

根据地面沉降与地下水头的关系 求地面沉降临界水位

赵 慧¹ 冉兴龙¹ 李 渊²

(1. 长安大学环境科学与工程工程学院 西安市 710054 2. 西安高新区雁塔科技产业管理办 西安市 710065)

摘要 该文通过地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系来确定临界水位,并将其与根据超固结应力确定的临界水位进行比较,结果表明:两种理论依据下提出的临界水位具有相同的物理意义,仅在值域上存在一些差异。就其准确性而言,通过地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系确定的方法明显具有较高的可信度,值得进一步推广。

关键词 地面沉降 临界水位 前期固结应力 线性相关关系

To Determine Critical Water Level by Correlation between Land Subsidence and Groundwater Drawdown

Zhao Hui¹ Ran Xinglong¹ Li Yuan²

(1. College of Environmental Engineering and Environmental Sciences, Chang'an University

2. Yanta Science Management Office in New Hi-technology Development Zone, Xi'an city)

Abstract In the paper, the critical water level is determined according to the linear correlation between land subsidence and groundwater drawdown, simultaneously, as compared with the critical water level by preconsolidation stress, the results show that their physical meaning is agreeable for two methods of acquiring critical water level, only exist some differences on value domain. As for their accuracy, the new method has obvious credibility and superiority to others, which is worthy to be further popularized.

Keywords land subsidence; critical water level; preconsolidation stress; linear correlation

1 前言

大范围超采地下水引起的地面沉降已成为地下水资源可持续开发和管理的约束因素,在实践中通常采用临界水头降深(简称临界水位)作为地下水管理模型的约束因子。临界水位最初是由牛修俊等(1998)天津的地面沉降研究专家根据含水层系统中的弱透水层存在超固结应力的现象提出的。从地面沉降的发生机理角度来看,这种临界水位概念的提出反映了弱透水层的形变特性,因而从理论上说是恰当的,但这种方法计算的临界水位具有多值性,即对某一确定的地层来说,其临界水位值不唯一,且变化范围较大。这样一来,该方法在实践中的可操作性

就受到了限制。本文将通过在多孔介质垂向弹性形变假定下对地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系研究,提出了求解临界水位的新方法,并通过理论与实例分析,与现有的临界水位计算方法进行对比,指出新方法的优越性及其使用条件。

2 根据前期固结压力确定临界水位

2.1 根据固结理论求临界水位的机理

第四系及第三系松散及半胶结的地层,依据其前期固结压力值 P_c 与地层有效自重压力值 P_0 大小,可分为欠固结地层、正常固结地层及超固结地层三种固结状态,如图 1 所示。其中 A_1 点及 A_2 点对应的横坐标值为地层的自重压力 P_0 及前期固结压力 P_c 。根据固结理论,临界水位仅存于超固结地层中,且依据超固结值(P_c 与 P_0 之差)来确定它的大小。正如

图2所示,天津市第二组地层(50~180m)的超固结值约为294~392kPa,则相应地层的临界水位值为30~40m。很明显,上述方法未给出超固结值向临界水位转化的机理,为了便于两种求解方法的理论比较,下面将着手探讨。

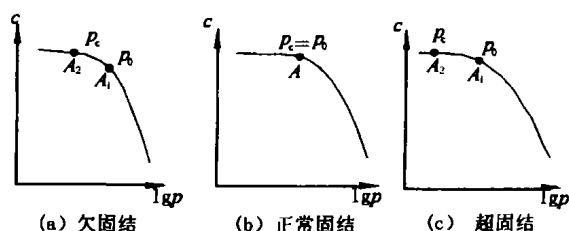


图1 地层的三种固结曲线

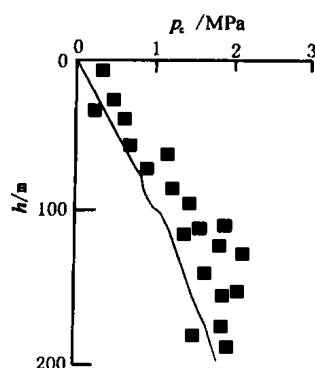


图2 P_c 随深度变化散点

2.2 超固结值向临界水位转化的机理

在土自重作用下地层任一深度处的自重压力 $P_0 = \gamma h$, 其中 γ 为有效重度。如不考虑地表荷载, 则总垂直压力

$$\sigma_h = P_0 = \gamma h \quad (1)$$

对于超固结地层来说, 其 $P_c > P_0$, 超固结值 $\Delta P_0 = P_c - P_0$ 。如果水位下降引起的附加荷载使土层现存的自重压力 P_0 增加一个压力增量 ΔP , 且 $\Delta P > \Delta P_0$, 则地层发生释水压密, 其机理表达式为

$$\begin{cases} \Delta P > \Delta P_0 (\text{地层压缩}) \\ \Delta P \leq \Delta P_0 (\text{地层未压缩}) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)说明: 由于水位下降产生附加荷载致使自重压力增加而引起土层的释水压密需要超固结值 ΔP_0 来启动, 因此相应地存在一个土层释水压密所需要的大于起始应力增值的应力增值 ΔP 。这与粘性土层中发生渗流需要起始水力梯度进行驱动一样, 地层发生释水压密也需要超固结值 ΔP_0 来启动。

根据有效应力原则(Terzaghi, 1925), 含水层中任一单位水平面积上的总压力 σ 、孔隙流体压力 P 与骨架颗粒的有效应力 σ' 之间存在下列关系

$$\sigma = \sigma' + p \quad (3)$$

若总压力 σ 不变, 孔隙流体压力 p 变化与骨架颗粒的有效应力 σ' 等量值变化之间存在下列平衡关系式

$$d\sigma' = -dp \quad (4)$$

式(4)表明: 当超固结地层中流体压力因水位下降而减少 ($dp < 0$) 时, 骨架颗粒的有效应力就增大 ($d\sigma' > 0$), 这将引起骨架的压缩, 从而导致地层的释水压密。

根据伯努利(D. Bernoulli)方程, 即水在土中流动所遵循的能量方程, 相对于任意确定的基准面, 地层中某一点的总水头 H 为

$$H = z + H_w + H_v \quad (5)$$

式中: z 为位置水头; H_w 为压力水头; H_v 为流速水头(忽略不计)。这样一来, 式(5)可简化为

$$H = z + H_w = z + \frac{p}{\gamma_w} \quad (6)$$

则孔隙流体压力 p 可由总水头 H 和位置水头 z 表示为

$$p = \gamma_w(H - z) = \rho_w g(H - z) \quad (7)$$

对某一特定点来说, 若 z 保持不变, 则表达式(7)可用微分形式表示为

$$dp = g d(\rho_w H) = g \rho_w dH + g H d\rho_w \quad (8)$$

其中 $g H d\rho_w$ 可以忽略不计。 ρ_w 可以认为是代表性单元体积的地层密度。

将式(8)代入式(4)中, 有

$$d\sigma' = -dp - \rho_w g dH \quad (9)$$

式(9)表明: ①在有效应力原则中, 不考虑上部荷载, 以及在伯努利能量方程中不考虑由于水流速带来的动水头 H_v 时, 同时 ρ_w 作为常数对待, 则有效应力 σ' 变化和水头降深 ΔH 之间存在反向等值变化关系, 即两者之间存在反比关系; 反过来从统计学上看, 有效应力变化与水头降深之间具有显著的线性关系。②以孔隙水压力 p 的变化为中间变量, 就可以将有效应力 σ' 变化同水头降深 ΔH 有力地结合起来, 这为超固结值 Δp_0 向临界水位值转化提供了重要的理论依据。

这样一来, 根据超固结值确定临界水位的机理很容易理解, 即在超固结地层中, 前期固结压力 p_c 对应 H_c , 自重压力 p_0 对应 H_0 , 根据有效应力与水头降深之间的反比关系可知: $H_c < H_0$, 且有 $\Delta H_0 = H_0 - H_c$ 。如果孔隙水头 H_0 存在一个降深 ΔH , 致使 $\Delta H > \Delta H_0$, 则地层将产生释水压密, 其机理表达式为

$$\begin{cases} \Delta H > \Delta H_0 (\text{地层压缩}) \\ \Delta H \leq \Delta H_0 (\text{地层未压缩}) \end{cases} \quad (10)$$

与式(2)比较, ΔH_0 可以看作是驱动储水层释水

压密的起始水头降深,并称之为临界水位。其中 ΔH 为水位实际变化值, $\Delta H - \Delta H_0$ 为有效水头降深。Jacob 假定下,储水系数视为常数,则储水层释水压密的机理表达式为

$$s = \begin{cases} S^* (\Delta H - \Delta H_0) & (\Delta H > \Delta H_0) \\ 0 & (\Delta H \leq \Delta H_0) \end{cases} \quad (11)$$

3 根据地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系确定临界水位

3.1 Jacob 假定下地面沉降与地下水头的关系

忽略颗粒的压缩性时,不管是否考虑水的弹性形变,冉兴龙在 Jacob 假定条件下已经推导出利用体应变 ϵ (压缩应变取正) 与孔隙水头 H 表示出的储水层形变关系方程(2002 年)

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = - S_s^* \frac{\partial H}{\partial t} \quad (12)$$

式中 $S_s^* = \rho_w g c_m$, 为骨架弹性储水率; ρ_w 为水的密度; g 为当地重力加速度; c_m 为多孔介质骨架的垂向弹性体积压缩系数或骨架垂向弹性压缩系数,简称骨架弹性压缩系数。由于 c_m 为常数且恒大于零,则 S_s^* 也为常数。这里 S_s^* 指垂向弹性形变下的储水率,所以储水层只发生垂向形变,设垂向应变为 ϵ_z ,此时 $\epsilon = \epsilon_z$,则式(12)可写为

$$\frac{\partial \epsilon_z}{\partial t} = - S_s^* \frac{\partial H}{\partial t} \quad (13)$$

假定储水层在非稳定渗流的初始时刻的垂向应变为 0,则 t 时刻纯粹由非稳定渗流引起的储水层垂向应变可通过对式(13)两端作 $0-t$ 的时间积分得到,即

$$\epsilon_z = - \int_0^t S_s^* \frac{\partial H}{\partial t} dt \quad (14)$$

在 Jacob 假定下,由于 S_s^* 不随时间变化而恒为常数,则上式积分结果为

$$\epsilon_z = S_s^* \Delta H \quad (15)$$

该式表明:储水层由于水头变化导致骨架对水的弹性储存或释放而引发的任一点处的体应变等于其骨架弹性储(释)水率与水头增量的乘积。

假定平原或盆地内的第 i 储水层底板处的颗粒累计位移为 0,那么,在储水层顶板处的累计位移或对地面沉降的贡献值 s_i 就可以通过对式(15)两端作储水层厚度范围的积分得到,即

$$s_i = \int_0^{b_i} \epsilon_i dz = \int_0^{b_i} S_{s_i}^* \Delta H_i dz \quad (16)$$

式中 b_i 为储水层厚度, z 为储水层厚度方向的坐标变量。如假定储水层在其厚度方向 z 上储水率及水头

增量均布,则上式转化为

$$s_i = S_{s_i}^* b_i \Delta H_i = S_i^* \Delta H_i \quad (17)$$

其中的 $S_i^* = S_{s_i}^* b_i$ 称作第 i 储水层的骨架弹性储(释)水系数, ΔH_i 为第 i 层的平均水头降深。该式反映了 Jacob 假定条件下储水层产生弹性变形的机理,即水头的变化起因于非稳定流与储水层的可压缩性 ($S_s^* > 0$)。

对地表某一点来说,假定地下所有储水层的展布近于水平,则地面沉降 s 就等于地表以下所有储水层(共 m 个)的垂向压缩量的叠加,即

$$s = \sum_{i=1}^m S_i^* \Delta H_i \quad (18)$$

如果假定各层的水头降深相同,并均取为 ΔH ,如再令 $S^* = \sum_{i=1}^m S_i^* = \sum_{i=1}^m S_{s_i}^* b_i$ 为 m 层的综和骨架弹性储水系数,则式(18)变为

$$s = S^* \Delta H \quad (19)$$

上式即为 Jacob 假定条件下储水层产生弹、塑性形变(即不适用于蠕变)的机理表达式。它表明:在 Jacob 假定条件下,由于储水层的骨架弹性储水率不随时间发生变化,如果在铅直方向各储水层的水头升降接近同步,则某点处的综合骨架弹性储水系数即为常数,亦即地面沉降应与地下水头降深成正比;反过来从统计学上看,地面沉降与地下水头降深之间应具有线性相关关系,其比例系数应为地表以下所有垂向压缩储水层的综合的骨架弹性储水系数。

3.2 实例分析

天津市地处宝坻断裂和蓟运河断裂以南的滨海平原,属于新华夏构造体系。其中市区位于沧州隆起的双窑凸起之上,第四系和上第三系松散沉积厚度 1200m 左右。岩性特征主要为海相的细砂和粘土层。可划分出 10 个含水层单元;上部的几个单元见图 3。在这些沉积物中,可压性粘性土层占 60% 以上,因此在地层释水压密的过程中,必须考虑深层粘性土层的滞后压密作用。

根据分层观测资料,可以作出某一观测时间段内不同含水单元中地面沉降与地下水头相关性分析成果图,如图 4 所示。规定沉降为“-”,回弹为“+”;箭头表示应力(水头降深)一应变(地面沉降)曲线随实测时间的变化方向(路径)。其中第四含水单元明显经历了两种形变过程,即地下水位持续下降条件下的地面沉降和地下水位回升条件下的地面沉降,由此可将图 4(c)分解为图 4(c₁)和图 4(c₂),以便于下面的分析研究。

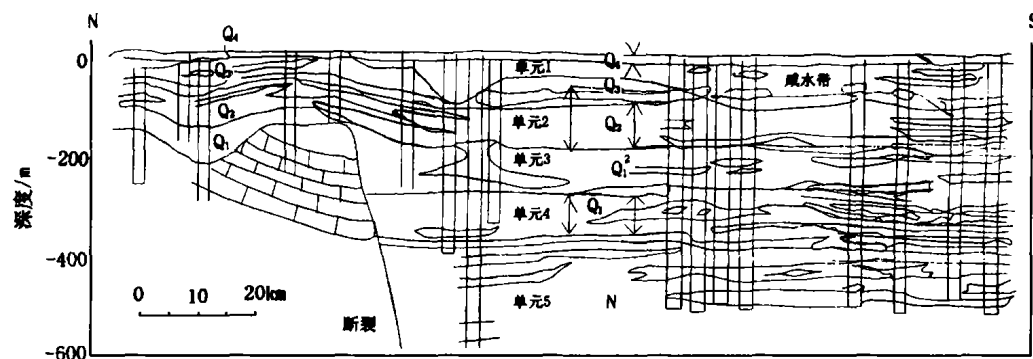


图3 天津市地质剖面

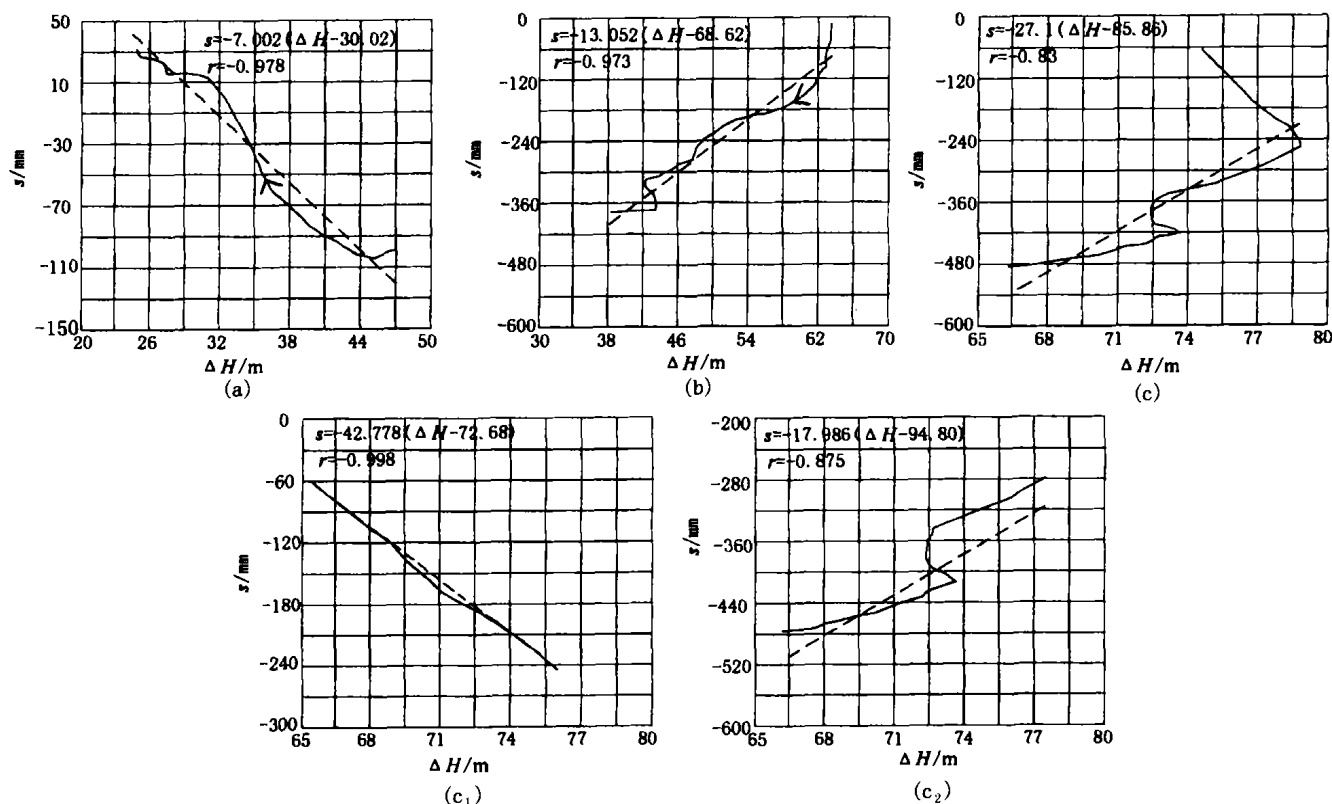


图4 天津地面沉降与地下水位相关关系分析成果

ΔH 为水位降深; S 为地面沉降量(按时间顺序连线); --- 线性回归曲线; —— 实测曲线; r 为线性相关系数; 图(a)第二含水层中的线性相关性; 图(b)第三含水层中的线性相关性; 图(c)第四含水层中的线性相关性; 图(c₁)、(c₂)为图c的分解。

根据图4,可知地层形变具有以下三种特征:1)地下水位持续下降条件下的地面沉降。这主要是由粘性土层压密所造成。据相关资料分析,粘性土层压密造成的沉降约占77.6%,砂层占22.4%;2)地下水位反复升降,但总趋势呈回升状态下的地面沉降。此形变存在于粘性土层中,粘土中非弹性组分的滞后效应,使得地层在水位回升动态下仍处于压密变形状态;3)地下水位持续回升条件下的地面回弹。砂层的变形特征属弹性形变,水位回升时地层回弹。

新方法是在 Jacob 假定下提出的,即仅局限于弱透水层发生铅直方向的完全弹、塑性形变,而不适用于蠕变。也就是说,若视骨架弹性储水系数为常数,则水位回升,地面回弹;水位下降,地面沉降。如果将此机理与图4结合起来,则可以看到:图4(a)和图4(c₁)所反映的地层形变特征恰好属于弹性形变范畴;而图4(b)和图4(c₂)所描述的地层形变特征基本上与特征②一致,即在水位弹性恢复的过程中,经历着非弹性压缩(滞后效应)现象,这属于非弹性机理范畴,在此将不做过多解释。

3.3 地面沉降与地下水头降深之间线性相关关系的修正

图4(a)和图4(c₁)中的两条回归直线均显示了地面沉降 s 与水头降深 ΔH 之间的线性相关性,其线性相关函数通式表达如下:

$$s = k(\Delta H - \Delta H_0) \quad (20)$$

显然式(20)仅对储水层产生弹、塑性形变有意义,而不适用于蠕变;若与式(19)所刻画的理论上的正比例相关关系式相比,可知该直线的斜率相当于垂向压缩层的综合骨架弹性储水系数 S^* ,而 $(\Delta H - \Delta H_0)$ 可以看作产生地面沉降的有效水头降深,则 ΔH_0 可以看作是垂向压缩层产生释水压密的理论起始水头降深(临界水位)。这正如粘性土层中发生渗流需要起始水力梯度进行驱动一样,地面沉降也需要起始水头降深来驱动;由此,粘性储水层释水压密表达式应修改为:

$$s = \begin{cases} S^*(\Delta H - \Delta H_0) & (\Delta H > \Delta H_0 \text{ 时}) \\ 0 & (\Delta H \leq \Delta H_0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (21)$$

比较表达式(11)和(21),很容易发现:根据地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系确定临界水位的机理表达式和根据前期固结应力求解临界水位的机理表达式是完全一致的,这就说明这两种理论下的临界水位物理意义不尽相同。

这样一来,根据图4(a)和图4(c₁)中的两条回归直线的函数表达式 $S = -7.002(\Delta H - 30.02)$ 和 $S = -42.778(\Delta H - 72.68)$,就可以得到以下结论:①第二和第四含水组的临界水位分别为 30.02m 和 72.68m;②临界水位的大小与地层工程地质性质息息相关,粘土释水压密以塑性形变为主,相应所需的驱动力要大一些,即临界水位大一些;而砂土释水压密以弹性形变为主,相对应的临界水位小一些;③不同含水层的骨架储(释)水系数与临界水位的大小保持一致,即临界水位大的相应骨架储(释)水系数也大一些,这与 Hanson 所提出的“当含水层系统应变处于非弹性范围内时,弱含水层的骨架储(释)水系数将是含水层的骨架储(释)水系数的几个数量级”是一致的。

4 讨论

1)根据前期固结应力和通过地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系提出的临界水位概念具有相同的物理意义,都描述了驱动地面沉降发生的极限水位。

2)比较两个求解临界水位的机理表达式,可以看到:它们与土层释水压密产生地面沉降的机理的贡献式存在着惊人的一致性。

3)由于前期固结压力的确定相当复杂,通过土的压缩实验得出或从地质角度来推测估计出来的结果,隐含着不可度量的误差因素,所以确定的临界水位值不唯一,且变化范围较大。而根据地面沉降与地下水头降深之间的线性相关关系确定的临界水位恰好克服了这一弊端。以第二含水组为例,根据前期固结压力确定出其临界水位为 30—40m,而通过新方法确定的为 30.2m。

5 结语

鉴于临界水位在地面沉降的研究、预测和控制方面具有指导意义,所以需要不断地完善和发展其求解方法。准确确定它,尽力减少不必要的损失和灾害,是人们需要关注的一个课题。本文分别从理论和实例上对上述的两种求解方法作了比较,并得出上述结论。总之,新的计算方法对地下水位持续下降条件下的地面沉降问题是适宜的,且克服了多值性的弊端。与采用超固结应力法提出的临界水位概念相比较,所得出的结论将对地下水资源的可持续开发利用和地面沉降控制提供指导。

参考文献

- 1 牛修俊.地层的固结特性与地面沉降临界水位控沉.中国地质灾害与防治学报.1998,9(2):68~74
- 2 刘成宇.土力学.北京:中国铁道出版社.2001,68~69
- 3 郭东屏,宋焱勋,钱会,冉兴龙.地下水动力学.西安:陕西科学技术出版社.1994
- 4 冉光龙.储水层质量守恒方程的简化及在垂向弹性变形下与水流方程的耦合.长安大学学报(地球科学版),2003,25(4):55~59
- 5 吴铁钧,崔小东,牛修俊,陈文杰.天津市地面沉降研究及综合治理.水文地质工程地质,1998,(5):17~20
- 6 吴铁钧,金东锡.天津地面沉降防治措施及效果.中国地质灾害与防治学报.1998,9(2):6~12
- 7 T.R. Shearer B. Adams R. Kitching R. Calow, etc. 中国汉沽地下水超采对物理性质及经济方面的影响.第30届国际地质大会论文集.1996,22
- 8 王大纯,张人权,史毅红,许绍倬.水文地质学基础.北京:地质出版社,1986
- 9 [American] Michelle Sneed, Michael T. Pavelko, and Devin L. Galloway. 限定厚层弱含水层垂直水力扩散系数时对残余含水体系的压实模拟.第六届地面沉降国际讨论会论文选.地质出版社.2001.114