

马河水库溢洪道干喷纤维混凝土加固工程研究

陈 瑛¹, 姜弘道¹, 冯新权², 宗士鹏³

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东省水利勘测设计院, 山东 济南 250013;
3. 滕州水务局马河工程管理处, 山东 滕州 277500)

摘要:根据喷射混凝土的施工工艺,采用现场喷制试件的方法,研究了加固马河水库溢洪道所用干喷聚丙烯纤维混凝土的塑裂性能,用切割法制作试件,研究了喷射纤维混凝土的抗冻性以及冻融循环对纤维混凝土与浆砌石界面黏结强度的影响.试验结果表明:低掺量聚丙烯纤维可抑制混凝土塑裂,提高抗冻融循环能力;干喷纤维混凝土与浆砌石之间的劈裂黏结强度随着时间的延长而提高,且受冻融循环影响很小;选择合适的材料和施工工艺,可有效地降低干喷纤维混凝土的回弹率.

关键词:喷射纤维混凝土;黏结强度;冻融循环;塑裂

中图分类号:TV431.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2005)03-0051-04

Strengthening of spillway for Mahe Reservoir with dry-sprayed polypropylene fiber concrete//CHEN Ying¹, JIANG Hongdao¹, FENG Xin-quan², ZONG Shi-peng³(1. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China; 2. Shandong Water Resources Survey and Design Institute, Jinan 250013, China; 3. Mahe Project Management Division, Tengzhou Bureau of Water Conservancy, Tengzhou 277500, China)

Abstract:The plastic cracking performance of dry-sprayed polypropylene fiber concrete used for strengthening the spillway of Mahe Reservoir was studied by in situ spraying of concrete samples. The results indicate that the mixing with low content of polypropylene fiber can reduce the plastic shrinkage and improve the freeze-thaw durability of sprayed concrete, and that the bond strength of the interface between sprayed fiber concrete and the stone blocks increases with time, while it is little affected by freeze-thaw cycling. It is also concluded that the rebound rate of dry-sprayed fiber concrete can be reduced obviously by adoption of rational materials and techniques.

Key words: sprayed fiber concrete; bond strength; freeze-thaw cycling; plastic cracking

马河水库位于南四湖流域北沙河上游,总库容 1.38 亿 m³,是以防洪为主,兼顾灌溉、城市供水、养殖、发电等综合效益的大(二)型水库.该库为险库,大坝属三类坝,溢洪道边墙原设计为浆砌石,存在严重质量问题.2002 年 2 月,淮河水利委员会以淮委规计[2002]47 号文批复同意进行马河水库除险加固工程.

溢洪道处于水位变动区,不断承受动水荷载、温度变化、冻融循环、水流冲刷磨损.防止和减少裂缝,提高混凝土变形能力是该工程的主要技术问题.为提高混凝土的质量,工程建设和设计单位共同决定采用新型聚丙烯纤维喷射混凝土对溢洪道浆砌石边墙进行加固,并进行塑裂性能、抗冻能力、聚丙烯纤维混凝土与浆砌石界面黏结强度的试验研究.

聚丙烯纤维是一种束状的合成纤维,化学性质稳定,耐酸碱性强,不与混凝土中的水泥、掺和料、

水、外加剂等发生化学反应,表面具憎水性,拌和时不易结团,混凝土拌和物的和易性良好.聚丙烯纤维还能提高混凝土的韧性,增大混凝土的抗冲击能力和耐磨性能,能经受住高速水流的冲刷磨损^[1].喷射混凝土比普通混凝土收缩大,加入聚丙烯纤维能显著减少混凝土的塑裂^[2,3].若聚丙烯纤维体积含量低于 0.1%,只要能均匀分布在混凝土中就能控制混凝土的塑性收缩,但对控制硬化混凝土的干裂效果不大;当聚丙烯纤维体积含量超过 0.7%,可大大改善硬化混凝土的性质.为保证纤维均匀地分布在混凝土中,应限制骨料的最大粒径不超过纤维的长度^[4,5].微纤维对提高水泥浆体或砂浆基体的性能很有效,但对混凝土的作用不大.用于喷射混凝土的纤维很少短于 15 mm 或长于 65 mm,19 mm 长的纤维比 13 mm 长的纤维控制混凝土塑裂效果好^[6].

作者简介:陈瑛(1970—),女,山东诸城人,讲师,博士研究生,从事高性能水泥基复合材料在水工中的应用研究.

1 喷射聚丙烯纤维混凝土实验研究

1.1 施工工艺及配合比

马河水库溢洪道边墙喷射纤维混凝土设计厚度 50 mm, 强度等级 C25, 抗渗等级 P4, 抗冻标号 F150. 采用干式喷射法. 为保证粗骨料嵌入浆体中, 喷射分两次进行, 第一次喷射厚度为 30 mm 的纤维混凝土, 在其完成终凝后喷射厚度为 20 mm 的纤维水泥砂浆找平层, 以得到平整的表面. 喷射纤维混凝土应尽量降低回弹率, 减少扬尘, 采取的主要方法有: ①减少用水量, 控制水灰比为 0.45, 以降低孔隙率; ②采用强度较高的碎石骨料, 以提高水泥浆与骨料的黏结强度以及纤维混凝土本身的强度; ③采用较小的骨料粒径, 控制碎石粒径在 5~10 mm, 因为混凝土的强度随骨料粒径的减小而增大, 且纤维较容易均匀分散; ④为形成“水泥裹砂”效应, 所采用马河砂的细度模数为 2.9, 含水率控制在 7%; ⑤掺入 SCR 聚合剂.

采用滕州产“鲁宏”牌普通硅酸盐水泥. 聚丙烯纤维采用美国希尔兄弟化工公司的杜拉纤维, 束状单丝, 抗拉强度 276 MPa, 密度 0.91 g/cm³, 弹性模量 3793 MPa, 拉伸极限 15%. 实验对不同体积含量、不同长度纤维混凝土的塑裂性能进行了比较, 最后决定施工用配合比见表 1, 实测纤维混凝土 7 d 抗压强度为 24.2 MPa, 28 d 抗压强度为 38.8 MPa, 劈裂抗拉强度为 2.58 MPa. 施工现场试验发现, 由于聚丙烯纤维混凝土与普通混凝土相比具有更高的黏稠性, 并采用了“水泥裹砂”技术, 虽然一次喷射厚度大于规范要求, 但回弹损失小, 回弹率降低到 10% 以下.

表 1 纤维混凝土及纤维水泥砂浆施工用配合比

名称	水泥		石子	砂	水	SCR 聚合剂	聚丙烯纤维	
	42.5R	32.5R					长度 /mm	体积含量 /%
纤维混凝土	1		1.64	2	0.45	0.005	19	0.076
纤维水泥砂浆		1		3.66	0.61	0.005	6	0.076

1.2 塑性开裂试验

试验采用 ICBO 大板比较法. 由于回弹喷射前后纤维混凝土混合物存在差异, 而纤维的实际含量是影响抗裂性能的主要因素. 此外, 基岩不同, 对混凝土的收缩约束也不同, 所以试件不能在实验室现浇. 为了能反映混凝土所处的真实条件, 进行现场喷制. 模具尺寸为 440 mm × 400 mm, 厚 100 mm, 在预定进行试验的溢洪道区段选择厚度约 50 mm、长宽尺寸略小于模具的岩块, 将其置于模板内, 用水冲洗表面, 喷成后, 将纤维混凝土试件和素混凝土控制试件同时放入尺寸为 1000 mm × 3000 mm × 1000 mm 的玻璃箱中, 箱内有温度计、湿度计. 用电风扇吹热风, 温度 35°C, 风速 0.003 m/s, 试件旁放蒸发皿, 水蒸发速

率 0.7 kg/(m²·h), 相对湿度 40%, 连续观察裂缝情况, 当混凝土产生裂缝时记录裂缝产生时间、裂缝长度、宽度与条数, 试验时间为 3 h.

采用计权法, 用裂缝相对面积 α 来评价纤维对混凝土塑裂性能的影响, α 值越小, 纤维对混凝土的阻裂效果越明显:

$$\alpha = \frac{A_f}{A_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_f 为计权的纤维混凝土板裂缝宽度与长度乘积的加和值; A_c 为计权的素混凝土控制试件裂缝宽度与长度乘积的加和值. 本实验把裂缝宽度分为 5 级, 当裂缝宽度在 $d \geq 1, 1 > d \geq 0.7, 0.7 > d \geq 0.4, 0.4 > d \geq 0.1$ 和 $d < 0.1$ 时权值分别为 3, 2, 1, 0.5 和 0.25. 纤维长度对塑裂的影响见表 2, 由表 2 知, 当纤维长度为 19 mm, 随着纤维体积分含量的增加混凝土收缩裂缝逐渐减小. 长度为 19 mm、体积分含量分别为 0, 0.05%, 0.076% 和 0.1% 的纤维裂缝相对面积为 1.1, 0.91, 0.5 和 0.44. 试验证明, 长度为 19 mm、体积分含量为 0.076% 的纤维已能够有效地抑制塑性收缩. 实验还得到, 纤维混凝土的初凝、终凝时间较普通混凝土分别缩短 10% 和 25%, 水分蒸发率降低 10%.

表 2 纤维长度对塑裂的影响

纤维长度 /mm	$\alpha / \%$		
	$C = 0.05\%$	$C = 0.076\%$	$C = 0.1\%$
12	77	70	63
19	31	17	12
50	20	23	8

注: C 表示纤维体积分含量.

1.3 冻融循环试验

在模具内直接喷射混凝土制作试件的做法不可取, 因为在这种条件下回弹物受到模具壁面阻拦, 不能自由溅出, 隅集于试模边角, 导致测得的强度比结构上喷射混凝土的真实强度要低. 因而, 喷射纤维混凝土冻融循环试验和黏结强度试验均采用施工现场切割法.

模具尺寸为 650 mm × 350 mm × 120 mm, 在预定进行试验的溢洪道区段选择厚度约 50 mm、长宽尺寸略小于模具的岩块, 将其置于模板内, 用水冲洗表面, 喷成后, 在现场洒水养护至 7 d 龄期, 用切割法去掉周边, 加工成 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体试件, 试件的浆砌石层和纤维混凝土层均为 100 mm × 50 mm × 400 mm, 继续养护至 28 d 进行冻融循环试验. 试件的纤维体积分含量分别为 0.05%, 0.076%, 0.1%.

冻融循环试验按照 GBJ82-85《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》中的抗冻性试验——快冻

法,利用全自动冻融仪进行测试.在评估纤维混凝土材料本身的抗冻融性能时,采用单面浸泡法,只浸泡纤维混凝土;在评估黏结界面的耐久性时,采用全部浸泡法.冻结温度为 -17.5°C ,解冻温度为 7.5°C .一个冻融循环的时间为3h左右,冻融循环次数为300次或者直到试件损坏为止.冻融试验测试参数为试件的相对动弹性模量(RDM)、质量损失率和抗压强度.混凝土棱柱体相对动弹性模量用式(2)计算:

$$\text{RDM} = \left(\frac{f_n}{f}\right)^2 \times 100 \quad (2)$$

式中: f_n 为冻融循环 n 次后试件的自然频率; f 为试件的初始自然频率.RDM表征试件因冻融循环引起的破坏程度.试验结果见图1.

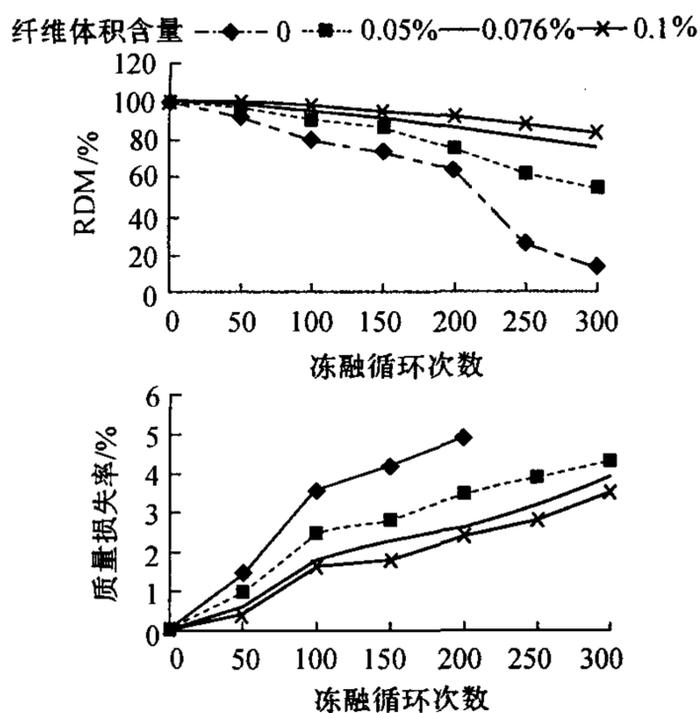


图1 纤维体积含量对抗冻融性能的影响

由图1可知,随着纤维含量的增加,混凝土的抗冻融循环能力增强.冻融循环200次后,不含纤维的素混凝土RDM下降到63.3%,质量损失率为4.9%,最后冻融破坏是其内部产生裂缝所致.当掺入0.076%的聚丙烯纤维,混凝土在整个冻融循环期间性能较好,RDM保持率为76%,质量损失率仅为3.9%,最后可观察到微小裂缝及少量碎屑.因而,聚丙烯纤维体积含量为0.076%时有助于抑制和减少裂缝的发展,抗冻标号提高到F300.

喷射聚丙烯纤维混凝土抗冻融循环能力优于现浇素混凝土,这是因为喷射纤维混凝土在喷射过程中会自动带入一部分空气,含气量大于素混凝土,气泡一般不连通,并有适宜的尺寸和分布,类似于加气混凝土,能缓解低温循环过程中的静水压力和渗透压力;坚硬的骨料、较小的水灰比也有利于提高喷射混凝土的抗冻性.聚丙烯纤维直径小、单位质量的纤维数目庞大,能减少内部原生裂缝的尺度,提高颗粒间的摩擦力,提高混凝土的极限拉应变和断裂能,增

加混凝土冻融损伤过程中的能量损耗,因此,即使在未掺加引气剂的情况下,混凝土抗冻耐久性也得到大幅度提高.

1.4 冻融循环对界面黏结强度影响的试验

新浇纤维混凝土与岩石的交界面是薄弱环节,其黏结性能的好坏是决定能否进行成功修补的关键,提高黏结界面的耐久性是提高加固补强后混凝土/岩石耐久性的前提,目前还未见冻融循环对界面黏结强度影响的实验文献.测试界面黏结强度的方法有很多,如直接拉伸法、钻芯拉拔法、直剪法、斜剪法等,各有优缺点,各国没有统一的标准.本文采用劈裂法,试件尺寸应与标准冻融循环所要求的试件尺寸一致.

试件有A、B两个系列,纤维体积含量均为0.076%,均按照GB50086-2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》附录A中“喷射混凝土与围岩黏结强度试验”规定的方法制作,只是模板的尺寸为适应冻融循环与规定不同.采用与1.3节中相同的方法,均制成3块尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 的棱柱体,浆砌石层和纤维混凝土层均为 $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 400\text{mm}$.其中1块(系列B)养护28d后放入冻融循环机,采用全部浸泡法,承受300次冻融循环后,将试件切割成4块边长为100mm的立方体试件,进行劈裂测试;另外3块(系列A)在承受冻融循环前分割成 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的试件,分3组,每组4块,浆砌石层和纤维混凝土层均为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 50\text{mm}$.第一、第二组试件的测试龄期分别为7d(相应于刚开始冻融循环)和15d;第三组试件劈裂测试龄期与承受冻融循环试验的试件相同.试件在测试之前放入饱和石灰水中保存.

黏结劈裂试验按照DL/T5150-2001《水工混凝土试验规程》,在200kN压力试验机上进行.试验时在垂直于黏结层的方向施加压力,压力先加至某一值,然后逐步增加,直到黏结层破坏.测得的黏结强度按式(3)计算:

$$\tau = \frac{2P}{\pi A} \quad (3)$$

式中: P 为破坏荷载,N; A 为试件劈裂面面积, mm^2 .

试验发现试件无论是否承受冻融循环均在黏结面破坏.系列A随着喷射纤维混凝土的硬化,浆砌石和纤维混凝土之间的黏结强度逐渐增强.对未承受冻融循环的试件(系列A),当测试龄期为7d,15d和28d时黏结强度分别为0.51,0.74和0.88,试件28d劈裂黏结强度较7d劈裂黏结强度增加72.54%.承受冻融循环的试件(系列B)平均黏结强度为0.86.比较承受冻融循环的试件和具有相同的

测试龄期但未承受冻融循环的试件,发现冻融循环对黏结强度影响很小.

2 现场裂缝检测

喷射两个月后,采用读数显微镜对溢洪道喷射聚丙烯纤维混凝土的裂缝宽度、长度进行检测,并利用超声波检测仪对裂缝深度进行观测.结果发现裂缝宽度超过 0.2 mm 的有 12 条,其中超过 0.15 mm 的有 8 条,说明低掺量聚丙烯纤维喷射混凝土的抗裂性能是很好的.

3 结论

试验研究和现场裂缝检测表明,聚丙烯纤维喷射混凝土回弹损失小,能有效地减少塑性收缩裂缝,提高抗冻融、抗渗、抗冲击能力,喷射纤维混凝土与浆砌石之间的劈裂黏结强度随着时间的延长而提高,且受冻融循环影响很小,因而特别适用于水利工程中陡度大、难养护的结构,喷射纤维混凝土综合技术性能明显优于普通混凝土,而且增加的投资不多,对于提高混凝土的质量,保证工程安全,延长工作寿命具有重要的意义.笔者认为,马河水库溢洪道护板采

用聚丙烯纤维混凝土在经济上和技术上都是可行的,建议在水利工程中进一步推广.

参考文献:

- [1] 徐至钧.纤维混凝土技术及应用[M].北京:中国建筑出版社,2003.100—150.
- [2] Webster T. Personal communication[J]. Webster Engineering Associates, Independence, Ohio,2001(3):72—76.
- [3] Soroushian, P, Stroeven P, Stroeven M. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 1995, 92(5):553—560.
- [4] Blood W. Modelling the flexural behavior of reinforced-fiber-reinforced concrete members[D]. Alberta, Canada: University of Calgary, 1970.
- [5] Tatro S B. Effect of low modulus sisal and polypropylene fiber on the free and restrained shrinkage of mortars at early age [D]. Lafayette, Indiana, USA: Purdue University, 1985.
- [6] Soroushian P, Mirz F. Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete[A]. International Conference on Reinforced Concrete Materials in hot Climate[C]. UAE: United Arab Emirates University, 1994. 441—452.

(收稿日期:2004-04-20 编辑:骆超)

(上接第 40 页)

a. 根据以上赋值可以求得各项数值如表 1 所示.对于墙高和底宽均不变的挡土墙,墙身重心圆心角、土体重心圆心角、土压力合力作用点中心圆心角以及墙基底面形心圆心角均为 45° 是很容易理解的,在进行整体设计计算时,认为 ΣG , ΣH 及 ΣM 作用在一个径向平面内不会产生歧义.对于墙高和底宽随圆心角而变化的挡土墙,如果墙重心圆心角、土体重心圆心角、土压力合力作用点中心圆心角与墙基底面形心圆心角之间的偏差过大,则按整体进行设计计算的合理性就值得怀疑;反之,如果圆心角之间的偏差很小,加之墙本身有足够大的强度和刚度,则其合理性可以保证.由表 1 可见,挡土墙重心圆心角、土体重心圆心角、土压力合力作用点中心圆心角与墙基底面形心圆心角相差不到 $\pm 1^\circ$,笔者认为,如此小的偏差不会影响整体计算的合理性.

b. 挡土墙抗滑稳定、抗倾覆稳定和基底应力计算可依据 SL265-2001《水闸设计规范》中的公式进行.

3 结语

a. 本文仅对挡土墙所承受的基本荷载进行了公式推导与计算.除此以外,挡土墙还会承受水压力、附加荷载、扬压力及地震效应,有兴趣者可循本

文思路与推导方法进行求解.

b. 对于圆弧形重力式挡土墙,以往通常取单位弧长的计算体按平面问题进行简化设计计算,这样的方法虽然方便易行,但不符合挡土墙的真实受力情况,存在的主要问题是人为放大了土压力作用效应.笔者推导的进行挡土墙整体设计计算的一系列公式,可以正确计算挡土墙的工程量和自重、墙后土体重、土压力及土压力力矩,可以对挡土墙的抗滑、抗倾覆、地基应力及分布特征作整体计算,并能真实反映挡土墙的受力状况和安全度,还可以取得节省工程量和投资的效果.

参考文献:

- [1] 杨文渊.实用土木工程计算图表[M].上海:龙门联合书局出版社,1948.1.25—1.26.
- [2] 钱家欢.土力学[M].第 2 版.南京:河海大学出版社,1995.140—141.

(收稿日期:2004-04-09 编辑:高建群)

