

深部弱透水层固结变形模型建议

谢海澜, 王小丹, 胡云壮, 秦雅飞

(天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘要: 地面沉降模型是地面沉降研究的重要内容, 由于弱透水层的变形量占地层全部变形量的比重较大, 因此对弱透水层固结模型的研究是地面沉降模型研究中的重要部分。笔者通过对深部弱透水层中粘性土孔隙水类型进行分析, 得出深度弱透水层中孔隙水类型并对该类型孔隙水变形特性进行了研究, 总结出深部弱透水层固结机理。在机理分析的基础上, 提出采用非达西流计算模式对深部弱透水层计算模型进行了修正, 并提出了深部弱透水层固结计算模型建议: 孔隙水类型主要为扩散层内结合水时, 可以采用利用非达西流修正的大沙基固结方程对深部弱透水层变形进行计算, 可以参考给出的采用非达西定律修正过的一维固结方程; 孔隙水类型主要为吸附结合水时, 可以利用弹性本构关系模型对深部弱透水层进行变形计算。

关键词: 地面沉降; 弱透水层; 非达西流; 固结模型

中图分类号: P641.2, P642.26

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2009)04-0306-04

1 引言

地下水开采引起的含水层系统压缩和由此形成的地面沉降是一个全球性问题。为了对地面沉降进行有效的控制, 各国专家学者对地面沉降从形成机理、监测手段到模型预测等方面都进行了大量研究工作。其中, 地面沉降预测模型研究是地面沉降研究中的重要内容, 很多学者致力于这方面研究, 提出了许多计算模型, 对地面沉降变形计算主要包括两部分: 含水层变形计算和弱透水层变形计算。研究表明, 在一个含水层系统中, 由细颗粒沉积物(主要为粘性土)组成的弱透水层的变形量占全部地面沉降变形量 50% 以上的比重^[1,2], 可见对弱透水层变形的准确计算是准确计算地面沉降变形的前提。在过去的地面沉降研究中为了控沉的需要, 对地下水开采层位进行了由浅部向深部的调整, 相应于此种变化, 为了准确预测地面沉降的发展, 应对深部(埋深大于 100 m 的地层)弱透水层的变形特性有清楚的认识。在已有的研究中发现深部弱透水层土体由于成岩作用的影响, 粘性土层较为坚硬、致密, 且在坚硬、致密的粘性土中孔隙渗流规律有偏离达西定律的现象^[3-6]。笔者以深部弱透水层为研

究对象, 对其固结机理进行了探讨, 在机理探讨的基础上提出了深部弱透水层固结变形计算模型建议。

2 深部弱透水层变形机理的探讨

2.1 深部弱透水层中粘性土体的孔隙水类型

讨论弱透水层释水机理的前提是明确深部弱透水层中水的存在形式。弱透水层的主要组成物质是粘

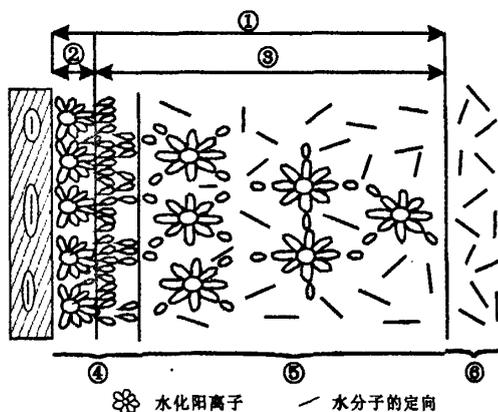


图 1 粘土结合水组构示意图^[7]

Fig. 1 Sketch showing the clay combined water structure
①. 双电层; ②. 吸水层; ③. 扩散层; ④. 吸附结合水; ⑤. 渗透吸附水; ⑥. 自由水

收稿日期: 2009-08-10

基金项目: 国家地质大调查项目“河北曹妃甸滨海地区地质环境调查评价”(1212010814005)

作者简介: 谢海澜(1976), 女, 博士, 主要从事水文地质环境地质等研究工作, Email: xie296226@163.com。

性土,粘性土主要由粘粒组成,粘粒具有胶体或准胶体的特性,它在沉积过程中和周围的溶液发生复杂的物理化学作用,并在其表面形成不同类型的结合水。按其¹⁾与粘粒表面结合的牢固程度的不同,结合水可分成吸附结合水和渗透吸附水。除此之外,在粘性土形成的弱透水层的孔隙中还有其他类型的孔隙水,如毛细水,重力水。为了讨论问题的方便,把毛细水和重力水归为自由水的范围。Р.И.兹洛切夫斯卡娅提出了直观、形象的结合水结构示意图⁷⁾(图 1)。其中,深部弱透水层中孔隙水类型主要为结合水⁸⁾。

随着弱透水层埋深的增加,成岩程度的增强,弱透水层中粘性土含水量减少⁹⁾,根据土质学原理^{6,7)}可以得出深部弱透水层孔隙水类型:1)孔隙水主要为扩散层内渗透吸附结合水和少量的自由水(接近液限含水量时),含水量小于液限含水量但大于塑限含水量,粒间靠重叠的扩散层连结,连结力有较大增加。土体呈塑性状态。2)孔隙水主要为吸附结合水,含水量小于塑限含水量,粒间连结以吸附结合水连结为主,连结力明显增强。土体处于半固态-固态状态。

2.2 深部弱透水层释水机理

深部弱透水层的释水变形机理是与它的孔隙水类型相对应的。深部弱透水层中孔隙水主要以扩散层中渗透吸附结合水为主,含少量自由水或以吸附结合水为主。孔隙水主要以扩散层中渗透吸附结合水为主并含少量自由水的深部弱透水层,在水力梯度作用下,首先是少量自由水释出⁹⁾,孔隙被压缩,当水力梯度进一步增加到足以克服扩散层内渗透吸附结合水抗剪强度时,扩散层内渗透吸附结合水转化为自由水释出,孔隙进一步压缩。在土颗粒接近,土体压密过程中,由于同号双电层斥力和结合水抗剪作用的影响,在压密过程中粘土颗粒的接近受到阻碍。而且随着粘土密度的增加和渗透吸附结合水排出这种影响也随之加大。因此,扩散层中结合水的排出比自由水要慢得多,且存在临界水力梯度,渗透规律偏离达西定律;当弱透水层含水量小于塑限含水量时,孔隙水以吸附结合水为主时,由于吸附结合水受到粘土颗粒强烈的静电吸引和氢键连结作用,其性质与固体比较接近。正如兹洛切夫斯卡娅在“不同密度饱水粘土物理-力学和物理-化学性质形成中的温度因素”一文中指出:“在高压(大于 30 kg/cm²)和低含水量(小于 w_p)时,饱

和粘土的压密性机理主要与吸附结合水强结构化层的抗压阻力有关”。由于粘土孔隙中水化层强结构化分子存在并占优势,阻碍外荷,阻碍这一部分结合水的排出,也阻碍了土体发生渗透变形。在此种土的受压变形中,因渗流(自由水的排出)而产生的变形已微乎其微。在水力梯度作用下基本不会产生渗透变形,而是土体骨架产生受压变形⁸⁾。

3 深部弱透水层固结模型建议

由上文分析可以看出,深部弱透水层中孔隙水类型分为两种,基于这两种孔隙水类型分别提出了深部弱透水层固结计算模型建议。

孔隙水主要以扩散层中渗透吸附结合水为主,在水力梯度作用下孔隙渗流服从非达西定律^{10,11)},如图 2 所示。处于这一含水范围内的弱透水层的变形计算建议采用利用非达西定律修正过的太沙基渗透固结理论。

鉴于太沙基一维固结方程的广泛应用,笔者采用 Hansbo 提出的非达西流表达形式(1)、(2),推导出在非达西流条件下太沙基一维固结方程的修正形式。如下式(3)及(4)所示:

$$\begin{cases} q = ki^m & (i \leq i_0) \\ q = K(i - i_0) & (i \geq i_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} q = \frac{Ki^m}{mi} & (i \leq i_0) \\ q = K(i - \frac{m-1}{m}i_0) & (i \geq i_0) \end{cases} \quad (2)$$

在表达式中,当水力梯度 i 大于起始水力梯度 i_0 时,流速与水力梯度之间的为线性关系,但当水力梯度 i 小于起始水力梯度 i_0 时,流速与水力梯度呈现的是一种指数关系。 m 是由试验确定常数, k 、 K 分

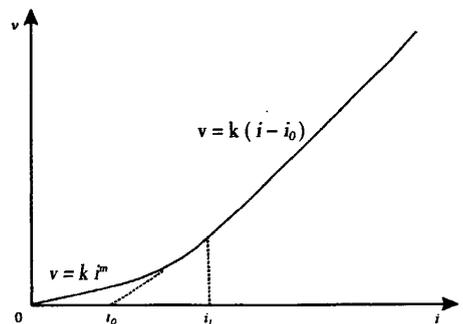


图 2 非达西定律的 v-i 关系曲线
Fig. 2 Relationship curve of non-Darcy flow

别是指数形式表达式中的渗透系数和线性关系表达式中的渗透系数。Hansbo 认为 i_i 代表克服最大的结合水吸附力所需的水力梯度。从公式中可以看出,当 $m=1$ 且 $i_0=0$ 时,就得到达西流的表达式,达西流是非达西流的一种特殊形式。由连续性和可微性可以得出 $i_0 = i_i(m-1)/m$ 和 $k = K/mi_i^{m-1}$ 。所以非达西定律还可以写为(2)式形式。

推导方程的基本假设与传统太沙基一维固结方程的假设^[1]基本相同,只是把压缩土层的孔隙渗流由达西流改为非达西流。当 $|i| \leq |i_i|$ 时,根据假设条件可推导出如下形式的固结方程:

$$\left[\frac{\partial h}{\partial z} \right]^{m-1} \frac{K(1+e)}{a\gamma_w} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

当时 $|i| \geq |i_i|$, 推导得出固结方程如下:

$$\frac{K(1+e)}{a\gamma_w} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

其中, a 为土体的压缩系数, e 为微分土体的孔隙比, u 为超静孔隙水压力, K 为渗透系数, h 为水头差, z 为深度, γ_w 为水的重度。

给固结方程(3)、(4)增加一定的边界条件和初始条件,就可得出方程的解析解或半解析解,从而能求出任意时间、任意深度处弱透水层的固结状态。

当含水量小于塑限含水量时,弱透水层中土体的成岩程度增强,已经处于固态-半固态状态,在外荷作用下是土体骨架产生受力变形,对其变形计算采用弹性力学中的理论进行。初步考虑可以假设受压缩弱透水层为各向同性的线弹性体,且由于抽水产生的附加荷载在弱透水层产生弹性变形的应力范围内,建议采用弹性本构关系模型对弱透水层的变形进行计算。

4 结论

(1)随着弱透水层埋深的增加,成岩程度的增强,依据土质学原理得出深部弱透水层孔隙水类型:主要为扩散层内结合水和吸附结合水。孔隙水主要为扩散层内渗透吸附结合水和少量的自由水时,含水量小于液限含水量但大于塑限含水量,粒间靠重叠的扩散层连结,土体呈塑性状态;孔隙水主要为吸附结合水,含水量小于塑限含水量,粒间连结以吸附结合水连结为主,土体处于半固态-固态状态。

(2)深部弱透水层的孔隙水类型决定了它的固结变形机理:当孔隙水类型主要为扩散层内结合水(含少量自由水)时,渗透固结存在水力梯度,渗透规律偏离达西定律;孔隙水类型主要为吸附结合水时,在水力梯度作用下基本不会产生渗透变形,而是土体骨架产生受压变形。其变形规律的数学描述应参考固体变形的数学表述。

(3)基于深部弱透水层渗透变形机理的分析,提出了深部弱透水层固结计算模型建议:孔隙水类型主要为扩散层内结合水时,可以采用利用非达西流修正的太沙基固结方程对深部弱透水层变形进行计算,可以参考给出的采用非达西定律修正过的一维固结方程;孔隙水类型主要为吸附结合水时,可以利用弹性本构关系模型对深部弱透水层进行变形计算。

参考文献:

- [1] 张云. 一维地面沉降模型及其求解 [J]. 工程地质学报, 2002, 10(4): 434-437.
- [2] 陈戈, 阎世骏, 李铁锋. 天津市深层粘性土对地面沉降的影响及其沉降量计算 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 804-809.
- [3] Moser M A. The effectiveness of sand drain in soft clays, Proc. of International Symposium on Soft Clay, 1977.
- [4] Hansbo S. Consolidation of clay, with Special Reference to Vertical Sand Drains, Proc. No.18, Swedish Geotechnical Institute, 1960.
- [5] Hansbo S. Influence of Mobile Particles in Soft Clay on Permeability, Proc. of International Symposium on Soil Structure, Sweden, 1973.
- [6] 王秀艳, 刘长礼. 对粘性土孔隙水渗流规律本质的新认识 [J]. 地球学报, 2003, 24(1): 91-95.
- [7] 唐大雄, 孙素文. 工程岩土学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987. 22-26.
- [8] 李文平. 饱水粘性土高压压实过程中孔压及体应变变化试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 666-669.
- [9] 王秀艳, 刘长礼. 深层粘性土渗透释水规律的探讨 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 308-312.
- [10] Teh Cee Ing, Nie Xiaoyan. Coupled consolidation theory with non-Darcian flow [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29: 169-209.
- [11] Hansbo S. Aspects of vertical drain design: Darcian of non-Darcian flow. Geotechnique, 1997, 47(5): 983-992.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000, 200-201.

Deformation Model Suggestion of Deep-dept Aquitard

XIE Hai-lan, WANG Xiao-dan, HU Yun-zhuang, QIN Ya-fei

(Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin 300170)

Abstract: Land subsidence model is an important part in research of land subsidence. And meantime study of aquitard deformation model is an important part in research of land subsidence model. Author analysed pore water type of deep depth aquitard and studied the deformation characters of the pore water type of deep depth aquitard, and understood the deformation mechanics of deep depth aquitard. Based on deformation mechanics analysis, non-Darcy flow was adopted to modify calculation model of land subsidence, and the authors put forward deformation model suggestion of deep depth aquitard. when pore water type is loosely bound water, authors advise to use Terzaghi consolidation equation modified by no-Darcy flow, and put forward the modified equation for deep depth aquitard deformation calculation; when pore water type is strongly bound water, authors advise to use elastic constitutive model to calculate deep depth aquitard deformation.

Key words: land subsidence; aquitard; non-Darcy flow; consolidation model

参考文献的标注方法

参考文献只列出公开发行者书刊、正是的学位论文和地质报告,非公开发行者用脚注表示。标注参考文献一定要内容全面,一般包括下列几项:1)主要责任者(专著作者、论文集主编、学位申报人、报告撰写人、期刊文章作者、析出文章作者等),为了节省版面,一般在人名多于三个时,仅列出前三个,其它用“等”字代替,少于三个时都要列出,换句话说,只有四个以上时才加“等”;2)文献题目;3)文献类型及载体标识,如书用[M],期刊用[J],报告用[R]等;4)其它责任者,如译者等;5)出版项,如果是书,要注明出版地、出版社、出版年;如果是期刊,按照顺序表明刊名、卷、期和文章所在的页码;如是科技报告或学位论文,应指明该文献存放的单位;如是电子文献,要有文献的出处和可获得的网址。

参考文献的注录格式不同期刊有不同的要求,今介绍本刊所用的顺序编码制:按参考内容在文章中出现的先后,在正文中用方括号([1]、[2]……)以右上角的形式标出,文后参考文献列表中编号还用[1]、[2]……标出,和文中出现的先后顺序一致。特别注意,参考文献不能标在任何级别的标题上。标注格式如下:

专著类: [1] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 20-30.

[2] Broko H, Jones W. Petrology[M]. New York: Pengamon Company, 1978, 20-50.

期刊类: [3] 沈保丰, 翟安民, 苗培森, 等. 华北陆块铁矿床地质特征和资源潜力展望[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(4): 244 - 252.

[4] Robert H. Ultramafic rocks[J]. Econ. Geol. 1990, 27(4): 7-14.

译文类: [5] 贝弗里奇 WB. 橄榄石矿物学[M]. 李大山译. 北京: 科学出版社, 1984, 10-40.

[6] 罗伯特 RH. 卡林型金矿[J]. 李大山译. 世界地质, 1984, 3(4): 17-20.

析出文章类(论文集集中的文章):

[7] 黄蕴慧. 国际矿物学研究动向[A]. 程裕淇. 世界地质发展动向[C]. 北京: 地质出版社, 1982, 38-4. (刘新秒)