



## 关于“超载卸载后再压缩软土的次压缩特征及变形计算”的讨论

胡亚元

(浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)12-1963-03

作者简介: 胡亚元(1968-), 男, 博士, 副教授, 从事环境土工、地基处理和土体本构关系的研究工作。E-mail:

huyayuan@ccea.zju.edu.cn

### Discussion on “Secondary compression characteristics and settlement calculation of soft clay under overloading-unloading and reloading”

HU Ya-yuan

(MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

近年来, 李国维先生在《岩土工程学报》上发表了一系列有关软土次固结论文<sup>[1-4]</sup>, 最新的一篇发表在 2009 年第一期<sup>[1]</sup>。这些论文主要采用试验手段对软土次固结特性进行了系统分析, 取得了一些有益的试验成果。笔者把土体看作是软体材料, 从非平衡态热力学超黏弹性理论出发, 对软土次固结的特性也进行了一些研究, 其中有些观点与李国维先生有所差别。为了能使岩土力学的研究园地百花齐放, 进一步深入认识软土次固结变形特性, 现与李国维先生就软土次固结的某些观点进行讨论, 如有不当之处, 敬请谅解。

(1) 首先, 笔者仔细研读了李国维先生近 5 年来有关软土次固结的一系列文章, 发现这些文章的某些学术观点似乎相互矛盾<sup>[1-4]</sup>。如文献[4]中计算蠕变变形的“绝对时间”是否等于真实的自然时间, 如果“绝对时间”等于真实的自然时间, 那么令  $\alpha = (C_c - C_e)/C_\alpha$ , 下式(文献[4]中式(5))

$$t_i = t_c(p_c/p_0)^\alpha, \quad (1)$$

是  $t_i$  等于真实的自然时间呢, 还是  $t_c$  等于真实的自然时间, 还是两个都等于真实的自然时间? 如果两个都等于真实的自然时间, 那么作用到土体上的自然时间只有一个, 为什么在软土次固结上会变成两个了呢? 如果只有它们中的一个等于真实的自然时间, 为什么它是另一个不是呢?

笔者认为, 绝对时间虽然具有时间量纲, 但其物理含义与自然时间并不相同, 因此两个都不是真实的自然时间。为避免与真实时间  $t$  混为一谈, 笔者在文献[5]中建议采用大写  $T$  来表示绝对(等效)时间, 由此文献[4]中式(1)的表达式应为

$$\Delta e = C_\alpha \lg(T/T_i) = C_\alpha \lg[(T_i + \Delta T)/T_i]. \quad (2)$$

显然, 式(2)仅是孔隙比增量与绝对时间的一个关系式, 要根据式(2)建立孔隙比增量与自然时间的关系式, 需要进一步根据具体的加载模式确定绝对时间与自然时间之间的关系。仅当不考虑流固耦合且外荷载骤然施加这种加载模式下方有<sup>[5]</sup>:

$$\Delta T = t, \quad (3a)$$

$$T_i = T_c(p_c/p_i)^\alpha = T_c(\text{OCR})^\alpha, \quad (3b)$$

式中,  $t$  为外荷载作用的自然时间,  $T_c$  为加载时初始孔隙比  $e_0$  和初始有效应力  $p_c$  所在的绝对(等效)时间,  $p_i$  为外荷载结束时土体所受的总有效应力,  $T_i$  为外荷载已骤然施加完毕真实时间还未开始时土体所处的绝对时间<sup>[5]</sup>。把式(3)代入式(2)得

$$\Delta e = C_\alpha \lg(T_i + t)/T_i. \quad (4)$$

在试验室中, 一般土体的固结时间较短, 按文献[6]的估计约为 0.1 d, 针对较长的荷载作用时间, 若 1 d, 可近似地认为试件符合流固不耦合的条件。此时若外荷载是骤然施加的, 则式(3)和式(4)近似成立。由式(4)可知,  $t_1$  自然时刻的蠕变量

$$\Delta e_1 = C_\alpha \lg(T_i + t_1)/T_i, \quad (5)$$

$t_2$  自然时刻的蠕变量

$$\Delta e_2 = C_\alpha \lg(T_i + t_2)/T_i, \quad (6)$$

$t_1$  自然时刻之后到  $t_2$  自然时刻止新增的蠕变量

$$\Delta e_{1-2} = \Delta e_2 - \Delta e_1 = C_\alpha \lg[(T_i + t_2)/(T_i + t_1)]. \quad (7)$$

由式(7)得

$$C_\alpha = \Delta e_{1-2} / [\lg(T_i + t_2) - \lg(T_i + t_1)]. \quad (8)$$

根据孔隙比差与应变的关系, 由式(8)获得以应变表示的次固结系数的表达式为

$$C_{\alpha(e)} = \varepsilon_{1-2} / [\lg(T_i + t_2) - \lg(T_i + t_1)]. \quad (9)$$

然而在文献[1]中, 以应变表示的超固结土体的次固结系数却是(文献[1]中的式(3))

$$C_{\alpha(e)} = \varepsilon_{1-2} / (\lg t_2 - \lg t_1). \quad (10)$$

同样的情况也表现在文献[7]的超固结部分。显然, 从文献[4]看来, 文献[1]对次固结系数的定义是欠妥的。同样地, 文献[1]也会持有与文献[4]对等的看法。把式(10)除以式(9)得

$$\beta = \frac{\text{文献[1]的 } C_{\alpha(e)}}{\text{文献[4]的 } C_{\alpha(e)}} = \frac{\lg(T_i + t_2) - \lg(T_i + t_1)}{\lg t_2 - \lg t_1}, \quad (11)$$

讨论稿收稿日期: 2009-04-23

答复稿收稿日期: 2009-08-27

式中的  $\{\text{文献}[1]\text{的 } C_{\alpha(e)}\} = \beta \times \{\text{文献}[4]\text{的 } C_{\alpha(e)}\}$ , 把式 (3b) 代入式 (11) 得

$$\beta = \frac{\lg[T_C(\text{OCR})^\alpha + t_2] - \lg[(T_C \text{OCR})^\alpha + t_1]}{\lg t_2 - \lg t_1} \quad (12)$$

如果文献[4]中的研究结论确实成立, 从式 (12) 看, 则式 (10) 中的  $C_{\alpha(e)}$  不但与超固结比 OCR 有关, 而且与  $t_1$  和  $t_2$  具体取值的大小也有关, 并不能简单地把式 (10) 中的  $C_{\alpha(e)}$  写成仅仅是超固结比 OCR 的函数。特别地, 对于长期沉降, 即当  $t_1 \rightarrow \infty$  和  $t_2 \rightarrow \infty$  时由式 (12) 可得  $\beta \rightarrow 1$ , 此值似乎与超固结比无关, 这说明利用式 (10) 和初期蠕变量计算所得的等效次固结系数  $C_{\alpha(e)}$  并不能预测超固结土的长期沉降。同时在荷载施加初期, 流固是不可能不耦合的, 此时骤然施加的附加应力是通过固结度的增加逐渐地增加到土骨架上去的, 严格地说式 (10) 所定义的  $C_{\alpha(e)}$  在荷载初期与土体的固结度也存在一定的相关性。总之, 从文献[4]的观点看, 文献[1]仅仅从几个试验就认定式 (10) 中的次固结系数只与超固结比有关而与其它因素无关并不令人信服。如果文献[1]的试验结果真的象它所提供的经验公式一样式 (10) 中的  $C_{\alpha(e)}$  只与 OCR 有关, 那么只有一个可能, 那就是文献[4]中有关绝对时间的论述是完全站不住脚的。

(2) 按文献[2~3]提供的资料, 按照文献[4]的学术观点初步估算一下, 按等载方法预压, 其工后沉降还有 80~90 cm 的次固结沉降量。当总有效应力超固结比达到 1.25 倍时, 如果这 80~90 cm 的沉降量平均到 350 a 的时间上, 当然问题不大, 但是对于次固结而言, 沉降量与时间为对数函数关系, 这 80~90 cm 的沉降量有一半是在竣工后的 18.7 a 内发生, 而在竣工后的 15 a 内其沉降量也将达到 37~41 cm, 这显然超出了高速公路规范的要求, 故文献[3]的结论 3 是偏不安全的。类似的情况也发生在文献[1]中, 文献[1]把超固结土主固结时间的减少归结为试样厚度的减少和渗透系数的改变(文献[1]中第 120 页第一段), 事实可能并非如此。岩土界公认的观点是压缩变形将使渗透系数减少而不是增大, 它能使主固结时间加快吗? 因此笔者认为这个解释是不充分的。更可靠的解释是借鉴弹塑性力学中土体屈服前后不同的变形特性来说明, 真实原因如下:

图 1 为 Bjerrum 蠕变图, 从纯塑性力学看, 当图 1 中荷载从  $p_0$  加载到  $p_A$  时, 孔隙比从  $P$  点降低到  $C$  点,  $C$  点的孔隙比由主固结理论可知:

$$e_c = e_0 - e^e - e^p = e_0 - \lambda \ln(p_A / p_0) \quad (13)$$

按照绝对时间的学术观点, 当图 1 中荷载从  $p_0$  加载到  $p_A$  时, 若不考虑流固耦合, 孔隙比首先沿瞬时时间线从  $P$  点降低到  $A$  点, 然后随着时间的增长孔隙比才从  $A$  点沿直线  $AC$  趋近  $C$  点, 最后越过  $C$  点孔隙比继续减少。结合式 (4) 有:

当  $t \leq T_0 - T_A$  时, 有

$$e_0 - e_t \leq e_0 - e_c \quad (14a)$$

当  $t > T_0 - T_A$  时, 有

$$e_0 - e_t > e_0 - e_c \quad (14b)$$

式中,  $T_0$  为加载时初始孔隙比  $e_0$  和初始有效应力  $p_0$  所在的绝对(等效)时间。从而有:

当  $t \leq T_0 - T_A$  时, 有

$$(e_0 - e_t) / (p_A - p_0) \leq (e_0 - e_c) / (p_A - p_0) \quad (15a)$$

当  $t > T_0 - T_A$  时, 有

$$(e_0 - e_t) / (p_A - p_0) > (e_0 - e_c) / (p_A - p_0) \quad (15b)$$

根据一维 Terzaghi 固结理论, 等效压缩系数越小, 固结越快。主固结理论假定软土只有塑性特性而无黏性特性, 实际是纯塑性本构模型理论。式 (15) 说明, 在不考虑流固耦合的条件下, 当  $t \leq T_0 - T_A$  时 EVP 模型的等效压缩系数小于纯塑性模型的等效压缩系数, 当  $T_0$  与固结时间相比较小时, 根据 EVP 模型计算所得的固结度将大于仅考虑主固结沉降的固结度, 而当  $t > T_0 - T_A$  时 EVP 模型的等效压缩系数大于纯塑性的等效压缩系数, 在  $t \gg T_0 - T_A$  的条件下, 根据 EVP 模型计算所得的固结度将小于仅考虑主固结沉降的固结度。这个事实表明, 在准塑性的黏弹性模型中, 当  $T_0$  与固结时间相比较小时(天然软土因存在预固结现象其初始绝对等效时间  $T_0$  均较大), 软土在固结初期一般呈现出蠕变系数越大固结度越大现象。对于超固结土, 如图中的  $B$  点, 此时初始应力和初始孔隙比所处的绝对(等效)时间  $T_B$  要比  $T_0$  大, 根据式 (4) 可知相同时间  $t$  所产生的孔隙比差超固结土要比正常固结土小, 因而有  $\Delta e_{\text{超}} / (p_A - p_0) < \Delta e_{\text{常}} / (p_A - p_0)$ , 根据固结理论中等效压缩系数较小固结度较快的力学性质, 超固结土的固结时间要比正常固结时间快, 并且根据式 (3b), 绝对等效时间随固结比呈幂级数增长, 这就是为什么超固结比较大时超固结土比正常固结土固结时间往往要快的多的主要原因。

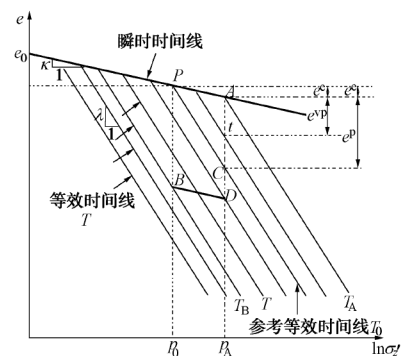


图 1 EVP 模型所依据的 Bjerrum 蠕变图

Fig. 1 Bjerrum creep based on EVP model

(3) 在此, 顺便要强调的是, 在计算软土的次固结沉降时, 要重视软土的预固结现象, 经过预固结软土的次固结沉降要比未经过预固结软土的沉降要小很多, 甚至比规范推荐的次固结计算量还要小。由文献[5]的结论可知, 当按照文献[4]的方法计算软土的蠕变沉降时 ( $t_c = 1 \text{ d}$ ), 必须按超固结土模式采用(表观)前期固结压力来计算软土的主固结沉降。当然, 也可以按正常固结土模式采用自重应力来计算软土的主固结变形, 但在计算次固结变形时则需选用自重应力和初始孔隙比所在的绝对等效时间作为次固结的起始时间, 此时如果还是采用文献[4]的建议按  $t_c = 1 \text{ d}$  来计算软土的次固结, 那么理论沉降量将比实际沉降量大得太多。这说明次固结的起始时间与主固结变形的计算方式密切相关的, 但无论计算次固结变形的起始时间如何变化, 土体的主固结变形之和是客观的, 它不会