

上海软土地地铁车站结构的横向地震响应分析*

袁 勇^{1,2} 王 祺¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海;

2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 200092, 上海//第一作者, 教授)

摘 要 以上海软土地地铁车站结构为分析对象,通过二层三跨和三层三跨两种典型车站,与场地深度和底部边界类型组合成8组场地-车站结构分析模型,研究车站结构地震响应分析的差异,探讨地铁车站结构横向地震响应分析模型选择边界范围和类型的合理方式。结果表明:当采用底部边界黏弹性透射边界时,不同深度模型响应基本一致;采用底部固定边界模拟刚性基岩时,基岩深度70 m的规范推荐模型计算结果较为保守,结构的地震响应会放大约55%。

关键词 地铁车站结构; 横向地震响应; 软土地

中图分类号 TU435: U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.043

Transverse Seismic Response Analysis of Shanghai Soft Soil Site Metro Station Structure

YUAN Yong, WANG Qi

Abstract Taking Shanghai soft soil site metro station structure as analysis object, through two typical stations of two-storey-three-span and three-storey-three-span, with site depth and bottom boundary type, 8 groups of site-station structure analysis model are composed. The station structure seismic response analysis difference is investigated. Reasonable method of choosing boundary range and type for metro station structure transverse seismic response analysis model is discussed. Results show that when viscoelastic bottom boundary is adopted, the responses of different depth models are basically the same. When fixed bottom boundary is used to simulate the rigid bedrock, the calculation results of the 70 m depth model are conservative, and the seismic response of the structure will be amplified by about 55%.

Key words metro station structure; transverse seismic response; soft soil site

First-author's address Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China

用有限元方法建立地铁车站的场地-结构模型分析地震动力响应时,需要确定计算区域,由此形成人工边界。GBT 51336—2010《地下结构抗震设计标准》给出了地下结构侧向及底部同人工边界的距离范围^[1],但并没有限定人工边界的选择方式。常见的人工边界有透射边界^[2]、黏性边界^[3]、黏弹性边界^[4]、一致边界^[5]及等位移边界^[6]等。当从半无限的深厚软土地截取有限的区域时面临的首要问题是,远端人为边界既要传递地震输入,又要透射或吸收区域内部的散射波,故计算范围应足够大,使结构散射不会对远端边界产生影响。

二维场地-结构分析模型常用于分析地铁车站及隧道等地下结构的横断面地震响应问题。研究发现,人工边界对无限域的模拟精度会直接影响二维横断面场地-结构分析模型的模拟精度^[7];尤其是深厚软土地的底部边界位置,其不仅影响场地地表加速度响应的峰值,也会导致场地基频变化。DG/TJ 08-2064—2009《地下铁道建筑结构抗震设计规范》建议,取70 m深度为假设基岩。但对于三层车站底部边界,该假设基岩可能不满足大于3倍结构尺度的要求。因此,研究数值模型中的地铁车站底板同假定基岩面距离,以及底部边界类型,有利于澄清数值模型选取方式对场地-结构地震响应分析结果的影响。

本文以二层三跨和三层三跨两种浅埋车站为例,建立场地-车站模型,对上海软土地区设防地震作用下的地层及地铁车站结构弹性动力响应进行研究。在场地-车站模型中:土体和车站结构均采用等效线性化本构关系;土体与车站结构的接触面为理想的无滑移连接;侧向远端采用等位移边界,边界距结构的距离应足够远;设定地震作用力从底部边界的基岩面输入,地震振动强度参数按上海市的

* 国家自然科学基金资助项目(51478343,51778487)

设防烈度选取。底部基岩面按照 DG/TJ 08-2064—2009 取为地表下 70 m,分别考察底部边界设为固定边界和黏弹性边界的差异,为地下结构地震安全性评价提供依据。

1 典型车站结构

1.1 地层参数

根据沿江通道的岩土工程勘察报告,上海软土

场地在埋深为 150 m 处土体的剪切波速基本达 500 m/s,符合 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》对基岩的规定^[8]。土层参数如表 1 所示。

1.2 车站结构

1.2.1 二层三跨车站

二层三跨车站结构如图 1 a)所示;其上覆土厚度为 5 m;车站结构外轮廓宽度为 21.34 m;车站中柱间距为 6 000 mm,对称布置;中柱至内墙内边距

表 1 上海沿江通道的土层参数
Tab.1 Soil layer parameters of Shanghai Yangtze River passage

计算序号	土层层号	土体类别	深度/m	层厚/m	剪切波速/(m/s)	体积质量/(kg/m ³)
1	①-1	填土	1.7	1.7	137	1 730
2	②-1	粉质黏土	3.2	1.5	138	1 830
3	②-3	砂质粉土	6.0	2.8	140	1 850
4	③-1	淤泥质粉质黏土	9.6	3.6	126	1 740
5	③-1	淤泥质粉质黏土	13.3	3.7	133	1 740
6	③-1	淤泥质粉质黏土	17.0	3.7	141	1 740
7	⑤-1	黏土	21.6	4.6	153	1 740
8	⑤-1	黏土	26.3	4.7	187	1 740
9	⑤-1	黏土	31.0	4.7	203	1 740
10	⑤-3	黏土	35.3	4.3	230	1 760
11	⑤-3	黏土	39.6	4.3	254	1 760
12	⑤-3	黏土	43.9	4.3	281	1 760
13	⑤-3	黏土	48.3	4.4	297	1 760
14	⑦-2	粉砂	52.7	4.4	339	1 840
15	⑦-2	粉砂	57.1	4.4	387	1 840
16	⑦-2	粉砂	61.6	4.5	362	1 840
17	⑦-2	粉砂	66.1	4.5	357	1 840
18	⑦-2	粉砂	71.5	5.4	365	1 920
19	⑦-2	粉砂	77.0	5.5	397	1 920
20	⑦-2	粉砂	82.5	5.5	396	1 920
21	⑦-2	粉砂	88.0	5.5	420	1 920
22	⑨-1	中砂夹粉细砂	92.8	4.8	436	1 960
23	⑨-1	中砂夹粉细砂	97.7	4.9	447	1 960
24	⑩	粉质黏土	105.2	7.5	466	1 920
25	⑭	粉质黏土	111.8	6.6	436	1 960
26	⑭	粉质黏土	118.4	6.6	446	1 960
27	⑭	粉质黏土	125.0	6.6	455	1 960
28	⑮	粉细砂	132.0	7.0	465	1 960
29	⑮	粉细砂	139.0	7.0	475	1 960
30	⑮	粉细砂	146.0	7.0	485	1 960
31	⑮	粉细砂	154.0	8.0	495	1 960

离为 6 870 mm;站厅层净高为 5 820 mm,站台层净高为 6 870 mm;车站结构外轮廓总高度为 14. 89 m;内墙厚 800 mm,底板厚 1 000 mm,顶板厚 800 mm,中板厚 400 mm;中柱截面为 600 mm×1 100 mm,底板纵梁截面为 800 mm×1 700 mm,中板下纵梁截面为 600 mm×900 mm,顶板纵梁截面为 800 mm×1 500 mm;纵向柱间距为 9. 12 m。车站采用现浇钢筋混凝土结构,混凝土等级 C40。地震响应分析不考虑围护墙临时结构的作用。

1.2.2 三层三跨车站

三层三跨车站结构如图 1 b)所示:上覆土层厚度为 5 m;车站结构外轮廓宽度为 22. 7 m;车站中柱间距为 6 000 mm,对称布置;中柱至内墙内边距离为 7 650 mm;地下一层净高为 4 400 mm,地下二层净高为 4 600 mm,站台层净高为 6 350 mm,总高度为 17. 85 m;墙厚 700 mm,底板厚 900 mm,顶板厚 800 mm,中板厚 400 mm;中柱截面为 800 mm×

1 000 mm,底板纵梁截面为 1 000 mm×1 900 mm,中板下纵梁截面为 1 000 mm×1 200 mm,顶板纵梁截面为 1 000 mm×1 200 mm;纵向柱间距 8 m。车站采用现浇钢筋混凝土结构,混凝土等级 C40。

2 场地-车站模型

2.1 模型范围

根据 GB 50909—2014《城市轨道交通结构抗震设计规范》规定采用时程分析法,计算模型见图 2。模型范围为:侧边人工边界距地下结构的距离不宜小于 3 倍地下结构的水平有效宽度,底面人工边界宜取至设计地震作用基准面,且距离结构的距离不小于 3 倍地下结构竖向有效高度^[9]。GB/T 51336—2018《地下结构抗震设计标准》的规定与之类似^[1]。

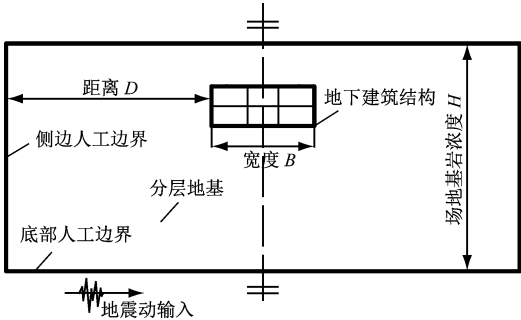


图 2 场地-地下结构模型计算简图

Fig. 2 Simplified display of site-underground structure model calculation

2.2 底部边界

2.2.1 黏弹性边界模型

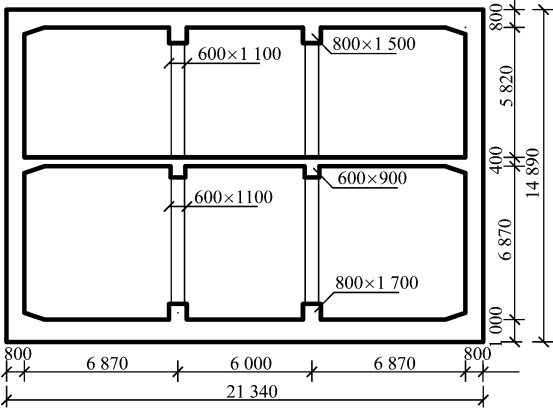
深厚软土场地地震反应分析的数值模拟表明,底部固定边界的误差较大,而采用黏弹性边界可以取得与解析方法吻合较好的结果^[10]。因此,场地-结构模型的底部边界应该采用黏弹性类的透射边界,并使用波动方法进行地震动输入。

二维黏弹性人工边界如图 3 所示,对应的弹性元件和黏性元件参数为:

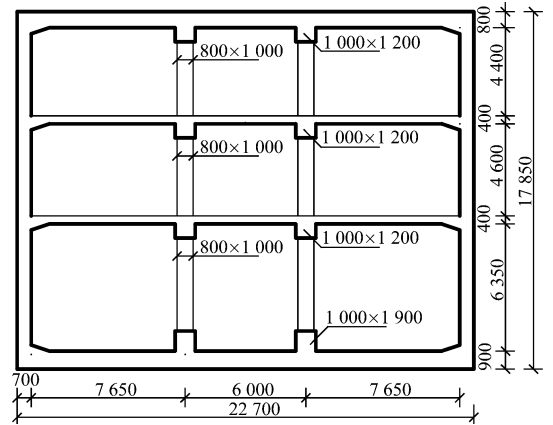
$$\begin{cases} K_N = \alpha_N \frac{G}{R} \\ C_N = \rho c_p \\ K_T = \alpha_T \frac{G}{R} \\ C_T = \rho c_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:

K_T 、 C_T ——分别为人工边界的切向、法向弹性



a) 二层三跨车站



b) 三层三跨车站

单位:mm

图 1 车站结构横断面图示意图

Fig. 1 Schematic diagram of station structure lateral section

元件系数;

K_N 、 C_N ——分别为人工边界的切向、法向黏性元件系数;

ρ ——为介质质量密度;

G ——介质剪切模量;

c_p 、 c_s ——分别为介质 P 波(压缩波)和 S 波(剪切波)的波速;

R ——波源至人工边界的距离;

α_N 、 α_T ——分别为法向与切向黏弹性人工边界修正系数;建议取 $1 \leq \alpha_N \leq 2$, $0.5 \leq \alpha_T \leq 1.0$ 。

根据脱离体分析,并结合黏弹性人工边界的运动方程,文献[11]推导人工边界上等效结点荷载 F_B 为:

$$F_B = A(\sigma_B(t) + K_b u_B(t) + C_b \dot{u}_B(t)) \quad (2)$$

式中:

A ——人工边界上结点影响面积;

K_b 、 C_b ——分别为黏弹性边界结点弹性元件系数和黏性元件系数;

$u_B(t)$ 、 $\dot{u}_B(t)$ 、 $\sigma_B(t)$ ——分别为边界结点处原自由场位移时程、速度时程和应力时程。

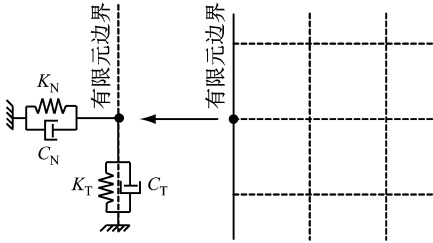


图 3 二维黏弹性边界
Fig.3 2D viscoelastic boundary

2.2.2 底部固定边界模型

将底部边界假设为下卧刚性基岩面,固定底部节点的竖向位移,形成底部固定边界模型。采用振动法在底部边界输入地震动,即在底部边界节点输入水平方向基岩加速度时程。根据达朗贝尔原理建立平衡方程^[12],有:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g \quad (3)$$

式中:

M ——计算模型的质量矩阵;

C ——计算模型的阻尼矩阵;

K ——计算模型的刚度矩阵;

u ——相对基岩的位移向量;

u_g ——基岩位移。

2.3 输入地震动与场地-结构模型

在场地-车站模型计算中,按基准场地为深度

150 m 的基岩输入地震动。对照场地深度为 70 m 的假设基岩面,按基岩面分别采用黏弹性边界和固定边界进行计算对比。通过改变基岩深度与模型底部边界条件,可得:

- 1) 基准模型:场地基岩深度 $H = 150$ m,底部为黏弹性边界。
- 2) 参考模型: $H = 150$ m,底部为固定边界。
- 3) 对比模型: $H = 70$ m,底部为黏弹性边界。
- 4) 推荐模型: $H = 70$ m,底部为固定边界;这为规范推荐模型。

变化车站结构类型,共计 8 组计算工况。

表 2 计算工况表

车站结构	工况			
	基准模型	参考模型	对比模型	推荐模型
二层三跨	E-150 m-VB	E-150 m-FB	E-70 m-VB	E-70 m-FB
三层三跨	S-150 m-VB	S-150 m-FB	S-70 m-VB	S-70 m-FB

在场地-结构模型底部边界按工况分别输入基岩波。其中, $H = 70$ m 处的地震波由 Shake 软件进行 150 m 的场地地震反应分析所得。 $H = 150$ m 时,模型输入的基岩波加速度峰值为 $0.067 g$ (g 为重力加速度),主频率为 1.8 Hz; $H = 70$ m 时,模型输入的地震波加速度峰值为 $0.067 g$,主频率为 2.1 Hz。地震波时程和频谱见图 4。

3 结果分析

根据以上 8 组工况计算结果,提取车站结构地震响应的最不利位置数据,即提取车站结构顶板中点加速度时程、站台层中柱剪力,以及站台层层间位移角响应时程,并进行频谱分析,以评价 4 种模型在 2 类典型车站地震响应分析中的差异。

3.1 加速度响应

图 5 为车站顶板中点的加速度时程。由图 5 可知,二层三跨车站和三层三跨车站结构顶板的加速度响应规律一致。参考模型的时程曲线、加速度峰值和频谱响应与基准模型基本一致。与基准模型相比,对比模型的加速度峰值接近,但响应主频率较小。推荐模型的计算结果显示,在振动持续 15 s 后仍有较为明显的加速度响应,即推荐模型存在比较明显的底部边界反射现象,地震波在地表和底部边界之间来回反射传播,且该模型加速度峰值响应、频谱峰值均比其他模型大。由此可见,由推荐模型计算得到的加速度计算结果是偏于安全的。

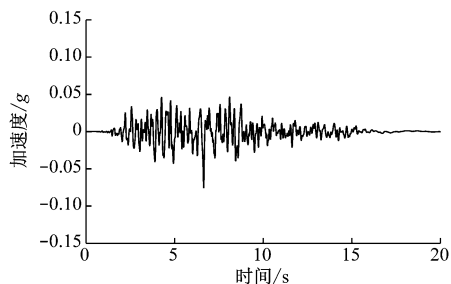
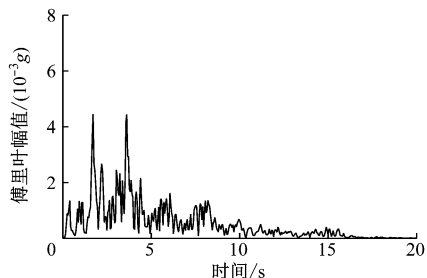
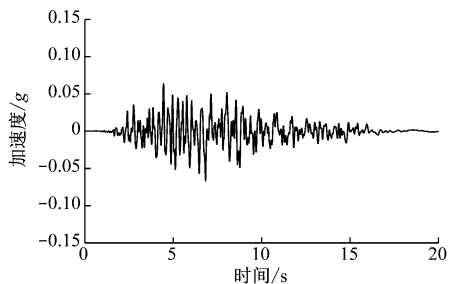
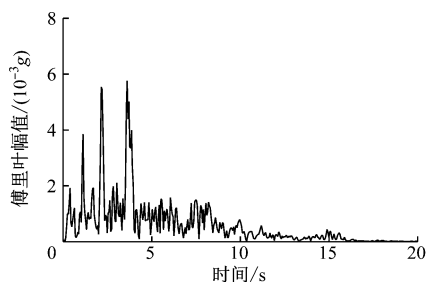
a) $H = 150$ m 时的基岩波加速度时程b) $H = 150$ m 时的基岩波频谱c) $H = 70$ m 时的正弦波加速度时程d) $H = 70$ m 时的正弦波加速度频谱

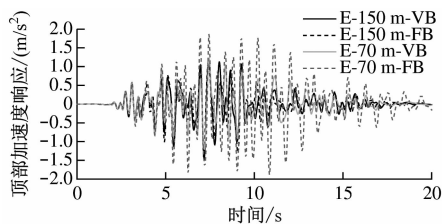
图4 输入地震动时程和频谱曲线

Fig. 4 Curve of inputting ground motion time-history and spectrum

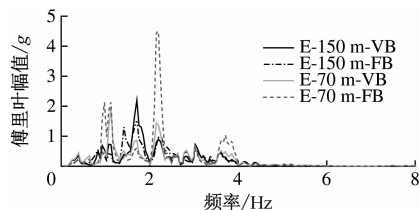
3.2 层间位移角响应

分别提取二层三跨车站模型和三层三跨车站模型的各层层间位移时程,并选取其中响应最大的站台层层间位移角进行分析,结果如图6所示。

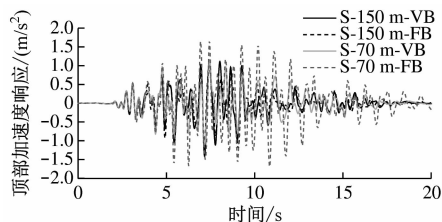
由图6的层间位移角时程曲线可得,基准模型、参考模型和对比模型的响应基本一致,推荐模型中有明显的放大现象,其中峰值响应约放大50%~60%。



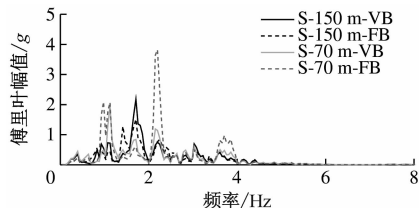
a) 二层站顶板加速度时程



b) 二层站顶板加速度频谱



c) 三层站顶板加速度时程



d) 三层站顶板加速度频谱

图5 加速度响应时程与频谱曲线

Fig. 5 Curve of acceleration response time-history and spectrum

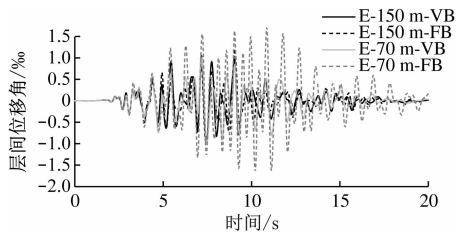
3.3 中柱剪力响应

站台中柱剪力时程见图7。由图7可知,推荐模型同样对结构地震响应有一定的放大效应,即采用推荐模型计算是偏保守的。

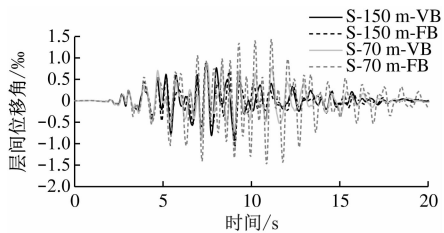
3.4 讨论

以基准模型的车站响应为标准,定义动力响应相对值为其他模型与基准模型的响应比值。绘制参考模型、对比模型和推荐模型的车站结构顶板加速度、中柱剪力和层间位移角等最大地震动力响应的相对值,如图8所示。

由图8可知:①无论哪种模型,车站结构响应的相对值差别不大,说明结构形式对计算模型范围和边界类型不敏感;②基准模型和对比模型均为黏弹性人工边界,但是对比模型计算得到的地下结构响



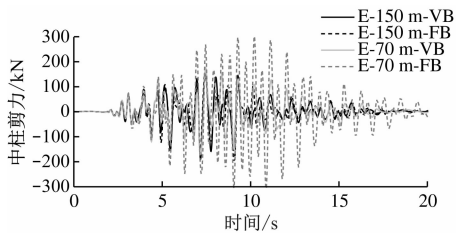
a) 二层车站站台层



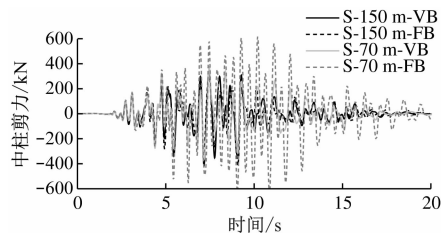
b) 三层车站站台层

图6 层间位移角响应时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of storey displacement angle response



a) 二层车站站台层

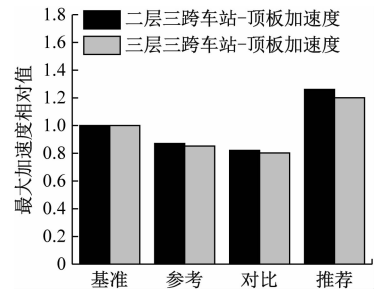


b) 三层车站站台层

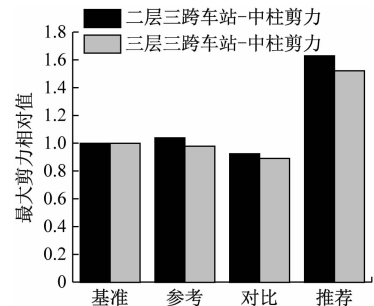
图7 中柱剪力响应时程曲线

Fig. 7 Time-history curve of middle column shear force response

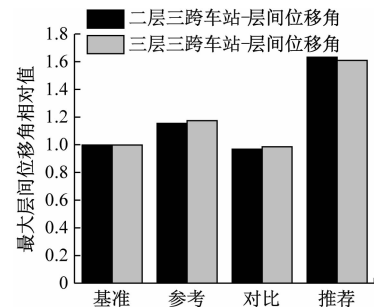
应偏低,表明计算范围有一定影响;③参考模型和基准模型的基岩深度(计算范围)一致、但边界假定不同,所得顶板加速度响应偏小、层间位移角偏大、中柱剪力基本相当,表明边界假定不同也会带来偏差;④推荐模型的底部边界为固定边界,推荐模型计算得到的响应较基准模型偏大约 50%~60%,所以使用假设基岩深度为 70 m、底部为固定边界计算的结果是偏于安全的。



a) 顶板相对加速度响应



b) 中柱相对剪力响应



c) 站台层相对层间位移角响应

图8 不同模型的车站地震响应相对值

Fig. 8 Relative value of station seismic response in different models

4 结语

本文以上海地区场地和地铁车站结构为研究对象,分析场地-结构模型底部范围及底部边界模拟方式对结构地震动力响应的影响。在特定地层条件下与设防地震作用下,选取车站层间位移角、中柱剪力和顶板加速度作为动力响应评价指标,对 $H=150\text{ m}$ 与 $H=70\text{ m}$ 两种计算范围,以及底部固定边界与底部黏弹性边界 2 类边界模拟分析车站结构地震响应,得到如下的结论:

- 1) 假定基岩深度 70 m 的计算范围,不仅会改变场地特征周期,地震正弦波输入的频率也会改变;
- 2) 若计算模型底部采用黏弹性人工边界,所得到的结构地震动力响应略低于基岩深度 150 m 模型;

3) 假定基岩深度 70 m 的计算范围,当底部边界为固定边界,所得到的结构地震动响应会放大 55% 左右,从结构安全的角度可能是保守的。

参考文献

- [1] 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: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Seismic design standard for underground structures: GB/T 51336-2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [2] 廖振鹏. 工程波动导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
LIAO Zhenpeng. Introduction to wave motion theories in engineering[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [3] LYSMER J, KUHLEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1969, 95(4):859.
- [4] 孙成禹, 李振春. 地震波动力学基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
SUN Chengyu, LI Zhenchun. Fundamentals of seismic wave dynamics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [5] WASS G. Linear two-dimensional analysis of soil dynamics problems in semi-infinite layered media[D]. California: University of California, Berkeley, 1972.
- [6] ZIENKIEWICZ O C, BICANIC N, SHEN F Q. Earthquake input definition and the transmitting boundary conditions[M]. Vienna: International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), 1989:109.
- [7] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
CHEN Guoxing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Bei-

jing: Science Press, 2007.

- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范 (2016 年版): GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
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 & Building Press, 2016.
- [9] 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.
- [10] 禹海涛, 杨喻声, 袁勇, 等. 地下结构抗震分析的振动法与波动法对比研究[J]. 地震工程学报, 2019(4): 845.
YU Haitao, YANG Yusheng, YUAN Yong, et al. A comparison between vibration and wave methods in seismic analysis of underground structures [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019(4):845.
- [11] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998(3): 55.
LIU Jingbo, LYU Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998(3): 55.
- [12] 克拉夫, 彭津. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006.
CLOUGH R, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

(收稿日期:2020-05-25)

(上接第 190 页)

- YANG Chengyu, CAI Xuesong, MA Yuanchi, et al. Study on test duration of hybrid simulation based on OpenFresco platform [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020(4):124.
- [6] 蔡雪松, 杨澄宇, 李衍熹, 等. OpenFresco 平台混合试验研究与应用[J]. 地震工程与工程振动, 2019(3):185.
CAI Xuesong, YANG Chengyu, LI Yanxi, et al. Research and application of OpenFresco platform in hybrid simulation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019(3): 185.
- [7] 蔡雪松, 杨澄宇, 袁勇. 地铁车站地震响应虚拟混合试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2019(5):234.
CAI Xuesong, YANG Chengyu, YUAN Yong. Study on seismic performance of subway station with virtual hybrid simulation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019(5):234.
- [8] 杨澄宇, 蔡雪松, 袁勇. 大空间地下结构地震响应混合试验研

究[J]. 世界地震工程, 2019(4):210.

- YANG Chengyu, CAI Xuesong, YUAN Yong. Seismic response hybrid simulation of large space underground structure to earthquake excitation [J]. World Earthquake Engineering, 2019(4):210.
- [9] SCHELLENBERG A, MAHIN S A, FENVES G L. A software framework for hybrid simulation of large structural systems[J]. Structural Engineering Research Frontiers, 2007:1.
- [10] LI C, YUAN J, YU H, et al. Mode-based equivalent multi-degree-of-freedom system for one-dimensional viscoelastic response analysis of layered soil deposit[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(1): 103.
- [11] LI C, YUAN Y, HE P, et al. Improved equivalent mass-spring model for seismic response analysis of two-dimensional soil strata [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 112: 198.

(收稿日期:2021-12-25)