

任意动载作用下长隧道纵向响应解析解

禹海涛^{1,2}, 蔡 创³, 张正伟⁴

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092;
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 4. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 将长隧道简化为作用在 Pasternak 双参数地基上的无限长均质直梁, 基于 Euler-Bernoulli 梁理论给出动力问题的控制方程, 运用积分变换以及卷积定理对该偏微分方程进行求解, 推导出长隧道在任意动载作用下竖向位移、竖向速度、竖向加速度、弯矩、剪力等响应的解析表达式. 讨论了简谐线荷载、移动线荷载和行波荷载三种典型动力荷载下长隧道响应的退化解析表达, 并与已有文献对比, 验证了所推导解析解的正确性. 以行波荷载为例, 通过参数化分析, 研究了行波波速、频率以及不同地基反力系数对隧道动力响应的影响规律. 研究结论对长隧道抗震设计具有一定的参考价值.

关键词: 长隧道; 动力荷载; 纵向响应; 积分变换; 解析解
中图分类号: U452.2⁺8 **文献标志码:** A

Analytical Solutions for Long Tunnels Under Arbitrary Dynamic Loadings

YU Haitao^{1,2}, CAI Chuang³, ZHANG Zhengwei⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Company Limited, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Company Limited, Shanghai 200125, China; 4. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Assuming the long lined tunnel as an infinite homogeneous beam resting on a Pasternak foundation, the governing equation of the dynamic problem can be established based on Euler-Bernoulli beam theory. Integration transform and Residue theorem are applied to solve the differential equation, thus the analytical solutions of displacement, velocity, acceleration, bending moment, shear force for long lined tunnels subjected to arbitrary dynamic loads are obtained. The specified solutions for harmonic line loads,

moving line loads and travelling loads are discussed and compared with the existing solutions, and therefore, the validation of the presented generic form of solutions is verified. Taking travelling loads as an example, parametric analyses are performed to investigate the influence of the velocity and frequency of travelling loads and the shear modulus of foundation on the tunnel dynamic responses. The proposed solution is of value for seismic design of long line tunnel.

Key words: long lined tunnel; dynamic loads; longitudinal response; integration transform; analytical solution

近年来,随着大量隧道工程的建设,隧道抗震设计越来越受到了人们的关注.长隧道运营期间的列车振动以及地震发生时的动力作用都会对隧道结构产生一定影响,研究隧道尤其是长隧道在动力荷载作用下的纵向响应(沿着隧道轴线方向)对于指导隧道结构设计有着重要意义^[1-2].

目前对于隧道纵向动力响应的研究大多采用数值方法,如有限差分法、有限单元法和边界单元法等.莫海鸿等^[3]采用三维动力有限差分法,对广州地铁 4 号线埋置于深厚软土地层之中的盾构隧道在地铁运营期间动力响应进行了深入分析.陈卫军等^[4]采用上海地铁某区间隧道现场实测振动加速度数据,运用有限单元法对南浦大桥近距离交叠隧道在列车振动荷载作用下的动力响应进行了数值模拟.刘卫丰等^[5]提出了一个在频率-波数域内的三维周期性有限元-边界元耦合的数值模型,计算了在隧道底板施加谐振荷载情况下隧道-自由场相互作用系统的动力响应.

收稿日期: 2017-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678438);上海市青年科技启明星计划资助(17QC1400500);上海市科学技术委员会(16DZ1201904);中央高校基本科研业务费专项资金;中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUK1723)

第一作者: 禹海涛(1983—),男,工学博士,博士后,副教授,博士生导师,主要研究方向为地下结构动力学.
E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn

采用这些数值方法研究隧道动力响应问题时,数值积分中需同时考虑时间域和空间域的增量,十分耗费时间,而且计算结果的精度也极其依赖积分算法. 推导动力响应解析解可以很好地弥补数值分析方法存在的不足,大大提高计算的效率^[6]. 本文将长隧道考虑为作用在 Pasternak 双参数地基^[7]上的无限长均质直梁,基于积分变换及卷积定理推导了长隧道在任意动载作用下纵向响应的解析解.

1 数学模型

实际工程中,隧道通常长达数公里,可将长隧道简化为无限长均质直梁,将土体考虑为 Pasternak 双参数地基,隧道与土体的相互作用通过地基反力系数和阻尼系数体现,外荷载表示为任意动力荷载函数 $F(x, t)$,基于这种假定的数学模型如图 1 所示. 图中, E, I, ρ, A 分别表示隧道的弹性模量、横截面惯性矩、密度和横截面面积. K, C, G_p 分别表示地基的反力系数、阻尼系数和剪切刚度, $y(x, t)$ 和 $F(x, t)$ 分别表示隧道的竖向位移和沿 x 轴分布的任意动力荷载, t 表示时间.

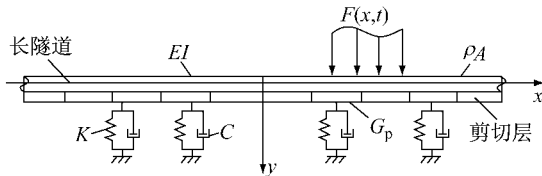


图 1 任意动载作用下长隧道-双参数地基简化模型
Fig. 1 Long lined tunnel on Pasternak foundation subjected to arbitrary dynamic loads

基于 Euler-Bernoulli 梁理论^[8], 可得到动力问题的控制方程如下:

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} + Ky(x, t) - G_p \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} = F(x, t) \quad (1)$$

基于 Pasternak 双参数地基理论, 此处采用的地基反力系数和地基剪切刚度可分别反应土弹簧自身的弹性系数与土弹簧之间的剪切系数.

假设隧道在受到任意动力荷载作用之前是静止的, 则该问题的初值条件为

$$\begin{aligned} y(x, t) \Big|_{t=0} &= 0, \\ \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

假设长隧道为无限长, 则问题的边界条件为

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\partial^n y(x, t)}{\partial x^n} = 0, \quad n = 0, 1, 2, 3 \quad (3)$$

方程(1)~(3)构成了这个问题的完整数学表达, 通过求解该四阶偏微分方程即可得到长隧道在任意动力荷载作用下的解析解.

2 解析表达

2.1 傅里叶变换

对方程(1)中的空间域进行傅里叶变换, 并考虑傅里叶变换的微分性质和问题的边界条件可得:

$$(EI\xi^4 + G_p\xi^2 + K) \tilde{y}(\xi, t) + \rho A \frac{\partial^2 \tilde{y}(\xi, t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial \tilde{y}(\xi, t)}{\partial t} = \tilde{F}(\xi, t) \quad (4)$$

式中: $\tilde{y}(\xi, t)$ 和 $\tilde{F}(\xi, t)$ 分别为 $y(x, t)$ 和 $F(x, t)$ 的傅里叶变换形式, ξ 为波数, 即:

$$\tilde{y}(\xi, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x, t) e^{-i\xi x} dx \quad (5)$$

$$\tilde{F}(\xi, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, t) e^{-i\xi x} dx \quad (6)$$

2.2 拉普拉斯变换

对方程(4)中的时间域进行拉普拉斯变换, 并考虑拉普拉斯变换的微分性质和问题的初值条件可得:

$$(EI\xi^4 + G_p\xi^2 + K + \rho A\omega^2 + C\omega) \bar{y}(\xi, \omega) = \bar{F}(\xi, \omega) \quad (7)$$

式中: $\bar{y}(\xi, \omega)$ 和 $\bar{F}(\xi, \omega)$ 分别为 $\tilde{y}(\xi, t)$ 和 $\tilde{F}(\xi, t)$ 的拉普拉斯变换形式; ω 为频率, 即:

$$\bar{y}(\xi, \omega) = \int_0^{+\infty} \tilde{y}(\xi, t) e^{-\omega t} dt \quad (8)$$

$$\bar{F}(\xi, \omega) = \int_0^{+\infty} \tilde{F}(\xi, t) e^{-\omega t} dt \quad (9)$$

由方程(7)可将问题在频域的解析解表示为

$$\bar{y}(\xi, \omega) = \frac{\bar{F}(\xi, \omega)}{EI\xi^4 + G_p\xi^2 + K + \rho A\omega^2 + C\omega} \quad (10)$$

2.3 拉普拉斯逆变换

为得到问题在时间域的解析解, 对方程(10)进行拉普拉斯逆变换如下:

$$\begin{aligned} L^{-1}[\bar{y}(\xi, \omega)] &= \\ L^{-1} \left[\frac{\bar{F}(\xi, \omega)}{EI\xi^4 + G_p\xi^2 + K + \rho A\omega^2 + C\omega} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)可整理为

$$L^{-1}[\bar{y}(\xi, \omega)] = \frac{1}{\rho A} \frac{1}{b(\xi)} \cdot$$

$$L^{-1}\left[\tilde{F}(\xi, \omega) \frac{b(\xi)}{(\omega+a)^2+b^2(\xi)}\right] \quad (12)$$

其中,

$$a = \frac{C}{2\rho A} \quad (13)$$

$$b(\xi) = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}\xi^4 + \frac{G_p}{\rho A}\xi^2 + \frac{K}{\rho A} - \frac{C^2}{4(\rho A)^2}} \quad (14)$$

已知

$$L^{-1}[\tilde{F}(\xi, \omega)] = \tilde{F}(\xi, t) \quad (15)$$

$$L^{-1}\left[\frac{b(\xi)}{(\omega+a)^2+b^2(\xi)}\right] = e^{-a} \sin[b(\xi)t] \quad (16)$$

结合式(15)~(16),对方程(12)的右边运用卷积定理,可得问题在时间域的解析解为

$$\begin{aligned} \tilde{y}(\xi, t) = & \frac{1}{\rho A} \frac{1}{b(\xi)} \int_0^t \tilde{F}(\xi, \omega) e^{-a(t-\omega)} \sin[b(\xi)(t-\omega)] d\omega \\ & (17) \end{aligned}$$

2.4 傅里叶变换

为获得在空间域的解析解,对方程(17)进行傅里叶逆变换可得:

$$y(x, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\rho A} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{b(\xi)} \left\{ \int_0^t \tilde{F}(\xi, \omega) e^{-a(t-\omega)} \sin[b(\xi)(t-\omega)] d\omega \right\} e^{i\xi x} d\xi \quad (18)$$

结合

$$\tilde{F}(\xi, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\gamma, t) e^{-i\xi\gamma} d\gamma \quad (19)$$

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\xi(x-\gamma)} d\xi = \int_0^{+\infty} \cos[\xi(x-\gamma)] d\xi \quad (20)$$

在时间域和空间域的解析解最终可表示为

$$y(x, t) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\cos[\xi(x-\gamma)]}{b(\xi)} \left\{ \int_0^t F(\gamma, \omega) e^{-a(t-\omega)} \sin[b(\xi)(t-\omega)] d\omega \right\} d\xi d\gamma \quad (21)$$

隧道的竖向速度响应和竖向加速度响应可以通过竖向位移响应对时间 t 分别进行一阶求导和二阶求导获得:

$$v(x, t) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\cos[\xi(x-\gamma)]}{b(\xi)} \left\{ \int_0^t F(\gamma, \omega) e^{-a(t-\omega)} \left[-a \sin[b(\xi)(t-\omega)] + b(\xi) \cos[b(\xi)(t-\omega)] \right] d\omega \right\} d\xi d\gamma \quad (22)$$

$$a(x, t) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\rho A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\cos[\xi(x-\gamma)]}{b(\xi)}$$

$$\left\{ \int_0^t F(\gamma, \omega) e^{-a(t-\omega)} \left[\begin{aligned} & [a^2 - b^2(\xi)] \sin[b(\xi)(t-\omega)] \\ & - 2ab(\xi) \cos[b(\xi)(t-\omega)] \end{aligned} \right] d\omega + F(\gamma, t) b(\xi) \right\} d\xi d\gamma \quad (23)$$

隧道的弯矩响应和剪力响应可以通过竖向位移响应对空间 x 进行二阶求导和三阶求导并乘以系数 $-(EI)$ 获得:

$$M(x, t) = \frac{1}{\pi} \frac{EI}{\rho A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\xi^2 \cos[\xi(x-\gamma)]}{b(\xi)} \left\{ \int_0^t F(\gamma, \omega) e^{-a(t-\omega)} \sin[b(\xi)(t-\omega)] d\omega \right\} d\xi d\gamma \quad (24)$$

$$Q(x, t) = \frac{1}{\pi} \frac{EI}{\rho A} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{\xi^3 \sin[\xi(\gamma-x)]}{b(\xi)}$$

$$\left\{ \int_0^t F(\gamma, \omega) e^{-a(t-\omega)} \sin[b(\xi)(t-\omega)] d\omega \right\} d\xi d\gamma \quad (25)$$

式(21)~(25)即为任意动力荷载作用下长隧道竖向位移、竖向速度、竖向加速度、弯矩和剪力响应的完整解析解表达。

3 荷载讨论

需要指出的是,第2.4节所给的解析解是基于任意动力荷载 $F(x, t)$ 给出的一个通解形式.对于几类典型荷载下的解析解,下文将给予具体讨论,为了求解方便,假定阻尼 $C=0$,也即 $a=0$.

3.1 简谐线荷载

简谐线荷载通常可表示为

$$F(x, t) = P \frac{H(r^2 - x^2)}{2r} e^{i\Omega t} \quad (26)$$

式中: r 表示线荷载的半宽; Ω 和 P 分别表示荷载圆频率和振幅; $H(\cdot)$ 为单位阶跃函数,定义如下:

$$H(x - x_0) = \begin{cases} 0, & x < x_0 \\ 1/2, & x = x_0 \\ 1, & x > x_0 \end{cases} \quad (27)$$

将式(26)代入式(21)并考虑无阻尼可得:

$$y(x, t) = \frac{P}{\pi \rho A r} \int_0^{+\infty} \sin(\xi r) \cos(\xi x) \left\{ \frac{b(\xi) e^{i\Omega t} - b(\xi) \cos[b(\xi)t] - i\Omega \sin[b(\xi)t]}{\xi b(\xi) [b^2(\xi) - \Omega^2]} \right\} d\xi \quad (28)$$

若仅考虑稳态响应,则有:

$$y(x,t) = \frac{Pe^{i\Omega t}}{\pi\rho A} \int_0^{+\infty} \frac{\sin(\xi r) \cos(\xi x)}{r\xi [b^2(\xi) - \Omega^2]} d\xi \quad (29)$$

若假设剪切系数 $G_p = 0$,即将地基退化为温克尔地基,式(29)可以表示为

$$y(x,t) = \frac{Pe^{i\Omega t}}{2\pi EI} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(\xi r) e^{i\xi x}}{r\xi [\xi^4 + K/EI - \Omega^2 \rho A/EI]} d\xi \quad (30)$$

式(30)的解析表达式与 Sun^[9] 给出的温克尔地基上无限长梁在简谐线荷载作用下的解析表达式一致,这在一定程度上可以验证本文所推导的 Pasternak 地基上长隧道在任意动力荷载作用下解析解的正确性。

3.2 移动线荷载

对于移动线荷载,通常可表示为

$$F(x,t) = P \frac{H[r^2 - (x - vt)^2]}{2r} e^{i\Omega t} \quad (31)$$

式中: v 表示荷载移动速度; r 表示线荷载的半宽; Ω 和 P 分别表示荷载的圆频率和振幅; $H(\cdot)$ 为单位阶跃函数,定义同式(27)。

将式(31)代入式(21)并考虑无阻尼可得隧道的稳态响应为

$$y(x,t) = \frac{Pe^{i\Omega t}}{\pi\rho A} \int_0^{+\infty} \frac{\sin(\xi r) \cos[\xi(x - vt)]}{r\xi [b^2(\xi) - (\Omega - v\xi)^2]} d\xi \quad (32)$$

假设地基剪切系数 $G_p = 0$,即将地基考虑为温克尔地基,式(32)可表示为

$$y(x,t) = \frac{Pe^{i\Omega t}}{2\pi EI} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(\xi r) e^{i\xi(x-vt)}}{r\xi \left[\begin{array}{l} \xi^4 - v^2 \xi^2 \rho A/EI + \\ 2v\Omega \xi \rho A/EI + \\ K/EI - \Omega^2 \rho A/EI \end{array} \right]} d\xi \quad (33)$$

式(33)的解析表达式与 Sun^[10] 给出的温克尔地基上无限长梁在移动线荷载作用下的解析表达式一致,这进一步验证了本文所推导的 Pasternak 地基上长隧道在任意动力荷载作用下解析解的正确性。

3.3 行波荷载

对长隧道进行地震下纵向动力响应分析时,地震荷载实际具有行波效应,荷载抵达隧道不同位置的时间不相同.为了体现这种效应,此处将行波荷载简化表示为

$$F(x,t) = \begin{cases} 0, & x > Vt \\ P \sin[\Omega(t - \frac{x}{V})], & x \leq Vt \end{cases} \quad (34)$$

式中: V , Ω 和 P 分别表示行波荷载的波速、圆频率和幅值.幅值 P 通常可以由隧道单位质量与地震加速度的乘积确定。

将式(34)代入(21),并考虑无阻尼条件可得隧道的动力响应为

$$y(x,t) = \frac{P}{\pi\rho A} \int_0^{+\infty} \int_0^{t-V\omega} \left. \begin{array}{l} \frac{\cos[\xi(\gamma - x)]}{b(\xi)} \\ \sin\left[\Omega\left(\omega - \frac{\gamma}{V}\right)\right] \\ \sin[b(\xi)(t - \omega)] \end{array} \right\} d\gamma d\omega d\xi \quad (35)$$

4 参数分析

基于第 3.3 节推导的解析解,此处将给出长隧道在行波荷载下动力响应的具体算例,进一步研究行波波速、频率以及不同地基反力系数对隧道动力响应的影响。

4.1 波速影响分析

假定隧道为均质各向同性的,以上海地区某大直径盾构隧道为例,参数取值见表 1.地基参数如下:反力系数取 $K = 3.5 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,阻尼系数取 $C = 0$,剪切刚度取 $G_p = 10 \text{ MPa}$.行波荷载参数如下:以上海地区设计地震加速度 $0.1g$ 为例,取振幅 73 kN ,频率取 2 Hz ,为研究行波荷载波速对隧道动力响应的影响,波速分别取 $200, 400, 600, 800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

表 1 隧道参数

Tab.1 Details of tunnel

外径/m	内径/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa
15	13.7	2 500	3.55×10^4

图 2 给出了不同波速的行波荷载作用下隧道 $x = 500 \text{ m}$ 处的竖向速度和弯矩的动力响应.从图中可以看出,行波波速对隧道动力响应有明显的影响.隧道的竖向速度响应随着行波波速的增大而增大,行波波速从 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时隧道竖向速度响应增幅较大,行波波速从 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时隧道竖向速度响应增幅有所减缓.隧道的弯矩响应与波速则并非成一种正相关或负相关关系,就本算例而言,隧道抗震设计中可考虑将 $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 波速的行波荷载作为最不利工况进行抗震计算。

4.2 频率影响分析

为研究行波荷载频率对隧道动力响应的影响,此处保留 4.1 节算例的隧道参数和地基参数,行波荷载振幅保持不变,波速取 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,频率分别取 $2, 4, 6, 8 \text{ Hz}$.

图3给出了不同频率的行波荷载作用下隧道 $x=500\text{ m}$ 处的竖向速度和弯矩的动力响应。

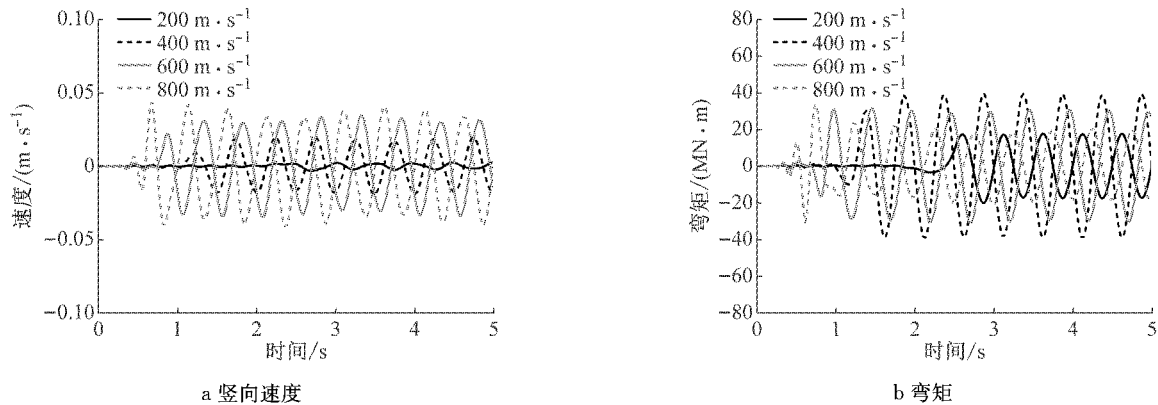


图2 不同波速行波荷载作用下隧道 $x=500\text{ m}$ 处响应

Fig.2 Structural responses at the position of $x=500\text{ m}$ of the tunnel under travelling loads with different velocities

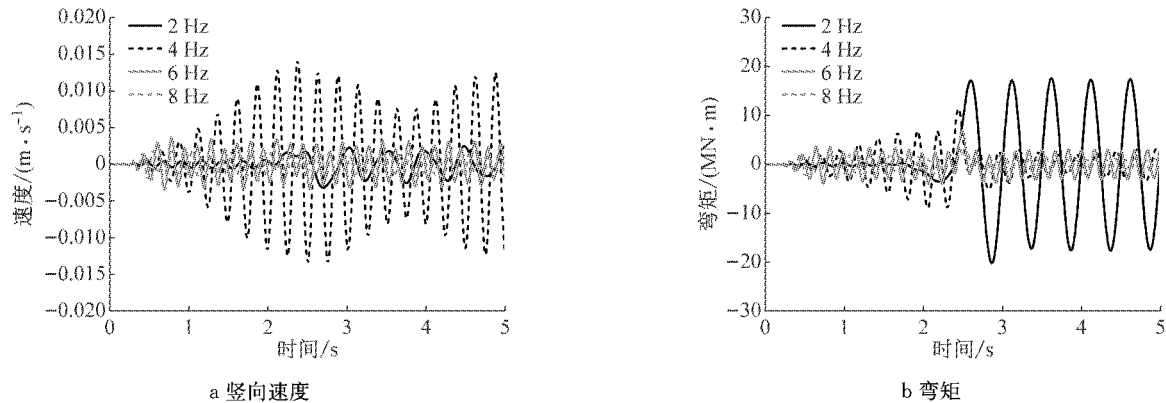


图3 不同频率行波荷载作用下隧道 $x=500\text{ m}$ 处响应

Fig.3 Structural responses at the position of $x=500\text{ m}$ of the tunnel under travelling loads with different frequencies

从图中可以看出,行波荷载的频率同样对隧道动力响应有着显著的影响.隧道的竖向速度响应与荷载频率没有明显的正相关或负相关关系,荷载频率为 4 Hz 下的隧道竖向速度响应比其他荷载频率下的响应有明显增大.隧道的弯矩响应则随着荷载频率的增大而减小,荷载频率从 2 Hz 增至 6 Hz 时隧道弯矩响应有明显减小,荷载频率从 6 Hz 增至 8 Hz 时隧道弯矩响应降幅有所减缓.因此,在抗震设计中应尤其关注地震波低频部分对隧道造成的破坏.

4.3 地基反力系数影响分析

为研究地基反力系数对隧道动力响应的影响,此处仍采用 4.1 节算例中隧道参数,行波振幅保持不变,波速取 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,频率取 2 Hz .阻尼系数 C 和地基剪切刚度 G_p 取 0,地基反力系数分别取 $K=3.5\times 10^2\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, $K=3.5\times 10^3\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, $K=3.5\times 10^4\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$, $K=3.5\times 10^5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,所选参

数基本涵盖了软土、硬土及岩石等不同场地条件下的地基反力系数,可以较好地反映实际工程中不同地基反力系数对隧道动力响应的影响.

图4给出了行波荷载作用下不同地基反力系数的地基上隧道 $x=500\text{ m}$ 处的竖向速度和弯矩的动力响应.由图可以看出,随着地基反力系数的增大,隧道的竖向速度响应和弯矩响应都趋于减小.由此可见,对于地基反力系数较小的软土地区,应尤其重视隧道的抗震设计.

5 结论

本文为长隧道纵向动力响应分析提供了一种新的快速实用简化算法,即将长隧道简化为作用在 Pasternak 双参数地基上的无限长均质梁,通过积分变换和卷积定理求解动力控制方程,推导出长隧道

在任意动力荷载作用下纵向响应的解析解表达式,讨论了简谐线荷载、移动线荷载和行波荷载三种具

体荷载作用下隧道纵向响应的解析表达式,通过与前人研究成果对比,验证了所给解析解的正确性。

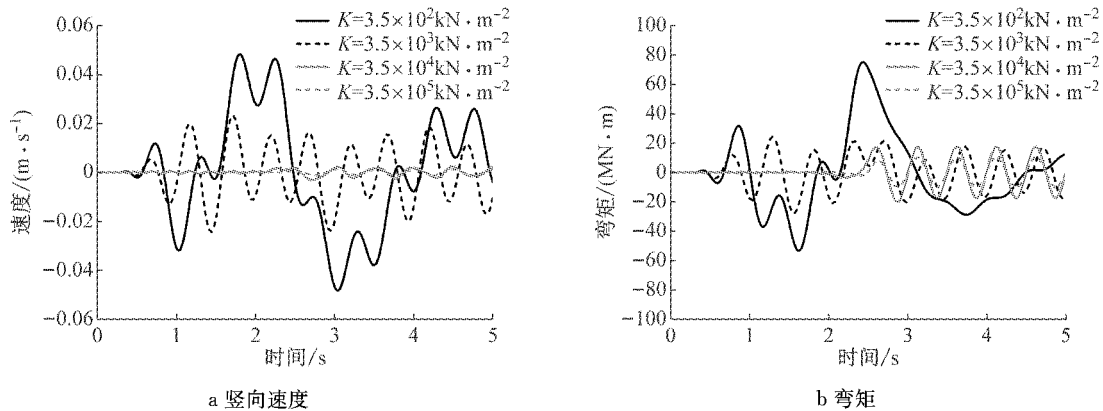


图 4 行波荷载作用下不同地基反力系数的地基上隧道 $x = 500 \text{ m}$ 处响应

Fig. 4 Structural responses at the position of $x = 500 \text{ m}$ of the tunnel on different foundations with different spring stiffness subjected to travelling loads

结合行波荷载作用下长隧道纵向响应的解析解算例,研究了行波荷载的波速、频率以及地基反力系数对隧道动力响应的影响,结果表明:隧道竖向速度响应随着行波波速的增大而增大,隧道弯矩响应与行波波速则没有明显的相关关系;隧道竖向速度响应与行波荷载频率没有明显相关关系,而隧道弯矩响应则随着行波荷载频率的减小而增大,因此在抗震设计中应尤其关注地震波低频部分对隧道的破坏;随着地基反力系数的减小,隧道动力响应逐渐增大,这说明对于修建于地基反力系数较小的软土地区隧道,应尤其注重隧道的抗震设计。

本文所推导出的解析解适用于线性问题分析,可以简便、快速地对实际工程长隧道结构的抗震安全性进行评估,还可以直观地给出各关键参数之间相互关联的解析关系,为实际工程长隧道结构抗震设计与分析提供了理论依据。

参考文献:

[1] 禹海涛,袁勇,刘洪洲,等. 沉管隧道接头力学模型及刚度解析表达式[J]. 工程力学, 2014, 31(6): 145.
YU Haitao, YUAN Yong, LIU Hongzhou, *et al.* Mechanical model and analytical solution for stiffness in the joints of an immersed-tube tunnel [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6): 145.

[2] 袁勇,申中原,禹海涛. 沉管隧道纵向地震响应分析的多体动力学方法[J]. 工程力学, 2015, 32(5): 76.
YUAN Yong, SHEN Zhongyuan, YU Haitao. Multibody dynamics method for longitudinal seismic response analysis of immersed tunnels [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5): 76.

(5): 76.

[3] 莫海鸿,邓飞皇,王军辉. 营运期地铁盾构隧道动力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3507.
MO Haihong, DENG Feihuang, WANG Junhui. Analysis of dynamic response of shield tunnel during method operation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S2): 3507.

[4] 陈卫军,张璞. 列车动载作用下交叠隧道动力响应数值模拟[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 770.
CHEN Weijun, ZHANG Pu. Numerical simulation of dynamic response of overlap tunnels in close proximity due to train's vibrating load [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(6): 770.

[5] 刘卫丰,刘维宁,Gupta S,等. 地铁振动预测的周期性有限元-边界元耦合模型[J]. 振动工程学报, 2009, 22(5): 480.
LIU Weifeng, LIU Weining, Gupta S, *et al.* A coupled periodic finite element-boundary element model for prediction of vibrations induced by metro traffic [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2009, 22(5): 480.

[6] YU Haitao, YUAN Yong. Analytical solution for an infinite Euler-Bernoulli beam on a viscoelastic foundation subjected to arbitrary dynamic loads [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2014, 140(3): 542.

[7] CAO Changyong, ZHONG Yang. Dynamic response of a beam on a Pasternak foundation and under a moving load [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 7(4): 311.

[8] Bauchau O A, Craig J I. Euler-Bernoulli beam theory [M]. Berlin: Springer Netherlands, 2009.

[9] SUN Lu. A closed-form solution of a Bernoulli-Euler beam on a viscoelastic foundation under harmonic line loads [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 242(4): 619.

[10] SUN Lu. An explicit representation of steady state response of a beam on an elastic foundation to moving harmonic line loads [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, 27(1): 69.