and fiber content, which could provide reference for practical engineering.

Key words: sisal fiber; fiber content; unconfined compressive strength; splitting tensile strength; prediction model

随着城市化建设的飞速发展,在承载力低、变形较大的软土地基上施工的基础建设项目日渐增加。为提高软土地基的承载力,对软土地基施工进行人工加固处理的技术应运而生^[1],其中利用水泥加固软土地基是地基处理技术的一个重要分支。利用水泥加固软土地基的机理是通过水泥水解反应产生的凝胶材料与软土产生一系列物理化学反应,增强软土地基承载力的同时也提高了其稳定性,在国内外的地基加固工程中得到广泛应用^[2-3]。

水泥土因具有较强的脆性和较差的抗拉强度而易发生较大变形,为解决上述问题,国内外学者将纤维掺入水泥土中来改善水泥土的性质。殷勇等^[4]通过研究得出,在水泥土中掺入玻璃纤维可以提高水泥土的抗压强度以及峰值应变。C. Consol 等^[5]研究了多个因素对聚丙烯纤维水泥土抗压强度的影响,结果发现,纤维的掺入、水泥掺量的增加以及减小孔隙率都可以提高水泥土抗压强度,并认为孔隙率与水灰比的比值是评估纤维水泥土抗压强度最合适的参数。陈峰等^[6]研究了纤维掺量、养护龄期对水泥土劈裂抗拉强度的影响,并建立了玄武岩纤维水泥土抗拉

与抗压强度的换算公式。阮波等^[7]通过研究得出,纤维的掺入可以明显地减缓水泥土裂缝的开展,抑制土体的变形,改善水泥土的脆性破坏特征。C. Cui 等^[8]研究发现,碳纤维与纳米硅的协同作用可以提高淤泥土的内摩擦角及密实度,从而增强土体的抗剪强度。

已有研究中,关于纤维水泥土加筋纤维的选择大都集中在化工合成纤维,以天然植物纤维为加筋材料以及对纤维水泥土抗拉强度的研究较少。剑麻纤维具有断裂强度高、耐腐蚀、产量大、造价低等优点^[10-11]。鉴于此,笔者选择在水泥土中掺入剑麻纤维,通过对其进行无侧限抗压试验以及巴西劈裂抗拉试验,研究剑麻纤维掺量、长度以及养护龄期对水泥土抗压强度和抗拉强度等力学性能的影响规律,并建立多因素下剑麻纤维水泥土抗压强度的预测模型,为剑麻纤维加筋水泥固化土的实际工程应用提供参考。

1 试 验

1.1 试验材料

试验用土取自于沈阳某工地,使用前将土碾压、风干过 5 mm 筛,并根据《土工试验

方法标准》(GB/T 50123—2019)^[9]测试土样的物理性质,结果见表1。

表1 土样物理性质指标

Table 1 Physical property index of soil sample				
天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	天然密度/(g·cm ⁻³)
27.4	38.6	24.3	2.73	1.84

采用江西某厂生产的剑麻纤维,试验前将剑麻纤维梳理并去除纤维表面的杂质,然后将剑麻纤维剪成试验所需长度:7 mm、11 mm、15 mm、19 mm。试验所用胶凝材料为P·C 42.5 普通硅酸盐水泥。

1.2 试验方案

为研究剑麻纤维掺量、纤维长度及养护龄期对剑麻纤维水泥土力学性能的影响,拟开展无侧限抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验。无侧限抗压强度试验分为A组和B组。其中A组研究剑麻纤维掺量、纤维加筋长度对28 d龄期试块无侧限抗压强度的影响;B组研究养护龄期对试块无侧限抗压强度的影响。试验C组研究纤维掺量对28 d龄期试块劈裂抗拉强度以及拉压比的影响。3组试件中水泥掺量均为15%,水灰比均为0.5;纤维掺量分别取0%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%;纤维长度分别取7 mm、11 mm、15 mm、19 mm;养护龄期分别取7 d、28 d、90 d。每种配比制备3个平行试块,取3个平行试块的平均值作为最终结果。A组试验制备51个试件,B组制备45个试件,C组制备51个试件,合计147个试件。试验方案见表2。

表2 试验方案

Table 2 Sample ratio scheme			
组别	纤维掺量 a/%	纤维长度 L/mm	养护龄期/d
A	0、0.2、0.4、0.6、0.8	7、11、15、19	28
B	0、0.2、0.4、0.6、0.8	11	7、28、90
C	0、0.2、0.4、0.6、0.8	7、11、15、19	28

1.3 试样制备及试验过程

根据上述配合比称取相应质量的干土、水泥、剑麻纤维、水放置于阴凉干燥处备用。无侧限抗压强度试验制作的试块的长×宽×高为70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的立方体试块,巴西劈裂抗拉试验制作的试块为直径39.1 mm、高80.0 mm的圆柱体试件。

在干土中加入水泥搅拌均匀,为保证纤维可以均匀分散,将其分少量多次加入到水泥与干土的拌合料中,最后将水逐次加入到拌合料中并搅拌均匀。为了保证试块密实,拌合料分三次装入模具,每一次装料后都用饱和击实器人工竖直击实25下。立方体试块与圆柱体试块分别静置24 h、48 h脱模,将脱模后的试块放置于温度(20±5)℃的水中进行养护。试件制备及试验流程如图1所示。试块养护至指定龄期后擦去表面多余水分进行试验,试验采用微机控制电液伺服万能试验机,加载速率为0.1 kN/s。

无侧限抗压强度按式(1)计算:

$$F = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中:F为水泥土试件的无侧限抗压强度,MPa;P为水泥土破坏时荷载,N;A为试件的横截面积,mm²。

巴西劈裂抗拉强度按式(2)计算:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DH} \tag{2}$$

式中:σ_t为水泥土试件的劈裂抗拉强度强度,MPa;P为水泥土破坏时荷载,N;D为试件的直径,mm;H为试件的厚度,mm。

2 结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

2.1.1 纤维掺量对无侧限抗压强度的影响
无侧限抗压强度是衡量纤维加筋水泥土加筋效果的重要指标之一。图2为加筋长度11 mm、养护28 d后,剑麻纤维水泥土无侧限抗压强度随纤维掺量变化曲线。

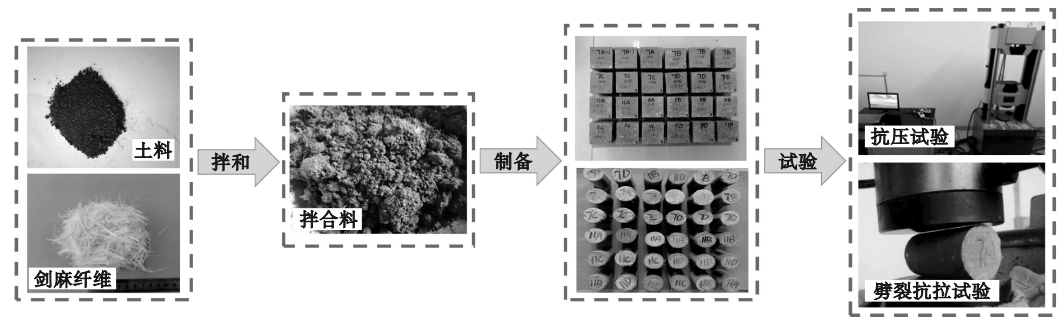


图1 试块制备及试验流程

Fig. 1 Flowchart of the production and testing stages of sisal fiber soil-cement

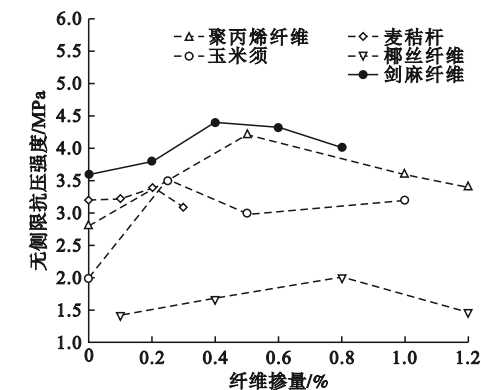


图2 无侧限抗压强度随纤维掺量变化曲线

Fig. 2 Unconfined compression strength of different fiber content

从图2可以看出,在水泥土中掺入剑麻纤维能够提高水泥土的无侧限抗压强度。随着剑麻纤维掺入量的增加,剑麻纤维水泥土的抗压强度呈先增大后减小的趋势。当纤维掺量为0.0%~0.4%时,抗压强度与纤维掺量呈正比,相较于素水泥土,掺入0.4%剑麻纤维的水泥土强度提升了30.2%。然而,若持续增加纤维掺量,纤维易相互粘附,导致其在水泥土基体分散不均,对纤维加筋效果起到负面影响。实验中测得最优剑麻纤维掺量为0.4%,这与国内外其他学者研究结果相近^[12-14]。

上述结果表明,由于水泥土中的加筋纤维材料、土料类别和水泥型号因材料源地及生产方式存在差异,纤维的加筋效果不尽相同,存在一个最优加筋率范围,剑麻纤维的掺入量在此范围内,可以对水泥土抗压强度的提升起到积极作用,当纤维的掺量超过最优

值后,纤维的弱化作用就会体现出来。这是因为剑麻纤维随机分布在水泥土中会形成一种空间网状的支撑体系,对水泥土侧向形变有一定约束作用^[15];纤维通过与基体间的摩擦与机械咬合力对水泥土受压时产生的纵向裂缝起到锚固作用,抑制了裂缝的开展,从而提高了水泥土的无侧限抗压强度。若超过了剑麻纤维与水泥土基体相容的最优掺量,纤维易发生“团聚”效应,纤维与水泥土基体的接触面积降低,有效承担水平拉应力的纤维含量减少,影响了剑麻纤维的效果,对水泥土抗压强度的增长起到了负面作用。

2.1.2 纤维长度对无侧限抗压强度的影响

剑麻纤维的加筋长度也是影响剑麻纤维水泥土抗压强度的重要因素之一。图3为龄期28 d时,剑麻纤维水泥土无侧限抗压强度随纤维加筋长度变化曲线。

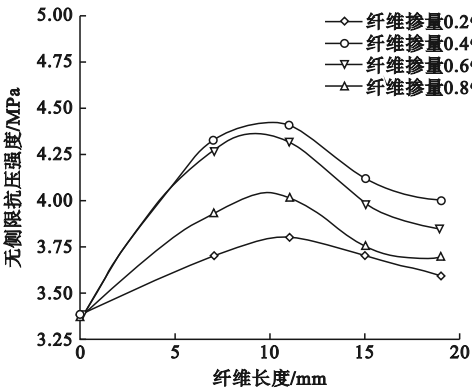


图3 无侧限抗压强度随加筋长度变化曲线

Fig. 3 Unconfined compression strength with different fiber length

从图3可以看出,剑麻纤维水泥土的抗压强度随着剑麻纤维加筋长度的增大,呈现先大幅增加后缓慢下降的趋势,变化情况与掺量对抗压强度的影响相似。剑麻纤维的最优加筋长度为11 mm,加筋长度若超过该值,纤维水泥土抗压强度随加筋长度的增大而减小。当剑麻纤维掺量为0.4%时,纤维加筋长度由11 mm增至19 mm,纤维水泥土抗压强度从4.4 MPa降至4.0 MPa,降幅达到9.1%。

剑麻纤维的加筋作用主要取决于纤维抗拉强度以及纤维与基体界面的相互作用力。若纤维加筋长度较短,纤维与水泥土基体接触面积小,界面相互作用力较小,当外部荷载传递到纤维表面的剪应力大于纤维与基体间的界面作用力,纤维易在水泥土基体发生相对滑动,或者剑麻纤维被拔出从而失去了加筋作用。若纤维的加筋长度超过了适宜的加筋长度值,虽然纤维的锚固作用增强,但纤维在基体中易折叠缠绕造成材料上的应力浪费,并且纤维聚集处会形成软弱面,外荷载作用下易发生局部破坏,产生缝隙,影响试块的密实度,从而降低水泥土的抗压强度。

2.1.3 龄期对无侧限抗压强度的影响

图4为加筋长度11 mm、不同纤维掺量条件下,剑麻纤维水泥土抗压强度随龄期的变化曲线。

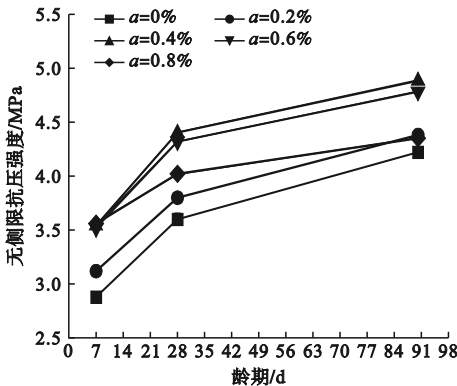


图4 无侧限抗压强度随龄期变化曲线

Fig. 4 Unconfined compression strength with curing time

从图4可以看出,龄期对水泥土试样抗压强度影响较大,不同纤维掺量下剑麻纤维水泥土抗压强度与养护龄期呈正比。28 d前剑麻纤维水泥土抗压强度增长迅速,随后抗压强度增长速率变缓。剑麻纤维掺量为0.4%时,龄期由7 d增至28 d,剑麻纤维水泥土的抗压强度由3.54 MPa增至4.4 MPa,增幅达到24.3%;龄期从28 d增至90 d时,抗压强度由4.4 MPa增至4.88 MPa,增幅仅为10.9%。加入剑麻纤维后,水泥土试样早期强度增长明显,适用于涉及大量软土处理的市政工程项目中。

剑麻纤维水泥土早期抗压强度增长迅速是因为水泥水化物以胶体的形式在纤维表面析出,这种黏附作用增加了剑麻纤维与水泥土基体间的粘结力,凝胶颗粒填充在土颗粒之间,增加了土体颗粒的联结,增强了试块的密实度,从而增强了水泥土的抗压强度。但随着养护时间的增长,土颗粒间的空隙减少,水泥水化反应速率变缓。另一方面,剑麻纤维中的半纤维素主要是由木糖等多种糖单元组成,在碱环境下水解出的糖类物质会抑制水泥的凝结,不利于水泥的水化反应,影响纤维与水泥土基体的粘结强度,因此在养护后期水泥土抗压强度增长变缓。

水泥土的强度随龄期不断增长,一般在90 d以后才基本趋于稳定。因此《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2022)建议,以龄期90 d的水泥土立方体抗压强度均值作为水泥土无侧限抗压强度的标准值。但在实际工程中,水泥土搅拌桩在养护3~4周后就要进行强度检测,因此有必要建立纤维水泥土短期强度与长期强度的关系。笔者通过对试验数据拟合分析,建立了以剑麻纤维水泥土短期强度预测其标准强度的换算公式(见图5)。R²值为0.97,拟合效果较好,可得到剑麻纤维水泥土以28 d短期强度预测90 d标准强度的模型。

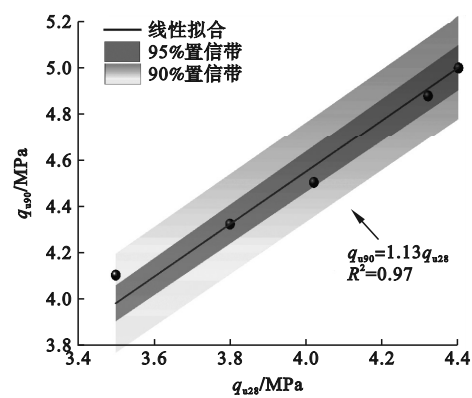


图5 剑麻纤维水泥土 q_{u28} - q_{u90} 关系

Fig. 5 q_{u28} - q_{u90} relationship of fiber soil-cement

2.1.4 掺量、龄期共同预测模型

诸多学者建立了水泥土抗压强度随养护龄期的预测模型。C. Consoli 等^[5]发现水泥稳定土的抗压强度与养护龄期呈幂函数关系,殷勇等^[4]同样用幂函数分析了玻璃纤维水泥土抗压强度与养护龄期之间的关系。笔者在此基础上,选取玄武岩等纤维材料与试验数据基于式(3)进行拟合:

$$q_u = \alpha T^\beta. \tag{3}$$

式中: q_u 为剑麻纤维水泥土无侧限抗压强度值,MPa; T 为养护龄期,d; α 、 β 为待定系数。

待定系数 α 、 β ,相关性系数 R^2 结果见表3,拟合结果如图6所示。可以看出, R^2 均大于0.97,拟合效果较好。

表3 待定系数统计表

Table 3 Statistical table of undetermined coefficients

纤维掺量/%	α	β	R^2
0	2.173	0.148	0.997
0.2	2.427	0.132	0.998
0.4	2.838	0.123	0.975
0.6	2.946	0.117	0.978
0.8	3.073	0.078	0.994

图7和图8为待定系数 α 、 β 随纤维掺量 a_f 的变化曲线。从图中可以看出,待定系数 α 、 β 与纤维掺量 a_f 间存在线性关系,说明剑麻纤维水泥土的抗压强度除了与养护龄期有关,也与剑麻纤维的掺量相关。将拟合建立的关系式代入式(3),即可得出水泥掺量

15%的剑麻纤维水泥土抗压强度与纤维掺量与养护龄期关系:

$$q_u = (1.16a_f + 2.23)T^{(-0.08a_f + 0.15)}. \tag{4}$$

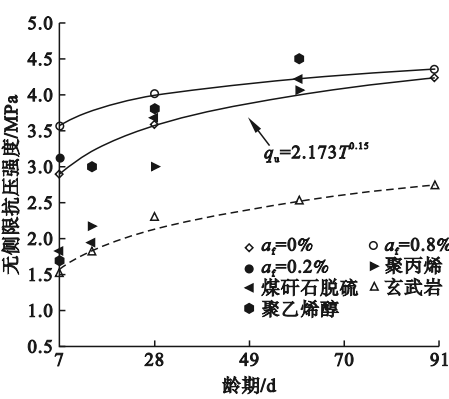


图6 无侧限抗压强度 - 龄期拟合曲线

Fig. 6 Unconfined compression strength-curing time fit curves

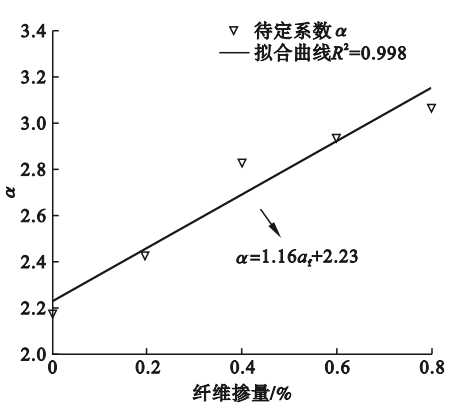


图7 待定系数 α -掺量拟合曲线

Fig. 7 Undetermined coefficient α -curing time fit curve

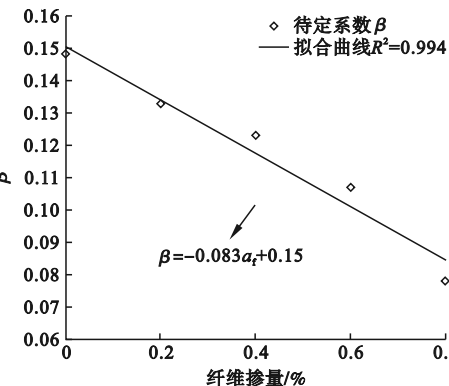


图8 待定系数 β -掺量拟合曲线

Fig. 8 Undetermined coefficient β -curing time fit curve

2.2 巴西劈裂抗拉强度

2.2.1 剑麻纤维水泥土受拉破坏性状

掺入剑麻纤维后,水泥土劈裂破坏性状对比如图9所示。从图中可以看出,素水泥土试件的劈裂破坏形式主要为突发性的脆性破坏,裂缝宽度较大,破坏时试件从中间劈开,劈裂面贯穿整个试件;掺入剑麻纤维后,试件破坏时存在一定的塑性特征,表现为裂而不断,裂缝逐渐延伸,且宽度明显小于素水泥土试件。分析原因是因为在外荷载作用下,水泥土裂缝开始扩展时,横跨在裂缝处的剑麻纤维起到了“联桥”作用(见图10),剑麻纤维的掺入减轻了裂纹尖端应力的集中,抑制了裂缝的扩展,改善了脆性破坏特性,从而提高了水泥土的延性。

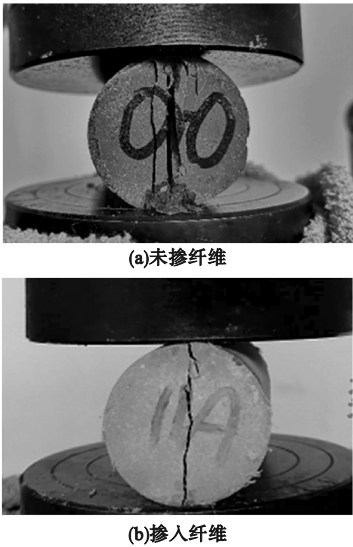


图9 水泥土劈裂破坏形态
Fig. 9 Failure modes

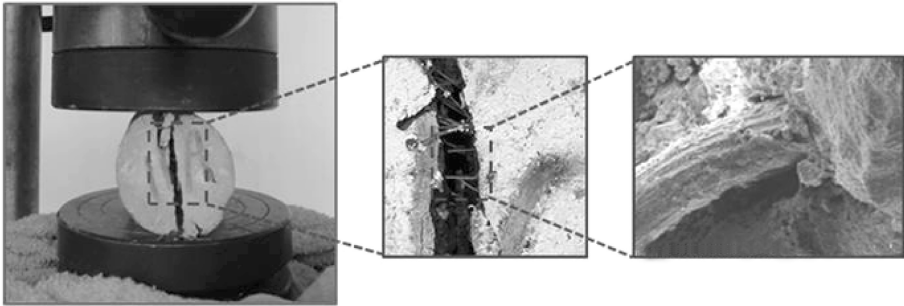


图10 纤维“联桥”作用抑制裂缝的发展进程

Fig. 10 The“bridge”effect of fiber in soil impedes the development of cracks

2.2.2 剑麻纤维掺量对劈裂抗拉强度的影响

图11为纤维掺量对龄期28 d试块的劈裂抗拉强度影响曲线。从图中可以看出,在水泥土中掺加剑麻纤维显著提高了水泥土的劈裂抗拉强度,随着剑麻纤维掺量的增加,水泥土的劈裂抗拉强度先大幅增加,在掺量0.4%后增幅减缓。纤维长度为7 mm、11 mm、15 mm、19 mm的试块抗拉强度峰值分别为0.75 MPa、0.8 MPa、0.82 MPa、0.79 MPa,比素水泥土试块抗拉强度(0.53MPa)分别提高了41.5%、50.9%、54.7%、49.1%。加筋长度为15 mm的剑麻纤维水泥土抗拉强度提高最为明显,纤维掺量在0.4%时,抗拉强度增幅达到47.1%,

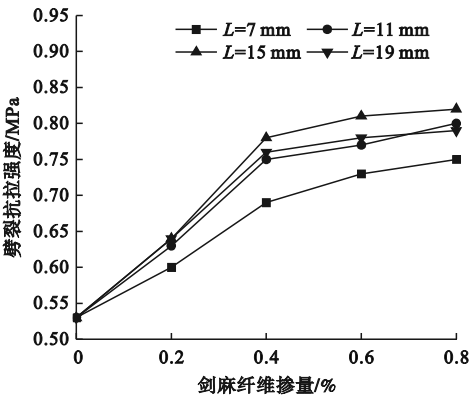


图11 劈裂抗拉强度随纤维掺量变化曲线

Fig. 11 The relationships between splitting tensile strength and fiber content

掺量从0.4%增至0.8%时,抗拉强度仅提高了7.6%。因此,为避免纤维材料的浪费,综

合考虑下,龄期 28 d 时剑麻纤维水泥土的最佳纤维掺量为 0.4%,最佳纤维长度为 15 mm。

剑麻纤维的掺入对水泥土抗拉与抗压强度增长率的对比如图 12 所示。从图中可以看出,剑麻纤维水泥土抗拉强度与抗压强度增长率差距较大,剑麻纤维的掺入对水泥土抗拉强度的增强效果明显优于抗压强度。这表明剑麻纤维的掺入对水泥土劈裂抗拉强度的增强效果优于对无侧限抗压强度的增强效果。

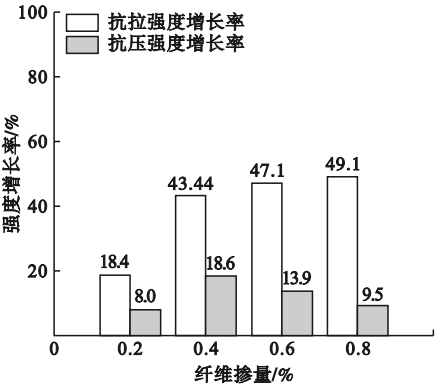


图 12 抗拉强度与抗压强度增长率对比
Fig. 12 Comparison of growth rate of tensile strength and compressive strength

2.3 拉压比分析

与混凝土抗拉强度特性相似,水泥土的抗拉强度值远远小于其抗压强度值,且两者存在着一定关系。拉压比为固态材料劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的比值,是评估材料脆性的重要参数之一^[16]。拉压比计算如下:

$$\eta = \frac{q_t}{q_u} \tag{5}$$

式中: q_u 为剑麻纤维水泥土无侧限抗压强度值,MPa; q_t 为剑麻纤维水泥土劈裂抗拉强度值,MPa。

图 13 为不同加筋长度下,剑麻纤维水泥土中纤维掺量对拉压比的影响曲线。从图中可以看出,剑麻纤维水泥土的拉压比与纤维掺量呈正比,且随着纤维掺量及加筋长度的

增加,拉压比增速变快。可见剑麻纤维的掺入可以提高水泥土的拉压比,当纤维加筋长度为 19 mm 时,纤维掺量从 0 增至 0.8%,拉压比从 0.144 增至 0.22,增幅达 52.78%。表明纤维在水泥土试件中的“联桥”作用抑制了裂缝的开展,改善了水泥土的脆性,试样的塑性也随拉压比的增大而明显增强。

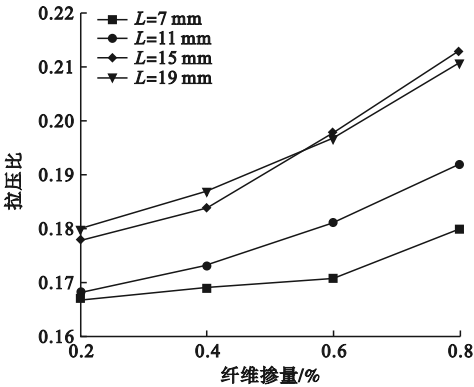


图 13 剑麻纤维水泥土拉压比随掺量变化
Fig. 13 Relationships between strength ratio and fiber content

根据上述剑麻纤维水泥土抗压及抗拉强度值,可以拟合出不同加筋长度下剑麻纤维水泥土试件抗拉强度和抗压强度之间的关系式:

$$q_t = \begin{cases} 0.170q_u, L=7\text{ mm}; \\ 0.176q_u, L=11\text{ mm}; \\ 0.188q_u, L=15\text{ mm}; \\ 0.192q_u, L=19\text{ mm}. \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)可以看出,水泥土抗拉强度与抗压强度的比值随着剑麻纤维长度的增加而缓慢增加,这表明剑麻纤维对水泥土抗拉强度的提高方面有明显效果,甚至好于对其抗压强度的增强效果。

3 结 论

(1)剑麻纤维的掺入对水泥土的无侧限抗压强度影响较小,随纤维掺量及加筋长度的增加,抗压强度先增大后减小;在加筋长度为 11 mm、纤维掺量 0.4% 时,加筋效果最明

显,抗压强度提高了 30.2%;由于水泥水化速度变慢及剑麻纤维中半纤维的水解,纤维水泥土抗压强度增长率随着龄期的增大而减小。

(2)纤维的掺入对剑麻纤维水泥土劈裂抗拉强度影响更显著,劈裂抗拉强度和拉压比随着纤维掺量的增大而增大,当加筋长度为 15 mm 时,掺入 0.8% 的纤维可使劈裂抗拉强度增幅达 54.7%,拉压比增幅达 47.91%。

(3)采用幂函数对试验数据进行拟合,建立了不同养护龄期、不同掺量下剑麻纤维水泥土抗压强度预测模型以及抗拉强度与抗压强度之间的换算关系式,可为实际工程中剑麻纤维水泥土材料的抗压、抗拉强度预测提供参考。

参考文献

- [1] 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(1):3446-3454.
(CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen. Characterization parameters of unconfined compressive strength of soil-cement [J]. Chinese journal of rock mechanics engineering, 2015, 34(1): 3446-3454.)
- [2] 刘松玉,周建.地基处理技术进展[J].土木工程学报,2020,53(4):93-110.
(LIU Songyu, ZHOU Jian. Progress of foundation treatment technology [J]. Journal of civil engineering, 2020, 53(4): 93-110)
- [3] 闫楠,郑晨,白晓宇,等.水泥加固腐蚀性土强度特征研究进展[J].科学技术与工程,2019,19(31):2855-2861.
(YAN Nan, ZHENG Chen, BAI Xiaoyu, et al. Research progress on strength characteristics of cement reinforced corrosive soil [J]. Science technology and engineering, 2019, 19(31): 2855-2861.)
- [4] 殷勇.玻璃纤维改善水泥土力学性能试验研究[D].南京:东南大学,2006.
(YIN Yong. Experimental study on improving mechanical properties of soil-cement with glass fiber [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.)
- [5] CONSOLI N C, C, BASSANI A A. Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils [J]. Geotextiles and geomembranes, 2010, 28(4): 344-351.
- [6] 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,2016,33(2):188-193.
(CHEN Feng. Experimental study on tensile properties of basalt fiber soil-cement [J]. Journal of Shenzhen university, 2016, 33(2): 188-193.)
- [7] 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.
(RUAN Bo, DENG Linfei, MA Chao, et al. Experimental study on unconfined compressive Strength of fiber-cement soils [J]. Journal of railway science and engineering, 2017, 14(7): 1415-1419.)
- [8] CUI H Z, JIN Z. Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms [J]. Construction and building materials, 2018, 189(20): 286-295.
- [9] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准规范:GB/T 50123—2019 [S].北京:中国计划出版社,2019.
(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.)
- [10] 司泽华.稻壳灰-水泥纤维改性盐渍土的路用性能研究[D].长春:吉林大学,2020.
(SI Zehua. Study on road performance of rice husk ash cement fiber modified saline soil [D]. Changchun: Jilin University, 2020.)
- [11] 戴文亭,司泽华,王振,等.剑麻纤维水泥加固土的路用性能试验[J].吉林大学学报,2020,50(2):589-593.
(DAI Wenting, SI Zehua, WANG Zhen, et al. Road performance test of sisal fiber cement reinforced soil [J]. Journal of Jilin university, 2020, 50(2): 589-593.)
- [12] SHUBHAM R, SHER M, RIMA D, et al. Reinforced cement stabilized rammed earth blocks [J]. World journal of engineering, 2017, 14(3): 208-216.
- [13] TRAN K Q, SATOMI T, TAK H. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers [J]. Construction and building materials, 2018, 178(30): 204-210.
- [14] 孙浩.麦秸秆纤维水泥土室内实验研究[D].安庆:安徽理工大学,2017.
(SUN Hao. Laboratory experimental study on wheat straw fiber soil-cement [D]. Anqing: Anhui University of Science and Technology, 2017.)
- [15] ZAK P, ASHOUR T, KORJENI A, WU W. The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials [J]. Construction and building materials, 2016, 4(7): 179-188.
- [16] DIAMBRA A, FESTUGATO L, IBRAIM E. Modelling tensile/compressive strength ratio of artificially cemented clean sand [J]. Soils and foundations, 2018, 58(1): 199-211.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)