



# 基于 EDEM 和 ANSYS 联合仿真的 格宾石笼护岸施工分析

陈广云, 詹锐彪

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510220)

**摘要:** 格宾石笼挡土墙属于柔性结构, 施工过程中变形和沉降过大容易导致平整度和高程超验收规范要求。采用离散元仿真软件 EDEM 和有限元仿真软件 ANSYS 联合仿真, 对格宾石笼本身及内部散粒体系的受力、变形进行研究。石笼网箱受力具有较复杂且随机性大的特点。以研究石笼网箱的土压力为着手点, 就石笼护岸变形过大的问题, 提出石笼护岸墙前一定范围采用料石码砌; 就沉降过大的问题, 提出预留沉降或增加网箱高度。解决措施效果显著, 研究成果可为类似项目提供借鉴。

**关键词:** 格宾石笼; 土压力; 变形; 沉降; EDEM; ANSYS

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0202-05

## Construction of gabion stone cage revetment based on EDEM and ANSYS joint simulation

CHEN Guangyun, ZHAN Ruibiao

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510220, China)

**Abstract:** Gabion retaining wall is a flexible structure that is prone to deformation and excessive settlement during construction, resulting in flatness and elevation exceeding the acceptance standards. This paper uses the discrete element simulation software EDEM and finite element simulation software ANSYS to jointly simulate the force and deformation of the Gabion gabion itself and the internal granular system. The force on the gabion mesh box has the characteristics of complexity and randomness. This paper starts from studying the soil pressure of the gabion net box, and proposes a solution to the problem of excessive deformation of the gabion revetment wall by using material and stone masonry within a certain range in front of the gabion revetment wall. Regarding the issue of excessive settlement, measures such as reserving settlement or increasing the height of the cage are proposed, which have achieved significant results and can serve as a reference for similar projects in the future.

**Keywords:** gabion stone cage; soil pressure; deformation; settlement; EDEM; ANSYS

格宾石笼挡土墙属于柔性结构, 有取材便利、施工方便等特点, 在河道整治工程中, 使用石笼挡土墙作为护坡、护岸使用更能发挥其透水性良好的优势, 利于与水体、水草、鱼类等共存。石笼护岸在京杭运河施桥船闸至长江口门段航道整治工程<sup>[1]</sup>、汉江左岸洋县党水河口—西汉高速公路桥段防洪工程<sup>[2]</sup>、松花江流域某二级支流的河道治理及生态修复工程<sup>[3]</sup>等项目中均取得良好的

应用效果。

由于格宾石笼挡土墙有易变形的特点, 国内学者做过很多研究, 柴贺军等<sup>[4]</sup>在颗粒流离散元程序的基础上, 建立石笼挡土墙 PFC 2D 模型, 测量不同深度的土压力; 孟云伟等<sup>[5-6]</sup>利用墙前直立、墙背阶梯式石笼挡墙进行 PFC 2D 的数值模拟, 对石笼挡墙所受土压力和变形情况进行研究, 推断出墙背阶梯式石笼挡土墙的破坏形式为倾覆

收稿日期: 2023-08-15

作者简介: 陈广云 (1979—), 男, 高级工程师, 从事港口航道施工技术与管理。

式;张波等<sup>[7]</sup>应用 PFC 2D 软件对石笼挡土墙进行仿真模拟,得出格宾挡土墙墙后土压力的分布特点及整体破坏机理;黄向京等<sup>[8]</sup>使用有限元软件 Phase2 对格宾石笼进行强度折减法分析其稳定性,效果较好。

国内外学者对格宾石笼研究的着重点为石笼整体力学性能、变形特点、破坏机理等,而未对格宾石笼本身及内部散粒体系的受力、变形进行揭示,本文将针对格宾石笼护岸施工中易产生变形及沉降的问题,通过使用仿真模拟的方法,提出施工措施。

## 1 工程概况

京杭运河枣庄段二级航道整治工程护岸设计为两级护岸。一级护岸为格宾石笼结构,高 5 m,由 5 层网箱累叠而成,外立面为直立,墙背坡度为 1:1;二级护岸为互嵌式挡土块,高 3.0~3.5 m。石笼网箱网面采用直径 2.7 mm 镀高尔凡低碳钢丝,网格尺寸 80 mm×100 mm。

## 2 仿真模型建立

EDEM 是通过离散元技术进行颗粒系统仿真和分析的通用 CAE 软件。通过 EDEM 可以快速、简便地建立颗粒系统的参数化模型,添加颗粒的力学性质、物料性质和其他物理性质。EDEM 能够管理每个颗粒的信息(如质量、温度和速度等)以及作用在其上的力<sup>[9]</sup>。联合仿真即是从 EDEM 中导出力的数据,映射到 ANSYS Workbench 模型中,进行静力仿真分析。

### 2.1 EDEM 模型

#### 2.1.1 仿真物理模型

采用 SolidWorks 软件建立石笼网箱结构模型(图 1),为简化模型,综合考虑仿真准确和电脑计算能力。为提高仿真速度,需减少划分网格数

量并保证网格质量,由于网箱内部网格受力是平衡的,因此省略网箱结构中间的分隔网片,并将网面钢丝直径由 2.7 mm 改为 20 mm。石笼结构后方填土采用钢板限制,高 8 m,长 2~6 m,宽 1 m(与网箱等宽)。钢板刚度计算为:

$$k=EA=\frac{1}{4}\pi ER^2 \quad (1)$$

式中:  $k$  为刚度;  $E$  为弹性模量,取  $0.018\ 2E_{\text{钢}}$ ;  $A$  为截面积;  $R$  为直径。

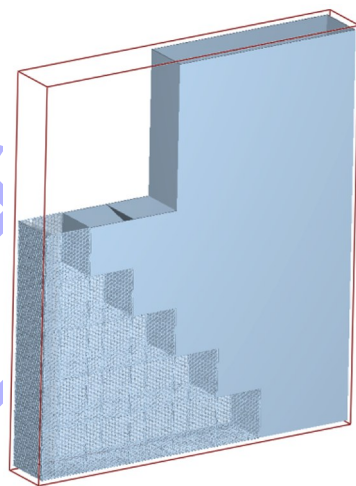


图 1 石笼网箱结构模型

#### 2.1.2 颗粒定义

一般颗粒的形状可以采用伸长率、扁平率及 Domokos 因子、圆度和凸度等指标进行定量分析,装填格宾石笼的石料一般由毛石破碎而成,毛石经破碎后形状各异,大致分为球状、扁平状、柱状、叶片状等 4 类,其占比分别为 36.10%、32.60%、23.90%和 7.40%<sup>[10-11]</sup>。本次仿真颗粒分为毛石、料石、后方回填土及上部压载土,其形状见图 2。毛石粒径按设计要求取 100~300 mm,料石尺寸按照 150 mm×150 mm×300 mm 考虑,对土颗粒进行放大处理,颗粒粒径取值及质量分数见表 1。

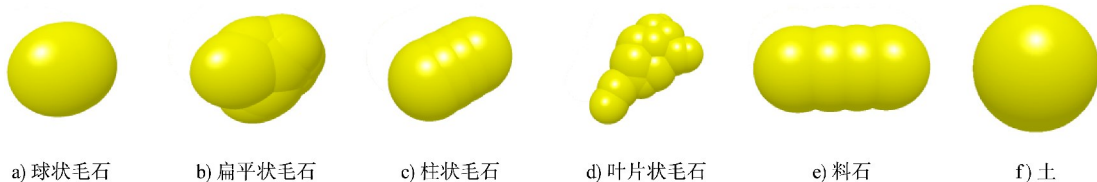


图 2 代表颗粒形状

表 1 颗粒粒径分级、质量分数

| 类别  | 颗粒直径/mm | 质量分数/% |
|-----|---------|--------|
| 毛石  | 100     | 10     |
|     | 150     | 20     |
|     | 200     | 40     |
|     | 250     | 20     |
|     | 300     | 10     |
| 料石  | 150     | 100    |
| 回填土 | 8       | 17.3   |
|     | 16      | 32.8   |
|     | 30      | 34.7   |
|     | 40      | 15.2   |
| 压载土 | 80      | 100    |

2.1.3 仿真参数

仿真参数包括材料参数和接触参数，参数取值对仿真结果影响较大。材料参数包括密度、杨氏模量(或剪切模量)、泊松比，毛石的材料参数

按照试验结果取值。因模型中回填土的粒径是被放大的，且未考虑土中含水量，故对土密度参数进行适当放大，以减少模型回填土压力与实际土压力的误差，不同材料参数取值见表 2。

表 2 不同材料参数取值

| 材料  | 密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 杨氏模量/GPa | 泊松比  |
|-----|--------------------------------------|----------|------|
| 毛石  | 2 600                                | 24       | 0.20 |
| 回填土 | 3 050                                | 24       | 0.25 |
| 压载土 | 3 320                                | 24       | 0.25 |
| 钢材  | 7 800                                | 200      | 0.30 |

在 EDEM 软件中，颗粒材料数据库推荐的接触参数取值范围见表 3。在本仿真中，毛石与毛石的接触参数参考宗璐<sup>[12]</sup>对道砟碎石的标定参数，土接触模型采用 EDEM 软件内置接触模型 Hertz—Mindlin (no slip)，土与土的接触参数参考宋占华等<sup>[13]</sup>对桑园土的标定参数，见表 4。

表 3 接触参数取值范围

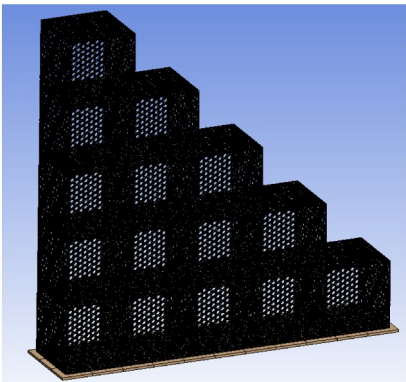
| 限值 | 土壤-土壤<br>恢复系数 | 土壤-土壤<br>静摩擦因数 | 土壤-土壤<br>动摩擦因数 | 土壤-钢材<br>恢复系数 | 土壤-钢材<br>静摩擦因数 | 土壤-钢材<br>滚动摩擦因数 |
|----|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|
| 下限 | 0.15          | 0.2            | 0.05           | 0.25          | 0.3            | 0.06            |
| 上限 | 0.75          | 0.9            | 0.20           | 0.65          | 0.6            | 0.40            |

表 4 模型接触参数取值

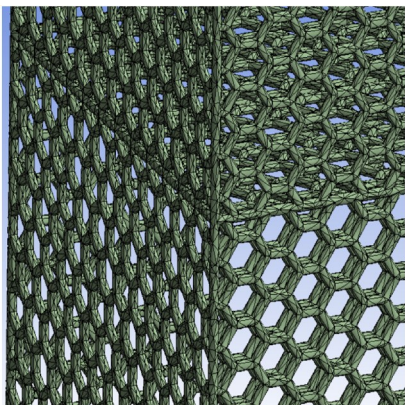
| 接触模型  | 恢复系数 | 静摩擦系数 | 滚动摩擦系数 | 法向刚度/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 剪切刚度/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 颗粒接触半径 |
|-------|------|-------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| 毛石-毛石 | 0.80 | 0.85  | 0.15   | —                                     | —                                     | —      |
| 土-土   | 0.57 | 0.76  | 0.45   | $1.0\times 10^8$                      | $5.0\times 10^7$                      | 1.1 倍  |
| 毛石-土  | 0.65 | 0.80  | 0.35   | —                                     | —                                     | —      |
| 毛石-钢材 | 0.30 | 0.55  | 0.21   | —                                     | —                                     | —      |
| 土-钢材  | 0.35 | 0.65  | 0.23   | —                                     | —                                     | —      |

2.2 ANSYS Workbench 模型

采用 SolidWorks 软件对石笼网箱整体建模，在 Workbench 中对模型进行网格划分，采用四面体单元，设定模型节点数量为 251.284 4 万个，划分网格数量为 118.588 2 万个，见图 3。对网箱底部和侧面固定支撑约束，荷载为由 EDEM 导出为 \*.axdt 数据文件，文件中包括 21.395 6 万行三维分量的荷载数据，然后把荷载数据映射到 Workbench 模型中<sup>[14]</sup>。



a) 整体模型



b) 局部放大

图 3 网箱结构模型

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 土(石)压力

根据在 EDEM 中导出的力数据筛选出网箱结构外立面的受力数据, 把每 0.2 m 高度内的合力换算成土(石)压力, 挡墙回填前后的土压力对比见图 4。由图可知, 网箱所受土压力离散性很大, 主要因为毛石的粒径大, 仅能在毛石与网箱有接触的位置产生压力, 随机性大, 而且毛石的形状和大小是随机的, 毛石颗粒之间的嵌固作用复杂, 因此产生压力的大小也呈现随机性。

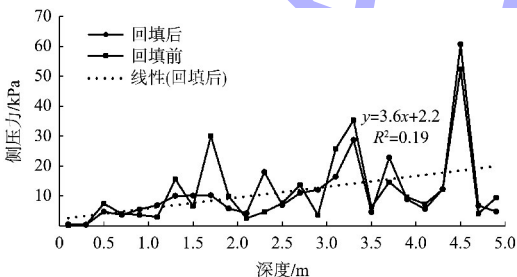


图 4 挡墙回填前、后土压力

根据式(2)可计算出静止土压力。经多次模拟, 石笼网箱外立面总压力数据见表 5。经统计, 总土压力平均值为 11.09 kPa, 方差 0.083 kPa, 总土压力波动不大;  $K_0$  变化也较小。

$$E_0 = \frac{1}{2} K_0 \rho g H^2 \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为总静止土压力, 其作用点在墙高的 1/3 处;  $K_0$  为静止土压力系数,  $K_0 = 1 - \sin \varphi'$ ,  $\varphi'$  为土的有效内摩擦角;  $H$  为墙高;  $\rho$  为土密度。

表 5 不同工况下的土压力

| 工况条件         | 总压力/kPa | $\rho/(t \cdot m^{-3})$ | $H/m$ | $K_0$ | $\varphi'/(^\circ)$ |
|--------------|---------|-------------------------|-------|-------|---------------------|
| 网箱 1         | 11.24   | 1.372                   | 5     | 0.066 | 69.15               |
| 网箱 2         | 10.73   | 1.369                   | 5     | 0.063 | 69.60               |
| 网箱 3         | 11.48   | 1.377                   | 5     | 0.067 | 68.96               |
| 网箱 4         | 10.91   | 1.371                   | 5     | 0.064 | 69.45               |
| 钢板替换网箱       | 11.04   | 1.383                   | 5     | 0.064 | 69.42               |
| 墙前 0.3 m 用料石 | 7.10    | 1.377                   | 5     | 0.041 | 73.49               |

计算可得, 回填土前、后总土压力分别为 10.94 和 11.24 kPa, 土压力变化不大, 主要因为墙背坡度 1:1, 而毛石的有效内摩擦角达到 69.5°, 填土范围在有效内摩擦角以外, 回填土对挡墙外立面几乎不会产生土压力。

如使用钢板替换网箱, 总土压力变化也不大, 但钢板受力点较网箱多, 土压力震荡幅度较网箱小。如在墙前 0.3 m 范围内采用料石码砌, 总土压力可减少 30% 以上, 主要原因是采用料石码砌后, 一部分水平推力被料石之间的摩擦力抵消, 即可大幅减少土压力。

#### 3.2 变形

经 Workbench 求解, 网箱变形云图如图 5 所示, 第 4、5 层的变形值分别为 52、63 mm, 而 JST 257—2008《水运工程质量检验标准》<sup>[15]</sup> 对石笼网箱护岸的平整度要求为 50 mm, 因此第 4、5 层网箱的平整度均达不到现行规范验收标准。施工过程中如石笼网箱护岸墙前 0.3 m 范围内采用料石码砌, 将大幅减小土压力, 其变形量也相应减小, 最大变形值为 18 mm, 见图 6。

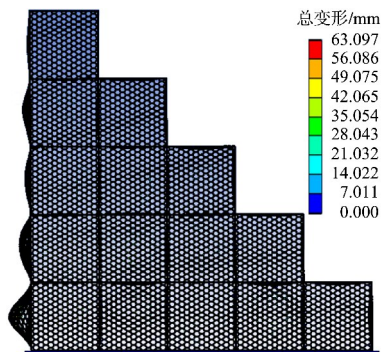


图 5 网箱变形云图



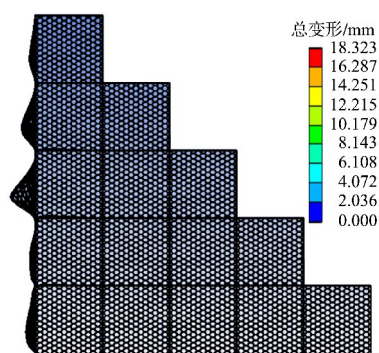


图6 墙前 0.3 m 用料石变形云图

### 3.3 沉降

模拟过程中,在第5层网箱顶部选取3个测点,观察在其上部加载1~4层网箱后测点的沉降值,见图7。沉降值的最大值发生在加载1层之后,平均值为26 mm;第2~4层沉降值很小,可忽略。逐层累加后5 m石笼网箱总沉降达到104 mm, JTS 257—2008《水运工程质量检验标准》规定石笼网箱护岸顶面高程偏差应在 $\pm 50$  mm以内,在施工过程中需采取预留沉降或增加网箱高度等措施才能达到验收标准。

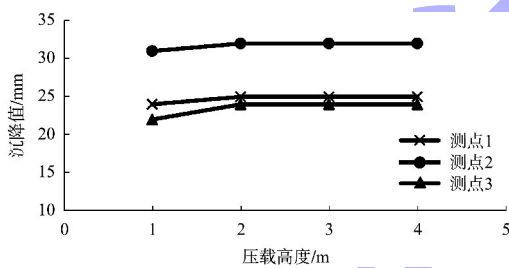


图7 网箱压载后沉降变化

## 4 结语

1) 格宾石笼网箱所受土压力离散性很大,力作用点及大小随机性大,当高度较大时,总土压力变化较小。

2) 在石笼网箱护岸墙前一定范围内采用料石码砌能有效减少土压力,相应减少了网箱变形量,从而符合规范平整度的质量要求。

3) 石笼网箱会在上部网箱的重力作用下产生沉降,网箱层数较多时,总沉降值将会较大,因此施工过程中需采取预留沉降或增加网箱高度等措施,以满足规范对石笼高程的质量要求。

## 参考文献:

- [1] 曲贝贝, 郭德宇, 郭扬扬. 格宾生态护岸适用性与施工质量控制[J]. 水运工程, 2022(S2): 49-53.
- [2] 孟登斐. 论水利防洪工程中格宾石笼的施工技术[J]. 大众标准化, 2023(6): 57-59.
- [3] 范昕然, 王海琳. 植物型生态护坡在河道治理中的应用[J]. 水运工程, 2023(S2): 15-19.
- [4] 柴贺军, 孟云伟, 贾学明. 柔性石笼挡墙土压力的 PFC2D 数值模拟[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 48-51.
- [5] 孟云伟, 肖文, 柴贺军, 等. 柔性石笼挡墙变形受力的 PFC2D 数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 373-377.
- [6] 孟云伟, 柴贺军, 贾学明. 石笼挡土墙的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2677-2681, 2688.
- [7] 张波, 陶连金, 孟云伟, 等. 石笼挡墙在振压下破坏机理的颗粒流模拟研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 48-52.
- [8] 黄向京, 许桂林, 陈润夏. 有限元强度折减法在加筋格宾陡坡支挡结构中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3916-3922.
- [9] 张辉, 张永震. 颗粒力学仿真软件 EDEM 简要介绍[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2008(12): 48-49.
- [10] 周剑, 马刚, 周伟, 等. 基于 FDEM 的岩石颗粒破碎后碎片形状的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 348-357.
- [11] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 考虑颗粒破碎的堆石体三维随机多面体细观数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1671-1682.
- [12] 宗璐. 基于 EDEM 的道砟离散元参数标定及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [13] 宋占华, 李浩, 闫银发, 等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 21-33.
- [14] 郑邵秋, 张彩虹, 王国强, 等. 基于 ANSYS 和 EDEM 的巨菌草茎秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 151-158, 165.
- [15] 中交第一航务工程局有限公司. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(本文编辑 王传瑜)