

# 交通荷载作用下玻纤格栅对反射裂缝扩展的影响

孙文图<sup>1</sup>, 白雨瓚<sup>2</sup>, 张洪亮<sup>2</sup>

(1.东营交通发展集团, 山东 东营 257091; 2.长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 为研究交通荷载作用下玻纤格栅对沥青路面反射裂缝扩展的影响, 采用 ABAQUS 有限元软件建立含有反射裂缝的半刚性基层沥青路面结构二维模型, 对裂缝尖端的应力强度因子进行计算分析, 比较铺设玻纤格栅前后路面面层内裂缝尖端应力强度因子, 并分析反射裂缝扩展速率随裂缝长度和面层模量、厚度等的变化。结果表明, 促进反射裂缝发展的最不利荷载方式是偏载; 设置玻纤格栅后, 裂缝尖端剪切型应力强度因子降低 41.7%, 玻纤格栅可起到延缓裂缝扩展的作用; 反射裂缝的扩展速率随着裂缝长度和面层模量的增大而增大, 随着面层厚度的增大而减小。

**关键词:** 公路; 玻纤格栅; 沥青路面; 半刚性基层; 反射裂缝; 交通荷载; 应力强度因子

中图分类号: U416.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0083-05

目前, 中国高等级公路的常见路面结构形式为半刚性基层沥青路面。半刚性基层极易在温度应力作用下发生温缩开裂, 导致其所在位置上方的面层底部容易发生应力集中现象, 使面层开裂, 路面结构产生反射裂缝。路表积水通过裂缝进入路面结构, 导致基层承载力下降、面层脱层、土基有效模量减小。反射裂缝的存在不仅影响行车舒适性和安全性, 还会缩减道路的服务年限。

常见的反射裂缝防治措施有适当增加面层厚度、合理选择面层和基层材料、加铺土工合成材料、基层和面层之间加铺柔性基层或应力吸收层, 其中基层和面层之间加铺玻纤格栅最为常见。张佰真铭通过 ABAQUS 有限元软件确定玻纤格栅的合理加铺位置, 并通过室内试验分析发现加铺玻纤格栅可有效延缓反射裂缝的扩展速率, 改善路面结构的承载能力。李文辉通过 MTS 疲劳加载试验进行玻纤格栅抑制反射裂缝扩展研究, 发现具有高抗拉强度和低延伸率的玻纤格栅可延缓反射裂缝产生和扩展的速率, 且抵抗起裂和扩展的能力较为均衡。李汝凯对荷载型反射裂缝进行分析, 提出玻纤格栅延缓反射裂缝的机理主要是其加筋作用。疲劳加载试验发现, 玻纤格栅可很好地延长反射裂缝的起裂寿命, 但在裂缝扩展阶段由于玻纤格栅在疲劳加载下发生部分失效而有所折扣。高冠群通过 ANSYS 有限元软件对土工织物的防裂机理进行研究, 通过室内车辙试验, 以轮载作用次数为裂缝扩展评价指标分析加铺玻纤格栅对延缓反射裂缝的作用, 结果表明, 面层和基层之间加铺玻纤格栅可提高路面使用寿命。

廖丹通过数值分析对半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展时的应力强度因子进行计算, 结果表明, 交通荷载作用下反射裂缝的扩展速率主要受面层材料参数的影响, 基层材料参数的影响较小。孙雅珍等以面层底部拉应力和裂缝尖端应力强度因子为指标, 运用有限元软件对路面结构中反射裂缝扩展机理进行分析, 结果表明, 交通荷载作用于裂缝正上方时, 反射裂缝的裂缝面受压, 裂缝不发生扩展; 交通荷载作用方式为偏载时, 反射裂缝的裂缝面两侧产生剪切应力, 裂缝扩展模式属于剪切型扩展。上述研究主要通过室内试验进行, 存在一定的局限性和较差的可控性, 受外界因素影响较大。为此, 该文借助 ABAQUS 有限元软件建立加铺玻纤格栅的路面模型, 考虑交通荷载条件, 对路面结构加铺玻纤格栅前后的受力情况和裂缝尖端应力强度因子进行模拟, 分析玻纤格栅防治反射裂缝的效用。

## 1 断裂力学理论

断裂力学中, 根据裂纹面的位移方式或外加力的形式将路面结构中的裂缝分为张开型、滑开型和撕开型 3 种(见图 1)。

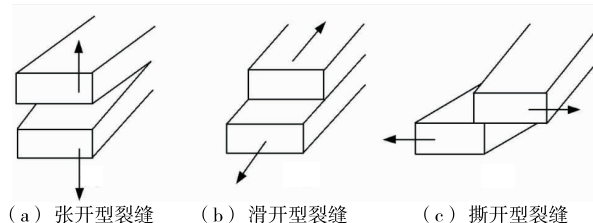


图 1 路面结构中的 3 种基本裂缝类型

根据 Westergard 复变函数可计算得到线弹性断裂力学中裂缝尖端的应力场,3 种类型裂纹尖端区域应力场的解析表达式分别为:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \left( 2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{Bmatrix} -\sin \frac{\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $K_I$ 、 $K_{II}$ 、 $K_{III}$  分别为 I 型(张开型)、II 型(滑开型)和 III 型(撕开型)裂缝的应力强度因子;  $r$ 、 $\theta$  为极坐标参数。

实际情况下,路面结构在受到外部荷载作用时,多数情况产生的是张开型和滑开型裂缝同时存在的复合型裂缝。而从式(1)~(3)来看,只要路面结构内部含有裂纹,且受到大小不为零的外部荷载作用,在裂缝尖端附近产生的应力就会随  $r$  的减小而趋于无穷大。这显然不符合实际情况,因为很多含有裂缝的结构仍具有足够的承载能力和稳定性。因此,以应力作为判断裂纹扩展的依据不太合适。

对于同一裂缝,不管构件的几何形状和荷载类型如何变化,在裂缝尖端附近足够小的范围内只要具有一样的应力强度因子  $K_n$  ( $n = I, II, III$ ),就有相同的应力场,其与  $K_n$  成正比。因此,  $K_n$  能反映裂缝尖端所受的荷载与变形的强度,可作为衡量裂缝尖端附近应力场强度的重要指标,用来度量裂纹扩展的推动力。

## 2 模型的建立

鉴于二维模型简单方便,计算速率快且模拟精度较高,建立含有反射裂缝的半刚性基层沥青路面结构二维模型,以裂缝尖端的应力强度因子为裂缝扩展指标,对不同工况下裂缝尖端的应力强度因子进行计算,研究反射裂缝的扩展机理。

### 2.1 基本假设

采用有限元软件建立半刚性基层路面模型对反射裂缝的扩展进行分析会受到许多因素的影响,建模时作如下假设:1) 各路面结构层材料均质、连续、各向同性,且不考虑自重影响;2) 各层之间的接触方式为完全连续;3) 土基侧面水平约束,底部完全约束;4) 基层裂缝贯通,且没有传荷能力,宽度为 1 cm;5) 裂缝扩展中,玻纤格栅不发生断裂。

### 2.2 结构层材料参数

半刚性基层沥青路面结构层材料参数见表 1。

表 1 半刚性基层沥青路面各结构层的材料参数

结构层	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比
面层	18	1 200	0.35
基层	40	1 500	0.25
土基	—	40	0.40

### 2.3 玻纤格栅材料参数

考虑到玻纤格栅是一种常见的网状结构织物,其上加铺的沥青砼会进入其中的网格部分,同时格栅是很薄的一层,有限元分析时把它被砼填充后的复合材料作为单独的一层,简称 AG 层。为方便模拟并考虑玻纤格栅与沥青砼实际咬合情况,该层厚度取 1 cm,且铺设在面层和基层之间。

由复合材料力学相关知识对玻纤格栅层的弹性模量  $E_{AG}$  进行计算:

$$E_{AG} = \frac{E_g V_g + E_a V_a}{V_g + V_a} \quad (4)$$

式中:  $E_{AG}$ 、 $E_g$ 、 $E_a$  分别为 AG 层、玻纤格栅网格和沥青混合料的弹性模量;  $V_g$ 、 $V_a$  分别为填充层和沥青混合料的体积。

参考文献[10],AG 层的弹性模量一般为 3 000 ~ 10 000 MPa,这里取 6 000 MPa。由于 AG 层中玻纤格栅网格较大,且被面层的沥青混合料完全填充,其泊松比与下面层相同,取 0.35。

### 2.4 有限元模型

二维有限元模型的长度为 6 m,深度方向为 3 m。土基底部完全固定约束,模型侧面施加对称边界条件以约束水平位移,面层表面为自由面。在路面结构的基层设置贯穿裂缝,模拟半刚性基层中产生的裂缝。由于基层裂缝向上发展的主要原因是裂缝正上方的面层底部产生应力集中,在基层裂缝正上方的面层位置预设长度为 2 cm 的竖直裂缝,模拟裂缝在沥青面层中向上扩展的情况。建立的整体模

型见图 2,裂缝尖端奇异网格见图 3。

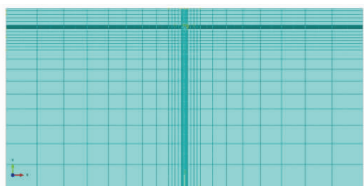


图 2 含有裂缝的沥青路面结构模型

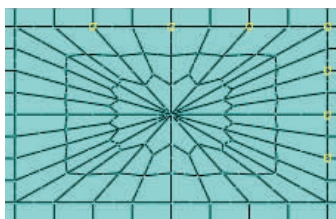


图 3 裂缝尖端网格划分

## 2.5 子模型的建立

在有限元计算过程中,模型网格划分越精密,计算精度越高,但相应地计算效率降低。子模型的引入是为了将模型应力集中区域独立出来,尽可能提高该区域的网格精度,以较高的计算效率得到较精确的计算结果。

子模型分析步骤如下:1)对整体模型进行计算分析,得到相关 ODB 文件;2)根据需求对加密位置进行截取并建立子模型;3)设置各分析步中的驱动变量;4)对加密区域施加子模型边界条件,并对其设置相关载荷、接触和约束;5)利用子模型进行计算分析。对裂缝尖端附近区域建立子模型见图 4,该区域网格密度提高 4 倍。

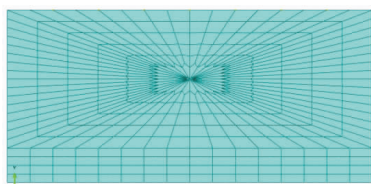


图 4 子模型网格划分

## 3 应力强度因子分析

在沥青面层预设长度为 2 cm 的裂缝,研究交通荷载作用下面层内反射裂缝的扩展机理。

### 3.1 行车荷载分析

实际工程中,单轴双轮标准轴载 0.7 MPa 作用在两个表面上。而该文采用的是二维平面模型,通过式(5)进行转化,得到转换为平面问题后的荷载为 108 696 Pa/m。

$$p = \frac{P}{4\delta} \quad (5)$$

式中: $P$  为轴重,一般取 100 kN; $\delta$  为单轮荷载分布长度,取 0.23 m。

交通荷载作用下,随着车辆荷载驶近和远离裂缝正上方,对裂缝尖端的作用方式依次为剪切—弯拉—剪切作用。当轮胎即将到达或刚驶离裂缝时,车辆荷载为偏荷载,裂缝尖端产生剪切应力;当轮胎到达裂缝正上方时,车辆荷载为对称荷载,裂缝尖端产生弯拉应力。因此,对对称荷载和偏载作用下裂缝尖端应力状态进行研究,其作用方式见图 5。

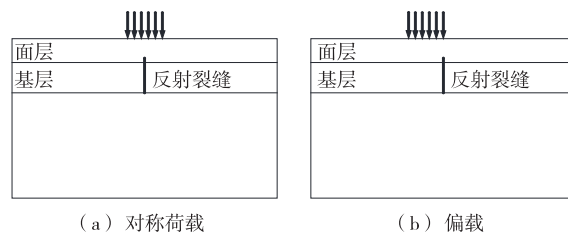


图 5 不同荷载作用方式示意图

### 3.2 未加铺玻纤格栅路面结构裂缝尖端状态分析

对未铺设玻纤格栅的路面结构施加图 5 所示对称荷载和偏载,对半刚性基层沥青路面反射裂缝的尖端应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$  进行比较,确定沥青层反射裂缝发生扩展的最不利荷载位置。施加对称荷载和偏载时裂缝尖端应力见图 6、图 7(为便于观察,应力云图均加大 ABAUQS 的动画缩放系数),应力强度因子计算结果见表 2。

由表 2 可知:对称荷载作用下,裂缝尖端应力强度因子  $K_I < 0$ ,表明裂缝尖端处于受压状态,即裂

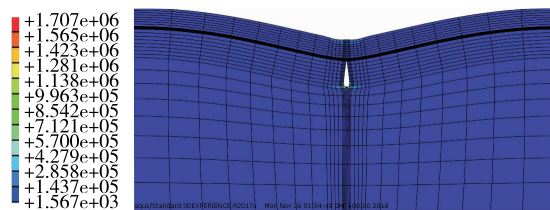


图 6 对称荷载作用下未铺设玻纤格栅路面结构裂缝尖端应力云图(单位:Pa)

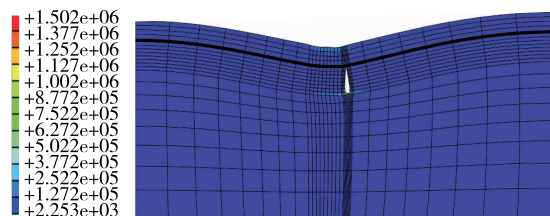


图 7 偏载作用下未铺设玻纤格栅路面结构裂缝尖端应力云图(单位:Pa)

表2 未铺设玻纤格栅路面结构裂缝尖端的应力强度因子

荷载形式	$K_I / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1/2})$	$K_{II} / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1/2})$
对称荷载	$-7.987 \times 10^3$	0
偏载	$4.291 \times 10^3$	$-2.245 \times 10^4$

缝不产生扩展;在偏载作用下, $K_I > 0$ ,  $K_{II} < 0$ ,表明沥青面层容易产生张开型和剪切型同时存在的复合型反射裂缝。而且车辆驶过裂缝时,在驶近和远离裂缝的过程中将发生2次偏载作用。因此,偏载作用位置为车辆荷载的最不利位置。

### 3.3 铺设玻纤格栅路面结构裂缝尖端状态分析

对比设置玻纤格栅与不设玻纤格栅时面层裂缝尖端的I、II型应力强度因子,分析铺设玻纤格栅延缓反射裂缝扩展的作用。基于前面对最不利荷位的研究,对偏载作用下裂缝尖端应力强度因子进行求解。偏载作用下铺设玻纤格栅路面结构裂缝尖端应力见图8,应力强度因子计算结果及与未铺设玻纤格栅时的对比见表3。

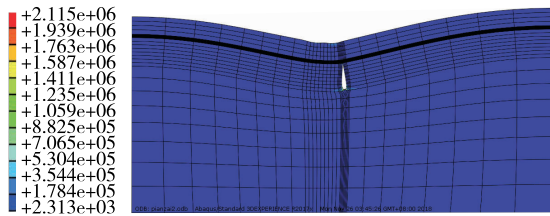


图8 偏载作用下铺设玻纤格栅路面结构裂缝尖端应力云图(单位:Pa)

表3 偏载作用下铺设玻纤格栅前后裂缝尖端的应力强度因子

工况	$K_I / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1/2})$	$K_{II} / (\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1/2})$
未铺设玻纤格栅	$4.291 \times 10^3$	$-2.245 \times 10^4$
铺设玻纤格栅	$-1.154 \times 10^4$	$-1.307 \times 10^4$
子模型	$-1.156 \times 10^4$	$-1.310 \times 10^4$

由表3可知:偏载作用下,铺设玻纤格栅后,路面结构裂缝尖端应力强度因子 $K_I$ 由正变为负, $K_{II}$ 降低41.7%,说明铺设玻纤格栅可延缓偏载作用下反射裂缝在沥青面层中的扩展。

## 4 裂缝扩展影响因素分析

### 4.1 裂缝长度对裂缝尖端应力强度因子的影响

路面结构采用表1中参数,裂缝长度分别取2、4、6、8、10、12、14、16 cm,通过有限元软件计算得到不同裂缝长度下2种应力强度因子(见图9)。

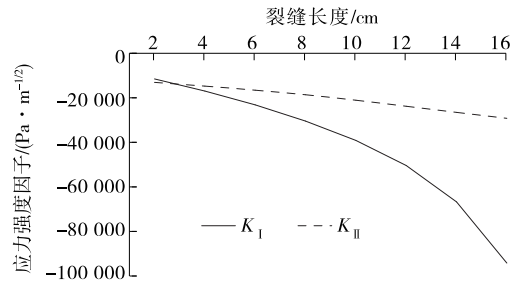


图9 不同裂缝长度下的应力强度因子

由图9可知:随着裂缝长度的增加,张开型应力强度因子 $K_I$ 一直为负值,说明路面结构铺设玻纤格栅后,偏载作用下的裂缝扩展模式仅为剪切型;剪切型应力强度因子 $K_{II}$ 随着裂缝长度的增加而增大,说明在裂缝不断扩展的过程中,扩展速率越来越大,直至面层发生破坏。

### 4.2 面层模量对应力强度因子的影响

路面结构采用表1所示参数,裂缝长度设为面层开裂2 cm,面层模量分别取1 000、1 100、1 200、1 300、1 400和1 500 MPa,通过有限元软件求解得出偏载作用下不同面层模量时2种裂缝尖端的应力强度因子(见图10)。

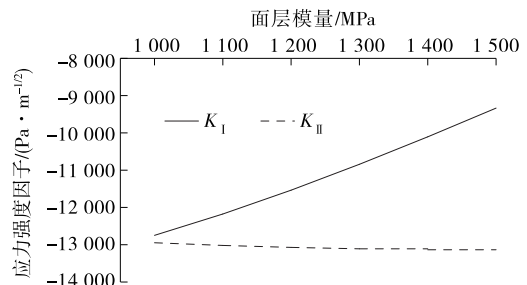


图10 不同面层模量下的应力强度因子

由图10可知:面层模量的改变对裂缝尖端张开型应力强度因子的影响较大,对剪切型应力强度因子的影响较小。根据应力场计算公式,裂缝尖端的应力场随着应力强度因子的增大而增大,张开型应力强度因子降低导致裂缝面两边路面结构之间的压应力减小,使抑制两边产生剪切的摩阻力减小。且随着路面结构面层模量的加大,剪切型应力强度因子略微增大。因此,面层模量增加导致反射裂缝扩展速率增大。

### 4.3 面层厚度对应力强度因子的影响

路面结构采用表1所示参数,裂缝长度设为面层开裂2 cm,面层厚度分别取18、20、22、24、26、28、30 cm,通过有限元计算得到偏载作用下不同面层厚度时2种应力强度因子(见图11)。



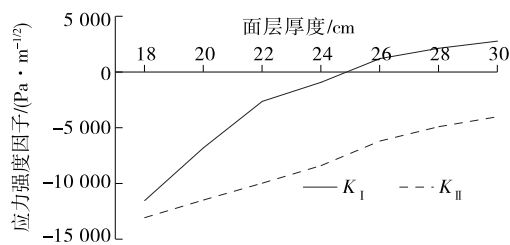


图 11 不同面层厚度下的应力强度因子

由图 11 可知:偏载作用下,在加铺玻纤格栅的道路结构中,随着面层厚度的增加,裂缝尖端的张开型应力强度因子增大甚至出现正值,即裂缝尖端从压应力逐渐减小直至变为拉应力;剪切型应力强度因子与面层厚度成反比,随面层厚度增加而减小,但其值达到 24 cm 后减幅变小。综上,增加面层厚度可延缓裂缝的发展,但超过 24 cm 后这种延缓作用逐渐减弱,甚至在裂缝尖端产生拉应力。

## 5 结论

(1) 行车荷载的最不利位置为偏载;在偏载作用下,路面结构反射裂缝类型以剪切型为主要表现形式。

(2) 路面结构设置玻纤格栅后,可明显延缓反射裂缝的扩展速率。

(3) 铺设玻纤格栅路面结构的反射裂缝扩展速率随着裂缝长度和面层模量的增大而增大,随着面层厚度的增大而减小。

## 参考文献:

- [1] 孙雅珍,翟晓星,李宁.沥青路面反射裂缝扩展机理与防裂效果分析[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2012,28(6).
- [2] 郝晓红.基于抗裂性能的橡胶沥青应力吸收层混合料关键指标研究[J].中外公路,2016,36(5).
- [3] 张佰真铭.玻纤格栅防治沥青路面反射裂缝技术的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [4] 李文辉.应用土工织物防治复合式路面荷载型反射裂缝的试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [5] 李汝凯.重载条件下复合式路面防反技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [6] 高冠群.农村公路旧水泥路面加铺沥青层防裂研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [7] 廖丹.半刚性基层沥青路面反射裂缝防治技术研究[D].北京:北京工业大学,2009.
- [8] 黄志勇.应力吸收层的有限元模拟分析[J].西部交通科技,2017(6).
- [9] 黄彬.玻纤格栅在防治沥青加铺反射裂缝中的应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [10] 陆军.加宽改造公路沥青路面防治反射裂缝技术探讨[J].公路与汽运,2016(5).
- [11] 杨烨.两种沥青路面的力学响应及结构层寿命对比分析[J].公路与汽运,2018(3).

收稿日期:2019-03-25

(上接第 82 页)

开裂的主要原因,砼开裂面积、裂缝宽度及数量呈增长趋势。

## 3 结论

(1) 花岗岩石粉作为矿物掺合料的微集料效应可优化砼胶凝材料颗粒级配,使砼内部空隙率减小,自由水增多,拌和物流动性增强。

(2) 砼 7、28 d 抗压强度随着花岗岩石粉掺量的增加而降低,3 d 抗压强度随着花岗岩石粉掺量的增加先增加后降低,掺入 10% 花岗岩石粉时砼 3 d 抗压强度达到最高值。

(3) 花岗岩石粉的掺入能提高砼约束自由水的能力,降低蒸发失水速率,提高砼早期抗裂能力;花岗岩石粉掺量为 10%、20%、30% 时,砼开裂面积比基准砼分别减少 76.8%、45.9%、30.5%;掺量为 10% 时总开裂面积最小,抗裂效果最好。

## 参考文献:

- [1] 郭平功,赵铁军,田砾.裂缝、表面防水处理对混凝土耐久性的影响[J].混凝土,2007(8).
- [2] 张德峰,吕志涛.裂缝对预应力混凝土结构耐久性的影响[J].工业建筑,2000,17(11).
- [3] 杨长辉,王川,吴芳.混凝土塑性收缩裂缝成因及防裂措施研究综述[J].混凝土,2002(5).
- [4] 高英力.超细粉煤灰高性能公路路面水泥混凝土早期收缩变形及抗裂性能研究[D].长沙:中南大学,2005.
- [5] 孙振平,蒋正武,王培铭,等.水泥混凝土路面裂缝成因及预防措施[J].公路交通科技,2005,22(4).
- [6] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [7] 李相国,李孟蕾,马保国,等.改性花岗岩石粉对水泥的性能影响[J].混凝土,2013(8).

收稿日期:2019-06-26