

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.013

# 高精度裂缝宽度变化量测试技术研究

郝天之<sup>1,2,3</sup>, 沈涛胜<sup>3</sup>, 杨涛<sup>1,2,3</sup>

(1. 广西交通集团有限公司, 广西 南宁 530007; 2. 广西桥梁监测及加固工程技术研究中心, 广西 南宁 530007; 3. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘要:** 现有技术中,通常采用位移计或千分表来测试裂缝宽度的变化量,其测试精度均较低,在进行破坏性试验时,由于成本较高,无法获得结构破坏过程的裂缝宽度变化量,不利于结构承载能力的判定。为此,本文提出了一种采用应变片组合结构测量构件上裂缝宽度变化量的新方法。该法采用的特殊结构包含两片应变片,一片平直贴于待测构件,另一片中段弯曲并与之重合贴于待测构件,其中该弯曲段为自由段,裂缝受力发生变化时不产生应变,故二者应变片受力大小不一。通过公式推导及误差分析,得出采用应变片组合结构测量高精度裂缝宽度变化量的计算公式,并通过试验验证,上述应变片组合结构能够显著提高测试精度,为高精度裂缝宽度变化量的测量提供了参考。本文还提供一种采用该应变片组合结构测量裂缝宽度变化量的测试装置。

**关键词:** 应变片; 裂缝; 宽度变化量; 高精度

**中图分类号:** TJ765.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-4710(2020)01-0095-05

## Research on high precision crack width variation measurement technology

HAO Tianzhi<sup>1,2,3</sup>, SHEN Taosheng<sup>3</sup>, YANG Tao<sup>1,2,3</sup>

(1. Guangxi Transportation Science &amp; Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China;

2. Guangxi Bridge Monitoring and Reinforcement Engineering Technology Research Center, Nanning 530007,

China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In the existing technology, displacement meters or micrometers are usually used to measure the variation of crack width, the accuracy of which is relatively low, and it is impossible to obtain the variation of crack width in the whole process of structural damage because of the high cost in the destructive test, which is not conducive to the determination of structural bearing capacity. To this end, a new method for measuring the width variation of cracks on components by using the strain gauge composite structure is presented in this paper. The special structure adopted in this method consists of two strain gauges, one of which is directly attached to the component to be tested, and the other is bended and overlapped with the first one. The two strain gauges have different forces because the bending section is a free section that there is no strain when the stress of cracks changes. Through formula deduction and error analysis, the formula for measuring the variation of high precision crack width with strain gauge combination structure is obtained, and the above strain gauge composite structure can significantly improve the test accuracy verified by scientific test, providing a reference for measuring the variation of crack width with high precision. This paper also presents a testing device for measuring the variation of crack width using the combined structure of strain gauges.

**Key words:** strain gauge; crack; width variation; high precision

收稿日期: 2019-06-25; 网络出版日期: 2020-04-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200426.1403.002.html>

基金项目: 南宁市“邕江计划”资助项目(2018-01-04); 国家自然科学基金资助项目(51868005)

第一作者: 郝天之,男,博士,正高级工程师,研究员,研究方向为桥梁试验检测、监测评估及维修加固。E-mail: htz0537@163.com

金属构件或混凝土构件在受力不均匀时会出现微小的裂缝,宽度一般为 0.02~2.00 mm。监测裂缝宽度的变化并分析原因成了结构安全评估的要点之一,高精度测量裂缝宽度变化显得尤其重要。此时,传统的裂缝宽度变化量测方法已不能满足检测需求,部分学者对裂缝宽度的高精度测量技术进行了研究。Dare 等<sup>[1]</sup>简要说明了自动图像处理技术在长期的裂缝精确测量中的应用,为裂缝宽度提供定量测量。姚冰等<sup>[2]</sup>在数字摄影原理的基础上提出了非接触检测的测距方法,可在桥梁工程中实现更精确的远距离、非接触裂缝宽度测量。Barazzetti 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于图像的裂缝分析方法(IMCA)测量裂缝变形(宽度、滑动和旋转),该法的精度约为 ±5~20 μm。张国旗<sup>[4]</sup>和夏巨武<sup>[5]</sup>为实现机器人系统检测裂缝,在研究过程中提出了一种提取裂缝目标的方法,并基于 MATLAB 平台开发了图像处理软件,实现了高精度的尺寸测量。李刚等<sup>[6]</sup>考虑了桥梁表面裂缝的特征,改进 Snake 算法并将算法误差分辨率降低至 3.89%,最终实现裂缝绝对误差小于 0.05 mm。许薛军等<sup>[7]</sup>应用编程研究了数字图像检测方法,裂缝宽度大于 0.3 mm,理论值与实测值相对误差不超过 6%,裂缝宽度在 0.2~0.3 mm,其误差不超过 10%。王琳等<sup>[8]</sup>研究了基于双目立体视觉技术的裂缝测量系统,研究结果表明用该系统在不同视角下对同一条裂缝的宽度、长度的计算结果基本一致,与实际测量值的绝对误差在 1%~10%。Li 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于 C-V 模型的改进图像分割算法,采用电子距离测量算法对裂纹宽度进行了毫米级计算,有效提高了检测精度。令永强等<sup>[10]</sup>提供了一种基于应变片技术监测混凝土表面裂缝的新装置,通过该装置可较为简便地得到裂缝变化值及变化速率。张奔牛等<sup>[11]</sup>研究了基于机敏网的混凝土结构裂缝宽度监测方法,研究表明结构裂缝宽度随着机敏线的极限拉应变增加而增大,最终可间接算出裂缝的宽度。针对传统裂缝监测传感器和传统统计模型在实际应用中的不足,张凯<sup>[12]</sup>基于光纤弯曲损耗原理,提出了一种用于水工混凝土结构裂缝监测的新型光纤传感器,验证了传感器用于结构裂缝监测的可行性。马云峰等<sup>[13]</sup>和王睿等<sup>[14]</sup>建立数值模型对隧道衬砌裂缝的渐进开裂过程进行分析,均指出有必要对裂缝分布和扩展进行高精度监测,未就高精度的裂缝宽度扩展监测方法展开阐述。

综上所述,大量学者对裂缝宽度监测方法进行了宏观的研究,但各法测试精度仍然较低,无法满足

工程要求,且测量成本较高、经济效果差。针对上述存在的问题,本文提出一种基于应变片技术测量裂缝宽度变化的方法,该法消除了现有的应变片测量裂缝宽时裂缝两侧的构件由于应力而产生的尺寸变化值,可显著提高测试精度,为构件裂缝宽度变化量测量提供参考。

## 1 基于应变片测量裂缝宽度变化的基本原理

### 1.1 传统测量方法存在的问题

传统测量裂缝宽度变化量的方法主要包括使用位移计、千分表等设备。采用两个磁性表座安装位移计、千分表横跨待测裂缝,其中一表座固定测量设备本身,另一表座固定设备顶杆。当裂缝宽度发生微小变化时两个表座间距离发生相应的改变,从而得到宽度变化量。但当裂缝受力发生变化时,该法未考虑裂缝周围构件部位受力产生的变形,在计算裂缝宽度变化量时变形不可忽略不计。

此外,在现有的应变片测量裂缝宽度变化的方法中,同样出现上述问题。见图 1,将一应变片横跨裂缝贴于待测构件上,待测构件受力后,构件裂缝发生形变,应变片产生应变  $\epsilon_1$ ,现有应变片测量裂缝宽度变化的方法认为该应变  $\epsilon_1$  即为裂缝宽度变化量,如图 1 中情况 I 所示。实际上从受力分析来看,构件变形时不仅裂缝变形会产生应变,裂缝周围区域同样会产生应变  $\epsilon_{11}$ 、 $\epsilon_{13}$ ,因此  $\epsilon_1$  实由 3 部分组成,裂缝宽度变化产生的应变  $\epsilon_{12}$  及裂缝周围区域产生的应变  $\epsilon_{11}$ 、 $\epsilon_{13}$ 。

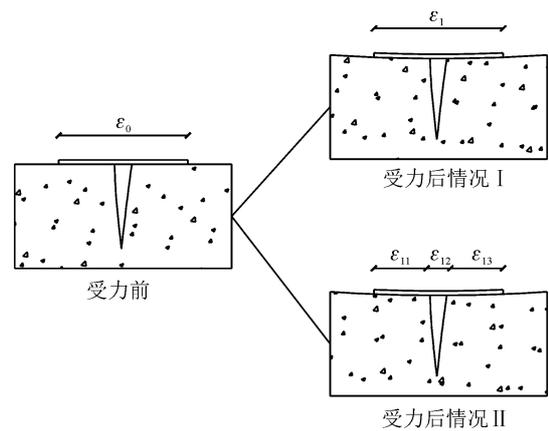


图 1 现有应变片测量裂缝宽度变化量方法原理  
Fig. 1 Principle of present strain gauge method for measuring crack width variation

综上所述,由于忽略裂缝开裂受力时,其周围区域变形产生的影响,传统位移计、千分表及现有应变片技术测量裂缝宽度变化量均存在较大误差,因此亟须一种考虑该误差的新方法,满足当代社会工程

需求。

### 1.2 高精度测量方法的基本原理

基于传统应变片测量裂缝宽度变化量的方法,提出的应变片组合结构包含 2 个应变片 A、B,其具体构造从左至右分别为贴合段 1、跨缝段及贴合段 2,见图 2。由于应变片 A、B 的长度相同,故其敏感栅长度相等,因此有:

$$l_{1z} + l_{1h} + l_{1y} = l_{2z} + l_{2f} + l_{2y} \quad (1)$$

式中:  $l_{1z}$ 、 $l_{1h}$ 、 $l_{1y}$  分别为应变片 A 敏感栅长度贴合段 1、跨缝段、贴合段 2;  $l_{2z}$ 、 $l_{2f}$ 、 $l_{2y}$  分别为应变片 B 敏感栅长度贴合段 1、跨缝段、贴合段 2。

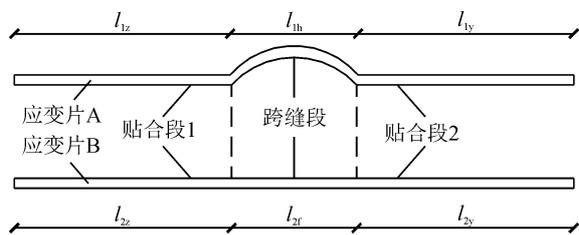


图 2 应变片组合结构布置图

Fig. 2 Layout of strain gauge composite structure

开裂构件受外荷载作用后,待测裂缝两侧开裂构件产生应变,其尺寸发生变化的同时待测裂缝宽度也在发生变化,因此对应变片 A、B,有:

$$\epsilon_1 = \frac{l_{1z}\epsilon_{1z} + l_{1h}\epsilon_{1h} + l_{1y}\epsilon_{1y}}{l_{1z} + l_{1h} + l_{1y}} \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = \frac{l_{2z}\epsilon_{2z} + l_{2f}\epsilon_{2f} + l_{2y}\epsilon_{2y}}{l_{2z} + l_{2f} + l_{2y}} \quad (3)$$

式中:  $\epsilon_{1z}$ 、 $\epsilon_{1h}$ 、 $\epsilon_{1y}$  分别为应变片 A 中左段贴合段 1、中段跨缝段、右段贴合段 2 的应变值;  $\epsilon_{2z}$ 、 $\epsilon_{2f}$ 、 $\epsilon_{2y}$  分别为应变片 B 中左段贴合段 1、中段跨缝段、右段贴合段 2 的应变值;  $\epsilon_1$  为应变片 A 总体应变;  $\epsilon_2$  为应变片 B 总体应变。

应变片 A、B 均关于待测裂缝对称粘贴,即应变片 A、B 的两贴合段长度相同,故有:

$$l_{1z} = l_{1y}, l_{2z} = l_{2y} \quad (4)$$

由于应变片 A 中段跨缝段处于弯曲松弛状态,其应变值  $\epsilon_{1h}$  为零。

应变片 A、B 平行紧贴布置,且应变片 A 与应变片 B 的尺寸均远小于开裂构件的结构尺寸,故有:

$$\epsilon_{1z} = \epsilon_{2z}, \epsilon_{1y} = \epsilon_{2y} \quad (5)$$

常见需测试的待测裂缝宽度一般取值为 0.02 ~ 2.00 mm,待测裂缝宽度远小于应变片 A、B 的敏感栅长度,因此:

$$l_{1z} = l_{1y} \approx l_{2z} = l_{2y} \quad (6)$$

根据式(1)~(6)可得:

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_{21} &= \epsilon_2 - \epsilon_1 \\ &= \frac{l_{2z}\epsilon_{2z} + l_{2f}\epsilon_{2f} + l_{2y}\epsilon_{2y}}{l_{2z} + l_{2f} + l_{2y}} - \frac{l_{1z}\epsilon_{1z} + l_{1y}\epsilon_{1y}}{l_{1z} + l_{1h} + l_{1y}} \\ &= \frac{l_{2z}\epsilon_{2z} - l_{1z}\epsilon_{1z} + l_{2f}\epsilon_{2f} + l_{2y}\epsilon_{2y} - l_{1y}\epsilon_{1y}}{l_{1z} + l_{1h} + l_{1y}} \quad (7) \\ &= \frac{(l_{2z} - l_{1z})\epsilon_{1z} + l_{2f}\epsilon_{2f} + (l_{2y} - l_{1y})\epsilon_{1y}}{l_{1z} + l_{1h} + l_{1y}} \\ &\approx \frac{l_{2f}\epsilon_{2f}}{l_{1z} + l_{1h} + l_{1y}} \end{aligned}$$

式中:  $\Delta\epsilon_{21}$  为应变片 A 和应变片 B 的应变差,且可由应变测试仪读出,故待测裂缝宽度变化量  $\Delta f$ :

$$\Delta f = l_{2f}\epsilon_{2f} \approx (l_{1z} + l_{1h} + l_{1y})\Delta\epsilon_{21} \quad (8)$$

## 2 实施方式

### 2.1 理论实施方式

针对现有监测裂缝宽度的变化技术成本高、精度低等问题,本文提出一种采用应变片的组合结构测量裂缝宽度变化量的方法及装置,用于测量裂缝的宽度变化量。该构件可以为金属构件、混凝土构件等。裂缝宽度变化量测试装置包括应变片组合结构及应变测试仪<sup>[15]</sup>,见图 3。

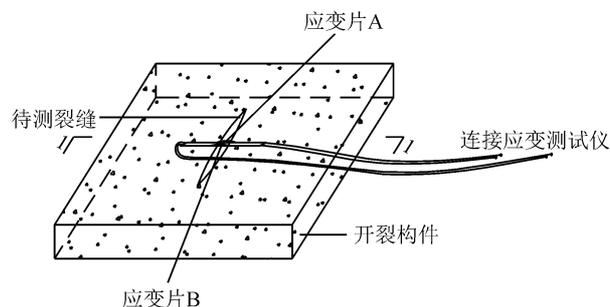


图 3 裂缝宽度变化量测试装置图

Fig. 3 Chart for measuring device for crack width variation

应变片组合结构中应变片 A、B 长度相同并平行紧靠在一起,见图 4 和图 5。两者均包括两段贴合段及一连接两段贴合段的跨缝段,应变片 A 的两贴合段与应变片 B 的两贴合段均用于与待测量的构件贴合,跨缝段用于横跨裂缝。

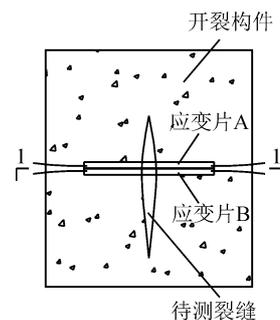


图 4 1-1 待测裂缝平面图

Fig. 4 Section Profile with 1-1

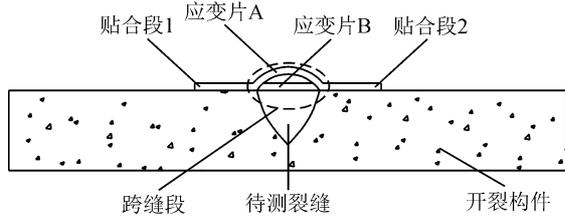


图 5 1-1 截面立面图

Fig. 5 Section Profile with 1-1

应变片 A 的跨缝段相对相应的贴合段凸设形成凸起部,以使得应变片 A 的跨缝段不会随裂缝宽度的变化而产生应变。凸起部朝远离开裂构件方向凸设,以避免凸起部与待测裂缝产生接触影响实验结果,最终通过应变测试仪得出两应变片应变差值<sup>[16]</sup>,最终得到裂缝宽度变化量。

特别指出,凸起部位可通过模具形成,见图 6。该模具包括基板,基板上设有一与所述凸起部形状相匹配的凸面,将应变片 A 置于该模具上,并对该应变片 A 施加压力,使得应变片 A 沿该模具的凸面发生形变以与该凸面贴合,从而于该应变片 A 上形成该凸起部。凸起部位的形状不限于图 2 中所示的弧段,凸起部还可以为椭圆弧线段,只要凸起部能够保持松弛状态,不随待测裂缝宽度的变化产生应力即可。

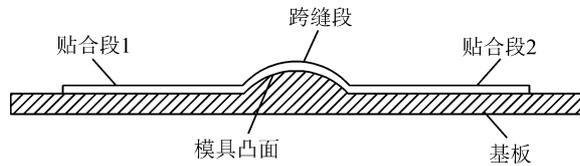


图 6 应变片 A 凸起部形成过程

Fig. 6 Process of protrusion formation with A strain gauge

### 2.2 试验验证

本文以 BFRP 钢筋混凝土框架连续倒塌性能试验为试验依托,见图 7。对一榀中柱失效的两跨混凝土框架结构进行破坏性荷载试验,采用传统方法中的千分表及本文提及的应变片组合结构,在试验加载过程中对已有的裂缝进行其宽度变化量测量。由于该试验的加载要求,试验加载方式采用先荷载控制、后位移控制。本文试验在混凝土框架结构达到弹性阶段前为荷载控制,逐级加载至结构进入弹性阶段后改为位移控制。本文提出的应变片组合结构为高精度测量,故在结构弹性阶段内,选取一条边柱端宽度较为明显的裂缝作为试验对象进行裂缝宽度变化量测量试验。为精细的测量裂缝宽度变化量,加载过程中荷载控制等级为 2 kN/级。荷载加至 8 kN 时,裂缝出现,选取一条裂缝作为观测对象,测得该初始裂缝宽度为  $l_{1h} = 0.62 \text{ mm}$ ,选取荷载控制下结构在弹性阶段的部分试验数据。



图 7 BFRP 钢筋混凝土框架连续倒塌性能试验

Fig. 7 Test on continuous collapse behaviour of BFRP reinforced concrete frame

根据本文提出的方法,依据式(8)计算出裂缝宽度变化量与常规方法使用千分表测量裂缝宽度变化量的测量结果,其对比见表 1。绘出在不同位移加载等级情况下裂缝宽度变化量曲线,见图 8。

表 1 应变片法与千分表方法测量裂缝宽度变化结果比较

Tab. 1 Comparison of crack width measured by strain gauge and dial indicator

荷载/ kN	裂缝宽度变化量/mm		荷载/ kN	裂缝宽度变化量/mm	
	千分表法	应变片法		千分表法	应变片法
8	0	0	18	0.004	0.003 2
10	0.001	0.000 7	20	0.004	0.003 9
12	0.001	0.001 2	22	0.004	0.004 3
14	0.003	0.002 3	24	0.005	0.005 1
16	0.003	0.002 7	26	0.006	0.005 7

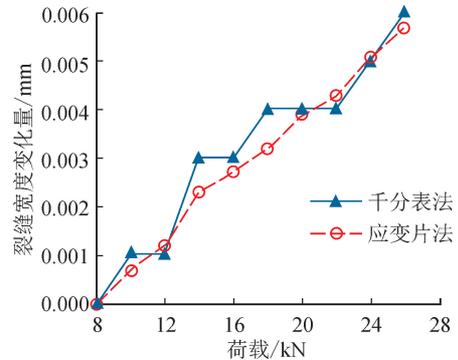


图 8 荷载工况下裂缝宽度变化量曲线

Fig. 8 Crack width variation curve under load conditions

由表 1 及图 8 可知如下结果。

1) 由于常规方法的精度有限,最小读数值是 0.001 mm,相对误差较大,测量所得数据不具有说服力。

2) 随着荷载的增加,千分表测得数据显示裂缝宽度变化呈现锯齿状非线性变化,而应变片测得数据显示其裂缝宽度变化量呈现较好的线性变化,后者更符合力学理论及工程实际。

### 3 结 论

本文提出了一种采用应变片组合结构测量构件上裂缝宽度变化量的新方法,基于应变测试的基本原理,推导了应变片组合结构测量裂缝宽度变化量的基本公式,并通过试验分析验证了该方法的可行性,得出以下结论。

1) 采用本文提出的应变片组合结构进行裂缝宽度变化量的测量,可排除裂缝两侧的构件由于应力而产生的尺寸变化值,有效提高了测量精度。

2) 提出的裂缝宽度变化量测试装置及其应变片组合结构,测试最小读数值为  $0.000\ 001\ l_{th}$ ,相较于现有裂缝宽度测试方法和仪器其测试精度得到显著提高。

3) 提出的测量设备成本低廉,实现裂缝宽度变化量全程测量,达到结构应变的同步测试,从而获得更多的结构及裂缝周边的受力状态信息,更有利于结构承载能力的判定。

4) 本文提出的采用应变片组合结构测量构件上裂缝宽度变化量的新方法,适用于测量弹性阶段下金属或混凝土构件中微小裂缝受力产生的裂缝宽度变化量,该方法可显著提高测试精度,为构件裂缝宽度变化量测量提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] DARE P, HANLEY H, FRASER C, et al. An operational application of automatic feature extraction: the measurement of cracks in concrete structures[J]. *The Photogrammetric Record*, 2002, 17(99): 453-464.
- [2] 姚冰,赵启林,芮挺,等. 非接触式检测混凝土桥梁裂缝的测距法[J]. *中国市政工程*, 2009(3): 38-40.  
YAO Bing, ZHAO Qilin, RUI Ting, et al. Ranging method of non-contact detection to cracks of concrete bridges[J]. *China Municipal Engineering*, 2009(3): 38-40.
- [3] BARAZZETTI L, SCAIONI M. Crack measurement: development, testing and applications of an automatic image-based algorithm[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(3): 285-296.
- [4] 张国旗. 基于图像处理的混凝土桥梁底面裂缝检测方法的研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.  
ZHANG Guoqi. Research on crack detection method of concrete bridge bottom based on image processing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [5] 夏巨武. 基于数字图像处理的桥梁裂缝测量应用研究[D]. 成都:西南石油大学,2011.  
XIA Juwu. Research on application of bridge crack measurement based on digital image processing[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.
- [6] 李刚,贺拴海,巨永锋,等. 远距离混凝土桥梁结构表面裂缝精确提取算法[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(4): 102-108,124.  
LI Gang, HE Shuanhai, JU Yongfeng, et al. Distant accurate crack extraction algorithm for surface of concrete bridge structure[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(4): 102-108,124.
- [7] 许薛军,张肖宁. 基于数字图像的混凝土桥梁裂缝检测技术[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(7): 34-40.  
XU Xuejun, ZHANG Xiaoning. Crack detection of concrete bridges based digital image[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2013, 40(7): 34-40.
- [8] 王琳,赵健康,夏轩,等. 基于双目立体视觉技术的桥梁裂缝测量系统[J]. *计算机应用*, 2015, 35(3): 901-904.
- [9] LI Gang, HE Shuanhai, JU Yongfeng, et al. Long-distance precision inspection method for bridge cracks with image processing [J]. *Automation in Construction*, 2014, 41: 83-95.
- [10] 令永强,周勇,杨校辉,等. 一种监测混凝土表面裂缝的装置:CN206146872U[P]. 2017-05-03.
- [11] 张奔牛,范中华,黄锐,等. 基于机敏网的混凝土结构裂缝宽度监测方法研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2014, 33(2): 26-29, 48.  
ZHANG Benniu, FAN Zhonghua, HUANG Rui, et al. Crack width monitoring of concrete structures based on smart film[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2014, 33(2): 26-29, 48.
- [12] 张凯. 水工混凝土结构裂缝的光纤智能传感技术与安全监控模型研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.  
ZHANG Kai. Research on optical fiber intelligent sensing technology and safety monitoring model of cracks in hydraulic concrete structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [13] 马云峰,徐林生. 基于近场动力学的隧道衬砌结构渐进裂损数值模拟分析[J]. *西安理工大学学报*, 2019, 35(1): 120-126.  
MA Yunfeng, XU Linsheng. Numerical simulation analysis of tunnel lining structure crack damage based on peridynamics[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2019, 35(1): 120-126.
- [14] 王睿,党发宁,李明亮,等. 基于概率统计法的隧道围岩变形稳定时间及二衬施作时机研究[J]. *西安理工大学学报*, 2017, 33(2): 204-210.  
WANG Rui, DANG Faning, LI Mingliang, et al. Research on deformation stability time and secondary lining laying time of tunnel surrounding rock based on probability statistics method[J]. *Journal of Xi'an University of technology*, 2017, 33(2): 204-210.
- [15] 郝天之,王龙林,刘世建,等. 裂缝宽度变化量测试装置及其应变片组合结构:CN107830795B[P]. 2019-06-14.
- [16] 郝天之,于孟生,陈齐风,等. 一种基于应变片的裂缝宽度变化量测试方法:CN108020654B[P]. 2019-06-14.

(责任编辑 王绪迪)