

聚丙烯纤维混凝土的动载力学特性研究

曹 诚

(市政工程设计研究院)

11414-180.3

1 前言

不断变动的行车荷载形成的疲劳作用,以及在边角处、行车遇到障碍物或路面凹凸不平时形成的高速冲击作用对路面、桥面结构材料提出了不同于其他结构材料的性能要求,即应具备较高的抗动载能力。路面混凝土的疲劳寿命也是水泥混凝土路面设计计算的基本参数。

纤维混凝土以其优良的抗裂性和抗冲击、抗疲劳等抗动载能力而很适用于路面、桥面工程,钢纤维混凝土的优良使用效果已对此给予充分证实。作为一种新型的混凝土增强纤维,聚丙烯纤维也在路面、桥面工程中取得了良好的使用效果,虽然该种纤维在混凝土中的主要功效是抗裂,但其对混凝土内在品质的改善作用同样会使混凝土的抗动载性能有所受益。

动荷载的特征是荷载在某一作用点上的作用时间短暂。在短暂时间内向材料施加较高的荷载时,材料介质处于高应变速率状态。和静载作用或准静载作用(如采用试验机进

行常规强度试验时的慢速加载过程)不同的是,材料对高应变速率荷载的响应性能是作用时间的函数,定量的测试也因此非常困难。但通过对不同材料在动载作用下的定性测试,仍可比较材料抗动载能力的优劣。

本文期望通过对聚丙烯纤维混凝土和普通混凝土的冲击和疲劳试验结果的分析,加深工程技术人员对聚丙烯纤维混凝土抗动载能力的认识。

2 聚丙烯纤维混凝土的抗冲击性能

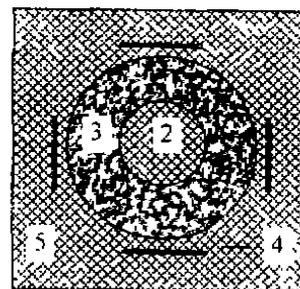
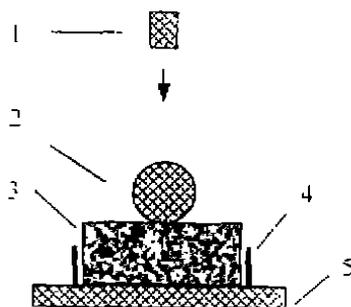
2.1 试验介绍

冲击试验按 ACI(美国混凝土协会)544委员会推荐的方法进行,试验方法见图 1。其中:

(1)按标准方法成型试件,尺寸 $\Phi 150 \times 64\text{mm}$ 。标准养护 28 天。

(2)冲击锤重 4.5kg,下落高度 $h = 457\text{mm}$ 。传力球直径 64mm,测试挡板和试件间距 5mm。

(3)传力球和试件同心,并在冲击锤的中线上。测试时,冲击锤自由落下。



1. 冲击锤 2. 传力球 3. 抗冲击试件 4. 测试挡板 5. 刚性底板

图 1 混凝土的抗冲击试验示意图

该试验方法通过以下几项指标评价或比较混凝土的抗冲击能力:①出现第一条裂缝(初裂)的冲击次数 n_1 ,②初裂后,试件体积膨胀,当试件和4块挡板中任意3块接触时的冲击次数 n_2 。 n_2 被定为试件破坏次数,③试件初裂和破坏时冲击次数的差值($n_2 - n_1$),④冲击韧性 W 和 ΔW ,即试件破坏过程吸收的全部冲击能量和初裂后能继续吸收的冲击能量。计算式如下:

$$W = n \times mgh$$

其中: h 为冲击锤下落高度(457mm), g 为重力加速度 9.81m/s^2 。

本试验采用的原材料和配比为:19mm 长聚丙烯纤维网(fibermesh),425 # 普通硅酸盐水泥,5~20 连续级配石灰石, $M_x = 2.8$ 河砂。基准混凝土设计等级为 C30,试验配比见表 1,掺入纤维后不改变基准配比。

不同掺量的试验编号分别为:CFM1 纤维网掺量 0.9kg/m^3 (相当于纤维体积率 0.1%),CFM2 纤维网掺量 1.8kg/m^3 (相当于纤维体积率 0.2%)。标准抗压试件和抗冲击试件同时制作和养护至 28 天测试。

表 1 抗冲击试验基准混凝土的配比(kg/m^3)

试验编号	纤维网	水泥	水	河砂	碎石
CCon.	0	435	200	580	1230

2.2 测试结果及分析

按 ACI 544 委员会推荐的方法进行测试和评价,聚丙烯纤维混凝土的抗冲击性能测试和计算的结果见表 2。

表 2 聚丙烯纤维混凝土的抗冲击试验结果

试验编号	抗压强度		$\Delta n = n_2 - n_1$	W	ΔW
	(MPa)				
CCon.	43.8	52 57	5	1150	101
CFM1	44.0	295 306	13	6173	262
CFM2	48.0	283 302	19	6092	383

表 2 示出:

(1)虽然较低掺量的聚丙烯纤维对混凝土的静载抗压强度无显著影响,但大幅提高了混凝土抵抗落锤冲击的次数。以混凝土的冲

击韧性 W 为指标进行评价可见,掺入 0.1%~0.2% 的聚丙烯纤维能使混凝土的抗冲击能力提高 5 倍以上。

(2)掺入聚丙烯纤维后,混凝土试件在初裂后能继续保持整体性,继续吸收冲击能量的能力明显提高。以初裂后混凝土的冲击韧性 ΔW 进行评价可知,聚丙烯纤维体积率为 0.1% 和 0.2% 时,能使混凝土的裂后抗冲击能力分别提高 2.62 倍和 3.83 倍。

(3)聚丙烯纤维掺量较高的 CFM2 并未显示出比掺量较低的 CFM1 更高的冲击韧性,但在初裂后继续吸收冲击能量的能力 ΔW 较高。

刚性材料如混凝土的抗冲击性和材料介质的连续性相关性良好。掺入纤维改善混凝土的抗冲击性的机理主要体现在以下几个方面:①弹性模量高、刚度较大的纤维如钢纤维在介质中能起到有效传递冲击荷载的作用。当介质中存在不连续的断裂面时,具有较大刚度的钢纤维能跨越裂缝传递冲击能量,使冲击能得以迅速消散,②直径较小的微纤维如聚丙烯纤维虽然刚度较低,但能有效减少介质内各种损伤因素如水化热、温差、干湿、离析等因素作用形成的内部结构缺陷,使混凝土在硬化后能保持较好的介质连续性,减少了因介质不连续造成的在冲击荷载作用下的应力集中,③纤维能有效约束裂缝的扩展。聚丙烯纤维的功效主要表现在后两点上,即提高混凝土裂前的连续性和裂后的整体性。

本试验中,CFM2 未显示出比 CFM1 更高的冲击韧性似可解释为在室内理想的环境条件下,0.1% 体积率的聚丙烯纤维已足于消除试件内缺陷的产生。但较高的纤维掺量显然使 CFM2 比 CFM1 在初裂后更能保持整体性,裂后的冲击韧性更高。

同文献[1]有关钢纤维混凝土的抗冲击试验结果相比较可知,同在常用的掺量下(聚丙烯纤维体积率为 0.1%~0.2%,钢纤维体积率为 0.7%~1.2%),两者对混凝土的抗冲击能力的提高效率相当(4~6 倍),但由于

钢纤维的弹性模量较高,对提高混凝土裂后的冲击韧性更有效(是普通混凝土的5~10倍)。

3 聚丙烯纤维混凝土的抗折疲劳特性

关于聚丙烯纤维混凝土的疲劳特性的研究文献报道的很少。少量文献[2,3]报道了聚丙烯纤维混凝土的低周抗压疲劳特性的研究成果,主要针对聚丙烯纤维混凝土作为结构材料的抗震性能。而聚丙烯纤维混凝土的抗折疲劳特性尚未见文献报道。

3.1 试验介绍

使用 MTS 810 型试验机采用三分点加荷的方式,测试混凝土小梁在不同应力比下的疲劳寿命,同时记录不同疲劳寿命下梁底的变形。试验方法见图 2。

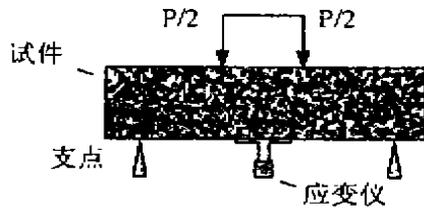


图 2 疲劳试验测试示意图

试验参数为:正弦波加载,频率为 8Hz;疲劳特征值(最小荷载和最大荷载的比值) $P=0.1$;试件尺寸为 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 。

原材料及试验配比为:19mm 长聚丙烯纤维网,425 # 普通硅酸盐水泥,5~31.5mm 连续级配碎石, $M_x=2.54$ 河砂。试验基准混凝土配比见表 3。掺入纤维后不改变基准混凝土配比,试验编号 PFMI 的纤维掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ (相当于体积率 0.1%)。

表 3 聚丙烯纤维混凝土的抗折疲劳试验配比

试验编号	纤维网	水泥	水	河砂	碎石
PCon.	0	435	200	580	1230

3.2 试验结果及分析

3.2.1 疲劳寿命

抗折基准强度的测试结果为:PCon. = 6.78MPa,PFMI = 6.66MPa。测试的结果见表

4。

表 4 聚丙烯纤维混凝土抗折疲劳试验结果

试件编号	应力比/ 应力水平(MPa)	疲劳寿命均值 (循环次数)
PCon. - 1	0.85/5.763	25
PCon. - 2	0.80/5.424	111
PCon. - 3	0.75/5.085	1318
PCon. - 4	0.70/4.746	26200
PFMI - 1	0.85/5.661	247
PFMI - 2	0.80/5.328	922
PFMI - 3	0.75/4.995	4880
PFMI - 4	0.70/4.662	43554

表 4 示出:掺入 0.1% 体积率的聚丙烯纤维后,混凝土的疲劳寿命明显增长。在高应力比下,疲劳寿命的增长幅度更大。对疲劳试验数据进行回归分析的结果见图 3。

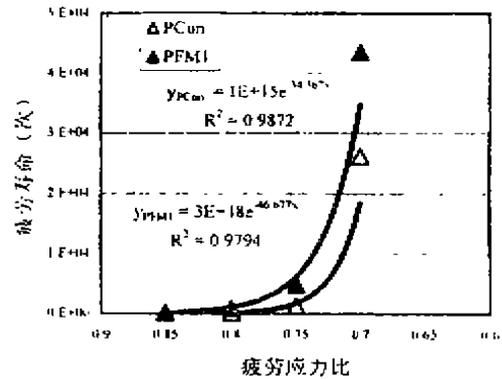


图 3 聚丙烯纤维混凝土的疲劳寿命曲线

图 3 示出:在同样的应力比下,聚丙烯纤维混凝土的疲劳寿命明显高于普通混凝土,或者说达到同样的疲劳寿命,聚丙烯纤维混凝土的疲劳强度更高。如以 10^6 次疲劳寿命所对应的应力比作为疲劳极限应力比 f ,通过回归经验式可计算出: $f_{PCon.} = 0.603$, $f_{PFMI} = 0.615$ 。

3.2.2 疲劳损伤过程

通过采集试件在最大疲劳循环应力 R_{max} 和最小循环应力 R_{min} 下对应的梁底应变 S_{max} 和 S_{min} ,由下式可计算出疲劳过程某一时刻的试件弹性模量:

$$E = (R_{max} - R_{min}) / (S_{max} - S_{min})$$

上式的计算结果实际上是试件由最小应

力到最大应力的割线模量。不同疲劳寿命率(某时刻疲劳循环次数和疲劳寿命的比值 N/N_f)下混凝土的弹性模量值见图 4。图 4 示出:

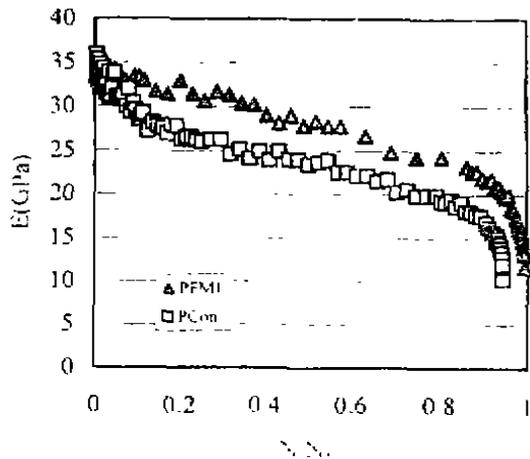


图 4 疲劳作用下混凝土弹性模量的衰减

(1)随疲劳寿命率的增长,混凝土的弹性模量衰减。当 $N/N_f \leq 0.9$ 时,弹模衰减相对缓慢,此后衰减加速,反映出混凝土结构内部的损伤积累在疲劳寿命达到 90% 时由量变演变为质变。

(2)普通混凝土弹模的衰减速度快于聚丙烯纤维混凝土,在疲劳初始阶段尤其明显。这意味着在疲劳应力作用下,普通混凝土比聚丙烯纤维混凝土的损伤速度更快,而聚丙烯纤维混凝土在疲劳荷载的作用下更能保持材料的刚度。

(3)在达到疲劳寿命的 90% 左右时,混凝土内的结构损伤加速,此时材料已基本丧失使用性能。相对于此时的普通混凝土和聚丙烯纤维混凝土的弹性模量分别约为 15GPa 和 20GPa,为初始弹模的 43% 和 61%。在损伤加速的过程中($N/N_f \geq 0.9$),同普通混凝土相比,聚丙烯纤维混凝土的损伤加速度也相对较小。

材料的疲劳破坏过程实际上是内部裂纹引发、扩展、回复、再引发的过程,也是结构损伤逐渐积累的过程。每一次应力循环都将造

成裂纹尺度上的增大,对损伤的积累有所贡献,或者说材料疲劳损伤的程度是疲劳寿命率(N/N_f)的函数。材料损伤的外在表现为强度和弹性模量的衰减。因此,换个角度理解疲劳现象,可以认为在设定应力比下的材料疲劳过程实际上是一个伴随着疲劳过程材料强度的衰减,真实应力比不断增大直至达到 100% 时材料发生疲劳破坏的过程。

抗疲劳性能优良是纤维混凝土的共性,但不同纤维品种的作用机理可能不尽相同。钢纤维混凝土优良的抗疲劳能力可解释为较高弹性模量的纤维能有效约束裂纹的扩展。聚丙烯纤维则有所不同。

聚丙烯纤维对混凝土疲劳性能的影响可从纤维对混凝土结构内原生裂纹尺度的细化效应增强了混凝土介质的连续性和纤维约束裂纹扩展两个角度理解。由于聚丙烯纤维的弹性模量低、掺量少、数量多等特点,前者的影响是主要的。当原生裂纹的尺度得以细化后,混凝土的疲劳寿命也因此得以延长。数量众多的聚丙烯纤维的荷载传递效应还有助于匀化混凝土结构内的应力场,使材料损伤能在介质内扩散,这种效应对材料在疲劳损伤过程中保持刚度有利。

4 结语

本文通过对试验结果的分析表明:聚丙烯纤维通过改善混凝土介质的连续性和约束裂缝的扩展能有效提高混凝土的冲击韧性、初裂后继续吸收冲击能的能力和延长混凝土的疲劳寿命,提高混凝土在疲劳过程中刚度的保持能力。这种特性使聚丙烯纤维混凝土适用于路面、桥面工程。

聚丙烯纤维对混凝土动载性能的提高作用是通过改善混凝土内在品质实现的,这为实现混凝土材料的高性能化提供了一条新的途径。可以预测在环境因素、资源因素和技术因素都要求水泥混凝土高性能化的形势下,作为一种纤维增强型水泥基复合材料,以聚丙烯纤维为代表的微纤维增强混凝土的应用将越来越受到重视。