

等效线性方法在地铁车站抗震分析中的应用*

周川,焦玉勇,张国华,张秀丽,王浩

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室 武汉 430071)

摘要: 地铁车站等地下结构的抗震设计离不开场地的地震分析,而一维等效线性化波动方法是土层地震反应分析的主流方法。该方法可以间接模拟土体的动力非线性,并能满足工程需要的精度要求。本文探讨了等效线性方法的有限元实现方法,并嵌入到 ABAQUS 的用户子程序 UMAT 数据接口。算例表明,此方法的一维场地地震分析与 SHAKE91 相吻合,符合实际规律并具有较高的计算精度和较快收敛速度。考虑土与结构相互作用,将等效线性方法应用于地铁车站的横断面抗震分析中,发现结构受力形式和滑移破坏与实际的震害观测资料吻合,与反应位移法的对比发现二者计算的内力分布差异较大,当按照传统拟静力方法抗震设计时,顶板的受力和设计应该引起足够的重视。此方法具有自身的优势,可以作为一种辅助手段运用于地铁车站等地下结构的抗震分析中。

关键词: 等效线性模型; 地铁车站抗震; SHAKE91; ABAQUS 二次开发; 反应位移法

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2015)增2-0518-08

Application of Equivalent Linear Method in the Subway Station Seismic Analysis

Zhou Chuan, Jiao Yuyong, Zhang Guohua, Zhang Xiuli, Wang Hao

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

Abstract: Site seismic analysis plays an important role in the seismic design for the underground structures including subway stations, and one widely-used approach for the layered soil responses is the one-dimensional equivalent linear method. It can simulate the dynamic nonlinear behavior of soil indirectly, and also provide satisfactory results. On the basis of UMAT subroutine provided by ABAQUS, the equivalent linear constitutive model for the layered soil deposits is implemented via the FEM. The results of examples match well with those of SHAKE91, and it's found to be reasonable and reliable. Moreover, considering the interaction between soil and structures, the equivalent linear method is used in the transverse seismic analysis of subway station. Results show that the mechanical behavior and contact sliding failure agree with the observation data and actual damage facts. Compared with the traditional Response Displacement Method, the proposed one indicates some differences of mechanical behaviour, especially in the upper plate. It verifies that this method has its own advantages and can be used as an auxiliary alternative in the seismic analysis of underground structures such as subway stations.

Key words: equivalent linear constitutive model; subway station seismic analysis; SHAKE91; ABAQUS secondary development; response displacement method

* 收稿日期: 2015-01-16(修改稿)

作者简介: 周川(1988-),男,四川广安人,硕士生,主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。

E-mail: 494979618@qq.com

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2011CB710602); 国家自然科学基金(51139004, 51479191); 国家自然科学基金青年基金(41202227)

1 引言

我国已经进入了一个地铁工程建设的黄金时代。地铁在改善大城市交通系统与环境条件以及有效利用地下空间、节省土地资源等方面具有突出优点,目前我国不少大城市正在或者将要设计建造城市轨道交通系统。

地铁地下结构需要进行抗震设计,主要的计算方法分为静力法、拟静力法和动力反应分析三大类。静力法计算过程过于粗糙,现在已基本淘汰。动力时程分析方法虽然精度较高,但是计算量较大且对模型的处理比较复杂,需工程师具备多方面的专业知识和技能,因此通常用于特别重大和结构复杂的工程项目中。目前地下结构抗震设计中运用较多的是基于高度简化的半经验方法和拟静力方法,如地下结构抗震分析最常用的反应位移法和反应加速度法^[1],这两种方法都属于拟静力方法。此类方法未能充分考虑土体的动力非线性,究其原因,在于土的动力非线性本构模型的相关参数难以准确确定,而且计算原理较为复杂。为了解决该问题,等效线性方法被提出,该方法原理简明,通过迭代近似反映土体的非弹性和非线性,且由于每个迭代过程都是线性的,计算量小,计算效率高,能够满足工程计算需求,是如今土层地震动反应分析的主流方法,最经典的应用就是水平成层自由场地的地震反应分析。

在前期建模阶段,不同于拟静力计算方法中普遍采用的荷载-结构简化模型,有限元连续介质模型能够更合理地考虑土与结构之间的相互作用。但大多数有限元软件提供的本构库缺乏相应的本构模型,这种被广泛应用于一维场地地震分析中的等效线性方法在地下结构的有限元抗震分析中还没有得到应用。

为此,本文探讨了等效线性方法的有限元实现方法,利用大型通用非线性有限元分析软件 ABAQUS 提供的二次开发用户子程序 UMAT,考虑土的动剪切模量和阻尼比随剪应变的变化,借助粘弹性本构模型编写了等效线性本构模型,并将该模型与 SHAKE91 程序的地震分析结果进行了对比验证。同时,考虑土与结构的相互作用,间接实现地下结构的动力非线性抗震分析。最后,以厦门地铁一号线上的地铁车站为例,将等效线性方法应用于地铁车站的抗震分析中。

2 等效线性模型的有限元实现

等效线性模型实际上是基于粘弹性理论发展而来的,即用一个线弹性弹簧和一个粘壶并联起来(Kelvin 模型)反映土体在周期荷载下的滞回性。图 1 给出了粘弹性模型的示意图,其应力应变关系为:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: E 为弹簧的弹性模量; η 为粘滞系数; $\dot{\varepsilon}$ 为粘壶的应变速率。等效线性模型所需输入参数包括每个土层的刚度和材料阻尼,其中土体刚度可以通过土的剪切波速或者剪切模量来表征。

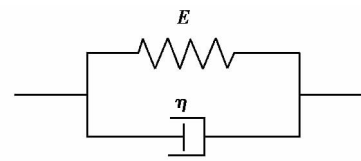


图 1 粘弹性模型示意图

Fig.1 Viscoelasticity model

小应变时,土体的刚度可以近似用原点处的割线模量(即最大剪切模量 G_{\max})来表示,而剪切波速 V_s 和 G_{\max} 的关系可以通过下式来表达:

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

式中: ρ 为土体的密度。应变较大时,割线剪切模量 G 被用来表征土体的平均刚度。 G_{\max} 、 G 、剪应变 γ 和剪应力 τ 的关系如图 2 所示。 D 表示一次循环加载中材料的阻尼比,将导致能量的耗散,可以通过下式求得:

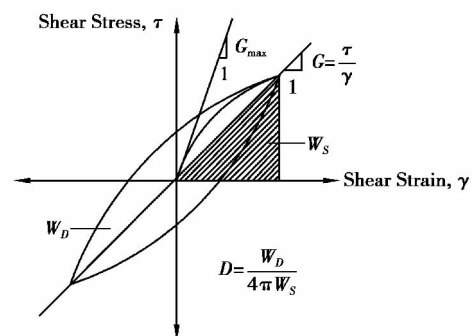


图 2 一次循环加载土体滞回圈

Fig.2 Hysteresis loop for one cycle of loading showing G_{\max} , G and D

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (3)$$

式中: W_D 表示一次循环加载中耗散的能量,也就是滞回圈所围成的面积, W_S 表示土体在加载时所

存储的最大应变能,等于图中阴影三角形的面积。应力应变关系的非线性将导致土体的动剪切模量比 G/G_{max} 随动剪应变幅值的增加而衰减,阻尼比 D 随动剪应变幅值的增加而增加。

等效线性方法中的剪切模量比和阻尼比由等效剪应变幅值来确定。由于等效剪应变振幅在计算开始的时候是不知道的,所以需要用迭代法来确定,具体做法是:给定一个初始的等效剪应变,根据剪切模量比和阻尼比随剪应变幅值变化曲线可确定初始的等效剪应变所对应的剪切模量比和阻尼比,从而完成一个动力计算过程,在这个过程中剪切模量比和阻尼比保持不变。计算完成后得到一个新的等效剪应变,据此又可确定出新的剪切模量比和阻尼比,再代入重新计算,直到相邻两次计算结果达到容许误差范围。

目前,土的动剪切模量比和阻尼比主要是通过动三轴或者共振柱试验确定。国内外学者们^[2,3]进行了大量的室内试验表明,土体的剪切模量比 G/G_{max} 和阻尼比 D 是剪切应变 γ 的函数。影响剪切模量比和阻尼比最重要的因素包括:剪应变 γ 、平均有效围压 σ'_m 、土壤类别和塑性指数(PI)等。函数的具体形式多是基于实验数据拟合得出,根据前人的研究成果^[4],考虑围压对模量和阻尼有重大影响,本文在等效线性模型中选用沈珠江院士提出的如下形式:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + k_1 \gamma_c} \tag{4}$$

$$G_{max} = k_2 (\sigma'_m)^{1/2} \tag{5}$$

式中: k_1 、 k_2 是由实验确定的材料参数; γ_c 为修正后的动应变幅值。形式与常见的一些经验公式是一致的,例如 Hardin-Drnevich 模型中土的动剪切模量比与动剪应变的函数:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)} \tag{6}$$

ABAQUS 提供了大量的用户子程序 (User subroutines) 作为其强大的二次开发平台,用户可根据自己的需要定义符合特定问题的模型。这些用户子程序基本覆盖了建立模型的整个范畴,如用户自定义荷载、用户自定义材料和单元等。用户材料子程序 (user-defined material mechanical behavior) 简称 UMAT,通过与主求解程序的接口实现与 ABAQUS 的数据交流,在输入文件中,使用关键词 * UMAT 自定义用户材料。在 UMAT 中,可以实现

定义材料的本构关系,也可以应用依赖于解的状态变量及结合应用程序来定义场变量。

ABAQUS 计算程序与 UMAT 子程序之间是一个动态交互传递数据、协同工作的过程。UMAT 子程序的主要任务是根据 ABAQUS 主程序传入的应变增量更新应力增量和状态变量,并给出材料的雅克比矩阵供 ABAQUS 求解使用,最后将这些变量的更新值通过接口返回计算程序。

等效线性材料的本构关系表达式(1)根据广义胡克定律可写为:

$$\sigma_{xx} = \lambda \varepsilon_V + 2\mu \varepsilon_{xx} + \tilde{\lambda} \dot{\varepsilon}_V + 2\tilde{\mu} \dot{\varepsilon}_{xx} \tag{7}$$

$$\sigma_{xy} = 2\mu \gamma_{xy} + 2\tilde{\mu} \dot{\gamma}_{xy} \tag{8}$$

其他分量形式可依此类推,式中 λ 和 μ 即为拉密常数, μ 又称剪切模量,若已知材料的泊松比 ν ,可由式 $\lambda = \frac{2\mu\nu}{1-2\nu}$ 算出拉密常数。 $\varepsilon_V = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ 是体积应变或应变张量的第一不变量, $\tilde{\lambda}$ 和 $\tilde{\mu}$ 也是材料参数,它们分别等于 λ 和 μ 的值乘以粘滞系数 η 。

基于广义中心积分算法,在 ABAQUS 隐式积分模块 Standard 中采用外挂子程序的方法实现材料子程序等效线性模型的二次开发。若已知泊松比 ν ,可得出拉密常数 λ ,粘滞系数 $\eta = 2GD/\omega$ 又与阻尼比 D 和圆频率 ω 有关,所以土体的等效线性粘弹性模型的子程序共有 3 个材料常数,分别代表式(5)中的 k_2 、泊松比 ν 和圆频率 ω 。有的学者将 ω 取为结构基频,也有学者把 ω 取为地震荷载的主要频率范围,文中将 ω 取为地下结构模态分析中的基频。除此之外:

(1) 设置四个求解状态变量 STATEV ① ~ STATEV ④ 分别代表地震前的平均围压、与剪应变幅值相对应的剪切模量比 G/G_{max} 、阻尼比 D 和每次迭代计算中产生的最大剪应变值 γ_{max} ,这个值也即用于求得下一次迭代计算所需的与 γ_{max} 值相对应的的模量比和阻尼比的初始值。

(2) 关于材料常数 k_2 的取值,可以根据实验数据拟合求得,也可以根据式(2)估算 G_{max} ,再联合式(5)据围压初步估出。

(3) 将更新后的四个状态变量数值按照 ABAQUS 读取数据的格式保存于一个外部文件,通过改变关键字 * INITIAL CONDITIONS,TYPE = SOLUTION,INPUT = *.TXT 中的文件名来实现迭代计算^[5]。

3 算例

3.1 一维场地地震反应验证

根据厦门地区轨道交通 1 号线的勘察设计资料, 取一个有代表性的地铁车站结构形式和场地条件, 应用编制的材料子程序进行一维场地地震反应的有限元分析, 将计算结果与 SHAKE91 的计算结果进行对比, 以此验证用有限元做等效线性分析的可行性。地基土的物理性质如表 1 所示。

表 1 土层的物理参数

Table 1 Physical parameters of soil

土层名称	厚度 /m	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	K_2 /Pa
素填土	2	1 830	0.38	695 485.63
残积砂质黏性土	10	1 830	0.35	418 232.13
散体状全风化土	6	1 920	0.32	433 289.58
碎裂状强风化土	2	2 640	0.3	11 310 398.13
中等风化花岗岩	1	2 670	0.25	28 638 761.46

图 3 中给出了由现场剪切波速试验推导的最大剪切模量随深度的分布, 土层的剪切模量比、阻尼比和剪应变幅值的关系曲线见图 4, 由于缺少动力实验数据, 参照厦门地区的文献和工程经验按照文 [6~8] 取得。

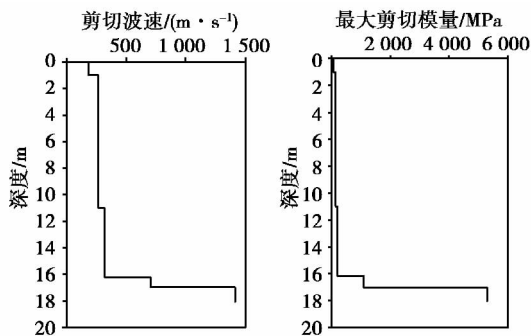


图 3 平均剪切波速和最大剪切模量随深度的变化
Fig.3 Values of G_{max} and shear wave velocity along depth

按照地震区划图和《建筑工程抗震性态设计通则 CECS160—2004》中的建议, 厦门地区的设计地震动可选取 El-Centro 波。根据地震安评报告, 50 年超越概率 10% 的基岩有效峰值加速度为 134.31~142.22 g。图 5 是经过 15 Hz 截断频率滤

波和缩放之后输入的基岩地震波加速度时程曲线, 最大峰值为 0.15 g, g 为重力加速度, 时间间隔 0.02 s, 持时 37.62 s。

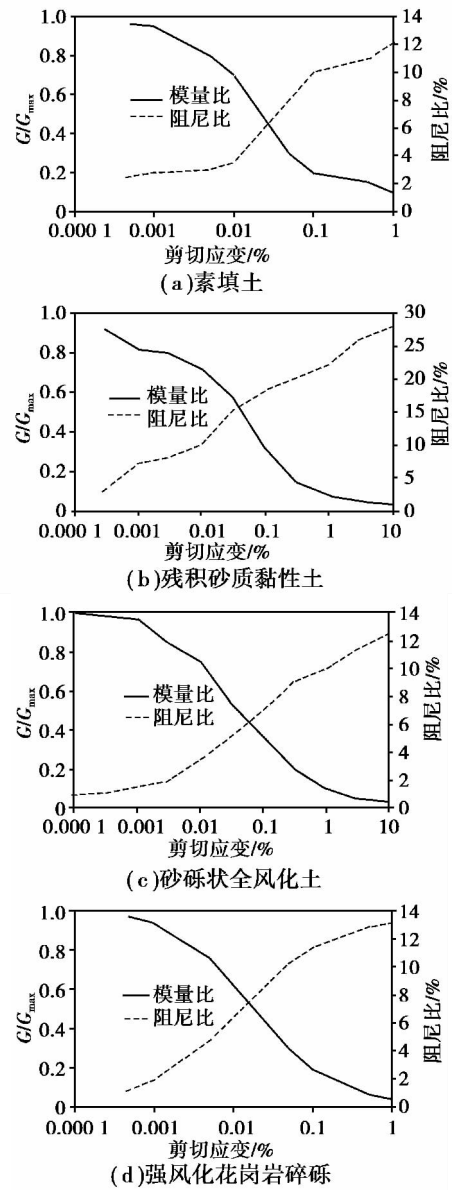


图 4 剪切模量比及阻尼比与剪应变的关系曲线
Fig.4 Shear modulus ratio and damping ratio versus shear strain for different soils

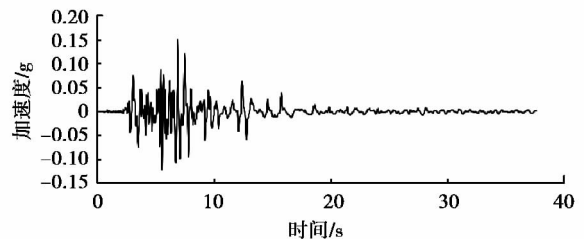


图 5 输入地震波加速度时程曲线
Fig.5 Input accelerations of ground motions

在 ABAQUS 分析中,按土层分布情况建立一个长 50 m(x 方向)、宽 21 m(y 方向)的平面应变有限元模型,全部采用平面 4 节点四边形全积分单元划分网格,单元边长取为 1 m,满足精确描述模型中波的传播的要求,网格的尺寸须小于输入波形最高频率对应的波长的 1/8 到 1/10。顶部为自由表面,左右边界为粘弹性人工边界^[9],散射波源与人工边界的距离 $R = 25$ m。整个模型中只允许发生 x 方向变形,以此来模拟一维场地的特性,方便与 SHAKE91 程序作对比。地震波在模型底部沿 x 方向输入。

图 6 给出了本文所用方法每次迭代计算中最大剪应变随深度的变化规律,可以发现,一共 5 次迭代计算最大剪应变值就能获得较为满意的结果。

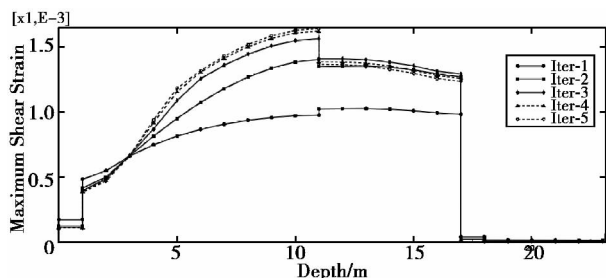


图 6 各次迭代计算中最大剪应变随深度的变化
Fig.6 Maximum shear strain at different depth in each iteration

图 7 给出了最大地震反应加速度沿深度的分布,两种计算方法的计算结果呈现出相同的变化趋势,即土层底部以上近 1/3 范围内加速度变化较小,在此范围之上,加速度放大较明显,最大的加速度出现在土层顶部,与实际情况场地对地震波的放大效应相符。SHAKE91 和 ABAQUS 等效线性方法求解的土层自由表面的绝对加速度最大值分别为 0.385 8 g 和 0.411 5 g,误差约为 7%。有限元模型底部考虑了一定厚度的基岩层,地震波输入后便会产生一定程度的放大效应,所以加速度从模型底部开始较 SHAKE91 结果稍大。

与 SHAKE91 计算结果对比表明,将文中使用的等效线性方法和最大剪切模量表达式(5)运用于 ABAQUS 有限元分析,可以进行一维场地的地震反应分析,计算速度快,并且能够间接反应土体的非线性,具有一定的准确性和可行性。

3.2 地铁车站抗震分析

以厦门地铁 1 号线上的某车站作为算例进行计算分析。地下车站为典型的双层三跨钢筋混凝土

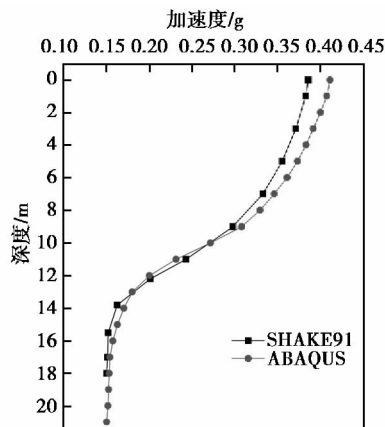


图 7 土层最大加速度沿深度的变化
Fig.7 Comparison of maximum acceleration at different depth

土闭合框架结构,车站总宽度为 20.70 m,总高度为 13.21 m。中柱横截面直径为 0.8 m,纵向间距为 7 m。混凝土结构材料密度 $\rho = 2\,500\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,弹性模量 $E = 34.5\text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.20$,中柱的参数沿纵向按间距将质量和刚度折减。在有限元建模时,只考虑车站主体结构,不考虑站台等车站附属部分的影响。二维土与结构相互作用有限元分析模型如图 8 所示,左右取远置边界,各按 3 倍地铁车站宽度取值,模型底部深度取至基岩处。

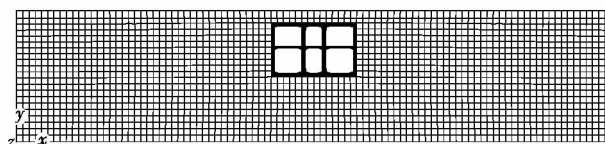


图 8 地下车站有限元模型
Fig.8 FEM model for the underground station

车站结构按弹性分析,土层采用等效线性模型,物理特征参数见表 1。输入水平向地震波时程曲线如图 5。土结相互作用通过 ABAQUS 自带的硬接触和 Rough 模拟,假设接触面完全粗糙,计算中允许大变形,地铁车站结构与周围地基土之间可以发生脱开滑移。从模型中取出车站结构和周围的一圈土体单元如图 9 所示,等效线性方法结果表明,此方法中土体所采用的等效线性模型既可以等效便捷地反应土的动力非线性,也可以和其他的材料本构模型一起应用于地下结构的抗震分析中。土层在地震时发生较大的剪切相对位移,导致土与结构的接触面在四个角点处发生张开滑移,最大位移可达到 3.6 cm,这与实际所发生的震害观测现象相吻合。

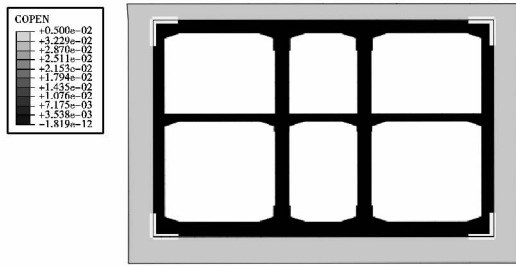


图9 接触面张开位移示意(单位: m)

Fig.9 Locations and magnitude of contact opening

车站主体结构的最大主应力矢量图如图 10 所示, ABAQUS 里面应力的正值代表拉力, 最大值均发生于中柱的端头和侧墙处, 这是由于结构承受周围土体发生的较大相对位移, 却又受中柱连接处的刚性限制而导致, 当拉应力超过抗剪强度, 便会沿着垂直于矢量线的方向发生张拉剪切破坏。实际震害中也经常出现中柱开裂倒塌、侧墙开裂等现象^[10] 模拟结果是与之相符的。因此抗震设计中, 在结构中柱和梁或顶板的节点处, 应尽量采用弹性节点, 而避免采用刚性节点, 这样可以减小中柱承受的外力。

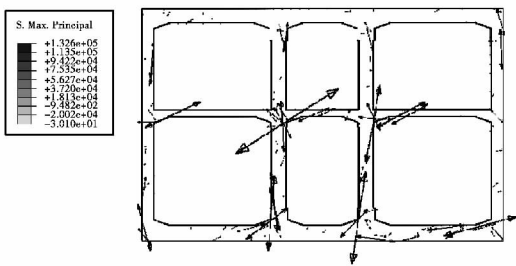


图 10 车站框架最大主应力矢量图

Fig.10 Vector of maximum principal stress in the structure

相对于地下结构抗震计算中的拟静力方法, 本文采用的基于等效线性模型的有限元整体分析方法, 可以将一维场地地震分析和结构动力响应合二为一, 而且在后处理过程中直接得到结构和土层的动力响应中的最大加速度分布云图, 水平方向的最大加速度如图 11 所示。加速度大小依然是从基岩到土层顶部逐渐被放大, 地下结构阻止了部分土层的剪切变形, 因此土层顶部的最大加速度响应减小为 0.342 g, 比自由场地的地震分析结果降低了 17%。

利用 ABAQUS 强大的后处理能力也可以求取截面中的内力分布, 从而根据弯矩、剪力和轴力值设计配筋, 达到结构抗震设计的目的。由于省去了中间的等效荷载转化环节, 此方法将更加便捷。

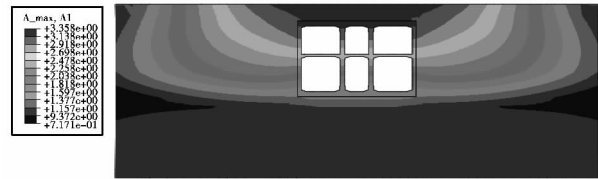


图 11 地震过程中的最大水平加速度云图

Fig.11 Distribution of the maximum horizontal acceleration during the earthquake

3.3 对比分析

我国的地下结构抗震领域发展相对滞后, 还没有形成统一的国家标准和规范, 行业内广泛使用的拟静力方法大多数是反应位移法。例如上海市的《地下铁道建筑结构抗震设计规范 (DG/TJ08—2064—2009)》就将反应位移法作为其中一种推荐方法。

反应位移法的基础就是一维土层地震反应分析, 认为地下结构在地震时的反应主要取决于周围土层的变形。地下结构的横断面抗震计算采用荷载-结构模型, 计算中将车站结构与地连墙围护结构一起建模, 围护结构与内衬墙之间采用铰接连杆模拟。框架结构采用梁单元模拟, 梁单元由剪切弹簧和法向弹簧与周围地层相连接, 将土层在地震时产生的最大变形通过地基弹簧以静荷载的形式作用在结构上, 以此计算结构反应。地基弹簧是为了考虑结构刚度与土层刚度的不同, 定量表示两者相互作用时引入的单元。

采用反应位移法进行地下结构横截面的抗震计算时, 需考虑土层相对位移、结构惯性力和结构周围剪力三种地震作用。整理以上一维地层地震分析的数据可以得到地层相对位移和剪应力, 见图 12。

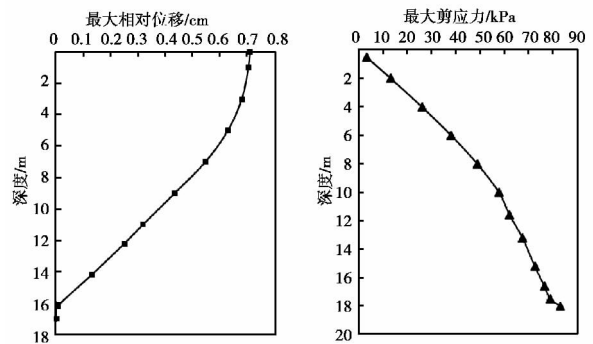


图 12 土层最大相对位移和最大剪应力

Fig.12 Maximum relative displacements and maximum shear stress along depth

上下顶板底板处的剪应力按图 12 中相应位置的值施加。地震时结构周围地层的侧向动土压力按下式计算:

$$p(z) = K_h [u(z) - u_0] \quad (9)$$

式中: K_h 为水平向地层基床系数; $u(z)$ 为地震时距地表面深度为 z 处地层的水平变形,按照图 12 中离散取值; u_0 为底板处土层的水平位移。

顶板、中板、底板、侧墙、中柱在地震荷载作用下的惯性力 根据计算出的最不利时刻的各单元处的平均地震加速度值求得 结构的水平惯性力计算如下。

顶板: $F_1 = 0.330 4 \times 20.7 \times 0.8 \times 25 = 136.79 \text{ kN}$

中板: $F_2 = 0.272 4 \times 20.7 \times 0.4 \times 25 = 56.39 \text{ kN}$

底板: $F_3 = 0.154 5 \times 20.7 \times 0.9 \times 25 = 71.96 \text{ kN}$

下一层侧墙:

$$F_{41} = (0.330 4 + 0.272 4) / 2 \times 0.7 \times 25 = 5.27 \text{ kN/m}$$

下二层侧墙:

$$F_{42} = (0.272 4 + 0.154 5) / 2 \times 0.7 \times 25 = 3.74 \text{ kN/m}$$

中柱: $F_5 = 0.272 4 \times 0.8 \times 25 / 7 = 0.778 \text{ kN/m}$

结构周围土体采用地基弹簧表示,包括压缩弹簧和剪切弹簧,刚度按下式计算:

$$k = KLd \quad (10)$$

式中: K 为基床系数, MPa/m ,由地勘报告获取; L 为单个弹簧的有效作用间距, m ; d 为沿地下车站纵向的计算长度, m 。

限于篇幅,也为了便于比较,本文仅对地震工况进行计算,不考虑其他相应的荷载组合验算,输入荷载包括结构自重、水土压力和地震导致的等效荷载。反应位移法的弯矩计算结果见图 13。关键部位拟静力法计算的断面力和等效线性方法计算的断面力最大值(基本集中在 6.90~6.96 s 范围之内)如表 2 所示。

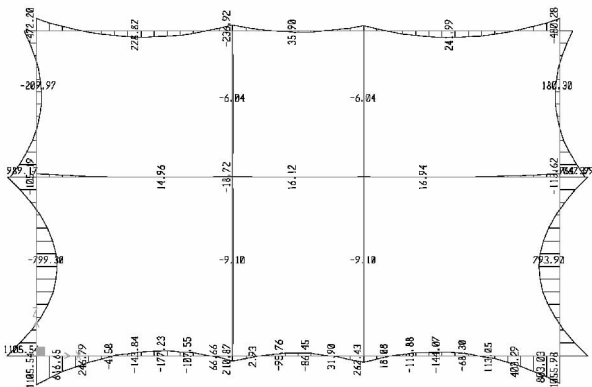


图 13 结构弯矩分布图(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig.13 Moment distribution in structure

表 2 结构断面力计算结果

Table 2 Results of moments and forces in section

考察位置	等效线性方法		反应位移法	
	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	剪力 / kN	弯矩 /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	剪力 / kN
顶板左侧	1 072.42	329.54	472.20	339.69
顶板跨中	686.03	—	228.82	—
顶板支座	750.61	296.35	236.92	211.90
底板左侧	743.25	390.68	1 105.54	477.64
底板跨中	382.36	—	177.23	—
底板支座	412.52	275.32	210.87	219.29
下一侧墙	732.24	1 034.26	209.97 (跨中)	542.50 (端)
侧墙支座	672.36	780.94	1 094.36	804.22
下二侧墙	406.82	621.46	799.30 (跨中)	1 103.91 (端)

由图 13 和表 2 中的结果可以看出,两种方法计算的内力结果是有较大差异的,整体上没有偏大或偏小的方向感。针对结构的内力分布模态,两种方法的结果大致是相互颠倒的,这主要是由两种方法的原理决定的。等效线性方法按照波动理论输入地震荷载,由下至上是一个逐渐放大的响应过程,结构和土层共同受力的结果就是顶板弯矩值大于底板,由下至上侧墙中的剪力也有明显的增幅;反应位移法中的内力分布规律主要受水、土压力支配,因为地震荷载中的侧向动土压力分布较均匀,土层上部基床系数较小,动位移大,下部基床系数较大,相对位移小,二者的影响相互抵消,所以弯矩和剪力都呈现出“下大上小”的特点,这和水、土压力的分布特点是一致的。

不难发现,两种方法计算所得内力峰值是相差不大的。反应位移法中,土体的等效弹簧之间是不相关的,造成土体对结构面四周接触面的荷载分布带来误差,而等效线性方法能更真实地反映地震过程中土体对结构动态力的作用。所以,当按照传统拟静力方法抗震设计时,顶板的受力和设计应该引起足够的重视。

4 结 论

利用 ABAQUS 有限元软件,采用 FORTRAN 语言,基于广义中心积分算法,编写了动力分析中等效线性模型的用户材料子程序。同时,考虑土与结构的相互作用,把地下结构和周围土体视为整体模型共同受力,间接实现了地下车站结构的动力非线性抗震分析。

(1) 自由场地的地震分析结果与 SHAKE91 的结果是相互吻合的,符合实际规律并具有较高计算精度和较快收敛速度。等效线性模型的有效性和正确性得到了验证。

(2) 这种方法克服了拟静力方法的缺陷,又兼具场地地震波动力学中等效线性方法和地下结构动力分析的优点。较之于拟静力方法,本文的方法和动力时程分析方法一样采用有限元连续介质模型,更合理地考虑了土与结构相互作用,还考虑了拟静力方法所不能反映的土体动力变形机制,因此计算结果更符合实际情况。

(3) 这种方法参数较少且获取方便,比动力非线性方法更便捷高效,适合运用于地下车站的抗震分析和计算中。将等效线性方法用于地铁车站的抗震分析中,结构受力形式和滑移破坏也与实际的震害观测资料吻合。与反应位移法的对比发现二者计算的内力分布差异较大,当按照传统拟静力方法抗震设计时,顶板的受力和设计应该引起足够的重视。

(4) 通过本文工作,可充分利用 ABAQUS 前后处理方便、计算效率高和模拟复杂问题能力强的优点,扩展等效线性方法在地铁建设工程中的应用范围。但是囿于等效线性理论固有的缺陷,如在软土

场地或者地震动输入较大等情况下计算误差偏大,其实际应用范围及可行性有待进一步深入研究。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] Zhang J F,Andrus R D,Juang C H.Normalized shear modulus and material damping ratio relationships[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2005,131(4):453-464.
- [3] 冯志仁,郭德存,刘红帅,等.最大剪切模量对土动力参数及地震反应的影响[J].自然灾害学报,2007,16(3):90-95.
- [4] 沈珠江.一个计算砂土液化变形的等价粘弹性模式[A]//中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议论文选集[C].1983:199-207.
- [5] 费康,刘汉龙.ABAQUS 的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J],岩土力学,2010,31(3):881-890.
- [6] 吴炳.花岗岩风化残积粘性土动力特性的试验研究[J].华侨大学学报(自然科学版),1987,8(1):25-33.
- [7] 向大济.原状花岗岩风化残积粘性土在地震荷载作用下的动弹性模量和阻尼比[J].华侨大学学报(自然科学版),1988,9(2):203-207.
- [8] 张明,廖蔚茗,王志佳,等.黏性土的动剪切模量比和阻尼比与剪应变关系的统计分析[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):256-262.
- [9] 徐磊,叶志才,任青文,等.基于 ABAQUS 的粘弹性动力人工边界精确自动施加[J].三峡大学学报(自然科学版),2010,32(1):20-23.
- [10] 郭美贤,王洋.城市地铁车站及隧道结构的震害分析及其对策[J].广州建筑,2006(6):24-27.