

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.002

纳米 $\text{SiO}_2/\text{CaCO}_3$ 复掺强化全再生骨料 混凝土与带肋钢筋的粘结性能

鲍玖文¹, 徐海栋¹, 柳根金², 宋 强¹, 王燕茹¹

(1. 青岛理工大学 海洋环境混凝土技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266520;

2. 浙大宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100)

摘 要: 为了探究纳米 SiO_2 (NS) 和纳米 CaCO_3 (NC) 复掺强化全再生骨料混凝土 (FRAC) 与钢筋粘结性能的演变规律, 通过对不同 NS 和 NC 掺量的 FRAC 试件与带肋钢筋进行中心拉拔试验, 研究了 NS/NC 掺量 (1%、2% 和 3%) 和锈蚀周期 (1 d 和 3 d) 对其粘结性能的影响。首先通过 FRAC 的抗压强度和氯离子扩散系数试验发现, NS/NC 单/复掺比例均为 3% 时, FRAC 表现出较高的抗压强度和较强的抗氯离子侵蚀性能。然后进一步对改性效果较好以及未掺入纳米材料试验组进行粘结性能对比。结果表明: 纳米材料掺入可有效改善带肋钢筋与 FRAC 的粘结滑移性能。在正常条件下, NS/NC 单/复掺改性 FRAC 的粘结强度提高了 6.5%~18.0%。1 d 加速锈蚀情况下, 钢筋与 FRAC 间的粘结强度有所增加; 电化学加速锈蚀 3 d 时, 由于 NS 和 NC 物理填充作用及产生更多 C-S-H 凝胶和水化碳铝酸钙使结构更加致密, 纳米材料复掺比例为 3% 试件 (S3C3 组) 表面未出现裂缝, 而其余组均发生锈胀破坏, 且纳米改性组钢筋锈蚀率较未改性组降低 14%~45%, 抗锈蚀能力显著提升。最后, 基于试验数据, 建立了 FRAC 与带肋钢筋的粘结强度预测模型, 模型计算值与试验值吻合度较高, 可精准预测不同纳米掺量及锈蚀状态下二者的粘结强度。

关键词: 全再生骨料混凝土 (FRAC); 纳米 SiO_2 ; 纳米 CaCO_3 ; 加速锈蚀; 粘结强度

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0014-11

Bonding Performance of Nano- $\text{SiO}_2/\text{CaCO}_3$ Dual-modification Enhanced Full Recycled Aggregate Concrete with Ribbed Steel Bars

BAO Jiuwen¹, XU Haidong¹, LIU Genjin², SONG Qiang¹, WANG Yanru¹

(1. Engineering Research Center of Concrete Technology under Marine Environment,

Department of Education, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Tech University, Ningbo, Zhejiang 315100, China)

Abstract: To explore the evolution of the bonding performance of reinforced concrete using nano- SiO_2 (NS) and nano- CaCO_3 (NC) with full recycled aggregates (FRAC), a central pull-out test was conducted on FRAC specimens with different NS and NC contents (1%, 2%, and 3%) and ribbed steel bars. The effects of NS/NC dosage (1%, 2%, and 3%) and corrosion periods (1 day and 3 days) on bonding performance were investigated. First, the compressive strength and chloride ion diffusion coefficient tests of FRAC revealed that when the NS/NC content was 3%, both single and combined doping of NS/NC exhibited higher compressive strength and better chloride ion corrosion resistance. Then, a comparative study was conducted on the bonding performance of the modified FRAC (with optimal NS/NC content) and the unmodified FRAC. The study found that the addition of nanomaterial effectively improved the bonding

收稿日期: 2025-09-30

修稿日期: 2025-11-11

基金项目: 国家自然科学基金 (52378247); 山东省自然科学基金 (ZR2025QB11); 山东省“泰山学者”青年专家资助项目 (tsqn202408223)

作者简介: 鲍玖文 (1989—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土耐久性与防护等方面研究工作。E-mail: baojiuwen@qut.edu.cn

通讯作者: 柳根金 (1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事纤维混凝土材料性能提升等方面研究工作。E-mail: liugenjin@163.com

slip performance between ribbed steel bars and FRAC. Under normal conditions, the bonding strength of the modified FRAC increased by 6.5% ~ 18%. In the case of accelerated corrosion for 1 day, the bonding strength between the steel bars and FRAC increased. After 3 days of electrochemical accelerated corrosion, the physical filling effect of NS and NC, as well as the formation of additional C-S-H gel and hydrated calcium aluminate, densified the structure. In the specimens with a combined NS and NC doping ratio of 3% corrosion, the physical filling effect of NS and NC, as well as the formation of additional C-S-H gel and hydrated calcium aluminate, densified the structure. In the specimens with a combined NS and NC doping ratio of 3% corrosion, the physical filling effect of NS and NC, as well as the formation of additional C-S-H gel and hydrated calcium aluminate, densified the structure. In the specimens with a combined NS and NC doping ratio of 3% (S3C3 group), no surface cracks were observed, while the other groups suffered from rust expansion damage. Moreover, the corrosion rate of steel bars in nano-modified groups was reduced by 14% to 45% compared with that in the unmodified group, indicating a significant improvement in corrosion resistance. Finally, based on the test data, a bond strength prediction model for FRAC (Full Recycled Aggregate Concrete) and ribbed steel bars was established. The calculated values of the model are in good agreement with the test values, which can accurately predict the bond strength between FRAC and ribbed steel bars under different nano-material dosages and corrosion states.

Keywords: full recycled aggregate concrete(FRAC); nano- SiO_2 ; nano- CaCO_3 ; accelerated corrosion; bonding strength

利用建筑拆除废物生产的再生骨料(RCA)替代天然骨料是建筑固废资源化利用的有效途径之一,有助于促进建筑材料的可持续发展和经济循环^[1]。然而,再生骨料表面附着的旧砂浆及旧界面过渡区(ITZ)使再生骨料具有多孔、疏松的特征,导致其与普通骨料相比吸水率大,使再生骨料混凝土力学性能和耐久性较差^[2-4],因此,如何改善再生骨料微结构特征并进而提升再生骨料混凝土(Recycled Aggregate Concrete,RAC)综合性能仍是亟需要解决的关键问题。

利用纳米材料对旧砂浆和再生骨料中的过渡区进行补强是提高再生骨料质量的有效途径之一。Zhou 等^[5]已证实,纳米 SiO_2 (NS) 掺入有效降低了再生骨料混凝土吸水率并可提高其强度。同样,Bao 等^[6]发现在再生骨料混凝土中掺入 3% 的 NS,因其填充效应、成核效应和火山灰效应的综合作用,氯离子扩散性能和毛细吸水性能显著降低。由于 NS 的掺入可有效填充 FRAC 内部的微裂缝与孔隙,细化孔隙结构并降低孔隙连通性,进而减少硫酸盐侵蚀引发的内部膨胀开裂和冻融循环中孔隙水结冰产生的膨胀压力,提升抗冻融性能^[6]。此外,研究也表明,掺入纳米 CaCO_3 (NC) 也能显著改善再生骨料混凝土内部微结构及综合性能,这主要是由于 NC 在早期提高了水泥基材料的水化速率,并在后期参与并促进水化反应,生成更多的水化产物^[7]。郭志明等^[8]研究发现,NC 不仅能促进水化反应速率,而且能促进氢氧化钙(CH)的二次水化,降低 CH 含量,

使得水化产物分布更为紧密,改善过渡区性能。除此之外,掺入 NC 还能物理填充再生骨料混凝土孔隙,与 C_3A 等反应生成水化碳铝酸钙致密过渡区,单掺 3% 左右即可提升再生骨料混凝土抗压强度、抗渗性能、抗酸侵蚀性能并细化孔径结构,适配再生骨料混凝土的性能优化需求^[9]。为了进一步探究 NS/NC 复掺的协同效应,针对不同 NS/NC 复掺改性全再生粗骨料混凝土的力学与吸水性能展开了试验研究^[10],研究发现,当两种纳米材料复掺量为 3% 时(S3C3),再生骨料混凝土内部孔隙和微裂缝最少,且过渡区结构更致密,表明纳米材料复掺改性效果较好。此外,苏鑫^[11]研究也发现,复掺 NS 和 NC 时混凝土抗压强度、劈裂抗拉强度和抗氯离子渗透性能都随着纳米材料掺量的增加呈现出先上升后下降的趋势,NS 对混凝土抗压强度、抗拉强度和抗氯离子渗透性能的影响要大于 NC,而适量掺入 NC 对混凝土坍落度具有调节作用,能够增加混凝土的和易性。但是,复掺过量的纳米材料会因电荷相反发生局部团聚,同时 NC 优先反应生成碳铝酸盐,消耗偏高岭土火山灰反应所需的 CH 与水分,从而减少 C-(A)-S-H 的生成^[12]。综上可知,NS/NC 的单/复掺在提升全再生骨料混凝土强度的同时,并未导致其他性能下降,反而实现多性能协同优化。

在钢筋混凝土结构中,钢筋与混凝土之间的粘结强度主要取决于混凝土强度、保护层厚度和钢筋直径等因素^[13]。Xiao 等^[14]发现,与不含再生粗骨料的混凝土相比,当再生粗骨料替代率提高到 50%

和 100% 时,再生混凝土与素筋之间的粘结强度分别下降了 12% 和 6%,但再生混凝土与带肋筋之间的粘结强度与再生粗骨料的掺量关系不大。然而,Butler 等^[15]研究表明,再生骨料混凝土与带肋钢筋的粘结强度较天然骨料混凝土降低了 9%~19%。掺入纳米材料能有效提升再生骨料混凝土微结构以及耐久性能^[16-17],但对于能否改善再生骨料混凝土与钢筋的粘结性能还需进一步研究。Wang 等^[18]研究了 8 种纳米材料改性活性粉末混凝土(RPC)与普通钢筋的粘结性能,得出纳米填料的掺入有效提高了 RPC 与普通钢筋之间的粘结强度,减少两者之间的粘结滑移量,同时建立了 RPC 与普通钢筋的粘结滑移本构模型。此外,Alhawat 等^[19]研究发现,在再生骨料混凝土中掺入少量 NS,可使再生骨料混凝土与钢筋混凝土的粘结性能提升 8%~21%;且随着腐蚀时间的延长,该粘结性能的增强幅度进一步扩大,最终观测到增强率超过 3 倍的显著效果。Hwangbo 等^[20]评估了碳纳米管(CNT)、NS 和氧化石墨烯(GO)复合对其混凝土力学性能的提升效果,并进一步分析了对其粘结强度的影响。综上所述,纳米材料的掺入可有效提高钢筋再生骨料混凝土的耐腐蚀性能和粘结性能。

纳米材料已经应用于提升钢筋和混凝土之间的粘结性能,其中 NS 的影响研究较为广泛,但因 NS 价格昂贵对其应用相对受限;对于价格更有优势的 NC 研究目前却较少^[21],特别是 NS/NC 复掺强化对钢筋再生骨料混凝土耐腐蚀性能的影响机理尚不明晰。基于此,为了进一步理解 NS/NC 复掺强化对再生骨料混凝土与带肋钢筋的粘结性能影响,开展不同 NS/NC 复掺掺量对再生骨料混凝土与带肋钢筋的粘结性能影响规律试验研究,并分析纳米掺量与加速锈蚀时间对其锈蚀速率的影响机制。

1 试验材料与方法

1.1 原材料及配合比设计

试验所使用的胶凝材料为 P·O 42.5 的普通硅酸盐水泥(C)。细骨料选用为级配良好的青岛大沽河天然河砂(S);再生骨料由现场浇筑 C30 混凝土构件经颚式破碎机破碎 2~3 次获得,其颗粒级配如图 1 所示,粗骨料的物理性能如表 1。试验所需的纳米材料,采用微量分散剂的商用 NS 溶液和 NC 分散溶液(图 2),通过透射电子显微镜对 NS 和 NC 溶液进行分散性能的测试,表明具有良好的分散性和稳定性,其物理性能参数指标见表 2。在不同的混

合料中加入不同量的高效减水剂(SP),试验中使用聚羧酸高效减水剂(SP)。

试验中 FRAC 配合比参考相关文献设计,同时通过调整聚羧酸高效减水剂掺量调控拌合物状态,确保各组 FRAC 工作性能达到相似水准且符合《混凝土质量控制标准》^[22](GB 50164—2011)规定。采用水胶比为 0.4 设计了全再生骨料混凝土 FRAC 试件,分别设置了 4 种 NS(0%、1%、2% 和 3%)、NC(0%、1%、2% 和 3%)的掺量(占胶凝材料的质量分数),共 16 种配合比,如表 3 所示。应注意的是,通过计算再生骨料吸水率和含水量之间的差异,在再生骨料混凝土拌合过程中还需要将附加用水量添加到混合物中。然而,研究表明,仅补偿再生骨料约 80%~90% 的额外吸水率,再生骨料混凝土的性能优于 100% 的额外吸水率补偿^[23],试验中按照 90% 附加吸水率进行。再生混凝土拌合物制备采取多次搅拌法,先倒入再生骨料,并加入预先计算好的附加用水量,搅拌 1 min;继而加入水泥、河砂和 1/3 用水量,搅拌 1 min;再加入 1/3 用水量和 SP,搅拌 2 min,使水泥的水化反应更加充分,使混凝土内部结构更加致密^[24];最后依次加入 NS、NC 分散溶液和 1/3 用水量的混合物,二者间隔 1 min,目的是让 NS 充分发挥火山灰和填充等作用,加入 NC 后继而搅拌 2 min,最后装入尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体模具和 100 mm×50 mm 的圆饼状模具内分别用于立方体抗压强度和氯盐侵蚀试验测试,浇筑完成后用保鲜膜覆盖试件,将试样在室温下放置 24 h,然后拆模并放置在温度(20±2)℃和相对湿度 95% 的标准养护室养护至 28 d。

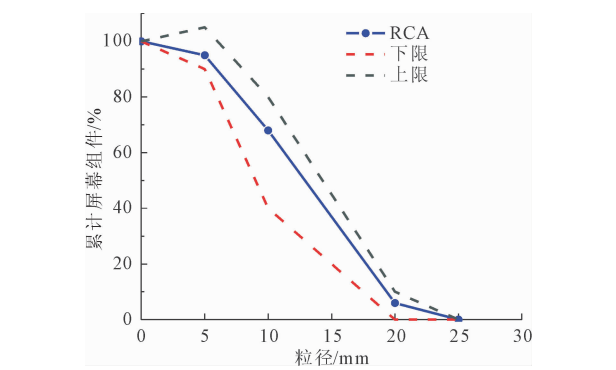


图 1 再生粗骨料的颗粒级配曲线

表 1 再生粗骨料的物理性能指标

类型	吸水率/%	含水量/%	压碎指数/%	表观密度/(kg·m ⁻³)
RCA	5.2	4.0	19.12	2706.2

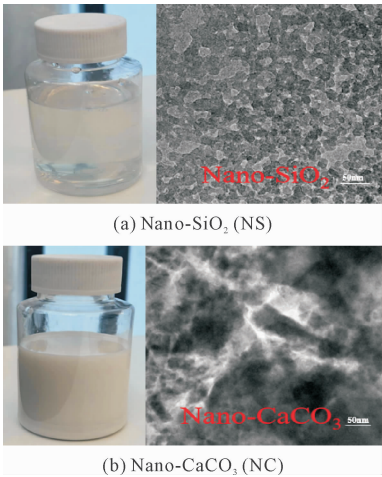


图 2 纳米材料分散液及透射电子显微镜图像

表 2 NS 和 NC 分散剂溶液的物理性质

类型	外观	粒径/nm	质量浓度/%	pH
NS	清澈液体	15 5	30	9.0~11.0
NC	清澈液体	40 2	20	9.5~10.5

表 3 再生混凝土配合比

单位:kg/m³

组别	C	W	AW	S	RCA	SP	NS	NC
S0C0	380	152	26	627	1269	1.00	0.0	0
S1C0	380	152	26	627	1269	1.22	12.7	0
S2C0	380	152	26	627	1269	1.54	25.3	0
S3C0	380	152	26	627	1269	2.00	38.0	0
S0C1	380	152	26	627	1269	1.22	0.0	19
S0C2	380	152	26	627	1269	1.54	0.0	38
S0C3	380	152	26	627	1269	2.00	0.0	57
S1C1	380	152	26	627	1269	1.54	12.7	19
S1C2	380	152	26	627	1269	2.00	12.7	38
S1C3	380	152	26	627	1269	2.14	12.7	57
S2C1	380	152	26	627	1269	2.00	25.3	19
S2C2	380	152	26	627	1269	2.14	25.3	38
S2C3	380	152	26	627	1269	2.28	25.3	57
S3C1	380	152	26	627	1269	2.14	38.0	19
S3C2	380	152	26	627	1269	2.28	38.0	38
S3C3	380	152	26	627	1269	2.36	38.0	57

注:C表示水泥含量;W和AW表示再生骨料混凝土混合料中的含水量和额外含水量;S表示使用的砂含量;RCA表示再生粗骨料;SP表示聚羧酸高效减水剂;NS和NC分别表示纳米硅和纳米碳酸钙;如S3C3表示纳米SiO₂和纳米CaCO₃分别掺量为3%。

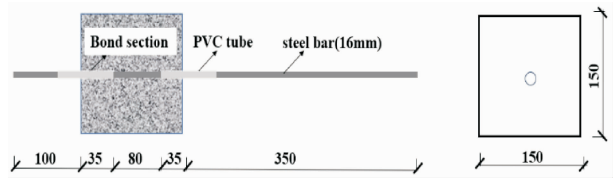


图 3 拔出试件示意图

1.2 试件设计与制作

所有拔出试验的尺寸为 150 mm × 150 mm × 150 mm,使用直径为 16 mm 的带肋钢筋 HRB400,参照《钢筋混凝土用钢材试用方法》^[25] (GB/T 28900—2022)进行钢筋材性试验可知,屈服强度为 452 MPa,极限拉伸强度为 646 MPa,最大延伸率为 14%。试件预埋长度为钢筋直径的 5 倍。位于立方体内的钢筋未粘结部分利用 PVC 套筒保护,以防止与混凝土接触。为了避免浆体流入钢筋和 PVC 管之间的裂缝,导致粘结强度增加,PVC 管端部的裂缝用聚氨酯泡沫填充,聚氨酯泡沫对钢筋与混凝土的粘结强度没有影响。试件详图见图 3。通过测定混凝土试件的抗压强度和氯离子扩散系数,选取力学性能和抗氯离子性能最好的配合比进行拔出试验。为了获得不同程度的腐蚀,在每个配合比中三个试件设置不同的腐蚀时间(0、1 和 3 d)进行对比分析。

1.3 通电加速锈蚀试验

为了分析加速腐蚀条件对不同 NS/NC 复合强化 FRAC 与带肋钢筋的粘结强度影响,试验采用目前常用的钢筋锈蚀电化学锈蚀法^[26-27]。通电锈蚀前将试件浸泡于质量浓度为 5% 的 NaCl 溶液中 3 d,钢筋通电锈蚀时则使试件半浸泡于溶液中,溶液不没过钢筋以避免线路短路,并采用并联的方式将

钢筋接于直流电源正极,在负极上接不锈钢棒,保持恒压锈蚀,其中锈蚀装置详细如图 4 所示,加速腐蚀

时间分别为 1 d 和 3 d,未加速腐蚀组为试验对照组。

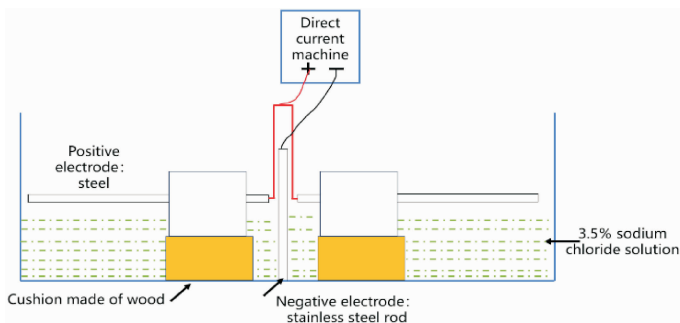


图 4 钢筋通电加速锈蚀试验

1.4 测试方法

1.4.1 抗压强度测试

依据国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[28] (GB/T 50081—2019),采用 YAW3000D 液压式万能试验机对 28 d 养护完成后的试件进行抗压强度测试,加载速度为 0.5 MPa/s。每个配合比选取三个试件测试的算术平均值作为该组试件的立方体抗压强度值。

1.4.2 氯离子扩散系数测试

氯离子扩散系数描述了氯离子在混凝土中的传输速率,这直接影响氯离子到达钢筋的速度和数量,从而影响不同配合比中钢筋的锈蚀率。根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[29] (GB/T 50082—2024),将制备好的 100 mm × 50 mm 的圆饼状试块,利用 Ca(OH)₂ 饱和溶液进行真空饱水处理,待真空饱水处理结束后,采用 NELD-RCU520 氯离子扩散系数测定仪,加速氯离子的侵蚀速度,在侵蚀过程完成后将试件竖向劈开,喷射硝酸银和显色剂进行氯离子侵蚀深度的测定,最后基于 Nernst-Planck 方程得到氯离子扩散系数。

1.4.3 拔出试验

采用 WAW-1000-G 微机控制电液伺服钢绞线试验机对钢筋混凝土试件进行拉拔强度测试,加载速度设置为 1 mm/min。当加载过程中出现钢筋断裂、混凝土劈裂、自由端滑移量超过 20 mm 中的任意一种情况时立即停止加载。采用西瓦卡容栅千分测微计 CW-341 与西瓦卡四路集线器 5010-311A 对自由端位移每隔 5 s 进行 1 次记录,拉拔力通过试验机记录。

1.4.4 质量损失测试

将钢筋从混凝土中取出,使用切割机截取粘结段钢筋,按照 ASTM G-1^[30] 的建议,采用质量分数为

5% 的盐酸进行浸泡酸洗 30 min,之后使用钢刷去除附着的混凝土及锈蚀物至表面光滑、无明显锈斑或锈蚀物残留,随后用清水冲净并拿干毛巾擦拭后,放入温度为 (100 ± 5) °C 烘箱烘干 3 h,随后取出进行称重与长度测量,按失重法计算钢筋实测锈蚀率如下式所示:

$$\rho = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ρ 为钢筋实测锈蚀率; W_0 为锈蚀前钢筋单位长度质量; W_1 为锈蚀后钢筋单位长度质量。

2 试验结果与分析

2.1 抗压强度分析

图 5 为不同 NS 和 NC 单掺/复掺改性再生骨料混凝土的 28 d 抗压强度。可以发现:经 NS 和 NC 改性后再生骨料混凝土的 28 d 强度较对照组 S0C0 均有明显提升。对于单掺 NS 后的 FRAC 抗压强度, S1C0、S2C0、S3C0 试件抗压强度分别较 S0C0 提高了 2.9%、7.1%、15.5%,即抗压强度随着 NS 掺量的增加而升高;对于单掺 NC 后的 FRAC 抗压强度, S0C1、S0C2、S0C3 试件抗压强度较 S0C0 分别增大了 1.4%、4.8%、11.9%,即随着 NC 掺量的增加,抗压强度同样呈现出升高的趋势。这是因为 NS 和 NC 本身的物理填充作用,以及火山灰与成核效应有效改善了 FRAC 内部微结构及密实性,即掺入适量纳米材料后再生骨料混凝土力学性能得到显著提高^[31]。当 NS 和 NC 同时掺入 FRAC 中时,对于 S1C1、S1C2 和 S1C3 组,相较于单掺 NS 的 S1C0 组,抗压强度分别提升了 4.4%、5.6%、9.7%。同理 NS 掺量为 2% 和 3% 时,复掺后试件抗压强度均有明显提升。无论是 NS 还是 NC,由于纳米材料粒径较小以及较大的比表面积,本身具备的物理填充作用,且

接触的水泥和水的数量会增加,从而有助于提高水化反应速率和反应程度,可以有效地减少再生骨料混凝土内部孔隙和微裂缝,使再生骨料混凝土抗压性能提高。同时,NS 较强的火山灰活性,与再生骨料混凝土内部特别是过渡区的 CH 发生反应,生成更多的 C-S-H 改善内部孔隙结构,提高界面过渡区的密实性。此外,NC 在水化的过程中与水泥中铝酸三钙(C₃A)和铁铝酸四钙(C₄AF)发生反应,生成的水化碳铝酸钙同样提高 FRAC 强度^[32-33]。从抗压强度结果来看,NS 和 NC 复掺掺量为 3% 时,FRAC 抗压强度提升效果最好。

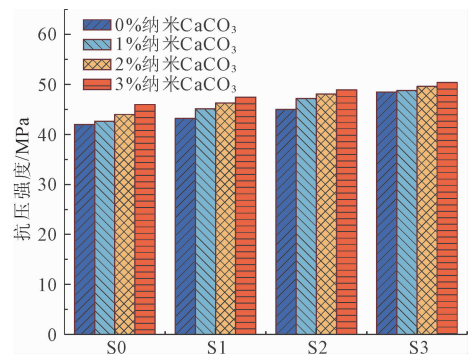


图 5 NS/NC 复掺对再生混凝土抗压强度的影响

2.2 氯离子扩散系数分析

不同 NS 和 NC 单掺/复掺掺量对 FRAC 的氯离子扩散系数影响如图 6 所示。S0C0 的氯离子扩散系数最大,因为掺入了 100% 的 RCA 代替 NCA,致使孔隙结构增多,抗氯盐侵蚀性能较差。当 NS 和 NC 单掺掺量分别从 0 增加至 3% 时,氯离子扩散系数均呈现出减小的趋势,说明抗氯盐侵蚀性能逐渐提高,表明掺入纳米材料后有效减少了 FRAC 内部孔隙和微裂缝的数量,NS 与 CH 发生二次水化反应生成更多 C-S-H,且 NC 掺入可促进水泥水化作用,与 C₃A 和 C₄AF 反应生成水化碳铝酸钙,进而形成再生骨料混凝土内部较为均匀且致密的水化基体结构,改善内部孔隙结构,细化并降低有害孔含量,提高了再生骨料混凝土抗氯盐侵蚀性能^[34]。复掺改性效果比单掺明显,其中掺入 3% NS 的四组配合比氯离子扩散系数整体较小,表现出较强的抗氯盐侵蚀性能。相较于 S0C0 组,S3C1、S3C2、S3C3 组氯离子扩散系数分别降低了 68%、69%、74.7%,表明 NS 和 NC 复掺具有一定的协同改性作用。

2.3 粘结性能分析

2.3.1 拔出破坏形态

根据 FRAC 的抗压强度和氯离子扩散系数试验

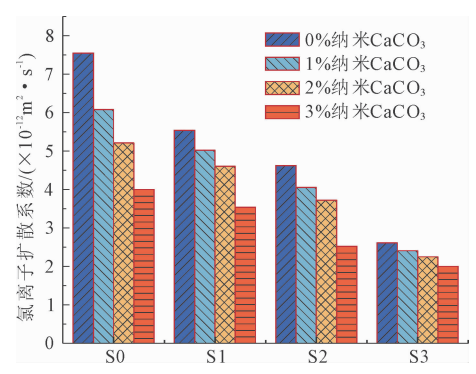


图 6 NS/NC 复掺对再生混凝土氯离子扩散系数的影响

结果分析,拔出试验选取 S0C0、S3C0、S0C3、S3C3 四组配合比制备拔出试验试件。在拔出试验中,所有试件均为经过不同天数氯离子侵蚀加速试验后的试件,其钢筋锈蚀程度将通过锈蚀率测定完成定量表征。中心拉拔试验试件破坏形态见图 7 所示。试件破坏形式大部分为劈裂破坏,主要表现为肋前混凝土被压碎,混凝土内部开裂,破坏前无任何征兆。这是因为混凝土是脆性材料,试件未设置箍筋,内部无横向约束,粘结力到达峰值后,试件突然破坏。从图 7(a)中可以看到,没有掺入任何纳米材料的 S0C0 组拉拔破坏时钢筋完全脱离混凝土,说明未掺加纳米材料的再生骨料混凝土试块韧性较差,破坏主要沿旧过渡区薄弱区快速贯通。单掺 NS/NC 的再生骨料混凝土试件,拉拔破坏时虽然也是发生劈裂破坏,但是缝隙相较于 S0C0 组试件裂缝较细。值得注意的是 S3C3 组试件破坏时大多发生劈裂拔出破坏,与钢筋还存在残余粘结力,整体性最好,说明 NS 和 NC 协同作用一定程度上可以提高再生骨料混凝土韧性,细化内部结构。从图 7(b)可以看到同样的表现,除 S3C3 组外,拉拔破坏的主要形式均为劈裂破坏,试件出现爆裂现象,甚至被直接劈成两半。此现象产生的原因可能是低锈蚀率下锈蚀产物填充了钢筋与再生骨料混凝土之间的界面过渡区以及空隙,钢筋周围的混凝土更为密实,从而使粘结力有所提高,最终发生劈裂破坏。从图 7(c)可以发现,对于锈蚀较为严重的试件而言,拉拔之前部分试件表面已出现锈胀裂缝,其中 S3C3 组因其较好的抗氯盐侵蚀性能和更加致密的内部结构,未出现裂缝,主要为中心拉拔试验所致的破坏形态。相较于 S0C0 和 S0C3 组,S3C0 组表面裂缝更细。随着荷载加大,锈胀裂缝宽度会逐渐增大,钢筋被慢慢拔出并伴随着劈裂破坏现象,且伴随着新的裂缝产生。



图 7 不同 NS/NC 掺量试件拔出破坏形态

2.3.2 粘结-滑移曲线

不同 NS/NC 复掺掺量的 FRAC 试件发生破坏时粘结滑移曲线如图 8 所示。相较于 S0C0 组, S0C3、S3C0、S3C3 组的粘结滑移曲线会越来越陡峭,最终的粘结强度会越来越高,而滑移量越来越小,其中 S3C3 组最为明显。S0C0 组荷载-滑移曲线中也呈现出单峰突降特征,单掺纳米材料后试件的滑移曲线出现轻微“台阶”,表明纳米材料通过改善过渡区结构增强了机械咬合作用。而纳米复掺的 S3C3 组最后快要破坏阶段粘结滑移曲线又变平缓,残余应力在达到应力峰值的 30% 左右时基本保持

不变。说明纳米材料掺入可以提高再生骨料混凝土韧性,增加了 FRAC 与钢筋的界面接触面积,提升了钢筋与 FRAC 之间的耗能能力,NS 和 NC 火山灰反应生成的 C-S-H 凝胶和单碳铝酸盐显著提升界面区密实度,提高钢筋与 FRAC 之间的化学胶结力,并且水化产物在钢筋肋部形成有效的机械互锁,使得机械咬合力也有一定程度的提升。此外,虽然纳米颗粒可能降低表面摩擦系数,但致密化的过渡区结构通过增大有效接触面积补偿了这一损失。以往研究中可以发现,低锈蚀率可以有效提升粘结强度。从图 8(b)中可以看出,四组配合比未经过锈蚀粘结应

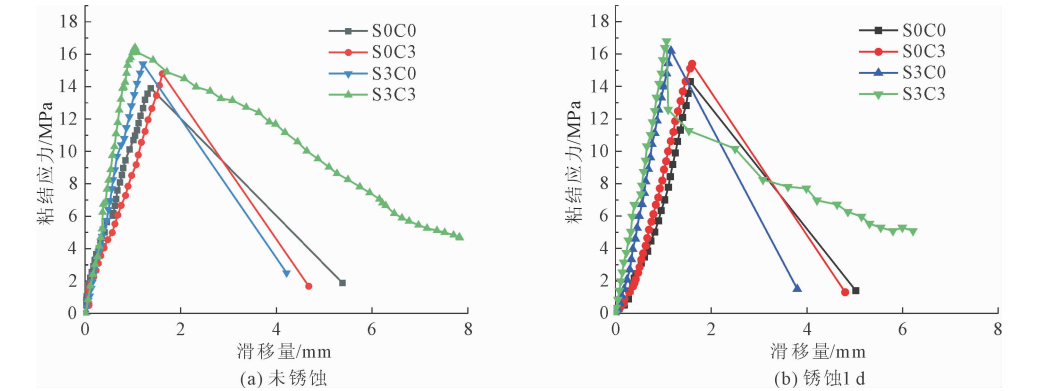


图 8 NS/NC 复掺改性 FRAC 的粘结-滑移曲线

力为 13.9、14.8、15.4、16.4 MPa。当经过 1 d 电化学加速锈蚀后,锈蚀率分别为 1.95%、1.60%、1.46%、1.23%。粘结应力分别提升 2.9%、2.7%、3.9%、2.4%。低锈蚀率(1%~2%)时,锈蚀产物填充钢筋与混凝土界面孔隙,提升机械咬合力,但纳米改性组(尤其 S3C3)因锈蚀率更低,粘结强度提升幅度虽略小,却更稳定,避免后期锈蚀快速退化。可见,低锈蚀率对粘结性能提升会有一定影响,但是影响并不大。

结合试验所获得的数据,假设粘结应力为平均分布,采用下式计算粘结应力:

$$\tau = \frac{P}{\pi D l_n} \tag{2}$$

式中: τ 为极限粘结应力,MPa; P 为拉拔力,N; D 为钢筋直径,mm; l_n 为钢筋锚固长度,mm。

试验所获得的试验结果如表 4 所示,如 SOC0-16-0 代表未掺入 NS 和 NC,钢筋直径为 16 mm,未进行加速锈蚀的试验组。表内样品 1、2、3 分别代表由式(2)计算的每个中心拉拔构件的极限粘结应力值,同时也给出了最大粘结应力值和平均粘结应力值。

表 4 中心拉拔试件的粘结应力

试验组	τ /MPa			τ_p /MPa	τ_m /MPa	故障模式
	样品 1	样品 2	样品 3			
SOC0-16-0	14.2	13.7	13.8	13.9	14.2	分裂式
S3C0-16-0	15.8	15.0	15.4	15.4	15.8	分裂式
SOC3-16-0	14.9	14.6	14.9	14.8	14.9	分裂式
S3C3-16-0	16.6	16.1	16.5	16.4	16.6	分裂拉出式
SOC0-16-1	14.4	14.0	14.5	14.3	14.5	分裂式
S3C0-16-1	16.1	15.7	16.2	16.0	16.2	分裂式
SOC3-16-1	15.3	15.4	14.9	15.2	15.4	分裂式
S3C3-16-1	17.1	16.6	16.7	16.8	17.1	分裂拉出式
SOC0-16-3	—	—	—	—	—	拉出式
S3C0-16-3	—	—	—	—	—	拉出式
SOC3-16-3	—	—	—	—	—	拉出式
S3C3-16-3	11.9	12.2	12.2	12.1	12.2	分裂式

注: τ_p 为三个试件中拔出破坏的平均拔出粘结应力; τ_m 为试件中测试出的最大粘结应力。

不同腐蚀时期的单掺/复掺 NS 和 NC 改性的 FRAC 粘结强度变化如图 9 所示。相较于 SOC0 组, SOC3、S3C0、S3C3 组试件粘结强度分别提高了 6.5%、10.8%、18%。纳米材料掺入的影响在腐蚀后更加明显,这一点可以从电化学加速锈蚀 3 d 时看出,仅 S3C3 组有粘结强度,未加速锈蚀时 S3C3 组粘结强度为 16.4 MPa,3 d 加速锈蚀后锈蚀率达到 3.9%,钢筋表面少量锈蚀产物虽未引发锈胀破

坏,却会小幅削弱钢筋与混凝土界面的化学胶结力和机械咬合力,最终保留 12.1 MPa 的平均粘结强度,较未锈蚀状态降低约 26.2%。其余组分均在加速锈蚀过程中发生锈胀破坏。这可能是 NS 和 NC 在提高粘结强度和耐腐蚀性方面的双重作用,以及 NS 和 NC 颗粒作为基体中可用的微小孔隙填料,填充 FRAC 孔隙,其中 NS 凭借其较小的粒度,直接物理填充效应体现在填充混凝土中的中孔与界面过渡区的微小间隙,NC 则侧重填充大孔和毛细孔,二者复掺时,凭借粒径梯度互补,可对混凝土内部孔隙实现从中孔到毛细孔的全范围填充。Liu 等^[35]和 Hosan 等^[36]的研究也证实这一点,NS 和 NC 的孔隙填充效应使混凝土基体更加致密化。有效地阻止氯离子进入钢筋/混凝土界面并且增强 FRAC 对钢筋的握裹力。因此在腐蚀过程的进展过程中,粘结强度的降低受到阻碍和延缓。

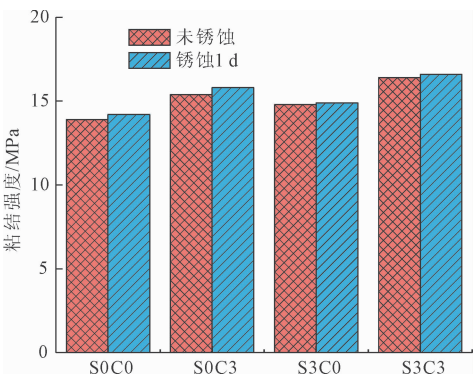


图 9 不同 NS/NC 复掺掺量对 FRAC 粘结强度的影响

2.4 耐腐蚀性能分析

中心拔出试验后将钢筋全部取出,观察其锈蚀情况如图 10 所示,每个图片中钢筋从上到下依次为未锈蚀、锈蚀 1 d 和锈蚀 3 d 的情况。从图 10 可以看到,发现锈蚀较严重部位均位于靠近溶液一侧,且随锈蚀率的增大,锈蚀区域的坑蚀效应更加明显,并且随着纳米材料的掺入,钢筋锈蚀率逐渐降低。图 11 为在外加电压条件下每个通电锈蚀周期(1 d、3 d),不同 NS/NC 复掺掺量对钢筋锈蚀率的影响,质量损失范围在 1.23% 到 7.2% 之间。无论单掺还是复掺,钢筋锈蚀率均有明显减小。另外,相较于 SOC0 组,S3C0、SOC3、S3C3 组锈蚀 1 d 分别降低了 18%、25%、37%;这是由于 NS 和 NC 的孔隙填充效应,因为它填充了纳米尺寸的孔隙,从而使混凝土的渗透性降低,以及其具有较强的吸附能力,从而阻碍了氯离子在混凝土中的扩散,更好的保护钢筋不被锈蚀。加速锈蚀 3 d 时,相较于 SOC0 组, SOC3、

S3C0、S3C3 组锈蚀率分别降低了 14%、27%、45%；S3C3 组锈蚀率降低尤为明显,在通电加速过程中可以观察到,S0C0、S0C3、S3C0 组前期裂缝发展较慢,后期裂缝发展较快。分析原因可知,在加速锈蚀后期,钢筋混凝土试件表面的已有裂缝为钢筋锈蚀提供了更好的离子通道,因而加速了锈蚀发生,其中 S3C0、S0C3 由于其较强的抗氯离子性能,裂缝发展相对较细,从而锈蚀率相对较低。而 S3C3 组可以观察到,直至加速锈蚀结束,表面未出现裂缝,在 NS 和 NC 协同效应下展现出最好的抗腐蚀性能。

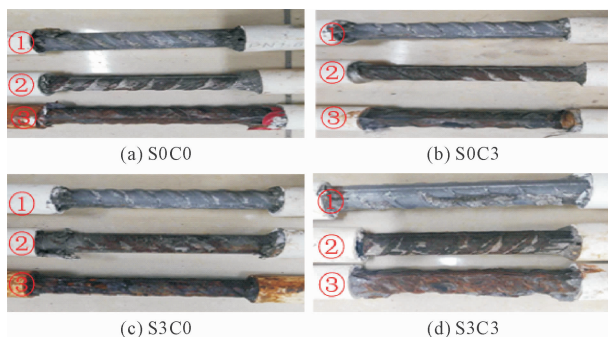


图 10 不同电化学加速钢筋锈蚀形貌

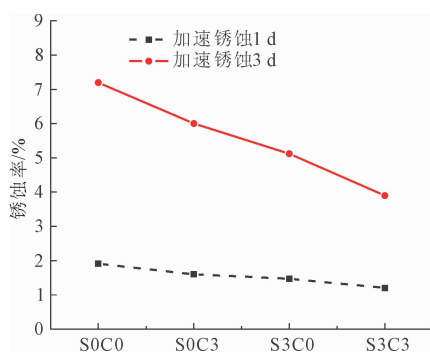


图 11 不同 NS/NC 复掺对钢筋锈蚀率的影响

2.5 粘结强度预测

以往的研究已经建立了经验方程,以计算不同条件下再生混凝土与钢筋之间的粘结强度。尽管对经验粘结强度公式进行了广泛研究,但再生骨料混凝土计算的准确性和适用性仍有待提高。粘结强度经验公式以 Orangun 粘结强度公式(3)为基础,筋材直径 d 为 16 mm,并假设保护层厚度 c 为 75 mm,粘结长度 l_n 为 80 mm;若考虑纳米 SiO_2 含量、纳米 CaCO_3 含量以及的影响,由此可推导得到公式(4),其中 a 、 b 、 c 为待定拟合参数。将混凝土强度 f'_c 、纳米 SiO_2 含量 n_1 、纳米 CaCO_3 含量 n_2 和极限粘结应力 τ_u 代入进行求解 a 、 b 、 c 以优化经验公式,可得到钢筋和 FRAC 的粘结强度经验公式(5)。

$$\tau_u = 0.083045 \sqrt{f'_c} \left[1.2 + 3 \left(\frac{c}{d} \right) + 50 \left(\frac{d}{l_n} \right) \right] \quad (3)$$

$$\tau_u = [a + bn_1 + cn_2] \cdot \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

$$\tau_u = [2.1089 + 3.6973n_1 + 2.7250n_2] \cdot \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

图 12 给出了计算值与实验值的相关度离散性,在优化经验公式后,计算值与实验值之间的相关离散程度显著降低,这强有力地表明优化后的经验公式极大地提升了预测精度,使得计算结果与试验观测值之间呈现出更为紧密的吻合关系。优化前后公式拟合值与试验值的决定系数 (R^2) 分别为 0.111 和 0.928。其中, $R^2 = 0.111$ 对应未纳入纳米 NS、NC 掺量的初始公式,该结果表明,未考虑纳米材料协同作用时,公式无法有效捕捉试验值的变化规律,拟合效果较差;而 $R^2 = 0.928$ 对应文中优化后的粘结强度预测公式,其值接近 1.0,说明该公式能精准反映纳米材料掺入后对 FRAC 与带肋钢筋粘结强度的强化规律,进一步验证了该预测模型的可靠性。利用优化后的公式对不同掺量纳米材料试件粘结强度如图 13 所示。

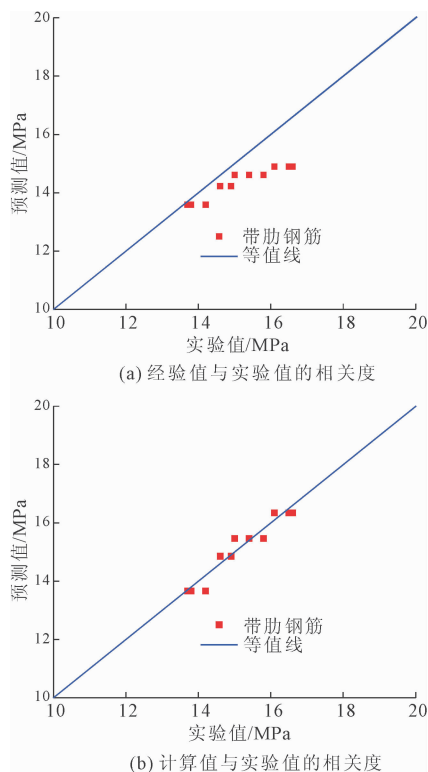


图 12 粘结强度预测值校正前后的相关度对比

3 结 论

(1) 与未改性的 FRAC 相比,NS 和 NC 掺入可有效提升混凝土抗压强度和抗氯离子扩散性能。

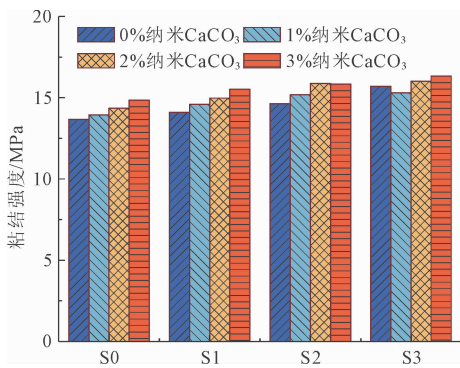


图 13 不同掺量纳米材料粘结强度预测值

NS/NC 复掺比例为 3% 时 FRAC 展现出更强的增益效果。这一优化效果源于 NS 和 NC 的协同作用: NS 凭借火山灰效应与 CH 反应生成更多 C-S-H 凝胶, NC 通过促进水泥水化与 C₃A、C₄AF 反应生成水化碳铝酸钙,二者共同填充 FRAC 内部孔隙与微裂缝,改善过渡区结构密实性,从而同步提升混凝土的力学强度与抗渗透性。

(2) 钢筋和混凝土破坏以劈裂破坏为主,掺入 NS 和 NC 复掺后发生劈裂拔出破坏。NS/NC 复掺有效阻碍破坏时裂缝扩展,改善钢筋混凝土破坏形态。当 NS 和 NC 单掺掺入 3% 时钢筋和再生骨料混凝土的粘结强度分别提高了 6.5% 和 10.8%,二者复掺 3% 时粘结强度提高了 18%。

(3) NS/NC 复掺改性 FRAC 与钢筋的粘结性能受钢筋腐蚀程度的影响;电化学加速锈蚀 1 d 情况下,粘结强度略有增加,但进一步腐蚀会导致粘结性能显著退化。同时,纳米材料掺入促进水化反应,腐蚀程度较未掺入纳米材料更低。

参考文献:

[1] Maldonado D M, Rodriguez A A, Blanco S, et al. Development of biogenic silica biocoatings to improve the performance of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2024,424:135829.

[2] Zheng Yuanxun, Zhuo Jingbo, Zhang Peng. A review on durability of nano-SiO₂ and basalt fiber modified recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021,304:124659.

[3] Behera M, Bhattacharyya S K, Minocha A K, et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete-A breakthrough towards sustainability in construction sector; A review [J]. Construction and Building Materials, 2014,68:501-516.

[4] 黄东明,宗 帅,刘真真,等. PVA 纤维地聚合物再生混凝土轴拉性能研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然

科学版),2023,42(3):265-272.

[5] Zhou Yingwu, Zhuang Jiahao, Xu Wenzhuo, et al. Study on mechanical performance and mesoscopic simulation of nano-SiO₂ modified recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2024,425:136053.

[6] Bao Jiuwen, Wang Yunwei, Zhang Peng, et al. The role of internally incorporated nano-silica in recycled aggregate concrete: Modification of transport properties[J]. Construction and Building Materials, 2023,317:130790.

[7] Chen Xuyong, Ai Yanzheng, Wu Qiaoyun, et al. Potential use of nano calcium carbonate in polypropylene fiber reinforced recycled aggregate concrete: Microstructures and properties evaluation[J]. Construction and Building Materials, 2023,400:132871.

[8] 郭志明,胡 旭,曾维圣. 纳米碳酸钙对自密实再生混凝土性能的影响[J]. 工业建筑,2023,53(S1):608-611.

[9] Abdalla J A, Thomas B S, Hawileh R A, et al. Influence of nano-TiO₂, nano-Fe₂O₃, nanoclay and nano-CaCO₃ on the properties of cement/geopolymer concrete[J]. Cleaner Materials, 2022,4:100061.

[10] 鲍玖文,罗 淦,马士伟,等. 纳米 SiO₂/CaCO₃ 复掺对全再生粗骨料混凝土性能的影响[J]. 复合材料学报,2025,42(2):1021-1033.

[11] 苏 鑫. 纳米二氧化硅和纳米碳酸钙减胶剂改性混凝土性能研究[D]. 广州:广州大学,2022.

[12] Kim G, Cho S, Moon J, et al. Investigation of the hydrate formation and mechanical performance of limestone calcined clay cement paste incorporating nano-CaCO₃ and nano-SiO₂ as partial limestone substitutes[J]. Construction and Building Materials, 2024,418:135335.

[13] Zheng Yuanxun, Fan Congcong, Ma Junjie, et al. Review of research on Bond-Slip of reinforced concrete structures [J]. Construction and Building Materials, 2023,385:131437.

[14] Xiao Jianzhuang, Falkner H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebar[J]. Construction and Building Materials, 2007,21(2):395-401.

[15] Butler L, West J S, Tighe S L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement [J]. Cement and Concrete Research, 2011,41(10):1037-1049.

[16] Prince M J R, Singh B. Investigation of bond behaviour between recycled aggregate concrete and deformed steel bars[J]. Structural Concrete, 2014,15(2):154-168.

[17] Paz S, Fonteboa B, López J, et al. Bond behavior be-

- tween steel reinforcement and recycled concrete [J]. *Materials and Structures*, 2014, 47: 323-334.
- [18] Wang Xinyue, Dong Sufen, Ashour A, et al. Bond behaviors between nano-engineered concrete and steel bars [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 299: 124261.
- [19] Alhawati M, Ashour A. Bond strength between corroded steel and recycled aggregate concrete incorporating nano silica [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117441.
- [20] Hwangbo D, Son D, Suh H, et al. Effect of nanomaterials (carbon nanotubes, nano-silica, graphene oxide) on bond behavior between concrete and reinforcing bars [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e02206.
- [21] Cao Mingli, Ming Xing, He Kaiyu, et al. Effect of micro-, micro- and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review [J]. *Materials*, 2019, 12(5): 781.
- [22] GB 50164—2011 混凝土质量控制标准 [S]. 北京: 中国建设工业出版社, 2011.
- [23] Ma Zhiming, Liu Miao, Tang Qin, et al. Chloride permeability of recycled aggregate concrete under the coupling effect of freezing-thawing, elevated temperature or mechanical damage [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237: 117648.
- [24] 司博畅. 搅拌时间对现代混凝土拌合物匀质性的影响 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [25] GB/T 28900—2022 钢筋混凝土用钢材试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [26] Van Zijl G P A G, Paul S C. A novel link of the time scale in accelerated chloride-induced corrosion test in reinforced SHCC [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 15-19.
- [27] Zhang Weiping, Chen Junyu, Luo Xujiang. Effects of impressed current density on corrosion induced cracking of concrete cover [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 213-223.
- [28] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [29] GB/T 50082—2024 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [30] ASTM G1-03 Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- [31] 李振东, 孟丹, 王智鹏, 等. 纳米二氧化硅改性混凝土宏观性能及微观调控机理分析 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(7): 2145-2153.
- [32] 朱靖塞, 许金余, 白二雷, 等. 纳米颗粒 SiO_2 和 CaCO_3 对混凝土动力特性的影响 [J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(10): 2974-2978.
- [33] 黄政宇, 祖天钰. 纳米 CaCO_3 对超高性能混凝土性能影响的研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2013, 32(6): 1103-1109.
- [34] Liu Xiaoyan, Liu Ruidan, Xie Xian, et al. Chloride corrosion resistance of cement mortar with recycled concrete powder modified by nano-silica [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 364: 129907.
- [35] Liu Rui, Xiao Huigang, Geng Jishuang, et al. Effect of nano- CaCO_3 and nano- SiO_2 on improving the properties of carbon fibre-reinforced concrete and their pore-structure models [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 244: 118297.
- [36] Hosan A, Shaikh F U A, Sarker P, et al. Nano- and micro-scale characterisation of interfacial transition zone (ITZ) of high volume slag and slag-fly ash blended concretes containing nano SiO_2 and nano CaCO_3 [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121311.