

DOI: 10.11779/CJGE2017S2011

基坑隆起稳定性数值分析中的若干问题

王成华, 李亚杰

(天津大学建筑工程学院, 天津 300354)

摘要: 基坑隆起稳定性数值分析是深基坑工程研究中的重要方法, 尚处于初步探讨阶段, 还存在一些重要的科学问题有待深入认识。基于国内外这方面的研究成果并结合笔者在软土基坑三维数值参数分析工作中的经验, 对基坑隆起稳定性数值分析中的隆起破坏空间效应、破坏模式、本构模型及参数选择等问题进行了初步探讨, 指出隆起稳定分析应重点开展三维和窄长基坑双侧隆起分析; 破坏模式辨识中, 隆起模式未必与传统方法的破坏模式相同; 土体本构模型选择应主要考虑土体加载卸荷条件以及屈服与破坏准则; 参数分析中, 首次指出本构模型参数选择存在可行域问题。

关键词: 隆起稳定性; 空间效应; 破坏模式; 本构模型; 参数分析

中图分类号: TU 470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S2-0041-04

作者简介: 王成华(1959-), 男, 教授, 工学博士, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: chwang@tju.edu.cn。

Some problems in numerical analyses of basal upheaval stability of foundation pits

WANG Cheng-hua, LI Ya-jie

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Numerical analysis of basal upheaval stability of foundation pits is a very important method in researches on deep excavation engineering, which is in the initial development stage and is of important issues remained to be understood and solved. Based on analysis of the results of the corresponding researches, combining the experience gained from the researches in three-dimensional parametric analysis of excavation in soft soils, the problems such as spatial effects, failure patterns, selection of soil constitutive models and their parameters are analyzed. Both the three-dimensional analyses and the bilateral plain analyses of basal upheaval stability are emphasized. The differences of failure patterns of basal upheaval from numerical analyses and those from the traditional analytical methods in failure pattern recognition are revealed. The great importance should be attached to the loading and/or unloading criteria and yield and failure criteria in selection of soil constitutive models and their parameters. The concept of feasible region for parameters in parametric analysis is firstly put forward.

Key words: basal upheaval stability; spatial effect; failure pattern; constitutive model; parametric analysis

0 引言

基坑隆起破坏是指随着基坑开挖深度的增加, 墙后地表土体发生沉降, 基坑底面土体隆起变形较大, 发生鼓起破坏, 如图1所示^[1]。基坑隆起稳定性受到基坑地质条件、坑外超载、基坑尺寸和形状以及支护结构的插入深度等诸多因素的影响, 其实际机理也较复杂, 因而选择和发展更好的分析方法仍然是当今基坑工程领域研究的热点之一。

基坑抗隆起稳定分析是基坑工程设计的重要内容之一。目前基坑抗隆起稳定性分析方法主要有极限平衡法、极限分析法和数值分析法等。极限平衡法主要包括极限承载力法和圆弧滑动法, 该方法是最常用但采用假定的滑裂面, 与真实情况还是存在一定差距; 极限分析法的人为假定过多、适用范围较小, 其应用也受到了限制。利用数值分析方法进行基坑抗隆起稳

定分析, 能够考虑较多的影响因素, 尤其能考虑基坑空间效应、土的本构关系和复杂地质条件, 能较好地模拟实际施工工况, 因而适用范围较宽, 越来越受到工程界和学术界的认可^[2]。

但是, 以数值分析方法研究基坑隆起稳定性尚处于探索阶段, 还有不少概念性和技术性问题有待深入认识和解决。本文在国内外基坑隆起稳定性分析成果的基础上, 结合笔者进行的基坑隆起稳定性有限元参数分析经验^[3], 对基坑隆起稳定性数值分析中存在的破坏模式辨识、土本构模型及其参数选取、大变形模拟等一些关键科学问题进行探讨, 以期加深对基坑稳定性数值分析科学性与合理性的认识, 提出新的研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478313, 50978182)

收稿日期: 2017-08-02

方向和思路, 促进基坑隆起稳定性数值分析的发展。

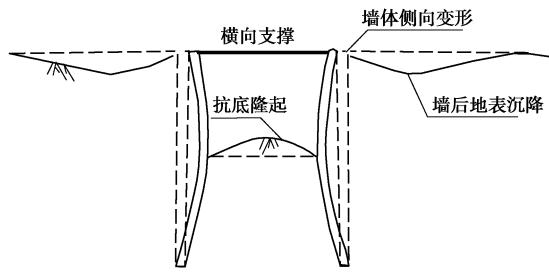


图 1 基坑坑底隆起破坏示意^[1]

Fig 1 Schematic diagram of upheaval failure of foundation pit

1 隆起空间效应问题

基坑隆起破坏的空间效应包括两个方面: 一是三向尺度均不能简化或忽视的三维基坑坑内外土体的三维滑动, 二是窄长基坑双侧隆起问题。现阶段基坑抗隆起稳定性分析的极限平衡方法和极限分析方法一般只能进行基坑单侧的平面分析, 难以反映隆起破坏的空间效应, 而数值分析也多是基坑平面分析, 而且是单侧平面分析。实际上, 大量基坑是三维的, 其隆起破坏应为三维滑动破坏, 平面分析方法不能很好反映基坑的空间效应^[2]。

为了更加准确地分析空间效应明显的深基坑的稳定问题, 应对基坑进行三维数值分析。国内外有一些学者对基坑的三维稳定问题进行研究。Cai 等利用强度折减有限元方法分析了软土中圆形基坑的隆起稳定性^[4], 而 Faheem 等也采用非线性有限元强度折减法分析了软土中矩形基坑的隆起稳定性^[5]。张震等在圆弧滑动法的基础上建立三维的有限元模型, 并通过工程实例对基坑的二维和三维计算结果进行对比分析, 得到三维隆起稳定性大于二维隆起稳定性^[6], 说明考虑空间效应的计算方法的合理性。这些分析对于认识在特定条件下的软土基坑稳定性有一定的帮助, 但是强度折减法分析基坑稳定性还存在一些因强度折减法带来的一系列问题, 自然导致以其分析结果的合理性和适用性值得商榷。目前基于真实应力场而非强度折减应力场的隆起稳定性分析还很少^[3], 因此建议大力开展基于真实应力场的基坑隆起稳定性分析。

基坑隆起空间效应的另一个方面就是大量存在的窄长基坑双侧隆起破坏问题。已有的基坑隆起稳定性分析多是假定基坑平面内出现单侧隆起破坏, 而未能考虑窄长基坑两侧由于空间狭窄且存在支护挡土结构约束情况下的隆起稳定性。随着长距离管线铺设尤其综合管廊工程的快速发展, 应更多开展基于真实应力场的窄长基坑双侧抗隆起破坏稳定性的数值分析。

2 隆起破坏模式问题

经典的极限平衡方法与极限分析方法分析基坑隆

起问题, 已经提出了一些基坑破坏模式, 如极限平衡分析地基承载力模式和圆弧滑动模式。由于这些传统模式得到大量应用, 已经深深地嵌入了基坑隆起稳定性研究者中的脑海中, 因而很容易导致以这些传统模式来鉴别数值分析结果的合理性。在基坑隆起稳定性数值分析中, 如何对待传统破坏模式是一个难以避免且尚未得到定论的问题。

2.1 破坏模式辨识问题

无论采用何种数值分析方法进行隆起稳定性分析, 均涉及破坏模式识别问题。众所周知, 在岩土破坏问题的数值分析中, 通常利用以塑性区开展边界或变形突变位置确定破坏范围和形态。笔者发现, 国内外大量的基坑非线性数值分析中, 很难找到与传统隆起破坏模式特别相符的土体破坏范围和形态。

笔者采用 ABQAUS 软件针对大比尺基坑模型试验进行了基于应力场的三维数值分析^[3], 所得到在不同参数及超载条件下, 模型基坑的破坏模式或塑性区虽有所差别, 但与图 2 所示的塑性区大致相同。在图 2 中, 看不见传统的隆起破坏的承载力模式或圆弧滑动模式。计算得到的模型的塑性区云图还有很大不同, 传统的破坏模式存在在某点开始沿着一条垂线延伸到地表, 为一个立面, 而计算得到的却不存在这一立面, 而是一个斜面, 这显然与传统的破坏模式是不相符的, 这就使得计算结果与真实结果产生很大误差。

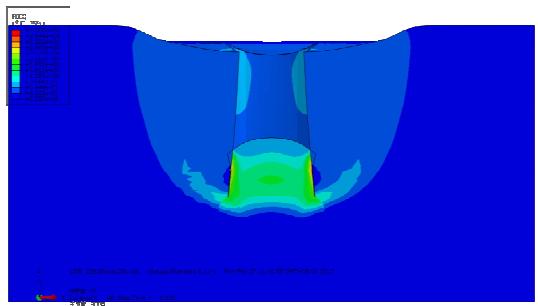


图 2 软土中模型基坑破坏模式

Fig. 2 Failure pattern of foundation pit in soft soils

胡安峰等利用 Plaxis 软件对黏土基坑开挖问题进行了数值分析, 得到某基坑破坏时土体的变形图和滑裂面如图 3 所示^[7]。从图 3 中可以看到, 坑底已经发生明显的隆起变形, 土体到达破坏, 该模型计算得到的滑裂面也是一个倾斜的面, 与传统的破坏模式不同。

张天宝利用 Limitstate:geo 极限分析软件搜索长条形基坑在单侧施加超载时的土体破坏面, 得到坑内土体有两种破坏模式, 分别为图 4 (a) 和 (b) 所示的三角形破坏模式和梯形破坏模式^[8]。随着基坑宽度从大变小, 无论是柔性挡土结构和刚性的挡土结构, 隆起破坏从三角形破坏模式向梯形破坏模式发展。

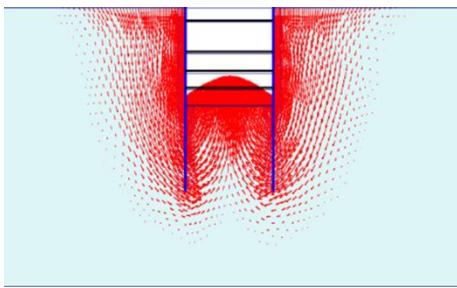
图 3 基坑破坏时土体变形图和滑裂面^[7]

Fig. 3 Displacement vectors of soil and slip surface at failure

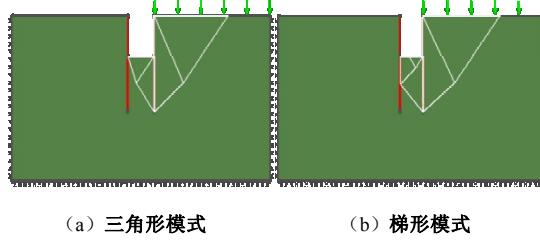
图 4 长条形基坑隆起的两种破坏模式^[8]

Fig. 4 Two upheaval failure patterns for long stripped pits

不难发现, 数值分析中并未出现传统的坑外立面破坏模式, 而出现了斜面破坏模式。但这种斜面模式产生的原因及其适用性尚需进一步研究。

通过阅读大量文献发现, 和传统的破坏模式相比, 很多数值分析研究中, 得出的基坑破坏模式并非传统的破坏模式, 而可能是各种破坏模式的集合或组合。

2.2 总破坏模式与子破坏模式

从理论概念上来讲, 岩土非线性数值分析能够得到在一定条件下的全部破坏范围和形态。为了方便讨论问题, 笔者定义由数值分析得到的全部破坏范围形态为总破坏模式 (Entire Pattern of Failure)。针对基坑非线性数值分析, 计算得到的所有土体破坏点的集合即为基坑土体破坏的总模式。理论上, 只要满足土体强度破坏的准则, 就可以找到全部破坏点, 根据破坏点的分布特征提取土体总破坏模式。

然而, 只要不是特别约束条件, 土体内的破坏点的出现和分布一般不会恰好与传统的隆起破坏模式严格相符。数值分析与传统极限平衡分析、极限分析方法在计算原理与准则方面的不同, 是数值分析得到的隆起破坏形态与传统隆起破坏模式不相吻合的内在原因。

在国内外的一些数值分析中, 很容易发现土体破坏的位置可能出现在传统破坏模式的内部、外围或更多的位置, 也可能包含有多种破坏模式的特征, 由此看来, 一个完整的土体破坏模式即总破坏模式中可能还有各种具体破坏模式即子破坏模式 (Subpattern of Failure), 如土体的整体滑动失稳、水平滑移、倾覆及隆起破坏等。从这个意义上讲, 数值分析得出破坏

模式与传统某一种子破坏模式不同也是正常的, 是可以理解的。

3 本构模型及参数选择问题

为了保证基坑隆起稳定性数值分析计算结果的准确性, 需要解决两个技术关键问题, 即土体本构模型和模型参数选择问题。而在模型的各项参数的确定过程中, 本构模型则要慎重选择, 它会对模型的结果产生很大的影响。

3.1 模型选择问题

各种土体本构模型都针对某些的土的主要特性做了适当的简化假设, 有各自的适用范围和局限性^[9]。基坑开挖的数值分析中, 根据具体土性及开挖问题的特点选择合适的本构模型, 才能到真实可靠的结果。

线弹性模型是最简单的, 但它不能反映土的非线性和塑性变形等特性, 自然不能用于基坑稳定性分析; 弹塑性模型反应了土的非线性特性, 但研究破坏问题尚需根据针对土性特点尤其是加卸荷应力路径下加卸荷条件及土体屈服和破坏准则来选择本构模型。表 1 对若干常用本构模型用于基坑开挖分析的适用性进行了总结, 同样适用于基坑隆起稳定性分析。

表 1 本构模型对基坑开挖问题的适用性

Table 1 Applicability of constitutive models to excavation issue

模型名称	不适用	较适用	适用
线弹性模型(LE)	√		
Mohr-Coulomb 模型(MC)		√	
Drucker-Prager 模型(DP)		√	
Duncan-Chang 模型(DC)		√	
修正剑桥模型(MCC)			√
硬化模型(HS)			√

探讨一般规律性的基坑隆起稳定数值分析中, 依据弹性理想塑性模型进行分析, 多数可采用 Mohr-Coulomb 屈服准则^[3]。该模型可以较好地描述土体的破坏行为, 但不能考虑中主应力的影响, 也不能考虑应力历史的影响以及区分加卸荷情况^[7]。通过计算发现, 计算得到的一般规律比较符合实际。

大变形问题是基坑隆起稳定性分析中本构模型选择的另一个方面问题。目前基坑隆起稳定性分析中多采用小变形本构模型, 但大多数基坑隆起破坏是在软黏土中产生的大变形。有些研究表明在一定情况下, 大变形模型更适合于计算基坑的抗隆起稳定问题, 本文限于篇幅, 不再展开讨论。

3.2 参数选择问题

由于土的复杂性和不可重复性, 在土力学中可以有通用的本构模型, 但不会有通用的模型参数。基于

长期的数值分析工作经验,笔者认为:作为研究一般规律性的数值分析,可基于所选择的本构模型,根据试验或经验选择适当的计算参数;对于与工程实测、模型试验及其他方法结果进行对比的数值分析,使用任何模型时必须针对具体的土进行试验,确定其参数。

笔者通过数值分析^[3]和阅读文献发现,适用于基坑开挖的本构模型都各有其优缺点,MC模型的参数较少,比较容易确立,但是得到的结果与修正的剑桥模型相比并不是十分理想,修正的剑桥模型相比于MC模型更适合模拟基坑开挖,但收敛性比较差,剑桥模型的参数确定比较复杂,必须进行试验测定参数。

在土体稳定性的数值计算参数分析中,应该重视参数分析的可行域问题。如采用Mohr-Coulomb屈服准则,可以分别考虑黏聚力或内摩擦角在零到某一数值以内变化进行参数分析,但是两者同时处于零或接近零的参数区域就可能失去可行性或合理性,即参数取值不可行。

董林伟等通过数学推导发现,当摩擦角大于22°时,修正DP模型和扩展剑桥模型不再适用,而可以选择MC模型^[10]。这也表明参数可行域问题可能与采用的本构模型有关,这一问题值得深入研究。

4 结 论

通过本文上述探讨,得出以下几点初步认识:

(1) 基坑隆起稳定性的数值分析,应在考虑真实应力场的基础上研究隆起稳定性的空间效应。应重点开展三维隆起及窄长基坑双侧隆起稳定分析。

(2) 基坑隆起稳定性数值分析得到的破坏模式一般并不符合极限平衡分析和极限分析得出的传统模式。基坑内外土体滑动可能存在斜面破坏模式。

(3) 基坑开挖非线性数值分析中的土体全部破坏范围即总破坏模式可能包含整体稳定性、隆起、倾覆及滑移等各种破坏形态即子破坏模式。

(4) 针对隆起稳定性的数值分析,应重点考查本构模型中土体应力路径对应的加卸荷条件以及屈服与破坏准则。在一般规律的参数分析中,本构模型参数选择存在可行域问题,值得深入研究。

参 考 文 献:

[1] 林 鹏. 基于板桩墙支护的基坑开挖模型试验的三维数值分析及变形预测[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008. (LIN Peng. Based on 3D numerical analysis of the sheet pile wall supporting model and deformation predicting for deep foundation pit[D]. Nanchang: East China Jiaotong University,

2008. (in Chinese))

- [2] GOH A T C. Estimating basal-heave stability for braced excavations in soft clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(8):1430 - 1436.
- [3] 李亚杰, 王成华. 基于大比尺基坑模型试验的基坑隆起稳定性参数分析[R]. 天津: 天津大学, 2017. (LI Ya-je, WANG Cheng-hua. A parametric analysis of the basal upheaval stability based on large-scale excavation model tests[R]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [4] CAI F, UGAI K, HAGIWARA T. Base stability of circular excavations in soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(8): 702 - 706.
- [5] FAHEEM H, CAI F, UGAI K. Three-dimensional base stability of rectangular excavations in soft soils using FEM[J]. Computers and Geotechnics, 2004(31): 67 - 74.
- [6] 张 震, 冯 虎, 刘国彬. 基坑抗隆起稳定三维分析的极限平衡法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(1): 37 - 43. (ZHANG Zhen, FENG Hu, LIU Guo-bin. A three-dimensional limit equilibrium method for basal stability analysis[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2012, 28(1): 37 - 43. (in Chinese))
- [7] 胡安峰, 陈博浪, 应宏伟. 土体本构模型对强度折减法分析基坑整体稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 592 - 597. (HU An-feng, CHEN Bo-lang, YING Hong-wei. Influences of constitutive models on overall stability analysis of deep excavations using strength reduction method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 592 - 597. (in Chinese))
- [8] 张天宝. 长条形基坑抗隆起稳定及整体稳定性分析方法[D]. 天津: 天津大学, 2016. (ZHANG Tian-bao. The methods for analyzing basal upheaval stability and general stability of long foundation pits[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese))
- [9] 宋 广, 宋二祥. 基坑开挖数值模拟中土体本构模型的选取[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 86 - 94. (SONG Guang, SONG Er-xiang. Selection of soil constitutive models for numerical simulation of foundation pit excavation[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 86 - 94. (in Chinese))
- [10] 董林伟, 张明义, 解云芸, 等. ABAQUS 软件本构模型中屈服准则的参数研究[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 34(1): 48 - 50. (DONG Lin-wei, ZHANG Ming-yi, XIE Yun-yun, et al. Study on the parameters of soil models yield criterion in ABAQUS software[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2013, 34(1): 48 - 50. (in Chinese))

(本文责编 明经平)