

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1324

地下结构抗震设计的改进等效反应加速度法

禹海涛^{1,2}, 张正伟³, 李 攀^{1,4}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092;
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125; 4. 苏州大学 轨道交通学院, 苏州 215131)

摘 要: 对地下结构横向抗震分析中的等效反应加速度法进行综合分析。结合算例, 以动力时程法为基准, 全面评价了等效反应加速度法的适用性; 进而深入分析其误差来源, 并做针对性改进优化, 通过引入动力响应调整系数 β , 提出了一种改进等效反应加速度法; 结合算例分析, 评价了改进等效反应加速度法对不同工况的适用性。结果表明: 等效反应加速度法计算所得结构内力及变形均偏小; 且计算精度随地层剪切波速的增大整体呈上升趋势, 但几乎不受结构埋深的影响; 同时, 明确了等效反应加速度法的误差源自于其忽略了地下结构对其周围土体动力响应的干扰作用, 改进优化后提出了改进等效反应加速度法; 相比现有等效反应加速度法, 改进等效反应加速度法具有更广泛的适用性及更优的计算精度, 可为地下结构抗震设计和分析提供新的计算方法。

关 键 词: 地下结构; 抗震设计; 动力时程法; 等效反应加速度法; 改进等效反应加速度法

中图分类号: TU 973+31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2020)07-2401-10

Improved equivalent response acceleration method for seismic design of underground structures

YU Hai-tao^{1,2}, ZHANG Zheng-wei³, LI Pan^{1,4}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Company Limited, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Company Limited, Shanghai 200125, China; 4. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215131, China)

Abstract: The equivalent response acceleration method for transverse seismic analysis of underground structures is systematically studied in this paper. Firstly, results of the dynamic time history analysis method are set as the benchmark to evaluate the adaptability of the equivalent response acceleration method through numerical examples. Then, error sources of the equivalent response acceleration method are dissected and overcome. An improved equivalent response acceleration method is proposed by introducing the dynamic response adjustment coefficient β . Finally, the applicability of the proposed method is evaluated through numerical examples. Results show that, the results of internal forces and deformations obtained from the equivalent response acceleration method are all smaller than those from dynamic time history analysis method. Moreover, its accuracy can be improved with the increase of soil shear velocity but less affected by the buried depth. Further research finds that the error of the equivalent response acceleration method comes from the fact that, the interference effect of the underground structure on the dynamic response of the surrounding soil is ignored in the method. After improvement and optimization, the improved equivalent response acceleration method is proposed to further consider the interference effect. Compared to the traditional equivalent response acceleration method, the proposed method has a wider applicability and better calculation accuracy, which provides a novel approach for seismic design and analysis of underground structures.

Keywords: underground structures; seismic design; dynamic time-history analysis method; equivalent response acceleration method; improved equivalent response acceleration method

收稿日期: 2019-07-30

修回日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41922059, No.51978431, No.51678438); 国家重点研发计划项目 (No.2018YFC1504305, No.2018YFC0809602, No.2017YFC1500703); 上海市青年科技启明星计划资助 (No.17QC1400500); 上海市科学技术委员会 (No.18DZ1205103, No.17DZ1203804, No.17DZ1203402)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41922059, 51978431, 51678438), the National Key Research and Development Plan of China (2018YFC1504305, 2018YFC0809602, 2017YFC1500703), Shanghai Rising-Star Program (17QC1400500) and Shanghai Committee of Science and Technology (18DZ1205103, 17DZ1203804, 17DZ1203402).

第一作者简介: 禹海涛, 男, 1983 年生, 博士, 教授, 主要从事地下结构防灾减灾方面的研究。E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn

通讯作者: 李攀, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程无损检测、风险与防灾。E-mail: yongpanli@163.com

1 引言

目前,地下结构抗震分析方法主要有动力时程法和拟静力法。动力时程法起源于 20 世纪 60 年代,它通过直接求解动力微分方程得到结构的地震动响应^[1],可真实模拟土-结构相互作用,从而获得结构最真实的动力响应。但动力时程法存在模型边界处理复杂、计算工作量大、结果处理繁琐等问题,导致其在工程实践中分析效率较低,难以在工程实践中推广应用。

工程设计普遍采用简化的拟静力法进行抗震分析,此类方法通过合理简化将动力学问题转化为静力学问题,并能较好地反映结构的动力响应,具有计算结果直观、计算效率高等优点。地下结构抗震分析的拟静力法较多,如地震系数法、自由场变形法、相互作用系数法、反应位移法等,其中反应位移法应用最为广泛。众多规范^[2-3]均推荐它作为地下结构抗震设计方法。但传统反应位移法在实际工程应用中仍存在诸多问题^[4-8]:对于断面形式复杂的结构,地层剪力的施加较困难;地基弹簧刚度难以确定;梁-弹簧模型中地基弹簧之间互不相关,无法真实反映地震过程中土体对结构的动态约束作用,离散的地基弹簧更无法体现结构角部的应力畸变状况,这些问题导致反应位移法的适应性较差。针对上述不足,国内外学者基于反应位移法的基本思想,提出了多种静力有限元法。

静力有限元法是对传统反应位移法的改进优化,其统一思想是:建立地层-结构整体有限元模型,将自由场分析所得等效地震荷载直接施加于地层-结构有限元模型,通过静力分析计算地下结构的动力响应。相比于传统反应位移法,静力有限元法的地层-结构整体有限元模型可以充分考虑地层-结构间的相互作用,无需计算地基弹簧刚度,分析流程更为简便,且计算精度更高。相比于动力时程法,静力有限元法可由一维土层地震反应分析求解土体自由场地震反应,既避免了动力时程分析模型的边界问题,又极大地提高了计算效率。现有静力有限元法较多,其中等效反应加速度法应用最为广泛,是众多规范推荐的地下结构抗震设计方法。

本文首先对等效反应加速度法的适用性做全面评价;深入探究其误差来源,并做针对性改进优化,从而提出一种改进等效反应加速度法;最后结合算例分析,验证改进等效反应加速度法的有效性。

2 等效反应加速度法评述

反应加速度法最早由片山幾夫等^[9]提出,是反应位移法的一种变化形式。计算模型如图 1 所示,底部边界为地震作用基准面并采用固定边界,侧面边界仅约束竖向位移,土体两侧竖直边界距结构的水平距离(简称侧边距)建议选取 3 倍以上的结构跨度^[10];将地震荷载转化为地层反应加速度,然后将其施加在地层-结构模型上,通过静力分析求解结构的动力响应。当地层复杂,结构位置处地层性质和地层刚度参数差别较大时,简单将地震荷载转化为地层反应加速度的分析精度较差。为提高计算精度,出现了将地震荷载转化为地层有效反应加速度的等效反应加速度法。

地层有效反应加速度的分布和大小可通过自由场一维土层地震反应分析获得。首先计算地下结构顶底板位置处自由土层发生最大相对位移时刻的土层剪应力分布,利用下式计算有效反应加速度^[11]:

$$a_i = \frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{\rho_i h_i} \quad (1)$$

式中: a_i 为第 i 层土体单元水平有效反应加速度; τ_{i-1} 、 τ_i 分别为结构横断面所处土体自由场出现最大相对位移时刻第 i 层土体单元顶部与底部的剪应力,当 $i=1$ 时, $\tau_0=0$; ρ_i 为第 i 层土体单元的密度; h_i 为第 i 层土体单元的厚度。

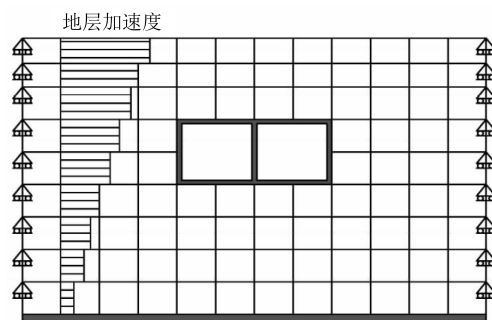


图 1 反应加速度法计算模型^[10]

Fig.1 Model of equivalent response acceleration method^[10]

2.1 等效反应加速度法的适用性评价

地下结构与地层的动力相互作用极为复杂,这导致地下结构抗震简化分析方法的计算精度及适用性受多方面因素的影响。作为反应位移法的变化形式,等效反应加速度法是众多规范推荐的地下结构抗震简化分析方法,但各规范对其适用性尚无明确说明。现通过改变地下结构的地层条件、结构埋深

对等效反应加速度法的适用性做全面评价。

2.1.1 不同地层

依托某典型两层三跨地铁车站，其结构横断面及各构件的尺寸如图 2 所示，其中中柱的纵向间距为 9.12 m。混凝土重度为 25 kN/m³，弹性模量为 3 450 MPa，泊松比为 0.2。根据规范^[2]，地下车站结构可按平面应变问题考虑，一般计算模型沿纵向取中柱间距，故本文车站计算模型纵向取中柱间距 9.12 m。

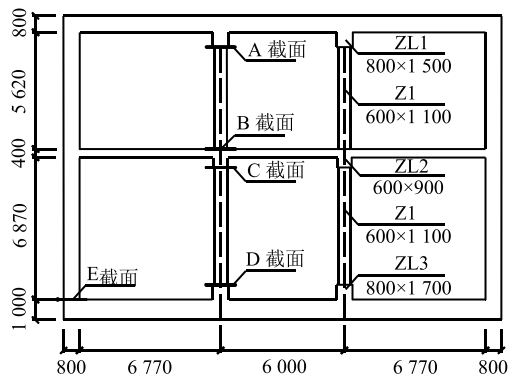


图 2 车站结构标准断面图 (单位: mm)
Fig.2 Typical cross section of subway station (unit: mm)

结构顶板埋深为 2 m，为探究等效反应加速度法对不同地层的普遍适用性，土体模型选用不同的地层参数。鉴于地铁车站埋置的地层剪切波速通常在 150~400 m/s，故选取 150~400 m/s 不同剪切波速的均质土分析等效反应加速度法对不同地层中矩形框架结构的适用性，具体地层参数见表 1。

表 1 地层参数 Table 1 Ground parameters					
地层类别	剪切波速 (m·s ⁻¹)	密度 (kg·m ⁻³)	动剪切模量 G/MPa	泊松比	动弹性模量 E _s /MPa
地层 1	150	1 800	45	0.3	57.68
地层 2	200	1 800	80	0.3	118.45
地层 3	300	1 800	180	0.3	326.74
地层 4	400	1 800	320	0.3	575.60

以动力时程分析为基准评价等效反应加速度法的计算精度。利用 ABAQUS 有限元程序建立动力时程分析模型，为减小边界效应的影响，土体两侧水平边界距地铁车站侧墙 20 倍的车站宽度，侧向采用等位移边界。为简化分析，假设地震动作用下，结构与土体不发生相对滑移，且结构与土体皆采用线弹性模型。

等效反应加速度法的计算模型与动力时程法保

持一致，同时调整模型侧边距为 3 倍的结构宽度，模型底部采用固定边界，侧面边界仅约束竖向位移。利用 SHAKE91 程序^[12]确定地震动作用下结构位置处土体自由场出现最大相对位移时刻的地层剪力，采用式 (1) 计算有效反应加速度，将有效反应加速度施加于等效反应加速度法计算模型。

为保持输入地震动的一致性，动力时程法与等效反应加速度法均从距地表 70 m 的基底处输入 El-Centro 波，地震波加速度时程曲线如图 3 所示。

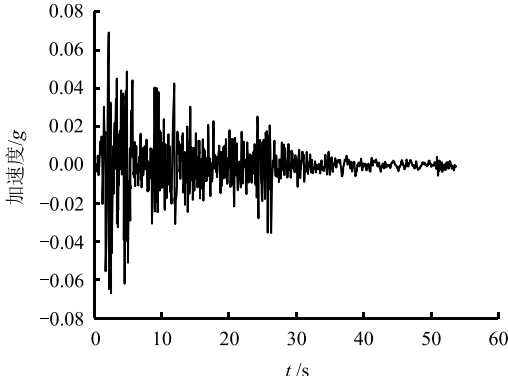


图 3 El-Centro 地震波
Fig.3 El-Centro seismic wave

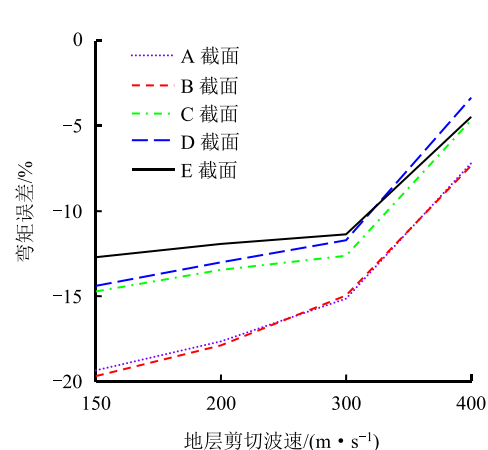
根据此前的震害调研成果^[13]，地铁车站结构在地震动作用下，中柱往往是最危险构件，且震害常集中在柱顶和柱脚（图 2 中的 A、B、C、D 截面）；同时，侧墙底端（图 2 中的 E 截面）往往是结构最大内力所在位置，因此取这 5 个控制截面作为内力观察截面，以其地震动附加弯矩及层间位移角为评价指标，探究等效反应加速度法在矩形地下结构中的适用性。

由图 4 中的曲线可知，不同地层参数下，等效反应加速度法整体计算精度尚可，分析误差可控制在 20% 以内，但计算所得内力及变形均明显偏小。从图 4 中曲线的变化趋势可以看出：随地层剪切波速的不断增大，等效反应加速度法内力及变形的计算精度均明显提高，因此等效反应加速度法更适用于地层剪切波速较大的场地。

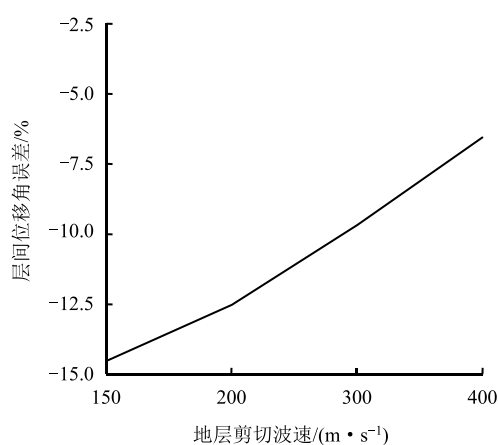
2.1.2 不同埋深

进一步探究不同埋深工况下，等效反应加速度法对于矩形地下结构的适用性。保持上文其他参数不变，固定地层剪切波速为 200 m/s，改变结构顶板埋深（埋深分别取 2、4、6、8、10 m），对比不同埋深工况下等效反应加速度法的计算精度。

由图 5 中曲线可知，不同埋深工况下，等效反应加速度法整体计算精度较高，但计算所得内力及



(a) 弯矩



(b) 层间位移角

图 4 不同地层参数下等效反应加速度法的计算误差

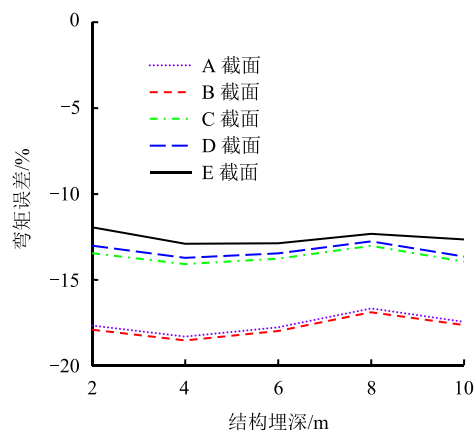
Fig.4 Calculation errors of equivalent response acceleration method with different ground parameters

变形依然普遍偏小。从图 5 中曲线的变化趋势可以看出：随结构埋深的变化，等效反应加速度法内力及变形的计算精度基本不变，因此等效反应加速度法的计算精度几乎不受结构埋深影响。

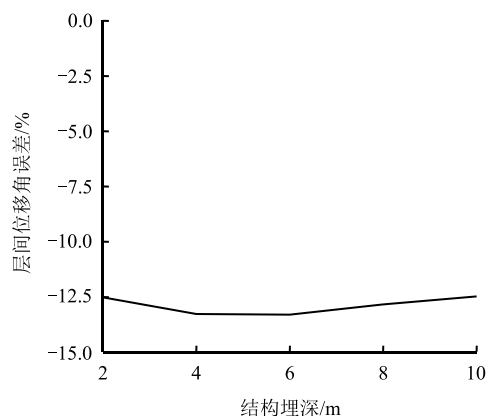
2.2 等效反应加速度法的误差分析

理论分析^[14]及数值模拟^[15]的研究结果均表明：等效反应加速度法中，采用剪应力差计算有效反应加速度作为等效地震荷载是合理的。然而，等效反应加速度法将自由场分析所得的有效加速度直接施加于地层-结构模型，即假定同一深度处土层及结构的动力响应均与相应位置处土层自由场的动力响应保持一致，这显然忽略了地下结构的存在对土体动力响应的影响^[16]。现通过分析地层-结构模型的动力响应特性，探究地下结构的存在对土体动力响应的干扰作用。

以 2.1.1 节算例中，地层剪切波速为 200 m/s、结构埋深为 2 m 的工况为例，绘制动力时程法最危



(a) 弯矩



(b) 层间位移角

图 5 不同埋深下等效反应加速度法的计算误差

Fig.5 Calculation errors of equivalent response acceleration method with different buried depths

险时刻土体及结构的加速度分布云图，见图 6(a)，为更详细地观察结构附近土体的动力响应特性，将车站两侧各 3 倍结构宽度范围内（图 6(a)中矩形框内）的加速度分布云图局部放大展示，如图 6(b)所示。图中， B 为结构宽度， H 为结构高度。

从图 6 可以看出，除结构附近小范围内的土体，其他区域的加速度云图基本呈水平层状分布，即同一深度处土层动力响应一致，故远离结构不受干扰的土体响应可近似看作自由场响应。通过图 6(b)进一步分析地下结构对其附近土体动力响应的影响，结果表明地下结构的干扰使其周围土体的动力响应明显不同于原自由场响应，图 6(b)中虚线矩形框内即为结构主要的影响区域（该区域的侧面边界距结构侧墙约 1.5 倍结构宽度，下部边界距结构底板约 1.0 倍结构高度，上部边界为地表），现将此区域定义为动力响应调整区。此区域外的土层动力响应几乎不受结构干扰，简称自由场响应区。分析其他工况最危险时刻土体及结构加速度分布结果，具有相

同规律。因此，等效反应加速度法关于土层与结构加速度分布的假定显然与真实地层-结构相互作用

模型的动力响应特性不符，这便是等效反应加速度法分析误差的主要来源。

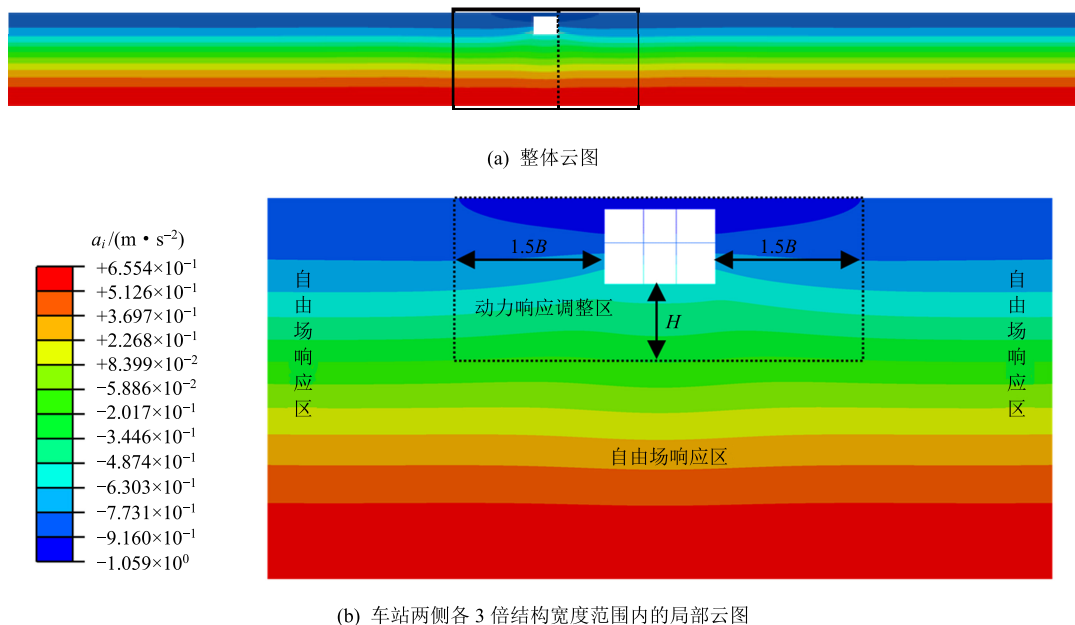


图 6 水平加速度分布云图

Fig.6 Distribution of horizontal acceleration

3 改进等效反应加速度法的提出

3.1 基本思想

现有等效反应加速度法在不同地层不同埋深工况下的计算结果普遍偏小，需提高其分析精度。为此，第 2 节系统地揭示了现有等效反应加速度法的误差来源。

针对现有等效反应加速度法的不足，通过分区施加有效加速度对现有等效反应加速度法进行改进优化。为进一步探究地下结构的存在对动力响应调整区内土体动力响应的具体影响，仍以 2.1.1 节算例中，地层剪切波速为 200 m/s、结构埋深为 2 m 的工况为例，提取最危险时刻地层-结构模型侧墙所处竖直断面（图 6(a)中虚线所示断面）的土体加速度，并与相同时刻自由场加速度进行对比，如图 7 所示。由图可以看出，动力响应调整区可分为两个区域：大致以结构侧墙中点为界，上部为动力响应增强区、下部为动力响应衰减区。动力响应增强区内结构的存在明显增强了其周围土体的动力响应，而动力响应衰减区内结构的存在明显削弱了其周围土体的动力响应。因此，等效反应加速度法在施加有效加速度时，应依据土体、结构的真实响应特征，对施加于模型各区域的有效加速度进行调整。

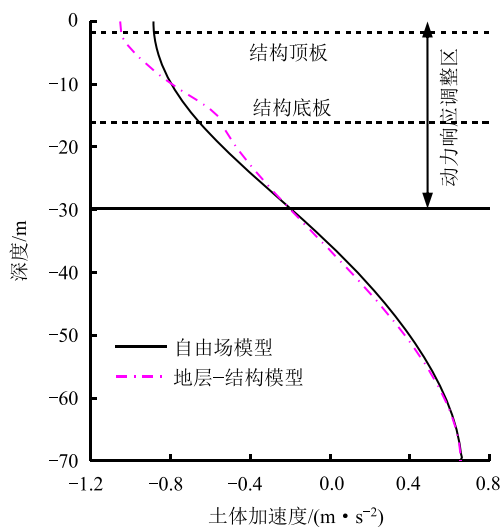


图 7 土体加速度响应对比

Fig.7 Comparison of soil acceleration response

改进等效反应加速度法的计算模型如图 8 所示，同现有等效反应加速度法计算模型，底部采用固定边界，侧面边界仅约束竖向位移，侧边距建议选取 3 倍及以上的结构宽度；根据上文分析结果，将计算模型分为 3 个区域：动力响应增强区、动力响应衰减区、自由场响应区，各区域的范围见图 8。对自由场响应区直接施加式 (1) 计算所得的有效加速度 a_i ，对动力响应增强区施加有效加速度 $(1+\beta) a_i$ ，对动力响应衰减区施加有效加速度 $(1-\beta) a_i$ ，其

中 β 为动力响应调整系数, 通过 β 均匀地调整动力响应调整区相应位置处的有效加速度, 从而考虑地

下结构的存在对动力响应调整区内土体的动力干扰作用。

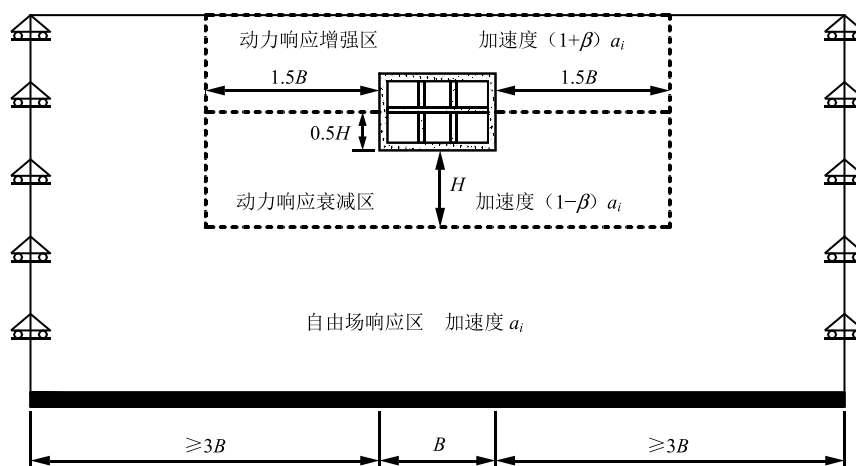


图 8 改进等效反应加速度法计算模型

Fig.8 Model of improved equivalent response acceleration method

3.2 动力响应调整系数 β 的确定

从 2.1 节等效反应加速度法的适用性评价结果可知, 等效反应加速度法的计算精度主要受地层剪切波速的影响, 与结构埋深无关。地层剪切波速直接决定土体刚度、场地特征周期 T_g (或场地主频 f_g)。保持结构及输入地震波不变, 改变地层剪切波速将改变地层-结构刚度比 F 、地震波主频 f_s 与土层场地主频 f_g 之比 f_s/f_g , 则等效反应加速度法的计算精度受刚度比 F 、频率比 f_s/f_g 的共同影响。因此, 动力响应调整系数 β 可看作土-结构刚度比 F 及频率比 f_s/f_g 的函数。

Wang^[17]对土-结构刚度比 F 做了如下定义:

$$F = \frac{GL}{HS_1} \quad (2)$$

式中: L 为结构长度; S_1 为结构顶底板产生单位相对位移所需要的力。

土层场地主频 f_g 可按式计算:

$$f_g = \frac{1}{T_g} = \frac{V_s}{4h} \quad (3)$$

式中: V_s 为土层剪切波速; h 为土层厚度。

足够的数值算例对归纳总结动力响应调整系数 β 与土-结构刚度比 F 及频率比 f_s/f_g 间的函数关系至关重要。鉴于工程实际, 选用 2.1.1 节算例中地层剪切波速为 200 m/s、结构埋深为 2 m 工况的计算参数, 针对土-结构刚度比 F 、频率比 f_s/f_g 两个参数综

合设计 5 组共 25 个算例。首先按频率比 f_s/f_g 分 5 个工况组, 通过输入不同频率的正弦波 (0.36、0.71、0.95、1.43、2.14 Hz) 以获取不同频率比 f_s/f_g 的工况组, 如表 2 所示。在每个工况组中, 通过改变结构的弹性模量 (0.25E、0.50E、E、2E、4E, 其中 E 为原车站的弹性模量) 以获取不同土-结构刚度比 F 的工况, 如表 3 所示。

表 2 不同频率正弦波对应工况组的频率比
Table 2 Frequency ratio of sine waves at different frequencies

地震波主频 f_s /Hz	场地主频 f_g /Hz	频率比 f_s/f_g
0.36	0.71	0.50
0.71	0.71	1.00
0.95	0.71	1.33
1.43	0.71	2.00
2.14	0.71	3.00

表 3 不同结构刚度对应工况的土-结构刚度比
Table 3 Stiffness ratio of different structure stiffness

结构弹性模量	土层剪切波速/(m·s ⁻¹)	土-结构刚度比 F
0.25E	200	26.44
0.50E	200	13.22
E	200	6.61
2E	200	3.31
4E	200	1.65

以结构层间位移角计算误差为评价指标, 通过数值分析, 获取各工况层间位移角计算误差为 0 时对应的动力响应调整系数 β , 按照不同工况组绘制动力响应调整系数 β 与土-结构刚度比 F 的关系曲

线,如图 9 所示。在应用改进等效反应加速度法时,便可依据土-结构刚度比 F 、频率比 f_s/f_g ,通过图 9 确定相应的动力响应调整系数 β ,将自由场地震反应分析获取的最不利有效加速度分区调整,从而考虑地下结构对动力响应调整区内土体动力响应的影 响,使得等效反应加速度法的分析结果更为真实可靠。

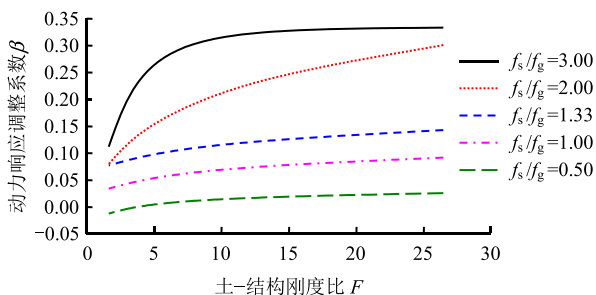


图 9 不同频率比 f_s/f_g 时,动力响应调整系数 β 与土-结构刚度比 F 的关系图

Fig.9 Relationships among the dynamic response adjustment coefficient β , the soil-structure stiffness ratio F and the frequency ratio f_s/f_g

图 9 中,其他频率比 f_s/f_g 对应的动力响应调整系数 β 可利用线性差值近似确定;当频率比 f_s/f_g 、土-结构刚度比 F 均较小时,动力响应调整系数 β 可能为负值,此时动力响应增强区的有效加速度将小于其自由场的有效加速度,动力响应衰减区的有效加速度将大于其自由场的有效加速度。

4 改进等效反应加速度法的适用性评价

为了验证改进等效反应加速度法的修正效果,首先基于 2.1 节算例的模型参数及计算工况,同样以动力时程法为基准,探究等效反应加速度法在不同地层条件、不同埋深下相对于现有等效反应加速度法的优势。此外,选用 2.1.1 节算例中地层剪切波速为 200 m/s、结构埋深为 2 m 工况的计算参数,通过改变输入地震波,进一步探究改进等效反应加速度法在不同地震波作用下更为广泛的适用性。

4.1 不同地层条件

根据不同地层工况的土-结构刚度比 F 及频率比 f_s/f_g ,利用图 9 所示曲线,确定各地层工况的动力响应调整系数 β ,见表 4。

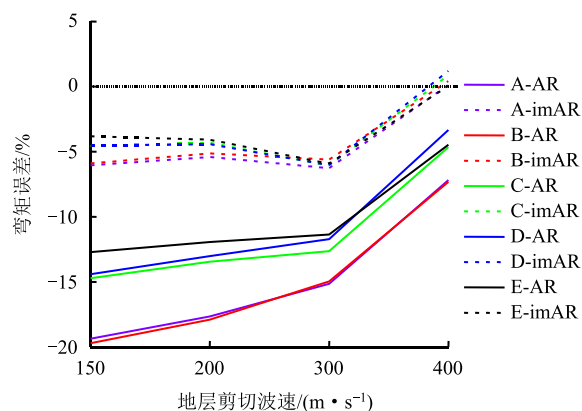
利用表 4 中的动力响应调整系数 β ,采用改进等效反应加速度法对 2.1.1 节中不同地层工况进行分析,通过与现有等效反应加速度法分析结果对比,验证引入动力响应调整系数 β 的修正效果。

表 4 不同地层工况的动力响应调整系数 β

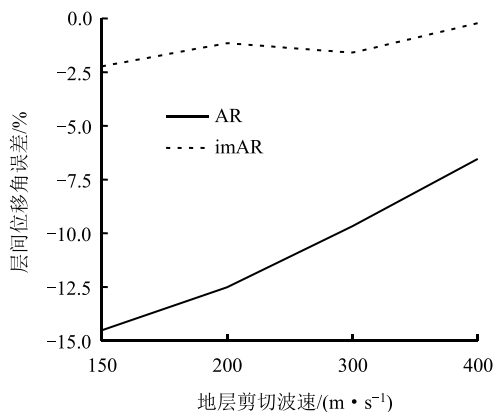
Table 4 Dynamic response adjustment coefficient β of different ground parameters

地层类别	剪切波速 $v_s/(m \cdot s^{-1})$	土-结构刚 度比 F	频率比 f_s/f_g	动力响应调 整系数 β
地层 1	150	3.72	2.74	0.22
地层 2	200	6.61	2.06	0.19
地层 3	300	14.87	1.37	0.13
地层 4	400	26.43	1.03	0.10

由图 10 中曲线可知,不同地层参数下,改进等效反应加速度法的计算精度明显优于现有等效反应加速度法:弯矩的最大计算误差从 19.70%降至 5.90%;改进后结构层间位移角的最大计算误差也从 14.52%降至 2.23%,分析精度显著提高。同时,改进等效反应加速度法内力及变形的计算精度受地层剪切波速的影响更小。因此,动力响应调整系数 β 的修正效果较好;相比于现有等效反应加速度法,改进等效反应加速度法的计算精度及稳定性均得到了极大提高。图中,曲线的命名规则为“A-AR (A-imAR)”中的“A”表示 A 截面,“AR (imAR)”表示等效反应加速度法(改进等效反应加速度法),以此类推。



(a) 弯矩



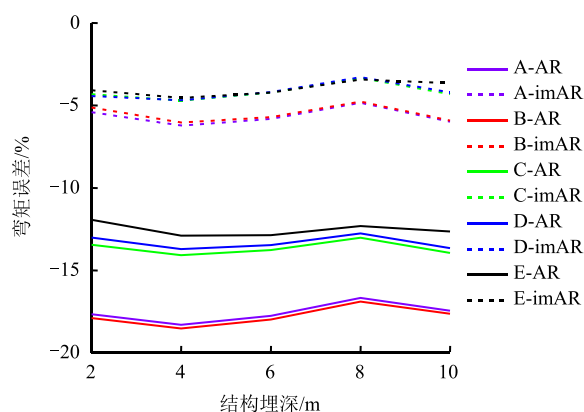
(b) 层间位移角

图 10 改进前后不同地层参数的计算误差对比
Fig.10 Calculation error comparison between two methods with different ground parameters

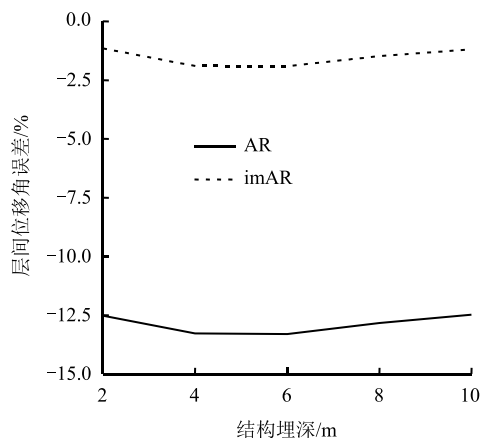
4.2 不同埋深

第 2 节等效反应加速度法的适用性评价结果表明：现有等效反应加速度法的计算精度几乎不受结构埋深的影响，因此假定动力响应调整系数 β 与结构埋深无关。采用改进等效反应加速度法对 2.1.2 节不同埋深工况进行分析，由表 4 可知，动力响应调整系数 β 统一取 0.19，通过与现有等效反应加速度法分析结果对比，验证关于动力响应调整系数 β 与结构埋深无关的假定是否合理，并探讨不同埋深工况下改进等效反应加速度法的适用性。

由图 11 中曲线的对比结果可以看出，改进后等效反应加速度法的计算精度明显提高：弯矩的计算误差普遍降至 5% 左右，层间位移角的计算误差降至 2% 以内；同时，内力及变形的计算精度几乎不受结构埋深影响。因此，对不同埋深工况选用同一动力响应调整系数 β 可获得稳定且精度较高的分析结果，再次证明动力响应调整系数 β 与结构埋深无关，同时也表明不同埋深条件下改进等效反应加速度法的适用性较好。



(a) 弯矩



(b) 层间位移角

图 11 改进前后不同埋深的计算误差对比

Fig.11 Calculation error comparison between two methods with different overburden depths

4.3 不同地震波作用

为探究不同地震波作用对改进等效反应加速度法适用性的影响，选用 2.1.1 节算例中，地层剪切波速为 200 m/s、结构埋深为 2 m 工况的计算参数，在模型底部边界输入不同地震波，除了 2.1 节采用的 El-Centro 波（主频为 1.47 Hz），另外选取 3 条频率成分不同的地震波：Chichi-TCU087 地震波（简称 CCT 波，主频为 0.46 Hz）、厦门人工波（简称 XM 波，主频为 1.16 Hz）、Chichi-HAW026 地震波（简称 CCH 波，主频为 1.98 Hz），为保持输入地震动强度相同，各地震波峰值加速度均与上文的 El-Centro 波保持一致。根据土-结构刚度比 F 及频率比 f_s/f_g ，利用图 9 所示曲线，确定各工况的动力响应调整系数 β ，见表 5。

表 5 不同地震波工况的动力响应调整系数 β
Table 5 Dynamic response adjustment coefficient β of different seismic waves

地震波	地震波主频 f_g /Hz	场地主频 f_s /Hz	频率比 f_s/f_g	土-结构刚度比 F	动力响应调整系数 β
CCT 波	0.46	0.71	0.65	6.61	0.03
XM 波	1.16	0.71	1.63	6.61	0.14
El-Centro 波	1.47	0.71	2.06	6.61	0.19
CCH 波	1.98	0.71	2.79	6.61	0.27

利用表 5 中的动力响应调整系数 β ，采用改进等效反应加速度法对不同地震波作用下的结构响应进行分析，并与动力时程法、现有等效反应加速度法的计算结果对比分析。以动力时程法为基准，通过对比等效反应加速度法改进前后的计算误差，验证改进等效反应加速度法对于不同地震波作用是否有普遍的适用性。

由图 12 中对应曲线可以看出，随地震波主频的增大，现有等效反应加速度法的计算误差（图中实线）整体呈上升趋势，即现有等效反应加速度法更适宜应用于频率比 f_s/f_g 较小的工况。而改进等效反应加速度法通过引入动力响应调整系数 β ，极大地降低了计算误差。从图 12 中曲线的对比结果可以看出，改进等效反应加速度法的计算误差（图中虚线）明显小于现有等效反应加速度法（图中实线），且地震波频率越高（即频率比 f_s/f_g 越大），计算精度提升越明显。因此，动力响应调整系数 β 在各种地震波作用下的修正效果均较好，即相比现有方法，改进等效反应加速度法可明显提高不同地震波作用下结构内力及变形的计算精度。

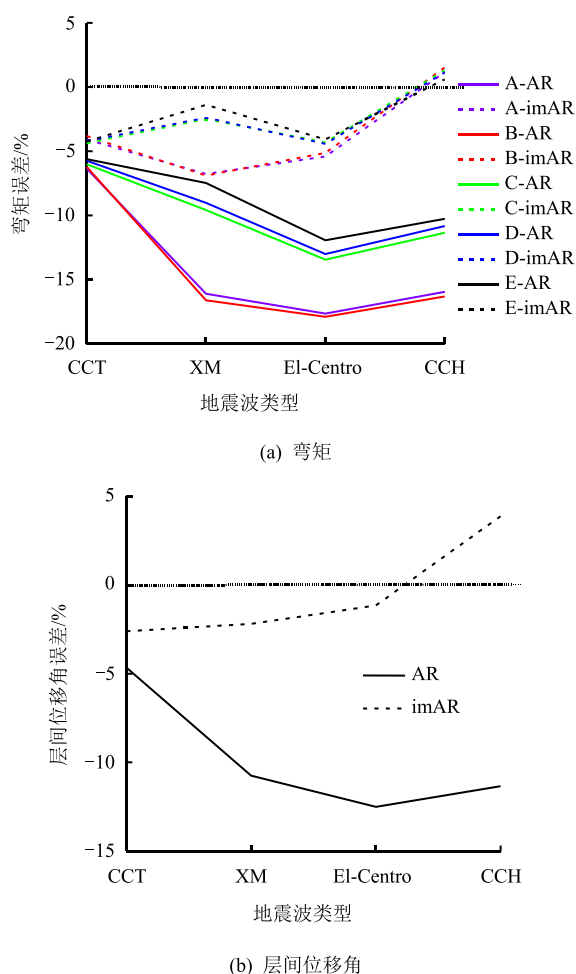


图 12 改进前后不同地震波作用下的计算误差对比
Fig.12 Calculation error comparison between two methods with different seismic waves

5 结 论

(1) 等效反应加速度法的计算精度随地层剪切波速的增大整体呈上升趋势, 而几乎不受结构埋深影响。

(2) 等效反应加速度法分析误差主要源于它忽略了地下结构对其周围土体动力响应的干扰作用, 未对自由场有效反应加速度进行修正。

(3) 通过引入动力响应调整系数 β , 考虑结构对土体的动力干扰作用, 提出了改进等效反应加速度法; 并通过大量算例分析归纳了动力响应调整系数 β 与土-结构刚度比 F 及频率比 f_s/f_g 的函数关系。

(4) 相比现有等效反应加速度法, 改进等效反应加速度法可明显提高地下结构横向抗震的分析精度, 并对不同地层、不同埋深、不同地震波均具有广泛的适用性。

参 考 文 献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综

述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.

Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2015, 28(5): 1-65.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50909—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.

Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. GB50909—2014 Code for seismic design of urban rail transit structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[3] 上海市城乡建设和交通委员会. DG/TJ08—2064—2009. 地下铁道建筑结构抗震设计规范[S]. 上海: [出版者不详], 2009.

Shanghai Municipal Urban Rural Construction Transportation Commission. DG/TJ08—2009 Code for seismic design of subway structures[S]. Shanghai: [s. n.], 2009.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 禹海涛, 张正伟, 李攀, 等. 土岩变化地层长隧道纵向地震响应解析解[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1244-1250.

YU Hai-tao, ZHANG Zheng-wei, LI Pan, et al. Analytical solution for longitudinal seismic responses of long tunnels crossing soil-rock stratum[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(7): 1244-1250.

[7] 禹海涛, 袁勇. 长大隧道地震响应分析与试验方法新

- 进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 19-35.
- YU Hai-tao, YUAN Yong. Review on seismic response analysis and test methods for long and large tunnels[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(10): 19-35.
- [8] 禹海涛, 张敬华, 袁勇, 等. 盾构隧道-工作井节点振动台试验设计与分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 183-192.
- YU Hai-tao, ZHANG Jing-hua, YUAN Yong, et al. Design and analysis of shaking table test on shield tunnel-shaft junction[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2017, 30(8): 183-192.
- [9] 片山幾夫, 足立正信, 嶋田穰, 等. 地下埋設構造物の実用的な準動的解析法「応答震度法」の提案[C]//土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集第 1 部門. 东京: 土木学会, 1985.
- KATAYAMA. A proposal for a practical quasi-dynamic response to seismic intensity method for buried structures[C]//Proceedings of the 40th Annual Lecture of the Civil Society Section 1. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 1985.
- [10] 张景, 何川, 耿萍, 等. 地下结构反应位移法的两种简化分析途径及应用[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(4): 248-253.
- ZHANG Jing, HE Chuan, GENG Ping, et al. Two simplified analysis processing and their application of underground structure seismic deformation method[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2014, 34(4): 248-253.
- [11] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构横截面抗震设计分析方法综述[J]. 施工技术, 2010, 39(6): 91-95.
- LIU Jing-bo, WANG wen-hui, ZHAO Dong-dong. Review of methods for seismic design and analysis of underground structure cross-section[J]. **Construction Technology**, 2010, 39(6): 91-95.
- [12] IDRIS I M, SUN J. User's manual for SHAKE91-A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits center for geotechnical modeling[M]. Davis, California: Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, 1992.
- [13] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. **Soils and Foundations**, 1996, 36(Special): 283-300.
- [14] 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 Zheng-fang, CAI Bao-zhan, YAO Yi-chao, 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.
- [15] 宾佳. 地下结构地震作用的简化分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- BIN Jia. Study on the simplified analysis methods of seismic effects of underground structures[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [16] 陈国兴, 庄海洋, 徐烨. 软弱地基浅埋隧洞对场地设计地震动的影响[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 739-744.
- CHEN Guo-xing, ZHUANG Hai-yang, XU Ye. A study on influence of excavated shallow tunnel on design parameters of ground motion in the soft site[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 739-744.
- [17] WANG J N. Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach[M]. New York: Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc., 1993.