

文章编号:2095-7386(2016)02-0055-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2016.02.010

基于 Chai-Miura 模型的低路堤软基沉降拟静力研究

周 峙,王志峰

(安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽 合肥 230088)

摘 要:低路堤设计理念可有效节约不可再生的土地资源。但随着我国重载交通逐渐增加,由交通荷载引起的低路堤软基沉降问题引人关注。本文通过将交通动荷载简化为集中静荷载,并利用 Boussinesq 应力解推导不同深度处的附加动应力计算公式,采用 Chai-Miura 简化模型计算地表以下每层土体的累积塑性应变,从而预测车辆动荷载作用下低路堤软基沉降量。依托安徽省五河县 S306 沿淮软土的物理力学特征,分别研究了车辆荷载在地基内部产生的动偏应力的分布规律及低路堤软基沉降的影响因素。

关键词:低路堤;交通荷载;Boussinesq;应力解;软基沉降

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

Quasi static low embankment of soft ground settlement based on Chai-Miura model

ZHOU Zhi ,WANG Zhi-feng

(Anhui Transport Consulting & Design Institute Co. Ltd , Hefei 230088 ,China)

Abstract: Low embankment design concept can effectively save non renewable land resources. However, with the gradual increase of heavy load traffic in China, the settlement of soft foundation caused by traffic load is concerned. The traffic load is simplified as concentrated static load, and the use of the Boussinesq stress solution at different depths can get additional dynamic stress calculation formula, and using Chai-Miura simplified model can calculate cumulative plastic strain below the surface of each layer of soil. So it can be used to predict vehicle dynamic load under the action of low embankment on soft ground settlement. Relying soft soil physical and mechanical characteristics of S306 along Huaihe River in Anhui Wuhe, respectively, the paper studies the laws of deviatoric stress distribution of the vehicle load in the interior of the foundation and influencing factors of low embankment settlement of soft soil foundation.

Key words: low embankment ; traffic load ; Boussinesq ; stress solution ; soft foundation settlement

1 引言

随着我国道路交通投资规模的加大,全国各地

的公路建设得到迅速发展。但是在经济建设发展的同时,也出现了公路永久占地面积大、土地资源浪费、对道路沿线环境影响严重等问题。若按路堤高

收稿日期:2016-03-01.

作者简介:周峙(1987-),男,工程师, E-mail:332440995@qq.com.

度每延米减少 1m 的路基高度计算,边坡按 1:1.5 坡率设置,每公里将节省占用土地 4.5 亩,这极大程度上节约了不可再生的土地资源,也契合我国的可持续发展方针。

交通运输部自 2004 年 4 月下发《关于在公路建设中实行最严格的耕地保护的若干意见》后,低路堤的设计理念受到了重视。但由于地区区域差异,目前低路堤在全国还没有形成统一的定义和标准,现在较为普遍的定义有两种,其一,将填土高度低于 2.5m 的路堤称为低路堤,其二,满足泄洪河流、通航和其相交的高速公路高程要求的基础上,公路设计的桥涵、通道密度比例和平均填土高度降低到特定值时的最小路堤高度^[1]。但不论何种定义,其实质均需要满足公路自身稳定安全、功能需求的前提下合理的降低填土高度以达到较好的经济效益。

实践过程中,并非路堤越低越好。随着公路交通流量、行车荷载不断增加,导致交通荷载对低路堤路基的影响也越来越大。由于车辆荷载在低路堤中产生的附加应力不能完全扩散,导致路基的沉降变形加剧,这一现象在软土地基中也显得尤为突出,因此低路堤软土地基沉降也引起了广大学者和设计师的关注。但截至目前,国内外学者虽然针对低路堤上的行车动荷载作用下的软基沉降开展了很多试验研究,但并没有形成成熟的计算方法。

一般将车辆荷载换算成作用效果相同的土柱来考虑车辆荷载对路基的作用,然后采用分层总和法计算软基沉降,但这样并未考虑车辆荷载的动力特性,必然导致沉降计算结果偏小,与实际相差较大。从目前研究现状看,研究交通荷载作用下的低路堤软基沉降计算主要有以下两种方式。

其一,建立软土动力本构有限元模型,利用数值计算确定地基的动力响应特征。张颖^[2]基于 COMSOL 建立有限元模型,导入控制方程,分析不同工况下交通荷载引起的永久性沉降和孔压变化规律。边学成^[3]采用维有限元方法对列车动荷载引起的三维地基动力响应问题进行研究,阐述了列车运行时的动荷载在地基内部产生动应力的变化路径。仇敏玉^[4]结合有限元法建立数值分析模型建立弹性人工边界,并采用经典问题解析解在理论上验证了该模型能反映车辆荷载作用下路基的动力响应特征。

其二,通过经验公式计算动荷载作用下软基的附加沉降及累计塑性应变。

Jones 和 Petyt (1993, 1998)^[5-6]将地基模拟为弹性半空间,利用傅里叶变换先后研究了矩形荷载、

条形荷载作用下地基的响应。兰辉萍和李德建 (2003)^[7]采用动力有限元法分析了交通荷载引起的水平及竖向应力沿路基深度传播规律。凌建明等 (2002)^[8]对软土地区的零填方路基在行车荷载作用下动力特性进行了研究,将行车荷载简化为双圆均布垂直荷载。高玉峰等 (2005)^[9]对沪宁、杭金衢高速公路的 4 个断面计算,交通荷载的有效作用深度为 6.0—8.0 m。张颖^[2]对交通荷载下高速公路低路堤沉降研究中引用 Chai 建立一个经验公式,得出了车辆荷载的主要影响深度为 6.0m 左右的结论。Kutara^[10]等将交通荷载等效为静力荷载计算,同时采用一维固结理论来预测交通荷载作用下的长期沉降。Hyodo 等 (1998)^[11]在 Ariake 粘土上进行了低路堤的交通荷载试验,对车辆动载作用下的路基土中的附加动应力进行了研究,根据现场动力试验后发现,低路堤地基内卡车引起的竖向应力大约是其自身净重所产生应力的 4—5 倍。

由于交通荷载是一种很复杂的随机荷载,即便通过建立较繁冗的有限元模型,也很难精确掌握动力作用下的软土的变形特点。而基于试验数据建立岩土初始应力、动应力及循环作用次数验公式的拟合计算方法,虽然对模型进行了简化,但工程实用意义更明确,参数也比较容易确定,在实际工程中应用更为广泛。因此,本文将依托安徽省蚌埠市五河县的省道 S306 的低路堤软土沉降问题,选用目前较为完善的 Chai-Miura 模型,开展低路堤软基在交通荷载作用下沉降预测研究。

2 Chai-Miura 简化模型及模型参数确定

2.1 简化模型

1978 年, Akili、Monismith 等人^[12]提出考虑重复荷载作用下的黏土的累计塑性应变指数模型:

$$\varepsilon_p = A \times N^b \quad (1)$$

A 、 b 均为与土体性质有关的常数, N 为循环荷载作用次数。 ε_p 为黏土的累计塑性应变。由于该模型 A 、 b 参数范围取值较大,计算结果与实测值往往相差较大。因此, Chai 和 Miura^[13]该模型基础上,提出了考虑初始静偏应力影响的修正公式:

$$\varepsilon_p = a \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_f} \right)^m \left(1 + \frac{\sigma_s}{\sigma_f} \right)^n \times N^b \quad (2)$$

式中 σ_d 表示动偏应力, σ_f 表示静破坏偏应力, σ_s 表示静偏应力。 a 、 b 、 m 、 n 均为常数, N 为交通荷载作用的轴载次数。

根据每层土体累计塑性应变,可求出不同土层的总的沉降变形 S :

$$S = \sum \varepsilon_p \cdot h_i . \tag{3}$$

其中 h_i 为每层土层厚度。

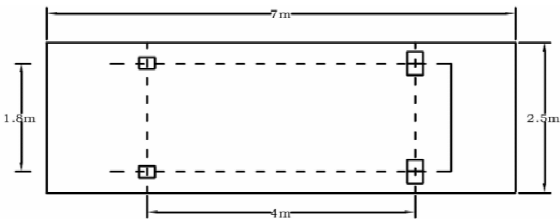
2.2 模型参数的确定

2.2.1 车辆荷载与交通轴载次数

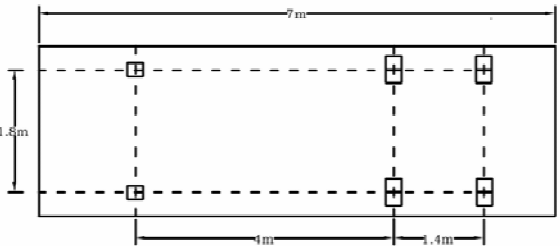
根据《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)^[14],不同载重的车辆的技术指标及平面尺寸详见表 1 和图 1。

表 1 不同载重车辆技术指标

主要技术指标	汽-10	汽-15	汽-20	汽-30
总重力/kN	100	150	200	300
前轴重力/kN	30	50	70	60
后轴重力/kN	70	100	130	240
轴距/m	4	4	4	5.4
轮距/m	1.8	1.8	1.8	1.8
后轮接地面积/m ²	0.1	0.1	0.12	0.24



(a)100, 150, 200 kN 汽车的平面尺寸



(b)300 kN 汽车的平面尺寸

图 1 100—300 kN 车辆平面尺寸

根据《公路沥青路面设计规范》(JTG D50-2006)^[15],依据预测交通量按下式计算设计年限内一个车道上的累计当量轴次:

$$N_1 = \sum C_1 \times C_2 \times n_1 \times (P_1/P_2)^{4.35} . \tag{4}$$

$$N_e = [(1 + \gamma)^{t-1}] \times 365 \times N_1 \times \eta/\gamma . \tag{5}$$

其中:

N_1 ——营运第一年双向日平均当量轴次(次/d);

t ——设计年限(年);

N_e ——设计年限内一个车道的累计当量轴次(次/车道);

γ ——设计年限内交通量的年平均增长率(%);

C_1 ——被换算车型的轴数系数;

C_2 ——被换算车型的轮组系数;

P_i ——被换算车型的各级轴载(kN);

n_i ——被换算车型的各级轴载作用次数(次/d)。

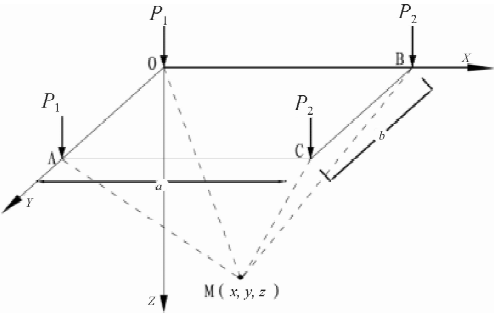
η ——车道系数,标准值 0.35。

2.2.2 动态偏应力 σ_d

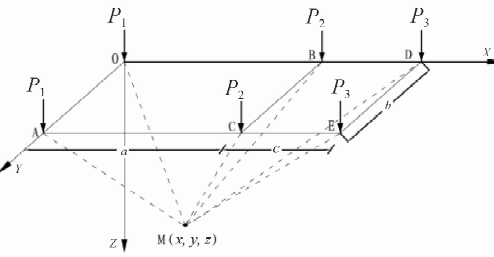
根据前文 Hyodo 等人对车辆动荷载作用下的路基土的附加动应力规律,低路堤地基内车辆荷载产生的动应力是其静荷载所产生应力的 4—5 倍,因此,本文假定车辆荷载产生的动应力是其静荷载产生附加应力的 4 倍。

如果将交通动荷载等效成静荷载,那么假定地基为半无限空间弹性体,那么上部荷载在弹性体内的任意 $M(x,y,z)$ 点处产生的附加动应力,也应满足 Boussinesq 的附加应力分布规律。本文将车辆静荷载设为 P ,并按规定比例分配到各个车轮上,并假定车轮作用于路面的是集中力。

应用 Boussinesq 应力解,可求出各个车轮处不同集中荷载点在 M 处产生的附加应力,如图 2 所示。



(a) 两轴车辆的 Boussinesq 应力解示意图



(b) 三轴车辆的 Boussinesq 应力解示意图

图 2 不同轴载作用下车辆荷载 Boussinesq 应力解示意图

图中 a 、 b 、 c 均为不同轴载车辆的尺寸参数。 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为不同车轴处作用力。对于两轴车辆, O 、 A 、 B 、 C 点在地基以下任意点 M 处的附加应力分别为 $(\sigma_z)_o$ 、 $(\sigma_z)_A$ 、 $(\sigma_z)_B$ 、 $(\sigma_z)_C$ 。

$$(\sigma_z)_o = \frac{3P_1z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P_1}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{x^2 + y^2}{z^2}\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (6)$$

$$(\sigma_z)_A = \frac{3P_1z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P_1}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{x^2 + (b-y)^2}{z^2}\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (7)$$

$$(\sigma_z)_B = \frac{3P_2z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P_2}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{(a-x)^2 + y^2}{z^2}\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (8)$$

$$(\sigma_z)_C = \frac{3P_2z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P_2}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{(a-x)^2 + (b-y)^2}{z^2}\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (9)$$

类似的可以求出三轴车辆轮胎集中荷载在地基处任意点 M 处的附加应力, D 、 E 处的附加应力分别为 $(\sigma_z)_D$ 、 $(\sigma_z)_E$ 。

$$(\sigma_z)_D = \frac{3P_3z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P_3}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{(a+c-x)^2 + y^2}{z^2}\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (10)$$

$$(\sigma_z)_E = \frac{3P_3z^3}{2\pi R^5} = \frac{3P_3}{2\pi z^2} \frac{1}{\left[1 + \frac{(a+c-x)^2 + (b-y)^2}{z^2}\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (11)$$

叠加式(6)~(11), 即为二轴车辆动荷载等效的静荷载在 M 点处产生的附加应力 σ_{sM} , 那么

$$\sigma_{dM} = 4\sigma_{sM} = 4\{(\sigma_z)_o + (\sigma_z)_A + (\sigma_z)_B + (\sigma_z)_C\} \quad (12)$$

因此, 车辆荷载在 M 处产生的动态偏应力即可求出。

2.2.3 静态破坏偏应力 σ_f

静态破坏偏应力由下式确定

$$\sigma_f = 2S_u \quad (13)$$

其中, S_u 为固结不排水剪切强度, 根据固结不排水剪切试验确定。

2.2.4 初始偏应力 σ_s

在路面施工完成后, 未开放交通时, 路基的初始偏应力为路基(含路面结构层)在地基上产生的静垂直应力。

$$\sigma_s = \sum \gamma_i \times h_i + \Delta\sigma_s \quad (14)$$

其中 $\sum \gamma_i \times h_i$ 为地基以下不同土层的自重应力, $\Delta\sigma_s$ 为路堤荷载引起的附加应力, 可以根据 Boussinesq 应力解求得。

2.2.5 常数 a 、 b 、 m 、 n

本文采用 Li 和 Selig^[16] 在 1996 年提出的模型参数值, 如表 2 所示。

表 2 a 、 b 、 m 参数值

土类	a	b	m
高液限黏土	1.2	0.18	2.4
低液限黏土	1.1	0.16	2.0
高液限粉土	0.84	0.13	2.0
低液限粉土	0.64	0.10	1.7

其中 b 仅与土体类型有关, m 影响塑性应变沿深度的变化情况, m 值愈大, 沿深度的塑性应变增长愈快。假定塑性应变随初始静态偏应力呈线性增长, $n = 1.0$ 。

3 基于 Chai-Miura 简化模型的低路堤软基沉降算例研究

3.1 研究对象概况

安徽省五河县省道 S306 定位于一级公路兼具城市主干道, 线位位于淮河两岸漫滩内, 软基段全长 3.84 km, 地表直接出露淤泥质粉质黏土, 厚度 15—25 m, 下卧土层为粉质低液限粘土层, 性质较差, 呈软塑状, 天然密度为 1.74 kg/m³, 天然含水率为 44.9%, 天然孔隙比 1.28, 固结不排水剪切强度指标中, 粘聚力 C_q 为 12.6 kPa, 内摩擦角为 5.3 度。路基宽 35.5 m, 路面结构厚 74 cm, 路面结构干容重 25 kN/m³, 路堤平均高度 2.8 m, 沿线均以低填或零填路基为主。

根据车辆调查, 客车占 56.8%, 货车占 43.2% (折算数比例)。调查车辆各种车型构成比例(绝对数比例)如表 3 所示。

表 3 车辆构成比例

车辆类别	小客	大客	小货车	中货车	大货车	特大货车
所占比例 /%	47.3	7.1	10.7	10.6	13.2	4.0

本文计算选取 10 t 以上客货车进行计算, 汽车荷载等级选用汽车-10、汽车-20、汽车-30 三种荷载。

根据式(4)、式(5), 将各级轴载换算为 BZZ-100 标准轴载 100 kN, 15 年内一个车道上的累计当量轴次为 2.10×10^7 (次/车道), 根据《公路沥青路

面设计规范》规定,本项目交通等级为重交通,大客车及中型以上的各种货车交通量为 1500—3000 辆/(d·车道)。

因此,本次模型计算将交通流量分为三个等级:1000 辆/d、2000 辆/d、3000 辆/d。

3.2 车辆动态偏应力分布规律

选取荷载等级汽车-20(200 kN),其前轮与后轮的荷载分布分别占 35% 和 65%,即前轮 70 kN,后轮

120 kN。根据 Boussinesq 的附加应力分布规律,当地基以下某一深度处附加动应力为自重应力的1/10 时,可认为该深度是车辆交通荷载的有效作用深度。

根据式(13)可求得静态破坏偏应力为 25.2 kPa,根据式(6)—(14),可分别计算不同车辆荷载作用下动态偏应力及初始静偏应力,如表 4 所示。

表 4 不同深度处不同车辆荷载作用下动态偏应力及初始静偏应力

Z(深度)/m	汽-20			汽-30		
	0.1σ _自 /kPa	σ _d /kPa	σ _s /kPa	0.1σ _自 /kPa	σ _d /kPa	σ _s /kPa
1.0	1.68	68.857	48.328	1.68	59.190	48.329
1.5	2.52	33.410	39.212	2.52	29.122	39.213
2.0	3.36	21.450	41.482	3.36	19.312	41.482
2.5	4.2	15.889	47.041	4.2	15.026	47.045
3.0	5.04	12.740	53.903	5.04	12.764	53.903
3.5	5.88	10.70	61.373	5.88	11.366	61.374
4.0	6.72	9.266	69.170	6.72	10.366	69.171
4.5	7.56	8.167	77.156	7.56	9.557	77.157
5.0				8.40	8.848	85.261

根据计算,100 kN 的汽车荷载作用下,动态偏应力的影响深度 2.5—3 m,200 kN 的汽车荷载作用下,动态偏应力的影响深度 4.0—4.5 m,300 kN 的汽车荷载作用下,动态偏应力的影响深度 4.0—5.0 m,并且动态偏应力随深度增加逐渐减小,呈幂函数模型分布,存在明显相关性。动态偏应力与荷载作用深度拟合方程如表 5 所示。

表 5 动态偏应力与荷载作用深度 h 拟合方程

汽车荷载/kN	拟合方程	相关系数
100	$\sigma_i = 14.918h_i^{-0.902}$	0.994 3
200	$\sigma_i = 34.505 h_i^{-0.939}$	0.987 8
300	$\sigma_i = 30.713 h_i^{-0.795}$	0.988 2

3.3 车流量对低路堤软基沉降影响

选取汽车荷载为汽车-20,路面厚度为 0.74 m,填土高度为 2.5 m(路基高度 3.24 m),车流量选取 1 000 辆/d 进行计算。

由于地层为淤泥质粉质黏土,根据表 2 可确定 $a = 1.1, b = 0.16, m = 2, n = 1$,根据表 5 计算模型参数及式(2)、式(3)计算由动偏应力引起的每层土体竖向累计塑性应变,按地表以下每层土厚 0.5 m 计算,可求得车辆荷载作用下的路基沉降值,选取 14 个月

的沉降时间进行计算,计算结果如图 3 所示。

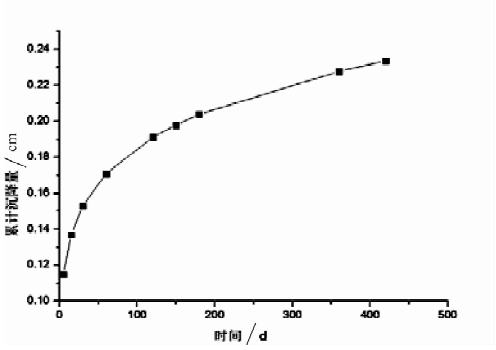


图 3 车流量 1000 辆/d, 200kN 的汽车荷载作用软基累积沉降曲线

通过计算结果可以看出,当交通荷载为 1000 辆/d 时,其 14 个月后的路基沉降约为 24 mm,且从沉降趋势看,路基在前 3 个月的沉降较为明显,一年内的累计沉降在加载 1 个月左右时便完成了总沉降的 60%—70%,而到后期时,由于软基孔隙率降低,土体逐渐完成固结,沉降趋势逐渐趋于平缓。

类似上述计算,通过改变车流量,即改变 Chai-Miura 简化模型中的 N 值,分别计算在 14 个月内车流量在 2 000 辆/d、3 000 辆/d 时的路基沉降。计算

结果如图 4 所示。

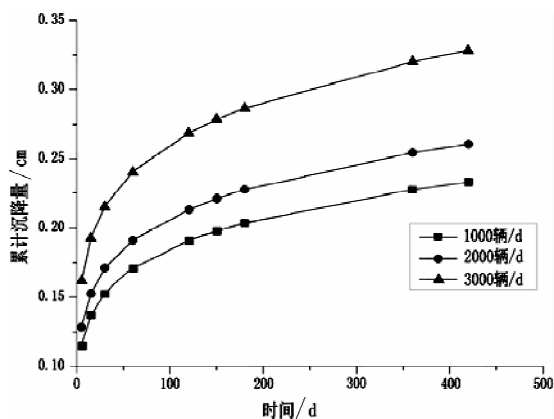


图 4 不同车流量状态下软基累积沉降曲线

从计算结果可以看出,不同车流量状态下软基沉降变化趋势基本一致,2 000 辆/d 车流量在 14 个月末的沉降值为 25—26 mm,而 3 000 辆/d 车流量状态时,沉降值则达 32—34 cm,表明交通荷载引起的软基沉降随着交通量的增加而增大。

3.4 车重对低路堤软基沉降影响

当车流量 1 000 辆/d 时,分别选取车重为 100 kN,200 kN,300 kN 的中型车及货车进行计算。计算结果如图 5 所示。

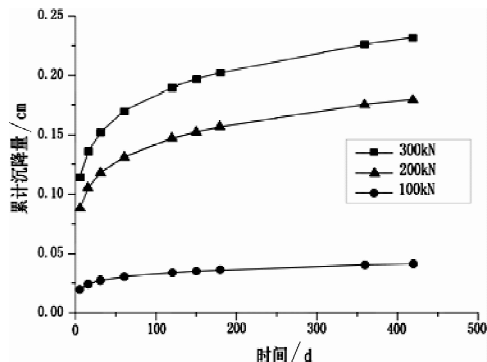


图 5 不同车重状态下软基累积沉降曲线

从计算结果可以看出,100 kN 的车辆在交通流量不大的情况下,对地基沉降的影响范围较小,年沉降总量小于 10 cm,而重型车辆对地基沉降影响则较为明显,300 kN 的车辆在相同交通流量的状态下,地基产生的变形量是轻型车辆的 2—3 倍,这是由于重型车辆经过路面时产生的动应力比轻型车辆大很多,产生的动力效应也更明显,也更易使路基产生沉降。

4 结论与展望

4.1 结论

本文结合我国低路堤软基沉降研究现状及公路

普遍超载的实际状况,重点考虑交通荷载作用下低路堤软基沉降计算及影响因素研究。

通过将交通动荷载简化为集中静荷载,并利用 Boussinesq 应力解推导不同深度处的附加动应力计算公式,采用 Chai-Miura 简化模型计算地表以下每层土体的累积塑性应变,从而得出车辆动荷载作用下低路堤软基沉降预测量。

依托安徽省五河县 S306 沿淮软土的物理力学特征,分别研究了车辆荷载在地基内部产生的动偏应力的分布规律及低路堤软基沉降的影响因素,主要有以下几点:

(1) 车辆荷载在地基内某一深度范围内,动态偏应力随深度增加逐渐减小,呈幂函数模型分布。

(2) 10 t 的汽车动态偏应力的有效影响深度 2.5—3 m,20 t 的汽车动态偏应力的有效影响深度 4.0—4.5 m,30 t 的汽车动态偏应力的有效影响深度 4.0—5.0 m。

(3) 交通动荷载引起的软基沉降主要集中在沉降初期,在开放交通后的 1—3 月沉降明显,后期逐渐趋于平缓。

(4) 车流量对低路堤软基沉降影响明显,并且软基沉降随着交通量的增加而增大。

(5) 轻型车辆对低路堤软基沉降影响较小,可以忽略,而重型车辆地基产生的变形量则是轻型车辆的 2—3 倍,应引起足够的重视。

4.2 展望

虽然用简化的数学理论模型对软基沉降进行预测有一定的规律性,且与实践过程中软基沉降规律相似,但本文还有如下几点有待与后期进一步探讨与验证。

(1) 车辆荷载的等效

由于交通荷载是一种间断、不连续的、随机性的冲击荷载,这种荷载对土体的作用大小、范围、频率、时间都是不断变化的,且受路面平整度的影响,完全模拟车辆在行车过程中的荷载分布状况十分困难的。因此后期还需进一步通过试验研究车辆荷载的动力特征,建立更接近实际情况的车辆荷载的本构模型,进行软基沉降有限元分析计算。

(2) 低路堤软基路基沉降的多因素分析

本文主要结合目前我国公路重交通、超载严重现象,仅考虑车辆荷载、车流量等外部因素对低路堤软基沉降的影响因素,但仍需进一步的研究多因素对低路堤软基沉降的影响,比如,超孔隙水压力变化、地下水位的变化、土体压缩模量的变化等。

(3) 沉降实测值与理论值的对比研究

鉴于本文缺乏软基沉降实测资料,研究方法有待于与实际沉降值进行进一步的对比研究。

参考文献:

- [1] 徐毅. 交通荷载对高速公路路基影响的试验研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [2] 张颖. 交通荷载下高速公路低路堤沉降研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
- [3] 边学成. 高速列车运动荷载作用下地基和隧道的动力响应分析[D]. 杭州:浙江大学,2005.
- [4] 仇敏玉. 交通荷载对道路工后沉降影响的研究[D]. 南京:河海大学,2006.
- [5] Jones DV, Petyt M. Ground vibration in the vicinity of rectangular load on half-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 166(1): 141-159.
- [6] Jones DV, Petyt M. Ground vibration due to a rectangular harmonic load[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 212(1): 61-74.
- [7] 兰辉萍, 李德建. 高速公路路基的动力响应分析[J]. 西部探矿工程, 2003, 15(8): 160-162.
- [8] 凌建明, 王伟, 邬洪波. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(11): 1315-1320.
- [9] 高玉峰, 黎冰, 刘汉龙. 车辆荷载作用下公路软基沉降的拟静力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(S2): 5470-5477.
- [10] Kutara K, Miki H, Mashita Y, et al. Settlement and countermeasures of the road with low embankment on soft ground[J]. Tech Rep of Civil Eng JSCE, 2000, 22(8): 13 - 16.
- [11] Hyodo M, Yasuhara K. Analytical procedure for evaluation pore water pressure and deformation of saturated clay ground subjected to traffic loads [J]. Numerical Methods In Geomechanics. 1988, 6(1): 653-658.
- [12] Akili W, Monismith CL. Permanent deformation characteristics of cement-emulsion stabilized sand [C]//Structural Design and Pavement Performance Evaluation. Kansas City: Association of Asphalt Paving Technologists Proc, 1978: 281-301.
- [13] Chai J C, Miura N. Traffic-Load-Induced Permanent Deformation of Road on Soft Subsoil [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG B01-2014, 公路工程技术标准[S]. 北京:人民交通出版社, 2014.
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D50-2006, 公路沥青路面设计规范[S] 北京:人民交通出版社, 2007.
- [16] Li D., Selig E. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils [J]. J Geotech Eng, 1994, 120(6): 939-957.