

文章编号: 1007-2993(2022)03-0190-06

考虑地基与基础协同作用的复合地基 沉降计算方法研究

王浩然¹ 郑浩琴² 李杰¹

(1. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

【摘要】 建立在柔性基础假定条件下的复合地基沉降计算方法, 因未考虑地基与基础相互作用影响下基底反力分布的不均匀性、最大基底反力与最大沉降位置的不重合性, 导致计算值往往比实测值偏大。对两种考虑地基基础协同作用的复合地基沉降计算方法——SFIA 法和结构计算软件“盈建科”的基础设计模块(弹性理论法)的计算原理分别进行了研究, 并在实际工程中分别采用前述两种方法和柔性基础法进行地基沉降计算。与柔性基础法相比, 此两种计算方法因考虑地基基础协同作用, 地基最大沉降与差异沉降计算值更小, 且更接近实测值。研究成果可为复合地基沉降计算提供借鉴和参考。

【关键词】 复合地基; 基础; 协同; 基底压力; 沉降计算

【中图分类号】 TU 470+3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.004

Study on Settlement Calculation Method of Composite Foundation in View of Interaction Between Ground and Foundation

Wang Haoran¹ Zheng Haoqin² Li Jie¹

(1. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

【Abstract】 For the settlement calculation method of the composite foundation based on the assumption of flexible foundation, the calculated value is often larger than the measured value due to the non-uniformity of base reaction distribution under the influence of foundation interaction and the non coincidence between the maximum base reaction and the maximum settlement position. Two composite ground settlement calculation methods considering foundation interaction were studied, including the SFIA method and elastic theory method used in the foundation design module of YJK building software. Foundation settlement calculation was conducted based on the above two methods as well as flexible foundation method. Compared with the flexible foundation method, the calculated values of the maximum settlement and differential settlement of the foundation are smaller and closer to the measured values due to the consideration of the interaction effect of the foundation. The research results can provide reference for the settlement calculation of composite foundation.

【Key words】 composite ground; foundation; the interaction between ground and foundation; base pressure; settlement calculation

0 引言

在北京地区, 28 层以下的高层建筑物多采用复合地基方案。一般来说, 拟处理建筑物基础不同位置的內力、基底反力大小和分布、沉降变形等受地基-基础协同作用的影响最大^[1], 但在我国现有工程体制下, 常规复合地基的沉降计算一般并不是由上部结构设计完成, 而是由地基处理设计单位的岩土工程师完成, 由于缺乏详细的结构基础模型和计算资料, 岩土

工程师无法进行深入的地基-基础相互影响分析, 仅能根据结构设计提供的最大基底压力假定按照均匀状态分布, 采用《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)中的有限压缩层地基模型理论(以 Boussinesq 解求得弹性半空间任意点附加应力, 采用侧限条件下的压缩模量, 考虑有限深度和土体成层性, 用分层总和法计算沉降)^[2]计算复合地基沉降, 这种计算方法虽简单实用, 但未考虑地基与不同刚度基础

作者简介: 王浩然, 男, 1986 年生, 满族, 河北承德人, 工学学士, 工程师, 主要从事岩土工程勘察、设计、施工等研究。E-mail: 31539341@qq.com

相互作用影响下基底反力分布的不均匀性、最大基底反力与最大沉降位置的不重合性^[3],计算结果偏大,不能很好地指导工程实践,且易增加工程造价。

20世纪60年代开始,我国学者陆续对协同作用问题开展研究工作。1989年杨敏对上部结构与桩筏基础的协同作用进行了理论与试验研究^[4]。1997年董建国、赵锡宏著《高层建筑地基基础协同作用理论与实践》^[5],系统地总结了高层建筑地基基础协同作用的工作机理和设计建议。2003年葛忻声通过建立框架结构、基础与地基的三维有限元模型,得到“基底土压力分布呈马鞍形,上部结构层数高刚度大,马鞍形越明显”的规律^[6]。

复合地基沉降计算的关键在于确定基底反力的大小和分布,只要确定基底反力,就可以得到基底不同区域附加应力,再根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)规定即可计算基底任意点沉降。基底反力的大小和分布与基础的大小、刚度、形状、埋深、地基土的性质以及上部结构传来的荷载等很多因素有关^[7],但在实际分析中无法考虑这么多因素,而是用刚度这个参数来统一描述基础的特性,将地基土按照弹性半空间体进行分析,将基底反力问题简化为研究不同刚度的基础和弹性半空间体表面的接触压力的分布问题^[8]。

1 基础刚度对基底反力和沉降的影响

针对基础刚度对基底反力的影响问题,采用极限逼近法分析,考虑完全柔性和完全刚性两种情况。

1.1 完全柔性基础

完全柔性基础是指基础刚度与地基刚度相比较小或者能完全适应地基变形的基础型式(如土坝、路堤等),在均布压力作用下,完全柔性基础基底的反力分布将与基础上作用的荷载分布图形相同(将基础想象为一张纸)^[9](见图1),因基底下土体中部附加应力大于边缘附加应力,基底沉降呈中央大而边缘小的情况(见图2)。

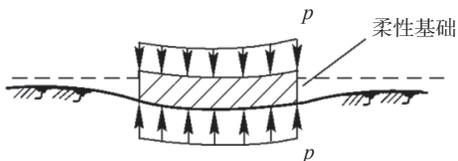


图1 柔性基础基底反力分布^[9]

1.2 完全刚性基础

完全刚性基础是指基础刚度与地基刚度相比较大(刚度很大桥梁墩台等)的基础型式,在中心荷载作用下,基底各点的沉降相同,根据弹性半空间理论,边

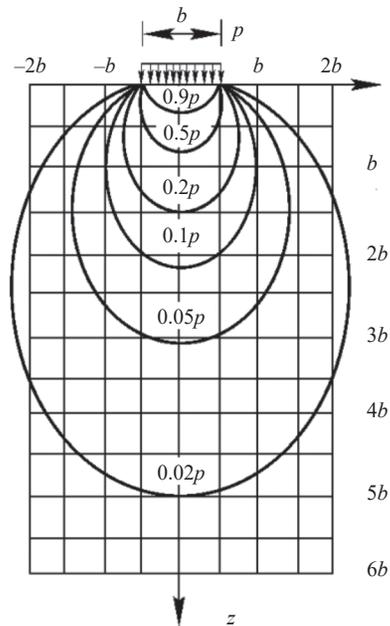


图2 柔性基础均布荷载作用下基底附加应力分布^[9]

缘要达到和中点相同沉降时其附加应力要大,因此基底反力分布呈中央小边缘大的马鞍形(理论上边缘无穷大),随着荷载作用增加,边缘应力达到土体塑性破坏极限时,边缘应力不再增加,中央部分开始增大,呈钟形分布^[10](见图3)。

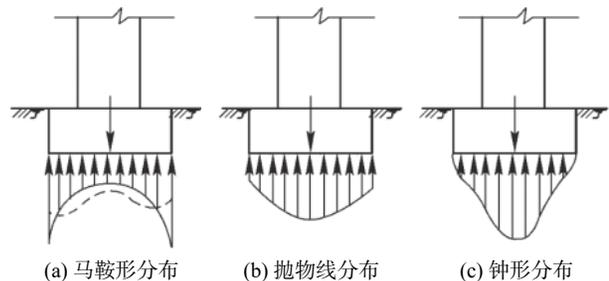


图3 刚性基础基底反力分布^[9]

1.3 弹性基础

常规设计中,我们即采用完全柔性基础假定,将结构设计提供的基底最大压力按照均布分布进行简化,其基底附加应力计算结果如图2,建筑物中点沉降量最大,而角点沉降量最小,且差异沉降较大。但一般采用复合地基的筏板基础刚度介于上述两种情况之间,为弹性基础,因此其基底压力分布介于两者之间,呈缓变的马鞍形,见图3(a)中虚线,且弹性基础对基础中心与边缘的沉降差异有较大的协调作用,会极大地减小地基最大沉降及基础各区域的差异沉降。

董建国等^[5]以上海某高层建筑箱型基础为例,用刚性基础假定,以弹性半无限体空间地基模型及上海粉砂土地基模型计算得到的基底反力分布结果,与该项目实测结果及两个类似项目的基底反力分布实测

结果进行了深入比较(见图4)。可以看出,刚性基础假定下,采用弹性半无限体空间地基模型得到的基底反力分布类似于图3(a)中实线,边缘基底反力与中心点反力比值很大,但实测结果显示,基底反力呈缓变马鞍形,充分说明弹性基础对基底沉降有较大的协调作用;同时沉降结果显示本项目实测最大沉降9.18 cm,而采用刚性基础假定及弹性半无限体空间地基模型计算得到的沉降为13.90 cm,远大于实测值。

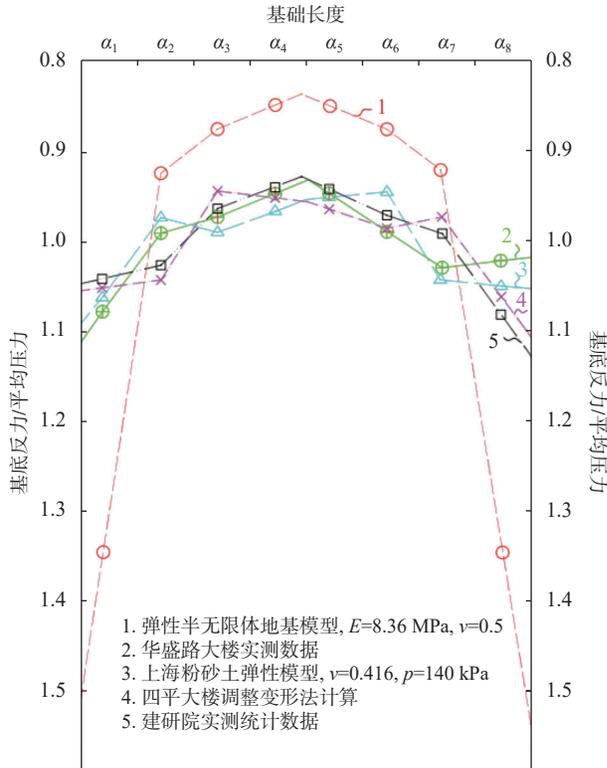


图4 某高层两种地基模型地基反力计算结果、类似建筑地基反力实测结果及该项目实测地基反力结果比较^[5]

余 斌等^[11]采用三维有限元方法,地基模型选取线弹性本构模型,对一个28 m×28 m的基础(见图5)考虑地基基础协同作用下的沉降进行了深入研究,研究表明,随着基础刚度的增加(底板加厚),地基最大沉降有所减小,且趋于均匀,当底板厚度从1 m变为3 m时,中心点最大沉降与边缘沉降的比值由10变为接近1(见图6),但底板弯矩却由1000 MN·m变为1800 MN·m,接近翻倍(见图7)。这一结果说明,通过基础刚度的协调作用可以大幅减小地基沉降及差异沉降,但代价是基础弯矩和配筋的增加。

由上可知,实际基础刚度介于完全柔性和完全刚性之间,考虑基础刚度与地基协调作用下的基底压力与沉降均与基础的两种极限假定计算值有较大差异。

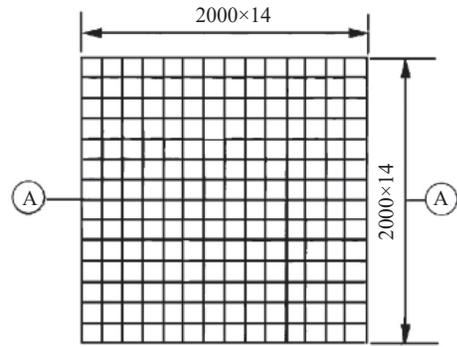


图5 拟研究基础模型^[11]

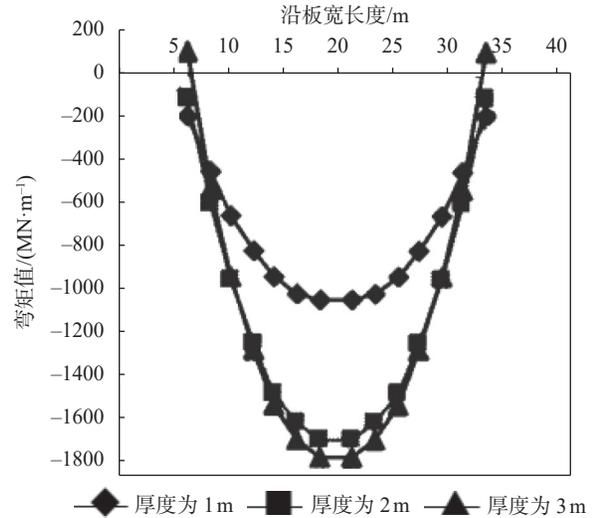


图6 A-A断面底板弯矩变化示意图^[11]

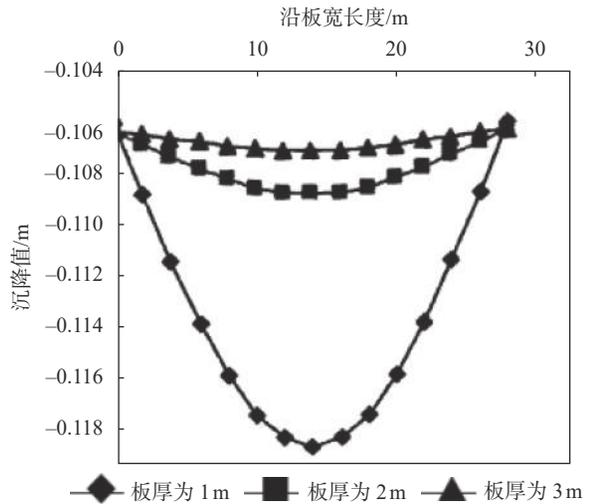


图7 A-A断面底板沉降变化示意图^[11]

因此,建议采用考虑地基与基础协同作用的复合地基沉降计算方法。

2 考虑地基基础协同的弹性基础法

目前行业内考虑地基与基础协同作用的复合地基沉降计算方法较多,统称为弹性基础法。不同方法在地基模型的选取和参数的确定上有一定差异,比如我院研发的SFIA法和结构计算软件盈建科中的基

础设计模块采用的弹性理论法。下面对上述两种方法的计算原理进行简要阐述。

2.1 SFIA 法的计算原理^[12]

(1)将基础划分为交叉梁体,确定计算节点,将节点处荷载代表面积内上部结构准永久组合代表值 $[P_0]$ 施加于各计算节点, $[P_0]$ 为节点荷载列向量;列出基础刚度矩阵 $[C]$,设基底反力列向量为 $[P]$,基底各节点位移矩阵为 $[S]$,根据基础变形与沉降协调一致的假定,可列出方程见式(1):

$$[A] \cdot [P] - [A] \cdot [P_0] = [C] \cdot [S] \quad (1)$$

式中: $[A]$ 为面积矩阵;未知数为基底反力矩阵 $[P]$ 及基底沉降 $[S]$ 。

(2)选取地基模型建立地基柔度矩阵,基底各节点按照 Boussinesq 附加应力计算法和分层总和法建立地基柔度矩阵 $[K]$,建立基底沉降与基底反力的关系式:

$$[S] = [K]^{-1} \cdot [P] + [S_0] \quad (2)$$

式中: $[S_0]$ 为外来沉降向量,也可作为下一步计算时的初始沉降;未知数为基底反力矩阵 $[P]$ 及基底沉降 $[S]$ 。

式中 $[K]$ 的选取应用了独创的单向压剪非线性本构模型,该本构模型是经过大量室内试验得出的非线性应力应变关系,可确定任意应力增量下的垂直变形模量并带入分层总和法计算,从而得到柔度矩阵中的任意项。

(3)将式(2)带入式(1),消去一个未知数 $[S]$,从而求得外荷载作用下考虑基础刚度的基底反力分布关系式:

$$([A] - [C][K]^{-1}) \cdot [P] = [C] \cdot [S_0] + [A] \cdot [P_0] \quad (3)$$

式中除 $[P]$ 外均为已知项。

(4)求得基底反力分布后,带入式(2)计算最终沉降。

2.2 盈建科内嵌的沉降计算原理

(1)基础划分网格,根据上部结构荷载组合值确定节点处外荷载矩阵 $[P_0]$;

(2)分别列出基础刚度矩阵(凝聚上部结构刚度) $[K_0]$ 及地基刚度矩阵 $[K_s]$,通过引入参数矩阵 $[k_{ij}]$ 来适应地基土的不同特性,见式(4):

$$[K_s]^{-1} = [k_{ij}] \cdot [K]^{-1} \quad (4)$$

式中: $[K]$ 为地基区格柔度系数;对调整系数 k_{ij} ,当 $i=j$ 时, k_{ij} 取1.0,当 $i \neq j$ 时, k_{ij} 取0~1,其物理意义是,当 k_{ij} 取0时,地基模型转变为完全文克尔地基模型,该点地基沉降仅与该点压力强度有关,当 k_{ij} 取1时,

地基模型转变为弹性半无限体模型,基础边缘反力接近无穷大,为接近实际情况,可根据地层条件选取参数,一般软土取小值,硬土取大值。

(3)根据基底变形与地基沉降协调假定,组装总刚度矩阵 $[K]=[K_0]+[K_s]$,列出关系方程式,求得基底位移 $[S]$

$$[P_0] = [K] \cdot [S] \quad (5)$$

该方法的重点在于地基刚度矩阵中各区块基床系数的确定,其直接影响沉降计算和分布结果,当有实测荷载试验资料时,可以实测为准,当无资料时,JD CAD 中提供了沉降试算方法,先按柔性基础假定,将上部荷载节点压力均布作用于基底,根据分层总和法求得基底沉降,此时沉降规律为基底中部大,边缘小,反算基床系数,可得初始基床系数分布规律为边缘远大于基础中部,将该初始基床系数替代弹性地基筏板计算中的基床反力系数,进行式(1)一式(3)计算,算得沉降后,求得基底反力,根据各单元中心处的沉降及基底反力重新计算基床系数,形成新刚度矩阵后重复式(1)一式(3)计算,计算最终沉降。

该方法本质上是一种有限单元计算法,只是其地基本构模型采用最简单的“广义文克尔”弹性地基模型,通过调整参数矩阵 $[k_{ij}]$ 来适应地基土的不同性质,取值有一定的随机性。如采用 PLAXIS 3D、Midas 等商业有限元数值分析软件,可以选择更适宜地基实际情况的本构模型进行计算,亦可通过调整相关参数进行仿真试验,进行各关心因素对结果的影响程度的深入分析。

3 工程实例计算比较

以北京通州地区某高层建筑为例,分别采用常规柔性基础法、SFIA 方法及盈建科内嵌的弹性基础法进行地基沉降计算,并与实测值进行比较。

通州地区某地上 28 层、地下 4 层的高层建筑,基础尺寸 48 m×20 m,筏板厚度 0.6 m,采用 CFG 桩复合地基方案,设计要求处理后的地基承载力标准值不小于 530 kPa,最大沉降量不大于 40 mm,整体倾斜不大于 0.15%,其典型地层剖面见图 8,地基承载力与沉降计算时概化地层剖面参数见表 1。

经地基处理设计单位复核计算后,该高层建筑地基处理设计方案见表 2。

针对上述地基处理设计方案,分别采用常规柔性基础法、SFIA 方法及盈建科内嵌的弹性基础法进行地基沉降计算,并与拟建建筑物实测结果进行比较(见表 3)。

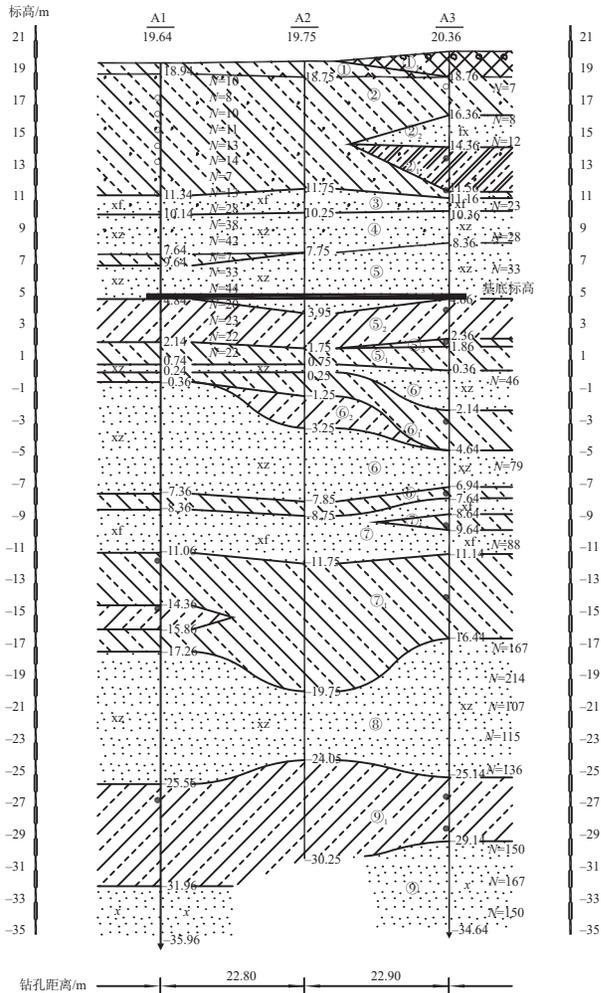


图8 典型地层剖面图

表1 基底以下概化地层剖面参数一览表

地层编号	厚度/m	压缩模量/MPa	承载力标准值/kPa
细中砂⑤层	0.34	30	260
粉质黏土⑤ ₂ 层	2.20	9.5	180
黏质粉土⑤ ₁ 层	1.00	18.3	200
细中砂⑥层	0.50	35	
粉质黏土⑥ ₁ 层	1.50	13.0	
黏质粉土⑥ ₂ 层	2.00	19.2	
细中砂⑥层	4.60	35	
粉质黏土⑥ ₁ 层	0.90	13.0	
细粉砂⑦层	3.00	50	
粉质黏土⑦ ₁ 层	8.00	15.3	
细中砂⑧层	4.30	60	
粉质黏土⑨ ₁ 层	6.20	21.3	

其中考虑地基基础协同计算的 SFIA 法与盈建科法其基底反力及地基沉降的分布规律见图9—图12。

由上述计算结果看出,考虑基础刚度作用下,基底反力呈缓变马鞍形分布,但其边缘基底反力与中心处基底反力比(小于2)由于基础刚度的作用远小于刚性基础假定计算的理论值(大于10)。考虑基础刚度作用下,基底沉降值中部大,边缘小,与常规柔性假定计算相比,整体分布规律一致,但基底最大沉降减小近1倍,且差异沉降更小,更接近实测值。

表2 CFG 桩设计参数一览表

基础直接持力层	天然地基承载力标准值/kPa	设计桩长/m (保护桩长/有效桩长)/m	桩间距/m	桩径/mm	桩体混凝土强度	桩端持力层	
⑤层⑤ ₂ 层	180	25.00	0.50/24.50	1.45	400	C30	细中砂⑧层

表3 沉降计算和实测情况一览表

计算方法	最大沉降/cm	最小沉降/cm	最大基底反力/kN	最小基底反力/kN
柔性基础法	6.02	1.91	530	530
SFIA法	3.60	2.45	685	357
盈建科法	4.40	2.30	621	450
实测值	1.15	0.41		

注: 1. 上述沉降计算均考虑回弹再压缩变形; 2. 实测值为结构封顶时监测值, 非最终沉降值, 根据沉降速率及北京地区经验(见《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ 11-501-2009, 2016年版)^[13]表7.4.5-1)推测, 拟建建筑最终最大沉降小于2cm

4 结论和建议

(1)考虑地基基础协同作用下,基底反力呈缓变马鞍形分布,基础起到了协调基底反力分布的作用。

(2)考虑地基基础协同作用下,基底沉降分布规律中部大,边缘小,但与常规柔性基础假定计算相比,

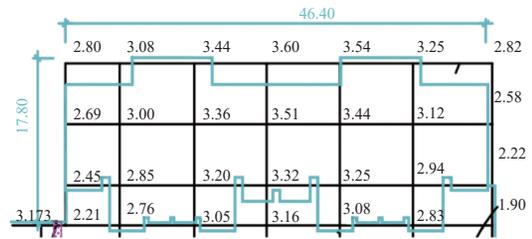


图9 SFIA 法计算基底沉降分布图(单位:cm)



图10 SFIA 法计算基底反力分布图(单位:kN)

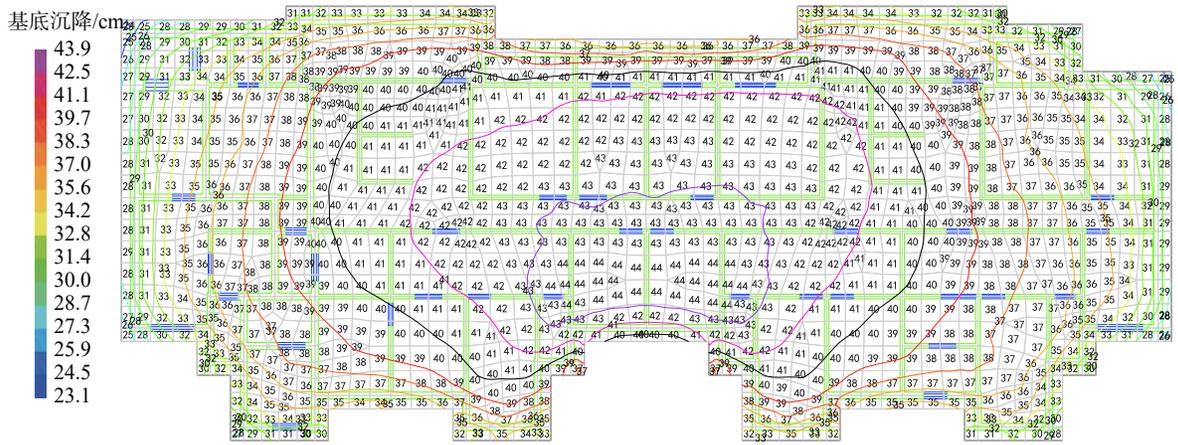


图 11 盈建科法计算基底沉降分布图(单位:cm)

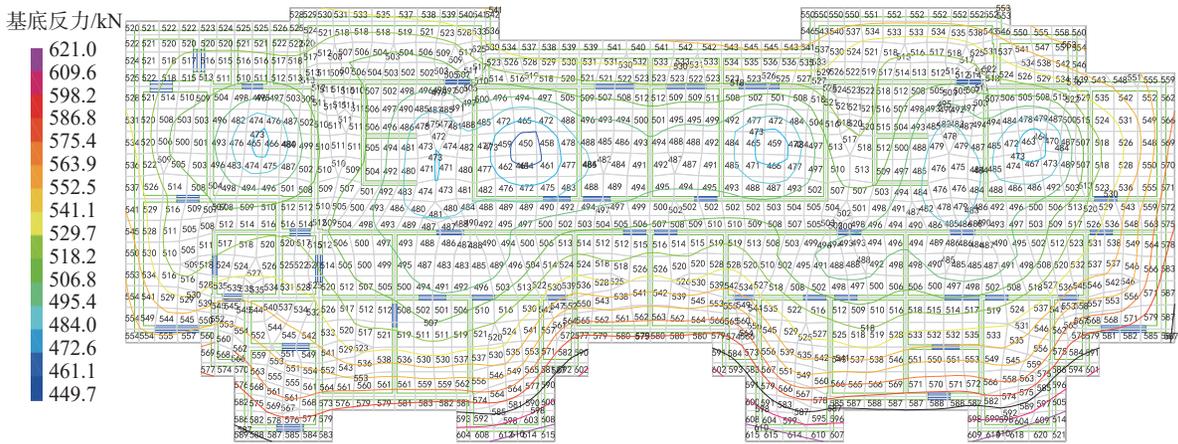


图 12 盈建科法计算基底反力分布图(单位:kN)

最大沉降与差异沉降更小,且更接近实测值。

(3)建议地基基础设计时进行地基基础协同分析,以便优化设计方案、节约工程成本。

参 考 文 献

[1] 张在明. 北京地区高层和大型公用建筑的地基基础问题[J]. 岩土工程学报, 2005, (1): 11-23.

[2] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[3] 佟建兴,周圣斌,杨新辉,等. 框筒结构高层建筑CFG桩复合地基基底反力及变形特征[J]. 北京科技大学学报, 2014, (10): 1420-1426.

[4] 杨敏,王树娟,王伯钧,等. 考虑极限承载力下的桩筏基础相互作用分析[J]. 岩土工程学报, 1998, (5): 82-86.

[5] 董建国,赵锡宏. 高层建筑地基基础共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.

[6] 葛忻声. 高层建筑刚性桩复合地基性状[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.

[7] 刘朋辉. 高低层复杂高层建筑厚筏基础反力及变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, (4): 3618-3626.

[8] KNAPPETT J A, CRAIG R F. Craig's soil mechanics[M]. London: Spon Press, 2012.

[9] 赵成刚,白冰,王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社,北京交通大学出版社, 2004.

[10] 袁杰. 地基刚度对平板式筏板基底反力分布影响的分析[J]. 建筑结构, 2021, (6): 1831-1835.

[11] 余斌,李广信,吴新春. 考虑基础与地基相互作用的复合地基沉降和基础内力计算[J]. 工业建筑, 2003, 33(5): 39-42.

[12] 薛祥,宋连亮,贾亮,等. 高速公路软土路基工后沉降预测的新方法[J]. 岩土工程学报, 2011, (8): 125-130.

[13] DBJ 11—501—2009 北京地区建筑地基基础勘察设计规范(2016年版)[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

收稿日期: 2021-04-19