

2009北京钻探技术国际学术研讨会论文

超高层建筑的基础桩承载性能研究及环境效应分析

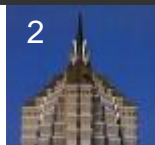
陈 辉 李 江

北京建材地质工程公司

2009年10月

1.前言

近年来，随着超高层建筑（ $\geq 100\text{m}$ ）的迅猛发展，超长直径钻孔灌注桩以其具有较高单桩承载力的优点在工程上的应用越来越广泛，但对这类桩的荷载传递机理到目前为止还不很清楚，迄今还没有符合实际的计算方法，已有的设计规范是基于中短桩试验研究基础上建立的，对于超长直径钻孔灌注桩的设计，存在适宜性问题。而对于超高层建筑来说，由于工程的特殊性，科学、合理的分析其潜在的灾害效应，对指导城市建设及城市地质灾害的防治有着重要意义。

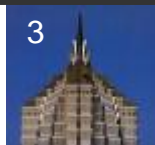


2. 超高层建筑基础桩承载性能

2. 超高层建筑基础桩承载性能

2.1 工程概况

工程建筑面积**178608.46m²**，主楼地上**53**层，高**236.6m**，地下**4**层，结构形式为框架—核心筒结构体系，钢混结构；主楼采用桩筏基础，桩基采用后压浆现浇钢筋砼灌注桩，桩长**43m**，桩径**1.0m**和**1.2m**。在超高层桩基工程实践和研究的基础上,我公司用后压浆技术对本工程桩基设计提出优化方案，施工工艺上采取了旋挖钻和冲击钻成孔两种方法，经静载试验和验收试验,成功地将桩长优化至**30m**,节约投资**1/3**以上,达数百万元之多,取得良好的技术经济效果。并为国家节约了资源。








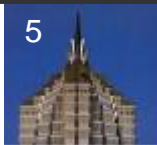
2. 超高层建筑基础桩承载性能

2.2工程地质条件

根据该工程的岩土工程勘察报告，影响超高层建筑基础施工的地层情况及其工程地质特性如下表所示：

地基土工程参数列表

地层简述	地基土图例	地基土承载力特征值 (KPa)	粘聚力 (KPa)	内摩擦角 φ (度)	侧摩阻力标准值 (KPa)	描述
⑧层粉土及粉质粘土		200	32.1	15.9		底面坡度平缓，厚度在基础宽度方向变化较小，属于均匀地基但承载力值相对较低。
⑨层细砂		220	—	37	50	主要下卧层，属于均匀地基， φ 值较高，具有较强的抗压缩性能，有利于控制地基沉降。
⑩层中砂		260	—	38	60	主要下卧层，属于均匀地基， φ 值较高，具有较强的抗压缩性能，有利于控制地基沉降。



⊕ (续前表)

①①层卵石		300	—	—	120	f_{ak} 值中等, 卵石具有很强的抗压缩性能, 侧摩阻力值较大, 可对桩体产生很高的侧摩擦力, 上部荷载转换为摩擦力的比值较大。
①②层粉质粘土		250	38.2	16.9	60	f_{ak} 和 φ 值相对较低, 抗压缩性较差, 同时侧摩阻力值较小, 上部荷载转换为摩擦力的比值较小。
①③层粉土		260	20.5	15.7	58	f_{ak} 和 φ 值相对较低, 抗压缩性较差, 同时侧摩阻力值较小, 上部荷载转换为摩擦力的比值较小。
①④层细砂		280	—	—	60	f_{ak} 和 φ 值相对较低, 抗压缩性较差, 侧摩阻力值较小, 轴力提供的承载力比值较大。
①⑤层卵石		380	—	—	130	f_{ak} 值较高, 卵石层的抗压缩性能很强, 侧摩阻力值较大, 压缩模量很大, 可对桩体提供极高的侧摩擦力。
①⑥层中粗砂含卵石		350	—	—	100	位于桩端层及桩下层, f_{ak} 值与压缩模量很高, 抗压缩性很强, 承载性能高且沉降极小。
①⑦层卵石		400	—	—	140	位于桩端下层, f_{ak} 值极高, 抗压缩性很强, 同时压缩模量很大, 承载性能高且沉降极小。

2. 超高层建筑基础桩承载性能

2.3 单桩承载性能现场试验

(1) 竖向抗压静载试验

对本工程的三根试桩进行了竖向抗压静载试验，采用油压千斤顶、压力和位移传感器等仪器设备对单桩竖向抗压静载进行了测试，其结果如图1-图3所示：

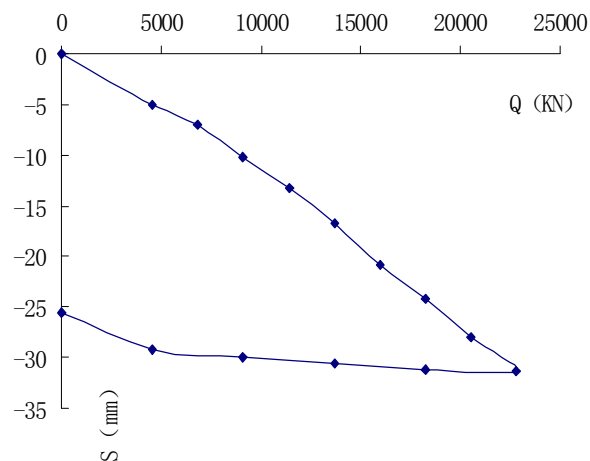


图2 SJ-2单桩竖向抗压静载试验曲线图
Fig.2 Q-S curve of SJ-2

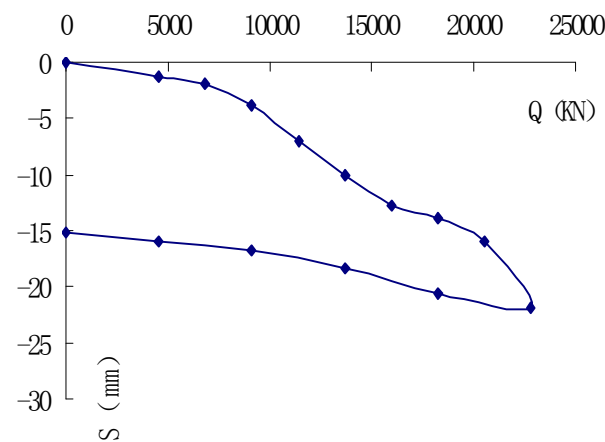


图1 SJ-1单桩竖向抗压静载试验曲线图
Fig.1 Q-S curve of SJ-1

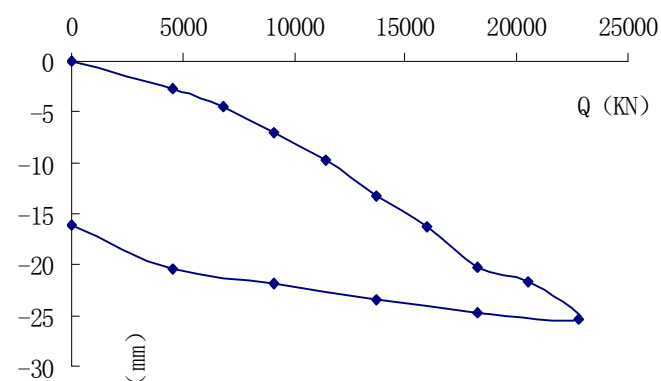
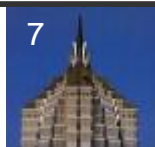


图3 SJ-3单桩竖向抗压静载试验曲线图
Fig.3 Q-S curve of SJ-3



2. 超高层建筑基础桩承载性能

由上图可知：

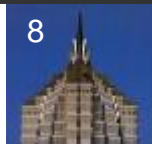
1) 根据单桩竖向抗压静载试验数据，**Q-S**曲线以及其他辅助曲线特征及有关规定，**3**根试桩在试验加荷至**22800KN**时，均未出现极限状态。

2) 超长桩的**Q-S**曲线基本无第二拐点，因此，超长桩极限荷载应根据桩顶沉降确定，设计桩基时，按变形控制较为合理。

笔者就超长桩的**Q-S**曲线基本无第二拐点做以下分析：

1) 桩基在深基坑内所处的地基土的应力状态为超固结应力状态，正常固结土经卸载就进入超固结状态，超固结土经加载，当应力超过历史上最大的固结压力土体才进入正常固结状态。

2) 护坡桩和基础桩对桩间土有一定的挤密作用，也限制了部分桩间土的侧向变形，这对桩间土承载力的提高是不容忽视的，特别是砂卵石地层，提高的幅度会更大。在有维护桩的作用下，随着垂直应力的增加，桩基的承载能力增强，沉降减小。



2. 超高层建筑基础桩承载性能

通过试验我们还发现，不同施工工艺对承载力的影响非常大，以本工程为例，在同一施工场地，旋挖钻机施工的**30m**长基础桩与冲击钻施工的**43m**长的基础桩**Q-S**曲线基本一致。旋挖钻机施工适用于各种桩型，特别是扩底桩，成桩速度快，孔壁暴露时间短，松弛效应不明显，泥皮薄，钻孔垂直度好等优点。

（2）桩身应力试验

桩身应力测试，根据土层分布，采用在试桩不同深度土层分层界面位置桩身断面处设置钢弦式应力传感器，利用桩顶受到竖向荷载后传感器的反应值，测试沿深度方向桩身轴力，并计算出不同深度方向上桩身侧摩阻力和桩端阻力，由此来评判桩身在不同荷载作用下的受力特性。测试结果如图4-图6所示：

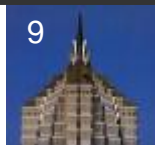


图4 SJ-1桩身轴力分布图
Fig.4 distribution of axial-stress (SJ-1)

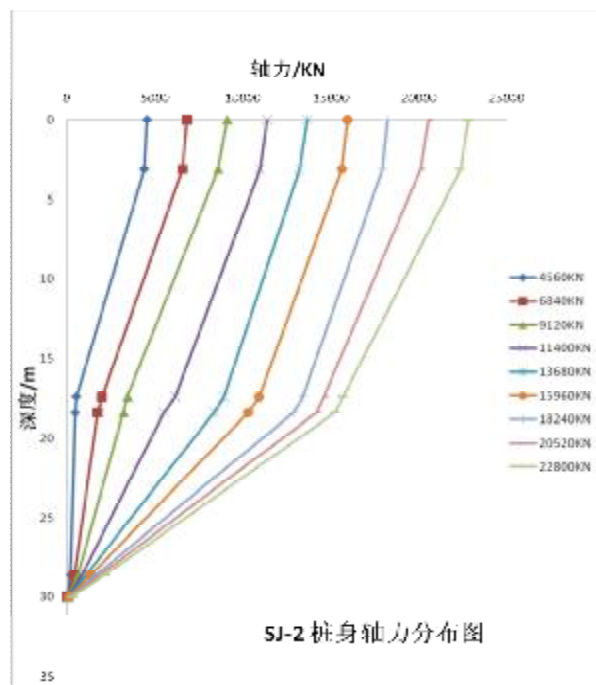
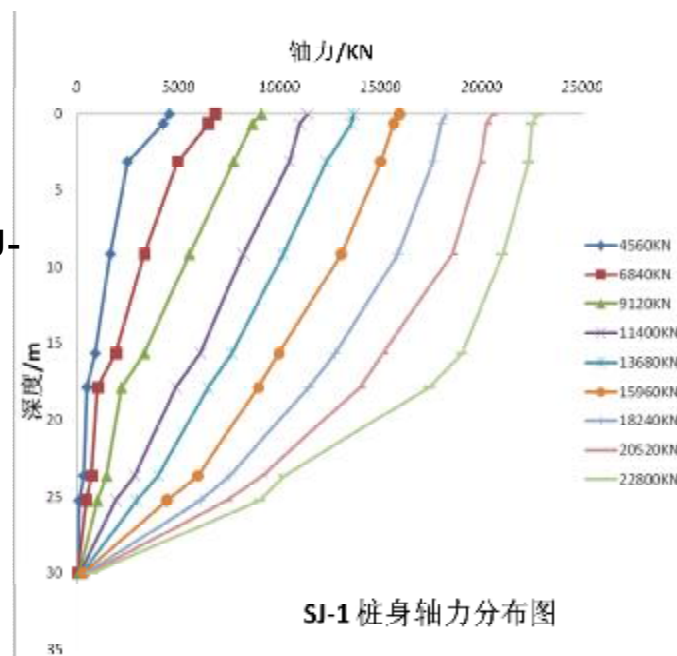
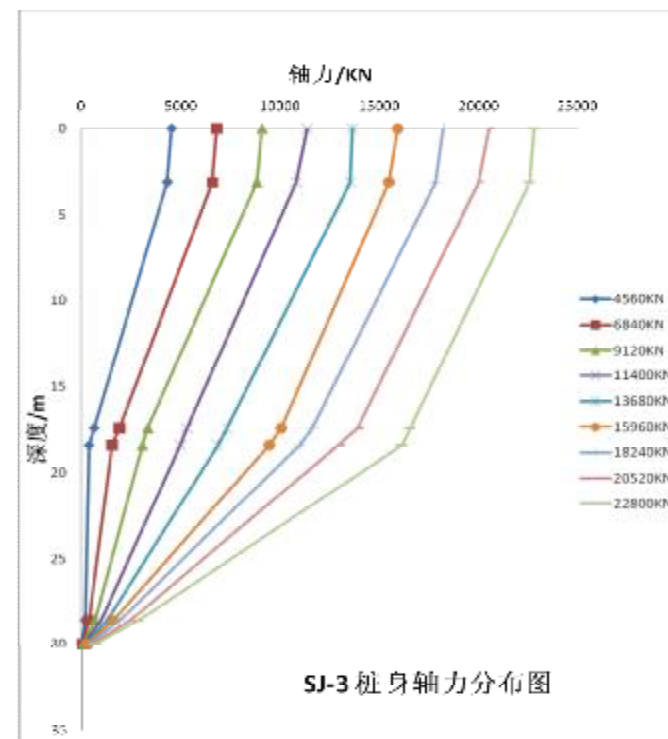


图5 SJ-2桩身轴力分布图
Fig.5 distribution of axial-stress (SJ-2)

图6 SJ-3桩身轴力分布图
Fig.6 distribution of axial-stress (SJ-3)

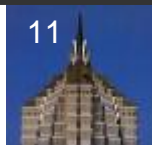


2. 超高层建筑基础桩承载性能

1) 在各级荷载作用下, 随着桩的入土深度的增加, 桩身的轴力逐渐减小。说明桩在传递竖向荷载过程中大部分荷载转嫁给了桩侧土体, 桩端承受的荷载很小, 试桩显示出了明显的摩擦桩的特性。

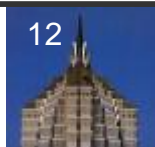
2) 从图中还可以看出, 桩端阻力的发挥随着荷载的增大而增大, 说明只要沉降满足要求, 则桩承载能力还有较大潜力。

3) 桩身轴力随深度逐渐减少, 并在不同的土层以不同的速度递减。随着桩顶荷载的增加, 荷载从上向下传递, 亦即上部土层的摩阻力先于下部发挥作用, 随着荷载的增加, 各层土的桩侧摩阻力逐渐增大, 上部土层的摩阻力首先达到极限, 并逐渐往下传递。随着桩顶荷载的增大逐渐达到最大试验荷载时, 桩身在各土层的侧摩阻力会重新分配。



2. 超高层建筑基础桩承载性能

根据《建筑基桩检测技术规范》（JGJ106—2003）中按每级试验荷载下桩身不同断面处的轴力值计算桩侧土的分层侧摩阻力和桩端阻力，从试验计算结果发现，在最大荷载作用下，试桩SJ-1桩端阻力占总荷载的3.3%；试桩SJ-2桩端阻力占总荷载的1.3%；试桩SJ-3桩端阻力占总荷载的3.1%。在最大加载下3根桩的桩端阻力基本未发挥，单从承载力的角度讲，桩端仍具有较大的承载潜能。计算出来的三根试桩SJ-1、SJ-2、SJ-3的桩侧阻力值比规范给定的标准值大很多：粉砂大163%~253%、粉质粘土大70%~118%、粉土大105%~172%、细砂261%~385%、粗砂大201%~268%、砂卵石大186%~247%。不难看出，在工程实际中，规范给定的桩承载力标准值比实际发挥的小很多。如何解决对基础的设计进行优化，能够比较真实地反映出基础的实际工作状态，同时在经济上比较合理，是值得我们进一步思考的问题。





3. 环境效应分析

3.1 地面沉降

地面沉降尤其是不均匀沉降将会导致很多灾害性的后果。超高层建筑的施工及使用过程中均会引起建筑周边地面沉降。如果沉降过大，有可能引起周边建筑物倾斜和开裂、地下管线断裂、道路开裂及其它设施的损坏等灾害。超高层建筑引起的地面沉降主要包括两个方面：

(1) 附加应力引起的地面沉降

由于超高层建筑的巨大荷载，地基土中将产生很大的附加应力。这对超高层建筑四周的建筑是有影响的。特别是在超高层建筑周边拟建具有较大基础埋深的建筑时，需要充分考虑超高层建筑对拟建建筑中点下各深度的附加应力引起的地面沉降，附加应力值可以通过角点法进行计算，计算图如图7所示：



3. 环境效应分析

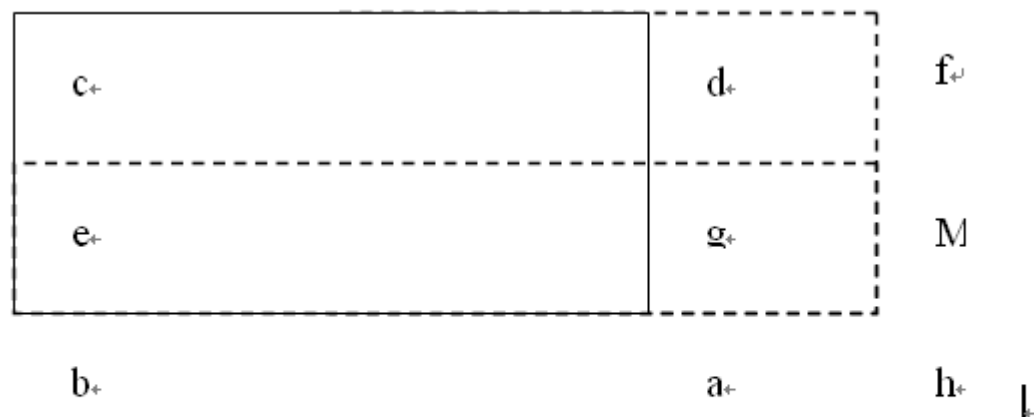


图 7 超高建筑周边拟建建筑基础中点 M 附加应力角点法计算示意图

Fig. 7 calculation schematic for additional-stress of center point M in proposed building foundation around skyscraper

abcd为超高层建筑的基底形状，其基底外任意点M下深度Z处的附加应力为：

$$\sigma_{zM} = (K_{s1} + K_{s2} - K_{s3} - K_{s4})P$$

式中： $K_{s1} \sim K_{s4}$ 分别为矩形 $Mhbe$ 、 $Mfce$ 、 $Mhag$ 、 $Mfdg$ 的角点应力分布系数；

P 为荷载强度，即超高层建筑产生的荷载。



3. 环境效应分析

虽然随距离超高层建筑基础之间的距离增加而迅速减少，但是由于超高层建筑本身的荷载强度非常大，因此，其影响的范围较普通建筑深远。拟建建筑的沉降计算中，应将超高层建筑荷载在基础中点下各个深度处引起的附加应力叠加到基础自身引起的附加应力中去。

1) 结合本次试验通过模拟计算得出竖向位移分布特征

图8是模拟计算得出的竖向位移分布等值线云图。通过该图做路径分析可得出地面沉降的横向变化图（图9）和竖向位移的纵向变化图（图10）。

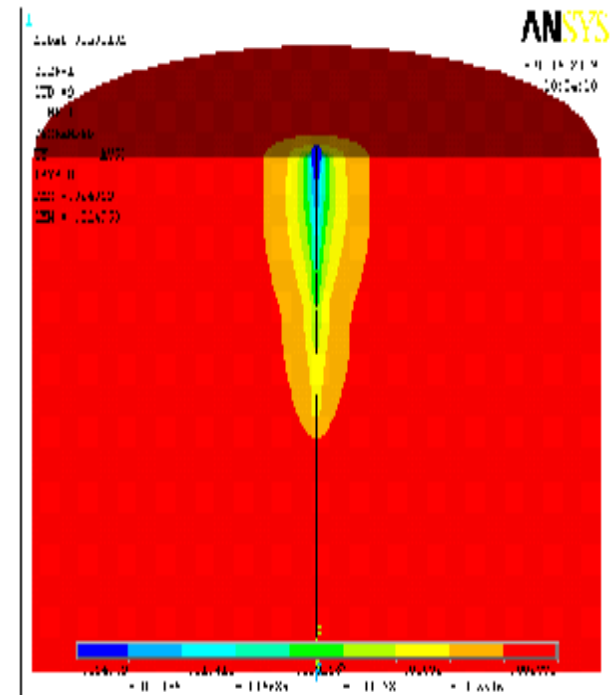
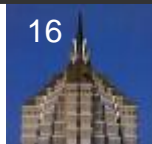


图8 竖向位移 U_y 分布等值线云图
Fig.8 Vertical displacement distribution



3. 环境效应分析

地表下沉的横向变化

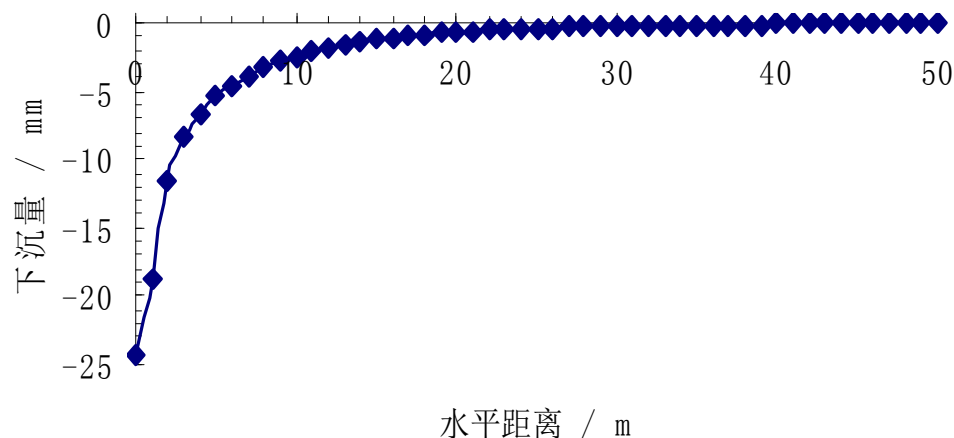


图9 地表下沉横向变化图

Fig.9 Ground depression lateral variation

由图9可以看出地面下沉量分布的特点，随着离开桩体距离的加大，地面下沉量迅速减小。桩顶下沉为24.9mm，在离开桩体10 m 处，地面下沉减小约为 1.5 mm，相当于桩顶下沉量的7%。离开距离大于10 m，即桩直径的10倍时，地面沉降小于1.5 mm。

由下图，图10可以看出，桩体的竖向位移在地表最大，为24.9mm，随着深度的加大，位移量逐渐减小，到桩底时，位移约为6 mm，相当于地表位移的25%左右。

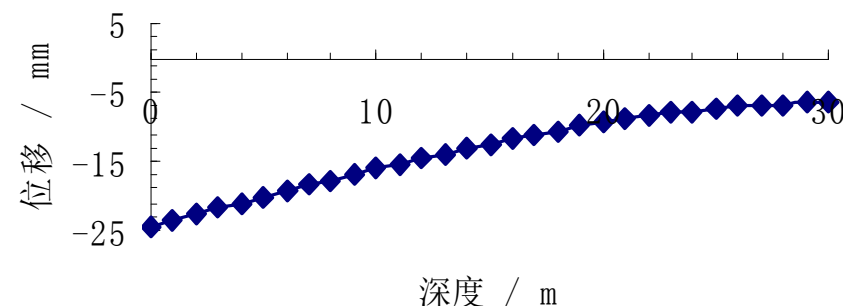
图10 桩体位移的纵向分布

Fig.10 Longitudinal distribution of Pile

displacement

桩体位移分布

(桩顶载荷22800KN)



3. 环境效应分析

2) 结合本次试验数据和模拟计算得出桩顶荷载—地表沉降曲线相关性

图11为桩顶荷载—地表沉降曲线。荷载由4560 KN 到22800 KN 。荷载—沉降曲线近于线性，说明土层没有明显的塑性变形。图中给出了试验结果和计算结果，可以看出，二者有很好的 consistency。

对于现有建筑以及在建建筑，同样需要充分评价超高层建筑附加应力引起的沉降对自身安全性的影响。

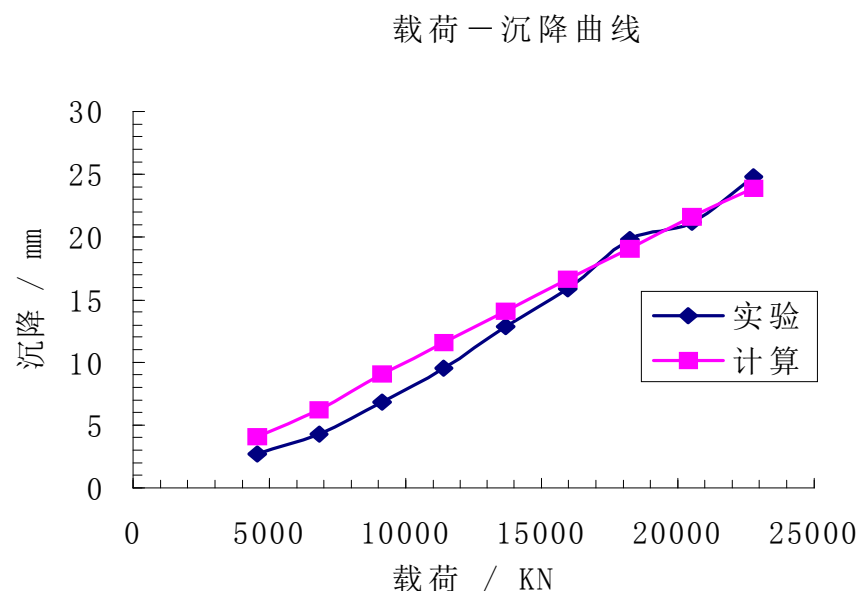
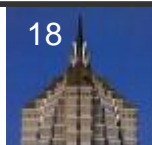


图11 桩顶荷载-地表沉降曲线
Fig.11 Load-depression curve



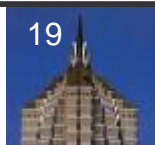
3. 环境效应分析

(2) 基坑降水引起的地面沉降

超高层建筑的基础埋深一般较大，在基坑开挖过程中，为保证干槽作业，势必需要通过一些降水措施来降低地下水位。由于地下水位的降低，超高层建筑周边地面将会产生沉降，这是因为：

- 1) 水位降低减少了土中地下水对地上建筑物的浮托，软弱土层受到压缩而沉降；
- 2) 使孔隙水从土中排出，土体固结变形，产生压缩沉降；
- 3) 在降水过程中，常会随着抽出的水流带走土层中部分细微土粒，引起周围地面沉降；

所以说，地面沉降与地下水位降落是对应的，地下水位降落的曲面分布必然引起邻近建筑物的不均匀沉降；当地面沉降达到一定程度时，建筑物就会发生开裂、倾斜甚至倒塌现象。因此，为防止超高层建筑因基坑降水而诱发的地质灾害，要严格论证超高层建筑基坑降水方案，鼓励采用合理的基坑止水措施。



3. 环境效应分析

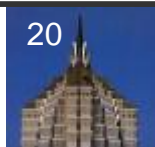
3.2 边坡变形

基坑开挖过程中，边坡的变形会对周边建筑物、道路和地下管线等构筑物造成影响，超高层建筑深基坑边坡，具有埋深大，跨度长等特点，其基坑边坡自身的允许变形甚至会超过其他建筑基坑的预警值或者破坏值。因此，超高层建筑基坑边坡的支护结构要同时满足结构强度和变形的要求。所以，超高层建筑边坡变形的灾害效应就表现为以下两个方面：

（1）边坡整体稳定，基坑变形大于基坑周边构筑物的允许变形，引起构筑物破坏；

（2）边坡失稳，支护结构自身破坏或者整体破坏，导致周边构筑物破坏。

上面两个方面，第二个方面相对较容易控制，但对超高层建筑基坑周边构筑物的允许变形则较难把握，不同周边环境，如建筑物、道路和各种地下管线的适应能力和要求各不相同。同时构筑物至基坑的距离、构筑物及其基础形式、管线和种类等都会影响到对基坑边坡变形的要求，因此，更多的需要根据具体情况和实际经验作出判断。

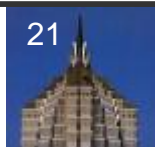


4. 结论

（1）通过试验计算发现，在工程实际中，规范给定的桩承载力标准值比实际发挥的小很多，超高层建筑桩基础极限荷载应根据桩顶沉降确定，设计桩基时，按变形控制较为合理；

（2）超高层建筑桩基础桩身轴力随深度逐渐减少，并在不同的土层以不同的速度递减；由于桩长较大，桩本身具有明显的摩擦桩性质，桩端承受的荷载很小；

（3）超高层建筑的灾害效应主要包括地面沉降和边坡变形两个方面，地面沉降贯穿于建设和使用全过程，而边坡变形则是基坑开挖过程中需要重点关注的。



谢谢大家！



北京建材地质工程公司