

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.020



沉积作用及应力历史对自重应力和沉降的影响

阮永芬¹,徐梦天源¹,刘克文²,叶文科¹

(1.昆明理工大学建筑工程学院,昆明 650500;2.十四冶建设云南勘察设计有限公司,昆明 650031)

摘要:土体的沉积作用和应力历史会影响土体自重应力的确定,也会影响地基最终沉降量的确定。鉴于 $e-\ln p$ 比 $e-\lg p$ 坐标图能更方便、精确地描述线性问题,根据 $e-\ln p$ 坐标图推导沉积作用对成层土、正常固结土、超固结土的自重应力与沉降影响的计算式。用该计算式对昆明滇池国际会展中心部分深厚软土地基的自重应力和最终沉降量进行计算,并用计算结果和不考虑沉积作用及应力历史影响的计算结果进行对比分析,结果表明,沉积作用对深厚软粘土自重应力和最终沉降量计算值的影响非常显著,并且土体厚度越厚、上覆荷载越大,其影响越明显。

关键词:沉积作用;深厚软土;应力历史;自重应力;沉降

中图分类号:TU431;TU433 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)02-0155-07

Influence of sedimentation and stress history on computation of gravity stress and settlement

Ruan Yongfen¹, Xu Mengtianyuan¹, Liu Kewen², Ye Wenke¹

(1. Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P. R. China;
2. The 14th Metallurgical Construction Corporation Yunnan Survey and Design Co., LTD, Kunming 650031, P. R. China)

Abstract: Soil sedimentation and stress history have great impact on the determination of soil gravity stress and the final settlement of the foundation soil. Due to the accurate and convenient of coordinate in dealing with the linear problem over coordinate, thus it is often applied to calculate the influence of sedimentation and gravity stress of the normal consolidated soil and over-consolidated soil. This formula is to used to calculate the gravity stress value and final settlement value of deep soft clay which came from Kunming exhibition Center near Dianchi Lake, while the calculation result is used to make a comparison with historical data of stress value and settlement impact. The result showed that the sedimentation has great impact to the gravity and final settlement value of deep soft clay, furthermore, the thicker of the soil will bring the bigger of the overlying load consistently.

Keywords: sedimentation; deep soft clay; stress history; gravity stress; settlement

在大应变固结分析中,自重应力对固结过程的影响不容忽视,会直接影响到固结土体超静孔隙水

压力的取值^[1]。用传统方法计算土的自重应力时,通常把同一性质土层的重度视为常数,认为其不随

收稿日期:2016-04-22

基金项目:教育部博士点基金(20135314110005);国家自然科学基金联合基金(U1502232)

作者简介:阮永芬(1964-),女,教授,博士,主要从事岩土工程研究,(E-mail)ryy64@aliyun.com.

Received:2016-04-22

Foundation item: Programs Foundation of Ministry of Education of China (No. 20135314110005); Joint Funds of the National Natural Science Foundation China(No. U1502232)

Author brief: Ruan Yongfen(1964-), professor, PhD, main research interest: geotechnical engineering, (E-mail)ryy64@aliyun.com.

计算深度的变化而改变。因此,常常使得计算出的土层自重应力随计算深度呈线性变化。然而,有研究表明,深厚软土层往往表现出非常大的压缩性,在固结过程中变形甚至达到了 80%^[2-3]。由此可见,同一土层重度为常数的假定不适用于土层厚度很大且压缩模量较小的沉积土,特别是对于深厚软粘土、海洋沉积土等一些压缩性较高的土层,由于沉积作用影响,同一土层的重度、孔隙比等物理力学性质随深度的变化十分明显^[4]。

Fungaroli 等^[5]最早提出考虑沉积作用影响的土体有效重度随深度变化的计算公式。在此基础上,De Simon 等^[6]推导了正常固结粘土在沉积作用下自重应力的表达式。Li^[7]提出了正常固结粘土在沉积作用下的最终沉降量表达式。文献[5-7]针对的都是处于正常固结状态的单层土,却没有研究成层土和超固结的情况。谢康和等^[8]对以上研究内容做了进一步分析,提出了沉积作用下正常固结成层地基土的自重应力和最终沉降量的表达式,但没有对超固结土进行研究。

除此之外,土体本身的应力历史也对其力学指标有不可忽略的影响。刘占芳等^[9]通过引入基于混合物理论的两相多孔介质理论,描述应力历史对软土弹塑性固结沉降过程的影响。李剑等^[10]通过对不同应力历史的重塑红黏土土样进行大量动三轴试验,分析了不同应力历史对重塑红黏土的影响规律,并建立了重塑红黏土动力指标与应力历史关系的经验公式。李新明等^[11]利用 GDS 应力路径三轴试验系统对南阳膨胀土进行了不同应力速率和超固结比条件下的被动拉伸三轴试验,得出了膨胀土变形模量随超固结比和应力速率的增加而增加的结论。Saye 等^[12]通过大量试验,探究了对不同类型土体的超固结比与其液限间的关系。Finno 等^[13]通过实验,探究了不同应力历史情况下芝加哥冰川黏土间力学性质的差异。上述文献都只探讨了土体应力历史对其力学性质的影响,并没有涉及到土体应力历史对其最终沉降的影响。

笔者在已有研究成果的基础上,利用不同于文献[8]采用的 $e-\lg p$ 坐标,而是采用 $e-\ln p$ 坐标,推导在沉积作用下超固结和正常固结土地基的自重应力及最终沉降量的计算表达式,量化沉积作用及应力历史对土体自重应力和最终沉降量的影响。

1 理论推导

1.1 $e-\lg p$ 与 $e-\ln p$ 坐标图中的压缩曲线比较

$e-\ln p$ 坐标图中的压缩曲线和回弹曲线常呈线性性状,如图 1 所示,而 $e-\lg p$ 坐标图中的压缩曲线和回弹曲线常常有明显拐点,如图 2 所示。所以 $e-\ln p$ 坐标比 $e-\lg p$ 坐标能更方便精确地描述压缩曲线及回弹曲线的线性问题。因此,采用 $e-\ln p$ 图来推导沉积作用对地基自重应力与沉降影响的表达式更合理。

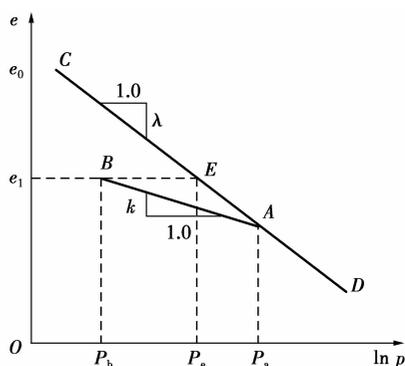


图 1 $e-\ln p$ 坐标下压缩与回弹曲线

Fig. 1 The compression and swelling curve in the $e-\ln p$ coordinates

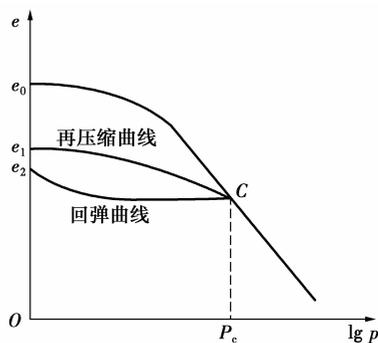


图 2 $e-\lg p$ 坐标下压缩与回弹曲线

Fig. 2 The compression and swelling curve in the $e-\lg p$ coordinates

在图 1 所示的 $e-\ln p$ 坐标中,压缩曲线及回弹曲线表达式为^[14]

$$e = e_0 - \lambda \ln p \quad (1)$$

$$e = e_1 - \kappa \ln p \quad (2)$$

式中: e_0 为压缩曲线上 p 等于单位压力时土体孔隙比; e_1 为回弹曲线上 p 等于单位压力时土体孔隙比; λ 为压缩曲线斜率; κ 为回弹曲线斜率。

1.2 自重应力计算式

总厚度为 H 的成层沉积土,总土层数为 n ,如图

3 所示。图 3 中 $h_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 层土的厚度; z 为原点位于地表的坐标, $z_i = \sum h_i$ 为原点至第 i 层土底面的距离, $z_0 = 0, z_n = H$ 。

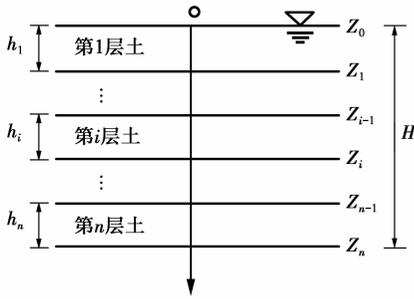


图 3 成层沉积土示意图

Fig. 3 Sedimentary deposit soil map

饱和土的有效重度 γ' 与孔隙比 e 的关系为

$$\gamma' = \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \quad (3)$$

式中: G_s, γ_w 分别为土粒相对密度和水的重度。

在同一土层中, G_s, γ_w 可以看作是常数。在沉积作用影响下的软粘土土层中, 孔隙比 e 不是常数, 而是随着深度 z 或者竖向有效应力 σ' 的增大而减小。在 $e - \ln p$ 坐标下, 可以将 e 表示为

$$e = e_1 - \lambda \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_1} \right) \quad (4)$$

式中: e_1 为压缩曲线上相应于 σ'_1 对应的孔隙比。为方便计算, 取 $\sigma'_1 = 50$ kPa 对应的孔隙比; σ'_z 为 z 处的有效自重应力, kPa。

1.2.1 饱和正常固结土在沉积作用影响下的自重应力

1) 单层正常固结土的自重应力 由式(2)和(3)可知, 有效重度 γ' 不是常量, 是随着自重应力的增大而增大的变量。结合式(3)和式(4), 可将自重应力 σ'_z 用积分形式写为

$$\sigma'_z = \int_0^z \gamma' dz = \int_0^z \frac{G_s - 1}{1 + e_1 - \lambda \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_1} \right)} \gamma_w dz \quad (5)$$

2) 成层土的自重应力 由式(1)~(5)可以得出第 i 层土内 z 处自重应力的表达式为

$$\sigma'_z = \sigma'_{z_{i-1}} + \int_{z_{i-1}}^z \frac{G_{si} - 1}{1 + e_{1i} - \lambda_i \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{1i}} \right)} \gamma_w dz \quad (z_{i-1} \leq z \leq z_i) \quad (6)$$

式中: e_{1i} 为第 i 层土中对应于有效应力 σ'_{1i} 的孔隙比; G_{si} 为第 i 层土的土粒相对密度; λ_i 为第 i 层土的

压缩曲线斜率; $\sigma'_{z_{i-1}}$ 为第 i 层土顶面 ($z = z_{i-1}$) 处自重应力, kPa。

式(6)可改写为

$$\int_{\sigma'_{z_{i-1}}}^{\sigma'_z} \left[1 + e_{1i} - \lambda_i \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{1i}} \right) \right] d\sigma'_z = \int_{z_{i-1}}^{z_i} \gamma_w (G_{si} - 1) dz \quad (7)$$

将式(7)积分整理, 得

$$A_i \sigma'_{z_i} \left[\ln \left(\frac{\sigma'_{z_i}}{\sigma'_{1i}} \right) - B_i \right] + z_i = A_{i-1} \sigma'_{z_{i-1}} \left[\ln \left(\frac{\sigma'_{z_{i-1}}}{\sigma'_{1i}} \right) - B_{i-1} \right] + z_{i-1} \quad (z_{i-1} \leq z \leq z_i) \quad (8)$$

$$A_i = \frac{\lambda_i}{(G_{si} - 1) \gamma_w} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

$$B_i = \frac{1 + e_{1i}}{\lambda_i} + 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

当 $n = 1$, 即为单层土时, 因为 $z_0 = 0$, 所以, $\gamma'(z_0) \rightarrow 0$, 此时, 式(8)变为

$$A_1 \sigma'_z \left[\ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{11}} \right) - B_1 \right] + z_i = 0 \quad (0 \leq z_i \leq z_1) \quad (11)$$

式(8)和式(11)共同组成了计算成层土中任一深度 z 处自重应力 σ'_z 的递推公式。计算时应先从式(11)求得第一层土 ($i = 1$) 中的自重应力, 然后将该层土底面处的自重应力代入式(8)的右边, 就可以得到计算第 2 个土层 ($i = 2$) 顶面处中自重应力, 以此类推, 就可以得到第 n 层土的自重应力。

1.2.2 单层饱和超固结土在沉积作用影响下的自重应力

1) 单层超固结土的自重应力 对于单层超固结土, 其室内压缩曲线应为图 1 所示的 BAD 折线形式。 p_a 为超固结土历史上所受到过的最大压力, 即为前期固结压力。当土层上覆压力小于 p_a 时, 土体的孔隙率随着压力的增大沿着直线 BA 变化; 当土层的上覆压力大于 p_a 时, 土体的孔隙率随着压力的增大沿着直线 CD 变化。所以, 求解单层饱和超固结土的自重应力应分为 2 个阶段, 即超固结阶段和正常固结阶段。

以各层土的先期固结压力 p_a 为分界点, 当土层上覆自重应力小于 p_a 时, 土体处于超固结阶段; 当土层上覆自重应力大于或等于 p_a 时, 对应土层深度以下的土体处于正常固结状态。

由式(3)可得单层土任一深度的自重应力。当土层某一深度的自重应力等于其前期固结压力 p_a 时, 其对应的深度可由式(12)得出。

$$p_a = \sigma'_z = \int_0^z \gamma' dz = \int_0^z \frac{G_s - 1}{1 + e_1 - \kappa \ln\left(\frac{p_a}{\sigma_1}\right)} \gamma_w dz \quad (12)$$

令此时的深度 $z = z^*$, 即 z^* 为临界深度。当土层深度 $z \leq z^*$ 时, 处于超固结阶段; 当 $z \geq z^*$ 时, 土层在 z^* 深度以上的部分处于超固结阶段, 在 z^* 以下的部分处于正常固结阶段。

当土层处于超固结阶段时, 其孔隙比 $e = e_0 - \kappa \ln p$, 此时可用式(13)计算其任一深度自重应力。

$$\sigma'_z = \int_0^z \gamma' dz = \int_0^z \frac{G_s - 1}{1 + e_0 - \kappa \ln\left(\frac{\sigma'_z}{\sigma_0}\right)} \gamma_w dz \quad (0 \leq z \leq z^*) \quad (13)$$

当土层深度超过 z^* 时, 即土层由超固结阶段和正常固结阶段组成, 可用式(14)计算其超过 z^* 下的任一深度的自重应力。

$$\sigma'_z = \int_0^{z^*} \frac{G_s - 1}{1 + e_0 - \kappa \ln\left(\frac{\sigma'_z}{\sigma_0}\right)} \gamma_w dz + \int_{z^*}^z \frac{G_s - 1}{1 + e_0 - \lambda \ln\left(\frac{\sigma'_z}{\sigma_{z^*}}\right)} \gamma_w dz \quad (z \geq z^*) \quad (14)$$

2) 成层饱和超固结土自重应力的计算 成层饱和超固结土的情况比较复杂, 需要把每层土单独拿出来讨论。若求第 n 层土某一深度的自重应力, 就要判断 $n-1$ 层土底面上的自重应力与第 n 层土顶面以上的土重之和是否超过了第 n 层土的前期固结压力 p_a , 若超过, 则用式(14)计算, 若没超过, 则用式(12)计算。

1.3 沉降计算

应用弹性理论计算在荷载作用下各土层的附加应力。考虑侧限条件下, 即单向压缩条件下的压缩性指标, 分层计算各土层的压缩量, 然后求和得到沉降的方法为单向压缩法。单向压缩法是分层总和法中的一种。其计算式为

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} H_i \quad (15)$$

式中: e_0 为第 i 层土的初始孔隙比; e_f 为第 i 层土的最终孔隙比; H_i 为第 i 层土的土层厚度。

可以把单向压缩条件下成层地基最终沉降计算式(15)改写为

$$S_\infty = \int_0^H \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} dz = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{fi}}{1 + e_{0i}} dz \quad (16)$$

1.3.1 饱和成层正常固结土在沉积作用影响下的沉降 对于正常固结的成层土, 由式(4)可得

$$e_{0i} = e_{1i} - \lambda \ln\left(\frac{\sigma'_{zi}}{\sigma_{1i}}\right) \quad (17)$$

$$e_{fi} = e_{1i} - \lambda \ln\left(\frac{\sigma'_{zi} + \Delta p}{\sigma_{1i}}\right) \quad (18)$$

式中: Δp 为作用于地表的竖向均布荷载。由 Δp 引起的沉降量为

$$S_\infty = \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \frac{\lambda_i \ln\left(\frac{\sigma'_{zi} + \Delta p}{\sigma_{1i}}\right)}{1 + e_{1i} - \lambda_i \ln\left(\frac{\sigma'_{zi}}{\sigma_{1i}}\right)} dz \quad (19)$$

根据式(6)、(7)、(9)可以将(19)式改写为

$$S_\infty = \sum_{i=1}^n \int_{\sigma'_{z_{i-1}}}^{\sigma'_{z_i}} A_i \ln\left(\frac{\sigma'_{zi} + \Delta p}{\sigma_{1i}}\right) d\sigma'_{zi} \quad (20)$$

1.3.2 饱和成层超固结土在沉积作用影响下的沉降 由 $e - \ln p$ 坐标图 1 可知, 超固结状态 B 与在压缩曲线上处于正常状态的 E 具有相同的孔隙比。通常将压缩曲线上点 E 对应的应力 p_e 称为固结状态 B 的等效应力, 其表达式为^[14]

$$p_e = p_b \text{OCR}^{1 - \frac{\kappa}{\lambda}} \quad (21)$$

1) 单层饱和超固结土的沉降 假设单层土的初始孔隙比为 e_0 时, 其所对应的超固结状态单位压力为 p_b , 其对应的正常固结状态单位压力为 p_e 。则可以把施加在处于超固结状态下土层上的压力 p_b 等效为施加在处于正常固结状态下土层的压力 p_e , 因此, 超固结状态的单层土可以转化为正常固结状态的单层土来求得沉降, 其沉降表达式为

$$S_\infty = \sum_{i=1}^n \int_0^{z^*} \frac{\lambda_i \ln\left(\frac{\sigma'_{zi} \text{OCR}^{1 - \frac{\kappa}{\lambda}} + \Delta p}{\sigma_{1i}}\right)}{1 + e_{1i} - \lambda_i \ln\left(\frac{\sigma'_{zi}}{\sigma_{1i}}\right)} dz \quad (22)$$

2) 成层超固结土的沉降 对于成层超固结土中处于超固结状态的土层的沉降计算, 可以把其转化为正常固结土来计算, 其计算式为

$$S_\infty = \sum_{i=1}^n \int_{\sigma'_{z_{i-1}}}^{\sigma'_{z_i}} A_i \ln\left[\frac{\sigma'_{zi} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}{\sigma'_{zi} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}}}\right] d\sigma'_{zi} \quad (23)$$

利用式(6)、(7)、(9)可以将式(23)改写为式(24)。

$$S_\infty = \sum_{i=1}^n A_i \left[\sigma'_{z_i} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} \ln\left[\frac{\sigma'_{z_i} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}{\sigma'_{z_i} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}}}\right] - \sigma'_{z_{i-1}} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} \ln\left[\frac{\sigma'_{z_{i-1}} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}{\sigma'_{z_{i-1}} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}}}\right] + \Delta p \ln\left[\frac{\sigma'_{z_i} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}{\sigma'_{z_{i-1}} \text{OCR}_i^{1 - \frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}\right] \right] \quad (24)$$

当成层土厚度足够时,其中某一层土的上覆压力大于这层土的先期固结压力,这层土以下的同一性质的土体就处于正常固结状态。处于正常固结状态的成层土体应按式(25)计算。

$$S_{\infty} = \sum_{i=1}^n \int_{\sigma'_{z_{i-1}}}^{\sigma'_{z_i}} A_i \ln \left(\frac{\sigma'_z + \Delta p}{\sigma'_z} \right) d\sigma'_z \quad (25)$$

积分整理式(25)可得

$$S_{\infty} = \sum_{i=1}^n A_i \left[\sigma'_{z_i} \ln \left(\frac{\sigma'_{z_i} + \Delta p}{\sigma'_{z_i}} \right) - \sigma'_{z_{i-1}} \ln \left(\frac{\sigma'_{z_{i-1}} + \Delta p}{\sigma'_{z_{i-1}}} \right) + \Delta p \ln \left(\frac{\sigma'_{z_i} + \Delta p}{\sigma'_{z_{i-1}} + \Delta p} \right) \right] \quad (26)$$

这时成层土最终沉降包括处于超固结状态土体部分的沉降和处于正常固结状态土体部分的沉降,应用式(24)、(26)进行计算。

3)若在计算成层土的最终沉降时不考虑沉积作用的影响,只需取各层土的有效重度 γ' 为常数 ($\sigma'_{z_i} = \sum_{i=1}^n \gamma' h_i$), 将其带入式(26)即得到不考虑沉积

$$S_{\infty} = \sum_{i=1}^n A_i \left[\sum_{i=1}^n \gamma' h_i OCR_i^{1-\frac{\kappa_i}{\lambda_i}} \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n \gamma' h_i OCR_i^{1-\frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}{\sum_{i=1}^n \gamma' h_i OCR_i^{1-\frac{\kappa_i}{\lambda_i}}} \right) - \sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} OCR_{i-1}^{1-\frac{\kappa_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} OCR_{i-1}^{1-\frac{\kappa_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} + \Delta p}{\sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} OCR_{i-1}^{1-\frac{\kappa_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} + \Delta p} \right) + \Delta p \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n \gamma' h_i OCR_i^{1-\frac{\kappa_i}{\lambda_i}} + \Delta p}{\sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} OCR_{i-1}^{1-\frac{\kappa_{i-1}}{\lambda_{i-1}}} + \Delta p} \right) \right] \quad (28)$$

在不考虑沉积作用的情况下,计算饱和超固结成层土的沉降,土层处于超固结状态时用式(28)计算,当压力变大,土层处于正常固结状态时用式(27)计算。

目前用于计算土体单向固结沉降方法中的分层总和法是先计算出每层土的附加应力,然后再查 $e-p$ 曲线得到所需的孔隙比,最后计算出沉降,过程略显繁琐^[10]。而通过式(27)、(28)计算土体沉降省去了查 $e-p$ 曲线的麻烦,并考虑了超固结作用对土体沉降的影响,提高了计算结果的准确性。

2 自重应力及沉降的计算及分析

2.1 饱和成层土自重应力的计算及分析

当不考虑沉积作用计算饱和成层土自重应力时,各层土的有效重度 γ' 为常数,各层土自重应力随着深度呈线性变化,饱和成层土的自重应力随深度沿折线变化。如果考虑沉积作用,成层饱和土各层土体的孔隙比 e 随所受自重应力变化,导致有效重度 γ' 随着土层深度呈非线性变化,从而使得饱和

作用的正常固结成层土的沉降计算式

$$S_{\infty} = \sum_{i=1}^n A_i \left[\sum_{i=1}^n \gamma' h_i \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n \gamma' h_i + \Delta p}{\sum_{i=1}^n \gamma' h_i} \right) - \sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} + \Delta p}{\sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1}} \right) + \Delta p \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n \gamma' h_i + \Delta p}{\sum_{i=1}^n \gamma'_{i-1} h_{i-1} + \Delta p} \right) \right] \quad (27)$$

4)将 $\sigma'_{z_i} = \sum_{i=1}^n \gamma' h_i$ 代入式(24)可以得出不考虑沉积作用时处于超固结阶段的成层土的沉降计算式

成层土的自重应力随深度呈非线性变化。

根据昆明滇池国际会展中心的初勘报告,选取的土层参数如表 1 所示,所取土层因沉积年代较长,部分已经固结为块状,有一定的结构强度。根据推导的计算式对表 1 所示的 4 层超固结土体系的自重应力进行不考虑沉积作用和考虑沉积作用的计算对比分析,结果如图 4 所示。

表 1 各层土的计算参数及厚度

Table 1 Calculation parameter and thickness of soil layer								
土层号 i	h_i/m	p_a/kPa	G_{si}	e_{1i}	σ'_{1i}/kPa	OCR_i	λ_i	κ_i
1	30	304.85	2.36	3.041	50	1.34	0.51	0.49
2	30	217.85	2.25	2.97	50	1.01	0.67	0.57
3	30	302.90	2.07	2.105	50	1.48	0.37	0.23
4	30	366.00	2.2	2.197	50	1.38	0.35	0.16

工况 1 对应的是考虑成层土体的沉积作用。采用表 1 中参数,按照式(8)及式(14)计算出成层土体自重应力随深度变化的规律,相应的曲线如图 4 所示;工况 2 对应的是不考虑沉积作用,取各土层的有

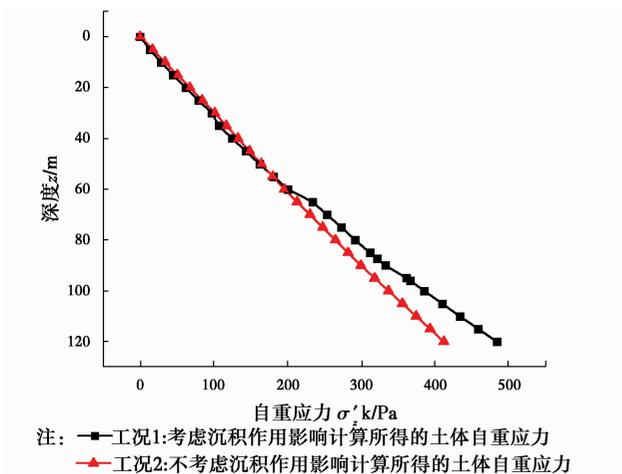


图 4 自重应力随深度的变化曲线

Fig. 4 Distribution of vertical effective overburden pressure

效重度 γ'_i 为恒定值时的计算结果,各土层的有效重度 γ'_i 按照式(3)进行计算,其中各层土的孔隙比 e_i 取对应于自重应力 $\sigma'_{i0} = 50$ kPa 时的孔隙比。

由图 4 可以看出,在计算成层超固结深厚软粘土的自重应力时,考虑和不考虑沉积作用对计算结果的影响有较大差异,并且这种差异随着计算深度的增加而变得越来越明显。

2.2 饱和成层土最终沉降量的计算及分析

与成层土自重应力的计算一样,工况 1 对应的是考虑沉积作用的影响,计算参数采用表 1 中的数据,按照式(24)、(26)计算成层土最终沉降量随上覆荷载的变化规律;工况 2 对应的是不考虑沉积作用影响,取各层土的有效重度 γ'_i 为恒定值,按式(27)、(28)计算成层土最终沉降量随上覆荷载变化的规律,各层土的有效重度 γ'_i 按式(3)进行计算,其中各层土的孔隙比 e_i 取对应于自重应力 $\sigma'_{i0} = 50$ kPa 时的孔隙比。工况 3 对应的是不考虑沉积作用和超固结作用影响,取各层土的有效重度 γ'_i 为恒定值,按式(27)计算成层土最终沉降量随上覆荷载变化的规律,其中各层土的有效重度 γ'_i ,孔隙比 e_i 与工况 2 的计算方法相同。各工况下对应的变化规律曲线如图 5 所示。

比较工况 1 和工况 2 对应的曲线可看出,在计算超固结成层土最终沉降量时,考虑沉积作用的计算结果和不考虑沉积作用的计算结果有明显差别,并且上覆荷载越大差别越明显,上覆荷载越大其计算所得的最终沉降越大;比较工况 2 和工况 3 对应的曲线可知,不考虑超固结作用影响的土体的最终沉降量要明显小于考虑超固结作用影响的土体,且上覆荷载越大两者之间的差异越明显。

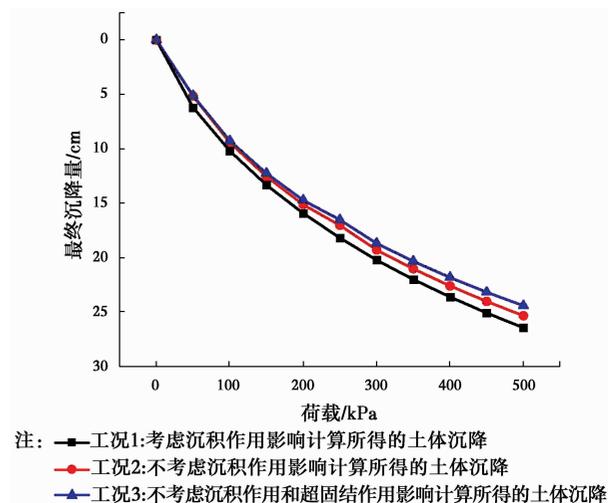


图 5 成层土的荷载-沉降曲线

Fig. 5 The load-settlement curve of layered soil

3 结论

1) 沉积作用对厚度较大、压缩性较高的软土地基自重应力和最终沉降量计算的影响十分明显。

2) 对于单层厚度较大,压缩性较高的成层软土地基,随着上覆荷载的增大,沉积作用对成层土体最终沉降量的影响会越来越大。

3) 对于单层厚度较大,压缩性较高的成层软土地基,在计算其自重应力时应该考虑沉积作用的影响。考虑沉积作用影响后,计算得出的土体自重应力曲线沿土层深度呈非线性变化。

4) 在计算单层厚度较大,压缩性较高的超固结成层软土地基最终沉降量时,超固结作用对沉降的影响不能忽略。

5) 根据推导的解析解公式,可以应用半解析法得到地面荷载变化条件下成层地基土大应变固结的半解析解,然后将其用于深厚软土的大应变固结特性分析研究。

参考文献:

- [1] 李冰河, 应宏伟. 考虑土体自重的一维大应变固结分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 54-59.
LI B H, YING H W. Analysis of 1-D large-strain consolidation considering the self-weight of soils [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 54-59. (in Chinese)
- [2] WEBER W G. Performance of embankments constructed over peat [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations, ASCE, 1969, 95(1): 53-76.
- [3] CARGILL K W. Prediction of consolidation of very

- soft soil [J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1984, 100(6):125-157.
- [4] 郑辉, 谢康和. 双层饱和软土地基一维大应变固结研究[J]. *岩土力学*, 2004, 25(11):1770-1775.
ZHENG H, XIE K H. Study of one dimensional large strain consolidation of double-layered saturated soft soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(11): 1770-1775. (in Chinese)
- [5] FUNGAROLI A A, PRANGER S R. Unit weights of a normally consolidated soil [C] // *Proceedings of the 7th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Mexico*, 1969: 131-134.
- [6] DE SIMON P, VIGGIANI C. Settlement of a thick bed of normally consolidated uniform clay [J]. *Geotechnique*, 1975, 25(2): 390-393.
- [7] LI K S. Predicting the density profile and settlement of marine deposits [C] // *Proceedings of International Conference on Computational Methods in Structural and Geotechnical Engineering, HongKong, China Translation & Printing Services Ltd*, 1994:1562-1567.
- [8] 谢康和, 胡安峰. 考虑沉积作用的成层地基自重应力与沉降计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(9): 1585-1589
XIE K H, HU A F. Discussion of settlement modification considering stress history of soil mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 23(9): 1585-1589. (in Chinese)
- [9] 刘占芳, 杨全虎. 饱和软土地基弹塑性固结沉降研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27(2):51-55.
LIU Z F, YANG Q H. On elasto-plastic consolidation settlement of saturated soft clay [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005, 27(2):51-55. (in Chinese)
- [10] 李剑, 陈善熊. 应力历史对冲塑红黏土动力特性影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(9):1657-1665.
LI J, CHEN S X. Experimental study on influence of stress history on dynamic properties of remolded red clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1657-1665. (in Chinese)
- [11] 李新明, 孔令伟. 考虑超固结比和应力速率影响的膨胀土卸荷力学特性研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 121-127.
LI X M, KONG L W. Effects of overconsolidation ratio and stress rate on unloading mechanical behavior of expansive clay [J]. *Rock and Mechanics*, 2013, 34(10): 121-127. (in Chinese)
- [12] SAYE S R, DAN A B, LUTENEGGER A J. Assessing adhesion of driven pipe piles in clay using adaption of stress history and normalized soil engineering parameter concept [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(7): 1062-1074.
- [13] FINNO R J, CHO W. Recent stress-history effects on compressible Chicago glacial clays [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137(3): 197-207.
- [14] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
GONG X N. *Advanced Soil Mechanics* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996. (in Chinese)
- [15] 张克龚, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
ZHANG K G, LIU S Y. *Soil Mechanics* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)