

基于 UBC3D-PLM 本构模型的砂土液化分析

筑信达 郭晓通

地震作用下，饱和砂土在振动作用下有颗粒移动和致密化趋势。由于孔隙水短时间内无法排出，土体内孔隙水压力急剧上升。当孔隙水压力等于总应力值时，有效应力下降为零，土体即发生液化。此时砂土颗粒处于悬浮状态，完全丧失承载力，造成建筑物大量沉陷和倒塌。

目前，研究砂土液化的方法主要有现场震害调查及经验方法、室内试验方法、数值模拟方法等。通常情况下，精确的场地响应分析需要对岩土体进行较深入的调查，例如：场地原位试验、循环三轴试验、循环直剪试验、共振柱试验等。PLAXIS 中的 UBC3D-PLM 本构模型可用于描述饱和砂土在循环荷载作用下的力学性能以及砂土的液化行为。该本构模型的输入参数主要基于常规的剪切试验和标准贯入试验，在保持计算精度的同时，用户也便于收集数据和工程应用。

1. UBC3D-PLM 本构模型

UBC3D-PLM 是 PLAXIS 在 UBCSAND 模型的基础上进一步改进后的本构模型。基于原始的邓肯-张模型，UBCSAND 是在经典塑性理论中建立的具有双曲应变硬化准则的二维本构模型。UBC3D-PLM 在此基础上扩展至广义的三维主应力空间。

1.1 弹塑性行为和硬化准则

UBC3D-PLM 模型中包含了对土体的非线性弹性行为的描述，主要由弹性体积模量 K 和弹性剪切模量 G 来定义。 K 和 G 的值主要受用户输入的弹性体积模量因子和弹性剪切模量因子等参数控制。

UBC3D-PLM 模型包含两个屈服面，在三维主应力空间中，UBC3D-PLM 模型使用莫尔-库伦屈服面进行初次加载，使用一个具有运动硬化准则的屈服面进行二次加载。模型中的硬化准则基于应变硬化原理（类似于硬化土模型），将运动摩擦角与给定应力下的塑性剪切应变联系起来，以控制塑性应变的数量和抗剪强度结果。初次加载过程中的塑性剪切模量因子与用户输入的参数相同，二次加载过程中的塑性剪切模量因子是加载过程中循环次数的函数，保证土体从初始状态到液化状态的平稳过渡。此外，为了保持偏应力平面上应力-应变同轴的假设，UBC3D-PLM 本构模型在其初始屈服面中采用了一种基于 Drucker-Prager 准则的修正的非相关塑性势函数作为流动准则。

关于该本构模型理论的详细介绍，请读者参阅《PLAXIS 材料模型手册》第八章内容。

1.2 主要参数及取值

UBC3D-PLM 模型中的主要参数如下，其中 $(N_1)_{60}$ 为修正的标贯击数。

刚度参数：

k_G^{*e} ：弹性剪切模量因子	$21.7 \times 20 \times (N_1)_{60}^{0.3333}$
k_B^{*e} ：弹性体积模量因子	$k_B^{*e} = 0.7 k_G^{*e}$
k_G^{*p} ：塑性剪切模量因子	$k_G^{*e} \times (N_1)_{60}^2 \times 0.003 + 100$
me：弹性体积模量的应力依赖性	(0-1) 推荐值 0.5
ne：弹性剪切模量的应力依赖性	(0-1) 推荐值 0.5
np：塑性剪切模量的应力依赖性	(0-1) 推荐值 0.4

P_{ref} ：参考压力 默认为 100

强度参数：

ϕ_{cv} ：定容摩擦角	土工试验结果
ϕ_p ：峰值摩擦角	土工试验结果

高级参数:	c : 黏聚力	土工试验结果
	σ_t : 抗拉强度	一般为 0
	R_f : 破坏比	$1.1(N_1)_{60}^{-0.15}$
	f_{dens} : 放大系数	推荐值为 1
	f_{Epost} : 后液化因子	推荐值 0.2-1
	σ_t : 抗拉强度	一般为 0

1.3 液化判别及注意事项

PLAXIS 在 UBC3D-PLM 本构模型的结果输出中, 提供了竖向有效应力的超静孔隙水压力比 r_{u,σ_v} 和平均有效应力的超静孔隙水压力比 $r_{u,p}$ 等计算结果, 如图 1.1 所示。在某些砂土液化的研究中, 以上述两个参数来定义液化标准。在 PLAXIS 的液化区域判别中, 以孔隙水压力比 R_u 的值作为液化判别标准, PLAXIS 定义 $R_u > 0.95$ 的点为液化点, 用户也可以通过查看塑性点分布来查看液化范围, 紫色倒三角形显示的点即为液化点。

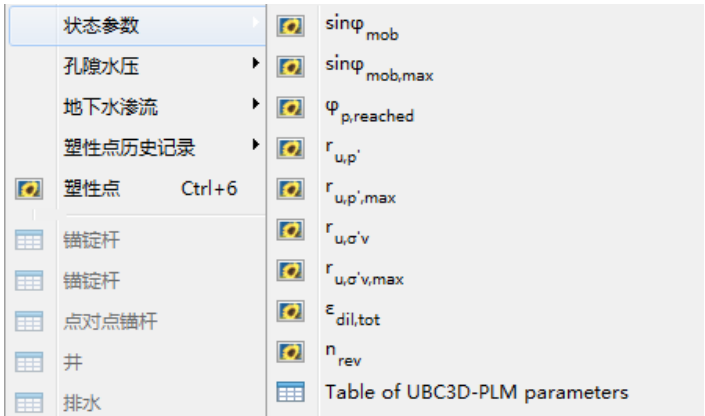


图 1.1 动力计算中土层的状态参数

在使用 UBC3D-PLM 本构模型时, 首先应注意, 土体参数中的排水类型应选择“不排水 A” (如图 1.2 所示), 以瑞利阻尼定义土体的初始阻尼特性。此外, UBC3D-PLM 模型主要用于模拟动力条件下土体的响应, 并不适用于静力分析, 尤其需注意的是初始应力状态不推荐使用重力加载的方式。

名称	1
材料模型	UBC3D-PLM
排水类型	不排水 (A)
颜色	RGB 230, 181, 132
注释	

图 1.2 土的排水类型

2、场地液化分析实例

2.1 模型概述及分析流程

图 2.1 所示为一土石坝场地模型, 坝体由土石混合料组成, 地基土共分为四层, 从上至下分别为粉砂、细砂、粉质黏土、中砂, 厚度分别为 2m、16.5m、17.5m、5m。不考虑坝前蓄水状态, 地下水埋深为 0m, 区域地震动峰值加速度为 0.5g。三层砂土均采用 UBC3D-PLM 本构模型, 修正的标贯击数分别为 5.5、15、45。根据标贯击数值大致推断, 第一层砂土中有可能发生液化。粉质黏土采用土体硬化本构模型, 土石坝采用摩尔-库伦本构模型。根据修正的标贯击数和土工试验结果来进行各

土层参数的输入。

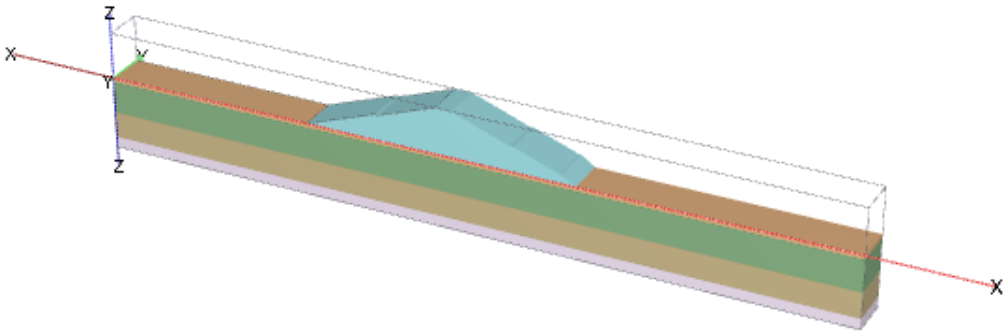


图 2.1 土石坝场地模型图

模型底部添加指定面位移来模拟地震作用，位移乘子类型选择为加速度，考虑水平和竖向地震作用，并选取一条天然波来定义动力分析中地震波的时程曲线（图 2.2）。

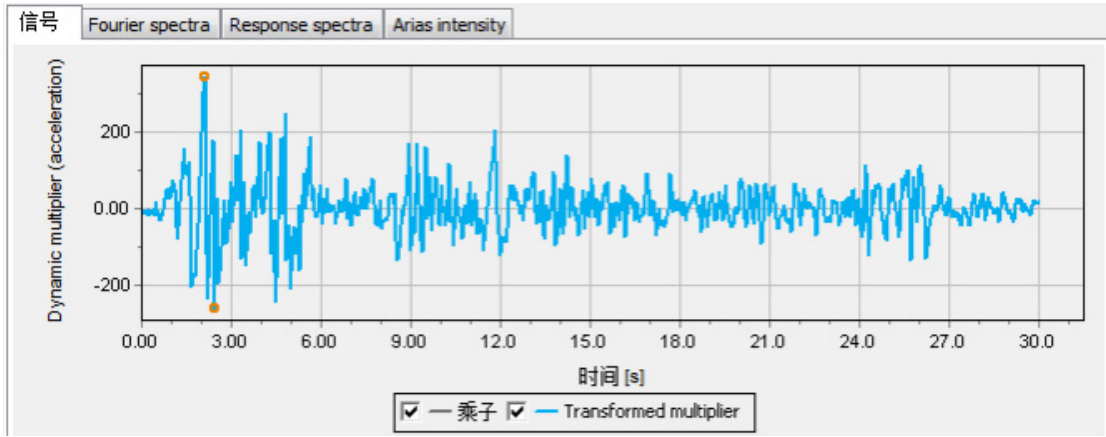


图 2.2 地震时程曲线

模型位移边界条件保持默认值，动力边界条件选择为自由场边界。初始阶段，采用 K0 法生成地基土的初始应力状态，阶段一激活坝体进行塑性计算，模拟坝体修筑后的场地应力场，同时修改砂土层的本构模型为硬化土模型，以避免使用 UBC3D-PLM 模型引起的静力计算不精确的现象。阶段二选择计算类型为动力计算及模型底部面位移，动力时间间隔设定为 10s。

ID	Phase_3 [Phase_1]
起始阶段	Phase_2
计算类型	动力
荷载类型	分步施工
孔压计算类型	使用前一阶段的压
动力时间间隔	10.0000 s
第一计算步	1

图 2.3 动力计算设置

2.2 分析结果

经计算，得到 10s 后坝体的整体变形如图 2.4，最大变形位置发生在土石坝顶部和坝体底部的粉砂层中。最大位移值为 0.1238m。总体变形趋势为坝体中部的沉降及其对坝底土层的挤压效应。

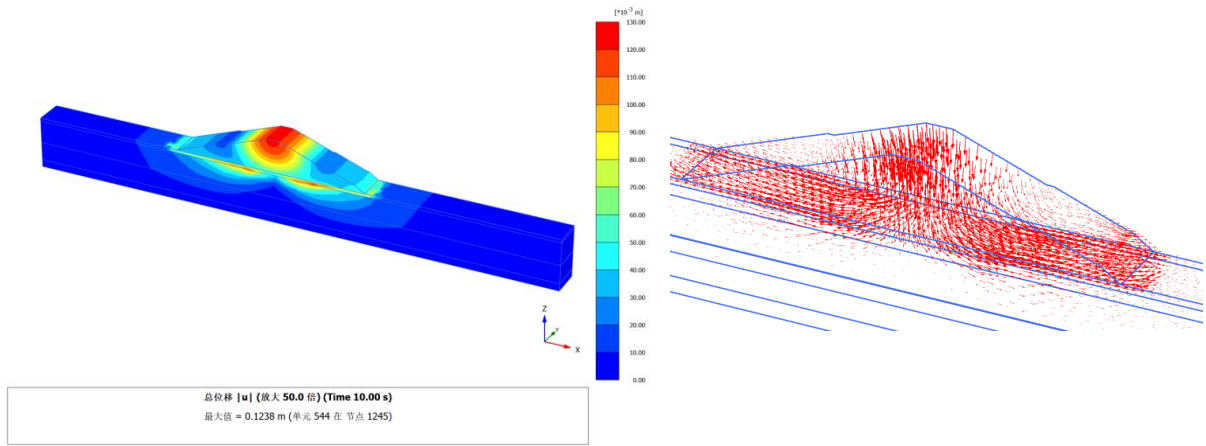


图 2.4 10s 后场地整体变形图

查看模型中液化点的分布如图 2.5，坝体底部的表层砂土中发生了振动液化现象。

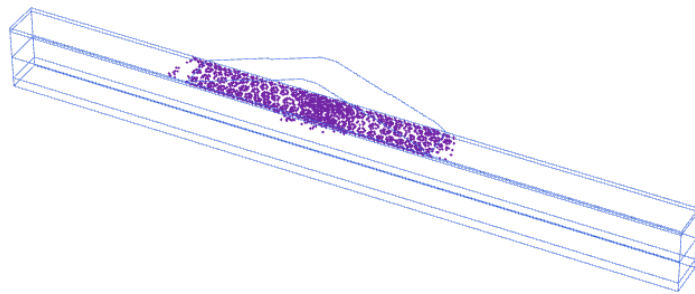


图 2.5 液化区域分布图

选取坝体底部粉砂层中的某一个应力点作为监测点，输出孔隙水压力随时间变化的曲线。如图 2.6 所示，土层中的孔隙水压力不断波动，在地震发生 0.6s 后达到最大值，随后逐渐减缓趋于平稳，最后稳定在约-72kPa 的位置。

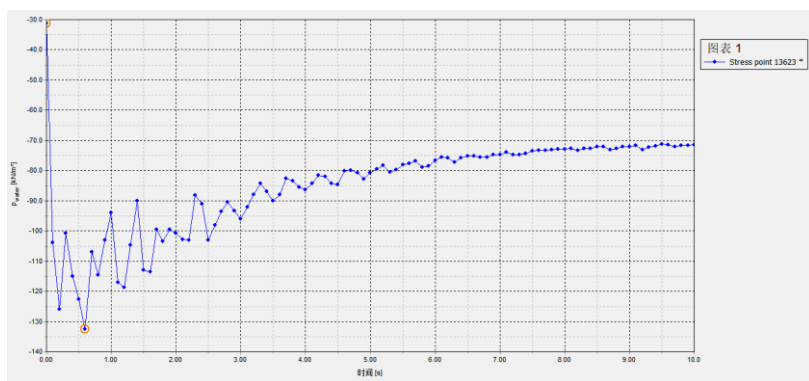


图 2.6 孔压-时间曲线

4、小结

UBC3D-PLM 本构模型是 PLAXIS 在 2018 版本之后新增的本构模型，同时适用于 PLAXIS 2D 和 PLAXIS 3D。该模型可以精确描述饱和砂土在循环荷载下的力学性能和动力荷载下的液化行为，且提供了方便可行的参数输入方式，所以推荐用户可尝试使用 UBC3D-PLM 本构模型进行工程场地的砂土液化分析。