

岩土工程有限元分析软件

PLAXIS 2D 2015[®]

案例教程



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

目录

软土地基上的路基建造.....	1
1.1 输入.....	2
1.2 网格生成.....	5
1.3 计算.....	5
1.4 结果.....	8
1.5 安全性分析.....	10
1.6 使用排水线.....	14
1.7 更新网格+更新水压力计算.....	15

软土地基上的路基建造

在具有高水位的软土上修筑路基将导致孔隙水压力的增加。此不排水建造过程，使有效应力维持在较低水平上。考虑修筑路基的安全性，必须采用中期固结。在土固结期间，超静水压逐渐消散，土的抗剪强度增加，才能保证施工过程得以继续。

这一案例涉及路基的施工。对上述机理将给予详细分析，并且介绍三种新的计算选项，分别为固结分析、更新网格分析和安全性分析（折减 c - ϕ 值）计算安全系数。

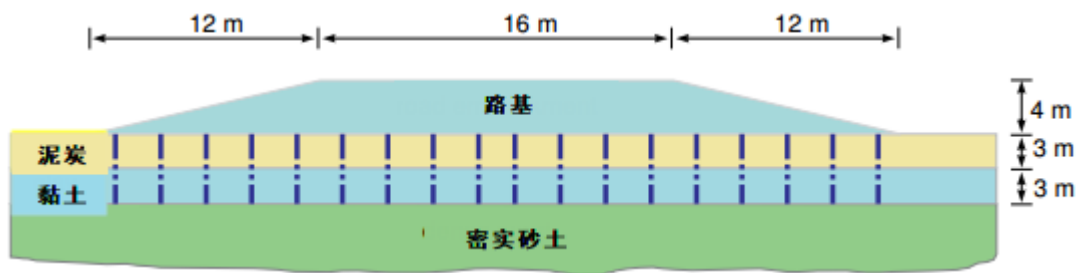


图 1.1 软土上路基示意图

目标:

- 固结分析
- 模拟排水线
- 在固结过程中改变渗透性
- 安全性分析（折减 c - ϕ 值）
- 更新网格（大变形）

1.1 输入

图 1.1 显示了路基的一个横断面，该路基 16 米宽，4 米高，坡度为 1: 3。鉴于研究的问题是对称的，可以只模拟其中一半(本情况下我们选择了右半边)。路基本身由松散的砂土构成。路基下面是 6 米的软土层，上部为 3 米泥炭层，下部 3 米是黏土层。水位位于原始的地面下 1m。软土层下是一密实的砂土层，模型中只考虑其 4m 深度。

1.1.1 一般设置

- 打开 PLAXIS 2D AE 程序。将会弹出快速选择对话框，选择一个新的工程。
- 在工程属性窗口的工程标签下，键入一个合适标题。
- 在模型标签下，模型（平面应变）和单元（15-Node）保持默认选项。
- 在几何形状设定框中设定土层模型尺寸 $x_{min}=0$ ， $x_{max}=60$ ， $y_{min}=-10$ ， $y_{max}=4$ 。
- 点击 OK 即关闭工程属性窗口，完成设定。

1.1.2 土层定义

路基下部土层用钻孔工具生成。路基层在结构模式中定义。定义土层：

- 点击创建钻孔命令，在 $x=0$ 处单击，修改土层窗口将出现。
- 定义土层，如图 1.2。
- 水位线位于 $y=-1m$ 。在钻孔柱状图上边指定水头为-1m。



打开材料设置窗口

- 按表 2.1 中的参数定义土层并分别指定给相应土层（图 1.2）。
- 关闭修改土层窗口并切换到结构模式定义路基和排水线。

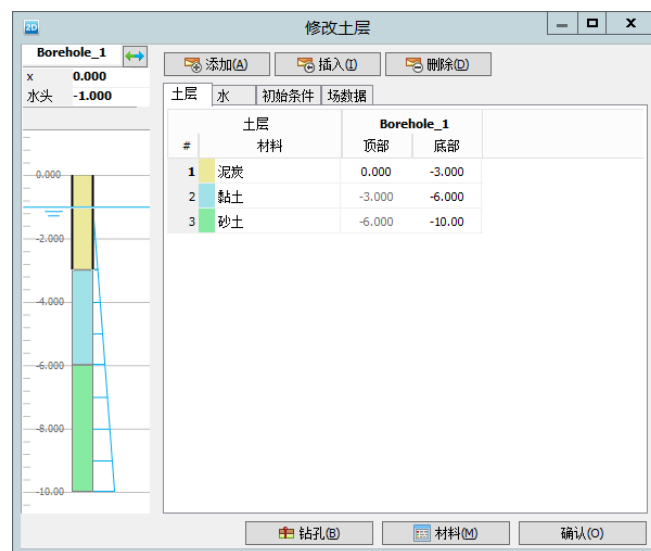


图 1.2 土层分布图


注意：初始孔隙比和改变的渗透率的值应该能够在固结分析时模拟由于土体压缩引起的渗透性的变化。当使用高级本构模型时，建议使用该选项。

表 2.1 路基和下层土的材料属性

参数	名称	路基	砂土	泥炭	黏土	单位
一般						
材料模型	模型	土体硬化	土体硬化	软土	软土	-
材料类型	类型	排水的	排水的	不排水的 (A)	不排水的(A)	-
水位以上土体容重	γ_{unsat}	16	17	8	15	kN/m ³
水位以下土体容重	γ_{sat}	19	20	12	18	kN/m ³
初始孔隙比	e_{int}	0.5	0.5	2	1	-
参数						
标准三轴排水试验割线模量	E_{50}^{ref}	25000	35000	-	-	kN/m ²
标准固结试验	E_{oed}^{ref}	25000	35000	-	-	kN/m ²
卸载/重加载刚度	E_{ur}^{ref}	75000	105000	-	-	kN/m ²
与刚度应力水平相关的幂指数	m	0.5	0.5	-	-	-
修正压缩指数	λ^*	-	-	0.15	0.05	-
修正膨胀指数	κ^*	-	-	0.03	0.01	-
黏聚力	c_{ref}'	1	0	2	1	kN/m ²
内摩擦角	ϕ'	30	33	23	25	°
剪胀角	ψ	0	3	0	0	°
流动参数						
数据组	-	USDA	USDA	USDA	USDA	-
模型	-	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	Van Genuchten	-
土类别	-	松砂	砂土	黏土	黏土	-
<2 μ m	-	6	4	70	70	%
2 μ m-50 μ m	-	11	4	13	13	%
50 μ m-2mm	-	83	92	17	17	%
默认参数	-	是	是	是	是	-
水平渗透系数	k_x	3.499	7.128	0.1	0.04752	m/天
竖向渗透系数	k_y	3.499	7.128	0.05	0.04752	m/天
渗透率变化	c_k	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	1	0.2	-
界面						
界面强度折减因子	Rinter	1	1	1	1	-
初始						
K_0	-	自动	自动	自动	自动	-
超固结比	OCR	1	1	1	1	-
前期固结压力	POP	0	0	5	0	kN/m ²

1.1.3 定义路基和排水线

在结构模式中定义路基和排水线：

 单击竖向工具栏中创建土多边形按钮并在出现的菜单中选择创建土多边形选项

- 在绘图区单击 (0 0) (0 4) (8 4) (20 0) 定义路基。
- 右键将路基材料数据添加给上步创建的多边形。

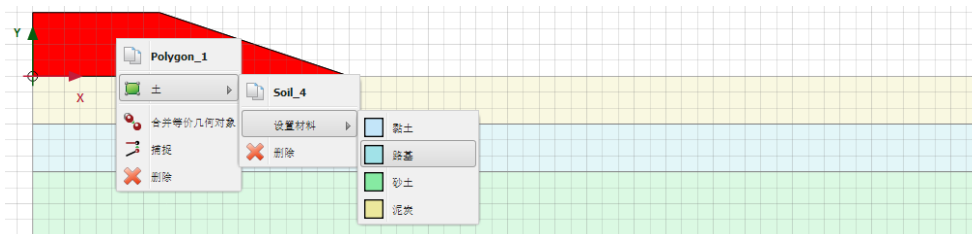



图 1.3 在绘图区为土层指定材料数据

 为了定义路基分步施工部分，单击竖向工具栏中的切割多边形按钮，点击 (0 2) (14 2) 定义分割线。路基土层就分割成了两个子部分。

在这个项目中，通过对比是否添加排水线，分析对固结时间的影响。排水线只在考虑排水线的情况下才会被激活。



 单击竖向工具栏中创建水力条件按钮并在出现的菜单中选择创建排水线选项（图 1.4）。



图 1.4 在创建水力条件菜单中创建排水线选项

 在软土层定义排水线（黏土和泥炭； $y=0$ 到 $y=-6$ ）。两条连续的排水线的距离是 2m。由于几何模型对称，第一条排水线的位置距模型边界为 1m，一共创建了 10 条排水线（图 1.5）。

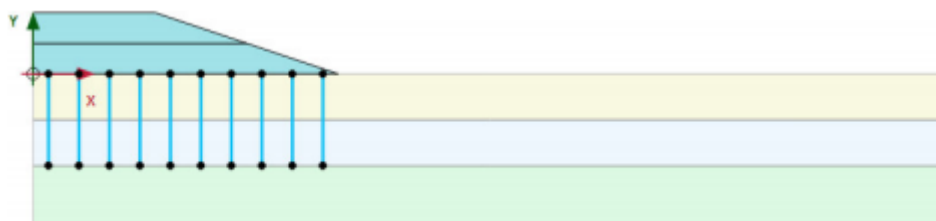




图 1.5 最后的几何模型

1.2 网格生成

- 切换到**网格模式**
 -  使用默认的单位分布参数（中等）。
 -  生成的结果如图 1.6.
- 单击关闭按钮，关闭输出窗口。

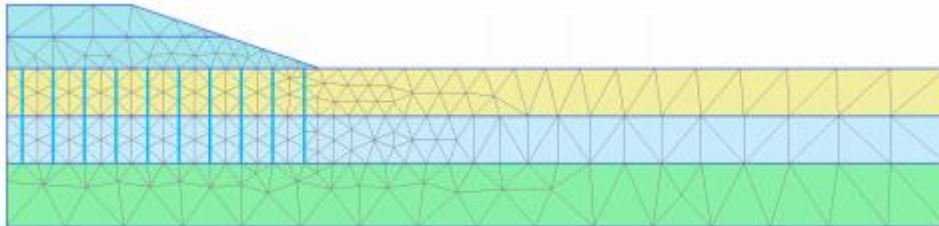


图 1.6 生成的网格

1.3 计算

路基施工分两个阶段。第一个阶段施工完成后，为了消散超孔隙水压力，有一个 30 天的固结期。第二阶段施工完成后，设置第二个固结期，达到最终沉降。因此，除了初始阶段，总共是 4 个计算阶段。

初始阶段：初始条件

初始阶段没有路基。为了生成初始应力，在分步施工模式中需要将路基冻结。

- 在分步施工模式中，冻结代表路基的两层土。剩余的土层是水平的土层，所以可以利用 K0 过程生成初始应力（图 1.7）。

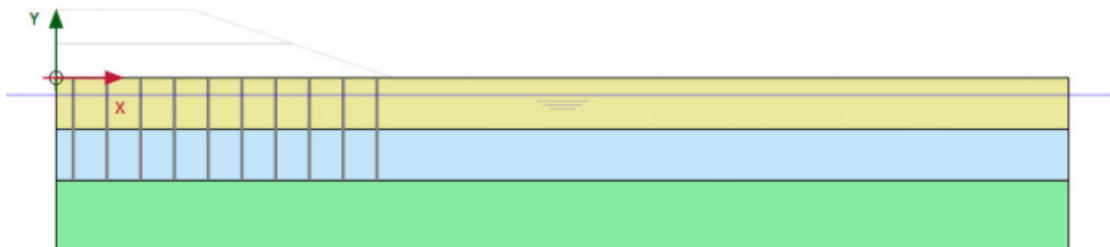


图 1.7 初始阶段

初始水压力完全是静水压力，潜水位线位于 $y=-1$ 。注意：此潜水位线是在钻孔中指定水头高度定义的。除了这条潜水位线，对于固结分析，要注意在计算阶段过程中设置的边界条件。初始时，除了底部边界，其余所有边界都是排水的，以便水能够自由流出边界条件和消散超孔隙压力。对于本模型来说，由于是对称模型，左侧垂直边界必须关闭，以便在水平方向没有水的流动。因为超孔隙压力可以通过边界条件消散，因此剩余边界都是打开的。边界条件的设置：

- 在模型浏览器中展开模型条件子目录

- 展开 GroundwaterFlow 子目录并设置 BoundaryXMin 为关闭和 BoundaryYMin 为打开（图 1.8）。

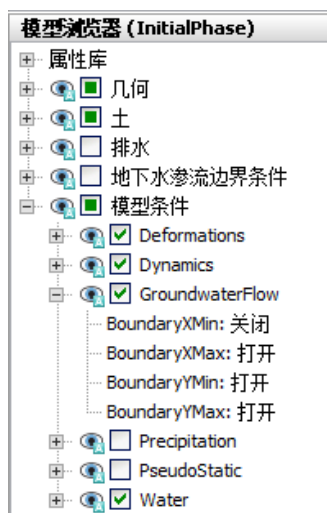


图 1.8 边界条件的问题

固结分析

固结分析考虑了计算阶段的时间因素。因为为了正确的执行固结分析，要设置一个合适的时间步。时间步如果小于临界最小值可能导致应力波动。

在 PLAXIS 中固结选项中，程序已经考虑了这个临界时间步，自动地设置了时间步选项。主要由三种方式：



包括几何模型的改变效应，预定义时间的固结（分步施工）。



固结直到几何模型中所有超孔压力减小到给定的最小值（最小孔隙水压力）。



固结直到指定的饱和度（固结度）

本项目中将使用前两种类型。定义分步阶段：

Phase 1: 第一个阶段时固结分析，分步施工。



添加新的阶段。



在阶段窗口一般子目录计算类型下拉菜单中选择固结选项



确保荷载类型中选择分步施工选项

- 键入一个 2 天的时间间隔。其余参数默认。
- 在分步施工模式中激活路基的第一部分（图 1.9）

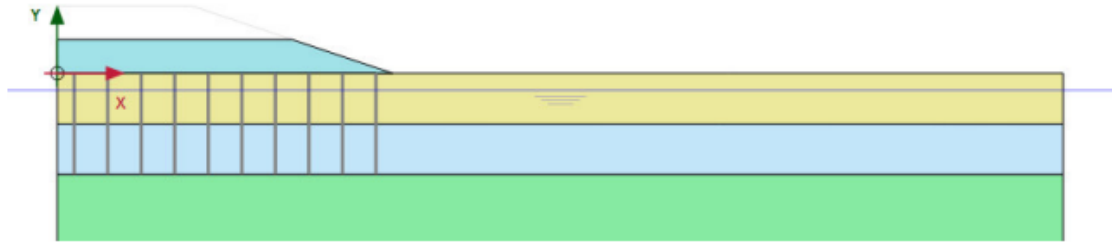




图 1.9 Phase 1

Phase 2: 第二个阶段也是固结分析，分步施工。本阶段只是固结分析到指定的最终时间。

 添加新的阶段。


 在阶段窗口一般子目录计算类型下拉菜单中选择固结选项


 确保荷载类型中选择分步施工选项

- 键入一个 30 天的时间间隔。其余参数默认。

Phase 3: 第三个阶段时固结分析，分步施工。

 添加新的阶段。

 在阶段窗口一般子目录计算类型下拉菜单中选择固结选项

 确保荷载类型中选择分步施工选项

- 键入一个 1 天的时间间隔。其余参数默认。
- 在分步施工模式中激活路基的第二部分（图 1.10）

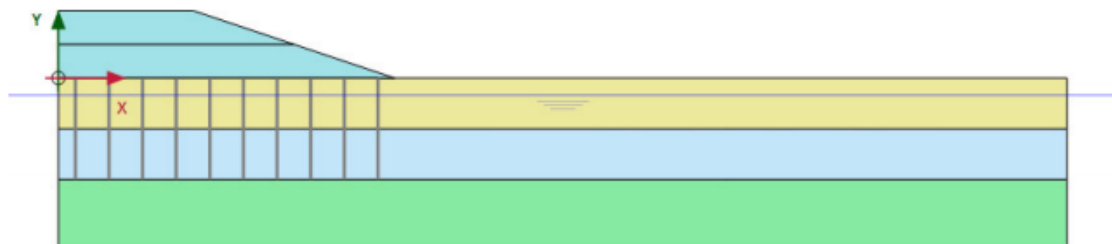


图 1.10 Phase 3

Phase 4: 第四个阶段也是固结分析，到最小超孔压。

 添加新的阶段。



在阶段窗口一般子目录计算类型下拉菜单中选择固结选项



选择荷载类型下拉菜单中最小超孔压选项,最小压力默认为 1kN/m^2 。其余参数默认。



在开始计算之前,单击生成曲线所需的点并选择下面的点:点 A,路基的坡脚。第二个点(点 B)用于绘制超孔压力的变化曲线。在软弱土层中间部位,紧挨左边界的点 C。选择完成后,点击开始计算。

在固结分析中时间的变化可以再计算信息窗口的上部分看见(图 1.11)

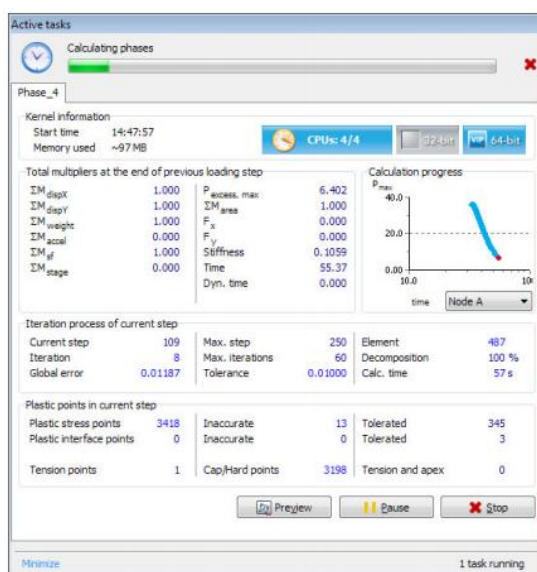


图 1.11 当前阶段窗口的计算过程显示

除了显示当前计算阶段的乘子,还会显示代表当前最大超孔压力的参数 $P_{\text{excess, max}}$ 。这个参数在最小孔压固结分析中非常重要,因为要求所有孔压都降低至低于一个预先定义的值。

1.4 结果



计算完成后,选择第三施工阶段并点击<输出>按钮。输出视窗将显示不排水施工变形的网格(图 1.12)。评估第三计算施工阶段(不排水施工)的计算结果,可以看到变形的网格导致路基坡脚的拱起以及由于土不排水行为而出现的腹地。

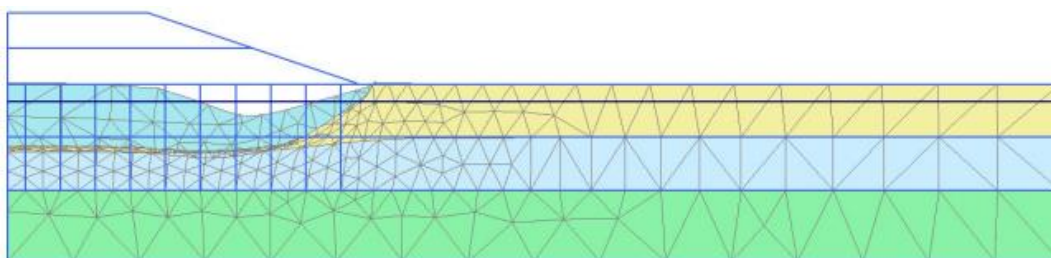


图 1.12 路基不排水施工变形网格

- 在变形菜单中选择增量位移 $|\Delta u|$



选择视图菜单中的箭头选项或者单击对应的快捷工具。

当分析总位移增量时，可以注意到一个破坏机制正在发展(图 1.13)。

- 按住<Ctrl>+<7>显示超孔隙水压力（更多的快捷键可以查看参考手册的附录 F）。也可以通过选择对应按钮，应力菜单中孔隙水压选项显示。

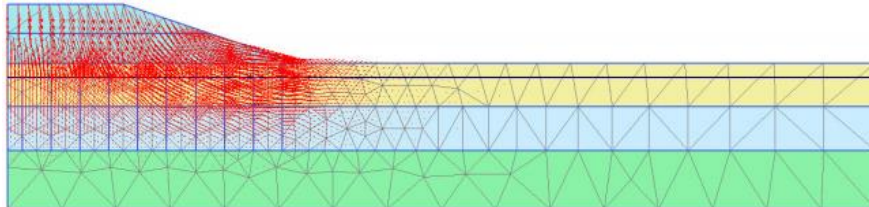


图 1.13 路基不排水施工后位移增量



单击中主应力方向。每个土单元中心都显示了超孔隙水压力的主方向。图 1.14 显示了计算结果。可以清楚的看到在路基中心超孔隙水压力分布。

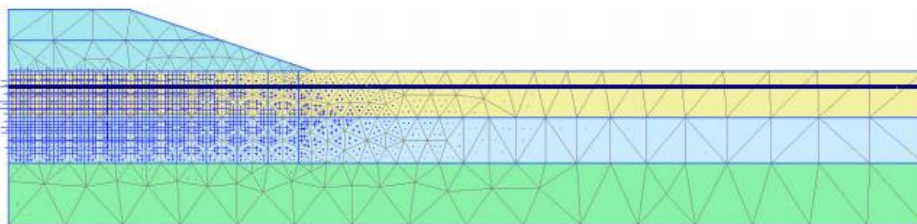


图 1.14 路基不排水施工后超孔隙水压力

- 在下拉菜单中选择 Phase 4



单击工具栏中等值线按钮，以等值线形式显示结果。



单击竖向工具栏中的绘制导航线选项，显示等值线的位置和大小。

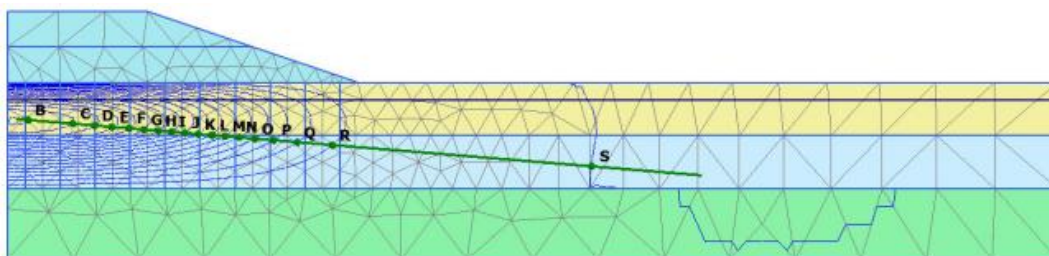


图 1.15 固结分析 $P_{excess} < 1.0 \text{ kN/m}^2$ 时超孔隙水压力等值线

PLAXIS 2D AE 案例教程：软土地基上的路建造

我们可以注意到在第四计算施工阶段中最初的地面和路基的沉降明显增加。这是因为超孔隙水压的消散导致的土固结。图 1.15 显示了固结后的超孔隙水分布，最大值低于 1.0 kN/m^2 。

使用曲线程序可以显示路基下超静水压随时间的变化。绘制曲线要遵循以下步骤：



创建一个新的曲线。

- 在工程选项下拉菜单，选择时间作为 x-轴。
- 选择 B 点，选择应力-孔压-超孔隙水压力作为 y-轴并选中反向符号。
- 点击<确认>按钮后，类似于图 1.16 的曲线随即生成。

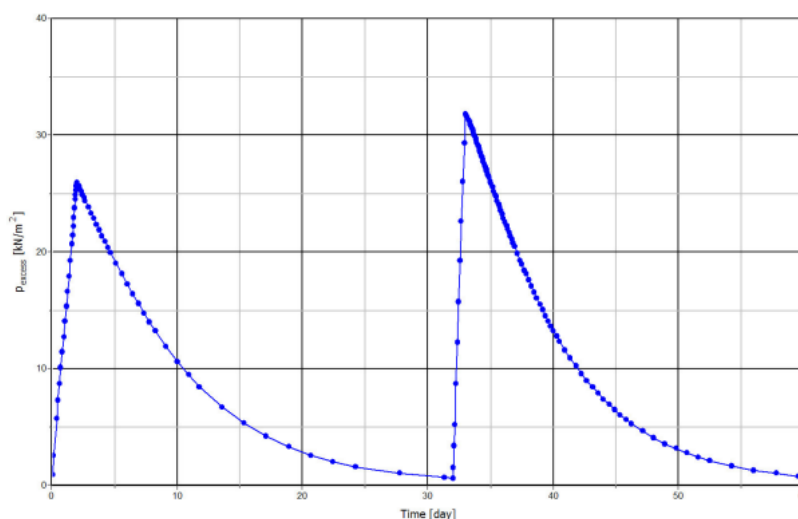


图 1.16 路基下超孔隙水压力变化

图 1.16 清楚地显示了四个计算施工阶段。在不排水施工过程中，超静水压在短时间内增加，而在固结期，超静水压随时间的增加而减小。事实上，在路基施工期，土固结已经出现，不过这只涉及一个很短的时间段。根据曲线，土的完全固结需要超过 50 天。

- 关闭输出窗口前保存图表。

1.5 安全性分析

在设计路基时，重要的是不仅考虑最终稳定性，而且也要考虑施工期间的稳定性。从模型输出结果，我们可以清楚地看到失效机制在第二计算施工阶段之后开始发展。在这一阶段和其他施工阶段评估整体安全系数是必须注意的。

在结构工程中，安全系数通常定义为破坏荷载和工作荷载之比。不过，对于土工结构来说，这样的定义不一定有效。例如，对于路基来说，大部分加载是由于土自重产生的，土重量的增加不一定导致结构的破坏。事实上，一个纯摩擦土坡在土自重增加的实验(离心机实验)中不会发生破坏。因此，对安全系数更恰当定义是：

$$\text{安全系数} = \frac{S_{\text{最大}}}{S_{\text{平衡态要求}}}$$

这里， s 代表抗剪强度。实际抗剪强度和计算获得的保证土体平衡状态所需要的最小剪应力之比是土力学中传统上使用的安全系数。通过引入标准库伦条件，安全系数可以表达为：

$$\text{安全系数} = \frac{c - \sigma_n \tan \phi}{c_r - \sigma_n \tan \phi_r}$$

这里， c 和 ϕ 是输入强度参数，而 σ_n 是实际正应力分量。 c_r 和 ϕ_r 是不断减小到恰好足够大而能保持土平衡的抗剪参数。上面描述的原理是 PLAXIS 程序中为计算整体安全系数而使用的折减 phi/c 方法的基础。应用这种方法，内聚力和内摩擦角的正切将成正比地减小：

$$\text{安全系数} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} = \Sigma Msf$$

强度参数的减小将由总乘子 ΣMsf 来控制。这个参数将逐步增加，直到破坏。假定在失效后连续几步的计算大体给出一个常值的 ΣMsf ，我们就定义其为安全系数。

在 PLAXIS 程序中，折减 phi/c 计算选项可以从一般标签页面的计算类型菜单中获得。如果选择折减 phi/c 选项，参数切换菜单中的加载类型将自动设置到增量乘子。

计算施工不同阶段路基的整体安全系数要遵循以下步骤：

- 在阶段浏览器选择 Phase 1。



添加新的阶段。

- 双击新的阶段打开阶段窗口。
- 在阶段窗口中，程序自动选择开始于选择的阶段。



在一般子目录中，选择安全性计算类型。



在荷载类型中，自动选择了增量乘子。将控制强度减小过程的第一个乘子增量 Msf 设置为 0.1。



注意到孔隙水压力计算类型下拉菜单中自动选择为使用前一计算阶段并且是灰色显示，表明不能修改。

- 为了排除先前计算的变形对破坏机制的影响，选择重置位移为零选项。
- 在数值控制参数子目录中，使用默认迭代参数，最大步属设置为 50
- 此时，第一个安全系数计算已经定义完毕。
- 为了分析每个固结阶段的稳定性，使用相同的步骤创建新的计算阶段。

提示：折减 phi/c 计算的附加计算步数默认值为 100。不同于终极水平计算，这里附加计算步总会完全实施。在大部分折减 phi/c 计算时，100 步足够达到失效状态。如果没有，附加计算步数最大可以增加至 1000。

PLAXIS 2D AE 案例教程：软土地基上的路建造

对于大部分折减 ϕ/c 计算， $Msf=0.1$ 是正常启动计算过程的第一步。在计算过程中，控制强度减小的总乘子 ΣMsf 的发展由自动加载控制。

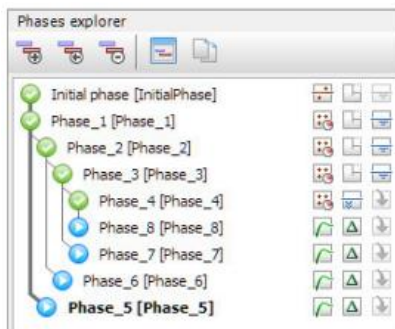


图 1.17 阶段浏览器显示安全性计算阶段

计算结果的评价

折减 ϕ/c 计算过程产生附加位移。总位移并没有什么物理意义，但是最后破坏步骤的增量位移表明了破坏机理。为了显示路基施工三个不同阶段的机理：



选择安全性分析其中一个阶段，单击查看计算结果按钮。

- 选择变形菜单中增量位移 $|\Delta u|$ 。



改变显示方式由箭头改为云图。显示的结果很好地展现了路基的破坏机理(图 1.18)。

这里，位移增量的大小并无意义。

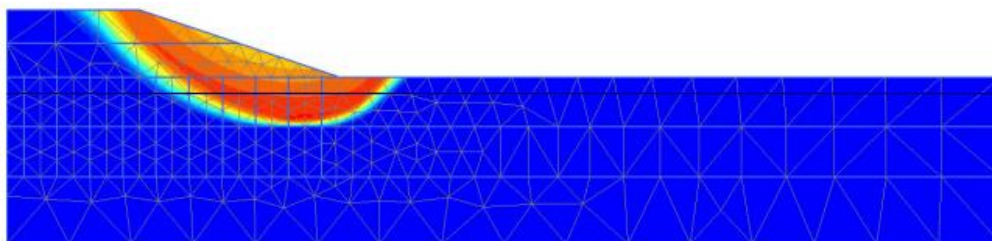


图 1.18 反映路基最后施工阶段可能破坏机理的总位移增量阴影图

从项目菜单的计算信息选项，我们可以获得安全系数。计算信息视窗的乘子标签页面反映了荷载乘子的实际值。假定 ΣMsf 在前面几个计算步骤基本保持为一常数，它就代表了安全系数。

不过,评估安全系数的最佳方式是画出某一节点上的位移- ΣMsf 参数曲线。尽管位移大小并无意义，但它们表示是否已经发生破坏。为了通过这种方式评估以上三种情形的安全系数，要遵循以下步骤：

- 点击进入曲线程序按钮去进入曲线程序。
- 选择新建图表。
- 在曲线生成视窗，选择路基坡脚(节点 A)的总位移 $|u|$ 为 x-轴。
- 对于 y-轴，选择乘子并从类型菜单中选择 ΣMsf 。
- 在出现的图表中右键选择设置选项。弹出设置窗口。

- 单击设置窗口中的阶段按钮。
- 在出现的选择阶段窗口中选择阶段 5（图 1.19）。

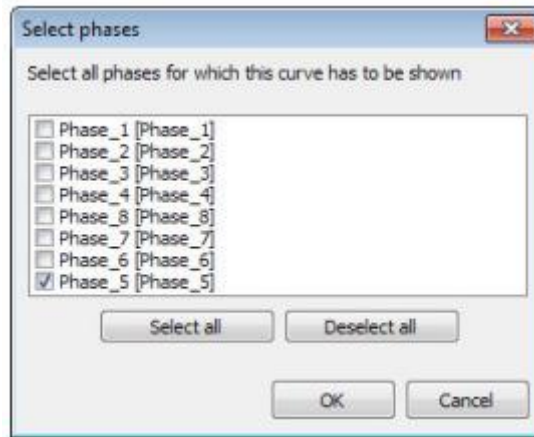


图 1.19 选择阶段窗口

- 单击 OK 按钮关闭选择阶段窗口
- 在设置窗口中，在对应的标签中更改曲线的标题。
- 单击添加曲线按钮并选择从当前工程中添加。利用上述方法为阶段 6,7 和 8 定义曲线。
- 在设置窗口单击图表标签。
- 在图表标签中指定图表名称。
- 设置 x-轴缩放为手动，设置最大值为 1（图 1.20）。



图 1.20 设置窗口中图表标签

- 单击添加按钮更新图表并单击 OK 按钮关闭设置窗口。
- 修改图例的位置，通过在图例上右键，选择查看-表格图例（图 1.21）。



图 1.21 图表图例设置

- 通过拖拽图例图标可以重新放置其位置（图 1.22）。

这里，图示的最大位移并无意义。对于所有曲线来说， ΣMsf 基本上为常数。将鼠标放置在曲线的某节点上，一个字框随即出现，显示出 ΣMsf 的数值。

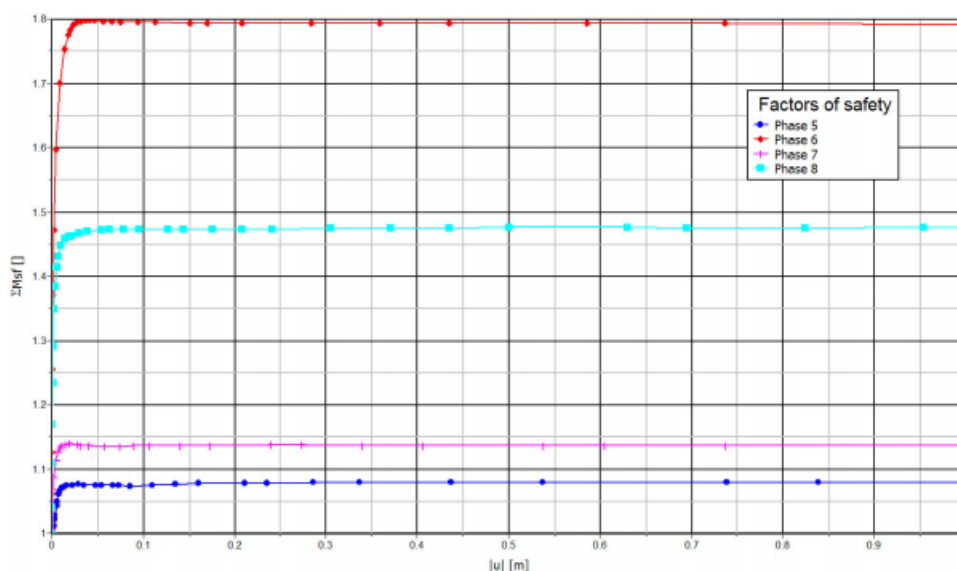


图 1.22 评估的安全系数

1.6 使用排水线

本节将分析排水线的响应。和前四个固结阶段的属性一样，新添加四个阶段。第一阶段也是开始于初始阶段，新阶段的差别在于：

- 所有新的阶段在分步施工模式中激活排水线。
- 前三个固结阶段(9-11)的时间间隔是 1 天。最后的阶段设置为最小超孔隙水压力，值为 1.0 kN/m^2 。



计算完成后保存项目，选择最后阶段并单击查看计算结果按钮。输出窗口显示了路基最后排水线施工阶段的变形网格。为了对比排水线的影响，考虑在节点 B 的超孔隙水压力消散情况。



打开曲线管理器。

- 在图表标签中双击图表 1（节点 B 的 p_{excess} 和时间曲线）。显示图表 1，关闭曲线管理器。
- 双击曲线右侧的图例，弹出设置窗口。
- 单击添加按钮并在出现的菜单中选择从当前工程添加选项。
- 选中 y-轴反向符号选项，单击 OK。
- 在设置窗口中添加一个新的图表和新的标签。单击阶段按钮。从显示窗口中选择初始阶段和最后四个阶段（添加排水线的）并单击 OK。
- 在设置窗口相应位置处改变曲线标题。
- 在图表标签下指定图表名称。
- 单击添加，预览生成的曲线并单击 OK 按钮，关闭设置窗口。图表（图 1.23）清楚的显示了排水线对超孔隙水压力消散所需时间的效果。

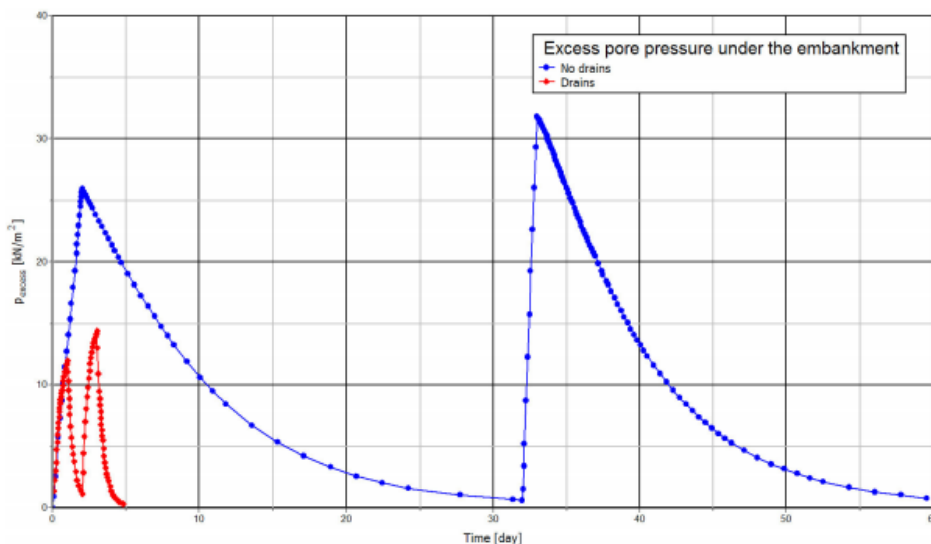


图 1.23 排水线效果

提示: 已经生成的曲线可以使用曲线设置窗口中对应的按钮重新生成, 而不用添加新的曲线。

1.7 更新网格+更新水压力计算

从固结 (Phase 4) 完成后输出的变形网格可以注意到, 在施工开始路基沉降超过半米。部分原来在水位之上的砂土将沉降在水位之下。由于浮力的作用, 沉降在水位之下的砂土有效重量将有所变化, 这将导致有效负载随时间的减小。这一效应可以通过 PLAXIS 程序的更新网格及水压选项来进行模拟。实现过程:

- 选择初始阶段。



添加新的阶段。

- 按照 Phase 1 一样定义新的阶段。在变形控制参数子目录下选中更新网格和更新水压选项。

PLAXIS 2D AE 案例教程：软土地基上的路基建造

- 按照上述方法定义其他的三个阶段。

当计算完成后，对比两种不同计算方法的沉降。

- 在曲线管理器窗口中为 x-轴选择时间，y-轴选择软土层中间点 B 的垂直位移。
- 生成初始阶段和 1-4 阶段的计算结果曲线。
- 为图表添加一个新的曲线。
- 这条曲线包括初始阶段和 13-16 阶段。定义好的图表见图 1.24。

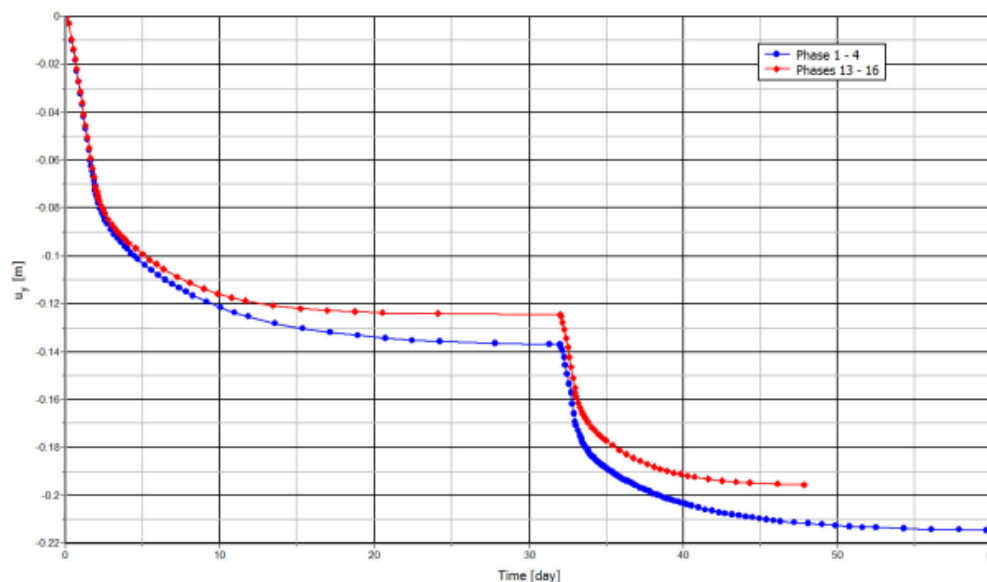


图 1.24 使用更新网格和水压力计算得出的沉降值

从图 1.24 中可以发现，当使用更新网格和更新水压选项时，路基沉降较小。这一现象的部分原因是更新网格过程包括二阶变形效应，因而考虑了几何的变化。另外部分原因是更新水压过程使得路基的有效重量变小。后者是因为沉降到水位之下的土受浮力而产生的。这些过程由于考虑了大变形的正面影响，可以真实地分析土的沉降。

本教程到此结束！