

引用本文:延永东,梁晓封,刘荣桂,等.考虑钢筋锈蚀的纳米 SiO_2 强化再生骨料混凝土梁受力性能研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(3):90-98.

YAN Yong-dong, LIANG Xiao-feng, LIU Rong-gui, et al. Research on Mechanical Properties of Nano- SiO_2 Strengthened Recycled Aggregate Concrete Beam with Corroded Reinforcements[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 90-98.

DOI:10.19815/j.jace.2020.10014

考虑钢筋锈蚀的纳米 SiO_2 强化再生骨料混凝土梁受力性能研究

延永东¹,梁晓封¹,刘荣桂¹,徐鹏飞²,司有栋¹

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院,江苏 镇江 212013;

2. 上海中森建筑与工程设计顾问有限公司,上海 200062)

摘要:采用纳米强化再生骨料表面的措施来改善再生骨料性能,分别考虑强化液中纳米 SiO_2 掺量、再生粗骨料取代率的影响,设计制作了1根普通混凝土基准梁和8根再生骨料混凝土矩形截面梁,采用内置近距离小阴极的方法对梁内受力钢筋进行通电非均匀加速锈蚀,待受拉主筋锈蚀到一定程度后进行四点受弯加载,对加载过程中的裂缝开展情况、荷载-挠度曲线以及极限承载力进行了记录及分析。考虑钢筋锈蚀率及再生骨料取代率等因素的影响,对锈胀开裂之后的再生骨料混凝土梁的承载力计算公式进行了修正,得出了可用于设计的受弯承载力计算公式。结果表明:相同锈蚀程度下,强化再生骨料混凝土梁的抗弯承载力比天然骨料混凝土有所降低,其中25%再生骨料取代率时承载性能退化较多,抗弯承载力下降19.3%;混凝土裂缝开展趋势较为一致,最大裂缝宽度随钢筋锈蚀程度增加而增大,随纳米 SiO_2 掺量增加先减小后增大;近距离小阴极通电可实现混凝土内钢筋的加速非均匀锈蚀;所提出的方法及获得的结论有助于推动再生骨料混凝土在沿海等不利环境中的应用。

关键词:纳米 SiO_2 ;再生粗骨料;非均匀锈蚀;受力性能

中图分类号:TU528.45

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)03-0090-09

Research on Mechanical Properties of Nano- SiO_2 Strengthened Recycled Aggregate Concrete Beam with Corroded Reinforcements

YAN Yong-dong¹, LIANG Xiao-feng¹, LIU Rong-gui¹, XU Peng-fei², SI You-dong¹

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. Shanghai Zhongsen Architecture and Engineering Design Consulting Co., Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract: Measurement of nano-reinforced recycled aggregate surface was adopted to improve the performance of recycled aggregate. Considering the influences of nano- SiO_2 content and replacement ratio of recycled aggregate, 1 ordinary performance concrete (OPC) beam and 8 recycled aggregate concrete (RAC) beams were designed and made. Non-uniform corrosion of steel was accelerated with electrification between the steel bar and a nearby fine stainless-steel wire embedded in concrete beams. The crack development, load-deflection curve and ultimate

bearing capacity were recorded and analyzed during four-point bend loading process after the reinforcement achieved a desired corrosion condition. The calculation formula of bearing capacity of RAC beams after corrosion-induced cracking was revised by considering the effects of steel corrosion ratio and replacement ratio of recycled aggregate. The results show that the flexure capacity of RAC beam is lower than that of natural aggregate concrete beam with the same corrosion ratio. The bearing capacity of RAC beam with 25% replacement of recycled aggregate decreases 19.3%, which is larger than other RAC beams. The development of concrete crack is basically same for all beams. The maximum crack width increases with the increase of corrosion ratio of reinforcement and decreases firstly and then increases with the increase of nano- SiO_2 content. Non-uniform corrosion of steel in concrete can be accelerated with electrification between the steel bar and a nearby fine stainless-steel wire embedded in concrete beams. The proposed method and results are helpful to promote the application of RAC in coastal environment.

Key words: nano- SiO_2 ; recycled aggregate; non-uniform corrosion; mechanical performance

0 引言

将废弃混凝土破碎加工成粗骨料制成再生混凝土用于新建工程,既能减少处置废弃混凝土对环境的污染,又能减少开采天然骨料造成的原材料消耗^[1-2],可以实现废弃混凝土的循环利用,符合中国的可持续发展理念。然而与天然骨料相比,再生骨料表面存在旧砂浆层,一定程度上会降低再生骨料混凝土的力学性能。陈爱玖等^[3]研究表明再生骨料混凝土梁的极限承载力较普通混凝土梁有所下降,且随着再生粗骨料取代率的增加,梁底部裂缝数量增多、间距减小;Seara-paz 等^[4]发现再生骨料混凝土梁的使用、屈服和极限状态与普通混凝土梁相似,但两者的开裂性能存在一定差异;刘超等^[5]发现再生骨料混凝土梁的短期刚度和长期刚度均明显小于普通混凝土梁。在此基础上,杜进生等^[6]依据再生骨料混凝土梁的试验结果修正了公路桥梁规范中关于开裂弯矩和抗弯刚度的计算公式。

为克服再生骨料掺入混凝土造成的性能不足,国内外学者提出了一些改善其性能的方法。Mukharjee 等^[7]将纳米 SiO_2 掺入再生骨料混凝土,发现质量分数为 3% 的纳米 SiO_2 对再生骨料性能改善效果最好,同时可以提高取代率为 100% 的再生混凝土的抗压、抗折强度。李文贵等^[8]通过对比不同种类纳米溶液对再生混凝土的强化效果,发现纳米硅溶胶能够改善再生混凝土界面过渡区的微观结构,从而提高再生混凝土的抗压强度,而纳米 CaCO_3 未能明显提高再生混凝土的抗压强度。林腾玮等^[9]发现经过纳米 SiO_2 溶液改性处理后的再生混凝土强度和抗氯离子渗透性能比未经改性处理的

再生混凝土有较大提升。笔者前期研究发现,与其他常见纳米材料相比,纳米 SiO_2 与水泥、水混合制成浆液覆盖在再生骨料表面可以明显改善再生混凝土的微观结构和宏观力学性能^[10]。对氯盐环境下服役的再生混凝土构件来说,氯离子侵蚀会造成钢筋锈蚀,而再生骨料的性能缺陷也会对锈蚀钢筋混凝土梁的长期性能产生不利影响^[11]。为此,有必要进一步研究不利服役环境下改善再生混凝土构件或结构性能的措施。

本文在笔者前期研究基础上^[10],针对再生骨料的主要缺陷,首先采用纳米 SiO_2 强化液对再生骨料表面进行处理,然后将其掺入混凝土内浇筑成梁,养护 28 d 后采用近距离小阴极通电的方法进行钢筋加速非均匀锈蚀,测试并分析不同因素(再生粗骨料取代率、纳米 SiO_2 掺量、钢筋锈蚀率)对钢筋锈蚀后纳米强化再生骨料混凝土梁的裂缝开展、变形、受弯承载力等的影响,并根据试验结果建立相应的承载力计算公式,以促进再生混凝土在沿海等不利环境中的应用。

1 试验

1.1 混凝土原材料

试验中的混凝土采用海螺 P.O42.5 水泥、上海迈坤化工有限公司生产的纳米 SiO_2 (Nano- SiO_2)、聚羧酸减水剂、普通河砂、5~25 mm 连续级配天然粗骨料与再生粗骨料、实验室自来水进行配置。其中再生粗骨料取自校内使用年限达 20 年的建筑经破碎筛分得的碎石,其级配曲线如图 1 所示,为Ⅱ类再生粗骨料^[12],满足规范要求。

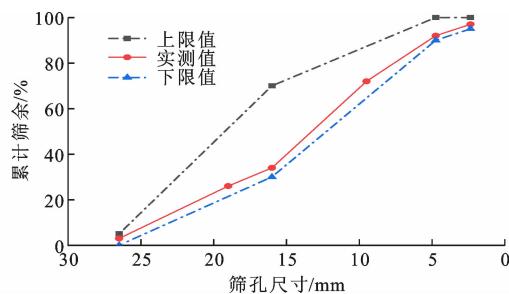


图 1 再生粗骨料级配曲线

Fig. 1 Grading Curves of Recycled Aggregate

1.2 试件设计及制作

本试验设计并制作了 8 根再生混凝土简支梁和 1 根相同配合比的基准梁, 截面尺寸为 120 mm × 200 mm, 梁长 1 400 mm, 支座间净跨 1 200 mm, 保护层厚度为 25 mm; 上部架立钢筋采用 $\text{Φ} 8$ 螺纹钢筋, 底部受拉纵筋采用 $\text{Φ} 12$ 螺纹钢筋, 箍筋采用 $\text{Φ} 8@100/200$, 实测钢筋力学性能如表 1 所示; 支座加密区的箍筋间距为 100 mm, 纯弯段箍筋间距为 200 mm; 混凝土配合比见表 2。为模拟氯盐环境中服役构件的钢筋锈蚀状态, 根据 Fu 等^[13]提出的近距离小阴极通电加速试验方法来快速实现钢筋沿横截面的非均匀锈蚀, 为此提前在梁内每根主筋外侧 10 mm 处各预埋 1 根直径为 0.8 mm 的 304 不锈钢丝作为辅助电极。试验梁尺寸及配筋如图 2 所示。

表 1 钢筋力学性能

Tab. 1 Mechanical Property of Reinforcement

型号	抗拉强度 f_u/MPa	屈服强度 f_y/MPa	伸长率 $\delta/\%$
$\text{Φ} 8$	400.16	372.54	25.6
$\text{Φ} 8$	589.86	495.43	23.2
$\text{Φ} 12$	550.42	436.34	20.1

每根梁的设计参数及用途如表 3 所示。

1.3 Nano-SiO₂ 强化再生骨料制备

由于纳米 SiO₂ 在水中难以溶解且易形成团簇状难溶物^[14], 因此先使用超声波分散仪将纳米 SiO₂、减水剂和少部分水混合后进行超声乳化, 以此充分发挥减水剂对纳米 SiO₂ 的分散作用。待母液制备完成后按 0.5 水灰比添加水泥, 充分搅拌制得纳米 SiO₂ 强化浆液, 随后将再生粗骨料浸泡于纳米 SiO₂ 浆液中, 30 min 之后将骨料和浆液分离并晾晒风干, 制成纳米 SiO₂ 强化再生骨料。

1.4 钢筋通电加速非均匀锈蚀

长期在氯盐环境中服役的钢筋混凝土构件表现出靠近保护层一侧的锈蚀大于另一侧的非均匀锈蚀形态^[15], 为在实验室内快速实现这一锈蚀形态, 本试验采用短距离小阴极通电来近似模拟。先将养护后的梁在 5% (质量分数) NaCl 溶液中浸泡 7 d, 再对其按图 3 所示进行通电锈蚀。由于在通电过程中需要构件保持湿润状态以降低混凝土的电阻率, 因

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mixing Proportion of Concrete

试验梁 编号	各材料用量/(kg · m ⁻³)									减水剂	
	水泥	砂	水	天然骨料	普通再 生骨料	纳米强化再生骨料					
						w=0.0%	w=0.2%	w=0.4%	w=0.6%		
R0-0	361	608	195	1 235.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.72	
R25-2	361	608	195	926.2	926.2	0.0	308.8	0.0	0.0	0.72	
R50-0	361	608	195	617.5	0.0	617.5	0.0	0.0	0.0	0.72	
R50-2	361	608	195	617.5	0.0	0.0	617.5	0.0	0.0	0.72	
R50-4	361	608	195	617.5	0.0	0.0	0.0	617.5	0.0	0.72	
R50-6	361	608	195	617.5	0.0	0.0	0.0	0.0	617.5	0.72	

注: 编号 R50-0 浇筑 2 根, R50-2 浇筑 3 根, 其余编号梁各浇筑 1 根; R0-0 表示基准梁; w 为纳米 SiO₂ 用量占胶凝材料的质量百分比。

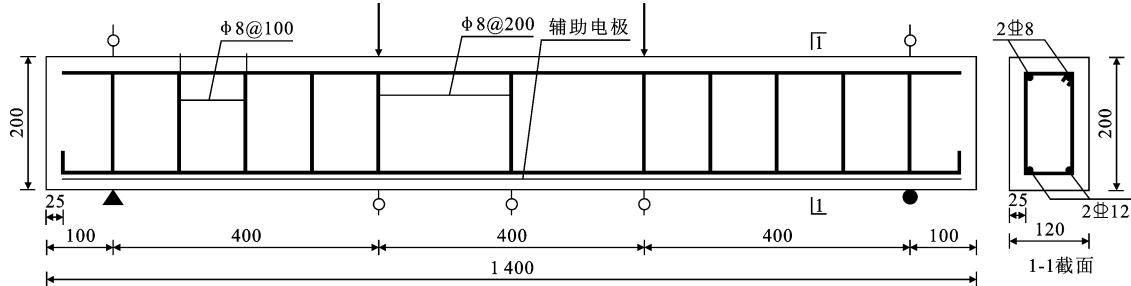


图 2 试验梁尺寸及配筋(单位:mm)

Fig. 2 Size and Reinforcement of Test Beam (Unit:mm)

表 3 纳米强化再生骨料混凝土梁试验参数

Tab. 3 Test Parameters of Nano-reinforced RAC Beams

试验梁编号	通电时间/d	侵蚀历史	用途
R50-0-0	无	无	基准梁
R50-2-A	10	氯盐浸泡	不同锈蚀率影响
R50-2-B	20		
R50-2-C	30		
R0-0-B	20	氯盐浸泡	不同再生骨料取代率影响
R25-2-B	20		
R50-2-B	20		
R50-0-B	20	氯盐浸泡	不同纳米 SiO_2 掺量影响
R50-2-B	20		
R50-4-B	20		
R50-6-B	20		

注:以 R50-2-B 为例,50 表示再生骨料的取代率为 50%,2 表示纳米材料的添加率为 0.2%,B 表示钢筋锈蚀程度为 B 等级,其中钢筋锈蚀等级 A,B 和 C 所对应的通电时间分别为 10,20,30 d。

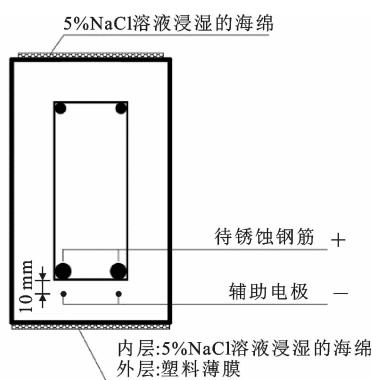


图 3 再生骨料混凝土梁通电非均匀锈蚀示意

Fig. 3 Schematic of Electrification Non-uniform Corrosion of RAC Beams

此在梁上下表面各覆盖 5% NaCl 溶液浸湿的海绵，并在梁底部铺上塑料薄膜，在通电期间不定期对海绵浸湿。同时考虑到再生骨料混凝土梁阻抗较大，外加电流密度难以达到拟定的下限 $10 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ，因此需控制电源电压在 30 V 以内^[16]。梁通电锈蚀现场布置如图 4 所示。

1.5 加载方案

对通电锈蚀后的梁依据规范^[17]进行加载，加载期间观测并记录梁侧面混凝土应变、构件跨中和加载点处的竖向位移、混凝土裂缝开展情况、破坏荷载等。

2 试验结果与分析

2.1 裂缝形态分布

受弯破坏梁裂缝开展情况如图 5 所示(裂缝下



图 4 再生骨料混凝土梁通电锈蚀现场

Fig. 4 Site of Electrochemical Corrosion of RCA Beam

面的 2 排数值分别表示裂缝出现顺序和裂缝总高度)。从图 5 可以看出:①天然骨料、普通再生骨料以及纳米强化再生骨料梁加载时裂缝开展的趋势基本相同,即在纯弯区段内的裂缝均是从梁底部向中性轴方向开展,弯剪区段的裂缝均向加载点方向开展;②比较 R50-2-A, R50-2-B, R50-2-C 三根不同通电时长梁的裂缝分布,可以看出,随通电时间的增加,钢筋位置处逐渐出现了锈胀裂缝,通电 30 d 后梁的锈胀裂缝基本贯通。

加载过程中不同等级荷载所对应的最大裂缝宽度如图 6 所示。可以看出:①在外加荷载一定且再生骨料取代率和纳米材料掺量相同的情况下,最大裂缝宽度随钢筋锈蚀程度增加而增大,如图 6(a)所示,这可能是钢筋锈蚀降低了纵筋与再生混凝土之间的黏结性能;②在纵筋锈蚀程度相近时,同一荷载水平下混凝土梁最大裂缝宽度随再生骨料取代率的增加而减小,如图 6(b)所示,这可能是因为掺入再生骨料后混凝土的裂缝数量有所增加;③在纵筋锈蚀程度相近的情形下,最大裂缝宽度随纳米 SiO_2 掺量增加呈先减小后增大的趋势,0.4% 掺量(质量分数)时的裂缝宽度要小于其他 2 种掺量下的值,如图 6(c)所示,说明强化再生骨料表面的 Nano- SiO_2 掺量有一定的最优值,不是越多越好。

2.2 受弯破坏模式

试验梁的典型破坏模式(图 7)均为适筋破坏,即纯弯段受压区混凝土被压碎导致构件承载力丧失而发生破坏,在梁破坏之前均发生较大的变形。同时发现再生骨料混凝土梁的开裂方式与传统混凝土梁有所不同,存在多条主裂缝,从而使其挠度大于普通混凝土梁的挠度。

2.3 跨中截面应变分布

为检验纳米强化再生混凝土锈蚀梁破坏过程中

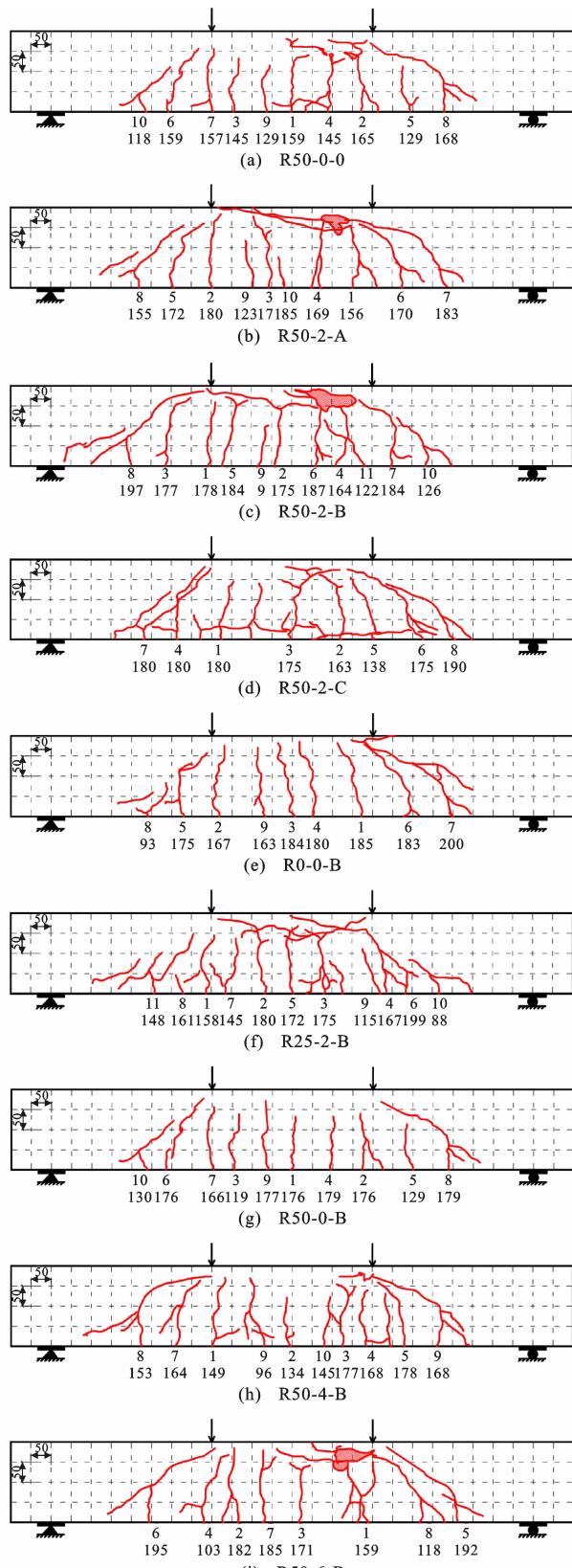


图 5 再生骨料混凝土梁受弯破坏裂缝开展情况(单位:mm)

Fig. 5 Crack Development of RAC Beams Under Bending (Unit:mm)

跨中截面是否符合平截面假定,对不同高度处混凝

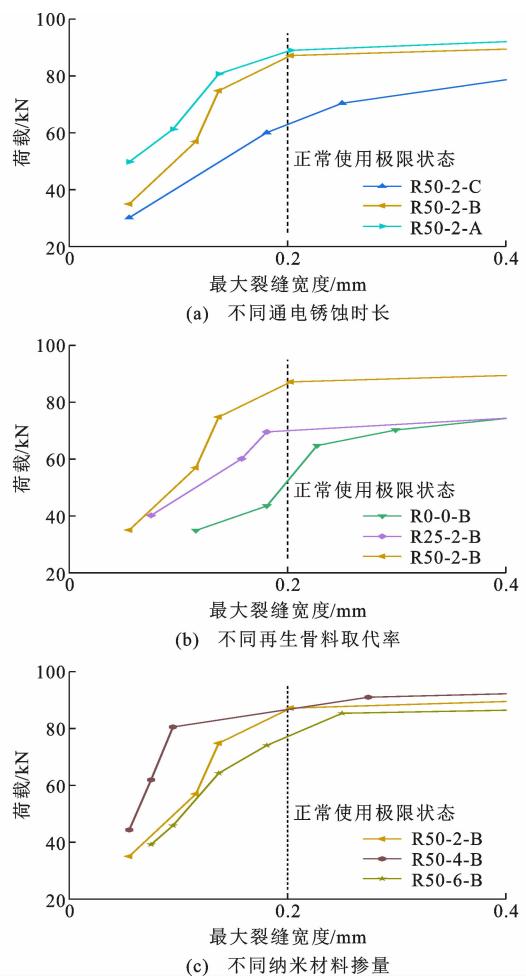


图 6 再生骨料混凝土梁荷载-最大裂缝宽度曲线

Fig. 6 Load-maximum Crack Width Curves of RAC Beams
土跨中截面的应变分布也进行了分析。不同弯矩 M 下典型梁(R50-2-B)的应变分布如图 8 所示(其他梁类似),其中 M_0 为按简支梁破坏时的实测值求出的弯矩极限值。可以看出,在构件屈服之前,简支梁跨中截面应变与中性轴距离成正比,说明受弯过程中纳米强化再生混凝土锈蚀梁跨中截面满足平截面假定。因此可借助普通混凝土梁受弯承载力的计算理论来分析本试验梁。

2.4 荷载-挠度曲线

加载过程中梁的荷载-挠度曲线如图 9 所示。从整体上看,所有梁在破坏之前均经历了 3 个阶段:①未开裂阶段,加载初期简支梁均处于弹性工作阶段,跨中挠度与加载值成正比;②裂缝发展阶段,梁底部混凝土开裂并不断发展,荷载-挠度曲线的斜率较前一阶段有所减小,且部分梁的曲线斜率逐渐降低[图 9(a)中的 R25-2-B];③破坏阶段,荷载增加较小而挠度增加很快,梁的荷载-挠度曲线基本为水平直线。设计参数对梁荷载-挠度曲线的影响为:

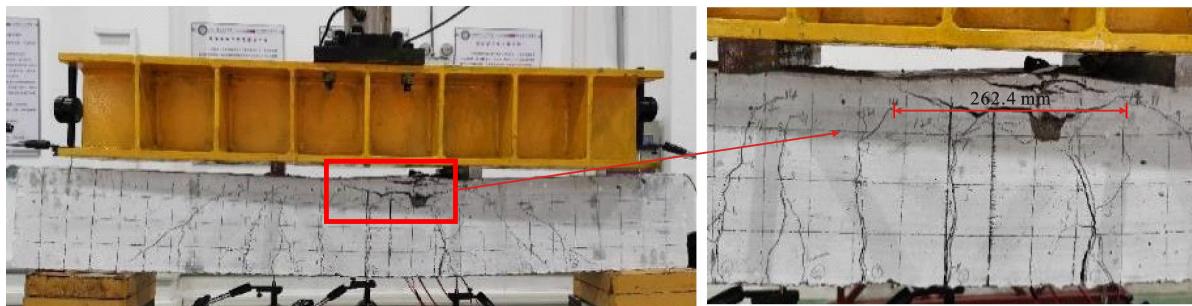
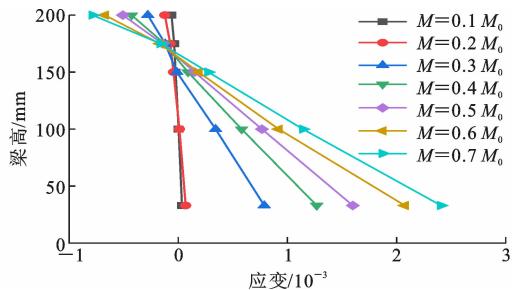


图 7 锈蚀再生骨料混凝土梁典型破坏形态(R50-6-B)

Fig. 7 Typical Failure Mode of Corroded RAC Beam (R50-6-B)

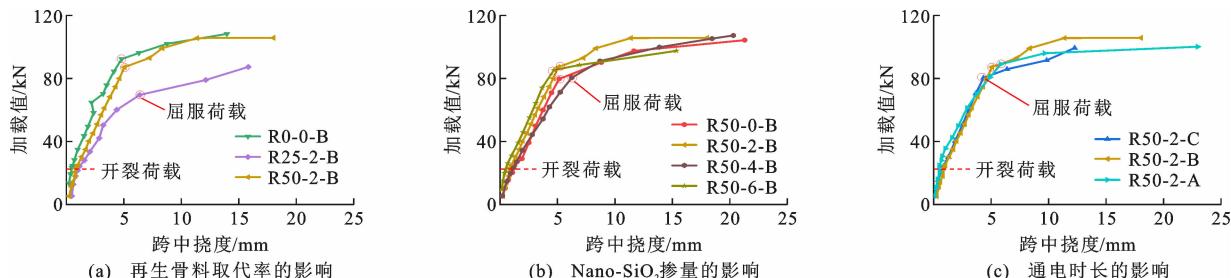
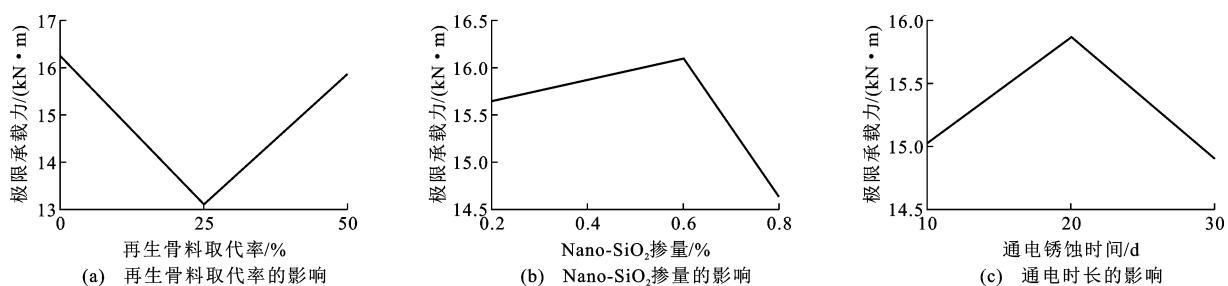
图 8 纳米 SiO_2 强化再生骨料混凝土梁跨中截面应变分布(R50-2-B)Fig. 8 Strain Distribution in Midspan of Nano- SiO_2 Strengthened RAC Beam (R50-2-B)

①掺入 25% (质量分数) 和 50% (质量分数) 的再生骨料后, 构件破坏时的跨中挠度有所增大、屈服荷载有所降低 [图 9(a)]。其中再生骨料取代率为 25% 的梁比普通混凝土梁的屈服荷载降低了 24.6%;

② Nano- SiO_2 摆量 (质量分数) 为 0.2% 时梁的极限承载力最高 [图 9(b)], 再次说明再生骨料表面的 Nano- SiO_2 摆量有一定的最优值, 不是越多越好; ③ 随钢筋通电锈蚀时间的增加, 混凝土梁的屈服荷载减小 [如图 10(c)], 通电 30 d 的梁 (R50-2-C) 在钢筋屈服后的延性也明显降低。

2.5 极限承载力

不同设计参数对梁极限承载力的影响如图 10 所示。可以看出: ①再生骨料取代部分天然骨料后试验梁的抗弯承载力比正常混凝土梁有所降低, 相同锈蚀程度下, 再生骨料取代率为 25% 时受力性能退化较多, 抗弯承载力下降 19.3%, 这说明当 Nano- SiO_2 浆液强化再生骨料数量较少时, 混凝土的性能改善不明显, 梁的承载力有所减小, 当 Nano- SiO_2 浆液强化再生骨料较多时, 混凝土性能有所改善, 导致

图 9 纳米 SiO_2 强化再生骨料混凝土梁荷载-挠度曲线Fig. 9 Load-deflection Curves of Nano- SiO_2 Strengthened RAC Beam图 10 纳米 SiO_2 强化再生骨料混凝土梁极限承载力Fig. 10 Ultimate Bearing Capacity of Nano- SiO_2 Strengthened RAC Beams

梁的承载力恢复到普通混凝土梁的水平;②随强化液中 Nano-SiO₂ 掺量的增加,试验梁的承载力先增大后减小,再一次说明包裹在再生骨料表面的强化液中 Nano-SiO₂ 掺量过多对混凝土性能有不利影响;③随通电锈蚀时间的增加,试验梁的抗弯承载力呈现出先上升后下降的趋势,其中锈蚀率为 4.2% 时承载力略有提高,这是因为钢筋的有限锈蚀膨胀有利于混凝土对其的握裹,从而提高了梁的承载力。

表 4 再生骨料混凝土梁受弯极限承载力试验值与计算值

Tab. 4 Experimental and Calculated Values of Ultimate Bending Capacity of RAC Beams

试验梁编号	f_{cu}/MPa	f_c/MPa	$M_u^t/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_u^{cl}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	M_u/M_u^{cl}	$M_u^{c2}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	M_u^t/M_u^{c2}
R50-0-0	53.43	40.61	13.78	15.15	0.91	13.63	1.01
R50-0-B	58.17	44.21	15.65	15.23	1.03	12.81	1.22
R50-2-C	62.46	47.47	14.90	15.29	0.97	12.31	1.21
R0-0-B	60.00	45.60	16.25	15.25	1.07	14.50	1.12
R25-2-B	60.01	45.61	13.11	15.25	0.86	14.13	0.93
R50-2-B	57.07	43.37	15.87	15.21	1.04	12.90	1.23
R50-2-A	60.89	46.28	15.03	15.27	0.98	13.42	1.12
R50-4-B	59.11	44.92	16.10	15.24	1.06	12.84	1.25
R50-6-B	65.68	49.92	14.63	15.33	0.95	12.80	1.14
均值					0.986		1.153
标准差					0.067		0.077
变异系数					0.068		0.067

注: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_c 为混凝土轴心抗压强度; M_u^t 为纳米强化再生骨料混凝土梁锈蚀之后的极限承载力试验值; M_u^{cl} 为纳米强化再生骨料混凝土梁锈蚀之后的极限承载力规范计算值; M_u^{c2} 为同时考虑再生粗骨料取代率和主筋锈蚀率的再生骨料混凝土梁的极限承载力。

下所示

$$\alpha_1 f_c b x = f_y A_{sc} \quad (1)$$

$$M_u^{c2} = \beta \eta \alpha_1 f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}) \quad (2)$$

$$A_{sc} = A_s (1 - \eta_1) \quad (3)$$

$$\eta = \begin{cases} 1 & \eta_1 < 1.2\% \\ 1.0168 - 0.014\eta_1 & 1.2\% \leq \eta_1 \leq 6\% \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = -0.2r + 1 \quad 0\% \leq r \leq 1\% \quad (5)$$

式中: α_1 为混凝土受压区等效矩形应力图形系数,取 1.0;混凝土轴心抗压强度 f_c 由混凝土立方体抗压强度实测值 f_{cu}^0 推算而来, $f_c = \alpha_{cl} f_{cu}^0$, α_{cl} 为混凝土棱柱体与立方体的抗压强度比值,本文取 0.76^[17]; b 为截面宽度; x 为混凝土受压区高度; f_y 为钢筋屈服强度; h_0 为截面有效高度; A_{sc} 为考虑实测锈蚀率的主筋截面有效面积; A_s 为主筋截面有效面积; η_1 为纵筋的实测锈蚀率; η 为考虑锈蚀影响的钢筋与混凝土的协同工作系数; β 为参考文献[20]确定的考虑再生骨料取代率对梁极限承载力影响的修正系

目前国内外学者^[3,9,18]关于普通及锈胀开裂再生混凝土简支梁的极限承载力计算公式均是在规范^[19]的基础上进行修正得到的。再生骨料混凝土梁受弯极限承载力试验值与计算值见表 4。由表 4 可知, M_u^t/M_u^{cl} 均值为 0.986,说明计算值与试验值较为吻合,但从设计角度考虑,缺少一定的安全储备,因此,本文在文献[9]的基础上考虑主筋锈蚀率和再生骨料取代率对承载力计算公式进行修正,如

数; r 为再生骨料取代率。

表 4 中 M_u^t/M_u^{c2} 的平均值为 1.153,说明试验梁的抗弯承载力试验值比计算值大 15% 左右,具有一定的安全储备,更符合设计要求。

2.6 钢筋锈蚀分析

对受弯破坏后的梁进行破碎,并取出钢筋进行观察,发现通电 10, 20, 30 d 后的部分梁内钢筋锈蚀情况如图 11 所示。可以看出,通电 10 d 时靠近外侧的钢筋表面出现了局部锈蚀,通电 20 d 时靠近外侧的钢筋表面出现了较大范围的锈蚀,通电 30 d 时靠近外侧的钢筋几乎全部锈蚀,锈蚀深度也较大,且靠近内部的部分表面也出现了锈斑。说明本试验采用的通电锈蚀方法可实现钢筋非均匀锈蚀。此外,依据规范^[21]测得的梁内受力钢筋锈蚀率如图 12 所示(1 号和 2 号钢筋是指同一根梁的 2 根纵筋),可以看出,钢筋实际锈蚀率随通电时间的增加而增大,其中通电时间 30 d 的锈蚀率是通电时间 10 d 锈蚀率的 2 倍多。



图 11 不同通电时长的钢筋锈蚀形态

Fig. 11 Corrosion Form of Reinforcement Under Different Electrification

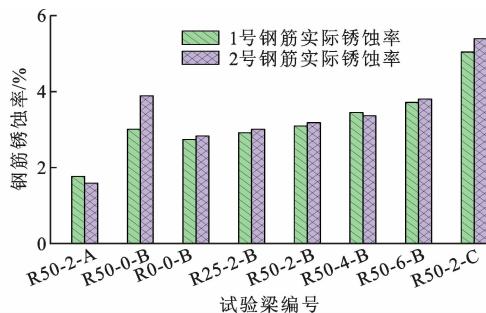


图 12 试验梁内钢筋实际锈蚀率

Fig. 12 Corrosion Ratio of Reinforcements in Test Beams

3 结语

(1) 相同锈蚀程度下纳米强化再生骨料混凝土梁的抗弯承载力比天然骨料混凝土梁有所降低, 再生骨料取代率为 25% 时梁承载力退化最为严重, 抗弯承载力下降 19.3%。

(2) 从抗弯承载力及最大裂缝宽度来看, Nano-SiO₂ 在再生骨料混凝土内的掺量有最优值, 不是越大越好。

(3) 加速锈蚀后的纳米强化再生骨料混凝土梁在受弯过程中的跨中应变分布遵循平截面假定, 破坏模式与普通混凝土梁较为相似。

(4) 纳米强化再生骨料混凝土腐蚀梁的抗弯承载力计算值与试验值较为一致, 为方便设计, 提出了考虑钢筋锈蚀率和再生骨料取代率影响的修正计算方法。

(5) 近距离小阴极通电可以实现梁内钢筋的非均匀锈蚀, 随通电时间的增加, 钢筋锈蚀程度逐渐增大。

参考文献:

References:

- [1] 程东辉,俞永志,董志鹏.无粘结预应力再生粗骨料混凝土梁力学性能[J].建筑科学与工程学报,2016,33(1):30-37.
CHENG Dong-hui, YU Yong-zhi, DONG Zhi-peng. Mechanical Properties of Unbonded Prestressed Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(1): 30-37.
- [2] FALESCHINI F, ZANINI M A, PELLEGRINO C, et al. Sustainable Management and Supply of Natural and Recycled Aggregates in a Medium-size Integrated Plant[J]. Waste Management, 2016, 49:146-155
- [3] 陈爱玖,王璇,解伟,等.再生混凝土梁受弯性能试验研究[J].建筑材料学报,2015,18(4):589-595
CHEN Ai-jiu, WANG Xuan, XIE Wei, et al. Experimental Research on Flexural Property of Recycled Concrete Beam [J]. Journal of Building Material, 2015, 18(4): 589-595.
- [4] SEARA-PAZ S, GONZALEZ-FONTEBOA B, MARTINEZ-ABELLA F, et al. Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Made with Recycled Concrete Coarse Aggregate[J]. Engineering Structures, 2018, 156:32-45.
- [5] 刘超,白国良,张玉,等.基于荷载长期效应再生混凝土梁受弯性能试验及刚度计算方法[J].建筑结构学报,2016,37(增2):1-8.
LIU Chao, BAI Guo-liang, ZHANG Yu, et al. Study on Stiffness Calculation Method and Flexural Performance of Recycled Concrete Beam Based on Long-term Loading Effect [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S2): 1-8.

- [6] 杜进生,王健,韦锦帆,等.再生混凝土梁开裂弯矩与抗弯刚度计算方法[J].中国公路学报,2019,32(3):93-100.
DU Jin-sheng, WANG Jian, WEI Jin-fan, et al. Methods for Calculating Cracking Moment and Flexural Stiffness of Recycled Concrete Beams[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 93-100.
- [7] 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.
- [8] 李文贵,龙初,罗智予,等.纳米改性再生骨料混凝土破坏机理研究[J].建筑材料学报,2017,20(5):685-691,786.
LI Wen-gui, LONG Chu, LUO Zhi-yu, et al. Investigation on Failure Mechanism of Nanomodified Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5): 685-691, 786.
- [9] 林腾玮,刘孙涛,罗素蓉,等.纳米 SiO_2 改性再生混凝土抗氯离子的渗透性能实验[J].福州大学学报:自然科学版,2019,47(4):533-537.
LIN Teng-wei, LIU Sun-tao, LUO Su-rong, et al. Experimental Study on Chlorine Ion Penetration Resistance of Nano- SiO_2 Modified Recycled Concrete[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2019, 47(4): 533-537.
- [10] 延永东,徐鹏飞,姚嘉诚,等.超声分散处理的纳米再生混凝土基本性能[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):124-131.
YAN Yong-dong, XU Peng-fei, YAO Jia-cheng, et al. Basic Performance of Nano-reinforced Recycled Concrete Adopting Ultrasonic Dispersion Technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 124-131.
- [11] 曹万林,肖建庄,叶涛萍,等.钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J].建筑结构学报,2020,41(12):1-16,27.
CAO Wan-lin, XIAO Jian-zhuang, YE Tao-ping, et al. Research Progress and Engineering Application of Reinforced Recycled Aggregate Concrete Structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 1-16, 27.
- [12] GB/T 25177—2010,混凝土用再生粗骨料[S].
GB/T 25177—2010, Recycled Coarse Aggregate for Concrete[S].
- [13] FU C Q, JIN N G, YE H L, et al. Non-uniform Corrosion of Steel in Mortar Induced by Impressed Current Method: An Experimental and Numerical Investigation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 429-438.
- [14] 朱勇年,张鸿儒,孟涛,等.纳米 SiO_2 改性再生骨料混凝土工程应用研究及实体性能监测[J].混凝土,2014(7):138-144.
ZHU Yong-nian, ZHANG Hong-ru, MENG Tao, et al. Performance of Nano- SiO_2 Modified Recycled Aggregate Concrete Applied in a Real Project [J]. Concrete, 2014(7): 138-144.
- [15] 袁迎曙,贾福萍,蔡跃.锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J].土木工程学报,2001,34(3):47-52,92.
YUAN Ying-shu, JIA Fu-ping, CAI Yue. The Structural Behavior Deterioration Model for Corroded Reinforced Concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 47-52, 92.
- [16] 于伟忠,金伟良,高明赞.混凝土中钢筋加速锈蚀试验适用性研究[J].建筑结构学报,2011,32(2):41-47.
GAN Wei-zhong, JIN Wei-liang, GAO Ming-zan. Applicability Study on Accelerated Corrosion Methods of Steel Bars in Concrete Structure[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 41-47.
- [17] GB/T 50152—2012,混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [18] 叶涛萍,曹万林,董宏英,等.锈蚀钢筋与高强再生混凝土的黏结性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(8):132-141.
YE Tao-ping, CAO Wan-lin, DONG Hong-ying, et al. Bond Behavior Between Corroded Steel Bars and High-strength Recycled Concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 132-141.
- [19] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [20] 常彦铮.再生混凝土抗压试验的数值模拟与等效抗压强度折减系数研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
CHANG Yan-zheng. Study on Reduction Factor of Equivalent Compressive Strength and Numerical Simulation of Compression Test of Recycled Concrete [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [21] GB/T 50082—2009,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009, Standard for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete[S].