

DOI: 10.11779/CJGE20240232

现场喷射成型双掺硅粉和钢纤维湿喷混凝土弯曲韧性研究

程伟峰^{1,2}, 杨虹¹, 仝德华², 张鹏³, 丁建彤⁴, 李海达⁴

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650033; 2. 中国电建集团市政规划设计研究院有限公司, 广东 珠海 519000;
3. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 4. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘 要: 针对强岩爆、高突涌水、高地应力硐室, 采用弓形排状新型钢纤维、新型液态无碱速凝剂、大型湿喷台车+机械臂及钢纤维新型添加工艺系统开展了掺硅粉及钢纤维湿喷混凝土的现场弯曲韧性试验研究。这种能够真实反应湿喷混凝土现场附着硬化性能的大规模生产性试验研究在中国尚属首次。结果表明: 随着硅粉和钢纤维的掺入, 附着硬化后的湿喷混凝土初裂荷载和极限荷载提高, 弯曲韧性指数、承载能力变化系数及残余强度因子明显改善, 开裂后未发生脆性断裂, 峰值荷载后的承载力下降缓慢, 且作用效果随着纤维掺量的增加而增强, 其中 40 kg 掺量下荷载-挠度曲线有二次硬化现象, 材料去脆性化迹象明显, 抑制围岩破坏和与围岩同步变形能力得到增强。

关键词: 硅粉; 钢纤维; 湿喷混凝土; 现场弯曲韧性; 喷射成型; 大型湿喷台车

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)05-1073-09

作者简介: 程伟峰(1982—), 男, 副高级工程师, 主要从事混凝土材料研究及工程管理工作。E-mail: chengwf@aliyun.com。

On-site flexural toughness of wet-sprayed concrete with silica fume and steel fibers

CHENG Weifeng^{1,2}, YANG Hong¹, TONG Dehua², ZHANG Peng³, DING Jiantong⁴, LI Haida⁴

(1. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650033, China; 2. China Power Construction Group Municipal Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 3. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China; 4. Power China Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610213, China)

Abstract: For the cavern with of rockburst, water gushing and high geostress, the researches on the on-site flexural toughness properties of the wet-sprayed concrete containing silica fume (SF) and reinforced by steel fibers are carried out to investigate the effects of steel fiber content and SF on flexural toughness index and the difference from the plain concrete. The SF is added according to 10% of the cement mass, two mass contents of steel fiber (35, 40 kg/m³) are considered in this study, and large wet spraying machine is used. The concrete specimens used in the flexural toughness experiments are formed in site, which contain accelerator of 8%. It is the first time in China that the large-scale productive experiments adopt a large number of new technologies and can truly reflect the on-site adhesion and hardening properties of the wet sprayed concrete. Through the collaborative participation of 10 institutions, the experiments are successfully completed, and the effective results are achieved. It is indicated that the crack load and the ultimate load of concrete increased, the flexural toughness is improved when the SF and steel fiber are added, and the flexural toughness index increases with the increment of the steel fiber. Especially, the load-deflection curves show the peak of the secondary hardening of shotcrete with steel fiber content of 40 kg, which means the better resistance deformation capacity and increased residual strength. So the steel fiber reinforced wet-sprayed concrete containing the SF can enhance its toughness and the capability of resisting crack and improve its brittleness characteristic.

Key words: silica fume; fiber steel; wet-sprayed concrete; on-site flexural toughness; field sprayed forming; large wet spraying machine

0 引 言

硅粉自 20 世纪 80 年代始用于工程^[1], 在喷射混凝土中的作用主要是改善拌和物易性、提高混凝土早期强度及密实度、增强与受喷面黏结力、减少喷射

回弹^[2-7]; 钢纤维在喷射混凝土中亦有较多应用, 其作用主要为提高混凝土的抗裂能力、增加韧性、抵抗冲

收稿日期: 2024-02-10

击荷载及能量吸收^[8-15]。钢纤维与硅粉双掺对于混凝土性能影响的研究不胜枚举,二者在喷射混凝土中的复合应用亦多有研究,但是研究多集中在室内拌和试验、干喷试验或小型湿喷机的喷射试验^[16-27]。近年王家滨等^[28]、夏冬桃等^[29]及苏安双等^[30]关于湿喷混凝土弯曲韧性的研究仍然基于小型湿喷机试验结果;李传习等^[31]、史占崇等^[32]关于混凝土弯曲韧性的研究仍然基于室内成型试件。

目前湿喷混凝土采用大型湿喷台车或 TBM 集成的机械手喷射施工的工艺日益增多,双掺硅粉及钢纤维的湿喷混凝土在隧道初期支护中亦多有应用,但是关于其附着硬化后的弯曲韧性的试验研究少有涉及。尤其是采用拌合楼规模化生产供料、机械臂远距离操控喷射施工、喷嘴处自动添加新型液态无碱速凝剂(PH 低于 2.5)、拌合楼处类似添加骨料的简易方式添加新型弓形排状钢纤维的湿喷混凝土附着硬化后的韧性能,至今少有公开的研究成果。而现场喷射过程中纤维飘散遗失、纤维高速飞向受喷面后的“定向”分布^[33-35],骨料回弹^[34-36]、液体速凝剂添加、喷射设备^[37]、湿喷混凝土试件成型等因素影响必然带来韧性等性能方面的差异,但是相关试验研究工作因样品制备复杂、工作量大^[19],涉及科研试验、现场生产及施工单位之间的交叉与协调,以及需要耗费大量的人力、物力,试验周期长及各环节人员技术素养及责任心要求高等综合因素影响而在国内外实属空白。

为此,针对高地应力、强岩爆及高突涌水症状硐室,为顺利、快速通过上述不良地质段,开展了掺硅粉、钢纤维湿喷混凝土现场弯曲韧性等相关性能的研究。鉴于目前硅粉及钢纤维对于混凝土性能影响的试验研究,以及复合应用的室内研究资料较多、成果较成熟,本文不再赘述。本文重点探究钢纤维两种掺量(35, 40 kg/m³)下现场采用前述设备及工艺施工的硅粉湿喷混凝土现场弯曲韧性。

1 原材料及混凝土配合比设计

1.1 原材料

水泥为四川凉山州乃托水泥有限公司生产的Π•O42.5P水泥;骨料为工程用大理岩人工粗、细骨料,其中细骨料的细度模数2.48,石粉含量(<0.16 μm) 17.7%,粗骨料最大粒径为 10 χμ;减水剂为北京冶建特种材料有限公司生产的9Γ-2H聚羧酸系缓凝高效

减水剂;速凝剂为巩义市宏超建材有限公司生产的跨越2000型新型液体无碱速凝剂,表1显示,速凝剂的πH值为2.45,在推荐掺量下,其与工程用水泥适用性良好;硅粉为埃肯国际贸易(上海)有限公司生产的埃肯微硅粉,表2为其性能参数,结果显示硅粉需水量比120%,掺入混凝土后将导致混凝土单位用水量增加。28 d 活性指数为97.6%,具有较高的火山灰活性;钢纤维为上海贝卡尔特一二钢有限公司生产、通过水溶性胶水黏结成排、弓状圆形断面新型佳密克斯钢纤维,使用时类似骨料的掺入方式,不需其它特殊播料设备,表3为性能测试结果,图1为其外观及形状参数。

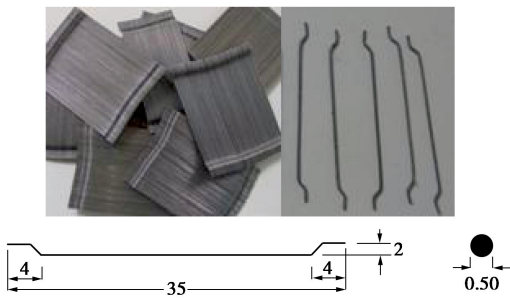


图 1 Dramix 钢纤维外观

Fig. 1 Geometry of Dramix steel fiber

1.2 配合比设计

设计坍落度 160~180 mm,硅粉掺量为胶凝材用量的 9%~10% (按质量计),钢纤维采用 35, 40 kg/m³两种掺量。配合比具体参数见表 4。速凝剂在推荐掺量下现场适时调整。图 2 显示,随着硅粉及钢纤维的掺入,湿喷混凝土现场喷射成型取样检测结果中早期及 28 d 强度均有所提升。

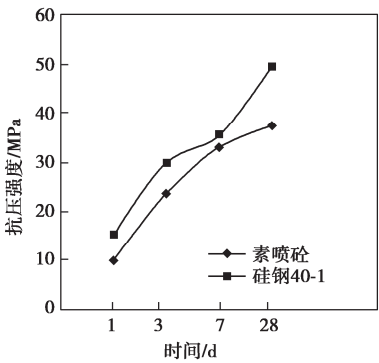


图 2 湿喷混凝土掺硅粉及钢纤维前后强度比较

Fig. 2 Comparison of strengths of wet-sprayed concrete

表 1 速凝剂品质检测结果

Table 1 Physical and chemical properties of accelerator

掺量/ %	掺速凝剂净浆凝结时/min		掺速凝剂砂浆		含固 量/%	碱含 量/%	pH 值	相对质量 密度
	初凝	终凝	1 d 抗压强度/MPa	28 d 抗压强度比/%				
8	2 : 08	3 : 16	10.0	89	38.9	3.52	2.45	1.41

表 2 硅粉物理化学性能检测结果
Table 2 Physical and chemical properties of silica fume

需水量比/ %	28 d 活性 指数/%	细度/%	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	含水率/%	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	碱含量/%	SiO ₂ /%	Loss/%	Cl ⁻ /%
120	97.6	0.05	15000	0.46	250	1.23	93.2	1.15	0.012

表 3 钢纤维 DramixRC-65/35-BN)物理性能试验结果
Table 3 Performance parameters of Dramix steel fiber

检验项目	组数	平均长度 L / mm	平均直径 d / mm	平均长径比 L/d	平均截面 积/ mm^2	抗拉强度/MPa		弯曲性 能
						平均值	最小值	
检验结果	10	35.88	0.55	65	0.24	1240	1024	无断裂

表 4 试验用湿喷混凝土配合比参数
Table 4 Mix proportions of wet-sprayed concrete mixtures

配比序号	水胶 比	减水剂 掺量/%	硅粉/ %	砂率/ %	设计坍落 度/mm	单方混凝土各材料用量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)								浆集比	砂石比
						用水量	水泥	硅粉	人工砂	米石	钢纤维	减水剂	速凝剂		
素喷砼	0.48	1	—	60	160~180	218	454	—	982	654	—	4.54	31.78	0.28	1.50
硅钢 35	0.45	1	10	60	160~180	227	454	51	970	653	35	5.05	35.35	0.30	1.49
硅钢 40-1		1	10	60	160~180	227	454	51	970	653	40	5.05	35.35	0.30	1.49
硅钢 40-2	0.44	0.8	9	65	160~180	230	479	47.9	1084	571	40	3.832	36.88	0.31	1.90

注：浆集比计算时钢纤维量计入骨料。

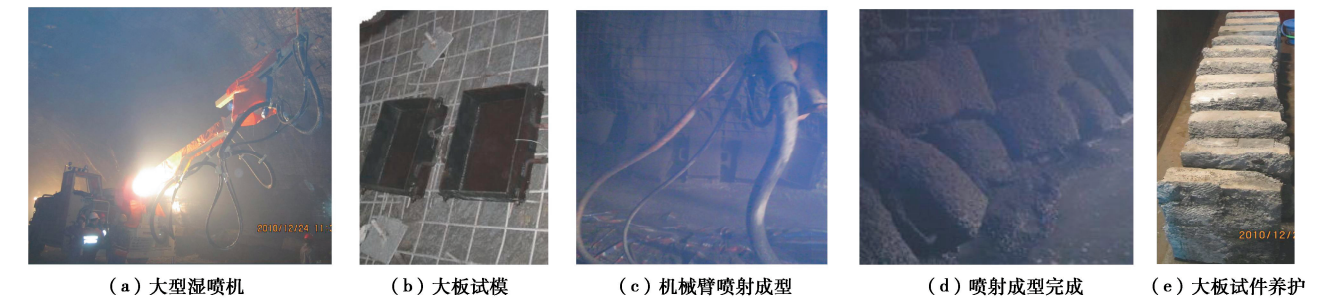


图 3 大板试件喷射成型
Fig. 3 Automatic spraying operation and sprayed panels

2 试验过程

2.1 现场喷射成型

现场喷射试验在工程引水隧洞掌子面附近选定的试验段进行, 4 种配合比下的混凝土由拌和楼集中生产, 每种混凝土分 4 盘下料, 一次性供料 6 m³, 运抵现场后罐车快速旋转 1 min 后放料到湿喷机进料口, 喷射采用 Normet Spraymec 7110 WP 型混凝土大型湿喷机 (图 3 (a)); 工人远距离操作机械臂自动喷射成型, 喷射距离控制在 1~1.5 m, 喷嘴和喷射面尽量保证垂直, 喷嘴做小圆周运动, 喷射风压控制在 0.5 MPa, 速凝剂掺量 8%, 混凝土吐出量控制在 12~15 m³/h。图 3 为现场喷射设备、成型过程及成型后的大板试件。

2.2 试件室内加工

根据 DL/T5721-2015 试验规程^[38], 弯曲韧性试验用小梁试件首先采用定制的 120 mm×350 mm×450 mm 专用钢试模 (图 3 (b)) 在现场喷射成型大板试件 (图 3 (c)), 现场养护 1 d (图 3 (d)) 后脱模并移

至室内养护 (图 3 (e)) 至 14 d 龄期时采用自进式双刀片岩石切割机 (图 4 (a)) 切割成 100 mm×100 mm×350 mm 小梁试件 (图 4 (b))。加工过程中需保证试件尺寸误差控制在±1mm 并注明受喷方向。

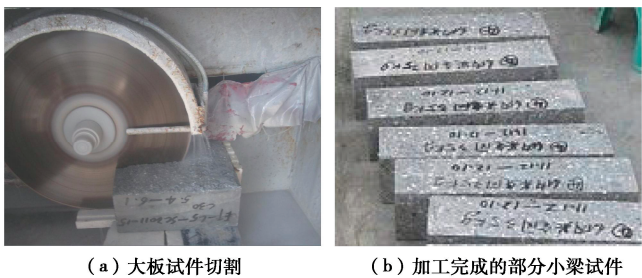


图 4 大板切割而成的小梁试件
Fig. 4 Beams cut from panels

2.3 弯曲韧性试验

现有钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准较多^[39-41], 根据 DL/T5721—2015 试验规程, 并结合北美应用较为广泛的 ASTM C1018^[42]标准来评价和计算混凝土韧性。试验采用三分点均匀加载, 加载在 MTS Landmark 100 kN 闭环液压伺服试验机上进行,

按照标准采用等速位移 0.05~0.1 mm/min 闭环控制。图 5 为根据标准开展的弯曲韧性试验装置图, IMC 数据采集系统动态采集荷载、混凝土梁两侧的跨中位移等参数 (LVDT 位移传感器)。加荷过程中梁尺寸的具体试验参数详见图 6。



图 5 弯曲韧性试验

Fig. 5 Flexural tests using beam with third-point loading according to ASTM C1018-98

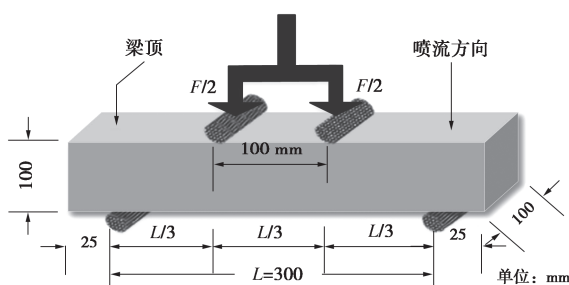
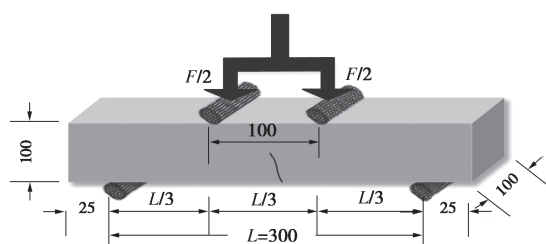
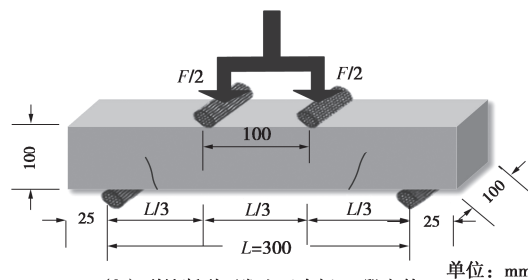


图 6 韧性试验用梁及其尺寸参数

Fig.6 Geometrical sizes of beams used in flexural toughness tests
弯曲韧性试验过程中, 小梁试件裂缝需发生在中间 $L/3$ 处 (图 7 (a)), 否则视为试验无效 (图 7 (b))。



(a) 裂缝断面位于中间 $L/3$ 处 单位: mm



(b) 裂缝断面发生于中间 $L/3$ 段之外

图 7 弯曲韧性试验裂缝发生发展断面示意

Fig. 7 Schematic diagram of development section of crack in flexural toughness tests

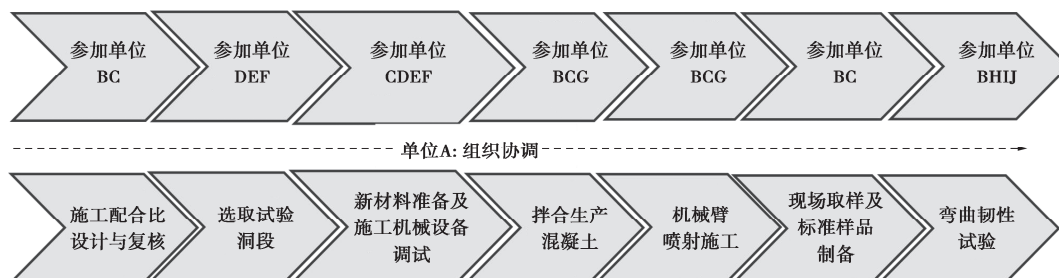
2.4 试验流程图

本次试验参加单位多、试验环节多, 因此试验过程可控性要求高, 对于参加单位人员技术素养及其责任心有着极高的要求。试验前需要进行明确的职责分工, 并对设备操作人员及其他参与试验的相关人员进行详尽的技术交底与培训, 具体试验流程如图 8 所示。

3 结果与讨论

3.1 弯曲韧性试验的荷载-挠度曲线

韧性表示材料在变形和断裂过程中吸收能量的能力。材料的韧性越好, 发生脆性断裂的可能性就越小。对于混凝土材料, 其与抗拉强度及变形能力有关, 反映的是材料延性和强度的综合指标, 因此, 一般用荷载与挠度 (或位移) 二者乘积的大小来表示材料韧性的好坏。钢纤维混凝土的荷载-挠度曲线基本如图 9 所示: A 点以前的曲线, 纤维混凝土与传统混凝土相同, 均约呈一直线, 到了 A 点即裂缝形成点, 对于素混凝土, 此点称为极限荷载点, 即混凝土随即破裂而完全丧失强度; 对于纤维混凝土, A 点称为初裂荷载点, 即此时混凝土发生开裂, 荷载转由跨越裂缝而发生桥接作用的纤维承担, 此时混凝土能够承受的应力大小由钢纤维强度及其与硬化浆体的黏结力决定。当混凝土继续开裂, 此时将有钢纤维拉脱或混凝土剥落现象, 但是承载能力将持续增加至 B 点, 即极限荷载点, 此时大部分钢纤维被拉断或拉脱; B 点之后, 则



参加单位: A-组织协调; B-研究方案策划与实施; C-混凝土生产兼新材料准备, 以及配合进行现场取样与样品加工;
DEF-三家施工单位, 负责提供试验段、机械设备及人员, 进行现场喷射试验, 并配合现场取样工作;
G-新材料供应单位, 指导新材料的应用; H1J-弯曲韧性试验单位

图 8 现场弯曲韧性试验研究工作流程图

Fig. 8 Flow chart of the on-site flexural toughness test

外作用力远大于混凝土未开裂截面、钢纤维及其与硬化浆体黏结力的承载力, 纤维以很快的速度从混凝土中拉脱或拉断, 终至混凝土断裂破坏。

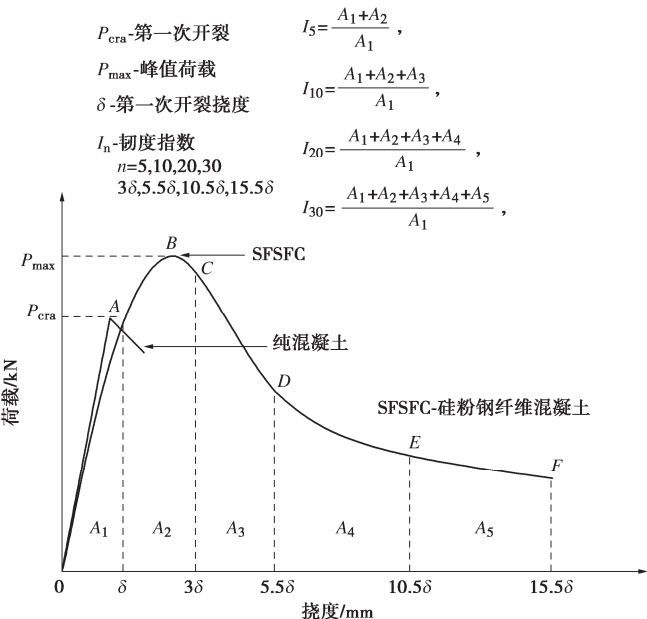


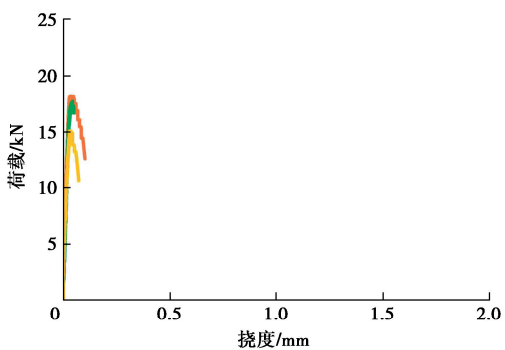
图9 典型钢纤维混凝土荷载-挠度曲线及其弯曲初度指数计算图示意^[38, 42]

Fig. 9 Typical load-deflection curve of steel fiber reinforced concrete and calculation diagram of its flexural toughness indexes

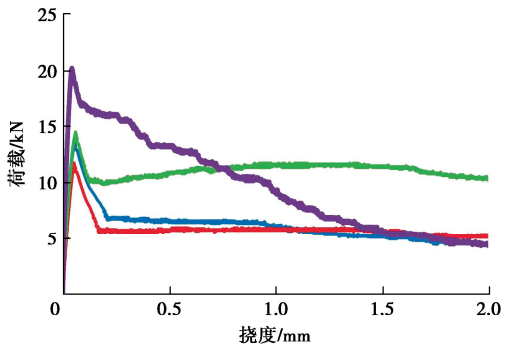
图10为本次试验的荷载-挠度曲线。由图10可见, 素混凝土梁达极限荷载后立即断裂, 丧失承载能力, 此时梁的变形很小, 表现出极强的脆性断裂特征。而掺硅粉、钢纤维湿喷混凝土小梁试件的初裂荷载和极限荷载相差不大, 之间的变化历程无明显拐点, 表明初裂不明显。承载力达极限荷载后, 硅钢35小梁试件荷载-挠度曲线存在明显的下降段, 之后混凝土进入失稳破坏阶段, 但是由于钢纤维的桥接、摩阻增强效应, 梁在较大变形下仍能保持相当高的承载力, 断裂后并非像素混凝土那样立即失去承载能力。硅钢40-1小梁试件在极限荷载后随着加荷的持续, 有二次硬化现象, 但是硬化峰值低于极限荷载; 钢纤维35 kg 掺量下, 由于纤维掺量低, 导致纤维均匀性难以保证, 以致于4个试件的荷载-位移曲线离散性较明显, 且荷载-挠度曲线不及40 kg 掺量下的曲线饱满, 表明延性特征不及40 kg 掺量。综合表明, 随着钢纤维掺量的提高, 小梁试件的剩余承载能力逐渐增大, 荷载-挠度曲线更加饱满, 呈现出更大的韧性。

硅钢40-1与硅钢40-2比较可见: 在配比相近的情况下, 钢纤维40 kg 掺量下的两种荷载-挠度曲线在峰值荷载处有一定差异。图10(d)显示, 硅钢40-2承载力在梁开裂后继续增加, 达到峰值荷载后逐渐趋于稳定, 并无明显下降趋势; 变形能力在梁开裂后继续上升, 使得曲线饱满程度较高; 残余承载能力优于

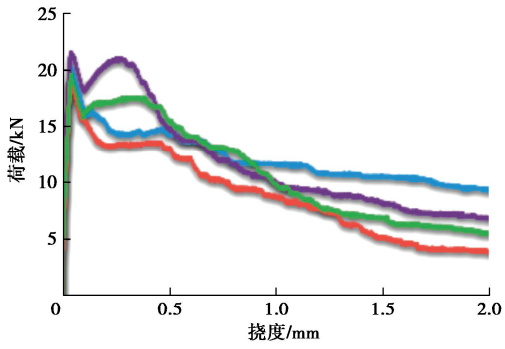
硅钢40-1结果。



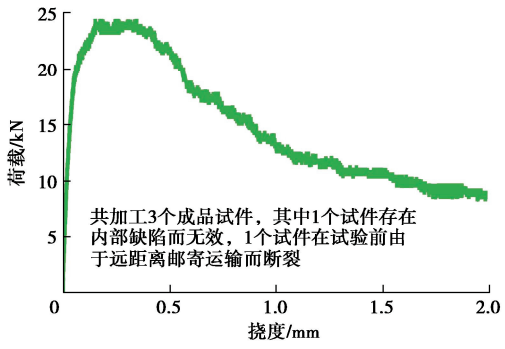
(a) 素喷砼弯曲韧性试验的荷载-挠度曲线



(b) 硅钢35湿喷混凝土弯曲韧性试验的荷载-挠度曲线



(c) 硅钢40-1湿喷混凝土弯曲韧性试验的荷载-挠度曲线



(d) 硅钢40-2湿喷混凝土弯曲韧性试验的荷载-挠度曲线

图10 湿喷混凝土弯曲韧性试验的荷载-挠度曲线
Fig. 10 Curves of load-deflection of flexural toughness of wet-sprayed concrete

分析由于现场喷射成型过程中的钢纤维回弹、分散均匀性, 以及喷射参数、人员技术素养、材料性能及设备参数等因素变化导致的试验试件性能的差异, 由此也表明现场喷射成型过程的重要性。

3.2 弯曲韧性指数

弯曲韧性指数为特征点与初裂点之间的能量比。 $I_5, I_{10}, I_{20}, I_{30}$ 分别表示按 3.0 倍、5.5 倍、10.5 倍及 15.5 倍初裂挠度时对应的荷载-挠度曲线下面积与初裂挠度时对应荷载-挠度曲线下面积的商值,理论弹塑性材料的韧性指数分别为 $I_5=5, I_{10}=10, I_{20}=20, I_{30}=30$, 混凝土弯曲韧性指数表明了与理想弹塑性材料的偏离程度。表 5 表明:①钢纤维的掺入使得混凝土材料特性发生根本变化,韧性显著提高,材料去脆性化迹象明显。②随着钢纤维掺量增加,韧性改善更趋明显。③相同纤维掺量下,混凝土不同配合比参数对于弯曲韧性指数结果有一定影响,分析可能由于不同配合比参数导致喷射施工时不同的回弹量,进而带来不同的附着硬化性能所致。

表 5 弯曲韧性指数汇总表
Table 5 Flexural toughness indices

配比序号	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}
素喷砼	1	1	1	1
硅钢 35	3.82	6.77	12.27	17.62
硅钢 40-1	3.96	7.18	13.61	19.45
硅钢 40-2	4.58	9.51	18.86	26.05

3.3 弯曲强度

混凝土弯曲强度及挠度试验结果表明(表 6):

(1)素喷混凝土初裂荷载和极限荷载基本一致,初裂挠度和最大挠度极为接近,表明素喷混凝土在开裂后即瞬间断裂,在达极限承载力后即失去继续受荷能力,脆性症状明显。

(2)随着硅粉和钢纤维的掺入,小梁极限弯曲荷载和最大挠度增加,其中极限荷载 35 kg 掺量下增加 36.4%、40 kg 掺量下增加 46.0%;最大挠度远高于素喷混凝土,表明材料变“软”的同时承载能力提高。

(3)当钢纤维由 35 kg/m³ 增加到 40 kg/m³ 时,小梁试件的初裂荷载提高了 6.9%,极限荷载提高了 7.0%,其结果与文献[43]均表明一定掺量内,纤维含量越高,对梁内部的微裂缝及其他内部缺陷的限制作用越大,桥接阻裂作用越明显。

3.4 承载能力变化系数

式(1)为承载能力变化系数计算公式,反映了钢纤维对受弯试件的增韧作用,其结果与理想弹塑性材料的承载能力变化系数相比较,可评定弯曲韧性,表

明不同钢纤维含量对试件承载能力变化系数的影响。表 7 显示,两种不同钢纤维含量的混凝土的承载能力变化系数均低于理想弹塑性材料($\zeta_n=1$),但随着钢纤维含量增加其值有所提高,随着混凝土配合比参数变化而有所变化。

$$\xi_n = \frac{I_n - \alpha}{\alpha - 1} \quad (1)$$

式中: α 为给定挠度/初裂挠度,本文分别为 3.0, 5.5, 10.5, 15.5。

3.5 残余强度因子

式(2)为残余强度 R 计算公式,对理想弹塑性材料来说, $R=100$, 低于该值则说明材料具有相对较低的塑性性能。素混凝土的 R 值趋近于 0。由表 8 可见:硅粉钢纤维湿喷混凝土较素喷混凝土残余强度性能表现有较大优势,且随着纤维掺量的增加而性能优势更加明显,表明由于钢纤维与基体的黏结作用,使得结构在开裂后仍能保持整体性和一定的承载能力,在喷锚支护应用中,可以允许围岩有较大的变形的同时,可有效抑制围岩破坏和瞬间崩塌。

$$\left. \begin{aligned} R_{5,10} &= 20(I_{10} - I_5), \\ R_{10,20} &= 10(I_{20} - I_{10}), \\ R_{10,30} &= 5(I_{30} - I_{10}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

4 再现性试验

因为试验过程涉及多家单位、多个环节、多种设备及工艺、多种新材料、多方人员,过程复杂,为验证结果的可靠性,在第一次大型科研试验成果的基础上,重新选择试验段对硅钢 40-1 开展了试验成果的再现性试验。再现性试验选择 3 家施工单位的 3 台湿喷台车,在 3 个试验段处同时进行现场湿喷成型,并选择 3 家科研机构试验室平行开展弯曲韧性试验,验证结果的有效性,结果如图 11 所示。由图 11 可见:3 家试验室的弯曲韧性再现性试验结果中,个别值存在偏离现象,譬如,试验室 B 的 ζ_5 及 ζ_{10} 试验结果明显高于试验 A 和试验室 C 对应检测结果。但是 3 家试验室的试验结果变化规律一致,数据整体上具有一致性,且与第一次大型试验结果一致,进一步验证了相关试验方法和结果的有效性 & 准确性。

表 6 混凝土弯曲强度及挠度试验结果

Table 6 Test results of bending strength and deflection of concrete

配比序号	初裂荷载/kN	初裂挠度/mm	初裂抗弯强度/ MPa	极限荷载/kN	最大挠度/mm	极限抗弯强度/ MPa
素喷砼	14.3659	0.032	4.311	14.7695	0.042	4.431
硅钢 35	19.9037	0.040	5.971	20.1507	3.045	6.045
硅钢 40-1	21.2758	0.040	6.383	21.5621	3.093	6.469
硅钢 40-2	19.1570	0.054	5.750	24.252	2.028	7.276

表 7 承载能力变化系数汇总表

Table 7 Variation coefficients of load-carrying capability				
配比序号	ζ_5	ζ_{10}	ζ_{20}	ζ_{30}
素喷砼	—	—	—	—
硅钢 35	0.41	0.28	0.19	0.15
硅钢 40-1	0.48	0.37	0.33	0.27
硅钢 40-2	0.79	0.89	0.88	0.73

表 8 残余强度试验结果

Table 8 Test results of residual strength factors			
配比序号	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{10,30}$
素喷砼	—	—	—
硅钢 35	59.00	55.00	54.25
硅钢 40-1	64.20	64.30	61.35
硅钢 40-2	98.60	93.47	82.67

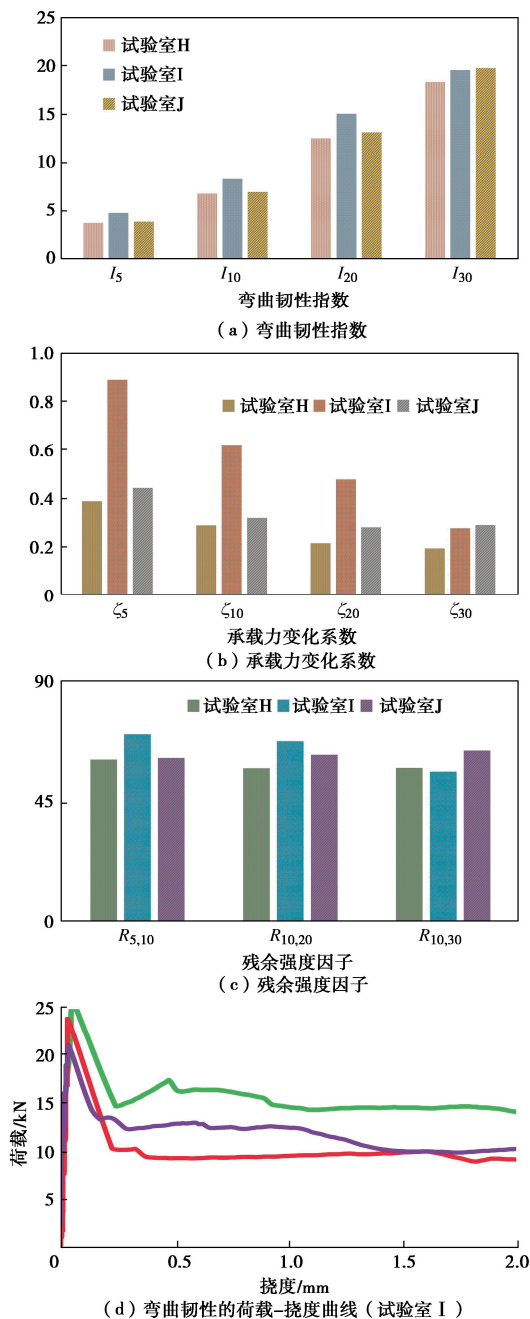


图 11 湿喷混凝土弯曲韧性再现性试验结果

Fig. 11 Reproducibility test results on flexural toughness of wet-sprayed concrete

5 结 论

结合高地应力洞室支护用新材料湿喷混凝土的应用研究,开展了掺硅粉、钢纤维湿喷混凝土现场弯曲韧性试验,成果涉及数家单位之间的交叉协作,成功开展此项工作为工程现场复杂环境下开展混凝土材料大型(或大规模)试验研究提供了参考。通过对素喷混凝土、两种钢纤维掺量下的硅粉湿喷混凝土,采用现场大型湿喷台车机械臂喷射成型的试件开展的弯曲韧性试验研究表明:素喷混凝土材料初裂荷载和极限荷载接近,在材料开裂后立即进入失稳破坏阶段,瞬间断裂;硅粉钢纤维湿喷混凝土两种钢纤维掺量下,初裂荷载和极限荷载得到提高,表现出了良好的残余承载能力,钢纤维的桥接、摩阻增强效应凸显^[44],使得小梁在较大变形下仍能保持相当高的承载力,且随着钢纤维掺量的提高,小梁试件的剩余承载能力逐渐增大,荷载-挠度曲线更加饱满,呈现出更大的韧性,进而与围岩同步变形能力增强。再现性试验进一步验证了试验成果的可靠性,并表明通过系统的试验设计,可以有效探测新材料湿喷混凝土在结构面附着硬化后的弯曲韧性变化规律。

参考文献:

[1] Guide for the Use of Silica Fume in Concrete: ACI 234R-06 [S]. 2012.

[2] WAN Z M, HE T S, CHANG N, et al. Effect of silica fume on shrinkage of cement-based materials mixed with alkali accelerator and alkali-free accelerator[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, **22**: 825-837.

[3] CHOI P, YEON J H, YUN K K. Air-void structure, strength, and permeability of wet-mix shotcrete before and after shotcreting operation: the influences of silica fume and air-entraining agent[J]. Cement and Concrete Composites, 2016, **70**: 69-77.

[4] LOTHENBACH B, RENTSCH D, WIELAND E. Hydration of a silica fume blended low-alkali shotcrete cement[J]. Physics and Chemistry Earth, Parts A/B/C, 2014, **70/71**: 3-16.

[5] AUSTIN S A, ROBINS P J, PEASTON C H. Effects of silica fume on dry-process sprayed concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1998, **50**(1): 25-36.

[6] YUN K K, CHOI S Y, YEON J H. Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2015, **78**: 194-202.

- [7] NING F W, CAI Y B, BAI Y, et al. Effect of expansive agent and internal curing agent on crack resistance of C50 silica fume wet-mix shotcrete[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, **11**(1): 1-11.
- [8] SJÖLANDER A, ANSELL A, NORDSTRÖM E. On the design of permanent rock support using fibre-reinforced shotcrete[J]. *Fibers*, 2023, **11**(2): 20.
- [9] GULER S, ÖKER B, AKBULUT Z F. Workability, strength and toughness properties of different types of fiber-reinforced wet-mix shotcrete[J]. *Structures*, 2021, **31**: 781-791.
- [10] CONGRO M, MOREIRA DE ALENCAR MONTEIRO V, DE ANDRADE SILVA F, et al. A novel hybrid model to design fiber-reinforced shotcrete for tunnel linings[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, **132**: 104881.
- [11] ALI SHAH S A, ALI GUL M A, NAQASH T, et al. Effects of fiber reinforcements on the strength of shotcrete[J]. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, **9**(1): 176-183.
- [12] ANSELL A. Tomography based method for investigation of steel fibre distribution in tunnel shotcrete[M]// *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. London: CRC Press, 2023: 435-443.
- [13] ESTRADA CÁCERES A R, CAVALARO S H P, MONTE R, et al. Alternative small-scale tests to characterize the structural behaviour of steel fibre-reinforced sprayed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, **296**: 123168.
- [14] ARMELIN H S, HELENE P. Physical and mechanical properties of steel-fiber reinforced dry-mix shotcrete[J]. *ACI Materials Journal*, 1995, **92**(3): 258-267.
- [15] MORGAN D R, MCASKILL N, RICHARDSON B W, et al. A Comparative Evaluation of Plain, Polypropylene Fiber, Steel Fiber, and Wire Mesh Reinforced Shotcretes. *International Symposium on Recent Developments in Concrete Fiber Composites*[R]. Washington D: Transportation Research Board, 1989.
- [16] AUSTIN S A, PEASTON C H, ROBINS P J. Material and fibre losses with fibre reinforced sprayed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 1997, **11**(5/6): 291-298.
- [17] Bindiganaville, Vivek Srinivasan .High-reactivity Metakaolin and Silica Fume in Steel Fiber Reinforced Dry-mix Shotcrete[M]. Vancouver: University of British Columbia, 1998.
- [18] YAN X, LIU L M, ZHANG J P, et al. Experimental study on basic mechanical properties of steel fiber-reinforced siliceous wet shotcrete[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1): 8.
- [19] ESTRADA CÁCERES A R, CAVALARO S H P, MONTE R, et al. Alternative small-scale tests to characterize the structural behaviour of steel fibre-reinforced sprayed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, **296**: 123168.
- [20] CHOI P, YUN K K, YEON J H. Effects of mineral admixtures and steel fiber on rheology, strength, and chloride ion penetration resistance characteristics of wet-mix shotcrete mixtures containing crushed aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, **142**: 376-384.
- [21] MORGAN D R, KIRKNESS A J, MCASKILL N, et al. Freeze-thaw durability of wet-mix and dry-mix shotcretes with silica fume and steel fibres[J]. *Cement, Concrete, and Aggregates*, 1988, **10**(2): 96-102.
- [22] LEUNG C K Y, LAI R, LEE A Y F. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, **35**(4): 788-795.
- [23] LI F H, CHENG Y H, WU F, et al. Compressive test characteristics and constitutive relationship of wet polypropylene macrofiber-reinforced shotcrete[J]. *Shock and Vibration*, 2021, **2021**(1): 6649283.
- [24] YAN X, LIU L M, ZHANG J P, et al. Experimental study on basic mechanical properties of steel fiber-reinforced siliceous wet shotcrete[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1): 1-8.
- [25] CÁCERES A R E, CAVALARO S H P, DE FIGUEIREDO A D. Integrated approach for quality control of fibre-reinforced sprayed concrete for tunnel lining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, **140**: 105260.
- [26] KAUFMANN J, FRECH K, SCHUETZ P, et al. Rebound and orientation of fibers in wet sprayed concrete applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, **49**: 15-22.
- [27] WANG Xiongxin. Understanding the Placement Mechanism of Wet-Mix Shotcrete and the Influence of Material[D]. Florida: Florida State University, 2021.
- [28] 王家滨, 牛荻涛, 张永利. 喷射混凝土力学性能、渗透性及耐久性试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016, **49**(5): 96-109. (WANG Jiabin, NIU Ditao, ZHANG Yongli. Investigation of mechanical, permeability and durability performance of

- shotcrete with and without steel fiber[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(5): 96-109. (in Chinese))
- [29] 夏冬桃, 张周强, 张严方, 等. 混杂纤维喷射混凝土的弯曲韧性[J]. 土木建筑与环境工程, 2015(2): 67-72. (XIA Dongtao, ZHANG Zhouqiang, ZHANG Yanfang, et al. Flexural toughness of hybrid fiber reinforced shotcrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2015(2): 67-72. (in Chinese))
- [30] 苏安双, 宁逢伟, 韩旭东, 等. 含水率及加载速率对纤维增韧喷射混凝土弯曲韧性的影响[J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 46-53. (SU Anshuang, NING Fengwei, HAN Xudong, et al. Influences of moisture content and loading rate on flexural toughness of fiber reinforced shotcrete[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(5): 46-53. (in Chinese))
- [31] 李传习, 聂洁, 石家宽, 等. 纤维类型对混凝土抗压强度和弯曲韧性的增强效应及变异性的影响[J]. 土木与环境工程学报, 2019, **41**(2): 147-158. (LI Chuanxi, NIE Jie, SHI Jiakuan, et al. Effect of fiber type on compressive strength and flexural toughness of concrete and analysis of variability[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2019, **41**(2): 147-158. (in Chinese))
- [32] 史占崇, 苏庆田, 邵长宇, 等. 粗骨料 UHPC 的基本力学性能及弯曲韧性评价方法[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(12): 86-97. (SHI Zhanchong, SU Qingtian, SHAO Changyu, et al. Basic mechanical behavior and flexural toughness evaluation method of coarse aggregate UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(12): 86-97. (in Chinese))
- [33] JENG F, LIN M L, YUAN S C. Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, **17**(1): 69-82.
- [34] 高尔新, 李元生, 薛玉, 等. 喷射混凝土钢纤维分布特性分析[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(2): 202-203. (GAO Erxin, LI Yuansheng, XUE Yu, et al. Analysis on distributions of steel-fiber in reinforced shotcrete[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(2): 202-203. (in Chinese))
- [35] AUSTIN S A, PEASTON C H, ROBINS P J. Material and fibre losses with fibre reinforced sprayed concrete[J]. Construction and Building Materials, 1997, **11**(5/6): 291-298.
- [36] NICOLAS G, MARC J. Characterization of placement phenomenon in wet sprayed concrete[C]// 7th International symposium on sprayed concrete-Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support-Sandefjord, Norway, 2014.
- [37] GINOUSE N, JOLIN M, BISSONNETTE B. Effect of equipment on spray velocity distribution in shotcrete applications[J]. Construction and Building Materials, 2014, **70**: 362-369.
- [38] 国家能源局. 水工喷射混凝土试验规程: DL/T 5721—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015. (National Energy Bureau of the People's Republic of China. Test code for hydraulic shotcrete: DL/T 5721—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. (in Chinese))
- [39] 丁一宁, 董香军, 王岳华. 钢纤维混凝土弯曲韧性测试方法与评价标准[J]. 建筑材料学报, 2005, **8**(6): 660-664. (DING Yining, DONG Xiangjun, WANG Yuehua. Testing methods and evaluating standards of flexural toughness for steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, **8**(6): 660-664. (in Chinese))
- [40] 卫明山, 李利莎, 郑全平, 等. 钢纤维混凝土韧性指数评价方法对比研究[J]. 建筑结构, 2007, **37**(12): 90-92. (WEI Mingshan, LI Lisha, ZHENG Quanping, et al. Comparative study of evaluate method for toughness factor of steel fiber reinforced concrete(SFRC)[J]. Building Structure, 2007, **37**(12): 90-92. (in Chinese))
- [41] 高丹盈, 赵亮平, 冯虎, 等. 钢纤维混凝土弯曲韧性及其评价方法[J]. 建筑材料学报, 2014, **17**(5): 783-789. (GAO Danying, ZHAO Liangping, FENG Hu, et al. Flexural toughness and it's evaluation method of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2014, **17**(5): 783-789. (in Chinese))
- [42] Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading): ASTM C1018-97 [S]. 1997.
- [43] SINGH S P, SINGH A P, BAJAJ V. Strength and flexural toughness of concrete reinforced with steel - polypropylene hybrid fibres[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2010, **11**(4): 495-507.
- [44] 赖建中, 孙伟, 董贺祥. 粗合成纤维混凝土力学性能及纤维-混凝土界面黏结行为研究[J]. 工业建筑, 2006, **36**(11): 94-97. (LAI Jianzhong, SUN Wei, DONG Hexiang. Mechanical performance of synthetic structural fiber reinforced concrete and bond behaviour of fiber-matrix interface[J]. Industrial Construction, 2006, **36**(11): 94-97. (in Chinese))