



软土地基沉降计算中的固结度分析

燕继宇，伍琪琳，李建宇

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东广州 510230)

摘要：在软土地基沉降计算中，忽略应力固结度与应变固结度的差异，且推导二者间换算公式时未考虑土体应力历史的影响。采用 $e\text{-}lgp$ 压缩曲线沉降计算方法，考虑土体应力历史，推导应力固结度与应变固结度之间的换算公式，分析应力固结度与应变固结度之间的差异大小及主要影响因素，并结合菲律宾帕塞填海工程实例进行验证。结果表明，通常情况下应力固结度与应变固结度并不相等，二者间差异主要取决于土体压缩特性、天然自重应力、应力历史及上覆附加荷载。

关键词：软土；沉降；应力固结度；应变固结度

中图分类号：TU 470；U 655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)09-0174-04

Analysis of consolidation degree in settlement calculation of soft soil

YAN Ji-yu, WU Qi-lin, LI Jian-yu

(CCCC FHD Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: For the settlement calculation of soft soil, the difference between stress consolidation degree and strain consolidation degree is neglected, and the soil stress history is not considered in the derivation of the corresponding conversion formula. We use the settlement calculation method considering $e\text{-}lgp$ compression curve, consider the soil stress history, derive the conversion formula between stress consolidation degree and strain consolidation degree, analyze the difference between stress consolidation degree and strain consolidation degree, and the main influencing factors, and carry out the verification based on the reclamation project in Philippines, Pasay. The results show that consolidation degree is not equal to the strain consolidation degree, the difference between them is influenced by the compression characteristics of soil, natural gravity stress, stress history, and overlying additional load.

Keywords: soft soil; settlement; stress consolidation degree; strain consolidation degree

软土地基的沉降问题是港口建设中普遍存在的工程问题。通常采用堆载或真空预压法使软土地基在施工期内排水固结以满足使用期残余沉降的要求。固结度是软土地基沉降计算中的一个重要参数，对预压法软基处理工程设计非常重要。

固结度的推算方法主要分为2种：1)基于Terzaghi的饱和土体渗流固结理论^[1]，其中一维渗流固结理论应用最广泛；2)基于实测沉降数据^[2]，以Asaoka法^[3]为代表。由于两种方法分别是从应

力和应变的角度推算固结度，因此将固结度细分为应力固结度和应变固结度，二者紧密关联，但并不相等^[4]。JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》^[5]推导出应力固结度与应变固结度的换算公式，但未考虑土体应力历史。

本文采用 $e\text{-}lgp$ 压缩曲线(e 、 p 分别为孔隙比、应力)计算沉降，考虑土体应力历史，推导应力固结度与应变固结度的换算公式，并结合工程案例进行验证，对固结度的合理应用和软土地基沉降计算具有一定的指导意义。

1 地基沉降计算

1.1 主固结沉降计算

土体沉降由瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降共3部分组成。瞬时沉降和次固结沉降通常都很小,一般可不考虑,因此土体沉降计算主要针对主固结沉降。根据土体应力历史,可按式(1)计算主固结沉降:

$$s_{\text{主}} = \begin{cases} \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} & (p_0 + \Delta p > p_c = p_0) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_c} & (p_0 + \Delta p > p_c > p_0) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} & (p_0 + \Delta p \leq p_c) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $s_{\text{主}}$ 为地基土主固结沉降 (m); p_0 为地基自重应力 (kPa); p_c 为地基先期固结应力 (kPa); Δp 为地基附加应力 (kPa); C_c 为地基土层压缩指数; C_r 为地基土层再压缩指数; e_0 为地基土层初始孔隙比; H 为土层厚度 (m)。

1.2 残余沉降计算

1.2.1 方法 1

利用式(1)分别计算地基土层在使用期荷载下的最终沉降量 $s_{\text{使}}$ 和施工期荷载下的最终沉降量 $s_{\text{施}}$; 计算施工期结束时的地基固结度 $u_{t_{\text{施}}}$; 计算使用期残余沉降 $s_{\text{残}}$:

$$s_{\text{残}} = s_{\text{使}} - u_{t_{\text{施}}} s_{\text{施}} \quad (2)$$

1.2.2 方法 2

计算施工期固结度 $u_{t_{\text{施}}}$, 并计算施工期沉降 $s_{t_{\text{施}}}$, 公式为:

$$s_{t_{\text{施}}} = \begin{cases} \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + u_{t_{\text{施}}} \Delta p_{\text{施}}}{p_0} & (p_0 + u_{t_{\text{施}}} \Delta p_{\text{施}} \leq p_c) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + u_{t_{\text{施}}} \Delta p_{\text{施}}}{p_c} & (p_0 + u_{t_{\text{施}}} \Delta p_{\text{施}} > p_c \geq p_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta p_{\text{施}}$ 为施工期荷载(包含回填料自身重力、预压荷载等)作用下的地基附加应力。

然后计算施工期结束时(卸载后)地基的自重应力 p'_0 和先期固结压力 p'_c , 公式为:

$$p'_c = \max(p_c, p_0 + u_{t_{\text{施}}} \Delta p_{\text{施}}) \quad (4)$$

最后计算使用期残余沉降 $s_{\text{残}}$, 公式为:

$$s_{\text{残}} = \begin{cases} \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p'_0 + \Delta p_{\text{使}}}{p'_c} & (p'_0 > p'_c) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p'_0 + \Delta p_{\text{使}}}{p'_0} & (p'_0 + \Delta p_{\text{使}} \leq p'_c) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p'_c}{p'_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p'_0 + \Delta p_{\text{使}}}{p'_c} & (p'_0 + \Delta p_{\text{使}} > p'_c \geq p'_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta p_{\text{使}}$ 为使用期荷载(包含铺面、堆货和建筑结构等荷载)作用下的地基附加应力。

1.3 固结度计算

固结度 u_t 有两种类型, 分别是应变固结度 u_e 和应力固结度 u_σ 。对于某时刻 t , 应变固结度 u_{te} 可按式(6)计算:

$$u_{te} = \frac{s_t}{s_\infty} \quad (6)$$

式中: s_t 为时刻 t 的地基土主固结沉降; s_∞ 为地基土最终主固结沉降。

在前期设计阶段, s_t 尚处于未知状态, 导致无法获取应变固结度, 因此实际采用应力固结度 u_{ts} 替代应变固结度 u_{te} 。对于应力固结度 u_σ , 单向排水条件下, 可按 Terzaghi 的一维固结理论计算竖向应力固结度 u_v ; 双向排水条件下, 可按 Barron 提出的公式计算径向应力固结度 u_h , 然后按式(7)得到总应力固结度:

$$u_\sigma = 1 - (1 - u_v)(1 - u_h) \quad (7)$$

2 应力固结度与应变固结度关系

2.1 理论公式

对于式(7), 当采用应力固结度 u_σ 替代应变固结度 u_e 时, 需考虑二者之间的关系。根据式(1), 计算时刻 t 的沉降 s_t 可按式(8)计算:

$$s_t = \begin{cases} \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + u_{\sigma t} \Delta p}{p_0} & (p_0 + u_{\sigma t} \Delta p > p_c = p_0) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + u_{\sigma t} \Delta p}{p_0} & (p_0 + u_{\sigma t} \Delta p \leq p_c) \\ \frac{C_r}{1+e_0} H \lg \frac{p_c}{p_0} + \frac{C_c}{1+e_0} H \lg \frac{p_0 + u_{\sigma t} \Delta p}{p_c} & (p_0 + u_{\sigma t} \Delta p > p_c > p_0) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 得到:

$$u_{\sigma t} = \frac{s_t}{s_\infty} = \begin{cases} \frac{\lg(1+au_{\sigma t})}{\lg(1+a)} & (\text{OCR}=1 \text{ 或 } \text{OCR} \geq 1+a) \\ \frac{b\lg(1+au_{\sigma t})}{\lg \frac{1+a}{\text{OCR}^{1-b}}} & (1+au_{\sigma t} < \text{OCR} < 1+a) \\ \frac{\lg \frac{1+aU_{\sigma t}}{\text{OCR}^{1-b}}}{\lg \frac{1+a}{\text{OCR}^{1-b}}} & (1 < \text{OCR} < 1+au_{\sigma t}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: a 为地基附加应力 Δp 与地基初始自重应力 p_0 的比值; b 为地基再压缩指数 C_r 与压缩指数 C_c 的比值, 一般介于 0.1~0.2, 在无资料时可取中间值 0.15; OCR 为超固结应力比, 其值为地基先期固结应力 p_c 与地基初始自重应力 p_0 的比值。

为更直观地观察应力固结度 u_σ 与应变固结度 u_e 的相对关系, 基于式(9)获得 u_σ 与 u_e 的关系曲线, 如图 1 所示。

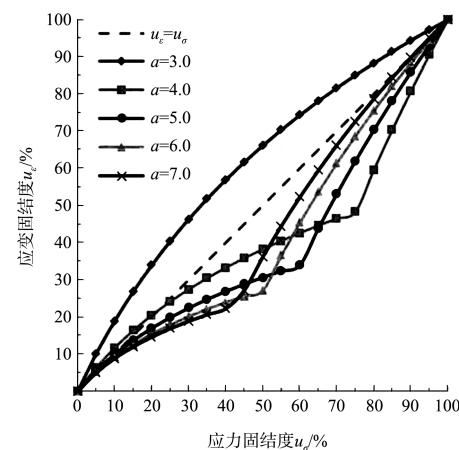
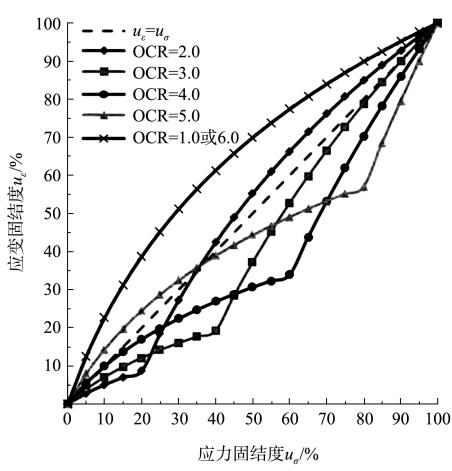
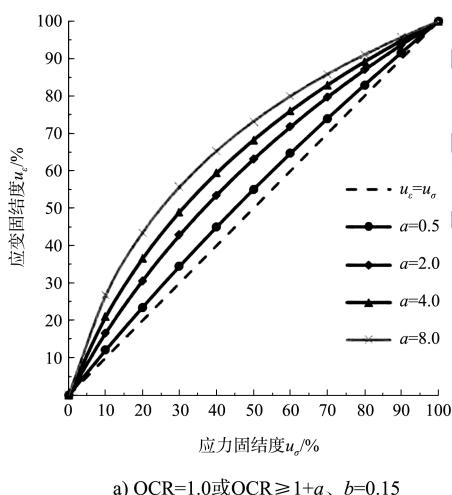


图 1 u_σ 与 u_e 的关系曲线

由图 1 可知:

- 1) u_σ 与 u_e 在固结度 0% 和 100% 处始终相等。
- 2) 当地基沉降仅由固结压缩变形 ($\text{OCR}=1.0$) 或固结再压缩变形 ($\text{OCR} \geq 1+a$) 单个部分组成时, u_e 大于 u_σ , 两者间差值先增大后减小, 在 $u_\sigma=40\%$ 时, 两者间差值最大, 且当 a 增大(即附加应力增大)时, 两者间差值也增大。

- 3) 当地基沉降由固结压缩变形和固结再压缩变形 ($1 < \text{OCR} < 1+a$) 两部分组成时, u_e 与 u_σ 的大小关系有 3 种情况: ①图 1b) 中 $\text{OCR}=2.0$ 所对应曲线, 从固结度 0% 开始, u_e 小于 u_σ , 且二者间差值逐渐增大, 当 $u_\sigma=20\%$ 时, 二者间差值达到最大, 然后二者间差值逐渐变小, 当 u_σ 为 35% 时, 二者相等, 然后 u_e 大于 u_σ , 二者间差值先增大后减小, 最终在固结度 100% 时再次相等; ②图 1b) 中 $\text{OCR}=3.0$ 和 $\text{OCR}=4.0$ 所对应曲线, 从固结度 0% 开始, u_e 小于 u_σ , 且二者间差值逐渐增大, 当 U_σ 分别为 40%、60% 时, 二者间差值达到最大, 然后二者间差值逐渐变小, 最终在固结度 100% 时相等; ③图 1b) 中 $\text{OCR}=5.0$ 所对应曲线, 从固结度 0% 开始, u_e 大于 u_σ , 二者间差值先增大后减小, 在固结度 30% 时, 二者相等, 然后 u_e 小于 u_σ , 且二者间差值逐渐增大, 当 u_σ 为 80% 时, 二者间差值达到最大, 然后二者间差值逐渐变小, 最终在固结度 100% 时相等。

由于此情况下地基变形由两部分组成, 对应 u_e 与 u_σ 的关系曲线也由两段曲线组成, 前段曲线

对应固结再压缩, 后段曲线对应固结压缩, 二者临界点对应的 $u_\sigma = \frac{OCR - 1}{a}$ 。

4) 采用排水固结法处理软土时, 一般要求预压结束时软土的固结度不低于 90%, 当临界 $u_\sigma = \frac{OCR - 1}{a}$ 靠近 90% 固结度时, u_e 将小于 u_σ , 且二者差值变大。

2.2 计算验证

为验证上述推导式(9)的正确性, 以菲律宾帕

塞填海开发工程的相关资料为基础, 计算地基沉降, 通过式(6)获得应力固结度 u_e , 然后与利用推导式(9)获取的应力固结度 u_e 进行对比验证。

菲律宾帕塞填海开发工程位于菲律宾马尼拉市, 拟在现有海岸外侧的马尼拉湾内填筑人工岛, 岛内土地未来将用作商业用地开发使用。拟建场地内平均水深约 -12 m, 天然地基表层分布有淤泥, 软-很软, 灰绿色, 含少量贝壳碎片, 具体物理力学指标见表 1。淤泥下部为标贯大于 30 击的硬土层。

表 1 淤泥层物理力学参数

天然密度 $\rho/(t\cdot m^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	液限 $\omega_L/\%$	塑性指数 I_p	压缩比 $C_v/(1+e_0)$	再压缩比 $C_r/(1+e_0)$	先期超固结 压力 POP/kPa
1.4	119	36	100	64	0.276	0.046	13

拟建场地的设计地面高程为 4 m, 采用疏浚砂回填成陆, 设计使用荷载 20 kPa, 为满足 50 年使用期内残余沉降不超过 30 cm 的使用要求, 考虑采用插板堆载预压法对表层天然淤泥进行地基处

理。场地内均匀选取 15 个位置, 采用方法 2 进行地基沉降计算, 结果见表 2。可以看出, 通过式(6)获得应力固结度 u_e 与利用式(9)获取的应力固结度 u_e 是相等的, 因此推导公式(9)是正确的。

表 2 菲律宾帕塞填海项目地基沉降计算结果

原地形 高程/m	淤泥 厚度/m	回填砂 厚度/m	堆载 高度/m	p_0/kPa	p_e/kPa	$\Delta p/kPa$	$u_\sigma/\%$	a	OCR^{1-b}	$s_{施}/m$	$s_{t施}/m$	$u_e/\%$	
												式(6)	式(9)
-14.3	4.7	18.3	1.5	9.2	22.2	231.6	90	-14.3	2.1	1.43	1.37	96.1	96.0
-13.5	5.3	17.5	1.5	10.6	23.6	222.4	90	-13.5	1.9	1.58	1.52	96.0	95.9
-13.1	5.0	17.1	1.5	10.0	23.0	219.0	90	-13.1	2.0	1.50	1.44	96.0	95.9
-13.1	4.1	17.1	1.5	8.0	21.0	220.9	90	-13.1	2.2	1.25	1.20	96.1	96.0
-13.1	3.7	17.1	1.5	7.4	20.4	221.5	90	-13.1	2.3	1.17	1.13	96.2	96.1
-12.3	5.1	16.3	2.0	10.0	23.0	220.0	90	-12.3	2.0	1.50	1.44	96.0	95.9
-10.7	8.6	14.7	2.5	17.2	30.2	207.3	90	-10.7	1.6	2.26	2.16	95.6	95.4
-10.4	10.7	14.4	2.7	21.4	34.4	204.3	90	-10.4	1.5	2.65	2.53	95.4	95.2
-10.0	9.0	14.0	2.5	18.0	31.0	199.9	90	-10.0	1.6	2.30	2.20	95.5	95.3
-10.0	10.3	14.0	2.5	20.6	33.6	198.2	90	-10.0	1.5	2.54	2.42	95.4	95.1
-10.0	12.8	14.1	5.0	25.6	38.6	237.7	90	-10.0	1.4	3.23	3.08	95.5	95.2
-10.1	13.8	14.1	5.5	27.6	40.6	246.1	90	-10.1	1.4	3.46	3.31	95.5	95.2
-10.2	15.2	14.2	5.5	30.4	43.4	245.2	90	-10.2	1.3	3.71	3.54	95.4	95.1
-10.3	16.6	14.3	5.5	33.2	46.2	244.5	90	-10.3	1.3	3.94	3.76	95.3	95.0
-10.3	17.1	14.3	5.5	34.2	47.2	243.9	90	-10.3	1.3	4.02	3.83	95.3	95.0

注: 采用疏浚砂作为回填料及堆载料, 其中设计高程 4 m 以下为回填, 4 m 以上为堆载, 回填砂水上密度取 1.8 t/m³, 水下饱和密度取 2.0 t/m³。

3 结论

1) 通常情况下应变固结度与应力固结度并不相等, 二者的相互关系一方面取决于土体自身的压缩特性、自重应力及应力历史, 另一方面取决于上覆附加荷载。

2) 计算某时刻主固结沉降时, 应根据选取的沉降计算方法(方法 1 或 2)选取对应的应变固结度或应力固结度; 对于沉降计算方法 1, 可先计算应力固结度, 再利用式(9)转换至应变固结度。