

文章编号: 1674-2869(2019)04-0380-06

# 桥梁伸缩装置锚固区混杂纤维混凝土力学性能及抗冻性试验研究

姜允庆<sup>1</sup>, 刘宏伟<sup>1</sup>, 李亮<sup>2</sup>, 黄民水<sup>\*2</sup>, 胡国祥<sup>2</sup>

1. 安徽省新路建设工程集团有限责任公司, 安徽 阜阳 236000;
2. 武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074

**摘要:**为了延长桥梁伸缩装置锚固区混凝土的使用寿命,减少维修次数,本文通过试验研究了混杂纤维混凝土早期力学性能及抗冻性。首先分析了混杂纤维混凝土的混杂机理;随后制作了38组混杂纤维混凝土试件,试验中2种纤维按照不同的体积掺量掺入混凝土中,并进行了抗压强度、抗折强度和抗冻性试验;最后,计算了混杂效应,确定了最优的纤维体积掺量。结果表明:钢纤维体积掺量为1.5%与聚乙烯醇纤维体积掺量为0.12%时,混杂纤维混凝土表现出较好的效果,1d和3d立方体抗压强度提高了30.9%和31.7%,1d和3d抗折强度提高了81.4%和65.5%,50次冻融循环后强度损失率为2.5%,质量损失率为0.6%。本文的研究结果可用于公路桥梁伸缩装置新建工程和维修更换中,有较强的工程应用价值。

**关键词:** 混杂纤维; 力学性能; 抗冻性; 锚固区混凝土; 桥梁伸缩装置

中图分类号: U416.217 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2019.04.015

## Experimental Study on Mechanical Properties and Frost Resistance of Hybrid Fiber Concrete in Anchorage Zone of Bridge Expansion Device

JIANG Yunqing<sup>1</sup>, LIU Hongwei<sup>1</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, HUANG Minshui<sup>\*2</sup>, HU Guoxiang<sup>2</sup>

1. Anhui Xinlu Construction Engineering Co., Ltd, Fuyang 236000, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** To increase the service life of concrete in anchorage zone of bridge expansion device and reduce the maintenance times, the mechanical properties at early stage and frost resistance of hybrid fiber concrete were studied. Firstly, the mechanism of hybrid fiber concrete was analyzed. Secondly, 38 groups of hybrid fiber concrete specimens were prepared, in which two fibers were added with different volume fractions, followed with the investigation of compressive strength, rupture strength and frost resistance. Finally, the hybrid effects were calculated and the optimal fiber volume fraction was acquired. The results demonstrate that hybrid fiber concrete shows best performance when a 1.5% volume fraction of steel fiber and a 0.12% volume fraction of polyvinyl alcohol fiber are added. Its compressive strengths increase by 30.9% and 31.7%, rupture strengths increase by 81.4% and 65.5% respectively for 1 d and 3 d specimens. After 50 freeze-thaw cycles, the strength loss rate is 2.5% and the mass loss rate is 0.6%. These results have great engineering application values in new projects or maintenance and replacement works of highway expansion devices.

**Keywords:** hybrid fiber; mechanical properties; frost resistance; concrete in anchorage zone; bridge expansion device

收稿日期: 2019-03-19

基金项目: 安徽省交通运输科技进步计划项目(皖交科技函[2017]574号)

作者简介: 姜允庆, 高级工程师。E-mail: 985256670@qq.com

\*通讯作者: 黄民水, 博士, 副教授。E-mail: huangminshui@tsinghua.org.cn

引文格式: 姜允庆, 刘宏伟, 李亮, 等. 桥梁伸缩装置锚固区混杂纤维混凝土力学性能及抗冻性试验研究[J]. 武汉工程大学学报, 2019, 41(4): 380-385.

桥梁伸缩装置是桥梁的重要组成构件,其暴露在大氣中,直接承受车轮荷载的反复冲击,在设计、施工和管理养护上稍有缺陷或不足,就会引起伸缩装置的早期破坏。而伸缩装置的早期破坏很大程度上是由于锚固区混凝土的破损引起的,传统的伸缩装置锚固区混凝土所使用的材料难以达到较好的效果,往往由于本身属刚性材料不耐冲击且界面黏结较差,在使用一定周期后很快又会出现坑槽或啃边等病害,且因其养护期长,易造成交通拥堵<sup>[1-4]</sup>。

纤维混凝土是一种复合混凝土材料,它将纤维分散在由水泥浆、砂浆或混凝土组成的基体中,以其优良的抗拉、抗弯、抗剪等性能在各种大型土木工程设施中均得到了广泛应用,主要有钢纤维混凝土和聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)纤维混凝土2种类型<sup>[5-6]</sup>。钢纤维由于其较高的弹性模量能够有效提高混凝土基体的强度,而低弹性模量的PVA纤维因其有较好的延伸性达到良好的韧性。若能将这2种纤维按照一定的比例混杂掺入混凝土中,即形成了钢-PVA混杂纤维混凝土。本文通过试验研究了混杂纤维对混凝土早期力学性能及抗冻性的影响,获得了最优的混杂纤维掺量,为混杂纤维混凝土在桥梁伸缩装置中的应用提供试验依据。

## 1 纤维混杂效应机理

混杂纤维混凝土是将多种纤维加入混凝土中进行二次复合,对混凝土基本性能的改变机理十分复杂,由以往的研究可以看出,与掺加单一纤维相比,掺加混杂纤维对混凝土基体性能有好的影响。

钢纤维具有抗拉强度大、弹性模量高等特点,掺入钢纤维的混凝土其抗拉强度和抗折强度相对于混凝土基体均有很大程度的提高。而PVA纤维与水泥的亲性好,对基体的增韧主要是通过PVA纤维与水泥之间的相互黏结力而产生的。PVA纤维可以抑制混凝土内部结构的微裂缝及开裂初期裂缝的扩展,当裂缝慢慢扩张时,纤维受力可以吸收裂缝释放的能量,推迟开裂的时间进而提高基体的形变能力。而且PVA纤维又是亲水性良好的纤维,水分会被纤维牢牢吸住,很难蒸发脱离,在混凝土养护过程中起到关键作用。在一定的环境下,PVA纤维混凝土的水分蒸发量较素混凝土有一定程度的降低。因此,水泥水化反应产生的水化产物和未发生反应的水分均会附着在PVA纤维的表面,这些物质堆集到一定程度会堵

塞蒸发水分的微小通道,从而防止混凝土的塑性裂缝,进而提高混凝土的强度<sup>[7-10]</sup>。

所以,PVA纤维与钢纤维对混凝土基体的增强效应不可相互代替。总的来说当混凝土即将破坏,PVA纤维与钢纤维将会对混凝土产生加强的作用,总体上提高了混凝土的强度,有较强的应用价值。

## 2 试验概况

### 2.1 原材料

本次试验采用武汉华新水泥厂的P.O 42.5级普通硅酸盐水泥;实验中所用到的粗骨料的碎石级配集中在5~20 mm;减水剂为萘磺酸钠甲醛缩合物,减水率为15%,最佳体积掺量为0.75%;钢纤维(青岛海尔新材料研发有限公司,波浪形),PVA短纤维(上海臣启化工科技有限公司,6 mm),图1为纤维的外观特征,主要参数见表1。

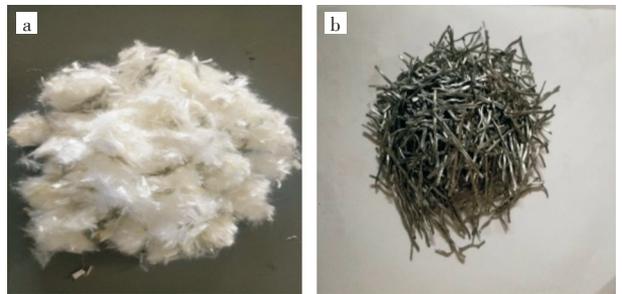


图1 纤维的外观特征:(a)PVA纤维,(b)钢纤维

Fig. 1 Appearance characteristics of fibers:  
(a) PVA fiber, (b) steel fiber

表1 纤维物理性能及主要参数

Tab. 1 Physical properties and main parameters of fiber

纤维	密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	断裂 伸长率 / %	拉伸强度 / MPa	弹性模量 / GPa
钢纤维	7 800	25	1 200	200
PVA纤维	910	17±3.0	1 400-1 600	35-39

### 2.2 配合比设计

混凝土的级配依据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)<sup>[11]</sup>和《高性能混凝土应用技术规程》(CECS 207:2006)<sup>[12]</sup>中的相关规定进行设计,目标等级为C50,混凝土的基本配合比如表2所示。

表2 试验配合比设计

Tab. 2 Test mixture ratio design kg/m<sup>3</sup>

水泥	石	砂	水	减水剂
414.38	1201.08	618.79	165.75	3.108

为了研究钢纤维和PVA纤维掺入时对混凝土抗压、抗折强度及抗冻性能的影响,依据《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T221-2010)<sup>[13]</sup>设计了单掺钢纤维、单掺PVA纤维以及二者混杂总体积掺量为2%的6组试件,其体积掺量如表3所示;单掺钢纤维、单掺PVA纤维及两种纤维按不同组合混杂的8组试件,其掺量如表4所示。

表3 纤维体积掺量  
Tab. 3 Fiber volume fraction

类别	编号	纤维体积掺量 / %	
		钢纤维	PVA纤维
普通	S0P0	0	0
单掺钢纤维	S2P0	2	0
单掺PVA纤维	S0P2	0	2
1:1混杂纤维	S1P1	1	1
3:1混杂纤维	S3P1	1.5	0.5
1:3混杂纤维	S1P3	0.5	1.5

注:纤维总体积掺量为2%

表4 钢纤维体积掺量  
Tab. 4 Steel fiber volume fraction

类别	编号	纤维体积掺量 / %	
		钢纤维	PVA纤维
普通	S0P0	0	0
单掺钢纤维	S4P0	1	0
	S5P0	1.5	0
单掺PVA纤维	S0P4	0	0.08
	S0P5	0	0.12
	S4P4	1	0.08
混杂纤维	S4P5	1	0.12
	S5P4	1.5	0.08
	S5P5	1.5	0.12

注:钢纤维最大体积掺量为1.5%

### 2.3 试件制作及方法

试件的制作与养护严格按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》《普通混凝土力学性能试验标准》规定进行试件制作。为了避免制备过程中纤维分布不均匀,本试验采用干拌法制备混杂纤维混凝土,立方体抗压强度试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,抗折强度试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,标准养护1 d、3 d;立方体抗冻融试件为100 mm×100 mm×100 mm,标准养护28 d。

试件的制作过程对混凝土的综合性能有直接或间接的影响<sup>[14-15]</sup>,在制备纤维混凝土的过程中,当纤维掺量很大时纤维之间容易结团,从而使纤维混凝土的基本力学性有一定程度的降低,所以

要尽可能地使纤维均匀分布在基体混凝土中。经过数次试配及综合前人研究经验,采取如下的制备过程:

普通混凝土:粗细骨料+水泥(搅拌2 min)→加入水(搅拌2 min)→加入减水剂(搅拌1 min)→制备完成,浇筑。

纤维混凝土:粗细骨料+纤维(搅拌2 min)→加入水泥(搅拌2 min)→加入水(搅拌2 min)→加入减水剂(搅拌1 min)→制备完成,浇筑。

浇筑分2步进行,先在试模中浇筑一半,在振动台上振动30 s后,再浇筑剩下的一半(浇筑一定要漫出试模),并同样振动30 s。振动时不能让试模在台上随意跳动,振动至表面出浆为止,抹平,盖上保护膜防止水分蒸发。

## 3 结果与讨论

### 3.1 抗压强度

根据《普通混凝土力学性能试验标准》(GB/T 50081)<sup>[7]</sup>的相关规定进行试验,记录试验试件破坏时的荷载值,按式(1)计算抗压强度,结果如图2所示。

$$f_{cu,k} = \frac{F_{C,max}}{A_C} \quad (1)$$

式(1)中: $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度,MPa; $F_{C,max}$ 为试件最大荷载,N; $A_C$ 为试件承压面面积,mm<sup>2</sup>。

混凝土基体中固定纤维总体积掺量为2%时,对龄期为1 d或3 d混凝土抗压强度的影响如图2(a)所示,掺入纤维会导致混凝土早龄期抗压强度有不同程度的降低。

在混凝土基体中钢纤维按照1%和1.5%的体积率、聚乙烯醇纤维按0.08%和0.12%的体积掺量单掺入或按不同组合掺入基体混凝土中,1 d和3 d抗压强度如图2(b)所示。可以看出,当钢纤维体积掺量为1.5%、聚乙烯醇纤维体积掺量为0.12%时,立方体抗压强度最大分别为10.23,31.52 MPa,较对照组分别提高30.9%,31.7%。

### 3.2 抗折强度

按式(2)计算抗折强度,将所得试件抗折强度乘以其尺寸的换算系数0.85,试验结果如图3所示。

$$f_r = \frac{Fl}{bh^2} \quad (2)$$

式(2)中: $f_r$ 为混凝土抗折强度,MPa; $F$ 为破坏荷载,N; $l$ 为支座间跨度,mm; $h$ 为试件截面高度,mm; $b$ 为试件截面宽度,mm。

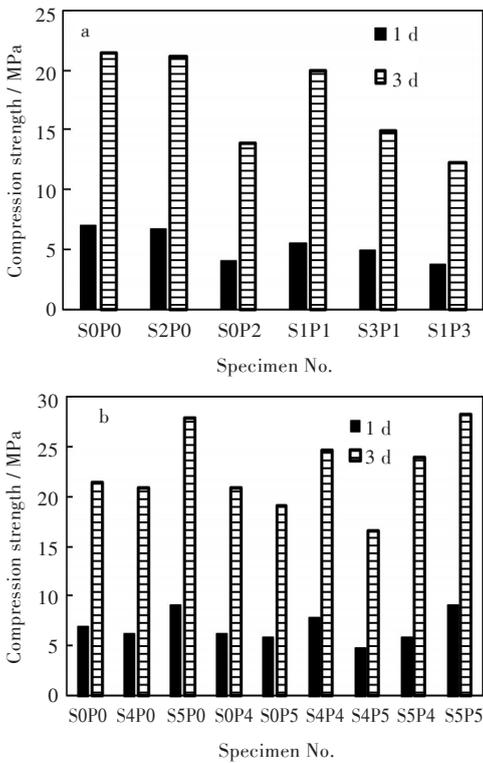


图2 不同纤维对混凝土抗压强度的影响:(a)纤维总体积掺量为2%,(b)钢纤维体积掺量最大1.5%

Fig. 2 Effects of different fibers on compressive strength of concrete:(a)total fiber volume fraction is 2%, (b)maximum steel fiber volume fraction is 1.5%

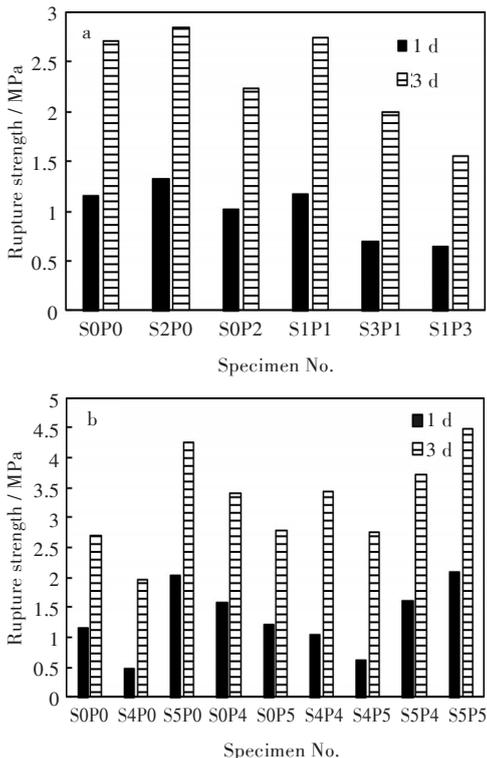


图3 不同纤维对混凝土抗折强度的影响:(a)纤维总体积掺量为2%,(b)钢纤维体积掺量最大1.5%

Fig. 3 Effects of different fibers on rupture strength of concrete:(a)total fiber volume fraction is 2%, (b)maximum steel fiber volume fraction is 1.5%

可以看出,混凝土中掺入聚乙烯醇纤维、钢纤维及其混杂纤维时,混凝土基体的早期抗折强度有明显提高。单掺钢纤维体积掺量为1.5%时,混凝土的1 d和3 d抗折强度提高了77.4%和57.0%;单掺聚乙烯醇纤维体积掺量为0.08%时,混凝土的1 d和3 d抗折强度提高了37.3%和25.4%;混杂纤维在钢纤维体积掺量为1.5%、聚乙烯醇纤维体积掺量为0.12%时,对基体混凝土的早期抗折强度提高最为显著,1 d和3 d抗折强度较素混凝土提高了81.4%和65.5%。由此而知:掺加混杂纤维对混凝土早期抗折强度的提高优于单掺纤维。

### 3.3 抗冻性

混凝土抗压强度损失率按式(3)计算:

$$\Delta f_c = \frac{f_{co} - f_{cn}}{f_{co}} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中:  $\Delta f_c$  为  $n$  次冻融循环后的混凝土抗压强度损失率,%;  $f_{co}$  为同龄期标准养护的对比试件的抗压强度测定值,MPa;  $f_{cn}$  为  $n$  次冻融循环后的一组混凝土试件的抗压强度测定值,MPa,  $n$  取50。

混凝土质量损失率按式(4)计算:

$$\eta_{\Delta m} = \frac{m_n - m_0}{m_0} \quad (4)$$

式(4)中:  $\eta_{\Delta m}$  为  $n$  次冻融循环后混凝土试件的质量损失率,%;  $m_0$  为冻融循环前混凝土试件的质量,g;  $m_n$  为  $n$  次冻融循环后混凝土试件的质量,g。

混凝土强度损失率、质量损失率越小,表明混凝土的抗冻性能越好。混凝土的冻融性能受混杂纤维掺量的影响趋势如图4所示,掺入纤维的混凝土相对于素混凝土经50次冻融循环后的强度损失率、质量损失率有不同程度的改善。钢纤维体积掺量1.5%和PVA纤维体积掺量0.12%的混杂纤维混凝土强度损失率、质量损失率最小,分别为2.5%、0.6%。

### 3.4 试件破坏形态分析

普通混凝土、混杂纤维混凝土的破坏形态如图5~图6所示。

抗压试验中,普通混凝土表面首先出现1~2条微小的裂缝,随着试验的进行,在原微裂缝的远处相继出现其他裂缝,随着荷载进一步增加,裂纹的宽度迅速增大,由上至下贯通整个混凝土试块,最终导致混凝土试件碎裂,这种破坏是突发的,表现出明显的脆性。而掺入钢纤维1.5%和PVA纤维0.12%的混杂纤维混凝土达到试块极限承载力后,

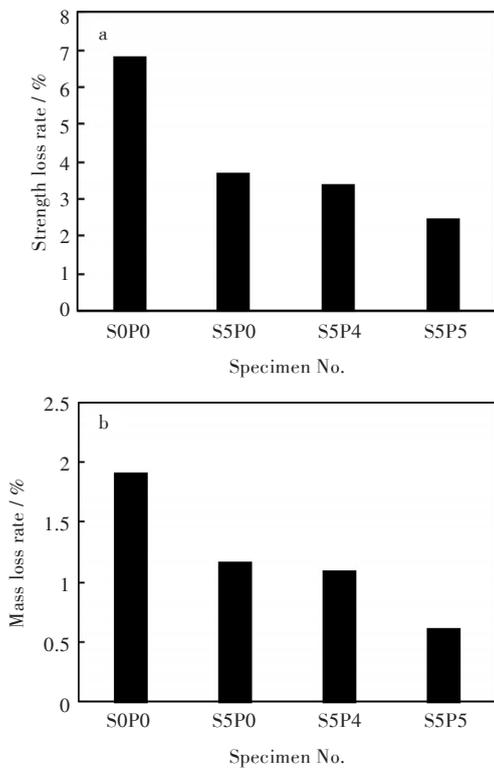


图4 不同纤维对混凝土抗冻性能的影响:  
(a)强度损失率,(b)质量损失率

Fig. 4 Effects of different fibers on freeze-thaw resistance of concrete: (a) strength loss rate, (b) mass loss rate



图5 普通混凝土破坏形态:(a)立方体抗压,(b)抗折

Fig. 5 Ordinary concrete failure forms:  
(a) cube compression, (b) rupture

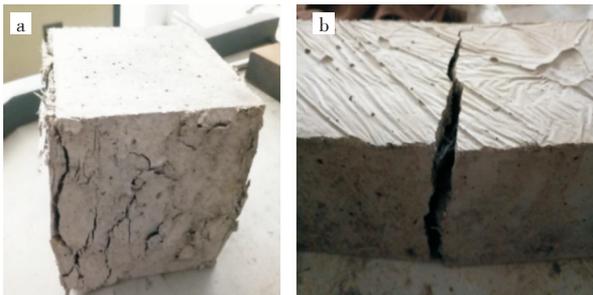


图6 混杂纤维混凝土破坏形态:(a)立方体抗压,(b)抗折

Fig. 6 Hybrid fiber concrete failure forms:  
(a) cube compression, (b) rupture

试块表面产生的裂缝的发展有一定过程,极限承载力虽不能增大,但是下降速度明显放缓,试块破坏时,并未破碎,表现出良好的延性。

抗折试验中,普通混凝土试件直接断开,这种破坏是突发的,表现出明显的脆性。而掺入钢纤维1.5%和PVA纤维0.12%的混杂纤维混凝土试块破坏时,纤维将试块连成一个整体,表现出良好的延性,大大提高了混凝土的抗折强度。

## 4 混杂效应分析

本次的混杂系数采用的是比值法,定义钢纤维与聚乙烯醇纤维的混杂系数如式(5):

$$\alpha_{sp} = \frac{\beta_{sp}}{\beta_s \times \beta_p} \quad (5)$$

式(5)中: $\alpha_{sp}$ 为混凝土抗压强度的混杂系数,当混杂系数 $\alpha \geq 1$ 时,称为正混杂效应,而当 $\alpha < 1$ 时,就称为负混杂效应; $\beta_{sp}$ 、 $\beta_p$ 和 $\beta_s$ 为混杂纤维混凝土、PVA纤维混凝土和钢纤维混凝土相对于基准混凝土的强度增强系数,按式(6)进行计算:

$$\beta = \frac{f}{f_m} \quad (6)$$

式(6)中: $f$ 和 $f_m$ 分别为纤维混凝土的强度和基体混凝土的强度。

1 d和3 d早期抗压强度各组试件混杂效应,结果如表5所示。

表5 混杂纤维的混杂系数

Tab. 5 Hybrid coefficients of hybrid fiber

试验编号	1 d			3 d		
	抗压强度 / MPa	强度增强系数 $\beta$	混杂系数 $\alpha$	抗压强度 / MPa	强度增强系数 $\beta$	混杂系数 $\alpha$
S4P0	7.03	0.90	—	23.32	0.97	—
S0P4	6.99	0.89	1.40	23.35	0.98	1.21
S4P4	8.79	1.12	—	27.41	1.15	—
S4P0	7.03	0.90	—	23.32	0.97	—
S0P5	6.60	0.85	0.89	21.37	0.89	0.89
S4P5	5.34	0.68	—	18.42	0.77	—
S5P0	10.19	1.30	—	31.01	1.30	—
S0P4	6.99	0.89	0.73	23.35	0.98	0.87
S5P4	6.57	0.84	—	26.62	1.11	—
S5P0	10.19	1.30	—	31.01	1.30	—
S0P5	6.60	0.85	1.18	21.37	0.89	1.14
S5P5	10.14	1.31	—	31.52	1.32	—
S0P0	7.82	—	—	23.93	—	—

从表5可以看出钢纤维体积掺量为1.0%、PVA纤维体积掺量0.08%与钢纤维体积掺量为1.5%、PVA纤维体积掺量0.12%的混杂系数均大于1。说明钢纤维和PVA纤维的两种组合中在混凝土中均呈现正混杂效应。说明这2组混杂纤维在提高混凝土基本力学性能方面较好。综合前述基

本力学性能和抗冻性试验结果,钢纤维体积掺量为1.5%、PVA纤维体积掺量0.12%时,能达到最佳混杂效果。

## 5 结 语

本文通过在混凝土中掺加不同体积掺量的PVA纤维和钢纤维的方法来配制混杂纤维混凝土,进行了抗压强度、抗折强度和抗冻性试验,得到如下结论:

1)PVA纤维的掺入降低了混凝土基体的早期抗压强度,而钢纤维对基体早期抗压强度降低较小。PVA纤维、钢纤维及其混杂纤维对混凝土基体的早期抗折强度有明显的提高。通过分析可知,在1 d和3 d的强度最佳组合为S5P5,即钢纤维体积掺量为1.5%,PVA纤维体积掺量为0.12%。

2)混杂纤维混凝土的抗冻性能明显优于普通混凝土,这是因为掺加混杂纤维抑制了混凝土结构内部裂缝的产生和发展,从而提高混凝土的抗冻融性能。其中最佳组合也为S5P5。

3)试块破坏时,普通混凝土表现出明显的脆性。而纤维混凝土试块破坏时在试块表面仍连成一个整体,表现出良好的延性,能有效地缓解混凝土的破坏。

4)对纤维混凝土的混杂效应进行了分析,发现不同纤维的混杂对基体混凝土的早期抗压强度部分起正混杂效应,结合混杂效应分析进行掺量优选,在实际工程中有较强的应用价值。

### 参考文献

- [1] 赵军丽. 桥梁伸缩缝装置的破坏与防治措施[J]. 华北航天工业学院学报,2004,14(1):18-19.  
[2] 张海涛. 高速公路桥梁伸缩缝病害原因分析和快速维

修更换工艺[J]. 交通标准化,2012(2):123-125.

- [3] 李锴. 桥梁伸缩缝的施工技术及病害防治措施[J]. 黑龙江科技信息,2015(34):207-207.  
[4] 张征,吴琼超. 桥梁结构伸缩缝病害的成因与防治策略[J]. 中国多媒体与网络教学学报(中旬刊),2018(9):125-126.  
[5] 徐至钧. 纤维混凝土技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.  
[6] PRISCOM D, PLIZZARI G, VANDEWALLE L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives [J]. Materials & Structures,2009,42(9):1261-1281.  
[7] 陈猛,白帅,张海鹏,等. 混杂纤维混凝土抗压和抗拉性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(10):113-117.  
[8] 黄国栋,马芹永. 混杂纤维混凝土力学性能试验研究与分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2):329-333,340.  
[9] 权长青,焦楚杰,杨云英,等. 混杂纤维混凝土力学性能的正交试验研究[J/OL]. 建筑材料学报(2019-01-03)[2019-03-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20181229.1510.088.html>.  
[10] 者亚雷,侯克鹏,杨志全,等. 钢纤维混凝土破坏机理及力学性能试验[J]. 矿产综合利用,2015(3):78-80.  
[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中国建设科学研究院. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
[12] 中国工程建设标准化协会混凝土结构专业委员会. 高性能混凝土应用技术规程: CECS 207: 2006[S]. 北京:中国计划出版社,2006.  
[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中国建设科学研究院. 纤维混凝土应用技术规程: JGJ/T221—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.  
[14] 吴科如,张雄. 土木工程材料[M]. 上海:同济大学出版社,2008.  
[15] 罗相杰,刘伟. 土木工程材料试验[M]. 北京:北京理工大学出版社,2012.

本文编辑:苗 变