

文章编号:1007-9629(2022)04-0327-12

水泥砂浆塑性收缩开裂预警机制拓展

马一平^{1,*}, 王琼琼¹, 付 杰¹, 朱文豪²

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 上海空间电源研究所, 上海 200245)

摘要:为预测水泥砂浆塑性开裂并对其进行有效预防,采用平板法与八字模法在前期初步建立的水泥砂浆塑性开裂预警机制的基础上增加了预测方程的开裂影响因素(材料组成、约束度及分层度),并扩大了环境参数的范围,由此对水泥砂浆塑性开裂预警机制进行了拓展.结果表明:室内建立的未掺PVA纤维的素砂浆七元本构方程以及掺PVA纤维砂浆的九元本构方程可有效预测室内外水泥砂浆的开裂状况;将二者及其相应的开裂判据结合起来构成水泥砂浆塑性开裂预警机制,可在准确预测素砂浆开裂状况后,通过掺加适量PVA纤维来有效减少砂浆的开裂,从而为保证施工质量提供了新方法.

关键词:塑性收缩开裂;开裂影响因素;本构方程;预警机制

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.001

Expansion of Early Warning Mechanism for Plastic Shrinkage Cracking of Cement Mortar

MA Yiping^{1,*}, WANG Qionqiong¹, FU Jie¹, ZHU Wenhao²

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200245, China)

Abstract: In order to predict the plastic shrinkage cracking of cement mortar and prevent it effectively, the cracking factors of the prediction equation (composition, constrained degree and segregated degree) were added and the range of the environmental parameter was expanded by flat plate method and eight-character model method based on the initial establishment of early warning mechanism for plastic shrinkage cracking of cement mortar. Thus the early warning mechanism for plastic shrinkage cracking of cement mortar was expanded. The results show that the seven-element constitutive equation of plain cement mortar without fibers and the nine-element constitutive equation of cement mortar with polyvinyl alcohol (PVA) fibers are established which can effectively predict the cracking of cement mortar. In addition, through combining the constitutive equations and their cracking criteria, the early warning mechanism for plastic shrinkage cracking of mortar is established, which can effectively reduce cracking by adding suitable PVA fibers after predicting the cracking condition of plain mortar correctly and ensure a good construction quality.

Key words: plastic shrinkage cracking; influencing cracking factor; constitutive equation; early warning mechanism

水泥基材料量大面广,是建筑物、道路及桥梁等工程中必不可少的组成部分.但因其自身原因,存在易收缩开裂的缺陷,会对水泥基材料的外观整体性、

抗渗性、钢筋锈蚀性能等产生较大影响,大幅度降低结构物使用寿命.为此,国内外开展了大量研究:Menu等^[1]基于力学理论,利用改进的圆环试验预测

收稿日期:2020-12-23; 修订日期:2021-04-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFB0303200)

第一作者(通讯作者):马一平(1960—),男,山东济宁人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail:ypma1239@sina.com

了喷射混凝土的收缩开裂敏感性;Boshoff等^[2]提出了可预测混凝土塑性收缩开裂的模型,研究得出,减少水分蒸发速率、增加表面水分含量^[3]均可有效缓解混凝土塑性收缩开裂。

但较少有学者将环境、材料组成、约束等施工条件纳入到水泥砂浆开裂预测中。鉴于此,笔者前期重点研究了水泥砂浆的干燥收缩开裂过程,在仅考虑环境变化的情况下初步建立了水泥砂浆塑性收缩开裂预警机制^[4]。但实际施工时水泥砂浆还会受到材料组成、结构及约束等多方面的影响,因此,本文在前期研究基础上进一步拓展该预警机制:增加素砂浆与掺PVA纤维水泥砂浆本构方程中塑性收缩开裂的影响因素,扩大了环境参数的范围,进一步验证该预警机制的准确性及可行性。研究成果

可为工程中准确预测水泥砂浆塑性收缩开裂提供方法,并有效预防开裂,为保障施工质量、提高结构物使用寿命贡献力量。

1 试验

1.1 试验原材料与仪器

水泥(C)采用上海产海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其化学组成¹⁾及物理力学性能同文献[5];砂(S)采用天然河砂,细度模数2.59,粒径分布同文献[5];缓凝剂采用玉堂牌普通食用白砂糖;减水剂(SP)采用湖南产雨虹牌聚羧酸减水剂;Ⅱ级粉煤灰(FA),比表面积341 m²/kg,粉末密度2.61 g/cm³;纤维采用福建产聚乙烯醇(PVA)纤维,其物理力学性能见表1;水(W)为实验室自来水。

表1 PVA纤维的物理力学性能
Table 1 Physical and mechanical properties of PVA fibers

Length/mm	Diameter/ μ m	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Elongation/%
6,9,12,18	40	42	1 600	7.0 $\pm$ 0.5

试验仪器主要包括:JJ-5型水泥胶砂搅拌机;LTC-025-04型激光位移传感器;稠度测定仪;砂浆标准分层度桶;八字模;尺寸为914 mm $\times$ 610 mm $\times$ 20 mm的木模;电子天平,精度0.01 g;温湿度记录仪,温度精度0.3 $^{\circ}$ C,湿度精度3%;SN-100型指针式拉压测力计,量程100 N,测量精度0.1 N;电子台秤,量程100 kg,精度0.01 kg。

1.2 试验方法

1.2.1 塑性收缩抗裂指数测试方法

水泥砂浆塑性收缩抗裂指数 K 为塑性抗拉强度与毛细管收缩应力的比值,是马一平等^[6]早期提出的水泥砂浆塑性收缩开裂判据。塑性抗拉强度与毛细管收缩应力的具体测试方法见文献[6-7]。

1.2.2 失水蒸发速率测试方法

失水蒸发速率 v 是环境条件(温度、湿度、风速和光照)对水泥砂浆收缩影响的量化指标,应与毛细管收缩应力试验处于同一环境下测试,具体测试方法见文献[8]。

1.2.3 约束度的测试方法

约束度 C 是衡量水泥砂浆约束大小的指标,具体测试方法见文献[9]。实验室内水泥砂浆的约束度通过连接杆的直径进行调节,底部为硬化砂浆板时的约束度与连接杆直径为3 mm时的约束度(0.82)接近^[9]。考虑到砂浆底部为硬化砂浆板的情况在工程中

较为普遍,如用途较广的抹面砂浆,故本文将0.82定为常见情况下的约束度取值,即基准砂浆的约束度。基准砂浆指水胶比为0.50,砂灰比为1.00,约束度为0.82,分层度为1.00,减水剂、粉煤灰掺量均为0%的砂浆。下文基准砂浆参数同此处。

1.2.4 分层度的测试方法

分层度 d 是表征砂浆结构的参数。将砂浆标准分层度筒与砂浆放在同一底板上,用1 kg砝码敲击底板若干次,对筒中砂浆进行分层度测试,测试结果用来表征水泥砂浆的结构,具体测试方法见文献[9]。结论如下:不敲击时,砂浆分层度 $d=1.00$ cm;敲击30下时, $d=0.50$ cm;敲击60下时, $d=0$ cm。

2 结果分析与讨论

2.1 素砂浆的七元本构方程

笔者前期初步建立的水泥砂浆塑性收缩开裂预警机制^[4]仅考虑环境变化,构建了基于失水蒸发速率的素砂浆塑性收缩抗裂指数一元本构方程。该方程可准确预测不同环境下固定配合比的砂浆是否开裂,但当其他条件改变时,则无法进行预测。因此本节对方程的开裂影响因素进行扩充,建立了基于水胶比 m_w/m_c 、砂灰比 m_s/m_c 、失水蒸发速率 v 和粉煤灰掺量 w_{FA} 、减水剂掺量 w_{SP} 、分层度 d 及约束度 C 的素砂浆塑性收缩抗裂指数七元本构方程,试验数据见表2。

1)文中涉及的组成、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比。

表2 素砂浆七元本构方程的试验数据
Table 2 Experimental data of seven-element constitutive equation of plain cement mortar^[10-11]

m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{sp}/\%$	C	d/cm	$v/$ ($kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$)	K	Cracking state
0.35	1.00	10	0.20	0.82	1.00	0.05	3.48	Uncracked
0.35	1.00	10	0.20	0.82	1.00	0.05	4.09	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.06	3.06	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.06	3.39	Uncracked
0.40	0.67	10	0.10	0.82	1.00	0.11	1.52	Uncracked
0.40	0.67	10	0.10	0.82	1.00	0.11	1.61	Uncracked
0.35	1.00	0	0.30	0.82	1.00	0.11	2.39	Uncracked
0.35	1.00	0	0.30	0.82	1.00	0.12	1.78	Uncracked
0.35	1.00	0	0.30	0.82	1.00	0.12	1.63	Uncracked
0.40	1.00	0	0	0.24	1.00	0.13	5.09	Uncracked
0.40	1.00	0	0	0.24	1.00	0.13	6.14	Uncracked
0.50	0.67	0	0	0.82	1.00	0.13	1.27	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	1.00	0.13	1.81	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.15	1.38	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.15	1.48	Uncracked
0.35	1.00	0	0.20	0.82	1.00	0.15	1.54	Cracked
0.40	1.00	50	0	0.82	1.00	0.15	1.60	Cracked
0.40	1.00	50	0	0.82	1.00	0.15	1.73	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.15	1.79	Uncracked
0.45	1.00	0	0	0.82	1.00	0.15	2.06	Uncracked
0.35	1.00	0	0.20	0.82	1.00	0.15	2.22	Uncracked
0.45	0.67	10	0	0.82	1.00	0.16	1.36	Cracked
0.40	1.20	55	0.10	0.82	1.00	0.16	1.53	Uncracked
0.40	1.20	55	0.10	0.82	1.00	0.16	1.54	Uncracked
0.40	1.20	55	0.10	0.82	1.00	0.16	1.49	Uncracked
0.50	0.67	0	0	0.82	1.00	0.19	1.17	Cracked
0.45	1.00	30	0	0.82	1.00	0.20	1.29	Uncracked
0.45	1.00	30	0	0.82	1.00	0.20	1.40	Cracked
0.45	0.67	10	0	0.82	1.00	0.21	1.24	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.22	1.03	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.23	0.95	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	0.75	0.23	0.95	Cracked
0.40	1.50	0	0	0.82	1.00	0.23	1.94	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.24	0.90	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	0.75	0.24	0.90	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	0.75	0.24	0.95	Cracked
0.40	1.50	0	0	0.82	1.00	0.24	1.86	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.25	0.98	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	0.25	0.25	0.98	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	0.25	0.25	1.08	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.27	0.98	Cracked
0.45	1.00	0	0	0.82	0.25	0.27	0.98	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.31	1.00	0.28	1.38	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.31	1.00	0.28	1.61	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.44	1.00	0.29	1.19	Uncracked

续表

m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{SP}/\%$	C	d/cm	$v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	K	Cracking state
0.50	1.00	0	0	0.44	1.00	0.30	1.07	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.32	0.77	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.33	0.84	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.34	0.85	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.37	0.58	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.38	0.98	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.39	0.67	Cracked
0.50	1.00	60	0	0.31	1.00	0.41	0.98	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.41	0.70	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.44	1.00	0.41	0.90	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.44	1.00	0.41	0.92	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.31	1.00	0.41	1.16	Cracked
0.50	1.00	60	0	0.31	1.00	0.41	0.92	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.24	1.00	0.42	2.51	Uncracked
0.50	1.00	60	0	0.31	1.00	0.42	0.93	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.24	1.00	0.42	2.32	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.24	1.00	0.44	2.47	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0.31	1.00	0.44	1.12	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.45	0.58	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.51	0.61	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.54	0.64	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.54	0.61	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.54	0.64	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.55	0.71	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.56	0.70	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.56	0.60	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.63	0.70	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.65	0.57	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.70	0.60	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.71	0.68	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.73	0.54	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.73	0.59	Cracked
0.50	1.00	0	0	0.82	1.00	0.73	0.53	Cracked

本文尝试将表2中数据通过Excel进行多项式、Linest函数以及Logest函数拟合,最终选择相关系数最大的Logest函数进行回归分析,得到了适用范围更广的水泥砂浆塑性收缩抗裂指数的七元本构方程:

$$K = 28.2 \times 0.00434^{m_w/m_c} \times 1.30^{m_s/m_c} \times 0.994^{w_{FA}} \times 0.247^{w_{SP}} \times 0.322^C \times 1.79^d \times 0.166^v \quad (1)$$

该方程的相关系数 $R=0.896$,相关性明显. F 统计量 $F=40.7$.当显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,从 F 分布表中查得临界值 $F_{0.05}(7,70)=2.11$, $F>F_{0.05}(7,70)$,表明该七元本构方程整体显著性明显.各参数的显著

性系数见表3.

由表3可知,七元本构方程中就单因素对水泥砂浆塑性收缩抗裂指数 K 的影响而言, v 对 K 的影响最大.

表3 七元本构方程中各参数的显著性系数

Table 3 Parameter significant coefficient of the seven-element constitutive equation

v	C	m_w/m_c	w_{FA}	d	w_{SP}	m_s/m_c
-8.64	-7.69	-4.53	-3.33	2.87	-2.00	1.09

与笔者前期建立的素砂浆一元本构方程^[4]相比:该七元本构方程拓展了水泥砂浆塑性收缩开裂影响

因素,增加了 m_w/m_c 、 m_s/m_c 、 w_{FA} 、 w_{SP} 、 d 及 C 等参数,使预测方程更符合工程中复杂多变的情况,更具有实际意义;同时,环境参数 v 的上限由 $0.51\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 扩大至 $0.73\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,使预测方程更适用于天气极端的施工状况;另外,新方程所采用的数据点比前期建立的素砂浆一元本构方程更多.因此,新建立的七元本构方程可信度更高,适用范围更广,更具有实际工程意义.

将七元本构方程试验数据中不同条件下的 K 值

与其对应的开裂状态归类于数轴中,得到本试验条件下水泥砂浆塑性收缩开裂的新判据,如图1所示.由图1可见:当 $K<0.95$ 时,砂浆开裂;当 $K>1.86$ 时,砂浆不开裂;当 $0.95\leq K\leq 1.86$ 时,砂浆以一定概率开裂.与前期建立的素砂浆一元本构方程的开裂判据节点 1.08 、 $1.79^{[4]}$ 相比,本次新判据的节点均向两侧扩张,因此概率开裂区间增大.由于本次建立的七元本构方程数据点多、范围大,因此所得新判据比前期判据更可信.

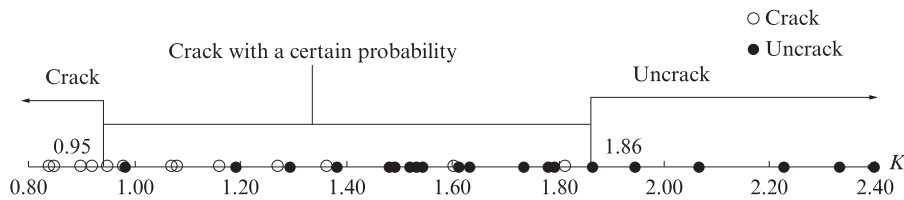


图1 七元本构方程的开裂判据(局部图)

Fig. 1 Cracking criterion of seven-element constitutive equation (partial enlarged view)

2.2 掺PVA纤维水泥砂浆的九元本构方程

在2.1的基础上,利用传统掺PVA纤维的方法进行

减裂,通过调整纤维长度 l 与纤维质量浓度 φ ,测定掺PVA纤维水泥砂浆在不同条件下的抗裂指数,试验数据见表4.

表4 掺PVA纤维水泥砂浆九元本构方程试验数据

Table 4 Experimental data of nine-element constitutive equation of cement mortar with PVA fibers^[9,11]

m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{SP}/\%$	l/mm	$\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	d/cm	$v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	K	Cracking state
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.65	0.57	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.37	0.58	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.45	0.58	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.56	0.60	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.51	0.61	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.54	0.61	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.54	0.64	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.54	0.64	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.39	0.67	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.82	1.00	0.50	0.68	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.63	0.69	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.56	0.70	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.41	0.70	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.55	0.71	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.82	1.00	0.49	0.72	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.39	0.73	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.37	0.76	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.67	0.76	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.32	0.77	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.64	0.78	Cracked
0.40	0.60	0	0.18	6	1.5	0.82	1.00	0.24	0.79	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.67	0.80	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.33	0.84	Cracked

续表

m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{SP}/\%$	l/mm	$\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	d/cm	$v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	K	Cracking state
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.34	0.85	Cracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	0.75	0.24	0.90	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.24	0.90	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.44	1.00	0.41	0.90	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.45	0.91	Cracked
0.50	1.00	60	0	0	0	0.31	1.00	0.41	0.92	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.44	1.00	0.41	0.92	Cracked
0.50	1.00	60	0	0	0	0.31	1.00	0.42	0.93	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.48	0.94	Uncracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	0.75	0.23	0.95	Cracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	0.75	0.24	0.95	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.23	0.95	Cracked
0.50	1.00	0	0	9	0.5	0.82	1.00	0.40	0.95	Cracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	0.25	0.25	0.98	Cracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	0.25	0.27	0.98	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.25	0.98	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.27	0.98	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.38	0.98	Cracked
0.50	1.00	60	0	0	0	0.31	1.00	0.41	0.98	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.22	1.03	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.44	1.00	0.30	1.07	Cracked
0.40	0.60	0	0.18	6	1.5	0.82	1.00	0.23	1.07	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.31	1.00	0.55	1.07	Cracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	0.25	0.25	1.08	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.15	1.08	Cracked
0.50	1.00	0	0	9	0.5	0.82	1.00	0.26	1.08	Cracked
0.40	0.60	0	0.18	6	1.5	0.82	1.00	0.25	1.09	Cracked
0.50	1.00	0	0	9	1.5	0.82	1.00	0.45	1.10	Cracked
0.50	1.00	0	0	6	1.5	0.31	1.00	0.53	1.10	Cracked
0.50	1.00	0	0	6	1.5	0.31	1.00	0.52	1.12	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.31	1.00	0.44	1.12	Cracked
0.50	1.00	0	0	6	1.5	0.31	1.00	0.50	1.15	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.31	1.00	0.41	1.16	Cracked
0.50	0.67	0	0	0	0	0.82	1.00	0.19	1.17	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.44	1.00	0.29	1.19	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.32	1.20	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.32	1.20	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.29	1.23	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.29	1.23	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.31	1.00	0.45	1.24	Cracked
0.45	0.67	10	0	0	0	0.82	1.00	0.21	1.24	Cracked
0.50	0.67	0	0	0	0	0.82	1.00	0.13	1.27	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.31	1.00	0.43	1.28	Cracked
0.45	1.00	30	0	0	0	0.82	1.00	0.20	1.29	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.28	1.30	Uncracked

续表

m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{SP}/\%$	l/mm	$\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	d/cm	$v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	K	Cracking state
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.31	1.35	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.34	1.35	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.34	1.35	Uncracked
0.45	0.67	10	0	0	0	0.82	1.00	0.16	1.36	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.42	1.36	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.32	1.37	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.31	1.00	0.43	1.37	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.15	1.38	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.31	1.00	0.28	1.38	Uncracked
0.45	1.00	30	0	0	0	0.82	1.00	0.20	1.40	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.35	1.45	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	0.5	0.82	1.00	0.31	1.48	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.15	1.48	Uncracked
0.40	1.20	55	0.10	0	0	0.82	1.00	0.16	1.49	Uncracked
0.50	1.50	0	0.10	9	2.0	0.82	1.00	0.17	1.51	Uncracked
0.40	0.67	10	0.10	0	0	0.82	1.00	0.11	1.52	Uncracked
0.40	1.20	55	0.10	0	0	0.82	1.00	0.16	1.53	Uncracked
0.40	0.60	30	0	12	0.5	0.82	1.00	0.15	1.53	Uncracked
0.35	1.00	0	0.20	0	0	0.82	1.00	0.15	1.54	Cracked
0.40	1.20	55	0.10	0	0	0.82	1.00	0.16	1.54	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	0.5	0.82	1.00	0.32	1.58	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.19	1.60	Cracked
0.40	1.00	50	0	0	0	0.82	1.00	0.15	1.60	Uncracked
0.40	0.67	10	0.10	0	0	0.82	1.00	0.11	1.61	Cracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.31	1.00	0.28	1.61	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	0.5	0.82	1.00	0.31	1.61	Cracked
0.35	1.00	0	0.30	0	0	0.82	1.00	0.12	1.63	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.18	1.63	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.18	1.64	Cracked
0.55	1.00	0	0	6	0.5	0.31	1.00	0.30	1.65	Uncracked
0.55	1.00	0	0	6	0.5	0.31	1.00	0.30	1.65	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.21	1.67	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.21	1.67	Uncracked
0.55	1.00	0	0	6	0.5	0.31	1.00	0.29	1.69	Uncracked
0.40	0.60	30	0	12	0.5	0.82	1.00	0.14	1.69	Cracked
0.50	1.50	0	0.10	9	2.0	0.82	1.00	0.14	1.69	Uncracked
0.40	0.60	30	0	12	0.5	0.82	1.00	0.14	1.72	Cracked
0.40	1.00	50	0	0	0	0.82	1.00	0.15	1.73	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.19	1.75	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.19	1.75	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.21	1.77	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.21	1.77	Uncracked
0.35	1.00	0	0.30	0	0	0.82	1.00	0.12	1.78	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.15	1.79	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	0.5	0.24	1.00	0.33	1.80	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.20	1.80	Uncracked

续表

m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{SP}/\%$	l/mm	$\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	d/cm	$v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	K	Cracking state
0.50	1.50	0	0.10	9	2.0	0.82	1.00	0.14	1.80	Uncracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.13	1.81	Cracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.24	1.00	0.33	1.84	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.15	1.85	Uncracked
0.40	1.50	0	0	0	0	0.82	1.00	0.24	1.86	Uncracked
0.45	1.00	50	0	18	0.5	0.31	1.00	0.20	1.89	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.15	1.94	Uncracked
0.40	1.50	0	0	0	0	0.82	1.00	0.23	1.94	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.15	1.94	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	0.5	0.24	1.00	0.32	1.99	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.0	0.82	1.00	0.14	2.06	Uncracked
0.45	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.15	2.06	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.15	2.06	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.15	2.06	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.19	2.06	Uncracked
0.45	1.00	50	0	18	0.5	0.31	1.00	0.21	2.13	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.82	1.00	0.21	2.13	Uncracked
0.50	1.00	0	0	9	0.5	0.82	1.00	0.14	2.14	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.13	2.16	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.15	2.19	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.11	2.19	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.11	2.19	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.82	1.00	0.20	2.20	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	1.5	0.82	1.00	0.20	2.20	Uncracked
0.35	1.00	0	0.20	0	0	0.82	1.00	0.15	2.22	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.11	2.27	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.11	2.27	Uncracked
0.50	1.00	0	0	9	0.5	0.82	1.00	0.14	2.27	Uncracked
0.50	1.00	0	0	9	0.5	0.82	1.00	0.14	2.28	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.24	1.00	0.42	2.32	Uncracked
0.35	1.00	0	0.30	0	0	0.82	1.00	0.11	2.39	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.13	2.45	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	0.5	0.82	1.00	0.17	2.47	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	1.5	0.82	1.00	0.17	2.47	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.24	1.00	0.44	2.47	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.24	1.00	0.42	2.51	Uncracked
0.50	1.00	0	0	12	1.5	0.82	1.00	0.12	2.51	Uncracked
0.50	1.00	0	0	6	1.5	0.82	1.00	0.15	2.70	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.06	3.06	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.07	3.26	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.07	3.26	Uncracked
0.40	1.00	10	0.16	9	1.0	0.82	1.00	0.06	3.33	Uncracked
0.50	1.00	0	0	0	0	0.82	1.00	0.06	3.39	Uncracked
0.35	1.00	10	0.20	0	0	0.82	1.00	0.05	3.48	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.08	3.58	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.08	3.58	Uncracked

续表										
m_w/m_c	m_s/m_c	$w_{FA}/\%$	$w_{SP}/\%$	l/mm	$\varphi/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C	d/cm	$v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	K	Cracking state
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.06	3.89	Uncracked
0.50	1.00	0	0	18	1.5	0.82	1.00	0.06	3.89	Uncracked
0.35	1.00	10	0.20	0	0	0.82	1.00	0.05	4.09	Uncracked
0.40	1.00	0	0.05	6	2.0	0.82	1.00	0.03	4.70	Uncracked
0.40	1.00	10	0.16	9	1.0	0.82	1.00	0.03	5.00	Uncracked
0.40	1.00	0	0	0	0	0.24	1.00	0.13	5.09	Uncracked
0.40	1.00	0	0.05	6	2.0	0.82	1.00	0.03	5.25	Uncracked
0.40	1.00	10	0.16	9	1.0	0.82	1.00	0.03	5.42	Uncracked
0.40	1.00	0	0.05	6	2.0	0.82	1.00	0.03	5.44	Uncracked
0.40	1.00	0	0	0	0	0.24	1.00	0.13	6.14	Uncracked

利用 Excel 中 Logest 函数对表 4 中数据进行回归分析,得到掺 PVA 纤维水泥砂浆塑性收缩抗裂指数的九元本构方程:

$$K=13.4\times 0.0142^{m_w/m_c}\times 1.68^{m_s/m_c}\times 0.993^{w_{FA}}\times 0.182^{w_{SP}}\times 1.01^l\times 1.14^\varphi\times 0.382^C\times 1.90^d\times 0.0714^v$$

(2)

该方程相关系数 $R=0.894$,相关性明显. F 统计量 $F=71.1$.在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时, $F_{0.05}(9,160)=1.94$, $F>F_{0.05}(9,160)$,表明该方程整体显著性明显.九元本构方程中各因素的显著性系数见表 5.

结合表 3、5 可知,显著性系数绝对值较大的前 3 个变量(v 、 C 、 m_w/m_c)并未改变,说明就单因素而言,上述参数对 K 值影响较为明显.

表 5 九元本构方程中各参数的显著性系数									
Table 5 Parameter significant coefficient of the nine-element constitutive equation									
v	C	m_w/m_c	w_{FA}	m_s/m_c	d	w_{SP}	φ	l	
-18.6	-9.61	-5.58	-4.29	3.66	3.45	-3.44	2.98	1.96	

与前面的七元本构方程类似,此九元本构方程比文献[4]中建立的掺 PVA 纤维水泥砂浆三元本构方程更具有可信度,更符合工程实际中复杂多变的情况,更满足实际施工条件.

将九元本构方程试验数据中抗裂指数与其对应的开裂状态归类于数轴中,可得到掺 PVA 纤维水泥砂浆塑性收缩开裂的新判据,见图 2.由图 2 可见:当

$K<0.93$ 时,掺 PVA 纤维的水泥砂浆开裂;当 $K>1.84$ 时,砂浆不开裂;当 $0.93\leq K\leq 1.84$ 间,砂浆以一定概率开裂.与文献[4]中建立的掺 PVA 纤维水泥砂浆三元本构方程的开裂判据节点 0.91、1.20 相比,新判据节点皆增大,且不开裂区间的最小值增大较为明显,概率区间范围增大.由于新判据的样本点多、范围广,因此其可信度更高.

2.3 预警机制的拓展及验证

2.1 和 2.2 已拓展建立了塑性收缩阶段预测素砂浆与掺 PVA 纤维水泥砂浆开裂状况的本构方程,将二者及其开裂判据结合,可建立新的水泥砂浆塑性收缩开裂预警机制,即:施工前使用式(1)对砂浆开裂状况进行预测,若 K 值在不开裂区间,则预测为不开裂,可直接进行施工;若预测为开裂,则可掺加 PVA 纤维进行减裂,再使用式(2)来验证掺 PVA 纤维水泥砂浆的开裂状况,若预测为不开裂,则说明 PVA 纤维减裂效果足够,可直接施工,若掺 PVA 纤维后预测仍为开裂,则调整纤维参数,再次用式(2)进行验证,直至预测为不开裂,方可施工.

为验证本文拓展的预警机制,笔者将前期初步建立的预警机制试验数据[4]代入本文预警机制中.其中,前期建立的三元本构方程只能改变 v 、 l 与 φ 这 3 个变量, m_w/m_c 、 m_s/m_c 、 w_{FA} 、 w_{SP} 、 d 及 C 不可改变,后 6 个变量采用基准砂浆的取值参数(具体数据见上文).将以上数据代入本文九元本构方程,结果见表 6.

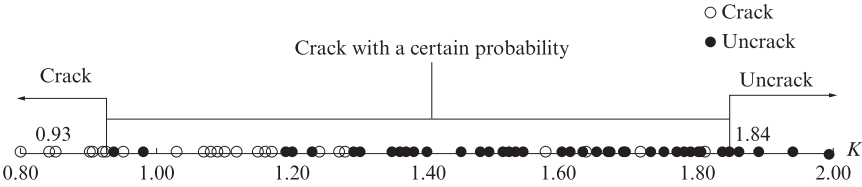


图 2 九元本构方程的开裂判据(局部图)
Fig. 2 Cracking criterion of nine-element constitutive equation (partial enlarged view)

表6中试验1、2是室内试验.由试验1可知,在 $v=0.33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,其他变量为基准参数时,式(1)预测素砂浆 $K=0.94$,小于素砂浆开裂判据中开裂最大值(0.95),预测砂浆开裂.实际砂浆试件确实开裂($K=0.97$),与预测的状态相同,且预测 K

值相对于实测 K 值的误差为2.7%,小于15%,在可接受范围内(15%为水泥基材料研究领域一般可接受的变异范围).说明本文方程的预测结果符合实际测量的结果,式(1)可准确预测该试验点的砂浆开裂状况.

表6 前期数据在本文九元本构方程中的验证结果
Table 6 Validation results of nine-element constitutive equation by pre-data

Test	Location	$v/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)	$l/$ mm	$\varphi/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Theoretical K	Pre-theoretical K	Measured $K^{[4]}$	Error/ %	Predicted state	Pre-predicted state	Measured state
1	Indoor	0.33		0	0.94	0.93	0.97	2.7	Cracked	Cracked	Cracked
2	Indoor	0.33	12	1.5	1.33	1.25	1.33	0.1	Probability cracking	Uncracked	Uncracked
3	Outdoor	0.32		0	0.96	0.95	0.88	9.2	Probability cracking	Cracked	Cracked
4	Outdoor	0.31	18	1.5	1.49	1.23	1.36	9.3	Probability cracking	Uncracked	Uncracked

Note: "Error" is relative error between theoretical K and measured K .

预测素砂浆在此条件下会开裂后,在同样的环境下掺加 12 mm 、 $1.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的PVA纤维进行减裂.将试验2的数据代入式(2),可得砂浆预测 K 值为1.33,处于九元本构方程开裂判据概率区间内,预测砂浆以一定概率开裂.实际测量结果砂浆未开裂,属于概率开裂的一种情形,且预测 K 值与实测 K 值相符,说明九元本构方程的预测结果符合砂浆实际测量结果,式(2)可在一定范围内准确有效地预测掺PVA纤维砂浆的开裂状况.本文九元本构方程预测 K 值1.33和前期三元本构方程预测 K 值1.25之间的相对误差仅为6.4%,但砂浆开裂的预测状态不一致,这主要是因为本文九元本构方程开裂判据的概率区间范围在前期基础上扩大较多,本文新判据更有效可信,故此次预测结果可信度较高.

上述试验1、2不仅证明了拓展预测方程式(1)与式(2)有效,同时也证明新预警机制在室内试验中科学可行:同样的环境下,用式(1)预测素砂浆在 $v=0.33 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时开裂;掺加 12 mm 、 $1.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的PVA纤维后,再用式(2)预测砂浆将以一定概率开裂,预测 K 值相对素砂浆提高了40.8%,且实际测量结果不开裂,表明掺PVA纤维后砂浆的抗裂效果比未掺时要好,拓展的新预警机制可在一定程度上预测并抑制砂浆开裂.但对于减裂要求高的工程,还需继续调整纤维参数,使预测 K 值处于不开裂区间方可施工.

上述结果显示新预警机制在室内确实科学可行,但考虑到实际施工时,试件多处于室外,比室内环境波动大,故本文将前期室外试验3、4的数据代入新预警机制中,验证其在实际施工条件下是否能较好地适用.与室内试验分析类似:预测素砂浆与掺

PVA纤维水泥砂浆的开裂状况与实际状况皆相同,并且预测 K 值与实际 K 值的相对误差皆在可接受范围内,说明本文建立的素砂浆七元本构方程与掺PVA纤维水泥砂浆的九元本构方程在环境不稳定的室外也可较准确地预测砂浆开裂状况.同时,掺PVA纤维后水泥砂浆的预测 K 值相对素砂浆提高了54.7%,再次说明掺PVA纤维在该条件下的减裂效果较好,证明了在更符合实际施工的情况下新预警机制依然科学可行.

由以上对表6分析可知,本文新预警机制可包容并适用于前期试验结果.为再次验证新预警机制,笔者进行了2组室内、室外试验,其中每组素砂浆与掺PVA纤维水泥砂浆试验应同时进行,保证除纤维参数外其他变量皆相同,但考虑到 v 值不易控制,且 v 值相差较小时对PVA纤维的减裂效果影响有限,故试验中 v 值允许有较小偏差.试验中 m_s/m_c 、 w_{FA} 、 w_{SP} 、 d 及 C 仍取基准砂浆的取值参数(具体数据见上文),其余变量取值及验证结果如表7所示.

与前期试验数据的分析类似,试验5、6的数据显示,素砂浆在 $v=0.55 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的室内情况下预测 K 值与实测 K 值相对误差在可接受范围内,预测砂浆开裂状态准确;然后在相似环境下掺PVA纤维进行减裂,方程预测情况与实际结果仍相符,再次证明本文拓展的预测方程可准确预测素砂浆与掺PVA纤维水泥砂浆是否开裂;同时,掺PVA纤维后砂浆的预测 K 值相对素砂浆提高了14.6%,证明了新预警机制预测与抑制开裂的思路是科学的,但若想确保施工质量还需继续调整纤维参数.试验7、8是在 $v=0.45 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的环境下进行的室外试验,将2次试验数据分别代入式(1)、(2)后的预测状况与实际测

表7 室内室外验证试验数据
Table 7 Experimental data of indoor and outdoor tests

Test	Location	$v/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)	m_w/m_c	l/mm	$\varphi/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Theoretical K	Measured K	Error/ $\%$	Predicted state	Measured state
5	Indoor	0.55	0.50		0	0.64	0.71	10.4	Cracked	Cracked
6	Indoor	0.58	0.50	18	1.5	0.73	0.73	0.1	Cracked	Cracked
7	Outdoor	0.45	0.45		0	1.00	0.89	12.2	Probability cracking	Cracked
8	Outdoor	0.45	0.45	18	1.8	1.32	1.28	3.3	Probability cracking	Uncracked

量结果均相同,且掺PVA纤维水泥砂浆的预测 K 值相对素砂浆提高了32.3%,实际试件不开裂,进一步证明了预测方程的准确性及新预警机制的科学可行性.

前期试验数据及笔者进行的试验结果多次证明了拓展的七元本构方程在 $m_w/m_c=0.35\sim0.50$, $m_s/m_c=0.67\sim1.50$, $w_{FA}=0\%\sim60\%$, $w_{SP}=0\%\sim0.30\%$, $C=0.24\sim0.82$, $d=0.25\sim1.00\text{ cm}$, $v=0.05\sim0.73\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 的范围内可较准确预测素砂浆的塑性收缩开裂状况;拓展的九元本构方程在 $m_w/m_c=0.35\sim0.55$, $m_s/m_c=0.60\sim1.50$, $w_{FA}=0\%\sim60\%$, $w_{SP}=0\%\sim0.30\%$, $C=0.24\sim0.82$, $d=0.25\sim1.00\text{ cm}$, $v=0.03\sim0.67\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, $l=0\sim18\text{ mm}$, $\varphi=0\sim2.0\text{ kg}/\text{m}^3$ 的范围内可较准确地预测掺PVA纤维水泥砂浆的开裂状况.由于预测方程的拓展,新预警机制比前期初步建立的预警机制^[4]更可信,使用范围更广,更符合施工中复杂的条件.并且,多次室内、室外试验证实,新预警机制可准确预测不同参数组合下的水泥砂浆开裂状态并有效减裂,保证工程具有较高的质量安全性及可靠性.

3 结论

(1)在前期素砂浆塑性收缩开裂预测方程的基础上建立了基于水胶比、砂灰比、粉煤灰掺量、减水剂掺量、约束度、分层度及失水蒸发速率的素砂浆塑性收缩抗裂指数七元本构方程和开裂判据,且多次室内、室外试验证明该方程可准确有效地预测素砂浆开裂状况.

(2)建立了基于PVA纤维长度、纤维质量浓度、失水蒸发速率、水胶比、砂灰比、粉煤灰掺量、减水剂掺量、约束度以及分层度的掺PVA纤维水泥砂浆塑性收缩抗裂指数九元本构方程和开裂判据,且多次室内、室外试验证明该方程可对施工中掺PVA纤维水泥砂浆的开裂状况进行有效预测.

(3)结合上述七元本构方程、九元本构方程及其开裂判据,构建了集预测砂浆开裂、掺PVA纤维减裂

于一体的新预警机制,其科学可行性在多次室内、室外试验中得到了验证.

参考文献:

[1] MENU B, JOLIN M, BISSONNETTE B. Assessing the shrinkage cracking potential of concrete using ring specimens with different boundary conditions[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020(8):13.

[2] BOSHOF W P, COMBRINCK R. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 48:34-39.

[3] ZHOU Z D, QIAO P Z. Prediction of restrained shrinkage cracking of shotcrete rings using fracture mechanics-based approach[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(10):04019214.

[4] 马一平,马正航,张乐,等.水泥砂浆塑性收缩开裂预警机制的初步建立[J].建筑材料学报,2019,22(6):839-845.
MA Yiping, MA Zhenghang, ZHANG Le, et al. Preliminary establishment of early warning mechanism for plastic shrinkage cracking of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(6):839-845. (in Chinese)

[5] 马一平,游璐,薛林,等.水泥砂浆塑性收缩开裂多元本构方程的研究[J].粉煤灰综合利用,2017(5):3-8.
MA Yiping, YOU Lu, XUE Lin, et al. Study on multivariate constitutive equation of plastic shrinkage cracking of cement mortar [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2017(5):3-8. (in Chinese)

[6] 马一平,王培铭.水泥基材料塑性收缩抗裂判据研究[J].建筑材料学报,2006,9(5):533-537.
MA Yiping, WANG Peiming. Research on the judge criterion of plastic shrinkage cracking for cement based materials[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(5):533-537. (in Chinese)

[7] 马一平,仇建刚,王培铭.聚丙烯纤维对水泥砂浆塑性收缩行为的影响[J].建筑材料学报,2005,8(5):499-507.
MA Yiping, CHOU Jiangang, WANG Peiming, et al. Effect of polypropylene fiber on the plastic shrinkage stress and plastic shrinkage ratio of mortar [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5):499-507. (in Chinese)

[8] 张乐,马一平,李国友,等.基于水灰比及水分蒸发速度的砂浆开裂本构方程[J].建筑材料学报,2012,15(1):75-79.
ZHANG Le, MA Yiping, LI Guoyou, et al. Constitutive equation of plastic shrinkage cracking related to water-cement

- ratio and evaporation rate of water for cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1):75-79. (in Chinese)
- [9] 张涵. 水泥基材料收缩开裂约束参数及硬化减裂的研究[D]. 上海: 同济大学, 2020.
- ZHANG Han. Research on shrinkage cracking constraint parameters and hardening crack reduction of cement-based materials[D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese)
- [10] 余少同. 水泥基材料收缩开裂约束参数及硬化减裂的研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.
- YU Shaotong. Research on shrinkage cracking constitutive relation of cement-based materials and plastic warping mechanism [D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (in Chinese)
- [11] 马正航. 水泥基材料收缩开裂约束参数及硬化减裂的研究[D]. 上海: 同济大学, 2020.
- MA Zhenghang. Study on environmental parameters of shrinkage cracking of cement-based materials and plastic cracking reduction [D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese)