

# PLAXIS 3D 在复杂岩土动力工程中的应用

筑信达 郭晓通

## 1. 前言

PLAXIS 3D 是一款针对岩土工程及土-结构相互作用 (SSI) 的专业有限元分析程序。在建筑与地下结构抗震、核电厂房动力评价以及精密设备基础振动分析等领域, PLAXIS 3D 凭借其卓越的非线性动力分析能力和完善的土体本构模型库, 能够提供高精度的数值解决方案。

PLAXIS 3D 采用 Newmark 隐式时间积分方法。它通过直接求解结构在地震波作用下的动力平衡方程, 得到结构在整个地震持续时间内每一时刻的位移、速度、加速度及内力响应。与传统的刚性地基假设不同, PLAXIS 3D 允许用户在统一的有限元框架下, 同时考虑上部结构、基础形式以及周围场地土的动力耦合效应。程序通过动力模块可以模拟地震波传播、机械振动、打桩施工等各类动力荷载, 并精确预测结构的动力响应及场地地层的变形规律。

## 2. 动力工程应用场景

### 2.1 核电厂房: 全耦合 ssi 与楼层反应谱分析

核电厂房属于重型结构, 其动力响应受场地地层条件影响极大, 传统抗震设计常将基础底板简化为刚性, 或使用简单的弹性、弹塑性岩土体模型, 忽略了土体的非线性刚度、阻尼及地基的不均匀性。

HS-small 模型是斯图加特大学 Benz, T 开发的非线性土体本构模型, 并应用于 PLAXIS 3D。该模型通过基于 Masing 规则的准弹性滞后方案, 与一个各向同性硬化塑性模型 (HS 模型) 结合, 解释了土体在正常应变和小应变范围内的各类非线性行为。HS-small 模型的主要优势包括:

1、滞回阻尼的自动捕捉: 这是 HS small 在动力分析中最重要的优势。由于模型引入了小应变刚度随应变增加而衰减的特性, 在循环荷载作用下, 模型会自动形成应力-应变滞回环。

2、剪切模量退化曲线: 在动力响应中, 土体的刚度会随着振动幅度的增大而迅速降低。HS-small 能够完美拟合实验室测得的模量退化曲线, 这使得它在模拟地震波通过土层时的放大效应或过滤效应时, 比常规模型精确得多。

3、参数获取与实测对应性强: 小应变参数可通过现场的原位测试 (如波速测试) 或室内共振柱试验获取, 常规刚度参数可以通过三轴压缩、固结试验获取。

通过在 PLAXIS 3D 中建立包含核岛、辅助厂房及周围地层的全尺寸三维模型, 利用 Hs-small 本构模型模拟场地土的非线性刚度衰减与滞回阻尼。工程师可以通过计算得到精确的、各楼层不同位置的加速度时程, 并生成楼层反应谱 (FRS), 真实还原土-结构的能量交换过程, 避免了因简化假设导致的反应谱峰值过估或漏估。

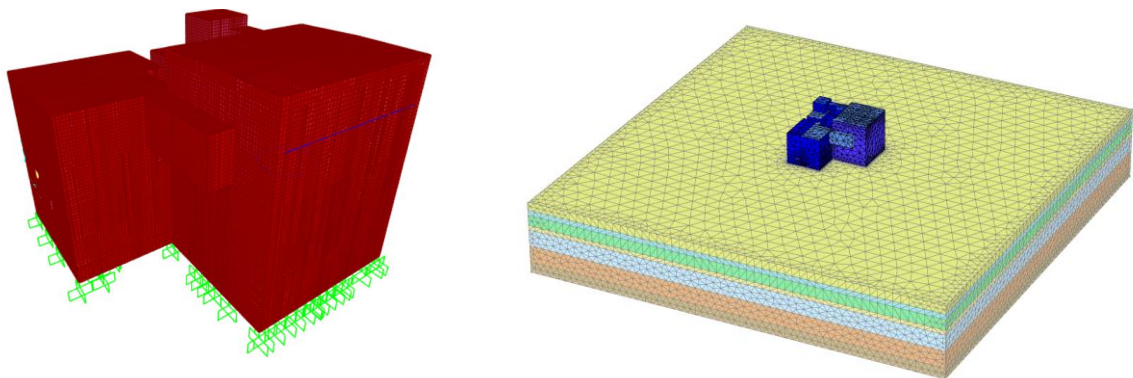


图 1 某厂房的土-结构相互作用分析模型

### 2.2 水利大坝: 动力超孔压与震后液化稳定性

针对土石坝或尾矿坝, 地震诱发的液化是威胁坝体安全的核心风险, 震动过程中孔隙水压力的累积会导致有效应力丧失, 进而引发渗透破坏或坝坡失稳。

UBC3D-PLM 是公认的用于模拟砂土液化及其动力响应最有效的本构模型之一。它源于著名的 UBCSAND 模型,由 Beaty 和 Byrne 开发,后来由 PLAXIS 团队进行了三维化扩展 (PLM 代表 PLAXIS Model)。UBC3D-PLM 是一个基于有效应力的弹塑性模型,其核心在于能够捕捉循环剪切过程中孔隙水压力的累积。UBC3D-PLM 模型的主要优势包括:

- 1、捕捉液化循环迁移: UBC3D-PLM 可以模拟砂土在液化过程中出现的“循环迁移”现象。即随着孔压升高,有效应力减小,土体刚度逐渐降低,导致应变周期性增大。
- 2、二次硬化效应: 模型考虑了应力路径的影响。当土体从压缩状态转为剪切状态时,它能准确反映出砂土的剪胀和剪缩转换点。
- 3、参数获取相对标准化: 核心输入参数大多与标准贯入试验 (SPT) 的击数挂钩,这使得工程实用性大大增强。

利用 UBC3D-PLM 等液化专用模型, PLAXIS 3D 可以在动力时程分析中同步计算超孔隙水压力的产生与消散,同时支持模拟通过附加质量功能模拟水库水对大坝上游面的动力冲击,不仅能评估震中的动力位移,还能分析震后由于孔压未能及时消散导致的滞后性滑坡风险。

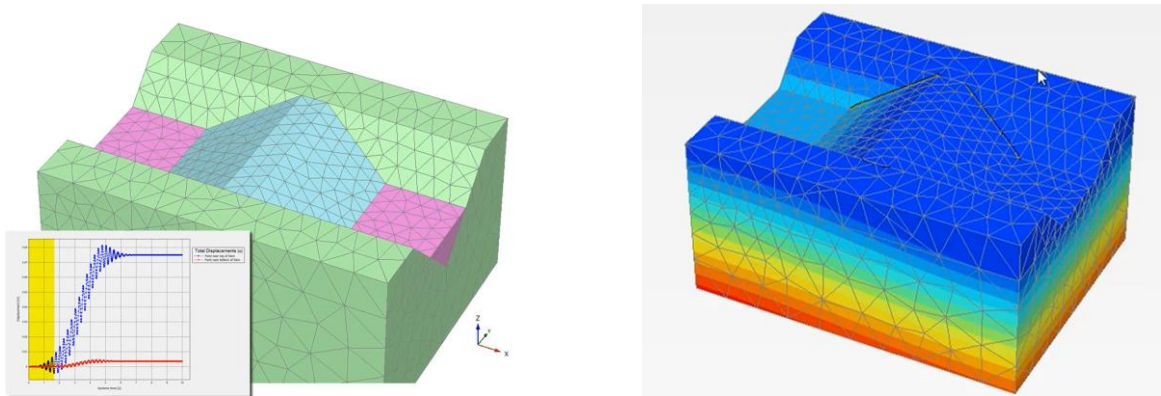


图 2 土石坝的动力响应分析

### 2.3 地下结构: 变形协调与结构-地层动力演化分析

地下结构 (如地铁车站、超长盾构隧道、地下综合管廊) 的地震响应与地上结构显著不同。其受力特征并非由自身惯性力主导,而是深受周围地层的约束与挤压。传统的静态反应位移法往往难以准确模拟复杂土层 (如软硬互层) 在动力载荷下的非线性退化,且无法有效捕捉地震波斜入射引发的纵向剪切与扭转效应。

通过在 PLAXIS 3D 中构建包含完整地层与支护体系的三维整体模型,利用 HS-small 和摩尔-库伦模型模拟土体与岩石行为;利用自由场边界确保地震能量无损输入;利用界面单元模拟结构与岩土体间的动力接触行为 (如滑移、脱开),可以得到精细的地下结构变形、内力、加速度响应。

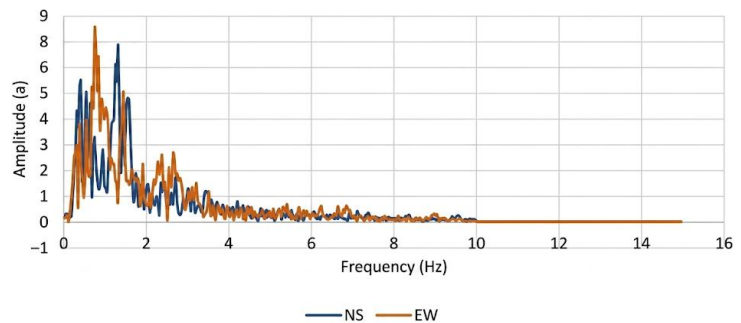
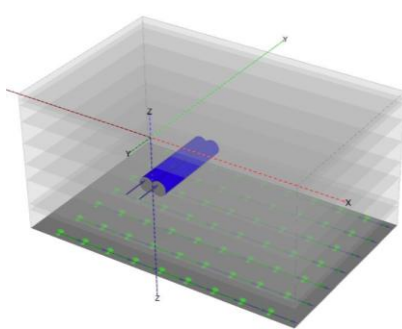


图 3 DOT 盾构隧道抗震分析<sup>[2]</sup>

### 2.4 建筑与工业厂房: 环境振动评估

建筑与工业厂房对来自地铁、交通或内部机械的微振动控制要求日益严苛,微振动通常属于高频、小振幅扰动,数值模拟中的“数值阻尼”和“网格色散”极易掩盖真实振动信号。

通过在 PLAXIS 3D 中建立地基-基础-设备的整体动力响应分析模型,在模型中输入模拟动力设备运行的振动荷载或实测的环境背景振动时程,可以分析评估振动在地基土中的传播过程,可以得到环境振动对当前厂房、设备的影响,并评估防振

沟、厚大基础对振动波的屏蔽效果，为高标准工业环境的微振动评估提供数字化技术支持。

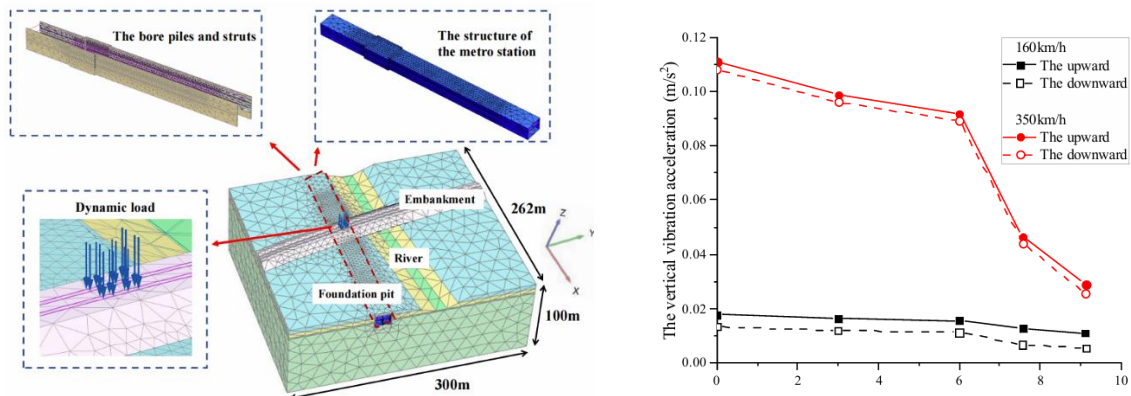


图 4 列车移动引起的振动评估<sup>[3]</sup>

### 3.动力分析设置

#### 3.1 动力荷载的输入

在 PLAXIS 3D 动力分析中，输入的动力荷载类型包括荷载和指定位移，其中指定位移类型包括速度、加速度、位移三种。PLAXIS 3D 通过基础荷载(或指定位移)与乘子(Dynamic Multipliers)相结合的方式来实现随时间变化的响应。乘子是 PLAXIS 3D 输入动力信号的核心机制。用户需要定义一个随时间变化的函数，程序会将其与指定的点、线、面几何对象上的荷载/指定位移相乘。输入信号类型包括：

- 1、谐波信号：通过定义振幅、频率和相位角来生成正弦波，常用于模拟机械振动。
- 2、表格数据：用户可以手动输入或导入外部文本文件（如.smc 或地震波 ASCII 文件），包含“时间-数值”对。这通常用于输入地震加速度时程。

通过这种“几何荷载+时间乘数”的输入模式，PLAXIS 3D 能够灵活地模拟从简单的机器简谐振动到复杂的随机地震波响应等各类工程问题。

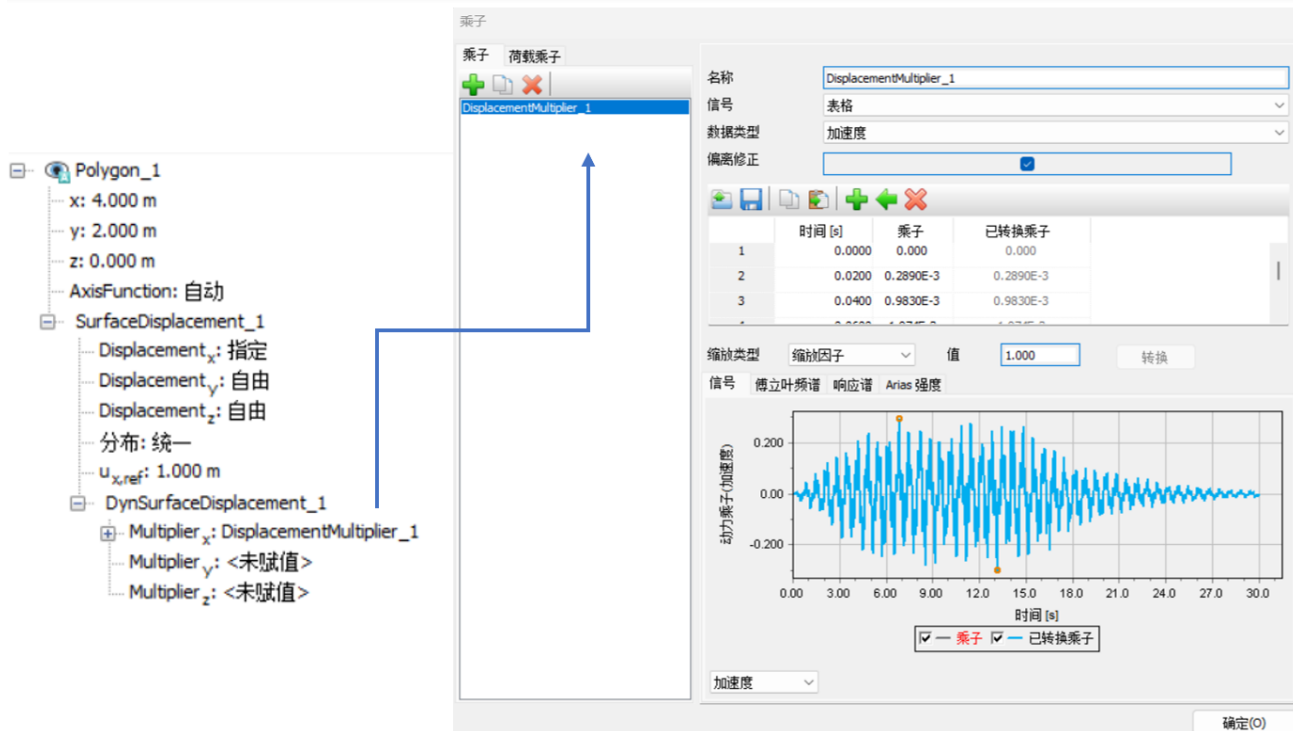


图 5 动力荷载创建

3.2 动力边界条件

PLAXIS 3D 中的动力边界条件包括：

1、粘性边界 (Viscous)

应用场景：适用于动力源位于模型内部的问题（如机械振动、打桩等）。

基本原理：基于 Lysmer & Kuhlmeyer (1969)的方法，在边界处使用阻尼器代替传统的固定约束。阻尼器确保边界上的应力增量被直接吸收，而不会向模型内部产生回弹。阻尼器在水平方向上吸收的法向应力和切向应力通过材料密度、波速和节点速度进行计算： $\sigma_n = -C_1\rho V_p\dot{u}_x$   $\tau = -C_2\rho V_s\dot{u}_y$

其中， $\rho$ 为土体密度， $V_p$ 、 $V_s$ 为波速， $\dot{u}_x$ 和 $\dot{u}_y$ 为节点速度， $C_1$ 和 $C_2$ 为松弛系数，在实际应用中， $C_1$ 和 $C_2$ 取 1 即可达到理想的吸收效果。

2、自由场边界 (Free-field)

应用场景：适用于动力源作为边界条件施加的问题，例如地震运动输入。

基本原理：由自由场单元组成，并通过阻尼器与主网格耦合（如图 6 所示）。自由场单元采用与其相邻的主域土体单元具有完全相同的力学本构模型，它通过施加等效力将自由场运动传递到主域，同时利用阻尼器吸收来自内部结构的向外传导波。其吸收公式考虑了主网格与自由场单元之间的速度差： $\sigma_n = -C_1\rho V_p(\dot{u}_x^m - \dot{u}_x^{ff})$   $\tau = -C_2\rho V_s(\dot{u}_y^m - \dot{u}_y^{ff})$

其中， $\dot{u}_x^m$ 和 $\dot{u}_y^m$ 为主域的节点速度， $\dot{u}_x^{ff}$ 和 $\dot{u}_y^{ff}$ 为自由场单元上的节点速度。

3. 柔性基底边界 (Compliant Base)

应用场景：施加于模型底部，允许同时进行地震输入的施加与波的吸收。

基本原理：该边界条件与自由场边界类似，但在柔性基底中，吸收公式会将自由场单元的速度乘以系数 2，以确保足够的能量传递到主域进行计算： $\sigma_n = -C_1\rho V_p(\dot{u}_x^m - 2\dot{u}_x^{ff})$   $\tau = -C_2\rho V_s(\dot{u}_y^m - 2\dot{u}_y^{ff})$

此外，在从静力分析过渡到动力分析时，由于边界上的固定约束被移除，边界可能会因为应力平衡被打破而产生位移。

PLAXIS 3D 会将原始边界应力转化为虚拟的初始边界速度，在后续计算中，程序会从真实速度中减去该初始速度，以确保计算是基于增量响应进行的。

适用于地震分析的标准边界条件设置如图 7 所示：

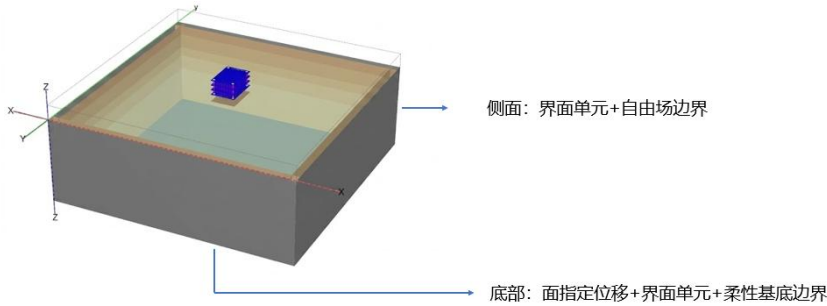


图 7 地震分析边界条件设置

适用于场地机械振动的标准边界条件设置如图 8 所示：

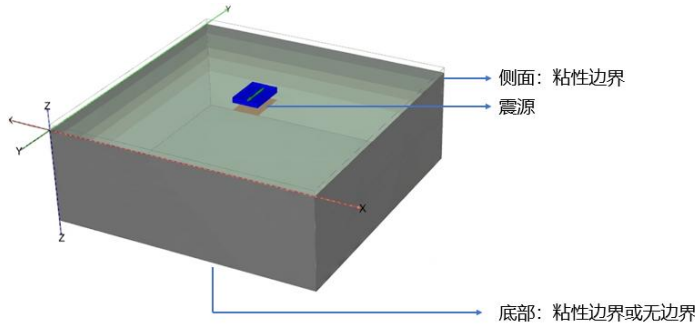


图 8 机械振动分析边界条件设置

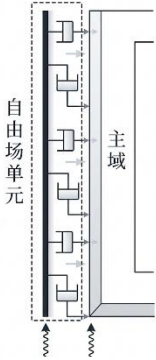


图 6 自由场单元示意图

### 3.3 动力分析相关控制选项

在数值求解策略上，PLAXIS 3D 默认使用平均加速度法（ $\alpha=0.25$  和  $\beta=0.5$  的 Newmark 时间积分方案），该配置具有无条件稳定且不产生数值阻尼的特性，确保了计算的高可靠性。在动力控制参数中，用户也可以针对该方案进行手动调整（如图 9 所示）。

为平衡计算精度与效率，程序内置了自动时间步长机制。同时，用户也可通过半自动或手动方式进行干预（如图 10）。程序会基于场地波速与网格尺寸特征，提供建议的最大时间步长及相应的子步数（Sub-steps）。子步数的设计是为了在宏观计算步内进一步细化积分频率，确保地震波中瞬时变化的峰值不被遗漏，从而提高频谱响应的覆盖范围。

动力控制参数	
Alpha - Newmark 时间积分	0.2500
Beta - Newmark 时间积分	0.5000
质量矩阵	0.000

图 9 动力控制参数调整选项

最大步数	100
时间步长确定	自动
子步骤数	自动
容许误差	半自动
最大卸载步数	手动
	5

图 10 步长调整选项

PLAXIS 3D 的后处理模块可以提取丰富的动力指标，包括各节点位置的加速度、位移响应；结构构件内力的动态变化；频谱与楼层反应谱等结果。

### 4.小结

PLAXIS 3D 的动力分析能力不仅体现在实现结构动力响应的模拟，更体现在其对复杂岩土体行为的精细表达。其主要优势包括：

土-结构相互作用（SSI）分析能力——通过界面单元与动力边界条件的合理设置，可真实反映结构基础与周围土体之间的动力耦合效应，捕捉接触非线性与能量传递机制。

非线性时程分析能力——在计算过程中持续更新土体应力-应变状态，能够模拟材料刚度退化、强度演化及累积塑性变形，从而更准确地预测永久变形与破坏模式。

水-力耦合动力分析能力——支持在动力加载过程中同步计算孔隙水压力的产生、发展与消散过程，可用于分析液化、超孔压积累及其对结构稳定性的影响。

此外，在有限元分析中，动力分析相比静力分析有更高的时间成本，PLAXIS 3D 的显著优势是通过用户友好的输入程序和自动网格求解器，可以大幅度缩减有限元模型创建的时间，同时基于高效的非线性求解器和步长自动优化机制，可以提供快速、稳定的求解体验。

### 参考资料

[1] Lysmer, J., Kuhlmeier, R.L. (1969). Finite dynamic model for infinite media. ASCE J. of the ENg. Mech. Div., 859-87.  
 [2] Hsu, C.-F.; Huang, C.-H.; Li, Y.-F.; Chen, S.-L.; Wang, C.-D. Three-Dimensional Seismic Analysis of Symmetrical Double-O-Tube Shield Tunnel. Symmetry 2025, 17, 719.  
 [3] Weiyang Wang, Quanqiang Huang, Ke Pan, Jinmei Li, Dynamic analysis on the structure of metro station under high-speed railway load, 63rd International Conference on Vibroengineering in Shanghai, China, May 18, 2023.