

地下水渗流的边界条件

筑信达 郭晓通

岩土工程中经常涉及地下水的渗流分析，如基坑的降水、边坡的降雨入渗、真空预压法的排水固结、坝前的库水位升降等等。PLAXIS 可以处理稳态-瞬态情况下各类饱和、非饱和土层中的达西流问题。可只进行渗流分析；可在变形分析中通过稳态渗流分析来生成模型孔隙水压力分布；也可以进行渗流、变形的全耦合分析。

地下水渗流分析的关键点在于渗流的边界条件。一般来说，渗流边界条件总体可分为三类，分别为水头边界、流量边界以及二者的混合。PLAXIS 中提供了多种渗流边界条件类型及定义途径，本文主要介绍这些与渗流相关的边界条件及其在典型渗流问题上的应用。

1. PLAXIS 中的渗流边界条件

1.1 “模型条件”中的渗流边界条件

PLAXIS 程序中具有默认的变形、渗流、动力等边界条件，用户可以在“模型浏览器”中的“模型条件”下进行查看、调整。默认的地下水渗流边界条件为：模型底面（ZMin）上所有节点的流动“关闭”，模型侧面（XMin、XMax、YMin、YMax）及顶面（ZMax）上所有节点的流动“打开”。



图 1 默认的地下水渗流边界条件

“打开”，即该边界上允许发生渗流。此外，如果该线/面上无其它渗流边界条件，所有节点的渗流边界条件为 $h = \text{高程 } z$ 。如果该线/面上被施加了或是由水位定义了一个外部水头边界 h' ，则高程小于外部水头 h' 的所有节点，其边界条件为水头边界 $h = h'$ ；高程大于外部水头边界 h' 的所有节点，其边界条件为流量 $Q = 0$ 且水头 $h = \text{高程 } z$ 。

“关闭”，即线/面上不允许发生渗流， $Q = 0$ 。

在默认边界条件中还会提供快捷的降雨边界（Precipitation）。降雨边界是一个混合边界条件，参数 q 为降雨量，用户可以定义其时间相关性，如果 q 值为负，即为蒸发。参数 ψ_{\min} 和 ψ_{\max} 分别是最小和最大的孔隙压力水头，默认分别为 -1 和 0.1 单位长度。降雨情况下，当边界上某点的孔隙压力水头达到 $z + \psi_{\max}$ 时，土体达到饱和，降雨入渗停止，模型边界条件从流量边界 $Q = q$ 转换为水头边界 $h = z + \psi_{\max}$ ；蒸发情况下，当边界上某点的孔隙压力水头低于 $z + \psi_{\min}$ 时，蒸发停止，模型边界条件从流量边界 $Q = q$ 转换为水头边界 $h = z + \psi_{\min}$ 。

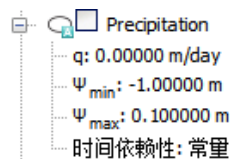


图 2 模型条件中的降雨边界

1.2 地下水渗流线/面边界条件

“模型条件”中的渗流边界条件只针对外部边界，而结构模式下允许用户对模型中的任意线（2D）或任意面（3D）定义其地下水渗流边界条件属性。

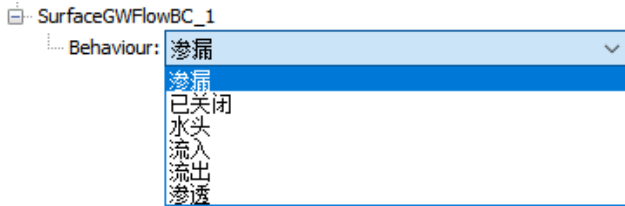


图3 地下水渗流线/面边界条件

地下水渗流线/面边界条件共分为六种。分别为“渗漏”、“已关闭”、“水头”、“流入”、“流出”、“渗透”。

“渗漏”与默认边界条件中的“打开”含义相同。

“已关闭”与默认边界条件中的“关闭”含义相同。

“水头”边界允许用户定义线/面上的总水头 h 。

“流入”和“流出”为流量边界，允许用户定义线/面上的流量 $Q=q$ （流入）或 $Q=-q$ （流出）。

“渗透”边界与“模型条件”中的降雨边界含义相同，主要用于入渗/蒸发的分析。

1.3 水力单元

PLAXIS 中提供了两种水力单元，分别为井和排水线/面，用户可以在结构模式中进行创建。

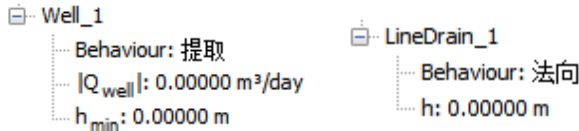


图4 水力单元

井的行为分为抽水和回灌， $|Q_{well}|$ 代表井单元上的最大流量值。井穿越的土层的渗透系数决定了井上的最大流量 Q ，当 $|Q_{well}| > Q$ 时，井的实际流量为 Q ，当 $|Q_{well}| < Q$ 时，井的实际流量为 $|Q_{well}|$ 。 h_{min} 是井上最小的地下水水头，当井的水头降低到 h_{min} 以下时，抽水/回灌停止。

排水线/面单元是一个以降底土层内部孔隙水压力为目的的水力单元，常用在排水固结分析中。排水线/面上所有节点的总水头值均为输入值 h 。排水线的行为包括常规和真空两种，当其行为选择真空时，水头值低于 h 的土层同样会受到排水线/面的影响（模拟真空预压行为）。

1.4 界面单元

界面单元除了用于定义材料之间的接触特性外，也可以参与渗流计算。

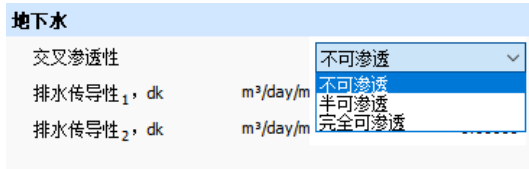


图5 界面单元的渗透性

地下水在界面单元上的流动包括两部分，穿越界面的流动和沿着界面的纵向流动，沿着界面的纵向流动可以用排水传导性定义，其含义为单位时间单位宽度的界面上流过的水的体积。单位为 $m^3/day/m$ 。1 和 2 分别对应不同的局部轴方向（3D）。

穿越界面的流动与界面单元的交叉渗透性有关，分为“不可渗透”、“半可渗透”、“完全可渗透”三种，默认为“不可渗透”。“不可渗透”表示地下水无法穿越界面；“完全可渗透”表示地下水可以直接穿越界面；“半可渗透”允许用户定义地下水穿越界面过程中的水力阻力，水力阻力的定义方式为界面的实际厚度除以界面的渗透系数，即 d/k ，用时间单位表示。

1.5 水位及“干”条件

水位线/面与水力条件（water condition）常被用来生成模型中的孔隙水压力分布。而水位线/面及水力条件中的“干”选项

也可以作为边界条件参与地下水渗流的计算。

在渗流分析中，水位会自动定义其与模型边界交界位置处的外部水头边界。如图 6 所示，该水位线定义了四个外部常水头边界条件 h1-h4。

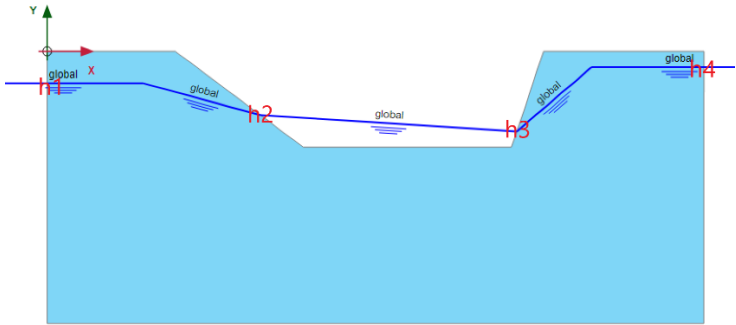


图 6 由水位线定义外部水头条件

水力条件中的“干”与土层类型中的“非多孔”类似，表示土层中没有孔隙水压力，而“干”选项也可以在渗流计算中作为一个隔水边界。注意，其它水力条件，如“全局水平”、“水头”、“内插”等均不参与渗流计算。

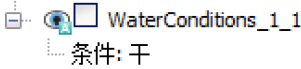


图 7 水力条件中的“干”条件

2. 渗流边界条件的灵活应用

2.1 模拟悬挂式止水帷幕的基坑降水

对于悬挂式止水帷幕的基坑降水，本质上，该问题应该是群井的抽水问题，需要在土层中定义井单元或定义模型内部的流量边界。但很多时候，我们会对该问题进行简化。常用的方法是定义水头边界通过稳态渗流分析来模拟降水过程中的地下水渗流状态。

对于这种方法，除用界面单元模拟止水帷幕的隔水特性外，关键点在于定义一个外部水头边界 h =全局潜水位，一个内部水头边界=降水后的坑底水位。图 8 所示三种方式均为基坑降水的分析模型，且三种方法具有相同的结果。

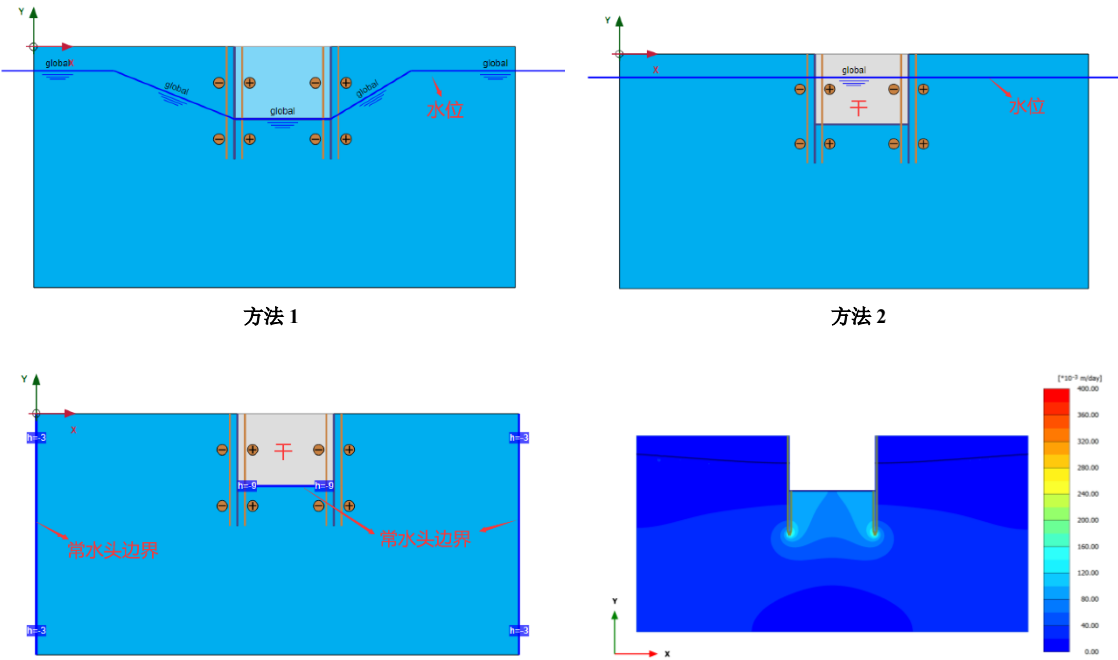


图 8 三种悬挂式帷幕降水的设置方法及共同的结果

对比三种方法，

方法 1：用水位线模拟外部与内部的水头边界。

方法 2：用水位线模拟外部水头边界，开挖+“干”条件模拟内部水头边界。

方法 3：“渗流线/面边界条件”定义外部水头边界，开挖+“干”+“渗流线/面边界条件”定义内部水头边界。

一般来说，更快捷的方法是方法 1 和 2，在 PLAXIS 3D 中，由于水位面定义相对复杂，所以方法 2 为优选方法。方法 3 中，用户可以通过改变 h 值来自定义坑内的降水效果，如降水到坑底以下 0.5m、1m。

2.2 模拟库水位的升降

库水位的升降问题，其特征在于坝前具有一个时间相关的水头边界，坝后具有一个常水头边界。

PLAXIS 中，水位线/面中的任意水平段可以定义其时间相关性，一种常用的做法是通过水位来定义。如图 9，水位线的红色部分定义了模型坝前一侧时间相关的外部水头边界，蓝色水平段定义了坝后一侧的常水头边界。

通过地下水渗流线/面边界条件来定义同样可行（图 10）。注意，选中模型整个右侧轮廓线与只选中右侧轮廓线-5m 以下的位置来定义-5m 的外水头边界，二者是完全等效的。

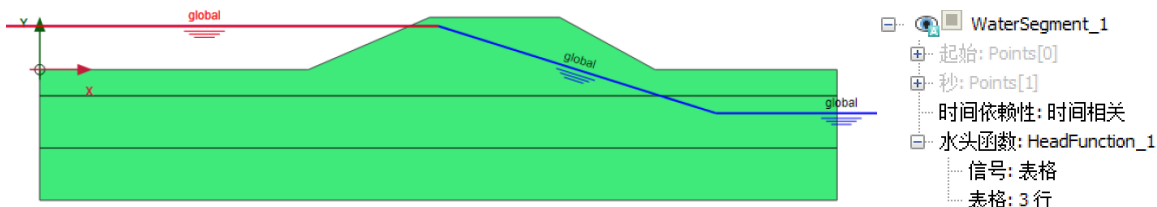


图 9 库水位升降问题的设置方法一

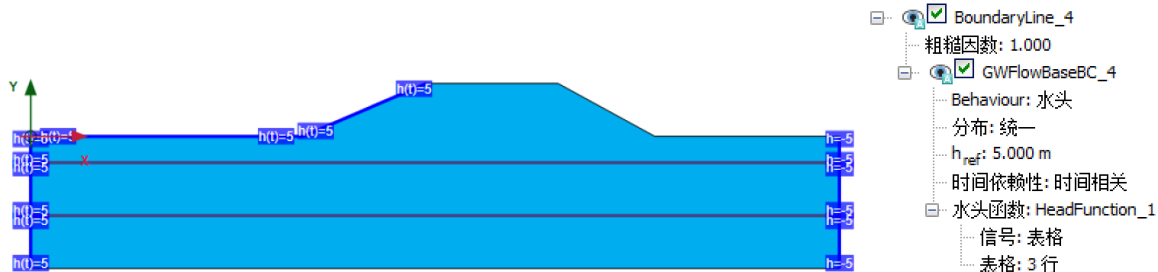


图 10 库水位升降问题的设置方法二

3. 小结及注意事项

将工程渗流问题转化为渗流分析模型的过程中，关键的点在于如何去定义渗流的边界条件，所以掌握 PLAXIS 中各类渗流边界条件的含义及定义方式尤为重要。同时，同一个渗流问题往往又可以有多种方式来定义其边界条件特性，用户应针对具体问题选择更为熟悉的、更简便的定义方法。

除此以外，在渗流分析中，用户应注意的点包括：

(1) 除了第一章中列出的渗流要素外，其它任何单元/条件均不参与渗流计算，如板、土工格栅等结构单元、除“干”外的任何水力条件。

(2) 地下水的渗流分析往往比岩土体的变形分析需要更细的网格密度，更大边界范围。

(3) 对于特定的不收敛问题，用户应考虑：1、边界条件定义是否有误；2、网格密度是否满足计算要求；3、渗透系数差异是否过大；4、渗流计算步数是否不够；5、模型几何轮廓能否简化。此外，计算机性能也会影响渗流分析收敛性。