

DOI: 10.11779/CJGE20211392

不同规范建议的反应加速度法的比较研究

刘晶波, 陆喜欢, 宝 鑫*

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要:《城市轨道交通结构抗震设计规范》和《核电厂抗震设计标准》给出了两种地下结构抗震分析的反应加速度法, 其差异在于有效惯性加速度的确定, 前者通过自由场剪应力计算水平有效惯性加速度, 后者直接采用自由场加速度作为有效惯性加速度。通过理论分析和数值算例评价了两种反应加速度法的适用性, 并比较研究了两种方法计算得到的水平有效惯性加速度随场地类型、场地剪切波速和地震动强度的变化规律。研究结果表明: 是否考虑土体的阻尼是两种反应加速度法计算差异的主要来源, 同时相邻土层的刚度比(波速比)也是产生差异的来源; 两种规范方法计算得到的水平有效惯性加速度的差异随场地剪切波速的增大而减小, 随地震动强度的增大而增大; 当场地条件差或地震动强度大时, 基于剪应力计算的水平有效惯性加速度更为合理, 据此计算获得的位移场与动力时程法的计算结果一致, 具有更为良好的计算精度。同时提出了一种通过自由场位移计算有效惯性加速度的反应加速度法——基于位移的反应加速度法, 讨论和比较了采用位移确定有效加速度时的特点及用于反应加速度法时的计算精度, 初步证明基于位移的反应加速度法具有良好的计算精度和更为广泛的适应性。

关键词:地下结构; 地震反应分析; 反应加速度法; 基于位移的反应加速度法; 有效惯性加速度

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)01-0047-10

作者简介: 刘晶波(1956—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗震和防灾减灾方面的研究工作。E-mail: liujb@tsinghua.edu.cn。

Comparison of response acceleration methods suggested by different standards

LIU Jingbo, LU Xihuan, BAO Xin

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The Chinese specifications, "Code for seismic design of urban rail transit structures" and "Standard for seismic design of nuclear power plants", give two response acceleration methods for the seismic analysis of underground structures. The difference lies in the determination of the effective inertial acceleration. The former calculates the horizontal effective inertia through free-field shear stress. However, the latter directly uses the free-field acceleration as the effective inertial acceleration. Their applicability is evaluated through the theoretical analysis and numerical examples, and the horizontal effective inertial acceleration calculated by the two methods is compared and studied with the site type, shear wave velocity and ground motion intensity. The research results show that whether to consider the damping of the soil is the main source of the difference in the calculation of the two response acceleration methods, and the stiffness ratio (wave velocity ratio) of the adjacent soil layers is also the source of the difference. The difference of the horizontal effective inertia calculated by the two standard methods decreases with the increase of shear wave velocity, and increases with the increase of ground motion intensity. When the site conditions are poor or the ground motion intensity is high, the horizontal effective inertial acceleration calculated based on the shear stress is more reasonable. The displacement obtained by this calculation is consistent with the calculated result by the dynamic time history method, thus it has better calculation accuracy. A new response acceleration method for calculating the effective inertial acceleration through free-field displacement is also proposed-displacement-based response acceleration method. The characteristics of using the free-field displacement to determine the effective acceleration and the calculation accuracy when used in the response acceleration method are discussed and compared, and it is preliminarily verified that the displacement-based response acceleration method has good calculation accuracy and wider adaptability.

Key words: underground structure; seismic response analysis; response acceleration method; displacement-based response

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108458, U1839201); 博士后创新人才支持计划项目(BX20200192); 中国博士后科学基金项目(2020M680575); 清华大学“水木学者”计划项目(2020SM005)
收稿日期: 2021-11-23

*通信作者(E-mail: baox@tsinghua.edu.cn)

acceleration method; effective inertial acceleration

0 引言

强震作用可能会使隧道、地铁车站等地下结构发生严重破坏及次生灾害，地下结构的抗震问题受到重视，目前已提出了一系列地下结构抗震分析方法，主要分为动力时程分析法和简化的实用分析法两大类^[1]，其中动力时程分析方法通过直接求解动力微分方程获得结构的地震反应，计算结果较为真实可信，但计算模型及边界处理复杂，计算工作量大，计算成本高。地下结构抗震问题的实用分析方法将土-结构动力相互作用问题转化为拟静力问题进行计算分析，具有物理概念明确，分析流程简便，计算效率高等特点，近年来在实际地下工程结构的抗震设计中得到较为广泛的应用。

地下结构横向实用抗震分析方法可分为两类：一类是采用局部加载的计算方法，如自由场变形法^[2-3]、强制反应位移法^[4]、反应位移法^[5-6]、整体式反应位移法^[6-8]等；另一类是对计算模型进行全局（整体）加载的分析方法，包括反应加速度法^[9-10]、地下结构 Pushover 方法^[11]，修正的强制反应位移法^[12]等。其中，反应加速度法通过在土-结构相互作用模型上直接施加水平等效惯性力进行静力计算，获得地下结构的地震反应。中国现行规范中的反应加速度法主要有两种，分别来自于《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[9]和《核电厂抗震设计标准》^[10]，前者建议了一种适用于复杂场地条件的反应加速度法，称为有效反应加速度法（本文称为规范一方法），后者采用的反应加速度法为经典反应加速度方法（本文称为规范二方法）。两种方法的计算思路与计算步骤相同，区别在于前者通过自由场剪应力计算水平有效惯性加速度，后者则直接采用自由场加速度作为水平有效惯性加速度。

近年来，研究人员针对两种方法分别开展了研究工作，刘如山等^[13]通过计算分析证明规范二方法在土层性质变化不大的场地中计算精度尚可，而土层情况复杂时计算误差将会增大；陶连金等^[14]通过对比研究证明了在不同土层条件下，规范一方法与动力时程方法的计算值基本一致；董正方等^[15]的研究表明，场地类别、土层厚度、结构埋深均会对规范二方法的计算精度产生影响，但与反应位移法相对比，规范二方法的计算精度受结构埋深的影响较小；徐琨鹏^[16]通过与强制位移法的对比分析，证明规范二方法的计算精度对计算模型侧向土体宽度的选取不敏感；禹海涛等^[17]通过改变地下结构的地层条件和结构埋深，对规范一

方法进行了较为全面的评价，揭示了规范一方法的计算精度几乎不受结构埋深的影响，且随着土体剪切波速的增大，规范一方法内力和变形的计算精度均明显提高。然而，目前尚缺乏针对这两种规范建议方法系统的对比研究，导致工程技术人员对不同方法的适用性的理解较为有限，限制了反应加速度法在不同工程问题中的正确使用。

本文通过理论分析研究两种反应加速度法的误差来源，通过不同场地类型、场地剪切波速和地震动强度下两种反应加速度法的对比研究，分析其异同特点；文中同时也建议了一种通过自由场位移计算有效惯性加速度的反应加速度法——基于位移的反应加速度法，比较了基于位移确定有效惯性加速度时的计算精度和特点；最后通过与动力时程分析方法的对比进一步论证了不同反应加速度法的合理性和适用性。

1 3 种计算有效惯性加速度的方法

反应加速度法的基本计算步骤如下：

(1) 通过一维土层地震反应分析得到自由场地震反应时程，获取结构顶底板位置处土层发生最大相对位移时刻，即结构最不利时刻 t_m ，土层单元的水平有效惯性加速度。

(2) 建立土-地下结构相互作用有限元模型，模型底部采用固定边界条件，侧面采用竖向固定、水平滑移边界条件。土体材料参数可采用一维等效线性化分析收敛后的土层参数。

(3) 将水平有效惯性加速度以惯性体积力的形式施加到土-地下结构有限元模型上，进行静力计算，获得地下结构的地震反应。

不同反应加速度法的差别主要在于第(1)步计算水平有效惯性加速度时采用的方法不尽相同，下面分别介绍 3 种计算有效惯性加速度的方法。

1.1 规范一方法

《城市轨道交通结构抗震设计规范》建议水平有效惯性加速度（或称等效惯性加速度）应取最不利时刻土单元的水平加速度；当土层复杂，结构深度位置土层性质和土层刚度参数差别较大时，水平有效惯性加速度由最不利时刻土层剪应力获得，如图 1 所示，最不利时刻的水平有效惯性加速度按下式计算：

$$a_i(t_m) = \frac{\tau_i(t_m) - \tau_{i-1}(t_m)}{\rho_i h_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中： $a_i(t_m)$ 为最不利时刻第 i 层土单元的有效惯性加速度， $\tau_i(t_m)$ 和 $\tau_{i-1}(t_m)$ 分别为最不利时刻第 i 土层单元底部和顶部的剪应力 ($\tau_0=0$)， ρ_i 和 h_i 分别为第 i 层土

单元的质量密度和厚度。本文将按式(1)计算有效惯性加速度的方法称为规范一方法。

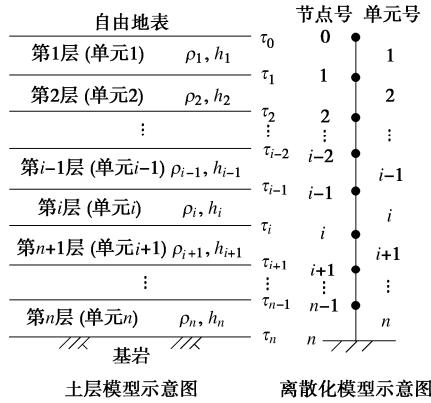


图1 土层单元示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil layers

应当注意的是图1中的第*i*层土，在离散化计算模型中实际对应的是第*i*个离散单元，由式(1)获得的有效惯性加速度应是第*i*个单元内的加速度平均值，而式(1)中的剪应力则是相邻单元之间的剪应力（即土层单元界面上的应力，若采用有限元模型，则相当于节点处的剪应力），而不是单元内的剪应力。因此在直接采用式(1)计算单元的有效加速度时，采用基于连续介质力学的土层地震反应分析软件SHAKE91或EERA更方便一些。若采用有限元模型计算一维土层反应，由于有限元模型给出的是单元内的应力，则在具体计算时要根据有限元模型的特点对式(1)进行适当的调整。

1.2 规范二方法

《核电厂抗震设计标准》建议的反应加速度法与规范一方法的计算步骤相同，区别仅在于水平有效惯性加速度的求解。该规范方法同样考虑水平成层的土体介质，通过一维地震反应分析获得对应于结构最不利时刻的土层加速度分布，并将该时刻的土层加速度作为水平有效惯性加速度。具体计算时可采用如下公式获得土层的有效惯性加速度：

$$a_i(t_m) = \frac{\ddot{u}_i(t_m) + \ddot{u}_{i-1}(t_m)}{2} \quad (i=1,2,\dots,n), \quad (2)$$

式中： $a_i(t_m)$ 为第*i*层土体单元的有效惯性加速度； $\ddot{u}_i(t_m)$ 和 $\ddot{u}_{i-1}(t_m)$ 分别为一维土层地震反应分析得到的最不利时刻第*i*层土单元底部和顶部的反应加速度值。若采用有限元离散化方法分析，则 $\ddot{u}_i(t_m)$ 为第*i*个节点上的加速度， a_i 为第*i*个单元内的加速度值。

1.3 基于位移确定有效加速度方法

规范一方法是基于自由场应力确定有效惯性加速度，实际上基于自由场位移也可以获得有效惯性加速度。Tateishi^[12]提出的修正的强制反应位移法是将自由

场位移施加到土-结构整体有限元模型的土体上，通过静力计算获得节点反力，再将节点反力施加到土-结构有限元模型上进行静力分析，以获得地下结构的地震反应。若将最不利时刻自由场位移施加在一维土柱有限元模型上，经过静力计算获得节点反力，再通过节点反力计算加速度即可以实现基于自由场位移获得有效惯性加速度。为此，本文提出了一种基于自由场位移确定水平有效惯性加速度的方法。

采用给定自由场位移计算一维土层的惯性加速度时，首先通过一维地震反应分析获得对应于结构最不利时刻的土层位移分布：

$$\{u(t_m)\} = \{\bar{u}_0(t_m), \bar{u}_1(t_m), \dots, \bar{u}_n(t_m)\}^T, \quad (3)$$

式中， $\bar{u}_i(t_m)$ 为最不利时刻节点*i*的位移。

再建立一维土层离散化模型（如图1所示），然后将获得的土层位移场施加到离散化模型之上，采用静力分析方法计算获得离散化模型的节点反力：

$$\{f\} = K\{u(t_m)\}, \quad (4)$$

式中， K 为一维土层离散化模型的刚度阵， $\{f\} = \{f_0, f_1, f_2, \dots, f_{n-1}\}^T$ 为除节点*n*以外的节点反力向量。

将节点反力除以节点的质量得到节点的有效惯性加速度：

$$\ddot{u}_i(t_m) = f_i / m_i \quad (i=0,1,2,3,\dots,n-1), \quad (5)$$

式中， m_i 为节点*i*的集中质量。

最后采用类似式(2)计算除单元*n*以外的单元有效惯性加速度：

$$a_i(t_m) = \frac{\ddot{u}_i(t_m) + \ddot{u}_{i-1}(t_m)}{2} \quad (i=1,2,\dots,n-1). \quad (6)$$

单元*n*的有效惯性加速度 $a_n(t_m)$ 可以简单地采用节点有效惯性加速度 $\ddot{u}_{n-1}(t_m)$ 代替，也可以在初始设计计算模型时向下延伸多取一个单元，以便更准确地获得单元*n*的有效惯性加速度。实际算例表明，采用以上两种处理方法获得的单元*n*的有效惯性加速度在量值上有所差别，但用于土层位移场计算所得结果基本相同。实际上，由于单元*n*的有效惯性加速度导致的单元体积力仅使其上土体模型产生一刚体位移，并不改变其上土层的变形，因此，单元*n*的有效惯性加速度对上部土层的变形及存在的地下结构的变形和内力没有影响。

在获得有效惯性加速度后，即可以采用反应加速度法的常规分析步骤获得地下结构的地震反应。本文将采用位移获得自由场有效惯性加速度，再利用反应加速度法计算地下结构地震反应的方法称为基于位移的反应加速度法。

1.4 3种确定有效惯性加速度方法分析

对规范一方法，取第*i*层土单元为隔离体，地震

作用下最不利时刻的平衡方程为

$$\tau_i(t_m) - \tau_{i-1}(t_m) - \rho_i h_i \ddot{u}_i(t_m) - c_i \dot{u}_i(t_m) = 0 \quad (i=1,2,3,\dots,n), \quad (7)$$

式中, $\ddot{u}_i(t_m)$ 和 $\dot{u}_i(t_m)$ 分别为第 i 层土单元的加速度和速度。将式(7)代入式(1)得

$$a_i(t_m) = \ddot{u}_i(t_m) + \frac{c_i}{\rho_i h_i} \dot{u}_i(t_m) \quad (i=1,2,3,\dots,n). \quad (8)$$

由式(8)可以清楚地看到, 规范一方法中的有效惯性加速度除考虑土层地震反应的实际加速度外, 还包含了阻尼的影响。而规范二方法中的有效惯性加速度实际上仅为土层地震反应的实际加速度, 而无法反映介质阻尼的额外影响。基于位移的反应加速度法(简称基于位移法)是采用土层地震反应的位移来获得有效惯性加速度, 由于土层位移反应包含了阻尼的影响, 因此采用基于位移法给出的有效惯性加速度自然也应该包含阻尼的影响。

计算一维土层的惯性加速度时, 由于规范一方法在进行水平等效地震作用计算时, 综合考虑了惯性力和阻尼力的影响, 而规范二方法忽略了阻尼力的影响, 可以预见当土层较软或地震动强度较大时, 随着土体阻尼影响的增大, 规范一和规范二方法计算结果的差异可能变大。

规范一方法可以完全基于连续介质力学方法, 采用 SHAKE91 或 EERA 等软件进行计算, 或采用 RSLNLM^[9]进行计算(此时式(1)需做适当调整), 也可以采用离散方法, 例如有限元法、有限差分法完成分析(式(1)亦需适当调整)。规范二方法可以直接采用连续介质力学方法(SHAKE91、RSLNLM 或 EERA)或离散化方法(FEM、FDM)进行计算。基于位移的反应加速度法可以用 SHAKE91、RSLNLM、EERA 或 FEM, FDM 首先获得一维土层的位移场, 在给定位移计算节点反力时, 通常采用离散模型, 例如有限元模型(FEM)完成计算。

本文计算中, 在采用规范一方法和规范二方法计算有效惯性加速度时, 均采用 SHAKE91 完成计算; 而在采用基于位移法计算有效惯性加速度时, 首先采用 SHAKE91 计算得到一维土层的位移反应, 在给定位移计算节点反力时, 采用了有限元模型。

2 不同确定有效加速度方法的对比分析

鉴于两种规范建议方法和基于位移的反应加速度法的主要差别在于计算水平有效惯性加速度的方法不同, 本节首先重点研究不同场地条件及地震动输入下, 不同方法计算得到的水平有效惯性加速度分布的差异。

2.1 计算模型

为研究不同场地条件的影响, 分别建立了三类场地模型: 均匀半空间场地(剪切波速 $v=786 \text{ m/s}$)、双覆盖层场地(等效剪切波速 $v_{se}=195.7 \text{ m/s}$)和复杂场地(等效剪切波速 $v_{se}=149.5 \text{ m/s}$)模型, 3 种场地模型及参数如表 1~3 所示。

表 1 均匀半空间场地模型参数

Table 1 Parameters of models for half space

| 材料类型 | 密度/(kg·m ⁻³) | 厚度/m | 初始剪切波速 $v_0/(m·s^{-1})$ |
|------|--------------------------|------|----------------------------|
| 基岩 | 2242.6 | — | 768.0 |

表 2 双覆盖层场地模型参数

Table 2 Parameters of models for double-covered site

| 材料类型 | 密度/(kg·m ⁻³) | 厚度/m | 初始剪切波速 $v_0/(m·s^{-1})$ |
|------|--------------------------|------|----------------------------|
| 黏土 | 1890.0 | 35.4 | 120.0 |
| 砂土 | 2010.0 | 52.6 | 340.0 |
| 基岩 | 2242.6 | — | 768.0 |

表 3 复杂场地模型参数

Table 3 Parameters of models for complex site

| 材料类型 | 密度/(kg·m ⁻³) | 厚度/m | 初始剪切波速 $v_0/(m·s^{-1})$ |
|------|--------------------------|------|----------------------------|
| 黏土 | 1930.0 | 2.0 | 80.0 |
| 黏土 | 1830.0 | 6.0 | 88.0 |
| 砂土 | 1890.0 | 2.0 | 208.2 |
| 黏土 | 2010.0 | 23.4 | 111.5 |
| 黏土 | 1930.0 | 2.0 | 278.5 |
| 黏土 | 1920.0 | 16.8 | 147.5 |
| 砂土 | 1970.0 | 3.5 | 368.3 |
| 黏土 | 1930.0 | 25.5 | 200.1 |
| 黏土 | 2010.0 | 4.8 | 356.2 |
| 砂土 | 1970.0 | 2.0 | 455.7 |
| 基岩 | 2242.6 | — | 768.0 |

2.2 岩土介质动力参数

土层场地地震动反应采用等效线性化方法完成计算, 黏土、砂土和基岩介质动力参数由表 4 给出。

2.3 输入地震动时程

选取 Loma Prieta 波、Kobe 波和 Northridge 波三条实际地震动记录作为入射地震波, 如图 2 所示(为露头基岩地震动)。均匀半空间场地模型地震波于深度 44 m 处输入, 双覆盖层场地和复杂场地模型地震波于基岩顶部入射, 垂直入射剪切波的时间步长为 0.01 s, 持时为 20 s, 图 2 中地震动加速度峰值统一调整为 0.4g。

2.4 3 种确定有效惯性加速度方法的一般规律和特征

应用规范一和规范二中的反应加速度法计算时, 首先通过一维土层等效线性化分析软件 SHAKE91 进行土层地震反应分析, 获得土层节点的加速度时程和

表 4 岩土介质动力参数

Table 4 Dynamic parameters of soils

| 黏土 | | | 砂土 | | | 基岩 | | |
|---------|--------------|-------|---------|--------------|-------|--------|--------------|-------|
| 应变/% | G/G_{\max} | 阻尼比/% | 应变/% | G/G_{\max} | 阻尼比/% | 应变/% | G/G_{\max} | 阻尼比/% |
| 0.0001 | 1.0000 | 1.50 | 0.0001 | 1.000 | 1.04 | 0.0001 | 1.000 | 1.00 |
| 0.0003 | 1.0000 | 1.60 | 0.0003 | 1.000 | 1.31 | 0.0003 | 1.000 | — |
| 0.0010 | 1.0000 | 1.88 | 0.0010 | 0.990 | 1.65 | 0.0010 | 1.000 | 1.42 |
| 0.0030 | 0.9840 | 2.81 | 0.0030 | 0.960 | 2.00 | 0.0030 | 0.981 | — |
| 0.0100 | 0.9470 | 4.65 | 0.0100 | 0.850 | 3.00 | 0.0100 | 0.950 | 2.80 |
| 0.0300 | 0.8470 | 7.51 | 0.0300 | 0.640 | 5.10 | 0.0030 | 0.850 | — |
| 0.1000 | 0.6560 | 11.69 | 0.1000 | 0.370 | 9.80 | 0.1000 | 0.725 | 6.14 |
| 0.3000 | 0.4380 | 16.16 | 0.3000 | 0.180 | 15.50 | 1.0000 | 0.550 | 13.59 |
| 1.0000 | 0.2380 | 21.00 | 1.0000 | 0.080 | 21.00 | | | |
| 3.0000 | 0.1440 | 25.00 | 3.0000 | 0.050 | 25.00 | | | |
| 10.0000 | 0.1100 | 28.00 | 10.0000 | 0.035 | 28.00 | | | |

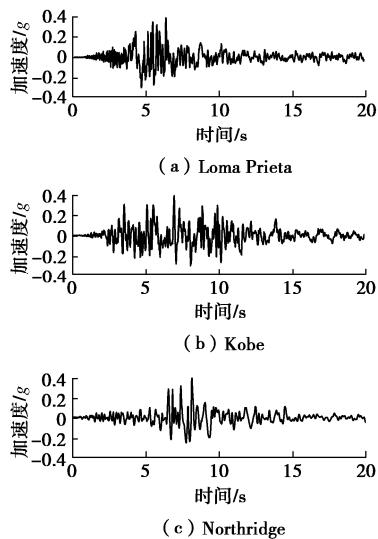


图 2 地震动记录加速度时程曲线

Fig. 2 Time histories of ground motion

剪力时程，对加速度时程进行两次积分获得土层节点的位移时程，从而确定最不利时刻，再根据 1.1 节和 1.2 节的方法计算得到土层水平有效惯性加速度。应用基于位移法时，还需再建立土柱有限元模型，模型宽度可取为 1 m，土体的材料参数取一维等效线性化土层地震反应计算收敛后的结果。将结构最不利时刻土层自由场位移施加到土柱模型上，进行静力计算获得节点反力，将获得的节点反力除以节点质量得到对应位置的土层有效惯性加速度，本文采用节点 $n-1$ 的有效惯性加速度作为基于位移法的单元 n 的有效惯性加速度。为确定最不利时刻 t_m ，假设地下结构高度为 5.34 m，埋深为 8 m（即上覆土层厚度为 8 m）。

对于表 1~3 给出的 3 个场地模型和图 2 给出的 3 条输入地震动 ($PGA=0.4g$)，分别采用规范一方法、规范二方法和基于位移法计算了土层的有效惯性加速度，结果如图 3 所示。

对于均匀半空间场地（图 3 (a)），不同地震波入射下规范一方法和规范二方法计算得到的水平有效惯性加速度的空间分布较为一致，且较为光滑。对于成

层场地，当场地土层性质沿竖向发生变化时（图 3(b), (c)），规范二方法计算得到的水平有效惯性加速度的空间分布仍较为光滑。但规范一方法计算得到的水平有效惯性加速度在土层交界面位置处出现了突变，且土层交界面两侧介质性质差别越大，有效加速度的突变一般也越大，突变位置处两种方法计算结果的差异越明显。同一地震波入射下，场地的土层数越多，发生突变的位置也越多。

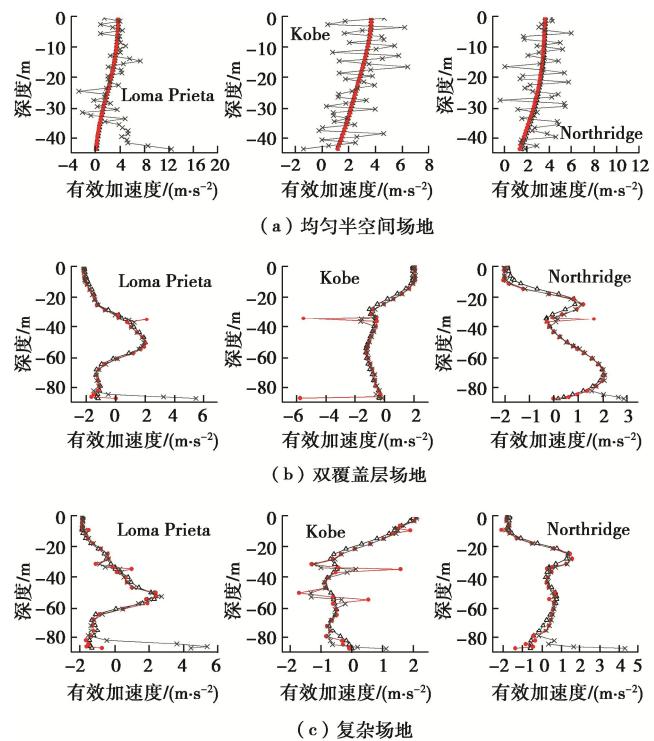


图 3 不同场地水平有效惯性加速度随深度的分布曲线

Fig. 3 Curves of effective response acceleration with depth by different soil models

进一步分析基于位移法的计算结果。在场地条件良好的半空间场地中（图 3 (a)），基于位移法计算得到的水平有效惯性加速度与其他两种方法的计算结果相差很大。在场地条件较差的成层场地中（图 3 (b)、(c)），基于位移法的计算结果与规范一方法的计算结

果吻合较好，场地土层性质沿竖直方向发生变化时，基于位移法的计算结果也出现突变，发生突变的位置与规范一方法的结果基本一致，但在靠近基岩位置处，基于位移法的突变值要明显大于规范一方法的结果，在其他位置，基于位移法的突变值小于规范一方法。

需要说明的是，由于在土层场地地震反应分析时采用了 SHAKE91 开展计算，而 SHAKE91 是基于波动理论开发的，采用的力学模型为连续介质力学模型，因此采用规范一方法和规范二方法进行计算时是直接基于连续介质模型完成的，而在采用基于位移法进行计算时首先通过 SHAKE91 计算自由场位移，再将自由场位移施加到有限元离散模型中进行计算获得有效惯性加速度，而离散模型往往不能很好地反映连续介质模型中的“高频振动成分”，从而导致均匀半空间场地中基于位移法的计算结果出现较为明显的空间振荡。图 4 为不同场地地面加速度时程的 Fourier 谱，由图 4 可发现，均匀半空间场地的高频成分明显多于双覆盖层场地和复杂场地，说明基于位移法的计算结果受频率成分影响较为显著，场地中高频成分少时，基于位移法的计算结果突变少；高频成分多时，基于位移法计算得到的水平有效惯性加速度的突变程度大。

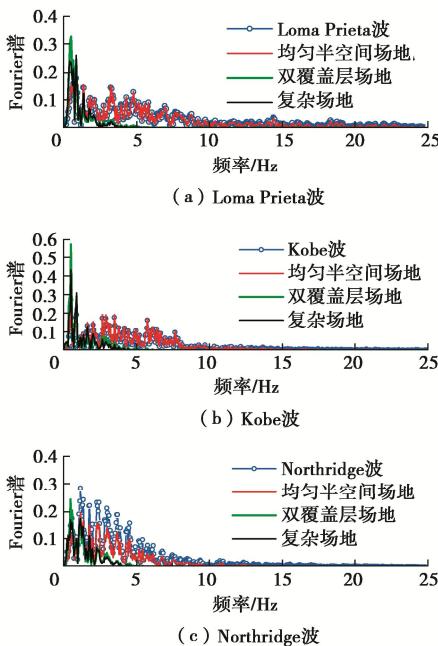


图 4 不同场地类型自由地表处加速度 Fourier 谱

Fig. 4 Fourier spectra on free surface by different soil models

3 场地条件与地震动强度的影响

3.1 场地剪切波速的影响

为进一步研究场地条件不同时各方法的计算特点，建立了剪切波速不同的 6 个均匀半空间场地，土体质量密度均为 1930 kg/m^3 ，初始剪切波速分别为 $100, 200, 300, 400, 768 \text{ m/s}$ ，输入地震动强度不变，

均为 $0.4g$ ，土的动力参数由表 4 给出，不同方法计算得到的水平有效惯性加速度随深度的分布曲线如图 5 所示。

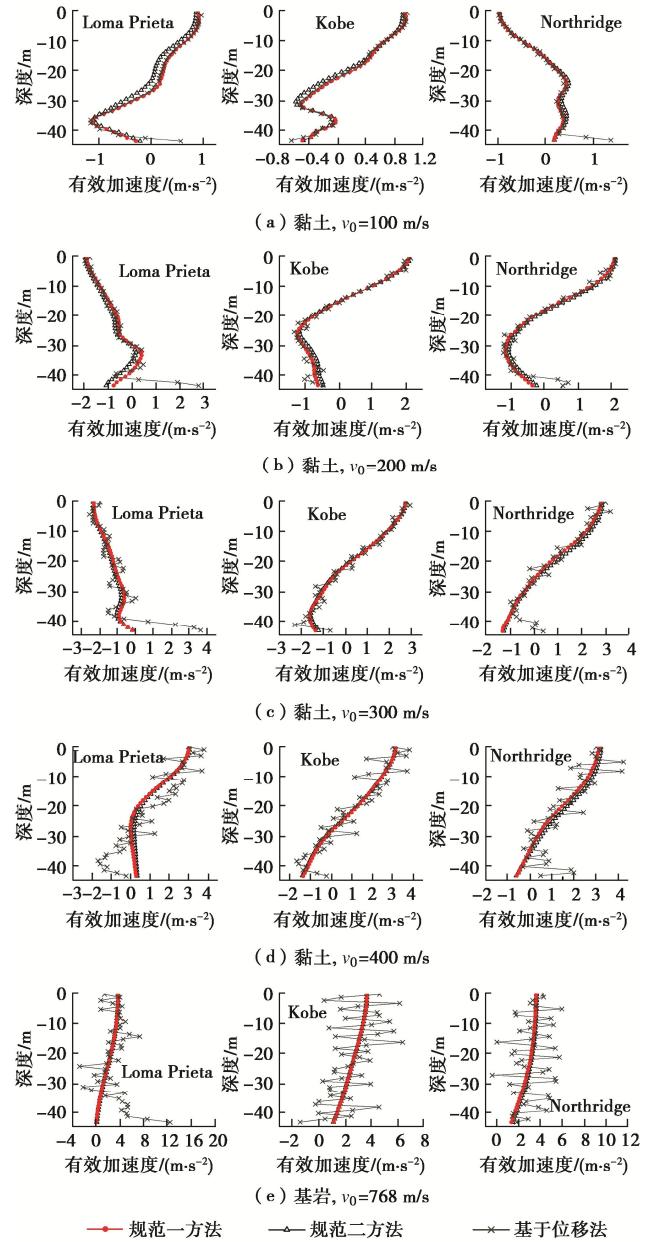


图 5 不同土体初始剪切波速下水平有效惯性加速度随深度的分布曲线

Fig. 5 Curves of effective response acceleration with depth by models with different soil parameters

首先比较规范一方法和规范二方法的计算差异，由图 5 可以清楚地看到，当场地土较软、介质剪切波速较小时，规范一和规范二方法计算结果的差异较大；随着介质初始剪切波速的增大，规范一方法和规范二方法计算结果的差异变小。这是由于土体初始剪切波速较大时，相同地震作用下土体的非线性程度降低，阻尼作用减小，使得采用规范一方法和规范二方法的计算结果差异变小。由图 5 (e) 可以清楚地看到，对于基岩场地，两种规范方法给出的有效加速度基本一致。

进一步观察采用基于位移法获得的计算结果, 当介质初始剪切波速较低时, 从图 5(a)可以看出, 基于位移法计算得到的有效惯性加速度与规范一方法的计算结果吻合较好, 仅在靠近基岩位置处基于位移法的计算结果出现了突变。随着土体初始剪切波速进一步增大, 采用基于位移法计算得到的水平有效惯性加速度沿深度均发生突变, 随着介质初始剪切波速的增大, 突变程度也增大。这是由于土体初始剪切波速小时, 地震作用下非线性和阻尼效应变大, 场地中高频成分少, 基于位移法结果的突变位置变少, 突变值小; 而随着土体初始剪切波速的增大, 地震作用下非线性和阻尼效应变小, 场地中的高频成分增加, 由基于位移法给出的水平有效惯性加速度的突变程度也随之增大。

3.2 地震动强度的影响

选取第3.1节中介质剪切波速为200 m/s的均匀半空间场地模型, 3条地震波的峰值加速度分别调幅为0.10g, 0.20g, 0.40g, 0.80g, 采用3种方法完成计算, 图6为水平有效惯性加速度随深度的分布曲线。

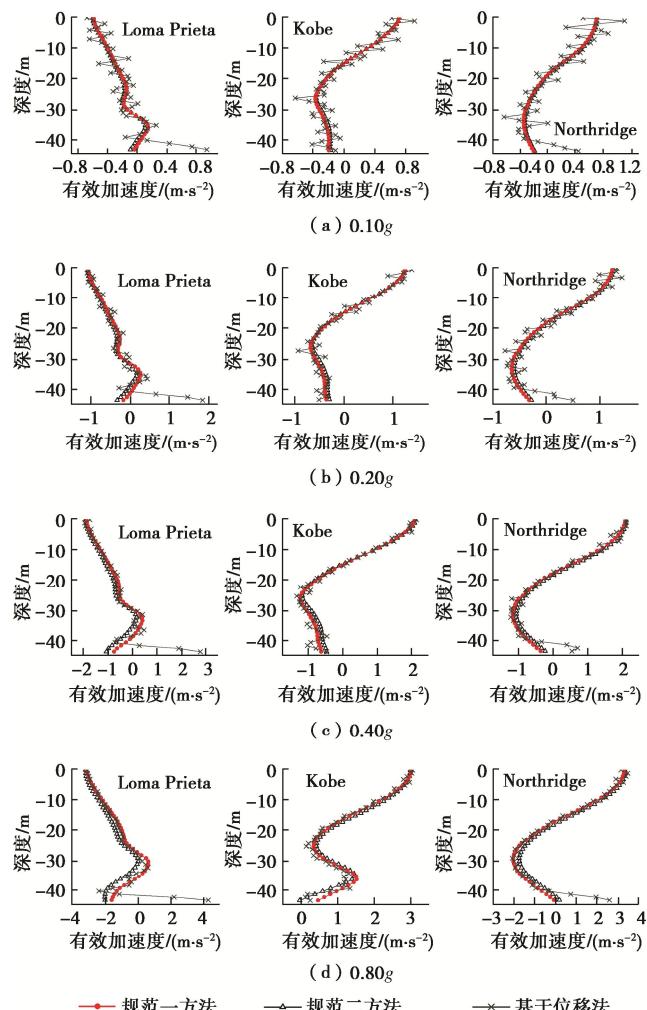


图6 不同地震动强度水平下有效惯性加速度随深度的分布曲线

Fig. 6 Curves of effective response acceleration with depth of different peak acceleration models

由图6可见, 3种地震波入射下规范一方法和规范二方法的计算差异随地震动强度的增大而增大。这是由于当地震动强度增大时, 地震作用下土体的非线性程度提高, 土体的阻尼增大, 由于规范二方法忽略了土体阻尼作用, 引起的计算差异随之增大。其中, Loma Prieta 波入射下, 随着输入地震动峰值加速度的增大, 两种计算方法引起的差异最为明显。

整体而言, 对于均匀半空间场地, 基于位移法的计算结果与两种规范方法的计算结果存在较为明显的差异, 在不同深度位置处均出现了突变现象, 特别是地震动强度较小时, 突变现象更为明显, 但随着地震动强度的增大, 基于位移法计算结果的突变程度变小。当地震动加速度峰值达到0.80g时(图6(d)), 基于位移法的计算结果与规范一方法的计算结果吻合较好, 仅在靠近基岩位置处两种方法的计算结果存在一定的差异, 这是由于场地地震动强度越大, 地震作用下非线性和阻尼作用越强, 场地中的高频成分越少, 基于位移法计算结果的突变程度也越小; 而当地震动强度小时, 地震作用下非线性和阻尼作用弱, 场地中的高频成分多, 基于位移法计算结果的突变程度也变大。

4 3种反应加速度法计算精度对比分析

地下结构在地震作用下的反应主要由周围岩土介质的位移控制。对地下结构进行地震反应分析时, 确保反应加速度法计算精度的前提是能将土层计算模型的地震位移反应较为精确地复原成自由场位移, 即将反应加速度法获得的沿深度分布的惯性体积力(由有效惯性加速度确定)施加到土层模型上时, 能够使土层场地的位移等于地震作用下结构最不利时刻的土层位移。这样就可以保证将自由场变形有效地传递到地下结构, 从而获得较高精度的地下结构最大地震反应计算结果。因此, 对不同反应加速度法计算精度的对比分析可以采用土-地下结构相互作用模型, 也可以采用自由场模型, 由于对自由场模型的分析更简单直观, 结果更易于分辨和对比分析, 下面将采用自由场模型而非土-结构相互作用模型进行不同反应加速度法计算精度的对比分析。

前面计算结果表明, 采用规范一和规范二方法以及基于位移计算得到的水平有效惯性加速度并不相同, 有时差异较大。为验证不同方法的计算结果是否合理及是否有足够的计算精度, 采用2.1节给出的均匀半空间场地模型和复杂场地模型, 分别建立场地土柱有限元模型, 均匀半空间场地模型厚度取为44 m, 复杂场地模型厚度取为覆盖层厚度, 材料参数取一维

等效线性化土层地震反应计算收敛后的结果。采用规范一和规范二反应加速度方法以及基于位移的反应加速度法进行计算, 得到土体水平位移沿深度变化曲线, 图 7, 8 分别为具有不同剪切波速的均匀半空间场地和不同强度地震波入射下复杂场地的计算结果, 图中同时给出采用动力时程方法计算的结果(相对位移), 其中动力时程法的计算结果由 SHAKE91 程序计算得到。表 5, 6 为 3 种反应加速度方法计算得到的均匀半空间场地和复杂场地结构位置处自由场变形(即结构顶底板位置处自由场位移之差)与动力时程法的相对误差。

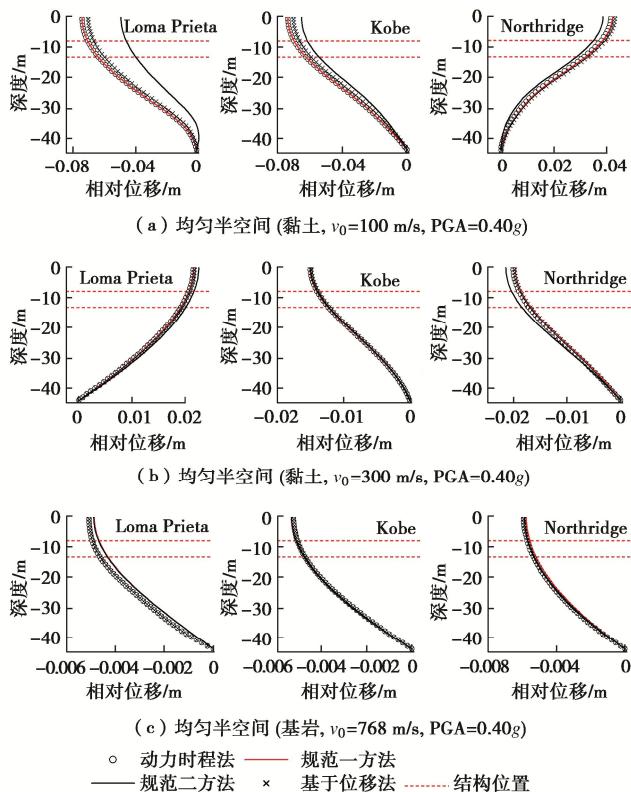


图 7 均匀半空间场地水平位移随深度变化曲线

Fig. 7 Curves of lateral displacement with depth of half space

表 5 均匀半空间场地结构位置处自由场变形相对误差

Table 5 Relative errors of free-field deformation at position of structures of half space

| 场地剪切波速/(m·s ⁻¹) | 地震波 | 峰值加速度/g | 规范一方法/% | 规范二方法/% | 基于位移法/% |
|-----------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| $v_0=100$ | Loma Prieta | 0.40 | -0.40 | -10.99 | -0.81 |
| | Kobe | | -0.22 | -3.28 | -0.80 |
| | Northridge | | -0.74 | -1.52 | 0.17 |
| $v_0=300$ | Loma Prieta | 0.40 | -0.39 | 1.36 | 0.13 |
| | Kobe | | 0.73 | 1.43 | -0.23 |
| | Northridge | | -0.28 | 4.29 | -0.37 |
| $v_0=768$ | Loma Prieta | 0.40 | 15.93 | 16.11 | 0.17 |
| | Kobe | | 8.28 | 8.10 | 1.06 |
| | Northridge | | -1.96 | -0.61 | -0.40 |

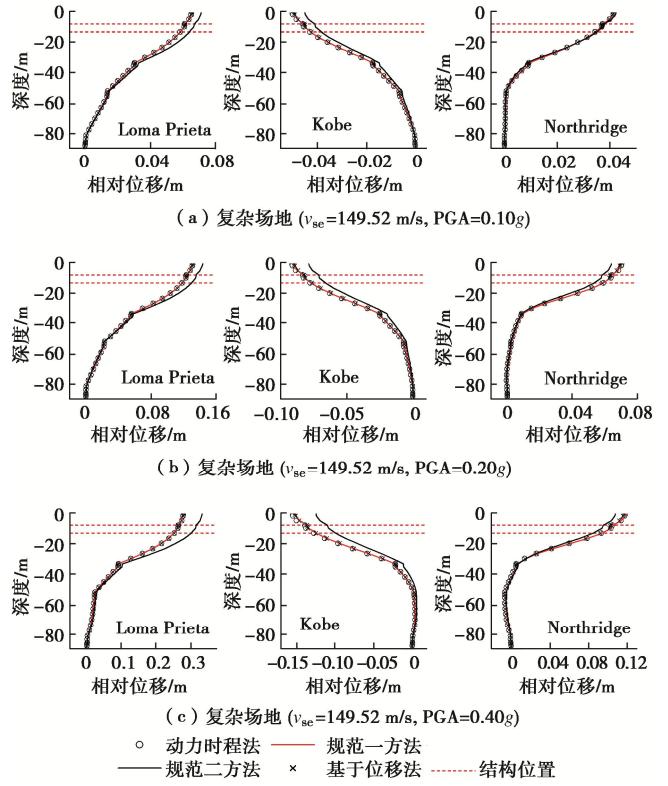


图 8 复杂场地水平位移随深度变化曲线

Fig. 8 Curves of lateral displacement with depth of complex site

对比图 7 给出均匀半空间场地的剪切波速从 100 m/s 增大到 300 m/s 的计算结果, 可以发现, 当场地条件较差, 即土介质的剪切波速较低时(如土体剪切波速为 100 m/s), 规范一方法的计算精度最优, 位移计算结果与动力时程法结果吻合良好, 基于位移的反应加速度法的计算精度也较为良好, 而规范二方法的计算误差较大; 当场地的剪切波速增大到 300 m/s 时, 规范一方法和基于位移的反应加速度法的计算结果与动力时程法的结果均拟合良好, 具有同样的计算精度, 规范二方法的计算精度低于规范一方法和基于位移的反应加速度法, 但计算精度得到明显提高; 当场地剪切波速为 768 m/s 时, 规范一方法和规范二方法的计

表 6 复杂场地结构位置处自由场变形相对误差

Table 6 Relative errors of free-field deformation at position of structures of complex site

| 场地模型 | 地震波 | 峰值加速度/g | 规范一方法/% | 规范二方法/% | 基于位移法/% |
|---|-------------|---------|---------|---------|---------|
| 复杂场地 ($v_{se}=149.52 \text{ m/s}$) | Loma Prieta | 0.10 | -1.16 | 4.06 | -0.16 |
| | Kobe | | -0.56 | -4.23 | -2.10 |
| | Northridge | | -1.00 | 2.48 | 0.26 |
| | Loma Prieta | 0.20 | -1.32 | 5.33 | -0.01 |
| | Kobe | | -0.31 | -5.70 | -1.27 |
| | Northridge | | -0.44 | -4.99 | -1.06 |
| | Loma Prieta | 0.40 | -0.93 | 21.25 | -0.39 |
| | Kobe | | -1.76 | -7.67 | -1.75 |
| | Northridge | | -0.52 | -5.99 | -1.37 |

算误差基本一致, 而基于位移的反应加速度法的计算精度良好。总体上看, 规范一方法比规范二方法具有更好的计算精度, 表 5 给出的结果也清楚地说明了以上规律。

由图 8 和表 6 可以看出, 对于复杂场地条件, 在不同强度地震作用下规范一方法计算得到的土层位移与动力时程法的计算结果均吻合良好, 结构位置处自由场变形相对误差最大为 1.76%。基于位移的反应加速度法与规范一方法具有同样的计算精度, 场地地震反应计算结果与动力时程法吻合良好。总体上规范一方法和基于位移的反应加速度法比规范二方法可以得到更加准确的场地位移计算结果。地震动强度小时, 规范二方法给出的位移结果与动力时程法吻合相对较好; 但地震动强度增大时, 规范二方法计算位移的误差较大, 当输入地震动加速度为 0.40g 时, Kobe 波入射下结构位置处自由场变形计算误差最大可达 21.25%。

对比表 3、图 3(c) 和图 8 可以发现, 图 3(c) 中规范一方法的水平有效惯性加速度出现突变的位置恰好是土性发生变化的土层交界面处。通过对沿深度土层剪应力分布规律的分析可以发现, 在土层交界面上部与下部剪应力的变化趋势并不同, 采用剪力差计算得到的该处土体单元的水平有效惯性加速度便会发生突变。图 8 和表 6 给出的计算结果显示, 尽管规范一方法求解得到的水平有效惯性加速度存在空间突变, 但将其用于场地地震反应计算时, 可更为精确地得到地震动位移分布。

5 结 论

本文通过理论分析和数值计算较为全面评价了规范一方法、规范二方法和基于位移的反应加速度法的适用性和计算精度, 得到以下 3 点结论。

(1) 规范一方法和规范二方法计算得到的自由场水平有效惯性加速度的差异随着场地波速的增大而减小, 随着地震动强度的增大而增大, 随场地土层复杂程度而增加。采用规范一方法计算得到有效惯性加速度在土层性质变化处出现空间突变现象, 且相邻土层性质差异越大, 突变程度也越大, 但采用具有空间

突变的有效惯性加速度进行地震反应计算可以获得更为精确的计算结果。相比于规范二方法, 规范一方法的土层位移计算结果与动力时程方法符合更好, 计算精度也更高。

(2) 规范一方法在进行水平等效地震作用计算时, 同时考虑了惯性力和阻尼力的影响, 规范二方法则仅考虑了惯性力而直接忽略了阻尼力的影响。算例分析结果表明, 在场地性质较好时, 规范一方法和规范二方法的计算结果差异不大; 当场地性质较差时, 规范二方法的计算结果与动力时程方法相比有时存在较大差别, 此时宜选用规范一推荐的反应加速度法进行地下结构抗震设计计算。

(3) 当土质较好或者地震动强度较小时, 非线性和阻尼作用较弱, 地震波作用下场地中高频成分多, 采用基于位移法获得的水平有效惯性加速度沿深度存在突变现象, 当场地高频成分较少时, 基于位移法获得的有效惯性加速度与规范一方法的结果符合较好。采用基于位移法给出的有效惯性加速度虽然有时出现突变, 但位移场计算结果与动力时程法吻合良好, 初步证明了基于位移的反应加速度法具有良好的计算精度和更为广泛的适应性。

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 Chengshun, XU Zigang, DU Xiuli, 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] VAN NOSTRAND R. Proceedings of the international symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials[J]. Earth-Science Reviews, 1969, 5(4): A203.
- [3] KUESEL T R. Earthquake design criteria for subways[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(6): 1213-1231.
- [4] HAMADA M, SUGIHARA Y, SHIBA Y, et al. Observation and study on dynamic behavior of rock cavern during earthquake[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil

- Engineers, 1984, **1984**(341): 187-196.
- [5] 川島一彦. 地下构筑物の耐震设计[M]. 鹿島: 鹿島出版会, 1994. (KAZUHIKO K. Seismic Design of Underground Structures[M]. Kashima: Kashima Publishing Company, 1994. (in Japanese))
- [6] 地下结构抗震设计标准: GB/T 51336—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (Standard for Seismic Design of Underground Structures: GB/T 51336—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese))
- [7] 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 Jingbo, WANG Wenhui, ZHAO Dongdong, 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))
- [8] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 复杂断面地下结构地震反应分析的整体式反应位移法[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(1): 134-142. (LIU Jingbo, WANG Wenhui, ZHAO Dongdong, et al. Integral response deformation method in seismic analysis of complex section underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(1): 134-142. (in Chinese))
- [9] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. (Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures: GB 50909—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese))
- [10] 核电厂抗震设计标准: GB 50267—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Standard for Seismic Design of Nuclear Power Plants: GB 50267—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [11] 刘晶波, 刘祥庆, 李彬. 地下结构抗震分析与设计的Pushover 分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(4): 73-80. (LIU Jingbo, LIU Xiangqing, LI Bin. A Pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(4): 73-80. (in Chinese))
- [12] TATEISHI A. A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method[J]. Structural Engineering, 2005, **22**(1): 41-54.
- [13] 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 Rushan, HU Shaoqing, SHI Hongbin. 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))
- [14] 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 Lianjin, WANG Wenpei, 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))
- [15] 董正方, 蔡宝占, 姚毅超, 等. 反应加速度法和反应位移法精度随结构埋深变化的研究[J]. 振动与冲击, 2017, **36**(14): 216-220, 244. (DONG Zhengfang, CAI Baozhan, YAO Yichao, et al. Accuracy of the response acceleration method and response displacement method considering different imbedding depths of underground structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, **36**(14): 216-220, 244. (in Chinese))
- [16] 徐琨鹏, 景立平, 宾佳. 地下结构强制反应位移法和反应加速度法的对比分析[J]. 地震工程学报, 2020, **42**(4): 967-972. (XU Kunpeng, JING Liping, BIN Jia. A comparative analysis of forced displacement and response acceleration methods for underground structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, **42**(4): 967-972. (in Chinese))
- [17] 禹海涛, 张伟伟, 李攀. 地下结构抗震设计的改进等效反应加速度法[J]. 岩土力学, 2020, **41**(7): 2401-2410. (YU Haitao, ZHANG Zhengwei, LI Pan. Improved equivalent response acceleration method for seismic design of underground structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(7): 2401-2410. (in Chinese))