

基于UHPC的内衬非开挖加固新方法及试验

李振华¹, 左勇健², 彭涛², 常柱刚², 吴斌³

(1. 长沙市公共工程建设中心, 湖南 长沙 410023; 2. 长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙 410125;

3. 湖南明湘科技发展有限公司, 湖南 长沙 410201)

摘要: 为解决老旧砖砌排水拱涵非开挖结构性修复中施工效率低和耐久性不足的问题, 以长沙市某渠修复工程为依托, 提出一种基于超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)预制内衬的非开挖加固新方法。对比分析不同材料及节点连接方式的力学性能, 并开展UHPC材料与拼装节点的模型试验及现场试验研究。UHPC构件在抗裂性能和极限承载能力方面显著优于普通混凝土; 曲螺栓连接在承载力、延性及节点安全储备方面表现最优; 预制内衬结构随时间逐步参与受力, 新旧结构可形成有效共同工作。该研究可为城市排水拱涵非开挖修复的工程设计与施工提供参考。

关键词: 拱涵; 非开挖; 超高性能混凝土; 顶推; 模型试验

中图分类号: TU992.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0343-07

New Method and Experiment for Trenchless Reinforcement of Inner Lining Based on UHPC

LI Zhenhua¹, ZUO Yongjian², PENG Tao², CHANG Zhugang², WU Bin³

(1. Changsha Public Engineering Construction Center, Changsha 410023, China; 2. Changsha Planning and Design Institute Co., Ltd.,

Changsha 410125, China; 3. Hunan Mingxiang Science and Technology Development Co., Ltd., Changsha 410201, China)

Abstract: To address the issues of low construction efficiency and insufficient durability in the trenchless structural repair of old brick-built drainage arch culverts, relying on a restoration project of a certain canal in Changsha City, a new trenchless reinforcement method based on ultra-high performance concrete (UHPC) prefabricated linings is proposed. The mechanical performances of different materials and joint connection methods are comparatively analyzed, and the model tests and on-site experiments of UHPC materials and assembled joints are conducted for research. UHPC components are significantly superior to ordinary concrete in terms of crack resistance and ultimate load-bearing capacity. The curved bolt connection performs the best in terms of bearing capacity, ductility and safety reserve of the joint. The prefabricated inner lining structure gradually participates in the force over time, and the new and old structures can work effectively together. The research result can provide a reference for the engineering design and construction of trenchless renovation of urban drainage arch culverts.

Keywords: arch culvert; trenchless; UHPC; incremental launching; model testing

0 引言

我国的城市中存在着很多20世纪50—80年代建成的城市排水系统, 这些排水管道的主要结构为砌体拱涵, 受力性能和耐久性较差; 且管道上方进行的开挖、爆破等工程行为也会对管道结构的安全性造成影响^[1-2]。随着时间的推移, 这些结构大都排水

疏导功能下降, 甚至存在着安全隐患。因此, 对城市中的老旧排水拱涵进行修复是一项极为迫切的工作。同时, 这些较老的排水管道大多位于城市居民密集区, 若选择明挖方式进行拱涵结构修复, 将对附近居民的出行、生活带来极大影响。目前国内主要采用非开挖法进行城市排水拱涵的修复^[3]。

城市排水拱涵的非开挖修复主要采用的施工方法是混凝土模筑法^[4], 但是该方法施工时间较长, 且对于环境要求较高, 而预制混凝土施工法具有施工速度快、环境要求低的优点, 如果使用该工法, 可以有效减少施工时间, 加快修复速度, 对消除城市排水系统的安全隐患极为重要。但是, 目前并没有针对

收稿日期: 2025-01-30

作者简介: 李振华(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 从事工程管理工作。

通信作者: 左勇健(1997—), 男, 硕士, 工程师, 从事市政工程设计工作。电子邮箱: 1251979886@qq.com

预制法进行排水拱涵修复的标准,预制法的一些关键技术没有解决,且预制法在防水防渗、结构强度方面不具有优势,普通的混凝土材料可能无法满足排水拱涵非开挖修复的要求。

针对上述现状,本文研究预制构件材料、连接方式等预制法的关键技术,确定了适合预制法非开挖修复的材料及连接方式。以长沙市某渠修复项目为例,开展现场试验,分析了预制法修复性能。

1 非开挖修复研究现状

非开挖修复技术(non-destructive examination, NDE)常用于管道维修和工程项目中。这些技术利用特殊的工具和方法,在不破坏地面或管道结构的情况下开展修复工作。排水渠道的非开挖修复技术主要包括管道内衬、管道重力注浆、管道环氧树脂修复、管道高压喷射混凝土修复等方法^[5],这些非开挖修复技术可以有效地修复排水拱涵管道的损坏部分,降低维修成本,并减少对周围环境和交通的影响。但是这些方法目前主要通过现场施工实现,施工进度受降雨、渠道内环境等因素限制;预制法在工厂中制作构件,无需现场养护,施工受环境影响较小。

2 非开挖修复技术方案

2.1 输水渠结构检测情况

长沙市某输水渠水系位于长沙市和东北中心城区,为雨污合流制。该输水渠始建于20世纪50年代,渠体结构以砖砌拱涵、预制混凝土圆拱、预制混凝土盖板涵现浇混凝土箱涵以及浆砌片石侧墙形式为主。在探讨该渠非开挖修复技术方案前,首先对120 m的试验段进行现场检测。本次结构检测工作主要有以下关键内容:勘察拱顶及周边土体的分布特征、实测结构断面的几何参数、详实记录结构体外观的各类损伤缺陷、检测核心受力构件的材料力学强度。依托本次检测获取的系统数据,参照现行相关工程技术规范,对选定试验渠段的整体结构安全性能展开综合评估,并完成相应的安全等级界定。

2.1.1 拱顶、周围土层及结构断面尺寸检测

对拱圈周围土层进行检测,可以判断地下渠道是否发生塌陷。长沙市该输水渠试验段位于地下,因缺乏渠道准确平面布置资料,采用LTD_2100探地雷达(见图1)在检测区段内的地面上进行电磁探测。拱顶及其他测线处结构完好,并未出现检测线突变的情况,检测段渠道拱顶完好,无塌陷。采用激光断

面扫描仪选取18处位置对结构尺寸进行检测。检测结果表明18个检测处的结构断面形状完好。

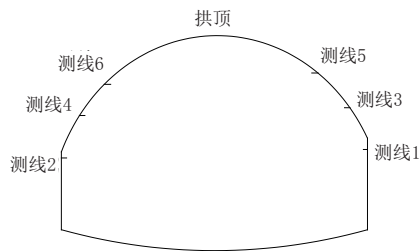


图1 LTD_2100探地雷达检测位置

2.1.2 结构外观缺陷检测

如图2各图所示,对试验段渠道内部进行结构外观缺陷检测,主要缺陷有:拱顶纵向裂缝、露砖及砂浆脱落、拱趾内移、内侧墙及拱圈渗漏现象。



(a) 拱顶裂缝



(b) 砂浆脱落



(c) 拱趾内移



(d) 渗漏

图2 渠道内部外观缺陷

2.1.3 结构强度检测

采用回弹法检测拱圈砖强度及砂浆强度、侧墙砂浆强度。在试验段每4 m凿出一个检测带,每个检测带设2~3个测点,根据回弹值推算出强度值如图3所示。

2.1.4 安全性评价

以上检测结果说明,试验段渠道的整体结构完整,未出现拱顶塌陷、结构破坏等现象。由于长时间的生活污水冲刷、不均匀沉降以及渗漏问题,渠道表面结构出现裂缝、脱落等缺陷,结构强度也有所降低。根据《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—

1999)^[6]及《城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程》(CJJ/T 210—2014)^[7]对试验段进行综合评定,大部分渠段安全性等级评定为Ⅲ级和Ⅳ级,即原结构承载力不足,需要采用半结构或全结构性的加固措施。

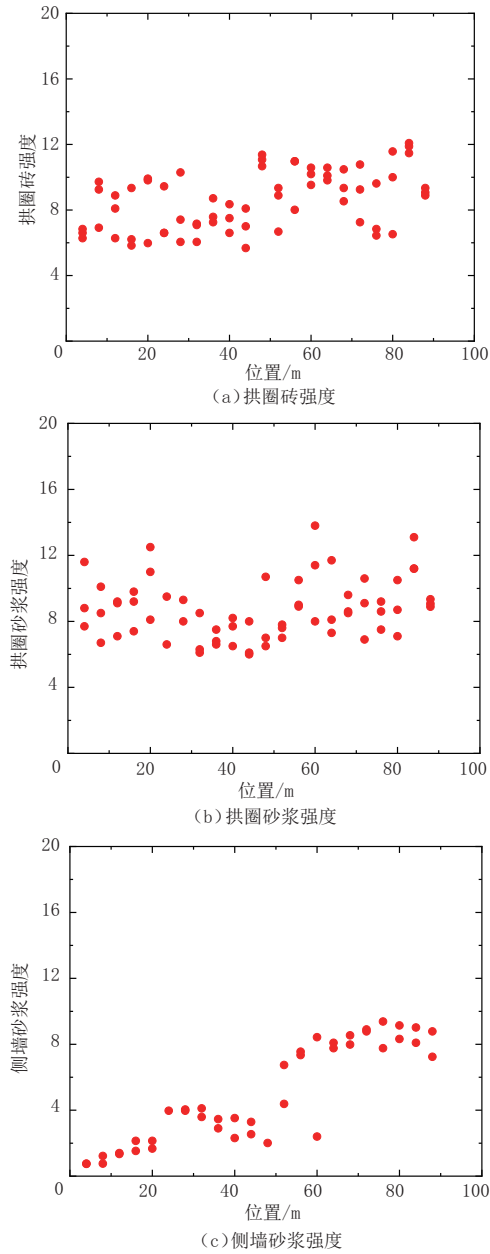


图3 强度检测结果

2.2 非开挖修复方案研究

结合 2.1 对试验段渠道的检测结果,提出 A/B 类修复方案。

2.2.1 A 方案:预防性修复 I、Ⅱ级结构渠段

首先进行结构预处理(各类病害处理和表面处理等),然后使用超高性能混凝土(UHPC)+钢丝网结构,采用增大截面加固法进行非受力修复。通过植筋可与旧混凝土结构、砖石可靠黏结,从而与旧结构

形成一个整体受力截面,并分担很小部分荷载。

2.2.2 B 方案:结构性修复Ⅲ、Ⅳ级结构渠段

首先进行结构预处理。对原结构进行表面预处理,然后在原结构内侧新建可以承担旧结构所有受力的钢筋混凝土拱结构,并用砂浆填补新旧结构间的缝隙。B 方案根据不同的工法可分为模筑法、喷射法、预制法等。

针对城市排水拱涵的结构性修复方案,本文将对试验段中安全性评价为Ⅲ、Ⅳ级的渠段采取预制法进行结构性修复。

2.3 拱形预制构件结构设计

由于目前并没有针对预制法进行排水拱涵修复的标准,制作预制构件的材料选择、结构构造等关键技术须进一步研究。

2.3.1 材料选择

根据所采用的材料不同,预制法可以分为预制 C50 混凝土结构、预制钢结构和预制超高性能混凝土(UHPC)结构。其中,预制钢结构适用于开挖修复,当采用非开挖修复时,箱涵两侧及顶部土压力分布不均匀,将产生扭曲和局部过大变形而破坏原有的拱形结构,故预制钢结构箱涵不适用于非开挖修复。因此本项目材料采用预制 C50 混凝土结构和预制超高性能混凝土(UHPC)结构。

2.3.2 预制构件节点连接方式选择

预制构件节点连接方式对预制构件的结构受力性能有很大的影响^[8-11]。预制构件有 3 种节点连接方式:灌浆套筒连接、直螺栓连接和曲螺栓连接。

2.4 预制非开挖修复顶推工法

预制混凝土施工法具有施工速度快、环境要求低的优点^[12-13]。针对本试验段的砂浆砌体拱涵结构,设计了一种预制非开挖修复顶推工法,原理如图 4 所示。

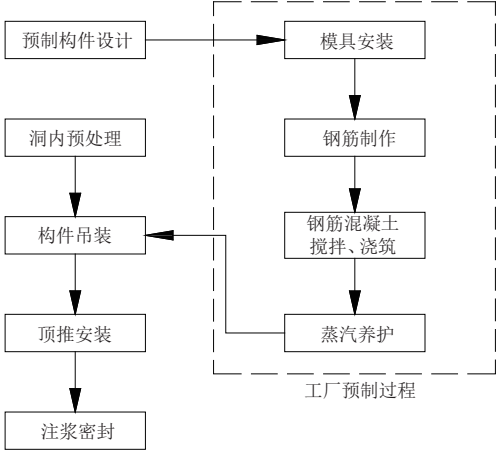


图4 预制非开挖修复工法流程

在利用目前原有排水系统基础上,安装预制件分体式管廊,进行加固处理,从而达到既排水又延长排水系统安全使用寿命的目的。地下管廊预制拼装施工方法是指采用工厂集中生产的可装配式超高性能混凝土构件。在出厂前,于工厂内依据实际安装工况开展模拟拼装作业,确认拼装质量满足要求后,方可运输至施工现场,从而保障现场装配施工的顺利实施。装配式构件采用节段式拼装,每节长为1.5 m,节段与节段间进行连接,节段与节段的接触端面设计止水槽,安装时将止水带压入止水槽中。根据整个管廊长度设计制作成若干个1.5 m长的管廊节段,每节管廊底部装有4个可辅助定向移动的滑轮,通过事先预埋的轨道,将各个管廊节段连接安装。调整到位后,再通过管廊节段上预留的灌浆孔注浆填充。

3 工程试验研究

第2.3节初步选定了预制拱涵的材料和节点连接方式,为确定适合预制法进行非开挖修复的材料和连接方式,对不同材料及连接方式进行了试验分析。并且开展了现场试验,分析预制法的修复性能。

3.1 UHPC材料的可行性分析对比试验

为探究配筋超高性能混凝土较配筋普通混凝土受力性能的差异,通过对2个配筋相同、尺寸均为2 000 mm×1000 mm×120 mm的板进行正截面抗弯试验,对比了2个试件的跨中挠度、底部跨中受拉钢筋应变变化、顶面和底面跨中混凝土应变变化等。试验设计2个试件,两试件的配筋图如图5所示。UHPC试件混凝土强度为RPC120,普通混凝土试件混凝土强度为C50。

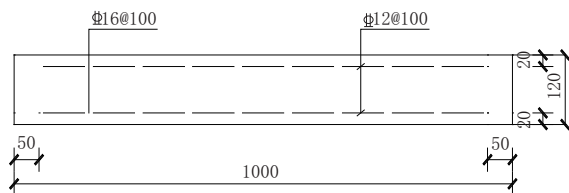


图5 混凝土板配筋图(单位:mm)

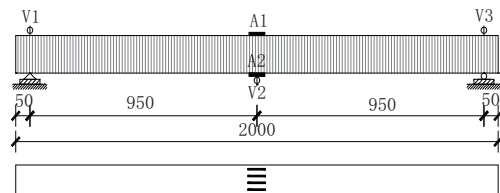
3.1.1 试验方案

试验加载装置如图6(a)所示,其中液压千斤顶最大压力为50 t,将千斤顶倒置并固定于反力梁上。在千斤顶下方安装压力传感器,千斤顶与压力传感器之间设置一块厚度为40 mm的钢垫板,以确保荷载传递均匀。该压力传感器的测量精度为0.1 kN。试件两端分别在固定支座和滑动支座上搭接100 mm,支座放置在两个加载台上,板的净跨径 L_0 为1 800 mm。

在试件跨中混凝土上、下表面和侧面,以及跨中纵向受拉钢筋处均匀放置应变片,侧面混凝土应变片沿试件厚度方向均匀放置4个,具体位置如图6(b)所示。



(a) 加载现场



(b) 测点布置图(单位:mm)

图6 试验加载装置

试验正式开始之前先进行预加载,本试验预加荷载取10 kN,之后进行正式加载,试件开裂前以4.0 kN为量级增加荷载。当荷载加载至接近设计开裂荷载时,开始对裂缝进行观测。一旦裂缝出现,即记录其长度与宽度的扩展情况。试件开裂后,荷载按每级8.0 kN的增量施加。待底部受拉钢筋达到屈服状态后,加载方式转为位移控制,位移步长取为屈服位移 Δ 的整数倍。

3.1.2 试验结果分析

通过对2个配筋、尺寸完全一致的板进行正截面抗弯试验,得到2个试件的跨中挠度、底部跨中受拉钢筋应变变化、顶面和底面跨中混凝土应变变化如图7所示。

由图7(a)可知,试件的破坏演化过程可划分为三个特征阶段,分别为弹性工作阶段、裂缝扩展阶段及最终破坏阶段。其中,曲线OA段对应试件的弹性工作阶段,在整个弹性阶段内,两种类型试件的跨中挠度均呈现缓慢增长态势。具体测试数据显示:UHPC试件与普通混凝土试件的弹性极限荷载分别达到21 kN·m和13 kN·m,对应的跨中挠度则分别为1.41 mm和1.18 mm。对比分析结果说明,UHPC试件具备更大的弹性工作区间和更好的抗裂承载性能。

由图7(b)可知,在线弹性阶段,超高性能混凝土(UHPC)试件中的钢筋应变相对于普通混凝土试件

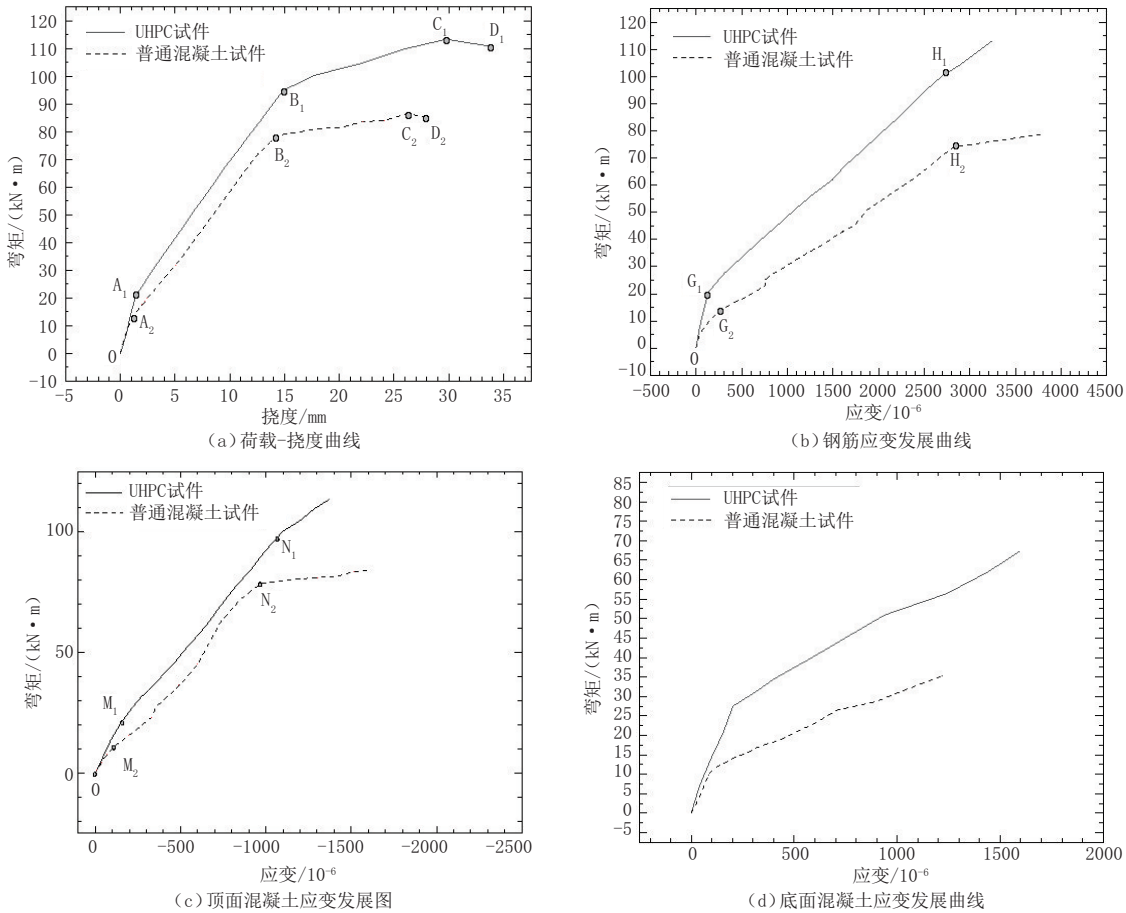


图7 加载试验结果

较小,其荷载-应变曲线呈更明显的线性特征。在GH段,UHPC试件的曲线斜率下降,底部混凝土出现裂缝,钢筋应变增速加快,但普通混凝土试件钢筋应变增速高于UHPC。在同等荷载下,UHPC试件的钢筋应变较低。在H点,UHPC和普通混凝土试件底部钢筋均屈服,但普通混凝土试件底部纵筋应变约为UHPC的130%。UHPC承载能力更高且可减小配筋面积。在钢筋屈服后,UHPC板可承受一定弯矩,相比普通混凝土,UHPC在地下结构修复中具有更高的安全性。

图7(c)和图7(d)的现象与图7(a)和图7(b)相似,说明UHPC试件在顶面和底面的受力性能仍然好于普通混凝土。相同配筋情况下,UHPC板较普通混凝土板的弹性极限荷载提升了62%,UHPC在极限承载能力和抵抗变形能力上,都要优于普通混凝土,UHPC构件不仅有着更好的适用性,而且增强了地下结构正常使用状态下耐久性。

3.2 拼装节点方式受力性能试验对比

UHPC预制构件有3种节点连接方式,分别是灌浆套筒连接、直螺栓连接和曲螺栓连接,3种连接方式的示意图如图8所示。为研究不同连接方式对预

制构件受力性能的影响,通过对比灌浆套筒连接、直螺栓连接和曲螺栓连接进行可行性试验,确定UHPC预制构件连接方式。

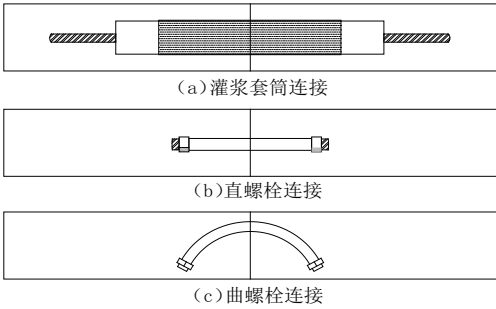


图8 预制构件节点连接示意图

试验设计3种连接方式,共计6个试件,通过3种连接方式两两拼接,试件的尺寸均为1 000 mm×1 000 mm×120 mm,保护层厚度为20 mm。两块板的配筋情况相同,纵向受拉钢筋均为10C16@100,节点试验图如图9所示,试件混凝土强度为RPC120。试验加载方案与整浇板试验加载方案相同。

3种节点连接方式的加载试验下UHPC预制构件的跨中挠度曲线、拼接缝宽度变化、螺杆应变变化、表面混凝土应变结果如图10所示。

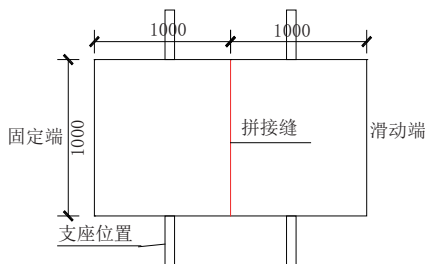


图9 预制构件节点试验示意图(单位:mm)

由图10(a)可知,在承载力方面,直螺栓连接的承载能力在3种连接方式中最低,灌浆套筒连接与曲螺栓连接的最大承载力挠度分别为6.86 mm和12.37 mm,曲螺栓连接跨中挠度约为灌浆套筒的180%。由此可知,曲螺栓连接较直螺栓连接而言,有着更高的承载能力;较灌浆套筒而言,具有更好的延性。图10(b)为3种连接方式的荷载-拼接缝宽度曲线,当荷载达到40 kN时直螺栓连接的拼接缝宽度已经达到5.5 mm,远大于其他两种连接方式的拼接缝宽度。在灌浆套筒连接和曲螺栓连接达到最大承载力时,拼接缝宽度分别为0.92 mm和1.52 mm,此时曲螺栓连接的拼接缝宽度较灌浆套筒连接增加了65%,因此曲螺栓的抵抗变形能力较强于灌浆套筒连接。预制法节点连接螺栓的受力状态是判断连接

方式受力性能的一个重要指标。由图10(c)可知,直螺栓连接在荷载达到32 kN时,连接螺栓的微应变已经达到1 900,为曲螺栓连接点3.13倍,为灌浆套筒连接的1.56倍。在达到最大荷载时,曲螺栓连接螺栓的应变为灌浆套筒连接的77%。由此可知,在同工况荷载条件下,曲螺栓连接构件不仅拥有更好的延性且连接螺栓的应力更小,具有更高的安全储备。由图10(d)可知,3种连接方式在相同荷载条件下,曲螺栓连接上表面混凝土压应变始终最小,随着拼接缝宽度的逐渐增大,曲螺栓连接试件拼接缝处混凝土的受压工作性能是3种连接方式中最好的,这更有利于与地下管渠结构在正常使用状态下的稳定性。

曲螺栓连接在保证承载力的前提下,其变形能力、连接螺杆使用的安全性和保证地下管渠结构在正常使用状态下的稳定性等性能方面,都优于直螺栓连接和灌浆套筒连接。

3.3 预制构件现场试验

根据3.1及3.2的结果,决定采用UHPC材料和曲螺栓连接方式。为了研究预制法的修复性能,在晓林公园取一段试验段进行了现场试验。

根据图4的修复流程,将预制构件节段送入现场进行拼接并注浆填充孔隙。预制构件如图11所示。

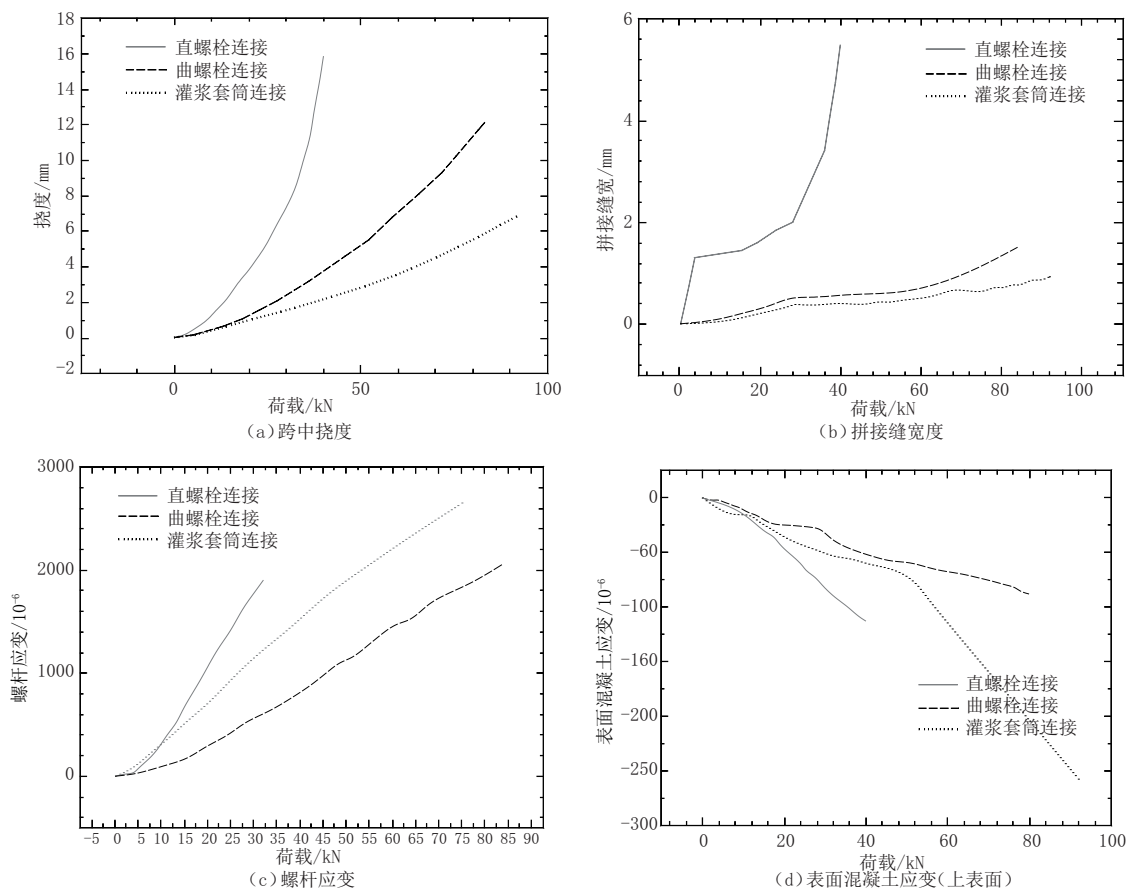


图10 预制构件节点试验结果

