

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201202003

隧道纵向抗震分析的反应加速度方法*

赵密¹, 陈晓晖¹, 黄景琦², 杜修力¹, 王媛²

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;
2. 北京科技大学城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:为研究隧道纵向地震响应, 首先将隧道结构的动力问题简化为地震变形场作用下的土-隧道拟静力相互作用问题, 推导了土-隧道拟静力相互作用模型的反应加速度方法。针对规范提供的纵向位移模式, 给出相应反应加速度方法的等效惯性力公式及模型边界条件, 最终建立基于规范位移模式的隧道纵向反应加速度方法。在与整体式反应位移方法对比验证的基础上, 开展不同场地条件及不同隧道埋深下的隧道纵向响应规律研究。数值模拟结果表明: (1) 当场地条件和埋深相同时, 隧道弯矩随场地水平位移的增加而增加, 而剪力、扭矩具有相反的变化规律; (2) 场地条件对隧道纵向响应的影响较大, 场地越软, 隧道剪力越小, 而弯矩和扭矩越大; (3) 在 50 m 覆盖土层厚度内, 随隧道埋深的增加, 隧道剪力、弯矩逐渐减小, 而扭矩基本保持不变。

关键词: 隧道结构; 抗震设计; 规范位移模式; 纵向地震反应; 反应加速度方法

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0742-09

Response Acceleration Method for Tunnel Longitudinal Seismic Analysis

ZHAO Mi¹, CHEN Xiaohui¹, HUANG Jingqi², DU Xiuli¹, WANG Yuan²

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: As one kind of long linear underground structure, the longitudinal response is a very important issue for seismic design of tunnels. In order to study the longitudinal seismic response of the tunnel, the dynamic problem of the tunnel structure under the action of the seismic deformation field is first simplified to pseudo-static interaction between soil and tunnel, and the response acceleration method of the pseudo-static interaction model of the soil-tunnel is derived. Then, based on the longitudinal displacement mode, the response acceleration method for longitudinal seismic analysis of tunnel is built, by offering formulas of the equivalent body forces and the boundary conditions. The developed method is employed to study the tunnel response with different ground conditions and buried depths. The result is compared with that of the integrated seismic displacement method. Through the analysis of the numerical results, some conclusions can be drawn: (1) When the site conditions and buried depth are the same, the bending moment of the tunnel increases with the increase of the hori-

* 收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672289, 51608015)、教育部创新团队发展计划项目(IRT_17R03)资助

作者简介: 赵密(1980—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事土结构相互作用研究。E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn

通讯作者: 黄景琦(1988—), 男, 讲师, 博士。主要从事岩体隧道等地下结构抗震性能研究。

E-mail: huangjingqi11@163.com

zontal displacement of the site, while the shear force and torque have opposite changes; (2) The ground condition has a significant effect on the tunnel internal forces. The softer the ground condition, the larger the bending moment and torsion the tunnel suffers, but the smaller the shear force of the tunnel; (3) With the tunnel depth increasing, the shear force and bending moment gradually decrease. However, the tunnel depth has a slight effect on the torsion.

Keywords: tunnel structure; seismic design; standard displacement mode; longitudinal seismic response; response acceleration method

引言

隧道等地下结构作为我国城市建设、交通运输领域的关键性基础设施,对促进我国经济发展具有重要作用^[1]。以往人们普遍认为,隧道等地下结构具有较好的抗震性能,但全球范围内多次震害调查显示,隧道等地下结构在地震作用下并不十分安全,甚至可能出现严重破坏^[2-5]。因此,隧道等地下结构设计中除需要考虑重力等静力荷载外,还需考虑地震荷载。

目前,地下结构抗震数值分析方法主要包括动力时程分析方法和实用(拟静力)分析方法两类^[6-10]。M. Zhao等^[11]也提出了地下结构抗震分析的反应谱方法。动力时程分析法通过求解动力微分方程获得结构地震响应,可以考虑复杂的边界条件及各种非线性情况,能够较真实地反应土-结构动力相互作用^[10]。但该方法计算工作量大,边界施加繁琐,导致在工程应用中分析效率不高。相对于动力时程分析,拟静力抗震分析方法相对简单、计算工作量大,易于被工程设计人员掌握,因此在工程设计中得到了广泛应用。针对隧道等地下结构二维横截面抗震分析,科研工作者已开展了大量研究工作,并提出了多种经典的实用分析方法,包括地震系数法、自由场变形法、柔度系数法、反应位移法和反应加速度法等^[10,12]。隧道作为一种长线型的地下结构,其纵向非一致地震响应相对横截面响应往往更为危险。然而,目前关于隧道纵向抗震实用分析方法的研究相对较少。在我国与隧道结构设计相关的主要规范中:《铁路工程抗震设计规范》^[13]、《建筑抗震设计规范》^[14]和《地下铁道建筑结构抗震设计规范》^[15]等均未对隧道结构纵向抗震设计作特别规定。《核电厂抗震设计规范》^[16]建议采用自由场变形法进行计算,但自由场变形法认为地下结构变形完全受控于场地变形,忽略了土-结构相互作用,导致计算结果与实际情况相差较大。《地下结构抗震设计标准》^[17]及《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[18]

中建议的纵向反应位移法将结构简化为梁单元,土层采用地基弹簧模拟,虽然一定程度上考虑了土体与结构的相互作用,但地基弹簧刚度难以准确确定,往往带来较大的计算误差^[19]。刘晶波等^[8,20-21]提出了一种适用于隧道结构纵向地震反应分析的整体式反应位移法,解决了反应位移法中地基弹簧较难确定的问题,具有较高的计算精度。整体式反应位移方法需要首先计算土-结构接触面位置处的场地变形等效荷载、结构周围剪力以及结构惯性力,然后建立土-结构整体有限元模型,将上述荷载加到土-结构整体模型中进行结构响应计算,因此整体式反应位移方法在操作上较为繁琐。

综上所述,目前隧道纵向实用抗震分析方法主要包括规范提供的反应位移方法和整体式反应位移方法,较难满足工程中对多种计算方法对比验证的需要。反应加速度方法采用整体式分析模型,不存在地基弹簧较难确定的问题,并且可以一定程度上对地下结构开展静力荷载与地震荷载的统一计算,但目前关于隧道纵向反应加速度方法的研究较少。

本文首先忽略隧道结构的惯性效应及结构对地震波的散射作用,将隧道结构的地震动问题简化为地震变形场作用下的土-隧道拟静力相互作用问题,对土-隧道拟静力相互作用模型进行反应加速度方法的理论公式推导,并采用规范提供的纵向位移模式,推导地震等效惯性力及场地截断边界上边界力的计算公式,最终建立基于规范位移模式的隧道纵向反应加速度方法。在与整体式反应位移方法对比验证的基础上,开展不同场地条件及不同隧道埋深下的隧道纵向响应规律研究。

1 隧道纵向反应加速度方法的建立

1.1 反应加速度方法理论公式推导

Y.M.A. Hashash等^[22]认为地下结构的地震惯性效应较小,抗震设计中需主要考虑岩土体自由场

变形以及其与结构的相互作用。S. Okamoto等^[23]对沉管隧道地震响应的研究表明:隧道响应主要受控于周围岩土体变形,其本身的惯性效应影响较小。Z.G. Xu等^[24]对地下结构的地震响应开展数值模拟研究,认为在地下结构的抗震设计中,可以忽略结构的惯性效应。此外,赵密等^[25]的研究成果表明地下结构地震反应中散射场的含量通常远少于自由场,忽略地震波的散射作用,对结构的地震响应影响不大。因此,本文忽略隧道结构的惯性效应及结构对地震波的散射作用,将隧道地震响应问题简化为地震变形场作用下的拟静力相互作用问题。图1为土-隧道系统的拟静力相互作用分析模型。采用子结构分析方法,将图1中的整体相互作用模型分解为隧道结构、近场土体及远场土体三个子模型。采用下标1,2,3,4分别表示隧道结构、结构-近场交界面、近场土体、近场土体-远场土体交界面。

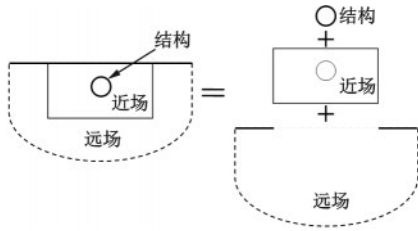


图1 土-隧道拟静力相互作用分析模型
Fig.1 Soil-tunnel quasi-static interaction model

隧道结构的(拟)静力平衡方程可写为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{F}_{2b} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{U} 为位移向量; \mathbf{F}_{2b} 为结构对边界处近场土体的作用荷载。

将近、远场土体的反应分解为无结构存在的场地自由场及结构存在后的扰动场,分别采用下标 f 及 s 表示。因此近、远场土体运动 \mathbf{U} 及交界面上的相互作用力 \mathbf{F}_b 可分解为:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}^s + \mathbf{U}^f \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_b = \mathbf{F}_b^s + \mathbf{F}_b^f \quad (3)$$

当无隧道结构存在时,近场场地的运动为自由场运动,此时,近场场地的(拟)静力平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & 0 \\ \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ 0 & \mathbf{K}_{43} & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2^f \\ \mathbf{U}_3^f \\ \mathbf{U}_4^f \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2i}^f \\ \mathbf{F}_{3i}^f \\ \mathbf{F}_{4i}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2b}^f \\ 0 \\ \mathbf{F}_{4b}^f \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, \mathbf{F}_i^f 为使场地重现自由场运动所需要的惯性力; \mathbf{F}_{2b}^f 和 \mathbf{F}_{4b}^f 为结构-近场交界面上相互作用力和近

场-远场交界面上的相互作用力。

隧道结构存在必然对近场场地的运动产生扰动作用。近场场地在扰动场下的(拟)静力平衡方程可写为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & 0 \\ \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ 0 & \mathbf{K}_{43} & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2^s \\ \mathbf{U}_3^s \\ \mathbf{U}_4^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2b}^s \\ 0 \\ \mathbf{F}_{4b}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

将公式(2)代入公式(5)可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & 0 \\ \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ 0 & \mathbf{K}_{43} & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 - \mathbf{U}_2^f \\ \mathbf{U}_3 - \mathbf{U}_3^f \\ \mathbf{U}_4 - \mathbf{U}_4^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2b}^s \\ 0 \\ \mathbf{F}_{4b}^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

将公式(3)和(4)带入公式(6),化简后可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & 0 \\ \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ 0 & \mathbf{K}_{43} & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2i}^f \\ \mathbf{F}_{3i}^f \\ \mathbf{F}_{4i}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2b}^s \\ 0 \\ \mathbf{F}_{4b}^s + \mathbf{F}_{4b}^f \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据圣维南原理,当近场场地足够大、远场距离结构足够远时,结构的存在对远场的扰动作用可忽略不计。此时, \mathbf{F}_{4b}^s 可设置0,公式(7)可重写为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & 0 \\ \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ 0 & \mathbf{K}_{43} & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2i}^f \\ \mathbf{F}_{3i}^f \\ \mathbf{F}_{4i}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2b}^s \\ 0 \\ \mathbf{F}_{4b}^f \end{bmatrix} \quad (8)$$

组装公式(1)和(8),可得场地-隧道结构相互作用系统的整体(拟)静力平衡方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & 0 & 0 \\ \mathbf{K}_{21} & \mathbf{K}_{22} & \mathbf{K}_{23} & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_{32} & \mathbf{K}_{33} & \mathbf{K}_{34} \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_{43} & \mathbf{K}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_3 \\ \mathbf{U}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{F}_{4b}^f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_{2i}^f \\ \mathbf{F}_{3i}^f \\ \mathbf{F}_{4i}^f \end{bmatrix} \quad (9)$$

从公式(9)中可以看出,反应加速度方法将地震引起的场地变形等效为场地惯性力及场地截断边界上的边界力。

1.2 基于规范位移模式的隧道纵向反应加速方法

1.2.1 隧道纵向地层位移模式

在《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[18]中针对城市土层场地,给出了隧道纵向地震响应的场地位移模式,如图2所示。地表的水平峰值位移为 u_{\max} ,地下50 m及其以下部分的峰值位移取地表峰值位移的1/2,不足50 m处的峰值位移按照深度通过线性插值确定。沿深度 z 方向土层的峰值位移为:

$$u_{\max}(z) = \begin{cases} u_{\max} - \frac{u_{\max}}{100}z & z \leq 50 \text{ m} \\ \frac{1}{2}u_{\max} & z > 50 \text{ m} \end{cases} \quad (10)$$

沿与隧道轴线方向垂直的水平方向位移 $u(x)$,



图2 隧道纵向位移模式示意

Fig.2 Illustration of the horizontal displacement along the tunnel axis

z)的计算公式为:

$$u(x, z) = u_{\max}(z) \sin \frac{2\pi x}{L} \quad (11)$$

式中, L 为土层变形波长, 其求解公式为:

$$L = \frac{2L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (12)$$

$$L_1 = T_s V_{SD} \quad (13)$$

$$L_2 = T_s V_{SDB} \quad (14)$$

式中, L_1 与 L_2 分别为表面土层变形的波长与基岩变形的波长; V_{SD} 与 V_{SDB} 为表面土层的平均剪切波速和基岩的平均剪切波速; T_s 为考虑土层地震应变水平的土层场地特征周期, 可由式(15)计算得到:

$$T_s = \frac{4H}{V_{SD}} \quad (15)$$

式中, H 为覆盖土层厚度。

1.2.2 隧道纵向反应加速度法建立

图3给出了直角坐标系下隧道结构的三维场地模型。 x 方向为隧道轴线方向, y 为模型高度方向, z 为平行隧道横截面的水平方向。模型高度为 L_y , 自由地表为 $y=L_y$ 面。另外, 考虑当前城市地下结构的埋深基本在 50 m 以内, 因此本文建立的方法仅针对 50 m 埋深以内的隧道结构。

根据《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[18] 中的位移函数, 在图3所示的坐标系内, 场地任意一点 $A(x, y, z)$ 的各位移分量可表示为:

$$\begin{cases} U_x = 0 \\ U_y = 0 \\ U_z = (u_{\max} + \frac{u_{\max}}{100}(y - L_y)) \sin \frac{2\pi x}{L} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16)中的位移, 可求得场地各应变分量为:

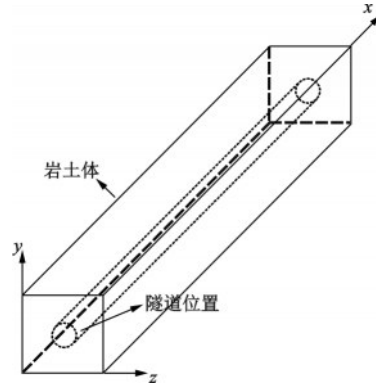


图3 隧道结构三维场地模型

Fig.3 3D ground model of soil-tunnel system

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = 0 \\ \epsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y} = 0 \\ \epsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z} = 0 \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x} = 0 \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y} = \frac{u_{\max}}{100} \sin \frac{2\pi x}{L} \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} = (u_{\max} + \frac{u_{\max}}{100}(y - L_y)) \frac{2\pi}{L} \sin \frac{2\pi x}{L} \end{cases} \quad (17)$$

假设土层为均匀线弹性介质, 将式(17)中的应变代入胡克定律公式, 可求得各应力分量为:

$$\begin{cases} \sigma_x = 0 \\ \sigma_y = 0 \\ \sigma_z = 0 \\ \tau_{xy} = 0 \\ \tau_{yz} = G \frac{u_{\max}}{100} \sin \frac{2\pi x}{L} \\ \tau_{zx} = G(u_{\max} + \frac{u_{\max}}{100}(y - L_y)) \frac{2\pi}{L} \cos \frac{2\pi x}{L} \end{cases} \quad (18)$$

由弹性力学理论可知, 一点的平衡方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = -F_{bx} \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -F_{by} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = -F_{bz} \end{cases} \quad (19)$$

将式(18)代入式(19)可求得各方向等效惯性的具体表达式为:

$$\begin{cases} F_{bx} = 0 \\ F_{by} = 0 \\ F_{bz} = G(u_{\max} + \frac{u_{\max}}{100}(y - L_y))(\frac{2\pi}{L})^2 \sin \frac{2\pi x}{L} \end{cases} \quad (20)$$

基于《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[18]纵向位移模式的反应加速度方法需要在模型内部施加公式(20)的等效惯性力 F_{bz} ,同时截断边界需要满足式(16)中的位移边界条件或式(18)所示的应力边界条件。基于规范位移的隧道纵向反应加速度方法的具体操作步骤如下:

(1) 建立土-隧道系统的三维有限元整体分析模型。

(2) 依据场地条件及抗震要求,确定地表设计地震动水平峰值位移 u_{\max} 和土层变形波长 L 。

(3) 在有限元模型中施加等效惯性力 F_{bz} 。

(4) 在模型每个截断边界处施加公式(16)中的位移边界条件,或混合施加公式(18)中的应力边界条件和公式(16)的位移边界条件,但应注意保证模型不做刚体运动和刚体转动。

(5) 模型提交计算,分析结果。

2 与整体式反应位移方法的对比验证

采用纵向整体式反应位移法^[8,20-21]对本文建立的反应加速度法的精度进行对比验证。建立的有限元整体分析模型如图4所示,模型高度45 m,宽度60 m。隧道埋深为20 m,外径为6.2 m,内径为5.5 m,衬砌厚度为0.35 m。混凝土衬砌弹性模量为34.5 GPa,密度为2 500 kg/m³,泊松比为0.2,岩土体与隧道单元均采用实体单元,岩土-隧道模型最大网格尺寸为5 m,共109 720个单元。隧道与岩土体采用绑定接触,边界采用式(16)所示的位移边界条件。场地覆盖土层厚度设定为70 m,70 m以下为下卧基岩,下卧基岩的剪切波速设定为2 000 m/s。场地为III类场地,弹性模量为195 MPa,密度为2 000 kg/m³,泊松比为0.35。地震动加速度分区为0.15g,抗震设防类别为E2地震作用,此时III类场地的地表位移峰值为0.125 m,土层纵向变形的波长为510.2 m。在模拟长大隧道的纵向响应中,需要截断有限区域进行有限元建模。而隧道两端截断处必然对隧道内部的响应产生干扰。根据圣维南原理,当隧道足够长时,两端截断的影响将逐渐消失,隧道中间部位

的响应可作为准确的反应。从文献[26]的模拟结果可以看出在距离隧道端部40 m左右,端部边界的影响变得非常微小。因此,本算例中模型长度取650 m,两端多预留了约70 m长度以消除截断边界的影响,取中间段的计算结果进行分析。

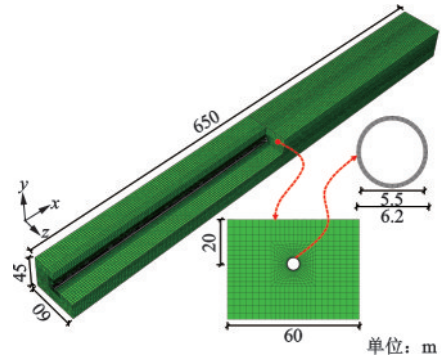


图4 有限元分析模型

Fig.4 Finite element model

隧道地震响应受控于周围场地变形,而规范提供的纵向地层位移为正弦波形式分布的周期函数,因此隧道纵向响应同样沿纵向周期分布。另外,由于场地位移为垂直于隧道轴线的水平位移,且沿深度方向和隧道纵向非均匀分布,此时隧道将承受较为明显的剪力 F_z 、弯矩 M_y 和扭矩 M_x ,如图5所示。因此,下文分析中仅对一个土层变形波长内的隧道剪力 F_z 、弯矩 M_y 和扭矩 M_x 进行讨论。

图6给出了分别由本文反应加速度方法和整体式反应位移法计算获得的剪力 F_z 、弯矩 M_y 和扭矩 M_x 在一个土层变形波长内的分布规律。其中,剪力 F_z 、弯矩 M_y 和扭矩 M_x 通过提取横断面上所有单元应力,并对应力进行积分获得。从图6中可以看出,

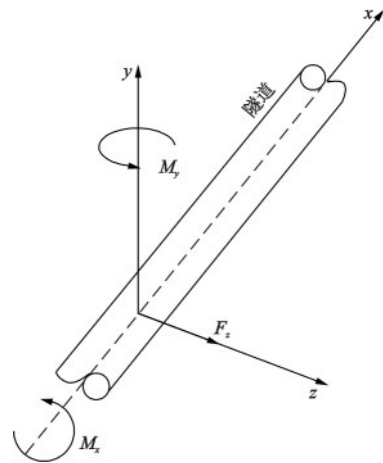


图5 隧道轴线内力示意

Fig.5 Illustration of the tunnel internal forces

反应加速度方法与整体式反应位移方法两种方法的计算结果基本重合,说明本文提出的反应加速度方法与整体式反应位移方法具有同样的精度,可作为除整体式反应位移方法外的另外一种隧道纵向抗震简化数值分析方法。另外,相对于整体式反应位移方法,该方法对土层变形进行模拟,可开展地下结构静力荷载与地震荷载的统一计算。

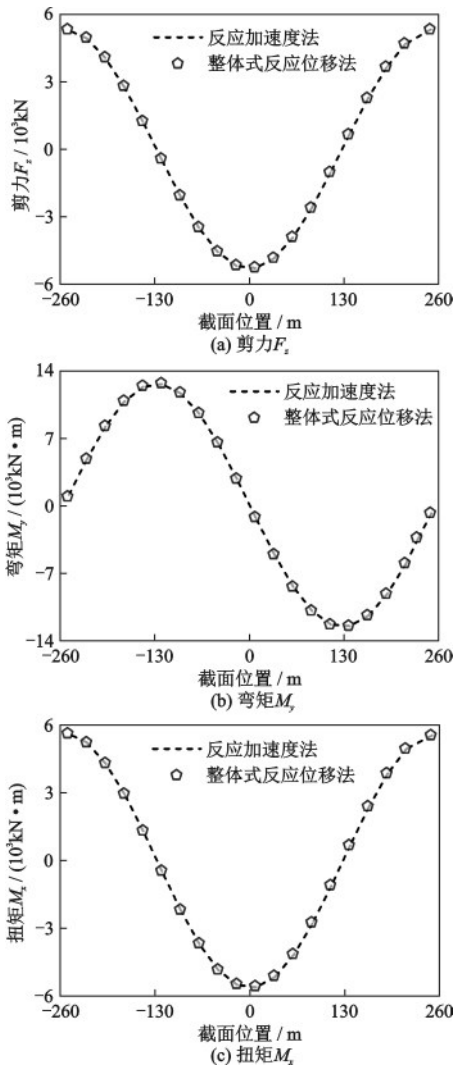


图6 隧道内力在一个土层变形波长内的分布情况
Fig.6 Distribution of internal forces in one wavelength

3 隧道纵向地震响应规律分析

3.1 场地条件对隧道地震响应的影响

为研究场地条件对隧道纵向地震响应的影响,参考《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[18],选取软

弱土、中软土、中硬土、坚硬土四种类别的场地土体,每种场地土类别选取1组土体参数,见表1。除场地类别不同以外,有限元模型其它参数均与图4相同,此时各场地的地表峰值位移、场地特征周期及土层变形波长等地震动参数见表2。

表1 场地材料参数

Table 1 Material parameters of ground sites

场地土类别	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
I类:坚硬土	2 240	0.3	2 500	587
II类:中硬土	650	0.3	2 200	337
III类:中软土	195	0.35	2 000	190
IV类:软弱土	50	0.35	1 800	101

表2 场地地震动参数

Table 2 Earthquake parameters of ground sites

场地土类别	地表峰值位移/ 特征周期/ 土层变形波长/ m s m		
	m	s	m
I类:坚硬土	0.08	0.477	432.9
II类:中硬土	0.1	0.83	478.8
III类:中软土	0.125	1.47	510.2
IV类:软弱土	0.155	2.77	534.8

图7给出了不同场地条件下,隧道结构在一个土层变形波长内的剪力 F_z ,弯矩 M_y 和扭矩 M_x 。由图7可以看出,不同场地条件下的剪力 F_z ,弯矩 M_y 和扭矩 M_x 在一个土层变形波长内具有相同的分布规律,具体为剪力和扭矩基本为余弦函数变化,而弯矩为正弦函数变化。对比公式(11)中规范^[18]给出的纵向位移函数可知,弯矩的变化情况与规范^[18]纵向位移变化相一致,即土层水平位移越大时隧道弯矩越大,当水平位移为0时隧道弯矩基本为0。而剪力与扭矩具有相反的变化规律,当水平位移达到最大时剪力和扭矩基本为0,而当水平位移为0时剪力和扭矩达到最大。

对比图7中不同场地类别之间的隧道内力可以发现,从I类场地变化为IV类场地,隧道剪力逐渐变小,即场地越软剪力越小。而对于隧道弯矩和扭矩而言,场地类别从I类场地变化为IV类场地,隧道弯矩和扭矩逐渐增加。

3.2 隧道埋深对隧道地震响应的影响

为研究不同埋深对隧道地震响应的影响,将埋

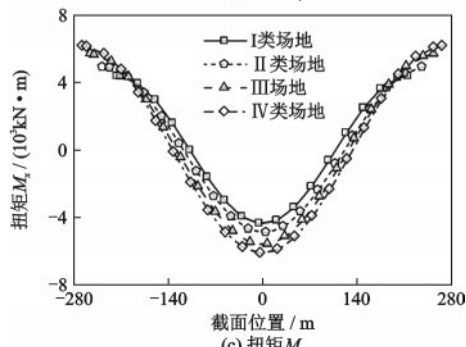
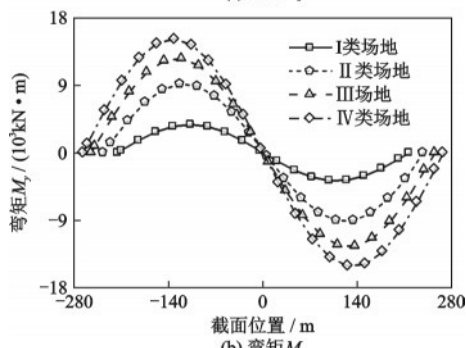
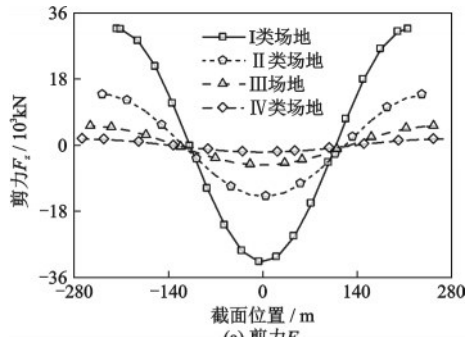


图7 不同场地条件下隧道纵向内力

Fig.7 Internal forces of tunnels in different ground sites

深分别设置为 10 m、20 m 和 30 m,如图 8 所示。除隧道埋深发生变化以外,模型其它参数均与图 4 的有限元模型相同。图 9 给出了隧道不同埋深条件下剪力 F_z 、弯矩 M_y 和扭矩 M_x 在一个土层变形波长内的分布情况。从图 9 可以看出,随埋深的增加,隧道剪力和弯矩均逐渐减小。而 10 m、20 m 和 30 m 埋深下的扭矩基本相等,即隧道扭矩基本不随埋深的变化而变化。

隧道等地下结构的地震响应受控于周围土体的地震变形。在规范^[18]给出的隧道纵向位移模式中,50 m 厚土层内的峰值位移沿深度方向线性减小,即随着隧道埋深的增加,隧道所处位置的峰值位移逐渐减小。对于不同埋深处的隧道结构而言,其纵向位移为有不同峰值位移但有相同波长的正弦波。峰值位移越小意味着场地沿隧道纵向的位

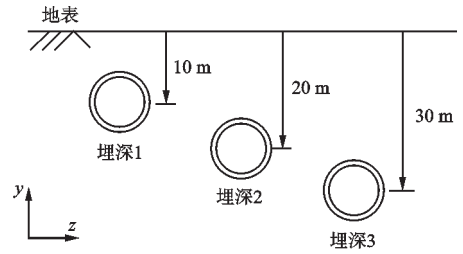


图8 隧道不同埋深

Fig.8 Tunnels with different buried depths

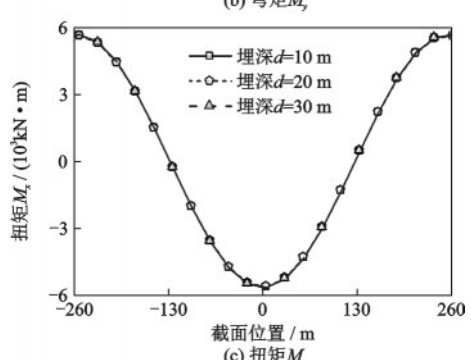
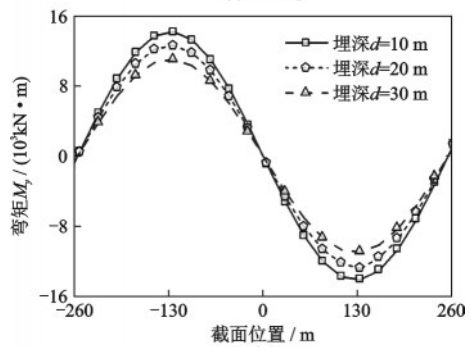
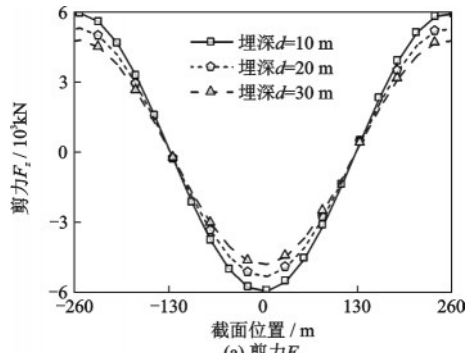


图9 不同埋深条件下隧道纵向内力

Fig.9 Internal forces of tunnels with different buried depths

移变化梯度越小,此时隧道弯矩和剪力越小。因此,图 9 中的隧道弯矩和剪力随埋深的增加而逐渐减小。隧道扭矩主要由隧道纵向不同横截面之间非一致的剪切变形引起。由于场地位移沿深度为线性变化,其引起的场地剪切变形沿深度方向不变,因此,隧道扭矩随深度的变化基本保持不变。

4 结 论

首先将隧道结构的地震动力作用简化为地震变形场作用下的土-隧道拟静力相互作用问题,推导了土-隧道拟静力相互作用模型的反应加速度方法,并与整体式反应位移法对比,验证了该方法的准确性。基于建立的反应加速方法,开展了不同场地条件及不同隧道埋深下的隧道纵向地震响应规律研究。得到以下结论:

(1) 隧道弯矩与场地水平位移的变化具有一致性,即随场地水平位移的增加而增加。而剪力与扭矩具有相反的变化规律。

(2) 随着场地从硬逐渐变软,隧道弯矩、扭矩逐渐增加,而剪力逐渐减小。

(3) 在 50 m 覆盖土层厚度内,随隧道埋深的增加,隧道剪力和弯矩逐渐减小,而扭矩基本保持不变。

需要指出的是,本文针对均匀场地和圆形隧道提出了隧道纵向抗震分析的反应加速度方法,而对于复杂场地以及复杂结构形式,该方法的适用性需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 112-113.
Qian Q H. The upsurge of urban underground space development in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 112-113. (in Chinese)
- [2] Wang W L, Wang T T, Su J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 133-150.
- [3] Chen Z Y, Shi C, Li T B, et al. Damage characteristics and influence factors of mountain tunnels under strong earthquakes [J]. Natural Hazards, 2012, 61(2): 387-401.
- [4] Wang Z Z, Zhang Z. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2013, 45: 45-55.
- [5] Shen Y S, Gao B, Yang X M, et al. Seismic damage

mechanism and dynamic deformation characteristic analysis of mountain tunnel after Wenchuan earthquake [J]. Engineering Geology, 2014, 180: 85-98.

- [6] 刘如山, 胡少卿, 石宏彬. 地下结构抗震计算中拟静力法的地震荷载施加方法研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 237-242.
Liu R S, Hu S Q, Shi H B. Study on seismic loading of pseudo-static approach used in the seismic design of underground structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 237-242. (in Chinese)
- [7] 刘祥庆, 刘晶波. 基于纤维模型的拱形断面地铁车站结构弹塑性地震反应时程分析[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 150-157.
Liu X Q, Liu J B. Time history analysis of elasto-plastic seismic response of a subway station structure with arched cross section based on fiber model [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(10): 150-157. (in Chinese)
- [8] 刘晶波, 王东洋, 谭辉, 等. 隧道纵向地震反应分析的整体式反应位移法[J]. 工程力学, 2018, 35(10): 17-26.
Liu J B, Wang D Y, Tan H, et al. Integral response displacement method for longitudinal seismic response analysis of tunnel structure [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(10): 17-26. (in Chinese)
- [9] 禹海涛, 张正伟, 李攀, 等. 地下结构抗震设计的改进等效反应加速度法[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 1-10.
Yu H T, Zhang Z W, Li P, et al. Improved equivalent response acceleration method for seismic design of underground structures [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 1-10. (in Chinese)
- [10] 陈国兴, 陈苏, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 7-29.
Chen G X, Chen S, Du X L, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 7-29. (in Chinese)
- [11] Zhao M, Gao Z D, Du X L, et al. Response spectrum method for seismic soil-structure interaction analysis of underground structure [J]. Bulletin Earthquake Engineering, 2019, 17(9): 5339-5363.
- [12] 宾佳. 地下结构地震作用的简化分析方法研究[J]. 国际地震动态, 2017(5): 42-43.
Bin J. Study on the simplified analysis methods of seismic effects of underground structures [J]. International Earthquake Dynamics, 2017(5): 42-43. (in Chinese)

- [13] 铁路工程抗震设计规范: GB5011—2006[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [14] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [15] 地下铁道建筑结构抗震设计规范: DG/TJ08-2064—2009 [S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2009.
- [16] 核电厂抗震设计规范: GB50267—97[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [17] 地下结构抗震设计标准: GB/T51336—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [18] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB50909—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [19] 王东洋. 隧道纵向地震反应分析方法及抗震性能研究 [D]. 北京: 清华大学, 2019.
Wang D Y. Research on longitudinal seismic response analysis method and seismic performance of tunnels. [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019. (in Chinese)
- [20] 刘晶波, 王东洋, 谭辉, 等. 隧道纵向地震反应分析的反应位移法对比[J]. 振动与冲击, 2019, 38(21): 104-111.
Liu J B, Wang D Y, Tan H, et al. Response displacement methods for longitudinal seismic response analysis of tunnel structures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(21): 104-111. (in Chinese)
- [21] 刘晶波, 王东洋, 谭辉, 等. 整体式反应位移法的理论推导及一致性证明[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 18-23.
Liu J B, Wang D Y, Tan H, et al. Theoretical derivation and consistency proof of the integral response deformation method [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(8): 18-23. (in Chinese)
- [22] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16(4): 247-293.
- [23] Okamoto S, Tamura C, Kato K, et al. Behaviors of submerged tunnels during earthquakes [C]//In Proceedings 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome, Italy:[s.n.], 1974: 544-553.
- [24] Xu Z G, Du X L, Xu C S, et al. Numerical research on seismic response characteristics of shallow buried rectangular underground structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 116: 242-252.
- [25] 赵密, 王利涛, 高志懂, 等. 土-结构相互作用分析中几类地震输入方式的比较[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(3): 589-598.
Zhao M, Wang L T, Gao Z D, et al. Comparison of earthquake input methods in soil-structure interaction analysis [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2017, 12(3): 589-598. (in Chinese)
- [26] Huang J Q, Du X L, Jin L, et al. Impact of incident angles of P waves on the dynamic responses of long lined tunnels [J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 2016, 45: 2435-2454.

(本文责编:池营营)