

聚丙烯纤维增强膨胀混凝土试验研究

孙道胜^{1,3}, 黄小明², 邓敏¹, 谭麦秋², 唐明述¹

(1.南京工业大学, 江苏 南京 21009;

2.空军后勤部机场营房部, 北京 1000729;

3.安徽建筑工业学院, 安徽 合肥 230022)

摘要:通过正交试验,研究2种聚丙烯纤维、4种膨胀剂分别在4个掺量和2个水胶比水平下,对混凝土工作性、力学性能和收缩变形特性的影响。研究表明,聚丙烯纤维和微膨胀剂复合,能提高混凝土的抗折强度、降低抗折弹性模量,并补偿收缩;聚丙烯纤维、膨胀剂和减水剂协同作用对混凝土力学性能的改善优于膨胀剂的单一作用。

关键词:聚丙烯纤维;膨胀剂;混凝土;道面

中图分类号:TU528.55

文献标识码:A

文章编号:1001-702X(2004)02-0001-04

Abstract:The orthogonal experiments were made using two kinds of polypropylene fibre and four kinds of expansion agent respectively with four adding amounts and two water-binder ratios so as to study their effect on workability, mechanical property and shrinkage deformation of the concrete. The result shows that compounding polypropylene fibre and expansion agent can enhance flexure strength and reduce flexure elasticity modulus and compensate shrinkage of the concrete. It also shows that conjunction of polypropylene fibre, expansion agent and water reducer is superior to single expansion agent in improving mechanical property of the concrete.

Key word:polypropylene fibre; expansion agent; concrete; pavement

目前,公路及机场飞机跑道路面有2种主要类型:沥青路面(柔性路面)和水泥混凝土路面(刚性路面)。水泥混凝土路面具有刚度大、强度高、稳定性好,使用耐久和日常养护工作量小等优点。尤其在高等级、重交通道路上,水泥混凝土路面所占的比重日益加大。我国优质路用沥青的不足和水泥资源的相对丰富,加之幅员辽阔,很多地区道路使用环境严酷,因此,推广使用水泥混凝土路面是我国道路发展的一个重要策略^[1]。

由于水泥混凝土的脆性和体积敏感性,这种路面设置了大量的接缝,以减少因温度、湿度引起的路面应力和变形,从而控制面板的开裂破坏。然而,接缝也成了混凝土面层的薄弱部位。随着温度和湿度的反复变化,接缝缝隙相应地张开和闭合,使路表水易于渗入而引起接缝唧泥、路面错台、板底脱空和道路开裂或者因坚硬杂物落入而阻碍膨胀,引起路面沿接缝碎裂等病害。而作用在板边缘和角隅处的荷载所产生的挠度和应力要比作用在板中间的大许多,这就使接缝成为混凝土路面结构缺陷的根源,严重影响混凝土路面使用寿命

以及行车平稳和舒适性^[2];此外,对接缝还需要做大量的养护工作,不仅花费大,而且常常中断交通。

本研究旨在开发一种新型道面水泥混凝土材料—聚丙烯纤维膨胀混凝土,通过补偿收缩和纤维增强的复合效应,减小湿度和温度变形,降低脆性,增加韧性,提高抗折强度、抗疲劳极限及抗冲磨性能,达到延长路面接缝间距,并全面提高水泥混凝土路面的路用品质。

1 试验设计

针对某机场跑道路面工程需要,为工程应用中材料的选择提供依据,选择了2种聚丙烯纤维(网状、单丝)和4种膨胀剂进行试验。为系统考察聚丙烯纤维、膨胀剂的种类和掺量及减水剂等对混凝土性能的影响规律,选用 $L_{16}(4^3 \times 2^0)$ 正交表进行试验。因素及水平设计方案见表1。

表1 正交设计因素水平表

水平	膨胀剂 种类	膨胀剂掺量 /%	纤维 种类	纤维掺量 /(kg/m ³)	水胶比
1	A	0		0	
2	B	5	S(单丝)	0.9	0.38
3	C	7	N(网状)	1.35	0.45
4	D	9		1.80	

膨胀剂为外掺,其掺量为胶凝材料的质量百分数;水胶比为0.38时掺减水剂,水胶比为0.45时不掺减水剂;纤维掺

基金项目:国家973计划项目(2001CB610705)

安徽省教育厅自然科学基金重点项目(2002KJ082ZD)资助

收稿日期:2003-08-16

作者简介:孙道胜,1963年生,男,博士研究生。电话:0551-3513131,

E-mail:sunjhf@mail.hf.ah.cn。

量是指每立方混凝土用量。

根据正交表安排的 16 组配比,分别配制混凝土。并测定混凝土工作性、抗压强度、抗折强度、抗折弹性模量和收缩变形。试验根据 JTJ 053-94《公路工程水泥混凝土试验规程》中的有关方法进行,即:工作性按规程中的 T0512-94,测定维勃稠度;抗压强度按 T 0517-94 测试,试样尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm;抗折强度按 T 0520-94 测试,试样尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm;抗折弹性模量按 T 0521-94 测试,试样尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm;收缩变形参照 T 0526-94 测试,试样尺寸为 100 mm×100 mm×515 mm;各试样带模养护 1 d 后拆模并测定其长度作为基准长度,然后在 (20±5) °C、相对湿度 75%~95%的条件下养护。

2 试验用原材料及配比

2.1 原材料

水泥:P.O 42.5 级水泥,掺有 9%~10%的粉煤灰;

粉煤灰(PFA):Ⅱ级粉煤灰,需水量比 100%,细度 45 μm 的筛,筛余量为 14.0%,烧失量为 6.59%,碱含量 1.28%,SO₃含量 0.38%,含水量 0.11%;

砂(S_F=32%):河砂,细度模数 2.90;

碎石:粒级 5~40 mm,松堆密度 1.53 kg/m³,紧堆密度为 1.67,压碎指标 13.8%;

膨胀剂:A、B、C 为 3 种不同型号的镁质膨胀剂,D 为钙矾石类膨胀剂;外掺。

纤维:江苏产聚丙烯单丝纤维(S),山东产网状纤维(N),技术参数见表 2;

表 2 聚丙烯纤维技术参数

项 目	聚丙烯纤维种类	
	S	N
当量直径/μm	45	100
密度/g/cm ³	0.91	0.91
抗拉强度/MPa	300~500	350~500
拉伸极限/%	28	12
弹性模量/GPa	3.85	3.76
熔点/°C	160~170	160~170
纤维长度/mm	15	20

减水剂:江苏产 JM-B 型萘系高效减水剂(固态)。掺量为胶凝材料总量的 0.60%。

2.2 混凝土配合比

混凝土基本配比:m(水泥):m(粉煤灰):m(砂):m(碎石)=310:39:645:1371。

W/B=0.45 或 0.38。

3 试验结果及讨论

3.1 试验结果

根据正交设计方案对混凝土维勃稠度(VC)、抗压强度、抗折强度、抗折弹性模量和膨胀(收缩)变形进行试验,结果分别列于表 3、表 4。

正交试验结果中空列试样(试样 1)的极差计算结果为:28 d 抗折强度平均极差 1.52,28 d 抗压强度平均极差 12.8;3 d 抗折强度平均极差 1.84,3 d 抗压强度平均极差 2.08;28 d 抗折弹性模量平均极差 0.624。

表 3 试验原材料与用量及混凝土稠度、强度、弹性模量和收缩变形正交试验结果

试 样	膨胀剂		纤维		水胶比	维勃稠度/s	28 d 抗折弹性模量/×10 ⁴ MPa	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		膨胀(收缩)变形率/×10 ⁻⁶		
	种类	掺量/%	种类	掺量/(kg/m ³)				3 d	28 d	3 d	28 d	1 d	6 d	28 d
1	A	0	S	0	0.45	25	3.89	4.74	6.54	32.5	53.9	-21	-10	-55
2	A	5	S	0.9	0.45	15	3.56	6.05	6.37	32.9	50.7	-11	80	42
3	A	7	N	1.35	0.38	43	3.88	5.32	7.45	40.4	64.1	-10	60	76
4	A	9	N	1.8	0.38	26	3.89	5.55	7.71	36.6	62.9	-10	40	96
5	B	0	N	0.9	0.38	20	4.22	6.32	7.56	41.3	72.9	30	-11	-50
6	B	5	N	0	0.38	13	3.91	5.79	6.48	37.0	57.7	0	10	44
7	B	7	S	1.8	0.45	27	3.40	4.66	7.09	25.4	36.9	35	20	67
8	B	9	S	1.35	0.45	21	3.47	4.19	6.76	27.3	47.4	10	40	99
9	C	0	S	1.35	0.38	25	3.89	6.21	7.85	41.0	63.1	30	-10	-41
10	C	5	S	1.8	0.38	29	3.77	5.56	6.69	35.6	61.3	110	140	55
11	C	7	N	0	0.45	12	3.90	4.09	5.96	28.3	50.9	87	123	85
12	C	9	N	0.9	0.45	15	3.88	5.23	6.61	30.7	51.2	60	100	93
13	D	0	N	1.8	0.45	33	3.72	5.52	6.32	38.1	52.1	40	-12	-31
14	D	6	N	1.35	0.45	20	3.80	4.92	6.21	34.2	56.4	140	100	59
15	D	8	S	0.9	0.38	20	3.72	5.67	7.45	35.9	64.9	20	112	64
16	D	10	S	0	0.38	14	4.02	5.90	7.65	35.3	68.6	20	132	102

表4 正交实验各因素极差结果

因素	抗折强度极差		抗压强度极差		弹性模量极差
	3 d	28 d	3 d	28 d	28 d
膨胀剂种类	1.04	0.96	12.64	27.6	0.44
膨胀剂掺量	2.24	2.88	23.04	25.2	0.82
纤维种类	0.56	2	20.64	20.8	1.48
纤维掺量	2.64	1.8	9.78	26.8	0.94
W/B	6.08	6.96	53.44	116	1.68

3.2 结果分析

3.2.1 膨胀剂对混凝土的影响

根据表4中正交实验数据的极差判断,各因素对28 d抗折强度影响大小依次为:W/B>膨胀剂掺量>纤维种类>纤维掺量>膨胀剂种类;对28 d抗折弹性模量影响大小依次为:W/B>纤维种类>纤维掺量>膨胀剂掺量>膨胀剂种类。

根据 $L_{16}(4^3 \times 2^6)$ 及表3分析结果,作出各种类膨胀剂均为0~9%掺量时对混凝土各龄期平均膨胀(收缩)率的影响曲线,见图1。

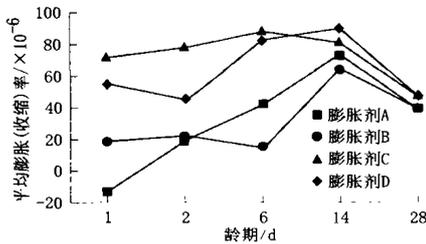


图1 各种类膨胀剂对混凝土膨胀(收缩)率的影响

由图1看出,在试验的养护条件下,4种膨胀剂的最终膨胀量基本接近,但膨胀进程有明显差别,掺A、B类膨胀剂的混凝土6~14 d仍有较大膨胀,而掺C、D类膨胀剂的混凝土其膨胀主要发生在6 d以前;4种膨胀剂在相同掺量时对混凝土的最佳影响为C类膨胀剂。综合考虑实际应用中路面混凝土的收缩特点,选择C膨胀剂较为合适。C膨胀剂在最优配合比条件下,掺量对混凝土试件各龄期的膨胀(收缩)变化见图2。

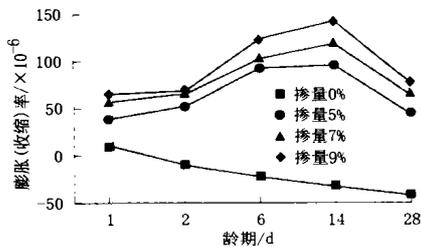


图2 C膨胀剂掺量对混凝土膨胀(收缩)率的影响

图2显示,C膨胀剂掺量为1水平(0%)时混凝土1 d后开始收缩;而掺5%膨胀剂时,混凝土6 d后膨胀开始降低,为保持混凝土6~14 d仍产生微膨胀,以补偿混凝土的收缩;在实际应用中加入聚丙烯纤维对混凝土产生约束的同时,膨

胀剂的掺量选取3或4水平(掺7%~9%)。

3.2.2 膨胀剂对混凝土抗折强度的影响

膨胀剂掺量对混凝土28 d抗折强度变化,见图3。

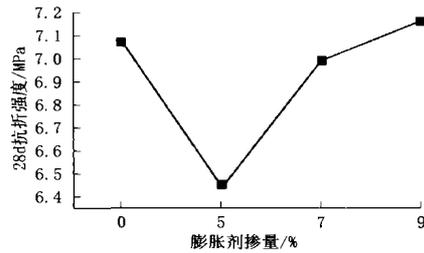


图3 膨胀剂掺量对混凝土28 d抗折强度的影响

图3表明,膨胀剂对混凝土抗折强度有负作用,但外加时,在适宜范围内,膨胀剂掺量增加所产生的胶结材料增强效应可抵消部分负作用,混凝土表现为随膨胀剂掺量增加,抗折强度提高。

3.2.3 纤维对混凝土强度的影响

根据正交试验所得结果的分析,掺S和N类纤维的混凝土平均抗折强度分别为7.04 MPa和6.97 MPa。且掺纤维后混凝土抗折强度提高,但掺量增加到1.35 kg/m^3 后,强度提高幅度较小;纤维掺量对混凝土28 d的抗折强度变化曲线见图4。

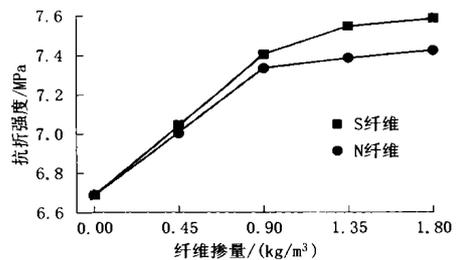


图4 S和N纤维掺量对混凝土28 d抗折强度的影响

从图4可见,2种纤维中,掺S聚丙烯纤维对混凝土28 d抗折强度的贡献优于N纤维,故实际应用的最优混凝土配比中选择掺S类聚丙烯纤维。纤维掺量对混凝土弹性模量变化曲线见图5。

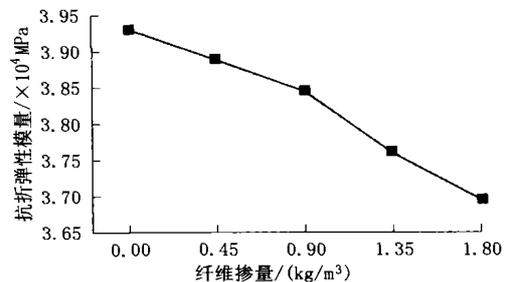


图5 纤维掺量对混凝土抗折弹性模量的影响

图5表明,掺加聚丙烯纤维的混凝土,抗折弹性模量降低,纤维掺量与抗折弹性模量呈近似直线关系。

3.3 聚丙烯纤维在混凝土中的作用

2种纤维对混凝土性能的不同影响,是由于纤维的当量直径和分散性差异所致。相同掺量时,单丝纤维的数量(根数)是网状纤维的1倍多,且在相同搅拌条件下单丝纤维比网状纤维的分散性好,因此单丝纤维对混凝土结构影响更有益。聚丙烯纤维属低弹性模量合成纤维,当其掺入混凝土后,依靠纤维与水泥基材的界面粘结,在未开裂的低应力水平下共同承受外力。在混凝土固化过程中,相对于塑性阶段混凝土的弹性模量,纤维的弹性模量已足够高,故能对混凝土的各种塑性变形起有效的约束作用。在硬化混凝土中,由于纤维的弹性模量低于混凝土,当受外部拉力作用时,纤维产生的变形大于混凝土,在混凝土未开裂前,纤维对基材变形难以起到限制作用,故该纤维混凝土复合材料初裂抗拉强度难以得到提高。若纤维掺量低,不足以承担基材开裂而传给荷载,则极限抗拉强度便很难提高,抗压强度、抗弯强度同样也是如此^[3-4]。之所以掺聚丙烯纤维混凝土的抗折强度略有提高,是因为在早期混凝土结构形成过程中,纤维使混凝土收缩减小、泌水和离析减少,提高了混凝土内部结构的均匀性。

3.4 聚丙烯纤维与膨胀剂的复合效应

在小限制或中等限制下,补偿收缩的原理是以适量的限制膨胀来补偿最大的限制收缩,或者说膨胀能对限制力做功,产生的限制膨胀可抵消干燥、降温等作用引起的限制收缩。膨胀混凝土中加入适量的聚丙烯纤维后,三维乱向分布的低模量聚丙烯纤维对膨胀剂膨胀的限制作用,能有效抑制后期膨胀可能产生的结构损伤,相比于纤维或膨胀剂的单一作用,两者共同作用能进一步改善混凝土的内部结构。同时部分膨胀能转化为纤维的弹性应变,在混凝土中建立一定的自应力,可提高混凝土抵抗变形的能力。

4 混凝土最优配比及其性能

根据试验结果及分析,考虑到强度富裕量较大(设计要求抗折强度为5.0 MPa),膨胀剂改为内掺;另外,为了对路面混凝土综合性能更有益,粉煤灰改为I级灰。

最终确定的混凝土最优配比(kg/m^3): $m(\text{水泥}):m(\text{粉煤灰}):m(\text{砂}):m(\text{碎石}):m(\text{纤维}):m(\text{膨胀剂}):m(\text{减水剂})=282:39:645:1371:0.9:28:2.09$ 。

按正交试验相同的试验条件,测定最优配比的混凝土维勃稠度、抗折强度、抗压强度、抗折弹性模量和膨胀(收缩)变形性能;并按T 0529-94,水压控制恒定为 (1.2 ± 0.05) MPa,加压24 h后停止试验,测定渗水高度,试验结果列于表5。

表5 混凝土性能试验结果

维勃稠度/s		22
28 d 抗折弹性模量/ $\times 10^4$ MPa		3.87
抗折强度/MPa	3 d	5.58
	28 d	7.41
抗压强度/MPa	3 d	37.6
	28 d	61.2
膨胀或收缩变形率 $\times 10^{-6}$	1 d	63.5
	3 d	64.6
	7 d	119
	14 d	125
	28 d	66
渗水高度/mm		7.0

5 结语

(1)所选4种膨胀剂膨胀进程有明显差异,路面混凝土的收缩主要发生在浇筑后的前3 d,故选用早期强度发展较快的C膨胀剂较为合适。

(2)膨胀剂掺量决定混凝土最终膨胀或收缩变形率,因路面混凝土无配筋约束,膨胀剂掺量应略低于一般钢筋混凝土,根据试验结果,考虑养护条件的差异,推荐掺量为7%~9%。

(3)单丝纤维对混凝土性能改善优于网状纤维,故道面混凝土选用单丝纤维更合适。

(4)掺加聚丙烯纤维的混凝土抗折强度提高,抗折弹性模量降低,但掺量增加强度增长幅度较小,掺量 $9 \text{ kg}/\text{m}^3$ 较经济合理。掺加聚丙烯纤维的混凝土流动性略有降低。

(5)使用减水剂降低水胶比是提高混凝土强度的有效措施,减水剂提高混凝土抗压强度的贡献比抗折强度高出近1倍。

(6)试验显示,聚丙烯纤维增强膨胀混凝土,通过纤维的物理约束和膨胀剂化学补偿复合作用,混凝土的体积稳定性得到有效改善,对混凝土的强度、韧性产生有益影响,为延长路面接缝间距,全面提高水泥混凝土路面的路用品质创了造条件。

参考文献:

- [1] 黄卫,钱振东著.高等级水泥混凝土路面设计理论与方法.北京:科学出版社,2000.
- [2] 姚祖康著.水泥混凝土路面设计.合肥:安徽科学技术出版社,1999.
- [3] N.Banthia, N. Nandakumar. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. Cement & Concrete Composites, 2003(25):3-9.
- [4] Wu YaoJie Li and Keru Wu. Mechanical properties of hybrid fiber-reinforced concrete at low fiber volume fraction. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1):27-30. ▲