

纤维素纤维对水泥砂浆湿度调控及性能影响研究

梁金国,马宝富

(中交公路规划设计院有限公司,北京市 100088)

摘要:为探究亚麻纤维素纤维对水泥砂浆湿度及基本性能的影响,该文采用两种不同长度(0.5 mm、5 mm)和不同掺量(质量分数分别为水泥的0.5%、1%、1.5%、2%)的亚麻纤维素纤维进行水泥砂浆流变性、力学性能、自收缩性能和内部相对湿度发展情况的试验研究,并通过凝结时间、抗压强度、收缩率和相对湿度来评价纤维素纤维对水泥砂浆的性能改善效果。结果表明:0.5 mm长度单位质量亚麻纤维的吸液倍率为自身重量的3.45倍,而5 mm长度下的吸液倍率为6.03倍。亚麻纤维的内养生作用对水泥基材料湿度补偿、收缩抑制及裂缝阻滞具有显著优势。在各养护龄期下,纤维掺量越大,抗压强度越小,在相同纤维掺量下,短纤维组的抗压强度均高于长纤维组。与基准砂浆组相比,短纤维对自收缩的抑制效果更明显。亚麻纤维掺量越高,内部湿度补偿越显著,且相同纤维掺量下,长纤维比短纤维的湿度补偿效果更优,说明内养生水量是补偿内部湿度的关键。

关键词:亚麻纤维素纤维;水泥砂浆;内养生;自收缩;湿度补偿

中图分类号:U414

文献标志码:A

Effect of Cellulose Fiber on Humidity Control and Properties of Cement Mortar

LIANG Jinguo, MA Baofu

(CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To explore the effect of flax cellulose fiber on the humidity and basic properties of cement mortar, this paper adopted flax cellulose fibers with different lengths (0.5 and 5 mm) and mixing amounts (mass fraction of 0.5%, 1%, 1.5%, and 2% of cement). Tests were conducted on rheological properties, mechanical properties, autogenous shrinkage properties, and internal relative humidity development of cement mortar. Setting time, compressive strength, shrinkage rate, and relative humidity were used to evaluate the performance improvement effect of cellulose fiber on cement mortar. The results show that the absorbance rate of flax fiber per unit mass of 0.5 mm is 3.45 times its weight, while the absorbance rate of flax fiber per unit mass of 5 mm is 6.03 times its weight. Flax fiber has significant advantages in humidity compensation, shrinkage inhibition, and crack retardation of cement-based materials. At each curing age, a higher mixing amount of fiber indicates lower compressive strength. Under the same mixing amount of fiber, the compressive strength of the short fiber group is higher than that of the long fiber group. Compared with the baseline mortar group, the short fiber has a more obvious inhibition effect on autogenous shrinkage. A higher mixing amount of flax fiber indicates more significant internal humidity compensation. In addition, under the same mixing amount of fiber, the humidity compensation effect of long fiber is better than that of short fiber, indicating that the water quantity of internal curing is the key to compensating for the internal humidity.

Keywords: flax cellulose fibre, cement mortar, internal curing, autogenous shrinkage, humidity compensate

0 引言

水泥基材料作为中国建设行业的基石,为中国

工程建设作出了巨大贡献。然而水泥混凝土构造物暴露于大气中且内部孔隙较多,使其在养生阶段由于其内部水化反应和近表面的水分频繁蒸发导致湿

收稿日期:2022-07-26(修改稿)

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:2019YFC1511102)

作者简介:梁金国,男,大学本科,高级工程师.E-mail:3262587416@qq.com

度降低,从而产生大量自收缩裂缝,并在外部荷载及环境因素的综合作用下,混凝土内部微裂缝扩展连通,进而出现剥蚀、破损、脱空等病害,大大降低了混凝土的服役寿命^[1-2]。为解决混凝土早期开裂问题,混凝土的养生显得尤为重要,传统的外部养生方式诸如湿制养生(蓄水、洒水、喷雾)及化学养生(喷射养护剂)仅能对混凝土的表面发挥作用,水分对混凝土内部结构的养生效率较低,导致因水分丧失形成的早期收缩、干缩开裂无法得到根治。因此,引入水泥混凝土内养生技术解决这一难题,即在混凝土中加入预吸水材料,补偿因蒸发和水化反应所消耗的水分,从根本上解决混凝土的早期开裂问题,并延长其使用寿命。

内养生是一种对水泥基材料起到有效减缩抗裂作用的热点技术,其主要依靠湿度补偿介质在水泥基材料内部释放水分以补偿其相对湿度,从而抑制早期收缩裂缝产生。目前,内养生蓄水材料种类繁多,如多孔陶粒轻骨料、超吸水性树脂、再生骨料、硅藻土等,其养生时效性也存在差异^[3-5]。近年来,纤维素纤维作为一种亲水性材料,同时具备了长效持水、补偿湿度、抑制收缩及阻滞开裂的多重潜能,对混凝土内养生体现出较大优势^[6]。纤维素纤维可以从植物的叶子、韧皮、茎和种子中提取,具有较低的密度和较高的强度、刚度及韧性。其中,从植物茎的外部树皮中分离出来的韧皮纤维通常比其他纤维素纤维具有更高的抗拉强度。由于纤维素纤维在腔内和细胞壁内存在较多微孔,因此能够吸收并储蓄大量水分。Symington等^[7]报道纤维素纤维的吸水率为水泥质量分数的70%~164%。类似地,Ramadevi等^[8]发现未经处理的蕉皮纤维分别浸入去离子水和不同浓度氢氧化钠溶液后,其含水率增加了135%~200%。在水泥基胶凝材料体系中,纤维素纤维的含水率对水泥水化过程中的流变行为、力学特征、体积稳定性和微观结构均带来显著影响,而水泥基材料的内养生效果又会受到纤维长度及其掺量等特征参数的制约^[9-10]。通常来说,纤维素纤维的长度对水泥砂浆和易性的影响较为显著,纤维越长,自身易缠绕而形成团块,导致和易性越低,而较短的纤维更易在水泥石中均匀分散,从而提升其内养生效果^[11-12]。此外,相关研究发现水泥砂浆的抗拉性能和韧性随纤维长度的增

大而提高,且纤维分散性越高,抗裂性能越好^[13]。综合上述研究可知,在实际工程应用中,水泥基材料的各项性能受纤维素纤维的影响显著性不同,基于不同纤维特征参数的混凝土各项性能之间的权衡尚未明晰。因此,亟须结合纤维尺寸效应,对水泥基材料的流动性、力学特性、收缩性及内部湿度进行深入研究,从而明确纤维素纤维对水泥基材料的内养生效果。

综上所述,本文主要目的是探索亚麻纤维素纤维长度和掺量对水泥基材料湿度调控及性能的影响,通过水泥砂浆的流动性、力学性能、自收缩性能和内部相对湿度试验来评价纤维素纤维中含水量对水泥水化过程中的内养生效果。研究成果对拓宽混凝土内养生材料适用领域及其工程应用具有重要意义。

1 试验概况

1.1 原材料

主要以水泥、细集料和亚麻纤维作为主要试验原材料。所采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥的基本物理力学性能见表1。细集料采用细度模数为2.72的中砂,含泥量为0.6%,表观密度为2.62 g/cm³。亚麻纤维经干湿处理后,不经任何化学和热处理而机械分离,其密度为1.33 g/cm³,并通过直接拉伸试验确定单根亚麻纤维的平均拉伸强度约为324 MPa。亚麻的化学成分组成如表2所示。可以看到其主要成分是纤维素(55.31%),该成分对亚麻纤维的力学性能有显著影响^[14]。同时通过文献[15]中提出的反向过滤法测定两种长度亚麻纤维在水泥浆孔溶液的吸液性能,发现0.5 mm长度单位质量亚麻纤维的吸液倍率为自身重量的3.45倍,而5 mm长度下的吸液倍率为6.03倍。此外采用聚羧酸高效减水剂作为外加剂,其减水率为27%,含气量为3.2%,固含量为23.82%,推荐使用掺量为0.9%~1.3%,所用拌和水为普通市政用水。

表1 P·O 42.5普通硅酸盐水泥基本物理力学性能

Table 1 Basic physical and mechanical properties of ordinary Portland cement P·O 42.5

稳定性/ mm	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/ min		抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
		1.5	350	192	284	31.3	66.1

表 2 亚麻化学成分(质量分数)

纤维素	半纤维素	木质素	萃取物	飞灰
55.32	24.28	14.93	0.65	1.62

1.2 配合比设计

为重点考虑亚麻纤维对水泥胶结料的内养生作用,并排除粗骨料吸水率及形态各项异性导致其对内养生效果的偏差,方案设计以水泥砂浆作为研究主体,结合控制变量法,探究亚麻纤维长度和掺量变量对水泥砂浆性能的影响规律。配合比设计如表 3 所示(其中表 3 方案组标识中 1-0.5 表示为 0.5 mm 长度且掺量为 0.5% 的纤维方案组;2-2 表示为 5 mm 长度且掺量为 2% 的纤维方案组)。所采用基准水胶比为 0.31,亚麻纤维掺量分别以 0.5%、1%、1.5%、2% 的水泥质量分数进行添加。内养生水的确定则根据 1.1 节中的不同长度纤维的吸液倍率分别计算得出。在水泥砂浆的拌和过程中,为了进一步判断纤维预吸内养生水量的准确性,对每组砂浆方案进行小型坍塌扩展度试验,即在流动台上用直径为 25 cm 的样品锥测量砂浆混合物的扩散直径,发现加了亚麻纤维和内养生水后的砂浆组扩展度和基准组的相差不大,其直径范围基本为 140~160 mm,说明通过上述方法计算出来的内养生水量较为准确。

表 3 亚麻纤维水泥砂浆配合比设计

方案组	水泥	水	亚麻纤维	内养生水	河砂	减水剂
J			—	—		
1-0.5			3.5	12.075		
1-1			7.0	24.150		
1-1.5			10.5	36.225		
1-2	700	217	14.0	48.300	1 400	9.1
2-0.5			3.5	21.105		
2-1			7.0	42.210		
2-1.5			10.5	63.315		
2-2			14.0	84.420		

在水泥砂浆的制备过程中,借助行星式搅拌机,首先将干料(水泥和十砂子)干拌 30 s。然后将搅拌水和高效减水剂搅拌混合,并倒入搅拌机中,以 100 rpm 左右的转速湿拌约 60 s。同时,在称取一定量纤维和内养水后,将纤维和内养生水混合进行预吸水

处理(通常 5 min 内亚麻纤维即可达到吸水饱和),并最后加入到搅拌机中,以大约 200 rpm 的转速继续湿混合 6 min,从而让纤维在水泥砂浆中充分均匀分散。砂浆浇筑入模后,所有试件放入温度(20±2)℃和湿度(95±1)%的养护箱中,直至待测时间点。

1.3 试验方法

1.3.1 凝结时间测定

根据《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020),采用维卡仪测定每个砂浆组在室内环境中[25℃、65%湿度(H_{RH})]的凝结时间。用直径为 1 mm 的探针测量砂浆的穿刺深度。所提供柱塞和探针的总重量约为 300 g。初凝时间是指从湿拌开始到针刺入 25 mm 深度之间所经过的时间,终凝时间是指从湿拌开始到探针停止下降所经过的时间。

1.3.2 抗压强度试验

砂浆抗压强度试验的龄期分别设置为 1 d、3 d、7 d、28 d 和 60 d。抗压强度试件尺寸为边长 70.7 mm 的立方体,设置 3 个平行试件,并以平均值作为最终抗压强度指标。

1.3.3 自收缩试验

自收缩试验采用深 MIC-YWC-5 型位移计和配套 MIC-DCV-4 型电压数据采集器进行测试,试件为 100 mm×100 mm×400 mm 的砂浆棱柱体,并在其表面涂抹厚度约 2 mm 的环氧树脂薄层,以避免砂浆内部和大气中的水分交换。为保证试件测试面平整,将一载玻片置于测头及水泥混凝土测试面之间进行调平。由于该测试系统显示的位移数据是以电压(单位:mV)的形式输出,因此根据厂家提供的相应转换公式及各通道灵敏度值 A ,将电压转化为位移值(微应变)再进行分析,转换公式见式(1)。自收缩测试在试件标准养生室中养生 24 h 并脱模后开始,其测试环境与室内环境相同。

$$\epsilon = (U_t - U_0) \times 10^{-6} / (4 \times 10^5 A) \quad (1)$$

式中: U_t 为 t 时间的电压值; U_0 为初始时间的电压值; A 为通道灵敏度值,取 0.5。

1.3.4 内部相对湿度测试

砂浆内部相对湿度测试采用预埋式 MIC-TD-TM 型湿度传感器及配套系统进行采集。试件尺寸与自收缩试验相同,即在砂浆拌制阶段,于试件表面中心预留深度为 50 mm、直径为 10 mm 的小孔,待砂浆凝

结一定程度后,插入传感器于预留小孔中,并在砂浆表面与传感器接触位置覆盖橡皮泥进行密封,防止水分散失。数据采集持续时间与自收缩同步,数据采集间隔时间为1 h。湿度测试如图1所示。



图1 湿度测试过程

Figure 1 Humidity test procedure

2 试验结果与讨论

2.1 凝结时间

亚麻纤维水泥砂浆初凝和终凝时间试验结果如图2所示。

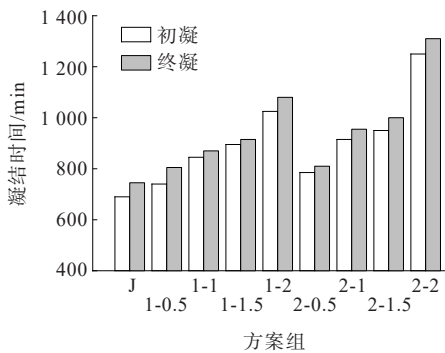


图2 亚麻纤维水泥砂浆凝结时间试验结果

Figure 2 Test results of setting time of cement mortar with flax fiber

由图2可以看出:①两种纤维长度下,随着纤维掺量的增加,砂浆的凝结时间都有所延长,主要集中在740~1310 min的范围内,这可能是由于亚麻纤维组分在水泥浆体碱性环境中发生了化学浸出;②1-2纤维方案组和2-2纤维方案组的初凝时间分别比基准砂浆组延长了48.55%和81.16%,同时其终凝时间也分别延长了44.97%和75.84%;③在相同纤维掺量下,5 mm长度纤维方案组的凝固时间普遍比0.5 mm的更长,这可能是由于较小尺寸的亚麻纤维在水泥基质中既易水解又易增溶的特性所致^[16];④对于5 mm长度纤维,砂浆凝结时间在1.5%~2%纤维掺

量之间发生了骤增,其中初凝时间和终凝时间分别增大了31.29%和30.4%,这可能是由于纤维掺量的进一步增加使其发生结团概率增大,从而导致砂浆拌和均匀性变差以及泌水性增加,一定程度延长了砂浆的凝结时间。相比于5 mm纤维长度,0.5 mm纤维长度下的凝结时间在1.5%~2%纤维掺量之间的增长率相对较小,其中初凝时间和终凝时间仅分别增大了14.91%和15.79%,该结果说明短纤维有利于提高砂浆拌和均匀性。另一方面,纤维过量加入也会一定程度影响水泥砂浆的触变性能,从而导致凝结时间发生变化,但其影响机制尚未明晰^[17]。

2.2 抗压强度

两种长度纤维水泥砂浆抗压强度随纤维掺量变化的测试结果如图3所示。

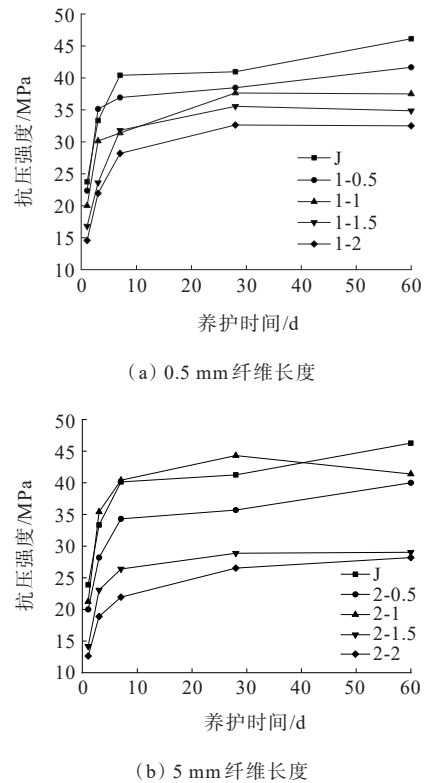


图3 亚麻纤维水泥砂浆抗压强度试验结果

Figure 3 Test results of compressive strength of cement mortar with flax fiber

由图3可知:随着养生龄期的增加,砂浆抗压强度7 d前增长迅速,随后逐渐变缓。在28 d龄期时,除1-2、2-1.5和2-2方案组外,其余方案组的抗压强度均大于30 MPa,其中1-0.5组和1-1组的强度相近,约为38.2 MPa,而2-1组在28 d时的强度最大,为44.3 MPa。对于28 d强度,0.5 mm和5 mm纤维长度的最

佳掺量分别为0.5%和1%。28~60 d龄期内,砂浆的抗压强度增长缓慢,说明该阶段的水化反应基本完成。

砂浆抗压强度受到纤维长度和掺量的共同影响。可以发现:各养护龄期下,纤维掺量越大,抗压强度越小,这是由于纤维内部的固有孔隙使砂浆内部产生应力集中薄弱点,从而导致强度发生损失。值得注意的是,对于5 mm长度纤维,1%掺量时的抗压强度始终高于0.5%掺量,由此说明在多孔造成强度损失的同时,内养生水的释放及促进水化进程也会在一定程度上提升强度。此外,在相同纤维掺量下,短纤维组在每个养护龄期的抗压强度都比长纤维组高,这是因为较小尺寸的纤维分散得更好,从而比大尺寸纤维更能有效桥接内部原生微裂纹。

2.3 自收缩性能

不同纤维长度及掺量对水泥砂浆自收缩性能的影响如图4所示。

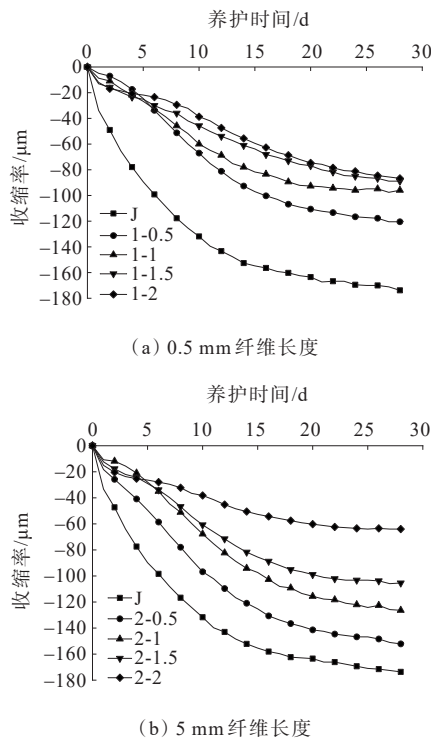


图4 亚麻纤维水泥砂浆自收缩测试结果

Figure 4 Test results of autogenous shrinkage of cement mortar with flax fiber

由图4可以发现:随着纤维掺量的增加,砂浆的自收缩逐渐减少,这主要是由于内养生水释放从而补偿湿度降低,减缓自干燥效应发生的缘故。理论上说,长纤维比短纤维的吸水率大,其抑制收缩的效果更好,而实际结果显示除了2%掺量外,其余掺量

下0.5 mm的自收缩率均小于5 mm,说明长纤维容易结团且分散性较差,从而阻碍了水分的迁移和养生效果。虽然2-2砂浆组中也会存在结团和分散性差的问题,但由于内养生水量相对较大,因此能够增加混合料在拌制阶段的流动性和均匀性,从而抵消纤维结团带来的负面影响。

在28 d时,短纤维组的收缩量比基准组减少了52~93 μm,而长纤维组的收缩量相对基准组减少的范围更大,在24~111 μm之间,意味着长纤维对于水泥基材料的收缩抑制更加敏感,在施工过程中更应注重控制长纤维的分散性以保证内养生的稳定进行。此外,对于微裂缝阻隔方面,由于微裂缝宽度远比纤维长度的数量级小,因此在保证均匀分散条件下,需要进一步明确纤维表面与水泥石的有效接触面积和摩擦阻力,以及纤维自身模量时变特性,才能更好地揭示纤维长度对于阻裂性能的影响规律。

2.4 内部相对湿度

图5为不同纤维长度及掺量时砂浆内部相对湿度随时间的变化规律。

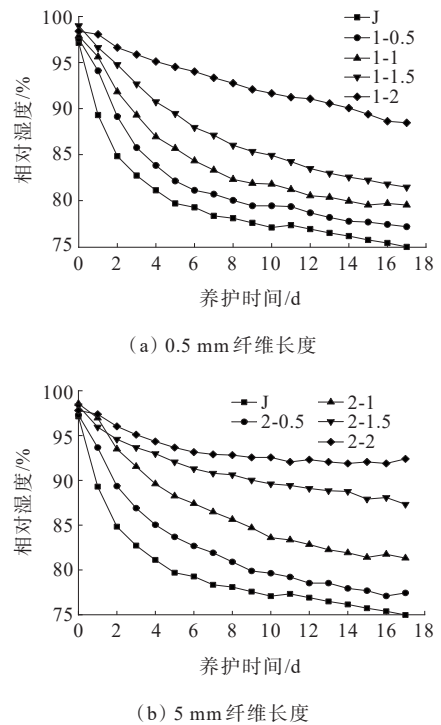


图5 亚麻纤维水泥砂浆湿度测试结果

Figure 5 Test results of humidity of cement mortar with flax fiber

由图5可以看出:基准组的内部湿度下降最大,在17 d时已达到75.8%,说明其在没有内养生的情况

下发生了严重的自干燥现象。而纤维组由于释水内养生作用补偿了湿度下降,且纤维掺量越大,湿度下降最小,该结果与收缩发展规律一致。

当纤维掺量相同时(0.5%掺量除外),5 mm长度纤维组内部相对湿度均高于0.5 mm组,意味着内养生水量是补偿内部湿度的关键,特别是当纤维掺量为2%时,其内部湿度在17 d后仍在90%以上。此外,在5 d时,纤维组和基准组的湿度差异幅度达到最大,随后逐渐趋于缓和下降的趋势,其中对于0.5 mm长度纤维组,0.5%、1%、1.5%和2%纤维掺量在5 d时的相对湿度分别比基准组增大了3.2%、6.1%、9.3%和16.2%,而对于5 mm长度纤维组,0.5%、1%、1.5%和2%纤维掺量在5 d时的相对湿度分别比基准组增大了3.8%、7.9%、13.7%和16.6%。由此可知,在较小纤维用量下,使用长纤维对湿度补偿更有效,而在较大纤维用量下,使用短纤维则更具备养生优势。

由上述分析可知:砂浆内部湿度(H_{RH})与自收缩的发展存在密切关系,因此建立湿度和自收缩指标的相关关系,如图6所示。

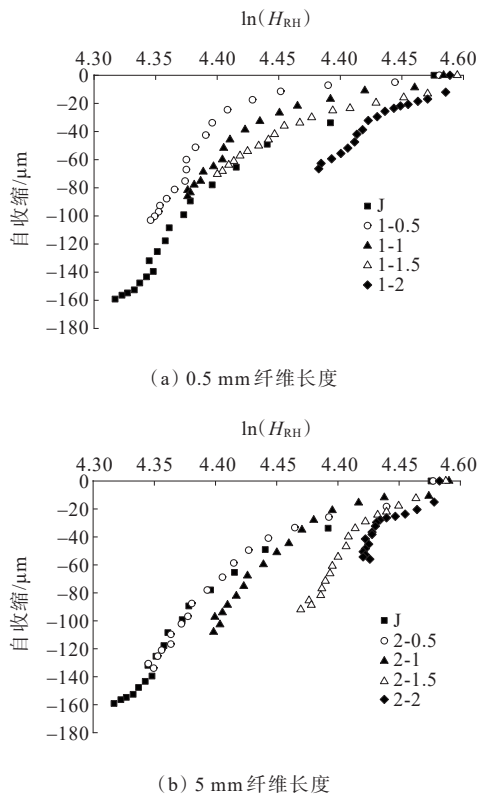


图6 亚麻纤维水泥砂浆湿度和自收缩相关关系

Figure 6 Correlation between humidity and autogenous shrinkage of cement mortar with flax fiber

由图6可以发现:①湿度和自收缩呈现正相关关系。这是由于随着水化过程的持续,内部毛细水逐渐被消耗,导致湿度降低,并同时在毛细孔内部产生 Kelvin 弯液面导致毛细孔负压的产生,该压力达到一定程度便会使混凝土整体产生自收缩,因此,湿度变化可以作为水化过程中水分消耗的反应,而自收缩可以认为是内部水分消耗而产生的结果;②相比于基准砂浆组,随着纤维掺量的增大,关系曲线呈现出更小的收缩量和湿度下降量。文献[18]研究表明,相对湿度和自收缩之间的关系可以表示为线性关系,其斜率被认为与材料的刚度成反比。然而本研究得出的数据不符合上述规律。这可能是由于亚麻纤维的内养生作用对自收缩产生的抑制影响,内养生历程的持续使得砂浆自身倾向密实,其密实度增长率又会随着内养生水的进一步消耗而逐渐衰减。

3 结论

(1) 亚麻纤维的吸释水内养生作用对水泥基材料湿度补偿、收缩抑制及裂缝阻滞具有显著优势。在相同纤维掺量下,0.5 mm长度纤维组的抗压强度比5 mm组大,短纤维具有更好的分散性和微裂缝桥接作用。对于28 d强度,0.5 mm和5 mm纤维长度的最佳掺量分别为0.5%和1%。纤维掺量越大,纤维内部的固有孔隙产生的应力集中薄弱点越多,导致抗压强度越小,但较高的纤维掺量有利于早期强度的增长,这与内养生促进水化及填补孔砂浆隙有关。

(2) 无论纤维长度如何,提高亚麻纤维掺量有利于减小水泥砂浆的自收缩。与基准砂浆组相比,短纤维对自收缩的抑制效果更明显,这是由于短纤维分散性较好,从而促进了砂浆的整体水化度。

(3) 纤维组相比基准组具有更高的湿度内环境,且亚麻纤维掺量越高,内部湿度补偿越显著。相同纤维掺量下,长纤维比短纤维的湿度补偿效果更优,说明内养生水量是补偿内部湿度的关键。湿度和自收缩呈现正相关关系,随着水化过程的持续,内部毛细水逐渐被消耗,导致湿度降低,并同时在毛细孔内部产生毛细孔负压,导致收缩增大,而内养生历程的持续使得砂浆自身趋于密实,其密实度增长率又会随着内养生水的进一步消耗而逐渐衰减。

参考文献:

References:

- [1] 李晋,熊大路,董旭,等.纤维增强聚氨酯水泥复合材料抗弯性能试验研究[J].中外公路,2021,41(1):249-252.
LI Jin, XIONG Dalu, DONG Xu, et al. Experimental study on flexural properties of fiber reinforced polyurethane cement composites[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 249-252.
- [2] 申爱琴.水泥与水泥混凝土[M].北京:人民交通出版社, 2004.
SHEN Aiqin. Cement and cement concrete[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] LIU J H, SHI C J, MA X W, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 702-712.
- [4] LYU Z H, SHEN A Q, HE Z M, et al. Absorption characteristics and shrinkage mitigation of superabsorbent polymers in pavement concrete[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(2): 270-284.
- [5] 高桂海.石灰石粉做矿物掺合料对水泥路面性能的影响研究[J].中外公路,2021,41(5):283-287.
GAO Guihai. Study on influence of limestone powder as mineral admixture on performance of cement pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 283-287.
- [6] JONGVISUTTISUN P, LEISEN J, KURTIS K E. Key mechanisms controlling internal curing performance of natural fibers[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 107: 206-220.
- [7] SYMINGTON M C, BANKS W M, WEST O D, et al. Tensile testing of cellulose based natural fibers for structural composite applications[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43(9): 1083-1108.
- [8] RAMADEVI P, SAMPATHKUMAR D, SRINIVASA C V, et al. Effect of alkali treatment on water absorption of single cellulosic abaca fiber[J]. BioResources, 2012, 7(3): 3515-3524.
- [9] JOHANSEN N A, MILLARD M J, MEZENCEVOVA A, et al. New method for determination of absorption capacity of internal curing agents[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(1): 65-68.
- [10] 谢晓丽.植物纤维改性水泥基复合材料的制备与力学性能研究[D].成都:西南交通大学,2016.
XIE Xiaoli. Preparation of cement based composites reinforced with plant fiber and their mechanical properties [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [11] SREEKUMAR P A, JOSEPH K, UNNIKRISHNAN G, et al. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(3/4): 453-461.
- [12] PICKERING K L, ARUAN EFENDY M G, LE T M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 83: 98-112.
- [13] 马国金,郑小秋,郭平,等.再生纤维素纤维增强水泥砂浆的早期抗裂和自收缩行为[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(3):127-132.
MA Guojin, ZHENG Xiaoqi, GUO Ping, et al. Early-age cracking resistance and self-shrinkage behavior of recycled cellulose fibers-reinforced cement mortar[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3): 127-132.
- [14] 罗成成,王晖,陈勇.纤维素的改性及应用研究进展[J].化工进展,2015,34(3):767-773.
LUO Chengcheng, WANG Hui, CHEN Yong. Progress in modification of cellulose and application[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(3): 767-773.
- [15] SCHRÖFL C, SNOECK D, MECHTCHERINE V. A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: Report of the RILEM TC 260-RSC[J]. Materials and Structures, 2017, 50(4): 197.
- [16] STANCATO R L. Starch: Chemistry and technology[M]. New York: Academic Press, 2012.
- [17] 杨钱荣,赵宗志,张庆钊,等.若干因素对水泥砂浆流变性能的影响[J].建筑材料学报,2019,22(4):506-515.
YANG Qianrong, ZHAO Zongzhi, ZHANG Qingzhao, et al. Influence of several factors on rheological properties of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 506-515.
- [18] BAŽANT Z P, XI Y P. Drying creep of concrete: Constitutive model and new experiments separating its mechanisms[J]. Materials and Structures, 1994, 27(1): 3-14.