

基于孔隙介质理论的路基压实度确定方法*

贺敏¹, 曹文贵^{1†}, 王江营², 罗宏¹

(1.湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2.长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为克服以往路基压实度快速检测法中需要繁琐的标定试验及忽视初始地应力对变形参数影响的缺陷,建立了路基压实度快速检测新方法.首先,基于孔隙介质理论,研究了孔隙率、变形模量及密度随路基材料变形而变化的规律;其次,引入分层总和法和分级加载思想,考虑初始地应力和路基变形均影响路基力学参数变化的特征,建立静力贯入条件下贯入荷载-沉降解析关系;然后,在路基静力贯入试验测得荷载-沉降试验曲线的基础上,利用自适应遗传退火算法反演得路基贯入荷载-沉降解析关系中的各参数,从而建立基于孔隙介质理论的路基压实度确定方法;最后,通过工程实例对比可知,本文方法精确度满足工程要求,检测过程中无需繁琐的灌水法标定试验,能快速准确地检测路基压实度,表明了本文方法的合理性和可行性.

关键词:压实度;变形模量;孔隙介质理论;静力贯入试验;反演分析

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Determination Method of Subgrade Compactness Based on Porous Media Theory

HE Min¹, CAO Wengui^{1†}, WANG Jiangying², LUO Hong¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to overcome two faults of the complicated calibration experiment in present methods for quick testing subgrade compactness and the neglectful effect of initial ground stress on deformation parameters, a new method for quick testing subgrade compactness was established. Firstly, the laws of porosity, deformation modulus and density varying with the deformation of subgrade soils were studied based on porous media theory. Then, the force-settlement analytical relation was established by considering the effect of initial ground stress and subgrade deformation on variational mechanical parameters by using the layer-wise summation method and step-loading idea in the process of static penetration. Besides, on the basis of force-settlement curves observed by static penetration experiments, the parameters of force-settlement analytical relation were obtained by back-analyses with adaptive genetic annealing algorithm, and the determination method for subgrade compactness based on porous media theory was then established. Final-

* 收稿日期:2016-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378198, 51508039), National Natural Science Foundation of China(51378198, 51508039); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130161110017), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China(20130161110017)

作者简介:贺敏(1988—),女,湖南南县人,湖南大学博士研究生

†通讯联系人, E-mail: cwglyp@21cn.com

ly, the engineering cases proved that the accuracy of this method satisfied the engineering requirements, and this method tested the subgrade compactness quickly and accurately without complicated calibration experiments which are essential in present methods. It shows that the proposed method is reasonable and feasible.

Key words: compactness; deformation modulus; porous media theory; static penetration experiment; back-analysis

公路路基压实质量是评判道路质量优劣的至关重要的因素之一.国内规范^[1]大多以压实度作为检测路基压实质量的标准,随着高速公路的快速发展,压实度的研究受到愈来愈多学者的关注.

我国规范规定用灌水(砂)法^[2-3]检测路基压实度,该方法检测精度高,但是,由于需要开挖试坑,因而不仅会破坏路基,而且劳动强度大,检测效率低.目前,除了规范规定的检测方法外,广泛应用于公路路基压实度检测的方法还有波法^[4-5]和经验法^[6-7].前者是利用波在不同密度材料中传播时其能量损失或传播速度不同的原理建立起来的,此方法无需开挖试坑,故检测效率高,但是,由于波在路基介质中传播规律与机理极其复杂,对于土石混填等材料复杂的路基,其检测精度难以满足工程要求;后者是通过试验建立压实度与静力贯入深度、弯沉值、回弹模量等的经验关系来实现压实度检测的,其经验关系不仅与压实程度有关,还与试验仪器和试件尺寸有关,并且不同的路基其材料差别较大,故此方法难以满足普遍适用性.前述两种检测方法虽然较规范法高效,但检测精度均不如人意.因此,一种基于静力贯入试验的路基压实度快速检测方法得以发展.

首先,曹文贵等^[8]和罗宏等^[9]将路基静力贯入视为集中荷载作用于半无限空间的弹性问题,引入布辛奈斯克解和分级加载思想,考虑变形模量在路基变形过程中的变化,建立起以路基材料初始孔隙率为参数的贯入荷载-沉降解析关系,再结合静力贯入荷载-沉降试验曲线拟合得到路基材料初始孔隙率,而路基材料初始孔隙率与路基压实度存在物理关系,利用这一物理关系即可得路基压实度,该方法改善了压实度检测中存在的效率与普遍适用性问题.但由于静力贯入试验并非集中荷载作用,使得该方法建立的解析关系与实际存在较大差异,导致检测精度仍然存在问题;随后,罗宏等^[10]在前述研究成果的基础上有所改进,将路基静力贯入视为圆形均布荷载作用于半无限空间的弹性问题,建立起

相应的贯入荷载-沉降解析关系,结合静力贯入荷载-沉降试验曲线拟合得到初始孔隙率,进而确定路基压实度.由于路基贯入沉降并非纯粹的半无限空间的弹性问题,该方法仍有待改进;于是,曹文贵和伍丹等^[11]视静力贯入荷载为均布荷载,将贯入变形视为贯入形成的土石柱压缩变形及柱端沉降两部分,仍然采用布辛奈斯克解及分级加载的思想,利用增量胡克定律导出以初始孔隙率为参数的路基贯入荷载-沉降解析关系,采用自适应遗传退火算法进行参数反演分析,从而很大程度上提高了其检测的精度.然而,前述方法视路基材料为弹性,未反映其材料变形的非线性本质,使得该方法的检测精度仍无法满足工程要求;因此,曹文贵和张峻淞^[12]在此基础上,充分考虑材料的非线性特征,引入 Duncan-Chang 模型,将压头中点下的微元体所受的应力视为体积应力和偏应力叠加,路基变形视为体积应力和偏应力分别引起的变形之和,且分别采用增量广义胡克定律和增量 Duncan-Chang 模型来确定体积应力和偏应力引起的变形,由于 Duncan-Chang 模型能较好地反映路基材料的非线性,使得检测精度有一定改善.至此,基于静力贯入试验的路基压实度检测方法已经发展到一定阶段.

然而,上述基于静力贯入试验的压实度检测方法仍存在缺陷:其一,在计算变形时,初始变形模量不随埋深的增加而变化,理论上,变形模量随埋深的不同而异,这主要是由不同埋深的初始地应力不同导致的,而忽视初始地应力对变形模量的影响会大大削弱变形分析时的精确度.其二,由于导出的荷载-沉降解析关系中,路基材料变形模量与骨架变形模量和孔隙率存在一定的相关性,故在参数反演前,需要先选择测点进行繁琐的灌水法标定试验来确定骨架变形模量,使得检测过程并未真正实现快速化.并且每个测点的材料参数并不完全相同,但上述研究中,将各个测点的骨架变形模量视为相同,是不符合实际情况的.针对上述问题,若充分考虑初始地应力对变形模量的影响,及变形模量在路基材

料变形过程中的变化规律,在此基础上推导得到的荷载-沉降解析关系,无需进行标定试验即可反演确定压实度,进而可以大大提高检测精度,缩短检测时间,提高检测效率,这正是本文研究的出发点.

本文将从静力贯入路基变形机理入手,引入孔隙介质理论^[13],充分考虑初始地应力对路基材料变形模量的影响,及路基材料变形过程中变形模量随之发生变化的这一特征,完善路基材料的本构模型关系,基于静力贯入试验建立快速检测路基压实度的新方法,以期大幅度提高路基压实度检测精度和效率,使该方法的广泛工程应用成为现实.

1 静力贯入路基变形机理

路基静力贯入试验成果是贯入荷载与路基表面沉降的关系曲线,要利用该荷载-沉降试验曲线参数反演求得压实度就必须确定反映路基压实度或孔隙率变化的荷载-沉降解析关系,而建立上述荷载-沉降解析关系的关键又在于正确且合理地认识路基贯入变形力学机理.为此,本文首先对路基贯入变形特点及力学机理^[8-12]总结归纳如下:

1)静力贯入试验压头采用的是平底圆形压头,则其作用于路基表面荷载为竖向圆形均布荷载,假设路基始终为各向同性材料,引用半无限空间表面作用竖向圆形均布荷载的布辛奈斯克解,由于圆形均布荷载中点的沉降值最大,因此,荷载-沉降解析关系中的沉降值为圆形均布荷载中心点的沉降.

2)为体现土体沉降变形的非线性特征,引入分级加载思想和分层总和沉降分析方法,假设各级荷载作用下的土体变形服从胡克定律,则只需利用胡克定律确定各分层各级荷载作用下的竖向应变即可确定路基总沉降.

3)将初始地应力即应力历史对变形模量的影响视为路基材料自重应力对变形模量的影响,自重应力随埋深而变化,也即变形模量随埋深而异,因此,本文通过基于孔隙介质力学模型的本构关系考虑初始地应力对变形模量的影响.

4)各级荷载作用前后,土体表观变形模量、孔隙率和密度均随路基材料变形而发生变化,基于孔隙介质力学理论,忽略孔隙水的影响,建立变形模量随路基变形而变化的本构关系,体现竖向压缩变形的非线性特征.

2 静力贯入路基荷载-沉降解析关系

在深入分析静力贯入路基变形力学机理的基础上,建立适合路基土体材料的荷载-沉降解析关系.由于路基材料是典型的孔隙介质,其在外力作用下发生变形基本是由于孔隙的不断减小引起的^[14],所以本文引入孔隙介质力学,深入分析路基土体变形模量和孔隙率在变形过程中的变化规律,完善其非线性变形模型,引入分级加载思想,采用分层总和法,建立路基静力贯入荷载-沉降解析关系.

2.1 孔隙介质力学模型及参数变化关系

将孔隙材料所受的应力称为表观应力,将固体颗粒骨架所受的应力称为实际应力.沿某应力方向取一土柱体单元,如图1所示,设沿柱体轴向长度为 L ,截面面积为 A ,体积为 V ,土颗粒骨架截面面积为 A_s ,土颗粒骨架体积为 V_s .在应力 σ 作用下的轴向长度变为 L' ,截面面积变为 A' ,体积变为 V' ,土颗粒骨架截面面积变为 A'_s ,土颗粒骨架体积变为 V'_s ,且土柱在应力 σ 作用之前的孔隙率为 n_0 ,而应力作用之后的孔隙率为 n .理论上,路基体在变形过程中各力学参数在不断变化,本文假设土体表观泊松比、土颗粒骨架的实际泊松比、实际变形模量及实际体积应变均不随路基材料变形而变化,而土体表观变形模量、土体表观孔隙率及密度均随路基材料变形而变化.

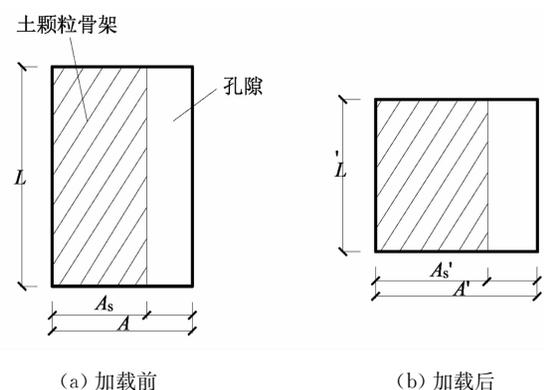


图1 土柱单元模型

Fig.1 The model of soil column element

依据孔隙介质理论^[13]可得:

$$\sigma = \sigma_s (1 - n). \quad (1)$$

式中: σ 为土体轴向表观应力; σ_s 为土颗粒骨架轴向实际应力.土柱轴向表观应变 ϵ_1 与土颗粒骨架轴向实际应变 ϵ_{s1} 之间的关系满足:

$$\epsilon_{s1} = \epsilon_1. \quad (2)$$

又由于:

$$\left. \begin{aligned} V_s &= (1 - n_0)V, \\ V'_s &= (1 - n)V'. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

依据材料应变的定义可得:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_v &= \frac{V - V'}{V}, \\ \epsilon_{sv} &= \frac{V_s - V'_s}{V_s}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: ϵ_v 为土体表观体积应变; ϵ_{sv} 为土颗粒骨架实际体积应变,联立式(3)(4)可得孔隙率与体积应变之间的关系:

$$n = 1 - \frac{(1 - n_0)(1 - \epsilon_{sv})}{1 - \epsilon_v}. \quad (5)$$

又有:

$$\epsilon_v = 1 - (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)^2. \quad (6)$$

式中: ϵ_1 为土体表观轴向应变; ϵ_2 为土体表观侧向应变.假设土颗粒骨架的体积应变在路基材料变形过程中为不变量,即 $\epsilon_{sv} \approx 0$,联立式(5)(6)可得孔隙率与土体表观应变之间的关系为:

$$n = 1 - \frac{1 - n_0}{(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)^2}. \quad (7)$$

式(7)即为孔隙率随材料变形的变化关系.

假设土体与土颗粒骨架变形均符合胡克定律,可得:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)], \\ \epsilon_{s1} &= \frac{1}{E_s} [\sigma_{s1} - \mu_s(\sigma_{s2} + \sigma_{s3})]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: E 为土体表观变形模量; E_s 为土颗粒骨架实际变形模量; μ 为土体表观泊松比; μ_s 为土颗粒骨架实际泊松比.联立式(1)(2)(8)可得:

$$E = E_s(1 - n) \frac{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \mu_s(\sigma_2 + \sigma_3)}. \quad (9)$$

假设土体表观泊松比、土颗粒骨架的实际泊松比、实际变形模量均为常量,且各级加载的应力相等,则初始加载时有如下关系:

$$E_0 = E_s(1 - n_0) \frac{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \mu_s(\sigma_2 + \sigma_3)}. \quad (10)$$

式中: E_0 为土体表观初始变形模量.联立式(7)(9)(10)可得土体表观变形模量与土体表观应变之间的关系为:

$$E = E_0 \frac{1}{(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)^2}. \quad (11)$$

式(11)即为变形模量随材料变形的变化关系.

由于忽略孔隙水的影响,土体密度 ρ 与孔隙率 n

有如下关系:

$$\frac{\rho}{1 - n} = \frac{m}{V_s}. \quad (12)$$

式中: m 为土体质量.假设土体质量 m 在变形过程中不变,则初始加载时有如下关系:

$$\frac{\rho_0}{1 - n_0} = \frac{m}{V_s}. \quad (13)$$

式中: ρ_0 为土体初始密度.联立(7)(12)(13)可得土体密度与土体表观应变之间的关系为:

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{(1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2)^2}. \quad (14)$$

式(14)即为土体密度随材料变形的变化关系.至此,孔隙率、变形模量和密度随材料变形而变化的关系式已建立.

2.2 静力贯入路基应力分析

考虑初始地应力对变形模量的影响需首先确定自重应力,分析变形模量随路基材料变形而变化的规律需首先确定附加应力.自重应力及附加应力的确定方法如下.

2.2.1 自重应力分析

自重应力作用下,各压缩分层土体所受主应力可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{c1} &= \rho g z, \\ \sigma_{c2} &= \sigma_{c3} = k \sigma_{c1}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: g 为重力加速度; z 为埋深; σ_{c1} 为竖向自重主应力; σ_{c2} 和 σ_{c3} 为侧向自重主应力; k 为静止土压力系数,可表示为:

$$k = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (16)$$

2.2.2 附加应力分析

静力贯入作用下,圆形压头对路基体的作用形式为圆形均布荷载,若贯入荷载为 P ,圆形压头半径为 r_0 ,则均布荷载 q 可表示为:

$$q = \frac{P}{\pi r_0^2}. \quad (17)$$

假设路基体为均匀的各向同性,故采用布辛奈斯克解计算附加应力,则贯入中心线上 z 深度处各贯入主应力为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= q(1 - \beta^3), \\ \sigma_2 &= \sigma_3 = q \left[\frac{\beta^3}{2} - (1 + \mu)\beta + \mu + \frac{1}{2} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中: σ_1 为竖向附加主应力; σ_2 和 σ_3 为侧向附加主应力; β 表示为:

$$\beta = \frac{z}{\sqrt{z^2 + r_0^2}}. \quad (19)$$

2.3 路基土体初始变形模量的确定

路基土体初始变形模量随埋深的不同而异,主要由不同埋深的土体自重应力不同导致,于是,设路基压缩层厚度为 H ,将其分为 N 层,各压缩土层厚度为 d_i ,以静力贯入中心线上第 i 分层中心所受应力代表该压缩层所受应力,则第 i 分层中心埋深 z_i 为:

$$z_i = (i - \frac{1}{2}) \frac{H}{N} = (i - \frac{1}{2}) d_i. \quad (20)$$

引入分级加载思想将各分层所受自重应力进行分级加荷,若各分层的自重应力分为 M 级加载,由式(15)可确定第 i 分层各自重主应力 σ_{cli} 和 σ_{c2i} ,则第 i 分层第 j 级加载的自重主应力 σ_{clij} 和 σ_{c2ij} 表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{clij} &= \rho_{i(j-1)} g z_i / M, \\ \sigma_{c2ij} &= k \sigma_{clij} / M. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $\rho_{i(j-1)}$ 为第 i 分层第 j 级自重应力加载前的土体密度,由式(14)可知第 i 分层第 j 级自重应力加载之后的土体密度 ρ_{ij} 与加载之前的土体密度 $\rho_{i(j-1)}$ 的关系为:

$$\rho_{ij} = \rho_{i(j-1)} \frac{1}{(1 - \epsilon_{clij})(1 - \epsilon_{c2ij})}. \quad (22)$$

式中: ϵ_{clij} 和 ϵ_{c2ij} 分别表示第 i 分层第 j 级自重应力加载引起的竖向应变及侧向应变.根据胡克定律,式(22)又可表示为:

$$\rho_{ij} = \frac{\rho_{i(j-1)}}{\left(1 - \frac{1}{E_{\sigma(i,j-1)}} [\sigma_{clij} - 2\mu\sigma_{c2ij}]\right) \left(1 - \frac{1}{E_{\sigma(i,j-1)}} [(1-\mu)\sigma_{c2ij} - \mu\sigma_{clij}]\right)}. \quad (23)$$

式中: $\rho_{i(j-1)}$ 为第 i 分层第 $j-1$ 级自重应力加载之后的土体密度,即第 i 分层第 j 级自重应力加载之前的土体密度.其中,各分层自重应力加载前的初始密度 ρ_{i0} 相同.

同理,由式(11)可知第 i 分层第 j 级自重应力加载之后的土体表观变形模量 E_{ij} 与加载之前的土体表观变形模量 $E_{i(j-1)}$ 的关系为:

$$E_{ij} = E_{i(j-1)} \frac{1}{(1 - \epsilon_{1ij})(1 - \epsilon_{2ij})}. \quad (24)$$

根据胡克定律,式(24)又可表示为:

$$E_{ij} = \frac{E_{\sigma(i,j-1)}}{\left(1 - \frac{1}{E_{\sigma(i,j-1)}} [\sigma_{clij} - 2\mu\sigma_{c2ij}]\right) \left(1 - \frac{1}{E_{\sigma(i,j-1)}} [(1-\mu)\sigma_{c2ij} - \mu\sigma_{clij}]\right)}. \quad (25)$$

式中: $E_{\sigma(i,j-1)}$ 为第 i 分层第 $j-1$ 级自重应力加载之后的土体表观变形模量,即第 i 分层第 j 级自重应力加载之前的土体表观变形模量.其中,各分层自重应力加载前的初始表观变形模量 $E_{\sigma i0}$ 相同,且第 M 级

自重应力加载之后的表观变形模量 $E_{\sigma iM}$ 为贯入荷载加载前的初始表观变形模量 E_{i0} .

2.4 静力贯入路基变形分析

采用地基沉降计算的传统方法分层总和法计算路基在静力贯入作用下的沉降变形.其分层与分级的方法与 2.3 节中相同,各分层在贯入荷载作用下的竖向变形为 s_i ,竖向应变为 ϵ_{1i} ,第 i 分层第 j 级加载的竖向应变为 ϵ_{1ij} ,则路基表面的竖向变形可表示为:

$$s = \sum_{i=1}^N s_i = \sum_{i=1}^N \epsilon_{1i} d_i = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \epsilon_{1ij} d_i. \quad (26)$$

由式(18)可分别确定第 i 分层附加主应力 σ_{1i} 和 σ_{2i} ,则第 i 分层第 j 级加载的附加主应力 σ_{1ij} 和 σ_{2ij} 表示为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1ij} &= \sigma_{1i} / M, \\ \sigma_{2ij} &= \sigma_{2i} / M. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

第 i 分层第 j 级贯入荷载加载的竖向应变 ϵ_{1ij} 及侧向应变 ϵ_{2ij} 符合胡克定律,如式(28)所示.

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{1ij} &= \frac{1}{E_{i(j-1)}} [\sigma_{1ij} - \mu(\sigma_{2ij} + \sigma_{3ij})], \\ \epsilon_{2ij} &= \frac{1}{E_{i(j-1)}} [\sigma_{2ij} - \mu(\sigma_{1ij} + \sigma_{3ij})]. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

式中: $E_{i(j-1)}$ 为第 i 分层第 $j-1$ 级贯入荷载加载之后的土体表观变形模量,即计算第 i 分层第 j 级贯入荷载加载引起竖向应变 ϵ_{1ij} 时的土体表观变形模量.那么,第 1 级加载时采用的是贯入荷载加载前的初始表观变形模量 E_{i0} .

由式(11)可知第 i 分层第 j 级贯入荷载加载之后的土体表观变形模量 E_{ij} 与贯入荷载加载之前的土体表观变形模量 $E_{i(j-1)}$ 的关系为:

$$E_{ij} = E_{i(j-1)} \frac{1}{(1 - \epsilon_{1ij})(1 - \epsilon_{2ij})}. \quad (29)$$

根据胡克定律,式(29)又可表示为:

$$E_{ij} = \frac{E_{\sigma(i,j-1)}}{\left(1 - \frac{1}{E_{\sigma(i,j-1)}} [\sigma_{1ij} - 2\mu\sigma_{2ij}]\right) \left(1 - \frac{1}{E_{\sigma(i,j-1)}} [(1-\mu)\sigma_{2ij} - \mu\sigma_{1ij}]\right)}. \quad (30)$$

2.5 静力贯入路基荷载-沉降解析关系计算方法

首先设定压缩层厚度为 H ,分层数为 N ,加载级数为 M ,自重应力加载前的土体表观变形模量的初始值为 $E_{\sigma i0}$ (各分层初始值均相同),初始孔隙率为 n_0 ,土体表观泊松比为 μ ,土体密度初始值为 ρ_{i0} (各分层初始值均相同),贯入荷载为 P ,圆形压头半径为 r_0 ,具体计算过程表述如下:

1) 采用式(16)(20)(21),第 i 分层第 $j-1$ 级自重应力加载之后的土体密度 $\rho_{i(j-1)}$ (若是第 1 级加

载,则采用初始密度 ρ_{i0})计算第 i 分层第 j 级自重应力加载的各主应力 σ_{c1ij} 和 σ_{c2ij} .

2) 采用步骤 1) 确定的第 i 分层第 j 级自重应力加载的各主应力 σ_{c1ij} 和 σ_{c2ij} 、第 i 分层第 $j-1$ 级自重应力加载之后的土体表观变形模量 $E_{ci(j-1)}$ (若是第 1 级加载,则采用初始表观变形模量 E_{ci0})、第 i 分层第 $j-1$ 级自重应力加载之后的土体密度 $\rho_{i(j-1)}$ (若是第 1 级加载,则采用初始密度 ρ_{i0})及式(23)确定第 i 分层第 j 级自重应力加载之后的土体密度 ρ_{ij} .

3) 采用步骤 1) 确定的第 i 分层第 j 级自重应力加载的各主应力 σ_{c1ij} 和 σ_{c2ij} 、第 i 分层第 $j-1$ 级自重应力加载之后的土体表观变形模量 $E_{ci(j-1)}$ (若是第 1 级加载,则采用初始表观变形模量 E_{ci0})及式(25)确定第 i 分层第 j 级自重应力加载之后的土体表观变形模量 E_{cij} .

4) 重复步骤 1), 2), 3), 直至确定第 M 级自重应力加载之后的表观变形模量 E_{ciM} ,即为贯入荷载加载前的初始表观变形模量 E_{i0} .

5) 采用式(17)(18)(19)(20)计算第 i 分层所受贯入荷载各主应力 σ_{1i} 和 σ_{2i} ,采用式(27)计算第 i 分层第 j 级贯入荷载加载的各主应力 σ_{1ij} 和 σ_{2ij} .

6) 采用步骤 5) 确定的第 i 分层第 j 级贯入荷载加载的各主应力 σ_{1ij} 和 σ_{2ij} 、第 i 分层第 $j-1$ 级贯入荷载加载之后的土体表观变形模量 $E_{i(j-1)}$ (若是第 1 级加载,则采用初始表观变形模量 E_{i0})及式(28)计算第 i 分层第 j 级贯入荷载加载引起的竖向应变 ϵ_{1ij} .

7) 采用步骤 5) 确定的第 i 分层第 j 级贯入荷载加载的各主应力 σ_{1ij} 和 σ_{2ij} 、第 i 分层第 $j-1$ 级贯入荷载加载之后的土体表观变形模量 $E_{i(j-1)}$ (若是第 1 级加载,则采用初始表观变形模量 E_{i0} ,即第 M 级自重应力加载之后的表观变形模量 E_{ciM})及式(30)确定第 i 分层第 j 级贯入荷载加载之后的土体表观变形模量 E_{ij} .

8) 重复步骤 6) 及 7), 确定各分层各级贯入荷载加载引起的竖向应变 ϵ_{1ij} ,采用式(26)计算总沉降,从而建立了静力贯入的荷载-沉降解析关系.

3 压实度确定方法

前述已经建立了基于静力贯入的荷载-沉降解析关系,其中力学参数 E_{ci0} 、 n_0 、 μ 和 ρ_{i0} 为未知常量.因此,结合静力贯入荷载-沉降试验曲线,利用自适

应遗传退火算法进行反演分析可得前述 4 个力学参数,进而可确定路基压实度.

3.1 确定初始孔隙率

首先建立优化目标函数,如下:

$$\min f(X) = \min \sum_{k=1}^{m'} [s_k(X)/s_k - 1]^2. \quad (31)$$

式中: m' 为贯入荷载级数; $s_k(X)$ 为贯入荷载 P_i ($i=1,2,\dots,m'$)的路基表面沉降理论值,可由式(26)确定; s_k 为贯入荷载 P_i ($i=1,2,\dots,m'$)的路基表面沉降实测值; X 为静力贯入荷载-沉降解析关系的参数向量,可表示为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [E_{ci0}, n_0, \mu, \rho_{i0}]. \quad (32)$$

式中:参数 x_i 的取值范围可表示为 $[L_{bi}, U_{bi}]$, U_{bi} 与 L_{bi} 分别为参数 x_i 的取值上、下限.

由此看出,上述问题属于多变量高度非线性优化问题,为此,本文采用自适应遗传退火算法反演各参数的值,具体求解方法见文献[15].

3.2 确定压实度

利用前述反演分析方法确定初始孔隙率 n_0 后,代入式(33)即可确定路基压实度 K :

$$K = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} = \frac{(1 - n_0)\rho_s}{\rho_{d \max}}. \quad (33)$$

式中: ρ_d 为路基材料干密度; $\rho_{d \max}$ 为路基材料最大干密度; ρ_s 为路基材料颗粒密度.

4 实例分析与验证

前述已经建立了基于静力贯入试验的路基压实度确定方法,为验证本文方法的合理性和可行性,参考文献[16]的室内静力贯入模型试验(实例一)及现场静力贯入试验(实例二)分别对本文方法进行验证.

4.1 实例一

室内静力贯入模型选用直径 $d=2r_0=100$ mm的平底圆形压头,选取 4 个测点,其静力贯入试验荷载-沉降($P-s$)数据见表 1.该路基其他物理性质参数为: $\rho_{d \max}=1.95$ g/cm³, $\rho_s=2.057$ g/cm³.选取路基压缩层厚度 $H=2$ m,将其均匀分成 $N=20$ 压缩分层,每层应力按 $M=10$ 级进行加载,并按以下步骤求解压实度:

1) 对 1#、2#、3#、4# 测点进行参数反演,按求解向量式(32)设定参数反演分析范围^[16],见表 2.

2) 利用前述建立的 $P-s$ 解析关系,结合 $P-s$ 试验曲线,即可反演确定出路基土体初始孔隙率 n_0 及

其他模型参数,见表3.

3) 将 n_0 代入式(33) 即可求得各测点的压实度,并与文献[16] 方法的分析结果以及实测值进行对比分析,见表4.

表1 实例一静力贯入试验 $P-s$ 数据

Tab.1 $P-s$ data of static penetration experiments(case1)

贯入荷载 P/kN	沉降 s/mm			
	1#测点	2#测点	3#测点	4#测点
0	0.000 00	0.000 00	0.000 00	0.000 00
1	0.955 20	0.955 30	0.955 40	0.955 10
2	1.900 90	1.920 90	1.917 90	1.913 90
3	2.866 36	2.547 87	2.869 72	2.545 14
4	4.453 25	4.458 78	4.451 75	4.452 34
5	6.488 16	6.051 20	6.369 68	6.684 32
6	7.962 10	7.643 62	7.921 10	7.652 14
7	9.532 15	9.525 84	9.512 56	9.545 22

表2 实例一测点求解参数取值范围

Tab.2 Ranges of parameter values of measurement points(case1)

反演参数	E_{ci0}/MPa	n_0	μ	$\rho_{i0}/(g \cdot cm^{-3})$
下限	1	0.05	0.1	1.5
上限	50	0.3	0.5	2.5

表3 实例一测点参数反演结果

Tab.3 Back analysis results of parameters for measurement points(case1)

测点	E_{ci0}/MPa	n_0	μ	$\rho_{i0}/(g \cdot cm^{-3})$
1#	13.54	0.087	0.173	1.878
2#	13.36	0.088	0.169	1.876
3#	13.28	0.086	0.172	1.880
4#	13.32	0.085	0.175	1.882

表4 实例一压实度结果比较

Tab.4 Comparisons of compactness results(case1)

测点	计算方法	理论压实度/%	灌水法压实度/%	相对误差/%
1#	文献[16]方法	—	96.4	—
	本文方法	96.31	96.4	0.09
2#	文献[16]方法	97.67	96.4	1.32
	本文方法	96.20	96.4	0.21
3#	文献[16]方法	97.86	96.4	1.51
	本文方法	96.42	96.4	0.02
4#	文献[16]方法	96.24	96.4	0.17
	本文方法	96.52	96.4	0.12

4.2 实例二

湖南省某高速公路某段路基现场静力贯入试验,选用直径 $d=2r_0=50$ mm 的平底圆形压头,选取4个测点,其静力贯入试验荷载-沉降($P-s$)数据

见表5.该路基其他物理性质参数为: $\rho_{dmax}=2.042$ g/cm^3 , $\rho_s=2.273$ g/cm^3 .路基压缩层厚度 H 、压缩分层数 N 、加荷级数 M 及压实度的确定步骤均同实例一,结果见表6~表8.

表5 实例二静力贯入试验 $P-s$ 数据

Tab.5 $P-s$ data of static penetration experiments(case2)

贯入荷载 P/kN	沉降 s/mm			
	1#测点	2#测点	3#测点	4#测点
0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
3	0.637 2	0.637 1	0.637 3	0.637 4
6	0.955 3	0.955 5	0.955 2	1.273 1
9	1.592 4	1.794 7	1.794 8	1.795 0
12	2.548 0	2.547 9	2.547 6	2.548 3
15	3.184 5	3.184 8	3.503 3	3.185 0
18	4.140 2	3.821 8	4.140 7	3.822 0
21	4.777 2	4.777 8	4.777 7	4.459 0

表6 实例二测点求解参数取值范围

Tab.6 Ranges of parameter values of measurement points(case2)

反演参数	E_{ci0}/MPa	n_0	μ	$\rho_{i0}/(g \cdot cm^{-3})$
下限	300	0.1	0.1	1.5
上限	400	0.3	0.5	2.5

表7 实例二测点参数反演结果

Tab.7 Back analysis results of parameters for measurement points(case2)

测点	E_{ci0}/MPa	n_0	μ	$\rho_{i0}/(g \cdot cm^{-3})$
1#	329.88	0.135	0.193	1.966
2#	324.63	0.131	0.198	1.975
3#	328.32	0.132	0.204	1.973
4#	325.54	0.134	0.201	1.968

表8 实例二压实度结果比较

Tab.8 Comparisons of compactness results(case2)

测点	计算方法	理论压实度/%	灌水法压实度/%	相对误差/%
1#	文献[16]方法	—	96.5	—
	本文方法	96.29	96.5	0.22
2#	文献[16]方法	96.24	96.5	0.27
	本文方法	96.73	96.5	0.24
3#	文献[16]方法	96.35	96.5	0.16
	本文方法	96.62	96.5	0.12
4#	文献[16]方法	96.68	96.5	0.19
	本文方法	96.40	96.5	0.10

通过上述实例分析,由文献[16]方法、本文方法的计算结果与实测压实度的对比分析可知,本文方法较接近实测结果,同时,避免了繁琐的标定试验.

5 结论

本文结合静力贯入试验的特点,在研究静力贯入试验路基变形机理的基础上,对路基压实度检测原理与压实度确定方法进行了深入探讨,并得出以下结论:

1)考虑初始地应力对变形模量的影响及变形模量随路基变形而变化的非线性特征,引入分级加载思想,采用分层总和法,基于孔隙介质理论建立了变形模量、孔隙率和密度随路基变形而变化的荷载-沉降分析模型,为基于静力贯入试验确定路基压实度奠定了基础。

2)基于本文建立的荷载-沉降解析关系,引入自适应遗传退火算法,无需标定试验^[9-13]即可对静力贯入荷载-沉降试验曲线进行参数反演,建立了真正意义上的快速检测压实度的方法。

3)本文参数反演不仅能确定路基的初始孔隙率,还能确定路基土其他物理力学参数,如初始变形模量、泊松比,亦可进行路基的沉降计算,较现有其他压实度检测方法具有明显优越性。

4)本文方法忽略了孔隙水的影响,更适合于含水量较小的粗粒土路基,为了增强本文方法的普遍适用性,将进一步考虑孔隙水的影响来完善本文方法。

参考文献

- [1] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015:10.
JTG D30—2015 Specifications for design of highway subgrades [S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 10. (In Chinese)
- [2] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].北京:人民交通出版社,2007:45—55.
JTG E40—2007 Test methods of soil for highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2007: 45—55. (In Chinese)
- [3] 沙庆林.公路压实与压实标准[M].3版.北京:人民交通出版社,1999:350—363.
SHA Q L. Road compaction and compaction standard[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 1999: 350—363. (In Chinese)
- [4] 柴华友,汪江波,周一勤,等.瑞利波分析方法及应用进展[J].岩石力学与工程学报,2002,21(1):119—125.
CHAI H Y, WANG J B, ZHOU Y Q, *et al.* Progress of Rayleigh wave analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 119—125. (In Chinese)
- [5] 张献民,王建华.公路工程瞬态激振无损检测技术[J].土木工程学报,2003,36(10):105—110.
ZHANG X M, WANG J H. Nondestructive detection technique for transient vibration used to highway engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(10): 105—110. (In Chinese)
- [6] 周志军.土石混填路基压实质量控制方法研究[D].西安:长安大学公路学院,2006:75—119.
ZHOU Z J. Study on the control method of quality in the construction of the subgrade filled with earth-rock mixtures [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2006: 75—119. (In Chinese)
- [7] 范磊.基于PFWD的土石混填路基压实质量快速检测方法研究[D].西安:长安大学公路学院,2011:40—61.
FAN L. Study on the rapid detection method of compaction quality with earth-rock subgrade based on PFWD[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2011: 40—61. (In Chinese)
- [8] 曹文贵,胡天浩,罗宏,等.土石混填路基压实度检测新方法探讨[J].湖南大学学报(自然科学版),2008,35(2):22—26.
CAO W G, HU T H, LUO H, *et al.* Discussion on a new technique for detecting compactness of soil-rock mixture roadbed [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, 35(2): 22—26. (In Chinese)
- [9] 罗宏,赵明华,曹文贵,等.基于静载试验的土石混填路基压实度检测新方法[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S2):4496—4502.
LUO H, ZHAO M H, CAO W G, *et al.* A new method for checking compactness of soil-rock mixture subgrade based on static load test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4496—4502. (In Chinese)
- [10] 罗宏,赵明华,曹文贵,等.基于弹性半空间理论的土石混填路基压实度确定方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(12):8—13.
LUO H, ZHAO M H, CAO W G, *et al.* A determination method for compactness of soil-rock mixture subgrade based on elastic half-space theory[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(12): 8—13. (In Chinese)
- [11] 曹文贵,伍丹,赵明华,等.基于静力贯入的土石混填路基压实度确定方法[J].中国公路学报,2010,23(5):8—15.
CAO W G, WU D, ZHAO M H, *et al.* Determination method for compactness of soil-rock mixture subgrade based on static penetration [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 8—15. (In Chinese)
- [12] 曹文贵,张峻淞.基于静力贯入的路基压实度确定方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(11):19—25.
CAO W G, ZHANG J S. Determination method for the compactness of subgrade based on static penetration [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(11): 19—25. (In Chinese)
- [13] 邵龙潭,孙益振.考虑空隙变形的孔隙介质本构关系初探[J].岩石力学,2006,27(4):561—565.
SHAO L T, SUN Y Z. Primary study of stress-strain constitutive relation for porous media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 561—565. (In Chinese)
- [14] 赵明华.土力学与基础工程[M].2版.武汉:武汉理工大学出版社,2003:68.
ZHAO M H. Soil mechanics and foundation engineering[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003: 68. (In Chinese)
- [15] 曹文贵,卢山,胡坚丽.基于自适应退火算法的非线性位移反分析方法研究[J].岩石力学,2008,29(7):1753—1758.
CAO W G, LU S, HU J L. Research on method of nonlinear displacement back analysis based on adaptive annealing algorithm[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1753—1758. (In Chinese)
- [16] 伍丹.基于静力贯入的土石混填路基压实度确定方法探讨[D].长沙:湖南大学土木工程学院,2010:45—56.
WU D. Study on a determination method for the compactness of soil-rock mixture subgrade based on static penetration test [D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2010: 45—56. (In Chinese)