

# Numerical Simulation of Soil Deformation under Special Stress Path

Jiangkailin Du Chen Tian

China Energy Construction Group Northeast Electric Power First Engineering Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110179, China

## Abstract

Deep foundation pit engineering has become an important subject in the field of geotechnical engineering, in this paper, the stress path of the side wall soil in the excavation of Payara foundation pit in Bangladesh is discussed, FLAC3D was used to analyze the displacement of foundation pit. Meanwhile, CID test, CK0D2 test and the special stress path test in this paper were compared.

## Keywords

deep foundation pit; FLAC3D; stress path; displacement of foundation pit

# 特殊应力路径下土体变形的数值模拟

杜姜开林 田晨

中国能源建设集团东北电力第一工程有限公司, 中国·辽宁·沈阳 110179

## 摘要

深基坑工程已然成为岩土工程领域的重要课题, 论文针对孟加拉帕亚拉基坑开挖过程中侧壁土体真实经历的应力路径, 采用 FLAC3D 进行基坑位移分析, 同时进行了 CID 试验、CK0D2 试验, 与论文进行的特殊应力路径试验进行对比。

## 关键词

深基坑; FLAC3D; 应力路径; 基坑位移

## 1 引言

随着中国经济发展, 高层建筑、地铁、发电站等大型重要工程建设和发展的速度非常快, 这使深基坑工程成为岩土工程领域的重要课题。长期以来, 人们采用常规三轴压缩试验来确定土体参数, 这种方法操作简单易于实现, 但缺点是忽略了实际基坑开挖过程中的应力路径。论文针对孟加拉帕亚拉项目基坑工程中基坑侧壁土体所受的实际应力路径, 进行了相应应力路径试验, 并采用 FLAC3D 对某一具体基坑的开挖进行模拟计算。

### 1.1 FLAC3D 简介

FLAC 是由美国明尼苏达 ITASCA 咨询公司专门为岩土工程编制开发的数值模拟软件。FLAC3D 是一种三维的有限差分程序, 采用显式拉格朗日算法和混合-离散分区技术模拟材料的流动和塑性破坏。FLAC3D 的应用十分广泛, 不仅用于一般岩土体的应力变形计算分析, 还可用于水-热-力三者的耦合计算, 尤其基坑开挖、边坡稳定分析、隧道交错

开挖等大变形及动态问题<sup>[1]</sup>。其中, FLAC3D 相对于其他有限元分析软件, 具有以下优势。

(1) 应用范围广泛, 可以模拟多种结构形式, 分析大多数岩土问题, 包括岩土体的渐进破坏和崩塌现象, 岩土体的动力稳定性分析, 土体与结构的相互作用, 液化和局部变形剪切带的演化过程模拟等。

(2) FLAC3D 既可以从键盘直接输入各种命令来执行操作, 也支持将要执行的计算写成命令流的形式读入程序来控制运算, 兼顾到不同用户的熟练程度和操作习惯。

(3) FLAC3D 具有强大的自身内嵌语言 FISH, 方便用户根据自己需要定义材料的分布规律, 新的变量和函数, 以及设计自己的材料本构模型。

(4) 由于 FLAC3D 采用显式算法, 每一时步只需要少量的计算, 并且在实现复杂的非线性本构模型时不需要进行反复迭代, 这就使计算占用的内存较少, 对非线性、大位移和物理不稳定性问题是最适用的。

(5) FLAC3D 具有强大的后处理功能, 在计算过程中用户就可以用不同的颜色或灰度或数据输出结果, 实时的对结果进行图形分析, 还可以生成网格、结构及有关变量的变形图、等值线图、矢量图<sup>[2]</sup>。

### 1.2 基坑开挖应力变形分析在 FLAC3D 中的实现

基坑开挖在 FLAC3D 中的实现流程如图 1 所示。

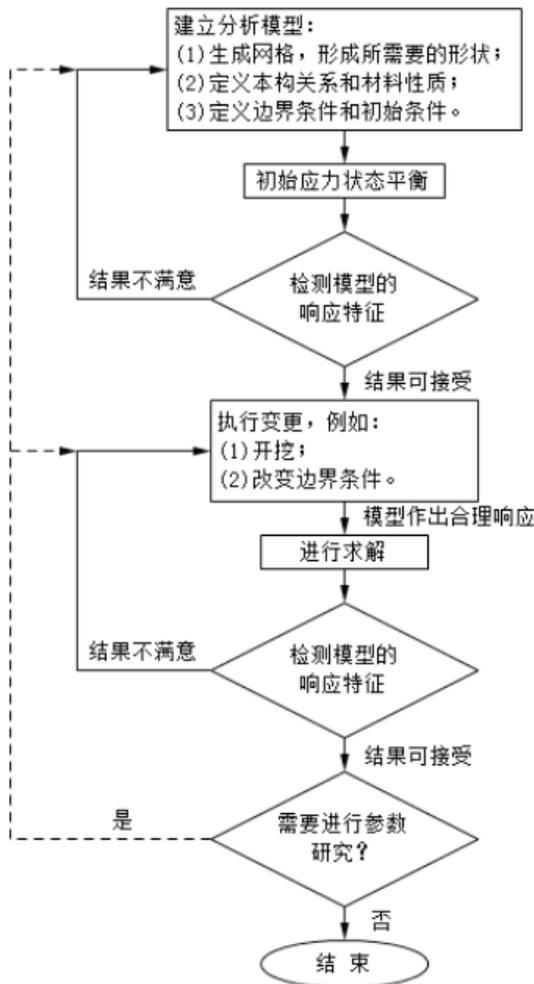


图 1 基坑开挖在 FLAC 中的实现流程图

若从模拟命令执行的角度来说, 可以归纳为三大基本组成部分, 即建立分析模型部分、模拟求解部分和输出计算结果部分。建立分析模型部分包括生成网格单元、设置初始条件和边界条件以及初始应力平衡等部分; 模拟求解部分包括加载及场方程的有限差分求解; 输出计算结果部分主要为图表的绘制、相关数据的输出等<sup>[3]</sup>。

### 2 特殊应力路径下的三轴试验

论文针对孟加拉帕亚拉基坑开挖过程中侧壁土体真实经历的应力路径, 为分析固结及加(卸)载方式对土体工程性

质的影响, 笔者进行了两种试验方案, 内容如下。

方案 1 (简称 CID 试验): 常规三轴固结排水试验, 即在各向等压条件下固结后再轴向加载至剪切破坏。供与论文进行的特殊应力路径试验进行对比;

方案 2 (简称 CK0D2 试验):  $K_0$  固结侧向卸荷排水剪切试验, 即  $K_0$  固结、轴压不变围压减小的排水剪切试验。该应力路径是基坑侧壁土体的应力路径。

以上两种方案均进行 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 四级围压下的试验, 剪切过程采用应变控制式, 考虑到试验仪器的局限性以及试验所用的粘性土渗透系数较低等因素的影响, 试验的固结和剪切过程采用同一速率 0.015mm/min。试验所用土样的物理性质指标如表 1 所示。

表 1 土样物理性质指标

含水率 / %	密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	液限 $L_{10}$ / %	液限 $L_{17}$ / %	塑限 P / %	比重 $G_s$	初始孔隙比 $e_0$	塑性指数 IP
39.6	1.71	38.6	46.7	21.5	2.71	1.22	17

众所周知,  $K_0$  固结试验的关键是控制试样不发生侧向变形。本次试验根据试样的体变  $\Delta V$  和轴向压缩量  $\Delta H$ , 建立如式 1 所示关系式来控制侧向变形。

$$\Delta V = A_0 \times \Delta H \quad (1)$$

其中, 式中  $A_0$  为试样的初始面积。

试验中  $K_0$  由式 2 确定。

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (2)$$

其中, 式中  $\varphi$  为土体的内摩擦角, 根据常规固结排水三轴试验确定。

## 2 基坑计算分析

### 2.1 整体模型的建立

深基坑的开挖影响范围取决于基坑开挖的平面形状、开挖深度, 土质条件以及支护情况等因素, 计算模型边界范围的确定, 尤其是计算深度的确定对数值计算结果的精度有较大的影响。根据已有的工程经验, 一般基坑开挖的影响宽度大约为基坑开挖深度的 3~4 倍, 影响深度约为开挖深度的 2~4 倍。论文算例的基坑的尺寸为 60m × 20m × 5m (长 × 宽 × 深), 采用的是地下连续墙支护形式, 根据 FLAC 影响范围的取值要求, 选取 120m × 50m × 15m 的区域建立 FLAC 计算模型, 划分单元后模型共产生了 41040 个单元, 45552 个节点, 如图 2 所示。

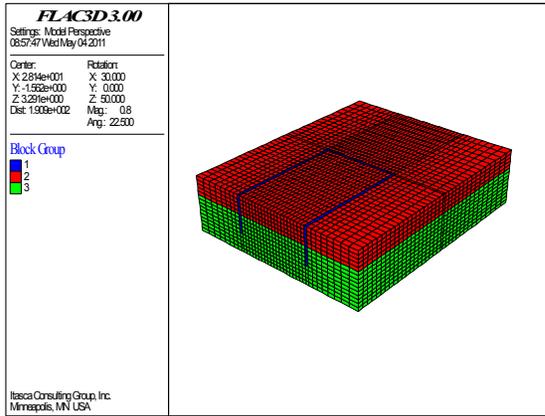


图2 基坑开挖数值计算几何模型

### 2.2 土体本构模型及参数选取

论文数值分析采用的是邓肯 E-B 模型, 假定土体材料性质为弹性非线性, 基坑影响深度范围内共分为两层土, 开挖面向下深度 5m 为论文试验所用的粘土, 下面土层为风化细砂岩, 模型参数是根据经验值确定的。表 2 列出了开挖基坑不同深度土层的邓肯模型参数。

表 2 基坑各土层的 E-B 模型参数

土层名称	①淤泥质粘土		②风化细砂岩
土层厚度 (m)	5		8.1
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.71		1.93
	CID 参数	CK <sub>0</sub> D2 参数	
粘聚力 (kPa)	13.46	11.66	20
内摩擦角 (°)	25.09	27.55	26
$R_f$	0.657	0.856	0.7
$k$	40.11	79.78	560
$n$	0.796	0.9	0.4
$Kb$	16.6	—	420
$m$	0.6	—	0.3

由于邓肯模型模拟 CK<sub>0</sub>D2 试验的体变曲线存在较大差异, 模拟曲线的体变值均为负值, 因此在 FLAC 计算中, 试验土体的体变模量取较大值, 认为土体的泊松比为 0.49, 这样更接近实际情况。

### 3 采用 FLAC3D 进行基坑位移分析

工程中基坑开挖的计算和支持设计采用的多是由常规试验得出的土体参数, 这与实际情况是有一些差距的, 没有考虑土体的 K<sub>0</sub> 固结过程和开挖卸荷实际的特殊应力路径。论文根据之前进行的特殊应力路径三轴试验得出的结果, 在此进行相关的数值计算, 定量研究采用特殊应力路径试验求出的不同土体参数对基坑应力、位移等的影响<sup>[4]</sup>。

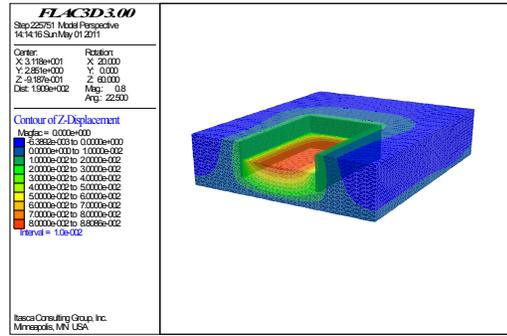


图3 采用 CID 试验邓肯模型参数计算基坑竖向位移分布图

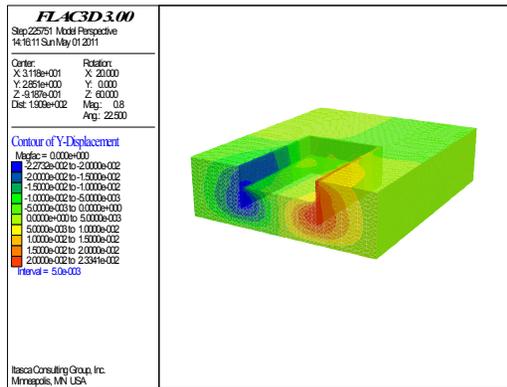


图4 采用 CID 试验邓肯模型参数计算基坑侧壁水平位移分布图

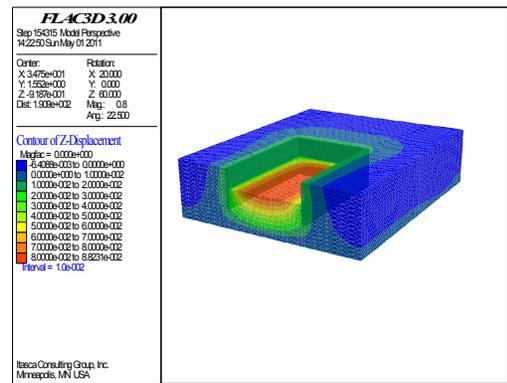


图5 采用 CK0D2 试验邓肯模型参数计算基坑竖向位移分布图

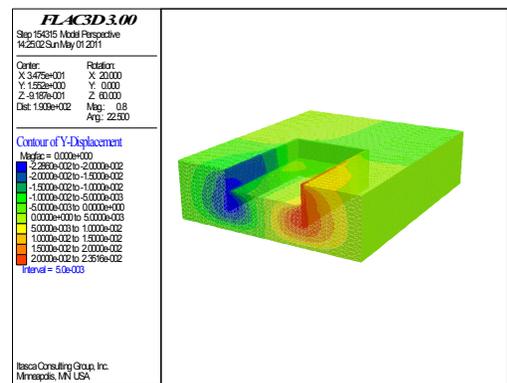


图6 采用 CK0D2 试验邓肯模型参数计算基坑侧壁水平位移分布图

结合特殊应力路径试验的设计情况,即主要研究侧向卸荷应力路径下的土体性质,论文数值分析主要讨论基坑侧壁土体的变形情况,尝试分析特殊应力路径下得出的土体参数引起的基坑变形计算的差距。

从图3图5可以看出开挖过程对基坑底部土体的竖向位移影响较大。开挖过程中由于上部土体的卸荷,导致原来位于基坑底部的土层失去原始的平衡状态,在基坑底部尤其是中心周围大部分区域呈现明显的隆起趋势,基坑周围土体采用不同试验土体参数时,呈现不同程度的下沉趋势,但数值都比较小而且差距不大。两种不同试验情况下基坑竖向位移最大值均发生在坑底,即坑底隆起位移值。如图6所示,采用CK0D2试验的土体参数计算时,基坑底部中心的隆起位移稍大于采用CID试验土体参数计算得到的位移量,但坑底隆起位移的差距不是太大,因此在实际工程中计算坑底隆起位移时,为试验方便,采用常规三轴试验的数据也是可行的。

图4图6可以看出两种情况下基坑侧壁水平位移最大值均发生长边地下连续墙稍偏下中间的位置,CID试验情况下土体的侧壁水平位移较之CK0D2试验稍大,但差距很小(5mm范围内),因此采用常规三轴试验得出的土体参数代替基坑侧向卸荷应力路径下的土体参数用于计算也是基本可行的。

由上述数值分析可看出,两种不同应力路径试验得出的土体参数用于基坑变形计算还是有些差距的。由图可以明显看出,采用CID试验参数计算得出的竖向沉降和基坑侧壁水平位移均略小于采用CK0D2试验参数计算得到的数值,在实际工程中采用CID试验参数进行计算是偏危险的,但应考虑

论文试验和算例有一定的局限和特殊。

## 4 结语

本章采用FLAC3D计算软件,把不同应力路径试验下得到的土体参数用于基坑工程中的变形计算,比较采用不同应力路径参数对基坑变形的影响差距,得出一些有一定参考价值的结论,总结如下。

(1) 开挖过程对基坑底部土体的隆起影响较大,采用两种不同试验参数计算的坑底隆起位移差距不是太大,因此在实际工程中计算坑底隆起位移时,采用常规三轴试验的数据是可行的。

(2) 采用CID试验参数计算得出的基坑侧壁竖向沉降和水平位移均略小于采用CK0D2试验参数计算得到的基坑侧壁沉降值,在实际工程中采用CID试验参数进行计算是稍显不安全的,但是数值差距很小,因此采用常规三轴试验的数据替代也是可行的。

## 参考文献

- [1] 朱涵成,韩文喜,陈超.砂岩常规三轴的颗粒流数值模拟[J].地质灾害与环境保护,2013(03):122-123
- [2] 陈志波,钟理峰,蔡廉锦.基坑开挖过程坑侧土体应力路径试验研究[J].防灾减灾工程学报,2016(06):39-41
- [3] 高永刚.基于AutoCAD的FLAC3D模型快速建模方法研究[J].西安:西安科技大学,2012.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,建筑基坑工程监测技术规范:GB50497-2009[S].2009-3-1.