

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.06.010

# 列车行车荷载作用下富水弹性砂性地基动态响应\*

常世清<sup>①</sup> 白海峰<sup>①</sup> 叶剑红<sup>②</sup> 张中俭<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>大连交通大学土木与安全工程学院 大连 116028)

(<sup>②</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

(<sup>③</sup>中国地质大学(北京)工程技术学院 北京 100083)

**摘要** 由于轨道的不平整性,列车运行中会产生较大的激振荷载。该激振荷载使铁路路基和地基发生动态响应。铁路路基过大的振动反应会对列车的通行安全不利,降低乘车的舒适性,而且会对铁路周边的建筑物带来不良振动,给周围居民带来噪音污染。所以研究和评估列车通过时铁路路基和地基的动态响应具有重要的实际意义。本文以 Biot 动态方程为控制方程,以有限元程序包 FSSI-CAS 2D 为数值计算工具,在前人研究的基础上,进一步深入研究了铁路路基、富水砂性地基在列车行车动荷载作用下的动态响应问题。考虑铁路路基和地基中地下水面线以上部分的非饱和带的存在是本研究的一个特色之处。数值计算表明在列车行车激振荷载作用下,铁路路基-地基系统发生强烈的动力响应,其中以低频的竖向响应为主;并且该响应存在衰减。非饱和带内的负孔隙水压力在列车激振荷载作用下不发生变化,而饱和带内孔隙压力发生振荡。本文所提供的研究方法、工具和计算案例可为铁路交通工程中评价列车通过的安全性、乘车的舒适性提供研究参考。

**关键词** 列车荷载 铁路路基 动态响应 有限元计算 FSSI-CAS 2D

中图分类号:TD741 文献标识码:A

## DYNAMIC RESPONSE OF RAILWAY SANDY FOUNDATION UNDER TRAIN RUNNING LOADING

CHANG Shiqing<sup>①</sup> BAI Haifeng<sup>①</sup> YE Jianhong<sup>②</sup> ZHANG Zhongjian<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028)

(<sup>②</sup>Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

(<sup>③</sup>School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing) Beijing 100083)

**Abstract** Intensive dynamic loading is generated when a train is running on railway due to the uneven track. Accordingly, intensive dynamic response occurs in the roadbed and foundation of railway. The excessive vibration response of roadbed and foundation is harmful for the security of running train, and also would make passengers feel uncomfortable. Furthermore, it also would bring harmful vibration to surrounding buildings, and noise pollution to people living around. Therefore, it is practically meaningful to investigate the dynamic response of roadbed and foundation of railways. This paper employs the Biot's dynamic equation as the governing equation, and takes the FEM package FSSI-CAS 2D as the numerical tool. The dynamics of a sandy foundation with ground-water under train running loading is comprehensively investigated. The consideration of the unsaturated zone in the foundation over the static ground-water line is a special point in this investigation. The numerical results indicate that the

\* 收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2014-03-10.

第一作者简介:常世清(1984-),男,硕士生,工程师,铁路工程地质、路基专业. Email: 51406140@qq.com

railway foundation system intensively responds to the running loading of train. Among them, the vertical dynamics with low frequency is the dominant part. It is also observed that the dynamic response of roadbed and foundation of railway both damps in horizontal and vertical direction. The negative pore pressure in unsaturated zone keeps unchanged due to the minor relative displacement of soil particles. The methods, tool and computational cases in this paper can be a research example for evaluating the safety, travelling comfort of a train running on a sandy foundation with ground-water.

**Key words** Train loading, Foundation of railway, Dynamics response, FEM computation, FSSI-CAS 2D

## 0 引言

近 10a 以来,轨道交通在我国发展十分迅速,对我国经济快速发展的贡献颇大。路基的工后沉降、列车荷载-路基-地基系统之间的动力相互作用以及对周边建筑物的振动影响问题越来越受到关注。由于轨道的不平整性,轨道接头处有数目众多的接缝等等原因,列车运行过程中会给路基施加量级较大的动态荷载。该激振荷载使铁路路基和地基发生相应的动态响应。铁路路基过大的振动反应会对列车的通行安全不利,降低乘车的舒适性,而且会对铁路周边的建筑物带来不良振动,给周围居民带来难以接受的噪音。所以研究和评估列车通过时铁路路基和地基的动态响应具有重要的实际意义。

对于列车行车荷载作用下路基-地基系统的动态响应这一工程问题的早期研究一般都采用解析的方法,Fourier 变换和逆变换通常被用到。但是由于解析方法只能处理较为简单的边界条件和荷载类型,真实的列车激振荷载难以被有效处理<sup>[1,2]</sup>。现场实测是获知列车通过时铁路地基动态响应非常可靠的方法<sup>[3]</sup>,但是操作复杂,成本费用极高,只适合个别案例的研究。近年来越来越多地采用了数值方法来研究这一工程问题,可有效降低工作强度,节省研究成本,如李双洋等<sup>[4]</sup>就采用有限元方法对青藏铁路路基在列车荷载作用下的瞬态动力反应进行了数值模拟,并系统地分析了列车荷载作用下铁路路基内的振动孔隙水压力、应力、位移等动力响应特点;陈建国等<sup>[5]</sup>采用非线性有限元方法分析了提速列车荷载作用下铁路路基的动力反应特性。在这些基于数值计算的结果分析中,对铁路路基-地基系统在列车行车荷载作用下的激振反应的分析还不够完善和全面,如没有考虑非饱和带的存在等等。本文将基于 Biot 动态方程为控制方程,以非线性有限元程序包 FSSI-CAS 2D 为工具,进一步深入研究铁路路基-地基系统在列车行车荷载作用下的激振反

应,为铁路交通工程中评价列车通过的安全性、乘车的舒适性,以及评估铁路周围地面在列车通过时的振动影响提供参考。

## 1 控制方程及数值计算模型

土体是一种三相孔隙介质,由土颗粒、孔隙水和包围于其中的气体三相组成。理论研究中,Biot 理论通常被用来描述三相孔隙介质的物理力学行为。本研究中,由 Zienkiewicz 提出的动态 Biot 方程( $u-p$  公式)作为研究铁路地基和路基孔隙介质力学性质的控制性方程。在该控制方程中,孔隙流体相对于土颗粒的相对位移不予考虑,但是固体颗粒和流体运动加速度都考虑在内:

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} + \rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$k \nabla^2 p - \gamma_w n \beta \frac{\partial p}{\partial t} + k \rho_f \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = \gamma_w \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (3)$$

在式(1)、式(2)和式(3)中, $u, w$  是土颗粒在  $x, z$  方向的位移; $\sigma'_x$  和  $\sigma'_z$  为水平和竖直方向的有效应力; $\tau_{xz}$  为剪应力; $p$  为孔隙流体的孔隙压力; $n$  为土的孔隙率; $\rho = n\rho_f + (1-n)\rho_s$  为孔隙介质的平均密度;其中  $\rho_f$  为孔隙流体密度,  $\rho_s$  为固体颗粒密度; $g$  为重力加速度; $\gamma_w$  为孔隙水的单位重量; $k$  为孔隙介质的渗透系数(达西流); $\varepsilon_v$  是孔隙介质的体应变; $\beta$  为孔隙流体的压缩性系数。体应变  $\varepsilon_v$  和流体压缩性系数  $\beta$  被定义为:

$$\varepsilon_v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{K_f} + \frac{n(1-S_r)}{p_{w0}} \quad (5)$$

其中  $S_r$  为孔隙介质的饱和度,  $K_f$  为孔隙流体的体积模量,通常为  $K_f = 2.27 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。  $p_{w0}$  为某处的绝对静水压力。通常饱和土的孔隙水被认为没有压缩性

的。对于非饱和土,由于气泡的存在,使孔隙水和气体的混合体具有很大的压缩性,例如,98%饱和度的土中,土、气的总体压缩性就是饱和时的约100倍。但是式(5)对于近饱和的土体( $S_r > 90\%$ )的适用性是已经被验证的,对于饱和度只有50%的土体的适用性目前还缺乏明确的结论。本文仍然采用式(5)来描述低饱和度土内水体的综合压缩性指标。

采用有限元方法求解上述控制方程(1)~(3)。所采用的软件包为FSSI-CAS 2D,由该文共同作者在前人基础上开发形成<sup>[6]</sup>。该软件包的有效性、适应性和准确性在岩土工程领域内已经被一些试验数据、解析解所验证<sup>[6~8]</sup>。该模型也已经成功地近海结构物的固结沉降<sup>[7,8]</sup>,开采扰动边坡的地震动反应<sup>[9]</sup>,近海波-结构物-海床相互作用等问题上得到应用<sup>[10,11]</sup>。FSSI-CAS 2D采用Newmark- $\beta$ 方法对控制方程进行时间域离散。相关的离散方法和离散公式见文献[12]。

## 2 列车荷载及地基参数

本文采用有限元软件包FSSI-CAS 2D研究铁路交通中一个重要但是被关注不多的问题,即在列车行车荷载作用下,铁路路基和地基的动态响应,包括铁路路基、地基的位移、速度、加速度以及孔隙水压的变化过程。研究的概化计算模型(图1),计算域内地基范围选314m(L)×40m(H),铁路路基为双线路基,高度为3m,坡度角为45°;地基内部地下水的位置为地面以下2m,即 $z=38\text{m}$ 。本研究中假定有一辆列车正从左侧通过,并施加相应的动力荷载(图2)。该列车荷载是基于汪杰等<sup>[13]</sup>的研究成果而设立的。汪杰等<sup>[13]</sup>通过建立列车荷载简化模型,在Matlab Simulink中仿真得到地铁列车荷载变化曲线,通过快速傅里叶变换分析列车荷载的频率成分,从而得到地铁列车荷载的模拟表达式。

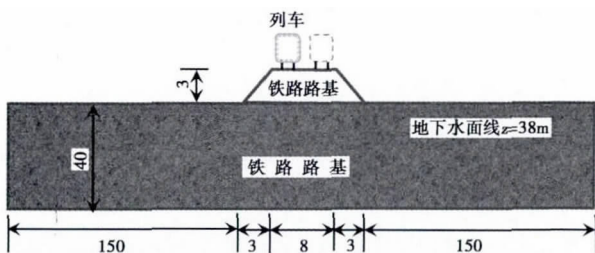


图1 研究列车行车荷载作用下铁路路基、地基动态反应的概化模型(单位:m)

Fig. 1 Computation set-up of railway foundation

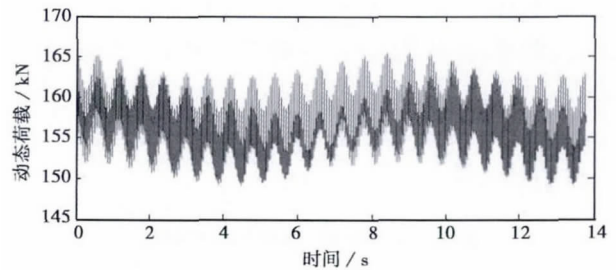


图2 列车通过时施加给铁轨的的竖向动态荷载

Fig. 2 Vertical dynamic loading induced by train when running on the foundation

列车荷载的变化范围为148~166kN(图2),与张昀青等<sup>[14]</sup>的仿真结果一致,并且与黄耿彩<sup>[15]</sup>的实测加速度结果控制在一个合适的误差范围以内。这表明本文所用的列车行车荷载能够合理地反映列车的荷载变化激振过程。

## 3 结果分析

针对图1所示的计算概化模型,对计算域进行有限元网格划分,采用4节点等参单元划分,共计近14000个单元,28500个节点。在单元划分时,在路基及其下方的部位,单元划分更密。7个监测点A( $x=157\text{m}, z=43\text{m}$ ),B( $x=157\text{m}, z=41.5\text{m}$ ),C( $x=157\text{m}, z=40\text{m}$ ),D( $x=157\text{m}, z=30\text{m}$ ),E( $x=157\text{m}, z=20\text{m}$ ),F( $x=100\text{m}, z=30\text{m}$ ),G( $x=100\text{m}, z=20\text{m}$ )设置在典型位置上,监测和记录列车行车荷载作用下铁路路基和地基的动态反应(图3)。列车动态荷载施加在路基顶部的左侧(即假定列车正从左侧车道通过)。由于列车通过时,双轨都将施加荷载给路基,所以计算中施加双荷载,作用点间距为我国列车轨道的标准间距1450mm。

由于地下水面线在地面以下2m位置,所以铁路路基存在饱和带和非饱和带。计算中分别给路

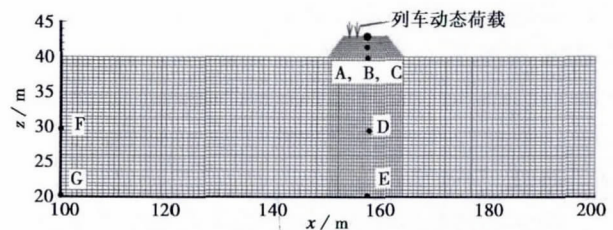


图3 计算所用的有限元网格系统

(注:只显示了100~200m范围内的网格)

Fig. 3 FEM mesh system used in computation

(Noted: only the zone in the range 100~200m is shown)

基、非饱和带和饱和带赋参数,包括弹性模量,泊松比,孔隙率,饱和度、渗透系数等(表1)。所施加的边界条件是吸收边界,即在左右两侧,底边界吸收列车通过时的激振荷载所传输到边界的振动能量,防止振动波反射。

表1 铁路路基、地基的计算参数

Table 1 Parameters for railway foundation in computation

|                        | 路基                   | 地基非饱和带               | 地基饱和带                |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 弹性模量/MPa               | 8000                 | 10000                | 10000                |
| 泊松比                    | 0.3333               | 0.33333              | 0.3333               |
| 孔隙率/n                  | 0.23                 | 0.25                 | 0.25                 |
| 饱和度/%                  | 10                   | 15                   | 98                   |
| 渗透系数/m·s <sup>-1</sup> | 1.0×10 <sup>-7</sup> | 1.0×10 <sup>-6</sup> | 1.0×10 <sup>-6</sup> |

### 3.1 地基初始固结

在实际铁路交通工程中,铁路地基和路基在建设后需要经历一个固结过程,以达到一个新的平衡状态。在该新的平衡状态中,没有超孔隙压,路基下面的地基中,有效应力因为加载而出现大幅度上升。这一固结平衡状态应首先确定,之后的动态计算应以该固结状态为初始条件。这样能使计算模拟过程更真实地接近实际。

从铁路路基修建后,路基和地基内的孔隙压力、有效应力的分布图(图4)可以看出,计算域范围内孔隙压力成层状分布,表明没有超孔隙压存在,地基已经完全固结。并且地下水面线以上部位的非饱和带和路基内都是孔隙负压区。这是非饱和带内存在毛细带水和表面张力的结果。有限元程序包FSSI-CAS 2D能很好地捕捉到这一非饱和带内特有的现象。

在x=157m位置上,沿深度方向上的孔隙压力的分布情况(图5)表明,在地下水位线以下,孔隙压力呈线性分布,并且满足 $\gamma_w = 9810\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 的规律。在地下水面线以上,存在负压区,最大负压在路基和地基的界面上,负压力的分布斜率也是 $\gamma_w = 9810\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。同时在铁路路基内也是负压区,但是负压是线性减少的,到路基顶面压力为大气压,认为是0。

图4还清楚地显示,在铁路路基建设完后,路基的压重使其下面地基内部的有效应力大幅度增加,而且存在较大的剪切应力,可达25kPa。这种影响只在路基附件区域存在,在远离路基的部位,路基建设的影响逐渐削弱,以致可忽略不计。

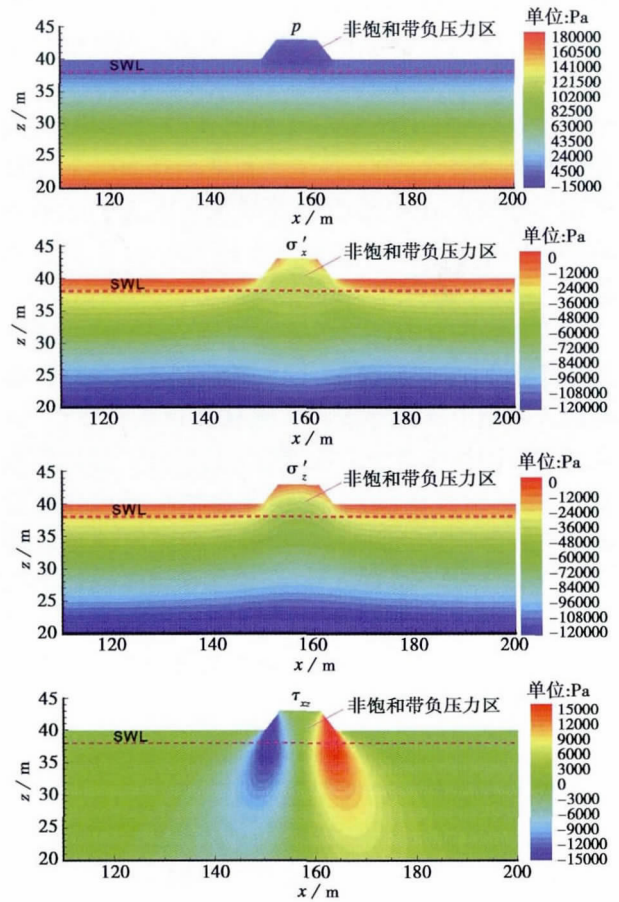


图4 固结状态中路基、地基内的孔压、有效应力分布  
SWL: Static Water Level

Fig. 4 Distribution of pore pressure, effective stresses in railway foundation at final consolidation status

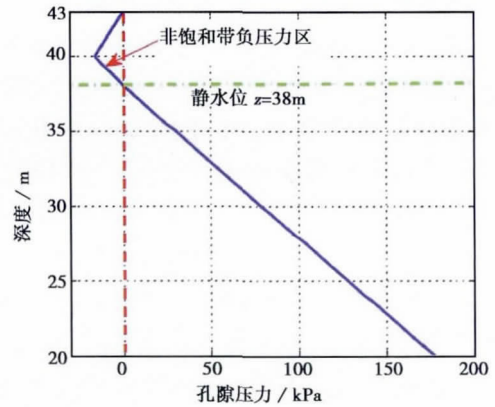


图5 孔隙压力沿深度方向分布(x=157m)

Fig. 5 Vertical distribution of pore pressure on x=157m

对铁路路基建设完工后,引起的地基土内部的水平、竖直位移场分布,以及路基本身的沉降量进行研究作图(图6)显示,铁路路基的建设使地基土向两侧运移,但是量级很小,最大只有2mm。然而竖向位移以及路基的沉降却非常大,达到10cm,且铁

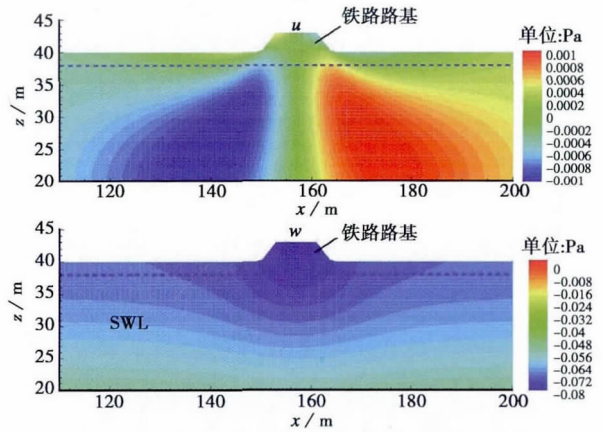


图6 完全固结后, 铁路路基建设引起的地基内的位移场分布  
Fig. 6 Distribution of displacement in railway foundation at final consolidation status

路路基基本上是整体沉降, 没有不均匀沉降发生。

这里需要说明的是, 由于位移场分布和沉降量在很大程度上取决于土的物理性能参数, 如弹性模量, 泊松比, 孔隙率等, 还有铁路路基的形状、所用材料的重度, 所以这里所提到水平位移和沉降量的量级仅是个例。对于其他案例, 需要具体计算才能获知。对于有效应力场的分布, 情况亦是如此。

### 3.2 地基动态反应

#### 3.2.1 位移、速度、加速度

铁路路建成后的固结平衡状态确定后, 以该平衡状态为初始条件, 采用有限元程序包 FSSI-CAS 2D 为研究工具, 计算研究铁路路基、地基系统在图 2 所示的列车行车荷载激振下的动态响应。图 7 显示的是路基顶部中心点 A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ ) 处在列车通过过程中的位移时程曲线。图 7 表明 A 点处的水平位移变化频率高, 但是振动幅度很小, 只有约  $0.2\text{mm}$ ; 然而, 竖向位移却截然不同, 振动频率低, 但是幅度却很大, 达到约  $2\text{mm}$ 。图 8 是路基顶部中心点 A 处的速度时程曲线。从图 8 中也可以看到与位移响应相类似的现象, 即水平速度变化频率高, 幅度小, 而竖向速度频率低, 振动幅度大, 可达  $30\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

从路基顶部中心点 A 处的加速度时程曲线 (图 9) 可以发现水平和竖向加速度的动态变化没有大的区别。它们的变化频率都很高, 幅值也类似, 大约为  $0.5\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。从图 7, 图 8, 图 9 的数值监测结果可知, 列车通过时, 路基发生了剧烈的振动, 其表面的最大竖向振幅可达  $2\text{mm}$ , 水平和竖向加速度达到

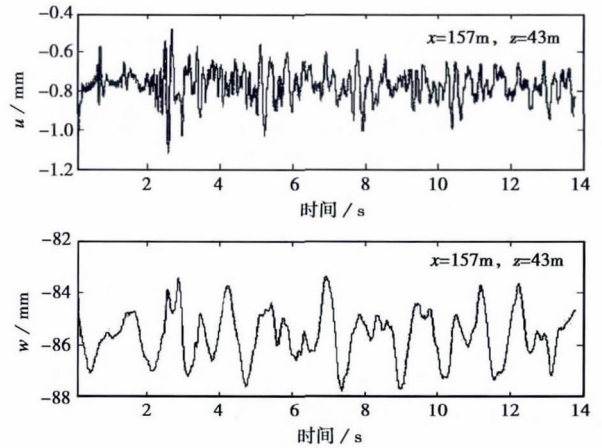


图7 路基顶部中心点 A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ ) 处的位移时程曲线

Fig. 7 Time history of displacement at top center of foundation A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ )

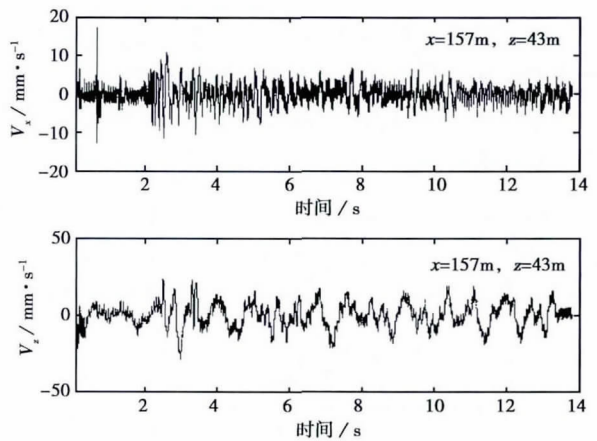


图8 路基顶部中心点 A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ ) 处的速度时程曲线

Fig. 8 Time history of velocity at top center of foundation A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ )

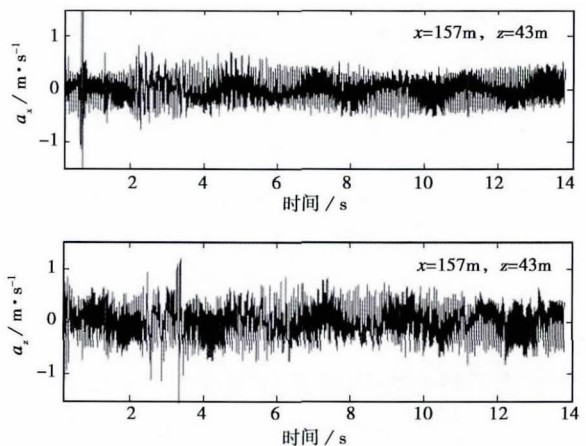


图9 路基顶部中心点 A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ ) 处的加速度时程曲线

Fig. 9 Time history of acceleration at top center of foundation A ( $x = 157\text{m}, z = 43\text{m}$ )

1.0m·s<sup>-2</sup>。过大的路基顶面竖向振幅可能会影响列车的通行安全和乘车的舒适性,所以本文的研究方法、工具和计算案例可为工程中评价列车通过的安全性、乘车的舒适性提供研究参考。

以上的讨论分析是基于铁路路基的动力反应,对于铁路路基下方的地基的动力反应,也是路基-地基系统动力反应的重要组成部分。由铁路路基的动力反应知道,水平位移、速度对列车行车动力响应往往是频率高、幅值小。相对水平响应,竖向动力响应幅值要大得多,是重点关注的对象。本文以下部分只分析竖向动态响应。通过对地基内部点 D(x=157m, z=30m) 处的竖向位移、速度和加速度时程曲线(图10)与图7,图8,图9中A点处的竖向动力响应对比发现,位于路基正下方10m处的D点处的竖向位移和速度响应和位于路基顶面的A点处的响应在幅值和频率上并没有显著区别;但是竖向加速度的幅值却有所减小,只有约0.25m·s<sup>-2</sup>。表明列车行车动荷载的影响在路基以下10m范围内都没有显著衰减。

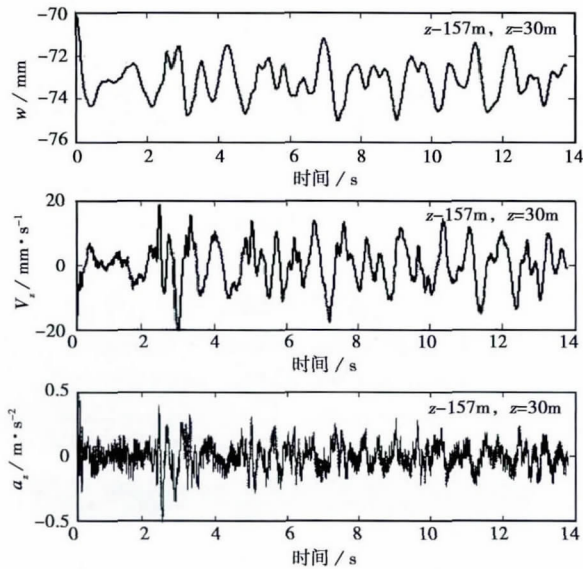


图10 地基内部点 D(x=157m, z=30m) 处的竖向位移、速度和加速度时程曲线

Fig. 10 Time history of vertical displacement, velocity and acceleration at D(x=157m, z=30m)

作出了路基左侧数值监测点 F(x=100m, z=30m) 处的竖向位移、速度和加速度时程曲线(图11)。F点与路基正下方,相同高程的D点相距57m;该点的动态响应可以用来研究地基对列车行车荷载的动态响应在水平方向上的衰减情况。从图11中可以看出,竖向位移幅值大约为1mm,竖向速

度的幅值一般为10~15mm·s<sup>-1</sup>,竖向加速度一般为0.1~0.2m·s<sup>-2</sup>。与图10中D点处的动力响应对比发现,在水平方向上,从D点到F点,地基对列车行车荷载的动态响应有显著的衰减。

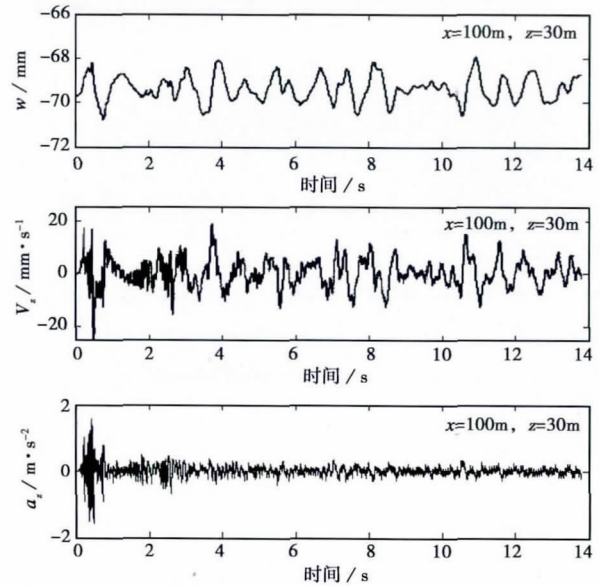


图11 地基内部点 F(x=100m, z=30m) 处的竖向位移、速度和加速度时程曲线

Fig. 11 Time history of vertical displacement, velocity and acceleration at F(x=100m, z=30m)

### 3.2.2 孔隙压力

作为富水地基,在列车行车荷载作用下,其内部的孔隙压力的响应需要予以关注。在 FSSI-CAS 2D 确定的地基、路基内部点 B, C, D, E(x=157m) 处的孔隙压力变化时程曲线(图12)上, B, C 两点在铁路路基非饱和带内, D, E 处地基地下水位线以下。图12给出了一个非常有意义的结果,即非饱和带内的孔隙水在列车动力作用下,其压力维持不变,一直保持着由表面张力引起的负孔隙水压力。这也说明在列车行车荷载作用下,路基、地基非饱和带内的土颗粒没有发生大的相对位移;非饱和带内土颗粒间引起表面张力的孔隙水的表面形态没有因土颗粒微小振动而发生大的变化。然而在地下水线以下,孔隙压力由水的重力引起,土颗粒的微小振动会引起孔隙压力的显著变化。由于本文假定铁路路基和地基均很密实,列车通过时不足以引起永久的塑性体积变形,所以不出现孔隙压力的持续上升导致地基液化。

图13显示的是路基左侧,与点D, E同高程的F, G点处的孔隙压力对列车行车动荷载的响应。与

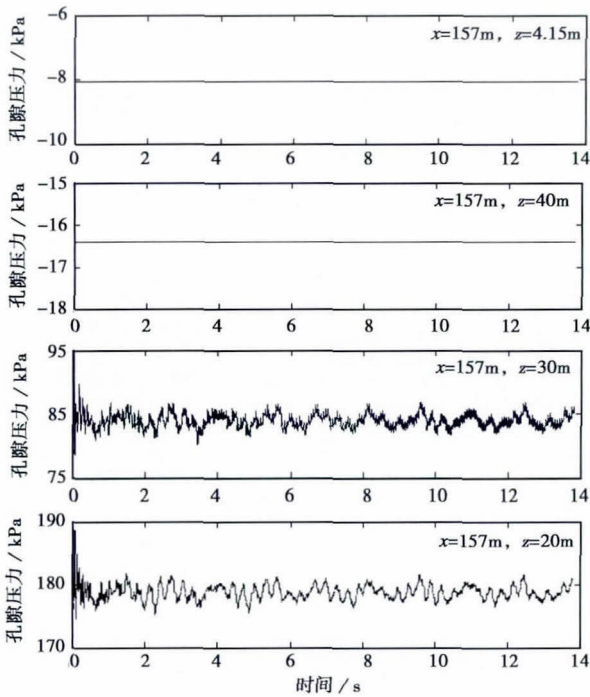


图 12 地基、路基内点 B、C、D、E ( $x=157\text{m}$ ) 处的孔隙压力时程曲线

Fig. 12 Time history of pore pressure at B, C, D, E ( $x=157\text{m}$ )

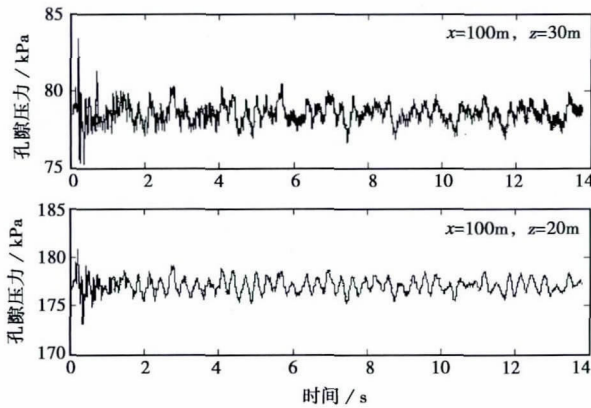


图 13 地基、路基内点 F、G ( $x=100\text{m}$ ) 处的孔隙压力时程曲线

Fig. 13 Time history of pore pressure at F, G ( $x=100\text{m}$ )

图 12 中点 D、E 处的孔隙压响应相比,发现 F、G 处的孔隙压力的变化幅度减小了很多。这一结果说明孔隙压力在离路基越近的区域,变化幅度越大,越远变化幅度越小。究其原因,作者认为这是由于离铁路路基近的区域,火车通过时引起的土颗粒相对位移大,从而导致孔隙压力变化幅度大。远离路基的区域,列车的动力荷载影响慢慢衰减,土颗粒间的相对位移小,从而引起的孔隙压力变化幅度相对就小。

### 3.2.3 应力、应变关系

这里选择两个典型点 D (路基正下方) 和 F (路

基左侧) 作为代表性点来研究列车行车荷载作用下的地基土的应力路径和应力-应变关系曲线 (图 14), 该图显示的是 D 点和 F 点在列车行车荷载作用下的应力路径。由于 D 点处于铁路路基的正下方,受路基的压重作用,其平均围压和偏应力均较 F 点的大。从图 14 中可以看出,地基内部的应力路径是沿某特定的轨迹或在某特定的区域无规则往复变化,并没有发生明显的不可恢复的渐进式移动。这是密实土的典型应力路径。对于松散土,在动荷载作用下,其应力路径是要向应力零点发生不可恢复的移动;这个过程伴随着孔隙压上升,地基土软化。所以松散土不是作为铁路地基的理想材料。

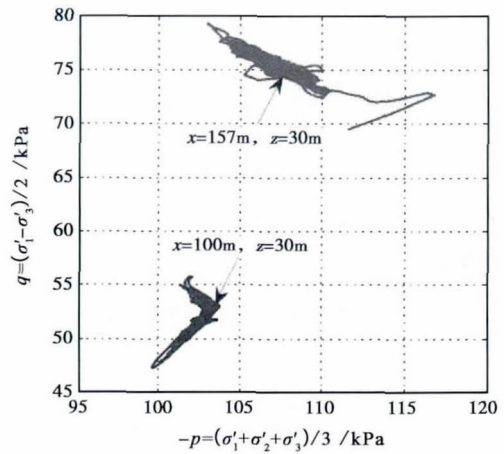


图 14 典型位置点 D 和 F 处的应力路径

Fig. 14 Stress path at typical position D and F

在典型点 D 和 F 处列车通过过程中的剪应力-剪应变关系变化过程 (图 15) 图中可以直接看出在整个列车通过过程中,剪应力和剪应变基本保持着线性关系,剪切模量大约为 80MPa。同时需要说明的是,这种线性的本构关系也是密实的地基土才具备的。对于松散土,其剪应力-剪应变关系是复杂的非线性关系。

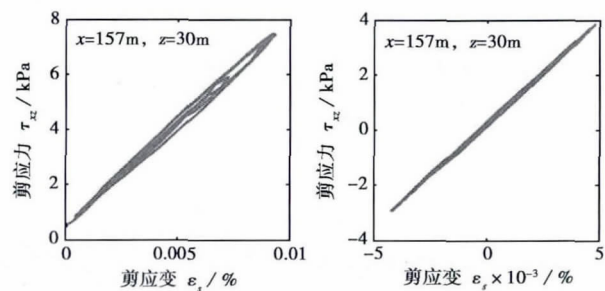


图 15 典型位置点 D 和 F 处的剪应力-剪应变曲线

Fig. 15 Shear stress-shear strain curve at typical position D and F

3.3.4 应力、孔隙压分布

以上的分析都是基于铁路路基-地基系统内部的几个典型点上数值监测结果进行的,对于整个路基-地基系统对列车行车荷载的动态响应不具有全局上的把握。这里将分析某一时刻整个路基-地基系统对列车行车荷载的动态响应的分布。

从典型时刻  $t=6.0s$  铁路路基、地基内的列车行车荷载导致的动态孔隙压力、有效应力分布图(图16)可以清楚地看出,在路基和地基非饱和带内( $z \geq 38m$ ),行车荷载引起的孔隙压力均为0,这与之前的分析结果一致。在路基的正下方的富水地基内,孔隙压力有大幅度上升;然而在路基两侧的地基内,出现了负的动态孔隙压力。究其原因,作者认为出现这种现象是因为在列车重力和动态荷载作用下,路基下方的地基土受到压缩,而受到变形协调的控制,路基两侧地基土中出现了拉伸变形;受到压缩的区域孔隙压上升,受到拉伸的区域出现孔隙压

减少,从而导致了这种孔压分布的现象。由于本文假定列车从左侧通过,所以孔压上升区并非在路基中下方,而是路基下方偏左的区域。

同样是由于上述原因,列车通过时路基下方区域出现了很大的压性竖向有效压应力  $\sigma'_z$  (以负为压),而在路基两侧的地基内,则出现了拉伸的  $\sigma'_x$ 。对于水平向有效应力  $\sigma'_x$ ,其分布在路基两侧的地基中与  $\sigma'_z$  类似,即为拉伸应力;然而在路基下方的地基中,与  $\sigma'_z$  的分布却截然不同,出现了很大的水平拉伸应力集中区。原因同样也与地基的变形有关。在火车和路基的压重作用下,路基下方的地基土有向两侧运移的趋势,从而导致路基下方地基出现水平方向拉伸应力区。但是这种向两侧运移的趋势却不能改变竖向有效压应力  $\sigma'_z$  的压缩性质。由于火车自身的重力作用,在路基的左侧区域引起了很大的水平和竖向的压应力集中区。图16中还显示在路基左侧及其下方的地基中,列车的通过会造成两个对称的剪应力集中区,这两个剪应力集中区内,剪应力量级对称,但方向相反。由于列车靠左侧通行,图16中  $\sigma'_z$  的分布显示左侧的应力扩展角要明显小于右侧的应力扩展角。

4 结论

本文以 Biot 动态方程为控制方程,以有限元程序包 FSSI-CAS 2D 为数值计算工具,研究了铁路路基、富水砂性地基在列车行车动荷载作用下的动态响应问题。本文所提供的研究方法、工具和计算案例可为铁路交通工程中评价列车通过的安全性、乘车的舒适性提供研究参考。通过对数值计算结果的深入分析,得到了以下认识:

(1) 在铁路路基完工后,路基-地基系统发生协调变形,以达到新的平衡固结状态。在这一过程中,路基发生整体的沉降,同时地基土向两侧运移。达到新的平衡状态后,路基和地基内的非饱和带内出现孔隙负压。最大孔隙负压发生在路基和地基土的界面处。孔隙负压力的梯度为  $-9.81kPa \cdot m^{-1}$ 。该平衡状态应该作为后续动态响应分析的初始条件。

(2) 当列车通过计算截面时,路基和地基系统会发生剧烈的动态响应。数值结果表明路基顶部的竖向位移的振幅可达  $2mm$ ,竖向速度达  $30mm \cdot s^{-1}$ ,竖向加速度达  $1.0m \cdot s^{-2}$ ,并且竖向响应的频率都很低。与之相反,水平方向的响应幅度小,频率高。表

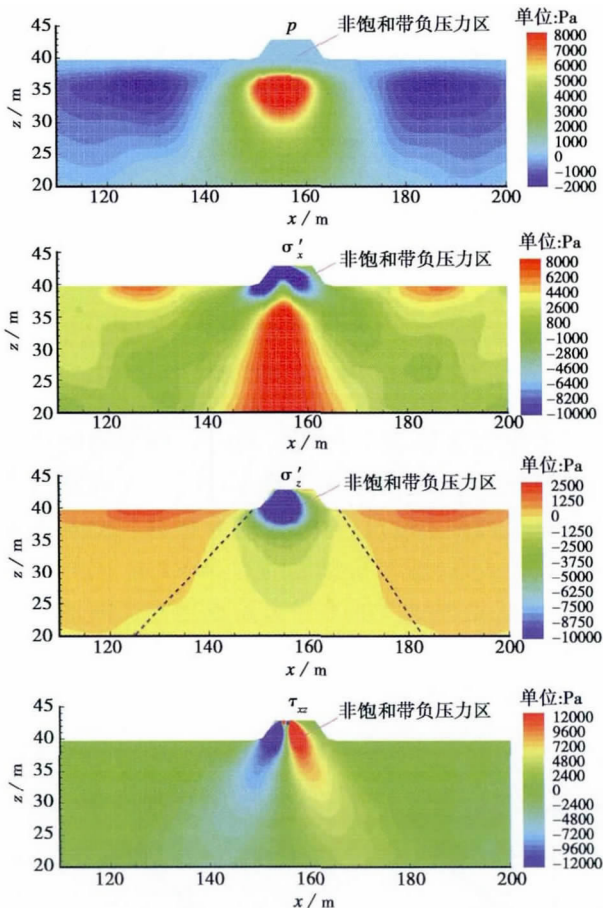


图16 典型时刻  $t=6.0s$  铁路路基、地基内的列车行车荷载导致的动态孔隙压力(不包括初始孔隙压力)、有效应力分布图

Fig. 16 Distribution of dynamic pore pressure, effective stresses in railway foundation induced by train running loading at typical time  $t=6.0s$



明路基-地基系统的动态响应以竖向为主。分析结果还表明地基内的竖向动态响应在路基下方 10m 范围内没有发生显著的衰减。在水平方向上,列车通过时的激振在地基土内存在衰减,但是衰减的幅度与距离密切相关。

(3) 计算结果表明列车通过路基时,非饱和带内的负孔隙水压不发生变化,而地下水位线以下部位的孔隙水压力发生振荡。这说明非饱和带内土颗粒间因表面张力而引起负压力的孔隙水的界面形态在列车激振下没有发生显著变化。在地下水面以下区域,孔隙水压的振荡幅度与距路基的距离成正相关的关系。

(4) 典型点上应力路径表明地基内部的应力路径是沿某特定的轨迹或在某特定的区域内无规则往复变化,并没有发生明显的不可恢复的渐进式移动。并且剪应力-剪应变呈线性关系。

(5) 典型时刻  $t=6.0\text{s}$  铁路路基、地基内的列车行车荷载导致的动态孔隙压力、有效应力分布图表明路基下方区域孔隙压力上升,而路基两侧的地基内孔隙压力出现了下降。列车通过时,路基-地基系统内出现了两个剪应力集中区。由于列车本身的重量,列车通过时在路基下方的地基内出现了拉伸的水平有效应力和压缩的竖向有效应力。由于变形协调的控制,路基两侧的上层地基内均出现了拉伸的水平和竖向有效应力。由于列车从左侧通过,导致了地基内左侧的应力扩展角要小于右侧的应力扩展角。

## 参 考 文 献

- [1] 孙宏磊,蔡袁强,陈成振. 列车荷载作用下路基系统及饱和弹性半空间上覆盖土层的动力响应[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 922~928.  
Sun Honglei, Cai Yuanqiang, Chen Chengzhen. Dynamic response of railways on layered half-space subjected to moving train load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 922~928.
- [2] 叶俊能. 列车荷载下轨道系统-层状横观各向同性饱和地基动力响应[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1597~1604.  
Ye Junneng. Dynamic response of track system-layered transversely isotropic saturated subgrade to train loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1597~1604.
- [3] 陈建国,夏禾,肖军华,等. 列车运行对周围地面振动影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3113~3118.  
Chen Jianguo, Xia He, Xiao Junhua, et al. Experimental study of ground vibrations induced by moving train[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3113~3118.
- [4] 李双洋,张明义,张淑娟,等. 列车荷载下青藏铁路冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 860~867.  
Li Shuangyang, Zhang Mingyi, Zhang Shujuan, et al. Analysis of the dynamic response of Qinghai-Tibetan railway embankment in permafrost regions under train load[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 860~867.
- [5] 陈建国,肖军华,李前进,等. 提速列车荷载作用下铁路路基动力特性的研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1944~1950.  
Chen Jianguo, Xiao Junhua, Li Qianjin, et al. Dynamic responses of existing-railway subgrade with train speed increasing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 1944~1950.
- [6] Ye J H. Numerical analysis of wave-seabed-breakwater interactions [Doctorate Thesis] [D]. Dundee, UK: University of Dundee, 2012.
- [7] Ye J H. Numerical modelling of consolidation of 2-D porous unsaturated seabed under a composite breakwater[J]. Mechanika, 2012, 18(4): 373~379.
- [8] Ye J H, Jeng D S, Chan A H C. Consolidation and dynamics of 3D unsaturated porous seabed under rigid caisson breakwater loaded by hydrostatic pressure and wave [J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 55(8): 2362~2376.
- [9] 张燕,纪洪广,叶剑红. 扰动岩质边坡强震作用下动力响应分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增2): 304~311.  
Zhang Yan, Ji Hongguang, Ye Jianhong. Dynamic response analysis of disturbed rock slope under strong earthquake loading [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S2): 304~311.
- [10] Ye J H, Jeng D-S, Wang R, et al. Validation of a 2-D semi-coupled numerical model for fluid-structure-seabed interaction [J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 42: 333~357.
- [11] Ye J H, Jeng D S, Liu P L F, et al. Breaking wave-induced response of composite breakwater and liquefaction in seabed foundation [J]. Coastal Engineering, 2014, 85: 72~86.
- [12] Ye J H, Jeng D S. Effects of bottom shear stresses on the wave-induced dynamic response in a porous seabed: PORO-WSSI (Shear) model [J]. Acta Mechanica Sinica, 2011, 27(6): 898~911.
- [13] 汪杰,宋瑞刚,袁天辰,等. 地铁列车荷载的仿真模拟[J]. 上海工程技术大学学报, 2011, 25(3): 213~216.  
Wang Jie, Song Ruigang, Yuan Tianchen, et al. Simulation of metro train load [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2011, 25(3): 213~216.
- [14] 张昀青,侯永会,杨竹林. 轨道结构参数对轮轨作用力的影响分析[J]. 河北交通科技, 2005, 2(2): 1~3.  
Zhang Yunqing, Hou Yonghui, Yang Zhulin. Effect analysis of track structure to the wheel-rail for CE [J]. Hebei Jiaotong Science and Technology, 2005, 2(2): 1~3.
- [15] 黄耿彩. 受扰动地铁隧道土体在列车周期性振动荷载下位移规律的研究 [硕士学位论文] [D]. 上海: 同济大学, 2007.  
Huang Gengcai. Study on displacement law under periodic load induced by train on the turbulent soil [Thesis of Master] [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.