

## 砂井地基堆载沉降的PFC<sup>2D</sup>模拟

张伟, 孙爱华, 张宁  
(山东水利职业学院, 山东日照 276826)

**摘要:** 砂井是利用土的排水固结原理来处理软弱地基的代表性施工技术。针对现有的软基沉降计算和预测方法存在的不足, 利用离散单元法中二维颗粒元法PFC<sup>2D</sup>建立了砂井二维模型, 对砂井地基堆载沉降过程进行二维离散元仿真模拟。采用由2~7个不同组合方式的簇单元来体现软基的孔隙率, 改进了PFC<sup>2D</sup>中的水位降深模型, 分析了软基沉降过程中水位的变化规律。模拟与现场实测结果的对比表明: 模拟沉降值与实测值基本吻合。

**关键词:** 砂井地基; 堆载沉降; PFC<sup>2D</sup>; 二维颗粒元; 数值模拟

中图分类号: TU 472.3<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0170-04

### PFC<sup>2D</sup> simulation of settlement on heaped load with sand-drained grounds

ZHANG Wei, SUN Ai-hua, ZHANG Ning

(Shandong Vocational Water Polytechnic College of Resources, Rizhao 276826, China)

**Abstract:** Sand drain is the representative construction technology for ground treatment by drainage consolidation to deal with the soft foundation. The usual settlement calculation for the soft foundation and the prediction method are defective. Using PFC<sup>2D</sup>, we set up a two-dimensional model and simulate the process of settlement on heaped load for sand-drained ground with two dimension discrete element. Using 2~7 cluster units of different combination modes, we embody the porosity of the soft foundation, improve the model and analyze the changing rule of water level in the settlement process. The computed results basically tally with the measured ones.

**Key words:** sand-drained ground; settlement on heaped load; PFC<sup>2D</sup>; two-dimensional particle element model; numerical simulation

近年来, 随着国家对基础建设投入的增大, 大量的堤坝、公路桥梁投入建设, 这些建筑物往往处于软弱地基之上, 要产生既定的工程效益和经济效益首先须保证安全性, 这就要求建筑物的地基具有足够的承载力和稳定性。砂井堆载预压法即是一种简单有效的处理软弱地基的方法。

大量工程实践表明, 准确计算软土地基的沉降特别是预测工后沉降是地基处理中关键要解决的问题。传统的地基沉降计算方法有分层总和法和应力路径法, 但是分层法只能计算竖向压缩, 与实际土体出入较大<sup>[1]</sup>; 应力路径法以弹性理论公式为基础, 而且对试验和试样要求很高, 故实际

应用受限<sup>[2]</sup>。

软基沉降计算数值方法主要是有限元法, 而有限元法是一种基于连续介质力学的方法, 它在求解流固耦合、非连续介质等涉及大变形的问题时, 网格可能会产生严重扭曲, 严重影响解的精度<sup>[3]</sup>。

总之, 传统方法以经典土力学为基础, 误差大, 适用范围小; 现有的预测沉降的经验公式模型, 大多只适用于一级荷载下沉降预测, 因为此时沉降-时间曲线呈渐变、光滑地发展, 无明显的台阶现象, 对于多级荷载下的软基沉降未必适合<sup>[4]</sup>; 耦合软土流变项的经验公式模型目前尚是空

收稿日期: 2012-03-14

作者简介: 张伟(1980—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程与建筑工程技术专业的教学和科研工作。

白, 现有经验公式都不能清楚给出不同时刻的软土层压缩量<sup>[2]</sup>。软基沉降的数值计算方法目前运用最广泛的是基于连续介质力学的有限元法, 在模拟由散粒体构成的土体时, 用有限元计算未必适合。

本文以某高速公路实测资料为依据, 采用离散元法对工程中砂井地基沉降过程进行了数值模拟。模拟时充分考虑了地基中水的影响, 改进了固定网格流固耦合计算模型。计算结果表明, 改进的固定网格流固耦合计算模型的计算结果与实际地基沉降监测值吻合较好。

### 1 离散元计算模型

#### 1.1 模型的建立

以某高速公路为对比实例, 取 $S_1(K16+100)$ ,  $S_2(K16+150)$ ,  $S_3(K17+400)$ ,  $S_4(K17+600)$ 4个断面为研究对象。

图1为计算断面堆载预压示意图: 第1层为亚黏土, 第2层为淤泥土, 第3层为黏土。塑料排水板间距为1.2 m。取两个塑料排水板间的土体(图中的阴影部分)为一个计算单元(图2)。对应的数值计算模型(图3), 左右段墙和底部墙围成的区域代表所要研究的计算单元, 区域内的圆形颗粒代表所要研究的土体颗粒; 用段墙模拟排水板的排水效果; 底部不透水边界用整墙来表示; 对顶部一定

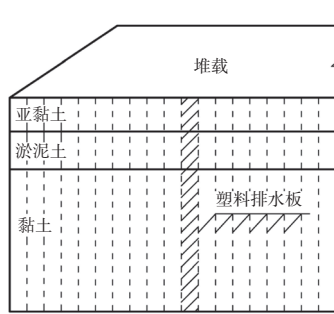


图1 断面

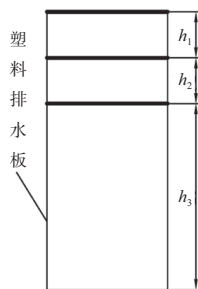


图2 计算单元

厚度内的颗粒施加竖向作用力来模拟堆载作用。计算单元尺寸见表1, 断面物理参数见表2。

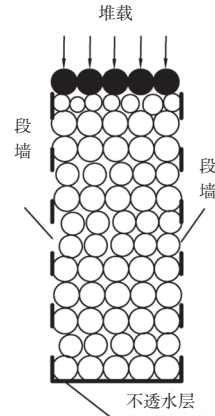


图3 计算模型

表1 计算单元尺寸

断面	m		
	$h_1$	$h_2$	$h_3$
$S_1$	1.8	1.8	5.4
$S_2$	2.0	7.0	4.0
$S_3$	2.2	7.4	6.0
$S_4$	1.8	5.3	4.1

表2 4个模拟断面的物理参数

断面	亚黏土层		淤泥土层		黏土层	
	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙率
$S_1$	2 600	0.22	2 426	0.25	2 400	0.11
$S_2$	2 670	0.23	2 467	0.25	2 600	0.15
$S_3$	2 714	0.25	2 588	0.25	2 750	0.18
$S_4$	2 720	0.25	2 500	0.25	2 793	0.18

### 1.2 力学模型

#### 1.2.1 簇单元

软土具有显著的结构性, 在成土的沉积过程中, 常常形成絮状、骨架状或蜂窝状等团聚状结构。这也是软土含水率高的原因之一。团聚状结构由于其内部复杂的微观力学性质因而具有一定的强度, 在外力较小时团聚状结构能够保持结构不变, 但外力较大时团聚状结构将发生破裂, 形成单粒结构。根据软土的这些特点, 模拟时颗粒单元选择了PFC<sup>2D</sup>提供的簇单元(图4)。

簇单元由2~7个颗粒按照一定的排列方式组合而成。黑球为主球, 虚线代表包装环, 依次在主球周围添加附加球—白球。根据单元个数及形

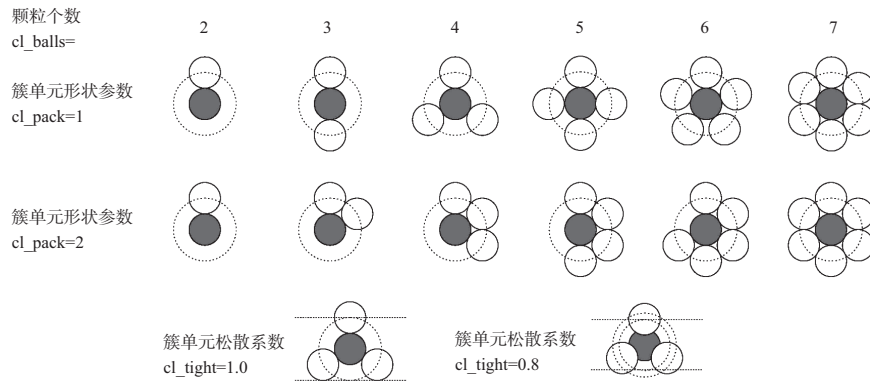


图4 簇单元

状系数的不同，簇单元可分为6种形式。簇单元的优点在于：1) 可以构建具有较高孔隙率的模型；2) 外部拉应力或切应力超过其内部的极限抵抗强度时，白球将出现剥离脱落的现象，能真实地模拟土体的团聚状结构在外力或内力作用下的破坏过程。

本文选取的4个模拟断面，其软土具有高孔隙比，最大可达到1.2，折合孔隙率为0.55。因此采用簇单元数=4，簇单元形式=1。参照文献[6]关于单粒结构的等效粒径的二维与三维孔隙率的转换方法确定簇单元的形状系数、包含的颗粒数、密实程度及最大与最小半径（表3）。

1.2.2 模型接触类型

本模拟计算中只存在2种接触：颗粒—颗粒，颗粒—墙。PFC<sup>2D</sup>中，每个接触上的本构模型由3个部分组成：刚度模型，滑动模型及连接模型。刚度

表3 4个断面的簇单元参数

断面	簇单元形状系数	簇单元包含的颗粒数	簇单元松紧程度	颗粒最小半径/mm	颗粒最大半径/mm
S <sub>1</sub>	1	4	1.0	0.02	0.02
S <sub>2</sub>	1	4	1.0	0.02	0.02
S <sub>3</sub>	1	4	1.0	0.02	0.02
S <sub>4</sub>	1	4	1.0	0.02	0.02

模型指出了接触力和相对位移间的弹性关系；滑动模型强调了导致两个接触的颗粒彼此发生相互滑动的法向和切向接触力的关系；连接模型通过限定连接的强度来控制总的法向力和切向力。

数值模拟颗粒之间采用了连接模型中的平行连接。连接模型能同时传递力和力矩，发生在接触颗粒间圆形或方形有限范围内，可以描述颗粒之间有限范围内的本构特性，对模拟散体土体具有优势。具体相关计算参数见表4~5。

表4 4个断面的计算参数

断面	平行连接切向强度/GPa	平行连接法向强度/GPa	平行连接切向刚度/GPa	平行连接法向刚度/GPa	颗粒法向刚度/GPa	颗粒切向刚度/GPa	接触连接法向强度/GPa	接触连接切向强度/GPa	平行连接半径系数	颗粒摩擦系数
S <sub>1</sub>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	1.2 × 10 <sup>8</sup>	1.2 × 10 <sup>8</sup>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	1.44 × 10 <sup>6</sup>	1.44 × 10 <sup>6</sup>	0.5	0.2
S <sub>2</sub>	8.0 × 10 <sup>6</sup>	8.0 × 10 <sup>6</sup>	4.0 × 10 <sup>8</sup>	4.0 × 10 <sup>8</sup>	8.0 × 10 <sup>6</sup>	8.0 × 10 <sup>6</sup>	4.8 × 10 <sup>6</sup>	4.8 × 10 <sup>6</sup>	0.5	0.2
S <sub>3</sub>	5.0 × 10 <sup>6</sup>	5.0 × 10 <sup>6</sup>	2.75 × 10 <sup>8</sup>	2.75 × 10 <sup>8</sup>	5.5 × 10 <sup>6</sup>	5.5 × 10 <sup>6</sup>	4.0 × 10 <sup>6</sup>	4.0 × 10 <sup>6</sup>	0.5	0.2
S <sub>4</sub>	6.0 × 10 <sup>6</sup>	6.0 × 10 <sup>6</sup>	3.0 × 10 <sup>8</sup>	3.0 × 10 <sup>8</sup>	6.0 × 10 <sup>6</sup>	6.0 × 10 <sup>6</sup>	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.6 × 10 <sup>6</sup>	0.5	0.2

表5 4个断面的边界参数

断面	墙法向刚度/GPa	墙切向刚度/GPa	墙摩擦系数/GPa	段墙间距/mm
S <sub>1</sub>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	2.4 × 10 <sup>6</sup>	0.3	0.036
S <sub>2</sub>	8.0 × 10 <sup>6</sup>	8.0 × 10 <sup>6</sup>	0.3	0.036
S <sub>3</sub>	5.5 × 10 <sup>6</sup>	5.5 × 10 <sup>6</sup>	0.3	0.036
S <sub>4</sub>	6.0 × 10 <sup>6</sup>	6.0 × 10 <sup>6</sup>	0.3	0.036

2 模拟结果比较与分析

2.1 PFC<sup>2D</sup>模拟沉降值与实测沉降值的对比

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>与S<sub>4</sub>断面 PFC<sup>2D</sup>模拟沉降值与实测沉降值分别如图6 a)~d)所示。

由图6可以看出，S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>断面的PFC<sup>2D</sup>模拟沉降值均比实测沉降值小，其原因主要为：

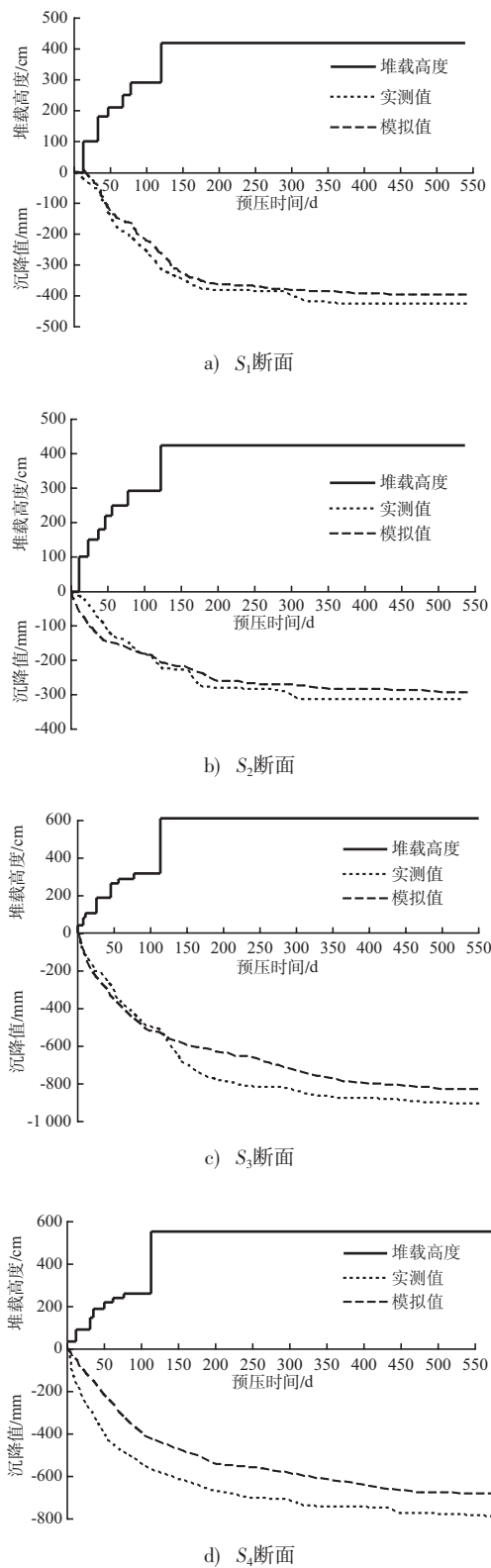


图6 PFC<sup>2D</sup>模拟沉降值与实测沉降曲线

计算模型中限制了侧墙的位移,因而也相应地阻止了周边与其接触的颗粒的侧向运动,也就是实际上断墙体现的是一种完全侧限边界。故而,模拟沉降值理应比实测值略小。

由PFC<sup>2D</sup>模拟沉降曲线看出,沉降曲线大致可分为3个部分:1)加载初期,曲线接近线性,斜率较大,沉降迅速;2)加载中期,曲线变缓,斜率变小,出现波动,有明显的台阶,沉降速度减缓,表现出非线性;3)加载后期,曲线趋于平直线,斜率趋于0,沉降趋于稳定。由此可见,用PFC<sup>2D</sup>模拟砂井地基堆载沉降,一方面,模拟结果与实测结果吻合较好;另一方面,沉降曲线较好的体现出了土体的非线性及传统方法所不能反映出的台阶现象。

### 3 结语

以某高速公路为背景,以PFC<sup>2D</sup>软件为框架,模拟了软土地基堆载沉降规律。模拟结果表明:砂井地基堆载沉降的模拟值与实测沉降值吻合较好,并且沉降曲线较好地体现了土体的非线性及传统方法所不能反映出的台阶现象。

### 参考文献:

- [1] 韩永强,魏俊,温雄. 分层总和法计算地基沉降缺陷的改进[J]. 西安工业学院学报, 2005, 25(3): 270-273.
- [2] 王志亮. 软基路堤沉降预测和计算[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [3] 张雄,刘岩. 无网格法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:1-6.
- [4] 周健,池永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 377-382.
- [5] Cundall P A. PFC<sup>2D</sup> Users' Manual: Ver.3.1 [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc, 2004.
- [6] 张刚. 管涌现象微观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

(本文编辑 郭雪珍)