



DeepEX 应用案例——上海某地铁深基坑开挖工程

筑信达 詹毕顺

本文主要利用 DeepEX 深基坑设计软件分析上海软土地区某地铁深基坑开挖工程。该工程信息来源于论文 *Performance of a deep excavation in soft clay* (同济大学 G.B. Liu、J Jiang 等)。根据论文提供的基坑及土层资料在 DeepEX 中重现该开挖过程，并将计算结果与论文中监测数据进行对比，以验证 DeepEX 分析计算的可靠性。另外，通过学习本案例，用户可以了解 DeepEX 中深基坑开挖建模全过程以及其独有的坑底加固模拟方法，以便更好地处理类似工程问题。

1. 工程概况

本工程位于上海市西南地区，是地铁 4 号线和地铁 9 号线的交汇点。场地平面布置，如图 1 所示。其中阴影部分为基坑位置，基坑宽 35m，开挖深度 20.7m。基坑采用地连墙以及多道内支撑组成的支护结构体系，断面如图 2 所示。为了提高基坑底部软黏土承载能力，对坑底以下 3m 区域内土体进行压密注浆处理。^[1]

基坑位于典型的上海深厚软土地层中，地层由第四纪陆相冲积层和海相沉积层组成。^[1]其土体具有高含水率，高压缩性，低渗透性，低承载力等特征。地下水位位于地表以下 1.0m 处。^[1]

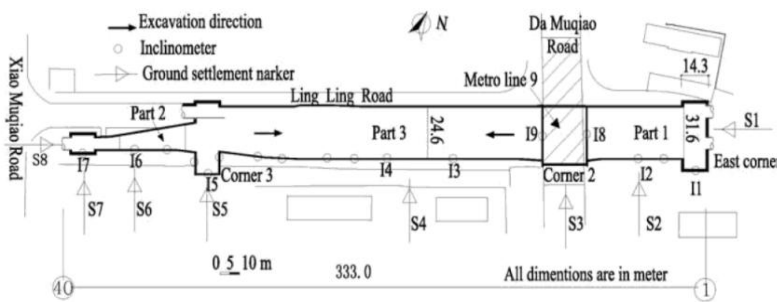


图 1 基坑平面位置图

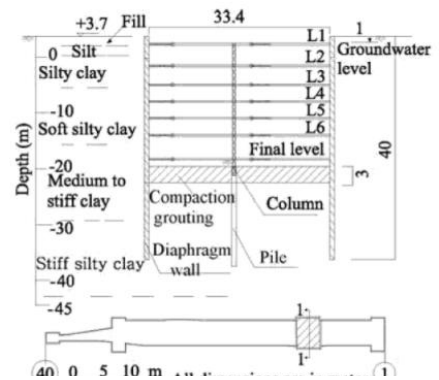



图 2 基坑断面图

2. 土体及支护参数选取

2.1 土体参数

DeepEX 中土体参数大致包括重度、强度参数、刚度参数、静止土压力系数、渗透系数等。要想获得所有这些参数，需要通过大量的现场和室内试验。在已知参数具体数值后，用户可以直接创建相应土体材料。但是，大多数情况下，我们没有办法直接获得所有参数。因此，为了方便用户使用，DeepEX 中提供了大量估算公式、图表以及推荐值，甚至还提供了根据现场试验 (SPT、CPT 等) 数据估算土体参数的工具，如【SPT Estimator】。当用户不确定土体某一参数时，可以点击其后面箭头符号 ()，弹出相应估算公式或图表，从而快速获得参数取值。当然，也可以利用估算工具【SPT Estimator】得到土体重量和刚度参数。

本例中根据文献提供的勘测数据断面图 (见图 3)，可以得到土体的液限、塑限以及 SPT 试验锤击数 N_{spt} 等数据。然后，可以由这些数据获得 DeepEX 中土体参数。其总体思路如下：依据 N_{spt} ，利用估算工具【SPT Estimator】，得到土体重量和强度参数 (对应表 1 中 3-5 列)；根据土体液限、塑限计算出的塑性指数 PI ，利用估算图表得到黏土等体积剪切摩擦角 Φ_{cv} ，利用估算公式得到峰值剪切摩擦角 Φ_{peak} (对应表 1 中 6-7 列)；最后由 N_{spt} 利用估算公式得到土体刚度参数 (对应表 1 中 8-9 列)。由此，获取 DeepEX 中全部土体参数，具体数值见下表。

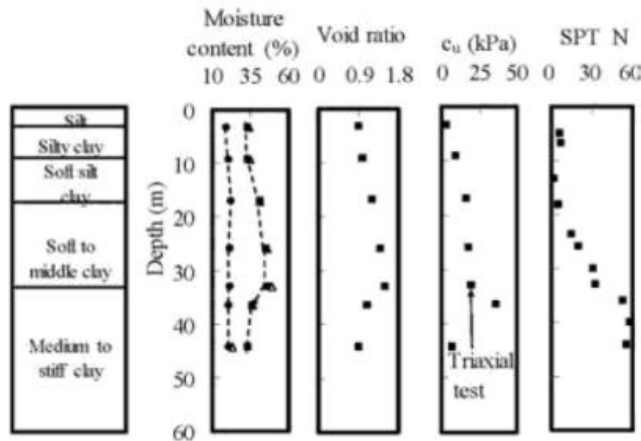


图3 文献中土体参数

表1 DeepEX 中土体参数取值

名称	土体类型	γ (kN/m ³)	C'或 Su (kPa)	Φ (deg)	Φ_{cv} (deg)	Φ_{peak} (deg)	E_{load} (kPa)	E_{ur} (kPa)	exp
F	砂土	19	2	32	-	-	18900	94500	0.5
S	粉土	18.5	4	24	-	-	15000	75000	0.5
SC	粉质黏土	17.5	20	-	28	19.5	12000	36000	1
SSC	黏土	18	30	-	28	19.5	12000	36000	1
SMC	黏土	19.8	100	-	30	21.1	40600	121800	1
MSC	黏土	23.2	334.3	-	30.47	21.4	137500	480000	1

注： γ —土体重度；C'—土体有效粘聚力；Su—土体不排水剪切强度； Φ —土体内摩擦角； Φ_{cv} —非线性分析时黏土的等体积剪切摩擦角； Φ_{peak} —非线性分析时黏土的峰值剪切摩擦角； E_{load} —加载时土体弹性模量； E_{ur} —卸载再加载时土体弹性模量；exp—指数数值（一般，砂土或粉土可以取 $E_{ur}=5E_{load}$ 、 $exp=0.5$ ，黏土取 $E_{ur}=3E_{load}$ 、 $exp=1$ ）。表中土体名称为图3左侧土体英文简称，自上而下一一对应，且土体F代表施工中在原有土层上添加的填土材料。

下面以MSC土层为例展示从图3中数据得到DeepEX土体参数的详细过程。

本例，从图3可以得到MSC土层SPT（标准贯入试验）锤击次数 $N_{spt}=55$ ，土体塑限 $\omega_p=20\%$ ，土体液限 $\omega_L=32\%$ ，塑性指数 $PI=\omega_L-\omega_p=32-20=12$ 。根据 N_{spt} 数值，在DeepEX估算工具【SPT Estimator】中拖动 N_{spt} 至55，得到黏土重度 $\gamma=23.2\text{kN/m}^3$ 和土体不排水抗剪强度 $S_u=334.3\text{kPa}$ 。（具体见图4）



图4 利用SPT锤击数估算黏土重度和抗剪强度

对于黏土在体积不变条件下的剪切摩擦角 Φ_{cv} ，可以根据 DeepEX 提供的 Φ_{cv} 与塑性指数 PI 之间的关系图表来估算。在图中将塑性指数 PI 移动到 12，可以得到 MSC 体积不变条件下的剪切摩擦角 $\Phi_{cv}=30.47^\circ$ ，见图5。然后根据 Φ_{cv} 与 Φ_{peak} 之间

关系式自动计算 Φ_{peak} ，则 $\Phi_{peak}=21.4^\circ$ 。

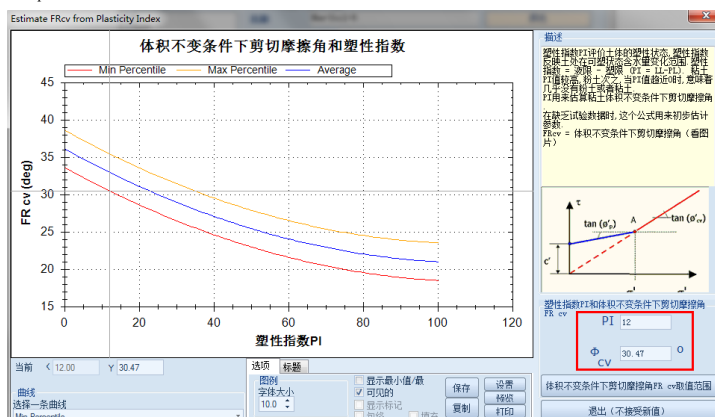


图 5 体积不变条件下黏土剪切摩擦角估算图表

对于 MSC 的刚度参数，由于软黏土具有很强的非线性特征，因此，选择能够体现土体非线性的指数模型作为其本构。另外，文献只提供了 SPT 试验锤击数 (N_{spt}) 且图 6 中第一个公式只适用于砂土，因此选择第三个估算公式 $E=2.5N_{spt}$ 计算加载弹性模量 E_{load} ，最终得 $E_{load}=2.5 \times 55 \text{MPa}=137500 \text{kPa}$ 。

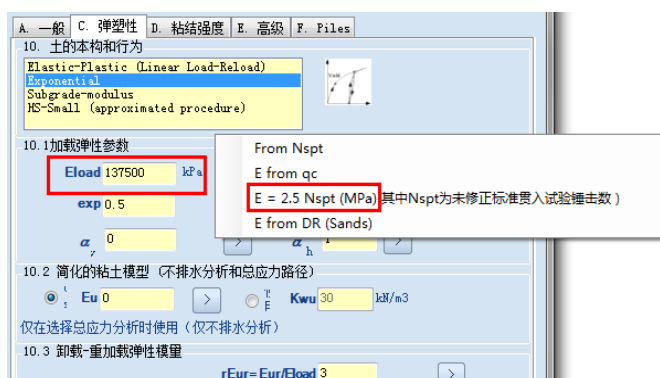


图 6 黏土 MSC 刚度参数估算

2.2 支护结构参数

由前面介绍可知，基坑采用地连墙以及 6 道内支撑组成的围护结构体系。其中地连墙长 40m，宽 0.8m，具体截面尺寸及配筋见表 2。

表 2 地下连续墙截面尺寸

墙体类型	厚度 (m)	长度 (m)	竖向配筋	横向配筋
地下连续墙	0.8	40	14 $\Phi 32$	$\Phi 8/10 \text{cm}$

6 道内支撑采用圆钢管截面，截面外径及厚度见表 3，支撑编号及位置见图 2。^[1]

表 3 内支撑截面

支撑编号	截面类型	直径 (mm)	厚度 (mm)
L1	圆钢管	580	16
L2	圆钢管	609	16
L3	圆钢管	609	16
L4	圆钢管	609	16
L5	圆钢管	609	16
L6	圆钢管	609	16

在 DeepEX 中用户可以通过【内支撑截面】菜单来创建上表中圆钢管截面。对于中国规范中给定的常见截面，用户可以自行选择使用。对于某些特殊尺寸截面，用户也可以在【内支撑截面】菜单中自行创建。下面以 L1 截面为例说明自行创建圆钢管截面过程，具体操作步骤见图 7。在输入截面尺寸时，用户需要注意按标准格式来输入，如 L1 截面应该表示为“PM580x16”，其中“PM”表示公制圆钢管，“580”表示截面外径 580mm，“16”代表钢管壁厚 16mm。在输入截面尺寸后，敲击回车键，程序会自动计算相应截面力学属性。



图 7 自行设置圆钢管截面

3 关键操作步骤介绍

在给出土体、支护结构参数以及开挖断面尺寸后，用户可以据此在 DeepEX 中建立模型。其建模过程可以全部在【一般】选项中完成（见图 8）。大体思路如下：建立土体材料、设定支护结构截面→编辑钻孔，设置土层→根据开挖过程，设置各施工阶段。整个建模过程，思路与同类软件类似，操作也非常简单。

但是，实际操作过程中，我们会发现没有那么容易，稍有不慎就会出现计算结果异常或者分析计算不收敛等问题。而出现这些问题的主要原因在于对一些关键操作步骤理解不够、认识不足。下面主要从土体参数输入和编辑土体命令两个方面来说明本例中的一些关键操作步骤，希望能够帮助用户快速准确建立模型，完成分析计算并得到符合实际情况的计算结果。

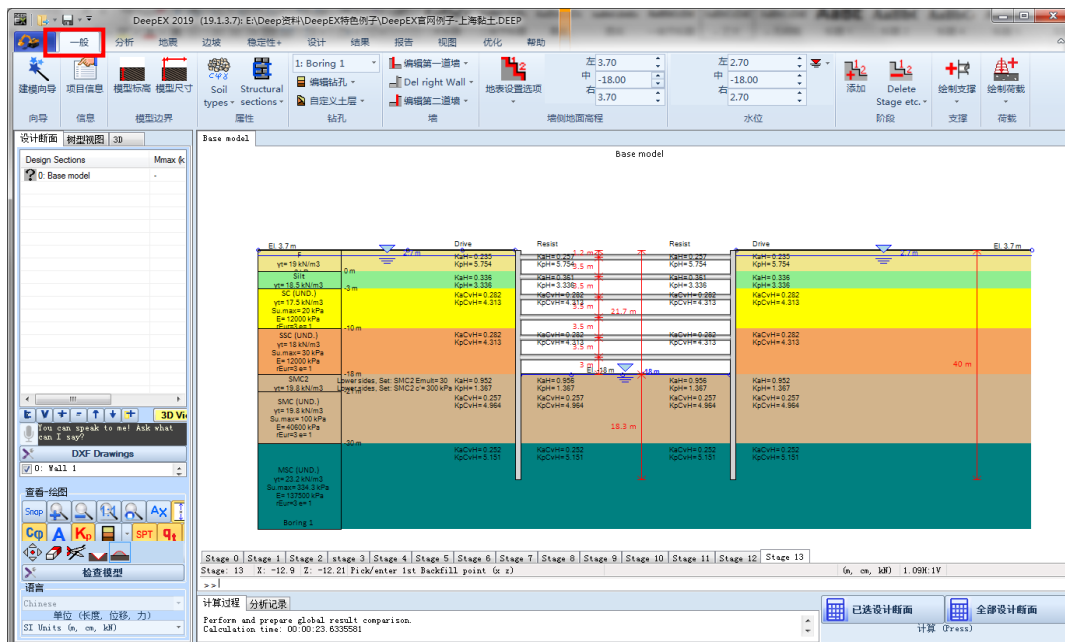


图 8 DeepEX 操作界面

3.1 土体参数输入

由于本案例中土体层数较多且类型不一，用户在输入土体参数时首先需要确保各个参数的准确性，避免出现串行或者参数名称和数值不对应情况。在此基础上，用户仍需要注意以下几点：

- 1) 正确选择土体类型。砂土、粉土以及黏土不同类型土体会有不同的参数，选择恰当的土体类型是准确输入土体参数的前提。具体操作，见图 9。

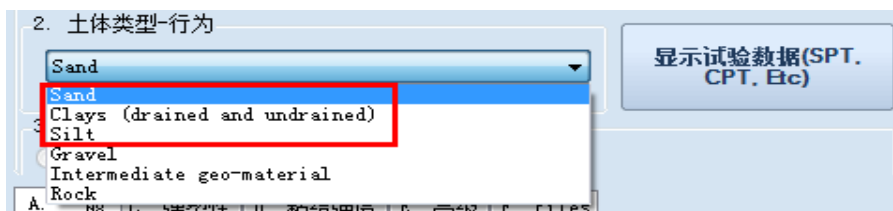


图 9 土体类型选择

- 2) 确保静止土压力系数数值处于正常范围内。一般情况下，用户在输入土体内摩擦角后，DeepEX 会根据公式自动计算静止土压力系数。其中公式默认采用 $K_0=1-\sin\varphi$ ，用户也可以选择公式 $K_0=0.95-\sin\varphi$ 进行计算，当然还能自行输入相应数值。但是在实际操作时，一不留神就会使用某些异常数值（见图 10），从而影响计算结果。

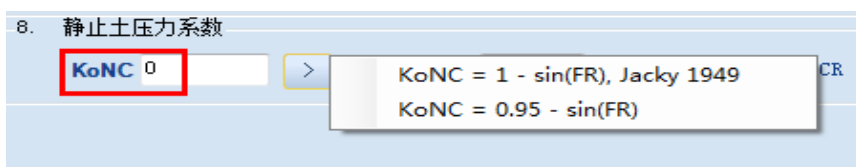


图 10 静止土压力系数输入

- 3) 选择合适的土体本构并正确输入相应参数。本例中基坑工程处于典型的上海软土地区，土体具有较强的非线性特性。因此，在 DeepEX 中应该选用能够体现土体非线性的指数模型进行计算。选择指数模型后，用户还需正确输入相应参数，尤其应该注意竖向应力系数 α_v 和水平应力系数 α_h 的取值。对于砂土，竖向应力系数 α_v 一般为 0，水平应力系数 α_h 取 1；对于黏土，竖向应力系数 α_v 一般为 1，水平应力系数 α_h 取 0。



图 11 土体本构参数

3.2 编辑土体命令

DeepEX 中【Edit soil change commands】（编辑土体命令）菜单具有改变土体某些属性的功能，可以用来模拟坑底土体加固情形。在本例中基坑底部有一个 3m 的注浆加固区域，加固处理使土体强度、刚度参数明显提高，因此可以利用【Edit soil change commands】来进行模拟。其具体操作步骤如下：

在【一般】选项土体类型下面找到【Edit soil change commands】（见图 12），点击该命令就会弹出【修改土层属性】菜单（见图 13），可以在该菜单中修改基坑加固区土体参数。



图 12 编辑土体命令

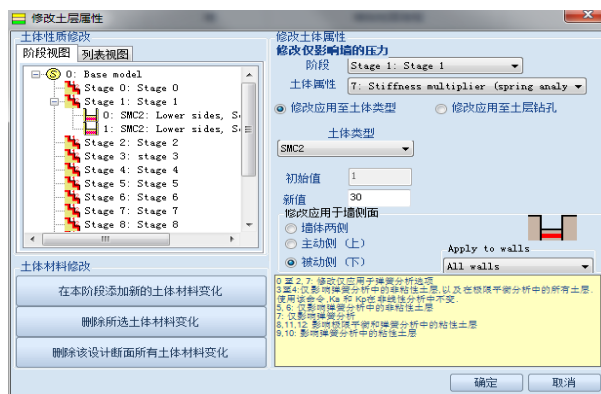


图 13 修改土体属性

【修改土层属性】菜单中的操作可以按照①→②→③→④→⑤→⑥的步骤进行，具体见图 14。其中①表示土体属性改变的起始阶段；②表示添加土体材料变化，可以添加一个或多个；③表示土体属性修改选项，下拉列表中有多种土体参数修改选项可供选择；④代表需要修改属性的土体类型，用户可以在下拉列表中选择相应土体；⑤此处可以修改土体某一参数具体数值；⑥表示土体参数修改应用的具体位置。

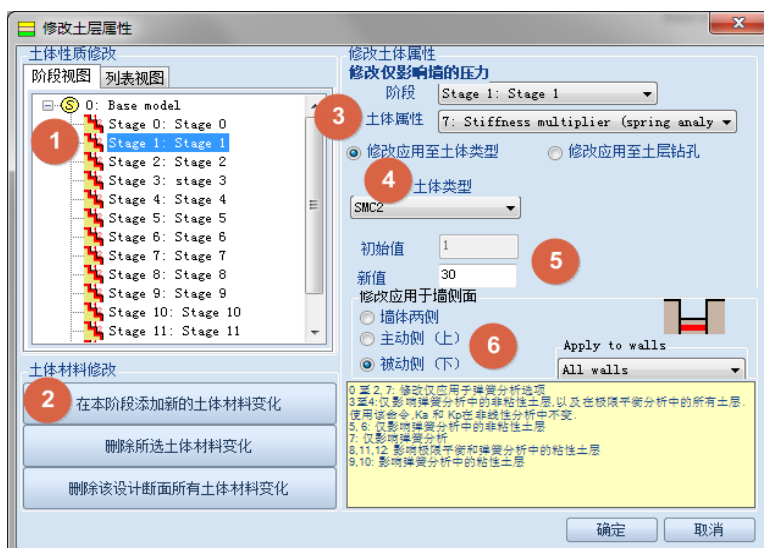


图 14 土体属性修改操作步骤

本例中土体属性修改始于 stage 1 (阶段 1)，因此①处应该选中 stage 1。基坑加固会使坑底土体弹性模量增大 30 倍，粘聚力达到 300kPa，因此需要添加两个材料变化，并在③土体属性选项中分别选择【7: Stiffness multiplier】(刚度放大)和【3: c'-effective cohesion】(改变有效粘聚力)选项。当③中选择【7: Stiffness multiplier】时，⑤中新值应该设为 30，表示土体刚度增大 30 倍；当③中选择【3: c'-effective cohesion】时，⑤中应将土体有效粘聚力调整为 300kPa。由于本例中只是对基坑底部被动区土体进行加固，故⑥中应选择被动区选项。

完成上述土体参数修改后，在坑底建立一个 3m 土层，选择相应土体类型，即可完成坑底土体注浆加固，达到图 15 所示效果。

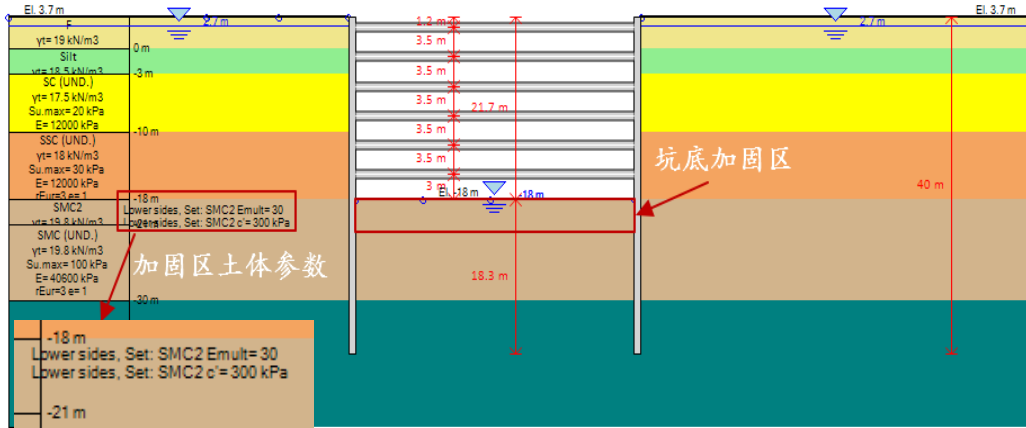


图 15 基坑底部注浆加固

4 计算结果分析

DeepEX 中计算结果类型较为全面，包括各类安全系数、墙体水平位移及内力、地表沉降、作用于墙上的水压力、土压力等。结果输出方式也是多种多样，可以通过表格、图表、计算报告等不同方式呈现。其中最常见的方式是在原模型中输出结果图，并且在图形相应位置标注出最值，方便用户查看。结果图的具体输出形式见图 16，用户可以在【结果】选项中自行选择需要呈现的结果。

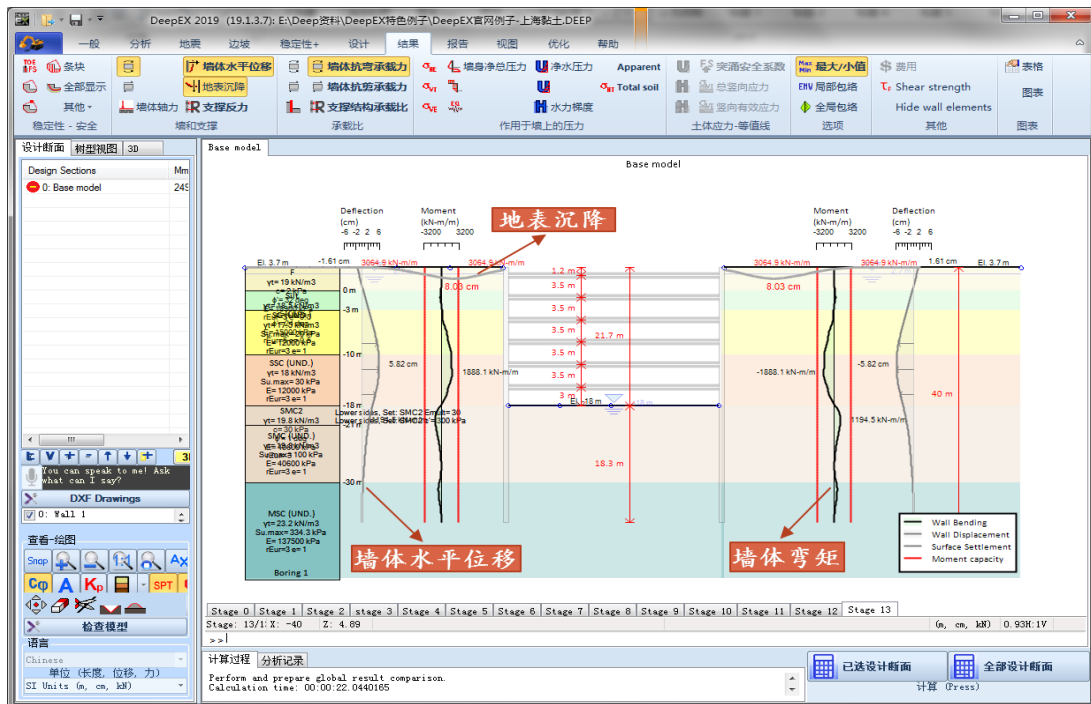


图 16 DeepEX 计算结果输出

本例中根据前面资料，在 DeepEX 中建立模型，分析计算即可得到如图 17 所示墙体水平位移和弯矩计算结果。从图中可以看出，左右两侧墙体位移和弯矩对称分布，大小相等。最终开挖完成后，墙体最大水平位移为 5.82cm；而根据文献监测数据，墙体最大水平位移为 5.45cm（见图 18）。通过对比可以发现两者相差不多，说明 DeepEX 计算结果与监测数据较为吻合。

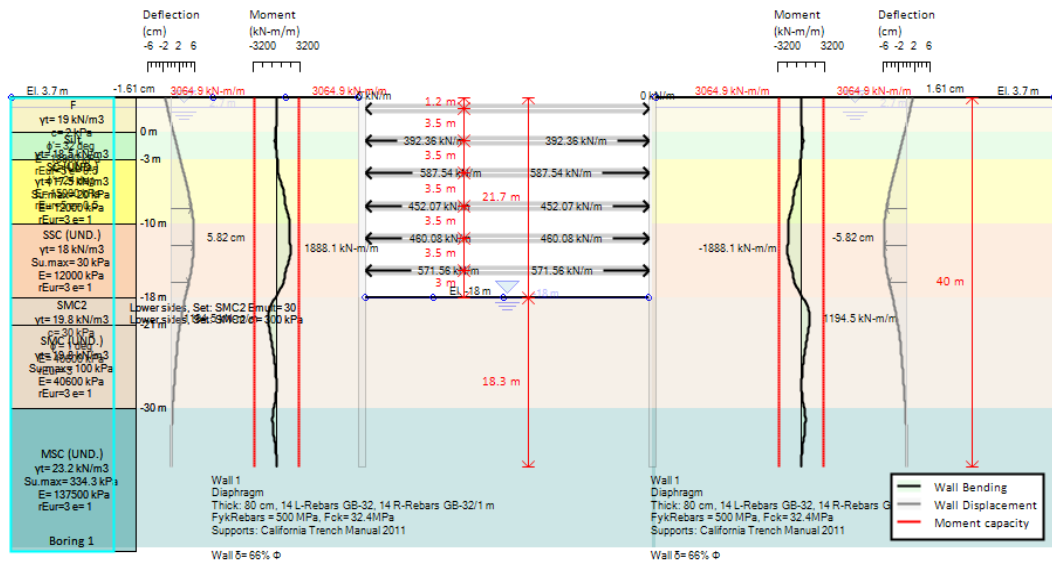


图 17 DeepEX 中基坑最终开挖深度处墙体水平位移及弯矩图

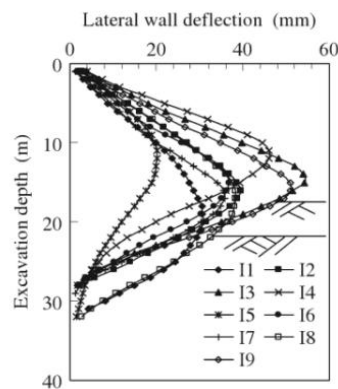


图 18 最终开挖深度处墙体最大水平位移监测值

5 小结

本文从实际工程出发，介绍了 DeepEX 中土体参数获取、支撑截面设置、土参输入注意事项以及坑底加固模拟方法等内容，并将 DeepEX 计算结果与监测数据进行对比分析。从分析结果的准确性、坑底加固模拟的独特性以及土参获取的便捷性等方面，说明 DeepEX 能够帮助工程师快速处理类似复杂工程问题，较好完成相应工程的设计工作。

参考文献

- [1] G.B. Liu, J Jiang, C.W.W.Ng. Performance of a deep excavation in soft clay Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground[C]. 2009: 419-425.
- [2] <https://www.deepex.com/resources/deep-excitation-professional-issues-case-studies>