



粘弹性边界输入及大直径隧道地震反应数值模拟

井渭彪, 王 展, 景立平, 齐文浩

Seismic motion input methods of viscous-elastic boundary and numerical simulation of seismic response on large diameter tunnels

Jing Weibiao, Wang Zhan, Jing Liping, and Qi Wenhao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地震波诱发的深部地层动应力机制及断裂位移研究

Study on the mechanism of dynamic stress and fault displacement in deep formations induced by seismic waves

地震科学进展. 2021(11): 489–497

鄂尔多斯活动地块边界带地震动力学模型与强震危险性研究项目及进展

Project plan and research progress on geodynamic models of earthquakes and strong seismic hazards in boundary zone of the Ordos active block

地震科学进展. 2020(4): 1–21

不同墩高的矩形单肢薄壁空心墩动力特性的数值模拟

Numerical simulation of dynamic characteristics of rectangular single leg thin-wall hollow piers with different pier heights

地震科学进展. 2021(4): 169–177

沉管隧道抗震性能试验研究与数值分析

Experimental study and numerical analysis on seismic responses of immersed tunnel

地震科学进展. 2019(10): 65–66

逆断层地震作用下三维沉积盆地地震动谱元法模拟

Spectral element method simulation of three-dimensional sedimentary basin under reverse-fault earthquakes

地震科学进展. 2020(10): 13–22

嘉祥地震台山洞防潮措施探索

Exploration on the moistureproof measures for the tunnel of Jiexiang seismic monitoring center station

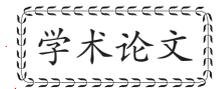
地震科学进展. 2020(8): 25–29



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

井渭彪, 王展, 景立平, 等. 粘弹性边界输入及大直径隧道地震反应数值模拟 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(3): 125-134. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-013

Jing W B, Wang Z, Jing L P, et al. Seismic motion input methods of viscous-elastic boundary and numerical simulation of seismic response on large diameter tunnels[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(3): 125-134. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-013



粘弹性边界输入及大直径隧道地震反应数值模拟

井渭彪 王 展 景立平* 齐文浩

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要 为了确定粘弹性边界输入地震动时底部波场的选择, 并在此基础上研究两条并行大直径盾构隧道的地震响应, 建立了相应的数值模型进行分析。首先通过对粘弹性边界地震动输入波动法的研究, 使用自由场和散射场算例对比了求解模型底部等效节点力时几种不同的波场选择方式。然后, 使用粘弹性边界和前面的地震动输入方法, 建立了大直径不同间距的土-隧道有限元模型, 输入不同频谱特性的地震动, 对土-隧道体系地震响应问题进行分析。研究表明: 粘弹性边界以等效节点力的方式输入地震动时, 采用自由波场求解等效节点力精度最高, 采用基于人工边界子结构的地震动输入方法也有较高精度; 地震动频谱特性对隧道的动力响应影响较大, 隧道间距对隧道的动力响应影响相对较小; 隧道间距对隧道衬砌的弯矩和轴力的影响存在差异。研究结果可为使用粘弹性边界时地震动的准确输入和大直径盾构隧道抗震设计提供参考。

关键词 粘弹性边界; 大直径隧道; 地震响应; 动力相互作用

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)03-0125-10

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2024-013

Seismic motion input methods of viscous-elastic boundary and numerical simulation of seismic response on large diameter tunnels

Jing Weibiao, Wang Zhan, Jing Liping, Qi Wenhao

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Heilongjiang Harbin 150080, China)

Abstract To determine the selection of input wave field at the bottom of the viscous-elastic boundary, and study the seismic response of two parallel large-diameter shield tunnels, corresponding numerical models were established for analysis. First, through the study of wave method for seismic motion input of viscous-elastic boundary, several different wave fields selection methods for calculating the equivalent nodal forces at the bottom of the model were compared using free field and scattering field models. Then, using viscous-elastic boundary and the previous seismic motion input method, established soil-tunnels system finite element models with different interval between two large-diameter tunnels and input seismic waves with different spectral characteristics analyzed the dynamic response of the soil-tunnels system. The results

收稿日期: 2024-01-16; 采用日期: 2024-04-01。

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2019B10)资助。

第一作者: 井渭彪(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事土-隧道动力相互作用研究。E-mail: jnaob@foxmail.com。

* 通信作者: 景立平(1963-), 男, 研究员, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: jing_liping@126.com。



show that the simulation accuracy is highest when calculating the equivalent nodal loads by the free wave field, and the seismic input method based on the substructure of artificial boundaries also has high accuracy; spectral characteristics of seismic motion has a significant impact on the dynamic response of tunnels, while the influence of two tunnels interval is relatively small; the influence of tunnels interval on the bending moment and axial force of tunnels lining is different. The research results can provide reference for accurately seismic motion input of viscous-elastic boundary and seismic design of large-diameter shield tunnels.

Keywords viscous-elastic boundary; large diameter tunnel; seismic response; dynamic interaction

0 引言

随着工程技术的快速发展,大量的隧道建设开始向大直径、大深度、长距离和高烈度场地发展^[1-2]。同时,随着城市地下空间利用率日益提高,双线隧道或隧道相互邻近的情况不可避免。大量的研究和震害现场调查表明,穿越复杂场地的隧道衬砌往往存在开裂、坍塌、渗水等破坏情况^[3-4],这些已引起了工程设计人员和研究者的高度重视。

目前,有很多学者对地震作用下土-隧道之间的相互作用进行研究,主要研究方法有理论推导、原型观测、模型试验和数值模拟等。理论推导形式复杂,且往往局限于各向同性弹性场地和线弹性衬砌等理想情况^[5],限制了其实际应用。原型观测^[3-4]结果可靠,其缺点是往往只能观测结果而不能获得破坏时的响应。模型试验主要有拟静力试验、振动台试验和离心机振动台试验。其中,邹炎等^[6]通过振动台试验研究了穿过土层分界面的隧道地震反应,认为此类隧道产生破坏的主要原因是隧道相对位移的出现;Wang等^[7]通过振动台试验研究了土-隧道-结构相互作用系统的地震反应规律,发现隧道结构的存在对周围土体和地表建筑的影响不同,且与地震动频谱特性有关;王彤辉等^[8]通过振动台试验分析了地震动特性对场地-地下结构-地上结构相互作用体系的影响;Baziar等^[9]通过离心机振动台试验及数值模拟分析,发现隧道的存在对地表加速度影响有正有负;李延涛等^[10]通过振动台试验研究了在上部结构存在时土-上下平行隧道体系的地震响应;Liang等^[11]通过振动台试验和数值模拟研究了超大直径盾构隧道上软下硬场地的响应。在数值模拟方面的研究也很多,有直接对土-隧道体系进行分析的,如王国波等^[12],黄忠凯和张冬梅^[13],张季等^[14];还有通过反应位移法等简化方法的,如Kontoe等^[15]对圆形隧道抗震设计的4个解析解进行了验证,并验证了使用等效线性化来模拟非线性的近似方法;Zhao等^[16]通过数值模拟采用改进反应位移法研究了大直径海底盾构隧道

混凝土衬砌在地震荷载作用下的损伤模式。当地震动作用于土-隧道体系时,其动力相互作用是复杂的,受到场地和地震动频谱特性、有无并行隧道及其间距等的影响,有必要对该体系的动力响应进行进一步研究。

地下隧道的地震反应计算,是半无限域中土-结动力相互作用问题,在进行涉及到地基半无限性影响的动力计算时,需要使用人工边界模拟半无限域对有限计算区域的作用,使得散射波穿过人工边界或被人工边界吸收而不反射回到计算区域。正确的地震动输入方法是数值模拟得到准确结果的前提。本文首先通过SV波垂直入射下的自由场和散射场算例给出了使用粘弹性边界时合理的底边界等效节点力计算方法;然后,采用粘弹性边界和前面提到的地震动输入方法,建立了实际工程中典型的上软下硬场地双线大直径盾构隧道的数值计算模型,研究地震作用下隧道衬砌的受力情况并探讨了地震动频谱特性和隧道间距对隧道衬砌动力响应的影响。本研究对复杂场地大直径隧道的抗震设计和性能分析有一定的参考作用。

1 粘弹性边界与地震动输入

1.1 粘弹性边界

ABAQUS自带的无限元在应用于动力计算时,本质上是粘性边界^[17],因此也具有粘性边界在低频动力荷载作用下模型容易整体漂移的缺点,粘弹性边界克服了粘性边界这一缺点,能吸收散射波并模拟半无限地基的恢复能力^[18]。粘弹性边界首先由Deeks和Randolph^[19]提出;随后刘晶波等^[18]在此基础上给出了二维时域粘弹性边界和外源荷载输入方法,并发展了三维时域粘弹性边界^[20];后来,刘晶波等^[21]又提出了一种基于子结构的外源地震动输入方法,避免了输入地震动时对自由场应力进行求解。粘弹性边界概念清晰,实现简单,稳定性良好,因此被广泛应用^[14, 16, 22]。

粘弹性边界是在有限的土体模型边界上施加弹

簧和阻尼器元件来模拟半无限土体的, 其弹簧系数 K 和阻尼系数 C 分别如下:

切线方向:

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, \quad C_{BT} = \rho C_s \quad (1)$$

法线方向:

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, \quad C_{BN} = \rho C_p \quad (2)$$

式中, G 表示介质的剪切模量; R 表示散射波源到人工边界的距离, 一般取模型对角线的一半; ρ 表示介质的质量密度; C_s 和 C_p 分别表示介质的剪切波速和压缩波速; α_T 和 α_N 分别表示切向和法向的弹簧刚度修正系数, 二维情况下使用刘晶波等^[23]的推荐值, 分别为 0.5 和 1。

将地震动合理输入到计算区域是取得正确数值模拟结果的前提。使用粘弹性边界, 需要将地震动转化为人工边界节点上的等效节点力实现地震动输入, 如果使用强制的位移或加速度边界条件输入会导致粘弹性边界失效^[22, 24]。根据刘晶波等的研究^[18],

施加在粘弹性边界上一点 P 的力为:

$$F_p(t) = A_p [\tau_p + C_p \dot{u}_p + K_p u_p] \quad (3)$$

式中, A_p 为节点控制面积, K_p 为弹簧刚度, C_p 为阻尼器系数, τ_p 为自由场在 P 点产生的应力, u_p 为自由场在 P 点产生的位移。马笙杰等^[22]推导给出了粘弹性边界的等效节点力, 但是在实际应用中发现这一结果和理论值存在一定的差距, 下面讨论粘弹性边界的地震动输入方式。

1.2 自由场和散射场工况及计算模型

在 ABAQUS 中建立的二维自由场和散射场模型如图 1 所示。模型尺寸均为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$, 单元尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 均采用 4 节点平面应变单元。在散射场中设置了边长为 4 m 的正方形不设衬砌隧洞。土体的质量密度 $\rho=2000 \text{ kg/m}^3$, 剪切波速 $C_s=200 \text{ m/s}$, 泊松比 $\nu=0.25$ 。在模型底部垂直入射 SV 波, 持时为 0.2 s , 步长为 0.001 s , 其位移时程曲线如图 2 所示。采用如式(4)所示 δ 函数的有限差分近似^[20]:

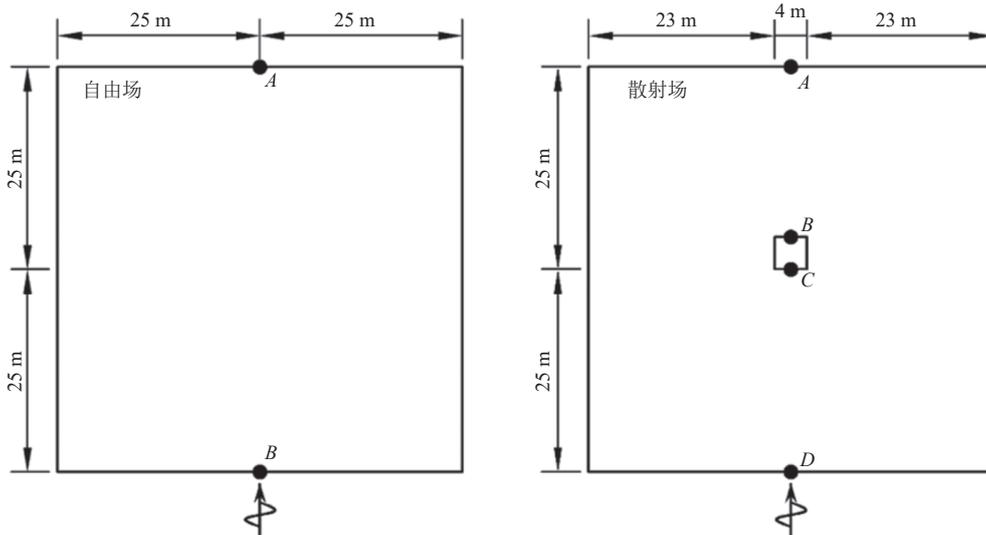


图 1 自由场和散射场计算模型

Fig. 1 Computational model of free field and scattering field

$$F(\tau) = 16 \left[G_4(\tau) - 4G_4\left(\tau - \frac{1}{4}\right) + 6G_4\left(\tau - \frac{1}{2}\right) - 4G_4\left(\tau - \frac{3}{4}\right) + G_4(\tau - 1) \right] \quad (4)$$

$$G_4(\tau) = \tau^3 H(\tau), \quad \tau = \frac{t}{T}$$

式中, T 是脉冲持时; $H(\tau)$ 是 Heaviside 函数。

根据马笙杰等^[22], 谭辉等^[24]的研究, 在数值模拟时应当在土体侧面和底面截断处都施加粘弹性边界, 侧边界输入波场应为自由波场。基于此, 在本节中, 保持侧边界均为自由波场, 仅考虑底部波场的不同,

再与刘晶波等^[21]提出的基于人工边界子结构的地震动输入方法对比。具体的计算方法见表 1。

1.3 不同方法下的结果分析

图 3 为自由场各方法的计算结果, 从自由场的计算结果中可以看到, 求解底部边界等效节点荷载

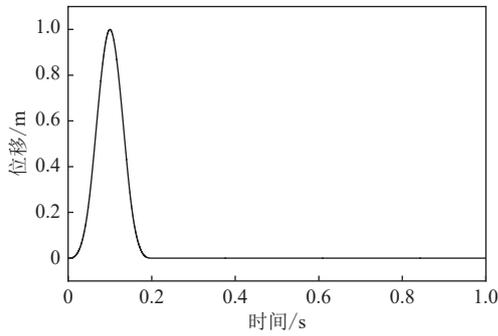


图2 入射脉冲位移时程曲线图

Fig. 2 Displacement curves of input wave

表1 底部x方向等效节点力计算方法表

Table 1 Different selections of bottom boundary force

方法	底边x方向节点力的计算公式
1 ^[22]	$F_{BB}^x = A [K_{BT}u_0(t) + C_{BT}(t)\dot{u}_0(t) + \rho C_s\dot{u}_0(t)]$
2	$F_{BB}^x = A [K_{BT}u(t) + C_{BT}(t)\dot{u}(t) + \rho C_s\dot{u}(t)]$
3	$F_{BB}^x = A [K_{BT}u_0(t) + C_{BT}(t)\dot{u}(t) + \rho C_s\dot{u}(t)]$
4	$F_{BB}^x = A [K_{BT}u(t) + C_{BT}(t)\dot{u}_0(t) + \rho C_s\dot{u}_0(t)]$
5 ^[21]	基于人工边界子结构的地震动输入法

注： $u(t)$ 表示地震动总位移时程， $u_0(t)$ 表示入射地震动位移时程

时速度采用入射波场或自由波场，位移采用自由波

$$F_{bx} = A_b \left\{ K_{BT} \left[u_0(t) + u_0 \left(t - \frac{2H}{C_s} \right) \right] + C_{BT} \left[\dot{u}_0(t) + \dot{u}_0 \left(t - \frac{2H}{C_s} \right) \right] + \rho C_s \left[\dot{u}_0(t) - \dot{u}_0 \left(t - \frac{2H}{C_s} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

再将式(1)代入式(7)，则反射回来的速度项会相互抵消，因此在本质上，方法1和方法3等效，方法2和方法4等效，在分析散射场结果时将等效的方法合并。

图4为散射场A, B, C, D四个点在不同方法下

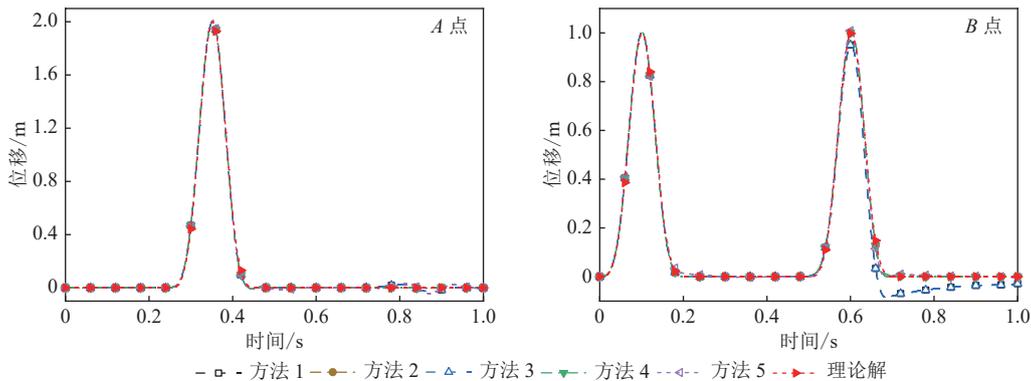


图3 自由场A点和B点水平位移时程曲线

Fig. 3 Displacement curves of point A and B in free field

场能获得最佳的模拟精度，如果位移选择了入射波场，则无论速度输入自由波场还是入射波场都存在较大的误差，采用子结构法输入地震动的模拟精度也较高。在粘弹性边界中，反射波在边界上引起的荷载一部分由阻尼器吸收，该部分荷载不需要额外输入来平衡，剩余部分由弹簧来平衡。当底边界上的等效节点力采用方法1, 3的公式进行计算时，位移项仅考虑了入射波场，没有考虑反射波对底边界位移的影响，因此计算结果与理论值存在较大差异。同时，发现方法1和方法3，方法2和方法4结果完全相同，这是因为在底部边界，当二维SV波垂直入射时，自由场只有水平位移。因此，根据胡克定律，自由场应力表示为：

$$\tau_p(x_p, y_p, t) = G\gamma_{xy} = G \frac{\partial u}{\partial y} \quad (5)$$

式中， τ_p 为该点水平应力， γ_{xy} 为切应变， u 为水平位移， y 为纵向位移， G 为介质剪切模量。

根据一维波动理论^[25]，有：

$$\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{C_s} \dot{u}(t) \quad (6)$$

式中， u 为由剪切波引起的横向位移， C_s 为介质剪切波速， y 为波前进的方向。

因此在底部边界，考虑入射波和反射波的延迟，假设土体模型高度为 H ，将式(5)，(6)代入式(3)，有：

水平方向位移与远置边界计算结果的对比，从图4可以看出，方法2, 4, 5与远置边界拟合度较高，但都不是完全重合，这是因为粘弹性边界是一种近似的人工边界，在推导过程中采用了一系列假设，但是从计算结果来看，完全满足工程精度要求；方法1，

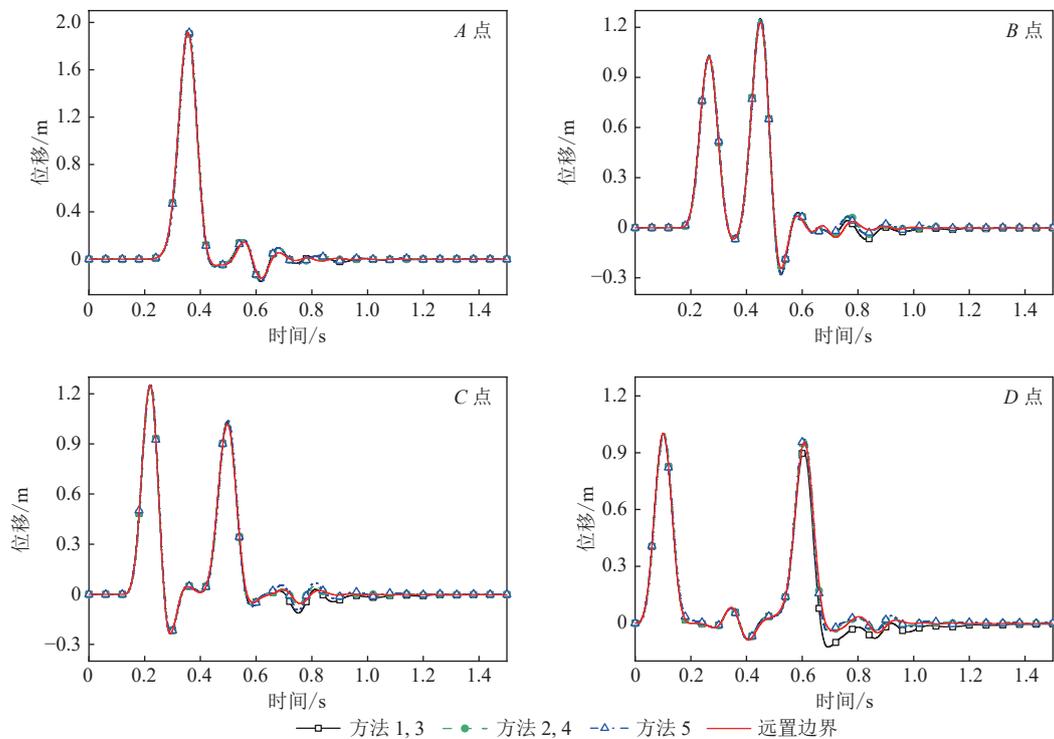


图 4 散射场 A, B, C, D 点水平位移时程曲线

Fig. 4 Displacement curves of point A, B, C and D in scatter field

3 如前文所述, 其计算结果存在较大偏差。

综上所述, 当采用波动法作为粘弹性边界输入方法时, 底边界建议采用方法 2, 4 所列公式, 可以高精度地模拟计算域有散射波的情况; 基于人工边界子结构的地震动输入方法也具有较高的精度。基于人工边界子结构的地震动输入方法使用方便, 可用于不同的应力型人工边界, 但需要对人工边界子结构模型进行一次动力计算, 速度较慢。

2 隧道-土体模型数值模拟

2.1 模型参数

为了分析不同地震动作用下不同间距的大直径

隧道的响应, 在 ABAQUS 中建立了不同隧道间距的土-隧道模型, 计算模型见图 5, 其中, B 表示并行隧道的间距。选择 90 m 厚的上软下硬土层进行分析, 为了减小边界对计算结果的影响, 土体水平向宽度取为 300 m。隧道外径为 15 m, 衬砌厚度为 0.65 m, 隧道最大埋深为 27.5 m, 采用 4 节点平面应变单元离散土体和衬砌。为了满足波传播的条件^[25], 土体单元的最大尺寸为 1 m×1 m, 并在隧道附近适当加密, 土体划分了约 45 000 个单元(不同工况方法单元数略有不同), 每个隧道衬砌划分了 1920 个单元。隧道衬砌和土体之间为有限滑移接触, 其中, 法向为“硬”接触, 切向为罚刚度算法, 摩擦系数为 0.6。为了更

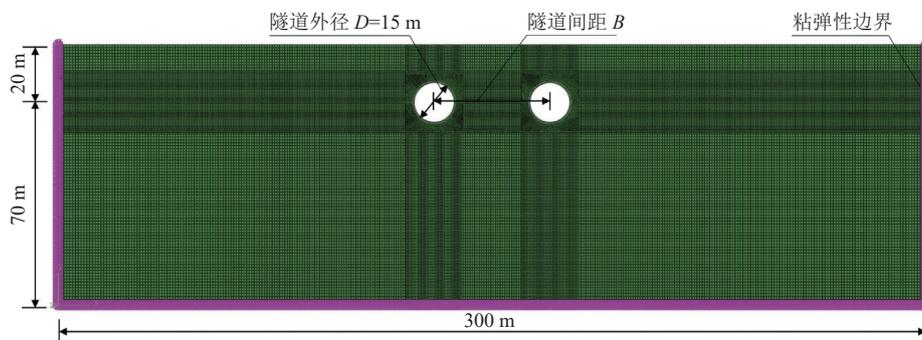


图 5 土-隧道有限元模型

Fig. 5 Soil-tunnel finite element model

贴近隧道的真实受力情况,参考王苏等^[26]的研究,对模型进行了地应力平衡。地震动以SV波形式从土体底部入射,为了考虑地震动频谱特性对隧道动力响应的影响,分别输入El Centro波, Northridge波, Kobe波,并将其调幅到0.1g,输入地震动的加速度时程曲线见图6。

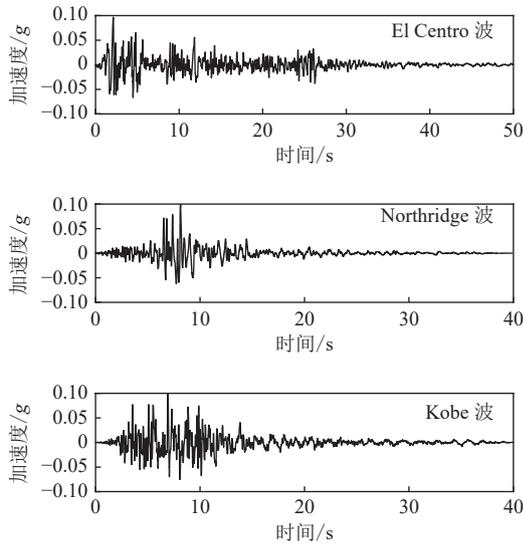


图6 入射地震动时程曲线
Fig. 6 Acceleration time-history of incident waves

采用等效线性化模型考虑土体的非线性,利用一维土层反应分析程序EERA计算自由场响应,获得土体的等效阻尼比和等效剪切模量。将土体的等效阻尼比以瑞利阻尼的形式施加,以自由场的一阶和二阶频率计算瑞利阻尼参数。土层信息见表2,各类土的剪切模量比、阻尼比与剪应变的关系曲线见图7。隧道衬砌选择为C60混凝土,采用基于规范的混凝土损伤塑性(CDP)模型来考虑混凝土的弹塑性,

表2 土层参数
Table 2 Soil profile

土层编号	土体类型	泊松比	厚度/m	剪切波速/(m·s ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)
1	I	0.3	10	175	1850
2	I	0.3	10	200	1875
3	II	0.3	10	225	1900
4	II	0.3	10	250	1925
5	II	0.3	10	300	1950
6	III	0.3	10	350	1975
7	III	0.3	10	400	2000
8	IV	0.3	10	450	2025
9	IV	0.3	10	500	2050
10	—	—	∞	500	2050

性,具体实现方式参考方自虎等^[27]的研究。混凝土密度为2400 kg/m³,弹性模量为36000 MPa,泊松比为0.18。根据土层参数和自由场响应,采用自编Python脚本批量施加粘弹性边界和等效节点荷载。

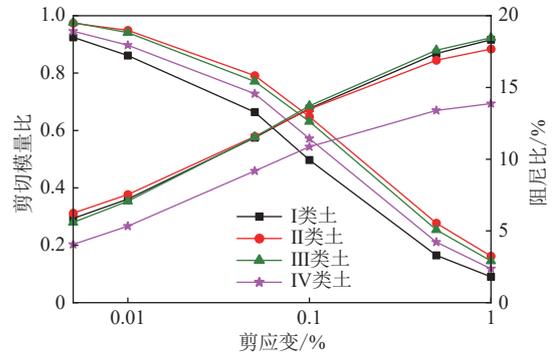


图7 土的剪应变与剪切模量比和阻尼比关系
Fig. 7 Curves of nonlinear parameters of soils

2.2 数值模拟结果

分别考察在输入不同地震动,隧道间距为20 m、25 m、30 m、40 m和50 m的双线隧道以及单孔隧道情况下衬砌弯矩(图8)和轴力(图9)的不同,来分析地震动频谱特性和隧道间距对隧道受力的影响。弯矩以使衬砌外侧受拉为正,轴力以受压为正,为方便起见隧道衬砌的环宽取1 m。

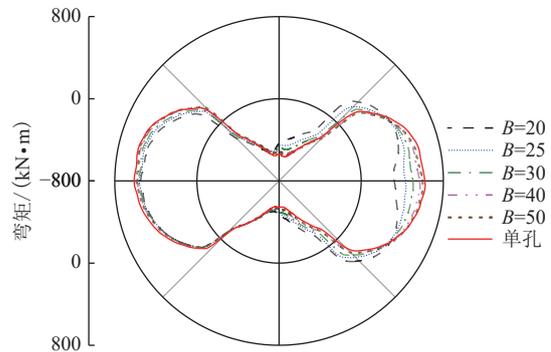


图8 El Centro波0.1g入射时左侧隧道的弯矩分布
Fig. 8 Bending moment distribution of left tunnel under 0.1g El Centro incident wave

2.2.1 代表性计算结果

由于土-隧道模型为对称结构,当地震动从底部垂直入射时,左右隧道受力也是对称的,因此,只分析一侧的隧道。图8给出了在0.1g的El Centro波入射时单一隧道以及不同间距并行隧道中左侧隧道衬砌的总弯矩沿着圆周方向的分布图。从图8可以看出,衬砌所受的弯矩在水平和垂直方向上最大,水平位置附近为外侧受拉,垂直方向附近为内侧受拉。并行隧道的弯矩与单一隧道有较大区别,且与并行

隧道的间距关系较大, 如当 $B=20\text{ m}$ 、 50 m 时, 并行左侧隧道衬砌的最大弯矩分别为 $548.5\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $603.2\text{ kN}\cdot\text{m}$, 比单一隧道衬砌的最大弯矩 $625.1\text{ kN}\cdot\text{m}$ 分别下降了约 12.3% 、 3.5% 。和单一隧道相比, 在并行隧道拱顶拱底附近和 2 个隧道内侧相对的水平位置附近, 单一隧道衬砌的弯矩大于并行隧道, 而在并行隧道内侧上下 45° 方向则相反, 并行隧道的间距越小, 这一趋势越明显。在并行隧道靠外的一侧, 单一隧道衬砌的弯矩和并行隧道衬砌的弯矩相差不大。

图 9 给出了在 $0.1g$ 的 El Centro 波入射时单一隧道以及不同间距并行隧道中左侧隧道衬砌的总轴力沿着圆周方向的分布图。由图 9 可知, 隧道衬砌轴力以压力为主, 最小值出现在隧道顶部位置, 在底部和中部也较小, 最大值出现在 2 个隧道下半部相对方向的 45° 位置。并行隧道衬砌所受的轴力比单一隧道要大一些, 两个隧道的间距越小这种趋势越明显。

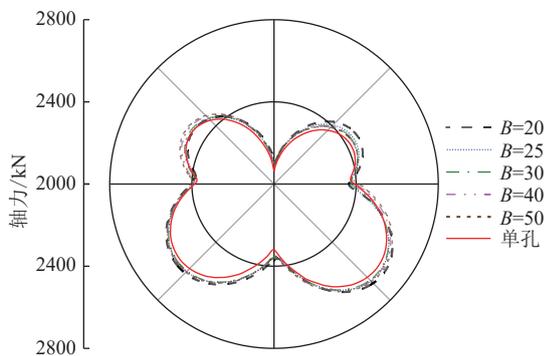


图 9 El Centro 波 $0.1g$ 入射时左侧隧道的轴力分布
Fig. 9 Axial force distribution of left tunnel under $0.1g$ El Centro incident wave

2.2.2 场地的地震响应

为了说明地震动频谱特性对场地响应的影响, 提取了不同入射波作用下自由场中隧道所在土层相对于隧道底部土体的最大位移的绝对值(图 10)。由图 10 可知, 地震动频谱特性对场地的最大相对位移影响较大。在 $0.1g$ 的 El Centro 波、Northridge 波和 Kobe 波作用下, 隧道顶部土层相对于隧道底部土体的最大相对位移分别为 6.71 mm 、 5.51 mm 和 3.84 mm , 由于隧道的受力和变形主要由土体的相对位移引起, 因此可以预见, 在 El Centro 波作用下, 隧道衬砌的动弯矩和动轴力最大, 在 Kobe 波作用下, 隧道衬砌的动弯矩和动轴力最小。

2.2.3 隧道所受动力荷载与隧道间距和地震动频谱特性的关系

用隧道衬砌受力的最大最小值减去地应力平衡

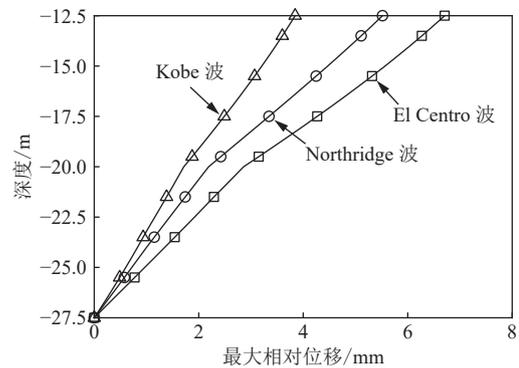


图 10 不同入射波作用下隧道所在土层相对于隧道底部土体的最大位移

Fig. 10 The maximum relative displacement of the soil layers where the tunnel is located under different incident waves

分析步的隧道衬砌受力, 即可得到隧道衬砌的最大动弯矩和动轴力, 以此来分析并行隧道的动力相互作用。

首先考虑地震动频谱特性的影响, 在 El Centro 波、Northridge 波和 Kobe 波作用下, 单孔隧道衬砌所受的最大正动弯矩分别为 $206.58\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $162.40\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $107.63\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。可见, 不同地震动入射时, 隧道衬砌所受的动轴力和动弯矩有很大的区别。

图 11 为不同间距, 不同地震动入射时, 隧道衬砌所受动弯矩的包络图。可以看出, 隧道衬砌动弯矩的最大值出现在衬砌上下共轭 45° 方向上, 且衬砌所受正负动弯矩的最大值位置不同。随着隧道间距的减小, 双线隧道衬砌所受正负动弯矩在 2 个隧道相对侧的上下 45° 方向增加明显, 有逐渐向水平方向移动的趋势, 而在另一侧变化不大。以左侧隧道的负动弯矩为例, 当 $B=20\text{ m}$ 、 25 m 、 30 m 时, El Centro 波入射下的并行左侧隧道的负动弯矩相较单孔隧道提高了 15.6% 、 9.5% 、 5.8% , 在 Northridge 波入射时, 提高值为 8.6% 、 3.3% 、 3.4% , 而在 Kobe 波入射时, 分别提高了 12.9% 、 5.4% 、 2.0% 。这说明并行隧道间距对地震动作用下衬砌动弯矩的影响很大, 这种影响主要体现在 2 个隧道相靠近的一侧, 且与地震动频谱特性的关系也较大。

图 12 为不同间距, 不同地震动入射时, 隧道所受动轴力的包络图。可以看出, 隧道所受动轴力的最大值位置和动弯矩类似, 出现在衬砌上下共轭 45° 方向上。随着隧道间距的减小, 衬砌所受动轴力逐渐增大, 增大位置出现在并行隧道相对侧的上部 45° 和另一侧下部 45° 位置, 而在其他位置变化不大, 甚至有可能略有减小。以右侧隧道的正动轴力为例, 当

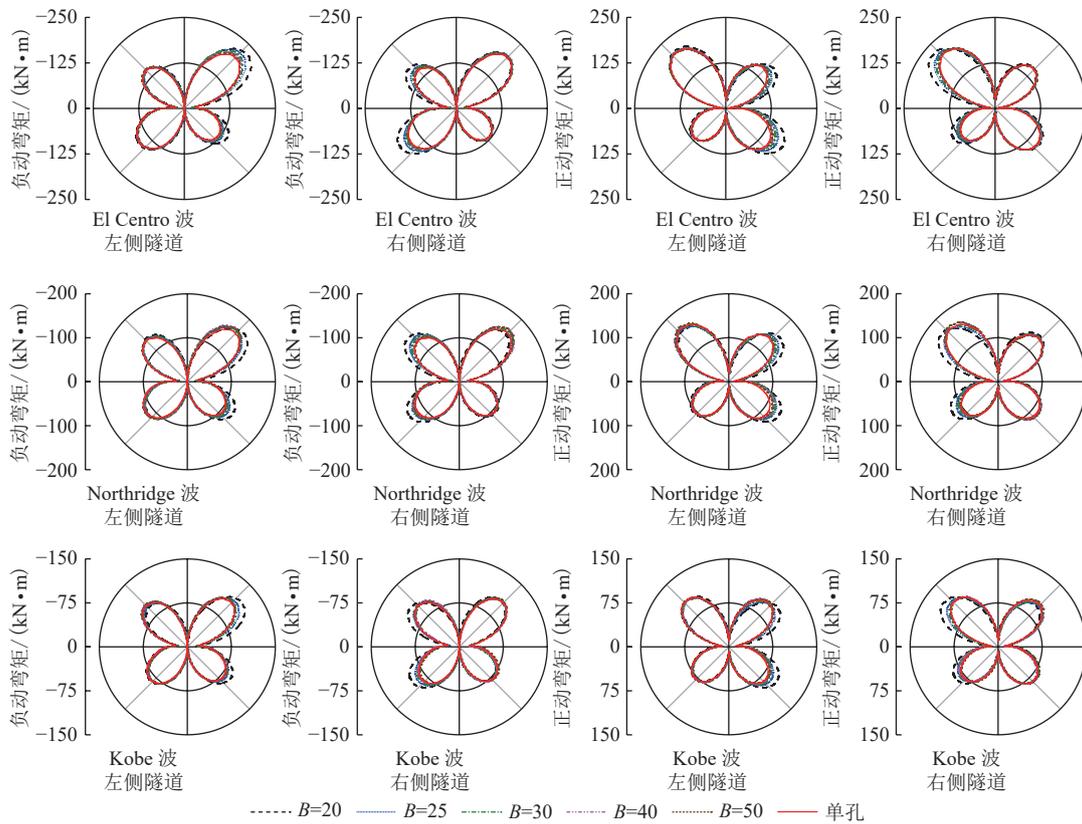


图 11 不同间距隧道在不同地震动入射时衬砌的动弯矩包络图

Fig. 11 Envelope diagram of dynamic bending moment distribution of tunnel lining under different interval and incident wave

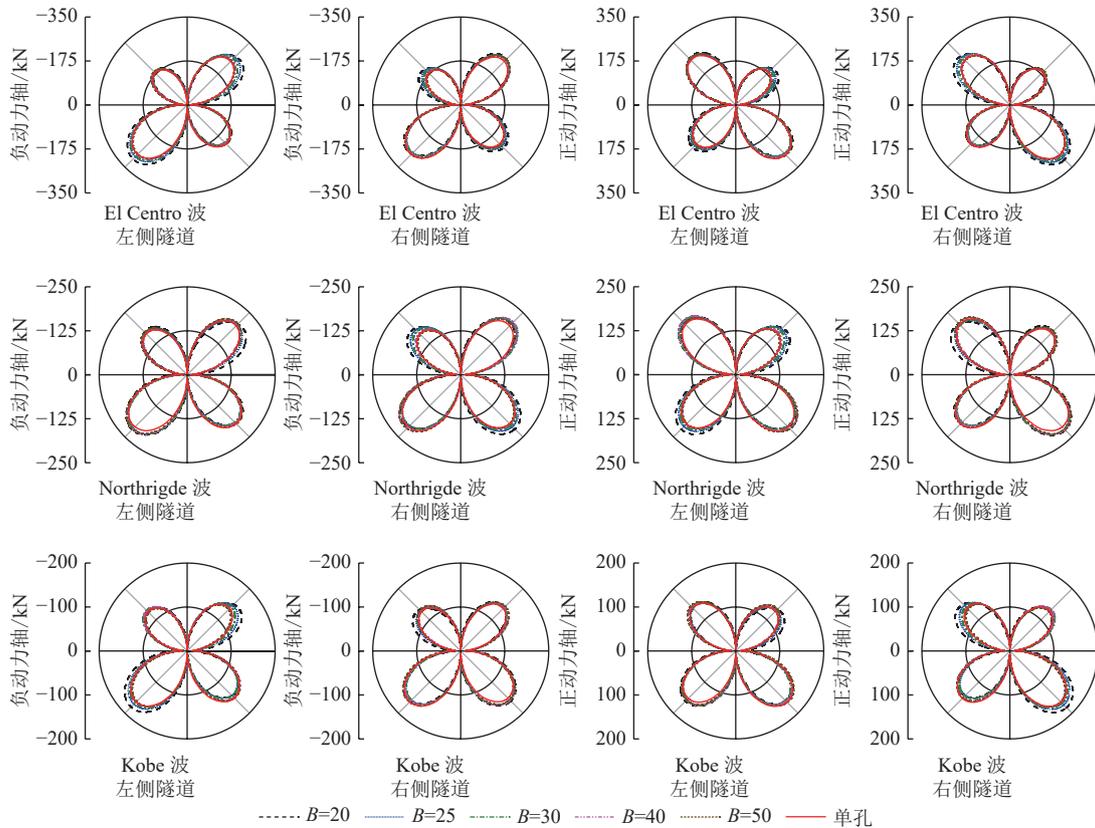


图 12 不同间距隧道在不同地震动入射时衬砌的动轴力包络图

Fig. 12 Envelope diagram of dynamic axial force distribution of tunnel lining under different interval and incident wave

$B=20\text{ m}$ 、 25 m 、 30 m 时, El Centro 波入射下并行右侧隧道的正动轴力相较单孔隧道提高了 9.5%、5.7%、3.2%, 在 Northridge 波入射时, 提高值为 5.5%、3.6%、3.7%, 而在 Kobe 波入射时, 提高值为 10.4%、4.8%、1.8%。这说明并行隧道间距对地震动作用下衬砌动轴力的影响很大, 这种影响主要体现在 2 个隧道相靠近的一侧的上半部和另一侧的下半部, 且受地震动频谱特性的影响, 地震动频谱特性对衬砌动轴力和动弯矩的影响存在不同。

3 结论

本文从地震动输入波动法节点等效荷载的计算公式入手, 在使用中发现理论公式的计算结果有一定偏差, 通过自由场和散射场算例验证了底边界几种输入方法的计算精度, 并通过分析计算结果与理论解和远置边界计算结果的差异, 得出精确程度最高的地震动输入方式。然后, 利用有限元软件建立了

土-大直径隧道模型, 采用粘弹性边界和前面提出的地震动输入方式, 考虑地震动频谱特性和隧道间距的影响, 得出了以下结论:

(1)粘弹性边界采用等效节点荷载方式输入地震动时, 侧面边界输入自由波场, 底部位移输入自由波场, 速度输入入射波场或自由波场, 能得到最高的模拟精度, 基于人工边界子结构的地震动输入方法精度也较高。

(2)隧道在地震动作用下的响应受地震动频谱成分的影响较大, 在设计时应当综合考虑多条地震动。

(3)地震作用下, 隧道衬砌所受的动弯矩、动轴力峰值位置出现在衬砌的共轭 45° 方向, 与静力作用下衬砌弯矩和轴力最大值的位置不同。

(4)地震动作用下双线隧道和单一隧道的受力存在差异, 随着双线隧道的间距逐渐减小, 2 个隧道之间的动力相互作用会越来越强烈, 且这种作用对动弯矩和动轴力的影响不同。

参考文献

- [1] 洪开荣, 冯欢欢. 近 2 年我国隧道及地下工程发展与思考(2019—2020 年)[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1259-1280
Hong K R, Feng H H. Development and thinking of tunnels and underground engineering in China in recent 2 years (from 2019 to 2020)[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1259-1280
- [2] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术综述: 2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(4): 1-40
- [3] 李天斌. 汶川特大地震中山岭隧道变形破坏特征及影响因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 742-750
Li T B. Failure characteristics and influence factor analysis of mountain tunnels at epicenter zones of great Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 742-750
- [4] 崔光耀, 王明年, 于丽, 等. 汶川地震公路隧道洞口结构震害分析及震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1084-1091
Cui G Y, Wang M N, Yu L, et al. Seismic damage and mechanism of portal structure of highway tunnels in Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(6): 1084-1091
- [5] Lee V W, Trifunac M D. Response of tunnels to incident SH-waves[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1979, 105(4): 643-659
- [6] 邹炎, 景立平, 李永强. 隧道穿过土层分界面振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 3340-3348
Zou Y, Jing L P, Li Y Q. Study of shaking table model test of tunnel through soil interface[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S1): 3340-3348
- [7] Wang G B, Yuan M Z, Yu M, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 76: 145-159
- [8] 王彤辉, 李小军, 陈红娟, 等. 场地-隧道-地上建筑结构体系地震响应的振动台试验[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4): 742-751
Wang T H, Li X J, Chen H J, et al. Shaking table test of seismic response of site-tunnel-aboveground building structure system[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 742-751
- [9] Bazar M H, Moghadam M R, Kim D S, et al. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 44: 10-22
- [10] 李延涛, 田野, 宗金辉, 等. 受相邻上部结构影响的隧道-土体系振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(3): 233-

- 241, 259
Li Y T, Tian Y, Zong J H, et al. Shaking-table tests for seismic response of tunnel-soil system affected by adjacent upper structure[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(3): 233-241, 259
- [11] Liang J W, Xu A Q, Ba Z N, et al. Seismic response of ultra-large diameter shield tunnel in upper-soft and lower-hard site: Shaking table tests and numerical simulations[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 164: 107634
- [12] 王国波, 王亚西, 陈斌, 等. 隧道-土体-地表结构相互作用体系地震响应影响因素分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(6): 1276-1287
Wang G B, Wang Y X, Chen B, et al. Analysis of factors influencing seismic responses of tunnel-soil-ground structural system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(6): 1276-1287
- [13] 黄忠凯, 张冬梅. 软土地层浅埋盾构隧道地震易损性分析[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(5): 51-60
Huang Z K, Zhang D M. Seismic vulnerability analysis of the shallow-buried shield tunnel in soft soil stratum[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2020, 57(5): 51-60
- [14] 张季, 谭灿星, 许开成. 地震作用下软土-隧道-地上框架体系非线性动力反应分析[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(12): 159-167
Zhang J, Tan C X, Xu K C. Nonlinear dynamic response analyses of a soft soil-tunnel-aboveground frame structure system under earthquake[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(12): 159-167
- [15] Kontoe S, Avgerinos V, Potts D M. Numerical validation of analytical solutions and their use for equivalent-linear seismic analysis of circular tunnels[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 66: 206-219
- [16] Zhao Z Y, Cui J, Liu C, et al. Seismic damage characteristics of large-diameter shield tunnel lining under extreme-intensity earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 171: 107958
- [17] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1969, 95(4): 859-877
- [18] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. *土木工程学报*, 1998, 31(3): 55-64
Liu J B, Lü Y D. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction[J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(3): 55-64
- [19] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, 120(1): 25-42
- [20] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 46-51
Liu J B, Wang Z Y, Du X L, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 46-51
- [21] 刘晶波, 谭辉, 宝鑫, 等. 土-结构动力相互作用分析中基于人工边界子结构的 seismic 波动输入方法[J]. *力学学报*, 2018, 50(1): 32-43
Liu J B, Tan H, Bao X, et al. The seismic wave input method for soil-structure dynamic interaction analysis based on the substructure of artificial boundaries[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 32-43
- [22] 马笙杰, 迟明杰, 陈红娟, 等. 黏弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及地震动输入方法的比较研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(7): 1445-1457
Ma S J, Chi M J, Chen H J, et al. Implementation of viscous-spring boundary in ABAQUS and comparative study on seismic motion input methods[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(7): 1445-1457
- [23] 刘晶波, 杜义欣, 闫秋实. 粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J]. *防灾减灾工程学报*, 2007, 27(增刊 1): 37-42
Liu J B, Du Y X, Yan Q S. Implementation of viscous-elastic artificial boundary and earthquake dynamic input in common finite element software[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(S1): 37-42
- [24] 谭辉, 刘晶波, 王东洋, 等. 地下结构地震反应分析中人工边界条件和地震波动输入方法对比研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(增刊 1): 212-216, 222
Tan H, Liu J B, Wang D Y, et al. Comparison on artificial boundaries and seismic wave input methods in seismic analysis of underground structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(S1): 212-216, 222
- [25] 廖振鹏. *工程波动理论导论* [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 7-9
Liao Z P. *Introduction to wave motion theories in engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002: 7-9
- [26] 王苏, 路德春, 杜修力. 地下结构地震破坏静-动力耦合模拟研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(11): 3483-3488
Wang S, Lu D C, Du X L. Research on underground structure seismic damage using static-dynamic coupling simulation method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(11): 3483-3488
- [27] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS 混凝土应力-应变关系选择[J]. *建筑结构*, 2013, 43(增刊 2): 559-561
Fang Z H, Zhou H J, Lai S Y, et al. Choose of ABAQUS concrete stress-strain curve[J]. *Building Structure*, 2013, 43(S2): 559-561