

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.017

# 结核质量分数及粒径对钙质结核土动弹性模量的影响

吴道祥, 林飞, 吴杰, 李文修

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**钙质结核土具有独特的物质组成和结构,其土动力学方面的研究较少。文章开展了一系列含有不同粒径和质量分数结核的钙质结核土试样的动三轴试验,研究结核的存在对钙质结核土动弹性模量的影响。试验结果表明:随着循环次数的增加,土体动弹性模量先迅速降低,而后降低幅度随动应变的增大而逐渐减小;随着结核粒径或质量分数的增大,土体动弹性模量随之增大,土体抵抗动荷载作用变形的能力越强。采用颗粒流 PFC2D 对钙质结核土的动三轴试验进行数值模拟,模拟结果表明在循环荷载作用下,结核明显阻滞了其周围细粒的变形,结核及其周围产生明显应力集中,形成土体“骨架”,从微观上解释了结核的存在对土体动弹性模量的影响和作用。该研究成果为钙质结核土动力学研究奠定了基础,对其他类似粗粒-细粒结构土体的动力学研究具有重要的参考价值。

**关键词:**钙质结核土;循环荷载;动弹性模量;滞回曲线;颗粒流

**中图分类号:** TU441.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-5060(2025)07-0969-06

## Effect of mass fraction and particle size of nodules on dynamic elastic modulus of cohesive soil containing calcareous nodules

WU Daoxiang, LIN Fei, WU Jie, LI Wenxiu

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Cohesive soil containing calcareous nodules has unique material composition and structure, and there has been relatively little research on its soil dynamics. In this paper, a series of dynamic triaxial tests of cohesive soil containing calcareous nodules with different particle sizes and mass fractions of nodules were carried out to study the influence of the presence of nodules on the dynamic elastic modulus of cohesive soil containing calcareous nodules. The test results show that with the increase of the number of cycles, the dynamic elastic modulus of the soil decreases rapidly at first, and then the reduction amplitude gradually decreases with the increase of dynamic strain. With the increase of particle size or mass fraction of nodules, the dynamic elastic modulus of the soil increases, and the ability of the soil to resist deformation under dynamic loads becomes stronger. Particle flow code (PFC2D) was used to numerically simulate the dynamic triaxial test of cohesive soil containing calcareous nodules. The simulation results indicate that under cyclic loading, the nodules significantly hinder the displacement of fine particles around them, and significant stress concentration is generated around the nodules, forming a “skeleton” of the soil. From a microscopic perspective, the influence and role of the presence of nodules on the dynamic elastic modulus of the soil are explained. The research results have laid the foundation for the dynamic research of cohesive soil containing calcareous nodules, and have important reference value for the dynamic research of other similar structured soils.

**Key words:** cohesive soil containing calcareous nodules; cyclic loading; dynamic elastic modulus; hysteresis curve; particle flow code

**收稿日期:** 2023-04-07; **修回日期:** 2023-05-26

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52372302); 合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2019JSFW0733)

**作者简介:** 吴道祥(1975—),男,湖北洪湖人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

在我国淮北平原,很多地区的黏性土中大量的  $\text{CaCO}_3$  因淋溶积淀而集中,形成了不同类型、结构各异、形态不一的钙质结核。结核的出现使得黏性土的不均性和各向异性显著增强,结构构造和工程性质更为复杂多变,与一般黏性土差异明显,是一种区域性特殊土,被称为钙质结核土<sup>[1]</sup>。对各类各区域性土的工程性质开展深入系统研究是岩土工程发展的方向<sup>[2]</sup>。作为一种区域性特殊土,钙质结核土进入岩土工程研究人员的视野,并对其岩土工程性质进行多方面的研究仅有近 15 年的历史,而在循环荷载作用下动力参数的研究较少。

文献[1]详细研究安徽淮北平原钙质结核土的分布规律、成因年代及土中钙质结核的类型等;文献[3]进行大型直剪试验,测定钙质结核土抗剪强度指标,讨论含水率、结核粒径等对土体强度的影响;文献[4]对钙质结核土细观结构进行定量分析,认为钙质结核的分布具有良好的分形特点和统计分析自相关特性;文献[5]制作大尺寸钙质结核土重塑样,进行压缩-电阻率测试,研究土体含水率及细观结构等对土体基本属性电阻率的影响;文献[6-8]进行钙质结核土的三轴压缩试验及颗粒流数值模拟,探讨钙质结核土的细观结构要素,研究结核的粒径、分布等对土体强度和变形性能的影响;文献[9]研究钙质结核土粒径分布及粒径的分形特征;文献[10]对钙质结核土三轴实验进行颗粒流数值模拟,分析结核对土体强度的影响;文献[11]提出钙质结核土的缩尺方法,分析不同条件下钙质结核土大型压缩试验及缩尺试验下的压缩性。已有的研究成果加深了人们对钙质结核土的认识,扩展了特殊土研究的领域,但在钙质结核土土动力学方面的研究较少。

各类交通工具在运行时都会因振动形成循环荷载,与静荷载作用不同,土体在长期、反复的循环荷载作用下,土体结构会逐渐发生变化,稳定性降低,沉降增大,从而产生各类工程问题。土的动弹性模量体现了土体在动荷载影响下抵抗变形的能力,是研究土体动力变形特性以及分析评价土体稳定性的重要参数。动弹性模量越大,土体在动力荷载作用下抵抗变形的能力就越强。土体动弹模量的研究是土动力学的重要内容之一。文献[12]研究发现,影响土体动模量的因素很多,包括土体结构、矿物成分、土粒形状、土粒大小、孔隙比、有效平均主应力、有效周围压力、循环次数等;文献[13-18]分

别对黏土、黄土、软土、砂土、膨胀土、粉质黏土等的动力学特性进行研究,讨论不同因素对各种土类的动弹性模量等土动力学参数的影响。钙质结核土因富含钙质结核,与一般黏性土存在物质组分和结构构造上的明显差别,结核对土体动弹性模量的影响不可忽略。

钙质结核土在我国分布较广,淮北平原是我国最大、最典型的钙质结核土分布区。由于钙质结核土往往埋藏较浅,其分布区内的铁路、公路及城市地铁等工程建设往往都会涉及钙质结核土<sup>[19-22]</sup>。本文通过制备具有不同质量分数和粒径结核的钙质结核土重塑样进行动三轴试验,测定试样的动弹性模量,分析和探讨钙质结核土在循环振动压缩条件下的动力特性,研究钙质结核的质量分数和粒径对土体动弹性模量的影响,研究成果具有重要的理论意义和实践价值。此外,研究结果对同样具备粗粒-细粒结构体系的土石混合体等类似土体的动力学特性研究,以及土中的粗粒组分对土体动力学特性的影响等研究具有重要的参考价值。

## 1 试样制备和试验方案

### 1.1 试样制备

试验土样取自安徽蒙城某工地,取土深度为 2~3 m,土样中结核为完形钙质结核,埋藏深度较浅,发育程度一般,粒径为 1~5 cm,赋存于粉质黏土层中。土体基本物理性质指标见表 1 所列。试样直径为 3.91 cm,高度为 8 cm,制备时分 5 层击实,每层进行刮毛处理。相同试验参数的试样制作 3 个平行样,确保数据的可靠性。将制好的试样装入保鲜袋中,置入恒温恒湿养护箱,养护 4~5 d 后可进行试验。

表 1 钙质结核土的基本物理性质指标

参数	数值
天然干密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.66
天然密度/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1.99
天然含水率/%	21.00
液限/%	30.30
塑限/%	15.10

### 1.2 试验方案

本文试验采用固结不排水试验,实验仪器为 SDT-20 型动三轴试验机,通过改变伺服阀控制油源,实现围压和轴向压力的控制。钙质结核质量分数分别为 5%、10%、15%、20%,钙质结核粒径分别

取1.0、1.5、2.0 cm,围压取100 kPa,固结比取1.0,振动频率取1 Hz,加载波形由伺服控制系统形成,选用正弦波形,分10级加载,每级动应力循环加载10次。施加动荷载前,先进行排水固结,之后在不排水的条件下增加轴向动压力。各参数条件进行3组平行试验,得出结果取其平均值,当轴向动应变达到5%时视为土体达到变形破坏。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 滞回曲线

循环加载状态下,将结核不同质量分数 $\omega$ 和

不同粒径 $d$ 的钙质结核土试样动应力-应变曲线进行分解,依次取第3、4、5、6级的第5次循环的滞回曲线进行分析,结果如图1所示。

由图1可知,在不同试验条件下,滞回曲线总体上表现出同样的规律。随着循环次数的增加、轴向应力的增大,各试样的滞回圈逐渐拉长、变宽,并逐渐向应变轴方向偏移和倾斜,表明随着循环次数的增加土样累积的塑性应变逐渐增大,土体不可逆的结构损伤或破坏在逐渐累积,试样抵抗应力变形的能力逐渐减弱,试样动弹性模量逐渐减小。

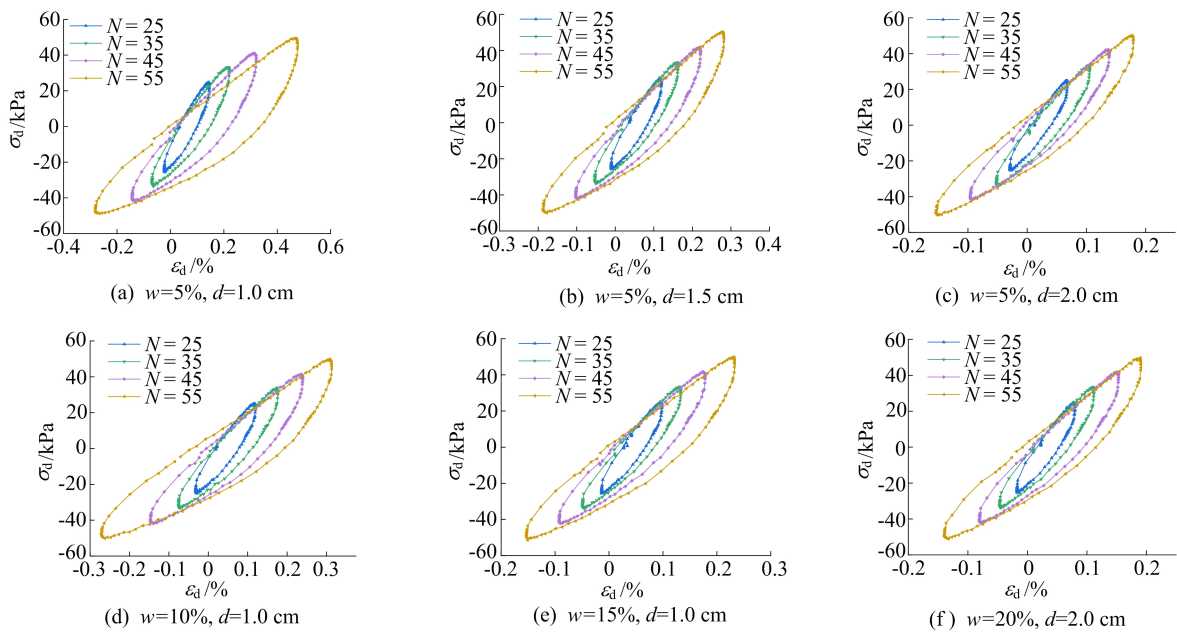


图1 钙质结核土滞回曲线

由图1a~图1c可知,当结核质量分数不变、粒径由1.0 cm增至1.5 cm和2.0 cm、循环次数 $N=55$ 时,土样最大应变由0.46%降低至0.17%。由图1d~图1f可知,当结核粒径不变、结核质量分数由10%增至15%和20%、循环次数 $N=55$ 时,土样最大应变由0.30%降低至0.18%。说明循环次数增加时,随着结核粒径或质量分数的增大,滞回圈向应变轴方向偏移的幅度逐渐减小,滞回圈明显变窄而互相靠拢,表明结核的粒径和质量分数的增大均会使得钙质结核土的动弹性模量随循环次数增大而衰减的幅度明显减弱,有效增强了动应力作用下试样抵抗变形的能力。

### 2.2 钙质结核粒径对动弹性模量的影响

连接动应力-应变滞回曲线最高点和最低点,该直线斜率为该振次的动弹性模量 $E_d$ ,计算公式为:

$$E_d = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{d,\max} - \epsilon_{d,\min}} \quad (1)$$

其中: $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 分别为滞回圈中的最大、最小动应力; $\epsilon_{d,\max}$ 、 $\epsilon_{d,\min}$ 分别为滞回圈中最大、最小动应力对应的最大、最小动应变。当轴向动应变达到5%,视为试样达到破坏应变,动应力达到最大值。

为研究钙质结核对试样动弹性模量的影响,选择每一级动应力下第5次循环条件下动弹性模量值与相对应的应变作为该级荷载动弹性模量和动应变, $E_d$ 与 $\epsilon_d$ 关系曲线如图2所示。

由图2可知,当试样中钙质结核的质量分数不同时,随着粒径的增大, $E_d$ - $\epsilon_d$ 曲线逐渐上移。换言之,动应变一定时,钙质结核粒径越大,试样的动弹性模量越大。当结核质量分数 $\omega=5\%$ 、动应变 $\epsilon_d=0.50\%$ 时,随着粒径的增大,试样的动弹性模量 $E_d$ 分别为18.739、21.149、23.577 MPa,

依次增长了 12.86%、11.48%。而当结核质量分数  $w=15\%$ 、动应变  $\epsilon_d=0.50\%$  时,随着粒径的增大,试样的动弹性模量  $E_d$  分别为 33.591、

36.171、39.839 MPa,其大小依次增长了 7.68%、10.14%。试验结果显示结核粒径对土体动弹性模量具有显著影响。

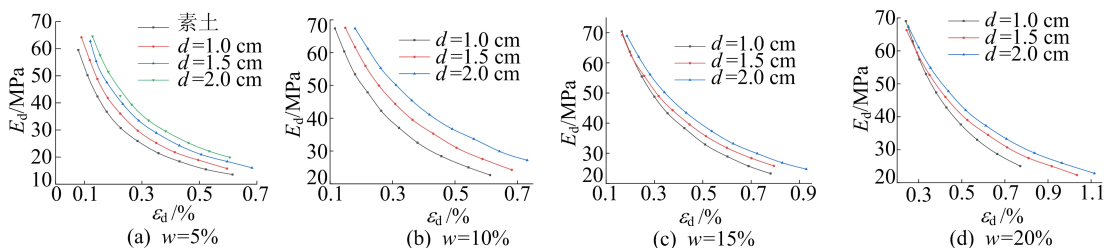


图 2 不同粒径条件下钙质结核土  $E_d-\epsilon_d$  变化规律

2.3 钙质结核质量分数对动弹性模量的影响

钙质结核粒径相等、质量分数不同的条件下,钙质结核土动弹性模量  $E_d$  随动应变  $\epsilon_d$  的变化曲线如图 3 所示。

由图 3 可知,当试样中钙质结核的粒径不同时,随着结核质量分数增大, $E_d-\epsilon_d$  曲线逐渐上移。动应变一定时,试样中钙质结核质量分数越大,试样的动弹性模量越大。当结核粒径  $d=1.0$  cm、动应变  $\epsilon_d=0.5\%$  时,随着结核质量分数增大,试样的

动弹性模量  $E_d$  分别为 19.031、26.535、33.543、37.240 MPa,依次增大了 39.43%、26.41%、11.02%。当结核粒径  $d=2$  cm、动应变  $\epsilon_d=0.5\%$  时,随着结核质量分数增大,试样动弹性模量  $E_d$  分别为 23.404、35.900、39.431、43.523 MPa,依次增大了 53.39%、9.84%、10.38%。由此可见,土体中钙质结核的质量分数对其动弹性模量具有显著影响,且结核质量分数的影响随着质量分数的增大而减弱。

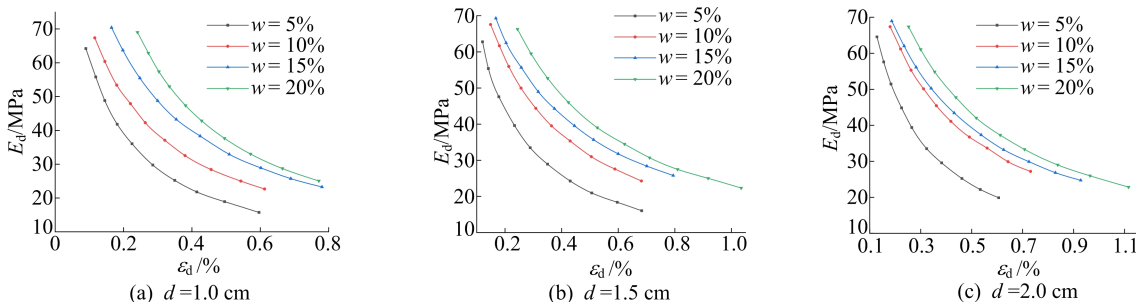


图 3 不同质量分数条件下钙质结核土  $E_d-\epsilon_d$  变化规律

2.4 试验结果分析

本文制作含有不同粒径和质量分数的钙质结核的试样,进行动三轴试验。当动应变  $\epsilon_d=0.5\%$  时,钙质结核土动弹性模量随结核的粒径和质量分数的变化如图 4 所示。

从图 4 可以看出,结核的粒径和质量分数对土体动弹性模量具有显著影响。当结核的粒径越大、质量分数越高时,土体的动弹性模量就越大,土体抵抗变形的能力就越强。当试样中结核粒径  $d=2.0$  cm、结核质量分数  $w=20\%$  时,其动弹性模量  $E_d$  为 43.523 MPa;试样中结核粒径  $d=1.0$  cm、结核质量分数  $w=5\%$  时,其动弹性模量  $E_d$  为 18.739 MPa,约为前者的 40%。

另外,相比于结核粒径,土体动弹性模量随结核质量分数的增大而增长的速率明显更高,表明

结核的质量分数对土体动弹性模量的影响程度明显高于结核粒径的影响。

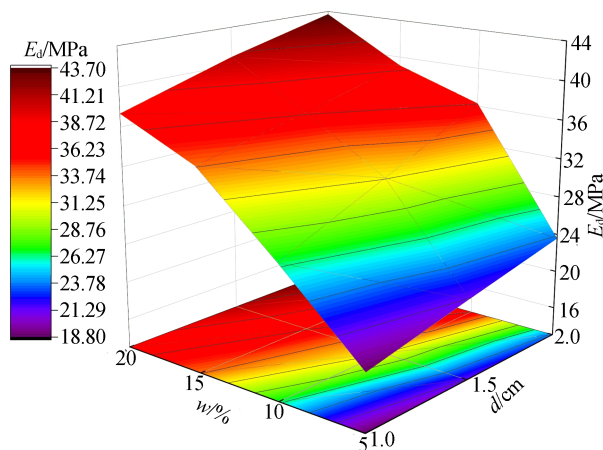


图 4 钙质结核土粒径、质量分数与动弹性模量的关系

说明在动荷载作用下,结核的应力集中等效应力仅限于结核附近较小范围,随着其质量分数的增大,结核扩散到土体中各部分,结核的“骨架”作用也随之扩散于土体各个部分,从而影响了土体整体的工程特性。

### 3 动三轴试验颗粒流模拟

文献[6-10]对钙质结核土的静三轴试验以及颗粒流模拟研究表明,在静力荷载作用下,当土体中钙质结核的粒径和质量分数增大时,钙质结核土的强度提高,变形减小。同时,PFC颗粒流法对钙质结核土的静三轴试验的数值模拟结果显示,在静力荷载作用下,土体中的钙质结核及其周围存在明显的应力集中,构成了土体的“骨架”,能提高和改善土体强度和变形性能。

本文采用PFC颗粒流法对钙质结核土的动三轴试验进行数值模拟,钙质结核土动三轴试验PFC2D模拟矢量图如图5所示。图5a中黑色圆圈为钙质结核,箭头的长短表示颗粒的速度大小;图5b中黑色圆圈为钙质结核,线条的粗细表示颗粒间接触力的大小。模拟结果表明,在循环荷载

作用下,钙质结核土中的结核明显阻滞了其周围细粒的变位(图5a),而结核及其周围出现明显的应力集中现象(图5b),结核及其周围的接触力明显高于细粒部分,结核分担了相对于细粒部分土体更多的应力,在一定范围内重塑了土体应力场的分布,起到骨架作用。

PFC颗粒流法对钙质结核土静三轴试验和动三轴试验的模拟结果从根本上解释了静力荷载和循环荷载作用下结核对土体强度和变形性能的影响机制。随着结核粒径的增大,结核对其周围细粒变位的阻滞作用及其影响范围均会有所增强和扩大,结核分担的应力也会更大,其“骨架”作用也就更为突出。而当结核质量分数提高时,结核在土体中的分布更广,结核的“骨架”作用也就更为显著。

综上所述可知,在静力荷载和循环荷载作用下,土体中钙质结核均会产生应力集中效应,形成土体“骨架”,有效提高土体强度,改善土体变形性能,验证了本文动三轴试验的结论:随着钙质结核质量分数和粒径的增大,土体动弹性模量随之增大。

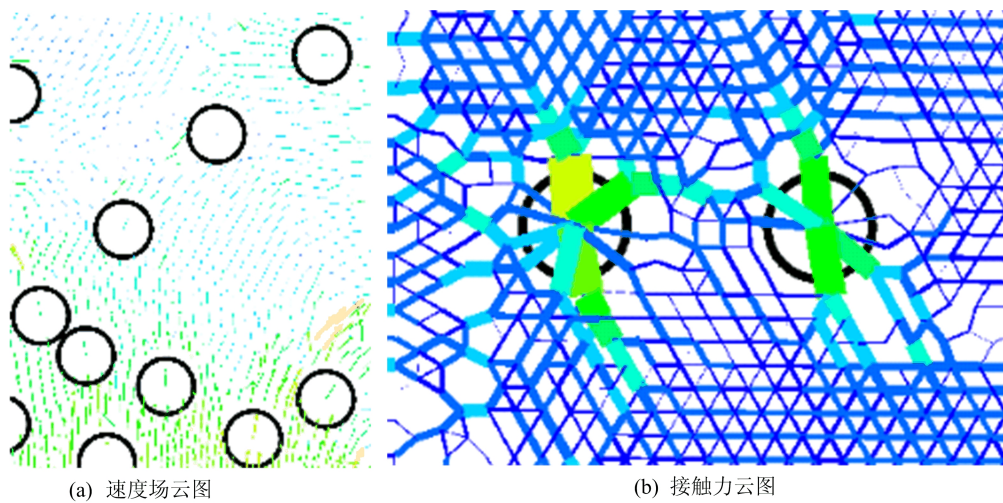


图5 钙质结核土动三轴试验PFC2D模拟矢量图

## 4 结 论

本文通过动三轴试验和颗粒流PFC2D数值模拟研究了钙质结核土动弹性模量随钙质结核粒径及质量分数的变化规律,得出以下结论:

1) 钙质结核土动三轴试验的滞回曲线随循环次数的增加而逐渐向应变轴增大的方向偏移和倾斜,表明其结构损失或破坏在累积而抗变形能力减弱。

2) 随着结核粒径或质量分数的增大,钙质结核土动三轴试验的滞回曲线逐渐靠拢,各滞回圈的最大应变逐渐减小,动弹性模量-动应变曲线渐渐地上移,即钙质结核粒径越大、质量分数越多,试样抵抗变形的能力越强,土体动弹性模量越大。

3) 钙质结核土的动三轴PFC2D数值模拟结果表明,循环荷载作用下,结核阻滞了周围细粒的变位,产生了应力集中效应,形成了土体的“骨架”,会加强土体强度和刚度。

## [参 考 文 献]

- [1] 吴道祥,曹亚娟,钟轩民,等. 安徽淮北平原钙质结核土分布及成因年代研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊 2): 434-439.
- [2] 龚晓南. 21 世纪岩土工程发展展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 238-242.
- [3] 蓝天鹏,吴道祥,杨远杰,等. 钙质结核土及其大型直剪试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(2): 257-261.
- [4] 季斌,吴道祥,王国强,等. 钙质结核土细观结构定量分析研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(5): 181-182, 211.
- [5] 华仁兵. 钙质结核土的电阻率试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [6] 胡雪婷. 钙质结核土细观结构要素与抗剪强度关系的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [7] 沈启鹏. 钙质结核土三轴试验的颗粒流模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [8] 巴墨浓. 钙质结核对土体抗剪强度影响的试验研究及离散元模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [9] 王小龙,任亚群,葛海明,等. 钙质结核土分形特性及表现特征研究[J]. 电力勘测设计, 2018(增刊 1): 104-108.
- [10] 廖君,任亚群,王小龙. 基于颗粒流法的钙质结核土三轴试验细观模拟研究[J]. 中国水运, 2019, 19(3): 246-248.
- [11] 梁传扬,吴跃东,吴回国,等. 钙质结核土缩尺试验压缩系数修正方法研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(2): 207-213.
- [12] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear modulus and damping in soil: measurement and parameter effects[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1972, 98(6): 603-624.
- [13] DARENDELI M B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves [D]. Austin: University of Texas at Austin, 2001.
- [14] 李又云,谢永利,刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037-1046.
- [15] 徐毅青,唐益群,任兴伟,等. 地铁振动荷载作用下隧道周围加固软黏土动弹性模量试验[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 250-255, 269.
- [16] 邱成春,张孟喜. 水平-竖向加筋饱和砂土动弹性模量试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1667-1672, 1702.
- [17] 庄心善,赵汉文,王俊翔,等. 合肥膨胀土动弹性模量与阻尼比试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 759-766.
- [18] 吴豪,邓全胜,张国栋,等. 振动频率对重塑粉质黏土动力响应特性的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 41-44.
- [19] 戴张俊,余飞,陈善雄. 淮北平原典型地基土动态变形模量特征及与承载力相关关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 59(增刊 1): 2723-2729.
- [20] 王少强,余飞,陈善雄,等. 淮北平原新近沉积层静探值域特征与承载力相关关系研究[J]. 路基工程, 2015(4): 49-54.
- [21] 赵权威. 盾构下穿京广线郑州站的地表沉降预计及控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [22] 宋豪. 徐州市主城区含砂姜结核粘土特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.

(责任编辑 吴 亮)

## (上接第 877 页)

- [15] CHENG X, CAI J, XU J, et al. High-performance strain sensors based on Au/graphene composite films with hierarchical cracks for wide linear-range motion monitoring [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2022, 14(34): 39230-39239.
- [16] ALGHAMDI A A, MRAIR Y M, ALHARTHI F A, et al. Catalytic performance of SBA-15-supported poly (Styrenesulfonic Acid) in the esterification of acetic acid with n-Heptanol[J]. Applied Sciences, 2020, 10(17): 5835-5848.
- [17] TAO Y, XU Q, LI N, et al. Synthesis and photoluminescent property of star polymers with carbzole pendent and a zinc porphyrin core by ATRP [J]. Polymer, 2011, 52(19): 4261-4267.
- [18] 韩晓东,赵志伟,李雪华,等. 一种氧化还原石墨烯的稳定水溶液分散体的合成方法[J]. 化工学报, 2016, 67(增刊 1): 396-401.
- [19] ZHANG P, CHEN Y, LI Y, et al. Flexible piezoresistive sensor with the microarray structure based on Self-Assembly of multi-walled carbon nanotubes [J]. Sensors, 2019, 19(22): 4985-5002.
- [20] YU H, LIAN Y, SUN T, et al. Two-sided topological architecture on a monolithic flexible substrate for ultrasensitive strain sensors [J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2019, 11(46): 43543-43552.
- [21] YANG Y, TAO L, PANG Y, et al. An ultrasensitive strain sensor with a wide strain range based on graphene armour scales [J]. Nanoscale, 2018, 10: 11524-11530.
- [22] SHEN Y, YANG W, HU F, et al. Ultrasensitive wearable strain sensor for promising application in cardiac rehabilitation [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2023, 6(1): 21-32.
- [23] 张之昊,李浩然,张思琦,等. 基于硅模具制作的纳米裂纹及应变传感器[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(4): 337-341.
- [24] 刘彩霞,卢柏声,李帅,等. 基于纳米银颗粒-聚多巴胺-碳纳米管导电材料的三明治型柔性应变传感器[J]. 复合材料学报, 2022, 39(12): 5835-5845.

(责任编辑 胡亚敏)