

引用本文:肖建庄,陈祥磊,李 标,等. 纳米 SiO₂ 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(1):26-32.
XIAO Jian-zhuang, CHEN Xiang-lei, LI Biao, et al. Effect of Mixed Nano-SiO₂ and Fly Ash on Properties of Recycled Aggregate Concrete[J].
Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 26-32.

DOI:10.19815/j.jace.2019.03027

纳米 SiO₂ 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响

肖建庄,陈祥磊,李 标,薛松涛,段珍华

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:使用质量取代法研究粉煤灰和纳米 SiO₂ 单掺及复掺对再生混凝土(RAC)工作性能、抗压强度(7,28,90 d)、抗折强度(28 d)和劈裂抗拉强度(28 d)的影响。浇筑试样时,基于现有的搅拌方式,提出了新的两阶段搅拌法,先将再生粗骨料和纳米 SiO₂、附加水进行搅拌,使得部分纳米 SiO₂ 颗粒能够被再生粗骨料吸收,用于填补老砂浆孔隙和微裂缝。结果表明:随着纳米 SiO₂ 掺量增加,再生混凝土的坍落度逐渐减小,复掺粉煤灰能够减少纳米 SiO₂ 引起的坍落度损失;粉煤灰掺量不变的情况下,再生混凝土抗压、抗折和劈裂抗拉强度随着纳米 SiO₂ 掺量的增加而增加;复掺纳米 SiO₂ 和粉煤灰不但能够补偿再生混凝土由粉煤灰引起的早期强度降低,而且 90 d 龄期抗压强度明显高于 2 种材料单掺的再生混凝土;纳米 SiO₂ 掺量(质量分数)为 1% 时,再生混凝土在 90 d 龄期的抗压强度相对再生混凝土提高了 3.0 MPa;复掺纳米 SiO₂ 和粉煤灰对再生混凝土的抗折强度、劈裂抗拉强度也有显著提升,S2F30 的抗折强度相对于 F30 增加了 24.17%,且劈裂抗拉强度高于 2 种材料单掺的再生混凝土,相对于 F30 提高了 12.68%。

关键词:再生混凝土;老砂浆;纳米 SiO₂;粉煤灰;质量取代法

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)01-0026-07

Effect of Mixed Nano-SiO₂ and Fly Ash on Properties of Recycled Aggregate Concrete

XIAO Jian-zhuang, CHEN Xiang-lei, LI Biao, XUE Song-tao, DUAN Zhen-hua

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The effects of fly ash and Nano-SiO₂ on the workability, compressive strength (7, 28, 90 d), flexural strength (28 d) and splitting tensile strength (28 d) of recycled aggregate concrete (RAC) were studied by using mass substitution method. When casting the sample, a new two-stage mixing method was proposed based on the existing mixing method. The recycled coarse aggregate, Nano-SiO₂ and additional water were stirred, so that some Nano-SiO₂ particles could be absorbed by the recycled coarse aggregate to fill the pores and micro cracks of the old mortar. The results show that the slump of RAC decreases with the increase of Nano-SiO₂ content, and the reduction of slump caused by Nano-SiO₂ can be alleviated with the addition of fly ash. Under the condition of the same fly ash content, the compressive strength, flexural strength and splitting tensile strength of RAC grow up with the increased content of Nano-SiO₂. With the

收稿日期:2019-04-07

基金项目:科技部中日合作重点项目(2016YFE0118200);国家自然科学基金重点项目(51438007)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

combination of Nano-SiO₂ and fly ash, not only the early strength reduction of RAC caused by fly ash can be compensated, but also the compressive strength of RAC at the age of 90 d is significantly higher than that of RAC adding the two materials respectively. When the mass fraction of Nano-SiO₂ content is 1%, the compressive strength of recycled concrete at the age of 90 d increases by 3.0 MPa compared with RAC. The flexural strength and splitting tensile strength of RAC are significantly improved by adding both Nano-SiO₂ and fly ash. The flexural strength of S2F30 is 24.17% higher than that of F30, and the splitting tensile strength of S2F30 is 12.68% higher than that of RAC mixed with Nano-SiO₂ or fly ash alone.

Key words: recycled aggregate concrete; old mortar; Nano-SiO₂; fly ash; mass substitution method

0 引言

相比天然粗骨料,再生粗骨料表面附着大量残余老砂浆,由其制备的再生骨料混凝土的各项力学和耐久性能均劣于普通混凝土(NAC)^[1-2]。随着纳米技术的发展,纳米材料在土木工程领域的应用受到越来越多的关注^[3],主要有纳米 SiO₂^[4], CaCO₃^[5]和 TiO₂^[6]等。Singh 等^[7]认为纳米材料及其二次水化的产物能够有效填充再生粗骨料表面老砂浆的孔隙和微裂缝,同时纳米颗粒的成核效应能够进一步促进水化,从而改善界面过渡区并提高早期强度。Salkhordeh 等^[8]在自密实再生混凝土中使用纳米 SiO₂ 取代了 10%(质量分数)的水泥,早期抗压强度得到明显提高,且 28 d 强度提高了约 64.86%,甚至超过了 NAC。Hosseini 等^[9-10]研究发现,3% 掺量的纳米 SiO₂ 取代水泥有助于提高再生混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性能。纳米 SiO₂ 对水泥基材料的早期水化有十分明显的促进效果,然而 Hou 等^[11]研究发现,纳米 SiO₂ 的水化产物会包裹并阻止砂浆中水泥颗粒的水化,从而阻碍砂浆的后期强度发展。同时,由于纳米 SiO₂ 的表面能大,颗粒周围大量存在的不饱和键易吸附自由水,导致新拌混凝土中自由水减少,使得混凝土的工作性显著降低^[12]。

粉煤灰为混凝土中常用的一种矿物掺合料,当粉煤灰取代率为 30% 时,再生混凝土的 7 d 抗压强度有所降低,但其长期性能会持续发展,甚至超过基准值^[13]。Kou 等^[14]研究发现,高掺量(55%)的粉

煤灰不仅有利于提高再生混凝土的长期抗压强度和弹性模量,而且能够改善其抗氯离子渗透能力。此外,粉煤灰可以改善再生混凝土的工作性能^[15-16]。

不难看出,纳米 SiO₂ 或粉煤灰在混凝土中的单掺使用尽管有助于改善再生混凝土的部分性能,但同时有可能会引起其他性能的劣化。两者的结合使用或许会解决这个难题,但当前极少有关纳米 SiO₂ 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能影响的研究报道。因此,本文将分析不同掺量的纳米 SiO₂ 和粉煤灰在单掺或复掺情况下分别对再生混凝土工作性能和力学性能的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

水泥采用 P. C 32.5 复合硅酸盐水泥,粉煤灰为二级粉煤灰,其化学成分列于表 1。由于纳米 SiO₂ 胶体溶液相比于纳米 SiO₂ 粉体颗粒有更好的分散性,其对水泥基材料的改善效果一般更加明显^[17],因此试验采用纳米 SiO₂ 胶体溶液,详细参数列于表 2。再生粗骨料各项性能按照《普通混凝土用砂、石质量及检测方法标准》(JGJ 52—2006)的规定进行测试,结果列于表 3。细骨料采用河砂,表观密度为 2.606 g·cm⁻³,细度模数为 3.37,属于粗砂。

1.2 配合比设计

基准组混凝土设计强度为 C20,水胶比取 0.50,粗骨料使用天然粗骨料,记为 NAC。试验组混凝土水灰比和胶凝材料用量不变,采用体积取代法,用再生粗骨料 100% 取代天然粗骨料。由于再生粗骨料

表 1 粉煤灰与水泥化学成分

Tab. 1 Chemical Component of Fly Ash and Cement

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	其他
粉煤灰	53.9	31.1	4.2	4.0	1.1	1.0	0.7	0.9	2.0	0.7	0.4
水泥	21.1	4.3	2.5	65.9	0.1	1.5	2.3	0.1	0.5	0.0	1.7

表2 纳米 SiO₂ 溶液性能Tab. 2 Properties of Nano-SiO₂ Colloidal

溶液类型	外观	粒径/nm	质量分数/%	pH值
纳米 SiO ₂ 溶液	透明液体	15±5	30	10

表3 再生粗骨料物理性能指标

Tab. 3 Physical Properties of Recycled Coarse Aggregate

骨料类型	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%	吸水率/%	含水率/%
天然粗骨料	1 450	2 675	3.54	1.27	0.85
再生粗骨料	1 220	2 553	14.30	6.92	2.01

吸水率远大于天然粗骨料,本文采用添加附加水的方法控制有效水灰比,其中附加水的用量除了根据再生粗骨料吸水率和含水率计算,还需扣除纳米 SiO₂ 溶液中的含水量。纳米 SiO₂ 和粉煤灰的掺量作为变量,使用质量取代法取代水泥,掺量分别为 0%,1%,2%和 0%,30%。

本文中将所有试验组统一称为再生混凝土,未掺纳米 SiO₂ 和粉煤灰的再生混凝土记为 RAC;单

掺纳米 SiO₂ 组记为 S,后跟数字代表掺量;单掺粉煤灰组记为 F,后跟数字代表掺量;复掺组记为 S+F,分别后跟数字代表掺量。

为了探究纳米 SiO₂ 和粉煤灰单掺或复掺情况下对混凝土工作性能的影响,每组配合比的初始减水剂用量保持为 1.9 kg·m⁻³,完成坍落度测试后,调整减水剂用量以确保所有配合比的坍落度均维持在(120±10) mm 范围内。混凝土配合比见表 4。

表4 混凝土配合比

Tab. 4 Mix Proportion of Concrete

kg·m⁻³

混凝土类型	水泥	粉煤灰	纳米 SiO ₂	粗骨料	天然砂	自由水	附加水	减水剂
NAC	320.0	0	0.00	1 113.6	806.4	160.00	0.00	2.5
RAC	320.0	0	0.00	1 062.8	806.4	160.00	54.68	2.1
F30	224.0	96	0.00	1 062.8	806.4	160.00	54.68	1.9
S1	316.8	0	10.67	1 062.8	806.4	160.00	47.21	3.1
S1F30	220.8	96	10.67	1 062.8	806.4	160.00	47.21	2.7
S2	313.6	0	21.33	1 062.8	806.4	160.00	39.75	4.0
S2F30	217.6	96	21.33	1 062.8	806.4	160.00	39.75	3.5

1.3 混凝土搅拌方式

使用纳米 SiO₂ 改性再生混凝土的方式分为 2 种:直接掺入和预浸泡^[18]。在直接掺入搅拌的过程中,大部分的纳米 SiO₂ 与砂浆混合在一起,起到强化砂浆的作用,只有小部分填充了再生粗骨料表面老砂浆的孔隙和微裂缝^[19];预浸泡则将所有的纳米 SiO₂ 用于填充老砂浆的孔隙和微裂缝。Shaikh 等^[18]通过对比研究认为预浸泡对 RAC 的提升效果更加显著。由于预浸泡的过程繁琐,耗时长且操作困难,为了简化搅拌方式,同时尽可能多地将纳米 SiO₂ 用于填充老砂浆孔隙和微裂缝,基于现有的搅拌法,通过适当调整,提出新的两阶段搅拌法,具体步骤如下:①将纳米 SiO₂ 与附加水混合,使用超声波清洗机进行分散;②将分散的纳米溶液与再生粗骨料搅拌 2 min;③加入砂、水泥和粉煤灰搅拌 2 min;④加入配合比中水充分搅拌。附加水与纳米 SiO₂ 溶液混合,其中的含水量等于配合比中再生粗骨料吸水量与含水量的差。由于再生粗骨料的吸水

速率快,在第 1 步的基础上,通过第 2 步的搅拌使得更多的纳米 SiO₂ 颗粒能够被再生粗骨料吸收用于填补老砂浆孔隙和微裂缝。

1.4 试块制作与测试方法

新拌混凝土工作性能依照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)进行坍落度测试。参照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2016),混凝土抗压试块采用非标准尺寸 100 mm×100 mm×100 mm 浇筑,每种配合比 9 个试块分成 3 组,每组 3 个试块分别用于测试 7,28,90 d 抗压强度,加载速率控制为 0.3 MPa·s⁻¹。28 d 抗折强度试块采用非标准尺寸 100 mm×100 mm×400 mm,每种配合比有 3 个试块,使用四点加载,加载速率为 0.03 MPa·s⁻¹。28 d 劈裂抗拉强度的测试不单独浇筑试块,使用抗折测试折断试块替代 100 mm×100 mm×100 mm 劈裂抗拉非标准试块进行试验。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

表 5 给出了所有配合比新拌混凝土坍落度和力学性能试验结果。

表 5 混凝土坍落度和力学性能试验结果

Tab. 5 Slump and Mechanical Properties of Concrete Experimental Results

混凝土类型	坍落度/mm	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa
		7 d	28 d	90 d		
NAC	80	19.75	22.00	27.89	4.97	2.65
RAC	100	13.79	17.06	19.52	3.45	1.82
F30	130	9.33	13.73	18.52	3.31	2.13
S1	45	16.98	20.55	21.26	3.85	2.08
S1F30	90	13.80	17.59	22.60	3.73	2.26
S2	10	18.87	23.08	24.30	4.11	2.33
S2F30	65	16.17	21.51	26.63	4.02	2.40

2.2 工作性能

新拌混凝土的坍落度测试结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,在相同的配合比及减水剂用量情况下,由于 RAC 配合比中使用了附加水,其坍落度略高于 NAC。这是由于附加水在短时间内无法被再生粗骨料老砂浆中孔隙全部吸收,使得新拌混凝土中自由水多于相同配合比的天然骨料。同时,由于试验所用再生粗骨料经 2 道破碎工艺加工,骨料颗粒饱满利于流动。

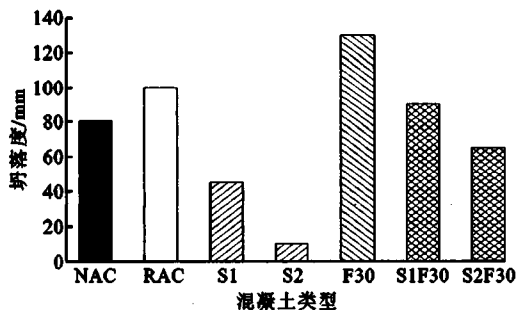


图 1 新拌混凝土坍落度

Fig. 1 Slump of Fresh Concrete

在相同减水剂掺量的情况下,随着纳米 SiO₂ 掺量的增加,新拌混凝土的坍落度逐渐降低。这可能是由于纳米材料粒径小,具有较强的表面能,能够吸附新拌混凝土中的自由水。同时,纳米 SiO₂ 周围有大量的不饱和键,不饱和键对水分子有很强的吸引能力,能够在水分子间形成牢固的化学键,进一步减少新拌混凝土中的自由水,最终导致坍落度大幅度下降^[12]。坍落度测试结果表明,在搅拌过程中纳米 SiO₂ 并未全部被老砂浆吸收,部分离开再生粗骨料

表面进入砂浆中。纳米材料的掺入给混凝土工作性能带来严重的问题,是推进纳米材料在混凝土中应用的一大阻碍。

在所有试验组中,F30 拥有最大的坍落度。这是因为粉煤灰颗粒表面光滑,在新拌混凝土中起到润滑的作用,同时化学结构特殊,水化速度慢于水泥,减少了前期水化消耗的结合水,从而增加了自由水,提高了再生混凝土的坍落度。

2.3 抗压强度

图 2 为单掺 SiO₂ 和粉煤灰情况下再生混凝土的抗压强度。RAC 的各龄期抗压强度相较于 NAC 均有 20%~30% 的下降。这与 Xiao 等^[20]对再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度影响的研究结果十分相近,说明再生粗骨料表面老砂浆的存在对再生混凝土力学性能产生显著的影响,寻找强化手段十分必要。在粉煤灰对再生混凝土性能影响的研究中,虽然 Kou 等^[14]研究认为粉煤灰能够强化再生混凝土 1 年及以上龄期的长期强度,但是 F30 的试验结果显示,在早期的表现中抗压强度有明显的下降,直到 90 d 龄期才逐渐接近 RAC。在再生粗骨料降低混凝土强度的基础上,使用粉煤灰导致的进一步降低必然给混凝土结构的建造和使用带来未曾遇到的问题。单独使用纳米 SiO₂ 对再生混凝土改性的结果显示,纳米 SiO₂ 能够有效提升再生混凝土的抗压强度,单掺 2% 纳米 SiO₂ 的再生混凝土 28 d 抗压强度相对 RAC 提高了 24.5%。提升效果在早期最为显著,后期增长速度相比于 RAC 明显下降,且随着纳米 SiO₂ 掺量的增加,强度的强化逐渐提升。这一特性也得到了 Mukharjee 等^[21]的证实,纳米 SiO₂ 能够填补再生粗骨料表面老砂浆的孔隙和微裂缝,从而改善再生混凝土中新老砂浆的界面过渡区,提升再生混凝土强度。

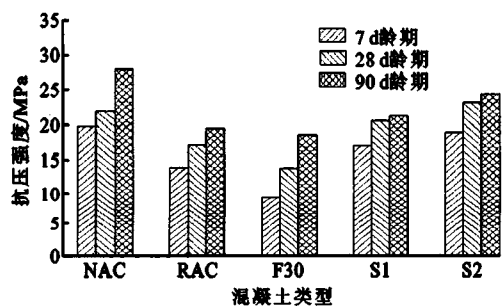


图 2 单掺纳米 SiO₂ 或粉煤灰对再生混凝土抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of Nano-SiO₂ or Fly Ash on Compressive Strength of RAC

纳米 SiO₂ 对粉煤灰掺量为 30% 的再生混凝土

的影响如图3所示。在粉煤灰再生混凝土中添加纳米SiO₂有效强化了再生混凝土的各龄期强度。掺量为1%时,纳米SiO₂完全弥补了粉煤灰引起的7d和28d强度的降低,甚至在90d龄期相对于RAC提升了3MPa,且随着纳米SiO₂掺量的增加,强度提升幅度增大。Shaikh等^[22]研究了纳米SiO₂和粉煤灰对砂浆与混凝土的影响,其中在40%粉煤灰掺量的砂浆中掺入纳米SiO₂能够提升砂浆的7d和28d强度,相应混凝土的强度也在各龄期得到提升。由此认为,粉煤灰再生混凝土中掺入纳米SiO₂除了能改善混凝土中界面过渡区强度,还能强化混凝土中粉煤灰砂浆的强度,从而增加粉煤灰再生混凝土的抗压强度。对比纳米SiO₂对粉煤灰再生混凝土和普通再生混凝土的影响规律发现,普通再生混凝土掺入纳米SiO₂在28d龄期后强度增长缓慢,然而粉煤灰再生混凝土在28d龄期后强度增长幅度显著高于前者,且大于普通再生混凝土的增长幅度。分析认为两者间产生差异的原因是在再生混凝土中掺入了粉煤灰。粉煤灰能够增强混凝土的长期性能,从而使得粉煤灰再生混凝土掺入纳米SiO₂后强度还有较长期的发展。

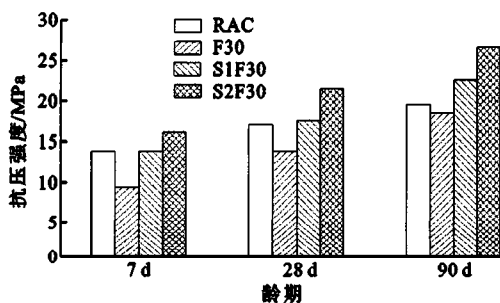


图3 纳米SiO₂对粉煤灰再生混凝土抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of Nano-SiO₂ on Compressive Strength of Fly Ash RAC

通过将S1F30和S2F30的坍落度与单掺纳米SiO₂的再生混凝土对比发现,在1%和2%纳米掺量的情况下掺入30%的粉煤灰,坍落度分别提升了100%和550%,且十分接近NAC。这说明再生混凝土中掺入粉煤灰带来自由水的增加和润滑作用能够有效地降低纳米SiO₂对再生混凝土工作性能的不利影响。根据2种材料对再生混凝土工作性能的影响规律,通过调整掺量能够满足不同施工中不同工作性能的需求。

图4给出了纳米SiO₂掺量为1%与2%情况下,掺入粉煤灰对再生混凝土的抗压强度影响。由图4可以看出,在纳米SiO₂再生混凝土中加入

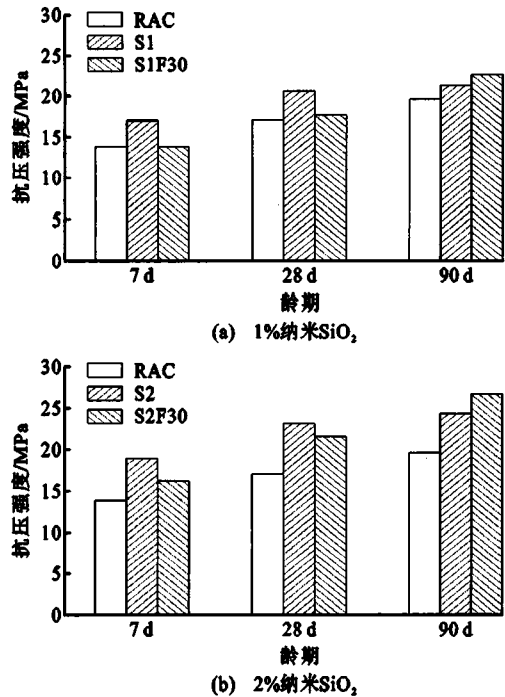


图4 粉煤灰对纳米SiO₂再生混凝土抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of Fly Ash on Compressive Strength of Nano-SiO₂ RAC

30%的粉煤灰,7d和28d龄期混凝土的抗压强度都有所下降,但是在90d龄期复掺组的抗压强度则超过了单掺纳米SiO₂的再生混凝土。可见虽然粉煤灰会降低纳米SiO₂改性再生混凝土的早期性能,但是能够弥补纳米SiO₂改性再生混凝土后期强度发展不足的缺陷。

综合可知,在再生混凝土中复掺纳米SiO₂和粉煤灰,能够在降低粉煤灰对早期强度影响的同时弥补纳米SiO₂带来的后期强度发展不足的缺陷。分析认为:纳米SiO₂拥有高火山灰活性和化学成核效应,在早期强度发展过程中起促进水化作用;粉煤灰由于早期活性低,水化较慢,在后期强度发展到一定程度时才逐渐水化,不断致密砂浆基体。因此,在再生混凝土养护的早期与后期均有可观的水化反应在进行,从而提升其强度。

2.4 抗折强度

图5(a)中由于再生粗骨料物理性能低于天然骨料,RAC中的老砂浆和新老砂浆界面过渡区成为薄弱点,导致RAC的抗折强度相对于NAC大幅度下降。随着纳米SiO₂的掺入,RAC的抗折强度逐渐提高,且效果显著。原因在于,纳米SiO₂改善了RAC的界面过渡区,增强了新老砂浆的强度,从而提高了RAC的抗折强度。当再生混凝土中掺入30%粉煤灰时,抗折强度小幅度下降,说明粉煤灰对再生混凝土抗折强度有不利影响。此时复掺纳米

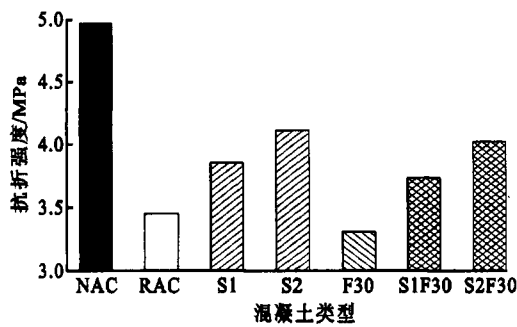
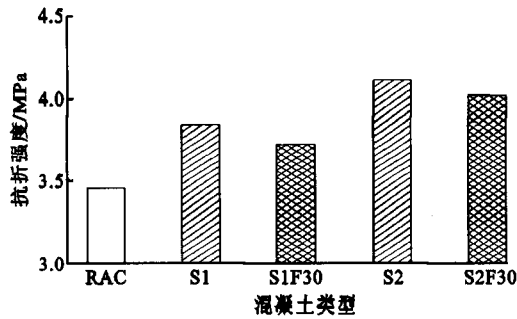
(a) 纳米SiO₂对粉煤灰再生混凝土抗折强度的影响(b) 粉煤灰对纳米SiO₂再生混凝土抗折强度的影响

图 5 混凝土抗折强度

Fig. 5 Flexural Strength of Concrete

SiO₂ 能够提升再生混凝土的抗折强度,且随着纳米 SiO₂ 掺量的增加而逐渐上升,S2F30 相对于 F30 提高了 19.46%。

对比图 5(b)中 RAC,S1,S1F30 和 RAC,S2,S2F30 的抗折强度发现,当粉煤灰与纳米 SiO₂ 复掺时,抗折强度并未像抗压强度一样有进一步的提升,而是相对于单掺纳米 SiO₂ 有所下降,但是相对于 RAC,复掺情况下抗折强度有明显提升。S2F30 相对于 F30 提高了 19.46%;虽然 28 d 龄期 S1F30 和 S2F30 的抗折强度分别低于 S1 和 S2,参考抗压强度的增长趋势,复掺情况下 RAC 在 28 d 龄期之后还拥有较强的强度增长趋势,反而 S1 和 S2 组却并无太大的增长空间。随着龄期的增长,预计 S1F30 和 S2F30 的抗折强度会超越 S1 和 S2。

2.5 劈裂抗拉强度

由图 6(a)可以看出,再生粗骨料对混凝土的劈裂抗拉强度产生不利影响。在再生混凝土内部,老砂浆与新老砂浆界面过渡区制约了其抗拉强度。由图 6(a)还可以看出,纳米 SiO₂ 能够改善再生混凝土的劈裂抗拉强度,并随掺量的增加,再生混凝土劈裂抗拉强度逐渐接近 NAC 的劈裂抗拉强度。这说明纳米 SiO₂ 能够强化 RAC 界面过渡区和老砂浆部分,增强砂浆和骨料之间的胶结力,从而提高 RAC 的劈裂抗拉强度。在再生混凝土中掺入 30% 的粉煤灰,发现粉煤灰能够提高再生混凝土的劈裂抗拉强度。在此基础上通过掺入纳米 SiO₂,再生混凝土

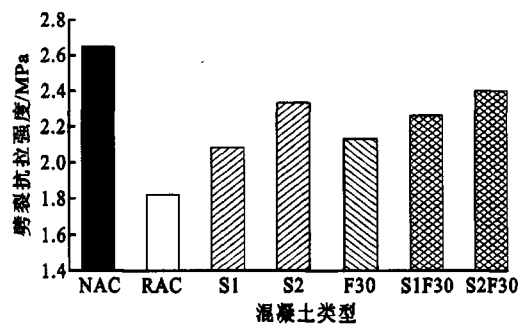
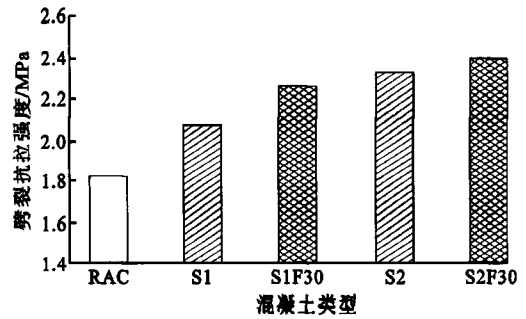
(a) 纳米SiO₂对粉煤灰再生混凝土劈裂强度的影响(b) 粉煤灰对纳米SiO₂再生混凝土劈裂强度的影响

图 6 混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 6 Splitting Tensile Strength of Concrete

的抗折强度有进一步的提升,且随掺量的增加逐渐增加。

由图 6(b)可以看出,S1F30 和 S2F30 的劈裂抗拉强度分别相对于 S1 和 S2 均有所提升。由此说明,在纳米 SiO₂ 对再生混凝土劈裂抗拉强度增强的基础上,粉煤灰能够进一步增强劈裂抗拉强度。不过纳米 SiO₂ 掺量为 1% 时,掺入粉煤灰提升了 8.7% 的劈裂抗折强度,掺量为 2% 时仅提升了 3%。由此说明,纳米 SiO₂ 掺量越大时,复掺粉煤灰对再生混凝土劈裂抗拉强的提升越小。

3 结 语

(1) 纳米 SiO₂ 的掺入会显著降低再生混凝土的工作性能,复掺粉煤灰能够弥补它对工作性能的负面影响。

(2) 复掺纳米 SiO₂ 和 30% 粉煤灰能够比单掺更加有效地提高再生混凝土的 90 d 抗压强度,且在较长龄期内有较高的强度增长速度。

(3) 复掺纳米 SiO₂ 和 30% 粉煤灰能够提升再生混凝土的 28 d 抗折强度,但略低于单掺纳米 SiO₂ 的再生混凝土。

(4) 复掺纳米 SiO₂ 和 30% 粉煤灰能够更加有效地提高再生混凝土的 28 d 劈裂抗拉强度。

(5) 复掺纳米 SiO₂ 和 30% 粉煤灰的改性方法仅依靠宏观的力学性能结果不能从机理上对其解释,后续还需在微观层面上对其进行更加深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] OTSUKI N, MIYAZATO S I, YODSUDJAI W. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(5): 443-451.
- [2] 李娟. 再生骨料附着砂浆对混凝土强度的影响及再生骨料二灰碎石试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- LI Juan. Influence of Mortar Adhesive to Recycled Aggregate on Strength of Concrete and Research of Lime-fly Ash Stabilized Recycle Aggregate[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [3] SANCHEZ F, SOBOLEV K. Nanotechnology in Concrete — A Review[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(11): 2060-2071.
- [4] JO B, KIM C, TAE G, et al. Characteristics of Cement Mortar with Nano-SiO₂ Particles [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(6): 1351-1355.
- [5] 张津践. 再生混凝土纳米强化技术及微观结构分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- ZHANG Jin-jian. Recycled Concrete's Nano-enhancement Technology and Microstructural Analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [6] CHEN J, KOU S, POON C. Hydration and Properties of Nano-TiO₂ Blended Cement Composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(5): 642-649.
- [7] SINGH N B, KALRA M, SAXENA S K. Nanoscience of Cement and Concrete [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(4): 5478-5487.
- [8] SALKHORDEH S, GOLBAZI P, AMINI H. The Improvement of 28-day Compressive Strength of Self-compacting Concrete Made by Different Percentages of Recycled Concrete Aggregates Using Nano-silica [J]. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2011, 5(11): 529-532.
- [9] HOSSEINI P. Developing Concrete Recycling Strategies by Utilization of Nano-SiO₂ Particles [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2011, 2(3): 347-355.
- [10] HOSSEINI P, BOOSHEHRIAN A, DELKASH M, et al. Use of Nano-SiO₂ to Improve Microstructure and Compressive Strength of Recycled Aggregate Concretes [C]//BITTNAR Z, BARTOS P J M, MEMECEK J, et al. *Nanotechnology in Construction 3*. Berlin: Springer, 2009: 215-221.
- [11] HOU P, KAWASHIMA S, WANG K, et al. Effects of Colloidal Nanosilica on Rheological and Mechanical Properties of Fly Ash-cement Mortar [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 35(1): 12-22.
- [12] SENFF L, LABRINCHA J A, FERREIRA V M, et al. Effect of Nano-silica on Rheology and Fresh Properties of Cement Pastes and Mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2487-2491.
- [13] LIMBACHIYA M, MEDDAH M S, OUCHAGOUR Y. Use of Recycled Concrete Aggregate in Fly-ash Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 27(1): 439-449.
- [14] KOU S, POON C. Long-term Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Prepared with the Incorporation of Fly Ash [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2013, 37: 12-19.
- [15] CHINDAPRASIRT P, HOMWUTTIWONG S, SIRIVIVATNANON V. Influence of Fly Ash Fineness on Strength, Drying Shrinkage and Sulfate Resistance of Blended Cement Mortar [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(7): 1087-1092.
- [16] GENG J, SUN J. Characteristics of the Carbonation Resistance of Recycled Fine Aggregate Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 814-820.
- [17] QUERCIA G, HUSKEN G, BROUWERS H J H. Water Demand of Amorphous Nano Silica and Its Impact on the Workability of Cement Paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2): 344-357.
- [18] SHAIKH F, CHAVDA V, MINHAI N, et al. Effect of Mixing Methods of Nano Silica on Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. *Structural Concrete*, 2018, 19(2): 387-399.
- [19] LI W, LONG C, TAM V W Y, et al. Effects of Nanoparticles on Failure Process and Microstructural Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 142: 42-50.
- [20] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Under Uniaxial Loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(6): 1187-1194.
- [21] MUKHARJEE B B, BARAI S V. Influence of Nano-silica on the Properties of Recycled Aggregate Concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 55: 29-37.
- [22] SHAIKH F U A, SUPIT S W M, SARKER P K. A Study on the Effect of Nano Silica on Compressive Strength of High Volume Fly Ash Mortars and Concretes [J]. *Materials & Design*, 2014, 60: 433-442.