

利用工程类比法预测建筑物沉降及其分布特征

王 林^{1,2}, 杨海朋^{1,2}, 聂庆科^{1,2}

(1.河北建设勘察研究院有限公司, 石家庄 050031; 2.河北省岩土工程技术研究中心, 石家庄 050031)

摘 要: 介绍利用工程类比法预估建筑物沉降及其分布规律的数值模拟计算方法。首先建立某区域地层的标准地层体系, 然后根据建立的地层标准和标准地层划分方法将工程地层归一化为标准地层, 再利用已建工程资料反演分析得到数值模拟计算参数, 最后用得到的计算参数预估拟建工程沉降。以两个工程模拟计算结果和实际观测结果对照, 说明这种模拟计算方法预估建筑工程沉降是有效的。

关 键 词: 标准地层; 建筑沉降; 数值模拟; 桩基础

中图分类号: TU 470^{+.3}

文献标识码: A

Numerical simulation for building settlements and its distribution characteristics using engineering analogy

WANG Lin^{1,2}, YANG Hai-peng^{1,2}, NIE Qing-ke^{1,2}

(1. Hebei Research Institute of Construction & Geotechnical Investigation Co. Ltd., Shijiazhuang 050031, China;

2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: A numerical simulating method of forecasting the building settlements and its distribution characteristics using engineering analogy is introduced. A regional standard stratum system is established firstly; and then the project stratum is normalized according to the stratum standard established. The parameters for numerical simulation are obtained by inversion analysis. At last the settlements of new building can be predicted. The effectiveness of method is proved by comparing the simulation results with actual observation values in two projects.

Key words: standard stratum; building settlements; numerical simulation; pile foundation

1 引 言

建筑物沉降量和沉降分布特征是建筑设计、工程勘察和建筑物施工时关注的重点。随着高层建筑、复杂形体建筑物增多, 预估建筑物沉降和预测建筑沉降分布变得越来越困难。传统计算方法只能计算建筑物角点和中心点的沉降, 很难预测建筑物沉降分布特征。利用数值计算方法对建筑物沉降和沉降分布规律进行预测, 则能够充分利用计算机和计算理论优势, 满足工程需要。在数值模拟计算分析中, 计算模型和模型参数是计算分析的关键因素, 采用合适的数值模型及取适当的模型参数才能保证计算结果可靠有效。本文介绍的利用工程类比法预测建筑物沉降及其分布特征, 即根据临近建筑物的实际沉降观测数据, 利用数值模拟反演分析地层计

算参数, 然后用于预测新建建筑物的沉降及其分布特征。

本文以桩基础工程为例进行了反演预测。桩基础作为一种深基础是解决地基承载力不足、变形过大或变形不协调的有效方法。桩基础建筑物沉降主要是由于桩端持力层和下卧层受到上部载荷作用产生压缩变形, 基桩本身压缩和桩基加固区的变形量在总沉降中所占比例很小, 可以忽略不计。因此, 对桩基础建筑只需要关注桩端持力层和下卧层的压缩变形量以及影响因素即可^[1]。

利用工程类比法预测建筑物沉降及其分布特征, 首先要建立统一的标准地层, 也就是对区域地层状况进行综合分析基础上, 建立具有统一层序划分标准的地层体系, 然后利用统一的标准地层对已建工程地层计算参数反演分析, 求得桩端持力层及

下卧层参数,最后用得到的参数对拟建工程沉降及其分布特征进行预测。

2 标准地层建立

2.1 标准地层划分依据

根据我单位完成的《石家庄市区工程地质地层序划分标准》^[2],以区域地质、水文地质、工程地质及岩土工程勘察资料为基础,通过对地层的地质演变、地质时代、古生物、古环境、成因、岩性、工程地质特性等因素系统地分析整理,以岩土工程特性为主要依据、参照地层成因和沉积旋回规律相辅,对石家庄市建成区岩土工程地层统一划分层组和层序及编号。

2.2 标准地层划分结果

根据文献[2],对地层按时代、空间分布规律,结合岩土工程勘察“岩性、强度”分层原则,按土层工程地质特性,综合划分层组。埋藏 60 m 以上的地层规律揭示较为明显,划分为 8 个层组:其中 1~4 层组为 Q₄ 地层、5~8 层组为 Q₃ 地层。1 层组:人工填土;2 层组:新近堆积土;3 层组:黄土状粉质黏土-粉土;4 层组:一般砂土;5 层组:黏性土-粉土;6 层组:砂土-碎石土;7 层组:黏性土-粉土;8 层组:砂土-碎石土。

将各工程地层按照标准地层划分依据进行地层归一化处理,则各工程地层都处于标准地层体系大地层单元中。由于划分标准地层的主要依据是岩土工程特性,划分在同一标准地层的不同工程的地层具有相似的工程特性,包括承载力、含水量和压缩性等物理力学性质,在上部荷载和附加荷载作用下具有相似的受力变形特性,因此可以在数值模拟分析中采用相近或相同的参数进行计算。这样在参数反演分析中可以针对标准地层参数进行反演计算,减少地层数和地层参数数量,降低反演分析难度。同时,采用标准地层归一化处理有利于对各工程进行工程类比分析。不同工程地层未归一化时,每个工程都是独立唯一的,无法相互对照类比。归一化处理后的工程地层具有统一的地层划分标准和统一的地层编号顺序,同一标准地层具有相同或相近的力学性质,受荷载作用时有相似的变形特性,因此可以采用已建工程的反演分析数据对拟建工程变形特性进行模拟计算和类比分析。

3 参数反演分析

根据工程设计资料、勘察资料和沉降观测资料对工程进行数值模拟分析,反演地层计算参数和数

值模拟参数。

工程中地层一般为粉土、粉质粘土、粘土、细砂、中砂、粗砂和卵砾石土,采用通用的 Mohr-Coulomb 本构模型,计算需要的地层参数包括容重、模量、泊松比、粘聚力和内摩擦角,岩土勘察报告中已经提供容重、粘聚力和内摩擦角等参数,泊松比依靠经验取值,需要确定的主要参数是土层的模量,由于桩基础建筑物沉降主要发生在桩端持力层和下卧层中,所以反演分析的重点是确定桩端土层与其下卧层的模量计算取值,在桩长加固范围内土层取岩土勘察报告中压缩模量进行计算。

桩基础中的基桩采用计算程序中的桩单元进行模拟,计算需要参数包括容重、弹性模量、泊松比和桩径等表征基桩本身性质的参数,表征桩土相互作用的参数包括桩侧阻力参数和桩端阻力参数^[3]。基桩自身性质参数在建筑设计资料中已经提供,反演分析只需确定桩土相互作用参数,初步计算时参数设定可以依照程序计算说明确定。然后将计算结果与沉降观测资料进行对比,逐步调整参数使得模拟结果与观测结果一致或接近。

数值模拟过程首先建立地层模型,长宽范围以建筑物为基础,向四周扩大 3 倍基坑深度范围,向下计算深度根据数值计算要求确定,超过国家工程规范确定的计算深度。先建立地层的弹性平衡及初始平衡,再根据开挖工况和施工情况,分别计算开挖回弹变形和加载沉降变形,其中加载过程分为再压缩加载过程,以及产生主要变形的附加荷载加载过程,附加荷载加载过程分为几步分别施加,同时相应地改变地层模量。最后计算出建筑沉降变形和沉降分布形态。

表 1 反演分析计算参数

Table 1 Calculation parameters of inversion analysis

参 数	建议取值
6-2 中粗砂层模量	60 MPa
6-2 含卵粗砂层模量	110 MPa
6-5 中粗砂	60 MPa
桩端弹簧刚度	10^{12} N/m ²
桩侧剪切弹簧粘聚力	与桩周土有关
桩侧剪切弹簧摩擦角	与桩周土有关
桩侧正弹簧粘聚力	与桩周土有关
桩侧正弹簧刚度	与桩周土有关
桩侧正弹簧摩擦角	与桩周土有关
桩侧剪切弹簧刚度	与桩周土有关

根据反复计算结果,得到一些地层参数和桩单

元计算参数如表 1，表中列出了桩端地层和下卧层计算用模量取值，同时也列出了桩单元参数建议计算取值。

4 工程实例

介绍两个地层情况相似、桩端持力层相似工程的模拟结果，并与实测结果进行对比，验证方法可行性。工程 1 位于石家庄市内一环东南部，工程 2 位于石家庄市内二环中北部，两个工程桩端持力层和下卧层相同，在标准地层分层中属于同一地层单元，所以采用了相同的计算模量。

4.1 工程 1 模拟计算情况

工程 1 位于市内中心地段，周围环境复杂，建筑地上为 26 层，地下室 2 层，建筑主体高 74 m，局部最大高度达到 80.8 m，为剪力墙结构，基坑开挖深度 8 m，设计基础为钻孔灌注桩，桩长 18.1 m，桩径 0.8 m。桩端持力层为中粗砂，承载力特征值为 280 kPa，地下水位在 35.4 m 以下，可以不考虑地下水对基础作用^[4]。

根据该工程岩土工程勘察资料，工程影响范围内地层状况为：①层杂填土，上部建筑垃圾为主，下部粉黏土为主，层厚 1.0~2.1 m；②层粉质黏土，新近沉积，可塑状态，层厚 0.7~2.5 m；③层黄土状粉土，局部夹粉黏，底部见砂，层厚 4.7~6.9 m；④层中细砂，顶部含粉土，下部纯净，水平层理，层厚 2.3~5.6 m；⑤-1 层粉黏，可塑状态，层厚 0.6~3.1 m；⑤-2 粉黏，软塑-流塑状态，层厚 1.1~3.8 m；⑤-3 粉土，欠固结，层厚 0~3.6 m；⑥层细中砂，中密，纯净，层厚 1.3~4.6 m；⑦层中粗砂，中密，纯净，分选性磨圆度差，层厚 2.0~5.5 m；⑧层含卵砾粗砂，中密-密实，局部钙质胶结，层厚 3.1~5.4 m；⑨层中粗砂，密实，局部夹粉质黏土透镜体，最大可见厚度 17.1 m。按照标准地层划分方法，其各地层对应标准地层情况如表 2 所示。

表 2 工程 1 地层与标准地层对照表
Table 2 Comparison of project 1 stratum and standard stratum

工程 1 地层	对应标准地层	工程 1 地层	对应标准地层
1 杂填土	1	5-3 粉土	5-2
2 粉质粘土	2	6 细中砂	6-1
3 黄土状粉土	3-2	7 中粗砂	6-2
4 中细砂	4-2	8 含卵砾粗砂	6-2
5-1 粉粘	5-1	9 中粗砂	6-5
5-2 粉粘	5-1		

按照与反演分析中同样的数值模拟过程，利用

反演分析得到的地层计算参数及桩单元计算参数，对工程 1 进行数值模拟，得到建筑物沉降云图 1(a) 和沉降等值线图 1(b)。

由图可见，模拟计算最大沉降发生在建筑物中心靠右侧部位，沉降量为 3.88 cm。沉降曲线和沉降云图都表明沉降在建筑物右侧明显，最大沉降偏离中心。对照实际观测结果，图 1(c)所示，最大沉降和沉降中心也都是偏右侧，最大沉降量为 3.138 cm。模拟计算结果与实际观测结果比较接近，在可以接受的范围以内，可以说模拟效果较好。

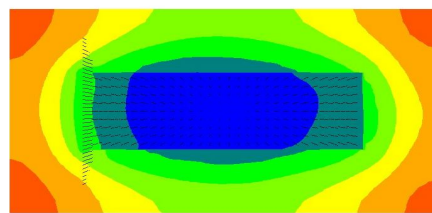


图 1(a) 建筑沉降云图

Fig.1(a) Nephogram of building settlements

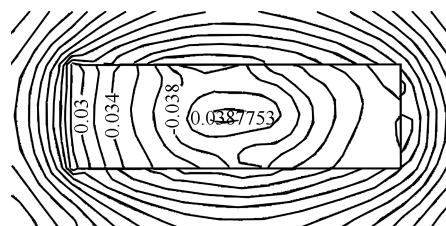


图 1(b) 建筑沉降等值线图

Fig.1(b) Isolines of building settlements

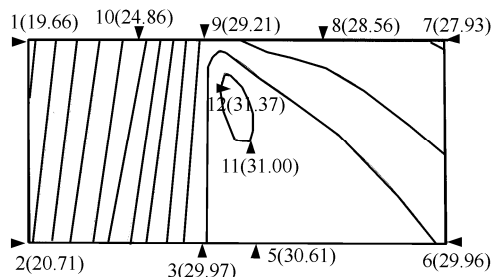


图 1(c) 实测建筑沉降等值线图

Fig.1(c) Measured isolines of building settlements

4.2 工程 2 模拟计算情况

工程 2 位于市内中心地带，周围环境复杂，该建筑主楼 1 地上 21 层，主楼 2 地上 27 层，建筑裙楼 4 层，地下 2 层，主楼为框架剪力墙结构，裙楼为框架结构，设计基础为人工挖孔扩底灌注桩基础，设计桩长 16.55 m，扩底墩直径为 1.5~2 m，扩大部分直径 2.8~3.8 m，墩底在中砂层上，设计单桩

最大荷载力 14 326 kN, 地下水位 40 m 以下, 不考虑地下水对基础的影响^[5]。

根据该工程岩土工程勘察资料, 工程影响范围内地层状况为: ①层杂填土, 主要以建筑垃圾为主, 层厚 0.4~2.6 m; ②层黄土状粉质黏土, 新近沉积, 可塑-硬塑状态, 分布不均, 局部可见, 层厚 0.6~2.6 m, 中压缩性; ③层黄土状粉土, 局部夹粉黏、粉砂、中砂, 层厚 2.4~7.4 m, 中压缩性; ④层中砂, 砂质均匀, 分选好, 层厚 3.2~6.7 m; ⑤层粉质黏土, 土质不均匀, 含零星姜石, 可塑-硬塑, 层厚 3~7.7 m; ⑥层粉土, 土质均匀, 层厚 0.3~5.6 m, 中压缩性土; ⑦层中砂, 中密, 分选一般, 砂质不均匀, 偶见小卵石, 层厚 2.2~8.8 m; ⑧层含卵中砂, 分选差, 卵石含量不均, 密实, 揭露厚度大于 5 m; ⑨层粉土, 土质不均匀, 揭露层厚大于 7.2 m, ⑩层卵石, 密实, 泥质胶结, 最大揭露层厚 3.5 m。按照标准层划分归一化方法, 其各地层对应标准土层情况如表 3 所示。

表 3 工程 2 地层与标准地层对照表
Table 3 Comparison of project 2 stratum and standard stratum

工程 2 地层	对应标准地层	工程 2 地层	对应标准地层
1 杂填土	1	6 粉土	5-2
2 黄土状粉质粘土	3-1	7 中砂	6-1
3 黄土状粉土	3-2	8 含卵中砂	6-2
4 中砂	4-2	9 粉土	7-2
5 粉质粘土	5-1	10 卵石	8-1

按照土受力变化和程序计算要求的分析过程进行数值模拟, 图 2(a)为建筑沉降云图, 能够看出沉降分布特征为沉降中心及逐渐减少的向外扩展图, 图 2(b)为主楼沉降等值线图, 可以看出沉降有明显的沉降中心, 并且向外逐步扩展, 最大沉降为 4.54 cm; 图 2(c)为实测主楼沉降等值线图, 等值线形态也为沉降中心, 然后逐步向外扩展。

对比图 2(b)、(c)可见, 模拟计算得到的等值线图与实测等值线图的形态很接近, 说明模拟计算预测的沉降分布规律比较可靠。

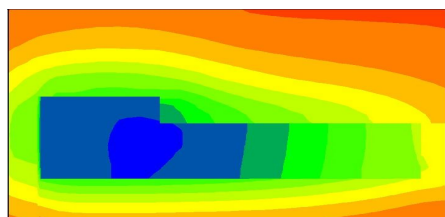


图 2(a) 建筑沉降云图
Fig.2(a) Nephogram of building settlements

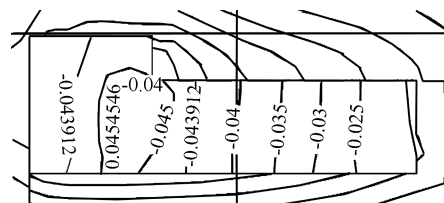


图 2(b) 主楼沉降等值线图
Fig.2(b) Isolines of building settlements

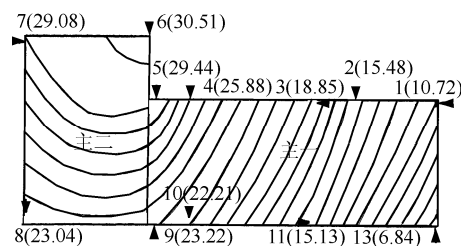


图 2(c) 实测主楼沉降等值线图
Fig.2(c) Measured isolines of building settlements

5 结 论

(1) 得到利用工程类比法预估新建建筑物沉降及其分布特征的数值计算方法, 即先建立区域标准地层体系, 再将工程地层归一化为标准地层, 用反演分析得到的地层参数和计算参数进行数值模拟, 预测建筑物沉降及沉降分布规律。

(2) 得到了模拟分析建筑物沉降用地层模量计算取值和利用桩单元模拟桩基础时计算参数取值。

(3) 当新建桩基础工程与以上工程地层情况相近, 主要持力层相似或相同时, 可以采用文中介绍的方法和推荐的计算模量进行数值模拟预估建筑物沉降。

(4) 不足: 桩基加固区域地层性质没有进行仔细研究, 土层性质对桩侧摩阻力参数设定的影响没有仔细分类。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. JGJ 94-2008《建筑桩基技术规范》. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 河北建设勘察研究院有限公司. 石家庄市工程地质地层层序划分标准[R]. 石家庄: 河北建设勘察研究院有限公司, 2004.
- [3] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [4] 河北建设勘察研究院有限公司. 石家庄市第三医院高层住宅楼沉降观测[R]. 石家庄: 河北建设勘察研究院有限公司, 2003.
- [5] 河北建设勘察研究院有限公司. 河北威远世纪广场沉降观测[R]. 石家庄: 河北建设勘察研究院有限公司, 2003.