

不同龄期下风积沙混凝土孔结构分析与强度预测

董 伟^{1,2}, 蒋鹏鹏¹, 张长敏¹, 孙安琪¹

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 内蒙古自治区土木工程安全与耐久性重点实验室, 内蒙古 包头 014010)

摘 要:为研究养护龄期对风积沙混凝土孔结构的影响, 采用不同掺量的风积沙替代河砂制备风积沙混凝土, 探究风积沙掺量及养护龄期对其孔结构及强度发展的影响规律。试验以抗压强度作为宏观指标, 对不同掺量不同龄期风积沙混凝土进行测量, 微观方面通过 NMR 分析了风积沙混凝土内部孔隙结构, 并利用 SEM 观察其内部微观结构变化。结果表明, 随着养护龄期的增加, 混凝土内部孔隙率逐渐降低, 抗压强度呈现增长的趋势。相同养护龄期下随着风积沙掺量的增加, 混凝土的抗压强度先增加后减少, 风积沙掺量为 25% 时提升效果最好, 28 d 龄期时抗压强度分别为 ASC-0 组、ASC-50 组、ASC-75 组和 ASC-100 组的 1.02、1.08、1.11 和 1.19 倍。通过灰色关联分析发现束缚流体饱和度、无害孔占比与风积沙混凝土抗压强度关联度较高, 建立的 GM(1, 3) 模型可预测不同养护龄期下风积沙混凝土的抗压强度。

关键词:风积沙混凝土; 养护龄期; 抗压强度; 孔结构; 预测模型

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2026)05-0198-08

Pore Structure Analysis and Strength Prediction of Aeolian Sand Concrete at Different Curing Ages

DONG Wei^{1,2}, JIANG Peng-peng¹, ZHANG Chang-min¹, SUN An-qi¹

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, China)

Abstract: [Objective] Owing to its abundant availability, aeolian sand can be used in concrete production. To investigate the influence of curing age on the pore structure of aeolian sand concrete, concrete specimens are prepared by replacing river sand with varying amounts of aeolian sand, and the effects of aeolian sand content and curing age on the development of pore structure and compressive strength are explored. [Methods] In the experiments, compressive strength was used as a macroscopic indicator for aeolian sand concrete specimens with different aeolian sand contents at different curing ages. At the microscopic level, nuclear magnetic resonance (NMR) was employed to analyze the internal pore structure, including T_2 spectrum, porosity, free fluid saturation (MFFI), and bound fluid saturation (BVI). Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the internal microstructure and monitor structural changes in the concrete. [Results] Results showed that the internal porosity of concrete gradually decreased with increasing curing age, while the compressive strength increased correspondingly. At the same curing age, the compressive strength of concrete initially increased and then decreased as aeolian sand content increased. The optimal improvement occurred at 25% aeolian sand replacement. At 28 d age, the compressive strength of the concrete with 25% aeolian sand replacement was 1.02, 1.08, 1.11, and 1.19 times that of ASC-0, ASC-50, ASC-75, and ASC-100, respectively. SEM observations showed that microcracks and pores gradually decreased with curing age, and ASC-25 exhibited superior compactness among all mixtures. The T_2 spectrum displayed three to four

收稿日期: 2025-02-26; 修回日期: 2025-05-16; 接受日期: 2025-06-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52268044); 内蒙古科技大学基本科研业务费项目(2023QNJS161)

作者简介: 董 伟(1987-), 男, 内蒙古包头人, 副教授, 博士, 研究方向为建筑新材料。E-mail: dw617@126.com

通信作者: 蒋鹏鹏(2000-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为混凝土耐久性。E-mail: 17861821198@163.com

peaks, with the first peak as the dominant component. As the curing age increased, the proportion of the first peak area gradually increased in all groups. At 14 d age, the first peak proportions of ASC-0, ASC-25, ASC-50, ASC-75, and ASC-100 were 89.7%, 92.68%, 88.74%, 86.66%, and 86.13%, respectively. The proportion of harmless pores gradually increased in each group. For ASC-25, the harmless pore proportion was 43%, 48%, 60%, 63%, and 66% at 7, 14, 28, 56 d, and 84 d, respectively. The internal pore structure of the concrete gradually became denser. For ASC-25, the bound fluid saturation values were 91.51%, 92.72%, 94.53%, 95.21% and 96.37% at 7, 14, 28, 56 d, and 84 d, respectively, with corresponding porosities of 3.00%, 1.65%, 1.25%, 1.22%, and 1.04%, respectively. [Conclusion] The gray correlation analysis indicates that bound fluid saturation and the proportion of harmless pores are strongly correlated with compressive strength, with correlation coefficients exceeding 0.8. The compressive strength predicted by the GM(1,3) model closely matches the experimental results, with a maximum residual of 0.44 MPa, and the relative errors are all within 5%. The established GM(1,3) model can effectively predict the compressive strength of aeolian sand concrete at different curing ages, providing a reference for practical engineering applications.

Key words: aeolian sand concrete; curing age; compressive strength; pore structure; prediction model

0 引言

在过去的几十年间,我国土木建设行业一路高歌猛进,各类工程项目如火如荼地开展起来。如今,我国已然跻身于世界最大基建国家行列。然而各类工程建设数量急剧攀升,使得河砂被过度开采,资源逐渐走向匮乏^[1]。我国拥有八大沙漠,风积沙资源十分丰富^[2],若能将风积沙作为细骨料用以制备混凝土,不仅可以维护河流生态稳定、实现资源可持续发展,还可以有效利用风积沙资源,抑制沙漠化进程^[3]。目前,已有众多学者针对风积沙混凝土进行研究,研究表明适量风积沙的掺入能够填充骨料间的孔隙,降低混凝土孔隙率,使集料间结合更为紧密^[4-6]。

混凝土是一种多相、非均质的多孔水泥基材料,其宏观性能与微观孔隙结构密切相关^[7-8]。Dong等^[9]研究了硫酸盐-干湿循环作用下风积沙混凝土的劣化机理,利用灰色关联理论建立了抗压强度与孔隙结构参数之间的关系,得到了高精度的GM(1,4)强度预测模型。Li等^[10]通过研究风积沙混凝土的微观力学参数、孔参数和孔径与相对动弹性模量之间的相关性,建立了基于碳化作用下风积沙混凝土使用寿命灰色预测模型,发现孔隙率对风积沙混凝土劣化损伤过程影响较大。混凝土的强度发展与养护龄期密切相关,大量学者对不同龄期下混凝土性能进行研究。刘倩等^[11]研究了不同养护龄期(7、14、28 d)混凝土的孔隙结构参数和抗压强度的变化规律,结果表明混凝土T2谱面积随着养护龄期先增大后减小,抗压强度随着养护龄期逐渐增加。

综上,当前风积沙混凝土的研究大多集中于标

准养护28 d或侵蚀条件作用后的宏微观性能研究,但混凝土的水化反应在28 d后仍持续进行,风积沙的高SiO₂含量可能引发二次火山灰效应,而针对56、84 d等长养护龄期下孔隙结构动态演变的研究相对较少。因此,试验对不同风积沙掺量(0%、25%、50%、75%和100%)的风积沙混凝土在不同养护龄期下(7、14、28、56、84 d)的性能进行研究,利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)对微观形貌和孔隙结构进行分析。最后,基于灰色关联分析,研究了孔隙结构参数与抗压强度之间的关系,建立GM(1,3)强度预测模型。

1 试验概况

1.1 原材料

水泥:P·O42.5普通硅酸盐水泥。粉煤灰品质:Ⅱ级粉煤灰,需水量比为95%,烧失量为2.8%,表观密度为2 200 kg/m³,活性指数85%。粗骨料:5~25 mm连续级配碎石。细骨料:普通河砂与库布齐沙漠的风积沙。骨料主要物理性能指标如表1所示,粒径分布信息如图1所示。外加剂:减水率为25%的聚羧酸高效减水剂。水:普通自来水。

表1 骨料物理性能指标

Table 1 Physical properties of aggregates

种类	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	含泥 量/%	含水 量/%	细度 模数	颗粒级配/ mm
石子	2 680	1 650	2.3	0.3	—	5~25
河砂	2 630	1 530	1.0	2.2	2.9	<4.75
风积沙	2 650	1 580	0.4	0.3	0.7	0.075~0.25

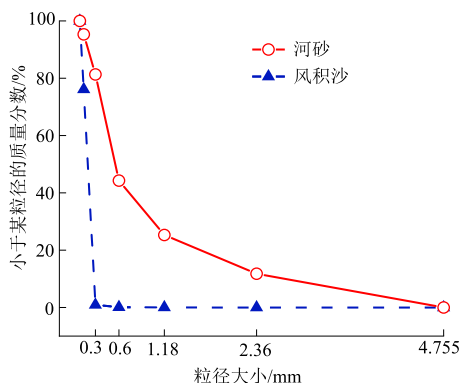


图1 粒径大小分布

Fig.1 Particle size distribution

1.2 试件制作

风积沙混凝土的制备参照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)进行。风积沙以 0%、25%、50%、75% 和 100% 的质量比等质量替代普通河砂配制风积沙混凝土,混凝土配合比列于表 2。

表2 风积沙混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of aeolian sand concrete kg/m³

试验组编号	水泥	粉煤灰	河砂	风积沙	石子	水	外加剂
ASC-0	330	35	697.0	0	1 138	200	3.65
ASC-25	330	35	522.8	174.2	1 138	200	5.48
ASC-50	330	35	348.5	348.5	1 138	200	5.48
ASC-75	330	35	174.2	522.8	1 138	200	7.30
ASC-100	330	35	0	697.0	1 138	200	9.13

注:试验组编号为英文简写与替代量组合形式(如 ASC-100 组为风积沙掺量为 100% 的混凝土),依此类推。

1.3 试验方法

1.3.1 立方体抗压试验

立方体抗压试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行,试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试块。

1.3.2 微观分析

扫描电子显微镜(SEM):仪器为 JSM-7800F 扫描电子显微镜。将不同养护龄期下(7、14、28、56、84 d)的风积沙混凝土试块破碎,从内部选取出大约 1 cm³ 的小块,进行无水乙醇浸泡、研磨、抛光和喷金处理等操作后进行观察。

核磁共振(NMR):仪器为 MesoMR23-060-I 型核磁共振成像分析仪。利用金刚石钻芯机对不同养护龄期混凝土试块进行取芯,将试件切割制成 Φ48 mm×H50 mm 的圆柱体并进行 24 h 真空饱水后开始测试。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度

图 2 为不同风积沙掺量和不同养护龄期下各组

风积沙混凝土的抗压强度。由图 2(a)可知,当风积沙掺量为 25% 时,风积沙混凝土较基准组抗压强度明显提升,而随风积沙掺量的进一步增加,混凝土抗压强度逐渐降低,28 d 龄期时抗压强度分别为 ASC-0 组、ASC-50 组、ASC-75 组和 ASC-100 组的 1.02、1.08、1.11 和 1.19 倍。原因在于适量掺入风积沙可以有效填充内部孔隙,改善骨料颗粒级配^[12],过量掺入风积沙将会造成粗细骨料比例失衡,骨料与浆体粘结程度下降,基体内部孔隙与微裂缝数量逐渐增加,导致其抗压强度降低。养护龄期 7 d 时,ASC-25 组、ASC-50 组和 ASC-75 组抗压强度相较于基准组均有不同程度的增强,这是因为风积沙粒径较普通河砂更加细小且亲水性强^[13],更容易使水化凝胶包裹骨料,加速水泥早期水化,在一定程度上有利于混凝土早期强度的增长。

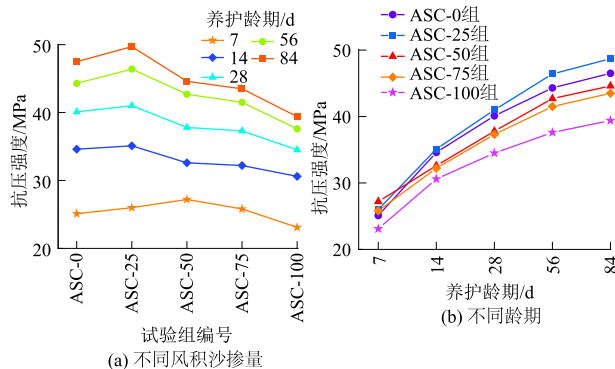


图2 抗压强度

Fig.2 Compressive strength of aeolian sand concrete with varying aeolian sand content at different curing ages

由图 2(b)可知,随着养护龄期的增加,各组风积沙混凝土抗压强度均呈现上升趋势,这是因为不断生成的水化产物填补了内部孔隙,减少了连通孔的数量,提高了整体密实性^[14]。养护龄期分别为 14、28、56、84 d 时 ASC-25 组相较于其他组的抗压强度表现更优,表明掺入适量风积沙有利于混凝土力学性能的提升。28 d 龄期时 ASC-25 组、ASC-50 组、ASC-75 组和 ASC-100 组的抗压强度分别是基准组的 1.02、0.94、0.93 和 0.86 倍。

2.2 SEM 微观结构

为了探究不同风积沙掺量和养护龄期对混凝土内部微观结构的影响,采用扫描电镜对其基质表面与界面过渡区(Interface Transition Zone, ITZ)进行观察。图 3 为养护龄期 7 d 时风积沙混凝土的微观形貌。由图 3 可知,养护 7 d 时水泥水化程度较低,各组风积沙混凝土内部均存在较多孔洞及微裂缝,ITZ 粘结效果较差,砂浆基质密实性较低,混凝土内部缺陷较大。

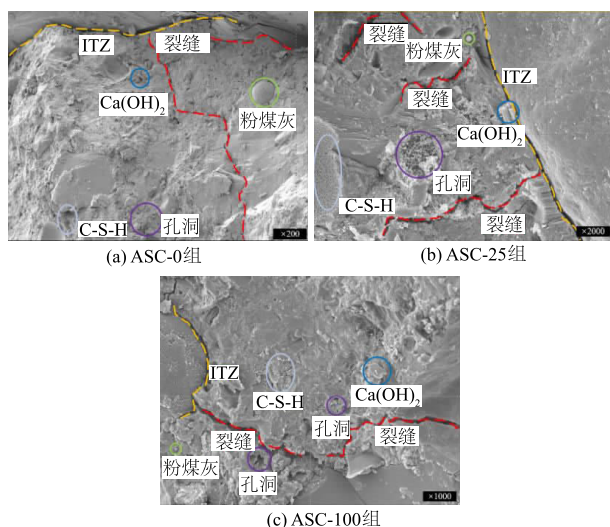


图3 7 d 风积沙混凝土扫描电镜照片

Fig.3 SEM images of aeolian sand concrete at 7 d

图4为养护龄期28 d混凝土的微观形貌。由图4可知,随养护龄期的增加,混凝土内部水泥水化程度进一步增加,片状氢氧化钙和絮状水化硅酸钙等水化产物不断增多,砂浆内部孔洞及微裂缝得到填充,基质密实性得到增强。由图4(b)可以看出,ASC-25组相较于基准组内部更加密实。这是因为风积沙粒径相较于河砂更小,掺入适量风积沙能够在骨料之间形成“填充”效应,改善骨料颗粒级配,填充部分孔隙^[15]。反观ASC-100组掺入100%风积沙作为细骨料导致骨料级配不良,因而相较于ASC-0组和ASC-25组内部基质中孔洞和微裂缝的数量均有增加,密实性较差。养护84 d时风积沙混凝土内部形貌如图5所示。可以看到此时水泥水化程度较为充分,砂浆基质密实性得到进一步加强,几乎看不到微裂缝和孔洞的存在。

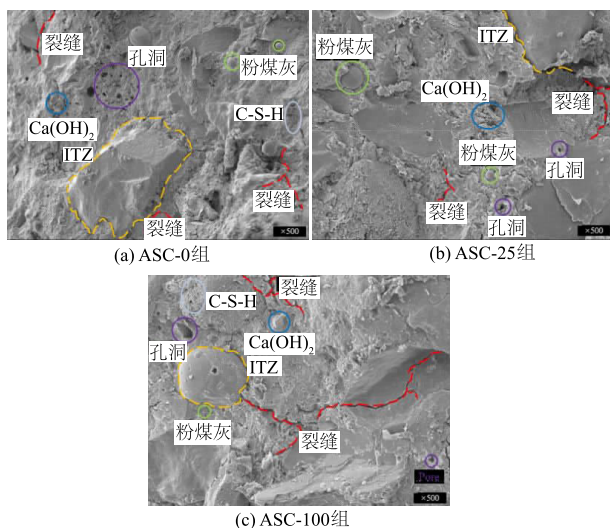


图4 28 d 风积沙混凝土扫描电镜照片

Fig.4 SEM images of aeolian sand concrete at 28 d

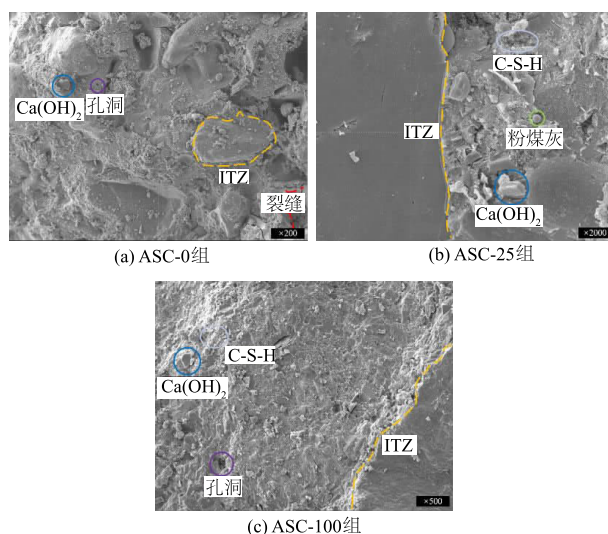


图5 84 d 风积沙混凝土扫描电镜照片

Fig.5 SEM images of aeolian sand concrete at 84 d

综上所述,随着养护龄期的增加,水化产物的生成填充内部孔隙,混凝土整体密实性提升。与基准组相比,风积沙掺量为25%时能够对混凝土的颗粒级配进行优化,进而提高其基体致密性及力学性能。

2.3 NMR 试验分析

为了更加清晰地了解养护龄期及风积沙掺量对风积沙混凝土内部孔隙结构的影响规律,通过核磁共振试验对风积沙混凝土的 T_2 图谱、孔隙率、自由流体饱和度(Movable Fluid Fraction Index, MFFI)和束缚流体饱和度(Bound Volume Irreducible, BVI)等指标进行测试。不同养护龄期下各组混凝土的 T_2 图谱如图6所示。由图6可知各组风积沙混凝土 T_2 图谱均有3~4个波峰,且第一个波峰为主要部分。随着养护龄期的增加,各组风积沙混凝土的“第一峰”面积占比均逐渐增加,表明混凝土内部小孔径的占比增多,这是因为水化产物填补部分孔隙,大孔径数量减少。由图6(c)可以观察到,ASC-25组“第一峰”占比最大,表明该组缺陷相比于其他组较少,密实性较好。养护龄期14 d时各峰面积占比如图7所示,ASC-0组、ASC-25组、ASC-50组、ASC-75组和ASC-100组第一峰面积占比分别为89.7%、92.68%、88.74%、86.66%和86.13%,ASC-25组风积沙混凝土内部小孔径占比最大,密实性最好,ASC-100组性能相对较差,与所测抗压强度规律一致。

依据图6所得 T_2 横向弛豫图谱数据,参照吴中伟教授孔结构理论将孔结构分为四类,得到弛豫时间 T_2 和孔径关系^[16]。

不同风积沙掺量及养护龄期下各组混凝土的孔结构类型占比如图8所示。由图8可知,随着养护龄期的增加,混凝土中多害孔呈现下降趋势。早期

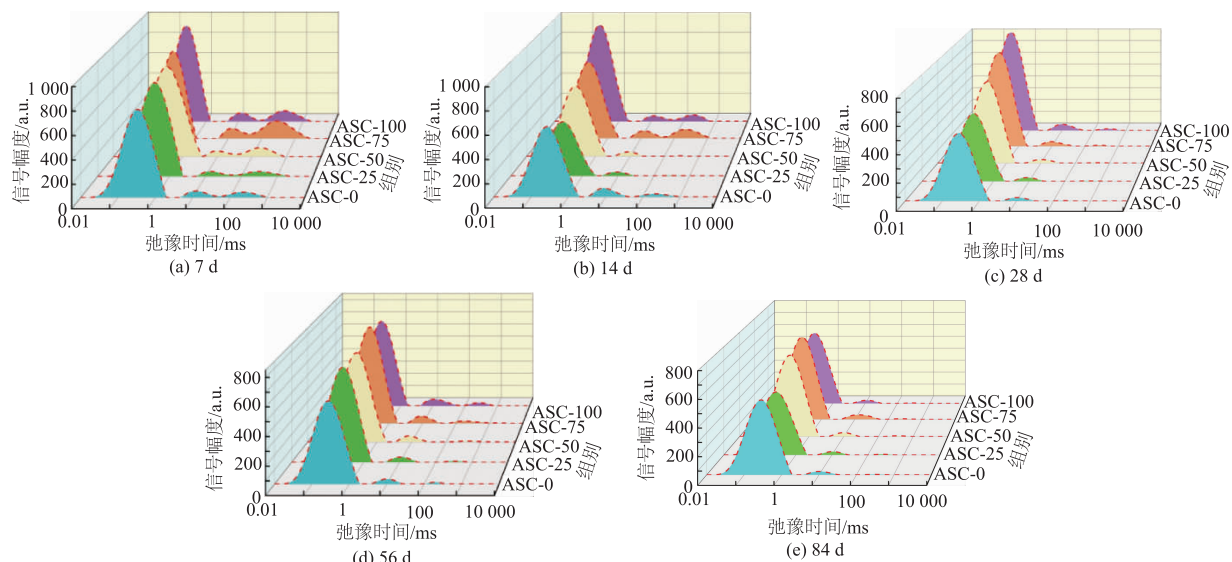
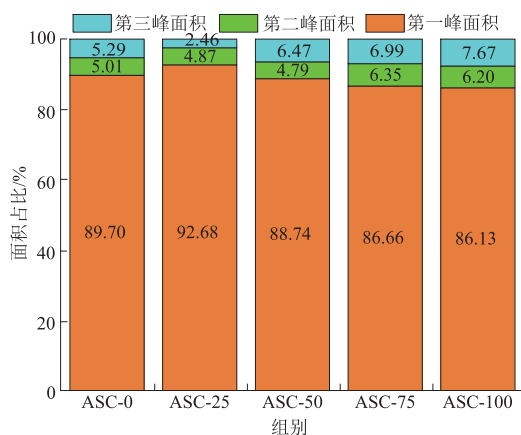
图 6 T_2 图谱Fig.6 T_2 spectra of aeolian sand concrete at different curing ages

图 7 各峰面积占比

Fig.7 Proportion of each peak area

混凝土内部水化不充分,砂浆基质中存在较多的微裂缝和孔洞,有害孔及多害孔占比相对较高。随着养护龄期的增加,各组无害孔占比逐渐增加,以 ASC-25 组为例,无害孔在 7、14、28、56、84 d 无害孔占比分别为 43%、48%、60%、63%、66%,这是因为水化产物不断在其内部进行填充,孔径逐渐细化。

各组风积沙混凝土不同养护龄期流体饱和度及孔隙率变化如图 9 所示。由图 9 可知,随养护龄期的增加,混凝土内部孔隙结构致密性逐渐增加。以 ASC-25 组为例,在养护龄期为 7、14、28、56、84 d 时的束缚流体饱和度分别为 91.51%、92.72%、94.53%、95.21%、96.37%,孔隙率分别为 3.00%、1.65%、

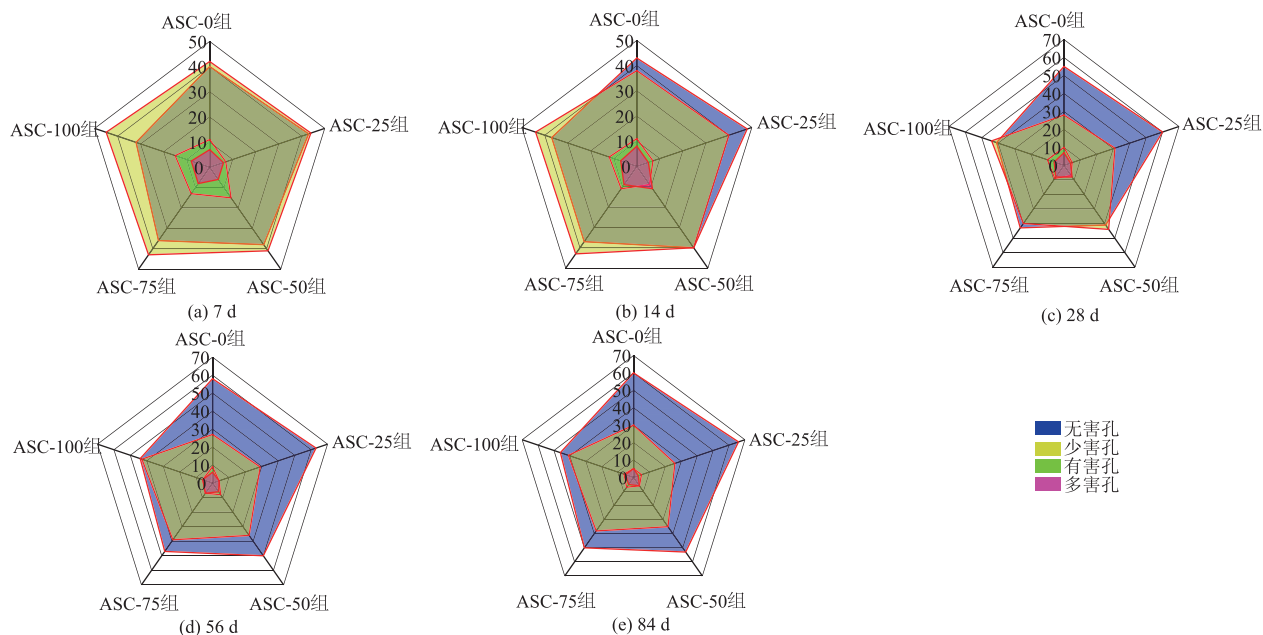


图 8 孔结构类型占比

Fig.8 Distribution of pore structure types

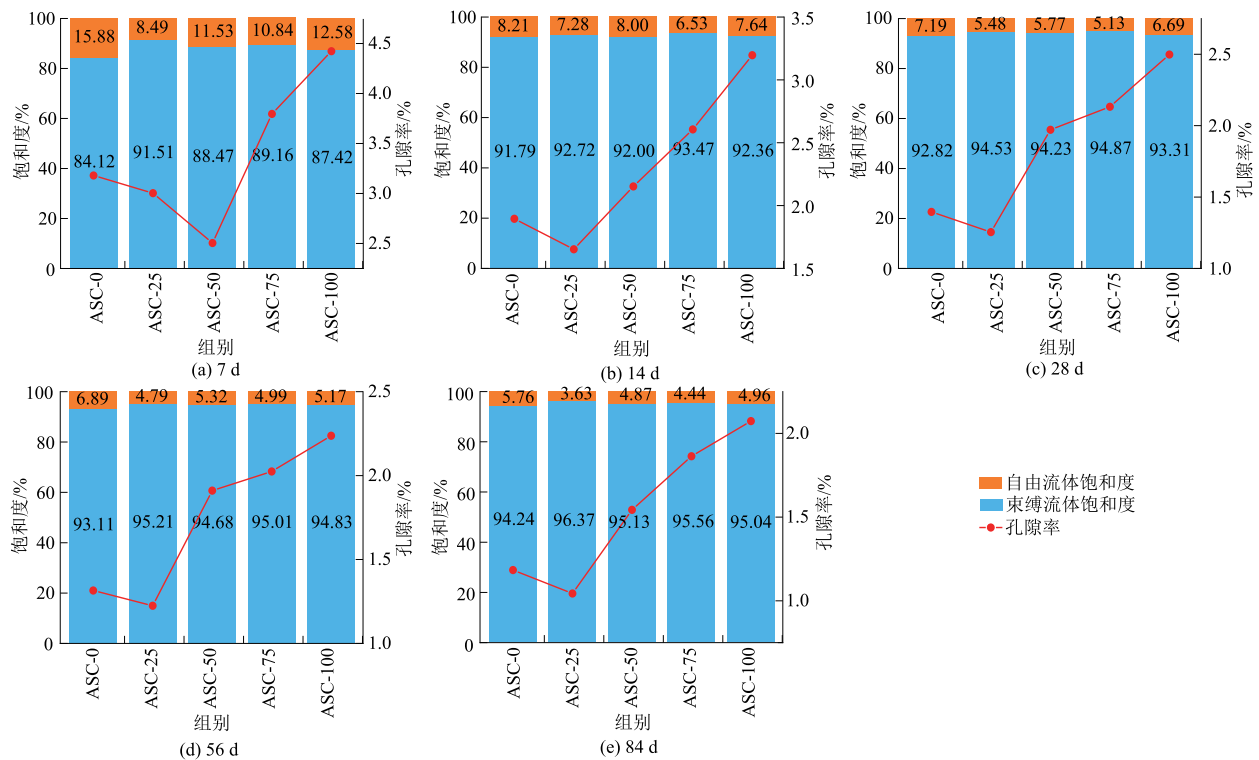


图9 不同养护龄期流体饱和度及孔隙率变化

Fig.9 Fluid saturation and porosity at different curing ages

1.25%、1.22%、1.04%。这是由于随着龄期的增长,水泥水化产物增多,对混凝土内部的填充效果逐渐增大,大孔隙向小孔隙转化,内部结构更密实。束缚流体饱和度作为评价混凝土内部水分流动和水分存储的重要指标。由图9(c)可知,养护龄期为28 d时ASC-25组孔隙率为1.25%,束缚流体饱和度为94.53%,均优于其它各组。

2.4 抗压强度预测模型

2.4.1 灰色关联分析

为了探讨不同养护龄期下风积沙混凝土宏观和微观参数之间的内在联系,利用灰色关联分析各孔隙结构参数对抗压强度的影响,计算过程参考灰色关联度计算方法^[17]。计算结果如图10所示。从图10可以看出束缚流体饱和度、无害孔与抗压强度的灰色关联度较高,其相关系数均在0.8以上。

2.4.2 GM(1,3)抗压强度预测模型

通过灰色关联度分析发现,随着养护龄期的增加,风积沙混凝土抗压强度的灰色关联度变化规律较为稳定。无害孔占比和束缚流体饱和度与抗压强度的关联度较高,可作为评价指标,建立GM(1,3)抗压强度预测模型。设置原始数列,将其进行一次累加,定义均值数列^[18]。

设 $X_1^{(0)}$ 为风积沙混凝土抗压强度,定义 $X_1^{(0)}$ 的紧邻均值数列为 $y_1^{(1)}$, $X_i^{(0)}$ ($i=2,3$)为束缚流体饱和度和无害孔占比,代入数据建立GM(1,3)灰色预测模型,即

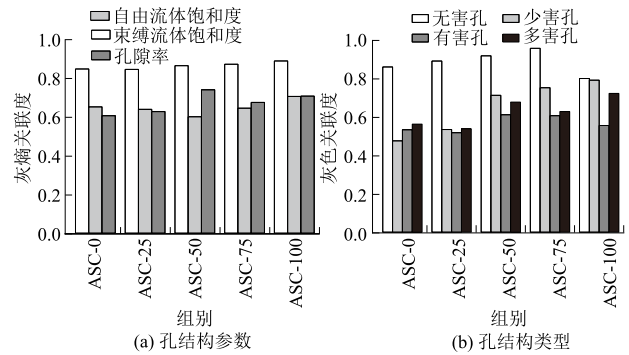


图10 灰熵关联度

Fig.10 Grey entropy correlation degree

$$X_1^{(0)}(k) + py_1^{(1)}(n) = \sum_{i=2}^3 q_i x_i^{(1)}(k) \quad (1)$$

式中: p 为发展系数; q_2 和 q_3 为灰色作用量;参数 p , q_2 和 q_3 构成关联矩阵 $r=[p \ q_2 \ q_3]^T$; n, k 分别表示主序列与相关因素序列的时间点编号。

利用最小二乘法获得系数矢量方程 $C=(A^T A)^{-1} A^T B=[p \ q_2 \ q_3]^T$,其中

$$A = \begin{bmatrix} -y_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & x_3^{(1)}(2) \\ -y_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & x_3^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -y_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & x_3^{(1)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (2)$$

将不同风积沙掺量和养护龄期条件下的抗压强度、无害孔占比和束缚流体饱和度作为建模集,试验数据作为验证集,将试验数据代入 GM(1,3) 预测模型,得到各组风积沙混凝土在不同养护龄期下的强度预测模型, $x'_1{}^{(0)}(n)$ 为各组预测值。如式(3)一式(7)所示。

ASC-0 组

$$x'_1{}^{(0)}(n) = -0.566x_2^{(1)}(n) + 0.929x_3^{(1)}(n) + 1.844y^{(1)}(n) \quad (3)$$

ASC-25 组:

$$x'_1{}^{(0)}(n) = -0.290x_2^{(1)}(n) + 0.728x_3^{(1)}(n) + 1.228y^{(1)}(n) \quad (4)$$

ASC-50 组:

$$x'_1{}^{(0)}(n) = 0.935x_2^{(1)}(n) + 0.238x_3^{(1)}(n) - 0.387y^{(1)}(n) \quad (5)$$

ASC-75 组:

$$x'_1{}^{(0)}(n) = 1.205x_2^{(1)}(n) + 0.097x_3^{(1)}(n) - 0.889y^{(1)}(n) \quad (6)$$

ASC-100 组:

$$x'_1{}^{(0)}(n) = 1.509x_2^{(1)}(n) - 0.042x_3^{(1)}(n) - 1.393y^{(1)}(n) \quad (7)$$

基于 GM(1,3) 模型的抗压强度预测值与测试值如图 11 所示。从图 11 可以看出,抗压强度的预测值与实际测试值较为接近,最大残差为 0.44 MPa。综合 5 组数据,相对误差均在 5% 以内。研究结果表明,GM(1,3) 预测模型具有较高精准度,能够较为准确地预测风积沙混凝土的抗压强度。

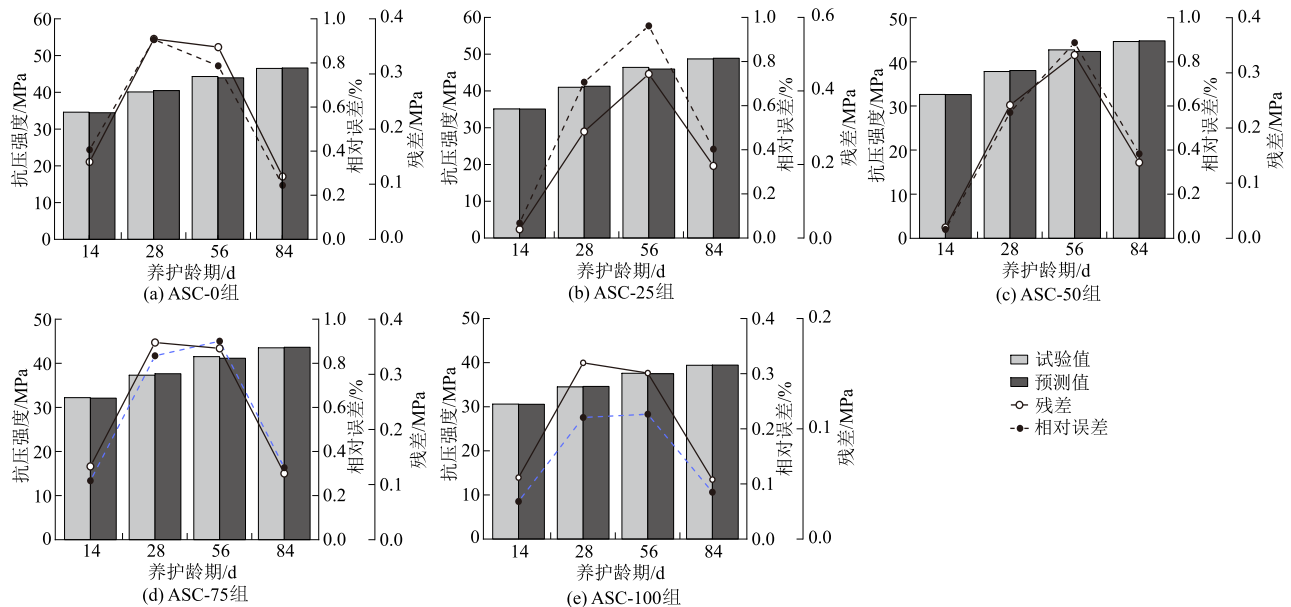


图 11 GM(1,3) 模型抗压强度试验值和预测值

Fig.11 Experimental values of compressive strength and predicted values by GM(1,3) model

3 结 论

(1) 相同风积沙掺量下,随着养护龄期增加,风积沙混凝土抗压强度逐渐增大,内部裂缝和孔洞数量减少,砂浆基质密实性加强。

(2) 相同养护龄期下,ASC-25 组较其它组表现出更好的力学性能,孔隙结构更加致密,孔隙率小,整体密实性更好。风积沙掺量为 25% 时可以充分发挥“填充效应”,填补内部缺陷。

(3) 灰色关联分析结果表明,风积沙混凝土的束缚流体饱和度、无害孔占比与其抗压强度相关性较好,关联度均在 0.8 以上。在此基础上建立灰色预测模型 GM(1,3) 能够预测不同养护时间风积沙混凝土的抗压强度。

参考文献 (References):

- [1] 李玉根,张慧梅,陈少杰,等.风积沙混凝土盐冻多尺度劣化机制[J].复合材料学报,2023,40(4):2331-2342. (Li Yu-gen, Zhang Hui-mei, Chen Shao-jie, et al. Multi-scale Degradation Mechanism of Aeolian Sand Concrete under Salt-frost Condition[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2331-2342. (in Chinese))
- [2] Ye Y, Xie T, Guo T, et al. Durability of Basalt Fiber-reinforced Aeolian Sand Concrete in Extreme Environments: Resistance to Wind-sand Erosion and Salt Freeze-thaw Cycles[J]. Construction and Building Materials, 2024, 457: 139264.
- [3] 王尧鸿,楚 奇,韩 青.库布齐风积沙对各分级河砂的填充效应[J].建筑材料学报,2021,24(1):191-198. (Wang Yao-hong, Chu Qi, Han Qing. Filling Effect of

- Kubuqi Aeolian Sand on Different Classifications of River Sand[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 191-198.(in Chinese))
- [4] Bai J, Zhao Y, Shi J, *et al.* Cross-scale Study on the Mechanical Properties and Frost Resistance Durability of Aeolian Sand Concrete[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(11): 4386-4402.
- [5] 申向东, 邹欲晓, 薛慧君, 等. 风积沙掺量对冻融-碳化耦合作用下混凝土耐久性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 161-167. (Shen Xiang-dong, Zou Yu-xiao, Xue Hui-jun, *et al.* Effect of Aeolian Sand Content on Durability of Concrete under Freezing-thawing-carbonization Coupling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 161-167. (in Chinese))
- [6] Li Y, Zhang H, Liu G, *et al.* Multi-scale Study on Mechanical Property and Strength Prediction of Aeolian Sand Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118538.
- [7] Xue H, Wang H, Zhang Q, *et al.* Micro-morphology and Fractal Characteristics of Pore Structure of Aeolian Sand Concrete under Long-term Semi-immersion with Chloride Solution[J]. Construction and Building Materials, 2024, 447: 137972.
- [8] 朱翔琛, 张云升, 刘志勇, 等. 基于核磁共振技术的硫酸盐冻融下机制骨料混凝土孔结构演变规律研究[J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5478-5491. (Zhu Xiang-chen, Zhang Yun-sheng, Liu Zhi-yong, *et al.* Study on the Evolution of Pore Structure of Manufactured Aggregate Concrete under Sulfate Freeze-thaw Based on Nuclear Magnetic Resonance Technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5478-5491. (in Chinese))
- [9] Dong W, Wang J. Degradation Mechanism and Strength Prediction of Aeolian Sand Concrete under Sulphate Dry-wet Cycles [J]. Construction and Building Materials, 2024, 450: 138617.
- [10] Li G, Gao B, Shen X, *et al.* Study on Microporosity, Mechanics and Service Life Prediction Model of Aeolian Sand Powder Concrete[J]. Jom, 2023, 75(3): 837-847.
- [11] 刘倩, 申向东, 董瑞鑫, 等. 孔隙结构对风积沙混凝土抗压强度影响规律的灰熵分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 108-114. (Liu Qian, Shen Xiang-dong, Dong Rui-xin, *et al.* Grey Entropy Analysis on Effect of Pore Structure on Compressive Strength of Aeolian Sand Concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 108-114. (in Chinese))
- [12] 刘超, 林鑫, 刘化威, 等. 风积沙与再生复合微粉对超高性能混凝土力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5415-5422. (Liu Chao, Lin Xin, Liu Huawei, *et al.* Effect of Aeolian Sand and Recycled Composite Micro-powder on Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5415-5422. (in Chinese))
- [13] Zhu C, Liu X, Lin X, *et al.* Study on the Mechanical Properties and Prediction Model of Ultra-high Performance Concrete Containing Aeolian Sand and Recycled Mixed Powder[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 74: 106880.
- [14] 阚黎黎, 王飞, 邬海江, 等. 不同养护条件下混杂钢纤维超高性能混凝土的早龄期力学性能及开裂特性[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 429-437. (Kan Li-li, Wang Fei, Wu Hai-jiang, *et al.* Mechanical Properties and Cracking Characteristics of UHPC with Hybrid Steel Fibers at Early Age under Different Curing Conditions[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2): 429-437. (in Chinese))
- [15] 董伟, 付前旺, 申向东, 等. 盐冻作用后风积沙混凝土孔结构对抗压强度影响的灰熵分析[J]. 材料导报, 2023, 37(2): 65-70. (Dong Wei, Fu Qian-wang, Shen Xiang-dong, *et al.* Grey Entropy Analysis on Effect of Pore Structure on Compressive Strength of Aeolian Sand Concrete after Salt-freezing[J]. Materials Reports, 2023, 37(2): 65-70. (in Chinese))
- [16] 计亚静. 低温下风积沙混凝土力学性能与孔结构动态演变规律研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2023. (Ji Ya-jing. Study on Mechanical Properties and Pore Structure Dynamic Evolution of Aeolian Sand Concrete at Low Temperature[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2023. (in Chinese))
- [17] 孙卫东. 硫酸盐侵蚀作用下玄武岩纤维改性混凝土耐久性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024. (Sun Weidong. Study on the Durability of Basalt Fiber-modified Concrete under Sulfate Erosion[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024. (in Chinese))
- [18] 刘鑫, 申向东, 薛慧君, 等. 水泥固化砷砂岩强度与孔隙结构演变的灰熵关联分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 125-133. (Liu Xin, Shen Xiang-dong, Xue Hui-jun, *et al.* Grey Entropy Analysis of Strength and Pore Structure Evolution of Cement-solidified Pisha Sandstone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 125-133. (in Chinese))