

# PLAXIS 基坑开挖支护模拟要点解析（二）

筑信达 章延平

上期文中主要就基坑开挖支护模拟中的土层模拟问题进行了介绍，包括土体本构模型选择、模型参数及其取值、土层排水类型等问题。本文继续对基坑支护结构模拟、基坑降水开挖及施工过程模拟等问题进行讨论。

## 1 支护结构模拟方法

基坑支护结构的模拟，主要分为挡土结构与支撑体系（包括内支撑系统，锚杆系统等）。

### 1.1 挡土结构模拟

挡土结构的形式多样，常见的有排桩、地连墙、钢板桩、型钢水泥土墙等，一般我们使用板单元进行等效模拟，针对不同断面形式的挡土结构，主要根据其刚度等效的原则获得板单元的等效模量和等效厚度。由于板单元实际为具有一定厚度的均匀板壳类构件（等厚度矩形截面），因此其等效刚度与等效厚度存在式 1.1 的关系：

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad \text{式 1.1}$$

采用等效刚度方法计算时，往往很难使各个方向的刚度完全等效，因此板单元等效模量和等效厚度的确定便取决于所模拟结构主要受力方向。比如，圆形竖井壁主要考虑轴向受力，则主要按照其轴向刚度等效来计算等效厚度；而矩形基坑挡墙以受弯为主，则主要按照其抗弯刚度等效来计算等效厚度。

对于具有特殊截面形状的挡土结构构件，比如型钢桩、钢板桩、T形板桩等，还需要考虑其刚度的各向异性问题，如图 1.1~图 1.2。在模拟上述截面形式的挡土结构时，有一些需要考虑各向异性刚度的典型应用，如圆形基坑挡墙或圆形竖井壁的环向刚度与竖向刚度差异，矩形或多边形基坑挡墙沿其竖向深度与平面长度方向弯曲刚度的不同等。

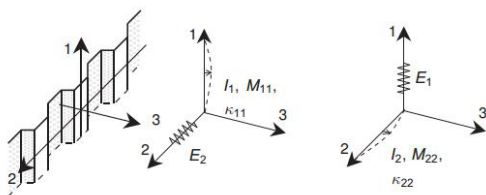


图 1.1 钢板桩各向异性刚度

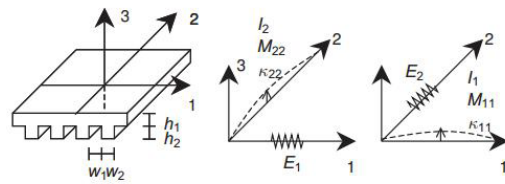


图 1.2 T形板桩各向异性刚度

由上述可知，对于矩形截面且连续分布的挡土结构（本质上与板单元类似），比如地连墙，可直接取其材料模量及构件厚度作为板单元的参数值；对于不符合该条件的挡土结构，比如排桩、钢板桩等，则不可直接取其实际厚度和模量作为板单元参数值，此时需要考虑排桩的截面形式和桩间距、钢板桩的截面形式和厚度变化。因此，在确定好刚度等效方向之后，可以首先确定出等效厚度，再据其推导出各个方向的等效模量。此时，等效厚度定义为构件在垂直主轴方向、单位宽度的横截面面积。

确定了挡土结构的等效厚度，便可计算出其平均分布自重，即单位面积（构件所在平面内）的自重，为构件材料重度与其厚度的乘积  $\gamma \times d$ ，需要注意的是，此处的  $\gamma$  也是等效计算值。此外，在定义板单元自重时需要注意以下事实：一般的，实际工程中的土工构件都具有一定厚度和体积，但板单元仅为线单元（2D）或面单元（3D），本身不占体积，因此位于土层内部的板单元重量与相应位置的土体重量产生“重叠”。为了准确计算土工结构的自重荷载，需要从结构材料重度中减去土体材料重度，作为程序中的输入参数。对于部分位于土体内部的土工结构，应按照体积比例对材料重量参数进行折减。

用于模拟挡土结构的板单元以承受横向荷载为主，但在有些情况下也承受竖向荷载，比如锚杆力的竖向分量，冠梁或内支撑（栈桥）上的临时施工荷载等，此时需要考虑挡土结构的竖向承载力问题。挡土结构的竖向承载力主要由侧摩阻力和端承力组成，端承力与挡土结构的底部横截面面积相关。而板单元本身为零厚度单元，无法提供端承力，端部在竖向荷载下可能发生“刺入式”破坏。为此，可



以选择“考虑板端承力”选项来避免上述问题，该选项的意义在于使板单元底部以其等效厚度为直径的区域内，不考虑土层的塑性特性（即该部分土层按弹性体计算）。需要注意的是，对于钢板桩这类本身非常薄的构件，可以忽略其端承力。板单元的材料属性见图 1.3~图 1.4。

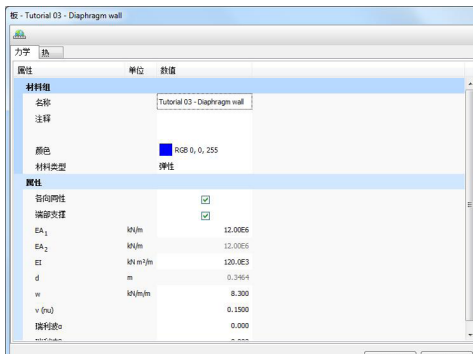


图 1.3 2D 板单元的材料属性

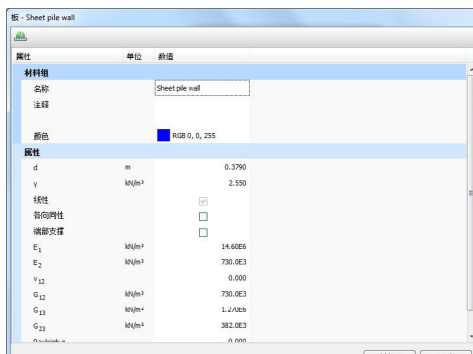


图 1.4 3D 板单元的材料属性

## 1.2 土 - 结构相互作用模拟

地下结构分析中，土与结构相互作用的考虑是不可或缺的，即土与结构的接触关系问题。在 PLAXIS 当中，我们使用界面单元模拟挡土结构与周围土体的相互作用。如图 1.5 所示，如果未定义界面单元，结构单元与土体单元的连接位置共用一个节点（左侧），二者位移协调，无法表达结构与土之间的相对位移（如滑动或裂隙）；而定义界面单元之后，在结构单元与土体单元接触位置将创建一系列节点对（右侧），在每一对节点中，一个属于土体单元，一个属于结构单元。在节点对之间，用三个不同方向的理想弹塑性弹簧代表土 - 结构之间的相对滑动和相对张拉。

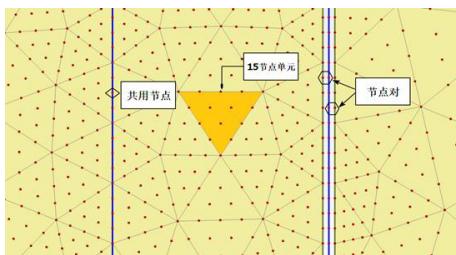


图 1.5 界面单元模拟结构 - 土相互作用

界面单元的力学属性，可以使用对周围土层力学参数值进行折减的方法计算（软件默认方法），折减系数为  $R_{inter}$ ，该折减系数在土层材料属性中定义，如图 1.6 所示。如此，结构单元穿越多层土的情况下，每层土内的界面单元属性均不同。

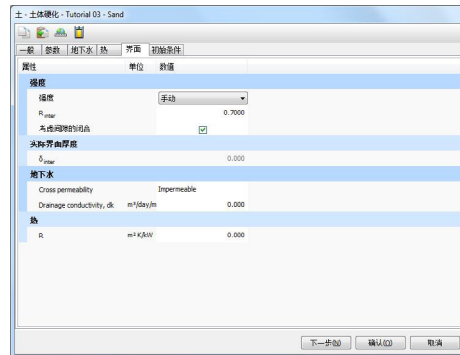


图 1.6 界面单元折减系数

界面单元折减系数  $R_{inter}$  的取值范围在 0~1 之间，该值取决于结构和土层的接触特征（即接触面粗糙程度），无相关经验和数据的情况下，可按照 2/3（约 0.67）输入。界面单元的强度指标按照式 1.2 计算，而刚度参数则与按照式 1.3 计算：

$$c_i = R_{inter} c_{soil}$$

$$\tan \varphi_i = R_{inter} \tan \varphi_{soil} \leq \tan \varphi_{soil} \quad \text{式 1.2}$$

$$\psi_i = 0^\circ \text{ for } R_{inter} < 1, \text{ otherwise } \psi_i = \psi_{soil}$$

$$E_{oed,i} = 2 G_i \frac{1 - \nu_j}{1 - 2 \nu_j}$$

$$G_i = R_{inter}^2 G_{soil} \leq G_{soil} \quad \text{式 1.3}$$

$$\nu_j = 0.45$$

可见，界面单元的强度和刚度会按照  $R_{inter}$  同时折减。然而，在某些情况下如果需要单独控制界面单元的材料属性，比如考虑界面刚度不变而强度折减的情况，则可选择界面的属性模式为“自定义”，如图 1.7 所示，同时为界面单元创建单独的材料属性，其方法与创建土层属性完全相同（注意此时  $R_{inter}=1$ ）。



图 1.7 “自定义”界面单元材料

界面单元模拟挡土结构与土层之间的相互作用，则界面单元应力可以用来表达挡土结构两侧的接触应力，如作用在挡土结构上的土压力，见图 1.8 所示。



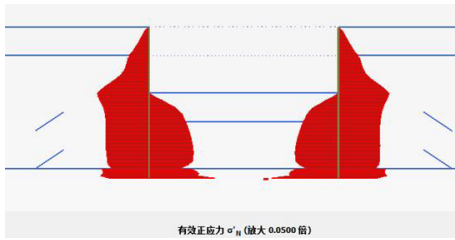


图 1.8 挡土结构的接触应力

### 1.3 支撑体系的模拟

对于基坑的内支撑系统，一般使用锚杆单元（包括两点间锚杆 n2n anchor 和一端固定锚杆 fixed anchor）或 3D 梁单元（beam）模拟；而锚杆系统则使用两点间锚杆（n2n anchor，锚杆自由段）和嵌入式梁单元（embedded beam，锚固段）组合来模拟。

PLAXIS 结构单元中的两种“锚杆”单元，实际上属于弹簧类力学构件，即仅可承受拉、压荷载，不可承受弯、剪荷载的结构单元。显然，用锚杆单元模拟锚杆自由段是非常恰当的，另外，在仅考虑内支撑轴向受力和变形的情况下，使用锚杆单元也是合适的。锚杆单元参数简单，只需定义其轴向刚度 EA 即可（2D 锚杆单元还需要定义间距）。如图 1.9 所示。

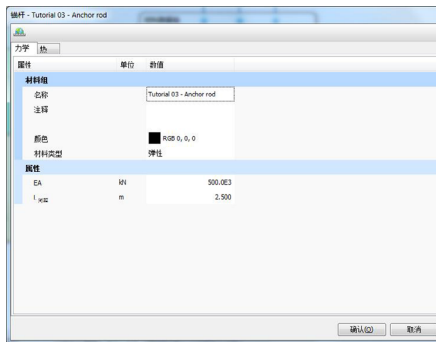
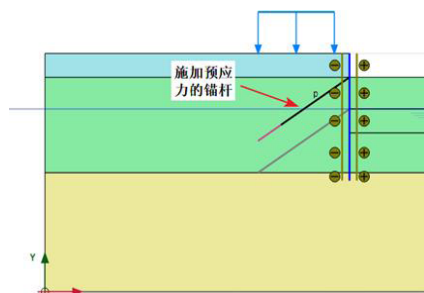
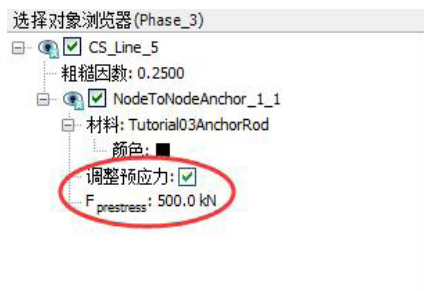


图 1.9 锚杆单元属性



(a) 锚杆施加预应力



(b) 锚杆预应力值定义

图 1.10 构件的预应力施加

需要注意的是，对施加预应力的构件（包括预应力锚杆、预应力内支撑），只能用锚杆单元来模拟。预应力的施加及其数值定义如图 1.10 所示。

对于需要考虑弯曲和剪切变形的内支撑构件，则可使用 3D 梁单元模拟。3D 梁单元模拟的基坑内支撑系统（包括冠梁、腰梁、内支撑等）及其材料属性见图 1.11~1.12。

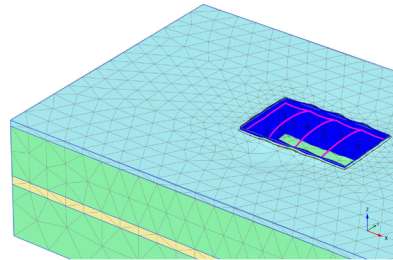


图 1.11 3D 梁单元模拟的内支撑系统

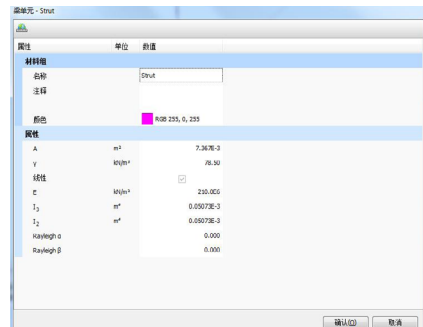


图 1.12 3D 梁单元的材料属性

基坑支护的锚杆系统，其锚杆承载力主要依靠锚固段与周围土层间的侧摩阻来提供，而 PLAXIS 中的嵌入式梁单元由梁单元与接触单元组成，接触单元代表结构与土的相互接触关系。该接触单元由弹塑性弹簧组成，可以计算锚杆锚固段与周围土层之间的弹性变形和塑性滑动。弹簧刚度与周围土体的剪切刚度相关，塑性强度由用户定义或按照周围土体强度确定。接触单元的计算原理见图 1.13 所示。

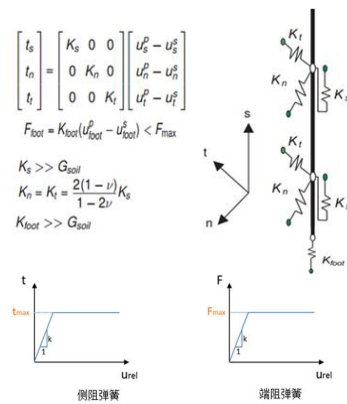


图 1.13 嵌入式梁单元的接触单元

接触单元强度的定义既可以为输入值，也可以为根据周围土层强度得到的计算值（折减系数 Rinter）。一般在具有试验数据或工程经验的情况下，

可以直接输入接触单元的强度参数值，如此可得到锚杆的极限承载力，见图 1.14。除了定义接触单元参数之外，嵌入式梁单元本身具有梁单元的性质，因此该单元的材料参数分为两部分，如图 1.15 所示。

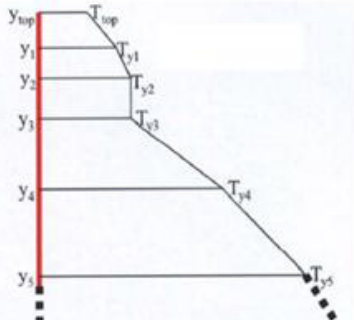


图 1.14 接触单元强度所定义的极限承载力

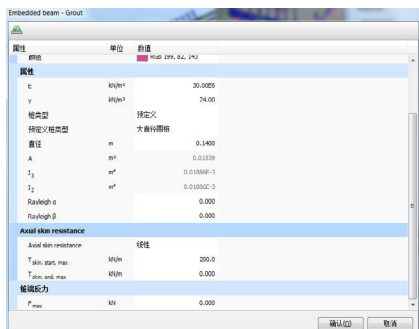


图 1.15 嵌入式梁单元的材料参数

对于复杂的基坑支护体系建模，可以综合采用 PLAXIS 软件中的命令行、拉伸、阵列、分解、合并等工具，也可以采用 PLAXIS 命令流快速建模，或者利用 CAD 图纸快速导入 PLAXIS 3D 来创建模型，如图 1.16 所示。

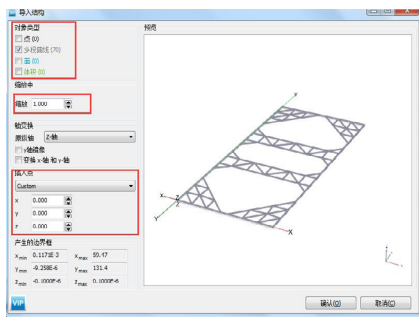


图 1.16 内支撑 CAD 文件导入 PLAXIS 模型

## 2. 基坑降水模拟

基坑开挖过程分析的另一个重要问题是地下水的控制。一般在高水位地区，都需要在开挖过程中同时降低坑内的地下水至坑底以下，地下水位的这种变化对地层位移及结构变形、内力等影响也比较明显。除了少数较浅基坑的明排降水之外，大部分深基坑均采用截水帷幕进行疏干降水。对于挡土结构外侧的截水帷幕，一般不作为受力结构参与分析，可以利用界面单元的透水性能来实现其截水性能，界

面单元透水性能设置及其所表达的结构体隔水效应见图 2.1~图 2.2。



图 2.1 界面单元渗透性定义

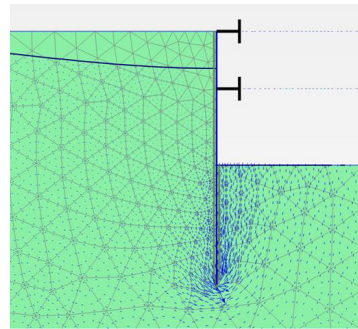


图 2.2 界面单元模拟的截水帷幕效应

### 2.1 封底式截水帷幕

对于封底式截水帷幕，我们一般认为坑内疏干降水对坑外水位的影响很小，因此可以直接定义基坑内外水位差，采用静水压力计算方法（孔压计算类型选择“潜水位”）得到挡土结构两侧的孔压分布。具体来讲，封底式帷幕底部进入弱透水层（相对隔水层），隔断坑内外水力联系，此时坑底含水层内孔压按照坑内低水位计算，而下卧弱透水层内孔压则可按线性插值计算。需要注意的是，此时已开挖土层必须“疏干”，即坑内为“干”开挖。

不同土层内孔压分布的计算，主要通过 PLAXIS 中土类组的孔压定义来实现，即选择基坑内相应位置的土层类组，在选择浏览器中修改其水力条件。比如坑底以下土层可将默认的“全局水位”（指地层初始的地下水位，与坑外水位一致）修改为“水头”，其水头值则对应坑内低水位位置（比如坑底高程，或者坑底以下 0.5m 高程），如图 2.3 所示。同样的，坑底下卧弱透水层、已开挖土层的水力条件则可分别修改为“内插”和“干”。坑内各土层的水力条件设置，如图 2.4 所示。

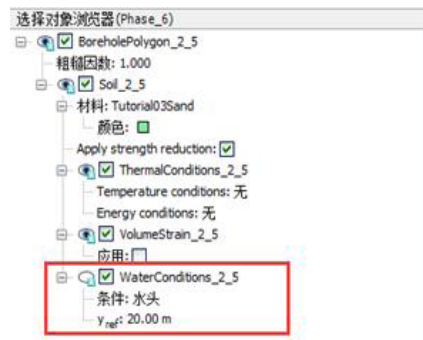


图 2.3 土层类组水力条件

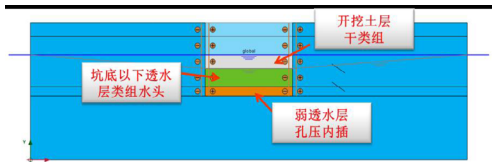


图 2.4 封闭式帷幕基坑降水的水力条件

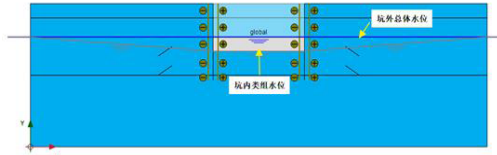


图 2.8 通过“干类组”定义的渗流边界条件

## 2.2 悬挂式截水帷幕

对于悬挂式截水帷幕，其底部并未进入相对隔水层，基坑内外的含水层存在水力联系，依然需要通过坑内疏干降水来降低坑内水位，此时一般需要计算渗流场（孔压计算类型选择“稳态地下水渗流”）。渗流计算时，孔压的计算方法不同于静水压力方法，需要首先确定渗流场，再根据渗流场确定孔压的分布。渗流场的确定主要与土层渗透性及模型水力边界条件相关，而与土层类组的孔压定义（如上节所述的方法）无关。

地下水渗流计算的水力边界条件对应到实际基坑工程周围和坑内的地下水分布状态。基本的水力边界条件为：坑外模型边界处定义为原地下水位，坑内开挖区域定义为坑底水位，形成坑内外的地下水水位差。在 2D 模型中，可以利用水位线来直接定义该水力边界条件，如图 2.5 所示。但要注意此时所定义的水位线仅代表水力边界条件，不同于实际的地下水渗流浸润线。地下水经过帷幕底部绕流的渗流场分布见图 2.6。

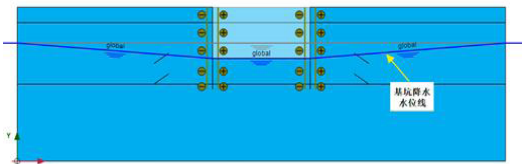


图 2.5 水位线定义基坑降水条件

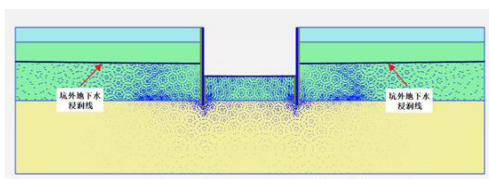


图 2.6 基坑降水渗流场及地下水浸润线

在 3D 模型中可以利用“疏干”已开挖土类组、或者在坑内定义面渗流边界等方式得到同样的对应坑内外水位差的水力边界条件，见图 2.7~图 2.8。



图 2.7 坑内开挖土层的疏干设置

## 2.3 基坑降水对地层位移的影响

在需要评估由于基坑降水引起地层位移的情况下，我们要考虑土层“内部”的降水问题，此时可以利用 PLAXIS 中的“井”和“排水体”工具对坑底地下水水位进行“预降水”。井单元作为模型内部的一种水力边界条件，需要指定其抽水流量及最大降水深度，如图 2.9 所示。在考虑降水过程对地层位移影响的情况下，甚至需要计算非稳定渗流场。通过基坑内的预降水渗流计算，便可得到降水对地层位移的影响，如图 2.10 所示。

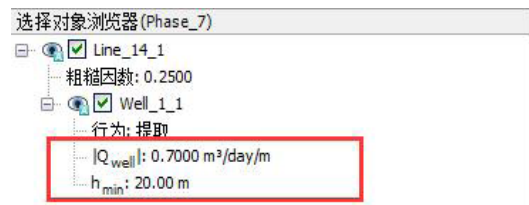


图 2.9 降水井流量及水头定义

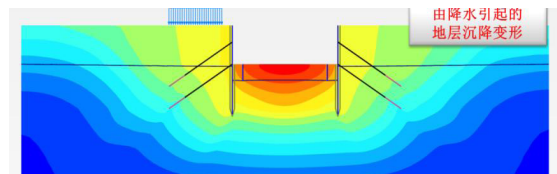


图 2.10 降水对地层位移的影响（抽水井）

## 3. 开挖过程及工况

基坑开挖是一个动态过程，在整个开挖过程中荷载及支护结构的受力体系处于不断变化之中，因此，一般讲信息化施工，就是对施工过程的监控、反馈及修正等。在有限元模型中模拟基坑的整个开挖、支护过程，就是将每一个施工阶段对应的工况反映到模型的变化当中，得到每一个施工步的分析结果，以及连续施工情况下整个模型的系统响应。对应到 PLAXIS 软件当中，主要是对每一个施工阶段进行开挖土层的冻结、相应支护结构的激活（包括接触关系）、荷载的激活与冻结、土层水力条件的修改等，如果考虑坑底土层加固等工程措施，还需要修改对应土层的材料属性。总之，基坑开挖分析是一个施工过程的模拟，必须注重施工顺序对整体工程系统的影响，图 3.1~图 3.2 表示了两个连续的施工阶段分析结果。

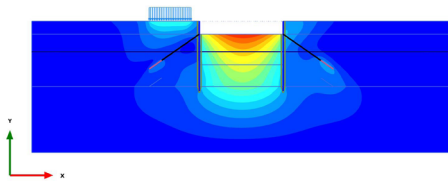


图 3.1 锚杆安装施工步

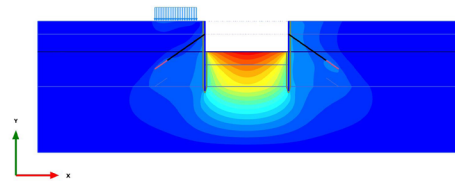


图 3.2 开挖下层土施工步

#### 4. 小结

基坑支护结构除了要达到快速建模之外，还要注重简化结构的主要受力体系，采用恰当的结构单元，以达到高效、准确的求解分析。同时，对地下水控制的合理分析、孔隙水压力的准确评估，也关系到土层力学行为及结构受力情况的变化。为此，本文对挡土结构、结构与土层相互作用、内支撑系统及锚杆系统的模拟做了系统性介绍，并就基坑降水的水力条件问题做了讨论。此外，在施工过程模拟当中，要注意实际施工过程与模型分析工况的对应和吻合，以利用数值分析结果对施工过程给予比较准确的指导。

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

- 板单元的材料重量参数如何计算
- PLAXIS 中结构 - 土相互作用的模拟
- 界面单元的材料属性
- 挡土结构两侧主被动区土压力如何输出
- 锚杆单元及其应用
- 锚杆预应力的施加
- 桩单元与土体的接触关系及承载力定义
- 基坑降水开挖的水力条件
- PLAXIS 渗流分析中结构体的透水性能定义方法
- 渗流分析中定义的水位线与渗流浸润线相同吗

## PLAXIS 分步施工中常用结构对象及菜单的介绍

筑信达 孙立超

在 PLAXIS 软件中，提供了丰富的结构单元和菜单，可以在分步施工阶段中模拟不同土工结构物以及不同计算类型和不同计算工况。只有对这些结构单元的定义和菜单有一个清晰的认识，才能不会由于错误使用某些菜单而导致错误的计算结果。本节主要介绍分步施工阶段中常用结构对象的定义和常用菜单的概念。

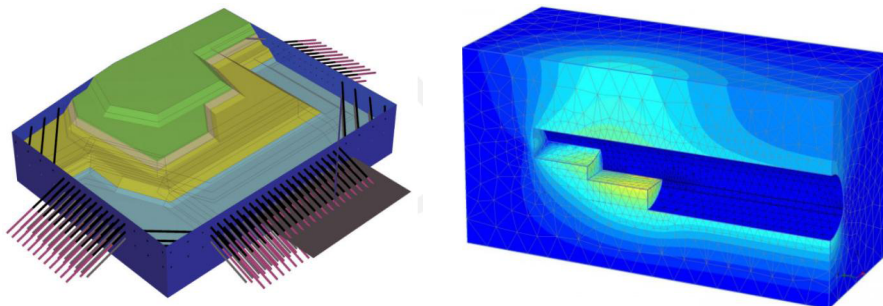


图 1 分步施工