

文章编号: 1673-9469 (2019) 02-0028-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.02.007

## 基坑开挖变形稳定颗粒流数值模拟研究

焦春茂<sup>1</sup>, 汪华安<sup>1</sup>, 陈晓<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210094)

**摘要:** 为了分析基坑开挖对周围环境的影响, 基于颗粒流数值模拟方法, 利用边界伺服法构建理想颗粒体系, 利用线性接触黏结模型标定岩土体的细观力学参数。结果表明: 基坑开挖后距离基坑壁 60 ~ 70 m 地表变形约 5 mm; 60 ~ 70 m 远处的管道相对变形量不超过 3 mm, 不会引起管线不均匀沉降而破坏; 桩墙失效基坑周围的素填土以及淤泥质黏土将会向基坑滑塌, 其滑塌范围从基坑内壁向外约影响 10 m, 约为基坑开挖深度的 2 ~ 3 倍范围。研究结果可为基坑壁的稳定判定与周围土体的变形控制提供参考。

**关键词:** 基坑; 颗粒流; 沉降变形; 坑壁稳定

**中图分类号:** TU478

**文献标识码:** A

## Numerical Simulation of Deformation and Stability in Foundation Pit Excavation with Particle Flow Code

JIAO Chunmao<sup>1</sup>, WANG Huaan<sup>1</sup>, CHEN Xiao<sup>2</sup>

(1. Guangdong Electric Power Design & Research Institute Co. Ltd China Energy Construction Group., Guangzhou 510663; 2 Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210094)

**Abstract:** In order to analyze the influence of foundation pit excavation on surrounding environment Based on the numerical simulation method of particle flow, the ideal particle system is constructed by boundary servo method, and the micro-mechanical parameters of rock and soil are calibrated by linear contact bond model. On this basis, the influence of foundation pit excavation on surrounding environment is analyzed. The results show that the ground deformation of 60-70m away from the foundation pit wall is about 5mm after excavation, the relative deformation of pipeline at 60-70m away from the foundation pit wall is less than 3mm, which will not cause uneven settlement of pipeline and damage; the plain filling and muddy clay around the failure foundation pit of pile wall will slide to the foundation pit, and the collapse range affects 10m approximately from the inner wall of the foundation pit, which is about 2 ~ 3 times the depth of the foundation pit. The research results can provide reference for the judgment of the stability of foundation pit wall and the deformation control of surrounding soil.

**Key words:** foundation pit; grain flow; subsidence deformation; stability of pit wall

基坑开挖过程受复杂的土层分布、地下水、周围环境共同影响, 变形机理复杂。开挖时, 基坑的侧壁将会向坑内产生近似三角形侧移, 引起基坑周围建筑物的沉降, 并使得建筑物墙体和梁等结构出现开裂现象。针对这一问题, 国内外已有众多学者在数值模拟、理论计算和模型试验等方面开展了大

量研究<sup>[1-6]</sup>。但数值模拟都是基于连续介质力学基础, 而岩土体是离散的, 在反映基坑变形破坏机理方面不如离散元、DDA 等非连续数值模拟方法。本文基于某典型基坑, 借助颗粒流方法研究开挖过程引起的周围沉降问题、预测施工完建变形, 探讨了坑壁稳定性。

收稿日期: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679071)

作者简介: 焦春茂(1980-), 男, 山东济宁人, 高级工程师, 主要从事电力勘察设计与研究方面的工作。

## 1 基坑颗粒流体系的建立方法

用颗粒元离散研究对象，在感兴趣的区域内生成颗粒体系。所生成的颗粒体系堆积密度能够反映模拟对象的真实情况，颗粒尺寸分布满足指定要求，颗粒间的接触精度足够高，体系中颗粒与边界紧密接触，完整耦合，体系中颗粒处于受力平衡状态。然而，初始建立的模型多数是不能满足这些要求的，这时候就需要利用伺服机制，来强迫模型接近于我们想要的状态<sup>[7-8]</sup>。所谓伺服，即通过模型边界条件的调整，使得颗粒体系间的接触尽可能快的达到理想状态，然后再在其基础上开展加载分析。而这一过程，恰恰是颗粒流用于材料、物理、力学分析的关键所在<sup>[9]</sup>。

由于模型边界转向部位颗粒很容易产生应力集中现象，且由于模型边界是固定的，不同位置的颗粒间因重叠量的不同应力状态差异性很大。此时，若以该颗粒模型开始进行数值模拟，在移除边界束缚束缚条件时局部应力集中的颗粒间应变能的快速释放会直接造成颗粒快速大量逃逸。因此，模型必须保证在施加边界条件时颗粒间应力处于很低状态，对于复杂的边界约束采用伺服机制可很好的实现该目标。

## 2 土体宏观与细观力学参数

采用颗粒流方法研究遇到的最大困难是细观力学参数的选取，本文采用平行粘结模型，根据接触黏结模型的特点，具体细观参数标定过程如下：

首先研究接触黏结模量与弹性模量之间的关系如图 1，得如下关系式：

$$E_c = 0.0585x + 0.142 \quad (1)$$

式中： $E_c$  为压弹性模量，GPa， $x$  为实际采用的线

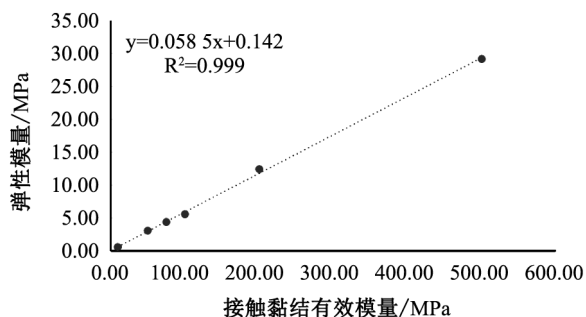


图 1 接触黏结模量与弹性模量之间对应关系

Fig. 1 Correspondence between modulus of contact and modulus of elasticity

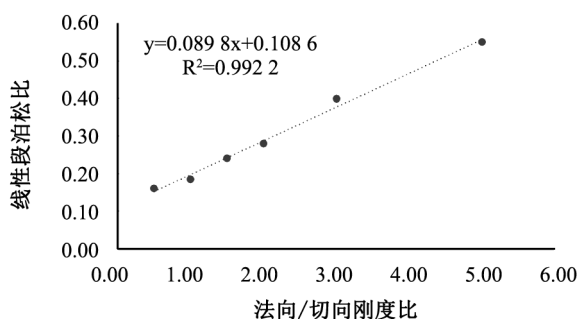
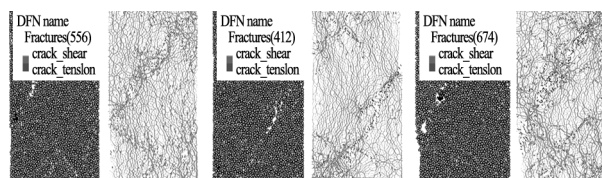


图 2 泊松比与刚度比关系

Fig.2 Relationship between Poisson's ratio and stiffness ratio



(a)N/S=0.5 (b)N/S=1.0 (c)N/S=2.0

图 3 不同法向黏结与切向黏结强度比对破坏形式的影响

Fig.3 The influence of different normal bond to tangential bond strength ratio on failure mode

性接触有效模量 ( $e_{mod}$ ) 值。然后改变法向与切向刚度比 ( $kratio$ )，得宏观泊松比与刚度比间对应规律如图 2：

$$\mu = 0.0898x + 0.1086 \quad (2)$$

固定法向与切向强度的比值分别为 0.5，1.0，2.0 时，分析试样的最终破坏形式可得如图 3 所示裂纹分布。结果表明，当法向与切向黏结强度比值越大，则颗粒间容易出现剪切方向破坏；当比值越小，试样容易出现法向的接触破坏，而试样表现出的宏观破坏模式基本一致，这表明在细观问题分析时，法向与切向黏结与宏观的脆性、剪切破坏并不对应，均匀颗粒体系下破坏可能出现在法向或切向，因此该比值在 1.0 附近较为符合实际，建议比值在 0.8 ~ 1.2 之间，本文标定时在该范围内任取一值 1.0，并固定该比值不变。

设置法向与切向黏结强度比值 1.0，并设置法向黏结强度  $1 \times 10^6$  Pa，不断改变接触黏结强度与基准黏结强度比值，可得峰值强度与细观接触强度间对应关系如图 4：

$$\sigma_c = 1.0236x - 0.3443 \quad (3)$$

式中， $\sigma_c$  为单轴抗压强度； $x$  为采用的黏结强度与基准强度的比值 (基准强度为  $1 \times 10^6$ )。由于细观参数 (有效模量、刚度比、黏结强度) 在其它量不变条件下与宏观弹性模量、泊松比、黏结强度均近似

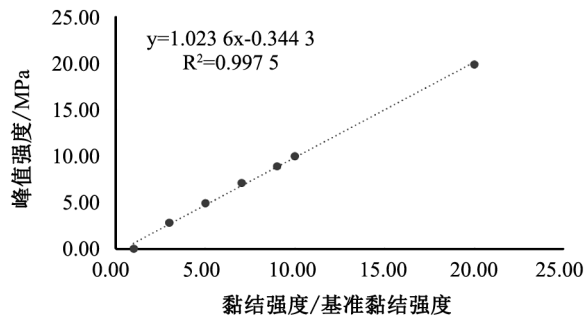


图4 峰值强度与黏结强度比间对应关系

Fig.4 The correspondence between peak strength and bond strength ratio

呈线性关系。因此可根据表1宏观参数,得出表2各土层细观力学参数。

### 3 基坑开挖对环境影响数值模拟研究

某建筑基坑开挖深度5 m,地质模型如图5所示。在图5(a)中,地层分别为①<sub>2</sub>层杂填土,②层淤泥质粘土,⑤层粉质粘土,⑥层粘土,⑩层含粘性土砾

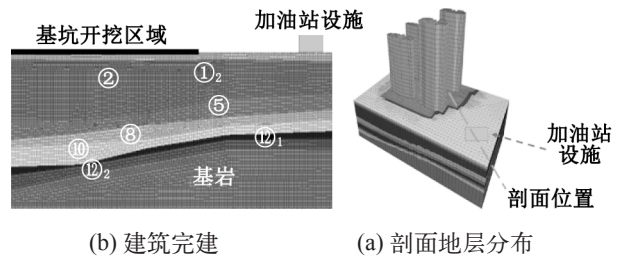


图5 地质模型构建  
(b) Construction completion (a) Profile stratigraphic distribution

Fig.5 The construction of geological model

砂,②层强风化凝灰岩,②<sub>2</sub>层中风化凝灰岩,如图5(a),建筑完工后如图5(b)所示。距离基坑外壁65 m远存在一加油站设施,开挖及完工工况需要关注该处的变形稳定性。

#### 3.1 基坑开挖变形分析

在模型侧壁向外每隔5 m布置一个测点,如图6(左)所示,图中点1-14即为测点位置。监测测点位置颗粒的位移变化,得如图6所示位移变化规律。在如图6所示基坑外侧约65 m存在一加油站,位

表1 宏观岩土力学参数

Tab.1 Macroscopic geotechnical parameters

名称	饱和密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	弹性模量 E/Mpa	粘聚力 c/Kpa	泊松比	体积模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	摩擦角 φ /°
杂填土	1.7	2	5.0	0.44	5.7	0.7	10
粉质粘土	1.96	4.66	25.7	0.35	5.2	1.73	16.3
淤泥质粘土	1.78	2.83	10.9	0.37	3.6	1.03	9.3
粉质粘土	1.98	5.47	27.5	0.28	4.1	2.13	17.5
粘土	1.88	5.28	23.4	0.27	3.83	2.08	16.7
含黏土砾砂	2.0	5.02	25.1	0.22	2.99	2.06	20.8
弱风化凝灰岩	3.2	863	500	0.2	479	359	42
强风化凝灰岩	2.9	6 530	27 000	0.15	3 109	2 839	50

表2 标定出的细观岩土力学参数

Tab.2 The meso mechanical parameters of rock and soil calibrated

名称	颗粒/(g·cm <sup>-3</sup> )	E <sub>mod</sub> /Mpa	Kratio	法向黏结强度/MPa	切向黏结强度/MPa	颗粒摩擦系数	单轴抗压强度/kPa
杂填土	2.02	31.76	3.69	0.35	0.35	0.18	11.92
粉质粘土	2.33	77.23	2.69	0.40	0.40	0.29	68.58
淤泥质粘土	2.12	45.95	2.91	0.36	0.36	0.16	25.66
粉质粘土	2.36	91.07	1.91	0.41	0.41	0.32	75.01
粘土	1.88	87.83	1.79	0.40	0.40	0.30	62.90
含黏土砾砂	2.38	83.38	1.24	0.41	0.41	0.38	72.77
强风化凝灰岩	2.90	111 621.5	1.46	11.41	11.41	0.81	11.3e3
弱风化凝灰岩	3.20	147 518.9	1.02	500	500	0.90	50.0e6
桩基础	2.50	1 500	1.50	10.0	10.0	0.85	10.0e6

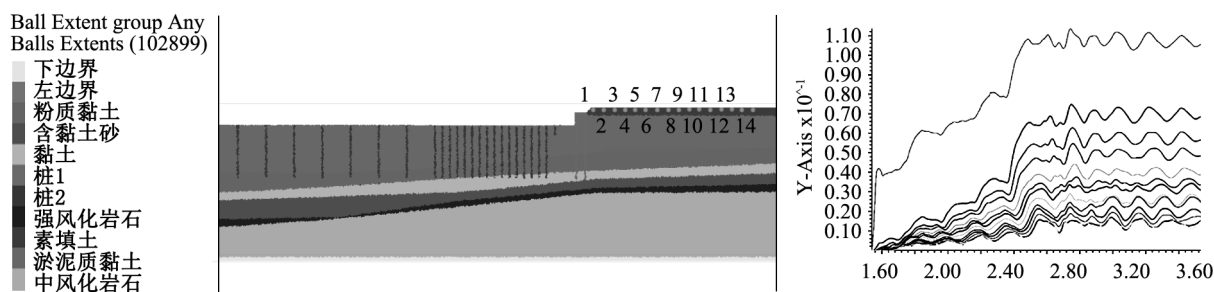


图 6 基坑外地表层监测点位位移预测

Fig.6 Displacement prediction of surface monitoring points in foundation pit

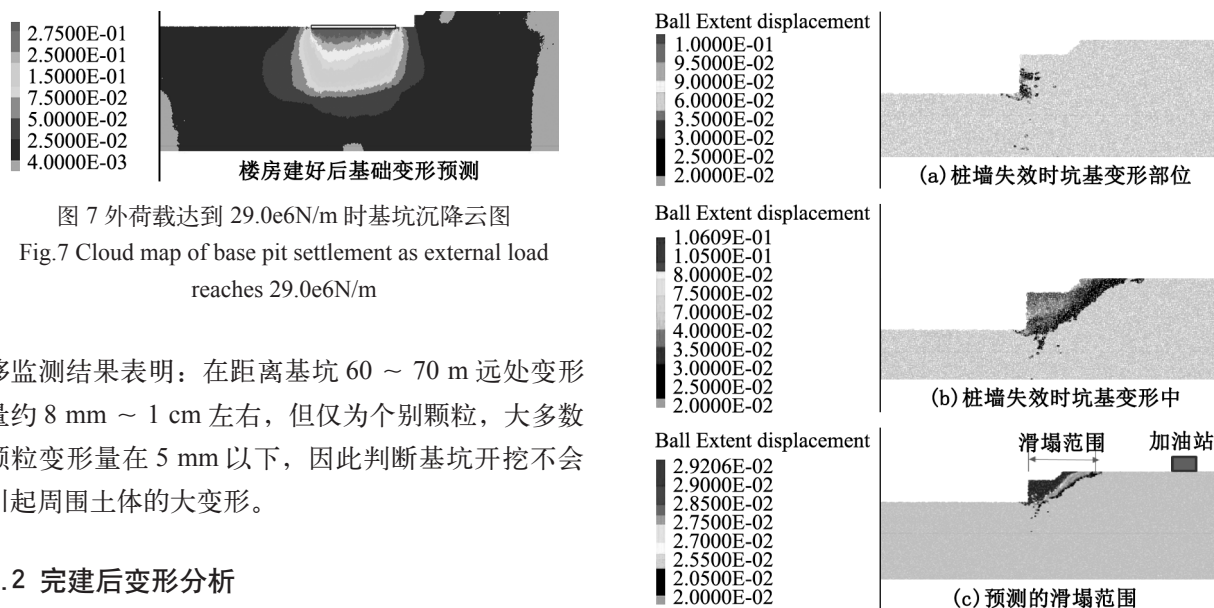


图 7 外荷载达到 29.0e6N/m 时基坑沉降云图

Fig.7 Cloud map of base pit settlement as external load reaches 29.0e6N/m

移监测结果表明：在距离基坑 60 ~ 70 m 远处变形量约 8 mm ~ 1 cm 左右，但仅为个别颗粒，大多数颗粒变形量在 5 mm 以下，因此判断基坑开挖不会引起周围土体的大变形。

### 3.2 建成后变形分析

建筑地基中，考虑到桩的影响，模拟桩的位置如图 6(右)所示。建筑物高度设计为 100 m，按照混凝土密度 2 500 kg/m<sup>3</sup> 考虑，在模型上施加外荷载，建筑物宽度 38 m，当外荷载为 14.5 × 10<sup>6</sup> N 时表示荷载相当于建筑实体体积的 10%，当外荷载达到 21.3 × 10<sup>6</sup> N/m 时相当于建筑实体体积的 15%，当外荷载达到 29 × 10<sup>6</sup> N 时，相当于建筑物实体体积的 20%，根据调查一般建筑物设计荷载约为实体混凝土重量的 10%，一般不大于 20%。因此只需施加该荷载可分析建筑物建成后基础沉降及其对周围建筑物的影响。

研究表明，按照实体体积占建筑物 10% 时，距离基坑外围 60 ~ 70 m 远变形量约 3 mm，当按照实体体积占建筑物 15% 时，距离基坑外围 60 ~ 70 m 远变形量约 3 ~ 4 mm，图 7 展示了考虑外荷载最大时，地基的变形位移云图，可以发现当实体体积占建筑物 20% 时，距离基坑外围 60 ~ 70 m 远变形量约 3 ~ 4 mm。这表明该变形应属于土体间自然蠕变引起，而不是由于建筑物自重引起的沉降造成的。

### 3.3 桩墙失效岩土滑塌范围估计

大量的基坑失稳案例表明，特殊情况下部分桩墙失效时基坑外土体容易形成局部滑塌，为了分析极端状况下滑动影响范围，将排桩参数降低为淤泥质黏土参数，研究滑塌范围及对地表变形的影响。其中，图 8(a) 展示了桩墙失效时，最初发生变形的部位，滑塌过程如图 8(b) 所示。图 8(c) 展示了最终计算结果，从图 8(c) 中可以看出，如果桩墙失效基坑周围的素填土以及淤泥质黏土将会向基坑滑塌，其滑塌范围从基坑内壁向外约影响 13 m，为基坑开挖深度的 2.6 倍范围。如图 8(c) 所示加油站约位于坑壁外侧 65 m 左右，因此即使基坑桩墙发生局部破坏，地表变形不会波及到加油站设施。

以上分析可表明：(1) 基坑开挖后距离基坑壁 60 ~ 70 m 远表层变形达到 8 ~ 10 mm，但整个淤泥质黏土变形均在此变形量级，判断是由于淤泥土

图 8 预测的滑塌范围

Fig.8 Prediction of landslide area

塑性流动引起,只要不产生大规模滑塌,不会引起周围建筑物大量不均匀沉降。(2)根据完建工况变形量判断,在60~70m远处的管道相对变形量不会大于3mm,不会引起管线因不均匀沉降而破坏。(3)桩墙失效基坑周围的素填土以及淤泥质黏土将会向基坑滑塌,其滑塌范围从基坑内壁向外约影响10m,约为基坑开挖深度的2~3倍范围。由于加油站约位于坑壁外侧65m左右,因此即使基坑桩墙发生局部破坏,地表变形不会波及到加油站设施。

#### 4 结论

1) 颗粒流数值模拟结果取决于合理的颗粒体系与边界条件,本文伺服过程得出的模型可以反映岩土细观力学特性,并赋予细观接触力学参数。

2) 通过宏观弹性模量、泊松比、峰值强度与细观有效模量、刚度比、黏结强度的线性对应规律推算,可以有效的确定土层岩土力学参数。

3) 基坑开挖分析发现,变形量不会对关心的加油设施产生大量不均匀沉降,与工程地质判断情况一致,表明计算结果合理。

#### 参考文献:

- [1] 姚爱军,张剑涛,郭海峰,等.地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究[J].岩土力学,2018,39(7):2318-2326.
- [2] 封超.太原市人民南路站基坑开挖对周边建筑物的影响分析[D].太原:中北大学,2018.
- [3] 苏容,郭建新,杜振.基于ANSYS的某深基坑降水开挖加固方案优化设计[J].吉林水利,2018,(2):1-4.
- [4] 梁潇文,张福龙.黄土地区基坑开挖对边坡稳定性的影响分析[J].山西建筑,2017,43(13):79-81.
- [5] 何世秀,韩高升,庄心善,等.基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J].岩土力学,2003,(1):17-20.
- [6] 刘兴旺,益德清,施祖元,等.基坑开挖地表沉陷理论分析[J].土木工程学报,2000,33(4):51-55.
- [7] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].2018,北京:中国建筑工业出版社.
- [8] SHI C, LI D J, CHEN K H, et al.Failure mechanism and stability analysis of the Zhenggang Landslide at the Yunnan Province of China using 3D particle flow code simulation[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(5): 891-905.
- [9] SHI Chong. A construction method of complex discrete granular model [J].Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012, 43(2): 203-207.

(责任编辑 李新)

(上接第27页)

#### 参考文献:

- [1] 王会娟,刘小伟.混凝土施工养护的重要性[J].商品混凝土,2012(9):101-103.
- [2] 肖建庄,李佳彬,孙振平,等.再生混凝土的抗压强度研究[J].同济大学学报:自然科学版,2004(12):1558-1561.
- [3] 陈爱玖,王静,杨粉.钢纤维再生混凝土抗压强度试验研究[J].混凝土,2012(4):64-66.
- [4] HANSEN T C. Recycled aggregate and recycled aggregate concrete[J].Material and Structures, 1986, 19(5): 201-246.
- [5] 胡功球.不同养护条件下超高性能混凝土(UHPC)的收缩性能研究[D].长沙:湖南大学,2015.
- [6] LIU J T, YANG Y, GU C P. Influence of dry heating regime on the mechanical and shrinkage properties of reactive powder concrete[J].Journal of Zhejiang University-Science A, 2018, 19(12): 926-938.
- [7] 侯永利,李晨霞,霍俊芳,等.再生混凝土力学性能

和收缩性能试验研究[J].硅酸盐通报,2017,36(1):311-314.

- [8] 罗俊礼,徐志胜,谢宝超.不同骨料等级再生混凝土的收缩徐变性能[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(9):3815-3822.
- [9] 崔正龙,吴翔宇,童华彬.砂率对再生混凝土强度及干燥收缩性能影响[J].硅酸盐通报,2014,3(11):3054-3057.
- [10] 安新正,牛薇,杨莹莹,等.废砖骨料对再生混凝土抗压与收缩性能的影响[J].河北工程大学学报:自然科学版,2017,34(3):56-59.
- [11] GB/T50081-2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [12] GB/T50082-2009,普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [13] 田丽,毛永琳,阎坤.不同养护条件对混凝土抗压强度的影响[J].工程地质学报,2007(增刊):593-595.
- [14] 王磊,陈杏,张毅.再生骨料混凝土长龄期收缩及基本力学性能研究[J].混凝土,2013(7):23-25.

(责任编辑 李新)