

变刚度调平、灌注桩后注浆技术在广奇财富中心二期工程的应用

安一清

(临汾市建筑勘察设计院, 临汾 041000)

[摘要] 对于采用框架-核心筒、框架-剪力墙结构的高层建筑以及主裙连体的大底盘基础设计,控制主楼与裙房之间、内筒(或剪力墙)与框架柱之间的差异沉降是地基基础设计的关键,《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的变刚度调平设计、灌注桩后注浆技术为这类问题提供了很好的解决方案。介绍了广奇财富中心二期工程的地基基础设计。桩基设计强化竖向刚度大、竖向荷载集中的主楼内部剪力墙区域,强化指数为 1.21,弱化荷载分散的框架柱区域,弱化指数为 0.91。主楼的框架柱区域按复合桩基考虑,主楼以外的裙房区域采用天然地基。采用灌注桩后注浆技术使单桩承载力提高约 80%。单桩静载试验显示,最大试验荷载下各试桩桩顶沉降很小且数值接近。沉降实测结果表明,建筑物基础总沉降、差异沉降远小于相关规范的变形允许值。变刚度调平设计、灌注桩后注浆技术为工程节约了可观的工程费用,经济效益显著。

[关键词] 变刚度调平设计;灌注桩后注浆;差异沉降

中图分类号:TU473 文献标识码:A 文章编号:1002-848X(2018)09-0108-04

Application of techniques on variable stiffness leveling design and post grouting for cast-in-situ pile in Phase II Project of Guangqi Fortune Center

An Yiqing

(Linfen City Architectural Survey and Design Institute, Linfen 041000, China)

Abstract: For design of frame-tube, frame-shear structure and large chassis base connecting main buildings and podium, the key to foundation design is to control the differential settlement between the main building and the podium, and between the inner tube (or shear wall) and the frame column, the variable stiffness leveling design and the post-grouting technology for cast-in-situ piles of the *Technical code for building pile foundations* (JGJ 94—2008) provide a good solution to this problem. The foundation design of Phase II of Guangqi Fortune Center was introduced. The design of the pile foundation enhanced the shear wall region of the main building with large vertical stiffness and vertical load concentration with the enhanced index of 1.21; the frame column region with distributed load was weakened with the weakening index of 0.91. The frame column area of the main building was considered as a composite pile foundation, and the podium area outside the main building adopted the natural foundation. The use of post grouting technique for cast-in-situ pile increased the bearing capacity of single piles by approximately 80%. Single pile static load test shows that the maximum test load settlement of top of each test pile is small and the value is close. The actual settlement test results show that the total foundation settlement and differential settlement of the building are far less than the permissible deformation values of the relevant specifications. The variable stiffness leveling design and post grouting technique for cast-in-situ pile saved considerable engineering costs for the project, resulting in significant economic benefits.

Keywords: variable stiffness leveling design; post grouting for cast-in-situ pile; differential settlement

0 引言

地基基础承载力、变形是地基基础设计的两大基本问题,特别是框架-核心筒、框架-剪力墙结构高层建筑以及主裙连体的大底盘基础,在地基基础承载力满足要求的前提下,控制主楼与裙房之间、内筒(或剪力墙)与框架柱之间的差异沉降是地基基础设计的关键。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[1](简称桩基规范)第 3.1.8 条及第 6、7 节中,变刚度调平设计、灌注桩后注浆技术为这类问题提供了很好的解决方案。

变刚度调平设计是指考虑上部结构形式、荷载和地层分布以及相互作用效应,通过调整桩径、桩长、桩距等改变基桩支承刚度分布,以使建筑物沉降趋于均匀、承台内力降低的设计方法^[1]。灌注桩后注浆技术是指灌注桩成桩后一定时间,通过预设于桩身内的注浆导管及与之相连的桩端、桩侧注浆阀注入水泥浆,使桩端、桩侧土体(包括沉渣和泥皮)

作者简介:安一清,本科,总工程师,高级工程师,一级注册结构工程师,Email:418007862@qq.com。

得到加固,从而提高单桩承载力、减小沉降^[1]。

文献[2]分析了按照传统设计理念设计的高层建筑箱基和桩箱、桩筏基础变形、反力以及裂缝的实测资料,研究了其碟形沉降和马鞍形反力分布的形成机理及其负面效应,提出了变刚度调平概念设计。并通过大型现场模型试验对变刚度调平概念设计进行了验证,也论证了该项技术在十余项工程中的应用效果。文献[3]提出了变刚度调平的原则,并结合工程实例对变刚度调平设计中的具体强化指数和弱化指数的取值进行分析说明。文献[4]和文献[5]分别报道了采用变刚度调平原理设计的北京和上海的工程实例。

变刚度调平设计、灌注桩后注浆技术在广奇财富中心二期工程中的应用,是山西临汾市的首例。该工程应用这两项技术,取得了良好的经济技术效果。

1 工程概况

1.1 建筑物基本情况

广奇财富中心二期位于山西省临汾市尧都区,总建筑面积 85 048.22m²,其中地上建筑面积 51 024.95 m²,地下建筑面积 34 023.27 m²,使用功能主要为车库、商业、住宿、办公。该工程地上分为 A、B 座及商业三部分,其中 A、B 座主楼地上 22 层,建筑高度 89.45m,商业部分地上 3 层。整个工程地下 2 层,位于同一大底盘基础之上。基础平面尺寸长 123m、宽 68m。A、B 座主楼长、宽均为 31.8m。A、B 座主楼为框架-剪力墙结构,地下室及裙房为框架结构。图 1 为该建筑物的首层平面图。

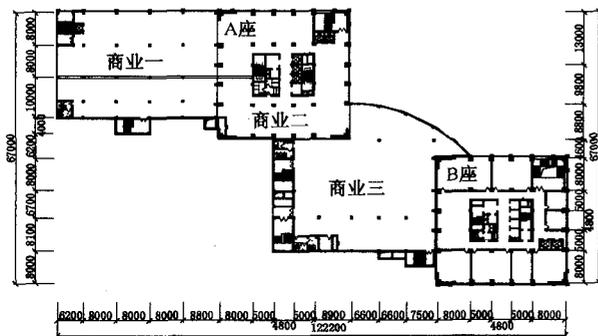


图 1 首层平面图

1.2 工程地质概况

该工程基础埋深约 10m,基础位于③层细砂,基底以下土层的物理力学参数见表 1。

2 地基基础工程特点及基础方案选型

2.1 地基基础设计的重点、难点

建筑物的竖向承重构件:高层部分(A座、B座)的中间为剪力墙,外围为框架柱;裙房为框架柱。

表 1 基底以下土层的物理力学参数

土层	稠度或密实度	层厚 /m	ρ /(g/cm^3)	ω /%	N /击	E_{s1-2} /MPa	f_{ak} /kPa
③细砂	稍密	2.0~10.4			15.9		180
④粉质黏土	可塑	3.7~9.0	2.01	22.5	25.6	8.7	200
⑤细砂	中密	1.2~9.2			28		220
⑥粉土、粉质黏土互层	密实、可塑~硬塑	2.1~18.3	2.00	23.1	34.5	11.4	240
⑦细砂	密实	0.4~3.3			37.5		250
⑧粉质黏土	可塑~硬塑	最大可见厚度约 18.2	2.08	18.0	44.3	9.4	280

注: ρ 为质量密度; ω 为含水量; N 为标贯击数; E_{s1-2} 为压缩模量; f_{ak} 为地基承载力特征值。

PKPM 结构设计软件分析显示,高层主楼与裙房的竖向荷载、基底压力差异显著,高层主楼基底平均压应力(标准值)约为 430kPa,裙房基底平均压应力(标准值)约为 100kPa。高层主楼内部剪力墙竖向刚度远大于外围框架柱,竖向荷载主要集中于内部剪力墙,其承担的竖向荷载约占主楼总竖向荷载的 40%。由此可知,本工程高层建筑与裙房之间、高层建筑内部的剪力墙与外围框架柱之间荷载分布差异很大,导致这些部位的差异沉降问题十分显著。因此,基础差异沉降的控制是本工程地基基础设计的重点与难点。

2.2 地基基础方案选型

本工程可选择的地基基础方案有:CFG 桩复合地基、PHC 管桩、23m 普通灌注桩、35m 普通灌注桩、后注浆灌注桩。根据初步分析计算,以上 5 种地基基础方案具体如下。

(1) CFG 桩复合地基(方案 1)

CFG 桩桩长约 21m,以⑤层细砂为桩端持力层,复合地基承载力可满足要求。但是,CFG 桩数量多,为满足布桩及荷载平衡要求,主楼筏板基础范围需大于主楼投影面积外 2m。CFG 桩在主楼基础下满堂布置,需要较大的筏板厚度。5 种方案中,该方案基础总沉降量最大、差异沉降亦难控制。而且该方案的地基处理与筏板基础的综合造价高于后注浆灌注桩方案。

(2) PHC 管桩(方案 2)

PHC 管桩桩长约 21m,以⑤层细砂为桩端持力层,桩基承载力可满足要求。但是,PHC 管桩数量多,为满足布桩及荷载平衡要求,主楼筏板基础范围需大于主楼投影面积外 2m。PHC 管桩在主楼基础下满堂布置,需要较大的筏板厚度。此外,PHC 管桩较密,施工时土体挤压现象严重,易出现地面隆起、浮桩等质量问题。5 种方案中,该方案基础总沉降量较大、差异沉降较难控制。该方案的桩基与筏板基础的综合造价高于后注浆灌注桩方案。

(3) 桩长 23m 普通灌注桩(方案 3)

普通灌注桩桩长约 23m,以⑤层细砂为桩端持力层,桩基承载力可满足要求。但该桩的单桩承载力小于后注浆灌注桩,桩数量较多。5 种方案中,该方案基础总沉降量较大、差异沉降较难控制。该方案的桩基与筏板基础的综合造价高于后注浆灌注桩方案。

(4) 桩长 35m 普通灌注桩(方案 4)

普通灌注桩桩长约 35m,以⑥层粉土、粉质黏土互层或⑦层细砂为桩端持力层,桩基承载力可满足要求。单桩承载力、桩数与后注浆灌注桩方案相当。该方案桩数较少,承台面积、厚度远小于方案 1~3。5 种方案中,该方案基础总沉降量、差异沉降均很小,能够满足规范要求。但是,该方案桩基造价远高于后注浆灌注桩方案。

(5) 后注浆灌注桩(方案 5)

桩长约 23m,以⑤层细砂为桩端持力层。桩端、桩侧复式注浆,不仅可大幅提高单桩承载力,而且注浆加固桩端、桩侧土体亦可提高地基刚度。该方案桩数较少,承台面积、厚度远小于方案 1~4。在 5 种方案中,该方案桩数少、基础总沉降量及差异沉降均很小,能够满足规范要求,且承台及桩基综合造价最低。

对比分析 5 种方案可知,后注浆灌注桩基础方案的经济性、可靠性均优于其他地基基础方案。因此本工程基础设计采用了后注浆灌注桩,后注浆为桩端、桩侧复式注浆。

3 桩基设计

本工程桩基设计等级为甲级,桩基结构安全等级为二级,桩基结构环境类别为二 a 类。桩身混凝土强度等级为 C35,桩径为 800mm,有效桩长为 23.5m,以⑤层细砂为桩端持力层。采用后注浆钻孔灌注桩技术,桩端、桩侧复式注浆。

3.1 单桩承载力计算

后注浆灌注桩单桩竖向极限承载力按桩基规范中公式(5.3.10)计算。基桩承载力计算参数根据岩土工程勘察报告(表 2)取值,计算公式如下:

$$Q_{uk} = u \sum q_{sjk} l_j + u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \beta_p q_{pk} A_p \quad (1)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值; q_{sik} , q_{sjk} , q_{pk} 分别为后注浆竖向增强段第 i 土层初始极限侧阻力标准值、非竖向增强段第 j 土层初始极限侧阻力标准值、初始极限端阻力标准值,数值见表 2; l_j 为后注浆非竖向增强段第 j 层土的厚度; l_{gi} 为后注浆竖向增强段内第 i 层土的厚度; u , A_p 分别为桩身周长和

桩底面积; β_{si} , β_p 分别为后注浆第 i 土层侧阻力、端阻力增强系数,数值见表 2。

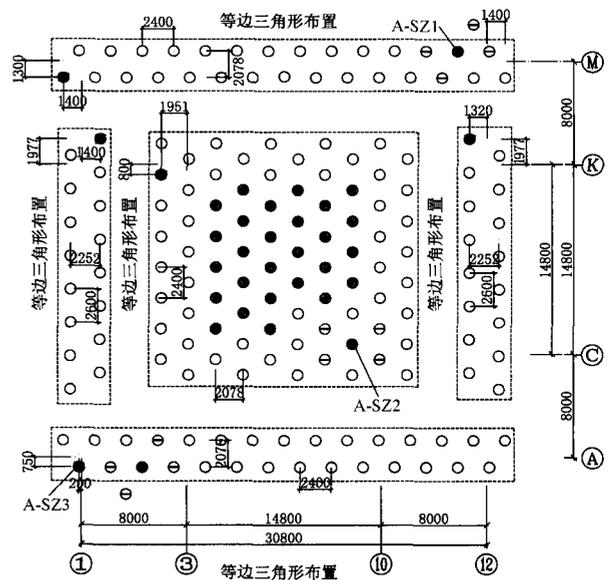
土层	q_s/kPa	q_p/kPa	β_s	β_p
③细砂	46	—	1.8	2.5
④粉质黏土	68	900	1.6	2.3
⑤细砂	60	1 200	1.8	2.5
⑥粉土、粉质黏土互层	60	900	1.6	2.3

由理论计算得到,后注浆灌注桩单桩极限承载力标准值大于 7 100kN,比普通灌注桩单桩极限承载力提高 80% 以上。本设计单桩承载力特征值取 7 100kN 的一半,即 3 550kN。灌注桩施工可采用旋挖钻机成孔或反循环钻机成孔工艺。

3.2 按变刚度调平原理布桩

本工程按照变刚度调平原理进行桩基的平面布置。即布桩时综合考虑上部荷载与桩、土反力的整体平衡与局部平衡,考虑上部结构以及基础刚度的分布。布桩时强化结构竖向刚度大、竖向荷载集中的主楼内部剪力墙区域,弱化荷载分散的框架柱区域。主楼内部剪力墙区域按纯桩基考虑,主楼的框架柱区域桩基设计时考虑桩间土分担荷载,按复合桩基考虑。主楼以外的裙房区域采用天然地基。通过地基、基础与结构的协同计算分析,以基础沉降差最小、筏板内力最小为原则,优化基桩布置。图 2,3 分别为 A 座主楼灌注桩平面布置图和工程桩详图。

实际布桩状态下,主楼内部剪力墙区域桩基强化指数、框架区域桩基弱化指数计算过程如下:内部剪力墙区域竖向总荷载标准值为 235 300kN,布桩



注:桩顶标高:○-11.650m,⊙-13.550m,虚线框内共 170 根桩,虚线框外共 2 根桩;
⊖ 锚桩 ● 试桩 ● 定位桩(平面定位尺寸处);A-SZ*i*($i=1,2,3$)为 A 楼试桩编号。

图 2 A 座主楼灌注桩平面布置图

80 个,单桩承载力特征值 3 550kN,强化指数 $\xi_j = 80 \times 3 550 / 235 300 \approx 1.21$ 。

框架区域竖向总荷载标准值 350 200kN,布桩 90 个,单桩承载力特征值为 3 550kN,弱化指数 $\xi_k = 90 \times 3 550 / 350 200 \approx 0.91$ 。

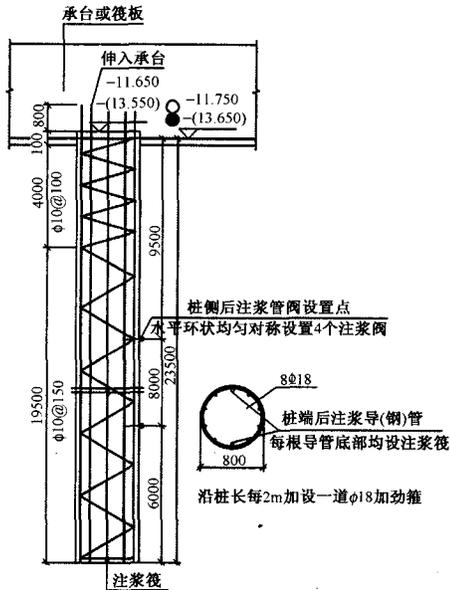


图 3 A 座主楼灌注桩详图

3.3 后注浆技术参数设计

本工程灌注桩采用桩端、桩侧复式注浆。桩端注浆装置设置为每个桩沿钢筋笼周围对称设置 2 根注浆导管和桩端注浆阀。桩侧注浆装置设置为每个桩在桩端以上 6,14m 处分别设置 1 道桩侧注浆阀。

注浆作业需同时控制注浆量、注浆压力两个指标。单桩注浆量(水泥质量)为:内筒群桩周边两排基桩及外筒柱下基桩为 3.0t,内筒群桩其余基桩为 2.5t,试桩为 3.0t,锚桩为 2.5t。桩端注浆终止注浆压力为 3~4MPa。注浆采用水泥浆,水灰比为 0.45~0.60。注浆施工作业须满足桩基规范的相关要求。

3.4 后注浆灌注桩静载试验

本工程共抽取 5 个试桩(B-SZ*i*(*i*=1,2)为 B 楼试桩编号,试桩位置与 A 楼对应试桩位置一致)做静载试验,试验加载量均不小于前述单桩承载力特征值的 2 倍。5 个试桩的静载试验 *Q-s* 曲线见图 4。静载试验结果显示:加载量等于单桩承载力特征值时,5 个试桩的桩顶沉降量在 2.53~3.4mm 之间;加载量等于单桩承载力特征值的 2 倍时,5 个试桩的桩顶沉降量在 8.56~11.96mm 之间。5 个试桩的桩顶沉降量均很小且沉降量数值接近,说明本工程后注浆对提高桩基承载力及稳定性、减小桩基沉降效果显著。

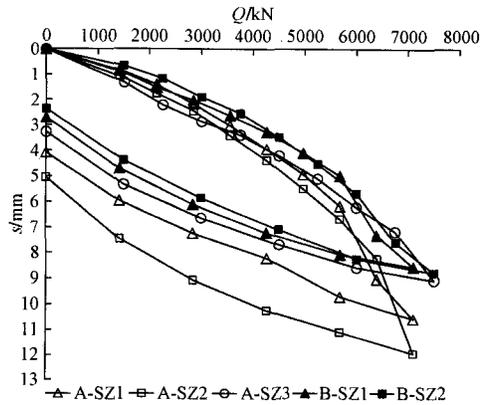


图 4 试桩静载试验曲线

4 建筑物实测沉降情况

本工程于 ±0.000 结构施工完成后布设沉降观测点,并于 2012 年 12 月 11 日开始观测。2013 年 8 月初主体结构封顶,2014 年 5 月中旬装修完成。主楼沉降观测点布置图见图 5(DS1,DS2 为观测基准点位置示意),沉降随时间的变化情况见图 6,各次沉降观测时的施工进度见表 3。

观测日期	2012 /12/11	2012 /12/21	2013 /1/3	2013 /2/4	2013 /3/5	2013 /3/30	2013 /4/19
施工进度	首层	2 层	3 层	6 层	6 层	9 层	12 层
观测日期	2013 /5/9	2013 /5/31	2013 /7/5	2013 /8/8	2014 /2/16	2014 /5/16	2014 /8/16
施工进度	15 层	18 层	21 层	机房层	装修	装修	竣工

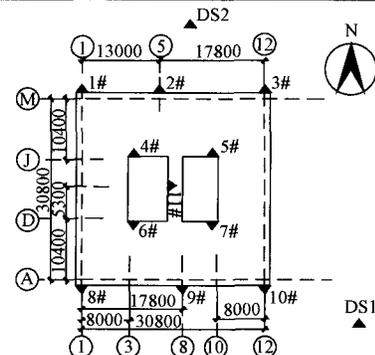


图 5 主楼沉降观测点布置图

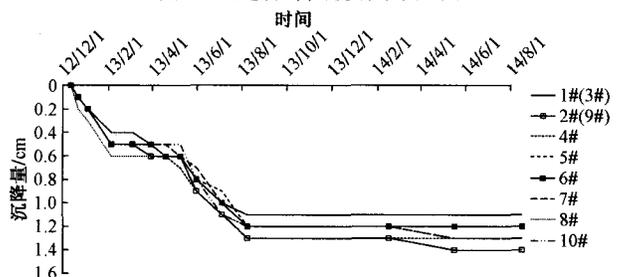


图 6 主楼沉降-时间曲线

据桁架挠度测试结果,得出桁架挠度与预应力变化的关系,见图 10。

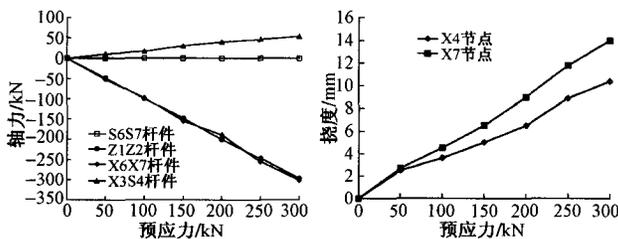


图 9 主要杆件轴力与预应力关系图

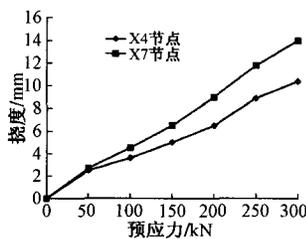


图 10 桁架挠度与预应力关系图

由图 9 可知,随着张拉力增加,下弦杆 X6X7 产生压力,该压力与张拉力同步增大,其增幅与张拉力几乎相等,说明采用预应力张拉有效地减小了受拉下弦杆受力,并有效地把下弦受力转移到新增的预应力钢绞线上;上弦杆件 S6S7 及斜腹杆 X3S4 随着钢绞线预应力增加,杆件出现较小的拉力增幅,由于上弦杆 S6S7 及斜腹杆 X3S4 主要承受压力,故预应力的施加,减小了杆件的受力;新增杆件 Z1Z2 主要通过 Z1 节点把钢绞线张拉力传递到桁架中,其受力方向与钢绞线之间的角度较小,随着张拉力增大,其所受压力逐渐增大,数值与张拉力几乎相等。

由图 10 可知,随着预拉力增加,钢桁架跨中挠度减小近 14mm,说明张拉效果明显。最后通过测量,还有 5mm 反拱,对钢桁架后期使用带来了较好效果。

通过以上现场试验及分析可知,采用预应力张拉加固钢桁架后,现场试验结果与理论计算结果吻合较好,通过张拉预应力钢绞线降低了主要构件的

(上接第 111 页)

由图 6 可知,主体结构封顶后沉降开始收敛,装修完成后不久沉降即达到稳定标准。从图 6 也可看出,内筒剪力墙、外围框架柱的沉降量非常接近,两者之间的沉降差极小,内外竖向承重构件之间的沉降差小于 0.02%。主楼的最大沉降量仅为 1.4cm,因此,主楼与周围裙房之间的沉降差也很小,远小于桩基规范中主裙楼沉降差的允许值。

5 结论

(1) 本工程采用地基基础变刚度调平设计、灌注桩后注浆技术,使得建筑物基础总沉降、差异沉降远小于桩基规范的变形允许值,结构因基础差异沉降产生的次应力可以忽略。

(2) 与其他常规桩基技术相比,变刚度调平、灌注桩后注浆两项新技术为本工程节约了近 208 万元,经济效益显著。

受力,同时还减小了跨中挠度,对加固后钢桁架正常工作起到了良好的作用。

4 结论

通过对腐蚀后钢桁架的检测、加固及分析,采用预应力加固钢桁架具有明显的效果,具体如下:

(1) 通过理论分析及现场试验,钢桁架下弦杆张拉预应力加固可以把受损下弦杆件及部分腹杆所受的力转移到预应力钢绞线上,以达到对原桁架杆件卸载的作用。

(2) 通过有限元分析,采用钢绞线预应力加固,增大了钢桁架的刚度,减小了后期使用过程中的变形,且提高了其抗震性能,增强了抵抗灾害的能力。

(3) 采用预应力钢绞线加固钢桁架具有不影响生产,加固过程安全、施工方便,且综合经济效益好的特点,对于选煤厂类似的受损皮带走廊钢桁架,均可采用此加固方法进行加固处理。

参 考 文 献

- [1] 白韬. 大跨度钢结构栈桥风振响应分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- [2] 黄世梅. 旧输煤走廊钢结构栈桥承载力分析[D]. 郑州:郑州大学,2009.
- [3] 郭兵. 钢结构的检测鉴定与加固改造[M]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [4] 钢结构现场检测技术标准:GB/T 50621—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [5] 钢结构设计规范:GB 50017—2003[S]. 北京:中国计划出版社,2003.
- [6] 工业建筑可靠性鉴定标准:GB 50144—2008[S]. 北京:中国计划出版社,2009.

(3) 地基基础要重视概念设计,设计时建议进行各种地基基础方案的技术经济对比,选择技术先进、经济合理的地基基础方案。

感谢:本工程和本文得到中国建筑科学研究院地基所杨生贵研究员的帮助,在此特别致谢!

参 考 文 献

- [1] 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 刘金砺. 高层建筑地基基础概念设计的思考[J]. 土木工程学报,2006,39(6):100-105.
- [3] 王涛,高文生,刘金砺. 桩基变刚度调平设计的实施方法研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(4):531-537.
- [4] 王杨,詹永勤. 北京达美中心广场基础变刚度调平设计[J]. 建筑结构,2015,45(13):62-66.
- [5] 姜文辉,巢斯. 上海中心大厦桩基础变刚度调平设计[J]. 建筑结构,2012,42(6):131-134.