

# 基于正交试验的植生型再生混凝土配合比优化研究

金耀华<sup>1</sup>, 赵延春<sup>1</sup>, 王 兵<sup>1</sup>, 范卫玲<sup>2</sup>

(1. 扬州市职业大学 土木工程学院, 江苏 扬州 225000; 2. 扬州华正建筑工程质量检测有限公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:** 通过正交试验法研究目标孔隙率、水胶比、硅灰掺量和增稠剂掺量四种因素对植生型再生混凝土实测孔隙率、28 d 抗压强度和 pH 值的影响。利用考虑外掺料的绝对体积法进行配合比设计计算, 通过极差和方差分析方法确定因素主次之分以及影响水平, 采用综合因素考虑法进行配合比优化设计。结果表明: 当目标孔隙率 30%, 水胶比 0.32, 硅灰掺量 7%, 增稠剂掺量 1% 时植生型再生混凝土性能最优, 其实测孔隙率达 28.3%, 28 d 抗压强度达 11.75 MPa, pH 值为 9.95。目标孔隙率是各性能指标的首要控制因素; 硅灰掺量对 pH 值有显著影响, 随着硅灰掺量的增加, 能明显降低 pH 值。

**关键词:** 植生型再生混凝土; 正交试验; 配合比设计

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0047-06

## Mix optimization design of platgrowing recycled concrete based on orthogonality test

JIN Yaohua<sup>1</sup>, ZHAO Yanchun<sup>1</sup>, WANG Bing<sup>1</sup>, FANG Weiling<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Yangzhou Vocational University, Jiangsu Yangzhou 225000, China;

2. Yangzhou Huazheng Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd, Jiangsu Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** The influence of target porosity, water-binder ratio, silica fume dosages, and addition of thickener ratio on the measured porosity, 28 days compressive strength, and pH value of platgrowing recycled concrete was studied by orthogonality test. The absolute volume method considering the admixture was used to calculate the mix design. The primary and secondary factors as well as the influence level were determined by range and variance analysis. The comprehensive factor method was used to optimize the mix design. Results showed that the platgrowing recycled concrete reached the optimum level when the target porosity water-binder ratio, the silica fume dosages, and the addition of thickener were 30%, 0.32, 7%, and 1%, respectively with this condition, the measured porosity, 28 days compressive strength, and pH value were 28.3%, 11.75 MPa, and 9.95 respectively. The target porosity is the primary control factor of each performance index, and the silica fume dosages has a significant effect on the pH value. With the increase of silica fume dosages, the pH value can be significantly decreased.

**Key words:** platgrowing recycled concrete; orthogonality test; max optimization design

随着环境保护、可持续发展和人与自然和谐共生的理念日益深入人心, 国内外学者逐渐研究再生混凝土生态化, 通过控制再生混凝土孔隙率、碱环境、抗压强度和透水、透气性, 并选择合适的植物种植在再生混凝土中, 发展形成植生型再生混凝土。该新型绿色建筑材料可广泛用于护坡、护堤、城市停车场、人行道、休闲绿地、住宅小区以及屋顶绿化等, 对改善生态环境具有重要作用。

植生型再生混凝土其配合比设计与普通混凝土有很大区别, 在集料级配组成、水泥用量及水胶比等方面都有一些特殊的要求, 既要保证有较高的孔隙率保证植物生长空间, 又要保证用于护坡、绿化

等用途的力学强度, 此外考虑植物生长的 pH 环境与混凝土高碱性存在矛盾, 需额外添加矿物外掺料进行降碱<sup>[1-7]</sup>。王桂玲<sup>[8]</sup>提出了植生型混凝土的技术指标及指标范围, 王成名<sup>[9]</sup>、刘君实<sup>[10]</sup>、韩健<sup>[11]</sup>开展了废弃砖瓦骨料制备植生型混凝土的试验研究, 廖文宇<sup>[12]</sup>、高婷<sup>[13]</sup>等研究了生态混凝土的降碱技术, 但以废弃混凝土为骨料的植生再生混凝土研究开展较少, 其中对孔隙率、水胶比、矿物外掺量 3 种因素对植生型再生混凝土的抗压强度、孔隙率、pH 值等指标影响的主次次序及规律, 缺乏系统的研究。

研究以目标孔隙率、水胶比、硅粉掺量和增稠

收稿日期: 2020-07-14

修改稿日期: 2021-01-12

基金项目: 扬州市级计划—社会发展基金资助项目(YZ2019049); 扬州市科技局“市校合作专项”基金资助项目(YZ2017287); 扬州市职业大学校级科研基金资助项目(2017ZR20、2018ZR22)

第一作者: 金耀华(1981—), 男, 副教授, 主要从事混凝土教学与研究。E-mail: jinyz03429@163.com

剂掺量四种因素,开展多因素正交试验,通过测定抗压强度、孔隙率、pH值等指标值,分析其影响规律,确定因素主次之分及最佳配合比,以期为植生型再生混凝土进一步应用推广提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

(1)水泥:选用江苏省扬州市绿杨水泥厂生产的P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,密度为2.95 g/cm<sup>3</sup>。

(2)粗骨料:采用再生碎石骨料,所用的骨料由废弃混凝土破碎、筛分、水洗及烘干而成,粒径为5~16 mm单级配,其中粒径为5~10 mm与粒径为10~16 mm的再生粗骨料的质量比为3:17。经实验测试得出:骨料的表观密度 $\rho$ 为2 722 kg/m<sup>3</sup>,紧密堆积密度 $\rho_G$ 为1 462 kg/m<sup>3</sup>,紧密堆积空隙率 $V_c$ 为46%。

(3)硅灰:平均粒径:0.1~0.3  $\mu$ m,容重1 670 kg/m<sup>3</sup>,其中SiO<sub>2</sub>质量百分含量为97.35%。

(4)拌和用水:扬州市自来水公司自来水。

(5)增稠剂:采用羟丙基甲基纤维素醚,粒径270~380  $\mu$ m,密度:1.39 g/cm<sup>3</sup>。

(6)减水剂:采用聚羧酸高效减水剂,减水率为20%,添加量为胶材的1%,对钢筋无锈蚀。

### 1.2 试验设计

选取目标孔隙率、水胶比、硅灰掺量及增稠剂掺量作为影响因素,其中硅灰、增稠剂以胶材质量的百分比外掺,每个因素选择四个水平,因素水平见表1。试验采用正交表 $L_{16}(4^4)$ ,安排16组试验组合。

表1 正交试验因素及水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal test

| 水平 | 因素            |       |              |               |
|----|---------------|-------|--------------|---------------|
|    | A 目标<br>孔隙率/% | B 水胶比 | C 硅灰<br>掺量/% | D 增稠剂<br>添量/‰ |
| 1  | 25            | 0.30  | 0            | 0             |
| 2  | 30            | 0.32  | 3            | 1             |
| 3  | 35            | 0.34  | 5            | 3             |
| 4  | 40            | 0.36  | 7            | 5             |

### 1.3 配合比设计计算

因植生型再生混凝土本质上是多孔混凝土,其配合比计算可采用绝对体积法方法<sup>[5]</sup>,即:胶结材浆体体积+粗骨料体积+目标孔隙体积=1 m<sup>3</sup>,考虑本试验中涉及到硅灰外掺料,按照掺量换算对应

的体积计入胶结材料体体积,具体步骤可按公式(1)~(7)<sup>[7]</sup>计算得到。

(1)单位体积粗骨料用量的计算,为

$$W_G = \alpha \cdot \rho_G \quad (1)$$

式中: $W_G$ 为单位立方米粗骨料用量(kg/m<sup>3</sup>); $\rho_G$ 为修正系数,本文取0.98。

(2)单位立方米胶结材浆体体积的计算,为

$$V_p = [1 - \alpha \cdot (1 - V_c) - R_{\text{void}}] \cdot 1\,000 \quad (2)$$

式中: $V_p$ 为胶结材浆体体积(L/m<sup>3</sup>); $V_c$ 为骨料紧密堆积空隙率(%); $R_{\text{void}}$ 为设计目标孔隙率(%)。

(3)单位立方米胶材用量的计算(考虑外掺料),为

$$W = \frac{V_p}{R_{w/c} + \frac{1 - \beta_1}{\rho_c} + \frac{\beta_1}{\rho_s}} \quad (3)$$

$$W_c = (1 - \beta_1) \cdot W \quad (4)$$

$$W_s = \beta_1 \cdot W \quad (5)$$

式中: $W$ 为单位立方米胶材用量(kg/m<sup>3</sup>); $W_c$ 为单位立方米水泥用量(kg/m<sup>3</sup>); $W_s$ 为单位立方米外掺料用量(kg/m<sup>3</sup>); $R_{w/c}$ 为水灰(胶)比; $\rho_c$ 为水泥密度(kg/m<sup>3</sup>); $\rho_s$ 为外掺料密度(kg/m<sup>3</sup>); $\beta_1$ 为外掺料质量百分比参量(%)。

(4)单位立方米水用量的计算,为

$$W_w = W \cdot R_{w/c} \quad (6)$$

式中: $W_w$ 为单位立方米水用量(kg/m<sup>3</sup>)。

(5)单位立方米添加剂用量的计算,为

$$W_i = \beta_2 \cdot W \quad (7)$$

式中: $W_i$ 为单位立方米添加剂用量(kg/m<sup>3</sup>); $\beta_2$ 为添加剂质量百分比参量(%)。

按上述步骤,分别设计计算16组的试验配合比用量,结果见表2。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 数据测定结果

测定试件有效孔隙率、立方体抗压强度、pH值三个性能考察指标。有效孔隙率测定,试件采用边长为100 mm×100 mm×100 mm立方体试件,2个试件为一组,按下式计算得出其有效孔隙率。

$$A = [1 - \frac{M_2 - M_1}{\rho_w V}] \times 100\% \quad (8)$$

式中: $A$ 为试件有效孔隙率,%; $M_1$ 为浸泡在水中并吸水饱和后水中的重量,kg; $M_2$ 为试件烘干后放置于(20±2)℃、相对湿度(60±5)%条件下24 h后称量其空气中重量,kg; $V$ 为采用游标卡

尺测量并计算所得的试件外观体积， $\text{cm}^3$ ； $\rho_w$  为水的密度， $\text{kg}/\text{cm}^3$ 。

抗压强度按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T50081—2019，测定 28 d 立方体抗压强度。

测定 pH 值：将边长 100 mm 立方体在标准养护条件下养护至 28 d，将其破碎，充分研磨，过 0.08 mm 筛，称取 10 g 准备好的粉体试样，倒入 100 ml 的蒸馏水，每隔约 5 min 振动均匀一次，

2 h 之后用滤纸过滤，使用酸碱仪测定滤液的 pH 值。按上述试验方法，测得各组试件的考察指标值，见表 2。

2.2 数据分析

为综合分析各因素水平下的指标值，将表 2 中各因素水平下的指标平均值整理，见表 3。将表 2 中各组指标观测值进行极差分析和方差分析，见表 4、表 5。根据表 3 绘制出各考察指标的趋势图，见图 1~图 3。从表 3~表 5 和图 1~图 3 可知：

表 2 正交设计、配合比安排及考察指标数值表

| Tab. 2 Numerical table of orthogonal design, mix proportion arrangement and evaluation index |      |   |   |   |  |       |       |      |      |             |                   |       |
|--|------|---|---|---|--|-------|-------|------|------|-------------|-------------------|-------|
| 试验<br>组号   | 因素水平 |   |   |   | 试验配合比用量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |       |       |      |      | 考察指标        |                   |       |
|  | A    | B | C | D | 粗骨料                                      | 水泥    | 水     | 硅灰   | 增稠剂  | 实测<br>孔隙率/% | 28 d 抗压<br>强度/MPa | pH 值  |
| N1   | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 432.8                                  | 345.5 | 103.7 | 0.0  | 0.00 | 23.6        | 15.4              | 11.03 |
| N2   | 1    | 2 | 2 | 2 | 1 432.8                                  | 321.2 | 106.0 | 9.9  | 0.30 | 22.6        | 14.4              | 10.83 |
| N3   | 1    | 3 | 3 | 3 | 1 432.8                                  | 303.1 | 108.5 | 16.0 | 0.96 | 21.9        | 13.4              | 10.52 |
| N4   | 1    | 4 | 4 | 4 | 1 432.8                                  | 321.2 | 106.0 | 9.9  | 0.33 | 22.6        | 12.0              | 10.02 |
| N5   | 2    | 1 | 2 | 3 | 1 432.8                                  | 256.2 | 79.2  | 7.9  | 1.32 | 27.7        | 10.5              | 10.52 |
| N6   | 2    | 2 | 1 | 4 | 1 432.8                                  | 259.2 | 82.9  | 0.0  | 1.30 | 27.6        | 11.5              | 10.85 |
| N7   | 2    | 3 | 4 | 1 | 1 432.8                                  | 227.8 | 83.3  | 17.1 | 0.00 | 28.4        | 12.5              | 10.08 |
| N8   | 2    | 4 | 3 | 2 | 1 432.8                                  | 227.9 | 86.4  | 12.0 | 0.24 | 28.7        | 11.5              | 10.22 |
| N9   | 3    | 1 | 3 | 4 | 1 432.8                                  | 176.0 | 55.6  | 9.3  | 0.93 | 32.3        | 6.1               | 10.04 |
| N10  | 3    | 2 | 4 | 3 | 1 432.8                                  | 165.9 | 57.1  | 12.5 | 0.54 | 33.0        | 8.3               | 10.25 |
| N11  | 3    | 3 | 1 | 2 | 1 432.8                                  | 177.9 | 60.5  | 0.0  | 0.18 | 33.2        | 7.7               | 10.52 |
| N12  | 3    | 4 | 2 | 1 | 1 432.8                                  | 165.8 | 61.5  | 5.1  | 0.00 | 34.2        | 9.5               | 10.28 |
| N13  | 4    | 1 | 4 | 2 | 1 432.8                                  | 100.2 | 32.3  | 7.5  | 0.11 | 37.0        | 5.9               | 9.36  |
| N14  | 4    | 2 | 3 | 1 | 1 432.8                                  | 100.1 | 33.7  | 5.3  | 0.00 | 37.6        | 6.5               | 9.52  |
| N15  | 4    | 3 | 2 | 4 | 1 432.8                                  | 100.0 | 35.1  | 3.1  | 0.52 | 37.1        | 6.2               | 9.62  |
| N16  | 4    | 4 | 1 | 3 | 1 432.8                                  | 101.3 | 36.5  | 0.0  | 0.00 | 36.2        | 5.8               | 9.95  |

表 3 各因子水平组下的考察指标平均值

| Tab. 3 The mean value of the indexes under each factor level group |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|
| 各因子水平组下考察指标平均值   | 因子及水平 |       |       |       |
|  | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ | $A_4$ |
| 实测孔隙率/%  | 22.68 | 28.10 | 33.18 | 36.98 |
| 28 d 抗压强度/MPa  | 13.80 | 11.50 | 7.90  | 6.10  |
| pH 值   | 10.60 | 10.42 | 10.27 | 9.61  |
|  | $B_1$ | $B_2$ | $B_3$ | $B_4$ |
|  |       |       |       |       |
| 实测孔隙率/%  | 30.15 | 30.20 | 30.15 | 30.43 |
| 28 d 抗压强度/MPa  | 9.48  | 10.18 | 9.95  | 9.70  |
| pH 值   | 10.24 | 10.36 | 10.19 | 10.12 |
|  | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ |
|  |       |       |       |       |
| 实测孔隙率/%  | 30.15 | 30.40 | 30.13 | 30.25 |
| 28 d 抗压强度/MPa  | 10.10 | 10.15 | 9.38  | 9.68  |
| pH 值   | 10.59 | 10.31 | 10.08 | 9.93  |
|  | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ | $D_4$ |
|  |       |       |       |       |
| 实测孔隙率/%  | 30.95 | 30.38 | 29.70 | 29.90 |
| 28 d 抗压强度/MPa  | 10.98 | 10.08 | 9.50  | 8.95  |
| pH 值   | 10.23 | 10.13 | 10.31 | 10.13 |

表 4 各考察指标的极差值及因子主次顺序  
Tab. 4 The range and factor order of each index

| 考察指标及极差 $R_g$ | 因素    |      |      |      | 因子主次顺序               |
|---------------|-------|------|------|------|----------------------|
|               | A     | B    | C    | D    |                      |
| 实测孔隙率         | 14.30 | 0.28 | 0.27 | 1.25 | 目标孔隙率→增稠剂添量→水胶比→硅灰掺量 |
| 极差 $R_g$ 抗压强度 | 7.70  | 0.70 | 0.78 | 2.03 | 目标孔隙率→增稠剂添量→硅灰掺量→水胶比 |
| pH 值          | 0.99  | 0.25 | 0.66 | 0.18 | 目标孔隙率→硅灰掺量→水胶比→增稠剂添量 |

表 5 各考察指标方差分析  
Tab. 5 Theanalysis of variance of each index

| 考察指标          | 方差来源 | 偏差平方和(SS) | 自由度(df) | 方差(MS)  | F 值    | 临界值( $F_a$ )                        | 显著水平  |
|---------------|------|-----------|---------|---------|--------|-------------------------------------|-------|
| 实测孔隙率/%       | A    | 463.131 9 | 3       | 154.38  | 428.83 | $F_{0.05}=9.28$<br>$F_{0.01}=29.46$ | * * * |
|               | B    | 0.206 9   | 3       | 0.07    | 0.19   |                                     | —     |
|               | C    | 0.186 9   | 3       | 0.06    | 0.17   |                                     | —     |
|               | D    | 3.716 9   | 3       | 1.24    | 3.44   |                                     | *     |
|               | 误差   | 1.071 9   | 3       | 0.36    | —      |                                     |       |
| 28d 抗压强度 /MPa | A    | 144.750 0 | 3       | 48.25   | 46.39  | $F_{0.05}=9.28$<br>$F_{0.01}=29.46$ | * * * |
|               | B    | 1.105 0   | 3       | 0.37    | 0.36   |                                     | —     |
|               | C    | 1.625 0   | 3       | 0.54    | 0.52   |                                     | —     |
|               | D    | 8.785 0   | 3       | 2.93    | 2.82   |                                     | *     |
|               | 误差   | 3.105 0   | 3       | 1.04    | —      |                                     |       |
| pH 值          | A    | 2.220 4   | 3       | 0.740 1 | 54.42  | $F_{0.05}=9.28$<br>$F_{0.01}=29.46$ | * * * |
|               | B    | 0.128 9   | 3       | 0.043 0 | 3.16   |                                     | *     |
|               | C    | 1.000 3   | 3       | 0.333 4 | 24.51  |                                     | * *   |
|               | D    | 0.063 4   | 3       | 0.021 1 | 1.55   |                                     | —     |
|               | 误差   | 0.040 7   | 3       | 0.013 6 | —      |                                     |       |

注：\* \* \* 为特别显著；\* \* 为显著；\* 为表示有一定影响；— 为表示无影响。

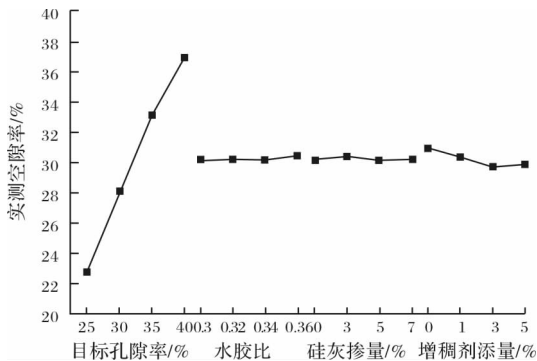


图 1 实测孔隙率趋势图

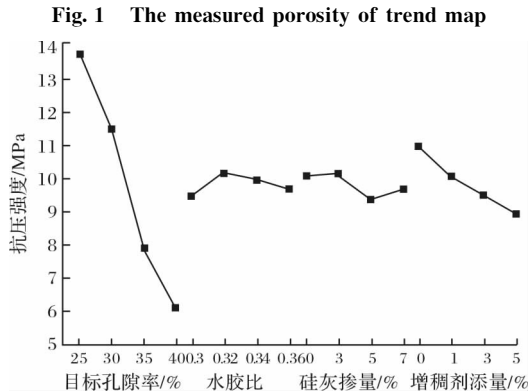


图 2 抗压强度趋势图

Fig. 2 The compressive strength of trend map

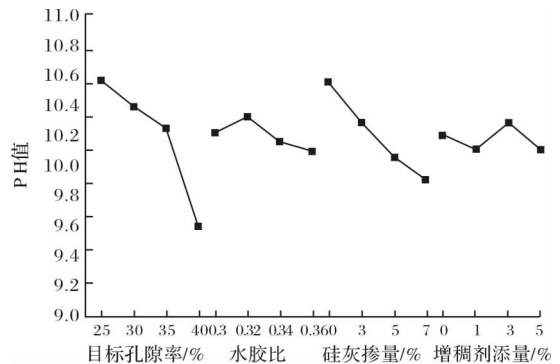


图 3 pH 值趋势图

Fig. 3 The pH of trend map

(1) 实测孔隙率与目标孔隙率存在着特别显著关系。当目标孔隙率 25% 时，达到最小实测孔隙比 22.68%，目标孔隙率 40% 时，达到最大实测孔隙比 36.98%，随着目标孔隙率的增大，实测孔隙率随着显著增大，显著成正相关关系。水胶比对实测孔隙率影响不显著，数值保持在 30% 左右，变化幅度较小，基本成水平直线分布，随着水胶比的增大，实测孔隙率略有增大。硅灰掺量对实测孔隙率影响微乎其微，数值保持在 30% 左右，变化幅度较小，基本成水平直线分布。增稠剂添量对实测

孔隙率影响不显著, 随着增稠剂添量的增大, 实测孔隙率略有下降;

(2) 28 d 抗压强度与目标孔隙率存在特别显著关系. 当目标孔隙率 25% 时, 达到最大抗压强度 13.80 MPa, 目标孔隙率 40% 时, 达到最小抗压强度 6.10 MPa, 随着目标孔隙率的增大, 28 d 抗压强度随着显著减小, 成负相关关系. 水胶比对抗压强度影响不显著, 强度保持 10 MPa 左右, 变化幅度小, 基本成水平直线分布; 硅灰掺量对抗压强度微乎其微, 变化幅度小, 数值保持 10 MPa 左右, 基本成水平直线分布. 增稠剂添量对抗压强度影响不显著, 随着增稠剂添量的增加, 抗压强度存在下降的趋势;

(3) pH 值与目标孔隙率存在特别显著关系, 目标孔隙率 25% 时, pH 值达到最大值 10.60, 目标孔隙率 40% 时, pH 值达到最大值 9.61, 随着目标孔隙率的增大, pH 值随着显著减小, 成负相关关系. 水胶比对 pH 值影响不显著, 数值保持在 10 左右, 变化幅度小, 基本成水平直线分布; 随着水胶比的增大, pH 值有所减小. 硅灰掺量对 pH 值存在显著关系, 变化幅度大, 当硅灰掺量为 0% 时, 存在最大值 10.59; 当硅灰掺量 7%, 存在最小值 9.93, 显著成负相关关系, 原因是硅粉中含有大量  $\text{SiO}_2$ , 能和混凝土  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  继续发生反应生成新的水化硅酸钙, 减少  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  含量, 从而降低混凝土碱性. 增稠剂添量对 pH 值影响微乎其微, 变化幅度小.

### 3 最优配合比确定

从上述极差和方差分析可以看出实测孔隙率与目标孔隙率正相关, 28 d 抗压强度与目标孔隙成负相关, 两者存在矛盾之处, 对于最优配合比的确定不能完全按极差和方差的分析为最终结果, 需考虑植生型再生混凝土的性能要求, 采用综合因素考虑方法来确定. 参照文献[2]植生混凝土的各指标范围, 见表 6.

表 6 各考察指标范围

Tab. 6 The range of indicators

| 考察指标 | 实测孔隙率/%   | 28 d 抗压强度/MPa | pH 值 |
|------|-----------|---------------|------|
| 指标范围 | $\geq 21$ | $\geq 10$     | 6~9  |

从表 3、表 6 中可知: (1) 目标孔隙率水平因子  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  的实测孔隙率均大于 21%; 水平因子  $A_1$ 、 $A_2$  的 28 d 抗压强度达到 10 MPa 以上, 水平因子  $A_3$ 、 $A_4$  未达到 10 MPa; 考察 pH 值指标数值, 水平因子  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  的 pH 值均大于 9, 但趋势逐渐减少; (2) 水胶比水平因子

$B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  的实测孔隙率均大于 21%; 28 d 抗压强度指标中只有  $B_2$  达到 10 MPa 以上; 水平因子  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  的 pH 值均大于 9, 且相差不大; (3) 硅灰掺量水平因子  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  的实测孔隙率均大于 21%, 水平因子  $C_1$ 、 $C_2$  的 28 d 抗压强度达到 10 MPa 以上, 水平因子  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$  的 pH 值均大于 9, 随着硅灰掺量增加 pH 值逐渐减少,  $C_4$  的 pH 值最接近 9; (4) 增稠剂添量水平因子  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  的实测孔隙率均大于 21%; 28 d 抗压强度指标中有  $D_1$ 、 $D_2$  达到 10 MPa 以上; 水平因子  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$  的 pH 值均大于 9,  $D_2$  的 pH 值最小.

综上所述, 经综合因素考虑, 可确定最终优化组合为:  $A_2B_2C_4D_2$ , 即选择目标孔隙率 30%, 水胶比 0.32, 硅灰掺量 7%, 增稠剂添量 1‰. 因所分析出来的最优方案  $A_2B_2C_4D_2$  并未包括在已经做过的 16 组试验中, 故应按照这个最优方案做一次验证试验. 按照前面配合比设计方法设计其配合比, 其单位立方米用量为: 再生粗骨料 1 432.8 kg, 水泥 227.8 kg, 硅灰掺量 17.1 kg, 水 83.3 kg, 增稠剂添量 0.24 kg. 测定其实测孔隙率、28 d 抗压强度和 pH 值, 数值见表 7.

表 7 最优组合  $A_2B_2C_4D_2$  各指标数值

Tab. 7 The optimal combination  $A_2B_2C_4D_2$  index value

| 考察指标 | 实测孔隙率/% | 28 d 抗压强度/MPa | pH 值 |
|------|---------|---------------|------|
| 指标范围 | 28.33   | 11.75         | 9.95 |

根据表 7 所示: 最优方案  $A_2B_2C_4D_2$  在实测孔隙率、28 d 抗压强度能符合要求, pH 值不能符合要求. 对于 pH 值的问题, 本文采用测定的方法是研磨法, 本质上是测定了混凝土本身的 pH 值, 而对于植生型混凝土, 影响植物生产环境的 pH 值还取决于孔隙中种植基质的 pH 值, 可以通过配制酸性种植基质进一步解决, 而最优方案  $A_2B_2C_4D_2$  的 pH 值已达到 9.95, 距离 pH 值 9.0 以内目标相差不远, 为进一步降碱打下了基础.

### 4 结论

(1) 目标孔隙率是首要控制因素, 对实测孔隙率、28 d 抗压强度和 pH 值都有特别显著影响, 并和实测孔隙率成正相关关系, 与 28 d 抗压强度成负相关关系, 与 pH 值成负相关关系. 目标孔隙率是配制植生型再生混凝土产品的关键参数;

(2) 本文试验配制的植生型再生混凝土 28 d 的抗压强度最高可达 15.4 MPa, 平均值达到 10 MPa

以上,能满足以植生为主的护坡混凝土强度指标要求;

(3)硅灰掺量对 pH 值有显著影响,随着硅灰掺量的增加,能明显降低 pH 值,本试验中当硅灰掺量达到最大值 7% 时, pH 值为 9.93,但仍不能满足植物生长的 pH 值 6~9 之间要求,需要进一步增大硅灰掺量,或者采取后期的降碱措施,满足 pH 值要求;

(4)综合多因素分析,本文试验研究给出的最优组合是  $A_2B_2C_4D_2$ : 目标孔隙率采用 30%、水胶比采用 0.32、硅粉掺量采用 7%、以及增稠剂量采用 1%。

## 参考文献 References

- [1] 桥本宏治,上野成三,片仓德男ほか. 生物附着多孔质担体の海水浄化特性その2[C]//大成建设技术研究 所报,第 25 号. 日本横浜:大成建设技术研究所,1992 (423).
- [2] 水口裕之. エココンクリートとは[J]. コンクリート工 学,1998(3):9-12.
- [3] 玉井元治. 緑化とコンクリート(コンクリート材料) [J]. コンクリート工学,1997,32(11):64-69
- [4] ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本 [M]. 日本:株式会社セメントジセーナル社,2001, 61.
- [5] YANAGIBASHI K, YONEZAWA T. Properties and performance of green concrete[C]//Recent Advances in Concrete Technology. Japan;1998;141-158.
- [6] TANAI M, MIZUGUCHI H, HATANAKA S, et al. Design construction and recent applications of porous concrete in japm[C]//Proceedings of the JCI symposium on design, constrection and recent applications of porous concrete. Tokyo: Japan Concrete Institute, 2004.
- [7] 刘海峰. 环境友好型植物生长多孔混凝土的研究与应用[D]. 南京:东南大学,2004.  
LIU Haifeng. Research and application of environmentally friendly green growing porous concrete[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [8] 王桂玲,王龙志,张海霞. 植生混凝土的含义、技术指标及研究重点[J]. 混凝土,2013(1):105-109.  
WANG Guiling, WANG Longzhi, ZHANG Haixia. Meaning, technology index and research emphases of plating eco-concrete[J]. Concrete, 2013(1):105-109.
- [9] 王成名. 再生砖骨料植生混凝土制备技术和工程应用 研究[D]. 泰安:山东农业大学,2014.  
WANG Chengming. Study on preparation technology and engineering application of recycled brick planting eco-concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
- [10] 刘君实,王杰,全洪珠. 再生骨料制备植生型生态混凝土 试验研究[J]. 混凝土,2018(12):129-132.  
LIU Qunshi, WNAG Jie, QUAN Hongzhu. Experimental study on the preparation of vegetative eco-concrete by recycled aggregate[J]. Concrete, 2018(12): 129-132.
- [11] 韩健. 植生型生态再生砖瓦混凝土抗压强度和透水性 能研究[D]. 泰安:山东农业大学,2014.  
HAN Jian. Study on compression strength and water permeability of vegetation-type ecological regenerate brick concrete[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
- [12] 廖文宇,石宪,黄泽峰. 植生混凝土的降碱技术及种植 效果研究[J]. 混凝土,2013(7):155-158.  
MIAO Wenyu, SHI Xian, HUANG Zefeng. Study on decreasing alkalinity of planting concrete and the resulting planting effect[J]. Concrete, 2013(7):155-158.
- [13] 高婷. 生态多孔混凝土降碱技术研究[D]. 长沙:中南 林业科技大学,2017.  
GAO Ting. Research on decreasing alkalintiy of eco porous concrete[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.
- [14] 赵延春,金耀华,仝小芳. 浅析植生型再生混凝土在绿 色生态城市建设中的应用[J]. 四川水泥,2016,(12): 86-87.  
ZHAO Yanchun, JIN Yaohua, TONG Xiaofang. Application of plant recycled concrete in green ecological city construction[J]. Sichuan Cement, 2016,(12):86-87.
- [15] 吴耀鹏,李晓蕾,姜厚文等. 不同配合比再生混凝土高 温后的残余抗压强度[J]. 西安建筑科技大学学报(自 然科学版),2017,49(3):375-381.  
WU Yaopeng, LI Xiaolei, JIANG HouWEN Residual compressive strength of recycled aggregate concrete with the different mixture ratio after high temperature [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2017, 49 (3):375-381.

(编辑 沈 波)