

文章编号: 1000-4750(2015)05-0076-08

沉管隧道纵向地震响应分析的多体动力学方法

袁 勇¹, 申中原^{1,2}, 禹海涛¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 南阳理工学院土木工程学院, 河南, 南阳 473004)

摘 要: 沉管隧道纵向地震响应分析是沉管隧道抗震设计的关键。根据沉管隧道结构的几何特征和结构特点, 基于合理假设建立了沉管隧道的多刚体-弹性阻尼铰-阻尼铰动力学模型, 并运用多体动力学理论中的离散时间传递矩阵法(MS-DT-TMM)推导出了其数学模型及表达式。通过算例进行了沉管隧道纵向地震响应的时程分析, 并将该方法与传统有限元方法的计算结果进行了对比, 结果表明了 MS-DT-TMM 法的可行性和有效性, 为快速实现沉管隧道抗震计算分析提供了新的手段。

关键词: 沉管隧道; 地震响应; 多体动力学; 离散时间传递矩阵法; 动力分析

中图分类号: TU311; P315.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1041

MULTIBODY DYNAMICS METHOD FOR LONGITUDINAL SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF IMMersed TUNNELS

YUAN Yong¹, SHEN Zhong-yuan^{1,2}, YU Hai-tao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473004, China)

Abstract: The longitudinal seismic response analysis of immersed tunnels is crucially important for the seismic design of immersed tunnels. Using the geometric features and structural characteristics of immersed tunnels, a dynamic model composed of multi-rigid bodies, elastic damping hinges, and damping hinges is proposed for immersed tunnels based on reasonable assumptions. The mathematical models and formulae are deduced using the discrete time transfer matrix method (MS-DT-TMM) of multibody dynamics theory. The new method is applied to a reference dynamic test and the seismic response of an immersed tunnel is analyzed. Results using the proposed method compare well with benchmark simulations from the traditional finite element method. The research could provide references for the rapid calculation of seismic response in immersed tunnels.

Key words: immersed tunnels; seismic response; multibody dynamics; discrete time transfer matrix method; dynamic analysis

沉管隧道是采用沉管法施工的水下隧道, 属于大型复杂地下结构。在地震作用下, 管节接头纵向变形过大会导致接头 GINA 止水带水密性降低, 危害接头防水性以及整条隧道的安全性^[1], 因此纵向地震响应分析是沉管隧道抗震设计的关键。

目前, 沉管隧道纵向地震响应分析所采用的力学模型有梁-弹簧模型^[2]、质点-弹簧模型^[3]或等效质

点-弹簧模型^[4], 前者把隧道作为支撑在弹性地基上的连续梁, 后者把隧道作为多质点系统, 接头统一用弹簧模拟, 土-结构之间的相互作用用弹簧和阻尼来模拟。由此导出的数学模型分别是弹性地基梁上的运动方程和结构动力学方程, 可采用解析解^[5]和动力有限元法进行求解^[6]。解析法虽然可以求得准确的结果, 但其表达式复杂, 对于一般的多体系统,

收稿日期: 2013-11-08; 修改日期: 2014-06-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2011BAG07B01); 国家自然科学基金项目(51208296, 51478343); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1029)

通讯作者: 袁 勇(1963—), 男, 云南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事地下结构抗震和防灾减灾研究(E-mail: yuany@tongji.edu.cn).

作者简介: 申中原(1972—), 女, 河南人, 副教授, 博士生, 主要从事地下结构动力学研究(E-mail: 2011shenzhongyuan@tongji.edu.cn);

禹海涛(1983—), 男, 河南人, 副研究员, 博士, 主要从事地下结构动力学研究(E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn).

难以获得解析解,故此方法只适于求解系统自由度较少的情况。随着计算机技术的发展,沉管隧道地震响应的整体动力分析方法目前主要集中于有限元的二维、三维分析^[3]。然而,有限元精细化的网格划分,虽然计算精度提高了,但建模复杂,计算工作量大^[7],如何快速有效地计算沉管隧道纵向地震响应是沉管隧道抗震研究者关注的热点问题。

多体系统离散时间传递矩阵法(MS-DT-TMM),是用来对时变、非线性、大运动等一般多体系统动力学问题进行研究的方法^[8]。该方法将“面向对象”的思想引入到多体系统动力学中,首先将多体系统划分成若干部分,并用矩阵表示各部分的力学特性;然后将结构中基本元件的传递矩阵进行所谓的“封装”,即根据它们之间的拓扑结构将代表其力学特性的矩阵进行数学运算,推导出系统的总传递矩阵和总传递方程;最后根据边界条件和初始参数求出系统的动力响应^[9]。该方法融合了传递矩阵法(TMM)、多体系统传递矩阵法(MS-TMM)、离散时间传递矩阵法(DT-TMM)和数值积分法的优点^[9],具有建模灵活、推导方便、求解过程简单、程式化程度高、涉及的矩阵阶次低等特点,能够实现现代工程大型复杂多体系统动态性能的快速分析和预测,已应用于航空、航天、兵器等领域^[10],在建筑结构领域也有探索性的应用^[11],但在地下结构领域未见报道。

由于工程结构都可归结为以各种方式相联接的多个物体(刚体、弹性体、质点等)组成的多体系统^[9],所以沉管隧道也可看作是建造在地层上由若干段管节和若干个GINA柔性接头组成的典型链式多体系统。根据沉管隧道的几何特征和结构特点,考虑土-结构相互作用,本文建立了沉管隧道纵向地震响应的多体动力学模型:多刚体-弹性阻尼铰-阻尼铰模型;引入多体系统动力学中的MS-DT-TMM法,推导出沉管隧道纵向地震响应的数学模型;最后基于MS-DT-TMM方法建立两管节沉管隧道进行了纵向地震响应的算例分析,并与传统有限元法的计算结果进行对比,两者吻合很好,表明了该方法的可行性和有效性。

1 沉管隧道的多体动力学模型

1.1 基本假设

1.1.1 沉管隧道结构的多刚体离散化模型

多刚体离散化方法是对结构的弹性进行分离,

建立多刚体系统的力学模型,其单元之间不必满足变形连续条件,在受力变形、运动过程中,对结构的变形和运动没有限制^[12]。该方法由Winge和Huston^[13]于1976年提出后,目前已被应用于缆索动力学^[13]、弹性梁屈曲动力特性分析^[14]、曲线箱型梁桥的动力响应分析^[15]、剪切型结构的地震响应分析^[16]、钢筋混凝土框架结构的地震响应分析^[17]和剪力墙结构的地震响应分析^[12]。沉管隧道结构是由若干段钢筋混凝土管节和若干个GINA柔性接头组成的典型链式多体系统,如图1所示。根据多刚体离散化思想,可将沉管隧道的钢筋混凝土结构进行多刚体离散,每段管节视为一个刚体,离散化模型如图2所示。

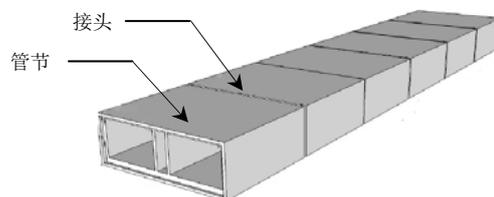


图1 沉管隧道结构示意图

Fig.1 Schematic of an immersed tunnel



图2 沉管隧道结构多刚体离散化模型

Fig.1 Multi-rigid-body discretization model of an immersed tunnel

1.1.2 接头的弹性阻尼铰模型

弹性阻尼铰是指由平移运动的弹簧和与之并联的阻尼器组成的铰^[10]。沉管隧道目前广泛采用的柔性接头主要由GINA止水带和钢剪力键组成。GINA是一种超弹性材料^[18],钢剪切键具有一定的弹塑性,综合考虑两者的耗能效应,将接头简化为弹性阻尼铰模型,如图2所示。

1.1.3 土-结构相互作用的阻尼铰模型

沉管隧道多体系统与其它多体系统的一个重要区别是沉管隧道建造在软弱土层中,土层对沉管隧道的运动具有一定的约束作用^[1]。王松涛和曹资^[19]采用粘性边界,认为土-结构相互作用的边界面上的粘性阻尼力和运动速度成正比。地震运动主要是水平方向的运动^[20],考虑管土间有相对滑移^[21],本文将土-结构相互作用简化为阻尼铰模型,其每段管节与地层的阻尼力可表示为:

$$f_i = -c'_i \dot{x}_{iC} \quad (1)$$

其中: f_i 是第 i 段管节与地层之间的阻尼力; c'_i 是第 i 段管节与地层之间的阻尼系数; \dot{x}_{iC} 是管节质心 C_i 的纵向速度。

1.1.4 地震荷载

地震荷载是一种极不规则的短期循环荷载,可看成是由许多频率不同的简谐波分量组成,因此简谐荷载作用下体系动力响应是研究结构地震反应的基础^[22]。本文仅研究简谐波地震动作用下沉管隧道的纵向响应,假设简谐地震等效荷载表达式为:

$$F = \sum_{i=1}^n m_i P \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

其中: F 是地震等效荷载; m_i 是第 i 个管节质量; P 是加速度峰值; ω 是频率; ϕ 是初相位。

1.2 多体动力学模型

基于以上基本假定,建立了沉管隧道纵向地震响应的多体动力学模型:多刚体-弹性阻尼铰-阻尼铰,如图3所示。

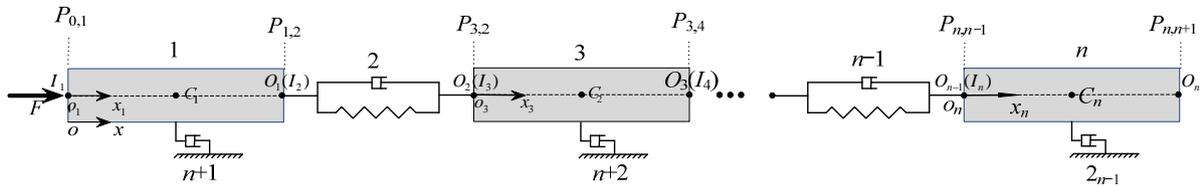


图3 沉管隧道的多体动力学模型 I

Fig.3 First multi-body dynamics model of immersed tunnel

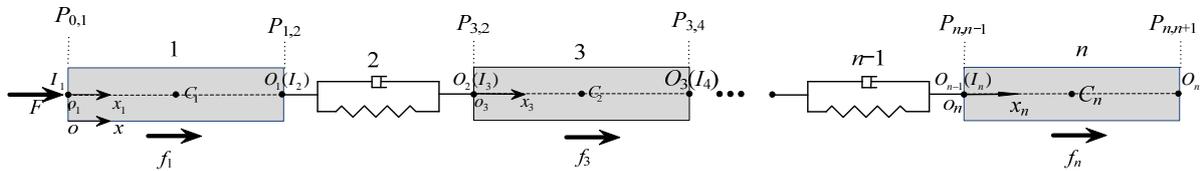


图4 沉管隧道的多体动力学模型 II

Fig.4 Second multi-body dynamics model of immersed tunnel

2 数学模型及表达式

2.1 状态矢量

定义各元件联接点 $P_{i,j}$ 的扩展状态矢量 $Z_{i,j}$ 为:

$$Z_{i,j} = [x, q_x, 1]_{i,j}^T \quad (3)$$

其中 x 是联接点 $P_{i,j}$ 在惯性系中的位置坐标; q_x 是联接点 $P_{i,j}$ 处的内力。

2.2 各元件传递矩阵

2.2.1 管节刚体元件传递矩阵

因为刚体受到的外力可等效为作用于刚体质心的外力,故下面的分析中认为管节刚体元件 i 只受到作用于质心的外力 F_i ,管节刚体元件的受力分析如图5所示。

根据多系统传递矩阵法“体”和“铰”统一编号的原则,图3中管节刚体元件编号依次为1、3、 \dots 、 n ;接头弹性阻尼铰元件编号依次为2、4、 \dots 、 $n-1$ 。每个管节均通过阻尼铰与土层相连,阻尼铰的编号依次为 $n+1$ 、 $n+2$ 、 \dots 、 $2n-1$ 。传递方向为从左到右,每个管节刚体元件输入端为 I_i ,输出端为 O_i ,质心为 C_i 。 P_i^j 表示第 i 个元件和第 j 个元件的联接点, ox 为惯性坐标轴, $o_i x_i$ ($i=1, 3, \dots, n$) 为各管节刚体元件的连体坐标轴。

如果将土-结构相互作用的阻尼铰用阻尼力 f_i ($i=1, 3, \dots, n$) 表示,则该力学模型也可表示为图4所示的形式,以下计算的力学模型均以图4为标准。

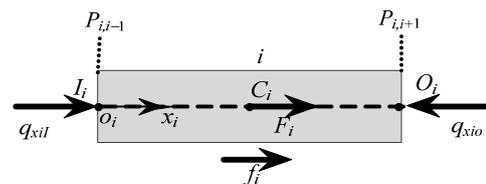


图5 管节刚体元件受力分析

Fig.5 Mechanical analysis of a segmental rigid body

在惯性坐标系中,输入点 I_i 和输入点 O_i 的位置坐标分别为 x_{il} 和 x_{io} ,质心 C_i 的位置坐标为 x_{ic} 。在连体坐标系中,输入点 I_i 和输入点 O_i 的位置坐标分别为 x'_{il} 和 x'_{io} ,质心 C_i 的位置坐标为 x'_{ic} 。

输入点 I_i 的位置坐标关系有:

$$x_{il} = x'_{il} \quad (4)$$

输出点 O_i 的位置坐标关系有:

$$x_{iO} = x_{iI} + x'_{iO} \quad (5)$$

质心 C_i 的位置坐标关系有:

$$x_{iC} = x_{iI} + x'_{iC} \quad (6)$$

由质心运动定理, 得:

$$m_i \ddot{x}_{iC} = q_{xil} - q_{xio} + F_i + f_i \quad (7)$$

其中: m_i 是管节刚体元件 i 的质量; \ddot{x}_{iC} 是管节刚体元件 i 质心 C_i 的加速度; q_{xil} 是管节刚体元件 i 输入端内力; q_{xio} 是管节刚体元件 i 输出端内力。

速度和加速度采用逐步时间积分法进行线性化, 可表示为^[9]:

$$\ddot{x}_i = A_{t_{i-1}} x_i + B_{t_{i-1}} \quad (8)$$

$$\dot{x}_i = C_{t_{i-1}} x_i + D_{t_{i-1}} \quad (9)$$

其中: \ddot{x}_i 是 t_i 时刻的加速度; \dot{x}_i 是 t_i 时刻的速度; $A_{t_{i-1}}$ 、 $B_{t_{i-1}}$ 、 $C_{t_{i-1}}$ 、 $D_{t_{i-1}}$ 分别是逐步时间积分法的线性化系数。在 t_i 时刻是 t_{i-1} 的已知函数, 选择 Newmark- β 法进行计算。以下质心 C_i 点对应的 t_i 时刻的线性化系数简写为 A 、 B 、 C 、 D 。

将式(1)、式(6)、式(8)和式(9)代入式(7)得:

$$q_{xio} = (-m_i A - c'_i C) x_{iI} + q_{xil} - m_i B - c'_i D + F_i \quad (10)$$

将式(5)和式(10)写成矩阵形式, 得到管节刚体元件的传递方程:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ q_{xi} \\ 1 \end{bmatrix}_O = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x'_{iO} \\ -m_i A - c'_i C & 1 & -m_i B - c'_i D + F_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ q_{xi} \\ 1 \end{bmatrix}_I \quad (11)$$

由此可得管节刚体元件的传递矩阵为:

$$U_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x'_{iO} \\ -m_i A - c'_i C & 1 & -m_i B - c'_i D + F_i \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.2.2 弹性阻尼铰传递矩阵

弹性阻尼铰的受力分析如图 6 所示。

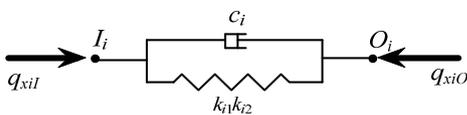


图 6 弹性阻尼铰受力分析

Fig.6 Mechanical analysis of an elastic damping hinge

假设非线性弹簧的力和位移满足:

$$q_{xio,k} = q_{xil,k} = -K_{i1} \Delta l_i - K_{i2} \Delta l_i^2 \quad (13)$$

其中: Δl_i 是弹簧的伸长长度; $\Delta l_i = x_{iO} - x_{iI} - l_{i0}$, l_{i0} 是弹簧的原始长度; K_{i1} 、 K_{i2} 分别是非线性弹

簧刚度系数。

根据并联无质量弹簧阻尼铰两端的阻尼力相等, 有:

$$q_{xio} = q_{xil} = -c_i (\dot{x}_{iO} - \dot{x}_{iI}) - K_{i1} (x_{iO} - x_{iI} - l_{i0}) - K_{i2} (x_{iO} - x_{iI} - l_{i0})^2 \quad (14)$$

将式(9)代入式(14), 得:

$$q_{xil} = -c_i [(C x_{iO} + D_{xio}) - (C x_{iI} + D_{xil})] - K_{i1} (x_{iO} - x_{iI} - l_{i0}) - K_{i2} (x_{iO} - x_{iI} - l_{i0})^2 \quad (15)$$

令,

$$\xi_i = x_{iO} - x_{iI} \quad (16)$$

则式(15)可写为:

$$q_{xil} = -c_i C \xi_i - c_i D_{xio} + c_i D_{xil} - K_{i1} \xi_i + K_{i1} l_{i0} - K_{i2} (\xi_i^2 + l_{i0}^2 - 2 \xi_i l_{i0}) \quad (17)$$

利用二次项线性化公式^[22]:

$$a(t_i) b(t_i) = a(t_{i-1}) b(t_i) + a(t_i) b(t_{i-1}) - a(t_{i-1}) b(t_{i-1}) + \dot{a}(t_{i-1}) \dot{b}(t_{i-1}) \Delta T^2 \quad (18)$$

有:

$$\xi_i^2(t_i) = 2 \xi_i(t_{i-1}) \cdot \xi_i(t_i) - \xi_i^2(t_{i-1}) + \dot{\xi}_i^2(t_{i-1}) \Delta T^2 \quad (19)$$

将 $\xi_i(t_i)$ 简写为 ξ_i , 并将式(19)代入式(17), 得:

$$\begin{aligned} [c_i C + K_{i1} - 2K_{i2} l_{i0} + 2K_{i2} \xi_i(t_{i-1})] \xi_i = \\ -q_{xil} - c_i D_{xio} + c_i D_{xil} + K_{i1} l_{i0} - \\ K_{i2} l_{i0}^2 + K_{i2} \xi_i^2(t_{i-1}) - K_{i2} \dot{\xi}_i^2(t_{i-1}) \Delta T^2 \end{aligned} \quad (20)$$

令:

$$E = c_i C + K_{i1} - 2K_{i2} l_{i0} + 2K_{i2} \xi_i(t_{i-1}) \quad (21)$$

$$Q = -c_i D_{xio} + c_i D_{xil} + K_{i1} l_{i0} - K_{i2} l_{i0}^2 + K_{i2} \xi_i^2(t_{i-1}) - K_{i2} \dot{\xi}_i^2(t_{i-1}) \Delta T^2 \quad (22)$$

则式(20)可写为:

$$E \xi_i = -q_{xil} + Q \quad (23)$$

即:

$$\xi_i = -\frac{1}{E} q_{xil} + \frac{Q}{E} \quad (24)$$

将式(16)代入式(24)得:

$$x_{iO} - x_{iI} = -\frac{1}{E} q_{xil} + \frac{Q}{E} \quad (25)$$

即:

$$x_{iO} = x_{iI} - \frac{1}{E} q_{xil} + \frac{Q}{E} \quad (26)$$

将式(13)和式(26)写成矩阵形式, 得到弹性阻尼铰元件的传递方程为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ q_{xi} \\ 1 \end{bmatrix}_O = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{E} & \frac{Q}{E} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ q_{xi} \\ 1 \end{bmatrix}_I \quad (27)$$

由此得到弹性阻尼铰元件的传递矩阵为:

$$U_i = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{E} & \frac{Q}{E} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

2.3 各元件传递方程及总传递方程

元件 1 传递方程:

$$Z_{1,2} = U_1 Z_{0,1} \quad (29)$$

元件 2 传递方程:

$$Z_{3,2} = U_2 Z_{1,2} \quad (30)$$

...

元件 n 传递方程:

$$Z_{n,n+1} = U_n Z_{n,n-1} \quad (31)$$

拼装各元件的传递矩阵, 得图 4 所示系统的总传递方程为:

$$Z_{n,n+1} = U_n U_{n-1} \cdots U_i \cdots U_2 U_1 = U Z_{0,1} \quad (32)$$

其中 U_i 是元件 i 传递矩阵, U 是系统总传递矩阵。

3 系统动力响应的求解

将两端自由的边界条件 $q_{x0,1} = 0$ 、 $q_{xn,n+1} = 0$ 和 t_0 时刻的初始条件代入式(32), 求得 t_1 时刻系统边界状态矢量中 $x_{0,1}$ 、 $x_{n,n+1}$ 的值。将此作为 t_2 时刻的初始条件, 重复上述过程可求得 t_2 时刻系统动力响应。依次类推, 可求得任意时刻系统动力响应。

4 算例

为了验证上述方法的正确性, 本文取两管节沉管隧道作为算例, 力学模型如图 7 所示, 假设简谐波动力循环荷载为 $F = 10\sin t$ 。

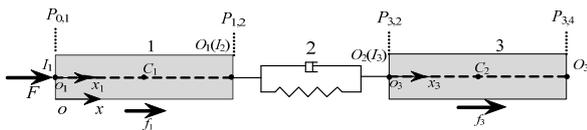


图 7 算例力学模型

Fig.7 Mechanical model used in the test

算例参数取值参考文献[23-25], 如表 1 和表 2 所示, 初始条件如表 3 所示。

表 1 管节刚体元件参数

Table 1 Parameters of the segmental rigid body				
元件序号	长度/m	宽度/m	质量/kg	阻尼铰系数 $c'_i/(N_s/m)$
1	6	4	1	100
3	6	4	1	100

表 2 弹性铰元件参数

Table 2 Parameters of the elastic damping hinge				
元件序号	弹簧刚度 $K_1/(N/m)$	弹簧刚度 $K_2/(N/m^2)$	阻尼系数 $c_2/(N_s/m)$	弹簧原长 l_0/m
2	2	0.5	3	0.3

表 3 初始条件

Table 3 Initial conditions				
元件序号	位置坐标 x_{iI}/m	位置坐标 x_{iO}/m	速度 $\dot{x}_{iI}/(m/s)$	速度 $\dot{x}_{iO}/(m/s)$
1	0	6	0	0
2	6	6.3	0	0
3	6.3	12.3	0	0

时间步长 ΔT 取 0.1s, 持时 6s, 速度和加速度线性化系数采用 Newmark- β 中的平均加速度法系数, 取 $\gamma = \frac{1}{2}$, $\beta = \frac{1}{4}$, 分别采用 MS-DT-TMM 法和有限元法对算例进行了纵向地震响应分析, 得到管节 1 和管节 2 的位移、速度、加速度以及接头压缩量和接头轴力的时程曲线, 分别如图 8~图 15 所示。

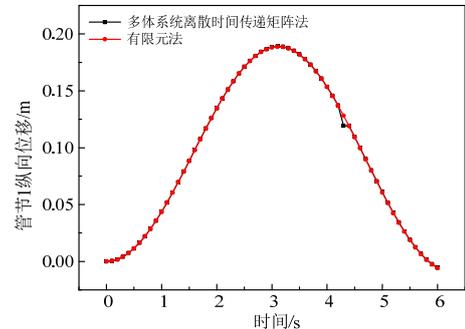


图 8 管节 1 纵向位移时程

Fig.8 Time history of the longitudinal displacement of No.1 segment

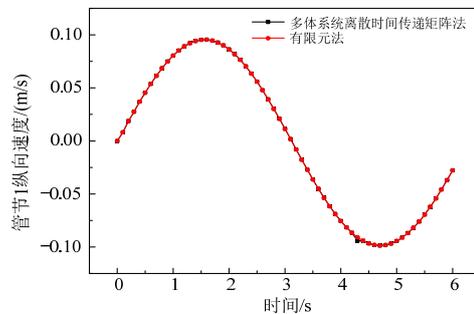


图 9 管节 1 纵向速度时程

Fig.9 Time history of the longitudinal velocity of No.1 segment

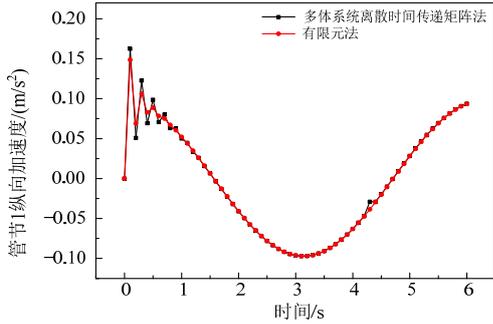


图 10 管节 1 纵向加速度历程

Fig.10 Time history of the longitudinal acceleration of No.1 segment

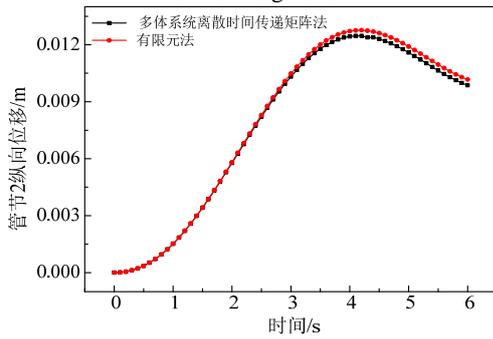


图 11 管节 2 纵向位移历程

Fig.11 Time history of the longitudinal displacement of No.2 segment

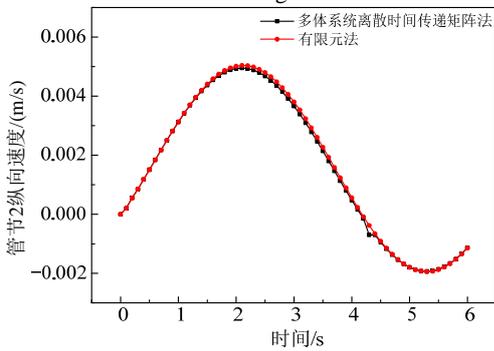


图 12 管节 2 纵向速度历程

Fig.12 Time history of the longitudinal velocity of No.2 segment

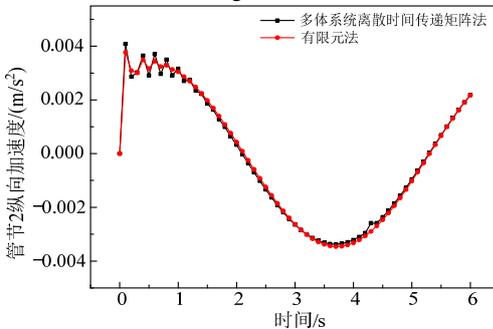


图 13 管节 2 纵向加速度历程

Fig.13 Time history of the longitudinal acceleration of No.2 segment

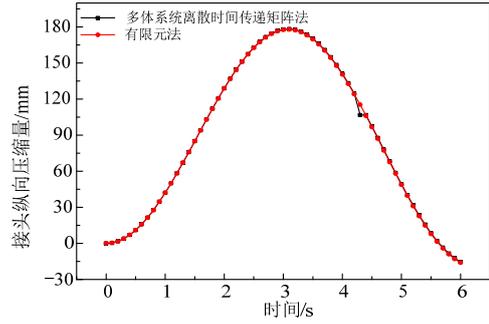


图 14 接头纵向变形量历程

Fig.14 Time history of the longitudinal deformation of the joint

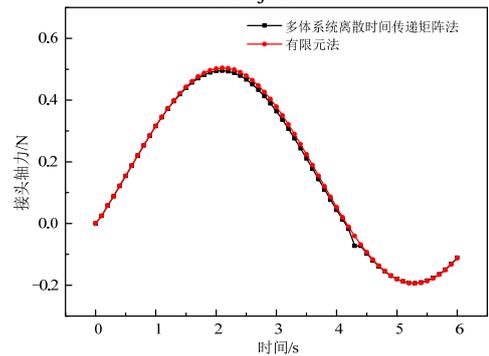


图 15 接头轴力历程

Fig.15 Time history of the axial force in the joint

由图 8~图 15 可以看出，两种方法计算所得结果基本一致，表明 MS-DT-TMM 方法具有较好的精度，从而验证了 MS-DT-TMM 方法计算沉管隧道纵向地震响应的有效性和可行性。

5 结论

本文在合理假设的基础上，建立了沉管隧道纵向地震响应分析的多体动力学模型：多刚体-弹性阻尼铰-阻尼铰模型；利用 MS-DT-TMM 方法的基本原理导出了其数学模型和表达式，根据边界条件和初始条件求出系统动力响应。由前述建模过程和算例计算可以看出本文建立的模型具有以下特点：

(1) 沉管隧道的地震响应分析必须考虑隧道与土的动力相互作用，这是沉管隧道多体动力学模型有别于其它领域多体系统动力学模型的重要特征。

(2) 在沉管隧道多体系统动力分析模型中，本文提出了接头采用非线性弹簧和阻尼并联的弹性铰模型，既考虑了接头材料的非线性，又兼顾了柔性接头的阻尼耗能效应，克服了现有沉管隧道接头动力模型只采用弹簧模型的不足。

(3) 在数学建模过程中，传统的有限元方法随着管节和接头个数的增加，每次都需要重新建立矩

阵,而基于 MS-DT-TMM 方法所建立的管节刚体元件和弹性阻尼铰元件的传递矩阵一经建立,即能直接调用并可拼装成任意长度的沉管隧道总传递矩阵,从而简化了推导过程。

(4) 基于 MS-DT-TMM 方法所建立的矩阵阶次仅取决于元件的最高阶次,与沉管隧道管节和接头个数无关,传统的有限元方法中涉及到的矩阵最高阶次与管节的个数成正比,故对于长隧道而言,本文方法的计算效率将大大提高。

(5) 对沉管隧道这样一种大型复杂的多体系统,其动力分析模型中接头的刚度和阻尼等参数取值,还需要做较多的试验工作并进行参数的敏感性分析。

本文将多体系统中的高效动力分析方法—MS-DT-TMM 方法引入沉管隧道纵向地震响应分析中,并通过算例将 MS-DT-TMM 方法与传统有限元方法的计算结果进行了比较,两者吻合很好,验证了本文建立模型的正确性和 MS-DT-TMM 方法应用于沉管隧道纵向地震响应分析的可行性。该方法为实现快速实用的沉管隧道抗震设计提供了新的手段,具有很高的发展和推广应用价值。

参考文献:

- [1] Anastasopoulos I, Gerolymos N, Drosos V, et al. Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(9): 1067—1090.
- [2] Kiyomiya O. Earthquake-resistant design features of immersed tunnels in Japan [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1995, 10(4): 542—551.
- [3] 严松宏, 高峰, 李德武, 等. 沉管隧道地震响应分析若干问题的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(5): 846—850.
Yan Songhong, Gao Feng, Li Dewu, et al. Studies on some issues of seismic response analyses for submerged tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 846—850. (in Chinese)
- [4] 韩大建, 周阿兴. 沉管隧道地震响应分析的等效质点系模型探讨[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1999, 27(11): 108—114.
Han Dajian, Zhou Axing. A study on the equivalent mass-system models for the analysis for earthquake response of an immersed tunnel [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 1999, 27(11): 108—114. (in Chinese)
- [5] Yu H T, Yuan Y. Analytical solution for an infinite Euler-Bernoulli beam on a visco-elastic foundation subjected to arbitrary dynamic loads [J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 2014, 140(3): 542—551. (DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000674, SCI retrieve)
- [6] Hatzigeorgiou G D, Beskos D E. Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2010, 30(9): 851—861.
- [7] Yu H T, Yuan Y, Bobet A. Multiscale method for long tunnels subjected to seismic loading [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(4): 374—398.
- [8] Rui X T, Lu Y Q, Pan L. Discrete time transfer matrix method for multibody system dynamics [C]. *Proceedings of the EUROMECH Colloquium on Advances in Computational Multibody Dynamics*, Lisbon, Portugal, 1999: 93—108.
- [9] Rui X T, He B, Lu Y Q, et al. Discrete time transfer matrix method for multibody system dynamics [J]. *Multibody System Dynamics*, 2005, 14(4): 317—344.
- [10] 芮筱亭, 袁来峰, 陆毓琪, 等. 多体系统传递矩阵法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 264—271.
Rui Xiaoting, Yuan Laifeng, Lu Yuqi, et al. Transfer matrix method of multibody system and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2008: 264—271. (in Chinese)
- [11] 戴玉伟. 基于多体系统传递矩阵法的结构地震响应分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
Dai Yuwei. Structural seismic response analysis based on transfer matrix method [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 蔡建国, 韩志宏, 冯健, 等. 多刚体动力学在结构地震响应分析中的应用[J]. *工程力学*, 2010, 27(11): 250—256.
Cai Jianguo, Han Zhihong, Feng Jian, et al. Application of dynamics of multi-rigid body to seismic response analysis of structures. *Engineering Mechanics* [J]. 2010, 27(11): 250—256. (in Chinese)
- [13] Winget J M, Huston R L. Cable dynamics—a finite segment approach [J]. *Computers & Structures*, 1976, 6(6): 475—480.
- [14] 殷学纲. 有限段法在梁非线性振动分析中的应用[J]. *重庆大学学报*, 1988, 11(11): 113—125.
Yin Xuegang. Analysis of the nonlinear oscillation of beams by finite segment method [J]. *Journal of Chongqing University*, 1988, 11(11): 113—125. (in Chinese)
- [15] Wang R H, Li Q S, Wu J R. A spatial elastic displacement model for curved box girders with corner stiffeners. *Computers and Structures* [J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(12): 1021—1029.
- [16] 赖明, 李英民. 剪切型结构地震响应的多刚体离散分析方法[J]. *建筑结构学报*, 1994, 15(6): 17—24.

- Lai Ming, Li Yingmin. A discrete analysis method of multi-rigid-body model for earthquake response of shear-type structures [J]. *Journal of Building Structures*, 1994, 15(6): 17–24. (in Chinese)
- [17] 王强, 吕西林. 离散单元法在框架结构地震反应分析中的应用[J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(5): 73–78.
- Wang Qiang, Lü Xilin. Application of DEM to seismic response analysis of frame structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(5): 73–78. (in Chinese)
- [18] 张振秀, 聂军, 沈梅, 等. ANSYS 中超弹性模型及其在橡胶工程中的应用[J]. *橡胶技术与装备*, 2005, 31(9): 1–5.
- Zhang Zhenxiu, Nie Jun, Shen Mei, et al. Superelastic model in ANSYS and its application in rubber engineering [J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2005, 31(9): 1–5. (in Chinese)
- [19] 王松涛, 曹资. 现代抗震设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 115–125.
- Wang Songtao, Cao Zi. *Modern seismic design method* [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997: 115–125. (in Chinese)
- [20] 陈绍章. 沉管隧道设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- Chen Shaozhang. *The Design and Construction of Immersed Tunnels* [M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese)
- [21] 韩大建, 唐增洪. 珠江水下沉管隧道的抗震分析与设计(II)—行波法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1997, 27(11): 122–130.
- Han Dajian, Tang Zenghong. Aseismic analysis and design of the Pearl River Tunnel (II)—travelling wave method [J]. *Journal of South China University of Technology (Nature Science)*, 1997, 27(11): 122–130. (in Chinese)
- [22] 徐龙军, 谢礼立, 郝敏. 简谐波地震动反应谱研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(5): 7–13.
- Xu Longjun, Xie Lili, Hao Min. On the response spectra to harmonic ground motion [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(5): 7–13. (in Chinese)
- [23] 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): 145–150.
- Yu Haitao, Yuan Yong, Liu Hongzhou, et al. Mechanical model and analytical solution of stiffness for joints of immersed-tube tunnel [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(6): 145–150. (in Chinese)
- [24] 周云, 汪大洋, 张敏, 等. 新型粘滞-弹性阻尼器的力学性能试验与理论研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 331–338.
- Zhou Yun, Wang Dayang, Zhang Min, et al. Experimental and theory study on mechanical property of a new viscous-elastic damper [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 331–338. (in Chinese)
- [25] Richards C M, Singh R. Characterization of rubber isolator nonlinearities in the context of single- and multi-degree-of-freedom experimental systems [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 247(5): 807–834.

(上接第 75 页)

- [26] Cundall P A. UDEC-A Generalised Distinct Element Program for Modelling Jointed Rock [R]. U.S.A: Army, 1980.
- [27] Tutumluer E, Huang H, Bian X. Geogrid-aggregate interlock mechanism investigated through aggregate imaging based discrete element modeling approach [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2010, 12(4): 391–398.
- [28] Nezami E G, Hashash Y M A, Zhao D W, Ghaboussi J. Simulation of front end loader bucket-soil interaction using discrete element method [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2007, 31(9): 1147–1162.
- [29] 张祺, 厚美瑛. 直剪颗粒体系的尺寸效应研究[J]. *物理学报*, 2012(24): 348–353.
- Zhang Qi, Hou Meiyang. Research on size effect of direct shear test [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012(24): 348–353. (in Chinese)
- [30] Ng T T. Input parameters of discrete element methods [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2006, 132(7): 723–729.
- [31] 刘连峰. 弹塑性颗粒物质准静态变形的细观力学行为[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(4): 524–530.
- Liu Lianfeng. Micromechanics of granular assemblies of elastic-perfectly plastic spheres during quasi-static deformation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(4): 524–530. (in Chinese)