

西安地区超高层建筑场地勘察、试桩及沉降观测分析与经验总结

熊 维, 戚长军, 吴学林, 赵星纬

(机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 随着经济的发展, 建设国际化大都市需要, 西安地区超高层建筑越来越多。西安地区地貌单元多, 地基土层差别大, 对超高层建筑地基处理影响大。以西安地区工程为例, 分析不同地貌单元、不同地基土层场地, 桩的应力随桩身分布变化, 桩身地基土层侧摩阻力随桩顶荷载增加沿桩身发挥程度不同及沉降量随时间变化分析, 总结了工程经验, 为今后类似工程建设提供参考。

关键词: 超高层建筑; 不同地基土层; 桩身应力; 侧摩阻力; 沉降量

中图分类号: TU431

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)01-0021-08

Analysis and experience summary of site exploration, pile test and settlement observation of super-high-rise buildings in Xi'an area

XIONG Wei, QI Chang-jun, WU Xue-lin, ZHAO Xing-wei

(China JiKan Research Institute of Engineering Investigations and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: With the development of economy and the need of building an international metropolis, there are many super high-rise buildings and geomorphic units in Xi'an area, and the difference of foundation soil layer is big, which has great influence on the foundation treatment of super high-rise buildings. Taking the project in Xi'an area as an example, the paper analyzes the variation of pile stress with pile body distribution in different geomorphic units and different foundation soil sites, the variation of shaft friction along the pile with the increase of pile top load and the variation of settlement with time. The engineering experience is summed up, so as to provide reference for similar engineering construction in the future.

Key words: super-high-rise building; different foundation soil layers; pile stress; side friction; settlement

0 引 言

随着经济发展, 城市建设土地有限, 尤其是城市核心地段地价昂贵, 为了充分发挥土地单位面积利用率, 打造地标性建筑, 超高层建筑在城市建设中越来越多。目前, 西安地区已建和在建的超高层项目超过 20 项, 多个区域形成超高层群, 已投入使用或主体竣工的超高层项目超过 10 项, 主要集中在西安高新区, 以锦业路和丈八二路十字区域为主。比如国瑞西安金融中心、西安绿地中心、中铁西安中心、西安迈科中心、西安永威时代中心等均位于该区域。除此以外, 西安高新区二期、西安经开区、西安浐灞生态区、西咸新区沣东新城、西安

新城区、曲江新区等区域也有已建或在建超高层项目。

为今后更好从事超高层项目场地勘察工作, 对已完成的超高层项目场地勘察工作进行经验总结分享是有必要的。本文将从超高层建筑场地的岩土工程勘察、试桩检测、沉降观测等工作进行经验总结与分享, 为今后类似工程相关工作的开展提供经验参考。

1 西安地区地质地貌环境

1.1 区域地质构造

西安地区位于渭河断陷盆地的中段, 西安凹陷

的东南隅。西安凹陷北侧以渭河断裂为界，东南侧以长安-临潼断裂为界，西南以秦岭北侧断裂为界（见图1）。西安凹陷是渭河断陷盆地内的沉降中心之一，区内第四系地层厚度600~1000 m。受骊山隆起和临潼长安断裂活动影响，基底由东南向西北倾伏，致使第四系地层厚度东南薄，西北厚。

1.2 区域地质地貌

西安有“八水绕长安”之说，在西安地区分布有渭河、泾河、灞河、泾河、沔河、沔河、泾河、沔河、泾河、沔河。 “八水”之中，渭河汇入黄河，而其他“七水”原本各自直接汇入渭河，然而由于时代变迁，河道改道，泾河成为了灞河的支流，泾河成为泾河的

的支流，泾河与沔河的交汇。整体上，西安地区渭河以南地形表现为南高北低。西安地区南部区域小型河流——泾河、泾河、泾河对区域内地貌影响不大，主要表现为对河道区域地貌变化。

受渭河冲积、秦岭山前冲洪积及“三门湖”沉积与萎缩消亡的影响，西安地区主要地貌单元分为：黄土塬和渭河冲积平原的地貌类型——河漫滩、一级阶地、二级阶地、三级阶地和黄土台塬，受三门湖沉积与萎缩消亡影响的冲洪积一级台地~三级台地，秦岭山前冲洪积扇等（西安地区地貌见图2）。

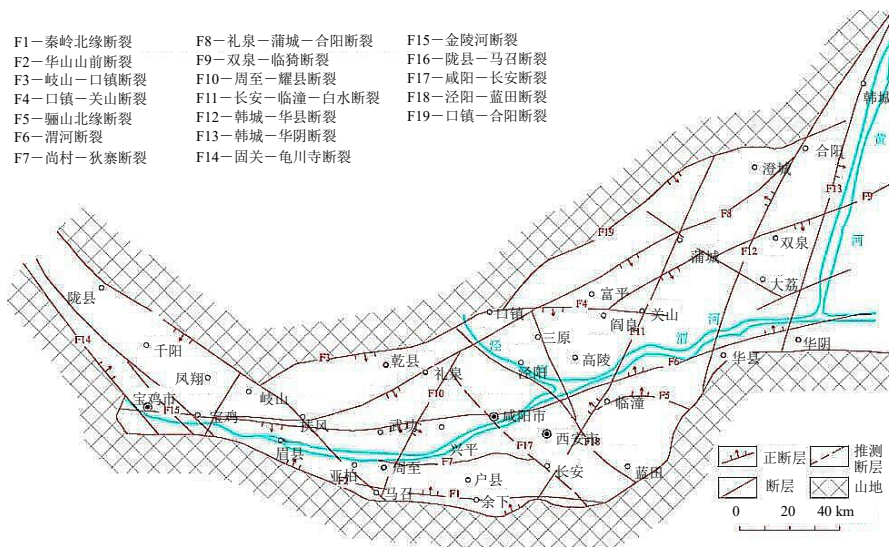


图1 渭河断陷盆地地质构造简图

Fig. 1 Diagram of regional geological structure of Weihe fault basin

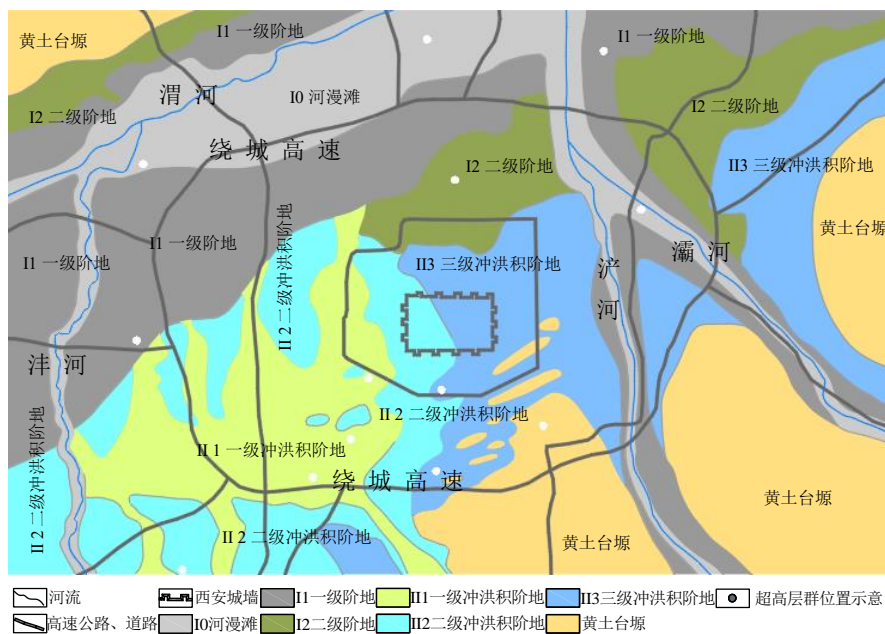


图2 西安地区地貌简图

Fig. 2 Geomorphologic diagram of Xi'an area

渭河漫滩和一级阶地主要以砂层为主, 上部分布有薄层黄土状土; 渭河二级阶地和三级阶地上部分布有黄土状土或黄土、古土壤, 下部分布有砂层和粉质黏土层; 黄土台塬以黄土和古土壤为主; 冲洪积一级台地以黄土状土、砂层、粉质黏土为主, 局部上部分布有圆砾、卵石层; 冲洪积二级台地~三级台地以黄土状土或黄土、古土壤、砂层、粉质黏土为主。由此可见, 地貌单元不同, 地层结构有差别, 对工程建设有影响。

2 场地地层结构分析

根据目前西安地区已建或在建超高层项目情况, 以及西安超高层未来建设发展规划, 大多数超高层建筑分布在冲洪积一级台地(西安高新区)或渭河一级阶地(沣东新城)。本文将以在对应区域已建或在建超高层项目场地地基土层情况进行分析, 冲洪积一级台地以西安高新区锦业路与丈八二路十字区域为例(简称“西安高新区项目”), 渭河一级阶地以沣东新城为例(简称“沣东新城项目”)。据岩土工程勘察资料, 结合设计参数, 将上述两个区域对应地貌单元的地层结构分布以剖面示意形式绘制出来进行对比分析, 具体可见图 3。

据图 3, 冲洪积一级台地主要以中压缩性粉质黏土层为主, 夹密实砂层; 渭河一级阶地主要以密实砂层为主, 夹中压缩性粉质黏土层。两个不同地貌单元地基土层结构差异大。据岩土工程勘察资料, 以上两个不同地貌单元地基土层随着深度的增加, 超固结比逐渐降低。全新世冲积的上部地基土层超固结性明显, 晚更新世冲积成因及中更新世冲积+湖积成因的地基土层超固结比均接近 1, 趋于正常固结。地基土层均呈现出自上而下工程性质逐渐增强的特性。

根据以上西安地区两个不同地貌单元地层结构分析, 地层中没有密实或坚硬的卵石、基岩层,

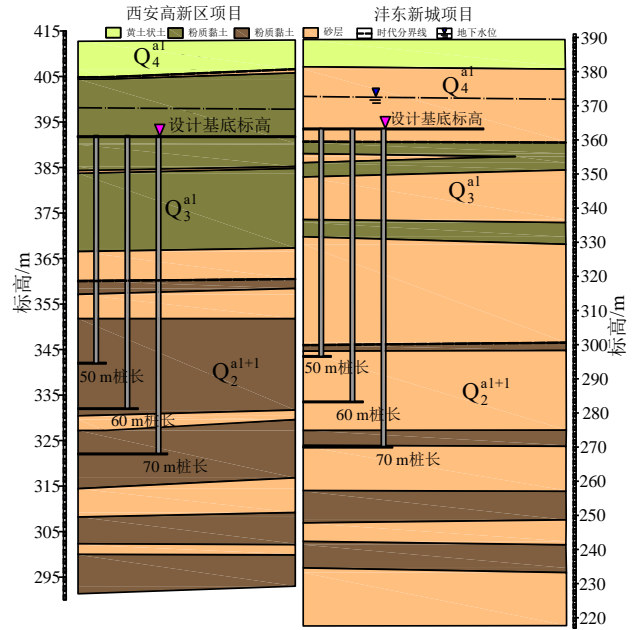


图 3 地层结构剖面示意图
Fig. 3 Diagram of stratigraphic structure section

地基土层以砂、土层为主, 因此, 桩基方案以摩擦桩为主。如何充分发挥桩侧摩阻力直接关系到单桩竖向承载力。结合工程实际情况, 对于超高层建筑桩基设计和施工时均增加了后注浆工艺。对于西安高新区一级冲洪积台地场地, 由于地基土层主要以粉质黏土层为主, 后压浆工艺主要考虑其作为充分发挥桩侧摩阻力的加强措施, 当作工程保障措施, 不考虑桩侧摩阻力提高。对于沣东新城渭河一级阶地, 由于地基土层主要以砂层为主, 后注浆工艺主要考虑充分发挥桩侧摩阻力, 提高单桩竖向承载力。针对以上两个不同地貌单元的地基土层, 结合工程地质条件、现场原位测试试验及室内土工试验结果等, 考虑采用泥浆护壁后注浆成孔工艺, 岩土勘察报告中综合确定地基土层灌注桩的极限侧阻力标准值和端阻力标准值(范围值)参见表 1。

据表 1 中的桩基参数, 估算上述两个场地的单桩竖向极限承载力可见表 2。

表 1 灌注桩的极限侧阻力和端阻力标准值(范围值)

Table 1 Standard value of ultimate shaft resistance and tip resistance of cast-in-place pile

kPa

指标	西安高新区一级冲洪积台地				沣东新城渭河一级阶地			
	晚更新世		中更新世		晚更新世		中更新世	
	粉质黏土	中砂	粉质黏土	中砂	粉质黏土	中砂	粉质黏土	中砂
q_{sik}	72~84	88~92	86~92	92~98	75~88	88~100	88~100	104~116
q_{pk}	—	1 900~2 100	1 700~1 900	2 200~2 400	—	2 300~2 600	—	2 500~2 900

备注: 表中参数已考虑了西安高新区一级冲洪积台地采用桩身后注浆工艺加强措施, 沣东新城渭河一级阶地场地采用桩端、桩身复式后注浆工艺。

表2 单桩竖向极限承载力标准值估算

Table 2 Estimation of standard value of vertical ultimate bearing capacity of single pile

项目名称	桩端持力层	估算桩长/m	桩径/mm	单桩竖向极限承载力标准值 Q_{uk}/kN
西安高新区项目	粉质黏土	60	$\Phi 900$	15 091~15 278
沣东新城项目	中砂	50	$\Phi 1\ 000$	16 602~17 124

3 超高层试桩情况分析

根据西安地区目前已建或在建超高层项目桩基方案具体情况,均采用钻孔灌注桩+后注浆工艺,满堂布桩+厚筏板,桩长一般 50~70 m,桩径 800~1 000 mm,以粉质黏土为主的场地设计考虑单桩竖向承载力标准值一般 12 000~20 000 kN,以砂层为主的场地设计考虑单桩竖向承载力标准值一般 20 000~32 000 kN。为了充分了解桩周土层侧阻力及桩端阻力发挥特征,试桩时进行了桩身应力测试(滑动测微测试或分布式光纤测试),并将测试结果应用于桩基优化设计。

3.1 试桩试验结果分析

本文以上述对应的西安高新区项目(地上 57 层、高约 270 m)和沣东新城项目(地上 57 层、高

约 300 m)现场试桩结果进行分析,单桩竖向抗压静载试验详见表 3。均采用锚桩提供反力,其中沣东新城项目设置双套筒消除附加段(设计桩顶标高至试验面之间的桩长)桩周侧摩阻力的影响。

根据试验数据绘制试桩的静载试验成果图 $Q-s$ 曲线和 $s-lgt$ 曲线详见图 4~5。

根据表 3、图 4~5 分析,沣东新城项目桩长比西安高新区项目桩长短约 10 m、单桩竖向承载力极限值大约 10 000 kN,说明对于渭河一级阶段场地(砂层厚的场地)通过后注浆工艺施工时,其桩身侧阻力提高明显、单桩竖向承载力容易提高。

3.2 桩身应力测试结果分析

(1) 桩身轴力分析

桩在各级荷载作用下各测段的滑动测微计(或分布式光纤)测试值与相应段的初始读数之差为该

表3 单桩竖向抗压静载试验一览表

Table 3 Vertical compressive static load test of single pile

项目名称	桩径/mm	试验桩长/m	有效桩长/m	最大荷载/kN	最大沉降量/mm	注浆方式
西安高新区项目	900	67.9	61.1	22 400	40.84	桩身注浆
沣东新城项目	1 000	66.4	51.4	32 000	40.96	桩端、桩身复式注浆

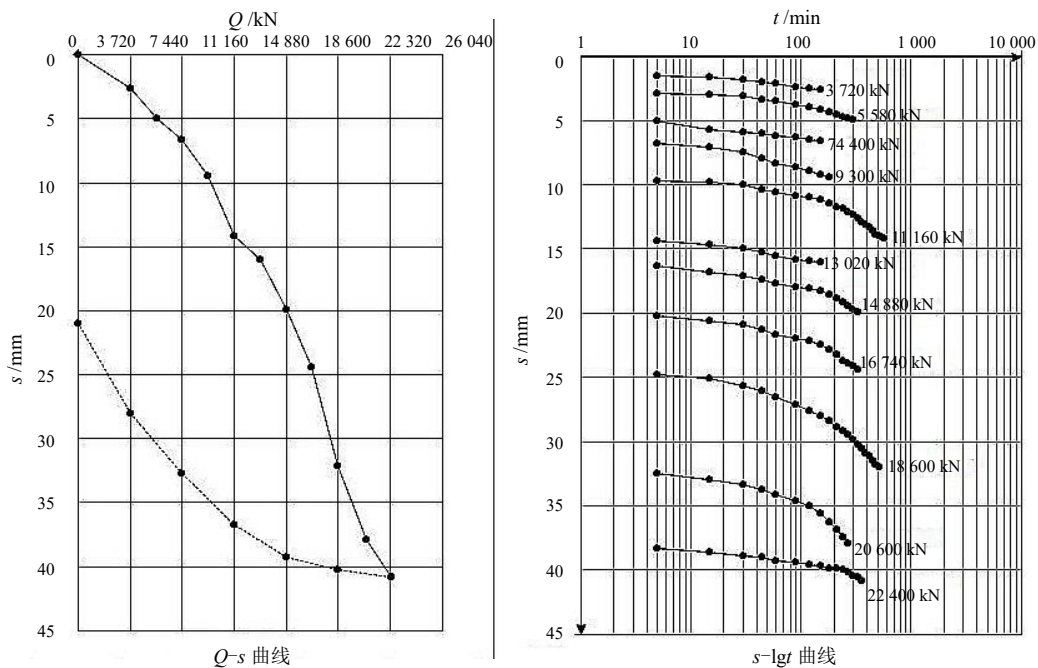


图4 西安高新区项目 $Q-s$ 曲线图和 $s-lgt$ 曲线图

Fig. 4 $Q-s$ curve and $s-lgt$ curve of Xi'an high-tech zone project

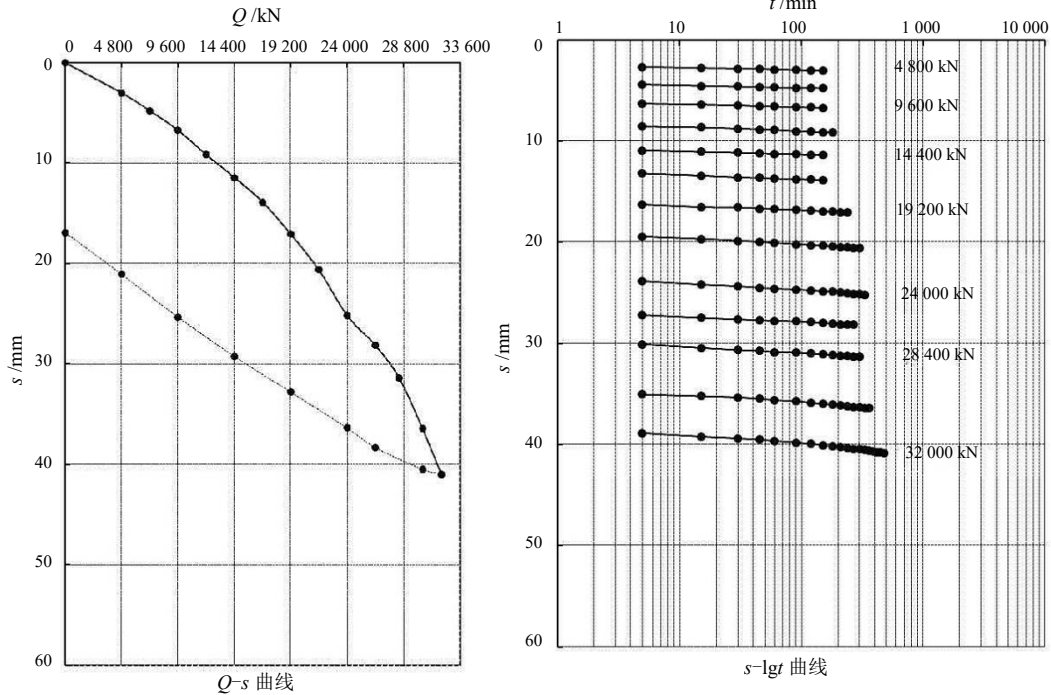


图 5 沔东新城项目 Q-s 曲线图和 s-lgt 曲线图

Fig. 5 Q-s curve and s-lgt curve of Fengdong new city project

段桩身在相应荷载下的压缩量，压缩量除以测段长度即为应变值。根据混凝土的应力与应变关系，在超过一定的应力水平后呈现出非线性特性，其弹性模量将随应变或轴力的增加而降低。桩的混凝土弹性模量 E_i 可根据桩顶实测应力应变由下式得出：

$$E_i = \frac{4}{\pi d^2} \times \frac{Q_i}{\varepsilon_{0i}} \quad (1)$$

式中： d 为桩顶部直径，m； Q_i 为第 i 级桩顶荷载，kN； ε_{0i} 为第 i 级荷载下桩顶处的拟合应变值。

桩身深度 z 处的应变 ε_i 和混凝土弹性模量 E_i ，可按下式计算桩身相应深度 z 处的轴力：

$$Q(z) = \frac{\pi d^2}{4} E_i \varepsilon_i(z) \quad (2)$$

根据以上计算方法，可得出桩身相应深度的轴力，绘制轴向力拟合曲线可见图 6~7。

由图 6~7 桩的轴向力曲线可以看出：

a) 沔东新城项目上部约 15 m 深度范围内曲线基本无变化，说明双套筒施工发挥了作用，基本消除了桩周土层侧阻力的影响。

b) 在桩顶荷载作用下，桩身轴力均随桩的深度的增加而减小；桩身中部是承受桩顶荷载的主要部位。

c) 在各级荷载作用下，桩身轴力随桩的深度变化相近，承载力性状表现一定的稳定性。

d) 在最大荷载作用下，桩端阻力均未发挥，

单桩竖向承载力发挥以侧阻力为主。

(2) 桩侧阻力和端阻力分析

桩侧阻力 $q_s(z)$ 及端阻力 q_p 可根据上述得出的桩轴力曲线，按下式进行计算：

$$q_s(z) = \frac{1}{\pi d} \cdot \frac{dQ(z)}{dz} \quad (3)$$

$$q_p = \frac{Q_p}{\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2} \quad (4)$$

式中： Q_p 为实测桩端阻力，kN； d_p 为实测桩端直径，m；其它符号详见前文。

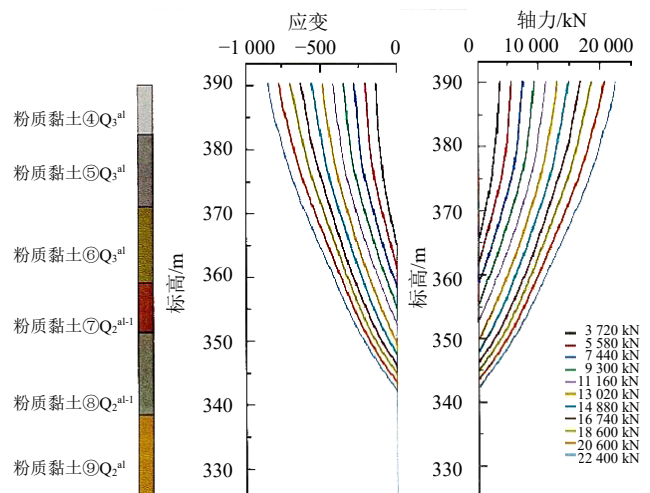


图 6 西安高新区项目桩的轴向力拟合曲线

Fig. 6 Axial force fitting curve of piles in Xi'an high-tech zone project

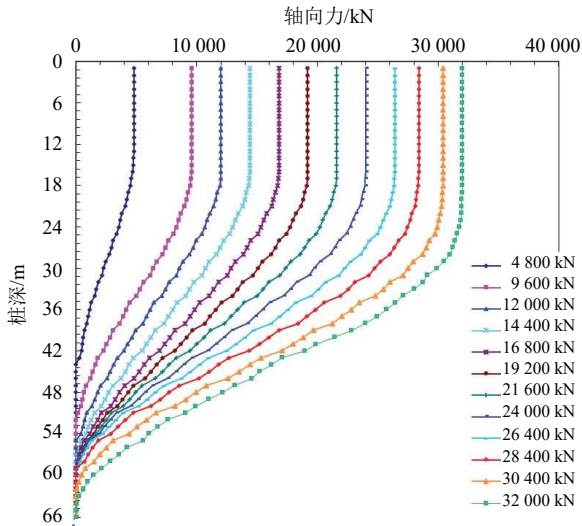


图7 沔东新城项目桩的轴向力拟合曲线

Fig. 7 Axial force fitting curve of piles in Fengdong new city project

利用桩身竖向轴力和实测的桩身直径，按上式可分别计算出试桩在不同荷载下桩身侧阻力的大小及其沿桩身的分布和桩端阻力。为了更好地了解桩侧阻力沿桩身随荷载变化情况，将西安高新区项目和沔东新城项目数据绘制两种不同类型的曲线进行分析（西安高新区项目按地层分层考虑、沔东新城项目按深度考虑），绘制桩侧阻力沿桩身随荷载变化曲线可见图8~9。

由图8~9 桩侧阻力沿桩身随荷载变化曲线可以看出桩侧阻力随桩深变化的规律：

(1) 在上部土层一定深度范围内，随着桩顶荷载的增加，桩侧阻力呈现先增加后减小的趋势；

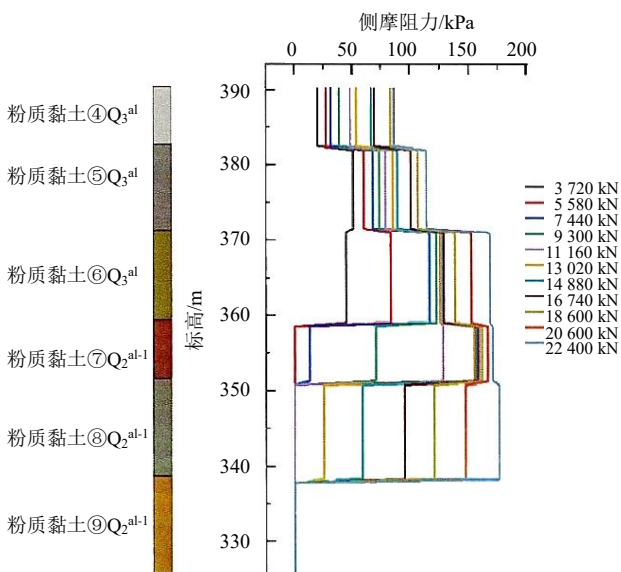


图8 西安高新区项目桩侧阻力沿桩身随荷载变化曲线

Fig. 8 Variation curve of pile shaft resistance along the pile body with the change of load in Xi'an high-tech zone project

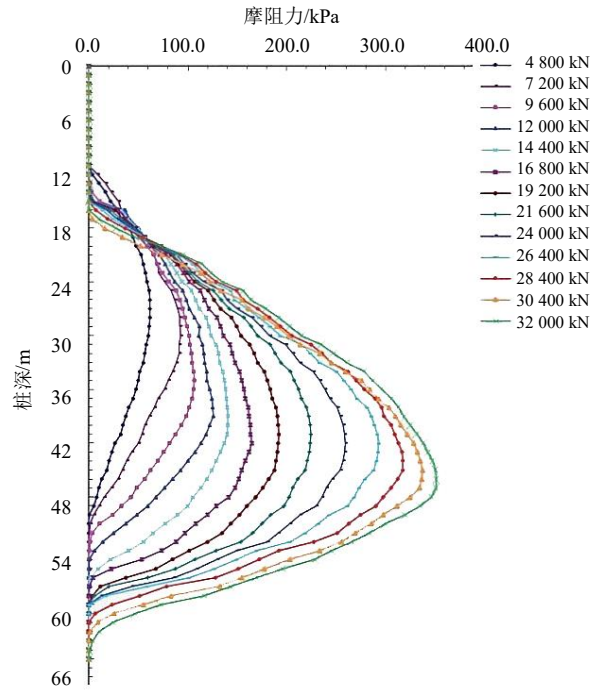


图9 沔东新城项目桩侧阻力沿桩身随荷载变化曲线

Fig. 9 Variation curve of pile shaft resistance along the pile body with the change of load in Fengdong new city project

在下部土层，随着桩顶荷载的增加，桩侧阻力随深度的增加而增加。

(2) 不同荷载作用下桩侧阻力的发挥程度不同，桩身地基土的桩侧阻力并不一定能最大程度的发挥；当桩顶荷载达到极限值时，沿桩身各土层的侧阻力并非都处于峰值，对于上部土层，侧阻力已超过峰值而有所下降，而下部土层的侧阻力尚处于增大过程并未充分发挥。

(3) 在不同荷载作用下桩侧阻力的发挥深度也不相同，大致位于有效桩身2/3附近段（桩身中下部）桩侧阻力发挥较好，桩身侧阻力随桩顶荷载的增大而增大。

4 超高层建筑物沉降观测数据分析

近年来，笔者一直参与、跟踪西安多个已建和在建超高层项目的沉降观测工作，收集、积累了相关沉降数据，对超高层建筑沉降规律有一定了解。为反映西安高新区已建超高层项目的沉降情况，将部分超高层建筑物沉降观测结果中最大、最小、平均沉降量及沉降速率列于表4。

据表4中统计数据，西安高新区超高层项目中主体施工阶段建筑物平均沉降速率介于0.05~0.066 mm/d之间，主体施工封顶后两年建筑物平均沉降速率基本上均小于0.02 mm/d。据表4中数据，

西安高新区超高层项目采用长桩地基处理方案后, 建筑物沉降量约为 50 mm, 在整个观测期间内建筑物沉降量较小, 差异沉降量较小, 建筑物沉降均匀。

为了更好了解超高层建筑沉降量随时间变化规律, 现将西安高新区项目 B 超高层建筑沉降观测数据平均值绘制沉降观测时间-沉降量变化曲线

详见图 10。

据图 10 可以看出, 西安高新区项目 B 超高层建筑在主体施工阶段观测时间-沉降量曲线较陡, 沉降量所占比重大, 约占总体沉降量 60%。超高层建筑主体施工完成后, 建筑物沉降观测时间-沉降量曲线相对平缓, 其沉降趋于稳定。

表 4 西安地区部分超高层建筑沉降观测数据一览表
Table 4 Observed settlement of some super-high-rise buildings in Xi'an

项目名称	观测阶段	观测时段	沉降量		平均沉降量/mm	平均沉降速率/(mm/d)
			最小值/mm	最大值/mm		
西安高新区项目 A (地上 45 层、高 207 m)	主体施工	2014-07~2015-08	17.17	32.08	25.06	0.065 6
	封顶后第一年	2015-08~2016-09	3.13	11.74	8.54	0.020 5
	封顶后第二年	2016-10~2017-11	4.72	5.61	5.33	0.015 7
西安高新区项目 B (地上 57 层、高 270 m)	主体施工	2013-11~2014-12	19.55	32.61	26.75	0.063
	封顶后第一年	2015-01~2015-12	5.02	10.09	7.08	0.020
	封顶后第二年	2016-01~2017-08	4.19	12.81	6.17	0.026
西安高新区项目 C (地上 46 层、高 195.5 m)	主体施工	2015-01~2016-07	16.78	33.48	26.27	0.049
	封顶后第一年	2016-07~2017-12	1.44	10.32	6.69	0.013
	封顶后第二年	2017-12~2019-05	2.04	5.24	1.77	0.003
西安高新区项目 D (地上 49 层、高 212 m)	主体施工	2015-12~2017-03	15.59	26.21	20.40	0.056 7
	封顶后第一年	2017-03~2018-03	4.01	9.96	6.86	0.029 6
	封顶后第二年	2018-03~2019-04	2.55	4.58	3.61	0.011 5
西安高新区项目 E (地上 48 层、高 218 m)	主体施工	2004-10~2006-01	24.64	35.13	29.59	0.066
	封顶后二年	2006-01~2008-05	10.51	17.70	15.34	0.018

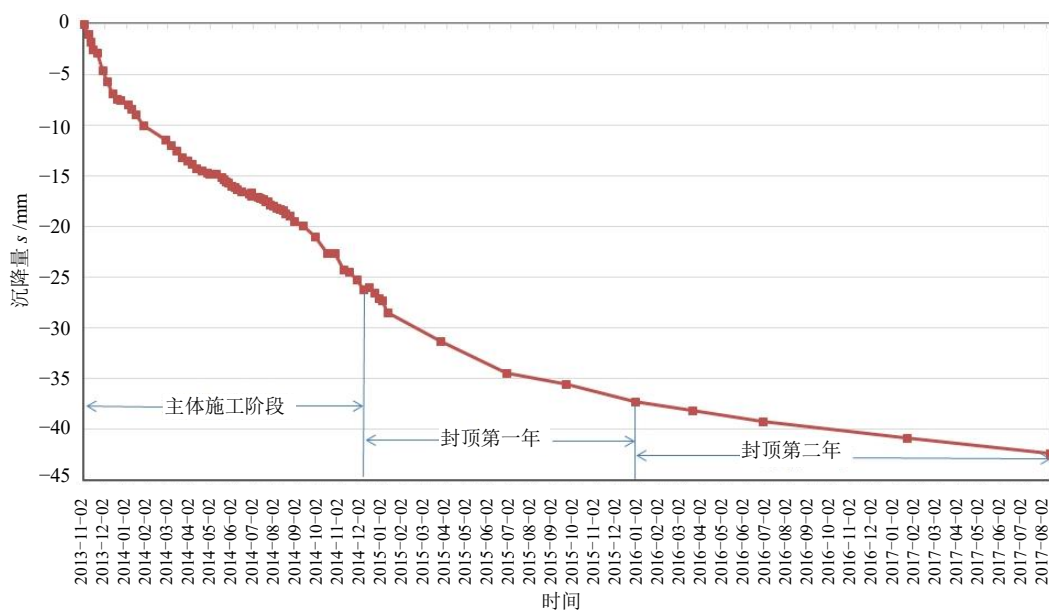


图 10 西安高新区项目 B 超高层建筑沉降观测时间-沉降量平均值变化曲线

Fig. 10 Variation curve of settlement observation time and the average of super-high-rise building settlement in Xi'an high-tech zone project B

5 结 论

根据上述分析,可以更进一步了解西安地区超高层建筑项目关于岩土工程勘察、桩基参数及沉降量方面的经验数据,为今后拟建超高层项目积累了经验。通过本文分析后主要总结经验与思考如下:

(1) 西安地区不同地貌单元,地层存在差异,对工程影响较大,尤其是对桩基方案设计影响大;对以砂层为主的场地钻孔灌注桩+后注浆工艺可以大幅提高单桩竖向承载力,以粉质黏土为主的场地可以作为工程措施考虑。

(2) 不同荷载作用下桩侧阻力的发挥程度不相同,发挥深度也不相同,有效桩身 2/3 附近段桩侧阻力发挥较好,桩身侧阻力随桩顶荷载的增大而增大。

(3) 西安地区超高层建筑主体施工阶段建筑物沉降量约占总体沉降量 60%,采用长桩地基处理方案后,建筑物沉降量约为 50 mm。

(4) 由现场载荷试验计算的桩侧摩阻力值比《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中的建议值大很多,对于大荷载超长桩桩身侧摩阻力如何取值

才能更符合实际情况值得进一步思考和研究。

(5) 对于此类建筑沉降量,不论是依据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011),还是依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)进行估算,如何取值才能使估算值更加符合实际情况也是值得思考和研究的问题。

参考文献

- [1] 锦业时代 C 区·D5 大道岩土工程勘察报告书[R]. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 2019.
- [2] 西安迈科商业中心塔楼、商业裙房钢筋混凝土钻孔灌注桩静载试验报告[R]. 陕西机勘检测工程咨询有限公司, 2013.
- [3] 西安迈科商业中心沉降观测技术报告书[R]. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 2018.
- [4] 西安·绿地中心沉降观测技术报告书[R]. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 2017.
- [5] 锦业时代 C 区·D5 大道钢筋混凝土钻孔灌注桩静载试验报告[R]. 陕西机勘检测工程咨询有限公司, 2019.
- [6] 西咸新区沣东新城国际丝路中心大厦钢筋混凝土钻孔灌注桩静载试验报告[R]. 陕西机勘检测工程咨询有限公司, 2019.