文章编号:1673-0062(2017)02-0090-07

软土场地中地铁地下车站对邻近高层建筑地震加速度响应的影响

龙 慧,陈振富,胡 萍*

(南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:基于典型的南京软土场地条件,建立地铁地下车站—土体—高层建筑系统二维非线性有限元分析模型,研究了两层三跨岛式地铁地下车站结构对邻近高层建筑地震加速度反应的影响规律.结果表明:地铁地下车站使高层建筑与地表接触位置的地表加速度反应动力系数β谱谱值在周期 0.5~3 s 范围有所增大,建筑各层的峰值加速度反应基本上均有所增大,局部楼层的峰值加速度反应增大达 43.7%.随高层建筑与地铁车站间距的增大,该影响逐渐减小.若高层建筑分别采用桩基础/筏板基础,间距与地铁地下车站宽度之比 D/B≥1,而 D/B≥0.75 时该影响可以忽略.

关键词:高层建筑;地铁地下车站;地震加速度响应;软土场地;动力相互作用
中图分类号:TU435 **文献标志码**:A

Analysis of Seismic Acceleration Response Influence of High Rise Building Nearby Subway Station in Soft Site

LONG Hui, CHEN Zhen-fu, HU Ping*

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: The two-dimensional finite element analysis models based on the Nanjing soft soil site of subway station, soil and high rise building are created to research the seismic acceleration response influence of high rise building nearby two-layer three-stride island-type subway station. The results show that the ground acceleration response dynamic coefficient β spectrum value in the cycle of 0.5~3 s range on the contact point of ground and building are increased. The peak acceleration response of the vast majority of the floors is increased, and the partial floor is increased by 43.7%. The influence decreases when the

收稿日期:2017-04-10
基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678286);湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ3263);湖南省教育厅项目(15C1194);南华大学博士科研启动基金资助项目(2013XQD09)
作者简介:龙 慧(1982-),男,讲师,博士,主要从事于岩土地震工程方面的研究. E-mail:28748388@qq.com. * 通讯作者:胡 萍, E-mail:14737724@qq.com

space between high-rise building and subway station increases, and if the high-rise building is with pile foundation/raft foundation, the influence can be ignored when the ratio of the space to width of underground subway station is 1/0.75.

key words: high rise building; underground subway station; seismic acceleration response; soft soil site; dynamic interaction

0　引　言

我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间,是世界上破坏性地震次数最多、地震灾害最为严重的国家之一.据统计,20 世纪以来全球发生的 7 级以上强震中,中国占 35%,尤其是 2008 年发生的四川汶川地震,造成了 69 227 人遇难、374 643 人受伤和 17 923 人失踪,直接经济损失达 8 451 亿元.

另一方面,由于城市化程度越来越高,相对狭小的城市空间面对日益增长的城市发展需求已不堪重负,而其中最为突出的矛盾就是交通问题.事实上对于国内外许多大中型城市而言,交通出行都是一大难题,目前最佳的解决办法就是大力发展城市轨道交通事业[1].作为城市轨道交通枢纽,地铁地下车站附近通常是高层建筑林立的繁华地段,该区域的抗震安全极为重要.现有对于高层建筑地震响应的研究几乎完全不考虑邻近建构物的影响,仅研究孤立的高层建筑在自由场地中的地震响应特性[2-5];还有部分学者研究了隧道盾构施工、地铁车站施工等工程活动对邻近建筑的影响[6-9];对于已建成地铁地下车站或者类似地下建构物对邻近地面建筑地震动力反应影响的研究非常少.事实上地铁地下车站结构和高层建筑间在地震中存在复杂的动力相互作用关系,尤其是在软土场地中,土层对于地震作用有明显的放大效应,此时地下车站结构对高层建筑地震加速度反应有何影响是一个亟待研究的问题.

1　计算模型及输入地震动

采用有限元软件 ABAQUS 作为计算分析平台,以南京地铁沿线有代表性的软土场地为计算场地条件,选取的场地土层总厚度为 61 m,宽度 158 m.地铁地下车站结构为两层三跨结构,边跨 7.5 m,中跨 6 m,上层中柱高 4 m,下层中柱高 4.2 m,侧墙高度 13 m,总宽度 22 m,总高度 14 m;下层底板、上层顶板、侧墙厚度均取 1 m,上层底板厚度取 0.5 m,中柱为 1 m×1 m 的方柱,纵向柱距为 9 m,车站底部埋深为 17 m.邻近的高层建筑为三跨式框架结构,边跨 6 m,中跨 3 m,梁截面为 0.6 m×0.8 m,柱截面为 1 m×1 m,桩基础,桩直径为 1.2 m.为考虑车站对桩基的影响,桩顶与车站顶板平齐,桩长 11 m,框架间距 6 m,结构顶部相对地面净高 42.8 m,共 15 层,宽度 15 m,位于离地铁车站右侧 10 m 处.假定地铁地下车站和高层建筑均采用 C30 混凝土,弹性模量 $E = 3.0 \times 10^4$ MPa.采用四结点平面应变缩减积分实体单元模拟土体介质,采用四结点平面应变完全积分实体单元模拟地铁车站结构,采用梁单元模拟高层建筑及其桩基础.为将模型简化为平面应变问题,将地铁车站中柱及高层建筑框架用等效刚度比折减模量的方法转化为等价连续墙,以考虑平面应变单元模拟三维地铁车站中柱和高层建筑框架的影响.模型的侧向边界和底边界为竖向固定约束、水平向自由的边界.

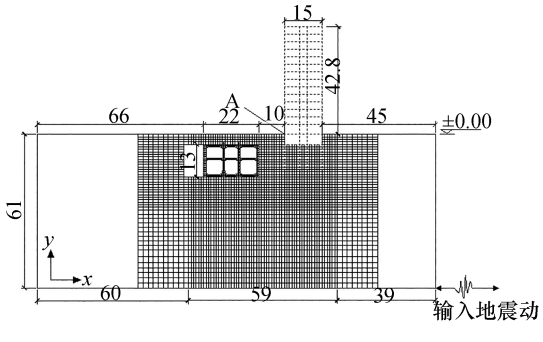


图 1　地铁地下车站结构—土—高层建筑二维有限元分析模型

Fig.1　Two dimensional finite element models of underground subway station, soil and high rise building system

采用黏塑性动力损伤本构模型描述混凝土的动力特性[10];采用记忆型黏塑性嵌套面动力本构模型描述土体的动力特性[11-12],土层的物理力学性质及本构模型参数见表 1.地铁地下车站结构网格大小为 0.33×0.33 m,场地核心区域网格大小为 1 m×1 m,场地最大网格为 2 m×2 m,二维有限元模型及其网格划分如图 1 所示.为了更明晰的反应高层建筑对地铁地下车站结构地震反应的影响,在分析计算的时候未考虑模型自重产生的应

力,也不考虑土体液化对车站结构地震反应的 影响.

表 1 典型的南京软土场地条件

Table 1 Site condition of a representative soft site in Nanjing city

层号	土层描述	厚度 /m	重度 /(kN·m^{-3})	剪切波速 /(m·s^{-1})	内摩擦角 /(°)	参考剪应变 /×10^{-4}
1	淤泥质土,灰色,软—流塑,饱和	2.0	19.0	114.0	16	4.0
2	淤泥质粉质黏土,灰绿色,软塑,饱和	2.0	17.8	129.1	18	4.0
3	粉土与粉砂互层,灰黄,中密,饱和	4.0	19.0	152.7	21	3.5
4	粉砂,灰黑,中密,饱和	3.0	20.5	137.1	26	3.6
5	淤泥质土,灰色,软—流塑,饱和	3.0	19.3	128.5	16	4.0
6	细砂,灰黄,密实,饱和	9.0	18.9	172.7	26	4.1
7	粉细砂,灰黑,中密—密实,饱和	12.5	21.2	205.8	26	3.8
8	细砂,灰黄,密实,饱和	10.3	18.9	236.3	26	4.1
9	粉砂,灰黑,中密,饱和	5.2	20.5	263.2	26	3.6
10	粘土,灰—灰黑,硬塑,饱和	10.0	19.3	491.6	17.2	3.8

南京地区为 7 度抗震设防,分别考虑中震及大震条件下,地铁地下车站结构的邻近高层建筑对动力反应的影响,选用南京地铁 1 号线某场地条件 50 年超越概率 10%的基岩人工波以及峰值加速度调幅为 1.0 m/s^{2}的 Taft 波和 Loma Prieta 波(图 2 中从左至右分别简记为 NJ1.0、TAFT1.0 和 LP1.0)作为中震条件下的基岩输入地震动;选用 Taft 波以及峰值加速度调幅为 1.5 m/s^{2}的 Loma Prieta 波和南京人工波(图 3 中从左至右分别简记为 NJ1.5、TAFT1.5 和 LP1.5)作为大震条件下的基岩输入地震动,持续时间均为 30 s.

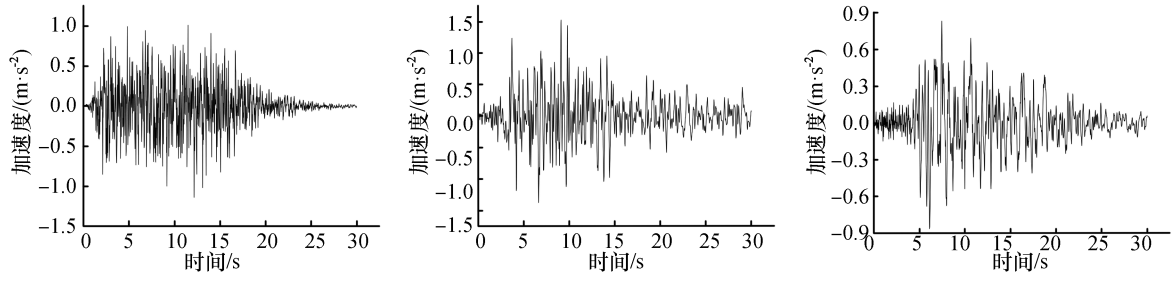


图 2 输入地震动的原始加速度时程

Fig.2 The original acceleration time-histories of ground motion

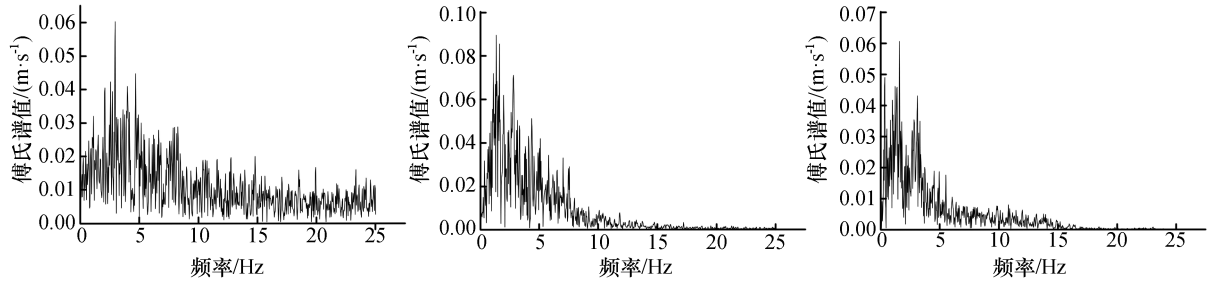


图 3 输入地震动的傅氏谱

Fig.3 The Fourier spectra of earthquake wave

2　动力相互作用体系的频率特性

对于上部结构而言,其地震加速度反应与自身振动特性有密切联系.上部结构的地震破坏主要是由于自身的惯性力引起的,因而地铁地下车站结构对于动力相互作用体系自振频率的影响值得关注.这里给出通过振型分析得到的不同模型 1~3 阶振型的自振频率如表 2 所示,其中模型 1 为刚性地基上仅有高层建筑,模型 2 为软土地基—高层建筑体系,模型 3 为软土地基—地铁地下车站结构—高层建筑体系.结果表明:1)与刚性地基上高层建筑模型相比,软土地基—高层建筑体系整体的自振频率显著降低;2)与软土地基中没有地铁地下车站结构的模型相比,地铁地下车站结构的存在使软土地基—高层建筑体系整体的自振频率略有提高.

表 2　不同模型的自振频率

Table 2　The natural frequency of different models　(Hz)

振型	模型 1	模型 2	模型 3
1	0.573	0.458	0.460
2	1.832	1.398	1.436
3	3.408	1.661	1.688

3　高层建筑加速度反应

这里定义加速度影响系数 $a=a_H/a_N$(a_H为有地铁地下车站结构时邻近高层建筑的峰值加速度反应,a_N为无地铁地下车站结构时邻近高层建筑的峰值加速度反应),表 3 中以 N-NJ、N-TAFT、N-LP 表示各工况下没有地铁地下车站影响时邻近高层建筑的地震动反应,以 H-NJ、H-TAFT、H-LP 表示各工况下有地铁地下车站影响时邻近高层建筑的地震动反应,层号-1 代表地下 1 层底板,层号 1 代表 1 层底板.以此类推,而层号 15 代表 14 层(顶层)顶板.给出高层建筑各层的水平向峰值加速度及对应的加速度影响系数见表 3 和表 4,同时,为了直观的反应地下车站结构对邻近高层建筑各层峰值加速度的影响,绘制了高层建筑各层加速度影响系数条状图如图 4 所示.

从计算结果可以得出以下反应规律:

表 3　中震地震动作用下高层建筑各层峰值加速度及相应的加速度影响系数

Table 3　The relative peak acceleration and acceleration influence coefficient of every floor by using design basic acceleration of ground motion

层号	N-NJ1.0	H-NJ1.0	N-TAFT1.0	H-TAFT1.0	N-LP1.0	H-LP1.0
	$a_H/(m\cdot s^{-2})$	a	$a_H/(m\cdot s^{-2})$	a	$a_H/(m\cdot s^{-2})$	a
-1	0.551	1.169	0.675	1.114	0.668	1.109
1	0.578	1.173	0.711	1.107	0.689	1.131
2	0.631	1.166	0.768	1.187	0.726	1.117
3	0.604	1.173	0.787	1.2	0.704	1.313
4	0.638	1.109	0.788	1.198	0.682	1.437
5	0.677	1.063	0.79	1.276	0.746	1.302
6	0.661	1.169	0.787	1.271	0.772	1.188
7	0.661	1.199	0.725	1.269	0.743	1.131
8	0.629	1.202	0.608	1.241	0.664	1.128
9	0.544	1.206	0.497	1.169	0.541	1.107
10	0.413	1.186	0.405	1.134	0.412	1.105
11	0.428	1.122	0.371	1.009	0.43	1.102
12	0.483	1.144	0.506	1.114	0.512	1.059
13	0.535	1.156	0.656	1.142	0.652	1.091
14	0.687	1.147	0.823	1.215	0.795	1.122
15	0.815	1.152	0.996	1.22	0.928	1.137

表 4 大震地震动作用下高层建筑各层峰值加速度及相应的加速度影响系数

Table 4 The relative peak acceleration and acceleration influence coefficient of every floor by using design excess acceleration of ground motion

层号	N-NJ1.5	H-NJ1.5	N-TAFT1.5	H-TAFT1.5	N-LP1.5	H-LP1.5
	$a_H/(m\cdot s^{-2})$	a	$a_H/(m\cdot s^{-2})$	a	$a_H/(m\cdot s^{-2})$	a
-1	0.641	1.107	0.839	1.016	0.758	1.106
1	0.662	1.138	0.861	1.021	0.81	1.077
2	0.719	1.115	0.989	0.977	0.908	1.067
3	0.839	1.121	0.983	0.99	0.925	1.034
4	0.9	1.125	0.921	1.003	0.897	1.006
5	0.895	1.132	0.919	1.004	0.845	1.054
6	0.832	1.126	0.864	1.066	0.792	1.158
7	0.725	1.122	0.862	1.059	0.761	1.144
8	0.59	1.122	0.779	1.029	0.668	1.129
9	0.54	1.022	0.638	1.028	0.524	1.108
10	0.485	1.062	0.541	0.991	0.474	1.016
11	0.495	1.014	0.458	1.002	0.485	1.060
12	0.505	1.031	0.551	1.054	0.613	0.986
13	0.662	1.072	0.731	1.005	0.776	1.024
14	0.891	1.092	0.994	0.966	0.915	1.062
15	1.076	1.104	1.225	0.967	1.036	1.079

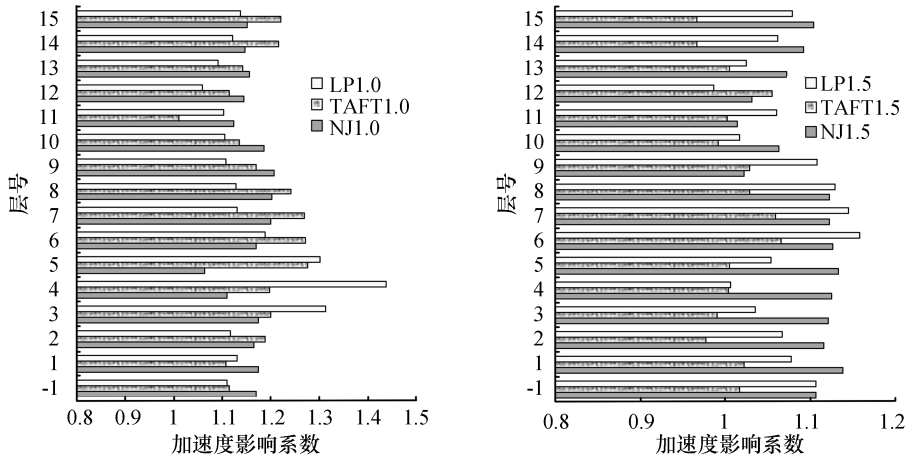


图 4 高层建筑各层加速度影响系数条状图

Fig.4 The acceleration influence coefficient bar graph of every floor

1)在 7 度抗震设防中震地震波作用下,受到地铁地下车站结构的影响,高层建筑各层的峰值加速度均有所放大.相对来说,在 NJ1.0 工况下,各层的峰值加速度放大程度较为接近,而在 LP1.0 工况下,高层建筑各层的峰值加速度放大程度差异最大.在 NJ1.0 工况下,各层的加速度影响系数在 1.06~1.21 之间,在 TAFT1.0 工况下,各层的加速度影响系数在 1.01~1.28 之间,在 LP1.0 工况下,各层的加速度影响系数在 1.06~1.44.值得注意的是,3 个工况下,加速度放大最大的楼层都出现在高层建筑的中部或中部以下位置,如 NJ1.0 工况下为-1~3 层和 6~9 层,TAFT1.0 工况下为 5~8 层,LP1.0 工况下为 3~5 层.

2)在 7 度抗震设防大震地震波作用下,高层建筑各层的峰值加速度总体上也有所放大,但在 TAFT-1.5 工况下,部分楼层的峰值加速度有所减小,相对来说,在 LP1.5 工况下,各层的峰值加速度放大程度差异依然最大.在 NJ1.5 工况下,高层建筑各层的加速度影响系数在 1.01~1.13 之间,在 TAFT1.5 工况下,各层的加速度影响系数在 0.97~1.07 之间,在 LP1.5 工况下,各层的加速度影响系数在 0.99~1.16.总体来说在大震地震波作用下,地铁地下车站结构对于高层建筑各层的峰值加速度反应影响较中震时要小.同时,3 个工况下,加速度影响系数最大的楼层非常接近,且都出现在高层建筑中部偏下的位置.具体而言,在 NJ1.5 工况下为第

5 层,在 TAFT1.5 和 LP1.5 工况下为第 6 层,而加速度影响系数最小的楼层则出现在高层建筑的中上部,在 NJ1.5 工况下为第 11 层,在 TAFT1.5 工况下为第 14 层,在 LP1.5 工况下为第 12 层.

下面将以中震条件下场地表面与于高层建筑接触的接触点位置(即图 1 中 A 点)的地表加速度对应的动力系数 β 谱为例(如图 5 所示),说明地铁地下车站结构对该位置地表振动特性的影响.

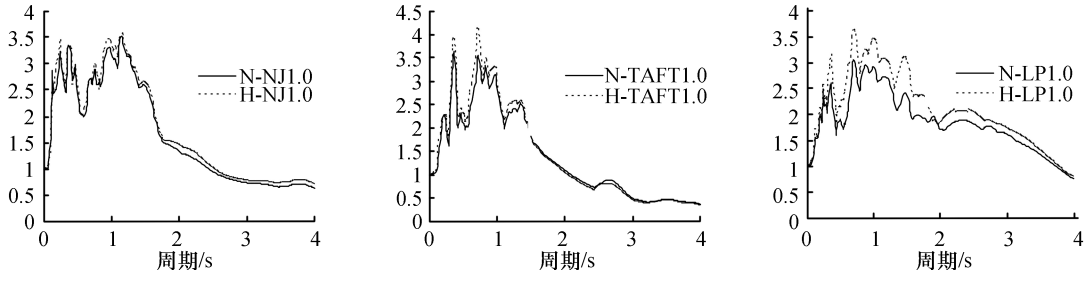


图 5　地面 A 点的地表加速度反应动力系数 β 谱

Fig.5 The dynamic coefficient β spectra of ground acceleration at node A

由图 5 可知,高层建筑左侧与地表接触的 A 点位置,在地铁地下车站结构影响下的 β 谱值与没有地铁车站时不同.具体而言,在 NJ1.0 工况下,其谱值在周期 0~4 s 范围内总体上略有增大,在 TAFT1.0 工况下,其谱值在周期 0.5~1.5 s 范围内有一定放大,而在 LP1.0 工况下,其谱值在 0.5~3 s 范围内有明显的放大.由前文分析的系统频率特性可知,高层建筑—土—地铁地下车站系统前三阶自振频率对应的自振周期分别为 2.17 s、0.70 s 和 0.59 s,地下车站结构对于 A 点 β 谱值的放大作用将对邻近高层建筑的动力反应产生不利的影响.

4　影响因素分析

本节将高层建筑采用不同基础形式,以及高层建筑与地铁地下车站结构水平距离不同时,地下车站结构对高层建筑地震加速度反应的影响进行对比分析.高层建筑分别采用筏板式基础和桩基础形式,其中筏板厚度 1 m,筏板顶面高度与桩基础时高度一致,采用四结点平面应变完全积分单元模拟,以研究高层建筑基础在地铁地下车站侧向水平位置(桩基础)或侧上方(筏板基础)时,地下车站结构对高层建筑地震加速度反应的影响.

高层建筑与地铁地下车站结构的水平距离分别为 2 m,5.5 m,11 m,16.5 m,22 m,33 m.以前缀 fb 代表高层建筑采用筏板基础,以前缀 zh 代表高层建筑采用桩基础,后缀数字代表高层建筑与车站结构的水平距离,如 fb-11 代表高层建筑采用筏板基础且高层建筑与地铁地下车站结构水平距离为 11 m.

为了对比分析高层建筑采用不同基础形式和与地铁地下车站结构不同距离时,地铁地下车站结构对邻近高层建筑加速度反应的影响,以-1 层(地下 1 层)、1 层、5 层、9 层底板和 14 层顶板为例,给出各工况下高层建筑各层加速度影响系数图如图 6 所示.加速度影响系数的定义第 3 节.

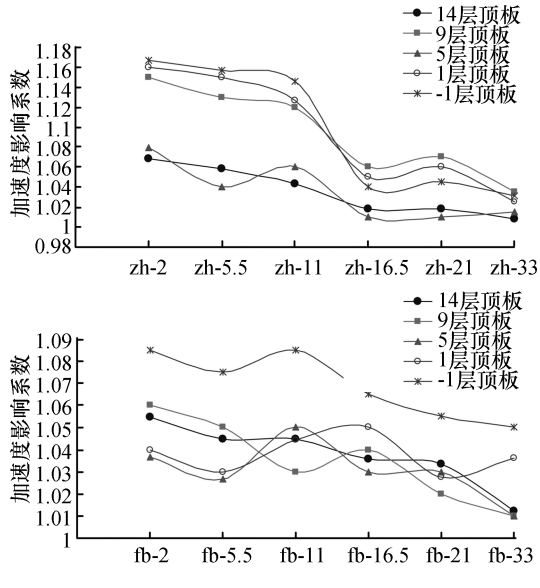


图 6　各工况下高层建筑部分楼层加速度影响系数

Fig.6 The acceleration influence coefficient of some floors

令 D 为高层建筑相对地铁地下车站结构的水平距离,B 为地铁地下车站结构的宽度,由图 6 可以得到以下反应规律:

1)从结构间的水平距离因素考虑,地铁地下车站结构对邻近高层建筑加速度反应的影响大致

随着两者间距离的增大而减弱,如在 zh-2 工况下,-1、1 和 9 层的峰值加速度都放大了 15%左右,而在 zh-33 工况下各层的峰值加速度的放大效应都小于 4%,综合各工况各楼层的结果,可以认为当 D/B≥1 时,地下车站结构对于高层建筑峰值加速度反应的影响在 5%以内,可以忽略.

2)总体来说,高层建筑采用桩基础时,地铁地下车站结构对其峰值加速度反应的影响大于高层建筑采用筏板基础的情况,尤其是当地下车站结构与高层建筑之间距离小于等于 11 m 时,这种情况更为显著:如两者距离为 2 m 时,fb-2 工况下高层建筑-1 层的加速度影响系数约为 1.08(即放大了 8%),而 zh-2 工况下该层的影响系数则约为 1.17(即放大了 17%),就影响程度而言,两者相差了超过一倍.

3)当高层建筑采用桩基础时,地铁地下车站结构对高层建筑-1、1 和 9 层的影响要明显大于其它两层,而在采用筏板基础时,对高层建筑-1 层的影响要明显大于其它四层.

5 结 论

基于典型的南京软土场地条件,通过建立一系列地铁地下车站结构—土—高层建筑系统的对比模型,对邻近高层建筑采用不同基础形式、高层建筑与车站结构不同距离时,地铁地下车站结构对高层建筑系统地震加速度响应的影响进行了研究,主要结论如下:

1)高层建筑与地表接触位置的地表加速度反应有影响,与没有地铁地下车站结构时相比,在 NJ1.0 工况下,其地表加速度反应对应动力系数 β 谱谱值在周期 0~4 s 范围内总体上略有增大,在 TAFT1.0 工况下,其谱值在周期 0.5~1.5 s 范围内有一定放大,而在 LP1.0 工况下,其谱值在 0.5~3 s 范围内有明显的放大,而这个周期范围恰恰是高层、超高层建筑的基本自振周期范围,因此这种影响使得高层建筑的地震反应产生趋于不利.

2)地铁地下车站结构对地震波的反射叠加作用使高层建筑各层的峰值加速度反应基本上都有所增大,并使得高层建筑的振型改变,局部楼层的峰值加速度响应显著变化,如在 LP1.0 地震波作用下,局部楼层的峰值加速度反应增大达 43.7%.

3)若高层建筑基础为桩基础,当 $D/B\geq1$ 时,地铁地下车站结构对高层建筑的地震加速度反应影响可以忽略;若高层建筑基础为筏板基础,当 $D/B\geq0.75$ 时,地铁地下车站结构对高层建筑的地震加速度反应影响可以忽略.可以认为高层建筑基础为桩基础时,地铁地下车站结构对高层建筑的地震加速度反应影响程度略高于高层建筑基础为筏板基础时的情况.

参考文献:

[1] 周强.地铁轨道交通发展对城市交通问题的有效改善[J].佳木斯教育学院学报,2014(5):478-479.

[2] SUMER A, KERSTING R A, HUTCHINSON D A. Nonlinear analysis of pre-northridge steel high-rise building using modal-pushover-based ground motion scaling procedure[C]// Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco, California, United States: ASCE, 2014, 103-113.

[3] ONKI A, TANAKA S, SAITO T. 21150 Response evaluation of high-rise building under long-period ground motion. Part 1 Time history response analysis [C]// Summaries of Technical Papers of Meeting. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2015. 299-300.

[4] TANAKA S, SAITO T, ONKI A. Earthquake response analysis of RC high-rise buildings under nankai trough long-period earthquake ground motion[J]. AIJ Journal of Technology and Design 2016, 22(52): 953-958.

[5] SAMANTA A, HUANG Y N. Ground-motion scaling for seismic performance assessment of high-rise moment-resisting frame building[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2017, 94(3): 125-135.

[6] 朱逢斌,缪林昌.盾构隧道邻近建筑物施工的地面变形分析及预测[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(4):856-862.

[7] 董燕,王安立,张刚,等.隧道施工对上覆建筑物基础变形的影响[J].地下空间与工程学报,2014,10(1):144-149.

[8] 张学富,刘佳祥,丁燕平,等.下穿高层建筑特大跨度超大断面偏压隧道施工方法研究[J].铁道学报,2012,34(5):107-113.

[9] REN J X, LI Q Y, Zheng Z Z, et al. Research on the Deformation Laws of Surface and Adjacent Building Induced by Shield Tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(1): 69-74.

[10] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.

[11] 庄海洋,陈国兴,朱定华.土体动力粘塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J].岩土工程学报,2006,28(10):1267-1272.

[12] 庄海洋,陈国兴,梁艳仙,等.土体动非线性黏弹性模型及其 ABAQUS 软件的实现[J].岩土力学,2007,28(3):436-442.