

聚丙烯纤维混凝土 在白溪水库面板堆石坝中的应用

郑子祥 张秀丽 郑芝芬

(华东勘测设计研究院 杭州 310014)

摘要 本文结合白溪水库二期面板聚丙烯纤维混凝土应用的成功经验,介绍了聚丙烯纤维混凝土的试验成果、设计和施工技术要求以及聚丙烯纤维混凝土应用前景展望。

关键词 聚丙烯纤维混凝土 面板堆石坝 设计 白溪水库

1 问题的提出

白溪水库拦河坝为钢筋混凝土面板堆石坝,最大坝高 124.4m,位居国内已建同类坝第四。坝顶高程 177.4m,坝顶长 398m,坝顶宽 8m,坝上游坡度为 1:1.4;下游平均坝坡 1:1.52。

面板的最大斜长为 203.3m,外侧坡比为 1:1.405。面板厚度在坝顶防浪墙底部为 30cm,河床部位面板底部最大厚度为 66cm,单层双向钢筋($\phi 20\text{mm}$ 、 $\phi 22\text{mm}$ 、 $\phi 25\text{mm}$,间距 20cm \times 20cm)布置在面板中部,纵横向配筋率为 0.35%~0.4%。

面板分两期施工。一期面板混凝土强度等级 C25,抗渗等级 W12,抗冻等级 F100;二期面板混凝土强度等级 C25,抗渗标号 W8,抗冻等级 F100。

一期面板从 54.0m 高程浇筑至 128.5m 高程,最大斜长为 125.0m,于 1999 年 11 月 2 日开始浇筑,至 2000 年元月 10 日完成,混凝土工程量 12113m³。

二期面板最大斜长为 78.3m,面板厚度为 30cm~43.5cm,于 2000 年 9 月 20 日开始浇筑,至 2000 年 12 月 5 日结束,混凝土工程量 11000 m³。

一期面板施工完成后,经检查发现裂缝宽度超过 0.15mm 的裂缝共有 21 条,其中大于 0.2mm 的裂缝共 8 条,平均分布在 95m 高程左右。

在混凝土面板堆石坝工程中,防止面板裂缝和提高混凝土变形能力一直是设计和施工需要解决的主要技术问题。裂缝的产生不仅加大了大坝渗漏损失,降低了工程效益,而且使混凝土的耐久性降低、钢筋锈蚀、影响工程寿命。白溪水库为不完全多

年调节水库,大坝二期面板位于水位变动区,冬季经常受到寒流、大风等环境因素的作用,工作条件比较恶劣。防止或减少裂缝并提高面板抗变形能力,对延长面板工作寿命和保证大坝安全运行十分必要。由于常态混凝土抗温度及干缩的能力较低,以增加配筋量来提高混凝土抗裂性能收效甚微。采用钢纤维混凝土,每 m³ 混凝土约增加 400 元~500 元,若采用微膨胀混凝土,又担心混凝土耐久性问题。

聚丙烯纤维混凝土是 60 年代末国外开发的一种新型混凝土材料。它具有防止或减少裂缝、改善结构长期工作性能、提高变形能力和耐久性等优点,因而在军事、交通、房建、机场、水利等类似工程上得到了广泛的应用。我国从 90 年代初首先在道路、桥梁和房建工程中应用此类材料,取得良好的技术经济效果。但水利水电工程对聚丙烯纤维混凝土的应用还只停留在试验阶段,尤其在混凝土面板堆石坝工程中的应用尚为空白。

为了提高白溪水库工程混凝土的质量和耐久性,参建各方共同研究决定结合工程建设开展对聚丙烯纤维混凝土在水利工程上的应用研究,以解决白溪水库二期面板防裂、限裂问题,填补聚丙烯纤维混凝土在水利水电工程上应用方面的空白。

2 聚丙烯纤维混凝土试验研究

本项研究首先进行了国内外聚丙烯纤维混凝土应用和研究情况的调研,在此基础上,开展了对聚丙烯纤维混凝土力学性能、防裂性能、变形、韧性、抗渗、抗冻、耐久性、聚丙烯纤维砂浆防裂和老

化以及增韧细观结构等性能的室内试验研究。室内试验主要由南京水利科学研究院等单位承担。在开展室内试验的同时,参建四方(指挥部、设计、施工、监理)在溢洪道进水口及二期面板1#、3#和9#试验块开展了施工工艺的试验研究。

2.1 室内试验

2.1.1 试验内容

在聚丙烯纤维混凝土配合比试验方案的拟定中,为比较纤维的不同掺量以及粉煤灰掺量对混凝土性能的影响,纤维掺量分 $0\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 四个等级,粉煤灰的掺量分等量替代和超量替代(超量系数1.3),试验内容包括:

①配合比试验方案的拟定;②拌合物性能试验;③力学性能试验;④变形性能和韧性试验;⑤干缩试验;⑥抗渗抗冻试验研究;⑦聚丙烯纤维阻裂作用试验;⑧聚丙烯纤维及聚丙烯纤维砂浆在紫外线辐射下的老化试验;⑨采用CT技术对聚丙烯纤维增韧防裂机制的试验研究。

2.1.2 试验主要结论

(1)抗压、早期抗拉均稍有下降,主要是由于掺入聚丙烯纤维后需增大水灰比所致,但28d抗拉强度与不掺基本相同,抗折强度比不掺纤维的混凝土略有增加。

(2)7d弹性模量比不掺纤维混凝土低5%~11%;28d弹性模量降低5%~13%。纤维混凝土的极限拉伸值均大于普通混凝土,7d极限拉伸值比普通混凝土提高8%~28%;28d极限拉伸值提高6%~20%。纤维混凝土的低弹模和高极限拉伸值说明其变形能力优于普通混凝土,因而有利于面板混凝土尤其早期抗裂。

(3)28d弯曲韧性系数比普通混凝土提高5%~136%。纤维混凝土的较高韧性说明了混凝土的传统脆性弱点得到改善,这对支承在堆石坝体和砂砾石层上的混凝土面板来说,适应沉陷和变形以及防止裂缝的发生具有重要意义。

(4)早期干缩量比普通高强混凝土略大,主要是由于掺入聚丙烯纤维后需增大水灰比所致,但60d后其收缩已低于普通高强混凝土。总之,掺入聚丙烯纤维对混凝土干缩量影响不大。

(5)在最终加压至2.1MPa时,纤维混凝土渗水高度比不掺纤维的混凝土减少16%~49%,抗渗能

力优于普通混凝土。抗冻试验按快冻法进行,聚丙烯纤维的掺入可使混凝土抗冻等级从F100提高到F200以上,其抗冻等级提高十分显著。

(6)试验中发现不掺纤维砂浆的裂缝长而粗,掺纤维砂浆的裂缝短而细,纤维混凝土的开裂系数仅为普通混凝土的42%~46%,阻裂作用明显。

(7)采用氙灯人工气候老化箱来进行加速老化试验,用人工方法模拟和强化在自然气候中受到的光、热、氧、湿气、降雨等环境因素的作用。试验证明,气候老化对聚丙烯纤维混凝土的作用很小,纤维仅在表面深度3mm、4mm的范围内受到老化影响。浅表层几毫米范围内聚丙烯纤维性能的下降,对整体混凝土的强度特性没有影响。对于厚度在30cm以上的二期面板,无需担心聚丙烯纤维的老化问题。

2.2 施工工艺试验研究

施工工艺试验主要结合溢洪道进水口底板浇筑开展了聚丙烯纤维混凝土施工的一般工艺试验,并结合二期面板施工进行滑模施工试验等。

2.2.1 试验内容

①聚丙烯纤维混凝土的拌和工艺及纤维的分散均匀性;②坍落度的控制;③二期面板聚丙烯纤维混凝土施工工艺(包括施工配合比、混凝土运输、平仓和振捣、模板提升、压面等)。

2.2.2 试验主要结论

(1)聚丙烯纤维在混凝土中的拌和工艺分为干拌法和湿拌法两种。根据现场试验,虽然干拌法纤维分散均匀性比湿拌法稍好,但干拌法存在混凝土坍落度变化较大、环境污染严重以及生产效率低下等问题,因此选择湿拌法,即砂、石、水泥、纤维及水一起湿拌,拌和时间为5min。经纤维分散均匀性检验,纤维平均含量与设计值 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 相比,误差在6%以内,基本是均匀的。

(2)根据现场施工工艺试验,坍落度大小直接影响混凝土的运输、振捣、强度及外观质量。坍落度过大造成混凝土运输过程中易分离、出模后混凝土易下塌、表面平整度差。坍落度过小的混凝土在溜槽中易发生堵塞现象,滑行困难,入仓后振捣及收面困难,滑模时阻力大,易拉裂。根据溢洪道进水口底板及二期面板混凝土浇筑试验块的经验,搅拌机口坍落度控制在5cm~7cm范围内比较适宜,同时应

注意各施工工序的协调配合,尽量缩短搅拌机出料到入仓的时间间隔,使仓面坍落度不低于3cm。试验证明,只要掌握合适的坍落度,同时适当加强振捣和收面作业,就可以确保聚丙烯纤维混凝土浇筑顺利进行并保证浇筑质量。

(3)根据施工中混凝土试块取样进行力学强度测试,滑模施工的聚丙烯纤维混凝土各项指标均超过设计要求,3d、7d强度比普通混凝土有所提高,对面板早期防裂十分有利。

在对聚丙烯纤维混凝土室内试验和现场施工工艺试验研究的基础上,2000年10月,白溪水库建设指挥部邀请了专家组对白溪水库二期面板聚丙烯纤维混凝土试验研究进行了评审。专家组一致认为,试验技术路线正确、方法合理,所得结果可信。试验成果表明,掺入聚丙烯纤维可以明显减少混凝土开裂,改善混凝土的变形性能并提高耐久性。在自然条件下,紫外线长期辐射不会造成聚丙烯纤维混凝土性能的退化。聚丙烯纤维混凝土技术性能明显优于普通混凝土,增加的少量工程费用与取得的质量效益相比,经济上是可以接受的,建议在二期面板上应用。

3 聚丙烯纤维混凝土在面板中的应用

室内外试验成果表明,聚丙烯纤维混凝土的力学性能、限裂、抗老化、耐久性等指标达到或超过设计要求,调整后的施工工艺可确保混凝土的浇筑质量。因此,设计同意二期面板采用聚丙烯纤维混凝土。

二期面板共33个条块,除1#、33#面板外,其余面板宽度均为12m,斜长17.3m~78.3m。浇筑自2000年9月20日开浇,至2000年12月5日结束,历时77d。施工中采用的聚丙烯纤维混凝土原材料、配合比、施工机具及布置、施工工艺完全按照面板聚丙烯纤维混凝土施工工艺试验的成果进行,施工过程基本顺利。

3.1 设计指标

(1)材质:为华东纺织大学研制、方大纺织化纤有限公司产品,出厂时应附有质保单,其性能指标如下:比重:0.91 g/cm³;纤维长度:15±1 mm;直径:51μm;燃点:590℃;熔点:167.2℃~168.8℃;抗

拉强度:382.9 MPa;极限拉伸:59.9%;加入防老化剂。

(2)掺量:每m³混凝土中掺0.9kg,约有3400万根~5300万根纤维丝,其掺量约为混凝土体积的0.1%。

(3)粉煤灰:质量不低于Ⅱ级(含Ⅱ级),等量替代水泥,掺量为水泥用量的15%。

(4)混凝土水灰(胶)比:0.40~0.425。

(5)混凝土含气量:4%~5%。

(6)坍落度:出机口为5cm~7cm,仓面为3cm~4cm,可根据气候作适当调整。

(7)纤维在混凝土中的均匀度:现场随机取样,每个试样纤维丝含量与设计值之差大于6%。

(8)聚丙烯纤维混凝土力学性能要求:满足C25、W8、F100,保证率大于95%。

3.2 聚丙烯纤维混凝土施工工艺要求

(1)袋装:根据混凝土拌和机容量确定每罐混凝土的聚丙烯纤维掺量,出厂时按此量袋装。

(2)拌和:聚丙烯纤维混凝土按湿拌5min考虑,但可根据实际情况作适当调整。

(3)运输:混凝土拌和系统应布置在坝顶,运输道路平坦,从出机口至溜槽运输时间控制在5min以内,以尽量减少坍落度损失。

(4)废料处理原则:发生下列情况之一者,应作废料处理:

①出机口混凝土坍落度一旦小于3cm,不得入仓;

②溜槽受料斗至仓面沿途从溜槽顶部散落在溜槽两侧的混凝土,当面板浇至该部位发现该散料已结块时,应作废料处理。

③在仓面振捣过程中一旦发现振捣困难并出现振捣棒拔出后形成空洞时,应将该部位混凝土作废料处理。

(5)交接班:交接班时间及用餐时间应控制在20min以内,并应事先将仓面内已入仓的混凝土振捣完毕。

(6)取样:(检查龄期均为28d)

①力学性能检测:抗压试块每班取1组;抗拉试块每浇筑块取1组;抗渗、抗冻试块每2000m³取样1组。

②坍落度检测:浇筑期间每2h测定一次出机

口混凝土坍落度,并根据气候情况随机在仓面取样测定坍落度

3.3 质量评定

根据试块 28d 龄期力学性能检测结果,对二期面板聚丙烯纤维混凝土的质量评定如下:

(1)混凝土抗压强度(共 108 组试件):设计等级 C25, 实测抗压强度平均值 38.8MPa, 均方差 3.28 MPa, 离差系数 8.5%, 保证率 99.98%。

(2)混凝土抗渗等级(共 7 组试件):设计抗渗等级 W8, 实测抗渗等级 W8~W14, 合格率 100%。

(3)混凝土抗冻等级(共 6 组试件):设计抗冻等级 F100, 实测抗冻等级 F100~F150, 合格率 100%。

(4)混凝土劈裂抗拉强度(共 15 组试件):实测劈裂抗拉强度平均值 2.47 MPa, 最大值 2.94MPa, 最小值 2.1MPa。

(5)混凝土抗折强度(共 1 组试件):抗折强度为 3.4MPa。

以上检测数据表明,二期面板聚丙烯纤维混凝土各项指标均满足设计要求。

3.4 裂缝检测

采用读数显微镜对二期面板聚丙烯纤维混凝土的裂缝宽度、长度进行观测,并用超声波检测仪对裂缝深度进行观测。

二期面板裂缝宽度超过 0.15mm 的裂缝共 8 条,其中裂缝宽度超过 0.20mm 的有 4 条,裂缝总数量少于一期常规混凝土面板,而且裂缝宽度、深度、长度都较一期面板有明显改善。与国内同类面板坝相比,面板裂缝数量较少,充分显示了聚丙烯纤维混凝土良好的抗裂性,同时,由于聚丙烯纤维混凝土其他方面的优越性也相应提高了面板工程的质量和耐久性。

4 聚丙烯纤维混凝土应用前景展望

多年来混凝土开裂一直是困扰水电工程施工的老问题,特别是堆石坝面板、闸室、溢流面、底板等部位,这些结构的共同特点是结构暴露面大,厚度小,对环境温度和湿度的变化较敏感,特别是气温骤变或混凝土干缩将造成结构拉应变而引起开裂。

为改善混凝土的变形特性和韧性,消除并减缓混凝土早期裂缝的发生,在一些水电工程上采用优

质水泥、选择吸水率及含泥量较小的砂石骨料、尽量减少水灰比及用水量、选用高效外加剂和粉煤灰以及加强保温和养护、减少基础约束等措施,取得了良好的效果,施工期没有发现或很少裂缝。但由于环境条件的限制,如一些地区的水泥和砂石骨料质量欠佳、或昼夜温差较大等因素,往往难以解决面板裂缝问题,一些工程面板裂缝多达数百条。也有一些工程在混凝土中掺入微膨胀剂,施工期没有发现或很少裂缝,但掺入微膨胀剂后是否会影响混凝土的耐久性,目前尚无明确结论。

聚丙烯纤维混凝土能有效地防止和减少塑性收缩裂缝,其增强机理是:当每 m^3 混凝土中加入数千万根纤维后,纤维在混凝土内部构成一乱向支撑体系,产生有效的多向二级加强效果,从而提高水泥及胶凝体的抗拉强度;把混凝土收缩能量分散到高抗拉强度而弹性模量(3400MPa~3500MPa)相对较低的纤维单丝上,阻止混凝土中原有缺陷(微裂缝)的扩展并延缓新裂缝的出现;减少混凝土的毛细管通道,降低混凝土暴露表面水分的损失率。同时,无数纤维丝形成的支撑体系,有效地保证了均匀泌水,阻止沉降的产生,由此达到提高混凝土的变形能力,改善混凝土的韧性,还可提高混凝土的抗渗、抗冻性能,从而使混凝土耐久性大大提高,气候老化对聚丙烯纤维混凝土的作用很小。因此,在面板中使用聚丙烯纤维混凝土其耐久性是有充分保障的,这与国外的研究结论相一致。

国产聚丙烯纤维丝其价格大约为进口聚丙烯纤维丝的 1/2 至 1/3, 其价格优势为今后我国聚丙烯纤维混凝土在水电工程中推广应用创造了条件。白溪水库大坝面板混凝土设计工程量 22350 m^3 , 工程投资为 447 万元(未计入钢筋等投资), 约占大坝工程投资的 9.5%。二期面板混凝土掺加聚丙烯纤维丝, 施工方法与普通混凝土基本相同, 二期面板混凝土工程量 11000 m^3 , 每 m^3 混凝土增加纤维材料费 45 元, 另外增加搅拌、振捣和收面台班费用约 35 元, 共增加工程投资约 80 万元, 占大坝面板混凝土投资的 19.7%, 但占大坝工程投资的比例不足 2.0%, 与所取得的质量效益相比, 在经济上是可以接受的。

聚丙烯纤维混凝土与钢纤维和硅粉混凝土等材料相比因其适宜的价格和常规施工工艺, 在板式结构和高流速建筑物的混凝土中具有很大经济、技

术优势和推广价值。白溪水库在二期面板成功应用聚丙烯纤维混凝土的基础上,又在溢洪道陡槽高速水流区(流速达到 36m/s)部分浇筑块成功应用了聚丙烯纤维混凝土。

许多水利工程因聚丙烯纤维混凝土可接受的价格,可以在避免采用钢纤维、硅粉等昂贵材料的条件下,合理提高混凝土的设计标准,从而大大提高我国水工混凝土工程的质量和安

全。由于聚丙烯纤维混凝土良好的技术经济指标,所以近一年来已引起国内水利界的广泛关注,如天荒坪、三峡等工程已经开始了工程应用;新疆吉林台、青海公伯峡、江苏铜官山等工程已决定采用并拟列入招标文件;洪家渡、水布亚电站及永定河滞洪工程等正在研究采用该项技术。由于聚丙烯纤维混凝土技术在提高防裂、抗变形、抗冲磨和耐久性性能方面的显著优势和适宜的价格,将可在下列各类水利水电工程得到广泛的应用:

(1)大面积的板式结构,如堆石坝面板、船闸底板和侧墙、护坦、消力池及其它直接浇筑在基岩面上的底板;

(2)防渗建筑物,如水电站厂房下层、地下室墙板、水池(供水池、游泳池、污水池)等;

(3)有抗冲磨要求的建筑物,如水电站高速水流的溢流面、重载车流的路面和桥面抗磨层等;

(4)对混凝土抗冻融性能有高要求的北方地区;

(5)喷射混凝土。

5 结 语

(1)室内及现场试验研究表明,聚丙烯纤维混凝土能有效地防止和减少塑性收缩裂缝,开裂可减少 54%~58%,28d 极限拉伸值提高 6%~20%,韧性系数提高 5%~136%,抗冻等级从 F100 次提高到 F150 以上。防渗性能也有较大提高,从而使混凝土防裂性能和耐久性大大提高,对提高面板等结构的混凝土质量、延长工程寿命具有重要意义。

(2)试验证明,气候老化对聚丙烯纤维混凝土的作用很小,纤维受到老化影响仅在混凝土表面深度 3mm、4mm 的范围内。浅表层几毫米范围内聚丙烯

纤维性能的下降,对整体混凝土的强度特性没有影响,故其老化问题基本可以排除,使用聚丙烯纤维混凝土其耐久性是有充分保障的。

(3)拟定合理的混凝土配合比是确保聚丙烯纤维混凝土质量的关键。由于掺入纤维会增加拌和物的粘稠度,降低坍落度,故应在原混凝土配合比的基础上适当增加水灰比或同时增加水和水泥用量及改变砂率等进行调整,但混凝土的抗压、抗拉和抗折强度都可以基本维持不变。

(4)施工工艺也是影响聚丙烯纤维混凝土施工质量的关键要素。虽然聚丙烯纤维混凝土的施工工艺与普通混凝土基本相同,但为了确保施工质量,室内试验和现场施工工艺试验是必不可少的。此外,还需要合理控制出机口混凝土坍落度,注意缩短出机口到仓面的运输时间,控制仓面混凝土坍落度不低于 3cm,适当加强振捣和收面作业,并对进入仓面前及在振捣过程中发现的不合格料及时作废料处理。上述施工工艺需要一支有聚丙烯纤维混凝土施工经验的专业队伍来完成,以确保聚丙烯纤维混凝土施工的顺利进行和质量。

(5)2001 年 5 月水利部国际合作与科技司对聚丙烯纤维混凝土在水利工程中的应用研究进行鉴定,对该研究成果给予较高评价,并以查新报告证明:“《聚丙烯纤维混凝土在水利工程中的应用研究》成果总体上达到国际先进水平,其中聚丙烯纤维混凝土在堆石坝混凝土面板中的应用达到国际领先水平”。

(6)国产聚丙烯纤维的适宜价格为今后我国聚丙烯纤维混凝土在水电工程中推广应用创造了条件。可以预见,在不久的将来,聚丙烯纤维混凝土将会在水电工程中得到推广应用。

参考文献

- [1] 南京水利科学研究所,《聚丙烯纤维混凝土试验研究》,2001.
- [2] 水电十二局第一分局,《掺改性聚丙烯纤维混凝土施工小结及施工指南》,2001.
- [3] 聚丙烯纤维混凝土在水利工程中的应用研究课题组,《聚丙烯纤维混凝土在水利工程中的应用研究报告》,2001.