

黏弹性人工边界在地下结构抗震分析中的应用

迟 恒, 王寿生, 王 维

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 地下结构地震反应分析需考虑结构-地基的动力相互作用, 其中场地土层的自由场反应分析是确定地震输入的关键问题。以往地下工程实例表明, 在结构动力时程计算中, 能否有效模拟无限地基边界对结构抗震分析有很大的影响。基于某地下综合体项目进行抗震评估, 采用黏弹性人工边界模拟自由场震动响应, 克服工程中传统分析里不能模拟场地无限域的缺点。为地下结构的动力时程分析提供可靠数值依据。

关键词: 地下综合体; 结构-地基的动力相互作用; 黏弹性人工边界; 自由场响应

中图分类号: TU470+.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)01-0237-05

0 引言

城市地下结构, 尤其是隧道、地铁、地下车站、地下管线系统, 是现代社会公共基础设施的重要组成部分。考虑到城市地下结构对经济及生命安全的重要性, 对地下结构进行抗震安全设计是必要的。依据《地下结构抗震设计标准》(GB/T 51336—2018)要求, 对于地质条件复杂(如: 含软弱、液化土层)且结构体型复杂的地下结构应进行弹塑性时程分析进行抗震安全评估。而地震时地下结构-土体相互作用是在无限域的场地中进行, 如何近真实地动态模拟场地边界成为分析结果可靠性的难点之一。图1为广义结构与远场岩土之间设置虚拟人工边界的整体计算模型^[1]。

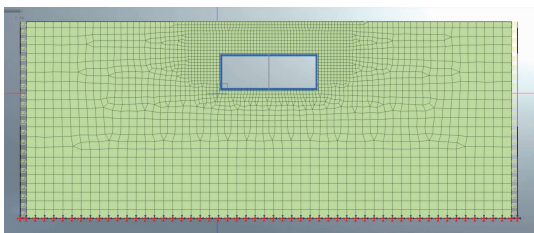


图1 结构-场地动力计算模型

在无限连续土层介质中采用虚拟边界进行有限化模拟, 即构建人工边界。在无限域的场地模拟人工边界不仅需满足边界设置要求条件, 且可真正模拟无限域场地动力特性。其土的力学分析上人工边界为近场波动对应的偏微分方程。人工边界条件的真

实性为是否能准确模拟对无限域连续介质场地, 即地震波在人工边界处的传播特性与无限域连续介质保持一致。从近场任何方向入射的地震波通过设置的黏弹性人工边界时无反射效应, 即波在人工边界处被边界完全吸收, 或完全透射。通常人工边界也被认为是无反射、透射或吸收的有限域边界^[2]。在地下结构抗震分析中, 人工边界条件对无限域模拟的准确与否将直接影响近场波动数值模拟的精度, 因此人工边界条件的研究具有重要意义^[3]。图2为ANSYS场地分析模型。

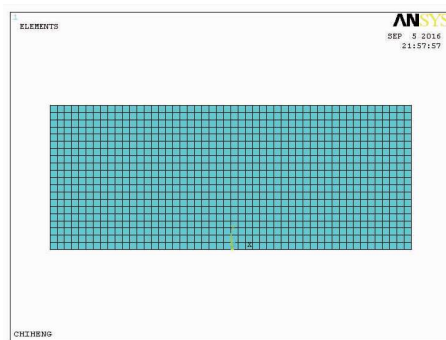


图2 ANSYS场地分析模型

1 黏弹性人工边界基本理论

Deeks 等人提出假定二维散射波以柱面形式向外发散, 模拟了黏弹性人工边界。此后黏弹性人工边界模型受到了国内外众多学者的关注, 其中刘晶波等人做了大量的研究工作, 例如, 基于柱面波动方程建立了二维黏弹性人工边界^[4]; 并以球面波动方程为基础提出了三维黏弹性人工边界^[5]; 依据半无限空间中的静力问题基本解构造出黏弹性静动力统一人工边界以及方便工程应用的二维、三维一致黏弹性人工

收稿日期: 2021-04-19

作者简介: 迟恒(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事城市交通与地下空间设计工作。

边界与等效黏弹性边界单元,并就人工边界的波源问题和地震波动输入问题进行了系统性的讨论,从而实现了对实际连续介质应力边界条件的模拟^[5]。

此外,L.Kellezi 在黏弹性人工边界的研究中引入了波动入射角度概念,对各入射角度赋予不同边界参数,取得了较好的效果。然而,人工边界是针对某种固定形式的外行波设置的,在近场地基地形和地质条件均较复杂下会产生各种的散射波形式,以致使边界对外行波的吸收不充分而产生误差,那么在复杂地基条件下此类边界模型的计算结果是否在工程精度要求将成为一个有待研究的课题。

1.1 黏弹性边界的一般表达式

黏弹性人工边界可表达为连续分布且相互偶联的耗能弹簧-阻尼器,拟设人工边界上法向及切向弹簧刚度和阻尼系数可按下列公式取值^[6]:

$$\sigma_{li} = -K_{li}u_{li}(t) - C_{li}\dot{u}_{li}(t) \quad (1)$$

式中: l 为人工边界节点号; $i=x,y,z$ 代表分量方向; t 表示时间; $\sigma_{li}, u_{li}, \dot{u}_{li}$ 为节点方向的应力、位移和速度; K_{li}, C_{li} 为节点方向的黏弹边界参数。

1.2 边界节点运动方程

为真实模拟有限域边界,考虑无限域动力特性的黏弹性有限边界表达时,边界节点动力方程可表达为:

$$m_l \ddot{u}_l + \sum_n \sum_j C_{linj} \dot{u}_{nj} + \sum_n \sum_j k_{linj} u_{nj} = f_l + A_l \sigma_{li} \quad (2)$$

式中: σ_{li} 为黏弹性边界处节点 l 应力; $A_l = \sum_{e=1}^N A_{le}$ 为节点 l 应力的作用范围; N 为与节点震动关联的单元数; A_{le} 为单元 e 上黏弹边界的作用范围,其中平面应力分析, A_{le} 则取值为 $1/2$ 单元边界线长度^[7]。

1.3 黏弹性边界单元参数

将黏弹性人工边界等效模拟成为连续分布的并偶联的弹簧-阻尼器系统,如图3所示。其中,平面分析中黏弹性人工边界等效的弹簧特性为 K_B 和阻尼系数 C_B 分别为:

$$\text{切向边界: } K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_S \quad (3)$$

$$\text{法向边界: } K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_P \quad (4)$$

式中: K_{BT}, K_{BN} 分别为法向与切向弹簧刚度; R 为波源至人工边界点的距离; C_{BT}, C_{BN} 分别为垂直向与剪切向阻尼器的阻尼系数; C_P, C_S 分别为介质的 P 波和 S 波波速; G 为介质剪切模量; α_N 和 α_T 分别为平面垂直向及剪切向黏弹性边界修正系数; α_T 值范围为 $[0.35, 0.65]$, α_N 的取值范围为 $[0.80, 1.20]$, 在本文中

α_N 取为 1.0, α_T 取为 0.5。

1.4 黏弹边界外源输入方法

刘晶波和吕彦东给出一种将人工边界入射场转化为等效边界力从而化外源波动问题为内源波动问题的黏弹性人工边界外源输入方法,并在二维平面问题中得到应用。由黏弹性边界弹簧-阻尼元件和内部计算区有限元模型共同构成整体计算模型,当人工边界入射位移场在模型的人工边界入射时,可以通过施加一个等效外荷载来代替人工边界入射位移场。在边界节点垂直向和剪切向上土体震动位移所需施加的等效地震力可分为有限域介质抵抗力及边界弹簧-阻尼元件的反力。工程中,地震源距离场地比较远,一般把地震波假设为地表竖直自由向上入射的平面体波,例如垂直向上的平面 SV 波。入射场就是人工边界入射场,侧边界无入射。质点只有水平方向上的运动^[8-10]。

2 数值分析

场地简化计算模型见图3,并设4个观测点。在模型底部垂直入射 SV 波,入射波位移方程式(5)和式(6)。通过提取左边界上表面节点 A 和下表面的节点 B 的 X 向位移信息以及中间处上表面节点 D 和下表面的节点 C 的 X 向位移的对比情况,来验证黏弹性边界的合理性(见图4~图5)。

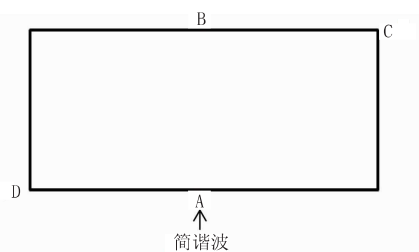


图3 场地简化分析模型

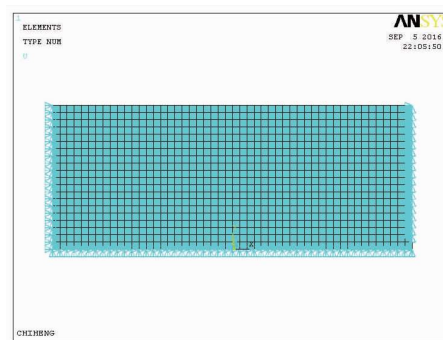


图4 施加边界约束

$$u(t) = 2\sin(5\pi t), 0 \leq t \leq 0.5 \text{ s} \quad (5)$$

$$u(t) = 0, t > 0.5 \text{ s} \quad (6)$$

式中: $u(t)$ 为正弦位移加载函数,加载时间参数 $t \geq 0$ 。

介质的弹性模量 $E = 1.85 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 介质的泊松

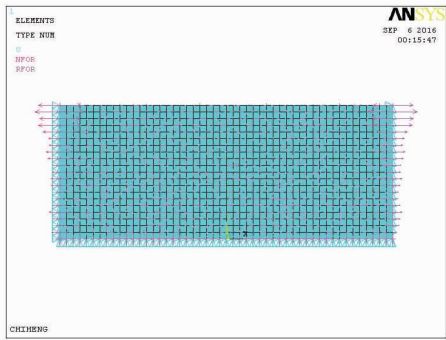


图5 加载求解后的位移图

比 $\mu=0.35$,介质密度 $E=2\,637\text{ kg/m}^3$ 。计算区域尺寸为:长 $\times$ 宽 $=1\,000\times 400\text{ m}$ 。

模型中观测点坐标分别为A(0,0),B(0,400),C(500,400),D(-500,0)。输出D点位移、速度、加速度时程曲线图,如图6~图7;A、B、C、D点位移时程曲线及各点间的对比曲线,如图8~图13。

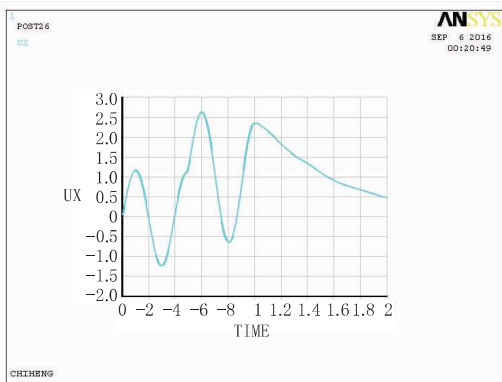


图6 D点位移时程曲线图

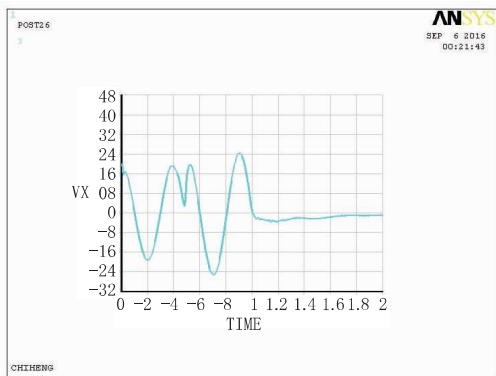


图7 D点速度时程曲线图

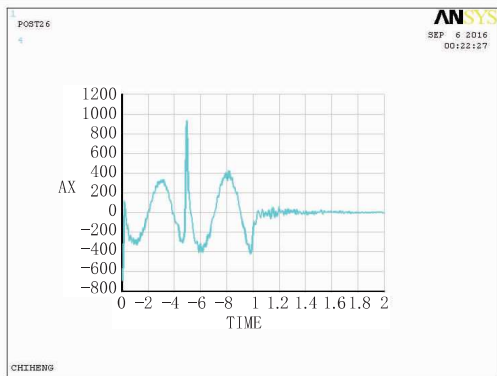


图8 D点加速度时程曲线图

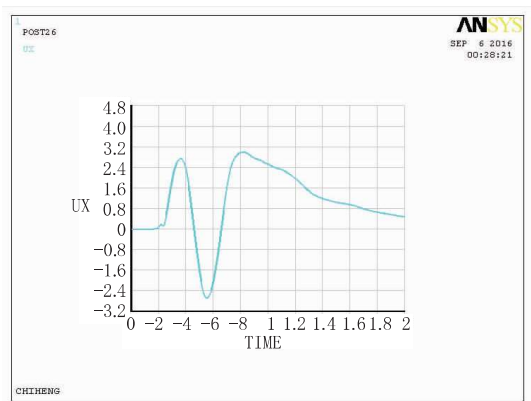


图9 B点位移时程曲线图

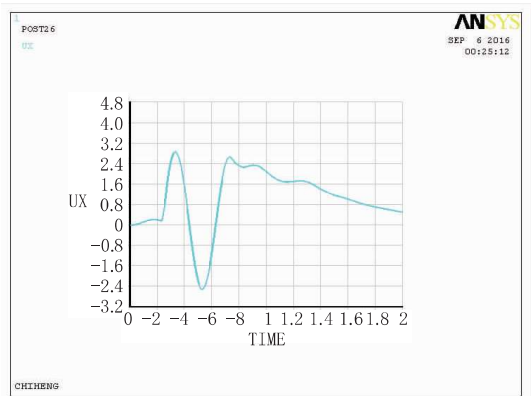


图10 C点位移时程曲线图

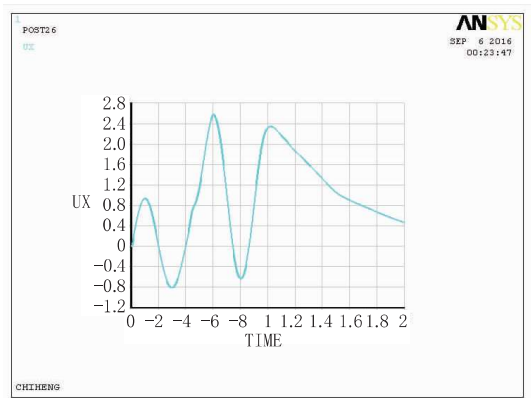


图11 A点位移时程曲线图

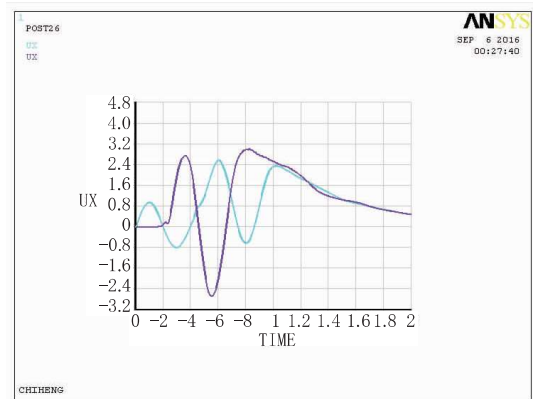


图12 A点、B点位移时程曲线图

通过对比各个观测点的位移时程曲线及单点加速度、速度时程曲线可知,模拟边界有效避免黏性边界产生的低频漂移现象,节点振动和波的传播速度

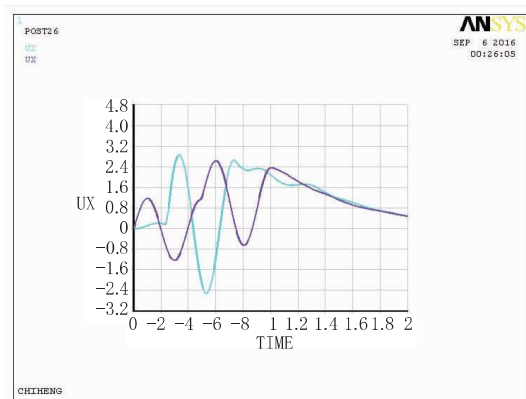


图 13 C点、D点位移时程曲线图

及振幅想对应,并且振动能够模拟场地有限区域之外的半无限介质动力恢复性能,说明土单元随地震波动具有稳定的频率。其中A点有一定的延时,为作用停止后的短暂时间内,会有滞后的位移,接着位移趋向为零。这都与理论解相一致。

其模拟边界方法比其他常用边界更易于在各种通用有限元程序中实现,因此,该边界模型可较为真实的应用于核电厂、地下综合体结构等重大工程的抗震安全分析及隔振工程数值分析。

3 ANSYS 施加黏弹性边界命令

```
!建立模型底部人工边界上的弹簧阻尼器
nselect,s,loc,y,0      !将底边上的节点选中
*get,np,node,,count
*get,npmax,node,num,maxd
*do,ip,1,np
  npnum=node((ip-1)*dxyz-Length/2,0,0)
  x=nx(npnum)
  y=ny(npnum)
  z=nz(npnum)
  npmax=npmax+1
  n,npmax,x,y-dxyz/20,z
  !施加法向的弹簧阻尼器
  type,3
  real,3
  e,npnum,npmax      !建立弹簧阻尼器单元
  d,npmax,all,0      !在弹簧阻尼器的另一端施加约束
  npmax=npmax+1
  n,npmax,x-dxyz/20,y,z
  !施加切向的弹簧阻尼器
  type,2
  real,2
  e,npnum,npmax
```

```
d,npmax,all,0
*enddo
!建立模型左侧边界上的弹簧阻尼器
nselect,s,loc,x,-Length/2      !将左侧上的节点选中
*get,np,node,,count
*get,npmax,node,,num,maxd
*do,ip,2,np
  npnum=node(-Length/2,(ip-1)*dxyz,0)
  x=nx(npnum)
  y=ny(npnum)
  z=nz(npnum)
  npmax=npmax+1
  n,npmax,x-dxyz/20,y,z
  !施加法向的弹簧阻尼器
  type,3
  real,3
  e,npnum,npmax
  d,npmax,all,0.
  npmax=npmax+1
  n,npmax,x,y-dxyz/20,z
  !施加切向的弹簧阻尼器
  type,2!
  real,2
  e,npnum,npmax
  d,npmax,all,0
*enddo
!建立模型右侧边界上的弹簧阻尼器
nselect,s,loc,x,Length/2
*get,np,node,,count
*get,npmax,node,,num,maxd
*do,ip,2,np
  npnum=node(L/2,(ip-1)*dxyz,0)
  x=nx(npnum)
  y=ny(npnum)
  z=nz(npnum)
  npmax=npmax+1
  n,npmax,x+dxyz/20,y,z
  !施加法向的弹簧阻尼器
  type,3
  real,3
  e,npnum,npmax
  d,npmax,all,0.
  npmax=npmax+1
```

```

n,npmax,x,y-dxyz/20,z
!施加切向的弹簧阻尼器
type,2
real,2
e,npnum,npmax
d,npmax,all,0.
*enddo
allsel,all
/pnum,type,1
/number,1
eplot
finish

```

4 结 语

本文对黏弹性人工边界基本理论与等效荷载波动输入方法进行了总结,并依据实际工程案例,实现 ANSYS 有限元自由场振动分析与实际工程中的应用。且通过计算表明黏弹性人工边界具有满意的计算精度和稳定性,可广泛应用于地下工程抗震分析中。

参考文献:

[1] Y.X.Cai,P.L.Gould,C.S.Desai. Nonlinear analysis of 3D seismic in-

teraction of soil-pile-structure systems and application [J]. Engineering Structures, 2000, 22(2): 191-199

[2] J.P.Stewart, G.L.Fenves, R.B.Seed. Seismic soil-structure interaction in buildings.I:Analyticalmethod [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(1):26-37

[3] J.P.Stewart, G.L.Fenves, R.B.Seed. Seismic soil-structure interaction in buildings.II:Empirical findings [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1999, 125(1):38-48

[4] R.W.Boulanger, C.J.Curras, D.W.Wilson. Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(9):750-759

[5] C.J.Curras, R.W.Boulanger, B.L.Kutter. Dynamic experiments and analysis of a pile-group-supported structure[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2001,127 (7): 585-596

[6] D.Finn, G.Wu. Nonlinear Seismic Analysis of Pile Foundations. In: Proc.11th World Conf. Earthquake Eng[C]. Acapulco, 1996, No.1414

[7] Dasgupta G.A finite element formulation for unbounded homogeneous eontniua[J]Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1982,49:36-140

[8] 阎俊义. 结构-地基动力相互作用的 FE-SBFE 时域耦合方法及工程应用[D].北京:清华大学.2003.10.

[9] Li P, Song E X. A high-order time-domain transmitting boundary for cylindrical wave propagation problems in unbounded saturated poroelastic media [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013,48:48-62.

[10] 刘晶波,王振宇,杜修力,等.[J].工程力学,2005,22(6):46-51.

(上接第 212 页)

质辉石玄武岩,属于碱性集料,各项性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》中对沥青路用混合料集料的相关要求。

(2)马普托地材矿粉岩性为碱性岩性,各项性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》对路用混合料集料的相关要求,但其中矿粉 0.075 mm 筛孔通过率偏高,总体符合使用要求。

(3)针对马普托大桥地材进行了浇注式聚合物改性沥青混合料 GA10 和高弹性改性沥青混合料 SMA10 的配合比设计,并通过各项路用性能指标进行验证,发现根据马普托地材设计得到的两种混合料配合比能够符合马普托大桥桥面铺装的使用要求。

参考文献:

[1] 黄卫,刘振清.大跨径钢桥面铺装设计理论与方法研究[J].土木工程学报,2005,38(1):51-59.

[2] 王旭东. 集料岩性及微观特征对沥青混合料路用性能的影响研究 [D].长春:吉林大学,2014.

[3] 向文凤,胡德勇,程华才.矿粉对浇注式沥青混合料性能的影响分析[J].公路交通技术,2016,32(4):22-25.

[4] 石红星,李海军,朱立国,等. SMA 混合料水稳定性的试验研究[J].石油沥青,2000(2):14-17.

[5] 薛文,史建方,夏志国. SMA 混合料水稳性能的探讨[J].河北工业大学学报(社会科学版),2001,16(4):16-20.

[6] 王民,周启伟,胡德勇,等. 三种不同钢桥面铺装材料的疲劳特性分析[J].公路工程,2016,41(3):40-42.