

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.03.19

使用图像分析方法研究整环加载试验中 盾构管片的错台变化特征

吴红斌¹, 徐金明¹, 刘大谋²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 中国地质工程集团公司, 北京 100093)

摘要: 随着盾构法隧道施工技术的发展, 管片错台可能引起管片开裂、拼装困难和防水隐患等问题, 这对隧道安全施工和正常运营具有较大影响。为了分析盾构隧道管片在侧向荷载作用下的错台变化特征, 进行了整环加载试验。在介绍整环试验方法(包括加载装置、荷载设计、测试内容)的基础上, 使用图像处理技术对加固前后衬砌圆环加载过程中管片接缝两侧的错台变化进行了研究, 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研究了管片加载引起的错台变化特征及整环加固后复合材料中的位移变化特征。结果表明: 加固前封顶块与邻接块间错台最大, 邻接块与标准块间错台次之, 标准块与底块间错台最小; 复合材料加固后, 封顶块与邻接块间错台比加固前明显减小, 邻接块与标准块间错台比加固前少量减小, 标准块与底块间错台变化幅度大于加固前的数值; 整环加固阶段, 封顶块与邻接块处复合材料位移变化幅度较大、与管片错台大小相近, 标准块与底块处次之, 邻接块与标准块处最小、且主要由加载设备振动引起。本文结果对隧道衬砌破坏机理研究有一定的参考价值。

关键词: 整环试验; 图像处理; 盾构隧道管片; 错台变化

中图分类号: U455.49

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)03-0113-06

Dislocation variations in tunnel segments in lining structure experiments using image processing techniques

WU Hongbin¹, XU Jinming¹, LIU Damou²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. China Geo-Engineering Corporation, Beijing 100093, China)

Abstract: With the development of shield tunnel techniques, the problems such as segment crack, difficulty in connection, and hidden water danger become more serious and obvious in practice. These problems may directly affect the safe-construction and normal-usages. In order to investigate the dislocation variations in the shield tunnel segments subjected to the lateral force, a lining structure experiment was conducted. After introducing the experimental processes, including loading apparatuses, loading processes, and monitoring techniques, dislocations of joints between various tunnel segments before and after reinforcement with composite materials were investigated using the image processing techniques for the images photographed during the experiment. The particle image velocimetry technique was used to compute the dislocation features of the concrete tunnel segments at different times. The results shows that before the lining structure was reinforced, the dislocations were the largest, medium, and smallest, respectively, in the top-side, side-standard, and standard-bottom segments; after the reinforcement of the lining structure, the dislocation were smaller, similar, and greater, respectively, in the top-side, side-standard, standard-bottom segments,

收稿日期: 2014-07-17; 修订日期: 2014-08-11

第一作者: 吴红斌(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程的科研工作。E-mail: whb159612@163.com

通讯作者: 徐金明(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程的教学和科研工作。E-mail: xjming@163.com

whereas the changes in magnitude and variations in displacement of composite materials were the largest, medium, and smallest, respectively, in the top-side, standard-bottom, side-standard segments; the displacement of composite materials was mainly caused by the equipment vibration. The results in the current study may provide references in investigating the failure mechanism of the lining structure of tunnel.

Keywords: full-ring experiment; image processing; shield tunnel segment; dislocations variations

盾构隧道衬砌结构一般由多块弧形管片拼装而成,管片之间的接头使用螺栓连接,两块管片间形成接缝。衬砌环的变形主要是管片接头处的位置错动与混凝土变形,反映了整体受力情况和变形特征。随着盾构法施工技术的发展,错台引起的管片开裂、拼装困难等问题对隧道安全施工和正常运营的不利影响逐步显现出来,分析管片接缝处的错台变化特征对衬砌圆环变形破坏机理的研究具有重要的实际意义。

许多学者使用室内模型试验对管片衬砌圆环接头处的力学性质与变形破坏机理进行了研究。Yan 等^[1]分析了温度对隧道管片接头力学性质的影响;张建刚等^[2]研究了管片接头端面的压应力分布特征;郭瑞等^[3]研究了管片接头在剪力作用下的变形特征;胡辉等^[4]研究了三种盾构管片配筋设计方法。闫治国等^[5-6]研究了盾构隧道衬砌结构计算模型中关键参数的选取方法,将试验得到的螺栓拉力和接头变形值与理论计算值进行了比较;于宁等^[7]分析了影响预应力管片接头刚度的各项因素;张厚美等^[8]通过管片接头荷载试验研究了接头变形破坏过程。

目前,将图像处理方法应用于岩土材料和隧道工程的变形破坏特征研究,已有一些成果。徐金明等^[9]、Xu 等^[10]使用图像处理技术研究了石灰岩试样中的位移场与应变场的分布特征;李元海等^[11]使用图像匹配技术研究了砂土试验模型的位移场和应变场;宋义敏等^[12]采用数字散斑相关方法对红砂岩试件表面的变形场进行了研究;朱珍德等^[13]基于数字图像技术对板岩卸荷后的力学性质变化进行了研究;魏继红等^[14]将图像处理技术用于隧洞断面超欠挖方量的评价;刘晓瑞等^[15]提出了基于图像处理的隧道表面裂缝检测技术;刘学增等^[16]使用数字图像处理技术对隧道衬砌渗漏水病害识别进行了研究。但是,结合数字图像处理技术对盾构隧道管片接缝处变形破坏机理的研究成果还很少。

本文根据复合材料加固前后衬砌圆环加载试验过程中拍摄的管片图像,利用粒子测速技术计算不同位置接缝处两侧管片的位移,分析加载引起的管片错台变化特征及整环加固后复合材料的位移变化,为衬砌

圆环破坏机理研究提供一条新的研究途径。

1 整环试验过程

1.1 试件结构

本次试验使用上海轨交通常见衬砌圆环,圆环外径、内径、厚度、环宽分别为 6.2, 5.5, 0.35, 1.2 m (图 1)。衬砌圆环由 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。不同块之间由环向螺栓连接形成整体。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。

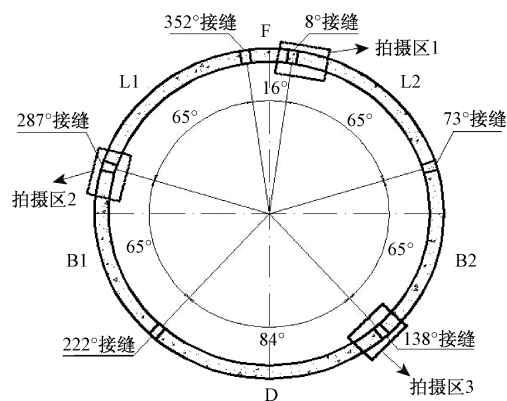


图 1 试件结构示意图

Fig. 1 Specimen of structure

1.2 荷载设计与布置原则

试验时衬砌圆环呈水平方向放置,外部荷载使用 24 个点的集中荷载来模拟,所有加载点荷载方向汇于衬砌圆环圆心,试件外观如图 2 所示。荷载分成 P1、P2、P3 共 3 组,分别为 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,加载等级见表 1。

1.3 试验图像的获取

取 8°、287°和 138°这 3 处接缝为研究对象,并规定 8°接缝为接缝 1, 287°接缝为接缝 2, 138°接缝为接缝 3。在 3 处接缝上方均安有固定照相设备进行定时拍摄(图 1)。试验采用复合材料对管片进行加固,分为未加固阶段和整环加固阶段。未加固阶段,外荷作用下管片产生变形;变形到一定程度后再进行整环加固试验,将未进行加固和整环加固之间的分界点定义

为试验加固点。整环加固阶段以试验加固点为起点加载、直至结构达到极限破坏状态。

表 1 加载等级表
Table 1 Loading level

荷载级数	P_1/kN	P_2/kN	P_3/kN
第 1 级	30.0	19.5	24.8
第 5 级	150.0	97.5	123.8
第 15 级	350.0	227.5	288.8
第 20 级	390.0	253.5	321.8
第 25 级	415.0	269.8	342.4
第 30 级	440.0	276.3	358.2
第 35 级	465.0	276.3	370.7
第 40 级	490.0	276.3	383.2
第 45 级	515.0	276.3	395.7
第 50 级	540.0	276.3	408.2
第 55 级	565.0	276.3	420.7
第 60 级	590.0	276.3	433.2
第 62 级	600.0	276.3	438.2



图 2 试件外观图
Fig.2 Appearance of experimental setup

共进行了两次试验。第一次试验时,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。第二次试验时,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 时接缝处裂缝开始扩展、复合材料开始破坏)。

拍摄试验照片时,第一次试验未加固和整环加固阶段拍摄频率分别为 20 s/张、10s/张,第二次试验的拍摄频率均为 10 s/张。图 3 为不同加载阶段接缝处分析点灰度图。所摄图像中,接缝 2、3 处图像摄自第一次试验,接缝 1 处图像摄自第二次试验。

2 基于粒子测速技术的管片错台计算

2.1 管片错台及复合材料位移计算方法

计算不同位置接缝处管片错台时,在 3 处接缝位

置管片两侧边缘各取 4 个位置点作为分析点(图 3)。研究时使用粒子测速技术对加载过程中不同接缝处的管片位移进行计算:对相邻时刻的两幅图像子区灰度相关匹配,相关系数选为:

$$C = \frac{\sum \sum [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})]}{[\sum \sum (f - \bar{f})^2 \cdot \sum \sum (g - \bar{g})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中: C ——相关系数;
 f 和 g ——2 幅图像的灰度值矩阵;
 $\bar{f}$ 和 $\bar{g}$ ——2 幅图像的背景矩阵。

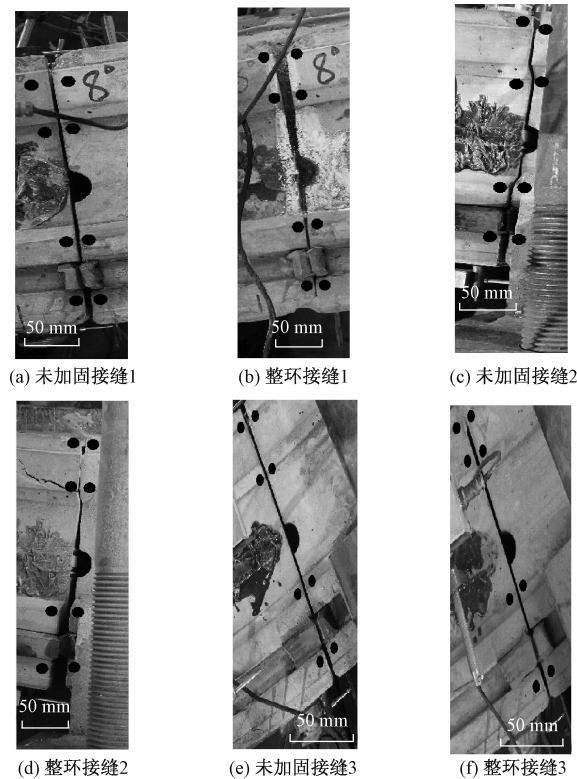


图 3 不同加载阶段接缝处分析点灰度图
Fig.3 Gray images of joints at various load stages

两幅图像匹配时,找出前一图像各点在后一图像中的位置,计算各点的水平和竖直方向位移,利用接缝倾角计算各点沿接缝方向的位移值,两侧各点位移均值相减后的绝对值即为管片混凝土错台。按照时间前后顺序,依次计算相邻时刻各点的位移;从加载开始对位移进行累加处理,得到每一时刻管片错台的变化。

同理,可以计算整环加固阶段复合材料的位移变化。在接缝复合材料处取 2 点作为分析点,将相邻时刻位移量转化为沿接缝方向的位移值,将这些位移值的平均值作为复合材料的位移变化量。

2.2 不同位置接缝各加载阶段的错台变化

图 4(a) 为接缝 1 处加固前后错台随时间的变化

曲线。由图可知,未加固阶段,随加载进行管片错台逐渐变化,变化速率在 50 min 前较为平稳、在 50 min 后逐步增大;加载至 203.9 min 时变化速率有一次明显增加、由 4.53 mm 增加至 5.98 mm(达到最大值);管片错台达到最大值时,荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 440, 276.3, 358.2 kN。整环加固阶段,由于已进行加固,管片错台整体变化较小;加载结束时管片错台达到最大值 1.30 mm,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 560, 276.3, 418.2 kN;加载结束时复合材料发生破坏,管片失去承载能力。根据加固前后管片错台对比,整环加固后接缝 1 两侧管片错台变化远小于加固前的数值。

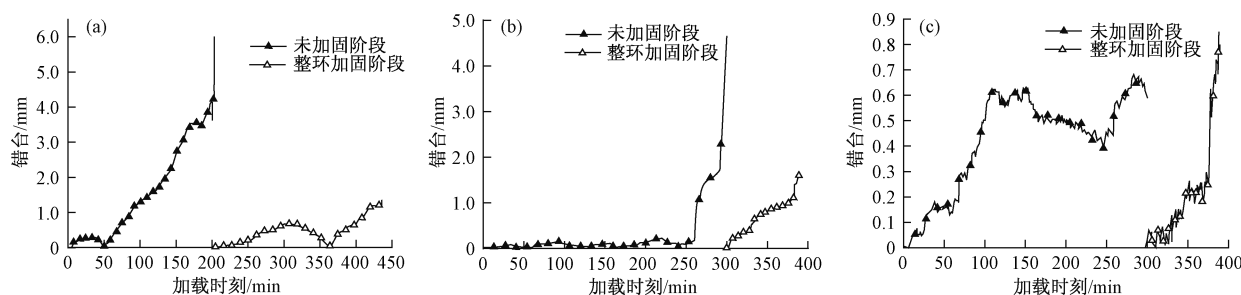


图 4 接缝 1(a)、接缝 2(b)、接缝 3(c) 处的管片错台-时间变化曲线

Fig. 4 Dislocations vs. time in joint No. 1 (a), 2 (b) and 3 (c)

图 4(c) 为接缝 3 处加固前后错台随时间的变化曲线。由图可知,未加固阶段,管片错台随加载进行而逐渐增加,在加载至 112.6, 284.3 min 时分别达到峰值点,峰值大小分别为 0.62 mm 和 0.68 mm;加载至 300 min 时错台有所减小,为 0.58 mm,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 440, 276.3, 358.2 kN。在整环加固阶段,管片错台整体变化也呈增大趋势,加载结束时达到最大值 0.84 mm,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 530, 276.3, 403.2 kN。根据加固前后管片错台的对比,整环加固后接缝 3 两侧管片错台变化大于加固前的数值。

图 4(b) 为接缝 2 处加固前后错台随时间的变化曲线。由图可知,未加固阶段,管片错台随加载进行而逐渐变化;变化速率在 260 min 前较为平稳,但在 260 min 后明显增大;加载至 300 min 时,管片错台达到最大值 4.64 mm,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 440, 276.3, 358.2 kN。整环加固阶段,管片错台整体变化也呈增大趋势,加载结束时达到最大值,为 1.58 mm,对应荷载 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为 530, 276.3, 403.2 kN。加载结束时管片混凝土开始脱落,邻接块处裂缝开始扩展。根据加固前后管片错台的对比,整环加固后接缝 2 两侧管片错台变化小于加固前的数值、但变化幅度小于接缝 1 处的结果。

值,这与接缝 1、2 处的结果不同。

综上所述,复合材料加固前,封顶块与邻接块间错台最大,邻接块与标准块间错台次之,标准块与底块间错台最小;复合材料加固后,封顶块与邻接块间错台明显减小,邻接块与标准块间错台有小幅减小,但标准块与底块间错台变化幅度明显大于加固前的数值。

2.3 整环加固阶段复合材料中的位移变化

整环加固阶段各接缝处复合材料位移随时间的变化曲线如图 5 所示。

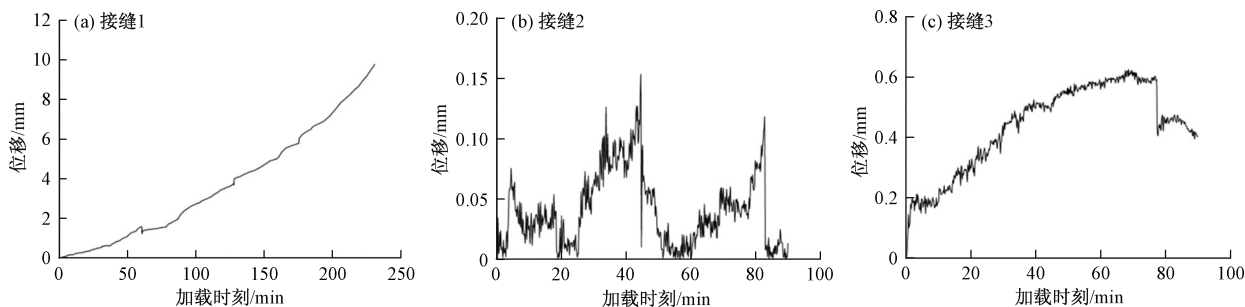


图 5 整环加固阶段复合材料位移随时间变化曲线

Fig. 5 Displacement vs time after reinforcement with composite materials

由图5可知,随着加载的进行,接缝1处复合材料位移逐渐增加,整体变化幅度较大,至230.6 min时达到最大值9.78 mm;此时,复合材料和管片衬砌的黏结失效,结构刚度大大降低,管片混凝土脱落并崩裂。接缝2处复合材料位移变化非常小,最大值仅为0.15 mm左右,这说明加固后材料中的位移变化主要是加载设备振动引起。接缝3处复合材料位移也随时间变化逐渐增加,但整体变化幅度较小,至第75 min时达到最大值0.6 mm;这说明复合材料和管片衬砌之间具有较好的黏结强度。

3 结论

(1)基于PIV技术,使用MATLAB自编程序分析了不同加载时刻不同位置接缝两侧管片错台随荷载增加的变化情况及复合材料处的位移变化情况。

(2)加固前,封顶块-邻接块间错台最大,邻接块-标准块间次之,标准块-底块间最小;加固后,封顶块-邻接块间错台明显减小,邻接块与标准块间错台小幅减小,标准块-底块间错台变化幅度大于加固前的数值。错台主要发生在封顶块-邻接块、标准块-邻接块的接缝。

(3)整环加固阶段,复合材料中位移整体变化幅度是封顶块-邻接块接缝较大、标准块-底块接缝次之、邻接块-标准块接缝最小。

参考文献:

- [1] YAN Z G, ZHU H H, JU J W. Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 610-618.
- [2] 张建刚, 何川. 不同承压衬垫的管片接头力学性能分析[J]. *铁道学报*, 2013, 35(12): 101-105. [ZHANG J G, HE C. Analysis on mechanical properties of segment joints with different pressure pads [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(12): 101-105. (in Chinese)]
- [3] 郭瑞, 何川, 苏宗贤, 等. 盾构隧道管片接头抗剪力性能研究[J]. *现代隧道技术*, 2011, 48(4): 72-77. [GUO R, HE C, SU Z X, *et al.* Study of shearing mechanical properties of segment joints of shield tunnels [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2011, 48(4): 72-77. (in Chinese)]
- [4] 胡辉, 张列, 仇文革. 三种盾构管片配筋设计方法对比及现场实测分析[J]. *水文地质工程地质*, 2012, 39(6): 72-76. [HU H, ZHANG L, QIU W G. Comparative analysis of three methods in shield segment design and onsite monitoring analysis [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(6): 72-76. (in Chinese)]
- [5] 闫治国, 彭益成, 丁文其, 等. 青草沙水源地原水工程输水隧道单层衬砌管片接头荷载试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9): 1385-1390. [YAN Z G, PENG Y C, DING W Q, *et al.* Load tests on segment joints of single lining structure of shield tunnel in Qingcaosha water conveyance project [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1385-1390. (in Chinese)]
- [6] 闫治国, 丁文其, 沈碧伟, 等. 输水盾构隧道管片接头力学与变形模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 1185-1191. [YAN Z G, DING W Q, SHEN B W, *et al.* Structural model for radial joints of water-conveyance shield tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(8): 1185-1191. (in Chinese)]
- [7] 于宁, 白廷辉, 朱合华. 盾构隧道预应力管片接头的模型试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2009, 5(3): 439-444. [YU N, BAI T H, ZHU H H. Model experimental study on joints stiff of precast and prestressed concrete lining in shield tunnels [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2009, 5(3): 439-444. (in Chinese)]
- [8] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2002, 39(6): 28-33. [ZHANG H M, FU D M, GUO C. Study on load test of segment joint in shield driven tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2002, 39(6): 28-33. (in Chinese)]
- [9] 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 J M, WANG Q, ZHOU T W. Displacement field of limestone using video images from laboratory tests [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, 37(2): 70-75. (in Chinese)]
- [10] XU J M, CHENG C H, LU H P. Strain field investigation of limestone specimen under uniaxial compression loads using particle image velocimetry [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2011, 18(5): 1619-1625.
- [11] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分

- 析的砂土模型试验变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 36 - 41. [LI Y H, ZHU H H, UENO K, *et al.* Deformation field measurement for granular soil model using image analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 36 - 41. (in Chinese)]
- [12] 宋义敏, 姜耀东, 马少鹏, 等. 岩石变形破坏全过程的变形场和能量演化研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1352 - 1356. [SONG Y M, JIANG Y D, MA S P, *et al.* Evolution of deformation fields and energy in whole process of rock failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1352 - 1356. (in Chinese)]
- [13] 朱珍德, 李道伟, 李术才, 等. 基于数字图像技术的深埋隧洞围岩卸荷劣化破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1396 - 1401. [ZHU Z D, LI D W, LI S C, *et al.* Study of unloading damage on immersed tunnel rock based on digital image processing technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1396 - 1401. (in Chinese)]
- [14] 魏继红, 吴继敏, 孙少锐. 图像处理技术在隧洞超欠挖评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 105 - 108. [WEI J H, WU J M, SUN S R. Image processing on the evaluation of overbreak and underbreak in the tunnels [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(1): 105 - 108. (in Chinese)]
- [15] 刘晓瑞, 谢雄耀. 基于图像处理的隧道表面裂缝快速检测技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(增): 1624 - 1628. [LIU X R, XIE X Y. Rapid crack inspection of tunnel surface based on image processing [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S): 1624 - 1628. (in Chinese)]
- [16] 刘学增, 桑运龙, 苏云帆. 基于数字图像处理的隧道渗漏水病害检测技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增): 3779 - 3786. [LIU X Z, SANG Y L, SU Y F. Detection technology of tunnel leakage disaster based on digital image processing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup): 3779 - 3786. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华

(上接第 112 页)

- [7] 杨利国, 骆亚生, 李焱, 等. 初始应力条件对压实黄土动强度影响的研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 87 - 91. [YANG L G, LUO Y S, LI Y, *et al.* Research on effect of initial stress conditions on dynamic strength of compacted loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 87 - 91. (in Chinese)]
- [8] 杨利国, 骆亚生, 王志杰. 中主应力对压实黄土动变形特性的影响[J]. 世界地震工程, 2010, 26(增刊): 59 - 64. [YANG L G, LUO Y S, WANG Z Z. Effect of intermediate principal stress on dynamic deformation of compacted loess [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Sup): 59 - 64. (in Chinese)]
- [9] 杨利国, 骆亚生, 李焱. 主应力轴旋转对压实黄土动变形特性的影响[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 392 - 397. [YANG L G, LUO Y S, LI Y. Effect of principal stress rotation on dynamic deformation of compacted loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 392 - 397. (in Chinese)]
- [10] 李又云, 谢永利, 刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037 - 1046. [LI Y Y, XIE Y L, LIU B J. Experimental research on dynamic characteristics of roadbed compaction loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1037 - 1046. (in Chinese)]
- [11] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soils: design equation and curves [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1972, 98(7): 667 - 692.
- [12] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988. [XIE D Y. Soil dynamics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1988. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华