

基于遗传算法和黏弹性理论的路基模量反算方法

代富贵¹,王曦辉¹,吴亚光¹,李海^{2*}

(1.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011;2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室,湖南 长沙 410114)

摘要:为了提高PFWD检测方法对路基模量反算的适用性,该文依托内罗毕西环线路基拼接工程,通过采用三维Kelvin黏弹性模型以及准静态响应分析方法,推导了长期固定荷载作用下黏弹性路基的位移函数,并结合黏弹性的线性叠加原理以及遗传算法,提出了基于多种群遗传算法的黏弹性路基模量反算新方法(TIV-AMGADCO)。其中,相应的反算程序采用Matlab编写。理论推导与现场测试对比验证表明:在PFWD荷载作用下,路基顶面竖向位移峰值明显滞后于荷载峰值;而基于弹性半空间模型的传统方法,仅选取位移和荷载峰值进行反算,导致其计算结果较新方法反算结果大20%左右;同时,新方法正算得到的位移时程曲线与真实曲线的相关系数基本大于0.9,对比其他方法的结果,其计算差距基本保持在10%左右;同时新方法收敛速度快,具有较好的适应性,能够较为准确地反算出路基模量,可作为路基设计与施工质量控制的依据。

关键词:路基模量;黏弹性模型;模量反算;遗传算法

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Back-Calculation of Subgrade Modulus Based on Genetic Algorithm and Viscoelasticity Theory

DAI Fugui¹, WANG Xihui¹, WU Yaguang¹, LI Hai^{2*}

(1.China Road & Bridge Corporation,Beijing 100011,China; 2.National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: To improve the applicability of the PFWD detection method for the back-calculation of subgrade modulus, taking the subgrade splicing project of the west loop line in Nairobi as an example, this paper adopted 3D Kelvin viscoelasticity model and quasi-static response analysis to deduce the displacement function of viscoelastic subgrade under long-term fixed loads, and combined the principle of liner superposition of viscoelasticity with genetic algorithm to propose a new method based on multi-population genetic algorithm for the modulus back-calculation of viscoelastic subgrade. Among them, the corresponding program for back-calculation was written by Matlab. The comparison between theoretical derivation and field tests shows that the peak value of vertical displacement on the top of subgrade under PFWD loads lags behind the load peak value. However, selecting only the displacement and load peak value for back-calculation, the traditional method based on the elastic half-space model yields a calculation result 20% larger than the result by the new method. At the same time, the correlation coefficient between the displacement time-history curve calculated by the new method and the real curve is basically greater than 0.9, and compared with the results by other methods, the calculation difference is about 10%. Moreover, with fast convergence speed, good adaptability, and accurate back-calculation results of subgrade modulus, the new method can be the reference for subgrade design and construction quality control.

Keywords: subgrade modulus; viscoelasticity model; modulus back-calculation; genetic algorithm

收稿日期:2023-12-10(修改稿)

基金项目:中国路桥工程有限责任公司科研项目(编号:P2200001)

作者简介:代富贵,男,工程师.E-mail:daifg@crbc.com

*通信作者:李海,男,硕士研究生.E-mail:13317485261@163.com

0 引言

路基是路面结构的基础,其抗变形能力对路基路面结构的强度和刚度起决定性作用,而路基模量的检测一直是道路设计中的一个难题。目前,现场路基模量检测的方法主要有承载板法、贝克曼梁法、落锤式弯沉仪 FWD 法和便携式落锤弯沉仪 PFWD 法。承载板法和贝克曼梁法测试费时费力,而 FWD 更准确、高效、安全、方便,也更能反映车轮对路面的实际作用,因而被广泛用于道路检测和评估^[1-2],但 FWD 需要牵引车辆,部分地点不易到达,因此在路基施工质量控制方面难以广泛应用^[3];PFWD 在保留 FWD 优势的同时克服其不足,因此常被用于路基施工质量控制。

路基模量检测是路基施工质量控制的依据之一,在使用传统方法进行路基模量反算时,往往将路基视为线弹性结构,仅有位移峰值和荷载峰值被采用进行模量反算。Hoffman 等^[4]从理论上证明了传统方法会对反演模量产生显著的系统误差;Nazal^[5]分析了路易斯安那州的 10 条道路测试数据,通过建立回归模型,发现将土壤性质作为变量纳入回归模型后,预测值显著提高,但该预估模型并不适用于所有土壤类型;谭伟^[6]基于物性指标构建了路基细粒土动态回弹模量预估模型,与规范通用模型相比,其预估效果得到提升;Deng 等^[7]提出了一种基于多种群策略、协同进化机制、信息素更新策略和信息素扩散机制的改进蚁群优化 (ICMPACO) 算法,该 ICMPACO 算法在求解 TSP 时能有效获得最佳优化值,并解决栅极分配问题,获得较好的分配结果,具有良好的优化能力和稳定性。

Kim 等^[8]为了更好地表征路面基础的弹性特性,在商用通用有限元程序 Abaqus 的用户材料子程序 (UMAT) 中编写了非线性应力相关模量模型。结果表明:适当的非线性应力相关岩土材料的表征显著影响了路面临界响应的准确预测。研究了基于非黏结颗粒材料真实三轴试验数据建立了考虑轴对称和三维应力状态的不同弹性模量模型。在三维模量模型开发中考虑中间主应力时,对无黏结骨料基础的柔性路面进行三维非线性有限元分析,得到的沥青混凝土拉应变略低。

徐远明等^[9]和 Guzzarlapudi 等^[10]在总结相关研究

的基础上,通过对多种路基材料的动静模量进行对比分析,表明路基动态模量和静态模量之间具有良好的相关性,并认为 PFWD 可作为路基强度快速评价的方式,为 PFWD 的推广使用打下了基础。

考虑到路基材料的位移滞后性,当前研究主要从路基的黏弹性及动力模型两方面展开研究。其中,Asli 等^[11]从黏弹性理论出发,将路基简化为质量-弹簧-阻尼系统,并结合动力学以及最小二乘法对路基模量进行反演计算,但其模型相对简单;Robbins 等^[12]总结了目前常见的模量反演方法,结合动态黏弹性模型提出了一种新的路基模量预测方法,并与现场测试结果进行对比,表明该方法具有较好的预测精度,但其未与路基模量反演相结合。此外,查旭东等^[13]基于弹性动力学理论改进了传统模量反演方法,但其仅将结果与线弹性模型计算结果进行对比。另外,Sirithemontree 等^[14]从动力模型出发,提出了基于动力半空间的模量反算方法,计算表明:下卧结构层类型会影响模量反算结果,为后续模量反算方法提供参考依据;刘闯等^[15]提出了一种克服传统线弹性法 (LEM) 局限性的黏弹性法 (VEM) 以提高 PFWD 反演土模量的精度,同时在某公路路堤进行了验证,试验结果表明土的挠度峰值与荷载峰值之间存在时滞,且荷载-挠度曲线呈非线性,表明了土的黏弹性特性。

在所有路基模量反算方法中,迭代法、数据库搜索法、遗传算法和人工神经网络法是较为常用的方法。其中,遗传算法以其大面积的搜索能力和广泛适应性,在模量反算领域被广泛应用。此外,刘跃等^[16]在标准遗传算法的基础上,提出了自适应信息遗传算法,其计算速度和收敛速度大大提高,并将其用于模量反算,但其根本还是基于弹性理论;Robbins 等^[12]结合遗传算法分析了路面在冲击荷载下的力学响应,证实了将遗传算法引入模量反算过程具有较高的收敛速度。而传统遗传算法受寻优条件的限制,难以得到全局最优解。陈曦等^[17]和杨东勇等^[18]通过对比证实了多种群遗传算法较传统算法有更好的全局寻优性。

基于以上研究,本文基于黏弹性模型,采用准静态动力响应分析方法,结合黏弹性的线性叠加原理以及多种群遗传算法,在充分考虑了土的位移滞后特性后,提出了能够适应于任意时程曲线的路基模

量反算的新方法(TIV-AMGADCO),并编写了相应的计算程序。计算结果表明:该方法计算速度快,且简单易于实现,反算结果可以为路基施工质量控制提供参考。

1 基于黏弹性模型的模量反算方法

目前广泛应用的路基模量反算方法是基于垂直刚性分布静荷载作用下的弹性半空间布辛尼斯克解析解公式,计算时只需取荷载与位移时程曲线的峰值,其表达式如式(1)所示:

$$E = \frac{\pi \delta \rho (1 - \mu^2)}{2 \omega} \quad (1)$$

式中: E 为路基模量值(MPa); ρ 为荷载板压力峰值(kPa); δ 为荷载板半径(m); μ 为泊松比,一般取0.35; ω 为承载板的中心弯沉峰值(mm)。

传统方法在进行模量反算时,未用到时程曲线,也未考虑到路基的非线性和位移滞后性。查旭东等^[13]通过理论与验证,表明在一般情况下,采用PFWD检测路基模量时,可只需进行静力反算。但若是对于非线性较强的路基而言,常规的方法已不适应,需要寻找一种适应性较强的模量反算方法。力学计算模型示意图如图1所示。

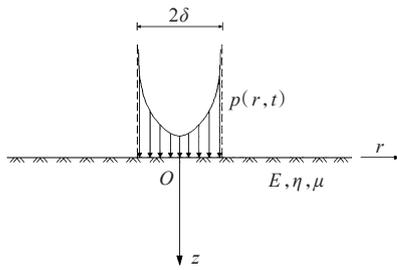


图1 力学计算模型图

Figure 1 Mechanical calculation model

1.1 黏弹性模型的选取

对于黏弹性材料而言,当输入交替循环的外激励力时,其应变也为交替循环变化,但常常会发生滞后现象^[19],这与路基在冲击荷载下的位移滞后性较为相似。目前常用的黏弹性模型有Maxwell模型、Kelvin模型、三参量固体模型以及较为复杂的Burgers模型。其中,Maxwell模型采用弹簧和阻尼器串联的形式,在外部荷载作用下将产生永久变形;Kelvin为弹簧和阻尼器并联的形式,在外部荷载作用下会产生位移滞后效应;而三参数固体模型和Burgers由于

模型较为复杂,使用起来不方便。同时,在PFWD测试试验前,会通过多次落锤冲击消除测点的塑性变形,所以无须考虑残余变形。因此,综合考虑以上4种模型的优缺点,本文选用形式简单的Kelvin模型。

Kelvin模型为弹性元件和黏性元件并联而成,其表达式如式(2)所示:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (2)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量; η 为黏滞系数。

在三维的本构方程中,对于黏弹性材料,通常仍然认为球应变张量只与球应力张量有关,而偏应变张量只与偏应力张量有关。参照式(2),将应力和应变分解成球应力与偏应力部分,在三维本构关系中,Kelvin模型可以写为式(3)所示形式:

$$\begin{cases} S_{ij} = 2Ge_{ij} + 2\eta \frac{de_{ij}}{dt} \\ \sigma = 3Ke_p \end{cases} \quad (3)$$

式中: S_{ij} 为偏应力张量; G 为剪切模量; e_{ij} 为偏应变张量; σ 为平均主应力; K 为体积模量; e_p 为平均主应变。

通过三维本构方程(3),并结合黏弹性理论,可以得到与偏应力和球应力相关的拉氏变换后的蠕变柔量 $\bar{J}^{(1)}(s)$ 、 $\bar{J}^{(2)}(s)$:

$$\begin{cases} \bar{J}^{(1)}(s) = \frac{1}{2\eta s \left(s + \frac{G}{\eta} \right)} \\ \bar{J}^{(2)}(s) = \frac{1}{3Ks} \end{cases} \quad (4)$$

式中: s 为拉普拉斯变换参数。

1.2 荷载类型的选取

对于圆形轴对称垂直荷载的表达形式,国内外学者进行了相关研究,提出了诸如均布荷载、半球形荷载、碗形荷载、抛物线荷载等多种表达形式。郭大智等^[20]在总结传统荷载表达式的基础上,提出了任意旋转抛物面垂直荷载的一般数学表达式:

$$p(r) = mp \left(1 - \frac{r^2}{\delta^2} \right)^{m-1} \quad (5)$$

式中: m 为荷载类型系数, m 取0.5、1.0、1.5分别为刚性承载板、均布荷载、碗形荷载; δ 为荷载圆半径(m); p 为均布荷载集度(kPa); r 为距离荷载中心处的距离, $r \leq \delta$ 。

Asli^[11]在进行荷载简化处理时,将荷载简化为抛物线的形式。本文对荷载的简化参考 Asli 的研究思路,结合弹性半无限空间上的刚性承载板的受力分布情况,将荷载视为抛物线的形式;结合式(5),取 $m=0.5$ 进行相关计算。

2 黏弹性反算方法

层状黏弹性体系力学中,轴对称问题通常有 3 类解法:位移函数法、积分变换法和传递矩阵法^[17]。本文从三维黏弹性本构方程出发,结合位移函数法,得到了长期单位恒定荷载作用下的位移函数,通过线性叠加原理求取位移时程曲线,并与真实结果进行对比,使用多种群遗传算法对反算参数进行自动寻优,得到最佳反算模量。

2.1 长期荷载作用下的位移函数

在半无限黏弹性模型中,轴对称荷载作用下的位移函数可以表示为:

$$\bar{\omega}(s) = -\frac{1}{2\bar{G}^*} \int_0^\infty (2 - 2\bar{\mu}^* + \xi z) \tilde{\bar{P}}(s) e^{-\xi z} J_0(\xi r) d\xi \quad (6)$$

式中: $\bar{\omega}(s)$ 为 z 方向上的位移值; $\bar{\mu}^* = \frac{\bar{J}^{(1)}(s) - \bar{J}^{(2)}(s)}{2\bar{J}^{(1)}(s) + \bar{J}^{(2)}(s)}$;

$\bar{G}^* = \frac{1}{2s\bar{J}^{(1)}(s)}$; ξ 为 Hankel 积分变换的参数; $\bar{J}^{(1)}(s)$ 、

$\bar{J}^{(2)}(s)$ 分别为拉普拉斯变换后的畸变部分和体积变化部分的蠕变柔量; $\tilde{\bar{P}}(s) = \tilde{\bar{P}}_r(\xi) \bar{P}_t(s)$,其中:

$\tilde{\bar{P}}_r(\xi) = \frac{2^{m-1}\Gamma(m+1)P\delta}{\xi(\xi\delta)^{m-1}} J_m(\xi\delta)$; $\bar{P}_t(s)$ 为拉氏变换

后的阶梯函数; z 为距离路基顶面的距离; $J_m(\cdot)$ 为 m 阶贝塞尔函数; $\Gamma(\cdot)$ 为第二类欧拉广义积分。

由式(6),取 $m=0.5$,令 $x = \xi\delta$;并由 $\frac{2^{-0.5}\Gamma(1.5)}{x^{-0.5}}$.

$J_{0.5}(x) = \frac{1}{2} \sin x$,可得到长期固定刚性承载板下的黏弹性半空间路基顶面竖向位移量的表达式:

$$\bar{\omega}(s) = -\frac{p\delta\bar{P}_t(s)}{4\bar{G}^*} \int_0^\infty \left(2 - 2\bar{\mu}^* + \frac{z}{\delta}x\right) \frac{\sin x}{x} e^{-\xi z} J_0\left(\frac{r}{\delta}x\right) dx \quad (7)$$

式中: p 为恒定荷载的大小。

结合式(4)、(7),通过反拉氏变换,可以得到无限半空间开尔文模型下的长期刚性承载板荷载下的

位移表达式:

$$\omega(t) = -\frac{p\delta H(t)}{4G} \int_0^\infty \left\{ 2\left(1 - e^{-\frac{G}{\eta}t}\right) - 2\mu + \left[1 - (1 - 2\mu)e^{-\frac{3K}{\eta}t}\right] e^{-\frac{G}{\eta}t} \frac{\sin x}{x} J_0\left(\frac{r}{\delta}x\right) dx \right. \quad (8)$$

式中: $H(t)$ 为阶梯函数; μ 为泊松比; t 为荷载作用时间。

令 $p=1$,并对式(8)取绝对值,得到单位荷载作用下的位移函数 $f(t, r)$ 为:

$$f(t, r) = -\frac{\delta H(t)}{4G} \int_0^\infty \left\{ 2\left(1 - e^{-\frac{G}{\eta}t}\right) - 2\mu + \left[1 - (1 - 2\mu)e^{-\frac{3K}{\eta}t}\right] e^{-\frac{G}{\eta}t} \frac{\sin x}{x} J_0\left(\frac{r}{\delta}x\right) dx \right. \quad (9)$$

注意到位移函数的位置为荷载中心位置,因此 $r=0$;同时广义积分 $\int_0^{+\infty} \frac{\sin x}{x} dx = \frac{\pi}{2}$,将其带入式

(9),最终得到在长期单位轴对称垂直刚性荷载作用下的位移函数 $f(t)$ 为:

$$f(t) = -\frac{\delta\pi}{8G} \left\{ 2(1 - \mu) - \left[1 + (1 - 2\mu)e^{-\frac{3K}{\eta}t}\right] e^{-\frac{G}{\eta}t} \right\} \quad (10)$$

对式(10)求极限,当 $t \rightarrow +\infty$,得到:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} f(t) = \frac{\delta\pi}{8} \frac{2(1 + \mu)}{E} (2 - 2\mu) = \delta\pi \frac{1 - \mu^2}{2E} \quad (11)$$

由式(11)可知模量 E 的表达式为:

$$E = \frac{2\delta(1 - \mu^2) \pi}{f(\infty) 4} = \frac{2p\delta(1 - \mu^2) \pi}{pf(\infty) 4} = \frac{2p\delta(1 - \mu^2) \pi}{\omega(\infty) 4} \quad (12)$$

该表达式与式(1)完全相同,表明了该公式推导的正确性。也说明了当时间趋近于无穷时,黏弹性半空间的位移函数退化成了弹性半空间的位移函数。

为了直观了解 $f(t)$ 函数的意义,取 $E=40$ MPa, $\mu=0.35$, $\eta=400$ kN·m,绘制 $f(t)$ 函数曲线,如图 2 所示。

从图 2 可以看出:若采用黏弹性模型,在恒定荷载作用下位移函数从 0 开始增加,最终趋近于一个较为稳定的值。

2.2 基于遗传算法的模量反算方法

遗传算法以其独有的全局搜索能力和广泛的适

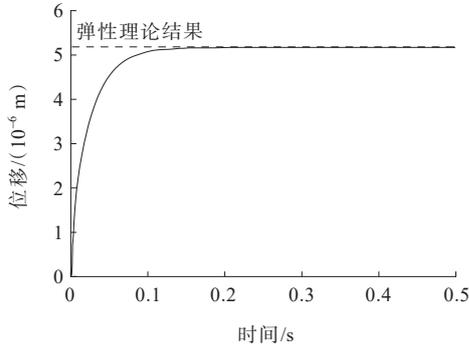


图2 单位荷载作用下的位移函数曲线

Figure 2 Displacement function curves under unit loads

性,被广泛应用于各个领域。考虑到传统遗传算法中存在的局部收敛问题,本文使用多种群遗传算法进行模量反算。多种群遗传算法通过多个独立种群之间的协同进化,从而使得模量反算结果最优化。因此,与传统遗传算法相比,其计算稳定性和全局搜索能力更好。

采用遗传算法的关键在于给定个体优劣评价标准,评价指标主要考虑两个方面,分别为正算曲线和真实曲线之间的相对误差和峰值差,并按式(13)计算得分:

$$M = 1 / \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{\omega}(t_j) - \omega_i(t_j))^2} + \left| \max[\bar{\omega}_i(t)] - \max[\omega_i(t)] \right| \right) \quad (13)$$

式中: $\bar{\omega}(t_j)$ 为第j时刻的真实位移值(mm); $\omega_i(t_j)$ 为第i代子代的第j时刻理论位移值(mm); $\max(\cdot)$ 为最大值函数;n为最大分段数。

以式(13)作为评价标准,对个体进行选择、交叉、重组、变异、移民操作,最终将最优个体作为反算结果。

2.3 模量反算的基本步骤

模量反算的基本步骤主要包括:对原始时程曲线数据的处理;获得每一个个体的正算位移;对个体进行优劣性评价,并采用多种群遗传算法对个体进行优劣选择;在一定的遗传代数后获取最有利个体,得到反算模量。详细步骤如下:

(1) 读取PFWD实测时程曲线数据,通过遗传算法随机生成若干个体,个体基因为一组 E, μ, η 。

(2) 按照式(14)所示的黏弹性线性叠加原理对位移曲线进行正算。依次计算每一阶段荷载 Δp_i ,依次带入 E, μ, η ,得到每一阶段荷载的位移序列: $A_i = [\bar{\omega}_i^1, \bar{\omega}_i^2, \dots, \bar{\omega}_i^n]$ 。其中,n为分段总数; $\bar{\omega}_i^n$ 为第i代子

代第m段所加荷载 Δp_i 在 $t_m = m \times \Delta t$ 时刻下的位移值。此外,总时间 $T = \Delta t \times n$ 取值应当包含时程曲线主要部分。

$$\omega(t) = f(t) p_0 + \sum_{i=1}^n f(t - \Delta t) \Delta p_i \quad (14)$$

(3) 求出每一个个体在每一阶段下的位移序列后,按式(15)计算不同的 E, μ, η 在荷载作用下的总位移序列:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_{n-1} = [\bar{\omega}_1, \bar{\omega}_2, \bar{\omega}_3, \dots, \bar{\omega}_n] \quad (15)$$

(4) 根据所得到的位移序列和真实位移序列,按式(13)对个体进行优劣性评价。按照得分越高遗传概率越大原则,对种群分别进行交叉、重组、变异、移民操作构成新种群,完成一代遗传。

(5) 重复上述操作,直到达到限制条件后结束算法,导出最优个体进行解码,以得到的 E, μ, η 作为反算结果。

按照前文提到的方法,使用Matlab编写了考虑黏弹性的路基模量反算程序,该程序不仅可用于PFWD冲击荷载作用下路基动力响应计算,也可用于FWD冲击荷载模量反算。其反算程序流程如图3所示,本文称这一方法为TIV-AMGADCO算法。

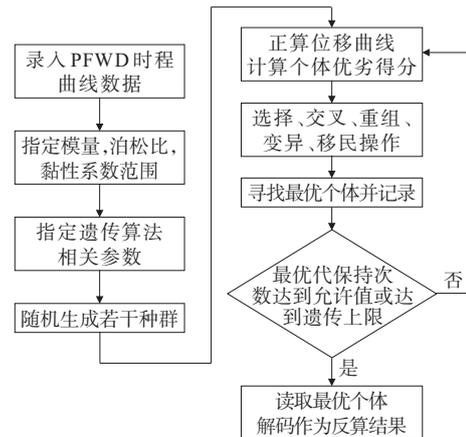


图3 基于多种群遗传算法模量反算程序流程图

Figure 3 Modulus back-calculation procedure based on multi-population genetic algorithm

3 模量反算新方法验证

依托内罗毕西环线路基拼接工程,在现场进行路基模量检测,内罗毕(Nairobi)是肯尼亚(The Republic of Kenya)的首都,也是肯尼亚最大的城市。内罗毕(Nairobi)位于肯尼亚中南部的高原地区,海拔1 660 m,

项目线路沿线广泛分布黏土层,该土呈红色,可塑—硬塑,含铁锰质结核,具有液限高,不易压实等特点。如图4所示,所用PFWD(又称LWD)是由Sweco Danmark A/S公司生产的PRIMA 100型号。设备主要由数据采集系统、加载系统和数据传输系统组成。仪器主要参数如下:载荷板半径0.15 m,载荷范围为1~15 kN,载荷脉冲形状为半正弦波;载荷传感器相对误差小于1%,绝对误差±0.1 kN;位移传感器有效测试精度1 μm,最大测试范围2 200 μm;数据采集周期为0~60 ms。

为了对新方法的模量预测精度给予评价,本文从文献[11]选用了5组数据以及3组高液限黏性土测试数据,文献[11]所取土基参数如表1所示;高液限黏土为海南省万宁至洋浦高速公路填方量较大的

第六、第九和第十合同段;按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21]对填料进行了基本性质指标测试,结果如表2所示。依次使用传统方法、新方法对路基模量进行反算,结果如表3所示。



图4 PFWD现场试验图

Figure 4 PFWD field test

表1 文献[11]部分土性参数

Table 1 Some parameters of soil properties in literature [11]

序号	土样名称	含水率/ %	压实度/ %	厚度/ cm	下卧层材料	
					名称	含水率/%
01	泥灰质黏土(70%)	17	70	35	泥灰泥	>35
02	泥灰质黏土(98%)	7	98	35	泥灰泥	>35
03	黏土	17	—	>300	—	—
04	混凝土碎石骨料	11	98	35	泥灰泥	>35
05	石灰处理淤泥	3	98	50	泥灰岩石灰岩	11

表2 高液限土土样基本性质

Table 2 Basic properties of high liquid limit soil samples

序号	天然含水率/ %	细粒含量/ %	液限/ %	塑限/ %	最佳含水率/ %	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
06	31.5	64.7	58.3	30.2	17.4	1.72
07	36.1	70.5	57.2	31.3	23.5	1.57
08	29.1	60.3	54.0	28.5	17.3	1.76

表3 新算法模量反算结果对比

Table 3 Comparison of modulus back-calculation results of the new calculation method

序号	土样名称	新方法预测结果			传统方法预测结果			文中(实际) 模量/MPa
		E/MPa	R ²	误差/%	E/MPa	R ²	误差/%	
01	泥灰质黏土(70%)	10.75	0.96	10.42	14.23	0.71	18.58	12.0
02	泥灰质黏土(98%)	20.52	0.88	10.78	26.21	0.66	13.96	23.0
03	黏土	32.74	0.96	2.31	38.53	0.75	20.41	32.0
04	混凝土碎石骨料	65.49	0.95	7.36	96.34	0.67	57.93	61.0
05	石灰处理淤泥	337.24	0.97	9.49	425.85	0.85	38.26	308.0
06	高液限黏土1	20.04	0.97	8.32	27.60	0.68	49.19	18.5
07	高液限黏土2	19.55	0.98	7.78	31.50	0.65	48.58	21.2
08	高液限黏土3	205.27	0.99	4.68	221.10	0.97	12.75	196.1

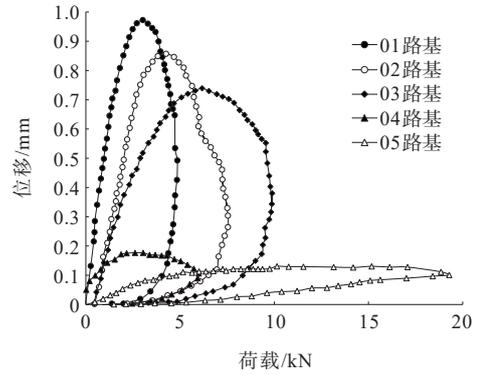
由表1可知:测试路基为5种不同类型,依次为压实度70%和98%的泥灰质黏土、混凝土碎石骨料、石灰处置淤泥及黏性土。每种路基具有不同下卧层和含水率。由表2可知:所选取高液限黏土含水率较高,均大于最佳含水率;其中06、07号路基未经处理,处于自然状态,而08号路基经过处置,为高模量路基。

由表3可知:① 01~08路基模量的反算结果,传统方法误差较大;而采用新方法计算得到的模量均比传统方法小20%以上,误差均在10%之内;② 使用新方法正算位移时程曲线,与真实曲线相关系数基本大于0.9,较传统方法准确性有较大提升;③ 对于黏性较弱的路基,如表中01~03路基,新方法与传统方法得到的模量值基本相同,绝对误差基本保持在6 MPa之内;随着土体黏性的增加,传统方法误差增大,如04~05路基,绝对误差达到了88 MPa,相对误差依次为57.93%和38.26%。对于高液限黏土,如06~07路基,自然状态时,传统方法误差达到49%左右;而对于高模量路基08,传统方法误差相对较小,仅12.75%。

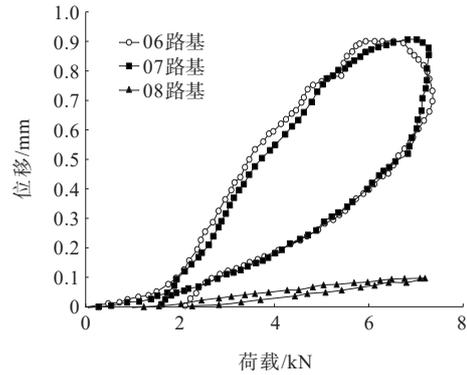
按照荷载和位移大小绘制出路基荷载-位移曲线,如图5所示。由图5可以看到:当荷载-位移曲线接近圆形时,传统方法误差越大;对于08路基,荷载-位移曲线基本接近直线,传统方法误差相对较小。这表明传统方法的误差与路基黏弹性存在较大关系;由于未考虑材料黏弹性,传统方法往往过高地估计了路基的模量和刚度,这对于路基施工质量控制是不利的。

为了直观地对比新方法和传统方法的计算结果,将由遗传算法正算所得的位移时程曲线与相应的真实荷载时程曲线进行对比。图6~8分别为表3中路基序号为05、07、08的路基所施加的荷载时程曲线以及传统方法和新方法正算得到的位移时程曲线图和实际位移时程曲线。

从图6~8可知:新方法所反算得到的位移曲线较传统方法更接近于真实位移曲线。新方法在传统方法的基础上考虑了材料的黏弹性,能够充分反映路基的位移滞后性;由于模型简单易行,只需改变 $f(t)$ 函数表达式便可适应于不同类型的路基模量反算;使用遗传算法进行最优值迭代,在一定程度上克服了收敛问题;其反算结果可为路基施工控制提供参考。



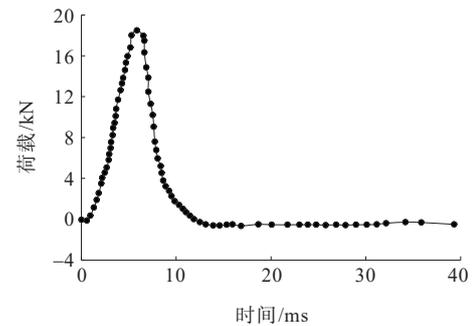
(a) 01~05路基



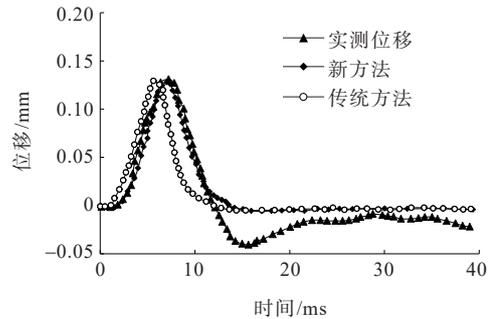
(b) 06~08路基

图5 荷载-位移曲线图

Figure 5 Load-displacement curve



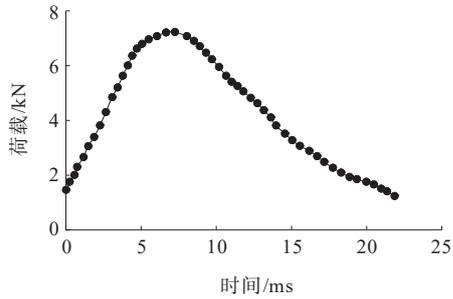
(a) 荷载时程曲线



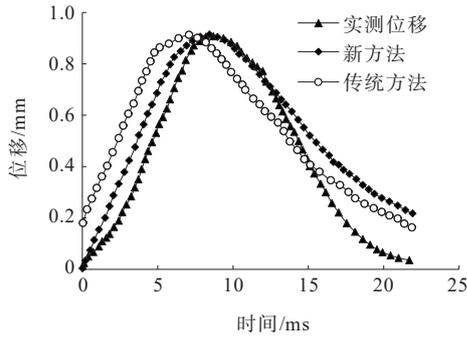
(b) 位移时程曲线

图6 石灰处理淤泥(05路基)时程曲线对比图

Figure 6 Time-history curves of lime-treated sludge (subgrade 05)



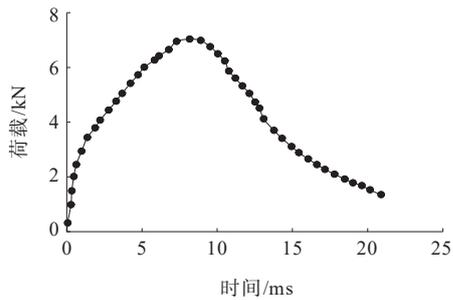
(a) 荷载时程曲线



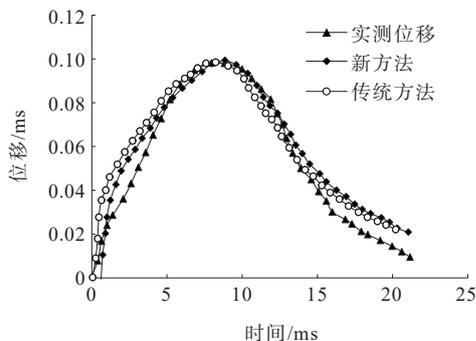
(b) 位移时程曲线

图 7 07 路基位移时程曲线对比

Figure 7 Displacement time-history curves of subgrade 07



(a) 荷载时程曲线



(b) 位移时程曲线

图 8 08 路基位移时程曲线对比

Figure 8 Displacement time-history curves of subgrade 08

4 案例验证

Asli 等^[11]考虑黏弹性和动力,将路基简化为等

效弹簧-质量-阻尼系统,土体动力响应可视为黏弹性一维波传播问题,研究了 5 种不同的路基情况。本文选取了文献[11]的数据进行对比验证,相关计算结果如表 4 和图 9 所示。这里的泊松比取 0.35。

表 4 TIV-AMGADCO 算法和文献方法反算结果对比

Table 4 Comparison of back-calculation results by the TIV-AMGADCO method and methods in literature

路基材料	TIV-AMGADCO 算法		文献结果	
	E_v/MPa	R^2	E/MPa	R^2
泥灰质黏土(70%)	8.16	0.98	12	0.98
泥灰质黏土(98%)	15.84	0.96	23	0.97
黏土	28.61	0.98	32	0.97
混凝土碎石骨料	71.77	0.99	61	0.97
最佳含水率淤泥	247.55	0.97	308	0.96

从表 4 可以看出:对于黏性土路基, TIV-AMGADCO 算法得到的结果通常小于文献结果。由于砾石材料的模量比通常小于 1,对于碾碎的混凝土骨料, TIV-AMGADCO 算法得到的结果较大。虽然两种方法的结果不同,但 TIV-AMGADCO 算法的结果也与实测挠度高度相关。并且通过前面的分析发现,路基的横向各向同性和刚性基底的存在是不可忽视的。因此,将路基简化为各向同性黏弹性动力模型可能会影响计算精度。

如前所述,模量的反计算本质上是求多元函数的最小值问题。同时,它也是一个多解问题,这些都给反算过程带来了很大的困难。就笔者所知,缩小参数的范围和增加函数的边界条件是求解多解问题的两种简单有效的方法。因此,可以考虑在 PFWD 试验中增加一些偏转传感器。此外,包括本文在内的大多数反计算方法仅通过比较理论挠度曲线和实际挠度曲线来确定结果,这只是一种数学方法,缺乏工程意义。

5 结论

为了充分考虑路基位移滞后现象,本文采用了三维 Kelvin 黏弹性模型,并使用准静态力学响应分析方法,推导了长期固定荷载作用下考虑黏弹性质质的路基的位移函数,依据黏弹性理论的线性叠加原理计算位移时程曲线,对比真实曲线并结合遗传算法进行迭代寻优,提出了基于多种群遗传算法的考虑黏弹性理论的路基模量反算新方法。通过对比较

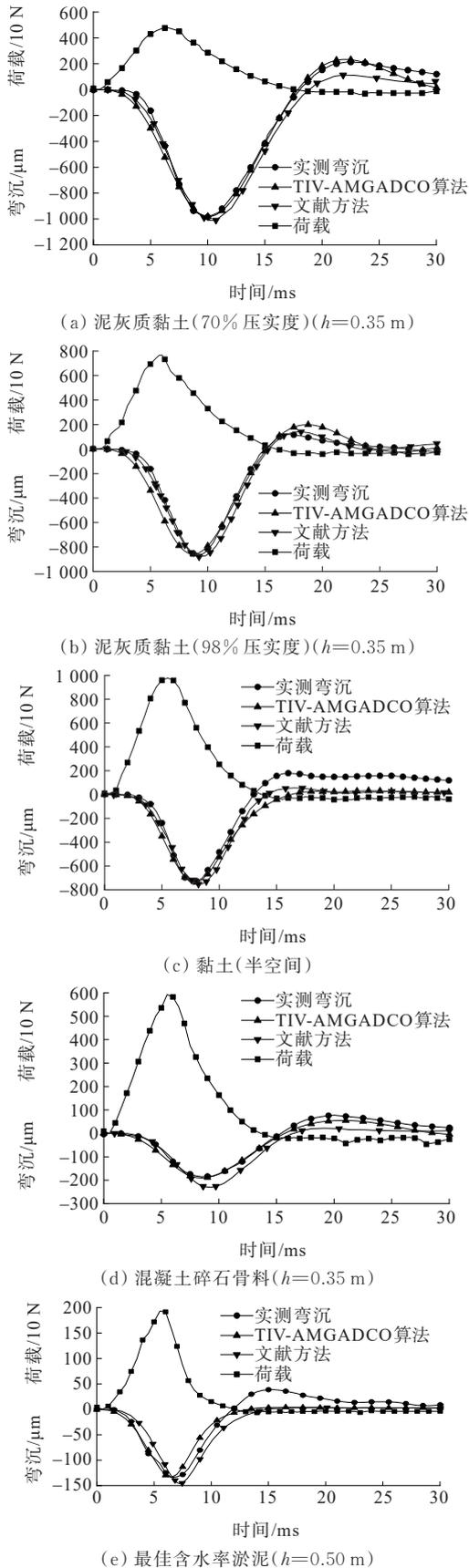


图9 不同土样的模量反计算结果对比

Figure 9 Comparison of modulus back-calculation results of different soils

证,得到以下结论:

(1) 对于考虑黏弹性性质的路基,在PFWD冲击荷载作用下,其位移时程曲线往往滞后于荷载时程曲线,在这种情况下,使用传统方法进行模量计算往往会过高地估计土基刚度。

(2) 传统方法的反算误差和路基性质有一定的关系;当土体黏性较小时,传统方法能够达到精度要求,但随着土基材料黏性增加,传统方法与新方法反算结果相差越大。

(3) 新方法具有较高的适应性和精度,反算曲线相关系数基本达到了0.9以上,能够快速反算路基模量;同时新方法适应任意时程曲线,无须简化时程曲线,适用范围较广。

(4) 新方法简化了实际情况,仅将模型简化为准静态模型,未考虑路基下卧层以及动力波的传播,今后将结合实际情况对模型进行进一步的修正。

参考文献:

References:

[1] 查旭东.路面结构层模量反算方法综述[J].交通运输工程学报,2002,2(4):1-6.
ZHA Xudong. Summary of backcalculation methods of pavement layer moduli[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2002,2(4):1-6.

[2] SEO J W, KIM S I, CHOI J S, et al. Evaluation of layer properties of flexible pavement using a pseudo-static analysis procedure of falling weight deflectometer[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(10): 3206-3213.

[3] 查旭东.PFWD快速检测路基模量研究[J].公路交通科技,2009,26(1):26-30.
ZHA Xudong. Study of rapid test of subgrade modulus with PFWD[J]. Journal of Highway and Transportation Science and Technology,2009,26(1):26-30.

[4] HOFFMANN J M, GUZINA B B, DRESCHER A. Stiffness estimates using portable deflectometers[J]. Transportation Research Record,2004,1869(1869):59-66.

[5] NAZZAL M D, MOHAMMAD L N. Estimation of resilient modulus of subgrade soils using falling weight deflectometer[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2010,2186(1):1-10.

[6] 谭伟.基于物性指标的路基细粒土动态回弹模量预估模型研究[J].中外公路,2023,43(2):36-42.

- TAN Wei. Study on dynamic resilience modulus prediction model of subgrade fine-grained soil based on physical property parameters[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(2):36-42.
- [7] DENG W, XU J J, ZHAO H M. An improved ant colony optimization algorithm based on hybrid strategies for scheduling problem[J]. *IEEE Access*, 2019, 7:20281-20292.
- [8] KIM M, TUTUMLUER E, KWON J. Nonlinear pavement foundation modeling for three-dimensional finite-element analysis of flexible pavements[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2009, 9(5):195-208.
- [9] 徐远明, 陈宇亮, 王新武. 路基动态静态回弹模量现场对比试验研究[J]. *路基工程*, 2011(1):87-88.
- XU Yuanming, CHEN Yuliang, WANG Xinwu. Study of subgrade dynamic and static modulus of resilience through site comparative test[J]. *Subgrade Engineering*, 2011(1):87-88.
- [10] GUZZARLAPUDI S D, ADIGOPULA V K, KUMAR R. Comparative studies of lightweight deflectometer and Benkelman beam deflectometer in low volume roads[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2016, 3(5):438-447.
- [11] ASLI C, FENG Z Q, PORCHER G, et al. Back-calculation of elastic modulus of soil and subgrade from portable falling weight deflectometer measurements[J]. *Engineering Structures*, 2012, 34:1-7.
- [12] ROBBINS M, TIMM D, TUTU K. Backcalculation of asphalt concrete moduli using field-measured strain[C]// *The 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRRA 2017)*, 2017.
- [13] 查旭东, 袁盛杰, 肖秋明. 冲击荷载作用下的路基动力反算[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 11(4):1-7, 14.
- ZHA Xudong, YUAN Shengjie, XIAO Qiuming. Subgrade dynamic backcalculation under impact loading[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2014, 11(4):1-7, 14.
- [14] SIRITHEPMONTREE H, SAPSATHIARN Y. Dynamic soil models for backcalculation of material properties from falling weight deflectometer deflection data[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 189:152-157.
- [15] 刘闯, 张锐, 滕煜晟, 等. 考虑变形滞后效应的高液限土路基模量反算方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021, 43(2):68-75.
- LIU Chuang, ZHANG Rui, TENG Yusheng, et al. Back-calculation method for modulus of high liquid limit soil subgrade considering deformation lag effect[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2):68-75.
- [16] 刘跃, 李跃军. 基于自适应信息遗传算法的路面模量反算研究[J]. *公路工程*, 2012, 37(3):136-143, 172.
- LIU Yue, LI Yuejun. Adaptive informational genetic algorithm based backcalculation of pavement layer moduli[J]. *Highway Engineering*, 2012, 37(3):136-143, 172.
- [17] 陈曦, 王希诚. 一种改进的多种群遗传算法[J]. *辽宁科技大学学报*, 2009, 32(2):160-163.
- CHEN Xi, WANG Xicheng. Application of improved genetic algorithm in gate location optimization of plastic injection molding[J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2009, 32(2):160-163.
- [18] 杨东勇, 陈晋音. 基于多种群遗传算法的检测器生成算法研究[J]. *自动化学报*, 2009, 35(4):425-432.
- YANG Dongyong, CHEN Jinyin. Research on detector generation algorithm based on multiple populations GA[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(4):425-432.
- [19] 毛红卫, 陈忠华. 湿度对沥青混合料性能影响研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(5):242-247.
- MAO Hongwei, CHEN Zhonghua. Study on the influence of humidity on the performance of asphalt mixture[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(5):242-247.
- [20] 郭大智, 冯德成. 层状弹性体系力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
- GUO Dazhi, FENG Decheng. *Mechanics of layered elastic system*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.
- [21] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2007.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. *Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020*[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.