

[文章编号] 1009-2846 (2004) 03-0020-04

聚丙烯纤维混凝土阻裂机理探讨

姜景, 钱玉林

(扬州大学水利与建筑工程学院, 江苏 扬州 225009)

【摘要】 聚丙烯具有价格低、抗塑性干燥收缩及良好的裂后韧性等特点, 常用作非结构性补强材料。针对聚丙烯纤维混凝土的研究现状, 对聚丙烯纤维的抗裂作用机理做了探讨, 为聚丙烯纤维的应用提供依据。

【关键词】 聚丙烯; 混凝土; 抗裂; 增韧

【中图分类号】 TV431+.3

【文献标识码】 B

聚丙烯具有价格低、物理力学性能好、抗早期塑性干燥收缩、抗爆、抗冲击、抗疲劳、韧性好等特点, 常用作非结构性补强材料。

早期混凝土中使用的聚丙烯纤维, 大多是由聚丙烯薄膜经高倍拉伸后, 再经针辊穿刺而成的束状合成纤维, 习惯上称为聚丙烯膜裂纤维。目前生产方法是直接拉丝制成的单丝束状集合体, 每一束中有多根纤维单丝, 在投入搅拌时自动分

散。某些聚丙烯纤维生产过程中经过了特殊的表面处理, 这样保证了聚丙烯纤维与混凝土中水泥水化物之间较好的粘结。

目前工程中常用的是美国 Hill Brothers Chemical CO. 生产的杜拉纤维, 其经过特别的工艺处理, 可以保证纤维在混凝土中长期发挥功效, 保持混凝土优良的性能。表1列出杜拉纤维主要技术参数。

表1 杜拉纤维主要技术参数

材料	纤维类型	密度	吸水性	熔点	导热性	导电性	拉伸极限
聚丙烯	束状单丝	0.91g/cm ³	无	168℃	极低	极低	15%
抗拉强度	安全性	吸湿率	抗酸碱性	燃点	旦尼尔	弹性模量	自分散性
≥276MPa	无毒材料	<0.1%	极高	580℃	15±2	3793MPa	好

1 研究状况

与木材、钢材等建筑材料相比, 混凝土有着十分明显的优点, 但也存在着一些缺点。如抗拉强度低, 通常其抗拉强度只是抗压强度的1/8~1/6; 极限拉伸率极小, 仅为0.005%~0.05%, 在受拉或受弯时的变形能力很差且呈脆性破坏, 抗断裂性、抗冲击性相应较低。

早在20世纪60年代中期, Goldfein用合成纤维作为水泥混凝土增强的可能性, 发现尼龙、聚丙烯、聚乙烯等纤维有助于提高混凝土的抗冲击性能。Zollo等的试验结果表明, 若在混凝土中掺有0.1%~0.3%的聚丙烯纤维, 可使混凝土

的塑性收缩减少12%~25%。Grzybowaki与Shah用圆环试件测定不同纤维体积掺率的聚丙烯纤维混凝土的裂缝宽度, 发现该值随纤维掺率的提高呈现较大幅度的下降。Ramakrishnantan的研究结果表明, 掺有0.1%~0.3%聚丙烯纤维的混凝土经过200万次加荷后, 疲劳极限较素混凝土增加15%~18%。Hughes等研究了掺入原纤化和单丝聚丙烯纤维增强混凝土的应力应变曲线, 并指出掺入聚丙烯纤维后混凝土的增韧效果显著。

国内关于聚丙烯纤维增强混凝土的研究是随着聚丙烯纤维在国内建设项目中的大规模应用开始的, 目前主要集中于聚丙烯纤维增强混凝土的物理力学性能的研究。朱江等根据美国、日本、

[收稿日期] 2004-01-07

韩国和中国等七家试验室对 PFRC 的力学试验进行误差分析, 建立力学性能计算, 并按我国混凝土规范建立的变异系数原则修正力学关系, 从而使 PFRC 的力学性能设计指标能与现行国家混凝土规范并轨。谷章昭等研究认为, 掺入合成纤维后可以使数以万计的纤维均匀地分布在混凝土内部, 混凝土塑性阶段干缩及冷却所产生的表面裂缝一旦延伸到纤维即可停止发生。纤维的抗裂性取决于纤维的长度与掺量, 综合技术经济一并考虑, 纤维掺量为 $0.6 \sim 0.9 \text{ kg/m}^3$ 已有良好的抗裂性。中国国家建筑材料测试中心按中国国家标准 GBJ82—85 对掺有 0.1% 体积率的聚丙烯单丝纤维混凝土与素混凝土进行抗渗试验和 50 次冻溶循环后试件重量与抗压强度损失作了对比, 证明聚丙烯的掺入对于抗渗和降低强度损失方面有较好的效果。马一平等在聚丙烯对于水泥混凝土性能影响方面主要研究内容有: 聚丙烯单丝与水泥石界面脱粘强度及其影响因素; 聚丙烯纤维对水泥复合材料物理力学性能, 聚丙烯纤维参数、纤维几何形态对水泥混凝土塑性干缩开裂性能的影响等。沈荣熹研究了低掺率合成纤维在混凝土中的作用机制, 归纳总结了合成纤维作为混凝土增强材料的特点, 表明低掺率合成纤维在混凝土中具有阻裂和增韧作用。亢景付介绍了水泥混凝土早期塑性收缩的发展过程, 约束状态下塑性收缩变形及收缩应力的量测方法, 聚丙烯纤维的尺寸和掺量对改善塑性收缩裂缝的影响, 并尝试着对聚丙烯纤维阻裂增韧的机理进行了初步探讨。

相比之下, 国内对于纤维作用深层次的微观机理如: 纤维增强材料的疲劳行为、疲劳裂纹的增长机理等的研究等还很少有报道。同时由于各种原因, 国内外研究的重点都放在了短纤维增强水泥复合材料上, 而长纤维及其织物增强水泥复合材料研究的相关报道则较少。

有报告称“掺入杜拉纤维的混凝土比未掺入杜拉纤维的混凝土无论是抗压强度还是轴心抗压强度都有明显的提高”; 也有观点声明“低掺率合成纤维对混凝土的抗压、抗拉与抗弯强度以及杨氏弹性模量均无明显影响。”中国国家建筑材料测试中心曾对美国两家公司的聚丙烯纤维分别以低掺率加入于混凝土中进行压、拉、弯强度指标的检测, 那些“低掺率的合成纤维即可适度提高混凝土强度指标”的试验结果“很可能是带有选择性的”。

一般而言, 在混凝土中加入聚丙烯纤维能显著改善混凝土的以下性能:

(1) 收缩能力。当混凝土中含有低掺率的聚丙烯纤维时, 即可显著减少其塑性收缩与早期干缩, 纤维体积掺率越大效果愈佳。

(2) 抗裂抗渗能力。聚丙烯纤维阻止了混凝土的离析现象, 提高了浇注体的整体性, 不致发生各层的不均匀收缩, 可显著减少裂缝的数量、裂缝的长度和宽度, 并因而降低生成贯通裂缝的可能性, 提高抗渗能力。

(3) 抗冻能力。聚丙烯纤维可以减少多次冻融循环温度变化而引起的混凝土内部的抗拉集中应力, 阻止微裂缝中扩展; 混凝土抗渗能力的增加也可大大增加混凝土的抗冻能力。

2 抗裂增韧作用机理

混凝土浇注后由于泌水的原因会在其内部形成很多毛细泌水通道, 当混凝土表面水份的蒸发速度大于水份向表面的迁移速度时, 混凝土失水将由表及里向深处发展, 毛细孔内水的弯液面的曲率也将随之逐渐增大(如图 1 所示)。根据毛细原理, 毛细管内水的张力作用将使凹液面有缩小的趋势, 这种趋势造成的孔内负压将使毛细管壁受到持续增长的压缩作用。当这种压缩作用受到约束时, 混凝土的表面将会因为处于受拉状态而开裂, 这是混凝土产生收缩并最终发展为裂缝的微观原因。

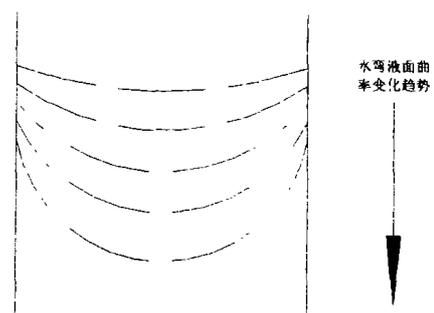


图 1 毛细孔水弯液面的曲率变化

关于纤维混凝土理论研究表明, 聚丙烯纤维对混凝土综合性能改善很可能不是增加强度而是抗裂增韧。聚丙烯纤维掺入混凝土中所起的阻裂作用大致可分为两个阶段:

2.1 塑性收缩过程中的阻裂作用

当混凝土处于半流态或塑性阶段, 由于沉降运动、毛细管压力、早期化学收缩以及自收缩等引起塑性收缩。当这种变化受到约束且约束应力超过混凝土抗拉应力时所诱发宏观裂缝称为塑性裂缝。由于聚丙烯纤维的加入, 可以显著的减少甚至完全消除混凝土浇注后所产生的塑性裂缝。其原因为: (1) 均匀散布的聚丙烯纤维在混凝土中呈现三维网络结构, 起到了“支撑”集料的作用, 其作用效果是阻止了集料的沉降; 同时可以减少混凝土表面的析水。这种水、料的离析使得表层失水迅速而发生较大的沉降, 从而导致表面出现比较多的裂缝, 这种裂缝常称为沉降裂缝。由于聚丙烯纤维的加入可以有效的防止和抑制混凝土的离析倾向, 故而也就减少甚至完全阻止了混凝土表层的裂缝产生。(2) 聚丙烯纤维在塑性状态的混凝土中承受干缩而产生拉应力, 因而减少裂缝的数量。塑性状态的混凝土强度很低, 当水分蒸发时, 混凝土因收缩而发生拉应力, 极易引起裂缝。大量均匀分散在混凝土中的单丝聚丙烯纤维可承受此种拉应力, 减少与防止裂缝的产生和发展。

2.2 硬化过程中的阻裂作用

硬化阶段的混凝土会发生干燥收缩、碳化收缩和温度收缩。在混凝土中加入一定量的聚丙烯纤维, 当混凝土中一旦有裂缝发生时, 因为裂缝的前端与纤维相交, 当微裂缝的长度大于纤维的间距时, 纤维将跨越裂缝起到传递荷载的桥梁作用, 使混凝土内的应力场更加连续和均匀, 使微裂缝尖端的应力集中得以钝化, 裂缝的进一步扩展受到约束, 使得引起裂缝的拉应力得以削弱和消除; 当微裂缝的长度小于纤维的间距时, 纤维将迫使其改变方向或跨越纤维生成更微细的裂缝场, 显著增大了微裂缝扩展的能量消耗。

根据“纤维间距理论”, 沈荣熹认为非连续纤维在混凝土中的阻裂效应很大程度上取决于纤维的平均间距 (S 值) 与单位体积纤维混凝土中纤维的根数 (N 值), S 值与 N 值可分别由下面公式计算:

$$S = 12.5d\sqrt{\frac{1}{V_f}} = 12.5d\sqrt{\frac{10r}{W}} \dots\dots (1)$$

$$N = \frac{1.27}{d^2lr} \times 10^6 \dots\dots\dots (2)$$

式中: S 为纤维平均间距 (纤维中心间距平均值); d 为纤维直径; V_f 为纤维体积掺率; r 为纤维密度; W 为单方纤维混凝土中纤维重量; N 为单方纤维混凝土中纤维的根数; l 为单根纤维的长度。

上述分析表明, 就纤维的阻裂效应而言, 在单位混凝土体积内纤维的根数越多, 纤维的间距越小, 纤维的阻裂效果越好; 或者说单位体积混凝土内纤维分散后的表面积越大, 阻裂效果越好 (见图 2)。以长度规格为 19mm 的杜拉纤维为例, 其直径为 $48\mu\text{m}$, 比重为 0.91, 当在混凝土中的纤维掺率为 0.1% 时, 纤维平均间距只有 1.9mm, 此时 n 值 2, 9×10^7 根/ m^3 。

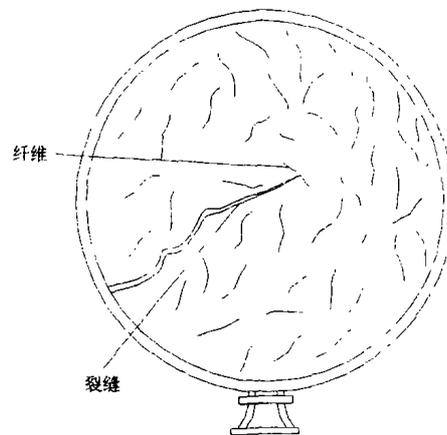


图 2 杜拉纤维的阻裂作用

聚丙烯纤维细度高、数量多的特点使其能有效的限制早期混凝土由于离析、泌水、收缩等因素引起的原生裂隙的发生和发展, 宏观效果是使混凝土中直径大于 50nm 的孔隙含量大量减少。Mehta 认为, 只有 100nm 以上的孔才对抗渗性有害, 小于 50nm 的孔数量的多少可能反映出胶凝数量的多少, 水化产物多, 则抗渗性好。均匀分布在混凝土中彼此相粘连得大量聚丙烯微纤维起了承托骨料的作用, 降低了混凝土表面得析水和骨料离析, 从而使混凝土中直径为 50~100nm 和 $\geq 100\text{nm}$ 的孔隙含量大大降低, 达到了抗裂抗渗的目的, 从而大幅度提高混凝土的耐久性。

3 应用展望

聚丙烯纤维用于混凝土工程始于美国、加拿

大并迅速推广至墨西哥、澳大利亚、日本等国家与地区。我国于20世纪90年代初期自广州至佛山高速公路的部分路段路面工程中试用了聚丙烯纤维混凝土,90年代中后期即在土木与建筑工程中大量使用。

具有显著阻裂效应的聚丙烯纤维多用于路面、桥面等易开裂的薄板混凝土结构,但其作用并不仅限于抑制混凝土塑性开裂。当混凝土表面的宏观塑性裂缝和尺度大幅下降后,路面、桥面混凝土的整体性能将有显著提高,抵抗动荷载的能力也将显著增强。可以说,聚丙烯纤维阻裂效应对混凝土性能的改善作用最终体现在通过提高混凝土材料介质的连续性、整体性使路面、桥面混凝土的综合性能得以提高。

从理论上说,聚丙烯纤维可以用于包括水利工程在内的任何混凝土工程,这样可以发挥纤维混凝土抗渗、抗冻、抗冲刷、耐磨性能好的特

点。大型水利工程中,如何防止大坝的混凝土面板出现裂缝和提高坝体的抗变形能力,一直是工程中最重要技术难题。曾有消息说“三峡大坝出现大裂缝”,有关专家认为:该裂缝是“表面向浅层发展的温度裂缝,不是结构型裂痕”,“经过处理后,能够满足工程设计和安全运行要求”。尽管大坝出现细小裂缝属于正常现象,裂缝在国内外所有水电工程中均不可避免,但是如果采用聚丙烯混凝土浇筑大坝面板肯定对克服大坝表面的裂缝会有所帮助。

高品质的聚丙烯纤维用于混凝土工程是纤维混凝土的发展方向。对于某些在韧性、抗裂性上有特殊要求的工程,聚丙烯纤维材料的掺入可以较好的改善混凝土在此方面的性能。相信在不太久远的将来,作为新型工程复合材料的聚丙烯纤维混凝土将逐步显示出其性能优势。□

Treating on the Mechanism of Resistant Crack of Polypropylene Fiber Concrete

JIANG Jing, QIAN Yu-lin

Abstract: PPF commonly be used as enhanced materials in non-structures, for its lower price, resisted plasticity and toughness resistance. This paper approaches the mechanism of resistant crack of PPF according to its present condition of being researched.

Key words: polypropylene; concrete; resistant crack; enhanced toughness

(上接第15页)

则 $A_s = \rho_{\min} b h_0 = 0.046 1\% \times 1\ 000 \times 2\ 450 = 1\ 130 \text{mm}^2$ 。

可见,采用规范9.5.2计算最小配筋率时,当承受的内力不变,则不论板厚再增大多少,配

筋面积 A_s 将保持不变。

值得注意的是水工大体积混凝土构件在采用少筋混凝土设计的同时还应充分考虑处于恶劣环境的结构,外界因素对构件的影响如抗冻、防海水侵蚀等。□

Talking on the Design for Little Steel Concrete Structure in Hydraulic Engineering

CAO Yu

Abstract: It has the special significance using little steel concrete structure in water engineering construction. This paper introduces the thought and principle of its design at present design standard.

Key words: concrete; steel concrete; little steel concrete; minimal steel bar rate