

DOI: 10.11779/CJGE201512011

移动交通荷载下公路软土地基的沉降计算

魏 星¹, 王 刚²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

摘要: 交通荷载是一种移动的重复作用荷载, 在地基中产生的附加动应力的路径和大小与移动速度密切相关, 目前的简化算法中忽略了移动速度的影响。通过数值积分算法得到了交通荷载在地基中引起的附加动应力, 探讨了移动荷载下地基中应力路径特点及其与荷载移动速度的关系, 提出在拟静力计算的地基附加应力结果上乘以荷载速度效应的放大系数的简化近似方法, 给出了便于工程应用的放大系数的实用图表。根据移动荷载在地基中产生的附加动应力路径的特点, 提出了一个适用于循环心形应力路径的饱和软土残余变形的经验模型, 通过对已有试验成果的模拟, 初步验证了所提模型的有效性。在此基础上, 建议了一种考虑荷载移动速度影响的路基沉降实用算法。以 Saga 机场高速公路的沉降计算为例, 初步探讨了不同车速比下的公路沉降发展的特点和规律。

关键词: 移动车辆荷载; 循环心形路径; 移动速度; 饱和黏土; 残余变形

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)12-2217-07

作者简介: 魏星 (1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事土的本构理论、数值分析等方面的研究工作。E-mail: weixinghl@163.com。

Predicting settlement of road on soft subsoil induced by moving traffic load

WEI Xing¹, WANG Gang²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The acting position of traffic load moves on road surface with certain velocity. The induced stresses in subsoil imposed by traffic load depend on the moving velocity of load, whereas the simplified procedures nowadays used for induced stresses calculation by traffic load have ignored this velocity effect. The paper studies the long-term settlement of road on soft subsoil with emphasis on the velocity effect of moving traffic load. The numerical integration method is employed to get the induced stresses in the elastic half-space by a surficial moving point load with uniform velocity. By analyzing the characteristics of the induced stresses, a practical procedure is proposed for calculating traffic-load-induced stresses in road subsoil, which combines the results of commonly-used pseudo method with two amplification coefficients accounting for velocity effect. In the other aspect, an empirical model is proposed for quantifying the accumulation of residual strain during the long-term repeated cycles of heart-shaped stress paths, a typical stress path-induced by surficial moving load. The proposed empirical model is validated by the simulated test results. Once the induced stresses and residual strain of the subsoil can be calculated, the road settlement prediction is straightforward following the layer-wise summation procedure. The Saga airport road is taken as an example to analyze the influence of vehicle moving speed on long-term settlements.

Key words: moving wheel load; heart-shaped stress path; moving velocity; saturated clay; residual strain

0 前言

交通荷载是一种作用位置按一定速度移动的、长期重复作用的荷载。目前, 公路地基的沉降计算方法中将交通荷载视为位置不变的重复作用的荷载来计算地基中的附加动应力^[1-5], 没有完全考虑交通荷载的作用位置移动和具有一定移动速度这两个特点。研究表明: ①移动荷载作用下地基中土单元的竖向和水平向正应力差值和水平剪应力随荷载作用点的位置变化而连

续变化, 是一种主应力轴连续旋转的心形应力路径^[6-13]; ②地基中附加动应力的变化幅值不仅与土性及荷载大小相关, 还受到荷载移动速度的影响, 当移动速度达到0.5~0.6倍的地基剪切波速时, 动应力响应将显著增大^[11-13]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51209179); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金课题 (sklhse-2015-D-02)

收稿日期: 2014-08-23

土体的变形特性具有应力路径相关性。由于试验手段的限制, 目前主要基于循环三轴试验得到的变形规律来建立交通荷载作用下土体的残余变形计算模型^[1-4, 14-15]。由于循环三轴试验无法再现移动荷载下地基土的心形应力路径, 因此需要进一步探讨和验证这些模型描述交通荷载作用下地基土的变形规律的合理性和可靠性。交通荷载在地基土中导致的心形应力路径可通过在双向振动扭剪仪上同时施加三角函数形式的轴力和扭矩来模拟^[16-20]。初步的试验结果证实^[19-20], 在相同的初始固结应力和竖向动应力条件下, 循环心形应力路径由于水平动剪应力的存在, 比循环三轴应力路径下土体的残余变形累积值更大, 孔压累积的速度也更快。因此, 交通荷载下地基土的残余变形计算模型应体现心形应力路径的基本特点及其对残余变形的影响规律。

本文试图建立一种实用的考虑交通荷载作用位置移动效应和移动速度效应的公路软土地基长期沉降的计算方法。该方法包括: ①按一定速度移动的荷载在地基中产生的附加动应力的计算及其特征的简化描述方法; ②建立可考虑移动荷载在地基中产生的应力路径特征的饱和软土残余变形的经验计算模型。文中首先说明移动荷载在地基中产生的应力的计算理论和简化方法; 然后根据具体试验成果提出地基土残余变形经验计算模型; 最后结合具体工程实例, 说明地基沉降计算方法的具体步骤, 探讨荷载移动速度对沉降的影响特点和规律。

1 移动荷载在地基中产生的应力

图1为表面移动点荷载作用下弹性半无限地基中附加动应力的计算示意图。不失一般性, 设移动荷载大小为P, t=0时荷载位于坐标原点O, 荷载以速度v沿Ox轴方向移动。为了计算地基中任意点N(x, y, z)的附加动应力时程, 引入如图1所示的(r, θ, z)坐标定义时刻t的荷载作用点与应力计算点N的相对位置关系, r是荷载作用点与N点的地表投影点间的距离, θ是r与Ox轴的夹角。如图1所示, 有如下关系:

$$\begin{cases} x - vt = r \cos \theta, \\ y = r \sin \theta. \end{cases} \quad (1)$$

Eason^[6]基于平衡方程、位移协调条件和边界条件, 并通过积分变换, 得到地基点(x, y, z)处产生的附加动应力的计算公式为

$$\sigma_{x,d} = \frac{p}{2\pi^2} \int_0^\pi \frac{\cos^2 \phi}{H} \{ \gamma_1 \gamma_2 S_2 - \gamma_3 \gamma_4 S_1 \} d\phi, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{y,d} &= \frac{p}{2\pi^2} \int_0^\pi \frac{1}{H} \{ \gamma_1 \gamma_2 \sin^2 \phi S_2 - \\ &\quad \gamma_3 [\sin^2 \phi + (\gamma_4 - 1) \cos^2 \phi] S_1 \} d\phi, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\sigma_{z,d} = \frac{p}{2\pi^2} \int_0^\pi \frac{1}{H} \{ \gamma_3^2 S_1 - \gamma_1 \gamma_2 S_2 \} d\phi, \quad (4)$$

$$\tau_{yz,d} = \frac{prz}{\pi^2} \int_0^\pi \frac{\gamma_1 \sin \phi}{H} \gamma_3 \cos(\theta - \phi) S_3 d\phi, \quad (5)$$

$$\tau_{xz,d} = \frac{prz}{\pi^2} \int_0^\pi \frac{\gamma_1 \cos \phi}{H} \gamma_3 \cos(\theta - \phi) S_3 d\phi, \quad (6)$$

$$\tau_{xy,d} = \frac{p}{2\pi^2} \int_0^\pi \frac{\cos \phi \sin \phi}{H} \{ \gamma_1 \gamma_2 S_2 - \gamma_3 S_1 \} d\phi. \quad (7)$$

其中,

$$\gamma_1 = (1 - \alpha_p^2 \cos^2 \phi)^{0.5}, \quad (8)$$

$$\gamma_2 = (1 - \alpha_s^2 \cos^2 \phi)^{0.5}, \quad (9)$$

$$\gamma_3 = 1 - \frac{1}{2} \alpha_s^2 \cos^2 \phi, \quad (10)$$

$$\gamma_4 = 1 + \alpha_p^2 (0.5 \beta^2 - 1), \quad (11)$$

$$\beta = \alpha_s / \alpha_p, \quad (12)$$

$$H = \gamma_3^2 - \gamma_1 \gamma_2, \quad (13)$$

$$S_1 = 1/R_1^2 - 2r^2 \cos^2(\theta - \phi)/R_1^4, \quad (14)$$

$$S_2 = 1/R_2^2 - 2r^2 \cos^2(\theta - \phi)/R_2^4, \quad (15)$$

$$S_3 = \gamma_1 / R_1^4 - \gamma_2 / R_2^4, \quad (16)$$

$$R_1 = [r^2 \cos^2(\theta - \phi) + \gamma_1^2 z^2]^{0.5}, \quad (17)$$

$$R_2 = [r^2 \cos^2(\theta - \phi) + \gamma_2^2 z^2]^{0.5}. \quad (18)$$

式中 $\alpha_p = v/v_p$, $\alpha_s = v/v_s$, v_p , v_s 分别为土层的压缩波速和剪切波速。需要指出的是, 式(2)~(7)的被积函数在 $\phi = \pi/2$ 时存在奇异点, 无法直接求解, 但该奇异点存在极限。本文先通过极限分析得到其极值, 后再采用梯形积分算法进行求解。

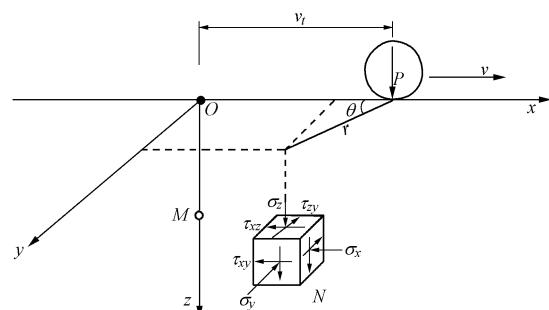


图1 移动点荷载作用下的地基应力计算示意图

Fig. 1 Sketch of subsoil submitted to moving point load

图2(a)给出了单位移动荷载作用下图1中M点的附加动应力随荷载位置变化的曲线。图2(b)将该应力变化过程绘制在正应力差-剪应力空间, 图中, σ_1 为大主应力, α 为 σ_1 与竖向的夹角。由图2(b)可见, 在荷载移动的过程中, 地基中M点的主应力方向和大小出现连续的变化, 呈典型的心形路径。地基中其他点的应力变化过程与M点相似, 只是各应力分量的大小不同。令应力差幅值为 $q_{d,c} = (\sigma_{z,d} - \sigma_{x,d})_{\max}$, 水平动剪应力幅值为 $\tau_{xz,c} = (\tau_{xz,d})_{\max}$, $q_{d,c}$ 和 $\tau_{xz,c}$ 是定义心形

应力路径的基本参数。 $q_{d,c}$ 和 $\tau_{xz,c}$ 不仅与土的性质和荷载大小相关, 而且与荷载移动速度相关。

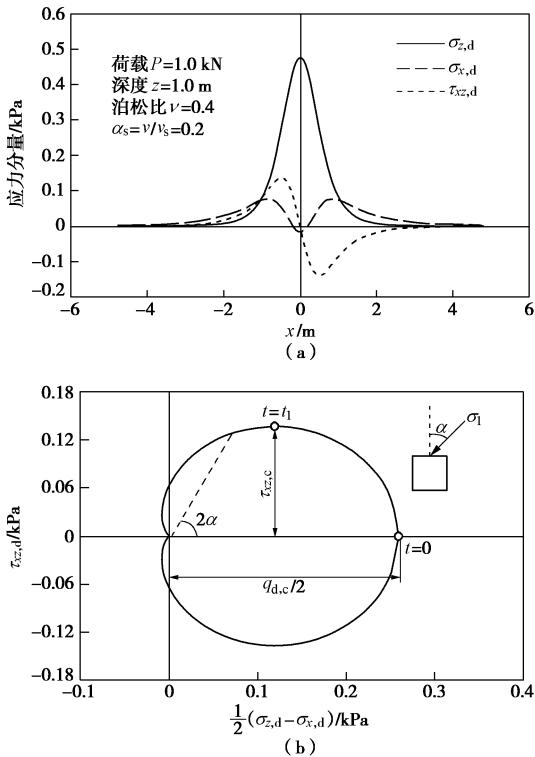


图2 移动荷载作用下地基土单元的应力变化过程

Fig. 2 Stress path of soil element induced by moving point load

图3给出了 $t=0$ 时刻移动线下方土单元中归一化的竖向动应力 $\pi z^2 \sigma_{z,d}/P$ 和水平动应力 $\pi z^2 \sigma_{x,d}/P$ 随速度比 α_s 的变化曲线。图4给出了移动线下方土单元中归一化的动应力幅值 $\pi z^2 q_{d,c}/(2P)$ 、 $\pi z^2 \tau_{xz,c}/P$ 随 α_s 的变化曲线。由图2可知, 当荷载位于计算点正上方时, 即 $t=0$ 时刻, 竖向和水平正应力差值达到其最大值(幅值 $q_{d,c}$), 因此 $q_{d,c}$ 可直接由图3中的两个正应力求差值得到。然而需要说明的是, 水平动剪应力幅值 $\tau_{xz,c}$ 出现的时刻 t_1 在不同深度处不同, 随深度的增大而延后, 因此需要计算荷载移动过程中水平动剪应力 $\tau_{xz,d}$ 的时程曲线, 通过比较确定其幅值 $\tau_{xz,c}$ 。查图3, 4可以得到移动点荷载作用下均匀弹性地基内的附加动应力及其幅值。

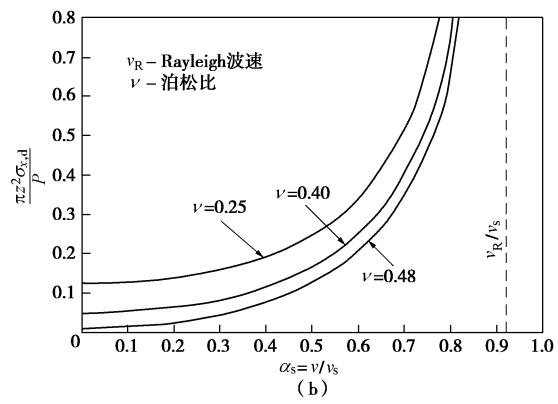
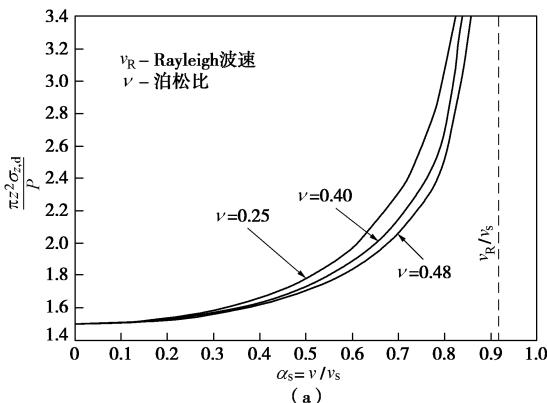


图3 动应力 $\sigma_{z,d}$ 、 $\sigma_{x,d}$ 与 α_s 间关系曲线

Fig. 3 Relationship among $\sigma_{z,d}$, $\sigma_{x,d}$ and α_s

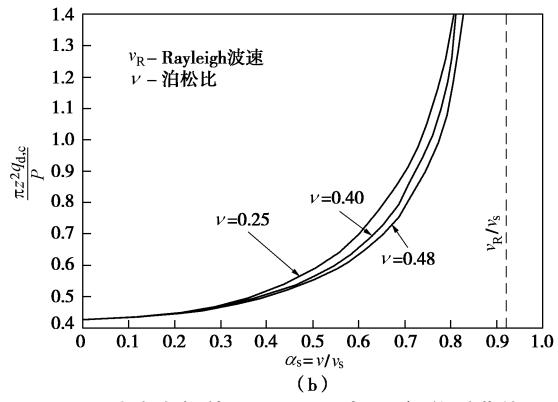
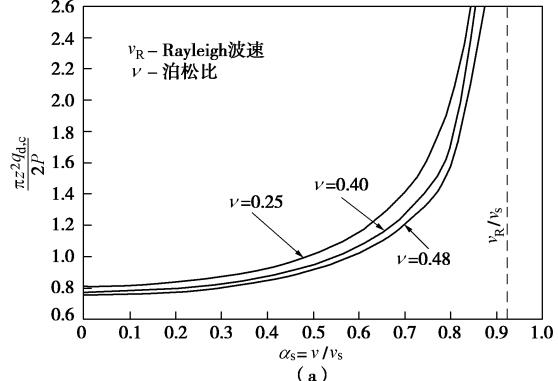


图4 动应力幅值 $q_{d,c}$ 、 $\tau_{xz,c}$ 与 α_s 间关系曲线

Fig. 4 Relationship among $q_{d,c}$, $\tau_{xz,c}$ and α_s

实际工程遇到的往往是成层地基, 假设荷载移动速度导致的放大效应可以用上述均匀地基计算的结果来近似。于是定义速度 v 下附加动应力幅值的放大系数 c_q 和 c_τ 为

$$c_q = (q_{d,c})_{\alpha_s} / (q_{d,c})_{\alpha_s=0}, \quad (19)$$

$$c_\tau = (\tau_{xz,c})_{\alpha_s} / (\tau_{xz,c})_{\alpha_s=0}. \quad (20)$$

如假设地基各土层均为弹性, 则 c_q 和 c_τ 仅和泊松比相关。图5给出了基于图4绘制的 c_q 和 c_τ 的量化曲线。由图5查得 $\alpha_s > 0$ 的 c_q 和 c_τ , 将其乘以拟静力法(如Boussinesq解、静力有限元法等)得到的 $\alpha_s=0$ 的附加应力幅值, 可得到速度为 v 时的近似附加动应力幅值。

由图3~5可见, 在车速较低时, α_s 值较小, 车速

对附加动应力的影响较小; α_s 大于 0.4 时, 附加动应力的放大效应就应该予以考虑; 当 α_s 接近于 v_R/v_s 时, 应力幅值急剧增加, v_R 为瑞利波速。

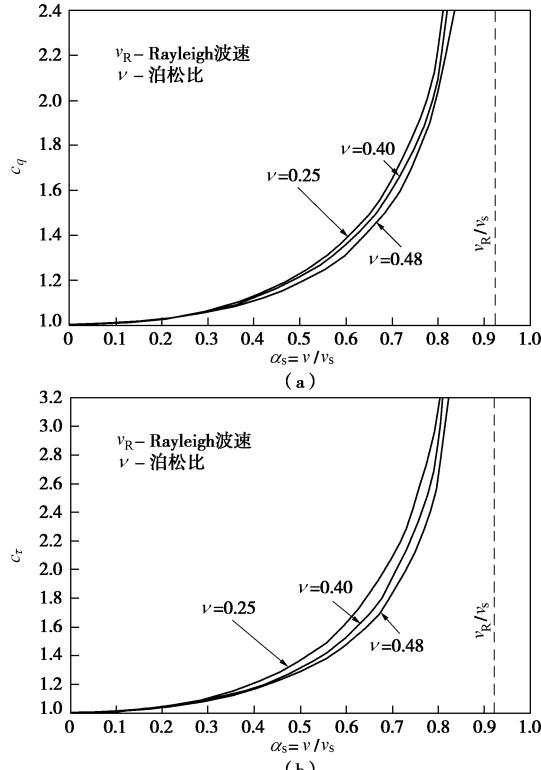


图 5 动应力放大系数 c_q 和 c_t 随 α_s 的变化曲线

Fig. 5 Relationship among c_q , c_t and α_s

2 心形路径下饱和黏土的残余变形

2.1 经验模型

为了描述对残余变形产生影响的静应力条件及循环心形应力路径条件, 分别引入表征初始静偏应力、附加动应力差和附加动剪应力影响的参数 R_s 、 R_q 和 R_t :

$$R_s = q_s / q_f \quad , \quad (19)$$

$$R_q = q_{d,c} / q_f \quad , \quad (20)$$

$$R_t = \tau_{xz,c} / q_{d,c} \quad , \quad (21)$$

式中, q_s 为静偏应力, $q_s = \sigma_{z,s} - \sigma_{x,s}$, $\sigma_{z,s}$ 和 $\sigma_{x,s}$ 分别为竖向静应力和水平静应力。 $q_f = 2\tau_f$, τ_f 为静荷载下土体的剪切强度, 对于正常固结土 $q_f = Mp_0$, M 为临界应力比, p_0 为前期固结压力。对于超固结土, 考虑超固结比 OCR 的影响:

$$q_{f,OCR \neq 1} = q_{f,OCR=1} \times OCR^{0.8} \quad . \quad (22)$$

根据试验揭示的循环荷载作用下黏土残余变形的累积规律并参考三轴应力路径下的经验模型^[1-4], 结合心形应力路径的特点, 采用如下指数型公式描述循环心形路径作用下黏土的残余变形累积过程:

$$\varepsilon_{q,r} = aK_q K_t K_a K_\sigma N^b \quad . \quad (23)$$

式中 $\varepsilon_{q,r}$ 为竖向残余应变; a , b 为材料参数, 由土的性质决定; K_q , K_t 为表征动应力影响的因子, K_q 由 R_q 定义, 是动应力差值影响的因子; K_t 由 R_t 定义, 是水平动剪应力影响的因子; K_a 和 K_σ 为表征静应力影响的因子, K_a 由 R_s 定义, 是初始静偏应力影响的因子; K_σ 由 p_0 定义, 是初始固结条件影响的因子。各因子的表达如下:

$$K_q = R_q^{\alpha_1} \quad , \quad (24)$$

$$K_t = 1 + \alpha_2 R_t \quad , \quad (25)$$

$$K_a = (1 + R_s)^{\alpha_3} \quad , \quad (26)$$

$$K_\sigma = (p_0 / p_a)^{\alpha_4} \quad , \quad (27)$$

式中, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 为材料参数, 由不同静动应力状态的试验结果拟合确定, p_a 为大气压强。

2.2 模型验证

郭林^[19]、钱建固等^[20]分别采用振动扭剪仪对饱和温州原状黏土和饱和上海淤泥质黏土开展了心形应力路径的不排水循环加载试验。本文拟通过模拟这两种土的试验结果初步说明所提出经验模型的参数确定和表现。

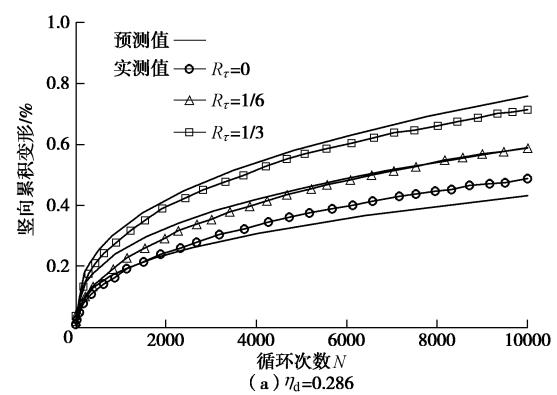
两种土的模型参数见表 1。郭林^[19]的试验中所有试样的初始静应力都相同, 因此与初始静应力相关的因子 K_a 和 K_t 中的参数 α_3 和 α_4 无法确定, 计算中将 $aK_a K_\sigma$ 视作一个常数。钱建固等^[20]的试验中试样为初始等向固结且 R_t 为定值, 因此与 K_t 和 K_a 相关的参数 α_2 和 α_3 无法确定, 计算中将 $aK_t K_a$ 视作一个常数。两种土样的循环心形加载路径的试验结果和模拟结果见图 6, 7, 图中 $\eta_d = q_{d,c} / p_0$ 为动静应力比。可见, 该模型采用一组参数较好地模拟了不同围压和不同循环动静应力比的心形应力路径下试样残余变形的发展过程。

表 1 模型参数

Table 1 Material parameters of soil samples

土样名称	$a/\%$	b	α_1	α_2	α_3	α_4
温州原状黏土 ^[19]	5.4*	0.37	3.91	2.25	—	—
上海淤泥质黏土 ^[20]	0.17**	0.31	1.61	—	—	1

注: *参数 a 为 $aK_a K_\sigma$ 的值; **参数 a 为 $aK_t K_a$ 的值。



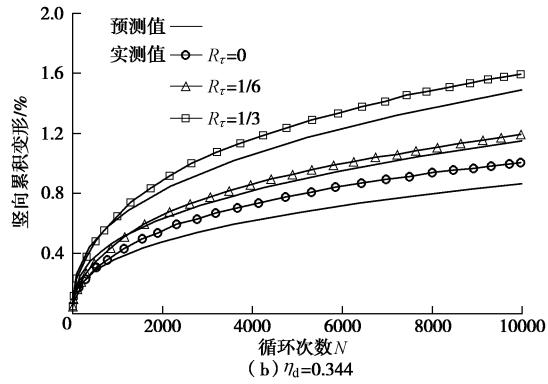


图 6 温州原状黏土残余变形的试验结果和模型预测

Fig. 6 Comparison between model predictions and test results of residual strain of intact Wenzhou clay

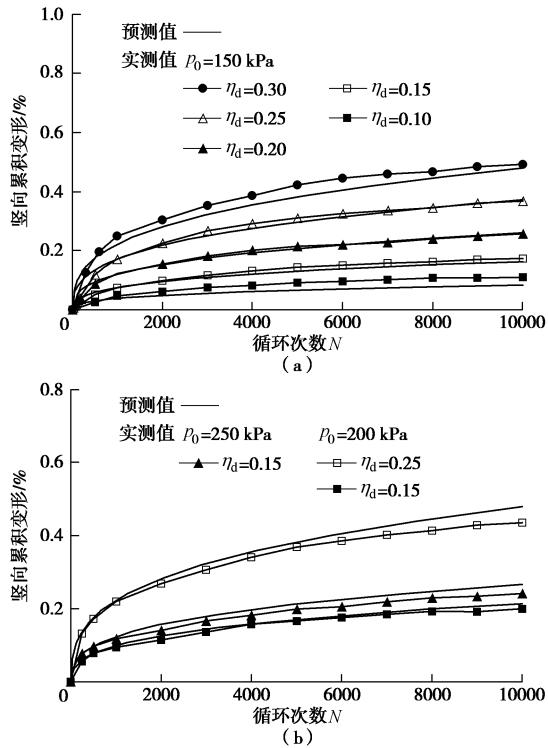


图 7 上海淤泥质黏土残余变形的试验结果和模型预测

Fig. 7 Comparison between model predictions and test results of residual strain of Shanghai silt clay

3 考虑车速影响的软土地基沉降计算

Saga 机场高速公路 Ap—A 断面建于软黏土地基上, 1991 年 8 月开始修建, 1992 年 3 月修建完成, 1992 年 5 月初通车, 1994 年 8 月又进行了全面整修, 路面上加铺了 0.1 m 厚的沥青层^[1]。通车后 Saga 机场正处于建设期, 每天约有 400 辆货车经过该路段, 货车平均重量约为 200 kN。因运营期交通荷载的作用, 该公路发生了显著的工后沉降。下面以该实例的分析为例说明考虑交通荷载移动效应和速度效应影响的公路地基长期沉降计算简化方法。该简化方法的具体计算步骤如下:

(1) 初始静应力和静强度。采用有限元法计算土层自重和路堤荷载下地基中的静应力分布, 基于初始静应力可以确定静强度, 计算参数及计算过程见文献[1]。土层的初始静应力和静强度值见表2。

表 2 静偏应力、静强度和附加应力 ($V=0$)

Table 2 Static deviator stresses and strengths, induced stresses at $V=0$

土层	深度 [*] /m	厚度/m	q_s/kPa	q_f/kPa	$q_{d,c}^{**}/\text{kPa}$	$\tau_{xz,c}^{**}/\text{kPa}$
1	1.45	0.5	15.3	25.0	9.33	2.52
2	1.95	0.5	16.8	25.0	6.80	1.84
3	2.70	1.0	16.8	30.2	4.81	1.30
4	3.70	1.0	13.3	32.6	2.94	0.79
5	4.70	1.0	13.5	34.6	2.11	0.57
6	5.70	1.0	13.6	36.8	1.56	0.42
7	6.80	2.0	18.0	40.0	1.45	0.39

注: *指土层中间距路面顶部距离; **指 $V=0$ 时的附加动应力幅值。

(2) 采用拟静力法计算附加应力 ($v=0$)。将交通荷载视作在固定位置重复作用的荷载, 采用弹性层状体系理论计算 $q_{d,c}$ (计算参数见文献[1])。该方法不能得到 $\tau_{xz,c}$ 的值, 需利用图4近似估算 $\tau_{xz,c}$ 。由土层泊松比 ν 为 0.4^[1], 查图4得到 $\alpha_s = 0$ 的 $\pi z^2 q_{d,c} / (2P)$ 和 $\pi z^2 \tau_{xz,c} / P$ 的值, 可求得 $\tau_{xz,c} / q_{d,c} \approx 0.27$, 将该值乘以已得到的 $q_{d,c}$ 可近似确定 $\tau_{xz,c}$ 的值。计算结果见表2。

(3) 计算行车速度对附加动应力的影响。由车速 v 计算 α_s , 查图5得到放大系数 c_q 和 c_τ , 将 c_q 和 c_τ 分别乘以表2中 $v=0$ 时的 $q_{d,c}$ 和 $\tau_{xz,c}$ 得到考虑速度效应的附加动应力。表3中给出4种 α_s 的取值对应的 c_q 和 c_τ 。

表 3 速度放大系数 c_q 和 c_τ

Table 3 Amplification coefficient c_q and c_τ

参数	$\alpha_s=0.2$	$\alpha_s=0.4$	$\alpha_s=0.6$	$\alpha_s=0.8$
c_q	1.0	1.1	1.4	2.5
c_τ	1.1	1.2	1.6	3.1

(4) 分层总和法计算地表沉降。根据荷载作用次数、静动应力条件, 采用残余变形经验公式(23)计算各土层残余应变, 材料参数见表4。各土层残余应变乘以厚度并累加得到地表沉降。

表 4 地基土层的模型参数

Table 4 Model parameters of subsoil

土层	$a/\%$	b	α_1	α_2	α_3
地基表层	0.75	0.29	2.0	2.5	1
黏土层 A_{cl}	0.75	0.22	2.0	2.5	1
粉土层 A_{sl}	0.65	0.13	2.0	2.5	1

图8给出了按上述方法计算得到的 α_s 为 0, 0.2, 0.4

和 0.6 的沉降发展曲线, 曲线中同时包含了固结计算得到的后期固结沉降。固结沉降计算参见文献[1]。由图 8 可见: ①在公路投入运营时, 路堤自重作用下的固结沉降已大部分完成, 工后沉降主要是交通荷载引起的沉降; ②沉降量随 α_s 值的增大呈快速增加现象, 说明移动速度效应对沉降的影响是明显的; ③ $\alpha_s = 0.4$ 时的预测曲线与实测数据较为接近。

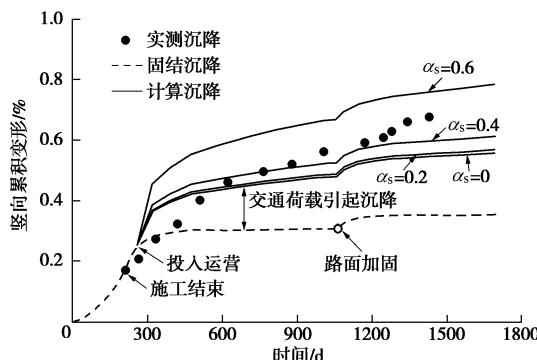


图 8 Saga 机场路实测沉降和计算沉降

Fig. 8 Measured settlements and predictions of Saga Airport road

4 结 语

交通荷载引起的地基长期沉降的计算主要包含两个问题: ①移动荷载下地基土单元的附加动应力的计算; ②该应力路径下土体的残余变形的预测。本文首先探讨了移动荷载下地基中应力路径的特点并给出了量化该路径的特征指标为 $q_{d,c}$ 和 $\tau_{xz,c}$, 绘制了地基中附加动应力及放大系数与移动速度的关系曲线, 建议了考虑荷载移动效应的附加动应力的简化计算方法。其次, 基于已有试验成果, 发展了一个适用于循环心形应力路径下、预测饱和黏土残余变形的经验模型, 通过对已有试验结果的模拟, 初步验证了所提残余变形模型的有效性。最后, 建议了一种考虑移动速度影响的、实用沉降计算方法, 将所提出的沉降计算方法用于 Saga 机场公路的沉降分析, 给出了不同车速下的沉降发展曲线, 验证了提出的沉降方法的有效性。

本文建议的考虑速度效应的地基附加应力方法是基于移动集中荷载作用下均匀弹性半空间地基的附加应力理论得出速度效应放大系数, 然后乘以拟静力法计算的附加应力来近似计算地基中的附加动应力。对于柔性路面路堤结构或路面结构刚度和厚度不大的公路且主要是汽车车辆荷载的情况, 由于车轮与路面接触半径较小, 并且上部路面路堤结构和地基的动力相互作用效应不显著, 因此该方法是一种合理的近似。对于轨道结构和轨道交通荷载的情况, 将荷载视为集中荷载, 并采用基于均匀弹性半空间理论的速度效应放大系数是不合适的, 此时地基中的附加动应力的计

算需要考虑荷载的分布效应以及地基与上部结构的复杂的动力相互作用, 本文方法不适用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] SAKAI A, SAMANG L AND MIURA N. Partially-drained cyclic behavior and its application to the settlement of a low embankment road on silty-clay[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(1): 33 - 46.
- [3] 魏 星, 黄茂松. 交通荷载作用下公路软土地基长期沉降的计算[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3342 - 3346. (WEI Xing, HUANG Mao-song. A simple method to predict traffic-load-induced permanent settlement of road on soft subsoil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3342 - 3346. (in Chinese))
- [4] 魏 星, 王 刚, 余志灵. 交通荷载下软土地基长期沉降的有限元法[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 2011 - 2015. (WEI Xing, WANG Gang, YU Zhi-ling. FEM of traffic-load-induced settlement of road on soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 2011 - 2015. (in Chinese))
- [5] 汤连生, 林沛元, 吴 科, 等. 单点动载下路基动应力状态及有效作用半径分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增刊 2): 4056 - 4063. (TANG Lian-sheng, LIN Pei-yuan, WU Ke, et al. Analysis of dynamic stress state and effective working radius in subgrade under concentrated load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 4056 - 4063. (in Chinese))
- [6] EASON G. The stresses produced in a semi-infinite solid by a moving surface force[J]. International Journal of Mechanics A: Solids, 1965, 2: 581 - 609.
- [7] LEKARP F, ISACSSON U, DAWSON A. State of the art. I : Resilient response of unbound aggregates[J]. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 2000, 126(1): 66 - 75.
- [8] POWRIE W, YANG L A, CLAYTON C R I. Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2007, 221(2): 247 - 262.
- [9] GRABE P J, CLAYTON C R I. Effects of principal stress rotation on permanent deformation in rail track foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(4): 555 - 565.

- [10] ISHIKAWA T, SEKINE E, MIURA S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(5): 691 - 703.
- [11] 蒋建群, 周华飞, 张土乔. 弹性半空间体在移动集中荷载作用下的稳态响应[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 440 - 444. (JIANG Jian-qun, ZHOU Hua-fei, ZHANG Tu-qiao. Steady-state response of an elastic half-space under a moving point load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 440 - 444. (in Chinese))
- [12] 丁智, 葛国宝, 魏新江, 等. 地铁列车运营引起的地基土应力状态变化分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊2): 647 - 651. (DING Zhi, GE Guo-bao, WEI Xin-jiang, et al. Variation of stress state of foundation soils induced by running subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 647 - 651. (in Chinese))
- [13] 王常晶, 陈云敏. 列车移动荷载在地基中引起的主应力轴旋转[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, **44**(5): 950 - 954. (WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Principal stress axes rotation in ground induced by train moving load [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, **44**(5): 950 - 954. (in Chinese))
- [14] LI D, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **122**(12): 1006 - 1013.
- [15] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(7): 891 - 895. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 891 - 895. (in Chinese))
- [16] HIGHT D W, GENN A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, **33**(4): 355 - 383.
- [17] 沈扬, 周建, 龚晓南. 空心圆柱仪(HCA)模拟恒定围压下主应力轴循环旋转应力路径能力分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 281 - 287. (SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Analysis on ability of HCA to imitate cyclic principal stress rotation under constant confining pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 281 - 287. (in Chinese))
- [18] 王常晶, 温日琨, 陈云敏. 交通荷载引起的主应力轴旋转室内试验模拟探讨[J]. 岩土力学, 2008, **29**(12): 3412 - 3416. (WANG Chang-jing, WEN Ri-kun, CHEN Yun-min. Discussion on laboratory test simulation of principal stress axes rotation induced by traffic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(12): 3412 - 3416. (in Chinese))
- [19] 郭林. 复杂应力路径下饱和软粘土静动力特性试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (GUO Lin. Experimental study on the static and cyclic behavior of saturated soft clay under complex stress path[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [20] 钱建固, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通动载下饱和软黏土累计变形的不排水循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(10): 1790 - 1798. (QIAN Jian-gu, WANG Yong-gang, ZHANG Jia-feng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(10): 1790 - 1798. (in Chinese))