

文章编号: 1000-7598 (2010) 11-3411-06

三角形周期荷载作用下软基路堤沉降研究

胡亚元^{1,2}

(1. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310027; 2. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 采用能够同时考虑主次固结变形的 Yin-Graham 一维弹黏塑性模型, 对三角形周期荷载作用下软土路堤运行期间和运行期结束时的长期沉降进行了理论分析, 获得三角形周期荷载作用下软基路堤运行期结束时的总沉降计算公式和工后沉降计算公式。分析了三角形周期荷载作用下软基不考虑流固耦合与考虑流固耦合时长期沉降之间的相互关系, 证明了三角形周期荷载作用下当循环荷载次数趋向于无穷大时软基具有最终沉降量与应力随时间增长的模式无关的性质。按照文中提供的总沉降计算公式, 针对具体工程的土工参数, 对路堤运行期结束时的总沉降量进行了计算, 并由此确定运行期开始时软基应发生的沉降量, 为合理确定高速公路路面铺筑时机提供沉降标准。

关 键 词: 路堤沉降; 三角形周期荷载; 主次固结; 弹粘塑性模型

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Study of settlements of road embankment on soft clay under triangle periodic loading

HU Ya-yuan^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Key Laboratory of Soft soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on Yin-Graham's 1D elasto-viscoplastic model which can predict both primary and secondary consolidations, the long term settlements caused by triangle periodic loading during road service period are theoretically studied. The expressions of total settlement and post-construction settlement of road embankment on soft clay produced by the triangle periodic loading during its service period are achieved. The relationship between the long term settlement considering fluid-solid coupling and that without considering fluid-solid coupling under the triangle periodic loading is analyzed. It is proved that the soft clay has the behavior of which the ultimate settlement when periodicity trend to infinite is not affected by the fashion that stress increases with time under the triangle periodic loading. Based on the expression of the total settlement proposed in the paper and the physical parameters of clay for a definite engineering, the total settlement of road embankment during its service period is numerically calculated. The critical settlement of road embankment at the start of its service period can further be determined from the total settlement at the end of its service period. From the above results, a required settlement standard is provided for rationally determining the start time of road pavement in the construction of expressways.

Key words: settlement of road embankment; triangle periodic loading; primary and secondary consolidations; elasto-viscoplastic model

1 引 言

交通荷载作用下软基路堤的沉降控制是交通工程中的一个重要研究课题^[1], 国内外许多岩土专家对其进行了深入研究^[2-10]。Parr^[2]通过伦敦软土循环三轴试验, 建立了累积塑性应变随循环加载次数增加的对数型增长模型; Monismith^[3]等试验研究

了黏土在循环荷载作用下累计塑性变形随循环次数的指数型增长规律; 在 Monismith 等研究成果的基础上, Chai 和 Miura^[4]考虑了初始剪应力对累计塑性变形的影响, 提出了含有初始剪应力因子的指数型塑性应变经验公式。在国内, 周建和龚晓南^[5]通过循环加载试验分析了软黏土的应变软化特性; 殷宗泽等^[6]分析了软土次固结模型与循环荷载累积变

收稿日期: 2009-04-02

作者简介: 胡亚元, 男, 1968 年生, 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

形之间的本构联系;黎冰等^[7]研究了车辆荷载的影响深度和影响因素;张仪萍等^[8]、聂庆科等^[9]和边学成等^[10]进一步分析了循环荷载作用下路堤的动力特性和沉降规律。他们的研究均有力地推动了路堤工程控制工后沉降技术的提高和发展。

近年来,笔者从非平衡态热力学出发揭示塑性和黏性的内在联系,提出了塑性是黏性的特例的学术观点^[11],并采用非平衡态热力学超黏弹性理论来研究软土的变形特性^[11],认为诸如黏土、牙膏等软体材料的黏塑性混合本构特性,需采用准塑性的黏弹性本构模型(Quasi-Plastic Visco-Elastic 模型,简称 qP-EV 模型)来模拟才能得到较为合理准确地描述。文献[11]中,笔者证明了能综合反映软土主次固结特性的 Yin-Graham 一维弹黏塑性模型(Elastic Visco-Plastic Model,简称 EVP 模型)^[12]本质上属于一种准塑性的黏弹性模型,并利用准塑性的黏弹性模型的特殊性质证明了软土流变理论中新假说 A 与假说 B 在某种条件下具有近似等价的性质^[11]。本文中,以最简单的软土模型为例,把路堤在交通荷载作用下的固结沉降问题视为一维沉降问题^[13],利用准塑性的黏弹性本构模型的性质,即 qP-EV 模型的特殊性质,来研究动荷载作用下公路路堤的沉降规律,分析三角形周期荷载作用下影响路堤沉降量的影响因素,建立了三角形交通荷载作用下计算路堤长期沉降的理论公式。由于自殷建华和 Graham 于 1989 年创建 Yin-Graham 一维软土流变本构模型以来,各国研究者均把 Yin-Graham 一维软土本构模型简称为 EVP 模型^[12]。尽管笔者在文献[11]中指出 Yin-Graham 一维软土流变模型实质应为一种 qP-EV 模型,但为了尊重历史习惯称呼,本文依然把 Yin-Graham 一维软土模型称为 EVP 模型。在此注明,在本文中所谓的 EVP 模型均指 qP-EV 模型。

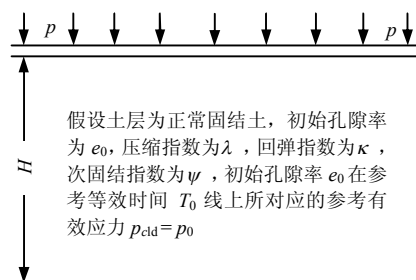
2 计算简图

考虑土层最简单的情况。图 1(a)是厚度为 H 的均质单一正常固结饱和软土层,取该土层的平均自重应力、平均初始孔隙比、平均压缩指数、平均回弹指数和平均次固结系数作为整个土层的初始有效应力 p_0 、初始孔隙比 e_0 、压缩指数 λ 、回弹指数 κ 和次固结系数 ψ ,若饱和软土层的浮重度为 γ' ,则平均初始有效应力 $p_0 = H\gamma'/2$,初始孔隙比 e_0 和初始应力 p_0 所处的绝对等效时间为 T_0 。把软土层承受的路堤静荷载简化为均布荷载 p_f ,把路堤交通动荷载简化为三角形周期荷载。令 t 为附加荷载

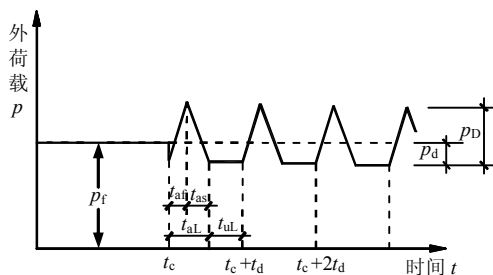
$p_f + p_d$ 中路堤静荷载 p_f 作用的时间, t_c 为动荷载 p_d 作用的开始时间,令 $t_m = t - t_c$,其表达式为

$$p_d(t_m) = \begin{cases} p_D t_m / t_{af} - p_b, & (0 \leq t_m < t_{af}) \\ p_D (t_{al} - t_m) / t_{as} - p_b, & (t_{af} \leq t_m < t_{al}) \\ -p_b, & (t_{al} \leq t_m < t_d) \\ p(t - t_d), & (t_m \geq t_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中: t_{af} 为加载段; t_{as} 为卸载段; $t_{al} = t_{af} + t_{as}$ 为荷载作用时间段; t_{ul} 为荷载间歇时间段; $t_d = t_{al} + t_{ul}$ 为交通荷载的周期。软土受力示意图如图 1(b)所示。



(a) 土层计算模型



(b) 软土层所受路堤荷载图

图 1 三角形动荷载下软土路堤长期沉降的计算简图
Fig.1 Sketch of calculating long-term settlement of clay embankment under triangle dynamic loading

3 理论研究

3.1 Yin-Graham 的一维 EVP 流变模型

选 T_0 为参考绝对等效时间,参考绝对等效时间 T_0 线上的初始孔隙比 e_0 和初始应力 p_0 选为参考孔隙比和参考有效应力,如图 2 所示,则依据 Yin-Graham 一维 EVP 等效时间线模型,土体的孔隙比 e 、有效应力 σ'_z 和绝对等效时间 T 具有以下惟一关系:

$$e = e_0 - \lambda \ln \left(\frac{\sigma'_z}{p_0} \right) - \psi \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (2)$$

令

$$\alpha = (\lambda - \kappa) / \psi \quad (3)$$

Yin-Graham 一维 EVP 流变模型可表示为^[11-12]

$$d \left\{ \exp \left[\frac{e_0 - e - \kappa \ln(\sigma'_z / p_0)}{\psi} \right] \right\} = \frac{dt}{T_0} \left(\frac{\sigma'_z}{p_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

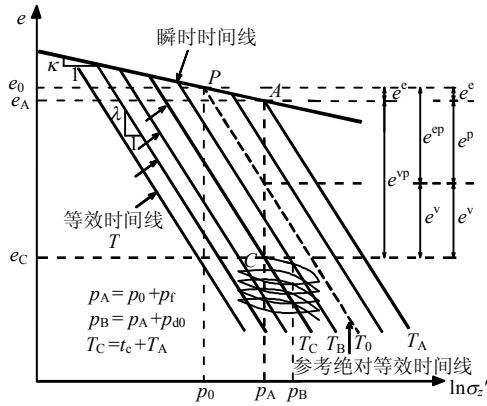


图 2 Bjerrum 的土体蠕变变形示意图
Fig.2 Sketch of Bjerrum's creep deformation

3.2 三角形周期荷载作用下不考虑流-固耦合时软土的变形规律

若不考虑流-固耦合, 外荷载直接变为有效应力施加在土骨架上, 根据图 1(b), 有

$$\sigma'_z = \begin{cases} p_0 + p_f = p_A, & (t \leq t_c) \\ p_0 + p_f + p_d = p_A + p_d, & (t > t_c) \end{cases} \quad (5)$$

把式 (5) 代入到式 (4) 可得

(1) 当 $0 \leq t \leq t_c$ 时^[11-12],

$$e(t) = e_0 - \kappa \ln \left(\frac{p_A}{p_0} \right) - \psi \ln \left[\frac{t}{T_0} \left(\frac{p_A}{p_0} \right)^\alpha + 1 \right] \quad (6)$$

从式 (6) 可得 $t=0$ 时的孔隙比为

$$e_A = e_0 - \kappa \ln p_A + \kappa \ln p_0 \quad (7)$$

若设图 2 中坐标点 $A (\ln p_A, e_A)$ 所处的绝对等效时间为 T_A , 由式 (2)、(7) 可得 T_A 为

$$T_A = T_0 (p_0 / p_A)^{(\lambda - \kappa) / \psi} = T_0 (p_0 / p_A)^\alpha \quad (8)$$

设 $e_C = e_0 - \kappa \ln \left(\frac{p_A}{p_0} \right) - \psi \ln \left[\frac{t_c}{T_0} \left(\frac{p_A}{p_0} \right)^\alpha + 1 \right]$, 则

当 $t = t_c$ 时, 图 2 中坐标点 $C (\ln p_A, e_C)$ 所处的绝对等效时间 T_C 根据式 (2) 和 e_C 值可得^[11-12]

$$T_C = t_c + T_0 (p_0 / p_A)^\alpha = t_c + T_A \quad (9)$$

(2) 当 $t \geq t_c$ 时, 由式 (5)、(9) 可得

$$e(t) = e_0 - \kappa \ln \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right) - \psi \ln \left[\int_{t_c}^t \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha \frac{dt}{T_0} + \left(\frac{p_A}{p_0} \right)^\alpha \frac{t_c}{T_0} + 1 \right] \quad (10)$$

令

$$K(t) = \int_{t_c}^t \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha \frac{dt}{T_0} = \int_0^{t-t_c} \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha \frac{dt}{T_0} \quad (11)$$

设正整数 N 和 t^* 满足:

$$\left. \begin{aligned} Nt_d < t - t_c \leq (N+1)t_d \\ t^* = t - t_c - Nt_d \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由式 (11) 得

$$K(t) = \sum_{k=1}^N \int_{t_d k - t_d}^{t_d k} \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha \frac{dt}{T_0} + \int_{t_d N}^{t_d N + t^*} \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha \frac{dt}{T_0} = \frac{NT_A + T_A^*}{T_0} \quad (13)$$

式中:

$$T_A = \int_0^{t_d} \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha dt, \quad T_A^* = \int_0^{t^*} \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right)^\alpha dt \quad (14)$$

根据式 (13), 式 (10) 可化简为

$$e(t) = e_0 - \kappa \ln \left(\frac{p_A + p_d}{p_0} \right) - \psi \ln \left[\frac{NT_A + T_A^*}{T_0} + \left(\frac{p_A}{p_0} \right)^\alpha \frac{t_c}{T_0} + 1 \right] \quad (15)$$

式 (6)、(15) 是三角形周期荷载作用下不考虑流-固耦合时软基土体的孔隙比随时间变化公式。设 H 为土层厚度, 由此可得时间 t 时土层的沉降量为

$$s(t) = \frac{e_0 - e(t)}{1 + e_0} H \quad (16)$$

3.3 在三角形周期荷载作用下考虑流-固耦合时软基的长期变形规律

鉴于循环荷载作用下考虑流-固耦合时软土的变形规律较为复杂, 本文在分析三角形周期荷载作用下考虑流-固耦合时软基的长期变形规律之前, 需理论和试验证明软土具有“最终沉降与应力随时间增长的模式无关”这一性质, 并用室内试验成果验证该性质的合理性。

定义“性质 1”为: 设三角形周期荷载 p_d 满足式 (1) 之规定, Γ 和 Θ 是 2 条不同的应力增长模

式, Γ 的应力增长模式为

$$\sigma'_z = \begin{cases} p_0 + p_f = p_A, & (t \leq t_c) \\ p_0 + p_f + p_d = p_A + p_d, & (t > t_c) \end{cases} \quad (17)$$

Θ 的应力增长模式为

$$\sigma'_z = \begin{cases} p_0 + \bar{U}_1(t)p_f, & (t \leq t_c) \\ p_0 + p_f\bar{U}_1(t) + p_d\bar{U}_2(t_m), & (t > t_c) \end{cases} \quad (18)$$

则对于任意确定的 t^* , 当 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_1(t_d N + t^* + t_c) = 1$ 和 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_2(t_d N + t^*) = 1$ 时, 有

$$\lim_{N \rightarrow \infty} [e_r(t_d N + t^* + t_c) - e_\Theta(t_d N + t^* + t_c)] = 0 \quad (19)$$

证明: 式 (10) 为按应力增长模式 Γ 加载时孔隙比随时间变化式, 故把式 (10) 中的 $e(t)$ 记为 $e_r(t)$ 。令 $t = t_m + t_c = t_d N + t^* + t_c$, 按模式 Θ 加载时孔隙比随时间的变化规律为

$$e_\Theta(t) = e_0 - \kappa \ln \left[\frac{p_0 + \bar{U}_1(t)p_f + \bar{U}_2(t_m)p_d}{p_0} \right] - \psi \ln \left\{ \int_{t_c}^t \frac{dt}{T_0} \left[\frac{p_0 + \bar{U}_1(t)p_f + \bar{U}_2(t_m)p_d}{p_0} \right]^\alpha + \int_0^{t_c} \frac{dt}{T_0} \left[\frac{p_0 + \bar{U}_1(t)p_f}{p_0} \right]^\alpha + 1 \right\} \quad (20)$$

式 (20) 减去式 (10) 并由 $p_A = p_0 + p_f$ 可得

$$e_\Theta(t) - e_r(t) = \kappa \ln \frac{p_0 + p_f + p_d(t_m)}{p_0 + \bar{U}_1(t)p_f + \bar{U}_2(t_m)p_d(t_m)} + \psi \ln \left[\int_{t_c}^t \left(\frac{p_0 + p_f + p_d}{p_0} \right)^\alpha \frac{dt}{T_0} + \left(\frac{p_0 + p_f}{p_0} \right)^\alpha \frac{t_c}{T_0} + 1 \right] - \psi \ln \left\{ \int_{t_c}^t \frac{dt}{T_0} \left[\frac{p_0 + \bar{U}_1(t)p_f + \bar{U}_2(t_m)p_d(t_m)}{p_0} \right]^\alpha + \int_0^{t_c} \frac{dt}{T_0} \left[\frac{p_0 + \bar{U}_1(t)p_f}{p_0} \right]^\alpha + 1 \right\} \quad (21)$$

根据式 (1) 表示的三角形周期函数的性质, 对于确定的时间 t^* 和正整数 N 有

$$p_d(t_m) = p_d(t_d N + t^*) = p_d(t^*) \quad (22)$$

根据 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_1(t_d N + t^* + t_c) = 1$ 和 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_2(t_d N + t^*) = 1$, 利用式 (22) 并结合求极限的洛必达法则可证明, 当 N 趋向无穷大时式 (21) 的极限值等于 (受篇幅限制具体推导过程从略):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} [e_r(t) - e_\Theta(t)] = 0 \quad (23)$$

即

$$\lim_{N \rightarrow \infty} [e_r(t_d N + t^* + t_c) - e_\Theta(t_d N + t^* + t_c)] = 0 \quad (24)$$

故性质 1 是成立的。

下面根据室内试验来验证性质 1 的合理性。蒋军曾^[14]在排水条件下且在三角形循环荷载作用下对黏土孔隙比随循环次数的变化规律进行了试验研究。土样未破坏前, 试验数据与依据本文性质 1 的理论计算结果对比如图 3 所示, 图中应变 $\varepsilon = (e_0 - e)/v$, $v = 1 + e_0$, “min”表示一个循环周期内的“极小值”而“max”表示极大值。图中土样试验曲线的第 1 拐点对应的是固结时间^[14]。从图中可以看出, 在这一拐点之前, 即土样未完成固结前, 试验数据与理论计算值相差较大, 但随着固结逐渐完成, 两者逐渐接近。当土样完成固结后, 即当 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_1(t) \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_2(t_m) \approx 1$ 时, 依据试验得出的考虑流固耦合的应变数据与本文依据性质 1 得出的未考虑流固耦合的理论数据相互之间较为吻合。公路路堤有些质量问题主要受沉降过大控制而非强度失稳控制。上述试验结果表明对于此类问题可以利用性质 1 的性质来估算循环荷载作用下当 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_1(t) \approx \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_2(t_m) \approx 1$ 时的长期沉降。

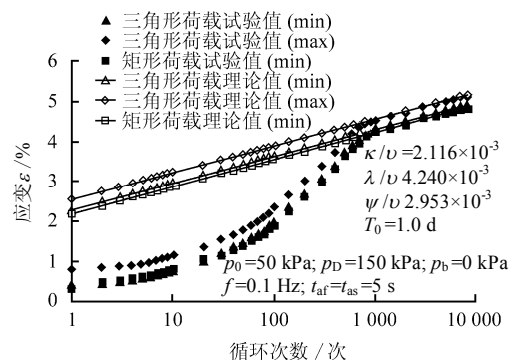


图 3 试验和理论结果对比图

Fig.3 Comparison between theoretical results and test data

图 3 对矩形循环荷载作用下软土的极小值沉降特性也作了分析。理论分析可知, 矩形循环荷载作用下的理论沉降值只需把式 (14) 中的动荷载代之以矩形循环荷载表达式即可。从图 3 中可以看出, 与三角形循环荷载类似, 矩形循环荷载的试验数据与理论数据在土样固结完成后也较为吻合, 这说明矩形循环荷载同样具有性质 1 特性。而按照蒋军^[14]根据室内循环试验认为循环荷载的类别对沉降影响

较小的结论, 矩形循环荷载作用下的黏土变形同样具有性质 1 特性这一事实间接说明本文提出的在三角形荷载作用下黏土变形具有性质 1 特性的结论是合理的。

对于实际软土公路路堤, 一般均经过排水加固处理, 其主固结时间远小于公路的运行期限, 运行期结束时公路软基已基本满足 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_1(t) = 1$ 和 $\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{U}_2(t_m) = 1$ 的要求, 故可以利用性质 1 按不考虑流-固耦合工况由式 (15)、(16) 来近似计算软基路堤的总长期沉降量。

同样, 对于软基路堤运行期间的工后沉降, 它也属于长期沉降, 根据性质 1 也可以采用式 (15) 和式 (16) 来计算。设运行期开始时土体的平均总有效应力为 p_s , 孔隙比为 e_s , 所处的绝对等效时间为 T_s 。由于公路运行期的开始时间与三角形周期荷载的施加时间非常接近, 故 $t_c \approx 0$ 。令

$$T'_\Delta = \int_0^{t_d} \left(\frac{p_A + p_d}{p_s} \right)^\alpha dt; \quad T_\Delta^* = \int_0^{t^*} \left(\frac{p_A + p_d}{p_s} \right)^\alpha dt \quad (25)$$

由式 (15)、(16) 求得运行期间土体的工后沉降量, 并根据工后沉降应小于预定沉降量可得

$$s_y = \frac{H}{1 + e_0} \left[\kappa \ln \left(\frac{p_A + p_d}{p_s} \right) + \psi \ln \left(\frac{NT'_\Delta + T_\Delta^*}{T_s} + 1 \right) \right] \leq [S_G] \quad (26)$$

$$\text{令} \quad e_{\text{cri}} = \frac{1 + e_0}{H} [S_G] - \kappa \ln \left(\frac{p_A + p_d}{p_s} \right) \quad (27)$$

把式 (27) 代入到式 (26) 可得

$$T_s \geq \frac{NT'_\Delta + T_\Delta^*}{\exp(e_{\text{cri}} / \psi) - 1} \quad (28)$$

笔者把按式 (28) 计算所得的最小等效时间 T_s 称为运行期开始前必须得到的临界绝对等效时间, 根据 T_s 值和式 (2) 可获得运行期开始时软基路堤必需达到的临界沉降为

$$s_s = \frac{e_0 - e_s}{1 + e_0} H = \frac{H}{1 + e_0} \left[\lambda \ln \left(\frac{p_s}{p_0} \right) + \psi \ln \left(\frac{T_s}{T_0} \right) \right] \quad (29)$$

4 算 例

某公路工程软基的物理力学指标为^[15], $H = 25 \text{ m}$, $e_0 = 2.278$, $\lambda = 0.275$, $\kappa = 0.0278$, $\psi = 0.0175$, $\gamma_{\text{sat}} = 15.0 \text{ kN/m}^3$, 故初始有效应力为

$p_0 = 62.5 \text{ kPa}$, 工作静荷载为 $p_f = 140 \text{ kPa}$, 前期固结压力为 100 kPa 。 t_c 和路堤“真固结时间因子 β ”值 (β 的定义见文献[1]) 按地基处理经验取 $t_c = 270 \text{ d}$ 和 $\beta = 0.02212 \text{ d}^{-1}$ 。令 $t_m = t - t_c$, 公路路堤承受的动荷载 p_d 为^[16]

$$p_d(t_m) = \begin{cases} 15t_m, & (0 \leq t_m < 1 \text{ s}) \\ 15(2 - t_m), & (1 \text{ s} \leq t_m < 2 \text{ s}) \\ 0, & (2 \text{ s} \leq t_m < 6 \text{ s}) \\ p(t - t_d), & (t_m > 6 \text{ s}) \end{cases} \quad (30)$$

现在利用性质 1 来估算运行期结束时软土层的总沉降量, 并按 15 年内高速公路路堤沉降不超过 30 cm 的要求, 确定运行期开始前软基路堤需完成的临界沉降量。

根据预固结与初始有效应力和前期固结压力之间的关系, 可获得初始孔隙比 e_0 和初始有效应力 p_0 所处的绝对等效时间 $T_0^{[12]} = \left(\frac{p_{\text{cld}}}{p_0} \right)^\alpha T_{\text{ld}} = \left(\frac{100}{62.5} \right)^{14.125} \times 86400 = 66836795 \text{ s}$ 。

单一循环引起的等效时间 T_Δ 为

$$T_\Delta = \int_0^6 \left[\frac{p_A + p_d(t)}{p_0} \right]^{14.125} dt = 56559003 \text{ s} \quad (31)$$

三角形周期交通荷载的循环次数 $N = \frac{1}{6} (15 \times 365 \times 86400) = 78840000$ 次。

由 $t_c = 270 \text{ d} = 23328000 \text{ s}$, $T_\Delta^* = 0$, 根据式 (15) 可得运行期结束时软基孔隙比变化量为 $\Delta e = 0.0278 \ln 3.48 + 0.0175 \ln(72395954) = 0.351$ 。

由式 (16) 可得总沉降量 $s_e = [\Delta e / (1 + e_0)] H = 2.77 \text{ m}$ 。

由于高速公路规范允许的工后沉降为 0.3 m, 故该路堤运行期开始时的临界沉降量需达到 2.37 m。当然, 工后沉降也可以根据式 (29) 来计算, 当运行期开始时软基固结度到达 90% 即 $p_s = 188.5 \text{ kPa}$ 时, 依据式 (29) 计算所得的临界沉降为 2.38 m, 与前一方法所得结果 2.37 m 相比差 1.0 cm, 二者近似相等, 能满足工程需要。

5 结 语

本文利用 Yin-Graham 一维 EVP 模型的特殊性质, 对三角形周期循环荷载作用下软基路堤的长期沉降问题进行了理论分析, 取得如下研究成果: (1) 获得三角形周期循环荷载作用下软基路堤运行期结束时的总沉降和工后沉降计算公式。(2) 文中算例具体分析了公路软基运行期结束时的总沉降量和运

行期开始时需要达到的临界沉降, 为高速公路路堤的沉降估算提供借鉴。

参考文献

- [1] 龚晓南. 地基处理新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 27—40.
- [2] PARR G B. Some aspects of the behavior of London clay under repeated loading[Ph. D]. UK: University of Nottingham, 1972.
- [3] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[R]. Washington, D. C: Transportation Research Board, 1975: 1—17.
- [4] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(11): 907—916.
- [5] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75—78.
ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(5): 75—78.
- [6] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521—526.
YIN Zong-ze, ZHANG Hai-bo, ZHU Jun-gao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 521—526.
- [7] 黎冰, 高玉峰, 魏代现, 等. 车辆荷载的影响深度及其影响因素的研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊 1): 310—313.
LI Bing, GAO Yu-feng, WEI Dai-xian, et al. Research on influential depth of vehicle loads and its influencing factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.1): 310—313.
- [8] 张仪萍, 俞亚南, 周宏伟. 桥头粉喷桩复合地基工后沉降原因分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1171—1175.
ZHANG Yi-ping, YU Ya-nan, ZHOU Hong-wei. Study on causes of post-construction settlement of DJM pile composite foundation at bridge approaches[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1171—1175.
- [9] 聂庆科, 白冰, 胡建敏, 等. 循环荷载作用下软土的孔压模式和强度特征[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1): 724—729.
- NIE Qing-ke, BAI Bing, HU Jian-min, et al. The pore pressure model and undrained shear strength of soft clay under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.1): 724—729.
- [10] 边学成, 曾二贤, 陈云敏. 列车交通荷载作用下软土路基的长期沉降[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2990—2996.
BIAN Xue-cheng, ZENG Er-xian, CHEN Yun-min. Long-term settlements of soft soil ground induced by train traffic loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 2990—2996.
- [11] 胡亚元. 准塑性的黏弹性模型在黏土中的应用[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 353—360.
HU Ya-yuan. Application of plastic-like visco-elastic model on clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(3): 353—360.
- [12] 殷建华, JACK I C. 土体与时间相关的一维应力-应变形状、弹黏塑性模型和固结分析[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 65—80; 15(4): 65—75.
YIN Jian-hua, JACK I C. One-dimensional time dependent stress-strain behaviour of soil, elastic Visco-plastic modeling and consolidation analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(3): 65—80; 15(4): 65—75.
- [13] 潘晓东, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载下黏弹性饱和土层的一维固结[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 272—276.
PAN Xiao-dong, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. One-dimensional consolidation of visco-elastic soil layer under cyclic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 272—276.
- [14] 蒋军. 循环荷载作用下黏土及含砂芯复合构件性状试验研究[博士学位论文D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [15] 李国维, 杨涛, 殷宗泽. 公路软基超载预压机理研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 896—901.
LI Guo-wei, YANG Tao, YIN Zong-ze. Study of mechanism about surcharge preloading method on the soft ground of highways[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(7): 896—901.
- [16] 陈勇. 交通荷载对低路堤高速公路路基影响的数值模拟研究[硕士论文D]. 南京: 河海大学, 2006.