

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.027



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



脲酶矿化胶结砂土的单轴压缩离散元分析

张建伟^{1,2}, 蒋洪亮¹, 尹悦³, 王培坤¹, 王俊⁴

(1. 河南大学建筑工程学院, 河南 开封 475004; 2. 河南省历史建筑智能保护与修复工程研究中心, 开封 475004; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 4. 许昌学院土木工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)是一种具有广阔前景的土体固化改良技术。为探究EICP胶结砂土的受力破裂机理和细观特性,基于PFC2D研究不同胶结水平、不同碳酸钙分布的胶结砂试样在单轴压缩试验中的力学参数、颗粒位移和微裂纹发展过程,解释其变形和破坏机制。结果表明:与室内试验相比,考虑碳酸钙含量、分布和颗粒接触模型的离散元模拟能较好地反映胶结砂试样的力学性能和变形特性;低胶结水平的试样发生局部剪切破坏,破坏面出现在中部碳酸钙含量较低的部位;随着胶结水平的提升,砂土颗粒平均位移减小,位移方向靠近轴向压缩的方向,试样发生整体劈裂破坏;胶结水平越高,试样中颗粒接触的分布越均匀,胶结破坏带扩展越慢,裂纹生长速率越低。

关键词: 酶诱导碳酸钙沉淀;砂土固化;离散元模拟;单轴压缩试验

中图分类号: TU441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)03-0021-09

Discrete element analysis of uniaxial compression test of EICP cemented sand soil

ZHANG Jianwei^{1,2}, JIANG Hongliang¹, YIN Yue³, WANG Peikun¹, WANG Jun⁴

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China; 2. Henan Province Research Center for Intelligent Protection and Restoration of Historical Buildings, Kaifeng 475004, Henan, P. R. China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China; 4. School of Civil Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, Henan, P. R. China)

Abstract: Enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) is a soil solidification and improvement technique with broad prospects. In order to study the mechanical fracture mechanism and meso-properties of EICP stabilized sand, this paper, based on PFC2D, studies the mechanical parameters, particle displacement and microcrack development process of cemented sand samples with different cementation levels and different calcium carbonate distributions in uniaxial compression tests to explain their deformation and failure mechanisms

收稿日期: 2024-11-08

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金(225200810005);河南省自然科学基金(232300420073)

作者简介: 张建伟(1981-),男,博士,教授,主要从事微生物岩土矿化技术研究, E-mail: zjw@henu.edu.cn。

尹悦(通信作者),男,博士生, E-mail: yy_cve@163.com。

Received: 2024-11-08

Foundation items: Joint Fund of the Technical R & D Program of Henan Province (No. 225200810005); Natural Science Foundation of Henan Province (No. 232300420073)

Author brief: ZHANG Jianwei (1981-), PhD, professor, main research interest: microbial geotechnical engineering, E-mail: zjw@henu.edu.cn.

YIN Yue (corresponding author), PhD candidate, E-mail: yy_cve@163.com.

and failure evolution laws. The results indicate that discrete element simulation considering the content, distribution, and particle contact model of calcium carbonate can better reflect the mechanical and deformation characteristics of the cemented sand specimens compared with laboratory tests. Specimens with a low level of cementation undergo local shear failure, and the failure surface emerges in areas with lower calcium carbonate content in the middle. With an increase in cementation level, average particle displacement in sandy soil becomes smaller, and the direction of particle displacement is closer to the axial compression direction of the specimen, leading to splitting failure with better global stability. The higher the level of cementation is, the more uniform the distribution of particle contacts in specimens is observed, resulting in slower extension rates for both crack growth and zones experiencing cementation failure.

Keywords: enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP); sand soil solidification; discrete element simulation; uniaxial compression test

作为新兴的生物固化技术,微生物矿化技术具有稳定性好、绿色环保等优点。目前研究者已在土体加固^[1-3]、坝体防渗治理^[4-5]、岩石裂缝修复^[6-7]、重金属污染土修复^[8-10]等方面展开研究。脲酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术通过脲酶催化尿素水解,生成铵根离子和碳酸根离子,在可溶性钙离子存在的情况下,产生碳酸钙沉淀。相较于微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术,EICP在细粒土的改良与裂缝修复方面展现出显著优势。脲酶矿化无需氧气参与,可有效应用于细粒土环境中;其使用的脲酶催化剂尺寸微小,能够渗透并修复深层裂缝;矿化后,残留的脲酶能自然降解。EICP技术在岩土工程领域具有广泛的应用前景。

砂土是脲酶矿化的主要研究和应用方向之一,已有众多学者对EICP胶结砂土的宏细观力学性能、理论推导和现场应用等方面开展试验研究并取得了显著成果。Cheng等^[11]通过控制不同脲酶浓度及温度等影响因素开展砂土固化试验发现,在低脲酶活性和常温条件下,EICP胶结砂能得到有效的碳酸钙晶体沉积模式,通过扫描电镜从微观角度观察到巨大的晶体簇沉积在砂颗粒之间,从而提升了颗粒的胶结程度,显著改善了土体的无侧限抗压强度与刚度。Xu等^[12]对酶诱导碳酸钙沉淀的胶结性能和微观力学性能进行研究发现,大豆粗脲酶诱导碳酸钙沉淀的延展性高于商业精酶,且方解石的弹性模量、硬度和延展性均高于文石。基于Lemaitre应变等效原理,Jiang等^[13]开发了能准确预测EICP固化砂土在不同围压条件下的完整应力-应变演化过程统计损伤本构模型。Yan等^[14]采用盐析法提取脲酶,减轻了提取脲酶过程中过量蛋白质导致的砂土顶部堵塞问题,实现了更均匀的碳酸钙沉积,提高了砂土的无侧限抗压强度。Gitanjali等^[15]通过三轴压缩和SEM试验发现,受益于碳酸钙颗粒的胶结作用,EICP固化后的砂土促使峰值偏应力和黏聚力显著增大。He等^[16]构建了尺寸为103 cm×63 cm×

50 cm的土模型,验证了较大规模土模型中EICP方法改善粉砂土力学性质的有效性。Xu等^[17]将EICP应用于海砂加固地下电缆管道下方垫层发现,EICP可提高地基的承载能力,经EICP处理后垫层的动态变形模量达50.55 MPa,远高于振动压实处理区域的32.925 MPa。EICP能有效改善砂土的承载能力和抗变形能力,但鉴于试验检测手段的局限性,目前EICP固化砂土的宏细观结构观测多基于加载试验后的静态图片观测,而对于破坏过程中的受力演化过程难以记录表征。

数值模拟能克服试验和监控手段的局限性,实现对EICP固化砂土破坏过程的全面监测与分析。作为一种典型的散粒状胶结体,脲酶矿化胶结砂不符合有限元的连续性假设。在遭受外力荷载作用时,胶结体内部颗粒之间的位移和运动将显著影响其宏观力学行为^[18]。有效的离散元模拟有助于理解脲酶矿化胶结砂的受力演化机制。已有学者针对MICP固化砂土进行了离散元模拟研究。申嘉伟等^[19]通过离散元方法探究了微生物胶结砂的颗粒压碎过程并与室内试验进行对比发现,离散元模拟可较为准确地模拟颗粒破碎中裂纹分布的过程。Feng等^[20]采用三维离散元法模拟研究了生物胶结砂的力学行为,对模拟试件的宏观试验响应进行比较,探讨了数值试样的黏结断裂模式和剪切带的开展,模拟结果与试验结果基本一致。章懿涛等^[21]利用离散元方法建立微小的颗粒接触点来模拟碳酸钙的胶结作用,分析MICP胶结珊瑚砂的无侧限抗压过程,给出了不同胶结程度下珊瑚砂固化体的位移及受力特征模拟结果。离散元方法可有效模拟微生物胶结砂的力学行为。然而,上述研究主要集中于微生物诱导碳酸钙固化砂土的离散元模拟或基于单一碳酸钙含量分布的砂颗粒胶结模型,而对于考虑上、中、下不同碳酸钙分布的不同胶结程度EICP固化砂土的离散元模型鲜有研究。

笔者通过室内试验制取非均质脲酶矿化胶结

砂试样,并使用 PFC2D 建立数值模型,将模拟结果与实测结果进行对比,分析不同碳酸钙含量、不同碳酸钙分布试样的力学参数、颗粒位移和微裂纹发展过程,解释变形和破坏机制。

1 室内单轴压缩试验

1.1 标准砂

试验用砂为中国厦门的标准砂,主要成分为石英,颗粒级配曲线如图 1 所示。标准砂的比重 G_s 为 2.65,平均粒径 D_{50} 为 0.065,曲率系数 C_c 为 0.577,不均匀系数 C_u 为 7.0,是一种级配不良的砂土。

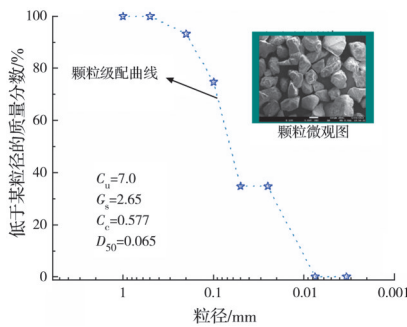


图 1 试验砂土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain gradation curve of test sand

1.2 大豆粗脲酶和胶结液的制备

采用黄豆作为脲酶源,在制备粗大豆脲酶时,先将大豆粉碎成豆粉,过 75 目筛后置于 50 °C 的烘干箱中进行 48 h 烘干,获取干燥豆粉。称取适量的豆粉混合在去离子水中,利用磁力搅拌机将豆粉搅拌 30 min,配制成浓度为 20 g/L 的豆液混合物。将

充分搅拌后的混合物置于 4 °C 的冰箱静置 2 h。取上部无渣豆液进行离心(转速 4 500 r/min、温度 4 °C),经过 15 min 离心后提取的上清液即为所需的粗大豆脲酶溶液。

脲酶活性采用 Whiffin 等^[22]提出的电导率法测定(电导率仪为雷磁 DDB-303A 型),经测试,粗脲酶分解尿素的活性为 7.45 (mmol/L)/min。在脲酶矿化过程中,胶结液可为脲酶诱导碳酸钙沉淀反应提供钙源和尿素。已有研究证明,在 EICP 矿化过程中,0.75 mol/L 的胶结液浓度碳酸钙转化率最高^[23],试验中以 0.75 mol/L 的尿素和氯化钙作为与脲酶溶液混合前的初始胶结液浓度,二者体积比为 1:1。

1.3 EICP 固化过程

注浆模具由内径 39.1 mm、高 100 mm 的圆形 PVC 双瓣膜组成,在进行标准砂样制作时,双瓣膜底部需放置一块透水石,并取一片滤纸覆盖在透水石上,分 3 层均匀压实,灌入标准砂。标准砂灌注完成后,顶部覆盖一块与砂柱内径相符的土工布。砂样填充完成后,采用两根导管分别吸收 25 mL 脲酶溶液和胶结液,同时从顶部注入,底部流出,注浆速率控制为 5 mL/min。按照上述流程,每隔 12 h 进行一次脲酶溶液和胶结液的注入,分别处理 2、6、10 次,以获得不同胶结水平、不同碳酸钙分布状态的非均质砂柱试样,将其依次标注为 1#、2# 和 3#。为减少试验结果的偶然性,每个工况进行 3 次重复试验,选取碳酸钙含量和抗压强度最接近平均值的试样进行室内试验结果分析,流程如图 2 所示。

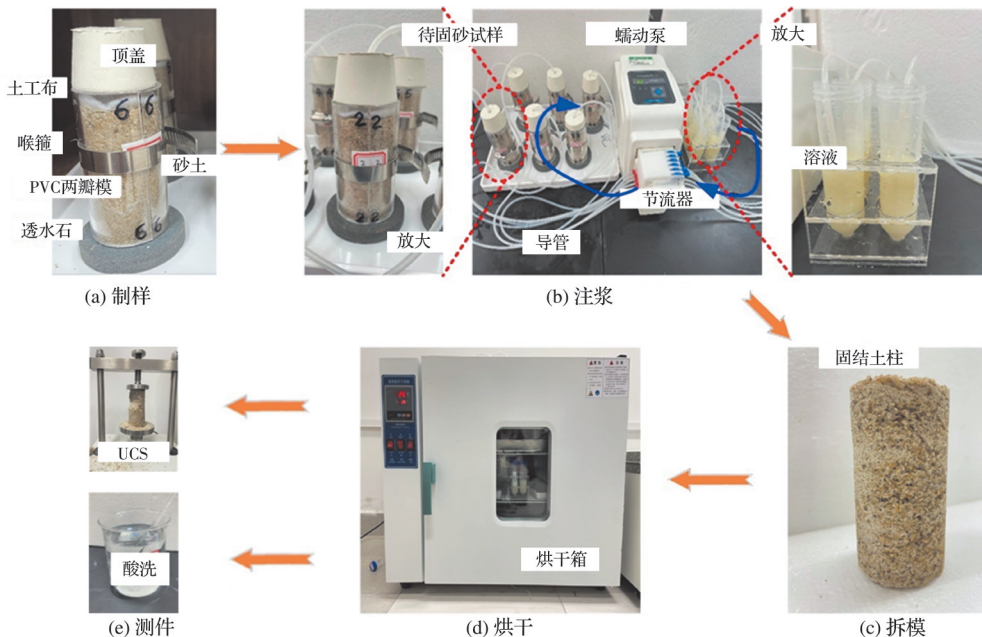


图 2 注浆流程图

Fig. 2 Flow chart of grouting

1.4 室内试验结果分析

经多轮注浆后,将PVC双瓣膜分离,取出固化后的砂柱试样,用去离子水冲洗杂质并终止脲酶矿化反应。随后,将其置于50℃烘箱中48h,完成干燥过程,从而获得具有代表性的3种不同碳酸钙总量及分布试样1#~3#。1#~3#试样的碳酸钙分布情况及无侧限抗压强度试验参数如表1所示。其中,3#试样的无侧限抗压强度较高,1#试样的无侧限抗压强度较低,1#~3#试样的无侧限抗压强度分别为264、649、1695 kPa。采用酸洗法测量试样的碳酸钙含量,1#~3#胶结试样的碳酸钙含量分别为1.917%、3.847%和4.396%。

表1 不同胶结水平试样的实测参数

Table 1 Measured parameters of samples with different cementation levels

试样 编号	碳酸钙含量/%			抗压 强度/kPa	破坏 应变/%
	上部	中部	下部		
1#	1.84	1.78	2.13	264	2.06
2#	3.81	3.95	3.78	649	5.00
3#	3.84	4.53	4.82	1695	4.50

2 模型的制备及参数标定

采用离散元数值模拟软件PFC2D(Particle Flow Code 2D)对具有不同胶结水平和碳酸钙分布状态的试样进行单轴压缩试验并进行分析。离散元数值模拟是一种基于圆形元素和接触物理学基本定律的数值模拟方法^[24]。该模拟方法应用牛顿第二定律,以计算颗粒单个球体的运动来模拟系统的动力学行为,使用力-位移定律计算颗粒间接触处的力,并通过这些力的相互作用来描述颗粒体系的相互运动和变形。EICP加固标准砂单轴压缩试验的离散元模拟过程分为3个步骤:数值模型制备、接触力学模型和细观参数的标定。

2.1 数值试样制备

为模拟非均质EICP胶结砂试样的单轴压缩试验,建立如图3所示的离散元数值模型。该模型由标准砂和碳酸钙两种颗粒组成,以圆形表示。构建数值试样时,砂颗粒粒径分布依照实际标准砂的分布生成。已有研究证实,适度放大颗粒尺寸对材料的力学性质和破坏模式影响较小^[21,25]。综合考虑计算成本和精度,将砂颗粒半径放大10倍。

2.2 接触力学模型

EICP固化后标准砂试样存在3种接触方式:碳酸钙-碳酸钙颗粒之间的接触、碳酸钙-砂颗粒之间的接触以及砂颗粒和砂颗粒之间的接触。针对3种不同接触方式,选择相应的本构模型来模拟它们之间不同的接触行为。考虑到砂颗粒与砂颗粒之间

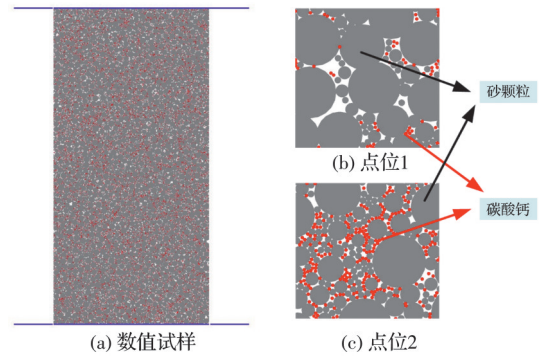


图3 数值试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of numerical sample

的相对位移有限,线性接触模型足以准确模拟砂颗粒间的相互作用和弹性变形,且能显著节约计算成本,接触模型示意图如图4(a)所示。针对EICP矿化标准砂中的碳酸钙-碳酸钙颗粒、碳酸钙-标准砂颗粒之间的胶结破裂行为,采用平行黏结模型作为这两种接触的本构模型^[25-26]。图4(b)给出了平行黏结模型示意图,该胶结键具有法向刚度和切向刚度,均匀地分布在两个颗粒的接触面之间。在颗粒相互运动时,若黏结内的最大法向力和剪切力超过各自的强度阈值,则会导致砂颗粒与碳酸钙颗粒、碳酸钙颗粒与碳酸钙颗粒之间的胶结键破坏,并伴随着胶结力和力矩的消失,形成松散游离颗粒。这正是EICP固化胶结破坏的微观原因。

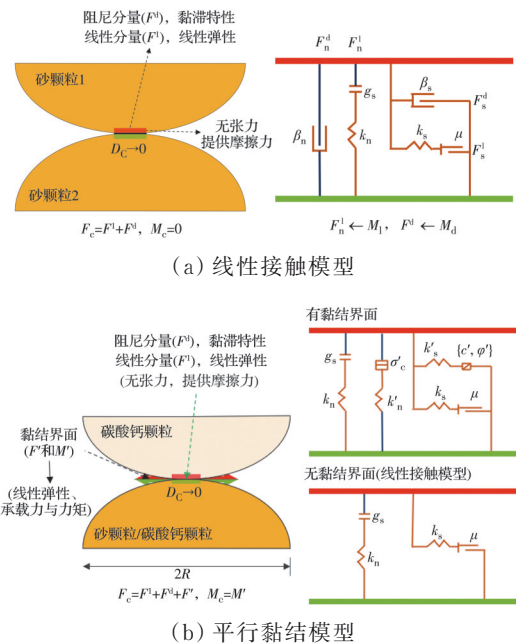


图4 接触模型示意图

Fig. 4 Schematic representation of the contact model

2.3 细观参数及加载方式

Xu等^[27]研究发现,在离散元模拟中,细观强度参数不仅直接影响土壤的宏观强度参数,还对土体的宏观变形参数产生显著影响。采用线性接触模

型描述砂颗粒间的相互作用时,其关键微观参数为颗粒有效模量 E^* ,可通过式(1)~式(3)计算。

$$E^* = \frac{k_n L}{S} \quad (1)$$

$$L = R_1 + R_2 \quad (2)$$

$$S = \pi r^2 \quad (3)$$

式中: k_n 为法向刚度; R_1 、 R_2 分别为接触中两个圆形单元的半径; r 为接触中两个圆形单元中半径较小的值。在试样上下两端设置刚性加载板,以 1.667×10^{-3} mm/s 的加载速率在上下两面刚性墙施加荷载,持续监测试样的应力-应变关系和微裂纹发展情况。为模拟单相注浆后试样的碳酸钙含量和分布不均匀现象,将模拟试样分为上、中、下 3 个部分,并基于砂土的实际粒径分布和上、中、下 3 个部分的不同碳酸钙分布建立对应的数值试样,模拟真实反应下脲酶矿化胶结砂中碳酸钙的不均匀分布状态。1#、2#、3#数值试样的碳酸钙颗粒个数分别为 58 412、117 219 和 133 379 个。采用“试错法”匹配单轴压缩离散元模型的细观参数,即通过多次调整细观参数使得模拟的应力-应变曲线和峰值强度接近室内试验结果。经过反复调试验证,材料细观参数和接触细观参数如表 2、表 3 所示。

表 2 材料细观参数

Table 2 Material meso-parameters

材料	颗粒密度/(kg/m ³)	有效模量/Pa	刚度比	摩擦系数
碳酸钙	2 930	3.0×10^7	1.0	0.5
砂颗粒	2 650	6.9×10^8	1.0	0.5

表 3 接触细观参数

Table 3 Contact meso-parameters

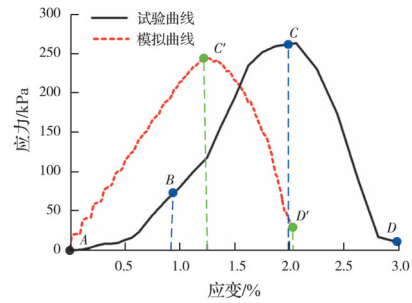
接触	胶结有效	胶结刚	拉伸	黏结
	模量/Pa	度比	强度/Pa	强度/Pa
碳酸钙-砂颗粒	3.0×10^7	1.0	7.0×10^5	7.0×10^5
碳酸钙-碳酸钙	4.9×10^7	1.0	2.3×10^5	2.3×10^5

3 数值模拟结果分析与讨论

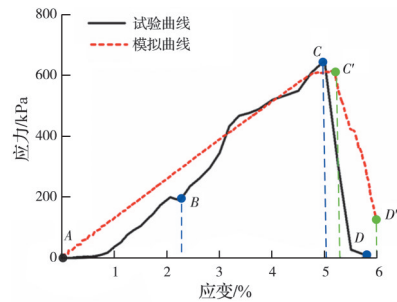
3.1 数值模拟与室内试验结果对比

在不同碳酸钙含量和分布状态下,数值试样单轴压缩模拟结果与室内试验得到的应力-应变曲线对比如图 5 所示。可以观察到,室内实际试样加载过程经历了 3 个阶段:第 1 阶段(AB 段)中,随着应变的增大,应力与应变之间呈线性或近线性关系,代表试样加载时的压密阶段;第 2 阶段(BC 段)中,随着应变的进一步增大,试样的应力迅速上升并达到峰值点,可视为近似弹性变形阶段;第 3 阶段(CD 段)中,试样的应力逐渐减小并快速下降至零,此时试样完全破坏。室内无侧限抗压强度试验得到的

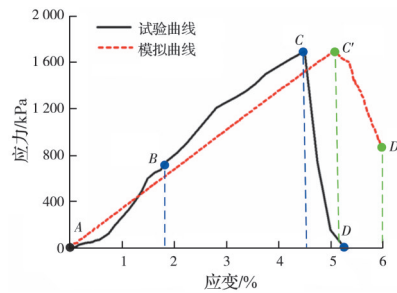
应力-应变曲线均有明显压密阶段,整体呈现压密阶段→近似线弹性变化阶段→破坏阶段。不同于韧性材料,脲酶矿化胶结砂并不存在“峰后残余应力”,是典型的脆性材料。对比实际试样,离散元模拟得到的应力-应变曲线缺乏初始压密阶段,这主要是因为离散元模拟中所模拟的材料都具有刚性特性,在进行压缩试验时无法体现实际土颗粒本身的变形,因此,无法准确体现室内试验加载过程中的起始压密阶段^[18]。



(a) 1#试样



(b) 2#试样



(c) 3#试样

图 5 模拟值与实测值的应力-应变曲线对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured stress-strain curves

为进一步验证参数选取的合理性,对比了 3 种胶结水平下数值模拟与室内试验得到的峰值强度 σ_{max} ,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,不同试样的模拟和实测峰值强度都非常接近,最大误差不超过 3.3%。表明前期建立的模型和选取的相关参数合理,可在此基础上继续进行脲酶矿化胶结砂单轴压缩试验的模拟结果分析。

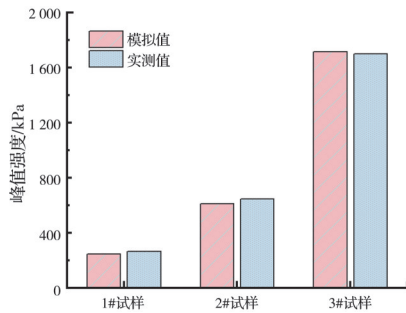


图 6 峰值抗压强度模拟值和实测值对比图

Fig. 6 Comparison of simulated and measured peak compressive strength

3.2 数值试样破坏模式分析

图 7 和图 8 分别为不同碳酸钙分布状态下大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀加固砂土的宏观破坏模式的 PFC2D 数值模拟结果和室内试验结果。

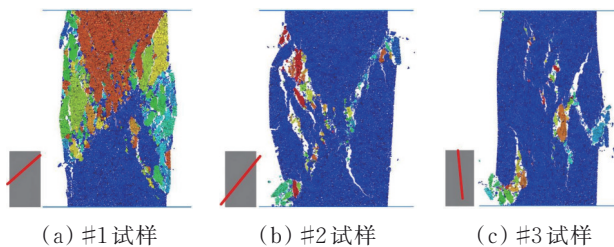


图 7 宏观破坏模式的数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of macroscopic failure modes



图 8 宏观破坏模式的室内试验结果

Fig. 8 Laboratory test results of macroscopic failure modes

由图 7、图 8 可知,脲酶矿化胶结砂试样在加载破坏时表现出较强的脆性破坏特征,模拟结果也表现出相同的破坏特征。对比模拟结果与实测破坏状态可以看出,PFC2D 的模拟结果与通过室内试验实际观测到的试样破坏模式接近。在较低胶结水平下(1#试样),非均质胶结砂产生了分布于试样上、中部的剪切裂纹,这与试样内部的碳酸钙分布状态相吻合,即碳酸钙含量在上中部最低,试样最终发生局部剪切破坏。非均质胶结砂的破坏裂纹首先出现在试样的薄弱部位,1#试样上部和中部碳酸钙含量相比底部更低,整体胶结水平不高,因此,破坏面出现在上、中部。在中等胶结水平下(2#试

样),大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀加固砂土形成跨度更大的剪切裂纹,沿着试样左下角和右上角发生贯通剪切破坏以及破坏面以外的部分剥离、脱落。在高胶结水平下(3#试样),试样形成较大的竖向贯通裂纹,破坏模式由剪切破坏转变为劈裂破坏。可见,非均质胶结砂的破坏模式也与胶结水平有关,当试样胶结水平较高时,其孔隙被碳酸钙大量填充,薄弱部位进一步减少,呈现出整体性更好的劈裂破坏。Xiao 等^[28]同样认为,胶结砂的破坏状态与整体胶结水平相关,胶结水平高、均匀性好的微生物矿化胶结砂试样往往呈劈裂破坏。

3.3 数值试样位移分析

经 PFC2D 数值模拟得到的 1#~3#非均质胶结砂试样破坏的位移场如图 9 所示。由图 9 可见,在低胶结水平下(1#试样),由于整体碳酸钙含量较少,试样上部和中部出现位移差异,形成了 X 形位移分割区域。特别是在 X 形分割区域右侧明显存在位移差异现象,与实际状态下由于中层碳酸钙含量较低导致其胶结水平较差,从而出现软弱区域的情况相一致。1#试样的位移场结果与图 8 中实际破坏形式高度吻合,可进一步确认该模型前期细观参数设置的准确性较高。在中等胶结水平下(2#试样),X 形位移分割区域的交点向下发展,形成斜向大剪切线。试样中部材料的颗粒位移明显,导致试样破坏时中部呈现清晰的剪切破坏面。在高胶结水平下(3#试样),试样中部及两侧部分颗粒由于位移大小、方向不同而存在明显位移差,进而导致颗粒分离,形成明显的竖向贯通裂纹。随着胶结程度的增加,数值试样红色区域逐渐消失,蓝色区域逐渐扩大。颗粒位移由中央集中的大规模位移转变为局部零散位移,并只在胶结薄弱部分和应力集中部分出现。总体上,颗粒位移程度逐渐减小,虽然模拟中部分点位的位移与实际破坏状态有差别,但试样的破坏模式较为接近。

3.4 数值试样微裂纹演化分析

结合应力-应变曲线能观察到不同胶结水平下 EICP 固化砂土试样中微裂纹数目在无侧限抗压强

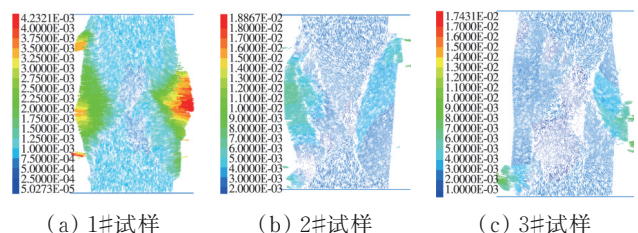


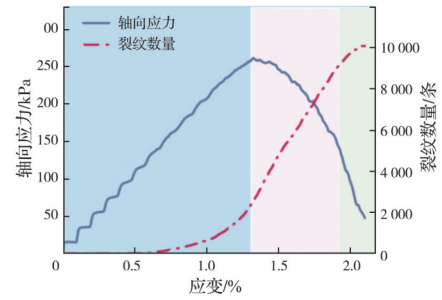
图 9 胶结砂位移场的数值模拟结果

Fig. 9 Numerical simulation results of displacement field of cemented sand

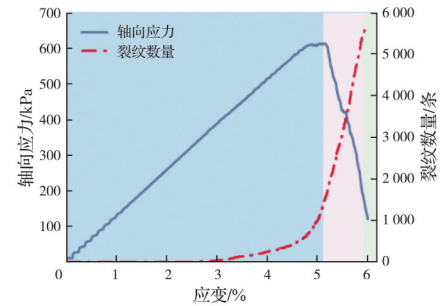
度试验过程中的变化规律,如图 10 所示。经 EICP 固化后,1#~3#砂土试样裂纹数量均随应变的增大而增大,但变化规律存在细微差异:当胶结水平较低时(1#试样),裂纹数量先缓慢增加然后快速增大,当裂纹数量接近峰值时,增大速度再次趋于平缓;在中等胶结水平下(2#试样),试样的裂纹数量同样先平缓增多,但平缓段相比 1#试样更长。上升段开始后裂纹数量迅速增加,几乎不存在 1#试样最后的平缓段;在高胶结水平下(3#试样),试样的前段更长。上升段开始后裂纹数量同样迅速增加,然后试样达到破坏极限,不存在平缓段。裂纹数量由低胶结水平(1#试样)的“缓慢增长→线性增长→逐渐稳定”转变成高胶结水平下的(3#试样)的“少量裂纹→指数增长”。可见,随着碳酸钙含量的增加,“碳酸钙颗粒”与“碳酸钙颗粒”、“碳酸钙颗粒”与“砂颗粒”之间的胶结力逐渐增强,裂纹的生长在初期受到抑制,当外力荷载大于胶结力后,裂纹扩展速度急速增长,胶结体强度增加的同时,脆性逐渐增强。

3.5 位移演化分析

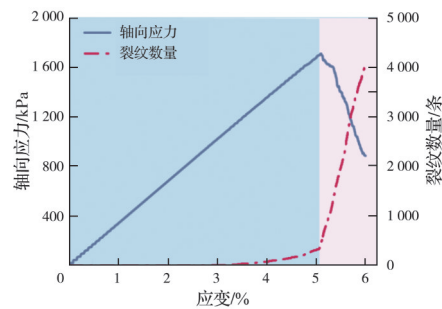
PFC2D 数值模拟得到的不同胶结水平下大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀加固砂土试样在单轴压缩试验过程中不同应变时的试样颗粒位移如图 11 所示。在单个不同应变的位移云图中,位移较为集中的部分更偏向于红色,表示该部分试样颗粒的相对位移量较大,而蓝色则表示该部分试样颗粒的位移量较小。不同应变的位移云图中,颜色仅表示每幅图的相对位移量,不同的图颜色标注尺度不同,已在每幅图的左侧单独标出了颜色代表的位移量。可以



(a) 试样 1#



(b) 试样 2#



(c) 试样 3#

图 10 不同胶结砂的应力及裂纹数量随应变的变化
Fig. 10 Variation of stress and crack number of different cemented sand with strain

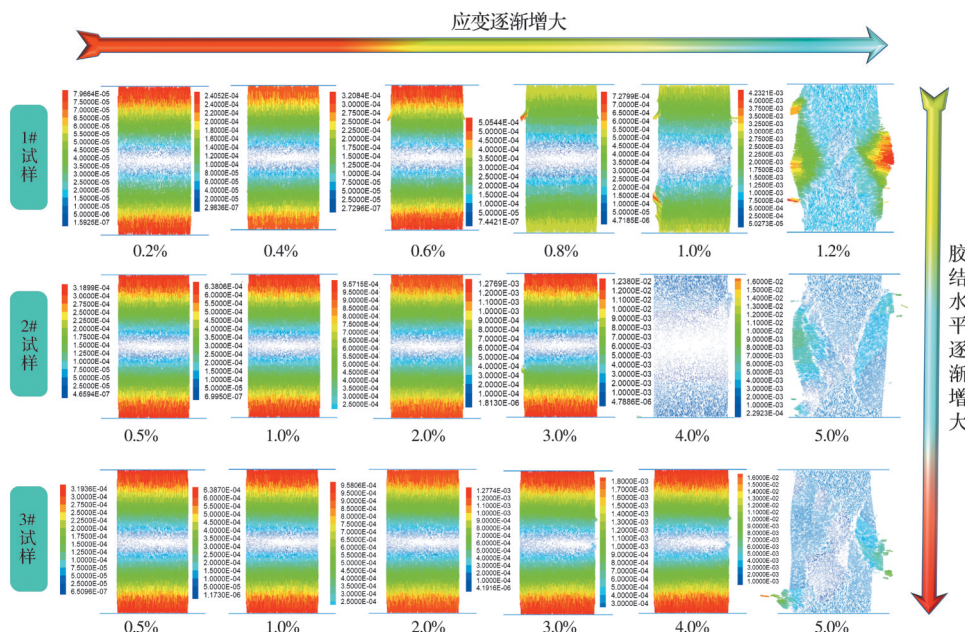


图 11 试样位移过程演变图

Fig. 11 Evolution diagram of displacement process of samples

看出,在应变较小时,胶结砂试样中颗粒间的胶结键相对完整,胶结砂主要表现出弹性变形,试样发生竖向位移;而当应变较大时,由于颗粒间胶结键的破坏及颗粒的重组,胶结砂由弹性变形转变为塑性变形,试样的水平位移更显著,位移方向水平向外。对比 1#与 3#试样可以发现,随着胶结程度的增加,3#试样显示出更均匀的微裂纹扩展和较小的内部位移差异,位移方向更贴近轴向压缩,表现出更好的结构稳定性。

4 结论

1)基于 PFC2D 模拟得到的大豆粗脲酶诱导碳酸钙沉淀胶结砂的应力-应变曲线与室内试验得到的应力-应变曲线在很大程度上具有相似性,二者仅在起始压密段有小幅偏差不,数值模型可以用作脲酶矿化胶结砂试样的单轴压缩分析。

2)数值模拟得到的峰值抗压强度 σ_{\max} 与试验实测数据非常接近,说明 PFC2D 数值模拟精度较高。通过设定考虑砂颗粒-砂颗粒、碳酸钙-砂颗粒、碳酸钙-碳酸钙接触模型的细观参数,并标定不同碳酸钙含量及分布的离散元模拟,能较好地模拟非均质胶结砂试样的单轴加载演化特性。

3)在单轴压缩试验中,不同碳酸钙含量及分布的试样破坏模式不同:低胶结水平下试样发生局部剪切破坏,破坏面出现在碳酸钙含量较低的中部脆弱部分;随着胶结水平的提升,试样发生整体剪切破坏及竖向劈裂破坏。离散元模拟结果与实际试验结果较吻合。

4)对应试样的实际破坏过程,离散元模拟的非均质胶结砂试样在加载过程中微裂纹的发展过程与应力-应变曲线阶段相对应,经过微裂纹数量缓慢增加的压密阶段及弹性变形阶段、微裂纹数量迅速增加的破坏阶段后,试样发生脆性破坏。

参考文献

- [1] Song J Y, Sim Y, Jang J, et al. Near-surface soil stabilization by enzyme-induced carbonate precipitation for fugitive dust suppression[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, 15(7): 1967-1980.
- [2] Behzadipour H, Sadrekarimi A. Effects of microbially induced calcite precipitation on static liquefaction behavior of a gold tailings sand[J]. *Biogeotechnics*, 2024, 2(4): 100097.
- [3] Ngoma M C, Kolawole O. Porosity and bedding controls on bio-induced carbonate precipitation and mechanical properties of shale and dolomitic rocks: EICP vs MICP[J]. *Biogeotechnics*, 2024, 2(4): 100102.
- [4] Yuan L J, Li G, Liu J, et al. Study on mechanical properties of sandy soil solidified by enzyme-induced calcium carbonate precipitation (EICP) [J]. *Buildings*, 2024, 14(7): 1977.
- [5] He J, Fang C H, Mao X Y, et al. Enzyme-induced carbonate precipitation for the protection of earthen dikes and embankments under surface runoff: laboratory investigations[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2022, 21(2): 306-314.
- [6] Yan Z, Gowthaman S, Nakashima K, et al. Polymer-assisted enzyme induced carbonate precipitation for non-ammonia emission soil stabilization[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12: 8821.
- [7] Xiao Y, Zhao C, Cui H, et al. Microscale insights into enzyme-induced carbonate precipitation in rock-based microfluidic chips[J]. *Geotechnique*, 2024, 75(7): 846-857.
- [8] 边汉亮, 吉培瑞, 王俊岭, 等. EICP 修复重金属污染土的环境耐久性研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(10): 2779-2788. Bian H L, Ji P R, Wang J L, et al. Study on the environmental durability of heavy metal contaminated soil remediated by enzyme induced carbonate precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(10): 2779-2788. (in Chinese)
- [9] Kumar A, Song H W, Mishra S, et al. Application of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) techniques to remove heavy metal in the natural environment: a critical review[J]. *Chemosphere*, 2023, 318: 137894.
- [10] Gao R X, Ma J H, Liu G, et al. Optimization of deposition process for a productive and cohesive bio-CaCO₃ to repair concrete existing cracks[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2023, 107(11): 3479-3494.
- [11] Cheng L, Shahin M A, Mujah D. Influence of key environmental conditions on microbially induced cementation for soil stabilization[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017, 143(1): 04016083.
- [12] Xu K, Huang M, Cui M J, et al. Effect of crystal morphology on cementability and micromechanical properties of calcium carbonate precipitate induced by crude soybean enzyme[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(12): 5095-5108.
- [13] Jiang X L, Wang H D, Yang H, et al. Triaxial compression behavior and damage model of EICP-cemented calcareous sand[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2025, 43(2): 77.
- [14] Yan B Y, Zhou Y D, Li C, et al. Modified SICP method to mitigate the effect of bio-clogging by excess protein from soybean crude urease extracts for biocementation process[J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(9): 5047-5062.

- [15] Gitanjali A, Jhuo Y S, Yeh F H, et al. Bio-cementation of sand using enzyme-induced calcite precipitation: mechanical behavior and microstructural analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 417: 135360.
- [16] He J, Yang F, Qi Y S, et al. Improvement in silty sand with enzyme-induced carbonate precipitation: laboratory model experiment[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(7): 2895-2905.
- [17] Xu K, Huang M, Zhen J J, et al. Field implementation of enzyme-induced carbonate precipitation technology for reinforcing a bedding layer beneath an underground cable duct[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(4): 1011-1022.
- [18] 刘学伟, 王赛, 刘滨, 等. 不同注浆材料填充双裂隙类岩石试样力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(3): 623-638.
Liu X W, Wang S, Liu B, et al. Effect of filling grouting material on mechanical properties and mechanism of rock-like samples with double-crack[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(3): 623-638. (in Chinese)
- [19] 申嘉伟, 周博, 付茹, 等. 钙质砂单颗粒破碎强度和模式的试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(增刊1): 312-320.
Shen J W, Zhou B, Fu R, et al. Experimental study on crushing strength and mode of calcareous sand single particle[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(Sup 1): 312-320. (in Chinese)
- [20] Feng K, Montoya B M, Evans T M. Discrete element method simulations of bio-cemented sands[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, 85: 139-150.
- [21] 章懿涛, 方祥位, 胡丰慧, 等. 不同胶结程度 MICP 固化珊瑚砂的无侧限压缩离散元分析[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(4): 18-26.
Zhang Y T, Fang X W, Hu F H, et al. Discrete element analysis of MICP solidified coral sand with different cementation degrees under unconfined compression test[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(4): 18-26. (in Chinese)
- [22] Whiffin V S, Harkes M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423.
- [23] Zhang J W, Yin Y, Shi W P, et al. Experimental study on the calcium carbonate production rates and crystal size of EICP under multi-factor coupling[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01802.
- [24] 孔德森, 栾茂田. 岩土力学数值分析方法研究[J]. *岩土工程技术*, 2005, 19(5): 249-253.
Kong D S, Luan M T. Study on numerical analysis methods of geotechnical mechanics[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005, 19(5): 249-253. (in Chinese)
- [25] Li Z, Wang Y H, Ma C H, et al. Experimental characterization and 3D DEM simulation of bond breakages in artificially cemented sands with different bond strengths when subjected to triaxial shearing[J]. *Acta Geotechnica*, 2017, 12(5): 987-1002.
- [26] Shen J W, Wang H B, Zhou B, et al. Investigation of the effect of microbial-induced calcite precipitation treatment on bio-cemented calcareous sands using discrete element method[J]. *Computers and Geotechnics*, 2023, 158: 105365.
- [27] Xu Z H, Yu T F, Lin P, et al. Integrated geochemical, mineralogical, and microstructural identification of faults in tunnels and its application to TBM jamming analysis [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 128: 104650.
- [28] Xiao Y, He X, Stuedlein A W, et al. Crystal growth of MICP through microfluidic chip tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2022, 148(5): 06022002.

(编辑 王秀玲)