

振动拌和对混凝土强度及其抗冻性能的影响

贾 蓬, 杜功成, 任云阳, 吴振东
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为研究混凝土振动拌和过程中的振动参数对混凝土强度和抗冻性能的影响,通过正交试验分析了振动功率、振动时间、拌和次数对混凝土抗压强度的影响,得到了实验室条件下混凝土振动拌和的最优参数组合;在此基础上,对以该最优振动参数振动拌和的混凝土试件进行冻融试验,分析了振动拌和对混凝土抗冻性能的影响. 试验结果表明,振动功率对混凝土试件的抗压强度影响较为显著,而振动时间对其影响较小;振动拌和可有效提高混凝土的抗压强度,以本试验获得的最佳振动参数振动拌和的混凝土,其 28 d 抗压强度较相同配比的静力搅拌的普通混凝土抗压强度提高 24.31%;随冻融循环次数的增加,经振动拌和的混凝土试件的质量损失率和抗压强度损失率均明显低于采用静力搅拌的混凝土的相应指标,振动拌和有助于提高混凝土的抗压强度和抗冻性.

关 键 词: 振动拌和;冻融;质量损失率;抗压强度;正交试验

中图分类号: TU 528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)12-1784-06

Strength and Frost-Resistance Properties of the Vibration-Mixed Concrete

JIA Peng, DU Gong-cheng, REN Yun-yang, WU Zhen-dong
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DU Gong-cheng, E-mail: 1228128369@qq.com)

Abstract: The influence of vibration parameters on strength and frost-resistance properties of vibration-mixed concrete was experimentally studied. Firstly, the effects of vibration power, vibration time and mixing numbers were analyzed through orthogonal tests to determine the optimal vibration parameters; then, freeze-thaw tests were conducted on those concrete specimens prepared according to the optimized vibration parameters to analyze the frost-resistance properties. Results show that the vibration power has a more significant effect on the compressive strength of concrete than the mixing numbers and the vibration time. Through vibration-mixing, the 28 d compressive strength increase by 24.31% compared with those prepared by static-mixing method. With the increase of freeze-thaw cycles, the mass loss rate and compressive strength loss rate of the vibration-mixed concrete are significantly lower than those of the static-mixed concrete. The concrete compressive strength and the frost-resistance properties can be improved through the vibration-mixing process.

Key words: vibration-mixing; freeze-thaw; mass loss rate; compressive strength; orthogonal test

混凝土作为目前最为常用的建筑材料之一,其力学性能和耐久性的提高一直是人们关注研究的热点问题.通过在混凝土中加入添加剂和掺合料,可以有效提高混凝土的性能^[1-5].尽管如此,将采用传统静力搅拌方式的新拌混凝土试样中的水泥浆放在显微镜下观察会发现仍有 10% ~ 30% 的水泥颗粒黏聚为小水泥团^[6],这说明新拌混凝土各组分尤其是水泥等胶结材料没有在微观上达到均匀,因此这种聚团现象不仅浪费了水泥,而且容易产生干缩和温缩开裂,从而影响混凝土

的强度和耐久性。Ferraris 等^[7]研究发现,利用振动频率为 7 500 r/min 的插入式振动器转盘式搅拌机,在水泥用量不变的条件下,其 28 d 抗压强度可提高约 50%。可见,在混凝土搅拌过程中通过振动改善水泥等胶结材料的聚团现象有助于提高混凝土的性能。

不少学者在振动拌和提高混凝土性能方面开展了研究。在振动拌和改善混凝土机理方面,冯忠绪等^[8]研究了振动拌和可提高界面过渡区的强度;冯建生等^[9]认为振动能够破坏水泥聚团现象,加速水泥水化反应,从而改善混凝土整体性能;赵悟等^[10]认为振动作用可有效提高界面过渡区的密实度;付昌会等^[11]研究发现振动改善了混凝土的含气量,进而增强了混凝土的耐久性。

在振动拌和装置方面,赵利军等^[12]针对混凝土搅拌过程中存在的水泥颗粒聚团和搅拌低效区问题,提出了搅拌低效区改进方法;Banfill 等^[13]分析了插入式振动的作用半径与新拌混凝土流变性和振捣特性的关系;沈虹等^[14]提出了改进的二次振动搅拌方案。

在振动拌和改善混凝土性能方面,赵利军等^[15-16]的研究表明振动搅拌能够提高混凝土强度,改善混凝土的孔结构和含气量;沈虹等^[17]的研究表明在适当的振动强度范围内,振动强度与混凝土的抗压强度呈线性相关;付昌会等^[18]发现振动搅拌可以增加混凝土的含气量,有效改善混凝土的孔结构;文献[19-20]研究表明振动搅拌的拌和可改善混凝土的性能。

上述研究为将振动拌和技术应用于提高混凝土的力学性能的研究奠定了坚实基础,但是由于在振动拌和过程中涉及振动时间、振动频率、拌和程度等多因素和参数的相互作用和影响,对于各因素对混凝土力学性能的影响及其优化研究较少,此外由于我国存在大量的寒区混凝土工程,振动拌和对寒区混凝土抗冻性能的探讨尚不多见。

本文在前人研究的基础上,首先基于正交试验,对振动拌和过程中的振动参数、振动时间及拌和次数对混凝土抗压强度的影响进行了研究,给出了最佳振动拌和参数组合,然后对以最佳振动拌和参数进行振动拌和的混凝土试件进行冻融试验,分析了振动拌和对混凝土抗冻性能的影响。

1 试验设计

采用的水泥为冀东水泥厂生产的盾石牌

42.5 普通硅酸盐水泥,粗骨料采用表观密度为 2 710 kg/m³,粒径不超过 20 mm 的花岗岩碎石;细骨料采用表观密度为 2 620 kg/m³的中砂;利用清洁自来水进行拌和。为研究振动拌和对混凝土性能的影响,利用插入式振动棒将振动能传递至拌和物,使其发生共振以达到破坏水泥聚团,并使水泥砂浆基质与粗集料充分握裹接触,同时排除空气。由于该振动棒的有效振动半径约为 25 cm,本文采用直径为 24 cm 的铁桶作为振动拌和容器。振动拌和应用于实际施工时振动与拌和是同时进行的,如文献[21-22]在振动拌和的机械装置方面开展了研究,但关于振动时间和拌和次数及其组合对混凝土力学性能的作用机制还缺乏讨论。

因此本文将振动和拌和分开实施,即在静力搅拌后,先振动后拌和。首先将静力搅拌过后的混凝土置于上下镂空的拌和容器中,每次拌和量为 0.006 m³。在拌和容器内采用振动棒进行振动,振动棒直径 35 mm,振动功率分别为 800 W(型号 ZDB35-1A)、1 300 W(型号 ZDB50-1A)、1 800 W(型号 Z1D-6501)。振动时采用快插慢拔的方式,按逆时针移动施加振动(图 1),每个位置振动时间为 3 s。拌和次数定义为在振动总时长一定的条件下,中间进行拌和的次数。如果振动总时长为 90 s,在振动 45 s 后对容器内的混合料倒出进行充分搅拌后装入铁桶再进行 45 s 的振动后,再次拌和均匀,最后装入模具制作试件,则拌和次数为 2 次。

为分析振动功率、振动时间和拌和次数对混凝土强度和抗冻性的影响,首先开展正交试验,分析振动拌和对混凝土强度的影响,并获得混凝土振动拌和的最佳参数;在此基础上,开展基于该最佳参数的振动拌和混凝土抗冻性能试验,分析振动拌和对混凝土抗冻性能的影响。

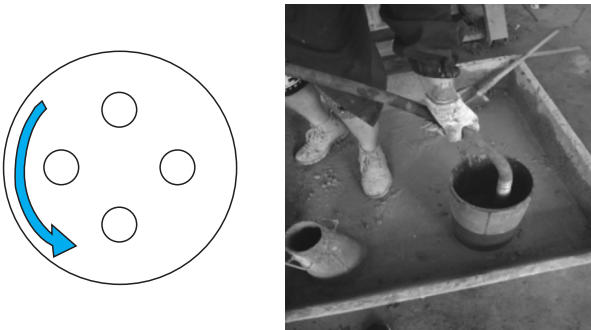


图 1 插入式振动棒移动及振动示意图
Fig. 1 Sketch map for the movement and vibration of the vibrating spear

2 振动拌和对混凝土强度的影响

2.1 各因素对混凝土抗压强度影响的正交试验设计

本正交试验为三因素三水平 $L_9(3^4)$ 试验,如表 1 所示,共设计 9 组试验,试验方案见表 2. 试验采用浇筑立方体试块 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,浇筑完养护 24 h 后进行拆模,放置于标准条件下养护 28 d,然后测试混凝土 28 d 抗压强度,并与相同配比但未经振动拌和的普通混凝土 (PT)28 d 抗压强度进行对比,如表 3 所示.

表 1 因素 - 水平表 Table 1 Factors and levels			
水平	振动功率/W	振动时间/s	拌和次数
1	800	30	1
2	1 300	60	2
3	1 800	90	3

表 2 正交试验方案 Table 2 Schemes for the orthogonal test				
试验号	振动功率/W	振动时间/s	空列	拌和次数
1	1(800)	1(30)	1	1
2	1(800)	2(60)	2	2
3	1(800)	3(90)	3	3
4	2(1 300)	1(30)	2	3
5	2(1 300)	2(60)	3	1
6	2(1 300)	3(90)	1	2
7	3(1 800)	1(30)	3	2
8	3(1 800)	2(60)	1	3
9	3(1 800)	3(90)	2	1

2.2 各因素对混凝土抗压强度的影响

图 2 为各组混凝土 28 d 抗压强度及各因素对抗压强度提高率,可以看出经振动拌和的各组混凝土的强度均比未经振动拌和的普通混凝土强度有明显提高,其中试验号 4 和 5 对混凝土强度的提高效果最为明显,分别可提高为 24. 31% 和 23. 83%,但各组提高的幅度不同,表明振动功率、振动时间及拌和次数对混凝土抗压强度存在不同程度的影响.

为获得各因素对混凝土抗压强度的影响程度,对混凝土抗压强度进行正交试验的极差分析

和方差分析,如表 3 和表 4 所示. 由表 3 可知,振动功率、振动时间以及拌和次数各影响因素的极差 R_j 的值由大到小依次为:振动功率 (A) > 拌和次数 (C) > 振动时间 (B); 方差 F 值大小依次为 $F_A(8. 37) > F_C(2. 21) > F_B(1. 37)$. 正交试验的极差分析和方差分析的结果表明,振动功率、振动时间以及拌和次数对混凝土强度的影响程度排序为:振动功率 > 拌和次数 > 振动时间,得到对于本试验的最优水平为 $A_2B_2C_2$.

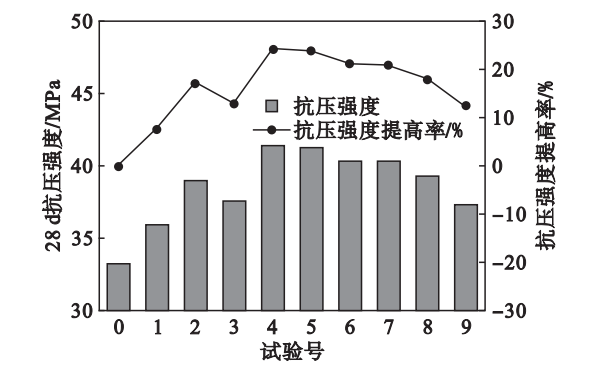


图 2 各因素对混凝土 28 d 抗压强度提高率
Fig. 2 Effect of various factors on the 28 d compressive strength and strength improvement rate

3 振动拌和对混凝土抗冻性的影响

为研究振动拌和对混凝土抗冻性能的影响,以最佳组合方式 ($A_2B_2C_2$) 对混凝土进行振动拌和并作长为 100 mm 的立方体试块,标准养护至 28 d 后,利用天津港源试验仪器厂生产的 HDD 型混凝土冻融试验机对试块分别进行 0, 25, 50, 75 次冻融循环试验,为进行对比,同时对同一批次相同配比标准养护 28 d 的未经振动拌和的普通混凝土试件分别进行 0, 25, 50, 75 次冻融循环试验.

图 3 为普通混凝土与振动拌和混凝土经过不同冻融循环后的表观形态. 当冻融循环次数小于 25 次时,振动拌和混凝土和普通混凝土试件表观形态都基本完好,没有出现明显的砂浆剥离现象,但随着冻融循环次数的增加,试件表面开始出现较明显的局部水泥砂浆脱离的现象,当冻融 50 次和 75 次时,可以看到普通混凝土试件表面砂浆剥落加重,粗骨颗粒外露程度较振动拌和混凝土试件严重,试件表面凹凸不平,粗细骨料分离,试件局部已经发生脱落破坏.

表 3 混凝土 28 d 抗压强度正交试验极差分析
Table 3 Differential analysis on the 28 d compressive strength

试验号	振动功率/W	振动时间/s	空列	拌和次数	强度/MPa
1	1(800)	1(30)	1	1	35.93
2	1(800)	2(60)	2	2	39.08
3	1(800)	3(90)	3	3	37.65
4	2(1300)	1(30)	2	3	41.42
5	2(1300)	2(60)	3	1	41.26
6	2(1300)	3(90)	1	2	40.39
7	3(1800)	1(30)	3	2	40.33
8	3(1800)	2(60)	1	3	39.35
9	3(1800)	3(90)	2	1	37.43
K_1	112.66	117.68	115.67	114.62	
K_2	123.07	119.69	117.93	119.80	
K_3	117.11	115.47	119.24	118.42	
k_1	37.55	39.23	38.56	38.21	
k_2	41.02	39.90	39.31	39.93	
k_3	39.04	38.49	39.75	39.47	
极差 R	10.41	4.22	3.57	5.18	

表 4 混凝土 28 d 抗压强度正交试验方差分析
Table 4 The orthogonal test variance analysis on the 28 d compressive strength

方差来源	平方和	自由度	均方值	F 值	影响显著性
总和	28.13	8	3.52		
A	18.19	2	9.09	8.37	显著
B	2.97	2	1.49	1.37	
C	4.80	2	2.40	2.21	
误差	2.17	2	1.09		

注： $F_{0.75}(2,2)=3$ ， $F_{0.90}(2,2)=9$ 。

图 4 为不同冻融循环后普通混凝土和振动拌和混凝土的质量损失率,随着冻融循环次数的增加,普通混凝土的质量损失明显高于振动拌和混凝土,冻融循环 75 次后,普通混凝土质量损失率约为振动拌和混凝土质量损失率的 2 倍. 可见振动拌和不但可以提升混凝土的抗压强度,并且有利于减少混凝土冻融后的质量损失. 图 5 为不同冻融循环后混凝土的强度损失,冻融循环后普通混凝土的强度损失均高于振动拌和混凝土,当冻融循环次数达到 75 次时,普通混凝土的抗压强度

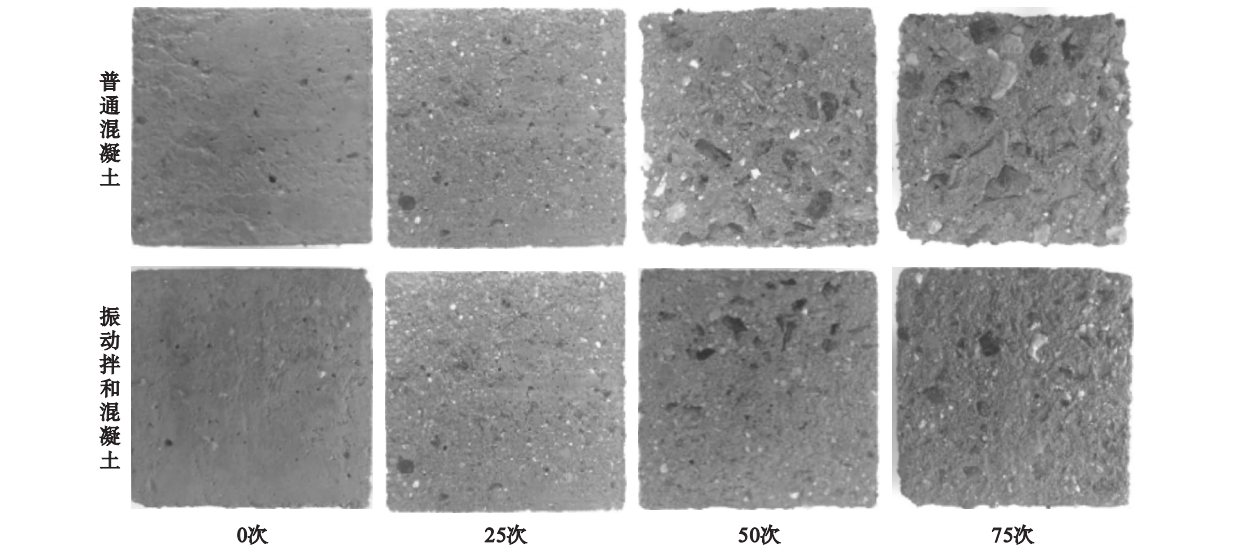


图 3 普通混凝土和振动拌和混凝土冻融破坏形态

Fig. 3 Failure modes of vibration-mixed concrete and static-mixed concrete after freeze-thaw cycles

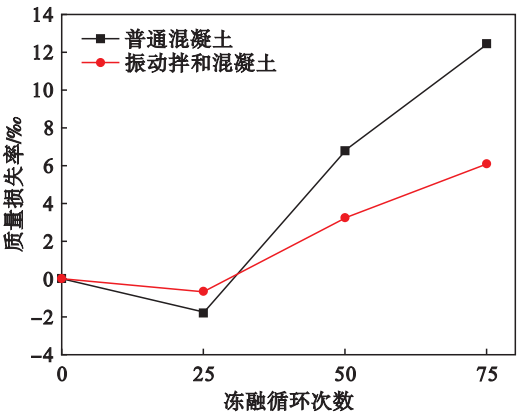


图 4 冻融循环与质量损失的关系

Fig. 4 Relationship between freeze-thaw cycles and weight loss rate

损失率达到 22.5%,而振动拌和的混凝土抗压强度损失率为 16.2%。这是由于振动拌和能够通过振动作用降低混合料之间的摩擦力,促进了骨料之间的剪切运动,使混凝土中的水泥砂浆能充分均匀分布于内部的孔隙。此外,振动可有效破坏水泥的聚团现象,促进水泥充分水化反应,使生成的水化产物有效填充混凝土内部的微小孔隙,提高混凝土的密实度,从而提高混凝土的抗压强度和抗冻性。

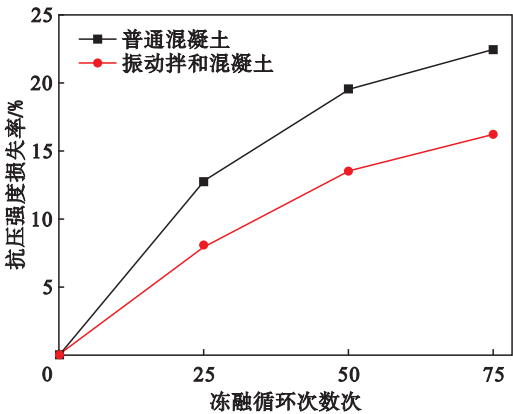


图 5 冻融循环与强度损失的关系

Fig. 5 Relationship between freeze-thaw cycles and the compressive strength loss

4 结 论

1) 振动功率、振动时间及拌和次数对混凝土的抗压强度均有影响,但影响程度不同,振动功率对混凝土试件的抗压强度影响最为显著,振动时间影响最弱,而拌和次数介于两者之间。

2) 振动拌和可有效提高混凝土的抗压强度,以本试验获得的最佳振动参数(功率 1 300 W,振动时间 60 s,拌和 2 次)振动拌和的混凝土,其

28 d 抗压强度较相同配比的静力搅拌的普通混凝土抗压强度提高 24.31%。

3) 随冻融循环次数的增加,经振动拌和的混凝土试件的质量损失率和抗压强度损失率均明显低于采用静力搅拌的混凝土的相应指标,振动拌和有助于提高混凝土的密实度,从而提高混凝土的抗压强度和抗冻性。

参考文献:

[1] Teng S, Afroughsabet V, Ostertag C P. Flexural behavior and durability properties of high performance hybrid-fiber-reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 182: 504 – 515.

[2] Wang D H, Ju Y Z, Shen H, et al. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 182: 464 – 473.

[3] Pradhan S, Kumar S, Barai S V. Recycled aggregate concrete: particle packing method (PPM) of mix design approach [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 269 – 284.

[4] Gyurkó Z, Sziájtó A, Nemes R. Increasing freeze-thaw resistance of concrete by additions of powdered cellular concrete and clay bricks [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 193: 11 – 18.

[5] Bogas J A, Brito J D, Ramos D. Freeze-thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 115: 294 – 306.

[6] Zhang L Q, Feng Z X, Zhao L P. Vibrating mixing and the improvement of concrete performance [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 652/653/654: 1260 – 1264.

[7] Ferraris C F. Concrete mixing methods and concrete mixers: state of the art [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards & Technology*, 2001, 106 (2): 391 – 399.

[8] 冯忠绪,王卫中. 增强混凝土界面黏结强度的方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(1): 91 – 94.
(Feng Zhong-xu, Wang Wei-zhong. Reinforcement methods of concrete interfacial bond strength [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2009, 29 (1): 91 – 94.)

[9] 冯建生,冯忠绪,王博. 振动搅拌对不同配合比混凝土性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(3): 636 – 642.
(Feng Jian-sheng, Feng Zhong-xu, Wang Bo. Effects of vibratory mixing on the performance of concrete with different mixing proportions [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2015, 40 (3): 636 – 642.)

[10] 赵悟,王博,赵利军,等. 改善搅拌过程提高混凝土强度[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 148 – 153.
(Zhao Wu, Wang Bo, Zhao Li-jun, et al. Improving concrete strength based on the mixing process [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2015, 35 (1): 148 – 153.)

[11] 付昌会,王卫中,张磊. 振动搅拌参数对混凝土含气量的影

响[J]. 长安大学学报(自然科学版),2011,31(6):100 – 104.
(Fu Chang-hui, Wang Wei-zhong, Zhang Lei. Impact of vibratory mixing parameters on air content of concrete[J]. *Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)*, 2011,31(6):100 – 104.)

[12] 赵利军,冯忠绪,张海军. 基于机械强化方法的混凝土搅拌技术研究[J]. 武汉理工大学学报,2008(1):62 – 66.
(Zhao Li-jun, Feng Zhong-xu, Zhang Hai-jun. Research of mechanical methods for improving mixing process of concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*,2008(1): 62 – 66.)

[13] Banfill P F G,Teixeira M A O M, Craik R J M. Rheology and vibration of fresh concrete:predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation[J]. *Cement and Concrete Research*,2011,41:932 – 941.

[14] Shen H,Duan Z S,Li F. Analysis of combination mode about vibration mixer in concrete mixing mechanics[J]. *Advanced Materials Research*,2012,468/469/470/471:443 – 447.

[15] Zhao L J, Weng J L, Feng Z X. Experimental research on vibrating mixing of concrete based on twin-shaft mixer[J]. *Applied Mechanics and Materials*,2012,253/254/255:349 – 353.

[16] Zhao L J, Feng Z X. Effect of vibrating mixing on air content and compressive strength of concrete[J]. *Advanced Materials Research*,2012,374/375/376/377:1863 – 1867.

[17] Shen H,Duan Z S, Li F. The significance of vibration in concrete mixing [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012,220/221/222/223:509 – 512.

[18] 付昌会,冯忠绪,张磊. 搅拌方式对混凝土含气量及孔结构的影响[J]. 郑州大学学报(工学版),2011,32(2):42 – 45.
(Fu Chang-hui,Feng Zhong-xu,Zhang Lei. Effects of mixing method on concrete air content and pore distribution [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science Edition)*,2011,32(2):42 – 45.)

[19] 闫少杰,宋少民,张良奇. 振动搅拌对大流动性混凝土性能的影响[J]. 混凝土,2017(8):152 – 155.
(Yan Shao-jie,Song Shao-min,Zhang Liang-qi. Influence of vibratory mixing on the performance of high fluidity concrete [J]. *Concrete*,2017(8):152 – 155.)

[20] 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.
(Dong Wu, Feng Zhong-xu, Zhao Li-jun, et al. Effect of vibratory mixing on performance of recycled concrete effect of vibratory mixing on performance of recycled concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37 (5): 1714 – 1721.)

[21] 霍忠义,赵悟,宋震宁. 基于 RCC 及 SFRC 的振动拌和方案选择[J]. 筑路机械与施工机械化,2008(8):46 – 49 + 52.
(Huo Zhong-yi, Zhao Wu, Song Zhen-ning. Research on mechanism of increasing uniformity and strength of RCC and SFRC using vibratory mixing[J]. *Construction Machinery & Construction Technology*,2008(8):46 – 49 + 52.)

[22] 赵悟,冯忠绪. 再生集料混凝土的振动拌和强化机理研究[J]. 混凝土,2006(8):17 – 20.
(Zhao Wu, Feng Zhong-xu. Research on the strengthening mechanism of vibration mixing recycled concrete [J]. *Concrete*,2006(8):17 – 20.)