

基于 FLAC 3D 对桩体置换模型沉降变形的进一步探讨

殷辰鹏¹ 张怀静¹ 孙宏伟^{1,2}

(1. 北京建筑大学,北京 100044;2. 北京市建筑设计研究院有限公司,北京 100045)

【摘要】 基于 FLAC 3D 再一次对桩体置换模型进行数值分析,并与 PLAXIS 3D 模拟的沉降变形结果、结构封顶时实际沉降观测结果进行比较,进一步验证了桩体置换模型的可靠性。同时,对比 FLAC 3D 建模过程与 PLAXIS 3D 建模过程的特点和优势,为以后在实际案例建模分析前,结合工程自身特点选取岩土工程数值软件提供一定依据。

【关键词】 FLAC 3D;桩体置换模型;多桩型复合地基;数值分析

【中图分类号】 TU 44;TU 47

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.01.006

Further Study of Settlement Deformation for Pile Unit Model on FLAC 3D

Yin Chenpeng¹ Zhang Huaijing¹ Sun Hongwei^{1,2}

(1. Beijing University of Architecture, Beijing 100044, China;

2. Beijing Institute of Architectural Design Co., Ltd, Beijing 100045, China)

【Abstract】 In order to further verify the correctness of pile unit model, comparing the results of settlement deformation, which is based on the finite element analysis software FLAC 3D, with the results of PLAXIS 3D and measurement data of settlement. At the same time, by comparing the operation process of FLAC 3D and PLAXIS 3D, there are some advantages and features about the two software that can provide a basis to select appropriate numerical analysis software for future engineering.

【Key words】 FLAC 3D; pile unit model; composite foundation with different reinforcement; numerical analysis

0 引言

在多桩型复合地基的变形数值计算方法的探讨过程中,文献[1]提出了复合土层模型和桩体置换模型,并应用有限元软件 PLAXIS 3D 分别对两种模型进行建模分析,在将两模型的输出结果与实际沉降观测结果对比分析之后,发现桩土相互作用的桩体置换模型的模拟结果更加接近实际情况。为进一步验证桩土置换模型的可靠性,本文基于有限差分软件 FLAC 3D 对文献[1]中某大底盘主裙楼结构工程再一次进行沉降变形计算,并将输出结果与 PLAXIS 3D 输出结果以及沉降观测结果进行对比分析,对比结果进一步验证桩体置换模型是合理的。同时将两款软件在建模时的特点进行比较,为以后实际案例建模分析时,计算软

件的选取提供一定参考。

1 工程介绍

1.1 工程概况

本工程拟建于北京市朝阳区朝阳路北,黄衫木店路东,原星牌建材厂厂区内。地上 21~29 层,建筑高度 59.7~79.5 m,地下 2 层,根据工程地质勘察资料,场地典型地层分布见图 1 所示,①、①₂、①₃ 为填土层,其中①₃ 为以粉煤灰为主的素填土,③ 为新近沉积层,其下均为一般第四纪沉积层。本工程共测量到 3 层水位:第 1 层为滞水,静止水位埋深在 3.20~7.40 m,标高 28.67~24.82 m;第 2、3 层均为潜水,静止水位标高分别在 17.69~22.38 m 和 11.79~11.86 m,且潜水以地下径流为主要的补给与排泄方式。

作者简介:殷辰鹏,1988 年生,男,汉族,河北涿鹿人,硕士研究生,主要从事地基处理、岩土工程数值模拟等方面的研究。

E-mail:2009.yep@163.com

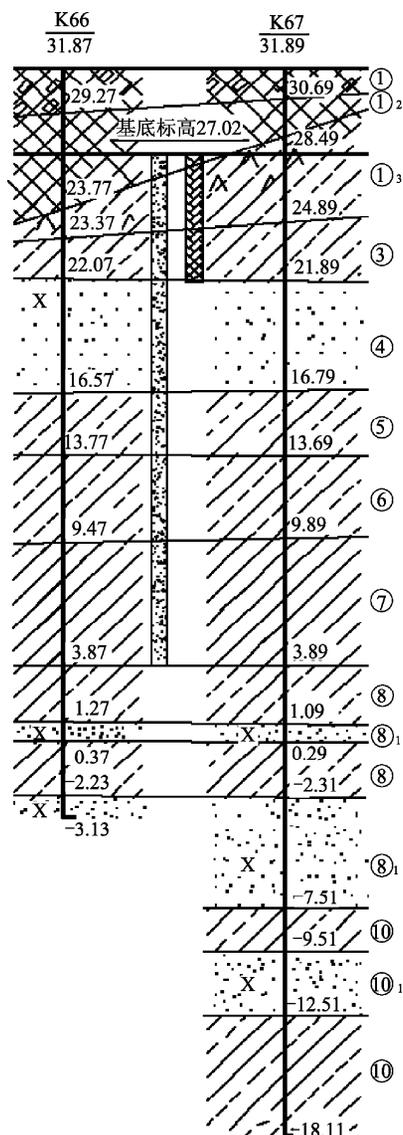


图 1 场地典型地层分布图(单位:m)

1.2 设计方案简介

根据勘察报告和现场开挖情况,可知基底以下仍存在 1~4 m 的人工填土,主要为粉煤灰,局部为粉质粘土素填土。设计要求地基承载力特征值大于等于 500 kPa,沉降小于等于 50 mm,故天然地基不满足设计要求,需进行加固处理。若采用换填处理则费用较高,最终决定采用多桩型进行加固处理。

考虑浅层填土以粉煤灰为主的特点,决定采用水泥搅拌桩进行加固处理,其中水泥土桩设计桩径为 500 mm,桩长为 5.0 m,桩端落在细砂层中,桩间距 0.8 m×0.85 m。同时,选用 CFG 桩进行沉降变形控制,桩径为 450 mm,有效桩长 23 m,桩间距 1.6 m×1.7 m,上部铺设 150 mm 厚碎石褥垫层,基础底板厚 1m。桩位布置示意图见图 2。

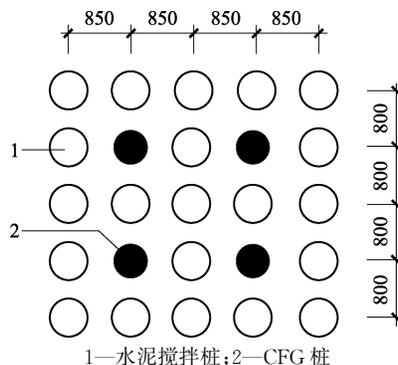


图 2 多桩型复合地基桩位布置图(单位:mm)

2 基于 FLAC 3D 的建模分析

2.1 基本假定

FLAC 3D 程序是美国 ITASCA 咨询集团公司开发的三维快速拉格朗日分析程序,该程序特别适用于分析渐进破坏失稳以及模拟大变形^[2],为使模拟结果更加接近实际情况,在建立模型前做了如下的基本假定:

1)在模拟过程中,不考虑天然地基下同一土层的各项指标随深度的变化,假设各土层为均质,各向同性体。

2)假定桩体布置关于纵横中线完全对称,且在模拟过程中考虑桩土之间的相对滑动,桩土之间设置接触面。

3)基础周围一定范围外的土和桩端一定深度的土不受影响。

4)初始应力只考虑土体的自重应力。

5)计算过程中不考虑水位的影响。

2.2 各单元参数的选取

2.2.1 土体参数的确定

FLAC 3D 提供了大量的本构模型,考虑本工程主要针对多桩型复合地基的沉降变形进行分析,故各天然土层依然采用经典的摩尔-库伦模型(Mohr-Coulomb Model),该模型的材料参数包括 6 个,即弹性体积模量 K 、粘聚力 c 、剪胀角 ψ 、内摩擦角 φ 、弹性切变模量 G 和抗拉强度 σ 。因为在 FLAC 3D 中,除正交各向异性弹性模型和横向同性弹性模型外,其他模型在弹性范围内都由两个弹性常量来进行描述,即体积模量 K 和切变模量 G ,而不用弹性模量 E 和泊松比 ν ,但它们之间存在如式(1)、式(2)的转化关系。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

根据勘察报告和上述转化关系式,将各天然土层详细参数列于表 1,对于抗拉强度 σ ,一般取较大

值,主要是防止在初始加载时就达到塑性极限,本次模拟中取抗拉强度为 $1e10$ MPa。

表 1 各土层材料参数

层号	土层名称	压缩模量 E_s /MPa	粘聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / (°)	泊松比 ν	剪胀角 ψ / (°)	切变模量 G / MPa	体积模量 K / MPa
① ₃	素填土	5.5	5	10	0.2	0	2.29	3.06
③	粉质粘土	10.5	25	10	0.3	0	4.04	8.75
④	细砂	20	0	30	0.26	8	7.94	13.89
⑤	粉质粘土	13.5	(5)	(18)	0.3	0	5.19	11.25
⑥	粉质粘土	14.5	(5)	(18)	0.3	0	5.58	12.08
⑦	重粉质粘土	9.5	(10)	(17)	0.3	0	3.65	7.92
⑧	粘性土	11	(30)	(16)	0.33	0	4.14	10.78
⑧ ₁	细砂	30	(0)	(35)	0.25	15	12.00	20.00
⑩	粘性土	13.5	(30)	(16)	0.33	0	5.08	13.24

注:1. 表中部分 c 、 φ 值根据勘察报告中直剪试验得到,其中加括号的值为勘察报告未给出,从《工程地质手册》查表获得的经验值;
2. 泊松比 ν 、剪胀角 ψ 的值均从《工程地质手册》查取;
3. 压缩模量 E_s 根据各土层有效自重压力至有效自重压力与附加压力之和的压力段来确定

2.2.2 结构单元参数的确定

对于刚度较大的 CFG 桩、水泥搅拌桩、基础底板和褥垫层,均采用较简单的本构模型,即各向同性弹性模型,该模型运行较快,只需要两个材料参数,即体积模量 K 和切变模量 G ,详细的材料参数见表 2。

表 2 结构单元材料参数

名称	弹性模量 E /MPa	ν	切变模量 G /MPa	体积模量 K /MPa
CFG 桩	28e3	0.3	10.8e3	23.3e3
水泥搅拌桩	150	0.2	62.5	83.3
基础底板	30e3	0.3	11.5e3	25e3
褥垫层	400	0.15	174	190

2.2.3 接触面单元的处理

在本工程中,由于桩体和土体的刚度相差较大,故需要在两者之间设置接触面单元。一般情况下,接触面单元必须设定法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s ,除此之外接触面单元材料参数还包括粘聚力 c_s 、内摩擦角 φ_s ,对于法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 的确定,可根据手册规定,取接触面相邻区域“最硬”土层的等

效刚度的 10 倍,即: $k_n = k_s = 10 \max \left[\left(\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right) \right]$,

其中 K 是体积模量, G 是剪切模量, Δz_{\min} 为接触面法向方向上连接区域最小尺寸,见图 3。

文献[3]对桩土界面的摩擦参数(主要是 c_s 、 φ_s) 的确定提出了两点明确建议,即:

1)对于现浇灌注桩、水泥土桩等桩土界面比较粗糙,接触面上摩擦特性较好,接触面上的 c_s 、 φ_s 值可以取与桩相邻土层的 c 、 φ 值的 0.8 倍左右,可以根据现场静载荷试验数据作适当地调整。

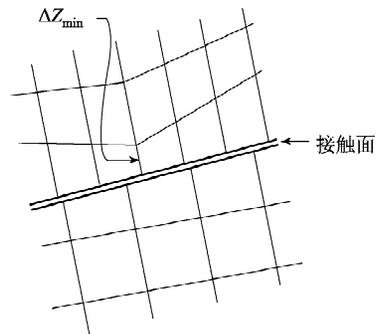


图 3 接触面法向方向上最小尺寸示意图

2)预制桩桩土接触面上的 c_s 、 φ_s 值可以取与相邻土层的 c 、 φ 值的 0.5 倍左右。

综上所述,最终得到接触面材料参数见表 3。

表 3 接触面材料参数

层号	土层名称	法向刚度 k_n / MPa	剪切刚度 k_s /MPa	c_s /kPa	φ_s / (°)
① ₃	素填土	61.1	61.1	4	8
③	粉质粘土	141.4	141.4	20	8
④	细砂	244.8	244.8	0	24
⑤	粉质粘土	181.7	181.7	4	14
⑥	粉质粘土	195.2	195.2	4	14
⑦	重粉质粘土	127.9	127.9	8	13.6
⑧	粘性土	163	163	24	13

2.3 模型的建立与分析

2.3.1 模型的建立

参考文献[4],为减小计算量,根据对称性(以整个基坑的纵、横中心线为对称轴),取整个地基的四分之一建立模型。根据地质情况和荷载的影响范

围,计算模型的大小为 50 m×22 m,其中需处理的地基尺寸为 30 m×7 m,建模时采用实体单元来模拟 CFG 桩和水泥搅拌桩。为了使桩土达到共同变形,避免桩顶处发生应力集中,故设置 150 mm 厚的褥垫层。且根据实际情况,在褥垫层上设置厚 1 m

的基础底板,以保证上部传来的荷载可以均匀分布。参考文献[1]的假定,仍然没有模拟实际的基坑开挖过程,而是通过设置初始地应力来模拟开挖后基坑周边土体应力场。具体桩位布置以及模型分别见图 4和图 5(a)(b)。

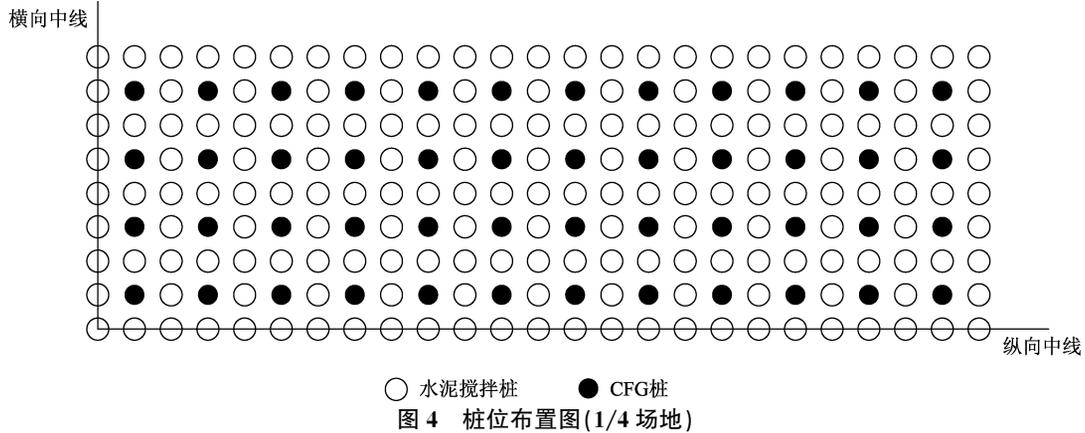


图 4 桩位布置图(1/4 场地)

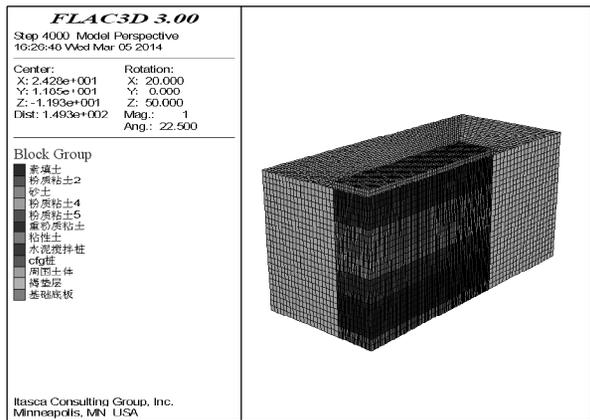


图 5(a) 划分网格后的模型

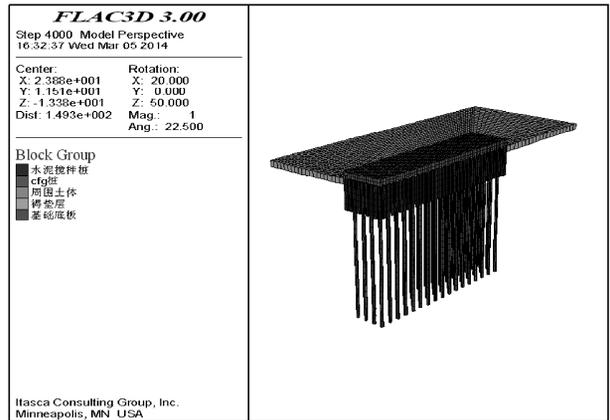


图 5(b) 桩体模型图

2.3.2 模型的验证

采用应力加载的方式,对上述模型进行分级加载,将现场静载荷试验所施加的荷载转化为平面应力,并在各级应力下计算收敛时,输出相应的沉降量,绘制相应的曲线,其中对于 $Q-s$ 曲线,需要将应力乘以桩截面积转化为桩顶荷载。将 FLAC 3D 模

拟得出的 $Q-s$ 曲线和 $P-s$ 曲线与现场静载荷试验数据作对比(见图 6 和图 7),从图中可看出,数值分析与现场实测得到相关曲线能够吻合,由此证明,该计算模型是合理的,利用 FLAC 3D 计算复合地基沉降差异是可行的。

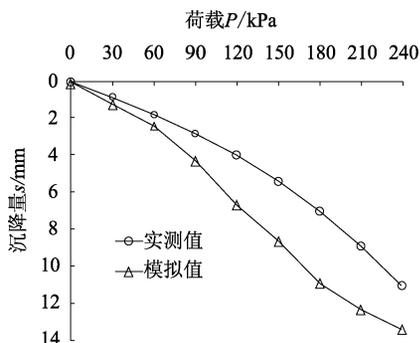


图 6 模拟和实测 $P-s$ 曲线

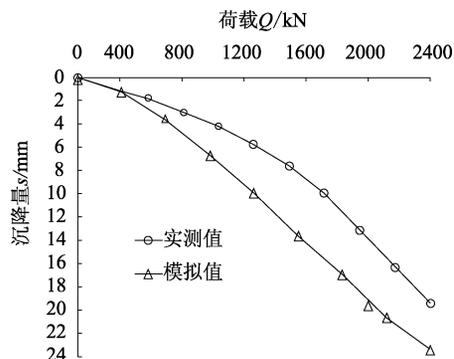


图 7 模拟和实测 $Q-s$ 曲线

2.3.3 模拟结果的输出与分析

首先,土体在重力作用下达到平衡,这一过程也就是模拟地质历史上土层沉积固结过程。然后将部分土体材料变更为桩体材料后,施加上部荷载,进行计算,最终以最大不平衡力趋于零作为收敛标准,由图 8 可知,在上部荷载作用下,该模型的计算结果基本趋于稳定。

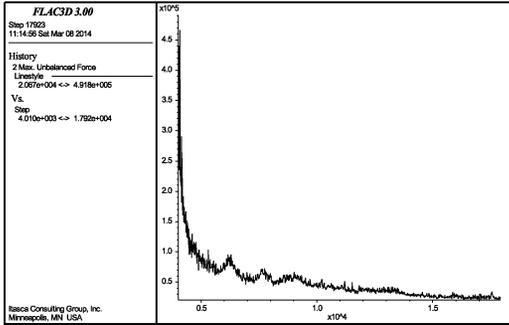


图 8 复合地基在上部荷载作用下最大不平衡力随时步演化曲线

当计算结果达到收敛后,可以通过后处理命令输出模型的位移云图、等值线图,由于本文主要评价桩体置换模型的沉降变形,故主要输出结果为 Z 方向的位移云图(见图 9 和图 10)。从图中可以看出,复合地基的最大沉降量为 49.85 mm,发生在复合地基的中心位置以及基础底板与土层接触边缘的土层中,最小值约为 40.00 mm,发生在复合地基长边方向的边缘处,且沉降值基本满足设计要求。由此可知,FLAC 3D 模拟的沉降变形值与文献[1]中 PLAXIS 3D 的模拟结果基本相似,最大沉降值出现的位置也基本相同。

为进一步探讨多桩型复合地基的沉降变形,对位移云图做切片处理,查看某一剖面的 Z 方向位移云图,取 $x=0.001$ 和 $y=0.001$ 两个最接近复合地基中心的剖面进行分析,见图 11 和图 12。从两个剖面图上可以看出,在应力加载的情况下,由于桩体刚度比桩间土刚度大,根据刚度分配原则,大部分荷载由桩体承担,故桩体先于桩间土达到最大沉降变形,即同一深度处,桩体的 Z 向位移要比桩间土的 Z 向位移大。同时也可以看出,复合地基的沉降呈层状分布,且中间沉降变形最大,向四周逐渐减小。

同时,为清楚表示复合地基基础底板的沉降变形趋势,从 FLAC 3D 中提取了基础底板沿长边方向和短边方向的位移值,并分别绘制了基础底板长边和短边的沉降变形随着距基础底板中心距离的变化曲线,见图 13 和图 14。从图中也可以看出,基础底板的沉降变形呈中间大并逐渐向四周变小的趋

势,最大位移发生在基础底板中心处。

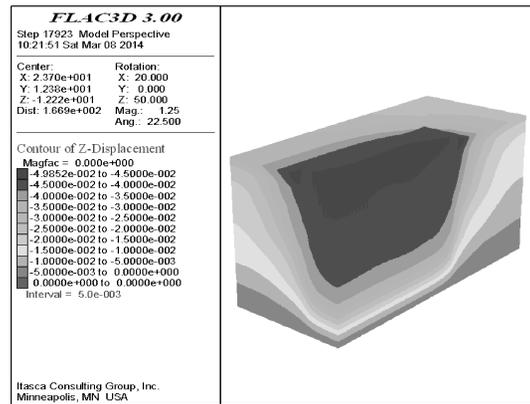


图 9 复合地基 Z 向位移图

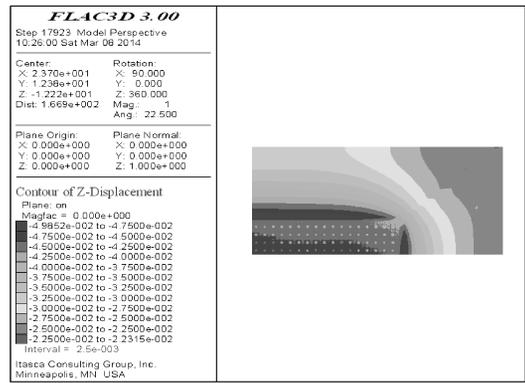


图 10 复合地基顶面 Z 向位移图

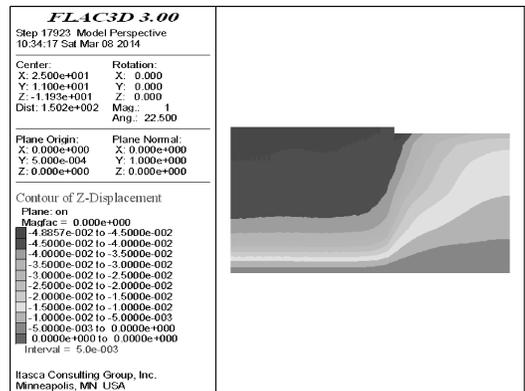


图 11 复合地基纵剖面沉降云图

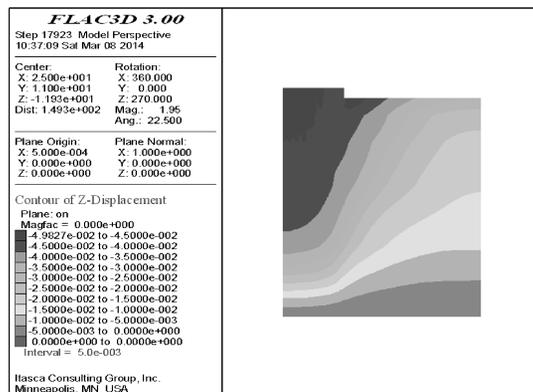


图 12 复合地基横剖面沉降云图

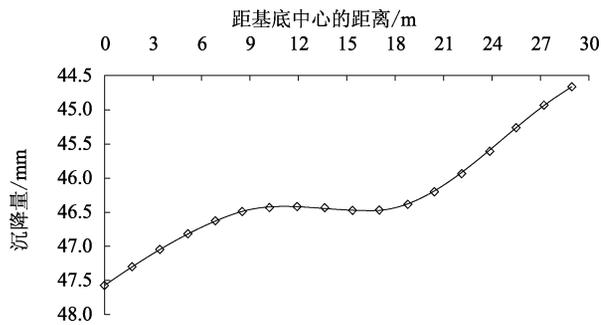


图 13 沿基础底板长边方向沉降变形曲线

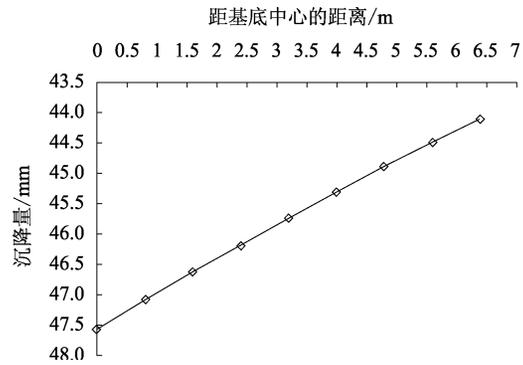


图 14 沿基础底板短边方向沉降变形曲线

2.3.4 输出结果与沉降观测的比较

为更加直观地分析比较各模拟结果的合理性,将 FLAC 3D 的模拟结果、文献[1]中 PLAXIS 3D

的输出结果以及结构封顶时实际沉降观测得到的数值进行对比分析,见表 4。

表 4 不同软件计算结果与沉降观测结果的对比

对比指标	PLAXIS 3D 输出结果(一)	FLAC 3D 输出结果(二)	沉降观测	观测值占输出结果(一) 的百分比/%	观测值占输出结果(二) 的百分比/%
最大沉降值 s_{max}/mm	47.83	49.85	34.80	72.8	69.8
最小沉降值 s_{min}/mm	30.15	40.00	20.60	68.3	51.5
平均沉降值 s/mm	40.00	44.90	27.70	69.2	61.69

根据北京地区经验,复合地基建筑物封顶时沉降量为最终沉降量的 50 %~70 %^[5],以此为参考,可见用 FLAC 3D 对桩体置换模型进行计算的结果能与实际沉降观测的结果很好吻合,从而进一步验证桩体置换模型的合理性。同时,从表 4 可知两款软件的模拟结果也较接近,且在模型建立时也有各自不同的优势和特点。

3 两款数值软件比较

在对北京某大地盘主裙楼结构工程数值分析过程中,PLAXIS 3D 和 FLAC 3D 选取相同的土体、相同的尺寸、相同的参数数据,但在建模的操作性上两款软件有各自的特点^[6]:

1)操作方式。PLAXIS 中模型的建立均采用界面操作,且各模块在同一界面中,操作较简单,但对于较复杂的模型,容易出现操作误差,建模精度有待提高。而 FLAC 中模型的建立是通过命令流实现的,且对于较复杂的模型,可通过内嵌的 FISH 语言来建立,精确度相对较高。

2)桩体单元的创建。PLAXIS 中提供了“Embedded pile”单元模拟桩体,且该单元自带了接触面单元,不需要单独建立,操作比较方便;应用 FLAC 建模时,本文采用实体单元模拟桩体,且桩土之间的接触面需要单独建立,并对其参数进行赋值,工作量相对较大。

3)网格的划分。PLAXIS 中网格的划分是自动的,可通过设置网格的疏密来确定划分单元数的多少及计算结果的准确度。FLAC 中网格是人工划分的,可以灵活地对局部重要单元进行加密处理,但为保证基本性状网格的连接,划分时通常存在一定的难度。

4)边界条件的确定。PLAXIS 中模型的边界条件是默认的,不需要单独设置。在 FLAC 中则需要通过命令流对各个边界条件分别设置。

4 结论

基于 FLAC 3D 再一次对北京某工程的多桩型复合地基进行精细建模和精确计算,并将建模特点和最终的输出结果分别与 PLAXIS 3D 的建模特点和输出结果进行对比分析,从而得出以下结论:

1)应用 FLAC 3D 计算出的沉降变形值能够与实际沉降观测值较好吻合,进一步验证了桩体置换模型是合理的。

2)FLAC 3D 与 PLAXIS 3D 模拟出的最大沉降变形值很接近,且出现最大位移的位置也基本一致。

3)两款软件在建模分析时均具有各自的特点和优势,最终的沉降变形值较接近,因此在进行实际案例建模分析时,需根据工程本身特点和软件的优势选择相应的数值计算软件。

(下转第 37 页)

构筑物施工同时进行,地基处理施工基本不占用项目工期。堆载预压联合深井降水法进行地基处理的关键在于对地下水位进行长期观测,并根据观测资料实时维持降水深度,保证深井长期降水效果。本工程实践表明,采用该方法进行地基处理可以很好地达到超载预压的目的,加速地基土的固结,有效减小工后沉降和差异沉降。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2] 龚晓南. 地基处理手册(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] 常士骝,张苏民. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [4] 李巧生,赵 钧,李坤维. 浅谈浅层软基处理新技术[J]. 机场工程,2004(4): 35-37.
- [5] 陆 新. 冲击碾压技术在填土地基处理中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(5): 990-994.
- [6] 刘 嘉,罗 彦,张功新,等. 井点降水联合强夯法加固饱和淤泥质地基的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(11): 2222-2227.
- [7] 史保华. 冲击压实技术在机场工程软基处理中的应用研究[J]. 中国公路学报,2001,14(3): 33-38.
- [8] 王可怡,陶建强. 堆载预压法在软弱地基处理中的应用[J]. 建筑技术,2011,42(2): 180-181.
- [9] 张雅丽,王志权. 塑料排水板预压法加固软基效果分析[J]. 岩土力学,2002,23(5): 654-660.
- [10] 周 健,姚 浩,贾敏才. 大面积软弱地基浅层处理技术研究[J]. 岩土力学,2005,26(10): 1085-1088.

收稿日期:2014-07-09

(上接第 27 页)

参 考 文 献

- [1] 殷辰鹏,张怀静,孙宏伟. 多桩型复合地基变形数值计算对比实例分析[J]. 岩土工程技术,2014,28(2): 64-69.
- [2] 彭文斌. FLAC 3D 实用教程[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [3] 孙书伟,林 杭,等. FLAC 3D 在岩土工程中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [4] 袁保军. 长短桩复合地基褥垫层作用影响因素数值模拟分析[D]. 四川:西南交通大学,2010.
- [5] 闫明礼,张东刚. CFG 复合地基技术及工程实践(第2版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [6] 王 媛,孙宏伟. 北京 Z15 地块超高层建筑桩筏基础的数值分析[J]. 建筑结构,2013,43(17):134-139.

收稿日期:2014-08-20