

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2023.01.001

【桩基工程专栏】（专栏主持人：刘汉龙）

盐渍土环境下 GFRP 复合桩耐久性能研究

樊亚龙¹, 张建伟^{1,2}, 丁乐¹, 闫艳军^{3*}

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 开封市特殊土改性与修复工程技术研究中心, 河南 开封 475004;
3. 鹤壁市工程质量监督站, 河南 鹤壁 458030)

摘要: 玻璃纤维增强复合材料 (Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) 由于其轻质高强和耐腐蚀性强的优点被广泛应用于抗震加固、结构补强、海洋防腐等实际工程中。GFRP 复合桩是将 GFRP 布粘贴在普通钢筋混凝土桩 (RC 桩) 桩身的一种桩型, 它具有提高结构承载性能、改善结构耐久性以及抵御环境侵蚀的能力。为探究桩身包裹 GFRP 布对桩基耐久性能的影响, 同时也为了更好的模拟自然环境下的侵蚀效果, 利用人工配置的盐渍土, 通过电加速快速腐蚀试验和室内模型试验, 考虑腐蚀离子与电流耦合作用, 研究盐渍土通电加速环境中 GFRP 复合桩耐久性能。结果表明, 盐渍土介质中的腐蚀规律与自然环境下腐蚀规律相符合, 证明利用盐渍土代替溶液进行电加速腐蚀试验是可行的; 同一腐蚀时期的 RC 桩腐蚀程度要明显高于 GFRP 复合桩, 说明包裹 GFRP 布对抗侵蚀发挥重要作用, 明显提高了桩基在复杂环境下的使用寿命。未腐蚀前, RC 桩和 GFRP 复合桩的竖向承载力为 5.7 kN 和 5.9 kN, 腐蚀 90 d 后, RC 桩和 GFRP 复合桩的竖向承载力为 4.1 kN 和 5.3 kN, GFRP 复合桩的承载力损失更小。

关键词: GFRP 复合桩; 盐渍土; 耐久性; 承载特性; 电加速腐蚀; 模型实验

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0001-08

Study on the durability performance of the GFRP composite pile in saline soil environment

FAN Ya-long¹, ZHANG Jian-wei^{1,2}, DING Le¹, YAN Yan-jun^{3*}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. Kaifeng Technology Research Center of Engineering on Soil Modification and Restoration, Kaifeng 475004, Henan, China;

3. Construction Quality Supervision Station, Hebi 458030, Henan, China)

Abstract: The Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) material is widely used in practical projects such as seismic reinforcement, structural reinforcement, and marine anti-corrosion due to its advantages of light weight, high strength and strong corrosion resistance. GFRP composite pile is a type of pile in which GFRP cloth is pasted on the body of a common reinforced concrete pile (RC pile). It has the ability to improve the bearing performance and durability performance of the structure, and resist environmental erosion. In order to explore the influence of pile body wrapped with GFRP cloth on the durability performance of pile foundation, an indoor model test was carried out. In order to better simulate the erosion effect in the natural environment, the electrically accelerated rapid corrosion test was carried out using artificially configured saline soil. By comprehensively considering the coupling effect of corrosion ions and current, the durability performance of GFRP composite piles in saline soil electrified acceleration environment was studied. The results show that the corrosion in the saline soil medium is consistent with what happened in the natural environment, which proves that it is feasible to use the saline soil instead of the solution to conduct the electric accelerated corrosion test. The corrosion degree of the RC pile in the same corrosion period is significantly higher than that of the GFRP composite pile. This proves that the wrapped GFRP cloth plays an important role in resisting erosion and significantly improves the service life of the pile foundation in complex environments. Before corrosion, the vertical bearing capacities of the RC piles and GFRP composite piles were 5.7 kN and 5.9 kN, respectively. After corrosion with 90 days, the vertical bearing capacity of the RC pile and GFRP composite pile is 4.1 kN and 5.3 kN respectively. The loss of bearing capacity of the GFRP composite pile is smaller.

收稿日期: 2022-07-03

作者简介: 樊亚龙 (1997—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事桩基工程方面的研究。E-mail: 104754190863@henu.edu.cn。

*通信作者: 闫艳军 (1979—), 男, 河南淇县人, 高级工程师, 主要从事桩基工程质量检测等方面的研究。E-mail: 15903923368@139.com。

Key words: GFRP composite pile; saline soil; durability; vertical bearing characteristics; electro-accelerated corrosion; model experiment

0 引言

中国是盐渍土广泛分布的国家,服役于盐渍土环境中的钢筋混凝土桩基结构由于受到土中氯离子的侵蚀,造成钢筋出现锈蚀现象,影响混凝土结构的力学性能和耐久性。在桩基结构加固工程中,纤维复合材料因其强度高、耐酸碱侵蚀的特性,被逐渐应用于一些有特殊加固要求的工程环境中^[1-2]。玻璃纤维增强复合材料桩(简称 GFRP 复合桩)通过在桩身粘贴 GFRP 布,改变桩身摩擦特性,使桩基的承载性能提高,同时还能抵抗地基中不良恶劣环境的侵蚀作用^[3-4]。

目前,国内外学者针对盐渍土环境下的桩基耐久性进行了一系列试验研究^[5-10]。同时,也有部分学者对 FRP 材料(纤维增强复合材料)加固混凝土构件的耐久性进行了研究,YAN 等^[11]研究了氯离子对 BFRP 材料(玄武岩纤维)增强薄板拉伸和弯曲行为的影响,对浸泡 30 d、60 d 和 90 d 的薄板和网格进行弯曲和拉伸能力测试,结果证明,BFRP 材料显著增强了薄板的耐久性与力学性能。IRMAWATY 等^[12]将梁底面黏结 GFRP 板,然后浸泡在模拟海洋环境的人工溶液池中,探究浸泡后的 GFRP 板黏结性能及梁的抗弯性能。KABIR 等^[13]研究了 CFRP 和钢材的黏结性能,得出在不同基层处理剂、不同天气状况和溶液浸泡等条件下的黏结耐久性变化。ALSAAD 等^[14]、KASHI 等^[15]和吴刚等^[16]将包裹 FRP 材料的试件浸泡于腐蚀溶液中,探究其随腐蚀时间的退化规律。

目前,国内外学者对盐渍土环境中钢筋混凝土结构耐久性的研究手段主要是用含有氯离子的溶液来浸泡构件,而在自然环境中,盐渍土侵蚀过程是在空气和桩土共同耦合作用下进行的。为此,本文采用人工配置盐渍土,并考虑侵蚀离子与电流耦合作用,设计通电加速试验,并与室内模型试验相结合,研究盐渍土环境中 GFRP 复合桩的耐久性性能,研究结果可为 GFRP 复合桩耐久性设计提供依据。

1 模型试验概况

1.1 盐渍土配置

本文采用开封黄泛区粉砂土进行单一盐渍土

(NaCl)的配置,含盐量为 10% (含盐量=盐重量/土重量),配置过程如图 1 所示。先增加粉砂土的含水量,将一定质量的盐与土体搅拌均匀,洒水养护 14 d,静待盐分与土体充分融合,氯离子充分交换。将配置的土体进行土体物理力学试验,如表 1 所示。



(a) 土体拌合均匀 (b) 湿润放置 14 d

图 1 单一氯盐渍土配置过程

Fig. 1 Configuration process of chloride saline soil

表 1 盐渍土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of the saline soil

最大干密度 $\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	最优含 水率 $\omega/\%$	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\circ)$	压缩模 量/MPa	孔隙比 e
1.78	11.6	6.8	24	11.76	0.875

1.2 模型桩

试验用模型桩长为 1.2 m,桩身截面为 0.07 m×0.07 m,钢筋笼采用 4 根直径为 6 mm 的钢筋进行绑扎。待养护期过后,利用纤维浸润胶在桩身粘贴 GFRP 布,并通过打磨撒砂保持 GFRP 布表面的粗糙性,如图 2 所示。GFRP 布由同申加固复合材料有限责任公司生产,GFRP 布和纤维浸润胶性能参数如表 2 和表 3 所示。



图 2 GFRP 布

Fig. 2 GFRP cloth

表 2 GFRP 布材料性能

Table 2 Properties of GFRP cloth

抗拉强度/ MPa	密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	厚度/ mm	弹性模量/ GPa	断裂伸长率/ %
2 039	2.0	0.17	76	2.3

表 3 纤维浸润胶材料性能
Table 3 Properties of fiber material

名称	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	拉伸强度/ MPa	抗弯强度/ MPa
纤维浸润胶	70	12.5	40	50

1.3 模型槽与通电装置

试验用模型槽高为 1.8 m, 直径为 1.3 m, 槽壁为高强度钢板, 如图 3 所示。



图 3 模型槽
Fig. 3 Model tank

模型槽内通电介质为利用开封地区粉砂土进行人工配置的盐渍土, 含盐量为 10%。电源采用直流可控电源。设置电加速试验装置图如图 4 所示, 电源的正负极分别连接碳棒和钢筋。

浇筑模型桩前除去钢筋笼上的锈迹, 用电线将 4 根钢筋并连, 节点处用胶带包裹固定, 防止钢筋骨架锈蚀后出现断触。将带有导线的钢筋埋置于混凝土内, 并通过预埋导线连接直流电源。通电前先 将桩充分浸润, 通电过程中定期在盐渍土中喷洒盐水, 以保证盐渍土中的水分和氯离子浓度, 保持良好的通路。电加速装置示意图如图 4 所示, 电源采用直流可控电源, 电流设置为 20 mA。

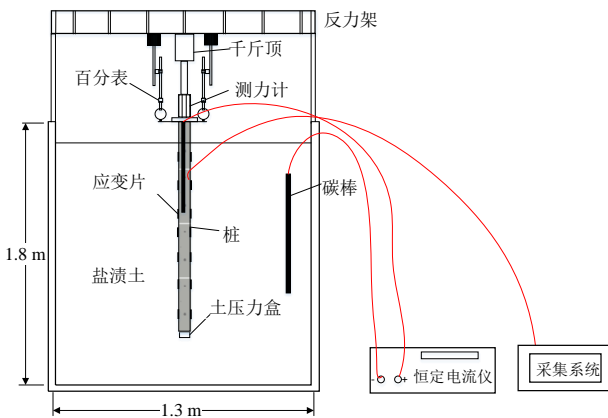


图 4 通电试验装置图
Fig. 4 Power-on test device diagram

通电加速试验分组如表 4 所示, 两种桩型的通电时间分别设定为 30 d、60 d、90 d, 盐渍土浓度为

10%, 通电时间达到后立即停止试验。

表 4 通电加速试验分组
Table 4 Groups of electrified test

分组	桩号	桩型	盐含量/ %	通电 时间/d
1	RC-0 d	RC 桩	10	—
	GFRP-0 d	GFRP 桩	10	—
2	RC-30 d	RC 桩	10	30
	GFRP-30 d	GFRP 桩	10	30
3	RC-60 d	RC 桩	10	60
	GFRP-60 d	GFRP 桩	10	60
4	RC-90 d	RC 桩	10	90
	GFRP-90 d	GFRP 桩	10	90

1.4 模型试验加载装置

加载采取慢速维持加载法, 荷载由液压千斤顶施加, 每一级荷载施加大小为 0.5 kN, 分 12 级加载至最终荷载为 6 kN, 通过测力计 (最小量程为 0.1 kg) 确定每级施加的荷载。桩顶沉降量采用两个百分表读取位移平均值。每级荷载施加后, 待前后读数变化范围小于 0.01 mm/h 时, 即视为稳定。并采用 CM-2B 静态应变采集仪记录桩身截面的应变数据及土压力盒数据^[17]。

2 试验结果分析

2.1 不同通电时长后桩身表现现象分析

通电加速腐蚀期间, 由于电流的作用, 随着通电时间的增加, 土体中的离子发生迁移, 向桩侧电极和碳棒处移动。同时土体表面的盐分随着含水量的变化, 结晶析出, 在两个电极附近出现了盐析现象, 出现硬壳层, 且硬壳层下方土体变得松软多孔。桩身与土体交界处出现明显裂缝, 如图 5 所示。



图 5 通电后盐渍土表面析盐现象
Fig. 5 Phenomenon of salt precipitation on the surface of saline soil after electrification

将不同腐蚀时间后的模型桩挖出,观察不同通电时间下桩身的劣化趋势,得到 RC 桩和 GFRP 复合桩通电腐蚀 30 d、60 d 和 90 d 后的表象劣化程度,如图 6~7 所示。

观察 RC 桩和 GFRP 复合桩通电腐蚀 30 d 后的表观劣化图可知,两种桩型的锈蚀程度均较小,桩身有轻微锈迹,出现微小裂缝,施加荷载后桩端有轻微压碎现象,综合腐蚀程度较低;通电腐蚀 60 d 后,两种桩型的锈蚀程度明显增加,桩身有腐蚀锈迹,锈蚀效果不均匀,并出现裂缝,静载试验后,桩端有明显压裂痕迹,综合腐蚀程度一般;通电腐蚀 90 d 后,两种桩型的锈蚀程度均较大,桩身有严重锈迹,出现较大裂缝,部分混凝土脱落,桩端被压碎,综合腐蚀程度较大。

通电 30 d 后,桩身锈迹不明显,60 d 后,RC 桩桩身表面锈迹变的明显,而 GFRP 复合桩在 90 d 时才被锈迹明显覆盖。桩身表面腐蚀规律总结为:桩身表面轻微钢筋锈迹→桩身表面钢筋锈迹大量出现→桩身被锈迹覆盖。

观察桩身和钢筋腐蚀后的效果,腐蚀 30 d 时,

钢筋锈蚀率较低,RC 桩身出现微小裂缝,裂缝宽度较小。观察 GFRP 复合桩可以看出,桩身未包裹 GFRP 布处出现裂缝,包裹 GFRP 布处未出现裂缝。出现这一现象的原因为:GFRP 布发挥包裹作用,对桩身裂缝的发展起到约束作用,使桩身锈蚀率下降,因此 GFRP 复合桩的裂缝宽度值小于 RC 桩;通电 60 d 后,相较于 30 d,桩身裂缝更宽,RC 桩出现桩身混凝土剥落现象,GFRP 复合桩的裂缝出现在 GFRP 布接缝处,即桩角处;通电 90 d 后,对比前两组,90 d 腐蚀效果严重,RC 桩桩身裂缝发展迅速,桩身出现严重混凝土脱落,桩端裂缝处的混凝土被压坏,发生脱落。而 GFRP 复合桩的变化较小,桩身裂缝由于 GFRP 布的包裹作用,发展较为缓慢,只发生了轻微破碎,开裂部位的混凝土依旧黏结在 GFRP 布上,保持较好的桩身整体性。RC 桩腐蚀效果明显高于 GFRP 复合桩,证明包裹 GFRP 布对抗氯离子侵蚀和提高承载力方面发挥重要作用,明显提高了桩基在复杂环境下的使用寿命。

2.2 桩身裂缝宽度

利用智博联裂缝观测仪对桩身裂缝宽度进行

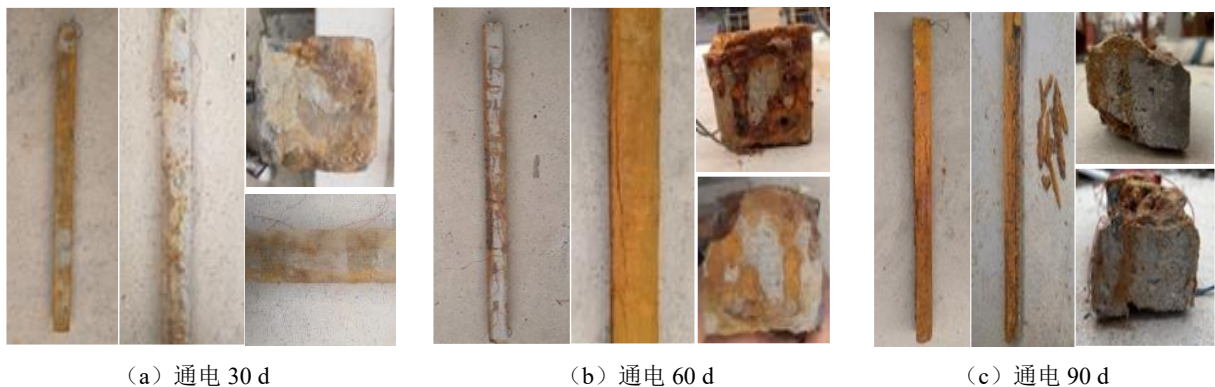


图 6 RC 桩不同通电时间的表观劣化图

Fig. 6 Apparent deterioration diagram of RC piles with different energization time

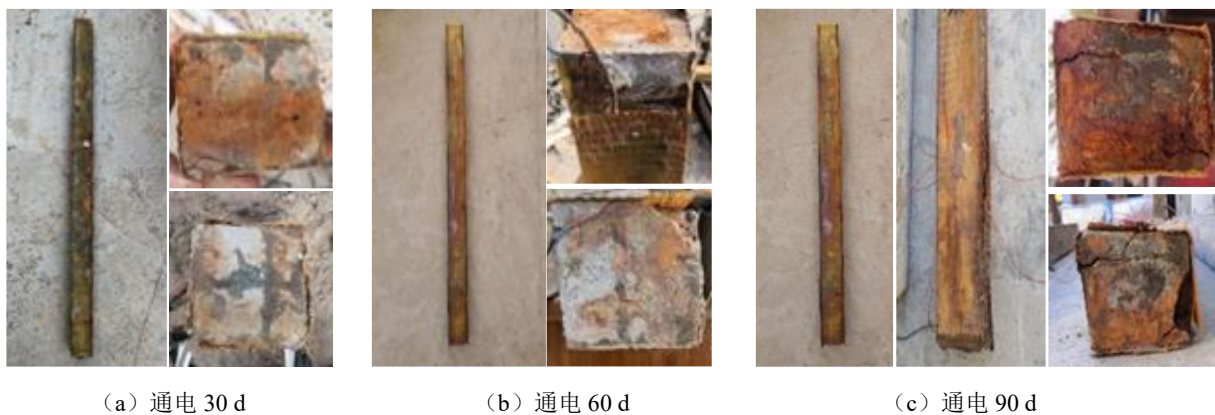
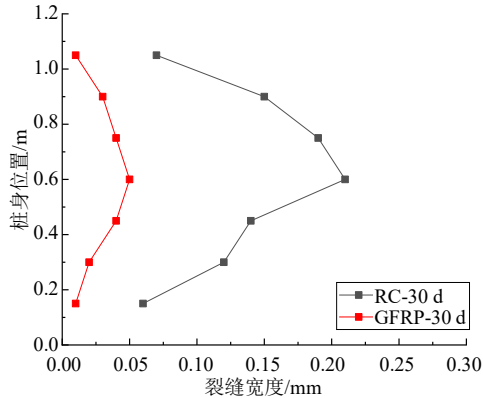


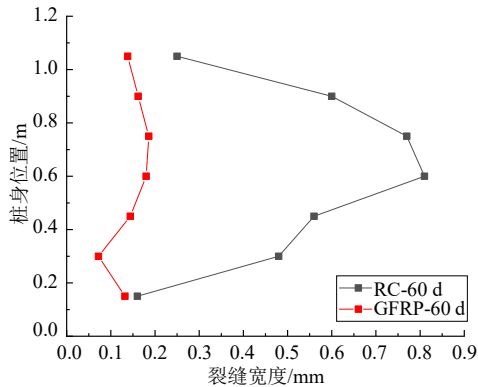
图 7 GFRP 复合桩不同通电时间的表观劣化图

Fig. 7 Apparent deterioration diagram of GFRP composite piles with different energization time

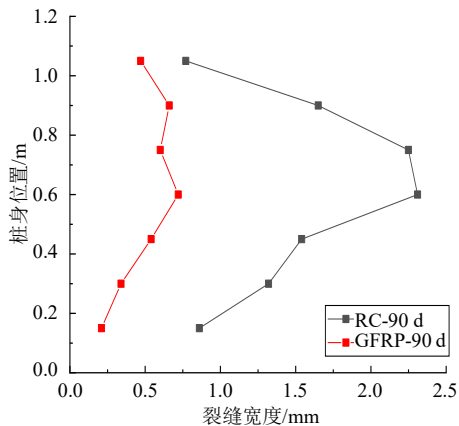
测量, 对不同通电时间后的桩身腐蚀程度进行评价。桩身观测点主要分为桩身 4 个表面及桩两端, 由于 GFRP 复合桩和 RC 桩的开裂特征不一样, RC 桩的桩身裂缝出现在钢筋骨架处, GFRP 复合桩的桩身裂缝出现在桩身四角处, 所以采用 GFRP 复合桩桩角处的裂缝来对比两种桩型的锈蚀程度。桩身采集位置沿桩身平均选取 7 点, 每个裂缝观测点的位置等距离为 150 mm。每个点取 4 个平面的平均值作为该点桩身的裂缝宽度值, 裂缝数值如图 8 所示。



(a) 通电 30 d 后桩身裂缝宽度值



(b) 通电 60 d 后桩身裂缝宽度值



(c) 通电 90 d 后桩身裂缝宽度值

图 8 不同通电腐蚀时期桩身裂缝值分布图

Fig. 8 Crack width along pile shaft in different galvanic corrosion periods

GFRP 布牢固粘贴在桩身四周, 对于较小的裂缝有明显抑制效果, 随着裂缝继续发展, 桩身开裂导致的膨胀力持续增大, GFRP 布接缝处承受较大拉力, 最终导致裂缝出现在 GFRP 布接缝处, 即 GFRP 复合桩桩角处。

通过观察不同锈蚀时间的桩基外观发现, RC 桩裂缝沿桩身竖向分布, 在钢筋骨架处裂缝最宽, 桩身每侧有沿钢筋方向的两条裂缝; GFRP 桩由于 GFRP 存在包裹作用, 导致桩身裂缝出现在 GFRP 布交接位置, 也是桩身薄弱部位, 裂缝沿着桩角位置形成竖向通缝。对比两种桩型的裂缝宽度值发现: GFRP 复合桩的裂缝数量和宽度明显小于 RC 桩。桩身中部裂缝最大, 考虑桩中距离碳棒最近, 土体电阻较小。随着裂缝的增大, 钢筋直接接触到土体, 两个电极间的电阻值变小, 使得锈蚀速率增大, 加速了接下来的锈蚀过程, 使得 90 d 的锈蚀裂缝宽度明显高于 30 d 和 60 d, 呈非线性增加。

2.3 钢筋状态分析

利用钢筋锈蚀检测仪对桩身锈蚀程度进行检测, 对腐蚀后的 GFRP 复合桩和 RC 桩进行锈蚀率检测。提前将模型桩浸泡在水中, 充分润湿, 锈蚀仪一端连接桩基内部预留的电极, 一端利用硫酸铜做参照电极, 采集到的电势值即是硫酸铜电极和桩基础之间的电压差 (又称腐蚀电势)。本文采用 ASTM C876-80 所推荐的临界数值作为钢筋锈蚀判定标准^[18-19]。

根据测量结果绘制两种桩型的半电池电势值对比图如图 9 所示。

根据结果可知, 由于模型槽内土体的渗透作用, 上部土体含水量较小, 且盐分易溶于水, 使得中下部土体含盐量略大于上部土体, 中下部土体含水量大导致土体电导率也高于上部土体, 导致两种桩身顶部锈蚀程度小于桩身中部和下部。两种桩型的桩中部位电势值最大, 桩顶电势值略小于桩底。分别比较 GFRP 复合桩和 RC 桩的锈蚀特征, 普通 RC 桩通电腐蚀 30 d、60 d 和 90 d 后, 最大电势值分别为 -340 mV、-571 mV 和 -810 mV, 呈逐渐下降趋势; GFRP 复合桩通电腐蚀 30 d、60 d 和 90 d 后, 最大电势值分别为 -170 mV、-295 mV 和 -520 mV, 相比于 RC 桩, GFRP 复合桩的电势值变化幅度较低。

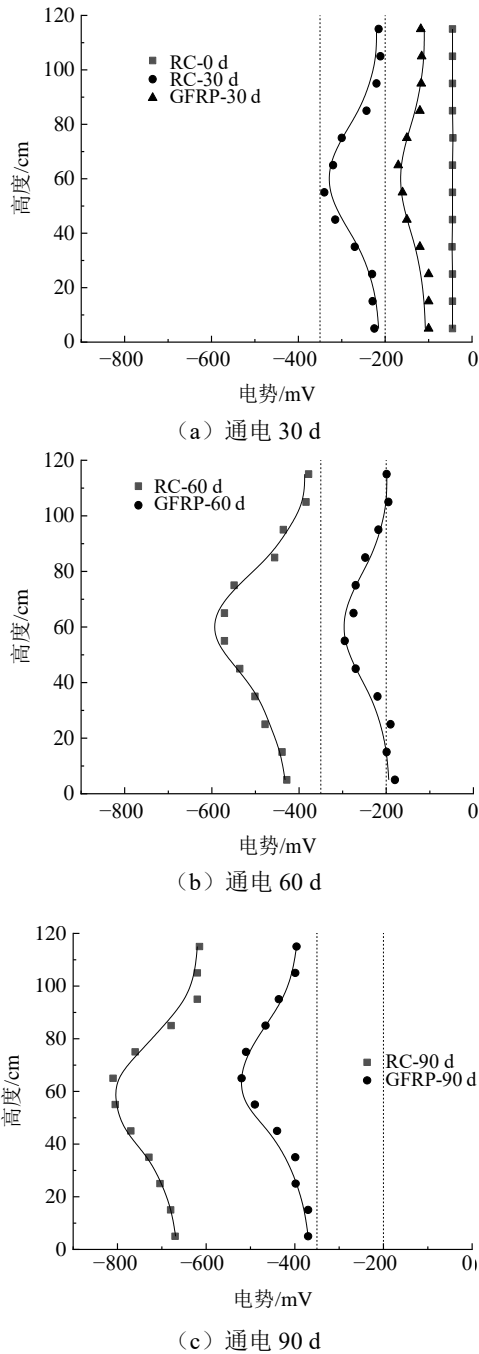


图9 不同腐蚀时期桩身半电池电势值

Fig. 9 Half-cell potential of pile in different corrosion periods

通电 30 d 时, GFRP 复合桩电势值较低, 发生锈蚀的概率较低, RC 桩电势在 $-340 \sim -211$ mV 之间, 锈蚀状态未明。通电 60 d 时, GFRP 复合桩电势在 $-295 \sim -180$ mV 之间, 发生锈蚀的概率未知, RC 桩电势在 $-571 \sim -378$ mV 之间, 发生锈蚀的概率较大。通电 90 d 时, GFRP 复合桩电势在 $-520 \sim -370$ mV 之间, 发生锈蚀的概率较大, RC 桩电势在 $-810 \sim -620$ mV 之间, 发生锈蚀的概率最大。通过对比相同通电时间的两种桩型发现, GFRP 复合

桩的锈蚀率明显低于 RC 桩, 桩身包裹 GFRP 布可以明显限制桩身裂缝的发展, 降低钢筋和土体的接触, 提高 GFRP 复合桩抗氯离子侵蚀作用。

2.4 不同腐蚀时间后桩基静载试验结果

将通电腐蚀后的桩基进行静载试验, 测量不同腐蚀时期的桩基承载特性, 并对试验结果进行分析, 综合评价腐蚀结果, 得出包裹 GFRP 布对桩基耐腐蚀性能的提升效果。

根据模型静载试验结果, 得到 GFRP 复合桩和 RC 桩不同腐蚀时期后的桩基沉降曲线, 如图 10 所示。当荷载较小时, 两种桩型的位移呈线性增加, 由于 GFRP 复合桩与土的摩擦系数较大, 桩侧摩阻力充分发挥作用, 且腐蚀后 GFRP 复合桩桩身混凝土破坏程度较小, 保持较好完整性, 导致 GFRP 复合桩的位移始终小于 RC 桩。

从荷载沉降图中可以看到, 随着荷载的增大, 两条曲线线形基本相似, 呈缓变型下降, 取位移为 40 mm 时所对应的承载力为极限承载力。RC 桩未腐蚀前的极限承载力为 5.7 kN, GFRP 复合桩未腐蚀前的极限承载力为 5.9 kN。腐蚀 30 d 后, RC 桩的承载力约为 5.3 kN, GFRP 桩的承载力约为 5.7 kN。30 d 的腐蚀效果并不显著, 两种桩型的裂缝均较小, 桩身和桩顶混凝土并未发生剥落现象, 使腐蚀后的承载力损失并不明显。腐蚀 60 d 后, RC 桩的承载力下降到 4.9 kN 左右, GFRP 复合桩下降到 5.6 kN 左右。60 d 的腐蚀效果开始明显, 两种桩型的裂缝逐渐发展, 桩身和桩顶混凝土发生剥落现象, 使腐蚀后的承载力发生损失。腐蚀 90 d 后, RC 桩的承载力下降为 4.1 kN, GFRP 复合桩下降为 5.3 kN。90 d 的腐蚀效果显著, 两种桩型的裂缝均较大, 桩身和桩顶混凝土发生严重剥落现象, 使腐蚀后的承载力损失明显增大。

根据腐蚀后的桩身外观可知: 钢筋和混凝土黏结力发生下降, 对混凝土的约束作用减小, 使桩基受压时发生开裂, 桩身压缩量也增加, 桩端混凝土开裂和桩身混凝土剥落, 导致端阻力和侧摩阻力都发生明显下降。包裹 GFRP 布的 GFRP 复合桩, 即使钢筋发生锈蚀, 但桩身混凝土并未剥落, 只在 GFRP 布接缝处开裂, 提高了桩基的整体性, 降低了桩身开裂引起的混凝土剥落, 使 GFRP 腐蚀后的竖向承载力损失并不明显。

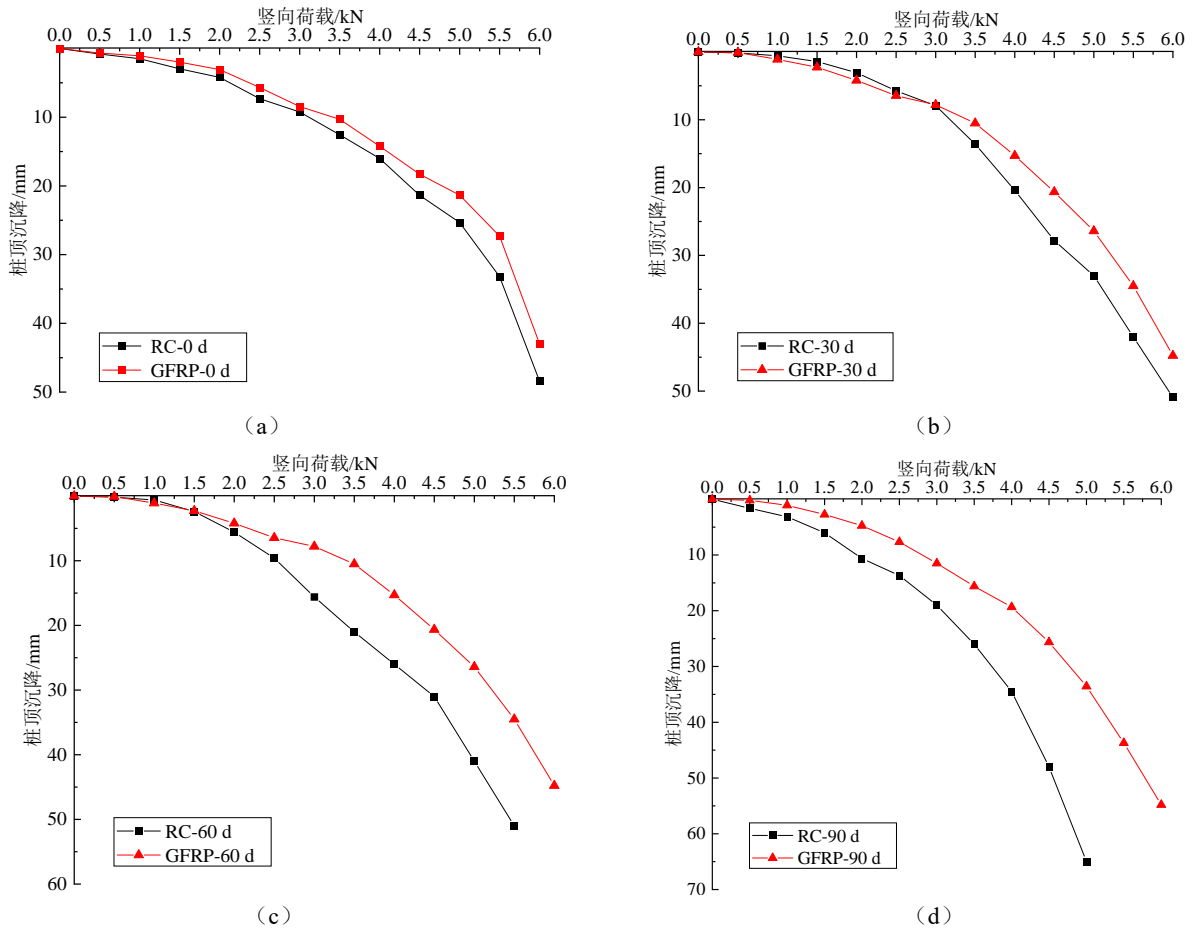


图 10 不同通电时间荷载沉降对比曲线

Fig. 10 Load-settlement curve for different energization times

3 结论

本文将通电介质换为人工配置的盐渍土, 分别将 GFRP 复合桩和 RC 桩埋置于盐渍土中进行通电加速腐蚀试验。在电加速试验结束后, 利用钢筋锈蚀检测仪和裂缝宽度观测仪记录不同时间下 GFRP 复合桩和 RC 桩的腐蚀差距, 并对不同通电腐蚀时期的桩基进行静载试验, 以综合评价盐渍土环境下 GFRP 复合桩的耐久性能, 得出以下结论:

(1) 通过观察 RC 桩和 GFRP 复合桩通电腐蚀 30 d、60 d 和 90 d 后的表观劣化现象发现: 通电 30 d 后, 两种桩型锈蚀程度均较小, 桩身有轻微锈迹, 出现微小裂缝, 静载试验后桩端有轻微压碎现象, 综合腐蚀程度较低; 通电 60 d 后, 两种桩型锈蚀程度均较小, 桩身有腐蚀锈迹, 锈蚀效果不均匀并出现裂缝, 桩端有明显压裂痕迹; 通电 90 d 后, 两种桩型锈蚀程度较大, 桩身有严重锈迹, 出现较大裂缝, 部分混凝土脱落, 桩端被破坏, 综合腐蚀程度较大。在同一腐蚀阶段, 复合桩的耐腐蚀效果要优于 RC 桩, 证明包裹 GFRP 布能有效抑制混凝土开裂、脱落, 增加桩基使用寿命。

(2) 根据桩身裂缝宽度值和电势值可知: GFRP 复合桩的裂缝数量和宽度明显小于 RC 桩, 且 GFRP 复合桩的电势值明显低于 RC 桩, 证明 GFRP 复合桩的锈蚀率较低。

(3) 根据不同腐蚀时期后的静载试验结果可知: RC 桩和 GFRP 复合桩未腐蚀前的极限承载力为 5.7 kN、5.9 kN; 腐蚀 30 d 后, RC 桩的承载力约为 5.3 kN, GFRP 桩的承载力约为 5.7 kN; 腐蚀 60 d 后, RC 桩的承载力下降到 4.9 kN 左右, GFRP 复合桩约为 5.6 kN; 腐蚀 90 d 后, RC 桩的承载力降为 4.1 kN, GFRP 复合桩为 5.3 kN。90 d 的腐蚀效果显著, 两种桩型的裂缝均较大, 桩身和桩顶混凝土发生严重剥落现象, 是造成桩基承载力损失的重要原因。

(4) 本文采用盐渍土作为通电介质。盐渍土具有孔隙大、透气性好等特征, 可以更真实的还原桩基服役环境。分别将 GFRP 复合桩和 RC 桩埋置于盐渍土中进行通电加速腐蚀, 更加真实的还原了自然环境中土、水、空气和荷载耦合的多重作用。经试验结果证明: 盐渍土环境下 GFRP 复合桩通电加速锈蚀试验是可行的, 其锈蚀规律与自然环境下的锈蚀规律基本相似。

专栏主持人 刘汉龙



博士, 博士生导师, 重庆大学党委常委、常务副校长, 教育部长江学者特聘教授, 国家杰出青年科学基金获得者, 获何梁何利基金科学与技术创新奖、第十四届光华工程科技奖、首届全国创新争先奖、茅以升土力学与岩土工程学术大奖和 16 项国家与省部级科学技术奖, 担任国际土力学与岩土工程学会 TC303 技术委员会主席, 《土木与环境工程学报》主编。长期从事软弱地基加固与桩基工程、环境岩土力学与工程领域的教学与科研工作。

参考文献

- [1] 董志强, 张光超, 吴刚, 等. 加速老化环境下纤维增强复合材料筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(6): 14-17.
DONG Zhi-qiang, ZHANG Guang-chao, WU Gang, et al. Experimental study on corrosion resistance of fiber reinforced composite bars under accelerated aging environment[J]. Industrial Construction, 2013, 43(6): 14-17.
- [2] 董志强, 吴刚. FRP 筋增强混凝土结构耐久性研究进展[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 1-19, 29.
DONG Zhi-qiang, WU Gang. Research progress on durability of FRP reinforced concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 1-19, 29.
- [3] POUR A F, GHOLAMPOUR A, ZHEN J A, et al. Behavior of FRP-confined high-strength concrete under eccentric compression: Tests on concrete-filled FRP tube columns[J]. Composite Structures, 2019, 220: 261-272.
- [4] 张建伟, 尹海峰, 李荣翔, 等. 不同包裹角度下 GFRP 复合桩水平承载特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1062-1068.
ZHANG Jian-wei, YIN Hai-feng, LI Rong-xiang, et al. Research on horizontal bearing characteristics of GFRP composite piles under different wrapping angles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1062-1068.
- [5] QIAN S Y, ZHANG J Y, QU D Y. Theoretical and experimental study of microcell and macrocell corrosion in patch repairs of concrete structures[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(8): 685-695.
- [6] 宿晓萍, 张利, 郭金辉. 单盐侵蚀与冻融循环作用下混凝土耐久性试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(9): 110-113, 6.
SU Xiao-ping, ZHANG Li, GUO Jin-hui. Experimental study on the durability of concrete under the action of single salt erosion and freeze-thaw cycles[J]. Industrial Construction, 2014, 44(9): 110-113, 6.
- [7] 郭飞. 西部盐渍土地区混凝土耐久性试验研究及寿命预测[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
GUO Fei. Study on durability test and life prediction of concrete in saline soil areas in Western China[J]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [8] 满都拉, 银花, 曹美琪. 盐渍土环境下混凝土耐久性研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(11): 3575-3580, 3606.
MAN Du-la, YIN Hua, CAO Mei-qi. Research progress of concrete durability in saline soil environment[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(11): 3575-3580, 3606.
- [9] TANG K K. Stray current induced corrosion of steel FIBRE reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 100: 445-456.
- [10] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 钢筋混凝土在重盐渍土通电环境中基于 Wiener 随机过程可靠性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2020, 51(8): 2266-2276.
LU Cheng-gong, WEI Zhi-qiang, QIAO Hong-xia, et al. Reliability analysis of reinforced concrete in heavy saline soil energized environment based on Wiener stochastic process[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51(8): 2266-2276.
- [11] YAN X, KUNHUA G, LIN L. Effect of chloride on tensile and bending capacities of basalt FRP mesh reinforced cementitious thin plates under indoor and marine environments[J]. International Journal of Polymer Science, 2016: 7162313.
- [12] IRMAWATY R, DJAMLUDDIN R, KWANDOU R. Effect of sea water submersion on GFRP-S bonding capacity of reinforced concrete beam[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 3885(752-753): 668-673.
- [13] KABIR M H, FAWZIA S, CHAN T H T, et al. Comparative durability study of CFRP strengthened tubular steel members under cold weather[J]. Materials and Structures, 2016, 49(5): 1761-1774.
- [14] ALSAAD A, HASSAN G. Utilization of CFRP for strengthening RC columns in marine environment[J]. Case Studies in Construction Materials, 2017, 7: 30-35.
- [15] KASHI A, RAMEZANIANPOUR A A, MOODI F. Durability evaluation of retrofitted corroded reinforced concrete columns with FRP sheets in marine environmental conditions[J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 520-533.

(下转第 32 页)