

文章编号: 1000-4750(2021)06-0062-10

深埋地下结构地震反应分析的局部反应加速度法

许紫刚¹, 杜修力², 徐长节^{1,3}, 吴 晔²

(1. 华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西, 南昌 330013;

2. 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; 3. 浙江大学滨海和城市岩土研究中心, 浙江, 杭州 310058)

摘 要: 城市地下结构逐渐呈现埋深更大化、断面复杂化、空间立体化等特点, 中国现行《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014) 推荐采用的反应位移法和反应加速度法在计算大埋深或复杂断面地下结构的动力反应方面存在一定的局限性。在广义反应位移法和传统反应加速度法的基础上, 该文提出一种适用于深埋地下结构地震反应分析的局部反应加速度法, 该方法只需确定局部区域自由场加速度和土层剪力; 结合某深埋圆形断面的隧道结构, 以整体动力时程分析方法为基准, 分析了不同模型高度和结构刚度工况下局部反应加速度法的计算效果。结果表明: 该文提出的局部反应加速度法是一种操作简便的实用分析方法, 并且当模型高度取为地下结构高度的 5 倍时, 可以获得较为准确的结构反应。

关键词: 地下结构; 抗震分析; 局部反应加速度法; 深埋; 简化分析方法

中图分类号: TU93 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.06.0406

LOCAL RESPONSE ACCELERATION METHOD FOR SEISMIC ANALYSIS OF DEEP BURIED UNDERGROUND STRUCTURES

XU Zi-gang¹, DU Xiu-li², XU Chang-jie^{1,3}, WU Ye²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The urban underground structures gradually show the characteristics of larger buried depth, of complicated section and of stereoscopic space. The response displacement method (RDM) and response acceleration method (RAM) recommended by Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures (GB 50909—2014) have some limitations in the seismic analysis of underground structures with large buried depth or complicated sections. Based on the generalized response displacement method (GRDM) and traditional RAM, this paper proposes the local response acceleration method (LRAM) for the seismic analysis of deep buried underground structures, and this method only needs to determine the acceleration and soil shear stress of the local free field. In combination with a tunnel structure with circle cross section, the validity of the proposed method with different heights of the model and different stiffness of the structure is verified by comparing with the results of the dynamic time history analysis method. The analysis results show that the proposed method is a practical analysis method with a simple operation. When the height of the model is 5 times that of the underground structure, a more accurate structural response can be obtained.

Key words: underground structure; seismic analysis; local response acceleration method; deep buried; simplified analysis method

收稿日期: 2020-06-19; 修改日期: 2020-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504305); 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”项目(IRT13044)

通讯作者: 许紫刚(1992—), 男, 江西南昌人, 讲师, 博士, 主要从事地下结构抗震领域研究 (E-mail: xuzigang1027@163.com).

作者简介: 杜修力(1962—), 男, 四川广安人, 教授, 博士, 博导, 主要从事地震工程学研究 (E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn);

徐长节(1972—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 博导, 主要从事土动力学、地震工程研究 (E-mail: xucj@zju.edu.cn);

吴 晔(1995—), 男, 安徽池州人, 硕士生, 主要从事地下结构抗震领域研究 (E-mail: wy1486026987@163.com).

21世纪是地下空间开发和利用的大时代,目前地下空间的开发和地下结构的建设已进入快速发展的高峰期^[1-2]。长久以来,地下结构被认为受土体约束作用明显,地震作用不会影响其安全性能,地下结构的早期设计也未对地震作用给予足够的重视^[3]。1995年阪神地震震害调查表明:地下结构同样面临十分严峻的地震威胁。针对此次地震中出现的大开地铁车站的整体塌毁破坏,世界范围内的地震工程领域专家和学者开展了大量的试验和数值研究,并取得了一系列进展^[4-5]。

在地下结构抗震设计方法方面,不仅有严格的土-结构整体动力时程分析方法^[6-7],还有实用的简化分析方法^[8]。后者通过静力学理论近似地解决动力学问题,在一定程度上反映地下结构在地震作用下的受力特点,实用性较强。刘晶波等^[8]和许成顺等^[9]总结了地下结构工程上常用的抗震简化分析方法,包括地震系数法、自由场变形法、柔度系数法、反应位移法、反应加速度法以及Pushover分析方法,并结合具体工程实例探讨了各简化分析方法与整体动力时程分析方法计算结果之间的差异。其中,反应位移法和反应加速度法具有相对严格的理论基础^[10-11],是目前地下结构抗震设计中应用最为广泛的方法,也是《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[12]推荐采用的方法。针对反应位移法和反应加速度法中存在的问题和局限性,国内外学者开展了一系列改进研究。李英民等^[13]和李亮等^[14]改进了反应位移法中地基弹簧刚度的求解问题,进一步简化了计算过程。刘晶波等^[15]提出的整体式反应位移法、陈之毅等^[16]提出的整体强制反应位移法、许紫刚等^[17]提出的广义反应位移法和韩润波等^[18]提出的边界强制反应位移法成功解决复杂断面地下结构的抗震分析难题。反应加速度法建立土-结构整体分析模型,既可以规避地基弹簧引起的计算误差,又可以适用复杂断面形式地下结构,是精度较高的简化分析方法。刘如山等^[19]采用先对一维自由土层反应剪应力沿铅直向微分,然后再将其作为水平体荷载离散到有限元节点上的加载方法,提高了计算精度。董正方和王君杰^[20]通过近似考虑场地影响,对反应加速度法中的地震动参数进行了修正。此外,Liu等^[21]将反应加速度法进一步拓展到非线性阶段,提出了地下结构的Pushover分析方法。

上述的简化分析方法多适用于埋深不是很大的地下结构,但当前的城市地下结构逐渐呈现埋深更大化、断面复杂化、空间立体化等特点,例如我国最大埋深的地铁车站已达到100 m左右。因此,针对深埋地下结构提出实用性强、精度高的简化分析方法也是十分必要的。本文在传统反应加速度法的基础上,选取结构及其周边范围部分土体进行分析,提出局部反应加速度法。采用有限元软件ABAQUS对某圆形断面的隧道结构开展数值计算,以动力时程分析方法为基准,对比分析了局部反应加速度法计算结果,验证了新方法在城市深埋地下结构抗震设计方面的可行性和有效性。

1 传统反应加速度法

《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[12]指出,采用传统反应加速度法进行隧道或地下车站结构横向地震反应分析时,计算模型底面可取设计地震作用基准面,并将其作为固定边界;顶面取地表面,并将其作为自由面;侧面边界到结构的距离取结构水平有效宽度的2倍~3倍,并将其作为水平滑移边界,如图1所示。

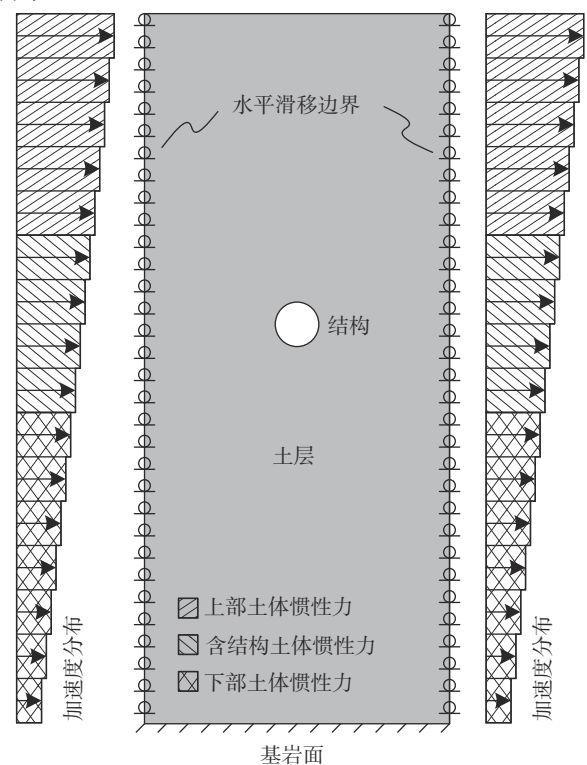


图1 反应加速度法计算模型
Fig. 1 Calculation model of response acceleration method (RAM)

反应加速度法的基本思想是土-地下结构体系在地震作用下受力以体积力为主,土层与地下结构之间存在着动力相互作用,土层对地下结构的约束作用不可忽略。因此,反应加速度法通过对各土层和地下结构按照其所在的位置施加相应的水平有效惯性加速度来实现整个土-结构体系中施加水平惯性体积力,各土层的有效惯性加速度可通过一维土层地震反应分析获得。

2 局部反应加速度法

2.1 理论分析

从图1所示的反应加速度法力学模型可以看出,在水平地震作用下,土-结构体系所受的惯性力可以看作三部分惯性力的组合,即上部土体惯性力、下部土体惯性力以及含结构土体惯性力。当地下结构埋深较大或者基岩面较深时,采用反应加速度法进行地下结构横断面抗震设计将需要花费较大的计算代价。例如文献[22]中盾构隧道埋深为40 m(约隧道直径的6倍),地表至计算基岩面的深度为100 m(约隧道直径的15倍)。若采用传统的反应位移法,则需要通过多次有限元计算确定弹簧刚度;若采用传统反应加速度法,则需要确定每一土层单元的加速度值。计算成本较高,文献[22]虽提出采用复变函数理论求解土体弹簧刚度,但该成果不适用复杂场地条件的情况。

采用传统的反应加速度法分析深埋地下结构的地震反应时,需首先进行场地地震反应分析,后将所得加速度值施加到每一层土体单元上。这样不仅需要建立庞大的模型,同时也需要逐层施加土体惯性力,建模过程复杂且计算效率不高。

本节试图对传统反应加速度法进行适当的改进,如图2所示,在结构往上和往下一定位置处分别取两个隔离面,上、下两个隔离面则将土-结构体系分成三个隔离体,地表面至上隔离面的区域定义为上部土体,上隔离面至下隔离面的区域定义为含结构土体,下隔离面至计算基岩面的区域定义为下部土体。对三部分隔离体分别进行受力分析:上部土体除受相应位置土层的惯性力以外,还受上隔离面位置的土层剪力;含结构土体除受相应位置土层的惯性力以外,还受上、下两个隔离面位置的土层剪力;下部土体除受相应位置土层的惯性力以外,还受下隔离面位置的土层剪力。上隔离面对上部土体作用的土层剪力和其

对含结构土体作用的土层剪力是作用力与反作用力的关系,两者大小相等、方向相反,下隔离面处的土层剪力亦是如此。

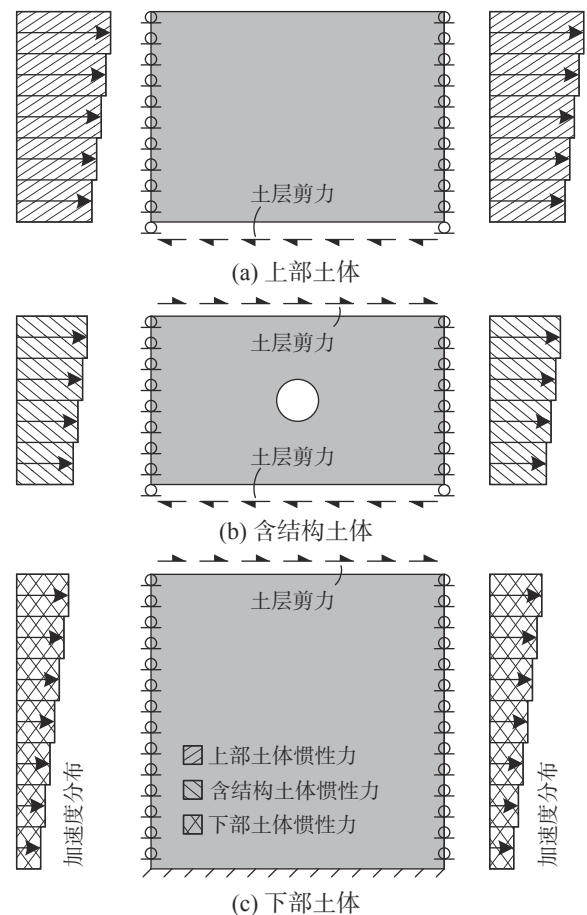


图2 反应加速度法受力分析
Fig. 2 Force analysis of RAM

2.2 力学模型

为解决复杂断面地下结构地震反应分析的问题,许紫刚等^[17]提出了广义反应位移法,其计算模型如图3所示。广义反应位移法是取结构周边一定范围内土体作为广义子结构,并按传统反应位移法的地震荷载进行受力分析。由于选取的土体范围有限,广义反应位移法也需要和传统反应位移法一样在广义子结构的周边设置地基弹簧。进一步地,如果广义反应位移法的土体范围选的足够宽,则可以较为真实地反映地下结构所受到的土体约束情况,此时即使不设置地基弹簧也可以获得较为真实的地震反应。

综合图2所示的含结构土体的受力分析和图3所示的广义反应位移法计算模型,本节提出局部反应加速度法计算模型,如图4所示。和传统反应加速度法模型一致,局部反应加速度法计算模

型左、右两侧面边界到结构的距离取结构水平有效宽度的 2 倍~3 倍 ($B=2D\sim 3D$), 并将其作为水平滑移边界。结构上、下也各取一定高度范围内的土体 (3.3 节将进一步讨论计算模型高度的影响), 将模型底面固定, 模型顶面自由。需要说明的是, 在本文方法中, 当分析模型总高度一定时, 结构上部和下部土层的厚度取为一致。局部反应加速度法的地震荷载包括模型顶面的土层剪力, 结构和局部土体的惯性力。

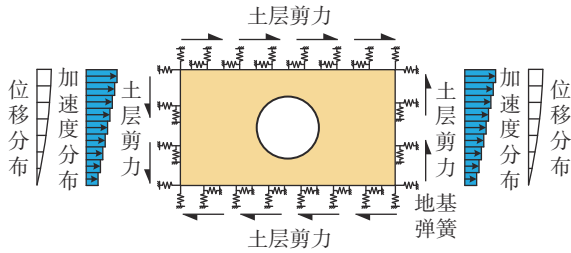


图 3 广义反应位移法计算模型
Fig. 3 Calculation model of generalized response displacement method (GRDM)

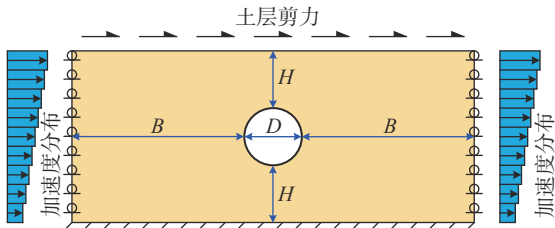


图 4 局部反应加速度法计算模型
Fig. 4 Calculation model of local response acceleration method (LRAM)

2.3 实施步骤

和传统反应加速度法、广义反应位移法的实施步骤相比, 局部反应加速度法有所差异, 其具体实施步骤如下:

1) 选取适当的土体计算范围。根据地下结构横断面的实际尺寸选择结构周边区域合理范围的土体作为局部反应加速度法的土-结构体系。

2) 求解自由场水平地震反应。采用等效线性化程序 SHAKE91 或 EERA 等方法对自由场模型进行水平地震作用下的一维土层地震反应分析, 求解局部土体对应高度位置的加速度, 以及局部土体顶面位置处的土层剪力。

3) 建立局部反应加速度法力学分析模型。按图 4 所示局部反应加速度法模型施加步骤 2) 所确定的地震荷载, 进行静力计算。

从上述局部反应加速度法的力学模型和实施步骤可以看出, 该力学模型比广义反应位移法和

传统的反应加速度法更为简单。在荷载确定方面, 传统反应加速度法需要确定地表至基岩面处每一层土体单元的加速度值, 而本文方法仅需确定结构上、下部一定区域内土体单元的加速度值; 在模型建立方面, 传统反应加速度法需要建立整个庞大的有限元模型, 而本文方法仅需选取结构周边一定范围的土体进行建模。因此, 对于深埋地下结构而言, 本文方法在计算效率方面要明显优于传统反应加速度法。

3 实例验证

3.1 计算参数

为验证局部反应加速度法在计算深埋地下结构地震反应的有效性, 本节选取某地铁区间隧道结构进行数值分析。该区间隧道的标准断面形式为圆形, 断面衬砌外径为 6.2 m, 内径为 5.8 m, 隧道结构厚度为 0.4 m。为便于计算, 衬砌环假定为修正后的等刚度环, 结构混凝土弹性模量取为 30 GPa, 泊松比取为 0.2, 密度为 2500 kg/m³。隧道顶部埋深为 38.8 m, 该场地的土层情况及其物理参数如表 1 所示。

表 1 土层参数
Table 1 Physical properties of soils

分层	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	剪切波速/(m·s ⁻¹)	泊松比	材料曲线
1	12	2000	100	0.3	材料一
2	12	2000	150	0.3	材料一
3	12	2000	200	0.3	材料二
4	12	2000	250	0.3	材料二
5	12	2000	300	0.3	材料三
6	12	2000	350	0.3	材料四
7	12	2000	400	0.3	材料五
8	12	2000	450	0.3	材料六
9	基岩	2200	1200	—	—

隧道结构采用梁单元建模, 尺寸取为内外径的中心线, 即直径为 6 m。土体采用平面应变单元建模, 根据隧道结构的直径确定土体模型的宽度, 左、右两侧距离结构边缘各取 3 倍结构直径, 即土体模型的总宽度取为 42 m; 土体模型的深度方向取值基岩面, 即土体模型的总高度取为 96 m。土体的动力参数采用典型的砂土和粘土的剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的试验曲线, 如图 5 所示。此外, 在土和结构交界面处, 结构节点和土体节点完全粘结, 即假定结构与土体两者之间不

发生相对滑移。限于模型高度，图 6 仅截取了部分有限元模型，隧道结构共划分为 48 个单元，除隧道结构周边范围 (12 m×12 m)，土体单元的网格尺寸均为 1 m×1 m，满足动力分析要求。

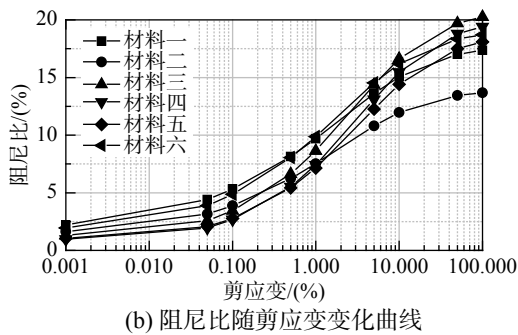
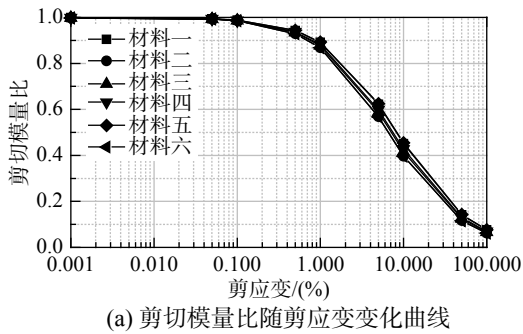


图 5 土体本构曲线
Fig. 5 Constitutive curves of soil

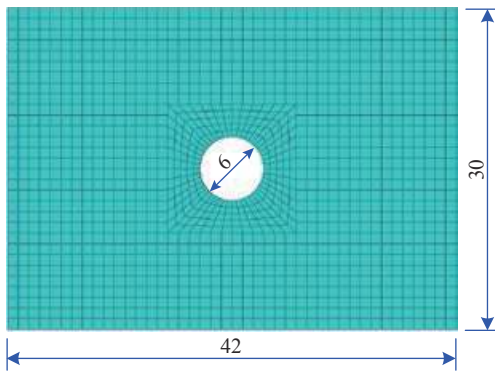


图 6 部分有限元模型 /m
Fig. 6 Part of the finite element model

在本节开展的数值实验中基岩输入地震动选用 El Centro 和 Loma Prieta 两条地震动，其地震动加速度时程曲线如图 7 所示，通过调整输入地震动加速度幅值使地表处的加速度峰值为 0.2 g。动力时程分析方法采用杜修力等^[23]提出的基于等效线性化方法的整体动力时程分析方法，即不同地震动对应不同的土体等效剪切模量和阻尼比，当进行局部反应加速度法计算时，相应土体的剪切模量也采用和动力时程分析中一致的计算参数。

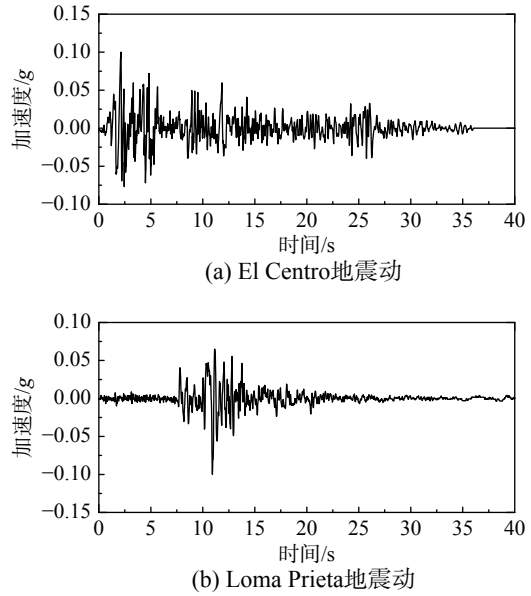


图 7 地震动加速度时程曲线
Fig. 7 Acceleration time history curves

3.2 不同部位土体惯性力作用对比

如 2.1 节所述，传统反应加速度法的地震荷载按结构所在的位置可以分为三部分惯性力的组合，即上部土体惯性力、下部土体惯性力以及含结构土体惯性力。为了确定各部分惯性力对结构动力响应贡献率的大小，本节在传统反应加速度法计算模型的基础上，分别单独施加这三部分惯性力，并计算各个荷载工况下结构的反应，包括轴力、剪力和弯矩。

除了讨论不同地震动作用以外，本节改变的模型参数还包括图 1 所示的含结构土体的模型高度。以结构直径为基准，设计了 6 种含结构土体的模型高度，分别为隧道结构直径的 2 倍~7 倍，含结构土体的模型高度分别为 12 m、18 m、24 m、30 m、36 m 和 42 m。El Centro 地震动和 Loma Prieta 地震动作用下三部分土体惯性力对结构反应贡献率的对比情况如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 中看出，相比于上部土体和含结构土体的惯性力作用，下部土体的惯性力对结构内力反应的贡献较小。当含结构土体的高度为两倍结构时，上部土体的高度最大，其惯性力作用效果也最为明显，对结构内力的贡献率基本在 90% 左右，随着上部土体高度的不断减小，贡献率也在不断减小，但从总体分析来看，上部土体的惯性力作用所占比例较大。由图 2 可知，上部土体的惯性力可等效成上部土层的剪力，这一部分荷载应重点考虑在局部反应加速度法计算模型中。

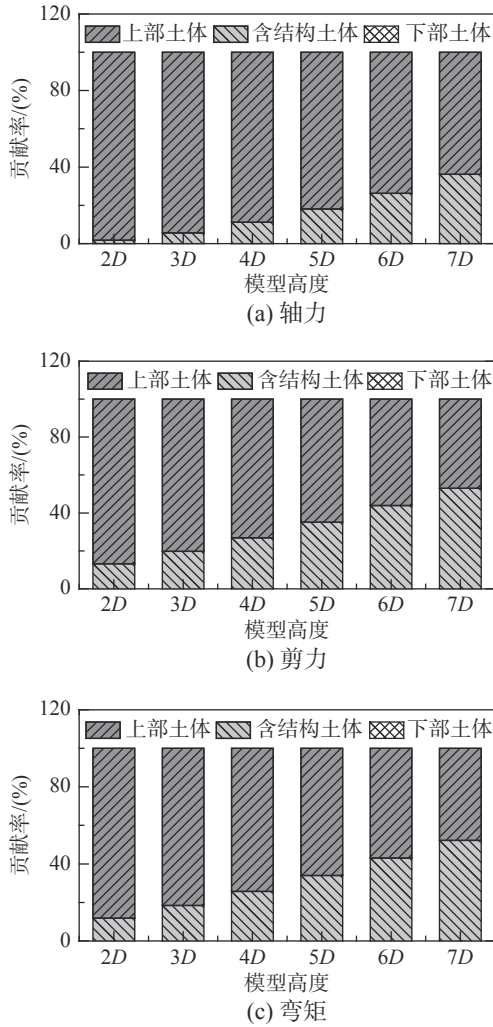


图8 El Centro地震动作用下三部分土体惯性力对结构反应贡献率

Fig. 8 Contribution rates of three parts of soil inertia force to structural responses under El Centro earthquake load

3.3 不同模型高度局部反应加速度法对比

本节主要讨论不同模型高度情况下局部反应加速度法的计算精度问题，模型高度的选取与3.2节一致，即分别考虑模型高度为隧道结构直径的2倍~7倍的计算工况，对比的基准是严格的动力时程分析方法。在动力时程分析方法中，模型底部取至基岩面，并在模型两侧施加人工边界条件^[7]，其中土体的材料参数同简化分析方法所用到的材料参数完全一致，保证了二者之间的可比性。

考虑到自由场地震反应分析所得的土层加速度和土层剪力是局部反应加速度法的关键参数，本节列举了结构局部区域自由场的地震反应，如图10和表2所示。从图10和表2可以看出，对于El Centro地震动和Loma Prieta地震动在最不利时刻，两者的加速度分布正好方向相反，表现出自由场的水平位移分布也相反。此外，当局部反应

加速度法的模型高度不同时，模型顶部的土层剪力也有一定的差异。

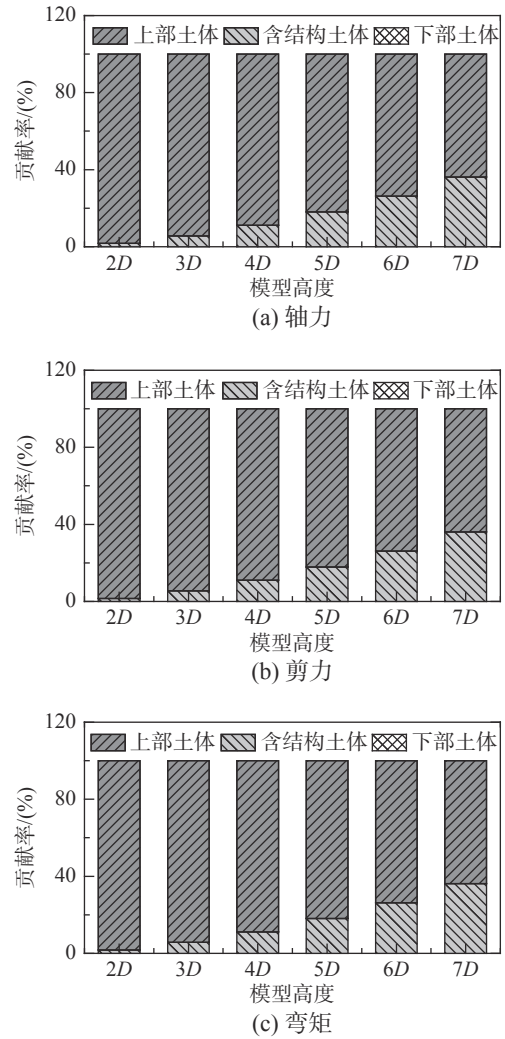


图9 Loma Prieta地震动作用下三部分土体惯性力对结构反应贡献率

Fig. 9 Contribution rates of three parts of soil inertia force to structural responses under Loma Prieta earthquake load

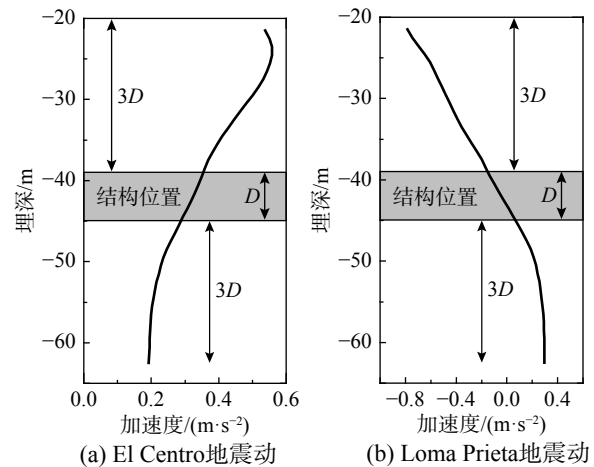


图10 局部自由场加速度分布

Fig. 10 Distribution of acceleration in local free field

表 2 土层剪力
Table 2 Shear stress of soil

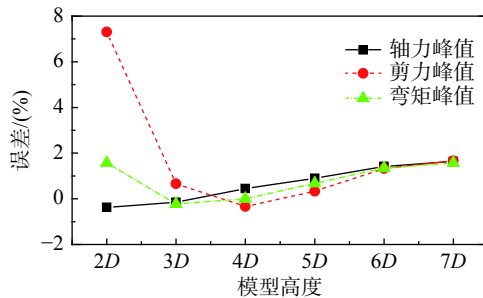
模型高度	El Centro地震动 土层剪力/kPa	Loma Prieta地震动 土层剪力/kPa
2D	-32.41	40.14
3D	-30.10	38.39
4D	-27.48	36.00
5D	-24.52	33.05
6D	-21.37	29.41
7D	-18.16	25.05

将上述荷载代入局部反应加速度法计算模型中, 通过静力分析即可获得结构的反应。将该简化分析方法的计算结果与动力时程分析方法进行对比, 这里首先定义一个内力峰值误差如下:

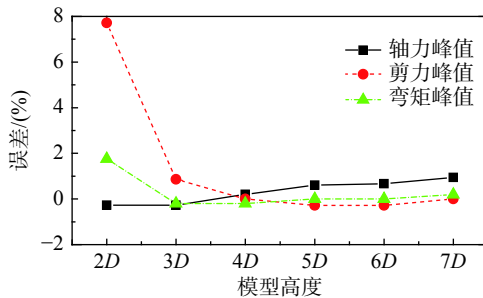
$$R_1 = \frac{F_{L\max} - F_{D\max}}{F_{D\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $F_{L\max}$ 表示局部反应加速度法所计算的内力峰值; $F_{D\max}$ 表示动力时程分析方法所计算的内力峰值。

图 11 为结构内力峰值的误差变化情况, 对于该圆形隧道结构, 动力时程分析方法和简化分析方法所计算的内力峰值出现的部位一致, 轴力和弯矩的最大值位于隧道横断面 45° 方向, 而剪力的最大值则位于隧道顶部和底部。由图 11 可以发现, 在局部反应加速度法计算模型高度为 $2D$ 时, 剪力峰值较动力时程分析的计算结构要大 8% 左右, 随着模型高度的增加, 各内力峰值的相对误



(a) El Centro地震动



(b) Loma Prieta地震动

图 11 内力峰值误差随模型高度变化规律

Fig. 11 Errors of peak section force changing with the height of the model

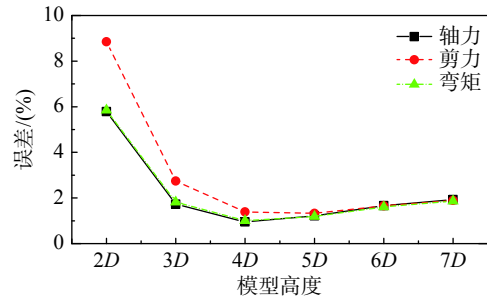
差基本呈现减小的趋势, 模型高度大于 $3D$ 时, 所有内力峰值的误差基本维持在 2% 以内, 表明局部反应加速度法具有良好的计算精度。

从内力峰值的角度对比局部反应加速度法和动力时程分析方法的计算误差仅能说明在结构某个个别节点的计算精度, 为了反映所有节点处内力是否计算准确, 本节采用二阶欧几里德范数分析隧道结构所有内力的误差值, 简称内力二范数误差, 其计算方法如式 (2):

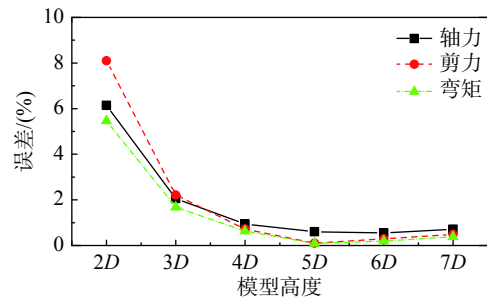
$$R_2 = \frac{\|F_L - F_D\|_2}{\|F_D\|_2} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n |F_{Li} - F_{Di}|^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n |F_{Di}|^2}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: F_L 表示局部反应加速度法所计算的内力值; F_D 表示动力时程分析方法所计算的内力值; i 表示节点号; n 为总节点数; F_{Li} 表示局部反应加速度法所计算的第 i 个节点的内力值; F_{Di} 表示动力时程分析方法所计算的第 i 个节点的内力值。

局部反应加速度法所计算的隧道结构内力二范数误差如图 12 所示, 其随模型高度的变化规律和内力峰值相对误差的变化规律基本一致。当局部反应加速度法的模型高度取 $2D$ 时, 轴力的二范数误差最大, 约为 9%, 剪力和弯矩的二范数误差



(a) El Centro地震动



(b) Loma Prieta地震动

图 12 内力二范数误差随模型高度变化规律

Fig. 12 2-norm errors of section force changing with the height of the model

也都要大于 5%；在模型高度大于 5D 时，内力二范数误差基本稳定，且维持在 2% 左右，表现出良好的计算精度。综合图 11 和图 12 的对比结果，本文认为模型高度为 5 倍结构高度时，局部反应加速度法可以较为准确地计算结构内力反应。

图 13 进一步列出了 El Centro 地震动作用下，整体动力时程分析方法和模型高度为 5D(H=2D) 时的局部反应加速度法所计算的隧道结构内力图，从图 13 可以看出，此时的局部反应加速度法和动力时程分析方法所计算的内力大小和分布规律基本一致。因此，后续对局部反应加速度法的计算精度的讨论也是基于模型高度为 5D 情况下开展的。

3.4 不同结构刚度局部反应加速度法对比

为进一步探讨本文提出的局部反应加速度法的适用性，本节通过改变隧道结构的刚度研究不同土-结构刚度比情况下本文方法的计算精度。原型结构的弹性模量为 30 GPa，此外还设计了结构弹性模量分别取 6 GPa、60 GPa、150 GPa 和 300 GPa 的计算工况。分析误差同 3.3 节一致，包含内力峰值相对误差和内力二范数相对误差。两种不同误差随隧道结构的刚度变化情况分别如图 14 和图 15

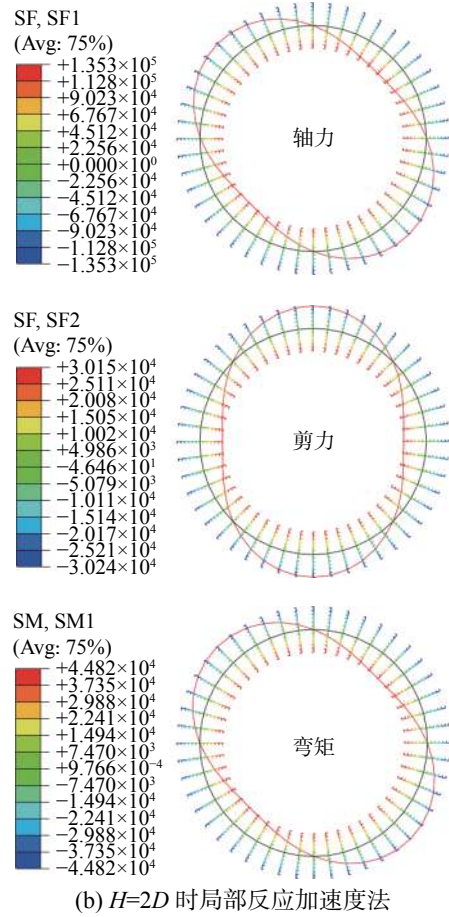
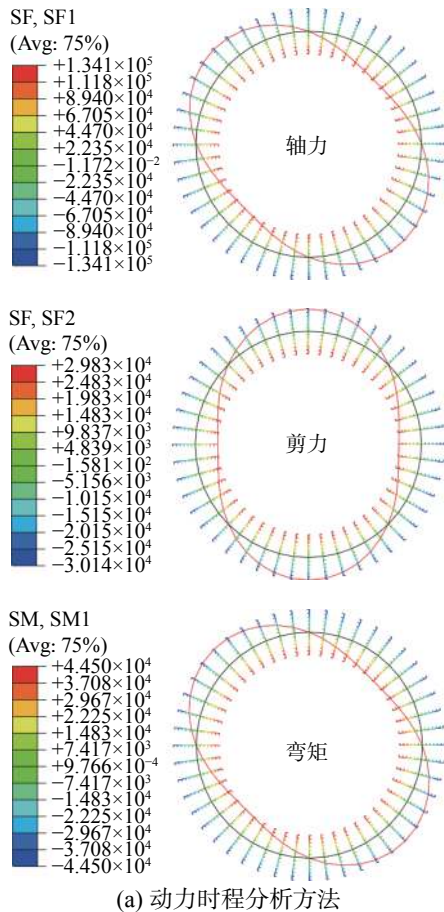


图 13 El Centro 地震动作用下内力图
Fig. 13 Internal force diagram under El Centro earthquake load

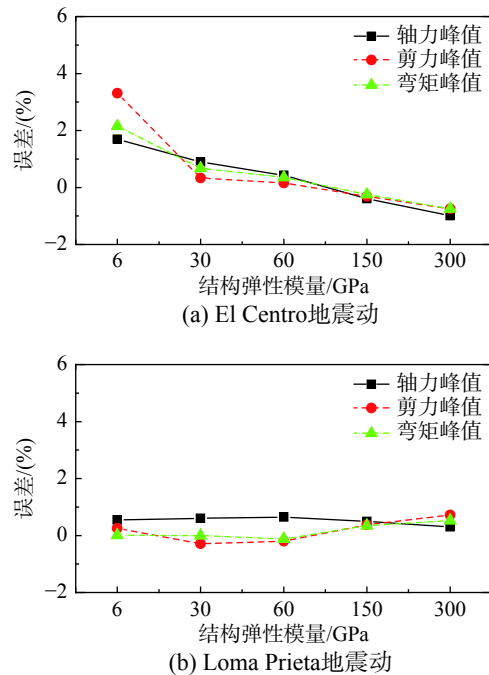


图 14 内力峰值误差随结构刚度变化规律
Fig. 14 Errors of peak section force changing with the stiffness of the structure

所示。从图 14 和图 15 可以看出, 随着结构刚度的逐渐增大, 内力峰值误差和内力二范数误差基本呈现逐渐减小的趋势。此外还可以看出, El Centro 地震动作用下隧道结构内力峰值和内力二范数误差要略高于 Loma Prieta 地震动作用下的相应误差值, 但所有误差值基本维持在 5% 以内, 这也表明局部反应加速度法在不同土-结构刚度比工况下都能表现出较好的计算精度。

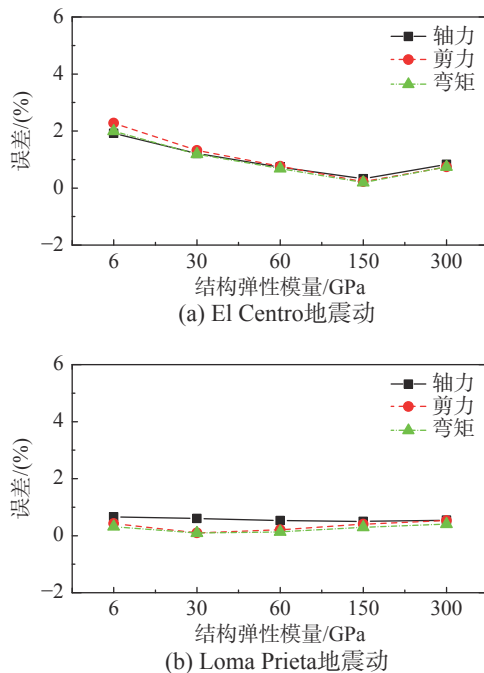


图 15 内力二范数误差随结构刚度变化规律

Fig. 15 2-norm errors of section force changing with the stiffness of the structure

4 结论

在我国现行《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[12] 中的反应加速度法的基础上, 并结合广义反应位移法的计算模型, 本文提出了一种适用于深埋地下结构地震反应分析的局部反应加速度法。通过改变局部反应加速度法的模型高度以及结构刚度, 研究不同工况下该方法的计算精度。具体可得到如下主要结论:

(1) 在传统反应加速度法的计算模型中, 结构下部土体的惯性力作用对结构反应的贡献较小, 而结构周边区域土体惯性力以及上部土体的土层剪力是影响结构反应的重要地震荷载。

(2) 随着模型高度和结构刚度的增大, 局部反应加速度法较整体动力时程分析方法的计算精度呈逐渐减小的趋势, 误差基本维持在 5% 左右。

(3) 当局部反应加速度法的模型高度取为地下结构高度的 5 倍时, 可以获得较为准确的结构反应, 建议在后续工程应用中采用该模型尺寸。

参考文献:

- 钱七虎. 岩土工程的第四次浪潮[J]. *地下空间*, 1999, 19(4): 267—272.
Qian Qihu. The fourth wave of geotechnolgy [J]. *Underground Space*, 1999, 19(4): 267—272. (in Chinese)
- He L, Song Y, Dai S, et al. Quantitative research on the capacity of urban underground space—the case of Shanghai, China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32: 168—179.
- Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. *Special Issue of Soils and Foundations*, 1996, 1: 283—300.
- 陈卫忠, 宋万鹏, 赵武胜, 等. 地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(2): 310—325.
Chen Weizhong, Song Wanpeng, Zhao Wusheng, et al. Research progress of seismic analysis methods and performance evaluation in underground engineering [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(2): 310—325. (in Chinese)
- 杜修力, 李洋, 许成顺, 等. 1995年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(2): 223—236.
Du Xiuli, Li Yang, Xu Chengshun, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(2): 223—236. (in Chinese)
- 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 Xiuli, 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)
- 谭辉, 刘晶波, 王东洋, 等. 地下结构地震反应分析中人工边界条件和地震波动输入方法对比研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(增刊 1): 212—216, 222.
Tan Hui, Liu Jingbo, Wang Dongyang, et al. Comparison on artificial boundaries and seismic wave input methods in seismic analysis of underground structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(Suppl 1): 212—216, 222. (in Chinese)
- 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构横截面地震反应拟静力计算方法对比研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(1): 105—111.
Liu Jingbo, Wang Wenhui, Zhao Dongdong. Comparison of the pseudo-static methods for seismic analysis of the

- underground structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(1): 105 – 111. (in Chinese)
- [9] 许成顺, 许紫刚, 杜修力, 等. 地下结构实用抗震分析方法比较研究[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)
- [10] Tateishi A. A study on loading method of seismic deformation method [J]. *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 1992(441): 157 – 166.
- [11] Tateishi A. A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method [J]. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, 2005, 22(1): 41 – 54.
- [12] GB 50909—2014, 城市轨道交通结构抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
GB 50909—2014, Code for seismic design of urban rail transit structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)
- [13] 李英民, 王璐, 刘阳冰, 等. 地下结构抗震计算地基弹簧系数取值方法研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, 32(1): 106 – 113.
Li Yingmin, Wang Lu, Liu Yangbing, et al. Analysis of methods for determining the spring constant of ground foundation in seismic design of underground structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 32(1): 106 – 113. (in Chinese)
- [14] 李亮, 杨晓慧, 杜修力. 地下结构地震反应计算的改进的反应位移法[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(7): 1360 – 1364.
Li Liang, Yang Xiaohui, Du Xiuli. Improved response displacement method for evaluating seismic responses of underground structures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(7): 1360 – 1364. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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 Zhiyi, Tan Zhongao, Lou Menglin. Integral forced displacement method for seismic design of underground structures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(8): 1145 – 1152. (in Chinese)
- [17] 许紫刚, 杜修力, 许成顺, 等. 复杂断面地下结构地震反应分析的广义反应位移法研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(8): 3247 – 3254.
Xu Zigang, Du Xiuli, Xu Chengshun, et al. Research on generalized response displacement method for seismic analysis of underground structures with complex section [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(8): 3247 – 3254. (in Chinese)
- [18] 韩润波, 许成顺, 许紫刚, 等. 对称地下结构抗震分析的边界强制反应位移法[J]. *工程力学*, 2021, 38(5): 50 – 60.
Han Runbo, Xu Chengshun, Xu Zigang, et al. Boundary forced response displacement method for seismic analysis of symmetrical underground structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(5): 50 – 60. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 董正方, 王君杰. 反应加速度法中地震动参数的修正研究[J]. *现代隧道技术*, 2014, 51(1): 32 – 37.
Dong Zhengfang, Wang Junjie. Research on ground motion parameter correction in the response acceleration method [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51(1): 32 – 37. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] 董正方, 王君杰, 姚毅超. 深埋盾构隧道结构抗震设计方法评价[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(19): 79 – 85.
Dong Zhengfang, Wang Junjie, Yao Yichao. Evaluation of seismic design methods for a deeply-buried shield tunnel [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(19): 79 – 85. (in Chinese)
- [23] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 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[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(12): 2155 – 2163.
Du Xiuli, Xu Zigang, Xu Chengshun, et al. Research on time history analysis method of soil-underground structure system based on equivalent linear method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(12): 2155 – 2163. (in Chinese)