

# 级配对水泥稳定再生集料强度影响

雷俊安<sup>1</sup>, 郑南翔<sup>1</sup>, 纪小平<sup>1</sup>, 杨 俊<sup>2</sup>

(1. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘 要** 目的 探究级配对水泥稳定再生集料强度的影响. 方法 在规范规定的级配上下限范围内均匀的选取5种级配, 分别进行水泥稳定再生集料的无侧限抗压强度试验和劈裂强度试验; 通过灰色理论分析了级配各组分与强度的关联性, 并拟合得到各级配分形维数与强度之间关系式. 结果 级配对无侧限抗压强度、劈裂强度影响明显, 且随级配由上限到下限的变化强度呈现先增大后降低的趋势, 并在中上级配时达到最大. 通过灰色关联度分析发现 4.75~9.5 mm 粒径组和强度的关联性最大, 大于 4.75 mm 的粒径与无侧限抗压强度关联性更好, 而小于 4.75 mm 粒径与劈裂强度关联性更好. 拟合得到级配分形维数与强度之间二次多项关系式. 结论 再生集料的最佳级配对应的分形维数为 2.491 4, 所得结果可为水泥稳定再生集料的级配设计提供参考.

**关键词** 级配; 再生集料; 无侧限抗压强度; 劈裂强度; 灰色关联; 分形维数

中图分类号 TU528.041; U416.217

文献标志码 A

## Influence of Gradation on the Strength of Cement Stabilized Recycled Aggregate

LEI Jun'an<sup>1</sup>, ZHENG Nanxiang<sup>1</sup>, JI Xiaoping<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, China, 710064; 2. School of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, China, 443002)

**Abstract:** In order to explore the effect of gradation on cement stabilized recycled aggregate, five gradations were evenly selected during the upper and lower limits of gradation that ruled in the specification and then unconfined compressive strength test and splitting strength test were carried out respectively. The test results show that the strength of the unconfined compressive strength and the splitting strength are obviously affected by the gradation, and the strength increases first and then decreases with the gradation from the upper limit to the lower limit. Through grey correlation analysis, it is found that the correlation between 4.75~9.5 mm particle size and strength is the

收稿日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408044); 住房和城乡建设部科学技术资助项目(2015-k4-13)

作者简介: 雷俊安(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事路面结构和材料方面研究.

largest. The correlation of particle size greater than 4.75 mm and unconfined compression strength is better, while less than 4.75 mm particle size is better associated with splitting strength. The relationship between gradation fractal dimension and strength is obtained by fitting. The best fractal dimension is determined to be 2.491 4, and the best gradation is obtained by backstepping, which provides a reference for gradation design of cement stabilized recycled aggregate.

**Key words:** gradation; recycled aggregate; unconfined compressive strength; splitting strength; grey correlation; fractal dimension

我国每年新产生的建筑垃圾超过 3 亿吨,其中废弃混凝土块所占比例高达 34% 以上<sup>[1]</sup>,废弃混凝土占用大量土地资源,影响市容市貌,污染水资源,增加空气中的粉尘影响人类的身体健康等<sup>[2]</sup>,因此开展废弃混凝土的再生利用具有重要的意义.废弃混凝土回收再利用的常见方式是将其再生成水泥<sup>[3-4]</sup>以及进行分拣、破碎、筛分后得到再生集料(RCA),取代部分或全部的天然集料制作新的混凝土<sup>[5-8]</sup>或者水泥稳定再生基层<sup>[9-13]</sup>.

级配是影响水稳基层强度大小的重要因素之一,不同的级配组成往往会导致较大的强度差异<sup>[14-15]</sup>,由于 RCA 和天然集料(NA)性质差异较大,因此 RCA 的级配设计和 NA 有所不同,有必要研究 RCA 级配的合理类型.扈惠敏<sup>[16]</sup>通过击实试验和无侧限抗压强度试验对比分析了四种 RCA 级配,胡忠辉<sup>[17]</sup>在级配上下限范围内合成了一种骨架密实型级配并通过现场测试了该级配的路用性能,肖杰<sup>[18]</sup>则直接采用骨架密实型级配范

围的中值进行设计.目前对 RCA 级配的设计主要还是参考了 NA 级配一般采用中值级配,尚未考虑 RCA 和 NA 的差异性.笔者在规范规定的级配范围内均匀的选取了 5 种级配,研究了级配变化对水泥稳定 RCA 的抗压强度和劈裂强度的影响,运用灰色关联度分析了影响强度的关键粒径组,借助级配的分形维数与强度的关系式确定了最佳的分形维数并反推得到最佳的级配组成,为水泥稳定 RCA 的级配设计提供参考.

1 试验材料

试验所用的水泥为复合硅酸盐水泥(P. C32.5),RCA 为混凝土路面经破碎筛分得到,原路面建于 20 世纪 80 年代,地处亚热带季风气候区,年均降水量 992.1 ~ 1 404.1 mm,平均气温 13.1 ~ 18 ℃,混凝土强度等级为 C30,所得 RCA 粒径规格为 0 ~ 5 mm,5 ~ 10 mm,10 ~ 20 mm,20 ~ 30 mm. RCA 的基本性质见表 1 所示.

表 1 RCA 基本性质  
Table 1 Basic properties of RCA

集料类型	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	针片状质量 分数/%	吸水率/ %	洛杉矶磨 耗值/%	坚固性/%	压碎值/%	砂当量/%	棱角性/s	含泥量/%
粗集料	2.659	8.6	3.36	26.7	7.8	21.53	—	—	—
细集料	2.483	—	5.57	—	6.4	—	65.5	45	3.2

2 级配选取与分形维数

集料级配是影响强度大小的重要因素之一,为探究级配变化对强度的影响规律,在规

范规定的碎石级配上下限范围内均匀地选取 5 种级配类型,即上限级配、中上级配、中值级配、中下级配和下限级配.级配组成如表 2 所示,级配曲线如图 1 所示.

表2 5种类型级配的通过比例

Table 2 Pass rate of five different gradation

级配	不同筛孔的通过比例/%							
类型	$d=31.5\text{ mm}$	$d=26.5\text{ mm}$	$d=19\text{ mm}$	$d=9.5\text{ mm}$	$d=4.75\text{ mm}$	$d=2.36\text{ mm}$	$d=0.6\text{ mm}$	$d=0.075\text{ mm}$
上限级配	100	100	89	67	49	35	22	7
中上级配	100	97.5	84.75	62	44	30.5	18.5	5.25
中值级配	100	95	80.5	57	39	26	15	3.5
中下级配	100	92.5	76.25	52	34	21.5	11.5	1.75
下限级配	100	90	72	47	29	17	8	0

注: $d$ 为筛孔直径,mm.

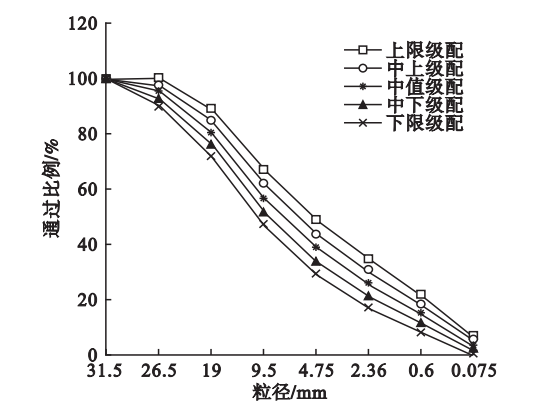


图1 5种类型的级配曲线图

Fig. 1 Gradation curves

大小不同、形状不一、性质各异 的 RCA 按不同比例组成的级配类型呈现出一种不规则性、模糊性、非线性的特征,因此为了将其量化的描述,采用分形维数  $D$  对不同级配进行表征.连续级配集料粒径分布的分形模型为<sup>[19-21]</sup>:

$$P(r)=\frac{r_{\min }^{3-D}-r^{3-D}}{r_{\min }^{3-D}-r_{\max }^{3-D}}.$$

(1)

式中: $P(r)$ 为各粒径筛孔通过比例; $D$ 为粒径分布分形维数; $r_{\min}$ 和 $r_{\max}$ 为最小和最大粒径. $r_{\min}$ 远小于 $r_{\max}$ 可忽略,上式可变为

$$P(r)=\left(\frac{r}{r_{\max }}\right)^{3-D}.$$

(2)

对式(2)两边取对数可得:

$$\lg P(r)=(3-D) \lg \left(\frac{r}{r_{\max }}\right).$$

(3)

通过拟合  $\lg P(r)$  与  $\lg (r / r_{\max })$  之间的关系式得到直线的曲线斜率  $K=3-D$  即可求出不同级配对应的分形维数  $D$ . 拟合得到中

值级配对应的双对数曲线如图 2 所示.

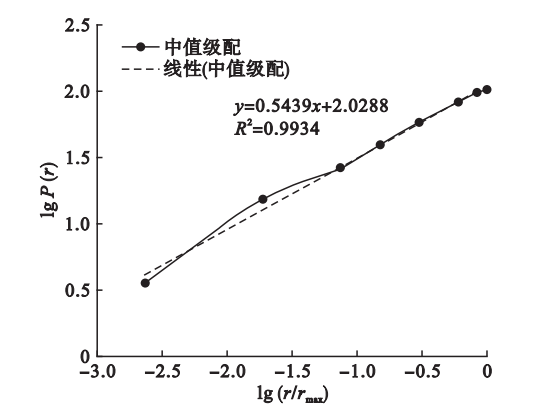


图2 级配双对数曲线图

Fig. 2 Double logarithmic diagram of grading curve

按照上述方法可以得到 5 种级配所对应的分形维数见表 3 所示.从表中可以看出,级配的分形维数随级配由上限到下限而呈现逐渐降低的趋势.

表3 5种级配的分形维数

Table 3 Fractal dimensions of five gradations			
级配类型	斜率 $K$	相关系数 $R^2$	$D$
上限级配	0.438 4	0.993 6	2.561 6
中上级配	0.482 4	0.994 3	2.517 6
中值级配	0.543 9	0.993 4	2.456 1
中下级配	0.646 4	0.987 2	2.353 6
下限级配	0.737 9	0.989 7	2.262 1

3 水泥稳定再生集料试验分析

首先对水泥稳定不同级配 RCA 进行击实试验,得到相应的最佳含水率和最大干密度,然后制作成高 15 cm,直径 15 cm 的圆柱体试

件,每种试件制备9个,标准条件下养护到龄期后即可进行强度试验,过程如图3所示。

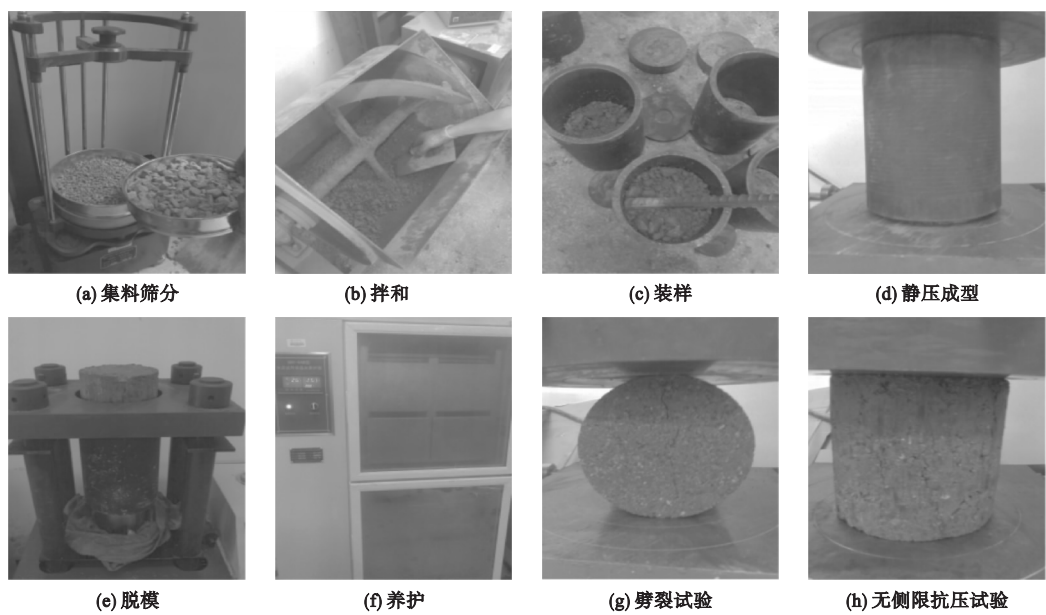


图3 试验过程

Fig.3 Testing process

3.1 击实特性分析

通过重型击实试验得到3%、4%、5%、6%水泥掺量稳定5种级配RCA的最佳含水率和最大干密度,试验结果如图4、图5所示。

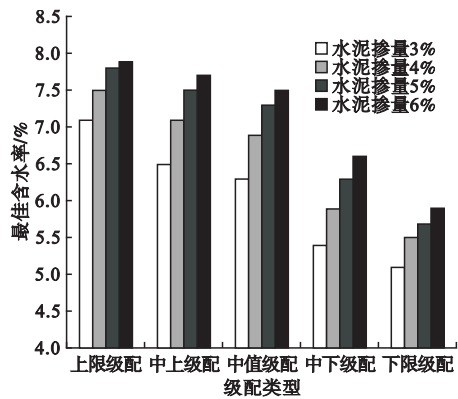


图4 最佳含水率与级配关系

Fig.4 Relationship between optimum moisture content and gradation

从图中可以看出:①最佳含水率随着级配由上限到下限的变化呈现出整体降低的趋势,这主要是因为RCA表面存在许多孔洞与裂隙,具有较强的吸水特性,级配越接近上限级配,集料整体粒径越小,比表面积也越大,吸水的潜势也越强,因此最佳含水率也相应

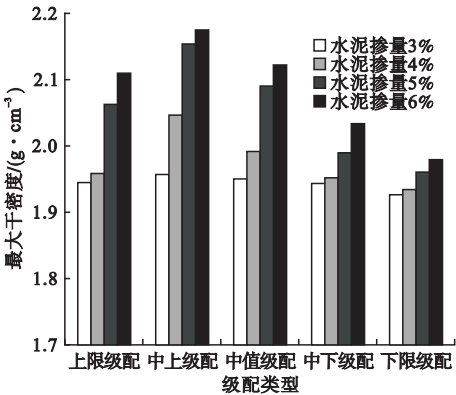


图5 最大干密度与级配关系

Fig.5 Relationship between maximum dry density and gradation

越大。②最大干密度均随着级配由上限到下限的变化呈现先增大后降低的趋势,这主要是因为上限级配粒细集料较多无法形成稳定的嵌挤结构,击实过程中很容易受到扰动松散,下限级配粗集料较多形成的空隙较大,细集料较少无法充分填充导致密实度不足。③最佳含水率和最大干密度均随水泥掺量的增加呈现一直增大的趋势。

3.2 无侧限抗压强度

规范中规定水泥稳定类半刚性基层是以

7 d 无侧限抗压强度为控制指标,因此在标准条件养护 7 d 后通过试验分别测试了 3%、4%、5%、6% 水泥掺量稳定五种级配 RCA 的无侧限抗压强度,试验结果见表 4 所示.

表 4 不同级配和水泥掺量下的无侧限抗压强度

Table 4 Unconfined compressive strength of different gradation and cement content

级配类型	无侧限抗压强度/MPa			
	水泥掺量 3%	水泥掺量 4%	水泥掺量 5%	水泥掺量 6%
上限级配	1.90	3.10	3.75	5.12
中上级配	2.64	3.72	4.08	5.64
中值级配	2.87	3.53	3.94	4.80
中下级配	2.52	2.97	3.59	4.67
下上级配	2.36	2.71	3.31	4.56

根据表 4 可画出无侧限抗压强度与级配和水泥产量之间关系曲线,如图 6、图 7 所示.

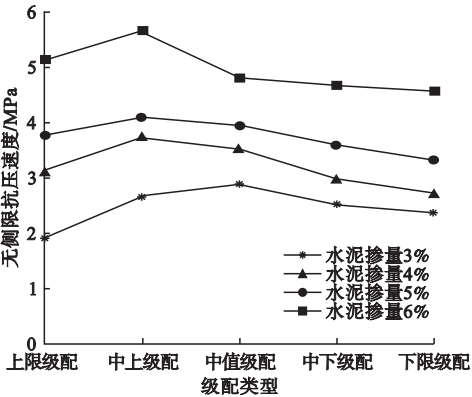


图 6 无侧限抗压强度与级配关系  
Fig. 6 Relationship between unconfined compressive strength and gradation

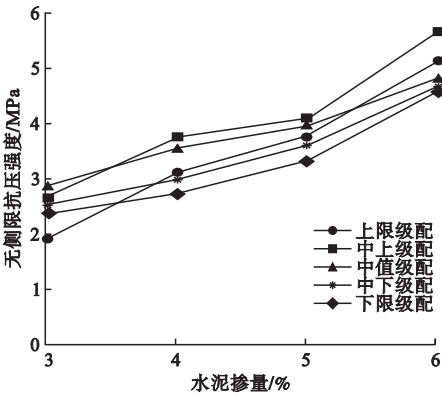


图 7 无侧限抗压强度与水泥掺量关系  
Fig. 7 Relationship between unconfined compressive strength and cement content

从图中可以看出:①水泥稳定 RCA 的无侧限抗压强度随级配由上限到下限的变化而呈现出先增大后减小的趋势,3%、4%、5%、6% 四种水泥掺量下的无侧限抗压强度最大值比最小值分别高出 51.05%、37.27%、23.26%、23.68%,可见级配对强度影响明显.②上限级配在四种水泥掺量下的平均无侧限抗压强度为 3.47 MPa,中上级配为 4.02 MPa,中值级配为 3.79 MPa,中下级配为 3.44 MPa,下上级配为 3.24 MPa,由大到小依次对应为中上级配、中值级配、上限级配、中下级配、下上级配.③无侧限抗压强度均随水泥掺量的增加而增大,平均水泥剂量每增加 1%,无侧限抗压强度增大约 26%.

3.3 劈裂强度

劈裂强度表征了水稳基层的抗拉特性,劈裂强度越大基层抵抗车辆荷载作用产生的层底弯拉应力能力越强,通过劈裂试验得到标准条件养护 7 d 后的 5 种级配下的劈裂强度,试验结果如表 5 所示.

根据表 5 可画出劈裂强度与级配和水泥产量之间关系曲线(见图 8、图 9).



表 5 不同级配和水泥掺量下的劈裂强度

Table 5 Splitting strength of different gradation and cement content

级配类型	劈裂强度/MPa			
	水泥掺量 3%	水泥掺量 4%	水泥掺量 5%	水泥掺量 6%
上限级配	0.30	0.39	0.54	0.70
中上级配	0.35	0.47	0.64	0.86
中值级配	0.32	0.40	0.56	0.68
中下级配	0.28	0.37	0.52	0.62
下限级配	0.26	0.31	0.49	0.58

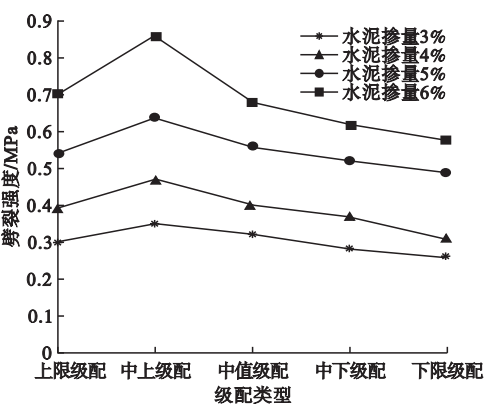


图 8 劈裂强度与级配关系

Fig. 8 Relationship between splitting strength and gradation

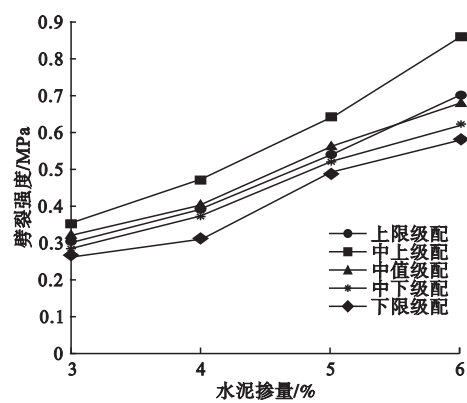


图 9 劈裂强度与水泥掺量关系

Fig. 9 Relationship between splitting strength and cement content

从图中可以看出:①水泥稳定 RCA 的劈裂强度随级配由上限到下限的变化而也呈现出先增大后减小的趋势,最大值所对应的级配为中上级配,最小值所对应的级配为下限级配,3%、4%、5%、6% 四种不同掺量水泥稳定 RCA 的最大劈裂强度比最小劈裂强度高

出 34.62%、51.61%、30.61%、48.28%。②劈裂强度由大到小排序依次对应级配为中上级配(平均 0.58 MPa)、中值级配(平均 0.49 MPa)、上限级配(平均 0.48 MPa)、中下级配(平均 0.45 MPa)、下限级配(平均 0.41 MPa),与无侧限抗压强度排列的顺序一致.这主要是因为 RCA 尤其是再生矿粉中存在一定的活性硅酸盐,能够能与水泥的水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生火山灰反应<sup>[22-23]</sup>,级配越靠近上限再生矿粉比例越大活性成分也越多,因此强度相应会增大,但由于上限级配粗颗粒含量较少而且容易压碎无法形成骨架嵌挤结构,下限级配来说虽然能够形成骨架但缺少细集料和矿粉的填充,因此靠近中值、中上级配时的强度更大.③劈裂强度也均随水泥掺量的增加而增大,平均水泥剂量每增加 1%,劈裂强度增大约 32%,大于 26%,可见水泥掺量的改变对劈裂强度的影响较无侧限抗压强度更显著.

## 4 基于灰色关联的粒径分析及最佳级配确定

### 4.1 基于灰色关联的粒径分析

为了确定级配中影响强度的关键粒径,采用灰色理论建立粒径与强度之间的关联度并据此提出合理的级配组成.

设  $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \cdots, x_0(n))$  为参考序列,  $X_i = (x_i(1), x_i(2), \cdots, x_i(n))$  为比较序列,则  $X_i$  与  $X_0$  灰色关联度的计算步骤如下<sup>[24]</sup>:

- (1)求各序列的初值像
- $$X'_i = X_i/x_i(1) = (x'_i(1), x'_i(2), \cdots, x'_i(n)), i = 0, 1, 2, \cdots, m.$$
- (2)求差序列
- $$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|.$$
- 其中,  $\Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \cdots, \Delta_i(n))$ ,  $i = 1, 2, \cdots, m$ .
- (3)求两极最大差和最小差
- $$M = \max_i \max_k \Delta_i(k), m = \min_i \min_k \Delta_i(k).$$
- (4)求关联系数
- $$\gamma_{0i}(k) = \frac{m + \varepsilon M}{\Delta_i(k) + \varepsilon M}.$$

其中,  $\varepsilon \in (0, 1)$ , 取  $\varepsilon = 0.5$ ;  $k = 1, 2, \cdots, n$ ;  $i = 1, 2, \cdots, m$ .

(5)计算关联度

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{0i}(k), i = 1, 2, \cdots, m.$$

将粒径分为 5 个粒组, 每粒组含量分别为  $X_1$  (0 ~ 0.075 mm),  $X_2$  (0.075 ~ 4.75 mm),  $X_3$  (4.75 ~ 9.5 mm),  $X_4$  (9.5 ~ 19 mm),  $X_5$  (19 ~ 31.5 mm) 构成比较序列, 将不同级配下的平均无侧限强度、平均劈裂强度分别构成参考序列  $X_0$ , 根据上述计算步骤计算得到灰色关联度如表 6 所示.

表 6 灰色关联度  
Table 6 Grey relational grade

试验指标	关联度				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
无侧限抗压强度	0.644 6	0.817 9	0.929 2	0.912 9	0.612 5
劈裂强度	0.653 8	0.843 2	0.908 8	0.889 1	0.611 1

从表 6 中可以看出:①无侧限抗压强度和劈裂强度与不同粒径组的关联程度顺序相同, 关联度最大的均为 4.75 ~ 9.5 mm 粒径组, 后依次为 9.5 ~ 19 mm 粒径组、0.075 ~ 4.75 mm 粒径组、0 ~ 0.075 mm 粒径组, 最小的为 19 ~ 31.5 mm 粒径组. ②粒径大于 4.75 mm 的粒径与抗压强度的关联程度比劈裂强度大, 而粒径小于 4.75 mm 的粒径

$X_1$ 、 $X_2$  与劈裂强度的关联度比抗压强度更大, 可见小粒径集料对劈裂强度更有利, 而大粒径集料对抗压强度更有利.

4.2 最佳级配确定

将 5 种级配的分形维数分别与平均无侧限强度、平均劈裂强度进行多项式拟合分析, 结果见图 10 所示.

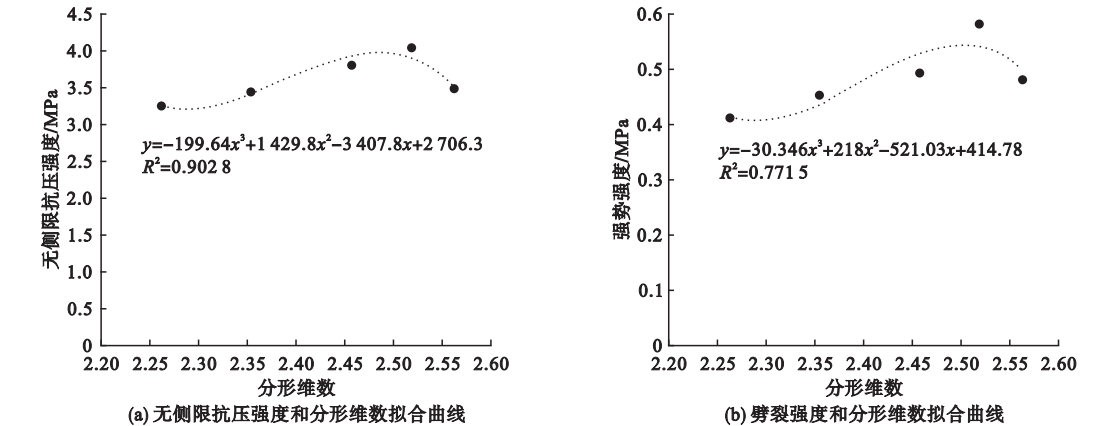


图 10 强度和分形维数拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of strength and fractal dimension

根据拟合得到的多项式分别求得强度最大时对应的分形维数为 2.483 6,2.499 1,为了使抗压和抗拉强度综合性能达到最优,可取  $D = \lambda D_1 + (1 - \lambda) D_2, 0 \leq \lambda \leq 1$ ,一般取  $\lambda = 0.5$ . 可得最优分形维数  $D_{opt} = (D_1 + D_2)/2 = (2.483\ 6 + 2.499\ 1)/2 = 2.491\ 4$ . 再根据式(2)即可反算得到最佳级配的组成见表7所示.

表7 最佳级配组成

Table 7 Composition of optimum gradation

粒径/mm	通过比例/%	粒径/mm	通过比例/%
31.5	100	4.75	38.2
26.5	91.6	2.36	26.8
19	77.3	0.6	13.3
9.5	54.4	0.075	4.6

5 结 论

(1)水泥稳定 RCA 的无侧限抗压强度、劈裂强度均随着级配由上限到下限的变化呈现先增大后降低的趋势,并在中上级配时达到最大值.

(2) RCA 与强度关联度最大分别为 4.75 ~ 9.5 mm 粒径组,关联度最低的为 19 ~ 31.5 mm 粒径组,大于 4.75 mm 的粒径与抗压强度的关联性更好,而小于 4.75 mm 的粒径与劈裂强度的关联性更好.

(3)优化得到最佳级配对应的分形维数为 2.491 4,并反推得到最佳级配对应各粒径组成比例.

参考文献

[1] 朱鹤云,张晶磊,唐凤,等. 掺合建筑垃圾微粉混凝土的性能研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,1(26),183-188.  
(ZHU Heyun, ZHANG Jinglei, TANG Feng, et al. Study on properties of concrete with admixture of construction waste powder performance[J]. Journal of water resources & water engineering, 2015, 1(26), 183-188.)

[2] 赵晓红,王文科,陈宇云,等. 建筑垃圾再生材料应用于公路工程的环境影响[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2016,44(2):111-115.

(ZHAO Xiaohong, WANG Wenke, CHEN Yuyun, et al. Environmental impact of construction waste used as recycled material in highway construction[J]. Journal of Shaanxi normal university (natural science edition), 2016, 44(2):111-115.)

[3] AI Hongmei, WEI Jing, BAI Junying, et al. Properties of recycled cement produced from waste concrete[J]. Advanced materials research, 2011(194/196):1170-1175.

[4] GASTALDI D, CANONICO F, CAPELLI L, et al. An investigation on the recycling of hydrated cement from concrete demolition waste[J]. Cement and concrete composites, 2015, 61(8):29-35.

[5] CLAUDIO J Z, ANGEL A D M. Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature[J]. Construction and building materials, 2009, 23(5):2047-2052.

[6] BRAVO M, DEBRITO J, PONTES J, et al. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants[J]. Construction and building materials, 2015, 77(15):357-369.

[7] BRAVO M, DEBRITO J, PONTES J, et al. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants[J]. Journal of cleaner production, 2015, 99(15):59-74.

[8] OMARY S, GHORBEL E, WARDEH G. Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties[J]. Construction and building materials, 2016, 108:163-174.

[9] 高启聚,丛林,郭忠印. 废弃水泥混凝土路面板在路面基层中的再生利用[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2):20-23.  
(GAO Qiju, CONG Lin, GUO Zhongyin. Recycling of waste cement concrete pavement slab in pavement base course[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2008, 25(2):20-23.)

[10] 杨俊,黎新春,陈峻松,等. 废旧混凝土用作水泥稳定基层的实验研究[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5):2097-2103.  
(YANG Jun, LI Xinchun, CHEN Junsong, et al. Experimental study on waste concrete used as cement stabilized base[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2014, 8(5):2097-2103.)

[11] 顾小安,张璠,钱海涛. 水泥路面再生集料用于水稳基层的性能试验研究[J]. 公路工程, 2014, 39(3):49-51.  
(GU Xiaohan, ZHANG Fan, QIAN Haitao. Performance test study on cement stabilized base of recycled aggregate from old concrete pavement[J]. Highway engineering, 2014, 39(3):49-51.)

[12] XUAN D X, MOLENAAR A A A, HOUBEN L J M. Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as



- road bases[J]. Journal of cleaner production, 2015(100):77-83.
- [13] EI-MAATY B A E A. Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt[J]. Ain shams engineering journal, 2013, 4(4):661-673.
- [14] 刘朝晖,孙潇潇,秦仁杰,等.不同级配类型水泥稳定碎石底基层路用性能对比分析研究[J].中外公路,2012,32(1):218-221.  
(LIU Chaohui, SUN Xiaoxiao, QIN Renjie, et al. Study on road performance of cement-stabilized macadam subbase with different gradation types[J]. Journal of China & foreign highway, 2012, 32(1):218-221.)
- [15] 彭波,李龙刚,尹光凯,等.低水泥剂量稳定碎石级配组成设计与性能研究[J].公路,2018(5):26-33.  
(PENG Bo, LI Longgang, YIN Guangkai, et al. Gradation composition design and performance study of low dose cement stabilized macadam[J]. Highway, 2018(5):26-33.)
- [16] 扈惠敏,孙业香.再生集料水稳碎石配合比设计与强度规律的试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(2):238-240.  
(HU Huimin, SUN Yexiang. Experimental research on the design of the mix proportion of recycled cement-stabilized aggregates and the strength rule[J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2009, 32(2):238-240.)
- [17] 胡忠辉,贾致荣,张文刚,等.水泥稳定再生集料基层性能试验研究与工程应用[J].施工技术,2016,45(7):126-129.  
(HU Zhonghui, JIA Zhirong, ZHANG Wengang, et al. Experimental study and engineering application of cement stabilized recycled aggregate pavement base course[J]. Construction technology, 2016, 45(7):126-129.)
- [18] 肖杰,吴超凡,湛哲宏,等.水泥稳定砖与混凝土再生集料基层的性能研究[J].中国公路学报,2017,30(2):25-32.  
(XIAO Jie, WU Chaofan, ZHAN Zhehong, et al. Research on performances of cement stabilized brick and concrete recycled aggregate base[J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(2):25-32.)
- [19] 赵大勇,童申家.基于粗糙集理论的AC-16级配抗滑设计的关键粒组[J].公路工程,2016,41(5):17-21.  
(ZHAO Dayong, TONG Shenjia. The key grain group for anti-sliding gradation design of AC-16 based on rough set theory[J]. Highway engineering, 2016, 41(5):17-21.)
- [20] 朱晟,邓石德,宁志远,等.基于分形理论的堆石料级配设计方法[J].岩土工程学报,2017,39(6):1151-1155.  
(ZHU Sheng, DENG Shide, NING Zhiyuan, et al. Gradation design method for rockfill materials based on fractal theory[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39(6):1151-1155.)
- [21] 黄维蓉,熊依筱,习磊.沥青混合料级配分维特征与路用性能相关性研究[J].重庆交通大学学报,2018,37(8):45-50.  
(HUANG Weirong, XIONG Yixiao, XI Lei. Correlation between fractal dimension characteristics and road performance of asphalt mixture gradation[J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2018, 37(8):45-50.)
- [22] 侯月琴,纪小平,刘陵庆.水泥稳定再生集料的力学特性及影响因素研究[J].公路交通科技,2016,12(33):56-61.  
(HOU Yueqin, JI Xiaoping, LIU Lingqing. Study on mechanical property and influencing factors of cement stabilized recycled aggregate[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2016, 12(33):56-61.)
- [23] 纪小平,曹海利,刘陵庆.水泥稳定再生集料的性能及其影响因素研究[J].建筑材料学报,2016,19(2):342-346.  
(JI Xiaoping, CAO Haili, LIU Lingqing. Performances and influencing factors of cement stabilized recycled concrete aggregate[J]. Journal of building materials, 2016, 19(2):342-346.)
- [24] 刘思峰.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2013.  
(LIU Sifeng. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013.)