

文章编号:1673-2049(2019)02-0039-09

# 上部结构刚度对桩基承台加防水板的影响

刘荣桂<sup>1</sup>, 席宜超<sup>1</sup>, 鲁开明<sup>2</sup>, 逯绍慧<sup>2</sup>

(1. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013; 2. 南京建工集团有限公司, 江苏 南京 210012)

**摘要:**基于弹性理论和变形协调关系推导了桩基承台加防水板时的桩土应力估算公式,采用ABAQUS建立了上部结构-桩基承台加防水板-地基共同作用模型和仅考虑桩基承台加防水板-地基共同作用模型,对比分析了上部结构刚度对地基反力、桩顶反力、基础底板内力与变形的影响,计算了不同位置处桩顶实际反力与设计反力的比值。利用“生死单元”技术模拟施工过程,研究了荷载分配比、单位荷载差异沉降、底板弯矩等随施工层数的变化规律。结果表明:荷载分配与桩-土刚度比、持力层硬度、柱距、防水板厚度等因素有关;防水板底土能承担20%左右的上部结构荷载,考虑上部结构刚度后板底反力分布更加均匀,防水板的“架越作用”不明显,角桩和边桩增荷而中部桩卸荷,基础底板差异沉降显著减小,承台最大弯矩截面由墙边处变为跨中处;逐层施工中桩分担的荷载逐渐增加,而防水板底土和承台底土分担的荷载逐渐减小,并且这种增加或减小的趋势逐渐减缓;上部结构刚度约束基础差异沉降的能力是有限的,考虑逐层施工后承台最大弯矩增加,防水板柱下板带最大弯矩减小,跨中板带弯矩始终很小且几乎无变化。

**关键词:**共同作用;上部结构刚度;桩基;承台;防水板;逐层施工

**中图分类号:**TU473

**文献标志码:**A

## Influence of Superstructure Stiffness on Pile Foundation Cap with Waterproof Slab

LIU Rong-gui<sup>1</sup>, XI Yi-chao<sup>1</sup>, LU Kai-ming<sup>2</sup>, LU Shao-hui<sup>2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China;

2. Nanjing Construction Industry Group Co., Ltd., Nanjing 210012, Jiangsu, China)

**Abstract:** Based on the elastic theory and the deformation compatibility relationship, the pile-soil stress estimation formula for pile foundation cap with waterproof slab was deduced. The coaction model of superstructure-pile foundation cap with waterproof slab, and the coaction model of only pile foundation cap with waterproof slab were established by ABAQUS. The influences of superstructure stiffness on the foundation reaction force, pile-top reaction force and internal force and deformation of foundation floor were compared and analyzed. The ratios of actual reaction force to design reaction force at different locations were calculated. The construction process was simulated by using the “life and death element” technology, and the variation law of load distribution ratio, differential settlement of unit load and bottom bending moment with construction story were studied. The results show that the load distribution is related to pile-soil stiffness ratio, hardness of bearing layer, column spacing and thickness of waterproof slab, etc. The bottom soil of waterproof slab can bear about 20% of the load of superstructure. After

收稿日期:2018-08-13

基金项目:江苏省建设系统科技项目(2016ZD102);国家自然科学基金项目(51508234)

作者简介:刘荣桂(1957-),男,江苏江都人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:liurong@ujs.edu.cn。

considering the superstructure stiffness, the distribution of bottom reaction is more uniform, the overhanging effect of waterproof slab is not obvious, and corner piles and side piles increase the load, while the middle piles unload, the differential settlement of bottom decreases significantly, and the maximum bending moment section of the cap changes from the side of wall to the middle of span. The loads of pile increase gradually, while the loads of bottom soil for waterproof slab and cap decrease gradually in layer-by-layer construction, and the trends of increasing or decreasing gradually slow down. The ability of the superstructure stiffness to restrain the differential settlement of foundation is limit, and the maximum bending moment of cap increases after considering layer-by-layer construction, the maximum bending moment of waterproof slab column decreases, and the bending moment of mid-span slab is always small and almost unchanged.

**Key words:** coaction; superstructure stiffness; pile foundation; cap; waterproof slab; layer-by-layer construction

## 0 引言

基础加防水板是近年来广泛应用于地下工程设计中的基础形式,包括独立基础加防水板和桩基承台加防水板 2 种形式。设计中一般假定上部结构荷载全部由独立基础或桩基础承担,防水板只起到防水和抗浮作用,按构造设计<sup>[1-3]</sup>。施工中基础和防水板是整体浇筑的,当基础受力产生竖向变形或沉降时,防水板也会发生协调变形,从而分担一部分地基反力,这将导致基础的实际工作性状与设计不符,使设计相对桩基础或独立基础来说偏于保守,而相对防水板却偏于不安全<sup>[4]</sup>。李纯等<sup>[5]</sup>对独立基础加防水板的地基反力进行了工程实测,得出防水板能分担 30% 左右的上部结构荷载,并建议根据最不利组合原则确定地基反力分配比;吴春萍等<sup>[6]</sup>运用变形协调原理推导出独立基础加防水板地基反力分配比公式,得出反力分配比与土体压缩模量、独立基础尺寸、柱距等因素有关,但未能考虑上部结构刚度的影响;武崇福等<sup>[7]</sup>建立框架结构与地基基础共同作用的有限元模型,分析认为防水板的受力类似于四角支撑的双向板,基底反力分布呈波浪形,独立基础下反力最大而防水板跨中反力最小。可见对于独立基础加防水板目前已开展了工程实测、理论分析、数值模拟等多方面的研究,但对于桩基承台加防水板,现有文献大都是介绍经验设计方法,并未考虑防水板承担地基反力作用,探讨其实际工作机理的研究迄今还鲜有报道。

有关上部结构-桩筏基础-地基共同作用的大量研究表明,设计基础时假定上部结构为完全柔性的传统分析方法,如弹性地基梁(板)法忽视了相互作用过程中上部结构刚度对基础内力和挠曲的贡献,

导致设计结果不经济<sup>[8-10]</sup>。随着计算机技术和有限元理论不断发展成熟,采用有限元软件对建筑物进行上部结构与地基基础共同作用的仿真分析是一种行之有效的方法。本文利用通用有限元软件 ABAQUS 对基础形式为桩基承台加防水板的建筑物进行竖向荷载作用下的数值模拟分析,研究上部结构刚度对其基础工作性状的影响。

## 1 变形协调分析

在对工程实例开展模拟分析之前,首先基于弹性理论建立端承桩、承台、防水板在竖向荷载下的变形协调方程,以期从理论角度说明三者协同工作机理。简化分析做如下假定:

(1) 变形较小,刚性桩与土皆视为线弹性体。

(2) 计算端承桩时,忽略桩侧摩阻力引起桩间土的剪切变形,桩间土的受力和变形采用浅基础下弹性地基的应力、变形计算方法。

(3) 混凝土的弹性模量远高于地基土,因此承台、防水板按刚性板考虑。

桩-土变形协调计算模型如图 1 所示,其中, $\Delta S_{Ptop}$ ,  $\Delta S_{Ctop}$ ,  $\Delta S_{Btop}$  分别为桩顶沉降量、承台下土顶沉降量、防水板下土顶沉降量,  $\Delta S_P$ ,  $\Delta S_C$ ,  $\Delta S_B$  分别为桩身压缩量、承台下桩间土压缩量、防水板下桩间土压缩量,  $\Delta S_{Pb}$ ,  $\Delta S_{Cb}$ ,  $\Delta S_{Bb}$  分别为桩底土沉降量、承台下持力层土沉降量、防水板下持力层土沉降量,  $L$  为桩长,  $H$  为承台与防水板厚度差,  $\sigma_p$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_b$  分别为桩截面应力、承台净底应力和防水板净底应力,  $A_p$ ,  $A_c$ ,  $A_b$  分别为桩截面面积、承台净底面积、防水板净底面积,  $N$  为荷载,  $G$  为承台和防水板自重,  $S_0$  为桩尖刺入持力层的刺入量。

由图 1(b)可知

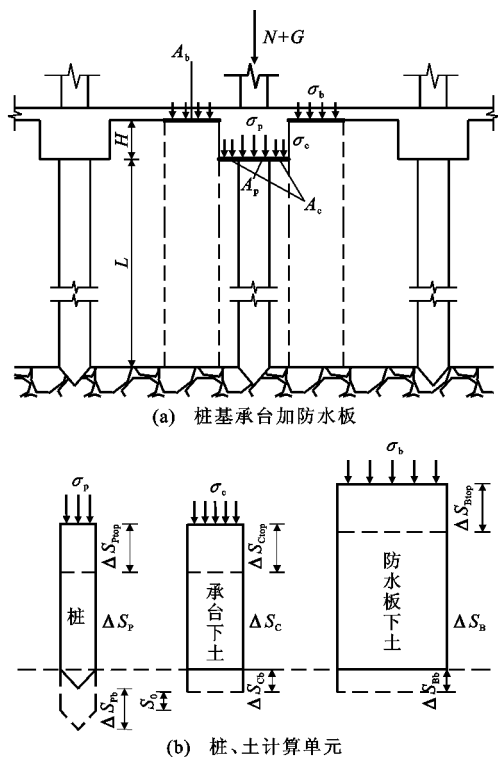


图 1 桩-土变形协调计算简图

Fig. 1 Pile-soil Deformation Coordination

## Calculation Diagram

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_{Ptop} &= \Delta S_P + \Delta S_{Pb} \\ \Delta S_{Ctop} &= \Delta S_C + \Delta S_{Cb} \\ \Delta S_{Btop} &= \Delta S_B + \Delta S_{Bb} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由假设(3)可得变形协调条件  $\Delta S_{Ptop} = \Delta S_{Ctop} = \Delta S_{Btop}$ , 代入式(1)中可得

$$\Delta S_C - \Delta S_P = \Delta S_B - \Delta S_P = \Delta S_{Pb} - \Delta S_{Cb} = S_0 \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta S_C &= \frac{\sigma_c}{E_S} L \\ \Delta S_B &= \frac{\sigma_b}{E_S} (L+H) \\ \Delta S_P &= \frac{\sigma_p}{E_P} L \\ \sigma_c A_c + \sigma_b A_b + \sigma_p A_p &= N+G \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $E_P, E_S$  分别为桩、土的弹性模量。

这里假设  $\Delta S_{Cb} = \Delta S_{Bb}$ ,  $S_0$  可由试桩静载-沉降(Q-S)曲线确定。

解式(2),(3)得到

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &= \left[ \frac{N+G}{L} - \frac{S_0}{L} \left( \frac{E_S A_c}{L} + \frac{E_S A_b}{L+H} \right) \right] / \\ &\quad \left[ \frac{A_p}{L} + \frac{E_S A_c}{E_P L} + \frac{E_S A_b}{E_P (L+H)} \right] \\ \sigma_c &= \left( \frac{N+G}{L} + \frac{S_0 E_P A_p}{L} \right) / \left( \frac{A_c}{L} + \frac{A_b}{L+H} + \frac{E_P A_p}{E_S L} \right) \\ \sigma_b &= \left( \frac{N+G}{L+H} + \frac{S_0 E_P A_p}{L L+H} \right) / \left( \frac{A_c}{L} + \frac{A_b}{L+H} + \frac{E_P A_p}{E_S L} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)可作为端承桩时桩基承台加防水板在竖向荷载下桩土应力的估算公式, 分析可得下列结论:

(1)  $E_P$  增大时  $\sigma_p$  增大,  $E_S$  增大时  $\sigma_c, \sigma_b$  增大, 即荷载分配比与桩-土刚度比有关, 桩间土相对桩的刚度越大, 其分担的荷载越大。

(2) 上部结构荷载一定时, 桩的刺入率  $S_0/L$  反映了地基持力层的坚硬程度, 持力层越坚硬,  $S_0/L$  越小, 从而  $\sigma_p$  越大,  $\sigma_c, \sigma_b$  越小, 即选择的持力层越硬, 桩分担的荷载越大, 承台和防水板下土分担的荷载越小。

(3) 柱(墙)距越大, 则  $A_b$  越大,  $\sigma_b$  越小, 即防水板的基底压力越小。

(4) 防水板相对承台越厚, 即  $(L+H)/L$  越小, 则  $\sigma_b/\sigma_c$  越大, 防水板分担更多的地基反力, 这也符合合力沿刚度大的方向传播的基本规律。

## 2 工程概况

### 2.1 上部结构与场地条件

南京燕子矶新城保障房项目某栋建筑物上部为 10 层框剪结构, 层高 3.3 m, 框架柱呈 3×3 跨布置, X 向柱距布置为 4 m×4 m×4 m, Y 向柱距布置为 4 m×6 m×4 m, 中间布置筒型开洞剪力墙, 洞口尺寸为 2.4 m×2.4 m, 标准层平面布置如图 2 所示。框架柱截面尺寸为 500 mm×500 mm, 主梁截面尺寸为 300 mm×500 mm, 次梁截面尺寸为 200 mm×400 mm, 剪力墙厚度为 300 mm, 楼板厚度为 100 mm, 混凝土强度均为 C30。参考南京某实际工程的勘察报告, 地基土由上至下分别为①-粉质黏土、②-黏土、③-砂土, 与单桩竖向承载力标准值相关的桩极限摩阻力和桩极限端阻力标准值见表 1。

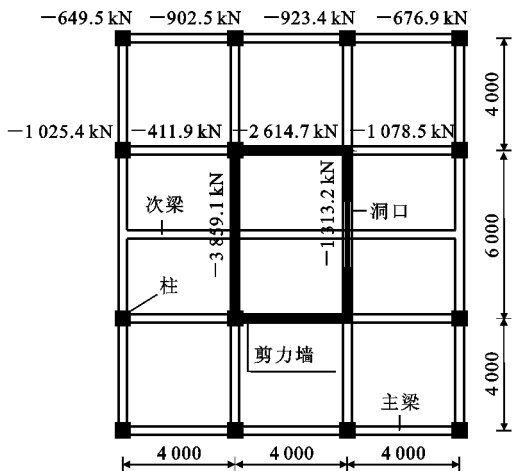


图 2 标准层平面布置(单位:mm)

Fig. 2 Plan Layout of Standard Story (Unit:mm)

表 1 桩极限摩阻力和极限端阻力标准值  
Tab.1 Standard Values of Ultimate Frictional  
Resistance and Ultimate Tip Resistance of Piles

土层名称	厚度/m	$q_{sik}/\text{kPa}$	$q_{pk}/\text{kPa}$
①-粉质黏土	2.1	58	
②-黏土	7.6	84	
③-砂土	未揭穿	82	9 400

注： $q_{sik}$ 为第*i*层土的桩极限摩阻力； $q_{pk}$ 为桩极限端阻力。

2.2 按现行规范进行桩基础设计

依据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)<sup>[11]</sup>取恒载 5 kPa(包含楼板自重)和活载 2 kPa 作用于楼板及屋面,求得相应于荷载效应标准组合时的柱(墙)底轴力,见图 2(由对称性只注明一半)。基础采用桩基承台加防水板,承台高度 0.9 m,防水板厚 0.3 m,钻孔桩直径  $d=800\text{ mm}$ ,以③-砂土为持力层,桩端进入持力层  $1.5d=1.2\text{ m}$ 。设承台顶面与土体表面齐平,则桩长  $L=10\text{ m}$ 。按式(5),(6)计算单桩竖向极限承载力特征值<sup>[12]</sup>

$$Q_{uk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \tag{5}$$

$$R_a = Q_{uk} / 2 \tag{6}$$

式中: $Q_{uk}$ 为单桩竖向极限承载力标准值; $u$ 为桩身周长; $l_i$ 为桩周第*i*层土的厚度; $R_a$ 为单桩竖向极限承载力特征值。

中部剪力墙及墙柱的竖向总荷载  $F_k=12\,538.7\text{ kN}$ ,桩数  $n>F_k/R_a=3.9$  根,取 4 根,沿柱网布置于各墙肢交接处。桩的外边缘至承台边缘距离等于桩半径,从而确定墙下承台的尺寸为  $5.6\text{ m}\times7.6\text{ m}$ 。桩、承台、防水板均采用 C30 混凝土,重度  $24.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,则桩顶平均竖向力  $Q_k=(F_k+G_k)/n=3\,369.3\text{ kN}<R_a=3\,374.1\text{ kN}$ ,检验满足要求。边柱和角柱采用一柱一桩的布置方式即可,相应承台尺寸均为  $1.6\text{ m}\times1.6\text{ m}$ 。桩、承台、防水板的平面布置见图 3,三维示意图(对称半结构)见图 4。

3 建立有限元模型

3.1 模型说明

利用 ABAQUS 建立了 2 种模型:上部结构-桩基承台加防水板-地基共同作用模型(图 5,以下简称共同作用模型)和仅考虑桩基承台加防水板和地基共同作用的模型(以下简称非共同作用模型),考虑对称性只取 X 轴以上建模。上部结构的梁、柱采用 B32 梁单元,剪力墙、屋面、楼板采用 S4R 壳单元,承台、防水板、桩和地基土均采用 C3D8R 实体单元。对于共同作用模型,由于梁、壳单元与实体单元

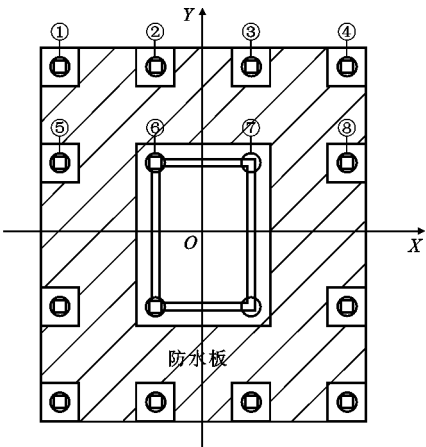


图 3 桩基承台加防水板平面布置  
Fig. 3 Plan Layout of Pile Foundation Cap with  
Waterproof Slab

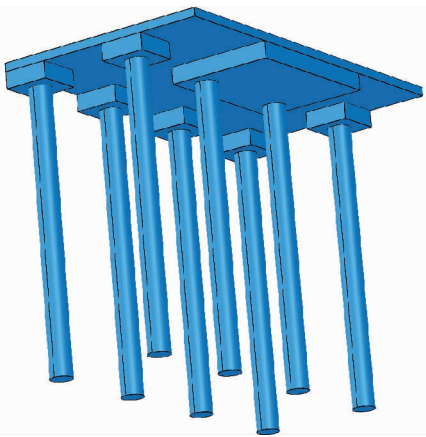


图 4 桩基承台加防水板三维示意图  
Fig. 4 Three-dimensional Graph of Pile  
Foundation Cap with Waterproof Slab

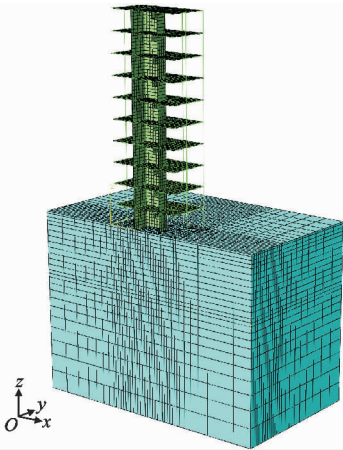


图 5 共同作用有限元模型  
Fig. 5 Coaction FEM Model

的节点自由度不同,为保证交接面上的位移协调,采用多点约束(MPC)方法<sup>[13]</sup>来连接墙、柱底节点与承台表面节点。对于非共同作用模型,首先将上部结

构在墙、柱脚处完全固支,求得 3 个方向上的反力,再将反力反作用于承台顶面相应墙、柱的位置,从而保证 2 种模型具有相同的荷载工况,通过对比分析研究上部结构刚度的影响。

地基土采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型<sup>[14-16]</sup>,

表 2 材料参数

Tab. 2 Material Parameters

材料名称	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$
C30 混凝土	2 500	30 000.00	0.25			
粉质黏土	1 930	19.23	0.30	36	21.7	11.0
黏土	1 970	27.36	0.30	51	25.0	12.5
砂土	1 840	51.50	0.30	1	30.0	15.0

注:ABAQUS 规定 Mohr-Coulomb 模型中的黏聚力  $c$  必须大于 0,故将砂土的  $c$  取为一较小值。

模型中考虑的荷载为:①上部结构及基础自重;②建筑做法及活载取 4 kPa,均布于屋面、各层楼板以及基础底板表面;③初始地应力。地基土人工边界尺寸取 24 m×41 m×30 m。土体 3 个侧表面约束其法向位移,底面约束 3 个方向的平移,所有对称面设置位移对称边界条件。为准确模拟地基土的沉降需平衡初始地应力,即任意深度处土体单元的竖向应力等于该处土体的自重应力,且位移场接近于 0 的初始状态。具体方法参考文献[18]。

3.2 合理性验证

基于桩基沉降量将非共同作用有限元模型和按现行规范执行的设计软件计算结果进行对比,以验证模型的合理性。其中,按规范(分层总和法)计算时,桩端压缩层的附加应力不仅考虑桩侧阻力和桩端阻力的影响,按 Mindlin 应力解计算,还考虑了承台和防水板底土压力的影响,按 Boussinesq 解计算,并将附加应力叠加。按照规范法计算出的基础沉降如图 6 所示,其与有限元法计算出的各桩桩顶沉降量对比如图 7 所示。

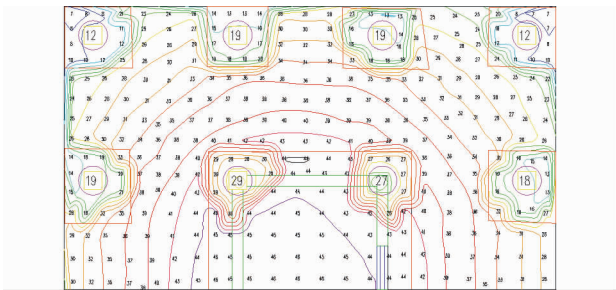


图 6 沉降等值线图(单位:mm)

Fig. 6 Settlement Contour Map (Unit:mm)

由图 7 可以看出,采用 2 种方法计算的角桩和边桩桩顶沉降结果非常接近,而有限元法计算出的中间承台桩沉降较大,其中 6 号桩的沉降差值最大,

其材料参数见表 2,其中土的密度、黏聚力和内摩擦角取自地勘报告,弹性模量取  $3E_{s1-2}$  ( $E_{s1-2}$  为压缩模量),剪胀角取为内摩擦角的一半。桩-土、承台-土、防水板-土的界面相互作用在法向设置为“硬”接触,切向为库仑摩擦模型,摩擦因数取为 0.3<sup>[17]</sup>。

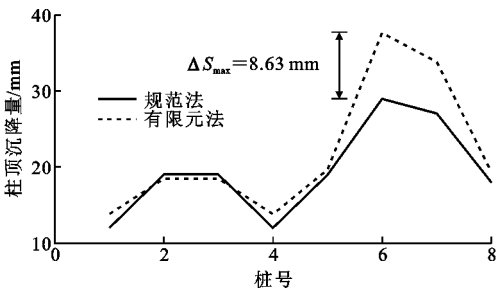


图 7 2 种方法沉降计算差值

Fig. 7 Settlement Calculation Difference Using Two Methods

为 8.63 mm。考虑到规范法计算时受沉降计算经验系数、桩身摩阻力分布假定等变量的影响,这一差值是可以接受的,因此认为本研究所采用的有限元模型及其参数取值是较为合理的。

4 上部结构刚度的影响

4.1 对地基反力分布的影响

表 3 列出了 2 种模型在上述工况下承台底土、防水板底土和桩分别承担的上部结构荷载值,并给出分担荷载的比例。

表 3 2 种模型的桩土荷载分布

Tab. 3 Pile-soil Load Distribution Using Two Models

模型	承担的荷载/kN			分配比/%
	承台底土	防水板底土	桩	
共同作用	3 713.77	2 428.48	6 131.65	19.8
非共同作用	4 024.19	2 289.96	6 054.16	18.5

由表 3 可知,考虑共同作用后桩承担的荷载增大约 1.2%,承台底土承担的荷载减小了 7.7%,相应的防水板底土分担荷载的比例从 18.5%增至 19.8%。结果表明:防水板能够承担一定的地基反力,且考虑上部结构刚度后其承担的地基反力略有



增加。

图 8 为共同作用和非共同作用时防水板的地基反力分布图。由图 8 可以看出:防水板边缘部分及与承台交界部分承受的地基反力较大,而中间部分承受的地基反力较小;考虑共同作用后,防水板与承台交界部分的地基反力集中现象减弱,板底反力的分布更加均匀。

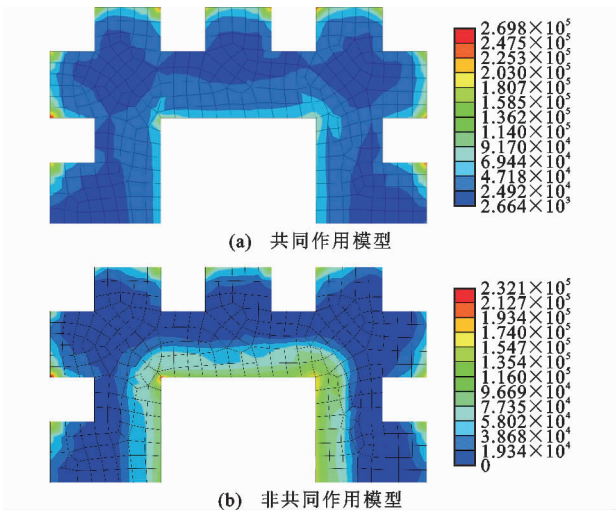


图 8 防水板地基反力分布(单位:Pa)

Fig. 8 Subgrade Reaction Force Distribution of Waterproof Slab (Unit: Pa)

4.2 对桩顶反力分布的影响

表 4 给出了 2 种模型下①,②,⑤,⑥号桩(位置见图 3)的桩顶实际反力与设计反力比值,其中设计反力不考虑承台和防水板承担地基反力的能力。设计反力按下式计算

F\_{Ki} = \frac{R\_{Fzi}}{n} + \frac{G+PA}{8} \tag{7}

式中: $F_{Ki}$ 为第*i*号桩的桩顶设计反力; $R_{Fzi}$ 为根据非共同作用模型计算出的第*i*号桩对应柱的竖向支座反力,当*i*=6 时取剪力墙半结构和一个墙柱的竖向支座反力合力,此时  $n=2$ ,对于边桩和角桩, $n=1$ ;  $P$ 为作用在基础底板上的均布荷载,为 4 kPa;  $A$ 为基础底板面积。

由表 4 可以看出:非共同作用下各桩的桩顶实际反力与设计反力的比值均在 60%左右,类似桩筏基础中桩顶反力外移的现象不明显,这是因为防水板相对筏板刚度小,“架越作用”不明显;考虑上部结构刚度后,角桩反力比增加了 20.5%,边桩反力比增加了约 6%,中间桩反力比减少了 15%,各桩实际桩顶反力值趋于均匀,说明上部结构刚度有使角桩和边桩“增荷”、中部桩“卸荷”的趋势。

表 4 桩顶实际反力与设计反力

Tab. 4 Actual Reaction Force and Design Reaction Force of Pile-top

桩号	设计反力 $F_{Ki}/\text{kN}$	实际反力/kN		$F_{1i}/F_{Ki}$	$F_{2i}/F_{Ki}$
		共同作用 $F_{1i}$	非共同作用 $F_{2i}$		
①	860.8	717.6	541.3	0.834	0.629
②	1 037.9	748.2	676.3	0.721	0.652
⑤	1 116.3	766.8	704.3	0.687	0.631
⑥	1 892.6	859.1	1 143.9	0.454	0.604

4.3 对基础底板内力与变形的影响

图 9 为 2 种模型基础底板(承台加防水板)顶面的沉降云图,由于四桩承台上部结构荷载较大,底板顶面整体呈盆式沉降,而底板侧面的沉降呈波浪形,在边桩承台处沉降较大,防水板柱下板带跨中处及角桩承台处沉降较小。2 种模型板面的最大沉降均发生在剪力墙对称轴位置,对于最小沉降,共同作用模型发生在柱下板带跨中处,而非共同作用模型发生在角桩承台处。

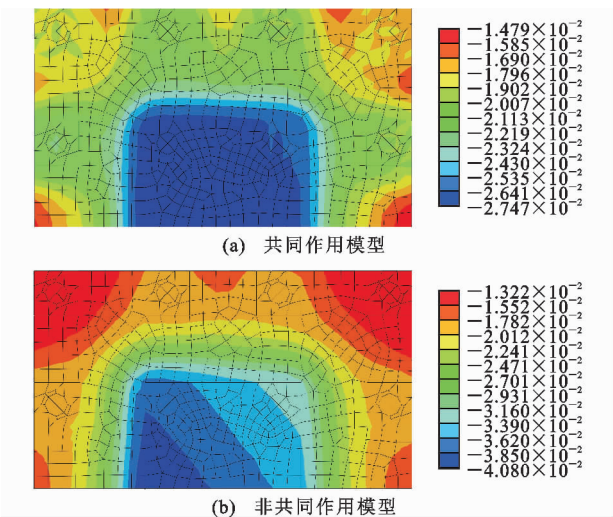


图 9 基础底板顶面沉降云图(单位:m)

Fig. 9 Surface Settlement Cloud Maps of Foundation Base Slab (Unit: m)

表 5 列出了 2 种模型底板表面的平均沉降和最大差异沉降情况。由表 5 可知,考虑共同作用后板面平均沉降减小了 2.53 mm,最大差异沉降减小了 14.9 mm,可见上部结构刚度对基础平均沉降影响不大,但约束其不均匀沉降的能力很强。这一点可以从图 9 直观地反映出来:由于右侧剪力墙开洞,墙身荷载要小于左侧完整剪力墙,故四桩承台左侧沉降应当大于右侧,图 9(b)显示了这种明显的沉降量梯度,而图 9(a)中承台左右两侧的沉降几乎一致。

图 10 为 2 种模型  $X, Y$  轴线截面弯矩  $M_y, M_x$ ,

表 5 2 种模型底板平均沉降和差异沉降

Tab. 5 Average Settlement and Differential Settlement

Using Two Models

模型	平均沉降 $\bar{S}/\text{mm}$	最大沉降 $S_{\text{max}}/\text{mm}$	最小沉降 $S_{\text{min}}/\text{mm}$	差异沉降 $\Delta S/\text{mm}$
共同作用	22.17	27.47	14.79	12.68
非共同作用	24.70	40.80	13.22	27.58

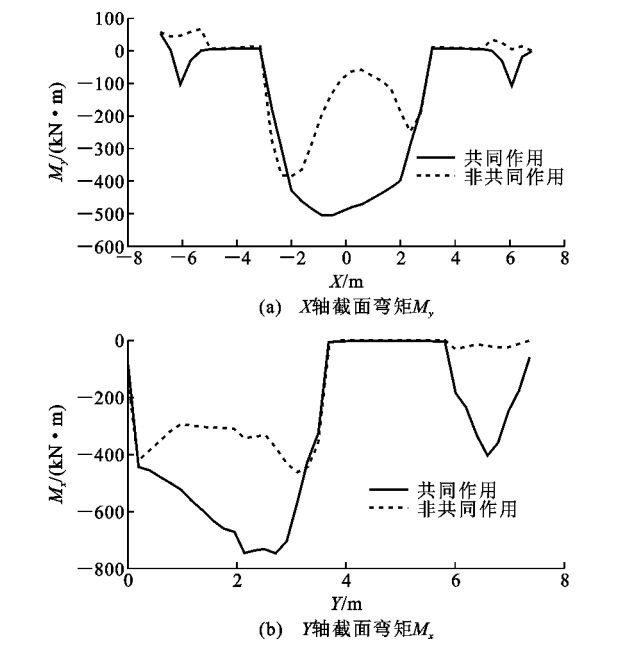


图 10 底板 X,Y 轴线截面弯矩

Fig. 10 Section Bending Moments of X, Y Axes

弯矩为正表示上部受拉,为负表示下部受拉。

由图 10(a)可以看出:对于 2 种模型,在  $X$  方向中间承台均为下部受拉;对于非共同作用模型,防水板柱下板带和跨中板带均上部受拉且跨中板带的弯矩很小;考虑共同作用后防水板跨中板带的弯矩几乎无变化,但柱下板带变为下部受拉。此外,不考虑上部结构刚度时,承台  $M_y$  在  $X = -2\text{ m}$  和  $X = 2.4\text{ m}$  处取得极值,大约对应上部结构的剪力墙边位置,这与现行规范中柱下多桩矩形承台的计算截面应取在柱边处的规定基本吻合,但考虑上部结构刚度后发现,承台中部负弯矩整体增加且极大值约发生在承台跨中处,并由跨中向两侧递减,在按常规方法进行设计时应当注意。

由图 10(b)可知,2 种模型中间承台和防水板柱板带在  $Y$  方向均为下部受拉,非共同作用时防水板跨中板带部分上部受拉,但弯矩很小。考虑上部结构刚度后中间承台和防水板柱下板带的负弯矩均增加,承台最大负弯矩截面对应剪力墙内部边,防水板最大负弯矩位置为柱下板带的中间截面。

5 逐层施工的影响

上面通过对比共同作用和非共同作用模型分析了是否考虑上部结构刚度对桩基承台加防水板的影响,但实际工程中上部结构刚度并不是一次性形成的,而是随着施工过程逐层形成。逐层施工(顺序施工)属于非线性静力分析,在 ABAQUS 中可以通过定义单元“生死”来实现此类分析:首先建立完整的共同作用模型,然后将上部结构单元全部移除,同时作用于其上的重力荷载和均布荷载也被移除,最后将各层单元和荷载逐步激活即可。

5.1 对上部结构荷载分配的影响

图 11 展示了桩、承台底土、防水板底土分担荷载比随上部结构逐层施工的变化规律。由图 11 可知,随着层数增加,桩分担的荷载比逐渐增加,而承台底土和防水板底土分担的荷载比逐渐减小,并且这种增加或减小的速率逐渐减缓。施工至 10 层时桩、承台底土、防水板底土分担的荷载比分别为 48.15%, 31.82%, 20.03%, 这与共同作用不考虑逐层施工时三者的比例(49.96%, 30.25%, 19.79%)相近。

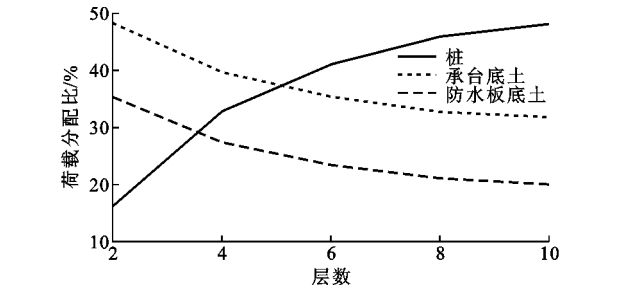


图 11 荷载分配比随施工层数的变化规律

Fig. 11 Variation Law of Load Distribution Ratio with Construction Story

5.2 对基础底板内力与变形的影响

图 12 展现了底板顶面平均沉降随施工层数增加的变化规律。由图 12 可知,平均沉降与层数之间近似满足线性关系,施工至 10 层时平均沉降为 22.76 mm,与共同作用不考虑逐层施工的结果(22.17 mm)相近。图 13 为单位荷载差异沉降与层数之间的关系, $j$  层对应的单位荷载差异沉降为施工至  $j$  层时底板的最大差异沉降与此时的上部结构总荷载之比,该指标反映了结构的差异沉降对荷载的敏感程度。由图 13 可以看出,随着层数增加,单位荷载能够引起的最大差异沉降逐渐减小,但这种趋势并不是线性的,而是随层数增加减小越来越缓慢,这说明上部结构刚度约束基础不均匀沉降的能力是有限的,当施工至一定层数时,再增加其刚度对

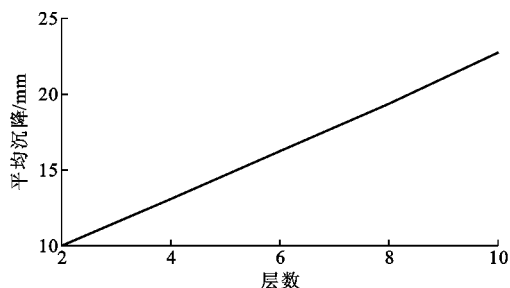


图 12 平均沉降随施工层数的变化规律

Fig. 12 Variation Law of Average Settlement with Construction Story

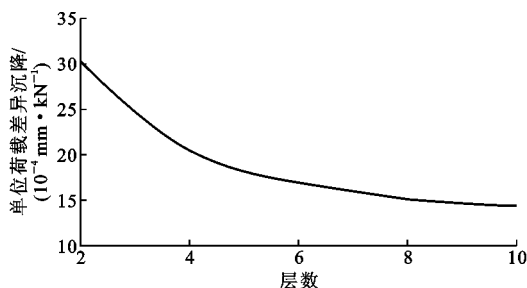


图 13 单位荷载差异沉降随逐层施工的变化规律

Fig. 13 Variation Law of Differential Settlement of Unit

Load with Construction Story

基础不均匀沉降的影响已经不大。

图 14 为底板 X、Y 轴线截面弯矩  $M_y$ 、 $M_x$  随施工层数增加的变化规律。图 14 可以看出,从 2 层至 10 层,中间承台和防水板柱下板带在 2 个方向上的弯矩均匀增加,而防水板跨中板带的弯矩始终很小且几乎无变化,这是因为柱及承台的存在使得柱下板带的跨度较跨中板带小很多,因此其刚度较跨中板带要大很多。此外,不考虑逐层施工时底板 X 轴线截面最大负弯矩为  $-505.72 \text{ kN} \cdot \text{m}$  (承台处),防水板柱下板带的最大负弯矩为  $-109.13 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,而考虑逐层施工至 10 层时上述值分别为  $-611.91 \text{ kN} \cdot \text{m}$  和  $-90.53 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ;对于 Y 轴线截面,不考虑逐层施工时最大负弯矩为  $-746.05 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,柱下板带的最大负弯矩为  $-404.88 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,而考虑逐层施工至 10 层时上述值分别为  $-900.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$  和  $-344.54 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。可见考虑逐层施工后,承台的最大负弯矩增加约 21%,而防水板下板带的最大负弯矩减小约 16%。

## 6 结 语

(1) 桩基承台加防水板基础中,荷载分配比与桩-土刚度比、持力层硬度、柱(墙)距、防水板相对承台厚度等因素有关,本工程中防水板能够承担 20%

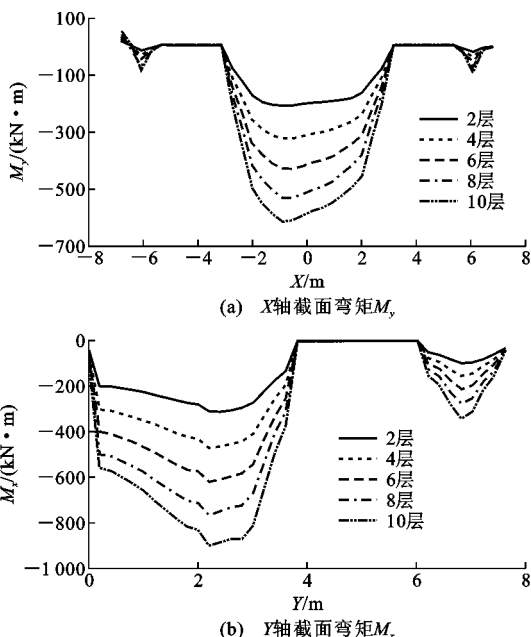


图 14 X、Y 轴线截面弯矩随施工层数的变化规律

Fig. 14 Variation Law of X and Y Axis Section Bending

Moment with Construction Story

左右的上部结构荷载。

(2) 考虑上部结构刚度后,桩顶反力增加约 1.2%,防水板底土分担的荷载增加约 1.3%,而承台分担的荷载减小了 7.7%,防水板底反力分布更加均匀。逐层施工中桩分担的荷载比逐渐增加,承台底土和防水板底土分担的荷载比逐渐减小,并且这种增加或减小的速率逐渐减缓。

(3) 防水板相对筏板刚度小,“架越作用”不明显,故桩顶反力外移现象也不明显。上部结构刚度有使角桩和边桩“增荷”、中部桩“卸荷”的趋势。

(4) 上部结构刚度能够约束基础的差异沉降,但这种约束能力是有限的,当施工至 8 层左右时,再增加层数对差异沉降的影响不大。

(5) 考虑上部结构刚度时,弯矩最大截面可能发生在承台跨中处而非墙(柱)边位置,在设计中应当注意。考虑逐层施工后,承台的最大负弯矩增加约 21%,而防水板柱下板带的最大负弯矩减小约 16%,跨中板带相对柱下板带的刚度小,因此跨中板带的弯矩很小且随层数增加变化不大。

## 参考文献:

### References:

- [1] 吴海胜, 阚明, 张胜潭. 高层建筑基础构造防水底板设计[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增 1): 233-236.  
WU Hai-sheng, KAN Ming, ZHANG Sheng-tan. Constructional Design of Flashing in High-rise Building



- [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (S1): 233-236.
- [2] 姚舒康,杨 丽,李亚楠,等. 深基础防水板应用探讨[J]. 工业建筑, 2012, 42(增): 485-489.  
YAO Shu-kang, YANG Li, LI Ya-nan, et al. Discussion on Application of Deep Foundation Waterproof Board[J]. Industrial Construction, 2012, 42 (S): 485-489.
- [3] 杜 鹏. 防水板受力分析及设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(16): 105-107.  
DU Peng. Mechanical Analysis and Design of Waterproof Plate[J]. Building Structure, 2016, 46(16): 105-107.
- [4] 刘 武,李 娜,谭光宇,等. 独立基础加防水板的设计[J]. 建筑结构, 2016, 46(增 2): 520-523.  
LIU Wu, LI Na, TAN Guang-yu, et al. Design of the Independent Foundation with Water-proof Slab[J]. Building Structure, 2016, 46(S2): 520-523.
- [5] 李 纯,朱浮声. 构造板独立基础地基反力测试[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(2): 220-222.  
LI Chun, ZHU Fu-sheng. Testing Spread Foundation with Concrete Slab[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(2): 220-222.
- [6] 吴春萍,白东丽. 独立基础加防水板的地基反力分配分析[J]. 工程与建设, 2008, 22(3): 371-373.  
WU Chun-ping, BAI Dong-li. Analysis of Foundation Reaction Distribution of Independent Foundation with Waterproof Board[J]. Engineering and Construction, 2008, 22(3): 371-373.
- [7] 武崇福,任顺利. 构造板独立基础地基反力的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 427-430.  
WU Chong-fu, REN Shun-li. Numerical Simulation on Ground Back Pressure of Spread Foundation with Concrete Slab[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2010, 29(3): 427-430.
- [8] 王小平. 地基基础与上部结构的共同作用机理分析[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.  
WANG Xiao-ping. Common Mechanism of Action of Foundation and Superstructure Analysis[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016.
- [9] SERT S, KILIC A N. Numerical Investigation of Different Superstructure Loading Type Effects in Mat Foundations[J]. International Journal of Civil Engineering, 2016, 14(3): 171-180.
- [10] FAROUK H, FAROUK M. Soil, Foundation, and Superstructure Interaction for Plane Two-bay Frames[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(1): B4014003.
- [11] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].  
GB 50009—2012, Load Code for the Design of Building Structures[S].
- [12] JGJ 94—2008, 建筑桩基技术规范[S].  
JGJ 94—2008, Technical Code for Building Pile Foundations[S].
- [13] 张俊飞,顾克秋,付 帅. 基于 Abaqus 的体壳单元组合建模研究[J]. 机械制造与自动化, 2014(3): 102-104, 108.  
ZHANG Jun-fei, GU Ke-qiu, FU Shuai. Study of Modelling on Combination of Solid and Thin-shell Elements Based on Abaqus[J]. Machine Building & Automation, 2014(3): 102-104, 108.
- [14] 刘 英,于立宏. Mohr-Coulomb 屈服准则在岩土工程中的应用[J]. 世界地质, 2010, 29(4): 633-639.  
LIU Ying, YU Li-hong. Application of Mohr-Coulomb Yield Criterion in Geo-technical Engineering[J]. Global Geology, 2010, 29(4): 633-639.
- [15] 姚仰平,张丙印,朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 127-150.  
YAO Yang-ping, ZHANG Bing-yin, ZHU Jun-gao. Behaviors, Constitutive Models and Numerical Simulation of Soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 127-150.
- [16] 费 康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.  
FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [17] 王成华,占 川. 土与结构界面力学特性研究综述[J]. 建筑技术, 2013, 44(6): 486-490.  
WANG Cheng-hua, ZHAN Chuan. State-of-the-art: Mechanical Properties of Interface Between Soils and Structures[J]. Architecture Technology, 2013, 44(6): 486-490.
- [18] 杨金尤,雷金波,邹永强,等. 基于 ABAQUS 的带帽桩复合地基初始地应力平衡方法浅析[J]. 南昌航空大学学报: 自然科学版, 2017, 31(4): 73-78.  
YANG Jin-you, LEI Jin-bo, ZOU Yong-qiang, et al. Preliminary Analysis on Initial Stress Balance Method of Composite Foundation with Cap Pile Based on ABAQUS[J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Science, 2017, 31(4): 73-78.