

邓宇洁,梁发云.地下结构地震反应规范计算方法的对比分析[J].地震工程学报,2018,40(5):996-1003.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.996
DENG Yujie,LIANG Fayun.Comparison of Calculation Methods for Seismic Response of Underground Structures in Design Codes[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):996-1003.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.996

地下结构地震反应规范计算方法的对比分析

邓宇洁^{1,2}, 梁发云^{1,2}

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 随着地下空间大规模开发利用,地震灾害对其造成的潜在威胁不容忽视。基于《城市轨道交通结构抗震设计规范(GB50909-2014)》和《地下铁道建筑结构抗震设计规范(DG/TJ08-2064-2009)》建议的分析方法,选取惯性力法、反应位移法(国家规范法、上海规范法)、动力时程方法(线弹性方法、等效线性化方法)三类共5种计算方法,以典型两层双柱三跨地铁车站结构为分析对象进行地震反应的对比验算,对上述计算方法的适应性进行评价。分析结果表明,与动力时程方法相比较,惯性力法计算得到的侧墙剪力值偏大,中柱结果较为接近;对于反应位移法,国家规范方法和上海规范方法的计算模型略有不同,但两者计算结果基本相近,其中土体强制位移、集中地基弹簧、土体动剪切模量等参数取值对计算结果影响显著;对于动力时程方法,线弹性方法和等效线性化方法的结果较为接近,且变化趋势相同。

关键词: 地下结构; 动力时程方法; 惯性力法; 反应位移法

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)05-0996-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.996

Comparison of Calculation Methods for Seismic Response of Underground Structures in Design Codes

DENG Yujie^{1,2}, LIANG Fayun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Large-scale development and utilization of underground space is threatened by earthquake. For practical approaches of seismic analysis in the *Code for Seismic Design of Subway Structures* (DG/TJ08-2064-2009) and *Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures* (GB50909-2014), this paper briefly introduces the principles, calculation processes of the codes, and the comparisons between them. Earthquake response analyses of a 2D subway station structure with two stories, double columns, and three spans are calculated by some methods: inertial force method, two response displacement methods (methods in national code and Shanghai code), and two dynamic time-history analysis methods with different assumptions (considering

收稿日期: 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41672266); 上海市人才发展资金资助项目(201548)

第一作者简介: 邓宇洁(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事地下工程抗震分析方面的科研工作。E-mail: dengyujie1109@163.com。

通信作者: 梁发云(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程抗震等领域的教学科研工作。

E-mail: fyliang@tongji.edu.cn。

linear elasticity property and equivalent linearization of soil particles). The nonlinear dynamic characteristics of soil obtained using dynamic time-history analysis method are similar to those obtained using an equivalent linearization method. The maximum internal forces of structures with different methods are mainly compared. The applicabilities are summarized and evaluated as follows. The analyses show that compared with dynamic time-history analysis method, the inertial force method has more accurate column results and a bit larger shear force on the left side of the wall. Considering the response displacement method, there are some slight differences between the national code and Shanghai code, even if calculations are basically consistent. The results of response displacement method are mainly influenced by forced displacement, equivalent hypothetical spring in foundation, and the dynamic shear modulus of soil layers. For the dynamic time-history analysis method, the results of linear elastic assumption are close to and have the same trend as those of the equivalent linear one. Combining analysis processes with calculation errors, inertial force method is simple but inaccurate, because it is too simplified. The point of soil-structure interaction is well represented in the response displacement method. The above two methods are suitable for seismic response of simple underground structures. Although the dynamic time-history analysis method requires much calculations, it considers more comprehensive factors and has a wide range of applications.

Keywords: underground structure; dynamic time-history method; inertial force method; response deformation method

0 引言

合理地开发利用地下空间不仅是缓解城市空间紧缺的有效途径,也可促进城市的发展。在地下工程兴建初期,其震害研究远不如地面建筑受重视,传统观念一般认为地下结构的抗震性能优于地面建筑^[1]。然而回顾世界范围内发生的一系列大地震,诸多地下建筑结构遭到破坏,特别是1995年日本阪神 $M_s7.2$ 地震,造成5个地铁车站和长约3 km的地铁区间隧道遭到严重破坏^[2]。地下结构数量和规模日益增大,遭受震害影响的概率也增加,修复重建的代价也增大,因此应对地下结构的地震安全问题给予高度重视。

国内外学者采取原型观测(包括震害调查、地震观测和现场足尺试验等途径)、模型试验(包括人工震源试验、振动台试验和离心振动台试验等)和理论分析(包括解析或半解析法、数值方法以及实用简化方法等)^[3-4]开展抗震研究工作。

近年来,我国地下结构抗震设计规范不断进步,一些实用抗震分析方法逐渐纳入其中。例如《建筑抗震设计规范(2010)》^[5]参照地上结构进行地下结构抗震设计;《城市轨道交通设计规范(2004)》^[6]等、《铁路工程抗震设计规范(2006)》^[7]、《地铁设计规范(2013)》^[8],对地下结构的抗震设防给出了原则性规定,其中《建筑抗震设计规范(2010)》^[5]推荐了反应

位移法、等效水平地震加速度法和动力时程法等抗震设计方法;《地下铁道建筑结构抗震设计规范(2009)》^[9]和《城市轨道交通结构抗震设计规范(2014)》^[10]列入了更多的地下结构抗震计算方法,包括拟静力法(惯性力法、等代水平地震加速度法、反应加速度法)、土-结构相互作用法(反应位移法)、动力时程方法。鲁嘉星等^[11]对上海《地下铁道建筑结构抗震设计规范(DG/TJ08-2064-2009)》的四种抗震设计方法进行对比验算,讨论了其适用性。

本文在已有研究的基础上,针对国家《城市轨道交通结构抗震设计规范(GB50909-2014)》和上海《地下铁道建筑结构抗震设计规范(DG/TJ08-2064-2009)》的主要计算方法,选取国家规范的反应位移法、动力时程方法,以及上海规范的惯性力法、反应位移法、动力时程方法,结合典型的两层三跨地铁车站结构算例进行计算对比,讨论各规范方法的适用性,以便工程设计人员参考。

1 地下结构抗震规范计算方法简介

为便于阐述本文的计算分析,针对规范中的惯性力法、反应位移法(国家规范法、上海规范法)、动力时程方法(线弹性方法、等效线性化方法)三类共5种计算方法,对比分析各种方法的基本原理、适用条件及区别。

1.1 惯性力法

惯性力法把地震动荷载转换为静荷载,即等效为作用于构件结点处的水平地震惯性力及与其相应的地层抗力,以求解地下结构的地震动响应(图 1)。

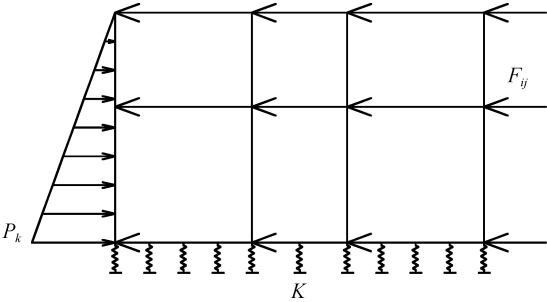


图 1 惯性力法的等代地震荷载分布及计算简图
Fig.1 Distribution of equivalent seismic load and diagram for inertial force method

图中 F_{ij} 为作用在结点 ij 上的等代水平地震惯性力; P_k 为呈三角形分布的地层水平抗力的最大值,由水平方向作用的等代地震荷载的平衡条件确定; K 为地层基床系数,其值可按《地基基础设计规范(DGJ08-11)》的有关条文选取。

1.2 反应位移法

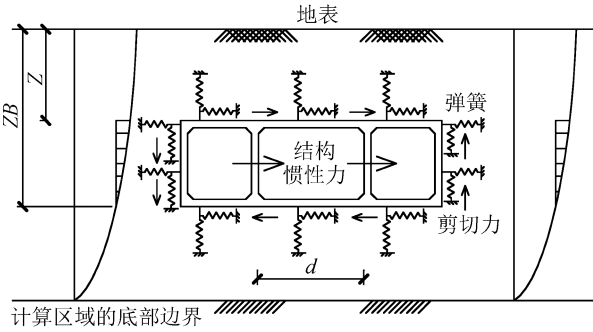
反应位移法认为地下结构的地震反应主要取决于周围土层的变形,而非惯性力,故将地震作用等代为地层强制位移施加在地下结构上,使用静力方法求解结构动内力。该方法概念清晰合理,能在一定程度上反映土-结构相互作用,国家规范和上海规范均有推荐,但两者在计算模型、地基基床系数、动剪切模量和侧向动土压力等方面存在差异。

(1) 计算模型

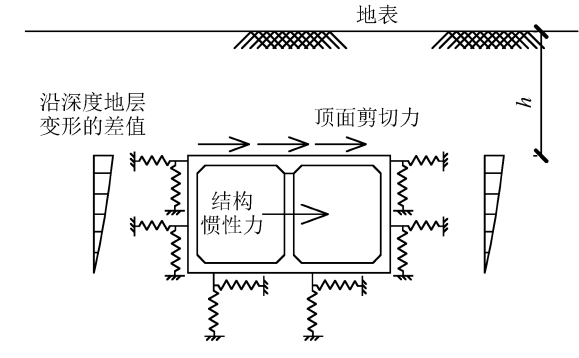
国家规范法[图 2(a)]在结构四周均设置有法向和切向地基弹簧以及土层剪力,其中土层剪力可采用自由场有限元法或反应谱法求解;上海规范法[图 2(b)]只在结构顶部施加剪力($\tau = G_s v_T / \pi h_s$, 式中 S_v 为作用在计算区域底部边界上的速度反应谱^[12]; G 为地层动剪切模量; T_s 为顶板以上地层的固有周期; h 为顶板上方的地层厚度)。

(2) 地基基床系数

上海规范推荐有限元法求解,国家规范推荐了经验法、公式法及有限元法。其中有限元法取一定宽度和深度的土层(图 3),将其侧面和底面边界固定,去除结构位置处的土体,再将土体分层建模,在孔洞各面分别作用法向、切向单位均布荷载,根据土体位移和力的关系求得地基基床系数。



(a) 国家规范法



(b) 上海规范法

图 2 反应位移法计算简图

Fig.2 Diagram of response displacement method

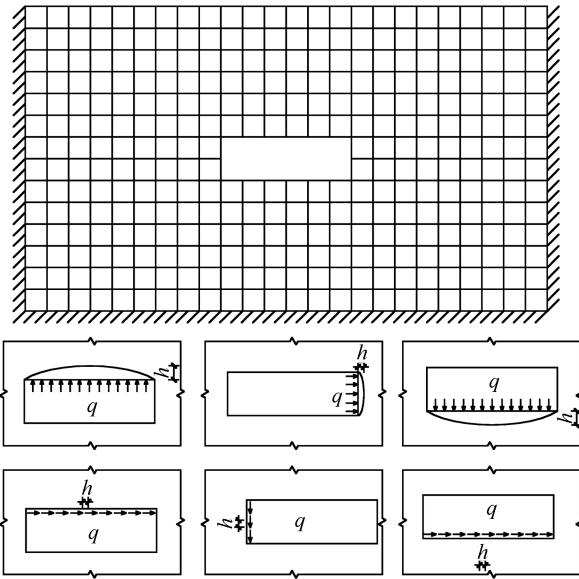


图 3 基床系数的有限元计算模型

Fig.3 Finite element model of bed coefficient

(3) 动剪切模量

国家规范法和上海规范法均可将动剪切模量 G 取为初始值 G_m 的 70%~80% (G_m 根据现场资料或经验公式 $G_m = \rho_m \times c_s^2$ 得到,其中 ρ_m 为土体密

度, c_s 为土体剪切波速)。此外上海规范法规定, 计算结构顶面剪力时可使用 Davidenkov 模型, 或者采用经验估算公式表估算地层动剪切模量。

(4) 侧向动土压力

上海规范法计算施加在结构周围土层的侧向动土压力有两种方式, 即强制位移与法向地层弹簧结合, 或者采用自由场动力有限元计算得到强制位移, 进一步换算成动土压力; 国家规范法的土层位移计算有自由场有限元法和公式法 ($u(z) = [u_{\max} \cos(\pi z/2H)]/2$, 式中 $u_{\max}$ 为场地地表最大位移, H 为设计地震作用基准面深度)。

1.3 地层-结构动力时程法

地层-结构动力时程法考虑地基-结构相互作用以及地震运动的时空效应(地震振幅、持时), 将地下结构物和周围岩土体介质视为共同受力变形的整体, 直接输入地震加速度记录, 在满足变形协调的前提下计算结构物和岩土体介质各时刻的位移、速度、加速度、应变和内力。其基本方程为:

$$\mathbf{M}\{\ddot{u}\} + \mathbf{C}\{\dot{u}\} + \mathbf{K}\{u\} = -\mathbf{M}\{l\}\ddot{u}_g(t) = \{F(t)\}$$

(1)

式中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 分别为体系的整体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{u\}$ 、 $\{l\}$ 、 $\{F(t)\}$ 分别为结点位移列阵、元素均为 1 的列阵和荷载向量列阵。

该方法适用于地质条件及结构形式复杂的情况, 但计算过程较为繁杂。国家规范和上海规范均有推荐, 两者规定内容一致。根据对土层特性的处理不同, 地层-结构动力时程方法分为线弹性法和等效线性化法(采用等效线性化近似处理土层的非线性特性)。动力时程方法对于计算区域规定如图 4 所示。

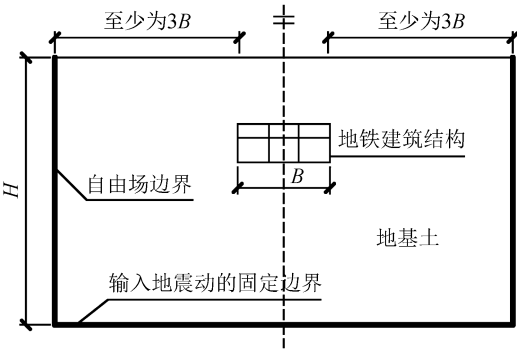


图 4 地层-结构整体动力分析法计算简图

Fig.4 Diagram for soil-structure dynamic time-history method

2 地下结构算例模型

为便于分析, 将地铁车站视为弹性地基上的框架结构, 仅考虑横向水平地震作用。在其作用下两层三跨地铁车站结构的地震反应可视为平面应变问题。

2.1 地铁车站结构模型

选取典型两层双柱三跨框架结构地铁车站。地铁车站横断面尺寸见图 5 和表 1。按刚度相等的原则, 将车站中柱等效为如图 6 所示的中墙, 刚度等效公式如式(2), 式中的参数如图 6 的标注。

$$(D+t)h^3/12=\pi D^4/64$$

(2)

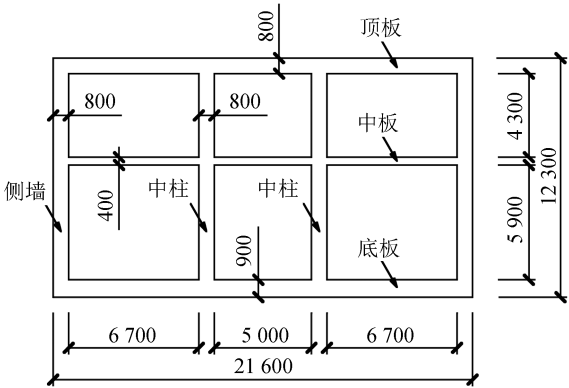


图 5 两层双柱三跨框架结构地铁车站基本尺寸(单位:mm)

Fig.5 Dimension of the metro station with two-story double-column three-span frame structure (Unit:mm)

表 1 两层双柱三跨框架结构地铁车站结构基本尺寸

Table 1 Dimension of the metro station with two-story double-column three-span frame structure

地铁车站参数	单位/m	地铁车站参数	单位/m
截面总宽度	21.6	中板厚度	0.4
截面总高度	12.3	侧墙厚度	0.8
上覆土层厚度	3.0	中柱直径	0.8
底板厚度	0.9	中柱间距	9.0
顶板厚度	0.8	等效后中墙厚度	0.3

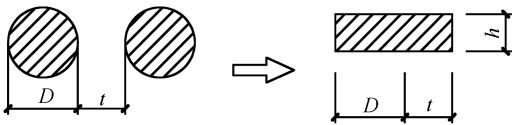


图 6 中柱刚度折算

Fig.6 Stiffness conversion of middle columns

2.2 场地条件

地铁车站拟建场地取自某深基坑工程的场地条件, 土层物理力学参数来自该工程的勘察报告^[13], 取地下水平均埋深 0.5 m, 设计计算深度 70 m。计

算区域内各土层性质参数列于表 2。

使用 Rayleigh 阻尼模拟土体阻尼和建筑物物

理阻尼,其中土体阻尼系数 $a_0=0.488,a_1=0.003$;

建筑物阻尼系数假定为 $\alpha=\beta=0.01$ 。

表 2 各土层物理力学性质参数

Table 2 Physical and mechanical properties of each soil layer							
土层编号	①	②	③、④	⑤	⑥	⑦	⑨
土层名称	杂填土	褐黄-灰黄色粉质黏土	灰色淤泥质黏土	灰色粉质黏土	暗绿-草黄粉质黏土	草黄-灰黄色粉细砂(夹砂质粉土)	灰色粉细砂(含砾中砂)
层厚/m	2.72	1.28	14.47	6.35	3.86	36.81	25.64
饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18.0	18.1	16.7	17.9	19.3	18.6	19.0
孔隙比 e	-	0.900	1.316	0.978	0.687	0.783	0.699
含水量 $\omega/\%$	-	31.6	46.8	34.1	23.9	28.0	25.0
压缩模量 E_s/MPa	2.00	4.85	2.99	4.52	7.14	14.24	14.97
动剪切模量 G_d/MPa	28.30	28.08	34.18	66.26	128.10	198.94	242.99
剪切波速 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	124.2	123.2	141.5	190.8	255.0	324.1	354.1
静止侧压力系数 K_0	0.65	0.46	0.54	0.49	0.46	0.35	0.35
泊松比 μ	0.48	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48

2.3 地震特性

该场地属于Ⅳ类场地,根据上海《建筑抗震设计规程(DGJ08-9-2013)》^[14],上海市的抗震设防烈度为Ⅶ度;上海地区多遇地震和设防烈度地震时,Ⅳ类场地的设计特征周期取为 0.65 s,Ⅶ度抗震设防烈度对应的设计基本地震加速度值为 0.10g。

自由场地震响应分析和动力时程分析均采用处理后的 Kobe 波,加速度时程分布见图 7。

2.4 自由场反应分析

为考虑土层的非线性,采用美国加州大学伯克利分校开发的土层地震反应分析程序 EERA 进行土体等效线性化自由场分析。输入场地的地震波时程和土层参数(准确性要求土层分层厚度不超过

1.0~1.5 m,故将 70 m 土层细分为 52 层,底部取为基岩边界),输出土层等效线性化处理结果(表 3)、土层最大加速度分布(图 8)。

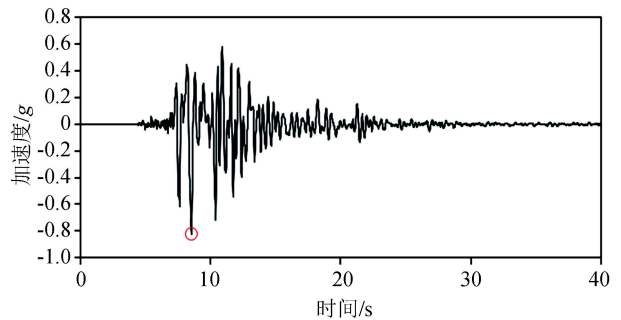


图 7 加速度时程分布图

Fig.7 Distribution of acceleration time history

表 3 土层等效剪切模量

Table 3 Equivalent shear modulus of the soils			
土层编号	土层名称	泊松比 μ	等效剪切模量 G/MPa
①	杂填土	0.48	19.32
②	褐黄-灰黄色粉质黏土	0.49	11.26
③、④	灰色淤泥质黏土	0.49	4.93
⑤	灰色粉质黏土	0.49	19.91
⑥	暗绿-草黄粉质黏土	0.48	44.66
⑦	草黄-灰黄色粉细砂(夹砂质粉土)	0.48	34.05
⑨	灰色粉细砂(含砾中砂)	0.48	37.98

根据自由场动力有限元计算结果,结构顶、底面之间最大相对位移为 0.169 8 m,发生在 10.48 s 时刻,此时结构所在土层水平位移分布列于表 4,结构周围土层剪应力分布列于表 5。

3 计算结果对比分析与讨论

土体介质和隧道结构材料视为均质各向同性体。在惯性力法和反应位移法中,假定结构和各构

件处于弹性工作状态;而在地层-结构动力时程分析方法中,进行土体的线弹性和非线性两类计算,其中利用等效线性化方法简化处理土体的非线性问题,其计算可信度高,可作为对比标准。鲁嘉星等^[11]针对《地下铁道建筑结构抗震设计规范(DG/TJ08-2064-2009)》的 4 种抗震设计方法进行对比验算,讨论其适用性,其中内力计算和误差分析对于本文具有参考价值,本文的分析结论与其基本一致。

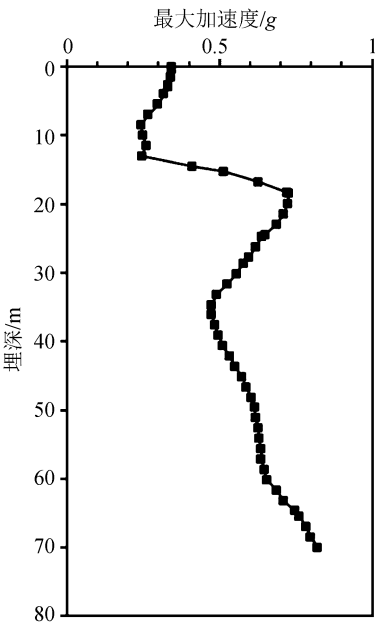


图 8 土层最大加速度分布

Fig.8 Maximum acceleration distribution of soil layers

表 4 结构所在各土层水平位移分布

Table 4 Horizontal displacement distribution of each soil layer			
土层编号	位移值/cm	土层编号	位移值/cm
第 5 层	27.8	第 10 层	26.0
第 6 层	27.7	第 11 层	25.1
第 7 层	27.5	第 12 层	22.9
第 8 层	27.2	第 13 层	15.3
第 9 层	26.7	第 14 层	10.9

表 5 结构周围土层剪应力分布

Table 5 Shear stress distribution of soil layers around the structure	
顶板剪应力 τ_v /kPa	14.4
底板剪应力 τ_H /kPa	53.4
侧墙剪应力 τ_s /kPa	33.9

3.1 构件内力对比

以地层-结构动力时程等效线性化方法计算结果作为标准,对各构件按照上述 5 种方法计算得到的最大内力(弯矩、剪力和轴力)进行对比(表 6)。

表 6 不同计算方法最大内力值汇总

Table 6 Values of maximum internal force by different methods						
最大内力	位置	惯性力法	国家规范反应位移法	上海规范反应位移法	线弹性时程分析	等效线性化时程分析
弯矩/(kN·m)	底板	970.0	5 047.7	5 692.0	384.4	508.5
	中板	42.4	269.1	856.2	98.6	120.2
	顶板	210.3	4 111.5	1 603.5	308.0	387.3
	侧墙	970.0	5 047.7	5 692.0	384.4	508.5
	中柱	40.4	559.9	800.2	20.4	33.5
剪力/kN	底板	896.9	1 300.2	1 139.5	473.8	505.4
	中板	62.4	113.3	310.9	78.1	84.8
	顶板	448.3	1 071.7	685.4	257.7	278.1
	侧墙	581.2	3 168.8	2 697.9	112.1	122.4
	中柱	13.9	224.7	234.2	8.3	12.8
轴力/kN	底板	1 077.5	3 303.6	2 775.2	97.0	103.8
	中板	457.8	973.3	653.0	110.1	133.4
	顶板	925.1	4 198.4	406.4	48.2	130.6
	侧墙	2 250.8	1 317.0	864.7	483.4	512.0
	中柱	1 068.3	1 577.2	1 251.0	672.0	693.5

根据表 6,(1)对于各构件的弯矩计算结果,惯性力法、线弹性时程分析方法与等效线性化时程分析方法大致接近;而国家规范反应位移法、上海规范反应位移法的计算结果是等效线性化时程分析方法的 2~10 倍,计算结果相去甚远。(2)对于各构件的剪力计算结果,线弹性时程方法与等效线性化时程方法大致接近;惯性力法对中板、中柱的计算结果较为接近,而底板、顶板、侧墙剪力值则明显偏大;国家规范反应位移法、上海规范反应位移法与等效线性化时程方法的计算结果相差很大。(3)对于各构件

的轴力计算结果,线弹性时程方法与等效线性化时程方法大致接近,总体上是偏小的;国家规范反应位移法、上海规范反应位移法与等效线性化时程方法的计算结果相差很大,部分结果高出等效线性化时程方法一个数量级。

3.2 结构最大内力对比

由表 7 可知,最大弯矩出现在底板两端和侧墙底部,最大剪力出现在底板两端,最大轴力出现在中柱底端和侧墙底端。而反应位移法的最大剪力和最大轴力位置略有不同。

表 7 结构最大内力及出现位置

Table 7 Maximum internal force and position in the structure

方法	最大弯矩		最大剪力		最大轴力	
	弯矩 /(kN·m)	出现位置	剪力 /kN	出现位置	轴力 /kN	出现位置
惯性力法	970.0	底板右端/侧墙底部	896.9	底板左端	2250.8	侧墙底部
国家规范反应位移法	5 047.7	侧墙底部/底板左端	3 168.8	侧墙底部	4 198.4	顶板左端
上海规范反应位移法	5 692.0	侧墙底部/底板左端	2 697.9	侧墙底部	2 775.2	底板左端
线弹性时程分析	384.4	底板两端/侧墙底部	473.8	底板两端	672.0	中柱底部
等效线性化时程分析	508.5	底板两端/侧墙底部	505.4	底板两端	693.5	中柱底部

3.3 计算结果讨论

基于以上对比分析,现对 5 种计算方法的误差来源逐一进行讨论。

(1) 惯性力法。惯性力法计算结果与等效线性化时程分析方法比较接近,略偏大,其基本沿用了地上建筑地震反应计算理念,计算模型中没有考虑地下建筑结构的顶部土体剪力和四周土体抗力作用,仅在底层施加土体弹簧;同时假定地层水平抗力仅位于结构左侧,且呈三角形分布,导致侧墙下部受到很大的侧向均布力,左右侧墙受力不平衡,左侧偏大。

(2) 反应位移法。反应位移法计算结果大于动力时程分析方法,原因可能在于:①对结构的变形估计过高。例如本算例中,反应位移法采用自由场动力时程分析得到的位移值,其中顶底板位移差最大值为 0.169 8 m,而等效线性化动力时程分析方法仅为 0.063 7 m,可见顶底板位移差放大,同时未考虑地基变形输入的衰减性和动力性,将土层作用力以强制位移的形式施加在结构侧墙上,使侧墙受到地基弹簧很大的剪切力,导致其剪力偏大,顶板、底板轴力偏大,导致结果出现偏差,也使得反应位移法的最大剪力和最大轴力位置略不同于其他方法;②动弹簧系数取值困难,受参数变化影响大。经验公式法计算地基弹簧系数,误差较大;静力有限元方法较为准确,但仍无法准确模拟地震动力作用下土体的反应,存在误差,且计算工作量大;③集中地基弹簧相互离散,互不相关,无法形成有效约束,易低估结构角部内力反应。

(3) 线弹性动力时程方法。采用地基动剪切模量、动弹性模量和泊松比作为土层参数,该方法计算结果与等效线性化时程分析方法最为接近且变化趋势相同,但偏小,原因在于仅输入土体初始动剪切模量值,没有考虑地震作用下土体性质的变化。

(4) 等效线性化动力时程方法。将地震记录直接输入模型求得结构全过程的动力反应,考虑地震的时间效应,考虑土-结构相互作用,考虑土体的非

线性动力特性,计算可信度高;适用范围广,存在结构形式复杂、地层变化或地层液化等特殊情况时同样适用。但动力分析存在计算量大、参数选取难、边界处理复杂的缺点。

4 结论

本文采用惯性力法、反应位移法(国家规范法、上海规范法)、动力时程分析方法(线弹性、等效线性化)三类共 5 种抗震设计方法对某典型地铁车站结构型式进行抗震计算,得出如下结论:

(1) 惯性力法计算简单,在工程实践中应用广泛,但简化较多,无法准确考虑材料非线性、边界条件等因素,计算精度受影响;反应位移法计算模型概念清晰,通过土体弹簧和地层剪应力体现土-结构相互作用,施加土体强制位移,体现周围土层变形对地下结构地震反应的主导作用,适用于地质条件及结构形式简单的地下建筑结构抗震问题;线弹性动力时程分析方法将土体视为线弹性体,采用地基动剪切模量、动弹性模量和泊松比作为土层参数;等效线性化动力时程分析方法考虑土体和地震的实时动力特性,计算可信度高,适用范围广泛,但计算量较大。

(2) 国家规范反应位移法和上海规范反应位移法的建模思想相似,但对土层的简化模型略有不同,两者计算结果较为相近,均大于动力时程分析方法,其计算结果易受土体强制位移、结构周围剪力、集中地基弹簧、土体动剪切模量等参数取值的影响。

(3) 线弹性动力时程分析方法计算结果与等效线性化时程分析方法较为接近且变化趋势相同,易被工程设计人员所掌握和实际应用。

参考文献(References)

[1] 于翔,赵跃堂,郭志昆.人防工程的抗地震问题[J].地下空间, 2001(1):28-32,43-78.
YU Xiang, ZHAO Yuetang, GUO Zhikun. Anti-earthquake Problem of Civil Air Defense Project[J]. Underground Space, 2001(1):28-32,43-78.

[2]

PARRA-MONTESINOS G J,BOBET A,RAMIREZ J A.Evaluation of Soil-Structure Interaction and Structural Collapse in Daikai Subway Station During Kobe Earthquake[J].ACI Structural Journal,2006,103(13):113-122.

[3]

郑永来,杨林德,李文艺,等.地下结构抗震[M].上海:同济大学出版社,2005.
ZHENG Yonglai, YANG Linde, LI Wenyi, et al. Earthquake Resistance of Underground Structures [M]. Shanghai: Tongji University Press,2005.

[4]

HASHASH Y M A,HOOK J J,SCHMIDT B,et al.Seismic Design and Analysis of Underground Structures[J].Tunneling and Underground Space Technology,2001,16(4):247-293.

[5]

建筑抗震设计规范:GB50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for Seismic Design of Buildings:GB50011-2010[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.

[6]

上海市工程建设规范:城市轨道交通设计规范:DGJ08-109-2004[S].上海:上海市建设管理委员会,2003.
Code of Shanghai Construction Engineering:Urban Rail Transit Design Standard:DGJ08-109-2004[S].Shanghai:Shanghai Municipal Construction and Management Commission,2003.

[7]

铁路工程抗震设计规范:GB50111-2006[S].北京:中国计划出版社,2006.
Code for Seismic Design of Railway Engineering:GB50111-2006[S].Beijing:China Planning Press,2006.

[8]

地铁设计规范:GB50157-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Code for Design of Metro:GB50157-2013[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2013.

[9]

上海市工程建设规范:地下铁道建筑结构抗震设计规范:DG/TJ08-2064-2009[S].上海:上海市城乡建设和交通委员会,2009.
Code of Shanghai Construction Engineering:Code for Seismic Design of Subway Structures:DG/TJ08-2064-2009[S].Shanghai:Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Commission,2009.

[10]

城市轨道交通结构抗震设计规范:GB50909-2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures:GB50909-2014[S].Beijing:China Planning Press,2014.

[11]

鲁嘉星,禹海涛,贾坚.软土地区地铁车站横断面抗震设计方法适用性研究[J].建筑结构,2014,44(23):80-84.
LU Jiaying, YU Haitao, JIA Jian. Feasibility Research on Seismic Design Methods for Cross Section of Subway Station in Soft Soil Area[J].Building Structure,2014,44(23):80-84.

[12]

大型地下结构的抗震设计指南[S].日本建设部土木研究所地震防灾部抗震研究室,1992.
A Guide to Seismic Design of Large Underground Structures [S]. Department of Earthquake Disaster Prevention and Earthquake Research,Institute of Civil Engineering,Ministry of Construction in Japan,1992.

[13]

褚峰.紧邻地下隧道深基坑变形特性模型试验、数值分析与实测研究[D].上海:同济大学,2011.
CHU Feng. Analysis on the Deformation of Deep Excavation Adjacent to Metro Tunnels with Model Tests, Numerical Methods and In-situ Observations[D].Shanghai: Tongji University,2011.

[14]

上海市工程建设规范:建筑抗震设计规程:DGJ08-9-2013[S].上海:上海市城乡和交通委员会,2013.
Code of Shanghai Construction Engineering:Code for Seismic Design of Buildings:DGJ08-9-2013[S].Shanghai:Shanghai Urban and Rural Construction and Transportation Commission,2013.