

# 云南腾冲火山石制备轻质透水混凝土的试验研究

梁亚鹏, 田京鑫, 孔 颜, 张云程, 施雁曦, 雷 真\*

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2023年5月19日; 录用日期: 2023年6月9日; 发布日期: 2023年6月21日

## 摘 要

以轻质多孔的云南腾冲火山石为骨料制备轻质透水混凝土, 采用体积法进行配合比设计。通过正交试验方法, 研究水灰比、有效孔隙率, 火山石粒径、硅灰比例等诸多因素对28 d龄期的混凝土抗压力性、透水系数的影响规律。试验结果表明: 使用火山石为轻型集料能够制备性能较好的轻质混凝土; 当孔隙率为17%, 水胶比0.30, 骨料粒径为5 mm~8 mm, 硅灰掺量5%左右, 增强剂掺量为10%到15%之间的情形, 试块抗压强度达到最大值25 MPa, 透水系数大于3 mm/s, 能够基本符合透水混凝土路面的压强标准和透水特性指标, 具有良好的经济和生态效益。

## 关键词

透水混凝土, 轻质火山石, 力学性能, 透水系数

# Experimental Study on Preparation of Lightweight Pervious Concrete Using Tengchong Volcanic Stone in Yunnan Province

Yapeng Liang, Jingxin Tian, Yan Kong, Yuncheng Zhang, Yanxi Shi, Zhen Lei\*

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: May 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jun. 9<sup>th</sup>, 2023; published: Jun. 21<sup>st</sup>, 2023

## Abstract

A lightweight permeable concrete was prepared using lightweight and porous Yunnan Tengchong  
\*通讯作者。

文章引用: 梁亚鹏, 田京鑫, 孔颜, 张云程, 施雁曦, 雷真. 云南腾冲火山石制备轻质透水混凝土的试验研究[J]. 土木工程, 2023, 12(6): 760-770. DOI: 10.12677/hjce.2023.126086

volcanic rock as aggregate, and the mix design was carried out using the volume method. Through the orthogonal test method, the influence of many factors, such as Water-cement ratio, effective porosity, volcanic stone particle size, silica fume ratio, and so on, on the pressure resistance and water permeability coefficient of concrete at the age of 28 days was studied. The experimental results indicate that using volcanic stone as a lightweight aggregate can prepare lightweight concrete with good performance. When the porosity is 17%, the water-cement ratio is 0.30, the aggregate particle size is 5 mm~8 mm, the silica fume content is about 5%, and the reinforcing agent content is between 10% and 15%, the compressive strength of the test block reaches the maximum value of 25 MPa, and the permeability coefficient is greater than 3 mm/s. It can basically meet the pressure standards and permeability characteristics indicators of permeable concrete pavement, and has good economic and ecological benefits.

## Keywords

Previous Concrete, Light Volcanic Stone, Mechanical Properties, Permeability Coefficient

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 社会经济的指数式增长带动着城市化进程的速度不断加快, 海绵城市的提出能够有效解决现代城市排水问题, 其中透水混凝土材料是重要解决方案之一, 其研究具有极强的实际应用价值和研究意义。透水混凝土简称 PC, 是一种具有独特性能的混凝土材料, 其孔隙结构由粗骨料与胶凝浆体互相粘结而成, 从而形成了多孔结构[1] [2] [3]。

现在有关透水混凝土的研究更多在于使用传统配合比设计方案以及利用工业废渣等材料和用粉煤灰来替代部分水泥成分来制备透水混凝土。然而目前大部分火山石主要用于鱼类景观、房屋装潢装饰以及渔业生态净水等方面的生态混凝土, 对于火山石透水混凝土的相关研究内容较少, 未能充分发挥火山石的各种特性。云南腾冲有着丰富的火山石资源, 且石材具有孔隙多、质量轻且无污染、无放射性等特性, 是理想的绿色生态材料。基于此, 本文采用腾冲火山石作为粗骨料, 结合透水混凝土的特点, 在混凝土中加入硅灰, 增强剂等矿物掺合料, 提高混凝土耐久性, 并对其配合比进行设计, 对 PC 的渗透性和力学特性进行科学探究。该研究既能够降低混凝土自重, 增加孔隙率, 同时能够令混凝土具有良好的经济效益和生态保护作用。

## 2. 试验设计

### 2.1. 原材料

Table 1. Chemical composition of cement and silica fume (unit: %)

表 1. 水泥、硅灰化学组成(单位: %)

种类	成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	烧失量
水泥		20.65	5.60	4.13	61.87	2.60	2.79	0.83	0.14	1.39
硅灰		81.40	4.47	1.40	0.82	1.48	1.35	/	/	7.26

本次试验采用的水泥为威顿水泥集团有限责任公司运城分公司生产的抗压强度为42.5 MPa的普通硅酸盐水泥(P.O.42.5)，比重为3.15，勃氏比表面积为3140 cm<sup>2</sup>/g；硅灰为河南义翔新材料生产，比重和单位质量分别为2.32和245 kg/m<sup>3</sup>，45 μm方孔筛余量为4.8%；增强剂为广东悦谷道路材料有限公司生产，化学组成如表1、表2所示。火山石采用产自云南腾冲的火山石，火山石的固有特性、成分配比见表3、表4。

**Table 2.** Chemical composition of enhancer (unit: %)

**表 2.** 增强剂化学组成和主要物理性能(单位: %)

成分	SiO <sub>2</sub>	CaO	含水率	细度	总碱量	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
含量	64.68	0.92	3.17	16.87	6.46	4.83

**Table 3.** Physical index of volcanic aggregate

**表 3.** 火山石骨料物理指标

骨料名称	粒径范围(mm)	堆积密度(g/cm <sup>3</sup> )	表观密度(g/cm <sup>3</sup> )	含水率(%)
小颗粒红色火山石 A	3~6	0.56	1.56	0.73
中颗粒红色火山石 B	5~8	0.57	1.36	1.03
大颗粒红色火山石 C	10~30	1.67	2.63	0.00

**Table 4.** Volcanic stone grading

**表 4.** 火山石级配单项百分比(单位: %)

骨料种类	筛孔尺寸					
	0~2.36 mm	2.36~4.75 mm	4.75~9.5 mm	9.5~16 mm	16~19 mm	>19 mm
小颗粒红色火山石 A	5	74	21	0	0	0
中颗粒红色火山石 B	2	12	81	5	0	0
大颗粒红色火山石 C	1	1	8	29	42	19

## 2.2. 试验方法

### 2.2.1. 正交试验设计方法

**Table 5.** Test factors and level table

**表 5.** 试验因素与水平表

水平	因素					
	目标孔隙率	水胶比	骨料种类	硅灰掺量	增强剂	搅拌方式
1	0.11	0.29	A	0.025	5%	一次投料法
2	0.17	0.33	B	0.05	10%	预拌水泥浆体法
3	0.23	0.37	C	0.075	15%	水泥裹石法

正交试验法是研究多因素、多水平组合的一种试验法，它是利用正交表来对试验进行设计，通过少数的试验替代全面试验，根据正交表的正交性从全面试验中挑选适量的、有代表性的点进行试验，这些有代表性的点具备了“均匀分散，整齐可比”的特点。“均匀分散”性使试验点均衡地分布在试验范围内，让每个试验点有充分的代表性；“整齐可比”性使试验结果的分析十分方便，可以估计各因素对指标的影响，找出影响事物变化的主要因素。实践证明，正交试验法是一种解决多因素问题卓有成效的方法。

本研究采用正交试验方法对火山石透水混凝土进行研究, 确定了水灰比例、孔隙率、硅灰比例、增强剂的用量以及搅拌方式等关键因素和三个水平的组合。透水混凝土的配合方案运用体积法, 根据关键因素和水平, 运用 PC 体积法运算配合方案的具体值。在试验方案的设计中, 使用了三个层次和六个因素的正交设计表, 共 18 组试验配合比方案(表 5、表 6)。表 6 中数字对应于测试因子所选择的水平。透水混凝土试验按三级六因素正交试验表进行匹配, 如表 6 所示, 本研究方法可以为透水混凝土的混合比设计提供参考[4] [5]。

**Table 6.** Orthogonal test design table

**表 6.** 正交试验设计表

因素 试验序号	目标孔隙率	水胶比	骨料种类	硅灰掺量	增强剂	搅拌方式
试验 1	1	1	1	1	1	1
试验 2	1	2	2	2	2	2
试验 3	1	3	3	3	3	3
试验 4	2	1	1	2	2	3
试验 5	2	2	2	3	3	1
试验 6	2	3	3	1	1	2
试验 7	3	1	2	1	3	2
试验 8	3	2	3	2	1	3
试验 9	3	3	1	3	2	1
试验 10	1	1	3	3	2	2
试验 11	1	2	1	1	3	3
试验 12	1	3	2	2	1	1
试验 13	2	1	2	3	1	3
试验 14	2	2	3	1	2	1
试验 15	2	3	1	2	3	2
试验 16	3	1	3	2	3	1
试验 17	3	2	1	3	1	2
试验 18	3	3	2	1	2	3

### 2.2.2. 配合比设计方法

透水混凝土是一种相较于普通混凝土具有更多孔隙的特殊混凝土材料, 渗透性混凝土不仅满足强度要求, 还需要保持一定数量的贯通孔以满足渗透性要求, 因此除了选择合适的原料外, 还需要通过配合设计和制备工艺以及添加剂来确保强度和孔隙率。渗透性混凝土由骨料, 水泥, 水等组成, 主要使用单一或间断的粗骨料作为骨架。而其配合比设计的方法是使用填充理论和体积法得到。根据 2009 年制定的透水混凝土路面的技术标准 CJ/T135 规定, 透水混凝土的外形大小是通过其中骨料掺入密实和所用胶凝材料所填充骨料所形成的透水混凝土, 借助试验来确定其目标孔隙率。透水混凝土  $V =$  所有材料的外形体积 + 孔隙体积, 每个单位  $V$  的质量是骨料的体积密度和单位立方米凝胶料的加入量, 体积法计算方法如下式所示[6]:

$$\frac{M_G}{\rho_G} + \frac{M_C}{\rho_C} + \frac{M_W}{\rho_W} + \frac{M_Z}{\rho_Z} + \frac{M_J}{\rho_J} + P = 1 \quad (\text{式 1})$$

式中  $M_G$  代表  $1 \text{ m}^3$  混凝土所用粗骨料的数量  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $M_C$  代表代表  $1 \text{ m}^3$  混凝土所用水泥的数量, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $M_W$  代表  $1 \text{ m}^3$  混凝土的水量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $M_Z$  代表  $1 \text{ m}^3$  混凝土的所用增强料的数量, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $M_J$  代表  $1 \text{ m}^3$  混凝土所有外加剂的数量, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_G$  代表粗骨料的视密度, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_C$  代表水泥的视密度, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_W$  代表水的视密度, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_Z$  代表增强料的视密度, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_J$  代表外加剂的视密度, 即  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $P$  代表试验对象孔隙体积率。

研究表明, 比表面积法和体积法是用于设计透水混凝土配合比的两种常用方法。其中, 体积法以目标孔隙率作为控制参数, 可以更加精准地满足透水性要求, 从而更加有效地实现设计目标。经过系统的研究和比较, 本文采用体积法来优化透水混凝土的配合比设计, 以达到最佳的性能效果, 详见表 7 [2] [3] [7]。

**Table 7.** Concrete mix ratio of orthogonal test group (unit:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

**表 7.** 正交试验组混凝土配合比(单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ )

序号	水灰比	目标孔隙率	粒径	粗骨料用量	水泥	硅灰	水	增强剂	搅拌方式
1	0.29	11%	A	750	517	13	155	31	1
2	0.33	11%	B	618	622	39	218	44	2
3	0.37	11%	C	490	735	51	294	66	3
4	0.29	17%	A	750	426	11	128	26	3
5	0.33	17%	B	618	539	28	189	38	1
6	0.37	17%	C	490	655	53	262	59	2
7	0.29	23%	B	618	483	25	150	34	2
8	0.33	23%	C	490	376	125	165	41	3
9	0.37	23%	A	750	109	3	41	7	1
10	0.29	11%	C	490	568	46	176	51	2
11	0.33	11%	A	450	316	8	107	19	3
12	0.37	11%	B	875	567	30	238	40	1
13	0.29	17%	B	800	547	29	186	38	3
14	0.33	17%	C	490	704	49	246	63	1
15	0.37	17%	A	750	380	10	144	23	2
16	0.29	23%	C	490	660	50	206	57	1
17	0.33	23%	A	750	316	8	19	19	2
18	0.37	23%	B	642	416	22	175	29	3

### 2.2.3. 抗压强度测试

试件成型后用水灰比为 0.3 的水泥浆体抹面, 采用万能机加压, 加压速度及相应数据根据相应规范进行, 根据下式计算结果[2] [4] [8]。

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \quad (\text{式 } 2)$$

式中  $f_{cc}$  -抗压强度, MPa;  $F$ -破坏荷载, N;  $A$ -受压面积, mm。

### 2.2.4. 孔隙率测试

总孔隙率按照下式计算[2] [4] [8]。

$$P = \left(1 - \frac{m_2 - m_1}{V}\right) \times 100\% \quad (\text{式 } 3)$$

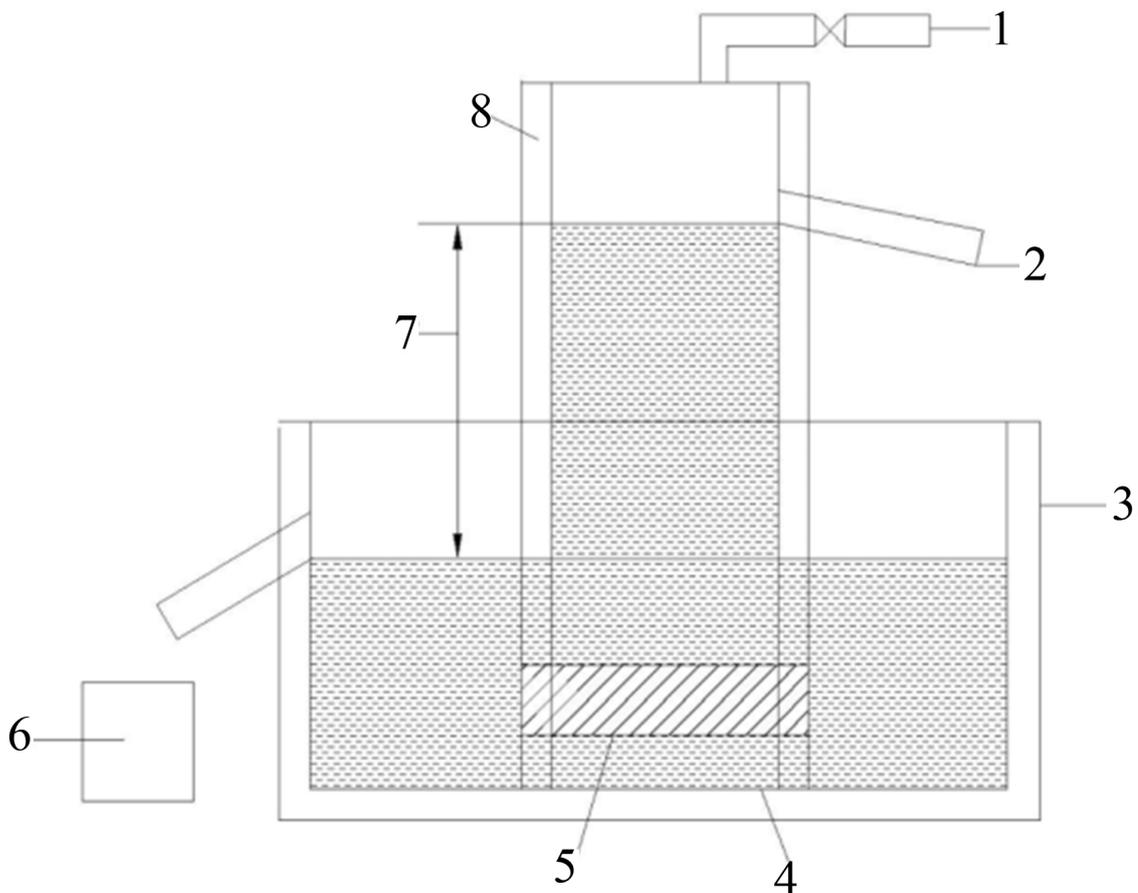
式中  $P$ -孔隙率, %;  $m_1$ -水中试件质量, g;  $m_2$ -试件经过烘干后质量, g;  $V$ -试件体积,  $\text{cm}^3$ 。

### 2.2.5. 透水系数测试

采用固定水头法, 根据实验室透水系数测定装置(图 1), 由下式计算透水系数[2]。

$$K_T = \frac{Q_1 \times L}{A \times H \times t} \quad (\text{式 } 4)$$

式中  $K_T$ -水温  $T^\circ\text{C}$  时的透水系数; 在  $Q_1-t$  时间段内, 通过透水混凝土试件的水量可以通过测量来获得, 而其厚度可以通过测量来获得, 横截面积可以通过测量来获得, 而水头差可以通过测量来获得。



(1-供水网络; 2-溢流管道; 3-溢流水槽(加装排水口); 4-支架; 5-透水混凝土构件; 6-计量器; 7-水位高度差; 8-透水圆套装置)

**Figure 1.** Schematic diagram of fixed head method test device

**图 1.** 固定头法试验装置示意图

## 3. 试验结果分析

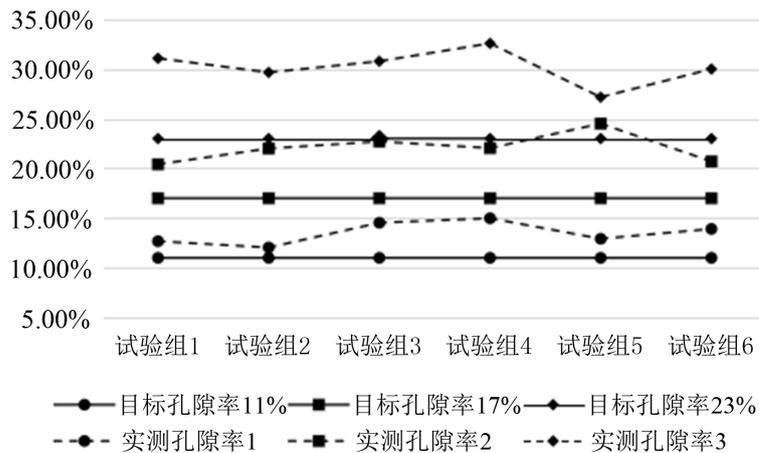
### 3.1. 火山石透水混凝土试验正交结果

18 组混凝土试件的主要试验结构如表 8 所示。

**Table 8.** Table of orthogonal results of pervious concrete test  
**表 8.** 透水混凝土试验正交结果表

试验序号	指标	抗压强度(MP)	实测孔隙率(%)	透水系数(mm/s)
试验 1		25.00	12.67	3.47
试验 2		24.45	12.04	3.14
试验 3		16.52	14.53	6.57
试验 4		15.30	20.41	10.31
试验 5		11.54	22.00	12.12
试验 6		9.29	22.70	10.99
试验 7		7.05	31.07	22.51
试验 8		8.62	29.65	21.98
试验 9		9.90	30.77	18.87
试验 10		16.54	14.98	5.67
试验 11		22.70	12.92	3.91
试验 12		17.86	13.91	4.10
试验 13		12.78	22.04	13.53
试验 14		12.39	24.5	16.45
试验 15		14.04	20.7	11.72
试验 16		6.86	32.57	25.44
试验 17		10.88	27.16	17.14
试验 18		11.01	29.99	19.83

### 3.2. 透水混凝土正交试验的孔隙率分析



**Figure 2.** Porosity analysis diagram

**图 2.** 孔隙率分析图

如图 2 所示，用柱状图将三种目标孔隙率和实测得到的有效孔隙率结果进行统计对比，发现目标孔隙率越大，所测的有效孔隙率与目标孔隙率的偏差就越大，同时所有试验组测得的孔隙率均大于目标孔

隙率,说明存在某种系统误差致使该偏差存在,但整体来说实测孔隙率波动性较小,并且由于火山石多孔的特殊性,所产生的偏差在一定程度上是在可允许范围内的,实际测量孔隙体积率与试验对象孔隙体积率也大致相等,因此对本研究采用目标孔隙率进行配合比设计的方法是可行的。

### 3.3. 透水混凝土正交试验参数分析

尽管有效孔隙率可作为一个参照,但无法作为透水混凝土的最佳性能的唯一衡量标准,因此,为确保正交试验结果的准确性及可操作性,试验中仅将抗压强度与透水系数作为两个重要参数指标[3] [5] [6] [8]。

根据图3能够看出,由于目标孔隙率的不断提高,其对应的抗压强度会显著下降,相应的透水系数也会相应提高,在两条曲线的交叉处,可以确定出一个最佳的参考值,即在抗压强度与透水系数的中间位置,也就是目标孔隙率为17% [5]。

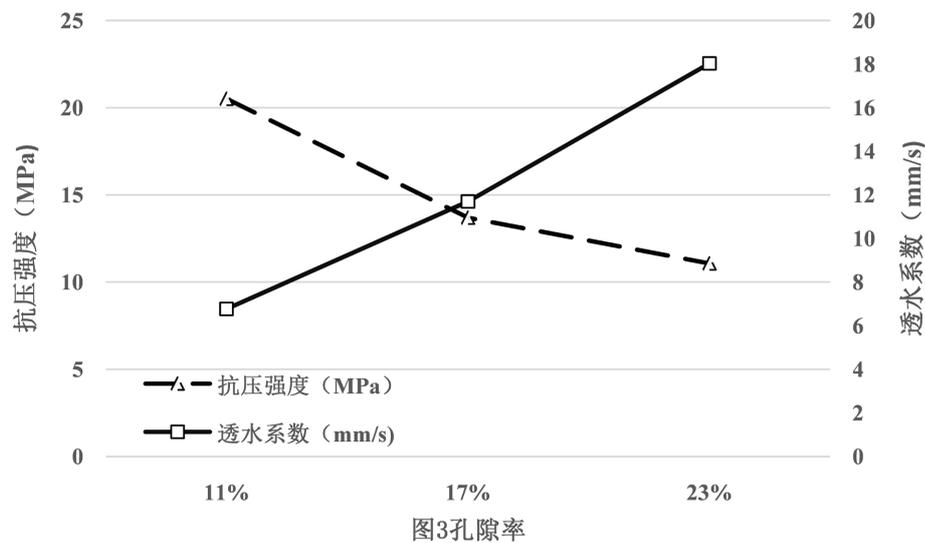


Figure 3. Relation of pore volume ratio with pressure resistance index value and permeability parameter  
图3. 孔隙率与抗压力指标值和透水参数关系

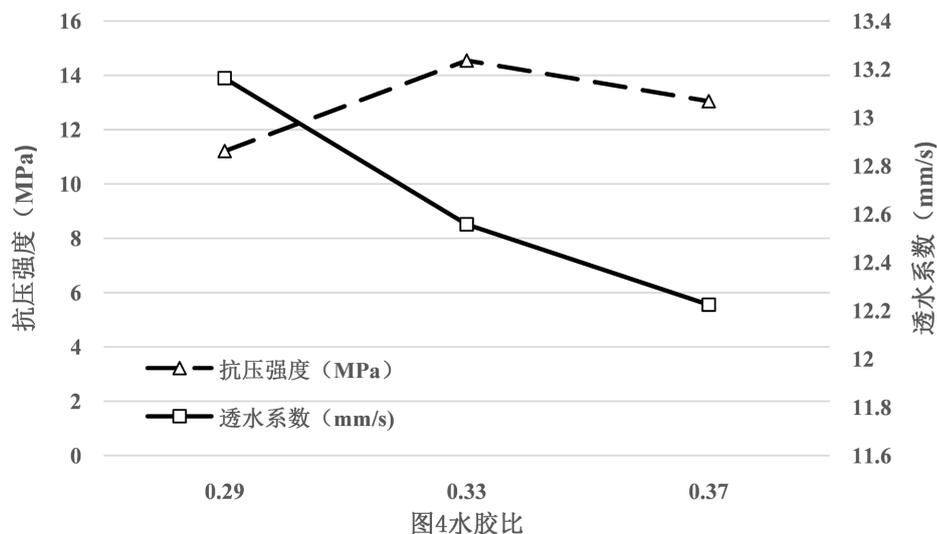


Figure 4. Relation between water cement ratio and pressure resistance index value and water permeability parameter  
图4. 水灰比与抗压力指标值和透水参数关系

在图 4 中能够得到, 随着水胶比的升高, 两项性能参量的差异会逐渐加剧, 其中, 抗压强度会呈现出明显的增加态势, 而透水关系则会出现下降的态势。在这种情况下, 将水胶比设置在 0.30 左右, 可以获得更好的性能。

在图 5 中可以得出, 随着从 A 到 C 的改变, 抗压强度会显著降低, 而透水系数则会显著提升, 在这两条曲线的交叉处, 我们可以确定 B 的最佳参考标准, 以获得更高的性能。

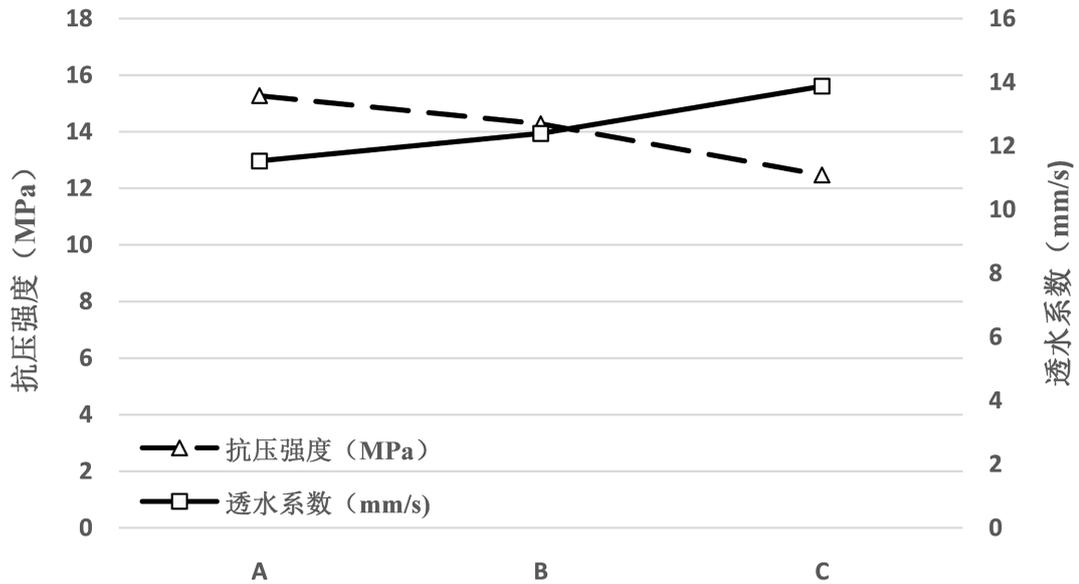


图5骨料

Figure 5. Relation between aggregate type and pressure resistance index value and pervious parameter  
图 5. 骨料类别与抗压力指标值和透水参数关系

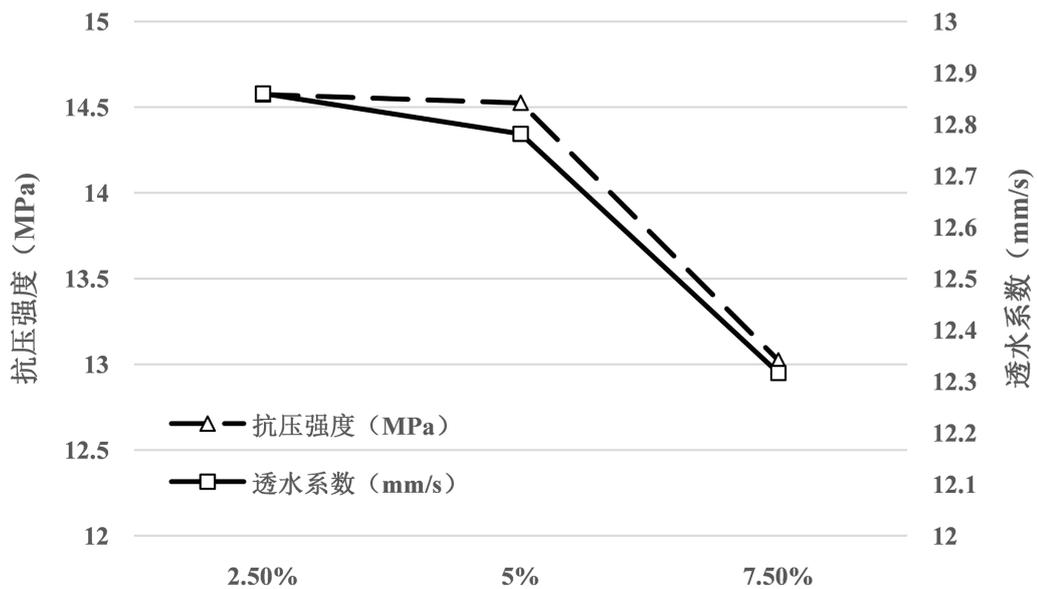
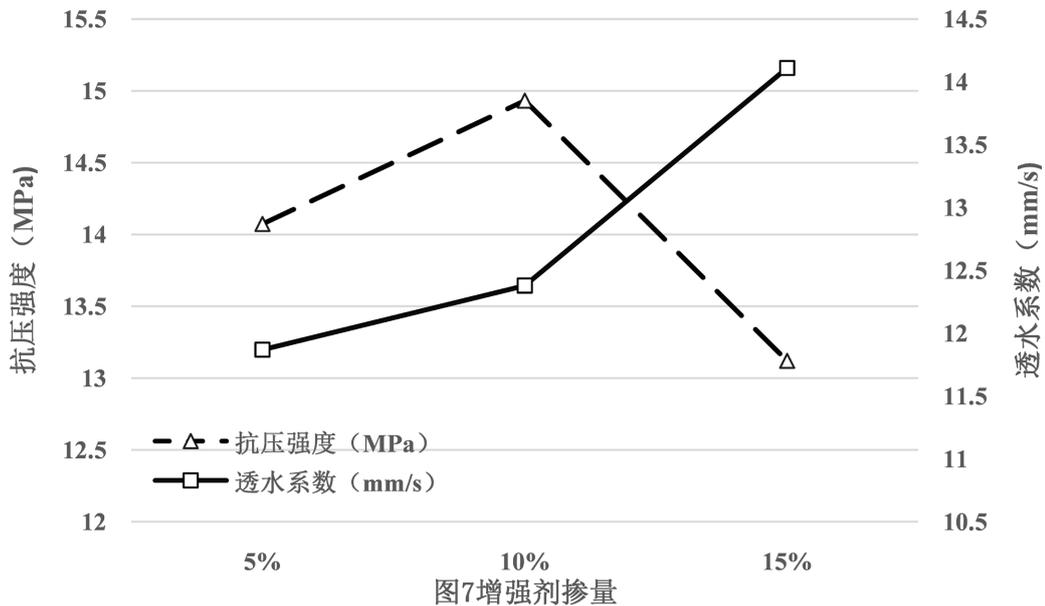


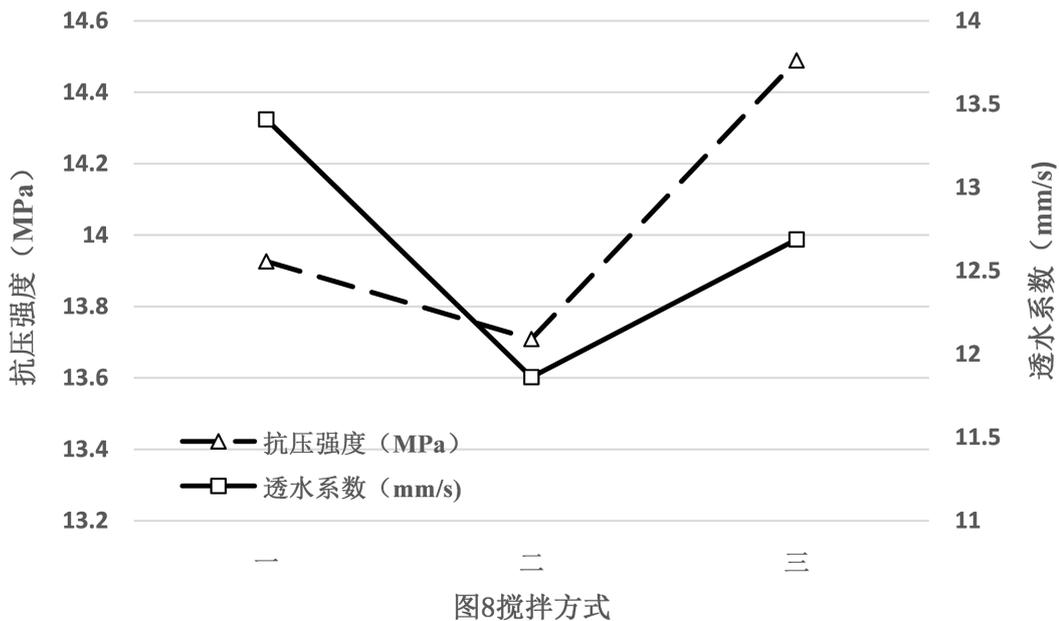
图6硅灰掺量

Figure 6. Relation between silica fume ratio and pressure resistance index value and water permeability parameter  
图 6. 硅灰比例与抗压力指标值和透水参数关系

可以从图 6 中发现, 抗压力指标值和透水参数通常会随着硅灰比例的降低而降低, 而在硅灰掺量为 2.5% 到 5% 之间时, 抗压力指标值和透水参数基本保持不变, 最佳硅灰掺量可选取在 5% 附近。



**Figure 7.** The relationship between reinforcement content and compressive strength and permeability coefficient  
**图 7.** 增强剂掺量与抗压强度和透水系数关系



**Figure 8.** Relationship between stirring mode and compressive strength and permeability coefficient  
**图 8.** 搅拌方式与抗压强度和透水系数关系

从图 7 中看出, 增强剂取值在 10% 时抗压强度最高, 而透水系数最高在 15% 时取得最大值。可以看出增强剂当处于 10% 到 15% 之间时候, 抗压强度和透水系数都能够取得较大值。

从图 8 中看出, 在搅拌方式从 1 到 3 的过程当中, 抗压力指标值和透水参数变化特征是先降低再上

升的态势；在搅拌方式 1 时透水系数达到三者当中的最大值，而搅拌方式 3 达到了抗压强度的三者中最大值。

#### 4. 结论

“海绵城市”是现代城市建设的趋势方向。在海绵城市的发展当中，透水混凝土起到了关键效应。因此为了充分利用云南本地火山石建材，开拓当地火山石建材市场，推动“海绵城市”的建设和发展，本试验参考国际有关的透水混凝土探究经验，并结合云南当地火山石特点开展研究。研究发现该火山石透水混凝土透水系数随孔隙率增大而增大，随水胶比增大而减小，随骨料粒径的增大而增大，随增强剂增加而增加；抗压强度随孔隙率增加而减小，随水胶比增大而先增加后减小，随骨料粒径增大而减小，随增强剂掺量增加而先增大后减小；同时两者随着硅灰掺量的增加都是先缓慢减小后急剧减小；通过搅拌方式二，透水系数和抗压强度取得最小值，通过搅拌方式一，透水系数取得最大值，通过搅拌方式三，抗压强度取得最大值。综合分析，当取孔隙率为 17%，水胶比 0.30，骨料粒径为 5 mm~8 mm，硅灰掺量 5% 左右，增强剂掺量为 10% 到 15% 之间，搅拌方式为水泥裹石法时能够得到抗压强度和透水性都较好的轻骨料火山石透水混凝土。该研究结果能够为云南火山石透水混凝土的实际应用提供科学依据和技术支撑。

#### 基金项目

云南大学大学生创新创业训练国家级项目(202210673082)；云南大学教育教学改革研究项目(2021Y37)。

#### 参考文献

- [1] 刘相如. 透水砼透水系数及其力学与抗冻性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 烟台: 烟台大学, 2019.
- [2] 孙宏友. 基于正交试验法的透水混凝土配合比设计和试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [3] 曾晖, 陈志成, 贺奇峰, 姚帆. 透水混凝土配合比设计及其优化方法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 144-147.
- [4] 杨洋. 路面透水混凝土配合比设计研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [5] 程娟, 杨杨, 陈卫忠. 透水混凝土配合比设计的研究[J]. 混凝土, 2006(10): 81-84.
- [6] 刘贞鹏, 王晶. 透水混凝土配合比设计及力学性能试验研究[J]. 地产, 2019(12): 123.
- [7] 巫广义, 徐锋, 王曙光, 李威威. 基于正交试验法的透水混凝土性能影响研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(9): 38-41+51.
- [8] 张灿文. 透水混凝土配合比设计参数对其性能影响研究[J]. 价值工程, 2022, 41(32): 160-162.