

使用图像分析研究隧道衬砌管片的位移变化^{*}

朱卫杰, 宿文德, 万敏

(上海隧道工程股份有限公司市政公用设计研究院, 上海 200062)

摘要:以复合材料加固前后的盾构隧道管片为对象,进行了盾构隧道管片在侧向荷载作用下变形能力和极限承载力的整环加载试验,使用图像处理技术对加固前后衬砌圆环管片接缝两侧的位移变化进行了研究。根据加载过程中不同时刻的试验图像,使用粒子图像测速技术得到了不同时刻、不同位置接缝两侧混凝土管片的位移变化情况。结果表明:未加固阶段管片顶部接缝处管片表面位移相对较小,两侧位移变化不相等,封顶块位移大于邻接块位移,加载结束时最大位移发生在封顶块位置;整环加固后,封顶块位移大于邻接块位移,加载结束时裂缝开始扩展;加固前后位移变化幅度大小次序依次是封顶块、标准块、邻接块和底块,破坏最先发生位置是封顶块和邻接块的连接位置;使用复合材料加固后,各处接缝两侧管片位移变化幅度及整体位移变化量均小于加固前,管片承载力增加,强度明显提高。本文结果对研究隧道衬砌破坏机理有一定的参考价值。

关键词:隧道衬砌;图像处理;位移变化

中图分类号:TU93

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)03-0658-07

Displacement Features of Tunnel Lining Segments Using Image Processing Techniques

Zhu Weijie, Su Wende, Wan Min

(Municipality Public Engineering Design Institute of Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd., Shanghai 200062, P.R. China)

Abstract: Taking the shield tunnel segments as a research object, a lining structure experiment was conducted to investigate the deformability and ultimate bearing capacity of the segments subjected to lateral forces before and after reinforced by composite materials. The displacement variations of joints between various segments were investigated by image processing techniques according to the images photographed during the experiment. The particle image velocimetry technique was used to compute the displacement variations of the joints in the concrete tunnel segment at different time and different locations. It shows that before the lining structure was reinforced, the changes of displacements of the joints were relatively small and the displacement variations at both sides were not same, and the position of maximum displacement was the top segment as the loading finished; after the lining structure was reinforced, the displacements at the top segment was also larger than those of the side one, and the cracks propagated as the loading process finished; the variations in magnitude of displacement were the largest, medium, and smallest, respectively at the top, standard, side and bottom segments before and after the lining structure reinforcement; failure occur initially in the connection between the top and side segment; after the lining structure was reinforced, the changes in magnitude and variations of displacement of the joints were smaller than those before the shield tunnel was reinforced; reinforcement with composite materials efficiently enlarged the strength of the segment. The results obtained in the current study may be referable in investigating the failure mechanism of lining structure of tunnel.

Keywords: tunnel lining; image processing; displacement variations

^{*} 收稿日期:2016-11-28(修改稿)

作者简介:朱卫杰(1975-),男,江苏海门人,硕士,教授级高工,主要从事隧道工程的施工、设计及科研工作。

E-mail: zhuweijie03@163.com

0 引言

地铁隧道经过多年运营,可能出现不同程度的破损,如管片局部破损引发的渗漏水、裂缝、管片错台、变形等问题。为了确保结构安全,需要对盾构管片进行加固。

隧道管片的接头受损,国内外已有一定研究。Asakura等^[1]研究了日本铁路隧道的结构变形治理问题;Yan等^[2]研究了高温下隧道管片接头的荷载试验,分析了温度对隧道接头力学性质的影响;鲁亮等^[3]研究了加载效应下隧道管片的横向大变形问题;封坤等^[4-5]对南京长江隧道原型管片衬砌结构进行了原型加载试验和结构破坏试验。

目前,对隧道盾构管片的损伤研究大多局限于管片开裂、渗水等局部破损问题,盾构隧道中出现的大变形问题和承载能力问题则通过衬砌整环1:1试验来研究。许多学者进行了隧道管片接头荷载模拟试验和整环加载试验研究。师永翔等^[6]运用理论分析方法提出了大直径盾构隧道接头的抗弯刚度计算公式,将计算结果与上海盾构隧道接头抗弯试验结果进行了对比;李宇杰等^[7]采用有限元软件ABAQUS建立了盾构管片与螺栓的三维非连续-接触计算模型,分析了错台对管片的影响,并与现场实测值进行了对比;张冬梅等^[8]考虑衬砌结构的横向和纵向结构特性,计算了管片和接头的内力、变形与接缝的张开量;Li等^[9]建立了隧道衬砌圆环混凝土管片与螺栓的计算模型,分析了管片接头的破坏机理;王华牢等^[10]应用刚度退化模型对隧道结构进行了承载力评价,得到了隧道结构安全系数的计算方法;唐志成等^[11]用三维土-盾构隧道相似模型试验对盾构隧道管片结构在不同拼装方式下的力学行为进行了研究;王彪等^[12]介绍了衬砌整环试验的加载方法和加载设备设计;柳献等^[13]采用足尺试验方法对整环加固工法下单环隧道衬砌的极限承载性能进行了研究。

近年来,数字图像处理技术发展很快。使用图像处理的粒子测速技术(即PIV,particle image velocimetry)能快速、准确地得到任意位置任意时刻的位移大小,可用于岩土工程问题的精细化研究。徐金明等^[14-15]使用PIV技术得到了石灰岩局部化变形的图像特征,实现了单轴压缩条件下石灰岩表面的位移计算;Hosseini和Mostofinejad^[16]使用PIV技术得到了外荷作用下碳纤维混凝土材料中的位移与应变分布。目前,使用图像处理技术研究盾构隧道管片混凝土变形破坏特征的报道还很少。

本文以复合材料整环加固盾构隧道管片为研究对象,使用相机拍摄加载过程中的试验图像,利用粒子测速技术计算不同位置的局部位移、接缝两侧混凝土管片随加载时间变化的位移,分析不同位置管片的变形破坏特征。

1 试验方案

1.1 试验试件及加固概况

本次试验采用的衬砌圆环尺寸为外径6.2 m、内径5.5 m、管片厚度0.35 m、环宽1.2 m,全环由6块组成,如图1所示。圆环由1个封顶块(F块)、2个邻接块(L1和L2块)、2个标准块(B1和B2块)、1个底块(D块)组成。共有6处接缝,分别位于封顶块与邻接块之间、邻接块与标准块之间、标准块与底块之间。每种类型接缝有两处,接缝位置对称于中轴线。

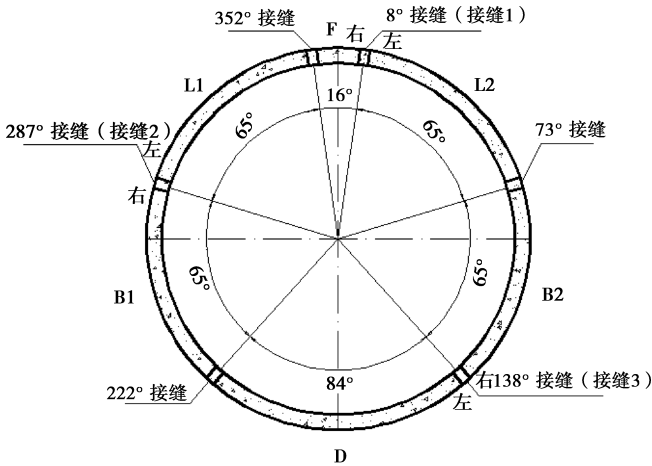


图1 试件结构

Fig. 1 Specimen structure

试验管片配筋及构造均按照实际工程设置,管片混凝土强度等级为C55,钢筋采用HPB235、HRB335级钢,主筋保护层为50mm。不同块之间由12根5.8级M30高强螺栓连接形成整体。加固所用复合腔体材料主要由钢材、碳纤维、砂浆和树脂组成。腔体形状与管片内侧表面相吻合,将碳纤维和树脂包覆在腔体表面,形成复合材料层,腔体本体内使用高强自密实砂浆灌注填充。

加固前,复合材料腔体先用钢材预制成空腔形式,截面尺寸为160 mm×40 mm,将碳纤维通过特殊工艺缠绕在复合材料空腔外侧,与其共同受力。加固施工时,先将空腔复合腔体与管片用结构胶粘结,然后再进行注浆。试验管片的底块处道床附近布置钢牛腿、用以连接复合材料,复合材料与混凝土之间的空隙使用环氧树脂进行灌注。由此制成

的复合腔体构件具有质量小、施工快捷、加固强度高等方面的优点。

1.2 加载设备布置

加载装置如图 2。试验时,衬砌圆环呈水平方向放置,共 24 个加载点,所有加载方向相交于衬砌圆环圆心,加载采用单调加载方式。水平荷载分为 3 组,为 P_1 、 P_2 和 P_3 ,分别有 6、10、8 个加载点。同一组内每点荷载值相同,加载时完全同步,加载等级如表 1 所示。

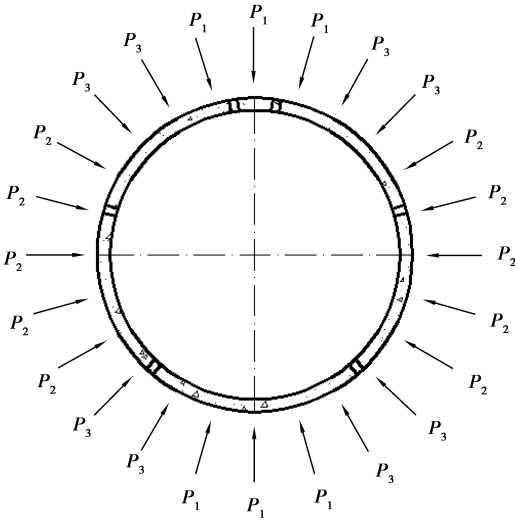


图 2 环向荷载分组
Fig. 2 Grouping of circumferential load

表 1 主要加载等级

Table 1 Main loading levels

荷载级数	P_1 /kN	P_2 /kN	P_3 /kN
第 1 级	30.0	19.5	24.8
第 15 级	350.0	227.5	288.8
第 26 级	420.0	273.0	346.5
第 28 级	430.0	276.3	353.2
第 29 级	435.0	276.3	355.7
第 30 级	440.0	276.3	358.2
第 44 级	510.0	276.3	393.2
第 47 级	525.0	276.3	400.7
第 48 级	530.0	276.3	403.2
第 54 级	560.0	276.3	418.2
第 62 级	600.0	276.3	438.2

1.3 试验过程

试验时采用复合材料对隧道衬砌进行加固,将试验分为未加固阶段与整环加固阶段。在未加固

阶段,管片在荷载作用下产生变形。将变形达到一定程度的状态定义为试验加固点。整环加固阶段以试验加固点为起点、加载至结构破坏状态。

共进行了 2 次试验。第 1 次试验时,未加固阶段分 30 级加载,共加载 300 min;整环加固阶段从第 30 级加载至第 48 级,共加载 90 min。第 2 次试验时,未加固阶段分 30 级加载,共加载 205.5 min;整环加固阶段从第 30 级加载至第 62 级(衬砌圆环开始破坏),共加载 230.6 min(201.46 min 后接缝处裂缝开始扩展、复合材料开始破坏)。

本次研究选取 8° 、 287° 和 138° 这三处接缝作为研究对象,规定 8° 接缝为接缝 1、 287° 接缝为接缝 2、 138° 接缝为接缝 3。3 处接缝上方均安有固定照相设备进行定时拍摄。左右侧的区分如图 1 所示,接缝 1 左侧为邻接块,右侧为封顶块;接缝 2 左侧为邻接块,右侧为标准块;接缝 3 左侧为底块,右侧为标准块。

拍摄设备为佳能 600D 数码相机,使用 220 V 交流电恒定供电。照相设备与计算机相连接,使用 EOS Utility 软件对照相设备进行远程控制,以避免人工拍摄时相机抖动等方面的影响。第一次试验时,未加固、整环加固阶段拍摄频率分别为 20 s/张、10 s/张,第二次试验时未加固、整环加固阶段拍摄频率均为 10 s/张。接缝 2、3 处图像取自第一次试验,接缝 1 处图像取自第二次试验。

2 基于粒子测速技术的管片位移计算

2.1 图像选取与匹配

位移场计算部分选取接缝 1 处两侧管片区域进行匹配分析。采用最大相关法对不同帧图像进行匹配,两帧图像中各像素块的实际位移为:

$$d_s = \delta \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$$
 (1)

式中: d_x 和 d_y 分别为像素位移的水平相和竖直向分量; δ 为单个像素代表的实际长度。

2.2 位移场计算方法

使用 MATLAB 编程平台编制应用程序实现位移场的计算。将原始彩色图像转换成灰度图像,间隔时间设置为 1 s。计算位移时,选取样品附近不动点作为参考点,匹配图像块面积重叠比取为 50%。经过信噪比滤波、峰高滤波、全局滤波、局部中值滤波后,使用滤波计算得到了含 NAN(非数字)位移值,使用最近点插值来消除 NAN 并得到全场插值结果,进而获得了总位移大小。在考虑小变形假设前提下使用图像灰度最大相关匹配,分别

计算了接缝1左、右两侧管片的位移。

2.3 接缝不同侧位移量计算方法

在接缝1、2、3处管片两侧内壁边缘各取4个位置点作为分析点,位置如图3所示。对相邻时刻图像进行匹配,找出每一点在下一加载时刻的位置,得到相邻时刻各点的位移量,对左右两侧4个位移量求均值即得到位移的平均变化量。

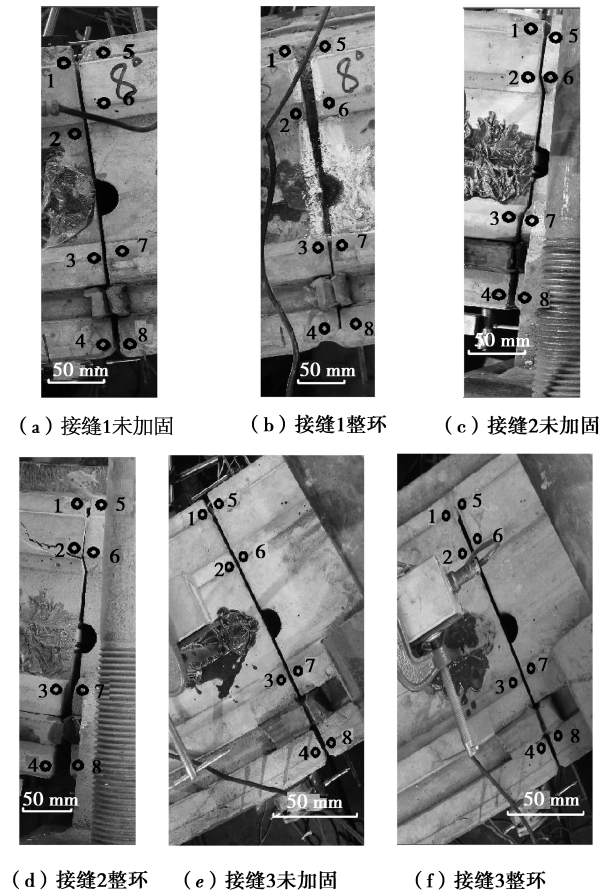


图3 各加载阶段接缝处分析点位置

Fig. 3 Analysis point of joints at each loading stage

2.4 不同加载阶段顶部管片中的位移场

图4为未加固阶段顶部管片两侧加载初始图像与第205.5 min图像匹配后的位移场。图中箭头表示位移的变化方向,箭头长度表示相对位移的大小。

由图4可以看出,开始加载时,管片表面变化不大,封顶块位移明显大于邻接块位移;205.5 min时,接缝两侧侧向位移较小、分布比较均匀;最大位移发生在封顶块位置、为1.93 mm;外荷载作用下,管片不同位置总的移动方向是向上的,与实际观测结果一致。图4中,位移场其他位置部分出现波动,源于外部干扰或光线不均匀变化。

图5为整环加固阶段顶部管片两侧以试验加固点为起点、第30级加载图像与第165.1 min图像

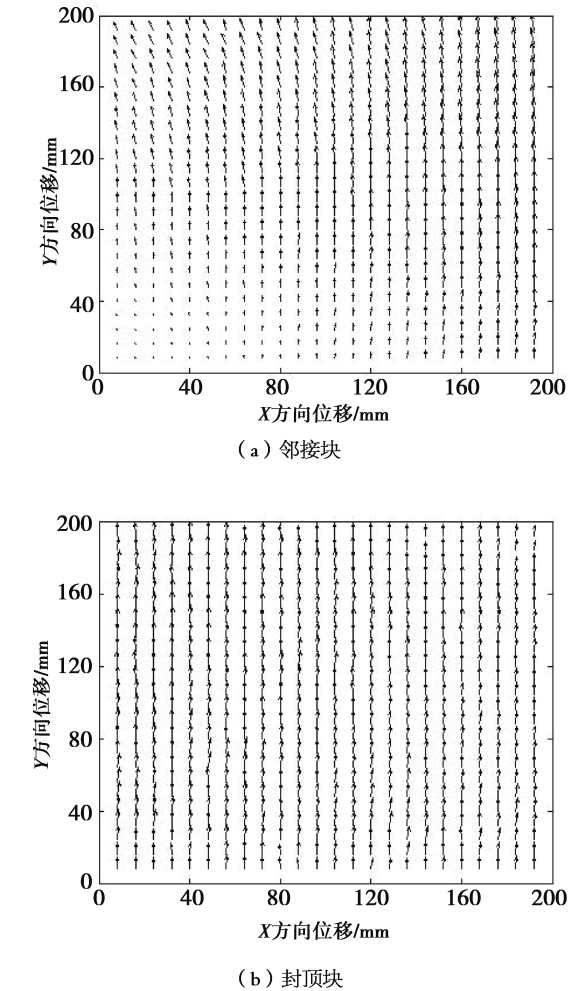
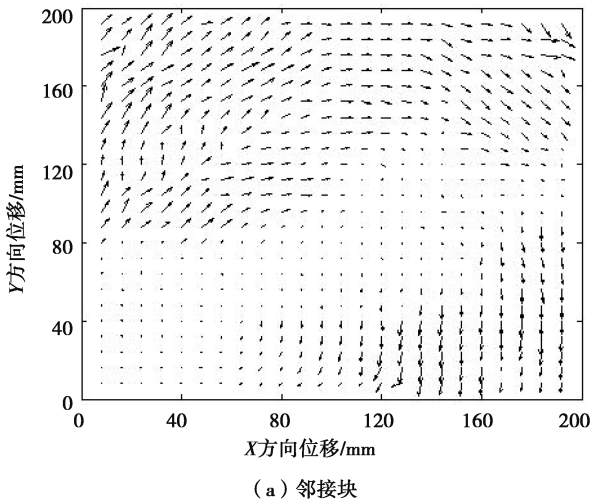


图4 未加固阶段第1 min与205.5 min图像匹配后的位移场
Fig. 4 Displacement field matched from 1 min to 205.5 min before reinforcement

匹配后的位移场。由图5可知,封顶块位移仍然大于邻接块位移。此时,接缝两侧管片表面位移相差较小、方向均为整体向右上方,中间区域有向外扩展的趋势。加载结束后裂缝开始扩展,最大位移发生在封顶块位置、为1.96 mm。



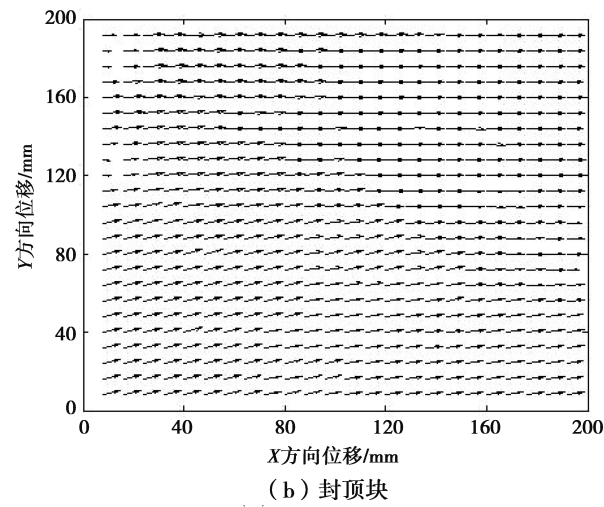


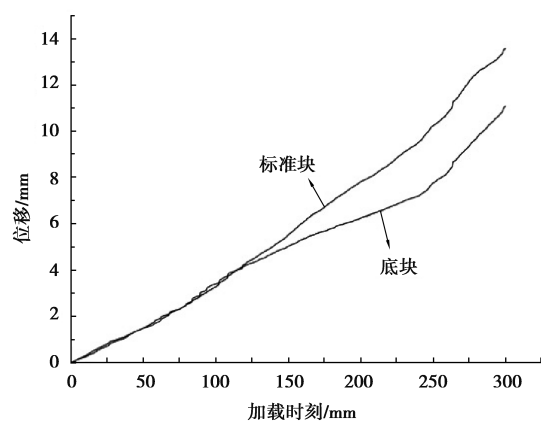
图 5 整环阶段第 1 min 与 165.1 min 图像匹配后的位移场
Fig. 5 Displacement field matched from 1 min to 205.5 min after reinforcement

2.5 不同接缝处不同时刻的位移变化

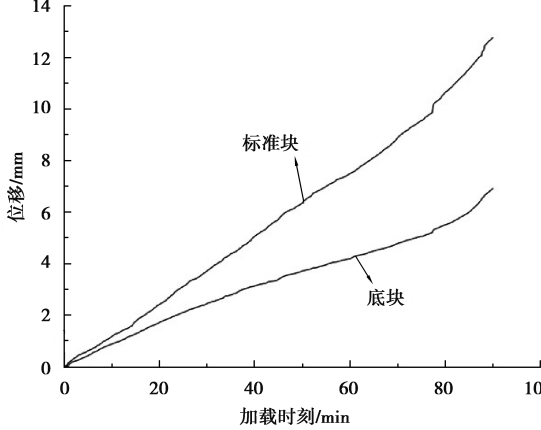
接缝 1 处加固前后平均位移量随时间变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,在未加固阶段,随着加载的进行,接缝 1 管片两侧位移均逐渐增加,在 188 min 前变化较为平稳,但在 188 min 后变化加剧;左侧邻接块在加载至 188 min 时位移有一次明显增加,由 9.90 mm 增加至 21.36 mm,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 420 kN、273 kN、346.5 kN;之后位移继续增加,至第 205.5 min 时达到最大值、为 24.36 mm,此时加载结束,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 440 kN、276.3 kN、358.2 kN。右侧封顶块的位移变化幅度在 188 min 时小于邻接块,但整体位移变化量大于邻接块且同样在 205.5 min 时达到最大值(为 37.42 mm)。在整环加固阶段,管片两侧位移均随加载逐渐增加;230.6 min 时,左侧邻接块和右侧封顶块位移均达到最大值,分别为 12.68 mm 和 18.22 mm,此时加载结束,复合材料和管片衬砌的黏结失效,结构刚度迅速降低,管片混凝土脱落并崩裂,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 560 kN、276.3 kN、418.2 kN。

由图 6 还可以看出,加固前后封顶块的位移变化量始终大于邻接块;整环加固后接缝 1 两侧管片的位移变化幅度与整体位移变化量均小于加固前的数值。

接缝 2 处加固前后平均位移量随时间变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,在未加固阶段,随着加载的进行,接缝 2 管片两侧位移均逐渐增加;在 280 min 前变化较为平稳,但在 280 min 后变化加剧。对于左侧邻接块,280 min 时位移有一次明显增加,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 435 kN、276.3 kN、



(a) 未加固阶段



(b) 整环加固阶段

图 6 不同加固阶段接缝 1 位移量随时间变化曲线

Fig.6 Displacement of joint 1 changing with time at various reinforcement stages

355.7 kN;280 min 后位移持续增加,第 300 min 时达到最大值,为 14.34 mm;300 min 时加载结束,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 440 kN、276.3 kN、358.2 kN。对于右侧标准块,整体位移变化量大于邻接块,同样在第 300 min 时达到最大值,为 27.14 mm。在整环加固阶段,管片两侧位移均随加载逐渐增加,变化幅度基本一致;两侧管片位移分别在第 45 min(对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 510 kN、276.3 kN、393.2 kN)和第 83 min(对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 525 kN、276.3 kN、400.7 kN)有两次明显增加,均在 90 min 时达到最大值,分别为 10.08 mm 和 11.72 mm;90 min 时,管片混凝土开始脱落,邻接块处裂缝开始扩展,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 530 kN、276.3 kN、403.2 kN,此时停止加载。

由图 7 还可以看出,加固前后标准块的位移变化量始终大于邻接块的相应数值;整环加固后接缝 2 两侧管片位移变化幅度与整体位移变化量均小于加固前的数值。

图 8 为接缝 3 处加固前后平均位移量随时间

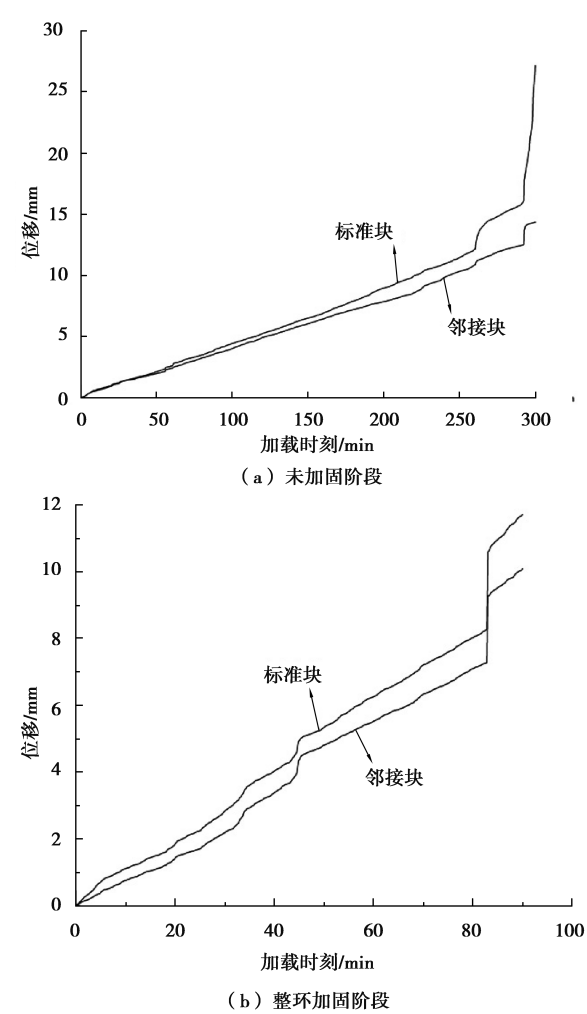


图7 不同加固阶段接缝2位移量随时间变化曲线

Fig. 7 Displacement of joint 2 changing with time at various reinforcement stages

的变化曲线。由图8可知,未加固阶段,随着加载的进行,接缝3管片两侧位移均逐渐增加,变化幅度基本一致;加载至第300 min时,两侧位移变化幅度均达到最大值,分别为11.08 mm和13.58 mm。整环加固阶段,右侧标准块位移变化幅度大于左侧底块的数值,加载至90 min时均达到最大值,分别为12.78 mm和6.90 mm。

由图8还可以看出,加固前后标准块的位移变化量始终大于底块的相应数值;整环加固后,接缝3两侧管片的位移变化幅度及整体位移变化量均小于加固前的结果。

综合对比图6~图8可以看出,加固前后封顶块位移变化幅度及位移变化量均为最大,标准块次之,邻接块和底块较小;整环加固后,3处接缝两侧管片的位移整体变化量均小于加固前的数值。因此,整环加固阶段,开始加载时荷载主要由管片承担,复合材料作用不明显;随着加载的进行,管片表

面裂缝开始扩展,裂缝深度开始增大;在中心连接螺栓孔附近裂缝扩展严重。管片混凝土破坏时,衬砌承载力急剧下降,荷载主要由复合材料承担且承担能力较大。复合材料加固后延性增加,说明管片承载力增加,复合材料加固效果良好。

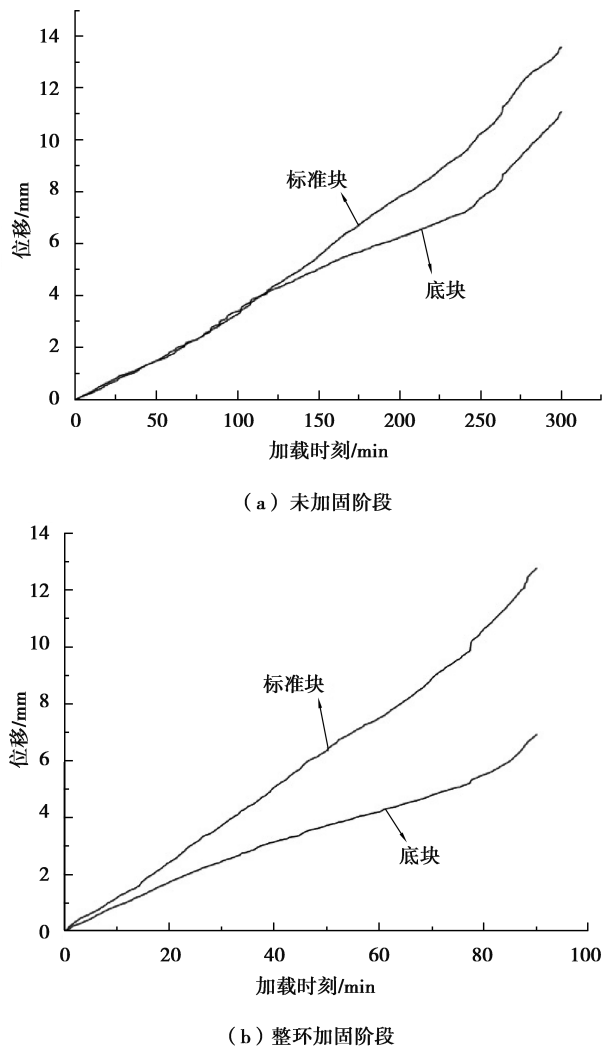


图8 不同加固阶段接缝3位移量随时间变化曲线

Fig. 8 Displacement of joint 3 changing with time at various reinforcement stages

3 结论

(1)使用试验图像和粒子测速技术,计算了复合材料整环加固试验时盾构隧道管片中不同位置的位移及其变化过程,可以用于分析不同位置管片的变形破坏特征。

(2)未加固阶段,接缝1处两侧管片表面位移相对较小,封顶块位移明显大于邻接块位移,加载结束时最大位移发生在封顶块位置;整环加固阶段,封顶块位移邻接块位移,加载结束时封顶块处有裂缝开始扩展。

(3) 加固前后封顶块位移变化幅度及位移变化量最大,标准块次之,邻接块和底块位移较小;破坏会首先发生在封顶块和邻接块的连接位置。整环加固后,各处接缝两侧管片位移整体变化量小于加固前的结果,管片承载力增加、加固效果良好。

参考文献(References)

- [1] Asakura T, Kojima Y. Tunnel maintenance in Japan [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 161-169.
- [2] Yan Z G, Zhu h H, Ju W J. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38 (2): 610-618.
- [3] 鲁亮, 孙越峰, 柳献. 地铁盾构隧道足尺整环结构极承载能力试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(6): 134-139. (Lu Liang, Sun Yuefeng, Liu Xian. Full-ring experimental study on the ultimate bearing capacity of the lining structure of the metro shield tunnel [J]. Structural Engineers, 2012, 28(6): 134-139. (in Chinese))
- [4] 封坤, 何川, 苏宗贤. 南京长江隧道原型管片结构破坏试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(4): 564-571. (Feng Kun, He Chuan, Su Zongxian. Prototype test on failure characteristics of segmental lining structure for Nanjing Yangtze river tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(4): 564-571. (in Chinese))
- [5] 封坤, 何川, 苏宗贤. 南京长江隧道管片衬砌结构原型加载试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 136-142. (Feng Kun, He Chuan, Su Zongxian. Prototype loading test on segmental lining structure of Nanjing Yangtze river tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 136-142. (in Chinese))
- [6] 师永翔, 赵武胜. 大直径盾构隧道管片接头抗弯性能研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 115-122. (Shi Yongxiang, Zhao Wusheng. Research on flexural rigidity of the segment joint large-diameter shield tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(1): 115-122. (in Chinese))
- [7] 李宇杰, 何平, 秦东平. 盾构隧道管片纵缝错台的影响分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 277-282. (Li Yujie, He Ping, Qin Dongping. Influence analysis on longitudinal dislocation for shield tunnel segment [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 277-282. (in Chinese))
- [8] 张冬梅, 樊振宇, 黄宏伟. 考虑接头力学特性的盾构隧道衬砌结构计算方法研究[J]. 岩石力学, 2010, 31(8): 2547-2552. (Zhang Dongmei, Fan Zhenyu, Huang Hongwei. Calculation method of shield tunnel lining considering mechanical characteristics of joints [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2547-2552. (in Chinese))
- [9] Li Z, Soga K, Wang F, et al. Behaviour of cast-iron tunnel segmental joint from the 3D FE analyses and development of a new bolt-spring model [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 41 (1): 176-192.
- [10] 王华牢, 刘学增, 李宁, 等. 纵向裂缝隧道衬砌结构的安全评价与加固研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (增 1): 2651-2656. (Wang Hualao, Liu Xuezheng, Li Ning, et al. Safety evaluation of tunnel lining with longitudinal cracks and reinforcement design [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Supp. 1): 2651-2656. (in Chinese))
- [11] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85-89. (Tang Zhicheng, He Chuan, Lin Gang. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 85-89. (in Chinese))
- [12] 王彪, 刘祖华, 鲁亮. 上海崇明越江隧道衬砌整环试验加载方法研究[J]. 施工技术, 2006, 35(增): 52-54. (Wang Biao, Liu Zuhua, Lu Liang. A loading method of the test for lining whole wreath of Shanghai Chongming tunnel [J]. Construction Technology, 2006, 35(Supp.): 52-54. (in Chinese))
- [13] 柳献, 唐敏, 鲁亮, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构承载能力的试验研究-整环加固法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2300-2306. (Liu Xian, Tang Min, Lu Liang, et al. Experimental study of ultimate bearing capacity of shield tunnel reinforced by full-ring steel plate [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2300-2306. (in Chinese))
- [14] 徐金明, 韩娜娜, 李岩松. 石灰岩局部化变形的图像特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2110-2115. (Xu Jinming, Han Nana, Li Yansong. Image features of localized deformation of limestone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2110-2115. (in Chinese))
- [15] 徐金明, 王强, 周廷文. 根据试验视频确定石灰岩中的位移场[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 70-75. (Xu Jinming, Wang Qiang, Zhou Tingwen. Displacement field of limestone using video images from laboratory tests [J]. HydroGeology and Engineering Geology, 2010, 37(2): 70-75. (in Chinese))
- [16] Hosseini A, Mostofinejad D. Effect of groove characteristics on CFRP-to-concrete bond behavior of EBROG joints: experimental study using particle image velocimetry (PIV) [J]. Construction and Building Materials, 2013, 49(4): 364-373.