

硫酸盐介质腐蚀混凝土灌注桩的质量与强度演变

姚明博^{1,2}, 李镜培^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为模拟混凝土灌注桩在硫酸盐渍土环境中侵蚀劣化规律, 开展了现浇混凝土试件硫酸盐侵蚀试验, 并研究了现浇混凝土试件硫酸盐侵蚀劣化机制. 与预制混凝土试件劣化机制进行对比, 分析现浇混凝土试件与预制混凝土试件硫酸盐侵蚀劣化的异同. 分析水灰比、硫酸盐溶液浓度对现浇混凝土试件耐久性的影响, 通过质量变化率、抗压强度相对值分析现浇混凝土试件劣化规律. 结果表明: 混凝土质量和抗压强度均呈现先增加后减少的趋势; 同一条件下, 现浇混凝土试件最先出现了质量和强度损失, 损失率分别为 0.4% 和 15%; 硫酸盐溶液浓度的增加对现浇混凝土试件劣化规律不明显, 而混凝土水灰比越大, 现浇混凝土试件更易趋于劣化.

关键词: 混凝土灌注桩; 硫酸盐侵蚀; 抗压强度; 质量损失

中图分类号: TU528

文献标志码: A

Evolution of Mass and Strength of Concrete Cast-in-situ Piles Under Sulfate Medium Attack

YAO Mingbo^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To simulate the degradation of cast-in-situ piles exposed to sulfate saline soil environments, a corrosion experiment of cast-in-situ specimen was conducted. The deterioration mechanism of fresh concrete specimen was studied. The difference of deterioration mechanism between precast concrete specimen and fresh concrete specimen was analyzed with comparison experiments. The effect of water-cement ratio and concentration of sulfate solution on the durability of cast-in-situ concrete specimen was analyzed. The mass change rate and the relative value of compressive strength were used to quantify the degradation rule of fresh concrete specimen. The results show that both the concrete mass and the compressive strength increases firstly and then

decreases. In the same condition, the fresh concrete specimen is the first to show the mass and compressive strength loss. The loss rate is 0.4% and 15%, respectively. The increase of sulfate concentration has not obvious effect on the degradation law of the fresh concrete specimen. However, with the water-cement ratio increases, the fresh concrete specimen is prone to deterioration.

Key words: cast-in-situ pile; external sulfate attack; compressive strength; mass loss

硫酸盐广泛存在于土壤、地下水、海水及由人类生产生活过程产生的废水中, 处于硫酸盐环境中的水利工程、房屋建筑、交通设施、地下基础工程及管线等, 易产生硫酸盐侵蚀问题, 进而影响混凝土结构的耐久性, 甚至导致混凝土结构在短时间内破坏. 目前, 针对混凝土硫酸盐侵蚀劣化的试验研究集中于混凝土抗硫酸盐侵蚀问题^[1-2]. 在混凝土材料因素方面, Shanahan 等^[3]、Kunther 等^[4]研究了水泥中硅酸三钙含量、胶凝材料中钙硅率对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响. 另外, 混凝土中外掺活性材料诸如粉煤灰、火山灰等有助于提高混凝土抗硫酸盐侵蚀性能^[5-8]. 在掺量 30% (质量分数) 的范围内, 镍铁渣粉掺量的增加有助于提升混凝土抗硫酸盐侵蚀性能, 但增强效果不及高炉矿渣粉, 尤其在掺量较大的情况下^[9]. 在混凝土配合比方面, 水灰比、胶砂比等因素对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响显著^[10-11]. 在混凝土所处环境方面, Ouyang 等^[12]揭示了硫酸盐溶液浓度对混凝土表面硬化衰减影响较大. 方祥位等^[13]认为提高养护温度、缩短养护时间可以加快硫酸盐侵蚀速度.

在混凝土硫酸盐侵蚀劣化效应方面, 主要基于加速侵蚀试验, 通过混凝土膨胀应力、混凝土微观结构、侵蚀产物、质量损失、抗压强度损失率等指标评

收稿日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(41772290)

第一作者: 姚明博(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为桩基础耐久性. E-mail: supersonic3035@qq.com

通信作者: 李镜培(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程耐久性. E-mail: lij2773@tongji.edu.cn

价混凝土在硫酸盐环境中的耐久性能. Santhanam 等^[14]定期监测水泥砂浆的长度、质量和抗压强度,并分析钙矾石、石膏和氢氧化钙的相对数量以及微观结构. Bassuoni 等^[15]认为纳米铝会使孔隙结构变大,纳米硅则使混凝土过于密实而导致混凝土承受更高的内部结晶压力. Müllauer 等^[16]通过测量硫酸盐侵蚀薄壁水泥砂浆产生的应力得出,在 10~50 nm 的孔隙中产生的钙矾石形成了高达 8 MPa 的应力,超过水泥基材料的抗拉强度而产生破坏. Hossain^[17]通过定期测量质量损失和极化电阻以评价混凝土的劣化. 赵力等^[18]和刘娟红等^[19]通过分析不同时期混凝土的抗压强度和重量等,评价地下复杂环境中受侵蚀混凝土的损伤与劣化性能. 张敬书等^[20]基于混凝土硫酸盐侵蚀抗压强度损失率的概念,提出抗压强度耐蚀系数以评价混凝土的劣化规律.

通过上述研究得到的硫酸盐环境中混凝土劣化规律以及抗硫酸盐侵蚀性能设计、评价指标、劣化宏观机理,为现有混凝土材料或结构在硫酸盐环境中的耐久性能提供分析依据和理论基础,加深对现浇与预制混凝土硫酸盐侵蚀破坏的认识. 然而,灌注桩施工、养护、服役整个生命周期均处于腐蚀环境中,尤其是桩身混凝土在凝结硬化前直接与腐蚀介质接触,其腐蚀过程和劣化规律与预制结构有显著不同. 因此,上述预制混凝土试验研究所得的硫酸盐侵蚀劣化规律用于硫酸盐环境中混凝土灌注桩的耐久性分析与评价已不再准确.

对于硫酸盐介质腐蚀灌注桩的研究,是基于现场混凝土桩体钻心取样的室内抗硫酸盐试验^[21],并没有反映现场浇筑后混凝土桩在硫酸盐环境中的劣化规律. 对于盐渍土强腐蚀环境下的桩基混凝土强度研究^[22],采用的试验方法也是基于标准养护下的混凝土试件,忽略了灌注桩混凝土流塑性状态时的抗硫酸盐侵蚀性能.

本文针对混凝土灌注桩成型到服役阶段的腐蚀特点,进行人工模拟腐蚀环境中灌注桩混凝土侵蚀试验,考虑了灌注桩混凝土成型过程中接触硫酸盐侵蚀介质. 同时,借鉴预制混凝土抗侵蚀试验设计方法,分析水灰比、硫酸盐溶液浓度对混凝土灌注桩耐久性能的影响,通过质量变化率、抗压强度相对值等指标分析混凝土灌注桩劣化规律. 研究混凝土灌注桩在硫酸盐侵蚀介质中的腐蚀效应,有助于评价硫酸盐侵蚀灌注桩耐久性能及预测其剩余寿命,为混凝土灌注桩的修复决策提供理论依据,具有重要的

理论意义和应用价值.

1 试验概况

1.1 试验材料与配合比

试验用水泥为江苏太仓生产的海螺牌 32.5R 复合硅酸盐水泥;粗骨料为碎石,最大粒径为 16 mm;细骨料为河砂,细度模量为 2.6. 根据《混凝土用水标准》^[23]规定,养护用水和拌合用水的指标相同,素混凝土拌合用水水质要求为:水中氯离子质量浓度不超过 3 500 mg·L⁻¹,水中硫酸根离子质量浓度不超过 2 700 mg·L⁻¹. 通过离子选择电极法对上海(实验室)自来水中的氯离子质量浓度进行测定,质量浓度为 33 mg·L⁻¹,同理水中硫酸盐质量浓度通过浊度法测试,质量浓度为 41 mg·L⁻¹,符合混凝土拌合用水及养护用水要求,因此本试验中混凝土试件的拌合、养护和浸泡用水均可直接采用本地自来水. 硫酸盐为沪试牌无水硫酸钠,为分析纯级,由国药集团化学试剂有限公司生产. 不同水灰比下混凝土配合比如表 1 所示.

表 1 不同水灰比下混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of concrete at different water-cement ratios

水灰比	水泥密度/ (kg·m ⁻³)	水密度/ (kg·m ⁻³)	粗骨料密度/ (kg·m ⁻³)	细骨料密度/ (kg·m ⁻³)
0.400	400	160	1 275	600
0.485	360	175	1 235	635
0.550	340	187	1 200	680

1.2 试验方案

ASTM C1012/C1012M-12 和我国《水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法》中均规定,受侵蚀混凝土水灰比为 0.485,并且混凝土经过标准养护^[24-25]. 张敬书等^[20]进行的硫酸盐侵蚀试验研究中,经过标准养护的混凝土的水灰比采用 0.40、0.50、0.55. 将预制混凝土硫酸盐侵蚀试验的水灰比设计作为本试验的间接参考依据,考虑水灰比对硫酸盐扩散侵蚀的影响,取水灰比为 0.400、0.485、0.550.

在国内外规范中,对腐蚀溶液均建议采用质量分数 5% 的硫酸钠溶液^[24-25]. 方祥位等^[13]研究硫酸盐质量分数对混凝土硫酸盐侵蚀速率的影响时,腐蚀溶液采用了质量分数 2.5%、5.0%、15.0% 和饱和硫酸钠溶液. 在混凝土干湿循环与硫酸盐侵蚀试验中,腐蚀溶液采用的是质量分数 10% 的硫酸钠溶液^[26-27],也有采用质量分数 5% 的硫酸钠溶液^[28]. 因此,本试验中硫酸钠质量分数分别取 5%、10%、

15%,以研究不同质量分数硫酸盐溶液对混凝土侵蚀的影响。

根据灌注桩的几何特点,试件的尺寸采用圆柱体试件 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。对于预制混凝土试件,将其放入标准养护室 24 h 后脱模,脱模后置于养护室(温度 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,湿度 95%)中 28 d;对于现浇混凝土试件,直接置于常温室 24 h 后脱模,脱模后置于硫酸盐溶液中。

硫酸盐进入及新产物生成、混凝土损伤使混凝土的质量和抗压强度发生变化,因此混凝土质量变化率与抗压强度损失率是评价混凝土受侵蚀损伤的 2 个常用指标^[14, 29-31]。将混凝土试件分别经过 4 个侵蚀龄期(30、90、180、270 d)后取出,擦干试件表面水分,放入 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥 24 h,然后进行质量和抗压强度测试。混凝土试件抗压强度试验按照普通混凝土力学性能试验方法标准^[32]进行,加载前测量试件 2 个垂直方向的直径以及 2 个直径端部的 4 个高度。当试件上表面与上承压板接触均衡时,采用 $150 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$ 的加载速度;当试件接近破坏、开始迅速变形时,记录破坏荷载。经测量,待测混凝土试件直径和高度的尺寸公差不超过 1 mm,满足规范^[32]要求。抗压强度值按照普通混凝土力学性能试验方法标准^[32]进行计算,计算结果精确到 0.1 MPa。

采用精度为 0.1 g、量程为 7.5 kg 的 APTP457A 型电子天平对试件称量,试件抗压强度测试采用 YE-1850 型液压式压力试验机,量程为 2 000 kN。试件几何尺寸采用游标卡尺测量,量程为 300 mm,分度值为 0.02 mm。

2 试验结果分析

2.1 质量变化规律

现浇混凝土试件经过硫酸盐溶液 270 d 的腐蚀,其外观经历从完整到轻微剥落,直至整个侵蚀面剥蚀的一系列损伤变化,同时伴随着质量的改变。因此,可采用质量变化率对混凝土试件侵蚀过程进行量化分析,当损失率达到 5% 及以上时,依据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》^[33]判定为损伤失效。混凝土试件质量变化率按下式进行计算:

$$\Delta m = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δm 为一定侵蚀龄期混凝土试件质量变化率,%; m_0 为同批未腐蚀 3 个混凝土试件质量平均值,g; m_t 为腐蚀后任一龄期的混凝土试件质量,g。

Δm 为正时,表示质量增加; Δm 为负时,表示质量损失。

2.1.1 溶液质量分数

图 1 为水灰比 0.400 时,不同硫酸盐溶液质量分数下,现浇和预制混凝土试件的质量变化率曲线。从图 1 可以看出,腐蚀前期混凝土试件质量总体呈增长趋势,现浇混凝土试件质量的最大增长幅度为 2.05%,预制混凝土试件质量的最大增长幅度为 3.02%。在侵蚀龄期 180 d 后,质量分数为 5% 和 15% 硫酸盐溶液中混凝土试件质量开始呈现不同幅度的下降。当硫酸盐溶液质量分数为 5% 时,现浇混凝土试件的质量变化率从峰值 1.74% 下降至 0.91%,预制混凝土试件的质量变化率从峰值 3.02% 下降至 1.40%,这表明混凝土试件质量已从增长趋势变为下降趋势。对于质量分数为 15% 硫酸盐溶液中的现浇混凝土试件,侵蚀龄期为 270 d 时,质量变化率为 -0.68% ,出现了质量损失,劣化最严重。在腐蚀前期,进入混凝土的硫酸盐与混凝土水化产物发生反应,从而填充混凝土孔隙,使混凝土更加致密,质量增加;随着侵蚀产物增多,混凝土内部开始出现裂纹,加剧了硫酸盐的侵入,裂纹拓展致使混凝土剥落,进而引起质量损失。现浇混凝土试件直接置于硫酸盐侵蚀环境,未经过标准养护,抗拉强度未完全形成,导致抗开裂能力较弱。由此可知,预制混凝土试件抗硫酸盐侵蚀性能优于现浇混凝土试件。

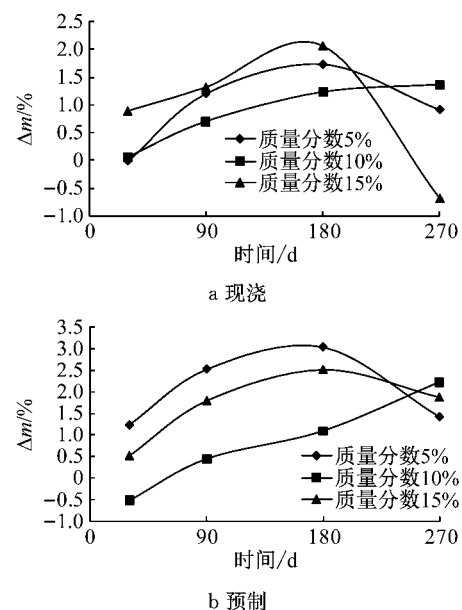


图 1 硫酸盐质量分数对混凝土试件质量变化率的影响

Fig.1 Effect of sulfate mass fraction on mass change rate of concrete specimen

从图 1 还可以看出,不论现浇混凝土试件还是

预制混凝土试件,并没有完全遵循硫酸盐溶液质量分数越高,混凝土质量劣化越快的规律.质量分数 10%硫酸盐溶液中的混凝土试件还处于质量增长阶段,即在 270 d 的侵蚀龄期内,现浇混凝土试件和预制混凝土试件的质量分别增加到 1.36% 和 2.21%,比质量分数 5%、15%硫酸盐溶液中的混凝土试件出现质量损失的时间晚.

2.1.2 水灰比

图 2 为硫酸盐溶液质量分数为 5% 时,不同水灰比条件下,现浇和预制混凝土试件的质量变化率曲线.从图 2 可以看出,所有混凝土试件的质量都是呈现先增长后下降的趋势.图 2a 中,侵蚀龄期 180 d 时,水灰比为 0.400、0.485、0.550 的现浇混凝土试件质量变化率分别增加至 1.7%、2.0%、1.2%;侵蚀龄期 270 d 时,水灰比为 0.400、0.485、0.550 的现浇混凝土试件质量变化率分别减少了 0.8%、1.3%、1.6%,尤其水灰比为 0.550 的混凝土试件,质量降低幅度大于增加幅度,质量变化率为 -0.4%,出现了质量损失.图 2b 中,侵蚀龄期 180 d 时,水灰比为 0.400、0.485、0.550 的预制混凝土试件质量变化率分别为 3.0%、1.4%、2.5%;侵蚀龄期 270 d 时,水灰比为 0.400、0.485、0.550 的预制混凝土试件质量变化率分别从峰值下降至 1.4%、0.2%、0.4%,质量变化率分别减少了 1.6%、1.2%、2.1%.

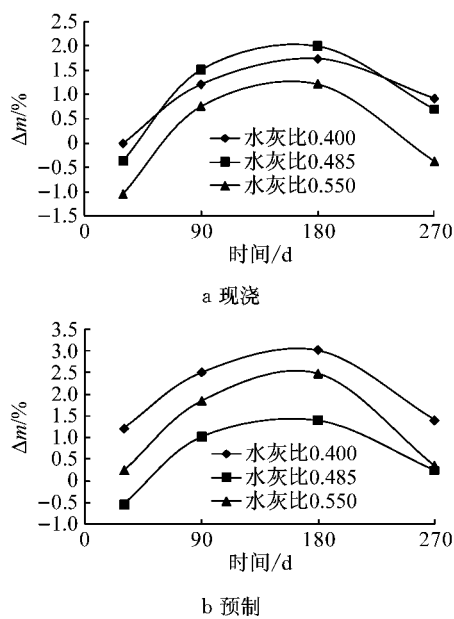


图 2 水灰比对混凝土试件质量变化率的影响
Fig.2 Effect of water-cement ratio on mass change rate of concrete specimen

综上所述,不论是现浇还是预制混凝土试件,水灰比越大,侵蚀后期出现的质量变化率减少幅度越

大.这一规律表明,水灰比越大,混凝土试件的抗硫酸盐侵蚀性能越低,后期混凝土劣化速度越快,部分现浇混凝土试件出现了质量损失.

2.2 抗压强度变化规律

依据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》^[33],混凝土抗硫酸盐侵蚀的指标为混凝土抗压强度耐蚀系数.该指标适用于干湿交替环境中,以最大干湿循环次数来表示混凝土的抗硫酸盐性能.除此之外,还有采用混凝土剩余强度比率表示混凝土在硫酸钠溶液中的强度变化规律^[34].本文研究对象为现浇混凝土,根据硫酸盐侵蚀机理可知:硫酸盐侵蚀混凝土初期,侵蚀产物填充混凝土孔隙,使得混凝土内部结构更加致密,从而提高混凝土强度;继续生成的侵蚀产物使混凝土孔隙受拉,超过混凝土抗拉强度后,混凝土出现开裂损伤,混凝土抗压强度下降.现浇混凝土试件受硫酸盐溶液侵蚀后抗压强度的变化规律采用下式表征:

$$R_c = \frac{f_{cs}}{f_{c0}} \quad (2)$$

式中: R_c 为抗压强度相对值; f_{cs} 为各侵蚀龄期混凝土抗压强度; f_{c0} 为水中养护 30 d 的混凝土抗压强度.

2.2.1 溶液质量分数

图 3~5 为不同水灰比时质量分数 5%、10%、15%硫酸盐溶液中预制和现浇混凝土试件抗压强度

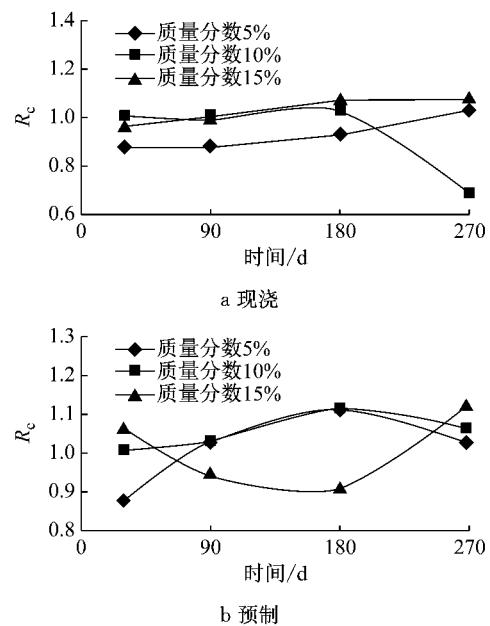


图 3 硫酸盐质量分数对混凝土试件抗压强度相对值的影响 (水灰比 0.400)

Fig.3 Effect of sulfate mass fraction on relative value of compressive strength of concrete specimen (water-cement ratio 0.400)

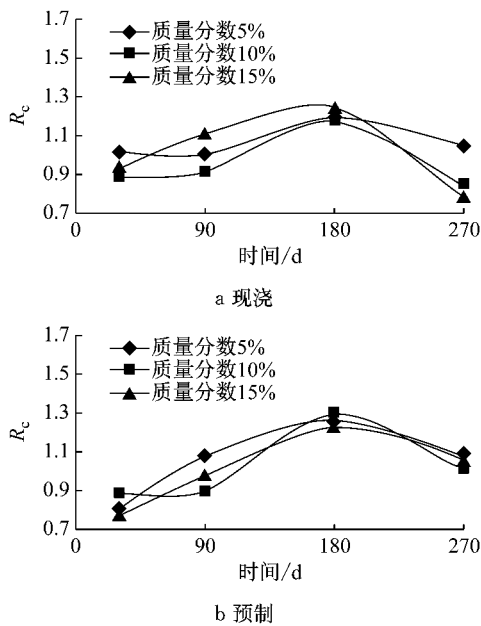


图 4 硫酸盐质量分数对混凝土试件抗压强度相对值的影响(水灰比 0.485)

Fig.4 Effect of sulfate mass fraction on relative value of compressive strength of concrete specimen (water-cement ratio 0.485)

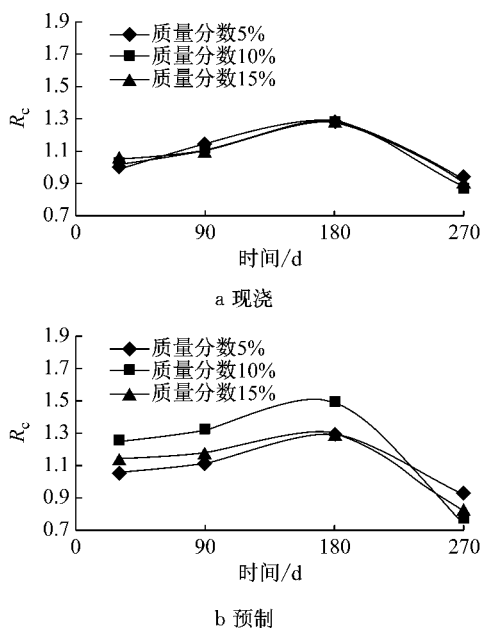


图 5 硫酸盐质量分数对混凝土试件抗压强度相对值的影响(水灰比 0.550)

Fig.5 Effect of sulfate mass fraction on relative value of compressive strength of concrete specimen (water-cement ratio 0.550)

相对值变化曲线.从图 3 可以看出,水灰比为 0.400 的混凝土试件,抗压强度相对值波动不大,先轻微增加后降低.同时,质量分数 10% 的硫酸盐溶液中现浇混凝土试件出现抗压强度损失,损失约 31%.从图 4

可以看出,水灰比为 0.485 的混凝土试件,抗压强度相对值波动明显,变化趋势为先增后减.现浇混凝土试件出现强度损失,质量分数 10% 和 15% 的硫酸盐溶液中现浇混凝土试件抗压强度分别损失了 15% 和 21%.从图 5 可以看出,水灰比为 0.550 时,现浇和预制混凝土试件均出现抗压强度损失.其中,质量分数 10% 硫酸盐溶液中的预制混凝土试件强度损失最严重,损失率为 25%.

2.2.2 水灰比

图 6 为质量分数 5% 的硫酸盐溶液中预制和现浇混凝土试件抗压强度相对值随侵蚀龄期变化曲线.从图 6a 可以看出,当水灰比为 0.400 时,现浇混凝土试件直接置于硫酸盐溶液中,其强度发展缓慢,经过 270 d 才达到水中养护 30 d 的混凝土试件抗压强度.这是因为水灰比较小时,混凝土密实,硫酸盐侵蚀进入混凝土内部缓慢.当水灰比为 0.485 和 0.550 时,混凝土试件抗压强度相对值先增加后降低,水灰比越大,增加和降低的幅度越大,最大强度增加幅度达到了 29%.现浇混凝土试件强度的增长,是混凝土在硫酸盐溶液中水化和侵蚀产物致密双重作用的结果.现浇混凝土试件成型后未经过标准养护,完全水化需要的时间比标准养护条件下混凝土完全水化更长.所谓的侵蚀产物致密作用是指硫酸盐进入混凝土与水化产物反应,生成膨胀性产物,初

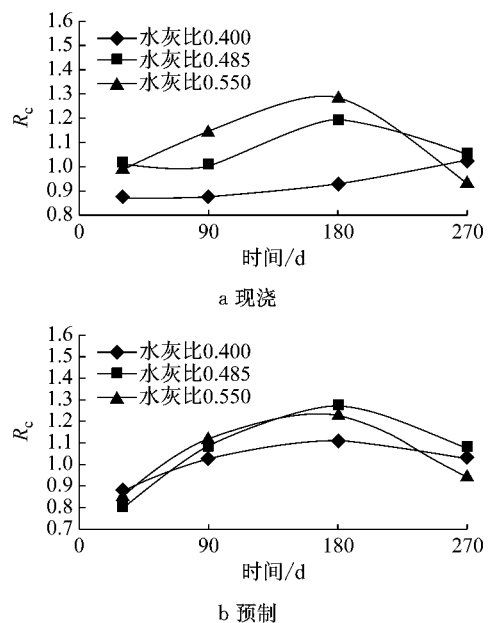


图 6 水灰比对混凝土试件抗压强度相对值的影响 (质量分数 5% 硫酸盐溶液)

Fig.6 Effect of water-cement ratio on relative value of compressive strength of concrete specimen (mass fraction 5% sulfate solution)

期填充混凝土孔隙,使混凝土更加密实,强度提高。后期孔隙填满,侵蚀产物的持续生成使混凝土裂纹发展,从而混凝土损伤,强度下降。混凝土水灰比越大,混凝土内部孔隙越多,更容易受到硫酸盐的侵蚀,孔隙被侵蚀产物填充得也越多,抗压强度涨幅越大;孔隙填充后,新生成的膨胀产物使混凝土开裂,裂纹越多,抗压强度损失越大。当水灰比为 0.550 时,在 180~270 d 龄期之间出现了强度损失,损失率为 6%。

从图 6b 可以看出,预制混凝土试件抗压强度出现先增加后降低的趋势。30 d 侵蚀龄期内抗压强度相对值下降是因为混凝土在侵蚀溶液中的水化程度不如水中养护的水化程度。后续预制混凝土试件抗压强度的增加与降低和现浇混凝土试件抗压强度变化趋势的原理一致。同样,水灰比为 0.550 时预制混凝土试件在 180~270 d 的侵蚀龄期内也出现了强度损失,损失率为 6%。由此可知,水灰比越大,混凝土抗硫酸盐侵蚀性能越低。

3 结论

(1) 混凝土试件质量呈现先增加后减少趋势。同一侵蚀环境中,现浇混凝土试件先于预制混凝土试件出现了质量损失。270 d 的侵蚀龄期内,水灰比为 0.550 的现浇混凝土试件的质量变化率为 -0.4%,而预制混凝土质量变化率为正值。混凝土水灰比越大,质量损失出现越早。

(2) 腐蚀过程中,混凝土抗压强度呈现先增加后减少的规律。质量分数 10% 和 15% 的硫酸盐溶液中,水灰比为 0.485 的现浇混凝土试件强度分别损失了 15% 和 21%,现浇混凝土先于预制混凝土出现强度损失。水灰比越小,强度变化幅度越小。质量分数 10% 和 15% 的硫酸盐溶液中混凝土试件抗压强度损失较为严重。

参考文献:

- [1] HOSSACK A M, THOMAS M D A. Varying fly ash and slag contents in Portland limestone cement mortars exposed to external sulfates[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 78: 333.
- [2] HOSSACK A M, THOMAS M D A. Evaluation of the effect of tricalcium aluminate content on the severity of sulfate attack in Portland cement and Portland limestone cement mortars[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 56: 115.
- [3] SHANAHAN N, ZAYED A. Cement composition and sulfate attack; Part I[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(4): 618.
- [4] KUNTHER W, LOTHENBACH B, SKIBSTED J. Influence of the Ca/Si ratio of the C—S—H phase on the interaction with sulfate ions and its impact on the ettringite crystallization pressure[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 69: 37.
- [5] Al-DULAIJAN S U. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to magnesium sulfate solutions [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(8): 1792.
- [6] DEHWAH H A F. Effect of sulfate concentration and associated cation type on concrete deterioration and morphological changes in cement hydrates[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(1): 29.
- [7] SIAD H, LACHEMI M, BERNARD S K, *et al.* Assessment of the long-term performance of SCC incorporating different mineral admixtures in a magnesium sulphate environment[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 80: 141.
- [8] SHANNAG M J, SHAIA H A. Sulfate resistance of high-performance concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2003, 25(3): 363.
- [9] 王强, 石梦晓, 周予启, 等. 镍铁渣粉对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(3): 306.
- WANG Qiang, SHI Mengxiao, ZHOU Yuqi, *et al.* Influence of ferro-nickel slag powder on the sulfate attack resistance of concrete[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2017, 57(3): 306.
- [10] ROZIERE E, LOUKILI A, El-HACHEM R, *et al.* Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(12): 1188.
- [11] El-HACHEM R, ROZIERE E, GRONDIN F, *et al.* Multi-criteria analysis of the mechanism of degradation of Portland cement based mortars exposed to external sulphate attack[J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(10): 1327.
- [12] OUYANG W Y, CHEN J K, JIANG M Q. Evolution of surface hardness of concrete under sulfate attack[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 53: 419.
- [13] 方祥位, 申春妮, 杨德斌, 等. 混凝土硫酸盐侵蚀速度影响因素研究[J]. *建筑材料学报*, 2007, 10(1): 89.
- FANG Xiangwei, SHEN Chunni, YANG Debin, *et al.* Investigations of influence factor on the rate of concrete sulfate attack[J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(1): 89.
- [14] SANTHANAM M, COHEN M, OLEK J. Differentiating seawater and groundwater sulfate attack in Portland cement mortars [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(12): 2132.
- [15] BASSUONI M T, RAHMAN M M. Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 79: 395.
- [16] MÜLLAUER W, BEDDOE R E, HEINZ D. Sulfate attack expansion mechanisms[J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 52: 208.
- [17] HOSSAIN A K. Resistance of scoria-based blended cement concrete against deterioration and corrosion in mixed sulfate environment[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(7): 299.
- [18] 赵力, 刘娟红, 周卫金, 等. 矿井环境中混凝土材料腐蚀损伤

- 演化与机理分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1422.
ZHAO Li, LIU Juanhong, ZHOU Weijin, *et al.* Damage evolution and mechanism of concrete erosion at sulfate environment in underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1422.
- [19] 刘娟红, 赵力, 纪洪广. 初始损伤对混凝土硫酸盐侵蚀劣化性能的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1278.
LIU Juanhong, ZHAO Li, JI Hongguang. Influence of initial damage on degradation and deterioration of concrete under sulfate attack[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(8): 1278.
- [20] 张敬书, 张银华, 冯立平, 等. 硫酸盐环境下混凝土抗压强度耐蚀系数研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 369.
ZHANG Jingshu, ZHANG Yinhua, FENG Liping, *et al.* Corrosion resistant coefficient for concrete compressive strength under sulfate environment[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 369.
- [21] 聂庆科, 白冰, 李华伟, 等. 利用Ⅱ级粉煤灰的灌注桩室内试件和现场取芯试件的耐久性研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(10): 57.
NIE Qingke, BAI Bing, LI Huawei, *et al.* Comparative research on the durability of concrete samples containing Ⅱ-fly ash drilled from field piles and prepared in laboratory[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(10): 57.
- [22] 陈波, 张文潇, 白银, 等. 混凝土强度对盐渍土地区钻孔灌注桩耐久性的影响[J]. 水电能源科学, 2016, 34(6): 165.
CHEN Bo, ZHANG Wenxiao, BAI Yin, *et al.* Influence of compressive strength on durability of bored pile concrete in saline soil region [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(6): 165.
- [23] 中华人民共和国建设部. JGJ63—2006 混凝土用水标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ63—2006 Standard of water for concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [24] ASTM. C1012/C1012M-12 Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution[S]. West Conshohocken: ASTM Press, 2012.
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 749—2008 水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 749—2008 Test method for determining capability of resisting sulfate corrode of cement[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [26] 姜磊, 牛获涛. 硫酸盐侵蚀与干湿循环下混凝土本构关系研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 66.
JIANG Lei, NIU Ditao. Study of constitutive relation of concrete under sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 66.
- [27] 牛获涛, 王家滨, 马蕊. 干湿交替喷射混凝土硫酸盐侵蚀试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 82.
NIU Ditao, WANG Jiabin, MA Rui. Sulfate attack test of shot concrete under dry-wet alternation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2): 82.
- [28] 张廷毅, 汪自力, 郑光和, 等. 碳化与硫酸盐溶液干湿循环后混凝土断裂韧度[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 1062.
ZHANG Tingyi, WANG Zili, ZHENG Guanghe, *et al.* Fracture toughness of concrete after carbonation and wet-dry cycle of sulfate solution[J]. Shuili Xuebao, 2016, 47(8): 1062.
- [29] SHAZALI M, BALUCH M, Al-GADHIB A. Predicting residual strength in unsaturated concrete exposed to sulfate attack[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18: 343.
- [30] YILMAZ A B, YAZLCL B, ERBIL M. The effects of sulphate ion on concrete and reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(8): 1271.
- [31] HUANG B, QIAN C X. Experiment study of chemo-mechanical coupling behavior of leached concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 2649.
- [32] 中华人民共和国建设部. GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T 50081—2002 Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 20082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB/T 20082—2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [34] 高润东. 复杂环境下混凝土硫酸盐侵蚀微-宏观劣化规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
GAO Rundong. Micro-macro degradation regularity of sulfate attack on concrete under complex environments [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.