

# 降雨条件下膨胀变形对膨胀土边坡暂态饱和区的影响研究<sup>\*</sup>

范峥<sup>1</sup>, 李金明<sup>2</sup>, 何李<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广西路建工程集团有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** 在非饱和渗流过程中膨胀土会产生膨胀变形, 研究多场耦合作用下膨胀变形对膨胀土边坡非饱和渗流的影响具有重要意义。文中利用 FLAC<sup>3D</sup> 将膨胀性引入非饱和流-固耦合模型, 分析在非饱和渗流过程中膨胀应变对渗流的影响及暂态饱和区的演化规律。结果表明, 膨胀应变对膨胀土边坡非饱和入渗过程的影响显著, 其入渗深度、湿润锋的推进及暂态饱和区的演化规律受膨胀应变的制约成负相关关系, 降雨结束后膨胀应变影响下暂态饱和区的发展呈现明显的时间滞后性。

**关键词:** 公路; 膨胀土; 膨胀变形; 非饱和渗流; 降雨入渗; 暂态饱和区

**中图分类号:** U416.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2021)06-0069-05

膨胀土是一种具有明显干缩湿胀性的特殊黏土, 由于其对水分变化极度敏感, 降雨入渗易导致膨胀土边坡发生崩塌、滑坡等地质灾害。土体的抗剪强度与孔隙中水的含量密切相关, 降雨入渗会将雨水带到非饱和土中, 导致孔隙中的气体逐渐减少, 单位水含量逐渐上升, 进而降低土体的基质吸力, 影响土体的抗剪强度。同时, 雨水入渗会形成一个不断变化的饱和区域, 该区域的形成、发展及消散受多个因素的影响呈动态变化, 将其称为暂态饱和区。雨水入渗到土体孔隙中, 该区域的土体重度增加, 下滑力上升, 且含水量的提升会软化土体的强度, 降低边坡的稳定性。因此, 分析暂态饱和区的变化规律对研究膨胀土边坡的稳定性具有重要意义。

谭新等认为降雨过程中在边坡浅表层会形成暂态饱和区, 该区域内的暂态水压力得到提升, 降雨结束后, 降雨入渗量会影响水压力的变化。付宏渊等基于饱和-非饱和渗流理论, 研究了不同降雨条件及地下水位形式对暂态饱和区发展的影响; 曾铃等分析了土体类型、初始表面吸力及坡度对暂态饱和区的影响; 许旭堂等通过试验监测研究了基质吸力与含水率的时空变化规律及对降雨入渗、湿润锋推进速率的影响; 詹良通采用室内外对比试验研究浅表层膨胀土边坡含水率的变化规律, 分析了浅层含水率变化对边坡稳定性的影响; 肖杰、湛文涛等采用有限元软件进行渗流和应力的非耦合分析, 认为降

雨强度和降雨历时共同影响边坡暂态饱和区的发展; 杨文琦等从孔隙水压力、含水率、渗透力和暂态饱和区的时空分布阐述了膨胀土体内部的渗流过程, 结果表明暂态饱和区的发展与诸多因素相关; 丁金华等基于湿度应力场, 将膨胀系数以温度膨胀系数代替, 实现适度预变形的耦合效应, 模拟降雨条件下膨胀土边坡暂态饱和区的变化规律; 张良以等通过膨胀模量的方式将膨胀性引入非饱和分析模型中, 分析了降雨与停雨过程中膨胀模量对暂态饱和区的影响; 陈亮胜等在膨胀土弹塑性本构模型和应变软化理论的基础上将膨胀变形引入流固耦合模型中, 采用 FISH 语言和 FLAC<sup>3D</sup> 进行数值模拟, 分析了暂态饱和区的变化过程。上述学者对边坡渗流的时空变化规律尤其是暂态饱和区的变化进行了分析, 但对膨胀土边坡暂态饱和区变化的研究较少。为研究降雨条件下不同膨胀性对暂态饱和区的影响, 该文将膨胀变形引入非饱和流-固耦合模型中, 运用有限元计算软件 FLAC<sup>3D</sup> 分析降雨过程中考虑膨胀变形时膨胀土边坡暂态饱和区的变化。

## 1 分析理论

准静态比奥理论计算非饱和渗流中, 将体积应变、孔隙水压及饱和度之间建立联系, 假设在非饱和渗流过程中不考虑气相影响, 针对非饱和多孔介质结构, 其流体连续性方程为:

<sup>\*</sup> 基金项目: 长沙理工大学校级实践创新项目(SJCX201902)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{s}{M} \frac{\partial p_w}{\partial t} + n \frac{\partial s}{\partial t} + \alpha s \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为单位时间内流体体积的变化量;  $t$  为时间;  $s$  为饱和度;  $M$  为比奥模量;  $p_w$  为孔隙水压力;  $n$  为孔隙率;  $\alpha$  为比奥系数;  $\varphi$  为土体发生的体积应变。

天然条件下膨胀土边坡处于非饱和状态,若发生雨水入渗,雨水影响区的含水率暂时提高,形成暂态饱和区,当外界不再提供水分补充时,随着时间的推移,暂态饱和区的含水率逐渐降低,直至趋于稳定,这就是饱和-非饱和渗流。采用土水特征曲线及渗透系数曲线建立三者之间(饱和度、基质吸力、渗透系数)的联系,VG模型以其拟合效果好、参数少且容易获取等特点成为广泛采用的膨胀土拟合方式,表达式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\psi)^n]^m} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为体积含水率;  $\theta_r$  为残余体积含水率;  $\theta_s$  为饱和体积含水率;  $a$ 、 $n$  和  $m$  为拟合参数;  $\psi$  为基质吸力。

由于在渗流模拟过程中忽略气相的影响,基质吸力为负的孔隙水压力,体积含水率是与饱和度有关的函数  $\theta = ns$ , 带入式(2),得:

$$s = s_r + \frac{1 - s_r}{[1 + (-p_w a)^n]^m} \quad (3)$$

式中:  $s_r$  为残余饱和度。

考虑与饱和度之间的关系,非饱和渗透系数  $k$  采用如下经验公式:

$$k = k_s s^2 (3 - 2s) \quad (4)$$

膨胀土在降雨入渗下发生膨胀变形,膨胀系数与含水率的变化量构成膨胀土的膨胀应变,表达式如下:

$$\epsilon_{ij}^w = \beta \Delta w \delta_{ij} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_{ij}^w$  为膨胀应变;  $\beta$  为膨胀系数;  $\Delta w$  为含水率变化量;  $\delta_{ij}$  为克罗尼克符号,通常取 1。

对于膨胀土这种因含水率变化而产生明显胀缩变形的特殊土,总应变应由应力应变和膨胀应变构成,总应变为:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^a + \epsilon_{ij}^w \quad (6)$$

将式(6)带入式(1),得到考虑膨胀应变的膨胀土的连续性方程:

$$\frac{s}{M} \frac{\partial p_w}{\partial t} + \left( n \frac{\partial s}{\partial t} - \frac{\partial \eta}{\partial t} \right) = \alpha s \left( \frac{\partial \varphi^w}{\partial t} + \frac{\partial \varphi^a}{\partial t} \right) \quad (7)$$

假设在进行渗流分析时水分运移服从 Darcy 定

律,FLAC<sup>3D</sup>软件进行饱和-非饱和计算时也采用相同定律,即:

$$q_i = -K_{il} k(s) (p_w - \rho_f x_j g_j)_{,il} \quad (8)$$

式中:  $q_i$  为单位流量向量;  $K_{il}$  为渗透系数张量;  $k(s)$  为相对渗透系数,  $k(s) = s^2(3 - 2s)$  且  $k(s) \in [0, 1]$ ,用以反映非饱和区土体渗透系数的降低;  $\rho_f$  为流体密度;  $x_j$  为笛卡尔坐标分量;  $g_j$  为重力加速度分量。

## 2 数值模型及计算方案

### 2.1 数值模拟

南邓(南阳—邓州)高速公路某匝道路堑高边坡高度为 18 m,为折线形边坡。该边坡所处位置地下水较充沛,地下水以上部位为残积型膨胀土,由膨胀泥岩风化堆积而成。在距离边坡表面 2 m 深度左右呈棕黄色,其余基本呈褐黄色。该边坡受到自然条件的影响,棕黄色膨胀土的表层区域有不规则裂隙,但裂隙发育程度较低。

根据该坡边的工程条件,在 FLAC<sup>3D</sup> 中建立边坡数值模型并采用 FISH 语言进行初始孔压场赋予(见图 1)。

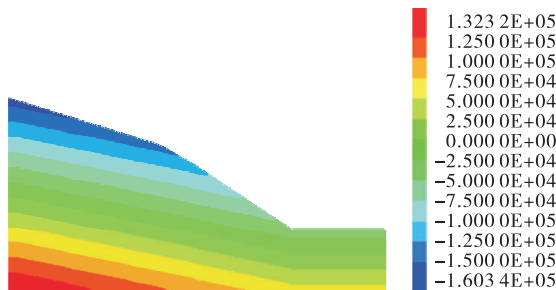


图1 边坡初始孔压场(单位:Pa)

### 2.2 边界条件

边坡两侧和底部设置为不透水边界,并限制两侧水平位移,底部则限制其双向位移。进行渗流分析时,根据降雨强度将边界分别设置为流量边界及零压力边界。选取饱和与非饱和 2 种降雨强度分析降雨持续 24、72 h 及停雨 24、72 h(总计 144 h)下暂态饱和区的变化。

### 2.3 降雨方案设计

膨胀土边坡非饱和渗流分析中,选取 2 组降雨强度进行对照分析,第一组降雨强度为  $1.65 \times 10^{-6}$  m/s,另一组降雨强度为  $6.07 \times 10^{-7}$  m/s。在引入膨胀变形的基础上考虑到最不利降雨条件选择第一组降雨强度,同时为分析较低降雨强度下渗流变化,选

取第二组降雨强度进行对照补充。

### 3 数值结果与分析

根据暂态饱和区的定义,将饱和度大于 0.9 的区域定义为暂态饱和区。图 2、图 3 为选取截面处

饱和降雨强度下边坡暂态饱和区的变化。

由图 2 可知:降雨强度大于渗透性能时,降雨 24 h 时边坡暂态饱和区的影响范围为 0.65~0.74 m,不同膨胀应变对暂态饱和区的影响相差无几;随着降雨时间的持续,降雨达到 72 h 时,暂态饱和区

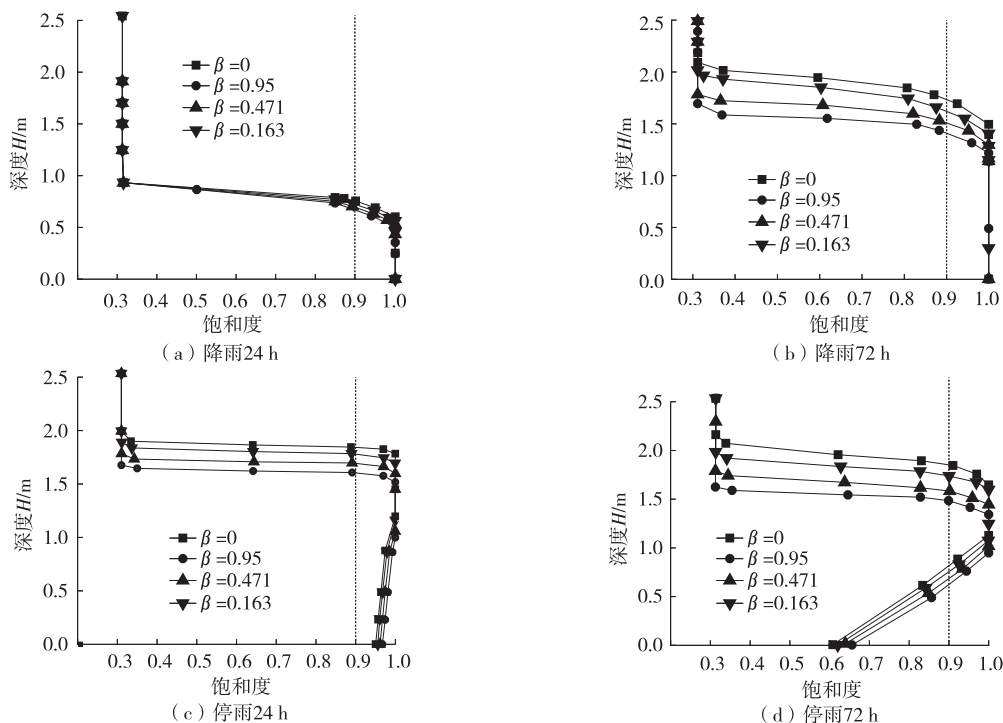


图 2 暂态饱和区的变化(降雨强度大于渗透性能)

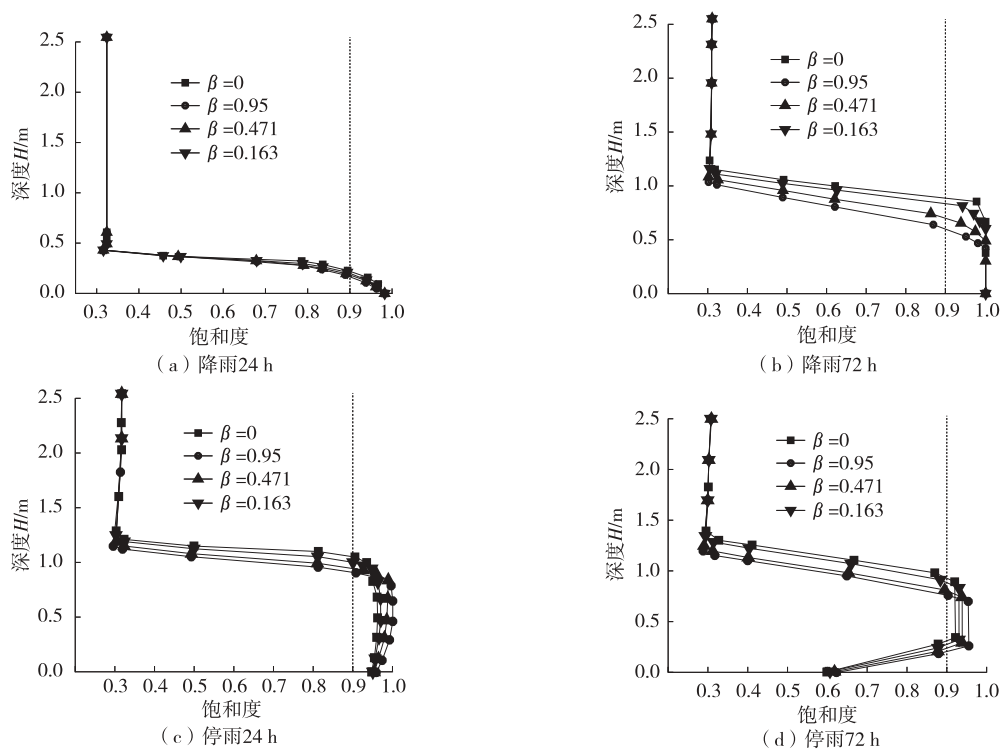


图 3 暂态饱和区的变化(降雨强度小于渗透性能)

从边坡表层逐渐向深层扩展,影响范围增长至 1.40~1.73 m,影响深度与膨胀性成正相关关系。随着降雨时间的增长,不同膨胀性所对应的土体饱和度变化趋势具有明显的差异,湿润锋的影响范围与膨胀性表现为正相关,膨胀性越大的土,其湿润锋的变化越平缓。停雨 24 h 时,水分在自重作用下发生迁移,暂态饱和区的影响范围进一步扩展,且湿润锋上部的饱和度开始降低,饱和度峰值(饱和度 1)范围减小,由于停雨时间较短,上部依然处于暂态饱和区。停雨 72 h 时,水分继续向下迁移,湿润锋上部地区由于水分的迁移出现非饱和区,中部土层中的水分得以补充,即暂态饱和区呈现向下扩展的趋势。此时,考虑不同膨胀性,暂态饱和区的向下扩展受到膨胀抑制。又因为上层土覆盖范围为边坡表层 2 m 处,且上层土的入渗能力大于下层土,膨胀性为零的土的湿润锋表现出变化推进平缓的趋势。随着水分的均匀化,深层土的固结度提高,湿润锋的推进速率呈现逐步下降的趋势,符合非饱和降雨入渗规律。

由图 3 可知:降雨强度小于渗透性能时,降雨 24 h,边坡浅表层饱和度提升幅度较大,饱和度与深度之间接近线性关系,说明降雨强度比入渗强度小,降雨基本处于全入渗的状态,难以形成较大范围的饱和区域。又因为膨胀性的作用具有滞后性,降雨 24 h 时饱和度的变化规律具有相似性。降雨持续到 72 h 时,随着水分的向下迁移,膨胀性对于水分迁移的影响表现出与饱和降雨强度相似的规律,但由于水分补给的原因,非饱和降雨条件下暂态饱和区的影响范围低于饱和降雨强度。停雨 24 h 后,水分在自重作用下发生运移,导致表层土水分较少,饱和度较低,且不同膨胀性的土其变化规律较相似。由于膨胀性对于水分运移起到抑制作用,上层部分的饱和度略有区别,表现为膨胀性越大,相同深度饱和度越大。停雨 72 h 后,随着水分的继续运移及外界环境的作用,表层饱和度持续下降,膨胀性抑制了水分的消散。但在湿润锋处,膨胀性阻止水分的继续下渗,即膨胀性越大的土,其湿润锋扩散减小。

综合分析图 2 和图 3,膨胀土边坡的含水率分布具有时空不均匀性,降雨入渗改变了土体含水率的时空分布,中下部土体的含水率率先发生变化,引起膨胀变形,湿润锋的影响范围和水分运移扩散速度受到膨胀变形的制约。从微观角度解释就是在发生渗流时,黏土颗粒与水化离子发生吸附作用生成双电层,水分子的定向排列形成结合水或水化膜,含

水率的变化引起水化膜的改变,表现在宏观上即为膨胀土体膨胀。考虑膨胀变形时,膨胀土在降雨过程中发生含水率的变化引起结合水(水化膜)改变,受到雨水影响的土颗粒发生吸水增湿膨胀,孔隙受到颗粒膨胀的挤压体积变小,挤占水分的流经途径,水分向下扩散速率因此受到影响。图 2(a)、(b)和图 3(a)、(b)中湿润锋上部暂态饱和区的影响深度随着膨胀性的增大而减小,湿润锋处其推进速率随膨胀性增大而减缓即体现了这一特性。降雨结束后,较浅的范围内饱和度降低,膨胀土开始出现失水收缩的现象,水分减少引起的膨胀变形也有所衰减,但其饱和度在降雨入渗过程中始终大于初始饱和度,膨胀变形对浅表层土体的水分运移过程起到抑制作用。如图 2(c)、(d)和图 3(c)、(d)所示,膨胀性增大,水分迁移减小,暂态饱和区的范围在相同时间时距离边坡表面越近。

在对膨胀土边坡进行数值模拟时,膨胀应变的引入使渗流的时空变化更符合实际情况,膨胀土数值模拟时应将水分引起的膨胀变形考虑在内。此外,暂态饱和区的大小和分布是影响边坡稳定性的重要因素之一,在降雨结束后的一段时间内,由于膨胀土的膨胀会抑制水分的消散,导致相同时间下边坡浅层部位的水分含量更高,也更易形成暂态饱和区,降低边坡的稳定性。这是膨胀土边坡发生失稳破坏不一定是发生在降雨期的原因。

#### 4 结论

将膨胀变形引入非饱和土的流-固耦合模型中,提出适用于非饱和膨胀土耦合分析的方法,研究膨胀变形对边坡渗流时空演化的影响,结论如下:

(1) 降雨强度与膨胀变形共同影响暂态饱和区的时空变化。降雨强度大于渗透性能时,暂态饱和区以悬挂形式分布在边坡上并随着时间而逐渐变大;降雨强度小于渗透性能时,暂态饱和区的影响深度较小,但也呈现出随时间而逐渐变大的趋势。膨胀性在暂态饱和区的发展中成负相关关系,降雨时抑制雨水向坡内渗透,停雨时影响雨水消散,即非饱和和渗流过程受到膨胀变形的调节。

(2) 水分的变化造成土颗粒孔隙间的水化膜增厚,自由水的渗流途径受到影响而变窄,宏观上表现为膨胀土产生增湿膨胀且水分迁移过程受到抑制,从而影响土体的渗透性能并抑制降雨入渗对于水分的扩散作用。在降雨阶段,膨胀性影响水分的下渗,

导致形成的暂态饱和区不同;在停雨阶段,影响水分消散,使相同条件下暂态饱和区表现出滞后性。暂态饱和区消散的滞后性也说明了膨胀土边坡破坏发生于停雨期的原因。

#### 参考文献:

- [1] 包承纲.非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题[J].岩土工程学报,2004,26(1):1-15.
- [2] 李涛,付宏渊,周功科,等.降雨入渗条件下粗粒土路堤暂态饱和区发展规律及稳定性研究[J].水文地质工程地质,2013,40(5):74-80.
- [3] 谭新,陈善雄,杨明.降雨条件下土坡饱和-非饱和和渗流分析[J].岩土力学,2003,25(3):381-384.
- [4] 戚国庆,黄润秋,速宝玉,等.岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):625-629.
- [5] 付宏渊,曾铃,蒋中明,等.降雨条件下公路边坡暂态饱和区发展规律[J].中国公路学报,2012,25(3):59-64.
- [6] 曾铃,史振宁,付宏渊,等.降雨入渗对边坡暂态饱和区分布特征的影响[J].中国公路学报,2017,30(1):25-34.
- [7] 许旭堂,简文彬,吴能森,等.降雨入渗影响下边坡中的非饱和渗流特性[J].地球科学,2018,43(3):922-932.
- [8] 詹良通.非饱和膨胀土边坡中土水相互作用机理[J].浙

江大学学报(工学版),2006,40(3):494-500.

- [9] 肖杰,杨和平,李晗峰,等.膨胀土边坡浅层破坏稳定性分析[J].交通运输工程学报,2014,14(2):21-27.
- [10] 湛文涛,肖杰,陈冠一,等.膨胀土边坡渗流数值模拟及稳定性分析[J].工业建筑,2018,48(9):133-139.
- [11] 杨文琦,周成,王林,等.降雨作用下考虑膨胀推力的膨胀土边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):874-880.
- [12] 丁金华,陈仁朋,童军,等.基于多场耦合数值分析的膨胀土边坡浅层膨胀变形破坏机制研究[J].岩土力学,2015,36(增刊1):159-168.
- [13] 张良以,陈铁林,张顶立.降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J].岩土工程学报,2019,41(1):70-77.
- [14] 陈亮胜,韦秉旭,廖欢,等.膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析[J].水文地质工程地质,2020,47(4):132-140.
- [15] 王一兆,隋耀华.降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J].长江科学院院报,2017,34(4):122-125.
- [16] QI S, VANAPALLI S K. Hydro-mechanical coupling effect on surficial layer stability of unsaturated expansive soil slopes[J]. Computers & Geotechnics, 2015, 70:68-82.

收稿日期:2021-01-13

\*\*\*\*\*

(上接第68页)

尽管也存在一些不足,总体来讲可在一定程度上能克服公路沥青路面主要病害及降低工程造价,从经济性角度来说更具市场竞争力。

#### 参考文献:

- [1] 冯新军,李旺,张喆.TLA+废胶粉复合改性沥青混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2020(6):61-64.
- [2] 任钰芳,孙皓,颜可珍,等.SBR/TLA复合改性沥青混合料性能试验研究[J].中外公路,2020,40(2):212-215.
- [3] 张海涛,宫明阳,杨斌,等.不同复合改性沥青混合料路用性能的对比研究[J].公路交通科技,2019,36(2):1-6.
- [4] DERVA Kava, ALITOP Al, MCNALLY Tony. Relationship between processing parameters and aging with the rheological behaviour of SBS modified bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221:345-350.
- [5] 冯慧敏.活性硅/SBS复合改性沥青混合料疲劳性能室

内试验研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.

- [6] 陈定.TLA改性沥青混合料疲劳性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [7] 陈炜.TLA改性沥青混合料应用技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- [8] 倪富健,赖用满,沈恒,等.TLA复合改性沥青混合料路用性能研究[J].公路交通科技,2005,36(1):13-16.
- [9] 梁辉如.TLA改性沥青在广韶高速路面处治中的应用[J].中外公路,2005,24(1):182-184.
- [10] 马峰,冯乔,傅珍,等.不同级配复合改性沥青混合料路用性能[J].广西大学学报(自然科学版),2019,44(1):219-227.
- [11] 王淮.TLA改性沥青混合料路用性能研究[J].湖南交通科技,2018,44(3):90-92.
- [12] 植豪文.不同掺量TLA改性沥青及其混合料路用性能研究[J].公路与汽运,2016(4):82-85.
- [13] 敖清文,田永娅.抗车辙剂改性沥青混合料疲劳性能试验研究[J].交通科技,2016(6):109-112.

收稿日期:2021-01-06