DeepEX 中非线性分析方法和基坑规范中弹性支点法的对比

筑信达　詹毕顺

分析计算方法是基坑支护设计的灵魂，决定了支护结构变形和内力计算的准确性以及基坑设计的合理性。因此，深入理解基坑设计中的各种分析方法对基坑设计工作具有重要意义。本文主要介绍 DeepEX 中非线性分析方法（Non-Linear）和《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120-2012）中弹性支点法，通过对比两种计算方法的异同，希望加深读者对这两种方法的理解。

1.《建筑基坑支护技术规程》中的弹性支点法

《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120-2012）中采用平面杆系结构弹性支点法进行基坑支护结构的分析，其计算模型如图 1 所示。

弹性支点法将竖直方向的支护结构拆分简化为竖向放置的弹性地基梁，假设支护结构主动侧为主动土压力，被动侧采用一组土弹簧来模拟水平土压力作用。锚杆和内支撑对挡土结构的约束作用按弹性支座考虑。

通过弹性地基梁的不同边界条件及变形方程可分段列出其挠曲线微分方程，求解微分方程可以得到围护结构的变形，然后根据围护结构的变形计算锚杆轴力和围护结构的内力。同时，为了防止被动区破坏，规程要求最终计算得到的被动区土反力的合力必须小于被动土压力，如果大于被动土压力，则必须重新调整支护方案。

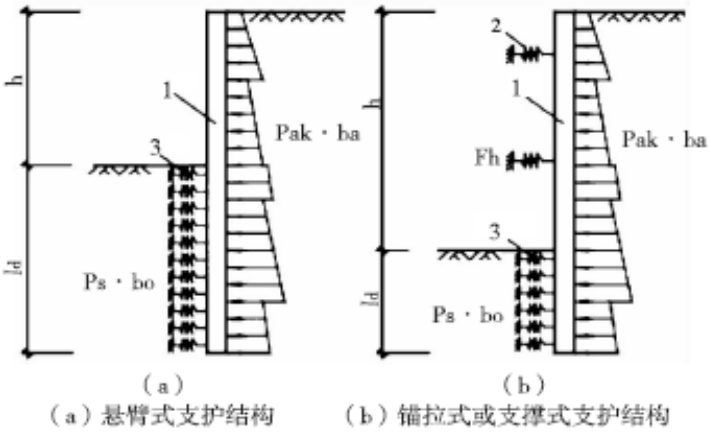

图 1　弹性支点法计算简图

2. DeepEX 中非线性（NL）分析方法

DeepEX 中采用的非线性分析方法是指 Winkler 弹性地基梁法，计算模型如图 2 所示。从图中可以看出，Winkler 弹性地基梁法将围护结构看作能够承受横向弯矩的梁单元，利用相互独立的土弹簧来模拟主动侧和被动侧土体对围护结构的作用；锚杆等支撑结构也采用弹簧单元来模拟。

根据 Winkler 地基梁模型，每个土弹簧的行为与相邻单元的行为无关。不同土体之间的相互作用完全依赖于挡土结构。通过静态增量方法，在 DeepEX 非线性分析中能够完全重现基坑开挖的中间过程，且后续施工阶段的计算结果取决于前置施工阶段结果，能够考虑相邻施工阶段之间变形的连续性。

另外，在 DeepEX 的非线性分析中只计算围护结构的水平方向变形，每个节点只有侧向位移和平面外转动作为独立的激活自由度。土体竖向应力分布不受水平变形的影响，一般某一深度处的竖向应力可根据常用的地应力分布假设计算。

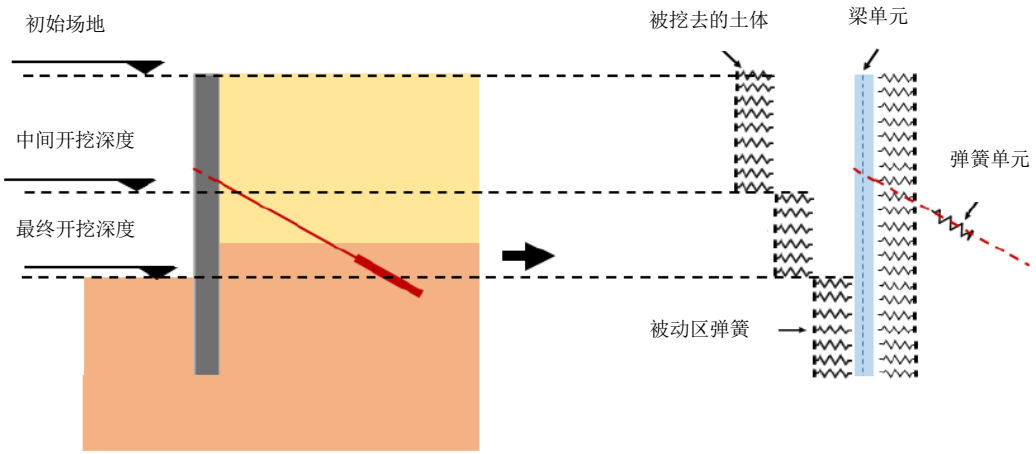

图 2 DeepEX 中的非线性分析方法

3. DeepEX 中非线性（NL）分析方法和弹性支点法的对比

根据前面介绍，将 DeepEX 中的非线性分析方法和规范中弹性支点法进行对比，可以发现一个明显不同：在 DeepEX 非线性分析方法中围护结构两侧的土压力全部利用土弹簧来模拟，随着围护结构变形其两侧土压力也会发生相应变化；而弹性支点法中围护结构右侧的土压力始终是主动土压力，这显然是不符合实际情况的。

除了前面提到的不合理之处，弹性支点法还存在以下不足：

1） 不能准确计算预应力作用产生的变形。

弹性支点法计算预应力工况时，仍以围护结构为分析对象，主动区受主动土压力作用，被动区土压力以土弹簧模拟，锚杆或内支撑作为弹性支点，预应力作为荷载施加在锚杆或内支撑上。因此，在整个计算过程中，围护结构在预应力下产生的变形与围护结构抗弯刚度、弹性支点刚度以及被动区土弹簧刚度有关，而与主动区土体无关。

但是这种计算明显不符合实际情况。实际施工中预应力通过围护结构传递到主动区土体，其变形也应是围护结构与主动区土体共同作用的结果，与主动区土体的性质密切相关。因而，利用弹性支点法计算得到的围护结构变形与实际监测结果相差较大。

2） 不能考虑土方开挖前后围护结构变形发展的连续性。

《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120-2012）中计算围护结构变形和内力的弹性支点法基于主动土压力全量法。如下图 3 所示，在整个计算过程中，相邻施工步之间的计算模型相互独立，不存在连续发展关系。例如，第二步土方开挖产生的变形不是在第一步土方开挖产生变形的基础上发展而来的，而是根据第二步开挖后的弹性支点计算模型独立计算得到。依次类推，后续土方开挖产生的变形计算也是如此，而这显然不符合实际情况，不能体现出当前施工步对后续施工步的影响，忽略了围护结构变形发展的连续性，而人为将各个施工阶段分割开来。

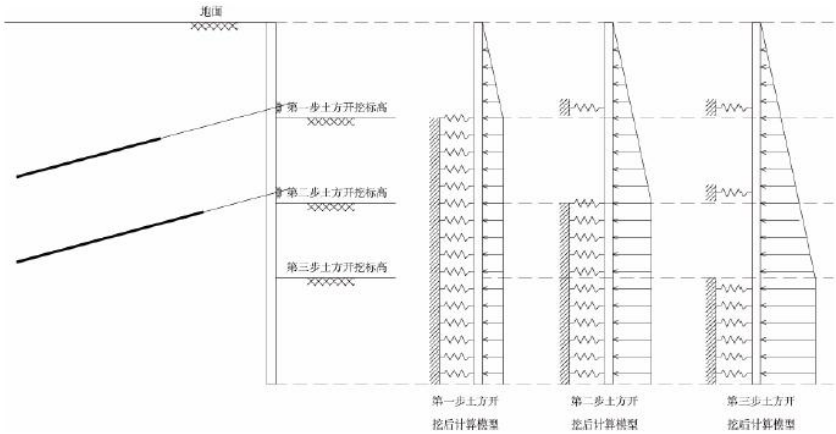

图 3 主动土压力全量法的弹性支点计算模型

4. 简单算例对比

下面用两个简单算例对比分析上述两种算法。其中，弹性支点法的计算结果来自理正深基坑设计软件。算例 1 为一个简单悬臂开挖工程，土层为匀质砂土，重度 19kN/m3，粘聚力为 0，内摩擦角 30°；围护结构采用排桩，桩长 8m，桩径 0.6m，开挖深度为 3.0m。

两种方法计算结果如图 4 和图 5 所示。

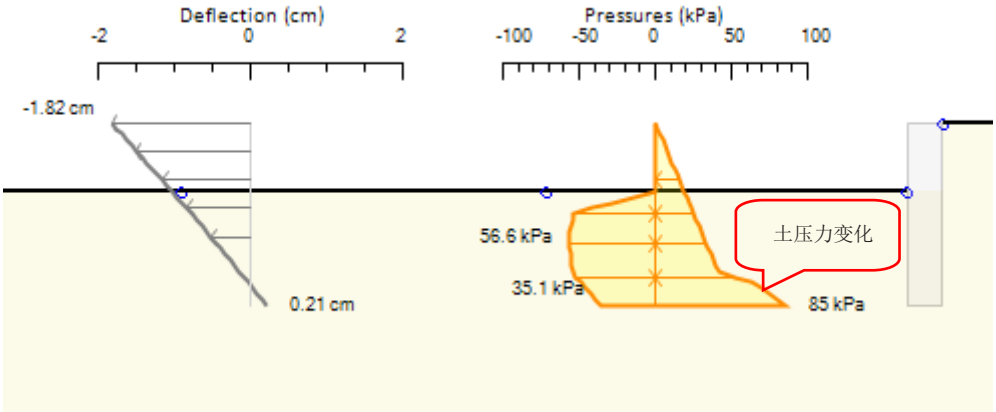

图 4 DeepEX 中非线性分析方法的计算结果

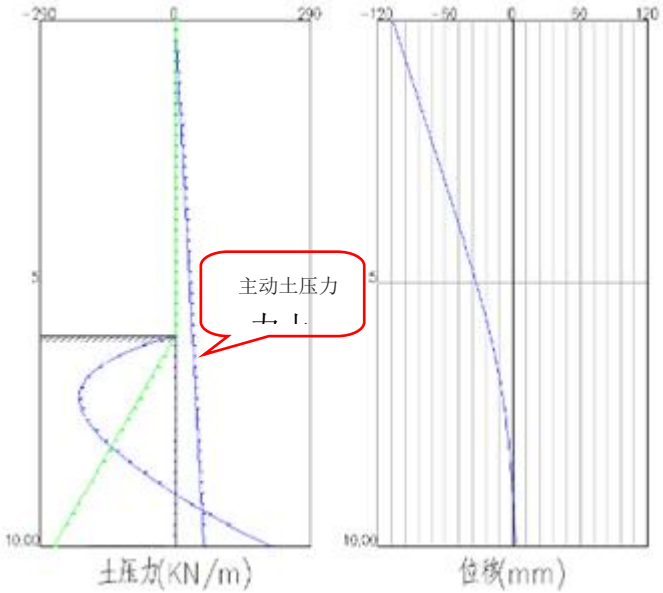

图 5 弹性支点法的计算结果

对比图 4 和图 5 可以看到，采用弹性支点法计算时，桩后土压力始终为主动区土压力；而采用 DeepEX 非线性分析方法计算时，桩后土压力在桩身上部为主动土压力，而在桩身下部则变为被动土压力。结合围护结构变形进行分析，在悬臂开挖时，围护桩在前后土压力作用下，桩体将绕开挖面下某一点发生转动。转动点以下的桩后土压力将会变为被动土压力，而桩前土压力变为主动土压力，与转动点以上土压力分布相反。DeepEX 非线性分析能够体现土压力随着围护结构变形而产生相应变化，但是在弹性支点法中桩后土压力始终保持为主动土压力，不符合实际情况。

算例 2 是一个采用锚拉式排桩作为支护结构的深基坑工程。其中排桩直径 0.8m，间距 1.5m，具体设计断面见图 6。锚杆分为两排，水平间距 1.5m，入射角 25°；第一排锚杆总长 14m，锚固段长 6.5m，第二排锚杆总长 13m，锚固段长 8m，两排锚杆分别施加 200kN 和 300kN 的预应力。土层信息见表 1。

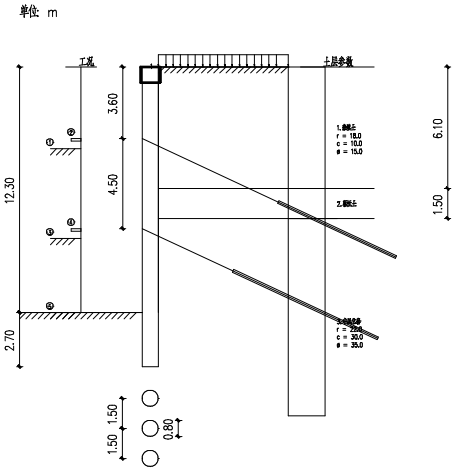

图 6 锚拉式排桩支护结构设计断面

表 1 土层参数

层号	土类名称	层厚 (m)	重度（kN/m³）	粘聚力 kN	内摩擦角（°）	与锚固体摩擦力（kPa）
1	杂填土	6.1	18	10.0	15.0	30.0
2	粘性土	1.5	19	35.0	20.0	70.0
3	中风化岩	15	20	30.0	35.0	150.0

根据上述信息，分别在 DeepEX 和理正中建立模型。两种方法计算结果如图 7 和图 8 所示。（以开挖 8.6m 工况为例）

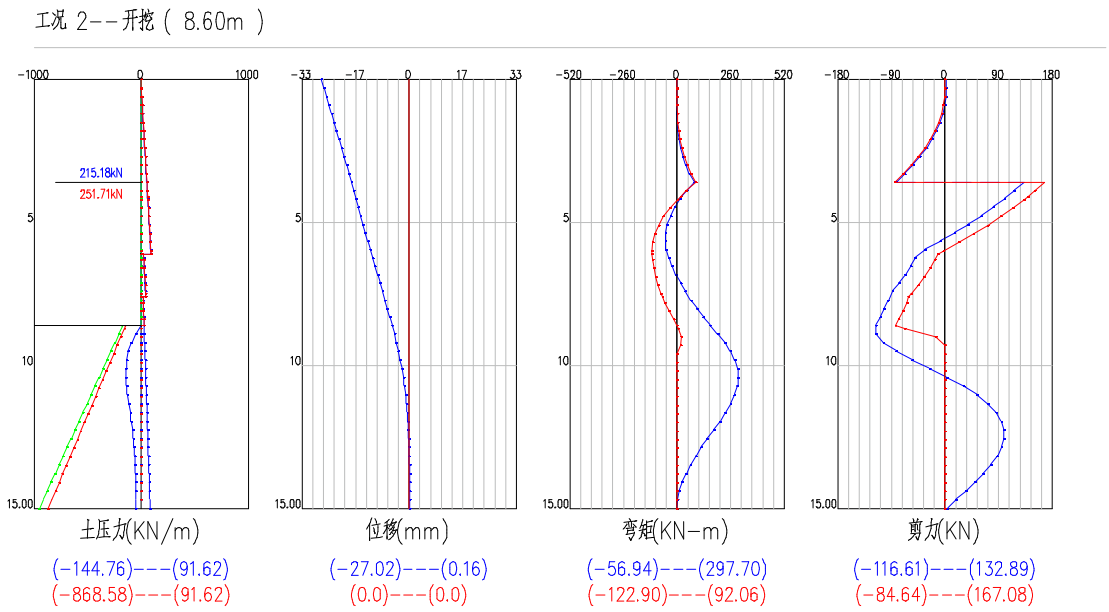

图 7 开挖 8.6m 时弹性支点法计算结果

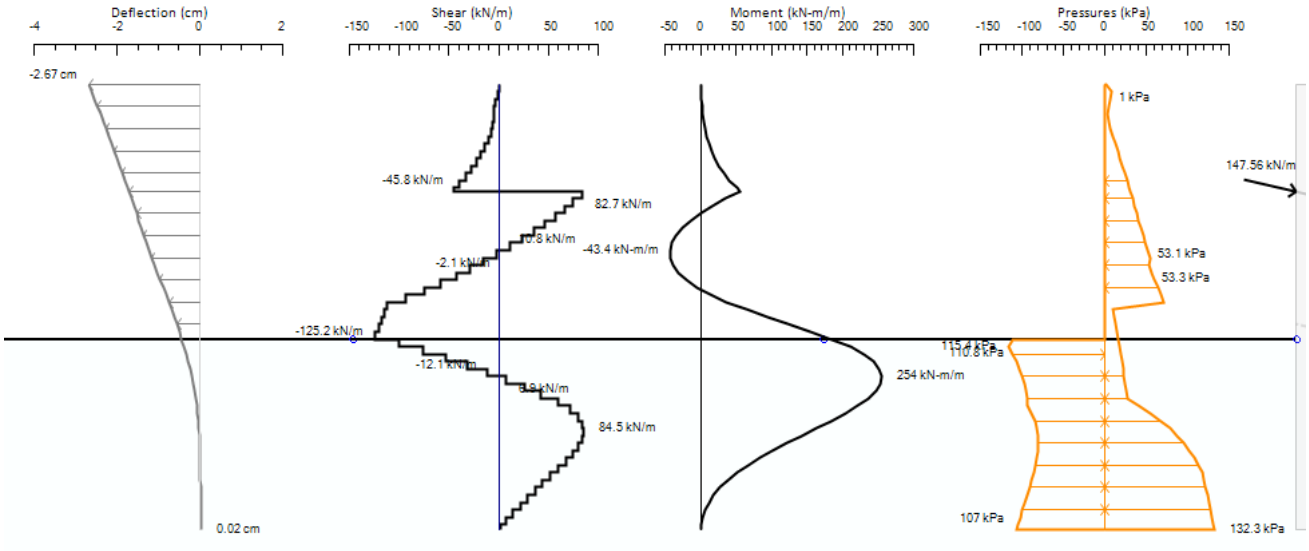

图 8 开挖 8.6m 时 DeepEX 计算结果

对比上述计算结果可以看出，弹性支点法中土压力在主动侧仍为主动土压力，而 DeepEX 中土压力随着锚杆预应力和排桩变形的共同作用而变化。由于 DeepEX 中最大弯矩和最大剪力是每延米的计算结果，在和理正进行对比时，需要乘以桩间距 1.5m。具体对比结果见表 2。从位移对比结果来看，最大位移相差-1.2%，差别较小，且位移分布形式一致；在内力计算结果中弯矩、剪力整体分布形式也较一致，弯矩最大相差 27.9%，剪力最大相差 61.5%。剪力差别较大，且最大正剪力出现位置存在差异，理正出现在预应力施加处，而 DeepEX 中出现在开挖面处；从而说明预应力施加以及是否考虑施工阶段变形连续性，对剪力计算结果影响较大。

表 2 计算结果对比

软件	最大位移 (mm)	最大正弯矩（kN.m）	最大负弯矩（kN.m）	最大正剪力（kN）	最大负剪力（kN）
理正	27.02	297.7	-56.94	132.89	-116.61
DeepEX	26.70	381	-65.1	126.75	-187.8
结果差异	-1.2%	27.9%	14.3%	-4.6%	61.5%

如此，通过上述两个例子，试图说明弹性支点法的局限性，同时展示 DeepEX 非线性分析方法的合理性。

5. 小结

本文将《建筑基坑支护技术规程》（JGJ120-2012）中的弹性支点法和 DeepEX 中的非线性分析方法进行对比分析，指出弹性支点法的缺陷，如坑外土压力始终为主动土压力，不随围护结构变形而变化；不能准确计算预应力工况下围护结构的变形；不能考虑不同施工步之间的变形连续性。而 DeepEX 非线性分析方法能够很好地弥补这些不足，使得计算结果更加符合实际情况。