

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.08.001

硫酸盐盐渍化道路横向隆起的力学响应分析

王智远¹, 张宏^{1,2}, 张海龙¹

(1. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070;

2. 内蒙古综合交通科学研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 针对沙漠区沥青混凝土道路因路基土硫酸盐盐渍化, 土体膨胀所导致的路面横向隆起病害, 为了研究病害不同发展阶段路面结构的受力特性及破坏形式, 了解该类病害影响下路面结构所能承受的临界应力和破坏时隆起变形的临界挠度, 以发生横向隆起病害的路面实体为研究对象, 基于复合材料力学与弹性力学理论, 结合病害实体基本特征及分布情况, 将路面结构抽象简化为一层间接触良好、变形连续的整体式层状结构, 构建了路面结构在路基盐胀作用及其自重影响下发生横向隆起病害的力学模型, 推导了路面结构在路基盐胀作用及其自重影响下隆起变形的挠度方程。在此基础上, 进一步求得了路面结构在上述作用下的应力、应变公式及整体式双层梁结构的刚度计算公式。之后, 结合具体实例, 分析了不同盐胀作用下, 基层、面层的最大拉应力和挠度变化规律。根据路面结构参数与面层、基层的抗拉强度, 通过所建力学模型中应力公式可判别在盐胀作用下路面结构基层、面层发生结构性破坏的时序。同时, 对于既定参数的路面结构, 利用模型中挠曲变形公式, 可建立不发生由盐胀引起路面结构层结构性破坏所能承受的临界隆起高度和临界盐胀作用, 有利于指导沥青混凝土道路盐渍化病害防治与路面结构组成设计。

关键词: 道路工程; 挠度方程; 弹性力学理论; 横向隆起病害; 路基盐渍化

中图分类号: U416.221

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)08-0001-06

Analysis on Mechanical Response of Transverse Uplift of Sulphate Salinized Pavement

WANG Zhi-yuan¹, ZHANG Hong^{1,2}, ZHANG Hai-long¹

(1. School of Transport, Inner Mongolia University, Huhehot Inner Mongolia 010070, China;

2. Inner Mongolia Comprehensive Transport Science Research Institute Co., Ltd., Huhehot Inner Mongolia 010000, China)

Abstract: Aiming at the transverse uplift disease occurred in asphalt concrete pavement in desert area which caused by the expansion of the sulfate salinization subgrade, in order to study the stress characteristics and failure modes of the pavement structure at different disease development stages, and figure out the critical stress and the critical deflection of uplift deformation at failure that the pavement can bear under the influence of the disease, taking the pavement entity which has occurred transverse uplift disease as the research object, combining with the basic characteristics and distribution of diseased entity, and under the assumption that the pavement structure is simplified as an integral layered structure with well contact and continuous deformation, a transverse uplift disease mechanical model of the pavement structure subjected to the subgrade salt expansion action and its gravity is built based on the theory of compound material mechanics and the elastic mechanics, and the deflection equation of the pavement structure under the salt expansion action and its

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51468047); 内蒙古自然科学基金项目(2015MS523, 2016MS0531); 内蒙古交通运输厅交通科技项目(NJ2012-10)

作者简介: 王智远(1965-), 男, 内蒙古商都人, 博士, 副教授. (nmgyh0845@163.com)

gravity is derived. On this basis, the formulas for calculating the stress and strain of the pavement structure under the abovementioned actions and the stiffness formula of the integral double-layer beam structure are obtained. Afterwards, combining with the specific instance, the maximum tensile stress and the deflection change laws of the base and surface subjected to different salt expansion action are analyzed. According to the pavement structure parameters and the tensile stress of the base and the surface, the destruction time sequence of base and surface under the action of salt expansion are determined through the stress formula in the established mechanical model. Meanwhile, for the pavement structure with given parameters, the critical uplift height and the critical salt expansion action that the pavement structure can bear which not occur structural destruction caused by the salt expansion action can be determined by utilizing the deflection formula in the model. It is benefit to guide the prevention and the treatment of salinization disease of asphalt concrete pavement and the design of pavement structure constitution.

Key words: road engineering; deflection equation; theory of elasticity; transverse uplift disease; subgrade salinization

0 引言

戈壁沙漠地区的气候主要特点是夏季炎热,冬季寒冷,年温差和日温差均较大,气候干燥少雨,蒸发量远远大于降水量。处于这样的赋存环境条件下,路基内的盐份容易迁移积聚,以少积多,发生盐渍化^[1]。路基盐渍化引起的路面病害常因导致盐渍化的盐份不同,呈现出不同的病害特征。氯化物盐渍土路基病害主要表现为路基路面的融陷变形破坏,而硫酸盐渍土路基病害主要表现为路基路面的盐胀变形破坏^[2]。对于盐渍化路基引起的病害问题,学者更多地从路基工程角度展开研究,分析盐-液-温间的迁移转化规律,探讨路基盐渍化机理、盐渍化路基土盐胀、融陷特性及其路用性能在环境因素周期性变化影响下的劣化规律与防治措施等^[3-13]。

路基作为路面的支撑结构物,其性能状态的变化必然会引起路面结构层的力学响应的变化。在内蒙古西北边境戈壁沙漠地区某公路路段,受所处地区气候环境、水文、工程地质条件以及路基土硫酸盐盐渍化的影响,路面不间断出现类似于“天然减速带”的横向隆起现象,当地人俗称“搓板路”,车辆即使慢速行驶,车身也颠簸不已,对行车安全构成极大威胁,严重影响公路的通行能力与服务质量^[14]。针对这样的实体路面病害现象,有必要分析盐胀作用下路面结构层的应力、挠度变化以及既定路面结构层能够承受的临界盐胀作用与临界隆起高度。对于发生盐胀病害的路面,由于盐胀作用不易检测而路面隆起高度易于测量,上述研究可为路面横向隆起病害防治时机及其措施的选择提供理论参考,对路面结构材料的组成设计也具有指导意义。

为此,以实体病害路面为研究对象,根据相关力学理论构建盐胀作用下路面结构横向隆起的力学模型,并分析路面结构在横向隆起作用下的力学响应。

1 力学模型

根据对病害地区沥青混凝土路面横向隆起的调查与分析,了解到路面横向隆起宽度与其沿路面纵向的分布间距之比一般小于1/10,且病害表现为路面结构层整体性的隆起,而不是某一层面的单一隆起,隆起高度在横向上差异不大;就其成因来说,路面横向隆起是由病害路段路基的硫酸盐盐渍化所导致的土体膨胀引起^[14]。因此,结合弹性层状体系理论^[15],将病害实体的受力模型抽象简化为一承受路基盐胀作用和自身重力并在路面纵向两端简支的双层板体结构;鉴于隆起高度在横向上差异不大,将路基盐胀作用看作一沿路面横向分布且大小不变的均布荷载。那么,由于路面结构在横向上受力相同,可沿路面纵向截取一横向宽度为1单位长的单元条来研究路面结构的受力,进一步将沥青混凝土路面横向隆起病害实体结构简化为一两端简支、承受路基盐胀作用和路面结构自重的双层梁结构;其中,路基盐胀作用等效为一竖直向上、均匀分布于梁底部局部位置上的均布荷载 $q(x)$,路面结构自重等效为一竖直向下、均匀分布于梁上的均布荷载 $q_0(x)$ 。另外,考虑到实际工程中面层与基层的路用性能差异,假设该梁由材料性能、厚度均不同的两根各向同性、均质梁所构成。

为简化问题,在梁弯曲理论基本假设的基础^[16]上进一步假定:

(1) 各梁之间粘结良好,可作为一个整体结构

梁且各梁之间变形连续。

(2) 各梁均为等截面梁且宽度相同。

在上述假定的基础上,路面结构在路基盐胀作用 $q(x)$ 和自身重力 $q_0(x)$ 作用下的弯曲变形将与简支单层梁一致,其力学模型如图1所示。

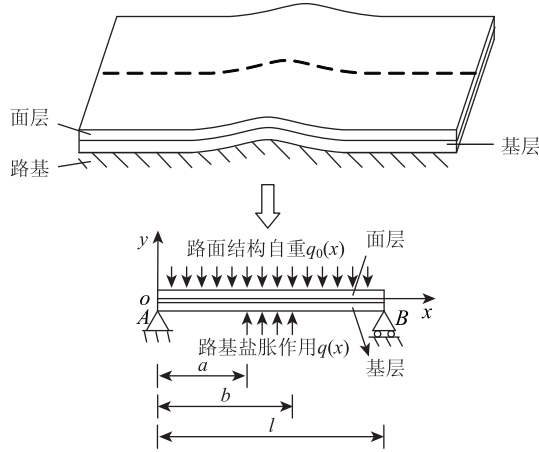


图1 路面结构力学模型

Fig.1 Mechanical model of pavement structure

图1所示路面结构力学模型中, o 为坐标原点, x 轴和 y 轴分别为简支双层梁横截面的几何对称轴, 且 x 轴位于双层梁的中性层内。在梁的底部 $x \in [a, b]$ ($0 \leq a \leq b \leq l$) 范围内由跨中向两侧对称分布有竖直向上的均布荷载 $q(x)$, 即路基盐胀作用, 荷载集度为 q ; 路面结构自重 $q_0(x)$ 分布于梁全长, 荷载集度为 q_0 , 且有 $lq_0 = (b-a)$ 。

2 路面结构弯曲变形的分析与计算

若要求得路面结构层在盐胀作用 $q(x)$ 、路面结构自重 $q_0(x)$ 作用下弯曲变形的挠度表达式, 需求得梁在上述荷载作用下的支座约束力 F_A 和 F_B 。根据梁体系的受力平衡方程可求得:

$$F_A = F_B = 0. \quad (1)$$

在求得梁支座约束力后, 即可进一步求得梁在均布荷载 $q(x)$ 及 $q_0(x)$ 作用下弯曲变形的挠度表达式。设坐标系的选取与图1所示力学模型一致, 梁的抗弯刚度为 D , 则对于上述荷载作用下的简支双层梁, 取挠度 w 以向上为正, 弯矩以使梁下部受拉为正, 截面转角以逆时针方向为正, 利用结构及其受力的对称性, 可取 $x \in [0, \frac{l}{2}]$ 的一段梁来研究其弯曲变形, 挠曲微分方程如下:

当 $x \in [0, a]$ 时,

$$D \frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{q_0}{2} x^2; \quad (2)$$

当 $x \in [a, \frac{l}{2}]$ 时,

$$D \frac{d^2 w}{dx^2} = -\frac{q_0}{2} x^2 + \frac{q}{2} (x-a)^2. \quad (3)$$

分别对式(2)、式(3)中各微分方程积分2次, 可得:

当 $x \in [0, a]$ 时,

$$D \frac{dw}{dx} = -\frac{q_0}{6} x^3 + C_1, \quad (4)$$

$$Dw = -\frac{q_0}{24} x^4 + C_1 x + C_2; \quad (5)$$

当 $x \in [a, \frac{l}{2}]$ 时,

$$D \frac{dw}{dx} = -\frac{q_0}{6} x^3 + \frac{q(x-a)^3}{6} + C'_1, \quad (6)$$

$$Dw = -\frac{q_0}{24} x^4 + \frac{q(x-a)^4}{24} + C'_1 x + C'_2. \quad (7)$$

所得式(4)~(7)需满足简支双层梁的边界条件及变形连续性条件。其中, 边界条件为: 当 $x=0$ 时, $w=0$ 。弯曲变形的连续性条件为: 当 $x=a$ 时, 由式(4)~(7)求得的梁的挠度与斜度相同; 同时还应满足 $x=\frac{l}{2}$ 时, 梁的斜度为0。

将式(4)~(7)代入梁的边界条件和变形连续性条件, 可得式中常数的值为:

$$C_1 = C'_1 = -\frac{q}{6} \left(\frac{l}{2} - a \right)^3 + \frac{q_0 l^3}{48}, \quad C_2 = C'_2 = 0.$$

求得各积分常数之后, 就可得梁在均布荷载 $q(x)$ 及 $q_0(x)$ 作用下的挠度表达式为:

当 $x \in [0, a]$ 时,

$$w = -\frac{1}{D} \left\{ \frac{q_0}{24} x^4 + \left[\frac{q}{6} \left(\frac{l}{2} - a \right)^3 - \frac{q_0 l^3}{48} \right] x \right\}; \quad (8)$$

当 $x \in [a, \frac{l}{2}]$ 时,

$$w = -\frac{1}{D} \left\{ \frac{q_0}{24} x^4 - \frac{q(x-a)^4}{24} + \left[\frac{q}{6} \left(\frac{l}{2} - a \right)^3 - \frac{q_0 l^3}{48} \right] x \right\}. \quad (9)$$

将 $lq_0 = (b-a)q$ 代入式(8)~(9), 进一步可得挠度表达式为:

当 $x \in [0, a]$ 时,

$$w = -\frac{1}{D} \left\{ \frac{q_0}{24} x^4 + \left[\frac{q}{6} \left(\frac{(b-a)q}{2q_0} - a \right)^3 - \frac{q_0}{48} \left(\frac{(b-a)q}{2q_0} \right)^3 \right] x \right\}; \quad (10)$$

当 $x \in [a, \frac{l}{2}]$ 时,

$$w = -\frac{1}{D} \left\{ \frac{q_0}{24} x^4 - \frac{q(x-a)^4}{24} + \left[\frac{q}{6} \left(\frac{(b-a)q}{2q_0} - a \right)^3 - \frac{q_0}{48} \left(\frac{(b-a)q}{2q_0} \right)^3 \right] x \right\}. \quad (11)$$

至此,已计算出均布荷载 $q(x)$ 和 $q_0(x)$ 共同作用下简支双层梁弯曲变形的挠度表达式式(10)~(11),也就是路面结构在盐胀作用及其自重作用下弯曲变形的挠度表达式。

由式(10)~(11)可知,计算路面结构在盐渍土的盐胀作用下弯曲变形的挠度还需计算路面结构即双层梁的抗弯刚度 D ,而计算双层梁的抗弯刚度,首先要确定双层梁中性轴的位置。对于所述力学模型,依据变形连续^[17]的条件,其中性轴的位置可通过在 x 轴方向上轴力为0的条件求得。现沿梁长方向上截取一微段 dx ,如图2所示。

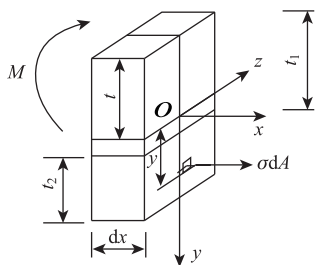


图2 梁横截面受力图

Fig. 2 Force diagram of beam cross-section

图2中坐标系的 x 轴、 y 轴为双层梁横截面的几何对称轴, z 轴为双层梁中性轴; t_1 和 t_2 分别为面层、基层厚度, t 为中性轴 z 轴距双层梁上表面的距离。设图示截面处中性层的曲率为 K , 横截面宽度为1, 则距中性轴距离为 y 的纵向纤维的应变为 $\varepsilon = Ky$, 相应的正应力 $\sigma = E_i Ky (i=1, 2)$ (E_1 和 E_2 分别为面层和基层的弹性模量), 根据 x 轴方向上轴力为0的条件, 可得:

$$\int_{-t}^{-t+t_1} E_1 Ky dy \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz + \int_{-t+t_1}^{t_1+t_2-t} E_2 Ky dy \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz = 0. \quad (12)$$

求解该积分可得中性轴 z 轴距双层梁上表面的距离:

$$t = \frac{E_1 t_1^2 + 2E_2 t_1 t_2 + E_2 t_2^2}{2(E_1 t_1 + E_2 t_2)}, \quad (13)$$

然后根据双层梁横截面上正应力对 z 轴的力矩之和等于外力矩 M 的条件, 可得:

$$\int_{-t}^{-t+t_1} E_1 Ky^2 dy \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz + \int_{-t+t_1}^{t_1+t_2-t} E_2 Ky^2 dy \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz = M. \quad (14)$$

由式(7)可得双层梁即路面结构的抗弯刚度:

$$D = \frac{1}{3} [E_1 t_1 (t_1^2 - 3t_1 t + 3t^2) + E_2 t_2 (3t_1^2 + t_2^2 + 3t^2 + 3t_1 t_2 - 6t_1 t - 3t_2 t)]. \quad (15)$$

结合式(6)与式(10), 就可计算路面结构在盐胀作用下弯曲变形的挠度表达式。

3 路面结构内力的分析与计算

在梁的支座约束力已知的情况下, 路面结构任意横截面上的弯矩可采用隔离体法通过列力矩平衡方程求得, 则各横截面弯矩计算结果如下:

当 $x \in [0, a]$ 时,

$$M = -\frac{q_0}{2} x^2; \quad (16)$$

当 $x \in [a, \frac{l}{2}]$ 时,

$$M = -\frac{q_0}{2} x^2 + \frac{q(x-a)^2}{2}. \quad (17)$$

由 $\sigma = E_i Ky (i=1, 2)$ 结合式(11)可得路面结构任意横截面上距中性轴 z 轴距离为 y 的任意点的正应力, 则有:

当 $y \in [-t, -t+t_1]$ 时,

$$\sigma = \frac{E_1 My}{D}; \quad (18)$$

当 $y \in [-t+t_1, t_1+t_2-t]$ 时,

$$\sigma = \frac{E_2 My}{D}. \quad (19)$$

4 算例分析

沙漠区某公路路段受到硫酸盐盐渍土盐胀作用而产生横向隆起病害, 现根据所建路面结构力学模型和路面结构参数对路面结构在盐渍土盐胀作用下的受力及其横向隆起的挠度值进行分析计算。路面结构参数^[18]如表1所示。

由表1可知, 路面结构自重 $q_0 = 16\ 229.29$ N/m; 设路面结构承受荷载集度为 $160\ 000$ N/m, 分布宽度 $b-a$ 为 0.5 m 的均布盐胀作用, 由 $lq_0 = (b-a)q$ 可知, $l = 4.92$ m。结合式(11), 可知任意截面的弯矩为:

$$M = \begin{cases} -8\ 114.65 x^2 & x \in [0, 2.21] \\ -8\ 114.65 x^2 + 80\ 000(x-2.21)^2 & x \in [2.21, 2.46] \end{cases}. \quad (20)$$

表1 路面结构参数

Tab. 1 Pavement structure parameters

面层参数				基层参数			
厚度 t_1/m	密度 $\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E_1/MPa	抗拉强度 σ_1/MPa	厚度 t_2/m	密度 $\rho_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E_2/MPa	抗拉强度 σ_2/MPa
0.18	2 365	1 200	1	0.55	2 237	1 500	0.5

对式(20)求导可知当 $x \approx 2.46 \text{ m}$ 时,路面结构取得最大弯矩值,此时 $M_{\max} \approx -44\,293.59 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

将路面结构相应参数代入式(13):

$$t = \frac{E_1 t_1^2 + 2E_2 t_1 t_2 + E_2 t_2^2}{2(E_1 t_1 + E_2 t_2)}, \quad (21)$$

可得路面结构中性轴距路面结构上表面的距离(即简支双层梁距梁上表面的距离) $t \approx 0.38 \text{ m}$,即中性轴位于路面基层内,进而由式(15)得:

$$D = \frac{1}{3} [E_1 t_1 (t_1^2 - 3t_1 t + 3t^2) +$$

$$E_2 t_2 (3t_1^2 + t_2^2 + 3t^2 + 3t_1 t_2 - 6t_1 t - 3t_2 t)], \quad (22)$$

得出路面结构抗弯刚度 $D \approx 4.42 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。

由最大弯矩值、梁的抗弯刚度、路面结构相应参数结合式(18)~(19),得:

$$\sigma = \begin{cases} \frac{E_1 M y}{D} & y \in [-t, -t + t_1] \\ \frac{E_2 M y}{D} & y \in [-t + t_1, t_1 + t_2 - t] \end{cases}, \quad (23)$$

可知最大弯矩截面上的应力分布情况,其中面层和基层的最大拉应力分别约为 0.46 MPa 和 0.3 MPa 。

路面横向隆起的最大挠度值可近似按跨中截面对应的挠度值来计算,且该挠度值可由式(11)计算得出,代入相应的参数可得相应的路面横向隆起的最大挠度 $w_{\max} \approx 0.000\,31 \text{ m}$ 。

为了研究在盐胀作用、路面结构自重影响下路面结构层的应力响应规律,在不改变路面结构其他参数和固有条件的基础上,改变路基盐胀作用 $q(x)$ 的集度的大小,分析路面结构基层、面层的最大拉应力与最大挠度变化规律。结果如图3、图4所示。

由图3结合式(18)~(19)可知,在盐胀作用下路面结构基层的拉应力将先达到其抗拉强度,即基层结构将先于面层结构开裂而发生破坏;同时可知路面结构不发生破坏所能承受的最大盐胀作用力为 225 kN/m 。由图4结合式(10)~(11)可知,路面结构横向隆起挠度值随路基盐胀力的增大而增大,且路面结构发生破坏时其临界挠度值为 0.001 m 。

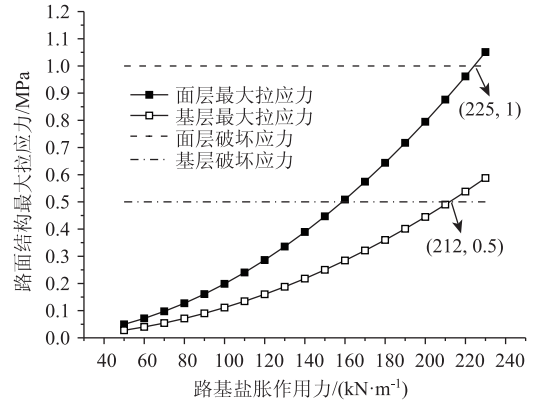


图3 路面结构应力与盐胀作用力关系

Fig. 3 Relationship between pavement structure stress and salt expansion force

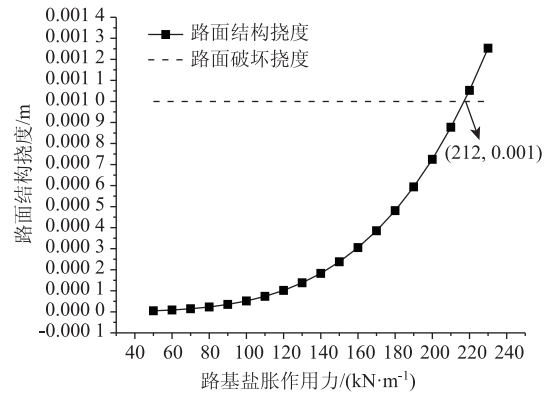


图4 路面横向隆起挠度与盐胀作用关系

Fig. 4 Relationship between pavement lateral uplift deflection and salt expansion force

5 结论

戈壁沙漠地区盐渍化路基受盐胀作用致使路面发生横向隆起,引起路面结构力学响应。基于病害实体路面结构与相关力学理论,建立了受盐胀作用下路面横向隆起的双层梁力学模型,并推导了路面横向隆起挠度公式。依据力学模型与公式,已知路面隆起高度与路面结构参数,可得到盐胀作用大小,反之亦可得到路盐胀作用下在路面结构基层、面层引起的应力大小与隆起高度。根据路面结构参数与面层、基层的抗拉强度,通过所建力学模型中路面

结构的应力公式可判别在盐胀作用下路面结构基层、面层发生结构性破坏的时序。同时,对于既定参数的路面结构,利用模型中路面结构挠曲变形公式可建立保证路面结构层不发生由盐胀引起的结构性破坏所能承受的临界隆起高度与所能承受的临界盐胀作用。这为发生病害地区路面结构材料组成设计与隆起病害防治等方面提供理论基础。

参考文献:

References:

- [1] 陈发明. 风积沙在盐渍土地区路用性能的研究及其应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
CHEN Fa-ming. Research on Road Performance of Aeolian Sand in Saline Area and Its Application [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [2] 杨保存, 汪为巍, 杨柳. 南疆盐渍土路基盐-冻胀变形综合防治技术研究 [J]. 干旱区地理, 2011, 34 (1): 133-142.
YANG Bao-cun, WANG Wei-wei, YANG Liu. Integrated Control Technology of Salt-frost Heave Deformation in Saline Soil Subgrade of Southern Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2011, 34 (1): 133-142.
- [3] 包卫星, 张莎莎. 路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (4): 734-739.
BAO Wei-xing, ZHANG Sha-sha. Experimental Study on Salt Expansion and Thawing Subsidence Properties of Sandy Saline Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (4): 734-739.
- [4] 赵德安, 余云燕, 马惠民, 等. 南疆铁路路基次生盐渍化试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (4): 745-751.
ZHAO De-an, YU Yun-yan, MA Hui-min, et al. Secondary Salinization of Subgrade of Southern Xinjiang Railway [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (4): 745-751.
- [5] 冯瑞玲, 王鹏程, 吴立坚. 硫酸盐渍土路基盐冻胀变形量计算方法探讨 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (1): 238-242.
FENG Rui-ling, WANG Peng-cheng, WU Li-jian. Discussion on Calculation Method of Salt Dilating and Frost-heave Deformation Occurred in Sulphate Saline Soil Subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (1): 238-242.
- [6] 杨保存, 刘新荣, 贺兴宏, 等. 盐渍土路基盐胀性试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5 (3): 594-603.
YANG Bao-cun, LIU Xin-rong, HE Xing-hong, et al. Test Study on Saline Soil Subgrade Salt-frost Deformation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5 (3): 594-603.
- [7] 邱林. 阿拉尔市区道路盐胀-冻胀变形破坏机理研究 [J]. 工程勘察, 2010, 38 (10): 28-31.
QIU Lin. Study on the Failure Mechanism of Salt-frost Heave Deformation in Alar Urban Roads [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38 (10): 28-31.
- [8] 陈再, 彭述权, 胡毅夫, 等. 上隔下疏型硫酸盐渍土路基盐胀模型试验研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2015 (1): 248-254.
CHEN Zai, PENG Shu-quan, HU Yi-fu, et al. Model Test Research on Salt Expansion of Partition above and Channelize below Sulfuric Acid Saline Soil Roadbed [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2015 (1): 248-254.
- [9] 杨西锋, 尤哲敏, 牛富俊, 等. 固化剂对盐渍土物理力学性质的固化效果研究进展 [J]. 冰川冻土, 2014, 36 (2): 376-385.
YANG Xi-feng, YOU Zhe-min, NIU Fu-jun, et al. Research Progress in Stabilizers and Their Effects in Improving Physical and Mechanical Properties of Saline Soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36 (2): 376-385.
- [10] 石群, 张远芳, 李炎, 等. 罗布泊天然盐渍土冻融循环条件下水盐迁移规律 [J]. 工程勘察, 2016, 44 (4): 1-4, 10.
SHI Qun, ZHANG Yuan-fang, LI Yan, et al. Migration Law of Water and Salt of Lop Nur Natural Saline Soil in the Conditions of Freeze-thaw Cycles [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44 (4): 1-4, 10.
- [11] 牛玺荣. 硫酸盐渍土地区路基水、热、盐、力四场耦合机理及数值模拟研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006: 17-20.
NIU Xi-rong. Study and Numerical Simulation on Moisture-heat-salt-stress Coupled Mechanism in Sulphate Saline Soil Subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006: 17-20.
- [12] 万旭升, 廖孟柯, 杜立群. 温度对硫酸钠盐渍土盐胀影响的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (8): 44-50.
WAN Xu-sheng, LIAO Meng-ke, DU Li-qun. Experimental Study on Influence of Temperature on Salt Expansion of Sodium Sulfate Saline Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (8): 44-50.

(下转第54页)

- WANG Shun-jiu. Changing Pattern of the Temperature, Precipitation and Runoff in Chuanjiang Section of the Yangtze River [J]. Resources Science, 2009, 31 (7): 1142 - 1149.
- [12] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann - Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究 [J]. 农业科技与装备, 2008 (5): 35 - 40.
- CAO Jie-ping, CHI Dao-cai, WU Li-qiang, et al. Mann-Kendall Examination and Application in the Analysis of Precipitation Trend [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2008 (5): 35 - 40.
- [13] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望 [J]. 水科学进展, 2002, 13 (4): 515 - 520.
- WANG Wen-sheng, DING Jing, XIANG Hong-lian. Application and Prospect of Wavelet Analysis in Hydrology [J]. Advances in Water Science, 2002, 13 (4): 515 - 520.
- [14] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望 [J]. 地理科学进展, 2013, 32 (9): 1413 - 1422.
- SANG Yan-fang, WANG Zhong-gen, LIU Chang-ming. Applications of Wavelet Analysis to Hydrology: Status and Prospects [J]. Progress in Geography, 2013, 32 (9): 1413 - 1422.
- [15] 林振山, 邓自旺. 子波气候诊断技术的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- LIN Zhen-shan, DENG Zi-wang. Research on Wavelet Climate Diagnosis Technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999.
- [16] 徐绪松, 马莉莉, 陈彦斌. R/S 分析的理论基础: 分数布朗运动 [J]. 武汉大学学报: 理学版, 2004, 50 (5): 547 - 550.
- XU Xu-song, MA Li-li, CHEN Yan-bin. Theoretical Basis of R/S Analysis: Fractional Brownian Motion [J]. Journal of Wuhan University: Natural Science Edition, 2004, 50 (5): 547 - 550.
- [17] 李金玉, 彭小平, 邓正刚, 等. 混凝土抗冻性的量化设计 [J]. 混凝土, 2000 (12): 61 - 65.
- LI Jin-yu, PENG Xiao-ping, DENG Zheng-gang, et al. Quantitative Design on the Frost-resistance of Concrete [J]. Concrete, 2000 (12): 61 - 65.
- [18] 秦健, 孙立军. 国外沥青路面温度预估方法综述 [J]. 中外公路, 2005, 25 (6): 19 - 23.
- QIN Jian, SONG Li-jun. Review of Foreign Asphalt Pavement Temperature Forecast Methods [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2005, 25 (6): 19 - 23.

(上接第 6 页)

- [13] 姚占勇, 滕显飞, 毕玉峰, 等. 黄泛区粉土路基次生盐渍化临界高度研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (11): 57 - 62.
- YAO Zhan-yong, TENG Xian-fei, BI Yu-feng, et al. Study on Critical Height of Secondary Salinization of Silty Soil Subgrade in Yellow River Impact Plain Area [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (11): 57 - 62.
- [14] 张宏, 王智远, 张海龙, 等. 阿拉善额济纳地区公路盐胀病害成因分析 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15 (6): 151 - 154.
- ZHANG Hong, WANG Zhi-yuan, ZHANG Hai-long, et al. Analysis of Desert Highway Expansion Caused by the Excessive Salt Content in Ejina of Alxa Area, Inner Mongolia [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15 (6): 151 - 154.
- [15] 刘鸿文. 材料力学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- LIU Hong-wen. Mechanics of Materials [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [16] 邓学钧. 路基路面工程 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- DENG Xue-jun. Road Subgrade and Pavement Engineering [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [17] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材料力学 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- SHEN Guan-lin, HU Geng-kai, LIU Bin. Mechanics of Composite Materials [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [18] JTG D50—2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
- JTG D50—2006, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement [S].