

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201903017

反应位移法中地基弹簧刚度系数求解方法 对比研究*

杜修力, 乔磊, 许紫刚, 阴孟莎

(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)

摘要: 反应位移法是目前地下结构抗震设计中应用最为广泛的简化方法之一, 其中的一个关键参数是结构周围弹簧刚度系数。基于《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)中简化的静力有限元法, 进行了不同加载形式的静力有限元刚度法和柔度法计算弹簧刚度系数, 将其计算结果应用于反应位移法与严格的动力时程计算结果进行对比研究。结果表明: 不论静力有限元刚度法还是柔度法, 除水平竖直加载方式外, 其余的加载方式确定的地基弹簧系数对反应位移法计算的结构变形及内力影响较小。考虑计算次数, 可以采用刚度法和柔度法中的径向切向和径向环向一次加载方式对静力有限元法进行简化计算。

关键词: 地下结构; 反应位移法; 弹簧刚度系数; 静力有限元法

中图分类号: TU311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0246-09

Comparative Study on Solution Methods of Foundation Spring Stiffness Coefficient in Response Displacement Method

DU Xiuli, QIAO Lei, XU Zigang, YIN Mengsha

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Response displacement method is one of the most widely used simplified methods in seismic design of underground structures. One of the key parameters in the method is the spring stiffness coefficient around the structure. Based on the simplified static finite element method in the Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures (GB50909-2014), the static finite element stiffness method and the flexibility method were used to calculate the spring stiffness coefficient with different loading forms. The calculation results were applied in response displacement method. The calculated internal structural forces and deformations are compared with the calculation results of strict dynamic time history method. The results show that the spring stiffness coefficient obtained by both the static finite element stiffness method and the flexibility method have little influence on structural deformation and internal force calculated by the response displacement method regardless of the loading forms except for horizontal and vertical loading forms. Considering the number of calculations, the static finite element

* 收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-05-14

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)资助

作者简介: 杜修力(1962—), 男, 教授, 博士。主要从事地震工程与防灾工程方面的研究。E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

method can be simplified by the radial tangential one-time loading method and the radial circumferential one-time loading method.

Keywords: underground structure; response displacement method; spring stiffness coefficient; static finite element

引言

在地下结构的抗震设计中,有多种简化分析方法^[1]。反应位移法因计算精度高且简单易操作被广泛应用,已列入《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[2]。反应位移法认为地下结构的地震反应主要取决于周围土体变形,简化地下结构的横断面为框架式结构,考虑地下结构与周围土体的刚度差异,引入弹簧刚度系数定量表示结构与土体之间的相互作用,将结构顶底板相对位移最大时刻的土层位移通过弹簧刚度系数转化为等效荷载与同一时刻结构四周土层剪力、结构惯性力一起作用于地下结构,以此来计算结构反应。

由于弹簧刚度系数的取值对反应位移法的计算精度影响较大^[3],学者们对其进行了较多研究^[4-13]。目前,主要形成了经验公式法、理论解析法和静力有限元法三种弹簧刚度系数计算方法。其中,经验公式较为简化且易操作应用,但其计算误差较大,适用范围有限;理论解析方法理论基础明确,但假设条件较多,不适宜工程应用;而静力有限元法因计算精度高,操作简便被广泛应用。

静力有限元法可以分为严格的静力有限元法和简化的静力有限元法。严格的静力有限元法如图1所示,需要在去除结构的土体有限元模型孔洞周边的各个节点上逐一施加荷载求出每个节点的弹簧刚度系数,从计算过程可以看出其计算繁琐,效率较低。

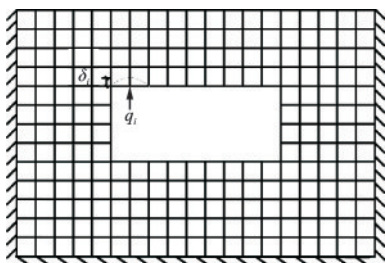


图1 严格的静力有限元法

Fig.1 Strict static finite element method

在严格的静力有限元法基础上进行一定的假设形成了简化的静力有限元法,如图2所示,假设同一面相同方向上的弹簧刚度系数相同,在土体有限元模型孔洞周边分别施加均布荷载,将计算得到的各个节点的位移平均来计算对应方向的弹簧刚度系数。简化的静力有限元法通过假设精简了严格的静力有限元法所需的计算次数,提高了计算效率,但其仍需进行6次加载计算,其计算次数可以通过改变加载方式进一步精简。

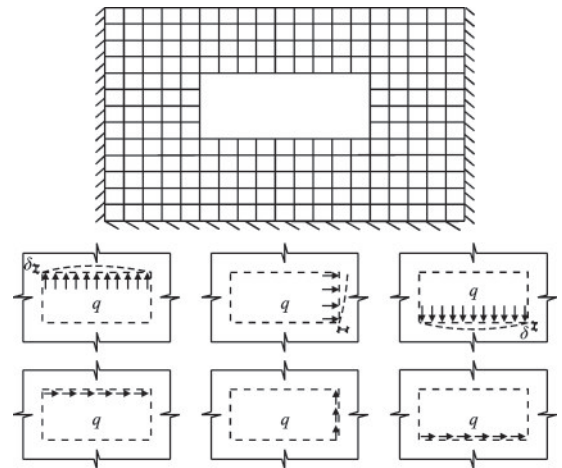


图2 简化的静力有限元法

Fig.2 Simplified static finite element method

除此之外,规范[2]将简化的静力有限元法分为静力有限元刚度法和静力有限元柔度法。对于静力有限元刚度法,为减少计算量,李亮等^[12]建议了一种仅对水平向和竖直向分别同时加载的静力有限元法,如图3所示,在保证结构内力计算精度的前提下,将计算次数由6次减少到2次;为验证不同加载方式的静力有限元刚度法对反应位移法计算结果的安全性影响,宾佳等^[13]进行了图2和图3的6种加载方式的静力有限元刚度法计算弹簧刚度系数。但目前对于静力有限元柔度法则缺少相应的研究与应用。

针对简化的静力有限元法计算次数的精简与静力有限元柔度法缺少应用研究的问题,本文进行了不同加载方式的静力有限元刚度法和柔度法计

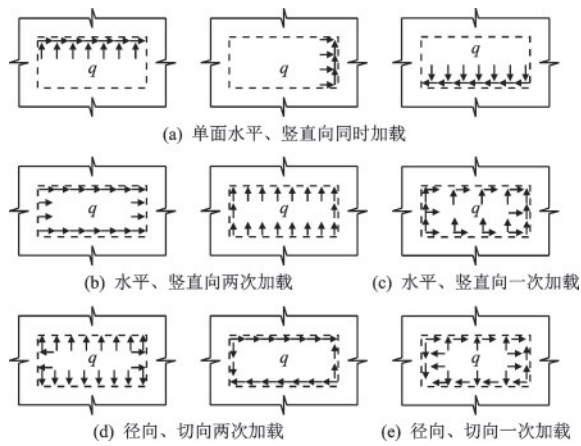


图3 静力有限元刚度法加载形式

Fig.3 Loading form supplement of the static finite element stiffness method

算弹簧系数的对比研究,并将计算结果应用于反应位移法,与严格的动力时程分析方法进行对比,旨在分析不同加载方式的静力有限元刚度法和柔度法对地下结构内力和变形的影响程度,并在此基础上对简化的静力有限元法的计算次数进一步精简。

1 静力有限元法求解地基刚度系数的简化方法

在图2和图3的6种加载方式的基础上,借鉴规范^[2]中求解圆形断面地下结构弹簧刚度系数的加载方式补充了图4所示两种加载方式,对上述的8种静力有限元刚度法进行弹簧刚度系数计算,同时,对应的进行图5所示的8种静力有限元柔度法计算,并将计算的弹簧刚度系数应用于反应位移法计算结构的内力和变形。以动力时程计算结果为基准,对比静力有限元刚度法和柔度法在不同加载形式下计算的弹簧刚度系数对反应位移法计算结果的影响。若加载方式的差异对计算结果的影响较小,即可以用图3、图4和图5中的一次加载代替规范中简化的静力有限元法的6次加载方式,从而达到简化计算次数的目的。

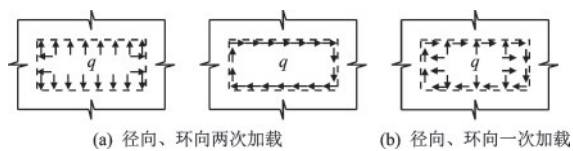


图4 静力有限元刚度法加载形式补充

Fig.4 Loading form supplement of the static finite element stiffness method

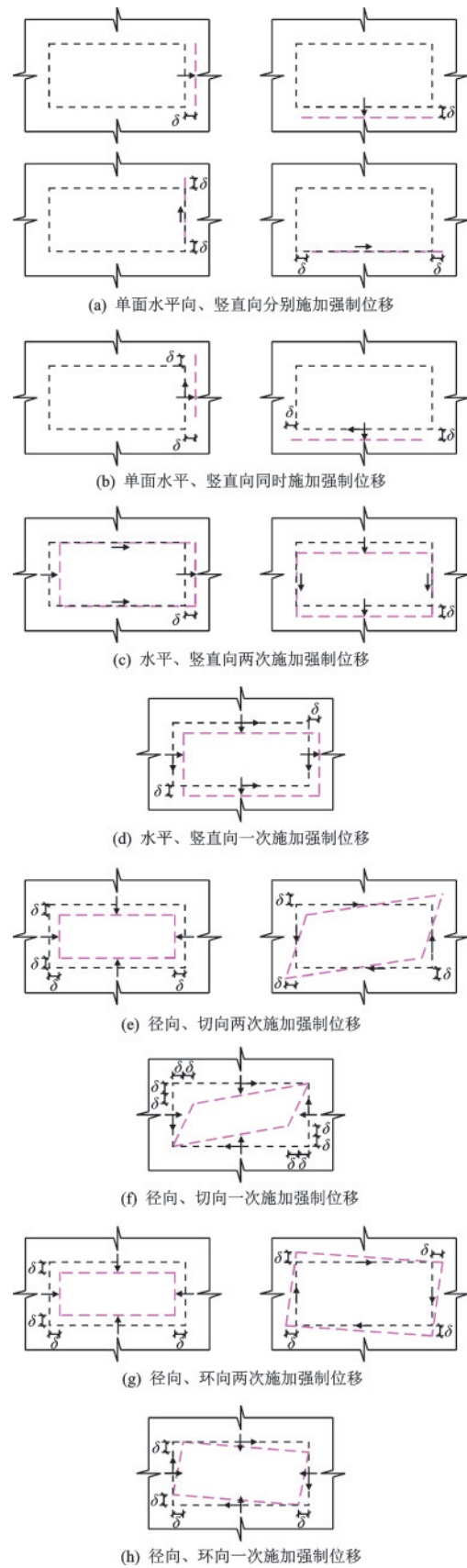


图5 静力有限元柔度法加载形式

Fig.5 Loading form of the static finite element flexibility method

2 实例分析

2.1 计算模型与参数

为了比较不同加载方式的静力有限元刚度法和柔度法对结构内力和变形的影响,采用ABAQUS对阪神地震中严重破坏的大开车站进行了反应位移法与动力时程计算,将动力时程的计算结果作为精确解进行比较分析^[1,14]。

车站结构断面尺寸如图6所示,结构埋深4.8 m,结构周围土层物理性质^[15]见表1。中柱沿车站纵向3.5 m等间距分布,将其按一定原则^[16]等效为3.5 m长的一面纵墙,并与顶板、底板及侧墙一样,取单位长度作为研究对象。等效后的中柱弹性模量取为 8.57×10^3 MPa,密度取为 7.14×10^2 kg/m³。结构顶底板及侧墙弹性模量取为 3×10^4 MPa,密度取为 2.5×10^3 kg/m³。

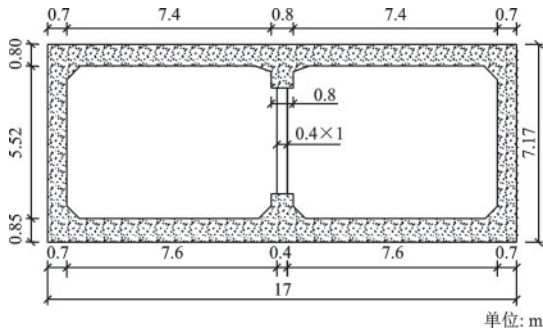


图6 大开车站标准断面

Fig.6 Standard cross-section of Dakai subway station

表1 土层物理性质

Table 1 Physical properties of soils

分层	土质	厚度/ m	密度/ (t·m ⁻³)	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	泊松比
1	填土	1	1.9	140	0.333
2	砂土	4.1	1.9	140	0.488
3	砂土	3.2	1.9	170	0.493
4	黏土	3.1	1.9	190	0.494
5	黏土	5.8	1.9	240	0.490
6	砂土	22	2.0	330	0.487

二维动力时程有限元模型如图7所示,车站结构埋深为4.8 m,结构采用梁单元^[13-14],网格尺寸取为0.5 m,土体采用平面应变单元。结构侧边至土层边界取结构宽度的五倍。土体底边为固定边界,

侧边为滚轴边界。不考虑地震作用下土体与结构之间的相对滑动,土-结之间采用绑定约束。

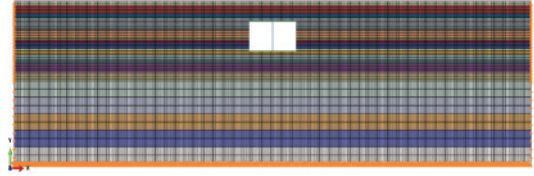
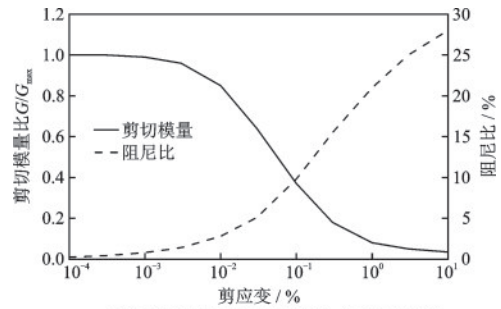


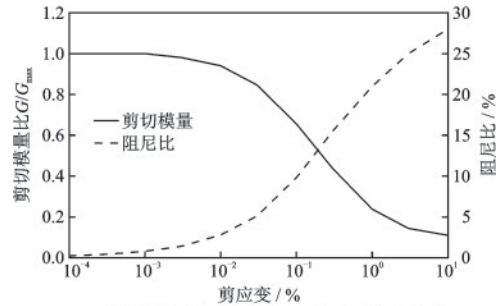
图7 动力时程有限元模型

Fig.7 Dynamic time history finite element model

反应位移法中作用于结构上的土层位移、剪力和加速度均由等效线性化程序EERA对场地进行一维自由场地震反应分析计算,由于缺少当地土体动力参数,采用典型的砂土和黏土剪切模量比、阻尼比与剪应变幅的试验曲线^[17],如图8所示,土体阻尼计算采用文献[18]的计算方法。



(a) 砂土的剪切模量比和阻尼比与剪应变幅曲线



(b) 黏土的剪切模量比和阻尼比与剪应变幅曲线

图8 砂土、黏土本构关系

Fig.8 Constitutive curves of sand and clay

为反映不同频谱成分的地震动对地下结构反应的影响,选取峰值加速度为0.1g的3种不同地震动(Kobe地震动、EL Centro地震动、Loma Prieta地震动)输入,如图9所示。

考虑单一大开车站模型计算结果的特殊性,本文选取两层三跨车站SS1与两层两跨车站SS2进行附加计算,采用Kobe地震动,图8土层动力参数。

车站SS1结构断面如图10所示,结构埋深为

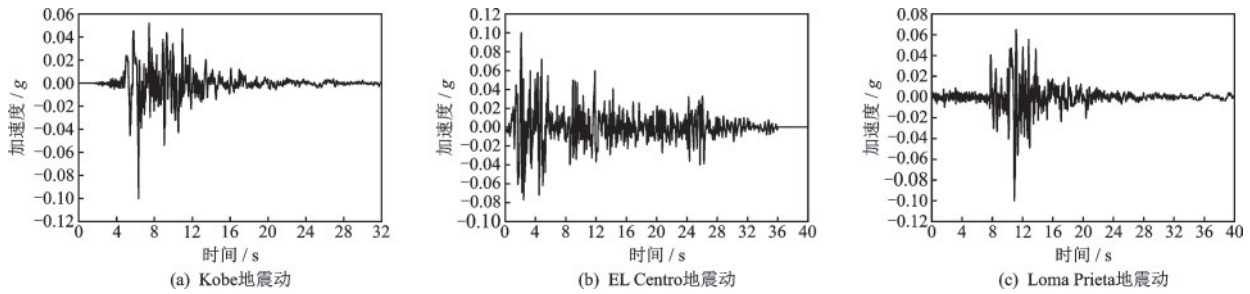


图9 加速度时程曲线

Fig.9 The acceleration time history curve

2.9 m,土层参数见表2。结构中柱沿车站纵向9 m等间距分布,按等效原则等效后弹性模量取为 3.15×10^3 MPa,密度取为 2.39×10^2 kg/m³。中层板弹性模量取为 3.15×10^4 MPa,密度取为 2.39×10^3 kg/m³。顶底板与侧墙弹性模量取为 3.45×10^4 MPa,密度取为 2.42×10^3 kg/m³。

10^3 kg/m³。结构顶底板与侧墙弹性模量取为 3.45×10^4 MPa,密度取为 2.42×10^3 kg/m³。

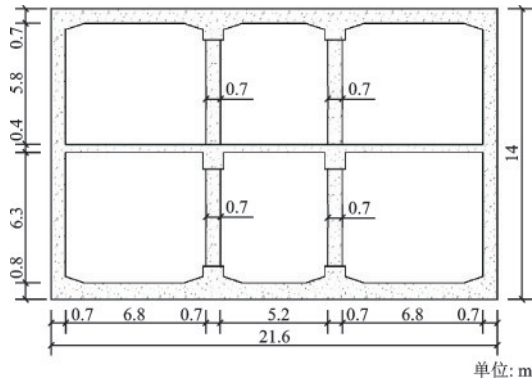


图10 SS1结构断面

Fig.10 Standard cross-section of SS1

表2 SS1土层物理性质

Table 2 Physical properties of soils of SS1

分层	土质	厚度/ m	密度/ (t·m ⁻³)	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	泊松比
1	粉土填土	2.5	1.7	148	0.35
2	粉土	5	2.0	210	0.35
3	粉质黏土	6.6	2.0	235	0.36
4	粉质黏土	3	2.02	242	0.36
5	粉质黏土	15	2.0	280	0.33
6	砂土	4	2.1	423	0.28

车站SS2结构断面如图11所示,结构埋深为3.5 m,土层参数见表3。结构中柱沿车站纵向6.5 m等间距分布,按等效原则等效后弹性模量取为 5.33×10^3 MPa,密度取为 4.05×10^2 kg/m³。中层板弹性模量取为 3.15×10^4 MPa,密度取为 $2.39 \times$

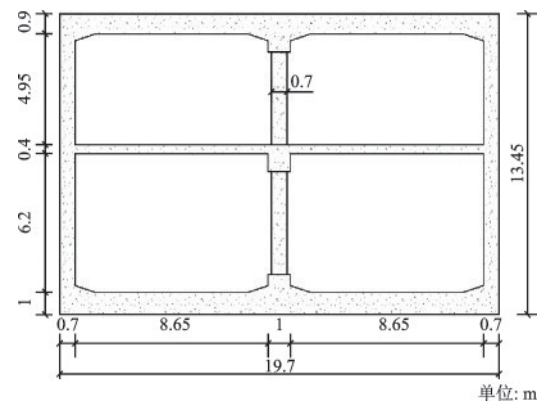


图11 SS2结构断面

Fig.11 Standard cross-section of SS2

表3 SS2土层物理性质

Table 3 Physical properties of soils of SS1

分层	土质	厚度/ m	密度/ (t·m ⁻³)	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	泊松比
1	素填土	0.8	1.89	136	0.38
2	黏土	2.7	1.95	138	0.37
3	粉质黏土	4.6	1.93	146	0.36
4	黏土	3.5	1.84	170	0.37
5	粉砂夹粉土	3.4	1.89	200	0.35
6	粉砂	3.9	1.91	217	0.34
7	粉质黏土	4.1	1.96	246	0.36
8	粉质黏土夹粉砂	9.5	1.91	250	0.38
9	粉质黏土	6.4	1.95	293	0.35
10	粉土夹粉质黏土	1.6	1.9	289	0.37
11	粉砂	10.2	1.88	331	0.35

2.2 内力比较

杜修力等^[14,19-20]研究指出地下结构中柱为抗震关键构件,因此,选取中柱顶底板相对位移、中柱底

部弯矩、中柱底部剪力和侧墙底部弯矩等4个参数进行结构内力对比分析,如图12所示。截面弯矩及剪力以每延米的值表示,弯矩单位为 $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$,位移单位为 mm ,剪力单位为 kN/m 。图中纵坐标误差的计算以动力时程为基准,横坐标 $A_1\sim H_1$ 表示静力有限元刚度法的加载方式为单面水平垂直分别加载(图2所示的加载方式)、单面水平垂直同时加载、水平垂直两次加载、水平垂直一次加载、径向切向两次加载、径向环向两次加载、径向切向一次加载、径向环向一次加载, $A_2\sim H_2$ 表示对应的静力有限元柔度法的8种加载方式。

由图12可以看出:在不同加载形式下,采用静力有限元刚度法的反应位移法,其内力与变形最大误差在26%以内,采用柔度法的内力与变形最大误差达到50%,上述的两种最大内力误差均由C、D加载方式(即图3(b,c)两种加载方式)所致。若不考

虑C、D两种加载方式的计算结果,采用静力有限元刚度法的内力与变形最大误差在16%以内,采用柔度法的内力与变形最大误差在20%左右。文献[21]中指出不同工况下反应位移法计算的内力误差可以达到38%,即反应位移法这种简化方法本身可能产生30%~40%的内力误差,可见上述B、E、F、G、H加载形式导致的最大误差均在合理范围内。另外,采用传统静力有限元加载方式 A_1 和 A_2 的反应位移法计算的结构最大内力与变形误差为20%,采用B、E、F、G、H加载方式的反应位移法计算的结构最大内力与变形误差同样为20%,即B、E、F、G、H加载方式产生的最大误差与传统加载方式产生的最大误差一致。综上所述,除去C、D加载方式,其余加载方式的静力有限元刚度法和柔度法计算的弹簧刚度系数对反应位移法计算的结构内力与变形的影响较小,考虑不同加载方式的计算次数差

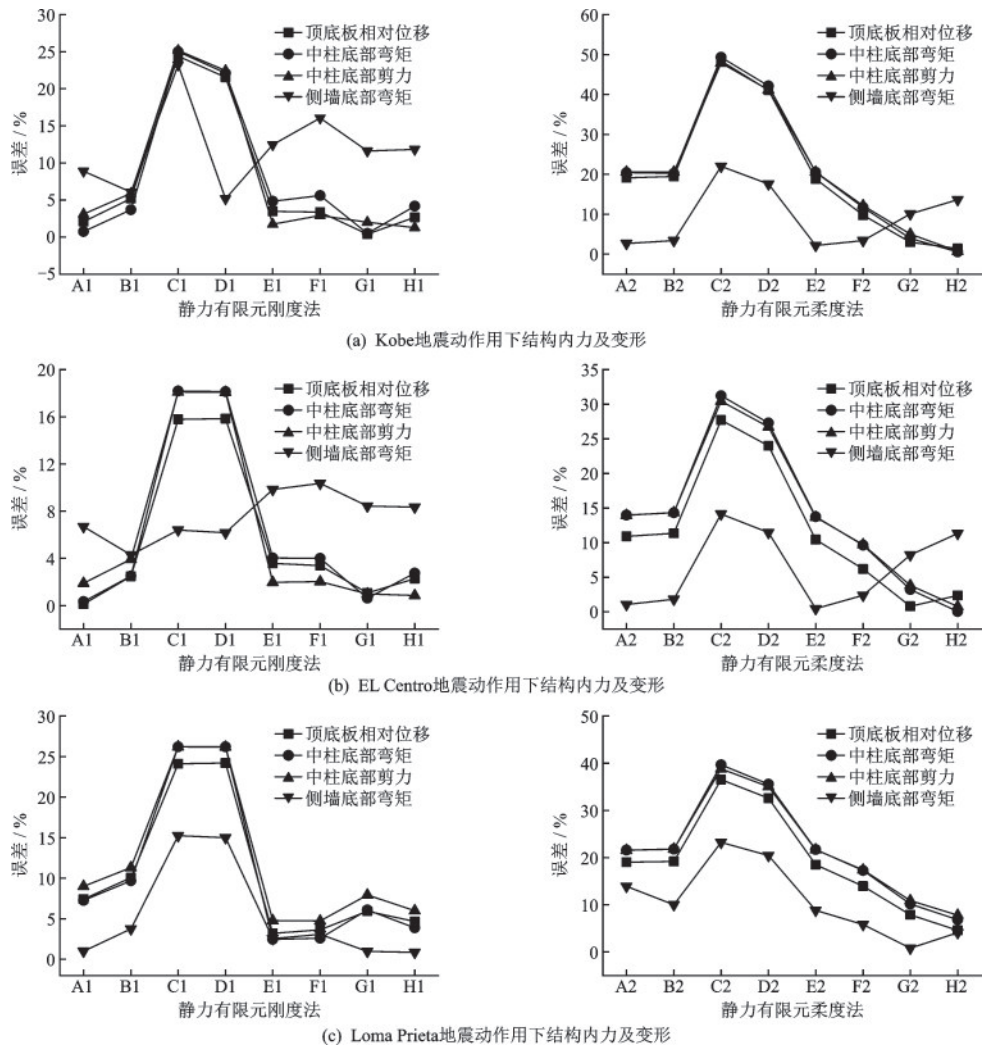


图12 结构变形与内力对比

Fig.12 Comparison of structural deformation and internal forces

异,可以采用静力有限元刚度法和柔度法中G、H(即径向切向一次加载和径向环向一次加载)4种一次加载方式简化弹簧刚度系数的计算。

为了验证上述分析结果的适用性,对2.1节选取的两座车站在Kobe地震动作用下进行上述4种一次加载方式的反应位移法计算,结构内力与误差结果如图13所示。图中横坐标A₁、G₁、H₁、G₂、H₂与图12的横坐标对应,分别表示静力有限元法加载方式为单面水平垂直分别施加荷载、径向切向一次施

加荷载、径向环向一次施加荷载、径向切向一次施加位移、径向环向一次施加位移,纵坐标误差仍以动力时程为基准进行计算。

图中可以看出:与动力时程相比,采用传统静力有限元加载方式A的反应位移法计算的结构侧墙弯矩最大误差为30%,中柱关键参数的最大误差为15%。而采用径向切向一次加载计算弹簧刚度系数求得的结构侧墙弯矩最大误差为30%,中柱关键参数的最大误差为15%;采用径向环向一次加载

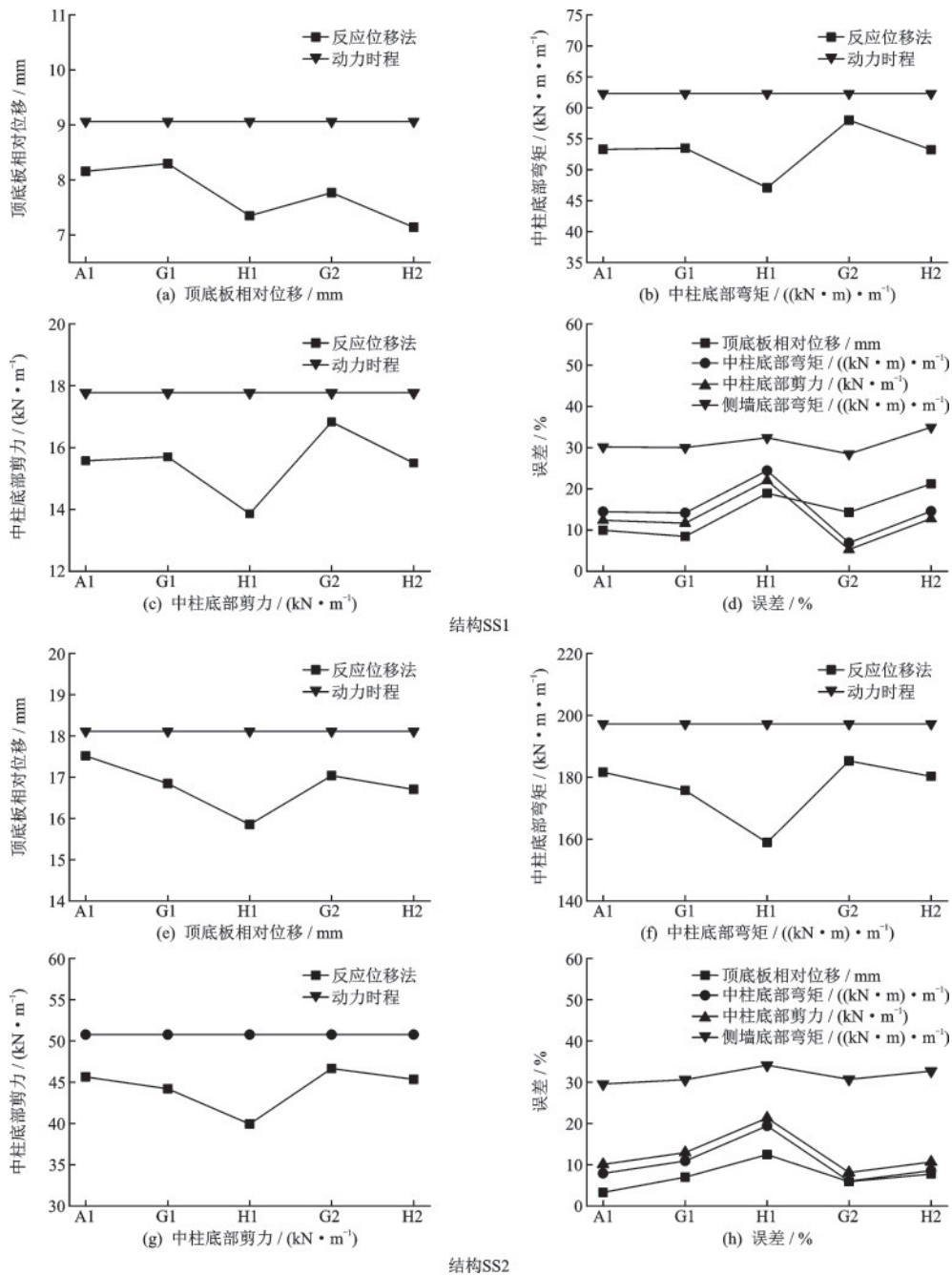


图13 SS1、SS2结构变形与内力

Fig.13 Structural deformation and internal forces of SS1 and SS2

计算弹簧刚度系数求得的结构侧墙弯矩最大误差为35%,中柱关键参数的最大误差为25%。上述的最大误差相比,径向切向一次加载与传统加载方式A产生的误差一致,而径向环向一次加载使侧墙弯矩误差增大5%,中柱关键参数误差增大10%,但其仍在合理误差范围内。由上可知,径向切向一次加载的静力有限元法可以在保证反应位移法的计算精度不变的前提下,使计算次数减少到1次,提高了计算效率。而径向环向一次加载,可以在精度略微减小的前提下提高计算效率。

3 结 语

基于《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)^[2]中的静力有限元法,对反应位移法的关键参数—弹簧刚度系数进行了8种不同加载形式的静力有限元刚度法和相对应的8种静力有限元柔度法的计算,并以三座不同结构形式的地下车站为模型,将不同弹簧刚度系数情况下反应位移法的计算结果与严格的动力时程分析方法计算结果进行对比。研究表明:不论静力有限元刚度法还是柔度法,文中所述的8种加载方式,除水平竖直加载方式外,其余加载方式计算的弹簧刚度系数对结构的变形和内力影响较小,考虑计算效率,可以采用径向切向和径向环向一次加载形式的静力有限元法简化反应位移法中弹簧刚度系数的计算。依据本文算例分析,优先推荐使用径向切向一次加载简化计算。

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 Ch S, Xu Z G, Du X L, 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] 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. (in Chinese)

[3] 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): 685-692.
Ding D Y, Yang X R. Discussion on the spring constant of ground foundation in seismic design of underground structures using the response displacement method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 685-692. (in Chinese)

[4] 林皋. 地下结构抗震分析综述(下)[J]. 世界地震工程, 1990(2):3-12.
Lin G. Review on seismic analysis of underground structures (part 2)[J]. World Earthquake Engineering, 1990(2):3-12. (in Chinese)

[5] 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 Y M, Wang L, Liu Y B, 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)

[6] 屈成忠, 宋巍. 不同工况下基床系数的取值研究[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(1):8-12.
Qu Ch Zh, Song W. Study on the foundation modulus dereferencing under different conditions[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2009, 29(1): 8-12. (in Chinese)

[7] 蒋通, 宋晓星. 层状地基中埋管地基阻抗函数的分析方法[J]. 力学季刊, 2009, 30(2):243-249.
Jiang T, Song X X. Analysis of impedance function of stratified soil with underground tunnel [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2009, 30(2): 243-249. (in Chinese)

[8] 王文沛, 陶连金, 张波, 等. 基于薄层分析的反应位移法研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8): 1231-1235.
Wang W P, Tao L J, Zhang B, et al. Displacement response method based on thin layer method[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1231-1235. (in Chinese)

[9] 黄茂松, 刘鸿哲, 曹杰. 软土隧道横向抗震分析的简化响应位移法[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3115-3121.
Huang M S, Liu H Zh, Cao J. Simplified response displacement method for transverse aseismic analysis of soft soil tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3115-3121. (in Chinese)

[10] 董正方, 王君杰, 赵东晓, 等. 浅埋盾构隧道地基弹簧刚度的求解方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35

- (6):28-32.
- Dong Zh F, Wang J J, Zhao D X, et al. Solving method for soil spring stiffness of shallow shield tunneling [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 35(6):28-32. (in Chinese)
- [11] 仲锁庆, 张西平, 潘海利. 地基土基床系数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(增1):1109-1112.
- Zhong S Q, Zhang X P, Pan H L. Study on foundation soil coefficient of subgrade reaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1 (Sup1): 1109-1112. (in Chinese)
- [12] 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 L, Yang X H, Du X L. Improved response displacement method for evaluating seismic responses of underground structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7):1360-1364. (in Chinese)
- [13] 宾佳, 景立平, 崔杰, 等. 反应位移法中弹簧系数求解方法改进研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 525-531.
- Bin J, Jing L P, Cui J, et al. Improvement of spring constant calculation in response displacement method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36 (3): 525-531. (in Chinese)
- [14] 杜修力, 许紫刚, 许成顺, 等. 浅埋地下结构地震反应分析的惯性力-位移法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (4): 583-591.
- Du X L, Xu Z G, Xu Ch Sh, et al. Inertia force-displacement method for seismic analysis of shallow buried underground structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 583-591. (in Chinese)
- [15] Nakamura S, Yoshida N, Iwatate T. Damage to Daikai subway station during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake and its investigation [J]. Japan Society of Civil Engineers, Committee of Earthquake Engineering, 1996:287-295.
- [16] 田雪娟. 地铁车站抗震分析[D]. 北京:北京交通大学, 2010.
- Tian X J. Seismic analysis of subway station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [17] Bardet J P, Ichii K, Lin C H. EERA-A computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits [R]. Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000.
- [18] 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, 2017, 40(12):2155-2163.
- Du X L, Xu Z G, Xu Ch Sh, et al. Time-history analysis method for soil-underground structure system based on equivalent linear method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 40(12): 2155-2163. (in Chinese)
- [19] 杜修力, 马超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1):57-66.
- Du X L, Ma Ch, Lu D Ch, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Dakai subway station under seismic loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1):57-66. (in Chinese)
- [20] 杜修力, 王刚, 路德春. 日本阪神地震中大开地铁车站地震破坏机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2):165-171.
- Du X L, Wang G, Lu D Ch. Earthquake damage mechanism analysis of dakai metro station by kobe earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2):165-171. (in Chinese)
- [21] 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 W H. Research on practical seismic analysis methods and performance index of underground structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)