

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0078-06

# 基于不同模型的基坑开挖过程力学响应研究

胡 偲<sup>1</sup>, 徐鼎平<sup>2</sup>, 江 权<sup>2</sup>, 张家新<sup>3</sup>, 樊 波<sup>3</sup>, 郭广涛<sup>4</sup>

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;  
3 中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056; 4 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

[摘 要] 基坑工程开挖力学响应数值模拟结果的可靠性, 依赖于选择合适的本构模型。为深入分析各常见本构模型在软土基坑开挖力学响应数值模拟中的适用性, 减少因为本构模型选择带来的模拟误差, 本文拟以武汉地区的一大型软土基坑工程为例, 利用 FLAC3D 开展该基坑工程的开挖支护过程仿真模拟, 基于基坑土体变形与基坑支护结构变形等来对比分析摩尔库伦模型、修正剑桥模型以及 Cysoil 模型在软土基坑工程开挖力学响应模拟中的异同和适用性。研究结果表明, 对于武汉地区的软土基坑工程开挖力学响应分析, 修正剑桥模型为最佳本构模型。该研究成果可为软土基坑工程开挖力学响应数值仿真的本构模型选择提供有益的借鉴。

[关键词] 软土; 本构模型; 基坑; 数值模拟; 变形

[中图分类号] TU753 [文献标识码] A

我国日益增长的能源、资源和交通等刚性需求使得城市地下空间开发与利用成为城市建设发展的常态化趋势, 以基坑工程为代表的城市开挖工程日益增多<sup>[1]</sup>。在城市基坑工程开挖建设过程中, 必然受到既有建(构)筑物(如建筑基础、桥梁基础等)的制约, 或遇到不同开挖工程(如临近地铁隧道工程)交叉作业和相互影响的情况, 这些为基坑工程的施工开挖带来了极高的风险与挑战, 严重时甚至引发工程事故。

如何通过科学合理的手段对施工开挖引起的基坑变形进行预测分析及对相应支护方案、支护效果进行分析评价, 已经成为城市基坑工程建设过程中不可避免的重要问题。随着数值计算方法与理论的不完善与成熟, 并考虑到仿真分析具有高效率、低成本、可重复的显著优势, 数值计算方法目前已经广泛应用于基坑工程的开挖施工与支护设计。例如: 戴轩<sup>[2]</sup>等基于 Plaxis<sup>3D</sup> 小应变硬化 HSS 模型对某盾构法管廊隧道下穿明挖法公路隧道基坑的工程案例进行了三维有限元数值模拟, 分析并且预测了盾构隧道下穿在建深基坑对于基坑内外结构的影响; 王恩钰<sup>[3]</sup>等基于某基坑支护工程, 利用 Plaxis<sup>3D</sup> 创建了不同形式的倾斜桩支护数值模型, 对多种倾斜桩支护模型和传统悬臂支护桩模型的桩身变形与沉降做了对比; 张光建<sup>[4]</sup>等结合杭州地铁 1 号线基坑工程的监测数据, 通过 ABAQUS 软件对杭州某地铁

车站的基坑进行了数值模拟计算, 并且对支撑轴力进行了分析, 为地铁基坑的优化设计和信息化施工提供了有力的技术支撑。

总体而言, 数值计算作为基坑工程开挖力学响应分析的一种手段正日益受到重视, 但各本构模型在软土基坑工程中的适用性还未得到充分的研究。摩尔库伦并不是用于模拟软土基坑开挖力学响应最合适的本构模型, 但由于输入参数简单易获得, 仍是当前软土基坑工程模拟分析最常用的模型; 修正剑桥模型理论上要比摩尔库伦模型和弹性模型更适合在软土基坑工程模拟分析中应用, 但由于输入参数较为复杂, 且难以通过室内试验进行确定, 相关研究成果不多。Cysoil 模型虽然对于土体的变形控制能力较好, 更能反映土体的真实变形情况, 但目前在软土基坑开挖力学响应数值模拟中的应用并不广泛, 缺乏相应的研究经验和积累。

笔者拟以武汉地区一在建大型软土基坑工程为例, 利用 FLAC3D<sup>[5]</sup> 开展该基坑工程开挖支护过程仿真模拟, 基于基坑周边变形、基坑底部隆起情况与基坑支护结构变形等来深入对比分析摩尔库伦模型、修正剑桥模型以及 Cysoil 模型在软土基坑工程力学响应模拟中的异同和适用性。研究成果可为软土基坑工程开挖力学响应数值仿真的本构模型选择提供有益的借鉴。

[收稿日期] 2019—10—15

[基金项目] 金属矿山安全与健康国家重点实验室开放课题(2017—JSKSSYS—01)

[第一作者] 胡 偲(1994—), 男, 湖北黄冈人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为基坑开挖稳定性

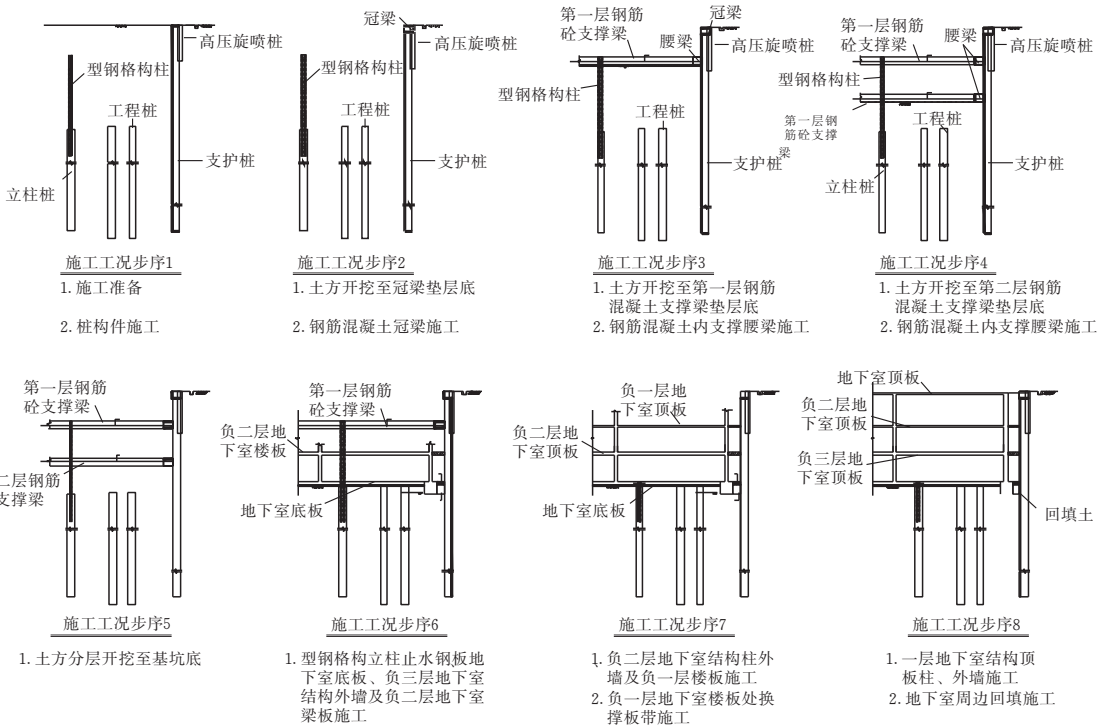


图 1 基坑施工顺序

## 1 工程概况

基坑工程位于武汉市汉阳区经济开发区立业路与东风大道之间,主要包括 1 栋 24 层办公楼,1 栋 3 层裙房,3 层地下室,以及钻孔灌注桩基础。基坑开挖深度约 13.10 ~14.10 m,周长约 403 m,面积约 8924 m<sup>2</sup>。图 1 为基坑主体及周围环境的平面布置情况,基坑周边紧邻地铁隧道 3 号线以及财富广场和中交第二公路勘察设计院有限公司办公大楼等高层建筑,开挖深度和开挖方量巨大,施工难度大且工期短,施工、管理不当极有可能造成基坑失稳,进而影响地铁 3 号线正常运营和周边高层建筑不均匀变形等不良后果,属典型高难度深基坑工程(图 2、图 3)。

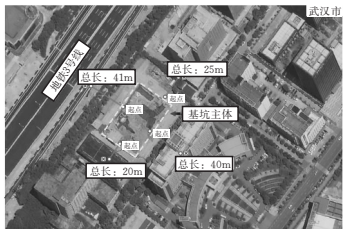


图 2 基坑周边环境图

根据文献[6],基坑工程开挖范围内土层主要为粉质黏土,呈灰褐色、褐灰,软塑—可塑状,中偏高高压缩性。

基坑开挖支护施工顺序按如下步骤进行(图 1):1) 基坑周围支护桩施工;2) 土方开挖至冠梁垫



图 3 基坑开挖前现场环境图

层底部,钢筋混凝土冠梁施工;3) 土层开挖至第一层钢筋混凝土支撑梁垫层底,钢筋混凝土内支撑、腰梁施工;4) 土层开挖至第二层钢筋混凝土支撑梁垫层底,钢筋混凝土内支撑、腰梁施工;5) 土方分层开挖至基坑底板。

## 2 本构模型介绍

### 2.1 摩尔库伦模型

摩尔库伦模型作为运用最广泛的一种本构模型,是描述土体和岩石剪切破坏的常规模型。该模型的破坏包络线符合剪切屈服函数和拉伸屈服函数。摩尔库伦模型屈服准则是考虑了正应力或平均应力作用的最大剪应力或单一剪应力的屈服理论<sup>[7]</sup>,材料发生屈服破坏取决于剪切面上的剪应力与正应力之比。该模型的剪切屈服准则为:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c \sqrt{N_\varphi} = 0$$

式中, $\varphi$  为内摩擦角, $N_\varphi = (1 + \sin\varphi)/(1 - \sin\varphi)$ ;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  分别为最大主应力、中间主应力和最小主应力,以压为负,拉为正; $c$  为粘聚力。

2.2 修正剑桥模型

修正剑桥模型是由 Roscoe 和 Burland 基于剑桥模型改进而来的弹性塑性模型<sup>[8]</sup>。修正剑桥模型适用于软质黏土,它的屈服方程如下:

$$p + \frac{q^2}{M^2(p + p_r)} = p_a \exp\left(\frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \epsilon_v^p\right)$$

式中,  $M = 6\sin\varphi/(3 - \sin\varphi)$  为摩擦常量;  $p_r = c\cot\varphi$ ;  $p$  为平均应力;  $q$  为广义剪应力;  $\epsilon_v^p$  为塑性体积应变;  $e_0$  为初始孔隙比;  $p_a$  为初始平均应力; 模型中的参数  $\lambda$  和  $\kappa$  控制着整个模型的变形,分别取值于正常固结线和等压膨胀线的斜率,如图 4 所示。图 4 中  $p_{c0}$  为前期固结应力;  $p_0$  为初始有效压力;  $V_0$  为特定的体积值;  $V_\lambda$  和  $p_1$  为指定值,通过各项同性三轴试验来确定。

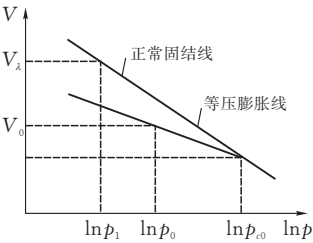


图 4 正常固结线与等压膨胀线

2.3 Cysoil 模型

Cysoil 模型作为双屈服模型的延伸,它的特征很明显,是以摩擦的摩尔库伦剪切包络线和一个带有比轴的椭圆形帽,可以表征材料体的应变硬化特性。模型服从体积帽准则和流动准则:

$$f_c = \frac{q^2}{\alpha^2} + p'^2 - p_c^2$$

式中,  $p'$  为平均有效应力,  $p_c$  为帽子压力;  $\alpha$  为无量纲常数,用于定义椭圆帽子屈服面。其  $p'$  与体积应变  $e$  关系曲线如图 5 所示。图 5 中  $K^e$  为弹性模量;  $H$  为硬化模量;  $R = K^e/H$  为常数。

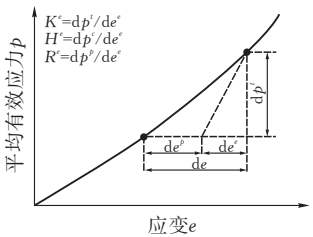


图 5  $p'$  与  $e$  关系曲线

3 开挖、支护过程仿真

3.1 网格模型与初始条件

基坑开挖、支护仿真的 3D 网格模型(高度 35 m,宽度 225 m,长度 280 m)如图 6 所示,共计约 43.3 万单元,45.6 万节点。为了提高速度与准确性,网格划分时从基坑侧壁到模型边界的网格密度逐渐

降低。3D 网格模型除包含基坑主体开挖区域以外,还包含了周边建筑物和地铁隧道,且在后续计算分析当中地铁隧道按已开挖和衬砌施工完毕状态进行考虑。开挖支护过程严格按图 1 所示的施工顺序进行。考虑到本基坑工程利用支护桩挂网喷锚形成了隔水帷幕,基坑内部也进行了降水处理,且开挖影响范围内的地下水位埋深较大,故模拟计算中并未考虑地下水的影响。

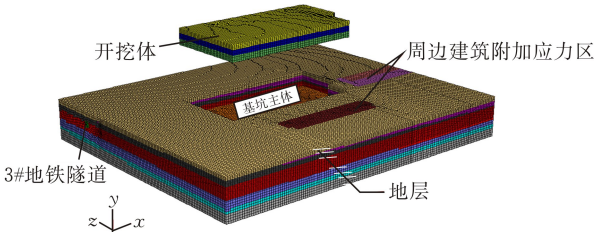


图 6 基坑网格模型

基坑支护结构模型如图 7 所示,主要包含支护桩、冠梁、腰梁(1、2 层)、坑内支撑(1、2 道)、支撑下的立柱以及止水帷幕。支护桩采用 Pile 单元进行模拟;冠梁、腰梁、坑内支撑以及支撑下的立柱均采用 Beam 单元进行模拟;桩间插筋挂网混凝土喷锚采用 Shell 单元进行模拟。各结构单元相互连接处均采用刚性连接,且支护桩和支撑考虑了不同区域支护构件的几何和力学参数的差异。

计算模型的初始应力状态为在弹性本构模型下自重应力作用下的平衡状态,而后位移场清零。在此基础上再进行下一步开挖与支护过程仿真模拟。模型四周采用辊支约束边界,模型底部采用固定约束边界。

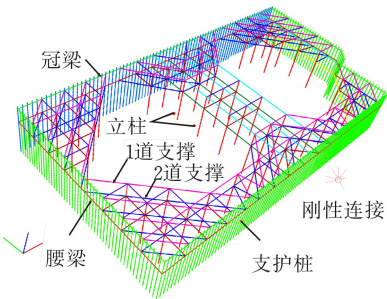


图 7 主要支护构件

3.2 计算参数

为有效对比摩尔库伦模型、修正剑桥模型以及 Cysoil 模型条件下软土基坑工程开挖、支护过程中的力学响应,并依据计算结果对各本构模型的适用性进行对比分析和评价,计算过程中基本力学参数的取值均保持一致。对于工程场地的粉质粘土,基于工程地质报告和经验类比对各本构模型进行参数取值,具体如表 1—3 所示。



表 1   摩尔库伦模型参数

$E$ /MPa	$\nu$	$c$ /kPa	$\varphi$ /(°)
20	0.3	30	22.5

$E$  为杨氏模量;  $\nu$  为泊松比

表 2   修正剑桥模型参数

$M$	$\lambda$	$\kappa$	$Ocr$	$p_a$ /Pa	$\varphi$ /(°)
0.45	0.14	0.01	1.0	1	22.5

$Ocr$  为超固结比

表 3   Cysoil 模型参数

$\alpha$	$\varphi$ /(°)	$G$ /MPa	$c$ /kPa	$\nu$
10	22.5	10	20	0.3

$G$  为剪切模量;  $\alpha$  为帽屈服面参数

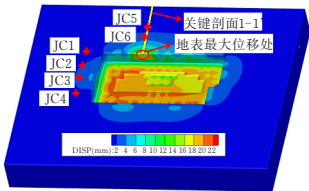
4   开挖支护响应结果对比分析及验证

考虑到基坑工程中,基坑和周围土体的变形以及支护结构的变形和受力往往是重点关注问题。因此,本部分主要从基坑和周围土体以及支护桩的变形分布特征等两个方面,对比分析三种不同本构模型在基坑工程开挖支护力学响应模拟中的适用性。

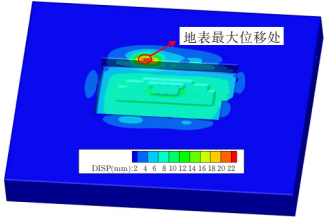
4.1   基坑周围变形及坑底隆起对比

实际的计算结果中,三种模型的最大位移分别为 2.36 cm、2.09 cm、2.0 cm(图 8)。三种模型在开挖区附近都存在一定程度的地表变形,由开挖区向远离开挖区逐渐减少。地表最大位移点都位于基坑壁的顶端以及靠近地铁侧偏南部位的上部;另外在内支撑间隙点的位移普遍呈现增大的趋势,这主要是因为在内支撑的间隙,基坑壁受到的支撑力较小,导致局部会有位移增大的趋势,除去最大位移点,地表总体位移都小于 2 cm,对地铁的影响很小,与实际情况相符合。摩尔库伦模型和修正剑桥模型对于内支撑附近地面的响应更加敏感,而 Cysoil 模型在基坑附近呈现环形的变形,对于支护结构的响应不太明显。

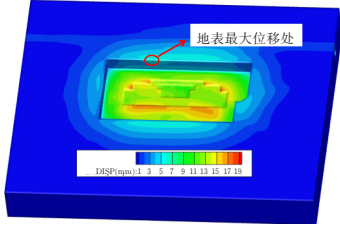
三种模型都存在一定程度的基坑底部隆起现象(图 9)。其中,摩尔库伦模型计算得到的基坑隆起现象最明显,最大隆起接近 2.0 cm;修正剑桥模型计算出的基坑底部隆起最小,不到 1.0 cm;Cysoil 模型计算得出的基坑隆起介于两者之间。由于摩尔库



(a)摩尔库伦模型

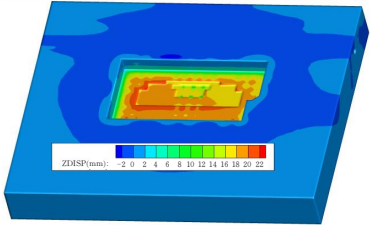


(b)修正剑桥模型

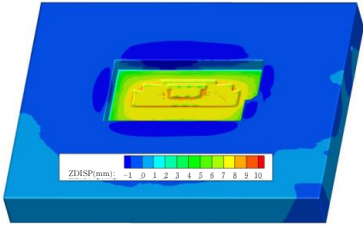


(c)Cysoil 模型

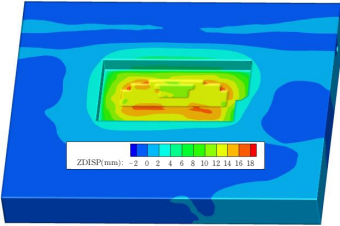
图 8   主要监测点布置和模拟的基坑变形分布



(a)摩尔库伦模型



(b)修正剑桥模型



(c)Cysoil 模型

图 9   模拟的基坑竖向位移分布

伦模型是一种理想的弹塑性模型,能够比较好地描述土体的破坏行为,并且在达到抗剪强度之前是符合胡克定律的,所以它比较适用于描述土体的强度问题,对于土体的应力历史以及加卸荷则无法准确的描述,以至于在进行基坑的数值模拟时,对于基坑底部的回弹很难控制,经常会出现不太合理的回弹位移,因而不太适用于基坑的开挖问题。相反,修正剑桥模型能够有效地模拟土体的应力路径,它不仅能反映土体的剪缩性,还能反映土体的剪胀性,对于

软粘土更为适用,所以模拟的效果更加真实。Cysoil 模型的屈服面为帽子形状,相比于摩尔库伦模型,不存在不合理的基坑回弹,对于基坑底部的位移控制更精确。此外,从图中可以看出,摩尔库伦模型与修正剑桥模型在基坑底部隆起现象更加集中,从支护桩底部往基坑中心部分逐渐增加,而 Cysoil 模型的基坑底部隆起主要分布在基坑内支撑立柱周围,这主要是因为内支撑立柱的压力限制了土体的隆起,并且存在一定的挤压作用,但在立柱附近没有明显的限制作用,导致附近隆起较大。这与实际情况相符合。将主要监测点沉降实测值与模拟计算值列于表 4,并绘制对比图(图 10)。从该图可以看出,修正剑桥模型的计算结果和实际监测点的数据总体吻合较好,Cysoil 模型次之,摩尔库伦模型偏差略大,但总体误差在 0.5 mm 之内。这从基坑周边沉降模拟的角度直接证明了本软土基坑开挖响应模拟结果的可靠性。

表 4 主要监测点的实测与计算沉降值				
测点编号	实测值/mm	计算值/mm		
		摩尔库伦	修正剑桥	Cysoil
JC1	0.11	0.16	0.14	0.15
JC2	0.13	0.21	0.18	0.20
JC3	0.15	0.23	0.17	0.19
JC4	0.12	0.17	0.11	0.13
JC5	0.30	0.50	0.31	0.39
JC6	0.80	0.95	0.76	0.86

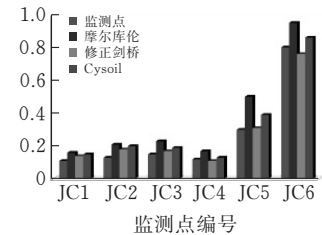


图 10 主要监测点实测与计算沉降对比

从图 11 可以清楚看出:修正剑桥模型在地表位移最大值点的变形最大,但是在往基坑外推移的过程中,变形下降的趋势最明显;摩尔库伦模型和 Cysoil 模型的变形趋势相对较缓,但最终的变形量都很接近。修正剑桥模型的优势在于能够真实地反映内支撑间隙导致的基坑壁受力不均,而 Cysoil 模型则能够将基坑的变形控制在一个真实的范围,减少局部的变形突变,两者在控制基坑周边变形方面相比摩尔库伦模型具有明显的优点。

4.2 基坑支护桩水平变形对比

支护桩的变形不仅影响软土基坑周边的变形范围和深度,而且对基坑的整体安全起至关重要的作用。当基坑开挖后,中间的土体被移走,基坑周边的土体在土体自重作用下存在向卸荷方向挤压的趋

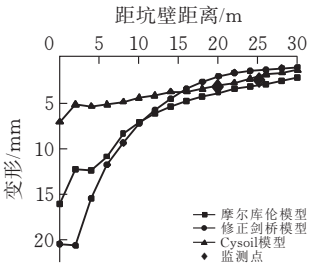


图 11 基坑周边变形与到基坑壁距离关系

势。支护桩的一个重要作用就是阻止这种趋势,因此支护桩会承受主动土压力和被动土压力。已有研究成果表明,支护桩上的最大压力点应该集中在支护桩的中上部,支护桩侧向变形应该呈“鼓肚子”抛物线形状<sup>[9]</sup>,因此其最大位移的位置也应该集中在中上部。本次计算中三种模型统一提取的支护桩位于地表最大位移处。在竖直方向按照每 0.5 m 一次取值,作出的三种模型支护桩随开挖深度变化曲线如图 12 所示。

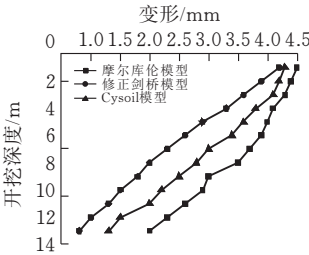


图 12 支护桩水平变形随深度的变化

从图 12 可以看出,在三种模型的计算下,支护桩变形都小于 4.5 mm,都满足实际的要求。由于选取的支护桩为基坑表面最大位移点,故支护桩的最大变形位于最上方,随着开挖深度的增加呈现递减的趋势。修正剑桥模型的变形曲线比较平滑,开挖过程中没有出现突变,与其它两个模型相比变形相对较小。Cysoil 模型与摩尔库伦模型的支护桩变形趋势比较接近,变形量相对较大。这是由于修正剑桥模型对于基坑底部基坑周边的变形范围控制比较小,其它两个模型的基坑周边变形范围较大,导致支护桩整体受力较大,变形有所增加。

5 结论

以武汉地区某在建大型软土基坑工程为研究对象,基于 FLAC3D 开展了该基坑工程的开挖支护过程仿真模拟,并结合监测数据从基坑周边变形、基坑底部隆起、支护结构变形等三个方面对比分析了摩尔库伦模型、修正剑桥模型以及 Cysoil 模型在基坑工程力学响应模拟中的适用性。主要结论如下:

1) 由于修正剑桥模型中的  $\lambda$ 、 $\kappa$  两个控制基坑土体变形的参数能有效反映基坑的加卸荷情况,且超固结比  $O_{cr}$ 、前期固结应力  $p_{c0}$  等参数可以真实

有效地反映软土的应力路径,使得该模型在数值仿真中能够有效避免软土基坑底部的异常隆起情况,开挖引起的支护桩力学响应也更贴近实际。因此,与摩尔库伦模型和 Cysoil 模型相比,修正剑桥模型可以更加准确的反映出软土基坑开挖的实际情况,是软土基坑开挖问题的最优本构模型;

2) 摩尔库伦模型作为岩土工程领域应用最为广泛的本构模型,其突出优点在于参数简单易获取。但对于软土基坑开挖的仿真模拟,其基坑底部隆起变形计算结果较实际值偏大,使得相应支护手段的安全储备偏于保守,从经济适用角度考虑,摩尔库伦模型并不适用于基坑开挖力学响应的分析计算;

3) Cysoil 模型也能够有效的避免软土基坑底部的异常隆起现象,但考虑到其涉及的计算参数极其复杂,在参数取值方面需要花费大量时间和成本,总体而言,在软土基坑开挖问题上该模型的适用性较修正剑桥模型稍差,但优于摩尔库伦模型。

[ 参 考 文 献 ]

[1]  王卫东,徐中华,王建华. 上海地区深基坑周边地表

变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (11): 1659-1666.

[2]  戴轩, 徐管应, 霍海峰, 等. 管廊隧道开挖对上覆在建深基坑影响的三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1):21-24.

[3]  王恩钰, 周海祚, 郑刚, 等. 基坑倾斜桩支护的变形数值分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 73-76.

[4]  张光建, 姚小波, 胡瑾. 地铁换乘车站基坑支撑轴力监测与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 455-459.

[5]  陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M].北京:中国水利水电出版社, 2009.

[6]  中交第二公路勘察设计院有限公司. 中交二公院新建科研综合大楼项目岩土工程勘察报告[R]. 武汉: 中交第二公路勘察设计院有限公司, 2017.

[7]  黄大勇. 近距隧道施工相互影响的 ANSYS 模拟[D]. 贵州大学, 2006.

[8]  Roscoe K H, Schofield MA, Wroth CP. On the Yielding of Soils[ J]. Geotechnique, 1958, 8(1): 22-53 .

[9]  徐中华, 宗露丹, 沈健, 等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 41-44.

Research on Mechanical Response of Excavation Process of Foundation Pit Based on Different Models

HU Cai<sup>1, 2</sup>, XU Dingping<sup>2</sup>, JIANG Quan<sup>2</sup>, ZHANG Jiaxin <sup>3</sup>, FAN Bo<sup>3</sup>, GUO Guangtao<sup>4</sup>  
(1 School of Civil Engin, Architecture and Environment, Hubei Univ.of Tech., Wuhan 430068, China ;  
2 State Key of Geomechanics and Geotechnical Engineering ,  
Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Science , Wuhan 430071;  
3 China Communications Construction Company Limited Second  
Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China ;  
4 Anhui Univ. of Sci. and Tech., Huainan 232001, China)

**Abstract:** The reliability of numerical simulation results of excavation response of foundation pit depends on the selection of appropriate constitutive model. To clearly analyze the applicability of various constitutive models in the excavation response simulation of foundation pit within soft soil and reduce the simulation error caused by constitutive models selection, this paper takes a large foundation pit with soft soil as an example, and carries out the excavation and support simulation of a foundation pit in Wuhan using FLAC 3D. The differences and applicability of the Mohr-Coulomb, modified Cam-clay and Cysoil models in the excavation response simulation of foundation pit within soft soil are comparatively investigated based on the deformation of foundation pit soil and supporting structure. The results show that the modified Cam-clay model is the best constitutive model for the excavation response simulation of foundation pit within soft soil in Wuhan. These presented experiences can provide useful reference for the constitutive model selection for the excavation response simulation of foundation pit within soft soil.

**Keywords:** soft soil; constitutive model; foundation pit; numerical simulation; deformation