

文章编号: 1000-7598 (2010) 05-1475-06

常规次固结沉降计算方法的改进研究

冯志刚¹, 朱俊高², 冯豪杰¹

(1. 广西电力工业勘察设计研究院, 南宁 530023; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘 要: 软土具有高含水率、大孔隙比等特点, 在荷载作用下超静孔隙水压力消散后会产生次固结变形。实际工程中很多工程问题是由土体的次固结引起, 因此对其沉降进行计算和预测很有必要。针对常规次固结沉降计算方法的不足, 进行了改进, 使随时间的发展, 次固结沉降趋于一个定值而不是无限增长。对 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型进行了简要介绍, 并进行了改进, 结合改进模型提出一种次固结沉降起讫时间的确定方法。与常规计算公式相比, 改进公式可行, 且更加合理, 可用于实际工程地基次固结沉降的计算。

关 键 词: 次固结沉降; 计算方法; 弹黏塑性模型; 改进研究

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of improvement of secondary consolidation settlement calculation method

FENG Zhi-gang¹, ZHU Jun-gao², FENG Hao-jie¹

(1. Guangxi Electric Power Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Soft clay has characteristics such as high moisture content and large void ratio. After excess pore water stress dissipation under loading, secondary consolidation settlement is produced. A lot of geotechnical engineering problems are caused by it and it is necessary to calculate and predict the settlement. The general secondary consolidation settlement calculation method has a shortage that when load duration is infinite, settlement infinite. An improved formula is presented aiming at the shortcoming. Brief review is given on Yin & Graham 1-D elastic viscoplastic model and improvement is given on it. A method to determine starting and finishing time of secondary consolidation settlement of soft foundation is put forward combined with the improved elastic viscoplastic model. The improved formula is feasible and more reasonable and can be used to calculate secondary consolidation settlement of foundation in actual engineering.

Key words: secondary consolidation settlement; calculation method; elastic viscoplastic model; improvement

1 引 言

软土具有含水率高、孔隙比大、渗透系数低、压缩性大等特点。在荷载作用下土体会产生较大的变形, 分为主固结和次固结变形两部分。主固结是指在外荷作用下土体中超静孔隙水压力逐渐消散, 土骨架有效应力随之增加, 土体体积减小, 土体固结的过程。次固结是指超静孔隙水压力消散后, 在恒定有效应力作用下土体缓慢变形的过程。岩土工程中, 很多工程事故都与土体的次固结有关。

随着高速公路建设的迅速发展, 公路软基工后沉降问题日益得到重视。很多学者对工后沉降中的

次固结进行了研究。倪一鸿^[1]分析了京津塘高速公路次固结变形, 认为次固结占总沉降的 9%~13%。张诚厚^[2]认为, 沪宁高速公路次固结占总沉降的 5%, 杭甬高速公路软基试验段得出的结论是次固结与瞬时沉降占总沉降的 10%~40%^[3]。王盛源^[4]对深圳某地基加固工程计算次固结变形量后认为, 次固结占总沉降的 20%左右。张迎春、刘吉福等^[5]对珠三角某高速公路软基, 采用黏弹性模型计算的次固结达到了总沉降的 32%。由此可见, 高含水率、深厚软土上建设的高速公路路基, 工后沉降往往很大, 是公路软基变形的重要组成部分, 次固结的影

收稿日期: 2008-10-22

第一作者简介: 冯志刚, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事软土特性及地基处理等方面的研究。E-mail: fengzhigang@foxmail.com

响不可忽视,对次固结沉降进行研究很有必要。

2 常规次固结沉降计算方法

很多弹黏塑性本构模型具有完整的理论体系,可用于地基次固结沉降的计算,但由于参数确定方法相对较复杂,且需要一定的解析或数值方法,因此,在实际工程中的应用较少。

实际工程中,计算次固结沉降的常规公式为

$$s = \frac{H}{1+e_0} C_\alpha \lg \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (1)$$

式中: s 为次固结沉降量; H 为压缩土层厚度; e_0 为初始孔隙比; C_α 为次固结系数; t_1 、 t_2 为次固结沉降的起讫时间; 参数 e_0 和 C_α 可通过常规土工试验和固结试验测定。

由于式(1)参数较少,且较容易确定,在实际工程中得到了广泛应用,但它存在一定的不足,即当 t_2 趋近于无穷大时, s 也趋于无穷大,这不符合实际情况。

3 对常规方法的改进

这里假定土颗粒不可压缩,土体的变形是由于孔隙比的减小,土体变形的极限值为 $He_0/(1+e_0)$ 。基于上述假定,对常规次固结沉降计算公式改进:

$$s = \frac{H}{1+e_0} \frac{C_\alpha \lg \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}{1 + \frac{C_\alpha}{e_0} \lg \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \quad (2)$$

式(2)中各参数意义同常规公式,同时假定数值大小不变。若采用改进公式计算,当 $t_2 \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow He_0/(1+e_0)$ 。

计算分层地基的次固结沉降量时,可按土样类型将土层划分为 n 层,根据当前应力状态求取各层地基的次固结沉降,并进行累加。地基土层总的次固结沉降 s_a 可按式(3)计算。

$$s_a = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{1+e_{0i}} \frac{C_{\alpha i} \lg \left(\frac{t_{2i}}{t_{1i}} \right)}{1 + \frac{C_{\alpha i}}{e_{0i}} \lg \left(\frac{t_{2i}}{t_{1i}} \right)} \quad (3)$$

式中: H_i 、 e_{0i} 、 $C_{\alpha i}$ 、 t_{1i} 、 t_{2i} 分别为第 i 层土的厚度、初始孔隙比、次固结系数以及次固结沉降的起讫时间。

4 可行性和合理性验证

4.1 可行性

下面用式(2)与常规公式进行对比来说明改进计算方法的可行性和合理性。

以理想地层情况(图1)来进行计算。假设某地基软土层厚度为 5 m,均为同一种软土,初始孔隙比 e_0 取 1.41,土层沉降量极限值 $He_0/(1+e_0) = 2.925\ 311\ \text{m} \approx 2\ 930\ \text{mm}$,当前应力状态下土体次固结系数 $C_\alpha = 0.022$,该层软土均采用此值作为计算标准,次固结沉降开始时间取施工结束后 100 d。

以施工结束时间为计算起点,用常规方法和改进公式对软土层随时间发展的次固结沉降进行了计算,结果见表1,在本文计算时间范围内,两者的差别很小,本文改进方法计算结果与其相近,说明了改进方法是可行的,可用于工程实际的次固结沉降计算。

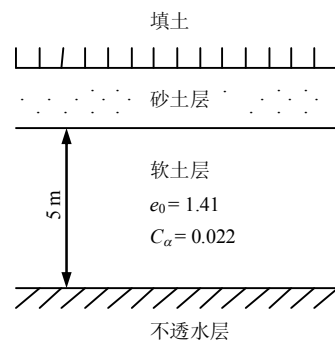


图1 理想地层示意图
Fig.1 Sketch of ideal foundation

表1 计算结果对比
Table 1 Result of calculation

t_2 /年	s / mm		
	常规方法	本文改进方法	两种方法的差值
1	25.4	25.2	0.2
5	57.3	56.2	1.1
10	71.0	69.4	1.6
100	116.7	112.2	4.5
500	148.6	141.4	7.2

4.2 合理性

图2为常规方法与改进方法计算结果对比。由图可知,随着时间的增长,常规方法计算得出的结果会不断增大,达到一定年限后甚至大于 5 000 mm(软土层厚度),这是不合理的。由改进方法计算得出的结果,随时间无限增长,逐渐趋近于 $s = 2\ 930\ \text{mm}$ 渐近线,这说明了本文改进方法较之常规方法更加合理。

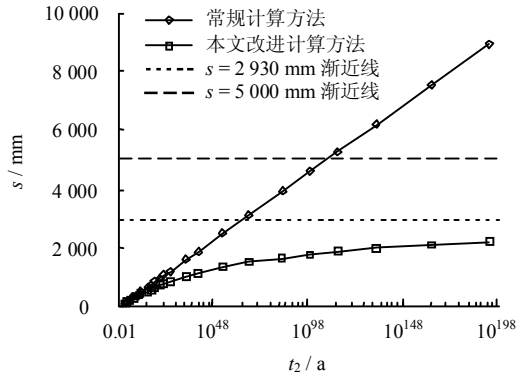


图2 改进方法合理性验证

Fig.2 Soundness verification of improvement method

5 t_1 、 t_2 的确定方法

次固结沉降计算的难点在于次固结沉降起讫时间如何确定,下面对 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型^[6-9]进行改进,并结合改进模型给出 t_1 、 t_2 的确定方法。

5.1 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型简介

Yin & Graham 提出了“等效时间”、“瞬时时间线”和“参考时间线”等概念,在此基础上建立了一维弹黏塑性“时间线”模型。该模型假设土体一维加载情况下的竖向变形由弹性应变和黏塑性应变组成:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^{\text{ep}} + \varepsilon_z^{\text{tp}} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_z^{\text{ep}}$ 为弹塑性应变,它由可恢复的弹性应变 ε_z^{e} 和不依赖于时间的塑性应变组成; $\varepsilon_z^{\text{tp}}$ 为黏性应变,即依赖于时间的塑性应变。不依赖于时间的塑性应变和黏性应变均为不可恢复的应变,两者之和称为黏塑性应变。

弹性应变 ε_z^{e} 可由下式确定:

$$\varepsilon_z^{\text{e}} = \varepsilon_{z0}^{\text{e}} + \frac{k}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{u0}} \right) \quad (5)$$

式中: σ'_z 为当前有效应力; σ'_{u0} 为单位有效应力; $\varepsilon_{z0}^{\text{e}}$ 为 $\sigma'_z = \sigma'_{u0}$ 时的弹性应变; $V = 1 + e_0$, e_0 为初始孔隙比,如图3所示, k/V 为瞬时时间线即 $\varepsilon_z^{\text{e}} - \ln \sigma'_z$ 曲线的斜率。

不依赖于时间的弹塑性应变可表示为

$$\varepsilon_z^{\text{ep}} = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{\text{zref}}} \quad (6)$$

式中: σ'_{zref} 为参考有效应力; $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$ 为 $\sigma'_z = \sigma'_{\text{zref}}$ 时的弹塑性应变; λ/V 为参考时间线的斜率(图4)。

黏性应变 $\varepsilon_z^{\text{tp}}$, 即在有效应力 σ'_z 恒定的情况下随时间而产生的变形,可由下式表示:

$$\varepsilon_z^{\text{tp}} = \varepsilon_{z0}^{\text{tp}} + \frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_{\text{ref}} + t_e}{t_{\text{ref}}} \right) \quad (7)$$

式中: t_{ref} 为开始计算黏性应变的参考时间; $\varepsilon_{z0}^{\text{tp}}$ 为 $t = t_{\text{ref}}$ 时的黏性应变; t_e 为“等效时间”,它满足 $-t_{\text{ref}} < t_e < \infty$; ψ/V 为蠕变压缩应变线(图5)即 $\varepsilon_z^{\text{tp}} - \ln(t)$ 曲线的斜率。

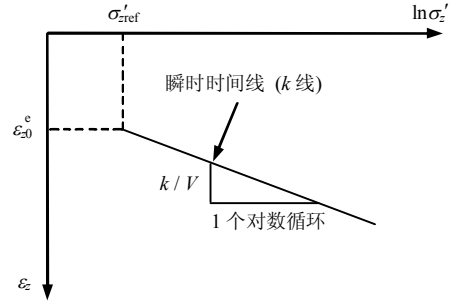


图3 瞬时时间线

Fig.3 Instant time line

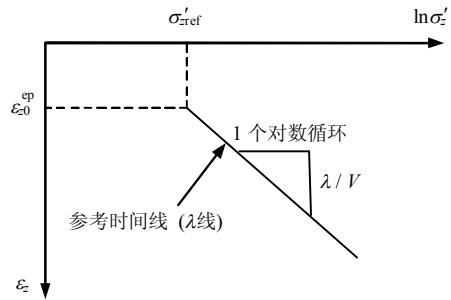


图4 参考时间线

Fig.4 Reference time line

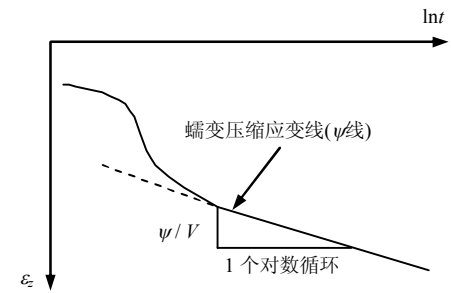


图5 蠕变压缩应变线

Fig.5 Creep compression strain line

由式(4)、(6)和式(7)可得

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{\text{zref}}} \right) + \frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right) \quad (8)$$

5.2 模型改进

与式(1)一样,式(7)同样存在着类似不足,即当等效时间“ t_e ”趋于无穷大时,黏性应变 $\varepsilon_z^{\text{tp}}$ 趋于无穷大,这是不合理的,因此考虑对式(7)进行

改进如下:

$$\varepsilon_z^{\text{tp}} = \frac{\frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)}{1 + \frac{\psi}{V \varepsilon_{z1}} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)} \quad (9)$$

式中: ε_{z1} 为时间趋于无穷大时的 $\varepsilon_z^{\text{tp}}$, 其他参数意义同上。

ε_{z1} 可表示如下:

$$\varepsilon_{z1} = e_0 / (1 + e_0) \quad (10)$$

式中: e_0 为初始孔隙比。

这样, 式 (8) 可以写成为

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^{\text{ep}} + \varepsilon_z^{\text{tp}} = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z\text{ref}}} \right) + \frac{\frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)}{1 + \frac{\psi}{V \varepsilon_{z1}} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)} \quad (11)$$

式 (11) 给出了任何荷载和加荷历史条件下 σ'_z 、 ε_z 、 t_e 之间一般的和惟一的联系。

由式 (11), 等效时间 “ t_e ” 可表示为

$$t_e = -t_{\text{ref}} + t_{\text{ref}} \exp \left\{ \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} - \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z\text{ref}}}}{\frac{\psi}{V} \left[1 - (\varepsilon_z - \varepsilon_z^r) / \varepsilon_{z1} \right]} \right\} \quad (12)$$

其中:

$$\varepsilon_z^r = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z\text{ref}}} \quad (13)$$

式 (11) 虽然表达了 3 个变量之间的一般关系, 但难以用于一般的荷载条件。

连续加荷或卸荷可认为是时间 dt 内一系列无穷小的荷载增量 $d\sigma'_z$, 如图 6 所示, 从点 A 到 C 的应变增量 $d\varepsilon_z$ 是弹性应变增量 $d\varepsilon_z^e$ ($A \rightarrow B$) 和蠕变应变增量 $d\varepsilon_z^{\text{tp}}$ ($B \rightarrow C$) 之和, 即

$$d\varepsilon_z = d\varepsilon_z^e + d\varepsilon_z^{\text{tp}} \quad (14)$$

弹性应变增量可通过对式 (5) 的微分得出, 蠕变应变增量等于相应点的蠕变应变速率乘以荷载持续时间 dt , 这样

$$d\varepsilon_z = \frac{k}{V} \frac{d\sigma'_z}{\sigma'_z} + \dot{\varepsilon}_z^{\text{tp}} dt \quad (15)$$

式 (5) 中的蠕变应变速率可由式 (9) 对等效时间 “ t_e ” 进行微分求得

$$\dot{\varepsilon}_z^{\text{tp}} = \frac{\frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{1}{t_e + t_{\text{ref}}} \right)}{\left[1 + \frac{\psi}{V \varepsilon_{z1}} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right) \right]^2} \quad (16)$$

将式 (12) 代入式 (16), 可得

$$\dot{\varepsilon}_z^{\text{tp}} = \frac{\psi}{V t_{\text{ref}}} \left[1 + \frac{(\varepsilon_z^r - \varepsilon_z)}{\varepsilon_{z1}} \right]^2 \exp \left\{ \frac{\varepsilon_z^r - \varepsilon_z}{1 + (\varepsilon_z^r - \varepsilon_z) / \varepsilon_{z1}} \frac{V}{\psi} \right\} \quad (17)$$

式 (17) 表明, 蠕变应变速率与等效时间或应力-应变状态点之间的关系是惟一的。由式 (4)、(5)、(15) 和式 (17), 可得改进模型任意加载条件下的本构关系:

$$\dot{\varepsilon}_z = \dot{\varepsilon}_z^e + \dot{\varepsilon}_z^{\text{tp}} = \frac{k \dot{\sigma}'_z}{V \sigma'_z} + \frac{\psi}{V t_{\text{ref}}} \left(1 + (\varepsilon_z^r - \varepsilon_z) / \varepsilon_{z1} \right)^2 \exp \left\{ \frac{\varepsilon_z^r - \varepsilon_z}{1 + (\varepsilon_z^r - \varepsilon_z) / \varepsilon_{z1}} \frac{V}{\psi} \right\} \quad (18)$$

式 (18) 是微分形式的一般本构方程。它描述了在任何加荷条件下土与时间相关的、非线性的和不可逆的应力-应变性状。

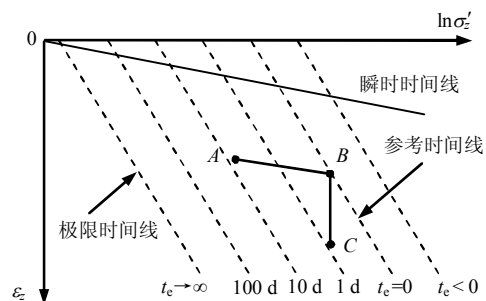


图 6 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型示意图

Fig.6 Sketch of Yin & Graham 1-D elastic viscoplastic model

5.3 参数确定方法

Yin & Graham 改进模型共有 7 个参数: ε_{z1} 、 κ/V 、 λ/V 、 ψ/V 、 $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$ 、 t_{ref} 、 $\sigma'_{z\text{ref}}$, 其中 ε_{z1} 可由式 (10) 确定, 参数 κ/V 可通过拟合回弹一再压缩 $\varepsilon_z - \ln \sigma'_z$ 试验曲线的斜率得到。

(1) 参数 ψ/V 和 t_{ref} 的测定

要测定参数 ψ/V 和 t_{ref} , 需要首先选择一条合适的 “参考时间线”, 如图 7 所示, i 和 $(i+1)$ 点分别对应于荷载 $\sigma'_{z,i}$ 、 $\sigma'_{z,i+1}$ 。假设 $(i+1)'$ 点正好位于所选择的 “参考时间线” 上, 即 $(i+1)'$ 点的 “等效时间” 为 0。当荷载从 $\sigma'_{z,i}$ 增加到 $\sigma'_{z,i+1}$ 时, 会产生

一个瞬时的弹性应变。

由式 (7) 可知, 在荷载 $\sigma'_{z,i+1}$ 下的应变为

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{z,(i+1)'} + \frac{\frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)}{1 + \frac{\psi}{V \varepsilon_{z1}} \ln \left(\frac{t_e + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)} \quad (19)$$

因为 $(i+1)'$ 点位于参考时间线上, 所以荷载 $\sigma'_{z,i+1}$ 下加荷持续时间即对应其等效时间, 其中 $(i+1)'$ 点的应变可根据式 (5) 求得

$$\varepsilon_{z,(i+1)'} = \varepsilon_{z,i} + \frac{k}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_{z,i+1}}{\sigma'_{z,i}} \right) \quad (20)$$

利用式 (19) 来拟合荷载 $\sigma'_{z,i+1}$ 作用下主固结完成后的应变-时间曲线, 求得模型参数 ψ/V 和 t_{ref} 。

(2) 参数 $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}}$ 、 λ/V 和 $\sigma'_{z,\text{ref}}$ 的测定

简便起见, 可以设 $\varepsilon_{z0}^{\text{ep}} = 0$ 。为测得参数 λ/V 和 $\sigma'_{z,\text{ref}}$, 需再增加一个点 $(i+2)$, 其对应的应力应变状态为 $(\sigma'_{z,i+2}, \varepsilon_{z,i+2})$ 。假设 $(i+2)'$ 点为从 $\sigma'_{z,i+1}$ 瞬时加荷到 $\sigma'_{z,i+2}$ 所对应的点, 即荷载 $\sigma'_{z,i+2}$ 下开始加荷的点。 $\sigma'_{z,i+2}$ 下的加荷历时为 Δt , 见图 7。 $(i+1)$ 点的竖向应变是已知的, 由式 (5) 可得, $(i+2)'$ 点的竖向应变为

$$\varepsilon_{z,(i+2)'} = \varepsilon_{z,i+1} + \frac{k}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,i+1}} \quad (21)$$

又由式 (11), 可得 $(i+2)'$ 点的应变为

$$\varepsilon_{z,(i+2)'} = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right) + \frac{\frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_{e,(i+2)'} + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)}{1 + \frac{\psi}{V \varepsilon_{z1}} \ln \left(\frac{t_{e,(i+2)'} + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)} \quad (22)$$

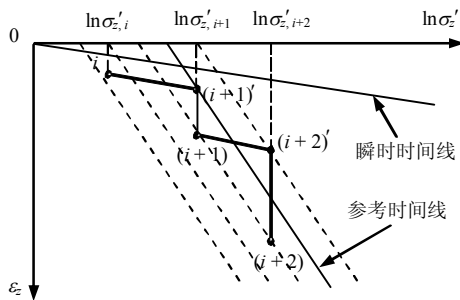


图 7 模型参数确定示意图

Fig.7 Schematic diagram of parameters determination

由式 (21) 和式 (22), $(i+2)'$ 点的等效时间为

$$t_{e,(i+2)'} = -t_{\text{ref}} + t_{\text{ref}} \cdot \exp \left\{ \frac{\varepsilon_{z1} \left(\varepsilon_{z,i+1} + \frac{k}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,i+1}} - \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} - \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right)}{\frac{\psi}{V} \left[\varepsilon_{z1} - \left(\varepsilon_{z,i+1} + \frac{k}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,i+1}} - \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} - \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right) \right]} \right\} \quad (23)$$

$(i+2)'$ 和 $(i+2)$ 点处于同一应力下, 两点的的时间间隔是 Δt , 因此, $(i+2)$ 点的等效时间为

$$t_{e,(i+2)} = \Delta t - t_{\text{ref}} + t_{\text{ref}} \cdot \exp \left\{ \frac{\varepsilon_{z1} \left(\varepsilon_{z,i+1} + \frac{k}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,i+1}} - \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} - \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right)}{\frac{\psi}{V} \left[\varepsilon_{z1} - \left(\varepsilon_{z,i+1} + \frac{k}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,i+1}} - \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} - \frac{\lambda}{V} \ln \frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right) \right]} \right\} \quad (24)$$

$(i+2)$ 点的应变可由式 (11) 求得

$$\varepsilon_{z,i+2} = \varepsilon_{z0}^{\text{ep}} + \frac{\lambda}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_{z,i+2}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right) + \frac{\frac{\psi}{V} \ln \left(\frac{t_{e,i+2} + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)}{1 + \frac{\psi}{V \varepsilon_{z1}} \ln \left(\frac{t_{e,i+2} + t_{\text{ref}}}{t_{\text{ref}}} \right)} \quad (25)$$

如图 7 所示, $(i+1)'$ 点位于“参考时间线”上, 其应变为

$$\varepsilon_{z,(i+1)'} = \frac{\lambda}{V} \ln \left(\frac{\sigma'_{z,i+1}}{\sigma'_{z,\text{ref}}} \right) \quad (26)$$

在式 (25)、(26) 中, $\sigma'_{z,i+1}$ 、 $\sigma'_{z,i+2}$ 、 $\varepsilon_{z,i+1}$ 、 $\varepsilon_{z,(i+1)'}$ 、 $\varepsilon_{z,i+2}$ 和 Δt_2 已知, 则其中只剩下未知数 λ/V 和 $\sigma'_{z,\text{ref}}$, 联合求解式 (24)~(26) 就可得到参数 λ/V 和 $\sigma'_{z,\text{ref}}$ 的值。

5.4 t_1 、 t_2 的确定

结合改进的 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型, 给出了一种确定次固结沉降起讫时间 t_1 、 t_2 的方法, 下面进行简要介绍:

(1) 通过分级加荷次固结试验, 确定 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型参数 ψ/V 、 t_{ref} 、 λ/V 、 $\sigma'_{z,\text{ref}}$ 和 ε_{z1} ;

(2) 根据地基土层单元的天然状态和当前状态指标, 计算加荷后的应变值, 得到当前附加应力下的应力-应变状态指标;

(3) 利用确定的 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型的参数, 根据式 (12) 计算当前应力状态下的“等

效时间” t_e ;

(4) 根据 t_{ref} 、 t_e 及计算次固结沉降的时间间隔 Δt , 确定 t_1 、 t_2 如下:

$$t_1 = t_{ref} + t_e \quad (27)$$

$$t_2 = t_{ref} + t_e + \Delta t \quad (28)$$

将式 (27)、(28) 代入式 (3), 得到考虑地基分层的次固结沉降量计算公式:

$$s_a = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{1 + e_{0i}} \frac{C_{ai} \lg \left(\frac{t_{refi} + t_{ei} + \Delta t}{t_{refi} + t_{ei}} \right)}{1 + \frac{C_{ai}}{e_{0i}} \lg \left(\frac{t_{refi} + t_{ei} + \Delta t}{t_{refi} + t_{ei}} \right)} \quad (29)$$

式中: t_{refi} 、 t_{ei} 分别为第 i 层土的 t_{ref} 和“等效时间”, 其他参数意义同前文所述。

6 工程实例

某高速公路某断面处路面宽 25 m, 路堤高 3.6 m, 坡比为 1:1.5。淤泥层位于 1.8~6.8 m, 即厚度为 5 m。路堤填筑高度为 360.5 cm。经室内试验, 该层软土试样的基本物理性质指标为: 天然含水率为 98.2%; 湿重度为 14.3 kN/m³; 初始孔隙比为 2.746; 塑性指数为 32; 液性指数为 1.81, 当前应力状态下次固结系数为 0.022 5。通过对试样进行分级加荷蠕变试验, 根据前文参数确定方法, 得到 Yin & Graham 模型参数 t_{ref} 为 1 490 min。又由当前应力-应变状态, 得到对应的“等效时间” t_e 为 500 min。由式 (1)、(27) 和式 (29) 可得之后随时间发展的次固结沉降, 结果见表 1。由表可知, 常规方法和本文改进方法计算结果在观测期限内接近。计算结果在 10 年内均大于实测值, 但随时间的发展, 差别越来越小, 10 年后则小于实测值。总体上, 实测值与计算结果相差不大, 误差在 5% 以内。

表 2 不同历时次固结沉降量
Table 2 Secondary consolidation settlements
with different durations

Δt / d	s / mm		
	现场实测值	常规方法	本文改进方法
360	67.7	72.6 (4.9)	71.2 (3.5)
1 500	86.5	91.2 (4.7)	89.0 (2.5)
3 500	98.8	102.2 (3.4)	99.4 (0.6)
6 000	110.4	109.2 (-1.2)	106.1 (-4.3)

注: 括号内数字为计算结果与实测值之间的差值。

7 结 语

对常规次固结沉降计算方法的不足进行了分

析, 假定土颗粒不可压缩, 土体变形是由于孔隙比的减小, 据此提出一个改进的计算公式。对 Yin & Graham 一维弹黏塑性模型进行了改进, 并结合改进模型, 给出了次固结沉降起讫时间的确定方法, 最后对改进公式的可行性和合理性进行了验证。对工程实例的计算结果表明, 改进公式与现场实测数据符合得较好, 可用于实际工程地基次固结沉降的计算。

参 考 文 献

- [1] 倪一鸿. 公路荷载作用下软土地基次固结[J]. 公路, 1999, (10): 56—61.
NI Yi-hong. Secondary consolidation of soft foundation under highway load[J]. **Highway**, 1999, (10): 56—61.
- [2] 张诚厚. 高速公路路基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 刘增贤. 公路软基次固结及其工程意义探讨[J]. 公路, 2006, (2): 73—76.
LIU Zeng-xian. Secondary consolidation of highway soft foundation and its engineering significance[J]. **Highway**, 2006, (2): 73—76.
- [4] 王盛源. 饱和黏性土主固结与次固结变形分析[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(5): 70—75.
WANG Sheng-yuan. Analysis of primary and secondary consolidation and deformation of saturated clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1992, 14(5): 70—75.
- [5] 张迎春, 刘吉福, 魏金霞. 砂土地基主、次固结度黏弹性分析[J]. 水运工程, 2003, (8): 20—24.
ZHANG Ying-chun, LIU Ji-fu, WEI Jin-xia. Visco-elastic analysis of the degrees of primary consolidation & secondary consolidation of sand-drained foundation[J]. **Port & Waterway Engineering**, 2003, (8): 20—24.
- [6] YIN J H, GRAHAM J. Equivalent times and one dimensional elastic viscoplastic modeling of time dependent stress strain behavior of clays[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 42—52.
- [7] ZHU J G. Experimental study and elastic visco-plastic modeling of the time-dependent stress-strain behaviour of Hong Kong marine deposits[D]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1999.
- [8] 殷建华, CLARK J I. 土体与时间相关的一维应力-应变性状、弹黏塑性模型和固结分析[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 65—80.
YIN Jian-hua, CLARK J I. One-dimensional time dependent stress-strain behaviour of soils, elastic viscoplastic modelling, and consolidation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(3): 65—80.
- [9] 殷建华, CLARK J I. 土体与时间相关的一维应力-应变性状、弹黏塑性模型和固结分析(续)[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 65—75.
YIN Jian-hua, CLARK J I. One-dimensional time dependent stress-strain behaviour of soils, elastic viscoplastic modelling, and consolidation analysis (continued)[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(4): 65—75.