

高层建筑基础埋深对复合地基稳定性的影响研究^①

戚明军¹, 石涛², 雷珂娜¹

(1.陕西省建筑设计研究院有限责任公司, 陕西 西安 710018; 2.云南工程建设总承包公司, 云南 昆明 650011)

摘要:针对基础埋深对高层建筑地基基础稳定性的影响,以某一高层建筑为例介绍了复合地基土体强度参数的确定;在基础埋深最不利的情况下分别从复合地基承载力、地基变形(沉降量)、地基抗滑移和抗倾覆稳定性及地基整体稳定几个方面进行了地基稳定性验算,得出在工程地质条件允许的情况下基础埋深适当减小可以满足地基承载力和地基基础稳定性要求。研究结果可供类似工程参考。

关键词:高层建筑;基础埋深;复合地基;地基稳定性

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0975-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0975

Influence of High-rise Building Foundation Depth on the Stability of the Composite Foundation

QI Ming-jun¹, SHI Tao², LEI Ke-na¹

(1. Shaanxi Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China;

2. Yunnan Construction Engineering General Contracting Company, Kunming, Yunnan 650011, China)

Abstract: With the rapid development of high-rise buildings, the stability and safety of high-rise building foundations is becoming increasingly important. The depth of a foundation is one of the most important factors affecting the stability and safety of buildings. At times, construction codes cannot be met by projects because of factors such as condition of the site and demand for land. Since the depth of a foundation can impact its stability, we used a high-rise building as an example to determine the strength parameters of the composite foundation soil and the stability of the foundation was checked under the condition of the worst buried depth by calculating the bearing capacity, safety parameter of resistance to slip and overturning, and the stability on the whole. Our results show that a reduced depth of foundation can lead to a stable foundation under better engineering geology conditions. These results can be referenced by similar projects.

Key words: high-rise building; foundation depth; composite foundation; foundation stability

0 引言

随着城市建设的迅速发展,高层、超高层建筑日益增多。因其所承受的水平荷载与竖向荷载较大,对地基基础的要求较高。其中基础埋深是影响地基基础稳定性的重要因素之一,主要体现在基础埋深对地基承载力、建筑物抗倾覆和抗滑移、地基的变形及地基整体稳定性等方面的影响。由于周围环境、

建筑功能影响或场地条件影响,可能会出现基础埋深不满足规范^[1]要求的情况。文献[2]根据已有实际工程认为在水平地面和地层水平分布的前提下,即使高层建筑的基础埋置深度小于规范要求,只要满足地基承载力要求,也可满足地基的整体稳定性要求。文献[3-4]指出基础埋深应主要考虑是否满足地基强度和稳定性的要求,以利于减少建筑物的整体倾

^① 收稿日期:2014-03-20

作者简介:戚明军(1972—),男,高级工程师,主要从事建筑结构与地基基础设计。E-mail:1369984200@qq.com

斜,防止倾覆及滑移。本文以某一实际工程为例,研究高层建筑基础埋深对地基稳定性的影响。

1 工程概况

某高层住宅地上 33 层,地下 2 层,剪力墙结构,建筑总高度 99.45 m,建筑总面积 23 972.13 m²,“一”字形近东西向布置。本工程地基采用水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)复合地基进行处理。基础采用筏板基础,基础长 64.95 m,宽 9.4 m,筏板厚 1.2 m,

设计埋深 6.6 m。该建筑工程属乙类建筑,设计等级为一级,设计地震分组第一组,抗震设防烈度Ⅷ度,设计基本地震加速度 0.41 g(根据当地地区规范确定),设计使用年限 50 年。由于要在该楼南侧拟建一个下沉式室外庭院,使得该建筑南侧基础埋深由原来的 6.6 m 减小为 3.9 m,不满足规范^[1]要求,需要对该基础稳定性进行验算。该建筑地下部分剖面见图 1。

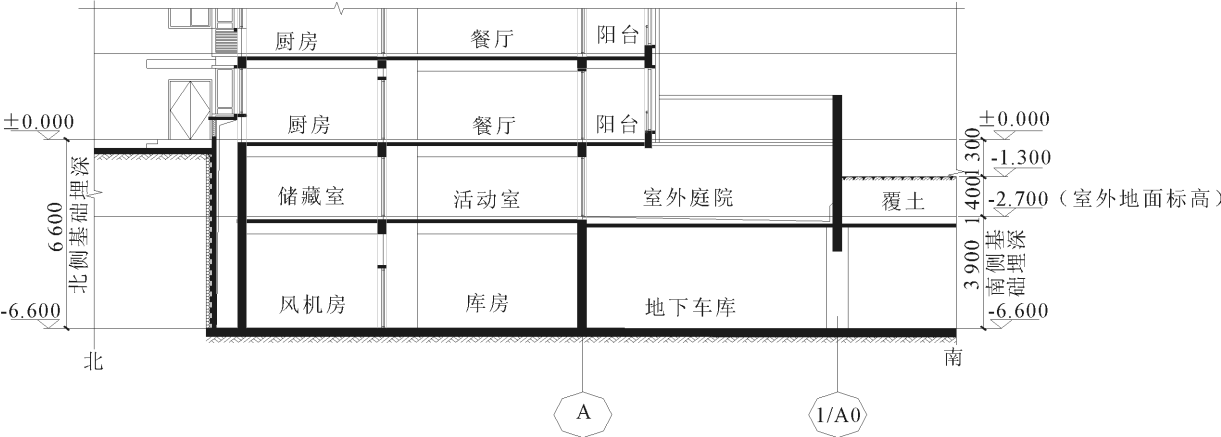


图 1 地下部分建筑剖面图

Fig.1 Section diagram of underground structure of the building case

2 场地工程地质条件

2.1 原场地工程地质条件

根据本工程岩土工程报告,勘探深度(70.0 m)范围内场区土层由上到下依次为:杂填土(Q₄^{2ml})、黄土状土(Q₄^{1eol+al})、黄土 1(Q₃^{2eol})、黄土 2(Q₃^{2eol})、粉质黏土(Q₂^{2al})、中粗砂(Q₂^{2al})、中砂(Q₂^{1al})、含砾中砂(Q₂^{1al})。各土层物理力学参数见表 1。场地地形北高南低,土层分布基本均匀,为Ⅲ类场地,工程地质条件良好,属一般建筑场地。本场地属非自重湿陷黄土场地,湿陷性等级Ⅱ级,湿陷深度为 7.5~9.5 m。

场区稳定地下水位埋深 15.1~16.6 m,属于孔隙潜水类型,地下水位变化主要受大气降水补给影响,年水位变化幅度 0.5~2.0 m。

2.2 复合地基土特性

根据工程地质条件及规范要求^[5],本工程采用 CFG 桩进行地基处理,桩径 400 mm,桩距 1.4 m,等边三角形满堂布置。CFG 桩的相关参数指标:增强体黏聚力 C_p=2.7 MPa;增强体内摩擦角 φ_p=55°;

增强体重度 γ_p=26 kN/m³;增强体压缩模量 E_{sp}=12 500 MPa;增强体变形模量为 152.7 MPa。由于用增强体的压缩模量计算的复合模量与规范计算的模量相差较大,用变形模量计算的复合地基模量与规范计算值接近,所以本文用变形模量来计算复合地基的压缩模量。根据文献[6]所给的复合地基抗剪强度指标及复合模量计算方法求得的复合地基指标参数见表 2。

3 地基稳定验算

为了保证地基的稳定性,应按照基础埋深最不利的情况进行复合地基稳定性验算。对本工程按基础埋深 3.9 m 分别从地基承载力、地基变形及抗滑移、抗倾覆稳定性等方面进行计算。

3.1 地基承载力验算

采用太沙基极限承载力理论^[7]进行验算,其整体剪切破坏和局部剪切破坏地基极限承载力分别按公式(1)和(2)计算:

$$P_u = 1.029cN_c + qN_q + 0.4855\gamma bN_\gamma \quad (1)$$

$$P_u = 0.686cN_c + qN_q + 0.4855\gamma bN_\gamma \quad (2)$$

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层名称	土层厚度/m	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	土重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E_s/MPa	承载力特征值 f_{ak}/kPa
(1)杂填土	2.7	15	16.0	16.5	—	—
(2)黄土状土	4.3	25	19.0	16.4	3.4	130
(3)黄土 1	3.7	25	15.5	18.2	4.3	145
(4)黄土 2	9.4	25	19.0	19.8	6.5	130
(5)粉质黏土	17.3	30	19.0	19.7	6.4	170
(6)中粗砂	21.1	0	30.0	19.8	—	380
(7)中砂	3.2	0	35.0	20	—	400
(8)含砾中砂	13.8	0	33.0	21	—	450

表 2 复合地基指标参数

Table 2 Parameters of the composite foundation

土层名称	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	土重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^{-3})$	弹性模量 E_s/MPa
(2)黄土状土	222.95	21.664	17.110	14.45
(3)黄土 1	222.95	18.423	18.777	15.282
(4)黄土 2	222.95	21.664	20.259	17.319
(5)粉质黏土	227.58	21.664	21.624	17.226

式中, p_u 为地基土极限承载力; c 为地基土的黏聚力; q 为地基顶面超载(取基础埋深范围内土重); γ 为地基土重度; b 为基础宽度; N_c 、 N_q 、 N_γ 、 N'_c 、 N'_q 、 N'_γ 均为无量纲承载力系数, 仅与土的内摩擦角有关, 实际工程应用中一般取其 $(1/2\sim 1/3)P_u$ 作为地基容许承载力来使用, 本文取 $1/3 P_u$, 即取安全系数 $K=3$ 。验算时, 复合地基土强度参数取复合地基一定深度范围内的加权平均抗剪强度指标。计算所得复合地基抗剪强度指标见表 3。由太沙基承载力曲线图查得: $N_c=17.53$ 、 $N_q=7.52$ 、 $N_\gamma=3.3$ 、 $N'_c=12.50$ 、 $N'_q=4.35$ 、 $N'_\gamma=1.28$, 计算所得复合地基承载力见表 4。

表 3 复合地基平均抗剪强度指标

Table 3 The index of average shear strength of the composite foundation

黏聚力 $\bar{C}_{SP}/\text{kPa}$	内摩擦角 $\bar{\phi}_{SP}/(\text{^\circ})$	土重度 $\bar{\gamma}_{SP}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
224.170	21.1	19.926

表 4 复合地基承载力

Table 4 The bearing capacity of the composite foundation

破坏类型	地基土极限承载力/ kPa	地基土极容许承载力/ kPa
整体剪切破坏	4 928.13	1 642.71
局部剪切破坏	2 376.69	792.23

由上部结构荷载和基础产生的基底平均压力为 436.94 kPa, 小于复合地基容许承载力, 满足地基承载力要求。由此可知, 当基础埋深为 3.9 m 时该复合地基满足承载力要求。

3.2 地基变形验算

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—

2011)要求按照分层总和法计算基础中心点沉降量。计算简图及土层计算参数见图 2 和图 3。

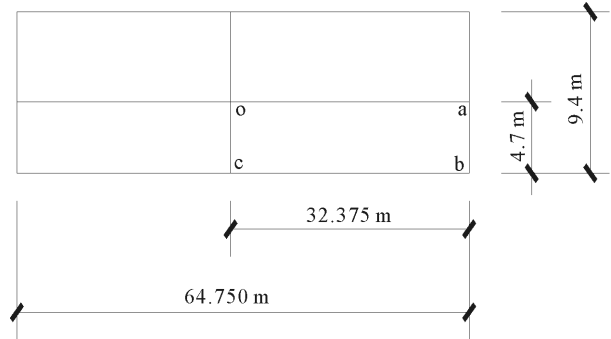


图 2 地基沉降计算简图

Fig.2 Calculating sketch of the foundation settlement

该工程基底平均附加压力为 $P_0=371.878\text{ kPa}$, 按规范要求^[6]确定的计算深度 $Z_n=20\text{ m}$ 。基础中心点沉降量计算结果见表 5。沉降计算经验系数 $\varphi_s=0.367\ 6$, 计算所得地基最终沉降量 s 为 100 mm, 满足规范^[8]要求。由此得出当基础埋深为 3.9 m 时, 该复合地基沉降变形满足要求。

3.3 地基抗滑移及抗倾覆稳定性验算

根据现行《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)采用安全系数法进行复合地基抗滑移及抗倾覆验算。偏心、水平荷载作用下的抗滑移稳定性验算和抗倾覆稳定性验分别按公式(3)和(4)计算:

$$K = \frac{(F + G)\mu}{V_y} > 1.3 \tag{3}$$

$$K = \frac{Fy + Gy_0}{V_y h + M_y} > 1.6 \tag{4}$$

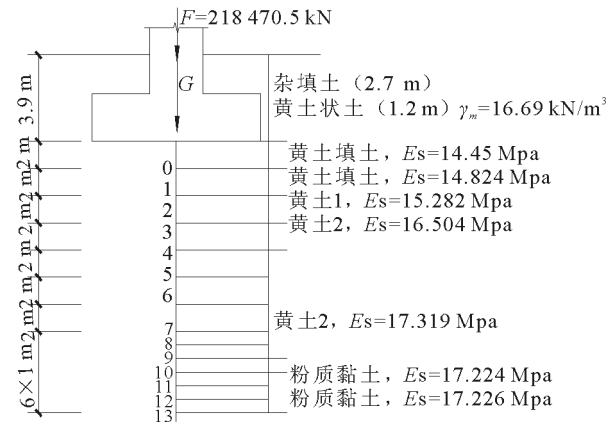


图 3 土体分层及计算参数

Fig.3 Divided layers and calculation parameters

式中, K 为抗滑移、抗倾覆稳定性安全系数; F 为上部结构传至基础顶面的竖向力标准值; G 为基础自重和基础上的土重; μ 为基底摩擦系数,偏于安全取 0.2; V_y 为上部结构传至基础顶面的水平力标准值; M_y 为上部结构传至基础顶面的倾覆力矩标准值; H 为基础厚度; y 为 F 至基础外边缘点的距离; y_0

为 G 至基础外边缘点的距离。

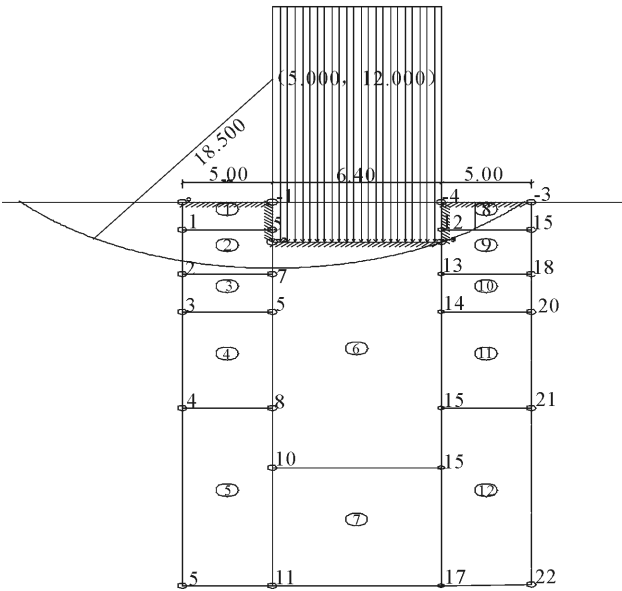


图 4 地基整体稳定性计算模型

Fig.4 Calculation model for the whole foundation stability

表 5 基础中心沉降量计算结果汇总表

Table 5 The calculated result of settlement of the foundation center

Z/m	基础			$\bar{z}\alpha$	$z_i\bar{\alpha}_i - z_{i-1}\bar{\alpha}_{i-1}$	E_{si}/MPa	$\Delta S_i^1/\text{mm}$	$\sum \Delta S_i^1/\text{mm}$
	l/b	z/b	$\bar{\alpha}$					
0	6.89	0	1.000	0				
2	6.89	0.4	0.994 0	1.988 0	1.988 0	14.450	51	51
4	6.89	0.9	0.952 8	3.811 2	1.823 2	14.824	46	97
6	6.89	1.3	0.901 6	5.409 6	1.598 4	15.282	39	136
8	6.89	1.7	0.846 8	6.774 4	1.364 8	16.504	31	167
10	6.89	2.1	0.794 0	7.940 0	1.165 6	17.319	25	192
12	6.89	2.6	0.733 6	8.803 2	0.863 2	17.319	19	211
14	6.89	3.0	0.691 2	9.676 8	0.873 6	17.319	19	230
15	6.89	3.2	0.671 6	10.074 0	0.397 2	17.319	9	239
16	6.89	3.4	0.652 8	10.444 8	0.370 8	17.319	8	247
17	6.89	3.6	0.635 2	10.798 4	0.353 6	17.224	8	255
18	6.89	3.8	0.618 4	11.131 2	0.332 8	17.226	7	262
19	6.89	4.0	0.602 4	11.445 6	0.314 4	17.226	7	269
20	6.89	4.3	0.580 4	11.608 0	0.162 4	17.226	4≤0.025×273 满足	273

根据 PKPM 软件计算结果由上部结构传至基础顶面的竖向力标准值 $F=218\,470.5\text{ kN}$;基础自重和基础上的土重 $G=47\,474.7\text{ kN}$;底部剪力 $V_y=7\,685.7\text{ kN}$;倾覆力矩 $M_y=573\,359.8\text{ kN}\cdot\text{m}$; $y=4.7\text{ m}$, $y_0=4.7\text{ m}$;基底摩擦系数(按偏于安全考虑)取 $\mu=0.2$ 。按式(3)求得的安全系数为 6.921,大于 1.3。按式(4)求得的安全系数为 2.15,大于 1.6,均满足规范^[6]要求。

由此可以得出当基础埋深为 3.9 m 时,该复合地基满足地基抗滑移稳定性和抗倾覆稳定性的要求。

3.4 地基整体稳定性验算

通过理正岩土分析软件验算地基整体稳定性。计算模型如图 4 所示。分析时采用瑞典条分法,土条宽度取 1 m,圆心 X 坐标 5.000(m),圆心 Y 坐标 12.000(m),半径 18.500(m)。

计算所得总下滑力为 966.066 kN,总抗滑力为 4 703.696 kN,安全系数为 4.869,符合地基整体稳定性安全系数要求。由此可以得出当基础埋深为 3.9 m 时,复合地基满足整体稳定性要求。

4 结论

(1) 对该建筑工程而言,当基础埋置深度为 3.9 m 时,复合地基承载力、沉降变形、抗倾覆和抗滑移稳定性及整体稳定性均满足要求。因此对于基础南侧埋深不满足规范要求的情况可不进行工程设计修改。

(2) 当场地条件允许且经验算处理后的地基满足地基稳定性要求时,基础埋深可适当减小。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高层建筑筏形与箱形基础技术规范(JGJ 6-2011)[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Construction of the People’s Republic of China. Code for Tall Building Raft Foundations and Boxfoundations (GB 50011-2010) [S].Beijing;China Architecture and Building Press,2011. (in Chinese)

[2] 张在明,陈雷.高层建筑地基整体稳定性与基础埋深关系的研究[J].工程勘察,1994(6):2-4.
ZHANG Zai-ming,CHEN Lei.Research on the Relationship Between the Overall Stability and the Foundation’s Depth of Tall Buildings [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1994(6):2-4. (in Chinese)

[3] 熊伯荣.高层建筑的基础埋深及基坑支护[J].铁道标准设计, 1995,(Z1):48-51.
XIONG Bo-rong.Foundation Depth and Excavation of Tall B-

uilding[J]. Railway Standard Design, 1995, (Z1): 48-51. (in Chinese)

[4] 古今强.高层建筑复合地基稳定性分析[C]//第二十一届全国高层建筑结果学术会议论文集.南京:[s.n.],2010.
GU Jin-qiang.Stability Analysis of Composite Foundation for Tall Building[C].The 21th National Conference Proceedings of the Structure for Tall Building.Nanjing:[s.n.],2010.(in Chinese)

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范(JGJ 79-2012)[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Construction of the People’s Republic of China. Technical Code for Ground Treatment Buildings (GJG79-2012)[S].Beijing;China Architecture and Building Press,2012. (in Chinese)

[6] 郑俊杰.地基处理技术[M].武汉:华中科技大学出版社,2008.
ZHENG Jun-jie.Ground Improvement Techniques [M]. Wuhan;Huazhong University of Science and Technology Press, 2008.(in Chinese)

[7] 张克恭,刘松玉.土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
ZHANG Ke-gong, LIU Song-yu. Soil Mechanics [M]. Beijing: China Architectutre & Building Press,2010.(in Chinese)

[8] 中国建筑科学研究院.建筑地基基础设计规范(GB 50007-2011)[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
China Academy of Building Research.Code for Design of Building Foundation (GB50007-2011) [S]. Beijing; China Architecture and Building Press,2011.(in Chinese)