

陕西榆林毛乌素沙漠南缘风积沙的湿陷规律及其影响因素

张 曦, 骆建文, 潘俊义, 刘 斌, 杨 楠

Collapse characteristics and influencing factors of wind-blown sands in the southern margin of Mu Us Desert, Yulin, Shaanxi Province

ZHANG Xi, LUO Jianwen, PAN Junyi, LIU Bin, and YANG Nan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202307023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

原状黄土土-水特征曲线与湿陷性的相关性

Correlation between soil-water characteristic curve and collapsibility in undisturbed loess

陈家乐, 倪万魁, 王海曼, 荣誉 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 107-114

黄土湿陷系数影响因素的相关性分析

$\${suggestArticle.titleEn}$

朱凤基, 南静静, 魏颖琪, 白兰 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(2): 128-133

基于分形理论的浙江省地质灾害分布特征与影响因素分析

Analysis of the distribution characteristics and influencing factors of geological hazards in Zhejiang Province based on fractal theory

戴梦兰, 陈志波, 施国栋 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 63-69

基于LBM-DEM细观数值模拟的水力诱导覆盖型岩溶地面塌陷发育过程分析

Analysis of the formation process of the covered karst ground collapse induced by groundwater changes based on the coupled LBM-DEM numerical simulation at micro scale

陶小虎, 叶明, 龚建师, 王赫生, 胡晓雨 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 124-131

炭质灰岩地区抽水致塌控制因素和影响因素

Controlling and influencing factors of the karst collapse caused by withdrawing of groundwater in carbonaceous limestone area: A case study of Xing'an County, Guangxi Province

唐灵明, 陈学军, 黄翔, 毕鹏雁, 张晓宸 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 65-72

四川美姑拉马阿觉滑坡复活特征与影响因素分析

Analysis of reactivated characteristics and influencing factors of the Lamajue landslide in Meigu County of Sichuan Province

王伟, 王卫, 戴雄辉 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 9-17



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202307023

张曦, 骆建文, 潘俊义, 等. 陕西榆林毛乌素沙漠南缘风积沙的湿陷规律及其影响因素[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 75-84.

ZHANG Xi, LUO Jianwen, PAN Junyi, et al. Collapse characteristics and influencing factors of wind-blown sands in the southern margin of Mu Us Desert, Yulin, Shaanxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 75-84.

陕西榆林毛乌素沙漠南缘风积沙的湿陷规律 及其影响因素

张曦¹, 骆建文¹, 潘俊义¹, 刘斌¹, 杨楠²

(1. 长庆工程设计有限公司, 陕西西安 710021; 2. 长安大学地质工程与测绘学院,
陕西西安 710054)

摘要: 随着中国干旱、半干旱地区的开发与发展, 湿陷性沙土对工程建设的危害日益显著。为探明沙土的湿陷规律及其影响因素, 文章以毛乌素沙漠南缘风积沙土为研究对象, 首先, 通过控制单因素室内压缩试验, 研究不同工况下风积沙的湿陷规律; 其次, 采用 PFC^{3D}(三维颗粒流软件)对风积沙土室内压缩试验进行数值模拟, 探究不同孔隙率、不同颗粒组成对沙土湿陷性的影响。研究结果表明: 沙土湿陷系数随压力呈先升后降的变化趋势, 压力为 150 kPa 时取得湿陷系数最大值; 随着干密度或含水率的增大, 沙土湿陷系数减小。相较于含水率, 干密度对沙土湿陷性的影响更大; 风积沙土的湿陷系数与孔隙率之间呈正相关关系, 毛乌素沙漠南缘风积沙土的湿陷起始孔隙率为 0.425; 当 0.075 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm 两粒组颗粒含量之比为 0.35 : 0.65 时, 沙土湿陷性最大。研究结果较全面地描述了沙土室内压缩试验从宏观到微观的全过程, 从多尺度揭示了沙土湿陷性的湿陷规律及其影响因素, 可为毛乌素沙漠地区工程建设提供参考, 同时为沙土在颗粒流数值模拟方面的研究提供了一定的思路和依据。

关键词: 风积沙; 室内压缩试验; 湿陷规律; 颗粒流数值模拟

中图分类号: P642.26 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2024)04-0075-10

Collapse characteristics and influencing factors of wind-blown sands in the southern margin of Mu Us Desert, Yulin, Shaanxi Province

ZHANG Xi¹, LUO Jianwen¹, PAN Junyi¹, LIU Bin¹, YANG Nan²

(1. Changqing Engineering Design Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710021, China;

2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: With the development of arid and semi-arid regions in China, the hazards posed by collapsible sands to engineering construction have become increasingly significant. In order to investigate the collapsibility regularity and its influencing factors of sand soils, this paper focuses on the wind-blown sands at the southern edge of the Maowusu Desert. Initially, by controlling the single factor laboratory compression tests, the collapsibility regularity of wind-blown sand under different working

收稿日期: 2023-07-13; 修订日期: 2024-01-11 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 长庆工程设计有限公司资助项目(CEDC-2021-026)

第一作者: 张曦(1989—), 男, 陕西西安人, 工程地质专业, 硕士研究生, 工程师, 主要从事岩土工程勘察设计及相关科研工作。

E-mail: 148374641@qq.com

通讯作者: 杨楠(1998—), 女, 内蒙古通辽人, 地质资源与地质工程专业, 博士研究生, 主要从事土动力学与岩土地震工程相关科研工作。E-mail: 2020126125@chd.edu.cn

conditions was investigated. Subsequently, using PFC^{3D} (three-dimensional particle flow software) for numerical simulation of the laboratory compression tests on wind-blown sands, the paper explores the effects of different porosities and particle compositions on the collapsibility of sandy soils. The research results indicate that the collapsibility coefficient of sandy soils shows a trend of first increasing and then decreasing with pressure, reaching its maximum value at 150 kPa. With the increase in dry density or moisture content, the collapsibility coefficient of sand decreases. Compared to moisture content, dry density has a greater impact on the collapsibility of sandy soils. There is a positive correlation between the collapsibility coefficient of wind-blown sand and its porosity. The initial porosity of the collapsibility of the wind-blown sand on the southern edge of the Maowusu Desert is 0.425. When the ratio of particle content between 0.075 ~ 0.25 mm and 0.25 ~ 0.5 mm is 0.35 : 0.65, the collapsibility of sandy soils is maximized. The research results comprehensively describe the entire process of laboratory compression tests on sand from macro to micro levels, revealing the collapsibility regularity and its influencing factors on wind-blown sand from multiple scales. This can provide a reference for engineering construction in the Maowusu Desert and provide certain ideas and basis for the research on particle flow numerical simulation of sand.

Keywords: wind-blown sand; laboratory compression test; collapse characteristics; particle flow numerical simulation

0 引言

国内外学者对黄土湿陷性及湿陷规律的探索从未间断^[1],湿陷性沙土相关研究成果较少。国内针对湿陷性沙土的研究主要集中在对新疆、甘肃、宁夏、陕西等省份戈壁地区或沙漠地区沙土变形机理^[2]、沙土湿陷性的影响因素及影响规律^[3-8]、湿陷性沙土地基处理方法^[9-10]的研究。但由于湿陷性沙土分布地区偏远,对沙土湿陷性的研究尚处于初探阶段,还未取得系统、显著的研究成果。

湿陷性沙土在我国分布范围较广,但对沙土的湿陷特性认识不足,不利于湿陷性沙土地区工程建设的推进。随着我国“一带一路”倡议实施,国外工程建设也遇到湿陷性沙土,如非洲安哥拉罗安达市的“Quelo 沙”^[11-15]、尼日尔某炼厂建设中的湿陷性风积沙土^[16]、巴基斯坦塔尔沙漠工程建设区遇到的风积沙土^[17-18]。因此,进一步了解与掌握沙土的湿陷特性,对世界范围内湿陷性沙土地基中的工程建设具有重要的指导意义和应用价值。

为确定湿陷系数,一般要在工程场地取样进行单线法或双线法湿陷实验,需要消耗大量的人力和时间^[19],且对于沙土的研究仅停留在宏观参数的获得,无法了解试样内部颗粒的变化规律。为弥补室内试验中无法观测土颗粒变化的缺陷,许多学者采用三维颗粒流软件对沙土进行数值模拟。学者们应用 PFC 软件对沙土进行研究,大多是从强度和力学特性等方面着手,采用 PFC^{2D}、PFC^{3D} 数值软件进行双轴试验^[20]、平面应变状态试验^[21]、三轴试验^[22-24]、剪切试验^[25-26]的颗粒流数值模拟,分析了各种细观参数对宏观力学性质的影响,得

到了数值试样在受力过程中的宏细观特征。显然,颗粒流方法已经逐渐成为国内外学者研究沙土的重要方法之一,但对于沙土湿陷试验的颗粒流模拟还未见报道。

综上所述,目前湿陷性沙土相关研究成果较少,缺乏对不同成因湿陷性沙土的针对性分析,也极少关注沙土湿陷的细观过程。鉴于此,本文以毛乌素沙漠南缘风积沙为研究对象,采用室内试验、数值模拟对沙土湿陷特性进行研究。研究从现象与本质两方面入手,将沙土微观参数与宏观湿陷反应联系起来,可以对沙土湿陷过程有更深入的认识,并从多尺度揭示风积沙的湿陷规律及其影响因素。研究成果对在风积沙土地区的工程建设具有重要的参考意义和应用价值。

1 湿陷试验

1.1 试验材料及试验方案

取样地点为榆林市榆阳区小纪汗镇活洛滩村,距离榆林市政府 30.3 km。该场地地势平坦,地层岩性分布较为简单,浅表地层均为第四系风积粉细沙,地下水位为 4 ~ 6 m,区域年平均降雨量约 280 mm,取样场地附近无地表河流发育。试样为淡黄色稍湿风积沙,其基本物理特性指标见表 1。沙土孔隙比较大,含水率低。粒径级配曲线见图 1,主要集中在 0.075 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm 两粒径区间内,不均匀系数为 3.2,曲率系数为 0.903。沙土颗粒均匀,级配曲线不连续,为级配不良土。现场标准贯入试验测得场地密实程度为松散至稍密,且通过人工取样法取场地原状环刀样测得其湿陷系数大于 0.015,场地湿陷性为轻微湿陷。

为探明风积沙的湿陷规律,以《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[27]为标准制取含水率(ω) 3%、

表 1 场地基本物理特性指标
Table 1 Basic physical charecteristics of the site

参数	密度/(g·m ⁻³)	含水率/%	干密度/(g·m ⁻³)	比重	孔隙比	饱和密度/(g·m ⁻³)	饱和度	最小干密度/(g·m ⁻³)	最大干密度/(g·m ⁻³)
数值	1.587	4.5	1.519	2.616	0.722	1.938	16.3	1.38	1.77

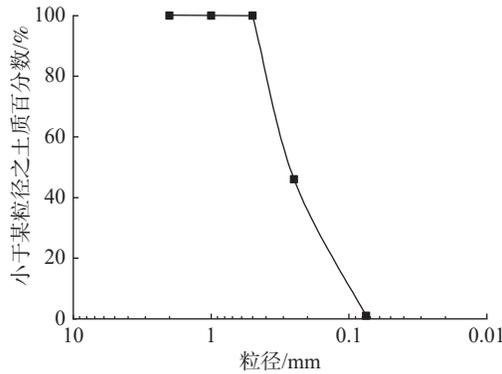


图 1 试验土样粒径级配曲线

Fig. 1 Distribution curve of particle sizes

6%、9%, 干密度(ρ_d)1.40, 1.45, 1.5, 1.55 g/cm³, 粒径区间为 0.075 ~ 0.25 mm 的不同组合重塑环刀试样, 遵循控制变量原则进行了重塑土室内压缩试验, 试验采用双线法, 压力取 25, 50, 100, 150, 200 kPa, 共计试验 12 组。

1.2 试验结果与分析

风积沙土质相对较均匀, 较少混有其他成因土层, 而且可以取得原状样, 所以对其湿陷性的评价仍可按《湿陷性黄土地区建筑规范》^[28]的有关规定进行。室内压缩试验结果见表 2。

表 2 室内压缩试验结果
Table 2 Laboratory compression test results

试样编号	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	粒径区间/mm	湿陷系数	湿陷等级
1	1.40	3	0.075 ~ 0.250	0.026 50	轻微湿陷
2	1.45	3	0.075 ~ 0.250	0.022 25	轻微湿陷
3	1.50	3	0.075 ~ 0.250	0.016 25	轻微湿陷
4	1.55	3	0.075 ~ 0.250	0.001 00	无湿陷
5	1.40	6	0.075 ~ 0.250	0.025 50	轻微湿陷
6	1.45	6	0.075 ~ 0.250	0.022 00	轻微湿陷
7	1.50	6	0.075 ~ 0.250	0.017 25	轻微湿陷
8	1.55	6	0.075 ~ 0.250	0.000 50	无湿陷
9	1.40	9	0.075 ~ 0.250	0.024 50	轻微湿陷
10	1.45	9	0.075 ~ 0.250	0.020 50	轻微湿陷
11	1.50	9	0.075 ~ 0.250	0.018 50	轻微湿陷
12	1.55	9	0.075 ~ 0.250	0.000 50	无湿陷

等间距选取表 2 中的试验结果, 分析试样的湿陷性系数(p)-压力(δ_s)曲线, 土样湿陷系数随压力的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着压力的增大, p - δ_s 曲线呈现先升

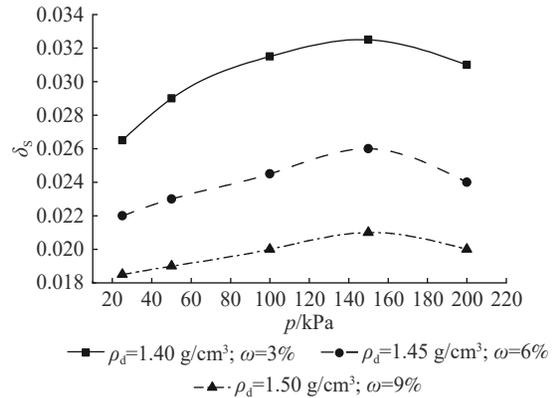


图 2 p - δ_s 曲线

Fig. 2 p - δ_s curves

后降的趋势, 在压力为 150 kPa 时取得湿陷系数最大值。这是因为在峰值压力之前, 风积沙土处于孔隙填充挤密阶段, 仍然保持较稳定的多孔结构, 随压力增大, 内部孔隙被水和细小颗粒填充的趋势随之增大, 故湿陷性变大。而当压力超过峰值压力后, 在高压和水的作用下, 沙土天然微观结构基本被破坏, 沙土试样反而呈现出膨胀的趋势, 故湿陷系数减小。此外, 随着干密度、含水率的增大, 湿陷系数减小。干密度的增加使土样更密实, 孔隙率减小, 含水率的增加使一部分孔隙被水填充, 进一步减小了孔隙率, 故干密度、含水率同时增大时, 土的湿陷性会明显减弱。为比较干密度、含水率对风积沙土湿陷特性的影响程度, 分别分析湿陷系数随含水率的变化规律、湿陷系数随干密度的变化规律(图 3)。

当干密度为 1.4 g/cm³ 时, 含水率从 3% 增至 9%, 最大湿陷系数(压力为 150 kPa 时的湿陷系数)仅减小了 0.004 3; 当含水率为 3% 时, 干密度从 1.4 g/cm³ 增至 1.45 g/cm³, 最大湿陷系数减小了 0.007。可见, 虽然含水率的增大会使湿陷系数减小, 但明显干密度才是影响风积沙土湿陷性的主控因素。

2 数值模拟

2.1 模型的建立

颗粒流程序 (particle flow code, PFC) 是在著名学者 Peter Cundall 主持下采用颗粒流理论开发的一种数值计算平台。该软件利用球形粒子之间的连续相互作用运动, 计算粒子位置和相对位移以及每个时步下粒子重

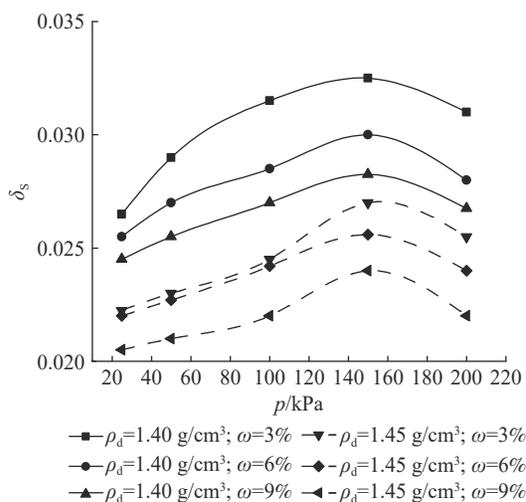


图 3 $p-\delta_s$ 曲线
Fig. 3 $p-\delta_s$ curves

叠量,通过力—位移定律计算粒子间的接触力、能量传递以及消耗^[29]。已有许多学者采用 PFC^{2D} 对沙土的变形和强度性质进行了数值模拟,但 PFC^{2D} 仅可以定性地研究沙土的细观力学行为。二维模拟与实际试验有着本质区别,主要体现在二维模型的孔隙率无法反应真实情况的孔隙率,故无法采用 PFC^{2D} 获取沙土宏细观参数间的定量关系。本文采用 PFC^{3D} 颗粒流软件进行数值模拟试验,试验分为以下两个步骤:

(1)成样

数值试样的生成包括试样尺寸的确定、颗粒的填充、接触模型的选择三个步骤:①根据实际室内压缩试验规模确定数值试样的大小和形状。数值试样墙体的形状、尺寸与实际室内压缩试验的规模完全相同,是由一个圆柱形墙面以及上下两墙面组成。为了避免颗粒在加载过程中,从墙体的缝隙中飞出,需对墙体的高度及上下墙面适当延伸。②颗粒的填充。在 PFC^{3D} 中合成材料土样是由球形颗粒组装而成,如果采用与实际风积沙土大小完全相同的粒径会生成过多的颗粒,影响计算机运算速率。为加快运算速率,可采用级配平移、放大粒径的方法来减少颗粒数目^[30],同时通过在 PFC 成样程序中根据实际颗粒分析试验结果设置不同粒组,并控制粒组含量,使数值试样的颗粒组成成分尽可能接近实际沙样。③对于不考虑黏聚力的沙土,采用线性接触模型^[31],该接触模型力学元件如图 4 所示。室内压缩试验计算模型如图 5 所示。

(2)加载

整个加载过程是用球形颗粒的运动来模拟土颗粒的运动变化情况,通过顶面墙体来控制施加压力,圆柱

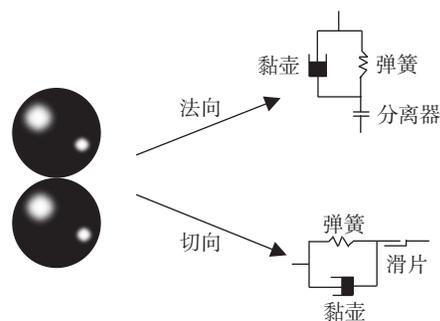


图 4 三维线性接触模型物理元件图
Fig. 4 Physical model diagram of the three-dimensional linear contact model

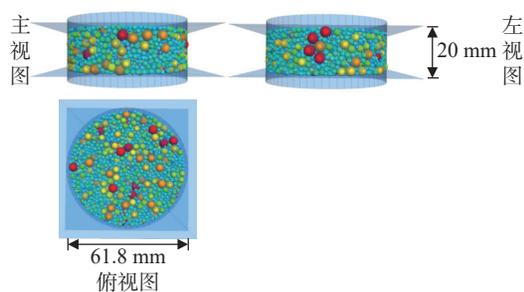


图 5 室内压缩试验计算模型三视图
Fig. 5 Three views of the calculation model for laboratory compression test

形墙面与底面墙体保持不动。在 PFC^{3D} 中,加载不是通过给顶面墙体一个力,而是通过给顶面墙体一个轴向的速度实现加载,轴向速度的大小为给定应变率与数值试样高度的乘积(图 6)。

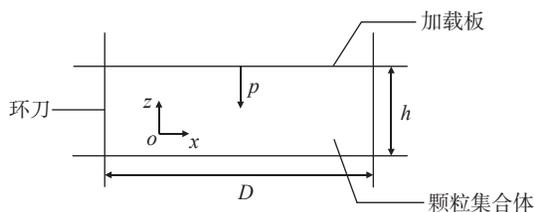


图 6 试样加荷示意图
Fig. 6 Schematic diagram of specimen loading

加载过程中实时监测试样高度的变化,用数值试样原始高度减沉降稳定后的试样高度,即为在该压力下的下沉量。试样的轴向应变为上下两面墙体的相对位移除以试样的初始高度,应力的大小为作用在顶面墙体上的力除以的圆柱形墙体的底面积。

2.2 模型参数的确定

本文颗粒流数值模拟的对象为沙土,颗粒间的接触模型选择线性接触模型。因此, PFC 程序中需要确定的参数如下:①模型的半径(r)与高(h);②比重(G_s);③加载压力(p);④孔隙率(n);⑤粒径范围与含量;

⑥摩擦系数(μ); ⑦法向接触刚度(k_n); ⑧切向接触刚度(k_s)。

根据已有的基本物理力学参数与室内湿陷试验结果确定上述宏、细观参数。上述参数中模型的半径(r)与高(h)、比重(G_s)、加载压力(p)、孔隙率(n)、粒径范围与含量可以通过换算或直接与基本物理力学参数相对应。而 PFC 软件中试样的宏、细观参数之间没有直接联系^[32], 摩擦系数(μ)、法向接触刚度(k_n)、切向接触刚度的确定首先需要遵循控制变量原则分析各参数对风积沙土变形特性的影响规律, 然后根据所得规律标定细观参数, 参数标定的依据为 12 组重塑土室内压缩试验结果。

(1)模型的半径(r)与高(h)

根据实际室内压缩试验规模确定数值试样的大小和形状。室内压缩试验所用的环刀内径为 61.8 mm, 半径为 30.9 mm, 高为 20 mm。数值试样约束墙体的形状、尺寸与实际室内压缩试验的规模完全相同, 即 $r = 30.9$ mm、 $h = 20$ mm。

(2)颗粒比重(G_s)

颗粒比重取值与比重试验所得结果相同, 即 $G_s = 2.616$ 。

(3)压力(p)

室内压缩试验压力取 25, 50, 100, 150, 200 kPa, 数值模拟加载程序中压力取值与室内试验相同。

(4)孔隙率(n)

已知土样的干密度(ρ_d)、比重(G_s), 可由下式计算出模型的孔隙率(n):

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w^{4^\circ\text{C}}} \quad (1)$$

式中: n ——孔隙率;

ρ_d ——干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 土颗粒的质量除以土的体积;

G_s ——比重;

$\rho_w^{4^\circ\text{C}}$ ——4°C时纯蒸馏水的密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

因为 $\rho_w^{4^\circ\text{C}} = 1.0$ g/cm^3 , 比重试验测得土的比重为 $G_s = 2.616$, 由式 (1) 可得干密度 $\rho_d = 1.4$ g/cm^3 、 $\rho_d = 1.45$ g/cm^3 、 $\rho_d = 1.50$ g/cm^3 、 $\rho_d = 1.55$ g/cm^3 对应的模型孔隙率分别为 $n = 0.465$ 、 $n = 0.446$ 、 $n = 0.427$ 、 $n = 0.407$ 。

(5)粒径范围与含量

采用级配平移、放大粒径的方法来减少颗粒数目。本文颗粒粒径放大系数为 20。颗粒分析试验结果得到的是不同粒径组颗粒的质量占比, 比重试验测出颗粒比重。已知质量与密度, 体积的计算公式为:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2)$$

式中: V ——体积/ cm^3 ;

m ——质量/ g ;

ρ ——密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 土颗粒和水的质量除以土的体积。

由式 (2) 可得, 颗分试验所得颗粒的质量占比可以在 PFC^{3D} 中等价为体积占比, 所以可以通过控制不同粒径组颗粒的体积占比使数值试样的颗粒组成成分尽可能接近实际沙样。

(6)摩擦系数(μ)

沙土内摩擦角取值范围一般为 $15^\circ \sim 40^\circ$ ^[33], 尹成薇等^[34]通过研究建立了 PFC 中沙土内摩擦角与颗粒间摩擦系数的线性相关关系:

$$\varphi = 0.73 \arctan \mu + 7.85 \quad (3)$$

式中: φ ——沙土内摩擦角/($^\circ$);

μ ——颗粒间摩擦系数。

由式 (3) 可以推出, 颗粒间摩擦系数的取值范围为 0.1~0.9。

重塑土室内压缩试验采用双线法, 一组试验 2 个环刀样。一个试样在天然含水率下分级加荷, 加至最后一级压力, 下沉稳定后浸水饱和; 另一个试样则是在浸水饱和后分级加荷。颗粒流数值模拟中水对摩擦系数影响较大^[35], 故在参数标定过程中将数值试样饱和后的摩擦系数统一定为最小值。PFC^{3D} 软件中无法模拟数值试样含水率的变化, 仅能根据含水率增大, 颗粒间摩擦系数减小的规律来体现含水率的变化。天然含水率下数值试样的摩擦系数大于饱和后数值试样的摩擦系数, 用天然含水率条件下的数值模拟结果减去饱和条件下数值模拟结果即可得到湿陷量。据此规则, 接触刚度保持不变, 根据前文所述生成试样并加载, 进行不同摩擦系数下的数值模拟^[36-37]。湿陷系数(δ_s)随摩擦系数(μ)的变化如图 7 所示。

由图 7 可知, 湿陷系数随摩擦系数的增大整体呈不断增大的趋势, 在摩擦系数小于 0.4 时, 湿陷系数增长速率较快, 摩擦系数大于 0.4 后, 湿陷系数增长速率减缓。摩擦系数较小时, 试样受压颗粒越容易克服摩擦力发生移动^[38-39]; 摩擦系数增大, 颗粒克服摩擦力发生滑动的难度加大, 故湿陷系数增长速率减缓。

(7)接触刚度(k)

文献^[24]研究结果表明, 对于线性接触模型, 切向刚度与法向刚度的比值对于压缩模量的影响不大, 因此本

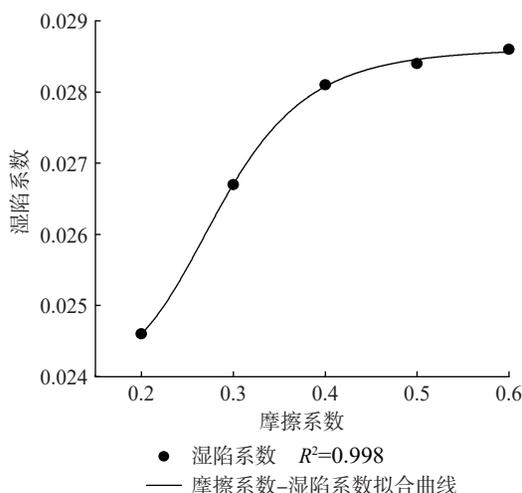


图 7 湿陷系数随摩擦系数的变化曲线

Fig. 7 Curve of collapse factor with variation of friction coefficient

文取 1.0, 即细观参数标定过程中法向接触刚度(k_n)=切向接触刚度(k_s)。摩擦系数保持不变, 进行数值模拟, 湿陷系数随接触刚度的变化如图 8 所示。

由图 8 可知, 湿陷系数随接触刚度的增大整体呈下降趋势。接触刚度在小于 1.1×10^7 时, 湿陷系数下降速率较快; 接触刚度处于 1.1×10^7 至 1.4×10^7 之间, 湿陷系数下降速率减缓; 接触刚度大于 1.4×10^7 后, 试样湿陷性迅速丧失。接触刚度较小时, 颗粒间相互作用较小, 颗粒容易产生位移使土样整体下沉量大; 而后, 土样下沉量增大的速率减缓, 当颗粒间相互作用足够大时, 颗粒几乎不产生大的位移, 试样便不具有湿陷性。

2.3 数值模拟结果分析

2.3.1 数值模拟结果

据前文中颗粒流数值模型的确定方法与所得规律对重塑土的室内压缩试验进行数值模拟, 数值模拟结果

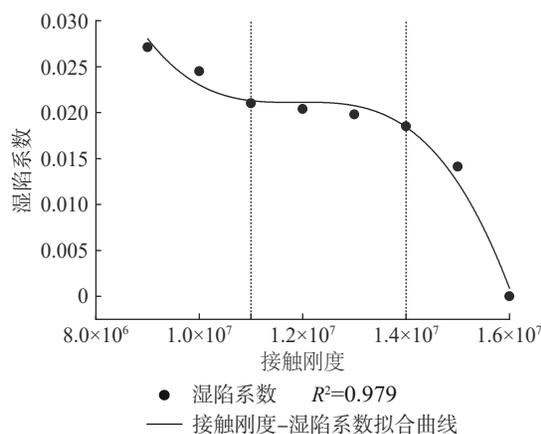


图 8 湿陷系数随接触刚度的变化曲线

Fig. 8 Curve of collapse factor with variation of contact stiffness

见表 3。

由表 3 可知, 数值模拟结果与室内重塑土湿陷试验结果较吻合。参数标定过程中发现, 摩擦系数受含水率影响较大, 随着含水率的增大, 摩擦系数减小; 接触刚度受干密度影响较大, 随着干密度的增大, 接触刚度增大。选取表 2 中干密度为 1.4 g/cm^3 、含水率为 3% 和干密度为 1.5 g/cm^3 、含水率为 9% 的两组试验进行数值模拟, 按照 25, 50, 100, 150, 200 kPa 分级加荷, 湿陷系数随压力的变化曲线($p-\delta_s$ 曲线)如图 9 所示。

图 9 中, 数值模拟结果较好反映室内试验结果。真实土颗粒与球形颗粒存在差别, 真实土颗粒形状不规则, 在高压作用下还会破碎, 这导致室内试验与数值模拟结果存在误差, 数值模拟所得曲线相对平滑^[40-42]。

2.3.2 孔隙率对湿陷性的影响

孔隙率是试样内部颗粒相对位移和试样变形规律的一个重要参数。借助 PFC 内置 measure 记录方法监测试样孔隙率在加载过程中的变化, 在试样内部布置半

表 3 数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results

试样编号	颗粒比重	干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	湿陷系数	模拟湿陷系数	孔隙率	粒径区间/mm	法向接触刚度	切向接触刚度	摩擦系数
1	2.65	1.40	3	0.026 50	0.027 00	0.465	0.075 ~ 0.250	1.109×10^7	1.109×10^7	0.350
2	2.65	1.45	3	0.022 25	0.022 43	0.446	0.075 ~ 0.250	1.284×10^7	1.284×10^7	0.370
3	2.65	1.50	3	0.016 25	0.016 33	0.427	0.075 ~ 0.250	1.473×10^7	1.473×10^7	0.360
4	2.65	1.55	3	0.001 00	0.001 10	0.407	0.075 ~ 0.250	1.590×10^7	1.590×10^7	0.350
5	2.65	1.40	6	0.025 50	0.025 80	0.465	0.075 ~ 0.250	1.109×10^7	1.109×10^7	0.270
6	2.65	1.45	6	0.022 00	0.022 30	0.446	0.075 ~ 0.250	1.284×10^7	1.284×10^7	0.270
7	2.65	1.50	6	0.017 25	0.017 33	0.427	0.075 ~ 0.250	1.473×10^7	1.473×10^7	0.273
8	2.65	1.55	6	0.000 50	0.000 70	0.407	0.075 ~ 0.250	1.590×10^7	1.590×10^7	0.271
9	2.65	1.40	9	0.024 50	0.025 00	0.465	0.075 ~ 0.250	1.109×10^7	1.109×10^7	0.232
10	2.65	1.45	9	0.020 50	0.020 20	0.446	0.075 ~ 0.250	1.284×10^7	1.284×10^7	0.230
11	2.65	1.50	9	0.018 50	0.018 20	0.427	0.075 ~ 0.250	1.473×10^7	1.473×10^7	0.230
12	2.65	1.55	9	0.000 50	0.000 30	0.407	0.075 ~ 0.250	1.590×10^7	1.590×10^7	0.231

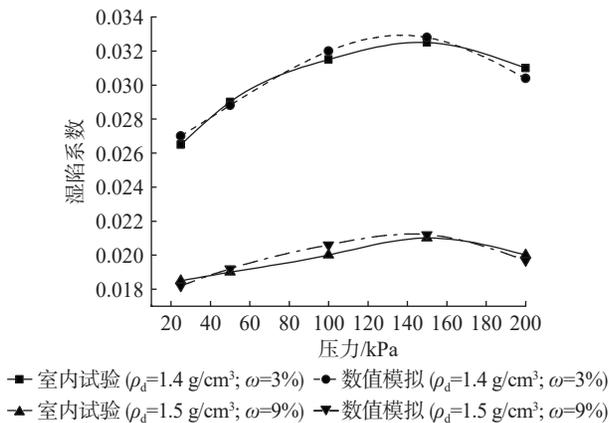
图 9 室内试验、数值模拟 $p-\delta_s$ 曲线对比

Fig. 9 Comparison of laboratory test and numerical simulation

 $p-\delta_s$ curves

径为 10 mm 的测量球共 9 个, 以监测加载过程中试样的孔隙率, 取 9 个测量球测得孔隙率的平均值代表数值试样下沉稳定后的孔隙率。对数值试样加压至 200 kPa, 孔隙率随压力的变化如图 10 所示。

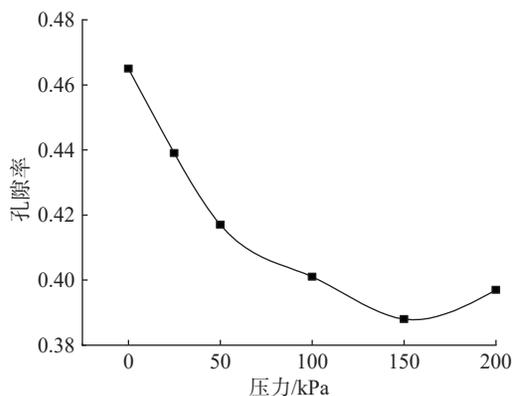


图 10 孔隙率随压力的变化曲线

Fig. 10 Curve of porosity variation with pressure

孔隙率随压力的变化曲线呈先降后升的趋势, 该变化规律与湿陷系数随压力先增后减的规律相对应。孔隙率在 150 kPa 时最小, 而后压力增大, 土颗粒间相互作用力增大, 出现膨胀现象。

变化不同的初始孔隙率, 进行数值模拟试验, 孔隙率对风积沙土湿陷性的影响如图 11 所示。

风积沙土的湿陷性与初始孔隙率之间呈正相关关系, 当孔隙率 $n < 0.425$ 时, 沙土不具有湿陷性; 当孔隙率 $n > 0.476$ 时, 沙土具有中等湿陷性。因此, 可将孔隙率 0.425 界定为沙土出现湿陷性的湿陷起始孔隙率。

2.3.3 颗粒组成对湿陷性的影响

室内试验所取试样粒径主要分布在 0.075 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.5 mm 两粒径区间内, 两者总量超过 95%, 基本

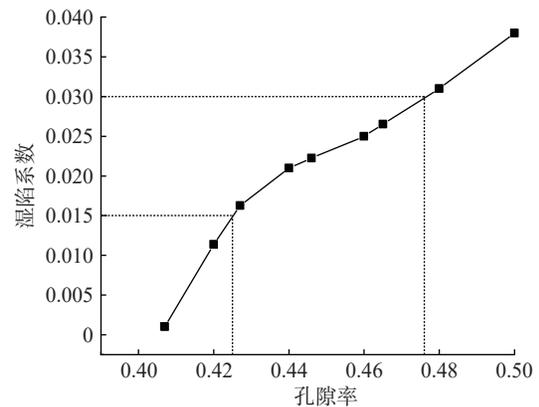


图 11 湿陷系数随孔隙率的变化曲线

Fig. 11 Curve of collapse factor variation with porosity

上可以忽略黏粒对湿陷性的影响。为反映颗粒级配对湿陷性的影响, 在 PFC^{3D} 成样程序中, 设置两个粒径区间, 并将两粒径区间内颗粒含量占比分别设置成: ①0 : 1; ②0.15 : 0.85; ③0.25 : 0.75; ④0.35 : 0.65; ⑤0.45 : 0.55; ⑥0.55 : 0.45; ⑦0.65 : 0.35; ⑧0.75 : 0.25; ⑨0.85 : 0.15; ⑩1 : 0, 得到不同颗粒组成情况下湿陷系数的变化曲线(图 12)。

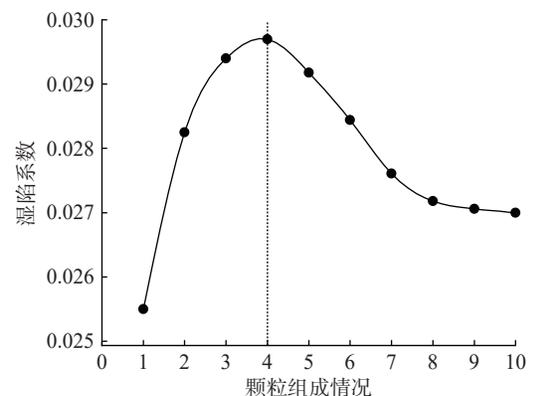


图 12 不同颗粒组成情况下湿陷系数变化曲线

Fig. 12 Curves of collapse coefficient variation under different particle compositions

由图 12 可知, 当 0.075 ~ 0.250 mm、0.25 ~ 0.50 mm 两粒径区间内颗粒含量比为 0.35 : 0.65 时, 沙土的湿陷性最强; 当 0.25 ~ 0.50 mm 区间内颗粒含量大于 65% 时, 湿陷系数随 0.075 ~ 0.250 mm 颗粒含量的增多而增大; 当 0.25 ~ 0.50 mm 区间内颗粒含量小于 65% 时, 湿陷系数随 0.075 ~ 0.250 mm 颗粒含量的增多而减小; 0.075 ~ 0.250 mm 或 0.25 ~ 0.50 mm 两粒径区间内颗粒含量过多时, 湿陷系数均较低。粒径较大的颗粒起骨架作用, 骨架颗粒间点与点接触, 骨架颗粒间的摩擦力阻碍颗粒移动, 造成大量的架空孔隙, 提供了湿陷空间, 在压缩过

程中粒径较小的颗粒充填于架空的大孔隙中导致试样下沉。0.075 ~ 0.250 mm 颗粒含量过多时(大于 35%),大颗粒无法形成稳固的联通骨架,骨架颗粒易于发生移动,土中孔隙剧烈减少,导致沙土湿陷系数减小。0.25 ~ 0.50 mm 颗粒含量过多时(大于 65%),大颗粒形成联通骨架,联通骨架不再压缩是湿陷系数减小的原因。

3 结论

(1)风积沙土湿陷系数随试验压力的增大呈现先增大后减小的趋势,湿陷系数可取到峰值时的压力为 150 kPa。

(2)随着干密度或含水率的增大,湿陷系数减小,但干密度对风积沙土湿陷系数的影响更大。

(3)孔隙率随压力的变化曲线呈先降后升的趋势,该演化规律与湿陷系数随压力先增后减的规律相对应;当初始孔隙率大于 0.425 时,风积沙土开始具有湿陷性,且湿陷系数与初始孔隙率之间呈正相关关系。

(4)当 0.075 ~ 0.250 mm、0.25 ~ 0.50 mm 两粒径区间内颗粒含量比为 0.35 : 0.65 时,风积沙土的湿陷性最强。粒径较大的颗粒形成联通骨架,造成大量架空孔隙,粒径较小的颗粒充填于架空的大孔隙提升了湿陷空间。0.075 ~ 0.250 mm 或 0.25 ~ 0.50 mm 两粒径区间内颗粒含量过多时,湿陷系数均较低。

(5)本文采用的室内压缩试验数量有限,这导致未建立宏观参数与细观参数间定量的相关关系,此外数值模拟过程中,仅用单一的球形颗粒单元无法全面揭示沙土颗粒不规则形状对工程力学性质的影响。为此,今后的研究中可以引入更多的室内试验结果,由此建立起宏观参数与细观参数间定量关系,并建立不规则的颗粒集合刚体,有望得到更好的结果。

参考文献(References):

- [1] 范文,魏亚妮,于渤,等.黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势[J].水文地质工程地质,2022,49(5):144-156. [FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 144-156. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 侯彦凯.戈壁地区粗粒土地基湿陷特性研究[J].铁道工程学报,2016,33(6):31-34. [HOU Yankai. Research on the collapse characteristics of coarse grained soil in Gobi region [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(6): 31-34. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 苏建德.沙漠区沙土类土湿陷性研究[J].岩土工程学报,2001(8):27-29. [SU Jiande. Study on collapsibility of sandy soil in desert area [J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 2001(8): 27-29. (in Chinese)]
- [4] 曾正中,张明泉,梁宗仁,等.腾格里沙漠南缘风积砂土地基的工程地质特性[J].西北水电,2001(3):18-20. [ZENG Zhengzhong, ZHANG Mingquan, LIANG Zongren, et al. Engineering geological features of eolian deposit sandy soil ground at southern edge of the Tenggeli Desert [J]. Northwest Water Power, 2001(3): 18-20. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 曾正中,张明泉,黄明源.腾格里沙漠南缘风积砂土湿陷性研究[J].甘肃科学学报,2000,12(2):63-68. [ZENG Zhengzhong, ZHANG Mingquan, HUANG Mingyuan. A study on the collapsibility of the eolian sand on the south edge of the tenggeli desert [J]. Journal of Gansu Sciences, 2000, 12(2): 63-68. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 武立波,胡冰涛,尹志远,等.宁东粉细砂的物理力学特性分析[J].工程建设与设计,2012(9):129-131. [WU Libo, HU Bingtao, YIN Zhiyuan, et al. Analysis of physico-mechanical characteristics of fine sand in ningdong rigion [J]. Construction & Design for Project, 2012(9): 129-131. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 胡玮,李云川,史成江.中卫地区粉砂土湿陷特性及影响因素探讨[J].宁夏工程技术,2017,16(2):178-182. [HU Wei, LI Yunchuan, SHI Chengjiang. Analysis of the collapsibility characteristics and its affecting factors of silt sand in Zhongwei Districts [J]. Ningxia Engineering Technology, 2017, 16(2): 178-182. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 杨瑞雪,崔自治,郗玥颖,等.细粒含量对银川细砂压缩及压缩水敏性的影响[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(3):1143-1148. [YANG Ruixue, CUI Zizhi, QIE Yueying, et al. Effects of fine grain content on compression and water sensitivity of Yinchuan fine sand [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(3): 1143-1148. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘峰,李超.某沙漠明渠基础变形分析及处理对策[J].中国水运(下半月),2021,21(7):99-100. [LIU Feng, LI Chao. Deformation analysis and treatment countermeasures of a desert open channel foundation [J]. China Water Transport, 2021, 21(7): 99-100. (in Chinese)]
- [10] 韩永强,石宇涵.粉细砂湿陷性研究[J].四川建材,2015,41(6):24-26. [HAN Yongqiang, SHI Yuhan. Study on collapsibility of silty fine sand [J]. Sichuan Building Materials, 2015, 41(6): 24-26. (in Chinese)]
- [11] 刘争宏,廖燕宏,张玉守.罗安达砂物理力学性质初探[J].岩土力学,2010,31(增刊1):121-126. [LIU Zhenghong, LIAO Yanhong, ZHANG Yushou. Preliminary

- study of physico-mechanical properties of Luanda sand [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Sup 1): 121 - 126. (in Chinese with English abstract)
- [12] 彭友君, 岳栋, 彭博, 等. 安哥拉格埃路砂地层的承载力研究 [J] . *岩土力学*, 2014, 35(增刊2): 332 - 337. [PENG Youjun, YUE Dong, PENG Bo, et al. Research on bearing capacity of Angola Quelo sand strata [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(Sup 2): 332 - 337. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 唐国艺, 唐立军, 刘智, 等. 安哥拉罗安达湿陷性砂的载荷试验研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2018, 45(5): 108 - 113. [TANG Guoyi, TANG Lijun, LIU Zhi, et al. Research on collapsible sand under plate load test in Luanda, Angola [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(5): 108 - 113. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 孙宏伟, 董勤, 石峰. 南部非洲红砂地基工程特性初探 [J] . *建筑结构*, 2015, 45(18): 105 - 107. [SUN Hongwei, DONG Qin, SHI Feng. Preliminary discussion on geotechnical characteristics of red sand in southern Africa [J] . *Building Structure*, 2015, 45(18): 105 - 107. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张富华. 安哥拉罗安达地区湿陷性砂土地基基础设计 [J] . *建筑结构*, 2016, 46(增刊1): 821 - 823. [ZHANG Fuhua. Foundation design of collapsible sand ground in Luanda' Angola [J] . *Building Structure*, 2016, 46(Sup 1): 821 - 823. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 刘彬, 张庚成, 李荣先. 尼日尔风积砂土湿陷性试验研究与评价 [J] . *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(7): 99 - 104. [LIU Bin, ZHANG Gengcheng, LI Rongxian. Experimental study and evaluation on collapsibility of wind-blown sand in Niger [J] . *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(7): 99 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 姚晨辉, 夏玉云, 吴学林, 等. 巴基斯坦塔尔沙漠风积砂土湿陷性特征 [J] . *长江科学院院报*, 2021, 38(5): 131 - 136. [YAO Chenhui, XIA Yuyun, WU Xuelin, et al. Collapsibility characteristics of wind-blown sand in thar desert, Pakistan [J] . *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(5): 131 - 136. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 柳旻, 姚晨辉, 张国敬, 等. 强夯法处理湿陷性风积砂土地基评价 [J] . *水利与建筑工程学报*, 2020, 18(3): 31 - 35. [LIU Min, YAO Chenhui, ZHANG Guojing, et al. Evaluation of collapsible wind-blown sand subgrade treated by dynamic compaction [J] . *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(3): 31 - 35. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 朱凤基, 南静静, 魏颖琪, 等. 黄土湿陷系数影响因素的相关性分析 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(2): 128 - 133. [ZHU Fengji, NAN Jingjing, WEI Yingqi, et al. Mathematical statistical analysis on factors affecting collapsible coefficient of loess [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 128 - 133. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟 [J] . *岩土力学*, 2003, 24(6): 901 - 906. [ZHOU Jian, CHI Yong. Mesomechanical simulation of sand mechanical properties [J] . *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(6): 901 - 906. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ZHAO Xueliang, EVANS T M. Numerical analysis of critical state behaviors of granular soils under different loading conditions [J] . *Granular Matter*, 2011, 13(6): 751 - 764.
- [22] ROBERTSON D, BOLTON M D. DEM simulations of crushable grains and soils [J] . In: 4th International Conference on Micromechanics of Granular Media Powders and Grains, 2001-5-21 to 2001-5-25, Sendai, Japan: 623 - 626.
- [23] 罗勇, 龚晓南, 连峰. 三维离散颗粒单元模拟无黏性土的工程力学性质 [J] . *岩土工程学报*, 2008, 30(2): 292 - 297. [LUO Yong, GONG Xiaonan, LIAN Feng. Simulation of mechanical behaviors of granular materials by three-dimensional discrete element method based on particle flow code [J] . *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(2): 292 - 297. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 吴越. 砂土力学特性及临界破坏三维离散元数值模拟 [D] . 杭州: 浙江大学, 2015. [WU Yue. Three dimensional discrete element simulations of mechanical behavior and critical state failure of granular media [D] . Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [25] THORNTON C, ANTONY S J. Quasi-static shear deformation of a soft particle system [J] . *Powder Technology*, 2000, 109(1/2/3): 179 - 191.
- [26] 曾远. 土体破坏细观机理及颗粒流数值模拟 [D] . 上海: 同济大学, 2006. [ZENG Yuan. Microscopic mechanics of soil failure and PFC numerical simulation [D] . Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S] . 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123 —2019 [S] . Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [28] 中华人民共和国建设部. 湿陷性黄土地区建筑规范: GB 50025—2004 [S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2004 [S] . Beijing: China Architecture & Building

- Press, 2004. (in Chinese)]
- [29] 韩振华, 张路青, 周剑, 等. 黏土矿物颗粒特征对含水合物的沉积物力学特性影响研究 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1733 - 1743. [HAN Zhenhua, ZHANG Luqing, ZHOU Jian, et al. Effect of clay mineral grain characteristics on mechanical behaviours of hydrate-bearing sediments [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1733 - 1743. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野——宏微观土力学 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195 - 254. [JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: Geomechanics from micro to macro [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195 - 254. (in Chinese with English abstract)]
- [31] ITASCA CONSULTING GROUP, INC. The manuals of particle flow code in 3-dimension. Version 3.1. Minneapolis, 2004.
- [32] 王杰, 庄建琦, 孔嘉旭, 等. 基于 DEM 模拟的破碎对黄土滑坡动力学特征影响研究 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 502 - 513. [WANG Jie, ZHUANG Jianqi, KONG Jiayu, et al. Influence of fragmentation on dynamic characteristics of loess landslide based on DEM simulation [J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 502 - 513. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 刘宁, 刘杰. 国内外标准中砂性土内摩擦角确定方法对比 [J]. 水运工程, 2021(1): 42 - 47. [LIU Ning, LIU Jie. Comparison of methods for determining internal friction angle of sand by domestic and foreign standards [J]. Port & Waterway Engineering, 2021(1): 42 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 尹成薇, 梁冰, 姜利国. 基于颗粒流方法的砂土宏-微观参数关系分析 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊 2): 264 - 267. [YIN Chengwei, LIANG Bing, JIANG Ligu. Analysis of relationship between macro-micro-parameters of sandy soil based on particle flow theory [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup 2): 264 - 267. (in Chinese with English abstract)]
- [35] YANG Liu, WANG Deguo, GUO Yanbao, et al. Tribological behaviors of quartz sand particles for hydraulic fracturing [J]. Tribology International, 2016, 102: 485 - 496.
- [36] 陈家乐, 倪万魁, 王海曼, 等. 原状黄土土-水特征曲线与湿陷性的相关性 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 107 - 114. [CHEN Jiale, NI Wankui, WANG Haiman, et al. Correlation between soil-water characteristic curve and collapsibility in undisturbed loess [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 107 - 114. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 王韵, 王红雨, 李其星, 等. 探地雷达在湿陷性黄土挖填方高边坡土体性状探测中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 102 - 110. [WANG Yun, WANG Hongyu, LI Qixing, et al. Application of the ground-penetrating radar technology in detection of soil properties of the high cutting and filling slopes in collapsible loess area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 102 - 110. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 李同录, 冯文清, 刘志伟, 等. Q₂ 黄土湿陷系数试验压力取值的讨论 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 59 - 68. [LI Tonglu, FENG Wenqing, LIU Zhiwei, et al. A discussion of the test pressure of collapsible coefficient for Q₂ loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 59 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 潘登丽, 胡向阳, 赵成, 等. 砂井载荷浸水试验在深层黄土湿陷性评价中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 122 - 131. [PAN Dengli, HU Xiangyang, ZHAO Cheng, et al. Application of sand-well load immersion test to deep loess collapsibility evaluation [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 122 - 131. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 钱法桥, 邓亚虹, 慕焕东, 等. 吕梁山区黄土物理性质力学参数区域分布特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 61 - 70. [QIAN Faqiao, DENG Yahong, MU Huandong, et al. Distributive characteristics of physical and mechanical parameters of the loess soils in Lüliang mountainous area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 61 - 70. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 乔峰, 薄景山, 常晁瑜, 等. 3 种特殊土物理力学性质指标统计分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1356 - 1365. [QIAO Feng, BO Jingshan, CHANG Chaoyu, et al. Statistical analysis of physical and mechanical properties of three special soils [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1356 - 1365. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 李林翠, 李喜安, 洪勃, 等. 不同埋深马兰黄土孔隙结构试验 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 493 - 503. [LI Lincui, LI Xi'an, HONG Bo, et al. Experiment on pore structures of Malan loess at different buried depth [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 493 - 503. (in Chinese with English abstract)]