

地基沉降计算方法应用综述

易应民

同济大学土木工程学院地下建筑与工程系 上海 200092

【摘要】：地基沉降是指建筑物或其他结构物在自身重量及使用过程中承受的外部荷载作用下，地基土层发生压缩，导致地基表面下沉的现象，是工程实践中重点关注的问题之一。本文主要综述地基沉降计算的方法和国内外的地基沉降计算方法最新进展。涉及到的计算方法有弹性理论计算、分层总和法、有限元法、经验公式法等。每种计算方法都有其适用范围和局限性，在实际应用中需要根据具体的工程条件、地质情况、可用数据和精度要求来选择合适的计算方法。随着计算机技术的发展，数值方法尤其是有限元方法在地基沉降计算中的应用越来越广泛，它们可以提供更为精确和全面的预测结果。

【关键词】：地基沉降；弹性理论算法；分层总和法；经验公式法；有限元方法

DOI:10.12417/2811-0536.26.04.018

1 技术起源与发展历程

地基沉降计算源于人类对建筑安全与稳定的持续追求，以及对土体力学特性认识的逐步深入。随着建筑向更高、更复杂发展，对地基性能的要求日益提高，土力学理论的发展为此提供了关键支撑^[1-2]。

地基沉降计算理论经历了从静力学假设到数值化仿真的关键发展。早期方法基于静力学与材料压缩性原理，随后弹性理论引入土体模量参数，实现了对土层变形的初步预测。20世纪中叶分层总和法^[3-4]的提出标志重要进步，该方法通过分层计算并累加土层压缩量，显著提升了沉降预测的准确性。随着计算力学发展，有限元等数值方法^[5]为沉降分析带来革命性突破。其能够模拟土体非线性、各向异性及复杂边界条件，实现对多种荷载组合下地基长期沉降行为的精细化预测，推动沉降计算从经验估算向科学仿真演进。

随着对土体力学特性认识的不断深化和计算技术的发展，地基沉降计算将更加科学、准确和高效，为工程建设提供更有力的支撑^[6-7]。

2 关键理论与关键技术

本文的关键方法包括解析方法、数值方法和经验方法。

2.1 弹性理论法

弹性理论法^[8]具备理论严密、计算简便的特点，适用于均质土层中的桩基分析，是分析单桩沉降的重要方法之一。它基于土体为均质、连续、各向同性的线性弹性体这一假设，利用半无限空间体的位移解，通过弹性理论计算桩周土体在荷载作用下的位移，进而求得桩的沉降。

一般认为，弹性理论法最早是由 Poulos^[9]提出的。经典的弹性理论法计算模型如下。

$$S_{sij} = A \cdot \frac{d}{E_s} I_{ij} \tau_j$$

式中： I_{ij} ——单元处单位剪应力对单元处所产生的垂直位移量。这是每一块土体单元的沉降量，积分后得到总体的函数公式如下：

$$\{S_s\} = \frac{d}{E_s} [I_s]\{\tau\}$$

式中： S_s ——土位移矢量； τ ——桩周应力矢量； I_s ——土位移因数的 $n+1$ 阶方阵。

实际应用中，弹性理论法能够较为准确地预测单桩在工作荷载下的沉降量，尤其适用于桩土界面未发生相对滑移的情况。然而，该方法也存在一些局限性，例如它过高估计了桩与土之间的相互作用，没有考虑桩土间的相对滑移，这可能导致沉降计算结果偏大。

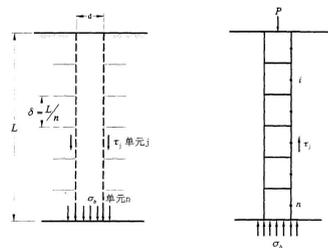


图1 桩周土和桩中土的应力分布

2.2 分层总和法

分层总和法^[10]是一种广泛应用于软土地基沉降计算的半理论半经验方法。该方法通过将地基土层划分为多个薄层，计算每个土层在荷载作用下的压缩变形量，再将这些变形量累加以得到总沉降值。在软土地基中，由于土层压缩性变异性大，分层总和法允许根据土层的实际压缩模量进行分层计算，从而更准确地预测沉降行为。目前，我国地基沉降计算应用最广泛的为《国标建筑地基设计规范例》^[11]的沉降计算公式，具体公式^[11]如下：

$$\left\{ \begin{aligned} S &= \Psi_s S' = \Psi_s \sum_{i=1}^n \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1}) \\ E_s &= \frac{\sum A_i + A_j}{\sum \frac{A_i}{E_{spi}} + \sum \frac{A_j}{E_{sj}}} \\ A_i &= z_i \bar{a}_i - z_{i-1} \bar{a}_{i-1} \\ A_j &= z_j \bar{a}_j - z_{j-1} \bar{a}_{j-1} \end{aligned} \right.$$

式中：

S——为地基沉降值；S'——为按分层总和法计算出的地基变形量； Ψ_s ——为沉降计算经验系数； E_{spi} ——为基础底面下第*i*层加固土的压缩模量； E_{sj} ——为加固土层下第*j*层土的压缩模量； E_s ——为计算深度范围内压缩模量的当量值； A_i ——为加固土层第*i*层加固土附加应力系数沿土层厚度的积分值； A_j ——为加固土层下第*j*层土附加应力系数沿土层厚度的积分值； z_i ——为基础底面至第*i*层土底面的距离； \bar{a}_i ——为基础地面计算点至第层地面范围内的平均附加应力系数；参数的具体意义可以参考图2。

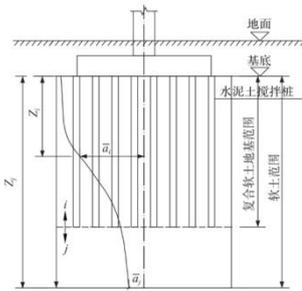


图2 水泥搅拌桩复合软土地基沉降分层计算参数表示图

然而，该方法也存在一些局限性，如对压缩模量的准确测定要求较高，且在计算过程中通常需要引入沉降经验系数以考虑侧向变形等因素，这些系数的选取往往依赖于地区经验和实测数据^[12]。

2.3 经验公式法

经验公式法^[13]基于大量实测数据和工程经验，通过建立沉降量与时间、荷载等变量之间的数学模型来预测沉降发展。该方法的优势在于不需要复杂的理论推导，计算过程简便快捷，适用于初步设计和施工监控。

宰金珉、梅国雄^[4]在研究地基沉降-时间规律时发现全过程沉降量与时间关系包含两个方面内容：其一是初始沉降不为零；其二是沉降-时间曲线呈现“S”形。加载过程地基沉降的发展可分为4个阶段：发生阶段、发展阶段、成熟段和到达极限阶段。这与 Logistic 模型所反映的实际事物产生、发展、成熟并达到一定极限的过程是一致的。

Logistic 模型，也可称之为增长曲线模型，在时间数列中其一般形式如下：

$$S_t = \frac{b_1}{1 + b_2 \cdot \exp(-b_3 t)}$$

b_1 、 b_2 、 b_3 为待定参数。

2.4 有限元法

有限元法^[15]作为一种现代数值分析方法，在地基沉降计算中发挥着重要作用。应用有限元法进行地基沉降计算时，首先需要建立土体的本构模型，描述土体在不同应力状态下的力学行为。然后，根据地质勘探和土工试验得到的数据，确定模型中的相关参数，如弹性模量、泊松比、抗剪强度等。接下来，通过有限元软件将地基模型进行网格划分，建立有限元方程，并施加相应的荷载和边界条件。通过迭代求解，可以得到每个单元的应力、应变和位移情况。

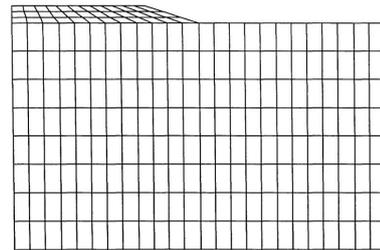


图3 计算某一地基沉降时的网格剖分用 Biot 固结^[16]方程解的有限元剖分格式如下：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{K}' \\ \mathbf{K}'^T & \bar{\mathbf{K}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{R} - \mathbf{R}_t \\ 0 \end{Bmatrix}$$

式中：

$$[\mathbf{K}] = \iint_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dx dy dz$$

$$[\mathbf{K}'] = \iint_V [\mathbf{B}]^T [\mathbf{M}] [\mathbf{N}] dx dy dz$$

$$[\bar{\mathbf{K}}] = \frac{\Delta t}{\gamma_w} \iint \left(K_s \left\{ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \right\}^T + K_y \left\{ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x} \right\}^T \right) dx dy$$

式中：

$[\mathbf{B}]$ ——为应变矩阵； $[\mathbf{M}]$ ——为形函数矩阵； $[\mathbf{R}]$ ——为节点荷载列阵； $[\mathbf{R}_t]$ ——表示平衡的部分荷载； K_s 、 K_y ——为渗透系数。

有限元法也存在一定的局限性，模型参数的确定往往需要依赖于复杂的土工试验，且参数的微小变化可能会引起计算结果的较大波动。此外，有限元法的计算过程较为繁琐，对计算资源的要求较高。随着计算机技术的发展和数值分析方法的不断完善，有限元法在地基沉降计算中的应用将更加广泛和深入。

3 发展趋势及展望

3.1 发展趋势

地基沉降计算作为地基处理中的关键环节，其未来发展将呈现多元化和高度综合化的趋势。以下是本文对地基沉降计算方法未来发展趋势的一些看法。

数值模拟技术，如有限元分析，将与现场实测数据深度融合，通过实时校准与验证，显著提升沉降预测的准确性。随着计算能力发展，多尺度建模将更全面地揭示土体的力学行为与物理特性。

智能算法与机器学习将变革传统沉降计算模式。通过分析海量工程数据，它们能高效辅助甚至自动化计算，并挖掘潜在规律。同时，计算模型将更多地纳入地下水位、气候变化等环境因素，以更全面地评估其对地基土性质的影响。未来，沉降分析将进一步向

水-热-力多场耦合的三维空间分析演进，显著提升模拟与预测的精确度。

综上所述，地基沉降计算方法的未来发展将是一个综合性、跨学科的过程，它将结合最新的科技进展，不断优化和完善，以满足工程建设中对安全、经济和环保的更高要求。

3.2 展望

在复合地基领域，刚性桩复合地基的研究虽已取得进展，但现有成果多基于单桩分析，整体系统研究亟待开展。当前沉降计算仍以分层总和法为主，其中复合模量的合理取值仍是难点，且缺乏对应力场与位移场的充分实测数据。未来应加强整体受力机理研究，发展更贴合实际的理论模型，并通过现场试验与监测积累数据，推动沉降计算方法向更科学、可靠的方向发展。

参考文献:

- [1] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[C]//中国土木工程学会土力学及岩土工程分会.中国土木工程学会第十二届全国土力学及岩土工程学术大会论文摘要集.2015.
- [2] 李保坚.刚性桩复合地基沉降分析与计算[D].太原理工大学,2011.
- [3] 马勤,张玉山.复合软土地基分层总和法沉降计算若干问题讨论[J].现代矿业,2023.
- [4] 胡君.基于分层总和法的建筑岩土工程勘察地基承载力分析[J].城市建筑,2022.
- [5] 张鹤旻,侯奎,程雍.数值模拟法在房建工程地基沉降计算中的应用研究[J].工程与建设,2025.
- [6] Zhang J,Huang L,Gao J,et al.Settlement Calculation Method of Lakeside Soft Soil Foundations Based on the Statistical Analysis of Physical and Mechanical Indexes[J].Transportation Research Record,2025.
- [7] Junjie C,Dashu G,Xiujie Z,et al.Discussion on Calculation Method of Soft Soil Foundation Settlement in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J].E3S Web of Conferences,2023.
- [8] 邹春华.单桩计算的弹性理论法及其改进[D].西南交通大学,2007.
- [9] K.J Xu,H.G Poulos.3-D elastic analysis of vertical piles subjected to“passive”loadings,[J].Computers and Geotechnics,Volume 28,Issue 5,2001,
- [10] 胡君.基于分层总和法的建筑岩土工程勘察地基承载力分析[J].城市建筑,2022.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.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,2012.
- [12] 张地,冯奇,张一品.复合地基沉降计算方法对比分析[C].2022年工业建筑学术交流会论文集,2022.
- [13] Bo P,Ruiling F,Lijian W,et al.Settlement Calculation Method for Peat Soil Foundations[J].International Journal of Geomechanics,2023.
- [14] 李洪峰.经验公式法在季冻地区软土地基沉降预测中的应用[J].东北林业大学学报,2007.
- [15] Tingyu W,Hongxu J,Lin G,et al.Predicting method on settlement of soft subgrade soil caused by traffic loading involving principal stress rotation and loading frequency[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2022.
- [16] Wang Z,Feng Y.An Integrated Graph Convolutional Network and Finite Element Analysis Model for Urban Ground Settlement Prediction[J].Journal of Circuits,Systems and Computers,2025.