

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.03.018

# 灰色聚类法在再生混凝土粗骨料 质量等级评价中的应用

鲍学英, 王起才

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

**摘要:**基于灰色聚类评估理论,提出了利用多项参数综合评价再生混凝土粗骨料质量等级的方案。方案依据中国《混凝土用再生粗骨料标准》选取了表观密度、空隙率、坚固性、压碎指标、微粉含量、泥块含量、吸水率等7项参数作为综合评价指标,采用相似权法确定各指标的客观权重,根据评价指标等级赋值区间的特点,将质量等级划分为4个灰类等级;利用白化权函数构建了评价模型,通过对灰色聚类系数的计算,得出再生混凝土粗骨料质量等级的评价结果;最后通过实例分析检验了该评价方案的实用性。

**关键词:**灰色聚类法;骨料;质量等级

**中图分类号:**TU528.041 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)03-0112-06

## Application of Grey Clustering Method for Quality Grade Estimate of Recycled Concrete Coarse Aggregate

Bao Xueying, Wang Qicai

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China)

**Abstract:** A comprehensive estimate scheme employed multiple parameters is proposed for quality grade of recycled concrete coarse aggregate based on grey clustering theory. In the scheme, seven parameters are selected as comprehensive evaluation indices according to Recycled Coarse Aggregate for Concrete of China. The parameters are apparent density, porosity, sturdiness, crushing index, micro-mist content, silt content and water absorption respectively. Secondly, weighted similarity method is adopted to determine the objective weight, and divide the quality grade into four grey ranks according to characteristics of grade assignment interval of the indices. Then, whitening weight function is employed to make an estimate model, by which the quality grade estimate result of recycled concrete coarse aggregate can be achieved through compute of grey clustering coefficients. Finally, a case study is adopted to verify the practicability of the proposed scheme.

**Key words:** grey clustering method; aggregates; quality grade

再生混凝土骨料是将废旧混凝土块经过清洗、破碎、筛分和按一定比例相互配合后所形成的骨料。根据再生骨料粒径的大小,可分为再生粗骨料(粒径 $> 4.75\text{ mm}$ )和再生细骨料( $0.15\text{ mm} < \text{粒径} < 4.75\text{ mm}$ )<sup>[1]</sup>。利用再生混凝土骨料部分或全部代替

砂石等天然骨料(主要是粗骨料)配制而成的混凝土称为再生混凝土。为了实现对再生混凝土粗骨料的合理利用,需要确定其质量等级。用于评价再生粗骨料质量的指标有很多,比较有代表性的是日本、英国和美国。日本1994年颁布的《再生混凝土材料质量

收稿日期:2013-09-09

基金项目:高校基本科研业务费专项资金资助(212097);长江学者和创新团队发展计划(IRT1139)

作者简介:鲍学英(1974-),女,教授,博士生,主要从事绿色建筑及建材综合评价,(E-mail)baoxueying2003@163.com。

试行条例》,以吸水率和压碎指标作为再生混凝土粗骨料质量等级的评价指标<sup>[2]</sup>,英国标准(BS)<sup>[3]</sup>和美国材料试验协会标准(ASTM)<sup>[4-5]</sup>是以最低表观密度、最大吸水率、最大针片状颗粒含量、最大冲击值、最大氯含量、最大硫酸盐含量对应用于不同工程中再生粗骨料的评价指标的极值,Tam<sup>[6]</sup>通过对废弃混凝土进行大量试验研究,并参照 BS 和 ASTM 提出了以表观密度、吸水率、针片状颗粒含量、冲击值、氯化物含量和硫酸盐含量作为评价指标将再生粗骨料分为 7 个等级。近年来,中国学者也在试验研究的基础上提出相应再生粗骨料的评价指标并对其进行分级<sup>[7-11]</sup>,中国 2010 年颁布的《混凝土用再生骨料标准》(GB/T 25177-2010),以颗粒级配、微粉含量和泥块含量、吸水率、针片状颗粒含量、有害物质含量、杂物含量、坚固性、压碎指标、表观密度和空隙率、碱骨料反应等共 10 项指标将混凝土再生粗骨料分成 3 个等级。上述研究都是通过试验的方法测定各单因子指标,利用各单因子指标来对混凝土再生粗骨料进行分级。由于影响再生混凝土粗骨料质量的因素很多,各种影响因素对再生混凝土质量的影响程度是未知的,再生混凝土粗骨料的质量等级评价应属于灰色系统范畴。而灰色聚类法是将聚类对象对于不同聚类指标所拥有的白化权数,按几个灰类进行归纳,从而判断聚类对象属于哪一个灰类<sup>[12-15]</sup>。所以可以根据灰色系统理论,应用灰色聚类法来评价再生混凝土粗骨料的质量等级。为了实现多因素影响下的混凝土再生骨料质量分级,笔者在《混凝土用再生骨料标准》(GB/T 25177-2010)的基础上确定了再生混凝土粗骨料质量等级的评价指标,采用灰色聚类方法来评价再生混凝土的质量等级。

## 1 再生混凝土粗骨料质量等级评价的灰色聚类法

### 1.1 评价模型的构建

设有  $n$  个样本,对每个样本设定  $m$  个评价指标、 $s$  个不同的灰类等级,记评价指标集合为  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ ,灰类等级集合为  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_s\}$ 。样本空间如式(1)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为第  $i$  个样本,  $x_{ij}$  为第  $i$  个样本相对于第  $j$  个指标的实测值,记  $x_{ij}$  属于第  $k$  个灰类的程度为  $f_{ij}^k$ ,可通过构造白化权函数的方式求解,常见的白化权函数基本形式如图 1 所示<sup>[16-17]</sup>。

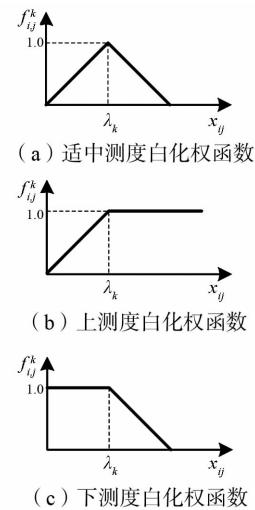


图 1 白化权函数基本形式

根据《混凝土用再生骨料标准》(GB/T 25177-2010)确定的各指标界限值如表 1 所示<sup>[19]</sup>。

由表 1 中各个评价指标的界限值,构造白化权函数,对于指标  $I_1$ ,当  $k = 1$  时,采用上测度白化权函数,当  $k = 2, 3$  时,采用适中测度白化权函数,当  $k = 4$  时,采用下测度白化权函数,具体如图 2 所示。

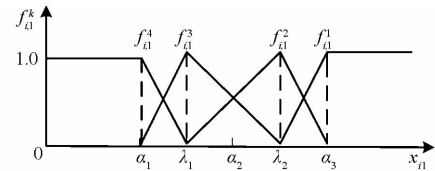


图 2 指标  $I_1$  白化权函数示意图

表 1 评价指标及界限值

分类		表观密度 $I_1 /$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	空隙率 $I_2 / \%$	坚固性 $I_3 / \%$	压碎指标 $I_4 / \%$	微粉含量 $I_5 / \%$	泥块含量 $I_6 / \%$	吸水率 $I_7 / \%$
合格品	I类	$>2\ 450$	$<47$	$<5.0$	$<12$	$<1.0$	$<0.5$	$<3.0$
合格品	II类	$(2\ 350, 2\ 450]$	$[47, 50)$	$[5.0, 9.0)$	$[12, 20)$	$[1.0, 2.0)$	$[0.5, 0.7)$	$[3.0, 5.0)$
合格品	III类	$(2\ 250, 2\ 350]$	$[50, 53)$	$[9.0, 15.0)$	$[20, 30)$	$[2.0, 3.0)$	$[0.7, 1.0)$	$[5.0, 7.0)$
不合格品	IV类	$\leq 2\ 250$	$\geq 53$	$\geq 15$	$\geq 30$	$\geq 3.0$	$\geq 1.0$	$\geq 7.0$

对于指标  $I_2 \sim I_7$ , 当  $k = 1$  时, 采用下测度白化权函数, 当  $k = 2, 3$  时, 采用适中测度白化权函数, 当  $k = 4$  时, 采用上测度白化权函数, 具体如图 3 所示。

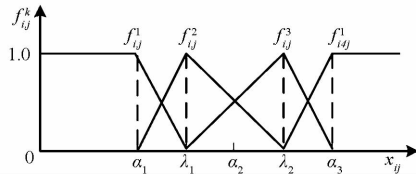


图 3 指标  $I_2 \sim I_7$  白化权函数示意图

在图 2、图 3 中,  $a_1, a_2, a_3$  分别对应于表 1 中各个聚类指标的 3 个分类界限值,  $\lambda_1 = \frac{1}{2}(a_1 + a_2)$ ,  $\lambda_2 = \frac{1}{2}(a_2 + a_3)$ 。

对于下测度白化权函数, 其表达式如式(2)所示。

$$f_{i,j}^k = \begin{cases} 0 & x_{ij} \notin [0, \lambda_1] \\ \frac{\lambda_1 - x_{ij}}{\lambda_1 - a_1} & x_{ij} \in [a_1, \lambda_1] \\ 1 & x_{ij} \in [0, a_1] \end{cases} \quad (2)$$

对于上测度白化权函数, 其表达式如式(3)所示。

$$f_{i,j}^k = \begin{cases} 0 & x_{ij} < \lambda_2 \\ \frac{x_{ij} - \lambda_2}{a_3 - \lambda_2} & x_{ij} \in [\lambda_2, a_3] \\ 1 & x_{ij} > a_3 \end{cases} \quad (3)$$

对于适中测度白化权函数, 其表达式如式(4)所示(以图 2 中,  $k = 2$  为例)。

$$f_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} & x_{ij} \in [\lambda_1, \lambda_2] \\ 0 & x_{ij} \notin [\lambda_1, a_3] \\ \frac{a_3 - x_{ij}}{a_3 - \lambda_2} & x_{ij} \in [\lambda_2, a_3] \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 评价的步骤

第 1 步: 按照评估要求所需划分的灰类数  $s$ , 将各个指标的取值范围也相应地划分为  $s$  个灰类。

第 2 步: 对于样本  $x_i$  的第  $j$  个指标的一个观测值  $x_{ij}$ , 根据式(2)~(4), 计算出其属于灰类  $k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) 的隶属度(白化权系数)  $f_{i,j}^k$ 。

第 3 步: 计算样本  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 关于灰类  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, s$ ) 的综合聚类系数  $\sigma_i^k$

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m f_{i,j}^k \cdot \eta_j \quad (5)$$

式中:  $f_{i,j}^k$  为样本  $x_i$  的第  $j$  个指标  $k$  子类白化权系数,  $\eta_j$  为指标  $j$  在综合聚类中的权重。

第 4 步: 由  $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$ , 判断样本  $x_i$  属于灰类  $k^*$ ; 当有多个样本同属于灰类  $k^*$  时, 还可以进一步根据综合聚类系数的大小确定同属于灰类  $k^*$

的各个样本的优劣或位次。

## 1.3 评价指标权重 $\eta_j$ 的确定

权重的计算方法有很多, 比较有代表性的有层次分析法、专家赋权法、频数统计分析法等<sup>[18]</sup>, 不同的权重对应不同的评价结果。因此, 评价指标权重的准确性将会大大影响评价结论。对于有些领域, 可以根据专家的经验利用层次分析法、专家赋权法等进行主观性赋值。但是再生混凝土粗骨料的各个评价指标对再生混凝土粗骨料的质量分级的影响目前无法靠专家的经验主观确定。而且, 用于灰色聚类的指标权重应该和聚类对象自身的样本数据有关, 相似权法是利用观测数据所提供的信息来确定权重, 既避免了主观赋权法的弊病, 又满足灰色聚类法的要求, 为此采用相似权法<sup>[19]</sup>对评价指标的权重进行客观赋值。

具体步骤如下:

第 1 步: 既然专家无法知道评价指标的相对重要程度, 则先假定样本的各个指标具有相同的重要程度, 取  $j$  指标的权重  $\eta_j = \frac{1}{m}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ )。

第 2 步: 在此假定条件下, 根据样本的实际观测值  $x_{ij}$ , 利用式(2)~(4)构造出样本  $x_i$  的单指标白化权系数评价矩阵  $F_i$ 。

$$F_i = [f_{i,j}^k]_{m \times s} = \begin{bmatrix} f_{i,1}^1 & f_{i,1}^2 & \cdots & f_{i,1}^s \\ f_{i,2}^1 & f_{i,2}^2 & \cdots & f_{i,2}^s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{i,m}^1 & f_{i,m}^2 & \cdots & f_{i,m}^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)矩阵的第  $j$  个行向量为指标  $I_j$  的白化权系数评价向量。

第 3 步: 由单指标白化权系数评价矩阵  $F_i$ , 根据公式(6)求出综合白化权系数评价矩阵  $F$ 。

$$F = [f_i^k]_{n \times s} = \begin{bmatrix} f_1^1 & f_1^2 & \cdots & f_1^s \\ f_2^1 & f_2^2 & \cdots & f_2^s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_n^1 & f_n^2 & \cdots & f_n^s \end{bmatrix} \quad (7)$$

评价矩阵式(7)中,  $f_i^k$  表示样本  $x_i$  属于第  $k$  个灰类的隶属度,  $f_i^k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_{i,j}^k$ 。

第 4 步, 单指标白化权系数评价向量与综合指标白化权系数向量的“相近”程度反映了指标  $I_j$  反映总体情况的能力, 单指标白化权系数评价向量与综合指标白化权系数向量越相近, 则说明指标  $I_j$  越能体现总体情况, 即指标  $j$  的权重越大。

$$\begin{aligned} \text{令, } r_j &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{i,j}^1, f_{i,j}^2, \dots, f_{i,j}^s) (f_i^1, f_i^2, \dots, f_i^s)^T \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^s f_{i,j}^k f_i^k \end{aligned} \quad (8)$$

$$\eta_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m r_j} \quad (9)$$

称  $r_j$  为相似数,  $\eta_j$  为相似权, 可以用相似权  $\eta_j$  作为指标  $I_j$  的权重。

## 2 评价实例

根据文献[20], 某 5 批再生混凝土粗骨料试验结果各指标实测值如表 3 所示, 试对其进行质量等级评定。

表 3 评价指标实测值

样本编号	表观密度/ $I_1$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	空隙率 $I_2/\%$	坚固性(质量损失) $I_3/\%$	压碎指标 $I_4/\%$	微粉含量 $I_5/\%$	泥块含量 $I_6/\%$	吸水率 $I_7/\%$
样本 1( $x_1$ )	2 300	53	12.0	17.5	1.40	0.7	9.0
样本 2( $x_2$ )	2 500	50	9.2	9.8	2.40	0.5	10.2
样本 3( $x_3$ )	2 435	44	1.4	23.1	0.18	1.0	4.9
样本 4( $x_4$ )	2 360	46	3.1	31.6	0.43	0.4	5.8
样本 5( $x_5$ )	2 620	53	1.0	16.0	3.40	0.9	2.5

根据已知条件, 确定研究对象为 5 个样本, 根据《混凝土用再生骨料标准》(GB/T 25177-2010) 将再生混凝土粗骨料质量等级分为 4 个灰类等级  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\} = \{\text{I 类}, \text{II 类}, \text{III 类}, \text{IV 类}\}$ 。

### 2.1 建立 5 个样本的单指标白化权系数评价矩阵

将表观密度、空隙率、坚固性、压碎指标、微粉含量、泥块含量、吸水率的实测值代入白化权函数计算公式, 得到表 3 中 5 个样本的单指标白化权系数评价矩阵  $F_1 \sim F_5$  为

$$\text{样本 } x_1 \quad F_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.83 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.60 & 0.40 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{样本 } x_2 \quad F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.56 & 0.44 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{样本 } x_3 \quad F_3 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.167 & 0.833 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.55 & 0.45 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{样本 } x_4 \quad F_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.067 & 0.933 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{样本 } x_5 \quad F_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.2 计算评价指标权重 $\eta_j$

首先假定 7 个评价指标具有相同的权重, 即  $\eta = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_7) = (\frac{1}{7}, \frac{1}{7}, \dots, \frac{1}{7})$ , 则综合指标白化权系数评价矩阵为

$$F = (f_i^k)_{5 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.318 & 0.396 & 0.286 \\ 0.429 & 0.166 & 0.263 & 0.142 \\ 0.529 & 0.145 & 0.183 & 0.143 \\ 0.286 & 0.229 & 0.067 & 0.419 \\ 0.571 & 0.143 & 0.000 & 0.286 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(8)得

$$(r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7) = (0.40, 0.35, 0.40, 0.26, 0.36, 0.38, 0.32) \quad (11)$$

由式(9)得

$$(\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5, \eta_6, \eta_7) = (0.16, 0.14, 0.16, 0.11, 0.15, 0.15, 0.13) \quad (12)$$

### 2.3 求综合指标评价矩阵

以式(12)作为指标权重向量,按照  $\sigma_i^k = \sum_{j=1}^7 f_{i,j}^k \cdot \eta_j$

求得综合指标评价矩阵为

$$\sigma = [\sigma_i^k]_{5 \times 3} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.30 & 0.43 & 0.27 \\ 0.42 & 0.17 & 0.28 & 0.13 \\ 0.56 & 0.14 & 0.15 & 0.15 \\ 0.29 & 0.10 & 0.07 & 0.54 \\ 0.60 & 0.11 & 0.00 & 0.29 \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 2.4 判断样本质量等级及优劣排序

由  $\max_{1 \leq k \leq 5} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$ , 根据式(13)判断样本 1 的质量等级为 III 类, 样本 2、样本 3、样本 5 的质量等级为 I 类、样本 4 的质量等级为 IV 类(不合格品)。

因为灰类等级集合  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$  是评价空间  $\sigma$  的有序分割类, 且  $e_1 > e_2 > e_3 > e_4$ , 令  $e_1, e_2,$

$e_3, e_4$  的得分分别为 4、3、2、1 分, 则样本  $X_i$  的质量等级得分为

$$Q_i = \sum_{k=1}^4 (5-k) \cdot \sigma_i^k \quad (14)$$

由式(14)可得:  $Q_2 = 2.88, Q_3 = 3.11, Q_5 = 3.02, Q_3 > Q_5 > Q_2$ 。故, 样本 2、样本 3、样本 5 的质量等级为 I 类, 且 3 个样本的质量优劣排序为: 样本 3、样本 5、样本 2。

### 2.5 评价结果对比分析

为对比起见, 对照《混凝土用再生骨料标准》(GB/T 25177-2010)对实例中 5 个样本进行质量等级分类, 结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 根据《混凝土用再生骨料标准》可以确定出 5 个样本各单项指标质量等级, 但是对于每一个样本的综合评价结果则不能确定, 而根据提出的评价方法则可以得出其综合评价结论。

表 4 实例质量等级分类结果

样本编号	各单项指标分类结果							综合评价结果
	表观密度	空隙率	坚固性	压碎指标	微粉含量	泥块含量	吸水率	
样本 1	III 类	III 类	III 类	II 类	II 类	II 类	IV 类	不能确定
样本 2	I 类	II 类	III 类	I 类	III 类	I 类	IV 类	不能确定
样本 3	I 类	I 类	I 类	III 类	I 类	III 类	II 类	不能确定
样本 4	II 类	I 类	I 类	IV 类	I 类	I 类	III 类	不能确定
样本 5	I 类	III 类	I 类	II 类	IV 类	I 类	I 类	不能确定

## 3 结 论

1) 再生混凝土粗骨料的质量受多种因素的影响, 在实践活动中往往会由于指标交叉而不能依靠试验方法来实现对再生混凝土粗骨料质量等级进行分类, 采用灰色聚类法使分类数学化和定量化, 比直接采用各单一指标的上下限值来划分质量等级更为合理。

2) 再生混凝土粗骨料的各个评价指标对质量等级的影响程度是未知的, 利用相似权法来确定各个评价指标的客观权重, 打破了传统的评价指标无权重或利用专家主观判断法确定指标权重的先例。在评定再生混凝土粗骨料的质量等级上更加科学。

3) 灰色系统理论着重研究概率统计、模糊数学所难以解决的“小样本”、“贫信息”不确定性问题, 在中国目前对于再生混凝土研究还不发达的今天, 利用灰色系统理论较好地解决了再生混凝土粗骨料质量等级评定问题, 具有一定的理论和实践价值。

### 参考文献:

- [1] 吕良英. 混凝土再生骨料的研究动态与发展趋势[J]. 混凝土, 2010(6): 77-81.  
Lyu L Y. Study dynamics and development trend of recycled aggregate and recycled concrete[J]. Concrete, 2010(6): 77-81.
- [2] Tomosawa F. The recycling of concrete: the Japanese experience [C]//Proceedings of the 4th CANMET/ACI/JCI international Conference on Recent Advances in Concrete Technology. London, UK, 1992: 221-237.
- [3] BS 882 Specification for aggregates from natural sources for concrete [S]. London, UK: British Standards Institution, 1992.
- [4] ASTM D 2940-03 Standard specification for graded aggregate material for bases or sub-bases for highways or airports [S]. USA: American Society for Testing and Materials, 2003.
- [5] ASTM D 448-03 Standard classification for sizes of aggregate for road and bridge construction [S]. USA: American Society for Testing and Materials, 2003.
- [6] Tam V Y, Tam C M. A new approach in assessing

- cement mortar remains on recycled aggregate [J]. Magazine of Concrete Research, 2007, 59(6): 413-422.
- [7] Chen C P. Investigation on factors influencing workability of recycled aggregates concrete [J]. Advanced Materials Research, 2013(631/632): 733-739.
- [8] 李秋义,李云霞,朱崇疾. 基于需水量和强度比的再生粗骨料分类方法[J]. 材料科学与工艺, 2007, 15(4): 480-483.  
Li Q Y, Li Y X, Zhu C J. The study on the classification method of the recycled coarse aggregate based on the ratio of water dosage and the ratio of compressive strength [J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(4): 480-483.
- [9] 王思源,朱平华,姚荣,等. 再生混凝土粗骨料质量等级模糊综合评估方法[J]. 混凝土, 2010(7): 87-89.  
Wang S Y, Zhu P H, Yao R, et al. Fuzzy synthesis method for evaluating quality class of recycled concrete coarse aggregate [J]. Concrete, 2010(7): 87-89.
- [10] Sun Y H, Wu S P, Zhu J Q, et al. Classification of fine recycled aggregate used in asphalt concrete [J]. Advanced Materials Research, 2012, 365: 33-37.
- [11] Zhu P H, Feng J C, Wang X J. Fuzzy synthesis method for evaluating quality class of coarse recycled concrete aggregate [J]. Advanced Materials Research, 2011, 250-253: 783-787.
- [12] Chen B P. Grey clustering model of coating erosion resistance evaluation [J]. Advanced Materials Research, 2013, 602/603/604: 2263-2266.
- [13] Fan L Q. Improvement of grey clustering model for comprehensive assessment of environmental quality: A case study in water environment [J]. Advanced Materials Research, 2012, 356-360: 2222-2227.
- [14] Hu S N. High-grade highway safety evaluation method based on grey clustering [J]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597: 1412-1415.
- [15] Luo Q. Green construction evaluation of wall project based on grey clustering method [J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-279: 6971-6975.
- [16] 蔡新,严伟,李益,等. 灰色理论在堤防安全评价中的应用[J]. 水利发电学报, 2012(1): 62-65.  
Cai X, Yan W, Li Y, et al. Grey theory in comprehensive evaluation of dyke safety risk [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012(1): 62-65.
- [17] 于爱兵,王敏,田欣利. 应用灰色聚类法评价陶瓷材料的磨削加工性[J]. 兵工学报, 2007, 28(2): 197-201.  
Yu A B, Wang M, Tian X L. Grindability evaluation of ceramics via grey clustering approach [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2): 197-201.
- [18] 苏永强,单仁亮,郭章林. 建筑工程设计安全的多层次模糊综合评价[J]. 北京工业大学学报, 2008(9): 961-964.  
Su Y J, Shan R L, Guo Z L. Fuzzy multiple goals decision making method for building engineering design safety [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2008(9): 961-964.
- [19] 庞彦军,刘开第,张博文. 综合评价系统客观性指标权重的确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 2001(8): 37-42.  
Pang Y J, Liu K D, Zhang B W. The method of determining the objective index weight in the synthetic evaluation system [J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2001(8): 37-42.
- [20] 李秋义,全洪珠,秦原. 混凝土再生骨料[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

(编辑 胡英奎)