

国内外基坑支护设计标准及常用支挡结构分析方法概述与对比

筑信达 郭晓通

《建筑基坑支护技术规程 JGJ 120-2012》是我国的建筑工程行业标准，是国内基坑工程设计主要的参考标准。本文除“规程”外，主要介绍了欧标 Eurocode7 和美标 AASHTO LRFD 中的设计思想与方法，并针对国内外常用的“极限平衡法”、“弹性支点法”、“弹塑性地基梁法”、“有限元法”四种不同的支挡结构分析方法做了简述与案例对比，希望能够对业内有关人士提供借鉴。

1. 国内外基坑设计标准概述

1.1 建筑基坑支护设计规程 JGJ 120-2012

“规程”的设计思想是极限状态设计，包括正常使用极限状态和承载能力极限状态。“规程”将支护结构的安全等级分为了三级，从高到低分别对应 1.1、1、0.9 三个结构重要性系数，并规定按正常使用极限状态设计时，无需考虑结构重要性系数和分项系数；按承载能力极限状态进行设计时，结构构件的内力设计值应在按标准组合计算的内力值的基础上乘以结构重要性系数和不少于 1.25 的综合分项系数。

“规程”中提供了对于各类支护体系下详细的计算方法。在稳定性验算上，“规程”将基坑的稳定性分为嵌固稳定性、整体稳定性、抗隆起稳定性、抗倾覆稳定性等几种，并根据不同的支护结构安全等级设定了不同的安全系数限值；在支挡结构分析上，“规程”规定支挡结构变形与内力计算应采用弹性支点法，并提供了详细的计算模型与参数取值方法。根据土质的不同，“规程”设定了土、水压力的合算和分算方法，即对于饱和砂土，采用有效应力的计算方法（分算），对于饱和黏土类土层，采用总应力的计算方法（合算）。此外，“规程”也对基坑降水和监测做了相应说明。

1.2 欧标 Eurocode7

Eurocode 是欧洲标准化委员会提出的结构规范，其中 Eurocode7 为岩土工程设计规范，该规范广泛应用于欧洲及除欧洲外全球多个国家地区。Eurocode7 同样采用极限状态设计，包括正常使用极限状态和承载能力极限状态。正常使用极限状态验算时，各分项系数取 1；承载能力极限状态验算时，Eurocode7 规定工程师需采用三种不同的“分项系数设计方法”来进行验算，分别为 DA-1、DA-2、DA-3（DA 为 Design Approach 缩写，即设计方法），其中 DA-1 还包含了两种组合形式。每种设计方法都包含三组分项系数，分别是：作用的 (Actions)，包括土水压力、渗透力、预应力、外荷载等；岩土体参数的 (Materials)；材料抗力的 (Resistances)。工程师需对各设计方法分别进行验算。

Eurocode7 中的内容主要集中于设计原理及设计过程中考虑的因素，并没有针对各类岩土工程类型提出具体的计算模型及详细的计算方法。在支护体系稳定性验算方面，Eurocode7 提出下列需要检查的内容，包括：结构设计/平衡性检查 (STR)，岩土平衡性检查 (GEO)，水力突涌检查 (HYD)，结构隆起检查 (UPL)，平衡状态检查 (EQU) 等；对于支挡结构的分析，Eurocode7 规定，计算模型可以由解析模型、半经验模型、数值模型等任意一个组成。其中跟随 Eurocode7 出版的设计指南的算例中，支挡结构的计算主要采用传统的极限平衡法（等值梁法）。此外，对于土-水压力，无论砂土还是黏土，设计指南中在整体计算方法上均采用土-水分算的方式，对于砂土，采用排水计算，对于黏土，除排水效应外，需对其不排水效应进行分析。

Eurocode7 的分项系数设计方法如表 1 所示。

表 1 Eurocode7 分项系数设计方法

参数	类型	DA1, 组合 1 (A1 + M1 + R1)	DA1, 组合 2 (A2 + M2 + R1)	DA2 (A1* + M1 + R2)	DA 3 (A1* + A2 + M2 + R3)
c'	M	1	1.25	1	1.25
tan φ	M	1	1.25	1	1.25
不排水抗剪强度 Su	M	1	1.4	1	1.4
可变荷载 (不利的)	A	1.5	1.3	1.5	1.5
永久荷载 (不利的)	A	1.35	1	1.35	1.35
可变荷载 (有利的)	A	0	0	0	0
永久荷载 (有利的)	A	1	1	1	1
地震荷载	A	0	0	0	0
永久锚杆	R	1.1	1.1	1.1	1
临时性锚杆	R	1.1	1.1	1.1	1
被动土压力	R	1	1	1.4	1
被动侧水压力	A	1.35	1	1.35	1
主动侧水压力	A	1	1	1	1
突涌安全系数	A	1.35	1.35	1.35	1.35
对突涌安全性有利的作用	A	0.9	0.9	0.9	0.9
对结构稳定性不利的作用	UPL	1.1	1.1	1.1	1.1
对结构稳定性有利的作用	UPL	0.9	0.9	0.9	0.9
主动土压力放大系数	A	1.35	1	1.35	1
嵌固安全系数	STR	1	1	1	1

注: M(Material)—材料分项系数; A(Actions)—作用的分项系数; R(Resistance)—材料抗力的分项系数; UPL—结构隆起的安全系数; STR—结构设计/平衡性的安全系数。

1.3 美标 AASHTO LRFD

AASHTO LRFD 标准是美国国家公路与运输协会的设计规范。在 AASHTO LRFD 中,所有结构的设计应符合规定的极限状态,包括服务极限状态(类似于正常使用极限状态)、裂缝和脆性极限状态、强度极限状态(类似于承载能力极限状态)、极端事件极限状态(地震、洪水、冰流等),以实现可施工性、安全性和可用性的目标,并适当考虑可检查性、经济性和美观性问题。LRFD 代表荷载系数抗力设计(Load Factor Resistance Design),在其原理中,每个结构的设计都是通过检查一组荷载和阻力组合来完成的。荷载乘以分项安全系数,而抗力除以另一组分项安全系数。对于基坑支护体系,除非对模型施加相当大的外部荷载,否则许多荷载组合下的计算结果不会产生显著差异,各组合中与常规基坑工程相关的主要包括服务 I、强度 I、II 与极端事件 I,分项系数设计方法如表 2 所示。

对于非重力式挡土结构, AASHTO LRFD 中将其稳定性分为整体稳定性、结构稳定性两大类,在 AASHTO LRFD 的描述中,支挡体系分析方法主要基于极限平衡方法。其中与其它规范不同的是: AASHTO LRFD 规定挡土结构上的土压力分布可以使用 Sabatini et al. (1999)、Cheney (1988)、Terzaghi and Peck (1967)、Clough and Tsui(1974)、Hanna and Matallana (1970)、Nicholson et al. 1981、Schnabel (1982)等多种土压力分布图表进行计算和对比检验。此外, AASHTO LRFD 规范对于岩土抗震设计有着较详细的计算规定,可为抗震设计基坑提供依据和借鉴。



表 2 AASHTO LRFD 在基坑工程中的主要分项系数设计方法

类型	Service I	Strength Ia	Strength Ib	Strength II	Extreme I
地震乘子	1	0	0	0	1
可变荷载	1	1.75	1.75	1.35	0.5
永久荷载	1	1	1.35	1.35	1.35
临时锚杆	1	1	1	1	1
永久锚杆	1	1.11	1.11	1.11	1.11
不利的土体作用	1	1.35	1.35	1.35	1.35
有利的土体作用	1	1.33	1.33	1.33	1
承载力安全系数	1	1.818	1.818	1.818	1.818
滑动安全系数	1	1	1	1	1
土钉摩阻力	2	1.54	1.54	1.54	1.54

整体来看，三个标准都基于极限状态设计思想，但各有其特点。设计系数方面，“规程”规定的较为简单，AASHTO LRFD 和 Eurocode 7 相对更复杂；支护结构分析计算方面，“规程”相较另外两个标准详细规定了支护体系计算的弹性支点方法，AASHTO LRFD 则提出了基于多种土压力分布规律的极限平衡方法，而 Eurocode7 相较前两者更具开放性。

某基坑设计断面采用 Eurocode7 和 AASHTO LRFD 中的设计系数进行挡土结构弯矩验算的结果对比如图 1 所示。在该断面中两者结果差距不大。

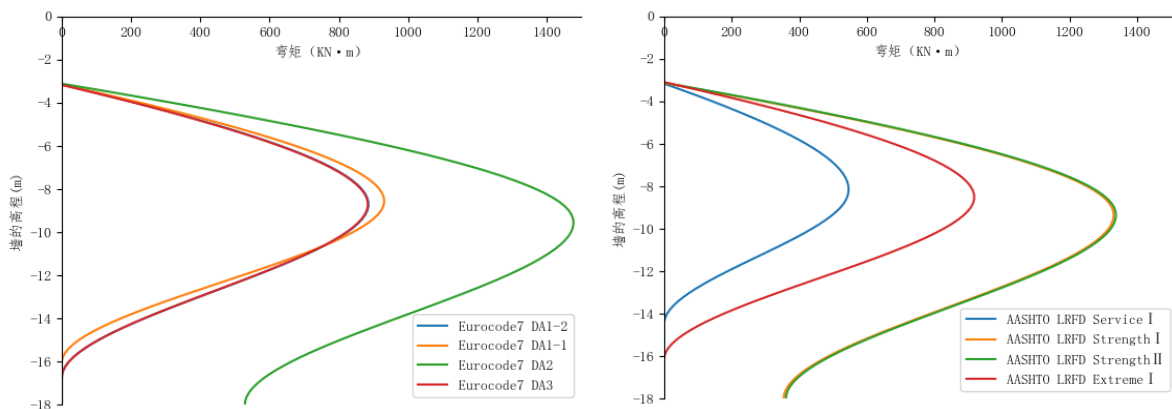


图 1 某基坑工程中采用 Eurocode 7 和 AASHTO LRFD 验算挡土结构弯矩对比

2. 基坑支挡结构分析方法的概述与对比

2.1 支挡结构分析方法概述

目前，对于基坑支挡结构常用的分析方法主要包含极限平衡法、弹性支点法、弹塑性地基梁法、有限元法四种（如图 2 所示）。四种计算方法中，弹性支点法是目前国内基坑支护设计的主要算法；极限平衡法属于经典算法，也是美标基坑设计的常用方法之一；弹塑性地基梁法和有限元法是更先进的算法，目前已越来越多地被使用到支挡结构设计中。

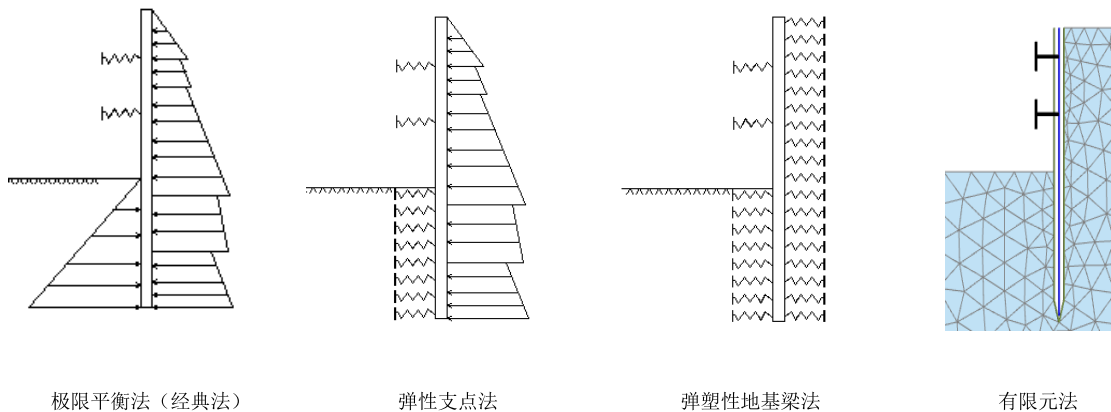


图 2 基坑挡土结构体系的各计算方法模型

极限平衡法又称“经典法”、“等值梁法”，其特点是挡土结构两侧为恒定的土、水压力分布，锚拉、支撑结构采用固定端或弹性支座。极限平衡法是一种传统的方法，其特点是计算模型简单，参数数量少，往往通过土体强度参数 c' 和 ϕ' 来反映土压力分布。但其计算过程中未考虑土压力的变化及土-结构的相互作用，计算精度相对较差。

弹性支点法是基于 Winker 梁理论在极限平衡法基础上的改进。挡土结构主动侧为朗肯/库伦主动或静止土压力，被动侧为固定刚度的土弹簧，弹簧刚度通过土体地基反力模量值控制，该方法根据模型计算方式，可分为一次加载的全量法和逐级加载的增量法，根据岩土体参数取值假定，又可分为 m 法、c 法、k 法等。

弹塑性地基梁法是一种更先进的挡土结构分析计算方法，是 Winker 梁法的改进，也是完全的有限元法的简化。在弹塑性地基梁法中，挡土结构两侧均为土弹簧，弹簧刚度可以是恒定的，也可以是应与应力路径、水平相关的，即非线性弹簧，其计算主要借助杆系有限元法。以 DeepEX 中的弹塑性地基梁算法为例，软件按岩土体的本构模型提供了线性加载重加载法、地基反力模量法、指数模型法、HSS 模型法等四种算法，其中前两个方法是比较简单的弹性-理想塑性算法，而指数模型法、HSS 模型基于土体硬化理论，是更精确的弹塑性算法。在参数需求上，线性加载重加载法和地基反力模量法需分别提供加、卸载模量和地基反力模量；对于指数模型法，需提供两个幂参数；对于 HSS 模型法，需提供其小应变刚度 G_0 和 $\gamma_{0.7}$ 参数。

有限元法是求解偏微分方程边值问题近似解的数值技术，目前已广泛应用在岩土工程领域，完全的有限元法处理基坑问题可以更好地描述岩土体行为及考虑土-结构的相互作用，是一种精确的算法。其中，对于尺寸效应不大的基坑，二维有限元法将基坑问题简化为平面应变问题，建模与计算速度快，非常适合工程设计；三维有限元法精度更高，偏向于空间效应明显、周边环境复杂的在基坑分析。基坑分析常用的岩土本构模型包括摩尔-库伦模型、硬化土模型、小应变土体硬化模型等。

2.2 不同支撑体系计算方法的对比分析

现将四种方法的计算结果进行对比。极限平衡法、弹塑性地基梁法采用 DeepEX 中的地基反力模量法进行计算。DeepEX 是国际先进的基坑工程设计与分析程序，支持多国家标准及包括弹塑性地基梁法、有限元法在内的多种计算方法；有限元法采用国际知名的 PLAXIS 2D 商业软件包进行计算，使用 HSS 本构模型；弹性支点法采用国内某计算程序进行求解。

由于各计算方法理论不同，为了完成不同算法的对比，需要保证各算法中的参数的对应性。对于土的强度参数，在砂土中各算法均采用三轴固结排水剪 (CD) 得到的有限粘聚力 c' 、有效内摩擦角 ϕ' 结果，在黏土中，极限平衡与弹性支点法采用有效强度参数，有限元和弹塑性地基梁法采用三轴不固结不排水剪不排水剪 (UU) 得到的不排水抗剪强度参数；

对于土的刚度参数，有限元法中将固结试验得到的压缩模量值近似为加载模量，通过经验公式计算其它参数。弹塑性地基梁法中既可以使用加载模量参数，也可以使用地基反力模量参数（二者等效），本次计算中先利用加载模量值求解，再反算地基反力模量 k 值，以得到精确的 m 供弹性支点法使用。对于弹性支点法，采用增量法计算，并按照“规程”要求，对于砂土采取水-土分算的算法，对于黏土采取土-水分算算法。各分析方法的材料特性、主要参数及参数来源列表如表 3 所示。

表 3 各分析方法材料特性、主要参数及参数来源列表

分析方法	土压力或材料本构特性	主要系数或土的主要刚度参数	参数来源
极限平衡法	朗肯主、被动土压力	由 ϕ 值计算土压力系数	-
弹性支点法	m 法	m (水平抗力系数的比例系数)	通过地基反力模量换算
弹塑性地基梁法	地基反力模量法	k (地基反力模量)	压缩模量反算
有限元法	HSS 本构模型	E_{50} 、 E_{oed} 、 E_{ur} 、 m (幂)、 $\gamma_{0.7}$ 、 G_0	经验公式

1) 悬臂式支挡体系中的土压力对比

一悬臂式支挡体系的基坑模型如图 3 所示，挡土结构为 C30 混凝土灌注桩，桩径 1m，间距 1.5m。基坑开挖深度为 5m，桩的嵌固深度为 8m，基坑范围内土层为砂土，砂土参数见表 2，地下水水位位于桩底以下。

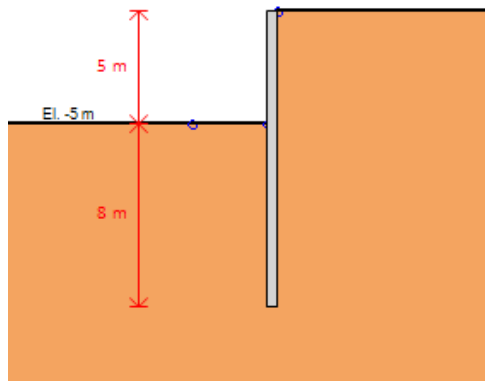


图 3 悬臂式支挡体系计算模型

各计算方法得到的桩侧土压力分布如图 4 所示。在主动侧（图 4 右侧），极限平衡法和弹性支点法均使用朗肯主动土压力计算公式，土压力分布相同；弹塑性地基梁法在桩深 10.5m 之前的曲线段，基本与朗肯主动土压力重合，在 10.5m-13m 之间，弹塑性地基梁法求得的土压力开始明显增加，最终在桩底位置处，达到了与有限元法近似的水平。有限元法得到的结果在坑底以上与朗肯土压力结果保持一致，坑底以下，主动侧土压力更大，在桩底的最大值约为朗肯土压力计算结果的两倍。

在被动侧（图 4 左侧），可以看到弹塑性地基梁法与有限元法得到的土压力曲线无论从趋势上还是大小上非常接近，其值远小于极限平衡法中朗肯被动土压力的计算结果。而弹性支点法求得的被动侧土反力值在所有结果中最小。尤其在约桩深 12-13m 的位置处，土反力出现了正值，即“土吸力”，所以弹性支点法在该模型中得到的反力结果是不符合实际的。

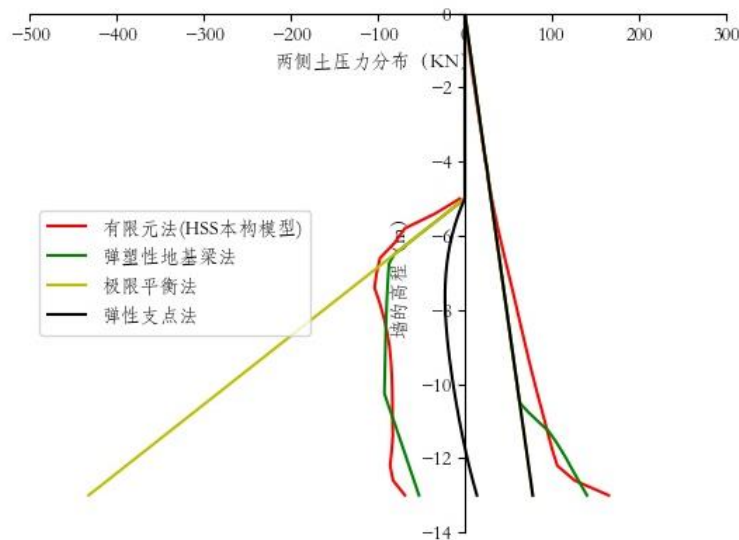


图 4 各计算方法得到的土压力分布

2) 桩-撑式体系在纯砂土和纯黏土中的对比

建立某桩-撑体系基坑模型如图 5 所示，基坑开挖深度为 8.5m，地下水位高程为-5m，基坑内侧降水高程为-9m，采用钢板桩-钢管支撑的支护形式，钢板桩桩长 18m，抗弯刚度为 111240KN，支撑距地表 3.5m，轴向刚度为 7143400KN。砂土和黏土参数见表 4。

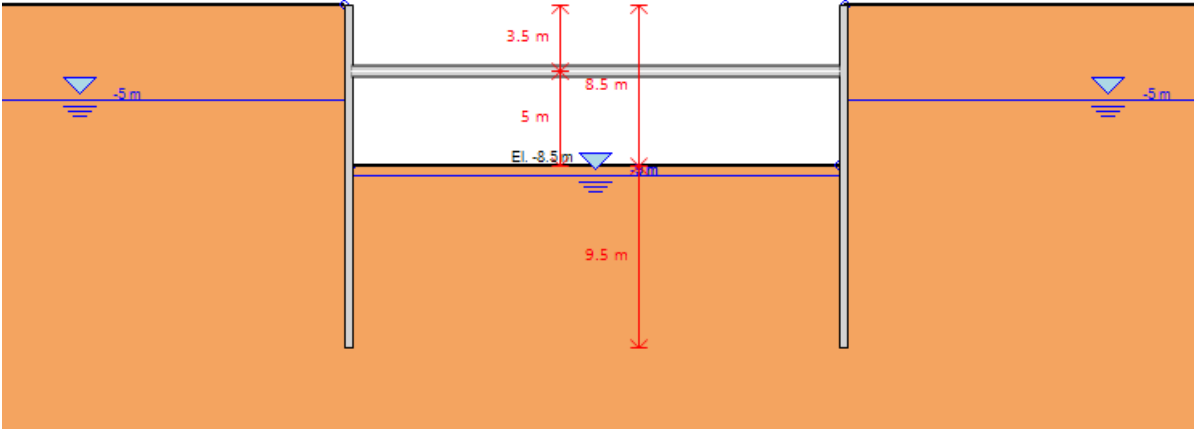


图 5 桩-撑式支护体系计算模型

表 4 砂土与黏土参数表

土层名称	加载模量 E0(KPa)	天然重度 (kN/m3)	饱和重度 (kN/m3)	不排水抗剪强度(kPa)	有效粘聚力(kPa)	有效内摩擦角(°)	m 值 (KN/m2)	小应变刚度(KPa)	$\nu_{0.7}$
砂土	14370	18.84	19.625	0	0	30	4.5	22450	0.005
黏土	19800	18	19	150	28	26.2	12.2	27850	0.005

不同分析方法在纯砂土基坑中挡土结构的弯矩和水平位移结果如图 6 所示。各方法得到的弯矩包络整体趋势基本保持一致。-3.5m 的支撑位置处，弹性支点法求得的弯矩略微偏小，高程-12 到-18m 位置处，各计算方法得到的反弯点位置及大小略有不同。从数值上看，有限元法得到的弯矩包络值整体偏小，最大正负弯矩值均约 170KN-m，弹塑性地基梁法的结果整体偏大，约-230 到 320KN-m 之间，其余计算方法在二者之间。

在水平位移上，各分析方法差异较大，从趋势上看，极限平衡法与其余算法的曲线走势差异较大，尤其有多段背离基坑方向的变形，其余算法变形趋势差异不大，值略有不同，有限元法得到的变形结果整体最小，弹塑性地基梁法变形整体更大，弹性支点法位于二者之间。

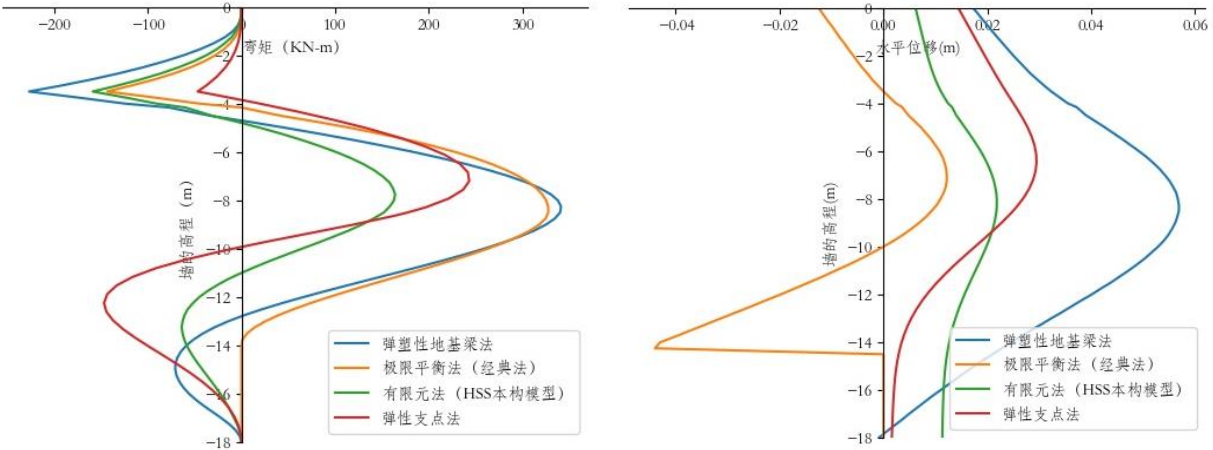


图 6 纯砂土中挡土结构弯矩与水平位移对比

纯黏土中各分析方法得到的弯矩和水平位移结果如图 7 所示，由于各方法对于黏土的分析理论差异性较大，可以看到结果差异也较为明显。弯矩结果从趋势上看，最大负弯矩均出现在-3.5m 的支撑点位置处，除极限平衡法外的三种方法整体趋势相差不大。弹性支点法和弹塑性地基梁法趋势更为接近，与有限元法在-10 到-18m 位置处弯曲方向相反。从数值上看，弹塑性地基梁法和有限元法得到的最大负弯矩结果较为接近，且远大于极限平衡与弹性支点法计算结果，最大正弯矩结果弹性支点法与有限元法数值接近，弹塑性地基梁法最大，极限平衡法最小。

水平位移结果从趋势上看，弹性支点法与弹塑性地基梁法较接近，最大变形均出现在约-7m 位置处，有限元法计算得到的最大变形位于基坑坑底。从数值上看，有限元结果与弹塑性地基梁结果较为接近，最大变形均为约 25mm，弹性支点法的最大变形越 5mm，极限平衡法的最大变形约 2mm，与前两者差距较大。

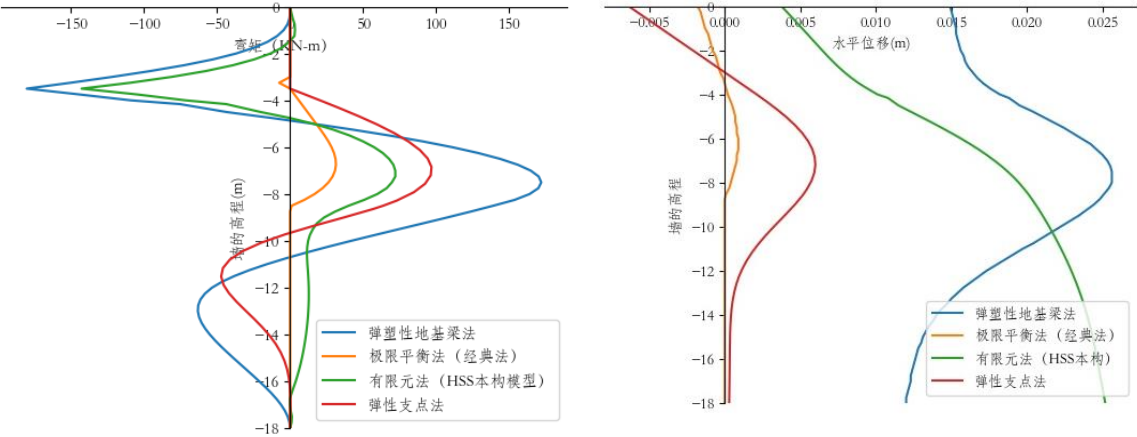


图 7 纯黏土中挡土结构弯矩与水平位移对比

3) 有限元与弹塑性地基梁法在某工程中的对比与验证

图 9 所示为台北盆地 K1 地区某深基坑断面图。该基坑开挖深度为 18m，支护形式为 1 米厚、40 米深的地下连续墙，沿地连墙布置了 6 道 H 型预应力钢支撑。该基坑工程来自 Hsiao-Chou Chao、Richard N. Hwang^[1]在 2010 年全球土壤保持会议中的成果展示和论文。在原论文中，作者提出了一种校正倾斜仪位移值的方法，并使用 PLAXIS 程序对该基坑施工过程进行了分析，对校正方案进行了验证。该基坑各岩土体参数见图 8 所示，地下水位于地面以下 2m 位置处。

Depth (m)	Soil Type	γ_t (kN/m ³)	N-value	Su (kPa)	c' (kPa)	Φ' (degrees)
0~2.3	SF	19.0	4	30~33.2		
2.3~6	CL	18.1		33.2~38		
6~9	SM	19.0	4		0	33
9~23.5	CL	18.6		43~64		
23.5~33.5	CL	19.2		64~141		
33.5~35.5	SM	19.5	25		0	35
35.5~42.5	CL	19.9		156~210		
42.5~49.5	SM	19.9	30		0	35
49.5~70	GM	20.0	100		0	38

图 8 土层主要参数

图 10 为原论文中 PLAXIS 有限元结果与测斜仪实测地下连续墙水平位移结果的对比，①-⑦代表各施工阶段。可以看到，除施工阶段 2 和阶段 6 两者差距偏大外，实测数据与有限元分析整体结果非常接近，最大位移值均保持在 70-75mm 之间。

在原论文的基础上，我们使用 DeepEX 程序基于弹塑性地基梁算法对该基坑进行了计算。得到的该基坑地下连续墙的水平位移结果见图 11。与实测和有限元结果比，变形量略微偏小，但无论从数值上还是趋势上，匹配效果较好。

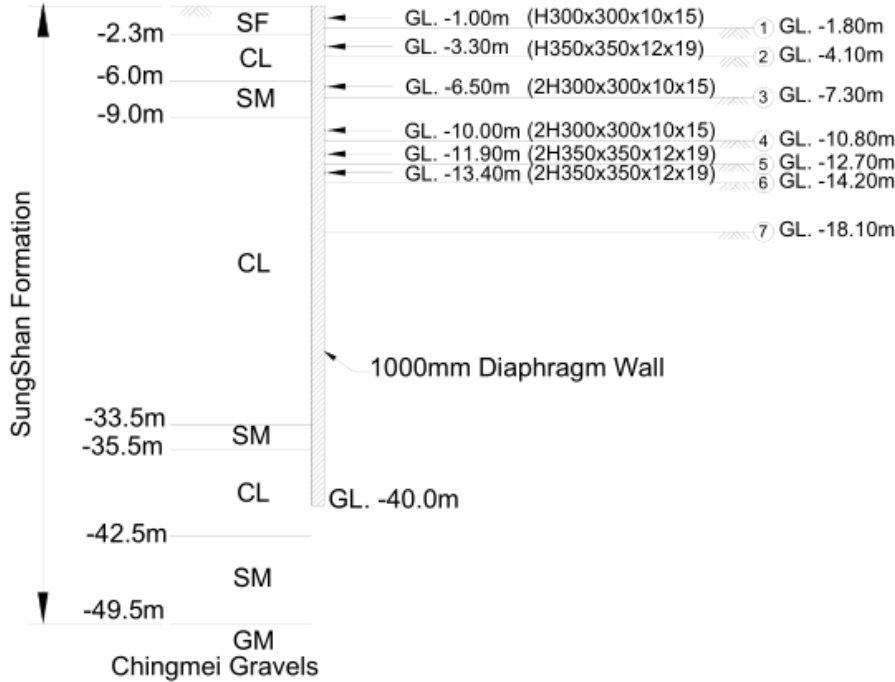


图 9 台北某基坑断面图

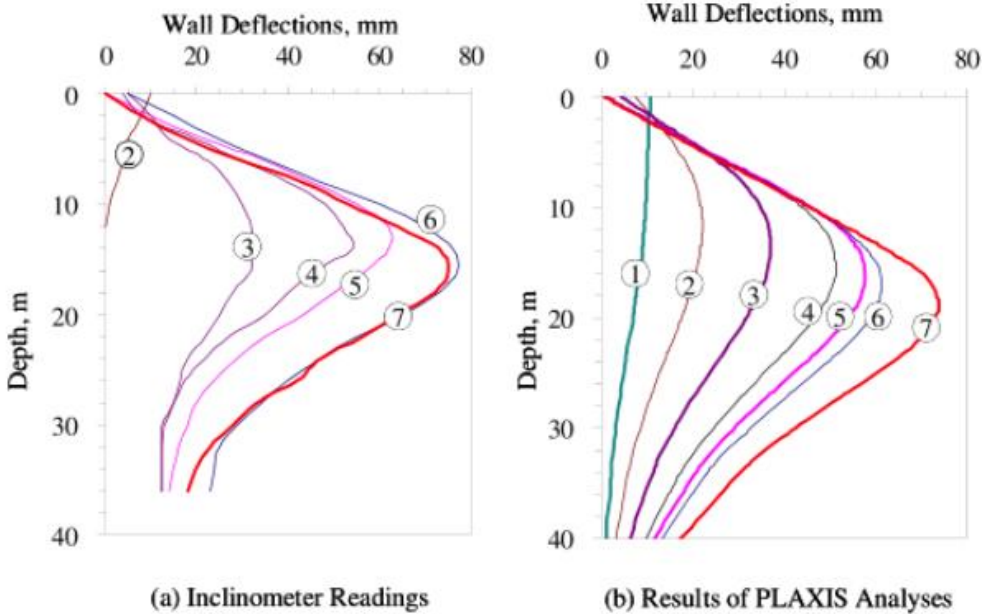


图 10 原论文中 PLAXIS 有限元结果与测斜仪实测结果的对比



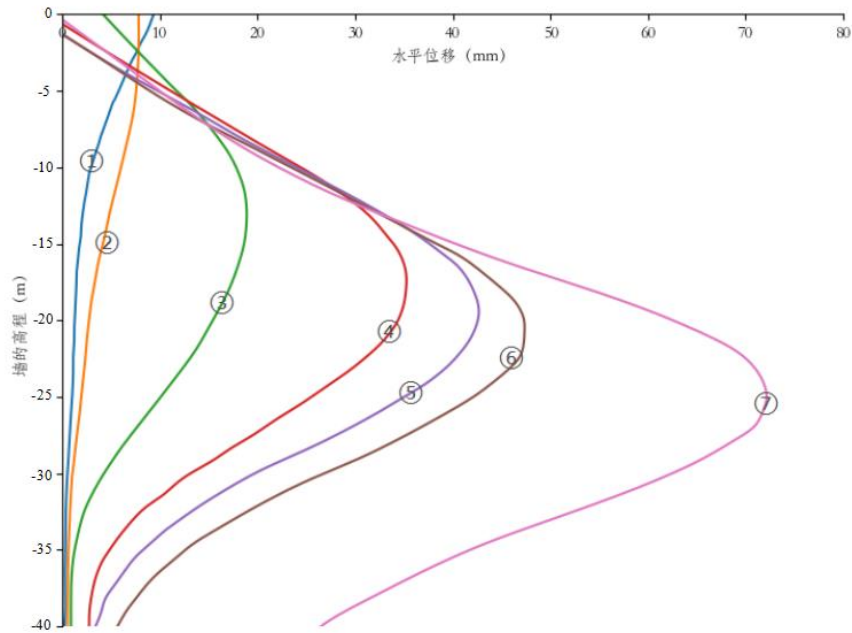


图 11 DeepEX 弹塑性地基梁法计算结果

原论文中除地连墙水平位移外，也包含了各支撑的支反力计算结果。如表 5 所示，分别是各预应力支撑在每个施工阶段的对应的支反力。

表 6 为 DeepEX 中弹塑性地基梁法计算所得各支撑反力结果，发现支撑弹塑性地基梁法结果整体略偏小，主要体现在前三道支撑上，后两道支撑反力结果较为接近，整体就设计而言，二者整体偏差程度满足精度要求。

表 5 有限元法计算得到的各支撑支反力结果

	第 1 道支撑	第 2 道支撑	第 3 道支撑	第 4 道支撑	第 5 道支撑	第六道支撑
预应力 (KN)	75	115	200	120	160	250
支撑反力 (KN)						
阶段 1						
阶段 2	187					
阶段 3	154	282				
阶段 4	104	258	480			
阶段 5	93	249	491	294		
阶段 6	91	240	472	284	313	
阶段 7	87	226	440	278	395	610

表 6 弹塑性地基梁法得到的各支撑支反力结果

	第 1 道支撑	第 2 道支撑	第 3 道支撑	第 4 道支撑	第 5 道支撑	第六道支撑
预应力 (KN)	75	115	200	120	160	250
支撑反力 (KN)						
阶段 1						
阶段 2	104.6					
阶段 3	47.9	232.1				
阶段 4		138.4	507			
阶段 5		103.2	478	325.9		
阶段 6		92.8	440	310.6	301.3	
阶段 7		74	350	244.3	378.1	669

3. 小结

本文主要介绍了 Eurocode7 和 AASSTO LRFD 中基坑支护体系的设计思想与分析方法，对比了其“规程”的异同，并针对国内外常用的四种基坑支挡结构分析方法进行了介绍和案例对比。得到的主要结论如下：

1、“规程”、Eurocode7、AASSTO LRFD 整体设计思想均为极限状态设计，但设计系数与分析方法上差别较大，国外标准中的分项系数验算方法与支挡结构抗震验算方法可为国内工程师提供借鉴意义。

2、在某悬臂支挡体系不同分析方法下的土压力对比中，弹塑性地基梁法和有限元法结果较为接近，朗肯土压力理论计算得到的被动区土反力整体偏大，而弹性支点法得到的土反力结果局部为不切合实际的“吸力”。

3、对于桩-锚/撑式支挡体系，在纯砂土中，四种计算方法所得挡土结构弯矩结果相差不大，变形结果略有不同；在纯黏土中，弹塑性地基梁法与有限元法得到的挡土结构弯矩和变形结果均较为接近，而另外两种算法与前者相比偏大较大。

4、对比了台北某 18m 深基坑工程中挡土结构水平位移的测斜数据、有限元结果、弹塑性地基梁法结果和有限元法与弹塑性地基梁法计算所得各支撑的支反力结果，发现匹配效果良好。

整体来看，完全的有限元法目前作为一种高精度的分析方法已被行业内认可，但从设计角度讲，有限元法存在参数不好获取、分析结果具有主观性、难以检查校正等问题；极限平衡方法和弹性支点法从对比结果来看，在某些情况下还是存在误差较大的问题；相比之下，弹塑性地基梁法计算精度较高，且模型简单、适合多次迭代，非常适合作为深基坑的设计、分析、验证的手段。

致谢：感谢清华大学土木工程系宋二祥教授在本文评阅阶段给予的意见！

参考资料

- [1] Eurocode 7[J]. 1997.
- [2] AASHTO LRFD[J]. 2007.
- [3] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] Deep EX Non linear analysis Manual[M] 2016.
- [5] Chao H C, Hwang R N, Chin C T. Influence of Tip Movements on Inclinometer Readings and Performance of Diaphragm Walls in Deep Excavations[C] / Earth Retention Conference. 2014.