

# 土工袋双轴压缩的离散元数值模拟

高军军<sup>1</sup>, 汤雷<sup>1</sup>, 刘斯宏<sup>2</sup>, 李建<sup>3</sup>, 王思准<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 江苏 南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京瑞迪高新技术有限公司, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 鉴于土工袋材料介质不连续性的特点, 采用离散元法模拟土工袋双轴压缩试验, 从细观角度分析土工袋的力学特性。通过蒙特卡洛随机算法生成一定颗粒级配的土颗粒样本, 计算时土颗粒间采用弹簧-阻尼器-滑块接触模型, 袋子颗粒间采用皮筋-阻尼器接触模型。计算结果表明: 土工袋的极限强度远大于无袋子土体的极限强度, 土工袋破坏时的总体变形远大于无袋子土体破坏时的总体变形, 且袋子颗粒间的张力呈非均匀分布; 土工袋应力-应变的数值模拟结果与理论推导公式计算值吻合较好; 竖向外力作用下, 土工袋内部颗粒间力链由环状均匀分布向大主应力方向发展, 颗粒位移呈对称性向两侧扩散, 且袋子破坏是土工袋达到极限强度的直接原因。

**关键词:** 土工袋; 蒙特卡洛算法; 离散元法; 双轴压缩; 细观模拟

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2019)01-0039-07

**Numerical simulation of a soilbag under biaxial compression using discrete element method//**GAO Junjun<sup>1</sup>, TANG Lei<sup>1</sup>, LIU Sihong<sup>2</sup>, LI Jian<sup>3</sup>, WANG Enzhun<sup>1</sup> (1. *Materials and Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Nanjing R & D High Technology Co., Ltd., Nanjing 210029, China*)

**Abstract:** Due to the discontinuity of soilbag materials, experiments of a soilbag under biaxial compression were modeled using discrete element method, and the mechanical characteristics of the soilbag were analyzed on a mesoscopic level. Monte-Carlo algorithm is introduced to randomly generate an assembly of soil particles with a certain grain composition. The contact between soil particles is simulated by a combination of a spring-dashpot-slider model, while the contact between bag particles is simulated by a rubber band-dashpot model. The results show that the bearing capacity of the soilbag is much higher than that of soil without a bag. When failure occurs, the overall deformation of the soilbag is also far higher than that of soil without a bag, and the tension between particles has a non-uniform distribution. The stress-strain relationship obtained from simulations agrees well with the theoretical formula. Under vertical loads, the intergranular force chains develop from the uniform circular distribution to the direction of the large principal stress, while the soil particles move to the both sides. Bag breakage is the direct reason for the soilbag to reach the ultimate strength.

**Key words:** soilbag; Monte-Carlo algorithm; discrete element method; biaxial compression; mesoscopic simulation

土工袋技术是近年来通过系列试验研究、理论分析及工程应用而发展起来的一项地基处理新技术。Matsuoka等<sup>[1-2]</sup>通过一系列的室内试验研究并验证了土工袋的加筋机理,即将散状土体装入土工编织袋,利用压缩过程中袋子产生的张力约束袋内土体,达到提高袋内土体强度的目的。土工袋已在房屋基础、公路与铁路路基、沟槽回填及挡土墙等工程中得到广泛应用。目前对土工袋的研究主要以室内试验为主;刘斯宏等<sup>[3]</sup>通过现场平板载荷试验验证了土工袋具有比一般土体高得多的承载能力;高

军军等<sup>[4-5]</sup>通过室内试验和数值模拟验证土工袋可显著提高淤泥土的强度,其极限抗压强度约为普通混凝土的1/10;李玲君等<sup>[6]</sup>探讨了不同袋内充填材料对土工袋动力特性的影响;相关学者还通过铝棒摩擦试验研究了不同条件下柔性土工袋层间摩擦与刚性体间摩擦特征的区别<sup>[7]</sup>。

对土工袋的数值模拟研究相对较少,刘斯宏等<sup>[8]</sup>将袋子张力的作用等效为附加应力,利用弹塑性有限元法对加固后的软基承载力进行了数值模拟;Ansari等<sup>[9]</sup>将土和袋子分别采用不同的模型利

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401610);国家自然科学基金(51509166);南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y415008)

作者简介:高军军(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事水工结构、基础加固技术的研究。E-mail: gaojunjun700@163.com

用有限元法研究单个土工袋在竖向荷载下的力学反应。但土工袋是一种复杂的复合型材料,存在非均质性和介质不连续性,尤其是不同材料介质间的接触问题,采用基于连续介质理论的有限元法反映其真实力学特性的难度较大,土工袋固有的间隙也直接制约有限元法计算的有效进行。故而采用基于非连续介质理论的颗粒离散元法对土工袋的力学特性进行数值模拟来验证土工袋的加筋机理有一定的现实意义。本文对土工袋在双轴压缩条件下的力学特性进行离散元数值模拟,从细观角度分析土工袋内部应力分布及发展规律。

## 1 土工袋模型的生成

考虑真实土体颗粒分布的空间随机性,本文采用蒙特卡洛随机算法生成一定颗粒粒径及颗粒级配的袋内土体样本,其中土颗粒间采用弹簧-阻尼器-滑块接触模型,袋子颗粒间采用皮筋-阻尼器接触模型。

### 1.1 蒙特卡洛随机算法

蒙特卡洛随机算法又称计算机随机模拟方法,它是一种基于随机数的计算方法<sup>[10-12]</sup>,在大数定理和中心极限定理等概率论的基础上,对随机变量进行方差判定来分析随机问题的不确定程度。

设  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ( $n$  为随机变量的总数) 为独立且均匀分布的随机变量序列,其期望值为  $E$ , 标准差为  $S$ , 则正态随机数可表示为

$$Q_n = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - nE}{S\sqrt{n}} \quad (1)$$

$Q_n$  具有渐近分布,当  $n$  取值很大时,近似服从标准正态分布(本文在颗粒生成程序中  $n$  取 100)。本文利用蒙特卡罗算法从空间几何着手,编制了二维圆形颗粒自动生成程序。假设  $X_1, X_2, \dots, X_{100}$  为区间  $[0, 1]$  上的 100 个均匀随机数,其期望值为  $1/2$ , 标准差为  $1/\sqrt{12}$ , 根据式(1)得到  $Q_{100}$ 。

颗粒生成程序中,根据边界条件和颗粒数可以求出颗粒的平均半径,输入比平均半径较小的一个值  $R_0$  和预设标准差  $S_0$ , 通过式(2)就可以得到第  $i$  个颗粒粒径  $R_i$ , 如果  $R_i$  小于 0, 则回到随机算法重新生成 100 个处在区间  $[0, 1]$  内的随机变量并重新得到  $Q_{100}$ , 根据式(2)得到新的粒径值, 重复判断, 直到  $R_i$  大于 0, 进入下一个循环生成第  $i+1$  个颗粒的粒径  $R_{i+1}$ 。

$$R_i = R_0 + S_0 Q_{100} \quad (2)$$

根据颗粒单元的交叉(重合)情况通过分级衰减粒径大小的方法再重新定位颗粒单元, 如此往复直至生成较满意的颗粒系统。此颗粒系统需满足两个条件:①颗粒在给定空间内具有各向均匀性;②颗

粒体的初始重叠量不宜过大。

### 1.2 颗粒体生成

首先确定矩形试样尺寸为长度 40 cm、高度 10 cm(土工袋的合理尺寸<sup>[13]</sup>)。如果颗粒最大粒径为 9.0 mm, 生成初始颗粒数为 1250, 再根据衰减系数对发生重叠的颗粒进行分级粒径衰减, 经过 5 级衰减后, 得到粒径分别为 9.00 mm、7.20 mm、6.12 mm、5.20 mm、4.16 mm、3.33 mm。此时生成的颗粒样本虽然不存在重叠现象, 但是部分颗粒间隙较大, 存在颗粒腾空现象, 需要再进行自重堆积得到新的颗粒位置状态。此时颗粒样本在顶部并不平整, 会影响竖向均布荷载的施加, 可在其顶部先施加 10 kPa 的预荷载, 同时限制侧向变形为 0, 待稳定后得到试验最终样本。

最终生成的样本包含 1250 个颗粒, 其中颗粒数按粒径从大到小分别为: 180、148、156、189、184、393, 颗粒级配曲线如图 1 所示, 最终的颗粒孔隙比为 0.20, 不均匀系数为 2.1。

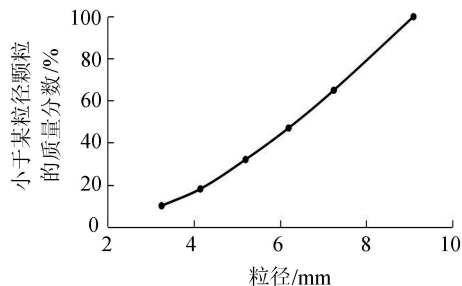


图 1 颗粒级配曲线

### 1.3 颗粒接触模型

在颗粒离散单元中, 宏观系统的力学行为通过细观颗粒间的接触模型体现出来。基于牛顿第二定律, 通过颗粒间的作用力求得各颗粒的加速度, 加速度对时间进行一次积分即可求得颗粒的速度, 加速度对时间进行二次积分则可求得颗粒的位移。

在土工袋的离散元模拟计算中, 袋内土颗粒间的接触简化为弹簧-阻尼器-滑块模型, 如图 2(a) 所示, 弹簧主要模拟颗粒间的压缩和切向所用, 滑块主要模拟颗粒间的滑移, 而阻尼器主要是为了消耗系统中多余的能量使系统快速趋向平衡状态; 土工袋通过在土颗粒的外面增加一层具有张力的小颗粒模拟, 袋子颗粒间的接触简化为皮筋-阻尼器模型, 如图 2(b) 所示, 其间的接触模型与土颗粒相同, 但只有法向接触, 无切向接触, 且只受拉不受压。

## 2 无袋子情况下的土体强度

为了反映土工袋对袋内土体的加筋作用(即提高袋内土体强度), 先对无袋子情况下近似同等体积的土体进行数值模拟, 分析其在双轴压缩条件下

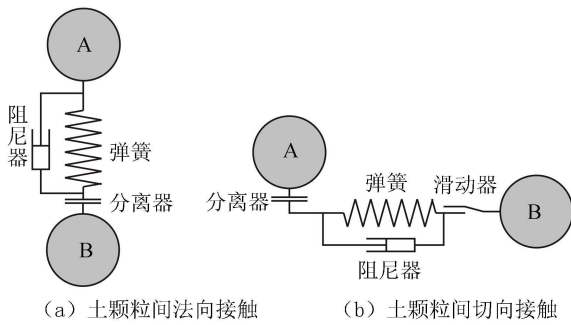


图2 袋子 DEM 数值模拟颗粒接触模型

的力学强度。

模拟试验在 4 块相对独立、互不影响的刚性加载板的范围内进行,如图 3 所示。颗粒密度为  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,颗粒间的摩擦角为  $20^\circ$ ;假定颗粒与刚性加载板之间无摩擦,避免加载板对试样端部变形及试样内部应力的影响。具体计算参数如表 1 所示。

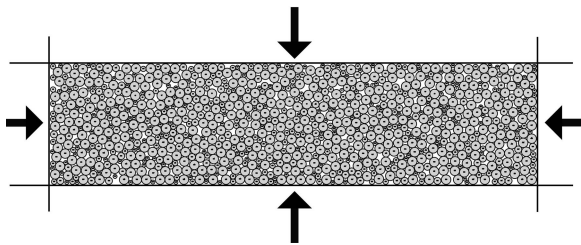


图3 无袋子情况下的土体试样双轴压缩模拟

加载过程中对试样施加以  $50 \text{ kPa}$  的稳定围压,再分别对顶部和底部的加载板施加以大小为  $0.01 \text{ cm/s}$ 、方向相反的竖向等应变率加载速度。

图 4 为无袋子包围的土颗粒试样偏应力及体应变与轴向应变之间的关系曲线。从图中可以看出土体在双轴压缩过程中应力随着应变非线性增长。而土体的体应变在压缩过程中先发生微小的剪缩现象,随即开始剪胀,且体应变随轴向应变的增大而增大,当土体发生破坏后,剪胀值有所降低。

图 5 为土颗粒试样达到极限强度时的力链结构图,线条的粗细代表颗粒间接触力的大小。力链是颗粒物质力学的基本概念,孙其诚等<sup>[14]</sup>认为颗粒在

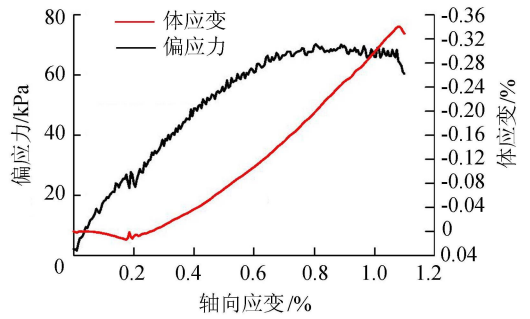


图4 无袋子土体的应力-应变关系曲线

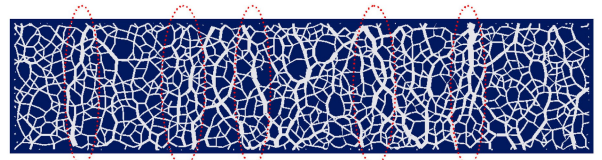


图5 土颗粒试样内部力链分布

外荷载作用下相互挤压形成接触网络,该网络是支撑外荷载的物质基础,就如同土力学中土骨架的概念一样<sup>[15-16]</sup>。从图 5 可看出,颗粒间的强力链(即较粗力链)分布较均匀,基本上与大主应力方向平行,而两侧颗粒间的力链较弱,说明土颗粒试样的破坏由竖向荷载主导,这与事实相符。

为了通过摩尔圆来分析土体的强度特性,又对该试样作了不同围压下( $100 \text{ kPa}$ 、 $200 \text{ kPa}$ )的双轴压缩模拟。从试验样本的摩尔强度线可以看出,不同围压条件下的应力摩尔圆基本相切于一直线,故本次试验样本的内摩擦角可取  $24.3^\circ$ 。

### 3 土工袋的力学强度

为了研究土工袋的力学性能,只需在原试验样本上加一圈袋子小颗粒,如图 6 所示,假设颗粒级配及样本内摩擦角不变。袋子颗粒间保留一定距离,允许袋子在外荷载作用下发生伸缩变形;且假设间距相等,为袋子颗粒粒径的 2.5 倍。该土工袋试样模型中,土颗粒数为 1 199,袋子颗粒数为 396,袋子颗粒粒径为  $0.1 \text{ cm}$ ,其密度设为  $0.8 \text{ g/m}^3$ 。土颗粒的计算参数如表 1 所示,袋子颗粒的计算参数见表 2,模拟中不考虑袋子与刚性边间的摩擦作用。

加载方式与无袋子情况相同。需要注意的是,在计算主应变时,将土工袋简化为理想的矩形结构,即利用上下刚性边的相对位移计算土工袋的轴向应变,利用左右刚性边的相对位移计算土工袋的侧向应变。

表 1 土体试样 DEM 计算参数

位置	法向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	切向刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	法向阻尼系数/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	切向阻尼系数/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	摩擦角/ $(^\circ)$
土颗粒间	$7.36 \times 10^{10}$	$7.24 \times 10^7$	$5.15 \times 10^4$	$1.60 \times 10^3$	20
土与刚性边之间	$1.87 \times 10^{11}$	$3.97 \times 10^7$	$8.06 \times 10^4$	$1.17 \times 10^3$	0

表2 土工袋试样 DEM 计算参数

位置	法向刚度/(N·m <sup>-2</sup> )	切向刚度/(N·m <sup>-2</sup> )	法向阻尼系数/(N·m <sup>-2</sup> )	切向阻尼系数/(N·m <sup>-2</sup> )	摩擦角/(°)
袋子颗粒间	4.00×10 <sup>9</sup>		4.30×10 <sup>3</sup>		
袋子与土颗粒间	9.00×10 <sup>8</sup>	1.40×10 <sup>7</sup>	7.90×10 <sup>3</sup>	1.00×10 <sup>4</sup>	20
袋子与刚性边间	1.87×10 <sup>10</sup>	3.97×10 <sup>6</sup>	8.06×10 <sup>3</sup>	1.17×10 <sup>2</sup>	0

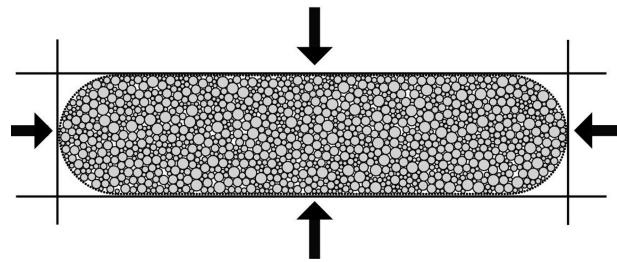


图6 土工袋试样双轴压缩模拟

图7为土工袋在围压50 kPa条件下的偏应力-轴向应变和体应变-轴向应变关系曲线。从图7可看出,土工袋的偏应力随着轴向应变的增长逐渐增大,直到土工袋发生破坏后,迅速下降;而土工袋的体应变在加载初期也发生微小的剪缩现象,随后快速膨胀,到后期增长速率变小,这与无袋子情况下的土体变形规律一致。不同的是,土工袋破坏时的偏应力(680 kPa)远大于无袋子的情况(70 kPa),并且土工袋破坏时的总体变形明显大于无袋子的情况。袋子具有可延性,到后期袋子的延伸速率下降,逐渐达到袋子的抗拉强度。从图中还可以看出,随着轴向应变的增长,偏应力有好几处(红圈标记)发生一定的下降后重新上升,这是由于虽然土工袋仍未破坏,但此时袋内的土体早已达到极限状态,袋内土体产生局部应力集中,部分土颗粒发生旋转,在袋子的侧向约束下重新达到新的平衡状态,而在此过程中体应变并无明显变化。

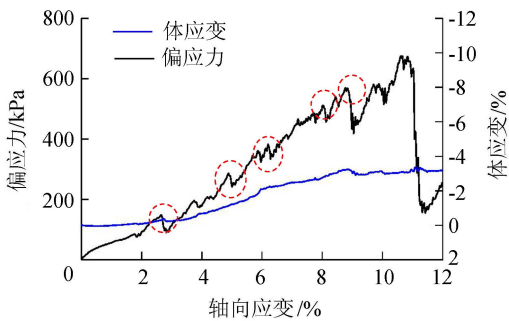
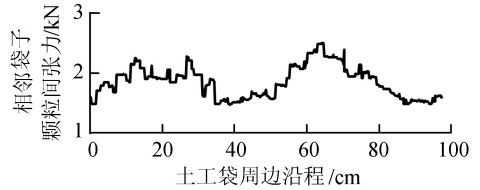


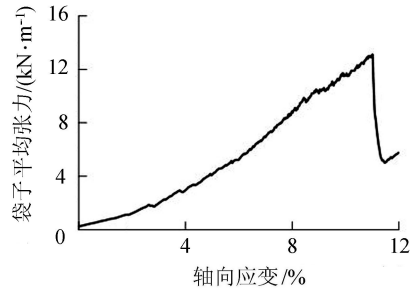
图7 土工袋的应力-应变关系曲线

图8(a)为土工袋破坏前某一状态下(轴向应变 $\epsilon_1=3\%$ )相邻袋子颗粒间的张力大小沿土工袋周边的分布情况,可见,袋子张力分布并不是均匀的,在袋子不同的位置张力大小不同,但基本上在一个平均值附近上下波动。对所有袋子颗粒间的张力取平均值可以得到袋子平均张力的变化情况,图8(b)为模拟过程中袋子的平均张力随着轴向应变的变化。袋

子的平均张力并不呈线性增长趋势,这是由于在变形过程中袋子周长的伸长与土工袋轴向应变并不呈线性关系。袋子破坏时袋子平均张力接近12.5 kN/m。



(a)  $\epsilon_1=3\%$ 时袋子颗粒间张力分布



(b) 袋子平均张力随轴向应变的变化

图8 土工袋袋子张力的变化

根据刘斯宏等<sup>[2]</sup>对土工袋加筋原理的阐述,将袋子张力等效为作用于土工袋轴向及侧向的附加应力( $2T/B, 2T/H$ ),强度公式可表示为

$$\sigma_1 + \frac{2T}{B} = K_p \left( \sigma_3 + \frac{2T}{H} \right) \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ 为土工袋大主应力; $\sigma_3$ 为土工袋小主应力; $T$ 为袋子的张力; $B$ 为土工袋的宽度; $H$ 为土工袋的高度; $K_p$ 为被动土压力系数, $K_p = (1 + \sin\varphi) / (1 - \sin\varphi)$ , $\varphi = 24.3^\circ$ 。

取图7中红圈内的大小主应力,再结合图8中对应轴向应变下的平均张力,可以得到袋内土体主应力之间的关系如图9所示,大小主应力之间基本呈线性关系,且斜率近似与 $K_p$ 一致,验证了理论强度式(3)的合理性。

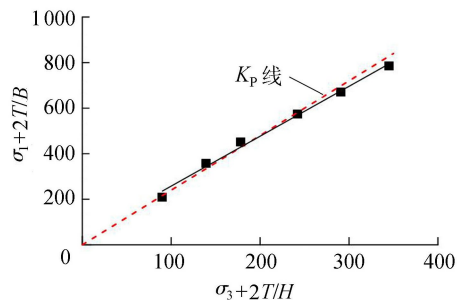


图9 袋内土体主应力之间的关系

假设土工袋在压缩过程中体积不变,可以推得土工袋的轴向应变  $\varepsilon_1$  与侧向应变  $\varepsilon_3$  之间的关系为  $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 / (\varepsilon_1 - 1)$ 。图 10 显示 DEM 数值模拟得到的土工袋轴向应变与侧向应变之间的关系(黑色实线),发现在加载初期土工袋基本上满足体积不变的假设,但当轴向应变超过 2% 以后,真实的侧向应变绝对值大于假设体积不变得到的值,即土工袋的体积发生了变化。DEM 数值模拟中的  $\varepsilon_1$  与  $\varepsilon_3$  的关系更接近于多项式表达式(如图 10 红色虚线所示):

$$\varepsilon_3 = 0.00785 \varepsilon_1^3 - 0.13834 \varepsilon_1^2 - 0.80065 \varepsilon_1 - 0.04987 \quad (4)$$

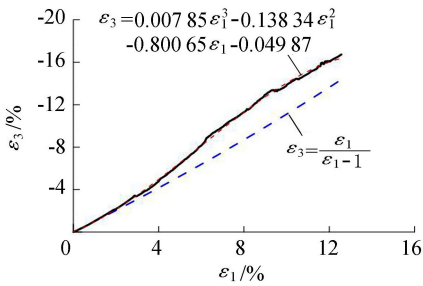


图 10 土工袋轴向应变与侧向应变的关系

通过几何换算,袋子的应变  $\varepsilon_{\text{bag}}$  可以表示为

$$\varepsilon_{\text{bag}} = \frac{-m\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{m+1} \quad (5)$$

式中: $m$  为初始状态下土工袋的宽度与高度的比值。

将式(5)代入  $T = k\varepsilon_{\text{bag}}$  (其中  $k$  为袋子接触模型的抗拉系数),并与式(4)一起代入式(3)可以推导出适合此双轴压缩试验的应力-应变关系:

$$\sigma_1 = K_p \sigma_3 + 2kK_p \frac{m\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{(m+1)(\varepsilon_1 - 1)H_0} - 2k \frac{m\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{(m+1)(\varepsilon_1 - 1)B_0} \quad (6)$$

式中: $H_0$ 、 $B_0$  分别为土工袋的初始高度和宽度。图 11 为 DEM 数值模拟结果与理论计算值的对比,可见推导公式与模拟结果吻合较好。

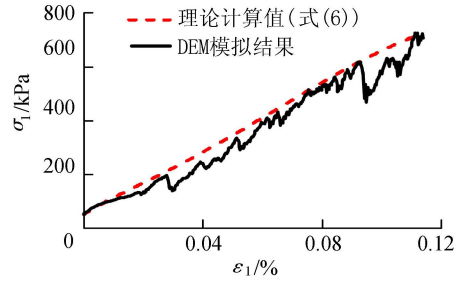


图 11 DEM 数值模拟结果与推导公式的对比

#### 4 土工袋微观结构变化

图 12 为不同加载时刻的土工袋微观分析图。 $\varepsilon_1 = 0$  时为围压 50 kPa 的情况,因为颗粒处于等向压缩状态,土工袋的内部应力比较均匀,力链群形成

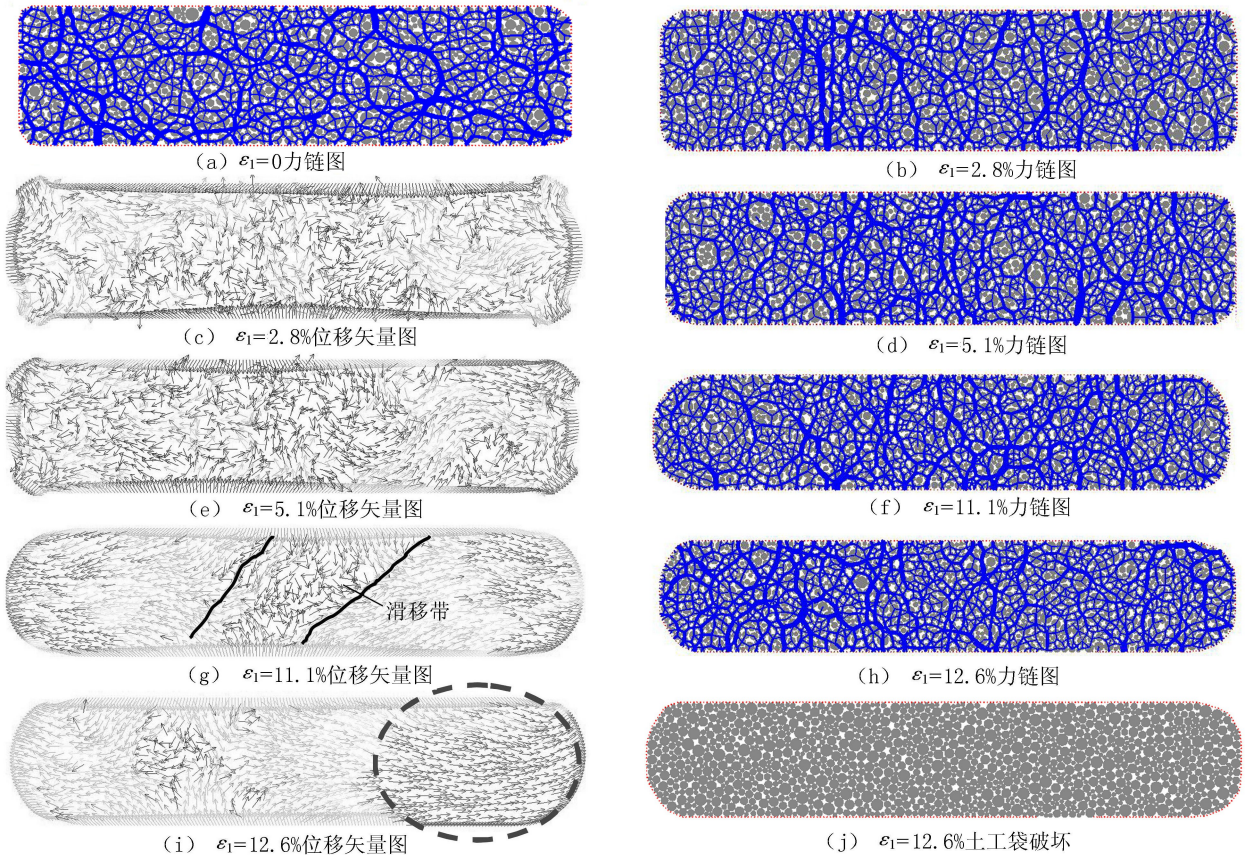


图 12 土工袋内部颗粒的微观分析

环状分布,表明此时外荷载由土颗粒均匀承担。当上下刚边以一定速度压缩土工袋时,土工袋被压扁,内部应力重新分布, $\varepsilon_1 = 2.8\%$ 时可以观察到内部应力出现局部集中化,力链方向大致为大主应力的方向;而土颗粒的位移较小且较乱,由于此时偏应力不大,在双轴压缩的情况下,土颗粒大致都往内部移动,导致土工袋在加载初期出现微小剪缩现象,同时袋子4个边角上的土颗粒有向外挤出现象。当 $\varepsilon_1 = 5.1\%$ 时,内部应力向中部集中,颗粒位移加大,颗粒基本上向土工袋两侧跑动,中部的颗粒位移较小;当 $\varepsilon_1 = 11.1\%$ 时,土体内部出现滑移带,颗粒有明显向两侧发生大位移的趋势;随着轴向应力的继续增加,内部颗粒应力重新调整,直至土工袋内部基本上都处于强力链的状态,在轴向应变达到12.6%时发生破坏。在加载后期,颗粒的运动也呈对称性地向两端扩散,出现明显的滑移带,直至土工袋发生破坏时,土颗粒有明显向右下侧滑移的趋势(图12(i)中圆圈处),这是由于袋子就在此处发生了破坏(如图12(j)所示),对袋内土体失去约束作用,导致颗粒向外跑动,同时发现此时强力链开始从右下侧消失,表明袋子破坏是土工袋达到极限强度的直接原因。

## 5 结 论

a. 土工袋破坏时的偏应力远大于无袋子土体破坏时的偏应力,且土工袋破坏时的总体变形明显大于无袋子土体破坏时的总体变形。

b. 袋子张力分布并不是均匀的,在袋子不同的位置张力大小不同,但基本上在一个平均值附近上下波动。

c. 土工袋双轴压缩 DEM 数值模拟得到的应力-应变关系与理论计算值吻合较好,轴向应变与侧向应变的关系更加接近于某个多项式函数。

d. 在竖向荷载作用下,土工袋内部颗粒间力链由环状均匀分布向大主应力方向发展,颗粒位移呈对称性向两侧扩散趋势,且袋子破坏是土工袋达到极限强度的直接原因。

## 参考文献:

[1] MATSUOKA H, LIU S H. A new earth reinforcement method using soilbags [M]. Rotterdam: Balkema Publishers, 2005.

[2] 刘斯宏, 松冈元. 土工袋加固地基新技术[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1665-1670. (LIU Sihong, MATSUOKA H. A new earth reinforcement method by soilbags [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1665-1670. (in Chinese))

[3] 刘斯宏, 高军军, 王子健, 等. 土工袋技术在市政沟槽

回填中的应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 765-771. (LIU Sihong, GAO Junjun, WANG Zijian, et al. Application of soilbags to urban trench backfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 765-771. (in Chinese))

[4] 高军军, 刘斯宏, 白福清. 袋装淤泥土土工袋的强度变形研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 33-36. (GAO Junjun, LIU Sihong, BAI Fuqing. Experimental study on strength and deformation properties of soilbags filled with mud soil [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2014, 36(1): 33-36. (in Chinese))

[5] 高军军, 刘斯宏, 王柳江. 竖向荷载下土工袋的有限元数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 524-528. (GAO Junjun, LIU Sihong, WANG Liujiang. Numerical simulation of a soilbag under vertical loads by FEM [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(6): 524-528. (in Chinese))

[6] 李玲君, 刘斯宏, 徐小东, 等. 袋内材料对土工袋动力特性参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 131-136. (LI Lingjun, LIU Sihong, XU Xiaodong, et al. Experimental study of effects of soil fills on dynamic characteristics parameters of soil-bags [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 131-136. (in Chinese))

[7] 刘斯宏, 樊科伟, 陈笑林, 等. 土工袋层间摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1874-1880. (LIU Sihong, FAN Kewei, CHEN Xiaolin, et al. Experimental studies on interface friction characteristics of soilbags [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1874-1880. (in Chinese))

[8] 刘斯宏, 王柳江, 李卓, 等. 土工袋加固软土地基现场荷载试验的数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 78-82. (LIU Sihong, WANG Liujiang, LI Zhuo, et al. Numerical simulation of in-situ loading tests on a soilbag-reinforced soft foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 78-82. (in Chinese))

[9] ANSARI Y, MERIFIELD R, YAMAMOTO H, et al. Numerical analysis of soilbags under compression and cyclic shear [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(5): 659-668.

[10] BINDER K. The Monte Carlo method for the study of phase transitions; a review of some recent progress [J]. Journal of Computational Physics, 1985, 59(1): 1-55.

[11] RUBINSTEIN R Y, KROESE D P. Simulation and the Monte Carlo method; student solutions manual [J]. Technometrics, 2012, 24(2): 167-168.

[12] PAKMAN A, PANINSKI L. Auxiliary-variable exact Hamiltonian Monte Carlo samplers for binary distributions [J]. Statistics, 2015: 2490-2498.

[13] 叶翠明, 徐永福, 邵介贤, 等. 环保节能型地基处理方

- 法;土工袋的性能分析[J]. 土工基础, 2008(1): 2-4. (YE Cuiming, XU Yongfu, SHAO Jiexian, et al. A new environmental protection and energy-saving earth reinforcement method: soilbags and its property[J]. Soil Engineering and Foundation, 2008(1): 2-4. (in Chinese))
- [14] 孙其诚, 辛海丽, 刘建国, 等. 颗粒体系中的骨架及力链网络[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊1): 83-87. (SUN Qicheng, XIN Haili, LIU Jianguo, et al. Skeleton and force chain network in static granular material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup1): 83-87. (in Chinese))
- [15] 刘斯宏, 姚仰平, 孙其诚, 等. 基于细观结构的颗粒介  
 (上接第38页)
- [5] 李炎隆, 李守义, 丁占峰, 等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7): 873-879. (LI Yanlong, LI Shouyi, DING Zhanfeng, et al. The sensitivity analysis of Duncan-Chang E-B model parameters based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 873-979. (in Chinese))
- [6] 陈辉, 刘东海, 戚蓝. 改进的堆石坝变形计算参数敏感性分析方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 406-412. (CHEN Hui, LIU Donghai, QI Lan. Improved sensitivity analysis method for calculating the deformation parameters of the rock-fill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 406-412. (in Chinese))
- [7] 彭正光. 西北口面板堆石坝蓄水7年变形分析[J]. 水利水电技术, 1999, 30(9): 24-27. (PENG Zhenggaung. Analysis on deformation of northwest mouth concrete face rock-fill Dam for 7 years [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 1999, 30(9): 24-27. (in Chinese))
- [8] LI Y L, LI S Y, YANG Y, et al. Temperature stress and surface insulation measures of concrete face slabs during cold wave period [J]. International Journal of Civil Engineering, 2015, 13(4): 501-507.
- [9] 王子健, 刘斯宏, 李玲君, 等. 公伯峡面板堆石坝面板裂缝成因数值分析[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 343-350. (WANG Zijian, LIU Sihong, LI Lingjun, et al. Numerical analysis of the causes of slab's cracks on Gongboxia face rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3): 343-350. (in Chinese))
- [10] 周恒, 翟迎春, 张晓将, 等. 茨哈峡混凝土面板堆石坝技术可行性及大坝安全性初步研究[J]. 西北水电, 2015(1): 25-29. (ZHOU Heng, ZHAI Yingchun, ZHANG Xiaojiang, et al. Study on technical feasibility and dam safety of CFRD, Cihaxia Hydropower Project [J]. Northwest Water Power, 2015(1): 25-29. (in Chinese))
- [11] 陈生水, 阎志坤, 傅中志, 等. 特高面板砂砾石坝结构安全性论证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 1949-1958. (CHEN Shengshui, YAN Zhikun, FU Zhongzhi, et al. Evaluation of safety performance of extremely high salb-face gravel dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 1949-1958. (in Chinese))
- [12] 贾超, 张凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1718-1726. (JIA Chao, ZHANG Kai, ZHANG Qiangyong, et al. Research on multi-factor optimization of underground laminated salt rock storage group based on orthogonal experimental design [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1718-1726. (in Chinese))
- [13] SHEN Q W, ZHENG Y, LI S, et al. Optimize process parameters of microwave-assisted EDTA method using orthogonal experiment for novel BaCoO<sub>3.8</sub> perovskite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 658: 125-131.
- [14] GAO X S, ZHANG Y D, ZHANG H W, et al. Effects of machine tool configuration on its dynamics based on orthogonal experiment method [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(2): 285-291.
- [15] GUO S, ZHOU X, SONG S S, et al. Optimization of leaching conditions for removing sodium from sodium-rich coals by orthogonal experiments [J]. Fuel, 2017, 208: 499-507.
- [16] 王瑞骏, 李阳, 丁占峰. 堆石料流变模型参数敏感性分析的正交试验法[J]. 水利学报, 2016, 47(2): 245-252. (WANG Ruijun, LI Yang, DING Zhanfeng. The sensitivity analysis of seven-parameter rockfill rheological model based on the orthogonal test method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(2): 245-252. (in Chinese))

(收稿日期:2018-03-07 编辑:雷燕)

(收稿日期:2018-04-03 编辑:骆超)