

徐琨鹏,景立平,宾佳.地下结构强制反应位移法和反应加速度法的对比分析[J].地震工程学报,2020,42(4):967-972.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.967
XU Kunpeng, JING Liping, BIN Jia. A Comparative Analysis of Forced Displacement and Response Acceleration Methods for Underground Structures[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 967-972. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.967

地下结构强制反应位移法和反应 加速度法的对比分析

徐琨鹏, 景立平, 宾佳

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 首先基于地震作用下地下结构的变形受周围地基土变形控制这一相互作用特征,在反应位移法的基础上讨论两种简化分析方法:一种是将土层变形施加在模型边界模拟地震作用;另一种是将土层加速度施加到整个模型上模拟地震作用。这两种简化分析方法都避免了反应位移法中弹簧刚度的取值问题,提高了计算效率。其次分析不同地震动强度、不同侧边距的计算结果,并用动力时程分析的计算结果校核,分析两种简化计算方法的精度。结果表明:随着地震动强度的增加两种简化分析方法的计算结果都令人满意,使用强制反应位移法时建议侧边距取两倍结构宽度,使用反应加速度法时建议侧边距取三倍以上结构宽度。

关键词: 地下结构; 强制反应位移法; 反应加速度法; 侧边距; 抗震分析

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0967-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.967

A Comparative Analysis of Forced Displacement and Response Acceleration Methods for Underground Structures

XU Kunpeng, JING Liping, BIN Jia

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: Two kinds of simplified analytical methods are discussed. Both were derived from the response deformation method based on the premise that the deformation of an underground structure depends on the deformation of the foundation soil. One method applied ground displacement to the boundary of the finite element model to simulate seismic load; the other applied ground acceleration to the integral finite element model to simulate seismic load. Both simplified analytical methods avoided calculating the value of the spring stiffness and improved the computational efficiency. Calculated results with different ground motion intensities and lateral margins were obtained and checked with the results of the dynamic time-history method. They showed that the

收稿日期: 2018-05-16

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2014B03, 2017B10, 2017B14); 国家重点研发计划(2016YFC0800205); 国家自然科学基金项目(51438004)

第一作者简介: 徐琨鹏(1995-), 男, 硕士, 主要从事地下工程抗震方面的研究。E-mail: iem_xkp@163.com。

通信作者: 景立平(1963-), 男, 研究员, 主要从事地下工程抗震方面研究及教学。E-mail: jing_liping@126.com。

results of the two simplified analytical methods were satisfactory as the ground motion intensity increased. The lateral margin had to be twice the width of the structure when using the forced displacement method, and needed to be more than three times the width of the structure when using the response acceleration method.

Keywords: underground structure; forced response displacement method; response acceleration method; lateral margin; seismic analysis

0 引言

近年来,为了缓解城市空间不足问题,全世界都在大力发展地下工程以提高城市空间利用率,地下工程已经成为城市正常运转不可或缺的生命线工程,包括地下管线系统、轨道交通、地下停车场、地下商场等^[1]。但是地下结构的安全却没有得到相应的重视,过去人们都认为地下结构的抗震性能优于地面结构,所以没有充分地重视地下结构的抗震设计,导致地下结构抗震研究以及设计规范发展迟缓。直到 1995 年日本阪神大地震造成了地下结构的严重破坏^[2],地下结构的抗震问题才真正吸引了学者们的关注。

长期以来我国没有专门针对地下结构的统一抗震设计规范,各种规范所采用的方法和参数都不一致。我国早期的很多地下结构抗震设计依然沿用地面结构的静力设计思想,但是地下结构在地震过程中受地基土约束,变形也受土体控制^[3-4],从抗震原理上来说与地面结构有所区别。

美国和日本等发达国家对地下结构抗震的研究较早,并且在结构变形受土体控制这一思想的基础上,提出了很多实用的简化抗震设计方法,包括自由场变形法、柔度系数法以及推广度较高的反应位移法等。中国的建筑抗震设计规范采用反应位移法,但是其中地基弹簧系数对于计算结果存在着决定性影响,弹簧系数的取值又难以准确确定。为了避免弹簧系数的取值问题,许多学者提出了改进方法,如 Akira 等^[5]提出了强制反应位移法,片山等^[2]提出了反应加速度法,刘晶波等^[6-7]提出了 Push-over 方法、整体式反应位移法,这些简化分析方法的提出都为地下结构抗震指明了新的方向,但是其适用性却不是十分明朗。

本文在大型通用有限元软件 ABAQUS 的基础上,针对一个双跨箱形地下结构的算例,通过强制反应位移法和反应加速度法进行计算对比,然后结合动力时程分析的结果,分析其弯矩、剪力、相对位移的计算精度,验证两种地下结构抗震简化分析方法的适用性和正确性。

1 常用地下结构抗震分析方法简介

1.1 动力时程分析法

动力时程分析法即通过有限元软件,建立土层-结构模型,结构采用梁单元模拟,当只考虑从底部向上传播的剪切波时,两侧边界采用竖向固定、水平向释放的方式,底边界固定竖向,然后在水平向以加速度时程或速度时程等地震动记录输入模型,从而模拟水平地震动作用下土-地下结构地震反应。计算模型示意图见图 1。动力时程分析法通过逐步积分可以求得结构在施加地震动的整个过程中所有时刻的动力响应,可以比较精确地处理各种材料的非线性,还能考虑地震波本身的频谱特性和振动持时。因为计算结果比较精确,该方法目前常用于各种简化分析方法的校核,但是在实际使用的过程中动力分析需要有较好的描述土动力特性的本构关系,而且非线性计算时间比较长,求解代价很大,所以对于使用人员以及计算设备的要求都比较高,通常只用于重大工程项目抗震设计的计算分析。

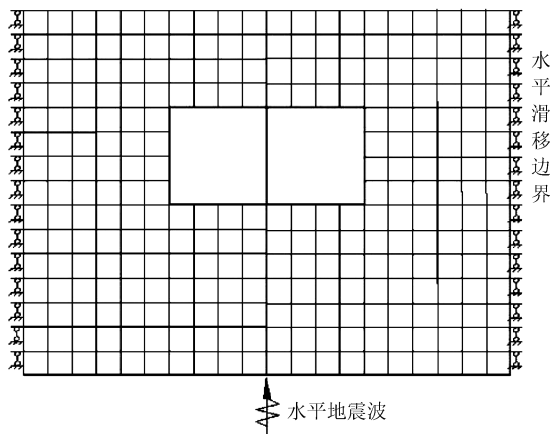


图 1 动力时程分析法模型

Fig.1 Dynamic time history method model

1.2 强制反应位移法

强制反应位移法是反应位移法的一种简化形式,这种简化的目的是为了避开弹簧刚度值的计算,计算过程与反应位移法类似,都是首先计算出地震作用下结构顶底板对应位置处土层的最大位移差,

此时结构处于最大变形状态,也是结构响应最大的状态,然后取出该时刻所有土层的相对位移,在有限元模型的两侧以强制位移的形式施加在侧边界上,采用静力的方法计算结构响应,模型见图 2。但是 Akira 在文章中指出以这种方法处理荷载会造成自由场应变只能在静力模型的边界及附近位置准确传递,在远离边界的位置会因为土体阻尼的存在而衰减,尤其是结构周围的土体,应变会衰减 20%~50%。但是由于结构刚度一般比土体刚度大,结构变形应该小于自由场变形,若把侧边距设置过小,土体阻尼不能发挥作用时,自由场变形就相当于直接施加在结构本身,这样也会导致结构响应过大,需要找出一个比较合适的侧边距才能够让该方法真实的体现结构响应。

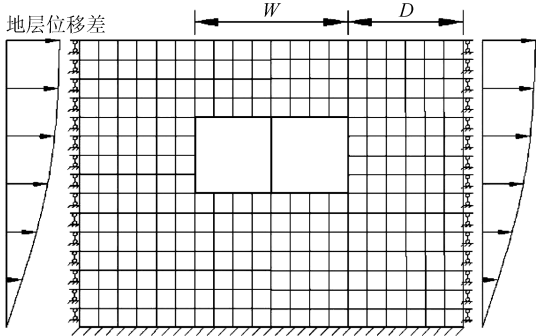


图 2 强制反应位移法模型

Fig.2 Forced displacement method model

1.3 反应加速度法

反应加速度法是反应位移法的另一种简化途径,目的同样是为了避免弹簧刚度取值不准造成的计算误差。首先计算出地震作用下结构顶底板对应位置处土层的最大位移差,然后取出该时刻所有土层的加速度,再将加速度施加到整个土层和结构上面,以静

力的方法计算结构响应,模型见图 3。近年来国内逐渐采纳并推广了反应加速度法,上海地方标准《地下铁道建筑结构抗震设计规范》^[8]、国家标准《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[9]都引入了该方法。

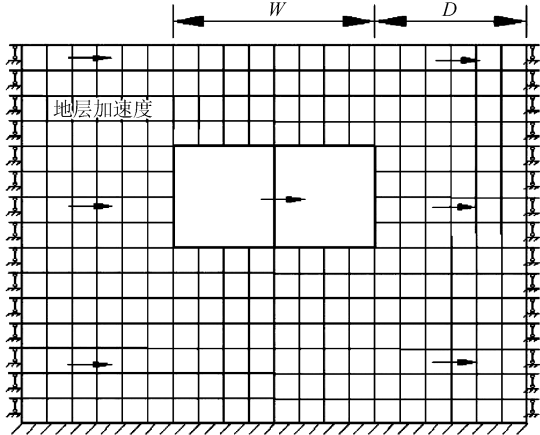


图 3 反应加速度法模型

Fig.3 Response acceleration method model

2 算例分析

2.1 模型建立

本文针对单一土层中埋深 7 m 的双跨矩形地下结构在地震作用下的响应建立模型。矩形地下结构尺寸为 8 m×4 m,墙厚 0.8 m,分别以动力时程分析法、强制反应位移法和反应加速度法计算其弯矩、剪力和中柱相对变形。采用瑞利阻尼,α 和 β 的值分别为 0.5 和 0.005,该地下结构的横截面抗震分析参照平面应变问题考虑,土体与结构之间的接触采用 ABAQUS 自带的面对面摩擦型接触,切向行为采用粗糙,法向行为采用硬接触。土体与结构参数列于表 1。

表 1 土体与结构的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil and structure

类型	密度/(g·cm ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
土体	1.9	30	0.3	30	30
结构	2.3	30 000	0.167		

动力时程分析法参照规范将侧边距和底边距取为结构宽度和高度的 4 倍,然后改变模型尺寸进行两种简化分析方法的试算。模型见图 4、5。

动力时程分析时地震波从模型底部水平向输入,输入为 El-Centro 波。自由场模型与土-结构动力时程模型采用相同的土体参数,各震动强度下土层位移差最大时刻的相对位移分布和加速度分布见图 6、7(此时结构顶底所在的土层位移差

最大)。
2.2 结构响应分析
2.2.1 不同侧边距结果分析
首先计算出动力时程分析法的结果作为校核标准,此时模型侧边距取为结构宽度的 4 倍,再改变模型尺寸以两种简化分析方法对结构响应进行计算。截面的弯矩、剪力和相对位移计算结果列于表 2。此时输入地震动的峰值加速度均为 0.4g。

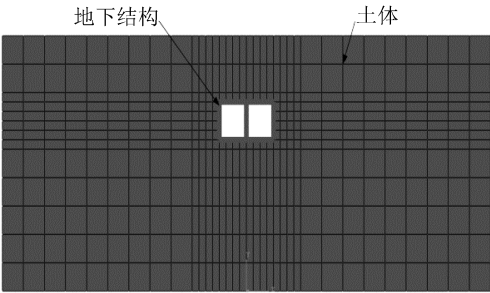


图 4 二维土-结构动力时程模型

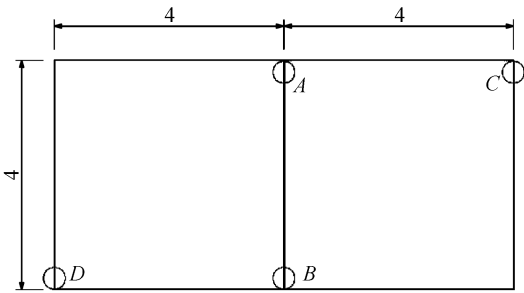


图 5 结构尺寸与控制截面

Fig.4 Two-dimension soil-structure dynamic model

Fig.5 Size of structure and control sections

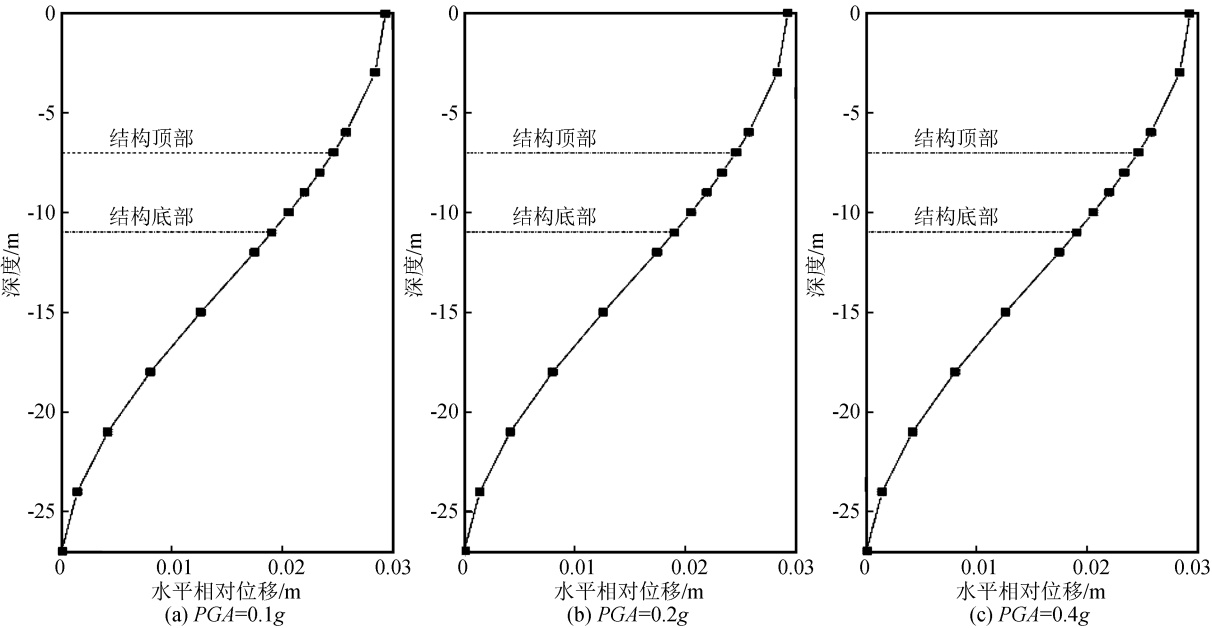


图 6 各工况自由场最不利水平相对位移分布

Fig.6 Least favorable displacement distribution of free-field under different condition

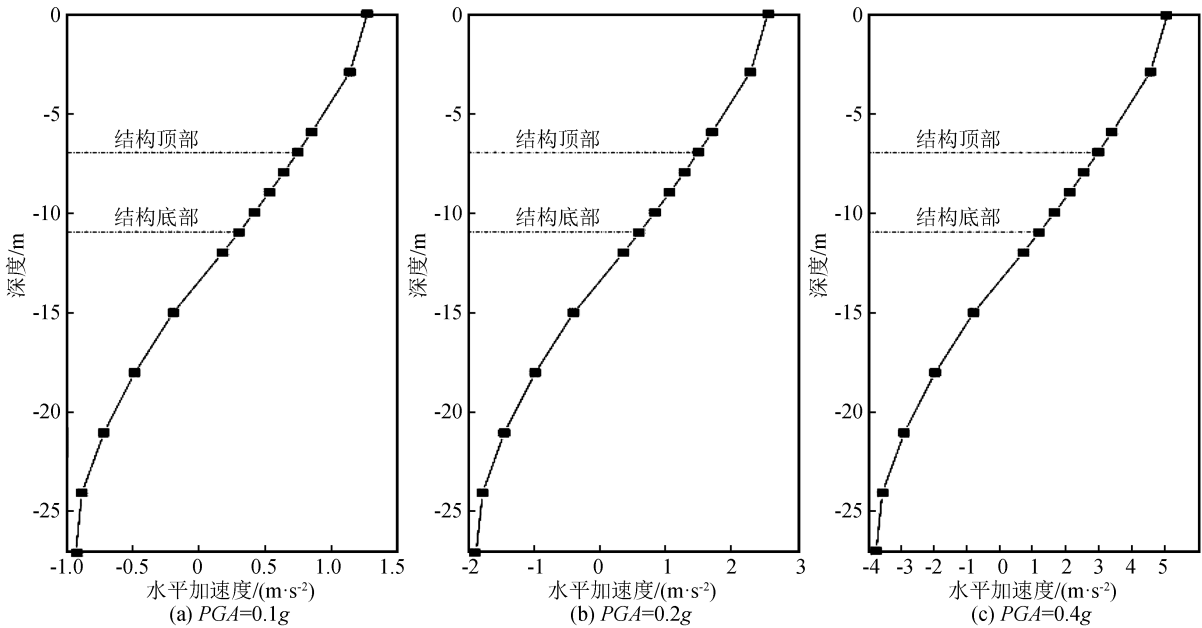


图 7 各工况自由场水平加速度分布

Fig.7 Acceleration distribution of free-field under different condition

表 2 不同侧边距的弯矩、剪力和变形计算结果

侧边距 (D/W)		弯矩/(kN·m)					剪力/kN					中柱顶底相对 位移/mm	
		截面 A	截面 B	截面 C	截面 D	误差 /%	截面 A	截面 B	截面 C	截面 D	误差 /%	截面 A~C	误差 /%
1 倍	强制反应位移法	451.7	−418.7	350.8	445.0	31.76	−256.0	−256.0	−231.1	−344.7	35.43	4.677 9	0.90
	反应加速度法	279.2	−252.3	244.0	313.1	7.83	−156.3	−156.3	−175.9	−250.5	7.25	3.911 1	15.64
2 倍	强制反应位移法	281.6	−324.0	269.8	350.7	1.05	−178.3	−178.3	−196.2	−291.9	4.61	1.338 5	71.13
	反应加速度法	292.8	−264.7	252.8	321.4	5.04	−164.0	−164.0	−180.7	−255.5	4.04	4.268 4	7.94
3 倍	强制反应位移法	191.1	−170.6	195.1	268.8	29.17	−106.9	−106.9	−165.1	−245.3	24.54	0.570 8	87.69
	反应加速度法	298.5	−269.9	256.0	325.1	5.46	−167.2	−167.2	−182.7	−258.0	2.64	4.320 4	6.81
4 倍	强制反应位移法	161.4	−101.9	140.9	210.6	44.66	−56.4	−56.4	−140.0	−213.2	45.99	0.104 6	97.74
	反应加速度法	266.8	−305.3	257.5	326.2	3.91	−168.3	−168.3	−183.0	−258.5	2.22	4.332 4	6.55
	动力分析	279.1	−323.1	266.6	337.3		−171.6	−181.7	−186.3	−265.2		4.636 3	

可见在 0.4g 地震动强度下,强制反应位移法的精度非常依赖于静力模型的侧边界选取,当侧边距取为 3 倍以上结构宽度时,弯矩与剪力的计算误差会越来越大,而因为土体阻尼的原因,变形的计算则是侧边距越小,计算误差越小。反应加速度法则是随着模型侧边距的增大,各项数据的计算误差都在减小,但是变化幅度很小。

2.2.2 不同地震强度结果分析

从上面可知强制反应位移法最好选取两倍结构宽度作为侧边距,而反应加速度法对于侧边距的选取不敏感,便统一采用两倍侧边界的静力模型。为了反映震动强度对两种方法计算精度的影响,分别采用 0.1g、0.2g 和 0.4g 的地震波进行计算。弯矩、剪力计算结果见表 3。

表 3 不同工况的弯矩及剪力计算结果

侧边距 (D/W)		弯矩/(kN·m)					剪力/kN				
		截面 A	截面 B	截面 C	截面 D	误差 /%	截面 A	截面 B	截面 C	截面 D	误差 /%
0.1g	动力分析	−256.0	−256.0	−231.1	−344.7	35.43	−42.9	−45.5	−126.6	−193.7	
	强制反应位移法	−156.3	−156.3	−175.9	−250.5	7.25	−50.9	−50.9	−126.3	−197.3	6.87
	反应加速度法	−178.3	−178.3	−196.2	−291.9	4.61	−41.0	−41.0	−124.3	−190.1	3.15
0.2g	动力分析	−164.0	−164.0	−180.7	−255.5	4.04	−85.9	−90.9	−146.5	−217.5	
	强制反应位移法	−106.9	−106.9	−165.1	−245.3	24.54	−100.3	−100.3	−146.8	−226.4	7.22
	反应加速度法	−167.2	−167.2	−182.7	−258.0	2.64	−82.0	−82.0	−143.1	−211.9	3.56
0.4g	动力分析	−56.4	−56.4	−140.0	−213.2	45.99	−171.6	−181.7	−186.3	−265.2	
	强制反应位移法	−168.3	−168.3	−183.0	−258.5	2.22	−178.3	−178.3	−196.2	−291.9	4.61
	反应加速度法	−171.6	−181.7	−186.3	−265.2		−164.0	−164.0	−180.7	−255.5	4.05

可见在面对不同强度地震波的时候,两种方法计算得到的内力数值相当。误差都处于一个比较小的量级,即计算结果比较精确,设计人员在设计阶段可以以这两种方法的计算结果作为参考。

3 两种简化分析方法的特点分析

强制反应位移法和反应加速度法的相同点在于都能够自动考虑土-结构相互作用,简化了地基弹簧刚度系数的取值这一难题,使得计算效率大大提高,而且在不同工况下都能得到令人满意的精度。但是这两种简化方法都需要进行自由场动力时程分析,从而获取地层位移或者地层加速度作为静力计

算的地震作用。

强制反应位移法和反应加速度法的不同点在于对于静力模型侧边界的选取,反应加速度法适应性比较广,对于不同的侧边距都能得到很好的计算精度,计算精度随着侧边距的增加会有略微的提高;但是对于强制反应位移法来说,侧边界的选取对于计算精度有重大影响,侧边距过大会导致结构响应偏小,侧边距过小会导致结构响应偏大,从计算结果来看建议采用两倍结构宽度作为侧边距。对于结构变形,由于强制反应位移法直接以位移作为施加荷载的方式,土体阻尼的存在让变形计算变得不够准确,这方面的研究还有待加强。

4 结 论

- (1) 强制反应位移法和反应加速度法计算得到的横断面在地震作用下的弯矩、剪力数值接近、规律一致,在不同强度地震作用下都能获得很好的计算精度。
- (2) 强制反应位移法和反应加速度法都省略了地基弹簧刚度系数的取值,同时还更加真实地反映了土-结构间的协调作用,且使用更加简便。
- (3) 模拟地震等效荷载的土层位移和土层加速度具有较好的计算精度,而且便于施加。
- (4) 具体在使用的时候,强制反应位移法的侧边距应该取为结构宽度的两倍;反应加速度法则建议取为结构宽度的 3 倍及以上。

参考文献(References)

[1] 陈晓强,钱七虎.我国城市地下空间综合管理的探讨[J].地下空间与工程学报,2010,6(4):666-671.
CHEN Xiaoqiang,QIAN Qihu.Study on the Integrated Management of Urban Underground Space in China[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2010,6(4):666-671.

[2] IIDA H,HIROTO T,YOSHIDA N,et al.Damage to Daikai Subway Station[J].Soils and Foundations,1996,36(Special):283-300.

[3] 林皋.地下结构抗震分析综述(上)[J].世界地震工程,1990,6(2):1-10.
LIN Gao.Overview of Anti-seismic Analysis for Underground

Structures (I).World Information on Earthquake Engineering,1990,6(2):1-10.

[4] 林皋.地下结构抗震分析综述(下)[J].世界地震工程,1990,6(3):1-10,42.
LIN Gao.Overview of Anti-seismic Analysis for Underground Structures (II).World Information on Earthquake Engineering,1990,6(2):1-10,42.

[5] TATEISHI A.A Study on Seismic Analysis Methods in the Cross Section of Underground Structures Using Static Finite Element Method[J].Structural Engineering,2005,22(1):41s-54s.

[6] 刘晶波,刘祥庆,李彬.地下结构抗震分析与设计的 Pushover 分析方法[J].土木工程学报,2008,41(4):73-80.
LIU Jingbo,LIU Xiangqing,LI Bin.A Pushover Analysis Method for Seismic Analysis and Design of Underground Structures[J].China Civil Engineering Journal,2008,41(4):73-80.

[7] 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 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):1618-1624.

[8] 地下铁道建筑结构抗震设计规范;DG/TJ 08-2008[S].上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2009
Code for Seismic Design of Subway Structures;DG/TJ 08-2008 [S].Shanghai;Shanghai General Administration of Market for Construction and Construction Materials.

[9] 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.
Code for Seismic Design of Urban Rail Transit Structures;GB 50909-2014 [S].Beijing:China Planning Press,2014.