

粉煤灰陶粒混凝土配合比设计研究

董娟

河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000

DOI:10.61369/ME.2026040022

摘 要 : 为解决粉煤灰陶粒混凝土界面过渡区薄弱、脆性较高的工程应用难题, 同时实现工业固废粉煤灰的高效资源化利用, 采用三因素三水平正交试验方法, 系统研究水胶比 (0.3、0.35、0.4)、粉煤灰陶粒替代率 (20%、35%、50%) 和粉煤灰替代率 (15%、20%、25%) 对混凝土 28d 立方体抗压强度、劈裂抗拉强度影响规律。结果表明: 粉煤灰陶粒替代率是影响混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的最显著因素; 综合各项指标, 最优基准配合比为水胶比 0.3、粉煤灰陶粒替代率 20%、粉煤灰替代率 15%, 该配合比下混凝土 28d 抗压强度达 38.64MPa, 劈裂抗拉强度达 2.50MPa, 在实现 15% 粉煤灰和 20% 粉煤灰陶粒固废利用的同时, 保证了良好的基本力学性能。

关 键 词 : 粉煤灰陶粒混凝土; 正交试验; 力学性能

Research on the Mix Design of Fly Ash Concrete

Dong Juan

Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000

Abstract : To address the engineering application challenges of the weak and brittle interface transition zone in fly ash concrete, and to achieve efficient resource utilization of industrial solid waste fly ash, a three-factor three-level orthogonal experimental method was adopted to systematically study the influence laws of water-cement ratio (0.3, 0.35, 0.4), fly ash substitution rate (20%, 35%, 50%), and fly ash substitution rate (15%, 20%, 25%) on the 28-day cube compressive strength and splitting tensile strength of the concrete. The results show that the fly ash substitution rate is the most significant factor affecting the compressive strength and splitting tensile strength of the concrete; based on all indicators, the optimal benchmark mix ratio is water-cement ratio 0.3, fly ash substitution rate 20%, and fly ash substitution rate 15%. Under this mix ratio, the 28-day compressive strength of the concrete reaches 38.64 MPa, and the splitting tensile strength reaches 2.50 MPa. While achieving the utilization of 15% fly ash and 20% fly ash waste, it ensures good basic mechanical properties.

Keywords : fly ash concrete; orthogonal experiment; mechanical properties

引言

在全球“双碳”目标背景下, 建筑行业向绿色低碳转型已成为必然趋势。粉煤灰作为燃煤发电行业排放的主要工业固废, 其大规模堆存不仅占用大量土地资源, 还会引发扬尘、土壤及水体污染等生态问题^[1-2]。将粉煤灰制备成陶粒作为混凝土粗骨料, 是实现固废高值化利用的重要途径, 所制备的粉煤灰陶粒混凝土具有自重轻、保温隔热性能好、抗震性能优异等特点, 在装配式建筑、大跨度结构及节能建筑中具有广阔的应用前景^[3-4]。

然而, 粉煤灰陶粒自身多孔、强度较低的特性导致其与水泥浆体之间的界面过渡区 (ITZ) 成为混凝土力学性能的薄弱环节, 同时粉煤灰陶粒混凝土普遍存在脆性较高、抗拉强度偏低的问题, 严重制约了其在承重结构中的推广应用^[5-6]。配合比设计是决定混凝土性能的核心因素, 合理的配合比不仅能有效提升材料的力学性能, 还能最大化固废利用率并降低工程成本。目前国内外学者针对陶粒混凝土配合比已开展了大量研究, 但多数研究仅聚焦于单一强度指标, 对反映材料韧性的拉压比指标关注不足, 且针对粉煤灰陶粒与粉煤灰双掺体系的配合比优化研究仍不够系统^[7-9]。

为此, 本文选取水胶比、粉煤灰陶粒替代率和粉煤灰替代率三个关键因素, 设计三因素三水平正交试验, 以 28d 立方体抗压强度、劈裂抗拉强度为评价指标, 通过极差分析和方差分析明确各因素对混凝土性能的影响规律及显著性, 综合确定粉煤灰陶粒混凝土的最优基准配合比。

一、试验设计

（一）试验材料

胶凝材料包括水泥、粉煤灰，水泥为 P · O42.5 级普通硅酸盐水泥，密度 3.15g/cm³；粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰，粉煤灰细度（45μm）是 16%，烧失量是 2.62%；粗骨料为天然碎石和粉煤灰陶粒，天然碎石是连续级配，粒径为 5~20mm；粉煤灰陶粒粒径为 5~15mm，1h 吸水率为 10.3%。细骨料选用细度模数为 2.91 的天然河砂，属于中砂。减水剂为聚羧酸高性能减水剂，减水率为 27%。水为实验室自来水。

（二）试验方法

采用 100mm×100mm×100mm 立方体试件，按照 JGJ55-2011《普通混凝土配合比设计规程》进行配合比计算。为保证试验准确性，所有试件均采用标准搅拌工艺，在标准养护室养护至 28d 龄期。

立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验按照 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行，非标准试件强度值分别乘以 0.95 和 0.85 的尺寸换算系数。每组试验制备 3 个平行试件，结果取平均值。

二、正交试验设计

（一）因素和水平选取

水胶比直接影响水泥水化程度和混凝土内部孔隙结构，是决

定混凝土强度的关键参数；粉煤灰陶粒替代率决定了骨料骨架的强度组成，对混凝土力学性能影响显著；粉煤灰替代率不仅关系到固废利用率，还会影响胶凝体系的水化进程和长期性能，因此选取水胶比（A）、粉煤灰陶粒替代率（B）和粉煤灰替代率（C）三个因素，每个因素设置三个水平，因素水平表见表 1。

表 1 因素水平			
水平	因素		
	水胶比 A	粉煤灰陶粒替代率 B/%	粉煤灰替代率 C/%
1	0.3	20	15
2	0.35	35	20
3	0.4	50	25

（二）试验方案

采用 L₉（3⁴）正交表安排试验，共设计 9 组配合比，试验方案及配合比设计分别见表 2 和表 3。

表 2 正交试验设计				
编号	水胶比 A	粉煤灰陶粒替代率 B/%	粉煤灰替代率 C/%	空列
A1B1C1	1(0.3)	1(20)	1(15)	1
A1B2C2	1(0.3)	2(35)	2(20)	2
A1B3C3	1(0.3)	3(50)	3(25)	3
A2B1C2	2(0.35)	1(20)	2(20)	3
A2B2C3	2(0.35)	2(35)	3(25)	1
A2B3C1	2(0.35)	3(50)	1(15)	2
A3B1C3	3(0.4)	1(20)	3(25)	2
A3B2C1	3(0.4)	2(35)	1(15)	3
A3B3C2	3(0.4)	3(50)	2(20)	1

表 3 混凝土配合比设计 kg/m³

编号	水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料	粉煤灰陶粒	水	减水剂
A1B1C1	363.44	64.14	637.97	947.84	152.68	165.38	2.57
A1B2C2	342.06	85.51	637.97	770.12	267.18	177.17	2.57
A1B3C3	320.68	106.89	637.97	592.40	381.69	188.96	2.57
A2B1C2	299.30	74.83	656.68	975.64	157.15	165.84	2.24
A2B2C3	280.59	93.53	656.68	792.71	275.02	177.98	2.24
A2B3C1	318.01	56.12	656.68	609.77	392.88	190.12	2.24
A3B1C3	249.42	83.14	671.23	997.25	160.63	166.20	2.00
A3B2C1	282.67	49.88	671.23	810.27	281.11	178.60	2.00
A3B3C2	266.04	66.51	671.23	623.28	401.59	191.01	2.00

三、试验结果分析

（一）立方体抗压强度分析

对 28d 立方体抗压强度进行极差分析和方差分析，结果见表 4 和表 5。

表 4 极差分析结果

水平	立方体抗压强度		
	A	B	C
K1	98.94	102.08	95.17
K2	92.59	91.05	93.10
K3	83.40	81.80	86.66
k1	32.98	34.03	31.72
k2	30.86	30.35	31.03

k3	27.80	27.27	28.89
极差 R	5.18	6.76	2.84
因素主次	B>A>C		

表 5 方差分析						
检验指标	方差来源	平方和	自由度	均方差	F	显著性
立方体抗压强度	A	40.697	2	20.348	5.968	**
	B	68.722	2	34.361	10.077	***
	C	13.131	2	6.565	1.926	*
	误差	6.819	2	3.410		
	总计	129.370	8			

由表 4 表 5 可知，各因素对混凝土 28d 立方体抗压强度的影响程度由大到小依次为：粉煤灰陶粒替代率（B）>水胶比（A）>

粉煤灰替代率（C）。最优水平组合为 A₁B₁C₁，即水胶比0.3、粉煤灰陶粒替代率20%、粉煤灰替代率15%。

（二）劈裂抗拉强度分析

对28d劈裂抗拉强度进行极差分析和方差分析，结果见表6和表7。

表6 极差分析结果			
水平	劈裂抗拉强度		
	A	B	C
K1	6.65	7.17	6.62
K2	6.43	6.33	6.62
K3	6.36	5.95	6.21
k1	2.22	2.39	2.21
k2	2.14	2.11	2.21
k3	2.12	1.98	2.07
K1	6.65	7.17	6.62
因素主次	B>A>C		

表7 方差分析						
检验指标	方差来源	平方和	自由度	均方差	F	显著性
劈裂抗拉强度	A	0.015	2	0.007	2.953	*
	B	0.262	2	0.131	51.909	***
	C	0.037	2	0.018	7.327	**
	误差	0.005	2	0.003		
	总计	0.319	8			

由表6表7可知，各因素对混凝土28d劈裂抗拉强度的影响程度由大到小依次为：粉煤灰陶粒替代率（B）>粉煤灰替代率（C）>水胶比（A）。最优水平组合为 A₁B₁C₁，即水胶比0.3、粉煤灰陶粒替代率20%、粉煤灰替代率15%。

四、结论

本文通过三因素三水平正交试验，系统研究了水胶比、粉煤灰陶粒替代率和粉煤灰替代率对混凝土28d立方体抗压强度、劈裂抗拉强度的影响规律，得出以下主要结论：

- 1.粉煤灰陶粒替代率是影响混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的最显著因素，粉煤灰替代率对各项性能指标的影响相对较弱。
- 2.综合力学性能、韧性及固废利用率，确定粉煤灰陶粒混凝土的最优基准配合比为：水胶比0.3、粉煤灰陶粒替代率20%、粉煤灰替代率15%。该配合比下混凝土28d抗压强度达38.64MPa，劈裂抗拉强度达2.50MPa，在实现固废高效利用的同时，保证了良好的基本力学性能。

参考文献

[1]周涛，谢雷.粉煤灰在混凝土中应用的现状及展望[J].江西建材，2022,(03):9-11.

[2]Alsharari F.Utilization of industrial, agricultural, and construction waste in cementitious composites: A comprehensive review of their impact on concrete properties and sustainable construction practices[J].Materials Today Sustainability,2025,29101080-101080.

[3]陈百江.绿色低碳理念下陶粒混凝土的配合比优化设计与性能提升[J].居舍，2025(10):41-43.

[4]Li W, Jia X, Ni G, et al. Mechanical Properties of Fly Ash Ceramsite Concrete Produced in a Single-Cylinder Rotary Kiln[J]. Buildings, 2025, 15 (17):3124.

[5]陈宇良，朱玲，张绍松，等.粉煤灰陶粒混凝土三轴受压破坏机制及强度准则[J].硅酸盐学报，2022,50(08):2196-2204.

[6]程兴旺，张超，冉旭勇，等.纳米 SiO2改性传统陶粒混凝土及力学性能研究[J].粘接，2023,50(10):90-93.

[7]连慧慧.配合比对粉煤灰陶粒混凝土强度影响的灰色关联分析研究[J].山西交通科技，2023(03):8-12.

[8]赵飞洋，乔思皓，解培睿，等.多粒级粗骨料级配对粉煤灰陶粒混凝土性能影响研究[J].混凝土，2022(08):60-66.

[9]赵欣悦，马芹永.页岩陶粒混凝土力学性能试验及微观结构分析[J].建井技术，2024,45(01):44-50.