

PLAXIS 基坑开挖支护模拟要点解析（一）

筑信达 章延平

开挖是岩土工程中常见的、普遍的一种工程实践，广泛地在建筑深基础、地铁车站或区间、地下空间开发等建设工程中实施。针对开挖的支护设计，便成了当前岩土工程师面对的一个重要问题。尤其在目前开挖工程周围环境复杂的情况下，要做到安全、经济的设计方案，需要对开挖支护方案做更加详细和全面的分析，有限元软件成为不可或缺的分析工具。

近年来，PLAXIS 软件在开挖工程分析中的应用越来越广泛，受到了广大岩土工程师的信赖和认可。本文就 PLAXIS 软件在基坑开挖支护分析中的相关问题做一些梳理和汇总，首先介绍地基土层模拟中需要注意的问题。

1 本构模型选择

基坑开挖分析中首先解决的问题是对土层的模拟，相较于传统设计方法中将土层作为荷载（抗力）或者线弹性弹簧来考虑，有限元分析中要考虑土层的非线性、弹塑性，以及土中地下水的变化对土层力学行为的影响等，因此涉及到本构模型选择和参

数取值问题。

1.1 摩尔 - 库伦本构模型

我们最熟悉的本构模型是摩尔 - 库伦模型（MC），即理想弹塑性模型，其参数简单、求解速度快，可以较好的模拟土体的破坏特性（摩尔 - 库伦强度破坏准则），应用十分方便，被广泛应用到各种领域的岩土工程计算分析当中。摩尔 - 库伦模型的应力 - 应变关系见图 1，在达到屈服强度之前其表现为线弹性状态，即其模量为常量（模型参数用杨氏模量 E 代表）。

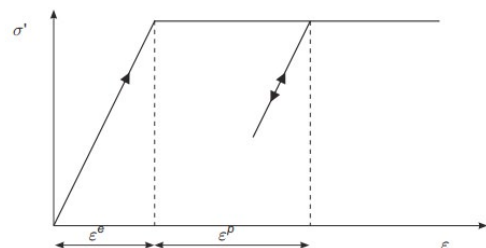


图 1 MC 模型的线弹性理想塑性应力 - 应变关系

对一般土体而言，其应力应变关系往往表现出非线性特征（甚至在一开始加载时），且其模量与应力

路径相关。将加载起始的切线模量定义为 E_0 ，屈服强度一半应力水平所对应的割线模量（实际指土体的平均加载模量）定义为 E_{50} ，而卸载再加载情况下则对应卸载重加载模量 E_{ur} 。三轴排水试验中土体不同模量的定义如图 2 所示。因此，在使用 MC 模型时，要特别注意根据土体的实际应力路径来确定使用合适的模量值，比如对于基坑开挖工程，主要为卸载过程，一般 E_{ur} 可以达到 $3E_{50}$ ，有些软黏土更高。

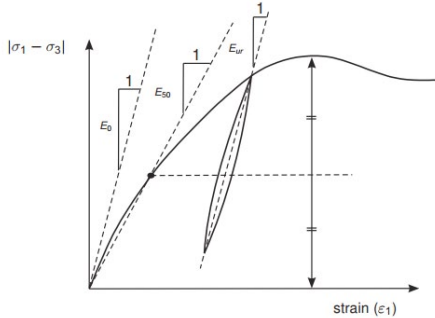


图 2 三轴排水试验的一般应力 - 应变曲线及不同刚度取值

此外，土体的模量与应力水平也具有相关性，一般在高应力水平下我们可以得到更高的模量值，即应力水平越高，土体越“坚硬”。因此，使用 MC 模型时，要注意评估试验指标与实际工程应力水平的关系。对于 MC 模型，可以定义其模量随应力水平（即土层埋深）的增长，表达式如下：

$$E(y) = E_{ref} + (y_{ref} - y)E_{inc} \quad (y < y_{ref}) \quad (式 1)$$

综上所述，MC 模型无法表达土体在屈服前的非线性特征，且无法区分加载应力路径，以及应力水平变化对土体行为的影响。基坑开挖中土体所经历的应力路径复杂，对于地层的变形情况，比如坑外沉降、坑底隆起、墙的位移等，使用摩尔 - 库伦模型相对简单的应力 - 应变关系进行计算，往往存在较大误差。

1.2 硬化土本构模型

为了得到更加准确的变形、内力结果，PLAXIS 高级本构模型——硬化土模型（HS）得到了广泛的重视和应用，其非线性应力 - 应变关系、刚度与应力的相关性、不同应力路径下的不同力学行为等特征，在开挖工程中表现良好，同时不断有国内的相关科研单位对其参数取值进行试验研究（可参见基坑工程手册第二版）。

HS 模型具有双曲线应力 - 应变关系，可表达土体的非线性变形过程，同时区分加载过程和卸载过程等不同应力路径下土体刚度的变化，其刚度参数用加载割线模量 E_{50} ，（一维）压缩切线模量 E_{oed} 和卸载 - 再加载模量 E_{ur} 表达。HS 模型的刚度参数如图 3 所示。关于 E_{oed} 的定义方法，可参见图 4，其余模量的定义方法见图 2。

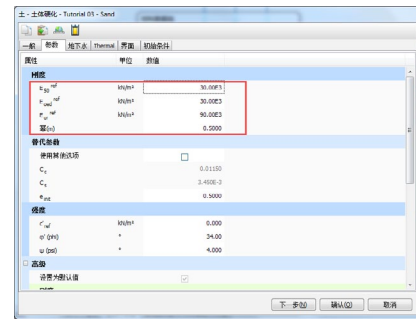


图 3 HS 模型的刚度参数

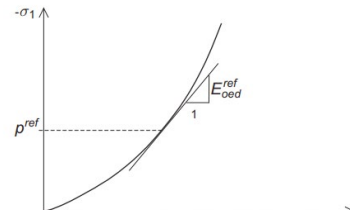


图 4 （一维）固结试验的应力 - 应变曲线

HS 模型的双曲线应力 - 应变关系如图 5 所示。一般可取 $E_{50} \approx E_{oed}$ ， $E_{ur} \approx 3E_{50}$ ，对于有些软土， E_{50} 可达到 $1 \sim 2E_{oed}$ ，而 E_{ur} 可达到 $3 \sim 10E_{50}$ ，需要根据当地经验取值。此时要注意我们由压缩系数得到的压缩模量 E_s ，国内有文献对相同应力水平下的 E_s 与 E_{oed} 做了试验统计研究，对于一般粘性土二者较为接近。

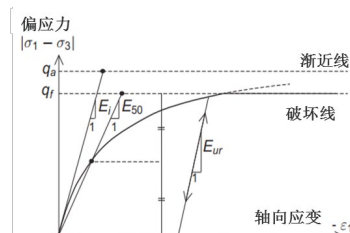


图 5 三轴排水试验中 HS 模型的双曲线应力 - 应变关系

此外，HS 模型还可以考虑刚度与应力水平的相关性，用幂值为 m 的如下函数表达，我们可以给出基准应力水平下的各个刚度参数值，比如 $p^{ref} = 100\text{kPa}$ ，再通过给定的幂值 m 即可得到任意应力水平下的实际模量值。 m 的取值范围一般为 $0.5 \sim 1.0$ ，对于砂土或硬土可取小值，软土可取大值。

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi + p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad (式 2)$$

选择不同本构模型对某基坑开挖支护工程进行 PLAXIS 数值分析，可见 MC 本构模型将得到较大的坑底回弹，导致坑外地表沉降呈现出墙顶附近隆起，远离墙顶位置处位移难以收敛，如图 6 所示。而 HS 本构模型的计算结果中，坑外地表沉降呈现出合理的沉降槽，并随着与墙顶位置距离增大而逐步收敛。

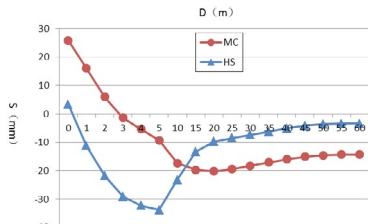


图6 坑外地表沉降曲线 (MC 模型 vs HS 模型)

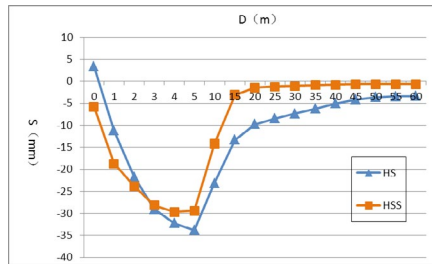


图9 坑外地表沉降曲线 (HS 模型 vs HSsmall 模型)

1.3 考虑小应变刚度的硬化土本构模型

研究表明，土体的刚度会随其应变增大而逐渐衰减，如图7所示。然而，我们所采用的土工试验指标，均是土试样处于较大应变水平时测试所得。从图中可以看出，一般工程中土体的应变水平要远小于土工试验中的应变水平，即在分析中我们采用的土体刚度参数较工程实际情况偏小。为此，PLAXIS 中的另一个高级本构模型——考虑小应变刚度的硬化土模型（HSsmall）也开始得到工程师的关注与研究。

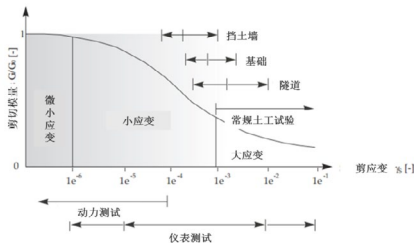


图7 土体的典型刚度（剪切模量）-（剪）应变关系

该模型中利用小应变剪切模量 G_0 和阈值剪应变 $\gamma_{0.7}$ （指剪切模量衰减到 $0.722G_0$ 时对应的剪应变）两个指标来表达土体刚度与应变水平的相关性，如图8所示。与HS模型中其他刚度参数相同，我们需要给定参考应力水平下的小应变剪切刚度值 G_{0ref} ，可由循环单剪试验或者动力试验等方法获取，也可按照经验取值，如国内一些文献中所做的试验统计研究。 $\gamma_{0.7}$ 的数量级一般为 10^{-4} 。

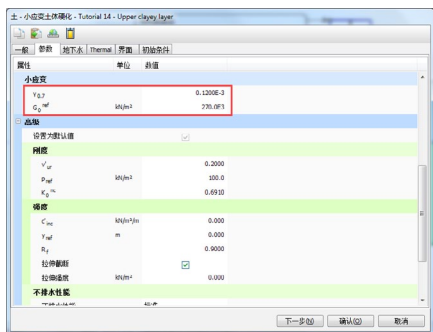


图8 HSsmall 模型的小应变刚度参数

对比HS模型和HSsmall模型的计算结果，如图9所示，可见选择HSsmall模型得到的坑外地表沉降曲线更加合理，具有更好的收敛性，据多个实际工程项目验证，后者的计算结果更接近实际监测结果。

2 土层排水类型与强度指标

土层的强度指标取值决定了土层塑性区域的发展及其对位移、结构内力的影响。具体的分析当中，要根据实际地层状况及施工状况来确定土层的排水行为，以得到更加符合实际的应力场及其变化规律。在黏土层中，超静孔隙水压力的发展对其变形和强度的影响尤其重要，需要仔细分析。

2.1 土层排水类型

土层在加卸载过程中，随着其应变与孔隙比的变化，孔隙水压力也会随之而改变。对于不同土体类型、不同工况，孔隙水的变化特征也不同，PLAXIS 中用排水类型来表达这种特征。一般的，排水类型主要分为排水、不排水两种，当然还包括针对无孔材料的第三种类型——非多孔材料，比如模拟混凝土材料，或者完整的新鲜基岩等。PLAXIS 土层材料排水类型选项见图10。

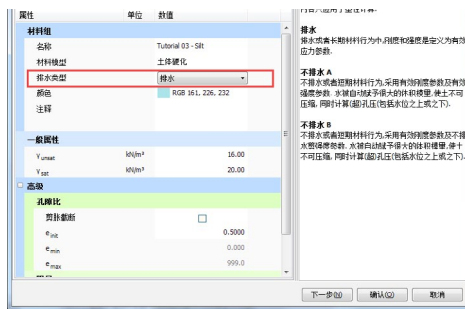


图10 材料排水类型选项

具体来讲，排水指加卸载时，土体孔隙水瞬间排出，不产生超静孔隙水压力。一般情况下，考虑排水的情况有：土层渗透性很强，加载速率很小，忽略短期施工效应等。不排水指加卸载时，土体孔隙水完全不能排出，产生超静孔隙水压力。一般情况下，考虑不排水的情况有：土层的渗透性很弱，加载速率很大，考虑短期施工效应等。非多孔是指材料无孔隙，其内部不存在任何水压力（静水压力和超静水压力）。一般情况下，非多孔与线弹性本构模型结合使用来代表结构材料，如混凝土。不排水情况下计算得到的超静孔压分布如图11所示。

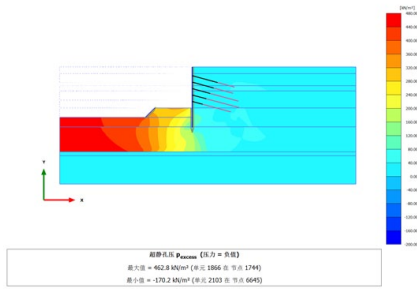


图 11 基坑开挖时黏土地基中的超静孔压

需要注意的是，土体排水类型确定孔隙水是否排出以及是否产生超静孔压，均是假定了上文所述的几种时间效应条件，在孔压计算过程中并未涉及与土层实际透水性能相关的参数及时间指标。因此，该选项仅适用于塑性计算、安全计算和动力计算。而对考虑时间效应和土层实际透水性能指标的固结计算和流固耦合计算，孔压的变化需根据材料的渗透性参数（如渗透系数等）及时间参数来确定，此时材料的排水类型设置则无效。

2.2 土体强度指标

土层的应力分析主要使用有效应力法，特殊情况下也可采用总应力法。上述几种本构模型，均采用摩尔-库伦强度准则，在有效应力分析方法中，其对应的强度指标便是有效强度指标 c' 和 ϕ' ，此时的土体抗剪强度为与应力水平相关的计算值。有效强度指标一般由三轴排水试验测定，如图 12 所示。上述排水类型选择排水或不排水 A 时，对应的强度指标便是有效强度参数。

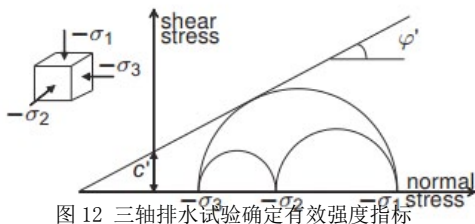


图 12 三轴排水试验确定有效强度指标

对于软黏土层，当其有效强度指标难以测定时，也可采用不排水强度指标 s_u ，代表土的总抗剪强度，即土的抗剪强度为已知的输入值。此时，土体的破坏准则由摩尔-库伦强度准则退化为 Tresca 强度准则，如图 13 所示。不排水强度指标一般由三轴不排水试验测定，也可采用原位十字板剪切试验等方法测定。上述排水类型选择不排水 B 或不排水 C 时，对应的强度指标便是不排水强度参数。注意不排水 C 对应总应力分析法，此时刚度参数也需要采用不排水指标。

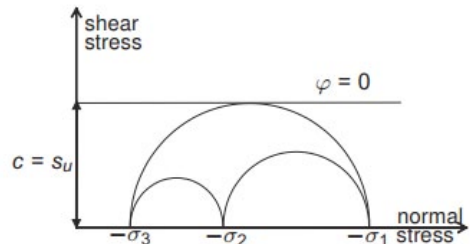


图 13 三轴不排水试验确定不排水强度指标

如果要考虑软黏土层抗剪强度随应力水平的变化（主要指随土层埋深增大其强度的提高），则可定义高级选项中关于强度变化的函数，如式 3 所示。

$$s_u(y) = s_{u,ref} + (y_{ref} - y)s_{u,inc} \quad (y < y_{ref}) \quad (式 3)$$

对于遵循摩尔-库伦强度准则的本构模型，其强度指标取值应符合相应的试验要求，此时需要特别注意有效应力指标（三轴排水试验）与我们在传统设计方法中按照经验使用的直剪试验指标或三轴固结不排水试验指标之间的区别，二者在试验条件和参数取值方面均存在较大差异，这对分析结果有着显著的影响。

3 小结

基坑开挖是一个相对复杂的综合性工程，在数值分析中我们要注重对土体本构模型及其参数取值的仔细研究，这是关系到分析结果合理与否的关键因素。能够考虑土体应力路径、应力水平、应变水平对刚度影响、并反映非线性应力-应变关系的高级本构模型 HS 模型和 HSsmall 模型应得到重视和应用，对其涉及各个参数的取值问题，应结合现有勘察资料中的土工试验数据、原位试验数据、以及地方工程经验来获取，必要时可利用 PLAXIS 软件中的土工试验工具、参数敏感性分析和参数优化工具进行土工参数的研究和确定。同时，利用现场监测数据进行参数反分析也是一种非常实用、有效的方法。

有关 PLAXIS 基坑开挖分析的更多资料，请关注筑信达 (www.cisec.cn) 网络课堂、知识库，以及案例教程：

- > 关于摩尔-库伦本构模型的刚度参数取值问题
- > PLAXIS 在基坑工程中的应用
- > 材料的排水类型与渗透性
- > 摩尔-库伦本构模型的强度参数与排水类型
- > 超静孔隙水压力的产生和影响

