

基于 ANSYS 的深基坑承压水降压对周边环境的影响分析

徐 进

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092]

摘 要:随着城市地下空间开发朝着深层发展,深基坑工程成为城市建设中的重要课题。当基坑达到一定深度后,不可避免地遇到承压水层的突涌问题。其中悬挂式止水帷幕的基坑,对承压水层的处理通常要求按需降压,既要保证基坑抗突涌稳定,同时也要尽可能保证对抗外承压水层产生较小的影响,特别是对于周边环境复杂、保护等级较高的基坑。利用 ANSYS 10.0 通用有限元软件中的热分析模块模拟基坑工程中承压水降压的过程,再通过结构模块继承承压水层水头降深结果,将其转换为土层的初始应变,最后经过结构模块的计算分析,得出准确的土体位移结果。为深基坑工程承压水降压设计以及对周边环境的影响分析提供了一种新方法。

关键词:深基坑;承压水;有限元计算;ANSYS

中图分类号: TU46+3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)07-0341-05

0 引言

随着城市化进程的推进,大型城市城区的浅层地下空间几乎已开发殆尽,城市建设中的轨道交通与给排水基础设施均需要从更深的地下寻求发展空间,故深基坑工程成为城市建设中绕不开的课题。基坑达到一定深度后,承压水突涌的风险成为不容忽视的问题。以上海地区为例,承压水层由浅及深分别为⑦、⑨、⑪、⑬、⑮层,颗粒以粉~中砂为主。其中⑦、⑨层与目前深基坑工程关系最为密切,也是承压水降压的主要对象。此外,⑤层中部分粉土内也具有一定微承压性。对于较浅较薄的⑤层承压水层可以通过隔断的方式解决抗突涌问题,但对于更深的基坑工程,采取更经济的悬挂式止水帷幕并结合降承压水的措施是主流的选择。

采用悬挂式止水帷幕的深基坑,降低坑内承压水势必导致坑外承压水的降低,从而引起坑外承压水层土体的固结沉降,进而引起地面上的建(构)筑物及管线的沉降。故精确评价基坑工程中降承压水对周边环境的影响成为基坑设计施工实践中的重要课题。

在承压水降压的领域,众多学者与工程技术人员已进行了大量的研究并取得丰富的成果。龚晓南等^[1]针对顶板完全隔水的承压水层,运用完整井理论与 Mindlin 解提出了地面沉降公式;常晓等^[2]通过

解析的方法得出完整井抽水引起地层的二维变形解析解;郑刚等^[3]通过抽水试验结合有限元模拟,对天津地区降压水抽水对土体分层沉降的一般规律进行了研究;雷丹^[4]基于上海某地铁车站基坑抽灌试验建立了三维有限元模型,分析表明,合理地抽灌措施能有效降低基坑降水的工程风险;徐耀德^[5]等利用 Modflow 软件模拟预测出基坑降水下的基坑内外地下水变化,定量评估了基坑降水引起的附加地面沉降。

上述研究成果对指导深基坑工程中降水设计有巨大的参考价值,但也存在一定的局限性,如解析公式的适用范围较窄,通常要求降水井为完整井或基坑形状为狭长形等。数值计算方法中有一些采用了复杂的流固耦合模型,需要较多的岩土参数及较强的计算机算力,在实际工程中应用的价值有限。有一些采用商业软件如 Modflow 进行模拟计算,但对于因降水引起的土层固结沉降需要数据导出后进行二次处理,一般的处理做法仅仅是按竖向一维分层总和法将降压等值线替换为地面沉降等值线。上述做法有三处不足,首先,未考虑水平向的土体固结影响;其次,未考虑承压水层上部土层的扩散影响。按照常规做法处理后,地表沉降的等值线分布即为承压水降深等值线的竖向投影,且数值上仅考虑承压水层的固结沉降量,与实际情况有较大出入;最后,在基坑周边有深基础的情况下,无法考量其与土体间的相互作用,通常仅将该处的土体沉降粗略地作为基础的沉降考虑,且无法直接得出基础的内力响应。

针对上述问题,本文基于温度场与渗流场(达西

收稿日期: 2021-02-23

作者简介: 徐进(1988—),男,硕士,工程师,从事结构设计工作。

定律)之间的相似性,通过 ANSYS 通用有限元软件中的热分析模块模拟基坑工程中的承压水降压过程,得出承压水层水头降深的空间分布。利用软件自身热模块与结构模块间单元转化与计算结果继承的功能,通过基本土力学公式,将承压水层水头降深的空间分布转化为土体的三维初始应变分布,最后经过结构模块的计算分析,得出土体位移与结构内力结果。

1 计算原理简介

1.1 基本原理的相似性

地下水在土体中的渗流遵循达西定律:

$$v = k_1 \times J$$

式中: v 为流速, m/s ; k_1 为渗透系数, m/s ; J 为水力梯度。

热传导遵循傅里叶假定:

$$q = k_2 \times \frac{dT}{dn}$$

式中: q 为热流强度, W/m^2 ; k_2 为热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; dT/dn 为温度梯度, $^\circ\text{C}/\text{m}$ 。

1.2 场方程的相似性

渗流场场方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{1x} \times \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{1y} \times \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{1z} \times \frac{\partial H}{\partial z}) = S \times \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中: H 为总水头高度, m ; k_{1x} 、 k_{1y} 、 k_{1z} 为 x 、 y 、 z 方向上的渗透系数, m/s ; S 为土体的贮水系数, $1/\text{m}$ 。

温度场场方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{2x} \times \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{2y} \times \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{2z} \times \frac{\partial T}{\partial z}) = C \times \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中: T 为温度, $^\circ\text{C}$; k_{2x} 、 k_{2y} 、 k_{2z} 为 x 、 y 、 z 方向上的热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; C 为导热介质的体积比热容, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

1.3 初始条件与边界条件的相似性

渗流场的初始条件即为场内任意一点初始时的水头高度,可以表达为 $H=M(x,y,z,t_0)$ 。温度场的初始条件即为场内任意一点初始时的温度,可以表达为 $T=N(x,y,z,t_0)$ 。

渗流场中的边界条件有两类,第一类为水头随时间恒定的情况,如承压水层远离降水井的水平边界,可以表达为 $H=M(x,y,z)$;对应温度场即为温度随时间恒定的情况,可以表达为 $T=N(x,y,z)$ 。第二类为流量随时间恒定的情况,可以表达为 $Q_1=F(x,y,z)$,如承压水层中顶底处不透水层的竖向边界,对应温度场即为热流随时间恒定(且为0)的情况,可以表达为

$$Q_2=G(x,y,z)。$$

综上,渗流场与温度场参数的对应关系可见表1。

表1 地勘土体参数表

场类型	参数1	参数2	参数3
渗流场	水头高度 H/m	渗透系数 $k_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	贮水系数 $S/(1 \cdot \text{m}^{-1})$
温度场	温度 $T/^\circ\text{C}$	热传导系数 $k_2/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	体积比热容 $C/[\text{J} \cdot (\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$

2 深基坑承压水降压对周边环境影响分析有限元计算

根据上文分析,ANSYS 10.0 通用有限元软件中的热分析模块可以模拟深基坑承压水降压后的水头分布,此外,此模块也具备热应力分析的功能。ANSYS 中的结构模块可以分析土体与结构的变形与内力。根据 ANSYS 软件的特点,计算分析方案有两条技术路线可选,第一种是直接耦合法,即进行热分析的同时进行位移与应力的分析,如 ANSYS 中的 PLANE13、SOLID5 单元等,该单元节点同时具备温度及位移两种自由度,这种处理方式适用于两种分析互为影响的情况;第二种是间接耦合法,即先进行热分析,将计算结果作为初始条件继承到结构模块,同时热单元转化为同节点数的结构单元,节点自由度由温度转变为位移,进而进行第二次计算分析,最终得到结构计算结果。如 SOLID70 热单元与 SOLID45 结构单元,这种方法适用于结构计算结果对热分析影响不大的情况,考虑到基坑降水过程的水头降深一般小于 20 m,即 200 kPa 水压变化,对土体产生的体积应变不大于 2%,2%的体积应变对应于土体贮水系数的影响可以忽略不计。我们可以认为基坑承压水降压产生的结果影响土体变形有限,而有限的土体变形不会对前者的渗流参数产生反作用。此外,考虑到间接耦合法采用自由度更少的单元,刚度矩阵规模更小,计算中占用的资源更少,故本文拟采用间接耦合法的技术路线。

2.1 背景工程简介

为了更直观地描述深基坑承压水降压的计算过程,以上海地区某深基坑工程为例进行介绍,基坑工程相关描述如下:

拟建基坑主体结构为污水泵房,开挖面积 1200 m^2 ,平面形状异形,开挖深度 12.6 m~16.8 m,基坑安全等级一级,环境保护等级一级或二级。围护形式采用 1 m 厚地下连续墙+三道钢筋砼支撑,地连墙以叠合墙的形式兼作主体结构外墙。坑底加固采用高压旋

喷桩裙边加固。基坑平面布置见图1,剖面详见图2、图3。

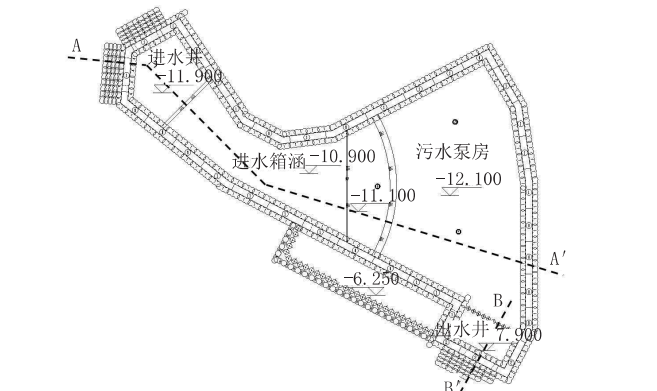


图1 基坑平面图(单位:m)

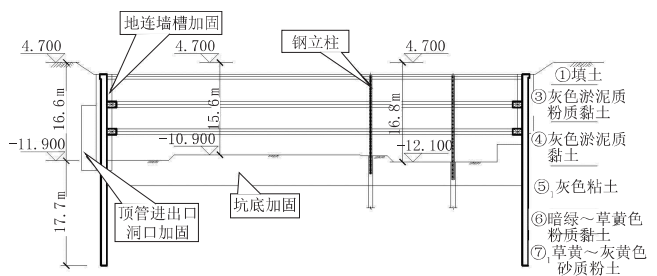


图2 基坑A-A剖面图(单位:m)

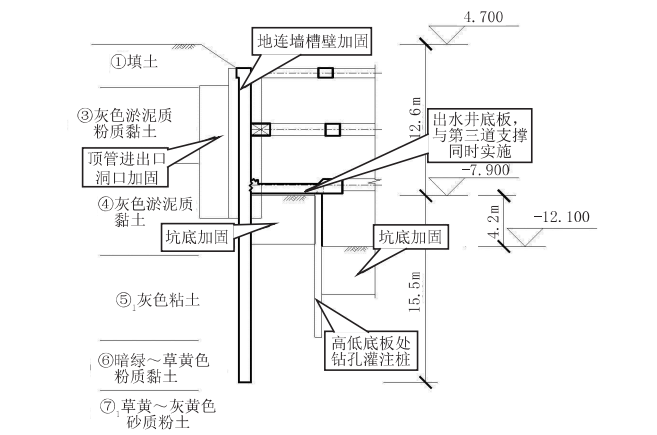


图3 基坑B-B剖面图(单位:m)

基坑所处位置的土层参数如表2所示。

表2 地勘土体参数表

编号	层位	土层名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\phi/(^{\circ})$
1	② ₁	褐黄~灰黄色粉质黏土	18.8	22	18.5
2	③	灰色淤泥质粉质黏土	17.7	13	16.5
3	③ ₁₂	灰色砂质粉土	18.7	6	30.5
4	④	灰色淤泥质黏土	16.8	12	11.5
5	⑤ ₁	灰色黏土	17.6	16	14.5
6	⑥	暗绿~草黄色粉质黏土	19.7	43	18.5
7	⑦ ₁	草黄~灰黄色粉质黏土	18.8	—	—
8	⑦ ₂	灰黄~灰色粉砂	19.0	—	—

根据勘察报告所述,本基坑开挖过程中涉及上海第Ⅰ层承压水层(第⑦层)的抗突涌问题,详见图4。

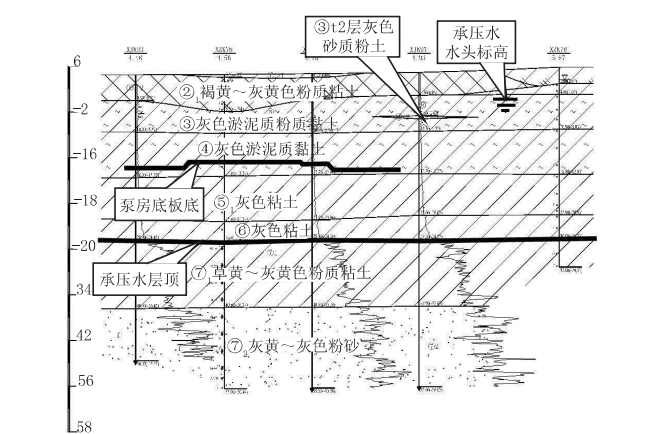


图4 基坑地质剖面图

根据勘察报告,拟建场地分布有⑦₁层承压含水层,承压水水头埋深年呈周期性变化,一般在3.0~12.0 m。根据上海市《基坑工程技术标准》(DGJ 08-61—2018)第6.7节规定以及地勘报告,承压水水头埋深分别按实测和最不利因素考虑取4.7 m(绝对标高0.0)。对泵房基坑坑底抗⑦₁层承压水稳定性进行计算,结果如表3所示。

表3 坑底抗突涌稳定性验算表

编号	基坑位置	承压水层顶标高 /m	坑底标高 /m	水头降深要求 /m
1	进水管	-24.03	-11.9	3.3
2	进水箱涵	-24.03	-10.9	1.6
3	泵房	-24.03	-12.1	3.6

注:表格内层顶标高按详勘中⑦₁层顶最高标高取值,承压水水头标高取0.0 m。

根据基坑底抗突涌分析,本工程泵房基坑坑底土体自重抗突涌不满足要求,故需采取降承压水措施。经计算,承压水水头需降低3.6 m(即绝对标高-3.6 m)可满足抗突涌稳定。基坑降压井布置如图5所示。

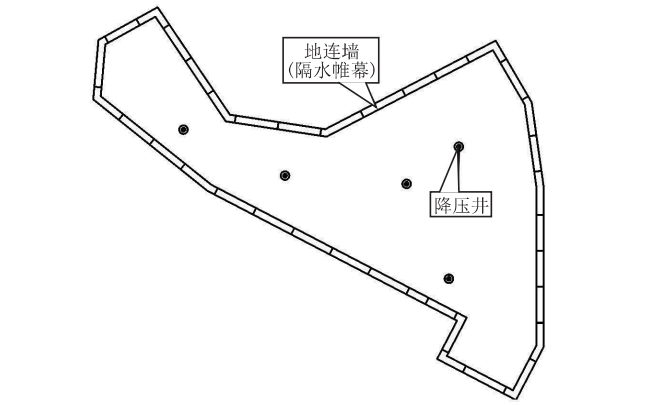


图5 基坑降压井布置图

2.2 深基坑承压水降压分析

以上述基坑工程为背景依托,建立承压水降压

的有限元模型。由于计算采用间接耦合法,每个单元同时具备热单元与结构单元两套属性,土体采用 SOLID70 八节点三维实体单元模拟,地下连续墙(隔水帷幕)采用 SHELL157 四节点三维壳单元模拟。土体与地连墙(隔水帷幕)模型见图 6、图 7。

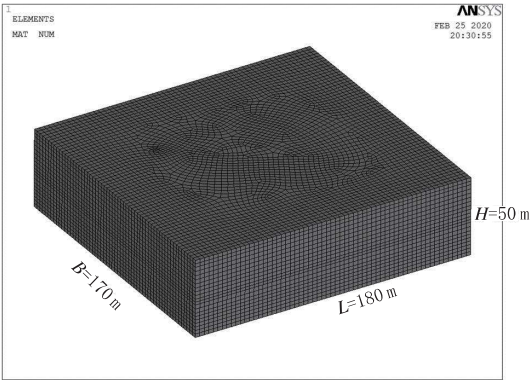


图6 基坑土层模型(单位:m)

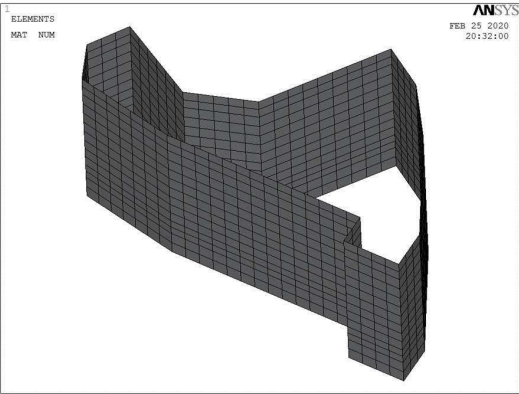


图7 基坑地下连续墙(隔水帷幕)模型

由于本文采用热模块模拟渗流过程,单元的参数设置在理解上需要一定的转换,基本计算参数见表 4。

表 4 渗流场与温度场参数对照表

场类型	参数 1	参数 2	参数 3
渗流场	水头高度	渗透系数	贮水系数
	H/m	$k_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$S/(1\cdot\text{m}^{-1})$
温度场	温度	热传导系数	体积比热容
	$T/^\circ\text{C}$	$k_2/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$	$C/[\text{J}\cdot(\text{m}^3\cdot^\circ\text{C})^{-1}]$
参数数值	0	4.07×10^{-5}	9.37×10^{-4}

降压井的设置本质上是边界条件的设置,本文采用对承压水层中降压井部分的节点设置边界条件,模拟抽水降压的效果。根据上文的阐述,边界条件分为两类,对应降水井的设置是水头控制与流量控制。其中流量控制需要较为准确的抽水试验做依据,且无法考量土体降压后出水量随时间的波动,故不推荐使用。本文采用第一类边界条件,即设置降压井的总水头值。本文假定承压水层的总水头值为 0 m,

总水头由压力水头 H_p 与位置水头 H_z 叠加而来。假设降压井中的水第一时间被水泵抽走,则降压井中的压力水头 H_p 始终为 0 m,则降压井位于承压水层部分的总水头应设置为位置水头 H_z , H_z 在数值上等于节点标高减去承压水水头标高,假定位于承压水层顶的降压井标高为 -29 m(地面标高为 0 m),承压水水头标高为 -4.5 m,则 $H_z=-24.5$ m,节点边界约束则定为 -24.5 即可。需要注意的是,若采用真空管井抽水,则边界条件在上述基础上还需要减去 13.6 m。

设置完所有参数后,采用瞬态分析,经过 10~15 d 后,承压水降压后逐渐趋于稳定。稳定后承压水层顶的总水头分布如下图所示,由于初始总水头取 0 m,故分布图数值上也等于承压水层顶总水头的降深,且由于位置水头没有变化,故同时也等于压力水头的降深,其分布详见图 8 所示。

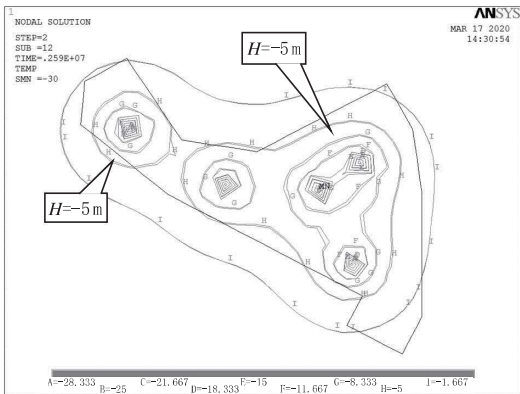


图8 基坑承压水降深分布(单位:m)

根据计算结果,除出水井部分区域,坑内降水水头均可达到 5 m 以上,可以满足表 3 中压力水头降深要求,前提是降压井中的水持续被抽出,以保证降压井处的边界条件与计算模型一致。

2.3 深基坑承压水降压对周边环境影响分析

从 ANSYS 热分析模块转换到结构模块是整个分析过程中的重点与难度,不论是操作上还是理解上。ANSYS 热应力分析中,间接耦合法的逻辑是:首先得出模型的温度变化分布,再通过结构分析中材料膨胀系数 α 使得模型得到新的初始应变条件 $\varepsilon=\alpha\times\Delta T$ 。同时,转换到结构模块后,由于单元节点自由度发生变化,模型的边界条件也要重新定义。上述做法“翻译”到渗流—结构分析如下:首先通过渗流分析得到模型压力水头变化分布,压力水头的变化与水重度的乘积可以理解为承压水层有效应力的变化,再通过结构分析中土体压缩模量 E_s 使得模型得到新的初始应变条件 $\varepsilon=\frac{\gamma_w\times\Delta H}{E_s}$,很容易得到将

$\frac{\gamma_w}{E_s}$ 定义到结构模型中的线膨胀系数参数即可得到承压水层的初始固结应变。

因本文对于承压水层初始固结及由此产生的上部土体变形均按线弹性考虑,故结构模型中的土体材料按线弹性考虑。各土层的压缩模量按表 5 所示。

表 5 土层压缩模量参数表

层序	压缩模量 E_s /MPa	层序	压缩模量 E_s /MPa
③	2	⑥	9
④	2	⑦ ₁	25
⑤ ₁	6	⑦ ₂	40

最后通过 ANSYS 软件结构模块计算得到的地表沉降如图 9 所示,基坑承压水降压引起的地表沉降最大值约为 20 mm,位于地连墙处,沉降值随与基坑距离增大而减小,沉降槽近似漏斗形。

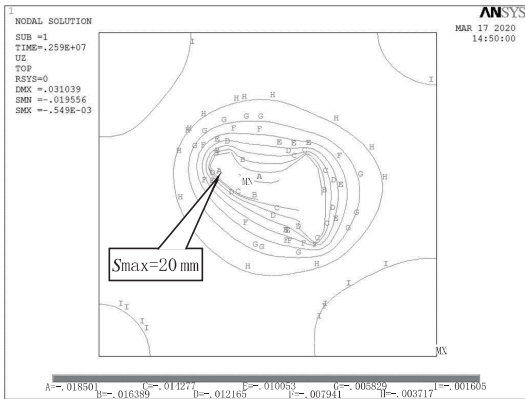


图 9 基坑降承压水引起地表沉降分布(单位:mm)

2.4 不足与进一步工作展望

通常评价基坑施工对周边环境影响程度须考虑降承压水与基坑开挖两种工况叠加的结果,目前由于基坑开挖模型更为复杂,不仅仅是空间模型本身(降水模型不包括支撑围檩等构件,也无需定义开挖步),也包括更复杂的本构模型,难以与降水分析所采用的模型一致,故无法完全将两者的模型的土体变形结果叠加,目前仅依靠粗糙的人工操作完成叠加工作,效率与准确性均难以令人满意。

此外,在某些工程中,承压水层与潜水层有一定水力联系,降承压水有可能导致潜水层的水位下降,

故计算中需要考虑潜水降水的情况。对于 ANSYS 软件,降承压水是线性的过程,降潜水是非线性的过程,主要是因为土体位于水位以上之后水头不会再下降,故操作上需要采用迭代的方式更新潜水层的浸润面,为了使得浸润面平滑,需要更为细致的潜水层土体单元,故相较后仅计算承压水降压的过程,潜水降水计算效率较低。

针对上述困难,下一步的工作主要是:

(1)寻求兼顾效率与精度相统一的模型,同时包含基坑降水与开挖计算,或采用更为灵活准确的土体变形叠加方式,如采用直接耦合法或采用流-固耦合计算方法等;

(2)寻求解决潜水降水计算效率较低的方法。

3 结 论

(1)本文论述了传统深基坑设计中承压水降压对周边环境影响分析方法的不足,包括降水与沉降计算的割裂、沉降计算方法不合理及对深基础影响分析的局限性。

(2)本文通过 ANSYS 10.0 通用有限元软件模拟某基坑承压水降压过程,提供计算基坑承压水降压对周边环境影响的计算方法。

(3)本文分析了现阶段计算方法的两点不足,主要包括难以建立统一的模型、叠加降承压水过程与基坑开挖过程中对周边环境影响的计算结果,也包括降潜水计算效率较低的问题。相应地,对下一步工作做出了展望。

参考文献:

[1] 龚晓南,张杰.承压水降压引起的上覆土层沉降分析[J].岩土工程学报,2011,33(1):145-149.
[2] 常晓.抽降承压水引起的地层二维变形解析研究[J].山西建筑,2018,44(13):70-73.
[3] 郑刚,栗晴瀚,哈达,程雪松.天津市承压层应力状态及减压引发沉降规律研究[J].岩土力学,2018,39(s2):292-301.
[4] 雷丹,杨石飞,苏辉,等.流固耦合在深层承压水降水及环境影响分析中的应用[J].上海国土资源,2018,39(2):70-74.
[5] 徐耀德,童利红.利用 Modflow 预测某基坑降水引起的地面沉降[J].水文地质工程地质,2004,31(6):96-98.