文章编号:1674-2974(2025)03-0161-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025036

运营地铁周边地层加固区的动力扩散传递特性

曹洋†,张利超,王祖瑞,李交锋,谭赠华
(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘 要:为保证软土地层中地铁线路建造及运营的稳定性,可通过注浆加固提高结构周边土体强度,而根据加固程度不同,土体介质的非连续性将逐渐转变,对应动力传递特性随之变化,因此行车状态下加固区及周边地层的动力响应分布模式有待进一步探索.基于解析理论建立含加固区的地铁线路-地层动力耦合模型,将加固土及天然土考虑为具有不同物理力学属性的饱和多孔介质,利用Biot理论分别推导运动方程,地铁结构视为均匀厚度的无限长圆柱壳体,采用无扭矩条件下薄壁圆柱壳理论进行描述.根据动力系统各交界面间的位移及应力连续条件,将以上各部位振动方程构建形成耦合动力方程组,计算了地铁周边含加固区地层的振动情况,并进一步对比了加固区刚度及黏滞阻尼对地层动力响应分布及传递的影响.结果表明:稳态作用下,地铁周边地层切向加速度最大值在结构斜下方两侧30°处呈蝉翼状分布,径向加速度最大值出现在荷载作用方向土体内部;由于输入波形的简谐特性,加速度在地层中呈波动式衰减,但在加固区范围内切向加速度出现明显的放大现象,振动进入天然土后,受地层阻尼影响,动力响应显著衰减;提高加固区刚度有利于降低对切向加速度的传导,而径向加速度变化不大,黏滞阻尼减小时,所传递动力响应有所提升.

关键词:地铁;加固区;饱和地层;动力传递;解析法
中图分类号:U231 **文献标志码**:A

Dynamic Diffusion Transmission Characteristics of Stratum Reinforcement Area around Operating Subway

CAO Yang†,ZHANG Lichao,WANG Zurui,LI Jiaofeng,TAN Zenghua
(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To ensure the stability of the construction and operation of subway lines in a soft stratum, the soil strength around the structure can be improved by grouting reinforcement. However, according to different reinforcement degrees, the discontinuity of the soil medium will be gradually changed, and the corresponding dynamic transmission characteristics will be changed, so the dynamic response distribution mode of the reinforced area and the surrounding stratum under the driving condition needs to be further explored. A dynamic coupling model of subway line-stratum with reinforcement area is established based on the analytical theory. The reinforced soil and the natural soil are considered as saturated porous media with different physical and mechanical properties, and the

* **收稿日期**:2024-03-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608127),National Natural Science Foundation of China(51608127);福建省自然科学基金资助项目(2017J05078),Natural Science Foundation of Fujian Province(2017J05078)
作者简介:曹洋(1985—),男,河南商丘人,福州大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: hnyccy@163.com

corresponding dynamic equations are derived respectively by Biot theory. The subway structure is regarded as an infinite cylindrical shell with uniform thickness, which is described by the theory of the thin-walled cylindrical shell under the torsion-free condition. According to the displacement and stress continuity conditions between interfaces of the dynamic system, the vibration equations of the above parts are combined into a set of coupled dynamic equations, and the vibration of the subway peripheral stratum containing the reinforced area is calculated, the effects of stiffness and viscous damping of the reinforcement area on the distribution and transmission of the stratum dynamic response are further compared. The results show that under the steady state action, the maximum tangential acceleration of the stratum around the subway shows a cicada-wing distribution at 30° on both sides of the structure diagonally downwards, and the maximum radial acceleration occurs in the soil in the direction of the load. Due to the harmonic characteristics of the input waveform, the acceleration decays fluctuating in the stratum, but an obvious amplification of tangential acceleration occurs in the reinforcement area. After the vibration enters the natural soil, the dynamic response is significantly attenuated by the effect of stratum damping. Increasing the stiffness of the reinforcement area is conducive to reducing the conduction of tangential acceleration, while the radial acceleration changes little, and the transmitted dynamic response increases when the viscous damping decreases.

Key words: subway; reinforcement area; saturated stratum; dynamic transmission; analytical method

随着居民对市内出行需求的逐步提高,地铁建设正在快速发展.为便于隧道开挖,城市地铁线路大多建设在较松散地层,对于土质较差地区,尤其是临近重要结构物或易产生较大扰动变形的富水软土地层,可在开挖前通过注浆方式在线路周围形成一定范围的加固区,以保证施工稳定性.进入运营阶段后,列车荷载引起的环境振动问题逐渐受到关注,加固区的存在必将影响地铁线路周边近场地层的振动效应,有必要进一步开展含加固区地层动力响应传递特性的研究.

已有针对地铁线路周边地层动力响应的研究中,马蒙等[1]通过总结包含列车运行引起地层振动的各类预测方法及不确定性问题,提出未来实现概率预测的观点.Hou 等[2]和 Zhong 等[3]均将地铁列车的长期作用模拟为循环荷载,利用动三轴试验分别研究了粉质黏土和土石填充地层的累积变形规律.Qu 等[4]通过对现场测试结果的分析,总结了地铁线路周边考虑地质差异及不同距离处的地层振动情况.Bashir 等[5]同样开展了现场测试,分析了传播路径距离和阻尼特性引起的振动能量衰减.Wu 等[6]采用比例尺试验模型和离散元法探讨了列车运行环境下双隧道埋深对线路周边环境动力响应的影响,为相关设计参数的选取提出了理论建议.赵江涛等[7]则从实际工程问题出发,证实并分析了凸形地貌环境中运营地铁周边地层的振动放大现象.为了进一步优化模型,马龙祥等[8]根据隧道-地层系统特性,将其模拟为薄片单元构成的周期模型,利用傅里叶变换及叠加原理进行求解,证明此方法具有计算速度快及高精度特性.雷华阳等[9]建立了移动列车荷载作用下隧道-土体三维有限元模型,分析了荷载运行速度对软土地基沉降量的影响,表明常速运行导致工后沉降更大.王力东等[10]将车辆-轨道-隧道-地层有限元模型计算结果与2.5维有限元-最佳匹配层模型相结合,提出并验证了预测地铁隧道及周边土体振动的高效时频混合方法.Gu 等[11]将人工确定性激励函数应用于隧道模型,利用有限差分法研究了列车振动对周围土层的动力响应.

由以上研究成果可知,数值方法在地铁线路环境振动研究中发挥了重要作用,随着模型的逐步完善,可以从多方面反映埋置列车荷载引起的地层动力响应.但各模型尚未考虑加固作用对线路近场动力特性的影响,为了探索影响机理,需借助解析方法加以深入分析.胡安峰等[12]基于 Biot 波动理论,利用 Helmholtz 矢量分解原理、贝塞尔函数以及傅里叶变换方法,获得了有下卧基岩的饱和土体在移动线荷载作用下的响应解析解,进一步分析了土体参数、运行速度及地层厚度等因素对位移、应力及孔隙水压力的影响.Zhou 等[13]建立了考虑相邻隧道动力相互

作用的多孔弹性半空间车辆-轨道-隧道-土体系统振动三维解析模型,分析了邻近隧道和含水饱和度对土体振动的影响.袁宗浩等[14]在Biot控制方程中引入黏弹性边界模型,研究了不同瞬态作用下饱和土体的动力响应.此外,Yuan等[15]还基于波函数法将包含两个空腔的半空间内总波场展开为来自自由面向下的平面波和每个空腔向外的柱面波组合,从而提出了一种计算半空间双隧道振动的解析解.黄强等[16]为研究浮置板轨道的减振效果,在轨道-隧道-地基耦合模型的基础上引入位移势函数和双重傅里叶变换,分析了轨道结构参数对地层振动的影响效果.何超等[17]提出了一种考虑振动在水环境中传播的隧道-地基-流体耦合系统动力响应解析方法,为水下振动传播特性的预测分析提供了理论支撑.

上述各类解析方法同样未涉及对地层局部加固线路周边土体动力响应的求解.而对于地铁预加固处理的描述,大多集中于加固机理探索[18]、施工扰动控制[19]、加固区渗流特性分析[20]及特殊土地层加固效果研究[21]等方面.因此,本文分别借助Biot理论和无限长圆柱壳体模型模拟饱和土体及地铁结构在列车荷载作用下的动力行为,建立含加固区的线路-地层动力耦合模型,研究稳态激振环境下地铁线路近场地层动力传递特性,并进一步分析了加固区刚度和黏滞阻尼对地层动力响应的影响.研究成果可从线路运营角度为软土地层地铁周边加固区设计提供理论参考.

1　计算模型

考虑到地铁区间线路为沿轴线延伸的长条状结构,列车运行的动力响应在各断面较为相似,因此选取代表性断面建立含加固区的地铁线路-地层动力耦合模型,如图1所示.

模型中将隧道结构简化为埋置于均质饱和土体中的无限长空心圆柱壳体,隧道内径为R_1,外径为R_2,隧道外部存在厚度为h_1的加固层.将列车荷载模拟为作用在隧道底拱处的径向集中简谐荷载,考虑隧道衬砌、注浆层及外部饱和土体三者的动力协调关系展开求解.模型假定如下:

1)忽略隧道及周围土体沿线路轴向的变形及应力,将荷载作用下模型的动力响应看作平面应变问题.

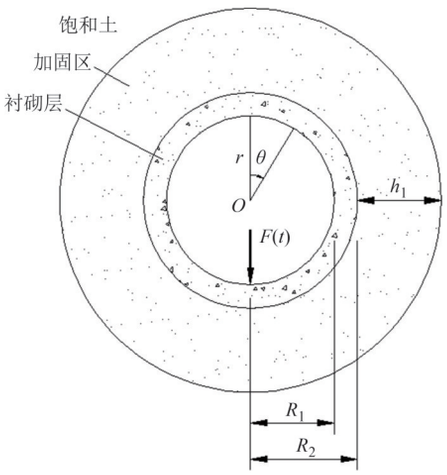


图1　含加固区动力计算模型

Fig. 1　Dynamic calculation model with reinforcement area

2)隧道埋深可不考虑上部地表界限.

3)模型各层间保持位移和应力协调条件.

2　控制方程及求解

2.1　饱和介质波动方程

由Biot理论[22-23]可知,饱和土体介质波动控制方程表示为:

$$\mu u_{i,jj}+(\lambda+\alpha^2M+\mu)u_{j,ji}+\alpha Mw_{j,ji}=\rho\ddot{\mu}+\rho_{\mathrm{f}}\ddot{w}_i \tag{1}$$

$$\alpha Mu_{j,ji}+Mw_{j,ji}=\rho_{\mathrm{f}}\ddot{\mu}_i+m\ddot{w}_i+b\dot{w}_i \tag{2}$$

式中:λ和μ为介质拉梅常数;α和M为Biot常数,即土颗粒和孔隙流体的压缩性参数;$\rho=n_{\mathrm{s}}\rho_{\mathrm{f}}+(1-n_{\mathrm{s}})\rho_{\mathrm{s}}$,$n_{\mathrm{s}}$为土体孔隙率,$\rho_{\mathrm{s}}$和$\rho_{\mathrm{f}}$分别为土骨架和流体密度;$m=\rho_{\mathrm{f}}/n_{\mathrm{s}}$;$b$为与流体动力黏滞系数$\eta_{\mathrm{d}}$和土体动力渗透系数$k$相关的土体渗透参数;$u_i$和$w_i$分别为土骨架位移及孔隙水相对土骨架位移,两者利用标量势函数Φ和矢量势函数Ψ可表示为$u\mid w=\nabla\phi+\nabla\times\psi$,并在极坐标下展开为法向及切向位移分量,表达如下:

$$\begin{aligned}
u_r&=\frac{\partial\phi_{\mathrm{s}}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\psi_{\mathrm{s}}}{\partial\theta}\\
u_\theta&=\frac{1}{r}\frac{\partial\phi_{\mathrm{s}}}{\partial_\theta}-\frac{\partial\psi_{\mathrm{s}}}{\partial r}\\
w_r&=\frac{\partial\phi_{\mathrm{f}}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\psi_{\mathrm{f}}}{\partial\theta}\\
w_\theta&=\frac{1}{r}\frac{\partial\phi_{\mathrm{f}}}{\partial\theta}-\frac{\partial\psi_{\mathrm{f}}}{\partial r}
\end{aligned} \tag{3}$$

简谐荷载($F_{\mathrm{n}}e^{\mathrm{i}\omega t}$, $F_{\mathrm{t}}e^{\mathrm{i}\omega t}$)作用下,系统动力响应分

量可表示为$f=\bar{f}e^{i\omega t}$,其中$\bar{f}$为振幅,ω为圆频率.将式(3)代入式(1)、式(2),并考虑谐振作用下的响应特性,得到势函数表达的波动方程:

$$\begin{pmatrix}\lambda+\alpha^2M+2\mu & \alpha M\\ \alpha M & M\end{pmatrix}\begin{bmatrix}\nabla^2\overline{\phi}_{\mathrm{s}}\\ \nabla^2\overline{\phi}_{\mathrm{f}}\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}-\rho\omega^2 & -\rho_{\mathrm{f}}\omega^2\\ -\rho_{\mathrm{f}}\omega^2 & -m\omega^2+\mathrm{i}wb\end{pmatrix}\begin{bmatrix}\overline{\phi}_{\mathrm{s}}\\ \overline{\phi}_{\mathrm{f}}\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix}\mu & 0\\ 0 & 0\end{pmatrix}\begin{bmatrix}\nabla^2\overline{\psi}_{\mathrm{s}}\\ \nabla^2\overline{\psi}_{\mathrm{f}}\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}-\rho\omega^2 & -\rho_{\mathrm{f}}\omega^2\\ -\rho_{\mathrm{f}}\omega^2 & -m\omega^2+\mathrm{i}wb\end{pmatrix}\begin{bmatrix}\overline{\psi}_{\mathrm{s}}\\ \overline{\psi}_{\mathrm{f}}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:∇^2为Laplace算子,在极坐标中$\nabla^2=\dfrac{\partial^2}{\partial r^2}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}+\dfrac{1}{r^2}\dfrac{\partial^2}{\partial\theta^2}$.

从式(4)和式(5)可得到有关土体介质的Helmholtz方程形式:

$$\left(\nabla^2+k_{1,2}^2\right)\overline{\phi}_{\mathrm{s1,s2}}=0 \tag{6}$$

$$\left(\nabla^2+k_3^2\right)\overline{\psi}_{\mathrm{s}}=0 \tag{7}$$

式中:k_1、k_2、k_3分别表示饱和土中快纵波、慢纵波和横波的复波数,即$k_{1,2}^2=\dfrac{B\pm\sqrt{B^2-4AC}}{2A}$,$k_3^2=\dfrac{C}{D}$,其中$A=\left(\lambda+2\mu\right)M$,$B=\left(\lambda+\alpha^2M+2\mu\right)\left(m\omega^2-\mathrm{i}b\omega\right)+\rho\omega^2M-2\rho_{\mathrm{f}}\omega^2\alpha M$,$C=\rho\omega^2\left(m\omega^2-\mathrm{i}b\omega\right)-\rho_{\mathrm{f}}^2\omega^4$,$D=\mu\left(m\omega^2-\mathrm{i}b\omega\right)$.

另外,由式(4)和式(5),可得到势函数总体表达式为:

$$\begin{aligned}&\phi_{\mathrm{s}}=\phi_{\mathrm{s1}}+\phi_{\mathrm{s2}}\\ &\phi_{\mathrm{f}}=c_1\phi_{\mathrm{s1}}+c_2\phi_{\mathrm{s2}}\\ &\psi_{\mathrm{f}}=d\psi_{\mathrm{s}}\end{aligned} \tag{8}$$

式中:$c_{1,2}=\dfrac{\left(\lambda+\alpha^2M+2\mu\right)k_{1,2}^2-\rho\omega^2}{\rho_{\mathrm{f}}\omega^2-\alpha Mk_{1,2}^2}$;$d=-\dfrac{\rho_{\mathrm{f}}\omega^2}{m\omega^2-\mathrm{i}b\omega}$.

饱和多孔介质应力应变关系为:

$$\sigma_{ij}=\lambda\delta_{ij}e+2\mu\varepsilon_{ij}-\alpha\delta_{ij}p_{\mathrm{f}} \tag{9}$$

式中:δ_{ij}为Kronecker delta符号;$e=u_{i,i}$为土骨架体积应变;$\varepsilon_{ij}=(u_{i,j}+u_{j,i})/2$为土骨架应变;孔压$p_{\mathrm{f}}=-\alpha Me+M\zeta$,其中$\zeta=-w_{i,i}$.

通过对势函数的谐振表达,将式(6)、式(7)的Helmholtz方程改写为Bessel函数,进而结合式(9)共同获得土体介质颗粒及流体的位移及应力分量.

取加固层($R_2\leqslant r\leqslant R_2+h_1$)中$n$阶模态下土体位移、应力响应可表示为:

$$\begin{bmatrix}u_{\theta1n}\\ u_{r1n}\\ w_{r1n}\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}\sin(n\theta) & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & \cos(n\theta)\end{pmatrix}\cdot\left[U_{3\times6}\right]\cdot\begin{bmatrix}A_{1n}\\ B_{1n}\\ A_{2n}\\ B_{2n}\\ E_n\\ F_n\end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_{r\theta1n}\\ \sigma_{rr1n}\\ p_{\mathrm{f}1n}\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}\sin(n\theta) & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & \cos(n\theta)\end{pmatrix}\cdot\left[T_{3\times6}\right]\cdot\begin{bmatrix}A_{1n}\\ B_{1n}\\ A_{2n}\\ B_{2n}\\ E_n\\ F_n\end{bmatrix} \tag{11}$$

$r=\infty$时,土体介质远离激振点,考虑无限远处位移、应力及孔压分量均衰减为0,即$A_{1n}=B_{1n}=E_n=0$.因此加固层外部$r>R_2+h_1$处饱和土体在n阶模态下的位移、应力响应可表示为:

$$\begin{bmatrix}u_{\theta2n}\\ u_{r2n}\\ u_{r2n}\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}\sin(n\theta) & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & \cos(n\theta)\end{pmatrix}\cdot\left[U_{3\times3}\right]\cdot\begin{bmatrix}B_{1n}\\ B_{2n}\\ F_n\end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix}\sigma_{r\theta2n}\\ \sigma_{rr2n}\\ p_{\mathrm{f}2n}\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}\sin(n\theta) & 0 & 0\\ 0 & \cos\theta & 0\\ 0 & 0 & \cos(n\theta)\end{pmatrix}\cdot\left[T_{3\times3}\right]\cdot\begin{bmatrix}B_{1n}\\ B_{2n}\\ F_n\end{bmatrix} \tag{13}$$

式中:$[U_{3\times3}]$、$[T_{3\times3}]$为$[U_{3\times6}]$、$[T_{3\times6}]$中去除A_{1n}、B_{1n}和E_n对应列的剩余矩阵.

2.2 衬砌壳体运动方程

基于无扭矩条件下薄壁圆柱壳理论,n阶模态下衬砌的运动方程可表示为:

$$\left(1+\beta^2n^4\right)U_r^n+\gamma^2\ddot{U}_r^n+nU_\theta^n=\frac{R_2^2\left(1-v_l^2\right)}{E_1h}q_n \tag{14}$$

$$nU_r^n+n^2U_\theta^n+\gamma^2\ddot{U}_\theta^n=\frac{R_2^\theta\left(1-v_l^2\right)}{E_1h}s_n \tag{15}$$

式中:U_r、U_θ分别为隧道衬砌径向及环向位移;$\beta^2=\dfrac{h^2}{12R_2^2}$;$\gamma=C_{\mathrm{s}}/C_{\mathrm{p}}$,$C_{\mathrm{s}}=\sqrt{\dfrac{\lambda+2\mu}{\rho_1}}$,$C_{\mathrm{p}}=\sqrt{\dfrac{E_1}{\rho_1\left(1-v_1^2\right)}}$,$E_1$、$\rho_1$、$v_1$分别为衬砌的弹性模量、密度和泊松比;$h$为衬砌厚度;$q$、$s$分别为隧道衬砌所受径向与切向净应力,即衬砌内表面的径向和切向外荷载Q、S与衬砌所受加固层的径向和环向土压力σ_{rr}、$\sigma_{r\theta}$的差值.

2.3 边界条件

在$r=R_2$处,根据隧道衬砌与周围土体交界面上的位移连续条件,有:

$$U_r = u_{r1};\ U_\theta = u_{\theta 1} \tag{16}$$

若隧道底拱θ处荷载为径向点荷载Q,则:

$$Q = \frac{F}{R_2}\delta(\theta)e^{i\omega t} \tag{17}$$

式中:F荷载幅值;$\delta(\cdot)$为狄拉克函数.

不考虑隧道边界透水,则:

$$\frac{\partial w_{r1}}{\partial t}|_{r=R_2} = 0 \tag{18}$$

在$r=R_2+h_1$处,根据加固层与饱和土体接触面位移、应力连续条件有:

$$\begin{aligned} &u_{\theta 1} = u_{\theta 2};\ u_{r1} = u_{r2};\ w_{r1} = w_{r2} \\ &\sigma_{rr1} = \sigma_{rr2};\ \sigma_{r\theta 1} = \sigma_{r\theta 2};\ p_{f1} = p_{f2} \end{aligned} \tag{19}$$

联合式(10)~式(15)并代入边界条件式(16)和式(19)及荷载条件式(17)和式(18),即可得到待定系数B_{1n}、B_{2n}、F_n,进而得到不同模态下土体位移、应力、孔压等响应结果.累加各模态结果可得不同位置处动力响应值,其中模态数的选取满足计算所需精度即可.

3　动力传递特性分析

以常规软土地层地铁隧道为例,计算参数取值如表1所示.单位幅值简谐荷载沿径向作用于隧道底部中间位置,振动频率取10 Hz.

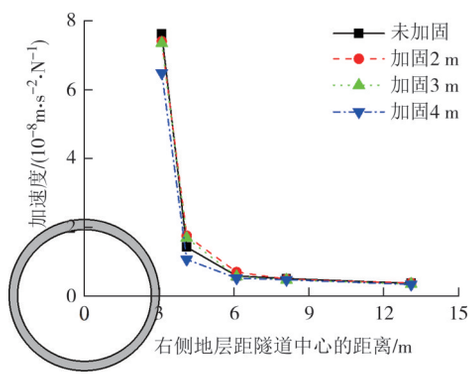
表1　模型参数

Tab.1　Model parameters

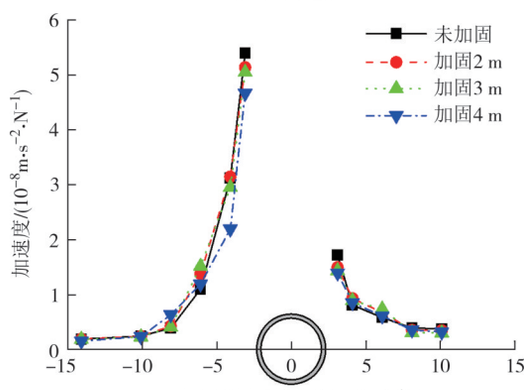
参数	数值
拉梅常数μ/Pa	7.7×10^6
拉梅常数λ/Pa	1.9×10^6
土颗粒压缩性参数α	1.0
孔隙流体压缩性参数M	5.0×10^9
流体密度ρ_f/(kg·m^{-3})	1.0×10^3
土骨架密度ρ_s/(kg·m^{-3})	2.0×10^3
饱和土体孔隙率n_s	0.4
土体渗透参数b/(N·s·m^4)	1.0×10^9
衬砌弹性模量E_l/MPa	3.0×10^4
衬砌密度ρ_l/(kg·m^{-3})	2.5×10^3
衬砌泊松比v_l	0.2
隧道外径R_2/m	3.0
衬砌厚度h/cm	25.0
加固区厚度h_1/m	3.0

作为对比,首先针对未加固及不同加固层厚度下的地层动力响应分布规律进行分析,以说明加固区对动力传递的影响.围绕3 m加固厚度,计算单位竖向荷载作用下,土体未加固及加固范围为2、3、4 m时,地铁线路周边地层的竖向加速度响应如图2所示,其中加速度代表单位荷载下的响应值.

图2中,距离地铁结构越近,加固范围对地层动力响应的影响越显著,其中较大的加固范围提高了结构外围土体的整体性,此时由于加固层自身体量扩大,其起振幅度有所降低.随着动力由加固层向外扩散,各加固层外侧原状土体开始激振,但原状土相对松散,动力衰减效果明显,尤其对于无加固土而言,线路下方直接承受荷载作用的地层动力衰减最为迅速.



(a)线路侧向地层



(b)线路竖向地层

图2　不同加固范围下地层振动加速度分布

Fig.2　Distribution of stratum vibration acceleration under different reinforcement ranges

为验证模型的可靠性,利用ABAQUS软件依照上述参数建立外形尺寸为100 m×80 m×60 m的数值模型,并对隧道周围3 m范围内土体进行加固,如图3所示.采用DLOAD子程序为数值模型施加相同移动荷载,获得对应图2右侧及下侧响应较大方向的地层加速度分布,如图4所示.

由图4可知,解析模型所得隧道侧向及下部含加固区地层动力响应计算结果与数值模型吻合度较好,数值模型受单元划分精细程度限制,在地铁结构

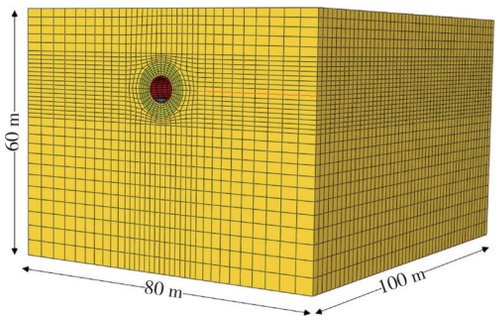


图3 含加固区动力有限元模型

Fig. 3 Dynamic finite element model with reinforcement area

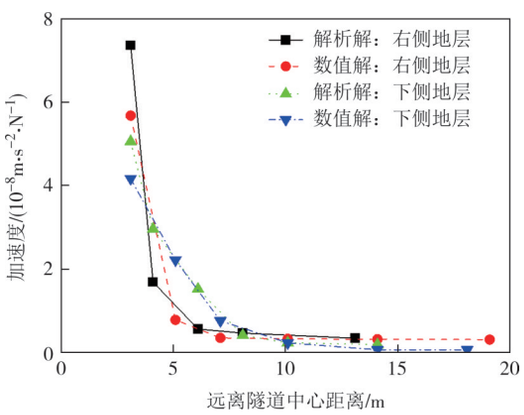


图4 计算结果对比

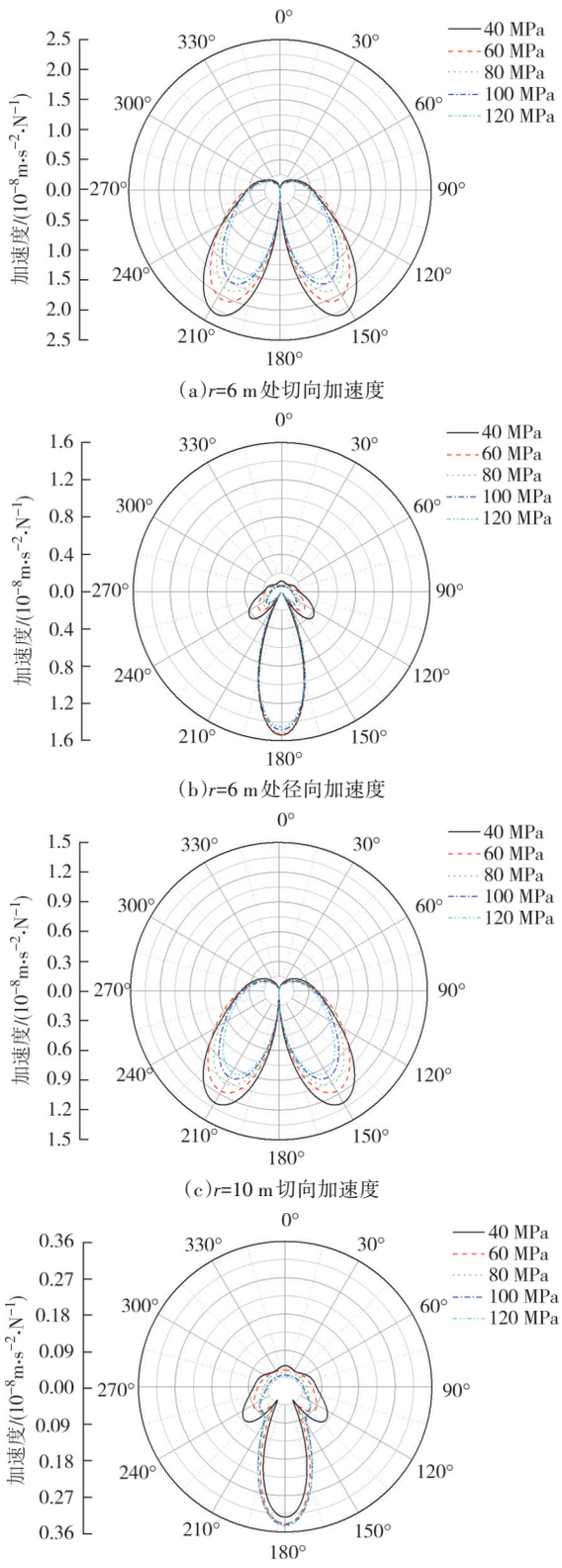
Fig. 4 Comparison of calculation results

附近地层响应较大处的加速度幅值略小于解析解.以上验证了所建立地铁线路-地层动力耦合模型的可靠性.

3.1 加固区刚度

隧道外围加固区可以看作土体与浆液的混合体,弹性模量与注入浆液量正相关.考虑土体不同加固程度,弹性模量可在40~120 MPa间取值,不同加固区刚度对应地层动力响应如图5所示.

从图5可以看出,加固区刚度对地层加速度的影响与环向位置有关.图5(a)(c)中,土体切向加速度在隧道周围呈蝉翼状分布,其中斜下方土体加速度响应随加固区刚度增加而逐渐减小,但刚度越大,加速度幅值降低速率越小.图5(b)(d)中土体径向加速度在隧道拱底出现明显峰值,随加固区刚度增大,拱底加速度有所升高,但在隧道斜下方土体中的微小峰值随加固区刚度增大而逐渐减小直至消失.综上说明,强加固土体更易于传导沿荷载作用方向的径向振动.对比加固区外围(r=6 m)与远离加固区(r=10 m)的加速度响应可知,土体振动向周围辐射时呈衰减趋势.为详细展示含加固区土体加速度的衰减过程,取θ=150°方向的切向加速度与θ=180°方向的径向加速度幅值变化曲线如图6所示.



(a)r=6 m处切向加速度

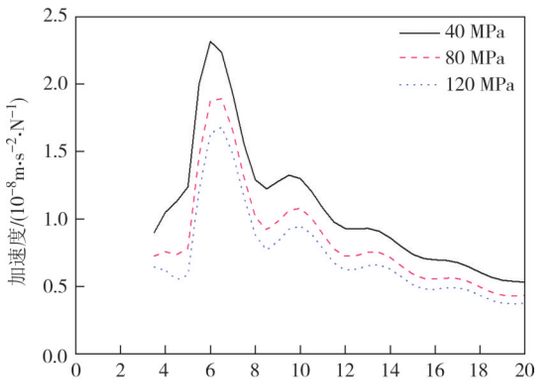
(b)r=6 m处径向加速度

(c)r=10 m切向加速度

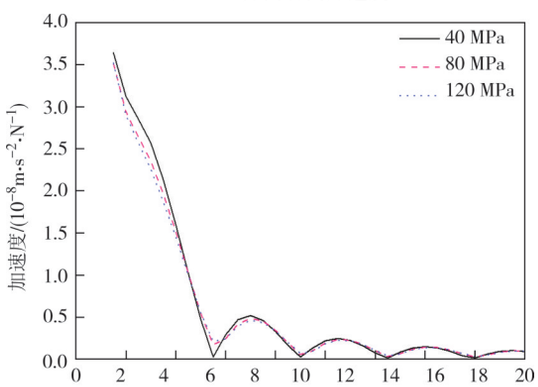
(d)r=10 m处径向加速度

图5 加固区刚度对地层动力响应的影响

Fig.5 Influence of reinforcement area stiffness on stratum dynamic response



(a)θ=150°方向切向加速度



(b)θ=180°方向径向加速度

图 6　加固区刚度影响下加速度幅值衰减曲线

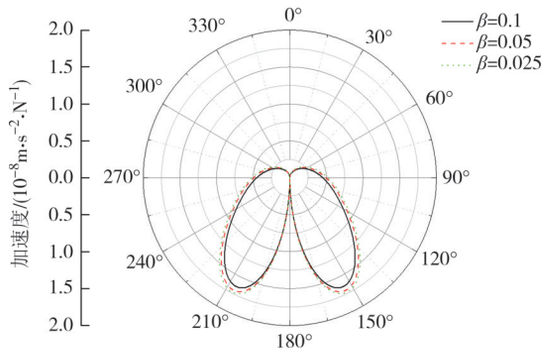
Fig.6　Acceleration amplitude attenuation curves under the influence of reinforcement area stiffness

由图 6(a)可知,土体加固区对切向加速度存在放大效果,加固区边缘 r=6 m 处加速度迅速达到峰值,进入外围地层后加速度快速衰减,首峰的放大及衰减过程在加固区边缘两侧各 2 m 左右范围内完成. 之后加速度逐渐衰减,其中微小波动源于谐波振动峰值的叠加效应,不同加固程度下衰减曲线波动趋势基本一致. 图 6(b)中径向加速度各工况波动规律一致,总体呈衰减趋势,近距离快速衰减区位于隧道外围 4 m 范围内,而后同样进入波动式衰减状态,在距离隧道中心 20 m 后地层振动逐渐恢复平稳.

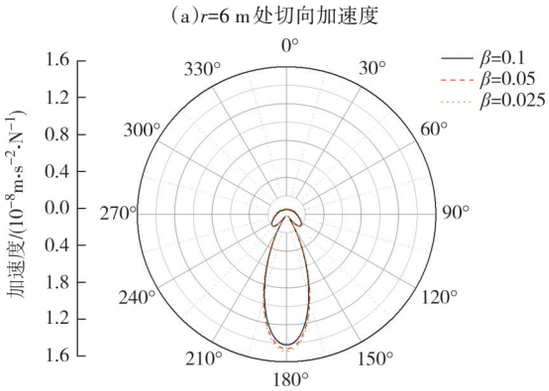
3.2　加固区黏滞阻尼

土体黏滞阻尼比β受到加固材料选取及加固程度的共同作用而产生变化,为实现单因素分析目的,保证其他参数不变的情况下,考虑β取 0.1、0.05、0.025,分别计算各工况隧道周围地层动力响应,如图 7 所示.

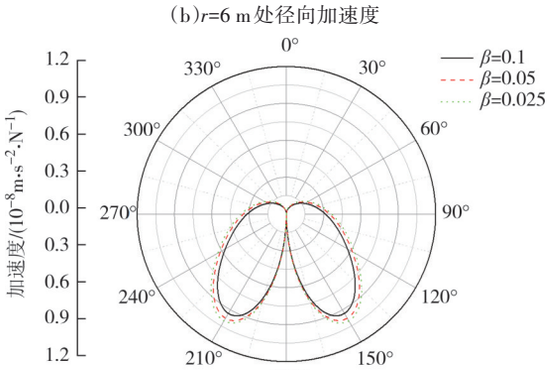
图 7 隧道周围不同距离地层切向及径向加速度变化规律与加固区刚度工况一致,即切向加速度呈蝉翼状分布,在隧道斜下方土体中达到峰值,径向加速度沿荷载作用方向在隧道底部最大,且距离隧道结构越远,加速度响应相应减小. 随着加固区黏滞阻尼比减小,土体对动力传递的阻碍作用降低,各部位



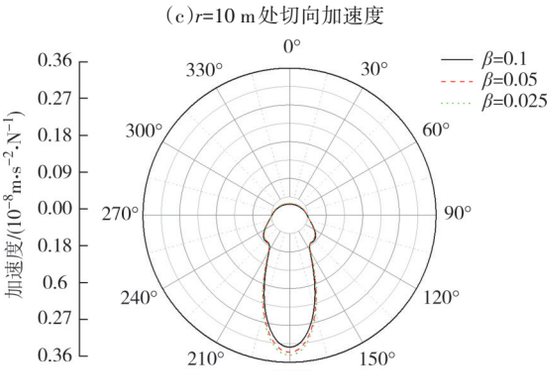
(a)r=6 m 处切向加速度



(b)r=6 m 处径向加速度



(c)r=10 m 处切向加速度



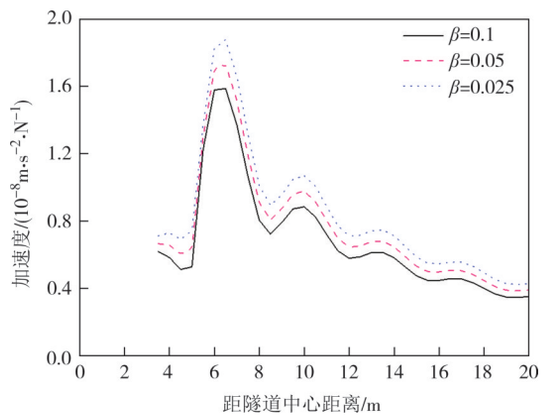
(d)r=10 m 处径向加速度

图 7　加固区黏滞阻尼对地层动力响应的影响

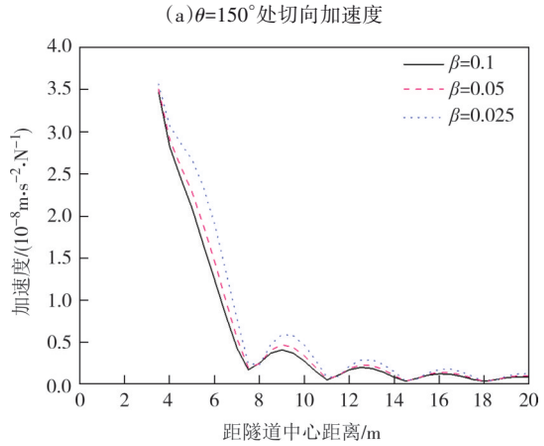
Fig.7　Influence of viscous damping of reinforcement area on stratum dynamic response

加速度幅值略微增大.

图8给出了加固区及外侧土体动力响应衰减过程,衰减规律与加固区刚度工况一致.



(a)θ=150°处切向加速度



(b)θ=180°处径向加速度

图8 加固区黏滞阻尼影响下加速度幅值衰减曲线

Fig.8 Acceleration amplitude attenuation curves under the influence of viscous damping of reinforcement area

4 结论

本文基于Biot饱和多孔介质理论建立土体运动方程,模拟加固及天然状态下地层动力传导特性,同时采用圆柱壳体来模拟地铁隧道结构,进而以多层介质交界面位移及应力协调关系建立含加固区的隧道-地层动力耦合解析模型.利用上述模型探索了稳态作用下地铁周边地层加固参数对动力系统振动传递的影响,所得结论如下:

1)竖向简谐荷载作用下,地铁周边地层切向加速度呈蝉翼状分布,最大值出现在结构中心竖轴两侧各30°斜下方土体中.径向加速度最大值沿荷载作用方向出现在地铁下方地层.在远离地铁结构过程中,地层振动加速度呈波动式衰减.

2)地层加固对结构周边土体切向加速度有显著放大作用,最大值出现在加固区边缘位置.径向加速度在加固区内部迅速下降,未体现放大趋势.

3)加固区刚度越大,对切向动力响应的传导性能越弱,而径向加速度受加固程度的影响较小.随着加固区阻尼减小,对应动力阻滞作用降低,地层响应幅值随之增大.

参考文献

[1] 马蒙,刘维宁,刘卫丰. 列车引起环境振动预测方法与不确定性研究进展[J]. 交通运输工程学报,2020,20(3):1-16.
MA M, LIU W N, LIU W F. Research progresses of prediction method and uncertainty of train-induced environmental vibration [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3):1-16.(in Chinese)

[2] HOU C Y, CUI Z D, YUAN L. Accumulated deformation and microstructure of deep silty clay subjected to two freezing-thawing cycles under cyclic loading[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(12): 452.

[3] ZHONG Z L, ZOU H, HU X X, et al. Experimental study on stiffness softening of soil-rock mixture backfill under metro train cyclic load[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1): 3024490.

[4] QU S, YANG J J, ZHU S Y, et al. Experimental study on ground vibration induced by double-line subway trains and road traffic[J]. Transportation Geotechnics, 2021,29:100564.

[5] BASHIR S, CHOWDHARY A R, AKHTAR N. Prediction and attenuation of ground vibrations generated by moving trains [J]. Current Science, 2022, 124(2): 202-209.

[6] WU L,ZHANG X D,KUANG F M,et al. Dynamic characteristics of adjacent tunnel and surroundings under the vibration of trains in the first tunnel with different buried depths [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 46(5): 5105-5119.

[7] 赵江涛,牛晓凯,苏洁,等.地铁致凸形地貌地表振动局部放大现象实测及机理分析[J].振动与冲击,2022,41(4):287-293.
ZHAO J T, NIU X K, SU J, et al. *In-situ* measurement and mechanism analysis for local amplification phenomena of ground vibration in the protruding topography induced by subway [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(4): 287-293.(in Chinese)

[8] 马龙祥,刘维宁,刘卫丰,等.地铁列车振动环境影响预测的薄片有限元-无限元耦合模型[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):2131-2141.
MA L X,LIU W N,LIU W F,et al. Sliced finite element-infinite element coupling model for predicting environmental vibration induced by metro train [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2131-2141.(in Chinese)

[9] 雷华阳,张磊,许英刚,等.快速地铁列车荷载下软土地基沉

降数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 45-48.
LEI H Y, ZHANG L, XU Y G, et al. Study on numerical simulation of soft soil foundation settlement under the load of express subway train [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup.1): 45-48.(in Chinese)

[10] 王力东,朱志辉,韩艳,等.地铁车致隧道与土体振动的高效时-频混合预测方法[J].振动工程学报, 2022, 35(2): 359-368.
WANG L D, ZHU Z H, HAN Y, et al. Efficient time-frequency hybrid method for predicting the subway train induced vibrations of tunnel and ground[J]. Journal of Vibration Engineering, 2022, 35(2): 359-368.(in Chinese)

[11] GU Z F, WEI H L, LIU Z K, et al. Dynamic response mechanism of silt ground under vibration load [J]. Sustainability, 2022, 14(16): 10335.

[12] 胡安峰,孙波,谢康和.下卧基岩饱和地基在移动荷载作用下的动力响应[J].振动与冲击, 2012, 31(4): 151-156.
HU A F, SUN B, XIE K H. Dynamic response of saturated subgrade with rock substratum subjected to moving loads [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(4): 151-156.(in Chinese)

[13] ZHOU S H, HE C, GUO P J, et al. Modeling of vehicle-track-tunnel-soil system considering the dynamic interaction between twin tunnels in a poroelastic half-space[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(1): 04019144.

[14] 袁宗浩,戴凯鑫,潘晓东,等.黏弹性边界对圆形衬砌隧道动力响应的影响[J].浙江工业大学学报, 2020, 48(5): 532-540.
YUAN Z H, DAI K X, PAN X D, et al. Effect of viscoelastic boundary on dynamic response of circular tunnel [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2020, 48(5): 532-540.(in Chinese)

[15] YUAN Z H, CAI Y Q, SUN H L, et al. The influence of a neighboring tunnel on the critical velocity of a three-dimensional tunnel-soil system [J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 212: 23-45.

[16] 黄强,冯青松,黄宏伟,等. 移动简谐荷载下浮置板轨道-隧道-地基模型二维振动响应研究[J].应用基础与工程科学学报, 2023, 31(3): 663-674.
HUANG Q, FENG Q S, HUANG H W, et al. 2D dynamic response of floating slab track-tunnel-ground model under moving harmonic load [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(3): 663-674.(in Chinese)

[17] 何超,贾缘平,周顺华.隧道-地基-流体耦合系统动力响应的三维解析计算方法[J].力学学报, 2023, 55(6): 1329-1341.
HE C, JIA Y P, ZHOU S H. Three-dimensional analytical method for calculating vibrations of a coupled tunnel-soil-fluid system [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(6): 1329-1341.(in Chinese)

[18] DING W T, HUANG X H, DAI Z Y, et al. Analysis of the collapse mechanism and stabilization optimization of the composite stratum at the boundary between prereinforced and unreinforced areas near a shield launching area[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(5): 05023002.

[19] 王鑫,罗富荣,张飞,等.深孔注浆条件下地铁施工地层位移预测研究[J].地下空间与工程学报, 2020, 16(5): 1521-1528.
WANG X, LUO F R, ZHANG F, et al. Study on stratum displacement prediction method induced by metro construction under deep hole grouting condition [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(5): 1521-1528.(in Chinese)

[20] SHI C H, SUN X H, LIU S L, et al. Analysis of seepage characteristics of a foundation pit with horizontal waterproof curtain in highly permeable strata[J]. Water, 2021, 13(9): 1303.

[21] 侯乐乐,翁效林,黄文鹏,等. 湿陷性黄土地铁隧道基底注浆加固处治试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 91-102.
HOU L L, WENG X L, HUANG W P, et al. Experimental on grouting reinforcement and treatment of metro tunnel basement in collapsible loess [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(2): 91-102.(in Chinese)

[22] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 168-178.

[23] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Ⅱ.higher frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28(2): 179-191.