

# 地铁浮置板轨道过渡段参数对隧道和土体振动的影响

张小会<sup>1,2</sup>, 张泽宇<sup>1,2</sup>, 狄宏规<sup>1,2</sup>, 何超<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为研究地铁车辆通过浮置板轨道过渡段时隧道和土体的动力响应规律,提出了时域高效计算的隧道-饱和土体半解析环状层单元,结合车辆-轨道动力学,建立了车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体系统耦合动力计算方法,研究了浮置板轨道过渡段长度、钢弹簧刚度等参数对隧道振动加速度、土体正应力和孔隙水压力的影响。结果表明,过渡段参数设计需重点关注2个刚度突变位置的动力响应,采用钢弹簧刚度渐变方案时,3个动力响应指标分别降低60%、15%和25%。

**关键词:** 地铁隧道;浮置板过渡段;饱和土;环状层单元

中图分类号: U211.3

文献标志码: A

established. The effects of the parameters of the floating slab transition section (i.e., the length and the stiffness of the steel spring) on the tunnel acceleration, soil normal stress and pore water pressure were studied. The results show that the parameter design of the floating slab track transition section needs to focus the dynamic responses at the two positions of sudden changes in stiffness of the transition section. The scheme of the gradient in steel spring stiffness can reduce the three evaluation indexes of the dynamic response by 60%, 15% and 25% respectively.

**Key words:** subway tunnel; floating slab track transition section; saturated soil; ring layered element

## Effect of Floating Slab Track Transition Section Parameters on Dynamic Responses of Subway Tunnel-Soil System

ZHANG Xiaohui<sup>1,2</sup>, ZHANG Zeyu<sup>1,2</sup>, DI Honggui<sup>1,2</sup>, HE Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To study the dynamic response of the tunnel and soil when the subway train passes the transition section of the floating slab track, this paper proposed a semi-analytical ring layered element for the efficient calculation of the tunnel-saturated soil vibration in time domain. Taking into consideration of the train-track model, the coupled dynamic model of the train-floating slab track transition section-tunnel-soil system was finally

地铁浮置板轨道结构具有优越的低频减振性能,广泛应用于振动最为敏感、减振难度最大的区段,例如上海轨道交通7号线浮置板轨道长度占线路总长的比例超过10%<sup>[1]</sup>。相比传统整体道床轨道而言,浮置板轨道具有较小的支撑刚度,因而在工程实践中,通常在浮置板轨道区段的两端采取增大钢弹簧刚度或减小分布间距的手段,形成浮置板轨道过渡段,保证列车在两者之间的平稳过渡。然而既有研究<sup>[2-7]</sup>表明,由于浮置板轨道区段、过渡段和整体道床区段之间的支撑刚度依然存在阶梯式变化,车辆在通过浮置板轨道过渡段时依然会产生较大的轮轨冲击,增加过渡段处隧道和土体的动力响应。在长期循环荷载的作用下,过渡段处隧道结构可能会产生不均匀沉降病害,进而恶化轮轨关系,形成恶性循环。

国内外众多学者开展了地铁浮置板轨道过渡段动力响应的研究,蔡成标等<sup>[3]</sup>建立了车辆-浮置板轨

收稿日期: 2020-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(5171101316)

第一作者: 张小会(1988—),男,助理教授,工学博士,主要研究方向为隧道-土体耦合动力分析。

E-mail: 1988xiaohui@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

道耦合动力学模型,研究了过渡段钢弹簧间距和刚度变化对车辆和钢轨动力响应的影响。刘笑凯等<sup>[4]</sup>和王平<sup>[5]</sup>分别使用弹性壳单元和板单元模拟浮置板结构,研究了不同设计的过渡段对钢轨挠度和车体加速度的影响。米洋<sup>[6]</sup>和田卫建<sup>[7]</sup>建立了浮置板过渡段垂向振动分析的有限元模型,研究了过渡段刚度分区变化的最优设置。Li等<sup>[8]</sup>和Jang等<sup>[9]</sup>则建立了二维车辆-浮置板耦合分析方法,用于分析浮置板过渡段的动力响应规律。然而上述文献均忽略了地铁隧道和土体对系统振动的影响,分析指标也仅限于车辆和轨道系统,无法直观评价浮置板过渡段的环境振动特征以及隧道、土体的车致动力响应。

在隧道-土体的车致动力响应研究方面,Hussein等<sup>[10-11]</sup>将隧道视为埋置于弹性空间中的圆柱壳体,使用周期性双层梁单元模拟钢轨和浮置板结构,研究了长板式和短板式浮置板轨道的环境振动响应。Lombaert等<sup>[12]</sup>和Gupta等<sup>[13]</sup>建立了三维隧道-饱和土体耦合动力分析方法,分别考虑了隧道、土体和浮置板结构在纵向上的周期性特征。上述模型较为精细地模拟了轨道、隧道和土体的三维空间特性,但是为了保证模型的计算效率,计算均在频率-波数域内完成,无法考虑浮置板过渡段刚度在线路纵向的非线性变化特征。

基于上述考虑,本文建立了车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体耦合动力分析的时域半解析方法,使用多刚体动力学计算车辆的动力响应,使用空间梁单元模拟钢轨和轨道板结构,将地铁隧道视为弹性圆柱壳,将隧道周边土体视为饱和多孔介质,并使用该模型研究车辆通过浮置板轨道过渡段时隧道和土体的动力响应特征。

## 1 车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体耦合动力模型及验证

为分析地铁车辆通过浮置板过渡段时隧道和土体的动力响应,建立了时域内车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体耦合动力计算模型,如图1所示,模型包括车辆子结构、浮置板轨道过渡段子结构、隧道子结构、土体子结构以及子结构之间的动力相互作用。

### 1.1 隧道-饱和土体的分向半解析方法

软土地区地铁盾构隧道通常埋置于饱和地层之中,根据Biot双相介质理论<sup>[14]</sup>,饱和土体的U-W型波动方程如式(1)所示,固相和液相的本构方程如式

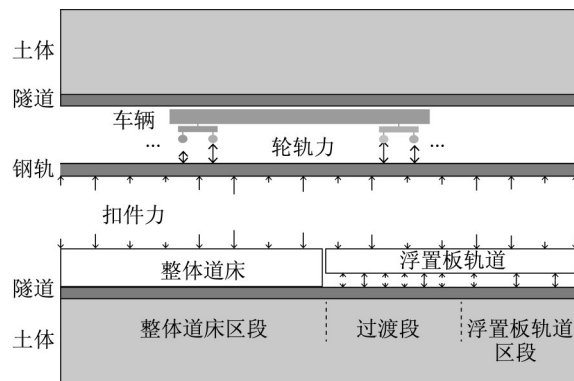


图1 车辆-过渡段-隧道-土体耦合动力分析模型

Fig. 1 Dynamic model of coupled train-track-tunnel-soil system

(2)所示:

$$\begin{cases} \mu \nabla^2 U + \nabla \left[ \left( \lambda + \mu + \frac{Q^2}{R} \right) e + Q \theta_w \right] = \\ (1 - \beta) \rho_s \ddot{U} + \frac{\eta \beta^2}{k} (\dot{U} - \dot{W}) \\ \nabla (Qe + R\theta_w) = \beta \rho_l \ddot{W} - \\ \frac{\eta \beta^2}{k} (\dot{U} - \dot{W}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \left( \lambda + \frac{Q^2}{R} \right) e \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} + Q \theta_w \\ \sigma_i = -\beta P_i = Qe + R\theta_w \end{cases} \quad (2)$$

其中, $U$ 和 $W$ 分别为固相和液相的位移向量, $\rho_s$ 和 $\rho_l$ 分别为固相和液相的质量密度, $e$ 和 $\theta_w$ 分别为固相和液相的体积应变, $\beta$ 为孔隙率, $\lambda$ 和 $\mu$ 为固相的弹性Lame常数, $\eta$ 为液相的绝对黏度, $k$ 为渗透率, $Q$ 和 $R$ 分别为液相的压缩性常数和双相体积变化的耦合系数, $\sigma_{ij}$ 和 $\sigma_i$ 分别为作用于固相和液相的应力, $P_i$ 为作用于单位体积上的孔隙压力。

为求解饱和土体的波动方程,将盾构隧道周边土体视为有限长饱和中空圆柱实体,如图2所示,饱和土体单元长度为 $L$ ,采用分向半解析法求解,即:土体动力响应在纵向和周向的分布特征通过解析的方法考虑,沿径向离散为 $n$ 个饱和实体环状层单元。与传统有限元方法相比,本文模型极大缩减了单元数目,计算效率得到大幅提高。

对于每个饱和土体单元而言,其长度为 $L$ ,内径和外径分别为 $R_1$ 和 $R_2$ ,假定单元内外表面之间的动力响应线性分布,施加的外荷载沿径向分布,那么饱和土体单元各向位移分量可表达为式(3)的形式:

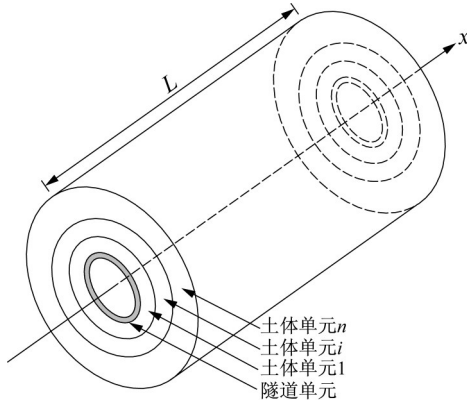


图2 隧道-土体模型:模型划分、主方向和相应的位移分量  
Fig. 2 Tunnel-saturated soil coupled model: model outline, principle directions, and corresponding displacement components

$$\{U \ W\}^T = \{U_z \ U_\theta \ U_r \ W_z \ W_\theta \ W_r\}^T = \begin{cases} \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} Z'_m(z) \cos n\theta [(1-\xi)T_{smmz}^{\text{in}}(t) + \xi T_{smmz}^{\text{out}}(t)] \\ \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} Z_m(z) \sin n\theta [(1-\xi)T_{smm\theta}^{\text{in}}(t) + \xi T_{smm\theta}^{\text{out}}(t)] \\ \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} Z_m(z) \cos n\theta [(1-\xi)T_{smmr}^{\text{in}}(t) + \xi T_{smmr}^{\text{out}}(t)] \\ \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} Z'_m(z) \cos n\theta [(1-\xi)T_{wmmz}^{\text{in}}(t) + \xi T_{wmmz}^{\text{out}}(t)] \\ \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} Z_m(z) \sin n\theta [(1-\xi)T_{wmm\theta}^{\text{in}}(t) + \xi T_{wmm\theta}^{\text{out}}(t)] \\ \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} Z_m(z) \cos n\theta [(1-\xi)T_{wmmr}^{\text{in}}(t) + \xi T_{wmmr}^{\text{out}}(t)] \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $U_z$ 、 $U_\theta$ 、 $U_r$ 、 $W_z$ 、 $W_\theta$ 和  $W_r$  分别为单元土骨架和孔隙水沿  $z$ 、 $\theta$  和  $r$  方向的位移,  $T_{smmz}^{\text{in}}(t)$  和  $T_{wmmz}^{\text{in}}(t)$  分别为单元内表面土骨架和孔隙水在  $i(i=z, \theta, r)$  方向的广义位移,  $T_{smmz}^{\text{out}}(t)$  和  $T_{wmmz}^{\text{out}}(t)$  分别为单元外表面土骨架和孔隙水在  $i(i=z, \theta, r)$  方向的广义位移向量,  $Z_m(z)$  为饱和土体单元沿纵向的模式振型,  $N_z$  和  $N_\theta$  分别为单元纵向和周向的模式阶数,  $\xi$  为径向线性分布系数,  $\xi = (r - R_1)/(R_2 - R_1)$ 。

将式(3)进一步化简后可获得包含单元纵向和周向模式的半解析形函数  $N$ :

$$\{U_z \ U_\theta \ U_r \ W_z \ W_\theta \ W_r\}^T = \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} N_{nm} \delta_{mm} = \{N\delta_s \ N\delta_w\}^T \quad (4)$$

其中:  $\delta_s$  和  $\delta_w$  分别为单元土骨架和孔隙水的广义位

移向量。

将式(3)代入柱坐标系下的几何方程,可获得包含单元纵向和周向模式的半解析应变矩阵  $B$ :

$$\{\epsilon\} = \sum_{m=1}^{N_z} \sum_{n=1}^{N_\theta} B_{nm} \delta_{mm} = \{B\delta_s \ B\delta_w\}^T \quad (5)$$

其中:  $\epsilon$  为单元的应变向量。将式(3)、式(4)和式(5)代入双相介质的本构方程,可得到双相介质波动方程的 Galerkin 弱式,如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} M_{es} & 0 \\ 0 & M_{ew} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_s \\ \ddot{\delta}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_e & -C_e \\ -C_e & C_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_s \\ \dot{\delta}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{es} & K_{esw} \\ K_{esw} & K_{ew} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_s \\ \delta_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{es} \\ F_{ew} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中参数表达式见式(7):

$$\begin{cases} M_{es} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} N^T (1-\beta) \rho_s N r dr d\theta dz \\ M_{ew} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} N^T \beta \rho_f N r dr d\theta dz \\ C_e = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} N^T \frac{\eta \beta^2}{k} N r dr d\theta dz \\ K_{es} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} B^T D_1 B r dr d\theta dz \\ K_{esw} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} B^T D_2 B r dr d\theta dz \\ K_{ew} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} B^T D_3 B r dr d\theta dz \\ F_{es} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} N^T q_s r dr d\theta dz \\ F_{ew} = \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} N^T q_w r dr d\theta dz \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $D_1$ 、 $D_2$ 和  $D_3$  为双相介质的弹性矩阵,其表达式见文献[15],  $q_s$  和  $q_w$  分别为作用于单元内任意点固相和液相的外力。

将半解析形函数  $N$ 、应变矩阵  $B$ 、弹性矩阵  $D_1$ 、 $D_2$ 和  $D_3$  分别代入式(7),利用振型函数和三角函数的正交性,可获得土体单元的单元刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵和外荷载向量,进而建立饱和土体半解析环状层单元关于广义位移的动力方程。

地铁隧道结构被视为均质的、各向同性的弹性圆柱壳体,其动力计算采用半解析壳单元理论,动力方程中质量矩阵、刚度矩阵和荷载向量组成见文献[16]。进一步考虑隧土交界面处位移协调,结合相邻土体单元的协调关系,进行隧道和饱和土体单元刚度矩阵的组装,获得隧道-饱和土体耦合动力方程。

## 1.2 耦合模型的求解和验证

地铁车辆、钢轨和浮置板过渡段的结构动力计算采用车辆-轨道垂向耦合动力学理论,车辆选取十



自由度模型,其自由度包括车体和转向架的沉浮和点头运动、轮对的沉浮运动等,为减小隧土单元规模,仅考虑一辆车运行的情况,其相关刚度矩阵、阻尼矩阵、质量矩阵和荷载向量组成见文献[3]。耦合模型中车轮与钢轨之间的接触关系采用赫兹非线性接触理论求解,钢轨和整体道床、浮置板之间通过扣件简化而成的离散弹簧-阻尼系统连接,浮置板和隧道之间则通过钢弹簧简化而成的离散弹簧传递力的作用,而整体道床与隧道之间则考虑位移连续性条件。在最外层饱和土体单元的外表面上施加半解析黏弹性边界,以降低截断边界对与计算结果的影响。最终建立车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体耦合动力模型,其方程如式(8)所示:

$$\begin{aligned} [M_{vts}] \{\ddot{\delta}_{vts}\} + [C_{vts}] \{\dot{\delta}_{vts}\} + \\ [K_{vts}] \{\delta_{vts}\} = \{F_{vts}\} \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $[M_{vts}]$ 、 $[C_{vts}]$ 、 $[K_{vts}]$ 和 $\{F_{vts}\}$ 分别为耦合系统的综合质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和荷载向量, $\{\ddot{\delta}_{vts}\}$ 、 $\{\dot{\delta}_{vts}\}$ 和 $\{\delta_{vts}\}$ 分别为耦合系统的广义加速度、广义速度和广义位移。

车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体动力方程的求解在时域内进行,可用于分析系统中存在的强非线性问题,数值积分格式采用翟婉明院士首次提出的新型快速数值积分方法(翟方法<sup>[17]</sup>),该方法经过长期的理论及实践证明其具有较高的稳定性和精度。使用MATLAB软件编程实现耦合计算方法的各项功能,研究地铁车辆通过浮置板过渡段时隧道-土体系统的动力响应。

为验证本文中提出的隧道-饱和土体耦合动力分析的分向半解析方法,使用文献[18]中提出的饱

和土体-隧道振动的PiP法进行对比,PiP模型在频率-波数域内分析,计算效率较高,但在处理诸如本文中浮置板过渡段的非线性问题时具有一定的局限性。前期试算结果表明,隧道周向模态阶数大于10、纵向模态阶数大于模型纵向长度时,数值结果趋于稳定。为进一步消除边界条件对计算结果的影响,使用本文模型进行分析时,选取隧土单元长度120m、最外层土体单元半径33m。对比验证的工况为在竖向集中单位简谐荷载作用下隧道和土体的动力响应,荷载频率为5Hz,隧道和饱和土体参数见表1和表2。

表1 隧道参数

Tab. 1 Parameters of tunnel

弹性模量/ Pa	泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	外径/m	厚度/m
5×10 <sup>10</sup>	0.3	2 500	6.2	0.35

图3为本文模型与PiP模型中隧道底部振动位移、隧土交界面处土体正应力和孔隙水压力沿隧道纵向的分布对比,由图可知,对于3个指标而言,本文模型与PiP模型无论在幅值还是变化趋势上均具有较高的吻合度,其中差别产生的原因可能有如下2个方面:①本文模型在径向离散成多个环状层单元,假定单元内外表面之间位移线性分布,因而单元的划分可能会带来一定计算误差;②本文模型在最外侧土体单元外表面施加半解析黏弹性边界,而PiP模型是全空间的土体模型,因而边界的处理也有一定的差别。但是总体而言,在分析浮置板过渡段参数对隧道和土体车致动力响应的影响方面,本文模型具备相应的非线性计算能力和较高的计算精度。

表2 饱和土体参数

Tab. 2 Parameters of saturated soil

弹性模量/Pa	泊松比	土骨架密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	孔隙水密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	孔隙率	液相的压缩性常数	双相体积变化耦合系数	渗透系数
3×10 <sup>7</sup>	0.44	2 300	1 000	0.4	1.2×10 <sup>9</sup>	8×10 <sup>8</sup>	1×10 <sup>-8</sup>

## 2 浮置板轨道过渡段位置隧道和土体动力响应特征

使用本文建立的车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体耦合动力分析方法,研究了地铁B型车以80km·h<sup>-1</sup>速度通过浮置板轨道过渡段时隧道和土体的动力响应特征。其中地铁B型车、钢轨和扣件相关参数见文献[16],采用单一变量分析方法,不设置

轨面不平顺;隧道和土体参数见表1,其中隧道和土体长度调整为220m,考虑纵向连续的长板式浮置板结构,高度为0.4m,宽度为2.8m,钢弹簧的支撑刚度为6.9MN·m<sup>-1</sup>,钢弹簧纵向间距为1.0m。浮置板过渡段长度设置为20m,仅考虑过渡段范围内钢弹簧间距缩小一半(即0.5m),不改变钢弹簧刚度。

考虑车辆由浮置板区段向整体道床区段运行和相反运行2种情况的差异,图4为地铁车辆第一节车

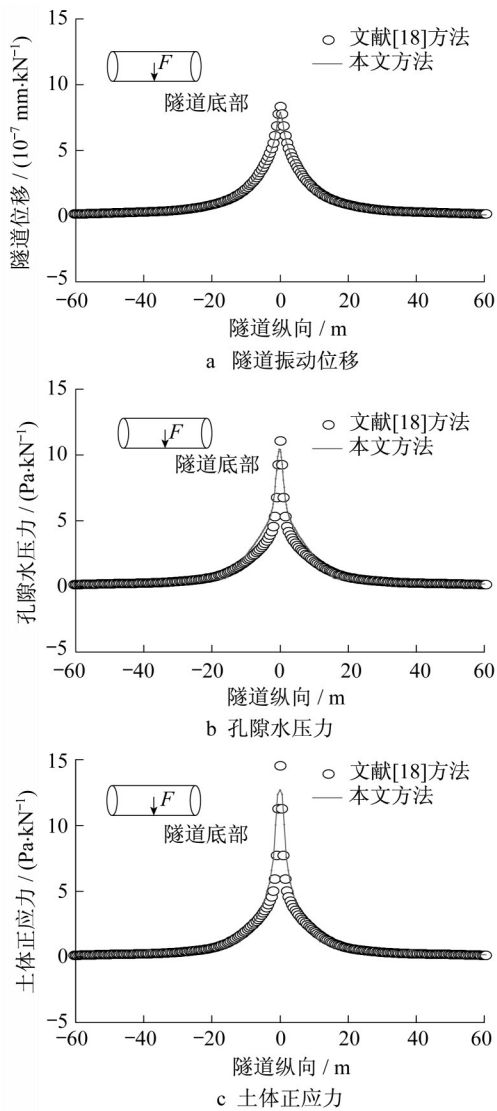


图3 本文模型与PiP模型中隧道土体振动响应对比  
 Fig. 3 Comparison of vibration response in tunnel-soil system between proposed model and PiP model

辆的第一位轮对作用位置的隧道底部垂向加速度时程曲线。由图可知,对于车辆运行方向的2种情况,隧道振动加速度均在轮对通过过渡段和整体道床相邻的刚度突变位置B时发生较大震荡;当车辆由浮置板向整体道床运行时,隧道振动加速度最大值为  $0.015 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,为车辆由整体道床向浮置板运行时的隧道振动加速度最大值的2倍,其原因为突变位置A处的刚度变化率要远小于突变位置B处的变化率。

图5为车辆由浮置板区段向整体道床区段运行过程中隧道周边土体正应力最大值的分布,其中图5a为正应力在隧道正下方水平面上的分布,图5b为正应力在隧道正下方竖平面上的分布。由图可知,当车辆由浮置板向整体道床运行时,土体正应力在

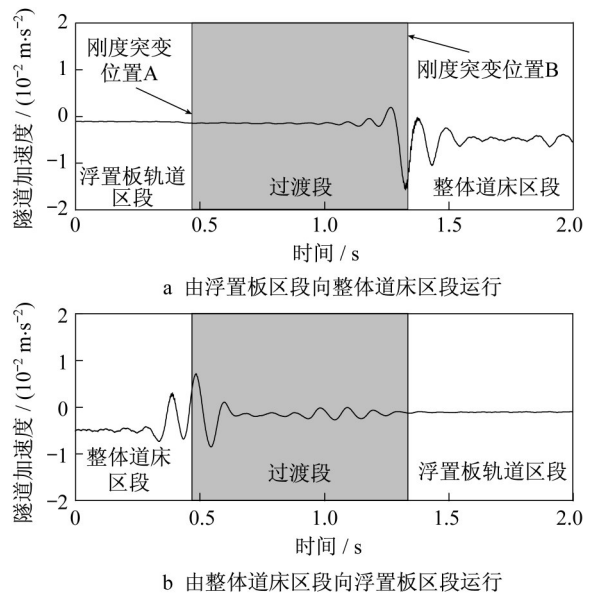


图4 地铁车辆通过浮置板轨道过渡段时产生的隧道底部垂向振动加速度

Fig. 4 Vertical acceleration of tunnel bottom when a subway train passes transition section of a floating slab track

刚度突变位置A和B处均发生了放大,正应力最大值发生于突变位置B附近,大小为  $9.47 \text{ kPa}$ ,较车辆在整体道床轨道区段运行产生的土体正应力最大值放大约25%。

图6为地铁车辆2种方向运行时第一节车辆的第一位轮对作用位置的隧道底部土体的孔隙水压力时程曲线。由图可知,当车辆由浮置板区段向整体道床区段运行时,隧道正下方土体中孔隙水压力在轨道支撑刚度突变位置A和突变位置B处均发生了一定的放大现象,刚度突变位置B处的放大现象要强于刚度突变位置A,刚度突变位置B附近土体孔隙水压力最大值为  $4.67 \text{ kPa}$ ,较车辆于整体道床区段运行的孔隙水压力增大大约26%;当车辆相反方向运行时,孔隙水压力有一定的减小趋势。

### 3 浮置板轨道过渡段参数分析

以浮置板轨道过渡段长度变化、过渡段内钢弹簧刚度变化以及刚度沿纵向逐渐变化的浮置板过渡段设计为研究对象,选取隧道振动加速度、土体正应力和孔隙水压力为评价指标,研究不同的过渡段设计对隧道-土体动力响应的影响,并依此给出浮置板过渡段参数设计的建议。在进行参数分析时,隧土单元长度设置为  $220 \text{ m}$ ,最外层土体单元半径为

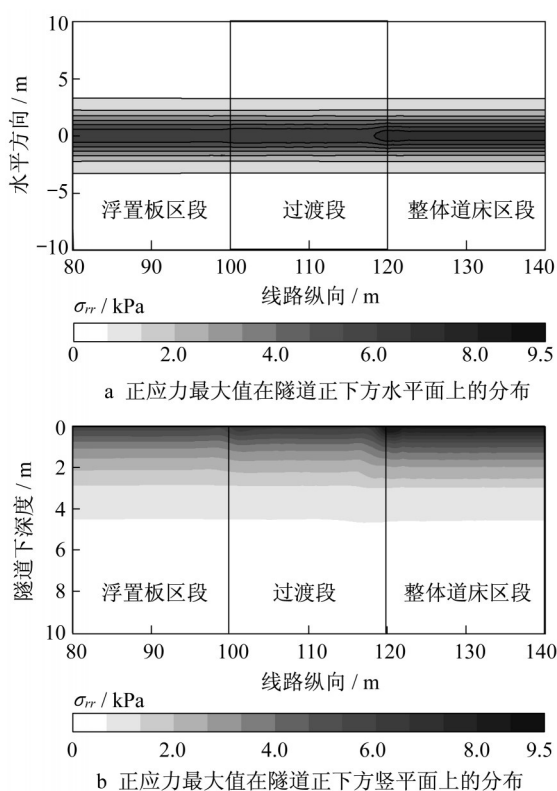


图5 地铁列车通过浮置板轨道过渡段时产生的土体正应力最大值分布

Fig. 5 Distribution of maximum soil normal stress generated when a subway train passes transition section of a floating slab track

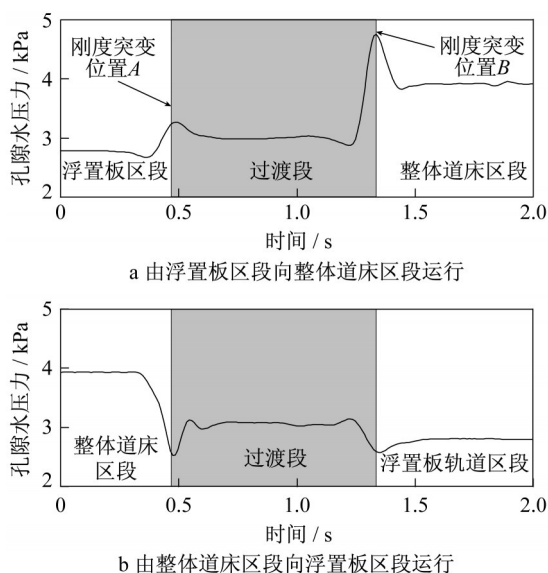


图6 地铁车辆通过浮置板轨道过渡段时产生的隧道底部土体孔隙水压力

Fig. 6 Pore water pressure generated below tunnel when a subway train passes transition section of a floating slab track

33m,最外层土体单元外侧施加黏弹性边界条件。

### 3.1 过渡段长度

考虑浮置板过渡段长度为5m、10m、15m和20m的参数设计,并以不设置过渡段作为对比工况,过渡段范围内钢弹簧的纵向分布间距调整为0.5m(即:较浮置板其他位置钢弹簧间距减小一半),其他车辆、轨道、隧道和土体参数与前节参数相同,地铁车辆运行的方向考虑由浮置板轨道向整体道床方向运行和由整体道床向浮置板轨道方向运行2种情况。

图7为不同浮置板过渡段长度下,车辆通过过渡段时隧道和土体的车致动力响应最大值的变化情况。由图可知,对于隧道振动加速度、土体正应力和孔隙水压力3种动力响应指标而言,设置过渡段以减缓浮置板轨道与整体道床轨道之间刚度突变的效果是很明显的,浮置板过渡段长度5m的工况与不设置相比,隧道加速度最大值降低27%,而对于刚度突变位置B附近,土体正应力最大值和孔隙水压力最大值分别降低8%和15%。但是由于过渡段的设置,浮置板在位置A处支撑刚度得以提升,导致该位置附近土体正应力最大值和孔隙水压力最大值增大14%和30%,但总体而言刚度突变位置B处的动力响应要显著大于刚度突变位置A处。此外,继续增加浮置板过渡段的长度对于隧道-土体系统车致动力响应的影响效应并不显著,为取得更进一步的降低效果,需考虑改变过渡段支撑刚度的方案。

### 3.2 过渡段钢弹簧刚度

在浮置板过渡段长度20m、过渡段范围内钢弹簧的纵向分布间距0.5m的情况下,考虑将过渡段范围内的钢弹簧支撑刚度调整为 $k_0$ 、 $2k_0$ 、 $3k_0$ 和 $4k_0$ (其中 $k_0$ 为钢弹簧的初始支撑刚度),并以不设置过渡段作为对比工况。图8为不同浮置板过渡段钢弹簧支撑刚度下车辆通过过渡段时隧道和土体的车致动力响应最大值的变化情况。由图可知,随着浮置板过渡段支撑刚度的逐渐增加,隧道加速度最大值、刚度突变位置B附近的土体正应力最大值和孔隙水压力最大值分别降低60%、15%和25%,其主要原因是过渡段与整体道床之间的刚度差异减小。然而由于过渡段支撑刚度的增加,浮置板与过渡段之间的刚度差异变大,在刚度突变位置A附近,土体正应力最大值和孔隙水压力最大值均随之增加,在浮置板过渡段钢弹簧支撑刚度为 $4k_0$ 时,二者相对于不设置过渡段情况分别增加50%和80%。

### 3.3 过渡段钢弹簧刚度渐变方案

考虑到浮置板过渡段钢弹簧刚度过大会在一定



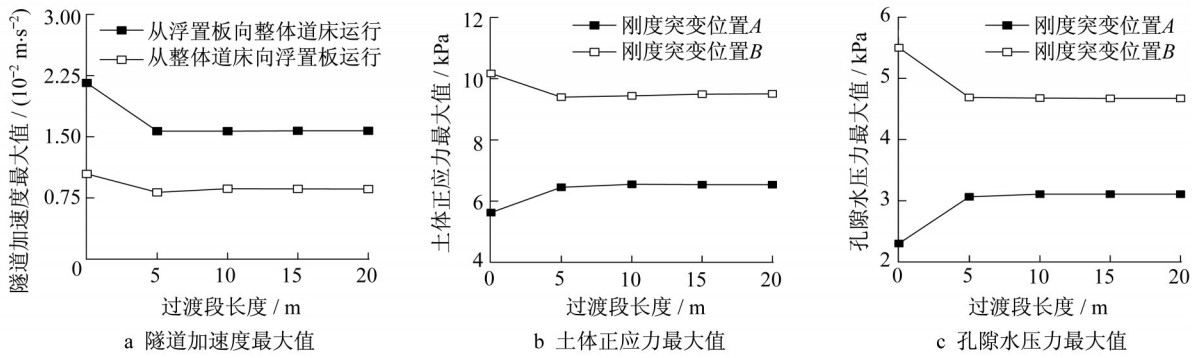


图 7 地铁隧道和土体的车致振动响应随浮置板过渡段长度的变化

Fig. 7 Variation of train-induced vibration responses of subway tunnel and soil with the length of floating slab transition section

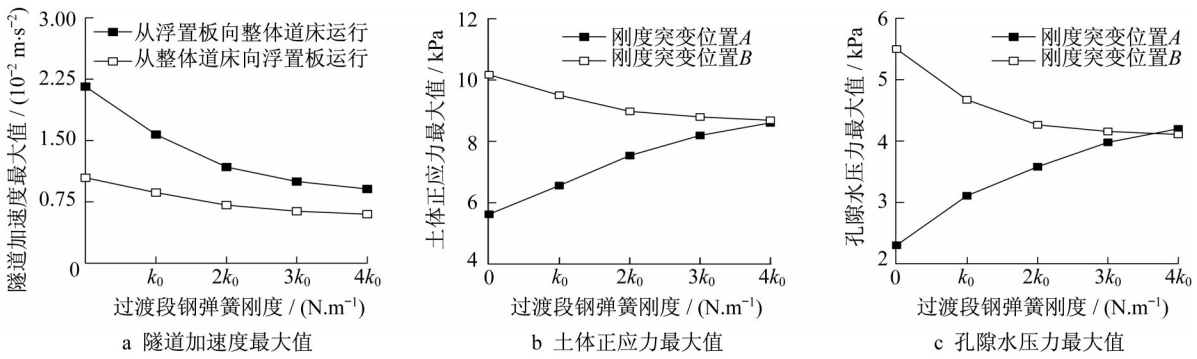


图 8 地铁隧道和土体的车致振动响应随浮置板过渡段内钢弹簧支撑刚度的变化

Fig. 8 Variation of train-induced vibration responses of subway tunnel and soil with stiffness of steel springs in floating slab transition section

程度上增大刚度突变位置 A 处的车致动力响应,提出过渡段钢弹簧刚度渐变方案,以缓和浮置板与过渡段和过渡段与整体道床之间的刚度差异,方案设置情况见表 3,并以不设置过渡段作为对比工况。

表 3 过渡段钢弹簧刚度渐变方案

Tab. 3 Schemes of gradual change of stiffness in floating slab transition section

渐变方案	长度/m	刚度
方案 1	5	k <sub>0</sub>
方案 2	5+5	k <sub>0</sub> +2k <sub>0</sub>
方案 3	5+5+5	k <sub>0</sub> +2k <sub>0</sub> +3k <sub>0</sub>
方案 4	5+5+5+5	k <sub>0</sub> +2k <sub>0</sub> +3k <sub>0</sub> +4k <sub>0</sub>

图 9 为不同浮置板过渡段钢弹簧刚度渐变方案下,车辆通过过渡段时隧道和土体的车致动力响应最大值的变化情况。由图可知,对于刚度突变位置 A 而言,渐变方案则实现了浮置板区段和过渡段之间的支撑刚度平顺变化,土体正应力最大值和孔隙水压力最大值相对于不设置过渡段情况仅分别增加

14% 和 33%,且浮置板过渡段长度更长、钢弹簧刚度组合更为复杂的渐变方案 2、3、4 相对于方案 1 并没有进一步的提升效果。对于刚度突变位置 B,隧道加速度最大值、突变位置 B 附近的土体正应力最大值和孔隙水压力最大值均随渐变方案的复杂程度而降低,且在方案 3 和 4 情况下的降低效果明显减弱,这与 3.2 节中过渡段范围内钢弹簧刚度统一增加时的响应情况一致,其原因是渐变方案中位置 B 处的刚度突变率与刚度统一增加方案相同。

## 4 结语

建立了车辆-浮置板轨道过渡段-隧道-土体耦合动力分析方法,考虑了既有浮置板轨道过渡段研究中忽略的隧道和土体系统,研究了浮置板轨道过渡段长度、钢弹簧刚度等参数对于隧道振动加速度、土体正应力和孔隙水压力的影响,相关结论如下:

(1) 当浮置板轨道过渡段长度为 5m 时,隧道振

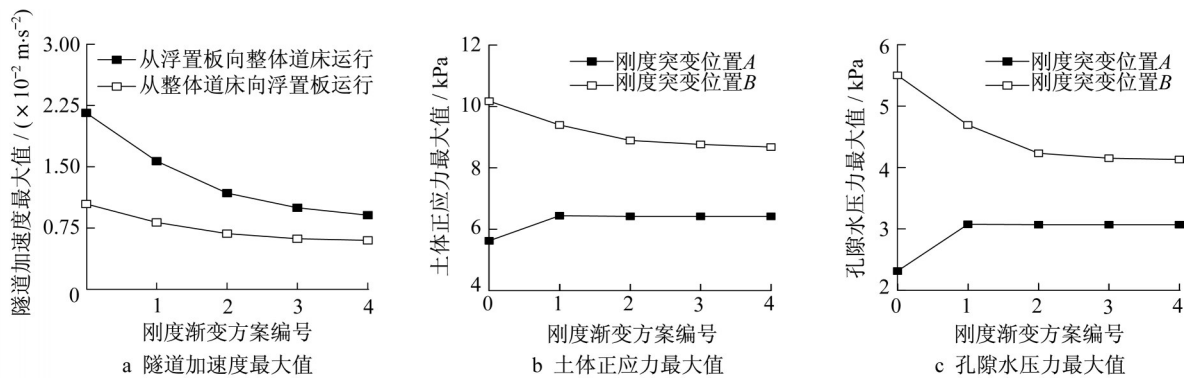


图9 地铁隧道和土体的车致振动响应随浮置板过渡段支撑刚度渐变方案变化

Fig. 9 Variation of train-induced vibration responses of subway tunnel and soil with gradual change of stiffness in floating slab transition section

动加速度、土体正应力和孔隙水压力最大值较不设置过渡段分别降低27%、8%和15%，增加过渡段长度对此降低作用的进一步效果并不明显。

(2)当浮置板轨道过渡段钢弹簧刚度为 $4k_0$ 时，隧道振动加速度、过渡段与整体道床相邻位置的土体正应力、孔隙水压力最大值分别降低60%、15%和25%，但会放大浮置板与过渡段相邻位置的隧道、土体动力响应。

(3)浮置板轨道过渡段钢弹簧刚度渐变方案在 $4k_0$ 刚度方案效果的基础上，可有效降低浮置板与过渡段相邻位置的隧道、土体动力响应，在实际工程中可优先选择浮置板过渡段支撑刚度渐变的方案设计。

#### 作者贡献申明:

张小会:确定文稿,撰写文稿。

张泽宇:处理数据,修改文稿。

狄宏规:公式推演,确定文稿。

何超:数据可视化处理。

#### 参考文献:

- [1] 刘维宁,丁德云,李克飞,等. 钢弹簧浮置板轨道低频特征试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(8): 118. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.08.006.  
LIU Weining, DING Deyun, LI Kefei, *et al.* Experimental study of the low-frequency vibration characteristics of steel spring floating slab track [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 118. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.08.006.
- [2] 雷晓燕,张斌,刘庆杰. 轨道过渡段动力特性的有限元分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(5): 15.  
LEI Xiaoyan, ZHANG Bin, LIU Qingjie. Finite element

analysis on the dynamic characteristics of the track transition [J]. China Railway Science, 2009, 30(5): 15.

- [3] 蔡成标,刘增杰,赵汝康. 浮置板轨道过渡段的动力学设计[J]. 铁道建筑, 2003(12): 41.  
CAI Chengbiao, LIU Zengjie, ZHAO Rukang. Dynamic design of the transition section of the floating slab track [J]. Railway Engineering, 2003(12): 41.
- [4] 刘笑凯,任娟娟,潘国瑞,等. 贵阳轨道交通1号线钢弹簧浮置板轨道过渡段合理设置方式研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 50. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2015.03.012.  
LIU Xiaokai, REN Juanjuan, PAN Guorui, *et al.* Setting of transition section of spring-steel floating slab track on Guiyang rail transit line 1 [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(3): 50. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2015.03.012.
- [5] 王平. 地铁典型减振轨道过渡段动力特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
WANG Ping. Analysis on the dynamic characteristics of the track transition of typical metro track systems [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] 米洋. 城市轨道交通钢弹簧浮置板轨道过渡段设置方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.  
MI Yang. Study on setting method of rail transit segment of steel spring floating slab in urban rail transit [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [7] 田卫建. 随机因素对钢弹簧浮置板过渡段动力响应的影响及钢轨挠度变化率控制指标研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
TIAN Weijian. The influence of random factors on the dynamic response of steel spring floating slab transition section and the control index of rail deflection rate [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [8] LI Z G, WU T X. On vehicle/track impact at connection between a floating slab and ballasted track and floating slab track's effectiveness of force isolation [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47(5): 513. DOI: 10.1080/00423110802167474.



- [9] JANG S Y, YANG S C. Assessment of train running safety, ride comfort and track serviceability at transition between floating slab track and conventional concrete track[J]. Journal of the Korean society for railway, 2012, 15 (1) : 48. DOI: 10.7782/JKSR.2012.15.1.048.
- [10] HUSSEIN M F M, HUNT H E M. An insertion loss model for evaluating the performance of floating-slab track for underground railway tunnels [C]//Proceedings of the Tenth International Congress on Sound and Vibration. Stockholm: International Institute of Acoustics and Vibration, 2003: 419-426.
- [11] HUSSEIN M F M, COSTA P A. The effect of end bearings on the dynamic behavior of floating-slab tracks with discrete slab units [J]. International Journal of Rail Transportation, 2017, 5(1): 38. DOI: 10.1080/23248378.2016.1203736.
- [12] LOMBAERT G, DEGRANDE G, VANHAUWERE B, *et al.* The control of ground-borne vibrations from railway traffic by means of continuous floating slabs[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 297 (3) : 946. DOI: 10.1016/j.jsv.2006.05.013.
- [13] GUPTA S, DEGRANDE G. Modelling of continuous and discontinuous floating slab tracks in a tunnel using a periodic approach[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(8): 1101. DOI: 10.1016/j.jsv.2009.10.037.
- [14] 吴世明. 土介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1997.  
WU Shiming. Wave propagation in soils [M]. Beijing: Science Press, 1997.
- [15] 田迎春. 层状黏弹性双相介质的动力响应与物性参数反演研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.  
TIAN Yingchun. The study on dynamic response and material parameters inversion of layered two-phase viscoelastic medium [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [16] ZHANG Xiaohui, ZHOU Shunhua, DI Honggui, *et al.* A semi-analytical model of the train-floating slab track-tunnel-soil system considering the nonlinear wheel/rail contact [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(8): 2063. DOI: 10.1177/0954409718759879.
- [17] 翟婉明. 车辆—轨道耦合动力学 [M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2015.  
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupled dynamics [M]. 4<sup>th</sup> ed. Beijing: Science Press, 2015.
- [18] DI H, ZHOU S, HE C, *et al.* Three-dimensional multilayer cylindrical tunnel model for calculating train-induced dynamic stress in saturated soils[J]. Computers & Geotechnics, 2016, 80:333. DOI: 10.1016/j.compgeo.2016.08.005.