

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.12.002

管片内衬修复用聚合物混凝土材料的性能研究

张涛^{1,2}, 甄亮¹, 王剑锋¹, 黄胜², 马保松², 李杰尧²

(1. 上海公路桥梁<集团>有限公司, 上海 200433; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082)

摘要: 管片内衬法作为一种施工便捷的管道非开挖修复方法,存在管片材料强度与刚度不足等缺点。为此,研究了一种适用于管道修复的新型聚合物混凝土材料。该材料具备聚合物混凝土的固有优势,与钢筋混凝土管道的基体材料兼容性较好,且可通过调节树脂含量获得较高的强度。通过修复前后管道的三边承载试验数值模拟,探讨了该材料对修复管整体结构性能的影响。结果表明,树脂含量为20%的常规聚合物混凝土材料具有良好的修复效果,在早期介入修复时,能够显著提升修复结构的承载能力。

关键词: 管片内衬修复; 聚合物混凝土; 埋地钢筋混凝土管道; 力学性能; 有限元模拟

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)12-0009-07

Properties of Polymer Concrete as a Repair Material for Segmental Lining

ZHANG Tao^{1,2}, ZHEN Liang¹, WANG Jianfeng¹, HUANG Sheng², MA Baosong², LI Jieyao²

(1. Shanghai Road and Bridge <Group> Co. Ltd., Shanghai 200433, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Segmental lining is a convenient trenchless pipe repair technique, however, it suffers from the drawback of low strength and stiffness of the segment material. To address this issue, a novel polymer concrete material suitable for pipe repair was developed. This material not only retains the advantages of polymer concrete, but also exhibits good compatibility with reinforced concrete pipes. High strength can be achieved by adjusting the resin content. The influence of this material on the structural performance of the repaired pipe was investigated through numerical simulations of the three-edge bearing test on pipes before and after repair. The results demonstrate that the conventional polymer concrete with 20% resin content achieves satisfactory repair performance, and the bearing capacity of the repaired structure can be significantly enhanced when the repair is applied at an early stage.

Keywords: segmental lining repair; polymer concrete; buried reinforced concrete pipe; mechanical properties; finite element simulation

当前,我国许多埋地管道因服役周期较长,面临一系列严重问题,亟须进行维护。老化钢筋混凝

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: 黄胜 E-mail: huangsh98@mail.sysu.edu.cn

土管道的结构性缺陷主要为裂缝与腐蚀,这些缺陷源于普通混凝土材料抗拉强度低、抗腐蚀性差,需选用合适的工法与材料进行修复。管片内衬法因其施工机动性强、运输便利等优势,区别于其他非开挖修复工法,在国内外管道修复项目中得到广泛应用^[1]。该法是将片状型材在原有管道内拼接成一条新管道,并对新旧管道之间的间隙进行填充的非开挖修复方法。管片材料通常选用硬质聚氯乙烯(UPVC),其强度和刚度较低,修复后管道的承载力和抗变形能力主要取决于水泥基填料^[2]。

聚合物混凝土以其高强度和轻质特性,非常适合作为管道内衬,用于替代UPVC材料。聚合物混凝土是一种利用聚合物材料(环氧树脂、聚酯和乙烯酯等)覆盖、补充或替代水泥,以增强混凝土力学性能与耐久性的材料^[3]。一般而言,聚合物混凝土的强度远高于普通混凝土^[4-5],且具有优异的耐腐蚀性^[6],其力学性能可能受树脂含量、纤维含量、骨料含量及添加剂种类的影响。尽管已有许多研究通过配合比设计来改善聚合物混凝土的力学性能,但目前尚无将聚合物混凝土管片用作钢筋混凝土管道内衬材料的工程案例。因此,选择适宜的聚合物混凝土配合比,对管片设计至关重要。

本研究采用薄壁聚合物混凝土管片作为内衬,对钢筋混凝土管道进行加固,以提升修复后管道的承载能力。首先,通过聚合物混凝土材料性能测试,开发一种轻质、高强度、耐腐蚀的聚合物混凝土,作为混凝土管道修复内衬的优化材料;随后,基于该材料的特性,开展修复管道三边承载试验(TEBT)的数值模拟,探讨其对管道承载力的影响。

1 聚合物混凝土材料测试

聚合物胶结混凝土的性能优化试验采用控制变量法,分两部分进行。第1部分:在粗、细骨料质量比固定的条件下,对不同树脂含量的轻质聚合物混凝土与常规聚合物混凝土进行试验,研究树脂含量对其抗压强度、抗折强度及抗拉强度等力学性能的影响。第2部分:在上述常规聚合物混凝土的基础上添加碳纤维,制备纤维增强聚合物混凝土,探讨纤维含量对材料抗拉强度与抗折强度的影响。完成基础力学性能试验后,采用扫描电镜(SEM)对破坏后的试样进行微观分析。

1.1 测试材料

轻质聚合物混凝土由环氧树脂基体与珍珠岩

粗骨料等混合制备,常规聚合物混凝土由环氧树脂基体与碎石粗骨料等制备,纤维增强聚合物混凝土则在常规聚合物混凝土的基础上添加短切碳纤维制备而成,具体见图1。试验采用的珍珠岩为多孔轻质骨料,碎石为常规混凝土粗骨料,二者的粒径均为4.75~9.50 mm;河砂为细骨料,粒径为0~4.75 mm。目前尚无针对轻质聚合物混凝土的设计规范,因此本研究中粗、细骨料的质量配比按照其密度比进行混合。

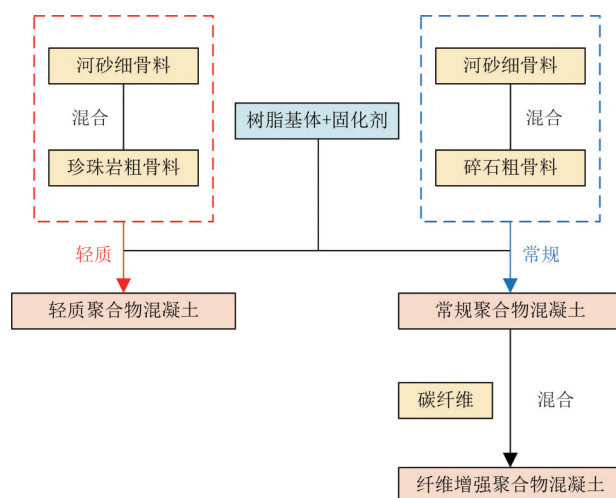


图1 不同聚合物混凝土制备示意

Fig.1 Schematic of different polymer concretes preparation

树脂基体采用环氧树脂。由于轻质聚合物混凝土孔隙率更大,需更多树脂填充,其树脂设计含量分为4组,分别为33%、40%、45%和50%;常规聚合物混凝土的树脂设计含量分为3组,分别为18%、20%和30%。两类聚合物混凝土每组粗、细骨料的质量比均为0.54。

在确定合适的环氧树脂含量后,开展纤维增强聚合物混凝土试验。考虑到纤维应满足轻质、耐腐蚀和高强度要求,选用短切碳纤维作为增强材料,质量分数分别设为0.1%、0.3%及0.5%。

1.2 基础力学性能试验

轻质聚合物混凝土的制备流程如下:首先按质量比混合珍珠岩粗骨料与河砂细骨料,树脂和固化剂按推荐比例混合后,将树脂基体和混合骨料倒入搅拌机搅拌2 min,然后将尚未固化但已搅拌均匀的混合料倒入模具中振实并固化。常规聚合物混凝土采用相同的制备流程,仅将珍珠岩粗骨料替换为碎石粗骨料。纤维增强聚合物混凝土的制备则先

混合树脂、固化剂与纤维,再将含纤维的树脂基体与混合骨料倒入搅拌皿中搅拌,后续步骤相同。

聚合物混凝土基础力学性能测试按照美国材料与试验协会(ASTM)标准进行:弯曲试样参照 ASTM C580-18(2023)^[7],采用尺寸为50 mm×50 mm×200 mm的矩形梁;抗压试样参照 ASTM C579-23^[8]中的B方法,采用边长为50 mm的立方体;拉伸试样尺寸无严格规定,参考 ASTM C580-18(2023)及 ASTM D3039/D3039M-17(2025)^[9],采用尺寸为320 mm×60 mm×13 mm的哑铃型试样。制备后的试样如图2所示。

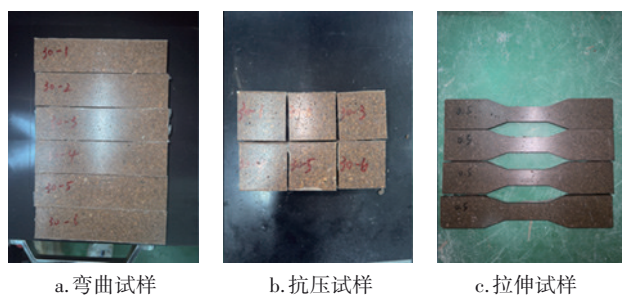


图2 基础力学性能试样

Fig.2 Specimens of basic mechanical properties

弯曲和压缩试验均按相应规范设计,每种配方制备6个试样。拉伸试验在规范方法的基础上进行改进,每种配方进行4次测试。拉伸试验采用万能试验机,引伸计初始标距为60 mm。通过位移控制加载:初始阶段以0.2 mm/min的速率加载,直至试样达到0.5%的拉伸应变;随后将加载速度调整为0.5 mm/min,直至试样拉伸断裂。

1.3 SEM分析

采用SEM对聚合物混凝土拉伸试样的断面进行分析,试验设定的加速电压范围为200 V~30 kV,束流最高达2 μ A。本次分析包括:①未添加骨料的树脂基体;②3种树脂含量的常规聚合物混凝土;③4种树脂含量的轻质聚合物混凝土。

2 测试结果与分析

2.1 树脂含量对力学性能的影响

不同树脂含量的聚合物混凝土力学性能如图3所示。常规聚合物混凝土与轻质聚合物混凝土的强度表现存在明显差异。在树脂含量较少时,随着含量增加,材料的综合性能呈增强趋势,这是因为树脂作为黏结剂,提高了材料的整体连续性与均匀性,从而改善其受力性能。然而,无论常规聚合物

混凝土还是轻质聚合物混凝土,各项力学性能指标随树脂含量的变化趋势并非严格单调;当树脂含量超过各自的最佳值后,性能反而下降。这说明聚合物混凝土存在最优树脂含量,对应的综合力学性能最佳,且不同性能指标的最优树脂含量并不完全一致。综合各项力学性能表现,树脂含量为20%的常规聚合物混凝土力学特性最优;对于轻质聚合物混凝土,树脂含量为45%时性能较好。

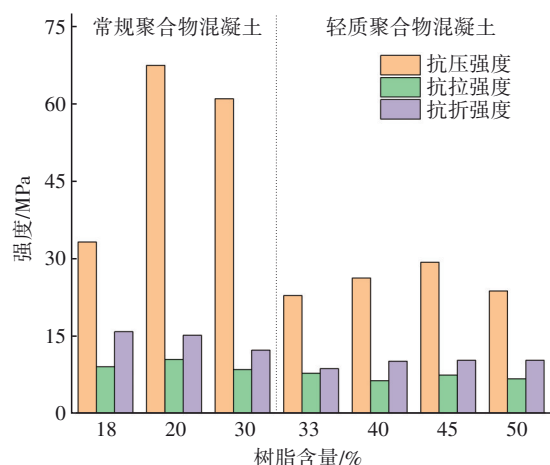


图3 不同树脂含量的聚合物混凝土力学性能

Fig.3 Mechanical properties of polymer concretes with different resin contents

树脂在聚合物混凝土中主要起黏结填料(如砂、骨料等)的作用。适量的树脂能够有效包裹填料,增强填料之间的黏结力,从而提升材料的抗压、抗拉与抗折强度。对于常规聚合物混凝土,当树脂含量达到最优值(20%)时,填料与树脂之间的界面黏结处于最佳状态,材料性能最优。此时,树脂分布均匀并充分渗透至填料间的空隙中,实现最佳的包裹与黏结效果。若树脂含量不足,部分填料未被充分包裹,则会削弱整体的力学性能。反之,若树脂含量过高,超过填料空隙的饱和值,多余的树脂将形成大量富集区,无法有效传递荷载,导致材料强度下降。此外,树脂在固化过程中会产生轻微收缩,过量的树脂将增大内部收缩应力,可能诱发裂纹,进而影响材料的强度和耐久性。

上述规律同样适用于以轻质粗骨料制备的聚合物混凝土。然而,由图3可知,即使采用更高的树脂含量,轻质聚合物混凝土的强度仍低于树脂含量较低的常规聚合物混凝土。其原因在于,多孔轻质粗骨料的物理结构中含有大量孔隙,导致骨料本身

强度较低。在荷载作用下,这些多孔骨料相较于密实的传统骨料更易破碎或变形,从而影响整体混凝土的强度。此外,轻质粗骨料的表面特性与传统骨料不同,其多孔结构可能影响骨料与树脂之间的黏结效果。理想情况下,树脂能够充分渗透骨料表面并形成强黏结,但多孔结构可能导致树脂分布不均,降低黏结强度。同时,多孔轻质骨料的高孔隙率使其吸水率较高,制备混凝土时需要更多的树脂填充孔隙以形成有效黏结。这不仅增加了材料成本,还可能因为树脂过量使用而影响混凝土性能,导致强度下降。在实际修复工程中,应权衡主次矛盾,合理选择材料:若原管道破坏较严重,应选用常规聚合物混凝土作为管片材料;反之,可选用轻质聚合物混凝土。

2.2 纤维含量对力学性能的影响

在树脂含量为20%的常规聚合物混凝土中,分别添加质量分数为0.1%、0.3%和0.5%的3 mm短切碳纤维,其抗拉强度分别为8.62、7.55和8.76 MPa,抗折强度分别为15.13、14.95和14.90 MPa。结果表明,添加不同质量分数的短切碳纤维对聚合物混凝土的抗拉强度与抗折强度提升效果有限。究其原因,可能包括以下几方面:首先,碳纤维在复合材料中的体积分数仍然较低,虽质量分数有所增加,但可能未达到显著改善力学性能的临界值。其次,制样过程中,若碳纤维在聚合物混凝土中分布不均,易形成团聚,不仅无法发挥增强作用,反而可能成为力学薄弱点,影响整体强度。此外,不同碳纤维的力学性能存在差异,其模量、强度等属性可能限制了其对聚合物混凝土的增强效果。同时,碳纤维和树脂之间的界面黏结性能也对复合材料强度具有重要影响;若界面黏结不良,即使添加碳纤维也难以有效传递荷载,因此对强度的提升作用有限。综上,纤维对聚合物混凝土性能的影响主要取决于其兼容性、表面处理及分散工艺,其含量的影响相对较小。

2.3 SEM结果分析

未添加骨料的树脂基体和不同树脂含量的常规聚合物混凝土试样的SEM照片见图4。未添加骨料的树脂基体断裂面相对平滑,呈现出脆性断裂特征。在相同放大倍率下,添加碎石粗骨料的聚合物混凝土断裂面与纯树脂基体存在显著差异:其断裂面沿骨料表面发展,形成锯齿状形貌,局部区域出

现骨料剥离。这是骨料-树脂基质界面处的内力超过界面黏结强度所致。随着树脂含量的增加,断裂面愈加粗糙,几何形态也更为复杂。

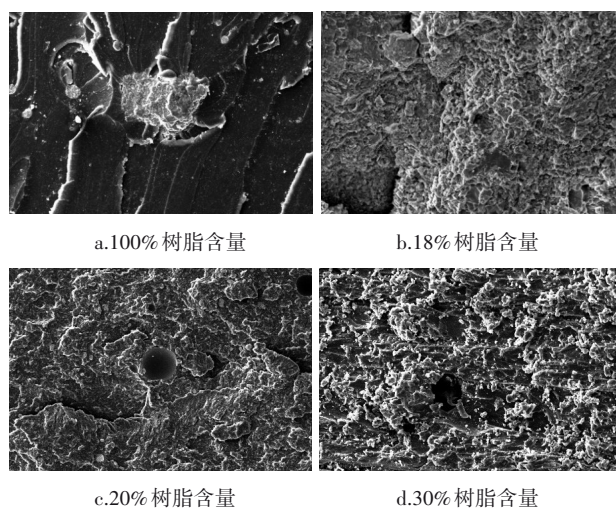


图4 树脂基体和不同树脂含量的常规聚合物混凝土SEM照片

Fig.4 SEM photos of resin matrix and conventional polymer concretes with different resin contents

轻质聚合物混凝土的断面形态与常规聚合物混凝土存在明显差异,具体见图5。与未添加骨料的树脂基体相比,珍珠岩粗骨料以外区域的断裂模式与碎石粗骨料以外区域相同,呈锯齿状断裂。而与常规聚合物混凝土相比,其孔隙率更大。在相同放大倍率下,常规聚合物混凝土几乎无明显气泡,而轻质聚合物混凝土中孔隙占比较大,两者断面形态差异显著。此外,轻质聚合物混凝土的断裂多沿珍珠岩粗骨料截面发展,其多孔结构在图像中清晰可见。结合基础力学性能测试结果可知,聚合物混凝土的强度不仅与骨料-基质界面的黏结强度有关,还取决于粗骨料自身的孔隙结构和力学性能。

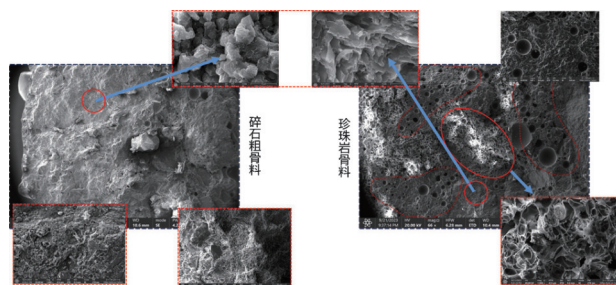


图5 常规/轻质聚合物混凝土断裂面的SEM照片对比

Fig.5 SEM photos comparison of fracture surfaces of conventional/lightweight polymer concrete

3 聚合物混凝土内衬修复管道有限元模拟

3.1 模拟工况

TEBT是一种常用的管道评估方法,应用该法时需将管体置于两个平行且间距较小的下支承梁上,然后通过一个上支承梁对管顶施加荷载。虽然TEBT无法准确模拟管道受荷后与周围土体的相互作用,但其已被证明能够有效评估管道质量,并广泛应用于研究及实际工程设计中^[10-11]。此外,TEBT常用于测试原管道与非开挖修复后管道的结构性能,以评价修复效果^[12-13]。本研究采用ABAQUS软件进行管道的TEBT数值模拟分析,探究在不同修复时机下,原管与内衬复合结构的性能变化。

钢筋混凝土原管的参数依据《钢筋混凝土排水管管体结构尺寸与配筋设计图册》中推荐值选取。为真实评估聚合物混凝土管片对修复后管道性能的影响,本次模拟不设置较厚的注浆层,采用界面单元代替原管与内衬之间的连接层;且将内衬视为一体化结构,不考虑管片接缝。聚合物混凝土内衬的力学参数采用树脂含量为20%的常规聚合物混凝土试验值。原管与内衬的尺寸及材料参数分别见表1和表2。

表1 原管参数

Tab.1 Parameters of the host pipe

内径/ mm	外径/ mm	壁厚/ mm	强度 等级	钢筋	开裂荷 载/kN	破坏荷 载/kN
1 000	1 200	100	C30	双层 CRB550	69	100

表2 内衬参数

Tab.2 Parameters of the lining

内径/mm	外径/mm	壁厚/mm	等效强度 等级	轴向长度/ mm
950	1 000	25	C70	1 000

根据表1和表2中的数据,通过ABAQUS软件进行1:1建模,采用ABAQUS/Standard求解。混凝土采用混凝土塑性损伤(CDP)模型进行模拟,用于描述其非线性损伤全过程,网格划分为三维六面体减缩积分单元(C3D8R)。钢筋笼嵌入混凝土管中,采用两节点线性三维桁架单元(T3D2)进行网格划分。此外,引入Cohesive单元模拟管道-内衬界面的黏结行为,定义零厚度的黏性截面作用于内衬与原管道内壁的接触界面。随着荷载和位移变化,界面将依据设定的强度参数发生分离及损伤失效。该

单元需赋予黏结抗拉强度、剪切抗拉强度及断裂能等参数,相关参数可参考已有研究中的界面试验与单边缺口梁试验获得^[14-16]。

首先进行原管道的TEBT模拟,在此基础上采用追踪单元法,在加载至一定程度后,于原管内壁形成聚合物混凝土内衬,随后对内衬修复后的管道继续加载。追踪单元法在管道模型建立之初即创建内衬层,并通过调用*Elcopy命令在内衬单元处复制一个追踪单元层。该单元层能够捕捉初始受力状态下既有管道的变形,并在需要修复时激活内衬单元。修复时机根据原管道管顶的变形率来确定,以探讨不同破坏程度对聚合物混凝土内衬修复性能的影响。

3.2 原管道模拟结果

原管道破坏过程如图6所示。

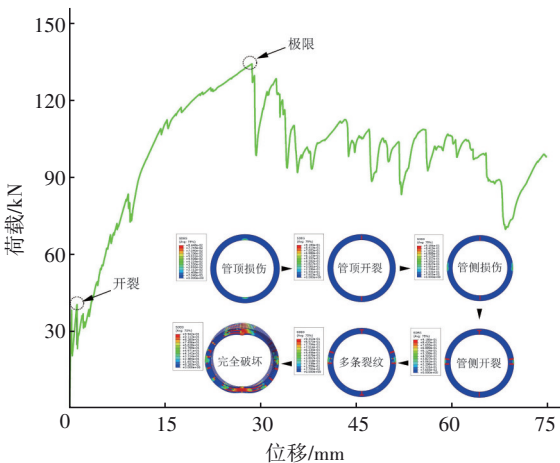


图6 原管道破坏过程

Fig.6 Damage process of the host pipe

钢筋混凝土管道从初始阶段至完全破坏可分为3个阶段:初始阶段,荷载-位移曲线呈线性上升,表明管道处于弹性阶段,即荷载与位移成正比,对应钢筋混凝土材料的线弹性状态;达到峰值荷载之前,曲线开始弯曲,表明材料进入塑性阶段,结构出现非弹性变形;峰值点对应的荷载即为管道的极限承载能力,此后荷载下降,标志着钢筋混凝土结构开始破坏,裂缝扩展、钢筋屈服或混凝土破碎导致管道承载力逐渐丧失。峰值后曲线出现波动,表明荷载与位移之间存在复杂关系,可能与管道在继续承载过程中的局部破坏及裂缝闭合有关。钢筋混凝土的损伤最先出现在管顶和管底,上下对称。当位移达到1.23 mm、荷载约40 kN时,管顶及管底开始开裂。当荷载达到80 kN左右时,管道起拱线两

侧发生开裂,并在管道外侧形成多条裂纹。当管道竖向位移达到30 mm左右时,管道内力达到其极限承载力,最终完全破坏。破坏后,管道仍保留一定的残余强度。

3.3 不同时机修复效果对比

不同时机采用聚合物混凝土内衬修复的管道荷载-位移关系如图7所示。修复时机分为5组:原管开裂即修复、管顶位移达20 mm时修复、达到极限状态时修复、位移达50和70 mm时修复。其中,20 mm位移处于第2阶段,50和70 mm位移处于第3阶段,此时管道具有不同的剩余承载力。结果表明,管道开裂后立即修复的效果最好,对应的修复管开裂荷载和极限荷载均显著高于原管与其他时机修复的管道。修复后管道的破坏过程与原管道基本一致,荷载-位移曲线同样存在3个阶段。不同之处在于,除开裂外,修复管界面处还会发生破坏,即内衬从原管剥离。在实际工程中,这一破坏模式与注浆层及原管或内衬的界面黏结性能有关。总体而言,所有修复管的结构性能均近似原管水平,满足修复要求,表明该聚合物混凝土是一种优良的管道修复材料。

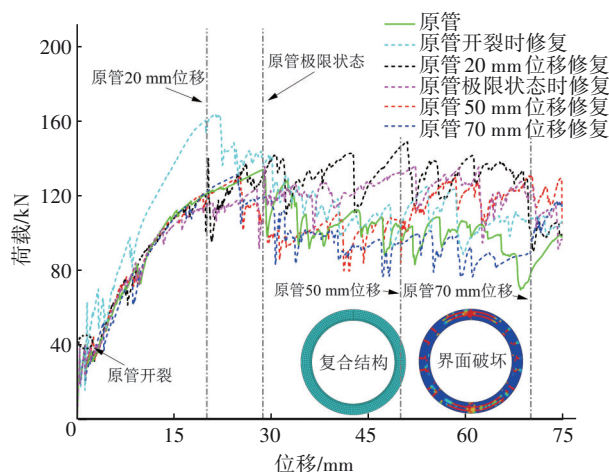


图7 不同时机修复后的荷载-位移关系

Fig.7 Load-displacement relationship after repair at different times

以极限承载力增长率为指标,可评估聚合物混凝土内衬的最佳修复时机。开裂后立即修复的管道,其整体结构承载性能提升22.12%;当原管位移达20 mm时修复,提升11.01%;极限情况时修复,提升1.51%。而在极限荷载后进行修复时,整体结构承载性能略有下降:原管位移达50 mm时修复,降低

2.26%;位移达70 mm时修复,降低7.24%。可知,随着原管竖向位移的增加,其损伤程度加剧,剩余承载力减少,修复效果受到限制。当位移达到极限状态时修复,尚可恢复至原管承载力水平;若再延迟修复,即使采用高强度的聚合物混凝土,也难以达到原管承载力。此外,修复材料与原结构之间的相容性对修复效果至关重要。及时修复有助于减轻长期荷载作用导致的不兼容问题,如模量或强度差异较大的材料可能在外荷载作用下出现某处应力集中现象,进而导致结构破坏。总体而言,由数值模拟结果可知,修复介入时机直接影响聚合物混凝土与原结构的结合质量及修复材料性能的发挥,从而对修复后的极限承载力产生显著影响。

4 结论

① 通过控制树脂含量,获得了力学性能较好的常规聚合物混凝土与轻质聚合物混凝土材料,对应的树脂含量分别为20%和45%。前者的抗压强度显著高于后者,实际使用时需综合考虑内衬的强度和重量。

② 聚合物混凝土的强度与粗骨料的孔隙结构和强度有关。粗骨料与树脂基体结合形成界面,其界面强度进一步影响材料的宏观力学特性。上述因素共同决定了最优树脂含量的存在。

③ 碳纤维含量对聚合物混凝土的抗拉强度和抗折强度影响较小。因此,材料性能的进一步优化应优先关注纤维的种类、分布和表面处理等方面,而后再考虑含量的影响。

④ 利用树脂含量为20%的常规聚合物混凝土对钢筋混凝土管道进行修复模拟,结果表明,该材料作为破损管道的内衬可获得良好的修复效果。此外,修复后结构的极限承载力受修复介入时机影响,修复时机决定了修复材料性能的发挥程度。修复时机越早,管道破损程度越小,效果越好。

参考文献:

- [1] 马保松. 非开挖管道修复更新技术[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2024: 269-280.
MA B S. Trenchless Pipeline Rehabilitation and Renewal Technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2024: 269-280 (in Chinese).
- [2] 杨后军. 排水管道管片内衬法修复工程施工质量控制[J]. 城市道桥与防洪, 2023(12): 170-174, 180.

- YANG H J. Construction quality control of drainage pipe segment lining repair project[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2023 (12): 170–174, 180 (in Chinese).
- [3] BĂRBUTĂ M, HARJA M, BARAN I. Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(7): 696–701.
- [4] JO B W, PARK S K, PARK J C. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(12): 2281–2291.
- [5] CHEN D, LIU F, YANG F, et al. Dynamic compressive and splitting tensile response of unsaturated polyester polymer concrete material at different curing ages [J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 477–498.
- [6] ATAABADI H S, SEDAGHATDOOST A, RAHMANI H, et al. Petrographic and mechanical analysis of lightweight polymer concrete subjected to acidic solution [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35 (1): 04022369.
- [7] ASTM. Standard Test Method for Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes: ASTM C580–18(2023) [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2023: 1–6.
- [8] ASTM. Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes: ASTM C579–23 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2023: 1–5.
- [9] ASTM. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials: ASTM D3039/D3039M–17 (2025) [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2025: 1–13.
- [10] DE LA FUENTE A, ESCARIZ R C, DE FIGUEIREDO A D, et al. A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes [J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 547–555.
- [11] MOORE I D, HOULT N A, MACDOUGALL K. Establishment of Appropriate Guidelines for Use of the Direct and Indirect Design Methods for Reinforced Concrete Pipe [R]. Washington, DC: AASHTO Standing Committee on Highways, 2014: 5–23.
- [12] 史国棚, 马保松, 杨超, 等. 水泥砂浆喷涂法修复钢筋混凝土管道结构性能[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (20): 32–38.
- SHI G P, MA B S, YANG C, et al. Structural performance of reinforced concrete pipe repaired by cement mortar spraying method [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 32–38 (in Chinese).
- [13] ZHAO Y, MA B, ARIARATNAM S T, et al. Structural performance of damaged rigid pipe rehabilitated by centrifugal spray on mortar liner [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104117.
- [14] DARWIN D, BARHAM S, KOZUL R, et al. Fracture energy of high-strength concrete [J]. ACI Materials Journal, 2001, 98: 410–417.
- [15] SONG S H, PAULINO G H, BUTTLAR W G. Simulation of crack propagation in asphalt concrete using an intrinsic cohesive zone model [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2006, 132(11): 1215–1223.
- [16] 张海丰. 水泥砂浆内衬法修复混凝土重力管道理论与实验研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2019: 96–143.
- ZHANG H F. Theoretical and Experimental Study on Structural Performance of the Sprayed-on Rement Mortar Liners Rehabilitating Precast Concrete Drainage Pipe [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019: 96–143 (in Chinese).
-
- 作者简介: 张涛(1982—), 男, 江苏徐州人, 工学学士, 正高级工程师, 主要研究方向为市政非开挖施工。
- E-mail: zhtcumt@qq.com
- 收稿日期: 2025–08–02
- 修回日期: 2025–10–26

(编辑: 沈靖怡)