

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202008019

落球检测技术的三维物质点法模拟研究*

张春新¹, 朱鸿鹄^{1,2}, 周谷宇¹, 张 巍¹, 周公旦²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 落球检测技术多用于测定填土路基的力学性质,但其可靠性缺乏深入的理论分析和对比验证。采用移动网格对落球检测的全过程进行三维物质点法模拟,通过改变被测土体的本构模型、弹性模量和强度参数(黏聚力、内摩擦角),分析土体的变形破坏特征,利用球体的加速度、接触时间和位移特征反推土体的变形模量和强度参数。模拟分析表明:当假定被测土体处于线弹性状态时,基于Hertz接触理论估算的弹性模量与模型设定值吻合较好;当被测土体发生较大塑性变形时,基于Hertz理论估算的变形模量以塑性变形为主,且在同一强度参数下趋于一致,基于修正Vesic空腔扩张理论估算的强度参数与设定值相差较大。在测试过程中,当土体以弹性变形为主时,估算的变形模量和强度参数具有一定的参考价值;当土体强度较低且以塑性变形为主时,估算的变形模量与平板载荷试验结果相差较大,其准确性存在一定问题。相关结论为评估落球检测结果的有效性、促进该技术的推广应用,提供了一定的参考依据。

关键词: 物质点法; 移动网格; 落球检测技术; 岩土参数

中图分类号: TU472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)02-0311-10

Simulation of Falling Ball Test using Three-Dimensional Material Point Method

ZHANG Chunxin¹, ZHU Honghu^{1,2}, ZHOU Guyu¹, ZHANG Wei¹, ZHOU Gongdan²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Falling ball test is widely used for determining mechanical properties of fill subgrade in the field, but its reliability has not been adequately evaluated using theoretical analysis and verifications. The whole process of the falling ball test is simulated by 3D material point method (MPM) with moving meshes. By changing the constitutive model, elastic modulus and strength parameters of the test soil, the deformation and failure characteristics of the soil are analyzed, and the deformation modulus and strength parameters of soil are deduced from the acceleration, contact time and displacement of the sphere. The numerical simulations indicate that the elastic modulus estimated based on Hertzian contact theory is in good agreement with the real one when the test soil is in linear elastic state; when

* 收稿日期:2020-08-27;修回日期:2021-01-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41722209,41672277)、中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金项目(2018)资助

作者简介:张春新(1997—),男,硕士研究生。主要从事地质工程大变形数值模拟研究。

E-mail: cxzhang@smail.nju.edu.cn

通讯作者:朱鸿鹄(1979—),男,教授,博导。主要从事地质工程、岩土力学方面的研究。E-mail: zhh@nju.edu.cn

the soil has large plastic deformation, the deformation modulus calculated based on Hertzian theory mainly includes plastic deformation, and tends to be consistent under the same strength parameters. The strength parameters estimated based on modified Vesic cavity expansion theory are quite different from the real ones. When the soil is mainly subjected to elastic deformation during the test, the estimated deformation modulus and strength parameters have certain reference value. When the soil is mainly subjected to plastic deformation, the deformation modulus estimated by falling ball test is quite different from those of plate load test, so there are some problems in its accuracy. The conclusions drawn in this paper provide useful reference for evaluating the effectiveness of the falling ball test results and promoting its wide application in engineering practices.

Keywords: material point method (MPM); moving mesh; falling ball test; geotechnical parameter

引言

“落球检测技术”是一种现场快速测定路基填土变形模量、估算土体强度参数(黏聚力、内摩擦角)的测试方法,已在多个工程项目及室内测试中得到应用^[1-5]。该方法使刚性球体从一定高度自由落下,通过测试球体与被测材料的接触时间等参数,推定该材料的力学特性。因其具有测试效率高、适用范围广等特点,此方法广泛应用于测试地基土、水泥土、回填土等岩土材料,以及钢、混凝土等建筑材料的力学性能。郭晔等^[2]通过钢球与混凝土构件的接触时间来推算混凝土表层的弹性模量,评价混凝土的表层状态。J. Y. Wu等^[3]采用落球法测定了不同岩土材料的压缩模量,并与平板载荷试验结果进行了对比。对于岩土材料,该方法不仅可以获得各种变形参数(压缩模量、回弹模量、基床系数等),还可用于强度参数的估算。在此基础上,J. Y. Wu等^[4]修正了Vesic空腔扩张理论,依据变形模量来推算不同土体的强度参数。目前,落球检测技术的准确性一般根据现场测试手段来评估,缺乏理论分析和对比验证。

数值模拟为落球检测技术的研究提供了一种途径,但传统的有限元方法在处理大变形问题时往往出现网格畸变等数值求解困难。物质点法(Material Point Method, MPM)是解决固体力学大变形问题的一种数值模拟方法。该方法是从描述流体运动的质点网格法(Particle In Cell, PIC)发展而来^[6]。国外学者^[7-8]首次将PIC扩展到固体力学中,提出物质点法,并离散了动量方程。这种方法结合了欧拉和拉格朗日算法的优点,既可避免网格畸变,又能将历史记录存储在物质点中,在岩土工程

大变形数值模拟中得到了广泛应用^[9-14]。C. J. Coetzee等^[9]基于物质点法模拟了不同土体刚度和锚杆粗糙度下锚杆的拔出过程。为了与桩基离心机试验结果进行对比,N. T. V. Phuong等^[10]采用物质点法模拟了桩基的压入及静载试验过程。E. J. Fern^[11]通过物质点法,分析了隧道变形引起地面变形破坏的机理。在国内,史卜涛等^[12]提出了物质点强度折减法,并将其应用于边坡稳定性分析。孙玉进等^[13]、张巍等^[14]对深圳“12·20”人工堆填土滑坡全过程进行了物质点法的模拟。除了以上这些应用领域,物质点法在分析强夯等冲击荷载下^[15-16]土体的大变形方面,与传统数值仿真方法相比,也有较大的优势。

本文采用移动网格,对落球检测技术进行了三维物质点法模拟。模拟过程中,通过改变被测土体的本构模型、弹性模量和强度参数,分析土体的变形破坏特征,并利用球体的加速度、接触时间和位移特征估算土体的变形模量和强度参数。相关结论为科学评估落球检测结果的有效性,促进该技术的发展成熟和推广应用,提供了一定的参考。

1 落球检测技术原理

1.1 变形模量的估算

土体变形模量的估算主要基于Hertz接触理论。在忽略接触面摩擦和物体中的弹性波动的情况下,球体与半无限空间弹性体发生碰撞接触时,通过静力接触理论推导出弹性体间碰撞的解析解^[17]。接触过程中的最大压缩位移 d 、接触时间 T 满足如下表达式:

$$d = \left[\frac{15(\delta_1 + \delta_2)mv_0^2}{16R^{1/2}} \right]^{2/5} \quad (1)$$

$$T_c = \frac{2x_0}{v_0} \int_0^{x_0} \frac{dx}{(1-(x/x_0))^{1/2}} = 2.865 \left[\frac{(\delta_1 + \delta_2)m}{\sqrt{Rv_0}} \right]^{2/5} \quad (2)$$

式中, d 为最大压缩位移, m ; T_c 为接触时间, s ; $\delta_i = (1 - \mu_i^2)/E_i$ ($i=1$ 或 2 , 分别对应于冲击球体和半无限空间弹性体(测试对象)), 其中 μ_i 为泊松比, E_i 为弹性模量, Pa ; m 为球体的质量, kg ; R 为球体的半径, m ; v_0 为球体与半无限体碰撞前瞬间的速度, m/s 。

在现有的落球检测技术中, 球体半径(R)及材料特性(E, μ, ρ)是已知的, 速度 v_0 由球体自由下落高度 H 求得, 通过在球体中放置加速度计测量出接触时间 T_c , 进而导出测试对象的材料特性(E, μ)。与弹性材料不同, 岩土材料会不可避免地产生塑性变形, 因此该技术将压缩过程和回弹过程分离, 通过压缩过程的接触时间来推算土体的变形模量 E_0 , 通过回弹过程的接触时间来推算回弹模量 E_{ur} , 即:

$$T_c = 1.432 \cdot 5 \left[\frac{(\delta_1 + \delta_2)m}{\sqrt{Rv_0}} \right]^{2/5} \quad (3)$$

式中, δ_2 的计算用变形模量 E_0 或回弹模量 E_{ur} 代替式(2)中的弹性模量 E_2 求得。

土体的泊松比一般取值在 0.2 (碎石土)~ 0.42 (黏性土)之间。对同一类土体, 泊松比的变化范围更窄, 对变形模量的估算影响较小^[2]。因此, 在测试中通常给定泊松比的取值, 再通过式(3)估算变形模量 E_0 。

1.2 强度参数的估算

J. Y. Wu等^[4]根据落球与土体间的局部接触特性, 对空腔扩张理论^[18]进行修正, 以估算土体的强度参数。该修正理论基于以下假设:(1)落球与土体间的相互作用主要局限于球下的锥形区域(图1);(2)ABCD区域为塑性变形区, 在塑性区土体应力达到 Mohr-Coulomb 抗剪强度, 塑性区的体积变化用平均体应变 Δ 表示, 且对应力进行动态加载修正;(3)塑性区以外的土体处于弹性状态。

该理论通过下式求解强度参数 $c(\varphi)$ 、塑性区半径 R_p 、塑性区形心处的切向应力 σ_θ :

$$R_p = \left[\frac{dR(3R-d)E_0(1-\sin\varphi)}{4(1+\mu)(\sigma_\theta \sin\varphi + c \cos\varphi)(1+\Delta)} \right]^{1/3} \quad (4)$$

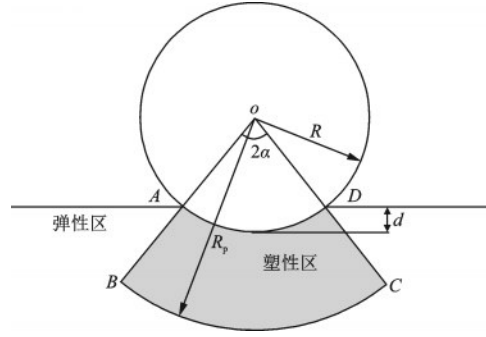


图1 修正 Vesic 空腔扩张理论示意

Fig.1 Modified Vesic Cavity Expansion Theory

$$\sigma_\theta = \frac{2\gamma(R_p - R)}{3} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) + 2c \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (5)$$

$$(p_u + c \cot\varphi) \cdot \left(\frac{R}{R_p}\right)^{\frac{4\sin\varphi}{1+\sin\varphi}} - c \cdot \cot\varphi = \left[\frac{(1+\sin\varphi)\sigma_\theta + 2c \cdot \cos\varphi}{1-\sin\varphi} \right] \cdot \frac{R_p}{R} \quad (6)$$

$$p_u = \frac{8dE_0\sqrt{(2R-d)d}}{3\pi R^2(1-\mu^2)(1-\cos 2\alpha)}, \Delta = \Delta_0 - \frac{E_0}{a+b \cdot E_0} \quad (7)$$

式中, R_p 为塑性区半径, m ; d 为最大压缩位移, m ; E_0 为土体变形模量, kPa , 通过式(3)计算而得; μ 为土体泊松比; c 为土体黏聚力, kPa ; φ 为土体内摩擦角, ($^\circ$); Δ 为塑性区的平均体应变; σ_θ 为塑性区形心处的切向应力, kPa ; γ 为土体重度, kN/m^3 ; p_u 为球、土接触面上的径向应力, kPa ; 2α 为塑性区的角度范围, 且 $\alpha = \arccos\sqrt{1-d/R}$; Δ_0 、 a 、 b 均为与土性有关的经验系数。

落球检测时通常给定 c 或 φ 值, 然后迭代求解式(4)~(6), 即可得到另一强度参数和其他 2 个未知量^[4]。在利用落球检测技术估算土体强度参数时, 还存在较多疑问, 比如修正空腔扩张理论的假设是否可靠、不同强度土体在冲击荷载下的变形特性是否相同等。下文通过三维物质点法模拟, 对这些问题进行剖析。

2 物质点法基本原理

在物质点法中, 连续体被离散为一系列拉格朗日质点(物质点), 物质点携带质点子域的信息(质量、速度、应力和应变等), 同时在求解域内构建背景网格。在一个时间步中, 首先通过插值函数将所需变量从物质点映射到网格节点求解动量平衡方

程。在求解动量方程时,质点和背景网格完全固连,随网格一起运动。随后使用插值函数将网格处求解的变量映射到物质点,以更新质点位置及携带的变量并进行下一时步的计算。此过程中,计算网格不携带任何信息,仅用于求解动量方程。

2.1 动量平衡方程及其弱形式

连续体在当前域 Ω 内处处满足动量守恒方程:

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (8)$$

式中, ρ 为材料密度; v_i 为速度; x_j 为空间坐标; σ_{ij} 为Cauchy应力; g_i 为单位质量体力。

边界条件表示为:

$$\left. v_i(x, t) \right|_{\partial\Omega_v(t)} = \bar{v}_i(t) \quad (9)$$

$$\left. \sigma_{ij}(x, t) n_j \right|_{\partial\Omega_s(t)} = \bar{\tau}_i(t)$$

式中, $\partial\Omega_v, \partial\Omega_s$ 分别为指定的位移边界和应力边界; \bar{v}_i 为边界 $\partial\Omega_v$ 处的速度; n_j 为边界 $\partial\Omega_s$ 外法线方向的单位向量; $\bar{\tau}_i$ 为边界 $\partial\Omega_s$ 处的面力。

根据虚功原理,将式(8)乘以虚速度 δv_i 并在当前域 Ω 内积分,利用分部积分和高斯定理,得到其弱形式为:

$$\int_{\Omega} \delta v_i \rho \frac{dv_i}{dt} d\Omega = \int_{\partial\Omega_s} \delta v_i \bar{\tau}_i dS - \int_{\Omega} \delta v_{i,j} \sigma_{ij} d\Omega + \int_{\Omega} \delta v_i \rho g_i d\Omega \quad (10)$$

2.2 空间离散及物质点离散

物质点法将连续体在空间上进行网格离散,如图2所示。在求解动量方程时,物体与背景网格固连,采用背景网格上的插值函数(形函数) $N(x)$,获得物理量的空间离散形式。

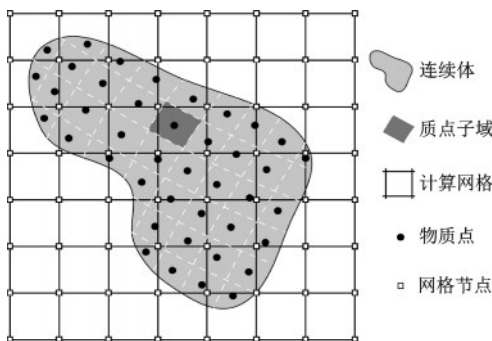


图2 背景计算网格与物质点离散

Fig.2 Computational grids and discretization of material points

速度 v_i 、加速度 $a_i = dv_i/dt$ 、虚速度 δv_i 可表示为

$$\left. \begin{aligned} v_i(x, t) &= N(x) \underline{v}_i(t) \\ a_i(x, t) &= N(x) \underline{a}_i(t) \\ \delta v_i &= N(x) \delta \underline{v}_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, $\underline{v}_i, \underline{a}_i, \delta \underline{v}_i$ 分别为节点速度、节点加速度和节点虚速度。

将式(11)代入动量方程的弱形式(10),整理得

$$\int_{\Omega} N^T(x) \rho N(x) \underline{a}_i d\Omega = \int_{\partial\Omega_s} N^T(x) \bar{\tau}_i dS + \int_{\Omega} N^T(x) \rho g_i d\Omega - \int_{\Omega} B^T(x) \sigma_{ij} d\Omega \quad (12)$$

式中, $B(x)$ 为形函数 $N(x)$ 的导数。

同时将连续体离散为一系列物质点,离散的物质点携带质量、速度、应变、应力等物理量,且在整个求解过程中,物质点质量保持不变,即质量守恒自动满足。相比于有限元中采用的高斯积分,物质点法中采用物质点积分进行数值积分^[19]。

采用物质点离散后,连续体的密度可表示为:

$$\rho(x) = \sum_{p=1}^{n_p} m_p \delta(x - x_{ip}) \quad (13)$$

式中, n_p 为单元内物质点的数量; m_p 为物质点 p 的质量; x_{ip} 为物质点的空间坐标; $\delta(x)$ 为Dirac delta函数。

节点质量矩阵采用集中阵 M :

$$M = \sum_{p=1}^{n_p} m_p N(\xi_p) \quad (14)$$

式中, ξ_p 为物质点的局部坐标。

内力在物质点处积分,积分权重为物质点体积,节点内力 f_i^{int} 表示为

$$f_i^{\text{int}} = \int_{\Omega} B^T(x) \sigma_{ij} d\Omega = \sum_{p=1}^{n_p} V_p B^T(\xi_p) \sigma_{ijp} \quad (15)$$

式中, V_p 为物质点的体积; σ_{ijp} 为物质点处的应力。

节点外力 f_i^{ext} 表示为

$$f_i^{\text{ext}} = f_i^{\text{trac}} + f_i^{\text{grav}} = \int_{\partial\Omega_s} N^T(x) \bar{\tau}_i dS + \int_{\Omega} N^T(x) \rho g_i d\Omega = \sum_{bp=1}^{n_{bp}} N^T(\xi_p) \left(\sum_{i=1}^{n_n} N(\xi_{bp}) \bar{\tau}_i(x_i) \right) + \sum_{p=1}^{n_p} m_p N^T(\xi_p) g_i \quad (16)$$

式中, ξ_{bp} 为面力边界物质点的局部坐标; n_n 为边界单元的节点数。

将式(14)、(15)、(16)代入式(12),整理得

$$M \underline{a}_i = f_i^{\text{ext}} - f_i^{\text{int}} \quad (17)$$

在时间离散时,采用显式格式积分求解节点动量方程^[19],当物质点趋近单元边界时,D. Sulsky等^[8]提出的改进算法能够较好地保持数值稳定性。

3 落球检测试验模拟

3.1 数值模型

由于落球过程为一轴对称问题,采用美国加州大学伯克利分校等单位联合开发的 Anura 3D 软件^[20]建立了一个半径 0.5 m、高 0.6 m 的 20°轴对称切片模型,对测试过程进行三维模拟。数值模型的几何尺寸如图 3 所示,其中球体直径为 48 mm,土体深度为 0.4 m,半径为 0.5 m。实际测试中,球体尺寸通常根据土体的粒径大小及级配进行选择,模拟中的尺寸参考了文献[5]中的试验。切片模型的左右两侧采用切向固定边界;曲面侧采用切向、法向固定边界;顶底面均采用竖向固定边界。采用二次插值的四节点四面体单元来离散计算区域。在球体材料中,每个单元内设置 1 个物质点;土体中每个单元设置 4 个物质点。计算区域内共包含 33 454 个四面体单元,88 481 个物质点。其中,只有当物质点进入的网格单元(激活网格)才参与计算,空网格在初始状态下未被激活。为更好地处理球、土体的接触界面问题,采用移动网格技术。界面的接触条件设置参考了文献[20]的处理方法。

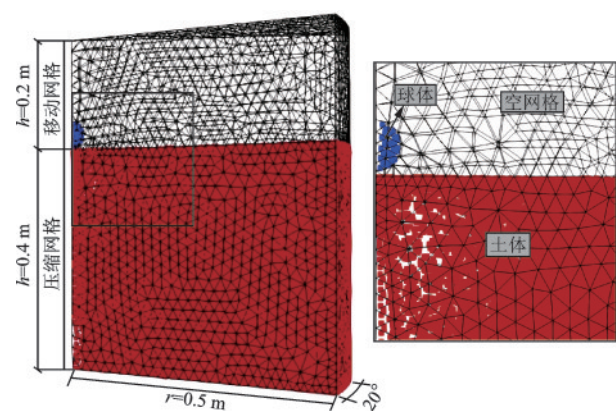


图3 落球模型的网格离散和物质点分配

Fig.3 Mesh discretization and distribution of material points of falling sphere model

改变球体落高与土体强度可得到相同的土体变形特性,且实际测试中通常保持落高不变,因此模拟中不考虑落高的影响,取落高为 0.5 m,即接触前球体初速度设置为 3.13 m/s。将球体设置为线弹

性材料,相关参数取为:弹性模量 20 GPa,泊松比 0.27,密度 7 545 kg/m³;土体本构模型及参数的选取见 4.1、4.2 节。在数值模拟中不施加阻尼,且采用 K₀法生成土体中的初始应力场。此外,采用混合积分算法^[19]以减小质点穿越网格引起的应力振荡。

3.2 移动网格

移动网格技术将背景网格划分为移动网格区和压缩网格区(图 3)。在球体撞击土体时,移动网格区以与球体相同的速度移动,且保持区域内网格形状不变;压缩网格区在计算过程中发生变形,顶部节点位移与球体位移(移动网格区位移)相同,底部节点位移为零,因此,在物质点的应力、应变、速度等信息更新后,需要调整网格的长宽比以适应压缩区范围。当压缩区域变形较大时,需重新划分网格^[19]。

在整个计算过程中,球体周围需要始终保持较密的计算网格,相比于沿整个贯入深度生成细密网格,移动网格可以更有效地保持球体周围的网格离散情况。同时,由于接触节点始终与球体的几何结构相吻合,保持了球体与土体的接触面。移动网格还可以防止球、土材料共享计算单元。此外,在施加面力或位移边界时,移动网格可以确保计算网格与所施加边界的曲面对齐^[21],而不必在物质点和边界节点之间反复映射,既可以保证计算过程中边界条件的精确性,又能减小计算代价。

4 数值模拟结果及讨论

数值模型中,球体参数及模型尺寸见 3.1 节。对于被测土体的应力—应变关系,首先采用线弹性模型,以与 Hertz 撞击接触的理论进行对比,初步验证物质点法模拟结果的有效性。而后,土体采用弹塑性本构模型,以分析不同土体强度下球、土间的冲击接触过程。

4.1 模型验证

采用线弹性模型时,土体的弹性模量分别取 1、5、10、15、20、25、30 MPa,泊松比取 0.33,重度 17.35 kN/m³,以模拟球体与不同模量的弹性土体的冲击接触过程。

在数值模拟结果中,球体中一物质点的加速度、压缩位移曲线如图 4 所示。可见球体在冲击接

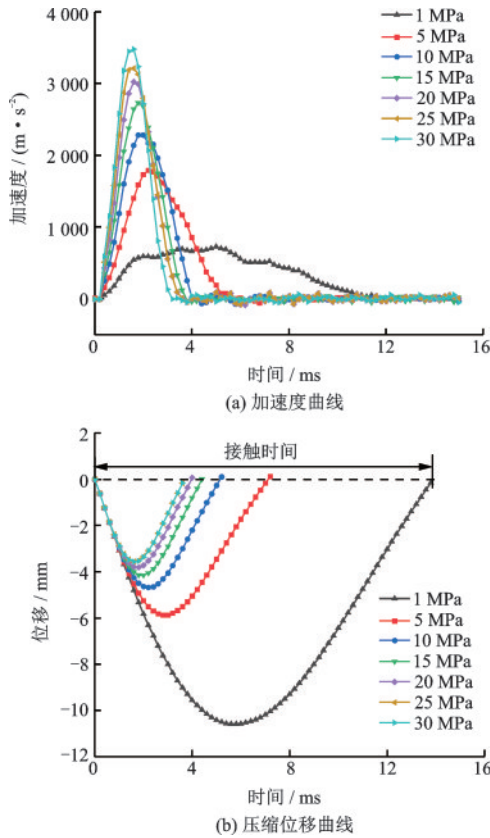


图4 冲击过程中球体的运动曲线

Fig.4 Curves of the sphere's motion during the impact

触土体的过程中,其加速度近似呈正弦曲线,反映出土体弹性模量越大,接触时球体的加速度越大,球、土间作用力越大,接触时间越小,由于在动态计算过程中未施加阻尼,存在一定数值振荡。由图4可见,球体位移曲线也与正弦曲线十分接近,与Hertz接触的理论压缩曲线^[17]相符。

从图4中获取不同弹性模量下球、土间的接触时间和最大压缩位移,与式(1)、(2)中计算的理论曲线进行对比,其结果如图5所示。模拟结果显示,在不同弹性模量下,土体的最大压缩位移,以及球、土间的接触时间均与Hertz接触的理论值保持较好的相符性,其中最大压缩位移较理论值稍小,这可能是由于Hertz静力接触理论未考虑弹性波动的能量造成的。

4.2 弹塑性土体模型

保持其他条件不变,土体采用弹塑性本构方程和Mohr-Coulomb屈服准则,土体黏聚力 c 、内摩擦角 φ 分别取 $c=15\text{ kPa}$ 、 $\varphi=30^\circ$, $c=5\text{ kPa}$ 、 $\varphi=30^\circ$, $c=5\text{ kPa}$ 、 $\varphi=20^\circ$,弹性模量分别取10、30、50 MPa,以模拟不同参数组合下落球与土体的冲击接触

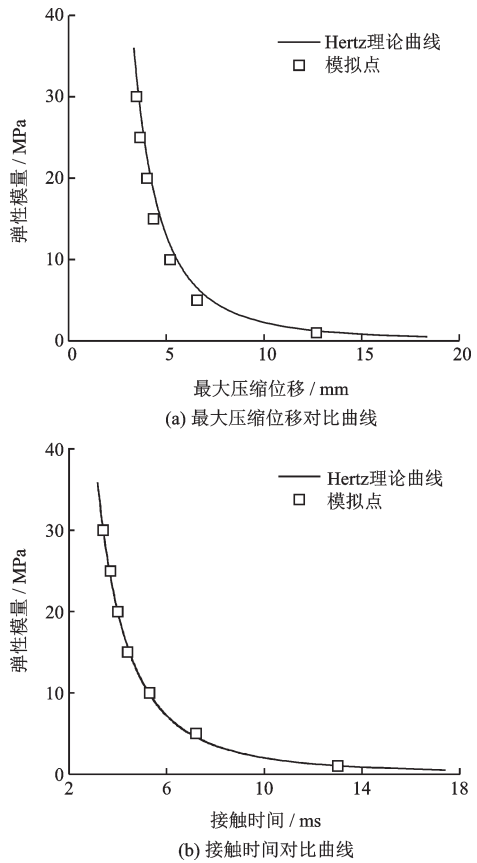


图5 最大压缩位移和接触时间与理论值的对比

Fig.5 Comparison of the maximum compression displacement and contact time with the theoretical value

特性。

不同参数组合下球体中一物质点的加速度、压缩位移曲线如图6所示。冲击荷载作用下土体难免发生塑性变形,因此图6中加速度、位移曲线不再呈典型的正弦型,可分为压缩与回弹阶段描述球体运动特性。在同一强度参数下,弹性模量越大,土体处于压缩阶段时,其压缩接触力越大,最大压缩位移越小;土体处于回弹阶段时,其回弹接触力越小,回弹位移越小。弹性模量越大,荷载作用附近的土体回弹效应更弱,可说明在压缩阶段土体强度发挥更大,塑性变形更加明显,与刘怡林等^[22]的研究结果一致。

通过图4及图6中球体的加速度曲线,可见与弹性土体相比:(1)球体加速度(球、土体间接触力)小得多,且随强度参数的减小,球、土体间的接触力减小,接触时间增加,土体的回弹效应明显减弱;(2)在压缩接触过程中,球体加速度并非随压缩位移的增加而增大,可见在接触力达到最大值后,土体变形主要发生在塑性区。当 $c=15\text{ kPa}$ 、 $\varphi=30^\circ$

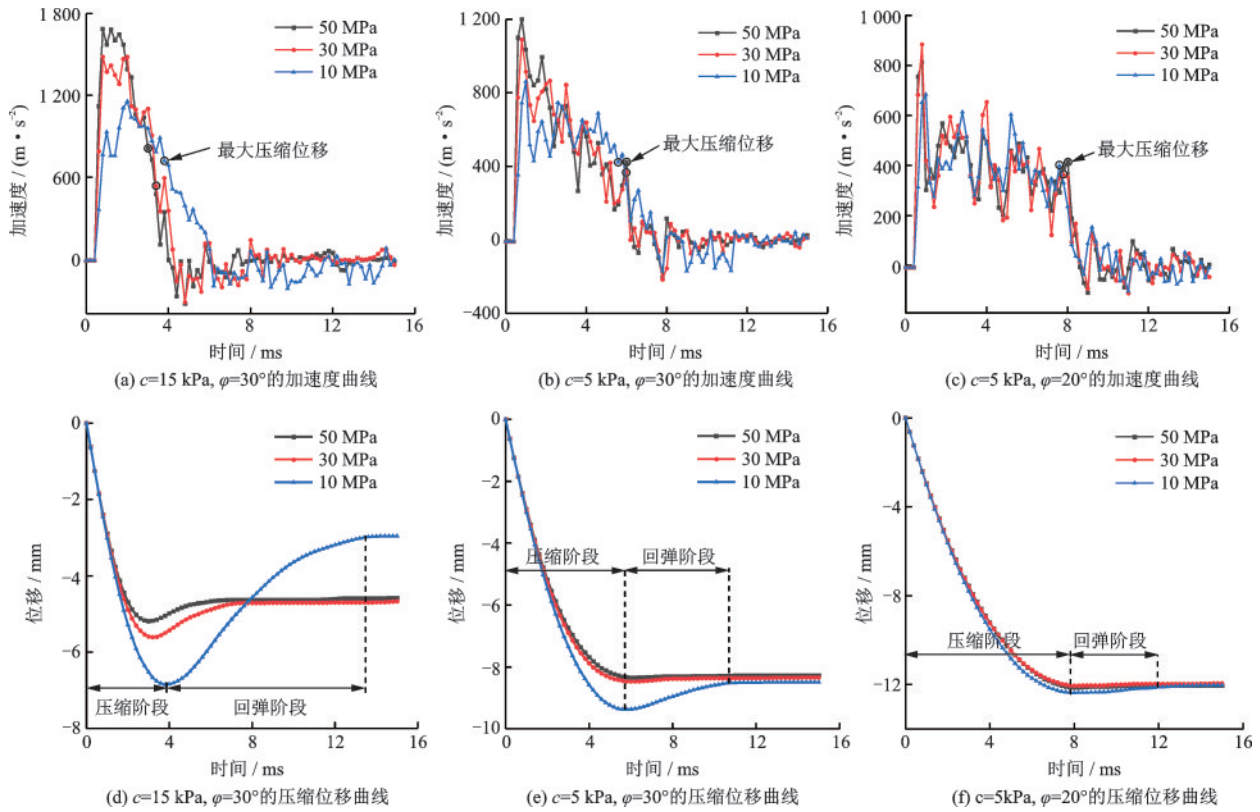


图6 不同强度参数下球体的加速度和位移曲线

Fig.6 Acceleration and displacement of sphere under different strength parameters

时,加速度曲线近似呈正弦型,且不同弹性模量下加速度、压缩位移曲线区分明显,随强度参数减小,不同弹性模量下加速度、压缩位移曲线均趋于一致,这是由于冲击荷载较大、土体强度较低时,接触过程中土体发生了较大的塑性变形。

在不同强度参数下,弹性模量 $E=50\text{ kPa}$ 的土体中(球体下方1倍直径处)一物质点的体应变如图7所示。土体的体应变均先减小后增大,即土体先被压缩而后发生部分回弹,与球体加速度曲线反映

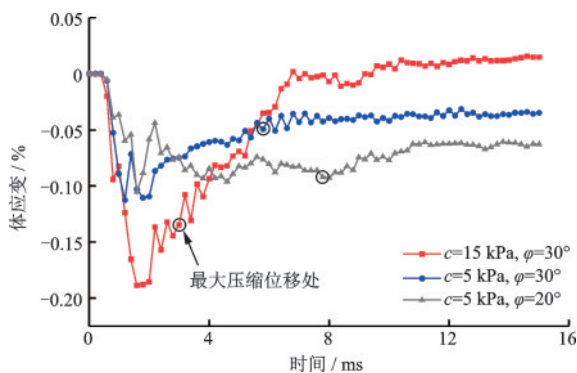


图7 地基土中一物质点的体应变时程曲线

Fig.7 Variation of volumetric strain of a material point in ground soil

一致。 $c=15\text{ kPa}$ 、 $\varphi=30^\circ$ 时,土体达到最大压缩量后,发生较大回弹,最终一倍球体直径处的土体基本完全回弹,甚至出现了略微的隆起变形,说明此时土体以弹性变形为主;而随强度参数减小,土体达到最大压缩量后,回弹量较小,以塑性变形为主。

在相同弹性模量($E=50\text{ MPa}$)下,不同强度地基土在最大压缩位移下的应变分布如图8所示。结合偏应变(广义剪应变)和体应变可见,达到最大压缩位移时,土体塑性区主要集中在球体周围的土体区域,球下锥形区域主要承受竖向冲击荷载,达到抗剪强度而产生塑性变形,表现为压应变;球侧土体受到球体的侧向挤压,呈现出浅层的被动破坏。这与J. Y. Wu等^[4]提出的修正Vesic空腔扩张理论基本相符,但该理论未考虑球体侧面土体的塑性破坏。且土体强度越高,塑性区范围越小,土体可以提供更大的接触力,即球下锥形区域的压应变更明显。

为了更好地与落球技术所测变形模量进行对比,本文建立了图9(a)所示的轴对称数值模型,在圆形荷载板(直径1 m)顶部施加位移荷载以对上述参数土体进行平板载荷试验,得到荷载一位移曲

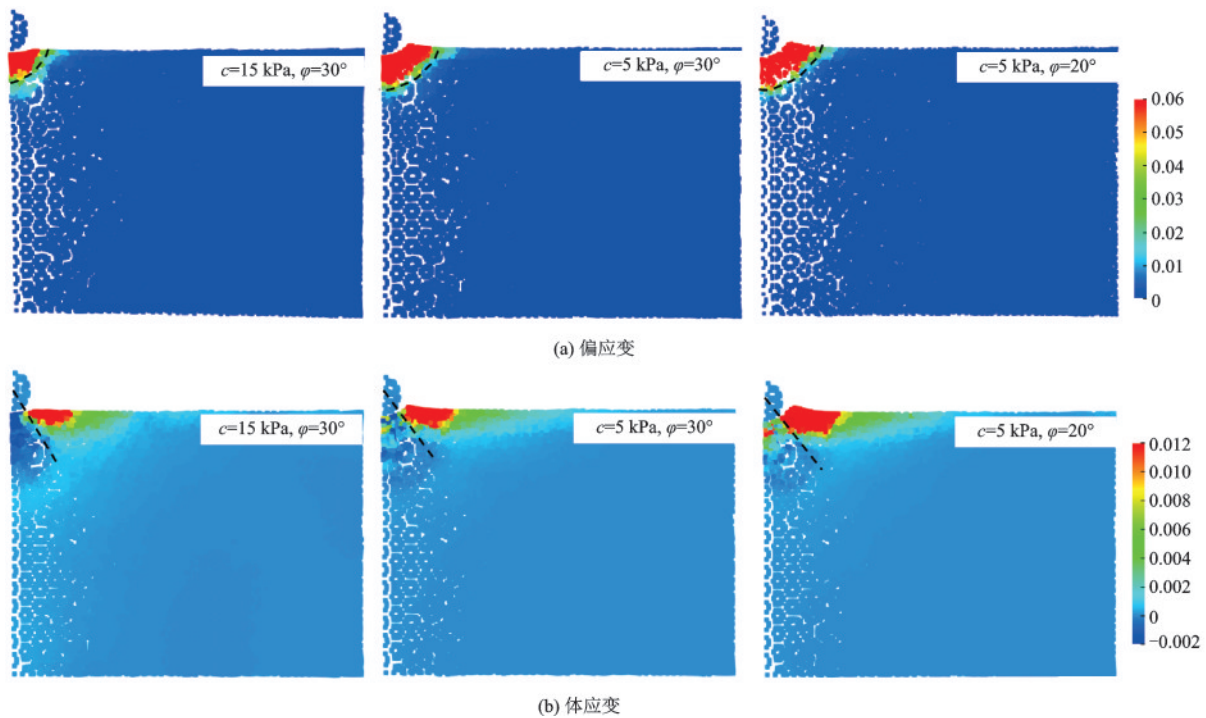


图8 最大压缩位移下地基土的应变分布

Fig.8 Strain distribution of ground soil under the maximum compressive displacement

线,进而算得变形模量。 $c=5\text{ kPa}$ 、 $\varphi=30^\circ$ 时土体的荷载—位移曲线如图9(b)所示。

从图6中获取不同弹性模量下压缩阶段的接触

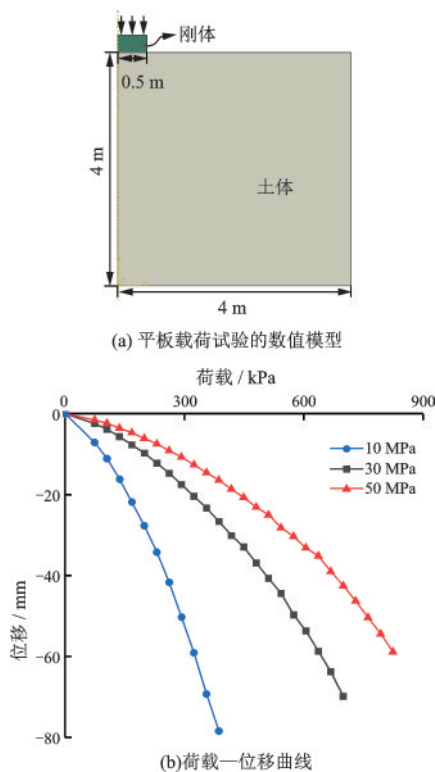


图9 平板载荷试验的数值模型及结果

Fig.9 Numerical model and results of the plate load test

时间,通过式(3)计算出土体的变形模量 E_0 ,与平板载荷试验所得变形模量进行对比,结果见表1。落球技术估算的变形模量比平板载荷试验小很多,且二者均比所赋弹性模量小。土体强度较高时,落球技术可以定性指示变形模量的相对大小,难以定量衡量其大小。可见该技术对于路基土、回填土等强度较高土体的均匀性监测具有一定适用性,但难以定量评价土体的变形模量。

对于强度较低的土体,由于球、土接触过程中会产生较大塑性变形,土体变形模量与弹性模量相关性较差,在同一强度参数下,变形模量计算值趋于一致。

根据计算得到的变形模量和最大压缩位移,给

表1 变形模量的对比

Table 1 The comparison of deformation modulus			
强度参数	弹性模量 /MPa	平板载荷试验	落球检测技术
$c=15\text{ kPa}, \varphi=30^\circ$	50	38.5	21.4
	30	22.8	18.6
	10	8.6	7.1
$c=5\text{ kPa}, \varphi=30^\circ$	50	18.8	1.7
	30	12.8	1.6
	10	5.6	1.7

定模拟中设定的一个强度参数 $c(\varphi)$, 迭代求解式 (4)~(7), 得到另一强度参数 $\varphi(c)$ 和塑性区半径 R_p , 其结果见表 2。计算结果显示, 强度参数计算值均较实际值偏小, 且差距较大。在土体强度和刚度较大时, 估算的强度参数具有一定参考价值。

在估算强度参数时, 需代入变形模量。由表 1 可知, 变形模量的估算同样受到强度参数的影响, 因此, 落球技术难以将变形与强度统一考虑。此外, 修正 Vesic 空腔扩张理论将最大压缩位移处的土体视为处于极限应力状态, 未考虑球体侧面土体的塑性破坏, 对岩土强度参数的估算存在一些局限。但是, 在土体强度参数和变形模量较高时, 估算的强度参数也具有一定参考意义。

表 2 强度参数和塑性区半径的计算值

Table 2 Calculated values of strength parameters and plastic zone radius

强度参数	变形模量 E_0/MPa	给定 φ 值的估算		给定 c 值的估算	
		c/kPa	R_p/m	$\varphi/(\circ)$	R_p/m
$c=15\text{ kPa},$ $\varphi=30^\circ$	21.4	9.2	0.070 5	25	0.066 5
	18.6	6.4	0.075 5	23	0.064 5
	7.1	2.5	0.090 0	20	0.063 5
$c=5\text{ kPa},$ $\varphi=30^\circ$	1.7	2.7	0.065 5	7	0.057 0
	1.6	2.9	0.065 5	7	0.057 5
	1.7	2.9	0.070 0	8	0.060 5

5 结 论

利用三维物质点法, 对落球检测过程进行数值模拟, 得到以下结论:

(1) 采用移动网格进行物质点模拟, 使得球体周围始终保持精细网格, 可减小计算代价, 提高数值精度。

(2) 模拟结果显示, 土体处于线弹性状态时, 球体加速度、位移曲线基本呈正弦型, 最大压缩位移、接触时间均与 Hertz 理论吻合较好。对于路基土、回填土等强度和模量较高的土体, 落球检测技术推算的变形模量和强度参数具有一定的参考意义。

(3) 物质点法的模拟结果显示, 当落球引起岩土体发生较大塑性变形时, 基于 Hertz 理论计算的变形模量较小, 且在同一强度参数下趋于一致; 基于修正 Vesic 空腔扩张理论估算的强度参数与实际值相差较大。

(4) 通过对比修正 Vesic 空腔扩张理论和模拟结果, 发现该理论存在一些局限, 比如达到最大接触力后土体以塑性变形为主, 而该理论将最大压缩位移处视为土体极限应力状态。因此, 将该理论应用于落球检测技术仍有一些不足, 有待于完善。

参 考 文 献:

- [1] 何静. 基于落球式测试法的宕渣路基施工质量检测技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
He J. Construction quality inspection technology analysis of slag embankment based on falling sphere test[D]. Xian: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [2] 郭晔, 吴佳晔, 黄新. 基于 Hertz 接触理论的混凝土表层性能的检测方法[J]. 混凝土, 2008, 219: 49-51.
Guo Y, Wu J Y, Huang X. Concrete surface performance test method based on Hertz contact theory[J]. Concrete, 2008, 219: 49-51. (in Chinese)
- [3] Wu J Y, He S, Kitamoto Y, et al. Impact based testing technique for measuring moduli of geomaterials [C]//Proceedings of GeoHunan International Conference, Hunan, ASCE: [s.n.], 2011: 132-140.
- [4] Wu J Y, Kitamoto Y, Yoshita T, et al. Impact based testing technique for measuring strength of geomaterials [C]//Proceedings of GeoHunan International Conference, Hunan, ASCE: [s.n.], 2011: 141-149.
- [5] 周谷宇, 朱鸿鹄, 朱宝, 等. 基于光纤光栅的土体含水率快速测定试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 34-41.
Zhou G Y, Zhu H H, Zhu B, et al. Experimental study on rapid determination of soil moisture content based on fiber Bragg grating technique[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 34-41. (in Chinese)
- [6] Harlow F H. The particle-in-cell computing method for fluid dynamics[J]. Methods in Computational Physics, 1964, 3: 319-343.
- [7] Sulsky D, Chen Z, Schreyer H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 118(1): 179-196.
- [8] Sulsky D, Zhou S J, Schreyer H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics[J]. Computer Physics Communications, 1995, 87(1-2): 236-252.
- [9] Coetzee C J, Vermeer P A, Basson A H. The modelling of anchors using the material point method[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 29(9): 879-895.

- [10] Phuong N T V, Van Tol A F, Elkadi A S K, et al. Numerical investigation of pile installation effects in sand using material point method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 73:58-71.
- [11] Fern E J. Modelling tunnel-induced deformations with the material point method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111:202-208.
- [12] 史卜涛, 张云, 张巍. 边坡稳定性分析的物质点强度折减法[J]. *岩土工程学报*, 2015, 38(9): 1678-1684.
Shi B T, Zhang Y, Zhang W. Strength reduction material point method for slope stability[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 38(9): 1678-1684. (in Chinese)
- [13] 孙玉进, 宋二祥. “12·20”深圳滑坡动态模拟[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(3): 441-448.
Sun Y J, Song E X. Dynamic simulation of “12·20” Shenzhen landslide[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(3): 441-448. (in Chinese)
- [14] 张巍, 史卜涛, 施斌, 等. 土质滑坡运动全过程物质点法模拟及其应用[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(3): 815-823.
Zhang W, Shi B T, Shi B, et al. Material point method of run-out process simulation of soil landslides and application[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(3): 815-823. (in Chinese)
- [15] 张芮瑜, 孙玉进, 宋二祥. 强夯的物质点法模拟及其能量转化规律分析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1206-1216.
Zhang R Y, Sun Y J, Song E X. Simulation of dynamic compaction using material point method and analysis of its energy conversion law[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1206-1216. (in Chinese)
- [16] 黄鹏. 金属及岩土冲击动力学问题的物质点法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
Huang P. Material point method for metal and soil impact dynamics problems[D]. Beijing: Tsinghua university, 2010. (in Chinese)
- [17] Johnson K L. 接触力学[M]. 徐秉业, 译. 北京: 高等教育出版社, 1992: 399-401.
Johnson K L. *Contact Mechanics* [M]. Translated by Xu B Y. Beijing: Higher Education Press, 1992: 399-401. (in Chinese)
- [18] Vesic A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, 1972, 98(3): 265-290.
- [19] Fern J, Rohe A, Soga K, et al. The material point method for geotechnical engineering: a practical guide[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019: 27-34.
- [20] Francesca C, Alexander C, Gaia D C, et al. Anura3D MPM software tutorial manual[M]. Delft: Anura3D MPM Research Community, 2019.
- [21] Beuth L. Formulation and application of a quasi-static material point method [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2012.
- [22] 刘怡林, 黄茂松. 公路路基地基承载特性及破坏模式[J]. *地下空间与工程学报*, 2010, 6(1): 88-93.
Liu Y L, Huang M S. Bearing capacity behaviors and failure modes of foundation under highway subgrade[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2010, 6(1): 88-93. (in Chinese)

(本文责编:赵霞)