

杜修力, 陈维, 李亮, 李立云, 2007. 斜入射条件下地下结构时域地震反应分析初探. 震灾防御技术, 2(3): 290—296.

斜入射条件下地下结构时域地震反应分析初探¹

杜修力 陈维 李亮 李立云

(北京工业大学城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100022)

摘要 通过采用平面波和远场散射波混合透射的应力人工边界条件, 得到了地震波斜入射的解析方式, 以此为基础建立了地震波斜入射条件下, 土体与地下结构动力相互作用的时域计算分析模型。以实际建设的南京地铁某车站结构为研究对象, 应用大型通用有限元分析软件 ANSYS, 进行了地震波斜入射条件下地下结构时域地震反应的计算和分析。初步结果表明: 在地震波斜入射的情况下, 地下结构的动力反应与地震波垂直入射时有较为明显的差异。

关键词: 地下结构 时域地震反应 斜入射 人工边界

引言

随着社会经济的发展和城市化程度的不断提高, 城市人口急剧增加, 城市的住房与交通压力也不断增大, 从而使得城市用地紧张的矛盾愈来愈突出, 这必然促进和加快地下结构在城市建设中的应用和发展。地下结构的快速发展和已有的一些地下结构在近期强地震中的表现, 引起了人们对这种结构体系抗震安全性问题的关注。应用合理而有效的计算模型和计算方法, 对地下结构体系在入射地震波作用下的动力反应进行计算和分析, 全面揭示地下结构体系地震反应的特点和规律, 已经成为结构工程和防灾减灾工程领域的重要研究课题之一。

在进行地下结构地震反应的计算和分析时, 必须将结构本身和周围的土介质作为一个整体, 考虑土体和结构的动力相互作用, 这可以归结为开放体系的波动定解问题。在已有的针对地下结构进行的地震反应分析中, 多是在假设地震波为垂直入射剪切波或压缩波的条件下去进行的。而事实上, 当震源距离场地较近时, 地震波并不是垂直向上入射的。为了确保重大工程结构在地震作用下的安全性, 有必要在抗震设计中考虑地震波斜入射的影响。本文以实际建设的南京地铁某车站结构为研究对象, 进行了地震波斜入射条件下地下结构时域地震反应的计算和分析。

1 时域地震波斜入射的实现方法

频率域斜入射地震动对土-结构体系地震反应的影响分析较易实现, 相对而言, 时间域

¹ 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50325826、50508002); 北京市教委科技创新平台建设项目——城市岩土与地下工程安全检测技术平台

[收稿日期] 2007-07-23

[作者简介] 杜修力, 男, 生于1962年。教授, 博士生导师。主要从事岩土与地下工程、结构抗震及计算力学方法等方面的研究工作。E-mail: duxl@iwhr.com

的情况则要复杂些。对于有非线性影响的情况, 时间域的分析又是必要的, 因此, 刘晶波等 (2006) 和赵建锋等 (2007) 研究了考虑地震波斜入射的时间域分析方法。本文论述的地震波斜入射的实现是基于赵建锋等 (2007) 建议的方式完成的。波场分解的基本方法是将人工边界上的波动场分解为无局部场地效应影响的自由场与局部场地效应引起的散射场两部分, 无限域地基中的波动传播对人工边界的影响通过将位移场、速度场转化为应力场施加到人工边界节点上来反映, 其中对散射波场的模拟采用了杜修力等 (2006) 提出的一种新的应力人工边界条件, 该方法的优点是可方便地在大型商用有限元软件上实现。

1.1 波场分解技术

地震波入射问题属于外源波动问题, 即波源来自人工边界外的无穷远处。对于人工边界外的无限域, 可以将总波场 u^T 分解为散射波场 u^S 和自由波场 u^F :

$$u^T = u^S + u^F \quad (1)$$

因此, 可以采用粘弹性人工边界条件和自由场结合的方法来处理外源波动问题。按照这种方法来处理外源波动问题时, 将任意外源波场统一为自由波场。在计算区域的边界上, 由弹簧-阻尼元件组成的粘弹性边界吸收散射波场的能量, 而自由波场可直接转换为应力边界条件施加在边界上, 从而提高了边界的透射精度。

由位移连续条件和力学平衡条件, 人工边界上任一点 l 的运动方程可写为:

$$m_l \ddot{u}_y^T(t) + C_l \dot{u}_y^T(t) + K_l u_y^T(t) = R_y^F(t) + R_y^S(t) \quad (2)$$

式中, $R_y^F(t)$ 和 $R_y^S(t)$ 分别为模拟自由场和散射场需要在人工边界节点上施加的荷载。

为模拟散射场而在人工边界节点上施加的力可以由粘弹性边界 (弹簧-阻尼元件组合) 来提供, 无需在边界节点上附加额外的荷载。模拟散射场需要在人工边界节点上施加的荷载 $R_y^S(t)$ 按照如下的表达式进行计算:

$$R_y^S(t) = -K_y \cdot u_y^S(t) - C_y \cdot \dot{u}_y^S(t) = -K_y [u_y^T(t) - u_y^F(t)] - C_y [\dot{u}_y^T(t) - \dot{u}_y^F(t)] \quad (3)$$

模拟自由场时, 在粘弹性边界节点需要施加的荷载分为人工边界上弹簧-阻尼元件所需的力和自由场在人工边界处的应力场两部分, 其计算式为:

$$R_y^F(t) = K_y \cdot u_y^F(t) + C_y \cdot \dot{u}_y^F(t) + \sigma_y^F(t) \cdot A \quad (4)$$

式中的 $R_y^F(t)$ 为在自由波场条件下边界节点 l 在 j 方向上需要施加的荷载; K_{y_j} 、 C_{y_j} 分别为边界节点 l 在 j 方向上构造粘弹性人工边界时附加的弹簧、阻尼系数; $u_{y_j}^F(t)$ 为原连续介质边界节点 l 在 j 方向上的自由场; A 为边界节点 l 所代表的边界面积。根据广义胡克定律, 各向同性弹性介质由自由场波动产生的应力场 $\sigma_y^F(t)$ 的计算式为:

对于边界点 l 的切向 j (假定方向 i 为边界节点 l 的外法向):

$$\sigma_y^F(t) = G(u_{y_j,i}^F(t) + u_{y_j,j}^F(t)) = \rho C_s^2 (u_{y_j,i}^F(t) + u_{y_j,j}^F(t)) \quad (5)$$

对于边界点 l 的法向 i (假定方向 j, k 为边界节点 l 的两个切向):

$$\sigma_y^F(t) = (\lambda + 2G)u_{y_i,i}^F(t) + \lambda(u_{y_j,j}^F(t) + u_{y_k,k}^F(t)) = \rho C_p^2 \left[u_{y_i,i}^F(t) + \frac{\nu}{1-\nu}(u_{y_j,j}^F(t) + u_{y_k,k}^F(t)) \right] \quad (6)$$

式中的 C_s 和 C_p 分别为介质剪切波波速和膨胀波波速; λ 和 G 分别为介质拉梅常数和剪切模量; ρ 和 ν 分别为介质密度和泊松比; i, j, k 分别为边界节点 l 所在局部坐标系的 3 个正方向, 其中 i 为外法向方向; $u_{y_i,i}^F(t)$ 为原连续介质边界节点 l 在 i 方向上的自由场沿 j 方向的偏导数。

1.2 地震波斜入射实现中的粘弹性人工边界条件

本文论述的地震波斜入射实现中的人工边界条件采用了杜修力等(2006)提出的粘弹性人工边界条件。该人工边界条件是根据平面波和远场散射波混合经验叠加并考虑多角度透射而建立的。它的经验参数能反映人工边界外行波动的衰减和多角度透射特性,由于这一边界条件的远场散射波是基于点源的格林函数解推得,它避免了基于球面波理论的粘弹性边界解与泊松比无关的理论缺点。从数值模拟的结果来看,无论是波源问题还是散射问题都具有较高的计算精度。

粘弹性边界相当于在人工边界上设置一系列由线性弹簧与粘滞阻尼器并联的弹簧-阻尼物理元件,对应于二维人工边界的弹簧刚度系数和粘滞阻尼系数按照如下的表达式进行计算:

$$\text{法向边界} \quad K = \frac{1}{1+\alpha} \cdot \frac{\lambda+2G}{2r} \cdot A \quad C = \beta \rho c_p \cdot A \quad (7)$$

$$\text{切向边界} \quad K = \frac{1}{1+\alpha} \cdot \frac{G}{2r} \cdot A \quad C = \beta \rho c_s \cdot A \quad (8)$$

三维人工边界的弹簧-阻尼元件参数为:

$$\text{法向边界} \quad K = \frac{1}{1+\alpha} \cdot \frac{\lambda+2G}{r} \cdot A \quad C = \beta \rho c_p \cdot A \quad (10)$$

$$\text{切向边界} \quad K = \frac{1}{1+\alpha} \cdot \frac{G}{r} \cdot A \quad C = \beta \rho c_s \cdot A \quad (11)$$

上述各表达式中, ρ 为介质密度; A 为边界节点所代表的面积; $c_p = \sqrt{\frac{\lambda+2G}{\rho}}$ 和 $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ 分别为 P 波和 S 波波速; 长度 r 可简单地取为近场结构几何中心到该人工边界点所在边界线或面的距离; 参数 α 表示平面波与散射波的幅值含量比, 反映人工边界外行透射波的传播特性; 参数 β 表示物理波速与视波速的关系, 反映不同角度透射多子波的平均波速特性。

调节参数 α 和 β 将使人工边界外行透射波近似满足近场波动问题的复杂波场性质, 从而提高人工边界计算精度。参数 α 和 β 的取值可通过数值试验经验地获得, 其较优建议值为 $\alpha=0.8$ 和 $\beta=1.1$ 。

1.3 地震波斜入射的解析实现

由波动理论可知, 在 P 波入射和 SV 波入射的条件下, 在自由表面处均会产生波形转换现象。当 P 波入射时, 反射波系中既有 P 波, 也有 SV 波; 当 SV 波入射时, 反射波系中既有 SV 波, 也有 P 波。将入射 P (SV) 波和反射 P (SV) 波以及反射 SV (P) 波各自产生的自由波场的应力进行叠加, 可以得到半空间的自由波场, 然后根据公式(4)就可以确定在所有人工边界节点上需要施加的荷载。对于均匀的弹性半空间而言情况会比较简单, 只要确定一个节点上需要施加的荷载, 其余的节点就可以通过水平波速和竖向波速来计算相对的时间间隔。对于地层较为复杂的情况, 例如多层不同介质则需要依次求出各个节点的自由波场。

2 地震波斜入射条件下地下结构地震反应分析

应用上述的基本原理和实现方法, 本文采用大型通用有限元计算分析软件 ANSYS, 对地震波斜入射条件下地下结构的地震反应进行了计算, 并将计算结果与地震波垂直入射时的计算结果进行了对比。算例的研究对象为南京地铁某车站的结构, 结构所在场地的土层分布情况如表 1 所示。根据土的类型划分和剪切波速的关系, 该场地 (0—9) m 深度范围内属软弱土; (9—46) m 深度范围内属中软土; (46—50) m 深度范围内属中硬土; (50—60) m 深

度范围内属坚硬土。该场地属III类场地。取第6层土的底面作为地震动输入的基准面。建立的有限元计算模型如图1所示, 图中场地土体的宽度为72m, 高度为60m; 土体中的地铁车站结构分为上下两层, 其整体的宽度为21.4m, 高度为12.49m, 埋深为12m; 车站结构的材料为混凝土, 其弹性模量为 $E=3 \times 10^{10} \text{Pa}$, 密度为 $\rho=2450 \text{kg/m}^3$, 泊松比取为 $\mu=0.15$ 。计算所采用的输入地震波的位移时程和速度时程如图2和图3所示。

表1 场地土层分布情况

Table 1 The soil layers and their parameters of the structure site

土层编号	土 类	埋深 (m)	容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均剪切波速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	素填土	1.80	17.80	122.0
2	淤泥质粉质粘土	6.50	17.40	107.6
3	粉土与粉砂互层	9.10	19.00	128.6
4	粉质粘土	14.00	18.80	168.4
5	粉质粘土	19.10	20.50	170.3
6	粉细砂	34.50	18.90	204.4
7	粉细砂	44.80	17.80	239.1
8	粉细砂	46.00	20.00	204.4
9	粉细砂夹砾砂	50.00	21.20	266.1
10	粘土	60.00	19.30	491.6

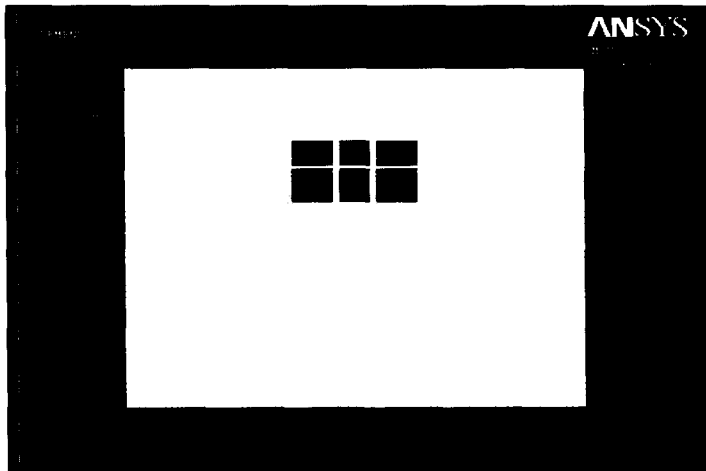


图1 地下结构地震反应有限元计算模型示意图

Fig. 1 The underground structure for finite element calculating model

地震波分别以P波和SV波的形式在斜入射的条件下, 分别计算出地下车站结构上层柱顶端A点、柱底B点和下层柱柱底C点的最大位移反应和最大应力反应, 其结果列于表2至表7。地震波的入射角分别取 15° 和 30° , 表2至表7同时给出了地震波垂直入射时的计算结果以供对比。由表2至表7给出的数据可知, 地震波斜入射对地下车站结构的动力反应具有比较显著的影响, 地下车站结构在斜入射条件下的地震反应与垂直入射条件下的地震反应有比较明显的差别。

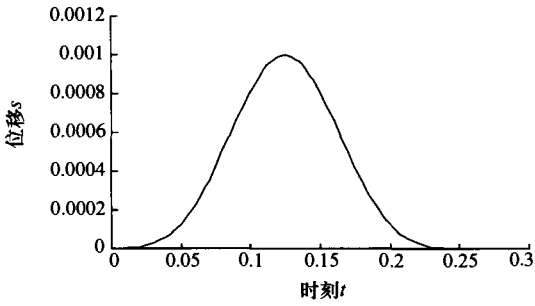


图 2 输入地震波位移时程
Fig. 2 Displacement vs. time curve of input earthquake wave

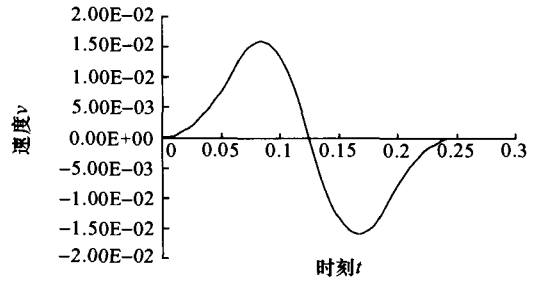


图 3 输入地震波速度时程
Fig. 3 Velocity vs. time curve of input earthquake wave

表 2 P 波斜入射条件下 A 点地震反应

Table 2 The seismic response of point A to obliquely incident P wave

地震反应 入射角	x 方向最大位移 (m)	y 方向最大位移 (m)	x 方向最大应力 (kPa)	y 方向最大应力 (kPa)
0°	6.0E-5	0.0056	550	24.9
15°	0.0021	0.0053	390	23.5
30°	0.0038	0.0047	201	22.1

表 3 SV 波斜入射条件下 A 点地震反应

Table 3 The seismic response of point A to obliquely incident SV wave

地震反应 入射角	x 方向最大位移 (m)	y 方向最大位移 (m)	x 方向最大应力 (kPa)	y 方向最大应力 (kPa)
0°	0.075	0.002	300	3
15°	0.081	0.021	722	15.5
30°	0.086	0.034	806	14.1

表 4 P 波斜入射条件下 B 点地震反应

Table 4 The seismic response of point B to obliquely incident P wave

地震反应 入射角	x 方向最大位移 (m)	y 方向最大位移 (m)	x 方向最大应力 (kPa)	y 方向最大应力 (kPa)
0°	4.8E5	0.0056	265	210
15°	0.0018	0.0053	128	220
30°	0.0032	0.0054	220	210

表 5 SV 波斜入射条件下 B 点地震反应

Table 5 The seismic response of point B to obliquely incident SV wave

地震反应 入射角	x 方向最大位移 (m)	y 方向最大位移 (m)	x 方向最大应力 (kPa)	y 方向最大应力 (kPa)
0°	0.065	0.002	510	19.5
15°	0.081	0.021	1600	78
30°	0.081	0.032	1200	180

表 6 P 波斜入射条件下 C 点地震反应

Table 6 The seismic response of point C to obliquely incident P wave

地震反应 入射角	x 方向最大位移 (m)	y 方向最大位移 (m)	x 方向最大应力 (kPa)	y 方向最大应力 (kPa)
0°	5.5E5	0.0056	440	160
15°	0.0015	0.0052	470	150
30°	0.0028	0.0047	510	140

表 7 SV 波斜入射条件下 C 点地震反应

Table 7 The seismic response of point C to obliquely incident SV wave

地震反应 入射角	x 方向最大位移 (m)	y 方向最大位移 (m)	x 方向最大应力 (kPa)	y 方向最大应力 (kPa)
0°	0.051	0.002	235	44
15°	0.088	0.021	650	160
30°	0.075	0.034	800	130

对于 SV 波入射的情形而言,地下车站结构各计算点 x 方向和 y 方向的位移反应均随着入射角的增大而增大,其中 y 方向位移反应的增大更为显著; y 方向的应力反应也是随着入射角的增大而逐渐增大, x 方向的应力反应起伏比较大,但其基本趋势是随着入射角的增大而逐渐增大的。

对于 P 波入射的情形而言,地下车站结构各计算点 x 方向的位移反应随着入射角度的增大而增大, y 方向位移反应的变化幅度较小; x 方向应力反应的变化趋势不明显,但是和垂直入射条件下应力反应的差别是相当明显的; y 方向的应力反应与垂直入射条件下的应力反应相近。同时,由地下车站结构上 A、B、C 三点地震反应的对比可以看出,位于结构内部的 B 点的应力反应大于结构表面的 A 点和 C 点的应力反应。

3 结语

本文以地震波斜入射条件下地下结构的地震反应为研究对象,基于平面波和远场散射波混合透射的粘弹性人工边界条件,建立了时域中的地震波斜入射的实现方法,并得到了地震波斜入射的解析方式,以此为基础建立了地震波斜入射条件下土体与地下结构动力相互作用的计算分析模型。以实际建设的南京地铁某车站结构为研究对象,应用大型通用有限元分析软件 ANSYS 进行了地震波斜入射条件下地铁地下结构地震反应的计算和分析。初步计算结果表明:在地震波斜入射的情况下,地下结构的动力反应与地震波垂直入射时有较为明显的差异,地震波斜入射条件下地下结构的动力反应要大于地震波垂直入射时结构的动力反应。如果按照垂直入射条件下的计算结果进行设计和处理,结构将偏于不安全。

参考文献

- 杜修力,赵密,王进廷,2006.近场波动模拟的一种应力人工边界.力学学报,38(1):49—56.
刘晶波,王艳,2006.成层半空间出平面自由波场的一维化时域算法.力学学报,38(2):219—226.
赵建锋,杜修力,韩强,李立云,2007.外源波动问题数值模拟的一种实现方式.工程力学,24(4):52—

Preliminary Study of Time-Domain Seismic Response for Underground Structures to Obliquely Incident Seismic Waves

Du Xiuli, Chen Wei, Li Liang and Li Liyun

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of
Technology, Ministry of Education, Beijing 100022, China)

Abstract In this paper, the time-domain calculating method for dynamic interaction between soil and underground structures object to obliquely incident seismic waves is developed based on the artificial boundary condition that adopts the planar waves and the scattered waves transmitting into the linear elastic infinite media through artificial boundary. Taking Nanjing metro as an example, the time-domain seismic response is calculated and analyzed using the finite element software ANSYS. The preliminary results show that under the action of obliquely incident seismic waves, the dynamic response of underground structures is clearly different from the dynamic response under the action of vertically incident seismic waves.

Key words: Underground structure; Time-domain seismic response; Obliquely incident; Artificial boundary condition