

解惠婷, 曹均锋, 冯伟栋, 等. 合肥城区基于抗倒塌的地表地震动峰值加速度研究[J]. 华南地震, 2023, 43(4): 26–33. [XIE Huiting, CAO Junfeng, FENG Weidong, et al. A Study on Peak Acceleration of Ground Motion Based on Collapse Resistance in Hefei Urban Area [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(4): 26–33]

合肥城区基于抗倒塌的地表地震动峰值加速度研究

解惠婷^{1,2}, 曹均锋^{1,2,3}, 冯伟栋^{1,2}, 彭刘亚^{1,2}

((1. 安徽省地震工程研究院, 合肥 230031; 2. 安徽省地震局, 合肥 230031; 3. 合肥工业大学, 合肥 230009))

摘要: 根据合肥城区地貌及第四系分布特征, 选取了36个典型钻孔, 运用一维等效线性方法, 对三种不同超越概率条件下地震动参数进行计算, 并对峰值加速度放大系数以及罕遇地震动与基本地震动放大倍数的规律进行研究。结果表明: 覆盖层厚度、地貌特征、土层结构对地表地震动峰值加速度及其放大系数的影响显著, 且存在一定规律性。

关键词: 合肥城区; 抗倒塌; 峰值加速度放大系数; 地表地震动峰值加速度

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)04-0026-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.04.04

Study on Peak Acceleration of Ground Motion Based on Collapse Resistance in Hefei Urban Area

XIE Huiting^{1,2}, CAO Junfeng^{1,2,3}, FENG Weidong^{1,2}, PENG Liuya^{1,2}

(1. Anhui Earthquake Engineering Research Institute, Hefei 230031, China; 2. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China; 3. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: According to the geomorphology and the Quaternary distribution characteristics of Hefei urban area, 36 typical boreholes are selected, and the one-dimensional equivalent linear method is used to calculate the ground motion parameters under three different exceedances probability conditions, and the peak acceleration amplification coefficient and the law of rare ground motion and basic ground motion amplification are studied. The results show that the overburden thickness, geomorphic features and soil structure have significant effects on the peak acceleration and amplification coefficient of ground motion, and there is a certain regularity.

Keywords: Hefei urban area; Collapse resistance; Peak acceleration amplification factor; Peak acceleration of ground motion

0 引言

合理的地震动参数设计是震灾防御的基础, 是一般工程进行抗震设防的重要参考依据。2015年

发布的最新版地震动参数区划图提出了最大考虑地震的概念(50年2%), 以其为编图的基准^[1], 可见抗倒塌的设计目标对保障人民生命安全有着十分重大的意义。

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划(2022m07020005); 安徽省地震局青年基金项目(20210615)联合资助。

作者简介: 解惠婷(1992-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事工程抗震及地震工程方面研究。

E-mail: xxy19920320@126.com

合肥市是中国长三角城市群副中心城市，近年来，城区建设飞速发展，重要建筑物和生命线工程不断增加，随之对工程的地震安全也提出了更高的要求。50年超越概率2%的罕遇地震参数是抗倒塌设计的基础，第五代地震动参数区划图中给出罕遇地震和基本地震动地表峰值加速度倍数的1.6~2.3之间，受地震构造、场地条件等因素的影响浮动较大。因此本文从抗倒塌(50年超越概率2%)的角度出发，采用一维土层等效线性方法，对合肥城区特有场地条件下的地震动参数进行分析讨论。

1 合肥城区地貌及第四系分布特征

1.1 地貌特征

合肥市位于华东地区，江淮丘陵中部，地貌景观为微波起伏，岗冲相间。地形总趋势由西北向东南倾斜，西部大蜀山海拔282 m，巢湖浅滩海拔最低，约6 m，区内地形标高大多在10~50 m之间，南淝河自西北部水库向东绕城，继而向南流入巢湖(图1)。地貌类型可细分为低丘、波状平原和冲积平原。低丘位于西北大蜀山位置，是构造剥蚀地貌，主要由次火山岩、熔岩、火山碎屑岩组成；波状平原分布广泛，分布于河流二级阶地，阶面有起伏，其上坳沟发育，为侵蚀堆积地貌；冲积平原广泛分布于河漫滩、一级阶地，属于堆

积地貌^[2]。

1.2 地层及第四系分布特征

合肥地区在元古代末期最终形成刚性基底，至三叠纪均处于古陆状态，缺失相应的沉积构造。中生代以来，受华北地块和扬子地块拼合的影响，断裂构造活动强烈，合肥地区发生断裂沉降，形成了合肥盆地，沉积了侏罗纪—古近纪以来的一套巨厚陆相碎屑物，基岩岩性主要为砂岩、粉砂岩、泥岩^[3]。

第四纪以来，地壳升降活动明显，合肥大部分地区被第四系覆盖，覆盖层厚度由西北向东南增大，由新到老可划分如下：

- (1)全新统：芜湖组全新统分布于一级阶地及河漫滩，为青灰色或褐黄色淤泥质粘土、粉质粘土、粉细砂、含砾中粗砂等；
- (2)上更新统：下蜀组上更新统广泛分布于二级阶地上，为棕黄色粘土或粉质粘土；
- (3)中下更新统：义城组主要分布于滨湖新区、经开区等地，岩性为粘土、粉质粘土、细砂、中砂等。

总体来说，覆盖层厚度差异较大，西北、西部及西南覆盖层厚度较小，最小为4 m，一般为10~24 m，东部及东南部覆盖层厚度较大，一般为25~58 m，巢湖沿岸第四系沉积厚度最大，最厚可达58 m左右(图2)。

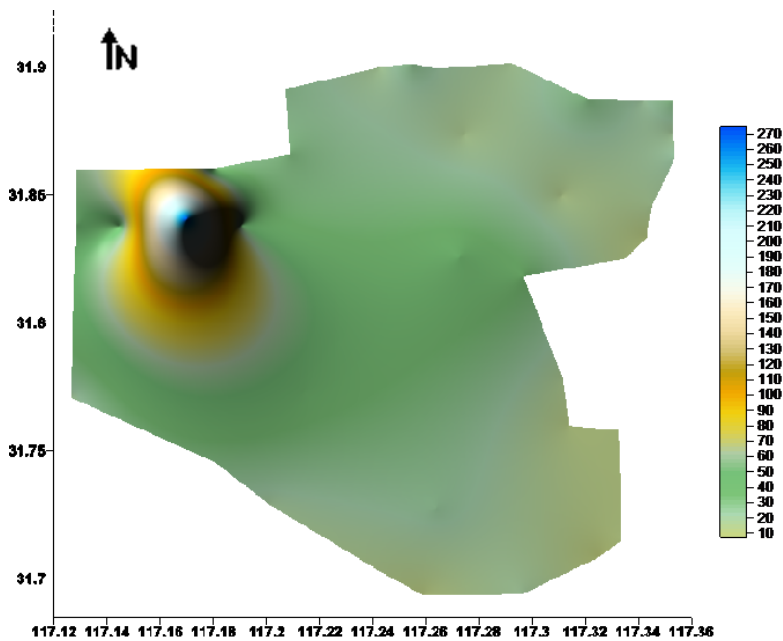


图1 合肥场地地形立体简图(图中数字为地表高程,单位:m)

Fig.1 The stereogram of the topography of Hefei urban area (the figure is the surface elevation, unit: m)

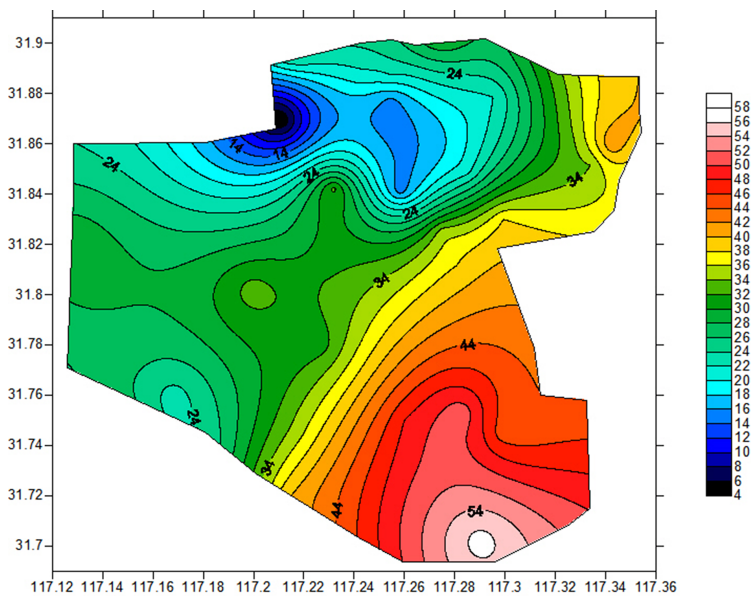


图2 合肥城区场地覆盖层等厚线图(图中数字为覆盖层厚度,单位:m)

Fig.2 The contour map of site covering layer in Hefei urban area (the figure is the overburden thickness, unit: m)

1.3 场地类别划分

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010) (2016年版)中场地类别划分标准,建筑物的场地类别应根据土层等效剪切波速和场地覆盖层厚度划分^[4](表1)。

表1 场地类别划分依据					
Table 1 The basis of site classification					
岩石的剪切波速 或土的等效剪切 波速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	场地类别				
	I_0	I_1	II	III	IV
$V_s > 800$	0				
$800 \geq V_s > 500$	0				
$500 \geq V_{se} > 250$		< 5	≥ 5		
$250 \geq V_{se} > 150$	< 5	3~50	> 50		
$V_{se} \leq 150$		< 3	3~15	15~80	> 80

根据上述规范中土层等效剪切波速的计算公式,对研究区36个钻孔的土层等效剪切波速进行计算和统计,结果场地类别均为II类场地。

2 地震动参数的计算结果与分析

2.1 基本资料

参考历年合肥城区地震安全性评价报告,选取36个典型工程场地的钻孔资料,钻孔较均匀分

布于研究区内(图3),覆盖层厚度在4~58 m之间,与合肥城区覆盖层厚度变化基本相符;钻孔第四系土层包括全新统、上更新统、中更新统及下更新统地层,并包括河漫滩、一级阶地及二级阶地等合肥地区典型地貌。钻孔资料可靠,并具有一定区域代表性,一定程度上能反映合肥城区场地的情况。各钻孔的土类特征详见表2。

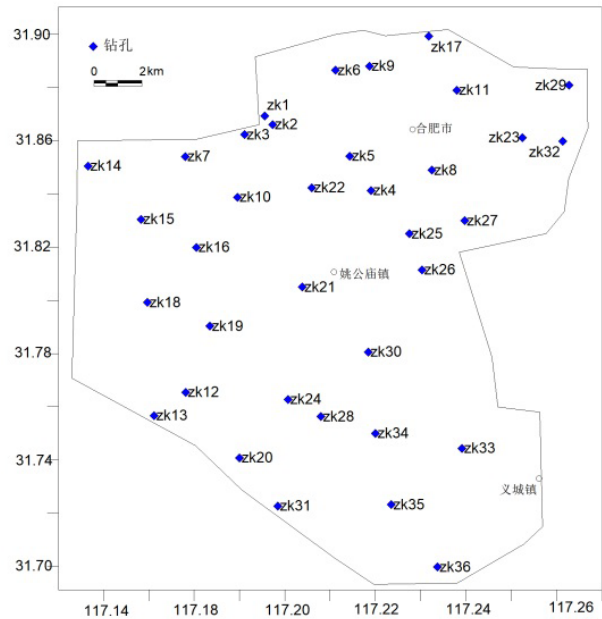


图3 钻孔平面分布图

Fig.3 The plane distribution map of boreholes

地震危险性分析中采用的潜源划分方案和地震动衰减关系对基岩地震动参数值影响较大,文中潜源的划分采用了新一代全国地震区划图所使

用的潜在震源区划分原则和方案，确定对合肥地区有影响的潜在震源区地震活动性参数；地震动衰减关系则选取与五代图相配套的中国东部活跃区地震动参数衰减关系。

利用概率危险性分析方法和一维土层等效线性化方法，得出超越概率50年63%、10%和2%(多遇地震动、基本地震动、罕遇地震动)条件下基岩的输入地震动以及特定场地条件下的地震动参数。

2.2 计算结果与分析

为了便于叙述与分析，在此引入地震加速度放大系数概念： $k_{sp}=a_{sp}/a_{rp}$ ，其中 k_{sp} 为50年超越概率为 p 的加速度放大系数； a_{sp} 为50年超越概率为 p 时的地表峰值加速度； a_{rp} 为50年超越概率水平为 p 时的基岩峰值加速度^[5-7]。各钻孔覆盖层厚度及50年超越概率为63%、10%、2%时的加速度放大系数数据见表3、图4及图5。

表2 钻孔土类特征
Table 2 The soil characteristics of boreholes

钻孔	第四系土层性质	钻孔	第四系土层性质
1	杂填土(Qh)粘土(Qp3)	19	杂填土(Qh)粘土(Qp3)
2	杂填土(Qh)淤泥(Qh)粘土夹粉粘(Qp3)粘土(Qp3)	20	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉土(Qp3)中砂(Q1-2)
3	杂填土(Qh)粉粘(Qh)粘土(Qp3)	21	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)粘土(Qp3)
4	杂填土(Qh)粘土(Qp3)	22	杂填土(Qh)粘土(Qp3)
5	杂填土(Qh)粘土(Qp3)	23	杂填土(Qh)粉粘(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)粉土夹砂(Qp3)
6	杂填土(Qh)粘土(Qp3)	24	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)粉粘夹粉土(Qp3)
7	杂填(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)	25	杂填土(Qh)粘土(Qp3)
8	杂填土(Qh)粘土(Qp3)	26	杂填土(Qh)粘土夹粉粘(Qp3)残积(Q2)
9	杂填土(Qh)粘土(Qp3)	27	杂填土(Qh)粉粘夹粘土(Qh)粘土夹粉粘(Qp3)
10	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉土夹粉粘(Qp3)	28	杂填土(Qh)粘土(Qp3)
11	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)粉土(Qp3)粉土夹砂(Qp3)	29	杂填土(Qh)粉粘夹粉土(Qh)粉土粉细砂(Qp3)
12	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉质粘土夹粉土(Qp3)粉土夹粉砂(Qp3)	30	杂填土(Qh)粘土(Qp3)
13	杂填土(Qh)粉粘(Qh)粘土(Qp3)	31	杂填土(Qh)淤泥质粉质粘土(Qh)粘土(Qp3)
14	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘夹粉土(Qp3)	32	杂填土(Qh)粘土(Qp3)
15	杂填土(Qh)粘土(Qh)	33	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)
16	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)粉土夹粉砂(Qp3)	34	杂填土(Qh)粉粘(Qh)粘土(Qp3)
17	杂填土(Qh)淤泥质填土(Qh)粘土(Qp3)	35	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘(Qp3)
18	杂填土(Qh)粘土(Qp3)粉粘夹粘土(Qp3)	36	杂填土(Q2)粘土(Qp3)粉土夹粉砂(Qp3)

表3 钻孔模型覆盖层厚度及不同超越概率加速度放大系数
Table 3 The overburden thickness of borehole models and the acceleration amplification coefficients under different exceedance probabilities

钻孔	覆盖层厚度/m	Ks63%	Ks10%	Ks2%	钻孔	覆盖层厚度/m	Ks63%	Ks10%	Ks2%
1	4	1.33	1.26	1.24	19	30	1.39	1.37	1.33
2	6	1.33	1.32	1.28	20	30	1.48	1.46	1.38
3	10	1.39	1.40	1.38	21	32	1.43	1.40	1.33

(转下表)

(接表3)

钻孔	覆盖层厚度/m	Ks63%	Ks10%	Ks2%	钻孔	覆盖层厚度/m	Ks63%	Ks10%	Ks2%
4	15	1.42	1.34	1.28	22	32	1.42	1.34	1.28
5	18	1.38	1.36	1.33	23	33	1.33	1.33	1.29
6	21	1.42	1.33	1.29	24	34	1.33	1.35	1.29
7	21	1.42	1.33	1.29	25	35	1.38	1.35	1.29
8	21	1.39	1.33	1.29	26	38	1.38	1.36	1.34
9	22	1.38	1.34	1.31	27	38	1.39	1.40	1.38
10	22	1.38	1.36	1.31	28	39	1.39	1.39	1.29
11	22	1.33	1.34	1.32	29	39	1.39	1.40	1.30
12	23	1.39	1.38	1.33	30	40	1.33	1.35	1.31
13	24	1.48	1.43	1.38	31	40	1.39	1.38	1.29
14	25	1.48	1.39	1.33	32	42	1.38	1.34	1.29
15	26	1.33	1.34	1.30	33	45	1.39	1.38	1.30
16	27	1.33	1.33	1.30	34	48	1.43	1.36	1.31
17	28	1.43	1.38	1.34	35	51	1.43	1.33	1.29
18	29	1.38	1.37	1.29	36	58	1.44	1.33	1.25

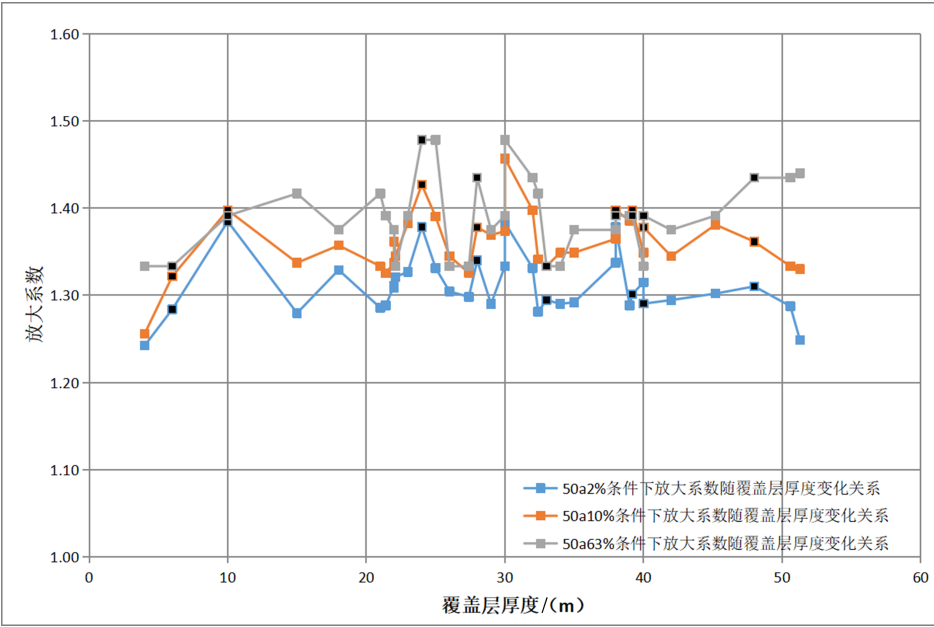


图4 覆盖层厚度对不同超越概率的加速度放大系数的影响

Fig.4 Influence of the overburden thickness on acceleration amplification coefficients under different exceedance probabilities

由图4可以看出：

(1)土层对三种超越概率的地震动均有不同程度的放大作用，总体来看，50年超越概率63%时的放大系数最大，平均值为1.39；50年超越概率2%时的放大系数最小，平均值为1.31，50年超越概率10%时的放大系数介于两者之间；

(2)放大系数随场地覆盖层厚度的变化而变化，覆盖层厚度为4 m时，各个超越概率的放大系数均

最小，随着覆盖层厚度的增加，放大系数明显增大，并在10 m~15 m后趋于稳定，此后随着覆盖层的增大，放大倍数无明显增大，但在20 m~30 m处有几处突增；

(3)覆盖层厚度大于40 m以后，大震及中震的放大系数略有下降，而小震的放大系数还未有明显下降趋势。

以上规律表明，在不同覆盖层厚度及不同地震

动条件下,土体表现的非线性特性是有所区别的。下面具体分析不同超越概率条件下,土层特性、覆盖层厚度对放大系数的影响规律。

由图5可以看出,50年超越概率2%时,放大系数在1.24~1.38之间,平均值为1.31。覆盖层厚度小于10 m时,放大系数随覆盖层厚度的增大而增大;覆盖层厚度大于10 m,放大系数在1.25~1.38之间浮动,并在覆盖层厚度大于48 m后,放

大系数呈明显下降趋势。同时,覆盖层厚度在24 m、28 m、30 m、38 m、48 m处有突增。分析这几个钻孔的模型的资料,有突增的模型大多是含有除杂填土外的全新统土层,土性有淤泥质粘土、粉质粘土等,钻孔位置分布在河漫滩或者一级阶地上;另外覆盖层30 m处的突增钻孔,含有中下更新统的中砂土土层,也对放大系数有增大的作用。

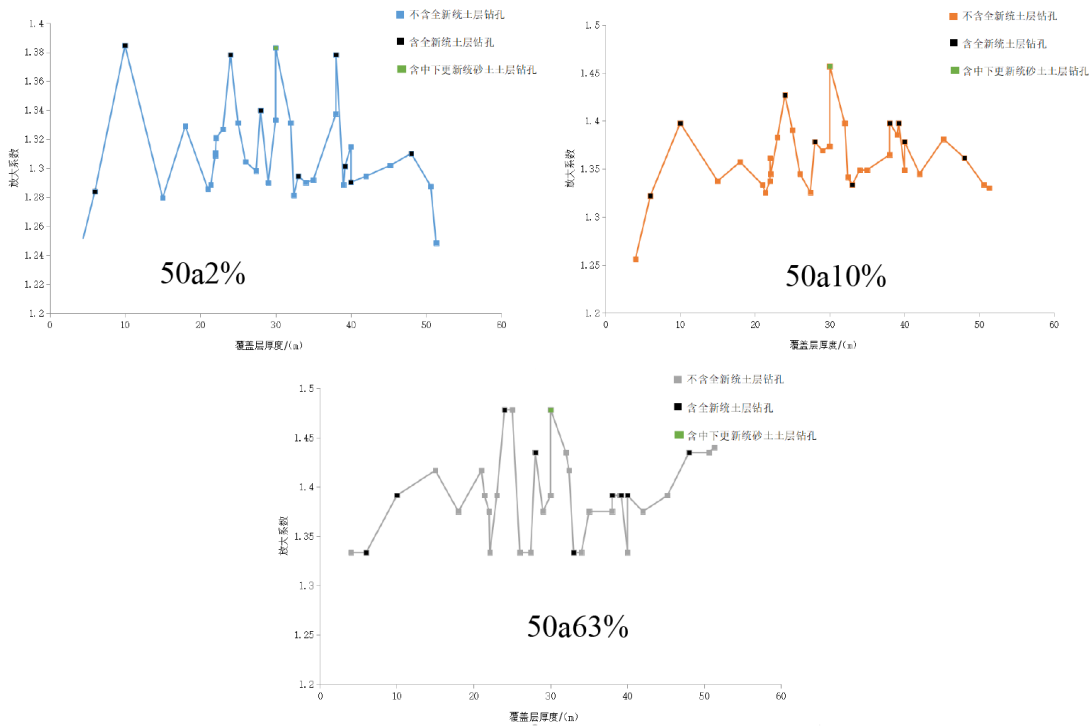


图5 覆盖层厚度及土层结构对不同超越概率的加速度放大系数的影响

Fig.5 Influence of the overburden thickness and the soil layer structure on acceleration amplification coefficients under different exceedance probabilities

50年超越概率10%时,放大系数在1.26~1.46之间,平均值为1.36。覆盖层厚度小于10米时,放大系数随覆盖层厚度的增大而增大;覆盖层厚度大于10 m,放大系数在1.33~1.46之间浮动,其中覆盖层厚度在24 m、28 m、30 m、38 m、39 m处有突增。在覆盖层大于45 m后,放大系数呈明显下降趋势。分析这几个钻孔的模型的资料,有突增的模型大多是含有除杂填土外的全新统土层,土性有淤泥质粘土、粉质粘土等,钻孔位置分布在河漫滩或者一级阶地上;另外覆盖层30 m处的放大系数的突增,也表明其含有中下更新统的中砂土土层的钻孔,对放大系数有增大的作用。

50年超越概率63%时,放大系数在1.33~1.48之间,平均值为1.39。覆盖层厚度小于15 m时,放大系数随覆盖层厚度的增大而增大;覆盖层厚

度大于15 m,放大系数在1.33~1.48之间浮动,且随着覆盖层厚度的增大,放大系数并无明显下降趋势。总体来看,含全新统的土层和含中下更新统中砂土的土层钻孔,其放大系数是大于其他钻孔模型的。

第五代中国地震动参数区划图(GB18306-2015)6.2规定,罕遇地震动峰值加速度宜按基本地震动峰值加速度1.6~2.3倍确定^[8]。下表用放大倍数 M 代表罕遇地震动地表峰值加速度与基本地震动峰值加速度的比值,合肥地区36个钻孔的 M 值计算结果如表4所示。

由表4和图6分析得出,合肥地区罕遇地震动峰值加速度与基本地震动峰值加速度比值在1.67~1.86之间,平均值为1.81。

表 4 各钻孔罕遇地震动峰值加速度与基本地震动峰值加速度及其放大倍数 M
Table 4 The peak acceleration of basic ground motion and the rare ground motion of each borehole and their amplification factor M

钻孔	as10%	as2%	M	钻孔	as10%	as2%	M
1	108	200	1.85	19	114	212	1.86
2	115	208	1.81	20	118	213	1.81
3	116	216	1.86	21	116	209	1.80
4	115	206	1.79	22	114	205	1.80
5	114	206	1.81	23	116	211	1.82
6	116	207	1.78	24	116	209	1.80
7	116	207	1.78	25	116	208	1.79
8	110	201	1.83	26	116	214	1.84
9	115	211	1.83	27	116	215	1.85
10	113	212	1.88	28	115	201	1.75
11	117	214	1.83	29	116	203	1.75
12	112	203	1.81	30	116	213	1.84
13	117	215	1.84	31	113	200	1.77
14	114	209	1.83	32	117	211	1.80
15	117	210	1.79	33	116	207	1.78
16	114	209	1.83	34	113	207	1.83
17	113	205	1.81	35	112	206	1.84
18	115	192	1.67	36	115	196	1.70

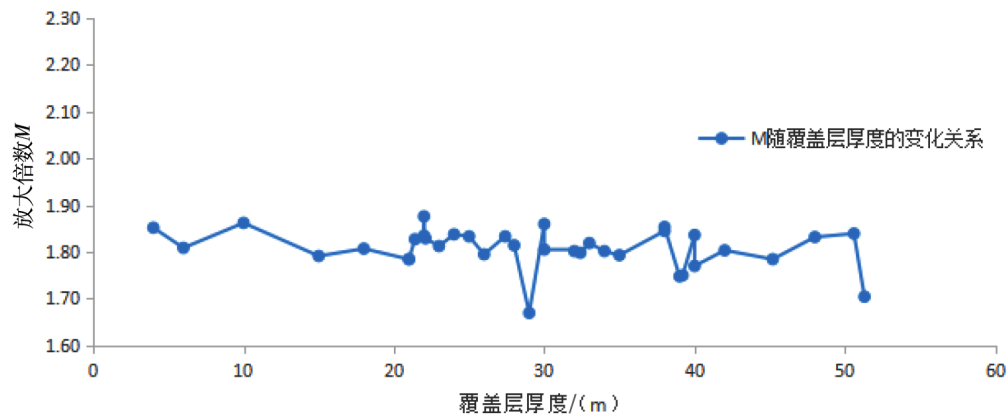


图6 放大倍数 M 随覆盖层厚度变化关系图
Fig.6 The relationship of amplification factor M with the overburden thickness

3 结论

通过对覆盖层厚度在 4 ~51 m 范围内 36 个典型钻孔土层放大系数 K_s 及罕遇地震动峰值加速度放大倍数 M 的分析, 得到以下初步结论:

(1) 36 个钻孔具有一定的代表性, 涵盖了合肥城区的典型地貌、土层以及覆盖层厚度。

(2) 合肥城区范围内, 土层对多遇、基本及罕遇地震动均有不同程度的放大效应, 放大系数在 1.24~1.48 之间。总体来看, 多遇地震(50 年超越概率 63%) 的放大系数最大, 罕遇地震(50 年超越概率 2%) 的放大系数最小。

(3) 根据上文分析, 在合肥城区进行抗倒塌计算时, 其地表峰值加速度的放大系数一般在 1.24~1.38 之间浮动, 均值 1.31。当土层含有全新统淤泥

质粘土、粉质粘土时,或其工程位置为位于河漫滩、一级阶地处,其放大系数明显变大;当土层含有中下更新统的中砂,或者其工程位置位于滨湖新区等地时,其放大系数也有明显增加。

(4)合肥地区罕遇地震动峰值加速度与基本地震动峰值加速度比值在 1.67~1.86 之间,平均值为 1.81。

上述研究得到的初步结论相对于中国地震动参数区划图而言,更具有地域针对性,可为今后合肥地区建筑物抗震设计,特别是在抗倒塌设计时的地震动峰值加速度的取值提供一定参考意义。

参考文献

- [1] 高孟潭,卢寿德. 关于下一代地震区划图编制原则与关键技术的初步探讨[J]. 震灾防御技术,2006,1(1):1-6.
- [2] 王国强. 合肥市岩土体工程特征及地基划分[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(6):694-698
- [3] 彭苗枝,李运怀,管后春,等. 影响合肥城市地下空间开发的地质因素分析[J]. 桂林理工大学学报,2019,39(2):396-401.
- [4] 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):GB50011-2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [5] 陈党民,段蕊. 场地条件对地表峰值加速度的放大效应分析[J]. 地震工程与工程振动,2013(1):24-30.
- [6] 刁颀. 山东Ⅱ、Ⅲ类场地地震动峰值加速度放大大效应分析[J]. 中国地震,2011,27(1):92-98
- [7] 宋键,周亚东,赵阳等. 软弱层对地表地震加速度影响的初步研究——以青岛地区为例[J]. 华南地震,2015,35(4):10-16.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图:GB18306-2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2016.