文章编号:1005-0523(2023)01-0010-09

尾矿固化体力学性质预测的 PFC 模型研究

徐贞珍[1,2],刘东锋[3],蒋亚龙[1,2]

(1.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;2. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心,江西 南昌 330013; 3. 武汉大学土木建筑工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:以某铁矿项目为工程背景,选用离散元颗粒流程序(PFC)对尾矿固化体的力学特征进行模拟,确定了尾矿固化体细观力学参数,建立了尾矿固化体单轴压缩数值模型,并在此基础上研究尾矿粒径分布及颗粒数量的简化对模拟尾矿固化体的力学特征的影响。研究发现:数值模型单轴压缩计算结果与试验值平均误差为 5.5%,证明采用该方法构建的数值模型能有效预测尾矿固化体单轴抗压强度,且对尾矿固化体柔性及脆性破坏形态的捕捉效果较好,进而证明了利用 PFC 数值模型对尾矿固化体进行模拟有效可行;由于不同工程条件下尾矿粒度分布差异比较大,若尾矿粒径分布较广,建立尾矿数值模型时,可对尾矿粒径分布及颗粒数量进行一定程度的简化。分析表明,当模型尾矿颗粒粒组范围选取比达到 50%以上,能较好地模拟尾矿固化体应力应变曲线及破坏形态。

关键词:尾矿固化体;PFC 数值模拟;单轴压缩;力学性质预测;模型优化

中图分类号:TU43;[U25] **文献标志码**:A

本文引用格式:徐贞珍,刘东锋,蒋亚龙. 尾矿固化体力学性质预测的 PFC 模型研究[J]. 华东交通大学学报,2023,40(1):10-18.

Study on the Prediction of Mechanical Properties of Tailings Solidified Body with PFC Model

Xu Zhenzhen[1,2],Liu Dongfeng[3],Jiang Yalong[1,2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper takes an iron ore project as the engineering background, simulates the mechanical characteristics of the solidified tailings with PFC, determines the meso-mechanical parameters of the solidified tailings, and establishes the uniaxial compression numerical model of solidified tailings. On this basis, the paper studies the influence of particle size distribution and particle number simplification on mechanical characteristics of simulated solidified tailings. According to research findings, the average error between the numerical model and experimental results under uniaxial compression is 5.5%. It proves that the numerical model constructed by this method can effectively predict the uniaxial compressive strength of solidified tailings, and the effect of capturing the flexible and brittle failure mode of the solidified tailings is good. It further indicates that the PFC numerical model is effective and feasible to simulate the solidified tailings. Because of different engineering conditions, the size distribution of tailings is quite different, if the size distribution of tailings is wide, the particle size distribution and particle number of tailings can be simplified when the numerical model of tailings is established. Anal-

收稿日期:2022-01-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41972291)

ysis shows that when the selection ratio of model tailings particle group range reaches more than 50%, the simulation of stress – strain curve and failure mode of solidified tailings can be well performed.

Key words: tailings solidified body; PFC numerical modeling; uniaxial compression; prediction of mechanical properties; model optimization

Citation format:XU Z Z,LIU D F,JIANG Y L. Study on the prediction of mechanical properties of tailings solidified body with PFC model[J]. Journal of East China Jiaotong University,2023,40(1):10–18.

尾矿固化体[1]是浓密后的尾矿浆加入定量的固化剂胶结后的混合物,具有一定的力学强度。其早期强度及胶结特性直接影响着尾矿堆存的安全性和经济性。国内外许多学者对尾矿固化体的力学性能进行了大量研究,Kesimal 等[2]通过试验研究发现不同尾矿和不同固化剂对尾矿固化体的固化效果均有影响。Ouellet 等[3]通过试验研究尾矿固化体内部孔隙与单轴抗压强度的关系, 发现尾矿颗粒分布、固化剂类型及养护时间均对固化体的内部孔隙结构有影响,从而影响固化体单轴抗压强度。Fall 等[4-7]通过大量试验发现影响尾矿固化体力学强度的主要因素包括尾矿颗粒级配、密度、矿物含量及固化剂的种类和添加量等。侯运炳等[8] ,魏书祥[9],彭勃[10]运用尾矿固结排放技术,将西石门铁矿尾矿浓缩后固结排放至北区塌陷坑,改变了传统尾矿库排放方式。

由于固化剂的选择与尾矿的性质密不可分,且固化剂对尾矿固化胶结起着关键性的作用[11-12],需要进行大量的配方试验来确定固化剂类型及添量。因此有必要发展一种数值方法来模拟尾矿固化的效果,减轻复杂繁重的室内试验的工作量,为尾矿固化剂的选择及优化提供支持。尾矿为散体材料,固化剂的加入将散体颗粒相互胶结在一起,基于此特征,部分学者尝试采用 PFC 对尾矿固化体的力学特征进行模拟。Wang 等[13-14]从微观尺度出发,利用 PFC 模拟胶结砂的力学行为特征,为了体现水泥添加量的影响,提出“Cementing particles”的概念。张千贵等[15]利用 PFC 进行试验,得到尾矿细观力学参数。刘先珊等[16]对三维颗粒流数值模型的胶结砂岩力学特性进行了研究,初步验证了该数值方法的可行性。然而,上述离散模型尚未详细考虑尾矿颗粒级配、孔隙比、胶结颗粒数量等因素对固化体力学性质的影响规律。

基于上述原因,本文建立了改进的颗粒流数值模型,从而反映尾矿胶结颗粒数量、初始孔隙比及颗粒粒径分布等因素的影响,验证了数值模型的准确性及可行性。进一步地,对尾矿固化体颗粒粒径及颗粒数量进行一定程度的优化,在保证模拟效果的情况下,提高计算效率,对于今后利用数值模型替代室内试验进行固化剂配方优化有重要的实际意义。

1　尾矿固化体单轴压缩试验

对某铁矿项目进行采样,经选矿工艺流程最终形成 H1#,H2#,H3#,H4# 共 4 种混合尾矿进行固化体试验,固化剂选择工业水泥(PCC 水泥)与矿区地表覆盖的大量类高岭土黏土物质(白泥)。

由于当地尾矿浆浓度多为 65%, 将固化剂与 65%浓度的尾矿浆混合搅拌均匀, 制作 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 尺寸的尾矿固化体试件, 室内常温条件(项目所在地 25 ℃、60%湿度)下养护,测量 1,3,7 d 龄期的单轴抗压强度。由于现场试验条件因素,部分试件未进行 7 d 龄期强度的测试,但其 3 d 的强度已经达到或接近 7 d 强度指标(0.5 Mpa),视为 7 d 强度可以达到要求指标。单轴压缩试验结果见表 1。表 1 中“65–磨细 PCC8.0+白泥6.0+粗骨料 20%+外加剂 1%”,表示尾矿浓度为 65%,固化剂中 PCC 水泥量与白泥量分别是干尾矿重量的 8.0%、6.0%,粗骨料用量为干尾矿重量的 20%,0.8%水泥重量的 NaCl 早强剂及水泥磨细时加入重量 0.2%的激发剂。

2　尾矿固化体单轴压缩数值试验

2.1　模型细观力学参数

尾矿固化体内部结构及本构关系随胶结程度(水泥添加量与水化度的乘积)不断变化,尾矿固化体 PFC 数值模型应反映固化体内部结构,以达到模拟其力学性质的效果。

表1 尾矿固化体试验结果

Tab.1 The test results of tailings solidified body

Specimen number	Tailings type	Density/(kg/m³)	Initial void ratio	Strength/MPa			The formula of subsidiary
				1 d	3 d	7 d	
A1–H1#	H1#	2.414	1.19	0.177	0.374	0.56	65–fine grindingPCC8.0 + white clay6.0+ coarse aggregate 20%+ admixture 1%
A1–H2#	H2#	2.388	1.18	0.175	0.344	0.587	
A1–H3#	H3#	2.362	1.17	0.157	0.379	0.676	
A1–H4#	H4#	2.336	1.15	0.149	0.359	0.653	
A2–H1#	H1#	2.414	1.25	0.263	0.499	–	65–fine grindingPCC9.0 + white clay4.0+coarse aggregate20%+ admixture 1%
A2–H2#	H2#	2.388	1.23	0.311	0.512	–	
A2–H3#	H3#	2.362	1.22	0.319	0.57	–	
A2–H4#	H4#	2.336	1.21	0.337	0.66	–	
A3–H1#	H1#	2.414	1.24	0.243	0.44	–	65–fine grindingPCC8.5 + white clay 4.5+coarse aggregate20%+ admixture 1%
A3–H2#	H2#	2.388	1.22	0.29	0.473	–	
A3–H3#	H3#	2.362	1.21	0.306	0.565	–	
A3–H4#	H4#	2.336	1.20	0.293	0.529	–	

数值模型建立的过程为:根据尾矿颗粒特征生成“尾矿颗粒”组成尾矿试件,在尾矿试件中加入“胶结颗粒” 模拟水泥水化产物对尾矿颗粒的胶结作用,组成尾矿固化体试件。胶结颗粒与相邻的颗粒之间建立起平行连接,以胶结颗粒的数量表征固化体的胶结度。由于固化剂中添加了部分黏土矿物,其失水后具有一定的黏结强度, 这种作用在数值模型中以胶结颗粒与相邻颗粒间的平行连接表征。

在建立数值模型之前,需要确定尾矿颗粒及胶结颗粒的颗粒数量、密度、粒度分布、初始孔隙比、颗粒刚度、摩擦系数、法向及切向刚度以及平行连接系数等参数。

2.1.1 尾矿颗粒粒度分布及初始孔隙比及胶结颗粒数量的确定

尾矿颗粒密度、初始孔隙比为实际值的反映,属于尾矿的固有属性。设置胶结颗粒密度为3.15 kg/m³,根据刘先珊等[17]的研究,PFC中生成的随机粒径分布颗粒不能反映真实材料的物理特征,尾矿固化体模型中的尾矿颗粒及粒度分布根据真实尾矿的粒径分布生成。

将实际测得的粒径分布用由大到小的粒径特征点 $r_1,r_2,\cdots,r_i,\cdots r_n$,分为$(n-1)$个粒组,对应粒组$(r_i,r_{i+1}]$所占的体积比记为 w_i,则 $\sum w_i=1$。粒组的平均半径取为上下限的平均值, 根据各粒组含量及粒组平均 r_{avgi} 粒径计算出相应粒组颗粒个数基本比例为

$$\frac{n_i}{n_1}=\frac{w_i r^3_{avgi}}{w_1 r^3_{avgi}} \tag{1}$$

式中:n_1 为$(r_1,r_2]$粒组颗粒数目。

根据计算需求设置一初始值,n_i 为$(r_i,r_{i+1}]$粒组颗粒数目。此时,数值试样对应粒组$(r_i,r_{i+1}]$含量为

$$w_i=\frac{n_i r^3_{avgi}}{\sum n_i r^3_{avgi}} \tag{2}$$

初始孔隙比根据尾矿的浓度和比重由式(3)得到。

$$e=\frac{1-\eta}{\eta/\gamma_T+n_B\eta/\gamma_B} \tag{3}$$

式中:n_B 为白泥添加量;e 为尾矿颗粒的初始孔隙比;η 为尾矿浆的浓度;γ_T 为尾矿颗粒的比重;γ_B 为白泥比重。

胶结颗粒数量与固化体的胶结度有关,建立两者的关系需要确定水泥在尾矿固化体中的水化度模型。水泥水化度是指发生水化反应的水泥占总量的比值[18],在尾矿固化体中,水泥的水化度模型可以用经验方程来表达[19–21]

$$\xi(t)=\xi_u\exp\left[-\left(\frac{\tau_T}{t}\right)^{\beta}\right] \tag{4}$$

式中:ξ_u 为最终水化度;τ_T 为养护温度下的水化时间参数;t 为养护龄期,d;β 为水化形状参数。当水灰比大于6.258时,最终水化度为1。

参数 ξ_u 的取值参照 Wu 等[19]的工作,根据 Schi–

ndler[20]通过试验得到的适用水泥胶结体的参数值,τ_f=1.4,β=0.394。

在本模型中,假定试件养护条件保持一致,符合上式的水化度模型,数值试件中胶结颗粒的数量可以表达为

$$n_c=1\ 000[-0.34(\chi^{0.68}\xi)^2+4.03\chi^{0.68}\xi+6.96] \quad (5)$$

式中:n_c 为数值试件中胶结颗粒数量;ξ 为水泥的水化度;χ 为水泥添加量占尾矿干重的比,这里采用重量比表示水泥添加量使等式左右两边量纲相符。

2.1.2　尾矿颗粒刚度、摩擦系数及平行连接参数的确定

颗粒刚度、摩擦系数[22]以及平行连接参数通过数值模拟与试验结果的标定得到,考虑拟合效果对颗粒级配、初始孔隙比的响应,需要在拟合时进行标定,确定一套符合试验材料及试验条件的参数。

尾矿的主要矿物成分石英的体积模量与剪切模量比接近 1[23],设置尾矿颗粒的法向刚度与切向刚度相等,为了简化计算和校准过程,设置胶结颗粒的法向刚度与切向刚度相等,颗粒的摩擦系数均设置为 0.5。设置平行连接强度满足威布尔概率分布,形状模量设置为 0.5[24]。同时,按照 PFC 手册的建议,设置平行连接的法向强度与切向强度的比为 10。胶结颗粒平行连接的法向连接强度为 1×10^8 Pa,切向连接强度为 1×10^7 Pa,弹性模量为 5×10^8 Pa,连接半径为 1.0。为了减少参数,便于计算,尾矿颗粒间的平行连接参数采用相同的比例关系。

综上所述,尾矿固化体的 PFC 数值模型参数如表 2、表 3 所示。

表 2　PFC 数值模型细观参数

Tab.2　The meso-structure parameter of PFC numerical model

Type	Parameter	Value
Tailings particles	Density/(kg/m^3)	Actual density
	Friction coefficient	0.5
	Normal contact stiffness/(N/m)	3×10^9
	Shear contact stiffness/(N/m)	3×10^9
	Radii of particles/m	Size distribution of tailings
Cementing particles	Density/(kg/m^3)	3.15
	Friction coefficient	0.5
	Normal contact stiffness/(N/m)	6×10^9
	Shear contact stiffness/(N/m)	6×10^9
	Radii of particles/m	9.0×10^{-5}
Parallel bond of cementing particles	Elasticity modulus/Pa	5×10^8
	Normal bond strength/Pa	1×10^8
	Shear bond strength/Pa	1×10^7
	Bond radius	1
	Number of cementing particles	Formula(4)

表 3　试件的数值模型参数

Tab.3　Numerical model parameters of specimen

Specimen number	Tailings particles			Number of cementing particles		
	Density/(kg/m^3)	Initial void ratio	Radii of particles/m	1 d	3 d	7 d
A1-H1#	2.414	1.19	9.5×10^{-5}~4.27×10^{-3}	13 104	15 025	16 035
A1-H2#	2.388	1.18	9.5×10^{-5}~3.72×10^{-3}	13 104	15 025	16 035
A1-H3#	2.362	1.17	9.5×10^{-5}~3.24×10^{-3}	13 104	15 025	16 035
A1-H4#	2.336	1.15	9.5×10^{-5}~2.82×10^{-3}	13 104	15 025	16 035
A2-H1#	2.414	1.25	9.5×10^{-5}~4.27×10^{-3}	13 518	15 498	16 511
A2-H2#	2.388	1.23	9.5×10^{-5}~3.72×10^{-3}	13 518	15 498	16 511
A2-H3#	2.362	1.22	9.5×10^{-5}~3.24×10^{-3}	13 518	15 498	16 511
A2-H4#	2.336	1.21	9.5×10^{-5}~2.82×10^{-3}	13 518	15 498	16 511
A3-H1#	2.414	1.24	9.5×10^{-5}~4.27×10^{-3}	13 315	15 267	16 281
A3-H2#	2.388	1.22	9.5×10^{-5}~3.72×10^{-3}	13 315	15 267	16 281
A3-H3#	2.362	1.21	9.5×10^{-5}~3.24×10^{-3}	13 315	15 267	16 281
A3-H4#	2.336	1.20	9.5×10^{-5}~2.82×10^{-3}	13 315	15 267	16 281

2.2 尾矿固化体单轴压缩模拟结果分析

2.2.1 单轴压缩抗压强度预测

对尾矿固化体进行单轴压缩数值试验,通过采集应力应变曲线的峰值,得到不同尾矿固化体单轴抗压强度的预测值,并与真实值进行对比,如表4所示。

如图1所示,数值模型对尾矿固化体单轴抗压强度的预测效果较好,尤其是在尾矿固化体强度较小时;模型的预测最大误差为17.8%,平均误差为5.5%。产生误差的原因为:① 第2及第3组试件的黏土矿物含量比第1组低,且数值模型未能准确考虑黏土矿物随时间对尾矿固化体强度增强的影响,导致预测结果低于试验结果;② 由于模型未考虑水泥水化作用与黏土矿物失水胶结作用两者间的相互影响,使得预测效果有一定的偏差。

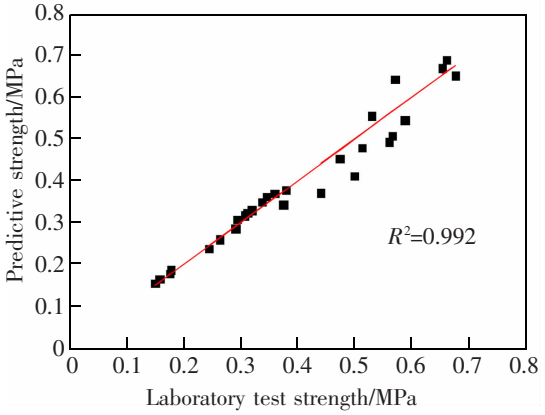


图1 尾矿固化体数值模型单轴压缩强度预测效果

Fig.1 Prediction effect of uniaxial compression strength of numerical model for tailings solidified body

综上所述,该模型在充分考虑尾矿固化体孔隙比、粒度分布、颗粒数量及颗粒间平行连接参数的情况下,可以较好地预测尾矿固化体单轴压缩强度。

2.2.2 尾矿固化体破坏形态模拟

在室内试验及数值模拟单轴压缩过程中,尾矿固化体的破坏形态主要分为柔性破坏和脆性破坏。柔性破坏主要表现为尾矿固化体轴向应变持续增加,应力持续增长,没有产生明显的剪切破坏裂缝;脆性破坏表现为在破坏时产生一条贯穿的剪切破坏区域,尾矿固化体不再有承载能力,应变继续增加时应力随之跌落。试验中1,3 d龄期试件多发生柔性破坏,7 d龄期试件多为脆性破坏。

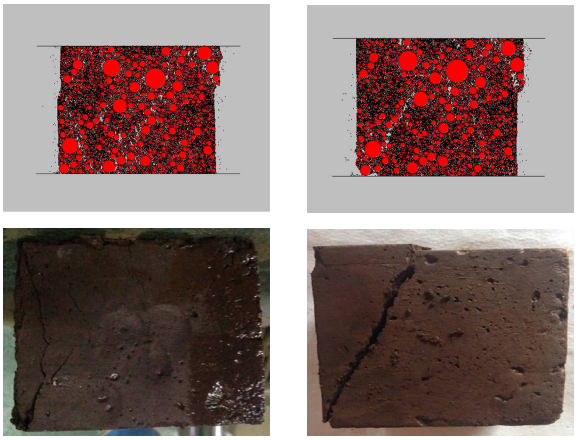
选取同一固化体1 d和7 d龄期试件及其相应的不同胶结颗粒数量的数值试件,对比两个典型的破坏形态如图2。室内试验中,柔性破坏试件轴向变形较大,没发生严重的破坏,试件左边边缘部位有轻微损坏,表面存在少量微裂缝;对应的数值试件也在左边边缘位置发生损坏,内部没有产生贯穿的裂缝,存在几条微裂缝,右上角部位发生破坏,与试验试件略有不同。脆性破坏试件产生一

表4 数值试件对尾矿固化体单轴抗压强度的预测

Tab.4 Prediction of uniaxial compressive strength of solidified tailings by numerical specimens MPa

Specimen number	1 d strength		3 d strength		7 d strength	
	Actual value	Predicted value	Actual value	Predicted value	Actual value	Predicted value
A1-H1#	0.177	0.185	0.374	0.341	0.56	0.492
A1-H2#	0.175	0.177	0.344	0.361	0.587	0.544
A1-H3#	0.157	0.164	0.379	0.377	0.676	0.650
A1-H4#	0.149	0.153	0.359	0.368	0.653	0.668
A2-H1#	0.263	0.258	0.499	0.410	–	–
A2-H2#	0.311	0.322	0.512	0.478	–	–
A2-H3#	0.319	0.328	0.57	0.642	–	–
A2-H4#	0.337	0.348	0.66	0.688	–	–
A3-H1#	0.243	0.235	0.44	0.370	–	–
A3-H2#	0.29	0.284	0.473	0.452	–	–
A3-H3#	0.306	0.315	0.565	0.506	–	–
A3-H4#	0.293	0.305	0.529	0.554	–	–

条从左下方到上方中部的裂缝，其数值试件在相同的位置也产生了一条裂缝，但由于没达到试验中的轴向应变,贯穿形态不明显。综上所述,数值试件对尾矿固化体柔性及脆性破坏形态的捕捉效果较好，说明利用 PFC 数值模型对尾矿固化体进行模拟有效可行。



(a) Flexible failure　　(b) Brittle failure

图 2　室内试验与数值模拟尾矿固化体破坏形态对比

Fig.2　Comparison of failure modes of solidified tailings between laboratory test and numerical simulation

3　数值模型应用优化

在建立尾矿试件时,无法做到将尾矿颗粒粒径完全还原到模型中,存在一个简化过程,需要研究尾矿粒径分布及颗粒数量的简化对模拟尾矿固化体力学特征的影响,以便对模型更好地应用。

以 H1# 尾矿为例,由于尾矿粒度分布广,最小颗粒粒径只有零点几微米,生成全部粒径分布需要最少 90 亿颗粒。粒组选取范围越大,颗粒数量增加越迅速(图 3)。图 2 中颗粒数由小到大对应的级配曲线选取粒组范围内颗粒体积占实际级配曲线总体积的比值（以下称粒组范围选取比）依次为 40.7%、43.8%、47.1%、50.6%、54.1%、57.6%、61.1%、64.3%、67.5%，当选取的最小粒组粒径小于 2 μm 时,每增加最大最小两个粒组,颗粒数量将增加近 10 万。

按照图 3 中颗粒数量最少的 5 条级配曲线生成尾矿颗粒，加入对应相同胶结度的胶结颗粒数量,分析计算效果,将得到的应力应变曲线与室内试验结果对比(图 4),并且将不同尾矿颗粒数量的数值试件抗压强度与室内实验值对比(表 5)。尾矿

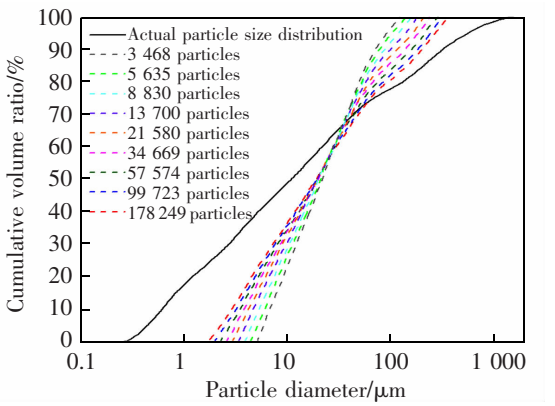


图 3　不同尾矿颗粒数量对应的级配曲线

Fig.3　Grading curve corresponding to different tailings particle number

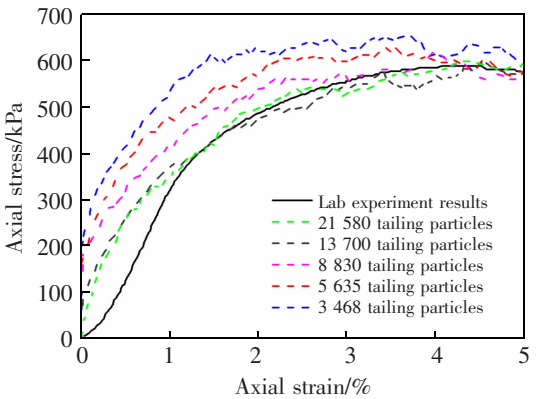


图 4　不同尾矿颗粒数量模拟效果对比

Fig.4　Comparison of simulation results of different tailings particle numbers

表 5　不同尾矿颗粒数量的数值试件抗压强度

Tab.5　Compressive strength of numerical specimens with different number of tailings particles

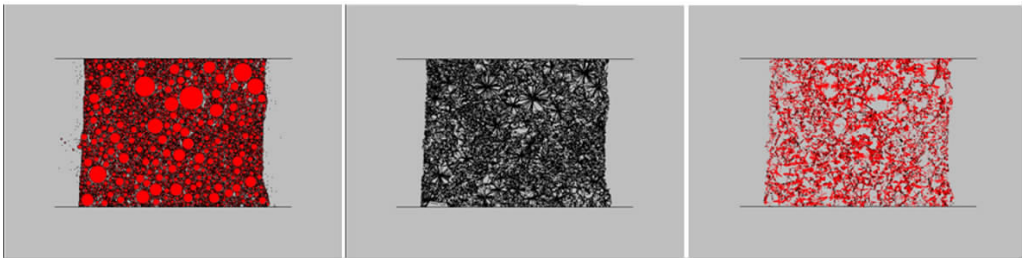
Type	Compressive strength/MPa	Relative error
Lab experiment results	0.587	/
21 580 tailing particles	0.595	1.36%
13 700 tailing particles	0.593	1.02%
8 830 tailing particles	0.617	5.11%
5 635 tailing particles	0.626	6.64%
3 468 tailing particles	0.650	10.7%

颗粒数量为 3 468、5 635、8 830 的数值试件峰值抗压强度与室内试验的相对误差均大于 5%，尾矿颗粒数量为 13 700 与 21 580 的数值试件与室内试验的误差分别为 1.36%与 1.02%,模拟效果较好。由图 4 所示,尾矿颗粒少的试件初始弹性模量较高,应力

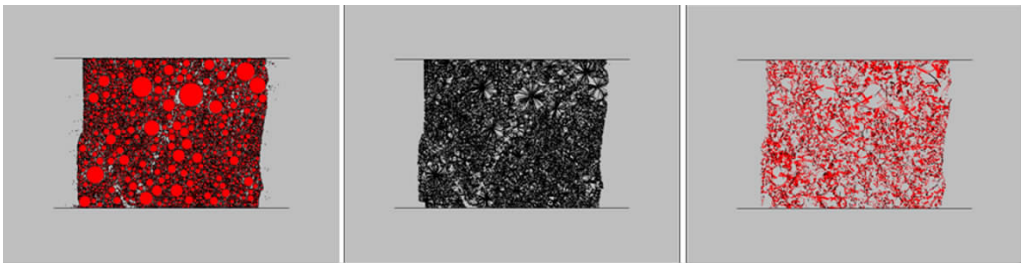
应变曲线模拟效果不佳,而尾矿颗粒数量为13 700及21 580的数值试件曲线形态与室内实验曲线较贴合,拟合效果较好。基于应力应变曲线形态与峰值抗压强度结果,说明当数值试件粒组范围选取比达到50%以上时,能够反映真实尾矿粒径分布对试件强度的影响。

由于模型在达到5%轴向应变时,轴向应力趋于稳定,分析不同尾矿颗粒数量的试件应变达到5%时的形态特征(图5)发现,尾矿颗粒少的试件在单轴压缩时侧边易发生明显的剪胀效应,当尾矿颗粒达到1万,即数值试件中粒组范围选取比占50%以上,上述情况不再发生,试件的破坏主要有边角部分块体剥离(该模型中试件的右上角),内部出现较明显的裂缝,裂缝处平行连接破坏严重。值得注意的是尾矿颗粒13 700和21 580的试件块体剥离位置和内部裂缝产生的位置都十分接近,而尾矿颗粒8 830的试件右上角块体也有剥离趋势,表明随着尾矿颗粒数量的增加,数值试件的破坏形态逐渐趋于稳定。

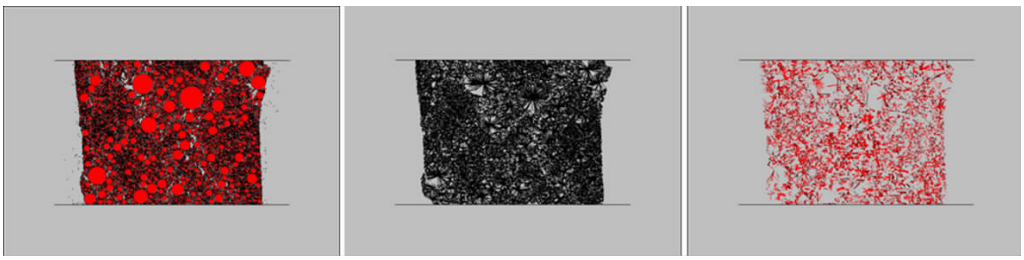
基于上述研究分析,建立粒径分布较广的尾矿数值试件时,保证数值模型粒组范围选取比在50%以上,能够提高计算效率,并且较好地模拟尾矿固化体应力应变曲线及破坏形态。



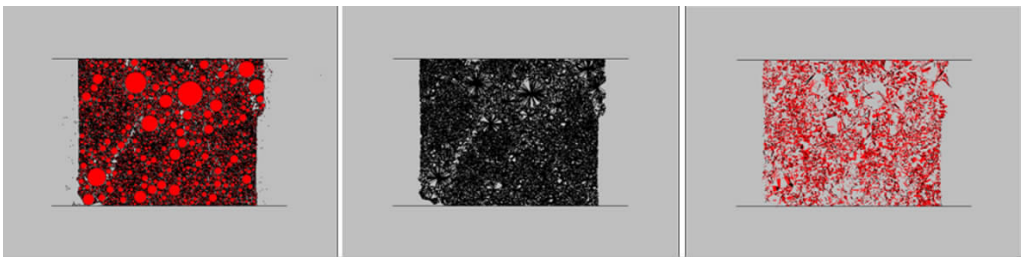
(a) The particle quantity of tailings is 3 468



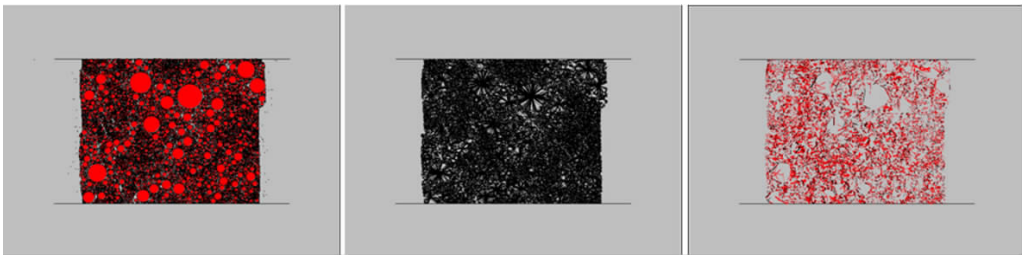
(b) The particle quantity of tailings is 5 635



(c) The particle quantity of tailings is 8 830



(d) The particle quantity of tailings is 13 700



(e) The particle quantity of tailings is 21 580

图 5　不同尾矿颗粒试件 5%轴向应变下形态特征(从左到右依次为颗粒位置、平行连接位置和平行连接力图)

Fig.5　Morphological characteristics of different tailings particle specimens under 5% axial strain(from left to right: particle position、parallel connection position and parallel connection force diagram)

4　结论

以某铁矿项目为工程背景，选用 PFC 对尾矿固化体的力学特征进行模拟，在模型的尾矿颗粒间建立平行连接,根据尾矿颗粒粒度分布、初始孔隙比、固化剂添加量及龄期确定了尾矿固化体细观力学参数,建立了尾矿固化体单轴压缩数值模型,结论如下。

1）尾矿固化体数值试件的单轴抗压强度与实验值平均误差为 5.5%,证明数值模型对尾矿固化体单轴抗压强度的预测效果比较好,尤其是在尾矿固化体强度较小时,而预测效果出现偏差的原因是由于模型未考虑水泥水化作用与黏土矿物失水胶结作用两者间的相互影响。

2）数值试件对尾矿固化体柔性及脆性破坏形态的捕捉效果较好,利用 PFC 数值模型对尾矿固化体进行模拟有效可行。在室内试验及数值模拟单轴压缩过程中，1 d、3 d 龄期试件多发生柔性破坏,而 7 d 龄期试件多为脆性破坏。

3）建立尾矿数值模型时，若尾矿粒径分布较广,可对尾矿粒径分布及颗粒数量进行一定程度的简化。分析表明,当模型尾矿颗粒粒组范围选取比达到 50%以上,能较好地模拟尾矿固化体应力应变曲线及破坏形态。

参考文献:

[1] 李金兰,刘东锋. 黏土矿物质对尾矿固化体强度的影响及其胶结机理研究[J]. 现代矿业,2018,34(6):159-164.
LI J L,LIU D F. Study on influence of clay minerals on early strength and cementation mechanism of cemented tailings paste[J]. Modern Mining,2018,34(6):159-164.

[2] KESIMAL A,YILMAZ E,ERCIKDI B,et al. Effect of properties of tailings and binder on the short-term and long-term strength and stability of cemented paste backfill[J]. Mater Lett,2005,59(28):3703-3709.

[3] OUELLET S,BUSSIERE B,AUBERTIN M,et al. Microstructur al evolution of cemented paste backfill:Mercury intrusion porosimetry test results[J]. Cement and Concrete Research,2007,37(12):1654-1665.

[4] FALL M,BELEM T,SAMB S,et al. Experimental characterization of the stress-strain behaviour of cemented paste backfill in compression[J]. Journal of Materials Science,2007,42(11):3914-3922.

[5] FALL M,BENZAAZOUA M,OUELLET S. Experimental characterization of the influence of tailings fineness and density on the quality of cemented paste backfill[J]. Miner Eng,2005,18(1):41-44.

[6] FALL M,BENZAAZOUA M,SAA E G. Mix proportioning of underground cemented tailings backfill[J]. Tunnelling & Underground Space Technology,2008,23(1):80-90.

[7] FALL M,NASIR O. Mechanical behaviour of the interface between cemented tailings backfill and retaining structures under shear loads[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2010,28(6):779-790.

[8] 侯运炳,唐杰,魏书祥. 尾矿固结排放技术研究[J]. 金属矿山,2011(6):59-62.
HOU Y B,TANG J,WEI S X. Research on tailings′ cementation and discharging technology[J]. Metal Mine,2011(6):59-62.

[9] 魏书祥. 尾砂固结排放技术研究[D]. 北京:中国矿业大学,2010.
WEI S X. Research on technology of cemented tailings emission disposal[D]. Beijing:China University of Mining and Technology,2010.

[10] 彭勃. 尾砂固结排放技术及其应用研究[D]. 北京:中国矿业大学,2013.
PENG B. Technology of the emission of cemented tailings

and its application[D]. BeiJing:China University of Mining and Technology,2013.

[11] 徐贞珍,刘东锋,蒋亚龙. 某铁矿厂尾矿固化体蒸发量模型研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(3):130-136.
XU Z Z,LIU D F,JIANG Y L. Study on evaporation model of tailings cemented paste from an iron ore plant[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(3):130-136.

[12] 张发文. 矿渣胶凝材料胶结矿山尾矿充填性能及机理研究[D]. 武汉:武汉大学,2009.
ZHANG F W. Investigations on solidified charactertics and mechanism of slag cementitious materials in mine filling [D]. Wuhan:Wuhan University,2009.

[13] WANG Y H,LEUNG S C. Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008,134:992-1004.

[14] WANG Y H,LEUNG S C. A particulate-scale investigation of cemented sand behavior[J]. Canadian Geotechnical Journal,2008,45(1):29-44.

[15] 张千贵,王雅梦,李广治,等. 尾矿坝变形细观力学机理的颗粒流数值模拟[J]. 重庆大学学报,2015,38(3):71-79.
ZHANG Q G,WANG Y M,LI G Z,et al. Simulation of the mesomechanics mechanism of the tailings dam′s deformation with particle flow code[J]. Journal of Chongqing University,2015,38(3):71-79.

[16] 刘先珊,董存军. 三维颗粒流数值模型的胶结砂岩力学特性[J]. 重庆大学学报,2013,36(2):37-44.
LIU X S,DONG C J. Research on mechanical characteristics of the cemented sandstone based on 3D PFC numerical model[J]. Journal of Chongqing University,2013,36(2): 37-44.

[17] 刘先珊,许明. 粒度分布对胶结砂岩力学特性的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(5):142-148.
LIU X S,XU M. Effects of particle size distribution on mechanical characteristics of cemented sandstone[J]. Journal of China University of Petroleum,2014,38(5):142-148.

[18] SCHUTTER G D. Hydration and temperature development of concrete made with blast-furnace slag cement[J]. Cement & Concrete Research,1999,29:143-149.

[19] WU D,CAI S J. Numerical modelling of thermally and hydraulically coupled processes in hydrating cemented tailings backfill columns [J]. International Journal of Mining Reclamation & Environment,2014,28(3):173-199.

[20] SCHINDLER A K. Heat of hydration models for cementitious materials[J]. Aci Materials Journal,2005,102:24-33.

[21] SCHINDLER A K. Effect of temperature on hydration of cementitious materials[J]. Aci Materials Journal,2004,101: 72-81.

[22] 许明,刘先珊. 颗粒摩擦因数对胶结砂岩力学特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,45(1):299-305.
XU M,LIU X S. Influence of particle friction coefficient on mechanical characteristics of cemented sandstone[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2011,45(1):299-305.

[23] JAY D. Elasticity of minerals glasses and melts[J]. Mineral Physics & Crystallography A Handbook of Physical Constants,1995,2:45-63.

[24] DEBONO J,MCDOWELL G,WANATOWSKI D. Investigating the micro mechanics of cemented sand using DEM [J]. Int J Numer Anal Methods Geomech,2015,39:655-675.



第一作者:徐贞珍(1992—),女,助理实验师,硕士,研究方向为TBM滚刀破岩机理与数值模拟;2013年本科毕业于武汉大学,2016年硕士毕业于武汉大学。E-mail:xzz2013@whu.edu.cn。



通信作者:蒋亚龙(1991—),男,讲师,博士,研究方向为TBM滚刀破岩机理与数值模拟,深部高地应力隧道围岩大变形机理与控制技术等;2013年本科毕业于武汉大学,2018年博士毕业于武汉大学土木建筑工程学院。E-mail:yalongjiang@whu.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕　刘棉玲)