

南京地铁用模筑聚丙烯纤维混凝土力学性能试验研究

耿飞 钱春香 王瑞兴

(东南大学材料科学与工程系 南京 210096)

摘要:针对南京地铁工程特殊部位对混凝土自密实和抗裂性的要求,研究了聚丙烯纤维混凝土的工作性能、力学性能、抗裂性能和收缩性能,比较了三种聚丙烯纤维增强混凝土性能的效果并对其机理进行了分析。

关键词:聚丙烯纤维;混凝土;抗裂性能;收缩性能

中图分类号:TU528.572 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4637(2003)02-37-03

0 前言

普通混凝土延性差、脆性大、抗拉强度低、抵抗变形能力差,很难满足地铁工程的要求,尤其不能满足一些特殊变截面和易开裂渗漏部位的要求。已有研究表明^[1-3],在混凝土中掺加聚丙烯纤维能大幅提高混凝土的性能。本文针对南京地铁TA1标菊花台1#隧道二次衬砌的仰拱部位,研究了具有自密实和较高抗裂性能的聚丙烯纤维混凝土的力学性能。

1 试验原材料

水泥 强度等级为42.5的普通水泥;

石子 石灰岩碎石,5mm~20mm的连续级配;

砂子 中砂,细度模数2.6;

粉煤灰 华能I级灰;

外加剂 JM-III, YF-7;

聚丙烯纤维 品种及性能见表1。

表1 聚丙烯纤维的性能

品种	长度/mm	形状	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	密度/(g/cm ³)	熔点/°C
P1	19	网状	3.50	560~770	0.91	160~170
P2	13和19混杂	网状	3.50	560~770	0.91	160~170
丹强丝	15	单丝	≥3.85	≥300	0.91	160~170

2 常规力学性能和断裂力学性能试验

研究了三种聚丙烯纤维对混凝土力学性能和断裂力学性能的影响,测试了素混凝土和聚丙烯纤维混凝土的抗压、抗折、劈拉及初裂强度。常规力学性能试验根据GBJ81-85进行,断裂力学性能试验参照CECS13:89进行。

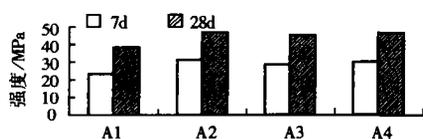


图1 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度

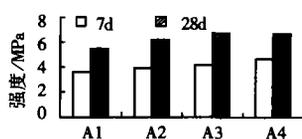


图2 聚丙烯纤维混凝土的抗折强度

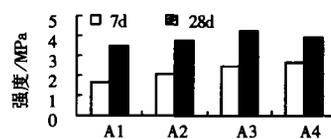


图3 聚丙烯纤维混凝土的劈拉强度

2.1 试验设计和配合比

设计混凝土强度等级为C30,水胶比为0.43。为实现研究目标,采用复合外加剂(膨胀剂JM-III和高效减水剂YF-7)与聚丙烯纤维复掺的技术,具体配合比见表2。

表2 混凝土试验配合比

编号	纤维	W	C	粉煤灰	S	G	JM-III	YF-7
A1	0	155	244	84	771	1160	30	1.432
A2	0.9(P1)	155	244	84	771	1160	30	1.432
A3	0.9(P2)	155	244	84	771	1160	30	1.432
A4	0.9(丹)	155	244	84	771	1160	30	1.432

2.2 常规力学性能试验结果与分析

A1~A4组的7d及28d抗压、抗折和劈拉强度分别如图1、图2和图3所示。

(1) 抗压强度分析

由图1可见,掺0.9kg/m³的P1、P2和丹强丝的混凝土,7d抗压强度相对于基准组(A1)分别提高了33.0%、20.6%和27.5%;28d抗压强度相对于基准组(A1)分别提高了21.5%、17.1%和20.2%。P1对抗压强度的提高贡献最大,其次是丹强丝。

(2) 抗折强度分析

由图2可见,掺0.9kg/m³的P1、P2和丹强丝的混凝土,7d抗折强度相对于基准组(A1)分别提高了9.8%、17.4%和31.7%,其中丹强丝的性能较突出,其次是P2;28d的抗折强度相对于基准组分别提高了13.7%、24.1%和23.0%。

(3) 劈拉强度分析

由图3可见,掺 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 的P1、P2和丹强丝的混凝土,7d劈拉强度相对于基准组分别提高了25.9%、50.6%和63.3%,丹强丝的性能较突出,其次是P2;28d的劈拉强度相对于基准组分别提高了8.3%、22.7%和13.8%,丹强丝较P2稍差。

(4) 比较与分析

研究表明,聚丙烯纤维能提高混凝土的抗折和劈拉强度,但对抗压强度却持有不同的说法^[1,4,5]。在本研究条件下,聚丙烯纤维提高了混凝土的抗压、抗折和劈拉强度。应该指出的是,很多因素会影响聚丙烯纤维对混凝土力学性能的增强效果,如骨料的粒径和级配,混凝土配合比,试件成型条件等。

本试验中,膨胀剂和聚丙烯纤维的复掺,有利于增强纤维与基体的粘附力,提高基体的致密性,减小孔尺度,优化孔分布。试验表明,丹强丝有利于提高混凝土的早期性能,而P2有利于提高后期性能。其原因在于早期混凝土和纤维丝的握裹力还不强,纤维的增强效果主要体现在单位体积纤维丝的数量上,单丝状的丹强丝在这一点上较网束状的占优势。随着水化和密实度的提高,纤维丝与混凝土的握裹力将发挥更大的作用,试验表明^[1],网束型聚丙烯纤维经搅拌后自动分散成两头带钩形的单丝型纤维,纤维两端呈半s型弯曲,增加了与混凝土的粘结力,在后期发挥较好的增强效果。P2的效果较P1好,一方面是因为P2的成网度高,另一方面是因为P2由两种不同长度的纤维混杂,单位质量的纤维丝数量更多,能更好地分布在水泥石内部及骨料周围。

2.3 断裂力学性能试验结果与分析

混凝土是一种含有许多缺陷或孔隙的多相复合材料,当承受荷载时,其内部会引发很多裂缝,随着荷载的增加,裂缝会扩展直至破坏。线弹性断裂力学认为^[5],欲提高混凝土的强度,就必须尽可能减小缺陷的程度,减少内部的应力尖端,以提高混凝土的初裂强度,能够减缓应力尖端的出现,提高自身的抗裂性能。试验测试了三种聚丙烯纤维混凝土的初裂强度,结果见表3。

表3 聚丙烯纤维混凝土的初裂强度

聚丙烯类型	基准组	P1	P2	丹强丝
初裂强度/MPa	5.6	6.4	6.58	6.44
相对于基准组提高率/%	0	14.3	17.5	15.0

由表3可见,聚丙烯纤维有效提高了混凝土的初裂强度,P2的性能最好,其次是丹强丝。试验表明,当聚丙烯纤维混凝土的挠度超过素混凝土的断裂挠度时,还能承受一定的荷载,截面纤维有部分脱出或被

拉出。美国 Romualdi 提出^[6],聚丙烯纤维的阻裂作用主要取决于纤维的平均间距 S , $S = 12.5d \sqrt{1.0/V_f}$,式中, S 表示纤维中心的平均距离; d 和 V_f 分别表示纤维的直径和体积率。理论和实验都证明,当纤维的平均中心间距小于 7.6mm 时,纤维混凝土的抗拉和抗弯初裂强度都得以提高,作用原理就是基体中的纤维在内外力的作用下,消耗部分能量,从而延缓了裂缝的发生和发展。消耗的能量主要由两部分组成,第一部分为纤维受力后因伸长变形积蓄的变形能,第二部分为纤维拔出过程中与基体摩擦消耗的能量。

3 收缩性能试验研究

混凝土的收缩是裂缝产生的重要原因之一,特别是早期的塑性收缩、温度收缩和长期的干燥收缩。由于采用了低掺量的胶凝材料,所以温度收缩可被大幅降低。塑性收缩试验是根据自行设计的快速试验方法来进行,干燥收缩试验根据标准 GBJ82-85 进行。

3.1 塑性收缩试验

采用弯起钢板约束的平板式试验装置^[7]来测试聚丙烯纤维混凝土抵抗塑性收缩的能力,所用试模的内部有突起的棱角,目的是为了产生约束,详见图4和图5。将刚刚成型的试件放在室内环境下,用暖风机为其通风加热6小时,混凝土的表面温度为 56°C ,表面风速为 $2.0\text{m}/\text{s}$ 左右。

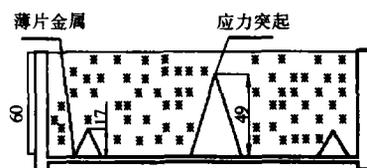


图4 塑性收缩试验平板式试验装置剖视图

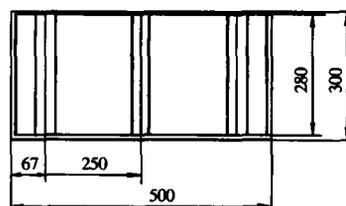


图5 塑性收缩试验平板式试验装置主视图

试验结果为:素混凝土试件中间产生了一条最大裂宽为 0.55mm 的裂纹,而掺了 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 的三种聚丙烯纤维混凝土的表面没有发现裂纹。为比较三种聚丙烯纤维的抗裂效果,将其掺量改为 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 。试验表明,掺 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 的三种聚丙烯纤维混凝土的表面均产生了裂缝,掺P1的裂缝最宽(约为 0.5mm),掺丹强丝的裂缝宽度最小(约为 0.35mm),这主要是因为单丝状的丹强丝单位体积内的纤维丝数量最多,能更有效的提高浆体的均匀性,减少泌水通道以阻止塑性收缩;同

时大量的纤维丝可以使混凝土内部的收缩应力分布得更加连续和均匀,使微裂缝尖端的应力集中得以钝化,从而有效防止塑性收缩裂缝^[8]。

3.2 干燥收缩试验

试验采用 100mm × 100mm × 515mm 的试件,试件成型拆模后,测定其初长,然后将其送入标准养护室浸水养护 7d,接着移入恒温恒湿室并测定其 7d 微应变,以后每隔 3d、7d、28d、45d、60d 测定其相应的应变。为说明膨胀剂补偿收缩的效果,采用 A0 组(用水泥取代等量的 JM-Ⅲ,其它同 A1)对比。

聚丙烯纤维混凝土各龄期的微应变见图 6,图中横坐标“7w”表示浸水养护 7d,其余表示在恒温恒湿室中养护的时间。由图 6 可见,P2 和丹强丝的加入减小了混凝土的干燥收缩,其中 60d 的干缩率可降低 20% 左右。丹强丝的效果稍稍逊色于 P2,P1 的效果不太理想,比只加膨胀剂 JM-Ⅲ 的 A1 组要差,但比没有加膨胀剂的 A0 组要好,60d 的干缩率比 A0 组降低了 27.2%。

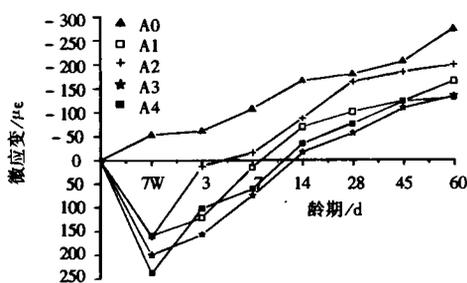


图 6 聚丙烯纤维混凝土各龄期的微应变

4 混合料的工艺性能

模筑聚丙烯纤维混凝土是用在隧道二次衬砌近乎免振捣的仰拱部位,它要求混合料具有自密实性能。鉴于丹强丝和 P2 两种纤维的性能较好,我们在搅拌站现场测试了它们的工作性能,所用石子的最大粒径为 31.5mm,砂率为 40%。混凝土采用干拌的方式,即将纤维、砂、粉状外加剂和胶凝材料预先搅拌,然后加入石子搅拌,最后加水拌匀,搅拌时间比原来素混凝土延长 1 分钟左右。现场试配混合料的工艺情况见表 4。

表 4 现场试配的混合料的工艺情况

	出机坍落度	1h后坍落度	出机扩展度	1h后扩展度
	/mm	/mm	/mm	/mm
素混凝土	225	225	515	500
P2混凝土	220	205	470	420
丹强丝混凝土	205	185	455	420

由表 4 可见,加入聚丙烯纤维后,混合料的工作性受到一定的影响,主要体现在扩展度变小,坍落度和

扩展度经时损失变大。这是由于大量的纤维丝提高了混合料的屈服应力,从而降低了其流变性能。此试验结果已基本能满足施工的要求,不过还应该依据实际情况适当的调整砂率、骨料粒径或者外加剂的用量。

5 结论

(1) 三种聚丙烯纤维的加入,不同程度提高了混凝土 7d 和 28d 的抗压、抗折和劈拉强度。其中丹强丝和 P2 的效果较好,丹强丝早期的增强效果较明显,而 P2 后期的增强效果较明显。

(2) 掺 P1、P2 和丹强丝混凝土的初裂强度分别提高 14.3%,17.5% 和 15.0%,当聚丙烯纤维混凝土的挠度超过素混凝土的断裂挠度时,还能够承受一定的荷载,韧性得以提高。

(3) 塑性收缩试验表明,当聚丙烯纤维的掺量为 0.9kg/m³ 时,可以大大避免塑性裂缝的产生;掺量为 0.6kg/m³ 时,可以减小裂缝宽度。丹强丝抵抗塑性收缩的效果最好,其次是 P2。干燥收缩试验表明,聚丙烯纤维能有效减少混凝土的干燥收缩,掺量为 0.9kg/m³ 时,60d 的干燥收缩率可降低 20% 左右。

(4) 丹强丝或 P2 纤维加入后,对混合料的流动性和扩展度有一定的影响,但是通过高效外加剂、砂率或者骨料粒径的适当调整可以实现自密实,能满足南京地铁隧道二次衬砌仰拱部位的免振捣施工要求,二种纤维都已应用于地铁工程中。

参考文献

- 戴建国,黄承逵.网状聚丙烯纤维混凝土的试验研究.混凝土与水泥制品,1999年第4期
- 朱江.聚丙烯纤维混凝土在路面工程中的应用研究.混凝土,2000年第9期
- Guo Hongding, Qian Chunxiang, Piet Stroeven, Fracture Properties of Cement Composites Reinforced With Steel - Polypropylene Hybrid Fibres, Journal Of Southeast University, 1999, Vol. 15. No. 2
- 陈控发,张登良,张洁等.聚丙烯纤维混凝土路用性能研究.东北公路,第24卷第2期
- 李光伟,杨元慧.聚丙烯纤维混凝土性能的试验研究.水利水电科技进展,2001年第21卷第5期
- 曹亚华,江伟忠.杜拉纤维混凝土的抗裂防水性能研究.重庆交通学院学报,2001年第3期
- 马丽媛,姚燕,田培等.国内外混凝土的收缩性能及抗裂性试验研究方法评述.中国建材科技,2001年第1期
- 刘兰强,曹诚.聚丙烯纤维在混凝土中的阻裂效应研究.公路,2000年第6期

收稿日期:2002-10-24

作者简介:耿飞,男,1979年3月生,硕士研究生

通讯地址:南京市四牌楼东南大学材料科学与工程系

联系电话:(0)13851728857