自适应调节下广义复合基础设计方法与工程实践

宰金珉，周 峰，梅国雄，王旭东
（南京工业大学土木工程学院，江苏 南京 210009）

摘 要：差异沉降是导致基础内力和上部结构次应力增大、基础板厚与配筋增加的根源，因此，保证筏板的零差异沉降是建筑物结构体系保持最优状态的根本措施，而实现这一措施最有效的方法就是合理布置与调整地基与桩基的支承刚度。另外，端承桩基础如何充分利用良好的地基土承载力仍然是桩土共同作用理论应用的一大难题。为此，专门研制了置于桩顶的变形调节器，并报导了它的构造和工作特性，通过它对桩土支承体系支承刚度进行人为干预下的自适应调节，提出了广义复合基础的设计方法。一项工程实践表明：本方法不仅成功解决了上述问题，而且取得了良好的经济效益。

关键词：自适应调节器；差异沉降控制；广义复合基础；支承刚度调整
中图分类号：TU473.1 文章标识码：A 文章编号：1000－4548(2008)01－0093－07

作者简介：宰金珉（1945－），男，江苏南京人，教授，博士生导师，长期从事岩土工程的教学与科研工作。E-mail: zjm@njut.edu.cn。

Design method and practice of generalized composite foundation by use of self-adaptable adjustor

ZAI Jin-min, ZHOU Feng, MEI Guo-xiong, WANG Xu-dong
(College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Difference settlement is the root which causes the increase of the internal force of foundation and the substress in superstructure as well as the increase of the thickness of raft and the steel. So minimizing raft difference settlement is the most essential measure that makes the working state of buildings keep optimizational. Then in order to realize the goal, the most effective measure is to disposal and adjust the bearing stiffness of subsoils and/or pile foundations. Otherwise, how to make use of the baering capacity of soil foundation for end-bearing pile foundation is a difficult problem for the application of pile-soil interaction theory. Consequently, a kind of settlement adjustor installed at the top of piles was studied, and its constitution and work characteristics were reported. Under artificial controlling by using settlement adjustors, through self-adaptation of bearing stiffness of piles and soil, the design method of the generalized composite foundation was put forward. The design method has been proved to be successful by a practical project.

Key words: self-adaptable adjustor; difference settlement control; generalized composite foundation; bearing stiffness adjustment

0 引 言

随着经济的发展，高层建筑大量涌现，尤其是近来高层建筑呈现出多幢高塔建筑紧密相邻，建筑物下部裙楼、地下室连成一片的多塔、大底盘的新特点。整个建筑物的荷载分布极其不均匀，高塔下基础的荷载一般达到500～600 kPa，甚至更大，产生很大的沉降，而裙楼部分荷载小却存在地下室，还需考虑浮起。因此整个建筑物的差异沉降非常大，筏板中产生的冲切与弯矩也非常惊人。加上目前基础设计理论的不完善和保守倾向，造成多塔、大底盘高层建筑的筏板动辄数米之巨[1-2]。即使是单幢高层，上部结构巨大的刚度虽能减少建筑物的不均匀沉降、改善筏板的受力状态，但是不可避免地会在上部结构中产生较大的次应力。目前上部结构设计还无法完善地考虑次应力的存在对上部结构的影响，这样就给建筑物带来一定的安全隐患。由此可见差异沉降是导致基础内力和上部结构次应力增大、板厚与配筋增加的根源所在。因此，

基金项目：国家自然科学基金资助项目（50678083）；国家青年自然科学基金资助项目（50608038）；江苏省六大人才高峰资助项目
收稿日期：2007-02－17

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

无论是单幢高层还是大底盘多塔结构，考虑建筑物上部结构－基础（桩筏）－地基的共同作用下，保证建筑物筏板的差异沉降为零，是建筑物基础和上部结构两者均保持最优工作状态的根本。要实现这一目标，不要说基础的刚度本身就很有限，就是上部结构的刚度贡献也是有限的[3-4]。由于建筑功能的要求，上述两者刚度的分布并不能随意调整。但他们最终总要支承于地基和桩基上，而后者在刚度的大小和分布才是唯一可以人工加以调节的，从而通过三者的共同作用，实现零差异沉降的控制[5-7]。我们把这种共同作用状态下并以零差异沉降为控制目标的基础称之为广义复合基础。

另外目前已经广泛注意的是，在土质较软地区可以通过桩基的向下刺入来考虑地基土的承载力，这方面的研究成果较丰富[8-10]，但是在某些土质较好的地区建造高层建筑，当天然地基承载力虽不能满足上部结构荷载的需要，但又相差不多，此时改用桩基后，由于桩端有较好的持力层，桩基无法向下刺入，基底下良好的持力层无法得到利用，浪费巨大。因此端承桩基础如何充分利用良好的地基土承载力成为桩土共同作用理论应用的一大难题。

正是基于上述原因，笔者结合其多年来在共同作用方面的一些研究成果，提出了一种自适应调节下的广义复合基础设计理论与方法，该方法不仅解决了端承桩充分利用良好地基土承载力的问题，而且在一定程度上能有效地调节建筑物的差异沉降，向基础设计中地基变形可控、差异沉降为零、地基土承载力得以充分发挥的理想目标迈出了一步。

1 差异沉降控制的常规方法

由共同作用理论研究可知，不同的上部结构、基础（桩筏）与地基的刚度分布均会对建筑物的内力与变形产生影响[3-4]。上部结构由于受到使用功能的制约，一般很难对其进行调整。筏板和其它形式基础，虽可通过变化板厚、设置肋梁、缩小墙距（箱基）等来调整基础刚度分布，但是效果并不明显，付出的代价却很大。因此对地基与桩基构成的支承体的支承刚度进行可控、合理的调整才是差异沉降控制设计最有效的方法。

目前国内外学者对控制建筑物的差异沉降以及地基基础的设计优化等问题开展了一些研究[11-15]，笔者也曾对上述问题进行了一些探索[7,16]，提出用不同刚度的垫层以及不同桩径、不同桩长的布桩方式来改善基础的工作性状，减少建筑物的沉降和不均匀沉降，特别是通过塑性支承桩尝试了零差异沉降控制的实际工程应用，取得了较显著的效果[17]。

1.1 土支承刚度的人为调整

人为合理地调整地基土的支承刚度，使其在基底平面内变化，将可能减少不均匀沉降，从而减少基础内力，使基础达到最优的工作状态[7,16]。最简单的方法就是在基底下设置变刚度垫层，如图 1 所示。加载初期主要通过中心区的混凝土垫层作用于地基形成大致均匀的反力 p_c，中心区如预加压实效果更显著；荷载增加发生沉降，周围松砂垫层也同时压密，达一定程度时全部底面积参加工作以承担后续荷载，形成大致均匀的反力 p_1，混凝土垫层下反力则为 $p_2=p_c+p_1=Rp_1$，R 为反力集中系数，使反力呈阶梯状，基础中心弯距远小于均匀反力下的结果。显然，当采用复合地基时，可令竖向增强体通过改变桩距和长度来实现这一刚度调整。

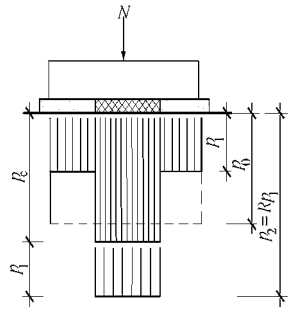


图 1 使基底反力分布合理化的变刚度垫层

Fig. 1 Bedding stiffness with varying stiffness to make reaction of foundation reasonable

1.2 桩基支承刚度分布的人为调整

对采用桩基础的建筑物，当采用摩擦桩型的复合桩基时，则桩与土的荷载分担是明确的，这就可能合理地布置桩基，以对基础工作有利方式，人为地调整以桩顶反力和基底土反力联合出现的反力分布，结合桩数的调整，综合优化基础设计，达到经济合理的目的。

桩基支承刚度在平面分布上的布局基本原则就是支承刚度增大的区域对准上部荷载集度大的区域；同时有利于减少乃至完全消除整体和局部的不均匀沉降。一般情况下这两者是相互统一的。桩基支承刚度分布人为调整方式有两类 采用相同或不同桩径的桩；再加上等桩距与否，等长度与否，共有 6 种基本情况，如图 2（a）～（f）所示。其中图 2（c），Randolph[13]、Horikoshi 和 Randolph[14-15]用参数法作过比较深入的研究，并进行了离心机模型试验验证。图 2（f）是最具综合性的布置方案。图 2（f）在文献[7]中都做过数值模拟，得到与试验和实测一致的结果。这些布置方

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式基本上都超出了现行规范允许的传统做法。

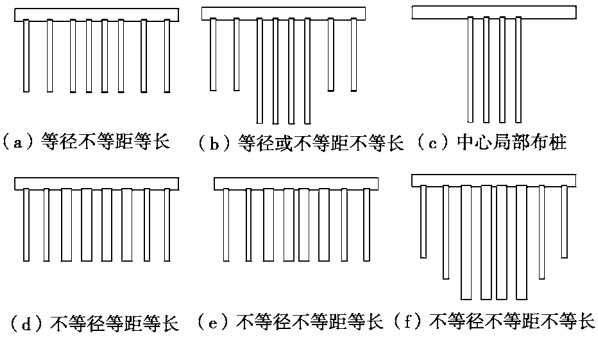


图 2 桩基支承刚度分布的人为调整方式

Fig. 2 Artificial adjustment for distribution of bearing stiffness of pile

2 摩擦桩桩土共同作用的实现

众所周知，在正常使用阶段，基桩与地基土的支承刚度通常存在数量级上的差异，因此要使桩土共同承担上部结构荷载，就必须要始终保证桩土的变形协调。常规桩基设计情况下，总荷载 $Q_1=Q_{s1}+nP_a$，沉降 s_1，Q_{s1} 未知，常略去不计。在软土地区常选用摩擦桩或端承作用较小的端承摩擦桩，此时为了解决桩土变形协调的问题可人为地令单桩工作荷载 P 接近或等于单桩的极限荷载 P_u，$Q_{p2}=nP_u$。于是 $Q_2=Q_{s2}+nP_u$，沉降为 $s_2\approx s_1$，Q_{s2} 已知。单桩进入极限状态后向下刺入，并始终只承担 P_u 的荷载，而不再提供新的支承刚度，其沉降状态完全由土的抗变形能力来决定，具有高度的自适应性和可协调性（所谓塑性支承桩复合桩基[6, 7, 17]）。在保持 $Q_p=Q_{p3}=Q_{p2}=nP_u$ 时，变形可按土变形要求自适应调整到 s_3，这时土承担 $Q_{s3}=Q_3-nP_u=AP_s$，因此整个桩土体系能变形一致、共同承担上部结构的荷载 $Q=Q_p+Q_s$（如图 3 所示）。

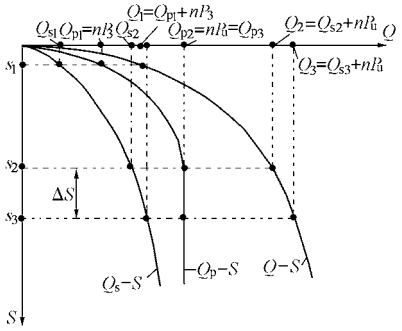


图 3 摩擦桩桩土共同作用的实现

Fig. 3 Realization of interaction of friction piles and soil

3 自适应调节下的广义复合基础设计理论

通过人为设置不同桩径、不同桩长的布桩方式来调整桩基的支承刚度，在一定条件下可以取得良好的使用效果。但是从大范围推广使用来看，该方法还会受上部结构形式和地质条件的影响，特别是端承占主要地位的摩擦端承桩或端承桩，筏板与桩端顶变形就难以协调，从而应用范围受到相当大的限制。本文着重讨论采用端承桩的广义复合基础如何实现桩土共同作用。

3.1 自适应变形调节器的研制

笔者研制的自适应变形调节器（displacement adjustor，下称“变形调节器”，见图 4）是用于调节物体支承接触点之间位移与反力的特殊装置，它主要由钢材、橡胶以及其它一些工程材料制成，具有能根据荷载自动调节自身变形的特点。变形调节范围可事先设定，大约在 3～10 cm，支承刚度 k_d 可根据需要在生产时设定（一般为 20～60 kN/mm），其典型受力特性如图 5 所示。变形调节器不仅可以单独使用，亦可多个并联或串联使用，以满足不同接触反力和变形调节量的要求。将变形调节器安装于桩顶后，可对整个基础的支承刚度分布按需要进行人为调控，从而达到建筑物零差异沉降的目标。由于通过变形调节器的设置形成的复合桩体的支承刚度可根据需要人为设定，其应用范围将不再为地质情况所束缚，因此具有广泛的适应性。



图 4 调节器外观

Fig. 4 Aspect of the adjustor

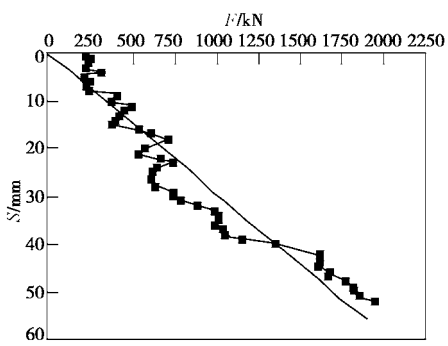


图 5 调节器典型受力特性

Fig. 5 Typical characteristics of the adjustor

3.2 端承桩桩土共同作用的实现

端承桩基由于桩端有良好的持力层，无法通过向

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下刺入来完成桩土的协调变形，此时可通过在桩顶设置变形调节器来调节桩土的变形差，从而达到充分利用地基土承载力的目的。

如前文所述，在软土地区的复合桩基中一般假定上部结构荷载首先主要由桩来承担，当上部结构荷载达到并超过承台下的单桩极限承载力之和时，承台下各桩将始终保持分担相当于各桩极限承载力之和的外荷载，而承台下地基土则分担余下之荷载，桩土之间最终有明确的荷载分担。而与常规复合桩基相比，安装了变形调节器的端承桩桩土共同作用有其自身的特点，在保持变形协调的同时，桩土始终共同承担上部结构荷载 $Q=Q_s+Q_p$，最终有 $Q=Q_s+nP_a$，桩土承荷比按照各自的刚度也基本保持不变。可参见图 6。

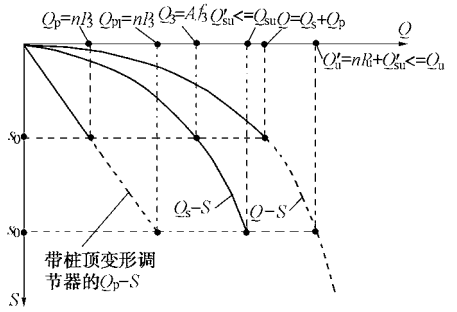


图 6 端承桩桩土共同作用的实现

Fig. 6 Realization of interaction of end-bearing piles and soil

应该指出的是，端承桩的桩土变形差通常在几厘米以上，而设置了褥垫层复合地基的调节量仅有几毫米，远远不能实现较好地质条件下的桩土共同作用。另外为了保证桩端的长期可靠联接，当建筑物的沉降稳定后（一般竣工后 2～3 a），安装了变形调节器的桩端即可通过混凝土浆注实。

3.3 桩基支承刚度人为控制下的自适应调节

一般情况下建筑物的共同作用方程可写为

$$[K]\{W\}=\{Q\} \quad , \tag{1}$$

式中，$[K]=[K_s]+[K_p]+[K_r]+[K_b]$，$[K_s]$为地基土的支承刚度矩阵，$[K_p]$为桩的支承刚度矩阵，$[K_r]$为筏板的刚度矩阵，$[K_b]$为上部结构刚度矩阵。

当建筑物的桩筏体系以差异沉降控制为主或者同时兼顾差异沉降控制与地基土的充分利用时，则可以通过在不同位置的桩顶人为设置不同刚度的变形调节器来优化整个桩筏体系的受力性能，此时式（1）中：

$$[K]=[K_s]+[\overline{K_p}]+[K_r]+[K_b] \quad , \tag{2}$$

式中，$[\overline{K_p}]$－复合桩体的支承刚度。当桩为端承桩时，安装变形调节器后的复合桩体的单桩支承刚度 $\overline{k_p}$ 近似等于变形调节器的刚度（可不考虑桩身压缩与桩端变形），即 $\overline{k_p}=k_d$；当桩为摩擦桩时，则 $\overline{k_p}=k_dk_p/(k_d+k_p)$，$k_p$为未安装调节器的基桩刚度。

另外，还需指出的是，如果需要获得更多种不同的支承刚度，还可以将 n 个变形调节器进行串、并联布置（如图 7 所示）。串联时 $k'_d=k_d/n$，并联时 $k'_d=nk_d$。

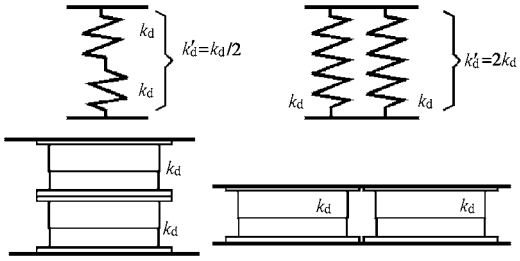


图 7 变形调节器串并联组合示意图

Fig. 7 Series-wound or shunt-wound displacement adjustor and its appearance

3.4 广义复合基础基本设计原则

采用端承桩或摩擦端承桩的广义复合基础一般适宜用于土质较好地区。地基土承担大部分上部结构荷载的同时，使用少量的桩来承担剩余荷载并且控制建筑物的总沉降和差异沉降。在广义复合基础的具体设计过程中应注意以下基本原则。

（1）地基土承载力的取值

地基土承载力的合理取值是广义复合基础成功设计的重要方面，也在很大程度上决定了整个基础的造价。文献[18]指出，当地基土不丧失稳定性的破坏，并且变形 s 也恰在容许范围[S]之内时，地基的设计是最经济的。为了充分利用地基土的承载力，在进行地基土承载力的计算时，就不能始终局限于弹性阶段。具体地基土承载力 f_a 的取定应根据现场原位试验并适当考虑筏板的尺寸效应来确定，亦即还应按容许变形控制来确定地基土的承载力。限于篇幅，将另文叙述。

（2）桩数的确定

桩应尽量布置于墙下和柱下，并且群桩重心尽可能对准荷载重心，在此基础上桩数为

$$n=\frac{Q-f_aA}{P_a} \quad , \tag{3}$$

式中，Q为上部结构竖向力设计值、基础自重设计值和基础上土重标准值，A为基础底总面积，f_a为经修正后地基土承载力特征值，P_a为单桩竖向承载力特征值。

在此类广义复合基础中，由桩顶变形调节装置来保证桩土的协调变形。因此式中单桩承载力亦无必要使用至极限值，按规范[19]建议取为特征值即可。于是，可按不同施工和使用阶段，由式（1）进行共同作用分析以控制沉降与差异沉降。

（3）桩端变形调节装置的设计

端承桩复合桩基在承荷受力的最终阶段，桩土的变形仍是协调的，因此桩端变形装置所需调节的位移

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量 s_0 实际上就是地基土承担荷载后桩间土的压缩量（严格意义上应再减去桩身的压缩量），当桩为端承桩时此变形量也是整个广义复合基础的沉降量。另外桩端变形装置最终承担的荷载即为单桩承载力特征值，因此桩端变形装置的刚度即为

$$K=\frac{P_{\mathrm{a}}}{s_0}=\frac{2P_{\mathrm{a}}}{2s_0}=\frac{P_{\mathrm{u}}}{2s_0}\quad , \tag{4}$$

式中，s_0 为自适应变形调节器的变形量。还应该指出的是，在整体安全度分析时桩是发挥至 P_{u} 的，因此以 $2s_0$ 为实际制作时的极限调节量。

（4）整体承载力安全度的分析与计算

天然地基极限承载力约为 $2.5f_{\mathrm{a}}$，当假想 Q 向 Q_{u} 发展时，P_{a} 向 P_{u} 发展，达到 P_{u} 时，预留变形量 $2s_0$ 已用完，桩端进一步变形很有限，并不能保证土体发挥到 $2.5\,f_{\mathrm{a}}$，见图 6。为安全起见可估计为 $2.0\,f_{\mathrm{a}}$。于是广义复合基础整体的极限承载力为

$$Q_{\mathrm{u}}=2.0\,f_{\mathrm{a}}A+nP_{\mathrm{u}}\quad , \tag{5}$$

而 $Q=f_{\mathrm{a}}A+nP_{\mathrm{a}}$，故端承桩复合桩基的整体承载力安全度为

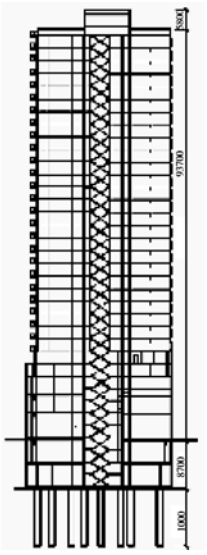
$$K=\frac{Q_{\mathrm{u}}}{Q}=\frac{2.0\,f_{\mathrm{a}}A+nP_{\mathrm{u}}}{f_{\mathrm{a}}A+nP_{\mathrm{a}}}\equiv 2\quad , \tag{6}$$

至此，按端承桩复合桩基设计基础，其整体承载力安全度 K 满足规范[19]要求。

4　工程实例分析

4.1　工程概况

厦门某高层建筑由两幢对称布置的 30 层住宅组成。其下部通过两层地下室和三层裙房连成整体，裙房与地下室的外包尺寸一致。地面±0.00 m 以上建筑物设缝断开，建筑物总高度 94 m，地下室埋深 10.5 m，建筑物剖面如图 8 所示。



尺寸单位：mm

图 8　建筑物剖面示意图

Fig. 8 Section of the building

工程地下室底板下主要分布花岗岩残积砂质粘土，该土层按物理力学性质又可分为 A，B，C 三个亚层，其土质条件 C 亚层相对最好，B 亚层次之，A 亚层相对较差。总的变化规律为土层随深度增加而逐渐变好，另外本工程场地地质条件异常，土层中分布有大量直径不等、未风化或轻微风化的孤石。孤石竖向、水平方向均随机分布，且密度较大，具体见图 9。

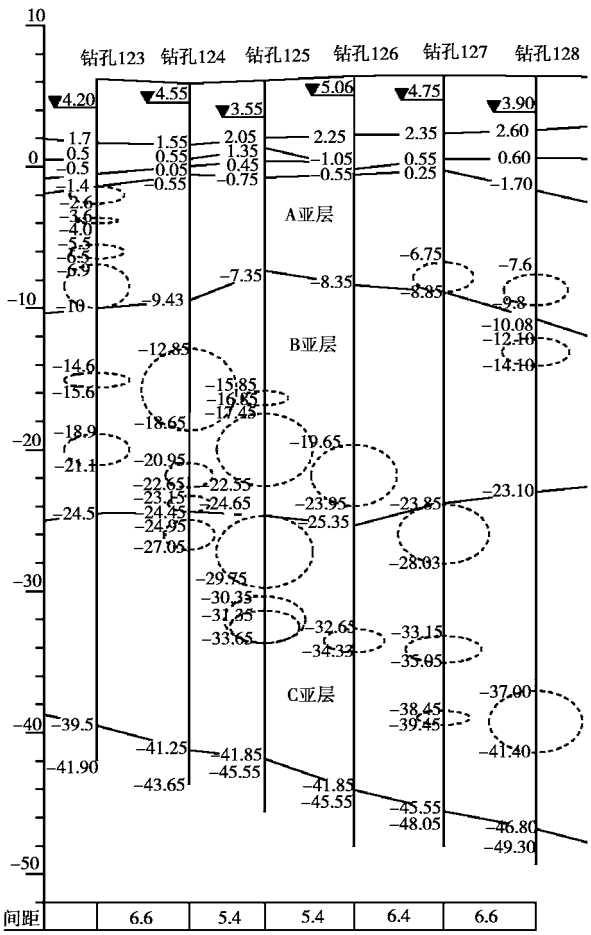


图 9　地质剖面示意图

Fig. 9 Geological section

该工程地质条件复杂，常规方案均无法实施或不经济，故采用广义复合基础方案，主要以充分利用良好的地基土承载力为目的，兼顾考虑差异沉降控制。整个广义复合基础共设置桩径 1 m，桩长 10 m 的人工挖孔桩 65 根，桩顶设置变形调节器。

4.2　工程实测结果与分析

建筑物封顶以后，桩顶位移调节装置变形 6～20 mm，平均变形 12 mm，基底土压力最小为 81 kPa，最大为 300 kPa，接近地基土的承载力设计值。图 10，图 11 分别为变形调节装置变形量与基底土压力随时间的变化曲线图，从图看出桩土承担荷载基本随时间呈同步线性增长趋势，说明桩土承载力同步发挥，图 12 的桩土承荷比随时间的曲线也证实了这一点。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

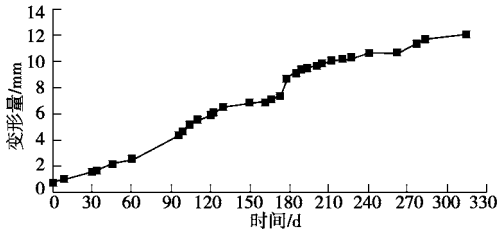


图 10 桩顶位移调节装置平均变形量随时间的变化曲线

Fig. 10 Curve of average deformation with time

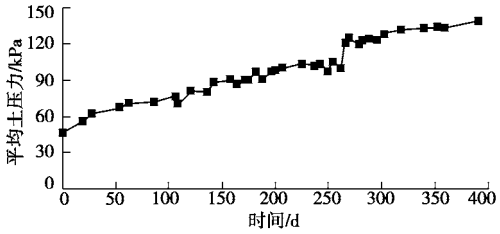


图 11 基底平均土压力随时间的变化曲线

Fig. 11 Curve of average earth pressure with time

在本工程中，人工挖孔桩主要起控制建筑物总沉降以及差异沉降的作用，另外还作为建筑物的安全储备。建筑物封顶 1 a 的平均沉降 27 mm，封顶 2 a 多的平均沉降 37 mm，具体如图 13 所示。从图可以看出目前建筑物沉降已经收敛，并且与设计时估算的最终沉降 3～5 cm 非常吻合，说明本工程的复合基础的设计计算是合理的也是成功的。

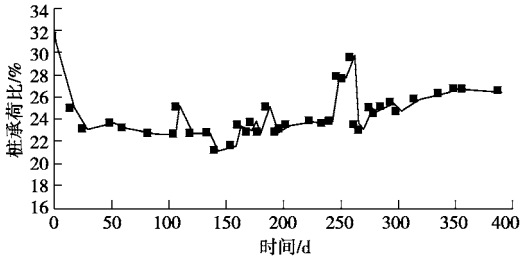


图 12 桩土的承荷比

Fig. 12 Ratio of supported loads between piles and soil

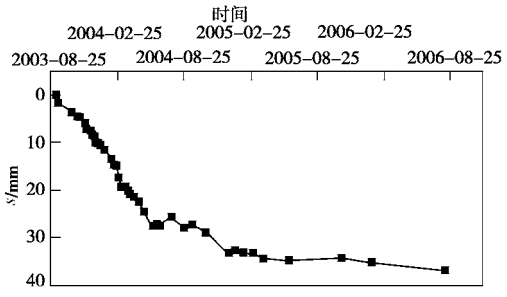
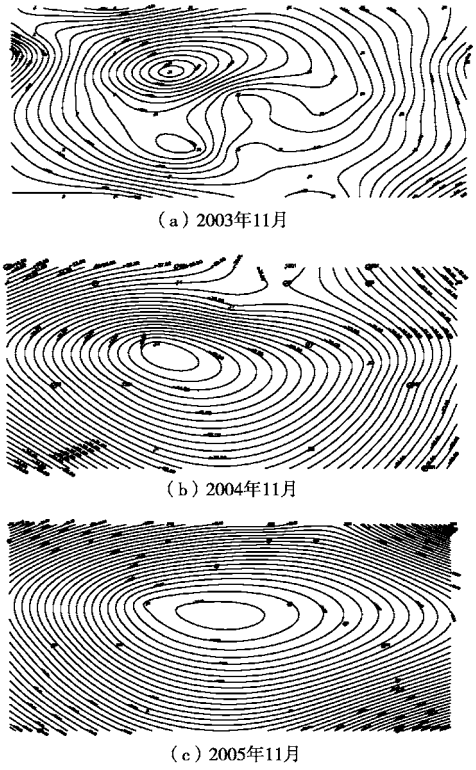


图 13 建筑物沉降曲线

Fig. 13 Curve of settlement of the building

图 14 分别为建筑物封顶、封顶 0.5 a、封顶 1.5 a 时刻的沉降等值线图（图中每条等值线间隔代表差异沉降 1 mm），从图可以看出建筑物施工过程中由于地基两侧差异，沉降并不均匀对称，但是随着时间的推移，在桩顶调节器自适应调节作用下，建筑物朝着最终使上部结构次应力最小的方向发展，并且建筑物 80 m 纵向边长的差异沉降从 20 mm 左右逐渐发展到 10 mm 左右，说明在自适应调节下本建筑的基础设计基本达到了零差异沉降的目标。



（a）2003年11月

（b）2004年11月

（c）2005年11月

图 14 建筑物沉降等值线图

Fig. 14 Settlement isoline of the building

5 结语与展望

保证建筑物筏板的差异沉降为零，是建筑物基础乃至上部结构保持最优状态的根本，而对地基与桩基构成的支承体的支承刚度进行可控、合理的调整是差异沉降控制设计最有效的方法。另外端承桩基础如何充分利用良好的地基土承载力也还是桩土共同作用理论应用的一大难题。本文提出的广义复合基础理论和给出的桩顶变形调节装置对上述问题进行了全新的尝试，一工程实践表明，本文方法不但成功解决了上述问题，而且还节省了大量建设成本，取得了良好的经济效益与社会效益。诚然广义复合基础理论还有待进一步的研究与实践，笔者真诚期望能得到广大同行的批评指正。

参考文献：

[1] 龚晓南，陈明中. 桩筏基础设计方案优化若干问题[J]. 土木工程学报，2001，**34**(4)：107－110. (GONG Xiao-nan, YANG Ming-zhong. Some issues on the optimum design for

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

a piled raft foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, **34**(4): 107－110. (in Chinese))

[2] 阳吉宝, 赵锡宏. 高层建筑桩箱(筏)基础的优化设计[J]. 计算力学学报, 1997, **14**(2): 241－244. (YANG Ji-bao, ZHAO Xi-hong. Optimum design for piled box (raft) foundation of tall building[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, **14**(2): 241－244. (in Chinese))

[3] 宰金珉, 宰金璋. 高层建筑基础分析与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993. (ZAI Jin-min, ZAI Jin-zhang. Analysis and design of high-building foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press. 1993. (in Chinese))

[4] 宰金珉. 复合桩基理论与应用[M]. 北京: 知识产权出版社, 2004. (ZAI Jin-min. Theory and practice of composite pile foundation[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House. 2004. (in Chinese))

[5] 刘金砺, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 151－157. (LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 151－157. (in Chinese))

[6] RANDOLPH M F. Science and empiricism in pile foundation[J]. Geotechnique 2003, **53**(10): 847－875.

[7] 宰金珉. 利用变刚度垫层改善基础工作性状的探讨[C]// 全国地基基础新技术学术会议论文集. 南京, 1989. (ZAI Jin-min. Discuss of character of foundation with varying bedding[C]// The Collection of Papers about New Technique of Foundation Countrywide, Nanjing, 1989. (in Chinese))

[8] 宰金珉. 按单桩极限承载力设计复合桩基的研究(上,下)[J]. 南京建筑工程学院学报, 1992(4). (ZAI Jin-min. A research on design for composite pile foundation according to the ultimate bearing capacity of single pile[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1992(4). (in Chinese))

[9] 黄绍铭, 等. 按沉降量控制的复合桩基设计方法(上/下)[J]. 工业建筑, 1992(7). (HUANG Shao-ming, et al. Design method of composite pile foundation controlled by settlement [J]. Industry Construction, 1992(7). (in Chinese))

[10] 宰金珉. 桩土明确分担荷载的复合桩基及其设计方法[J]. 建筑结构学报, 1995(4): 66－74. (ZAI Jin-min. Composite pile foundation with distinct load distribution in piles and soils and its design method[J]. Journal of Building Structures, 1995(4): 66－74. (in Chinese))

[11] 罗宏渊, 尤天直, 张乃瑞. 北京嘉里中心基础底板下垫泡沫板的设计[J]. 建筑结构, 1997(7). (LUO Hong-yuan, YOU Tian-zhi, ZHANG Nai-rui. Design of foam deposited under raft[J]. Journal of Building Structures, 1997(7). (in Chinese))

[12] 童衍蕃. 设置不同材料的基础垫层减少建筑物差异沉降的理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2003, **24**(1): 92－96. (TONG Yan-fan. Theory and practice of reducing building unequal settlement by bedding course with different materials[J]. Journal of Building Structures, 2003, **24**(1): 92－96. (in Chinese))

[13] RANDOLPH M F. Design methods for pile groups and pile rafts[C]// Proc of 13th ICSMFE, New Delhi: India, 1994: 61－82.

[14] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. Optimum design of piled raft foundation[C]// 14th Proc Int Conf on SMFE, 1998.

[15] HORIKOSHI K, RANDOLPH M F. A contribution to optimum design of piled rafts[J]. Geotechnique, 1998, **48**(3): 301－317.

[16] 宰金珉. 地基刚度的人为调整及其工程应用[C]// 第八届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京: 万国学术出版社, 1999. (ZAI Jin-min. Artificially modified rigid of soil foundation and its application[C]// The Collection of Papers about 8th Conference of Soil Mechanism and Geotechnical Engineering. Beijing: International Academic Publishers, 1999. (in Chinese))

[17] 宰金珉. 塑性支承桩——卸荷减沉桩的概念及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, **22**(3): 273－278. (ZAI Jin-min. Concept of plastically bearing pile and its practical application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(3): 273－278. (in Chinese))

[18] 陆培炎, 徐振华. 地基的强度和变形的计算[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1979. (LU Pei-yan, XÜ Zhen-hua. Calculation of capacity and deformation of soil foundation[M]. Xining: Qinhai People's Press, 1978. (in Chinese))

[19] GB50007－2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB50007－2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net