

PLAXIS 固结沉降分析中软土、软土蠕变模型特征与对比

筑信达 郭晓通、秦子寒

摘要: 本文系统阐述了 PLAXIS 固结沉降分析的基本理论及注意事项, 并从理论基础、参数体系、数值算例等维度, 对比了软土模型 (SS 模型) 与软土蠕变模型 (SSC 模型) 的特性差异。1D 固结试验与 2D 堆载固结分析结果表明: 两个模型对于沉降分布、超静孔隙水压力分布与消散时间的影响很小, 总体差别主要体现在具体的沉降数值上。在主固结阶段, 软土模型下的初始沉降量更大, 软土蠕变模型初始沉降量小于软土模型, 但其能够持续捕捉土体的次固结沉降, 沉降曲线呈现明显的伴随时间的线性增长特征, 最终的沉降数值往往比软土模型略大。对于关注施工期稳定或短期主固结沉降的工程, 推荐选用参数较易获取的软土模型即可; 而对于运营期长期变形控制严格的重大工程 (如高铁、机场、高填方等), 推荐采用软土蠕变模型, 并结合长期固结试验准确测定修正蠕变指数 μ^* , 以确保长期安全预测的可靠性。

关键词: PLAXIS; 软土地基; 软土模型 (SS); 软土蠕变模型 (SSC); 固结沉降; 次固结; 数值模拟

1. 概述

软土具有高含水率、高压缩性、低强度和低渗透性等工程特性。在软土地区进行工程建设时, 地基的沉降变形控制往往是设计的核心问题之一。软土地基在荷载作用下的沉降由瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降三部分组成, 其中主固结沉降和次固结沉降的时间效应显著, 准确预测其时程规律对工程安全至关重要。

PLAXIS 程序内置了多种土体本构模型, 从简单的线弹性模型到复杂的亚塑性模型, 为用户提供了丰富的选择。在软土固结分析中, 软土模型 (Soft Soil model, SS 模型) 和软土蠕变模型 (Soft Soil Creep model, SSC 模型) 是两种专门针对软土特性开发的本构模型。软土模型能够较好地描述正常固结和轻微超固结软土的压缩特性及剪切强度特性, 但无法考虑土体随时间发展的蠕变变形。软土蠕变模型则在软土模型的基础上引入了蠕变机制, 将土体的体积蠕变与时间建立联系, 从而能够模拟软土在主固结完成后的次固结沉降现象。

正确认识两种模型的理论基础、参数含义和适用条件, 对于合理开展软土固结沉降数值分析、准确预测地基长期变形具有重要意义。

2. PLAXIS 固结沉降分析简述

软土地基在外部荷载作用下的总沉降可表达为:

$$S = S_d + S_c + S_s$$

其中, S_d 为瞬时沉降 (不排水剪切变形), S_c 为主固结沉降 (超静孔隙水压力消散引起的体积压缩), S_s 为次固结沉降 (土体骨架蠕变引起的体积压缩)。

与 Terzaghi 一维固结理论不同, PLAXIS 使用更符合实际受力状态的 Biot 三维固结理论 (完全耦合的孔隙水消散与土体骨架变形), 固结排水过程并不依靠人工输入的固结系数 c_v , 而是由程序根据用户定义的土层渗透系数与渗流边界条件自动考虑。其中渗透系数决定了水在土体内部流动的阻力, 渗流边界条件决定了排水通道的位置。在 PLAXIS 中, 排水条件可以设置在任何被激活的可渗透边界上, 从而能够精确模拟多向排水和复杂几何边界的固结过程。

几乎所有的本构模型可用于计算 S_d 与 S_c , 仅软土蠕变模型等特殊土体本构模型可以计算 S_s 。在 PLAXIS 中进行固结沉降分析需要注意的几个点包括:

1) 排水类型的选择

固结分析中, 土层排水与不排水选项不影响超静孔隙水压力的计算, 仅影响抗剪强度。排水与不排水 A 使用有效强度 c' 和 ϕ' , 不排水 B 使用不排水抗剪强度 S_u , 如果计算时必须要考虑土层在固结过程中的强度增加, 则不应使用不排水 B 选项。

2) 固结过程控制与固结度

PLAXIS 中有三个固结过程控制选项, 分别是指定时间、指定孔压、指定固结度。当选择指定孔压或固结度时, 不应把孔压、固结度值设置的过低, 比如一般可以认为固结度达到 90%-95% 后场地已经完成固结, 超过 95% 可能引起计算时间显著

增加或默认计算步数不足。

3) 本构模型的选择

对于稳定性分析，可以使用包括摩尔-库伦模型各类岩土体本构模型，对于沉降变形分析，建议使用硬化土、小应变刚度硬化等高级本构模型，其中对于软土，尤其是 E_{50} 接近或大于 2 倍 E_{oed} 的高压缩性软土，建议使用软土模型或软土蠕变模型。

2.1 软土模型的特点

软土模型是一种专门用来模拟正常固结或轻微超固结的软弱粘性土（如淤泥、淤泥质土、泥炭土）的高级本构模型。对于这类土层，如果使用传统的摩尔-库伦模型，很难准确模拟出其在高压压缩变下的特性。

软土模型基于修改剑桥模型（Modified Cam-Clay）演变而来，它的主要特征包括：

1) 应力依赖的刚度

软土的刚度不是恒定的，而是随着有效应力的增加而增加（埋得越深、上覆压力越大，土层就越硬）。如图 1 中左侧的 ϵ_v - p' 曲线所示，伴随着有效主应力增加，曲线的斜率逐渐减小，表示软土的刚度逐渐增加。加载过程中的刚度受修正压缩指数 λ^* 控制， λ^* 即为图 1 右侧 ϵ_v - $\ln(p')$ 曲线的斜率。

2) 区分压缩与回弹

模型引入了塑性体积硬化。它用不同的参数来描述加载（产生无法恢复的塑性变形）和卸载/重加载（弹性的、可恢复的变形）。图 1 中红色和绿色虚线表示卸载与卸载后重加载的过程。

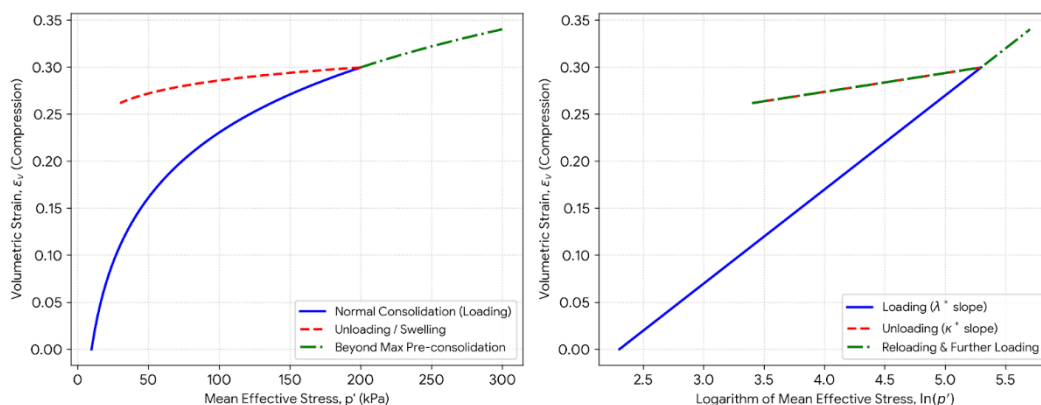


图 1 体积应变与有效主应力的关系曲线

3) 帽盖屈服面

如下图所示，软土模型的屈服面由一个椭圆形的“帽盖”和一个摩尔-库伦破坏面共同组成。当应力触碰到“帽盖”时，土体会发生显著的体积压缩变形。

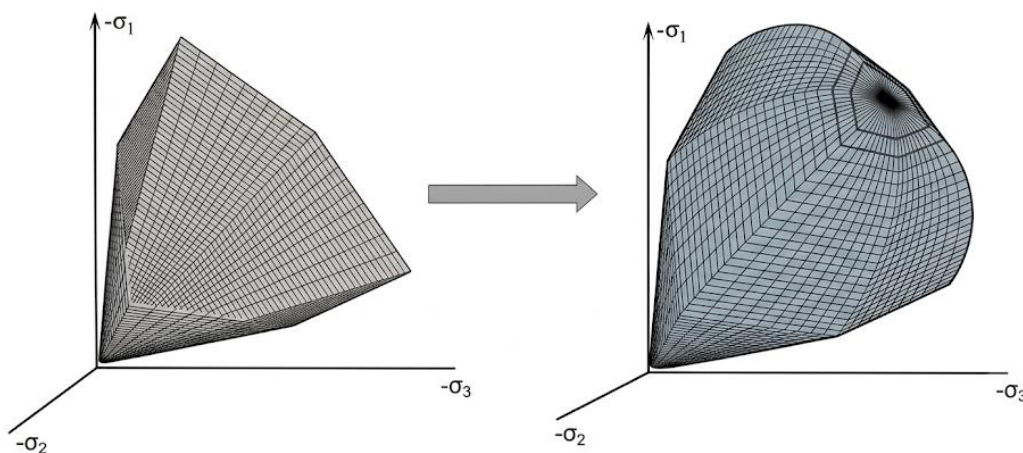


图 2 软土模型在主应力空间中的屈服面（左侧为摩尔-库伦模型，右侧为软土模型）

2.2 软土蠕变模型的特点

软土蠕变模型是在软土模型基础上进一步演变而来的高级本构模型，它专门用来模拟软黏土的次固结与蠕变行为。在实际工程中，软土在有效应力不再变化后，依然会随着时间推移产生不容忽视的持续沉降，传统的软土模型无法捕捉这种“时间效应”。软土蠕变模型的主要特征包括：

1) 应力与时间双重依赖的刚度

软土蠕变模型的刚度不仅随着有效应力的增加而增加，还会随着时间的累积而发生动态演化。在加载初期，土体变形主要受修正压缩指数 λ^* 控制（图 3 中 b 段）；而当主固结结束、有效应力趋于稳定后，土体进入次固结阶段，其长期的蠕变速率和硬化程度则由修正蠕变指数 μ^* 决定（图 3 中 c 段）。随着时间的增长，土体会持续产生向下延伸的体积蠕变应变。

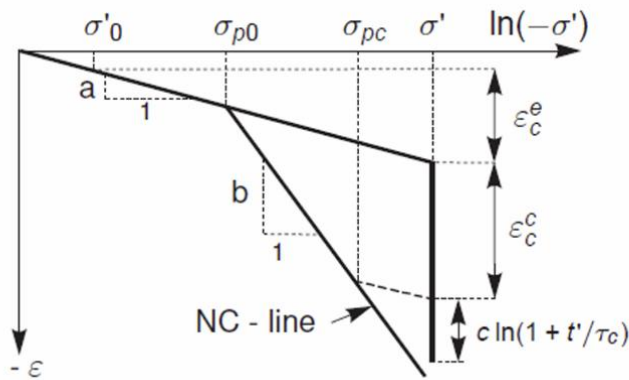


图 3 软土蠕变模型理想化的应力-应变曲线

2) 蠕变硬化特性

与传统弹塑性模型中加载立刻触发瞬时塑性变形的设定不同，软土蠕变模型认为所有非弹性变形都是时间依赖性的。模型基于 Bjerrum 的蠕变理论，即使上覆压力不发生变化，随着蠕变应变的不断累积，前期固结压力 σ_p 也会随时间自动缓慢增大，土体变得“越硬”。

3) 蠕变速率受应力历史控制

模型的蠕变应变率不是常数，而是强烈依赖于当前应力水平 (p^{eq}) 与当前预固结应力 (p_p^{eq}) 的比值。模型初始的 OCR 不建议设为 1.0，即使是正常固结土，否则会产生过大的初始蠕变速率。推荐初始 OCR 设为 1.2~1.4 甚至更高，以反映地质历史中的“老化”效应。

2.3 模型参数与取值

软土、软土蠕变模型的参数基本一致，软土蠕变模型比软土模型多一个修正蠕变指数参数 μ^* ，两个模型的主要参数见表 1 所示。

表 1 软土和软土蠕变模型基本参数

参数	描述	单位
λ^*	修正压缩指数	[-]
κ^*	修正回弹指数	[-]
μ^*	修正蠕变指数	[-]
ν_{ur}	卸载/再加载泊松比	[-]
c	有效黏聚力	[kN/m ²]
ϕ	有效内摩擦角	[°]
ψ	剪胀角	[°]
σ_t	抗拉强度	[kN/m ²]

两个模型刚度参数的通常输入方式是使用替代参数（表 2），程序将基于输入的 C_c 、 C_s 、 C_a 值自动换算得到 λ^* 、 κ^* 、 μ^* 值。而 C_c 、 C_s 参数可以直接由固结试验获取，地勘报告往往直接提供。 C_a 往往需要在固结试验中通过更长期的观测来获取。

如果没有试验数据，可以使用以下经验公式：

$$\lambda^* \approx I_p(\%) / 500 \quad \lambda^* / \mu^* \approx 15-25 \quad \lambda^* / \kappa^* \approx 2.5-7$$

其中， I_p 为软黏土的塑性指数。

表 2 替代刚度参数参数

参数	描述	单位
Cc	压缩指数	[-]
Cs	回弹指数	[-]
C α	蠕变指数	[-]

3. 软土与软土蠕变模型结果对比

3.1 一维固结试验下的响应

通过 PLAXIS 中的土工试验模块对同参数的软土和软土蠕变模型运行固结试验，竖向向压力取 100kPa， λ^* 和 κ^* 分别为 0.15 和 0.03，其中软土蠕变模型的蠕变指数 μ^* 取 1/20 倍的 λ^* 。

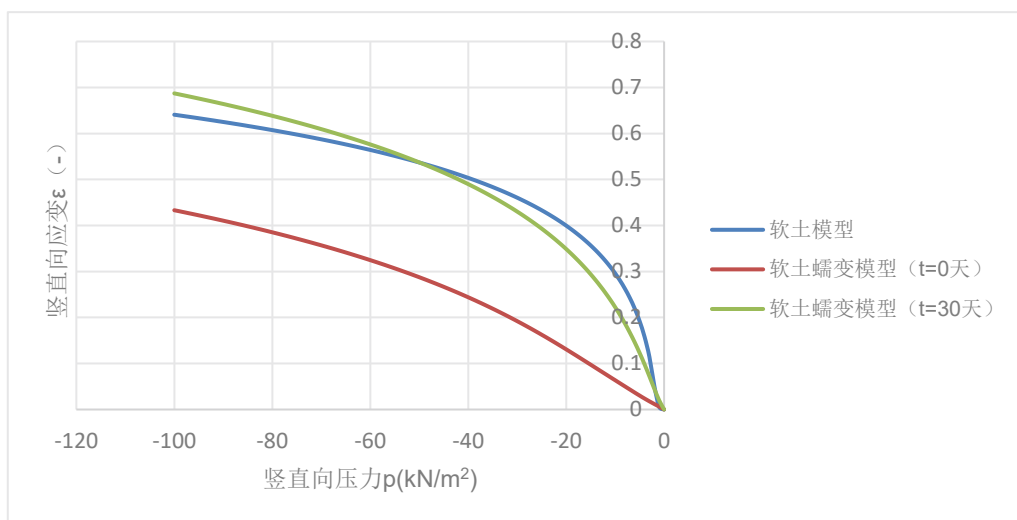


图 4 软土（上）和软土蠕变（下）固结不排水试验应力应变曲线

计算得到的 p - ε 曲线如图 4 所示，不考虑蠕变的情况下，压力在 0-100kPa 下的竖向应变，蓝色曲线（软土模型）要显著高于红色曲线（软土蠕变模型）；绿色曲线（考虑 30 天蠕变）的整体斜率与蓝色曲线（软土模型）比较接近，在压力较小时土层整体刚度表现的比软土模型更大，在后期更高压力下产生的应变超过了软土模型，说明长期荷载下蠕变变形对总变形的贡献非常显著。

3.2 PLAXIS 2D 分析模型

使用 PLAXIS 2D 对软土和软土蠕变模型在固结沉降分析中的差异进行对比。图 5 是用于测试的模型示意图，模型范围为 200×40m，水位高出地表 0.8m。土层分别使用软土、软土蠕变模型。土层上方使用实体单元模拟堤坝堆载。

模型材料参数如表 3 和表 4 所示。软土蠕变模型除蠕变指数外，其他参数完全一致。

模型的分析阶段包括：

Initial Phase-使用 K0 法生成初始地应力。

Phase_1-激活上部堤坝，固结时间间隔设置为 5 天。

Phase_2-评估工后 1 年沉降，设置固结时间为 1 年。

Phase_3-评估工后 10 年沉降，设置固结时间为 10 年。

测试分为两个项目模型进行，两个模型除本构模型不同外，其他条件均保持完全一致。模型中的土体参数见表 2 和表 3 所示。

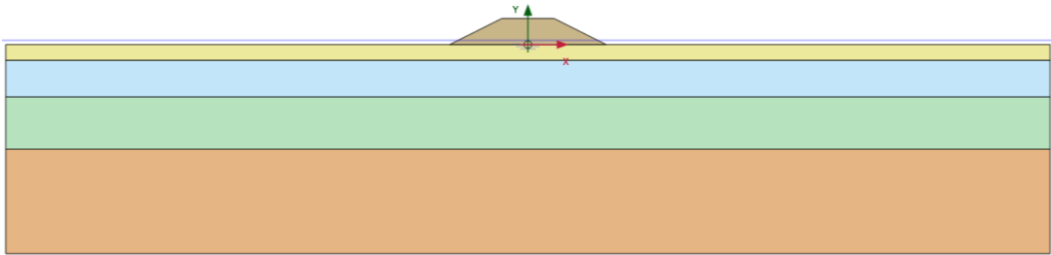


图 5 模型示意图

表 3 材料参数

土层	本构模型	饱和重度 γ (kN/m^3)	杨氏模量 E (kN/m^2)	泊松比 ν	粘聚力 c (kN/m^2)	内摩擦角 Φ ($^\circ$)	渗透系数 K (m/d)
砂土	摩尔-库伦	19	72e3	0.3	3	32	1/1
回填土	线弹性	21	60e3	0.25	/	/	0.05/0.05

表 4 软土层材料参数

土层	软土-1	软土-2	软土-3
本构模型	软土/软土蠕变	软土/软土蠕变	软土/软土蠕变
饱和重度 γ (kN/m^3)	17.7	18.1	18.2
压缩指数 C_c	0.266	0.281	0.3
回弹指数 C_s	0.029	0.026	0.044
蠕变指数 C_α	4.5e-3	4.8e-3	3.8e-3
有效粘聚力 c (kN/m^2)	5	5	6
有效内摩擦角 ϕ ($^\circ$)	27	27	27
渗透系数 K_x/K_y (m/d)	2.8e-3/0.207e-3	3e-3/1.47e-3	2.108e-3/1.59e-3

计算得到的沉降位移云图和超孔压分布云图如图 6 和图 7 所示。从分布来看，软土和软土蠕变模型计算得到的位移、超孔压分布规律基本一致。靠近堤坝几何中心点的位置沉降量最大，伴随着深度逐渐减小；堤坝正下方的地基土超孔压最大，伴随着深度增加以及向两侧的扩张超孔压逐渐减小。

在堆载中心下方位置监测到的时间-沉降量变化和超孔压消散曲线如图 8 和图 9 所示。从沉降-时间曲线可以看出，在加载初期及主固结阶段（约 0~1000 天），蓝色曲线（软土模型）的沉降发展速度快于红色曲线（软土蠕变模型），且在同一时间点软土模型的沉降量更大。这是因为软土蠕变模型中考虑了时间效应，在较快的加载速率下，土体骨架表现出更高的瞬时刚度。两者的超孔压消散趋势基本一致，但软土蠕变模型模型（红色）的消散速度略慢于软土模型（蓝色），且由于蠕变引起的骨架持续挤压，超孔压完全消散至零所需的时间更长。

当计算时间超过 2000 天后，超静孔隙水压力已基本消散完毕（图 9），软土模型（蓝色）的沉降曲线趋于水平，说明主固结结束后变形基本停止，最终稳定在约 0.72m。相反，软土蠕变模型（红色）在主固结结束后，曲线依然保持一定的斜率持续向下延伸。在 4000 天（约 11 年）时，软土蠕变模型的沉降量（约 0.745m）已超过软土模型，并表现出明显的对数时间线性增长特征。这准确地模拟了软土在有效应力恒定下的次固结蠕变现象。

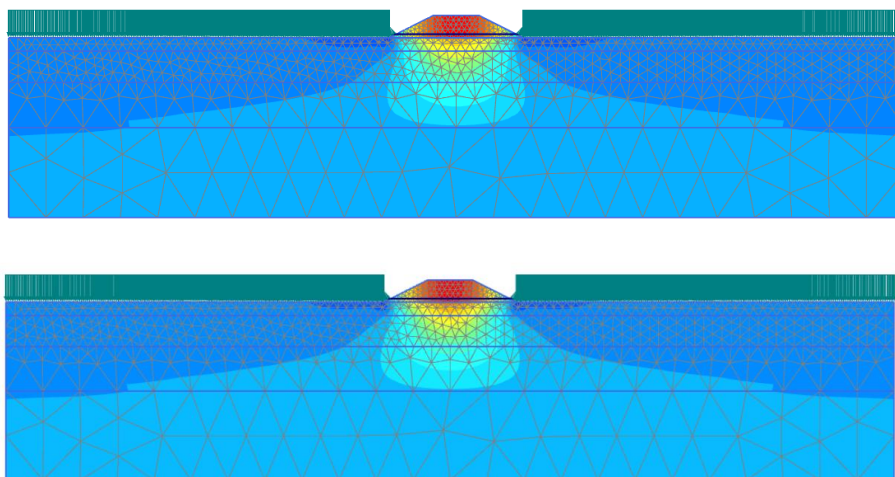


图 6 软土（上）和软土蠕变（下）模型的沉降位移云图

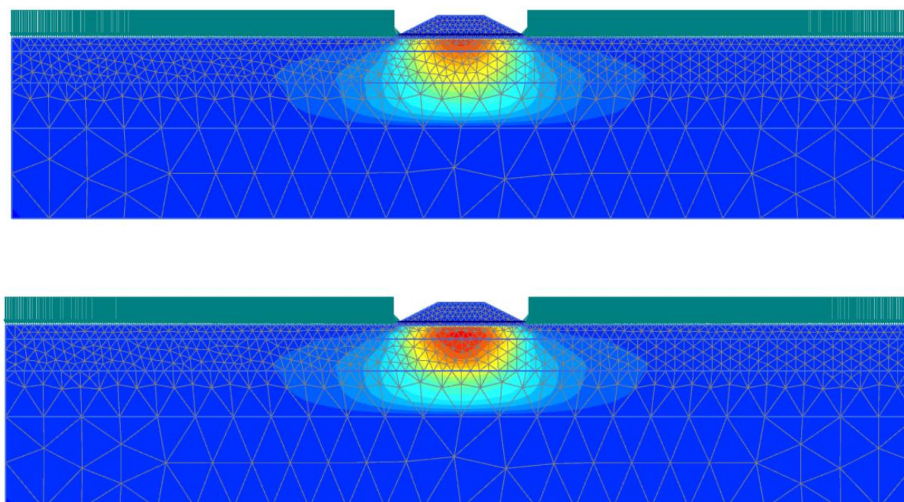


图 7 软土（上）和软土蠕变（下）模型的超孔压分布

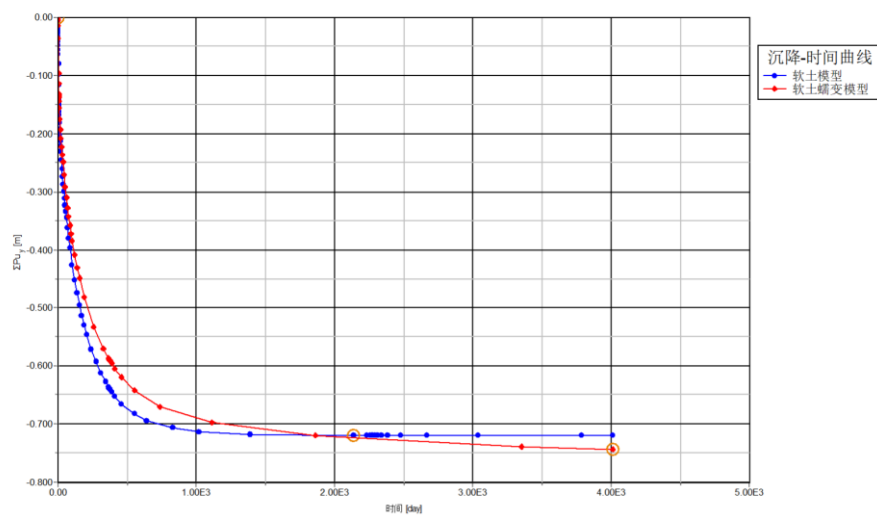


图 8 软土和软土蠕变模型沉降时间曲线

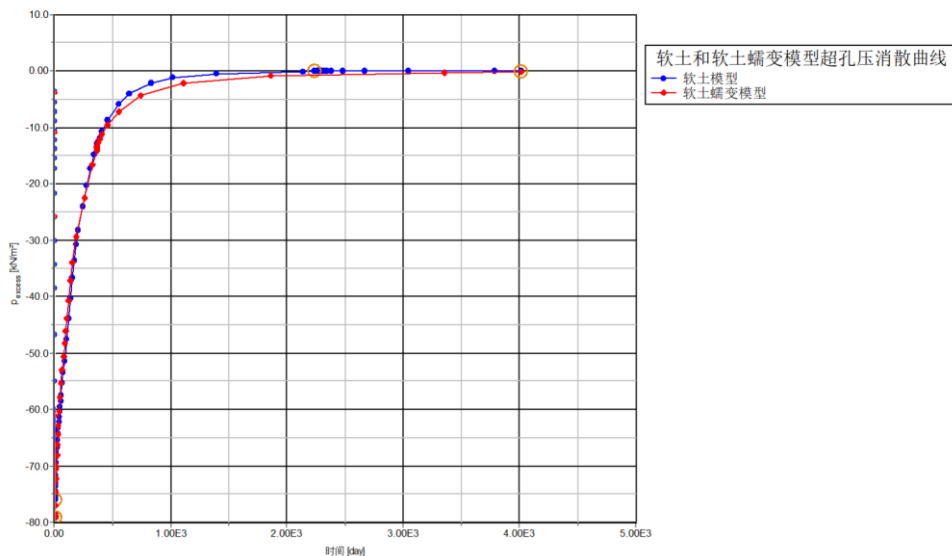


图9 软土和软土蠕变模型超孔压消散曲线

4.小结

本文简述了 PLAXIS 固结沉降理论及固结沉降分析中的注意事项，重点对模拟软土行为的软土模型（SS）和软土蠕变模型（SSC）从基本特征、参数体系、数值算例等多个维度进行了系统对比。得出的主要结论如下：

机理差异决定适用范围：软土模型基于经典弹塑性理论，侧重于模拟软土应力依赖的刚度变化与主固结体积压缩；而 SSC 模型引入了时间效应，是针对次固结蠕变专门开发的粘塑性模型。

变形响应各具特征：在一维和二维堆载固结沉降算例中，主固结阶段软土模型由于没有时间刚度硬化，其沉降发展较快；而在工后长期阶段，由于超静孔隙水压力消散殆尽，软土模型停止变形，此时软土蠕变模型能够持续捕获次固结沉降，更符合软土场地的实际变形规律。

工程应用建议：在实际工程中，如果关注的核心是施工期稳定性或短期主固结沉降，选用参数较易获取的软土模型即可满足精度要求；如果工程对运营期的工后长期变形控制严格（如高铁软基、机场跑道、高填方堤坝等），则推荐采用软土蠕变模型，并通过长期固结试验准确测定修正蠕变指数 μ^* ，以确保长期安全预测的可靠性。

参考资料

[1] PLAXIS Material Models Manual. 2025

审定：李立

返回
目录页