

文章编号:1673-2049(2016)05-0070-07

机场道面混掺纤维混凝土强度与抗弯韧性试验

邓宗才¹, 耿雪辉¹, 刘岩², 兰明章³

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京中企卓创科技发展有限公司, 北京 100621;
3. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

摘要:为了降低机场道面混凝土脆性,通过混掺高性能粗聚烯烃纤维(PP)和细聚乙烯醇纤维(PVA)来提高道面混凝土韧性。通过四点弯曲试验,测得了梁试件荷载-挠度曲线,分析了2种纤维掺率混掺对改善三级配机场道面混凝土弯曲韧性的效果。结果表明:纤维混掺可明显改善混凝土抗弯韧性;PP的掺入使荷载-挠度曲线出现了2次峰值;PVA掺率为0.2%或0.4%时,随着PP掺率增加,韧性指标值 P_{300} , P_{75} , P_{50} 均呈增大趋势;PP掺率的增加对后期韧性指标值 P_{75} , P_{50} 的提高更为显著;增加PVA掺率对提高第一峰值强度较为显著;PP和PVA分别以掺率1.1%和0.4%混掺时,机场道面混凝土抗弯韧性提高最为明显。

关键词:机场道面;抗弯韧性;混掺纤维混凝土;强度;掺率

中图分类号:TU502 **文献标志码:**A

Experiment on Strength and Flexural Toughness of Hybrid Fiber Reinforced Concrete for Airport Pavement

DENG Zong-cai¹, GENG Xue-hui¹, LIU Yan², LAN Ming-zhang³

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Beijing Super-creative Technology Co., Ltd, Beijing 100621, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to reduce the brittleness of airport pavement concrete, the toughness of pavement concrete was improved by mixing high performance coarse polyolefin fiber (PP) and fine polyvinyl alcohol fiber (PVA). By four point bending test, the load-deflection curves of beam specimens were obtained, and the improving effects of mixing ratio of two different fibers on the flexural toughness of three-graded airport pavement concrete were analyzed. The results show that the flexural toughness of concrete can be significantly improved by fiber mixing. There are 2 times of peak values of load-deflection curves when PP is mixed. When volume ratio of PVA is 0.2% or 0.4%, with the increase of PP mixing ratio, the toughness index values P_{300} , P_{75} , P_{50} show an increasing trend. The late toughness index values P_{75} , P_{50} can be improved more obviously when PP mixing ratio increases. The first-peak strength can be more significantly improved when PVA mixing ratio increases. When the volume ratios of PP and PVA are 1.1% and 0.4% respectively, the flexural toughness of airport pavement concrete is most obviously improved.

Key words: airport pavement; flexural toughness; hybrid fiber reinforced concrete; strength;

收稿日期:2016-03-17

基金项目:中国民航局项目(20150225)

作者简介:邓宗才(1961-),男,陕西扶风人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dengzc@bjut.edu.cn.

volume ratio

0 引言

水泥混凝土道面是中国民航机场最主要的道面结构形式,但是水泥混凝土道面使用情况并不理想^[1-5]。目前大部分水泥道面平均寿命为 15~20 年,有的在新建后 2~3 年就出现道面破坏,无法达到 30 年的设计年限^[6-7]。道面早期角隅断裂、断板、掉边掉角等现象导致大量结构性损坏,扎破轮胎现象时有发生,严重威胁飞行安全。根本原因是当前机场道面建设中传统的道面混凝土材料是脆性材料,容易开裂和断板,影响道面使用安全性和服役寿命^[8-10]。为此,有必要在混凝土中掺入纤维,开发一种具有高韧性的混凝土道面材料,从而降低脆性,有效改善抗裂性和抗疲劳性能等^[11-14]。

混掺纤维混凝土^[15-17]是指用 2 种或 2 种以上纤维或不同几何特性的纤维制备的纤维混凝土。混掺

纤维可以优势互补,充分发挥不同纤维的增强和增韧作用,以显著改善混凝土变形性能。本文试验研究了粗聚烯烃纤维(PP)和细聚乙烯醇纤维(PVA)混掺对改善三级配机场道面混凝土弯曲韧性的效果,且给出了纤维最佳掺率的建议值,为机场工程建设提供参考数据。

1 纤维混凝土配合比及强度

1.1 纤维材性

PP 由上海罗洋材料有限公司提供,它是聚丙烯与聚乙烯的共聚物,表面为压痕波浪形;PVA 由凯泰特种纤维科技有限公司提供,呈单丝状。2 种纤维的物理、力学性能指标见表 1。

1.2 混凝土配合比

水泥采用金隅牌 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,石子为石灰岩碎石,采用粒径 5~10 mm,10~20

表 1 纤维物理、力学性能指标

Tab. 1 Physical and Mechanical Indexes of Fibers

纤维种类	直径/ μm	抗拉强度/MPa	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量/GPa	伸长率/%	长度/mm
PP	1 000	530	0.91	10	15	40
PVA	20	1 600	1.30	35	8	10

mm,20~26.5 mm 三级配。砂为中砂,细度模数为 2.7,水为自来水,减水剂为江苏奥莱特建材有限公司生产的 ATR-M12 高性能聚羧酸类减水剂,固含量为 40%,减水率为 37%。按照混凝土抗折强度设计值为 5.0 MPa 的要求,混凝土配合比见表 2。

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix Proportions of Concrete $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

水泥	水	砂	碎石			减水剂
			5~10 mm	10~20 mm	20~26.5 mm	
450	180	619	180	540	480	1.8

1.3 混凝土强度

混凝土抗压强度试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试件,抗折强度试验采用 150 mm×150 mm×550 mm 的标准试件。

PP 体积掺率(简称掺率)为 0.7%,0.9%,1.1%,PVA 体积掺率为 0.2%,0.4%,0.6%。为了减小基体变化对弯曲韧性的影响,所有试件的基体都采用表 2 的配合比。每种纤维掺率的试件有 3 个,试件浇筑成型 24 h 后脱模自然养护 28 d。测得的试件抗压强度和抗折强度平均值见表 3。试件编号中“-”前的数字为 PP 体积掺率,“-”后的数字为

表 3 强度试验结果

Tab. 3 Experimental Results of Strength

试件编号	PP 掺量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	PVA 掺量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
C0-0	0.0	0.0	61.3	5.66
HC0-0.2	0.0	2.6	59.8	5.91
HC0-0.4	0.0	5.2	63.1	6.08
HC0-0.6	0.0	7.8	61.2	6.19
HC0.7-0	6.4	0.0	58.9	5.72
HC0.9-0	8.2	0.0	58.1	5.81
HC1.1-0	10.0	0.0	57.7	5.83
HC0.7-0.2	6.4	2.6	61.9	5.96
HC0.7-0.4	6.4	5.2	62.4	6.21
HC0.7-0.6	6.4	7.8	60.7	6.15
HC0.9-0.2	8.2	2.6	60.2	5.98
HC0.9-0.4	8.2	5.2	62.3	6.31
HC0.9-0.6	8.2	7.8	59.1	6.19
HC1.1-0.2	10.0	2.6	59.3	6.18
HC1.1-0.4	10.0	5.2	60.5	6.35
HC1.1-0.6	10.0	7.8	56.8	6.09

PVA 体积掺率,如 HC0.9-0.2 表示 PP 体积掺率为 0.9%,PVA 体积掺率为 0.2%。

由表 3 可看出:无论 PP,PVA 是单掺还是混

掺,均对改善混凝土抗压强度和抗折强度的效果不明显;所有试件的抗折强度大于 5.5 MPa,满足机场道面对混凝土抗折强度的要求。

2 抗弯韧性

2.1 试验方法

抗弯韧性试验采用三分点加载,混凝土梁尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,跨度为 300 mm,试验在电液伺服控制试验机上进行,恒位移控制加载,位移速率为 2 min·mm⁻¹,计算机自动记录数据,并自动绘制荷载-挠度曲线。

2.2 破坏过程及形式

随着荷载的增加,素混凝土梁在发生初裂瞬间即开始裂纹的局部扩展,且扩展时间极短,一裂即断,属于脆性破坏。相比素混凝土梁,单掺 PVA 混

凝土梁发生初裂后,主裂缝扩展相对较慢,变形性能较明显,由脆性破坏变为具有一定延性的破坏,裂缝具有一定的宽度。

单掺 PP 混凝土梁和混掺纤维混凝土梁的破坏过程较为相似,明显呈延性破坏,随着荷载增大,裂缝不断扩展,但荷载下降缓慢,裂缝截面的纤维逐渐从混凝土中拔出或拔断,表现出良好的变形性能。

2.3 荷载-挠度曲线

典型试件的荷载-挠度曲线见图 1。由图 1(a)可看出:单掺 PVA 混凝土梁开裂前,荷载增长较快,荷载-挠度曲线呈直线上升趋势;开裂后,挠度增长速度加快,曲线斜率略有下降,此阶段和素混凝土基本相同;当荷载达到峰值以后迅速下降,然后保持在较低值,随着挠度的继续增大,荷载下降速度逐渐变缓,裂缝宽度变宽,直至试件破坏。

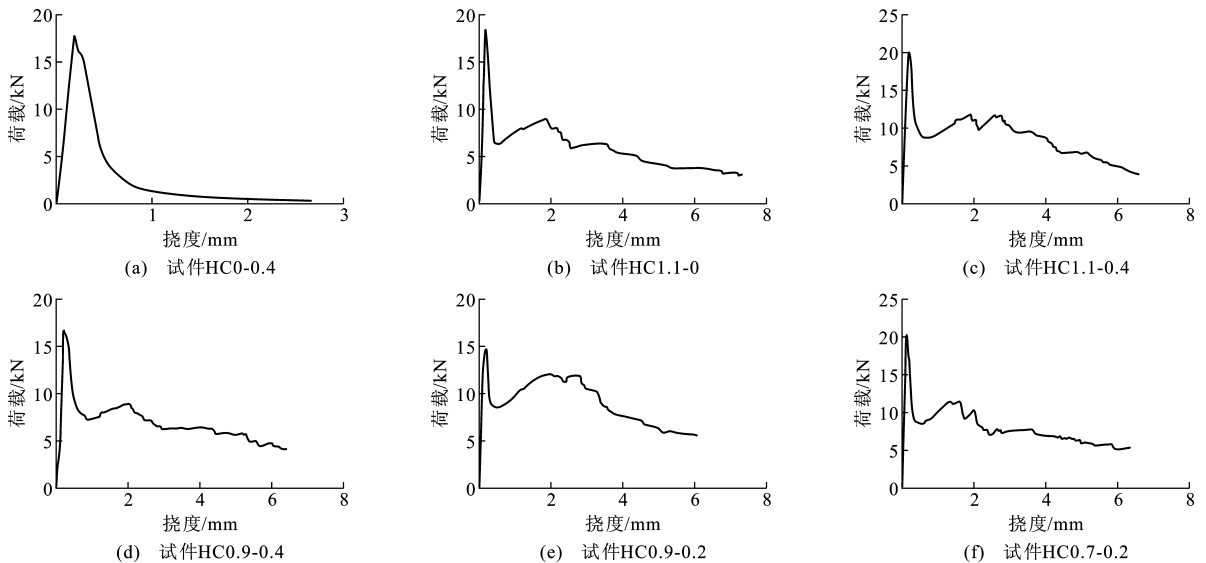


图 1 典型试件的荷载-挠度曲线

Fig. 1 Load-deflection Curves of Typical Specimens

比较图 1(b), (c)可看出,单掺 PP 混凝土梁和混掺纤维混凝土梁的荷载-挠度曲线特征较为相似,荷载-挠度曲线都出现了 2 次峰值,裂缝扩展很慢,呈延性破坏。当荷载过峰值后迅速下降,但仍保持着较高承载力,下降趋势也变得平缓,在峰值荷载之后出现了第 2 次峰值,原因主要是 PP 横跨裂缝阻止了裂缝的进一步扩展,引起了受拉区的应力重分布。曲线达到第 2 次峰值后的下降段出现了上下抖动的锯齿状,这是 PP 不断拔出和拔断的过程。

混掺纤维与单掺 PP 试件荷载-挠度曲线的不同之处是峰值荷载后单掺 PP 混凝土梁的荷载会接近直线迅速下降,混掺纤维混凝土梁由于 PVA 的桥联作用荷载下降较缓慢。

2.4 抗弯韧性评价

2.4.1 Bantbia 韧性指标评价方法

由于确定初裂挠度存在很大的人为误差,Bantbia 等^[18-19]提出纤维混凝土韧性分析方法,以峰值荷载为界限把荷载-挠度曲线面积在峰值荷载 P_{peak} 处分为峰前 (T_{pre}) 和峰后 ($T_{pwt,m}$) 两部分,以特定的挠度为变量来考虑纤维混凝土在变形过程中的能量消耗。这样定义的韧性指标不像 ASTM C1018 方法那样过度依赖初裂挠度,Bantbia 韧性指标计算方法示意如图 2 所示。

韧性指标 P_m 为

$$P_m = T_{pwt,m} L / [(\frac{L}{m} - \delta) b h^2] \quad \frac{L}{m} > \delta \quad (1)$$

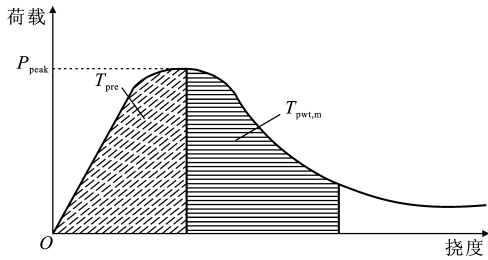


图 2 韧性指标计算方法示意

Fig. 2 Sketch of Calculation Method for Toughness Index

Toughness Index

式中： L 为梁的跨度，取为 300 mm； δ 为峰值荷载对应的挠度； b, h 分别为梁截面的宽和高； m 为定值，取 50, 75, 300 等。

韧性指标 P_m 计算结果见表 4。

表 4 韧性指标 P_m 计算结果

Tab. 4 Calculation Results of Toughness Index P_m

试件编号	P_{300}/MPa	P_{75}/MPa	P_{50}/MPa
C0-0			
HC0-0.2	1.04		
HC0-0.4	1.42		
HC0-0.6	1.99		
HC0.7-0	2.54	1.79	1.43
HC0.9-0	2.91	2.14	1.91
HC1.1-0	3.08	2.40	2.01
HC0.7-0.2	3.21	2.18	2.11
HC0.7-0.4	3.65	2.36	2.30
HC0.7-0.6	3.40	2.16	2.11
HC0.9-0.2	3.75	3.10	2.61
HC0.9-0.4	4.10	3.30	3.12
HC0.9-0.6	3.89	2.48	2.42
HC1.1-0.2	3.84	3.31	2.70
HC1.1-0.4	4.14	3.44	3.30
HC1.1-0.6	3.98	2.65	2.45

由表 4 可看出：随着 PVA 掺率的增加，韧性指标 P_{300} 增大；PP 掺率增加，韧性指标 P_{300}, P_{75}, P_{50} 均增大，掺入纤维明显改善了混凝土的韧性。

不同挠度下韧性指标与 PP, PVA 掺率的关系见图 3。由图 3 可知：当 PP 掺率一定时，PVA 掺率由 0.2% 提高到 0.4%，韧性指标增加幅度较大；当 PVA 掺率为 0.6% 时，韧性指标增加幅度减小；当 PP 掺率为 0.7%，PVA 掺率为 0.2%, 0.4%, 0.6% 时，韧性指标 P_{300} 比单掺 PP 时分别提高了 26.4%, 43.7%, 33.9%， P_{75} 分别提高了 21.8%, 31.9%, 20.7%， P_{50} 分别提高了 47.6%, 67.8%, 55.2%。PVA 掺率为 0.4% 时韧性指标值最大，掺率为 0.6% 时韧性指标值减小，韧性降低，这是由于 PVA

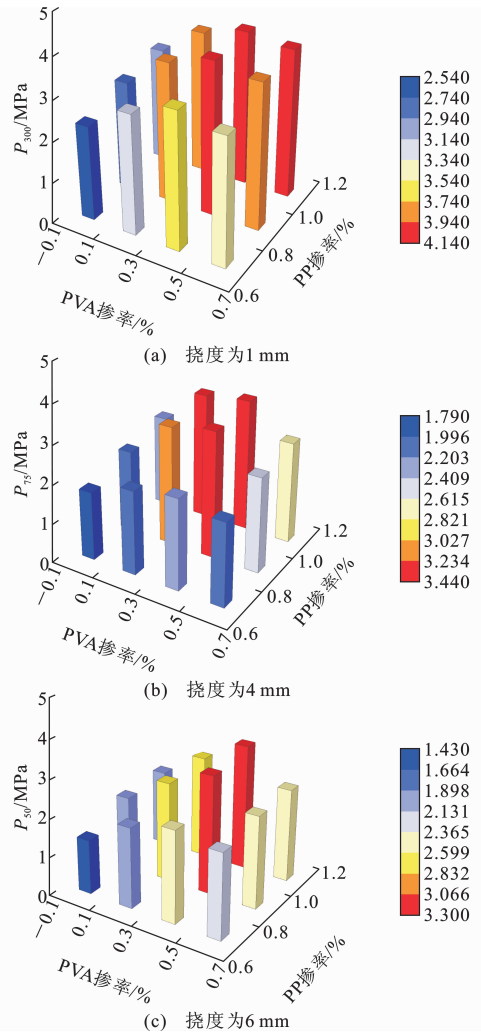


图 3 不同挠度下韧性指标与 PP, PVA 掺率的关系
Fig. 3 Relationship of Toughness Index with PP and PVA Mixing Ratio Under Different Deflections

掺率为 0.6% 时，PVA 分散不均匀所致，这与试件成型过程中观察的 PVA 分散状况一致。

当 PVA 掺率为 0.2% 或 0.4% 时，随着 PP 掺率增加，韧性指标值呈增大趋势，且 PP 掺率由 0.9% 提高到 1.1% 时，韧性指标提高值明显小于掺率由 0.7% 提高到 0.9%，当 PP 掺率大于 0.9% 时，韧性指标增长趋势变缓。

PVA 掺率 0.2% 与 PP 掺率 0.9% 混掺较与 PP 掺率 0.7% 混掺时，其韧性指标值 P_{300}, P_{75}, P_{50} 分别提高了 16.8%, 42.2%, 25.7%；PVA 掺率 0.2% 与 PP 掺率 1.1% 混掺较与 PP 掺率 0.7% 混掺时，其韧性指标值 P_{300}, P_{75}, P_{50} 分别提高了 19.6%, 51.8%, 30%。PP 掺率增加对韧性指标 P_{75}, P_{50} 提高更为明显，表明其对后期增韧效果显著。

由图 3 还可以看出：PP 与 PVA 混掺时，混凝土的韧性指标 P_{300} 最大， P_{75} 其次， P_{50} 最小， P_{50} 和

P_{75} 非常接近,表明韧性指标值随挠度增大而逐渐降低,但挠度大于4 mm以后基本不变。

2.4.2 美国 ASTM C1609 标准评价方法

ASTM C1609 标准是在 2005 年提出的一个新的韧性评价标准^[20],以取代 ASTM C1018 标准。ASTM C1609 标准采用的评价韧性指标为绝对值参数而不是相对值参数,主要包括荷载 P 、强度 f 、挠度 δ 以及某一特定挠度时荷载-挠度曲线下的面积 T 。确定第一峰值荷载 P_1 、特定挠度残余荷载 $P_{100,1.0}, P_{100,4.0}, P_{100,6.0}$,通过计算获得 0~6.0 mm 挠度区间内荷载-挠度曲线下的面积 $T_{100,6.0}$,即弯曲韧性。 $P_{100,1.0}, P_{100,4.0}, P_{100,6.0}$ 分别为宽和高均为 100 mm 的棱柱体试件在弯曲韧性测试过程中挠度达到 1.0, 4.0, 6.0 mm 时对应的荷载。由 P_1 计算的强度为第一峰值强度 f_1 ,挠度分别为 1.0, 4.0, 6.0 mm 时对应的残余弯曲强度为 $f_{100,1.0}, f_{100,4.0}, f_{100,6.0}$ 。评价韧性指标计算结果见表 5。

表 5 韧性指标计算结果

Tab. 5 Calculation Results of Toughness Index

试件编号	f_1 /MPa	$f_{100,1.0}$ / MPa	$f_{100,4.0}$ / MPa	$f_{100,6.0}$ / MPa	$T_{100,6.0}$ / (kN·mm)
C0-0	6.36				
HC0-0.2	6.72	0.28			
HC0-0.4	6.81	0.66			
HC0-0.6	6.94	0.76			
HC0.7-0	6.45	2.40	1.12	0.64	39.2
HC0.9-0	6.51	2.70	1.46	0.89	55.2
HC1.1-0	6.55	2.84	1.65	0.99	60.5
HC0.7-0.2	6.84	2.69	1.35	0.92	54.1
HC0.7-0.4	7.02	2.88	1.47	1.02	62.5
HC0.7-0.6	6.87	2.75	1.28	0.80	49.8
HC0.9-0.2	6.78	2.94	1.91	1.25	72.4
HC0.9-0.4	7.08	3.25	2.01	1.47	78.1
HC0.9-0.6	6.92	2.96	1.66	1.03	57.3
HC1.1-0.2	6.91	3.05	1.99	1.35	75.2
HC1.1-0.4	7.13	3.19	2.08	1.65	84.0
HC1.1-0.6	6.85	2.89	1.88	1.12	69.3

由表 5 可以看出:单掺 PVA 的掺率为 0.2%, 0.4%, 0.6% 时,第一峰值强度比素混凝土分别提高了 5.66%, 7.08%, 9.12%, 提高值呈增大趋势;残余弯曲强度 $f_{100,1.0}$ 随着 PVA 掺率增加而增大;随着 PP 掺率增加,第一峰值强度几乎保持不变,但残余弯曲强度 $f_{100,1.0}, f_{100,4.0}, f_{100,6.0}$ 均增大。

第一峰值强度与 PP, PVA 掺率的关系见图 4。结果表明:当 PP 掺率不变,随着 PVA 掺率增加,第一峰值强度较单掺 PP 时有一定提高;当 PVA 掺率

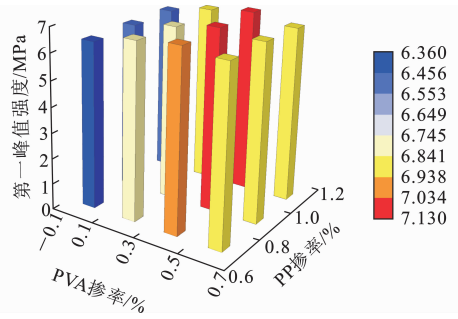


图 4 第一峰值强度与 PP, PVA 掺率的关系

Fig. 4 Relationship of the First Peak Strength with PP and PVA Mixing Ratio

不变,随着 PP 掺率增加,第一峰值强度较单掺 PVA 时几乎没有变化。无论单掺还是混掺,掺入 PVA 对提高第一峰值强度影响较为显著,这是因为 PVA 为短细纤维,强度和模量较高,其在混凝土裂缝萌生和微裂阶段的阻裂作用明显。

残余弯曲强度、弯曲韧性与 PP, PVA 掺率的关系分别见图 5, 6。结果表明,PP 掺率一定, PVA 掺率由 0.2% 提高到 0.4% 时,残余弯曲强度、弯曲韧性增加幅度较大,但当 PVA 掺率为 0.6% 时增加幅度减小。当 PVA 掺率为 0.2% 或 0.4% 时,随着 PP 掺率增加,残余弯曲强度、弯曲韧性都增大,但当 PP 掺率大于 0.9% 时增长趋势变缓;PP 掺率增加对残余弯曲强度 $f_{100,4.0}, f_{100,6.0}$ 和 $T_{100,6.0}$ 提高更为明显。

由图 5 可以看出,混掺纤维时残余弯曲强度 $f_{100,1.0}$ 最大, $f_{100,4.0}$ 其次, $f_{100,6.0}$ 最小, $f_{100,6.0}$ 和 $f_{100,4.0}$ 相差很小,表明残余弯曲强度随挠度增大而逐渐降低,但挠度大于 4 mm 以后基本不变。

3 结语

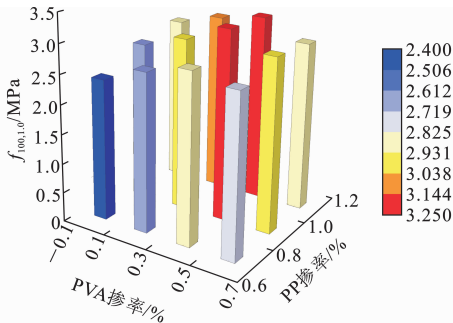
(1)粗 PP 和细 PVA 混掺显著改善了三级配机场道面混凝土的弯曲韧性,由于 PP 的掺入,荷载-挠度曲线出现了 2 次峰值,呈现出良好的变形性能。

(2)当 PP 体积掺率一定, PVA 掺率由 0.2% 提高到 0.4% 时,韧性指标值增幅较大,但当 PVA 掺率为 0.6% 时,韧性指标值增幅减小,这是 PVA 分散不均匀所致。

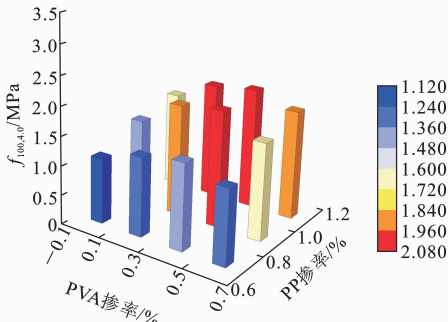
(3)PVA 掺率为 0.2% 或 0.4% 时,随着 PP 掺率增加,韧性指标值 P_{300}, P_{75}, P_{50} 均增大,且韧性指标值 P_{75}, P_{50} 的提高更为明显,说明粗 PP 对后期增韧效果显著。

(4)采用 ASTM C1609 标准计算后可知,增加 PVA 掺率对提高第一峰值强度影响较为显著。

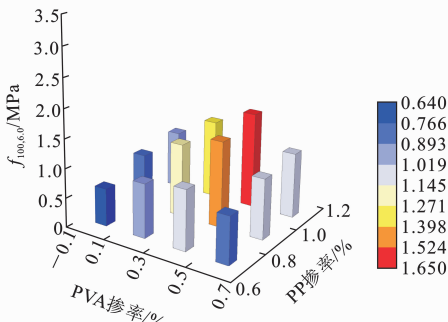
(5)PP 掺率为 1.1% 与 PVA 掺率为 0.4% 混掺



(a) 挠度为1 mm



(b) 挠度为4 mm



(c) 挠度为6 mm

图 5 不同挠度下残余弯曲强度与 PP,PVA 掺率的关系

Fig. 5 Relationship of Residual Strength with PP and PVA Mixing Ratio Under Different Deflections

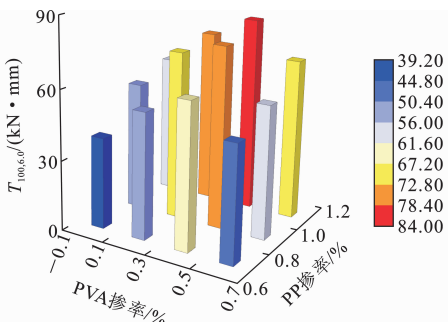


图 6 弯曲韧性与 PP,PVA 掺率的关系

Fig. 6 Relationship of Flexural Toughness with PP and PVA Mixing Ratio

时,弯曲韧性指标值达到最大,若再增加 PP 掺量,韧性指标值提高很小。综合考虑纤维分散性及经济性,建议 PP 与 PVA 混掺时纤维体积掺率分别为 1.1% 和 0.4%。

参考文献:

References:

[1] 赵志刚,谭云亮,王斐峰. 钢纤维混凝土试验研究与疲劳破坏模拟[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(2):40-43,46.
ZHAO Zhi-gang, TAN Yun-liang, WANG Fei-feng. Experimental Study and Fatigue Failure Simulation on Steel Fiber Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2007,24(2):40-43,46.

[2] 刘庆涛,岑国平,蔡良才,等. 机场道面再生混凝土的性能与应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(8):3263-3269.
LIU Qing-tao, CEN Guo-ping, CAI Liang-cai, et al. Properties and Applications of Recycled Concrete for Airport Pavement[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(8):3263-3269.

[3] 钱振东,孟凡奇,曾靖. 高性能沥青混凝土机场道面结构[J]. 东南大学学报:自然科学版,2015,45(3):575-580.
QIAN Zhen-dong, MENG Fan-qi, ZENG Jing. Airfield Pavement with High Performance Asphalt Concrete [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2015, 45(3):575-580.

[4] 麻海燕,吴雅玲,余红发,等. 机场道面除冰液作用下大掺量粉煤灰混凝土的抗冻性[J]. 建筑科学与工程学报,2014,31(2):78-83.
MA Hai-yan, WU Ya-ling, YU Hong-fa, et al. Freezethaw Durability of High Volume Fly Ash Content Concrete Exposed to Airfield Pavement Deicer [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2):78-83.

[5] 刘海鹏,蒋应军,王琪. 钢纤维混凝土路用性能与施工工艺研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2009,26(1):37-40.
LIU Hai-peng, JIANG Ying-jun, WANG Qi. Study on Pavement Performance and Construction Technology of Steel Fiber Reinforce Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2009, 26(1):37-40.

[6] 朱志远,王硕大,邓可库. 新型机场道面混凝土性能研究[J]. 新型建筑材料,2007,34(4):67-69.
ZHU Zhi-yuan, WANG Shuo-tai, DENG Ke-ku. Study on Performance of New Airfield Pavement Concrete [J]. New Building Materials, 2007, 34(4):67-69.

[7] 滕力鹏,谭悦,柴震林. 中国机场水泥混凝土道面脱空状况分析与评价[J]. 中国民航大学学报,2013,31(6):41-45.
TENG Li-peng, TAN Yue, CHAI Zhen-lin. Analysis

- and Evaluation on Void Condition of China's Airport Cement Concrete Pavement[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2013, 31(6): 41-45.
- [8] 刘庆涛, 岑国平, 蔡良才, 等. 机场道面再生混凝土的抗冻性能及机理[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 128-132.
LIU Qing-tao, CEN Guo-ping, CAI Liang-cai, et al. Frost-resistant Performance and Mechanism of Recycled Concrete for Airport Pavement[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2011, 39(12): 128-132.
- [9] 马好霞, 余红发, 卢一亭, 等. 水泥混凝土在机场道面除冰液作用下的化学腐蚀[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 61-66.
MA Hao-xia, YU Hong-fa, LU Yi-ting, et al. Chemical Corrosion of Cement Concrete Exposed to Airport Pavement Deicers[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 61-66.
- [10] 徐桑振, 迟维胜, 刘庆涛, 等. 硅烷浸渍机场道面混凝土性能试验研究[J]. 混凝土, 2012(7): 67-70.
XU Sang-zhen, CHI Wei-Sheng, LIU Qing-tao, et al. Experimental Study on Performance of Airport Pavement Concrete Impregnated with Silane[J]. Concrete, 2012(7): 67-70.
- [11] 邓宗才, 李建辉, 孙宏俊. 新型腈纶纤维混凝土的弯曲韧性试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2004(6): 39-41.
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, SUN Hong-jun. Experimental Research on the Flexural Toughness of New Acrylic Fiber Reinforced Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2004(6): 39-41.
- [12] 沈荣熹. 聚烯烃粗纤维增强混凝土的性能及应用[J]. 混凝土世界, 2009(9): 42-50.
SHEN Rong-xi. The Performance and Application of Fiber Reinforced Concrete with Polyolefin[J]. China Concrete, 2009(9): 42-50.
- [13] 邓宗才, 薛会青, 李朋远. PVA纤维增强混凝土的弯曲韧性[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(5): 139-141.
DENG Zong-cai, XUE Hui-qing, LI Peng-yuan. Flexural Toughness of Polyvinyl Alcohol (PVA) Fiber Reinforced Concrete Beams[J]. South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(5): 139-141.
- [14] 姚武, 蔡江宁, 吴科如, 等. 钢纤维混凝土的抗弯韧性研究[J]. 混凝土, 2002(6): 31-33, 30.
YAO Wu, CAI Jiang-ning, WU Ke-ru, et al. Study of Flexural Toughness of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Concrete, 2002(6): 31-33, 30.
- [15] 邓宗才, 李建辉, 刘国栋. 混杂粗纤维增强混凝土力学特性试验研究[J]. 混凝土, 2006(8): 50-55.
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, LIU Guo-dong. Experimental Study on Mechanical Properties of Hybrid Macro-fiber Reinforced Concrete[J]. Concrete, 2006(8): 50-55.
- [16] 梅国栋, 李继祥, 刘肖凡. 混杂纤维混凝土增强机理研究综述[J]. 建材世界, 2009, 30(3): 10-14.
MEI Guo-Dong, LI Ji-xiang, LIU Xiao-fan. Review of the Research and Application About Hybrid Fiber Reinforced Concrete[J]. The World of Building Materials, 2009, 30(3): 10-14.
- [17] YAO W, LI J, WU K R. Mechanical Properties of Hybrid Fiber-reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 27-30.
- [18] BANTHIA N, TROTTIER J F. Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete; Some Concerns and a Proposition [J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(1): 48-57.
- [19] 王现卫, 邓宗才. 合成纤维混凝土梁弯曲韧性研究[J]. 工程建设, 2007, 39(2): 10-12, 17.
WANG Xian-wei, DENG Zong-cai. Study on Flexural Toughness of Synthetic Fiber Reinforced Concrete Beam[J]. Engineering Construction, 2007, 39(2): 10-12, 17.
- [20] ASTM C1609-10, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)[S].