

文章编号:1672-3961(2024)04-0106-09

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2023.183

基于 MatDEM 的松散地基喷浆加固浆液扩散规律

郭静¹,赵振华²,马梦媛³,史长远³,姚占勇³,赵秋红²,姚凯^{3*}

(1.济南城市建设集团有限公司,山东 济南 250014; 2.济南黄河路桥建设集团有限公司,山东 济南 250013; 3.山东大学齐鲁交通学院,山东 济南 250002)

摘要:为分析松散地基喷浆加固过程中浆液扩散规律,借助 MatDEM 软件生成模拟土层,基于孔隙密度流原理实现喷浆过程可视化,生成土体颗粒位移场。从现有成桩直径预测公式出发,分析基于极限侵蚀距离的成桩直径预测公式的可靠性,基于模拟结果,通过分析喷浆压力、颗粒粒径等对修正参数的影响,对成桩直径预测公式进行修正,将现场试验中双管法旋喷浆施工参数及原位土体力学参数带入修正后成桩直径预测公式计算,与现场试验桩体开挖后实测直径进行对比,验证了修正公式的可靠性。

关键词:MatDEM; 高压喷浆; 孔隙密度流; 基础加固; 公式修正**中图分类号:**TV543+1 **文献标志码:**A**引用格式:**郭静,赵振华,马梦媛,等. 基于 MatDEM 的松散地基喷浆加固浆液扩散规律[J].山东大学学报(工学版),2024,54(4):106-114.

GUO Jing, ZHAO Zhenhua, MA Mengyuan, et al. Grout diffusion law for grouting reinforcement of loose foundation based on MatDEM [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(4):106-114.

Grout diffusion law for grouting reinforcement of loose foundation based on MatDEM

GUO Jing¹, ZHAO Zhenhua², MA Mengyuan³, SHI Changyuan³, YAO Zhanyong³, ZHAO Qiuhong², YAO Kai^{3*}

(1. Jinan Urban Construction Group Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China; 2. Jinan Yellow River Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

Abstract: In order to analyze the slurry diffusion law in the process of grouting reinforcement of loose foundation, the simulated soil layer was generated by MatDEM software. At the same time, the principle of pore density flow was used to realize the visualization of the grouting process, and the displacement field of soil particles was generated to analyze the slurry diffusion law. The reliability and influencing factors of the pile diameter prediction formula based on the ultimate erosion distance were analyzed. Based on the simulation results, the correction parameters of the ultimate erosion distance in the pile diameter prediction formula were proposed. By analyzing the influence of grouting pressure and particle size on the correction parameters, the prediction formula of pile diameter after correction was given. When the grouting pressure was small, the error of the formula was obvious. The construction parameters of the on-site double-pipe jet grouting method and the mechanical parameters of the in-situ soil were brought into the modified pile diameter prediction formula to obtain the predicted value of the slurry diffusion distance, and compared with the diameter of the pile after excavation in the field test. It could be seen that the reliability of the modified formula was improved.

Keywords: MatDEM; jet grouting; pore density flow; foundation reinforcement; formula modification

收稿日期:2023-07-24

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2021QE254);山东省优秀青年科学基金资助项目(海外)(2022HWYQ-016);教育部“春晖计划”合作科研资助项目(HZKY20220470)

第一作者简介:郭静(1987—),男,山东临沂人,高级工程师,主要研究方向为城市道路与交通工程施工技术。E-mail: 15615616118@163.com

* 通信作者简介:姚凯(1988—),男,山东临沂人,教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为地基处理。E-mail: yaokai@sdu.edu.cn

0 引言

近些年来,我国道路交通基础设施迅速发展。在我国高速公路工程快速发展的背景下,软弱地基加固一直是关键技术之一。目前,高压旋喷加固法为地基加固的主要方法^[1]。高压旋喷技术的设计理论主要类比现有同类工程经验,施工缺少参数化的理论依据,造成巨大的工程隐患^[2],且成桩直径受到施工参数的影响,现有的成桩直径预测公式存在一定误差。

离散元方法在模拟高压旋喷这一大变形非连续过程具有显著优势,在赋予颗粒间一定的力学特性(粒间接触行为、颗粒及其胶结强度等)并遵循牛顿第二定律(质心运动定律和动量矩定律)的基础上,通过时间迭代法实现宏观材料变形和破坏过程的模拟,此方法更适用于模拟土体中复杂的应力环境^[3]。国内外已有很多学者采用该方法实现喷浆过程的可视化和具体化。文献[4]引入颗粒离散元数值分析方法探究高压旋喷桩的成桩机理,克服传统力学模型中的连续性假定,模拟出高压喷浆时各向异性、紊乱的劈裂扩散现象;文献[5]借助离散元方法揭示喷浆压力与浆泡半径的关系,借助颗粒流语言建立6 m深处喷浆过程模型,得出土体压密范围随喷浆压力增大而增大的结论;文献[6]采用PFC3D软件,建立了富水粉细砂地层三维喷浆模型,并从微观角度确定出最佳喷浆压力;文献[7]采用二维颗粒离散元程序,考虑了砂卵石层渗透系数对浆液扩散半径的影响,按照时间因素对浆液扩散过程进行划分,并结合现场注水试验,验证模拟结果;文献[8]利用多相流方法,将土体简化为宾汉姆流体,对高压射流的施工过程进行可视化模拟,模拟了三维旋喷喷浆过程,观察到形成了约0.38 m³的土壤改良体,测量到的最高泥浆排放颗粒数为896。当前学者采用离散元方法模拟时,多以水代替浆液,且对土体进行了大量简化,模拟喷浆压力较低,常规高压旋喷压力多为20 MPa及以上^[9]。文献[10]开发的MatDEM软件采用孔隙密度流方法模拟流固耦合的过程,该方法可从单个孔隙尺寸模拟,并且不考虑单个孔隙内部流场,能满足大尺度离散元流固耦合过程计算力的要求。相较于主要的离散元流固耦合模拟方法(DEM-CFD^[10-13]、DEM-LBM^[14-17]和DEM-SPH^[18-19]),运算量大幅减小。

在成桩直径理论公式方面,目前高压旋喷技术

成桩直径预测多采用经验公式,其中文献[20]基于极限侵蚀理论,在考虑钻杆的旋转及上提等施工参数的前提下,建立了相应的理论预测公式,但未充分考虑喷浆压力对成桩直径的影响;文献[21]考虑到了浆液的侵蚀能力和土体抵抗能力及钻杆提升速度和浆液压力,其预测结果与现场实测数据十分接近,但公式形式复杂,参数较多,实际工程应用存在困难。因此急待提出准确且工程应用性强的成桩直径公式。

为探究松散地基浆液扩散规律,并提高高压旋喷成桩直径预测的准确性及便捷性,本研究借助MatDEM软件生成模拟土层,基于孔隙密度流原理,以喷浆压力为主要变量参数进行喷浆过程模拟,分析浆液扩散规律;同时基于模拟结果,在考虑喷浆压力影响的前提下修正基于极限侵蚀理论的成桩直径预测公式,并与现场试验结果做对比,验证修正公式的可靠性。

1 喷浆过程数值模拟

1.1 喷浆模型简介

主要对松散地基单管定喷喷浆加固过程开展建模分析。由于高压旋喷单管法现场施工常选取水灰比为1的水泥浆液,故模型选用水灰比为1的水泥浆液建立流体域。为简化模型,提高计算效率,建立单管法定喷1/4模型,模拟区域如图1所示。喷浆口位于模型左下角0.002 m×0.002 m区域处。根据最后一次循环平衡后的颗粒位移场图确定浆液扩散范围。

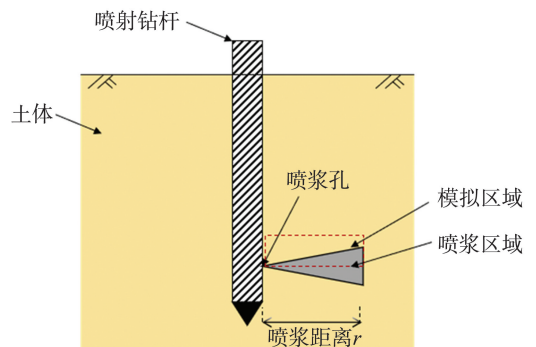


图1 模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of simulation model

1.1.1 几何尺寸的选取

当颗粒粒径减小时,模型计算量呈指数增长,为保证模拟精度,多次试算后,在保证生成颗粒数目量级的基础上,模拟区域选定为0.4 m×0.4 m,故模型尺寸参数见表1。

表1 不同粒径对应模型尺寸

Table 1 Corresponding model sizes for different particle sizes

粒径/mm	模型尺寸/(m×m)	颗粒数目/个	孔隙数目/个	模拟时长/s
3	0.4×0.4	5 046	5 956	0.317
4	0.4×0.4	2 929	3 273	0.307
5	0.4×0.4	1 949	2 137	0.263

1.1.2 模型参数的选取

参考文献[22]提出的材料训练方法,可通过模

表2 砂土材料的宏观力学参数

Table 2 Macromechanical parameters of sandy soil materials

杨氏模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	内摩擦因数	密度/(kg·m ⁻³)
7	0.2	1.2×10 ⁻⁴	0.37	0.69	1 960

表3 砂土材料微观力学参数

Table 3 Micro mechanical parameters of sand and soil materials

法向刚度/(kN·m ⁻¹)	切向刚度/(kN·m ⁻¹)	断裂位移/m	抗剪力/kN	摩擦因数	单元质量/kg
117 920	20 331	0.7×10 ⁻⁴	9 352	0.25	3 562

基于文献[26]提出的孔隙密度流方法赋值流体域参数,通过对喷浆压力进行赋值实现喷浆过程模拟。孔隙密度流方法是文献[27]提出的,这种方法将颗粒堆积起来(如图2(a)),当颗粒间的距离小于某一值(默认为单元平均半径的1/3)时,相邻颗粒中心会产生连接,通过连接线划分孔隙网络(如图2(b)),生成颗粒单元,最终建立孔隙流体模型(如图2(c))。赋值每个网格温度和密度,计算得出孔隙流体的压力。若两个孔隙间存在压力差,

拟土体整体力学参数给出土体颗粒微观参数。文献[23-24]采用上述材料训练方法,分别模拟了砂土的侧限压缩试验与球形石英砂的直剪试验,并将模拟试验与真实试验应力-应变曲线对比,证明该方法生成的微观参数可以反映土体的宏观力学性质,说明该方法切实可行^[25]。基于室内试验,选取一现场试验的松散地基土体,其宏观力学参数见表2。将宏观力学参数输入后,经上述方法进行材料训练后得到相应的微观力学参数见表3。

则发生渗流,渗流量遵循达西定律。当发生渗流后,孔隙内流体的质量和温度发生变化,随之引起孔隙内流体的密度和压力改变,形成压力差,进而发生下一次渗流,不断循环直至平衡。该方法可以实现单孔隙尺度模拟,并且流体运移的同时伴随热能、受力的改变。

通过建立孔隙流体拓扑差分网格,实现单个孔隙尺度模拟,孔隙密度流方法模型示意如图3所示。

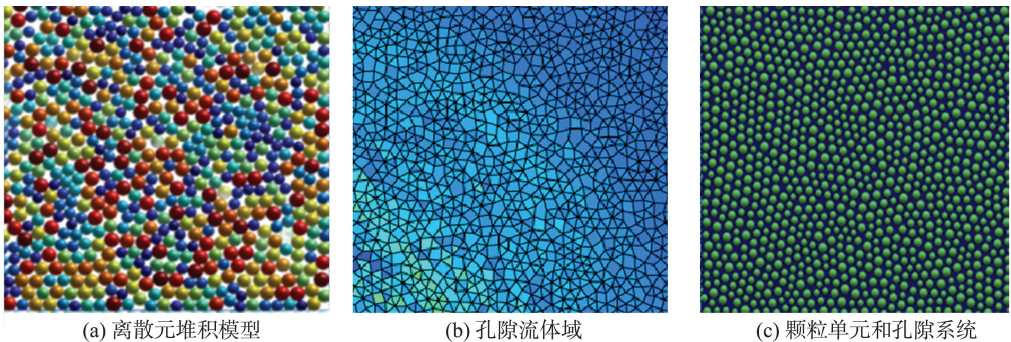


图2 单元颗粒-孔隙流体模型
Fig.2 Elemental particle-pore fluid model

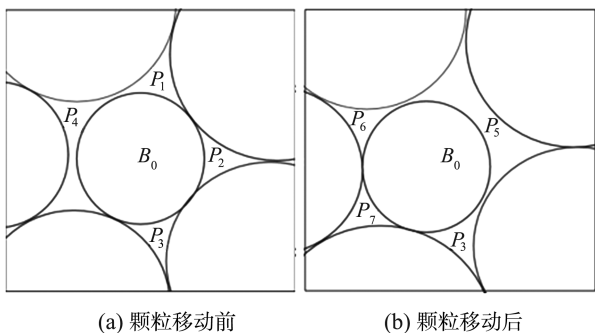


图3 孔隙密度流方法模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of pore density flow method model

由图3可知,孔隙P₁~P₄包围离散颗粒B₀,周围流体单元共同提供作用在固体颗粒上的合力F_w。当孔隙P₁和P₂被赋予较大的压力,与孔隙P₃和P₄存在较大压力差,进而发生渗透,B₀颗粒向左下角移动,实现流体对固体的作用过程的模拟。颗粒运动后,孔隙体积发生改变,孔压发生改变,系统自动计算并更新孔压。当颗粒向左下角移动后,孔隙P₁与P₂体积增大,孔隙压力减小;孔隙P₄体积减小,孔隙压力增大,流体的受力过程示意图如图3(a)所示。单元间的距离发生改变,流体网格重新

划分,原孔隙 P_1 和 P_2 合并为新孔隙 P_5 ,原孔隙 P_4 分割为 P_6 和 P_7 ,颗粒移动后示意图如图 3(b) 所示。重新划分网格后,根据新孔隙体积计算其质量。更新孔隙间的压力差,开始新的循环,直至固体颗粒平衡流场稳定为止。

根据颗粒直径选取孔喉直径,计算水灰比为 1 时水泥浆液渗透系数,计算公式为:

$$\{K\} = \frac{\{\omega\}^2}{12\{\mu\}}, \quad (1)$$

式中, $\{K\}$ 为单位为 m/s 的孔喉渗透系数 K 的数值, $\{\mu\}$ 为单位为 $Pa \cdot s$ 的流体黏滞系数 μ 的数值, $\{\omega\}$ 为单位为 m 的等效孔喉宽度 ω 的数值。浆流体域基本参数如表 4 所示。

1.1.3 建模过程

模型在 xOz 面建立,模型的建立可以分为 3 个过程,分别为堆积地层模型、赋值材料、施加孔隙压力。经过多次沉积压实产生超固结土和欠固结

土^[22]。在模型外围设置厚 0.004 m 的边界墙体,防止在施加荷载过程中颗粒外溢。在模型上方添加压力板,用于压实堆积土体颗粒。生成的土层模型如图 4 所示。根据颗粒粒径场可以看出,土颗粒在预设颗粒平均直径的 1.2~0.8 倍范围内随机生成,颗粒平均直径根据土质特点选取了 3、4、5 mm,粒径越小,土层堆积越密集,模型进行沉积压实耗时越长。借助材料训练方法,生成可表现出宏观力学性质的土层。随后采用孔隙密度流方法模拟喷浆过程,赋值喷浆压力,直到固体颗粒平衡流体区域稳定后,系统自动更新相关参数进入下一次循环。完成所有循环后,生成颗粒位移场。

表 4 流体域基本参数表

渗透系数 $K/(m \cdot s^{-1})$	孔喉直径 d/m	流体密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
1.39×10^{-11}	0.000 2	1 518.07

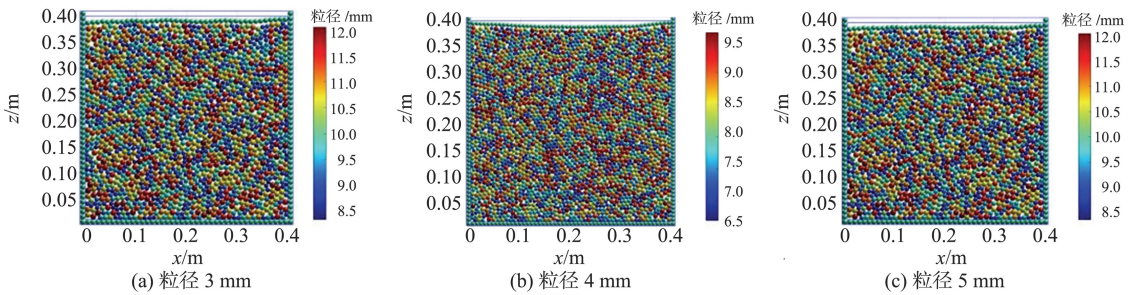


图 4 不同颗粒平均尺寸粒径图

Fig.4 Particle size distribution based on different particle average diameters calculated

1.2 高压旋喷技术的浆液扩散范围

流体赋值喷浆压力后,模拟结果如图 5~7 所示。其中坐标横纵轴表示距离浆液喷射点的距离,色带表示颗粒的位移。由于模拟土体为大粒径松散土,浆液在土体中的扩散以渗透作用为主,通过在模拟结果中识别出发生最大位移的颗粒,

得出浆液的最大扩散距离。成桩体是由喷浆浆液形成的浆液主体部分(位移场图中白色区域)、土颗粒与浆液混合部分(位移场中出现位移颗粒区域)、压实渗透部分(位移场中浅蓝色附近区域)构成。浆液在土体中的扩散路径不规则且分布不均匀。

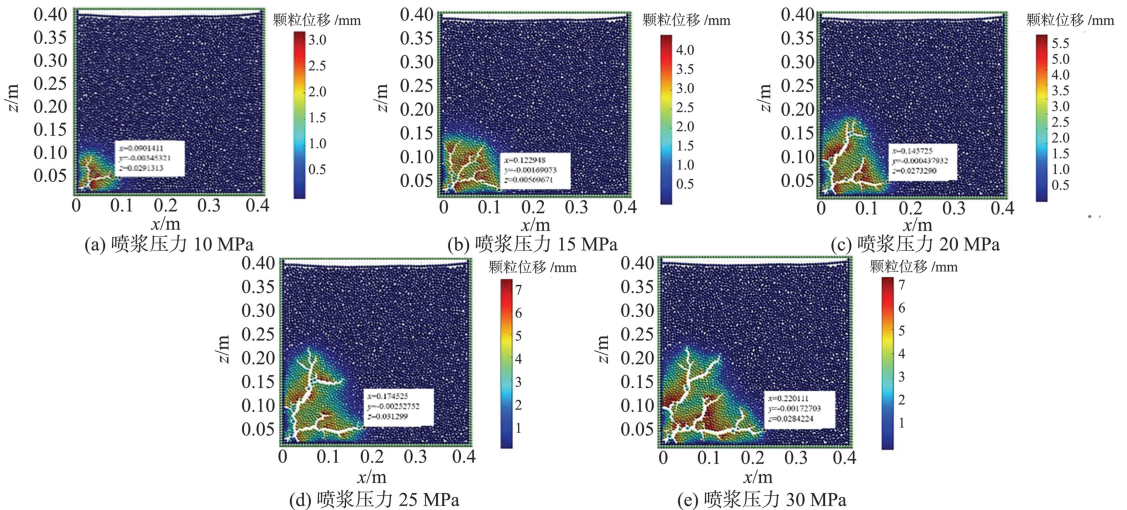


图 5 平均粒径尺寸为 3 mm 时不同喷浆压力下的位移

Fig.5 Displacement of particle size 3 mm with different grouting pressure

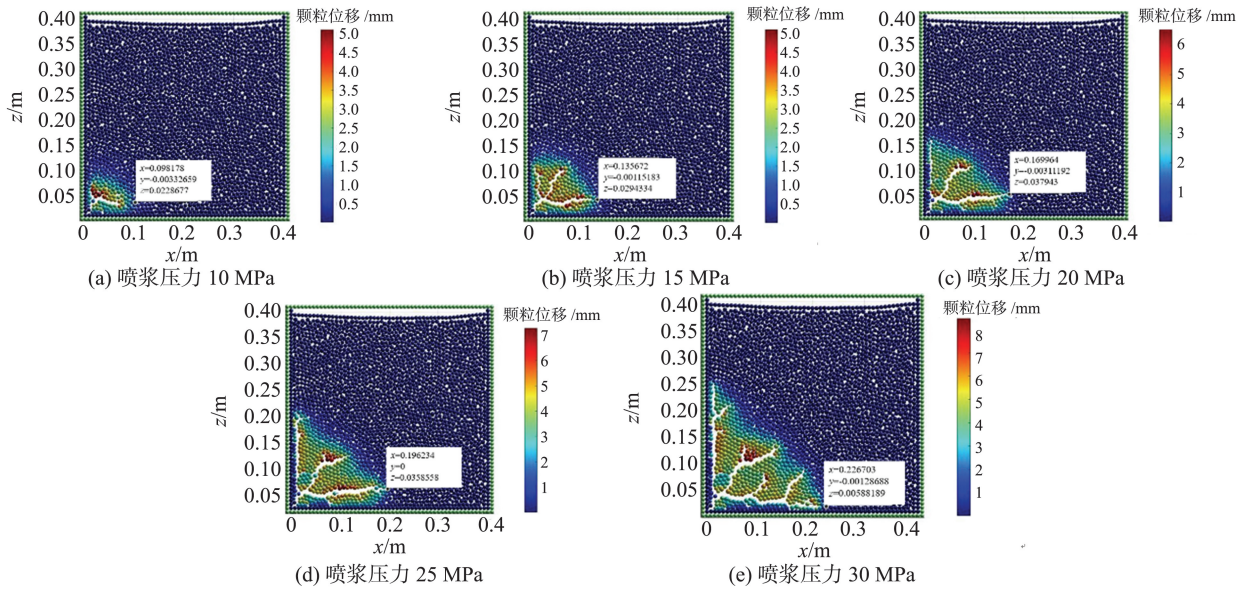


图6 平均粒径尺寸为4 mm时不同喷浆压力下的位移
Fig.6 Displacement of particle size 4 mm with different grouting pressure

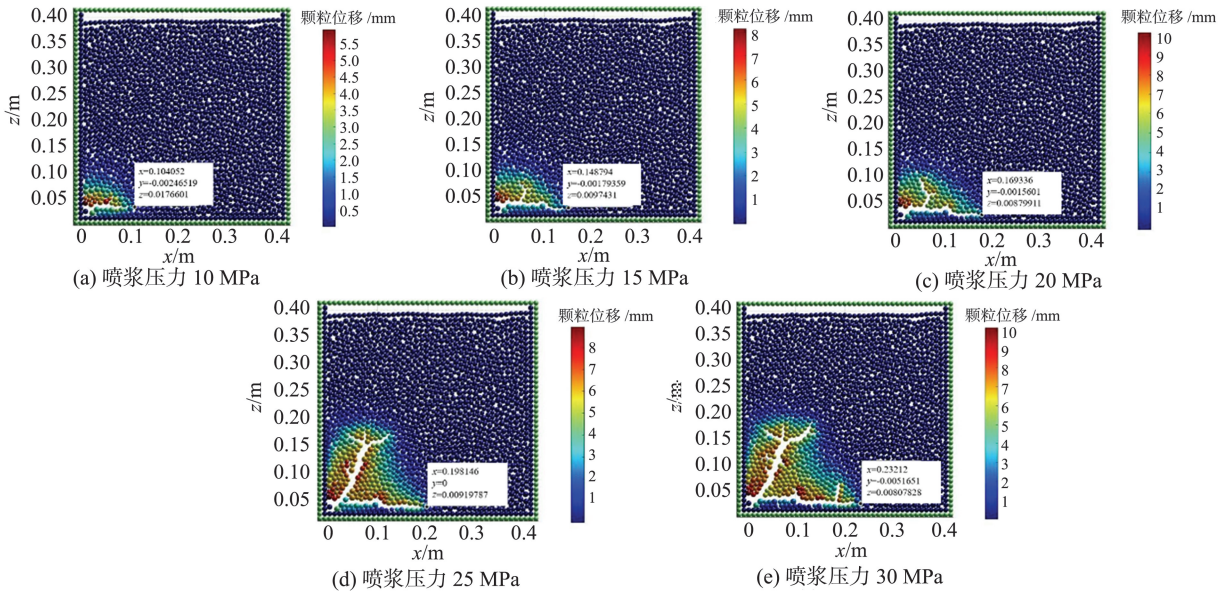


图7 平均粒径尺寸为5 mm时不同喷浆压力下的位移
Fig.7 Displacement of particle size 5 mm with different grouting pressure

经数值模拟得出的不同粒径及喷浆压力下的喷浆距离汇总如表5所示。由表5可知,浆液扩散范围整体上随着喷浆压力的增大而增大。同一喷浆压力下,不同粒径的浆液的扩散范围差异较小。粒径为3 mm时,喷浆压力大于20 MPa时浆液扩散范围增速较快。

表5 不同粒径及喷浆压力下喷浆距离表

Table 5 Grouting distance table under different particle size and grouting pressure

颗粒 粒径/mm	喷浆距离/m				
	喷浆压力 10 MPa	喷浆压力 15 MPa	喷浆压力 20 MPa	喷浆压力 25 MPa	喷浆压力 30 MPa
3	0.090	0.123	0.146	0.175	0.220
4	0.098	0.136	0.170	0.196	0.226
5	0.104	0.149	0.169	0.198	0.232

2 浆液扩散范围数值分析

2.1 成桩直径预测经验公式介绍

本研究基于极限侵蚀距离的成桩直径预测公式分析浆液扩散规律,公式为:

$$D_0 = 2\epsilon x_L + D_r, \quad (2)$$

式中, D_0 为所求成桩直径, x_L 为极限侵蚀距离, ϵ 为侵蚀距离折减系数, D_r 为钻杆直径^[20]。

模型模拟定喷时不考虑钻杆的旋转等操作,故 ϵ 取值为1;模型采用单管喷浆模拟,常规单管法的钻杆直径 $D_r = 60$ mm;未知量仅有 x_L 。随着浆液冲击侵蚀,流体速度衰减为极限侵蚀速度 v_L (使土体

发生侵蚀最小的速度)时,对应的距离即极限侵蚀距离 x_L ,计算公式为:

$$x_L = \frac{\alpha d_0 v_0}{v_L}, \quad (3)$$

式中: α 为射流衰减系数,不同性质的流体对应不同的衰减系数^[28]; v_L 为临界速度,根据文献^[29]中水射流土壤侵蚀室内试验数据拟合后得出; d_0 为浆液喷嘴的直径; v_0 为出口速度,等于浆液流量 Q 除出口总面积^[28],根据每个孔隙单元体积渗透流量计算公式求出孔隙总流量,进而求出出口速度^[30],显然不同压力下产生的浆液流量不同,但公式(3)并未考虑到喷浆压力对浆液流量的影响。代入公式(3)计算得出极限喷浆距离,如表6所示,可以看出经验公式计算值普遍比模型模拟值大,且喷浆压力越

小,两者之间差距越大。因此需要对该经验公式进行参数修正。

表6 经验公式求得喷浆距离表

颗粒 粒径/mm	喷浆距离/m				
	喷浆压力 10 MPa	喷浆压力 15 MPa	喷浆压力 20 MPa	喷浆压力 25 MPa	喷浆压力 30 MPa
3	0.255	0.280	0.292	0.317	0.353
4	0.279	0.305	0.337	0.350	0.363
5	0.301	0.338	0.354	0.356	0.381

2.2 经验公式修正参数提取

定义 W_i 为颗粒平均直径为 i 时的模型模拟的喷射距离与经验公式极限喷浆距离 x_L 的比值,经2.1节的讨论,对浆液扩散距离进行修正。如图8所示。

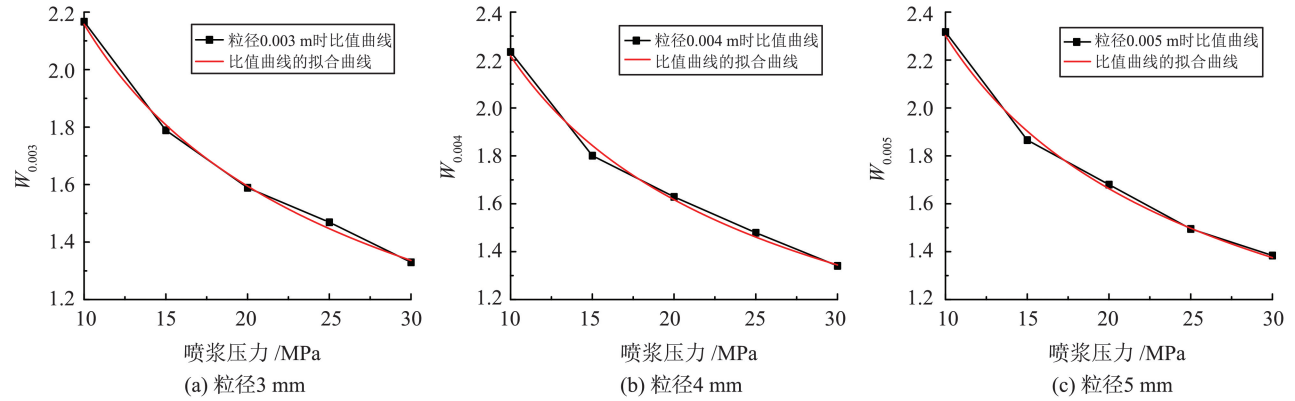


图8 不同粒径模拟值与经验公式值比值

Fig.8 Ratio of simulation value to empirical formula value of different particle sizes

不同粒径下经验公式的喷浆扩散范围与模型模拟输出扩散范围的比值呈现同一趋势;考虑喷浆压力的影响,得到在粒径为3~5 mm时的拟合方程分别为:

$$W_{0.003} = 5.881 57 p^{-0.435 54}, R^2 = 0.997 67, \quad (4)$$

$$W_{0.004} = 6.320 84 p^{-0.455 03}, R^2 = 0.994 64, \quad (5)$$

$$W_{0.005} = 5.881 57 p^{-0.468 84}, R^2 = 0.996 30, \quad (6)$$

式中, p 为喷浆压力, R 为拟合公式的相关系数。

公式(4)~(6)相关系数高,说明公式能够较好地表达同一粒径尺度下,浆液扩散范围随喷浆压力的变化趋势。根据公式(4)~(6),发现 $W_i = a \cdot p^b$,其中 p 为喷浆压力, a 、 b 为回归系数, a 、 b 与颗粒粒径存在较强的相关关系,为了求得不同粒径下的参数 a 、 b ,对不同粒径下的回归参数进行拟合分析,如图9所示,求得系数 a 、 b 关于粒径 t 的表达式为:

$$a = 4.758 35(1+t)^{70.912 96}, R^2 = 0.999 89, \quad (7)$$

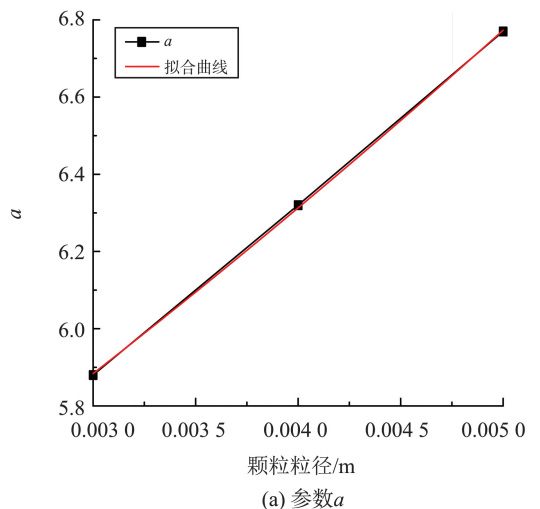
$$b = 0.32e^{-693.147t} - 0.48, R^2 = 0.999 89。 \quad (8)$$

根据模型模拟结果,对基于极限侵蚀距离的成桩直径预测公式提出修正参数

$$W = ap^b。 \quad (9)$$

考虑喷浆压力后的成桩直径预测公式为:

$$D_0 = 2\varepsilon \frac{x_L}{W} + D_r。 \quad (10)$$



(a) 参数a

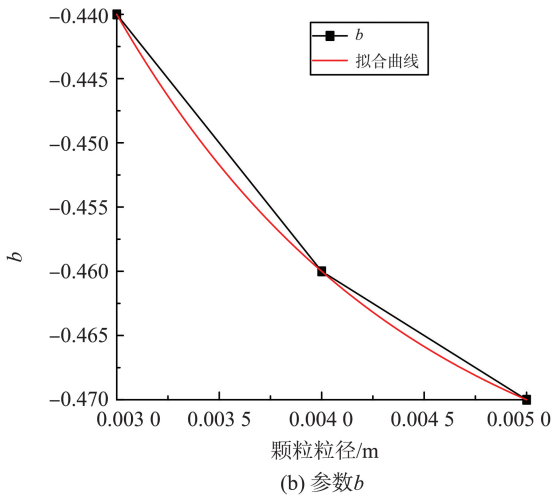


图9 不同粒径下参数拟合曲线

Fig.9 Parameter fitting curve under different particle sizes

3 修正后成桩直径预测公式应用

为验证修正后成桩直径公式的准确性,于山东省

德州禹城市石佛寺村展开了现场双管法旋喷喷浆试验。现场土体宏观力学性质与模型模拟土体一致。其土质多为松散土体,地层条件与试验场地条件如图10所示。喷浆深度为地下7 m,施工过程中有关参数如表7所示。对于4种喷浆压力下的常规旋喷桩,在施工结束后3 d进行了开挖,开挖深度为3 m。4种喷浆压力下试验桩侧面剖情况如图11所示。

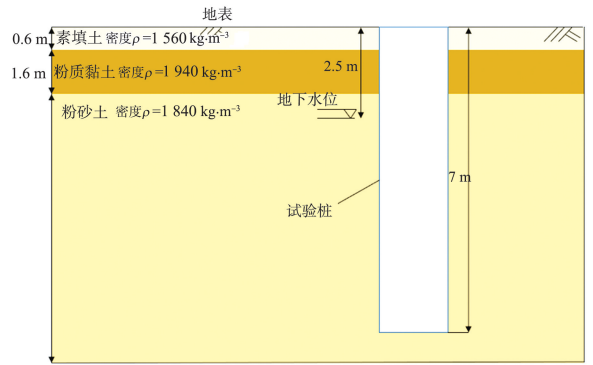


图10 试验场地条件及地层条件示意图
Fig.10 Schematic diagram of test site conditions and formation conditions

表7 双管法现场施工参数

Table 7 Site construction parameters of double pipe method

气体压力/MPa	喷口总数量/个	喷嘴直径/mm	钻杆提升速度/(cm·min ⁻¹)	钻杆旋转速度/(r·min ⁻¹)	水灰比
0.7	2	2	12	25	1

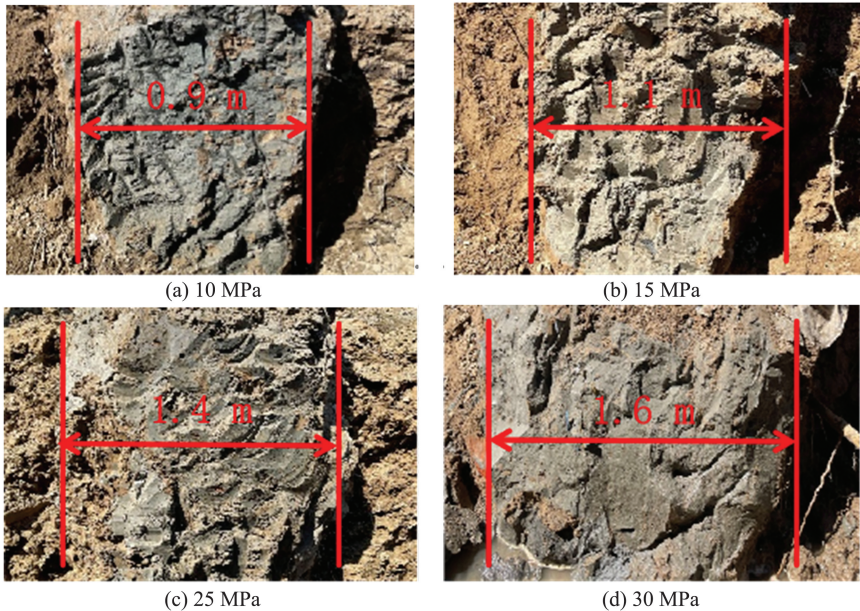


图11 4种喷浆压力试验桩侧面剖开图

Fig.11 Four kinds of grouting pressure test pile side profile

3.1 修正后成桩直径预测公式计算

二重管施工法喷浆过程中高压气体的存在,对成桩直径起到增强作用,原水灰比为1时所求衰减系数 α_g 需要乘以与喷浆气体压力相关的增大系数 α_p 。基于所取土体的无侧限压缩室内试验,得到

该土质的黏聚力 τ_f 及有效粒径,代入临界速度经验公式后求出 v_l 。依据不同喷浆压力下浆液流量不同,得出不同压力下的出口速度 v_e 。采用经验公式计算出成桩直径,带入公式(7)(8),求得该土质情况下对应的参数 $a=4.76433, b=-0.417$,从而得到

修正参数值

$$W = 4.764 33p^{-0.417} \quad (11)$$

带入不同的喷浆压力后求该土体下不同喷浆压力对浆液扩散距离的修正参数如表 8 所示。

表 8 不同喷浆压力下修正参数值

Table 8 Correction parameter values under different grouting pressures

喷浆压力/MPa	10	15	25	30
W	1.953	1.672	1.372	1.277

3.2 修正前后成桩直径预测公式对比

结合修正系数计算相应喷浆压力下成桩直径,将修正前后成桩直径预测值与现场试验数值绘制于同一折线图,观察公式修正效果,如图 12 所示。修正后的成桩直径预测值更符合现场试验结果,该经验公式修正效果较好,有一定的工程应用价值。

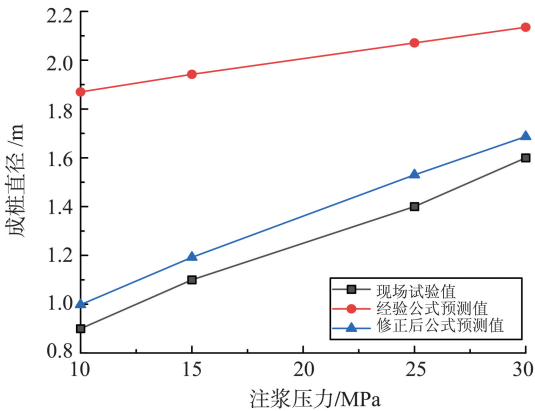


图 12 修正前后预测结果与现场试验结果对比图
Fig.12 Comparison of predicted results and on-site experimental results before and after correction

4 结论

本研究主要针对松散地基喷浆过程中浆液的扩散规律,采用 MatDEM 软件建模,用孔隙密度流法实现流固耦合,建立了单管法高压喷浆定喷过程模型,从细观角度分析了土颗粒和浆液颗粒的作用规律。模拟了在不同压力、不同粒径下浆液的扩散范围,并基于模拟结果中喷浆压力对浆液扩散范围的影响规律,对基于极限侵蚀距离的成桩直径公式提出了修正参数,修正了喷浆压力对成桩直径的影响。并结合现场喷浆试验中不同喷浆压力下得到成桩直径,验证修正公式的可靠性,具体结论如下。

(1)通过对土体颗粒位移图分析得出,浆液在粗粒土中主要以沿颗粒间隙扩散为主,对土体结构的破坏较少,同时,形成的固结体边缘形状不规则。喷浆压力越大,浆液扩散范围越大。

(2)现有基于极限侵蚀距离的成桩直径预测公式存在较大误差,且误差随着喷浆压力的增大而减小。数值模拟结果充分考虑喷浆压力的影响,故可基于模拟结果修正基于极限侵蚀距离的成桩直径预测公式。得出修正系数 W 关于喷浆压力 p 的表达式,并给出与颗粒粒径相关的参数 a、b 的表达式。结合现场二重管旋喷喷浆试验结果,分析修正公式对极限侵蚀距离预测的可靠性。通过对比修正前后计算结果,修正后公式对成桩直径预测准确性更高。

参考文献:

[1] 胡瑞军. 高压喷浆技术在公路养护中的应用[J]. 运输经理世界, 2022(15): 116-118.
HU Ruijun. Application of high-pressure grouting technology in highway maintenance[J]. Transport Manager World, 2022(15): 116-118.

[2] LU Haifeng. Application of dynamic compaction and high-pressure grouting in special geological foundation treatment engineering[J]. Jiangxi Building Materials, 2023(2): 236-238.

[3] 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. A new perspective on modern soil mechanics research-macro and micro soil mechanics[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195-254.

[4] 邓开鸿. 高压旋喷桩的成桩机理和挤土效应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
DENG Kaihong. Research on the formation mechanism and squeezing effect of high pressure jet grouting pile [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.

[5] 周子龙, 赵云龙, 陈钊, 等. 基于颗粒流方法的土体压密喷浆细观机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 465-472.
ZHOU Zilong, ZHAO Yunlong, CHEN Zhao, et al. Microscopic mechanism of soil compaction spraying based on particle flow method [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2017, 48(2): 465-472.

[6] 尤田, 刘军, 吴玉勤, 等. 富水粉细砂地层喷浆三维颗粒流数值模拟分析[J]. 市政技术, 2015, 33(6): 68-71.
YOU Tian, LIU Jun, WU Yuqin, et al. Numerical simulation analysis of three-dimensional particle flow in spray grouting of water rich fine sand formations [J]. Municipal Technology, 2015, 33(6): 68-71.

[7] 胡焕校, 王文进, 刘猛. 复合膏浆渗透扩散的二维离散元模拟分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5):

- 198-202.
- HU Huanxiao, WANG Wenjin, LIU Meng. Two-dimensional discrete element simulation analysis of permeation diffusion in composite paste [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(5): 198-202.
- [8] SUDIP Shakya, SHINYA Inazumi, SUPAKIJ Nontanandh. Potential of computer-aided engineering in the design of ground-improvement technologies[C]// *Grouting 2022: Grouting and Ground Treatment*, ASCE. Florida, USA: ASCE, 2003: 198-217.
- [9] 国家能源局. 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范: DL/T5200—2019 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2019. National Energy Administration. Technical specification for high pressure jet grouting in hydroelectric and hydraulic engineering: DL/T5200—2019 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [10] 彭岩岩, 刘宇航, 王天佐, 等. 数值模拟实验在岩土工程中的应用与展望[J]. *绍兴文理学院学报(自然科学)*, 2018, 38(2): 39-44. PENG Yanyan, LIU Yuhang, WANG Tianzuo, et al. Application and prospect of numerical simulation experiments in geotechnical engineering [J]. *Journal of Shaoxing University of Arts and Sciences (Natural Science)*, 2018, 38(2): 39-44.
- [11] KLOSS C, GONIVA C, HAGER A, et al. Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM [J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2012, 12(2/3): 140.
- [12] NOROUZI H R, ZARGHAMI R, SOTUDEHGHARE-BAGH R, et al. Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows [M]. New Jersey, USA: Wiley-Blackwell, 2016.
- [13] 戴轩, 郑刚, 程雪松, 等. 基于 DEM-CFD 方法的基坑工程漏水漏砂引发地层运移规律的数值模拟 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(2): 396-408. DAI Xuan, ZHENG Gang, CHENG Xuesong, et al. Numerical simulation of formation migration caused by water and sand leakage in foundation pit engineering based on DEM-CFD method [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(2): 396-408.
- [14] 卞跃威, 张小龙, 袁甲, 等. 基于 CFD-DEM 方法的砂土注浆微观机理研究 [J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(增刊 1): 528-534. BIAN Yuewei, ZHANG Xiaolong, YUAN Jia, et al. Research on the microscopic mechanism of sand spray based on CFD-DEM method in modern tunnel technology [J]. *Modern Tunnel Technology*, 2020, 57(Suppl. 1): 528-534.
- [15] 郭照立, 郑楚光. 格子 BOLTZMANN 方法的原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 201-216. GUO Zhaoli, ZHENG Chuguang. Principle and application of lattice BOLTZMANN method [M]. Beijing: Science Press, 2009: 201-216.
- [16] 浦海, 郭世儒, 刘德俊, 等. 基于 LBM-DEM 耦合方法的突水溃砂运移规律研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(2): 206-216. PU Hai, GUO Shiru, LIU Dejun, et al. Study on the transport law of sudden water and sand burst based on LBM-DEM coupling method [J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(2): 206-216.
- [17] 金磊, 曾亚武, 程涛, 等. 隧道突泥破坏的耦合格子 Boltzmann-离散元法模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(6): 1000-1009. JIN Lei, ZENG Yawu, CHENG Tao, et al. Coupled lattice Boltzmann discrete element method simulation of tunnel mud burst failure [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(6): 1000-1009.
- [18] HAN Y, CUNDALL P A. LBM-DEM modeling of fluid-solid interaction in porous media [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, 37(10): 1391-1407.
- [19] ROBINSON M J, LUDING S, RAMAIOLI M. Fluid-particle flow simulations using two-way-coupled mesoscale SPH-DEM and validation [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2014, 59(2): 121-134.
- [20] SHEN S L, WANG Z F, YANG J, et al. Generalized approach for prediction of jet grout column diameter [J]. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(12): 2060.
- [21] FLORA A, MODONI G, LIRER S, et al. The diameter of single, double and triple fluid jet grouting columns: prediction method and field trial results [J]. *Geotechnique*, 2013, 63(11): 934-945.
- [22] 刘春. 颗粒离散元法工程应用的三大问题探讨 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(6): 1142-1152. LIU Chun. Exploration of three major issues in the engineering application of particle discrete element method [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1142-1152.
- [23] 秦岩, 刘春, 张晓宇. 基于 MatDEM 的砂土侧限压缩试验离散元模拟研究 [J]. *地质力学学报*, 2018, 24(5): 676-681. QIN Yan, LIU Chun, ZHANG Xiaoyu. Discrete element simulation study of sand lateral compression test based on MatDEM [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(5): 676-681.