

基坑支护设计中支点刚度的取值应用研究

邓祖豪¹ 贾梦洁²

1. 广西湘桂岩土工程有限公司; 2. 广西土木勘察检测治理有限公司

摘要: 基坑支护设计中, 支锚式支挡结构支点刚度取值对挡土构件的内力变形乃至支护结构的安全可靠性至关重要, 合理选取支点刚度值, 既可以让挡土构件和支锚构件变形协调, 满足基坑支护设计的目的, 又可以让支护设计方案更经济合理。

关键词: 基坑支护; 支点刚度; 变形协调; 经济合理

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2022. 24. 098

一、前言

支锚式支挡结构是基坑支护设计中常用的一种支护形式, 包括锚拉式支挡结构和支撑式支挡结构。

锚拉式支挡结构主要由挡土构件支护桩或地下连续墙与锚杆(索)共同受力所组成的结构体系, 其主要受力特点是将基坑外侧水平向的土压力传递至坑底和坑外深部稳定岩土层中, 从而起到加固基坑侧壁土体的作用; 支撑式支挡结构主要由挡土构件支护桩或地下连续墙与内支撑杆件共同受力所组成的结构体系, 其主要受力特点是将基坑外侧水平向的土压力一部分通过挡土构件传递至坑底岩土层中, 另一部分则通过支撑杆件内力平衡相互抵消, 从而使基坑支护结构体系达到稳定状态。

支锚式支挡结构设计计算中, 通常将整个结构体系分解为挡土构件(如支护桩、地下连续墙)、支锚构件(锚杆、内支撑杆)分别进行分析计算, 由此挡土构件与支锚构件的节点内力, 不仅与基坑外侧的土压力有关, 还与挡土构件的承载能力和支锚构件的刚度有关, 其中支锚构件的刚度取值应用为本文所研究的内容。

二、支锚刚度

刚度是指材料或构件在受外力作用下抵抗变形的能力, 亦可释义为材料或构件单位变形所需的外力, 其变形通常处于弹性阶段, 倒数称为柔度系数。物理学中弹簧的刚度称之为弹性系数; 地基基础学中地基土的刚度称之为基床系数, 结构设计中构件的刚度包括轴向刚度、弯曲刚度、剪变刚度和扭转刚度等等。

基坑设计中, 为便于计算, 通常将挡土构件外支锚

构件简化为弹性支座, 弹性支座的弹性系数亦即支锚点的刚度系数, 其单位为kN/m或MN/m, 简化计算模型见图1:

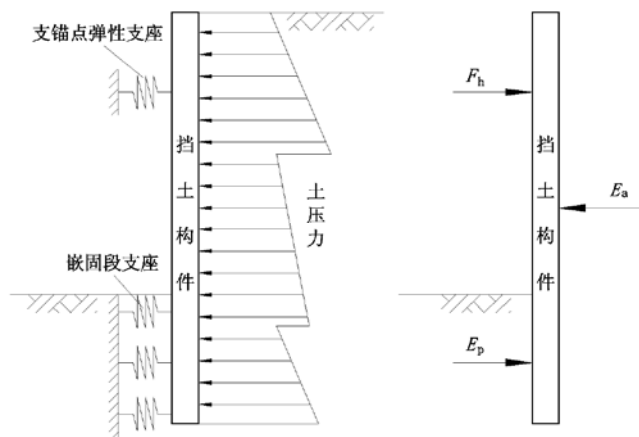


图1 支锚式支挡结构计算模型

根据图1模型, 将挡土构件作为一个刚体单元进行受力分析, 挡土构件受到右侧主动土压力 E_a 、左侧嵌固段被动土压力 E_p 和支锚点力 F_h 的共同作用, 处于静力平衡状态。根据力学原理, 左侧支锚支点力: $F_h = E_a - E_p$ 。

挡土构件嵌固段属于弹性支座, 所能承受的力与土体变形有关; 支锚点也属于弹性支座, 所能承受的力与支锚构件材料抗变形能力有关。对于挡土构件, 常用的材料主要有钢筋混凝土桩、地下连续墙、钢板桩、钢管桩等, 在其正常受力工作条件下, 属于弹性材料, 相应的挠度变形将引起外部支点力的变化。由此得知, 支锚点的反力除与基坑外侧主动力、基坑内侧嵌固段长度及被动土弹性系数、挡土构件刚度因素有关外, 还与其支锚支座自身的刚度有关。

针对锚拉式支挡结构, 支点刚度即为锚杆(索)的抗变形能力, 与岩土层特性、锚杆(索)体材料强度、截面、长度等方面因素有关, 可采用锚杆(索)抗拔基本试验测定。常用的锚杆钢筋主要为HRB400级, 直径18mm~25mm; 锚索采用的钢绞线为1860级, 直径15.2mm和17.8mm, 锚孔直径130mm~150mm。据试验实测数据统计分析, 长度15m~25m的锚杆(索), 锚拉支点刚度在10MN/m~25MN/m之间, 锚杆(索)越长, 刚度越小; 自

由段越长，刚度越小。支撑式支挡结构支点刚度除与构件本身材料强度、截面、长度方面的因素影响外，还与基坑岩土特性差异、工序工法所导致的内支撑结构体系变形相关，难以采用试验方法测定，基坑工程设计中，常采用构件线弹性结构分析位移相协调法确定支点力。相比于锚拉式支点刚度，支撑式支点刚度数值更大，一般地，截面500mm×500mm，长10m的内撑杆，支撑点的刚度将达到500MN/m以上。由此可知，采用锚拉式支挡结构所设置的支点较多，即锚杆（索）的数量较多，而其可靠度并不比支撑式支挡结构安全稳定。在工程实践中，锚拉式支挡基坑方案出事故远比支撑式支挡基坑方案的概率高，究其原因，就是锚拉式支挡结构的支点刚度远比支撑式支挡结构的支点刚度低很多。

三、支锚刚度应用分析

从前文的分析阐述中可知，基坑支锚式支挡结构支点刚度的取值对基坑方案的可行性至关重要。从另一个方面理解，基坑支锚构件的设计实则是支锚点的布置及刚度的取值问题。为对支锚刚度作更深一步研究探讨，本文以某基坑工程支护设计案例作详细地分析阐述。

如图2所示，某基坑开挖深度10m，周边环境较复杂，基坑安全等级为二级；场地地层为黏土，重度 γ 为19kN/m³，黏聚力 c 值为35kPa，内摩擦角 ϕ 值为12°，土体对锚杆的极限黏结强度标准值 q_{sk} 为60kPa；支护设计方案拟选用排桩+锚杆或内支撑形式，排桩采用钢筋混

凝土灌注桩，钢筋HRB400级，砼C30，桩径1m，桩间距2m，支锚构件设一道，位于坑顶以下4m处；腰梁根据支锚构件的设计要求另行设计计算。

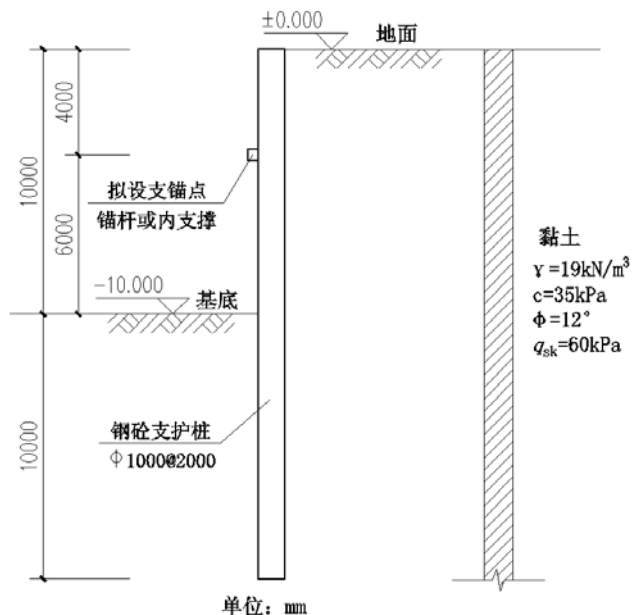
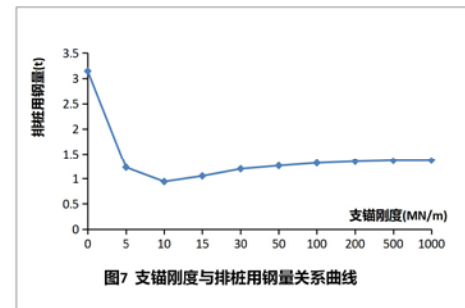
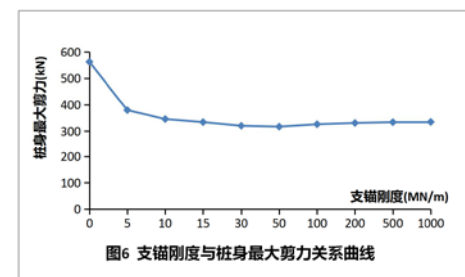
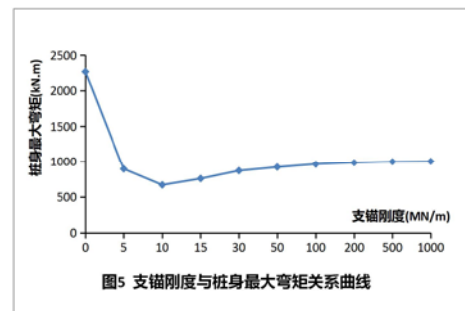
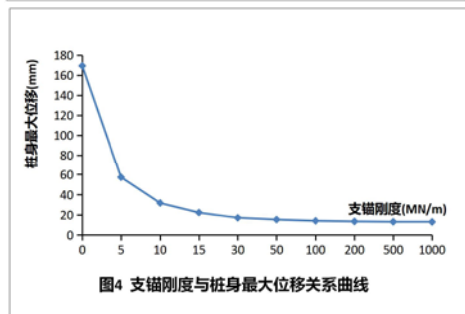
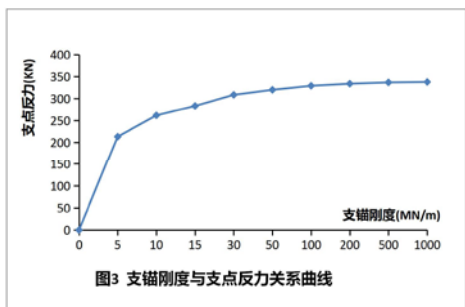


图2 某基坑支护案例简图

根据上述已知的设计条件，采用改变支锚刚度数值对模型分析，运用《理正深基坑设计软件7.0BP3版》进行演算，计算结果详见表1。将表1中支锚刚度值与支护桩的内力变形及钢筋用量绘制成关系曲线图，详见图3~图7。

表1 基坑支护模型计算成果表

支锚刚度 k_R (MN/m)	支点反力 F_h (kN)	桩身最大位移 v_{max} (mm)	桩身最大弯矩 M_{max} (kN·m)	桩身最大剪力 Q_{max} (kN)	排桩纵筋计算配筋量 A_s (mm ²)	排桩箍筋计算配筋量 A_{vs} (mm ² /m)	单根排桩计算钢筋用量 G (t)
0	0.00	169.35	2268.51	562.29	18834.00	839.00	3.14
5	213.51	57.28	893.24	379.38	6612.00	839.00	1.22
10	261.98	31.85	668.70	345.67	4807.00	839.00	0.94
15	283.42	22.36	757.54	334.03	5513.00	839.00	1.05
30	308.69	17.06	868.72	320.32	6412.00	839.00	1.19
50	320.10	15.25	918.94	316.95	6823.00	839.00	1.26
100	329.23	13.98	960.97	326.08	7170.00	839.00	1.31
200	334.00	13.38	983.83	330.84	7360.00	839.00	1.34
500	336.92	13.03	997.87	333.77	7476.00	839.00	1.36
1000	337.91	12.91	1002.61	334.76	7516.00	839.00	1.37



由表1和图3~图7可知，当支锚刚度为0时，支点反力为0，桩身位移、内力（弯矩和剪力）、用钢量均为最大。随着支锚刚度的增大，支点反力逐渐增大并收敛；桩身位移逐渐减小并收敛；桩身弯矩及用钢量先降后缓增，并逐步收敛；桩身剪力逐渐减少后趋于定值。

支锚刚度为0值，表明无支撑或支点不发挥作用，

基坑外侧土体可充分变形，土压力为主动土压力，排桩相当于悬臂梁，基坑外侧的主动土压力需通过排桩传递至坑底以下嵌固段土体中，其桩身位移和内力最大，所需用钢量自然最大；当支锚刚度逐步增大直至无穷，相当于弹性系数逐步增大的弹性支座，最后变成了刚性支座，基坑外侧的土体变形逐步受限直至完全限定，土压力由主动土压力过渡为静止土压力，排桩也由悬臂梁过渡为弹性支座连续梁，最后变成了刚铰支座连续梁，基坑外侧的土压力将随支挡结构的整体抗变形能力增加而重新分布，由此桩身内力也随之改变。

支锚刚度越大，表明支锚刚度抗变形能力越强，基坑外侧的土体变形就越小，支点所分担的外力就越大；支锚刚度越大，所要求的排桩刚度也越大，否则就会使排桩变成了柔性构件，由此可能导致排桩深层位移过大，桩间土体鼓胀脱落，地表沉降等险情。因此，支锚刚度取值过大，未必能使支护结构体系协调变形平衡受力，而且还有可能造成结构局部失衡破坏造成事故。大刚度支护体系还容易形成结构冗余，材料浪费，支护造价成本增加，不经济。

当支锚刚度处于某一数值时，基坑外侧的土体变形可使排桩两侧受力均衡，此时排桩桩身位移既非最小也非最大，但其桩身的弯矩值可达最小，表明支锚构件和排桩的位移变形相协调，材料可充分发挥其强度作用，支护结构趋于合理经济。

当然，支锚刚度的取值应用还需重点考虑基坑顶外侧被保护建（构）筑物的允许变形，若需严格控制变形，那么支锚刚度必须取足够大值，使支护结构体系抗变形能力达到控制变形的要求；若基坑外条件简单，支护结构满足承载能力极限状态设计即可，那么能使支锚构件与挡土构件的位移变形相协调的支锚刚度值将是最合理的选择。

四、结束语

支锚式支挡结构作为基坑设计中常用的支护形式，支点刚度的取值关系着支锚构件和挡土构件的内力变形及材料用量问题，不合理的取值可能导致支护结构体系刚度不足或不平衡，基坑整体或局部失稳导致事故，还有可能导致材料浪费不经济。合理的支点刚度取值是在明确基坑允许变形的前提下，充分发挥材料的强度作用，使支挡构件相互之间变形协调，让支护结构体系即能保证基坑安全稳定可靠，又不造成结构冗余材料浪费。

参考文献

[1] 邵小江. 基坑支护设计[J]. 铁道建筑, 2001 (10): 8-11.