

## 土的排水、不排水特性及排水固结过程模拟

筑信达 郭晓通

土的一个重要特性是孔隙水的存在。根据有效应力原理，饱和土体内任意一点的总应力由土骨架和孔隙水共同承担，所以孔隙水显著影响土体在荷载作用下的响应。

PLAXIS 中提供了多种方式来描述在该响应过程中土骨架-孔隙水的相互关系。其中，塑性计算、动力计算与安全性计算中使用一种简化的方式，即选择分析一个排水效应或不排水效应；固结计算根据土体的渗透特性来描述时间相关的排水固结过程，可以用来分析超静孔隙水压力的消散问题；最高级的选项是完全的流固耦合计算，用于描述土体在任一瞬时状态下的渗流场与应力场。

### 1. 土的排水与不排水特性

#### 1.1 土体的排水类型

排水，即在外荷载作用下土体中的水可以很快排出，不会产生超静孔隙水压力。不排水，即在外荷载作用下土体中的水不能及时排出，引起孔隙水压力增加，产生超静孔隙水压力。排水、不排水特性的选择主要与土体类型和分析内容有关，排水主要适用于渗透特性好的土层（如砂土），也被用于荷载施加速率慢或仅考虑长期效应的分析；不排水主要适用于渗透特性差的土层（如黏土），也被用于荷载施加速率快或需要考虑短期效应的分析。例如，分析某路基填筑后地基土的长期沉降时，地基土的排水类型应选择排水。地震作用下，砂土中的孔隙水无法及时排出，产生超静孔隙水压力。因此，在采用 UBC3D-PLM 本构模型计算砂土在循环荷载下的液化行为时，排水类型应选择不排水。

土的排水与不排水特性可以通过材料设置窗口中的排水类型选项来定义，如图 1.1 所示。



图 1.1 PLAXIS 中的排水类型选项

排水：孔隙水可以及时排出，土体内不会产生超静孔隙水压力。

非多孔：材料中无孔隙或裂隙，如混凝土。

不排水 A：采用有效刚度参数 ( $E'$ ,  $\nu'$ ) 及有效强度参数 ( $c'$ ,  $\phi'$ )，水被赋予很大的体积模量，使土难以压缩，同时计算超静孔隙水压力值。不排水 A 选项可以在除霍克-布朗模型与节理岩体模型外所有本构模型中使用，也是 PLAXIS 中最常用的不排水选项。在不排水 A 中，不排水抗剪强度  $S_u$  是一个计算结果，而非输入参数，用户可以通过在后处理中应力菜单栏下选择动抗剪强度选项来查询并检查该数值，所以不排水 A 选项可以用来分析固结过程中土体抗剪强度的变化。

在不排水 A 选项下，土体遵循摩尔-库伦屈服准则，土压力系数  $K_0$  值默认为  $1 - \sin\phi'$ 。需要注意的是，排水类型选择不排水 A 时，用户必须输入材料刚度与强度参数的有效值。此外，当使用不排水 A 时，剪胀角为正值可能会引起不符合实际情况的孔隙吸力和抗剪强度；剪胀角为负值可能会引起不符合实际情况的孔压和液化行为。因此选择不排水 A 时建议将剪胀角  $\psi$  设置为 0。

不排水 B：采用有效刚度参数 ( $E'$ ,  $\nu'$ ) 及不排水抗剪强度参数  $S_u$  ( $\phi = 0$ )，水被赋予很大的体积模量，使土难以压缩，同时计算超静孔隙水压力值。与不排水 A 的不同点在于，不排水 B 中抗剪强度值  $S_u$  是输入参数。在计算过程中，土体的抗剪强度是不变的，不会在计算中实时更新。该选项可以在摩尔-库伦模型 (MC)、硬化土模型 (HS)、小应变土体硬化模型 (HSS)、NGI-ADP 模型中使用。在不排水 B 选项下，土体的破坏由最大剪应力决定，即遵循 Tresca 屈服准则，土压力系数  $K_0$  的默认值为 0.5。需要注意的是，如果在 HS 或 HSS 本构模型中使用不排水 B，则土体的刚度不再依赖于应力，模型不存在压缩硬化现象。

不排水 C：采用不排水刚度参数 ( $E_u$ ,  $\nu_u$ ) 和不排水抗剪强度参数  $S_u$  ( $\phi = 0$ )，孔隙水压力的计算包含在总应力计算中，不单独进行计算。此时，孔隙水压力  $P = 0$ ，有效应力  $\sigma' =$  总应力  $\sigma$ ，不区分有效应力与孔隙水压力。该选项可以在线弹性模型、

摩尔-库伦模型、NGI-ADP 模型中使用。不排水 C 选项中土体的破坏也由最大剪应力决定，遵循 Tresca 屈服准则，土压力系数 K0 的默认值为 0.5。

1.2 不排水特性的计算及控制参数

PLAXIS 中采用如下式所示的有效应力原理表达方式，土体内的总应力  $\sigma$  可分为有效应力  $\sigma'$  和活动孔隙水压力  $P_{active}$ ，由于水不承受任何剪应力，因此有效剪应力等于总剪应力。

$$\underline{\sigma} = \underline{\sigma'} + mP_{active} \quad m = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$$

活动孔隙水压力  $P_{active}$  为孔隙水压力  $P_w$ 、有效饱和度  $S_{eff}$  与孔隙压力系数  $\alpha_{Biot}$  的乘积。孔隙压力系数  $\alpha_{Biot}$  是一个表征固体颗粒可压缩性的参数，如果视土颗粒为不可压缩固体，则  $\alpha_{Biot}=1$ ：

$$P_{active} = \alpha_{Biot} S_{eff} P_w$$

孔隙水压力  $P_w$  又可划分为稳态孔隙水压力  $P_{steady}$  和超静孔隙水压力  $P_{excess}$ 。其中，稳态孔隙水压力即静孔隙水压力，是地下水位以下土体中的静态孔隙水压力或稳态渗流计算的土体中的孔隙水压力。

$$P_w = P_{steady} + P_{excess}$$

由于稳态孔隙水压力不随时间变化，所以其速率为 0，总孔隙水压力的速率等于超静孔隙水压力的速率：

$$\dot{P}_w = \dot{P}_{excess}$$

在不排水分析中，超静孔隙水压力速率的计算公式为：

$$\dot{P}_{excess} = \frac{\alpha_{Biot} \dot{\epsilon}_v}{n/K_w + (\alpha_{Biot} - n)/K_s} \quad C_s = \frac{1}{K_s} \quad C_w = \frac{1}{K_w}$$

式中，

$K_w$  和  $K_s$  分别为水和土颗粒的体积模量， $n$  为土的孔隙率， $\epsilon_v$  为土的体积应变率。 $K_w$  可以由土的剪切模量、不排水泊松比  $\nu_u$  和有效泊松比  $\nu'$  求得，如下式所示：

$$K_w = \frac{2G}{3} \left( \frac{1+\nu_u}{1-2\nu_u} - \frac{1+\nu'}{1-2\nu'} \right)$$

同时 PLAXIS 中引入了孔隙压力系数 B (Skempton-B)，用户可以使用 B 参数进行不排水特性的表达。B 与  $\nu'$  和  $\nu_u$  有如下关系：

$$B = 1 - \frac{(1+\nu')(1-2\nu_u)}{(1+\nu_u)(1-2\nu')}$$

土层的材料参数选项卡中提供了这些参数的输入可用于调整土层的不排水性能。如图 1.2 所示，不排水性能共分为三种，分别是标准、手动-刚度依赖  $K_w$  和手动-常量  $K_w$ 。

默认情况下，不排水性能为标准，不排水特性参数不可手动修改。此时，土体的固体材料（即颗粒）不可压缩 ( $\alpha_{Biot}=1$ )，Skempton-B 值为 0.992979，不排水泊松比为 0.495，水的参考体积模量  $K_{w,ref}/n$  为  $90 \times 10^{12}$ 。

“手动刚度依赖  $K_w$ ” 选项中，土体的固体材料同样默认为不可压缩 ( $\alpha_{Biot}=1$ )，用户可以手动指定 Skempton-B 的值。在最高级的第三种选项“手动-常量  $K_w$ ” 中，用户需输入  $K_w$  值，也可以考虑固体材料的可压缩性，指定不等于 1 的  $\alpha_{Biot}$  值。

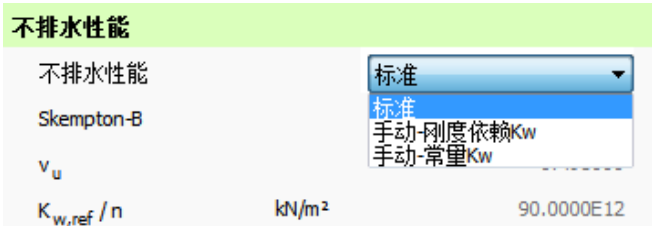


图 1.2 土的不排水性能调整

2. 土的排水固结过程分析

PLAXIS 中的塑性计算通常只用于进行弹塑性变形分析，仅在软土蠕变模型中考虑时间相关的效应，且在该分析中不考虑孔隙水压力随时间的变化。土体的排水固结过程需要通过固结计算或流固耦合计算来完成。

2.1 PLAXIS 中的排水固结理论

PLAXIS 中的固结控制方程遵循 Biot 耦合固结理论 (Biot, 1956)，一般称该理论为真三维固结理论。

假设一均质同向的饱和土单元体  $dx dy dz$ ，体力只考虑重力，以土为隔离体 (土骨架+孔隙水)，渗流遵循达西定律，土骨架遵循弹性假设，则将平衡方程、有效应力原理、土颗粒的本构方程、几何方程、连续性方程联立得到 Biot 三维固结微分方程：

$$\begin{cases} -G\nabla^2 u^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G\nabla^2 v^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G\nabla^2 w^s - \frac{G}{1-2\nu} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \\ -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u^s}{\partial x} + \frac{\partial v^s}{\partial y} + \frac{\partial w^s}{\partial z} \right) + \frac{K}{\gamma_w} \nabla^2 u = 0 \end{cases}$$

上式中， $u$  为超静孔隙水压力， $K$  为渗透系数， $\gamma_w$  为水的容重。

PLAXIS 中的固结计算主要用于分析超静孔隙水压力的消散问题。固结计算以超孔压为计算目标，可以计算指定时间内的固结状态及达到某一固结状态所需要的时间。

与固结计算相比，流固耦合计算可以考虑瞬态渗流场与应力场的耦合问题。如果用于固结计算的模型中存在时间相关的渗流边界条件，则只能采用流固耦合计算。与固结计算不同的是，流固耦合计算直接计算总孔压，且流固耦合计算中必须考虑非饱和土引起的孔隙吸力。此外，本文 1.2 节介绍的不排水特性中的高级参数同样会影响固结计算与流固耦合计算结果。

2.2 固结计算的分类

1、按荷载类型分类

固结计算按荷载类型的不同可分为分步施工计算、指定固结度的计算和指定最小超孔压的计算三种。如图 2.1 所示：



图 2.1 固结计算中的荷载类型

(1) 分步施工

分析指定的时间后模型中土层的固结情况，在该模式下，时间间隔为输入值，荷载随着时间步线性增加达到指定值。

(2) 指定固结度的计算

常在分步施工模型之后进行计算，该荷载类型下不可改变模型中的激活对象，分析达到某一固结度所需的时间及变形情况。

(3) 指定最小孔压的计算

常在分步施工模型之后进行计算，该荷载类型下不可改变模型中的激活对象，分析模型中的超静孔隙水压力最大值达到某个数值 (输入值) 所需的时间及变形情况。

通常情况下，用户可以采用分步施工的荷载类型来计算指定时间内模型中超静孔隙水压力及应力场、位移场的变化情况；也可以采用指定固结度或指定孔压的方式计算特定的固结状态及所需时间。

2、按固结方式分类

固结计算按固结方式还可分为常规固结与真空固结。真空预压法是在需要加固的软土地基表面先铺设砂垫层、埋设垂直排水管道，再用不透气的封闭膜使其与大气隔绝，密封膜端部进行埋压处理，通过砂垫层内埋设的吸水管，使用真空泵或

其他真空手段抽真空，使其形成膜下负压，以增加地基土的稳定性、减小沉降的地基处理方式。由于 PLAXIS 不考虑孔隙气压力，但用户可采用水头边界条件建立真空固结的计算模型。通常，用户可以选择创建排水线单元来模拟真空预压法中的塑料排水板，排水线的行为选择真空，用排水线上的水头值  $h$  来近似描述真空吸力，如图 2.2 所示。 $\gamma_w h$  即为真空吸力值。

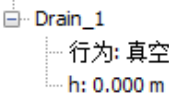


图 2.2 排水线单元中的真空排水选项

3. 排水固结典型案例分析

图 3.1 为一路堤的填筑及固结沉降分析的二维平面应变模型。分析目标是分析场地的最终沉降量和完成 90%固结所需的时间。共设置两个工况。

- 工况 1：天然固结
- 工况 2：塑料排水板排水固结法

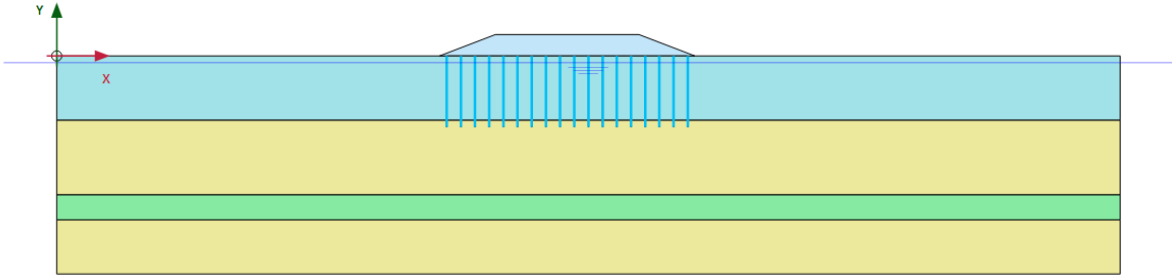


图 3.1 案例模型图

首先，指定模型计算类型为平面应变问题，节点类型为 15 节点。  
 随后进行场地土层与路堤的几何建模与参数输入。土层共分为三层，表层土为淤泥质黏土，下伏土层为中砂，中间夹一层薄层粉质黏土，地下水水位为-0.9m。  
 然后，根据各土层特性，选取本构模型和参数。淤泥质黏土采用软土本构模型，中砂及粉质黏土采用硬化土本构模型，回填路堤采用摩尔-库伦模型。

其中，淤泥与粉质黏土具有不排水特性，排水类型选择不排水 A，输入地勘报告提供的有效强度参数  $c'$  和  $\phi'$ 。同时根据压缩试验提供的压缩系数  $C_c$  和回弹系数  $C_s$ ，作为替代参数进行硬化土本构模型和软土本构模型中刚度参数的输入，最后输入初始孔隙比  $e_{mi}$  和各方向的渗透系数  $K$ 。由于各土层为正常固结，初始应力选项卡下的先期固结压力 POP 和超固结比 OCR 值保持默认值。在路堤底部创建间隔为 2m 的排水线单元模拟塑料排水板。行为选择常规，水头值  $h$  为 0。

- 网格划分后，定义分步施工模式下的施工顺序，如图 3.2。
- 初始阶段，采用土压力系数  $K_0$  直接生成场地的初始应力场。
- 阶段一，设置计算类型为固结计算，荷载类型为分步施工，时间间隔设置为 30 天，同时激活路堤。
- 阶段二，设置计算类型为固结计算，荷载类型为固结度，其值设置为 90%。
- 阶段三，设置计算类型为固结计算，荷载类型为分步施工，指定其上一阶段为初始阶段，同时激活排水线和路堤，输入时间间隔为 30 天。
- 阶段四，设置计算类型为固结计算，荷载类型为固结度，其值设置为 90%。



图 3.2 分步施工阶段设置图

如图 3.3，经过计算，天然固结工况下，路堤天然修建 30 天的沉降最大值为 0.4017m，固结度达到 90%所需时间为 159.2 天，完成 90%固结时沉降最大值为 0.7120m。塑料排水板工况下，路堤修建 30 天的沉降最大值为 0.7040m，固结度达到 90%所需时间为 52.63 天，完成 90%固结时沉降最大值为 0.7065m。可见塑料排水板能有效加快地基土的排水固结过程。

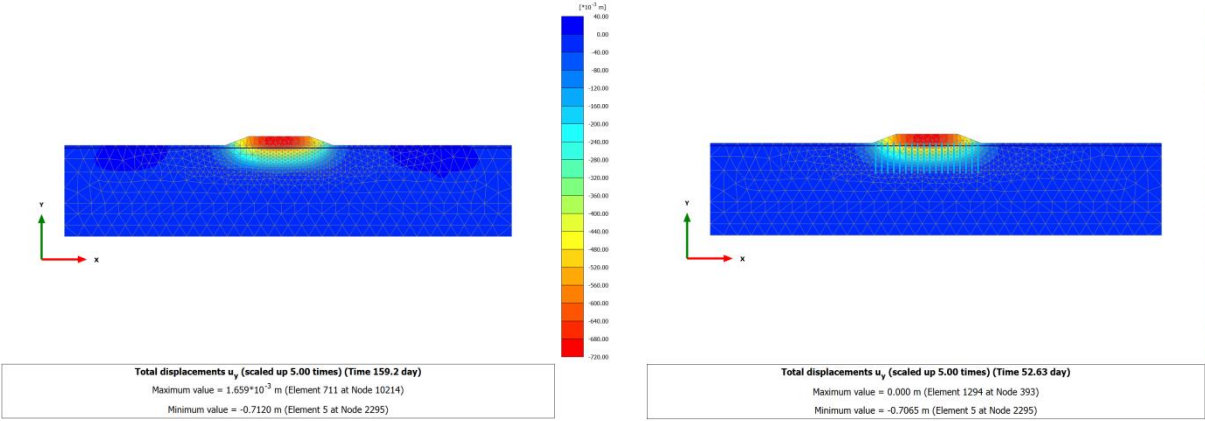


图 3.3 两工况下最终沉降图

取模型中路堤下方一应力点，通过曲线生成器可以得到两工况下土体内超静孔隙水压力的消散曲线。如图 3.4，天然工况下，超孔压的消散速率总体较为平缓；塑料排水板工况下，超孔压消散速率初始较高，随着超孔压数值的逐渐减小，其消散速率也逐渐变缓。

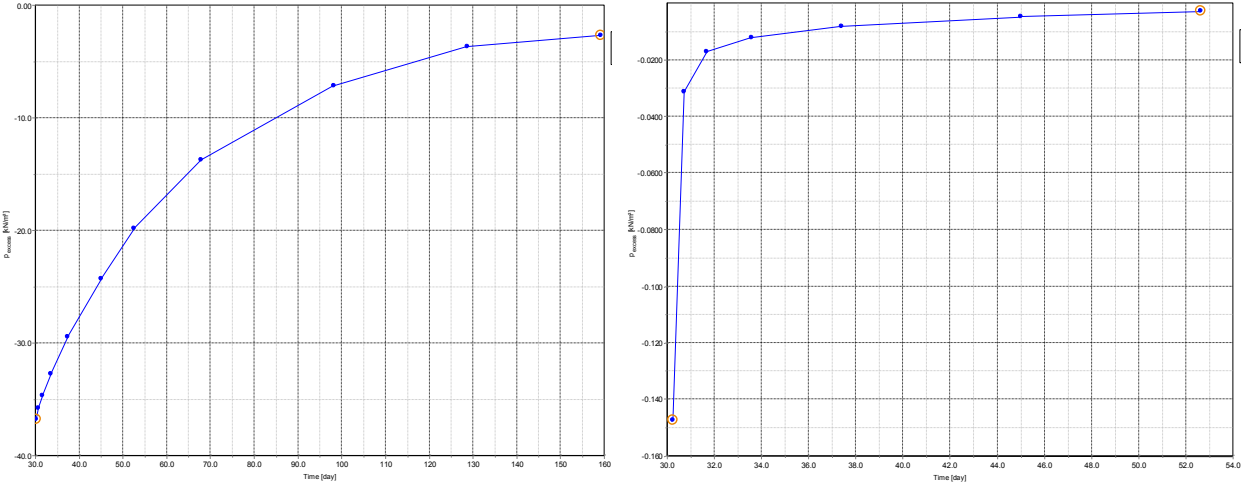


图 3.4 两工况下超静孔隙水压力消散曲线

4、小结

土体在荷载作用下超静孔隙水压力的产生与消散问题是岩土工程中经常遇到的问题，PLAXIS 中用不排水特性来描述超静孔隙水压力的产生，用固结与流固耦合两种分析方式来描述时间相关的超静孔隙水压力消散问题。更多相关内容，请参照筑信达知识库中的相关文章，具体如下：

- 1、[材料的排水类型与渗透性](#)
- 2、[固结分析中可以采用哪些加载方式？](#)
- 3、[超静孔隙水压力的产生和影响](#)
- 4、[真空固结的模拟方法](#)