

文章编号:1671-1637(2019)06-0054-11

## 铁路路基翻浆冒泥的机理及影响因素

王 威, 吴宇健, 杨成忠, 冯青松

(华东交通大学 轨道交通基础设施运维安全保障技术国家地方联合工程研究中心, 江西 南昌 330013)

**摘 要:**为研究铁路路基翻浆冒泥的发生机理,进行了大量调查,总结了目前铁路2种较易发生翻浆冒泥的路基模型;建立了循环列车荷载作用下土中振动孔压增长与消散规律的控制微分方程,计算了土中孔压比的增长规律,判断其是否会液化而引发翻浆冒泥;分析了普铁和高铁列车运行速度、列车轴质量、土的固结系数、固结应力比和围压对翻浆冒泥的影响。分析结果表明:路基在列车荷载和水的持续共同作用下,土中孔压比随列车荷载振次的增加而迅速增大,但是其增长速度处于持续减小的状态,最终趋于稳定;土中孔压比随深度的增加呈先增大后减小的变化形式,且其最大值通常在距土层表面0.6 m处;列车运行速度越大,土中孔压比增长越快,越容易发生翻浆冒泥,当速度为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,普铁路基土发生翻浆冒泥所需振次为高铁路基的19%;列车轴质量越大,土中孔压比增长越快,当轴质量为18 t时,普铁路基土液化所需振次为高铁的24%;增大土的固结系数能降低孔压比的增速,路基土达到液化所需振次就越多,从而越难发生翻浆冒泥;等压固结时路基土比偏压时更容易发生液化而形成翻浆冒泥;增大围压能够降低孔压比的增速,路基土也就更难发生液化,发生翻浆冒泥的可能性就越小;普铁路基发生翻浆冒泥的可能性比高铁线路中更高。

**关键词:**铁道工程;翻浆冒泥;路基模型;列车荷载;振动孔压;影响因素

**中图分类号:**U216.41 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.06.006

## Mechanism and influencing factors of mud pumping in railway subgrade

WANG Wei, WU Yu-jian, YANG Cheng-zhong, FENG Qing-song

(National Local Joint Engineering Research Center of Safety Guarantee Technology for Operation and Maintenance of Rail Transport Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

**Abstract:** In order to study the mechanism of mud pumping in railway subgrade, many investigations were conducted and two subgrade models that prone to mud pumping in current railways were summarized. A governing differential equation for the description of the increase and dissipation rule of vibration pore-water pressure in subsoil under cyclic train load was established. The growth law of pore-water pressure ratio in subsoil was calculated, which accordingly decided whether the subsoil was liquefied to cause the mud pumping. The effects of different parameters, such as train operation speeds, axle weighings of train, consolidation coefficients of subsoil, consolidation stress ratios and confining pressures on mud pumping, were analyzed for the general-speed and high-speed railways. Analysis result indicates that when the subgrade is under the continuous combined action of train load and water, the pore-water

收稿日期:2019-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51908215);江西省自然科学基金项目(20181BAB216030);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ170399)

作者简介:王 威(1987-),男,江西抚州人,华东交通大学讲师,工学博士,从事交通岩土工程及有砟轨道结构研究。

pressure ratio in subsoil grows quickly with the increase of vibration number of train load, but its growth rate continuously decreases and its value stabilize in final. With the increase of the depth, the change pattern of the pore-water pressure ratio in subsoil grows first and then falls. Its value is normally largest at 0.6 m under the surface of subsoil. The faster the train speed is, the quicker the pore-water pressure ratio grows, and the simpler the mud pumping takes place. When the train speed is  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , the vibration numbers for mud pumping to appear in subsoil under general-speed railway are 19% of that under high-speed railway. The pore-water pressure ratio grows quicker as the axle weighing of train increases. When the axle weighing is 18 t, the vibration number for mud pumping to appear in subsoil under general-speed railway is 24% of that under high-speed railway. Increasing the consolidation coefficient of subsoil can reduce the growth rate of the pore-water pressure ratio, and the subsoil will need more vibration number to liquefy, which makes it more difficult for mud pumping to appear. The subsoil is easier to liquefy under isotropic consolidation than that under anisotropic consolidation, which leads to mud pumping. Increasing the confining pressure can reduce the growth rate of pore-water pressure ratio, which makes it more difficult for subsoil to liquefy and less likely for mud pumping to appear. It is more likely for mud pumping to appear in general-speed railway than in high-speed railway. 10 figs, 33 refs.

**Key words:** railway engineering; mud pumping; subgrade model; train load; vibration pore-water pressure; influencing factor

**Author resume:** WANG Wei(1987-), male, lecturer, PhD, rebwg05@163.com.

## 0 引言

大量的铁路运营实践表明:虽然在铁路工程建设中,项目设计与施工方案的选取均严格参照了工程技术规范,但由于路基的主要组成成分为天然形成的岩石材料,具有多样性、松散性和分层差异性等特点<sup>[1]</sup>,且所处环境较为复杂,铁路投入运营后,在环境多变和列车荷载的长期循环作用等条件下,线路局部地段就不可避免地出现了不同类型的路基病害,其中翻浆和冒泥是铁路路基中常见的2种病害类型,也是出现最频繁的危害之一<sup>[2-7]</sup>。由于这2种病害的发生机制和影响结果非常相似,故在研究讨论时一般会把它们结合起来,统称为翻浆冒泥。此病害会引起轨道的严重退化,进而影响到列车运行的稳定性和安全性,是困扰世界上铁路路基正常工作的最严重的病害问题<sup>[8-11]</sup>。一般情况下,当列车通过轨道时,列车运行产生的动荷载经由轨道结构传递给路基,路基土中振动孔压在孔隙水和列车荷载的共同作用下迅速增长,使得道床与基床层土体粉化、破坏、侵蚀软化,如此反复作用,路基土最终变成液态泥浆(可以理解为土中孔压比不小于1),列车通过前后所产生的抽吸作用会使得这些泥浆和附带的细粒土往外翻冒,形成翻浆冒泥病害。

翻浆冒泥分为道床性和基床性<sup>[12]</sup>,其中基床性翻浆冒泥要比道床性出现得更频繁,且治理基床性翻浆冒泥也比治理道床性更难,所需的费用也更多,故本文主要围绕基床翻浆冒泥展开研究。针对铁路路基翻浆冒泥病害问题,国内外许多学者对其发生机理进行了大量的研究,也提出了许多整治方法。Duong等进行室内物理模型试验,发现路基土发生翻浆冒泥和细颗粒土的迁移有关,而土中水的含量是影响细颗粒土迁移的最重要因素,土越接近饱和状态时,循环荷载越容易引起超孔压从而导致土体发生液化,而随着超孔压的消散,细粒土会被带着向上迁移,土的压缩性越高时,荷载引起的超孔压就越大,翻浆冒泥现象也就更易发生<sup>[13-14]</sup>;Chawla等将不同厚度的道砟分别铺在黏土和粉土路基上,对轨道进行循环加载试验,发现厚度更大的道砟层能有效地减少翻浆冒泥的发生,粉土路基由于其高渗透性,使得其相较于黏土路基更容易浸水软化,加上荷载的循环作用后更易形成翻浆冒泥<sup>[15]</sup>;聂如松等认为路基经长期服役后的状态也是影响基床翻浆冒泥的重要因素,路基填料不密实、承受过大的动偏应力、基床层围压过低等因素导致路基表面形成很多细小裂缝,地表水的渗入使得路基土体浸湿软化,再加上列车荷载的反复作用,导致土体发生液化后向

上翻冒,从而形成翻浆冒泥病害<sup>[16-17]</sup>;贡照华分别从道床脏污、道床厚度不足、路拱翻浆和路基土质方面分析了翻浆冒泥的发生机理,并且将翻浆冒泥的产生过程划分成多个阶段,按阶段对其采用不同的整治办法<sup>[18]</sup>;王卓贤认为土质不良、水和动力这 3 个主要因素的同时存在便具备了产生翻浆冒泥的条件,防治路基翻浆冒泥应从排水和路基面所受压应力等方面着手<sup>[19]</sup>;黄兴政等对铁路路基某工程实例进行分析,认为为了更好地治理和防范翻浆冒泥病害,应恰当处理路基中的水<sup>[20]</sup>;王亚东认为在引起翻浆冒泥病害 3 个主要影响因素水、动荷载和土当中,处理此病害最简单快捷的方法就是解决水的问题<sup>[21]</sup>;段靓靓等根据室内及现场试验、数值分析和实际观测所得的结果,合理分析了列车荷载、水以及土对翻浆冒泥的影响,提出了复合地基法很大程度上缓解了翻浆冒泥的发生<sup>[22]</sup>;王鑫通过测试聚氨酯灌浆材料的多项物理参数特性,并将其投放于铁路线路中的试用后,发现该材料对于翻浆冒泥的整治效果非常显著<sup>[23]</sup>;杜攀峰等采用学习向量量化神经网络模型对路基段的实际资料中的各种路基病害的特征值进行辨别训练,并对探地雷达检测资料进行自动分析,对翻浆冒泥的识别精度达到了 90% 以上,然后根据判释结果采取合理的整治措施,不但取得很好的效果,且相对于传统的挖深方法还省时省力,不会损害到既有线路<sup>[24]</sup>。

对于铁路路基翻浆冒泥病害问题,以往的研究大多是利用物理模型试验或者案例总结的方法,对此病害的发生机理进行分析,时间和金钱成本较高。本文通过建立描述路基土中振动孔压增长与消散规律的控制微分方程,计算出不同土层深度处孔压的增长曲线,从而判断其是否发生液化而引起翻浆冒泥现象,该计算方法简单且耗时短;同时,基于此方法分析了列车运行速度、列车轴质量、土的固结系数、固结应力比和围压等参数对铁路路基基床翻浆冒泥的影响,并根据所得结果提出了有利于防范和治理翻浆冒泥病害的建议。

## 1 常见的翻浆冒泥路基模型

根据以往对翻浆冒泥的研究以及现场情况的调查,发现易发生该病害的铁路路基应满足如下条件:列车荷载的循环作用;路基土层含水量过高,常发生于道床不清洁、低路堑地势易积水、低路堤易渗水、路基陷槽积水和无砟轨道伸缩缝及裂缝渗水严重等情况;路基土质不良,其属性通常满足塑性指数大于 12,

液限大于 32%,渗透系数小于  $1.05 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,饱和度和大于 50%,细颗粒含量(粉粒与黏粒所占土的质量百分含量)大于 60%<sup>[25]</sup>。根据以上条件,本文总结并建立了 2 种易发生翻浆冒泥的铁路路基模型,模型具体结构分别见图 1、2,图 1 为铁路路堑模型,图 2 为铁路路堤模型。

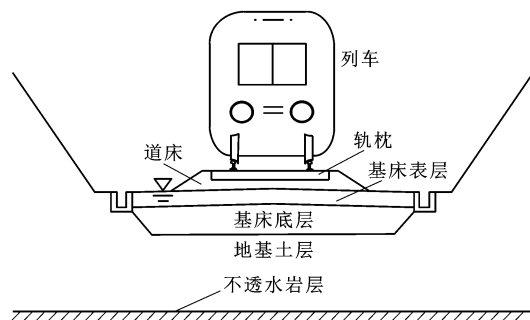


图 1 易发生翻浆冒泥的路堑模型

Fig. 1 Cutting model prone to mud pumping

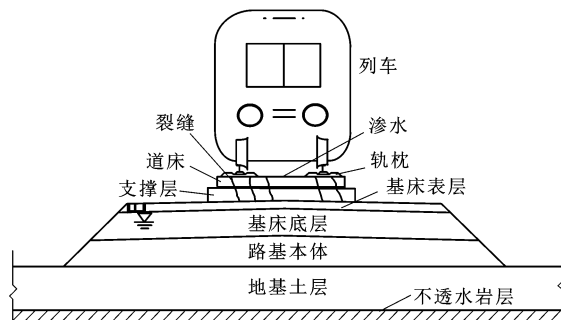


图 2 易发生翻浆冒泥的路堤模型

Fig. 2 Embankment model prone to mud pumping

## 2 控制微分方程建立与求解

### 2.1 方程建立

基于上文所述条件,以铁路路基层和地基层为研究对象,为方便推导出循环列车荷载下路基土内振动孔隙水压力增长及消散的表达式,将列车荷载及路基和地基土层作了简化,如图 3 所示,其中: $z$  为土层深度,以土层表面为原点向下取值; $H$  为土层厚度。

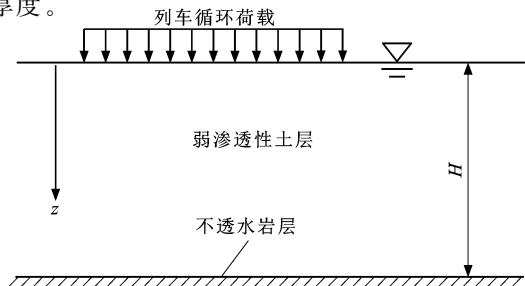


图 3 简化列车荷载与土层基础

Fig. 3 Simplified train load and soil foundation

通过大量调查发现:在实际易发生翻浆冒泥的铁路路段中,路基和地基土层中的部分土体已发生破碎,使土中存在大量的细小颗粒,降低了土体渗透性,导致水分大量积滞于土层中;部分路基与地基土层的破损,加上列车的反复作用,会使得土体发生迁移,最后导致路基土与地基土混合在一起。对上述模型做出以下假设:将路基土层和地基土层看作一个整体,且此土层上表面为排水边界,下表面为不透水岩层;将列车循环荷载看作连续均布荷载。

在列车循环荷载的作用下,土体振动所产生的周期循环剪应力会在土层内引起振动孔隙水压力,并在荷载的持续作用下保持递增。同时,由于长期循环荷载作用下的路基可看作是处于部分排水的状态<sup>[26]</sup>,该振动孔隙水压力会随着土中孔隙水的排出而不断消散。而且将太沙基一维固结理论与不排水条件下振动孔压增长模式相耦合的方法,是计算一维部分排水条件下振动孔压增长与消散的常用途径<sup>[27]</sup>。故据此建立的微分控制方程表达式为

$$C \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial u_g}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $C$ 为土的固结系数; $u$ 为超静孔隙水压力; $u_g$ 为周期剪应力引起的振动孔隙水压力; $t$ 为振动时间。

孔压随时间的增长模式可采用张建民等建立的经验公式<sup>[28]</sup>表示

$$\frac{u_g}{u_1} = F\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (2)$$

式中: $F(\cdot)$ 为孔压增长模式的经验公式; $u_1$ 为界限孔压,表示振动孔压  $u_g$  的最大值; $t_1$  为与  $u_1$  对应的振动时间。

根据栾茂田等给出的孔压增长模式<sup>[29]</sup>,式(2)可改写为

$$\frac{u_g}{u_1} = \frac{t}{t_1} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得

$$C \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{u_1}{t_1} \quad (4)$$

另外,上述假设土层底部为不透水边界,故在此条件下式(4)有如下初始条件与边界条件

$$\begin{cases} u|_{z=0} = 0 \\ u|_{t=0} = \varphi(z) \\ \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varphi(z)$ 为土层深度  $z$  处土体所受附加应力。

式(5)为求解式(4)的初始条件与边界条件,可采用叠加原理对其进行求解。步骤为:首先利用

式(5)中所述的初始和边界条件,将式(4)分解为式(6)、(7)所示2个具有定解条件的方程,然后根据分离变量法和齐次化原理求得式(6)、(7)的解,最后进行叠加便可得到式(4)的解

$$\begin{cases} C \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \\ u|_{z=0} = 0 \\ u|_{t=0} = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{u_1}{t_1} \\ u|_{z=0} = 0 \\ u|_{t=0} = \varphi(z) \\ \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

按上述步骤求得式(4)的解为

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u_1}{t_1} \frac{2H^2}{CA^3\pi^3} \sin\left(\frac{Az\pi}{H}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{A^2\pi^2 Ct}{H^2}\right)\right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma_0}{z} \frac{\sin(A\pi)}{A^2\pi^2} \frac{H^2}{A} \cos(A\pi) \sin(Az\pi) \cdot \exp\left[-\left(\frac{A\pi}{H}\right)^2 Ct\right] \quad (8)$$

$$A = \frac{2n+1}{2} \quad (9)$$

式中: $n$ 为正整数; $\sigma_0$ 为初始有效应力。

$u_1$ 的表达式通过参考文献[28]得到

$$u_1 = \frac{\eta(2-m)\sigma_0}{m+2} \quad (10)$$

式中: $m$ 为固结应力比; $\eta$ 为  $u_1$  与  $m$  间的关系系数,一般取 0.28。

$t_1$ 可利用频率和振次的关系进行换算

$$t_1 = \frac{N_1}{f} \quad (11)$$

式中: $N_1$ 为土体达到破坏所需的振次; $f$ 为荷载振动频率<sup>[30]</sup>。

式(11)中破坏振次  $N_1$  可根据边学成等提出的公式<sup>[31]</sup>得到

$$N_1 = 10^{\frac{\zeta-b}{a}} \quad (12)$$

式中: $\zeta$ 为土体动应力比; $a$ 、 $b$ 均为经验常数, $a$ 取 -0.2, $b$ 取 1.3。

结合式(10)~(12),对式(8)进行参数等量替换可以得到孔压比( $u/\sigma_0$ )随时间的表达式为

$$\frac{u}{\sigma_0} = \frac{\eta f(2-m)}{(m+2)N_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2H^2}{CA^3\pi^3} \sin\left(\frac{Az\pi}{H}\right) \cdot$$

$$\left[1 - \exp\left(-\frac{A^2 \pi^2 C t}{H^2}\right)\right] + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H^2}{z} \frac{\sin(A\pi)}{A^3 \pi^2} \cdot \cos(A\pi) \sin(Az\pi) \exp\left[-\left(\frac{A\pi}{H}\right)^2 C t\right] \quad (13)$$

计算式(13)的关键在于求解土体动应力比,通常情况下,土体动应力比为

$$\zeta = \frac{\sigma_d}{2\sigma_c} \quad (14)$$

式中: $\sigma_d$  为土中任意位置的动应力; $\sigma_c$  为围压。

由于路基动应力随深度增加而衰减,文中的动应力( $\sigma_d$ )采用蒋红光<sup>[26]</sup>、韩自力等<sup>[32]</sup>的相关结论,首先获取列车以某一速度通过时路基表层的动应力,然后采用 Boussinesq 公式,依据瞬时动应力沿深度方向的衰减规律,得出土中任意位置的动应力。而不同设计速度下的列车运行时引起的路基表层(此刻  $z$  等于 0)动应力<sup>[26]</sup>是不一样的,表示为

$$\sigma_d|_{z=0} = 0.26P(1 + \alpha v) \quad (15)$$

式中: $P$  为列车轴质量; $v$  为列车行车速度; $\alpha$  为速度影响系数,普通铁路线路中取 0.005,高速铁路线路中速度为  $200 \sim 250 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时取 0.004,速度为  $300 \sim 350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时取 0.003。

将式(14)、(15)求得的参数代入至式(13)中,最终可获得不同工况条件下孔压比随时间的变化关系。另外,可根据时间、振次和频率三者之间的关系,将时间替换为振次,得出土体孔压比与振次之间的关系曲线。

## 2.2 模型验证

为了验证本文所推导出方程的正确性,参照文献[33]的试验条件,土样为粉土,其液限为 32.8%,细粒土含量为 87.59%,施加的循环荷载的频率为 0.05 Hz,固结应力比为 1.0。将以上条件按本文建立的方程进行相应的换算,计算结果与文献[33]中试验结果对比如图 4 所示。

由图 4 可以看出:在循环荷载的作用下,土中孔压比的增长是一个由快到慢直至稳定的过程。计算结果与文献[33]的试验结果吻合度较好,表明本文推导的方程能较好地反映循环列车荷载作用下路基土内力学响应特性,表明了方程的正确性。

进一步,本文调查了不同振次下孔压比沿路基土深度的分布情况。土的固结系数为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,围压为 65 kPa,荷载频率为 5.0 Hz,固结应力比为 1.0 时,列车荷载振次分别为  $5.0 \times 10^4$ 、 $1.0 \times 10^5$ 、 $1.5 \times 10^5$  和  $1.8 \times 10^5$  次时路基土中孔压比随土层深度的变化规律见图 5。由图 5 可知:在列车动荷载的作用下,同一土层深度处,随着

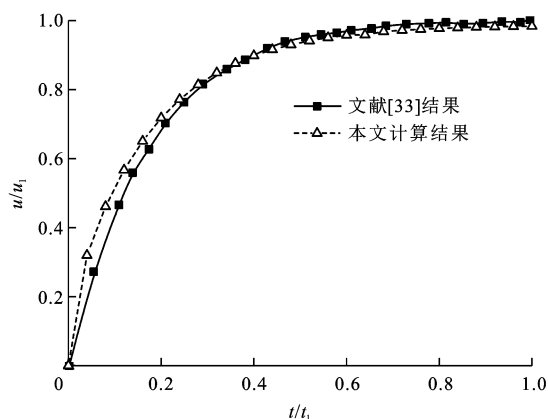


图 4 孔压比增长曲线对比

Fig. 4 Comparison of growth curves of pore-water pressure ratio

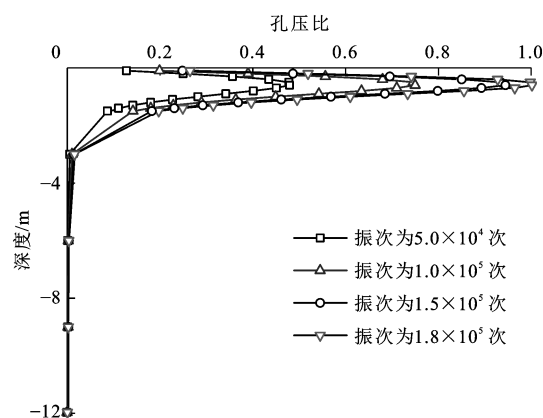


图 5 深度-孔压比关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between depth and pore-water pressure ratio

列车荷载振次的增加,路基土中孔压比呈现出增长的趋势;深度在距离路基上表面 0.6 m 以内时,随着路基土层深度的增加,土体中孔压比也随之增大,路基土层深度大于 0.6 m 时,孔压比会随着深度的增加逐渐减小,孔压比在距路基表面 0.6 m 深度处会达到其最大值。由此可得,在路基上表面以下 0.6 m 处左右土体最容易发生液化破坏,继而最容易发生翻浆冒泥现象。

## 3 翻浆冒泥影响参数分析

由上述分析可知,路基土层内振动孔压会随深度的增加发生较大的变化,下文将根据实际的普铁和高铁线路的运营状况,对影响土中振动孔压变化的参数(运行速度、列车轴质量、固结系数、固结应力比和围压)进行不同取值,并计算出孔压比随振次的变化关系,进而评价其对路基翻浆冒泥的影响。

### 3.1 行车速度的影响

列车运行时产生的动荷载是引起路基土体振动孔压的直接来源,其运行速度是影响孔压增长的重

要因素。为研究列车运行速度对翻浆冒泥产生的影响,本节在列车轴质量为 18 t,围压为 65 kPa,固结应力比为 1.0,路基土的固结系数为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  的条件下,分别计算不同列车运行速度时普铁和高铁线路在路基最易发生液化破坏的位置处(本文取在路基表面以下 0.6 m)的孔压比随振次的变化曲线,如图 6 所示。

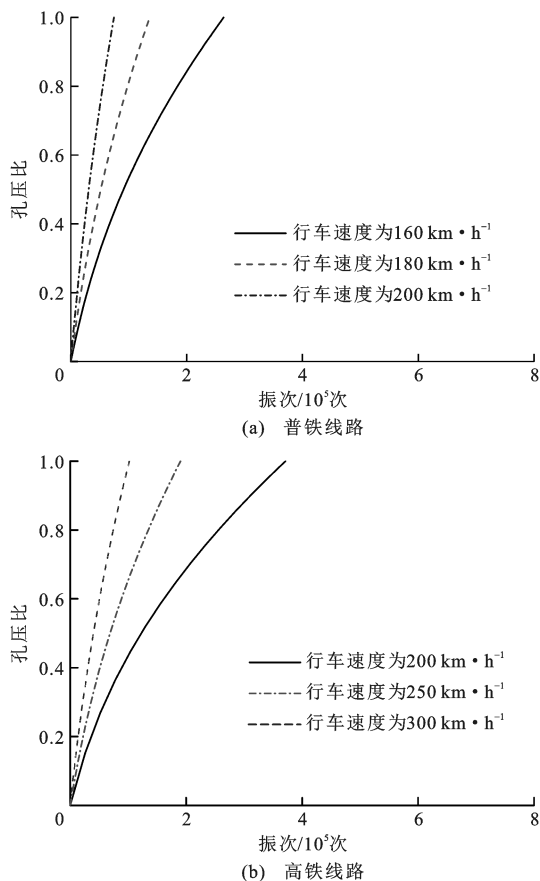


图6 不同行车速度下孔压比增长曲线

Fig. 6 Growth curves of pore-water pressure ratio under different train speeds

图 6(a) 表示普铁线路上列车运行速度分别为 160、180、200  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,在路基表面以下 0.6 m 处土中孔压比随振次的变化曲线,从图 6(a) 中可以看出:土体中孔压比增长至 1.0 时(可理解为土体液化的标准)所需振次分别为  $2.7 \times 10^5$ 、 $1.3 \times 10^5$  和  $7.8 \times 10^4$  次;列车运行速度为 180  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时路基土液化所需振次较 160  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时所需振次减少约 52%,列车运行速度为 200  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时路基土液化所需振次较 180  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时所需的振次减少约 40%。图 6(b) 表示高铁线路上行车速度分别为 200、250、300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,在路基表面以下 0.6 m 处土中孔压比随振次的变化曲线,从图 6(b) 中可以看出:土体中孔压比增长至 1.0 时所需振次分别为  $4.1 \times 10^5$ 、 $1.9 \times$

$10^5$  和  $1.0 \times 10^5$  次;列车运行速度为 250  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时路基土液化所需振次较 200  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时所需的振次减少约 54%,列车运行速度为 300  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时路基土液化所需振次较 250  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时所需的振次减少约 47%。由此可知,随着列车运行速度的增大,路基土发生液化所需的振次会随之减小,故所需列车荷载作用时间也随之降低,继而越容易引起翻浆冒泥。

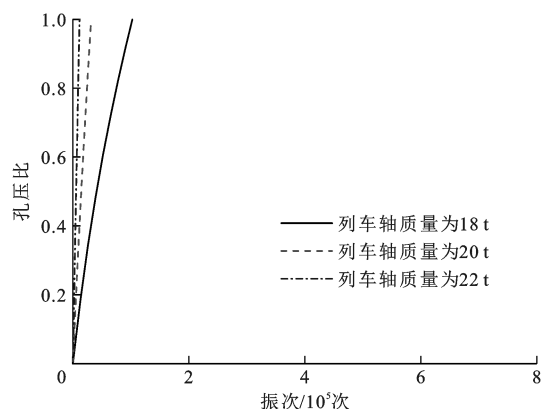
对比图 6(a)、(b) 可知:在列车运行速度同为 200  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,普铁线路下的路基土内孔压比达到液化破坏标准时所需振次为高铁线路的 19%,故在相同的列车运行速度下,普铁线路下的路基土比高铁线路更容易发生液化,继而引起翻浆冒泥现象。

### 3.2 列车轴质量的影响

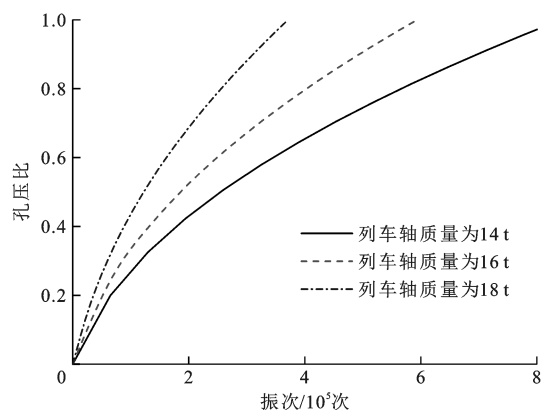
列车轴质量指每根车轴能分摊的最大整车质量,是求解路基动应力的主要参数之一,也是影响路基土内振动孔压增长的重要因素。为研究列车轴质量对翻浆冒泥产生的影响,本节在列车运行速度为 200  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,围压为 65 kPa,固结应力比为 1.0,土的固结系数为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  的条件下,分别计算不同轴质量列车运行下普铁和高铁线路在路基土最易发生液化破坏的位置处的孔压比随振次的变化曲线,如图 7 所示。

图 7(a) 表示普铁线路上列车轴质量分别为 18、20、22 t 时,在路基表面以下 0.6 m 处土中孔压比随振次的变化曲线,从图 7(a) 中可以看出:土体中孔压比增长至 1.0 时所需的振次分别为  $1.0 \times 10^5$ 、 $3.4 \times 10^4$ 、 $1.2 \times 10^4$  次;列车轴质量为 18 t 时路基土液化所需振次较 20 t 时所需的振次减少约 66%,列车轴质量为 22 t 时路基土液化所需振次较 20 t 时所需的振次减少约 65%。图 7(b) 表示高铁线路上列车轴质量分别为 14、16、18 t 时,在路基表面以下 0.6 m 处土中孔压比随振次的变化曲线,从图 7(b) 中可以看出:轴质量为 14 t 时路基土液化所需的振次超过  $8.0 \times 10^5$  次,16、18 t 时所需振次分别为  $6.5 \times 10^5$  和  $4.1 \times 10^5$  次;列车轴质量为 16 t 时路基土液化所需振次较 14 t 时所需的振次减少约 23%,列车轴质量为 18 t 时路基土液化所需振次较 16 t 时所需的振次减少约 37%。由此可见,列车轴质量越大,土中孔压比随振次的增加而增长得越快,土体也就越容易发生液化破坏。

对比图 7(a)、(b) 可知:在列车轴质量同为 18 t 时,普铁线路下的路基土内孔压比达到液化破坏标准时所需振次为高铁线路的 24%,故在相同的列车



(a) 普铁线路



(b) 高铁线路

图 7 不同轴质量下孔压比增长曲线

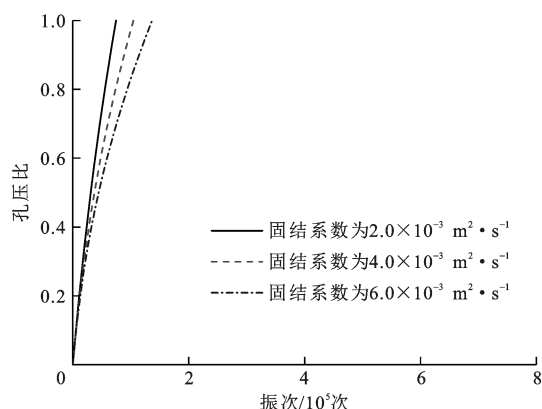
Fig. 7 Growth curves of pore-water pressure ratio under different axle weightings

轴质量下,普铁线路下路基土更容易发生破坏,继而更容易引起翻浆冒泥。

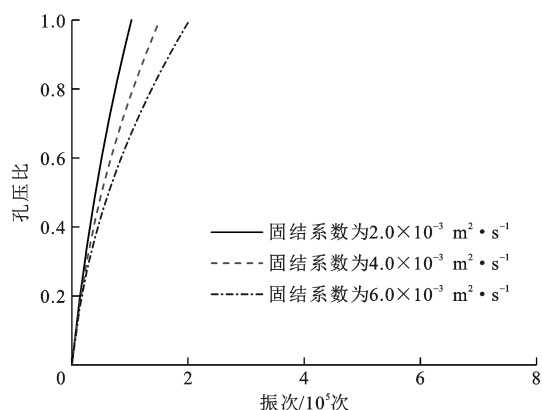
### 3.3 固结系数的影响

固结系数是反映土体固结快慢的重要参数,同时也是影响路基土内孔隙水压力增长的关键因素。为研究固结系数对翻浆冒泥产生的影响,本节在列车运行速度为  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,列车轴质量为  $18 \text{ t}$ ,围压为  $65 \text{ kPa}$ ,固结应力比为  $1.0$  的条件下,分别计算不同的路基土的固结系数时普铁和高铁线路在路基土最易发生液化破坏的位置处的孔压比随振次的变化曲线,如图 8 所示。

图 8(a)表示普铁线路中路基土固结系数分别为  $2.0 \times 10^{-3}$ 、 $4.0 \times 10^{-3}$ 、 $6.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时,在路基表面以下  $0.6 \text{ m}$  处土中孔压比随振次的变化曲线,从图 8(a)中可以看出:土体中孔压比增长至  $1.0$  时所需的振次分别为  $7.8 \times 10^4$ 、 $1.1 \times 10^5$ 、 $1.4 \times 10^5$  次;路基土的固结系数为  $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时土体液化所需振次较  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时所需的振次增加约  $41\%$ ,路基土的固结系数为  $6.0 \times$



(a) 普铁线路



(b) 高铁线路

图 8 不同固结系数下孔压比增长曲线

Fig. 8 Growth curves of pore-water pressure ratio under different consolidation coefficients

$10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时土体液化所需振次较  $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时所需的振次增加约  $27\%$ 。图 8(b)表示高铁线路中路基土的固结系数分别为  $2.0 \times 10^{-3}$ 、 $4.0 \times 10^{-3}$ 、 $6.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时,在路基表面以下  $0.6 \text{ m}$  处土中孔压比随振次的变化曲线,从图 8(b)中可以看出:土体中孔压比增长至  $1.0$  时所需的振次分别为  $1.0 \times 10^5$ 、 $1.6 \times 10^5$ 、 $2.1 \times 10^5$  次;路基土的固结系数为  $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时土体液化所需振次较  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时所需的振次增加约  $60\%$ ,路基土的固结系数为  $6.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时土体液化所需振次较  $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  时所需的振次增加约  $31\%$ 。由此可见,路基土的固结系数越大,土中孔压比随振次的增加而增长得越慢,路基土也就越难发生液化破坏,继而越难引起翻浆冒泥。

对比图 8(a)、(b)可知:随着土的固结系数的增大,路基土内孔压比增长至  $1.0$  时所需振次在普铁和高铁线路中都是呈增大的变化形式;在固结系数相同的条件下,普铁线路下路基土内孔压比增长至  $1.0$  时所需的荷载振次比高铁线路更少。由此可得,路基土的固结系数越大,土体就越难发生液化,

且普铁线路下的路基较高铁线路更易发生破坏,继而更容易引起翻浆冒泥。

### 3.4 固结应力比的影响

固结应力比是影响路基土内动孔压增长的重要参数。为研究固结应力比对翻浆冒泥产生的影响,本文在列车运行速度为  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,列车轴质量为  $18 \text{ t}$ ,围压为  $65 \text{ kPa}$ ,土固结系数为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  的条件下,分别计算不同固结应力比时普铁和高铁线路在路基土最易发生液化破坏的位置处的孔压比随振次的变化曲线,如图9所示。

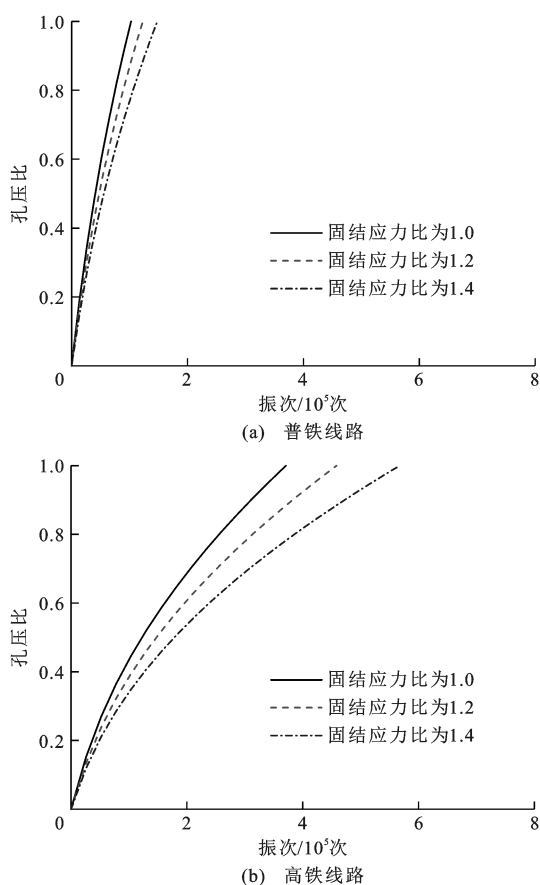


图9 不同固结应力比下孔压比增长曲线

Fig.9 Growth curves of pore-water pressure ratio under different consolidation stress ratios

图9(a)表示普铁线路中固结应力比分别为1.0、1.2和1.4时,在路基表面以下0.6 m处土中孔压比随振次的变化曲线,从图9(a)中可以看出:土体中孔压比增长至1.0时所需的振次分别为  $1.0 \times 10^5$ 、 $1.3 \times 10^5$ 、 $1.6 \times 10^5$  次;固结应力比为1.2时路基土液化所需振次较1.0时所需的振次增加约30%,固结应力比为1.4时路基土液化所需振次较1.2时所需的振次增加约23%。图9(b)表示高铁线路中固结应力比分别为1.0、1.2和1.4时,在路基表面以下0.6 m处土中孔压比随振次的变化曲线,

从图9(b)中可以看出:土体中孔压比增长至1.0时所需的振次分别为  $3.9 \times 10^5$ 、 $4.7 \times 10^5$ 、 $5.7 \times 10^5$  次;固结应力比为1.2时路基土液化所需振次较1.0时所需的振次增加约21%,固结应力比为1.4时路基土液化所需振次较1.2时所需的振次增加约21%。由此可见,固结应力比越大,土中孔压比随振次的增加而增长得越慢,路基土也就越难液化,故可得路基土在等压固结(固结应力比等于1)下比偏压(固结应力比大于1)下达到液化破坏所需的振次更少,继而可得等压固结条件下路基土更容易发生破坏,也就更容易引起翻浆冒泥。

对比图9(a)、(b)可知:在固结应力比相同时,普铁线路下路基土内孔压比增长至1.0时所需振次较高铁线路要更少;随着固结应力比的增大,路基土内孔压比增长至1.0时所需振次在普铁和高铁线路中都是呈增大的趋势。由此可得,固结应力比相同的条件下,普铁线路下的路基较之高铁线路更易液化,并且固结应力比越小时,路基土就越容易液化,继而更易引起翻浆冒泥。

### 3.5 围压的影响

围压的增大会加速土的固结,进而影响土层中孔压的增长。为研究围压对翻浆冒泥产生的影响,在列车运行速度为  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,列车轴质量为  $18 \text{ t}$ ,土的固结系数为  $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,固结应力比为1.0的条件下,分别计算不同围压下普铁和高铁线路在路基土最易发生液化破坏的位置处的孔压比随振次的变化曲线,如图10所示。

图10(a)表示普铁线路中围压分别为60、65、70 kPa时,在路基表面以下0.6 m处土中孔压比随振次的变化曲线,从图10(a)中可以看出:土体中孔压比增长至1.0时所需的振次分别为  $4.1 \times 10^4$ 、 $1.0 \times 10^5$  和  $2.6 \times 10^5$  次;围压为65 kPa时路基土层破坏所需振次较60 kPa时所需的振次增加约144%,围压为70 kPa时路基土层破坏所需振次较65 kPa时所需的振次增加约160%。图10(b)表示高铁线路中围压分别为60、65、70 kPa时,在路基表面以下0.6 m处土中孔压比随振次的变化曲线,从图10(b)中可以看出:围压为60、65 kPa时,土体中孔压比增长至1.0时所需振次分别为  $1.4 \times 10^5$  和  $4.1 \times 10^5$  次,围压为70 kPa时所需振次则超过  $8.0 \times 10^5$  次;围压为65 kPa时路基土层破坏所需振次较60 kPa时所需的振次增加约193%,围压为70 kPa时路基土层破坏所需振次较65 kPa时所需的振次增加约125%。由此可见,随着围压强度的

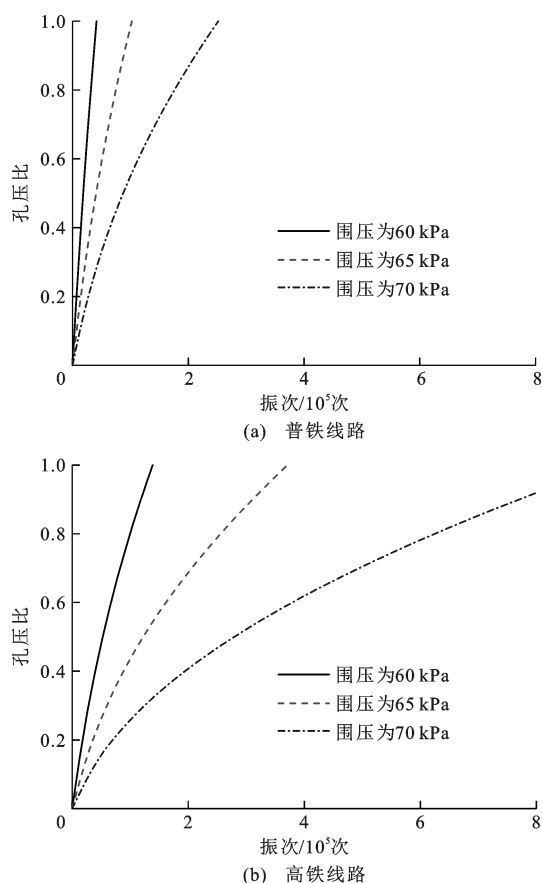


图 10 不同围压下孔压比增长曲线

Fig. 10 Growth curves of pore-water pressure ratio under different confining pressures

增大,路基土中孔压比增长至液化标准时所需的振次也随之增大,土体越难发生液化,继而越难引起翻浆冒泥。

对比图 10(a)、(b)可知:围压越大,普铁线路和高铁线路下路基土内孔压比增长至液化标准时所需的振次越多,并且在相同的围压条件下,普铁线路路基土内孔压比增长至 1.0 时所需振次比高铁线路更少。由此可得,围压越小时,路基土越容易发生破坏,而且在相同的围压条件下,普铁线路下的路基较之高铁线路更易发生破坏,继而更易引起翻浆冒泥。

### 3.6 工程建议

针对铁路路基翻浆冒泥病害问题,通过前文的分析,总结出一些施工和治理方面的有利建议。在施工方面,路基设计施工时,应采取相应的工程措施处理地表水及地下水,做好路基防、排水系统的设计;路堑遇渗水性较差土壤时,应采取换填和各种封闭措施。在治理方面,应及时清理不良或已破坏的土体,保持排水沟排水顺畅及路基土体干燥,且换填土时宜采用透水性良好的土样,并合理设计其粗、细颗粒的比例,换填深度大于 0.6 m 为最佳。

## 4 结 语

(1)初步揭示了在循环列车荷载作用下,路基土中不同深度处孔压比的分布情况,发现铁路路基翻浆冒泥病害最易发生的部位大约在路基表面以下 0.6 m 处。

(2)随着列车运行速度的提升,路基土中孔压比增长得越快,当列车运行速度同为  $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  时,普铁线路下路基土中孔压比达到 1.0 时所需振次仅为高铁线路下的 19%,故普铁线路下的路基土较高铁线路下更易发生翻浆冒泥。

(3)随着列车轴质量的提升,路基土中孔压比增长得越快,当列车轴质量同为 18 t 时,普铁线路下路基土液化所需振次仅为高铁线路下的 24%,同时普速列车大多比高速列车轴质量更大,故普铁线路上更容易出现翻浆冒泥现象。

(4)增大路基土的固结系数能够减缓土中孔压比值的生长,同时普铁线路中孔压比增长得比高铁线路中快,故增大土的固结系数能使翻浆冒泥更难发生,且其发生在普铁线路中的可能性比高铁线路中更大。

(5)路基土中孔压比在等压固结的条件下比偏压时要增长得更快,即等压固结下路基土更容易发生液化从而引起翻浆冒泥,且其在普铁线路下影响更明显。

(6)围压越大,路基土发生液化所需振次就越多,则翻浆冒泥病害就越难发生,在相同的围压强度下,普铁线路下路基较高铁线路要更容易发生翻浆冒泥。

(7)在铁路路基施工及整治工作过程中,应重点关注路基的渗水问题,并且需要确保基床土层填料长期保持着良好的渗水性,保证土层中的水能够及时排出。

### 参考文献:

### References:

- [1] 刘朝军. 铁路路基翻浆冒泥整治新材料及施工工艺研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.  
LIU Chao-jun. Research on new materials and construction technology of railway subgrade mud pumping[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [2] 郭建湖. 运营高铁路基变形病害微变形扰动整治技术[J]. 铁道工程学报,2018,35(6):26-30.  
GUO Jian-hu. Micro-deformation and micro-disturbance treatment technique for deformation disease of operating high speed railway subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(6): 26-30. (in Chinese)

- [3] 聂如松,冷伍明,栗雨,等.基床翻浆冒泥土的物理力学性质[J].西南交通大学学报,2018,53(2):286-295.  
NIE Ru-song, LENG Wu-ming, SU Yu, et al. Physical and mechanical properties of mud pumping soils in railway subgrade bed[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 286-295. (in Chinese)
- [4] HUANG Jun-jie, SU Qian, WANG Wei, et al. Field investigation and full-scale model testing of mud pumping and its effect on the dynamic properties of the slab track-subgrade interface[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 233(8): 802-816.
- [5] HUANG Jun-jie, SU Qian, WANG Wei, et al. Vibration behavior and reinforcement effect analysis of the slab track-subgrade with mud pumping under cyclic dynamic loading: full-scale model tests[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018: 1-14.
- [6] CAI Xiao-pei, CAI Xiang-hui, LIU Ke-xu, et al. Study on mud pumping mechanism of subgrade surface layer in slab ballastless track zone[J]. Sensors and Transducers, 2015, 186(3): 154-160.
- [7] HUDSON A, WATSON G, LE PEN L, et al. Remediation of mud pumping on a ballasted railway track[J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 1043-1050.
- [8] 杨志浩.重载铁路翻浆冒泥病害机理研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2015.  
YANG Zhi-hao. Research on mechanism of mud pumping of heavy haul-railways[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2015. (in Chinese)
- [9] 刘 亭,苏 谦,赵文辉,等.板式无砟轨道路基翻浆整治效果研究[J].铁道学报,2015,37(12):88-95.  
LIU Ting, SU Qian, ZHAO Wen-hui, et al. Study on injection-repaired and reinforcement effects of subgrade frost boiling under ballastless track[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(12): 88-95. (in Chinese)
- [10] LIU Shu-shu, HUANG Hai, QIU Tong, et al. Characterization of ballast particle movement at mud spot[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 31(1): 1-11.
- [11] SU Yu, LENG Wu-ming, TENG Ji-dong, et al. Analysis of subgrade soil mud pumping model[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 21(24): 7667-7678.
- [12] 杨新安.论铁路路基翻浆冒泥病害与发生机理[J].湘潭矿业学院学报,2002,17(4):60-63.  
YANG Xin-an. Study on the mud pumping in railway subgrade and its mechanism[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2002, 17(4): 60-63. (in Chinese)
- [13] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure[J]. Engineering Geology, 2014, 171: 45-58.
- [14] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. A physical model for studying the migration of fine particles in railway substructure[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(5): 895-906.
- [15] CHAWLA S, SHAHU J T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: model tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 366-380.
- [16] 聂如松,冷伍明,杨 奇.既有重载铁路路基检测试验与状态评估[J].铁道工程学报,2014,31(11):20-24.  
NIE Ru-song, LENG Wu-ming, YANG Qi. Detection test and condition assessment on existing heavy haul railway subgrade[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(11): 20-24. (in Chinese)
- [17] 聂如松,冷伍明,杨 奇.铁路路基质量检测试验对比分析[J].铁道学报,2015,37(1):91-96.  
NIE Ru-song, LENG Wu-ming, YANG Qi. Comparison and analysis on railway subgrade quality detection tests[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(1): 91-96. (in Chinese)
- [18] 贡照华.全面整治翻浆冒泥病害的探讨与实践[J].铁道建筑,2001(6):16-18.  
GONG Zhao-hua. Discussion and practice on comprehensive remediation of mud pumping disease[J]. Railway Engineering, 2001(6): 16-18. (in Chinese)
- [19] 王卓贤.路基翻浆冒泥浅析[J].铁道建筑,1985(9):5-8.  
WANG Zhuo-xian. Analysis of mud pumping in railway subgrade[J]. Railway Engineering, 1985(9): 5-8. (in Chinese)
- [20] 黄兴政,方理刚,段靛靛.铁路路基翻浆冒泥的列车动力学研究[J].路基工程,2008(5):101-103.  
HUANG Xing-zheng, FANG Li-gang, DUAN Liang-liang. Research on train kinetics of mud pumping in railway embankment[J]. Subgrade Engineering, 2008(5): 101-103. (in Chinese)
- [21] 王亚东.站场翻浆冒泥原因分析及整治经验[J].路基工程,2000(5):65-66.  
WANG Ya-dong. Cause analysis and treatment experience of mud pumping in station yard[J]. Subgrade Engineering, 2000(5): 65-66. (in Chinese)
- [22] 段靛靛,方理刚,梅文勇.铁路路基翻浆冒泥的机理分析和整治研究[J].路基工程,2005(6):80-82.  
DUAN Liang-liang, FANG Li-gang, MEI Wen-yong. Mechanism analysis and treatment of mud pumping in railway subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2005(6): 80-82. (in Chinese)
- [23] 王 鑫.无砟轨道路基翻浆冒泥整治用聚氨酯灌浆材料的研制[J].中国胶粘剂,2017,26(5):42-44.  
WANG Xin. Study on preparing polyurethane grouting material for renovating mud pumping of ballastless track subgrade[J]. China Adhesives, 2017, 26(5): 42-44. (in Chinese)
- [24] 杜攀峰,廖立坚,杨新安.铁路路基病害的智能识别[J].铁道学报,2010,32(3):142-146.  
DU Pan-feng, LIAO Li-jian, YANG Xin-an. Intelligent recognition of defects in railway subgrade[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 142-146. (in Chinese)
- [25] 冷伍明,栗 雨,滕继东,等.易发生翻浆冒泥的细粒土物理状态指标分析与评判[J].铁道学报,2018,40(1):116-122.  
LENG Wu-ming, SU Yu, TENG Ji-dong, et al. Analysis

- and evaluation on physical characteristics of fine-grained soils prone to mud pumping[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(1): 116-122. (in Chinese)
- [26] 蒋红光. 高速铁路板式轨道结构-路基动力相互作用及累积沉降研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- JIANG Hong-guang. Dynamic interaction of slab track structure-subgrade system and accumulative settlement in high-speed railways[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [27] HYODO M, YASUHARA K, HIRAO K. Prediction of clay behaviour in undrained and partially drained cyclic triaxial tests[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(4): 117-127.
- [28] 张建民, 谢定义. 饱和砂土振动孔隙水压力增长的实用算法[J]. 水利学报, 1991(8): 45-51.
- ZHANG Jian-min, XIE Ding-yi. A practical algorithm for vibration pore water pressure growth of saturated sand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(8): 45-51. (in Chinese)
- [29] 栾茂田, 钱令希. 层状饱和砂土振动孔隙水压力扩散与消散简化解法[J]. 大连理工大学学报, 1995, 35(2): 216-221.
- LUAN Mao-tian, QIAN Ling-xi. Simplified procedure for estimating shaking-induced pore-water pressure dissipation of layered saturated sands[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1995, 35(2): 216-221. (in Chinese)
- [30] 王启云, 张丙强, 赵卫华, 等. 高速铁路无砟轨道路基动应力频谱特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2299-2308.
- WANG Qi-yun, ZHANG Bing-qiang, ZHAO Wei-hua, et al. Research on dynamic stress frequency spectrum of ballastless track subgrade of high speed railway[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2299-2308. (in Chinese)
- [31] 边学成, 卢文博, 蒋红光, 等. 粉土循环累积应变和残余动模量的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 974-980.
- BIAN Xue-cheng, LU Wen-bo, JIANG Hong-guang, et al. Experimental study of cumulative axial strain and residual dynamic modulus of silt soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 974-980. (in Chinese)
- [32] 韩自力, 张千里. 既有线提速路基动应力分析[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(5): 1-5.
- HAN Zi-li, ZHANG Qian-li. Dynamic stress analysis on speed-increase subgrade of existing railway [J]. China Railway Science, 2005, 26(5): 1-5. (in Chinese)
- [33] 曾长女, 刘汉龙, 丰土根, 等. 饱和粉土孔隙水压力性状试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1963-1966.
- ZENG Chang-nv, LIU Han-long, FENG Tu-gen, et al. Test study on pore water pressure mode of saturated silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1963-1966. (in Chinese)