

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.003

海水侵蚀工程水泥基复合材料排水管力学性能研究

陈瑞¹, 伍浩良^{1,2}, 宋紫豪¹, 黄胜^{1,2}, 马保松^{1,2}

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 中山大学 隧道工程灾变防控与智能
建养全国重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 滨海地区排水管道长期服役于高盐、高湿度环境,传统混凝土及钢筋混凝土管材易腐蚀劣化,影响系统运行安全。为提升排水管道耐久性,采用工程水泥基复合材料(ECC)制备管材,并开展海水环境下的抗压、拉伸及外压荷载试验。结果表明,ECC管经270 d海水浸泡后,抗压强度提升至56.1 MPa,极限抗拉强度达4.70 MPa,仍保持0.8%的延性,外压承载力优于现行Ⅲ级钢筋混凝土管标准要求。ECC管无需配置钢筋即可实现良好的抗裂和承载性能,在高腐蚀、高湿度环境下表现出优异的耐久性与工程适配性。

关键词: 工程水泥基复合材料; 海水侵蚀; 排水管道; 延性; 抗压强度

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0016-08

Mechanical Properties of ECC Drainage Pipes under Seawater Exposure

CHEN Rui¹, WU Haoliang^{1,2}, SONG Zihao¹, HUANG Sheng^{1,2}, MA Baosong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. State Key
Laboratory for Tunnel Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In coastal areas, drainage pipes are exposed to high-salinity and high-humidity environments for extended periods, where traditional concrete and reinforced concrete pipes are prone to corrosion and deterioration, compromising system safety. To enhance the durability of drainage pipes, this study utilized engineered cementitious composites (ECC) to fabricate drainage pipes and conducted compressive, tensile, and external load-bearing tests under simulated seawater conditions. The results show that after 270 days of seawater immersion, ECC pipes achieved a compressive strength of 56.1 MPa, an ultimate tensile strength of 4.70 MPa, and maintained a ductility of 0.8%. The external load-bearing capacity exceeded the standard requirements of class III reinforced concrete pipes. Without requiring steel reinforcement, ECC pipes demonstrated excellent cracking resistance and load-bearing performance, along with outstanding durability and engineering adaptability in severely corrosive and high-humidity environments.

Keywords: engineered cementitious composites (ECC); seawater exposure; drainage pipes; ductility; compressive strength

当前,混凝土管道因其制作工艺简单、刚度高,成为排水管网中最常用的管材。全国城市市政公

基金项目: 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087)

通信作者: 伍浩良 E-mail: wuhliang5@mail.sysu.edu.cn

用设施普查数据显示,20世纪90年代末,我国市政排水管道中混凝土管与钢筋混凝土管占比达67.51%,为主要使用材料。排水管通常长期处于高湿度、高腐蚀环境中,若防护措施不到位,极易遭受化学或电化学腐蚀,其中钢筋锈蚀尤为普遍^[1-2]。素混凝土本身抗拉和抗裂性能较差,在海洋大跨度高应力结构中服役时易开裂甚至剥落。尽管钢筋混凝土管较好地弥补了素混凝土抗裂性能不足的缺陷,但若出现裂缝,氯离子便可迅速渗透至混凝土内部,诱发钢筋腐蚀^[3-4],从而降低承载力,甚至引发结构破坏。特别是在海洋或滨海区域,环境中氯离子浓度高、离子半径小、迁移速度快,加之干湿循环和盐雾冲击等因素共同作用,使得钢筋混凝土管中氯离子侵蚀过程显著加剧。腐蚀产物体积膨胀会引发混凝土保护层开裂、剥落,导致管道结构耐久性显著下降,成为滨海城市排水系统中亟待解决的重要技术难题^[5-6]。目前,混凝土排水管常采用材料改性、表面涂层、外包防护及阴极保护等方式进行防腐^[7],但普遍存在施工复杂、成本较高及耐久性有限等问题,难以从根本上解决长期服役过程中的腐蚀劣化隐患。

工程水泥基复合材料(ECC)是一类具备高强度、高延性、裂缝自控与自愈合能力的新型材料,在复杂腐蚀环境中展现出良好的稳定性与耐久性^[8-12]。研究^[13-14]表明,ECC可用于加固受硫酸盐或氯离子侵蚀受损的混凝土结构。郑福斌^[15]开展了超高性能混凝土管道的制备与研究,结果表明超高性能混凝土在抗氯离子渗透性和抗污水腐蚀性方面均优于普通混凝土,能够有效延长管道使用寿命。与传统钢筋混凝土管道不同,ECC管材无需配置钢筋即可具备良好的抗裂性能和承载能力,有望有效解决钢筋腐蚀等问题,适用于滨海等高腐蚀环境下的排水工程。为探究ECC在海水腐蚀环境中的适用性,以其为基础制备排水管样品,并开展抗压、拉伸及外压荷载等力学试验,系统评估ECC在模拟海水服役环境中的性能表现,研究结果可为滨海城市排水管道的新材料选型、结构设计及工程推广提供数据支持和理论依据。

1 试验方案

1.1 试验材料和配比

试验采用的原材料包括:42.5复合硅酸盐水泥、I级粉煤灰、70~120目石英砂(细骨料),以及聚

乙烯醇(PVA)纤维。为提高ECC的和易性,选用水溶性良好的液体减水剂作为外加剂。每立方米ECC的配比为:水泥565.70 kg,粉煤灰678.90 kg,石英砂448.10 kg,水311.10 kg,减水剂10.00 kg,PVA纤维18.46 kg。试验所用PVA纤维的参数为:长度12 mm,直径39 μm ,弹性模量16.9 GPa,抗拉强度1 600 MPa,伸长率7%,密度1 300 kg/m^3 。

1.2 试样制备与养护

抗压强度测试采用40 mm×40 mm×40 mm的立方体试块,单轴拉伸测试采用狗骨型试样,管道外压荷载采用小尺寸管道试样,具体见图1。

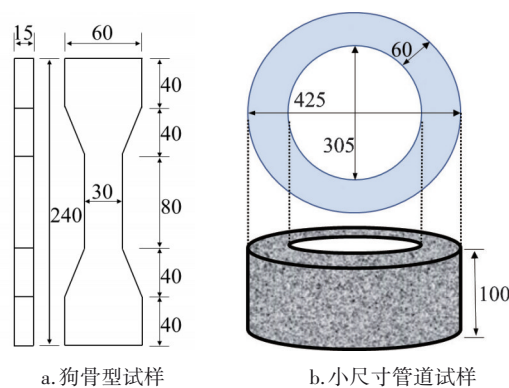


图1 狗骨型试样和管道试样尺寸

Fig.1 Specimen dimensions of dogbone and pipeline

试样成型过程如下:首先按配比计算并称量水泥、粉煤灰、石英砂、自来水、减水剂以及纤维;然后将凝胶物质倒入已清洗并润湿的搅拌机中搅拌均匀。浆料搅拌完成后,及时倒入提前洁净并涂有脱模剂的模具中。狗骨型试样一次浇筑成型,其余试样分两次浇筑成型。浇筑完成后,狗骨型试样盖上配套顶板,其余试样覆上一层洁净塑料薄膜,以防止水分过快散发,随后将试样置于自然环境中养护。从浆料入模开始计时,试样在自然环境中养护24 h后及时脱模并编号。最后对试样进行分类,以进行不同条件的养护。模拟海水按质量比水:海盐=964:36自行配制。本文以在空气基准养护60 d的试样为对比组,其余条件下,试样根据完成基准养护的60 d后,继续在空气或海水环境中养护的时间进行命名。

1.3 试验设备与方法

1.3.1 流动度测试

浆体搅拌完成后,立即使用水泥胶砂流动度测定仪对浆体进行跳桌试验,以测定其流动度。

1.3.2 抗压及拉伸测试

试样养护至设定龄期后取出,将表面擦拭干净并测量尺寸,随后进行力学性能测试。抗压试验采用水泥胶砂抗折抗压试验机,加载速率为2.4 kN/s,加载至试样破坏并记录破坏荷载,各养护条件下的试样均应保证获得3个及以上有效数据。拉伸性能测试采用微机控制电子万能试验机,加载速率为0.5 mm/min,加载至荷载衰减为峰值荷载80%以下时结束试验。通过仪器自带的荷载传感器记录荷载,试样变形测量区取等截面区。

1.3.3 外压荷载试验

根据《混凝土和钢筋混凝土排水管试验方法》(GB/T 16752—2017),采用万能试验机以三点荷载法进行外压荷载试验。加载速率为20 N/s,以裂缝宽度达到0.20 mm时的荷载为待测管道的裂缝荷载。通过仪器自带的荷载传感器记录荷载,两个位移传感器分别固定在管顶和管侧中心处。试验前,在试样表面制作散斑。测试过程中,使用数码相机对图像进行实时采集,后续采用数字图像相关(DIC)系统进行分析。相较于传统的贴应变片法,该方法无需在试样表面贴片,非接触式测量既避免了对试样力学行为的干扰,又可获取全场范围内的应变数据,更加经济与高效。

2 试验结果及分析

2.1 流动性和抗压强度

试验测得材料的流动度为156 mm,满足一般混凝土的施工要求。ECC试块抗压强度测试结果如图2所示。

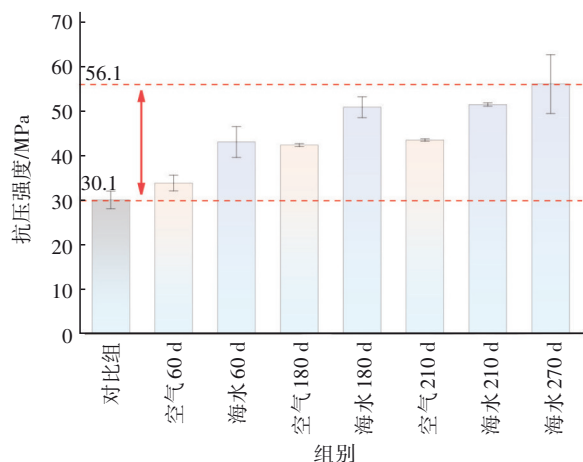


图2 ECC试块抗压强度测试结果

Fig.2 Results of compressive strength of ECC test block

养护龄期内,相较于对比组,随着养护时间增长,试块的抗压强度均呈上升趋势,至后期强度增长逐渐趋缓。分析其原因:水化初期,原材料水泥及粉煤灰中的主要矿物成分与水反应,生成水化硅酸钙、氢氧化钙及钙矾石等水化产物;随着水化反应的持续进行,这些产物不断堆积、相互连接并填充孔隙,使基体密实度逐步提高,抗压强度随之增大^[16-17]。至养护后期,材料表面可参与反应的矿物成分大部分已消耗,内部反应所需的水分补给受限,参与水化反应的矿物和水分逐渐减少,因此强度增长趋于平缓^[18]。

相同龄期内,海水浸泡养护下试块的抗压强度高于空气养护。空气养护210 d组的抗压强度为43.5 MPa,海水浸泡210 d组为51.5 MPa,与对比组(30.1 MPa)相比,分别提升了44.5%和71.1%。海水浸泡条件下,ECC始终处于高湿度环境,参与水化反应的水分充足,可保证水化反应持续、充分地进行,从而生成更多水化产物以提升抗压强度。相比之下,空气养护时,ECC处于湿度相对较低的环境,参与水化的水分较少,水化产物相应减少;此外,空气养护时ECC表面水分散失速度较快,易在其表面形成一层硬壳,阻碍内部水分散失及外部水分渗入,进而影响水化反应的进行,抑制抗压强度的提升^[18-19]。

2.2 拉伸性能分析

ECC管的拉伸应力-应变曲线均呈明显的弹性和应变硬化阶段,具体如图3所示。

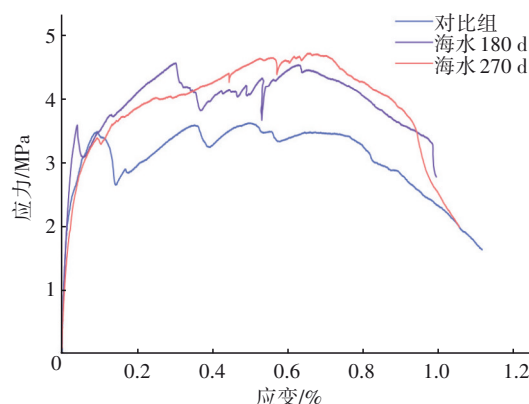


图3 ECC管拉伸应力-应变曲线

Fig.3 Tensile stress-strain curves of ECC pipes

由图3可知,在弹性阶段,应力-应变曲线呈线性关系。随着应力逐渐增加,曲线偏离线性并达到开裂点,试样出现第一条裂缝。此后,随着应变和

应力增大,ECC截面处产生并扩展出多条微裂缝。由于ECC中均匀分散着纤维,当基体开裂后,在荷载作用下裂缝张开,横跨裂缝两侧的纤维受拉,其与基体间的黏结力阻止裂缝进一步扩展并承担部分拉力,使材料能够承受更大荷载,应力持续增加,从而出现应变硬化现象。应变硬化结束后,较多纤维因达到极限桥接状态而被拉断,拉应力急剧下降;试样破坏后荷载立即释放,加之纤维桥接的弹簧效应,导致大部分裂缝收缩。

养护龄期内,与对比组相比,随着海水浸泡时间延长,ECC管的极限抗拉强度呈缓慢增大趋势,而拉伸应变变化不明显。对比组的极限抗拉强度为3.61 MPa,在海水中浸泡180和270 d后,ECC管的极限抗拉强度分别为4.55和4.70 MPa,分别增长26.0%和30.2%。相较于对比组,海水浸泡条件下,养护时间延长且水分充足,ECC可进行持续的水化反应,从而提高其极限抗拉强度。在拉伸应变方面,所有ECC试样的极限拉伸应变均满足大于0.5%的要求,显示出优异的延性^[20]。ECC的高韧性和裂缝自愈合机制使其在地下排水系统中具有更长的预期使用寿命,为提升城市排水基础设施的长期服役性能提供了借鉴。

2.3 ECC管外压荷载试验

2.3.1 外压荷载试验结果

在外压荷载测试过程中,加载初期材料处于弹性变形阶段,ECC管的变形与外压荷载呈线性关系,类似于传统材料管道。此时,管道基体(主要为水泥浆体)和纤维共同承担压力。从微观层面看,材料内部的化学键及纤维的拉伸作用共同抵抗外压,孔隙结构亦发生轻微压缩。随着位移继续增加,荷载-位移曲线上升斜率逐渐变缓,表明材料进入弹塑性阶段,内部开始出现不可逆的塑性变形。荷载增长速度变慢,但仍持续增加,ECC管不断产生微细裂缝,荷载-位移曲线出现波动,表现出韧性变化特征。当达到峰值荷载后曲线开始下降,ECC管道发生破坏,部分曲线仍持续波动,此时管道仍保留一定的承载力及较好的延性。外压荷载的计算为:

$$P = F/L \quad (1)$$

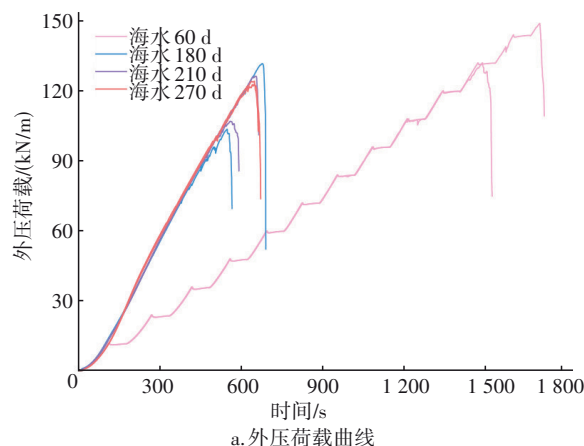
式中: P 为外压荷载,kN/m; F 为破坏压力,kN; L 为管道的有效管体长度,0.1 m。

不同龄期及养护条件下ECC管的外压荷载测

试结果如图4所示。

随着海水浸泡时间的延长,ECC管的峰值荷载呈下降趋势,管顶位移的变化趋势与其一致。原因可能在于:海水中氯离子进入水泥基材料后,与氢氧化钙反应生成易溶性氯化钙,导致材料内部钙成分流失,从而破坏材料的化学平衡和结构稳定性^[21];此外,氯离子还可能破坏纤维与基体之间的化学键,使界面黏结强度下降^[22]。同时,海水中的硫酸根离子可能与水泥基材料中的氢氧化钙和水化铝酸钙反应,生成钙矾石和石膏。当这两种产物的体积超过孔隙空间时,混凝土内部产生膨胀应力,一旦膨胀应力超过混凝土的极限抗拉强度,便会出现微裂缝,加速硫酸盐腐蚀过程^[23]。

由图4可知,海水浸泡60 d组的峰值荷载为140.31 kN/m,管顶位移为4.43 mm;海水浸泡270 d组的峰值荷载为123.34 kN/m,管顶位移为3.81 mm。值得注意的是,海水浸泡270 d后试样的外压荷载仍高于《混凝土和钢筋混凝土排水管》(GB/T 11836—2023)中Ⅲ级钢筋混凝土管的破坏荷载设计值(内径300 mm、设计壁厚60 mm时,Ⅲ级钢筋混凝土管破坏荷载为80 kN/m;需说明的是,试验中管道设计长度为100 mm,而规范设计长度大于1 m),这充分证明了ECC管的优异性。由此可以推测,在相同设计荷载条件下,ECC管采用更小的壁厚即可满足结构强度与耐久性要求,从而有效增大管道过水断面,提高排水能力,具有显著的水力与空间利用优势。其无需配置钢筋即可实现高强度与良好的抗裂性能,这一特性对于高腐蚀、高湿度等特殊环境下的管材选型与结构优化具有良好的工程借鉴意义。



a. 外压荷载曲线

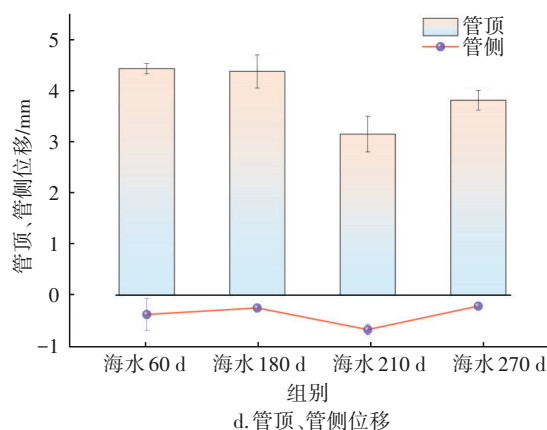
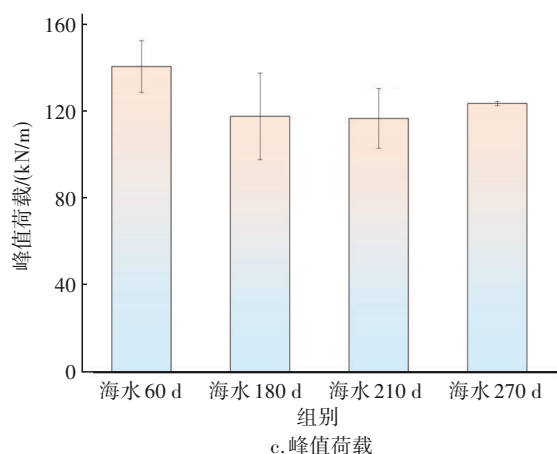
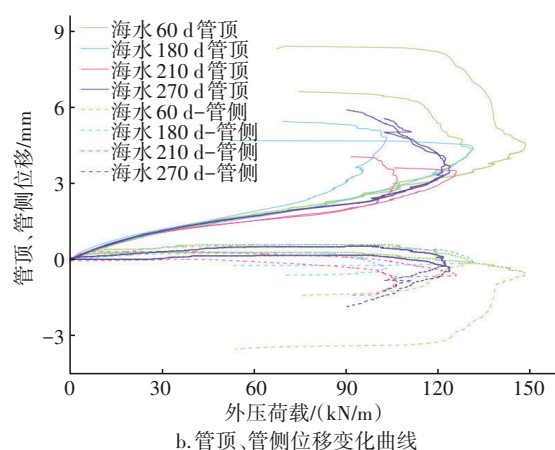


图 4 ECC 管外压荷载测试结果

Fig.4 Results of external load-bearing test of ECC pipes

2.3.2 ECC 管无损监测分析

通过 DIC 技术分析散斑图像,可获得 ECC 管在受力过程中的表面位移变化、裂纹萌生位置、扩展方向与速度,以及应变演变规律等信息。

ECC 管在三点加载各阶段的 DIC 应变云图如图 5 所示。

由图 5 可知,ECC 管在加载过程中从初始状态到破坏可分为以下 4 个阶段:①弹性阶段,应变分布

均匀,无应变集中现象,管道处于弹性状态。②初裂阶段,管底与管顶内壁出现首条微裂缝,云图呈现局部应变集中带。③多缝开裂阶段,裂缝数量增加并向管腰扩展,云图出现多条平行高应变带,纤维桥接作用使管道在开裂后仍能继续承载。④破坏阶段,峰值荷载后,高应变区域扩大,管道进入软化阶段,承载能力下降,但裂缝保持细密分布。分析可知,在管顶及管底裂缝出现之前,ECC 管的管顶及管底内壁受拉、外壁受压,管腰内壁受压、外壁受拉。随着管顶及管底内壁裂缝的出现与发展,管道内壁受拉区域和外壁受压区域逐渐减小,而内壁受压区域和外壁受拉区域逐渐增大。当管顶及管底内壁裂缝贯穿至外壁时,管道内壁受拉区域和外壁受压区域消失。

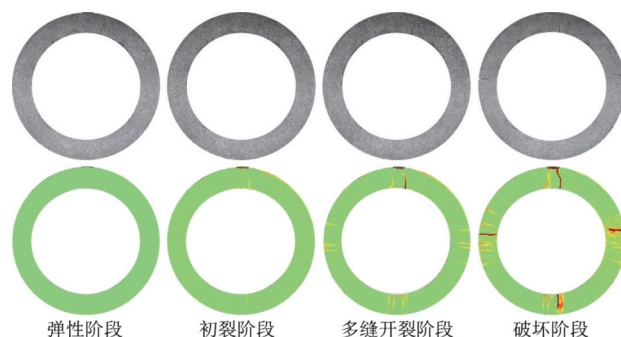
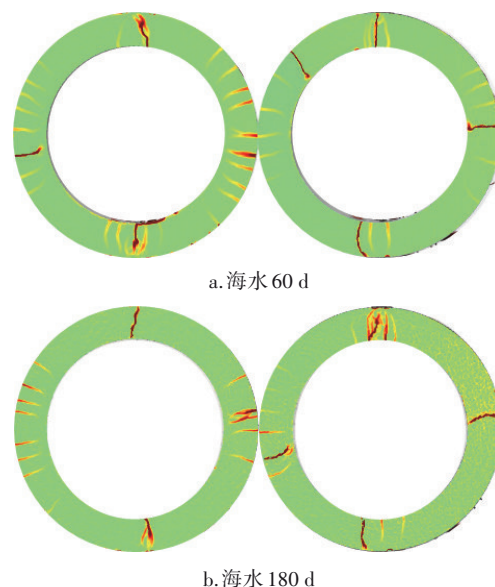


图 5 ECC 管在三点加载各阶段的 DIC 应变云图

Fig.5 DIC strain contours of ECC pipe at various stages under three-point loading

ECC 管在不同龄期下的裂缝形态分布如图 6 所示。



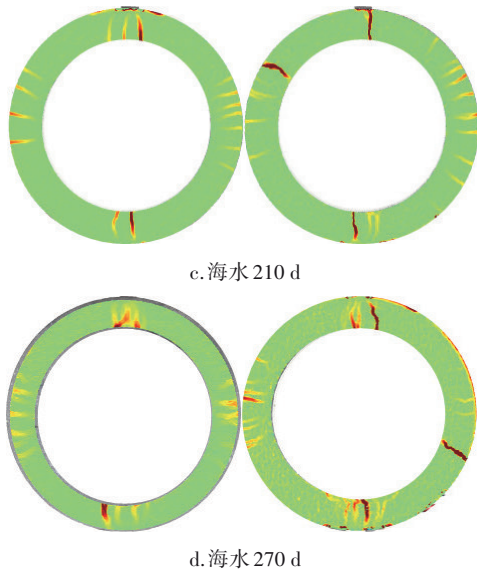


图6 ECC管道在不同龄期时的裂缝形态分布云图

Fig.6 Crack pattern distribution contours of ECC pipes at different curing ages

由图6可知,每条ECC管均具有多缝开裂能力,在管顶及管底内侧、管腰外侧均产生了多条裂缝,这些部位均为拉应变集中区,也是管道最容易发生破坏失效的位置。随着在海水环境中浸泡时间的延长,管道裂缝数量呈先增加后减少的趋势。ECC管的破坏过程与普通混凝土管道存在显著差异:普通混凝土管道通常在初裂后迅速发生脆性破坏,裂缝数量少且宽度大;而ECC管在初裂后经历了较长的多缝开裂阶段,裂缝数量多且分布均匀,裂缝宽度得到了有效控制。这一现象与ECC材料的应变硬化特性相一致,也验证了纤维桥接作用在管道结构中的有效性。此外,DIC云图显示,裂缝主要集中在受拉区,而受压区未出现裂缝,说明管道的破坏以弯曲受拉为主。

2.3.3 管道的承载力推导计算

研究^[24]表明,混凝土管道底部和顶部的最大弯矩 $M_{\max}$ 相似。 $M_{\max}$ 可通过最大外部荷载($F_{\max}$)表示,对于ECC管,两者关系为:

$$M_{\max} = \text{MAF} \cdot F_{\max} \cdot (D_i + t) \quad (2)$$

式中:MAF为ECC管极限裂缝荷载的弯矩拱形系数,取0.254; D_i 为管道内径,取305 mm; t 为管壁厚度,取60 mm。

Zhu等^[25]的研究表明,若已知ECC材料的拉伸与压缩性能,则可通过管道尺寸(直径、壁厚和宽度)设计,利用一系列方程预测ECC管的承载能力。

管道底部的应力和应变分布模型^[25]如图7所示。其中, b 为所取截面宽度, a 为微裂纹区厚度, c 为截面中轴厚度, e 为截面受拉边缘至受压区刚度变化折点的距离, x 为管道底部从内壁任一点沿管壁厚度到拉应力位置的距离; σ_t 为抗拉强度, σ_{tc} 为初裂强度, σ_c 为抗压强度; ε_t 为拉伸应变, ε_{tc} 为初裂应变, ε_c 为压缩应变。随着外部荷载增加,ECC管底部的微裂缝由内表面向外表面延伸。同时,ECC管截面中轴从中心轴向位置 c 移动。基于平截面假定,假设管道应变从管内壁到外壁沿管壁厚度截面呈线性变化,则应力分布可通过应力-应变分布模型进行推导。

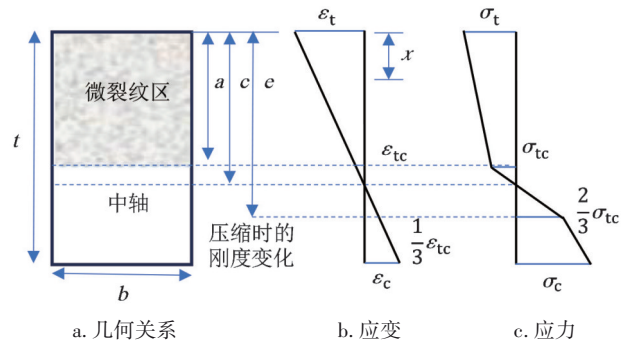


图7 管道截面应力、应变分布模型

Fig.7 Model of stress and strain distribution in pipe cross-section

位置 x 处的应力、应变^[25]分别为:

$$\sigma_1(x) = \sigma_{tc} + \frac{\sigma_{tu} - \sigma_{tc}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tc}} [\varepsilon(x) - \varepsilon_{tc}] \quad 0 < x \leq a \quad (3)$$

$$\sigma_2(x) = \frac{\sigma_{tc}}{\varepsilon_{tc}} \varepsilon(x) \quad a < x \leq c \quad (4)$$

$$\sigma_3(x) = \frac{-2\sigma_{cp}}{\varepsilon_{cp}} \varepsilon(x) \quad c < x \leq e \quad (5)$$

$$\sigma_4(x) = -\frac{\sigma_{cp}}{2} \left[1 + \frac{\varepsilon(x)}{\varepsilon_{cp}} \right] \quad e < x \leq t \quad (6)$$

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_t + (\varepsilon_{tc} - \varepsilon_t) \frac{x}{a} \quad 0 < x \leq c \quad (7)$$

$$\varepsilon(x) = -\left[\varepsilon_t + (\varepsilon_{tc} - \varepsilon_t) \frac{x}{a} \right] \quad c < x \leq t \quad (8)$$

式中: σ_{tu} 为极限抗拉强度,MPa; ε_{tu} 为极限拉伸应变,%; σ_{cp} 为极限抗压强度,MPa; ε_{cp} 为极限抗压应变,%。

研究^[25]表明,截面中轴厚度、截面受拉边缘至受压区刚度变化折点的距离以及拉伸应变与压缩

应变的几何关系分别为:

$$c = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t - \varepsilon_{tc}} a \quad (9)$$

$$e = \frac{\frac{1}{3}\varepsilon_{cp} + \varepsilon_t}{\varepsilon_t - \varepsilon_{tc}} a \quad (10)$$

$$\varepsilon_c = \frac{t - c}{c} \varepsilon_t \quad (11)$$

此时,力和力矩平衡方程为:

$$\int_0^a \sigma_1(x) dx + \int_a^c \sigma_2(x) dx + \int_c^e \sigma_3(x) dx + \int_e^t \sigma_4(x) dx = 0 \quad (12)$$

$$\int_0^a \sigma_1(x) x dx + \int_a^c \sigma_2(x) x dx + \int_c^e \sigma_3(x) x dx + \int_e^t \sigma_4(x) x dx = \frac{M_{\max}}{b} \quad (13)$$

对于ECC管,无论是将 $\varepsilon_t = \varepsilon_m$ 还是 $\varepsilon_c = \varepsilon_{cp}$ 代入式(12),均可求得微裂缝区厚度 a ,进而通过式(13)计算最大弯矩 $M_{\max}$,最后通过式(2)求得最大外部荷载 $F_{\max}$ 。

3 结论

① 抗压性能方面:在海水作用下,ECC的抗压强度随龄期增长而提升,未出现劣化迹象。空气养护60 d试样的抗压强度为30.1 MPa,海水浸泡270 d后提升至56.1 MPa,增长明显,表明材料在海水中具备良好的力学稳定性。

② 拉伸性能方面:海水浸泡可在一定程度上增强ECC的极限抗拉强度,且对延性无明显影响。空气养护60 d试样的极限抗拉强度为3.61 MPa,应变为0.8%;海水浸泡270 d后,极限抗拉强度增至4.70 MPa,应变仍可维持在0.8%。这说明即使长期浸泡,ECC仍能保持优异的拉伸韧性。

③ 外压荷载性能方面:随着浸泡时间延长,ECC管的抗外压性能略有下降,但整体仍优于现行排水管道规范要求。海水浸泡270 d后,ECC管的抗压强度达123.34 kN/m,管顶位移为3.81 mm,仍保持多缝细化开裂模式。其外压承载能力高于GB/T 11836—2023中Ⅲ级钢筋混凝土管的破坏荷载设计值,验证了ECC管在排水领域的优越性能。

在当前滨海城市排水系统的新建与改造工程中,ECC管材具有较强的工程适配性与推广潜力,有望替代传统排水管材,为排水工程设计人员在材料选型、耐久性控制及降低运维成本等方面提供新

的技术路径。建议在后续工程实践中开展小规模试点应用与长期服役性能跟踪研究,以进一步验证其应用效果与工程可行性。

参考文献:

- [1] 王志委. 埋地式圆形混凝土排污管腐蚀规律及蚀后力学性能[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
WANG Z W. Analysis on Corrosion Rule and Mechanical Properties of Underground Circular Concrete Drainage Pipe [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012(in Chinese).
- [2] CHEN D, MAHADEVAN S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation [J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(3): 227-238.
- [3] FANG C, LUNDGREN K, CHEN L, et al. Corrosion influence on bond in reinforced concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(11): 2159-2167.
- [4] AL-AMEERI A S, RAFIQ M I, TSILOULOU O. Combined impact of carbonation and crack width on the chloride penetration and corrosion resistance of concrete structures [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 115: 103819.
- [5] 刘玉美, 杨浪, 饶峰, 等. 氯离子对海工混凝土钢筋腐蚀的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(9): 3059-3074.
LIU Y M, YANG L, RAO F, et al. Research progress of chloride ions on corrosion of marine concrete reinforcement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(9): 3059-3074(in Chinese).
- [6] 姜慧, 刘奇东, 徐洁, 等. 海洋环境人工气候模拟加速试验设计[J]. 混凝土, 2013(11): 18-21, 24.
JIANG H, LIU Q D, XU J, et al. Artificial climate simulation acceleration test design of marine environment [J]. Concrete, 2013(11): 18-21, 24(in Chinese).
- [7] MERACHTSAKI D, TSARDAKA E C, ANASTASIOU E, et al. Anti-corrosion properties of magnesium oxide/magnesium hydroxide coatings for application on concrete surfaces (sewerage network pipes) [J]. Construction and Building Materials, 2021, 312: 125441.
- [8] WAGNER C, VILLMANN B, SLOWIK V, et al. Water permeability of cracked strain-hardening cement-based composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 82: 234-241.
- [9] WANG Q, BANTHIA N, SUN W, et al. Water

- permeability of eco-friendly ductile cementitious composites (EDCC) under an applied compressive stress [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 107: 103500.
- [10] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246–2264.
- [11] SINGH S B. Engineered cementitious composites (ECC): bendable concrete for sustainable and resilient infrastructure [J]. *The Indian Concrete Journal*, 2020 (6): 94.
- [12] LI V C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite [J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98: 483–492.
- [13] ZHOU C, XIE Y, WANG W, et al. Performance-based design for improving impact resistance of RC bridge piers with CFRP grid-reinforced ECC [J]. *Engineering Structures*, 2023, 275: 115217.
- [14] SUN R, LU W, MA C, et al. Effect of crack width and wet-dry cycles on the chloride penetration resistance of engineered cementitious composite (ECC) [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 352: 129030.
- [15] 郑福斌. 超高性能混凝土排水管道的制备及性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- ZHENG F B. Research on the Preparation and Performance of the Drainage Pipeline Made by Ultra High Performance Concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016(in Chinese).
- [16] CHEN X, XU L, WU S. Influence of pore structure on mechanical behavior of concrete under high strain rates [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28 (2): 04015110.
- [17] ISHIKAWA Y, FUKUTOME K, OTSUKI N, et al. Strength development of fly ash concrete using sea water as mixing water [J]. *Cement Science and Concrete Technology*, 2014, 68: 315–322.
- [18] BEDIAKO M, KEVERN J T, AMANKWAH E O. Effect of curing environment on the strength properties of cement and cement extenders [J]. *Materials Sciences and Applications*, 2015, 6(1): 36–42.
- [19] KASANIYA M, THOMAS M D A, MOFFATT E G. Pozzolanic reactivity of natural pozzolans, ground glasses and coal bottom ashes and implication of their incorporation on the chloride permeability of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 139: 106259.
- [20] GUO L P, FEI X P, WU J D, et al. High ductility cementitious composites incorporating seawater and coral sand (SCS-HDCC) for offshore engineering: microstructure, mechanical performance and sustainability [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 147: 105414.
- [21] AHMARAN M, LI V C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(11): 1033–1043.
- [22] LI V C, HORIKOSHI T, OGAWA A, et al. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite [J]. *ACI Materials Journal*, 2004, 101(3): 242–248.
- [23] QUAN X, WANG S, LIU K, et al. The corrosion resistance of engineered cementitious composite (ECC) containing high-volume fly ash and low-volume bentonite against the combined action of sulfate attack and dry-wet cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 303: 124599.
- [24] FUENTE A D L, ESCARIZ R C, FIGUEIREDO A D D, et al. A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 30: 547–555.
- [25] ZHU H, OU J, LI D, et al. Bottom-up innovation for sustainable leakproof engineered cementitious composites (ECC) pipe: design method, ECC material, and pipe structure [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2025, 157: 105947.

作者简介: 陈瑞(1999—), 女, 云南昭通人, 硕士, 主要研究方向为水泥基复合材料。

E-mail: chenr268@mail2.sysu.edu.cn

收稿日期: 2025-08-01

修回日期: 2025-10-27

(编辑: 沈靖怡)