

钢纤维喷射混凝土的室内湿喷试验

石 妍 杨华全 李家正 林育强 王仲华

(长江科学院水利部水工程安全与病害防治工程技术研究中心,湖北 武汉 430010)

摘要 对钢纤维喷射混凝土进行了室内湿喷试验,结合喷大板切割试件的硬化性能,比较不同品种的钢纤维对喷射混凝土拌和物及弯曲性能的影响,为钢纤维的选用提供依据。结果表明:除 G1 外其他编号的钢纤维平均抗拉强度均满足 YB/T151—1999 规定的 1000 级;掺 G2 和 G4 钢纤维的混凝土在喷射过程中有结团现象,可能是较大的长径比导致的,G5 的长径比虽最大,但利用“二次分散”的原理,保证了钢纤维在混凝土中的均匀性;掺 G3 和 G5 钢纤维的混凝土强度及弯曲韧性性能较好,总体性能略优。

关键词 钢纤维喷射混凝土 室内喷射试验 喷大板切割 弯曲韧度

中图分类号 :TU528.572 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2008)S1-0061-03

钢纤维喷射混凝土是在普通砂浆或混凝土中掺入分布均匀且离散的钢纤维,依靠压缩空气高速喷射在结构表面的一种新型复合材料。钢纤维喷射混凝土试验研究工作始于 20 世纪 70 年代初期,此后,在世界范围内各个工程领域得到广泛应用,主要包括岩坡加固工程、地下洞室支护工程、水坝工程、建筑结构改造工程以及公路、桥梁、隧道、机场建设工程等。在我国水电工程中,钢纤维喷射混凝土首先在鲁布格工程中大规模应用,并陆续在天生桥二级水电站、大朝山水电站、二滩水电站及万家寨水利枢纽等工程中推广^[1-2]。

喷射混凝土中掺入钢纤维,为混凝土提供了微型配筋,增强与混凝土之间的握裹力和锚固力,显著改善混凝土的力学性能和韧性,但必须保证混凝土中钢纤维的品种和含量^[3]。因此,笔者进行了室内试验研究,包括钢纤维品质检验、钢纤维混凝土的室内湿喷射及喷大板切割试件的性能试验,比较不同品种的钢纤维对喷射混凝土拌和物及弯曲性能的影响,为钢纤维的选用提供依据。

1 试验原材料

1.1 水泥

采用四川峨胜 P. O42.5 水泥。水泥的化学成分分析结果见表 1,物理力学性能检验见表 2。检验结果表明 P. O42.5 水泥的性能指标符合 GB 175—1999《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》的有关规定。

表 1 水泥的化学成分								%
样品名称	化学组成							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O	
普通硅酸盐水泥	62.79	20.84	4.64	3.01	1.45	2.70	0.59	3.00
GB 175—1999 水泥	≤6.0 ≤3.5 ≤0.60 ≤5.0							

注 :R₂O 为当量碱含量,R₂O = Na₂O + 0.658K₂O。

1.2 硅粉

硅粉由贵州遵义铁合金厂生产,化学成分分析结果见表 3。

采用气体吸附方法进行比表面积测定,测得比表面积值为 15.07 m²/g,达到国家标准要求。硅粉

表 2 水泥物理力学性能检验结果

水泥品种	比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	密度/ (g·cm ⁻³)	稠度/%	安定性	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
					初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
峨眉 P. O42.5	330	3.20	27.2	合格	136	178	27.4	50.6	4.93	7.97
GB 175—1999 42.5 普硅	≥300			合格	≥45	≤600	≥16.0	≥42.5	≥3.5	≥6.5

表 3 硅粉的化学成分 %

样品 名称	化学组成								烧失量
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	
硅灰粉	0.34	93.0	0.52	1.13	1.85	0.21	0.60	0.14	2.14

微粒在纳米数量级能改善新拌混凝土的泌水性和黏聚性,提高混凝土致密度。加入硅粉的主要目的是改善喷混凝土的可泵性和喷射性能。

1.3 骨料

试验用细骨料为大理岩人工砂,细度为 2.63,粗骨料为砂岩碎石,粒径为 5~10 mm,均为某水电站工程现场使用的骨料。试验用骨料符合 DL/T5144—2001《水工混凝土施工规范》对骨料的技术要求。

1.4 外加剂

试验用外加剂包括速凝剂及 SP8CR-HC 高效减水剂。

2 钢纤维品质检验

试验共 5 种品种钢纤维,样品编号为 G1~G5。钢纤维的品质检验按 YB/T151—1999《混凝土用钢纤维》进行。表 4 为钢纤维的外观、尺寸及力学性能检测结果。结果表明,长径比最大的是编号 G5 和 G2 的钢纤维,其次是 G4,除 G1 外,其他编号的钢纤维平均抗拉强度均高于 1 000 MPa,满足 YB/T151—1999 规定的 1 000 级 5 种钢纤维同属弓形,G5 黏结成排。

表 4 钢纤维的外观、尺寸及力学性能检测结果

编号	平均直径/mm	平均长度/mm	长径比	弯曲性能	平均抗拉强度/MPa	类型及形状
G1	0.51	25.7	50.4	合格	977	弓形,圆形截面
G2	0.51	34.6	67.8	合格	1 143	弓形,圆形截面
G3	0.50	29.3	58.6	合格	1 176	弓形,圆形截面
G4	0.48	29.5	61.5	合格	1 179	弓形,圆形截面
G5	0.53	36.0	67.9	合格	1 052	弓形,圆形截面,黏结成排

表 5 钢纤维喷射混凝土试验配合比及拌和物性能

编号	钢纤维		水胶比	硅粉掺量/%	含砂率/%	减水剂掺量/%	速凝剂掺量/%	拌合物性能	
	品种	掺量/(kg·m ⁻³)						坍落度/mm	分布和结团情况
J1	G1	40	0.48	10	55	0.3	6	94	钢纤维分布均匀,喷射过程中无结团现象
J2	G2	35	0.48	10	55	0.3	6	90	钢纤维分布均匀,喷射过程中有结团现象
J3	G3	35	0.48	10	55	0.3	6	67	钢纤维分布均匀,喷射过程中无结团现象
J4	G4	35	0.48	10	55	0.3	6	70	钢纤维分布均匀,喷射过程中结团较多
J5	G5	30	0.48	10	55	0.3	6	72	钢纤维分布均匀,喷射过程中无结团现象

钢纤维的增强效果与钢纤维外观、尺寸及力学性能有关^[4-5]。钢纤维增强作用随长径比增大而提高,钢纤维长度太短起不到增强作用,长度太长施工又较困难,影响拌合物的质量,钢纤维直径过细在拌合过程中容易被弯折,钢纤维直径过粗则在同样掺量时,其增强效果较差,为使钢纤维混凝土具有良好的力学性能,还要求钢纤维具有一定的抗拉强度。

3 钢纤维喷射混凝土的性能试验

3.1 试验方法

钢纤维喷射混凝土的性能试验按 DL/T5150—2001《水工混凝土试验规程》和 CECS 13 :1989《钢纤维混凝土试验方法》等的有关规定进行。

先干拌混凝土,同时慢慢撒入钢纤维,干拌均匀后,加入掺有减水剂搅拌均匀的水。钢纤维混凝土机拌完成后,装入喷射机中,由喷射手持喷枪喷入两块大板钢模内,速凝剂在喷射过程中由导管注入混凝土,一旦发现结团现象,立即进行人工剔除。大板钢模尺寸为 100 mm×500 mm×1 000 mm,喷射成型后一天拆模。

按试验规程将大板试件切割成所需尺寸的硬化小试件,其中抗压试件为 100 mm×100 mm×100 mm,抗弯试件为 100 mm×100 mm×400 mm。弯曲初度试验主要测试仪器为 1346 型电液伺服材料试验机,该试验的加载速率为 0.012 mm/min。

3.2 拌合物性能

拌合物性能主要考察湿喷混凝土的可泵性和喷射性能、钢纤维在混凝土中的分布情况及喷射过程中是否结团堵管等。钢纤维混凝土要求拌和物内钢纤维分布均匀,无结团,喷射钢纤维混凝土能保证喷射顺畅,不会发生堵管现象。表 5 为钢纤维喷射混凝土试验配合比及拌和物性能,钢纤维喷射混凝土试验配合比经过试拌后适当调整确定,钢纤维采用推荐掺量。

由表 5 可知 ,5 组钢纤维喷射混凝土坍落度在 67 ~ 94 mm 之间 ,和易性良好 ;掺 G2 钢纤维的喷射混凝土 ,出机时分布均匀 ,但喷射过程中有结团现象 ;掺 G4 钢纤维的喷射混凝土 ,出机分布均匀 ,喷射过程中结团较多 ;掺 G1 ,G3 和 G5 钢纤维的混凝土拌和物均匀 ,喷射过程中无结团现象。

钢纤维拌和过程中容易缠绕成团 ,使钢纤维无法均匀分散在喷射混凝土中 ,影响钢纤维喷射混凝土的质量。缠绕成团的钢纤维容易堵塞、划伤喷射混凝土的输送胶管 ,泵送时易造成堵管现象 ,现场施工中 ,随着泵压力的逐渐增大 ,甚至会发生爆管事故 ,造成混凝土浇筑不连续 ,施工中出现冷缝。所以 ,泵送喷射时是否堵管是衡量钢纤维类型优劣的主要指标^[6]。试验证明 ,掺钢纤维 G1 ,G3 和 G5 的混凝土拌和物性能优良 ,而 G2 和 G4 在混凝土中结团的原因可能是因为较大的长径比 ,G5 的长径比虽然最大 ,但它采用水溶性胶水将单根钢纤维黏结成排的技术 ,利用“二次分散”的原理 ,保证了钢纤维在混凝土中分散均匀、易搅拌、不结团。

3.3 硬化混凝土强度及弯曲韧性

硬化混凝土试验主要是比较大板喷射混凝土切割试件的弯曲韧度性能 ,并观察破坏试件截面中钢纤维的分布情况。表 6 为大板喷射混凝土切割试件的硬化性能试验结果 ,抗压强度和韧度系数柱状图见图 1 和图 2 ,图 3 是弯曲荷载 ~ 挠度曲线。

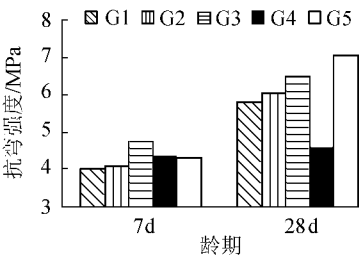


图 1 钢纤维喷射混凝土的抗弯强度柱状图

由表 6 及图 1 ~ 3 可知 ,掺 G5 和 G3 钢纤维的混凝土 7 d 抗压强度略高 ,掺 G1 钢纤维的混凝土 28 d 时抗压强度略低 ;混凝土抗弯强度 7 d 时在 4.03 ~

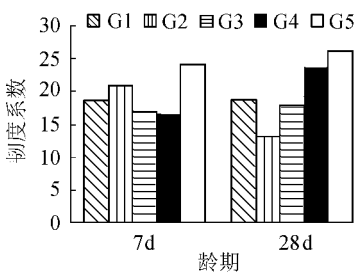


图 2 钢纤维喷射混凝土的韧度系数柱状图

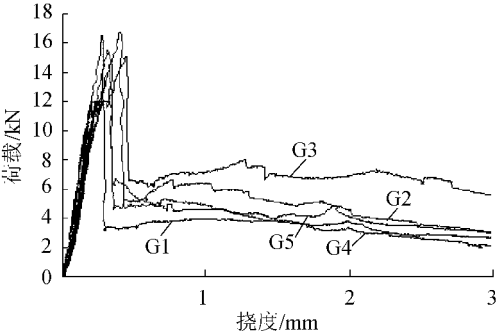


图 3 不同品种钢纤维混凝土荷载 ~ 挠度曲线

4.74 MPa 之间 ,其中掺 G3 钢纤维混凝土的抗弯强度略高 ,混凝土抗弯强度 28 d 时在 4.57 ~ 7.05 MPa 之间 ,结果略高的是掺 G5 钢纤维的混凝土 ;掺各种钢纤维的混凝土初裂强度结果接近 ,规律与抗弯强度相同 ;各组试件的等效抗弯强度值也较接近 ,7 d 在 1.82 ~ 2.32 之间 ,28 d 在 1.98 ~ 2.32 之间 ;掺 G5 钢纤维的混凝土韧度系数较高 ;5 种钢纤维混凝土的荷载 ~ 挠度曲线发展形状相似 ,峰值比较集中 ,G3 的峰值荷载高于其他钢纤维 ,表现出较好的增韧效果。

弯曲韧度是钢纤维喷射混凝土最为主要的性能 ,也是较素喷混凝土性能改善最为显著的方面 ,弓形钢纤维的两端端钩可保证钢纤维和混凝土之间具备良好的握裹力 ,一般在设计中均有明确的规定。相比之下 ,掺 G3 和 G5 钢纤维的混凝土强度及弯曲韧度性能较好 ,总体性能略优。但整体而言 ,由于该试验采用钢纤维的掺量不够大 ,所以曲线的下降段仍然较陡 ,掺钢纤维的增韧作用不太突出 ,而且同属弓形钢纤维 ,导致混凝土性能的差异不够明显。

表 6 大板喷射的混凝土切割试件的硬化性能试验结果

编号		钢纤维	弯曲韧度试验结果									
			抗压强度/MPa		抗弯强度/MPa		初裂强度/MPa		等效抗弯强度/MPa		韧度系数	
			7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
J1	G1	40	25.5	38.8	4.03	5.79	3.63	5.54	2.01	2.30	18.6	18.7
J2	G2	35	26.9	47.3	4.09	6.03	3.91	5.62	2.14	1.98	20.8	13.2
J3	G3	35	27.5	44.9	4.74	6.50	4.42	6.16	2.32	2.27	16.8	17.8
J4	G4	35	24.6	44.2	4.35	4.57	4.08	4.41	1.82	2.08	16.5	23.7
J5	G5	30	28.8	42.8	4.33	7.05	4.02	6.46	1.90	2.13	24.0	26.0

(下转第 161 页)

式采点,由于设备为全一体化蓝牙连接,因此操作十分方便。为了检验 RTK 测量精度,对控制点进行了检测,结果如表 1 所示。同时对高程检测的结果也进行了比较:1-1 控制点高程为 11.259 m,RTK 测量结果为 11.250 m,偏差为 -0.009 m。

表 1 RTK 测量精度检测

检测 点名	控制成果		RTK 测量结果		东向 差/m	北向 差/m
	东向坐标	北向坐标	东向坐标	北向坐标		
1-1	150 316.334	124 821.691	150 316.341	124 821.690	0.007	-0.001

由此可见 RTK 测量精度完全能满足地形测量要求。

3.2.3 水下部分测量

水下部分测量采用中海达-16 测深仪测量水深,平面坐标由 GPS 定位,河底高程用 GPS 测得的高程减去水深求得。

为了检验测深仪测深精度,对水深也进行了检测,结果如表 2 所示。

表 2 测深仪测量精度检测

编号	测深仪水深/m	测深锤水深/m	差值/m
1	1.34	1.32	0.02
2	1.56	1.58	-0.02

由表 2 可知测深仪测深精度完全能满足地形测量要求。

3.3 测量中出现问题的处理

在基站设置成功后,立即开始进行点测量,但流

动站却收不到基站信号,使测量无法进行。将基站流动站重启后,问题未能解决,为此又对系统清星历仍无效。这是因为在手簿连接到基站的情况下,如果立即进行点测量,会导致设置好的基站重置为流动站模式,以致基站电台不发射。

3.4 内业资料整编

该次地形测量所测的成果全部由南方 CASS 成图系统处理,该系统能将所测成果直观地显示在电脑屏幕上,随时编辑、检查、修改、校核,其图式符号符合国家规范,并可自行定义,既提高了成图速度,又提高了测图的准确性和真实性,成图比例尺为 1:500。在系统智能化成图的基础上,经人工按 1996 年版图式进行整饰,形成 AUTOCAD R14 版本下的 DWG 文件。

4 结 语

该次测量的所有内、外业资料及成图,经技术负责人全面审核后,组织进行了质量评定,认为此次测量的外业操作及所有内业资料整理均符合有关规范规定。

拓普康 HiPerPRO GPS 接收机的卓越性能,为水利工程观测带来巨大的效益。江苏省水利工程众多,根据工程规范管理的要求和防汛及水利建设、规划等的需要随时需进行地形和冲淤测量,因此应大力推广应用。

(收稿日期 2007-06-15 编辑 方宇彤)

(上接第 63 页)

从硬化试件的破坏断面观察,各种品种的钢纤维分布均良好,因为在混凝土喷射过程中,出现的结团部分被人工剔除了。

4 结 论

不同品种的钢纤维将影响钢纤维喷射混凝土的拌和物及硬化性能,在选用时需要考虑其综合性能,笔者通过室内湿喷射试验,得到以下结论:

- a. 编号 G5 和 G2 的钢纤维长径比稍大,G2,G3,G4 和 G5 的钢纤维抗拉强度满足 YB/T151—1999 规定的 1000 级。
- b. 泵送喷射时是否结团堵管是衡量钢纤维优劣的主要指标,掺 G2 和 G4 钢纤维的混凝土,喷射过程中有结团现象,可能是因长径比较大造成的,掺钢纤维 G1,G3 和 G5 的混凝土拌和物性能优良,G5 的长径比虽最大,但利用“二次分散”的原理,保证了在混凝土中的均匀性。
- c. 分析钢纤维喷射混凝土硬化性能试验结果,

掺 G3 和 G5 钢纤维的混凝土强度及弯曲韧度性能较好,总体性能略优。由于混凝土喷射过程中人工剔除了结团部分,钢纤维在硬化试件中均分布良好。

参考文献:

[1] 段福荣,皮奇志,欧建广,等. 钢纤维喷混凝土在引水隧洞永久支护中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(4): 45-51.
[2] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 佳密克丝钢纤维喷混凝土及其在二滩水电站工程中的应用[R]. 成都: 国家电力公司成都勘测设计研究院, 1999.
[3] 赵家声. C30 钢纤维喷射混凝土的配合比设计[J]. 云南水力发电, 2004, 20(1): 62-75.
[4] 张云升,孙伟,秦鸿根,等. 基体强度和纤维外形对混凝土抗剪强度的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(1): 36-39.
[5] 高丹盈,刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
[6] 白晓光. 钢纤维混凝土施工质量控制[J]. 施工技术, 2007, 36(S): 337-339.

(收稿日期 2008-01-18 编辑 方宇彤)