

短文

应用沉降速率法计算软土路堤剩余沉降 Application of rate of settlement to evaluate residual settlement of embankment on soft soil ground

刘吉福¹, 陈新华²

(1. 广东省航盛工程有限公司 岩土分公司, 广东 广州 510230; 2. 广东省公路建设公司, 广东 广州 510620)

中图分类号: TU 433; U 416. 12 文献标识码: A 文章编号: 1000- 4548(2003) 02- 0233- 03

作者简介: 刘吉福(1971-), 男, 山东阳谷人, 硕士, 工程师, 主要从事高速公路软基处理施工、监测、科研等工作。

由剩余沉降量也可以得到对应的沉降速率。

0 引言^①

随着我国经济的快速发展, 沿海地区高速公路建设规模增长迅速。沿海地区存在深厚软土, 修建高速公路时多采用排水固结软基处理方案。路基工后沉降过大可能造成桥头跳车、路面积水、混凝土路面开裂等危害。为了避免桥头跳车等危害, 施工路面之前的剩余沉降应当小于允许工后沉降。如何简便、可靠地确定剩余沉降一直是个难题。根据早期建设的深汕高速公路的实践, 广东地区高速公路建设者总结出了“当沉降速率小于等于 5 mm/月时施工路面, 剩余沉降满足工后沉降要求”的经验, 其后建设的多条高速公路均采用该沉降速率标准控制剩余沉降, 并称之为沉降速率法。本文对沉降速率法从理论上予以解释, 并讨论了其适用条件。

表 1 不同条件下的 α, β 值

Table 1 Values of α and β under different conditions

序号	条件	α	β
1	竖向排水固结 (当 $\bar{U}_i > 30\%$)	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$
2	向内径向排水固结	1	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2}$
3	竖向和向内径向 排水固结	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2} + \frac{\pi^2 C_v}{4H^2}$
4	砂井未贯穿压缩层	$\frac{8}{\pi^2} Q$	$\frac{8C_h}{F(n)d_e^2}$
5	向外径向排水固结 (当 $\bar{U}_i > 60\%$)	0.692	$\frac{5.78C_h}{R^2}$

H 为竖向排水距离; C_v 为竖向固结系数; C_h 为水平向固结系数; n 为井径比; d_e 为等效圆直径; $F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2}$; Q 为砂井长度与压缩层厚度的比值; R 为土柱体半径。

1 沉降速率与剩余沉降关系

1.1 均质地基一级瞬时施加荷载时

对于均质地基, 当只有一级瞬时施加的荷载, 则 t 时的平均固结度的普遍表达式为^[1]

$$\bar{U}_i = 1 - \alpha e^{-\beta t}, \quad (1)$$

式中 α, β 见表 1。

t 时的沉降量为

$$S_t = (S_\infty - S_D)(1 - \alpha e^{-\beta t}), \quad (2)$$

式中 S_∞, S_D 分别为最终沉降和瞬时沉降。

t 时的沉降速率为

$$V_S = \frac{dS_t}{dt} = (S_\infty - S_D) \beta \alpha e^{-\beta t}. \quad (3)$$

t 时的剩余沉降为

$$S_r = (S_\infty - S_D)(1 - \bar{U}_i) = (S_\infty - S_D) \alpha e^{-\beta t}. \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知

$$V_S = S_r \beta, \quad (5)$$

因此, 由 t 时的沉降速率可以得到对应的剩余沉降量,

1.2 均质地基多级荷载时

设 t 时已经施加 n 级荷载, 则 t 时的沉降量为

$$S_t = \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{D i})(1 - \alpha e^{-\beta t_i}), \quad (6)$$

t 时的沉降速率为

$$V_S = \beta \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{D i}) \alpha e^{-\beta t_i}, \quad (7)$$

t 时的剩余沉降为

$$S_r = \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{D i}) \alpha e^{-\beta t_i}. \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得到式(5)。

等速加载可以等同于若干级瞬时施加的荷载, 其推导过程与多级瞬时施加荷载情况相同。

1.3 均质地基砂井未贯穿压缩层时

设 H_1, H_2 分别对应砂井长度和砂井以下黏土层厚度; α_1, β_1 和 α_2, β_2 分别对应砂井范围、砂井以下黏

① 收稿日期: 2002- 07- 29

土; $Q = \frac{H_1}{H_1 + H_2}$ 。对于一级瞬时施加荷载 t 时的沉降量为

$$S_t = (S_\infty - S_D)[Q(1 - \alpha_1 e^{-\beta_1 t}) + (1 - Q)(1 - \alpha_2 e^{-\beta_2 t})], \quad (9)$$

t 时的沉降速率为

$$V_S = (S_\infty - S_D)[\beta_1 Q \alpha_1 e^{-\beta_1 t} + \beta_2 (1 - Q) \alpha_2 e^{-\beta_2 t}], \quad (10)$$

t 时的剩余沉降为

$$S_r = (S_\infty - S_D)[Q \alpha_1 e^{-\beta_1 t} + (1 - Q) \alpha_2 e^{-\beta_2 t}], \quad (11)$$

因此, 此时式(5)不成立。多数工程 Q 较大, 近似有

$$V_S = (S_\infty - S_D) \beta_1 Q \alpha_1 e^{-\beta_1 t}, \quad (12)$$

$$S_r = (S_\infty - S_D) Q \alpha_1 e^{-\beta_1 t}. \quad (13)$$

由式(12)、(13)可得到式(5)。对于多级荷载, 推导过程类似, 此略。

1.4 均质地基未设砂井时

无砂井, 仅有竖向排水固结时, 一级瞬时施加荷载的平均固结度精确公式为

$$\begin{aligned} \bar{U}_t &= 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^2} \exp\left[-\frac{m^2 C_v}{4H^2} t\right] \\ &= 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i e^{-\beta_i t}. \end{aligned} \quad (14)$$

$\bar{U}_t > 30\%$ 时, 式(14)可以近似表达为式(1), 从而得到式(5); $\bar{U}_t < 30\%$ 时, 存在多个不同的 β 值, 式(5)不成立。

1.5 地基内存在多种土层时

(1) 压缩层内存在强透水层时

由于砂层等强透水层压缩变形完成迅速, 可以计入 S_D 中, 因此, 强透水层不影响式(5)的成立。

(2) 压缩层内存在 n 种黏性土层时

压缩层内存在 n 种黏性土层时, 对于一级瞬时施加的荷载, t 时的沉降量为

$$S_t = \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di})(1 - \alpha_i e^{-\beta_i t}), \quad (15)$$

t 时的沉降速率为

$$V_S = \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) \beta_i \alpha_i e^{-\beta_i t}, \quad (16)$$

t 时的剩余沉降为

$$S_r = \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) \alpha_i e^{-\beta_i t}, \quad (17)$$

此时式(5)不成立。如果除第 i 种黏土外, 其他黏土层厚度较小时, 沉降速率和剩余沉降近似简化为

$$V_S = (S_{\infty i} - S_{Di}) \beta_i \alpha_i e^{-\beta_i t}, \quad (18)$$

$$S_r = (S_{\infty i} - S_{Di}) \alpha_i e^{-\beta_i t}. \quad (19)$$

由式(18)、(19)可得到式(5)。

如果各种黏性土固结系数差别不大, 可按各种黏性土的厚度进行加权平均求得固结系数, 视作均质土, 式(5)也近似成立。

对于多级荷载, 推导过程类似, 此略。

2 $V_S = S_r \beta$ 关系式影响因素

由上述推导可知, 砂井下部压缩层较厚时, 压缩层由厚度差别不大、固结系数差别较大的黏性土层组成时, 未设砂井且固结度小于 30% 时, 式(5)不成立, 其他情况式(5)成立或近似成立。强透水层的存在不影响式(5)的成立。

由上述推导过程可知, 当式(5)成立或近似成立时, 沉降速率与剩余沉降的关系与最终沉降、加载情况、地层结构等无关, 只需根据沉降监测资料即可较可靠地确定剩余沉降。如果已知允许剩余沉降量, 可以计算得到对应的沉降速率标准, 施工监测可以根据该沉降速率标准判定是否满足工后沉降的要求。根据目前的沉降速率也可以得到剩余沉降量。

由式(5)等可见, 沉降速率标准与允许工后沉降、砂井间距、井径比、固结系数等有关。当上述参数不同时, 沉降速率标准可能不同, 不可固守 5 mm/月的经验标准。

(4) 上述分析均未考虑次固结的影响, 根据式(5)确定的沉降速率控制, 实际工后沉降可能大于允许工后沉降, 因此, 实际沉降速率标准应适当小于式(5)计算所得沉降速率。

3 β 计算方法

3.1 根据固结系数计算 β

根据室内试验或原位试验确定的固结系数 C_v 和 C_h , 计算得到 β , 应选取厚度较大的黏性土层中的固结系数或各种黏性土的固结系数进行小值平均。

3.2 根据沉降资料反算 β

可以根据前几级荷载下的沉降监测资料反算 β 。设 S_1, S_2 和 S_3 分别是施加第 n 级荷载后 t_1, t_2 和 t_3 时的沉降, 第 1, 2, ..., i , ..., n 级荷载施加至 t_0 时刻的持续时间为 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$, 则有

$$\begin{aligned} S_1 &= \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di})(1 - \alpha_i e^{-\beta(\tau_i + t_1 - t_0)}) \\ S_2 &= \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di})(1 - \alpha_i e^{-\beta(\tau_i + t_2 - t_0)}) \\ S_3 &= \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di})(1 - \alpha_i e^{-\beta(\tau_i + t_3 - t_0)}) \end{aligned} \quad (20)$$

可得到

$$\left. \begin{aligned} S_2 - S_1 &= e^{-\beta(t_1 - t_0)} \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) (\alpha e^{-\beta \tau_i} - \alpha e^{-\beta(\tau_i + t_2 - t_1)}) \\ S_3 - S_2 &= e^{-\beta(t_2 - t_0)} \sum_{i=1}^n (S_{\infty i} - S_{Di}) (\alpha e^{-\beta \tau_i} - \alpha e^{-\beta(\tau_i + t_3 - t_2)}) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

如果 $t_3 - t_2 = t_2 - t_1$, 由式(21)可得

$$\frac{S_2 - S_1}{S_3 - S_2} = e^{\beta(t_2 - t_1)} \quad (22)$$

因此, 由第 n 级荷载后间隔时间相同的 3 个时刻的沉降可以计算出 β 。

从上述推导过程可知, 该方法适用于多级加荷, 但 t_1, t_2 和 t_3 之间不得有加荷。时间间隔 $\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1$ 较大时, 计算 β 的准确性增大。当压缩层内含有多种黏性土层时, 该方法计算得到的 β 综合反映了各种黏性土的固结特性。因此, 以该方法得到的 β 最为合理。

由第 2 节推导可以看出, 如果 $Q = H_1 / (H_1 + H_2)$ 较小, 存在两个不同的 β , 式(5)不再成立。此时, 可以分别测定砂井部分、砂井以下部分的压缩量和压缩速率, 分别确定 β 和剩余沉降等。

3.3 根据孔压资料反算 β

可以根据前几级荷载下的孔压监测资料反算 β 。设 u_1, u_2 分别是施加第 n 级荷载后 t_1 和 t_2 时的孔压, 第 1, 2, ..., i , ..., n 级荷载施加至 t_0 时刻的持续时间为 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$, 则有

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \sum_{i=1}^n u_{\max i} \alpha e^{-\beta(\tau_i + t_1 - t_0)} = e^{-\beta(t_1 - t_0)} \sum_{i=1}^n u_{\max i} \alpha e^{-\beta \tau_i} \\ u_2 &= \sum_{i=1}^n u_{\max i} \alpha e^{-\beta(\tau_i + t_2 - t_0)} = e^{-\beta(t_2 - t_0)} \sum_{i=1}^n u_{\max i} \alpha e^{-\beta \tau_i} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

由式(23)可得

$$\frac{u_1}{u_2} = e^{-\beta(t_2 - t_1)} \quad (24)$$

因此, 由施加第 n 级荷载后的 t_1 和 t_2 时的孔压可以计算出 β 。

从上述推导过程可知, 该方法适用于多级加荷, 但 t_1 和 t_2 之间不得有加荷。时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$ 较大时, 计算 β 的准确性增大。该法可以根据不同深度处的孔压资料反算 β , 应选取厚度较大的黏性土层中的 β 或进行小值平均。

由不同时段沉降、孔压资料反算的 β 不完全相同, 可以采用统计理论处理后确定。

4 工程实例

深汕高速公路第 4 标段软土深厚, 软黏土土质均匀, 采用袋装砂井排水固结软基处理方案, 袋装砂井直径 $d_w = 7 \text{ cm}$, 间距 $d = 130 \text{ cm}$, 等边三角形布置。袋装砂井打穿软土层。统计显示, $C_h = 1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。考虑次固结影响因素, 采用 $S_r = 10 \text{ cm}$ 计算沉降速率。软土较厚, 可以忽略不计竖向固结作用, 计算得 $d_e = 1.05d = 136.5 \text{ cm}$; $n = 19.5$; $F(n) = 2.289$; $\beta = \frac{8C_h}{F(n)d_e} = 1.926 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$; $V_s = S_r \beta = 4.993 \text{ mm/月}$ 。计算结果与深汕高速公路的经验标准十分接近。

5 结 语

(1) 多数情况下, $V_s = S_r \beta$ 成立或近似成立, 利用沉降速率判定工后沉降是否满足要求是有理论依据的, 可以由沉降速率得到剩余沉降。

(2) β 与加固方案参数、地质条件等有关, 条件差别较大的工程不宜采用同样的沉降速率标准。

参考文献:

[1] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988. 73-74.

《土的弹塑性理论基础》简介

刘祖典、党发宁编著的《土的弹塑性理论基础》一书, 已由世界图书出版公司 2002 年出版发行, 书号为 ISBN7-5062-3887-X/S·79。该书由原陕西机械学院油印教材《土的弹塑性变形理论基础》改编而成, 已作为研究生教材在西安理工大学岩土工程专业使用 10 多年, 针对我国目前研究生培养的实际情况, 从简到难、循序渐进地引入了土的塑性变形理论。

全书共分 11 章, 内容包括: 序论; 应力应变及其不变量; 土的线弹性应力应变关系; 土的应力应变路径; 土的变形特性; 土

的非线性弹性本构关系; 土的物态全界面; 土的弹塑性特性; 屈服与破坏准则; 土的弹塑性本构关系; 饱和土固结问题。

本书可作为土木工程、水利工程、铁道工程和交通工程等学科研究生教材, 也可作为此类部门技术人员、研究人员、高校教师和高年级本科生的学习参考书。

购书者请直接与西安理工大学岩土工程研究所党发宁联系; 邮编: 710048; E-mail: dangfn@mail.xaut.edu.cn

(党发宁 供稿)