

# 刚架护坡桩边坡支护技术

蒋天涛

(北京中建建筑科学技术研究院,北京 100076)

**【摘要】** 介绍了刚架护坡桩的概念、特性、实用计算方法、刚架护坡桩的施工和工程应用情况,并就刚架护坡桩与双排桩护坡的本质区别作了分析,供从事岩土工程设计、施工的人员参考。

**【关键词】** 刚架;护坡桩;刚接;铰接;超静定;排架;稳定

**【中图分类号】** TU413.62

## Slope Supportig Technology of Rigid-jointed Fram Piles

**【Abstract】** The Concept and characteristics of slope supporting piles with rigid-jointed frame are introduced, as well as its calculation method, construction and engineering application. The essential distinction between supporting piles with rigid-jointed frame and two-line piles is analyzed. Some reference is provided to geotechnical designers and constructors.

**【Key words】** rigid-jointed frame; slope supporting piles; rigid joint; pin joint (pin connected); indetermination; bent; stability

## 0 引言

刚架护坡桩边坡支护技术,利用超静定刚架结构随支承条件及荷载条件的变化而自动调整结构内力分配的特性,不设锚杆和支撑,用以解决复杂多变、模糊不定的边坡支护问题,具有适应性强、安全度高、节约材料、施工方便等多种优点,用于支护较深基坑的边坡已取得良好效果。1996年由建设部组织鉴定通过,为建设部97重点推广项目。专家认为:“刚架护坡桩结构内力分布特性与其它悬臂支护结构相比,减小桩顶位移,提高抗倾覆能力,具有重要实用价值”,“刚架护坡桩在不设锚杆和支撑的情况下进行深基坑支护适用于非软土地区、中等深度的基坑”,其“总体研究和应用达到国内领先水平”。刚架护坡桩在一定的范围内代替悬臂式单桩,可降低材料用量30%以上。代替加锚杆的护坡桩则可避免交叉施工,并节约造价5%以上。在不能采用锚杆的工程场地和地质条件下将更显示出其独

特的优越性。

刚架护坡桩工法已由建设部批准为国家一级工法。

## 1 刚架护坡桩的概念及特性

刚架护坡桩是用处于同一平面的前桩和后桩之间以刚性节点和刚性横梁联成的一个整体单元叫做刚架(为结构力学中的一种结构形式),是三次超静定结构。不设锚杆或支撑将其用于深基坑边坡支护,叫刚架护坡桩,简称刚架桩。其特点是:①刚架的顶部为刚性结点,桩梁之间不能相互转动,可以抵抗弯矩。在底部不插入土中的情况下,两樁以上刚架就可以组成一个稳定结构。②刚架可以随下端支承情况的变化而自动调整刚架上、下端的弯矩,同时可以自动调整结构各部分的内力以适应复杂多变、荷载作用位置模糊的边坡支护问题。从而可以充分发挥材料的作用,减小桩径和减少钢筋,达到节约的目的。悬臂桩和锚拉桩都不具备以上两种功能。③刚架桩的抗倾

覆能力强,首先它是靠基坑以下的桩前土(稳定土体)的被动土压力和刚架插入基坑部分的前桩抗压,后桩抗拔所形成的力偶来抵抗倾覆力矩。同时刚架上端的刚性节点也增加了刚架的抗倾覆能力。而悬臂桩仅靠桩插入基坑部分的桩前的被动土压来抵抗倾覆力矩,比刚架的抗倾覆能力小得多。与锚拉桩相比,锚拉桩是靠桩前的被动土压和插入一侧凌空土体的锚杆的抗拔来抵抗倾覆力矩,亦比刚架的抗倾覆能力小。

## 2 刚架桩的实用算法

刚架桩的实用算法按以下步骤进行:①根据工程的地质情况、开挖深度、地下水位高低及地面荷载,先假定一个刚架的桩径、横梁断面(一般与桩同刚度)、跨度和间距。一般深度4 m以内的基坑桩径用200 mm;5~7 m用300 mm;8~10 m用400 mm;11~13 m用600 mm;14 m以上用800 mm,若地质条件较差,地面荷载又大可加大一级。刚架的跨度根据场地情况和桩顶位移控制要求,可为桩径的2~6倍。②按《结构静力计算手册》下端嵌固的门式刚架分别计算出三角形荷载及均布荷载作用在任意一侧时的上、下固端弯矩及下端剪力。同时算出刚架在开挖面以上各点的弯矩和刚架在基坑以上部分产生的位移。③将两种不同荷载作用下的弯矩及剪力前后桩进行平均。④按上、下、前、后四个固端弯矩总和不变的原则对基坑以上各点的弯矩进行弹性修正,修正系数上端可取1.33,下端可取0.67。⑤以地面荷载和基坑以上的土压力及水压力所产生的力矩为倾覆力矩,以前后桩形成的力偶(根据桩土摩擦系数及假定桩长确定)及桩前土的被动土压力形成的力矩为平衡力矩,取安全系数1.3~1.5计算前桩的嵌固深度。⑥用修正后的下端弯矩及剪力按《工业与民用建筑灌注桩基础设计与施工规程》附录二的方法计算基坑以下各点的弯矩和刚架顶部的总位移。⑦用④、⑥条算出的最大弯矩再按0.6~0.7折减后按等代矩形截面配筋。

我们已经编制出相应的计算程序,计算简便,数据可靠。可对任意开挖深度,不同地质条件、各种土压力、地面荷载、水压力作用下的刚架进行计算,并绘制了通用图。可进行各种投标及施工图的快速设计。经多个工程应用证明,安全可靠,经济合理。

## 3 刚架桩的施工

刚架桩的桩体施工同一般悬臂桩及锚拉桩的桩体施工,仅桩头钢筋的伸出长度必须满足设计要求。桩体施工完毕后,即于地面按设计要求挖出纵、横梁地槽,再按设计要求弯折和绑扎横、纵梁钢筋,经检查验收后原槽浇灌混凝土。待混凝土强度达70%后即可进行基坑开挖。

## 4 工程应用情况

刚架桩已在众多工程应用,比较典型的工程如:北京糖业烟酒公司批发市场,基坑深4.0 m,仅用 $\phi 200$ 桩,跨度及间距各为1 m,经250 kN混凝土罐车及泵车同时连续开行三昼夜,实测桩顶最大位移仅12 mm;北京富国广场一期工程东侧,紧邻兆龙饭店地下室8 m左右,基坑开挖深度13.5 m,要求控制坑壁位移不大于5 mm。若用锚拉桩,锚杆长度无法满足要求。悬臂桩又算不下来。最后采用 $\phi 800$ ,间距1.8 m,跨度4 m及2.6 m的刚架桩护坡,前桩最小嵌固深度2.97 m,实测最大桩顶位移仅4 mm;北京高等学校教师楼,原设计为锚拉桩,桩体施工完毕后在打锚杆过程中遇到古暗河,锚杆技术无法实施,最后采用刚架桩进行处理,取得良好效果;北京工艺进出口公司住宅楼,为大卵石地层,最大开挖深度14.23 m,如采用锚拉桩,锚杆施工困难,费用很高,经过比较,最后采用刚架桩支护,取得了良好的技术经济效益。

## 5 讨论

刚架桩经在多个工程上应用及测试表明,其安全储备还很大,这一方面是按库仑土压力理论计算出来的土压力偏大,另一方面是桩土共同作用没有加以利用。事实上在一般的地

质条件下,刚架前后桩之间的土与刚架之间,形成了一个以前后桩为翼板,以桩间土折算成等代厚度的混凝土为腹板的复合工字梁。其断面约等于刚架的跨度加桩径,这是一个断面相当大的梁。在基坑以下受三向约束的土体中它是一个比较稳定的组合体,完全可以考虑加以利用或部分加以利用。如加以利用,则在这个最大弯矩的范围内就可大大减少配筋量,从而取得更好的经济效益。当然在软弱土中不能加以考虑。

关于在软弱土中应用的可能性问题,按理论分析,刚架护坡桩的计算是基于不同的工程和地质参数,采用通常的经典力学的计算方法算出的结果。从逻辑上讲,在软弱土地区也应该是可以用的。例如在软弱土地区,无非其粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  很小,因而作用在刚架上的主动土压力要大得多,而使刚架稳定的被动土压力要小得多。因此,根据力矩平衡原理计算的结果可能桩的嵌固长度要很长。另一方面算出的固端弯矩之总和也要大得多。同时,由于下端弹性支承的减弱,更趋近于铰,所以上端弯矩要加大,而下端弯矩要相应减小,且往下移。此时若在被动土压力区采取一些补强措施,如在基坑以下的桩前土中作一些水泥搅拌桩或旋喷桩,同时对深层滑移加以验算,是可以取得很好效果的。当然,我们自己还没有在软弱土中应用过,还需要通过实践来加以验证。

刚架桩的设计原理和计算方法不仅适用于深基坑的边坡支护,同时可用于道路、码头、堤坝、桥梁、山体滑坡的边坡支挡或加固处理,尚有待进一步的推广和深化。

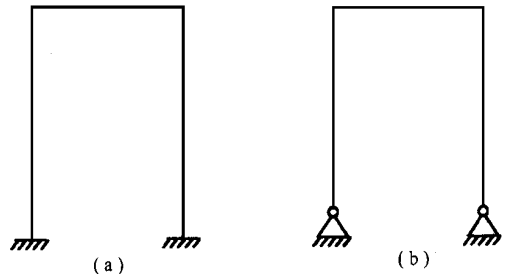
## 6 刚架护坡桩与双排桩护坡的区别

在深基坑支护的悬臂式支挡结构中,除悬臂桩外尚有双排桩;类似双排桩的空间组合支护桩和刚架桩。有的工程技术人员将双排桩与刚架桩混淆,认为双排桩就是刚架桩,把双排桩当成刚架桩来分析使用,结果造成不可挽回的工程事故。笔者试图从概念、结构构造和力学的角度来谈谈二者的本质区别。

### 6.1 概念

刚架是结构力学中一个明确的、独立的结构体系。与之相应的还有排架、梁、板、桁架、拱等等。每种结构体系均有其相对独立的内力分析方法和结构构造要求。内力分析是在相应的结构型式和结构构造基础上建立的。按照不同的结构进行内力分析也就必须要求有相应的结构型式和结构构造来加以保证,缺一不可。若只有相同的结构型式,而没有相应的结构构造来加以保证,结构的性质也会发生根本性的改变。因此,不同的结构构造,则只能按不同的结构体系来进行分析。如刚架和排架是具有相同的结构外形,但由于其结构构造的不同,而形成两种截然不同的结构体系和内力分配特性。刚架要求其顶端必须为刚性节点,能绝对有效地抵抗在预定荷载作用下所产生的弯矩。而其下端可以是嵌固或铰接。在下端为嵌固时,刚架为三次超静定结构。下端为铰接时,它仍是二次超静定结构,一个很稳定的结构。

排架则不然,它的上端为铰接,不能有效地抵抗弯矩,而要求其下端必须是嵌固状态,在这种条件下排架仅仅是一次超静定结构。如果排架的下端由嵌固变成了铰接,则此时这个体系就变成了可以转动的机构,而不再是结构了。换句话说,它就变成了一个不稳定的结构了。由此可见,刚架与排架虽然具有相同的结构外形,但实质上它们是两种截然不同的结构体系(见图1~图3)。



(a) 下端嵌固刚架 (b) 下端铰接刚架

图1 刚架结构图

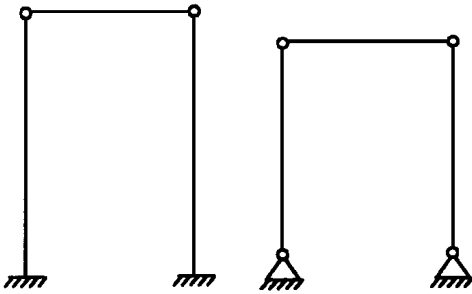


图2 排架结构图

图3 不稳定结构图

## 6.2 结构构造

如前述刚架桩的顶端必须是刚性节点,不能发生转动,能绝对有效地抵抗相应荷载所产生的弯矩。以刚架的前桩而言,在均布荷载作用下其桩顶弯矩和对应的横梁端部弯矩相等,横梁的端部弯矩沿刚架跨度方向逐渐减小,到后桩的桩顶变成反向弯矩,与后桩的桩顶弯矩相等(见图4)。

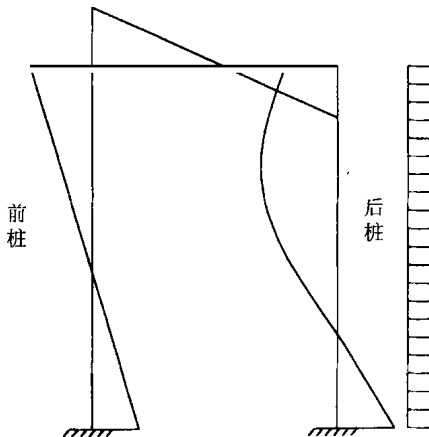


图4 均布荷载作用下刚架弯矩分布示意图

要抵抗多大的弯矩,要多大的断面,多少配筋,钢筋在何处不需要了,该反向配置了,只能通过计算确定。此外,按钢筋混凝土结构设计材料包络图的要求,在计算不需要配筋的截面以外,还必须保证钢筋的锚固长度不小于规范要求的受拉钢筋的锚固长度。

排架的顶端为铰接,不要求它抵抗弯矩,而只要求它的横梁能承受和传递轴向力。在轴向力的作用下不产生拉伸或压缩变形即可。因此,它的节点配筋不通过计算弯矩来确定。

而住住按构造设置,满足桩(柱)和梁之间的联结构造,如通常将桩(柱)顶钢筋直接伸入梁内500 mm左右即可。双排桩的桩与梁之联结是将桩顶钢筋伸入纵向联系圈梁,如文献[1]所述“将单排桩桩距拉开做前后排相对应或梅花式前后排桩,并在桩顶用联系圈梁把前后排桩连起来,沿基坑长即形成双排护坡桩”。而纵向联系圈梁都是按纵向配筋。横向(双排桩的排距方向或叫排架的跨度方向)仅按构造设置箍筋。它没有考虑和设置专门的抗弯节点钢筋(见图5)。

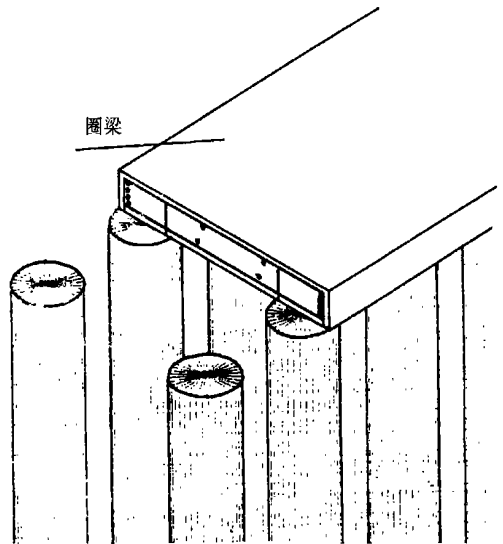


图5 双排护坡桩桩顶构造示意图

又如文献[2]的模拟试验所述“……每排桩在桩顶地面处用较柔的扁钢(1 200 mm × 120 mm × 1 mm)、螺栓联系在一起,前后排相对应的桩则用150 mm × 40 mm × 4 mm扁钢、螺栓联系起来,模拟实际工程中桩顶的联系梁”。文献[1]、[2]所述的桩顶结构构造,在前后排桩的距离及荷载都较小时,具有一定的嵌固作用,能起多大作用很难定量。但随着排距(即跨度)及荷载加大,这个作用逐步减小和消失。文献[2]的结论则是“悬臂双排护坡桩与排架结构的受力情况相似”。

如前所述,刚架桩的桩顶节点是完全按照刚架内力分析算出的刚架节点弯矩,计算配筋

面积并符合混凝土结构设计规范关于框架节点的构造要求(见图6)。

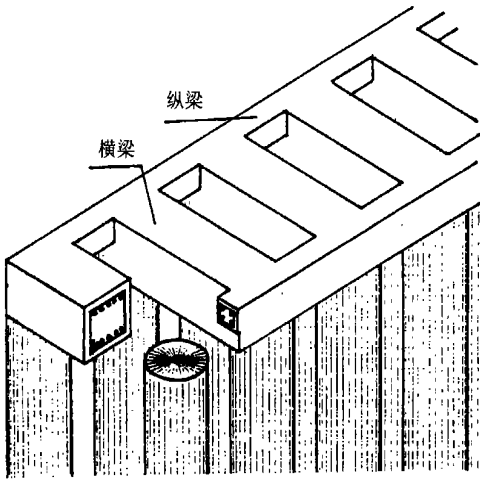


图6 刚架护坡桩桩顶构造示意图

### 6.3 力学分析

如本文第一部分所述,刚架与排架是两种不同的结构体系,当横梁的线刚度与桩的线刚度基本一致时,其根本区别在于桩顶与横梁的联结构造是刚性节点还是铰接节点。在假定下端均为良好嵌固的情况下,刚架是三次超静定结构,排架仅是一次超静定结构。在实际

工程中,桩的下端插入土中都不是完全嵌固状态,它是介于铰和嵌固之间的一种弹性支承。当土质较好、插入深度也较大时,它更接近于嵌固。反之,土质较软、插入深度也不大时它更接近于铰。在护坡桩的整个使用阶段,它都是一个随着气候条件变化而变化的可变因素。我们在前面已经分析过了,当刚架的下端支承条件完全由嵌固变成了铰(如地质参数变化、插入深度减小或桩断裂等),刚架能自动调整结构各部分的内力,下端弯矩为零,上端承受全部由外荷载所引起的弯矩,结构仍为二次超静定,处于绝对稳定状态。但此时非直接受荷桩的内力将大于直接受荷桩的内力。属于排架的双排桩在这种情况下将完全丧失稳定而倒塌。因为它的顶部不具备足够抵抗弯矩的能力,此时它已经变成一个机构了,由外荷载所引起的固端弯矩没有地方可以承受或抵抗,而这个弯矩在地质条件、地面荷载及开挖深度一定时,它是一个定值。表1是三种不同支承及联结条件下按结构力学算出来的各种固端弯矩及总和弯矩值。

表1 三种不同结构在三角形荷载作用下的固端弯矩对比表

结构支承情况	比值	$M_1$	$M_2$	$M_A$	$M_B$	$\sum  M $	计算简图
上端刚接 下端嵌固 ①		21.0	-93.5	-252.7	101.4	468.6	
	①/②	0.1257	0.310			1	
	①/③			0.77	0.72	1	
上端刚接 下端铰接 ②		167	-301.5	0	0	468.5	
	②/①	7.950	3.225			1	
上端铰接 下端嵌固 ③		0	0	328.03	140.5	468.5	
	③/①			1.296	1.385	1	
备注	桩径为 $\phi 400$						

试想表中的第三种状态下,当其下端也变成了铰,又由谁来承担这个固端弯矩呢?

如前分析,因双排桩的上端不是一个良好有效的刚节点,当下端支承条件变坏时,它将失稳而造成工程事故。

以上仅是从内力的角度分析了刚架与排架即与双排桩的区别。下面我们再来讨论一下刚架桩与双排桩在抗倾覆能力上的区别。

按照一般的力学概念知道,顶端是一个刚性联结(不可转动)的四条腿结构,它的成对的腿之间可以形成一个力偶来抵抗水平力所引起的倾覆力矩。能不能形成力偶来抵抗倾覆力矩,这是刚架桩与双排桩的又一根本区别。刚架桩既有前后桩桩前土的被动土压力所形成的抵抗力矩,同时还有前后桩之间,前桩抗压、后桩抗拔所形成的抵抗力矩。当刚架的跨度较大时,这是一个更大的抗倾力矩。因此,刚架的插入基坑深度远小于双排桩的插入基坑深度。如我们在北京宣威大厦使用的刚架护坡桩前桩长 13.5 m,插入基坑深度 2.97 m,仅为桩长的

1/4.55。使用结果,实测桩顶最大位移 4 mm,仅为实际开挖深度的 1/3 158。而双排桩属于上端可以转动的排架,则不具此能力。故文献[2]提出的插入深度控制范围是桩长的 1/3,与文献[3]提出的“桩端嵌埋深度对前桩可按单排悬臂桩计算确定”是一致的。即按悬臂桩计算其插入深度,所以其插入深度必然要大。

#### 6.4 工程事故实例

1990 年施工的上海某工程,基坑开挖深度 6.6 m,主要地质情况从上到下分别为:杂填土及素填土厚 1.4 m;亚粘土厚 1.35 m,  $\varphi=25^\circ$ ,  $c=18$  kPa;粘土厚 0.76 m,  $\varphi=18.5^\circ$ ,  $c=18$  kPa;淤泥质亚粘土厚 2.6 m,  $\varphi=13.5^\circ$ ,  $c=15$  kPa;淤泥质粘土厚 9.5 m,  $\varphi=13.5^\circ$ ,  $c=15$  kPa。该工程一侧 8 m 左右有一高层建筑,另一侧紧邻主要交通干道延安西路。其他两侧为城市一般道路。因锚杆均不允许伸出红线界外,且地质情况甚差,故不能采用锚拉桩支护,悬臂桩又不能满足支护能力要求。实际采用的支护方法见图 7。

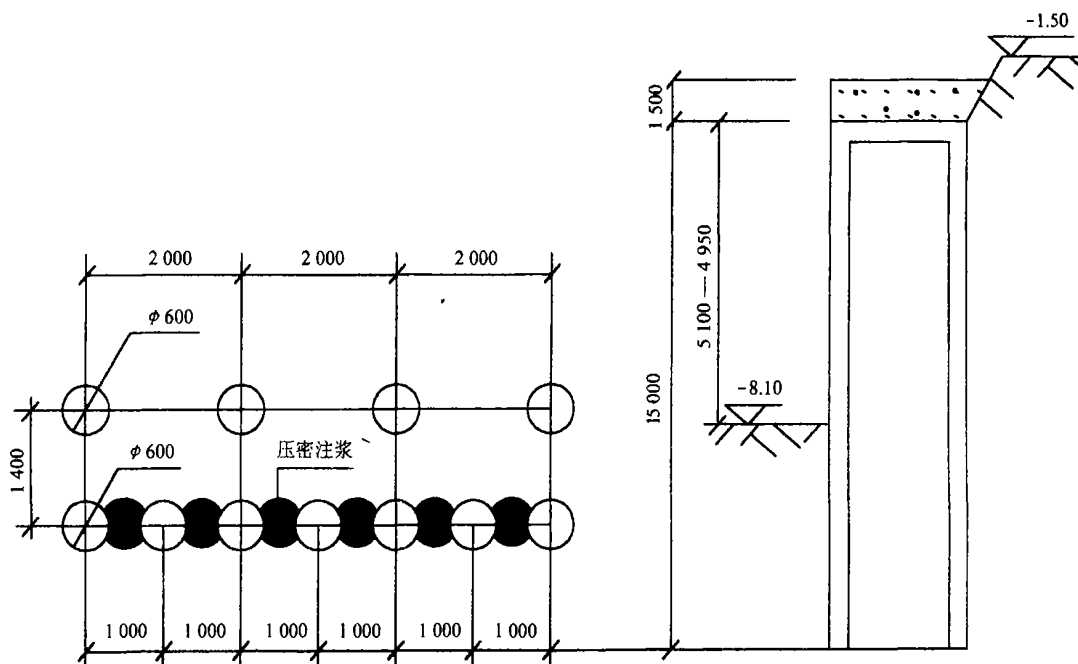


图 7 上海某工程基坑护坡桩布置图

其计算方法也是采用框架(单层框架即为刚架)原理进行内力分析,但其节点实际截面及配筋均未按刚架进行,而如同通常的双排桩一样,仅将桩顶钢筋直接伸入纵向联系圈梁500 mm左右。在连续数天大雨的影响下,基底土变软。假定的下端嵌固条件更接近于铰。上端又不能有效地抵抗弯矩,双排桩已处于不稳定状态。加以基坑上部土层地质参数的改变、荷载增加,靠高层建筑一侧的桩全部倒塌。靠延安西路一侧,因事前就对被动土压区的土进行了压密注浆加固,所以没有出现险情。而另两侧的基坑也处于岌岌可危状态。倒塌后的桩顶钢筋全部从纵向联系圈梁中拉出。这就是把双排桩误作刚架桩这个假定上的失误而带来的工程事故。

### 6.5 结论

刚架护坡桩是开始就按明确的结构概念与确切的结构定义,依照相应的结构理论和计算方法研究设计出来一种新的边坡支护技术。双排桩是先在实践中一排悬臂桩满足不了计算要求时,采用的前后排交错或对应布置的,加密的悬臂桩的做法。它的基础是始于悬臂桩。通过使用后发现它的性能优于单排悬臂桩的简单组合,因而加以研究、归纳。双排桩的性能如何,人们在充分认识它以前,仅仅从简单的结构外形出发,把它定名为双排桩,用刚架的分析方法对它作近似分析是可以理解的。但仔细研究后就感到,“双排桩”是一个没

有明确结构概念和确切定义的提法。它既可以是单独的悬臂桩,如纵向不加联系梁时就是这样,这也是可能经常遇到的;它也可能是叠合式(处于同一平面又相距很近时),或组合式(处于同一平面并考虑桩间土参加共同工作时)的悬臂桩(梁)。当然还可能是一个小跨度的排架。唯独它不可能是一个刚架。因为它的节点没有按照刚架进行专门设计,节点设计不能满足刚架要求,它的内力分配特性也就完全变了。所以,不能把双排桩误作刚架桩来分析和使用,二者之间是有着本质差异的。

### 7 结语

目前刚架护坡桩的研究和应用仅限于单跨刚架,两跨以上的刚架用于边坡支挡结构上的受力性能如何?单跨刚架加桩顶锚拉,以减小刚架顶部位移的性能如何?刚架前后桩间的桩间土与刚架的共同工作如何利用?刚架在软弱土地区是否适用?如何使用?等等问题,笔者认为仍然是具有研究及实用价值的。

### 参考文献

- 1 余志成,施文华.深基坑护坡桩技术的几项新发展.建筑技术,1994(5):274~275
- 2 谭永坚,何颐华.粘性土中悬臂双排护坡桩的受力性能研究.建筑科学,1993(4):28~34
- 3 孙家乐等.深基坑空间组合支护桩设计与工程应用.工业建筑,1995,25(9):8~13

收稿日期:2000-11-23