

PLAXIS LE 与 PLAXIS 在边坡工程中的协同应用

筑信达 郭晓通

PLAXIS 系列产品目前主要包括 PLAXIS、PLAXIS LE 及 PLAXIS Monopile Designer，其中涉及边坡工程问题的主要是前两者。PLAXIS 是岩土工程通用的有限元分析程序，可用于分析岩土体的应力与变形特性、岩土体与结构之间的相互作用、岩土工程施工过程等问题，目前已广泛应用在岩土工程领域的科研和生产中；PLAXIS LE 是 Bentley 新近推出的岩土工程分析程序，作为 PLAXIS 在岩土工程应用中的功能补充，提供了精细化的三维地质建模工具及基于极限平衡法的边坡分析功能。本文主要向各位工程师介绍 PLAXIS 与 PLAXIS LE 在边坡工程领域的协同应用。

1. PLAXIS 与 PLAXIS LE 产品的功能对比

PLAXIS 软件包可以进行岩土体的弹塑性变形、安全性、动力、渗流、流固耦合、固结等多方面的分析；PLAXIS LE 软件包是模块化的，共包含 PLAXIS Designer，Slope Stability，Groundwater，Consolidation，Dynamic 5 个主要模块，可用于三维地质模型创建及边坡稳定性、渗流、固结、动力的分析。同为岩土工程分析程序，PLAXIS 与 PLAXIS LE 有一小部分功能重叠，但各自的侧重点不同：

(1) 从分析方法来看，PLAXIS 是完全的有限元分析程序，而 PLAXIS LE 虽具有有限元功能，但核心模块仍为极限平衡法的稳定性计算，其有限元模块更多地起辅助作用。

(2) 从分析对象来看，PLAXIS 适合于处理工程岩土体、土-结构相互作用等问题，而 PLAXIS LE 的有限元模块不含结构单元，更偏向于岩土体本身的分析及非饱和土的分析计算。

(3) 从分析范围来看，PLAXIS LE 善于处理大场地及复杂地质条件下的内的边坡、渗流场、应力场问题，而 PLAXIS 更多地是针对局部区域进行分析计算。

总体来讲，PLAXIS 与 PLAXIS LE 各有其功能特色。PLAXIS LE 弥补了 PLAXIS 在复杂地质结构的处理、分析模型大小及边坡分析方法上的不足，而同时，二者也可以相互配合使用。

2. PLAXIS 与 PLAXIS LE 在边坡工程中的协同应用

2.1 PLAXIS Designer 模块可作为 PLAXIS 的模型前处理工具

三维的边坡问题，经常涉及到复杂的地表及地层分布，分析模型中地质结构的精度影响着计算精度。

对于三维地表面的创建，PLAXIS 3D 中主要有两种方式，直接导入外部的面或导入外部的点云数据创建面，而通常边坡地表数据的记录形式是等高线，这意味着等高线数据与 PLAXIS 3D 之间需要利用中间媒介进行数据处理。

对于三维地层的创建，PLAXIS 3D 中主要基于钻孔。但更多的是为了创建一个便于分析计算的简单模型。在 PLAXIS 中无法大规模布置多个钻孔，且钻孔间的地层仅可以通过线性插值得到。土层分布较为简单的工程可以通过在 PLAXIS 中的土模式直接进行模型创建，如果工程岩土体涉及到复杂的三维地层分布问题，直接在 PLAXIS 中建模则略显困难。

PLAXIS 中边坡的几何模型创建问题，可以利用 PLAXIS Designer 进行模型的前处理：

- (1) PLAXIS Designer 中创建地表及地层模型导入 PLAXIS 3D。
- (2) PLAXIS Designer 中进行大范围的地层建模，再针对局部工程抽取局部地层导入 PLAXIS 3D。
- (3) 利用 PLAXIS Designer 创建土层模型，切断面导入 PLAXIS 2D 进行分析。
- (4) 利用 PLAXIS Designer 进行三维地层可视化，根据地层分布及物理力学特性简化后在 PLAXIS 3D 中建模。

2.2 Slope Stability 模块与 PLAXIS 联合分析边坡问题



PLAXIS LE 的 Slope Stability 模块与 PLAXIS 为边坡稳定性问题提供了完整的解决方案。前者基于极限平衡法，偏向于

设计，后者基于有限元理论，偏向于分析。而 PLAXIS LE 与 PLAXIS 中的不同的计算方法也可用于相互验证：

PLAXIS LE 中，用户可以直接基于规范方法对单一边坡进行稳定性的二维、三维极限平衡计算，并进行锚杆、土钉、支护桩等支护结构的设计，或利用三维极限平衡分析理论及三维滑移面搜索方法对区域边坡的稳定性做整体评估。

对于二维边坡剖面，PLAXIS LE 中的二维边坡模型可直接导入 PLAXIS 2D 中进行边坡的分析，对于三维边坡，可由 PLAXIS Designer 作为二者共同的模型前处理工具。

PLAXIS 中，用户可以基于有限元方法对边坡的多种特性进行细节性分析，包括：

- (1) 基于强度折减法的安全系数计算
- (2) 边坡开挖、回填过程中的应力场分布问题。
- (3) 施工过程中边坡的变形。
- (4) 完全的流固耦合分析
- (5) 各类支护结构与边坡土体之间的相互作用分析
- (6) 边坡与周边的环境要素的相互影响分析。

2.3 共同分析非饱和和边坡问题

对于非饱和土的分析，非饱和土水特征曲线（SWCC）的获取至关重要。在工程生产中，不同土体 SWCC 的估算主要依赖于参数数据库。PLAXIS 中提供了标准、Hypres、UDSA、Staring 四个参数数据库，各数据库基于 V-G 模型拟合 SWCC 曲线；而 PLAXIS LE 具有更强大的非饱和土数据库及 SWCC 的估算功能。在处理非饱和土问题时，用户可以首选 PLAXIS LE 进行解决，涉及到必须使用 PLAXIS 的工程，用户可以利用 PLAXIS LE 中的非饱和数据库进行土体 SWCC 估算，再将 SWCC 导入 PLAXIS 进行分析。

3. PLAXIS 与 PLAXIS LE 对某公路边坡的协同分析案例

3.1 边坡概况

某三维公路边坡的 PLAXIS Designer 模型如图 1 所示。该边坡为一天然斜坡，坡体地层从上至下土层可分为 3 层，表层为残积粉质黏土，厚度约 0.5-2m，其顶、底面模型由工程测量数据和钻孔揭露的高程数据插值得到；表层以下为全风化岩，厚度 1-8m 不等，底面高程约为 4m，坡体底部为强-中风化岩，底面高程取-5m，坡体水位位于强-中风化岩体中，高程为-4m。各土层物理力学参数表见表 1。

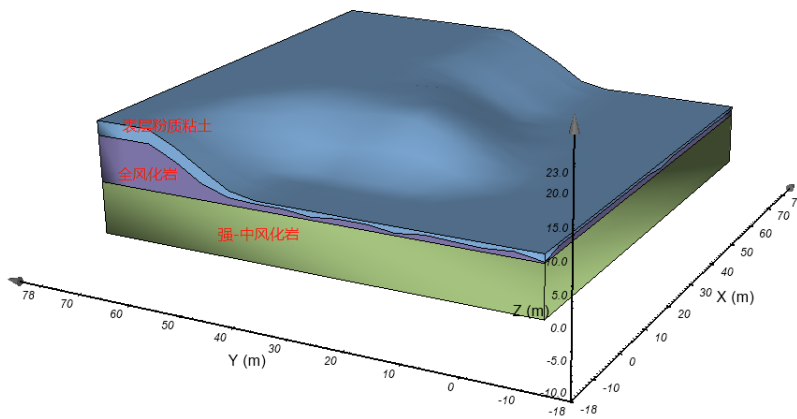


图 1 二维多平面分析

表 1 边坡土层物理力学参数表

土层名称	重度	c'	ϕ'	E(KN/m ²)
粉质粘土	18.82	25	22	15000
全风化岩	18.82	19	14	12500
强-中风化岩	19.62	294	40	450000

3.2 PLAXIS LE 中的分析计算

首先计算边坡体天然状态下的安全系数。在 PLAXIS LE 中将 PLAXIS Desinger 中创建好的三维模型导入 Slope Stability 模块，指定边坡稳定性计算方法为 Bishop，分析方法为二维多平面分析，搜索方法为布谷鸟搜索，并沿坡体布置 40 个计算剖面，如图 2 所示。

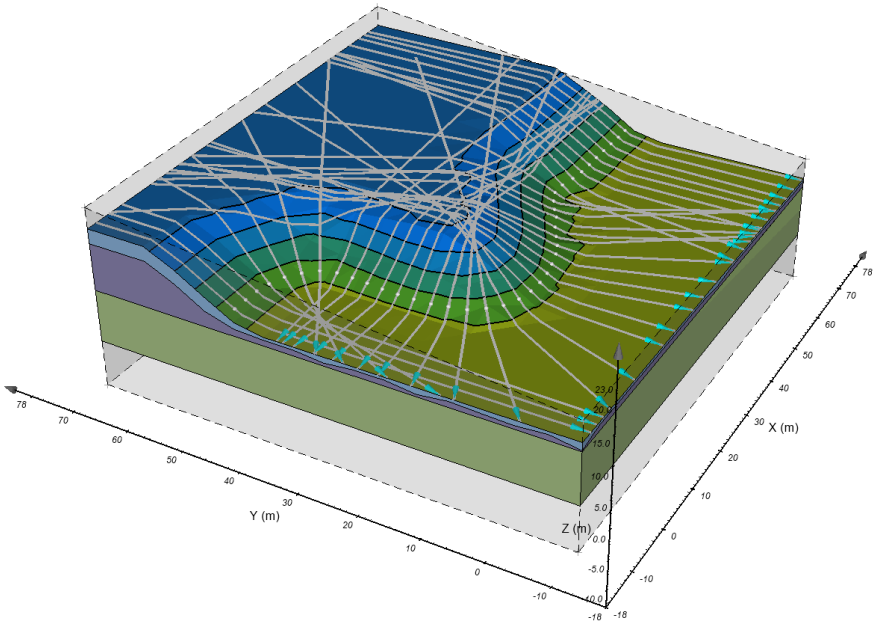


图 2 多平面分析模型

经计算，得到各计算剖面的安全系数结果如图 3 所示。天然状态下，边坡的安全系数数值整体在 1.25-1.6 范围内，整个边坡范围内中部偏左侧区域的安全系数偏小，整体在 1.25-1.3 范围内，坡体两侧安全系数整体较大，均在 1.4 以上。

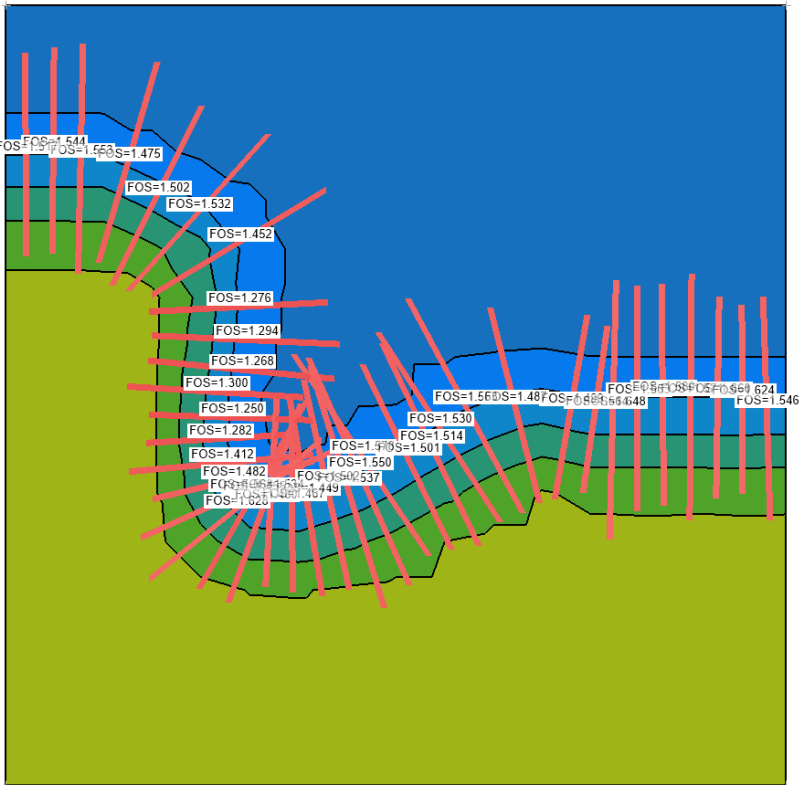


图 3 多平面分析结果

现对边坡采用土钉的支护方式，拟沿边坡布置两排土钉。PLAXIS LE 中可以非常方便地在三维模型中布置支护措施，用户只需框取土钉范围，并输入土钉竖直与水平间距、长度、倾角等参数，程序会自动地在三维模型上生成多排土钉。由于边坡左右两侧边界位置处的安全系数整体较大，为了提高计算效率，添加土钉后的多平面分析不再计算该部分区域的安全系数，计算剖面数量减少为 27 个（如图 4 所示）。

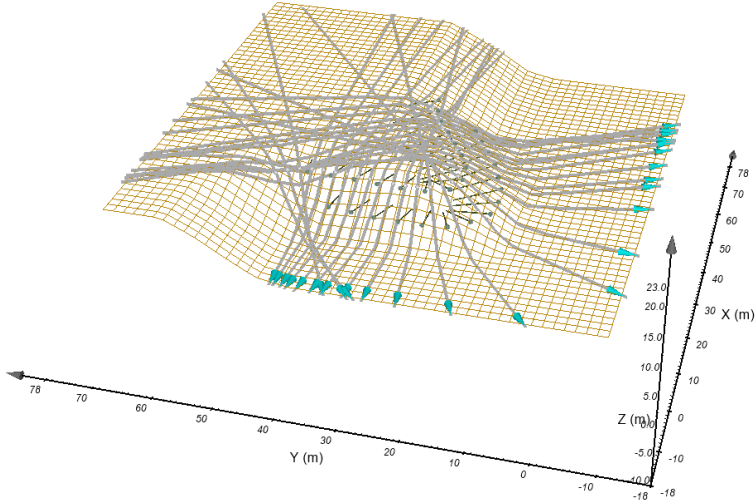


图 4 PLAXIS LE 中土钉布置

土钉添加后的边坡稳定性分析采取三维极限平衡算法，计算结果如图 5 所示。剖面范围内的安全系数整体提高，最小值依然位于边坡的中部偏左侧，具体数值达到 1.516，中部偏右侧的安全系数分布整体在 1.7-1.9 范围内。

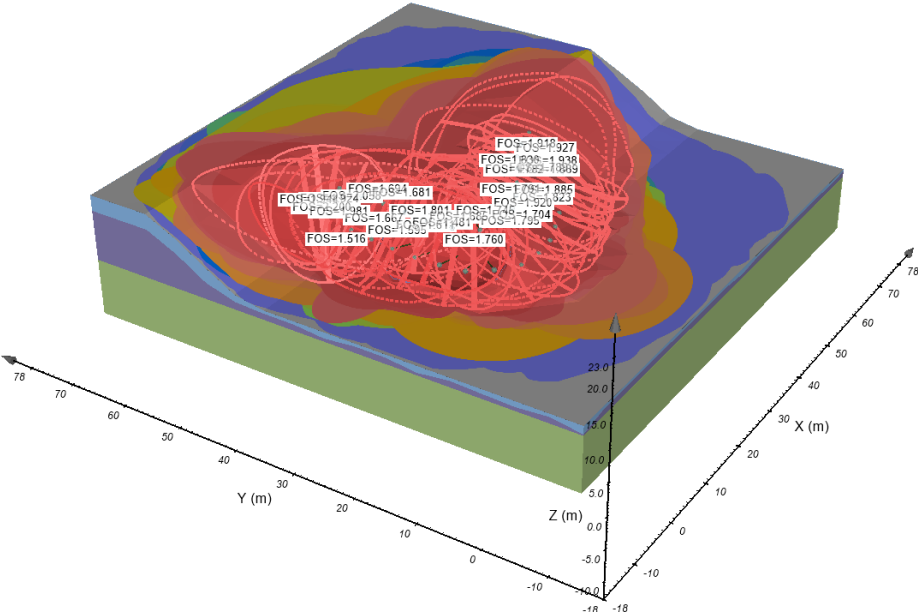


图 5 土钉加固后边坡的三维极限平衡计算结果

3.3 PLAXIS 中的分析计算

将 PLAXIS Designer 中边坡各地质界面导入 PLAXIS，在 PLAXIS 的结构模式中组装生成体模型；将 Slope Stability 模块中的土钉坐标导出，利用命令流的方式在 PLAXIS 中进行土钉的快速布置。几何模型和网格剖分结果见图 6。

在 PLAXIS 中利用有限元强度法计算边坡的潜在滑移面位置如图 7 所示，与极限平衡算法得到的结果基本一致。强度折减法得到的边坡安全系数为 1.372。

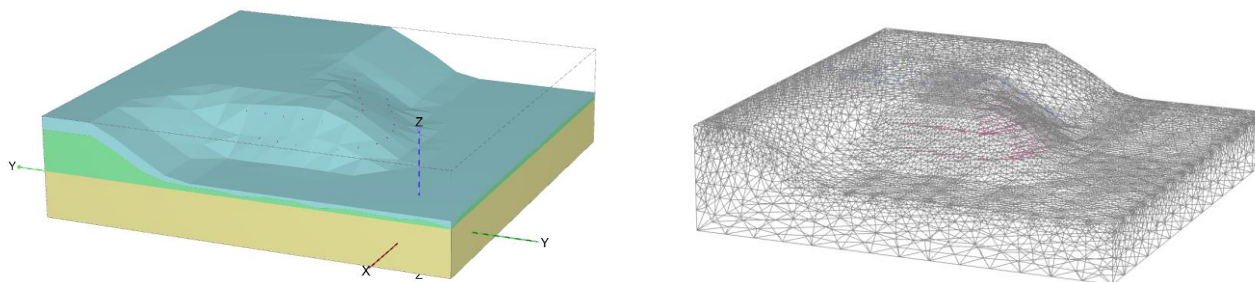


图 6 PLAXIS 中的几何模型及网格剖分结果

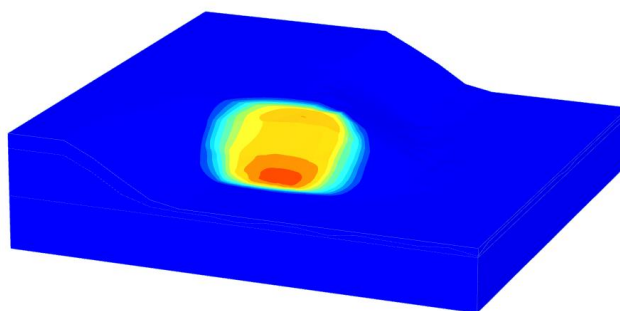


图 7 强度折减法得到的边坡潜在滑移面位置

随后，激活土钉，进行弹塑性变形计算并再次进行安全性分析，可以获取土钉的变形及轴力分布如图 8 所示。土钉施工后，强度折减法得到的边坡安全系数为 1.521。

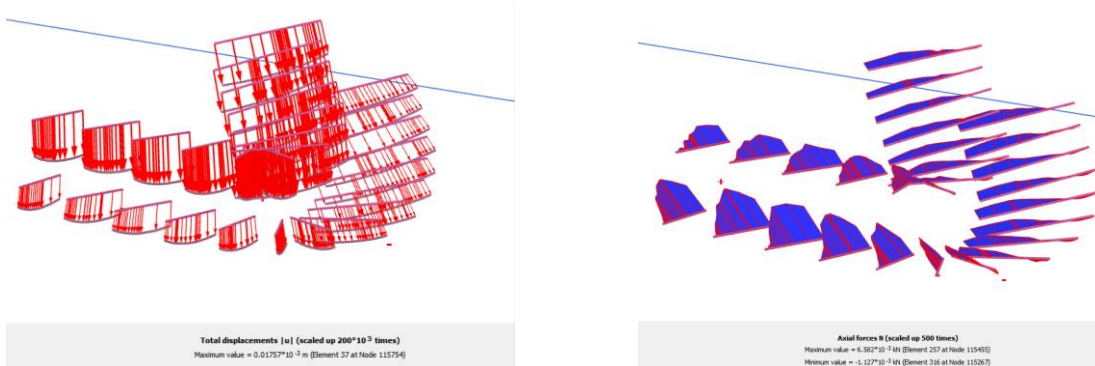


图 8 PLAXIS 中土钉计算结果

4、小结

PLAXIS 与 PLAXIS LE 具有各自的功能特色与优势点，PLAXIS 善于处理复杂的岩土体本构特性、土-结构相互作用、复杂施工过程等问题，而 PLAXIS LE 具有世界先进的极限平衡分析模块，可以解决复杂地质结构的模型创建、渗流、固结、动力问题。

对于边坡工程，PLAXIS LE 可用于边坡三维地质模型的创建及可视化、场地边坡体的二维、三维滑移面搜索及极限平衡计算，锚杆、土钉、微型桩等的设计；PLAXIS 可以用于处理边坡体内部岩体土与结构的应力、变形、相互作用问题；可以处理分析各类外部要素与边坡体本身的相互影响问题。二者相互配合，为边坡工程的设计与分析提供了完整的解决方案。

参考资料

[1] PLAXIS CE V21 Reference Manual, Bentley Systems Team,(2021).

[1] PLAXIS LE SlopeStability_Theory_Manual, Bentley Systems Team,(2021).