

DOI:10.11918/201906201

利用双参数地基模型修正反应位移法弹簧

邱滢佳,张鸿儒,于仲洋

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘要:为得到一种模型简单、计算精度高,且能更好反映土-结构相互作用的地下结构抗震设计方法,根据双参数地基模型的原理,用比传统单参数模型更加接近土体性质的双参数模型简化土体,并根据受力和变形特性对双参数计算模型进行简化,最终得到能考虑土体间相互作用的修正反应位移法。修正方法计算模型与传统反应位移法相比,仅仅是法向弹簧的基床系数进行了一定的修正,仍然是一种模型简单的计算方法。建立数值模型进行分析,以动力时程计算结果为基准,并与传统反应位移法作对比验证修正方法的正确性。结果表明,相比传统采用离散弹簧模拟土体的反应位移法,修正方法的内力及变形误差能减小一半左右,由此得到修正方法是一种模型简单且计算精度较高的设计方法,能够应用到地下结构抗震设计中。

关键词:地下结构;抗震设计;拟静力方法;反应位移法;双参数模型

中图分类号: TU92

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)05-0148-08

Modified the spring of response displacement method using two-parameter foundation model

QIU Yanjia, ZHANG Hongru, YU Zhongyang

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To obtain a seismic design method for underground structures, which has simple model with higher accuracy and can better reflect the soil-structure interaction, this paper presents a modified response displacement method. The two-parameter foundation model was adopted to simplify the soil, which is closer to the soil properties than the traditional single-parameter foundation model. Based on the force and deformation properties, the two-parameter computational model was simplified, and the modified response displacement method was obtained, which considers soil-structure interaction. Compared with the traditional model, the proposed model only modifies the foundation bed coefficient of normal spring, making it still a simple computational model. In addition, a numerical model was established to verify the correctness of the modified method and compared with the traditional response displacement method based on the results of dynamic time-history calculation. Results show that the error of the modified method could be reduced by half compared with the traditional response displacement method. Therefore, the proposed method has simple model and high computational accuracy, which can be applied in the seismic design of underground structures.

Keywords: underground structures; seismic design; quasi-static method; response displacement method; two-parameter model

从20世纪70年代,日本学者提出反应位移法^[1]以来,反应位移法由于理论严谨、模型简单的特点逐渐成为实际工程中应用最广泛的拟静力方法之一,并且是国家规范^[2-4]建议的方法之一,但是该方法也存在一定的缺陷。安军海等^[5]总结了反应位移法的几个关键问题,其中非常重要的一个就是土弹簧刚度的确定方法。反应位移法采用部分近似条件将离散的地基弹簧模拟土层,计算结果存在一定误差^[6]。已有研究表明,反应位移法在计算结构变

形时误差可达30%,计算结构内力时最大误差接近40%^[7]。为了解决反应位移法计算误差偏大的问题,大量学者对反应位移法进行了修正。董正方等^[8]提出基于土层位移差的反应位移法,该方法适用于埋深较大地下结构;宾佳等^[9]利用土-结构相互作用系数法的原理修正反应位移法,提出了基于变形修正的反应位移法,该方法能较好地提高反应位移法计算精度,但在计算中还需要考虑土-结构相互作用系数,会增加计算量。这两种方法在一定程度上提高了反应位移法计算精度,但都没有解决土弹簧刚度确定的问题。

为了忽略土弹簧计算带来的误差,部分学者提出通过直接建立土-结构分析模型来反映土-结构

收稿日期: 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(51678042)

作者简介: 邱滢佳(1994—),男,博士研究生;

张鸿儒(1959—),男,教授,博士生导师

通信作者: 邱滢佳,17115316@bjtu.edu.cn

间相互作用. 刘晶波等^[10-13]提出的整体式反应位移法、整体强制反应位移法都是直接建立土-结构分析模型的计算方法. 这一类方法计算精度明显高于传统反应位移法, 但引入土单元会使简单的反应位移法模型复杂化.

本文从另外一个思路出发修正反应位移法, 用更接近土体性质的双参数地基模型简化土层, 得到一种相比传统反应位移法更加精确, 又比整体式反应位移法、整体强制反应位移法模型更加简单的地下结构抗震设计方法.

1 弹簧修正原理及修正方法计算过程

目前反应位移法已发展了多种计算形式, 不同规范给出的计算模型也不相同, 刘晶波等^[14]以大开车站为案例, 对比分析了不同规范中反应位移法的计算精度, 结果表明《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[2]中的反应位移法模型更加合理.

规范^[2]建议的反应位移法模型(见图1)将地震对结构的作用分为3部分, 即结构顶底及侧墙剪力、结构惯性力以及侧墙自由场变形. 其中结构顶底剪力、结构惯性力、自由场变形均可由一维场地反应分析得到, 侧墙剪力取结构顶底剪力的均值^[15], 同时反应位移法将周围土体简化成离散弹簧. 丁德云等^[16]总结并对比分析了离散弹簧的各种计算方法. 将土体简化成离散弹簧的方法虽然简单, 却不能反映土体间的相互作用, 影响结构的内力响应.

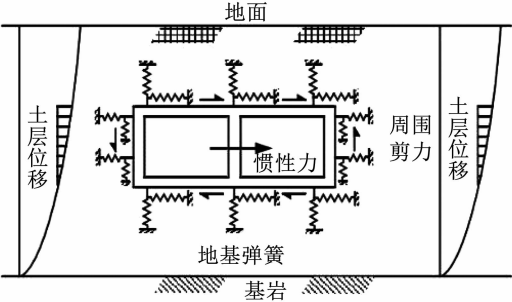


图1 反应位移法示意

Fig. 1 Schematic diagram of response displacement method

双参数模型是一种能反映土体间作用的地基模型, 本文利用双参数地基模型原理对传统反应位移法的土弹簧进行修正, 以考虑土体间的相互作用.

1.1 双参数模型及修正弹簧的原理

常见的双参数模型有 Filonenko-Boorodich 模型、Hetenyi 模型和 Pasternak 模型^[17](见图2). 三者都用弹簧模拟土体的抗压性质, 这与温克尔地基模型相同, 但都增加了一个剪切参数来模拟土体之间的作用. 3种模型本质是相同的, 本文分析计算采用弹簧加剪切层的 Pasternak 模型.

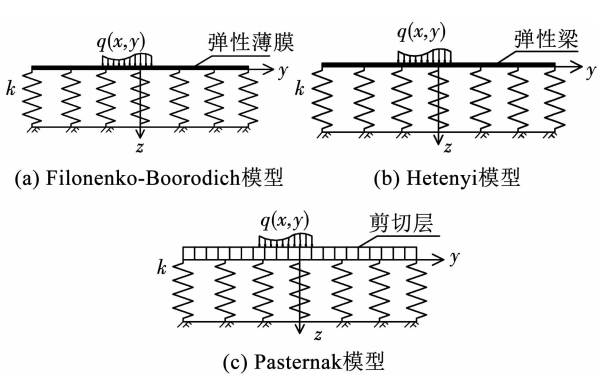


图2 双参数模型

Fig. 2 Schematic diagram of two-parameter model

以结构底板为例, 土体是摩擦性材料不受拉, 可不考虑底板平面以上土层对底板弹簧的影响(见图3模型A). 传统反应位移法将底板外土层简化成离散弹簧, 底板两侧弹簧不受力可直接去除(见图3模型B、C), 这样的简化方法会忽略底板两侧土体对结构的作用. 采用 Pasternak 模型(见图3模型D), 在剪切层的作用下底板两侧压缩弹簧受力不能直接去除, 能模拟两侧土体对结构的作用.

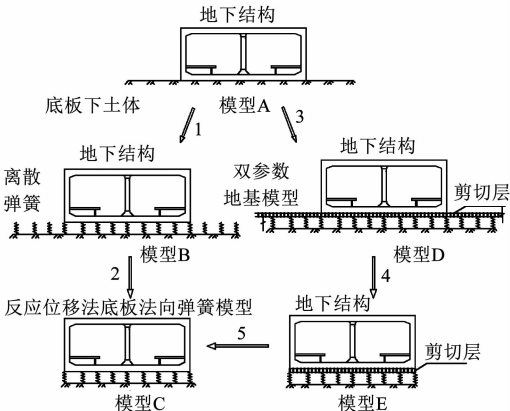


图3 弹簧的简化过程示意

Fig. 3 Schematic diagram of simplified process of spring

为了简化模型, 经过分析可通过修正底板压缩基床系数去除底板两侧的弹簧(见图3模型E). 以底板边缘点处弹簧为例, 修正原理如图4所示, 在同样大小集中力 F_1 、 F_2 作用下, 模型1结构底板位置的变形与简化后的模型2相同.

张载^[17]给出 Pasternak 模型在条形荷载作用下变形公式:

$$w(y) = \begin{cases} w_0 e^{\sqrt{\frac{K_s}{G_s}}(y+b)}, & y \leq -\frac{b}{2}, \\ w_0 e^{-\sqrt{\frac{K_s}{G_s}}(y-b)}, & y \geq \frac{b}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $w(y)$ 为任意点变形; w_0 为力作用点下的变形; b 为力的作用范围, 由于是集中力可取 0; K_s 为压缩基床系数; G_s 为剪切层剪切基床系数, 当满足最小

势能原理时, $G_s = K_s$.

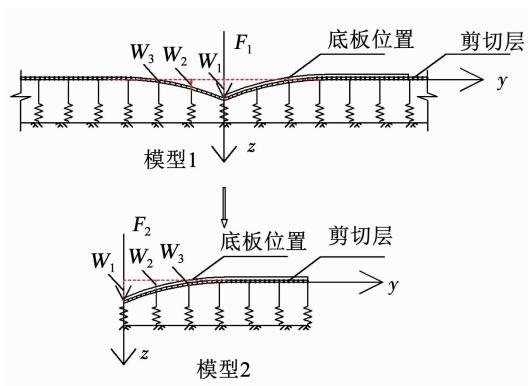


图 4 双参数模型简化原理

Fig. 4 Principle of simplifying two-parameter model

模型 1 与模型 2 变形相同, 则有模型 1、2 竖向反力 F_1 、 F_2 为

$$F_1 = K_s \times B \times l \times w_1 + 2 \times K_s \times B \times l \times w_2 + \dots, \quad (2)$$

$$F_2 = K \times B \times l \times w_1 + K \times B \times l \times w_2 + \dots. \quad (3)$$

式中: K 为修正后的压缩基床系数; l 为压缩弹簧的间隔; B 为计算单元的宽度, 二维模型取 1 m.

由模型 1、2 竖向反力 F_1 、 F_2 相等得

$$K = \frac{K_s \times w_1 + 2 \times K_s \times w_2 + 2 \times K_s \times w_3 + \dots}{w_1 + w_2 + w_3 + \dots}. \quad (4)$$

当弹簧的间距 l 足够小, 上述求和公式就可以转换成积分, 得

$$K = \frac{K_s \times 2 \times \int_0^{+\infty} w \times e^{-y} dy}{\int_0^L w \times e^{-y} dy} = \frac{2K_s}{(1 - e^{-L})}. \quad (5)$$

式中 L 为模型 2 的宽度, 即底板宽度.

利用同样的方法得到其他位置的基床系数修正公式为

$$K = \frac{K_s \times 2 \times \int_0^{+\infty} w \times e^{-y} dy}{\int_{-a}^{L-a} w \times e^y + \int_0^{+\infty} w \times e^{-y} dy} = \frac{2K_s}{(2 - e^{-a} - e^{-(L-a)})}. \quad (6)$$

式中 a 为修正点到底板角点的距离.

由于结构底板的剪切刚度远大于双参数模型剪切层剪切刚度, 在计算中可忽略底板下剪切层的作用, 得到修正后底板外法向弹簧模型 (见图 3 模型 C), 修正模型与传统模型相比除了对弹簧系数进行了修正其他一样.

1.2 双参数模型的压缩基床系数确定方法

从式(6)可以看出, 修正基床系数 K 是双参数模型压缩基床系数 K_s 的函数, K_s 的确定是修正模

型非常重要的一步. 其确定原理是在相同荷载作用下, 采用不同的模型只会影响受力和变形的分布, 不会改变地基土体整体的受力和变形.

目前, 规范中有两种离散地基弹簧的计算方法. 其中更为精确且应用更广泛的是有限元方法, 本文 K_s 的确定方法就基于该方法. 有限元计算离散地基弹簧基床系数 K_1 的公式为

$$K_1 = \frac{p}{\bar{x}}. \quad (7)$$

式中: p 为底板土体处施加的法向压强, $\bar{x}$ 为底板土体法向变形的均值.

控制双参数模型变形、受力与有限元计算结果相同, 即

$$p = \frac{\int_0^L \frac{2K_s}{(2 - e^{-a} - e^{-(L-a)})} \times \bar{x} da}{L}. \quad (8)$$

由式(7)和(8)得

$$K_s = \frac{K_1 L}{\int_0^L \frac{2}{(2 - e^{-a} - e^{-(L-a)})} da}. \quad (9)$$

式(9)为本文建议的双参数模型压缩基床系数 K_s 的计算公式, 将其代入式(6)中就能得到反应位移法模型任意位置的修正基床系数.

1.3 修正反应位移法的计算过程

修正反应位移法计算过程与传统反应位移法基本相同, 分为 3 步: 1) 利用 SHAKE91、EERA^[18-19] 等进行场地反应分析. 得到结构位置处土层变形、剪力和加速度; 2) 求解模型的弹簧系数. 模型的剪切弹簧直接利用规范中的有限元方法计算, 法向弹簧利用本文的修正方法计算; 3) 建立模型并施加弹簧和地震荷载. 其中顶、底板、侧墙剪力以及结构惯性力的施加方法与传统反应位移法相同. 侧墙的土层变形可直接施加在修正弹簧的远离结构一侧, 也可转化为由自由场变形乘以修正后弹簧系数得到的等效力.

2 修正反应位移法的验证

地下结构抗震设计分析方法主要可分为动力时程分析方法和拟静力分析方法 (包含反应位移法) 两类, 其中动力时程方法是在时域内直接计算地震反应过程中土-结构的动力相互作用的分析方法, 其能够计算地震反应过程中各时刻结构的内力和变形响应, 计算精度高. 为了验证本文提出的修正方法计算精度高于传统反应位移法, 以动力时程的计算结果为准对比两种方法.

2.1 车站结构

以标准断面为单层和双层的车站结构验证修正方法的正确性,其中单层车站为单层双跨结构,车站宽度为12 m,高度为6.2 m;双层车站为双层三跨结构,宽度为20.3 m,高度为12.4 m,具体的构件尺寸见图5。

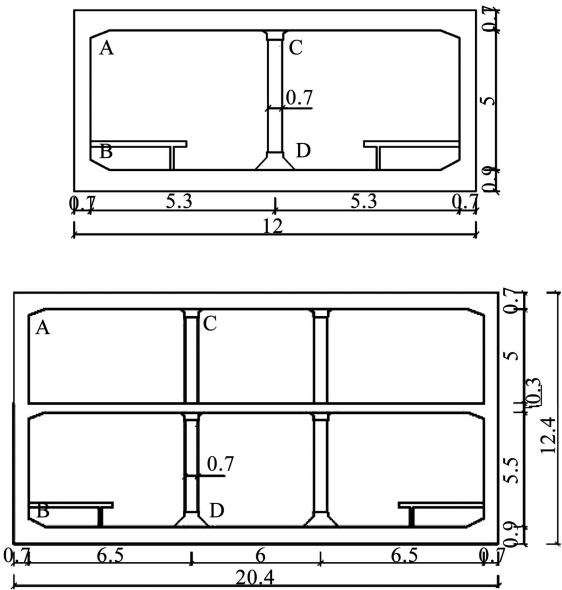


图5 计算模型的断面(单位:m)

2.2 动力时程法

采用线性动力时程分析方法,单层结构模型计算尺寸为200 m×50 m(见图6),双层结构模型计算尺寸为400 m×80 m.采用四节点平面应变减缩积分实体单元模拟土体介质,采用梁单元模拟结构构件.场地土与地铁车站结构之间的法向接触采用“硬”接触的方式,即当场地土与地下结构之间出现拉力时,场地土与地下结构间的接触面将立即分离;切向接触服从Coulomb摩擦定律,当接触面上剪应力大于它们之间的摩擦力时,将发生土体相对地下结构的切向滑动,计算过程中不同模型各个接触面摩擦系数均取0.45。

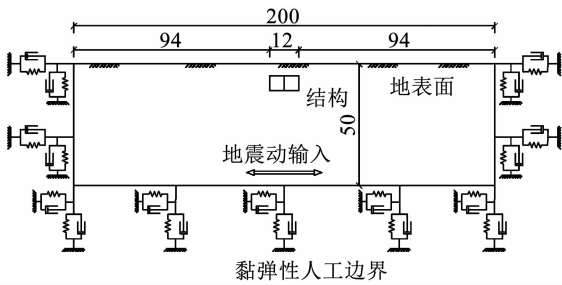


图6 单层结构动力时程模型(单位:m)

Fig. 6 Dynamic time-history model of single-layer structures (unit: m)

场地土为单一饱和黏性土,并采用等效线性动力本构,即用黏弹性 Kelvin 模型来反映土体在周期荷载下的滞回性^[20].剪切模量比、阻尼比和剪应变关系曲线如图7所示.车站结构为C40混凝土,用弹性本构模拟.采用刘晶波等^[21]提出的黏弹性动力人工边界,该人工边界是在模型边界施加弹簧和阻尼系统以达到耗散和吸收散射波的目的,法向和切向弹簧阻尼参数计算公式为

法向边界

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho c_p. \tag{10}$$

切向边界

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho c_s. \tag{11}$$

式中: K_{BN} 与 K_{BT} 分别为弹簧法向与切向刚度; R 为波源至人工边界点的距离; c_s 和 c_p 分别为S波和P波波速; G 为介质剪切模量; ρ 为介质质量密度; α_T 与 α_N 分别为切向与法向黏弹性人工边界参数,取值如表1所示。

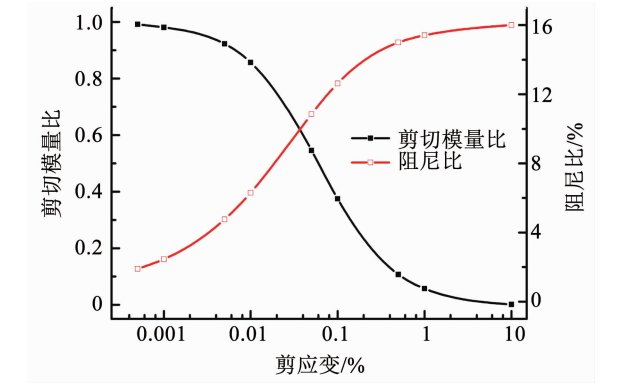


图7 剪切模量比、阻尼比与剪应变关系

Fig. 7 Relation between shear strain, shear modulus, and damping ratio

表1 黏弹性人工边界参数取值

Tab. 1 Parameters of viscoelastic artificial boundary		
参数	取值范围	建议值
α_N	0.80 ~ 1.20	1.0
α_T	0.35 ~ 0.65	0.5

选用一个实际发生的地震波(El-Centro波)和一个人工合成波(北京人工波)作为地震输入波分析不同地震输入波对传统方法及修正方法计算精度的影响.El-Centro波和北京人工波原始波形与频谱分析见图8,其中El-Centro频谱曲线主要分布在低频区,北京人工合成波分布较为均匀,两者对比可分析输入波的频谱特性对修正方法计算精度的影响。

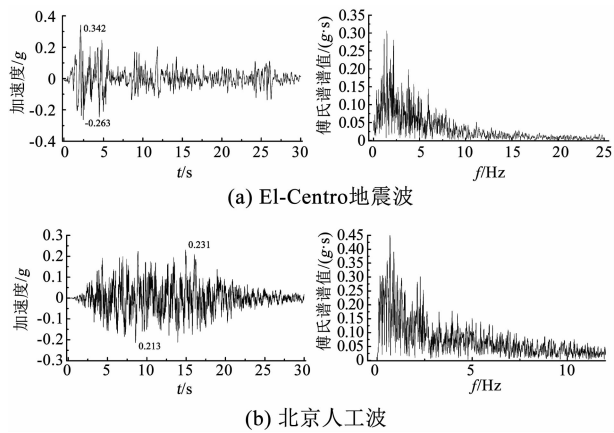


图 8 地震波原始波形和频谱分析

Fig. 8 Original seismic waves and spectrum analysis

2.3 反应位移法计算参数的获取及计算工况

由于本文计算工况较多,不同工况下的反应位移法计算参数不同.以工况 1 为例计算传统反应位移法和修正方法的参数,其他工况的参数用相同方法获取.首先利用 EERA 进行场地反应分析,得到埋深 2 m,地表峰值加速度为 0.2g 时,结构位置处土层变形、剪力和加速度,这一步修正方法与传统反应位移法相同.然后利用有限元方法(见图 9)得到结构四周弹簧的基床系数,有限元的计算范围与动力时程的计算范围相同.

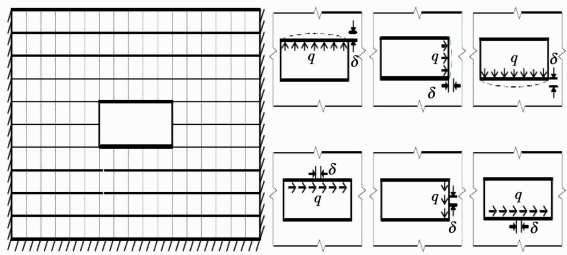


图 9 有限元方法计算基床系数

Fig. 9 Finite element method for calculating foundation bed coefficient

利用上述有限元方法得到的基床系数,是传统反应位移法采用的基床系数 K_1 ;根据式(9)得到双参数模型压缩基床系数 K_s ;最后利用式(6)得到修正模型任意点弹簧的修正基床系数 K .工况 1 的传统及修正基床系数见表 2,其中 a 为弹簧位置到构件角点的距离.

表 2 传统及修正基床系数 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$

Tab. 2 Traditional and modified foundation bed coefficients

弹簧位置	传统基床系数 K_1	双参数基床系数 K_s	修正基床系数 K
顶板法向	850.6	685.6	$\frac{1\,371.2}{(2 - e^{-a} - e^{-(12-a)})}$
板切向	363.4	—	363.4
侧墙法向	5\,856.5	4\,720.3	$\frac{9\,440.6}{(2 - e^{-a} - e^{-(6.2-a)})}$
侧墙切向	2\,952.2	—	2\,952.2
底板法向	3\,519.4	2\,836.6	$\frac{5\,673.2}{(2 - e^{-a} - e^{-(12-a)})}$
底板切向	2\,173.1	—	2\,173.1

通过改变土体剪切波速、地震强度、结构埋深、结构层数和地震输入波验证修正方法在不同条件下的适用性和计算精度,具体的计算工况见表 3.

2.4 计算结果及分析

本文计算工况较多,由于篇幅的限制,只给出第一组工况的内力表(表 4),其他几组工况的结果均以内力误差图的形式给出.

图 10~14 给出各种工况下,以动力时程计算结果为基准,传统反应位移法和本文修正方法的内力及变形误差对比.综合对比图 10~14 可以得出,相比传统反应位移法,修正方法的结果更加接近动力时程的计算结果,整体误差能减小一半左右.

表 3 计算工况

Tab. 3 Calculation conditions

组别	工况编号	峰值加速度/g	土体剪切波速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	结构埋深/m	结构类型	地震输入波	分析因素
一	1	0.2	250	2	单层	El-Centro	结构埋深
	2	0.2	250	5			
	3	0.2	250	10			
二	4	0.2	200	5	单层	El-Centro	土体剪切波速
	2	0.2	250	5			
	5	0.2	300	5			
三	6	0.1	250	5	单层	El-Centro	地震强度
	2	0.2	250	5			
	7	0.3	250	5			
四	8	0.1	250	5	双层	El-Centro	结构层数
	9	0.2	250	5			
	10	0.3	250	5			
五	11	0.1	250	5	双层	北京人工波	地震输入波
	12	0.2	250	5			
	13	0.3	250	5			

表 4 不同埋深 3 种方法计算结果

Tab. 4 Calculation results of different depths using three methods

埋深/m	计算方法	侧墙顶部弯矩/(kN·m)	侧墙底部弯矩/(kN·m)	中柱顶部弯矩/(kN·m)	中柱底部弯矩/(kN·m)	结构顶底相对变形/mm
2	动力时程法	96.7	156.4	77.5	78.2	1.13
	传统反应位移法	116.3	168.6	87.2	89.6	1.32
	修正方法	105.0	162.8	84.7	85.2	1.23
5	动力时程法	184.6	253.1	122.0	124.6	1.57
	传统反应位移法	198.9	272.9	133.3	140.9	1.78
	修正方法	188.1	248.9	129.7	132.5	1.67
10	动力时程法	330.2	428.3	211.5	217.9	3.36
	传统反应位移法	362.3	477.6	231.3	234.0	3.56
	修正方法	340.1	441.6	228.7	231.1	3.52

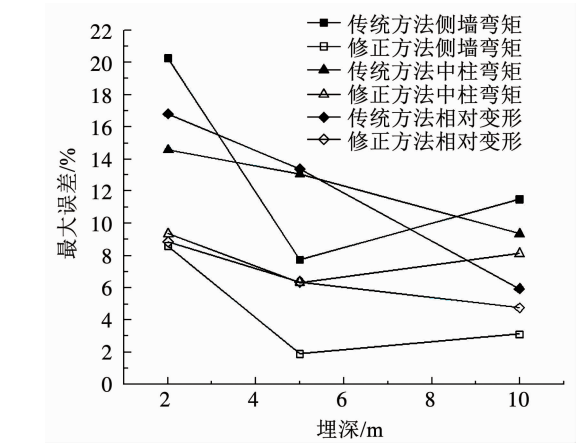


图 10 不同埋深传统方法和修正方法误差比较

Fig. 10 Comparison of errors between traditional and modified methods for different depths

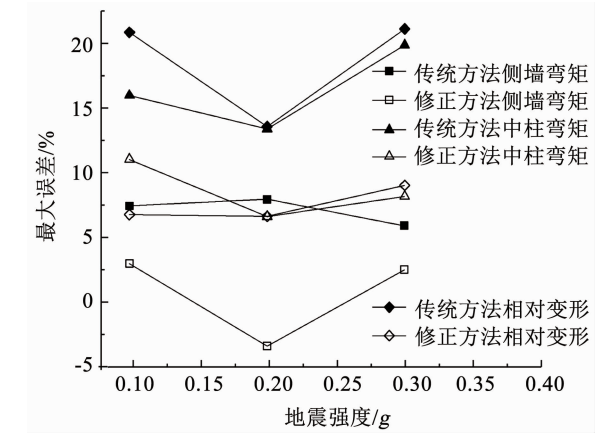


图 12 不同地震强度传统方法和修正方法误差比较

Fig. 12 Comparison of errors between traditional and modified methods for different earthquake intensities

分别对比每种工况的结果可以得到,影响传统反应位移法和修正方法计算精度的最主要因素是结构的类型。其中改变结构埋深、土层的剪切波速和地震强度(图 10~12)对两种方法计算单层结构内力及变形精度的影响不大,传统反应位移法内力及变

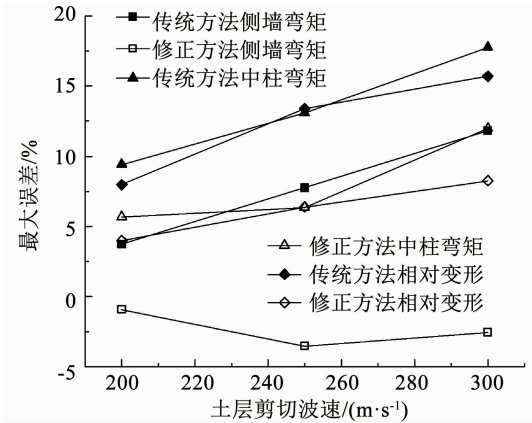


图 11 不同土层剪切波速传统方法和修正方法误差比较

Fig. 11 Comparison of errors between traditional and modified methods for soil with different shear wave velocities

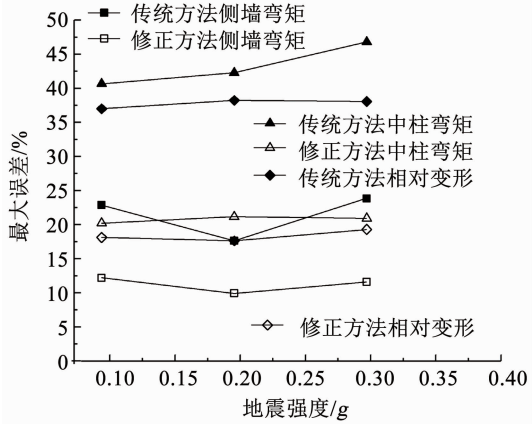


图 13 双层结构传统方法和修正方法误差比较

Fig. 13 Comparison of errors between traditional and modified methods for double-layer structures

形的最大误差会达到 20%,经过本文方法修正之后,内力及变形的最大误差会减小到 10% 左右;改变结构类型(对比图 12,13)对两种方法计算精度的影响明显,其中用传统反应位移法计算双层结构的误差是计算单层结构的 2 倍左右,修正方法计算双

层结构的误差是计算单层结构的 1.8 倍左右;改变地震输入波(对比图 13,14)对两种方法的计算精度影响不大,传统反应位移法最大计算误差会达到 40%,经过本文方法修正之后,最大计算误差会减小到 20% 左右.综合上面分析,修正方法的修正效果明显.

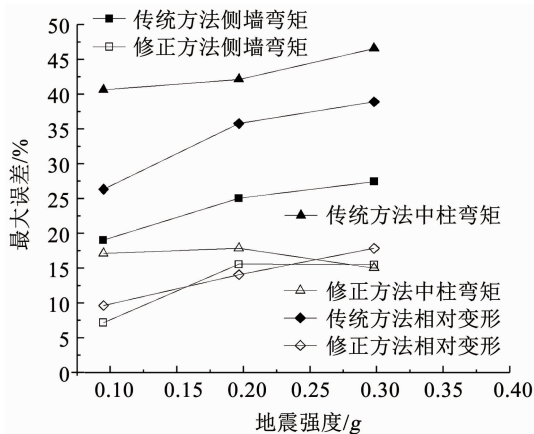


图 14 北京人工波为输入波时传统方法和修正方法误差比较

Fig. 14 Comparison of errors between traditional and modified methods for Beijing artificial wave as input wave

3 结 论

1)修正方法除了修正法向弹簧的基床系数,其他部分与传统反应位移法相同,仍然是一种相对简单的地下结构抗震设计方法.

2)传统反应位移法采用离散弹簧模拟土体,会影响结构内力响应,其计算精度偏低.对于单层结构传统反应位移法计算误差会超过 20%;对于双层结构其计算误差则会超过 40%.经本文提出的方法对弹簧进行修正之后,单、双层结构的内力误差都能减小一半左右,修正效果明显.

3)修正方法是实用性较强且计算精度较高的地下结构抗震设计方法,可利用于地下结构的抗震设计中.

4)本文采用比传统单参数模型更接近土体性质的双参数模型简化土层,但双参数模型并不能完全模拟土体的性质,比如动力作用下土体剪切模量的非线性变化,所以,地基弹簧随场地应力状态的修正是进一步提高反应位移法精度的方向之一.

参考文献

- [1]川岛一彦. 地下构筑物耐震设计[M]. 鹿岛: 鹿岛出版会, 1994: 43
KAZUHIKO K. Seismic design of underground structures [M]. Kashima: Kashima Publishing Company, 1994: 43
- [2]中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[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. Code for seismic design of urban rail transit structures: GB 50909—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014

- [3]中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010
- [4]中华人民共和国住房和城乡建设部. 地下结构抗震设计标准: GB/T 51336—2018[S]. 北京: 中国建设工业出版社, 2018
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic design of underground structures: GB/T 51336—2018[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2018
- [5]安军海, 安林轩, 李积栋. 浅埋地下结构抗震设计的反应位移法关键问题[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 927
AN Junhai, AN Linxuan, LI Jidong. Response displacement method in several key issues of shallow buried underground structure seismic design[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(6): 927. DOI: 10.11936/bjtxb2015080015
- [6]刘晶波, 王文晖, 赵冬冬. 地下结构地震反应计算反应位移法的改进[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(增刊2): 211
LIU Jingbo, WANG Wenhui, ZHAO Dongdong. Improved response displacement method for evaluating seismic responses of underground structures[J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2010, 32(S2): 211
- [7]刘晶波, 王文晖, 刘祥庆. 地下结构抗震分析方法对比研究[C]//第四届全国防震减灾工程学术研讨会会议论文集. 北京: 中国土木工程学会, 2009: 270
LIU Jingbo, WANG Wenhui, LIU Xiangqing. Comparison of the common methods in seismic analysis of the underground structure [C]//Proceedings of the Fourth National Conference on Earthquake Disaster Mitigation Engineering. Beijing: China Civil Engineering Society, 2009: 270
- [8]董正方, 王君杰, 王文彪, 等. 基于土层位移差的地下结构抗震反应位移法分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 38
DONG Zhengfang, WANG Junjie, WANG Wenhui, et al. Response displacement method for seismic analysis of underground structures based on soil layers displacement difference[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 38. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-3835. 2013.07.008
- [9]宾佳, 景立平, 李永强. 基于变形修正的反应位移法改进研究[J]. 湖南工业大学学报, 2017(2): 38
BIN Jia, JING Liping, LI Yongqiang. Research on the improvement of the response displacement method based on deformation modification[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017(2): 38. DOI:10.3969/j. issn. 1673-9833.2017.02.007
- [10]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
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
- [11]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, 341:

187. DOI:10.2208/jscej1969.1984.187

[12] 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, 122 (1): 41. DOI: 10.2208/jsceseee.22.41s

[13] 陈之毅, 谈忠傲, 楼梦麟. 整体强制反应位移法适用性分析及修正[J]. 振动与冲击, 2018, 37(21): 126
CHEN Zhiyi, TAN Zhongao, LOU Menglin. Applicability analysis and modification for integral forced response displacement method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(21): 126. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.21.018

[14] 刘晶波, 谭辉, 张小波, 等. 不同规范中地下结构地震反应分析的反应位移法对比研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 5
LIU Jingbo, TAN Hui, ZHANG Xiaobo, et al. Comparative study of response deformation methods for seismic analysis of underground structures in different design codes [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 5

[15] 王文晖. 地下结构实用抗震分析方法及性能指标研究[D]. 北京: 清华大学, 2013
WANG Wenhui. Research on practical seismic analysis methods and performance index of underground structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013

[16] 丁德云, 杨秀仁. 反应位移法抗震设计中地基弹簧系数取值的探讨[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5): 685
DING Deyun, YANG Xiuren. Discussion on the spring constant of ground foundation in the seismic design of underground structures using the response displacement method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 685. DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0685

[17] 张载. 双参数地基模型基床系数的获取及应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2014
ZHANG Zai. The derivation and application of coefficients of subgrade reaction of two parameters foundation [D]. Changsha: Hunan University, 2014

[18] IDRIS I M, SUN J I. SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits [R]. California: University of California, 1992

[19] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA: A computer program for equivalent-linear earthquake site response analysis of layered soil deposits [R]. Los Angeles: University of Southern California, 2000

[20] KRAMER S L, PAULSEN S B. Practical use of geotechnical site response models [C]//Proceedings of International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and their Impact on Modeling Dynamic Soil Response. Berkeley: University of California, 2004: 162

[21] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070

(编辑 刘 彤)

封面图片说明

封面图片来自本期论文“猪粪堆肥过程中可培养耐药菌的抗性研究”,是哈尔滨工业大学陈志强教授课题组基于对含抗生素残留的猪粪源堆肥中多重耐药菌的潜在环境风险研究. 前期研究表明,好氧堆肥能够有效降低残留在猪粪中的抗生素含量并且可以有效削减耐药基因及抗性基因遗传元件的丰度. 利用传统划线培养法、平板计数法、微量肉汤稀释法、16S rRNA 测序等方法,对含金霉素等残留的猪粪堆肥展开可培养耐药细菌的抗性研究. 从耐药菌的多重耐药性角度阐明堆肥过程对磺胺类、四环素类、大环内酯类和喹诺酮类多重耐药细菌的抗性种类及分布的影响. 不同类别的耐药细菌对药物的抗性以及对温度的敏感程度不同,导致猪粪好氧堆肥过程对不同种类耐药细菌的削减程度不同,为完善堆肥产品对环境产生的耐药性风险评价体系提供理论基础.

(图文提供:王瑶,马广玉,温沁雪,马放,陈志强. 哈尔滨工业大学环境学院)