

# 基于数字散斑方法的 OGFC 混合料低温 变形破坏行为研究

于保阳<sup>1,2</sup>, 陈希栋<sup>1</sup>, 齐琳<sup>3</sup>, 赵志强<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连海事大学交通工程学院, 辽宁 大连 116026;  
3. 沈阳城市建设学院土木工程系, 辽宁 沈阳 110167)

**摘要** 目的 研究四点加载状态下 OGFC 沥青混合料的低温变形破坏行为, 提出基于弹性变形的应力重构, 探究其变形过程中的应力变化规律。方法 通过数字散斑方法结合四点弯曲试验, 分析小梁试件完全破坏前应变场分布规律, 并量化分析应变集中带区域应变变化规律。结果 水平应变场随加载由均匀分布向应变集中带状区域渐变, 具有局部化特征; 通过关注点的点应变非线性增长曲线得到其起裂时间点、起裂应变以及变形时间段; 基于 DSM 的应力重构可用于分析 OGFC 混合料变形阶段应力变化规律。结论 赋予材料属性的应力重构与数字散斑方法相结合使得 OGFC 沥青混合料的应力测量更具有真实性。

**关键词** 数字散斑方法; OGFC; 四点弯曲试验; 应变场; 应力重构

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Study on Low Temperature Deformation and Failure Behavior of OGFC Asphalt Mixture Based on the Digital Speckle Method

YU Baoyang<sup>1,2</sup>, CHEN Xidong<sup>1</sup>, QI Lin<sup>3</sup>, ZHAO Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction Institute, Shenyang, China, 110167)

**Abstract:** In order to study the low-temperature deformation and failure behavior of OGFC asphalt mixture under four-point loading, the digital speckle method combined with four-point bending test is used to analyze the strain field distribution law and the strain change law in the strain concentration zone before the trabecular specimen is completely destroyed. The stress reconstruction based on elastic deformation is proposed to explore the law of stress changes in the process of deformation. The results show that the horizontal strain field gradually changes from a

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908378); 辽宁省教育厅一般项目(lnjc202014)

作者简介: 于保阳(1980—), 男, 高级实验师, 博士研究生, 主要从事道路材料方面研究。

uniform distribution to a strain-concentrated banded area with the load, which has localized characteristics;the initiation time point,the crack initiation strain and the deformation time period are obtained through the non-linear growth curve of the point strain of the focus point;the DSM-based stress reconstruction can be used to analyze the stress change law of OGFC mixture in the deformation stage. The combination of stress reconstruction with material properties and digital scattering methods makes the stress measurement of OGFC asphalt mixes more realistic.

**Key words:** digital speckle method; OGFC; four-point bending test; strain field; stress reconstruction

开级配抗滑磨损层 (Open Graded Friction Course, OGFC) 因排水能力强、提高路面摩阻力、低噪音等优点被推广应用<sup>[1-2]</sup>。OGFC 相比于其他类型混合料,空隙率大、粗集料含量高。但也因这种独特的结构,使其空间分布对其变形破坏行为产生很大的影响<sup>[3]</sup>。

低温变形破坏是沥青路面常见的病害,对 OGFC 混合料路用功能具有重要影响。多以宏观试验的名义用应力应变对材料的变形破坏行为进行整体评价<sup>[4-5]</sup>。但对材料性能的评判均基于各向同性的假定,忽视了混合料的各向异性特性<sup>[6-7]</sup>。同时忽略了破坏前的变形过程,无法得到试样表面或关注部位的变形情况。不管是试样表面还是关注部位,获得材料的实际应变场对于认知材料的宏观行为是必要的<sup>[8]</sup>。因此,综合考虑材料的各向异性进行 OGFC 混合料的变形破坏行为研究,对认识 OGFC 的力学行为与发挥路用性能具有重要意义。

数字散斑方法 (Digital Speckle Method, DSM) 可实现全场非接触测量。C. M. Stewart 等<sup>[9]</sup>以 DSM 结合宏观试验发现裂纹对细观结构特征敏感;谭亿秋等<sup>[10]</sup>以 DSM、应变片测量法、算法对沥青混合料间接拉伸试验中的拉伸应变进行对比研究,表明 DSM 测量间接拉伸应变可行;王岚等<sup>[11]</sup>以 DSM 研究紫外光老化的沥青混合料裂纹产生及扩展规律,并分析了沥青混合料的界面特征。

鉴于上述分析,笔者以 DSM 结合四点弯曲试验对 OGFC 混合料的变形破坏行为

开展细观研究,以便获得 OGFC 混合料的全场位移、应变信息,并提出应力重构,得到加载过程中的应力变化情况,进一步认识 OGFC 混合料的全场变形破坏行为。

## 1 试验

### 1.1 OGFC 混合料

OGFC 混合料是由沥青与集料组成的开级配沥青混合料,矿粉由磨细的石灰岩制成,其级配设计如图 1 所示。

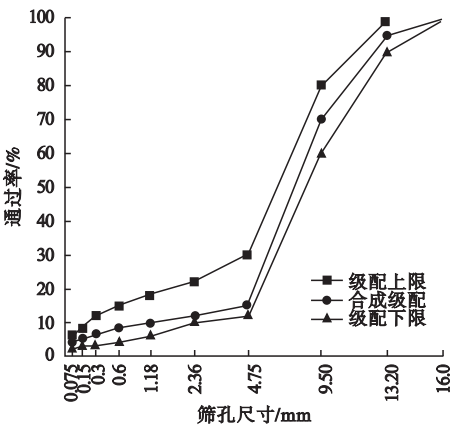


图 1 OGFC 沥青混合料的级配设计

Fig. 1 Gradation design of OGFC asphalt mixture

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 数字散斑方法 (DSM) 及基本原理

笔者主要采用 MatchID 系统开展 DSM 试验,其测量装置由相机、计算机、光源构成,试验系统如图 2 所示。

DSM 的基本原理:对变形前后散斑图像通过相关性匹配,得到图像子区灰度场,根据像素点灰度变化进行试样位移、应变计算。其算法原理如图 3 所示。

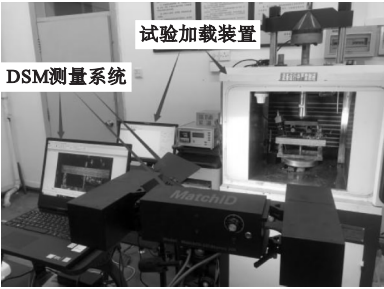


图2 试验系统  
Fig. 2 Test system

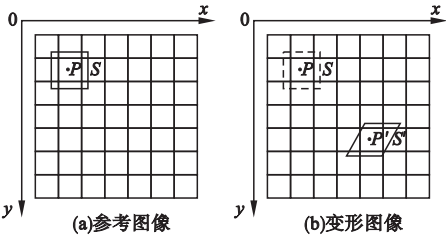


图3 相关性算法实现基本原理图  
Fig. 3 Basic principle diagram of correlation algorithm implementation

$$C_{ZNNSSD} = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[ \frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \right]. \tag{1}$$

1.2.2 试件制备

将长×宽×高为 300 mm×300 mm×50 mm 的车辙板试件切割成长×宽×高为 250 mm×30 mm×35 mm 的梁式试件,并对试件制作散斑,形成白底黑斑的散斑表面,如图 4 所示。

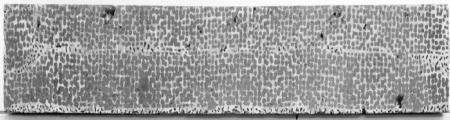


图4 试件散斑表面  
Fig. 4 Speckle surface of the specimen

1.2.3 试验方案

试验加载装置采用 SANS 万能试验机,试件安放装置支座间距为  $L=200\text{ mm}$ ,相邻夹头中心间距为  $L/3=66.67\text{ mm}$ ,加载速率为  $50\text{ mm/min}$ ,试验温度  $-10^\circ\text{C}$ ,图像采集频率为  $10\text{ ms/副}$ 。

参考图 3 中图像、变形图像的灰度值分别为  $f(x,y)$ 、 $g(x',y')$ ,在参考图像中取一点  $P(x,y)$ ,并以  $P$  点为中心取大小为  $(2M+1) \times (2M+1)$  像素点的子集  $S$  作为参考图像匹配子区。加载后, $P$  点移动到  $P'(x',y')$  点,则  $S$  内的散斑点移动到以  $P'$  点为中心的  $S'$  子区内对应位置。基于概率统计原理,变形后的  $P'$  点可以通过与  $P$  点匹配后最大相关系数的点位置确定<sup>[12]</sup>。匹配到对应的点之后,两点坐标差即  $P$  点变形后的位移分量。

采用零均值归一化平方差和相关函数<sup>[13]</sup>计算 OGFC 沥青混合料梁式试件变形前后的相关系数。其中, $f(x,y)$  为图 3 中参考图像点  $P$  的灰度值, $g(x',y')$  为图 3 中变形图像点  $P'$  的灰度值; $f_m$  和  $g_m$  分别为参考图像与变形图像中子区灰度平均值。

2 试验结果分析与讨论

2.1 荷载-时间曲线分析

以 DSM 结合四点弯曲试验研究 OGFC 混合料的全场变形破坏行为。其荷载-时间曲线如图 5 所示。

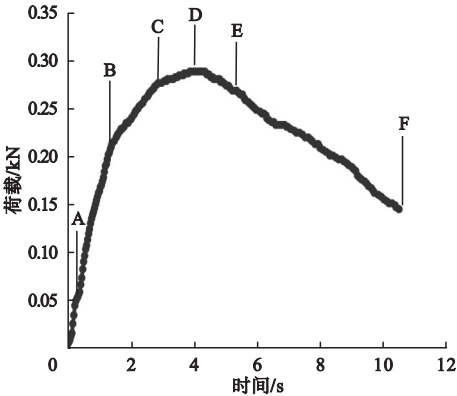


图5 四点弯曲试验荷载-时间曲线  
Fig. 5 Load-time curve of four-point bending test  
由荷载-时间曲线以及 DSM 分析中应

变场云图演化特征,选6个代表性时间点处应变场分析其演化过程。其中,A点为试件初始加载;B点处于荷载线性增长阶段;C点位于荷载缓慢增长阶段;D点为峰值荷载附近;E点位于荷载下降阶段;F点为下降阶段末端,此时试验终止。

2.2 应变场演化分析

笔者关注 OGFC 沥青混合料梁式试件完全破坏前应变场的演化过程,主要通过研究其水平应变场<sup>[14]</sup>的演化来研究其变形破坏行为,如图6(a)~(f)所示。

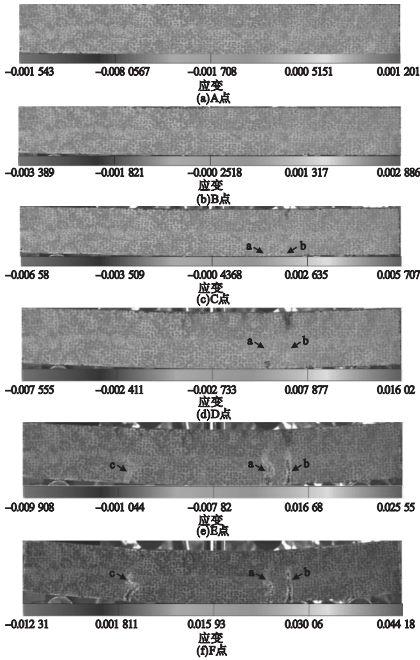


图6 加载中水平应变场

Fig. 6 Horizontal strain field during the loading

由图6可知:①A点与B点的应变场无明显区别,水平应变场云图呈均匀化分布,但B点处出现了较为模糊的丝带状区域。②加载至C点,试样处于荷载缓慢增长阶段,先在右压头底部出现火苗状区域a、b,即应变集中区域,并向上扩展形成图6(c)所示应变集中带状区域,且a区域的应变集中程度高于b区域。③加载至D点,a区域的应变集中程度高于b区域,其应力也集中,当集中应力超过OGFC可承受的极限强度时,便出现图6(d)所示的a区域先于b区域开裂,同时

产生裂缝尖端,其应变集中区域上移到尖端处,促进裂缝的不断扩展。④随荷载施加,a区域裂缝继续扩展,b区域处应变集中程度同步增加,当超过材料极限便出现图6(e)所示b区域开裂,同时左边压头底部由于应变的集中出现火苗状区域c;⑤加载至F点,应变集中导致左压头试件底部的裂缝开裂到一定程度,与右侧两个裂缝共同形成图6(f)中试件的最终破坏形态。

通过不同时间点不同特征的6副应变场云图的整体观察可知:随加载时间变化,初始加载时的上部水平压应变、下部水平拉应变转变为上压头之间水平压应变,其他区域以水平拉应变为主;应变场由均匀分布渐变为显著集中,表明OGFC变形的局部化特征。另外,将应变集中带与试件材料分布位置相对应,可观察到图6中a、b、c区域的应变集中带均位于较大集料之间,且所处位置的材料均是由沥青结合料与细集料形成的沥青砂浆,同时形成的裂缝也均是沿着沥青砂浆的分布,在细集料与沥青结合料的界面处开裂扩展。

2.3 应变集中带处应变特征

为更客观的定量考察应变集中带区域的演化情况,采用MatchID系统的point功能测得图6(c)中四个关注点(见图7)水平应变,其中1、3、4三点均位于应变集中带开裂点处,2点位于中间底部,其各点水平应变随采集帧数的变化如图8所示。

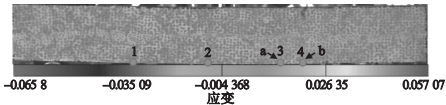


图7 关注点选取位置

Fig. 7 Selecting the locations of the interest points

由图8可知,关注点的应变变化趋势不同,在前期应变增长缓慢,没有明显差别,3、4点大约在200帧处应变增长速度加快并趋于线性,但3点增长速度在早期快于4点;1点大约在600帧处应变开始加快增长并趋于线



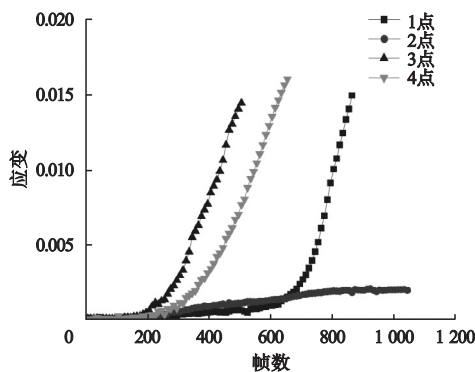


图8 关注点水平应变随采集帧数的变化

Fig. 8 Changes in the horizontal strain of the focus point with the number of acquisition frames

性;1、3、4点处产生裂纹时,应变值中断;而2点由于未出现开裂,其经历1、3、4点曲线变化趋势之后趋于平稳,直到试验停止。1、3、4点根据曲线由缓慢增长到快速增长的转折处帧数可知其开裂先后次序分别是:3点、4点、1点;3点应变中断处对应时间是其起裂时间点(4.33 s),对应应变值是其起裂应变(0.014 4),进而可得到其产生开裂前(应变中断)的时间为试件变形时间段,约为0~4.33 s(520帧)。四点弯曲试验名义应变如图9所示。

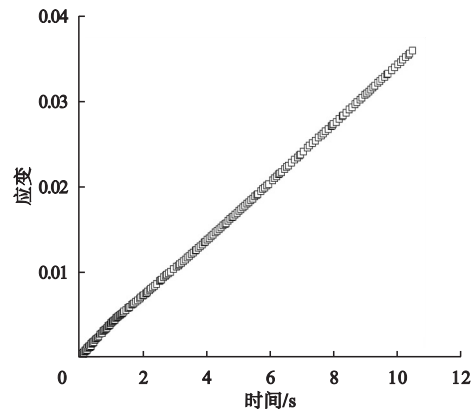


图9 四点弯曲试验名义应变

Fig. 9 Nominal strain of four-point bending test

对比图8与图9可知,四点应变变化趋势虽然不同,但均不是名义应变所具有的近似线性增长趋势,而是呈现出非线性增长,其原因是OGFC混合料具有各向异性,这一点也被应变场分布以及四点的应变变化得到验

证,名义应变是试件均质化得到的理想应变,DSM计算的是试件表面的点的应变值。因此,由DSM分析计算得到的应变为各点的真实应变值。

2.4 OGFC混合料变形破坏过程应力重构及应力演化分析

在现有研究体系中可通过有限元<sup>[15]</sup>等方法实现应力变化研究,但有限元方法过于理想化,若能直接通过DSM获取材料应力将更具有真实性。因此笔者借鉴有限元方法,结合材料属性,通过应力-应变反演力学分析方法基于DSM的应变测量结果对OGFC沥青混合料变形过程进行应力重构。

2.4.1 应力重构

笔者所采用的四点弯曲试验处于低温情况下进行,假定其加载过程中产生弹性变形,则其变形阶段的应力-应变关系由弹性力学理论可表达为

$$\varepsilon_x = \frac{1-\mu}{E}(\sigma_x - \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_y).$$
 (2)

$$\varepsilon_y = \frac{1-\mu}{E}(\sigma_y - \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_x).$$
 (3)

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\mu)}{E}\tau_{xy}.$$
 (4)

式中: $\sigma_x$ 为水平应力; $\sigma_y$ 为垂直应力; $\tau_{xy}$ 为剪切应力; $\mu$ 为材料泊松比; $E$ 为弹性模量。

令  $a = \frac{(1-\mu)}{E}$ ,  $b = \frac{\mu}{(1-\mu)}$ , 可将上述表

达式简化为

$$\varepsilon_x = a(\sigma_x - b\sigma_y).$$
 (5)

$$\varepsilon_y = a(\sigma_y - b\sigma_x).$$
 (6)

$$\gamma_{xy} = 2a(1+b)\tau_{xy}.$$
 (7)

由式(5)、(6)、(7)联立反演可得到试样的水平、垂直和剪切方向的应力重构表达式:

$$\sigma_x = \frac{\varepsilon_x + b\varepsilon_y}{a(1-b^2)}.$$
 (8)

$$\sigma_y = \frac{\varepsilon_y + b\varepsilon_x}{a(1-b^2)}.$$
 (9)

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2a(1+b)}\gamma_{xy}.$$
 (10)

由上述公式,结合弹性模量、泊松比以及应变数据,便可应力重构得到真实应力。其中,弹性模量、泊松比由变形阶段 DSM 应变计算得到。首先确定变形阶段起终点,计算试件的平均弹性模量  $E_{av}$  和平均泊松比  $\mu_{av}$ <sup>[16]</sup> 作为该阶段的弹性模量、泊松比。

为得到试件的  $E_{av}$  和  $\mu_{av}$ , 首先采用 MatchID 分析系统中测线(line)功能,在所得应变云图中布置测线,求取所需应变值表达式为

$$\varepsilon_{ha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{iha} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{ea} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{iea} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{hb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ihb} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{eb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ieb} \quad (14)$$

式中: $a$ 、 $b$  为变形阶段起终点标记; $\varepsilon_{ha}$ 、 $\varepsilon_{hb}$  与  $\varepsilon_{ea}$ 、 $\varepsilon_{eb}$  为变形阶段起终点的平均水平应变与平均垂直应变; $n$  为测线上测点的数目; $\varepsilon_{iha}$ 、 $\varepsilon_{ihb}$  与  $\varepsilon_{iea}$ 、 $\varepsilon_{ieb}$  为起终点处测线测点  $i$  的水平应变与垂直应变。

根据弹性模量与泊松比定义,求解得到表达式:

$$E_{av} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (15)$$

$$\mu_{av} = \frac{\varepsilon_{eb} - \varepsilon_{ea}}{\varepsilon_{hb} - \varepsilon_{ha}} \quad (16)$$

式中: $\sigma_a$ 、 $\sigma_b$  分别为变形阶段起终点应力值,MPa。

### 2.4.2 基于 DSM 的应力分析

由上文可知,OGFC 混合料梁式试件弹性变形时间为  $0 \sim 4.33$  s ( $0 \sim 520$  帧),由于起点处未受力,其水平应变与垂直应变均为 0,结合时间对应关系得到变形阶段终点水平应变与垂直应变。

根据试验受力状况,沿试件侧面顶底边分别水平布置一条侧线计算平均水平应变,在加载端正下方分别垂直布置一条测线计算平均垂直应变。每条测线取 51 个点,得到试件的应变变化情况,如图 10 所示。图 10(a) 中,顶底部测线波动位于中部测点,顶部测线波动远弱于底部测线,说明试件变形发生在加载端之间,顶部为压应变,底部为拉应变且对变形起主要作用;图 10(b) 中,左侧测线与右侧测线平行,无显著变化,但与图 10(a) 相比,其垂直应变值比水平应变值小 1 个数量级,表明试件主要受到水平应变的作用;图 10(a) 与 10(b) 测线无规则波动以及峰值的出现,表明了 OGFC 混合料的各向异性特性,同时也验证了 DSM 对 OGFC 混合料的适用性。

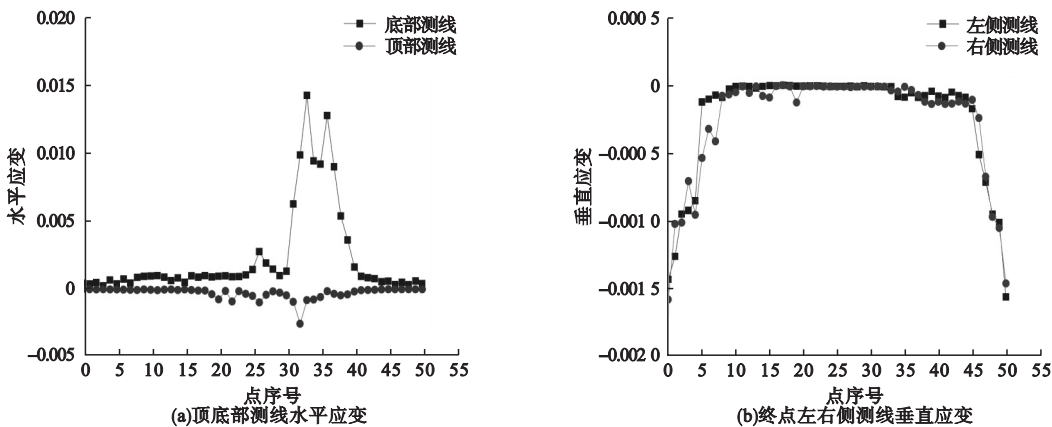


图 10 测线水平应变与垂直应变

Fig. 10 Horizontal strain and vertical strain of the line

将顶底部测线测点的水平应变代入式(13)中, $n$ 是两测线测点之和;将加载端正下方测线测点的垂直应变数据代入式(14)中得到: $\varepsilon_{ha} = 0, \varepsilon_{ea} = 0, \varepsilon_{hb} = 1.008 \times 10^{-3}, \varepsilon_{eb} = 2.467 \times 10^{-4}$ ;由时间对应确定变形阶段起终点应力值,并同上述数据代入式(15)、式(16),得: $E_{av} = 1\,580\text{ MPa}, \mu_{av} = 0.24$ 。

以图7中所取四点为关注点进行应力重构,将变形过程中的水平应变与垂直应变及所求弹性模量与泊松比代入式(8)、(9)中得到水平应力与垂直应力,如图11所示,其中

正负值仅代表应力方向,不代表数值大小。由图11可看出,四个关注点的水平应力相比垂直应力均有大幅增长,说明试件主要受水平应力的作用。另外,水平应力值从大到小依次为3点、4点、2点、1点,其中3点的水平应力值略大于4点,并远大于1点、2点,说明3点作为先开裂点,不仅应变集中程度最高,而且应力集中程度也最高。因此,应力重构的应力分析结果与宏观现象及DSM结果一致,验证了应力重构对于分析OGFC沥青混合料应力变化规律的可行性。

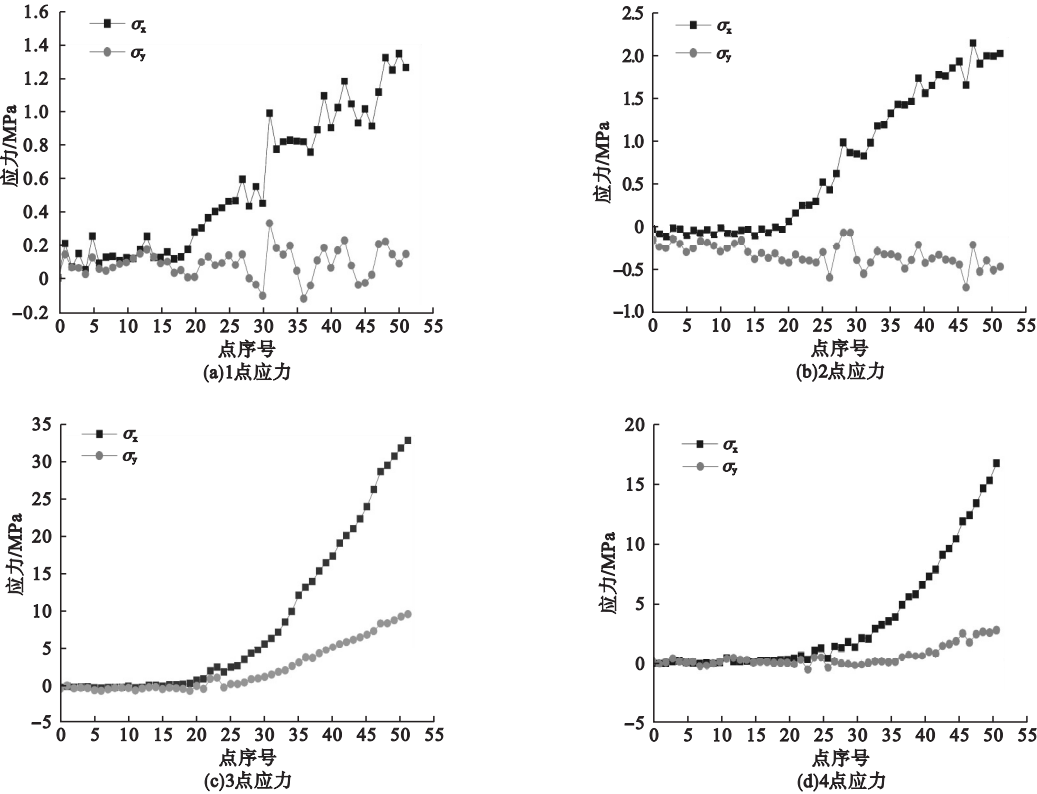


图 11 关注点水平应力与垂直应力

Fig. 11 The horizontal stress and vertical stress of the focus points

3 结 论

- (1) OGFC 沥青混合料四点弯曲试验时,其水平应变场在砂浆分布处出现应变集中带,直至应变集中程度最高处出现开裂。
- (2) 通过关注点的点应变定量分析,发现点应变呈非线性增长,前期增长缓慢,之后加快增长并趋于线性,在应变集中带处因试

- 件开裂而中断,未开裂处后期趋于平稳。
- (3) 以应力 - 应变反演力学结合 DSM 的应力重构分析,验证了应力重构用于 OGFC 混合料应力变化规律分析的有效可行。

参考文献

[1] 安少科,张家康,黄杨权,等. 基于综合性能的

- OGFC 沥青混合料配合比设计优化研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 487-494.  
(AN Shaoke, ZHANG Jiakang, HUANG Yangquan, et al. Optimization of mixture proportion design of OGFC asphalt mixture based on comprehensive performance [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(3): 487-494.)
- [2] XIONG Rui, FANG Jianhong, XU Anhua, et al. Laboratory investigation on the brucite fiber reinforced asphalt binder and asphalt concrete [J]. Construction and building materials, 2015, 83: 44-52.
- [3] TANZADEH R, TANZADEH J, HONARMAND M, et al. Experimental study on the effect of basalt and glass fibers on behavior of open-graded friction course asphalt modified with nanosilica [J]. Construction and building materials, 2019, 212: 467-475.
- [4] 黄拓, 郑健龙. 沥青混合料强度试验方法及破坏准则研究评述[J]. 中外公路, 2015, 35(1): 222-227.  
(HUANG Tuo, ZHENG Jianlong. Review of research on asphalt mixture strength test method and failure criteria [J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35(1): 222-227.)
- [5] PIRMOHAMMAD S, SHOKORLOU Y M, AMANI B. Laboratory investigations on fracture toughness of asphalt concretes reinforced with carbon and kenaf fibers [J]. Engineering fracture mechanics, 2020, 226: 106875.
- [6] 陈俊, 孔燕. 沥青混合料各向异性的研究综述[J]. 公路, 2017, 62(2): 36-42.  
(CHEN Jun, KONG Yan. Summary of research on anisotropy of asphalt mixture [J]. Highway, 2017, 62(2): 36-42.)
- [7] 王雪莲, 金晶, 黄晓明. 基于各向异性的沥青混合料车辙模拟分析[J]. 中外公路, 2015, 35(2): 194-198.  
(WANG Xuelian, JIN Jing, HUANG Xiaoming. Simulation analysis of asphalt mixture rutting based on anisotropy [J]. Journal of China & foreign highway, 2015, 35(2): 194-198.)
- [8] HUANG Y H, LIU L, SHAM F C, et al. Optical strain gauge vs. traditional strain gauges for concrete elasticity modulus determination [J]. Optik-international journal for light and electron optics, 2010, 121(18): 1635-1641.
- [9] STEWART C M, GARCIA E. Fatigue crack growth of a hot mix asphalt using digital image correlation [J]. International journal of fatigue, 2018, 120: 254-266.
- [10] 谭忆秋, 张魁, 吴思刚, 等. 应用数字散斑技术的沥青混合料劈裂应变研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(9): 56-58.  
(TAN Yiqiu, ZHANG Kui, WU Sigang, et al. Research on splitting strain of asphalt mixture using digital speckle technology [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2009, 41(9): 56-58.)
- [11] 王岚, 弓宁宁, 邢永明. 基于数字散斑相关法的紫外老化沥青混合料界面开裂特性[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4): 732-740.  
(WANG Lan, GONG Ningning, XING Yongming. Characteristics of interface cracking for ultraviolet aged hot-mix asphalt based on digital speckle correlation method [J]. Acta materiae compositae sinica, 2016, 33(4): 732-740.)
- [12] 郭海鸿, 李晓星. 非接触应变测量的数字散斑相关方法的研究[J]. 现代制造工程, 2007(11): 96-98.  
(GUO Haihong, LI Xiaoxing. Research on digital speckle correlation method for non-contact strain measurement [J]. Modern manufacturing engineering, 2007(11): 96-98.)
- [13] 王罗斌, 万强, 韦利明, 等. 带权重因子相关函数对数字图像算法性能的影响[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 346-350.  
(WANG Luobin, WAN Qiang, WEI Liming, et al. Influence of correlation function with weighting factor on digital image algorithm performance [J]. Journal of Chengdu university (natural science edition), 2019, 38(4): 346-350.)
- [14] 牛东瑜. 基于细观力学的沥青砂浆及骨架结构沥青混合料性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.  
(NIU Dongyu. Study on performance of asphalt mortar and framework structured asphalt mixture based on meso-mechanics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.)
- [15] UNDERWOOD B S, KIM Y R. Experimental investigation into the multiscale behaviour of asphalt concrete [J]. International journal of pavement engineering, 2011, 12: 357-370.
- [16] 陈新忠, 曹远威, 刘世伟, 等. 基于数字图像的非接触式泊松比测试方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊2): 366-371.  
(CHEN Xinzhong, CAO Yuanwei, LIU Shiwei, et al. Non-contact testing method for Poisson ratio based on digital image [J]. Journal of China coal society, 2014, 39(S2): 366-371.)  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)