

实海暴露环境下偏高岭土改性再生混凝土界面劣化演变

邢斐¹, 路殿成², 高嵩^{1,*}, 郭嘉¹, 陈建珍³

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛理工大学科技发展集团有限公司, 青岛 266033;

3. 武汉市建筑工程质量检测中心有限公司, 武汉 430022)

摘要: 由于再生骨料存在自身的缺陷, 再生混凝土容易遭受到侵蚀环境的影响。偏高岭土作为矿物掺合料, 可以在早期促进水泥水化, 最终产物以离子键和共价键为主, 范德华键为辅, 因而较其他掺合料具有更优越的性能。以偏高岭土为掺合料对再生混凝土进行改性, 分析实海暴露环境侵蚀下的再生混凝土界面区的劣化演变过程。研究表明, 当偏高岭土掺量为 4%、7%、10% 时, 抗压强度分别较基准混凝土提升了 11.1%、19.4%、8.3%。当受到海水侵蚀时, 各界面过渡区性能都随着时间的推移先增强后减弱。新砂浆-骨料界面、新砂浆-旧砂浆界面对于海水侵蚀较为敏感, 而旧砂浆-骨料界面在海水侵蚀下表现出更稳定的性能, 旧砂浆以及新旧砂浆界面为薄弱部位。

关键词: 实海暴露; 偏高岭土; 再生混凝土; 界面过渡区; 劣化演变

中图分类号: TU528.44

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)04-0022-09

Deterioration evolution of the interface of recycled concrete modified by metakaolin under solid sea exposure

XING Fei¹, LU Diancheng², GAO Song^{1,*}, GUO Jia¹, CHEN Jianzhen³

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Tech Development Group Co., Ltd. of QUT, Qingdao 266033, China;

3. Wuhan Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd., Wuhan 430022, China)

Abstract: Due to the defects of recycled aggregate, recycled concrete is prone to the impact of corrosive environment. As a mineral admixture, metakaolin can promote cement hydration in the early stage. The final product is dominated by ionic and covalent bonds and supplemented by van der Waals bonds, and thus metakaolin has better performance than other admixtures. This study modified the recycled concrete by taking metakaolin as the admixture, and analyzed the deterioration evolution process of the recycled concrete interface area in the corrosive environment of solid sea exposure. The results show that when the dosage of metakaolin is set at 4%, 7% and 10%, the compressive strength of the recycled concrete is increased by 11.1%, 19.4% and 8.3% compared with that of the benchmark concrete. When subjected to seawater erosion, the performance of each interface transition zone first increases and then decreases over time. The new mortar-aggregate interface and the new

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51978353)

作者简介: 邢斐(1999—), 男, 山东青岛人。硕士, 研究方向为再生混凝土。E-mail: xfsyjs@163.com。

* 通信作者: 高嵩(1978—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事混凝土耐久性及固废资源化利用等方面的研究。
E-mail: gaosong@qut.edu.cn。

mortar-old mortar interface are more sensitive to seawater erosion, while the old mortar-aggregate interface shows more stable performance under seawater erosion, and the old mortar interface and the new-old mortar interface are the weak parts.

Key words: solid sea exposure; metakaolin; recycled concrete; interfacial transition zone; deterioration evolution

随着海洋强国战略的实施,近海工程基础设施以及防护工程构筑物等建设速度大大加快,预防海水侵蚀成为海洋建设工程的重中之重,且在实际施工过程中,临海区域天然砂石材料匮乏,跨区域运输材料需耗费大量人力物力,所以采取再生骨料制备再生混凝土应用于近海工程设施将更好地消纳建筑废弃物,使其资源化再利用^[1-2]。

由于再生骨料表面残余旧砂浆以及再生混凝土多重界面的缺陷使得其通过强化才能在实际中得以使用,在新水泥浆体(新砂浆)中掺入掺合料改性作为有效手段常被采用。偏高岭土较其他矿物掺合料而言,对水泥水化过程的影响更为明显^[3]:①加快水泥水化效应,偏高岭土中的六配位铝转化成四配位铝,这些无定形 SiO_2 和 Al_2O_3 能与硅酸盐水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,促进水泥进一步水化,提高混凝土的早期和后期强度。②填充效应,细磨的偏高岭土颗粒会填充水泥颗粒之间的间隙^[4-5];水化反应生成具有填充效应的 C-S-H(水化硅酸钙)及 C-A-H(水化铝酸钙)等物质,使混凝土形成密实充填结构和细观层次自紧密堆积体系^[6-7]。③火山灰效应,偏高岭土与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水在常温条件下产生水化反应生成具有胶凝性质的水化产物,促进 AFt(钙矾石)与 C-S-H 的生成^[8-9];且水泥水化时,偏高岭土中的活性铝与活性硅与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 和 C-A-H 等水化产物,进一步增强了混凝土密实度,改善了混凝土耐久性能^[10]。HOMAYOONMEHR 等^[11]指出,偏高岭土按一定比例掺入可以显著提高混凝土早期强度。曾俊杰等^[12]的研究表明在偏高岭土替代率不超过 12%时, Cl^- 渗透性随替代比例的增加而减小。在海水侵蚀方面,针对 Cl^- 、 SO_4^{2-} 侵蚀 RAC(再生骨料混凝土)已开展了研究,并取得了一定成果。ZHANG 等^[13]将混凝土浸泡于不同浓度的 Na_2SO_4 溶液中,发现 Na_2SO_4 溶液浓度不同,硫酸盐侵蚀机理不同。李涛等^[14]发现浸泡于侵蚀离子溶液的混凝土中,侵蚀离子含量随离子扩散时间同比上升。SUN 等^[15]通过背散射技术观察到,混凝土中 SO_4^{2-} 浓度在浸泡 20 d 内快速上升。另外在干湿循环作用下,CHEN、陈旭鹏等^[16-17]研究发现,掺入掺合料能显著改善混凝土密实度,并提高混凝土的抗侵蚀性能。

过往研究针对于真实海洋环境暴露下的研究较少,大多数为室内模拟暴露实验,故本文突出海洋真实环境,对再生混凝土掺入偏高岭土进行改善,来强化界面抵抗海水侵蚀的能力,研究不同暴露周期下再生混凝土不同界面抵抗海水侵蚀的能力,来更有针对性地对再生混凝土界面进行改善,以提高再生混凝土在实际海洋环境下的服役能力。

1 实验

1.1 实验方案

本研究以偏高岭土为掺合料进行再生混凝土的制备,水灰比为 0.43,配合比如表 1 所示。于小麦岛(青岛市区东南部海域)进行实海暴露实验,暴露龄期分别为 130、260 d,以此对实海暴露环境下偏高岭土改性再生混凝土界面劣化行为演变进行研究。

表 1 再生骨料混凝土配合比设计

	kg/m ³				
样品	水	水泥	再生粗骨料	细骨料	掺合料
M0	175	406.9	1098.1	720	0
MK4	175	390.6	1098.1	720	16.3
MK7	175	378.4	1098.1	720	28.5
MK10	175	366.2	1098.1	720	40.69

注: M0 为对照组; MK4、MK7、MK10 分别代表偏高岭土掺量为 4%、7%、10%。

1.2 实验方法

1.2.1 抗压强度测试

根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测定再生混凝土在标准养护龄期 28 d、暴露龄期 130 d、暴露龄期 260 d 的抗压强度。

1.2.2 显微硬度测试

显微硬度能够表示不同界面微观强度以及裂缝宽度,以此来评价再生混凝土界面微观性能。取各龄期试件进行切片处理,采用不同目数砂纸进行打磨并抛光。试件制备完成后采用显微硬度仪进行再生混凝土显微硬度测试。

1.2.3 背散射测试和扫描电镜测试

取各龄期试样切片,采用无水乙醇浸泡终止其水化进程,并进行烘干处理。进行打磨抛光、环氧树脂固化等完成试样制备,采用背散射技术进行孔隙率计算。采取自然断面作为扫描电镜试件进行扫描电子显微镜观察。

2 结果分析

2.1 抗压强度

抗压强度是混凝土力学性能的基本指标,代表了材料抵抗外来破坏的能力,是耐久性的基本参数之一。图 1 为偏高岭土掺量以及暴露龄期对再生混凝土抗压强度的影响。

由图 1 可以看出,偏高岭土对再生混凝土具有明显的改善作用,按照 4%、7%、10% 的掺量,经过标准条件养护 28 d 后,抗压强度分别较对照组提升了 11.1%、19.4%、8.3%,这是由于偏高岭土内部有大量的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 ,这些活性物质能够快速地与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,从而大幅度地改善混凝土的强度^[17-19]。另外随着暴露龄期的增加,抗压强度均出现先增加后降低的趋势。这可能是在早期侵蚀阶段,侵蚀反应在 ITZ(界面过渡区)中发生,有助于填充孔隙和微裂纹,从而产生有益的填充效应,使 ITZ 致密化并增强。随着时间的推移,AFt 或石膏引起的膨胀导致孔壁或裂缝壁的压力增大。当压力超过黏结剂强度时,产生新的裂纹并扩展,最终导致再生混凝土耐久性能恶化。

2.2 显微硬度

图 2—4 为 RAC 中所含 3 种界面过渡区在海洋环境下显微硬度的演变情况。ITZ_{XS-LG} 代表新砂浆-骨料界面,ITZ_{LS-LG} 代表旧砂浆-骨料界面,ITZ_{XS-LS} 代表新砂浆-旧砂浆界面。

2.2.1 新砂浆-骨料界面

由图 2 可知,未暴露前,MK 组 ITZ_{XS-LG} 较 M0 组显微硬度平均增加 10.2%、15.3%、5.1%,界面区宽度平均减少 8.7%、12.5%、2.5%,这证明加入偏高岭土能够明显改善再生混凝土界面性能。暴露 130 d 后,MK 组 ITZ_{XS-LG} 较 M0 组显微硬度平均增加 8.5%、14.2%、6.7%,界面区宽度平均减少 11.3%、17.2%、5.7%,这说明暴露 130 d 后,在海水攻击和水泥水化持续进行的耦合作用下,水泥水化的增幅作用大于海水攻击的侵蚀损耗,显微硬度较未暴露前呈增长趋势。暴露 260 d 后,MK 组 ITZ_{XS-LG} 较 M0 组显微硬度平均减少 9.7%、12.6%、3.1%,界面区宽度平均增加 3.8%、12.6%、3.8%,这说明暴露 260 d 后,在海水攻击和水泥水化持续进行的耦合作用下,海水攻击的侵蚀损耗已大于水泥水化的增幅作用,显微硬度明显呈下降趋势,另外可以注意到,M0 标准组界面过渡区显微硬度下降显著,这可能与高孔隙率

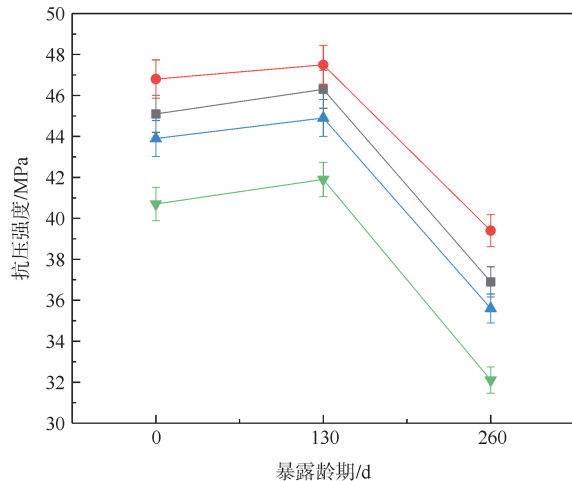


图 1 暴露龄期内偏高岭土改性再生混凝土抗压强度

—▼— M0; —■— MK4; —●— MK7; —▲— MK10

以及较多裂缝有关。

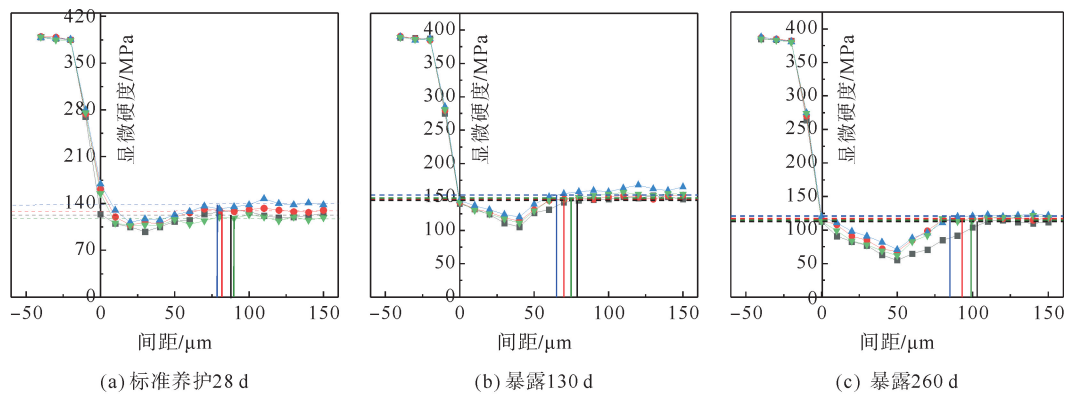


图 2 新砂浆-骨料界面显微硬度
 —■—M0; —●—MK4; —▲—MK7; —▼—MK10

2.2.2 旧砂浆-骨料界面

由图 3 可知,未暴露前,MK 组 ITZ_{LS-LG} 较 M0 组显微硬度平均增加 5.6%、8.4%、2.8%,界面区宽度平均减少 10.5%、11.7%、7.1%,这证明加入偏高岭土能够改善再生混凝土界面性能,但改善效果不如新砂浆-骨料界面明显。暴露 130 d 后,MK 组 ITZ_{LS-LG} 较 M0 组显微硬度平均增加 10.9%、14.2%、5.3%,界面区宽度平均减少 3.7%、11.2%、2.5%,显微硬度呈现较未暴露前呈增长趋势,但不如新砂浆-骨料界面增幅明显,这可能是由于旧砂浆在长期的服役过程中,水化程度高,缺少合成膨胀性产物的原料导致。可以看出,在暴露前期阶段,旧砂浆-骨料界面面对海水冲击较新砂浆-骨料界面有着更好的稳定性。暴露 260 d 后,MK 组 ITZ_{LS-LG} 较 M0 组显微硬度平均增加 9.6%、14.8%、4.8%,界面区宽度平均减少 5.4%、8.1%、2.7%,可以看出在暴露 260 d 后,旧砂浆-骨料界面较新砂浆-骨料界面力学性能劣化更为显著。

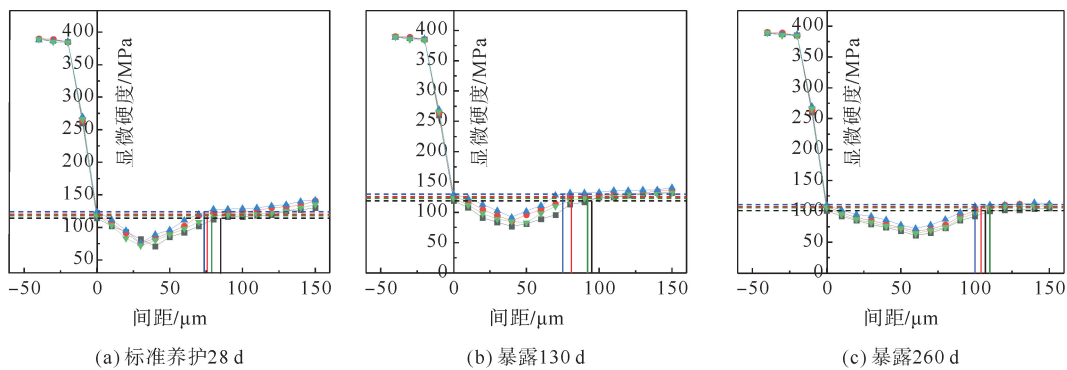


图 3 旧砂浆-骨料界面显微硬度
 —■—M0; —●—MK4; —▲—MK7; —▼—MK10

2.2.3 新砂浆-旧砂浆界面

由图 4 可知,未暴露前,MK 组 ITZ_{XS-LS} 较 M0 组显微硬度平均增加 10.1%、15.2%、5.2%,界面区宽度平均减少 4.9%、8.9%、3.9%,但呈现出比其他两个界面更小的显微硬度值。暴露 130 d 后,MK 组 ITZ_{XS-LS} 较 M0 组显微硬度平均增加 9.7%、15.1%、8.3%,界面区宽度平均减少 7.7%、13.5%、4.8%,但仍比其他两个界面存在更大的界面区宽度。暴露 260 d 后,MK 组 ITZ_{XS-LS} 较 M0 组显微硬度平均增加 9.2%、12.3%、4.6%,界面区宽度平均减少 8.1%、15.1%、4.4%。在这个时期,显微硬度值较其他两个界面有着更大程度的损耗。随着龄期的增加,旧砂浆的劣化程度大于新砂浆。

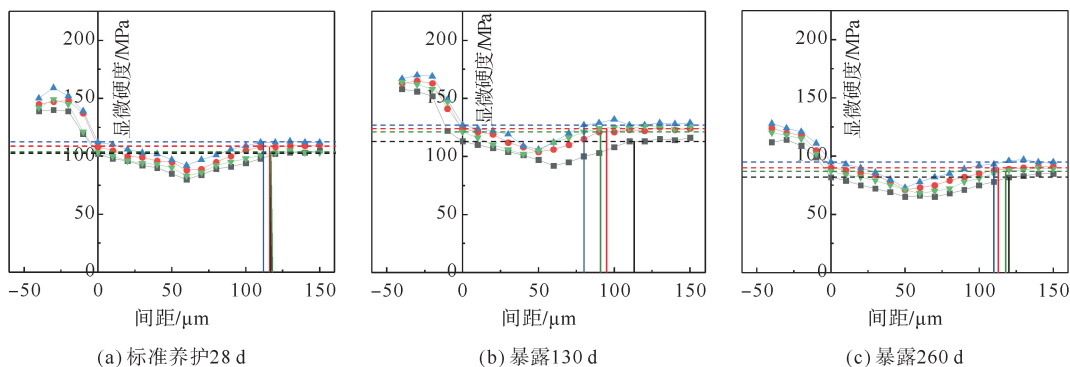


图4 旧砂浆-新砂浆界面显微硬度
 —■—M0; —●—MK4; —▲—MK7; —▼—MK10

2.3 界面区孔隙率

为分析比较再生混凝土 ITZ 疏松程度,以 BSE 图像同心膨胀法^[20]计算 ITZ 孔隙率,如图 5(a)所示,首先选取包含 ITZ 的图像,标记骨料砂浆界面。然后如图 5(b)所示,以 10 μm 为间距计算骨料边界不同距离处的孔隙率。图中左边暗色区域为水泥浆体,红色区域表示孔隙。

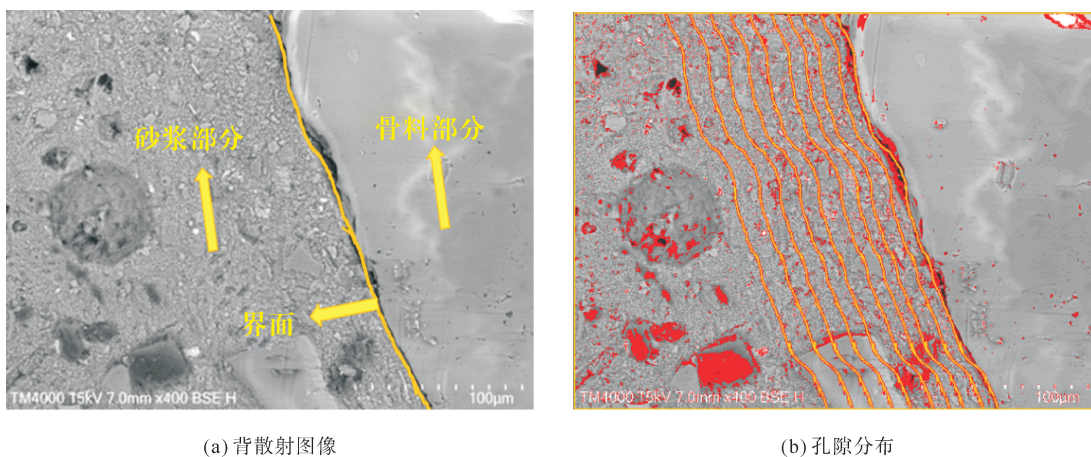


图5 同心膨胀法

由于新砂浆-旧砂浆的特殊性,分析暴露龄期对于其界面孔隙率的影响,结果如图 6 所示。

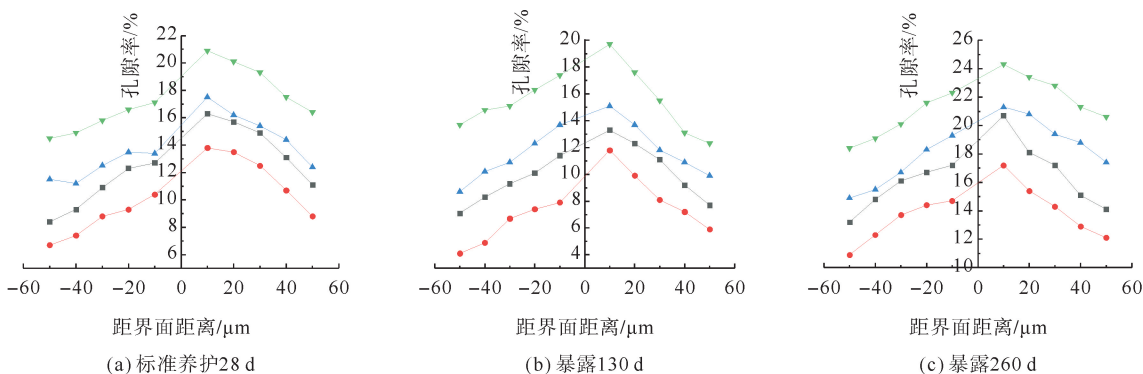


图6 新砂浆-旧砂浆界面孔隙率
 —▼—M0; —■—MK4; —●—MK7; —▲—MK10

未暴露前,新砂浆的孔隙率高于旧砂浆,这可能是由于新砂浆水化进程还未进行完全,而再生骨料表面上残余的旧砂浆部分已服役多年,所以水化程度较新砂浆要高得多。可以看出,偏高岭土对再生混凝土孔隙率有着明显的提升作用,随着用量增加,孔隙率减少,这也与显微硬度进一步对应。但过量的掺入,不会造成明显的增益效果甚至会加大孔隙率。

暴露 130 d 后,由于膨胀反应的增益作用主要发生在新砂浆部分,且随着新砂浆部分水化进程的不断进行,可以看出新砂浆部分孔隙率较标准养护 28 d 的进一步减小,造成较大波动,而旧砂浆孔隙率波动相对来说较小,这说明在海水侵蚀初期,旧砂浆-骨料界面有着更加稳定的性能。因此,在硫酸盐侵蚀下的早期膨胀是有益的,因为它有助于填充孔隙或微裂纹,以提高这些 ITZ 的密度。这与暴露 130 d 之前,界面区的显微硬度随着暴露龄期的增加而增加的结果相对应。同时,ITZ 与相邻材料相如骨料或砂浆之间的显微硬度差异减小。

暴露 260 d 后,新旧砂浆孔隙率均呈现增加的结果,这是因为此时的海水侵蚀破坏作用远大于水泥水化的增益作用,且从图 6(c)可以看出旧砂浆部分较新砂浆有着更明显的下降波动幅度,即旧砂浆表现出较差的抵抗能力。这可能是由于旧砂浆在母混凝土结构中已经服役了多年,在硫酸盐攻击之前,旧砂浆很可能存在许多初始缺陷,如微裂缝或损坏的孔隙。侵蚀反应往往发生在这些缺陷内部,因为离子运输更容易,而且可能更有利于侵蚀产物如 AFt、石膏和硫酸钠晶体的成核位置的生成。在较长的暴露龄期时,当这些侵蚀产物膨胀产生的拉应力超过墙体水泥黏结剂的抗拉强度时,微裂缝会迅速发展为细观微裂缝,从而大大削弱老砂浆的密度和力学性能。因此,在较长的暴露龄期下,旧砂浆比新砂浆表现出较差的抗侵蚀性能。

对于新砂浆-骨料界面、旧砂浆-骨料界面,随着暴露龄期的进行,孔隙率也呈先降低后增加的趋势。与新砂浆-旧砂浆界面相同的是,附着于旧砂浆-骨料界面上的旧砂浆也表现出较差的抗侵蚀性能。

2.4 界面区微观形貌

以新砂浆-旧砂浆界面为例,各暴露龄期界面微观形貌如图 7—9 所示。

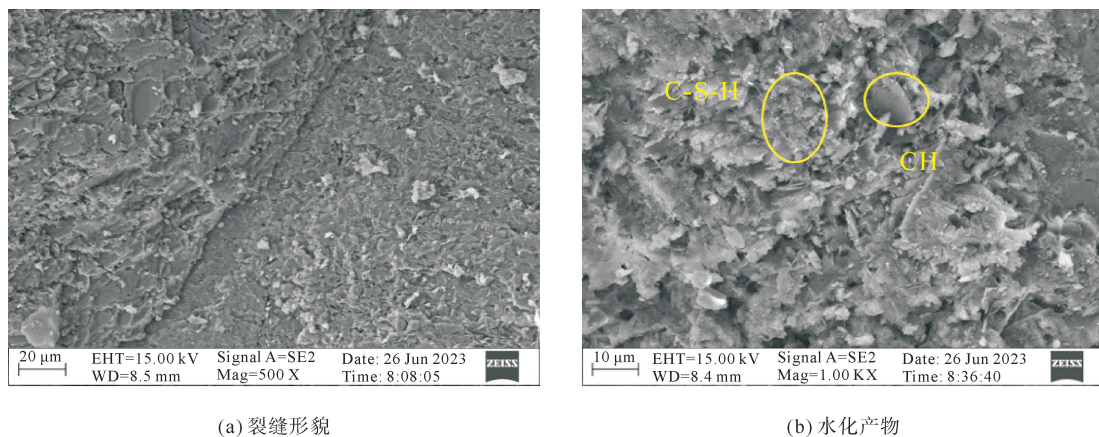


图7 标准养护 28 d 界面区微观形貌及水化产物分布

与 28 d 标准养护龄期相比,暴露 130 d 龄期的再生混凝土 ITZ 水化更为充分,结构密实程度更高,其中的孔隙和裂缝被水化产物填充。随着时间的推移,暴露 260 d 龄期的再生混凝土 ITZ 因长时间受到海水侵蚀,可清楚地看到界面充斥着孔隙,并存在较大裂缝。在长达数十年的使用中,ITZ_{LS1G} 中水泥几乎完全水化,这是导致其微观结构比 ITZ_{XS1G} 致密的主要原因。在 ITZ_{LS1G} 中很少观察到 CH 晶体,在长达几十年的使用中,由于母混凝土中存在火山灰物质,CH 可能会被火山灰反应消耗掉。

ITZ 被广泛认为是再生混凝土中的薄弱环节,这主要归因于再生骨料表面残余的旧砂浆部分本就在大量毛细管空隙,与新水泥浆体相比,存在更多的微裂缝。在早期暴露龄期(130 d),侵蚀反应在 ITZ 中发生,有助于填充孔隙和微裂纹,从而产生有益的填充效应,使 ITZ 致密化并增强。这与显微硬度较 28 d

呈现提升趋势相对应。随着时间的推移,界面结构出现大量的裂缝,AFt 或石膏等膨胀性水化产物引起的膨胀及生长会导致再生混凝土耐久性性能恶化,所以到暴露 260 d 时,界面变得粗糙并有大量裂缝,这与显微硬度大幅度下降变化相对应。

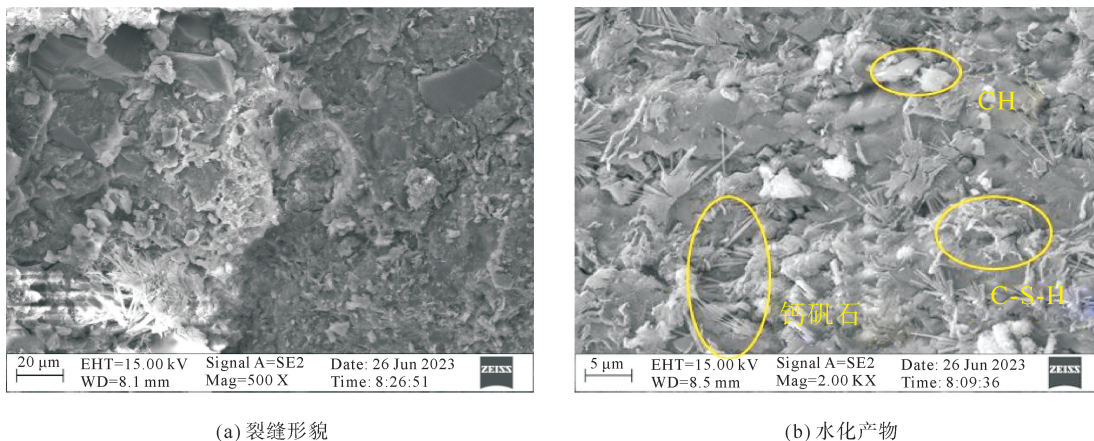


图8 暴露 130 d 界面区微观形貌及水化产物分布

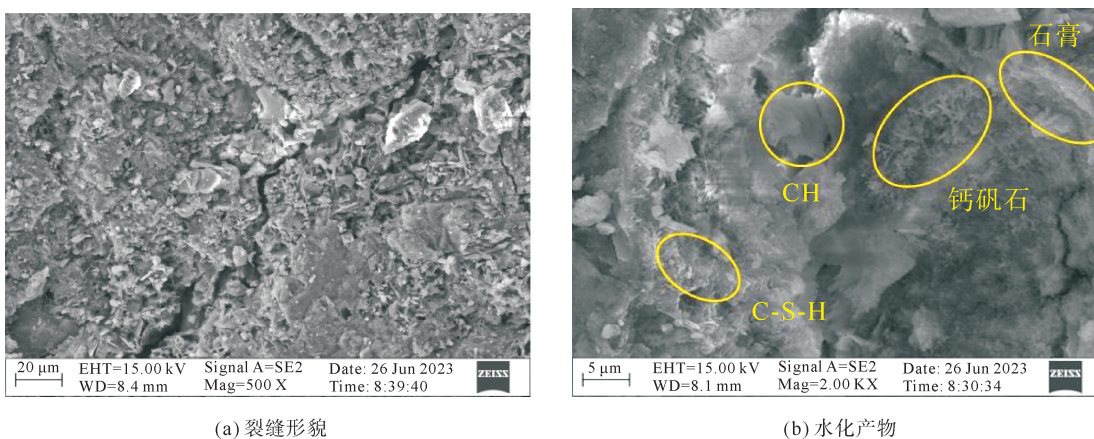


图9 暴露 260 d 界面区微观形貌及水化产物分布

3 演变规律原因分析

由于 ITZ_{LS-LG} 已有几十年的历史,所以可能很少有 CH 和 C_3A (铝酸三钙)包含在其中。此外,由于 ITZ_{LS-LG} 的骨架比其他两种 ITZ 更致密,所以穿透到 ITZ_{LS-LG} 的 SO_4^{2-} 数量可能也比穿透到 ITZ_{XS-LG} 和 ITZ_{XS-LS} 的要少。由于 C_3A 和 SO_4^{2-} 的稀缺性,侵蚀反应的强度和速率可能会降低,从而导致在 ITZ_{LS-LG} 中产生的膨胀侵蚀产物比在 ITZ_{XS-LG} 和 ITZ_{XS-LS} 中更少。通过这种方式,在 ITZ_{LS-LG} 中既延缓了早期有利的填充效应,也延缓了后期由于侵蚀产物膨胀而产生的有害影响。因此, ITZ_{LS-LG} 在暴露于硫酸盐侵蚀和干湿循环时,能更好地抵抗膨胀引起的张力,并能维持更长的时间。由于在新旧砂浆界面处的黏结比 ITZ_{XS-LG} 更好, ITZ_{XS-LS} 中产生的拉伸应变可能会被相邻的新旧水泥基质部分平衡,这也是 ITZ_{XS-LS} 在长期硫酸盐暴露下表现略好于 ITZ_{XS-LG} 的另一个可能原因。

因此,新的 ITZ_{XS-LG} 和 ITZ_{XS-LS} 以及再生骨料表面残留的旧砂浆部分应被确定为外部硫酸盐攻击的微观弱相。如果使用不同来源的再生骨料或设置不同的水灰比,各 ITZ 在抗硫酸盐性能方面的比较可能会有很大的不同。但同样值得注意的是,RAC 在抵御外部硫酸盐攻击方面存在的初级弱相取决于不同类型的 ITZ 之间的相对质量,如孔径、孔隙率、渗透性和强度,这可能受到母材混凝土的原始性能、RAC 的水

灰比、混合方式和养护条件等的显著影响。

4 结论

1) 在标准养护条件下,偏高岭土的掺入对于再生混凝土性能有着明显的提升效果。按照4%、7%、10%的掺量,28 d再生混凝土抗压强度分别较对照组提升了11.1%、19.4%、8.3%。在水泥水化初期,掺合料对于新ITZ(界面过渡区)的改善效果要明显大于旧ITZ,且随着龄期的增长,新ITZ的填充效果大于旧ITZ。

2) 随着暴露龄期的增加,在暴露130 d时,由于AFt(钙矾石)或石膏等膨胀性产物填充了孔隙与裂缝,显微硬度达到峰值。在暴露260 d时,随着时间的推移,AFt或石膏等引起的膨胀导致孔壁或裂缝壁的压力增大。当压力超过黏结剂强度时,产生新的裂纹。之后,由于裂纹扩展,导致再生混凝土耐久性能恶化,显微硬度呈现明显的下降趋势。孔隙率呈现与显微硬度负相关的趋势。

3) 在实海暴露过程中,各界面均有不同程度的损坏,根据实验结果得出改性再生混凝土中的薄弱部位为新砂浆-旧砂浆界面以及再生骨料表面附着的旧砂浆部分。针对薄弱界面进行强化可以更好地提高再生混凝土在海洋环境下的服役能力。

参考文献(References):

- [1] 张志刚. 海洋强国战略中建筑材料的应用探讨[J]. 中国建材科技, 2017, 26(2): 17-19.
ZHANG Zhigang. Discussion on application of building materials in marine power strategy[J]. China Building Materials Science & Technology, 2017, 26(2): 17-19.
- [2] 常洪雷, 陈繁育, 金祖权, 等. 再生骨料混凝土在护岸工程应用的可行性[J]. 材料导报, 2020, 34(S2): 1206-1211.
CHANG Honglei, CHEN Fanyu, JIN Zuquan, et al. Feasibility of utilizing recycled aggregate concrete for revetment engineering[J]. Materials Reports, 2020, 34(S2): 1206-1211.
- [3] 张明明, 王社良, 张世民, 等. 矿物掺合料对再生混凝土力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1505-1511.
ZHANG Mingming, WANG Sheliang, ZHANG Shimin, et al. Effect of mineral admixture on the mechanical properties of the recycled concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(5): 1505-1511.
- [4] 莫宗云, 高小建. 偏高岭土改性混凝土的耐久性研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(15): 115-119.
MO Zongyun, GAO Xiaojian. Research progress on durability of metakaolin-modified concrete[J]. Materials Review, 2017, 31(15): 115-119.
- [5] 耿海宁. 偏高岭土改性海工混凝土的若干问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
GENG Haining. Research on some aspects of metakaolin-modified marine concrete for marine engineering[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [6] 刘沛, 姚素玲, 董宪姝, 等. 矿物掺合料透水混凝土微观结构及性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(7): 2504-2512.
LIU Pei, YAO Suling, DONG Xianshu, et al. Microstructure and performance analysis of pervious concrete with mineral admixtures[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(7): 2504-2512.
- [7] 杜渊博, 葛勇. 偏高岭土、玻璃粉和石灰石粉对水泥石微观结构和性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8): 773-780.
DU Yuanbo, GE Yong. Effects of metakaolin, glass powder and limestone filler on microstructure and properties of cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8): 773-780.
- [8] 王家滨, 侯泽宇, 张凯峰, 等. 再生混凝土高浓度 $Mg^{2+}-SO_4^{2-}-Cl^-$ 复合盐侵蚀耐久性[J]. 材料导报, 2022, 36(23): 73-83.
WANG Jiabin, HOU Zeyu, ZHANG Kaifeng, et al. Durability of recycled aggregate concrete subjected to high concentration $Mg^{2+}-SO_4^{2-}-Cl^-$ compound salts[J]. Materials Reports, 2022, 36(23): 73-83.
- [9] 周建伟, 李辉, 郑伍魁, 等. 掺粉煤灰和偏高岭土对高强混凝土不同温度下力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3952-3958.
ZHOU Jianwei, LI Hui, ZHENG Wukui, et al. Effect of fly ash and metakaolin mixture on mechanical properties of high-strength concrete at different temperatures[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(12): 3952-3958.
- [10] BADOGIANNIS E, KAKALI G, DIMOPOULOU G, et al. Metakaolin as a main cement constituent; Exploitation of poor Greek kaolins[J]. Cement and Concrete Composites, 2005, 27(2): 197-203.

- [11] HOMAYOONMEHR R, RAMEZANIANPOUR A A, MIRDARSOLTANY M. Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 44:103011.
- [12] 曾俊杰, 王胜年, 范志宏, 等. 偏高岭土改善海工混凝土抗氯离子侵蚀性的效果及机理[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(4):22-28.
ZENG Junjie, WANG Shengnian, FAN Zhihong, et al. Improvement effect and mechanism of metakaolin on marine concrete chloride penetration resistance[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(4):22-28.
- [13] ZHANG H, JI T, LIU H. Performance evolution of recycled aggregate concrete (RAC) exposed to external sulfate attacks under full-soaking and dry-wet cycling conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248:118675.
- [14] 李涛, 朱鹏涛, 张彬, 等. 硫酸盐侵蚀下混凝土内腐蚀反应-扩散过程的实验研究[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(1):50-55.
LI Tao, ZHU Pengtao, ZHANG Bin, et al. Experimental study on corrosion reaction-diffusion process of concrete under sulfate attack[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(1):50-55.
- [15] SUN D, WU K, SHI H, et al. Effect of interfacial transition zone on the transport of sulfate ions in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192:28-37.
- [16] CHEN Y, GAO J, TANG L, et al. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106:650-658.
- [17] 陈旭鹏, 庞建勇. 偏高岭土对混凝土抗复合盐侵蚀性能的研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(1):78-80.
CHEN Xupeng, PANG Jianyong. Study on the resistance of metakaolin to composite salt erosion of concrete[J]. *Non-Metallic Mines*, 2021, 44(1):78-80.
- [18] 莫宗云, 刘益良, 王大光, 等. 偏高岭土-水泥基材料力学性能研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(3):911-917.
MO Zongyun, LIU Yiliang, WANG Daguang, et al. Research progress on the physical properties of cement-based materials blended with metakaolin[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(3):911-917.
- [19] 曹芙波, 魏子洋, 王晨霞, 等. 稻壳灰与偏高岭土掺料对再生混凝土性能的影响[J]. *工业建筑*, 2021, 51(4):167-171.
CAO Fubo, WEI Ziyang, WANG Chenxia, et al. Effects of rice husk ash and metakaolin admixture on the properties of recycled concrete[J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(4):167-171.
- [20] WONG H, BUENFELD N. Patch microstructure in cement-based materials: Fact or artifact? [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(5):990-997.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)