

轻质多孔结构制备及响应面优化

何 凯, 裴向军, 张晓超, 李 强, 侯谦儒, 王萌琪, 黄山松, 蒙明辉

Preparation and response surface optimization of lightweight porous structures

HE Kai, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, LI Qiang, HOU QianRu, WANG Mengqi, HUANG Shansong, and MENG Minghui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻融作用下纤维加筋固化盐渍土的抗压性能与微观结构

Compressive properties and microstructure of saline soil added fiber and lime under freezing–thawing cycles

柴寿喜, 张琳, 魏丽, 田萌萌 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 96–105

高寒阴湿区边坡浅层土体温湿响应规律研究

The response regularity of temperature and humidity of surface soil on slopes in high–cold and humid areas

孙巍锋, 常洲, 兰恒星, 晏长根, 杨万里, 徐伟 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 204–213

非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media

张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35–42

上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟

Physical simulation of the excavation deformation response of counter–tilt slope with rigid layers on the soft

郑达, 毛峰, 王沁沅, 苏杭, 李文龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 89–95

井内嵌入同轴多孔与固体圆柱地下水渗流流型分析

Flow pattern analysis around a solid cylinder with both porous and water rings in porous media

朱琳, 雷海燕, 马非, 戴传山 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 25–31

多孔介质界面对重非水相液体迁移过程影响的图像法研究

Investigation on the influence of porous media interface on DNAPL migration based on image methods

刘汉乐, 郝胜瑶, 马建初 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 169–174



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309012

何凯, 裴向军, 张晓超, 等. 轻质多孔结构制备及响应面优化 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 208-218.

HE Kai, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao, et al. Preparation and response surface optimization of lightweight porous structures[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 208-218.

轻质多孔结构制备及响应面优化

何 凯^{1,2}, 裴向军^{1,2}, 张晓超^{1,2}, 李 强³, 侯谦儒³, 王萌琪^{1,2}, 黄山松⁴, 蒙明辉⁵

- (1. 天府永兴实验室, 四川 成都 610213; 2. 地质灾害与环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610054; 3. 新疆地矿局第一水文工程地质大队, 新疆 乌鲁木齐 830091;
4. 重庆市地质矿产勘查开发局 607 地质队, 重庆 400054;
5. 四川省华地建设工程有限公司, 四川 成都 610081)

摘要: 多孔结构作为新型建筑材料结构, 目前依然存在制备材料最佳配比不准确、结构材料与植物相容性差等问题影响其应用。为确定制备多孔结构最佳材料配比, 提高其力学强度的同时具有良好植生空间, 文章采用轻质多孔火山石作为骨料, 水泥、粉煤灰、拌合水搅拌而成的胶凝浆体作为胶结剂, 制作轻质多孔材料, 开展相关的多孔结构制备试验并探究其不同单因素水平下的物理力学性能, 得到合理的配合比范围, 并采用响应面进行优化, 得到满足一定抗压强度、具有良好植生空间及透水性能的最佳材料配合比。结果如下: (1) 抗压强度随着水灰比增大呈现先增大后减小的变化趋势, 最佳水灰比约 0.35, 骨料粒径越小, 多孔结构抗压强度越高, 但为了满足多孔性和透水性, 选取 2 cm 左右的骨料较为适宜; (2) 胶凝浆体中胶凝材料由质量占比 75% 的水泥与 25% 的粉煤灰组成, 并含有 0.1% 的减水剂, 应控制浆体含量为 15%~25%, 且不应超过 30%; (3) 根据响应面优化分析, 制备多孔结构最优化配合比为: 骨料粒径约 2 cm, 水灰比 0.377, 胶凝材料体积含量 20.7%, 在该配比下孔隙率、有效孔隙率和透水系数分别为: 38.3%、33.5%、2.98 cm/s。最佳配比下的多孔结构既满足其力学要求, 同时具有良好的植物相容性, 研究成果可为多孔结构的制备与应用提供科学依据。

关键词: 多孔结构; 边坡防护; 抗压性能; 孔隙率; 透水性能; 响应面优化

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0208-11

Preparation and response surface optimization of lightweight porous structures

HE Kai^{1,2}, PEI Xiangjun^{1,2}, ZHANG Xiaochao^{1,2}, LI Qiang³, HOU QianRu³, WANG Mengqi^{1,2}, HUANG Shansong⁴, MENG Minghui⁵

- (1. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu, Sichuan 610213, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610054, China; 3. The First Hydrologic Engineering Geology Group, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Urumqi, Xinjiang 830091, China; 4. Chongqing 607 Reconnaissance Survey General Co., Chongqing 400054, China; 5. Sichuan Hua Di Building Engineering Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: As a new type of building material structure, the porous structure still faces problems such as inaccurate

收稿日期: 2023-09-05; 修订日期: 2023-12-22

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0378); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题(SKLG2021Z018); 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局地质勘查项目(XGMB202358)

第一作者: 何凯(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态修复方向的研究工作。E-mail: hekai_1999@163.com

通讯作者: 张晓超(1978—), 女, 博士, 教授, 主要从事地质灾害调查及岩土工程试验研究。E-mail: 31685032@qq.com

optimal ratio and poor compatibility with plants, which affect its application. To determine the optimal ratio of porous structure and improve its mechanical strength while providing a good planting space, this study used lightweight porous volcanic stone as coarse aggregate, cement, fly ash, and water mixed into a cementitious slurry as a binder to produce lightweight porous materials. Relevant porous structure preparation experiments were conducted to explore its physical and mechanical properties at different single factor levels, and then a reasonable range of mix designs was obtained. Response surface methodology was used to obtain the optimal mix ratio of lightweight porous structure with certain compressive strength and good planting space and permeability. The results are as follows: (1) The compressive strength shows a trend of increasing first and then decreasing as the water cement ratio increases. The optimal water cement ratio is located around 0.35. The smaller the aggregate particle size, the higher the compressive strength of the porous structure. However, to meet the requirements of porosity and permeability, selecting an aggregate of about 2 cm is appropriate. (2) The cementitious material in the cementitious slurry is composed of 75% cement and 25% fly ash by mass and contains 0.1% water reducing agent. The dosage should be controlled between about 15%–25%, and should not exceed 30%. (3) Based on the response surface optimization analysis, the optimal mix design for preparing porous structures is as follows: The aggregate particle size is approximately 2 cm; the water cement ratio is 0.377, and the volume fraction of the cementitious slurry is 20.7%. At such design, the porosity, effective porosity, and permeability coefficient are 38.3%, 33.5%, and 2.98 cm/s, respectively. The porous structure under the optimal ratio not only meets its mechanical requirements, but also has good plant compatibility, which can provide the scientific basis for the preparation and application of porous structures.

Keywords: porous structure; slope protection; compression resistance; porosity; permeability performance; response surface experiments

多孔结构是一种内部具有大量联通孔隙的结构, 主要由单一粒径的轻质粗骨料及其表面包裹的水泥浆体组成, 粗骨料之间堆积接触, 并通过包裹其表面的水泥浆体实现各粗骨料间的相互胶结, 使相互独立的粗骨料彼此具有一定的连接强度, 进而组成整体具有一定力学强度的材料结构^[1-2]。材料内部通常存在能够满足植物在其内部生长的孔隙, 因此在工程方面是河湖岸坡、公路护坡的理想材料结构^[3]。近年来, 我国地质灾害频发, 人类工程对环境的扰动增强, 在造成直接经济损失的同时, 也破坏了原有的生态环境, 仅依靠自然力量修复往往过于漫长, 故生态修复工程十分必要。多孔结构作为将传统混凝土与现代生态环保理念二者相结合的新型材料结构, 在生态修复方面相较于其他传统的建筑材料有明显的优势^[4], 但依然存在强度低、制备不规范、对不同种类植物缺乏针对性等各种问题限制其应用^[5]。因此, 针对多孔结构性能改良的研究意义重大。

多孔结构的正式概念首先于 20 世纪 90 年代由日本提出, 日本于 2001 年编制了《多孔植被混凝土河川护岸工法》^[6], 开启了多孔结构的大规模运用。目前, 欧美国家对多孔结构的研究主要针对其环境友好的

特性, 如探究植物与多孔结构的相容性, 通过在其孔隙中构建植物根系网络, 以达到防止水土流失, 实现生态修复的目的^[7]; 利用多孔结构密度小、吸附能力强的特点, 探究其应用于固碳的可行性^[8]; 研究土壤与多孔结构中骨料的热能传递, 探究传递机理对植物的影响^[9]。总体来讲, 欧美国家的研究方向多集中于骨料-土壤-植物间的耦合作用, 以求最大化发挥多孔结构在生态环境保护方面的作用。

我国的多孔结构研究起步虽晚, 但仍有一定成果, 并于 2003 年首次运用多孔结构进行生态修复。目前, 我国的多孔结构研究主要集中在分析多孔结构的力学强度特征, 分析以不同材料及制备方法下所生产的多孔结构的差异性, 探究制备多孔结构的最佳材料配比^[10-12], 以及特殊工况下多孔结构的抗变形抗侵蚀能力^[13], 较少考虑其在生态环境保护方面与土壤植物的相互作用, 就整体情况来看, 我国的多孔结构研究与国外仍然有一定差距, 并存在制备材料最佳配比不够准确、与植物相容性差等问题有待解决。

水土条件改变是导致生态系统退化的一大原因^[14], 对于应用于库岸边坡及绿化的多孔结构, 强度、孔隙率、透水性能是十分重要的指标^[15]。具有一定强度的

多孔结构可以抵御外界的破坏,如岸边的水力冲刷和波浪侵蚀,从而保护其内部结构,达到护坡效果的同时为植物的生长提供一个较为稳定的环境,而能否在库岸为植物提供较为稳定的生长环境影响着库岸土壤的生态适应能力^[16];孔隙率及透水性能是植物能否依附于多孔结构生长的关键,联通孔隙率决定着植物根系能否穿过多孔结构扎根于下部土壤。为探究影响多孔结构性能的主要因素以及其对多孔结构的影响程度,文章设计了单因素试验,探究骨料粒径、水灰比、胶凝材料体积对多孔结构性能的影响^[17-19]。并在试验结果的基础上,针对上述 3 个因素进行响应面试验,最终确定多孔结构最优化配合比,使该配比下的多孔结构同时满足力学条件与供植物生长的植生性能,从而为实际工程应用提供有效的参考和建议。

1 试验设计

1.1 试验材料

本次制备的多孔结构是采用火山石作为粗骨料,以水泥、粉煤灰、拌合水等材料作为胶凝浆体包裹而成的特殊多孔骨架,其中粗骨料采用轻质多孔的火山石,并根据粒径大小,在以往成果的基础上将其划分为 9.5~16.0 mm、16.0~19.0 mm、19.0~26.5 mm、26.5~

31.5 mm 4 个等级^[20];采用强度等级为 P.O42.5 的普通硅酸盐水泥和二级粉煤灰作为胶凝材料,减水剂采用聚羧酸高性能减水剂。在不添加骨料的情况下,仅以胶凝材料拌合而成的试块 28 d 抗压强度为 43.9 MPa。基于前期抗压强度试验结果及相关文献^[21],将水灰比、胶凝材料体积含量、骨料粒径分别作为自变量的多孔结构单因素试验设计如表 1—3 所示。

表 1 水灰比单因素试验设计

Table 1 Single factor test design of water cement ratio

| 序号 | 水灰比 | 胶凝材料 体积占比/% | 骨料/ (kg·m ⁻³) | 水泥/ (kg·m ⁻³) | 粉煤灰/ (kg·m ⁻³) | 拌合水/ (kg·m ⁻³) | 减水剂质 量分数/% |
|----|------|----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 0.25 | 20 | 720 | 274.8 | 68.7 | 85.9 | 0.1 |
| 2 | 0.30 | 20 | 720 | 253.9 | 63.5 | 95.2 | 0.1 |
| 3 | 0.35 | 20 | 720 | 234.5 | 58.6 | 102.6 | 0.1 |
| 4 | 0.40 | 20 | 720 | 218.6 | 54.7 | 109.3 | 0.1 |

表 2 胶凝材料体积含量单因素试验设计

Table 2 Single factor test design of volume content of cementitious material

| 序号 | 水灰比 | 胶凝材料 体积占比/% | 骨料/ (kg·m ⁻³) | 水泥/ (kg·m ⁻³) | 粉煤灰/ (kg·m ⁻³) | 拌合水/ (kg·m ⁻³) | 减水剂质 量分数/% |
|----|------|----------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 0.35 | 15 | 720 | 190.8 | 47.7 | 83.5 | 0.1 |
| 2 | 0.35 | 20 | 720 | 244.5 | 61.1 | 107.0 | 0.1 |
| 3 | 0.35 | 25 | 720 | 293.2 | 73.3 | 128.3 | 0.1 |
| 4 | 0.35 | 30 | 720 | 340.1 | 85.0 | 148.8 | 0.1 |

表 3 骨料粒径区间单因素试验设计

Table 3 Single factor test design of aggregate particle size interval

| 序号 | 水灰比 | 胶凝材料 体积占比/% | 骨料/ (kg·m ⁻³) | 骨料粒径 /mm | 水泥/ (kg·m ⁻³) | 粉煤灰/ (kg·m ⁻³) | 拌合水/ (kg·m ⁻³) | 减水剂质 量分数/% |
|----|------|----------------|------------------------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 0.35 | 20% | 796 | 9.5~16.0 | 254.5 | 63.6 | 111.3 | 0.1 |
| 2 | 0.35 | 20% | 762 | 16.0~19.0 | 244.5 | 61.1 | 107.0 | 0.1 |
| 3 | 0.35 | 20% | 720 | 19.0~26.5 | 234.5 | 58.6 | 102.6 | 0.1 |
| 4 | 0.35 | 20% | 683 | 26.5~31.5 | 226.7 | 56.7 | 99.2 | 0.1 |

1.2 试件制备

对于多孔构件的制备,由于水泥浆体的用量较少,传统的碎石骨料为了让水泥浆体充分的包裹住骨料,常常采用裹浆法进行制备,但是由于本次采用的

是轻质骨料,浆体对于骨料过重且黏稠,无法对骨料进行很好的包裹,会出现浆骨分离的现象,所以经过多次试验,最终采取造壳法进行制备。每组试验配比分别制备 3 个试件,制备过程如图 1 所示。

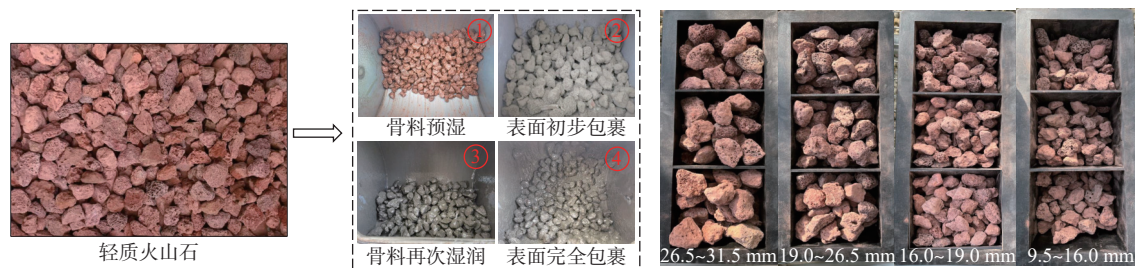


图 1 试件制备

Fig. 1 Specimen preparation

1.3 测试

试件制备完成后,对养护到期的轻质多孔结构分别测定其孔隙率与透水系数,测定结束后将试块保留继续进行抗压强度测试。抗压强度测试过程见图 2,试验仪器为微机控制电液伺服压力试验机,加载方向垂直试件接触面,加载速率 0.2 MPa/s,试验结果精确至 0.01 MPa。在测试前,为保证接触面平整及试件整

体受力均匀,采用 M5 砂浆对试件的上下表面进行“封浆”处理,使试件上下受压表面平整光滑,“封浆”时的砂浆厚度应小于 5 mm,以尽可能减小砂浆渗入试件内部导致试件强度及结构变化所带来的影响,试验结果取该组配比下 3 个试件的平均值。试件为边长 10 cm 的正方体,如图 2(b)所示。

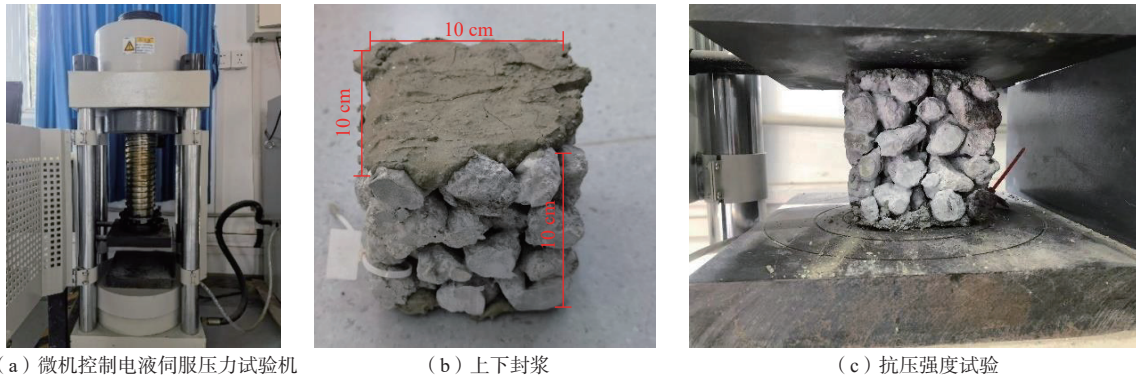


图 2 抗压强度测试

Fig. 2 Compressive strength tests

2 结果

轻质多孔结构单因素试验变量分别为水灰比、胶凝材料体积含量以及骨料粒径,不同变量下试验结果分别如表 4—6 所示;按试验所测定的基本性能划分,抗压强度、孔隙率及透水系数结果如图 3—5 所示。

表 4 水灰比单因素试验结果

Table 4 Results of single factor test of water cement ratio

| 序号 | 水灰比 | 抗压强度/MPa | | 孔隙率/% | | 透水系数/(cm·s ⁻¹) |
|----|------|----------|------|-------|-------|----------------------------|
| | | 7 d | 28 d | 全孔隙率 | 有效孔隙率 | |
| 1 | 0.25 | 0.28 | 0.32 | 40 | 36 | 2.90 |
| 2 | 0.30 | 0.58 | 0.62 | 42 | 37 | 3.03 |
| 3 | 0.35 | 0.95 | 1.10 | 43 | 37 | 3.19 |
| 4 | 0.40 | 0.74 | 0.82 | 44 | 39 | 3.23 |

表 5 胶凝材料体积含量单因素试验结果

Table 5 Results of single factor test of volume content of cementitious materials

| 序号 | 胶凝材料体积含量/% | 抗压强度/MPa | | 孔隙率/% | | 透水系数/(cm·s ⁻¹) |
|----|------------|----------|------|-------|-------|----------------------------|
| | | 7 d | 28 d | 全孔隙率 | 有效孔隙率 | |
| 1 | 15 | 0.69 | 0.79 | 45 | 41 | 3.52 |
| 2 | 20 | 1.02 | 1.12 | 40 | 36 | 3.11 |
| 3 | 25 | 1.78 | 1.90 | 38 | 32 | 2.15 |
| 4 | 30 | 2.20 | 2.37 | 34 | 27 | 0.06 |

抗压强度为多孔结构的基本力学性质,其值决定了多孔结构能否在抵抗外界作用力时维持自身形态,

保证其内部的稳定。如图 3 所示,多孔结构的抗压强度随着养护龄期的增加而逐渐增强,而在同一养护龄期下,水灰比从 0.25 提高至 0.35 时,抗压强度逐渐增大,当水灰比为 0.35 时,28 d 龄期的混凝土抗压强度达到最大值 1.10MPa,这与先前研究成果相一致^[22],但当水灰比继续上升至 0.4 时,抗压强度反而略有减小;此外,多孔结构抗压强度随骨料粒径减小或胶凝浆体的增多而增大。

孔隙率包括全孔隙率与有效孔隙率,对材料本身的透水性和植生性能十分重要。如图 4 所示,不同水灰比和骨料粒径下的多孔结构孔隙率及有效孔隙率并无较大差别,相关试样全孔隙率为 40%~45%,有效孔隙率为 35%~39%,两者相差约 6%,说明在多孔结构存在约 6% 的封闭孔隙,这部分孔隙不能为后续植物生长所用,为无效孔隙;而随着胶凝材料体积含量

表 6 骨料粒径区间单因素试验结果

Table 6 Results of single factor test of aggregate particle size range

| 序号 | 骨料粒径/mm | 抗压强度/MPa | | 孔隙率/% | | 透水系数/(cm·s ⁻¹) |
|----|-----------|----------|------|-------|-------|----------------------------|
| | | 7 d | 28 d | 全孔隙率 | 有效孔隙率 | |
| 1 | 9.5~16.0 | 1.55 | 1.81 | 42 | 35 | 2.83 |
| 2 | 16.0~19.0 | 1.22 | 1.24 | 41 | 37 | 2.98 |
| 3 | 19.0~26.5 | 1.02 | 1.15 | 40 | 38 | 3.22 |
| 4 | 26.5~31.5 | 0.64 | 0.72 | 45 | 39 | 3.24 |

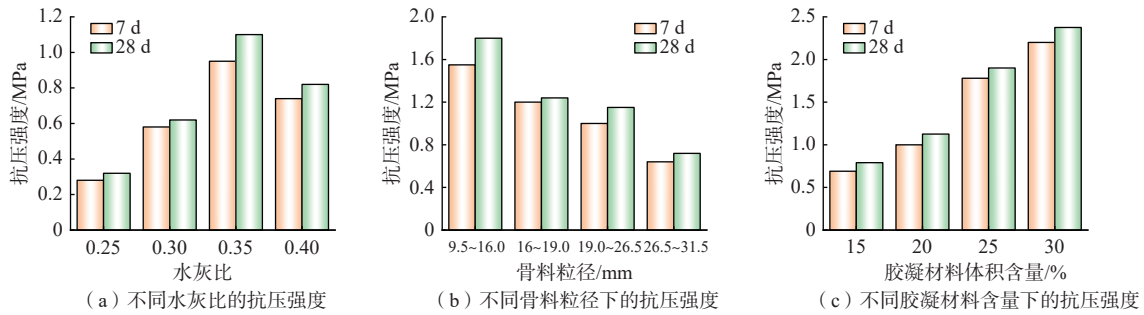


图 3 不同因素下的抗压强度变化

Fig. 3 Changes of compressive strength under different factors

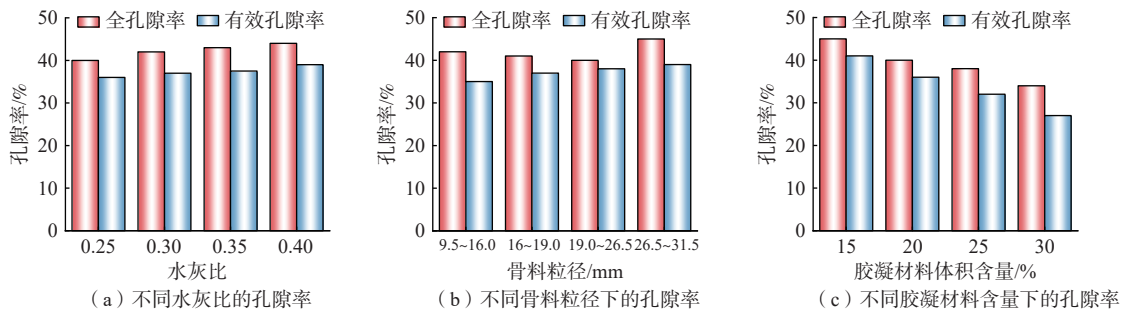


图 4 不同因素下的孔隙率变化

Fig. 4 Porosity changes under different factors

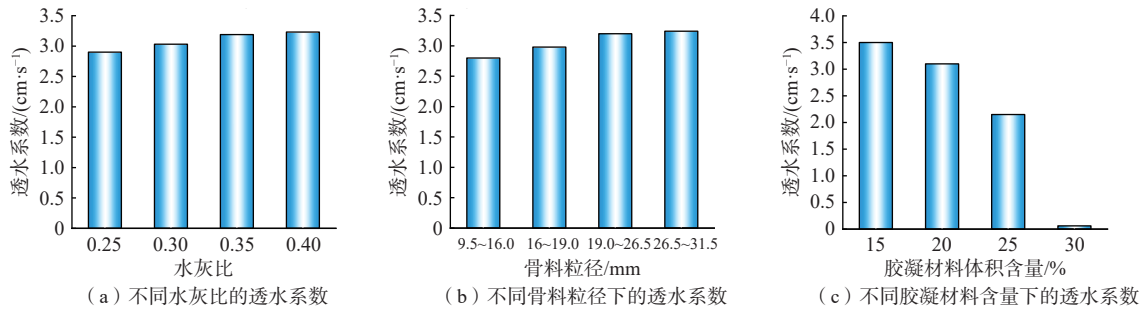


图 5 不同因素下的透水系数变化

Fig. 5 Changes of permeation coefficient under different factors

的增加,多孔结构单位体积内的孔隙率及有效孔隙率明显降低,全孔隙率从 46% 降至 33%,而有效孔隙率则从 41% 降至 27%。

透水系数(permeation coefficient)是衡量多孔结构排水能力的指标,多孔结构骨料粗大,排水能力较好,具有很好的透水性能,文章参考《大孔混凝土的透水性及其测定方法》^[23]采用实验室自制的常水头仪器对多孔结构试块的透水系数进行测定^[24]。试验结果如图 5 所示,可以发现多孔结构透水系数随水灰比与骨料粒径的增大而略微增大,随胶凝浆体增多显著降低。当胶凝浆体体积含量为 15%~25% 时,透水系数范围为 2.15~3.52 cm/s,而当胶凝浆体体积含量为 30% 时,透水系数仅为 0.03 cm/s,此时多孔结构已经基本失去透水性能。

3 分析与讨论

3.1 抗压强度测定及结果分析

水灰比对抗压强度的影响如图 3(a)所示,抗压强度随水灰比的增加先增大后减小。这主要是因为当水灰比较小的时候,包裹不均匀,浆体较干会导致水化不完全;当水灰比为 0.35 时,骨料表面均匀包裹混凝土,结构整体稳定性较高;当水灰比大于 0.35 时,浆体过稀,流动性较高,对骨料的包裹厚度较薄,且浆体会沉积在试块底部,导致试块整体抗压强度降低,因此,水灰比在 0.35 左右较为适宜。

如图 3(b)所示,骨料粒径越小,多孔构件抗压强度越高。是因为当骨料粒径越小的时候,粗骨料之间的接触点就会越多,多孔结构就越接近实心^[25]。然而

当骨料粒径偏小时, 孔隙就会过于细小, 导致后续为植被提供生长环境的土壤浆体难以贯入孔隙。综合考虑抗压强度和土壤浆体贯入 2 个因素, 结合先前的制样经验^[26], 多孔结构的制备选取粒径 2 cm 左右的骨料比较合适。

从图 3(c)中可以看出, 随着胶凝浆体的增多, 多孔骨架的抗压强度上升, 但是过多的浆体会导致浆体下沉, 导致骨架上下不连通, 透水性差, 所以选择胶凝浆体体积占比为 15%~25% 较为适宜。

3.2 孔隙特征测定及结果分析

不同水灰比和不同骨料粒径的孔隙率及有效孔隙率并无较大差别^[27]。而在不同胶凝材料体积含量下, 2 种孔隙率变化幅度较大, 说明胶凝材料体积含量才是控制多孔结构孔隙率最关键的影响因素。如图 4(c)所示, 随着胶凝材料体积含量的增加, 单位体积内的多孔结构孔隙率及有效孔隙率明显降低。

多孔结构中的孔隙中可由三部分组成: 联通孔隙、半联通孔隙和封闭孔隙, 其中前两者构成了有效孔隙, 三者一起构成了全孔隙空间。有效孔隙可进入空气和水, 且具有一定连通性的有效孔隙可供植物扎根生长, 对多孔结构的植生性能至关重要, 为了能够为后续植物生长提供足够的有效孔隙, 多孔结构必须存在足够的有效孔隙空间, 一般来讲, 全孔隙率在 20%~30% 即可满足工程应用条件, 且常用 20%~30% 的孔隙率作为配合比设计基础, 并以此为依据确定胶凝材料体积含量, 但这并不适合于轻质骨料多孔结构。当轻质多孔结构的有效孔隙率为 25%~30% 左右时, 胶凝材料体积含量约为 30%, 但这时因为胶凝材料体积含量过高, 使结构孔隙窄小, 结构致密, 且浆体因过多会下沉, 导致结构底部封闭, 不能满足工程应用的透水性能^[28]。故为了兼顾植生性能和透水性能的双重条件, 应控制胶凝体积掺量为 15%~25%, 最好不要超过 25%。

对以上所有试件的全孔隙率及对应的有效孔隙率进行统计分析, 发现两者之间存在着良好的二次函数关系, 如图 6 所示, 这与先前研究成果相一致^[29]。基于此, 我们建立了有效孔隙率与全孔隙率预测模型, 模型回归关系式如下, 其中 P_e 为有效孔隙率, P_t 为全孔隙率。

$$P_e = -0.04039P_t^2 + 4.2849P_t - 71.0655 \quad (1)$$

3.3 透水系数测定及结果分析

从图 5(a)中可以看出, 随着水灰比的增大, 透水

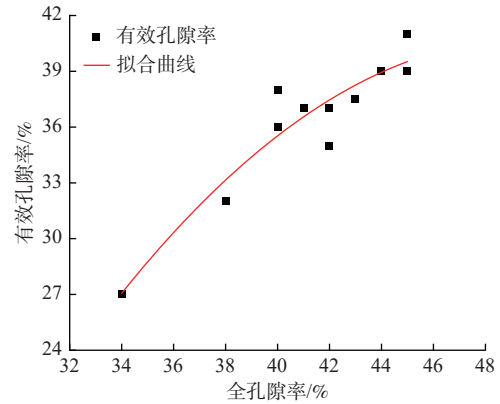


图 6 有效孔隙率与全孔隙率的关系

Fig. 6 Relationship between effective porosity and total porosity

系数轻微增大, 这是因为在水灰比增大的同时, 胶凝浆体的流动度增大从而导致浆体对骨料的包裹厚度变薄, 单位厚度透水面积增大。而当骨料粒径增大的同时, 堆积形成的孔隙也较大, 所以透水系数也相应地有所增加。透水系数随胶凝浆体增加而显著降低, 当胶凝材料体积含量为 30% 左右时, 多孔结构底部由于浆体沉降封死已失去透水性能。综上, 胶凝材料体积含量应在 25% 以下。

在胶凝材料体积含量不超过 25% 时, 如图 7 所示, 有效孔隙率与透水系数呈现较强的相关性, 基于此建立了有效孔隙率与透水系数预测模型, 其中 P 为透水系数, 模型拟合公式如下所示:

$$P = 0.0916P_e - 0.3354 (R^2 = 0.946) \quad (2)$$

可见透水系数随着有效孔隙率增大而逐渐增大。因此, 在制备多孔结构的时候, 既要注意孔隙率, 也要重视有效孔隙率, 即选择合适的胶凝材料体积含量显

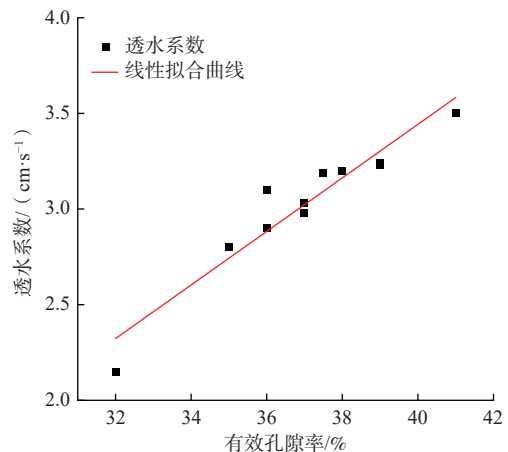


图 7 有效孔隙率与透水系数的关系

Fig. 7 Relationship between effective porosity and permeability coefficient

得尤为重要。结合前述孔隙率的研究,为了多孔结构拥有足够的植生空间并具备良好的透水性能,胶凝体积含量应控制在 25% 以下,这与先前结论一致。

4 轻质多孔结构配合比优化

4.1 响应面设计

为了获取满足植物生长且具有一定强度的多孔结构,前期的单因素试验中,选取合适范围,采用响应面对不同骨料粒径(X_1),水灰比(X_2),胶凝材料体积含量(X_3)的多孔构件配比进行进一步的优化分析^[30]。选取轻质骨料粒径、水灰比、胶凝材料体积含量作为自变量,选取范围如表 7 所示:

表 7 自变量因素水平表
Table 7 Independent variable factor level

| 自变量 | 代号 | 自变量水平 | | |
|------------|-------|-------------|-------------|-------------|
| | | -1 | 0 | 1 |
| 骨料粒径/mm | X_1 | 16.0 ~ 19.0 | 19.0 ~ 26.5 | 26.5 ~ 35.0 |
| 水灰比 | X_2 | 0.30 | 0.35 | 0.40 |
| 胶凝材料体积含量/% | X_3 | 15 | 20 | 25 |

通过前面的单因素试验确定采用抗压强度作为响应量,优化多孔结构配合比设计,在满足植生性能和透水性能的条件下,采用 Box-Bohnken 响应面法进行 3 因素 3 水平的响应面试验,优化多孔结构的配比方案。

4.2 响应面结果优化分析

通过采用不同的骨料粒径(X_1)、水灰比(X_2)、胶凝浆体体积(X_3)作为自变量,抗压强度作为响应量进行优化分析,建立 28 d 抗压强度(Y_1)与 X_1 、 X_2 、 X_3 之间的多元二次回归曲线,并检测其显著性,然后利用回归方程得出具有更高强度的优化后的配合比设计,同时验证其孔隙特征和透水性能是否满足条件。

试验结果如表 8 所示,发现抗压强度与这三者存在明显的回归关系,并建立了回归方程,如式(3)所示。此外,我们希望通过这些回归方程可以量化不同因变量对响应量的影响规律并对不同胶凝材料体积含量下的多孔构件力学性能(28 d 抗压强度)进行预测。

$$Y_1 = 1.29 - 0.1669X_1 + 0.013X_2 + 0.207X_3 - 0.0038X_1X_2 - 0.0965X_1X_3 - 0.0215X_2X_3 - 0.1707X_1^2 - 0.0407X_2^2 - 0.1915X_3^2 \quad (3)$$

对该回归方程中的因素进行方差分析,结果如表 9 所示,从表中可以看出一次项 X_1 、 X_3 对 28 d 抗压强度影响及其显著,交互项 X_1X_3 和二次项 X_1^2 、 X_3^2 对其影

表 8 响应面试验结果

Table 8 Results of response surface test

| 编号 | X_1 | X_2 | X_3 | Y_1 /MPa |
|----|-------|-------|-------|------------|
| 1 | -1 | -1 | 0 | 1.24 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 0.90 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 1.24 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0.90 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 0.83 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 0.69 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 1.35 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 0.92 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 0.75 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 0.85 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 1.27 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 1.28 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 1.27 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 1.33 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 1.21 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 1.26 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 1.36 |

表 9 回归模型方差分析

Table 9 Regression model analysis of variance

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F值 | P值 | 显著性 |
|--------------|--------|-----|--------|---------|---------|-----|
| 模型 | 0.8560 | 9 | 0.0952 | 31.3500 | <0.0001 | ** |
| X_1 | 0.1907 | 1 | 0.1907 | 50.0400 | <0.0001 | ** |
| X_2 | 0.0014 | 1 | 0.0014 | 0.3215 | 0.5221 | |
| X_3 | 0.3604 | 1 | 0.3604 | 77.0000 | <0.0001 | ** |
| X_1X_2 | 0.0001 | 1 | 0.0001 | 0.0126 | 0.9137 | |
| X_1X_3 | 0.0204 | 1 | 0.0204 | 8.3700 | 0.0232 | * |
| X_2X_3 | 0.0019 | 1 | 0.0019 | 0.4153 | 0.5398 | |
| X_1^2 | 0.0960 | 1 | 0.0960 | 27.5700 | 0.0012 | * |
| X_2^2 | 0.0154 | 1 | 0.0154 | 1.5700 | 0.2506 | |
| X_3^2 | 0.1460 | 1 | 0.1460 | 34.6700 | 0.0006 | * |
| 残差 | 0.0212 | 7 | 0.0030 | | | |
| 失拟项 | 0.0072 | 3 | 0.0024 | 0.6820 | 0.6078 | |
| 纯误差 | 0.0141 | 4 | 0.0035 | | | |
| 总变异 | 0.8779 | 16 | | | | |
| R^2 | | | | | 0.9670 | |
| R_{Adj}^2 | | | | | 0.9247 | |
| R_{Pred}^2 | | | | | 0.8439 | |

注:表中**表示极显著差异;*表示显著差异; R_{Adj}^2 为修正决定系数; R_{Pred}^2 为预测决定系数;空白表示该项不存在此类数据。

响显著,其他因素的影响不显著,且影响 28 d 抗压强度的因素强弱顺序为: $X_3 > X_1 > X_2$,此结果亦与先前的研究结论一致。此次模型的 $P < 0.0001$,回归模型达到了极显著的水平,失拟项($P = 0.6078 > 0.05$)不显著,变异系数为 4.99% (<10%),说明该响应面模型具有较好的稳定性,非试验因素对其影响不显著。模型相关系数为 0.9670,说明试验中有 96.7% 的结果可以通过模型

拟合进行揭示。矫正后的 R^2_{Adj} 为 0.924 7, AP 信噪比为 17.352, 该值大于 4 说明可取, 该模型可用于分析预测并作为多孔结构力学强度设计参照标准。

采用 Box-Bohnken 响应面法分析交互作用并依回归方程, 在此基础上绘制响应面图及等高线图, 分析骨料粒径、水灰比和胶凝材料体积含量对 28 d 抗压强

度的影响。当固定骨料粒径、水灰比和胶凝材料体积含量 3 个因素中的 1 个因素时, 其他 2 个因素间的交互作用可用响应面图和等高线图表示, 结果见图 8—10。响应面中曲面越陡, 等高线越密集, 影响越显著, 2 个因素的等高线越接近椭圆说明两者的相互作用越强。

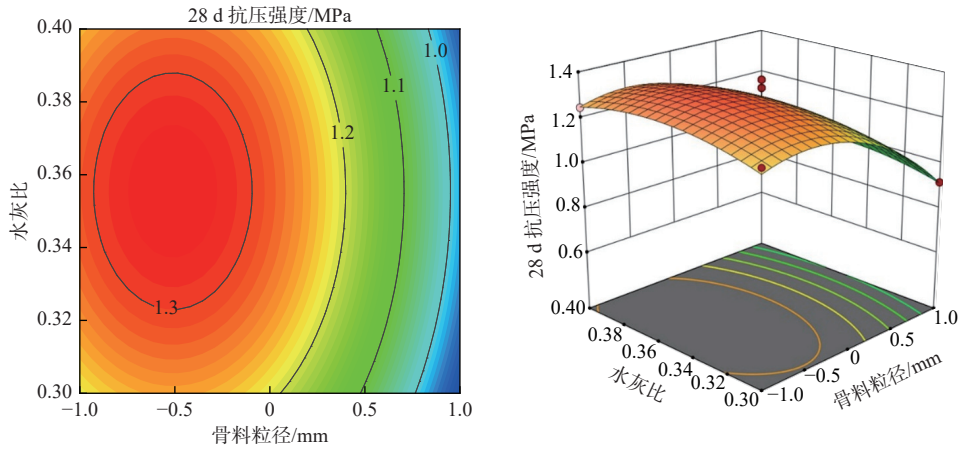


图 8 骨料粒径与水灰比对抗压强度的交互影响

Fig. 8 Interaction effects of aggregate size and water-cement ratio on compressive strength

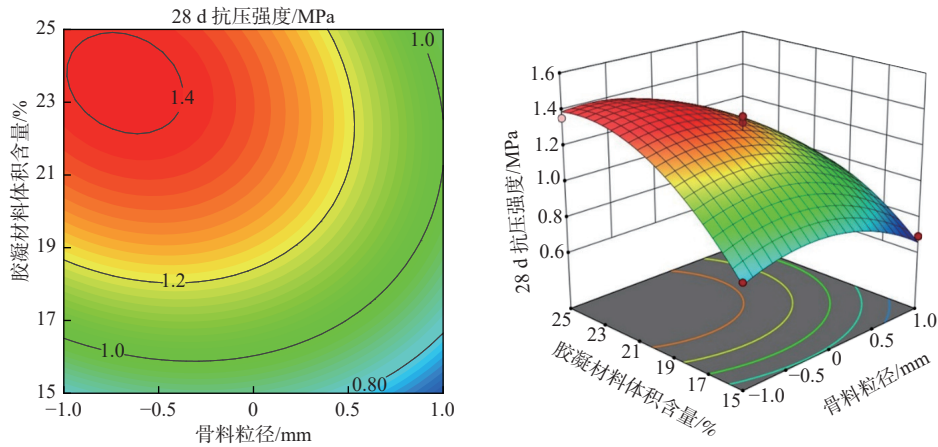


图 9 骨料粒径与胶凝材料体积含量对抗压强度的交互影响

Fig. 9 Interaction effects of aggregate size and cement paste volume on compressive strength

图 8 表示在胶凝材料体积含量处于中心水平时, 骨料粒径与水灰比的交互作用对多孔结构 28 d 抗压强度的影响。在胶凝材料体积含量固定的时候, 随着骨料粒径的减小抗压强度增强, 且响应面坡度陡峭, 说明骨料粒径对于抗压强度影响较强。水灰比在 0.30 ~ 0.40 区间, 曲线呈现出先增大后降低的弯曲趋势, 峰值靠近 0.35 附近。

图 9 表示在水灰比处于中心水平时, 骨料粒径与胶凝材料体积含量的交互作用对多孔结构 28 d 抗压强度的影响。两者的交互影响对其抗压强度影响显

著, 响应面的坡度陡峭, 趋势明显, 且等高线呈现明显的椭圆形, $P < 0.05$, 说明 2 个因素对抗压强度的影响很强。且在骨料粒径较小的时候, 随着胶凝材料体积含量的增加, 多孔结构的强度显著增强, 趋势明显; 在胶凝材料体积含量较多时候, 多孔结构抗压强度随着骨料粒径的减小而增强。

图 10 表示当骨料粒径处于中心水平时, 水灰比与胶凝材料体积含量的交互作用对多孔结构 28 d 抗压强度的影响。在水灰比处于中心水平 0.35 左右的时候, 抗压强度随着胶凝浆体的增加而增强, 当胶凝材

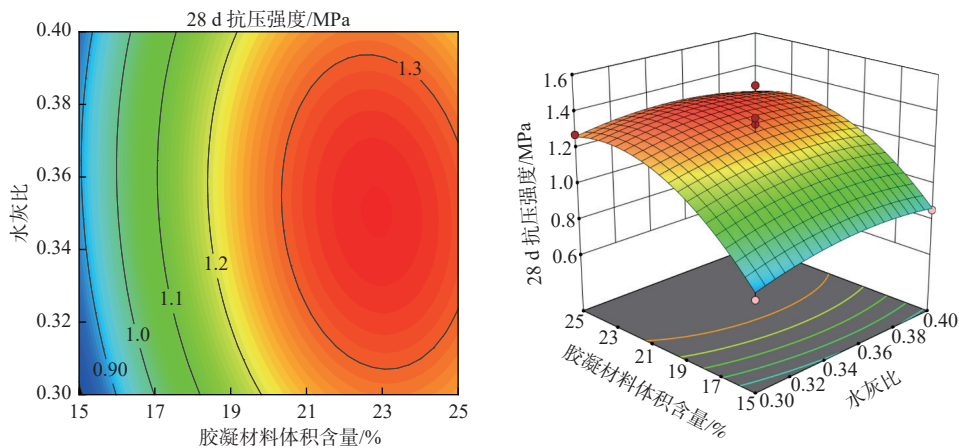


图 10 水灰比与胶凝浆体体积对抗压强度的交互影响

Fig. 10 Interaction effects of water-cement ratio and cement paste volume on compressive strength

料体积含量在 20% ~ 25% 时, 抗压强度呈现出弯曲的趋势, 并在胶凝材料体积含量为 23% 左右时达到最大值, 抗压强度在水灰比处于 0.30 ~ 0.40 范围内, 呈现出先增大后减小的趋势, 即当水灰比在 0.35 附近抗压强度取得最高值。

通过回归分析后得出多孔结构抗压强度在 3 个因素影响下的预测趋势, 如图 11 所示, 图中不同颜色的点代表不同编号的试验组别, 试验值与预测值呈现出良好的拟合趋势, $R^2_{pred}=0.8439$, 说明模型具有较高的可靠性。

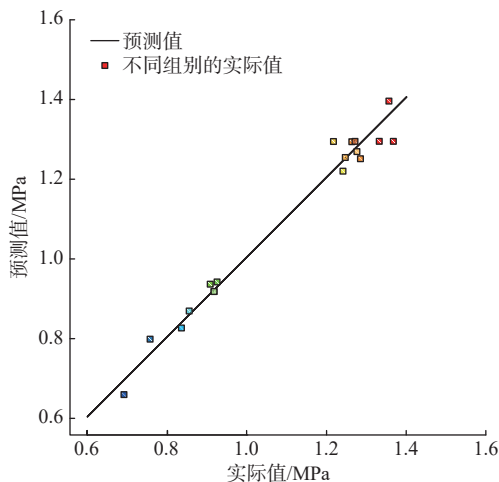


图 11 预测抗压强度值与试验值对比

Fig. 11 Predicted compressive strength value compared with the experimental value

通过 Design Expert13 软件求解方程, 得到较为合适的配合比设计并进行换算: 骨料粒径在 2 cm 左右, 水灰比为 0.377, 胶凝材料体积含量在 20.7% 左右较为合适, 此时得到的 28 d 抗压强度值为 1.34 MPa 左右。通过此配合比制取 3 个平行样并得到多孔结构的 28 d 抗压强度为 1.29 MPa, 与预测值基本相符。在此配合

比下, 孔隙率为 38.3%, 有效孔隙率为 33.5%, 透水系数为 2.98 cm/s。由此可见, 在该优化配合比下, 多孔结构具有足够的植生空间和良好的透水性能, 满足应用条件。

5 结论

(1) 抗压强度随着水灰比增大呈现先增大后减小的变化趋势, 最佳水灰比约 0.35。骨料粒径越小, 多孔结构抗压强度越高, 但为了满足多孔性和透水性, 选取粒径 2 cm 左右的骨料较为适宜。

(2) 在不影响强度的条件下, 胶凝材料体积含量是影响有效孔隙和形成上下表面联通的透水通道的最关键因素, 应控制为 15% ~ 25%, 胶凝材料体积含量不应超过 30%。

(3) 采用响应面对不同水灰比、骨料粒径区间、胶凝材料体积含量进行优化设计并进行抗压试验, 以抗压强度为响应量, 得到优化后的配合比设计: 骨料粒径约 2 cm, 水灰比为 0.377, 胶凝材料体积含量为 20.7%。测试了该配比下的多孔结构孔隙率、有效孔隙率和透水系数分别为: 38.3%、33.5%、2.98 cm/s。证明在该优化配合比下, 多孔结构不仅具有较高的抗压强度, 还具有良好的植生性能和透水性能, 满足工程需求。

(4) 轻质多孔结构在力学强度与结构稳定性方面具有十分优异的性能, 加之其内部具有满足植物生长的孔隙, 相比普通建筑材料对环境具有更加良好的相容性, 因此在生态保护方面有更为广阔的应用前景。然而, 目前关于多孔结构的研究主要集中于制备工艺与力学性质, 依旧将其作为普通混凝土开展传统力学试验, 忽视了其生态环境作用, 在今后的研究中可更多地考虑其环境友好性优势, 为生态修复工程提供技术支持。

参考文献 (References) :

- [1] 王桂玲, 王龙志, 张海霞, 等. 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, et al. Meaning, technology index and research emphases of planting eco-concrete[J]. *Concrete*, 2013(1): 105 - 109. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王俊岭, 王雪明, 冯萃敏, 等. 植生混凝土的研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(7): 1915 - 1920. [WANG Junling, WANG Xueming, FENG Cuimin, et al. Research progress on the planting eco-concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(7): 1915 - 1920. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 房嘉铭. 植生型多孔混凝土在生态护坡的应用研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. [FANG Jiaming. Research on application of green-growing porous concrete in ecological slope protection. [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴元梅, 郭凯先, 贾海峰. 生态混凝土在海绵城市中的应用及其特性试验设计 [J]. *混凝土*, 2018(7): 122 - 125. [WU Yuanmei, GUO Kaixian, JIA Haifeng. Application of ecological concrete in sponge city construction and its characteristic experiment design[J]. *Concrete*, 2018(7): 122 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [5] LIU Chang, XIA Yangyang, CHEN Jianguo, et al. Research and application progress of vegetation porous concrete[J]. *Materials*, 2023, 16(21): 7039.
- [6] 曾文才. 多孔轻质材料在直立式硬质护岸生态化改造中的应用 [D]. 南京: 东南大学, 2019. [TANG Vantai. Porous lightweight material and its application in the ecological transformation of vertical hard revetment [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [7] KIM H H, PARK C G. Plant growth and water purification of porous vegetation concrete formed of blast furnace slag, natural jute fiber and styrene butadiene latex[J]. *Sustainability*, 2016, 8(4): 386.
- [8] MI Renjie, YU Tao, POON C S. Feasibility of utilising porous aggregates for carbon sequestration in concrete[J]. *Environmental Research*, 2023, 228: 115924.
- [9] RAHMAN M S, MACPHERSON S, AKBARZADEH A, et al. A study on heat and mass transfer through vegetated porous concrete for environmental control[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 366: 132984.
- [10] 侯泽彪, 刘冠志, 赵金昌, 等. 均匀设计与正交设计相结合的植生型多孔混凝土配合比设计研究 [J]. *混凝土*, 2023(2): 154 - 158. [HOU Zebiao, LIU Guanzhi, ZHAO Jinchang, et al. Study on the mix proportion design of plant-grown porous concrete combining uniform design and orthogonal design[J]. *Concrete*, 2023(2): 154 - 158. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李九苏, 张安, 保安青, 等. 粉煤灰地质聚合物植生混凝土的制备及性能研究 [J]. *公路交通科技*, 2023, 40(10): 18 - 26. [LI Jiusu, ZHANG An, BAO Anqing, et al. Study on preparation and properties of fly ash based geopolymer vegetation concrete[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(10): 18 - 26. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 曲广雷, 闫宗伟, 郑木莲等. 基于神经网络与回归分析的多孔混凝土性能预测 [J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*, (2023-08-31)[2023-09-02]. [QU Guang-lei, YAN Zongwei, ZHENG Mulian, et al. Performance prediction of porous concrete based on neural network and regression analysis[J/OL]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, (2023-08-31)[2023-09-02]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7gnxONS3vkkAcrrmmzh3hGerBVetojOBUVIPujjH5uLCLoq0APV6NZemdOaAP6-G9oIl8Z03TsNhPtsOiqiZLyPI97OTnceqZmC3z6za7nlnSCT_BhB3YfyDtaTYRC1ZQNfOt-qL6t9rd27Eg5-3yWSFSqRNGWFPx14JXdwfGNeIoXaIP5-rzXnvQm3fABwLcdi2VUFssFGmOCaBpu_dyagM_NUlejTmbCzVoUmXGe4YQuJBieFiy853FfbOhLyNI&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 闫滨, 张博, 闫胜利, 等. 多孔混凝土抗冲刷性能影响因素试验 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2020, 51(2): 162 - 168. [YAN Bin, ZHANG Bo, YAN Shengli, et al. Experimental study on the factors influencing the scour resistance of porous concrete[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2020, 51(2): 162 - 168. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 胡雅璐, 张万益, 王泉, 等. 地球系统科学视角下美国湿地保护修复的经验及启示——以大沼泽地综合修复计划为例 [J]. *地质通报*, 2024, 43(8): 1305 - 1314. [HU Yalu, ZHANG Wanyi, WANG Quan, et al. Experience and implications of wetland conservation and restoration in the United States from the perspective of earth system science: Take the comprehensive Everglades restoration plan as an example[J]. *Geological Bulletin of China*. 2024, 43(8): 1305 - 1314. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨善印, 侯利军, 吉庆伟, 等. 植生混凝土抗压强度和降碱方法研究进展 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 202 - 211. [YANG Shanyin, HOU Lijun, JI Qingwei, et al. Research progress on compressive strength and alkali reduction technology for vegetation concrete[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(6): 202 - 211. (in Chinese with English abstract)]

- [16] 徐宏林, 李梦茹, 姜华, 等. 丹江口水库土壤-底积物镉生态地球化学风险评价 [J]. *中国地质*, 2021, 48(4): 1166 - 1176. [XU Honglin, LI Mengru, JIANG Hua, et al. Ecological geochemical risk assessment of cadmium in soil-sediment of Danjiangkou Reservoir[J]. *Geology in China*, 2021, 48(4): 1166 - 1176. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 乔建刚, 董进国, 李明浩, 等. 生态混凝土植生与抗冲刷性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(3): 917 - 924. [QIAO Jiangang, DONG Jinguo, LI Minghao, et al. Study on planting performance and scouring resistance of eco-concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(3): 917 - 924. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 刘琦, 夏振尧, 刘大翔, 等. 页岩陶粒植生型多孔混凝土制备与植生试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(12): 115 - 121. [LIU Qi, XIA Zhenyao, LIU Daxiang, et al. Shale ceramsite porous concrete for plant growing: Preparation and planting test[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017, 34(12): 115 - 121. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 郑木莲, 王国清, 贾献卓, 等. 基于正交试验的多孔混凝土强度与空隙率影响因素分析 [J]. *公路*, 2015, 60(7): 230 - 234. [ZHENG Mulian, WANG Guoqing, JIA Xianzhuo, et al. Analysis on the influence factors of strength and porosity based on orthogonal experiment for porous concrete[J]. *Highway*, 2015, 60(7): 230 - 234. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 蒋昌波, 刘易庄, 肖政. 多孔混凝土内部孔隙特征研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(4): 1105 - 1110. [JIANG Changbo, LIU Yizhuang, XIAO Zheng. Study on the Characteristic of Pore in Porous Concrete.[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(4): 1105 - 1110. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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. [HUANG Jianpeng, HU Yongyou. Study on preparation and properties of plant- growing porous concrete.[J]. *Concrete*, 2011(2): 101 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王家庆, 吴健生, 黄凯健, 等. 生态混凝土绿色护坡的植生性与耐久性 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(4): 29 - 40. [WANG Jiaqing, WU Jiansheng, HUANG Kaijian, et al. Planting performance and durability of eco-concrete for slope protection[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(4): 29 - 40. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈志山. 大孔混凝土的透水性及其测定方法 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2001(1): 19 - 20. [CHEN ZhiShan. Permeability of macroporous concrete and its measurement method[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2001(1): 19 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 许燕莲, 李荣炜, 谭学军, 等. 植被型多孔混凝土的制备与植生试验 [J]. *新型建筑材料*, 2009, 36(2): 16 - 20. [XU Yanlian, LI Rongwei, TAN Xuejun, et al. Planting experiment and preparation of porous concrete adapt to plants-growing[J]. *New Building Materials*, 2009, 36(2): 16 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张贵. 生态多孔混凝土孔隙结构与植被生长规律的结构相容性研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018. [ZHANG Gui. The research on compattibility of pore structure and laws of vegetation growth in eco-porous concrete. [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 田砾, 逢增铭, 全洪珠, 等. 植生型多孔混凝土物理性能及植生适应性研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(10): 3381 - 3386. [TIAN Li, PANG Zengming, QUAN Hongzhu, et al. Physical properties and vegetative adaptation of eco-porous concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(10): 3381 - 3386. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 刘赛赛, 陈徐东, 李升涛, 等. 基于 CT 的再生骨料生态多孔混凝土细观结构分析 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(2): 174 - 183. [LIU Saisai, CHEN Xudong, LI Shengtao, et al. Mesoscopic structure analysis of recycled aggregate ecological porous concrete based on CT[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(2): 174 - 183. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 卞立波, 董申, 陶志. 碱激发矿渣/粉煤灰多孔混凝土基本性能试验研究 [J]. *材料导报*, 2020, 34(增刊 2): 1299 - 1303. [BIAN Libo, DONG Shen, TAO Zhi. Basic properties of alkali activated slag/fly ash pervious concrete[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(Sup 2): 1299 - 1303. (in Chinese with English abstract)]
- [29] XU Gelong, SHEN Weiguo, HUO Xujia, et al. Investigation on the properties of porous concrete as road base material[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 141 - 148.
- [30] 王灏喆, 武钢义, 代育恒, 等. 基于响应面法的 EICP-PVA 固化粉砂土优化试验研究 [J]. *公路*, 2023, 68(11): 264 - 272. [WANG Haozhe, WU Gangyi, DAI Yuheng, et al. Research on optimization of EICP-PVA solidified silty sand based on response surface method[J]. *Highway*, 2023, 68(11): 264 - 272. (in Chinese with English abstract)]