

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.02.012

多场耦合视角下深基坑降水数值模拟 研究进展及模型适用性分析

汪先国

(中铁十一局集团有限公司,湖北武汉430079)

摘要: 数值模拟技术已成为深基坑降水引起周边土体渗流场、应力场变化分析的重要方法。本文在系统收集国内外深基坑降水数值模拟研究相关文献的基础上,详细综述了模拟软件差异、本构模型选取、多场耦合分析的关键技术方法。通过对摩尔-库仑模型、修正剑桥模型、硬化土模型的运算特性差异进行分析,阐述了目前针对降水问题水-土耦合的主流建模方法及边界条件设置机制,以及黏土、砂土、粉土等土体材料的扰动特性差异;归纳了解决地下水迁徙、降水漏斗形成、周边建(构)筑物扰动等不同问题的软件表现特性,提出不同特殊工况的模拟方案。指出目前关于数值模拟在反演求参、与地理信息数据库结合方面的研究成果较少,有必要对该领域广泛开展研究。

关键词: 基坑降水;数值模拟;本构模型;渗流场变化;有限元法

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)02-0089-09

Research Progress and Model Applicability Analysis of Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Dewatering from the Perspective of Multi-field Coupling

WANG Xianguo

(China Railway Eleventh Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430079, China)

Abstract: With the development and deep application of computer technology, numerical simulation technology has become an important way to analyze the changes in the surrounding soil seepage field and stress field caused by deep excavation dewatering. A detailed research progress was provided on the key technical methods for simulating software differences by selecting constitutive models and multi field coupling analysis. This work concludes the main modeling methods and boundary condition settings for water soil coupling in precipitation problems, as well as the differences in disturbance characteristics of soil materials such as clay, sand, and silt, based on the differences in computational characteristics among the Moore Coulomb model, modified Cambridge model, and hardened soil model. The differences in software performance in solving different problems such as groundwater migration, precipitation funnel formation, and disturbance of surrounding buildings, and proposed simulation schemes for different special working conditions was also summarized. Finally, it is suggested that there are relatively few research results on numerical simulation in inversion and parameter calculation, as well as its integration with geographic information databases. It is suggested to conduct extensive research in this field.

Keywords: foundation pit dewatering; numerical simulation, constitutive model; seepage field change; finite element method

基坑降水是保持基坑内部干燥状态,并为施工提供良好的工作环境的必要过程。在降水的过程

中,通过降低土中孔隙水压力,推动土体发生排水固结增加有效应力,提高土骨架抗剪强度,保证施工的

收稿日期:2024-09-18

修稿日期:2024-11-25

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51309100);河南省科技攻关项目(222102320231)

作者简介:汪先国(1987—),男,工程师,主要从事岩土工程、城市轨道交通方面的研究。E-mail:136273419@qq.com

安全进行。但降水过程中,由于地下水位下降,可能引起周围土体不均匀沉降、渗流场变化,导致支护结构失效、地面塌陷或周边建筑物受损,从而引发工程事故。早期对于基坑降水产生的影响研究主要集中于理论分析与现场试验方面,往往结合相关土工试验数据对降水扰动规律进行经验总结。常规试验只能对相关土体物理参数等进行定量分析,但由于实际工程中水文地质条件的差异性 & 现场周边环境的复杂性,无法对降水施工过程中土体分层沉降、渗流场变化、含水层越流等现象进行深入分析。相比现场试验与室内试验,数值模拟具有更高的可重复性,可以通过设置不同工况进行对比分析,进而选取最优施工方案,在成本、效率上优势突出。为深入研究深基坑降水引起的多场耦合变化,国内外学者着眼于宏观和微观尺度,采用相应数值模拟技术对基坑降水开展从单场到多场、从连续介质模型到离散模型的研究历程,推动基坑降水研究体系逐步从经验总结向科学分析转变。

本文从数值模拟在基坑降水方面的研究现状出发,聚焦不同类型的基坑降水问题,对比分析不同数值模拟方法的优缺点,归纳总结最新数值模拟技术在实际工程分析研究中的应用;并对下一步的数值模拟研究提出建议,旨在帮助学者快速、全面了解基坑降水扰动规律研究现状,推动相关数值模拟方法发展。

1 基坑降水渗流本构模型研究现状

饱含地下水的土体通常由土体粗颗粒和多种形式的水组成,降水施工会打破其内部平衡,改变相应的渗流力、土颗粒与水的黏性力、以及两相之间相对运动产生的相互作用力。因此决定土体力学特性(粘弹塑性、剪胀性、各向异性、剪胀性、摩擦性等)的本构模型是决定深基坑工程数值计算分析结果合理与否的关键因素^[1]。自 1773 年库仑(C. A. Coulomb)提出库仑屈服准则以来,学者先后提出了多种适合各种土体的本构模型。如江建红^[2]和 Teo 等^[3]将摩尔-库仑模型(Mohr-Coulomb)和硬化土模型(Hardening Soil Model 模型)应用于基坑力学特性数值分析,两种模型计算得到的围护结构变形计算值则存在较为显著的差异,建议在基坑开挖数值计算中采用考虑卸荷特性的硬化土本构模型。谢建斌等^[4]将 HS 模型用于桩锚与桩撑组合支护深基坑工程,发现 HS 模型计算结果与基坑开挖实测变形规律比较吻合。刘景锦等^[5]研究发现在综合考虑深

基坑开挖与降水等因素时,摩尔-库仑模型相比于硬化土模型及小应变硬化模型具有更好的收敛性。根据林煌超等^[6]将硬化土模型用于高原湖相沉积土层以及 Wu 等^[7]将 HS 本构模型用于美国某现场试验模拟降水效果的结果来看,发现随着实际工程的日趋复杂,对基坑降水模拟结果的精度要求也越来越高,对数值模拟本构模型的选取提出了更高的要求。目前在用的本构模型简介如下。

1.1 摩尔-库仑模型

摩尔-库仑模型(Mohr-Coulomb,简称 M-C 模型)是一种塑性本构模型^[8]。其屈服准则是一个理想弹塑性模型,主要描述岩土材料的屈服特性,其在主应力空间中的屈服面是一个不规则的六棱锥^[9],如图 1 所示。

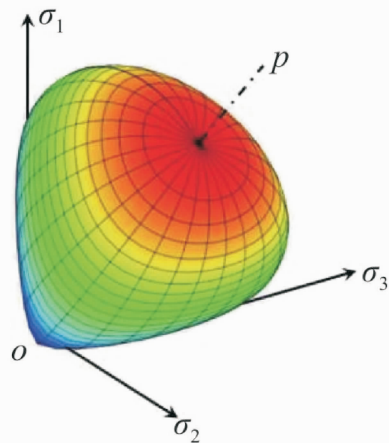


图 1 M-C 模型在主应力空间的屈服面

M-C 模型假设土体在弹性阶段是线性的,在塑性阶段遵循莫尔-库仑屈服准则。在使用该模型时只需剪切强度参数(内摩擦角、黏聚力)和弹性参数(杨氏模量、泊松比)即可对相关工况进行模拟,因此在实际降水数值模拟中,通常用于模型较简单的开挖、加载、卸荷等数值计算中。

弹性模型与摩尔-库仑模型的地表沉降曲线及连续墙变形曲线都较为接近,如图 2 所示。

经分析,弹性模型与摩尔-库仑模型的地表沉降曲线及地下连续墙变形曲线表现出较高的一致性特征。究其原因可能是均质土层具有较高的刚度参数,导致采用摩尔-库仑模型进行基坑降水模拟时,土体未产生显著塑性应变区域。在此工况下,两种本构模型的材料响应趋近于线弹性特征,导致降水工况对基坑围护体系的变形影响未呈现显著差异。

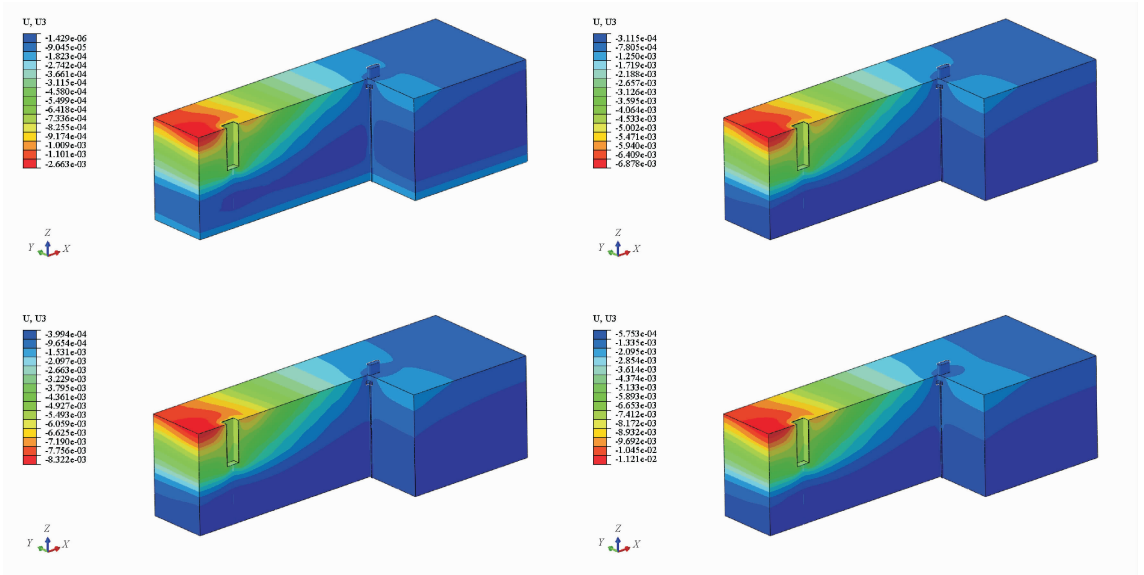


图 2 基坑开挖的土体沉降云图(M-C 模型)

1.2 修正剑桥模型

修正剑桥模型(Modified Cam-Clay Model, 简称 MCC 模型), 采用了椭圆屈服面和相适应的流动准则, 从理论上解释了土体的变形特性, 且在试验上与土体弹塑性变形相吻合^[8]。

MCC 模型属于一种等向硬化的弹塑性模型, 以塑性体应变为硬化参数, 可以较好地描述土体依赖于应力水平和应力路径的变形行径, 具有计算参数少、稳定、简单的特点, 尤其适用于软土地下工程^[10]。模型参数见图 3。模型的屈服函数 $F(p, q)$ 及屈服后的弹塑性刚度矩阵 D 可分别按下式计算:

$$F = \frac{p}{p_0} - \frac{M^2}{M^2 + (q/p)^2} = 0 \quad (1)$$

$$D = D_{ep} = \left[I - \frac{D_E \alpha \alpha^T}{\alpha^T D_E \alpha - c H \alpha} \right] \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\partial f}{\partial \sigma} = \left[\frac{\partial f}{\partial \sigma_r}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta}, \frac{\partial f}{\partial \sigma_z} \right]^T \quad (3)$$

式中: p 为平均应力; p_0 为初始平均应力; M 为 $p-q$ 平面上 CSL 线的斜率; q 为偏差应力; I 为单位矩阵; D_E 为弹性刚度矩阵; α 为中间参数; c 为凝聚力, $c = pp_c(1 + e)/(\lambda - \kappa)$, p_c 为椭圆屈服面与 p 轴的交点的 p 值大小, e 为空隙比, λ, κ 分别为等向压缩和回弹曲线的斜率; $H = (1, 1, 1)$; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 分别为径向应力、轴向应力和环向应力。

相比较与 MC 模型, 定义 MCC 模型需要更多的参数, 分别为等压固结曲线 $e - \ln p$ 平面上回弹曲线的斜率 κ 、等压固结曲线 $e - \ln p$ 平面上正常固结线的斜率 λ 、 $p - q$ 面上 CSL 线的斜率 M 以及泊松比 ν , 如图 3 所示。

根据经验计算公式, λ, κ, M 可按下式计算:

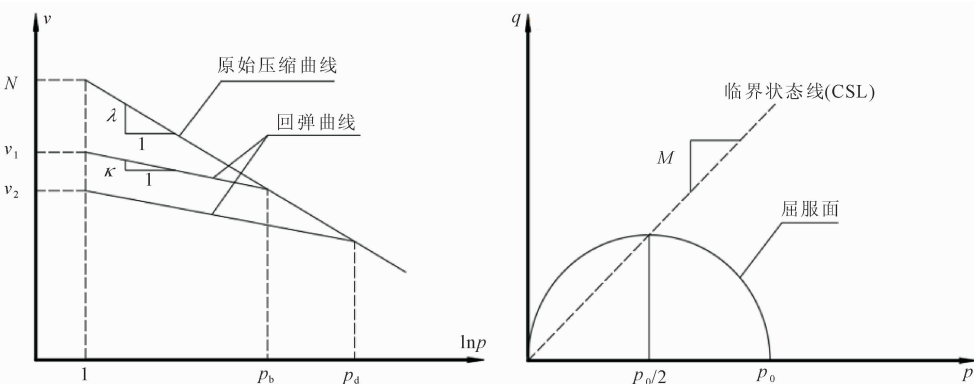


图 3 修正剑桥模型参数图

$$\lambda = \frac{C_c}{2.303} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{C_s}{2.303} \quad (5)$$

$$M = \frac{6\sin\varphi}{3 - \sin\varphi} \quad (6)$$

式中: C_c 、 C_s 、 φ 分别为土体压缩指数、回弹指数、内摩擦角。

MCC 引入了非线性应力-应变关系,可以更准确地描述土体非线性行为、屈服特性和历史应力状态,由于其给出特定应力路径的软化行为,可以更准确地模拟土体在复杂应力条件下的蠕变响应^[11],使其广泛应用于饱和软土和黏性土的深基坑开挖、地下结构设计等较为复杂场景中。

1.3 硬化土模型

硬化土模型(Hardening Soil Model,简称 HS 模型)是 Schanz^[12]根据土的固结试验和三轴试验而提出的一种高级本构模型。HS 模型引入土体硬化特性,其屈服函数与塑性应变呈正相关,表现在主应力空间中为屈服面随着塑性应变的发生而逐渐扩大^[14]。通过剪切硬化来模拟主加载过程带来的非可逆应变,压缩硬化来模拟土体固结加载时主加载压缩带来的非可逆塑性应变,可以更加贴合实际工程变化状态^[13-14]。

HS 模型是等向硬化弹塑性模型,其主应力空间中的整个屈服面如图 4 所示。在三轴排水情况下,轴向应变与偏差应力之间是双曲线关系^[15],可以表述为:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} = \frac{q}{1 - q/q_a} \quad (7)$$

式中:参数 E_{50} 是围压相关的刚度模量; q_a 是抗剪强度的渐进值^[16]; ε_1 是主加载下的轴向应变。

在 HS 模型中,岩土刚度采用三轴试验刚度(E_{ur})、三轴卸载/再加载刚度(E_{ur}^{ref})和固结仪荷载强度(E_{oed})来描述,公式如下:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \times \cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (8)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \times \cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (9)$$

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \times \cos\varphi - \sigma_3 \sin\varphi}{c \times \cos\varphi + p^{ref} \sin\varphi} \right)^m \quad (10)$$

式中: E_{50}^{ref} 为参考应力 p^{ref} (100 kPa) 50% 强度下的割线模量; E_{ur}^{ref} 为卸载/再加载模量; E_{oed}^{ref} 为主固结加载中的切线刚度; c 为黏聚力; σ_3 为第三主应力; m 为

模量应力相关幂指数^[17]。

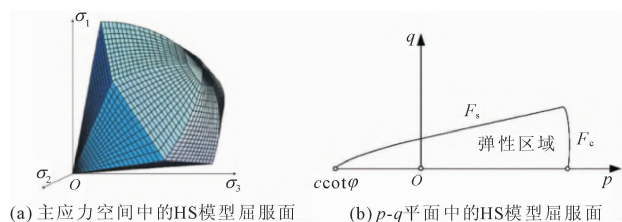


图 4 主应力空间中土体硬化模型屈服面

相较于修正剑桥模型(MCC),硬化土体模型(HS)在表征岩土材料力学行为方面具有更显著的优势。该模型能够有效反映土体的剪胀效应、应力路径依赖性以及多轴硬化特征等关键力学特性,为复杂应力状态下土体的本构关系提供了更为精确的描述。HS 模型实现了对土体在不同加载条件下的应力-应变响应的全面模拟,显著提升了数值分析的可靠性^[16]。此外,HS 模型在应变硬化(shear hardening)和压缩硬化(compression hardening)两方面进行了区分,能够反映土体在剪切应力和体积应力作用下不同的屈服路径,对于多次循环加载和复杂应力历史的工程问题具有更高的适应性,尤其适用于软土和松散砂土的应力演化和破坏过程的模拟。

1.4 亚塑性模型

亚塑性理论是由德国学者 Kolymbas^[17]提出的新型土体本构理论,其核心在于采用非线性增量法来描述土体材料的力学行为。与传统弹塑性理论相比,该理论具有显著差异:它摒弃了弹性应变与塑性应变的区分,同时也不采用硬化规律、屈服面、塑性势函数以及流动法则等传统概念。而是通过一个简洁的非线性张量方程来刻画土体的应力-应变关系。这一理论框架为土体力学研究提供了新的视角和方法。其基本形式可写为:

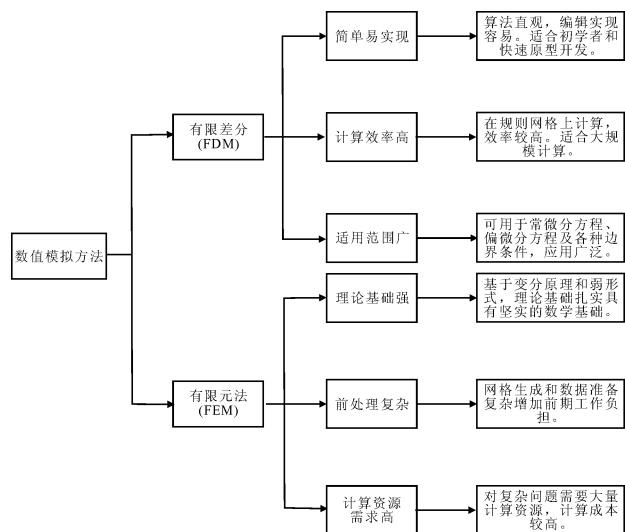
$$\dot{\sigma} = \mathcal{L} : \dot{\varepsilon} + N \| \dot{\varepsilon} \| \quad (11)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应力率; $\mathcal{L} : \dot{\varepsilon}$ 和 $N \| \dot{\varepsilon} \|$ 表示应力率关于应变率的线性项和非线性项,反映了土体的可恢复和不可恢复变形。

然而,亚塑性模型因包含非线性项而存在一定局限性,尤其在模拟卸载过程中无法准确反映土体的纯弹性行为特征。这一缺陷导致其在荷载模拟时往往会产生过大的应力或应变预测值。基于此,该模型在实际应用中主要侧重于模拟长期循环荷载作用下土体累积沉降变形的模拟分析,用以揭示加载历史与土体响应之间的动态演化规律。

2 基于数值模拟在基坑降水的研究现状

目前关于基坑降水研究的数值模拟软件可以分为两大类,即以有限单元法(Finite Element Method, 简称 FEM)与有限差分法(Finite Difference Method, 简称 FDM)为主的两种模拟方法,如下图 5 所示。作为一种基于变分原理的数值计算技术,有限元法通过将连续介质离散为有限数量的子区域来实现求解。有限元法的优点在于其适用范围广,理论基础强,但前处理复杂,网格生成和数据准备增加了前期工作负担。此外,有限元法对复杂问题需要大量计算资源,计算成本较高。相比之下,有限差分法采用区域分割策略,将求解域划分为网格单元,并在每个单元内构建线性近似函数。通过整合各单元的局部解,形成全局近似解,这一过程需要将单元贡献叠加到系统矩阵和载荷向量中,最终构建大规模稀疏线性方程组。该方法在简单几何模型中表现出计算效率高、适合大规模计算并且适用范围广,可用于常微分方程、偏微分方程及各种边界条件。



目前在模拟水位变化方面主要有两种方法:稳态分析法和瞬态分析法。稳态分析法采用孔压控制降水水位,在降水前设置孔压为零的边界条件,通过改变孔压值来模拟降水负压,实现对地下水渗漏的模拟。瞬态分析法则采用流量控制降水水位,在降水点施加抽水流量荷载,设置降水时间,实现降水。稳态分析法则可以设置降水水位的稳定边界条件,以平衡状态下的水位为计算基准,可有效预测降水完成时的孔压和位移变化。但是不论动态模拟降水过程中的孔压和位移变化。瞬态分析法可以控制渗流量并且模拟降水的全过程,进而反映孔压和位移随降水时间的变化情况。但是瞬态分析法的计算参数复杂,需要设置流量荷载的流量以及降水时间,这都需要通过降水反分析来确定,导致其计算收敛难度大^[18]。因此针对简单的渗流耦合问题,只需降水的结果不关注降水过程,可以采用稳态分析法;复杂的渗流耦合问题,更多关注降水的过程,可采用瞬态分析法。代表软件有 ABAQUS、COMSOL、ANSYS、MIDAS GTS NX、PLAXIS 等。

有限差分法通过将连续的偏微分方程离散化,在网格点上用差商代替微商,将微分方程转化为差分方程进行求解,在模拟基坑开挖过程中围护位移和应力的变化规律效果较好,代表软件为 FLAC 3D、Visual MODFLOW 等。各软件特点对比见表 1。

2.1 渗流场变化数值模拟研究

在降水过程中,地下水位的下降首先引起渗流场的变化。1856 年,Darcy 通过一系列试验研究,建立了描述地下水渗流的 Darcy 定律,为之后研究渗流提供了方向。在 Darcy 定律的基础上,1931 年结合渗流连续性原理 Richards 方程的提出标志着非饱和渗流理论的成熟。20 世纪中后期至今,随着计算机技术的发展,Nenman 等提出的非饱和渗流场计算的有限元法,为复杂渗流问题的求解开启了数值模拟的方法。

表 1 各软件特点对比

软件名称	功能特点	用户界面	计算能力	多物理场耦合能力	数值精度	数值方法
ABAQUS	高度专业的有限元分析软件,适用于静态和动态分析	丰富但复杂	极高	强	高	有限单元法(FEM)
COMSOL	多物理场仿真软件,支持丰富的模块化扩展	用户友好	高	非常强	高	有限单元法(FEM)
ANSYS	通用的有限元分析软件,覆盖广泛的仿真需求	丰富但略复杂	极高	强	高	有限单元法(FEM)
MIDAS GTS NX	针对土木工程,尤其是岩土工程的高端 CAE 软件	用户友好	高	有限	高	有限单元法(FEM)
PLAXIS	专注于岩土工程的有限元软件	用户友好	高	中等	高	有限单元法(FEM)
FLAC 3D	专注于地下水流和溶质迁移的仿真软件	相对复杂	高	有限	高	有限差分法(FDM)
Visual MODFLOW	专注于地下水流和溶质迁移的仿真软件	用户友好	中等	有限	中等	有限差分法(FDM)

在此基础上,国内外学者利用有限元软件在解决基坑降水引起渗流场变化开展了大量研究。马昌慧等^[19]利用 Visual MODFLOW 数值计算软件分析了在考虑止水帷幕情况下降水引起的渗流场变化,并证明了 Visual MODFLOW 软件可以有效显示周边地下水水头、流速的分布情况。

欧孝夺等^[20]基于 GMS 软件对车站深基坑降水过程进行三维渗流数值模拟,通过模拟绘制水位线,分析了降水时地下连续墙对于周边地下水渗流的阻隔作用。万学林等^[21]利用 Abaqus 软件,模拟了管井在降水过程中渗流量、渗流速率、孔压与管井孔径、孔间距的关系;栗晴瀚^[22]利用 Abaqus 软件,对含水层越流对降水引发变形的影响机理,且发现地连墙变形及坑外沉降与地连墙墙趾处土层渗透性相关;詹胜文^[23]则利用 Abaqus 软件模拟了深层地下连续墙降水基坑内外的孔隙水压力分布情况,展现了 Abaqus 软件在矢量图可视化方向的突出表现。

徐岩^[24]利用 COMSOL Multiphysics 软件,建立土体渗透系数 k 与孔隙率 n 之间的非线性关系,模拟了降水引起的周边水位变化。且通过 COMSOL 软件能够实现对单井流量进行赋值,真实的反映降水井的运行方式,与真实工况更加切合。He 等^[25]利用 Hydrus 2D 软件,并引入一种计算机图形学领域的粒子流方法可视化渗流场,模拟了中国江苏盐城地下水运移变化。与其他模拟软件不同的是,Hydrus 2D 软件更侧重于模拟土中水分蒸发、入渗、内部运移等方式的迁移变化,适用于大区域地下渗流场变化研究。

数值模拟技术在基坑降水引起地下水渗流场扰动研究,从宏观上侧重于模拟区域大面积地下水位降低引发的水力迁徙,以及降水漏斗的形成、演变过程;从微观上变为单个基坑降水引发的渗流场、孔隙水压力变化,以及围护结构、土体参数对于降水扰动的影 响,多用于对施工方案进行对比、验证与优化。

2.2 降水对周边扰动数值模拟研究

Terzaghi^[26]提出,地下水在渗流过程中会使土体孔隙水压力减小,并同时产生相应的渗透力,进而导致土体有效应力增加;Biot^[27-28]通过连续体力学的基本方程推导了有关地面沉降的问题,进一步提出较为完整的三维固结理论。至此之后,多种计算排水固结沉降理论相继被提出。然而对于降水过程中非线性、不规律的沉降难以通过理论的方式进行计算,因此数值模拟法受到了众多学者的青睐。基坑降水诱发地面沉降的作用机理主要是有效应力原

理,是渗流场与土体应力场相互影响的过程,主要与土体的弹性、粘弹性、塑性、粘弹塑性变形及蠕变特性相关,其相互之间的耦合机理如图 6 所示。通过数值模拟软件,可以根据实际土体概况选择自带或二次开发的本构模型,确保模拟可以适应各种不同的施工状况。

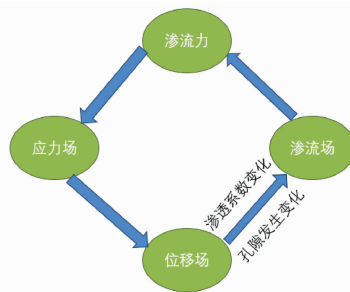


图 6 渗流场、应力场耦合机理示意图

裴桂红^[29]通过基坑渗流-应力耦合数值模拟,研究了群井降水条件下基坑地下水渗流场变化规律及渗流过程中基坑应力场变化特征。朱天然^[30]通过建立三维模型,然后借助 Ansys 三维有限差分数值模拟软件 FLAC^{3D},并用 fish 语言编制程序对地铁深基坑降水工程进行模拟,发现降水会引发既有车站的侧向位移。张明飞^[31]利用 FLAC^{3D} 软件流固耦合功能,分析了降水条件下土体和下卧隧道受力变形规律。吴昊^[32]为了分析基坑降水及开挖对临近桥桩变形影响,采用 MIDAS GTS 软件建模并与现场监测数据进行对比验证。

Zhang 等^[33]采用 CFD-DEM 耦合数值模型,分析了深基坑降水对细颗粒损失、表面沉降与滤料粒度、脱水速率的关系。与其他模拟方法不同,CFD-DEM 是一种离散元的数值模拟方法,能够同时考虑流体和颗粒的运动特性,以及两者之间的相互作用,在微观显示土颗粒的流失上表现出了良好的效果。

综上,数值模拟在研究降水引起的多场耦合变形方面表现出色,不但可以模拟周边地表沉降,而且可以有效模拟临近桥桩、车站、下卧隧道、围护结构、土体颗粒等复杂工况下的扰动情况;同时还可以帮助收集孔隙水压力、土体深层位移、地下结构变形等常规手段难以获取的数据。

2.3 降水对基坑围护结构影响数值模拟研究

在基坑降水过程中,在止水帷幕或其他围护结构的阻隔下,坑内水位会明显低于坑外水位,因此不当的降水方案会引起支护发生显著初始侧移^[34],而在同时考虑开挖与降水工况时,支护结构的变形将

更加难以预测,围护结构主要受力情况见图 7。

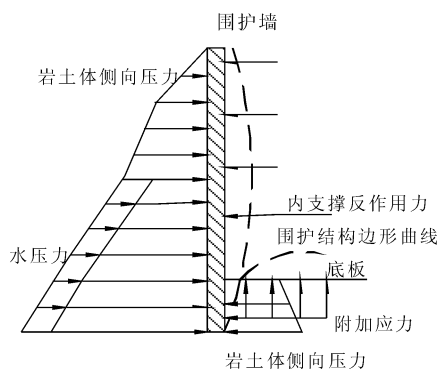


图 7 围护结构受力情况

现有的研究表明,通过数值模拟可以较好模拟基坑围护结构在降水及开挖条件下的扰动影响规律,以 Abaqus 为例,其内置函数可以良好还原实际工程中桩-土、墙-土之间的摩擦行为,可在模拟计算过程中绑定以更好地模拟支护体受弯特性。有学者对地下连续墙在潜水^[35]、承压水^[36]中降水的位移状况进行模拟,发现长条形基坑在开挖前进行降水会使地下连续墙发生向坑内的显著侧移。而针对不同类型的止水帷幕,如落地式与悬挂式,黄云浩等^[37]模拟了落地式止水帷幕条件下井点降水渗流规律。何绍衡等^[38]通过模拟悬挂式止水帷幕不同插入深度的侧移值,研究了强透水层悬挂式止水帷幕的最优深度;而郑刚等^[39]则在复杂地层中对分析了各含水层之间的水力联系,特别是在土层中含有大量透镜体时支护结构的位移情况。

数值模拟还可以开展降水与开挖同时进行的耦合变形响应分析,林迪斯^[40]用 MIDAS GTS NX 有限元软件,采用 M-C 模型及 MMC 模型建立基坑降水开挖支护数值模型,发现随着开挖的进行,支护结构表现为两端小,中间大的“弓”型。

对于不同土层降水对围护结构的影响,如砂层^[41]、砂卵石^[42-43]、软土^[44]、黏土^[45-47],学者们根据不同土体特性,选择不同的本构模型并取得了良好的模拟效果。

3 基坑降水数值模拟未来发展方向

未来基坑降水数值模拟结合领域面临的科学问题多种多样,解决这些问题不仅依赖于单一学科的发展,还需要多学科的交叉合作和技术的集成应用,如图 8 所示为基坑降水数值模拟未来发展的三个方向,主要分为基于机器学习的土体本构模型的发展、提高软件的综合模拟水平、多学科交叉的数据获取

方面。

3.1 反演求参问题

在基坑降水数值模拟中,本构模型参数是影响模拟结果的关键问题。但由于地下介质属性(如渗透系数、孔隙率等)在空间上的变化复杂且不均匀,使得参数难以精确测定。实地观测数据的获取受限于技术手段和经济成本,数据点有限且分布不均,数据噪声和测量误差又进一步增加了反演求参的不确定性。参数的不确定性会导致水头、流速等模拟结果的显著波动。另一方面,模型本身的简化和假设(如边界条件、初始条件等)也可能与实际情况存在偏差,导致反演结果的不唯一性。不同模型对同一组数据产生不同的模拟结果,影响模拟结果准确性。这种参数的不确定性直接影响到模型的可靠性,从而影响工程的设计与施工。因此,随着计算机技术及算力的提升,如果可以利用观测数据,结合相关机器学习,通过相关神经网络模型来建立本构模型,进而确定模型的参数,模型将更准确地模拟地下水渗流和水位变化。

3.2 模拟软件功能参差不齐

基坑降水数值模拟的发展在很大程度上依赖岩土本构模型和计算机技术的进步。模拟软件对模型参数的要求和处理方法各异,导致不同软件之间的结果不一致,增加了结果解释的复杂性。目前,市面上存在众多模拟软件,如 GMS、Visual Groundwater 等,在功能、适用范围和技术水平上存在显著差异。不同模拟软件侧重于某一特定方面,如水文模拟、地质模拟等,难以全面覆盖基坑降水的各个方面。例如,在深圳某地铁工程中,设计团队希望通过 GMS 软件进行渗流场模拟,但发现该软件在处理复杂地层与多种边界条件下的能力有限,导致无法准确反映降水对周边环境的影响。一种软件可能在模拟特定问题上表现出色,但在处理其他问题时功能不足,限制了其在复杂工程中的应用,因此提高模拟软件的综合功能以应对多种多样的复杂工况仍是一个全新的挑战。

3.3 遥感、GIS 等技术与地下水数值模拟的结合

遥感技术(Remote Sensing, RS)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)等技术的发展,给数值模拟的解决带来了新思路。这些技术提供了大范围、高分辨率的空间数据,如地形、水体分布等实际数据。这些数据若经过合理的处理并加以利用,将提高模拟的精确性和适用性。

目前相关数值模拟模型通常基于物理过程和数

学方程,如何将遥感和 GIS 数据与模拟软件进行有效对接,实现高分辨率数据驱动的模式参数的空间分布和边界条件,是未来基坑降水模拟的发展方向(见图 8)。

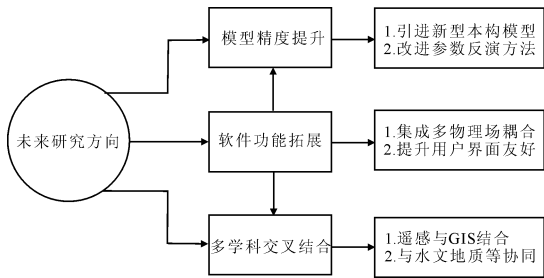


图 8 未来研究方向

4 结 论

(1) 本文通过对基坑降水数值模拟的现状和进展进行系统的综述,分析了数值模拟技术在基坑降水研究中的应用和发展。首先介绍了基坑降水的背景,强调了数值模拟在研究降水扰动规律中的优势。在基坑降水数值模拟方面,详细讨论了土体本构模型的选择及其对数值模拟结果的影响,包括摩尔-库仑模型、修正剑桥模型和硬化土模型等常用本构模型,并进行了详尽的分析和比较。

(2) 从数值模拟方法的角度探讨了当前主要使用的有限元法和有限差分法,并结合具体的软件应用案例,如 ABAQUS、COMSOL、ANSYS、PLAXIS、FLAC 3D 等,展示了这些方法在模拟基坑降水引起的渗流场变化和对周边环境扰动中的实际应用,指出了现有研究的不足和面临的挑战。

(3) 提出多学科交叉合作,创新数值模型数据获取与本构建立的途径与方法,提高模拟的精度和可靠性。同时,强调了 GIS 和遥感技术在地下水数值模拟中的潜力,指出了这些技术与数值模拟的集成应用将成为未来研究的重要方向。

(4) 未来,基坑降水数值模拟领域面临诸多复杂的科学问题,解决这些问题不仅需要单一学科的深入发展,更需要多学科交叉合作和技术集成应用。遥感、地理信息系统在基坑降水数值模拟中的进一步应用将是重要研究方向。随着 GIS 在水文地质领域应用的深化,其与地下水模拟模型的集成将更加紧密。未来的研究应注重多学科融合,采用先进数值模拟技术,结合实际工程案例,不断提高模拟精度和可靠性,为基坑降水工程提供科学依据和技术支持。

参考文献:

- [1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [2] 江建红,崔江余. 不同土体本构模型对基坑开挖数值模拟计算结果的影响分析[C]//中国老教授协会土木建筑(含建筑物改造与病害处理)专业委员会全国第九届建筑物改造与病害处理学术研讨会论文集, 2011.
- [3] Teo P L, Wong K S. Application of the hardening soil model in deep excavation analysis[J]. The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, 2012, 5(3): 152-165.
- [4] 谢建斌,曾宪明. 硬化土模型在桩锚与桩撑组合支护深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 56-63.
- [5] 刘景锦,雷华阳,郑刚,等. 基坑开挖对坑内土体刚度特性影响室内试验研究与本构模型应用分析[J]. 施工技术, 2017, 45(S1): 77-81.
- [6] 林煌超,谢建斌,张水兵. HS 模型在高原湖相沉积土层深基坑的应用[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(1): 122-126.
- [7] Wu J T H, Tung C Y. Analysis of stress-deformation behavior of soil-geosynthetic composites in plane strain condition[J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2018, 5(3): 210-230.
- [8] 刘帅君. 深基坑降水开挖引发的地面沉降及其控制措施研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- [9] 黄鑫,樊秀峰,安亚洲. HS 模型在基坑工程数值模拟中的适用性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 115-120.
- [10] 吴东伟,蒋健楠,沈昊. 基于修正剑桥模型的基坑开挖变形分析[J]. 河北水利, 2022(6): 44-46.
- [11] 陈源. 海口某深基坑支护数值模拟及土体本构模型研究[D]. 海口:海南大学, 2014.
- [12] Schanz T, Vermeer A, Bonnier P. The hardening soil model: formulation and verification[J]. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, 1999: 281-287.
- [13] 李子健. 天津市区 HSS 模型参数及其在深基坑变形分析中的应用[D]. 天津:天津大学, 2022.
- [14] 王卫东,王浩然,徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [15] 张飞,李镜培,唐耀. 考虑土体硬化的基坑开挖性状及隆起稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2): 79-84.
- [16] 姚仰平,侯伟,罗汀. 土的统一硬化模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2135-2151.
- [17] Kolymbas D. A rate-dependent constitutive equation for

- soils[J]. *Mechanics Research Communications*, 1977,4(6):367 - 372
- [18] 刘 婧,陈锦剑,王建华.上海世博500 kV 地下变电站降水固耦合分析[J]. *上海交通大学学报*,2010,44(6):721-725.
- [19] 马昌慧,毛 云,黄 魏,等.帷幕在降水条件下对基坑周边渗流及变形影响的研究[J]. *岩土工程学报*,2014(S2):294-298.
- [20] 欧孝夺,全守岳,李 胜,等.基于GMS软件的基坑降水数值模拟[J]. *城市轨道交通研究*,2019,22(5):22-27.
- [21] 万学林,陈德洋,王 哲,等.基于有限元法的坑中坑降水管井技术研究[J]. *地下空间与工程学报*,2023,19(S2):1021-1027,1034.
- [22] 栗晴瀚,张静涛,郑 刚,等.含水层越流情况下基坑降水引发变形机理及控制措施[J]. *土木工程学报*,2023,56(5):89-101.
- [23] 詹胜文,丁苏南,任文明,等.长江漫滩高承压水地层悬挂式帷幕深基坑变形规律研究[J/OL]. *工程地质学报*,2025:1-10 [2025-04-18]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2022-0291>.
- [24] 徐 岩.基于目标函数法和有限单元法的深基坑井群降水优化分析[D].沈阳:东北大学,2013.
- [25] He Liang, Chen Ling, Chen Shuzhong. Visualization method for porous groundwater seepage flow field based on particle flow; Case of Yancheng city in the East coast of China[J]. *Geofluids*, 2022(1):4850968.
- [26] Terzaghi K, Peck R B. *Soil mechanics* [M]. *Engineering Practice John Wiley and Sons, Inc, New York*, 1948.
- [27] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1941,12(2):155-164.
- [28] Biot M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid [J]. *Journal of Applied Physics*, 1955,26(2):182-185.
- [29] 裴桂红,吴 军,刘建军,等.深基坑开挖过程中渗流-应力耦合数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*,2004,23(S2):4975-4978.
- [30] 朱天然.基坑降水对既有车站结构影响研究[D].北京:北京交通大学,2008.
- [31] 张明飞.地下水位变动诱发地铁隧道变形机理及其与地铁隧道相互影响研究[D].南京:东南大学,2018.
- [32] 吴 昊,姚顺意,薛勋强,等.基于渗流应力耦合的基坑降水及开挖对邻近桥桩的影响分析[J]. *公路交通科技*,2019,36(10):59-66.
- [33] Zhang X, Wang L, Wang H, et al. Investigating impacts of deep foundation pit dewatering on land subsidence based on CFD-DEM method[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022,26(13):6424-6443.
- [34] 韩 旭,刘俊城,张建辉,等.深厚富水砂土地层深基坑开挖降水变形研究[J]. *建筑结构*,2022,52(S2):2246-2255.
- [35] 郑 刚,曾超峰.基坑开挖前潜水降水引起的地下连续墙侧移研究[J]. *岩土工程学报*,2013,35(12):2153-2163.
- [36] 蔡娇娇.落底式止水帷幕条件下承压含水层基坑降水设计方法研究[D].武汉:中国地质大学,2018.
- [37] 黄云浩.既有落底式止水帷幕对地下径流的阻碍影响研究[D].武汉:武汉科技大学,2023.
- [38] 何绍衡,夏唐代,李连祥,等.地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形影响[J]. *浙江大学学报(工学版)*,2019,53(4):713-723.
- [39] 郑 刚,赵悦缤,程雪松,等.复杂地层中基坑降水引发的水位及沉降分析与控制对策[J]. *土木工程学报*,2019,52(S1):135-142.
- [40] 林迪斯.富水软土地层地铁车站深基坑降水开挖支护稳定性研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [41] 张誉津,刘俊城,谭 勇.深厚富水砂性地层深基坑开挖降水变形特性研究[J]. *隧道建设(中英文)*,2023,43(9):1511-1522.
- [42] 罗正东,吴 鹏,黄 河,等.富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析[J]. *建筑结构*,2020,50(23):128-133.
- [43] 向贤华.基于流固耦合作用的富水砂卵石地层深基坑变形特性分析[J]. *铁道标准设计*,2016,60(6):80-84.
- [44] 曾超峰,薛秀丽,郑 刚.软土地基渗透性条件对基坑预降水过程中支护墙侧移的影响研究[J]. *岩土力学*,2017,38(10):3039-3047.
- [45] 熊一帆,应宏伟,张金红,等.考虑时空效应的杭州软黏土超深基坑地表沉降分析方法[J]. *上海交通大学学报*,2025,59(1):48-59.
- [46] 张宗领.基于整体三维有限元模型的粉质黏土深基坑土钉支护参数分析[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*,2021,34(4):686-691.
- [47] 孙振华,邵凌峰,辛全明,等.降雨入渗对非饱和黏土桩支护基坑稳定性影响研究[J]. *建筑结构*,2019,49(S2):926-932.