

抽水和建筑荷载双重作用下的地面沉降模型

赵 慧¹, 钱 会¹, 李 渊², 彭建兵³

(1 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 西安阎良国家航空产业基地管委会, 陕西 西安 710089; 3 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 依据含水层质量守恒原理, 推导了非固结地层在建筑荷载作用下的地面沉降机理模型, 并将其与 Jacob 假定下抽水引起的地面沉降弹性模型相比较, 结果发现两种模型的机理表达式完全一致, 仅区别于水动力原因或实质的不同。在同一坐标系中, 根据线性叠加原理, 抽水沉降漏斗和荷载沉降漏斗可能都落在地下水位降落漏斗内。假定两者为相互独立事件, 给出了抽水和建筑荷载双重作用下的地面沉降模型, 表明其如果以水位降深为制约因子, 则可以对水动力实质完全不同的两种沉降过程进行线性叠加计算。

关键词: 质量守恒原理; 建筑荷载; 抽水; 双重作用; 叠加原理; 沉降模型

中图分类号: P642.26; X143.69; P641.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)01-0057-03

Land Subsidence Model under Dual Effects of Groundwater Pumping and Construction Loading

ZHAO Hui¹, QIAN Hui¹, LI Yuan², PENG Jian-bing³

(1 School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Board of Management, Xi'an Yanliang National Aviation Hi-Tech Industrial Base, Xi'an 710089, Shaanxi, China; 3 School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract Based on conservation of mass, this paper deduced a theoretical model for land subsidence caused by construction loading on unconsolidated strata, and compared it with the elastic model for subsidence controlled by groundwater pumping. The results show that the mechanism expressions of two models are accordant, but their hydrodynamic essences are different, that is the former is caused by dissipation of pore water pressure, and the later is for the sake of draw down. Calculation model for subsidence under the dual effects of pumping and loading is given according to superposition principle. Taking draw down as main factor, two subsidence processes with different hydrodynamic essences can be overlaid effectively.

Key words: conservation of mass; construction loading; groundwater pumping; dual effects; superposition principle; model for subsidence

0 引言

随着城市建筑的高层化和密集化, 建筑荷载应力引起的应变场和抽水附加应力引起的应变场相互叠加, 致使区域地面沉降愈来愈严重, 这不但影响了城市建筑的正常运营, 而且加剧了城市地面沉降^[1-4]。龚士良等认为, 在上海, 高群体建筑引起的

地面沉降占总沉降量的30%左右, 且沉降速度与建筑面积增长速度之间存在线性相关关系^[5-6]。

单体建筑荷载引起的地基形变, 通常表现为浅部和局部形变, 历时相对较短, 其危害性主要表现在对建筑物本身稳定性的影响上。对此, 传统土力学研究中已有详细阐述。而高群体建筑荷载引起的地面沉降, 主要表现为相邻建筑的单体地基变形

收稿日期: 2007-10-20

基金项目: 中国地质调查局项目(200411300025); 国家自然科学基金项目(40534021)

作者简介: 赵 慧(1976-), 女, 陕西扶风人, 博士研究生, 从事环境水文地质研究。E-mail: zhaohuixa@163.com

©1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的相互影响、相互叠加,并在一定地质条件下,与抽水地面沉降相互作用,形成大面积、区域性的新型地面沉降,具有渐进、累积和不可恢复的特点^[7]。

对于这一新型地面沉降的解释,不仅传统土力学理论具有明显的局限性,而且普遍建立在 Jacob 假定^[8]下,以水头为因变量的非稳定流基本微分方程的可操作性也明显受限。笔者旨在探索性研究抽水和建筑荷载双重作用下的地面沉降模型,以期能对城市地面沉降研究提供帮助。

1 Jacob 假定下的地面沉降弹性模型

Donald Helm 以微分方程形式给出了用非固结含水层的颗粒位移速度及地下水流速表达的含水层形变的质量连续性方程^[9]。忽略介质颗粒本身和水的压缩性时,冉兴龙^[10]在 Jacob 假定条件下通过该方程与孔隙水流连续性方程的耦合给出了抽水地面沉降弹性模型

$$s = S^* \Delta H \quad (1)$$

式中: $S^* = S_s^* b$ 为骨架弹性释水系数(表示孔隙水头降低一个单位时,从单位体积多孔介质中释放的体积水量); ΔH 为含水层平均水头降深。

式(1)表明,在 Jacob 假定条件下,忽略孔隙水压缩性时,骨架弹性释水系数可视为常数,则地面沉降与地下水头降深之间具有线性相关关系。

2 建筑荷载作用下的地面沉降模型

依据土力学理论,荷载堆积引起的地面沉降是与孔隙水压力消散相联系的压密固结,也是渗透固结作用的结果。对任一含水土体而言,若假设介质骨架颗粒本身不可压缩,则当上覆荷载瞬时增加时,多孔介质骨架和孔隙水将共同承担来源于上覆荷载的附加应力^[11]。

从含水层中任取一微分六面体单元,设其在铅直方向所受应力处于自然平衡状态,则有

$$\sigma = \sigma' + p_0 \quad (2)$$

式中: σ 为垂向总应力; σ' 为骨架有效应力; p_0 为孔隙水压力。若某一时刻单元体受到上覆荷载附加应力 $d\sigma$ 作用时,则上述 3 种应力将积极响应这一动态平衡过程(图 1)。

通常用孔隙水压力参数来描述孔隙水压力对上覆荷载附加应力的分担程度,即

$$B = dp/d\sigma \quad (3)$$

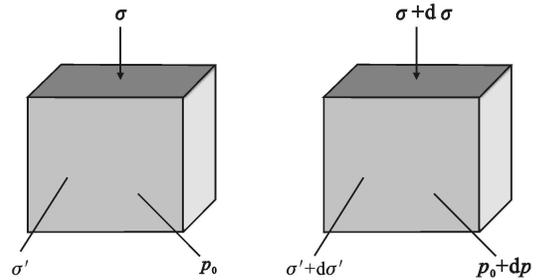


图 1 瞬时荷载作用下的动态平衡过程

Fig. 1 Dynamic Equilibrium Process Under the Instantaneous Loading

式中: B 为孔隙水压力参数; dp 为孔隙水压力增量; $d\sigma$ 为荷载附加应力^[12]。

对饱和多孔介质单元体而言,若骨架颗粒本身不可压缩,则骨架压缩系数 α 和孔隙水的压缩系数 β 可分别表示为

$$\alpha = - (1/V) (dV/d\sigma') \quad (4)$$

$$\beta = - (1/V_w) (dV_w/dp) \quad (5)$$

这里, $V = V_s + V_w$, 则可用多孔介质孔隙率 n 表示

$$n = V_w/V \quad (6)$$

式中: V 为单元体的总体积; V_s 为骨架颗粒体积; V_w 为孔隙水体积^[13]。

根据含水层的质量守恒原理可知,有效应力增加引起的介质骨架体积变化 ΔV 与孔隙水压力变化引起的孔隙体积变化 ΔV_w 是相等的,因此,联立式(3)~(6),可将孔隙水压力参数 B 用含水层变形参数描述为

$$B = dp/d\sigma = \alpha/(\alpha + n\beta) \quad (7)$$

若将式(7)应用于整个饱水系统,则式(7)变为

$$\alpha \Delta \sigma = (\alpha + n\beta) \Delta p \quad (8)$$

据压力水头的定义式 $\Delta H = \Delta p/\rho_w g$ 有

$$\Delta p = \rho_w g \Delta H \quad (9)$$

联立式(8)~(9),则可得到地下水位对荷载附加应力的响应机理表达式

$$\Delta \sigma = \{[\rho_w g(\alpha + n\beta)]/\alpha\} \Delta H \quad (10)$$

对于均质各向同性的饱水介质而言,骨架压缩系数、孔隙水的体积压缩系数以及孔隙度都可视为常数,则荷载附加应力与地下水位变化之间存在正比例关系,且正比例系数为

$$K = [\rho_w g(\alpha + n\beta)]/\alpha$$

通常在高压缩性多孔介质体系中,与介质骨架压缩系数相比,孔隙水的压缩系数极小,可忽略不计,则式(10)可变为

$$\Delta\sigma = \rho_w g \Delta H \quad (11)$$

根据土力学理论, 地层形变还可表示为

$$s = (b/E)\Delta\sigma \quad (12)$$

式中: s 为地层形变; $E = 1/(1-n)\alpha$ 为多孔介质骨架弹性模量(不考虑介质颗粒本身及孔隙水的压缩性); b 为含水层厚度。

联立式(11)~(12)可得

$$s = (b/E)\rho_w g \Delta H = \rho_w g(1-n)\alpha b \Delta H \quad (13)$$

令 $S_s^* = \rho_w g(1-n)\alpha$, 则式(13)变为

$$s = S_s^* b \Delta H = S^* \Delta H \quad (14)$$

式中: S_s^* 为含水层的骨架弹性释水率, 其大小与含水层的总弹性释水率 $S_s = \rho_w g[(1-n)\alpha + n\beta]$ 基本相等, 亦即 $S_s \approx S_s^*$ 。式(14)为建筑荷载堆积作用下非固结地层发生地面沉降的机理模型, 它表明, 建筑荷载引起的地面沉降与水头降深之间同样具有线性相关关系。

比较式(1)和式(14)发现, 两种模型的机理表达式是完全一致的, 仅区别于水动力原因或实质的不同。对式(1)而言, 抽水引起的地下水头降深是地面沉降发生的水动力原因; 而对式(14), 孔隙水压力的消散则是地面沉降发生的本质所在^[14]。

3 建筑荷载和抽水双重作用下的地面沉降模型

若视荷载沉降和抽水沉降为两个相互独立事件, 并假定饱和多孔介质均质各向同性, 则

$$\begin{cases} s_1 = S_s^* b \Delta H_1 \\ s_2 = S_s^* b \Delta H_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: ΔH_1 、 ΔH_2 分别为抽水和荷载堆积行为影响下的地下水位响应值。图 2 为抽水和荷载堆积作用下的地层变形曲线。

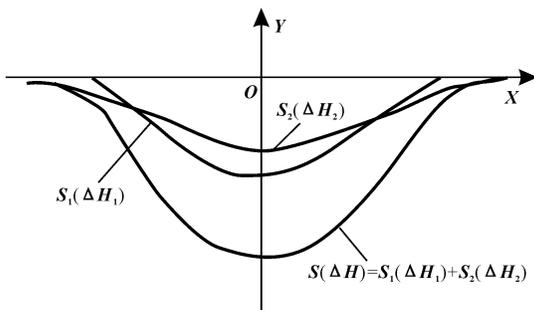


图 2 抽水和建筑荷载双重作用下的地层变形曲线

Fig. 2 Curves for Deformation under the Dual Effects from Pumping and Loading

根据图 2 可知, 在同一坐标系中, 抽水引起的地面沉降漏斗和建筑荷载引起的沉降漏斗可能都落在地下水位降落漏斗范围之内, 则地层总形变应为这两种因素在同一坐标系下所产生的两种结果的线性叠加^[15-16], 即

$$s = S^* (\Delta H_1 + \Delta H_2) \quad (16)$$

对地表某一点来说, 地面沉降就等于地表以下所有含水层(共 m 个)的垂向压缩量的叠加, 即

$$s = \sum_{i=1}^m s_i = \sum_{i=1}^m S_i^* (\Delta H_1 + \Delta H_2)_i \quad (17)$$

式中: $S^* = \sum_{i=1}^m S_i^* b_i$ 为 m 层的综合骨架弹性释水系数。式(17)为抽水和建筑荷载双重作用下的地面沉降计算模型。它表明, 如果以水位降深为地面沉降的制约因子, 则可以对水动力实质完全不同的两种沉降过程进行线性叠加计算。

4 结语

(1) 依据含水层质量守恒理论, 推导了非固结地层在建筑荷载堆积作用下的地面沉降机理模型, 结果表明, 若含水层的骨架弹性释水系数为常数, 则地面沉降与地下水头降深之间具有线性相关关系。

(2) 比较荷载沉降模型和抽水沉降模型发现: 两种模型的机理表达式完全一致, 仅区别于水动力原因或实质的不同。前者为孔隙水压力消散所致, 后者则为地下水位降深所致。

(3) 依据线性叠加原理, 给出了抽水和建筑荷载双重作用下的地面沉降计算模型。结果表明, 如果以水位降深为地面沉降的制约因子, 则可以对水动力实质完全不同的两种沉降过程进行线性叠加计算。

(4) 荷载沉降与抽水沉降并非完全独立事件或过程, 而是通过相互叠加、相互作用, 共同致力于城市地面沉降。由于建筑荷载作用下的地面沉降处于探索性研究阶段, 所以视两者为相互独立事件的模型研究具有一定的合理性, 但进一步的研究工作应以建立两者的耦合模型为主。

(5) 抽水与建筑荷载双重作用下的地面沉降模型属于探索性研究成果, 需要相应的实例研究来证实。但在城市地面沉降研究中, 针对荷载沉降的定量研究甚少。目前, 笔者尽力搜集同一时期、同一区域的水位降深、建筑物荷重和地面沉降等监测数据及资料, 以期能对此问题进行更深入地研究。

(下转第 68 页)

过神经网络的学习功能迅速获得指标因素与评判目标关系的规则知识,网络结构清晰,每层均有明确的物理意义。在网络训练过程中通过对不同参数选用不同的学习速率以及学习速率渐小的方法,使网络迅速收敛达到期望值。此外,模型还具有极强的自适应能力,当条件变化或样本增多时,可在新条件下重新训练网络以进一步提高模型效率,达到较好地评价效果。

参考文献:

- [1] 陈国兴. 对我国六种抗震设计规范中液化判别规定的综述和建议[J]. 南京建筑工程学院学报, 1995, 33(2): 54-61.
- [2] 陈文化, 孙巨平, 徐 兵. 砂土地震液化的研究现状及发展趋势[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 15(1): 31-40.

- [3] 谢定义. 饱和砂土液化的若干问题[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 90-98.
- [4] 刘 颖, 谢君斐. 砂土震动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- [5] 刘恢先. 唐山大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
- [6] 闻 新, 周 露, 王丹力, 等. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 科学技术出版社, 2002.
- [7] 王士同. 神经模糊系统及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [8] 刘勇健, 刘义健. 人工神经网络在砂土液化评价中的应用[J]. 勘察科学技术, 1999(1): 3-7.
- [9] 徐起浩, 左开挺, 吴名彬, 等. 1997 年 9 月 3 日水 4.4 级地震影响场与构造背景[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 135-142.

(上接第 59 页)

参考文献:

- [1] 吴 琳, 李天文. 基于 GIS 的沉降监测数据分析及其三维模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 67-70.
- [2] 郑铄鑫, 武 强, 侯艳声, 等. 关于城市地面沉降研究的几个前沿问题[J]. 地球学报, 2002, 23(3): 279-282.
- [3] 刘 毅. 地面沉降研究的新进展与面临的新问题[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 273-278.
- [4] 李日云, 王 利, 张双成. 灰色预测模型在高层建筑物沉降预测中的应用研究[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(1): 84-87.
- [5] 龚士良. 上海城市建设对地面沉降的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(2): 108-111.
- [6] 严学新, 沈国平. 上海城区建筑密度与地面沉降关系分析[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(6): 21-25.
- [7] 吴 恒, 张信贵, 代志宏, 等. 城市建设的附加应力与地质极限问题研究[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 6-11.
- [8] Jacob C E. On the Flow of Water in an Elastic Artesian Aquifer[J]. EOS Trans Am Geophys Union, 1940, 21: 574-586.

- [9] Helm D C. Three-Dimensional Consolidation Theory in Terms of the Velocity of Solids[J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 369-392.
- [10] 冉兴龙. 储水层质量守恒方程的简化及其在垂向弹性形变假定下与水流方程的耦合[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(4): 55-59.
- [11] 刘成宇. 土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [12] 张昭栋, 刘庆国, 耿 杰. 由承压井水动态反演水并含水层的应力变化[J]. 华南地震, 1999, 19(1): 38-40.
- [13] 郭东屏, 宋焱勋, 钱 会, 等. 地下水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- [14] 赵 慧. 地面沉降的人为主控因素研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [15] 刘宝琛, 阳军生, 张家生. 露天开挖及疏水引起的地面沉降及变形[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 39-42.
- [16] 成 枢. 地面沉降变形预计模型与监测技术研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2005.