

# 多孔混凝土植被砖的立体绿化应用

李晓东<sup>1,2</sup>, 李可<sup>3</sup>, 翁殊斐<sup>2\*</sup> (1. 广州市林业和园林科学研究院, 广东广州 510405; 2. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 3. 广州市绿风生物技术有限公司, 广东广州 510410)

**摘要** 根据立体绿化环境特点, 旨在研制出适用于立体绿化墙面和屋面绿化施工用的多孔混凝土植被砖, 并筛选出抗逆性强的植物。结果表明, 水泥的理化性质会影响植物的生长, 当水灰比在 0.25、集灰比为 3:1、碎石作为粗集料, 可以制得有效孔隙率大于 20% 并且抗压和抗折强度较高的多孔混凝土植被砖。研究发现, 多孔混凝土植被砖的抗压与抗折强度与集料尺寸大小成反比, 随着集料尺寸的增大, 多孔混凝土植被砖的抗压和抗折强度都随之降低。通过植生试验发现, 垂盆草与佛甲草在植被砖上长势较好, 盖度高且抗逆性强。研制出的多孔混凝土植被砖已成功应用于立体绿化中, 具有快捷、低成本的特性, 易于推广。

**关键词** 多孔混凝土; 立体绿化; 屋顶绿化; 植被砖

**中图分类号** S731 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)11-0142-04

## Application of Porous Concrete Brick in Vertical Greening

LI Xiao-dong<sup>1,2</sup>, LI Ke<sup>3</sup>, WENG Shu-fei<sup>2\*</sup> (1. Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou, Guangdong 510405; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642; 3. Guangzhou Green Wind Biotechnology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510410)

**Abstract** Based on the environmental characteristics of stereo greening, the utility model of porous concrete brick which suitable for the construction of the three-dimensional greening wall surface and the roof greening construction was expected to be developed, while the plants with strong resistance were screened. The results showed that the physical and chemical properties of cement can affect the growth of plants, and when the water cement ratio is 0.25, the ash collection ratio is 3:1, and the crushed stone is used as coarse aggregate, the porous concrete with effective porosity of more than 20% and high compressive strength and flexural strength can be obtained. It is found that the compressive strength and flexural strength of porous concrete are inversely proportional to the aggregate size, and the compressive strength and flexural strength of porous concrete decrease with the increase of aggregate size. The planting test found that *Sarcocolla* and *Sedum lineare* grew better in vegetation brick, with high coverage and strong resistance. The porous concrete brick has been successfully applied in the three-dimensional greening, which has the characteristics of fast and low cost, and is easy to be popularized.

**Key words** Porous concrete; Vertical greening; Roof greening; Vegetation brick

多孔混凝土是采用特定粒径集料作为骨架, 胶结材料包裹在集料颗粒的表面, 作为集料颗粒之间的胶结层, 形成骨架-孔隙结构的多孔混凝土材料<sup>[1]</sup>。其具有透水透气、抗压抗折、多孔过滤、吸音减噪、耐水冲刷的特点, 可以保持地面的水、气交换, 还可以通过填充基质肥料供植物生长。因此, 将多孔混凝土作为立体绿化植物载体具有很高的应用潜力。

目前, 发达国家已将多孔混凝土广泛应用于地面铺装, 并通过绿色建筑加分的手段进行推广。潘坤胜等<sup>[2]</sup>进行了使用水库淤泥轻集料配制绿化混凝土的研究, 经种植试验, 用水库淤泥制造多孔混凝土有利于保水和排水, 对植物生长有显著帮助。吕立祥<sup>[3]</sup>报道了绿化用的多孔混凝土成了上海浦东新区建设生态河道的主力军, 植物的种类选用了水葱、黄菖蒲、水生美人蕉。

该研究结合园林绿化实际生产工作中的需求, 根据立体绿化的环境特点进行多孔混凝土植被砖的制备研究, 主要对影响多孔混凝土砖基架种植性能和安全性能的相关因素进行了研究, 并筛选适合种植的植物。最后集成一套能够应用于立体绿化的多孔混凝土的植被砖的制备方法, 进行小范围立体绿化示范点建设。

## 1 材料与方法

**1.1 原材料** 供试水泥为石井牌矿渣硅酸盐水泥, 强度等级 32.5R, 购自广州市白云区市场。

种植基质由土壤改良剂与黄泥 1:1 配合而成, 其理化性质为: 有机质 18.22%, 总养分 1.15%, pH 6.80, EC 值 0.46 mS/cm。土壤改良剂由广州市绿风生物技术有限公司生产, 黄泥来自广州市白云区太和镇穗丰村。

供试植物为佛甲草、垂盆草、东南景天、大花马齿苋。供试集料碎石、椰棕、陶粒等购自市场, 提前进行筛选分级。

试验仪器: 300 kg 电子台秤, 130 L 小型电动混凝土搅拌机, 千分之一电子天平, DYE-2000 型数字式压力试验机, DKZ-5000 型电动抗折试验机。

## 1.2 试验方法

**1.2.1 不同水灰比对多孔混凝土植被砖性能的影响。** 为了解不同水灰比对多孔混凝土性能的影响, 试验设置 5 个水平, 水灰比分别为 0.15、0.20、0.25、0.30、0.35, 集料使用 5~15 mm 的碎石, 胶体使用石井牌 32.5R 矿渣硅酸盐水泥; 集灰比为 3:1。

多孔混凝土制作方法采用“裹浆法”进行, 即在集料表面拌和薄层水泥胶体, 然后振捣黏结成型, 使用模具制作不同条件下多孔混凝土 100 mm × 100 mm × 100 mm 的抗压试块各 9 件及 160 mm × 40 mm × 40 mm 的抗折试块各 9 件, 成型后进行标准养护, 测定有效孔隙率及 7 d 和 28 d 的抗压、抗折强度。

**1.2.2 不同集料尺寸与类型对多孔混凝土植被砖性能的影响。**

**基金项目** 广东省重大科技专项资金项目(2013A011401004); 广东省科技计划项目(2012A030600009)。

**作者简介** 李晓东(1986—), 男, 广东清远人, 工程师, 硕士, 从事园林植物研究。\*通讯作者, 副教授, 博士, 从事园林植物研究。

**收稿日期** 2016-11-29

响。为了解不同集料尺寸与类型对多孔混凝土性能的影响,试验设置 3 个水平,使用 5~15 mm、15~25 mm 和 25~35 mm 3 种大小规格的碎石作为集料,胶体使用石井牌 32.5R 矿渣硅酸盐水泥;水灰比与集灰比按照“1.2.1”试验结果选择最优组合。

使用尺寸为 5~15 mm 的碎石、陶粒、椰棕片 3 种类型的集料进行试验,胶体使用石井牌 32.5R 矿渣硅酸盐水泥;水灰比与集灰比按照“1.2.1”试验结果选择最优组合。按照“1.2.1”试验方法进行检测。

**1.2.3 植被砖植生试验及立体绿化应用。**选择 4 种屋顶绿化植物进行种植,种植 60 d 后观察植物生长状态。

立体绿化示范点选择在广州市林业和园林科学研究院,将预置的植被砖搬运至屋顶上,在屋面上拼装成坪,实现简易式的屋顶绿化。墙面绿化使用瓷胶砖将预置的植被砖安装于墙面之上。

### 1.3 项目测定

**1.3.1 有效孔隙率的测试方法。**测试时,首先将试块放入电热鼓风干燥箱,80℃恒温下烘干试块至恒重。用细绳把试块固定好,用电子吊秤称取其在空气中的质量  $m_1$ 。再将试块浸入水中浸泡 24 h,取出后沥干水,直至没有水滴出为止,然后称取在空气中的质量  $m_2$ 。然后,再将试块浸入水中,称取其在水中的质量  $m_3$ 。多孔混凝土的有效孔隙率按下式计算:

$$P = [1 - (m_2 - m_3) \div v] \times 100\% \quad (1)$$

式中, $P$  为有效孔隙率; $v$  为试块的外观体积( $\text{cm}^3$ )。

**1.3.2 抗压和抗折强度的测试方法。**抗压强度测试方法:用 DYE-2000 型数字式压力试验机进行测试,使用每组抽取 3 件试块进行测试,并记录数据。抗压强度按下式计算:

$$F_{cu} = F/A \quad (2)$$

式中, $F_{cu}$  为混凝土立方体的抗压强度,单位为 Mpa(精准至 0.1 Mpa); $F$  为试块破坏荷载(N); $A$  为试块的承压面积( $\text{mm}^2$ )。

抗折强度测试方法:使用 DKZ-5000 型电动抗折试验机进行测试,每组抽取 3 件试块进行测试,并记录数据。

抗折强度  $R_f$  以 Mpa 表示,按下式计算:

$$R_f = 1.5F_f L/b^3 \quad (3)$$

式中, $F_f$  为折断时施加于棱柱体中部的荷载(N); $L$  为支撑圆柱之间的距离(mm); $b$  为棱柱体正方形截面的边长(mm)。

**1.4 数据分析** 采用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行数据分析,并采用 Duncan 氏新复极差法(SSR 法)进行显著性检验。

## 2 结果与分析

**2.1 不同水灰比对多孔混凝土植被砖性能的影响** 从表 1 可知,5 种水灰比条件下,多孔混凝土的有效孔隙率均值在 11.67%~26.17%。只有水灰比为 0.35 时,有效孔隙率低于 20%,其余 4 种水灰比条件下,多孔混凝土的有效孔隙率均在 20% 以上。

从表 1 可知,水灰比在 0.15~0.35,多孔混凝土 7 d 抗压强度在 3.59~6.78 Mpa,28 d 抗压强度在 4.35~7.63 Mpa。28 d 抗压强度比 7 d 抗压强度要高,表明随着时间的增加,抗压强度也增加。

表 1 不同水灰比对多孔混凝土植被砖性能的影响

Table 1 The influence of different water cement ratio on the performance of porous concrete brick of vegetation

| 水灰比( $m_w/m_k$ )<br>Water-cement ratio | 有效孔隙率<br>Effective porosity<br>% | 7 d 抗压强度<br>Compressive strength<br>of 7 d//Mpa | 28 d 抗压强度<br>Compressive strength<br>of 28 d//Mpa | 7 d 抗折强度<br>Bending strength<br>of 7 d//Mpa | 28 d 抗折强度<br>Bending strength<br>of 28 d//Mpa |
|--|----------------------------------|---|---|---|---|
| 0.15                                   | 26.17 ± 1.76 a                   | 3.59 ± 0.32 d                                   | 4.35 ± 0.17 d                                     | 1.03 ± 0.03 d                               | 1.33 ± 0.04 d                                 |
| 0.20                                   | 26.33 ± 1.61 a                   | 4.19 ± 0.18 c                                   | 5.12 ± 0.30 c                                     | 1.14 ± 0.04 c                               | 1.48 ± 0.04 d                                 |
| 0.25                                   | 26.50 ± 0.87 a                   | 6.78 ± 0.11 a                                   | 7.63 ± 0.12 a                                     | 1.17 ± 0.03 c                               | 1.80 ± 0.21 c                                 |
| 0.30                                   | 20.00 ± 1.32 b                   | 6.12 ± 0.29 a                                   | 6.83 ± 0.60 a                                     | 1.50 ± 0.07 b                               | 2.26 ± 0.12 b                                 |
| 0.35                                   | 11.67 ± 1.61 c                   | 5.80 ± 0.06 b                                   | 6.38 ± 0.14 b                                     | 1.92 ± 0.01 a                               | 2.48 ± 0.04 a                                 |

注:数值为平均值 ± 标准差,不同字母表示处理间差异性显著在  $P < 0.05$

Note: Data are average ± standard deviation, different letters mean significant differences between treatments,  $P < 0.05$

在不同水灰比条件下,多孔混凝土试块 7 d 及 28 d 的抗压强度存在显著差异。抗压强度随水灰比的增加,呈先上升后下降的趋势。水灰比在 0.15~0.25,多孔混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度均是逐渐增强。水灰比在 0.30~0.35,7 d 和 28 d 的抗压强度是呈下降趋势。当水灰比为 0.25,在 5 种水灰比中抗压强度最大,28 d 的抗压强度可以达到 7.63 Mpa 以上。

多孔混凝土的抗折强度可以作为植被砖基架制造的技术指标之一,抗折强度的高低会影响多孔混凝土植被砖的安全性和耐用性。水灰比在 0.15~0.35,多孔混凝土 7 d 抗折强度在 1.03~1.92 Mpa,28 d 的抗压强度在 1.33~2.48

Mpa。28 d 抗折强度比 7 d 抗折强度要高,表明随着时间的增加,多孔混凝土的抗折强度也增加。

**2.2 集料尺寸对多孔混凝土植被砖性能的影响** 结果表明,在水灰比 0.25,集灰比 3:1 的条件下,碎石集料尺寸在 5~35 mm,多孔混凝土有效孔隙率在 26.33%~30.13%。从均值来看,多孔混凝土的有效孔隙率随集料尺寸的增加而增加。

在 5~35 mm 内,多孔混凝土的有效孔隙率存在显著差异。集料尺寸在 5~15 mm 与 15~25 mm 时,多孔混凝土的有效孔隙率差异不显著,在 25~35 mm 条件下的有效孔隙率差异显著。

表2 集料尺寸对多孔混凝土植被砖性能的影响

Table 2 The influence of different aggregate size on the performance of porous concrete brick of vegetation

| 集料尺寸<br>Aggregate size//mm | 有效孔隙率<br>Effective porosity<br>% | 7 d 抗压强度<br>Compressive strength<br>of 7 d//Mpa | 28 d 抗压强度<br>Compressive strength<br>of 28 d//Mpa | 7 d 抗折强度<br>Bending strength<br>of 7 d//Mpa | 28 d 抗折强度<br>Bending strength<br>of 28 d//Mpa |
|----------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|
| 5~15                       | 26.33±1.04 b                     | 6.78±0.11 a                                     | 7.63±0.12 a                                       | 1.17±0.03 a                                 | 1.80±0.21 a                                   |
| 15~25                      | 27.67±0.58 b                     | 5.52±0.26 b                                     | 5.97±0.13 b                                       | 1.13±0.01 ab                                | 1.52±0.06 b                                   |
| 25~35                      | 30.13±0.50 a                     | 4.68±0.35 c                                     | 5.52±0.21 c                                       | 1.09±0.03 b                                 | 1.44±0.04 b                                   |

注:数值为平均值±标准差,不同字母表示处理间差异性显著在 $P<0.05$

Note:Data are average±standard deviation,different letters mean significant differences between treatments, $P<0.05$

集料尺寸在5~35 mm条件下,多孔混凝土的7 d抗压强度在4.68~6.78 Mpa,28 d抗压强度在5.52~7.63 Mpa。3种集料尺寸相比,5~15 mm的抗压强度最高,25~35 mm的最低。随着集料尺寸的增大,抗压强度减小。多孔混凝土的抗压强度与集料的尺寸大小成反比关系,集料越大,抗压

强度就越小;集料越小,抗压强度就越高。

**2.3 集料类型的影响分析** 在集灰比、水灰比和集料尺寸相同的条件下,3种集料类型多孔混凝土的有效孔隙率都在20%以上,其中碎石的有效孔隙率最高,陶粒的有效孔隙率最低(表3)。

表3 集料类型对多孔混凝土植被砖性能的影响

Table 3 Effects of different aggregate type on the performance of porous concrete brick of vegetation

| 集料类型<br>Aggregate type | 有效孔隙率<br>Effective porosity<br>% | 7 d 抗压强度<br>Compressive strength<br>of 7 d//Mpa | 28 d 抗压强度<br>Compressive strength<br>of 28 d//Mpa | 7 d 抗折强度<br>Bending strength<br>of 7 d//Mpa | 28 d 抗折强度<br>Bending strength<br>of 28 d//Mpa |
|------------------------|----------------------------------|---|---|---|---|
| 碎石 Macadam             | 26.33±1.04 a                     | 6.78±0.11 a                                     | 7.63±0.12 a                                       | 1.17±0.03 a                                 | 1.80±0.21 a                                   |
| 陶粒 Ceramsite           | 21.50±1.73 b                     | 1.76±0.03 b                                     | 1.81±0.12 b                                       | 1.25±0.07 a                                 | 1.50±0.07 b                                   |
| 椰棕片 Coconut palm       | 25.83±1.76 a                     | 0.30±0.01 c                                     | 0.30±0.01 c                                       | 0.44±0.09 b                                 | 0.51±0.11 c                                   |

注:数值为平均值±标准差,不同字母表示处理间差异性显著在 $P<0.05$

Note:Data are average±standard deviation,different letters mean significant differences between treatments, $P<0.05$

3种集料类型多孔混凝土的7 d及28 d抗压强度存在显著差异,抗压强度从低到高依次是椰棕片、陶粒、碎石。碎石集料的抗压强度最高,7 d可达6.78 Mpa,28 d可达7.63 Mpa;椰棕片集料的最低,7 d及28 d的抗压强度仅为0.30 Mpa。碎石集料多孔混凝土的28 d抗压强度是椰棕片集料的25.43倍。碎石集料多孔混凝土的抗压强度随着时间的增加有较大的增长,而陶粒和椰棕片集料多孔混凝土的抗压强

度增幅很小。这反映出多孔混凝土的抗压强度与集料的硬度有关,集料的硬度越大,抗压强度就越高。

## 2.4 多孔混凝土植被砖植生试验及立体绿化应用

**2.4.1 多孔混凝土植被砖植生试验。**通过植生试验,观察到4种植物均能在多孔混凝土砖上正常生长。综合来看,垂盆草的成坪效果更好。图1中的A组图为垂盆草、佛甲草、东南景天和入户马齿苋种植当天,B组图为第60天效果。



图1 多孔混凝土植被砖植生试验

Fig. 1 Plant growth test of porous concrete brick of vegetation

多孔混凝土砖可以提供良好的排水和透气性能,保障植物的根部不会积水。在寒冷天气下,4种植物的生长速度较

慢。进入春天后,生长速度加快。垂盆草在寒冷天气叶子表现出蓝绿色,东南景天表现出淡红色。大花马齿苋在寒冷天

气表现出叶片发红萎缩,张开度收缩,茎干匍匐的现象。从生长情况看,垂盆草的覆盖度最好。

**2.4.2 多孔混凝土植被砖的立体绿化应用。**该研究研制出



图 2 多孔混凝土植被砖的立体绿化应用

Fig. 2 Application of porous concrete brick of vegetation in vertical greening

### 3 结论与讨论

研究结果表明,水灰比在 0.25 ~ 0.30 可以获得较高的抗压、抗折强度,同时可以避免因为胶体沉积造成有效孔隙率下降的现象。这与胡春明等<sup>[4]</sup>的研究结果是一致的,但黄剑鹏等<sup>[5]</sup>的研究结果则表明水灰比控制在 0.33 ~ 0.37 较适宜,徐荣进等<sup>[6]</sup>的研究结果则是水灰比在 0.42 左右较合适。

集料的尺寸大小会影响多孔混凝土的有效孔隙率,集料越大,有效孔隙率就越大,抗压和抗折强度就越低,这与魏清伟等<sup>[7]</sup>的研究结果一致。三重大学对细集料配制多孔混凝土的基本属性进行了试验研究<sup>[8]</sup>。Chindaprasirt 等<sup>[9]</sup>对集料的尺寸大小对多孔混凝土结合力、抗压强度和孔隙度的影响进行了研究,提出了集料的强度与多孔混凝土的强度、孔隙度成正比。韩国忠南大学在种植用的多孔混凝土中加入了硅灰和碳纤维来提高其物理机械性能,可以减少硅酸盐水泥的用量,抗折强度还得到提高<sup>[10]</sup>。悉尼理工大学经过试验研究使用粉煤灰替代 50 % 的硅酸盐水泥,同样可以配制出孔隙率大、抗压强度高多孔混凝土<sup>[11]</sup>。

集料类型对多孔混凝土的有效孔隙率、抗压强度和抗折强度均有影响。该研究的结果表明,用碎石作为集料得到的多孔混凝土抗压、抗折性能较好。刘聃等<sup>[12]</sup>的研究结果表明,增加碎石掺量可以提高多空混凝土抗压强度。

目前将多孔混凝土进行苗圃预制植被砖的应用研究暂时未见报道,尤其是根据立体绿化的环境进行多孔混凝土与抗逆性强的植物搭配的应用研究。该研究中进行的植生试验及小型工程试验表明,研究制备得到的多孔混凝土适宜植

的多孔混凝土植被砖在广州市林业和园林科学研究院进行小型工程试验,经过一段时间的观察,未发现植株死亡和植被砖断裂现象(图 2)。

物长期生长,并能实现绿化效果。该研究为了满足立体绿化需要,选择了 4 种适应立体绿化应用的植物。

### 参考文献

- [1] 王智,钱觉时,张朝辉,等. 多孔混凝土配合比设计方法初探[J]. 重庆建筑大学学报,2008,30(3):121-124.
- [2] 潘坤胜,张朝顺,王一新. 水库淤泥轻质骨料绿化混凝土之研发[C]//第七届全国轻骨料及轻骨料混凝土学术讨论会暨第一届海峡两岸轻骨料混凝土产制与应用技术研讨会论文集. 南京:中国硅酸盐学会房屋建筑材料分会轻集料及其制品专业委员会,2004.
- [3] 吕立祥. 绿化混凝土成浦东建设生态河道主力军[N]. 中华建筑报,2010-05-25(004).
- [4] 胡春明,胡勇有,魏清伟,等. 植生型生态混凝土孔隙碱性水环境改善的研究[J]. 混凝土与水泥制品,2006(3):8-10.
- [5] 黄剑鹏,胡勇有. 植生型多孔混凝土的制备与性能研究[J]. 混凝土,2011(2):101-104.
- [6] 徐荣进,刘荣桂,颜庭成. 植生型多孔混凝土的制备和性能试验研究[J]. 混凝土,2006(12):18-21.
- [7] 魏清伟,胡勇有,郑丙辉,等. 植生混凝土的透水性能研究[J]. 水利水电技术,2006,37(9):1-4.
- [8] 前川明弘,山本晃,三岛直生,et al. Experimental study on properties of small particle size porous concrete[C]//セメント・コンクリート論文集. 东京:公益社団法人日本コンクリート工学会,2006,28(1):1397-1402.
- [9] CHINDAPRASIRT P, HATANAKA S, MISHIMA N, et al. Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete[J]. International journal of minerals, metallurgy and Materials, 2009, 16(6):714-715.
- [10] PARK S B, KIM J H. Studies on the physical-mechanical properties of carbon fiber reinforced porous concrete for planting[C]//Proceeding of the 5th International Symposium on the Cement and Concrete. Beijing: The Chinese Ceramic Society Cement Sub-committee, 2002.
- [11] YUKARI A. Development of pervious concrete[D]. Sydney: University of Technology, 2009.
- [12] 刘聃,刘荣桂,胡白香,等. 掺碎石陶粒多孔混凝土基本性能试验研究[J]. 混凝土,2015(6):144-148.
- [13] 李勇. 杉木愈伤组织诱导及植株再生[J]. 林业勘察设计,2011(1):84-88.
- [14] 陈剑勇. 杉木茎尖诱导愈伤组织及植株再生研究[J]. 西南林学院学报,2009,29(5):37-41.
- [15] 欧阳磊,郑仁华,翁玉榛,等. 杉木优良无性系组培快繁技术体系的建立[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(3):47-51.
- [16] 高小坤. 杉木组培无根苗瓶外生根试验[J]. 福建林业科技,2006,33(4):163-165.

(上接第 128 页)

### 参考文献

- [1] 黄开勇,陈代喜,郝海坤,等. 杉木无性系对比测定与选择研究[C]//第三届南方林木育种研讨会论文集(摘要)集. 北京:中国林学会林木遗传育种分会,2006.
- [2] 彭万喜,吴义强,张仲凤,等. 中国的杉木研究现状与发展途径[J]. 世界林业研究,2006,19(5):54-58.
- [3] 韦华,何振革,黄开勇,等. 杉木轻基质容器育苗技术[J]. 广西林业科学,2014,43(2):332-334.