

文章编号: 1004-4353(2019)03-0279-04

基于排队评分法与矩阵分析法的多指标再生混凝土力学性能的优选研究

唐佳军, 裴长春*
(延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为了研究多指标情况下再生混凝土力学性能的最优组合,以再生骨料替代率、粉煤灰替代率和钢纤维掺入率为因素,抗压强度、劈拉强度、抗折强度、拉压比和折压比为指标,分别利用排队评分法与矩阵分析法对再生混凝土正交试验结果进行分析.结果表明:各因素对再生混凝土力学性能影响的大小顺序依次为钢纤维掺入率、粉煤灰替代率、再生骨料替代率;再生混凝土力学性能的最优组合为 A4B2C4,即再生骨料替代率为 100%、粉煤灰替代率为 10%、钢纤维掺入率为 1.8%;矩阵分析法所得结果与正交试验分析结果更为接近,这表明矩阵分析法在确定最佳组合方案时优于排队评分法.

关键词: 再生混凝土; 排队评分法; 矩阵分析法; 多指标

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A

Study on optimum selection of mechanical properties of multi-index RAC based on queuing scoring method and matrix analysis method

TANG Jiajun, PEI Changchun*
(College of Engineering, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: In order to study the optimal combination of mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC) under multi-index conditions, the orthogonal test results of RAC were analyzed by queuing scoring method and matrix analysis method, taking the replacement rate of recycled aggregate, fly ash and steel fiber as factors, and the compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, tension-compression ratio and flexural-compression ratio as indicators. The order of the influence of various factors on mechanical properties of RAC is the incorporation rate of steel fiber, the replacement rate of fly ash and the replacement rate of recycled aggregate. The optimal combination of mechanical properties of RAC is A4B2C4, that is, the replacement rate of recycled aggregate is 100%, the replacement rate of fly ash is 10%, and the incorporation rate of steel fiber is 1.8%. The results of matrix analysis method are closer to that of orthogonal experiment, which shows that matrix analysis method is superior to queuing scoring method in determining the best combination scheme.

Keywords: RAC; queuing scoring method; matrix analysis method; multi-index

近年来,一些学者对再生混凝土(RAC)进行了正交试验研究.例如,金宝宏等^[1]以再生骨料(RA)替代率、粉煤灰(FA)替代率和钢纤维(SF)掺入率为因素,以坍落度、抗压与劈拉强度为指标,通过极差分析与点图分析对研究指标进行了正交试验研究.孙呈凯等^[2]以 RA 替代率、FA 替代率、水胶比和 PVA 纤维掺入率为因素,通过对正交试验结果进行层次分析、方差分析与因素指标分析,研究了各因素对 RAC 的抗压与劈拉强度的作用规律.张学兵等^[3]设计了一种 3 因素、4

水平、3 指标的正交试验方案,利用直观分析、极差分析、层次分析、因素指标分析和方差分析研究了 RAC 的最佳强度组合与因素指标的关系.由以上研究可以看出,目前正交试验方案中的分析方法较为复杂.研究表明,采用排队评分法^[4]或矩阵分析法^[5]时仅需对评分总和或试验指标进行极差分析,可以大大减少工作量,提高分析效率,但目前该方法多应用于机械设计制造等方面^[6-8],在 RAC 的正交试验分析中的应用尚未见报道.基于此,本文在文献[9]研究的基础上,以 RA 替代率、FA 替代率和 SF 掺入率为因素,抗压强度、劈拉强度、抗折强度、拉压比与折压比为指标,分别利用排队评分法与矩阵分析法研究多指标情况下 RAC 的最佳组合方案,以期 RAC 的正交试验研究提供理论参考.

表 2 RAC 各指标的测试结果^[9]

试验序号	正交组合	抗压强度/MPa	劈拉强度/MPa	抗折强度/MPa	拉压比/ $\times 10^{-2}$	折压比/ $\times 10^{-2}$
1	A1B1C1	43.3	2.73	4.67	6.30	10.79
2	A1B2C2	43.3	3.05	5.18	7.04	11.96
3	A1B3C3	39.1	3.06	4.82	7.83	12.33
4	A1B4C4	41.3	3.76	5.73	9.10	13.87
5	A2B1C2	45.7	2.68	5.02	5.86	10.98
6	A2B2C1	42.5	2.77	4.98	6.52	11.72
7	A2B3C4	40.4	3.91	6.12	9.68	15.15
8	A2B4C3	39.9	3.06	5.38	7.67	13.48
9	A3B1C3	51.6	3.80	6.23	7.36	12.07
10	A3B2C4	48.0	4.57	6.24	9.52	13.00
11	A3B3C1	39.3	2.47	4.26	6.28	10.84
12	A3B4C2	43.6	2.74	4.63	6.28	10.62
13	A4B1C4	53.8	4.64	7.33	8.62	13.62
14	A4B2C3	50.3	3.62	6.17	7.20	12.27
15	A4B3C2	43.0	3.06	4.90	7.12	11.40
16	A4B4C1	42.0	2.62	4.54	6.24	10.81

2 排队评分法的计算

排队评分法首先依据测试结果在单个指标中的排序对测试结果进行评分,然后对各指标下的分数求和,从而把多指标问题转化为单指标问题.评分总和越高,表明组合越优.本文将各指标下的评分最大值定为 10 分,最小值定为 1 分,其他值根据内插法^[10]确定分数.考虑到计算量较大,采用 Spss 软件进行内插法的计算,计算结果见表 3.由表 3 可知,各试验组中第 13 组的评分最高,即结果最优,这与文献[9]中的分析结果相同.

评分总和的极差分析结果见表 4.由表 4 可

1 试验概况

设计 3 因素、4 水平、5 指标的 $L_{16}(4^3)$ 正交试验方案,试验因素与水平见表 1,其中因素 A、B、C 分别表示 RA 替代率、FA 替代率和 SF 掺入率.试验原材料、配合比、试件制备与具体试验方法详见文献[9],RAC 各指标(28 d 抗压强度、劈拉强度、抗折强度、拉压比与折压比)的测试结果见表 2.

表 1 试验因素与水平

水平	因素/%		
	A	B	C
1	0	0	0
2	30	10	0.6
3	50	20	1.2
4	100	30	1.8

以看出:各因素对试验指标影响的大小顺序依次为 $C>B>A$,即 SF 掺入率 $>$ FA 替代率 $>$ RA 替代率;RAC 的最优组合为 A4B2C4,即 RA 替代率为 100%、FA 替代率为 10%、SF 掺入率为 1.8%.文献[9]的结果表明:各因素对劈拉与抗折强度影响的大小顺序依次为 SF 掺入率 $>$ FA 替代率 $>$ RA 替代率,而各因素对抗压强度影响的大小顺序依次为 FA 替代率 $>$ RA 替代率 $>$ SF 掺入率;RAC 的最优组合为 A4B1C4.由以上可知,排队分析法所得结果与文献[9]的结果有所不同,其原因为:①排队评分法在确定评分最大值与最

小值时易受主观判断的影响;②文献[9]中的指标仅考虑了强度,而本研究除了考虑强度还考虑了拉压比与折压比.

表 3 排队评分法的计算结果						分
正交组合	各指标分值					总和
	抗压强度	劈拉强度	抗折强度	拉压比	折压比	
A1B1C1	3.57	2.08	2.20	2.05	1.33	11.23
A1B2C2	3.57	3.41	3.70	3.79	3.67	18.13
A1B3C3	1.00	3.45	2.64	5.63	4.39	17.11
A1B4C4	2.35	6.35	5.31	8.64	7.47	30.11
A2B1C2	5.04	1.87	3.23	1.00	1.72	12.86
A2B2C1	3.08	2.24	3.11	2.55	3.18	14.17
A2B3C4	1.80	6.97	6.45	10.00	10.00	35.21
A2B4C3	1.49	3.45	4.28	5.26	6.69	21.17
A3B1C3	8.65	6.52	6.78	4.54	3.89	30.38
A3B2C4	6.45	9.71	6.80	9.62	5.73	38.32
A3B3C1	1.12	1.00	1.00	2.00	1.44	6.56
A3B4C2	3.76	2.12	2.08	2.00	1.00	10.96
A4B1C4	10.00	10.00	10.00	7.51	6.97	44.48
A4B2C3	7.86	5.77	6.60	4.15	4.27	28.65
A4B3C2	3.39	3.45	2.88	3.96	2.54	16.21
A4B4C1	2.78	1.62	1.82	1.89	1.38	9.49

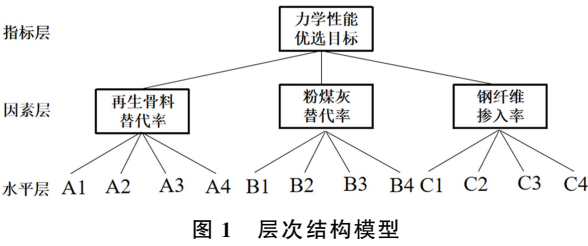
表 4 评分总和的极差分析结果			
参数	A	B	C
k_1	19.15	24.74	10.36
k_2	20.86	24.82	14.54
k_3	21.55	18.77	24.33
k_4	24.71	17.93	37.03
R	5.56	6.88	26.67

注: k_i 为各因素 i 水平评分总和之和的平均值,
R 为极差.

3 矩阵分析法的计算

矩阵分析法不是直接利用各试验组的测试结果,而是通过设置权矩阵的形式对数据进行客观分析^[11].其计算过程如下:

1)建立层次结构模型.建立一个由指标层、因素层和水平层构成的 3 层递阶层次结构模型,如图 1 所示.



2)建立矩阵. 指标层矩阵 M 由各因素各水平下试验指标的平均值 K_{ij} (或平均值的倒数 $1/K_{ij}$) 组成,其中 i 代表因素, j 代表水平. 若指标数值越大越好,则矩阵 M 中的数值取平均值 K_{ij} ;反之取其倒数 $1/K_{ij}$. 因素层矩阵 T 由同一因素下各水平的试验指标之和的倒数构成. 矩阵 M 与 T 的乘积表示单个水平在因素内的影响程度. 水平层矩阵 S 由同一指标下各因素的极差与极差之和构成, S 矩阵表示单个指标下各因素的影响程度. 将指标层矩阵 M 、因素层矩阵 T 与水平层矩阵 S 连续作乘法得到矩阵 W , 矩阵 W 表示各因素各水平对各指标影响权重的集合. 对于 m 因素 n 指标的正交试验研究,各矩阵如式(1)—式(3)所示.

$$M = \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{1n} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_{21} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & K_{2n} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & K_{m1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & K_{mn} \end{bmatrix}; \tag{1}$$

$$T = \begin{bmatrix} t_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & t_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & t_m \end{bmatrix}, t_i = 1 / \sum_{i=1}^n K_{ij}; \tag{2}$$

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix}, s_i = r_i / \sum_{i=1}^m r_i, r_i \text{ 为极差}. \tag{3}$$

3)计算矩阵. 本文以抗压强度这一指标为例,利用 Matlab 软件对矩阵分析法的计算进行说明. 表 5 所示为抗压强度的极差分析结果,将表 5 中的值以矩阵的形式编程输入 Matlab 窗口运行,以此求解各因素水平对试验指标影响的权重值. 具体矩阵见图 2.

表 5 抗压强度的极差分析结果			
参数	A	B	C
k_1	41.75	48.60	41.78
k_2	42.13	46.03	43.90
k_3	45.63	40.45	45.23
k_4	47.28	41.70	45.88
R	5.53	8.15	4.10

```
>> M1=[41.75 0 0;42.13 0 0;45.63 0 0;47.28 0 0;
      0 48.60 0;0 46.03 0;0 40.45 0; 0 41.70 0;
      0 0 41.78; 0 0 43.90;0 0 45.23;0 0 45.88]
T1=[1/176.78 0 0;0 1/176.78 0;0 0 1/176.78]
S1=[5.53/17.78;8.15/17.78;4.10/17.78]
W1=M1*T1*S1
```

图 2 输入 Matlab 的具体矩阵

利用以上方法分别对其他指标进行矩阵分

析,并对所得结果求和,结果见表 6. 由表 6 可知, RAC 的最优组合为 A4B1C4,即 RA 替代率为 100%、FA 替代率为 0%、SF 体积率为 1.8%;各因素对试验指标影响的大小顺序依次为 SF 掺入率(C)>FA 替代率(B)>RA 替代率(A). 以上结果表明,采用矩阵分析法所得的结果与文献[9]的结果更为接近.

表 6 采用矩阵分析法对各指标的计算结果

参数	各指标计算值					总和
	抗压强度	劈拉强度	抗折强度	拉压比	折压比	
A1	0.073 5	0.037 8	0.047 8	0.018 5	0.065 1	0.242 7
A2	0.074 1	0.037 3	0.050 4	0.018 2	0.068 2	0.248 2
A3	0.080 3	0.040 8	0.050 0	0.018 0	0.061 9	0.251 0
A4	0.083 2	0.041 9	0.053 8	0.017 8	0.063 9	0.260 6
B1	0.126 0	0.050 3	0.067 2	0.042 4	0.029 5	0.315 4
B2	0.119 4	0.050 8	0.065 2	0.045 6	0.030 4	0.311 4
B3	0.104 9	0.045 5	0.058 2	0.046 6	0.030 9	0.286 1
B4	0.108 1	0.044 3	0.058 6	0.044 1	0.030 3	0.285 4
C1	0.054 5	0.131 4	0.117 4	0.160 6	0.140 4	0.604 3
C2	0.057 3	0.142 8	0.125 6	0.166 7	0.143 0	0.635 4
C3	0.059 0	0.168 1	0.143 9	0.190 2	0.159 5	0.720 7
C4	0.059 8	0.209 2	0.162 0	0.233 8	0.176 9	0.841 7

4 结论

本文以 RA 替代率、FA 替代率和 SF 掺入率为因素,抗压强度、劈拉强度、抗折强度、拉压比与折压比为指标,分别利用排队评分法与矩阵分析法研究 RAC 力学性能的最优组合. 结果表明: ①各因素对 RAC 力学性能影响的大小顺序依次为 SF 掺入率>FA 替代率>RA 替代率. ②排队评分法计算得出的 RAC 力学性能的最佳组合为 A4B2C4,矩阵分析法计算得出的 RAC 力学性能的最佳组合为 A4B1C4. 考虑到使用粉煤灰可节约水泥用量且环保,因此在实际应用中 FA 替代率应取为 10%(因素 B 选取水平 2). ③本研究显示,矩阵分析法所得结果与正交试验分析的结果更为接近,由此表明矩阵分析法在确定最佳组合方案时优于排队评分法.

参考文献:

[1] 金宝宏,詹冬. 钢纤维再生混凝土强度的试验研究[J]. 混凝土,2014(3):102-105.
[2] 孙呈凯,金宝宏,李家俊,等. PVA 纤维再生混凝土力学性能正交试验研究[J]. 广西大学学报(自然科

学版),2018,43(4):1569-1575.
[3] 张学兵,匡成钢,方志,等. 钢纤维粉煤灰再生混凝土强度正交试验研究[J]. 建筑材料学报,2014,17(4):677-684.
[4] 张子建,范利丹,余永强,等. 多指标混凝土正交试验的分析方法研究[J]. 科技通报,2017,33(11):47-51.
[5] 王玄静. 正交试验设计的应用及分析[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版),2016,30(1):17-22.
[6] 伍毅,阮竞兰. 矩阵分析法在胶辊磨谷机工作参数优化中的应用[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2012,33(5):83-88.
[7] 高世龙,安立宝. 基于矩阵分析法的 CBN 刀具干式硬车参数优化研究[J]. 机床与液压,2016,44(17):63-67.
[8] 杜金萍,王桂梅,高术振. XX-2 不锈钢切削参数模糊正交优化[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(2):65-68.
[9] 匡成钢. 钢纤维粉煤灰再生混凝土力学性能的试验研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2013.
[10] 姚庆鑫,谢建军,刘军霞. 多指标正交实验优化 BL-PAMA 选择性吸附树脂的制备[J]. 化工新型材料,2015,43(5):127-129.
[11] 魏效玲,薛冰军,赵强. 基于正交试验设计的多指标优化方法研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2010,27(3):95-99.