

# 半刚性基层沥青路面反射裂缝应力强度分析

何俊雄, 陈良锐, 龚贵友, 张 丛

(中机中联工程有限公司, 重庆 400041)

**摘要:**为探究半刚性路面在交通荷载作用下反射裂缝的发展规律及不同裂缝形态下的应力变化趋势,以应力强度因子作为裂缝应力强度的表征对象,通过改变倾斜裂缝的角度、长度及交通荷载大小,研究应力强度因子在荷载移动过程中的变化情况。研究表明:1)张开型应力强度因子 $K_I$ 随反射裂缝与交通荷载倾斜角度的增大而减小,在倾角从 $0^\circ$ 增大至 $30^\circ$ 的过程中, $K_I$ 峰值降低了33.74%;剪切型应力强度因子 $K_{II}$ 的变化趋势与此相反,随着倾角增大至 $30^\circ$ , $K_{II}$ 峰值增加了90.7%;2)当倾斜角度为 $30^\circ$ 时, $K_I$ 、 $K_{II}$ 均随裂缝长度增加而增加,横向对比发现, $K_I$ 受裂缝长度的影响更为明显,在同一裂缝长度条件下, $K_I$ 的增长幅度较 $K_{II}$ 大约高出32%;3)在交通荷载增加过程中, $K_I$ 峰值由 $0.235 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 增大至 $0.375 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,增幅达59.6%,且综合应力强度因子与交通荷载成正比关系。本文研究成果对半刚性路面结构裂缝病害的合理评价和反射裂缝的养护处置具有一定的工程应用价值。

**关键词:**沥青路面; 半刚性基层; 反射裂缝; 应力强度因子

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)03-0060-05

doi:10.13402/j.gcjs.2025.03.038

## Analysis on stress intensity of reflection cracks in semi-rigid base asphalt pavement

HE Junxiong, CHEN Liangrui, GONG Guiyou, ZHANG Cong

(CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400041, China)

**Abstract:** In order to explore the development law of reflection cracks in semi-rigid pavement under traffic load and the stress change trend under different crack morphologies, the stress intensity factor is used as the characterization object of crack stress intensity, and the change of stress intensity factor in the process of load movement is studied by changing the angle, length and traffic load of inclined crack. The results show that: 1) The open stress intensity factor  $K_I$  decreases with the increase of the inclination angle of the reflection crack and the traffic load, and the peak value of  $K_I$  decreases by 33.74% when the inclination angle increases from  $0^\circ$  to  $30^\circ$ ; and the trend of shear stress intensity factor  $K_{II}$  is opposite, and the peak value of  $K_{II}$  increases 90.7% with the increase of inclination angle to  $30^\circ$ . 2) When the inclination angle is  $30^\circ$ , both  $K_I$  and  $K_{II}$  increase with the increase of crack length. Lateral comparison shows that  $K_I$  is more significantly affected by crack length. Under the same crack length, the growth rate of  $K_I$  is about 32% higher than that of  $K_{II}$ ; 3) In the process of increasing traffic load, the peak value of  $K_I$  increases from  $0.235 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  to  $0.375 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , an increase of 59.6%, and the comprehensive stress intensity factor is proportional to the traffic load. The research results have certain engineering application value for the reasonable evaluation of cracks in semi-rigid pavement structures and the maintenance and disposal of reflection cracks.

**Key words:** asphalt pavement; semi-rigid base; reflection cracks; stress intensity factor

在公路工程中,半刚性基层因其整体性好、承载能力强、稳定性高,常作为公路面层结构的

收稿日期:2023-09-05

作者简介:何俊雄(1986—),男,工程师,从事道路设计工作。

持力层,能够减少沥青层的铺设厚度,从而降低工程造价。然而,半刚性基层也存在一定的缺点,在道路运营过程中,路面结构常常出现横向反射裂缝<sup>[1]</sup>。早期建设的高等级公路中,由于荷载和温度的影响,半刚性基层产生的裂缝逐渐向路面扩散,最终贯通形成路面开裂。关于现状道路裂缝扩展规律及应力强度因子的研究已有广泛开展,如:马林等<sup>[2]</sup>通过沥青路面结构层弯拉试验,研究了半刚性基层沥青路面反射裂缝的形成过程,结果表明裂缝尖端的应力强度因子是导致裂缝贯通的根本原因;罗蓉等<sup>[3]</sup>基于断裂力学基本理论,通过数值模拟分析了结构断裂的扩展过程,并通过应力强度因子与材料韧性的关系,探讨了裂缝发展趋势;吴梓敬等<sup>[4]</sup>以半刚性水稳基层为研究对象,从基层强度的角度提出了预防半刚性基层沥青路面反射裂缝的对策。近年来,针对半刚性基层路面反射裂缝的研究主要集中在形成机理和处置措施上。新型材料的应用对高等级高速公路半刚性基层沥青路面反射裂缝的产生有显著改善效果<sup>[5-6]</sup>。然而,对于已产生反射裂缝的老旧路面,在裂缝产生后,不同形态的裂缝在交通荷载作用下的应力强度因子变化情况研究仍不完善。本文在上述研究成果的基础上,针对不同角度、长度及不同交通荷载条件下的半刚性基层反射裂缝进行数值模拟研究,利用有限元数值模拟软件分析反射裂缝,研究其应力强度因子的变化规律,以期对半刚性路面结构裂缝病害的合理评价和反射裂缝的养护处置提供一定的工程应用价值。

## 1 工程理论背景

### 1.1 理论分析

蓬溪县县道常乐至回马公路为现状三级公路,全长 20.6 km,设计时速为 40 km/h,路基宽度为 7.5 m,双向两车道布置。根据现场路面调查结果显示:现状常回公路路基为水泥稳定土,基层和底基层平均厚度总和约为 37 cm,面层为沥青混凝土路面,平均厚度为 15 cm;现状公路路面存在分散裂缝,局部存在网裂,分散裂缝以横向裂缝为主,并与车行方向存在一定角度。现场路面病害情况如图 1 所示。



图 1 常回公路路面横向裂缝

由图 1 可知:裂缝为典型反射裂缝,平均宽度为 3 mm,自上而下贯穿至路面基层。根据断裂力学理论分析,当路基路面结构出现裂缝时,裂缝尖端会出现应力集中现象,但带裂缝结构仍能在一定荷载作用下,维持稳定状态。为反映裂缝尖端应力分布场变化情况,特引入应力强度因子  $K$ ,根据应力强度因子手册,张开性应力强度因子  $K_I$  可简化:

$$K_I = F\sigma \sqrt{\pi d} \quad (1)$$

式中:  $K_I$  为张开型裂缝因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $\sigma$  为裂缝两段均布拉应力,  $\text{MPa}$ ;  $d$  为裂缝长度,  $\text{m}$ ;  $F$  为与裂缝长度和路基宽度  $b(\text{m})$  比值相关系数,其计算公式:

$$F = 1.12 - 0.23(b/d) + 10.6(b/d)^2 - 21.7(b/d)^3 + 60.4(b/d)^4 \quad (2)$$

另外,对于仅受剪切作用的 II 剪切裂缝强度因子  $K_{II}$ ,其计算公式:

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi d} \sqrt{\frac{2b}{\pi d} \tan \frac{\pi d}{2b}} \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为纯剪作用下的裂缝剪切应力,  $\text{MPa}$ 。

在工程中发生的路面反射裂缝,不存在单纯地张开或剪切型裂缝,而是发生两种应力状态下的复合裂缝。根据复合强度准则,对复合裂缝的等效应力强度因子  $K_{\text{eff}}(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$  可采用公式(4)进行计算。

$$K_{\text{eff}} = \frac{0.81 K_I + \sqrt{0.45 K_I^2 + 3 K_{II}^2}}{1.5} \quad (4)$$

### 1.2 数值模拟

根据公路工程实际建立数值模拟模型,选定模型尺寸为  $6 \text{ m} \times 7.5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ (长  $\times$  宽  $\times$  高)。模型采用线弹性本构关系,初始裂缝位于基层底部,并沿基层向上延伸贯穿整个基层厚度,向沥青面

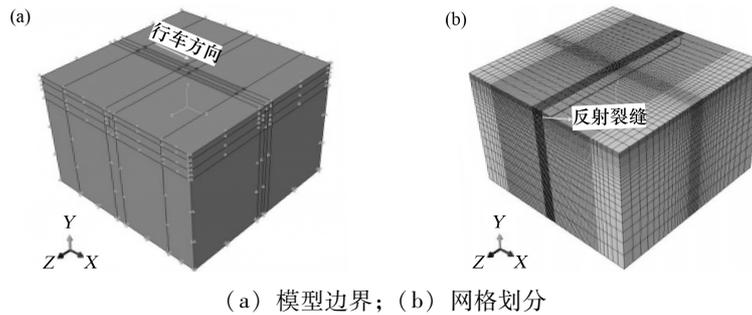
层扩散。根据实际工程对模型施加 BZZ - 100 单轴双轮移动荷载, 换算得荷载作用下的轮胎接地压力为 0.7 MPa, 摩擦系数取 0.05, 设定车速为 40 km/h, 用时 0.18 s。数值模拟模型如图 2 所示, 路面结构材料参数如表 1 所示。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 裂缝倾斜角度对应力强度因子的影响

为探究交通荷载作用下, 路面反射裂缝角度(以垂直于车行方向为 0°)对裂缝应力强度因子的关系, 特拟定裂缝投影长度为 2 cm、倾角分别为 0°、10°、20°、30°, 汽车荷载为标准轴载, 作用时间为 0.18 s, 荷载通过裂缝时应力强度因子时程曲线如图 3 所示。

由图 3(a)可知: 在交通荷载作用下, 0.09 s 时裂缝顶面完全受力。对于张开型应力因子  $K_I$ , 当反射裂缝完全垂直于车行方向(即倾斜角度为 0°)时, 时程曲线呈正态对称分布, 峰值为  $0.246 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ; 随着裂缝倾斜角度的增大, 在 0.09 s 之前应力强度因子出现负峰值, 表明此时裂缝前端受到压应力作用, 且倾斜角度越大, 压应力越大, 正峰值也从  $0.246 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  下降至倾角 30° 时的  $0.163 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ,  $K_I$  峰值降低了 33.74%。在图 3(b)中, 剪切型应力强度因子  $K_{II}$  出现了正负交替的峰值, 其正负变化表明裂缝剪切应力在交通荷载作用前后, 作用方向发生了变化。当角度从 0° 增加到 30° 的过程中,  $K_{II}$  正峰值从  $0.172 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  增大至  $0.328 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 增加了 90.70%, 而  $K_{II}$  负峰值从  $-0.161 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  减小至

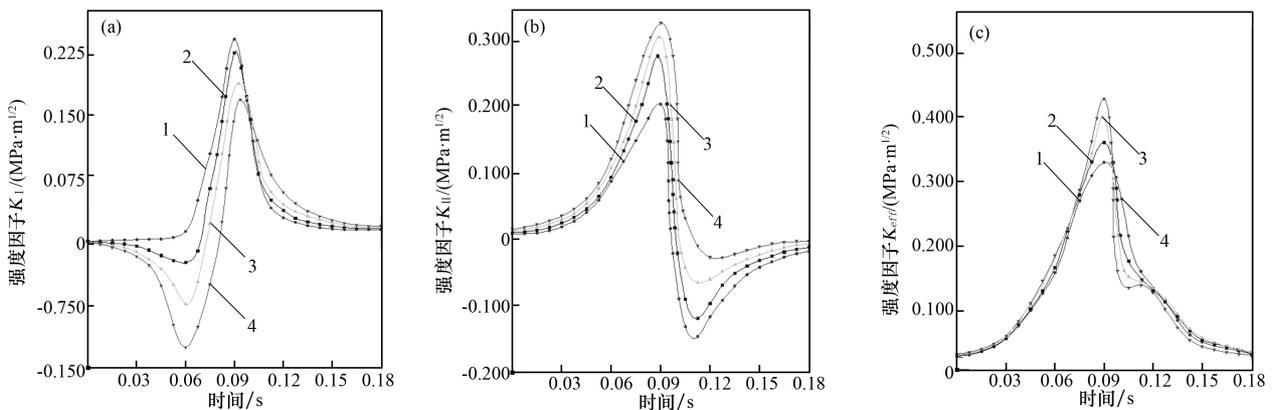


(a) 模型边界; (b) 网格划分

图 2 数值模拟计算模型示意

表 1 路面结构物理力学参数

| 不同结构层材料 | 厚度/cm | 弹性模量/MPa | 泊松比  | 抗拉强度/MPa |
|---------|-------|----------|------|----------|
| 面层材料    | 15    | —        | 0.30 | 3.62     |
| 基层材料    | 20    | 1 450    | 0.25 | 2.25     |
| 底基层材料   | 20    | 1 350    | 0.30 | 2.25     |
| 路床材料    | —     | 280      | 0.35 | —        |



(a)  $K_I$  强度因子时程曲线; (b)  $K_{II}$  强度因子时程曲线; (c)  $K_{eef}$  强度因子时程曲线

裂缝倾角 / (°): 1—0; 2—10; 3—20; 4—30。

图 3 不同裂缝倾角条件下应力强度因子变化时程曲线

$-0.065 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 绝对值减少了 59.63%。这表明交通荷载通过裂缝前, 倾斜角度越大的斜裂缝剪切应力越大; 通过裂缝后, 倾斜角度越大的斜裂缝剪切应力越小。产生上述现象的原因: 交通荷载接近反射裂缝时, 产生的冲击荷载沿裂缝方向分解, 裂缝倾斜角度越大, 冲击荷载产生的剪切应力越大; 通过裂缝后, 裂缝角度越大, 沿裂缝方向分解的剪切应力越小<sup>[7-8]</sup>。如图 3(c) 所示, 两种应力强度因子叠加后的等效强度因子  $K_{\text{ef}}$  峰值随倾斜角度增大而整体增大, 说明倾斜角度对裂缝扩展有较大影响。对于斜裂缝而言, 交通荷载作用下, 倾斜角度越大, 裂缝越容易扩展。因此, 在工程中应对此类裂缝加以关注。

## 2.2 裂缝长度对应力强度因子的影响

拟定倾斜角度为  $30^\circ$  的倾斜裂缝, 绘制不同长度斜裂缝(0、3、6、9 cm)在交通荷载作用下, 应力强度因子的时程曲线, 如图 4 所示。

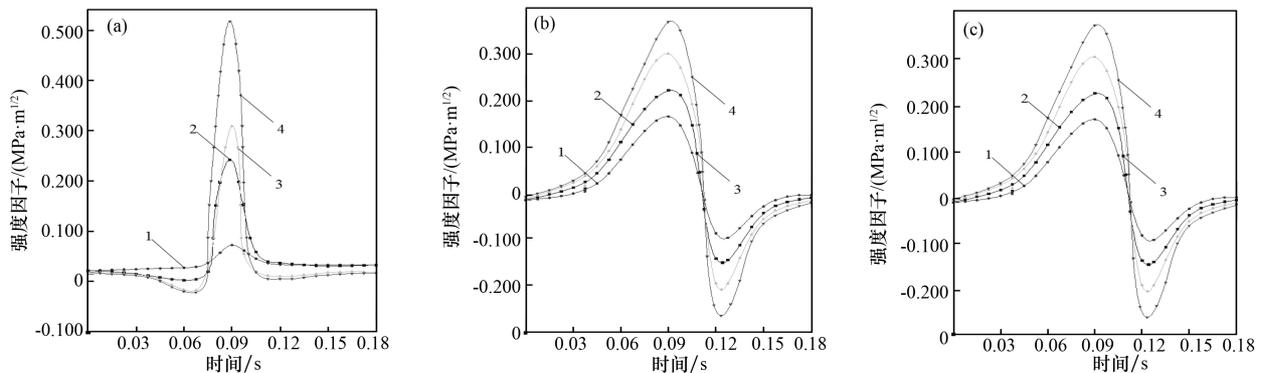
由图 4 可知: 当裂缝长度为 0 cm 时, 反射裂缝仍位于基层, 尚未扩散至路面, 在这种状态下, 应力强度因子相对较小。图 4(c) 中的综合强度因子中出现了两个峰值, 分别为  $0.194$ 、 $0.068 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ; 而当交通荷载作用于基层裂缝正上方(作用时间约为  $0.09 \text{ s}$ )时, 综合应力强度因子反而最小, 仅为  $0.025 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。产生上述现象的原因: 交通荷载作用于裂缝上方时, 由于裂缝尚未延伸至面层结构形成贯穿裂缝, 在竖向荷载作用下, 基层裂缝的扩展受到约束, 反而起到了闭合裂缝的作用, 因此此时的综合强度因子表现出最小值<sup>[9-10]</sup>。一旦面层出现反射裂缝后, 交通荷载作用于裂缝上

方时的应力强度因子均表现为峰值, 并且随裂缝长度的增加而迅速增长。例如, 当裂缝长度从 3 cm 增长至 9 cm 时,  $K_{\text{ef}}$  由  $0.336 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  增长至  $0.629 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 增长率为 87.20%。由图 4(a)、(b) 可知: 裂缝长度对张开型应力强度因子  $K_{\perp}$  的影响最为显著。当裂缝未扩展至路面时,  $K_{\perp}$  为  $0.049$ ; 而当裂缝增加至 9 cm 时,  $K_{\perp}$  为  $0.492$ , 增长幅度超过 9 倍。剪切型应力强度因子  $K_{\parallel}$  随裂缝长度呈现出规律性变化, 仍然出现两处剪切峰值, 但整体峰值均为正值。

## 2.3 交通荷载对应力强度因子的影响

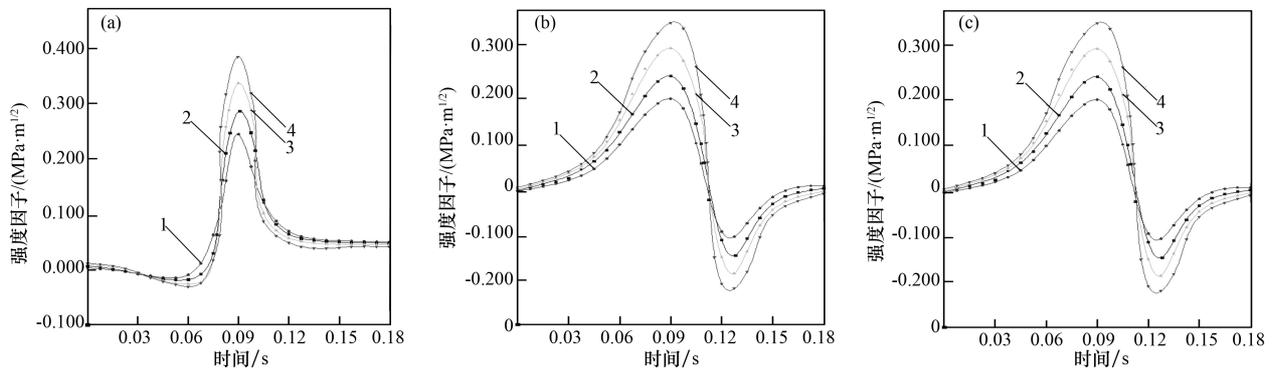
在实际工程中, 交通荷载并非完全等同于标准轴载。在重载交通作用下, 半刚性基层沥青路面反射裂缝扩展速度呈现不断增长的趋势, 对于已经出现的路面倾斜裂缝, 重载交通会加剧其扩展与延伸。为了探究不同重载交通条件下, 长度为 3 cm, 倾斜角度为  $30^\circ$  的反射裂缝应力强度因子变化情况, 依次选取轴载分别为 100、120、140、160 kN 的条件, 并根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017) 换算轮胎接地压力后, 带入数值模拟模型计算, 得到交通荷载与应力强度因子之间的关系曲线, 如图 5 所示。

由图 5 可知: 应力强度因子  $K_{\perp}$ 、 $K_{\parallel}$  峰值均随交通荷载的增加而增加。以张开型应力强度因子  $K_{\perp}$  为例, 当轴载从标准值 100 kN 增大至 160 kN 时,  $K_{\perp}$  峰值由  $0.235 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  增大至  $0.375 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , 增幅达 59.6%。在相同条件下, 剪切型应力强度因子  $K_{\parallel}$  峰值的正负值也均有不同程度地增加。从应力强度因子的时程曲线来看,  $K_{\perp}$  时程曲线大致



(a)  $K_{\perp}$  强度因子时程曲线; (b)  $K_{\parallel}$  强度因子时程曲线; (c)  $K_{\text{ef}}$  强度因子时程曲线  
裂缝长/cm: 1—0; 2—3; 3—6; 4—9。

图 4 不同裂缝长度条件下应力强度因子变化时程曲线



(a)  $K_I$  强度因子时程曲线; (b)  $K_{II}$  强度因子时程曲线; (c)  $K_{\sigma}$  强度因子时程曲线

导荷载/kN: 1—100; 2—120; 3—140; 4—160。

图 5 不同交通荷载强度下应力强度因子变化时程曲线

呈对称分布, 裂缝对其对称性产生了一定影响; 而  $K_{II}$  时程曲线则更接近余弦函数分布, 裂缝角度对其影响较小。整体而言, 由图 5(c) 可知: 综合应力强度因子的峰值与轴载成正比关系。由此可见, 重载交通对半刚性基层沥青路面反射裂缝的发展具有显著影响, 超载会加速裂缝的扩展, 加重沥青路面的破损程度, 对路面结构产生不利影响。因此, 在工程中应严格控制超载现象, 避免其对路面造成的损害<sup>[11]</sup>。

### 3 结 论

(1) 裂缝倾角对张开型和剪切型反射裂缝的影响规律相反。张开型应力强度因子  $K_I$  随反射裂缝与交通荷载倾斜角度的增大而减小, 在倾角从  $0^\circ$  增大至  $30^\circ$  的过程中,  $K_I$  峰值降低了 33.74%; 而剪切型应力强度因子  $K_{II}$  则随倾角增大而增大, 角度由  $0^\circ$  增大至  $30^\circ$  时, 峰值增加了 90.7%, 综合应力强度因子整体呈现增大的趋势。

(2) 当倾斜角度为  $30^\circ$  时, 倾斜裂缝长度对两种强度因子  $K_I$ 、 $K_{II}$  均有促进作用, 但张开型应力强度因子  $K_I$  受裂缝长度的影响更为显著。在同一裂缝长度条件下,  $K_I$  的增长幅度较剪切型应力强度因子  $K_{II}$  大约高出 32%, 在裂缝未贯通的情况下, 当交通荷载作用于基层裂缝正上方时, 综合应力强度因子反而最小, 仅为  $0.025 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

(3) 重载交通会导致路面裂缝应力强度急剧增加。交通荷载从 100 kN 增至 160 kN 的过程中, 张开型应力强度因子  $K_I$  的峰值由  $0.235 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  增大至  $0.375 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 增幅达 59.6%。此外,

复合应力强度因子与交通荷载成正比关系。

### 参考文献:

- [1] 张佳, 刘晶晶, 温宏平, 等. 半刚性基层沥青混凝土路面反射裂缝的防治措施[J]. 四川水泥, 2023(7): 227-228.
- [2] 马林, 罗传熙, 聂文, 等. 超长服役的半刚性基层模量衰减机理研究[J]. 公路, 2023, 68(5): 59-65.
- [3] 罗蓉, 李冲, 程博文, 等. 基于 GPR 正演技术的路面反射裂缝图像解译研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 36-44.
- [4] 吴梓敬, 李汝凯, 李先延, 等. 复合式路面加筋防裂夹层防治反射裂缝性能模拟研究[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(6): 72-75.
- [5] 陈卫东, 董凤珍. 荷载-温度耦合作用下土工布防治反射裂缝效果试验研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 82-88.
- [6] 单超, 郑传峰, 杨雪, 等. 半刚性基层沥青路面反射裂缝形成试验及扩展机理研究[J]. 路基工程, 2021(6): 69-74.
- [7] 武越锋. 半刚性基层沥青路面温缩反射裂缝疲劳扩展[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(10): 260-261.
- [8] 肖丽霞. 旧水泥混凝土路面沥青加铺层反射裂缝破坏机理与防治措施分析[J]. 工程技术研究, 2022, 7(19): 25-27.
- [9] 朱明哲, 余云燕, 王堃. 考虑循环荷载的高速公路路面复合型裂缝动力分析[J]. 公路, 2021, 66(12): 23-31.
- [10] 罗惠文. 半刚性基层裂缝对沥青路面使用性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(2): 313-318.
- [11] 徐世法, 胡超峰, 胡伦福, 等. 基于复合梁疲劳试验的半刚性基层抗反射裂缝性能评价[J]. 公路工程, 2020, 45(6): 22-26.