

振动搅拌对钢纤维混凝土力学性能的影响分析

徐一鸣^{1,2}, 王江飞³, 孙一凯⁴, 徐建国², 周奇³, 张梦乐²

(1. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001;
3. 河南濮泽高速公路有限公司, 河南 郑州 450001; 4. 解放军信息工程大学, 河南 郑州 450001)

摘要: 为提高钢纤维混凝土的匀质性, 通过采用振动搅拌技术开展钢纤维混凝土力学性能对比试验, 探讨搅拌方式、钢纤维体积率和基体强度对钢纤维混凝土力学性能的影响规律。结果表明: 当钢纤维体积率小于1.0%时, 振动搅拌对试件抗压强度、弹性模量和抗折强度的提升效率最高; 振动搅拌对试件劈裂抗拉强度提升幅度随着钢纤维体积率增大而不断增高, 且基体强度越高, 提升效果越好。振动搅拌能改善混凝土界面过渡区结构并提高浆体黏聚力。振动搅拌可以提高钢纤维混凝土的均匀性, 增强混合物之间的粘结力, 有利于提高钢纤维混凝土的力学性能。

关键词: 钢纤维混凝土; 振动搅拌; 力学性能; 微观形貌

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)02-0066-06

Mechanical Properties Analysis of Vibratory Mixing Steel Fiber Reinforced Concrete

XU Yiming^{1,2}, WANG Jiangfei³, SUN Yikai⁴, XU Jianguo², ZHOU Qi³, ZHANG Mengle²

(1. SIPPR Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450001, China;

2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

3. He'nan Puze Expressway Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450001, China;

4. PLA Information Engineering University, Zhengzhou, He'nan 450001, China)

Abstract: To improve the homogeneity of SFRC, the mechanical properties tests of SFRC were compared by vibration mixing technology. The effects of vibration mixing, steel fiber volume fraction and matrix strength on the mechanical properties of SFRC were analyzed. The results show that when the steel fiber volume fraction is less than 1.0%, the vibration mixing has the highest efficiency in improving the compressive strength, elastic modulus and flexural strength of the specimen. With the increase of the volume ratio of the steel fiber, the improvement of the tensile strength of the specimen by vibrating mixing increased continuously, and the higher the matrix strength, the better the lifting effect. Vibration mixing improves the structure of Concrete interface transition zone and improves the cohesion of the slurry. Vibration mixing can improve the uniformity of steel fiber reinforced concrete (SFRC), strengthen the bond between the mixtures and improve the mechanical properties of SFRC.

Keywords: steel fiber reinforced concrete; vibration mixing; mechanical properties; elastic modulus

混凝土的匀质性反映了混凝土中各组分分布的均匀程度, 当混凝土配合比相同时, 其综合性能取决于匀质性的高低^[1-2]。钢纤维混凝土是钢纤维、水泥、砂石等配制养护形成的一种复合材料, 是一种不完全均质材料, 在普通搅拌过程中, 由于混合料各组

分表面间存在粘结力, 很难使钢纤维混凝土搅拌均匀, 这将影响钢纤维混凝土的性能和应用^[3-5]。振动搅拌技术近年来发展迅速, 即在普通的强制搅拌基础上加以振动作用, 能提高混合物拌合的均匀性, 提高混合物搅拌效率^[6-7]。长安大学冯忠绪等^[8-9]

据此发明了振动搅拌机,使用振动搅拌机对混合料进行振动搅拌,加快了水化反应,提高了砂浆包裹骨料速度,从而改善了混凝土的综合性能。王银龙等^[10]发现振动搅拌能使混凝土的塑性黏度和剪切应力降低,在较短搅拌时间内实现混凝土的均质性。李雪连等^[11]采用振动搅拌技术提升了混合料的强度和抗裂性。文献[12-14]分别设计了高强混凝土和超高性能混凝土的配合比,研究了振动搅拌和普通搅拌对混凝土性能的影响。李汉渤等^[15]开展了混凝土新拌性能、耐久性能及微观性能试验研究,说明振动搅拌降低了混凝土总孔隙率、减小了大孔及中孔含量,同时也减小了混凝土内部微裂纹和缺陷。综上所述,目前振动搅拌已应用到普通混凝土中并取得了一些进展,但对于钢纤维混凝土的应用研究仍然不够系统和完善。本文将振动搅拌作为新型搅拌技术,开展对钢纤维混凝土性能的试验研究,为振动搅拌技术的工业应用提供参考。

1 试验概况

本试验采用 DT60ZBW 型双卧轴振动搅拌机制作试件,它主要由搅拌驱动机构、振动驱动机构、链传动装置等组成,如图 1 所示。搅拌驱动机构通过链传动装置驱动搅拌轴和其上安装的搅拌臂和搅拌叶片转动,从而使物料在搅拌筒内强制循环流动,同时振动驱动机构使偏心振动轴高速旋转,使安装在偏心振动轴上的搅拌轴、搅拌臂和搅拌叶片边搅拌边振动,实现振动搅拌。试验的控制变量为振动因素,普通搅拌只运行强制搅拌程序,振动搅拌运行强

制搅拌和振动搅拌程序。



图 1 双卧轴振动搅拌机

1.1 原材料

钢纤维采用端勾型钢纤维,长度为 30 mm,等效直径为 0.55 mm,长径比为 64,抗拉强度为 1 000 MPa;水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;粉煤灰采用 I 级粉煤灰;粗骨料采用粒径 5 mm~20 mm 的碎石,颗粒级配良好,含泥量小于 1%;细骨料选用级配良好的中砂,细度模数控制在 2.66;外加剂选用聚羧酸系高性能减水剂。

1.2 试验方法及配合比

试验参考《纤维混凝土应用技术规程》^[16](JGJ/T 221—2010)标准规范进行,设定搅拌方式(普通搅拌、振动搅拌)、基体强度(CF40、CF50、CF60)和钢纤维体积率(0%、0.5%、1.0%、1.5%和 2.0%)作为研究因素,以力学性能指标作为考察对象,设计试验配合比见表 1。

表 1 钢纤维混凝土配合比

基体强度	钢纤维体 积率 $\rho_f/\%$	砂率	配合比/(kg·m ⁻³)						
			钢纤维	水	水泥	粗集料	细集料	飞灰	减水剂
CF40	0.0	0.37	0	172	301	1195	702	30	1.65
	0.5	0.37	39	172	301	1173	712	30	1.65
	1.0	0.37	79	172	301	1151	722	30	1.65
	1.5	0.37	118	172	301	1129	732	30	1.65
	2.0	0.37	157	172	301	1107	742	30	1.65
CF50	0.0	0.36	0	172	347	1181	664	35	2.68
	0.5	0.36	39	172	347	1159	674	35	2.68
	1.0	0.36	79	172	347	1138	684	35	2.68
	1.5	0.36	118	172	347	1117	694	35	2.68
	2.0	0.36	157	172	347	1094	704	35	2.68
CF60	0.0	0.36	0	164	452	1078	661	45	4.97
	0.5	0.36	39	164	452	1057	671	45	4.97
	1.0	0.36	79	164	452	1033	682	45	4.97
	1.5	0.36	118	164	452	1011	692	45	4.97
	2.0	0.36	157	164	452	990	702	45	4.97

2 试验结果及其分析

表 2 为普通搅拌和振动搅拌钢纤维混凝土力学性能试验结果。

2.1 振动搅拌对立方体抗压强度的影响

2.1.1 立方体抗压强度的变化规律

由表 2 和图 2 可知振动搅拌方式和掺加钢纤维都能提高基体的立方体抗压强度。相同基体强度

时,随着钢纤维体积率的增加,振动搅拌对立方体的抗压强度提升的幅度先增高后降低,振动搅拌在低钢纤维体积率提升效果明显,钢纤维体积率为 0.5% 提升幅度最大,最高可达 14.94%。随着钢纤维体积率的增加,振动搅拌提升效果降低;同钢纤维体积率时,基体强度越高,振动搅拌对立方体抗压强度的提升效果越好。

表 2 试验结果

试件 编号	立方体抗压 强度/MPa		轴心抗压 强度/MPa		弹性模量 /GPa		劈裂抗拉 强度/MPa		抗折强度 /MPa		拉压比	
	普通搅拌	振动搅拌	普通搅拌	振动搅拌	普通搅拌	振动搅拌	普通搅拌	振动搅拌	普通搅拌	振动搅拌	普通搅拌	振动搅拌
CF40-0.0	45.89	49.51	33.75	36.53	32.54	33.82	3.57	3.83	5.02	5.81	0.078	0.077
CF40-0.5	48.06	53.33	36.14	39.13	33.76	34.72	3.78	4.09	5.34	6.22	0.079	0.077
CF40-1.0	50.77	54.31	37.06	39.42	34.01	34.95	3.80	4.21	6.01	7.34	0.075	0.078
CF40-1.5	51.62	55.16	37.42	39.61	33.94	34.83	3.99	4.53	7.28	8.13	0.077	0.082
CF40-2.0	53.89	56.49	38.15	40.01	34.21	35.16	4.26	4.94	8.93	9.86	0.079	0.087
CF50-0.0	52.64	57.13	39.46	42.90	33.79	35.58	3.76	4.07	5.35	6.28	0.071	0.071
CF50-0.5	56.67	63.44	42.76	46.89	35.06	36.41	4.25	4.65	5.51	6.59	0.075	0.073
CF50-1.0	60.24	64.58	44.75	47.54	35.81	36.63	4.39	4.92	6.91	7.96	0.073	0.076
CF50-1.5	62.56	66.86	45.50	48.13	35.74	36.52	4.70	5.39	8.48	9.21	0.075	0.081
CF50-2.0	63.98	67.41	47.01	49.12	36.23	36.94	5.06	5.94	9.67	10.51	0.079	0.088
CF60-0.0	59.84	64.74	43.25	47.36	35.46	37.57	4.14	4.47	5.92	7.15	0.069	0.069
CF60-0.5	64.67	74.33	47.11	52.23	36.74	38.23	5.09	5.64	6.34	7.86	0.079	0.076
CF60-1.0	72.60	79.14	52.45	56.17	37.91	38.71	5.12	5.75	7.53	8.79	0.071	0.073
CF60-1.5	75.32	81.62	54.32	57.86	37.76	38.57	5.32	6.19	9.96	10.85	0.071	0.076
CF60-2.0	76.39	82.21	55.13	58.27	38.57	39.27	5.57	6.79	11.45	12.40	0.073	0.083

注:CF40-0.5 代表:基体强度为 CF40,钢纤维体积率为 0.5%。

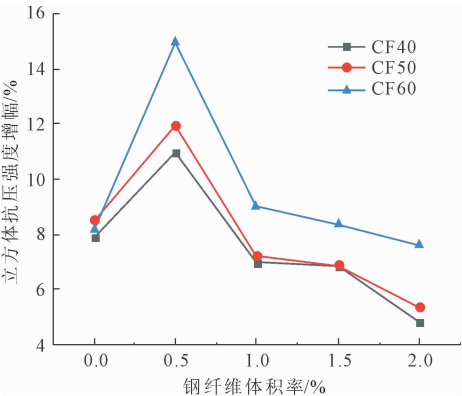


图 2 立方体抗压强度提升幅度

2.1.2 振动搅拌立方体抗压强度计算公式

试验表明,影响振动搅拌钢纤维混凝土立方体抗压强度的因素有振动搅拌方式、基体强度和钢纤维体积率。简化计算模型,建立振动搅拌钢纤维混凝土立方体抗压强度关系式如下:

$$f_{fcu} = f_{cu} \alpha (\frac{W}{B})^{\mu} (1 + \beta \lambda_f) \tag{1}$$

$$\lambda_f = \rho_f l_f / d_f \tag{2}$$

式中: f_{fcu} 为振动搅拌立方体抗压强度,MPa; f_{cu} 为基体素混凝土立方体抗压强度,MPa; α 、 μ 、 β 为振动搅拌、基体强度和钢纤维对立方体抗压强度的影响系数。 W/B 为钢纤维混凝土水胶比; λ_f 为钢纤维含量特征值; ρ_f 为钢纤维体积率; l_f 为钢纤维长度,mm; d_f 为钢纤维直径,mm。

得到振动搅拌立方体抗压强度计算公式如下:

$$f_{fcu} = 1.06 f_{cu} (\frac{W}{B})^{-0.1} (1 + 0.11 \lambda_f) \tag{3}$$

试验值与理论值误差范围在 8.43% 以内,比值的均值为 1.0004,均方差为 0.0361。

2.2 振动搅拌对轴心抗压强度的影响

2.2.1 轴心抗压强度的变化规律

由表 2 和图 3 可知,相同基体强度时,随着钢纤维体积率的增加,振动搅拌对轴心的抗压强度提升的幅度先增高后降低,钢纤维体积率为 0.50% 提升幅度最大,最高可达 10.87%;相同钢纤维体积率

时,基体强度越高,振动搅拌对轴心抗压强度的提升效果越好。

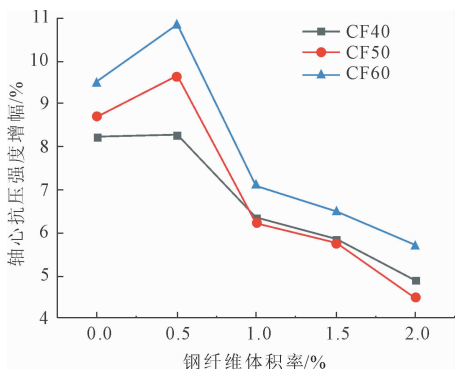


图 3 轴心抗压强度提升幅度

2.2.2 振动搅拌轴心抗压强度计算公式

建立振动搅拌钢纤维混凝土轴心抗压强度与基体素混凝土轴心抗压强度关系式如下:

f_{fc} = 1.05f_c(\frac{W}{B})^{-0.1}(1 + 0.08\lambda_f) \tag{4}

式中:f_{fc}为振动搅拌轴心抗压强度,MPa;f_c为基体素混凝土轴心抗压强度,MPa。

轴心抗压强度试验值与理论值误差范围在 6.66% 以下,比值的均值为 0.9988,均方差为 0.0356。

2.3 振动搅拌对弹性模量的影响

2.3.1 弹性模量的变化规律

由表 2 和图 4 可知,同基体强度时,随着钢纤维体积率的增加,振动搅拌和普通搅拌下弹性模量都经历先提升后降低再提升的过程,振动搅拌对弹性模量提升的幅度不断降低。钢纤维体积率为 0 和 0.50% 时,基体强度越高,振动搅拌提升幅度越大,随着钢纤维体积率的增加,基体强度越高,振动搅拌对弹性模量提升的幅度越低。

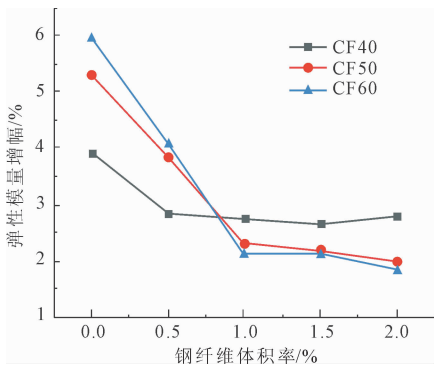


图 4 弹性模量提升幅度

2.3.2 振动搅拌弹性模量计算公式

建立振动搅拌钢纤维混凝土弹性模量计算模型如下:

E_{fc} = \frac{1.03 \times 10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}}(1 + 0.16\lambda_f) \tag{5}

式中;E_{fc}为振动搅拌钢纤维混凝土弹性模量,MPa;f_{cu}为基体素混凝土立方体抗压强度,MPa。

弹性模量试验值与理论值的误差范围大部分在 10% 以下,比值的均值为 1.0416,均方差为 0.0648。

2.4 振动搅拌对劈裂抗拉强度的影响

2.4.1 劈裂抗拉强度的变化规律

由表 2 和图 5 可知,同基体强度时,随着钢纤维体积率的增加,振动搅拌对劈裂抗拉强度的提升幅度不断升高,整体呈上升趋势,钢纤维体积率为 2.00% 时提升幅度最大,最大可达到 21.90%;相同钢纤维体积率时,基体强度越高,振动搅拌对劈裂抗拉强度的提升效果越好。

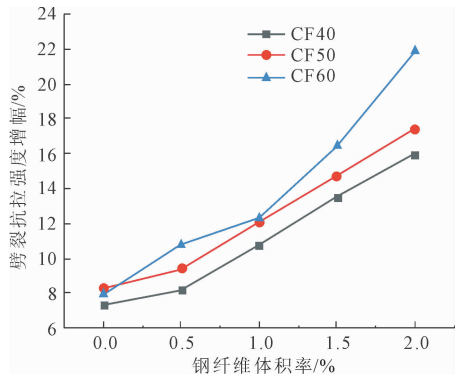


图 5 劈裂抗拉强度提升幅度

2.4.2 振动搅拌劈裂抗拉强度计算公式

建立振动搅拌钢纤维混凝土劈裂抗拉强度计算模型如下:

f_{ft} = 1.09f_t(1 + 0.33\lambda_f) \tag{6}

式中:f_{ft}为振动搅拌劈裂抗拉强度,MPa;f_t为基体素混凝土劈裂抗拉强度,MPa。

劈裂抗拉强度试验值与理论值误差范围在 10% 以下,比值的均值为 0.9892,均方差为 0.0698。

2.5 振动搅拌对抗折强度的影响

2.5.1 抗折强度的变化规律

由表 2 和图 6 可知,相同基体强度时,随着钢纤维体积率的增加,振动搅拌对抗折强度的提升幅度先升高后降低,CF50 和 CF60 钢纤维体积率为 0.5% 时提升幅度最大,CF40 钢纤维体积率为 1.0% 时提升幅度最大;钢纤维体积率为 0 和 0.5% 时,基体强

度越高,振动搅拌对抗折强度的提升效果越好,当钢纤维体积率为 1.5% 和 2.0% 增大时,基体强度越高,振动搅拌对抗折强度的提升幅度越低。

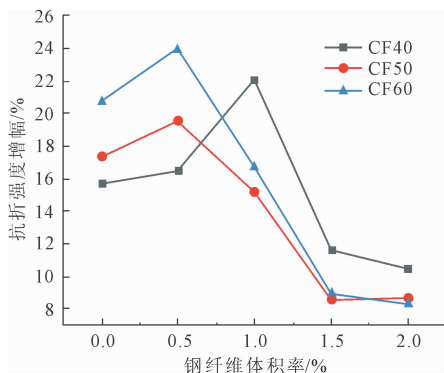


图 6 抗折强度提升幅度

2.5.2 振动搅拌抗折强度计算公式

试验表明,影响振动搅拌钢纤维混凝土抗折强度的因素有振动搅拌方式、基体强度和钢纤维体积率。因此建立振动搅拌钢纤维混凝土抗折强度计算模型如下:

$$f_{fjm} = 1.10f_{tm} \left(\frac{W}{B} \right)^{-0.1} (1 + 0.45\lambda_f) \quad (7)$$

式中: f_{fjm} 为振动搅拌抗折强度, MPa; f_{tm} 为基体素混凝土抗折强度, MPa。

抗折强度试验值与理论值误差范围在 10% 以下,比值的均值为 1.003,均方差为 0.0596。

2.6 拉压比关系研究

将表 2 中的数据进行回归分析,建立劈裂抗拉强度与立方体抗压强度的关系式为:

$$f_{fj1} = 0.19(1 + 0.09\lambda_f)f_{fcu1}^{0.76} \quad (8)$$

$$f_{fj2} = 0.19(1 + 0.12\lambda_f)f_{fcu2}^{0.78} \quad (9)$$

式中: f_{fj1} 为普通搅拌劈裂抗拉强度, MPa; f_{fj2} 为振动搅拌劈裂抗拉强度, MPa; f_{fcu1} 为振动搅拌立方体抗压强度, MPa; f_{fcu2} 为振动搅拌立方体抗压强度, MPa。

2.7 振动搅拌钢纤维混凝土微观形态研究

图 7 为普通搅拌和振动搅拌样品界面过渡区微观结构对比,普通搅拌钢纤维混凝土试样的水泥团与骨料界面过渡区的结构松散,其界面过渡区有较大裂缝,存在大大小小的气孔,可观察到未完全水化的产物。振动搅拌钢纤维混凝土试样的界面过渡区结构紧密,仅有少量孔径较小且分散均匀的细小裂缝,孔隙主要被 C-S-H 凝胶填充,没有发现明显的絮状、针状以及片状的未完全水化产物。通过对比发现,振动搅拌相比普通搅拌明显改善了界面过渡

区的微观形貌,提高了界面过渡区的性能,减少了裂缝和孔隙的数量,使结构黏聚力加大。

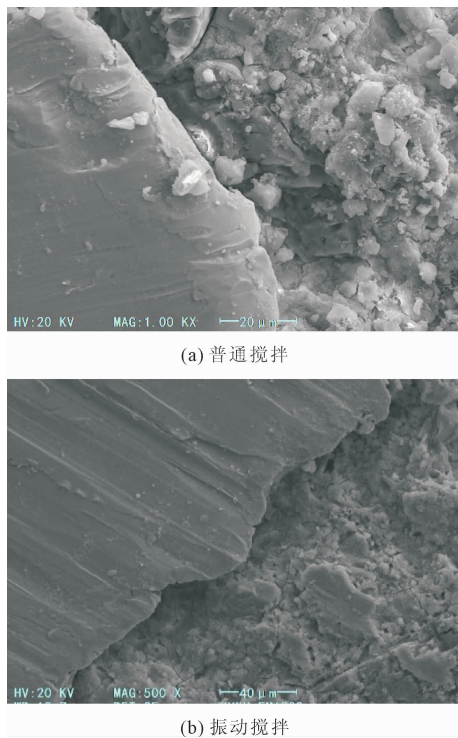


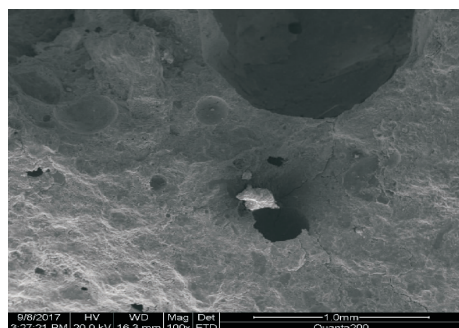
图 7 不同搅拌方式样品界面过渡区微观结构

图 8 和图 9 分别为放大 100 倍和放大 2000 倍的普通搅拌和振动搅拌样品混凝土浆体形貌对比。通过电镜观察放大 100 倍的微观形貌照片,在普通搅拌条件下,可以看到试样有较大的孔隙,结构疏松,混合料各组分之间粘结性较差;在振动搅拌条件下,可以看到试样水化产物和骨料连接紧密,钢纤维均匀嵌在混合料之间,混合物各组分之间粘结性较好。通过电镜观察放大 2000 倍的微观形貌照片,在普通搅拌条件下,可以看到试样存在孔隙和裂缝,孔隙较大且分散在混合料中,部分钢纤维出现结团聚集现象;在振动搅拌条件下,可以看到水化产物和骨料连接紧密,钢纤维均匀包裹在混合料之间,混合料中孔隙较小且分布均匀。

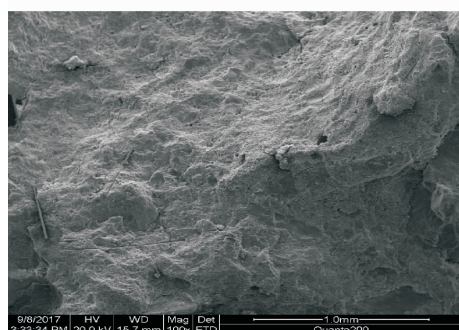
3 结 论

(1) 相比普通搅拌,随着基体强度的提高和钢纤维体积率的增加,振动搅拌下立方体的抗压强度、棱柱体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度不断提升,整体呈线性上升趋势。振动搅拌对立方体的抗压强度、棱柱体抗压强度和抗折强度提升的幅度先增高后降低,钢纤维体积率小于 1% 时提升效率最高,后期随着钢纤维体积率增加,提升效率降低;随

着钢纤维体积率的增加,振动搅拌对劈裂抗拉强度提升的幅度不断增高,钢纤维体积率为 2% 时提升效率最高;随着基体强度的提高,劈裂抗拉强度提升的幅度不断增高。

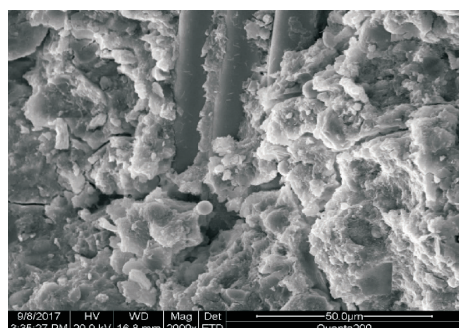


(a) 普通搅拌

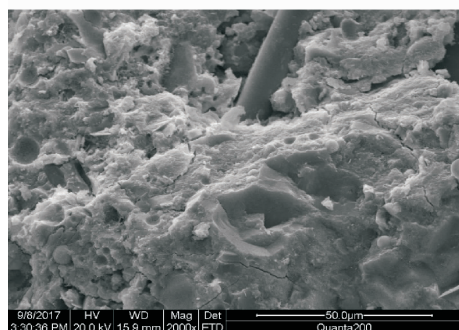


(b) 振动搅拌

图 8 钢纤维混凝土 100 倍 SEM 照片



(a) 普通搅拌



(b) 振动搅拌

图 9 钢纤维混凝土 2000 倍 SEM 照片

振动搅拌和普通搅拌下弹性模量都经历先提升、后降低、再提升的过程,振动搅拌对弹性模量提升的幅度不断降低。钢纤维体积率为 0% 和 0.50% 时,基体强度越高,振动搅拌对弹性模量提升幅度越大,随着钢纤维体积率的增加,基体强度越高,振动搅拌对弹性模量提升的幅度越低。

(3) 通过普通搅拌和振动搅拌样品界面过渡区微观结构对比,说明振动搅拌方式可以提高钢纤维混凝土的均质性,增强混合物之间的黏结力。振动搅拌的混合料之间密实度较好,性能明显较优,同时钢纤维在混合料之间分布均匀,避免了结团聚集现象,有利于提高钢纤维混凝土性能。

参考文献:

- [1] 张健健,赵 悟,赵凯音,等. 振动对立式搅拌均匀性的影响[J]. 筑路机械与施工机械化,2018,35(9):109-112,118.
- [2] 谢 亮. 多次冲击荷载下玄武岩纤维高强混凝土孔隙结构及力学特性试验研究[J]. 复合材料科学与工程,2023(12):112-118.
- [3] 高丹盈. 钢纤维混凝土设计与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2002:173.
- [4] Rahman Sobuz Md. Habibur, Alam Arafat, John Oehlers Deric. Experimental and analytical studies of size effects on compressive ductility response of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2023,409:70-74.
- [5] 何文昌,黄敏聪,韦时华,等. 钢纤维增强混凝土动态力学性能试验研究[J]. 四川水泥,2023(12):4-7.
- [6] Safawi Mohammad Ibrahim, Iwakiichiro, Miura Takashi. A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(9):1834-1845.
- [7] Navarrete Ivan, Lopez Mauricio. Estimating the segregation of concrete based on mixture design and vibratory energy [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122:384-390.
- [8] 冯忠绪,江建卫,于丽娟. 振动搅拌理论及其装置的试验研究[J]. 中国公路学报, 1999(3):122-126.
- [9] 董 武,冯忠绪,赵利军,等. 振动搅拌对再生混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018,37(5):1714-1721.
- [10] 王银龙,曹仲龙,马建磊. 新型沥青混合料高频振动搅拌装置的研究[J]. 四川水泥, 2022(9):243-247.
- [11] 李雪连,鞠志成,周宇豪,等. 振动搅拌水泥稳定碎石的路用性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022,47(4):124-127.

(下转第 121 页)

(2) 相比普通搅拌,随着钢纤维体积率的增加,

- properties of alkali activated slag concrete [J]. Construction Building Materials, 2017,133:65-72.
- [10] Shi X S, Collins F G, Zhao X L, et al. Mechanical properties and microstructures analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,237:20-29.
- [11] Xie J, Wang J, Zhang B, et al. Physicochemical properties of alkali activated GGBS and fly ash geopolymeric recycled concrete [J]. Construction Building Materials, 2019,204:384-398.
- [12] Tang Z, Hu Y, Tam V W Y, et al. Uniaxial compressive behaviors of fly ash/slag-based geopolymeric concrete with recycled aggregates [J]. Cement and Concrete Composites, 2019,104:103375.
- [13] 赵秋红,董 硕,谢 萌. 钢纤维增强地聚物再生混凝土单轴受压全曲线试验[J]. 建筑结构学报,2022,43(11):255-265.
- [14] Nattapong D, Srikkhama T, Plongkrathok C, et al. Assessment of equivalent substrate stiffness and mechanical properties of sustainable alkali-activated concrete containing recycled concrete aggregate [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022,16:e00982.
- [15] 普通混凝土配合比设计规程:JGJ 55—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [16] 再生混凝土结构技术标准:JGJ/T 443—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [17] 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [18] Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression: ASTM C469M[S]. West Conshohocken, United States: American Society of Testing and Materials, 2010.
- [19] 史才军,曹芷杰,谢昭彬. 再生混凝土力学性能的研究进展[J]. 材料导报,2016,30(23):96-103,126.
- [20] Li B, Wang C, Yu S, et al. Compressive constitutive behavior of steel fiber reinforced geopolymeric recycled aggregate concrete: Experimental investigation and analytical model [J]. Structures, 2023,58:105531.
- [21] Carreira D J, Chu K H. Stress-strain relationship for plain concrete in compression [J]. Journal of American Concrete Institute, 1985,82:797-804.
- [22] Kathirvel P, Kaliyaperumal S R M. Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete [J]. Construction Building Materials, 2016,102:51-58.
- [23] 丁兆洋,苏 群,李明泽,等. 水玻璃模数对地聚物再生混凝土力学性能的影响[J]. 建筑材料学报,2023,26(1):61-70.
- [24] 郑居焕,刘如月,颜桂云,等. 砖骨料地聚物再生混凝土力学性能试验研究[J]. 工业建筑,2022,52(9):234-240.
- [25] Nath P, Sarker PK. Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete [J]. Construction Building Materials, 2017,130:22-31.

~~~~~

(上接第71页)

- [12] 罗 为,熊光启,熊晨晨,等. 振动搅拌工艺制备轻质高强钢纤维混凝土[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(1):14-22.
- [13] 张颜科,路 钰,杨 迎,等. 振动搅拌对普通混凝土和超高性能混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品,2023(11):16-21.
- [14] 何志勇,阳洁颖,邹丽梅,等. 双卧轴振动搅拌对超高性能混凝土性能的影响研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2023,20(5):154-162.
- [15] 李汉渤,丁平洋,张孙文,等. 振动搅拌对混凝土新拌性能及耐久性性能影响[J]. 建筑结构,2022,52(S1):1609-1614.
- [16] 纤维混凝土应用技术规程:JGJ/T 221—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.