

聚丙烯纤维混凝土在水利水电工程上的应用探讨

钟秉章¹, 朱 强², 倪建华³

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310013; 2. 甘肃省水利水电科学研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 东华大学材料学院, 上海 200051)

摘 要:国外从 70 年代末以来,对聚丙烯纤维混凝土进行了大量的试验研究,并在军事、房屋、交通、水利等工程中得到广泛应用。我国则在 80 年代中期开始引进应用。研究成果和工程经验证明,聚丙烯纤维能减少和防止混凝土在塑性和初期硬化阶段的收缩裂缝产生,从而提高防渗、抗冻、抗冲磨等性能。本文介绍聚丙烯纤维混凝土的性能和它在水利水电工程中广泛的应用前景。

关键词:聚丙烯;纤维网;纤维短丝;纤维混凝土;收缩裂缝;混凝土韧性

中图分类号:TU528.572 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-408X(2002)04-0038-05

室内试验和工程实践证明,在混凝土中加入较低掺量水平的聚丙烯纤维,即可减少或防止混凝土在浇筑后早期硬化阶段,因泌水和水分散失而引起塑性收缩和微裂纹;也可以减少和防止混凝土硬化后期产生干缩裂缝及温度变化引起的微裂纹,从而改善混凝土的防渗、抗冻、抗冲磨等性能。同时由于大量纤维随机分布于混凝土中,使混凝土结构的变形能力、初裂后残余强度、韧性都有一定提高。此外聚丙烯纤维混凝土具有的较高粘稠性,可改善喷射混凝土的性能和降低回弹。所有这些特点使聚丙烯纤维成为国外 20 多年来提高混凝土性能的一项重要措施。

80 年代中期以来聚丙烯纤维混凝土在我国土建和交通行业逐渐得到应用,如高层建筑的地下室、污水处理厂的污水池、游泳池、粮食仓储库、大型停车场、高速公路路面、高架路路面、桥梁路面铺装层、机场停机坪、码头货物料场,以及在地下洞室、护坡等工程应用喷射聚丙烯纤维混凝土。由于其良好的性能价格比以及和常规混凝土相同的施工方法,使聚丙烯纤维混凝土得到广泛应用。

1 聚丙烯纤维混凝土的性能

聚丙烯纤维作为一种次要的混凝土加强系统(即不代替受力钢筋),对混凝土的性能产生如下影响:

1.1 聚丙烯纤维抑制了混凝土的塑性收缩微裂纹的产生,提高了建筑物的整体性、耐久性和使用寿命

美国 Pardon 与 Zollo 等人分析了混凝土塑性收缩的性质,用模拟体积变化的平面试样代替 ASTM 沿用的只能反映线收缩的试样来做试验。加入体积含量 0.1% 聚丙烯纤维的砂浆和混凝土,裂缝比对照试样分别减少 87% 和 82%;砂浆收缩量比对照减少 32%~40%;混凝土试样收缩量有一组比对照减少 48%,另一种则与对照相同。同济大学混凝土材料国家重点试验室的测试表明,聚丙烯纤维含量为 0.05% 和 0.15% 的砂浆干缩裂缝加权宽度分别为对照试样的 63.5% 和 37.3%。浙江大学土木工程学院 28 d 干缩试验表明,掺量为 0.1% 的聚丙烯纤维可减少混凝土干缩 10% 左右。大量的工程实践也都证明,聚丙烯纤维的使用对减少混凝土塑性收缩和防止开裂作用十分明显。特别是随着混凝土施工技术的发展,出现了用激光照准的混凝土平面浇筑机,每小时浇注量可达 70 m³,一日可铺设 2 000 m² 地面。采用聚丙烯纤维混凝土能成功地解决了在这样的施工强度下,控制收缩裂缝的问题。对聚丙烯纤维减少收缩裂缝的机理初步认为,一是由于聚丙烯纤维的存在,降低了水分在混凝土中的

收稿日期:2002-11-04

作者简介:钟秉章(1936-),男,浙江温州人,教授;

朱 强(1935-),男,浙江杭州人,高级工程师(教授级);

倪建华(1955-),男,浙江上虞人,工程师。

迁移性,减少了泌水现象,因而减少了体积变化。根据英国认证委员会(BBA)出具的证明,聚丙烯纤维混凝土泌水可减少35%~55%;另一种认识是聚丙烯纤维的变形模量虽然较低,但却与混凝土在早期硬化阶段(24 h内)时的变形模量相当,因而可以有效地抑制开裂。对板式结构防止裂缝过去一般是采用钢筋网。聚丙烯纤维的广泛应用已在一定程度上替代了这种传统作法。圣荷西大学的一项对比试验表明,采用聚丙烯纤维含量为 0.68 kg/m^3 的混凝土比素混凝土减少裂缝71.5%,而设置钢筋网的混凝土仅减少6.5%。多数人认为钢筋网与聚丙烯纤维混凝土都有一定的抑制裂缝产生的作用,都属于次要增强。但前者由于分布很稀,实际上这种作用较弱,而主要是在裂缝发生后限制裂缝宽度。因此不少人主张在地面支承板结构中,可以用聚丙烯纤维混凝土取代钢筋网,但同时也指出两者结合使用效果更好。至于用聚丙烯纤维混凝土代替钢筋网混凝土能方便施工,并大大加快进度,以及由此而带来的效益,则是不言而喻的。

1.2 强度和韧性是混凝土的两大主要性能

当聚丙烯纤维加入量为混凝土体积的0.1%左右时,不会提高混凝土的静力强度(抗压、抗拉、抗折等),但对韧性有显著影响。试验表明能较大地增强混凝土的抗冲击性和柔韧性。圣荷西大学的试验表明,聚丙烯纤维混凝土比普通混凝土抗冲击能力提高一倍,柔韧性大约提高40%,抗疲劳性能增加3倍。Lanning根据已进行的许多试验综合得出结论:聚丙烯纤维混凝土按开裂后整体性衡量的韧性指标(ASTM方法)可提高15%,抗冲击力增加10%~50%。也有试验结果表明,按ASTM方法,韧性指标中的 I_{100} 可提高70%。Soroushian等人用破坏圆柱试样的落锤次数表示抗冲击性,含量0.1%的聚丙烯纤维混凝土是对照素混凝土的约2.9倍,南京水科院的落锤试验的对比结果则更好。在浙江大学进行的抗折试验表明,掺量为0.1%的聚丙烯纤维混凝土尽管不提高抗折强度,但在试验过程中表现为开裂之后,仍能维持整体,不继续加载,试样就不破坏,这说明聚丙烯纤维混凝土有很好的韧性。表征韧性的另一个性能是抗破碎性。在抗压试验中,素混凝土压裂后马上完全破碎,而聚丙烯纤维混凝土在达到最大荷载后仍不碎裂,这对受地震破坏的建筑结构中人员和财产安全有很大意义。此外,由于大量的聚丙烯纤维(每立方米大约千万根的量级)随机分别于混凝土中,使混凝土的变形性能有显

著提高。根据国外报道,高掺量的聚丙烯纤维混凝土极限拉伸应变可达到普通混凝土的2~3倍。有人指出,为提高混凝土韧性,以及用于预制、喷射混凝土时,需要较大的聚丙烯纤维含量。一项按照ASTM C1018进行的试验表明,聚丙烯纤维达0.5%体积含量时,残余强度系数可达到与钢纤维含量为 20 kg/m^3 的水平相当。

1.3 提高了混凝土的抗渗性

圣荷西大学的试验表明含量 0.5 kg/m^3 的聚丙烯纤维混凝土渗水性减少33%~44%,而含量 1 kg/m^3 的聚丙烯纤维混凝土则可减少79%。有人综合了已有的资料,得出纤维混凝土可减少渗透性33%~45%的结论。同济大学混凝土材料研究国家重点试验室的试验得出,聚丙烯纤维含量 0.8 kg/m^3 的混凝土抗渗标号从素混凝土的S10提高到S14。体积含量0.05%的纤维砂浆,抗渗压力提高25%。聚丙烯纤维混凝土抗渗性好对防止和延缓渗水、潮湿气体和氯化物等有害介质对混凝土的侵蚀和对受力钢筋的锈蚀起了良好作用,可延长建筑物的使用寿命。

1.4 提高混凝土的抗冻融次数

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。以往工程上为满足抗冻指标要求,除用引气剂外,往往增加水泥用量,提高混凝土标号,这使混凝土更易开裂,对抗冻不利。南京水科院对C25混凝土,按快冻法进行试验结果表明,普通混凝土抗冻标号为100,而纤维掺量大于或等于 0.9 kg/m^3 的,抗冻指标都大于或等于200次。冻融循环试验后,通常混凝土失重较小,而相对动弹性模数下降较多,说明混凝土冻融破坏主要是混凝土内部产生微裂缝造成,而掺入聚丙烯纤维有助于抑制和减少微裂缝的产生和发展,从而提高了混凝土的抗冻性,可见聚丙烯纤维在提高混凝土的抗冻性上作用十分显著。

1.5 提高海水环境下的耐腐蚀性

混凝土浸没在海水中时,由于海水与水泥及骨料中某些离子的化学反应,表面将形成水镁石、文石(碳酸钙)等物质。某些骨料中的部分离子溶于水中,使混凝土表面软化,降低混凝土抗渗性和抗电解性,加上长期的干湿循环,使混凝土丧失耐久性,导致混凝土的破坏。Abdul-Hamid等人对现场条件的模拟试验表明,体积含量0.2%的聚丙烯纤维混凝土表面结垢时间比素混凝土延长1~10倍。普通

混凝土经海水浸泡的试样表面成片状,很容易剥落,而聚丙烯纤维混凝土表面则未呈分离状。根据 X 光衍射试验,衡量混凝土腐蚀程度的石膏和文石物质生成数量,聚丙烯纤维混凝土仅为普通混凝土的 38% 和 58%。研究者认为掺入聚丙烯纤维是降低海水对混凝土腐蚀的有效措施。西班牙的一项研究表明聚丙烯纤维混凝土降低了内部气体循环,由此延缓了海水腐蚀。

1.6 聚丙烯纤维混凝土的弯曲强度

聚丙烯纤维混凝土的抗压强度与素混凝土相当,但能在一定程度上提高弯曲强度,提高的程度与掺量有关。体积含量达到 0.5%~1% 的聚丙烯纤维混凝土弯曲强度是素混凝土的 1.6~1.9 倍。经过对比试验得出结论,可以用掺入聚丙烯纤维的措施减少传统方法设计的钢筋网数量。同济大学的试验结果,掺量 0.8 kg/m³ 的聚丙烯纤维混凝土抗弯强度提高 7.6%,这说明聚丙烯纤维低掺量水平下对混凝土弯曲强度的影响效果十分有限。

1.7 提高了混凝土的耐磨损性能

根据挪威政府公路试验室的模拟抗磨损试验,加入聚丙烯纤维的混凝土,抗磨损能力提高 52%,并减少材料损耗 34.4%。美国陆军工程师团 CRD-C52-54 方法测试结果,聚丙烯纤维混凝土提高抗磨力 105%,相同条件下加入聚丙烯纤维可延长混凝土寿命一倍。南京水科院和长江科学院分别用不同的试验方法进行的抗冲磨试验,也证实聚丙烯纤维混凝土有较好的抗磨损性能。

聚丙烯纤维混凝土的其他性能,如:防止粗骨料在施工震动时的沉降,提高表面强度;由于聚丙烯纤维熔点为 160℃~170℃,在发生火灾高温时能融化形成气体通道,防止高强度混凝土(60~100 MPa)的爆炸,因此有人认为,聚丙烯纤维混凝土可作为高层建筑防火混凝土。此外,国外为缩短老化建筑物的修补时间而广泛采用了快速硬化混凝土(硬化时间 1 h 以内),其水泥用量增加较多,使混凝土脆性加大。采用聚丙烯纤维混凝土能较好的弥补这一不足。

2 聚丙烯纤维混凝土的经济性

目前质量好的进口聚丙烯纤维网和聚丙烯纤维丝每千克价格在百元以上,国产高质量的改性聚丙烯纤维丝为 50~65 元,按每立方米混凝土加入 0.9 kg 改性聚丙烯纤维丝计,每立方米混凝土单价增加 50 元左右,这比钢纤维混凝土的价格低得多。许多

国内外文献都指出聚丙烯纤维混凝土与钢纤维、钢筋网比较的经济性。在我国条件下,以桥梁、高速公路路面,采用厚 65 mm 的耐磨、防寒、抗裂的铺装层为例,对聚丙烯纤维混凝土、钢纤维混凝土和用钢丝网加固的面层进行比较。则每平方米铺装层材料价格分别为人民币 9.6 元、29.3 元、26 元。说明聚丙烯纤维是最经济的。这当中尚未涉及其他种材料在运输、安装过程所增加的费用和施工中增加的麻烦。用于喷射的聚丙烯纤维混凝土,其回弹损耗比喷射普通混凝土少得多。

3 聚丙烯纤维混凝土的施工方法

在混凝土中掺入聚丙烯纤维极为方便,无须改变原设计混凝土的配比,也不取代原设计的受力钢筋。一般情况下每立方米现浇混凝土掺入量为 0.6~1.2 kg,纤维长度为 15~19 mm。聚丙烯纤维在加入干料(砂石、水泥等)之后,加水之前投入。搅拌时间视搅拌方法、搅拌机种类而异,可以与不加聚丙烯纤维搅拌时间基本相同或稍稍延长。此外,聚丙烯纤维总表面积很大,它的表面要吸附水,因此聚丙烯纤维的加入会增加拌合料的粘稠度,降低塌落度。如果发现施工浇注有困难时,一般不宜增加用水量,而应采用塑化剂或减水剂。由于聚丙烯纤维能保持水分,泌水速度减缓,因此收面工序宜适当推后,应比普通混凝土更接近终凝时再进行。此外,由于聚丙烯纤维混凝土具有较大的粘稠性,比普通混凝土更适合于滑模施工。对于预制混凝土制品施工时,聚丙烯纤维混凝土也可减少搬运时的损坏。

4 聚丙烯纤维混凝土在水利水电工程中的应用探讨

根据聚丙烯纤维混凝土的特性,它在水利水电工程中主要可以用于下列结构部位。

4.1 主厂房水下部分

在水电站主厂房的水下结构中,普通混凝土通常因微裂纹或开裂而降低了防渗能力,使主厂房下层十分潮湿,影响机电设备正常运行。而聚丙烯纤维混凝土因其抗渗能力强,目前在上海等地高层建筑的地下室有大量成功应用经验,可借鉴用以解决水电站主厂房下层潮湿问题。国外已经在许多诸如水池、水利工程及海岸工程等对抗裂防渗有较高要求的混凝土构筑物中,采用了聚丙烯纤维混凝土,既抑制了混凝土的塑性龟裂,又提高了抗渗性能,对薄壁结构尤为适宜。

4.2 板式混凝土结构

聚丙烯纤维混凝土目前得到最广泛应用的场合主要是面支承平板结构,水电站的消力池、护坦、船闸底板等都属于面支承平板结构一类的底板混凝土。厚度大多较小,常和基岩直接接触,混凝土浇筑后因基岩约束,容易发生裂缝。聚丙烯纤维混凝土因其干缩量小,初凝时的塑性收缩微裂纹得到抑制,因此可以减轻这类底板混凝土开裂问题。在常规设计中,为了防止表面收缩裂缝,往往设置了表层分布钢筋网。由于钢筋网中间距一般为 15~20 cm,因各种原因,有时实际起不到防止混凝土表面裂缝的目的。采用一定掺量的聚丙烯纤维混凝土来替代钢筋网可能是一个经济有效的措施,也大大简化了施工,加快了进度,很值得进行试验研究。

滑模施工的堆石坝面板也是一种板式结构,而长度达数十米至一、二百米,易产生裂纹。堆石坝面板是挡水结构,过多的裂纹引起渗漏水量过大,对工程有害。聚丙烯纤维混凝土能减轻或防止开裂从而提高防渗性能,是特别适宜应用于面板。浙江白溪水库工程,堆石坝坝高 124 m,在作了大量室内试验和在现场工艺性试浇基础上,在 2000 年 9~12 月份进行二期面板聚丙烯纤维混凝土的滑模施工,检查发现裂缝较未掺聚丙烯纤维的一期面板少得多,而且宽度较细。蓄水至高水位后大坝实测渗漏量仅为 5~6 L/s。

4.3 喷射混凝土工程的应用

聚丙烯混凝土有较高的粘稠性,很适宜用于喷射混凝土。喷射聚丙烯纤维混凝土与喷射普通混凝土比较,能显著减少回弹损失,增加一次喷射厚度,提高生产能力,降低总成本,并能防止产生裂纹。可用于隧道支护、护坡工程、建筑物穹顶和拱桥底部修补喷浆、水池及筒仓结构的预应力绕丝喷浆护面等。

1985 年瑞典国家研究院对掺加钢纤维、聚丙烯纤维的喷射混凝土和普通喷射混凝土作了对比试验。结果加纤维的喷射混凝土比不加的抗压强度高 34%,抗弯强度高 46%。在矿山加固等工程应用中实际回弹量为:没加纤维为 25%,加钢纤维为 10%。加聚丙烯纤维为 4%~5%。Morgan 等人的试验,采用含量为 4~6 kg/m³ 的聚丙烯纤维高粉煤灰(占胶凝材料的 63%左右)混凝土进行喷射混凝土试验,从喷射层上取的试样试验结果,不掺聚丙烯纤维的混凝土基本上不具备韧性指标,而两种含量的聚丙烯纤维混凝土则均能达到 ASTM 试验规范要求,开裂后的残余强度系数达到 0.33~0.55。

在工程应用方面,美国亚利桑那州的运河防洪工程加固所用的喷射混凝土,全部用聚丙烯纤维取代金属丝网,喷射厚度为 100~150 mm。香港新隧道工程出于环保、电力和商业要求,用聚丙烯纤维取代钢纤维,喷射混凝土厚度 75 mm,效果非常好。菲律宾的某隧道用聚丙烯纤维混凝土加固洞内仰坡和作洞内初期支护,都很成功。我国的引黄工程和铁道工程中采用了喷射聚丙烯纤维混凝土作为边坡防护。根据他们的经验,聚丙烯纤维混凝土在边坡稳定的效果上优于喷射普通混凝土。

喷射聚丙烯纤维混凝土施工时宜用湿喷法,可以较准确的控制水灰比,提高喷射混凝土质量和减少回弹损失,并使聚丙烯纤维在混凝土中得到充分分散。湿喷机械过去完全要靠进口,主要是有日本、美国研制的挤压泵型、英国的 Compermass 型和德国的 BSM-903 型湿喷机,价格十分昂贵。近年来,我国铁道科学研究院西南分院已研究出 TK-961 型湿喷混凝土喷射机,比进口产品便宜甚多,每小时可喷射混凝土 5 m³,最大水平和垂直输运距离分别达到 40 m 和 20 m,但自动化程度低,操作人员需精心控制喷射参数。

4.4 高速水流作用的部位

水利水电工程的溢流面、泄洪洞、消力池、溢洪道泄流槽、闸门门槽以及排沙孔道都有高速水流冲刷、磨损和气蚀问题,特别当水流中掺有泥沙时,问题更为突出。为提高这些部位的混凝土抗冲刷磨损能力,以往的工程措施是采用高强度混凝土、硅粉混凝土和钢纤维混凝土等。不但工程造价高,而且高强度混凝土、钢纤维混凝土和硅粉混凝土施工都较困难。利用聚丙烯纤维混凝土良好的抗冲刷性能用于上述工程部位是合理的选择,还可以不必提高混凝土标号。

4.5 工地路面和桥梁工程

国内外在公路工程中采用聚丙烯纤维混凝土已有大量成功实例,工程建设实践证明聚丙烯纤维混凝土有良好的抗磨损和抗冲击疲劳特点,在高速公路上应用比普通混凝土路面使用寿命增加 5~10 年。大中型水利水电工程往往要装备重型或超重型汽车,对现场施工道路路面要求抗磨、抗裂、抗冲击。普通混凝土路面耐久性差,而钢纤维混凝土路面造价甚高,而且还有磨损轮胎问题。用聚丙烯纤维混凝土铺设路面,可以满足大中型水利水电工程在施工期的施工运输要求。天荒坪抽水蓄能电站后期用聚丙烯纤维混凝土浇筑了数千平方米的厂区道路,

至今未发现开裂。小湾水电站也已开始大量用于混凝土路面工程中。

用聚丙烯纤维混凝土作桥梁工程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寿命。山东济青高速公路一桥面混凝土出现严重破碎,1996 年用聚丙烯纤维混凝土修复,10 d 后恢复使用,效果良好。郑州市政当局从 1996 年开始,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。浙江富阳中埠大桥是 320 国道上的富春江大桥,桥面铺装层为 C50 钢纤维混凝土。我们和设计、施工、建设单位及监理商定少量试用国产改性聚丙烯纤维代替钢纤维,并作了室内混凝土对比试验。1999 年 12 月 30 日在富阳中埠大桥 22 号桥段下游侧桥面铺装层用国产改性聚丙烯纤维混凝土浇灌了 120 m²,次年元月 8 日出现 30 年不遇的大寒潮,当地气

温骤降到 -8℃,过后检查和通车运行后检查未发现任何开裂。三峡大坝 120 栈桥铺垫层已用聚丙烯纤维混凝土代替钢纤维混凝土,节省了投资。

国际上合成纤维混凝土已有 20 多年的发展历史。除了聚丙烯纤维外,还有高模量聚乙烯、丙烯酸纤维、聚酯纤维等,有些试验证明这些纤维在相同掺量下,工程性能优于聚丙烯纤维,但因价格性能比,大量应用的还是聚丙烯纤维。我国聚丙烯纤维混凝土的应用比国外落后了近 20 年,虽然近年来在我国这一材料的应用也得到了较快的发展,但由于进口的纤维价格昂贵,限制了它的使用范围,使得这一新技术不能得到长足地发展。目前国内已研制出改性聚丙烯纤维,其价格只相当于进口纤维价格的 1/2~1/3。白溪水库二期面板全部用国产改性聚丙烯纤维浇筑混凝土的成功经验,为我国水利水电建设推广应用开创了良好的局面。

Study on the Application of Polypropylene Fibre Concrete in Water and Hydropower Projects

ZHONG Bing-zhang¹, ZHU Qiang², NI Jian-hua³

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310013, China; 2. Water and Hydropower Research Institute of Gansu, Lan zhou 730000, China; 3. Material college of Donghua university, Shanghai 200051, China)

Abstract: Many experiments and studies has been done in foreign countries for polypropylene fibre concrete since 1970s, and it has been generally applied to various projects for military affairs, housing, transportation, and water conservancy, etc. It was firstly introduced to China in the middle of 1980s, and the research results and practical experience prove that polypropylene fibre can reduce or prevent the generation of shrinkage crack of concrete in plastic and initial hardening process, thus improving its performances in seepage resisting, frozen resisting, shock strength and wearing strength. This paper make an introduction to the performance of polypropylene fibre concrete and its extensive use prospect in water and hydropower projects.

Key words: polypropylene; fibre net; short fibre; fibre concrete; shrinkage cracks; toughness of concrete

简 讯

百色水利枢纽提前实现大江截流

百色水利枢纽工程是西部大开发标志性工程之一。位于珠江水系郁江流域右江干流中部,坝址距百色市 22 km,是一座以防洪为主,兼有发电、灌溉、航运、供水等综合利用效益的大型水利工程。枢纽由碾压混凝土重力坝、地下厂房、副坝和通航建筑物组成。大坝采用全断面碾压混凝土,最大坝高 130 m。

2002 年 3 月,我公司认真分析了右江历年水文、气象等综合资料,利用导流洞已能过水的条件,综合周密的研究布署并得到了上级主管部门的批准,做出了重大决策,从 3 月份就陆续开始进行围堰截流施工。进入汛期后,上游混凝土围堰经受了多次洪水考验。9 月 18 日下游围堰合龙,提前实现了大江截流。11 月 12 日下游混凝土围堰浇到设计高程,整个围堰截流工作全部完成。工程进入全面施工阶段。

百色水利枢纽工程总投资 53.33 亿元,总工期为 6 年。根据工程建设总进度计划安排:2001 年 10 月主体工程开工、2002 年 10 月中旬大江截流、2005 年 10 月第一台机组发电、2006 年底工程竣工。(广西右江水利开发有限责任公司 辛祖成)