

Investigation on Compressive Strength of Ceramsite Concrete at Early Age

Shukai Tang, Wenbo Jia, Yan Liu*, Xinghuan Yang

College of Civil Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu
Email: Tangshukai123@163.com, 564315734@qq.com, *liuyan@yzu.edu.cn, 453096484@qq.com

Received: Jul. 23rd, 2020; accepted: Aug. 5th, 2020; published: Aug. 12th, 2020

Abstract

Ceramsite concrete is widely used in construction projects owing to its light weight, good durability and heat preservation. To research the compressive strength of ceramsite concrete at early age, the experiments with 28 groups of cubic specimens with 9 length of a side 150 mm in each group are carried out to measure the compressive strength of ceramsite concrete from the first day to the 28th day, and to analyze the mean value, standard deviation and coefficient of variation of compressive strength of ceramsite concrete in early age with the change of time. The calculation models of the compressive strength of ceramsite concrete within 28 days were established using logarithmic model, exponential model, hyperbolic model and three-parameter model respectively. Finally, the results show that the logarithmic model is in good agreement with the experimental results and can be used to calculate the compressive strength of ceramsite concrete at early age.

Keywords

Ceramsite Concrete, Compressive Strength, Age, Analysis, Calculation Model

陶粒混凝土早龄期抗压强度试验研究

汤书凯, 邾文博, 刘雁*, 杨星欢

扬州大学, 建筑科学与工程学院, 江苏 扬州
Email: Tangshukai123@163.com, 564315734@qq.com, *liuyan@yzu.edu.cn, 453096484@qq.com

收稿日期: 2020年7月23日; 录用日期: 2020年8月5日; 发布日期: 2020年8月12日

摘要

陶粒混凝土具有质轻、耐久性和保温性好等特点, 在建筑工程中多有应用。为研究陶粒混凝土早龄期抗压强度, 进行了28组边长为150mm的立方试件, 从第一天到第28天, 测量陶粒混凝土的抗压强度, 并分析其平均值、标准差和变异系数随时间的变化。分别建立了陶粒混凝土在28天内的抗压强度对数模型、指数模型、双曲线模型和三参数模型。最后, 结果表明对数模型与试验结果吻合良好, 可用于计算陶粒混凝土早龄期的抗压强度。

*通讯作者。

压强度,通过28组,每组含9个边长150 mm的立方体试件的试验,量测陶粒混凝土第1天至第28天的抗压强度,分析陶粒混凝土早龄期抗压强度均值、标准差和变异系数随时间的变化规律。利用对数模型、指数模型、双曲线模型和三参数模型,分别建立陶粒混凝土28 d内抗压龄期强度的计算模型。结果表明对数模型计算值与试验结果吻合最优,可以用于陶粒混凝土早龄期抗压强度的计算。

关键词

陶粒混凝土, 抗压强度, 龄期, 分析, 计算模型

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前国内外已经对陶粒混凝土在建筑材料和土木工程领域的应用作了大量研究[1]-[6],但对于陶粒混凝土早龄期抗压强度的系统研究则较少。关于陶粒混凝土的抗压龄期强度的研究,工程中有强烈的需求。实际工程中往往因为工期原因而较早地对部品构件进行拆模吊装,导致安全事故频发。

陶粒混凝土的早期强度对后期强度及耐久性都有重要的影响[7]。陶粒混凝土强度与龄期关系的研究,主要参照普通混凝土龄期与强度关系进行。对于普通混凝土,利用对数模型、指数模型、双曲线模型、三参数模型等进行抗压强度与龄期之间的关系分析;而对于陶粒混凝土,则大多数仍然利用对数模型进行分析[8]。

以28天抗压强度为标准,定义 $\frac{f_n}{f_{28}}$ 为相对抗压强度。研究结果[9]表明:相对抗压强度和龄期的对数之间存在着线性关系,即:

$$\frac{f_n}{f_{28}} = A \ln n + B \quad (1)$$

式中:

f_n ——第 n 天抗压强度(MPa),

f_{28} ——第 28 天抗压强度(MPa),

A、B 为待定参数。

该式可以用来较好地表述龄期和相对抗压强度之间的关系,但由于陶粒混凝土抗压龄期强度的发展与普通混凝土有所不同,并且随着粗骨料种类、配合比、水泥品种等不同,得到的拟合参数也不相同。抗压龄期强度随龄期的增长对陶粒混凝土的设计和使用至关重要,因此有必要对其进行较为精确的数学描述。本文通过28组,每组含9个边长150 mm的立方体试件的试验,量测陶粒混凝土从第1天到第28天的抗压强度;通过对数模型、指数模型、双曲线模型和三参数模型,分别建立陶粒混凝土28 d内抗压龄期强度的计算模型,研究早龄期陶粒混凝土抗压强度均值、标准差和变异系数随时间的变化规律,以满足工程需求。

2. 试验概述

为了研究陶粒混凝土立方体抗压龄期强度随时间增长的规律,同批制作28组试件,每组9个,试件

尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm，试件合计 252 个。

本试验所采用“洋房牌”P.O 42.5 普通硅酸盐水泥，由扬州亚东水泥有限公司提供，其性能指标如表 1 所示。

Table 1. Cement performance indicators

表 1. 水泥性能指标

混合材掺量(%)	石膏掺量(%)	助磨剂掺量(%)	比表面积(m ² /kg)	安定性(mm)	抗折强度(Mpa)		抗压强度(Mpa)	
					3 d	28 d	3 d	28 d
15.0	5.5	0.035	348	1.0	5.1	8.2	26.0	48.7

所采用的砂为 II 区中砂，其性能指标如表 2 所示。

Table 2. Sand performance indicators

表 2. 砂性能指标

细度模数	级配区	含泥量(%)	泥块含量(%)	表观密度(kg/m ³)	堆积密度(kg/m ³)	堆积密度孔隙率(%)
2.6	II 区	0.4	0.4	2580	1480	43

粉煤灰为 F 类 II 级，其性能指标如表 3 所示。

Table 3. Performance indicators of fly ash

表 3. 粉煤灰性能指标

细度(%)	含水量(%)	烧失量(%)	含水量(%)	三氧化硫(%)
16.8	98	2.08	0.4	1.38

矿粉为 S95 型，其性能指标如表 4 所示。

Table 4. Mineral powder performance indicators

表 4. 矿粉性能指标

比表面积(m ² /kg)	密度(g/m ³)	活性指数(%)		流动度比(%)	含水量(%)	烧失量(%)	三氧化硫(%)
		7 d	28 d				
417	2.90	78	96	101	0.1	1.8	1.25

外加剂为自配复合抗裂增稠引气减水剂，母料为 PCA-10 型聚羧酸系高效减水剂，其性能指标如表 5 所示。

Table 5. Performance Index of PCA-10 Polycarboxylate Superplasticizer

表 5. PCA-10 型聚羧酸系高效减水剂性能指标

含固量(%)	密度(g/m ³)	减水率(%)	抗压强度比(7 d)(%)
11.14	1.024	18	143

本试验所采用的陶粒为粒径 5 mm~10 mm 连续级配的粘土陶粒，如图 1 所示陶粒的粒径为一元硬币的三分之一大小，由江苏建华陶粒有限公司提供，其性能指标如表 6 所示。



Figure 1. Ceramsite used in the test
图 1. 试验所用陶粒

Table 6. Ceramsite performance index
表 6. 陶粒性能指标

堆积密度 (kg/m ³)	表观密度 (kg/m ³)	密度等级	1 h 吸水率(%)	粒型系数	筒压强度 (MPa)
481	735	500	11.4	1.3	1.5

复合外加剂掺量如表 7 所示。

Table 7. Compound admixture dosage
表 7. 复合外加剂掺量

减水剂 (g/m ³)	甲基 (g/m ³)	胶粉 (g/m ³)	聚丙烯纤维 (g/m ³)	引气剂 (g/m ³)
6.24	312	208	312	520

陶粒混凝土的配制强度等级为 LC7.5，其配合比如表 8 所示。

Table 8. Mixture ratio of ceramsite concrete
表 8. 陶粒混凝土配合比

水泥 (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	砂 (kg/m ³)	陶粒 (kg/m ³)	粉煤灰 (kg/m ³)	矿粉 (kg/m ³)	外加剂 (kg/m ³)
270	150	704	442	100	31	7.62

按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081-2002) [10]的规定，在试件制作过程中，采取了严格的质量控制措施，以最大限度地减少试件内部缺陷的产生以及加工制作过程中试件造成的损伤，以降低试验结果的离散程度。

2.1. 试验步骤

陶粒混凝土立方体抗压强度试验按照文献[10]的规定，在压力试验机上进行，试验装置如图 2 所示。陶粒混凝土立方体抗压强度的试验结果，按照下列方法确定：

1) 陶粒混凝土的立方体抗压强度按下式计算：

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中： f_{cc} ——陶粒混凝土立方体抗压强度(MPa)；

F ——试件破坏荷载(N)；

A ——试件承压面积(mm^2)。

陶粒混凝土立方体抗压强度计算精确至 0.1 MPa。



Figure 2. Cube compressive strength test device
图 2. 立方体抗压强度试验装置

2.2. 试验现象

在加载过程中, 陶粒混凝土立方体试件表面很少出现裂缝, 破坏大多发生在试件内部。将试件劈开, 由于早期水泥浆体与骨料的粘结过渡区的孔隙体积和孔径比浆体本身大(孔隙率大), 可以观察到试件内部存在着大量随机分布的气孔, 如图 3 所示。



Figure 3. Internal properties of the specimen at failure
图 3. 破坏时试件内部性状

3. 陶粒混凝土抗压龄期强度理论分析

目前, 主要利用对数模型、指数模型、双曲线模型和三参数模型等对普通混凝土的抗压强度与龄期的关系进行分析; 陶粒混凝土, 抗压强度与龄期之间的关系, 主要也是参照普通混凝土进行, 所以有必要对其进行较为精确的数学描述[11] [12]。

陶粒混凝土抗压龄期强度模型

关于混凝土的抗压龄期强度模型, 目前主要有 4 种, 如表 9 所示。其中 $f(t)$ 为相对抗压强度, f_{ult} 为时间趋于无穷时混凝土强度的定值, t 为龄期, t_0 为混凝土强度开始的时间, A 、 B 、 C 为待定参数。

Table 9. Concrete age resistance strength model [13] [14] [15]
表 9. 混凝土抗压龄期强度模型[13] [14] [15]

模型类别	函数表达式	建议者
对数模型	$f(t) = A \ln t + B$	—
	$f(t) = \frac{1}{1 + A \lg t - t_0^B}$	Lew
	$f(t) = A \cdot e^{\frac{B}{t}}$	JGJ/T 104-2011
指数模型	$f(t) = \frac{1}{f_{ult}} \cdot (1 - e^{-At})$	Nykanen
	$f(t) = \frac{1}{f_{ult}} \cdot e^{\left(\frac{A}{t}\right)^B}$	Freiesleben
	$f(t) = e^{A \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}$	CEB-FIP
双曲线模型	$f(t) = \frac{t}{A + B \cdot t}$	ACI 209
	$f(t) = \frac{t}{1.5 + 0.95 \cdot t}$	AFREM
	$f(t) = \frac{t - t_0}{A + B \cdot (t - t_0)}$	Chin
三参数模型	$f(t) = A \cdot t \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{B + C \cdot t} \right)$	王伟 - 周爱兆

3.1. 陶粒混凝土抗压龄期强度试验结果分析

3.1.1. 抗压龄期强度试验结果

陶粒混凝土试件的抗压龄期强度试验结果如表 10 所示。

Table 10. Test results of age resistance of ceramsite concrete specimens
表 10. 陶粒混凝土试件抗压龄期强度试验结果

龄期 (d)	立方体抗压强度(MPa)								
	第 1 块	第 2 块	第 3 块	第 4 块	第 5 块	第 6 块	第 7 块	第 8 块	第 9 块
1	6.6	6.5	6.8	5.2	6.5	6.8	7.2	6.6	7.2
2	8.6	9.0	9.1	8.8	8.8	9.2	8.4	8.4	9.2
3	10.6	9.5	9.3	9.9	9.5	9.5	8.9	9.7	10.0
4	10.6	10.2	10.6	11.0	9.5	10.0	11.2	10.9	10.2
5	11.1	10.4	11.7	11.0	11.7	11.2	10.9	10.9	12.0
6	11.4	10.7	10.8	11.6	11.9	11.4	11.1	13.1	11.1
7	10.7	10.0	10.1	12.1	11.4	11.7	11.7	10.6	10.1
8	12.1	10.3	12.1	11.7	11.8	11.5	12.2	10.7	11.9
9	11.4	11.3	10.2	11.8	12.2	11.8	11.5	12.1	11.3
10	12.1	11.5	11.5	11.6	11.1	11.7	11.6	11.6	12.6
11	12.8	12.6	12.9	12.0	12.1	11.8	11.9	12.1	11.0

Continued

12	12.4	12.3	11.9	12.1	13.9	12.2	12.8	13.4	13.1
13	12.0	14.0	12.4	12.0	12.8	12.2	12.6	13.0	12.5
14	12.6	12.1	12.9	13.3	13.9	13.2	13.4	13.9	13.7
15	12.3	13.3	12.6	12.5	12.6	13.2	13.0	13.5	12.8
16	13.0	14.5	13.1	14.2	13.9	13.8	13.3	13.5	12.3
17	12.5	14.6	14.3	13.4	12.9	14.5	12.6	12.7	13.8
18	14.2	13.9	13.9	14.3	14.1	13.3	13.4	14.3	13.6
19	14.3	14.1	13.0	14.6	13.9	12.4	14.8	13.4	13.9
20	14.6	14.3	14.8	13.9	13.7	13.4	14.4	13.8	13.5
21	15.3	14.1	14.3	14.5	15.2	12.9	14.4	14.5	12.9
22	14.6	14.0	12.8	14.6	15.0	14.2	12.8	13.5	14.1
23	14.0	14.6	16.2	14.1	14.9	13.4	12.9	14.0	14.3
24	15.2	14.6	15.7	13.2	14.8	14.6	14.5	14.9	13.7
25	14.2	14.1	13.6	16.1	13.7	14.2	15.3	14.3	14.2
26	13.4	14.8	15.5	13.4	14.5	14.5	14.3	12.9	15.0
27	14.4	13.9	14.7	15.1	15.1	15.3	15.3	13.9	14.1
28	15.2	15.3	14.6	15.2	14.8	14.4	14.3	13.6	15.8

3.1.2. 试验结果分析

在混凝土材料试验中，用来表示试验数据分布的统计量可以分为两类，1) 数据集中位置；2) 离散程度。本文利用算术平均值 \bar{x} 来表示数据集中位置，利用标准差 s 和变异系数 c_v 来表示数据离散程度。三者的表达式分别为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{3}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{4}$$

$$c_v = \frac{s}{\bar{x}} \tag{5}$$

陶粒混凝土抗压龄期强度统计分析结果如表 11 所示。

Table 11. Strength statistics of age resistance of ceramsite concrete specimens

表 11. 陶粒混凝土试件抗压龄期强度统计

龄期(d)	统一参数			
	均值 \bar{x}	均值归一化	标准差 s	变异系数 c_v
	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
1	6.6	44.6	0.556	8.4
2	8.8	59.5	0.298	3.4
3	9.7	65.5	0.452	4.7
4	10.5	70.9	0.510	4.9
5	11.2	75.7	0.472	4.2

Continued

6	11.5	77.7	0.682	5.9
7	10.9	73.6	0.759	7.0
8	11.6	78.4	0.624	5.4
9	11.5	77.7	0.559	4.9
10	11.7	79.1	0.400	3.4
11	12.1	81.8	0.550	4.5
12	12.7	85.8	0.632	5.0
13	12.6	85.1	0.590	4.7
14	13.2	89.2	0.571	4.3
15	12.9	86.2	0.383	3.0
16	13.5	91.2	0.635	4.7
17	13.5	91.2	0.780	5.8
18	13.9	93.9	0.357	2.6
19	13.8	93.2	0.727	5.3
20	14.0	94.6	0.469	3.4
21	14.2	95.9	0.804	5.7
22	14.0	94.6	0.737	5.3
23	14.3	96.6	0.884	6.2
24	14.6	98.6	0.705	4.8
25	14.4	97.2	0.749	5.2
26	14.3	96.6	0.804	5.6
27	14.6	98.6	0.552	3.8
28	14.8	100	0.620	4.2

陶粒混凝土抗压龄期强度均值 - 龄期折线图、均值归一化 - 龄期折线图、标准差 - 龄期折线图和变异系数 - 龄期折线图分别如图 4~7 所示。

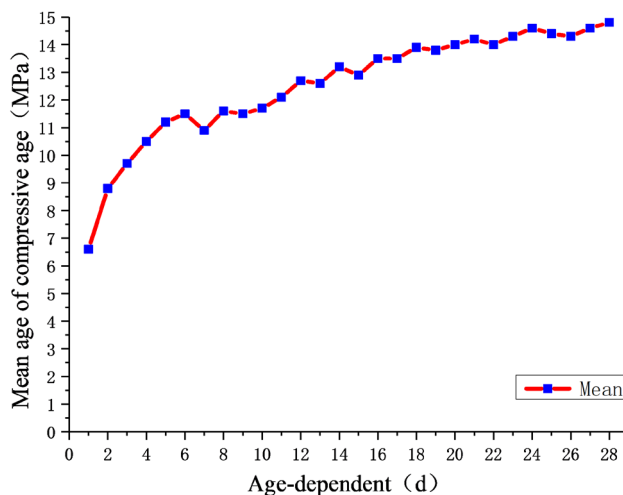


Figure 4. Average age of stress-resistant line chart

图 4. 抗压龄期强度均值 - 龄期折线图

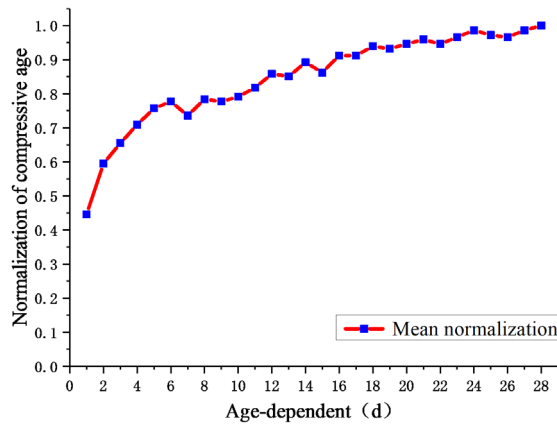


Figure 5. Normalization of age-intensity of age-age stress-resistant age-line diagram

图 5. 抗压龄期强度均值归一化 - 龄期折线图

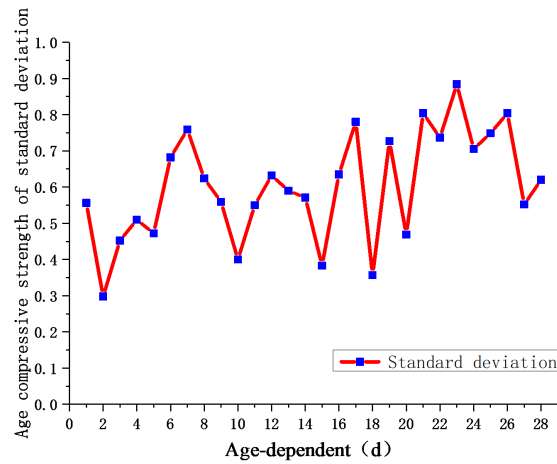


Figure 6. Standard deviation of age during age of compression-age line chart

图 6. 抗压龄期强度标准差 - 龄期折线图

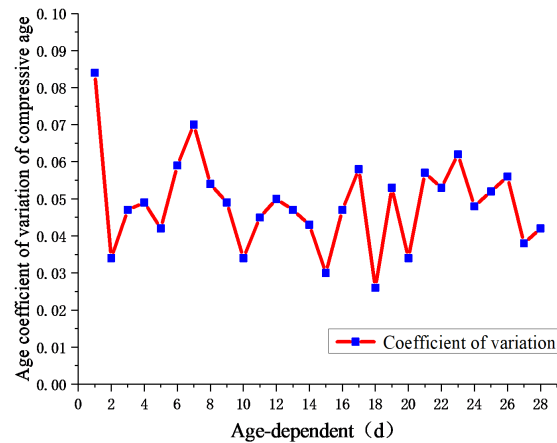


Figure 7. Age-dependent strength coefficient of age-age line chart

图 7. 抗压龄期强度变异系数 - 龄期折线图

通过 Origin 9.1 软件对陶粒混凝土抗压龄期强度均值归一化与龄期的关系进行非线性最小二乘拟合。通过计算加权卡方检验系数(Reduced Chi-square)和校正决定系数(R_{adj}^2), 可以定量判断拟合效果的优劣程度。加权卡方检验系数越接近于 0, 校正决定系数越接近 1, 拟合效果越好。对陶粒混凝土抗压龄期强度均值归一化 - 龄期关系进行非线性最小二乘拟合, 结果如表 12 所示。

Table 12. Normalized age-intensity-time nonlinear least squares fitting results
表 12. 抗压龄期强度均值归一化 - 龄期关系非线性最小二乘拟合结果

模型类别	函数表达式	加权卡方检验系数	校正决定系数
对数模型	$f(t) = 0.1565 \ln t + 0.46801$	4.38×10^{-4}	0.976
指数模型	$f(t) = 0.96484e^{\frac{1.0544}{t}}$	2.73×10^{-3}	0.848
双曲线模型	$f(t) = \frac{t}{1.68578 + 0.99471t}$	1.63×10^{-2}	0.909
三参数模型	$f(t) = 15.22836t \cdot \ln\left(1 + \frac{1}{25.18033 + 15.14701t}\right)$	1.69×10^{-3}	0.905

4 种模型的拟合曲线图和残差 - 龄期图如图 8~15 所示。若残差散点图显示无序, 则表明拟合度好。若残差散点图显示残差值随着自变量的变化, 具有增大或减小的趋势, 则表明模型不稳定, 随着自变量的变化, 拟合模型的误差增大或减小, 可能还有其他因素影响模型。如果残差散点图显示残差值不随自变量变化, 则表明模型稳定。

综上所述, 在上述 4 种模型中, 对数模型拟合度最佳。指数模型、双曲线模型和三参数模型存在的共性问题是在起始阶段和后期阶段, 模型预测值较试验值偏高; 而在中间阶段, 模型预测值较试验值偏低。

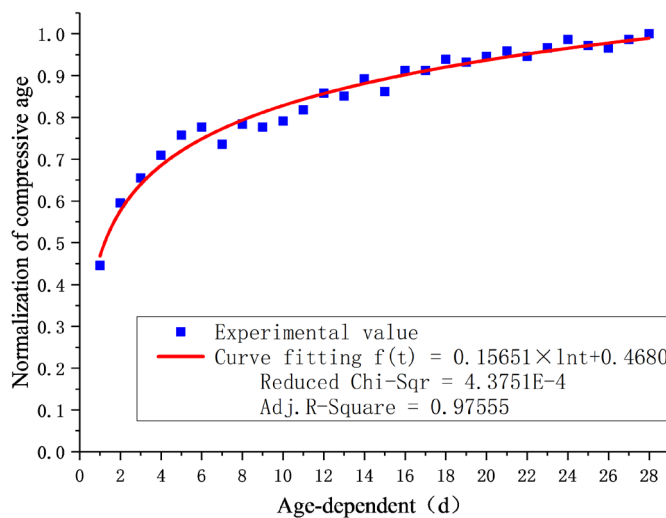


Figure 8. Logarithmic model fitting curve

图 8. 对数模型拟合曲线图

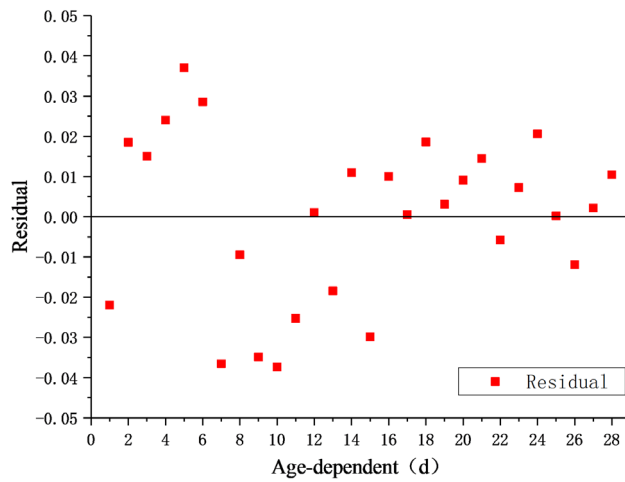


Figure 9. Logarithmic model residual-age chart

图 9. 对数模型残差 - 龄期图

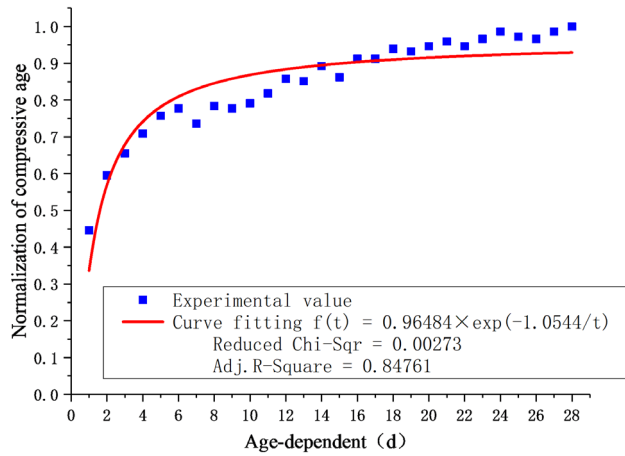


Figure 10. Index model fitting curve

图 10. 指数模型拟合曲线图

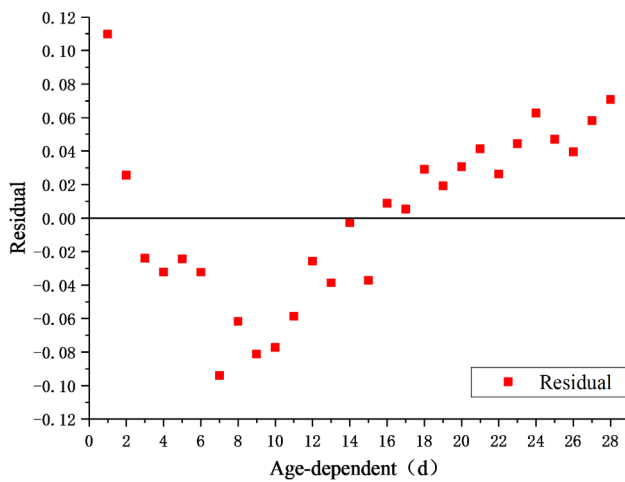


Figure 11. Index model residual-age chart

图 11. 指数模型残差 - 龄期图

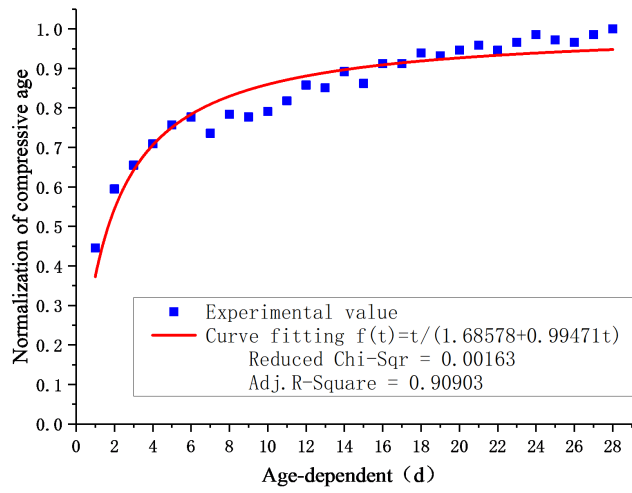


Figure 12. Hyperbolic model fitting curve

图 12. 双曲线模型拟合曲线图

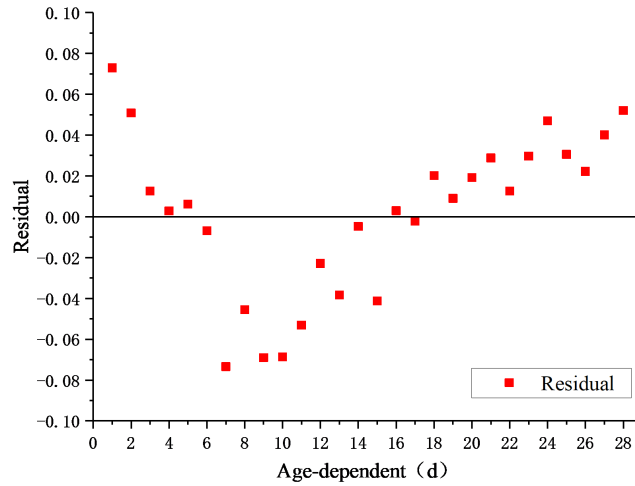


Figure 13. Hyperbolic model residual-age chart

图 13. 双曲线模型残差 - 龄期图

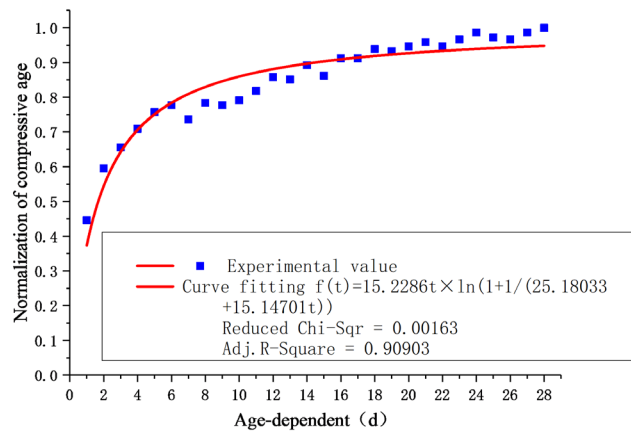


Figure 14. Three-parameter model fitting curve

图 14. 三参数模型拟合曲线图

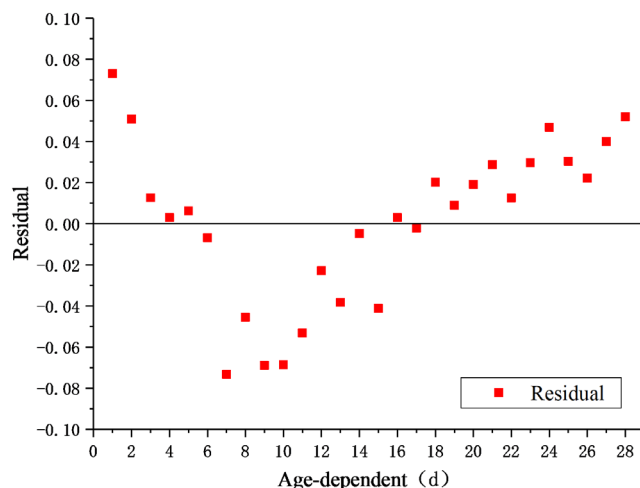


Figure 15. Three-parameter model residual-age chart

图 15. 三参数模型残差 - 龄期图

4. 结论

1) 在 28 天内, 陶粒混凝土抗压龄期强度均值随龄期单调增加, 且 7 天内增长较快, 7 天后增长较慢, 出现这一现象的原因较多, 其中主要因素是水泥和骨料的含量。由于混凝土抗压强度是由水泥的水化进程所决定的, 随着龄期增加, 水化产物不断增多, 胶凝材料不断形成, 使混凝土强度不断提高。抗压龄期强度标准差和变异系数随龄期变化规律均不明显, 具有显著的随机性。

2) 对陶粒混凝土抗压龄期强度进行拟合, 对数模型拟合度最佳, 可以用于陶粒混凝土早龄期抗压强度的计算。

基金项目

项目名称: 陶粒混凝土内隔墙条板研制; 项目编号: BY2016069-04。

参考文献

- [1] Shafigh, P., Ghafari, H., Mahmud, H.B., *et al.* (2014) A Comparison Study of the Mechanical Properties and Drying Shrinkage of Oil Palm Shell and Expanded Clay Lightweight Aggregate Concretes. *Materials & Design*, **60**, 320-327. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.001>
- [2] Zhang, B. and Poon, C.S. (2015) Use of Furnace Bottom Ash for Producing Lightweight Aggregate Concrete with Thermal Insulation Properties. *Journal of Cleaner Production*, **99**, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.007>
- [3] Guneyisi, E., Geso, G., Lu, M., Mohamadameen, A., *et al.* (2014) Enhancement of Shrinkage Behavior of Lightweight Aggregate Concretes by Shrinkage Reducing Admixture and Fiber Reinforcement. *Construction and Building Materials*, **54**, 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.041>
- [4] Dilli, M.E., Atahan, H.N. and Şengul, C. (2015) A Comparison of Strength and Elastic Properties between Conventional and Lightweight Structural Concretes Designed with Expanded Clay Aggregates. *Construction & Building Materials*, **101**, 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.080>
- [5] Tassew, S.T. and Lubell, A.S. (2014) Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Ceramic Concrete. *Construction & Building Materials*, **51**, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.046>
- [6] Medina, C., Zhu, W., Howind, T., *et al.* (2015) Influence of Interfacial Transition Zone on Engineering Properties of the Concrete Manufactured with Recycled Ceramic Aggregate. *Statyba*, **21**, 11. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802727>
- [7] 赵联楨, 杨平, 刘成. 混凝土早期力学性能试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(1): 35-40.

- [8] 王鹏. 陶粒混凝土基本力学性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [9] 吴中伟, 廉慧珍. 高强轻骨料混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 104-2011 建筑工程冬季施工规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] 肖建庄, 杜江涛. 不同再生粗集料混凝土单轴受压应力-应变全曲线[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(1): 111-115.
- [12] Xiao, J.Z., Li, J. and Zhang, C. (2005) Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete under Uniaxial Loading. *Cement and Concrete Research*, **35**, 1187-1194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>
- [13] Nur, Y. and Bryant, M. (2001) Time Dependent Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Florida Concrete. FDOT Contract No. BD-221.
- [14] EuroInternational Committee for Concrete (1990) CEB-FIP Model Code 1990: Final Draft. CEB Bulletin D' Information, No. 203, 39-52.
- [15] 王伟, 周爱兆, 冯丽, 等. 再生粗骨料混凝土抗压强度-龄期数学模型[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 134-140.