

DOI: 10.7672/sgjs2026040014

# 聚乙烯醇和玄武岩混掺纤维增强再生骨料 透水混凝土性能研究\*

杜腾飞<sup>1</sup>, 折帅<sup>1</sup>, 王吉鹏<sup>1</sup>, 寇威<sup>1</sup>, 陈潇龙<sup>1</sup>, 张轩宁<sup>2</sup>

(1. 中铁七局集团西安铁路工程有限公司, 陕西 西安 710032;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 针对再生骨料透水混凝土强度不足的问题,通过混掺聚乙烯醇纤维(PVA)和玄武岩纤维(BF)进行性能优化。采用不同掺量的双纤维混掺方案,结合XRD和SEM微观分析及物理力学性能测试,系统探究纤维对再生骨料透水混凝土的增强机理与综合性能影响。结果表明:纤维混掺可消耗水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,优化微观结构密实度,抗压强度提升幅度显著高于抗折强度;透水系数与孔隙率随纤维掺量增加呈规律性递减,但仍满足透水材料的基本要求。通过灰色关联理论与熵权法综合评价发现,当PVA和BF各掺入0.1%时,再生骨料透水混凝土的综合性能最优,此时28d抗压强度达24.5MPa,透水系数维持2.1mm/s,可实现力学性能与透水功能的协同提升。

[关键词] 混凝土;再生骨料;混掺纤维;XRD分析;SEM电镜;灰色关联理论

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0014-06

## Performance Study of Pervious Recycled Aggregate Concrete Reinforced with Hybrid Polyvinyl Alcohol and Basalt Fibers

DU Tengfei<sup>1</sup>, SHE Shuai<sup>1</sup>, WANG Jipeng<sup>1</sup>, KOU Wei<sup>1</sup>, CHEN Xiaolong<sup>1</sup>,  
ZHANG Xuanning<sup>2</sup>

(1. China Railway Seventh Bureau Group Xi'an Railway Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an,  
Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** This paper addresses the issue of insufficient strength in pervious concrete made with recycled aggregate by optimizing its performance through the combined incorporation of polyvinyl alcohol (PVA) fibers and basalt fibers. A dual-fiber mixing scheme with varying dosages was adopted, and the enhancement mechanism and comprehensive performance effects were systematically investigated using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and physical-mechanical property tests. The results indicate that fiber incorporation consumes cement hydration products, particularly  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , and improves the compactness of the microstructure. The increase in compressive strength was significantly higher than that of flexural strength. The permeability coefficient and porosity exhibited a regular decreasing trend with increasing fiber content, while still meeting the basic requirements of pervious materials. A comprehensive evaluation based on grey correlation theory and the entropy weight method revealed that the optimal performance was achieved when both PVA and basalt fibers were incorporated at 0.1%, yielding an evaluation index of 93.9%. At this dosage, the 28-day compressive strength reached 24.5MPa, and the permeability coefficient remained at 2.1mm/s, achieving a synergistic enhancement of mechanical properties and permeability performance.

**Keywords:** concrete; recycled aggregate; hybrid fiber incorporation; XRD analysis; SEM microscopy; grey correlation theory

\* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 杜腾飞,高级工程师,E-mail:570287999@qq.com

[收稿日期] 2025-09-05

## 0 引言

近年来,随着我国城镇化、工业化进程的不断深化,各类建筑、基础设施建设项目激增,在新建、改建、拆除等过程中产生了大量的建筑垃圾。我国当前对各类建筑垃圾的利用率低于 10%,造成资源大量浪费,阻碍了建筑行业的可持续发展。目前,建筑垃圾的资源化利用主要包括制备再生混凝土、再生路面砖等建筑材料并将其应用于路基工程<sup>[1]</sup>。由于吸热快、热容量较低,传统密实混凝土路面易加剧城市“热岛效应”,从而降低居民的居住体验。相比之下,透水混凝土路面因其较高的孔隙率,能够促进雨水回渗至土壤,同时增强地面透气性,并具备降噪、缓解城市内涝、改善地下水循环等多重优势。透水混凝土由粗骨料、水、胶凝材料及特定掺合料按比例混合制备,其孔隙结构包括大量连通孔隙及半连通孔隙。当透水混凝土的骨料部分或全部由再生骨料替代时,则被称为再生骨料透水混凝土(recycled aggregate permeable concrete, RAPC)。

对于纤维透水混凝土,Zhu 等<sup>[2]</sup>研究了纤维类型和纤维含量对渗透系数和孔隙率的影响,结果表明,渗透系数与曲率和孔隙率有关,但是当孔隙率相同时,渗透系数可能会不同。Wu 等<sup>[3]</sup>将纤维与透水混凝土混合,发现纤维透水混凝土的立方抗压强度、轴向抗压强度和抗弯强度先增大后减小,而透水混凝土的渗透率和孔隙率随着玄武岩纤维含量的增加而减小。赵剑锋等<sup>[4]</sup>发现当掺入长 6mm 的聚乙烯醇纤维时,透水混凝土的抗压强度和抗折强度均得到提高。陈守开等<sup>[5]</sup>设计并制备了不同纤维增强透水混凝土并对其抗压强度等关键性能指标进行了测试。结果表明,纤维的掺入显著提升了再生骨料透水混凝土的抗压强度。目前纤维对透水混凝土影响的研究较为单一,往往只研究了单一纤维对透水混凝土的性能影响,多种纤维混掺对透水混凝土的改性尚不明确。基于此,本文选用废弃混凝土块作为再生骨料来源,制备了 RAPC 并在其基础上掺入聚乙烯醇纤维(PVA)与玄武岩纤维(BF),通过试验分析不同纤维掺量对 RAPC 性能的改性作用。

## 1 原材料

### 1.1 粗骨料

本试验采用连续级配,以废弃混凝土为原料制备再生粗骨料(RA)。骨料制备过程中,通过人工破碎与颞式破碎机相结合的方式进行处理,再经人工分选和机械筛分,最终获取 5~10mm 粒径范围的再生粗骨料。试验选取 4.75~13.2mm 连续级配

骨料,采用 4.75,9.5,13.2mm 标准方孔筛进行三级筛分,粒径 4.75~9.5mm 和 9.5~13.2mm 再生骨料的配合比为 4:1,再生骨料表观密度为 2 645.15kg/m<sup>3</sup>,紧密堆积密度为 1 392.6kg/m<sup>3</sup>,含水率为 3.13%,5min 吸水率和 24h 吸水率分别为 5.21% 和 7.06%,压碎值为 13%,针片状含量为 9%。试验设置基准组,采用 100%再生骨料制备透水混凝土试件,且不掺加纤维增强材料。

### 1.2 水泥

为了保证再生透水混凝土的力学性能,水泥选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。

### 1.3 纤维

聚乙烯醇纤维及玄武岩纤维可以改善混凝土的力学性能和物理性能,其材料特性如表 1 所示。

表 1 纤维物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of fiber

纤维类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	单丝直径/ μm	长度/ mm	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ MPa	断裂延伸率/%
BF	2 620	15	6	2 500	80 000	3
PVA	1 180	13	6	640	16 000	16

## 2 试验设计

为研究 2 种纤维对 RAPC 的影响,设置不掺纤维的基准组和不同掺量玄武岩纤维和聚乙烯醇纤维试验组,水胶比为 0.35;为提高再生骨料的利用率,粗骨料采用 100%再生骨料;透水混凝土配合比参照 CJJ/T 253—2016《再生骨料透水混凝土应用技术规程》设计,纤维以体积百分比掺入再生透水混凝土<sup>[4]</sup>,并将骨料的 5min 吸水率与其含水率差值作为附加用水量<sup>[6]</sup>,配合比以 1m<sup>3</sup>混凝土用量计,具体材料配合比如下:胶凝材料总用量为 393.25kg,其中水泥为 346.06kg,粉煤灰为 47.19kg;粗骨料用量为 1 364.75kg;总用水量为 166.06kg,包括拌合水 137.64kg 和附加用水 28.42kg;减水剂掺量为 1.08kg,最终水胶比为 0.35。

### 2.1 混掺纤维比例

为研究混掺纤维交互作用对 RAPC 的影响,设计 3 种掺入比例、9 个掺量水平,探讨混掺纤维 RAPC 基本性能的变化,如表 2 所示(其中 a 为 1m<sup>3</sup>混凝土中纤维的掺加质量;b 为 1m<sup>3</sup>混凝土中纤维的体积掺量百分比)。

### 2.2 测试方法

依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》,对再生透水混凝土试块的立方体抗压强度及抗折强度进行测试。同时,依据《再生

表 2 掺量水平

Table 2 Dosage level

掺入比例	掺量 编号	PVA 纤维		BF 纤维	
		a/kg	b/%	a/kg	b/%
PVA : BF = 2 : 1	A1	1.18	0.10	1.31	0.05
	A2	2.36	0.20	2.62	0.10
	A3	3.54	0.30	3.93	0.15
PVA : BF = 1 : 1	B1	0.59	0.05	1.31	0.05
	B2	1.18	0.10	2.62	0.10
	B3	1.77	0.15	3.93	0.15
PVA : BF = 1 : 2	C1	0.59	0.05	2.62	0.10
	C2	1.18	0.10	5.24	0.20
	C3	1.77	0.15	7.86	0.30

骨料透水混凝土应用技术规程》和 JC/T 2558—2020《透水混凝土》，测定试块的孔隙率和透水系数。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 纤维透水混凝土微观性能

##### 3.1.1 XRD 分析

为研究掺入混合纤维后对于 RAPC 中成分的变化,采用 XRD 法<sup>[7]</sup>分别检测了混掺纤维和未掺纤维的 RAPC 碎片的物相组成,测试结果如图 1 所示。在掺入纤维之后,CH 衍射峰消失,而  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  的衍射峰明显增多且变高。这是因为一部分 CH 与掺入的纤维发生火山灰反应生成更多 C-S-H 凝胶增加砂浆密实度,提高了 RAPC 的强度;同时另一部分 CH 也与  $\text{CO}_2$  发生碳化反应生成  $\text{CaCO}_3$ ,已将 CH 全部消耗完。

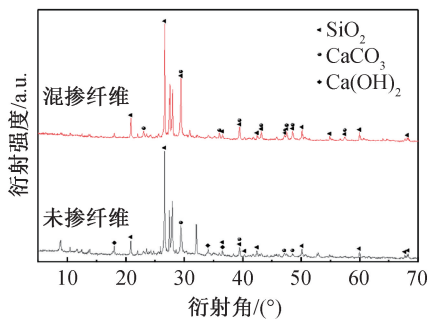


图 1 掺加纤维和未掺纤维的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of fiber-added and fiber-free samples

##### 3.1.2 SEM 电镜分析

SEM 扫描电镜试验是观察混凝土中水化产物的微观形态、结构均匀性、微观结构缺陷的常规手段<sup>[8]</sup>,分别选取未掺纤维和掺加纤维的混凝土试块,在养护 28d 后,将其破碎后取样并干燥处理,进行扫描电镜试验,在放大 5 000 倍下未掺纤维的 RAPC 电镜图如图 2 所示。

由图 2 可知,在未掺纤维时透水混凝土内部结构存在大量孔洞,结构并不紧密,并且在孔洞附近还产生了大量较长的针状钙矾石晶体,这些侵蚀产

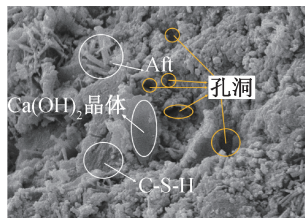


图 2 未掺纤维透水混凝土 SEM 图

Fig. 2 SEM image of fiber-free pervious concrete

物大多具有膨胀性,随着侵蚀产物的增多,导致孔洞扩大甚至产生裂缝,对透水混凝土的力学和耐久性均有不利影响。此外,观察发现存在大量结晶良好的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体本身强度较低,会削弱混凝土的整体力学性能。

混掺纤维的 RAPC 的微观结构如图 3 所示,加入纤维后的 RAPC 孔洞明显变小且孔洞数量也减少,混凝土内部结构完整、密实,PVA 纤维和 BF 纤维与水泥基体结合良好,这是由于掺入纤维后其孔洞周围基体的水化反应较为充分。虽然结构内部仍存在微小裂缝和些许未水化颗粒,但由于密实的水泥水化产物将未水化颗粒紧紧包围,结构密实度显著提升,结构整体的宏观强度得以提高。纤维掺入有效增强了新旧砂浆界面过渡区的黏结性能,界面区微裂纹缺陷显著减少,且大量相互重叠的水化产物 C-S-H 构成致密结构体系,有效提升了混凝土的整体强度。

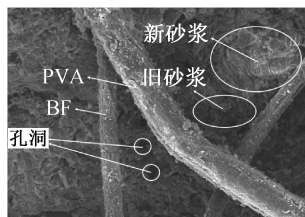


图 3 混掺纤维透水混凝土 SEM 图

Fig. 3 SEM image of fiber-reinforced pervious concrete

混合掺入 PVA 和 BF,不仅显著提升了 RAPC 的密实性,还促进了水泥水化过程中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  晶体的充分反应,生成了致密的 C-S-H 凝胶。这些凝胶发育良好且结构紧密,是 RAPC 强度提高、内部结构密实度提升和孔隙率下降的主要原因。

#### 3.2 纤维透水混凝土力学性能

制备了 2 种尺寸的试块:  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$  和  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ ,分别用于测试透水混凝土的抗压强度和抗折强度。试块虽非标准尺寸,但通过试验研究已确定其与标准尺寸试块强度的换算关系,可将试验结果换算成标准试件的强度值,保证试验结果在工程质量评定中的有效性和

准确性。此外,在满足试验精度要求前提下,较小尺寸试块可减少混凝土用量,降低制作、养护、运输及后期处置成本,同时减少资源消耗和废弃物排放,符合绿色环保和成本控制理念。

### 3.2.1 立方体抗压强度

未掺纤维和掺纤维的 RAPC 立方体试块的破坏形态如图 4 所示。未掺纤维的 RAPC 试块在达到最大承载力后已完全破坏,部分骨料呈片状脱落,破碎显著。掺纤维的 RAPC 试块虽然表面产生了贯通裂缝,但仍能保持立方体形态,试件完整性良好。



图 4 RAPC 立方体抗压破坏形态

Fig. 4 Compressive failure pattern of RAPC cube

不同掺量比例下 RAPC 试块的抗压强度变化如图 5 所示。与不掺纤维的基准组相比,采用 VA : BF = 2 : 1 和 PVA : BF = 1 : 1 配合比的 RAPC 试块的抗压强度均显著提高。2 种比例下,抗压强度均随纤维掺量的增加先升高后降低。其中,PVA : BF = 2 : 1 组在掺入 0.2% PVA + 0.1% BF 时取得该比例下的峰值,达 17.95 MPa,相比基准组提高了约 31.6%;而在 PVA : BF = 1 : 1 组在掺入 0.1% (PVA + BF) 时获得该比例下的峰值,达 19.15 MPa,约为基准组的 1.4 倍,为所有试块的最高值,表明该配合比对 RAPC 抗压强度提升效果最显著。

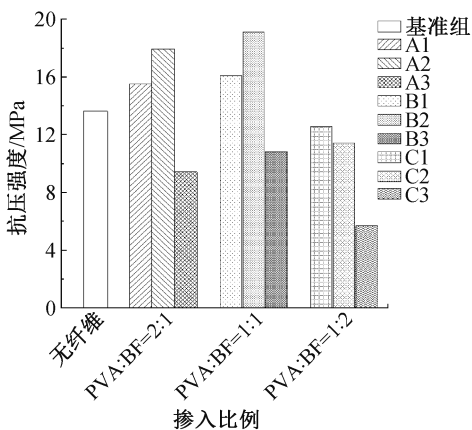


图 5 不同掺量下 RAPC 试件的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of RAPC specimens at different dosages

### 3.2.2 抗折强度

RAPC 试件在抗折试验破坏时的形态如图 6 所

示。未掺纤维的 RAPC 试件中部产生竖向断裂,掺纤维的 RAPC 试件在抗折破坏时,局部也出现裂缝,但未贯通整个截面且未断裂,RAPC 试件完整性良好。

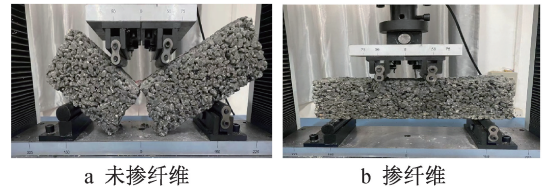


图 6 RAPC 棱柱抗折破坏形态

Fig. 6 Bending failure pattern of RAPC prism

RAPC 试件的抗折强度随掺量比例的变化如图 7 所示。在掺入 0.1% (PVA + BF) 时获得最大 RAPC 抗折强度,对比基准组约提高了 24.1%,由于 RAPC 在掺入 0.05% (PVA + BF) 时得到的抗折强度仅比最大抗压强度降低 0.02 MPa,考虑到其经济性,RAPC 抗折强度在掺入 0.05% (PVA + BF) 时较优。

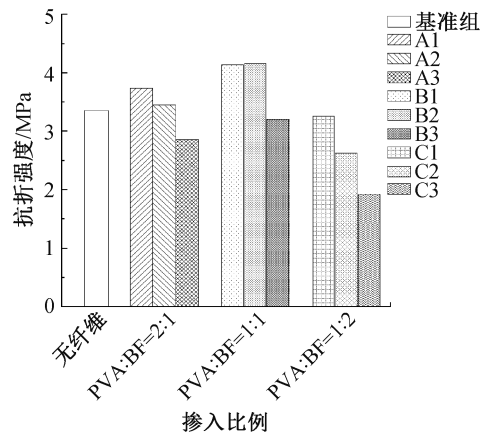


图 7 不同掺量下 RAPC 试件的抗折强度

Fig. 7 Flexural strength of RAPC specimens at different dosages

## 3.3 纤维透水混凝土透水性及孔隙率

### 3.3.1 透水性

通过检测立方体试块的透水性获得再生透水混凝土的透水系数,测试透水混凝土的简易装置如图 8 所示。

在测试时先将试件装在棱柱管内并置于底座上,用橡皮泥从上方将试件的四周密封,保证水流只能从试件的内部流过,计算得出的透水系数如图 9 所示。

在混合掺入纤维后,RAPC 的透水系数均出现了降低的情况,在 PVA : BF = 2 : 1 和 PVA : BF = 1 : 1 掺量下,RAPC 的透水性表现出相似的变化规律,都随着掺量的提高先迅速减小,再缓慢减小。对于 PVA : BF = 1 : 1 下的 RAPC 透水性,其透水系

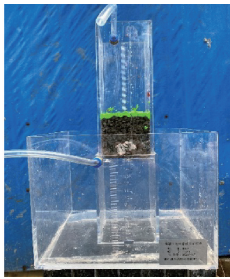


图 8 RAPC 试件透水系数测试装置

Fig. 8 Permeability coefficient testing device for RAPC specimens

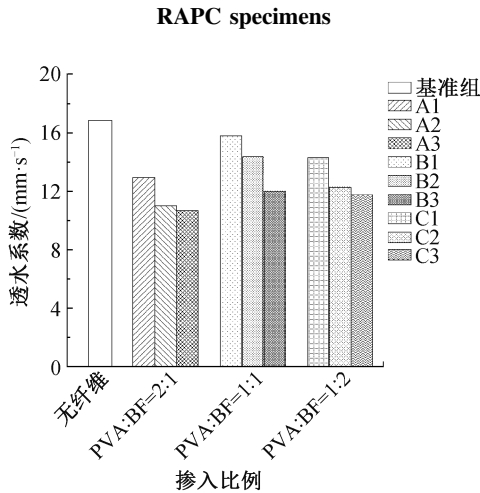


图 9 各混掺纤维比例下透水系数变化

Fig. 9 Variation of permeability coefficient at different fiber mixing ratios

数分别降低了 9.2% 和 12.4%，在该掺量比例下提升掺量对于减弱 RAPC 透水性能仍有较为不利的影响。可以看出混掺纤维后的 RAPC 透水系数在 10.86~15.84mm/s，满足《再生骨料透水混凝土应用技术规程》中的要求。

### 3.3.2 孔隙率

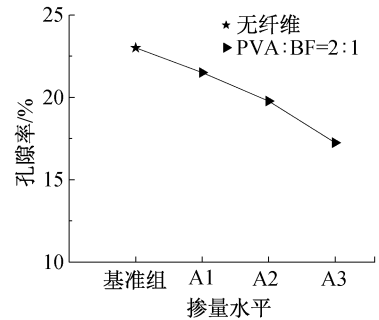
将 RAPC 试样在水中浸泡 24h 后，然后取出试样放置在空气中自然干燥，直至表面干燥，可以通过试样干燥前后的差异率获得 RAPC 的孔隙率。3 个掺量比例下 RAPC 孔隙率的变化如图 10 所示。

在 PVA : BF = 2 : 1 下，随着掺量的提高，RAPC 孔隙率逐渐降低，较基准组分别降低 6.5%，14.0%，25%。在 PVA : BF = 1 : 1 和 PVA : BF = 1 : 2 下均体现出不规则的下降。对于混掺纤维 RAPC 孔隙率，均满足《再生骨料透水混凝土应用技术规程》的要求。

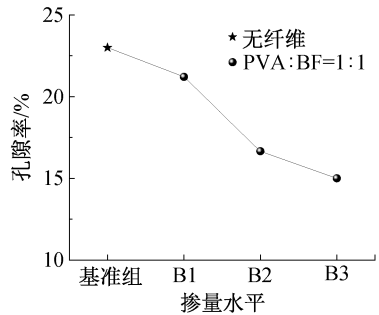
### 3.3.3 透水系数与孔隙率的关系

孔隙率是影响 RAPC 透水性的因素，透水系数和孔隙率之间的曲线关系如图 11 所示。

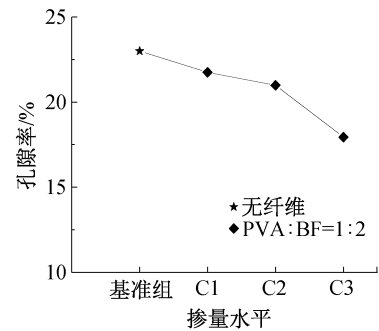
Wu 等<sup>[3]</sup>研究了掺入玄武岩纤维后 RAPC 透水



a PVA:BF=2:1



b PVA:BF=1:1



c PVA:BF=1:2

图 10 各掺量比例下 RAPC 孔隙率变化

Fig. 10 Variation of porosity in RAPC at different dosage ratios

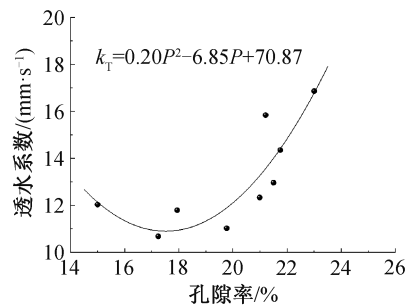


图 11 RAPC 孔隙率与透水系数的关系

Fig. 11 Relationship between porosity and permeability coefficient of RAPC

系数  $k_T$  与孔隙率  $P$  的关系为  $k_T = 0.39P - 2.04$ ，发现了 RAPC 的透水性与孔隙率呈正相关，由图 11 可知，透水系数与孔隙率之间呈现出二次函数的曲线关系，这是由于上述研究均为单掺纤维后 RAPC 透水系数与孔隙率之间的关系，采用混掺纤维表现出

了新的变化规律。RAPC 的透水系数于孔隙率 17.5%附近达到最低点,之后透水系数随孔隙率的增大而增大,且变化速率越来越大,说明当 RAPC 孔隙率达到 17.5%后,再增大孔隙率会极大增加 RAPC 的透水性能。

### 3.4 纤维透水混凝土综合评价分析

分析了 2 种纤维混合掺入 RAPC 后其基本性能的变化,由于在掺入纤维时采用了多组不同掺量比例,对 RAPC 的影响较复杂,因此基于灰色系统分析理论<sup>[9]</sup>,并结合熵权法研究混掺纤维 RAPC 的最优掺入比例及其最佳掺量水平<sup>[10]</sup>。

#### 3.4.1 灰色关联理论

在进行灰色关联分析时,首先应根据原始数据确定最优指标集,而 RAPC 的重要性主要是由强度和透水能力决定,因此选取 RAPC 的抗压强度、抗折强度、透水系数、孔隙率作为评价指标。根据本次试验结果,确定最优指标集  $U^*$ ,即抗压强度和抗折强度,取试验结果的最大值,考虑到抗压强度与抗折强度、强度与透水性之间的平衡关系,透水系数和孔隙率指标取试验结果的平均值,即抗压强度为 19.51MPa,抗折强度为 4.17MPa,透水系数为 12.82mm/s,孔隙率为 19.12%。

#### 3.4.2 熵权法客观赋权

为研究各评价因素对于混掺纤维 RAPC 的性能影响,基于试验结果,有 9 组样品,每组样品有 4 个评价指标,因此组成的评价单元序列  $\{X_{ij}\} (i=1, 2, \dots, 9; j=1, 2, 3, 4)$ 。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (1)$$

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \quad (2)$$

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \quad (3)$$

$$w_j = \frac{1 - E_j}{4 - \sum_{j=1}^m E_j} \quad (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

计算得知,混掺纤维 RAPC 各评价指标的权重为:抗压强度 25.5MPa,抗折强度 25.8MPa,透水系数 23.4mm/s,孔隙率 25.3%。

通过灰色关联分析得到综合评价结果:当掺量为 B2 时,即 0.1% (PVA : BF = 1 : 1) 时,综合评价指标最高,为 93.9%,此时 RAPC 的综合性能最佳;在 PVA 纤维和 BF 纤维 1 : 1 掺入时,其综合评价指标

平均值最高,为 85.6%,PVA : BF = 2 : 1 时次之,为 83.5%,在 PVA : BF = 1 : 2 时效果最差,仅为 72.9%。

## 4 结语

1) 基于 XRD 分析和 SEM 电镜试验,掺入纤维后对于 RAPC 微观性能改性有较为明显的影响。掺入纤维后 RAPC 中的  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  增加,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的含量减少,且 RAPC 内部结构较为完整,各水化产物结合较为紧密,RAPC 整体结构密实。

2) 掺入纤维可以在一定程度上提高 RAPC 的抗压强度和抗折强度,且对抗压强度的改性效果优于抗折强度。对不同比例下混掺纤维改性效果而言,RAPC 的抗压强度和抗折强度均在 0.1% (PVA : BF = 1 : 1) 掺入比例下达到最大值。此外,掺入纤维对 RAPC 的透水系数和孔隙率也有不同程度的影响,但相对较小,研究发现在 PVA 纤维和 BF 纤维混合掺入下,RAPC 的透水系数和孔隙率之间表现为二次函数的曲线关系,透水系数随孔隙率的增大先减小后增大。

3) 通过灰色关联理论并结合熵权法客观赋权对混掺纤维改性 RAPC 的基本性能进行了综合评价,结果表明,当掺入比例为 0.1% (PVA : BF = 1 : 1) 时,综合评价指标最高,为 93.9%;在 PVA 纤维和 BF 纤维 1 : 1 掺入时,其综合评价指标平均值最高,为 85.6%。

### 参考文献:

- [1] 张军辉,丁乐,张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报,2021,34(10):135-154.  
ZHANG J H, DING L, ZHANG A S. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering: a review [J]. China journal of highway and transport,2021,34(10):135-154.
- [2] ZHU H T, WEN C C, WANG Z Q, et al. Study on the permeability of recycled aggregate pervious concrete with fibers [J]. Materials,2020,13(2):321-339.
- [3] WU J, PANG Q, LÜ Y Y, et al. Research on the mechanical and physical properties of basalt fiber-reinforced pervious concrete [J]. Materials,2022,15(19):65-82.
- [4] 赵剑锋,杨晓杰,李好新,等. 短切纤维对透水混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报,2019,22(2):266-271.  
ZHAO J F, YANG X J, LI H X, et al. Effect of chopped fibers on the performance of pervious concrete [J]. Journal of building materials,2019,22(2):266-271.
- [5] 陈守开,卢鹏,李炳林,等. 不同纤维对再生骨料透水混凝土性能的影响与评价[J]. 应用基础与工程科学学报,2022,30(1):208-218.  
CHEN S K, LU P, LI B L, et al. Influence and evaluation analysis of different fibers on the performance of recycled aggregate pervious concrete [J]. Journal of basic science and engineering, 2022,30(1):208-218.

$1.32 \times 10^{-5}$ ,  $1.62 \times 10^{-5}$ ; 设置3种钢支撑长度: 23, 43, 63m, 并根据钢支撑长度改变基坑宽度。

### 3 温度效应下支护结构力学响应分析

#### 3.1 温度对地下连续墙变形的影响

结合式(1), 在基坑开挖过程中, 环境温度为  $22^\circ\text{C}$ , 当环境温度升高至  $32^\circ\text{C}$  时, 基坑地下连续墙在  $y$  方向的水平位移分布如图2所示。

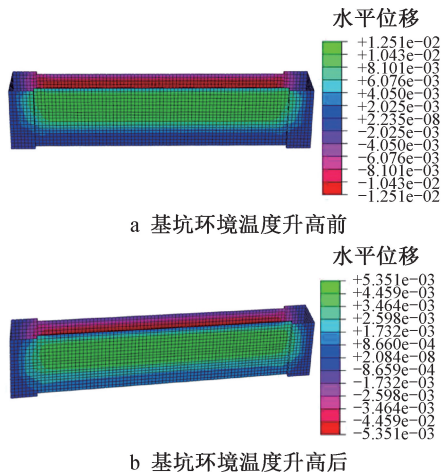


图2 不同环境温度下地下连续墙的水平位移(单位:m)

Fig. 2 Horizontal displacement distribution of underground continuous wall under different environmental temperatures (unit: m)

由图2可知, 在环境温度升高前, 基坑地下连续墙在  $y$  方向的最大水平位移主要集中在墙体长边中上部, 最大水平位移为  $1.25\text{cm}$ , 从墙体中部至基坑底部, 墙体在  $y$  方向的水平位移逐渐减小。在环境温度升高后, 基坑地下连续墙在  $y$  方向的最大水平位移逐渐减小, 但最大水平位移分布范围无明显变化, 墙体的最大水平位移为  $0.54\text{cm}$ 。可见, 随着温度的增大, 基坑地下连续墙的最大水平位移逐渐减小。

#### 3.2 围护结构刚度对支撑轴力的影响

选取第1~3道钢支撑为研究对象, 在不同环境温度下, 当围护结构的弹性模量变化时, 即混凝土的强度等级分别为 C30, C35, C40 时, 基坑钢支撑轴力变化如图3所示。

在相同混凝土强度下, 随着环境温度的增加, 第1道钢支撑的轴力逐渐增大, 这是由于环境温度升高使钢支撑产生显著的伸长变形趋势, 但基坑两侧的混凝土围护结构会对其伸长形成约束, 由于混凝土围护结构整体刚度大、变形受限, 无法随钢支撑自由伸长, 从而导致钢支撑被强行约束, 这种约束会在钢支撑内部产生温度附加应力, 从而表现为轴力增大。当混凝土强度相同时, 温度越低, 钢支撑产生收缩变形趋势越大, 在此阶段, 约束作用表

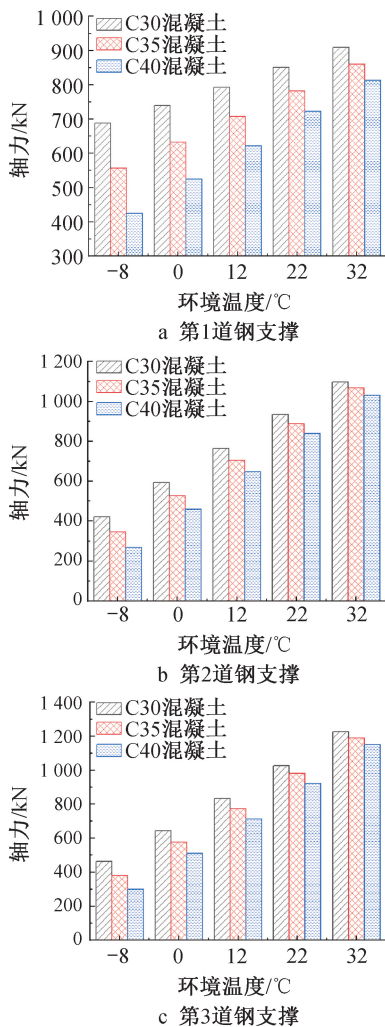


图3 不同围护结构弹性模量下钢支撑轴力变化

Fig. 3 Changes in axial force of steel support under different elastic moduli of enclosure structures

现为限制收缩, 产生的附加应力远小于限制伸长的应力, 因此钢支撑轴力减小。当混凝土强度等级为 C30 时, 围护结构抵抗变形能力弱, 无法承担过多侧向荷载, 大部分荷载需由钢支撑承担, 因此钢支撑轴力最大。当混凝土强度等级增大至 C40 时, 围护结构自身能承担更多侧向荷载, 钢支撑承担荷载的比例降低, 在此阶段, 第1道钢支撑的轴力最小。

当基坑施工到第2道钢支撑时, 在不同混凝土强度和环境温度下, 第2道钢支撑的轴力变化趋势与第1道钢支撑基本一致。在相同环境温度下, 随着混凝土强度的增大, 第2道钢支撑的轴力逐渐减小。在相同混凝土强度条件下, 当温度较低 ( $-8^\circ\text{C}$ ) 时, 围护结构整体收缩, 钢支撑对灌注桩的约束力度减弱, 仅需承担少量因收缩产生的拉力或土压力传递的轴力, 轴力减小。当温度升高 ( $32^\circ\text{C}$ ) 时, 结构整体膨胀, 灌注桩有向基坑内侧膨胀位移的趋势, 钢支撑有沿水平方向伸长的趋势, 但两者均被