郑捷,王帆,雷震东,等.绿色高性能减水剂与水泥相容性的评判方法与试验验证[J].地震工程学报,2017,39(1):0088-0094.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2017.01.0088
ZHENG Jie,WANG Fan,LEI Zhen-dong,CHEN Jing-heng,et al.Evaluation Method and Experimental Verification of the Compatibility between Green-high-performance Water-reducing Agent and Cement [J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(1):0088-0094.doi:10.3969/j.issn.1000－0844.2017.01.0088

绿色高性能减水剂与水泥相容性的评判方法与试验验证①

郑 捷[1],王 帆[2],雷震东[1],陈景恒[1],郑山锁[1]
(1. 西安建筑科技大学 建筑设计研究院,陕西 西安 710055;2. 西安工业大学 建筑工程学院,陕西 西安 710021)

摘要:基于 Matlab 平台,同时考虑聚羧酸系高性能减水剂的饱和掺量点、水泥浆体的初始 Marsh 时间或流动度、经时损失率、凝结时间和泌水率的影响,将掺有聚羧酸系高性能减水剂受检水泥与基准水泥相比较的各因子作为评判其相容性的指标,建立相应的隶属度函数,运用模糊数学评判方法,打破基准水泥的局限,对聚羧酸系高性能减水剂与水泥的相容性作出较为全面和准确的综合性评价。试验结果分析表明,掺入评价结果为优的同一聚羧酸系高性能减水剂预拌混凝土性能与其水泥浆体一致,相关性较好。研究对于绿色高性能减水剂混凝土的配制具有指导意义。

关键词:模糊评判;相容性;聚羧酸系高性能减水剂;基准水泥
中图分类号:TU528.042 **文献标志码**:A **文章编号**:1000－0844(2017)01－0088－07
DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2017.01.0088

Evaluation Method and Experimental Verification of the Compatibility between Green-high-performance Water-reducing Agent and Cement

ZHENG Jie[1], WANG Fan[2], LEI Zhen-dong[1], CHEN Jing-heng[1], ZHENG Shan-suo[1]
(1.*Architectural Design Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *Shaanxi*, *China*;
2.*School of Architectural Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an* 710021, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In this paper, the initial marsh-time or fluidity (MF), loss rate of fluidity as time (FL), saturation point (SP), setting time (ST), and bleeding rate are considered simultaneously to evaluate the compatibility between a polycarboxylate high-performance water-reducing (HPWR) agent and cement. The comparisons of these parameters between tested concrete and reference cement are conducted, and the corresponding membership functions are established. Then, the fuzzy mathematical evaluation method based on Matlab is used, and the limitation of reference cement is broken, resulting in a more comprehensive and accurate evaluation. Both the premixed concrete and the cement paste, which use the same polycarboxylate HPWR agent, are evaluated as "the best" by the method proposed in this paper, and the consistency is acquired

① **收稿日期**:2015-11-20
基金项目:国家科技支撑计划(2013BAJ08B03,2015BAL01B02-04);国家自然科学基金(51678475);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20136120110003)
作者简介:郑 捷(1988－),女,陕西西安人,讲师,从事建筑与结构设计研究。E-mail:julie1314fl@126.com。
通信作者:王 帆(1982－),女,河南南阳人,讲师,从事建筑新材料研究。E-mail:ship_wang2955@sina.com.cn。

according to the performance experiment. Results also show that they have good correlation. The research findings can serve as guidelines in the preparation of green concrete made of HPWR agents.

Key words: fuzzy evaluation; compatibility; polycarboxylates high performance water-reducing (PC-HPWR) agent; reference cement

0　引言

随着经济的快速增长和城市规模的不断扩大，混凝土技术越来越向高强化、高性能化、绿色环保等方向发展和提高，对具有减水、保坍、增强、低收缩和环保的聚羧酸系高性能减水剂的应用也越来越广泛。聚羧酸系高性能减水剂除了高减水率外，更重要的性能是其与水泥之间的相容性，相容性不好则会影响所配制混凝土的各种性能，如减水塑化效果差，预拌混凝土出现泌水、分层离析现象，预拌混凝土坍落度损失较大甚至出现异常凝结，硬化混凝土各龄期强度无明显提高，硬化混凝土体积稳定性和早期开裂性能无明显改善等。因此对聚羧酸系高性能减水剂与水泥之间相容性给出较为准确的评价十分必要。

指导工程实践的减水剂与水泥之间相容性检测方法通常有 Marsh 筒法（标准法）和水泥净浆流动度法（代用法）。随着减水剂技术的提高和应用领域的扩展，减水剂与水泥之间的相容性问题已引起国内外学者的广泛关注[1-8]。我国，虽然在研发、工业化生产方面已重视聚羧酸系高性能减水剂与水泥的相容性，但通常指导工程应用的多限于以基准水泥的推荐性指标。

本文将结合定性与定量分析，通过研究聚羧酸系高性能减水剂与水泥的相容性影响因子及其相互关系，基于 Matlab 平台，利用模糊数学评判方法定量地评价聚羧酸系高性能减水剂与水泥的相容性。

1　模糊评判理论概述

模糊理论是由美国加利福尼亚伯克利分校电气工程系的系统理论专家 L.A.zadeh 教授结合康托尔的经典集合理论与 J.Lukasievicz 的多值逻辑理论于 1965 年创立和发展的[9]，模糊评价与预测是其中的一个分支。

聚羧酸系高性能减水剂与水泥之间相容性的好与坏并没有一个明确的界限，属于一个模糊的概念，且影响其的诸多因子也具有模糊性。因此可以应用基于 Matlab 的模糊数学方法进行评判。本文提出的模糊数学评价方法采用线性加权平均模糊综合评判模型，即：确定评判因子形成模糊集合，建立因子隶属度函数并确定因子权重，选取模糊关系合成算法-加权平均型算子，最后依据最大隶属或加权平均原则进行评判。图 1 为其框架示意。

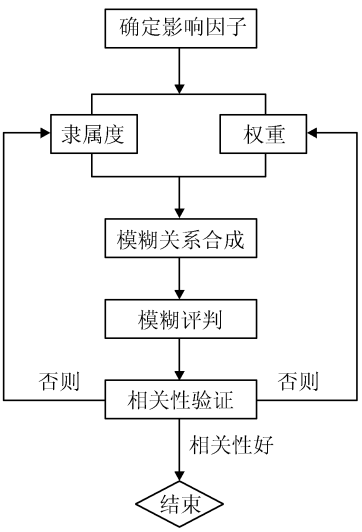


图 1　模糊评价框架示意

Fig.1　Fuzzy evaluation framework

2　基于 Matlab 的相容性模糊评判

2.1　评判因子及评价集合确定

标准《JC/T 1083-2008 水泥与减水剂相容性试验方法》对“水泥与减水剂相容性”的定义及其表征参数包含了流动度、经时损失率和饱和掺量点三个要素。肖忠明等[10]指出饱和掺量或接近饱和掺量的保水性也属于水泥与减水剂之间相容性不可忽略的一个方面，避免出现水泥净浆流动度很大但已明显泌水、分层离析的情况。加拿大 Aiticin 等[8]认为水泥与减水剂之间的相容性可依据饱和掺量点的大小及明显程度、水泥净浆黏度、流动度及其经时损失划分类型来评价。

综合考虑以上影响因素，结合工程实践中常用的检测减水剂与水泥之间相容性方法——Marsh 筒法（标准法），作者认为比较全面表征水泥与减水剂相容性的参数或指标应该包括：(1)减水剂的饱和点掺量；(2)减水剂推荐掺量下的初始流动度或 Marsh 时间；(3)减水剂推荐掺量下的流动度经时损失率；(4)减水剂推荐掺量下水泥净浆的初、终凝结时间；

(5)减水剂推荐掺量下或饱和掺量点掺量下水泥净浆的泌水率。故选择饱和点掺加量比(SP)、Marsh时间比(MT)、经时损失率比(FL)、凝结时间差比(ST)和泌水率比(BR)作为评判因子,构成评判因子向量:

$$X=(SP\quad MT\quad FL\quad ST\quad BR)^T \tag{1}$$

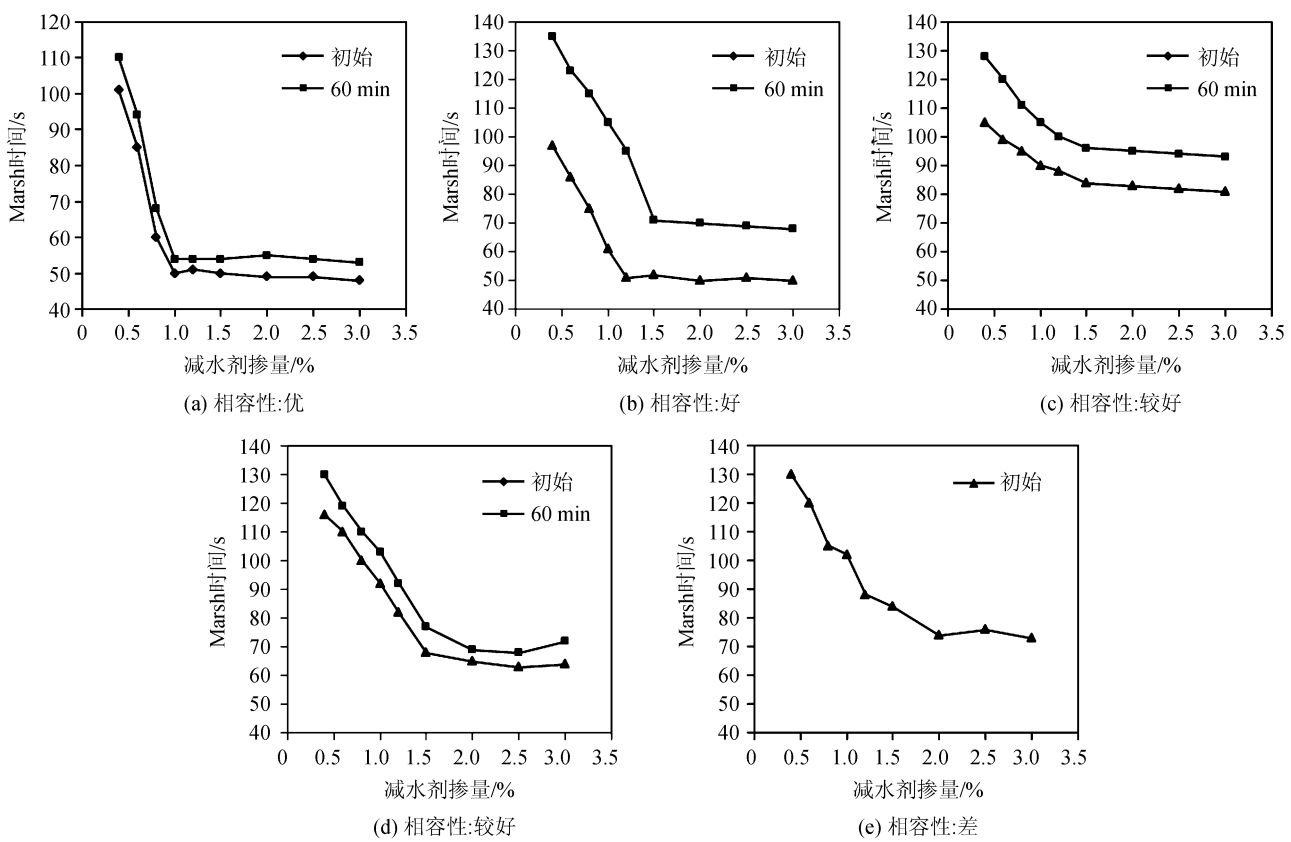
式中:SP 为受检水泥与基准水泥掺聚羧酸系高性能减水剂的饱和点掺量之比(以质量百分比计);MT 为受检水泥与基准水泥掺 0.8%聚羧酸系高性能减水剂的初始 Marsh 时间之比;FL 为受检水泥与基准水泥掺 0.8%聚羧酸系高性能减水剂的经时损失率之比;ST 为受检水泥与基准水泥掺 0.8%聚羧酸系高性能减水剂混凝土拌合物的终、初凝结时间差比;BR 为受检水泥净浆与基准水泥掺 0.8%聚羧酸系高性能减水剂净浆的泌水率比。

依据上述 5 项指标,将水泥与减水剂相容性程度分为优、好、较好、较差(一般)、差 5 个水平作为评价集合的元素。上述 5 个水平相容性程度的具体表现为:(1)优:减水剂饱和点掺量低、饱和掺量点明显,水泥浆体初始流动度大、流动度经时损失小,初、终凝结时间短且基本不出现泌水现象,如表 1 和图 2(a)所示。(2)好:减水剂饱和点掺量低、饱和掺量点比较明显,水泥浆体初始流动度较大、流动度经时损失较多,初、终凝结时间较短且可能会出现轻微的泌水现象,如表 1 和图 2(b)所示。(3)较好:饱和掺量点不明显、掺量低,水泥浆体初始流动度不大,但流动度经时损失较小,初、终凝结时间符合相关规范要求,出现比较明显的泌水现象,如表 1 和图 2(c)所示。(4)较差:饱和掺量点不明显且掺量较高,水泥浆体初始流动度不大,但流动度经时损失较小,

表 1 不同相容性水平的凝结时间和泌水率

Table 1 Setting time and bleeding rate of different compatibility level

指标	相容性水平				
	优	好	较好	较差	差
初凝时间/min	[45,50)	[50,55)	[55,60)	≥60	≥60
终凝时间/min	(330,345]	(345,360]	(360,380]	>380	>390
泌水率(3 h)/%	≤0.5	(0.5,1]	(1,2]	>2	>3



(a) 相容性:优 (b) 相容性:好 (c) 相容性:较好

(d) 相容性:较好 (e) 相容性:差

图 2 水泥与减水剂相容性的水平

Fig.2 Level of compatibility between PC-HPWR and cement

初、终凝结时间和泌水率均接近相关规范要求的临界值，泌水现象明显，如表 1 和图 2(d)所示。(5)差：减水剂饱和掺量点难以确定，水泥浆体初始流动度较小，与素水泥净浆相比无变化，初、终凝结时间超过相关规范要求，严重泌水甚至出现分层离析、“扒底”现象，如表 1 和图 2(e)所示。

2.2　隶属度函数建立

根据本领域技术专家定性分析，结合已有的试验数据、实践经验与“主观概率”，分别对评判因子 SP、MT、FL、ST 和 BR 建立 Z 型、钟型和 sigmoid 型隶属度函数(图 3)。

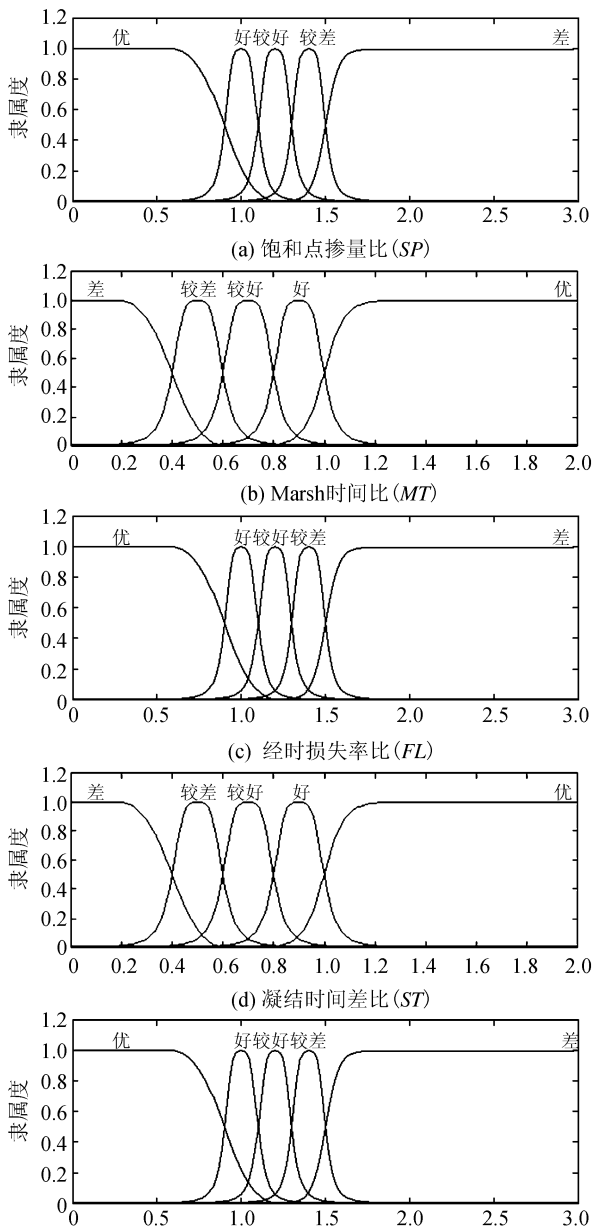


图 3　不同评判因子的隶属度函数

Fig.3　Corresponding membership functions of different evaluation factors

2.3　权重系数确定

评判因子 SP、MT、FL、ST 和 BR 对水泥与聚羧酸系高性能减水剂之间相容性好坏的贡献大小不一，需要确定各评判因子的权重系数。美国运筹学家萨蒂 T.L.Saaty[10] 提出的层次分析法(AHP 法)是一种定性与定量相结合的层次权重决策分析方法，其简洁、实用且较为系统。本文根据各评判因子的相对重要性采用 AHP 法确定其权重系数。

根据 T.L.Saaty 提出的标度方法及其各级标度的含义(表 2)可建立判断矩阵 A，如式(2)所示；进而求得归一化判断矩阵 A 的特征向量，此即为向量 X 对应的权重向量 W：

表 2　判断矩阵 A 中元素 a_{ij} 的标度方法

Table 2　Scaling method for judgment element a_{ij} in matrix A

标度	含义
1	两两比较，同等重要
3	两两比较，稍微重要
5	两两比较，明显重要
7	两两比较，强烈重要
9	两两比较，极端重要
2,4,6,8	上述相邻判断的中值
倒数	$a_{ij}\cdot a_{ji}=1(a_{ij}>0)$

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/5 & 3 & 2 \\ 6 & 1 & 2 & 5 & 3 \\ 5 & 1/2 & 1 & 5 & 6 \\ 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/3 & 1/6 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$W=(w_1\ \ w_2\ \ w_3\ \ w_4\ \ w_5)^T=\begin{pmatrix} 0.1058 \\ 0.4125 \\ 0.3462 \\ 0.0536 \\ 0.0819 \end{pmatrix} \tag{3}$$

式中：$w_i=\dfrac{\sqrt[5]{\prod_{j=1}^{5}a_{ij}}}{\sum_{i=1}^{5}\sqrt[5]{\prod_{j=1}^{5}a_{ij}}}$，$i,j=1,2,\cdots,5$

衡量判断矩阵 A 不一致程度的一致性指标 CI：

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1},\ n>2 \tag{4}$$

式中：$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\dfrac{(AW)_i}{nW_i}$，为判断矩阵 A 的最大特征根。当 $n=5$ 时，按式(4) 求得 $CI=0.0872$。

5 阶平均随机性指标 RI：

$$RI=\frac{\sum_{i=1}^{2\,000}\lambda_{\max,i}-5}{4} \tag{5}$$

式中：$\lambda_{\max,i}$ 为第 i 个随机判断矩阵的最大特征根。

根据式(5)进行 Matlab 编程，运行结果：$RI=1.119$。一致性比率 $CR=CI/RI=0.078<0.1$，则可判断矩阵 A 一致性检验通过，具有满意的一致性，评判因子权重系数向量 W 可用。

2.4 模糊评判矩阵建立及相容性综合评判

将 5 个评判因子获得的主观评价集合的隶属度形成单因素模糊评判矩阵 B 为：

$$B=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} \end{bmatrix} \tag{6}$$

选取可明显体现权数、充分利用单因素模糊评判矩阵 B、综合程度强的加权平均型算子 $M(\cdot,\oplus)$ 进行模糊合成，确定模糊评判向量 S 为：

$$S=W^T\circ B \tag{7}$$

式中："∘"代表模糊合成算子，则：

$$s_j=\min\left(1,\sum_{i=1}^{5}w_i^T b_{ij}\right),\ j=1,2,\cdots,5$$

分析模糊评判向量 S，按最大隶属原则、加权平均原则或单值化原则进行评判，选用评判结果符合要求的聚羧酸系高性能减水剂产品，并验证对掺有该减水剂混凝土拌合物影响的相关性。

3 试验验证

3.1 试验原材料

试验所用基准水泥应符合《GB 8076-2008 混凝土外加剂》附录 A 相关技术条件要求。受检水泥应符合《GB/T 21372-2008 硅酸盐水泥熟料》及《GB 175-2007 通用硅酸盐水泥》相关技术条件要求。所用水泥的化学成分、矿物成分组成及其物理性能见表 3 和表 4。

受检减水剂为非缓凝液体聚羧酸系高性能减水剂(PCA-FHN-Y)，其化学性能和匀质性指标如表 5 所示，符合《JC/T 223-2007 聚羧酸系高性能减水剂》的要求。

表 3 水泥熟料化学成分及其矿物组成

Table 3 Chemical components and mineral constituent of cement clinker

编号	品种	化学成分(以质量计)/%								主要矿物成分(以质量计)/%			
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$NaO+0.658K_2O$	f-CaO	SO_3	C_3S	C_3A	C_2S	C_3AF
C01	P·Ⅰ 42.5	22.31	4.5	2.95	58.92	3.14	0.57	0.91	0.87	58.92	7.16	14.43	8.87
C02	P·O 42.5R	23.89	4.63	4.47	62.37	2.30	0.58	0.66	0.92	54.61	4.29	23.96	14.83

注：C01 为基准水泥。

表 4 水泥物理性能

Table 4 Physical properties of cement

编号	品种	初凝时间/min	终凝时间/min	标准稠度(按质量计)/%	细度/($m^2\cdot kg^{-1}$)	氯离子含量(按质量计)/%	抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
							3 d	28 d	3 d	28 d
C01	P·Ⅰ 42.5	128	210	28.1	357	0.015	23.4	53.8	5.3	7.5
C02	P·O 42.5R	135	222	26.8	378	0.015	28.7	54.9	6.0	8.6

注：C01 为基准水泥

表 5 聚羧酸系高性能减水剂的化学性能和匀质性

Table 5 Chemical properties and uniformity of PC-HPWR

编号	外观	含固量/%	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	PH 值	氯离子含量(按折固含量计)/%	甲醛含量(按折固含量计)/%	碱含量($NaO+0.658K_2O$)/%	对钢筋锈蚀作用
PC-HPWR-01	淡黄色透明液体	20.2	1.04	7.2	0.16	0.035	7.8	无
PC-HPWR-02	淡黄色透明液体	20.6	1.06	6.9	0.13	0.029	4.6	无
PC-HPWR-03	黄色透明液体	21.1	1.08	6.5	0.08	0.030	3.9	无

预拌混凝土细骨料选用中偏粗河砂，细度模数为 2.8；粗骨料选用碎石，级配良好，最大粒径为 20 mm。

3.2 试验方法

受检减水剂的饱和掺量点、新拌水泥净浆(浆体)的 Marsh 时间、经时损失率由《JC/T 1083-2008 水泥与减水剂相容性试验方法》的 Marsh 筒法获得，新拌水泥净浆(浆体)初、终凝结时间和泌水率的测定分别参照《GB/T 1346-2011 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》、《JC/T 2153-2012

水泥泌水性试验方法》中规定的试验方法进行。

3.3　试验结果分析

3.3.1　模糊评判

试验可测得编号为 PC-HPWR-01、PC-HPWR-02 和 PC-HPWR-03 的聚羧酸系高性能减水剂的评判参数：饱和点掺加量比（SP）、Marsh 时间比（MT）、经时损失率比（FL）、凝结时间差比（ST）和泌水率比（BR）（表 6）。

表 6　聚羧酸系高性能减水剂的评判参数

Table 6 Evaluation factors of PC-HPWR

编号	饱和点掺加量比（SP）	Marsh 时间比（MT）	经时损失率比（FL）	凝结时间差比（ST）	泌水率比（BR）
PC-HPWR-01	0.9	1.2	1.1	1.5	0.8
PC-HPWR-02	1.0	1.0	1.1	1.1	0.8
PC-HPWR-03	1.1	1.0	1.2	1.0	0.9

在 Matlab 运行环境下，将各聚羧酸系高性能减水剂的 5 个参数值代入图 3 所示的隶属度函数求得对应的单因素评判矩阵 B_1、B_2、B_3 为：

$$B_1=\begin{bmatrix}0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0.001\,6 & 0\\ 0.993\,3 & 0.012\,2 & 0.001\,6 & 0.000\,4 & 0\\ 0.055\,6 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0\\ 1.000\,0 & 0.000\,8 & 0.000\,1 & 0.000\,1 & 0\\ 0.777\,8 & 0.058\,8 & 0.003\,9 & 0.000\,8 & 0\end{bmatrix}$$

$$B_2=\begin{bmatrix}0.222\,2 & 1.000\,0 & 0.058\,8 & 0.003\,9 & 0\\ 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0.001\,6 & 0\\ 0.055\,6 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0\\ 0.924\,1 & 0.058\,8 & 0.003\,9 & 0.000\,8 & 0\\ 0.777\,8 & 0.058\,8 & 0.003\,9 & 0.000\,8 & 0\end{bmatrix}$$

$$B_3=\begin{bmatrix}0.005\,6 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0\\ 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0.001\,6 & 0\\ 0.000\,0 & 0.058\,8 & 1.000\,0 & 0.058\,8 & 0.006\\ 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0.001\,6 & 0\\ 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.012\,2 & 0.001\,6 & 0\end{bmatrix}$$

则相应的模糊评判集 S_1、S_2、S_3 为：

$$S_1=W^T\cdot B_1=(0.599\,2\ \ 0.235\,9\ \ 0.175\,4\ \ 0.004\,5\ \ 0)$$

$$S_2=W^T\cdot B_2=(0.362\,2\ \ 0.493\,1\ \ 0.184\,9\ \ 0.005\,4\ \ 0)$$

$$S_3=W^T\cdot B_3=(0.274\,6\ \ 0.347\,3\ \ 0.405\,8\ \ 0.022\,5\ \ 0.000\,2)$$

归一化后的$\overline{S_1}$、$\overline{S_2}$ 和$\overline{S_3}$ 为：

$$\overline{S_1}=(0.590\,3\ \ 0.232\,4\ \ 0.172\,8\ \ 0.004\,4\ \ 0)$$

$$\overline{S_2}=(0.346\,4\ \ 0.471\,6\ \ 0.176\,8\ \ 0.005\,2\ \ 0)$$

$$\overline{S_3}=(0.261\,4\ \ 0.330\,6\ \ 0.386\,4\ \ 0.021\,4\ \ 0.000\,2)$$

最后，按最大隶属原则进行评判，编号为 PC-HPWR-01、PC-HPWR-02 和 PC-HPWR-03 的聚羧酸系高性能减水剂的相容性结论评语分别为优、好和较好，则编号为 PC-HPWR-01 的受检减水剂最适宜用于文中所选用水泥（P・O42.5R）的混凝土的配制。

3.3.2　混凝土性能验证

混凝土试验配合比为：水泥：细骨料：粗骨料：水＝450：782：1116：138（kg/m^3），编号为 PC-HPWR-01 的受检减水剂掺量为 1.2%（液体掺量）。预拌混凝土性能试验依照《GB/T 50082-2009 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》要求进行，试验结果如表 7 所列。

表 7　掺最适宜受检减水剂混凝土性能

Table 7　Concrete properties with the most appropriate tested water reducing agent

掺量 /%	减水率 /%	坍落度/mm		含气量 /%	收缩率比 /%	抗压强度比/%		
		初始	60 min			3 d	7 d	28 d
1.2	31.6	208	586	4.1	98.9	187	172	146

可以看出，掺最适宜受检减水剂混凝土的综合性能均有显著提高，表明利用文中所述方法做出的相容性程度为优的减水剂，其混凝土试验结果与水泥浆体试验结果一致，具有较好的相关性，评价模型合理可行。

4　结论

本文基于 Matlab 平台，研究建立了聚羧酸系高性能减水剂与水泥之间相容性的模糊评判模型与方法，并通过混凝土性能试验验证了评判模型的合理性。

（1）选择饱和点掺加量比（SP）、Marsh 时间比（MT）、经时损失率比（FL）、凝结时间差比（ST）和泌水率比（BR）作为评判因子来表征聚羧酸系高性能减水剂与水泥相容性指标，并与基准水泥相比较来建立隶属度函数切实可行。

（2）绿色高性能混凝土制备中矿物超细粉与羧酸系高性能减水剂双掺亦越来越普遍，本文思路与方法可为研究其与水泥之间相容性的影响所借鉴。

参考文献(References)

[1] 李崇智，冯乃谦.梳形聚羧酸系减水剂与水泥的相容性研究[J].建筑材料学报，2004，7(3)：252-260.
LI Chong-zhi，FENG Nai-qian. Study on Compatibility of Comb-like Polycarboxylic Acid Type Water-reducer with Cements[J].Journal of Building Materials，2004，7(3)：252-260.(in Chinese)

[2] 曾磊，郑山锁，吴敏哲.适用于型钢混凝土结构的高强高性能混凝土试验研究及其力学性能分析[J].建筑结构学报，2006，27(增刊)：225-228
ZENG Lei，ZHENG Shan-suo，WU Min-zhe. Experimental Study and Mechanical Analysis on HSHPC Applied to SRC Structures[J].Journal of Building Structures，2006，27(Supp)：225-228.(in Chinese)

[3] Zheng S S，Zeng L，Zhang W H，et al.Multi-objective Optimization on Mix Proportions of HSHPC Applied to SRC Composite Structures[J].International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization，2008，2(3)：231-236.

[4] 冯世虎，张云升，朱薇薇.新型木聚系高效减水剂与水泥的适应性[J].建筑材料学报，2010，13(3)：385-389.
FENG Shi-hu，ZHANG Yun-sheng，ZHU Wei-wei.Compatibility between New Lignosulfate Graft Copolymer Superplasticizers and Cements[J].Journal of Building Materials，2010，13(3)：385-389.(in Chinese)

[5] Agarwalu S K，Masood I，Malhotra S K.Compatib-ility of Superplasticizer with Different Cements[J]. Construction and Building Materials，2000，14(1)：253-259.

[6] Erdogdu S.Compatibility of Superplasticizer with Cements Different in Composition[J]. Cement and Concrete Research，2000，30(3)：767-773.

[7] Hsu K C，Chiu J J，Chen S D，et al.Effect of Addition Time of a Superplasticizer on Cement Adsorption and on Concrete Workability[J].Cement and Concrete Composites，1999，21(3)：425-430.

[8] Aitcin P C，Jolieoeur Camiel，Maegregor J G. Superlastieizer-How They Work and Why They Occasionaly Don't[J].Concrete International.1994，5：45-52.

[9] Zadeh L A. Fuzzy Sets[J]. Information and Control，1965，8：338-353.

[10] Saaty T L. Modelingunstructured Decision Problems——The Theory of Analytical Hierarchies[J].Math Computer Simulation，1978，20：147-158.

（上接 87 页）

[12] 房华，程国建，吴文海.一种基于最大熵的改进型 PCNN 图像分割新方法[J].软件导刊，2010，9(5)：189-191.
FANG Hua，CHENG Guo-jian，WU Hai-wen. Software Guide，an Improved PCNN Image Segmentation Method Based on Maximum Entropy[J].software Guide，2010，9(5)：189-191.(in Chinese)

[13] 马义德，戴若兰，李廉.一种基于脉冲耦合神经网络和图像熵的自动图像分割方法[J].通信学报，2002，23(1)：46-51.
MA Yi-de，DAI Ruo-lan，LI Lian.Automated Image Segmentation using Pulse Coupled Neural Networks and Image's Entropy[J].Journal on Communications，2002，3(1)：46-51.(in Chinese)

[14] 雷祥义.中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J].中国科学：B 辑，1987，17(12)：1309-1318.
LEI Xiang-yi.The Types of Loess Pores in China and Their Relationship with Collapsibility[J].Science in China：Series B，1987，17(12)：1309-1318.(in Chinese)

[15] 李强，鲍苏苏.基于灰度计算饱和黏土的孔隙率[J].重庆师范学院学报：自然科学版，2003，20(1)：30-31.
LI Qiang，BAO Su-su. The Computation of the Porosity of Saturated Clay Based on the Gray Scale of Soft Microstructure Graph[J].Journal of Chongqing Normal University：Natural Science，2003，20(1)：30-31.(in Chinese)

[16] 王宝军，施斌，蔡奕，等.基于 GIS 黏性土 SEM 图像三维可视化与孔隙度计算[J].岩土力学，2008，29(1)：251-255.
WANG Bao-jun，SHI Bin，CAI Yi，et al.3D Visualization and Porosity Computation of Clay Soil SEM Image by GIS[J]. Rock and Soil Mechanics，2008，29(1)：251-255.(in Chinese)

[17] 孙霞，吴自勤，黄畇.分形原理及其应用[M].合肥：中国科学技术大学出版社，2003，10.
SUN Xia，WU Zi-qin，HUANG Yun. Fractal Theory and Its Application[M]. Hefei：Press of University of Science and Technology of China，2003，10.(in Chinese)

[18] 施斌.黏性土击实过程中微观结构的定量评价[J].岩土工程学报，1996，18(4)：57-62.
SHI Bin.Quantitative Assessment of Changes of Microstructure for Clayey Soil in the Process of Compact[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，1996，18(4)：57-62.(in Chinese)

[19] 谷天峰，王家鼎，郭乐，等.基于图像处理的 Q_3 黄土的微观结构变化研究[J].岩石力学与工程学报，2011，30(1)：3185-3192.
GU Tian-feng，WANG Jia-ding，GUO Le，et al. Study of Q_3 Loess Microstructure Changes Based on Image Processing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2011，30(1)：3185-3192.(in Chinese)