

聚丙烯纤维混凝土的研究与应用

卫爱民¹, 赵 涛²

(1. 河南安阳工学院建筑工程系, 安阳 455000; 2. 济宁公路管理局, 济宁 272000)

摘要: 分析了聚丙烯纤维增强混凝土的作用机理及其对混凝土性能的改善规律, 并分析了我国目前对于聚丙烯纤维混凝土的研究应用状况及发展前景。

关键词: 聚丙烯纤维; 纤维改性; 混凝土

中图分类号: TU528.572

文献标识码: C

文章编号: 1003-1324(2005)02-0033-04

聚丙烯纤维具有耐化学腐蚀性强、强度高、加工性好、质轻、蠕变收缩小、价格低廉和在低掺量下对混凝土的抗裂、增韧效果显著等优良的技术经济性能, 因而在建筑工程中得到越来越广泛的应用, 它的物理性能见表 1。聚丙烯纤维混凝土是一种掺入少量短切聚丙烯纤维来增强或改善混凝土性能的复合材料。大量的室内试验和工程实践证明^[1~10], 聚丙烯纤维混凝土能够抑制塑性收缩裂缝、显著提高混

凝土的抗冲击性能和弯曲疲劳性能, 同时, 随着聚丙烯纤维的掺入, 混凝土的抗松散性、抗渗性较好, 抗拉及抗折弯强度增加。由于聚丙烯纤维具有上述优良的物理性能, 使得混凝土具有较好的耐老化和优良的抗冻融性。因而聚丙烯纤维混凝土在高层建筑的地下室、污水处理厂的污水池、港区路面、高速公路路面、码头货物料场以及地下洞室、护坡等工程中得到了广泛的应用, 并收到了良好的效果^[11~13]。

表 1 聚丙烯纤维物理性能

密度	熔点	耐酸碱性	含湿量	吸水性	拉伸极限 %	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	导电、导热性
0.91	165℃	极高	≤0.1%	无	≤15	≥270	≥3500	极低

1 聚丙烯纤维混凝土的研究与应用现状

国外对聚丙烯纤维混凝土的研究, 始于 20 世纪 60 年代。1975 年, 在国际材料与结构实验室联合会论文集《纤维增强水泥与混凝土》上, 对有关聚丙烯纤维混凝土的各项性能、计算方法、施工技术等均有较全面的论述。20 世纪 80 年代初期, 为解决军用混凝土工事在受炮火攻击后的抗碎问题和军事工程的耐久性问题, 美国军队工程师的混凝土专家与美国最大的化工产品企业——合成工业公司聚丙烯材料专家共同研制出用于混凝土增强的聚丙烯纤维, 并已大量应用于机场跑道、高层建筑地下室等工程中。美国最大的丹佛机场(总面积超过 53 平方英

里, 设计年客流量 11 亿人次), 其机场跑道、停机坪、地下传输通道等, 都采用了掺加聚丙烯纤维网的混凝土。墨西哥市高级购物中心, 是 1989 年墨西哥最大的建筑项目, 为了提高建筑物的抗地震破坏能力, 全部混凝土结构中(包括板、梁、柱)都掺入了纤维网。国内关于聚丙烯纤维混凝土的研究起步较晚, 是随着国外聚丙烯纤维在国内重大建设项目中的大规模应用开始的, 目前的研究主要集中于聚丙烯纤维混凝土的物理和力学性能方面。20 世纪 90 年代, 中国纺织大学开始进行改性聚丙烯纤维的研制。2001 年, 吉林水利实业公司在吉林省梅河口市进行的渠道防渗护砌试验工程, 则是在全国水利工程中较早采用了改性聚丙烯纤维混凝土的应用实例。浙江省宁波市将聚丙烯纤维混凝土用于水库大

坝面板、溢洪道进水渠底防护工程,该工程于 2001 年 4 月通过了国家验收,其中改性聚丙烯纤维混凝土面板达到了国际领先水平。

2 纤维增强混凝土的作用机理

2.1 多缝开裂理论

多缝开裂理论认为乱向分布的纤维与混凝土复合后,复合基体开裂后的性能,主要取决于纤维的体积率 V_f 与临界体积率 V_{ter} 之间的关系,当 $V_f > V_{ter}$ 时,纤维将承担全部荷载,并有可能产生多缝开裂状态,改变了混凝土材料的单缝开裂、断裂性能低的状态,并出现假延性材料的特征。在多缝开裂时,裂缝间距变小,数量增多,裂纹更细,用肉眼不能看见。同时聚丙烯纤维产生乱向分布,削弱混凝土的塑性收缩,收缩的能量被分散到无数的纤维丝上,从而有效地增强混凝土的韧性,减少混凝土初凝时收缩引起的裂纹和裂缝,同时,无数的纤维丝在混凝土内部形成乱向撑托体系,从而阻碍了沉降裂纹的形成,改变了应力—应变状态,提高了耐久性。

2.2 纤维间距理论

纤维间距理论认为在混凝土内部存在着不同尺度及不同形状的孔缝、微裂纹和缺陷,当受到外力作用时,这些部位将产生应力集中,引起裂纹扩展,导致混凝土结构的过早破坏。为减少这种破坏程度,应尽量减少裂缝源的尺度和数量,缓和裂缝尖端应力集中程度,抑制裂缝延伸。在混凝土中掺入一定体积率的纤维后,在受拉时,跨过裂缝的纤维将荷载传递给裂缝的上下表面,使裂缝处的材料仍能继续承载,缓和了应力集中程度,随着纤维数量的增加,纤维间距的减小并密布于裂缝周围,使应力集中会逐渐减少和消失。

2.3 复合力学理论

复合力学理论^[15]是基于线弹性、匀质顺向配置连续纤维混凝土复合材料而提出的,在混凝土中掺入聚丙烯纤维后,纤维不仅能够转移荷载,还能与基体界面粘合,当沿纤维方向承受拉力时,外力通过基体传递给纤维,使纤维混凝土复合材料的抗拉强度和弹性模量有所增加,其静力弹性模量低于普通混凝土,当聚丙烯纤维掺率达到一定范围时,纤维掺量的变化对静力弹性模量没有太大的影响,但对疲劳变形模量产生影响,使聚丙烯纤维混凝土抗疲劳强度提高,从而改善了混凝土的性能。

2.4 二次微加筋系统理论

二次微加筋理论认为聚丙烯纤维与水泥基料有极强的结合力,纤维为混凝土提供了有效的二次微加筋系统,使聚丙烯纤维易与混凝土材料混合,分布均匀,同时由于细微,故比面积大,有效地抑制了混凝土因干缩、外力等作用所产生的微小裂缝,增强了混凝土的强度,延长了混凝土的使用寿命。

3 聚丙烯纤维混凝土的性能

聚丙烯纤维是一种新型的混凝土增强纤维,被称为混凝土的“次要增强筋”(即不代替受力钢筋),聚丙烯纤维混凝土是把一定量的聚丙烯纤维加入到普通混凝土的原材料中,在搅拌机的拌和下,使纤维受到水泥和骨料的冲击混和,然后均匀、随机地分布在混凝土中,使混凝土的耐久性能(如抗渗透性,抗碳化性能,抗硫酸盐侵蚀等)和物理力学性能(抗拉强度、抗冲击性能、疲劳性能等)得到显著的改善,使其在屋面、路面、桥梁、大坝等实际工程中得到广泛的应用。

3.1 力学性能及疲劳性能

聚丙烯纤维的存在能较大地增强混凝土的柔韧性和抗冲击性,从而增加混凝土的抗破碎性。聚丙烯纤维混凝土比普通混凝土的抗冲击能力提高 1 倍,柔韧性提高 40%^[14]。当聚丙烯纤维掺率在 $0.5\% \leq \rho_f \leq 1\%$ 范围时,纤维掺量的变化对静力弹性模量没有太大的影响,但疲劳变形模量则随着掺率增大而增大,说明对动力荷载作用下的结构物,聚丙烯纤维能发挥更大的效果。聚丙烯纤维混凝土在一定程度上能提高混凝土的抗弯强度。纤维含量在 1%~2% 的聚丙烯纤维混凝土抗弯强度是普通混凝土的 18~23 倍。总之,聚丙烯纤维的掺入有效地提高了混凝土的冲击韧性、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。

3.2 抗渗透性能

和钢纤维等相比,聚丙烯材料的特点是强度高,密度低,加入混凝土后,对控制混凝土的龟裂效果比普通混凝土高出 90%~100%。这是由于纤维的存在,降低了水分在混凝土中的迁移性,减少了泌水和体积变化,减少了混凝土的塑性收缩,从而减少或消除裂缝的产生;同时,由于纤维在混凝土中是均匀分散的,减少了混凝土内部由于干缩和自收缩所产生

的微裂纹,即使是在内部有原始裂纹的存在,由于纤维的存在,阻止了裂纹的进一步扩展,从而阻断了水分的渗透,提高了混凝土的耐久性能。聚丙烯纤维是一类惰性材料,其不吸水,不与酸碱发生作用,加入混凝土后,不会使原混凝土的水胶比及混凝土本身的性能发生变化,保证原混凝土的稳定性。在混凝土中掺入一定比例的改性聚丙烯纤维,可以明显改善混凝土的抗渗性能,而且掺入纤维的比例越高,抗渗性能改善越明显^[15]。聚丙烯纤维混凝土良好的抗渗性能对延缓渗水、防止潮湿和有害介质对混凝土和钢筋的侵蚀起到良好作用,从而延长结构物的寿命。

3.3 抗裂性能

微纤维可以有效地阻止裂纹的产生和发展,可以有效地提高混凝土的抗裂性,其原因主要是当微纤维加入混凝土后,成束的短丝随着搅拌,受到水泥、砂、骨料的冲击就会散开,成为约 1000 万根的短纤维,均匀分布在混凝土内。由于微纤维与混凝土之间握裹力极强,裂缝碰到邻近的微纤维时立即被阻挡,因而防止了裂缝的扩大,提高了混凝土的抗裂性。在混凝土基体不变的情况下,低掺量聚丙烯纤维(掺量为 $0.91\text{kg}/\text{m}^3$)略微降低混凝土的抗压强度和抗剪强度,少许提高混凝土的抗弯强度,显著提高混凝土的弯曲韧性和断裂能,从而起到阻裂和增韧作用,而对混凝土的抗冲磨性能几乎没有改善。

3.4 抗冻融性能

混凝土的抗冻融性能是耐久性的表征,也是寒冷地区混凝土所必需的性能要求。掺少量短切聚丙烯纤维的混凝土按混凝土抗冻试验法,经 25 次反复冻融,无分层与龟裂等现象发生。究其原因,由于纤维在混凝土材料内部各方向上的随机均匀分布,对材料整体产生微加筋作用,缓解了温度变化而引起的混凝土内部应力的作用,阻止了温度裂缝的扩展;同时,聚丙烯纤维混凝土抗渗能力的提高也有利于其抗冻能力的提高。

3.5 高温爆裂性

高性能混凝土由于其组成决定了它一般都具有较高的密实度,这一特性对于提高建筑物的耐久性来说是很有利的,但对于建筑物的防火来说,则有不利的方面,因为一旦建筑物发生火灾,致密的混凝土将使得建筑物内的水蒸气和热量无法排出,从而引起构件保护层爆裂剥落,构件强度降低,严重的则会

引起建筑物的倒塌。而若在高性能混凝土中掺入聚丙烯纤维,利用它在耐火性能方面所具有的特性,即当温度超过了聚丙烯纤维的熔点 165°C 时,混凝土内的聚丙烯纤维熔化挥发逸出,并在混凝土中留下了相当于纤维所占体积的孔道,而聚丙烯纤维由于能均匀乱向分布在混凝土中,因此所留下的孔道也均匀分布在构件中,这对于建筑物内由于温度升高所产生的水蒸气和热量的排出都是很有利的,由此亦改善了高性能混凝土的耐高温性能。

3.6 经济性

聚丙烯纤维的价格为 148 元/kg,按加入量 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 计,纤维混凝土增加的费用为 $133.20\text{元}/\text{m}^3$ 。聚丙烯纤维混凝土与钢纤维、钢筋网比较的经济性可用 65mm 的耐磨、防寒、抗裂的铺装层为例,每 m^2 钢纤维、钢筋网、聚丙烯纤维混凝土的铺装层材料价格分别为 2930 元、26 元、960 元,其中未计及安装和运输过程中的费用差额及施工中的工艺费用差额,聚丙烯纤维混凝土的经济性是显而易见的。

4 聚丙烯纤维混凝土的应用

4.1 聚丙烯纤维混凝土在道路工程中的应用

用聚丙烯纤维混凝土作公路和飞机场跑道面,可有效控制路面的塑性龟裂,抗冲击破碎和抗磨损能力提高 1 倍,抗疲劳性能增加 3 倍,使混凝土路面的完好性延长 5~10 年。另外,在飞机场跑道、停机坪上采用聚丙烯纤维混凝土还能减少接缝处的混凝土破裂的小碎片被喷气发动机吸入产生事故的隐患,提高飞机的安全性。在国外,聚丙烯纤维混凝土已成为机场跑道、停机坪、机库、地下传输管道等工程的综合加固措施之一。在桥梁工程中,用纤维混凝土作桥面铺装层可有效地抑制和减少裂缝,增强桥面的防水性和抗破碎能力,减缓钢筋锈蚀和延长结构的使用寿命。以聚丙烯纤维混凝土取代金属网作公路、桥梁路面的加强结构,成功解决了桥面混凝土容易产生裂缝的难题。

4.2 聚丙烯纤维混凝土在水利工程中的应用

水利工程中常用的普通混凝土在早期硬化阶段,常会因泌水和水分蒸发而产生塑性收缩,混凝土表面形成龟裂缝,影响结构的整体外观。在混凝土硬化后期,还会形成干缩裂缝,影响结构的整体外观。在温度与外力的作用下,裂缝将进一步发展,从而影响混凝土的耐久性与抗磨性,并使钢筋锈蚀,影

响结构安全。近年来,大型水利工程建设对水工混凝土提出了新的、更高的技术要求。现代水利工程要求水工混凝土具有优良的抗渗、防裂、耐磨、抗冲击韧性和耐久性等高性能。聚丙烯纤维特性可显著改善水工混凝土的上述性能,因此,它在水利工程中有广泛的用途。

水工高性能混凝土除了要解决普通混凝土的脆性大、易开裂和抗冲击性能差等问题外,还对抗裂、抗渗、抗冻和抗冲磨能力有更高的要求。研究表明^[16],在水工混凝土中掺入适量的聚丙烯微纤维,能改善混凝土的脆性破坏特征,减少混凝土的收缩裂缝,提高混凝土的韧性、抗冲耐磨性,还能提高混凝土的抗渗、抗冻等特性,是使水工混凝土高性能化的很好途径。

5 聚丙烯纤维混凝土的发展趋势

5.1 高性能聚丙烯改性纤维混凝土

高性能聚丙烯改性纤维混凝土,是21世纪水泥基材料的发展方向之一。据专家预测,21世纪初将是我国钢筋混凝土破坏的高峰期,每年所需维修费将高达数千亿元。而聚丙烯能改善水泥土的耐久性,使混凝土高性能化,效果显著。在建筑中将会具有广阔的发展前景。

5.2 复合聚丙烯纤维改性混凝土

复合材料综合了多种材料的性能,使其性能比单一性能大大提高。在混凝土中加入复合聚丙烯纤维后其各种性能大大提高。如在混凝土中加入聚丙烯纤维和硅灰石,由于水泥体基体内聚力的增加,加入了硅灰石和聚丙烯纤维后,纤维在混凝土基体中得到有效分散,硅灰和聚丙烯纤维的混掺能显著提高混凝土的抗冲击性能。复合聚丙烯纤维改性混凝土将会受到许多学者的重视。

从现代建筑和可持续发展观点看,需要发展高性能混凝土,它是当前水泥基材料的主要发展方向,

被称为“21世纪混凝土”。聚丙烯纤维由于能有效地改善混凝土的耐久性,提高混凝土性能而备受青睐。在北美和欧洲,经过20年来的工程实践,使用聚丙烯纤维混凝土的技术已日臻完善,聚丙烯纤维已成为改善混凝土性能效果较好的材料之一。在我国,对混凝土增强聚丙烯纤维的研究也越来越受到重视。

参考文献:

- [1] 马华堂. 聚丙烯纤维混凝土的力学特性及路面工程应用[J]. 河南科学, 2002, (6): 722~724.
- [2] 朱江. 聚丙烯纤维混凝土的力学性能研究[J]. 广西工学院学报, 2000, (2): 60~65.
- [3] 苏晓薇, 刘丽英. 聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 吉林水利, 2002, (3): 15~17.
- [4] 鞠丽英, 张雄. 聚丙烯纤维混凝土的性能及应用[J]. 合成纤维工业, 2004, (1): 35~37.
- [5] 李卫东. 聚丙烯纤维混凝土的性能试验研究[J]. 国外建材科技, 2004, (3): 18~19.
- [6] 汪洋等. 聚丙烯纤维混凝土的研究现状及趋势[J]. 混凝土, 2004, (1): 24~27.
- [7] 成全喜. 聚丙烯纤维混凝土抗裂性能试验研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2003, (4): 265~268.
- [8] 龚益, 沈荣熹, 李清海. 杜拉纤维在土建工程中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [9] 李北星. 聚丙烯纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2003, (11): 21~24.
- [10] 陈拴发. 聚丙烯纤维混凝土弯曲疲劳性能[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, (2): 18~20.
- [11] 单俊鸿等. 聚丙烯纤维混凝土在路桥中的应用[J]. 建筑石膏与胶凝材料, 2004, 8: 20~22.
- [12] 吴富平, 张恒, 张晓辉. 改性聚丙烯纤维混凝土在高寒地区工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2000, 18(8): 8~9.
- [13] 孙家瑛, 魏涛, 王学文. 聚丙烯纤维对混凝土路用性能的影响[J]. 混凝土, 2001, (6): 57~59.
- [14] 曹诚等. 聚丙烯纤维混凝土动力学特性的影响研究[J]. 混凝土, 2000(5): 43~45.
- [15] 王书祥等. 改性聚丙烯纤维混凝土抗渗性能的试验研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2003, (9): 261~264.
- [16] 盛松涛, 方坤河. 聚丙烯纤维在水工高性能混凝土中的作用[J]. 混凝土, 2003, (11): 51~54.

(收稿日期: 2005-01-11)