

# 掺入废弃混凝土颗粒的水泥复合土力学特性研究

马 啸<sup>1,2</sup> 陈四利<sup>1</sup> 侯 芮<sup>1</sup>

(1. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院 沈阳 110870; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

**摘要:** 为了研究水泥复合土在建筑垃圾处理中发挥的作用,设计了不同废弃混凝土颗粒掺入比,不同的水泥掺入比,制作了掺入无筛分废弃混凝土颗粒的水泥复合土试件,进行了无侧限抗压强度试验,研究了不同龄期下水泥复合土的无侧限抗压强度变化规律,运用 SPSS 软件建立了无侧限抗压强度的多元线性回归分析模型。试验结果表明,废弃混凝土颗粒掺量存在适宜区间,适宜区间随着水泥掺量的增加而向数轴右侧移动;加入过低掺量的废弃混凝土颗粒会降低水泥复合土的抗压强度,随着废弃混凝土颗粒掺量增加,废弃混凝土颗粒形成骨架支撑,使抗压强度上升;当掺入废弃混凝土颗粒超过适量值后,抗压强度反而降低;水泥复合土强度后期增长潜力大,在 28~60 d 龄期区间可维持 0.14 MPa/d 的高速增长。其研究成果可为水泥土拓展新的应用方向,提供有效解决废弃混凝土堆放问题的新思路和研究数据。

**关键词:** 废弃混凝土; 水泥复合土; 多元线性回归方程; 无侧限抗压强度; 龄期; 水泥掺量

中图分类号: TU521

文献标识码: A

文章编号: 1001-4625(2018)03-4010-07

DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2018.03.042

## Mechanical Properties of Composite Cement Soil Mixed In Wasted Concrete Particle

MA Xiao<sup>1,2</sup>, CHEN Si-li<sup>1</sup>, HOU Rui<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** In order to study the function of the composite cement soil in construction waste dispose, specimens of composite cement soil mixed in un-sieved wasted concrete particle were made, various cement proportion and wasted concrete particle proportion was designed, unconfined compressive strength test was conducted, the unconfined compressive strength of composite cement soil in different curing time was studied, the multiple linear regression model of unconfined compressive established by SPSS software. Experimental results showed that suitable range of wasted concrete particle proportion does exist, the suitable range move toward right side of the number axis as the increase of cement proportion, excessive low cement proportion can weaken the compressive strength of composite cement soil, as the increase of the wasted concrete particle proportion, the particle form a skeleton which caused the increase of compressive strength, the excessive wasted concrete particle proportion can cause the decrease of compressive strength. The potential strength growth of the composite cement soil is large, which can maintain the velocity of 0.14 MPa/d during 28-60 d time section. The study can expand new direction of cement soil application and provide data of the solution in wasted concrete accumulation problem.

基金项目: 国家自然科学基金(51279109)

作者简介: 马 啸(1994-) 男, 硕士研究生, 主要从事水泥复合土与岩石的研究。

通讯作者: 陈四利 教授, 博导。

**Key words:** wasted concrete; composite cement soil; multiple linear regression equation; unconfined compressive strength; curing time; cement proportion

## 1 引言

近年来建筑垃圾中废弃混凝土的重复再利用问题是绿色低碳建筑的一个重要课题<sup>[1]</sup>, 此类相关研究方向集中在优化破碎工艺<sup>[2]</sup>、制作再生骨料<sup>[3]</sup>、制作水泥胶凝材料<sup>[4]</sup>、制作再生砌块<sup>[5]</sup>等方向, 旨在解决废弃混凝土资源重新再利用的问题。废弃混凝土由于自身的复杂性, 实际生产中有制作出的粗细骨料强度离散型大、耐久性能低等缺点<sup>[6]</sup>。实际工程运用中为了达到混凝土设计强度, 再生骨料的级配需要人工控制<sup>[7]</sup>, 这就造成某范围内的粒径需求量各不相同, 破碎后再筛分会造成二次浪费和废物再处理, 无法达到完全利用的标准, 若直接破碎成指定粒径范围, 则破碎技术的经济性<sup>[8]</sup>则是首要解决的问题。水泥石作为岩土工程类材料, 由于其经济、施工便利、强度高、抗渗性好等优点, 被广泛应用于基坑工程、路基工程、堤坝工程中<sup>[9]</sup>。废弃混凝土颗粒作为外加剂掺入水泥石在国内研究较少, 赵光鹏<sup>[10]</sup>对废弃混凝土进行筛分或磨细等再处理, 对掺入废弃混凝土的水泥复合土进行了初步研究。

为了实现 100% 的废弃混凝土颗粒利用率, 最大限度从经济性方面考虑利用废弃混凝土, 把粗糙破碎的废弃混凝土颗粒不经筛分, 在破碎形成原始级配的基础上直接加入到土体中, 再按比例加入水泥和水进行搅拌, 制成水泥复合土试块, 进行无侧限抗压强度实验, 研究不同水泥掺量、不同废弃混凝土掺量和不同龄期对水泥复合土无侧限抗压强度的影响。

## 2 试验

### 2.1 原材料

试验采用强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥, 土体来源于沈阳某工地的粉质黏土, 其物理性能指标如表 1, 对土体进行晒干过 2 mm 筛处理后使用。

表 1 试验用土的物理参数指标

Tab.1 Physical parameters of experiment soil

Unit weight/ $g \cdot cm^{-3}$	Liquid limit/%	Plastic limit/%	Plasticity	Liquidity
19.2	35.0	19.4	15.6	0.58

为控制实验误差减少杂质的影响, 自配标准 C30 混凝土, 配置混凝土配合原材料质量配合比为水泥: 水: 沙: 石子 = 1: 0.57: 2.04: 3.78, 经过鄂式破碎机(见图 1)模拟废弃混凝土破碎后的状态。其塌落度和 28 d 龄期抗压强度均符合《普通混凝土配合比设计规程》<sup>[11]</sup>。破碎后的废弃混凝土粒径控制在 16 mm 之内, 超过 16 mm 的颗粒需要重新放入破碎机中继续破碎, 直至所有颗粒粒径都可通过 16 mm 筛, 模拟废弃混凝土的完全破碎过程, 经过破碎后的废弃混凝土粒径分布情况见图 2。



图 1 废弃混凝土破碎机

Fig.1 Waste concrete crusher

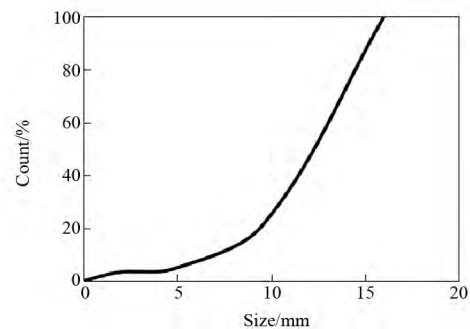


图 2 废弃混凝土颗粒粒径分布曲线图

Fig.2 Grain distribution curve of waste concrete particle

## 2.2 试验方案

制作的水泥复合土试件中的水泥掺量为12%、16%、20%，在各水泥掺量下分别加入废弃混凝土颗粒掺量为15%、20%、25%，所有试件的水灰比为2.0，每种组合试件都需要养护7 d、14 d、28 d、60 d，总计36组试件，每组取3个试件进行无侧限抗压试验，共制作118块试件。根据《水工混凝土配合比设计规程》<sup>[12]</sup>，计算每组水泥复合土中各成分的质量比，采用70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的试件模具。将原材料按计算好的质量比放入搅拌机中搅拌，搅拌均匀后装入70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm的模具中，24 h后拆模，将拆模后的试块置入在恒温25℃养护室内装满清水的养护盆中养护（见图3）。在养护时间为7 d、14 d、28 d、60 d时使用WDW4204型万能试验机（见图4）进行无侧限抗压试验，加载速率为1 mm/min，取每组3个平行实验的算术平均值作为该组无侧限抗压强度的数据。

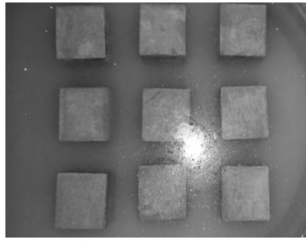


图3 试件养护中

Fig.3 Specimens under curing



图4 WDW4204 万能试验机与压碎后的试块

Fig.4 WDW universal testing machine and crushed specimen

## 3 结果与讨论

### 3.1 废弃混凝土颗粒掺量对抗压强度的影响

如图5、图6、图7所示，在不同水泥掺量的影响下，水泥复合土的无侧限抗压强度随废弃混凝土颗粒掺量的变化趋势也是不同的。从图5、图6中可以看出，在12%和16%水泥掺量下，在废弃混凝土颗粒掺量15%增加到20%的过程中，除28 d龄期时，水泥复合土的无侧限抗压强度由6.19 MPa和7.14 MPa增加到7.41 MPa和8.55 MPa外，其余废弃混凝土颗粒掺量为20%的无侧限抗压强度均小于15%时的无侧限抗压强度。由于水泥复合土材料是由被水泥胶凝材料固化的土体和废弃混凝土颗粒两种主要部分组成，所以其无侧限抗压强度大小是由有部分土力学特征的固化土体和废弃混凝土颗粒组成的支撑骨架协同作用而决定的。低水泥掺量和过短的养护龄期意味着土体中水泥的固化作用有限，水泥复合土中土力学特征还很明显，根据李广信教授的土骨架理论研究<sup>[13]</sup>，可以解释无侧限抗压强度下降的原因，即废弃混凝土颗粒被土体分离包围，没有形成骨架起到支撑作用，却使土体干密度下降，从而导致整体无侧限抗压强度下降。当废弃混凝土颗粒掺量大于20%时，废弃混凝土颗粒形成的骨架支撑对无侧限抗压强度的增强作用大于由于其破坏土骨架受力体系对无侧限抗压强度的消极作用，在整体上起到对水泥复合土无侧限抗压强度的改善作用，从实验数据上表现为废弃混凝土颗粒掺量为25%的无侧限抗压强度均大于废弃混凝土颗粒掺量为20%时的无侧限抗压强度。

如图7所示，在20%水泥掺量下，水泥复合土的无侧限抗压强度在废弃混凝土颗粒掺量为20%时比其为15%和25%时均有提高，表明在废弃混凝土颗粒掺量在小于20%时就已经起到了对水泥复合土无侧限抗压强度的改善作用。当废弃混凝土颗粒掺量为25%时水泥复合土的强度降低，此现象表明水泥复合土中的废弃混凝土颗粒掺量存在适宜区间，而且水泥掺量为20%时适宜区间的右区间值在20%~25%之间。当掺入了过量的废弃混凝土颗粒时，水泥复合土的无侧限抗压强度会下降。

上述分析表明，水泥复合土中废弃混凝土颗粒掺量存在适宜区间，超过或低于适宜区间都会使其无侧限抗压强度降低。废弃混凝土颗粒掺量的适宜区间随着水泥掺量的增大而向数轴右侧移动。

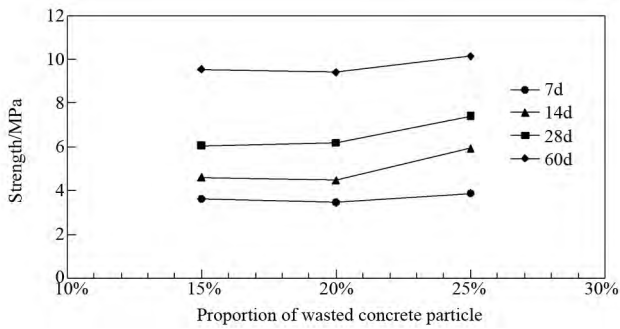


图 5 废弃混凝土掺量与抗压强度的关系曲线图 (12% 水泥掺量)

Fig. 5 Relationship curves between proportion of wasted concrete particle and unconfined compression strength

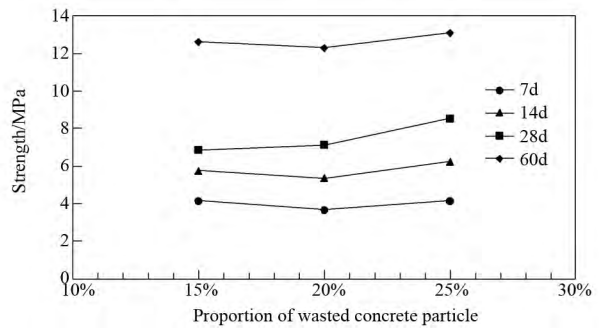


图 6 废弃混凝土掺量与抗压强度的关系曲线图 (16% 水泥掺量)

Fig. 6 Relationship curves between proportion of wasted concrete particle and unconfined compression strength

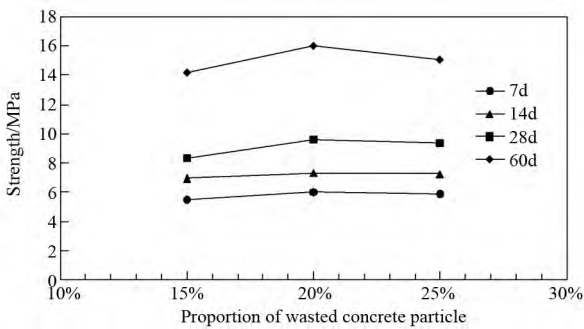


图 7 废弃混凝土掺量与抗压强度的关系曲线图 (20% 水泥掺量)

Fig. 7 Relationship curves between proportion of wasted concrete particle and unconfined compression strength

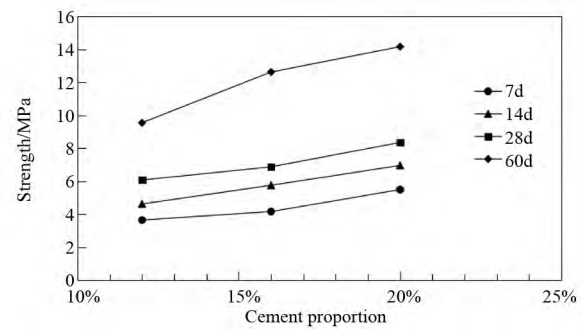


图 8 水泥掺量与无侧限抗压强度的关系曲线图 (15% 废弃混凝土颗粒掺量)

Fig. 8 Relationship curves between proportion of cement and unconfined compression strength

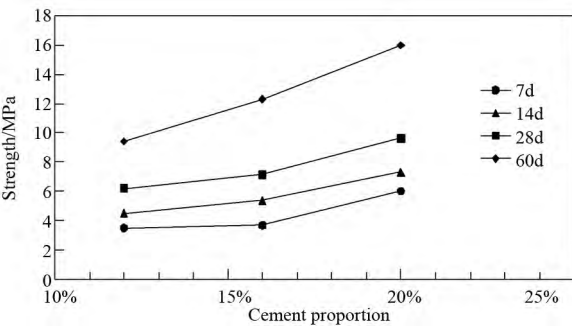


图 9 水泥掺量与无侧限抗压强度的关系曲线图 (20% 废弃混凝土颗粒掺量)

Fig. 9 Relationship curves between proportion of cement and unconfined compression strength

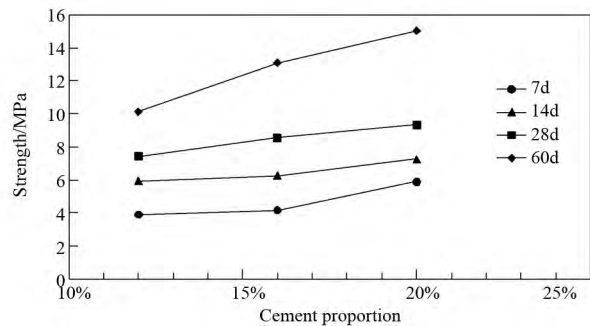


图 10 水泥掺量与无侧限抗压强度的关系曲线图 (25% 废弃混凝土颗粒掺量)

Fig. 10 Relationship curves between proportion of cement and unconfined compression strength

### 3.2 水泥掺量对抗压强度的影响

如图 8、图 9、图 10 所示, 在 7 d 龄期时, 15% 废弃混凝土颗粒掺量下, 水泥掺量为 12%、16%、20% 的抗

压强度分别为 3.64 MPa、4.15 MPa、5.49 MPa,水泥掺量由 12% 以每次 4% 速度递增到 20% 时,强度分别递增 0.51 MPa 和 1.34 MPa; 20% 废弃混凝土颗粒掺量下,水泥掺量为 12%、16%、20% 的抗压强度分别为 3.48 MPa、3.66 MPa、6.00 MPa,水泥掺量由 12% 以每次 4% 速度递增到 20% 时,强度分别递增 0.18 MPa 和 2.34 MPa; 25% 废弃混凝土颗粒掺量下,水泥掺量为 12%、16%、20% 的抗压强度分别为 3.89 MPa、4.15 MPa、5.88 MPa,水泥掺量由 12% 以每次 4% 速度递增到 20% 时,强度分别递增 0.26 MPa 和 1.73 MPa。以上表明数据表明水泥复合土的无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增加,在养护龄期较短时水泥掺量基数越高,递增同等掺量时增加的强度也越高。

### 3.3 养护龄期对抗压强度的影响

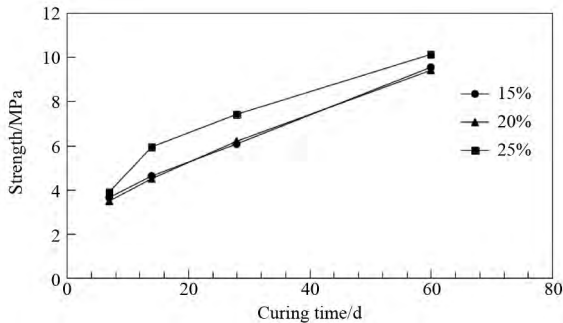


图 11 养护龄期与无侧限抗压强度的关系曲线图  
(12% 水泥掺量)

Fig. 11 Relationship curves between proportion of curing time and unconfined compression strength

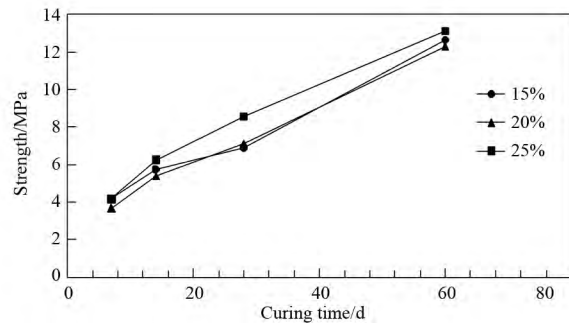


图 12 养护龄期与无侧限抗压强度的关系曲线图  
(16% 水泥掺量)

Fig. 12 Relationship curves between proportion of curing time and unconfined compression strength

如图 11、图 12、图 13 所示,水泥复合土的无侧限抗压强度随着养护龄期的增大而增大。在图 12 中,16% 水泥掺量、25% 废弃混凝土颗粒掺量下,水泥复合土的无侧限抗压强度在 7 d、14 d、28 d 和 60 d 分别为 4.15 MPa、6.24 MPa、8.55 MPa 和 13.10 MPa,在 7~14 d、14~28 d 和 28~60 d 龄期区间内的日均增长强度分别为 0.30 MPa/d、0.17 MPa/d 和 0.14 MPa/d,可见虽然随着龄期增加,抗压强度日均增长速度变缓,但在 28~60 d 龄期区间内仍保持较高的增长速度,只比 14~28 d 的日均增长速度减少 0.03 MPa/d。

上述现象表明,水泥复合土的后期抗压性能增长良好。由于水泥对土体的固化作用随着龄期增长而大幅增加,土体中土力学特征越来越小,材料内部粘结力性能越来越强,表现为水泥浆体把受力分散的土体固化为为了受力整体性好的胶凝材料。上文中提到水泥复合土中无侧限抗压强度大小是由有土力学特征的固化土体和废弃混凝土颗粒组成的支撑骨架协同作用而决定的,在后期水泥胶凝作用越来越充分的情况下,废弃混凝土颗粒所形成支撑骨架对抗压性能的积极作用越来越大,废弃混凝土颗粒一级骨架与充分固化的土体二级骨架形成了有协同作用的受力整体,是后期水泥复合土抗压强度保持高速增长的重要原因。

### 3.4 对试验结果的多元线性回归分析

设因变量  $y$  为水泥复合土无侧限抗压强度,自变量为  $x_1$  为废弃混凝土掺量、 $x_2$  水泥掺量和  $x_3$  龄期,采用 spss 软件进行多元线性回归分析,得到的分析结果见表 2、表 3、表 4、表 5。

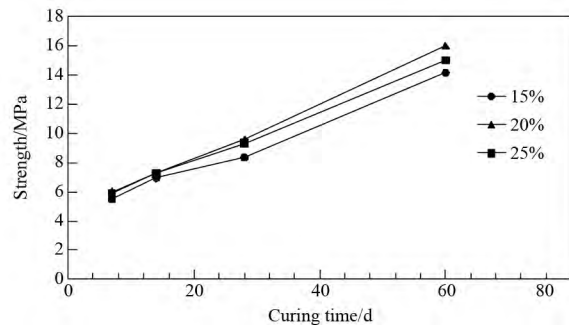


图 13 养护龄期与无侧限抗压强度的关系曲线图  
(20% 水泥掺量)

Fig. 13 Relationship curves between proportion of curing time and unconfined compression strength

表 2 模型摘要

Tab.2 Model summary

R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
0.977 <sup>a</sup>	0.954	0.949	0.7632507	1.174

表 3 方差分析

Tab.3 ANOVA

Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig
Regression	382.750	3	127.583	219.008	0.000 <sup>b</sup>
Residual	18.642	32	0.583	-	-
Total	401.392	35	-	-	-

由表 2 可以看出,此次分析中修正后的  $R^2$  为 0.949,说明线性回归方程反映真实数据的拟合度为 94.9%。Durbin-Watson 指数为 1.174,符合 0~4 的取值范围,说明此次分析中误差项是独立的。即分析得出的多元线性回归方程具有高度准确性和实用性。由方差分析可得(见表 3),显著性水平等于 0,由于其小于 0.05,三个自变量(废弃混凝土颗粒掺量、水泥掺量和养护龄期)都能对因变量(抗压强度)产生显著影响。由系数表(表 4)中得到了此模型的非标准化系数,由此建立的多元线性回归方程为:

$$y = -3.891 + 7.253x_1 + 38.093x_2 + 0.147x_3$$

回归系数假设检验见表 4,其中  $x_1$ 、 $x_2$  和  $x_3$ (废弃混凝土掺量、水泥掺量和养护龄期)显著性水平分别为 0.026、0.00 和 0.00,均小于 0.05,表明  $x_1$ 、 $x_2$  与  $x_3$  都可以对  $y$  造成显著影响,此模型具有显著意义。

表 4 系数表

Tab.4 Coefficients

Model	Unstandardized coefficients		Standardized coefficients	t	Sig	Collinearity statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(Constant)	-3.891	0.907		-4.292	0.000	1.000	1.000
Curing time	0.147	0.006	0.898	23.579	0.000	1.000	1.000
Cement content	38.093	3.895	0.373	9.780	0.000	1.000	1.000
Wasted concrete content	7.253	3.116	0.089	2.328	0.026	1.000	1.000

表 5 残差统计数据

Tab.5 Residuals statistics

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted value	2.799150	14.378272	7.668144	3.3069198	36
Residual	-1.5617887	1.9955614	0.0000000	0.7298073	36
Std. predicted value	-1.472	2.029	0.000	1.000	36
Std. residual	-2.046	2.615	0.000	0.956	36

由表 4 中 VIF 的值都为 1.000 且小于 5 可以得出  $x_1$ 、 $x_2$  与  $x_3$  不存在共线性,即  $x_1$ 、 $x_2$  与  $x_3$  都是独立作用于  $y$  的。由表 5 可得标准残差的最大值为 2.615 且小于 3,说明此模型中并无异常现象。

## 4 结 论

本文对掺入废弃混凝土颗粒的水泥复合土进行无侧限抗压实验,得到了不同废弃混凝土颗粒掺量、不同水泥掺量、不同养护龄期对水泥复合土无侧限抗压强度的影响规律,并运用 SPSS 得到了无侧限抗压强度的多元线性回归方程,主要结论如下:

(1) 水泥复合土中废弃混凝土颗粒掺量存在适宜区间,在不同水泥掺量下,废弃混凝土颗粒掺量的适宜区间也在变化,超过或低于适宜区间都会造成其无侧限抗压强度降低。废弃混凝土颗粒掺量的适宜区间随着水泥掺量的增大而向数轴右侧移动;

(2) 水泥复合土的无侧限抗压强度随水泥掺量的增加而增加,且在早期水泥掺量基数越高,递增同等掺量时增加的强度也越高;

(3) 后期废弃混凝土颗粒一级骨架与充分固化的土体二级骨架形成了有协同作用的受力整体,抗压强度在 28~60 d 龄期区间内仍可保持较高增长速度。

### 参 考 文 献

- [1] 张庆伟. 建筑废弃混凝土可再生利用探究[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版, 2014, 32(3): 371-381.
- [2] 肖建庄, 孙振平, 李家彬, 等. 废弃混凝土破碎及再生工艺研究[J]. 建筑技术, 2005, 36(2): 141-144.
- [3] 许岳周, 石建光. 再生骨料及再生骨料混凝土的性能分析与评价[J]. 混凝土, 2006(7): 41-46.
- [4] 胡曙光, 何永佳. 利用废弃混凝土制备再生胶凝材料[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(5): 593-599.
- [5] 张波. 再生混凝土砌块及其在墙体中的应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(11): 2913-2917.
- [6] 胡治春, 李国新, 欧阳孟学. 废弃混凝土回收利用的研究进展[J]. 商品混凝土, 2012, 34(5): 19-24.
- [7] 肖建庄, 林壮彬, 朱军. 再生骨料级配对混凝土抗压强度的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(7): 154-160.
- [8] 杜婷, 李慧强, 郭太平, 等. 废弃混凝土再生骨料应用的经济性分析[J]. 新型建筑材料, 2006(5): 30-33.
- [9] 陈四利, 宁宝宽. 岩土材料的环境效应[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [10] 赵光鹏. 废弃混凝土-水泥土实验研究[D]. 天津: 天津城市建设学院, 2008.
- [11] JGJ 55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [12] JGJ/T 233-2011 水泥土配合比设计规程[S].
- [13] 李广信. 论土骨架与渗透力[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1522-1528.

## 欢 迎 赐 稿

——硅酸盐通报

《硅酸盐通报》是中国硅酸盐学会的会刊,由中国硅酸盐学会和中材人工晶体研究院有限公司联合主办;月刊:大 16 开;是中文核心期刊、中国科技核心期刊、CSCD 核心期刊;第 2 届中国精品科技期刊;国内被《中国学术期刊(光盘版)》、万方、维普、超星等数据库收录,国外被美国化学文摘(CA)收录,在国内无机非金属材料行业有较大影响。

《硅酸盐通报》主要报导:高技术陶瓷、水泥、玻璃、建材、耐火材料、人工晶体、非金属矿及复合材料等相关领域中科学技术研究方面的创新和成果,交流生产和技术经验,追踪硅酸盐行业的前沿发展与动态。旨在全面提升行业科研、生产、教学、设计、管理等学术水平和技术创新能力,追逐专业制高点,为促进国内外无机材料领域的发展服务。

《硅酸盐通报》现为月刊出版,投稿程序简单方便、审稿专业速度快、发表周期短、影响力大,欢迎相关方面的专家、学者和技术人员赐稿,本编辑部将竭力为您的劳动成果登上展示平台服务。

具体事宜请与编辑部联系。

地 址:北京市朝阳区东坝红松园 1 号人工晶体研究院通报编辑部(100018)

电 话:010-65492963(主编室) 010-65492968、65493320(编辑室)

投稿网站: <http://gsyt.chinajournal.net.cn>