

DOI: 10.11779/CJGE201812001

基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法研究

杜修力, 许紫刚, 许成顺, 李 洋, 蒋家卫

(北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘 要: 地下结构抗震设计简化分析方法离不开场地地震反应分析, 而频域内的等效线性化方法是一维土层地震反应分析的主流方法。在一维土层地震反应分析的等效线性化方法的基础上, 提出了一种地下结构抗震设计的等效线性化分析方法, 并给出场地材料参数的确定方法。将该方法应用于地铁车站的横断面抗震分析中, 并与土体直接采用非线性性的 Davidenkov 模型进行的动力时程分析方法对比, 两者计算误差满足工程需要的精度要求。此方法兼具场地等效线性化方法和地下结构动力时程分析方法的双重优势, 可以作为一种动力时程分析方法运用于地铁车站等地下结构的抗震设计中。

关键词: 地下结构; 等效线性化方法; 时程分析; Rayleigh 阻尼

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2018)12-2155-09

作者简介: 杜修力(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地震工程领域的研究工作。E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn。

Time-history analysis method for soil-underground structure system based on equivalent linear method

DU Xiu-li, XU Zi-gang, XU Cheng-shun, LI Yang, JIANG Jia-wei

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Site seismic analysis plays an important role in the practical seismic design of underground structures, and the equivalent linear method is a widely-used approach for the seismic response analysis of one-dimensional soil layer. Based on the theory of the equivalent linear method, an equivalent linear method for the seismic design of underground structures is proposed. And the methods to calculate the material properties are also presented. Then the proposed method is applied in the transverse seismic analysis of a subway station. The Davidenkov constitutive model is applied in the time history method as the comparative model. The error between them can meet the requirements of engineering design. The proposed method has advantages of the equivalent linear method and the time-history analysis method for underground structures, which can be used as a time-history analysis method for the seismic design of the underground structures such as subway stations.

Key words: underground structure; equivalent linear method; time history analysis; Rayleigh damping

0 引 言

近年来, 随着地下空间的不断开发和利用, 地下结构抗震的相关研究工作正在陆续开展并日趋完善。就地下结构抗震设计方法而言, 目前通常采用简化分析方法和动力时程分析方法两大类。其中, 常见的地下结构抗震简化分析方法有自由场变形法、柔度系数法、反应位移法、反应加速度法等拟静力方法^[1], 以及近年来对上述方法的完善和改进等^[2-4]。地下结构抗震设计规范《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[5]对两种常用的地下结构抗震简化分析方法有明确表述: 当采用反应位移法时, 需首先进行

一维土层的地震反应分析, 并将等效后的土层弹性模量用于确定结构周围的弹簧刚度; 当采用反应加速度法时, 同样需首先进行一维土层的地震反应分析, 并将等效后的土层弹性模量用于建立土-地下结构整体分析模型。

在评价各简化分析方法的适用性和精度时, 通常采用动力时程分析方法。刘如山等^[6]在验证其提出的

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(91215301); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51421005); 教育部“创新团队发展计划”(IRT13044); 国家留学基金委资助项目; 北京工业大学博士生创新奖学金

收稿日期: 2017-11-12

改进拟静力方法时,分别采用了 SHAKE、SperFLUSH 和 TDAP-3 软件,不同程序之间的材料参数难以统一,不便于客观地评价计算方法的准确性。袁勇等^[7]在评价软土浅埋框架结构抗震计算方法时,一维土层反应计算也使用 SHAKE 软件,土-结构整体动力模型中土体采用线弹性模型,但未交代其具体参数的取值。陶连金等^[8]和陈之毅等^[9]都采用莫尔库仑模型进行土-结构动力时程分析评价简化分析方法的适用性。上述研究中对新提出的简化方法和动力时程分析方法之间土体采用了不同的模型,因此很难客观评价方法的准确性。

等效线性化方法理论基础完善,是一种广泛应用于桥梁结构^[10]、高层建筑^[11]、核设施^[12]等土-结构相互作用研究领域的土体模型之一。就地下结构而言,Kontoe 等^[13]对圆形隧道的动力反应的解析解进行了数值验证,并指出等效线性化方法可用于地下结构抗震初步设计。Rashidell 等^[14]采用等效线性化的土体模型对某隧道进行了拟静力分析,并与 4 种常见的解析解进行了对比。上述对等效线性化模型的应用多集中于拟静力方法,董正方等^[15]将其应用于地下结构的动力反应分析,但需要手动迭代或通过自编程序迭代,计算效率也有待提高。

总的来说,地下结构抗震简化分析方法的土层地震反应分析多采用等效线性化方法,一般需给出土体的动剪切模量比和动阻尼比随动剪应变的变化曲线,计算效率较高;土-地下结构的整体动力时程分析方法中土体或直接采用线弹性模型或采用莫尔库仑模型。如果需要将简化分析方法和严格的动力时程分析方法进行对比时,由于两者模型参数的不一致,难以客观评价简化方法的适用性和计算精度。因此,减少因土体本构模型选取的不同所带来的分歧,是地下结构抗震研究中需要进一步研究的问题。本文充分利用等效线性化方法在土层地震反应分析方面的优势,并在此基础上,提出一种基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法,给出了通过等效线性化方法迭代的参数确定动力时程分析方法中土体材料参数的方法,并通过土-地下结构整体分析模型验证了方法的合理性。

1 一维土层地震反应分析等效线性化方法

一维土层地震反应分析的等效线性化方法通常在频域下进行,常用的程序有 SHAKE 和 EERA 等。进行土层地震反应时,一般假定其为水平成层的均匀介质,并且输入的地震波是垂直向上入射的平面剪切波。

因此,土层地震反应问题一般简化为一维波动问题进行处理。如图 1 所示,假设第 n 层的厚度、密度和剪切模量分别为 h_n , ρ_n 和 G_n , $n=1, 2, \cdots, N$ 。

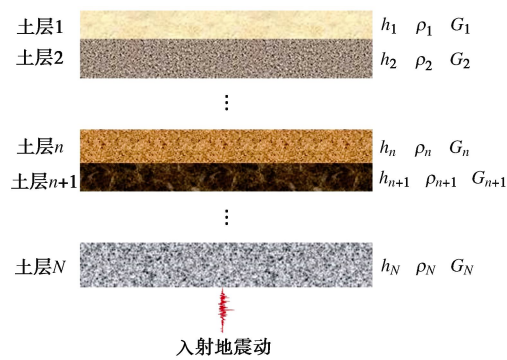


图 1 一维土层地震反应分析模型

Fig. 1 Seismic analysis model for one-dimensional soil layer

一维土层节点运动方程在频域内有如下形式:

$$[(1 + 2\zeta i)[K] - \omega^2[M]]\{U\} = \{P\} \quad (1)$$

式中, ζ 为滞回阻尼比, ω 为频率, $[M]$ 和 $[K]$ 分别为质量矩阵和刚度矩阵, $\{U\}$ 为位移向量, $\{P\}$ 为等效地震荷载向量。其中, 频域本构方程为

$$T = \mu^* \Gamma \quad (2)$$

$$\mu^* = (1 + 2\zeta i)\mu \quad (3)$$

式中, T , Γ 分别为应力 τ 和应变 γ 的傅里叶变换, μ , μ^* 分别为介质的弹性模量和复弹性模量。

采用等效线性化解法, 其基本思想为: 当真实地震动穿过土层时, 由于土体承受极不规则的周期荷载, 在应力应变平面上会呈现复杂的回线图像, 用平均意义上的一条等效的稳态回线近似地表示所有回线的平均关系, 以此作为一种简单的处理方法。这条等效的稳态回线的应变振幅称为等效应变振幅 $\bar{\Gamma}$, 根据土的剪切模量和滞回阻尼比随应变振幅的变化关系求得土层的等效剪切模量和阻尼比, 从而将土层地震反应的非线性问题简化为线性问题求解。一般取等效应变振幅为

$$\bar{\Gamma} = 0.65\gamma_{n,max} \quad (4)$$

式中, $\gamma_{n,max}$ 为第 n 层中点剪应变的最大值。

土层等效动剪切模量 \bar{G}_{nd} 和等效滞回阻尼比 $\bar{\zeta}_n$ 可表示为

$$\bar{G}_{nd} = \bar{G}_d(\bar{\Gamma}_n)G_n \quad (5)$$

$$\bar{\zeta}_n = \zeta(\bar{\Gamma}_n) \quad (6)$$

等效线性化方法的计算流程可归纳如下: ①假定各土层中点的初始等效剪应变, 根据剪切模量 - 剪应变关系和阻尼比 - 剪应变关系计算初始的等效剪切模量和等效阻尼比; ②用快速傅里叶变换确定输入加速度傅里叶谱, 进而确定相应的输入位移傅里叶谱; ③

计算各层中点的剪应变; ④取各层中点最大剪应变的 0.65 倍确定各层中点的等效剪应变, 进而确定等效剪切模量和等效阻尼比; ⑤检查计算得到的剪切模量和阻尼比与初始的剪切模量和阻尼比的相对误差是否小于给定误差允许值, 误差允许值通常取 0.05~0.1; ⑥如果检查结果满足精度要求, 则计算第 n 层顶面的加速度傅里叶谱, 并利用快速傅里叶变换计算出相应的加速度时程; 如果检查结果不满足精度要求, 用最新得到的剪切模量和阻尼比重新计算, 直至检查结果满足精度要求。

2 土-地下结构整体动力时程分析关键问题

基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法就是建立地下结构和场地的整体分析模型, 其中土体的材料参数是通过频域分析的等效线性化方法确定。通过等效线性化的方法确定的动力时程分析模型和一般的动力时程分析模型的区别在于土体是等效线性的, 这样可以减少计算时间、减少土体模型选取的不同所带来的分歧。也就是说, 基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法中土体是通过采用等效线性模型来考虑其非线性的, 其中包括 3 个具体的关键问题: ①正确地反映模量和阻尼比随应变水平的变化, 即土体等效模量的取值; ②正确地反映阻尼的作用; ③合理地设置人工边界条件等。

2.1 剪切模量、阻尼比随剪应变的变化

从上述一维场地地震反应分析的等效线性化方法的计算过程可知, 土体的等效剪切模量和等效阻尼比是根据土体的等效剪切模量和剪切模量、阻尼比随剪应变的变化曲线计算确定, 通过更新土体材料参数重复进行计算直到土体材料参数取值满足相应的精度要求。因此, 剪切模量、阻尼比随剪应变的变化曲线是等效线性化方法的关键问题之一, 图 2 给出了一种典型土体的剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化关系。

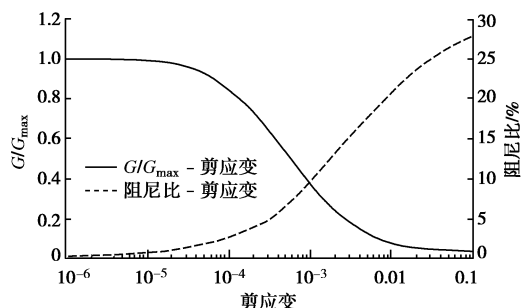


图 2 剪切模量比、阻尼比随剪应变的变化曲线

Fig. 2 Variation of shear modulus ratio and damping ratio with shear strain

Hardin 等^[16]于 1972 年提出的 H-D 模型采用双曲

线函数近似表达剪切模量比与剪应变之间的关系, 此后 Martin 等^[17]对其进行了一定的修正提出 Davidenkov 模型, 是目前在岩土地震工程领域应用比较广泛的模型之一。赵丁凤等^[18]提出了 Davidenkov 本构模型的不规则加卸载修正准则, 开发了基于不规则加卸载准则的修正 Davidenkov 本构模型的显式子程序模块。

对于本文提出的基于等效线性化的土-地下结构整体动力时程分析方法而言, 剪切模量、阻尼比随剪应变的变化曲线可直接采用场地工程地震条件调查提供的实际工程地质钻孔数据。但是, 剪切模量比、阻尼比随剪应变的变化关系的影响因素较多。陈国兴等^[19]对国内外的研究成果进行了总结, 认为塑性指数是影响剪切模量比-剪应变曲线关系的最主要因素, 尤其是对黏性土影响更大。同时也建议对于高灵敏度的黏土和其他特殊土类应进行专门的动力试验确定其材料参数。因此, 这也使得本文提出的方法具有一定的局限性。

2.2 阻尼的作用

等效线性化中土体的非线性采用等效线性模型, 其中假定阻尼力的大小与位移幅值成正比而与速度同相, 阻尼与频域无关。当进行时域分析时, 土体介质阻尼一般采用 Rayleigh 阻尼形式, 即 $C = \alpha M + \beta K$, 该阻尼是一种正交阻尼, 有利于在时域逐步积分分析中的运用。Rayleigh 阻尼是与频率相关的, 这是与频域分析方法的最大的区别, 因此, 如何确定 Rayleigh 阻尼系数是时域分析方法的关键所在。

由结构动力学知识可知, 对于任意阶振型阻尼比 ζ_n , 可以通过需要 α , β 及相应的自振频率 ω_n 表示:

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2} \quad (7)$$

从式 (7) 也可以看出, 时域计算中的阻尼比是与频率相关的, 振型阻尼比与自振频率的关系也可用图 3 表示。通过等效线性化方法可以获得不同土层的等效阻尼比 $\bar{\zeta}_n$, 因此, 在构造时域分析方法的 Rayleigh 阻尼时可以假定 $\zeta_i = \zeta_j = \bar{\zeta}_n$, 则由式 (7) 可得

$$\begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} = \frac{2\bar{\zeta}_n}{\omega_i + \omega_j} \begin{bmatrix} \omega_i\omega_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式 (8) 可知, Rayleigh 阻尼系数可通过选取适当的自振频率确定。围绕 Rayleigh 阻尼系数的取值, 国内外学者也提出了不同的方法。本文采用频域等效线性化方法中最后一次的迭代结果来定义时域分析中的土层参数, 而不是初始值。因此, 在确定场地自振频率时, 土层的材料参数也采用等效线性化方法中最后一次的迭代结果来定义, 并且考虑到土体的动力反应以低阶振型为主, 故 ω_1 取为场地的第一阶自振频率

ω_1 , ω_j 则取为地震动的卓越频率。也就是说, 将等效线性化方法最后一次迭代的等效阻尼比, 与通过等效线性化方法最后一次迭代的等效剪切模量确定的场地的第一阶自振频率和地震动的卓越频率代入式 (8) 中, 可以确定不同土层的 Rayleigh 阻尼系数。

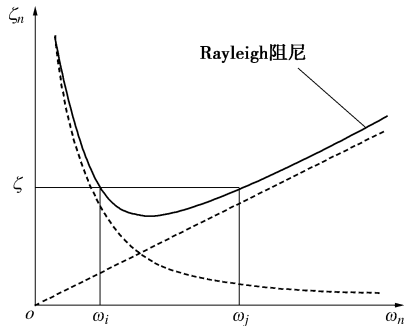


图3 振型阻尼比与自振频率的关系

Fig. 3 Relationship between damping ratio and natural frequency

有了上述关系, 在地下结构抗震设计的等效线性化分析方法中, 就可以只在初次的等效线性化计算时, 确定材料的等效模量和对应的 Rayleigh 阻尼系数, 省掉了动力计算过程中每一步的迭代过程, 使得计算过程更为简单。

2.3 人工边界条件

与频域分析所不同的是, 动力时程分析的有限元计算模型只能截取其中的一部分进行计算, 在截断位置处需要设置边界来处理, 即人工边界。人工边界的早期思想是远置人工边界方法, 即将人工边界设置在离结构足够远的位置, 以此来消除其对结构产生的影响。之后的研究工作主要包括两方面: ①一类是全局人工边界条件, 它使穿过人工边界任一点的外行波满足无限域内所有的场方程和物理边界条件, 是无限域精确的模拟; ②另一类是局部人工边界条件, 它使射向人工边界任一点的外行波从该点穿出边界, 是对无限域的近似模拟^[20]。

本文提出的地下结构抗震设计的等效线性化分析方法在计算时, 顶面取至地表, 底面采用固定边界, 两侧面采用自由场边界条件, 以模拟地震能量向两侧方向无限远处的逸散。该自由场边界条件的设置及动力输入包括: 土体底部固定, 在土体水平侧边界节点处设置弹簧和阻尼器; 在除底部边界以外的所有有限元节点上施加基岩加速度等效的惯性力, 侧边界节点处施加自由场作用反力及近场域克服人工边界约束运动而产生的作用反力^[21]。对于黏弹性边界上任一点 l 的运动方程可表示为

$$m_l \ddot{u}_{li} + \sum_n \sum_j (c_{linj} + \delta_{ln} \delta_{ij} A_l c_{li}) \dot{u}_{li} + \sum_n \sum_j (k_{linj} + \delta_{ln} \delta_{ij} A_l k_{li}) u_{li} = -m_l \ddot{u}_{li}^g + f_{li}^f + f_{li}^b \quad (9)$$

式中 m_l 表示节点 l 的集中质量; A_l 表示节点 l 黏弹性边界应力作用的范围; \ddot{u}_{li} , \dot{u}_{li} 和 u_{li} 分别表示节点相对基岩的加速度、速度和位移; c_{linj} 和 k_{linj} 分别是节点 n 方向 j 对于节点 l 方向 i 的阻尼系数和弹簧刚度; $\delta_{ij} = 1 (i = j)$, $\delta_{ij} = 0 (i \neq j)$; $m_l \ddot{u}_{li}^g$ 项为施加在 l 节点 i 方向上的惯性力; $f_{li}^B = f_{li}^f + f_{li}^b$, 其中, $f_{li}^b = A_l (c_{li} \dot{u}_{li}^f + k_{li} u_{li}^f)$, 是边界节点运动时由黏弹性边界效应所引起的作用反力, u_{li}^f 及 \dot{u}_{li}^f 为自由场动力位移反应和速度反应, f_{li}^f 为反映自由场边界效应的等效节点力, 其计算方法可参考文献[21]。目前有许多研究者和工程人员认为截断边界的影响只是一个人工边界处理问题, 仅采用人工边界条件模拟截断边界对辐射能量的影响, 而忽略自由场效应的影响是不合理的。

3 土-地下结构整体动力时程分析实现过程

等效线性方法多用在土层的地震分析中, 现有的等效线性化的程序一般是基于频域的, 并且仅针对土层分析, 不包含结构。大型通用的有限元程序, 功能强大, 但一般不包括等效线性方法, 使用时, 可人为控制循环, 即重复做多个工况, 处理数据很多, 耗时易错; 或进行二次开发加入等效线性方法, 但不宜推广。因此, 结合等效线性化方法和动力时程分析方法, 本文提出的地下结构抗震分析等效线性化分析方法实现过程可以分为两个部分: ①通过频域等效线性化程序 (本文指 EERA) 和大型通用有限元软件 (本文指 ABAQUS) 共同确定土体的材料参数; ②通过大型通用有限元软件对土-结构整体分析模型进行动力时程分析。地下结构抗震分析等效线性化分析方法实现过程如图 4 所示。

(1) 采用 EERA 建立一维土层等效线性化模型。对给定的基岩地震动进行频域求解, 获得不同深度位置土层的等效剪切模量和等效阻尼比。

(2) 采用 ABAQUS 建立等效后一维土层频率分析模型。这一步骤需要将 EERA 迭代的等效剪切模量作为材料参数进行输入, 通过 ABAQUS 分析得到土体的阵型和固有频率。

(3) 构造基于单元的 Rayleigh 阻尼。利用土层的等效阻尼比, 步骤 (2) 中自由场第一阶自振频率和地震动卓越频率及等效阻尼比按式 (8) 进行计算, 确定不同土层的 Rayleigh 阻尼系数。

(4) 采用 ABAQUS 建立等效后一维土层动力时程分析模型。这一步骤需要将 EERA 迭代的等效剪切模量以及步骤 (3) 构造的 Rayleigh 阻尼系数作为材料参数进行输入, 通过 ABAQUS 的动力分析完成时

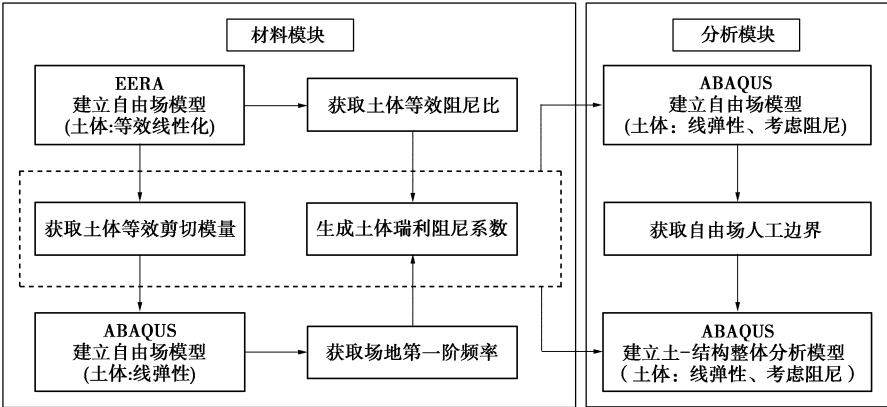


图 4 地下结构抗震分析等效线性化分析方法实现流程

Fig. 4 Process of equivalent linear method for seismic design of underground structures

表 1 某典型软场地模型参数

Table 1 Parameters of a representative soft site

土层	土类	土层深度 /m	子层 数目	密度 /(g·cm ⁻³)	剪切波速 /(m·s ⁻¹)	泊松比	Davidenkov 模型参数			材料 曲线
							A	B	γ ₀ /(10 ⁻⁴)	
1	淤泥质粉质黏土	0~2	1	1.82	129.1	0.45	1.02	0.35	4.0	图5(a)
2	粉土粉砂互层土	2~6	2	1.94	152.7	0.35	1.05	0.345	3.5	图5(b)
3	砂土①	6~10	2	2.09	137.1	0.30	1.10	0.35	3.8	图5(c)
4	砂土②	10~20	5	1.93	172.7	0.30	1.10	0.35	3.8	图5(c)
5	砂土③	20~32	6	2.09	263.2	0.32	1.10	0.35	3.8	图5(c)
6	黏土	32~40	4	1.97	491.6	0.42	1.20	0.35	2.5	图5(d)

域内的一维土层地震反应分析。

(5) 采用 ABAQUS 建立土-结构整体动力时程分析模型。这一步骤同样需要将 EERA 迭代的等效剪切模量以及步骤 (3) 构造的 Rayleigh 系数作为材料参数, 同时土-结构整体分析模型还需要设置步骤 (4) 计算得到的自由场边界条件, 通过 ABAQUS 的动力分析完成时域内的土-结构整体地震反应分析。

4 实例分析

本节开展地下结构地震反应实例分析, 为了更好地验证本文方法的计算效果, 以土体材料选用目前应用较为广泛的 Davidenkov 模型的动力时程分析方法作为对比。该模型的数学表达式为^[22]

$$H(\gamma_d) = \left[\frac{(\gamma_d / \gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma_d / \gamma_0)^{2B}} \right]^A, \tag{10}$$

$$G_d / G_{\max} = 1 - H(\gamma_d) \tag{11}$$

根据 Masing 法则可构造相应的滞回曲线, 经推导可进一步得出土体阻尼比计算公式:

$$\zeta_d = \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{\gamma_d^2 - 2 \int_0^{\gamma_d} \gamma H(\gamma) d\gamma}{\gamma_d^2 [1 - H(\gamma_d)]} - 1 \right\}, \tag{12}$$

式中, G_d 和 ζ_d 分别动剪切模量和动阻尼比, γ_d 为剪应变, G_{\max} 为土体最大剪切模量, A , B 和 γ_0 为与土性有关的拟合参数。

根据文献[22]提供的材料参数, 选取某典型软场地条件如表 1 所示, 包括 Davidenkov 模型参数的取值。通过式 (10) ~ (12) 构造的土体动剪切模量比和动阻尼比随动剪应变的变化关系曲线如图 5 所示。为方便统计结构变形及相关构件的内力情况, 本文以某单层双跨地铁站作为研究对象, 其横断面如图 6 所示。结构埋深 5 m, 结构材料采用 C30 混凝土, 弹性模量取为 3×10^4 MPa, 密度取为 2.5×10^3 kg/m³, 考虑中柱在车站纵向是等间距 (3.5 m) 分布, 等效后的中柱弹性模量取为 8.57×10^3 MPa, 密度取为 7.14×10^2 kg/m³[1]。当土体采用 Davidenkov 模型时, 在模型两侧边设置远置边界, 此时通过将模型宽度取为地下结构宽度的 11 倍 (结构距两侧边界各 5 倍), 以此消除边界效应对地下结构地震反应的影响; 当土体采用本文方法所确定的模型参数时, 并合理考虑了自由场的边界条件, 此时的模型整体宽度为地下结构宽度的 5 倍。建模时, 结构和土体均采用平面应变单元, 并且假设土与结构之间不发生滑移。有限元网格如图 6 所示, 两种模型中结构的网格尺寸均为 0.2 m; 土体的竖向网格尺寸均为 1 m, 水平尺寸在结构附近 (过渡区) 为 0.5 m。计算过程基岩输入地震动选用 Loma Prieta 和 EL Centro 两条地震动, 其地震动加速度时程和傅里叶振幅谱如图 7 所示, 并分别将加速度峰值调整至 0.1g, 0.2g 和 0.3g, 共计 6 种计算工况。

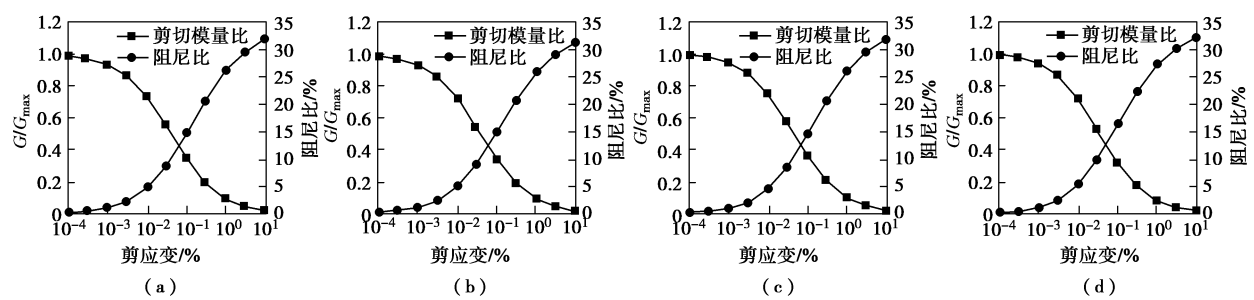


图 5 典型土体动剪切模量比和动阻尼比随动剪应变的变化关系曲线

Fig. 5 Variation of dynamic shear modulus ratio and damping ratio with dynamic shear strain of representative soil

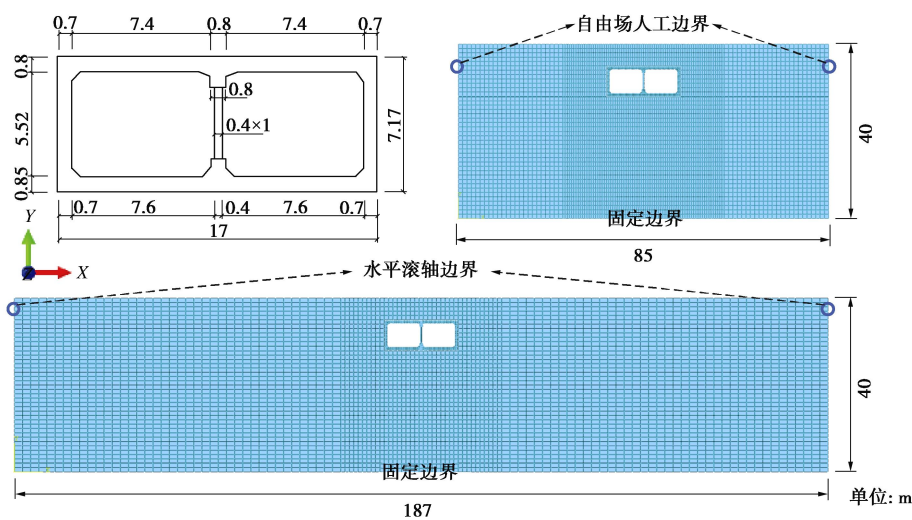


图 6 土-结构整体动力分析几何模型

Fig. 6 Geometric model for time-history analysis method for soil-underground structure system

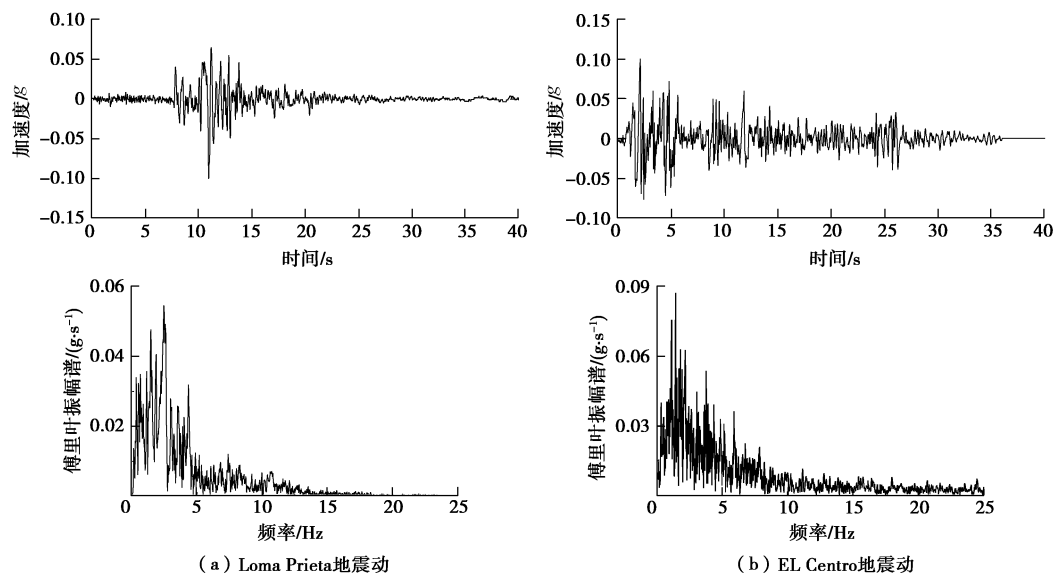


图 7 地震动加速度时程、傅里叶振幅谱

Fig. 7 Time histories of acceleration and Fourier amplitudes of earthquake motion

有研究表明^[1]：在水平地震作用下，结构中柱与侧墙的水平相对变形相差不大；结构中柱底部由于构件截面较小最先达到其极限承载力，是较危险的截面；另外，结构侧墙底部也是抗震设计中需要关注的截面之一。因此，选取结构顶底板水平相对位移，中柱和侧墙底部的轴力、剪力和弯矩作为对比指标，对比时

均选取动力时程结果的绝对值最大值。其中内力以每延米内力值表示, 力单位为 kN/m , 弯矩单位为 $\text{kN}\cdot\text{m/m}$ 。计算结果如图 8 所示。

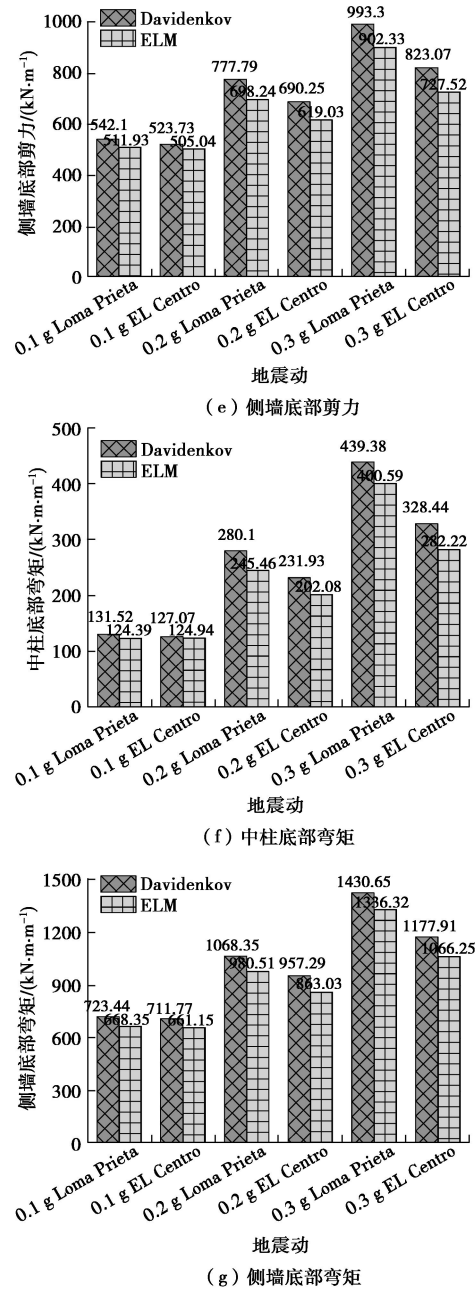
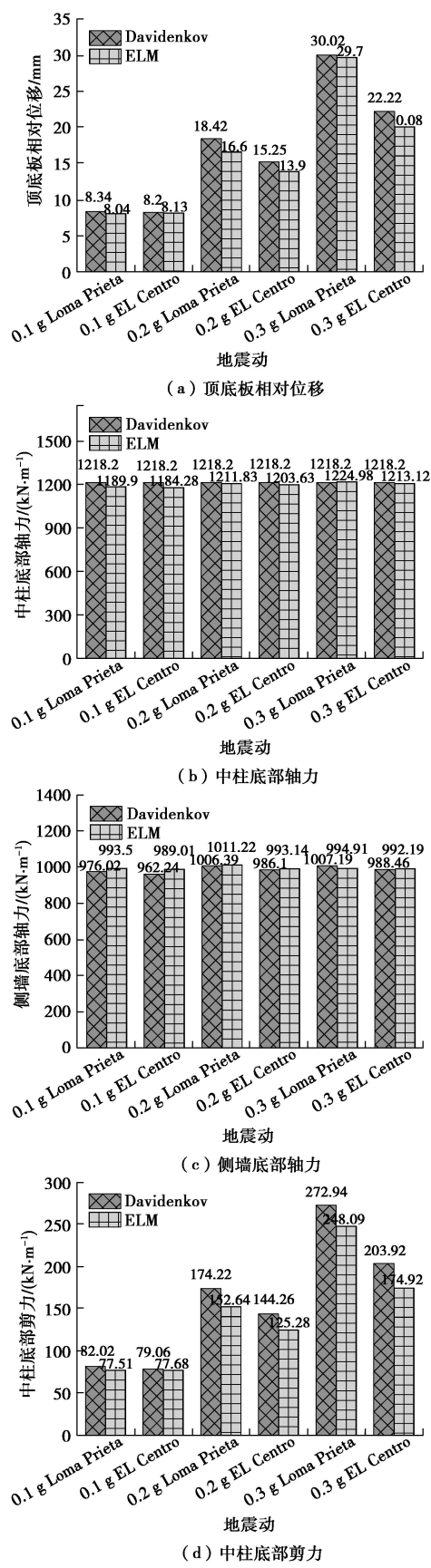


图 8 结构动力反应对比

Fig. 8 Comparison of responses of structures

从计算结果可以看出, 无论是对于何种工况而言, 采用本文所提出的确定土体等效模量和材料 Rayleigh 阻尼系数的方法所计算的位移响应和截面内力响应与直接采用 Davidenkov 模型的最大计算误差均在 10% 左右。从结构顶底板相对位移可以看出, 随着地震动峰值加速度的增大, 本文模型与 Davidenkov 模型之间的误差增大, 分析原因是大震情况下土体可能表现出较强的非线性效应, 而采用本文模型计算时, 尽管通过等效线性化方法近似考虑土体的非线性, 但等效后的土体仍是弹性的, 这就使得大震作用下结构的变形要小于实际情况。对比中柱和侧墙底部轴力可以发现, 两者相对误差在 2%, 这是由于当仅考虑水平地震作

用时,结构竖向支撑构件的轴力主要取决于重力荷载。中柱和侧墙底部的剪力和弯矩则表现出与顶底板相对位移一致的规律,即随着地震动峰值加速度的增大,本文模型与 Davidenkov 模型之间的误差增大,最大误差均在 10%左右。

5 结 论

本文以一维土层地震反应分析的等效线性化理论为基础,提出了一种地下结构抗震设计的等效线性化分析方法。采用该方法进行了不同地震强度作用下的地下结构地震反应分析,并与直接采用 Davidenkov 模型的时域计算方法进行了对比,得到了以下结论:

(1)本文方法计算结果与土体直接采用对应的非线性 Davidenkov 模型计算结果相吻合,验证了本文方法在计算土-结构动力相互作用问题的可行性,扩展了等效线性化方法在地下结构抗震分析中的应用范围。

(2)本文方法兼具场地地震反应分析的等效线性化方法和地下结构动力时程分析方法的优点。同时本文方法又采用与简化分析方法相同的材料参数,可以作为评价简化分析方法的标准动力时程分析方法。

(3)考虑到等效线性化方法的固有缺陷,如在场条件较软或者输入地震动较大等情况下,土体非线性效应较为明显,此时的计算误差偏大,因此本文方法实际应用范围还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等. 地下结构抗震简化分析方法比较研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, **37**(2): 65 - 80. (XU Cheng-shun, XU Zi-gang, DU Xiu-li, et al. Comparative study of simplified methods for seismic analysis of underground structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, **37**(2): 65 - 80. (in Chinese))
- [2] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 地下结构抗震分析的整体式反应位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(8): 1618 - 1624. (LIU Jing-bo, WANG Wen-hui, ZHAO Dong-dong, et al. Integral response deformation method for seismic analysis of underground structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(8): 1618 - 1624. (in Chinese))
- [3] LIU J B, WANG W H, DASGUPTA G. Pushover analysis of underground structures: method and application[J]. Science China Technological Sciences, 2014, **57**(2): 423 - 437.
- [4] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 浅埋地下结构地震反应分析的惯性力-位移法[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 583 - 591. (DU Xiu-li, XU Zi-gang, XU Cheng-shun, et al. Inertia force-displacement method for seismic analysis of shallow buried underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 583 - 591. (in Chinese))
- [5] GB50909—2014 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 2014. (GB50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. 2014. (in Chinese))
- [6] 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. (LIU Ru-shan, HU Shao-qing, SHI Hong-bin. Study on seismic loading of pseudo-static approach used in the seismic design of underground structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(2): 237 - 242. (in Chinese))
- [7] 袁 勇, 禹海涛, 陈之毅. 软土浅埋框架结构抗震计算方法评价[J]. 振动与冲击, 2009, **28**(8): 50 - 56. (YUAN Yong, YU Hai-tao, CHEN Zhi-yi. Evaluation of seismic calculation methods for shallow-buried frame structures in soft soil[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, **28**(8): 50 - 56. (in Chinese))
- [8] 陶连金, 王文沛, 张 波, 等. 地铁地下结构抗震设计方法差异性规律研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(12): 170 - 176. (TAO Lian-jin, WANG Wen-pei, ZHANG Bo, et al. Difference law study of seismic design methods for subway structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(12): 170 - 176. (in Chinese))
- [9] 陈之毅, 谈忠傲, 楼梦麟. 地下结构抗震设计方法整体强制反应位移法[J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2016, **44**(8): 1145 - 1152. (CHEN Zhi-yi, TAN Zhong-ao, LOU Meng-lin. Integral forced displacement method for seismic design of underground structures[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, **44**(8): 1145 - 1152. (in Chinese))
- [10] CARBONARI S, MORICI M, DEZI F, et al. Soil-structure interaction effects in single bridge piers founded on inclined pile groups[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **92**: 52 - 67.
- [11] LI M, LU X, LU X, et al. Influence of soil-structure interaction on seismic collapse resistance of super-tall buildings[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, **6**(5): 477 - 485.
- [12] BOLISSETTI C, WHITTAKER A S, MASON H B, et al. Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear

- structures[J]. Nuclear Engineering & Design, 2014, **275**(8): 107 - 121.
- [13] KONTOS 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 & Earthquake Engineering, 2014, **66**: 206 - 219.
- [14] RASHIDDEL A, KOOPALIPOOR M, HADEI M R, et al. Numerical investigation of closed-form solutions for seismic design of a circular tunnel lining (by Quasi-Static Method)[J]. Civil Engineering Journal, 2018, **4**(1): 239 - 257.
- [15] 董正方, 王君杰, 郭 进, 等. 地下结构横向抗震一体化方法研究[J]. 现代隧道技术, 2015, **52**(6): 85 - 91. (DONG Zheng-fang, WANG Jun-jie, GUO Jin, et al. On the integrated transverse aseismic method for underground structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, **52**(6): 85 - 91. (in Chinese))
- [16] HARDIN B O, DMEVICH V P. Shear modulus and damping in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, 1972, **98**: 667 - 692.
- [17] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, **108**(7): 935 - 952.
- [18] 赵丁凤, 阮 滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 888 - 895. (ZHAO Ding-feng, RUAN Bin, CHEN Guo-xing, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(5): 888 - 895. (in Chinese))
- [19] 陈国兴, 谢君斐, 张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动, 1995, **15** (1): 73 - 84. (CHEN Guo-xing, XIE Jun-fei, ZHANG Ke-xu. The empirical evaluation of soil module and damping ration for dynamic analysis[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, **15**(1): 73 - 84. (in Chinese))
- [20] 赵 密. 近场波动有限元模拟的应力型时域人工边界条件及其应用[D]. 北京: 北京工业大学, 2009. (ZHAO Mi. Stress-type time-domain artificial boundary condition for finite-element simulation of near-field wave motion and its engineering application[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009. (in Chinese))
- [21] 杜修力, 李 洋, 赵 密, 等. 下卧刚性基岩条件下场地土-结构体系地震反应分析方法研究[J]. 工程力学, 2017, **34**(5): 52 - 59. (DU Xiu-li, LI Yang, ZHAO Mi, et al. Seismic response analysis method for soil-structure interaction system of underlying rigid rock base soil condition[J]. Engineering Mechanics, 2017, **34**(5): 52 - 59. (in Chinese))
- [22] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006. (ZHUANG Hai-yang. Study on nonlinear dynamic soil-underground structure interaction and its large-size shaking table test[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006. (in Chinese))