

目 次

论 文

- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩概论.....谢庆道, 郑尔康 (4)
- 大直径现浇薄壁筒桩竖向受力性状分析.....周建, 焦丹 (11)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载性状数值分析.....郭平, 王哲 (17)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载力研究.....郭平, 王哲 (21)
- 现浇薄壁筒桩水平承载力计算方法研究.....张杰 (28)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩工程应用浅析.....焦丹 (34)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩处理桥头软基的试验研究.....史海莹 (40)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩在基坑工程中的应用.....史海莹 (44)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩海堤结构影响因素分析及应用.....刘卫未, 周建 (47)
- 填海工程中大直径薄壁筒桩结构海堤的应用.....刘卫未, 张杰 (59)
- 联体薄壁筒桩施工简介.....赵汉金, 黄定西 (65)
- 现浇混凝土薄壁筒桩施工工艺介绍.....赵汉金, 黄定西 (70)
- 大直径现浇混凝土薄壁筒桩的施工、质量检查及验收.....张铁柱, 郑尔康 (75)
- 高频液压振动锤在筒桩施工中的应用研究.....王进怀, 王卫东 (81)
- 关于大直径现浇砼薄壁筒桩若干问题的探讨.....郑尔康 (86)

一题一议

- 关于筒桩竖向承载力受力分析图.....龚晓南 (89)

编者按:

大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术是我国近年发展的新技术,已在港湾工程、高速公路、高速铁路、建筑工程和市政工程等基础工程中得到成功应用,具有施工快、质量易于保证、经济效益好、环境污染小等特点。

浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》DB33/1044-2007已于2008年1月1日实施。

为了推动大直径现浇混凝土薄壁筒桩新技术的推广应用,根据浙江海桐投资管理有限公司和浙江省地质矿产工程公司的建议,本刊该期编辑出版“大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术”专集,以飨读者。

借此机会,欢迎从事地基处理的诸位同仁,积极为本刊撰稿,感谢各位同仁长期以来对本刊的支持和帮助,欢迎从事地基处理的单位系统总结经验,在本刊出版专集。让我们为更好地促进我国地基处理技术的不断发展、创新和提高而共同努力!

《地基处理》编辑部

2008年9月1日

大直径现浇混凝土薄壁筒桩概论*

谢庆道 郑尔康

(浙江海桐投资管理有限公司 杭州 310014)

[摘要] 本文系统地论述了筒桩的工作原理与技术特点、筒桩设计计算方法及施工设备和工艺、筒桩的质量检测、工程实例以及对筒桩未来发展的展望。

[关键词] 大直径薄壁筒桩; 竖向承载力; 水平向承载力; 成孔器; 单体筒桩; 联体筒桩; 质量检测; 接桩; 吊打

筒桩工作原理与技术特点

1. 筒桩定义及分类

大直径现浇混凝土薄壁筒桩简称筒桩, 是谢庆道教授在长期从事教学科研工程实践的基础上, 创造性地发明了筒桩。于2002年获得中国专利(专利号: ZL 01 2 44439.1), 2004年获得美国专利(专利号: US 6, 749, 372 B2)。

所谓大直径现浇混凝土薄壁筒桩是这样的一种桩型: 其外径在1000mm至1500mm之间, 并正在向2000mm或更大的方向发展; 利用内外两层钢管, 间距为150mm至200mm, 或根据需要设置, 底部装有预制的环形桩靴; 通过特制的夹持器, 在顶部以中高频率激振器的作用下, 将钢管成孔器一起沉入地基土内的设计标高并把套入内管的部分土芯从成孔器排土孔中排出; 揭开夹持器放入钢筋笼, 再在成孔器的外钢管的灌入口中灌入砼; 并边振边拔管, 中心填充有地基土的筒形桩体, 我们称它为筒桩。

根据筒桩有无设置钢筋分为钢筋混凝土筒桩或素混凝土筒桩, 在承受较大竖向力或水平力的情况下, 应设置钢筋笼。只承受竖向力不大的情况下, 如作为复合地基的增强体则可用素混凝土筒桩。

另外, 根据筒桩的布置, 可分为单体筒桩和联体筒桩。以单桩分散布局的称单体筒桩, 在两根单体筒桩之间以联体的方式, 紧密咬合在一起形成联体筒桩。目前联体筒桩的直径通常为1000-2000mm, 咬合厚度50-100mm, 咬合宽度200-400mm, 最终形成空心连续墙, 既可作抗水平力又可作防渗。这种联体筒桩目前在海洋工程中或深基坑支护中用得较多。

2. 筒桩的工作原理

筒桩和别的桩型不同在于从上到下有一个巨大的空腔, 在工作状态下由于地基土性质不同腔内部分充填, 或不充填, 土芯形成端部堵塞, 由此造就了筒桩内腔不相同的工作状态。

* 收稿日期: 2008年9月

当竖向荷载作用于筒桩桩顶时, 桩身上部受到压力而产生相对于桩周土体向下的位移, 桩身外侧表面受到桩周土向上的摩阻力, 摩阻力由上而下逐渐发挥作用; 随着桩体下部摩阻力的逐渐发挥, 桩体下部产生压缩, 将一部分荷载传给桩端土层, 使其压缩产生阻力, 端阻力先作用在环形截面上; 在环形截面上的反力完全发挥后, 作用在土芯部分反力使土芯压缩, 随着荷载增大, 土芯压缩量也增大。于是土芯开始相对于内壁向上移动, 筒桩内摩阻力开始逐渐发挥作用, 当内摩阻力达到极限值时, 筒桩达到竖向承载力极限状态。在这种状态下筒桩的竖向承载力主要由外侧摩阻力, 环形截面上的端阻力和内侧摩阻力组成, 但此时的内侧阻力很小, 可以忽略不计。这种情况往往在饱和软粘土地层出现, 进入筒内的土芯有一部分会在出泥孔中溢出。第二种情况, 土芯闭塞, 桩外土体不再进入桩内, 桩内土体也不再向上运动, 此时承载力由外侧摩阻力和端阻力组成, 端阻力又分为环形截面上的端阻力和土芯与桩间的内侧摩阻力两部分。这种情况往往是遇到较好的土层, 如硬粘土、砂性土等。外侧摩阻力和内侧摩阻力性质和计算方法有所不同, 内侧摩阻力仅发生在土芯端部一定范围内。

上述分析是基于浙江大学岩土工程研究所大量分析计算研究的基础上得出的^[1]; 河海大学室内模型试验得到的桩身土压力分布及桩身应变分布证实了这种理论^[2]; 同时杭宁高速公路长兴试验段测出的实际数据又一次证明了这种土芯作用的存在^[3]。

对于筒桩的水平向受力, 相对竖向受力研究得比较少一些, 实际工程桩试验做得不多, 据查在长兴高速公路试验段曾做过两根筒桩水平剪切试验。直径为 1000mm, 壁厚 120mm 的素砼筒桩, T-15 试桩水平极限承载力为 125kN, B-16 试桩水平极限承载力为 150kN。承受水平力的筒桩均布有钢筋, 从钢筋砼物件抗弯能力计算可知, 断面中心部位混凝土所起的作用可忽略不计, 受力并不需要全断面, 正好是筒桩的中部土芯部位, 筒桩用合理的材料获得有效的结构效应。

3. 筒桩的技术特点

(1) 从桩的形态来看, 属于大直径薄壁筒形桩, 突破了沉管桩和预制桩直径限于 600mm 以内的限制, 使桩径大大增加, 充分发挥了大直径稳定和强度的作用。

(2) 从桩的排土性能来看, 它是属于少量挤土桩。在成桩的过程中大量土石不是挤向周围土体而是被内管套入其中, 对于土质较软的粘土, 当内管土挤到一定程度时, 便从上部泄口中溢出, 桩周土受挤仅是少量, 克服了沉管桩和预制桩的桩身受施工桩的挤土作用, 从而避免了地基土的隆起作用。

(3) 从桩的承载能力来看, 它能承受较高的竖向极限承载力, 长兴试验段素砼筒桩, 直径 1m, 壁厚 12cm, 桩长 18m, 单桩极限承载力为 1400-1500kN, 比理论计算值 (只考虑外侧阻力及端阻力合计 1000kN) 提量 40%-50%。按壁厚 20cm 计, $\Phi 1.5\text{m}$ 筒桩和 $\Phi 1.0\text{m}$ 钻孔灌注桩砼用量大体相等。在相同桩长的情况下, 筒桩的竖向极限承载力是钻孔桩的 1.54-1.56 倍, 可见筒桩具有很好的竖向承载能力。同时筒桩还具有很好的水平向承载能力。根据需要, 在薄壁中安放钢筋笼, 在实际工程中收到极好的效果。在长兴试验中曾做过两根 $\Phi 1.0\text{m}$ 壁厚 12cm 的素砼筒桩的水平静载试验, 其结果为 125kN 及 150kN。相当于竖向极限承载力的 1/10 左右, 而素砼筒桩的水平承载力大小与砼的强度和筒桩直径值直接相关。

(4)从桩型结构特点来看,它是属于现场灌注薄壁圆形结构,且有较强的抗压抗弯性能。一般灌注桩竖向受力并不需要全断面,砼的强度大为浪费;从抗弯能力计算,断面中心部位砼所起的作用更可忽略不计,然而筒桩正是避免了灌注桩存在的混凝土和钢筋材料严重浪费问题,以最合理的材料获得最有效的结构效应。它可制成钢筋混凝土筒桩也可制成素砼筒桩,可以灵活组成多重形式的组合,形成单体排列成联体;也可用系梁连成空间框架结构。又因为相对重量轻,摩阻力大,桩的沉降量相对减少。

(5)从施工角度来看,由于筒桩是连续灌注而成,而且是在高频振动下起拔,因而整体性和砼密度质量好,施工方便迅速;尤其在海上施工,插入土层的桩体,进入海水层以及上部的桩柱,数十米长度可一次性浇筑完成,对砼质量能进行有效的控制。必要时还可增强和扩底。由于采用高频振动,对地表振动影响小,对地基土体起振密作用,提高地基土的天然承载力;施工中没有泥浆排放,故对环境无污染。

(6)从桩的用途来看,可以说使用广泛。目前已用于工民建的基础,高速公路或铁路的软弱地基加固。海洋码头和大型油罐的基础加固,各种类型的支撑建筑,特别是在海洋工程中发挥着越来越重要的作用。

4. 筒桩的适用范围及工程应用

(1)筒桩的适用范围,应该说筒桩适用于软弱土层及第四纪覆盖的松散地层,具体的说适用于软粘土、粘土、砂粘土、砂土、砂砾土及严重风化成土状的岩层。特别适用于软粘土。对于嵌岩桩暂时还无能为力,因为筒桩的桩头是一个砼预制的管靴,当基岩超过砼硬度时无法进入基岩,满足不了桩基嵌岩深度。对于一定要达到嵌岩深度的筒桩,只能将钢管内土体挖除,用人工方法掘岩扩底,然后一并浇筑成桩。筒桩不仅适用于陆地,更适用于海洋。

(2)筒桩的工程应用

筒桩自发明至今仅8年之久,但在工程界的应用却与时俱进,据不完全统计全国已施工的筒桩达数十万余米,而且以很快的速度向前发展。这项技术不仅在国内,而且还远销国外使用,已在美国获得专利权,而且有几处海洋工程在相继施工。

筒桩的工程应用,主要表现在以下几方面:

① 道路工程中的软基处理及桥涵的桩基工程

在高速公路和高速铁路的软基处理中,由于从过去的稳定控制转向到以沉降为主的变形控制,例如克服桥头跳车采用素砼筒桩复合地基,有效地解决了这个问题,现代高速铁路软基处理要求更高,所以常采用桥梁通过,避免路基变形,但现在也逐渐试用筒桩复合地基。最近在浙江温岭东海塘开发区,存在大片软弱海相地层,已研究并采用筒桩基础,改变原设计,采用变形控制,促使桥台和桥墩基本同步沉降,把这种差异沉降控制在规范范围之内。

② 海洋工程中的支护结构及软基处理

随着大量工程向海洋发展,如防波堤、护岸、码头工程等,为了节省投资,避免海水对钢材的腐蚀,越来越多地采用筒桩基础,由于筒桩的力学特性和多重组合的灵活性,在福建、浙江、广东沿海设计和施工了颇有效的防波消能结构。此外,在以往码头桩基经长期使用和海水腐蚀出现一些问题也逐渐倾向于采用筒桩刚性复合地基组建重力式结构。软基处理就是采用水下筒桩加固地基。

③ 工业和民用建筑中,利用筒桩作深基坑支护已经做得比较多了,因为筒桩受力性能好,又节省材料,倍受采用,现在已逐渐发展到用筒桩直接作建筑物的桩基础,目前主要应用在多层建筑中。

④ 其他重要建筑物的地基加固,如机场跑道、停机坪、发射场软基加固等。

⑤ 水文地质中利用筒桩的有利成孔条件,可大量开发地下水资源开辟新的途径。

⑥ 可广泛应用于地下连续墙工程:城市地下工程、沿海防咸工程、护岸工程等。

筒桩的设计和计算

筒桩的设计和计算是一个比较复杂的问题,计算方法和计算公式随着实际资料的积累和理论研究的深入而不断改进。根据目前浙江省发布的筒桩技术规程,主要计算项目如下:

1. 筒桩单桩竖向极限承载力标准值的确定;

(1) 设计等级为甲级的建筑桩基,应通过单桩静载试验确定。

(2) 设计等级为乙级的建筑桩基应通过单桩静载试验确定;当地质条件简单时,可参照地质条件相同的试桩资料,结合静力触探,标准贯入和经验参数综合确定。

(3) 设计等级为乙、丙级的建筑桩基确定单桩竖向极限承载力标准值,无当地经验时,可按下列式计算:

$$Q_{UK} = \xi_1 Q_{SK} + \xi_2 Q_{PK} + \xi_3 Q_{PSK} = \xi_1 U_p \sum q_{sik} l_i + \xi_2 q_{pk} A_p + \xi_3 q_{pk} A_{ps}$$

式中 Q_{UK} ——单桩竖向极限承载力标准值;

Q_{SK} 、 Q_{PK} ——单桩总极限侧阻力,总极限桩端阻力标准值;

Q_{PSK} ——单桩总极限桩芯端阻力标准值;

ξ_1 、 ξ_2 ——桩侧阻力和桩端阻力修正系数;

ξ_3 ——桩芯土柱承载力发挥度;

U_p ——桩身外截面周长;

q_{sik} ——第*i*层土的极限侧阻力标准值;

l_i ——桩身穿越第*i*层土的厚度;

q_{pk} ——单桩的极限端阻力标准值;

A_p ——桩端环形截面面积, $A_p = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$, D 、 d 分别为筒桩外、内直径;

A_{ps} ——桩以内径计算的横截面面积, $A_{ps} = \frac{\pi}{4}d^2$ 。

关键是筒桩侧阻力和端阻力修正系数及桩芯土柱承载力发挥度等的确定。应综合考虑桩长、桩径、土层分布、土的物理力学性质、桩端进入持力层深度,综合分析确定。

2. 筒桩单桩水平承载力特征值取决于桩的材料强度、截面刚度、入土深度、土质条件、

桩顶水平唯一允许值和桩顶嵌固情况等因素,应通过现场水平荷载试验确定。

3. 筒桩桩基沉降验算可参照《建筑地基基础设计规范》和《建筑桩基技术规范》中的有关规定进行。

笔者认为,这些计算只是一种估算,正确值应该是以实际静荷载试验中得出,包括沉降计算。

4. 筒桩支护结构设计

应根据筒桩围护结构的使用目的,就其在施工和使用过程中的不同阶段可能出现的最不利内力进行截面设计。筒桩构件承载力应满足: $S_w \leq R_w$,式中 S_w —围护结构构件的内力组合设计值; R_w —围护结构构件的承载力设计值。筒桩设计可按圆环形截面受弯构件或受弯压构件来计算。

5. 筒桩复合地基设计

筒桩复合地基设计应包括复合地基承载力计算和沉降计算两部分。筒桩复合地基竖向承载力特征值,应通过现场复合地基荷载试验确定,初步设计时可按照常规的计算方法进行。

复合地基沉降计算值不应大于地基沉降允许值,通常分为两部分,即加固区压缩 S_1 和加固区下卧压缩量 S_2 的总和。

筒桩施工

1. 施工准备

筒桩施工的准备工作中除了常规的工作之外,如三通一平,测量放线,图纸会审等,最主要的是选择合适的桩架和适用的中高频率激振锤。桩架高度应附合桩长的要求,地基应满足所有钻机设备荷载的承载力。激振锤同样要满足成桩直径、孔深和对土层性质的要求。在正式施工前应进行试打桩,以检查设备、工艺、设计参数的合理性。

2. 桩尖制作

桩尖制作是一项施工的重要环节,应按桩尖制作的具体规定制作,因为桩尖质量达不到规定要求,将直接影响整个桩的长度,桩径和桩体的质量。

3. 筒桩施工工艺流程

筒桩施工的工艺流程包括下列各步骤:

- (1) 成孔器安装、定位;
- (2) 成孔器下沉及设计要求标高;
- (3) 松开震动锤下夹持器并移开,安置钢筋笼;
- (4) 再安上夹持器及震动锤,并向加料孔中灌入砼;
- (5) 提升成孔器,留下钢筋笼及砼;
- (6) 成孔器完全提出地面,并移至下一根桩位。

4. 施工中的有关注意事项

(1) 当桩端位于坚硬硬塑的粘性土、卵砾石、中密以上砂土或风化岩等土层时,以贯入度控制为主,桩端设计标高控制为辅。

(2) 桩端标高未达到设计要求时,应连续的激振三阵,每阵持续1分钟,再根据其平均贯入度大小研究确定。

(3) 桩端位于软土层时,以桩端设计标高控制为主。

(4) 分段制作的钢筋笼,其按应复合现行国家标准。

(5) 灌注砼前必须检查成孔器内有无桩尖或进泥、水现象。

(6) 砼应连续进行,筒桩砼充盈系数不得小于1.1。

筒桩质量检测及验收

1. 筒桩质量检测主要是对桩身质量检测,包括施工后14天现场开挖检查桩顶质量。成桩28天作动测检查,检查桩长和桩的完整性,以及初步测定单桩承载能力。最重要的是采用单桩静载荷试验检测桩的承载能力。

2. 如果筒桩是在水下施工,其质量主要是在施工过程中控制,确保工程质量。

3. 筒桩质量检验标准见表1。

筒桩质量检验标准

表1

项目	检查项目		允许偏差或允许值		检查方法
			单位	数值	
主控项目	桩长		不小于设计桩长		测桩管长度
	混凝土充盈系数		>1.1		每根桩的实际灌注量
	桩身质量检验		本规程第7.0.2条		低应变试验
	混凝土强度		设计要求		试块报告
	承载力		设计要求		静载荷试验
一般项目	桩位	单桩	mm	150	开挖后量桩中心
		群桩	mm	250	
	垂直度		<1%		测桩管垂直度
	桩径		mm	±20	开挖后实测桩头直径
	壁厚		mm	±10	开挖后用尺量筒壁厚度,每个桩头取三点计算平均值
桩顶标高		mm	+30~50		需扣除桩顶浮浆层

工程实例

1. 高速公路软基处理工程

杭宁高速公路二期(长兴段)、杭州市绕城高速公路南段、绍兴市104国道南连北连续建设工程、申苏浙皖高速公路、杭州至千岛湖高速公路、07省道等。

2. 高速铁路软基处理工程

高速铁路沿海通道甬台温铁路台州站等。

3. 工民建深基坑支护工程

杭州罗马公寓、福建漳州悦华集团高层建筑、浙江乐清泉丰园大酒店、温州中西医结合医院等。

4. 海洋工程

上海金山浦东片出海闸导流堤工程、上海浦南金山卫出海闸导流堤、浙江温州鹿西岛透空型防波堤、温州灵昆岛水闸堤。

5. 桥涵工程

泉州金鸡闸排洪管基础、浙江湖州桥梁基础等。

6. 其他特殊工程的软基处理。

展望

每一种新生事物在其成长发展过程中总会出现这样那样的问题，这是自然的，筒桩也不例外。在克服这些矛盾后，实际上又前进了一大步。

随着筒桩的扩大使用，越来越感到目前施工能达到的长度，已远远不能满足需要，需要在桩长方面创出新的路子。办法有二个：一是扩大桩架底座，加长桩架，但这是有限度的。另一个方法是接桩，在两层钢管同时连接，要在较短时间内完成，起拔时又要较快拆卸。经过一番努力已经获得成功，但用时较多，需1-2个小时，今后有待进一步改进做到快捷稳固，使筒桩长度不断增加，满足需要。

另一方面要扩大筒桩桩径，目前只做到1.5米的外径，根据海洋工程的需要，最佳外径为2米。因为桩径加大有利于竖向和水平向的承载力提高，而且所增加砵不多，这是非常划得来的事，关键仍是施工设备和工艺的改进需要在这方面的努力。

工程向海洋发展给筒桩创造了机遇，但也提出了挑战，要促使筒桩从陆上向海上，从浅海向深海发展，这时搭排架已无能为力了，唯一的办法将筒桩机械转移到船上去打，可以设计同时一起打几根，移孔也方便，大大提高施工进度和成桩质量。

不论在陆地或海上除了接桩外，采用吊打的方式可能会更有效，使用步履式或履带、吊机，在导向控制的协同下将成孔器吊装激振插入土中，这样可降低桩架高度，增加自由度，更为方便。这种吊打施工方法已有试打成功的实例。

除此之外，还有更重要的一点就是大力发展筒桩理论研究，提出更切合实际的计算方法，把筒桩的真正优势大白于天下，相信这一天总会来临的。

参考文献

- [1] 郭平, 周建. 大直径现浇砵薄壁筒桩竖向荷载传递机理研究[J]. 地基处理, 2005.3,
- [2] 张晓健, 刘汉龙. PCC单桩性状室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2004.9,
- [3] 杭宁高速公路科研项目组. 现浇砵薄壁筒桩加固桥头软基试验研究报告[R]. 2001.8,
- [4] 中国计划出版社. 浙江省工程建设标准. 大直径现浇砵薄壁筒桩技术规程 (DB33/1044-2007). [S]. 2008.1,

大直径现浇薄壁筒桩竖向受力性状分析*

周建 焦丹

(浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

[摘要] 大直径现浇混凝土薄壁筒桩是一种新的地基处理方法, 具有施工迅速、质量好、无污染、经济效益好等优点, 已成功应用于高速公路、铁路、水利堤坝、基坑支护工程及民用建筑地基处理中。本文对现浇大直径筒桩竖向受力性状进行了较为全面的分析, 其竖向承载力由桩端阻力、桩外侧阻力、土芯摩阻力三部分组成, 而且三者异步发挥。并用杭宁高速公路二期(长兴段)白溪港桥南端桥头段筒桩为实例, 分析计算三种国内筒桩计算方法, 比较得出了筒桩现行较好的计算方法—浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》计算方法, 为今后该方法的推广奠定了基础。

[关键词] 大直径薄壁筒桩; 竖向受力性状; 桩端阻力; 桩外侧阻力; 土芯摩阻力

引言

大直径现浇混凝土薄壁筒桩(以下简称为筒桩)由国家海洋局第二海洋研究所谢庆道在长期从事海洋工程科学研究和工程实践的基础上创造发明, 已获得中国国家发明专利权(ZL98 113070.4)。该桩用现浇素混凝土或钢筋混凝土一次成型, 目前已逐渐应用于堤坝和公路软基处理中, 同时也适用于一般粘土、粉土和松~中密砂。该桩型直径比较大, 一般在800~1500mm之间, 远远超过了预应力管桩的直径(400~600mm), 因其直径较大, 故称为大直径桩, 壁厚一般为120~200mm。

该桩型吸收了预应力管桩和振动沉管技术的优点, 采用自动排土振动灌注而成, 施工时, 先用高频锤将内外套管压入土层设计深度, 然后向桩管内注入混凝土(如有钢筋笼, 先将钢筋笼放入桩管内), 灌满后一边振动一边拔套管, 拔管过程中继续加注混凝土, 直到满足灌注量要求为止。该桩属于少量挤土型桩, 成桩过程中大量的土不是被挤出桩外, 而是被内套管压入桩内, 当桩内土体挤压到一定程度时, 可以从上部泄口中溢出, 因此施工时对周围建筑物影响不大。

该种筒桩既可承受巨大的压应力, 也可承受强大的水平力, 素混凝土筒桩可作为复合地基增强体有效地控制土的侧向变形、减少工后沉降; 高频振动连续浇灌, 对环境污染小且能有效控制桩身的混凝土质量; 施工迅速、方便, 无环境污染。介于该桩型的诸多优点, 其应用日益广泛, 但该桩型的竖向受力性状还不是很清楚, 这在一定程度上制约了其进一步发展和应用。本文首先对该桩型竖向所受荷载和荷载传递机制进行了分析, 然后对比分析了三种不同的筒桩竖向极限荷载的计算公式, 其中包括浙江省刚颁布执行的省工程建设标准《大直

* 收稿日期: 2008年8月

径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》^[1]，以一具体工程实例为根据，论证了浙江省大直径筒桩行业标准中对竖向承载力计算的合理性。

荷载传递机理

筒桩为端承摩擦桩，单桩竖向承载力主要由外侧摩阻力、内侧摩阻力及端阻力三部分组成。单桩端阻力是按等效截面法计算作用在环形截面上的端阻力，因壁厚较薄，所以单桩端阻力在总承载力中占的比重较小，而内摩阻力是作为安全储备暂不考虑，则外摩阻力即是竖向承载力的主要组成部分，介于理论分析中的保守成分，我们计算所得的理论值应低于实际值，实际桩体偏于安全。

竖向荷载作用于筒桩桩顶时，桩身上部受到压缩而产生相对于桩周土体向下的位移，与此同时桩身外侧表面受到桩周土向上的摩阻力，摩阻力由上而下逐渐发挥作用^[2]，见图1(a)；随着桩体下部摩阻力的逐渐发挥，桩体下部产生压缩，并将一部分荷载传给桩端土层，使其压缩而产生端阻力，端阻力先作用在环形截面上，见图1(b)；在环形截面上的反力完全发挥后，作用在土芯部分的反力使土芯压缩，随着荷载的增大，土芯压缩量也增大，土芯开始相对于内壁向上移动，并试图挤出桩外，筒桩内摩阻力开始逐渐发挥作用，当内摩阻力达到极限值时，筒桩达到竖向承载力极限状态，见图1(c)。

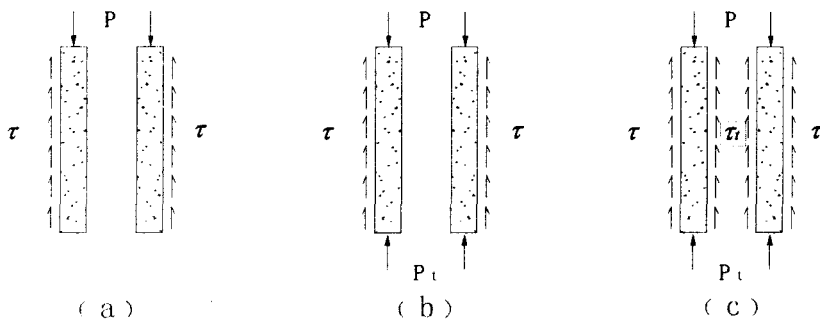


图1 竖向荷载作用下筒桩荷载传递示意图

竖向荷载作用下筒桩破坏主要有两种模式(见图2)：一是土芯从下往上大量涌出桩外，见图2(a)；二是筒桩端部呈闭口桩的破坏模式，见图2(c)，此时筒桩因整体沉降过大而破坏。这两种模式下承载力计算方法不同：第一种情况下，筒桩竖向承载力主要由外侧摩阻力和环形截面上的端阻力组成，内侧摩阻力贡献很小，可忽略不计；第二种情况下，土芯闭塞，桩外土体不再进入桩内，桩内土体也不再向上运动。此时承载力也由外侧摩阻力和端阻力组成，但端阻力又分为环形截面上的端阻力和土芯与桩间的内侧摩阻力两部分。两种计算模式的区别在于：下部相对好土层对土芯底部的向上端阻力是否应该考虑。

若作用在土芯上的端阻力克服土芯自重和侧摩阻力，推动土芯涌出桩外，则计算时可不考虑；如果端阻力使土芯压缩，产生闭塞效应，则在上部荷载作用下，这部分端阻力转化为土芯与桩间的内侧摩阻力，此时则需要考虑。特别要注意的是，内侧摩阻力仅发生在土芯端部一定范围内，向上逐渐递减，不是沿土芯全长发挥。

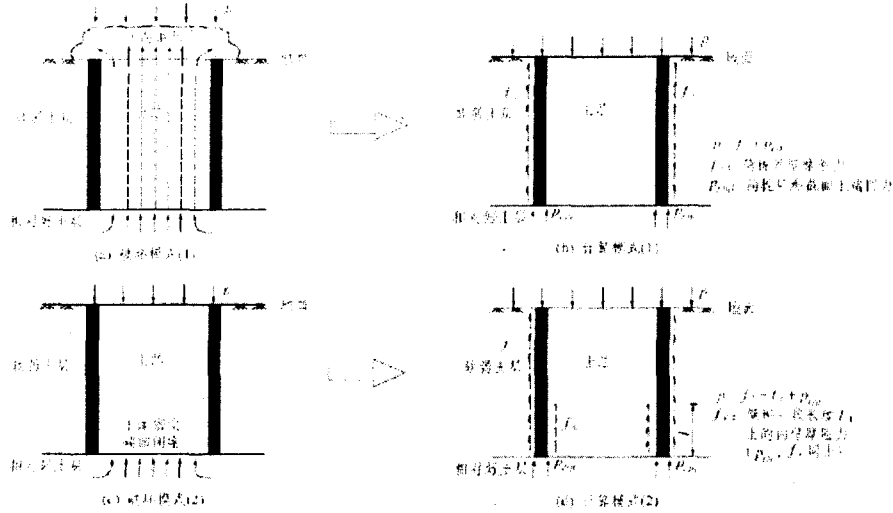


图2 竖向荷载作用下筒桩破坏模式示意图

现有单桩竖向承载力计算方法不论破坏模式如何，都不考虑内侧摩阻力，计算侧阻力和端阻力时选用的折减系数也不同，导致各种方法计算的承载力有较大差异，与实测值相差也较大。下面介绍几种国内筒桩竖向承载力计算方法，并对浙江省刚刚制定颁布的浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》(DB33/1044-2007)进行对比分析，用一个浙江省工程实例论证了技术规程的合理性。

筒桩计算方法

1. 江苏省工程建设推荐的技术规程(简称“江苏推荐法”)

河海大学岩土工程研究所开发的现浇混凝土薄壁管桩(简称PCC管桩)，与本文研究的大直径现浇混凝土薄壁筒桩施工工艺不同，名称不同，但其荷载作用机制一致，其设计计算可作为参考。江苏省工程建设推荐的技术规程《现浇混凝土薄壁管桩技术规程》(苏JG/T017-2004)^[3]中规定，单桩竖向承载力在无单桩荷载试验资料时，初步设计估算为：

$$R_a = u \sum_{i=1}^n \xi_{si} q_{sia} l_i + \xi_p q_{pa} A_p' \tag{1}$$

式中： R_a 为单桩竖向极限承载力特征值(kN)； u 为桩身外周长(m)； n 为桩长范围内划分土层数； ξ_{si} 为桩第 i 层土(岩)侧阻力修正系数，取值0.77~1.00； ξ_p 为端阻力修正系数，取值0.9~1.0； q_{sia} 为桩第 i 层土(岩)侧阻力特征值(kPa)； q_{pa} 为桩端阻力特征值(kPa)； l_i 为桩穿越第 i 层土的厚度(m)，当桩端持力层为强风化岩石且进入深度大于 $4d$ (d 为桩身直径)时，按 $4d$ 计算； A_p' 为管壁横截面面积(m^2)。由式(1)可见，竖向承载力主要由桩外侧摩阻力和管壁横截面上的端阻力组成，外侧摩阻力和端阻力都进行了折减修正。

2. 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94)中钢管桩竖向承载力计算

大直径现浇混凝土薄壁筒桩的竖向承载力计算也可参考现行钢管桩计算方法。目前我国《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94)^[4]中,计算钢管桩竖向承载力时已考虑了土芯作用。规范建议,根据土的物理指标与承载力参数之间的经验关系确定钢管桩单桩竖向极限承载力标准值时,可用下式进行计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = \lambda_s u \sum_{i=1}^n q_{sik} l_i + \lambda_p q_{pk} A_p \quad (2)$$

$$\lambda_p = 0.16 \frac{h_p}{d_s} \lambda_s \quad (h_p/d_s < 5) \quad (3a)$$

$$\lambda_p = 0.8 \lambda_s \quad (h_p/d_s \geq 5) \quad (3b)$$

式中: q_{sik} , q_{pk} 取与混凝土预制桩相同值; λ_p 为桩端闭塞效应系数,对闭口钢管桩 $\lambda_p = 1$,对敞口钢管桩按式(3a)或(3b)取值(当敞口钢管桩底部设置隔板时,桩端的闭塞效应会提高,即 λ_p 增大); h_p 为桩端进入持力层深度; d_s 为钢管桩外直径; λ_s 为侧阻挤土效应系数,对于闭口钢管桩取 $\lambda_s = 1$,敞口钢管桩 λ_s 取值按表1确定。

敞口钢管桩侧阻力挤土效应系数 λ_s

表1

d/mm	λ_s
≤ 600	1.00
700	0.93
800	0.87
900	0.82
1000	0.77

3. 浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》(DB33/1044-2007)

根据该规程,单桩竖向极限承载力标准值对于设计等级为甲级的建筑桩基,应通过单桩荷载试验确定;对于设计等级为乙、丙级的建筑桩基,应通过单桩静荷载试验并根据原位测试和经验参数确定。

对于设计等级为乙、丙级的建筑桩基竖向极限承载力标准值,在无当地经验时,可按下列下式计算:

$$\begin{aligned} Q_{uk} &= \xi_1 Q_{sk} + \xi_2 Q_{pk} + \xi_3 Q_{psk} \\ &= \xi_1 U_p \sum q_{sik} l_i + \xi_2 q_{pk} A_p + \xi_3 q_{pk} A_{ps} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值; Q_{sk} 单桩总极限侧阻力标准值; Q_{pk} 总极限端阻力标准值; Q_{psk} 单桩总极限桩芯端阻力; ξ_1 桩侧阻力修正系数; ξ_2 端桩阻力修正系数; ξ_3 桩芯土柱承载力发挥度; U_p 桩身外截面周长; q_{sik} 第 i 层土的极限侧阻力标准值; l_i 桩身穿越第 i 层土的厚度; q_{pk} 单桩极限端阻力标准值; A_p 桩端环形截面面积; A_{ps} 桩以内径计算的横截面面积 ($A_{ps} = \pi \cdot d^2 / 4$)。

筒桩侧阻力和桩端阻力修正系数 ξ_1 、 ξ_2 及桩芯土柱承载力发挥度 ξ_3 应综合考虑桩长、土层分布及土的物理力学性质、桩端进入持力层厚度、锤重等因素，其中 ξ_3 还应考虑筒筒内径。上述 (4) 式还可以写为下列形式：

$$Q_{uk} = \xi_1 Q_{sk} + \xi_4 Q_{dk} = \xi_1 U_p \sum q_{sik} l_i + \xi_4 q_{pk} A_p \quad (5)$$

式中： Q_{dk} 为单桩总极限端阻力标准值； ξ_1 为桩侧阻力修正系数，取值在 0.95 ~ 1.05 间； ξ_4 为单桩总端阻修正系数，取值在 0.4 ~ 1.0 间；其它符号含义同上。

工程实例

2000 年杭宁高速公路二期(长兴段)^[5]白溪港桥南端桥头段(桩号为 K16+678 ~ K16+728)设计路堤底宽 46.5 m，路面宽度 34.5 m，填土高 4.5 m。根据浙江省工程勘察院的工程地质报告，该试验场地地层为冲湖积，各土层物理力学性质见表 2，场地土层情况自上而下分别为：

土体物理力学性质指标^[6]

表2

编号	土层名称	厚度 (m)	含水量 (%)	天然湿密度 (g/cm ³)	孔隙比	塑性指数 I _p	压缩模量 (MPa)	快剪		地基土承载力 (kPa)	抗剪强度 τ (kPa)
								C (kPa)	ϕ (°)		
1-2	粘土	1.3	35.4	1.8	1.061	15.2	3.26			90	20
1-3	亚砂土	2.7	34.7	1.86	0.956		7.81	21.0	6.0	100	25
2-1	淤泥质亚砂土	12.0	46.1	1.75	1.274	13.57	1.94	16.8	4.38	50	10
4-1	亚粘土	2.2	23.0	2.04	0.631	10.95	5.85	42.0	16.7	130	30
5-1	亚粘土	3.1	21.5	2.04	0.614		8.13	38.3	17.6	185	50
5-2	亚砂土	10.6				6.96				180	45
7-1	亚粘土	10.5	30.3	1.92	0.855	13.20	6.52	33.1	12.9	170	45
7-2	粘土	7.2	32.4	1.89	0.929	18.50	7.93	39.1	16.2	220	55

1-2 亚黏土：灰黄色，软塑，厚层状，含铁锰质，顶部含植物根茎；

1-3 亚砂土：浅绿灰色、灰色，稍密，粉粒含量高；

2-1 淤泥质亚黏土：灰色，流塑，厚层或薄层状，底部含少量贝壳；

4-1 亚黏土：褐黄色，软塑，厚层状，含腐殖质，粉粒含量高；

5-2 亚砂土：青灰~灰色，稍~中密，厚层状，粉粒含量高，局部含粉砂；

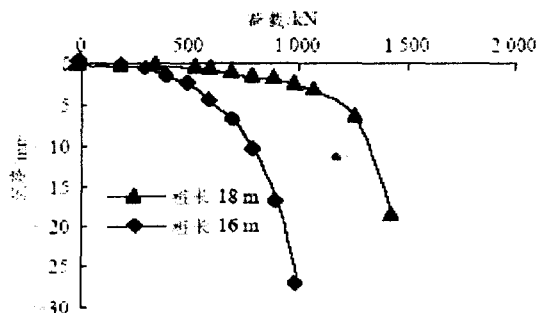


图3 杭宁高速公路二期(长兴段)筒桩静荷载试验曲线^[6]

7-1 亚黏土：浅绿灰色，软塑，厚层状，含亚砂土团块；

7-2 黏土：灰绿色，灰黄色，硬塑，厚层状，土质均一，含铁锰质斑点。

筒桩桩径 1000mm，壁厚 120mm，混凝土等级为 C25，桩长分为两种，一种为 16 m，基本打穿 2-1 层；另一种桩长 18 m，可进入 4-1 层亚黏土中。图 3 为静载荷试验曲线图。

三种不同计算方法得到的单桩竖向承载力见表3。

不同计算方法得到的筒桩承载力计算表

表3

计算方法	Q _u 计算值/kN		根据土层情况确定的相关参数	Q _u 实测值/kN	
	L=18m	L=16m		L=18m	L=16m
江苏推荐法	798	613	$\xi_{si} = 0.900, \xi_p = 0.950$	1400~1500 (取 1400)	800~1000 (取 800)
建筑桩基规范	801	615	$\lambda_s = 0.900, \lambda_p = 0.288$		
浙江省规程	884	647	$\xi_1 = 1.000, \xi_4 = 0.950$		

计算结果分析：本文介绍了三种不同的国内筒桩承载力计算方法，并用这三种方法对杭宁高速公路二期(长兴段)白溪港桥南端桥头段筒桩极限承载力进行了对比计算，由表3计算结果可知这三种计算的理论与实际值都相差很大，理论值相对保守，但刚刚颁布实施的浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》中的计算方法更加接近实际值，较前两种方法具有一定的优越性，因此浙江省规程对实际工程的指导意义更加明显。

结语

本文介绍了大直径薄壁筒桩竖向受力性状，主要分析了其竖向所受荷载的种类和荷载传递机理，发现竖向荷载由端阻、桩外侧摩阻力、桩内侧土芯摩阻力三部分组成，荷载异步发挥直到破坏。并对国内几种典型的筒桩竖向承载力计算方法进行介绍，并用三种不同的方法对抗宁高速公路二期(长兴段)白溪港桥南端桥头段进行计算分析，得出浙江省《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》计算值更加接近实际值的结论，进一步论证了该规程制定的实际工程意义。

参考文献

- [1] 浙江省建设厅.大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程(DB1044-2007)[S].北京:中国计划出版社,2007.
- [2] 张忠苗.桩基工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.69-70.
- [3] 江苏省建设厅.现浇混凝土薄壁管桩技术规程(苏JG/T017-2004)[S].[s.l.]:[s.n.],2004.
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组.建筑桩基技术规范(JGJ94-94)[S].北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [5] 杭宁高速公路二期科研项目组.现浇混凝土薄壁筒桩加固桥头软基试验研究报告[R].杭州:杭宁高速公路科二期研项目组,2001.
- [6] 朱向荣,叶俊能,姜贤放等.沉管灌注筒桩的承载特性浅析[J].岩土工程学报,2003,25(5):538-542.

大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载性状数值分析*

郭平¹ 王哲²

(1. 杭州市城市基础设施建设发展中心 杭州 310000; 2. 浙江工业大学 杭州 310014)

[摘要] 本文通过有限元分析揭示了顶部封盖筒桩的荷载传递机理, 考虑了桩土接触、土体自重初始应力场和土体非线性的情况, 并分析了筒桩内摩擦力的分布形式。有限元计算所得的荷载—沉降曲线结果与现场试验结果进行了对比, 结果非常接近, 从而也验证了本文有限元分析方法的合理性。

[关键词] 筒桩; 数值分析; 土芯; 内摩阻力

前言

大直径现浇混凝土薄壁筒桩吸收了预应力管桩和振动沉管桩技术的优点, 目前已逐渐应用于堤坝和公路软基处理等工程中。该桩型直径比较大, 一般在 800-1500mm 之间, 这点突破了预应力管桩直径在 400-600mm 的限制。成桩过程中该桩体挤土非常小。与钢管桩相比, 该桩体的桩壁断面面积比钢管桩大的多, 一般占外包断面积的 42% 左右, 由于目前该桩型在海洋上施工的困难, 在海洋工程中应用很少, 而在软基处理中应用较多, 通常顶部用素混凝土进行封盖, 以期达到更大的承载力和更小的工后沉降。用筒桩进行软基加固有造价低、承载力高、沉降小和地基稳定性好等优点。

目前该桩型的竖向承载机理还不是很清楚, 这在一定程度上制约了工程应用。本文采用有限元数值分析方法, 详细分析用于公路软基处理的顶部封盖筒桩的竖向承载性状。

有限元分析模型

1. 桩土本构模型

桩体采用线弹性模型。土体采用 Drucker-Prager 弹塑性模型。Drucker-Prager 弹塑性模型的屈服准则采用广义的 Von Mises 屈服条件, 其屈服准则表达式为:

$$F = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - K = 0 \quad (1)$$

$$\text{上式中 } J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3,$$

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}, \quad K = \frac{\sqrt{3} C \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}, \quad c, \varphi \text{ 分别为土的粘聚力和内摩擦角。}$$

* 收稿日期: 2008年8月

2. 桩土接触面本构模型

桩土接触采用 Coulomb 摩擦模型。库仑摩擦模型中，两个接触面在开始相互滑动之前，在它们的界面上会有某一大小的剪应力产生，这种状态则作粘合状态 (stick)。库仑摩擦模型定义了一个等效剪应力，一旦剪应力超过此值后，两个表面之间将开始相互滑动，这种状态叫做滑动状态 (Sliding)，如图 1 所示。粘合\滑动计算决定什么时候一个点从粘合状态到滑动状态或从滑动状态变到粘合状态。桩土界面的摩擦情况通常由摩擦系数及极限动摩阻力决定。

3. 几何模型

本文结合南京大厂经一路筒桩软基加固工程的现场静载试验，用有限元方法分析筒桩的荷载传递机理。分析区域由桩端和桩中心线分别向下和向外延长一倍桩长，分析范围内土层共两层。模型右侧施加水平方向位移约束，左侧施加对称约束，底端施加固定约束。分析模型见图 2。

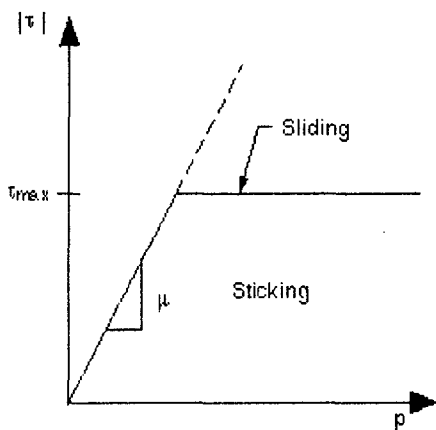


图1 接触摩擦模式

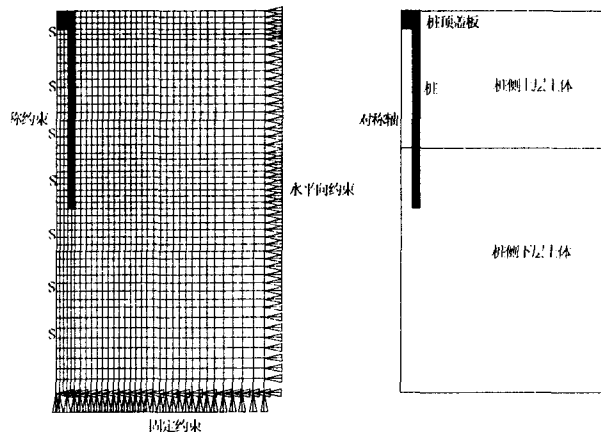


图2 有限元分析模型

4. 基本假定及计算参数

桩和土体采用 PLANE42 单元，即平面四结点等参单元，考虑土体自重初始应力场的影响，考虑筒桩顶部盖板与桩内土芯、桩内侧与土芯、桩外侧与土体和桩身端部与土体的接触摩擦，计算时每次在桩顶施加 200kN 的竖向荷载，并假定荷载产生的超孔压有足够的时间消散。

桩：桩长为 7.8m，桩顶盖板厚度为 0.6m，桩壁厚度为 120mm，桩径为 1000mm，桩端进入下层土体 3.3m，桩体弹性模量为 20GPa，泊松比取 0.18。

桩侧上层土体：土体高度 4.5m，密度为 980 kg/m^3 ，凝聚力为 28.5kPa，内摩擦角为 30.6° ，压缩模量为 11.5MPa。

桩侧下层土体：土体高度 11.1m，密度为 980 kg/m^3 ，凝聚力为 16.6kPa，内摩擦角为 32.8° ，压缩模量为 14.2MPa。

接触面：Potyondy 和 Acer 等研究表明，对于粘土，取 $\delta/\phi' = 0.6 \sim 0.7$ 是比较合适的，因此取接触面摩擦系数 $\mu = \tan \delta = 0.42$ 。

计算结果与分析

顶部封盖筒桩的承载力由土芯顶部阻力、桩身端部阻力、外摩阻、内摩阻四部分组成，土芯土体受到土芯端部阻力、内摩阻和桩身顶部封盖对它的反力作用。见图3所示。

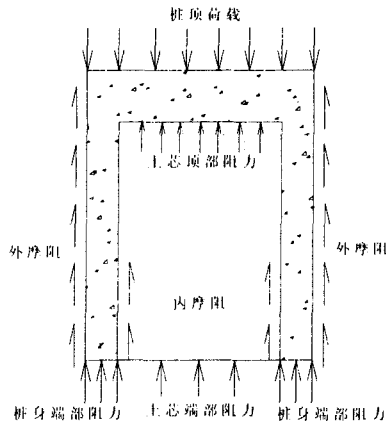


图3 顶部封盖筒桩的受力图

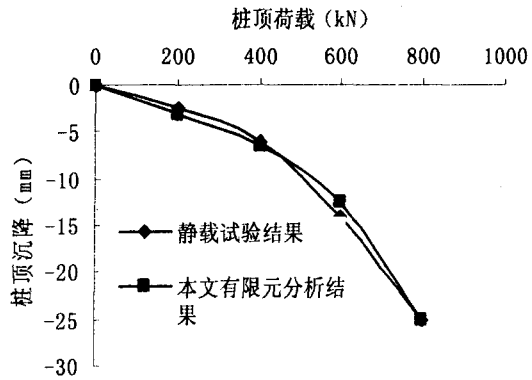


图4 计算结果比较

由图4可见，本文有限元分析结果与静载试验结果非常吻合，可见本文有限元分析方法的正确性。

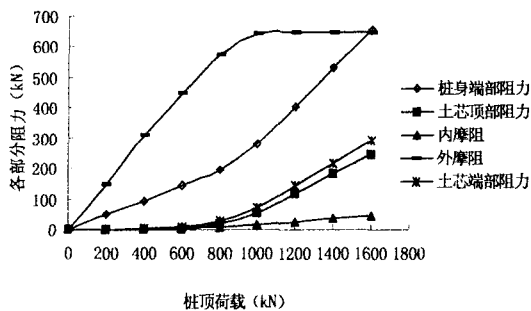


图5 筒桩各部分承载力分担曲线

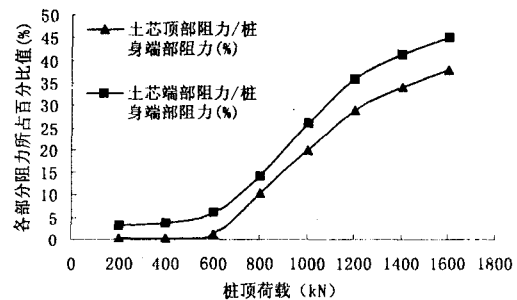


图6 土芯顶部阻力、土芯端部阻力和桩身端部阻力三者间关系

图5是采用本文有限元方法模拟静载试验加载方法，随桩顶荷载增加时筒桩各部分承载力的分担示意图。在桩顶荷载作用的初始阶段，外摩阻最先发挥，荷载传递到筒桩端部，产生桩身端部阻力，而内摩阻和土芯顶部阻力并未产生，土芯端部阻力此时也未开始产生。随着桩顶荷载的增加，当桩顶荷载达到600kN时，此时内摩阻渐渐发挥出来，土芯顶部盖板也开始承受压力，土芯端部阻力也开始发挥。当桩顶荷载增加到大概1000kN时，由于外侧摩阻此时已发挥到极限值，多余的荷载则由桩身端部、土芯顶部和筒桩内侧来承担，其中外摩阻发挥到极限值后，桩身端部阻力将快速增加，土芯顶部阻力和土芯端部阻力也开始快速增加，内摩阻的发挥也开始加快但远没有桩身端部阻力、土芯顶部阻力和土芯端部阻力的增加来的快，内摩阻发挥值仍然非常小。从以上的分析不难说明，筒桩荷载主要由桩的外侧摩阻和桩身端部阻力来分担，当达到极限承载力时，外侧摩阻大约分担了60%左右的荷载，由此可以认为，筒桩是一种摩擦桩或者端承摩擦桩，土芯顶部分担的荷载比较小，而内摩阻几乎可以忽略不计，土芯端部阻力比土芯顶部阻力略微小点，两者的变化规律是一样的。

由图6可见,当筒桩达到极限承载力时,土芯端部阻力远远小于桩身端部阻力,土芯顶部阻力也远远小于桩身端部阻力,两者大约是桩身端部阻力的30%~40%。

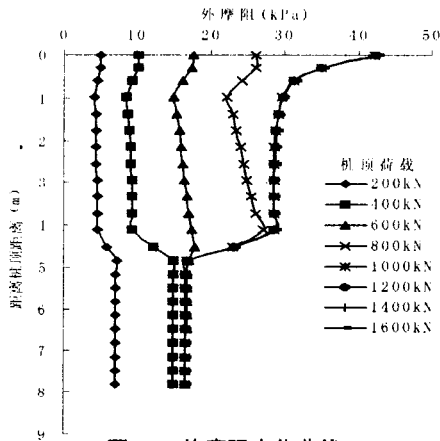


图7 外摩阻变化曲线

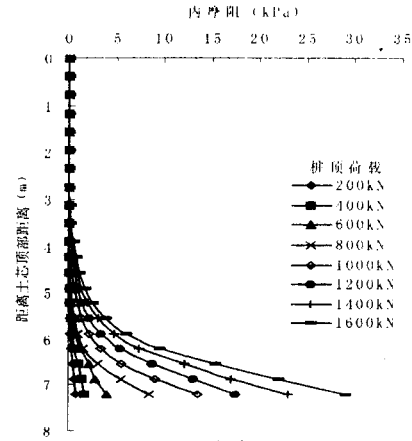


图8 内摩阻变化曲线

图7和图8是筒桩顶部各级荷载下外摩阻和内摩阻变化曲线。筒桩外侧摩阻力的发挥没有明显的规律可循,随着桩顶荷载的增加,桩侧下层土的摩擦力发挥速度比桩侧上层土来的快,当桩侧下层土摩擦力达到极限值后,桩侧上层土才随后达到极限值。随着桩顶荷载的增加,内摩阻的发挥值有所提高,内摩阻沿着桩长呈指数分布。内摩阻并没有沿整个桩长发挥,而是在桩端部分长度处。内摩阻是从下到上发挥的,桩顶荷载越大,内摩阻沿着桩长的发挥长度将越大,在桩的上半段内摩阻几乎为零。

结论

本文采用有限元分析方法来分析顶部封盖筒桩的竖向承载性状,有限元计算结果与南京大厂经一路筒桩软基加固工程的现场静载试验结果进行了对比,结果非常吻合,验证了本文有限元分析方法的合理性,并在此基础上分析了详细分析了用于公路软基处理的顶部封盖筒桩的荷载传递机理,揭示了内摩阻的发挥规律,呈指数函数分布,内摩阻值非常小,几乎可以忽略不计。土芯端部阻力和土芯顶部阻力大小非常接近,两者远远小于桩身端部阻力,筒桩达到破坏时,两者大约是桩身端部阻力的30%~40%。

参考文献

- [1] 单煜辉,段勇,顾华忠.现浇砼薄壁筒桩处理公路软基[J].山东交通科技,2002,(3):1~2,5.
- [2] 蔡金荣,应齐明,谢庆道.现浇混凝土薄壁筒桩加固桥头软基试验研究[J].公路,2003,(5):71~74.
- [3] 朱向荣,叶俊能,姜贤放等.沉管灌注筒桩的承载特性浅析[J].岩土工程学报,2003,25(5):538~542.
- [4] 刘汉龙,费康,马晓辉等.振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I):开发研制与设计[J].岩土力学,2003,24(2):164~168.
- [5] 刘汉龙,郝小员,费康等.振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II):工程应用与试验[J].岩土力学,2003,24(3):372~375.
- [6] 温淑莲,高山,闫守坤.用于软基处理的现浇薄壁筒桩设计计算方法[J].山东交通学院学报,2002,10(3):58~61.
- [7] 叶俊能.沉管灌注筒桩工作性状研究[博士学位论文[D].杭州:浙江大学,2003年5月.
- [8] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].中国水利水电出版社,1996
- [9] Potyondy J G Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.

大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载力研究*

郭平¹ 王哲²

(1. 杭州市城市基础设施建设发展中心 杭州 310000; 2. 浙江工业大学 杭州 310014)

[摘要] 本文通过对筒桩内土芯的一维分析,推导出土芯在排水和不排水两种状态下的极限端阻力计算公式,分析了土芯在排水和不排水时内摩阻的分布,认为土体排水时内摩阻呈指数分布,不排水时呈线性分布。内摩阻随着土芯土体的内摩擦角和有效重度的增大而增大,当内摩擦角增大到一定值后,内摩阻反而减小。并在此基础上提出了筒桩单桩极限承载力的计算公式,计算所得结果和一筒桩静载试验结果相比较,验证了其合理性。

[关键词] 筒桩; 竖向承载力; 土芯; 极限端阻力; 内摩阻

前言

大直径现浇混凝土薄壁筒桩(以下简称筒桩)吸收了预应力管桩和振动沉管桩技术的优点,目前已逐渐应用于堤坝和公路软基处理等工程中。

作为一种新的桩型,对其单桩承载力的理论研究还落后,目前还未见有通过对筒桩内土芯的分析来研究筒桩承载力的报道,一般都采用经验方法来计算单桩承载力。文献[2]中提出单桩极限承载力标准值为桩外侧摩阻力、桩端阻力和土芯有效自重三者之和,缺乏理论依据。文献[3]中提出单桩竖向极限承载力为桩外侧摩阻力标准值、桩身端阻力标准值和土芯端阻力标准值之和,其中土芯端阻力标准值的取值为土芯端阻修正系数乘以桩身端阻力标准值,土芯端阻修正系数取0~1,笔者认为修正系数的取值有很大的随意性。因此,本[基金项目:浙江省水利厅科研项目(I40301)]文通过对土芯的一维分析,推导出土芯极限端阻力在排水和不排水时的解析解,并分析了土芯内摩阻的分布。

筒桩特点及应用

1. 筒桩特点

(1) 桩的形态:它是大直径薄壁筒型桩,目前工程中已采用直径800-1500mm,壁厚50-200mm,并且正在向直径2000mm的目标发展,突破了沉管桩和预制桩直径限于600mm以内的限制,使桩径大大增加,充分发挥了大直径桩稳定和强度的作用。

(2) 桩的性质:它属于少量挤土桩,在成桩过程中大量的土石不是挤向周围而是被内管

* 收稿日期:2008年8月

套入其中,当内管土挤到一定程度时可以从上部泄口中溢出,受挤的土只是少数,克服了沉管桩和预制桩桩身受施工桩的挤土作用,导致桩的变形、断裂、上浮。尤其是预制桩的接头处更易破坏,导致严重的质量问题。

(3) 桩的受力:筒桩可加筋可制成钢筋混凝土桩,承受上部巨大的压应力,也可承受强大的水平推力。它可制成素混凝土的低标号桩,组成复合地基的增强体,并能有效控制土的侧向变形,减少工后沉降。

(4) 桩的结构:它是现场灌注的薄壁圆形结构,且有极强的抗压抗弯性能。一般灌注桩竖向受力并不需要全断面,从抗弯能力计算,断面中心部位混凝土所起的作用也可忽略不计,筒桩正是避免了灌注桩存在的浪费材料问题,把最合理的材料获取最有效的结构效应。

2. 筒桩的应用

目前已用于工业及民用建筑的基础,高速公路的软弱地基加固,各种类型的支挡建筑,特别是在海洋工程中发挥极佳的作用,如建造码头、护岸、防浪堤、海上平台等。工业及民用建筑的应用有温州龙湾新村(深井)、嘉兴名人国际花园(基坑围护)等。公路的软弱地基加固有杭宁高速公路长兴三标段(公路)、湖州段(桥梁)。海洋工程中的应用有温州洞头防波堤、广东省惠州市大亚湾石化工业区的路堤等。

筒桩竖向极限承载力

1. 筒桩土芯的极限端阻力

采用以下三个假定:1)不考虑土芯土体粘聚力对极限端阻力的影响;2)桩内侧与土芯接触部分土体发生剪切破坏时为极限破坏状态;3)筒桩不封盖,即顶部开口,或者筒桩内土芯顶部未与桩顶盖板接触。

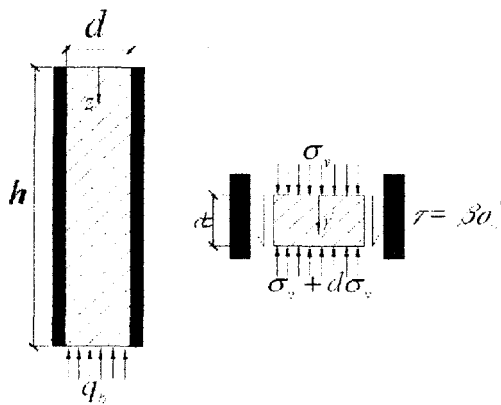


图1 土芯单元土条的受力平衡

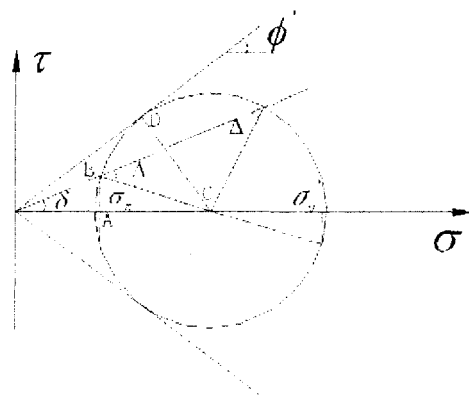


图2 Mohr 应力圆

(1) 土芯在排水状态下的极限端阻力

考虑土芯内单元土条的受力平衡,如图1所示。

$$\gamma' \cdot \frac{\pi}{4} d^2 \cdot dz + \sigma_v' \cdot \frac{\pi}{4} d^2 + \tau \cdot \pi d \cdot dz = (\sigma_v' + d\sigma_v') \frac{\pi}{4} d^2 \quad (1)$$

$$\text{整理(1)式得, } \frac{d\sigma_v'}{dz} = \gamma' + \frac{4}{d} \tau \quad (2)$$

假定 $\tau = \beta \sigma_v'$, 其中 β 为待定常数, 代入(2)式得,

$$\frac{d\sigma_v'}{dz} = \gamma' + \frac{4}{d} \beta \sigma_v' \quad (3)$$

解方程(3), 并采用边界条件: 当 $z=0$ 时, $\sigma_v' = N$, 得到,

$$\sigma_v' = N + (e^{4\beta z/d} - 1) \left(N + \frac{d\gamma'}{4\beta} \right) \quad (4)$$

另外, 土芯端部的初始应力为 $(N + \gamma' h)$, 则土芯在排水状态下的极限端阻力为:

$$q_{bd} = N + (e^{4\beta h/d} - 1) \left(N + \frac{d\gamma'}{4\beta} \right) - (N + \gamma' h) = (e^\alpha - 1) \left(N + \frac{\gamma' h}{\alpha} \right) - \gamma' h \quad (5)$$

上式中, $\alpha = 4\beta h/d$ 。

确定常数 β 时, 由于假定土芯外周的土体先发生破坏为极限破坏状态, 那么此时土芯周边土体一点的应力情况用 Mohr 圆表示, 如图 2 所示。

$$\tan(\Delta - \delta) = \frac{BA}{AC} = \frac{\tau}{AC}, \quad AC = \frac{\tau}{\tan(\Delta - \delta)} \quad (6)$$

$$\tan \delta = \frac{BA}{OA} = \frac{\tau}{\sigma_n}, \quad OA = \frac{\tau}{\tan \delta}, \quad \sigma_n = \frac{\tau}{\tan \delta} \quad (7)$$

由 $OA + AC = (\sigma_n' + \sigma_v')/2$, 得

$$\frac{\tau}{\tan(\Delta - \delta)} + \frac{\tau}{\tan \delta} = \frac{\sigma_n' + \sigma_v'}{2} \quad (8)$$

把 $\sigma_n' = \tau/\tan \delta$, $\sigma_v' = \tau/\beta$ 代入式(8)得

$$\frac{1}{\tan(\Delta - \delta)} + \frac{1}{\tan \delta} = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{1}{\tan \delta} \right) / 2 \quad (9)$$

$$\beta = \frac{\tan \Delta - \tan \delta}{1 + \tan \Delta (\cot \delta + 2 \tan \delta)} \quad (10)$$

$$\text{即 } \beta = \frac{\sin \phi' \sin(\Delta - \delta)}{1 + \sin \phi' \cos(\Delta - \delta)} \quad (11)$$

$$\text{另外, 由图2根据几何关系, 可得 } \sin \Delta = \frac{\sin \delta}{\sin \phi'} \quad (12)$$

(2) 土芯在不排水状态下的极限端阻力

当土芯处于不排水状态时, 由于土芯竖向受力增加了一项水重, 因此土芯单元土条的受力平衡方程变为

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma_w + \gamma' + \frac{4}{d}\tau \quad (13)$$

并且当土芯在不排水时, 土芯外周土体的剪应力可以表示为

$$\tau = \beta \sigma_v' = \beta(N + \gamma'z) \quad (14)$$

把式(14)代入式(13)得

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma_w + \gamma' + \frac{4\beta}{d}(N + \gamma'z) \quad (15)$$

解上式, 采用边界条件: 当 $z=0$ 时, $\sigma_v = N$, 得

$$\sigma_v = N + (\gamma' + \gamma_w)z + \frac{4\beta z}{d}N + \frac{2\beta z^2}{d}\gamma' \quad (16)$$

土芯在不排水时, 端部的初始应力为 $(N + \gamma'h + \gamma_w h)$, 此时土芯端部 ($z=h$) 的极限端阻力为

$$q_{bu} = N + (\gamma' + \gamma_w)h + \frac{4\beta h}{d}N + \frac{2\beta h^2}{d}\gamma' - [N + (\gamma' + \gamma_w)h] = \frac{4\beta h}{d}N + \frac{2\beta h^2}{d}\gamma' \quad (17)$$

上式中 β, N 等参数的定义同上。

以上各方程式中, N 为作用在土芯顶部的荷载, γ' 为土芯土体的有效重度, γ_w 为水的重度, ϕ' 为土芯土体有效内摩擦角, δ 为桩体材料与土芯接触的摩擦角, β 为常数, d 为土芯圆柱体的直径, h 为土芯高度, l 为土芯内摩阻发挥段长度, σ_v' 为竖向有效应力, τ 为土芯外周与桩体接触处的竖向剪应力。

2. 土芯内摩阻分析

由式(4)和式(14), 当土芯顶部没有作用荷载时, 可以得到土芯在排水和不排水时的内摩阻分布计算式, 分别为:

$$\tau = \frac{\alpha \gamma'}{4} (e^{4\beta z/d} - 1) \tag{18}$$

$$\tau = \beta \gamma' z \tag{19}$$

选取桩长和土芯高度均为 10m, 土芯土体 $\gamma' = 9 \text{ kN/m}^3$, 土芯与桩壁间的摩擦角 $\delta = \phi'$, 当 ϕ' 变化时, 根据式 (18) 和式 (19), 内摩阻的计算结果如图 3 和图 4 所示:

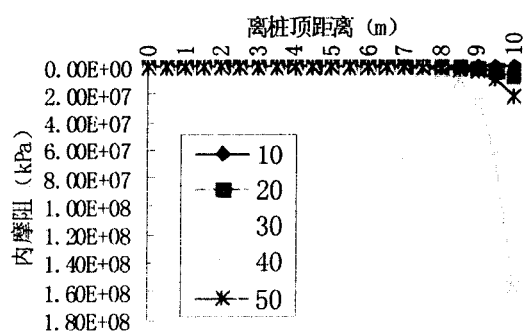


图3 土芯排水时内摩阻分布

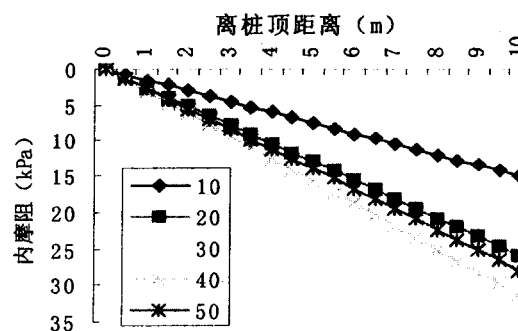


图4 土芯不排水时内摩阻分布

可见, 当土芯排水时, 内摩阻呈指数分布, 距土芯端部越远, 内摩阻越小, 至土芯上半截时, 内摩阻已发挥很少, 实际上可以忽略不计。土芯接近桩端处的内摩阻增大较快, 距土芯端部越远, 内摩阻增加越小。土芯内摩阻随着 ϕ' 的增加而增大, 当 ϕ' 超过 40° 时, 内摩阻反而减小, 而当 $\phi' = 10^\circ$ 时, 内摩阻非常小, 接近于零。因此, 土芯在排水状态下的内摩阻分布与土芯土体材料有很大关系, 内摩阻随 ϕ' 的增加而增大, 当增加到某一值时反而减小, 既存在一个临界摩擦角。此外, 从图3可得, 土芯排水时内摩阻的分布段长度约为离桩端四分之一桩长 (即 $0.25h$), 和文献 [7] 中的有限元分析结果相符合。

当土芯不排水时, 由图4可得, 内摩阻呈线性分布, 随 ϕ' 的增加而增大, 也存在一个土体临界内摩擦角, 即当 ϕ' 增加到 40° 这样时, 内摩阻反而减小, 并且土芯不排水时的内摩阻远小于排水时, 可能是由于水的润滑作用。

土芯在排水时和不排水时的内摩阻都随土体的有效重度增大而增大。

由于筒桩的内摩阻并非在整个土芯段都发挥, 只有靠近筒桩端部的土芯段才发挥出内摩阻。因此假定内摩阻发挥段长度为 l (可取 $0.25h$), 如图 5 所示。

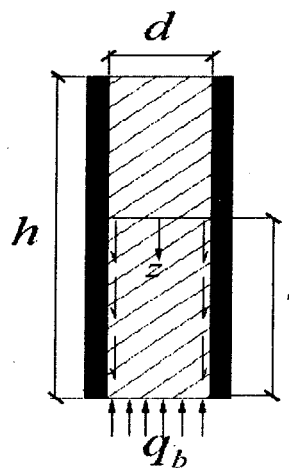


图5 土芯内摩阻发挥段

此时, 把 $N = \gamma'(h-l)$ 代入 (4) 式得

$$\sigma_v' = \gamma'(h-l) + (e^{4\beta z/d} - 1) \left[\gamma'(h-l) + \frac{d\gamma'}{4\beta} \right] \quad (20)$$

则此时土芯的极限端阻力为

$$q_{bd} = \gamma'(h-l) + (e^{4\beta l/d} - 1) \left[\gamma'(h-l) + \frac{d\gamma'}{4\beta} \right] - \gamma' h = (e^{4\beta l/d} - 1) \left[\gamma'(h-l) + \frac{d\gamma'}{4\beta} \right] - \gamma' l \quad (21)$$

上式中常数 β 的确定在于土芯土体与桩内壁摩擦角 δ 的确定, δ 的选取可以参考文献 [9] 中的试验成果。

3. 筒桩单桩极限承载力

筒桩单桩的极限承载力除保留沉管灌注桩的桩侧摩阻力、桩端阻力外, 增加了土芯端阻力。其单桩极限承载力可按下式计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} + Q_{bk} = u \sum q_{sik} l_{si} + q_{pk} A_p + q_b A_b \quad (22)$$

上式中, Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值; Q_{sk} 为单桩总极限外侧摩阻力标准值; Q_{pk} 为单桩总极限桩身端阻力标准值; Q_{bk} 为单桩总极限土芯端阻力标准值; q_{sik} 为桩周第 i 层土的外侧阻力标准值; q_{pk} 为极限桩端阻力标准值; q_b 为极限土芯端阻力标准值, 按照本文中 (4)、(5) 或 (21) 计算; u 为桩外侧周长; l_{si} 为桩穿越第 i 层的厚度; A_p 为桩身截面积; A_b 为土芯截面积。对于 q_{sik} 和 q_{pk} 的取值, 可以参照《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94) 中的沉管灌注桩取值。

4. 计算结果比较

由于缺乏实测数据, 本文引用杭—宁高速公路二期工程长兴段筒桩加固桥头软基试验中单桩竖向静载结果, 与用笔者提出的单桩极限承载力计算公式计算所得结果进行比较。

试验段的工程地质条件见表 1。

试桩桩长 18m, 持力层为 ④-1 层, 土芯高度为 18m, 竖向静载试验最大试验荷载为 1440kN, 极限承载力为 1440kN。

取土芯内摩阻发挥段长度 $l = 0.25h = 4.5\text{m}$, 剩下的 13.5m 土芯以自重形式施加于内摩阻发挥段土芯的顶部, 即 N , 如图 3 所示。参考文献 [9] 中的试验成果, 选取 $\delta = 0.68\phi'$ (土芯排水)。采用式 (4) 进行计算, 计算得, $Q_{bk} = 239.2\text{kN}$ 。

q_{sik} 和 q_{pk} 的取值依据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-94), 经计算得, $Q_{sk} = 934.8\text{kN}$, $Q_{pk} = 331.6\text{kN}$ 。

单桩极限承载力 $Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} + Q_{bk} = 934.8 + 331.6 + 239.2 = 1505.6\text{kN}$, 稍大于静载试验所得结果。笔者认为, 此结果是建立在土芯土体完全排水的基础上, 但实际上不可能达到完全排水, 因此, 计算结果稍大于静载试验结果, 是合理的。

长兴段的土性指标

表 1

层号	土名	厚度 (m)	含水量 (%)	密度 (g/cm ³)	孔隙比	塑性 指数	压缩模量 (MPa)	快剪	
								C(kPa)	ϕ (°)
①-2	粘土	1.3	35.4	1.8	1.061	15.2	3.26		
①-3	粉砂	2.7	34.7	1.86	0.956		7.81	21.0	6.0
②-1	淤泥质粘土	12.0	46.1	1.75	1.274	13.57	1.94	16.8	4.38
④-1	粉质粘土	2.2	23.0	2.04	0.631	10.95	5.85	42.0	16.7
⑤-1	粉质粘土	3.1	21.5	2.04	0.614		8.13	38.3	17.6
⑤-2	粉砂	10.6				6.96			
⑦-1	粉质粘土	10.5	30.3	1.92	0.855	13.20	6.52	33.1	12.9
⑦-2	粘土	7.2	32.4	1.89	0.929	18.50	7.93	39.1	16.2
⑧	粉质粘土	2.6	18.4	1.96	0.793		8.78	48.0	15.0
⑨-1	中砂		20.3	1.99	0.624		11.6	17.0	30.8

结论

本文通过对筒桩内土芯的一维分析,在三个假定的基础上,推导了土芯在排水和不排水两种状态下的极限端阻力解析解,并提出了筒桩单桩极限承载力的计算公式,利用一单桩静载试验结果和计算所得结果相比较,验证了其合理性,同时也验证了不考虑土芯土体粘聚力对极限端阻力的影响这个假定的合理性。通过对筒桩内土芯的一维分析,推导了土芯在排水和不排水两种状态下的极限端阻力计算公式,分析了土芯在排水和不排水时内摩阻的分布,认为土体排水时内摩阻呈指数分布,不排水时呈线性分布。内摩阻随着土芯土体的内摩擦角和有效重度的增大而增大,当内摩擦角增大到一定值后,内摩阻反而减小。

这种新型桩的极限承载力与沉管灌注桩相比多了一项土芯端阻力,对其极限承载力的研究应从土芯出发。本文分析了土芯排水和不排水两种状态,以后应进行考虑土芯固结的极限承载力研究。

参考文献

- [1] 单煜辉,段勇,顾华忠. 现浇砼薄壁筒桩处理公路软基[J]. 山东交通科技, 2002, (3): 1~2, 5.
- [2] 蔡金荣,应齐明,谢庆道. 现浇混凝土薄壁筒桩加固桥头软基试验研究[J]. 公路, 2003, (5): 71~74.
- [3] 朱向荣,叶俊能,姜贤放等. 沉管灌注筒桩的承载特性浅析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 538~542.
- [4] 刘汉龙,费康,马晓辉等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I): 开发研制与设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 164~168.
- [5] 刘汉龙,郝小员,费康等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372~375.
- [6] 温淑莲,高山,闫守坤. 用于软基处理的现浇薄壁筒桩设计计算方法[J]. 山东交通学院学报, 2002, 10(3): 58~61.
- [7] 叶俊能. 沉管灌注筒桩工作性状研究[博士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 2003年5月.
- [8] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 中国水利水电出版社, 1996
- [9] Potyondy J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Geotechnique, 1961, 11(4): 339-353.

现浇薄壁筒桩水平承载力计算方法研究*

张杰

(浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

[摘要] 单桩水平承载力的确定方法有水平静载试验和计算分析两类,水平静载试验最能反应实际情况,计算分析方法有:极限地基反力法、弹性地基反力法、弹性理论法、P-Y曲线法等。影响筒桩单桩水平承载力的因素包括桩的截面刚度、材料强度、桩侧土质条件、桩的入土深度、桩顶约束情况等。筒桩具有很大的抗压抗弯能力,可以承受强大的水平推力,并可节省大量材料。

[关键词] 现浇混凝土薄壁筒桩;水平荷载

引言

大直径现浇混凝土薄壁筒桩(cast-in-situ concrete large-diameter tubular pile, CTP),简称筒桩,是指采专用施工机械在地基中形成大直径筒形孔,然后配置钢筋笼并就地灌注混凝土而成型的筒形桩^[1]。筒桩吸收了预应力管桩和振动沉管桩技术的优点,采用自动排土振动灌注而成。可大量节省混凝土使用量,工程造价低;无泥浆污染、挤土效应较小;可充分利用和发挥桩内土体的作用,承载力高;直径大,稳定性好,抗弯能力强。在海河防护堤、公路软基处理、深基坑支护、建筑物基础处理等工程中得到应用。目前关于筒桩的研究主要集中在桩的竖向承载特性^[2],而形成支护结构的筒桩,要承受一定的水平荷载,关于筒桩水平荷载作用下的工作性状研究却很少,还有待于补充完善。

水平受力机制

筒桩作为基坑支护结构时所受水平荷载主要是土压力和水压力;筒桩直立式海堤根据结构形式的不同和工程所处地区不同,有可能受到填土压力、水压力、波浪压力、风压力、浮冰冲击力等水平向荷载的作用。设计计算中应根据结构特点及设计要求选取荷载的最不利组合进行验算。

对于桩承受水平荷载作用的研究,按总的研究分类,可分为主动桩和被动桩两大类。主动桩指的桩基承受由建筑物的上部结构传给它的水平荷载和力矩;被动桩指的是由于桩周土体的水平移动而施加给桩的侧向力。前者主要有作为房屋、桥梁等建筑物基础的桩基;后者主要有作为岸坡、码头边坡及基坑支护的桩基。主动桩的外加荷载明确,而被动桩的荷载不

* 收稿日期:2008年8月

甚清楚,但是在实际工程中,同一桩基有可能是主动桩也可能是被动桩。

水平承载桩的工作性能主要是桩土相互作用问题,不论是主动桩还是被动桩,不论是部分埋置桩还是完全埋置桩都是利用桩周土的抗力来承担水平荷载,它的受力情况都是在水平荷载和力矩的作用下受弯,桩身产生水平变位和弯曲,致使桩周土产生侧向挤压变形而产生抗力,阻止桩侧向变位的进一步发展。当水平荷载较低时,这一抗力主要靠地表附近桩周土提供,而且土体的变形主要表现为弹性,也即桩周土处于弹性压缩阶段。随着水平荷载的加大,桩的变形加大,表层土逐渐产生塑性屈服,从而使水平荷载向更深处的土层传递,当变形增大到桩身开裂或桩周土失去稳定时,桩—土体系便趋于破坏。

根据桩相对刚度的不同,桩的工作性状也不同,主要分两种情况:(1)当桩径较大,桩的入土深度较小,或者桩周土质较差,桩土刚度比较大时,在水平荷载下,桩体本身一般不发生弯曲,而是绕某点整体性的转动,这时桩一般被视为刚性桩。(2)当桩径较小,桩的入土深度较大,桩周土质较密实,桩土刚度比相对较小时,在水平荷载下,由于桩周土体的反力作用,桩的变形呈波浪状,且由桩顶向深处逐渐消失,此时,桩一般被称为弹性桩或柔性桩。刚性桩的水平承载力一般由桩周土的强度所控制;弹性桩的水平承载力则主要由桩身材料的抗弯强度和桩周土抗力所控制。水平荷载桩的计算主要涉及以下三个方面:桩身的变形及弯矩分布问题;桩侧土体的反力问题;桩的极限承载力问题。

设计思路

与单桩竖向承载力相比,单桩水平承载力问题显得更为复杂,影响水平承载力的因素有很多,包括桩的截面刚度、材料强度、桩侧土质条件、桩的入土深度、桩顶约束情况等。对于抗弯性能差的桩其水平承载力由桩身强度控制,通常是桩身首先出现裂缝,然后断裂破坏;对于抗弯性能好的桩,桩身虽未断裂,但档桩侧土体显著隆起,或桩顶水平位移大大超过上部结构的允许值时,也应认为桩已达到水平承载力的极限状态。单桩水平承载力的确定方法,大体上有水平静载试验和计算分析两类,其中以水平静载试验最能反应实际情况^[3]。

薄壁筒桩在水平荷载作用下表现为受弯混凝土构件的特性,在一定的地基条件下其承载能力主要取决于混凝土和钢筋的抗拉强度。在我国目前的设计规范中,关于水平荷载作用下桩基的计算仍采用线性弹性地基反力法中的 m 法。然后对薄壁筒桩按环形截面进行抗弯验算。沿桩周边均匀布置纵向钢筋的环形截面受弯构件,当截面内纵向钢筋数量不少于6根,而且环形外半径和环形内半径之比大于 $0.5 \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2} \leq 0.5 \right)$ 时,单体筒桩抗弯承载力按下面公式计算:

$$KM \leq (R_w A \frac{r_2 + r_1}{2} + 2R_g A_g r_g) \frac{\sin \pi \alpha}{\pi \alpha} \quad (1)$$

此时,应符合下列要求:

$$\alpha = \frac{R_g A_g}{R_w A + 2R_g A} \leq 0.3 \quad (2)$$

式中 A 为构件截面面积; A_g 为全部纵向钢筋的截面面积; r_1, r_2 为分别为环形截面的内外半径; r_g 为纵向钢筋所在圆的半径。从抗弯能力计算公式(1)可知, 桩径和壁厚起决定作用, 而断面中心部位作用很小, 因此薄壁筒桩结构作为海堤结构, 具有很大的抗压抗弯能力, 可以承受上部巨大的压应力, 也可以承受强大的水平推力。可以节省大量材料, 并且质量可靠。

当桩身在泥面处水平变形大于 10mm 时, 港口工程桩基规范采用推荐使用 P-Y 法。而建筑桩基规范则认为, 对于抗弯能力好的桩, 可根据静载试验结果取地面处水平位移为 10mm 所对应的荷载为单桩水平承载力设计值。

计算分析方法

目前, 对承受水平荷载的桩基础进行分析时, 根据地基反力系数假定的不同, 对水平受荷桩的分析方法有: 极限地基反力法、弹性地基反力法(线性弹性地基反力法、非线性弹性地基反力法)、弹性理论法、P-Y 曲线法(复合地基反力法)和数值分析法, 以及其他一些相关的分析方法等。

1. 极限地基反力法

极限地基反力法主要是假定桩为刚性桩, 事先对处于极限状态的地基土反力分布形式进行假定, 并根据作用在桩上的外力及其平衡条件来求桩侧土抗力。地基反力分布只是桩入土深度的函数, 与桩的挠曲没有关系。根据所假定的极限地基反力的不同分布形式的不同, 此法可分为土反力按二次抛物线分布法和土反力按直线分布法。Rases(1936)、冈部三郎(1951)和 Broms(1964, 1965)等分别利用假设反力直线分布法求解桩的横力。由于极限地基反力法是事先假定地基反力的分布形式, 且一旦给出分布形式后, 极限地基反力仅与桩的入土深度有关, 而与桩的挠曲变形无关, 因此该法不适宜于一般桩基变形问题的研究, 使用受到很大的限制, 多用于埋入深度较小的刚性桩。

2. 弹性地基反力法

弹性地基反力法主要是利用 Winkler 地基模型, 把桩周土体看作线弹性体, 并离散为一个一个单独作用的弹簧, 某一弹簧受力时, 仅该弹簧发生与作用力成正比例的压缩而和其它弹簧无关。这种把地基土看作非连续弹性介质且水平地基反力系数在整个位移过程中均为常数的假定与土体实际有很大差异, 但计算较为简单, 在荷载不大的情况下可得出接近实际的桩性状, 为目前较为广泛采用的一种方法。假设桩为通长全埋桩, 根据材料力学弹性梁弯曲微分方程, 可以得到弹性地基反力法桩身挠曲的基本微分方程为:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + d \cdot p(z, y) = 0$$

式中: EI 为桩的抗弯刚度($\text{kN} \cdot \text{m}^2$); y 为桩计算点的水平位移(m); z 是计算点距离泥面深度(m); d 为桩径或桩宽(m); $P(z, y)$ 为桩计算点处单位面积上承受的土抗力(kPa)。

又根据文克尔假定, 桩弯曲时桩侧产生的土抗力仅与土的深度和桩的挠度有关, 则单位土抗力可以表示为: $p(x, y) = K(z)y^n$, 其中, K 为由土的弹性性质决定的地基反力系数,

与深度 z 有关, y 为桩的挠度。根据 n 的取值不同, 弹性地基反力法又可以分为: 当 $n=1$ 时的线弹性地基反力法; 和 $n \neq 1$ 时的非线性弹性地基反力法。由于解答上的困难, 非线性弹性反力法很少应用, 常用的是线弹性地基反力法。根据反力系数 K 的不同假设, 线弹性地基反力法又可以分为常数法、C 法、k 法和 m 法等。

常数法: 早在 1937 年, 我国的张有龄就假定地基抗力系数沿深度为常数, 进行桩的横向抗力分析, 即张氏法, 也称为常数法。由于该法计算结果与实际有很大不符, 应用较少。

k 法: 前苏联安盖尔斯基(1937)给出地基系数在第一弹性零点以上呈凹形抛物线分布, 弹性零点以下为常数的假定, 即 k 法。由于凹曲线图式的假设过低估计了近地面的桩侧土抗力, 所以由 k 法算得的桩身弯矩偏大。同时当桩的入土深度越大时, 由 k 法计算的桩顶位移和转角反而越大, 这与桩的实际工作性状不符, 现在很少使用。

m 法: 该法是弹性地基反力法中使用较为广泛的一种方法, 该法假定水平地基反力系数随深度成线性增加, 即 $K=mz$ 。此时桩的挠曲微分方程化为:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} + dmxy = 0$$

根据已知桩头边界条件, $[y]_{x=0} = y_0$, $\left[\frac{dy}{dx} \right]_{x=0} = \varphi_0$, $\left[EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right]_{x=0} = M_0$,

$\left[EI \frac{d^3 y}{dx^3} \right]_{x=0} = Q_0$, 并利用 Rowe 幂级数解法, 即可对桩的挠曲方程进行求解。

m 法克服了常数法地基反力系数为常数的缺点, 能反应出地基反力系数随深度的变化。由于 m 法的计算图式简单, 既可以用解析法求解也可以采用数值解法, 使用非常方便, 在国内外得到广泛的应用, 也是我国相关规范推荐使用的方法之一。m 法主要适用于正常固结的粘性土和一般砂土。

但 m 法仍有其不足之处: 对于 m 法来说, 地基反力系数的比例系数 m 的取值是对计算结果比较敏感的一个参数, m 值的正确与否直接关系到计算结果的正确性, 而影响 m 的因素又很多, 同一种土由于地质条件的不同, m 的取值也不同; 即使地质条件相同, 由于水平荷载大小、桩刚度等的不同, m 的值也会不同。因此, 对于某一特定的桩基计算问题, 如果在没有试桩的情况下, 很难给出一个合适的 m 值。此外, m 法仅能反映出土的弹性性能, 即在桩顶位移较小情况下, 能较好地反映出桩的受力特性; 但在桩身位移较大, 桩侧土体进入非线性状态时, 按 m 法计算所得到的泥面位移、桩身弯矩及其位置等与实测结果有一定的差异, 且随荷载的增大, 差异也逐渐增大。因此, 如何给出一个合适的 m 值仍是一个需要进一步研究的问题。

3. 弹性理论法

由于在地基反力法中, 假定与基础接触的土介质每一点处的表面位移与作用在该点处的应力成正比, 而与交界面上各点包括相邻点的应力和位移完全无关, 因而不能反映土体作为

连续介质的力学性质。而弹性理论法从传统的弹性理论出发,考虑了土体间的连续性。Poulos法是弹性理论法的典型代表,他建议将土体视为均质弹性体,利用 Mindlin 积分解因考虑桩身和土体中各点之间的相互作用,从而建立起水平荷载单桩的弹性力学方法。

弹性理论法概念明确,能够反映桩身各土层之间的相互作用和桩顶荷载一位移关系的非线性特性,但难以确定合适的土体模量,特别是荷载不同时,要选取不同的土体模量,才能得到较为合理的结果。

4. P-Y 曲线法

P-Y 曲线法是考虑土体弹塑性变化的一种分析方法。1956年 McClelland 和 Focht 通过现场试桩实测出桩侧土反力与侧向变位的 P-Y 曲线关系,并与土体的室内不排水三轴试验应力应变曲线进行对比,发现两者有一定的相似性,从而提出了一种求解桩非线性横向阻力的方法,该法即为 P-Y 曲线法的起源。P-Y 曲线法能够对桩土体系作非线性分析。在这一方法中,横向荷载所产生的土反应由 P-Y 曲线表达,各深度处的 P-Y 曲线法被假定为互不干扰的并共同构成一个曲线族,来表达桩周土体的应力应变性状。

与其他方法相比,P-Y 法考虑了桩土作用的非线性性质,既可以用于水平位移较小的情况,也可以用于水平位移较大的情况;可以是静力荷载,也可以是循环荷载。从理论上讲,P-Y 曲线适合港口码头以及海洋工程等桩基的水平受力分析,适用范围相对较广。

5. 方法局限性

在以上各种方法中以非线性弹性地基反力法、P-Y 曲线法和 Poulos 弹性理论法应用较为广泛。弹性地基反力法、弹性理论分析法等均是假定桩周土体为弹性体的分析方法,当桩的水平位移较小时,这些分析方法是有效的。但当桩的水平变形较大时,桩周土由地表开始屈服,产生塑性变形,且随荷载的增大逐渐向深处发展,此时如果仅考虑弹性变形进行桩土作用受力分析,显然是不合理的。由于桩基础在水平荷载作用下的受力性状是一个复杂的桩土相互作用过程,这些方法都不能很好地描述水平荷载作用下桩土共同作用的机理。对于非线性弹性地基反力法、P-Y 曲线法来说,其计算较为简单,应用方便,能够考虑桩周土体的非线性特性,但不能考虑沿桩身各土层土体之间的相互作用。而对于 Poulos 弹性理论法来说,能够考虑沿桩身各土层土体之间相互作用,引入桩周土体屈服压力后也能够近似考虑桩周土体的非线性性质,但计算分析时采用预先选定的土体模量,在计算过程中桩身各土层的土体模量随荷载大小而变化,因而增加了同一组桩基在不同大小的荷载作用时选择土体参数的难度,其计算结果有一定的局限性。

水平静载试验

根据浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》中 5.1.8 条,筒桩单桩水平承载力特征值“应通过现场水平荷载试验确定。试验宜采用慢速维持荷载法。必要时可进行带承台桩的水平荷载试验。”

试验方法宜采用单向单循环水平维持荷载法,根据设计要求也可采用多循环等其他水平

荷载试验方法。在某级荷载下, 横向变形急剧增加、变形速率明显加快、地基土出现明显的斜裂缝、达到试验要求的最大荷载或最大位移, 终止加载。试验结束后应绘制荷载—变形(H-Y)曲线, 荷载—时间—变形(H-t-Y)曲线或荷载—地基土水平向反力系数随深度增长的比例系数(H-m)曲线。对于埋设量测装置的试桩应绘制桩身弯矩分布曲线, 桩顶或泥面处倾斜角度变化曲线等; 根据实测变形和桩身弯矩, 计算并绘制桩身挠曲及桩侧土抗力与变形关系曲线簇(P-Y)。试桩水平极限承载力应根据H-Y曲线上第二折点前一级荷载或lgH—lgY曲线上第二折点的前一级荷载等方法综合确定。

结论与建议

(1) 影响筒桩单桩水平承载力的因素包括桩的截面刚度、材料强度、桩侧土质条件、桩的入土深度、桩顶约束情况等。单桩水平承载力的确定方法, 大体上有水平静载试验和计算分析两类, 以水平静载试验最能反应实际情况。按照浙江省《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》, 筒桩单桩水平承载力特征值“应通过现场水平荷载试验确定。试验宜采用慢速维持荷载法。必要时可进行带承台桩的水平荷载试验。”

(2) 桩筒承受水平荷载时, 计算分析承受水平荷载的桩, 方法有: 极限地基反力法、弹性地基反力法(线性弹性地基反力法、非线性弹性地基反力法)、弹性理论法、P—Y曲线法和数值分析法等。目前应用较广的是m法和P—Y法。水平荷载作用下, 桩土相互作用过程复杂, 这些方法尚不能很好地描述水平荷载作用下桩土共同作用的机理。当桩顶位移达到一定数值, 桩侧土已经发生局部塑变, 应用线弹性理论计算其承载力和位移是近似的, 其桩侧土水平抗力系数是随荷载增大而降低的。

(3) 桩径和壁厚对单桩抗弯能力起决定作用, 而断面中心部位作用很小, 因此薄壁筒桩结构作为海堤结构, 具有很大的抗压抗弯能力, 可以承受上部巨大的压应力, 也可以承受强大的水平推力。可以节省大量材料, 并且质量可靠。

(4) 筒桩水平承载力问题, 与竖向承载力相比显得更为复杂。单桩在水平荷载下, 桩土共同作用机理需要深入研究。实际工程中, 往往采用双排、多排桩的支护形式, 桩土相互作用更加复杂。另外, 海堤支护结构中, 有时竖向荷载是控制荷载, 有时水平荷载又成为控制荷载, 会产生所谓的“P— Δ ”效应, 桩侧土体的抗力分布也非常复杂。这些问题都有待研究。

参考文献

- [1] 中国计划出版社. 浙江省工程建设标准. 大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程 (DB33/1044-2007) [S], 2007, 12.
- [2] 周建. 大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载力计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(Supp.1): 3181~3189.
- [3] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范 JGJ 94-94[S], 1995, 7.
- [4] P.E. Rase. Theory of lateral bearing capacity of piles[C], Proc. 1st ICSMFE, 1936.
- [5] 冈部三郎, 望ましい矢板岸壁の安定算法[J], 港湾, 1951, 25(3).
- [6] B.B. Broms. Design of laterally loaded piles[J], Proc., ASCE, 1965, 91(3).
- [7] 《港口工程桩基规范》(JTJ254-98) [S], 中华人民共和国交通部发布.

大直径现浇混凝土薄壁筒桩工程应用浅析*

焦丹

(浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

[摘要] 本文针对大直径现浇薄壁筒桩展开了介绍,对其施工工艺和工程应用进行了较为详细的说明,并对比分析了筒桩和粉喷桩、塑板桩地基加固效果,得出了筒桩技术在地基处理中的优越性。本文最后还对筒桩施工中可能遇到的问题进行了说明,并提出了解决问题的办法。本文对大直径薄壁筒桩技术做了较为充分的阐述,为进一步了解筒桩技术奠定了基础。

[关键字] 大直径薄壁筒桩; 围海工程; 公路铁路软基; 施工工艺; 工程应用; 优越性

简介

大直径现浇混凝土薄壁筒桩,简称筒桩,是外径在 1000—2000mm 之间,厚度在 120—250mm,采用素混凝土或钢筋混凝土现场一次浇注完成的一种新型桩型。该桩型广泛应用于高速公路路堤处理、围海工程、水利工程等建筑地基的处理中,具有施工迅速方便、施工质量高、经济效益好、环境污染小等特点。该桩型在成桩过程中,原位土体不是被挤到桩体周围,而是被套入筒桩内管中,很大程度减小了桩身的挤土效应。素混凝土筒桩可以作为复合地基的增强体有效地控制土体的侧向变形、减少工后沉降;钢筋混凝土筒桩,既可以承受巨大的竖向荷载,也可以承受很大的水平荷载,提高了桩体抵抗外界荷载的能力。

施工工艺

大直径现浇混凝土薄壁筒桩采用自动排土振动灌注而成^[1],施工时,先把筒桩靴套入内、外钢制套管之间的孔隙中,使内、外套管的下端面与桩靴的内、外支撑面相接触;内外套管上部与压盖相连接,且其上部成锥度管穿过压盖,插入施力压头与出泥孔导通,然后将切削头(桩靴尖头)压入土层中;接着振动下沉,在成圆筒型孔的同时也同步自动排出土体,随后放入钢筋笼及灌注混凝土,一边灌注混凝土,一边振动拔出成孔器套管(留下桩靴)即成筒桩。施工工艺流程图如下图 1,大直径现浇混凝土薄壁筒桩包括单桩施工和联体筒桩施工。

1. 单体筒桩

* 收稿日期: 2008 年 8 月

单体筒桩施工是指针对一个独立的筒桩进行的施工, 施工流程^[2]示意图如图2所示。

2. 联体筒桩

联体筒桩^[3]是两个以上的单体筒桩经过一定的连接而形成的具有一定的整体特性的筒桩连接体, 联体筒桩直径可取 800 ~ 1500mm, 及适当的咬和厚度和咬合宽度, 最终形成空心连续墙, 既可以抵抗侧向压力又可充当防渗墙, 实现挡土和防渗两种功能, 是基坑维护中一种新的支挡结构, 其施工工艺如下:

(1) 将联体筒桩成孔器依次打入土中, 后者的前端套入前者的导接器中, 再由激振力打入, 浇注第一根时至少后面连续打入两根沉管。

(2) 连续打入两根后, 再在每个环形孔内放下钢筋笼。

(3) 对已下入钢筋笼的孔内浇注混凝土。

(4) 浇注所有柱形成空心连续墙。

联体筒桩施工流程示意图如图3所示。

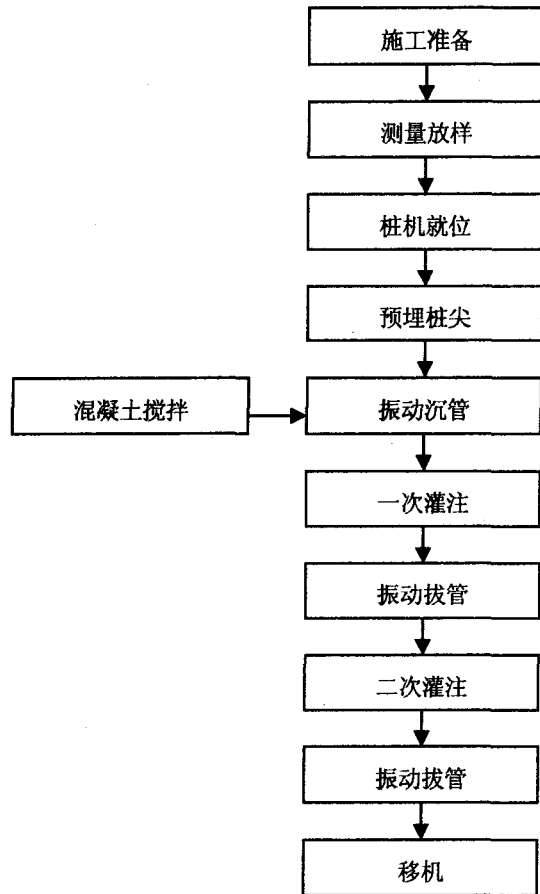


图1 施工工艺流程图

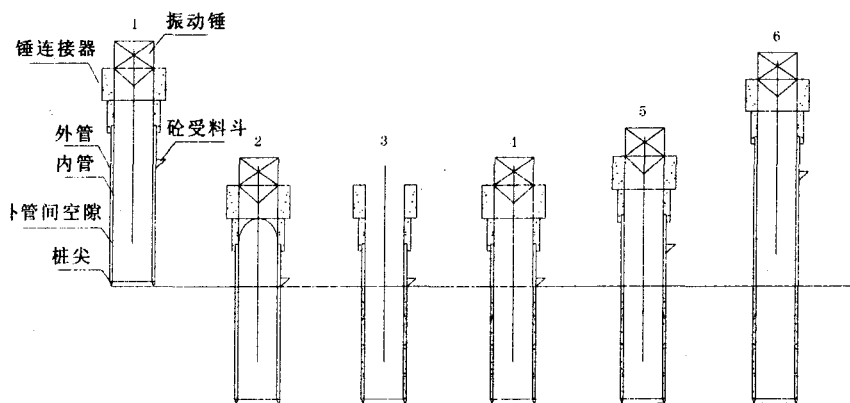


图2 单体筒桩施工流程图

1. 钻机就位, 埋好环形尖桩, 使成孔器的内外钢管底端分别顶住桩尖的外台阶支撑面, 并检测成孔的垂直度。
2. 双管在激振力的作用下逐渐下沉到预定的标高, 内管中的土芯逐渐上升。
3. 沉管到预定标高后卸去振动锤和夹持器, 并放置钢筋笼 (无钢筋笼时省此步骤)。
4. 安装振动锤及夹持器, 向外管上的受料斗送入砵, 落入内外管间的环形空腔中, 达到适量后启动振动锤稍加密实。
5. 无钢筋笼时, 连续送砵至桩身砵理论方量, 然后边振动边上拔沉孔器, 上拔至适当高度后, 根据量测管内砵面决定需补砵量, 使浇注砵的实际高度高于设计桩顶标高 50cm。
6. 砵浇注结束后, 成孔器拔出地表, 钻机移至下已孔位, 重复上述工作。

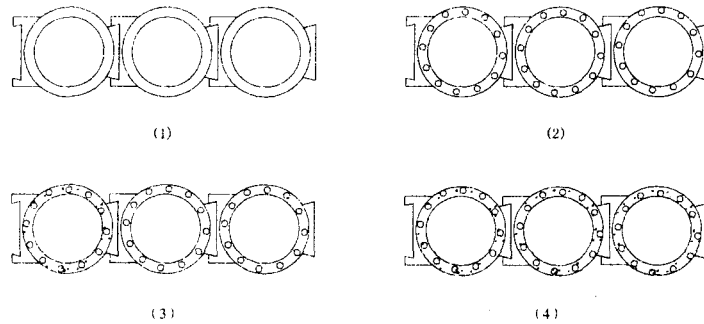


图 3 现浇联体筒桩施工流程示意图

工程应用

筒桩具有施工迅速、挤土效应小、桩径大、桩身质量好、环境污染小等特点, 在高速公路路基处理和海洋工程建筑物地基处理方面得到了广泛的应用。筒桩的布置采用 3 种结构形式^[4]: (1) 单排联体结构: 将单排筒桩按一定的间距, 用钢筋混凝土现浇板将筒桩以一定的方式咬合, 形成一个类似地下连续墙的围护结构; (2) 单面插板的双排框架结构: 桩顶采用钢筋混凝土现浇板连接, 两排桩之间采用连续梁、系梁加强两排之间的刚性连接, 并在内海侧单面插板, 可以采用 I 型和工字型布置; (3) 双面插板的双排框架结构: 用钢筋混凝土现浇板将内海侧筒桩都连成墙体, 墙心可填筑砂土并用抽排方法将其固结, 形成一个类似于重力式挡墙的结构体系, 三种筒桩布置形式如图 4 所示。

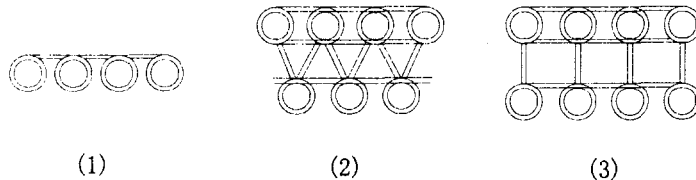


图 4 筒桩的三种布置方式

1. 大直径现浇薄壁筒桩在海洋工程中的应用

筒桩在作为海堤的围桩结构时,根据实际的地质情况共有两种布置形式,联体结构[图4(1)]和双排架结构[图4(2)或(3)],由筒桩结构建造而成的直立式海堤是一种上部结构与下部桩基结合的新型结构形式的混凝土海堤,能够解决传统海堤工程软土地基处理方法施工时间长,工后质量难以保证等难题。

从筒桩的实际应用效果看,筒桩海堤具有如下优点:结构合理、抗弯能力强;设计断面小,结构稳定性好;沉降稳定期短,工后沉降及不均匀沉降小;开孔双筒群结构,对减小波浪力和靠海侧海堤波面高度有很大作用;施工工期短、进度快;可采用分区、分段、预制拼工作业;施工无污染等。

2. 大直径现浇薄壁筒桩在高速软基中的应用

基于筒桩既可以抵抗巨大的竖向荷载,又可以抵抗较大的水平荷载,并且素混凝土筒桩亦可以作为复合地基的水平增强体,从而有效地控制土体侧向变形和减少工后沉降,大直径现浇薄壁筒桩在高速公路的路基处理中应用日益广泛。

现以杭宁高速公路二期工程长兴段^[5]为例,说明筒桩在高速公路路基处理中的巨大作用。长兴段采用筒桩加固桥头软基6.16km,设计桩径均为1000mm,壁厚120mm,混凝土设计等级为C25。接桥路段25m,设计桩长18m,桩端持力层为4-1层;过渡带25m范围内,桩长依次设计为17、16、15m,桩端持力层为2-1层,场地各土层物理力学参数见表1。加固区筒桩按梅花形布置,共布桩419根。

杭宁高速公路二期长兴段地基土物理性质指标

表1

编号	土层名称	厚度(m)	含水量(%)	天然湿密度 (g/cm ³)	孔隙比	塑性指数 I _p	压缩模量 (MPa)
1-2	粘土	1.3	35.4	1.80	1.061	15.2	3.26
1-3	亚砂土	2.7	34.7	1.86	0.956		7.81
2-1	淤泥质亚砂土	12.0	46.1	1.75	1.274	13.57	1.94
4-1	亚粘土	2.2	23.0	2.04	0.631	10.95	5.85
5-1	亚粘土	3.1	21.5	2.04	0.614		8.13

对采用筒桩与相同条件下17.5m塑料排水板和13.0m粉喷桩两种加固方案的加固效果进行比较,采用筒桩加固的路堤,施工期间的沉降速率、沉降值和工后沉降分别为其上两种方法的13%、25%、13.4%、36.9%和4.6%、16.7%。表明用筒桩进行软土地基处理可以显著降低沉降速率,减少施工期沉降及路基总沉降量。

筒桩与粉喷桩、塑板桩加固地基效果比较

粉喷桩和塑板桩也是软基处理中常用到的方法。粉喷桩^[1]是利用水泥、石灰等粉体材料作为固化剂,通过特殊的搅拌钻机,定时定量地从钻头喷嘴喷出,就地将软土和固化剂强行

搅拌,利用固化剂和软土间产生的物理化学作用,使软土结构形成具有整体性、水稳性和一定强度的柱形体而组成复合地基。它的设计计算安装复合地基理论进行;塑板桩^[1]是由带沟槽的塑料芯板和一个无纺布滤套组成,在上部填土荷载的作用下,软土中的水通过这些排水通道缓慢排出,地基产生固结,强度逐渐提高的一种地基处理方法。

以下用工程实例对筒桩和粉喷桩、塑板桩加固地基效果进行比较。

杭宁高速公路 K16+756 处塑料板埋深 17.5m,填土高度 4.5m;杭宁高速一期 K57+140 路基采用粉喷桩加固,加固深度 12m,填土高度 4.5m;K16+682.4 路段筒桩埋深 18m,填土高度 4.5m,从施工沉降和侧向变形两个方面对比如下表 2。

不同方法填土高度相同时的变形对比表^[1]

表 2

项 目	K16+682.4 路段 (18m 薄壁筒桩)	K16+756 路段 (17.5m 塑板)	K57+140 路段 (12m 粉喷桩)
平均填土速率 (m/d)	0.023	0.013	0.012
沉降值 (mm)	85	636	300
沉降速率 (mm/d)	0.3	2.0	0.8
最大侧向变形 (mm)	4.6	200	25
最大侧向变形位置 (m)	3.0	4.0	5.0

从表 2 可以看出:筒桩处理地基可大大减少施工期沉降,降低沉降速率,减小侧向变形,工程中采用筒桩远远优于粉喷桩和塑板桩。

工程中常见问题和处理措施

筒桩技术虽然具有诸多优点,但是实际工程中仍存在一些问题,施工中常见的问题^[3]为混凝土用量过大和断桩缩颈现象,我们对工程中这两种问题处理如下:

(1) 混凝土用量过大:产生原因是内外钢管振动提升过快,混凝土灌注扩散,或者遇到地下溶洞、枯井等,使混凝土灌注时流失。处理措施是在淤泥或淤泥质土中施工时,放缓施工速度,并且设置补投料口;了解施工现场的地下孔洞情况,做好预先回填等处理工作。

(2) 断桩缩颈现象:原因是套管中进水造成夹泥断桩;或者在淤泥质地层中,钢套管起拔速度过快,由于孔壁土体应力释放以及混凝土成型不稳定不规则等作用,造成混凝土被淤泥土挤压缩颈,或者断桩现象发生。解决办法是:为防止混凝土下落太快,补充混凝土灌注量;注意邻桩的施工影响,宜采取跳打法或者控制施工时间间隔;在流态淤泥质地层中施工时,应控制套管的提升速度,一般控制在 60cm/min。

结语

大直径薄壁筒桩因其强大的优势,现已广泛应用于软基处理中尤其在海洋防波堤、互堤和围海工程、铁路公路软基处理中具有广阔的发展前景。

但是目前仍存在一些问题,如深厚软粘土应用中接桩问题以及粉砂土层施工中土塞效应问题。因此需要进一步加强理论研究和实际施工中的技术问题,这样大直径筒桩技术才能不断地发展。

参考文献

- [1] 现浇混凝土薄壁筒桩应用研究项目组.现浇混凝土薄壁筒桩的应用[R].杭州:现浇混凝土薄壁筒桩应用研究项目组,2004.
- [2] 中铁十八局集团甬台温铁路工程指挥部.甬台温铁深厚软土地基处理现浇薄壁筒桩试桩工艺[R].杭州:中铁十八局集团甬台温铁路工程指挥部,2007.
- [3] 刘曰飞.大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术及其应用[J].探矿工程,2003,6:21-23.
- [4] 郭平,胡明华,周建等.大直径现浇混凝土薄壁筒桩在围海工程中的应用研究[J].水利水电技术,2004,35(5):29-31.
- [5] 杭宁高速公路二期科研项目组.现浇混凝土薄壁筒桩加固桥头软基试验研究报告[R].杭州:杭宁高速公路科二期项目组,2001.

大直径现浇砼薄壁筒桩专利权单位 ——浙江海桐投资管理有限公司

公司董事长、筒桩发明人:谢庆道 公司总经理:高文清
向岩土工程界全体同仁致意!

薄壁筒桩自发明至今已近10个年头,10年来得到全国高等院校、科研设计及施工单位的广泛应用,全国已完成数十项工程,近百万延米筒桩施工,得到普遍好评。在各位专家学者的共同努力下完成《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》的编写工作。利用筒桩复合地基很好的解决了软土地区的桥头跳车,利用筒桩结构成功修筑防波堤等。最近正在设计用筒桩建造印度尼西亚加里曼丹岛巴里巴板一个5万吨级油码头和一个1万吨级的杂货码头;温州瓯江口航道整治二期工程及温岭开发区的公路桥梁工程正在设计。欢迎各位领导及专业同仁进行合作开发和交流咨询。

公司地址:浙江省杭州市朝晖路205号深蓝广场商务楼1006室

公司电话:0571-56766113

传真:0571-56766065

网址:<http://www.ht-ht.cn>

邮箱:gwqhj_0008@vip.163.com

大直径现浇混凝土薄壁筒桩处理桥头软基的试验研究*

史海莹

(浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

[摘要] 某高速公路桥头路段采用大直径现浇混凝土薄壁筒桩加固软基,并进行了大量试验研究。研究表明筒桩成桩质量良好,能达到设计要求;与常用的粉喷桩及塑料排水板加固方法相比,筒桩能有效减少沉降变形和路基侧向位移;在筒桩顶部设置盖板能有效增大桩土荷载分担比,发挥筒桩的承载性能;虽然筒桩造价较高,但沉降稳定历时短,大大缩短工期,具有显著的社会效益和经济效益。

[关键词] 大直径现浇混凝土薄壁筒桩;土工格栅;沉降;侧向变形

引言

路基沉降大以及“桥头跳车”是软土地区修建高速公路普遍存在的问题。常用的塑料排水板和粉喷桩存在施工工期沉降速率大、沉降稳定历时长、成桩质量不易控制、抗滑能力较低等缺点。为解决这些问题,杭宁高速公路二期工程^[1]长兴三标K16+682处采用大直径现浇混凝土薄壁筒桩(下文简称筒桩)加土工格栅形成桩网复合地基加固桥头软基,并进行了大量试验研究。本文将结合其试验成果分析筒桩加固路堤的工作性状。

试验路段概况

试验路段位于杭宁高速公路二期工程(长兴段)第三合同段K16+612白溪港桥南端桥头路段,里程桩号为K16+678~728。设计路堤底宽46.5m,路面宽度34.5m,填土高度4.5m,原设计采用塑料排水板软基处理。筒桩桩长18m,桩间距2.5m,设计直径1000mm,壁厚120mm,桩身混凝土强度等级为C25。为调整筒桩区与塑料排水板区之间沉降差异,将筒桩桩长逐渐减少至15m以形成一个过渡带。

成桩质量检测

筒桩由于壁薄以及采用现场灌注混凝土成桩,易出现质量事故,故通过现场开挖、壁厚测量以及桩身混凝土强度试验对其成桩质量进行检验。

首先,对试验区段的10根桩进行现场人工开挖。从开挖情况看,桩身内、外壁表面光滑,壁厚均匀,未发现薄壁坍塌、严重缩颈等不良现象,少量桩存在浅部均匀性较差、局部凹陷等现象。

其次,对开挖的6根桩体钻探取芯,进行壁厚测量。桩身厚度自上而下基本一致,除桩

* 收稿日期:2008年8月

顶附近局部小于设计厚度 12cm 外, 其余各段均在 12±0.3cm 范围内。

第三, 抽取 3 根桩的芯样进行混凝土单轴抗压强度试验。试验发现, 筒桩混凝土强度略大于设计值 C25, 且自上而下逐渐提高, 下部混凝土均匀性、密实性较上部好。

第四, 对 40 根桩进行低应变测试。测试结果显示所测桩桩身质量良好, 桩底清晰。

从上述各项检测结果可见, 在遵守筒桩施工细则的前提下, 筒桩成桩质量良好, 几何尺寸和桩身强度均达到设计要求。

载荷试验

在试验区段, 对 10 根单桩、一组四桩复合地基进行竖向静载荷试验, 对 2 根单桩进行水平荷载试验。为进行承载力对比, 将筒桩内部土芯挖空至桩底, 进行了空心桩竖向静载荷试验。

单桩竖向静载荷试验结果显示, 挖除土芯的空心桩承载力比未挖除土芯的实体桩承载力要低 20~30%。根据 ICP 法^[4]的计算结果与载荷试验结果比较, 可解释为由于土芯的存在引起桩端闭塞效应, 导致桩端阻力的提高。因此这一现象能否直接证实内摩阻力的存在还有待进一步的研究。但由此对比试验可知, 土芯的存在对筒桩竖向承载力产生有利的影响。

单桩水平荷载试验结果显示, 在试验过程中桩体未出现过大大变形, 到达极限荷载时, 相应的桩身转角很小。通过预埋钢筋计测试分析, 桩身最大应力在 4m 左右深度。由此说明筒桩成桩质量良好, 具有较大的抗弯刚度, 抗滑移效果好。

监测成果分析

为比较土工格栅、盖板对于筒桩复合地基的影响以及筒桩区与塑料排水板区的应力、沉降差异, 将试验区段划分为四个分区, 各分区加固处理方式和监测内容见表 1。

各分区加固处理方式

表 1

分区号	加固处理方式	监测内容
A	筒桩桩长 18m; 盖板区; 单层土工格栅。	1、桩顶、桩间土土压力; 2、不同深度土层水平向位移; 3、地下孔隙水压力; 4、路堤表面位移; 5、桩顶、桩间土沉降; 6、桩间土不同深度土层沉降。
B	筒桩桩长 15~17m; 无盖板; 双层土工格栅。	同 A 区。
C	塑料排水板; 双层土工格栅。	1、路堤沉降; 2、路堤表面位移; 3、地下孔隙水压力; 4、路堤不同深度土层沉降; 5、路堤不同深度土层水平向位移。
D	塑料排水板; 土工布。	同 C 区。

1. 应力分析

从 A、B 区的桩顶及桩间土压力的变化趋势可发现, 填土初期桩顶和桩间土压力同时增

长,当桩间土压力增至一定值后,趋于平缓,大部分路基荷载由筒桩承担。至等载标高时,A、B两区桩土荷载分担比分别为5和2.5。对比A、B区的地基加固方式可见,在调整桩土荷载分担比方面,桩顶盖板比土工格栅具有更显著的效果。这是由于盖板不仅将路基荷载直接转移至筒桩,且减小了桩间土的受力面积。

比较各区的孔隙水压力沿深度的变化可见,C、D两区地面以下5m左右孔压增长幅度远高于A、B两区,说明筒桩加固区的路基荷载对桩间土的影响范围小,荷载主要由筒桩承担,因而桩间土不会产生较大变形;而塑料排水板区土体压缩变形的影响深度超过5m。

2. 沉降分析

监测数据显示,筒桩加固区的沉降量和沉降速率远远小于塑料排水板区。路堤填土高度为3.8m时,D区总沉降量达895mm,预压期沉降占260mm且仍表现为不稳定;填土高度4.5m时,A区总沉降为97mm,至等载标高预压期沉降量12mm,且趋于稳定。对比两组数据可见筒桩加固区沉降量小,路基易稳定。

A、B两区桩顶沉降量相近,但B区桩间土沉降速率较A区高,且沉降量为A区的1.5倍。此结果进一步说明盖板能较好地协调复合地基中的桩土变形。

从各区断面沉降环的变化曲线看出,A、B区的压缩变形主要发生2m以内的表层桩间土,下部基本无沉降。C、D两区的压缩变形影响范围较大,深达10~12m。C区的最大沉降量较D区小,说明土工格栅对土体的加筋拉力作用,限制了路堤侧向变形,从而起到减少沉降的作用。

3. 侧向位移分析

边桩位移监测资料显示,筒桩加固区边桩位移量是塑料排水板区的2.5%;塑料排水板加土工格栅区的边桩位移为纯塑料排水板区的30%。可见土工格栅的侧限作用非常明显。

4. 过渡区效果分析

表2为各分区断面沉降计算值及监测值成果。由表中数据可见,筒桩区与塑料排水板区的衔接区域沉降差异较大,说明采用变桩长来达到平稳过渡的效果不是非常理想。考虑到施工的易操作性,可通过改变桩间距进行过渡。

各区断面沉降计算值和监测值

表2

	桩长 18m 筒桩区	桩长 16m 筒桩区	塑料排水板加双层土工格栅区	纯塑料排水板区
填筑期沉降计算值 (mm)	82	123	370	870
填筑期沉降监测值 (mm)	85	119	230	636
等载标高后沉降实际监测值 (mm)	97	141	295	895

筒桩与粉喷桩、塑料排水板加固软基的比较

为研究筒桩加固软基的效果,将其与塑料排水板、粉喷桩进行比较。塑料排水板区位于K16+756处,处理深度17.5m,粉喷桩则是相同填土高度的杭宁高速公路一期K57+140路基,加固深度12m。填土高度为4.5m时,各试验断面的施工期沉降见表3。从表中可看出,

在填土速率快一倍的情况下,筒桩加固区路基沉降速率仅为塑料排水板加固区的15%,施工期沉降为塑料排水板区的10%;筒桩沉降速率为粉喷桩加固区的37.5%,预压期沉降是粉喷桩加固区的20%。从沉降随时间的变化曲线看,塑料排水板沉降速率较大,至等载标高后停止加荷,沉降仍然明显;而粉喷桩的沉降速率在停止加荷后虽然减缓,但稳定历时较长;筒桩沉降速率小,且停止加荷后,沉降就趋于稳定。

各断面沉降计算值与实测值(填土高度4.5m)

表3

断面位置	K16+682.4 路段 (18m 筒桩区)	K16+756 路段 (17.5m 塑料排水板区)	K57+140 (12m 粉喷桩)
平均填土速率 (m/d)	0.023	0.013	0.012
沉降值 (mm)	85	636	300
沉降速率 (mm/d)	0.3	2.0	0.8

表4为各区的侧向变形监测数据。从表中可看出,在相同荷载作用下,塑料排水板和粉喷桩加固区的最大侧向变形分别为筒桩加固区的44倍、6倍,筒桩区的最大侧向变形位置较浅,说明在路基稳定性方面,筒桩加固软基优于粉喷桩和塑料排水板。

对各区的预压期沉降进行比较,粉喷桩加固区为塑料排水板区的1/4左右,筒桩加固区为粉喷桩加固区的1/5,说明筒桩加固在预压期的沉降控制优于其他两种处理方法。

各区侧向变形对比(填土高度4.5m)

表4

断面位置	K16+682.4 路段 (18m 筒桩区)	K16+756 路段 (17.5m 塑料排水板区)	K57+140 (12m 粉喷桩)
最大侧向变形 (mm)	4.6	200	25
最大侧向变形位置 (m)	3.0	4.0	5.0

结论

- (1) 在遵守施工细则的前提下,筒桩的成桩质量良好,能满足设计要求。
- (2) 筒桩具有较大的竖向承载能力和截面抗弯刚度,经处理后的软基压缩变形及侧向位移均非常小,故而能控制沉降防止桥头跳车,且路基具有较好的稳定性。
- (3) 在筒桩桩顶设置盖板,较铺设土工格栅能更有效地将填土荷载转移到桩上,发挥筒桩的承载能力。
- (4) 筒桩加固区与塑料排水板区存在较大沉降差异,可通过改变桩间距形成一稳定过渡带。
- (5) 筒桩在预压期沉降小,沉降稳定历时短,所以虽然筒桩造价较其他方法高,但大大缩短工期,具有显著的社会效益和经济效益。

参考文献

- [1] 杭宁高速公路科研项目组. 现浇混凝土薄壁筒桩加固桥头软基试验研究报告[R]. 杭州: 杭宁高速公路科研项目组, 2001.
- [2] 蔡金荣, 应齐明, 谢庆道. 现浇混凝土薄壁筒桩加固桥头软基试验研究[J]. 公路, 2003, (5): 71-74.
- [3] 朱明双, 朱向荣, 王金昌. 桥头软基现浇筒桩处理现场试验分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 102-106.
- [4] 周建. 大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载力计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(supp.1): 3181-3189.

大直径现浇混凝土薄壁筒桩在基坑工程中的应用*

史海莹

(浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

[摘要] 大直径现浇混凝土薄壁筒桩截面抗弯刚度大, 作为挡土结构应用于基坑工程具有良好的抗侧移性能, 与其他形式围护桩相比, 具有施工质量有保证、环境影响小等优点。联体筒桩同时具有挡土、止水功能, 用于深基坑支护有较好的经济效益。本文从截面特点、布桩形式、环境效应等方面对筒桩支护进行了讨论。

[关键词] 大直径现浇混凝土薄壁筒桩; 基坑支护; 截面抗弯刚度; 桩间距

引言

2001年, 大直径现浇混凝土薄壁筒桩(下文简称筒桩)作为基坑围护桩在杭州市区首次使用, 桩径为800mm、900mm, 壁厚150mm。其后, 筒桩应用于基坑工程较少见诸于报道。实际上, 在横向力作用下, 筒桩的大直径圆环几何特性使其作为基坑围护桩具有一定推广意义。本文将从筒桩的截面特点、布桩形式、环境效应等方面对其进行分析。

截面特点

根据现有施工机械能力, 筒桩的直径可达1200~1500mm, 壁厚通常为120~200mm。直径1500mm壁厚200mm的筒桩, 其截面惯性矩相当于1370mm的实心桩, 而混凝土用量却仅与1020mm实心桩相当。表1为不同单桩混凝土用量与截面惯性矩对比结果。由表中数据可见, 筒桩与实心桩的混凝土用量相近时, 前者具有更大的截面惯性矩; 两者截面惯性矩相近时, 前者混凝土用量更少, 即构件受弯时, 筒桩的环形截面特性使材料抗力得以充分发挥。

不同桩径单桩混凝土用量与截面惯性矩^[7]

表1

技术类型	桩径/mm	每延米混凝土用量/m ³	截面惯性矩 m ⁴	指标对比	
				混凝土用量/%	截面惯性矩/%
沉管桩支护	700	0.385	0.0117	47.1	6.6
冲、钻孔桩支护	800	0.503	0.0201	61.6	11.4
	1000	0.785	0.0491	96.1	27.8
	1200	1.131	0.1017	138.4	57.6
	1500	1.767	0.2485	216.3	140.7
筒桩支护	1500(壁厚200)	0.816	0.1766	100.0	100.0

* 收稿日期: 2008年8月

布桩形式

排桩支护的基坑一般采用间隔布桩,其中,桩间距是一个重要指标。工程设计中常按经验或构造要求确定其值,但力学分析和数值模拟^[1-2]均表明挡土支护桩之间存在土拱效应。基坑支护桩间的土拱效应可理解为:由于支护桩的存在,桩间土和桩后土朝向基坑内侧的变形存在差异,从而土颗粒之间出现摩擦剪切,桩间土的应力状态发生改变,垂直于基坑侧壁的主应力向平行于基坑侧壁方向倾斜,桩间土压力遂向桩体转移,如图1所示,即发生应力迁移^[2]。因此,在保证基坑稳定安全的前提下,确定合理的桩间距,可利用土拱效应使桩间土保持自立,体现间隔布桩的经济效益。各研究者得出的合理桩间距存在着一定差异,但影响因素均包括:土的抗剪强度参数 c 、以及桩径 $d^{[1-4]}$,且与桩径 d 成正比。基于筒桩的大直径特点,布桩时合理桩间距也能相应增加,从而进一步发挥其经济性的优势。表2给出了基坑围护采用不同桩径支护桩时主要技术指标的对比结果。从表中数据看出,在满足设计要求的前提下,筒桩的混凝土用量、钢筋用量与各种桩径的实心桩相比,存在显著优势。

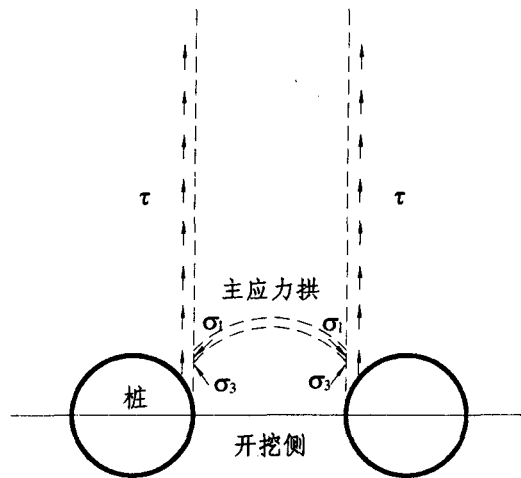


图1 基坑支护桩间土拱效应

基坑围护采用不同桩径支护桩时的主要技术指标对比(按挖深10m,桩长15m,一道支撑计算)^[7] 表2

技术类型	桩径/mm	围护桩最大间距/m	桩身最大变形/mm	每米基坑桩砼用量/m ³ /m	每米基坑钢筋用量/kg/m	指标对比	
						混凝土用量/%	钢筋用量/%
沉管桩支护	700	1.0	41.7	5.78	1009.1	131.9	184.7
冲、钻孔桩支护	800	1.1	32.0	6.86	878.6	156.7	160.8
	1000	1.5	27.7	7.85	694.5	179.4	127.1
	1200	2.0	29.2	8.48	582.2	193.8	106.6
	1500	2.8	31.1	9.47	489.7	216.3	89.6
筒桩支护	1500(壁厚200)	2.8	32.1	4.38	546.4	100.0	100.0

联体筒桩是指筒桩之间相互搭接,形成类似于地下连续墙的结构,因造价较高,在一般基坑工程中应用较少。而在开挖深度较大的基坑中,使用这种联体形式,可将挡土、止水功能合二为一。文献[5]报道了联体筒桩支护在南京某基坑中的成功应用,对比联体筒桩支护和钻孔灌注桩挡土加深搅拌桩止水两种方案,发现前者费用较低,且无需另设止水帷幕,一定程度上缩短了施工工期。将联体筒桩应用于基坑支护是一种大胆的创新与尝试,但其支护效果、

经济效益还需通过更多的工程实践予以论证。

环境效应

筒桩采用环状桩尖和高频振动施工,施工过程中有一半土体从内管排出,因而属于半挤土桩,挤土效应远弱于静压桩。如果设置了相对较大的净桩间距并采用跳打施工,挤土问题不会导致相邻桩体的破坏^[7]。与基坑支护中常用的钻孔灌注桩相比,筒桩的施工无需泥浆处置,不存在环境污染问题。

设计计算

浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》DB33/1044-2007建议,筒桩围护结构的稳定性验算遵循现行《建筑基坑支护技术规程》JGJ120-99有关规定。筒桩的设计,按环形截面受弯或压弯构件计算。因而与一般实心排桩围护结构的设计并无区别,目前的研究工作尚未探明筒内土芯对支护效果及支护结构的性状存在何种影响。

在开挖深度不大的情况下,可采用悬臂式筒桩围护。由于截面抗弯刚度大,桩顶位移非常小。悬臂式筒桩围护与内撑式围护结构相比,具有工期短,方便大规模机械化开挖的优点。当基坑开挖超过某一深度后,由于筒桩刚度较大,将出现整体平移。内支撑是提供侧向刚度的主要结构,因而须采用筒桩加内撑的围护形式。

结语

从上文的分析可见,大直径现浇混凝土薄壁筒桩应用于基坑支护具有以下几个特点:

1. 大直径环形截面,能提供较大的抗弯刚度,有效限制基坑侧向变形;
2. 环形截面及大桩距布桩降低桩身混凝土用量和钢筋用量,具有良好的经济效益;
3. 开挖深度较大时,采用联体筒桩支护,集挡土、放水功能于一体,降低造价;
4. 属于半挤土桩,施工中无泥浆处置,对环境影响小。

因此,筒桩作为基坑支护桩丰富了基坑支护的形式,具有较好的应用前景。

致谢 感谢铁道部第四勘察设计院软土地基研究所郑尔康总工为本文提供了相关研究资料。

参考文献

- [1] 胡敏云. 深基坑护壁桩间距确定方法探讨[J], 中国公路学报, 2001, 14(2): 27~29.
- [2] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J], 岩土力学, 2004, 25(2): 174~178, 184.
- [3] 蒋良潍, 黄润秋, 蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J], 岩土力学, 2006, 37(3): 445~460.
- [4] 赵明华, 陈炳初, 刘建华. 考虑土拱效应的抗滑桩合理桩间距分析[J], 中南公路工程, 2006, 31(2): 1~3, 28.
- [5] 邓学支, 卫龙武, 张力. 薄壁联体筒桩在某深基坑支护中的应用[J], 山西建筑, 2005, 31(20): 89~90.
- [6] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [7] 宁波市商会. 国贸中心基坑支护设计方案汇报[R]. 福建工大建筑设计院, 福建工程学院, 简洪钰.
- [8] 中国计划出版社. 浙江省工程建设标准 大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程 (DB33/1044-2007) [S]

大直径现浇混凝土薄壁筒桩 海堤结构影响因素分析及应用*

刘卫未¹ 周建²

(1. 中建一局集团建设发展有限公司 北京 100102; 2. 浙江大学建筑工程学院岩土所 杭州 310027)

[摘要] 利用刚度等效的原则,对双排筒桩海堤这一新型结构进行研究,将其简化为二维问题,研究了排距、排桩刚度、系梁刚度、位置、土体性质等对结构内力和位移的影响。研究表明,增大筒桩排距可以减小筒桩侧向变形,排距为4~6倍筒桩外径比较合适;为减小侧向变形,提高筒桩桩径和壁厚或增加配筋的做法不可取;但增大系梁尺寸或增加系梁配筋的措施很有效。系梁位置适当下移可以减小桩顶位移,提高筒桩结构整体刚度;对海底地基土体进行抛石处理,一方面可以有效减小筒桩海堤的侧向变形,另一方面还可提高海堤的整体稳定性。筒桩海堤结构为直立式断面占地面积小,在土地资源紧张的情况下经济效益突出;桩径大承载力大,将地基基础与上部结构充分结合,稳定性好,因而有很好的应用前景。在影响因素基础上进行了优化设计,对该结构的适用条件也进行了探讨,强调指出应用时一定要注意适用条件,若涂面较低,且持力层较深,超出筒桩目前施工最大桩长的情况,则要慎重选用。

[关键词] 筒桩;海堤;影响因素;适用性研究

引言

海堤是围海工程的主体,也是海岸防护的主要工程措施。软土地基上围海筑堤的主要工程问题之一是地基承载力低,沉降量大,容易失稳。目前常用的海堤主要有三种结构型式:斜坡式、陡墙式(包括直立式)和混合式,事故研究发现海堤结构设计不合理(如消浪措施不当、结构单薄等)、地基处理不当或外部荷载作用引起地基失稳等是目前海堤损毁的主要原因。

现有海堤结构设计时一般将上部结构和下部地基基础分开考虑,这时如果上、下部不能很好匹配、互相协调,必导致事故发生:如下部基础处理不当,有较大沉降或不均匀沉降发生,上部刚性结构不能适应此变形特征,就会发生整体倾斜,危及结构安全;或上部结构荷载太大,地基承载力不能满足要求,会引起地基失稳等等。从结构优化角度出发,最小断面的堤型最经济(占地面积小),而上、下部统一设计的结构有最好的稳定性。本文提出的大直径现浇混凝土薄壁筒桩(以下简称筒桩)海堤结构兼具以上优点,因而有着广阔的应用前景。

本文研究的大直径薄壁筒桩不同于预应力管桩和钢管桩,不是预制桩,而采用现场浇筑;

* 收稿日期:2008年8月

桩径也较管桩和近岸工程中常用的钢管桩大,国外目前还没有这类桩,国内大多将其用于路基处理,充分利用筒桩经济,有效减少地基沉降的特点,取得了很大成功。筒桩用于海堤结构设计中主要基于以下三点:一,其直立式结构断面小,在当前土地紧缺、征地费用高的情况下优势突出;二,将地基基础与上部结构作为统一整体设计,不用进行上下部荷载、沉降协调,有效避免了潜在隐患;三,筒桩桩径较大($\Phi 1,000 \sim 2,000\text{mm}$),充分发挥桩管内土体作用,承载力大,工后沉降小;壁薄(120~200mm),混凝土用量省,可一次施工完成,因此既经济、处理效果又好。



图1 单排联体结构

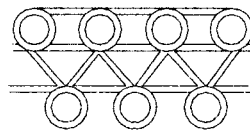


图2 单面插板双排框架结构

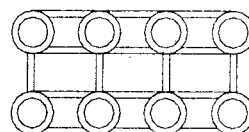


图3 双面插板双排框架结构

大直径现浇混凝土薄壁筒桩是一项新技术,可以为现浇素混凝土筒桩,若外荷载较大,也可在内外套管间下设钢筋笼,再浇筑混凝土,形成现浇钢筋混凝土薄壁筒桩。该桩可自由组合成各种形式,如单排联体结构(图1)和双排框架结构(图2和图3)。桩顶可用现浇钢筋混凝土压顶梁连接,两排桩之间用系梁连接,在水深较大的海域或软土较深地区,水平向荷载较大,多采用这种双排框架结构(若为挡土结构,可不用系梁,排桩间土体用土工织物或其它方法处理),其稳定性好,强度高,抗冲击能力强。

筒桩多用于路基处理,已有研究主要集中在竖向承载力方面,海堤结构主要承受水平向波浪荷载,荷载特点与路基中筒桩不同,因此在竖向承载力和沉降满足要求的前提下,水平向稳定性更为重要,目前水平荷载下该结构性状研究未全面开展^[1]。本文研究的主要目的是用有限元方法,对影响筒桩海堤结构的主要因素进行研究,考虑排距、排桩刚度、系梁刚度和位置,及不同持力层对结构内力和变形的影响,确定主要影响因素,并提出合理措施和对策,为结构设计提供理论依据。在研究的基础上,进行优化设计,并提出该结构的适用条件也是本文的目的之一。

有限元分析

1. 简化分析方法

筒桩海堤结构是一个复杂的三维问题,海堤长度远大于其它方向尺寸,且荷载分布大致均匀,因此可按抗弯刚度(EI)等效原则^[2]将筒桩结构转换为连续挡墙,桩和连系梁用可承受弯矩的梁单元模拟,从而将三维问题简化为平面应变问题进行研究,相应换算公式为:

$$\frac{1}{12} \times (d+t) \times h^3 = \frac{1}{64} \times \pi \times (d^4 - d_1^4) \quad (1)$$

式中 d 为筒桩外径, d_1 为筒桩内径, t 为壁厚, $(d+t)$ 为筒桩中心距; h 为换算的连续墙厚

度。

2. 有限元分析模型

为模拟桩土共同作用, 结合现有研究成果^{[3]-[4]}, 在建模和计算过程, 采用以下假定:

(1) 采用四结点二维平面单元, 网格划分如图4所示;

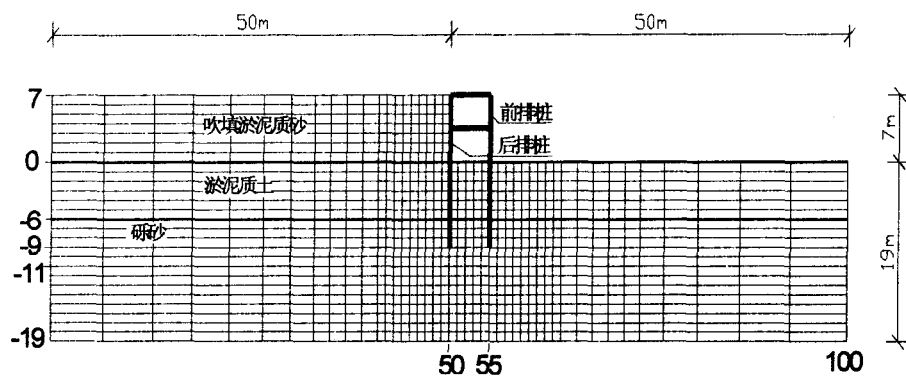


图4 有限元网格划分图

(2) 土体为均质各向同性弹性材料;

(3) 桩和连系梁用梁单元模拟, 桩土界面上设置 Goodman 接触面单元, 可考虑二者相对滑移;

(4) 不考虑海堤结构施工和水位变化对土体性质的影响;

(5) 地表和填土表面为自由面, 远处竖向边界有水平向位移约束, 底面边界有水平、竖直方向位移约束。

本文对两种荷载组合进行了研究: 正常使用条件下最不利荷载组合和施工条件下最不利荷载组合, 前者只考虑结构后填土的作用(图5), 认为填土一次完成; 后者只考虑波浪力的作用(图6), 波浪力计算方法参照《海港水文规范》(JTJ213-98)^[5]。

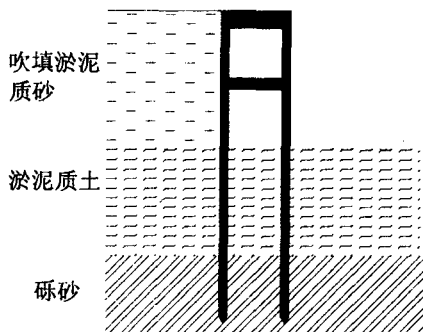


图5 正常使用条件下最不利荷载组合

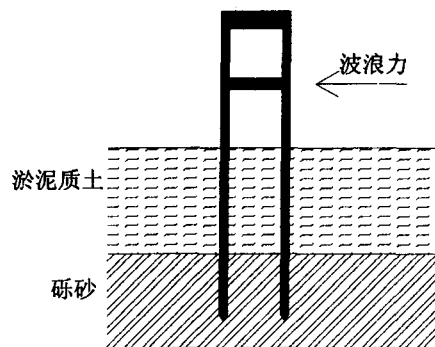


图6 施工条件下最不利荷载组合

土体参数

表1

名称	厚度 (m)	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	μ	K_0
吹填淤泥质砂	7	17.0	9	18	3	0.45	0.51
淤泥质土	6	18.5	15	21	3	0.41	0.46
砾砂	5	20.0	17	40	12	0.31	0.39
基岩		25.0			2×10^4	0.3	0.39

3. 计算参数

以广东惠州某工程为研究对象^[6], 地层情况及相关参数如下。

基岩以上土体分三层: 基岩, 残积层(主要为砂岩风化后的残留物), 沉积层(主要为淤泥或淤泥质土), 填土为淤泥质砂, 分布如图5示, 具体参数见表1。双排筒桩结构的前、后排桩长均为16m, 桩径1500mm, 壁厚180mm, 桩中心距为3m, 系梁截面尺寸为0.3×0.6(m²), 连系梁距桩顶3.5m, 桩体和连系梁的重度25kN/m³, 弹性模量为 2.5×10^4 MPa, 泊松比 $\nu=0.15$; 接触面切向刚度 $k_s=500$ kN/m, 法向刚度 $k_n=10^3$ kN/m。由工程水文地质资料, 并据《海港水文规范》(JTJ213-98)相关规定, 确定堤顶高程为+4.5m, 见图7, 波态为近破波, 波浪力 $P=288$ kN, 作用于泥面以上4.4m处。

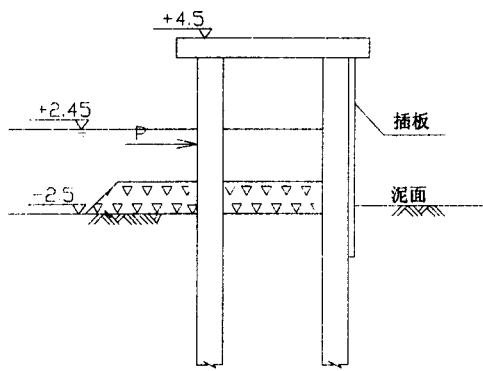


图7 波浪力示意图

筒桩海堤结构主要影响因素

1. 正常使用条件下最不利荷载组合情况

先对正常使用条件下最不利荷载组合时不同排距、排桩刚度、系梁刚度和位置, 及不同软土模量对结构内力和变形的影响进行研究。文中符号说明如下: 填土作用下, 桩身位移朝临海侧为正; 波浪力作用下, 朝填土侧为正; 弯矩逆时针方向为正。

(1) 排距的影响

保持其它参数不变, 仅变化筒桩排距, 分别为3m, 4m, 5m, 7m和9m, 研究排距变化对筒桩海堤水平承载性状的影响。

计算结果表明, 筒桩排距增大后, 后排桩和前排桩的桩身位移都随之减小, 排距变化对桩身上部位移的影响比较显著, 但排距超过7m后, 影响已不明显。其桩顶位移随排距增大而减小, 这与基坑支护中用到的门架式维护结构性状一样^[7]。排距3m时桩顶位移为9.78cm, 排距9m时桩顶位移为7.45cm, 减小了2.5cm左右, 开始时减小幅度很大, 随后趋于平缓。

研究还发现,排距较小时前后排桩的桩身位移相差不大,随着排距增大二者差距加大,这是因为排距较小时结构整体刚度较大,变形类似于地下连续墙,而排距较大时,前排桩的作用类似于锚桩;后排桩的桩身位移因结构后有填土,始终大于前排桩。前后排桩弯矩曲线形状随排距的增大基本没有改变,但排距的变化对前排桩桩身弯矩影响较大。由图8和图9可见,排距增大后,后排桩最大桩身弯矩先增大后减小,变化幅度不是很大;而前排桩最大桩身弯矩一直增大,变化的幅度开始很大,排距3m时,最大负弯矩为-572.03kN.m,排距为9m时,为-832.84kN.m,增大了49.65%。

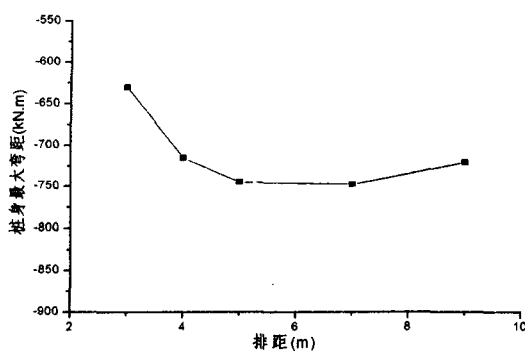


图8 不同排距时后排桩最大桩身弯矩

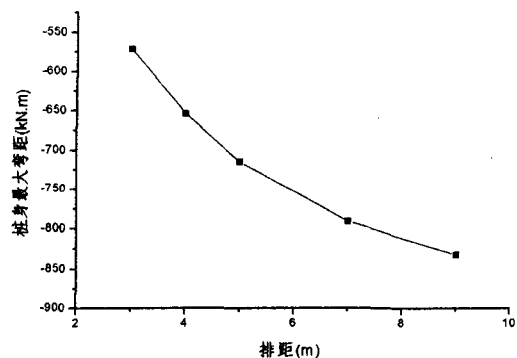


图9 不同排距时前排桩最大桩身弯矩

因此,为减小侧向变形可以适当增大排距,但排距达到一定数值后继续增大排距,效果已不明显,而且增大排距会增加前排桩的弯矩,笔者认为取排距为6m较合适,即 $4d$ (d 为筒桩外径)。

(2) 排桩刚度的影响

为考虑排桩刚度变化对筒桩海堤水平性状的影响,分别计算筒桩刚度为 $0.25EI$, $0.5EI$, $1.0EI$, $2EI$, $4EI$ 的情况, EI 为初始计算时排桩的刚度($1.52 \times 10^6 \text{kN.m}^2$),其它参数保持不变。

排桩刚度增大后,后排桩和前排桩的桩身位移曲线逐渐变成直线,刚度较小时变化幅度较大,刚度超过 $2EI$ 后逐渐变小。排桩刚度对桩顶位移的影响很小,刚度为 $0.25EI$ 时的桩顶位移和刚度为 $4EI$ 时的桩顶位移基本一致。

排桩刚度不影响前后排桩桩身弯矩曲线形式,对弯矩大小的影响却比较大,后排桩桩身弯矩随刚度增大而增大,在排桩刚度较小时增幅明显(刚度 $0.25EI$ 时为 -433.48kN.m ;刚度 $4EI$ 时为 -834.84kN.m ,增加了92.6%),但刚度超过 $2EI$ 后弯矩变化变小;前排桩桩身弯矩随着排桩刚度增大而增大,增幅一直较大($0.25EI$ 时为 -333.69kN.m , $4EI$ 时为 -1190.8kN.m ,增加了257%)。

可见增大排桩刚度对减小桩顶位移作用不大,却大大增加了桩身弯矩,排桩刚度主要受桩体模量、桩径和壁厚影响,换句话说,若通过增大桩径和壁厚,或增加桩体配筋达到减小筒桩侧向变形的目的不合适。

(3) 系梁刚度的影响

图 10、11 是不同系梁刚度下前后排桩水平向位移的情况。由图可见,系梁刚度对桩身上部水平位移的影响比较大。随着系梁刚度增大,桩身上部水平位移逐渐减小。系梁刚度达到 $2EI$ 以后,继续增大系梁刚度对减小桩身水平位移的作用已经很小。系梁刚度较大时,前后排桩水平位移曲线基本一致,说明前后排桩的相互作用得到加强。

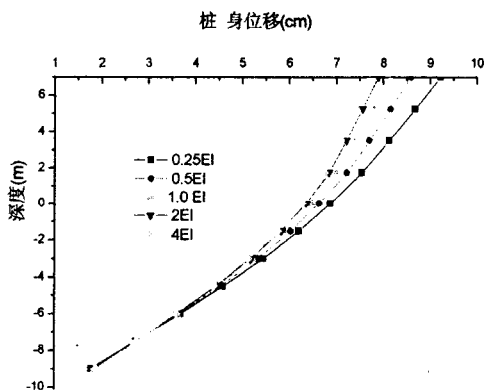


图 10 不同系梁刚度下后排桩水平位移

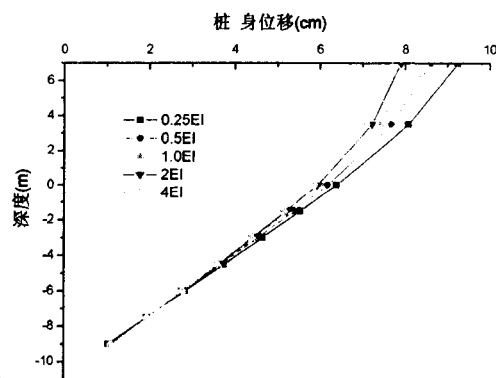


图 11 不同系梁刚度下前排桩水平位移

系梁刚度对后排桩弯矩的影响不大。由图 12 可知,系梁刚度增大后,后排桩桩顶弯矩有所减小,桩身最大正弯矩和最大负弯矩却略有增加。系梁刚度对前排桩弯矩的影响较大,图 13 为不同系梁刚度时的前排桩弯矩图,随着系梁刚度的增大,前排桩桩顶弯矩、桩身最大正、最大负弯矩均有所减小,前排桩弯矩曲线形式在系梁刚度达到 $4EI$ 时发生改变,最大负弯矩的位置往下移动,发生在泥面位置,在砂砾层顶面位置出现反弯点,这是因为系梁对前排桩的约束加强了。

可见,提高系梁刚度可以有效减小侧向变形,虽然后排桩桩身弯矩也会随之增大但增幅不大,而且前排桩桩身弯矩有较小的趋势,因此提高系梁刚度是减小侧向变形的有效措施。通常的做法是增大系梁截面尺寸,比如说增大梁高,或者增加配筋。

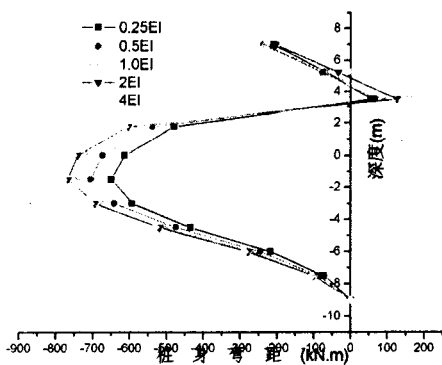


图 12 不同系梁刚度下后排桩弯矩

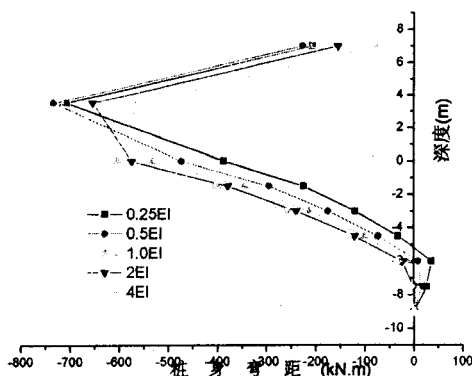


图 13 不同系梁刚度下前排桩弯矩

(4) 系梁位置的影响

初始计算参数中系梁距桩顶 3.5m, 为考虑不同系梁位置对筒桩工作性状的影响, 对系梁距桩顶 1.75m、5.25m、7m 的情况进行了计算。

计算结果表明, 当系梁位置逐渐下移靠近泥面时, 后排桩桩身位移逐渐减小, 前排桩桩身位移在泥面以上部分减小, 泥面以下部分则增大, 不过变化不大, 如系梁距桩顶 1.75m 时, 桩顶位移为 0.0836m; 系梁距桩顶 7m 时, 桩顶位移 0.0788m, 仅减小了 4.8mm。系梁位置下移后, 前后排桩的位移曲线逐步接近, 因为结构的整体性加强了。

前后排桩的桩身弯矩曲线形式随系梁位置下移也会有所变化, 后排桩反弯点和最大弯矩的位置以及前排桩最大弯矩的位置也会下移。后排桩桩身最大弯矩当系梁位置距离桩顶 1.75m 时为 -786.72kN.m, 系梁距离桩顶 7m 时为 -571.41kN.m, 减小了 27.3%; 前排桩桩身最大弯矩变化则很小。

因而适当下移系梁位置可以提高筒桩结构整体刚度, 虽然桩顶位移减小得不多, 但后排桩桩身弯矩会减小, 因此设计时可以考虑, 当然还要结合结构功能、景观要求和施工条件等综合确定。

(5) 海底土体弹性模量的影响

由图 5 可见, 筒桩要穿过 6m 厚的淤泥质土进入砾砂持力层, 这部分土体对筒桩稳定和变形影响如何值得关注, 尤其对施工期而言。

图 14, 15 给出了不同土体弹性模量对应的前后排桩水平位移, 前后排桩最大水平位移都发生在桩顶处, 然后随深度逐渐递减, 桩底处位移最小。由于压顶梁和中间系梁的作用, 前后排桩之间的相互作用得到加强, 前后排桩的位移曲线形式非常相似。前后排桩水平位移随着淤泥质土土体弹性模量的增大而减小, 位移曲线随着弹性模量的增大, 逐渐变陡, 桩顶与桩底的位移差别也逐渐减小。

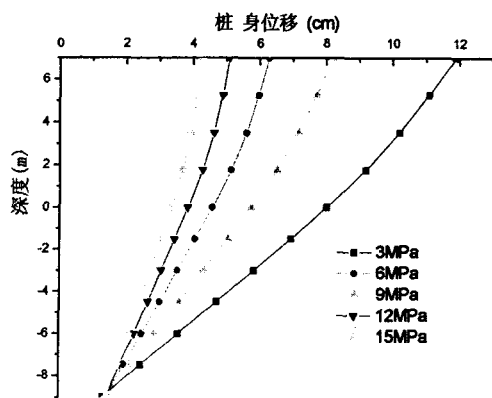


图 14 不同土体弹性模量下前排桩水平位移

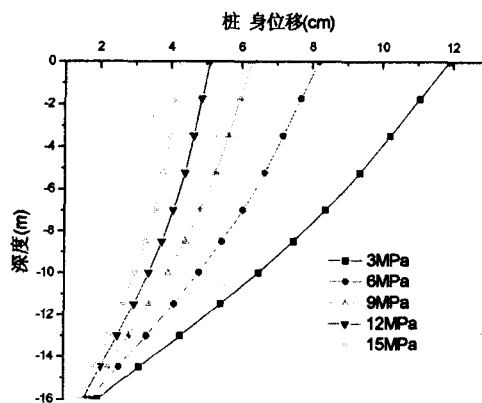


图 15 不同土体弹性模量下后排桩水平位移

淤泥质土对前后排桩弯矩的影响非常显著。由图 16、17 可知, 淤泥质土弹性模量增大时, 虽然前、后排桩桩顶处弯矩和桩身最大正弯矩变化不大, 但桩身最大负弯矩却显著减小, 因此提高淤泥质土弹性模量可以有效减小筒桩侧向变形, 并大大减小前后排桩最大桩身弯矩。

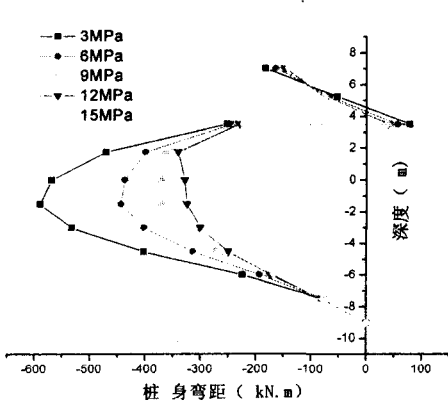


图 16 不同土体弹性模量下前排桩弯矩

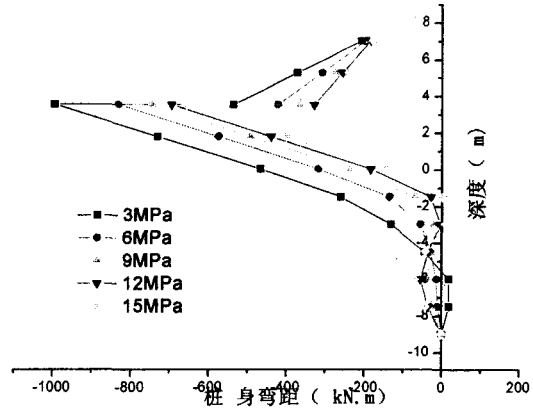


图 17 不同土体弹性模量下后排桩弯矩

(6) 抛石的影响

由上节结果可知,对淤泥质土体进行处理可以有效提高筒桩海堤结构的稳定性,常用的抛石法不仅可以加固海底地基,还起到消浪作用。为确定合适的抛石范围B(见图18),分别取 $B=2d, 3d, 4d, 6d$ (d 为筒桩外径)计算,设计抛石层高2m,抛石外侧的坡比为1:1.5,将抛石当作一层土体单元来模拟,弹性模量为 $2 \times 10^4 \text{MPa}$,泊松比0.3,重度 20kN/m^3 。图19,20是不抛石及不同抛石范围时前后排桩的水平位移。由图可见,抛石的影响非常大,随着抛石范围增大,桩身水平位移不断减小。抛石对桩身上部水平位移的影响远大于对桩端的影响。抛石后,位移曲线变陡,桩身不同位置处位移差别减小,当抛石范围达到4d时,最大水平位移已不在桩顶,而在泥面处。

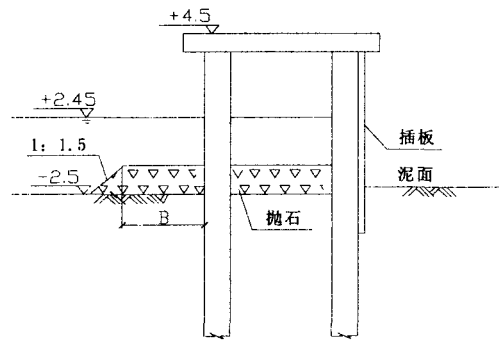


图 18 抛石范围示意图

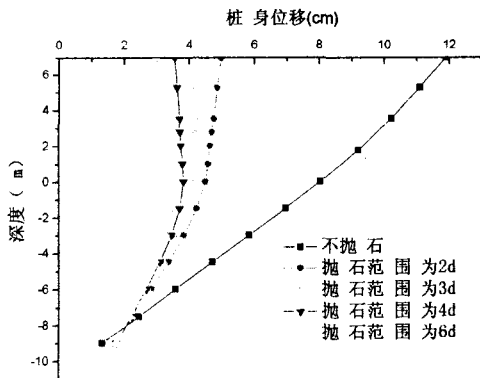


图 19 不同抛石范围下前排桩水平位移

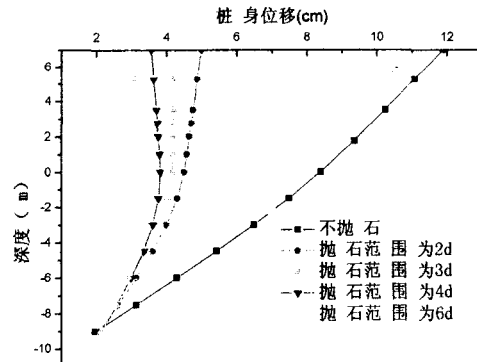


图 20 不同抛石范围下后排桩水平位移

抛石与否对前后排桩弯矩影响也很显著。抛石后，前、后排桩桩顶弯矩和抛石顶部以上桩身弯矩有所减小，桩身最大负弯矩却随之增大，如图 21、22 所示。相比而言，抛石范围对桩身弯矩的影响不是很大，尤其是当抛石范围达到 4d 以后，桩身弯矩基本不变。

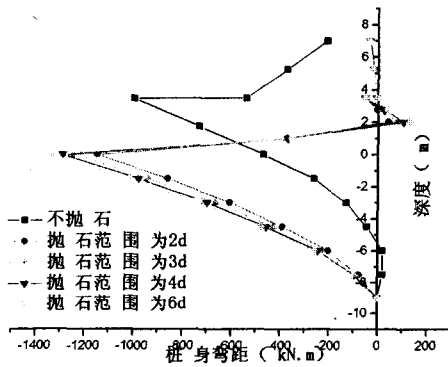


图 21 不同抛石范围下前排桩弯矩

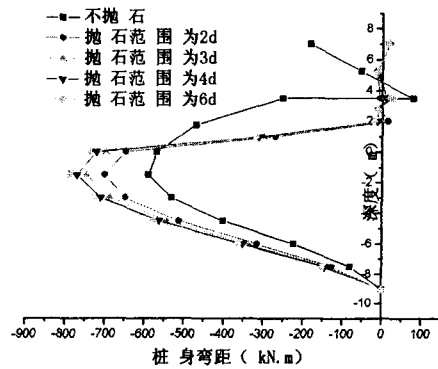


图 22 不同抛石范围下后排桩弯矩

计算表明，抛石可以有效减小桩身侧向变形，但是会增大前后排桩桩身弯矩，抛石范围达到 4d 以后，抛石范围对桩身弯矩的影响已经很小，因此筒桩海堤堤前可以抛石护堤，考虑到经济因素，建议抛石范围 B 为 3d。

2. 施工条件下最不利荷载组合

施工阶段结构受力情况见图 6，计算发现，波浪力作用下筒桩海堤结构的内力随排距、排桩刚度、系梁刚度、系梁位置、土体模量等因素的变化规律与正常使用条件下最不利荷载组合时基本相同，因此不再列出全部分析结果，只给出该荷载下初始参数计算结果，并与正常使用条件下最不利荷载组合（填土作用）的结果比较。

由图23, 24可知，不同工况下前后排桩桩身位移曲线的形式基本都为直线，由于荷载作用方向不同，位移方向也相反。桩身最大位移都发生在桩顶位置。波浪力作用下，前后排桩桩身位移曲线基本保持一致，表明波浪力作用下，前后排桩整体性较好，基本同步变形。

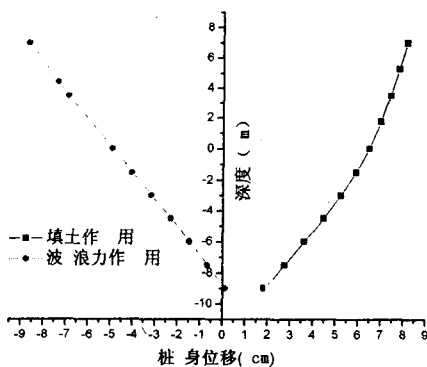


图 23 不同荷载条件下后排桩水平位移

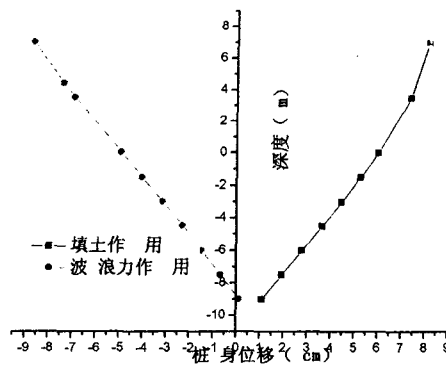


图 24 不同工况下前排桩水平位移

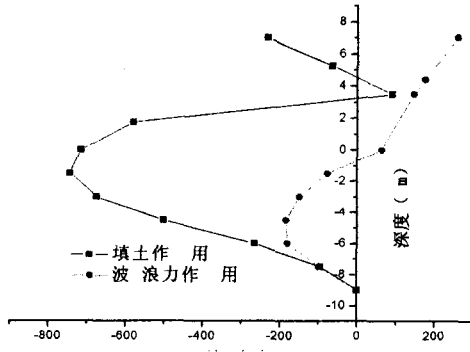


图25 不同荷载下后排桩弯矩

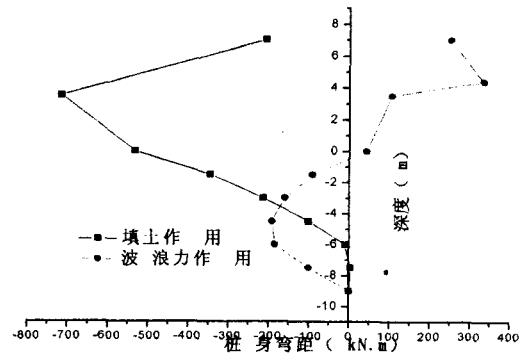


图26 不同荷载下前排桩弯矩

由图25可知，不同荷载下后排桩桩身弯矩曲线形式差别较大。填土作用下，桩身最大弯矩为负弯矩，发生在泥面以下1m左右的位置；波浪力作用下，桩顶弯矩即为最大桩身弯矩，符号为正。两种情况下，桩顶弯矩方向相反。填土作用下，后排桩在系梁位置上下左右会出现两个反弯点，在系梁位置弯矩曲线会发生突变；而在波浪力作用下，反弯点出现在泥面以下附近位置，且系梁位置弯矩变化较为平缓。前排桩的弯矩变化与后排桩类似，见图26。

由于本工程填土荷载较大，波浪荷载较小，因此填土作用下桩身位移和桩身弯矩都较大，比较而言，正常使用条件下最不利荷载组合较危险。

3. 结构优化设计

充分运用上述研究成果，对筒桩海堤结构进行优化。针对文中研究的工程，具体体现在：

(1) 对海堤淤泥质土进行处理，取抛石范围 $B=4.5\text{m}$ ，使其土体模量达到 8MPa ，泊松比 $\nu=0.4$ ；

(2) 系梁刚度提高2倍；

(3) 排距为 6m ；

(4) 系梁距桩顶距离不变；筒桩桩径、壁厚不变。

计算结果表明，优化以后桩顶位移为 0.25cm ，远远小于优化前结果；后排桩最大桩身弯矩为 -712kN.m ，前排桩最大桩身弯矩为 1082kN.m 。桩身所能承受的极限弯矩可根据《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ267-98)^[8]计算，对本工程单体筒桩，计算得到极限弯矩为 1772.47kN.m ，由此可见，前后排桩桩身弯矩均未超出桩身极限弯矩。

筒桩间用系梁和压顶梁刚性连接，因此整体刚度较大，整体稳定计算简化为水泥土重力式挡土结构模式^[9]，表2列出了正常使用下最不利荷载组合和施工条件下最不利荷载组合的抗滑移、抗倾覆稳定计算结果。

不同工况下筒桩海堤结构稳定性验算

表2

工况	抗倾覆	抗滑移
正常使用下最不利荷载组合	$\gamma_d = 1.64 > 1.5$ 满足规范要求	$\gamma_d = 2.96 > 1.4$ 满足规范要求
施工条件下最不利荷载组合	$\gamma_d = 1.53 > 1.5$ 满足规范要求	$\gamma_d = 2.1 > 1.4$ 满足规范要求

由表2计算结果可知,该工程筒桩海堤的稳定性满足规范要求。

适用性研究

筒桩海堤作为一种新型海堤结构有广阔的发展前景,但并不意味任意情况下均适用,选择此结构应注意以下要求:

① 深度要求(小于25m)

就目前筒桩的施工能力而言,桩长最长可达25m左右;若处理深度大于此值就要接桩,海上接桩不方便,而且接桩处的桩身质量难以保证。从这个角度说,选用该结构应满足深度限制条件。

② 地层要求(没有硬夹层和浮泥层)

筒桩施工要打设内、外套管,如遇硬夹层就难穿透进入下卧软土,对较密实的砾砂、砾石层也不能进入较深(一般只能进入1~2m),因而如果工程地基中有较厚的(3~4m以上)硬粘土层或密度较高的砾石层夹层,则不宜选用。

此外地层中的浮泥层对筒桩连续一次性浇筑不利,会大大影响施工进度。因为土质较软时,向上挤出的浮泥或稀软的淤泥在成孔器上拔时会下沉,影响筒壁混凝土厚度的均匀性。为避免其严重的下沉反压作用,灌注混凝土时必须加较长的外护筒,这会使施工难度增加,造价提高,成桩时间亦相应延长。

③ 施工要求

对筒桩结构海堤而言,施工在海上进行,此时,应充分考虑波浪、潮差、流速、水深等条件对海上排架施工的影响。如果周围环境不利于施工,也要慎重考虑。

本文广东惠州某工程的地质条件非常适宜选用筒桩海堤结构,该工程上部地层为淤泥或淤泥质亚粘土,含一定的粉砂,很少有浮泥层,也没有硬夹层,下伏砾砂残积土物理力学性质良好,可作筒桩持力层,大大缩短了桩长,提高了施工进度,降低了单桩成本。工程所在海区的水文、气象条件对施工也十分有利,因而该工程采用筒桩结构海堤十分适合。

我国东南沿海涂面较低,堤前水深较大,软土深厚,在这样的地段若采用该结构,一是桩长不能满足要求(需接桩),二是结构不能负荷15~18m高的填土水平荷载(水平向承载力不够),因而不一定适合。

结论

本文对新型海堤结构——筒桩结构海堤进行了研究,重点研究了排距、排桩刚度、系梁刚度和位置、淤泥土体模量对结构内力和变形的影响,得到了以下结论:

(1)增大筒桩排距可以减小筒桩侧向变形,但排距达到一定数值后继续增大排距效果不大,而且增大排距会增加前排桩的弯矩,计算结果表明 $4\sim 6d$ (d 为筒桩外径)的排距比较合适。

(2)增大排桩刚度会大幅度提高桩身弯矩,但对减小筒桩侧向变形效果不明显,因此通过提高筒桩桩径和壁厚或增加配筋来减小筒桩侧向变形的做法不可取。

(3)增大系梁刚度对减小筒桩侧向变形效果非常明显,虽然后排桩桩身弯矩有所增大,但增幅不大,而且前排桩桩身弯矩也有减小的趋势,因此,增大系梁尺寸或增加系梁配筋可

以有效减小侧向变形。

(4) 适当下移系梁位置可以减小桩顶位移, 虽然效果不是很明显, 却可以提高筒桩结构整体刚度, 而且后排桩桩身弯矩有所减小, 因此设计时可以考虑将系梁位置适当下移。

(5) 海底淤泥进行抛石处理可以有效减小筒桩海堤的侧向变形, 还可以提高海堤的整体稳定性, 防止波浪冲刷带走堤底泥沙, 因此建议采用。研究表明, 当抛石范围 $B=3d$ 时, 筒桩侧向变形较小, 而且前后排桩最大桩身弯矩增幅不大。

(6) 筒桩海堤结构有很多优点, 但应用时一定要注意其适用条件。若涂面较低, 且持力层较深, 超出筒桩目前施工最大桩长的情况, 则要慎重考虑, 或结合其它措施联合使用。

(7) 筒桩海堤结构的研究刚起步, 本文研究成果对实际工程设计有很大帮助, 后续研究应结合更多实际工程, 争取早日出台相关规程、规范。

参考文献

- [1] 王哲. 大直径灌注筒桩承载性状研究[博士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [2] 蔡袁强, 阮连法, 吴世明, 陈云敏. 软粘土地基基坑开挖中双排桩式围护结构的数值分析及应用[J], 建筑结构学报, 1999, 20(4): P65~71.
- [3] 俞建霖, 曾开华等. 深埋重力-门架式围护结构性状研究与应用[J], 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): P1578~1584.
- [4] 熊巨华, 杨敏等. 水泥土复合式围护结构的稳定性验算方法[J]. 工业建筑, 1999, 29(8): P32~43
- [5] 中华人民共和国交通部, 海港水文规范(JTJ 213-98)[S], 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [6] 郑尔康, 姜贤放等. 大亚湾石化区筒桩结构海堤及相关工程优化设计报告, 铁道第四勘察设计院大亚湾分院, 2003.
- [7] 张耀东. 深埋重力-门架式围护结构性状研究[硕士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 2000.
- [8] 中华人民共和国交通部, 港口工程混凝土结构设计规范(JTJ 267-98)局部修订(桩的水平承载力设计)[S], 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [9] 建筑基坑工程技术规范(YB9258-97)[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

Effect on seawall by using large diameter cast-in-place tubular piles and its application

LIU Wei-wei¹ ZHOU Jian²

(1. China Construction First Division Group Construction & Development Co., Ltd, Beijing, 100102, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China)

Abstract: Seawall constructed by using large diameter cast-in-place tubular piles is a new structure type. Through equivalent stiffness method the structure was simplified into plain strain problem, and different effects, such as array pitch, stiffness of pile, stiffness of collar beam and its location, different soil modulus were studied through numerical analysis. Results showed that enlarged array pitch can decrease lateral deformation and its value of 4-6 times of pile outer diameter was suitable. Increasing pile diameter and wall thickness was not worth thinking while large section of collar beam or using reinforced concrete would be a good option. Moving down the collar beam from the top can not only decrease the displacement of pile top, but also stabilize the structure and riprap stones have the same effect. This new structure, with smallest cross-section and combining the infrastructure and upper structure as a whole body, has dominant advantage and remarkable profits. Though this type of structure has lots of advantages it cannot be used in every situation, especially those with deeper supporting course, due to the pile length limit caused by present construction technology.

Key words: large diameter cast-in-situ tubular piles; seawall; applicability

填海工程中大直径现浇薄壁筒桩结构海堤的应用*

刘卫未 张杰

(浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

【摘要】介绍了大直径现浇混凝土薄壁筒桩的特点及筒桩结构海堤的设计计算及海堤的施工流程。该桩型质量可靠、造价低、承载力高,能有效地提高地基承载力和减小地基沉降,非常适合于在围海工程中应用。

【关键词】大直径现浇砼薄壁筒桩;围堤

引言

大直径现浇混凝土薄壁筒桩(简称CTP桩)结构直立式海堤从断面形式上可以划为陡墙式海堤一类,但与传统陡墙式海堤有所不同,它的堤身和基础全部由筒桩组成,因此它可以解决传统海堤工期长、工后沉降大和不均匀沉降大的缺点。同时筒桩可以灵活组成各种形式的组合,形成单体排列的联体,也可用系梁连成空间框架结构,组成各种支挡建筑和消浪设施,所以这种结构不仅受力能力强而且功能多、造型美观,增加堤身可供使用的空间。因此,它与传统海堤设计有所不同。筒桩海堤结构对持力层的要求较高,如果良好持力层的埋深较大,超过了筒桩可以达到的范围,或者在浅部存在硬壳层,筒桩难以穿透到达持力层的

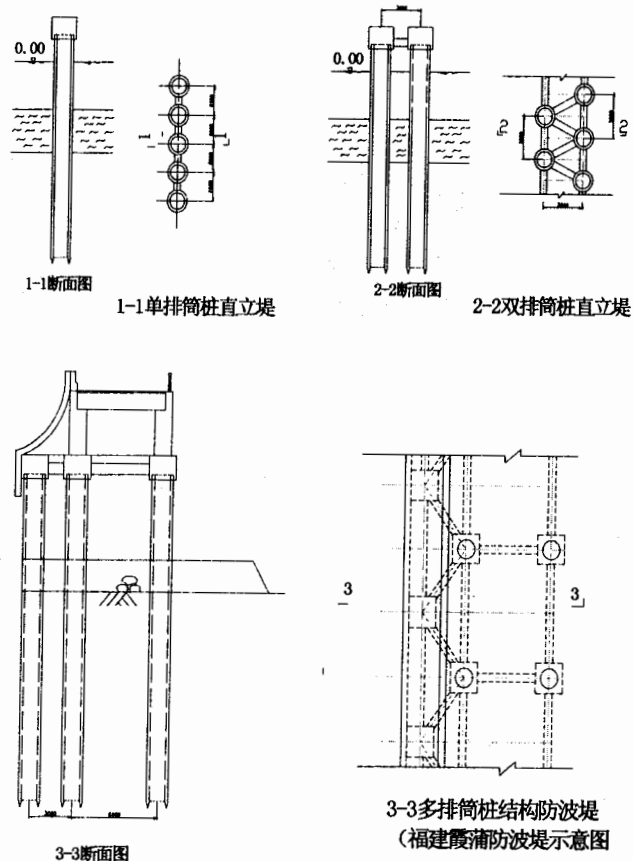


图1 筒桩结构堤示意图

* 收稿日期: 2008年8月

情况,筒桩是不合适的。另外如果海区泥面较低,水深和波浪较大,会导致堤高增大,相应的填土和波浪力等水平荷载也较大,筒桩海底结构的水平承载力不一定满足条件,也不合适。

近年来,筒桩结构栅栏式透空防波堤已得到迅速发展,其结构形式常见的有:单排结构,横断面中仅一排桩(包括联体),常用在高滩围堤中;双排结构,横断面中有两排桩,常用在透空防波堤中;多排结构,横断面中有三排或三排以上的桩,常用在强浪压透空防波堤^[1],其示意图见图1。

海堤结构设计的步骤

海堤结构设计主要包括以下几个步骤:

1. 根据海堤拟建场地的地质和海洋水文资料,确定海堤堤顶高程,并计算波浪力大小和作用位置;
2. 根据工程的地理位置、建筑物的重要程度、堤高、堤前水深、场地地质情况、水流及波浪特性等因素初步选定海堤断面形式和结构型式,如果有两种或两种以上的堤型满足要求,应该分别进行考虑,并对比分析;
3. 如果采用桩基础,对单桩竖向和水平向承载力要进行验算;
4. 根据堤顶高程和波浪特性确定选用堤型的计算断面,分别进行堤身和地基的强度、变形以及稳定性计算,根据计算结果判断选用的堤型是否合适,并对海堤断面尺寸进行调整;
5. 进行地基沉降计算。

大亚湾石化工业区围海工程

大亚湾石化工业区围海工程填海区位于惠州奥头港东侧,西起南边灶,东至螺子角一带,海堤总长8.8公里,海域宽约1公里,面积约6.6平方公里。

进行具体设计时,先要确定相关参数,如水位、波浪海流、工程地质条件、暂时和永久作用荷载、高程等。

1. 设计波浪要素

大亚湾湾口朝向SE,湾内有众多岛屿遮挡,波浪一般不大,其中大亚湾口至马鞭洲、碧甲一带最大,霞海、亚婆角、喜洲等处波浪略小,大亚湾西部哑铃湾、奥头湾一带波浪最小。波浪要素参见表1。

设计波浪要素

表1

波向	水位	重现期	$H_{1\%}$	$H_{4\%}$	$H_{13\%}$	波高 H (m)	周期 T (a)	波长 L (m)
NE	设计高水位	50年	3.20	2.76	2.29	1.53	6.2	46.1
	设计低水位	50年	2.99	2.61	2.22	1.52	5.9	37.8
SW	设计高水位	50年	2.80	2.40	1.98	1.31	5.7	41.2
	设计低水位	50年	2.57	2.23	1.88	1.27	5.6	33.4
SE	设计高水位	50年	3.62	3.15	2.65	1.78	7.4	57.4
	设计低水位	50年	2.93	2.19	2.19	1.50	7.4	49.3

2. 工程地质条件

根据勘探表明,本填海区地层自上至下分为:第四系沉积层、残积层、岩石风化层。沉积层主要由淤泥或淤泥质亚粘土组成,层厚在8m以内;残积层主要由石英岩残积土组成,埋深不大,在2~8m左右。表2为围海范围内某典型断面土层物理力学性质指标(参照《大亚湾石化区筒桩结构海堤及相关工程优化设计报告》),堤后吹填淤泥质砂。

地基土物理力学性质指标

表2

名称	厚度(m)	γ (kN/m ³)	C (kPa)	φ (°)	E (MPa)	μ	K_0
吹填淤泥质砂	7	17.0	9	18	3	0.45	0.51
淤泥质土	6	18.5	15	21	3	0.41	0.46
砾砂	5	20.0	17	40	12	0.31	0.39
基岩		25.0			2×10^4	0.3	0.39

3. 海堤及陆域高程

根据《海港水文规范》CJTJ213-98相关规定,由大亚湾填海区设计波浪要素,按照下式确定海堤堤顶标高:堤顶高程=设计高水位+设计风浪爬高+安全超高计算,可得堤顶高程为+4.5m;填海区地基加固后形成陆域标高最低+4.5m。

4. 海堤结构选型

所选典型断面处(见图2)涂面高程为-2.5m,因此海堤提高至少应大于7m,但是填海区内有众多岛屿遮挡,波浪并不是很大,因此按照常规抛石堤设计的话,应该选用斜坡式断面形式。

① 围堤区域的上部地层为淤泥或淤泥质亚粘土,厚度在8m以内,此层土体含水量高,孔隙比大,天然地基承载力极低,厚度变化大(2~8m),由其它方法处理(如爆破挤淤法、塑料板排水固结法、深层搅拌法.....等)难度均较大,效果不太理想。而该地层条件对筒桩施工十分理想。因为若用筒桩处理30m以上的软土,成孔器长度难以达到要求,在海上施工不方便。

② 筒桩在海上施工时,对软土层的强度有一定的要求,如遇硬塑层就难以穿透,对较密实的砾砂、砾石层也不能进入较深(一般只能进入1~2m),所以遇到较厚的(3~4m以上)硬粘土层或密度较高的砾石层夹层,难以穿透进入下面的软土层。大亚湾围堤区要处理的软土层不仅厚度不大(小于8m),而且没有硬质夹层,十分适合筒桩施工。

③ 大亚湾的淤泥层含有一定量的粉砂成份,即通常所谓的浮泥层很少或缺失,这对筒桩施工连续一次性浇灌很有利,可以大大提高施工进度。因为土质较软情况下,向上挤出的浮泥或稀软的淤泥在成孔器上拔时会下沉,影响筒壁混凝土厚度的均匀性。为避免其严重的下

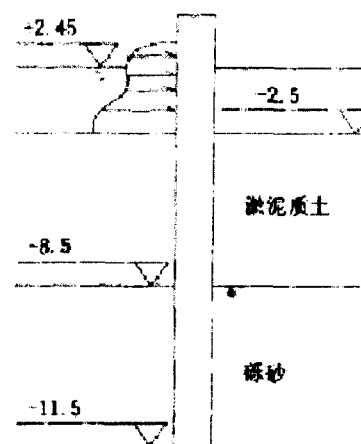


图2 海堤典型断面图

沉反压作用，灌注混凝土时必须加较长的外护筒，这会使施工难度增加，造价提高，成桩时间亦相应延长。

④ 大亚湾围堤区的砂砾残积土物理力学性质良好，可作筒桩基础的持力层，同时深度不大(2~8m左右)，这大大缩短了桩长，提高了施工进度，降低了单桩成本。

⑤ 本海区的波浪、潮差、流速、水深等条件十分理想，采用海上排架施工十分有利，可大幅度提高施工进度。

下面对筒桩海堤进行桩身变形、强度、以及堤身稳定性验算，验证筒桩海堤在大亚湾石化区围海工程中的适用性。

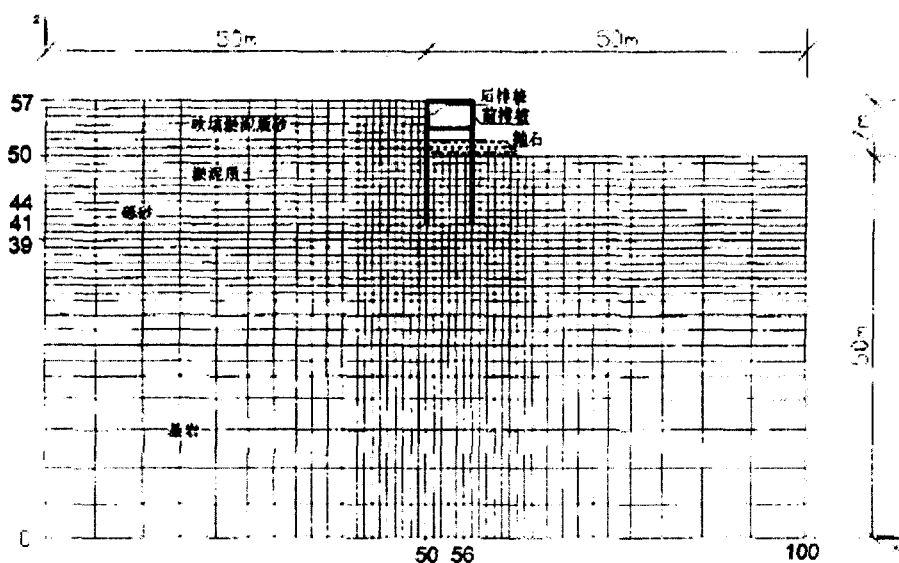


图3 优化后大直径现浇薄壁筒桩海堤结构计算有限元网格划分图

a. 筒桩变形和强度验算

对淤泥质土进行处理，其弹性模量取 $E=8\text{MPa}$ ，泊松比取 $\nu=0.4$ ，系梁刚度提高2倍，即系梁尺寸取为 $3.5 \times 7(\text{m}^2)$ ，筒桩桩径和壁厚不变，排距为6m，系梁距离桩顶5.25m，抛石范围 $B=4.5\text{m}$ ，调整以后的筒桩海堤有限元计算模型见图3。计算结果表明，桩顶位移为0.25cm，桩身弯矩如图4和图5示。后排桩桩身最大弯矩为 $-712\text{kN}\cdot\text{m}$ ，前排桩最大桩身弯矩为 $1082\text{kN}\cdot\text{m}$ 。桩身所能承受的极限弯矩可以根据《港口工程混凝土结构设计规范》(JTJ267-98)按照下式来计算：

$$M_u = f_c A (r_1 + r_2) \frac{\sin \pi a}{2\pi} + f_y A_s r_s \frac{(\sin \pi a + \sin \pi a_1)}{\pi}$$

$$a_1 = 1 - 1.5a$$

式中 A ——构件截面面积(mm^2)；

A_s ——全部纵向钢筋的截面面积(mm^2)；

R_1, r_2 ——环形截面的内、外半径(mm)；

r_s ——纵向钢筋所在圆周的半径(mm);
 α ——受压区混凝土截面面积与全截面面积的比值;
 α_t ——受拉纵向钢筋截面面积与全部纵向钢筋截面面积的比值,当 $\alpha > 2/3$ 时,取 $\alpha_t = 0$
 f_c 是C40混凝土抗压强度设计值,为 21.5N/mm^2 , f_y 是II级钢筋抗拉强度设计值,为 310N/mm^2 。

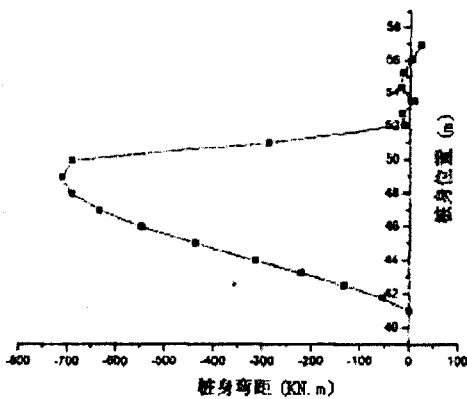


图4 优化后后排桩桩身弯矩

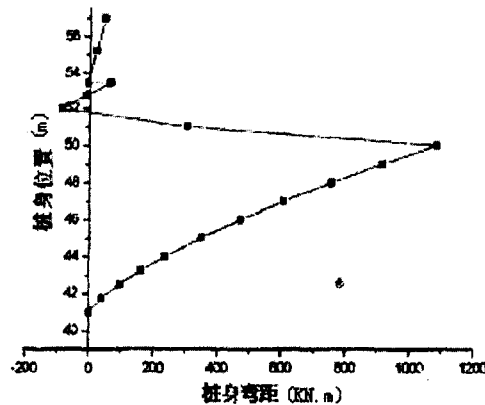


图5 优化后前排桩桩身弯矩

筒桩外径为 $\Phi 1500\text{mm}$,壁厚 180mm ,混凝土强度为C40,配纵向钢筋为II级钢筋 $28\Phi 20$,计算得到极限弯矩为 $1772.47\text{kN}\cdot\text{m}$,由此可见,前后排桩桩身弯矩均未超出筒桩桩身极限弯矩。

b. 海堤稳定性验算

由于筒桩之间采用系梁和压顶梁刚性连接,筒桩海堤整体刚度较大,因此海堤整体稳定计算采取水泥土重力式挡土结构模式,按照第三章提到的两种工况最不利荷载组合来进行。

- (1) 正常使用下最不利荷载组合,即只有桩后填土作用;
- (2) 施工条件下最不利荷载组合,即只有波浪力作用。

倾覆稳定抗力分项系数按下式计算:

$$\gamma_d = \frac{\sum M_{EP} + G \frac{B}{2}}{\sum M_{Ea} + \sum M_w}$$

水平滑动稳定性抗力分项系数按下式计算:

$$\gamma_d = \frac{\sum E_P + G \tan \varphi_{cu} + G_{cu} B}{\sum M_{Ea} + \sum M_w}$$

相关符号参见《建筑基坑工程技术规范》(YB9258-9[S])。

表3列出了正常使用下最不利荷载组合和施工条件下最不利荷载组合的抗滑移、抗倾覆稳定计算结果。

筒桩海堤结构稳定性验算结果

表3

	抗倾覆	抗滑移
正常使用下最不利荷载	$\gamma_d = 1.64 > 1.5$	$\gamma_d = 2.96 > 1.4$
组合	满足规范要求	满足规范要求
施工条件下最不利荷载	$\gamma_d = 1.53 > 1.5$	$\gamma_d = 2.1 > 1.4$
组合	满足规范要求	满足规范要求

由表3的计算结果可知,筒桩海堤的稳定性满足规范要求。因此对大亚湾石化区的填海工程,筒桩海堤结构是适用的。

参考文献

- [1] 刘卫未. 水平荷载作用下大直径现浇混凝土薄壁筒桩性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 郭平, 胡明华, 周建等. 大直径现浇混凝土薄壁筒桩在围海工程中的应用研究[J], 水利水电技术, 2004, 35(5), 29-31.
- [3] 龚迪快, 夏唐代. 填海工程中PCC桩结构围堤的应用[J], 建筑结构, 2006, 36(10), 50-52.
- [4] 陆海源. 新型PCC桩结构直立式海堤技术开发及其抗弯性能研究[D], 南京: 河海大学, 2005.
- [5] 王哲, 龚晓南, 郭平等. 大直径薄壁灌注筒桩在堤防工程中的应用[J], 岩土工程学报, 2005, 27(1), 121-124

大直径现浇砼薄壁筒桩专业施工单位浙江省地质矿产工程公司概况

浙江省地质矿产工程公司创立于1958年,由建设部核定的地基与基础工程施工壹级企业。

公司现有职工2000余人,各类工程技术人员360人,能承担大中型项目施工的项目经理51人,其中一级项目经理15人,二级项目经理36人,涉外项目经理5人。

经营地基与基础工程施工、隧道工程施工、基坑支护设计及施工。持有外地施工企业进沪许可证,并取得上海钻孔灌注桩甲类专业资格证书。

公司拥有大直径现浇砼薄壁筒桩、大口径钻孔桩、预制桩、沉管桩、软土地基处理、坑探、地下连续墙、地下室围护、工程测量、地下管线探测、固体矿产勘查、水文等设备仪器600多台套。

四十多年来,公司完成大直径现浇砼薄壁筒桩工程近20项,40多万延米;矿山岩心钻探224万米,最大孔深1803米;水文地质、工程地质钻探勘察48万米,其中海上钻探2800米;找水成井1220眼,最大井深260米;大型重点项目的工程地质勘察项目18个;地下工程掘进各类断面规格的探洞、隧道、涵洞、斜井、竖井等27万米,其中上海金山石化总厂码头工程地质勘察等被石化部评为优质勘察工程;杭州西湖引水隧道被评为优质工程,《人民日报》及中央、省电视台曾作专题报导。

公司视质量为生命,以科技进步为动力,全面推行工程项目质量管理责任制,严格按照ISO9002质量体系的要求组织项目实施,是省内首家通过ISO9002质量体系认证的地基与基础施工企业。公司积极引进新工艺,大力提高工程施工中的技术含量,除采用常用的岩土工程各种工法外,还引进大功率高效能台湾产S-500自行式反循环钻机、意大利R-618干取土钻机及德国宝峨BS-650型地连墙等施工设备。

公司弘扬创业、守信、团结、奉献的地矿精神,恪守质量为本,信誉至上的经营宗旨,连续五年获得AAA级企业;连续三届(六年)获得“重合同守信用”单位;连续九年获得浙江省进沪施工“优胜单位”称号,先后被评为“杭州市文明单位”和“浙江省文明单位”。

公司地址: 杭州市航海路218号 联系电话: 86954891 网址: www.zjssjs.com

浙江省地质矿产工程公司

联体薄壁筒桩施工简介*

赵汉金 黄定西

(浙江省地质矿产工程公司 杭州 310016)

【摘要】通过联体现浇混凝土薄壁筒桩在实际工程中的应用,介绍其施工技术、施工工艺、检测、围护效果。

【关键词】现浇混凝土薄壁筒桩;地基加固;软土地基;施工工艺

联体现浇薄壁筒桩施工技术

现浇混凝土薄壁筒桩是采取振动沉管、下钢筋笼、灌注混凝土、振动拔管工序形成的混凝土桩。其基本技术原理是利用沉腔上部振动锤的振动力,将内外双层钢管所形成的环形腔体在预制桩尖的保护下打入设计深度,在腔体内灌注混凝土,之后边振动边拔管,在土体形成环形混凝土筒桩。而联体薄壁筒桩是利用特殊的多套成孔器连续施工形成的挡土止水合一薄壁混凝土桩墙。

联体薄壁筒桩作为围护结构桩,具有设计桩径比较大(直径1m)、施工速度快、工程造价低、无泥浆污染等优点。主要可应用基坑支护、水利堤坝、围海等工程。现以某出海闸导流堤工程为例介绍其工艺及加固效果。

工程概况

上海浦南东片出海闸导流堤工程是2002年上海市重点工程,地处杭州湾北岸,上海石化金山嘴老沪杭公路南侧。其主要作用是为了黄浦江的防汛排涝及水资源调配,改善浦南东片的水环境和航运条件。导堤长140米,结构见下图(图1)。

工程原设计采用两排 $\text{O}800\text{PHC}$ 管桩,桩长14米,在堤外侧桩顶以下4米用衬砌墙止水,墙后铺土工布,造价400万。经公司向上海水利设计院推荐,并联合向业主(上海水务局)提出修改原设计,采用 $\text{O}1000$ 现浇砼筒桩技术代替 $\text{O}800\text{PHC}$ 管桩,获准后经与上海水利设计院多次商讨,决定尝试用现浇筒桩制成地下空心连续墙,实现止水、挡土二墙合一。具体筒桩连续墙参数为:桩径1m,壁厚20cm,中间配 $28\text{O}16$,砼强度C30,桩与桩之间相互搭接咬合,设计15根桩联体为一幅,每幅间设伸缩缝,伸缩缝外用单管旋喷桩止水,上设 $1\text{m}\times 1.2\text{m}$ 压顶导梁。

* 收稿日期:2008年9月

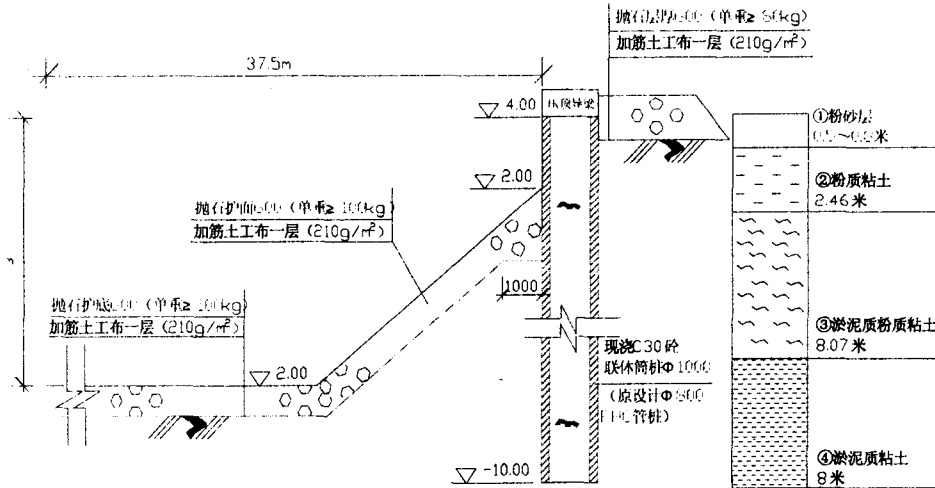


图1 导流堤标准断面

联体筒桩施工

1. 筒桩桩位放样

根据施工图坐标和高程进行导流堤定位和桩位放样,并且在导流堤两端及轴线上每隔30米点上设置固定标记(插上钢筋并浇灌混凝土护座),作为控制点。误差不超过5mm,桩位放样按桩心距1040mm布置,确定桩位中心后插上钢筋,后按桩心位置安放桩尖。

2. 制尖预制及埋设

对于自然地坪标高大于3.00m的导堤段,因潮位对联体筒桩施工几乎没有影响,因此桩尖制作后沿导堤墙按设计桩心距连续布置。但对于在高潮位时施工,桩尖不是预埋,是在施工平台上与成孔器内外管扣接后,用铅丝将桩尖与内外管固定后并保证放入水中不会有严重渗水,后将成孔器与前一成孔器扣接后,放到水下滩地表面,成孔器压紧桩尖后,方可成孔。

3. 桩机就位

桩机底座架坐在钢管上,钢轨架设在机台木上,机台木铺设在钢架平台上,依靠桩机配备的卷扬拉动钢绳实现向前滚动钢管而前移,横向拉动底座在钢管上滑移而横向移动。联体第一根桩成孔:待位置初步对中后,下放成孔器,使成孔器的内外钢管底端接近桩尖顶面,再调整纵横相对位置,使桩尖顶面凸台嵌入成孔器内外管间的腔内,实现完全对中,且对中后校正桩机底座水平和桅杆垂直度,垫实底座;后继桩成孔器就位首先与前成孔器的导接器相连接,微转成孔器使之与本桩尖相嵌套。

4. 联体筒桩施工工艺方法

专门加工5套带有公母扣导向槽的成孔器和一套液压夹持器。桩机就位后,启动振动器

将带有导接器的第 1#成孔器 (见图 2) 振动沉入土层至设计标高,成孔器脱离导接器后,利用桩机副卷扬起吊钢笼放入内外管环腔内,并加心标高控制,具体工艺流程 (见附图):

- ① 1 号成孔器下沉至设计标高,松开夹持器——
- ② 夹住 2 号成孔器在公母导向槽和 1 号咬合后下沉至设计标高,松开夹持器——
- ③ 夹住 3 号成孔器在公母导向槽和 2 号咬合后下沉至设计标高,松开夹持器——
- ④ 夹住 4 号成孔器在公母导向槽和 3 号咬合后下沉至设计标高,松开夹持器,——
- ⑤ 夹住 5 号成孔器在公母导向槽和 4 号咬合后下沉至设计标高,松开夹持器——
- ⑥ 在 1 号成孔器中下放钢筋笼,并灌注混凝土,振动拔管——
- ⑦ 夹住 1 号成孔器在公母导向槽和 5 号咬合后打 6 号孔下沉至设计标高,松开夹持器——
- ⑧ 在 2 号成孔器中下放钢筋笼,并灌注混凝土,振动拔管——
- ⑨ 将 2 号成孔器打 7 号孔,依次循环类推轮流成孔、下钢筋笼、浇注混凝土施工,形成地下联体筒桩构成的地下连续墙结构物。联体筒桩施工流程见图 2:

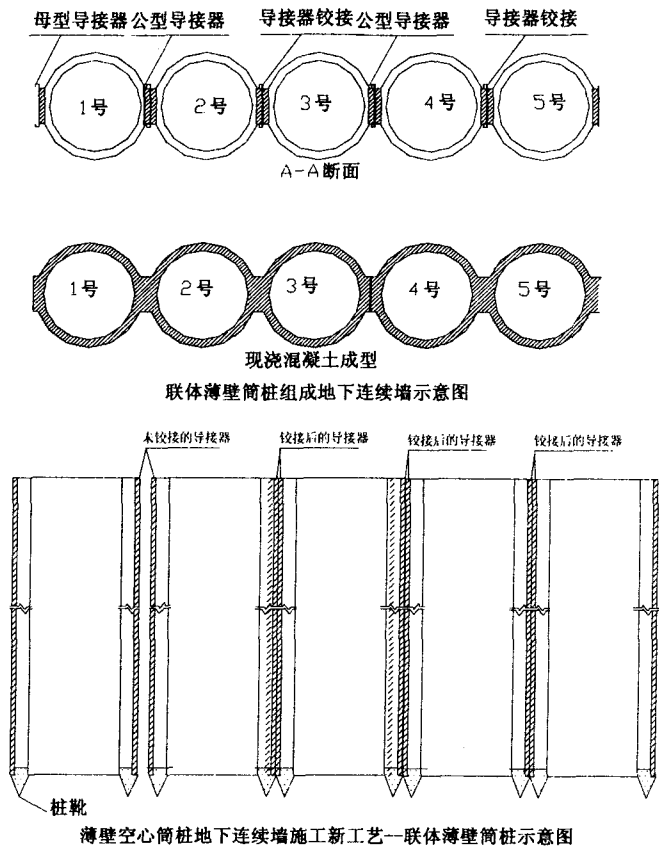


图 2 联体薄壁筒桩施工工艺流程图



图 3 联体筒桩施工图

5. 联体薄壁筒桩质量控制
(1) 成孔器下沉质量控制

- a. 成孔器定位偏差应小于 1cm。
- b. 成孔器应保证有 5 套以上连续施工, 否则将影响成孔器下沉垂直度。
- c. 成孔器垂直度允许偏差要小于 $L/50$ (L 为桩的长度), 因为成孔下沉时两付成孔器连接处是公母扣相嵌的, 如垂直度控制不好, 成孔器下沉将非常困难, 严重时损坏成孔器, 故控制好垂直度是确保成孔顺利与否的关键。
- d. 成孔深度控制偏差为 0—200mm。
- e. 沉桩时要求止水 (在桩尖上端铺盖编织袋、麻布、棉布等), 壁腔中不宜有过多水渗入, 应在无水时浇灌混凝土, 才能保证质量, 若成桩时发现漏水现象, 应配备微型深井泵抽水、待清除干净后方能灌注混凝土。当有泥进入时, 厚度超过 30cm, 应拔出沉孔器, 重下桩尖并沉管, 小于 30cm 不予处理。

(2) 桩身混凝土质量控制

联体筒桩混凝土质量控制要点:

- a. 壁厚为 180mm, 混凝土配合比中的骨料直径不宜过大, 应为 5-30mm 之间, 当有较多配筋时, 应为 5-25mm。
- b. 现浇筒桩不是水下混凝土, 而是常规混凝土, 其坍落度要求在 8-12cm。
- c. 要求在砼灌满成孔器后才允许上拔, 且上拔速度控制在 0.6 米/分钟。落实专人检查砼灌注情况, 监督操作手上拔速度。
- d. 筒桩壁厚要求均匀, 同时不容许有松散土质夹层。
- e. 钢筋笼制作要求及定位偏差控制参照沉管灌注桩施工规范。

联体筒桩桩身质量检测方法

联体筒桩桩身质量检测方法:

- a. 桩身成型完整性: 筒桩成桩后的筒壁应完整无损, 应抽样 1-2% 的桩进行筒内挖土观察, 观察桩身及联体搭接混凝土成型情况, 也可以垂直桩身钻取桩壁混凝土以测量壁厚, 从而判断桩的壁厚的均匀性及试验检测混凝土强度。
- b. 筒桩完整性检测: 按基桩低应变动力检测规程 (JGJ/T93-95) 执行, 但筒桩系空心管型桩, 因而动测时在桩体上应取 4 个测点 (均布桩壁四周)。
- c. 如设计部门需要对筒桩承载力评定时, 可与其他类型单桩静载试验规范进行, 但桩顶需进行盖帽处理后才能进行;
- d. 如主要受水平荷载作用的筒桩需对桩的弯能力评估时, 亦可按现行国家对单桩水平静荷载试验规范进行现场水平推力试验, 按建筑桩基技术规范 (JGJ94-94) 执行。

本工程通过随后进行的工程检测, 统计如下:

联体筒桩检测统计表

表 1

检测内容 筒桩参数		设计要求	检测方法	检测结果	检测单位	备注
1	桩身 砼强度	C30	桩身取芯 5 组	平均 34.46MPa 最低 31.5MPa	上海建科院检测站	筒桩侧向 3 米深取芯
2	桩身 完整性	桩身砼 完整	小应变抽 50%	全部合格, 没 有Ⅲ类Ⅳ类桩	上海勘测设计研究院	I类桩优良 率 78.4%
			超生波检测 2根 10组	综合评定桩身 砼完整		每根 5组通 长设置
3	两桩咬合 部位	要求砼连 续止水	咬合部位通 长检测	咬合部位砼结 构完整	上海勘测设计研究院	A123、A124 相邻两桩检 测
4	单桩水平 承载力		水平静载 试验	$f_{max}=540kN$, 最 大水平位移 27.56mm.	上海勘测设计研究院	桩头没有加 固, 破坏后 停止静载

结束语

通过检测、观测反映了联体筒桩的施工效果: 相邻筒桩间实现了相互咬合, 且桩形完整、实现挡土止水二墙合一, 达到了预期的效果。联体筒桩作为导流堤围护结构自 2000 年投入使用后效果良好。因此联体筒桩具有一定的推广价值。联体筒桩技术的成功施工, 创造了一个崭新的地下挡土止水二墙合一的施工技术。实践表明, 它在基坑围护、水利堤坝、填海围堰等领域都有施工速度快、工程造价低、处理效果好等经济和技术优势。



图 4

现浇混凝土薄壁筒桩施工工艺介绍*

赵汉金 黄定西

(浙江省地质矿产工程公司 杭州 310016)

[摘要] 现浇混凝土薄壁筒桩是谢庆道教授发明的一种加固软土地基的新桩型。其采用振动沉模、现场浇筑混凝土一次性成桩,加固软土地基施工速度快、工程造价低。文章介绍了现浇混凝土薄壁筒桩的技术原理、加固机理、施工设备、施工工艺、质量检测及工程应用。

[关键词] 现浇混凝土薄壁筒桩;软土地基加固;施工工艺;质量检测

引言

浙江省地处东南沿海,杭嘉湖、宁绍及甬台温地区不但软土层深厚,而且软土力学指标极差,因此高等级公路、高速铁路等大面积软土地基的处理方案显得尤其重要。目前公路软基处理中主要的施工方法有水泥土搅拌桩、塑料排水板、强夯法和真空预压、超载预压、桩基等加固方法。每种加固技术都有它的适用性和局限性。采用桩基加固软土地基,由于施工速度快,可缩短工期,可明显增加路基的稳定性,提高地基的承载力和减小变形。现场浇筑混凝土薄壁筒桩(以下简称“筒桩”)以其独特的构想具有设计桩径大、混凝土用量少、挤土少、施工速度快等技术优势。筒桩加固软土地基实现了造价低、承载力高、地基稳定性增加和地基沉降减少等目标。目前筒桩已在高速公路等领域地基处理中有了一定的应用:主要已应用于杭州绕城南线高速公路、上海东南片出海堤、杭千高速公路、杭宁高速公路、杭浦高速公路、07省道等工程中得到了应用,获得了较好的社会和经济效益。

筒桩地基加固原理

筒桩是采取振动沉模、内管排土、现场灌注混凝土、振动拔管工艺成桩。具体步骤是依靠振动锤的振动力将内外双层成孔器打入设计深度,在成孔器环型腔体内浇筑混凝土,灌满混凝土后振动拔管,形成薄壁混凝土筒桩。筒桩作为复合地基时,为了保证桩与土共同承担荷载,并调整桩与土之间竖向荷载及水平荷载的分担比例以及减少基础底面的应力集中问题,在桩顶设置褥垫层。成桩机理为:1) 模板作用。在振动力的作用下环形腔体成孔器沉入土中后浇筑混凝土,当振动模板提拔时,混凝土从成孔器下端进入环形槽孔内,空腹模板起到了护壁作用,因此不会出现缩壁和塌壁现象。从而成为成孔、护壁、浇筑一次性直接形成筒桩的工艺。2) 振捣作用:成孔器振动提拔时,对混凝土有连续振捣作用,使桩体充分振动密实,

* 收稿日期:2008年9月

由于混凝土向两侧挤压,而使筒桩壁厚度保证,混凝土密实。3)挤密作用。振动沉模大直径现浇混凝土薄壁管桩在施工过程中由于振动、挤压和排土等原因,可对桩间土起到少量的密实作用。

施工工艺介绍

1. 施工准备

- (1) 筒桩施工前应具备以下资料:工程地质勘察报告,施工设计图纸,建筑场地资料。
- (2) 施工前应进行施工图会审、设计技术交底;编制施工组织设计及审核确认;组织施工人员进行技术交底。
- (3) 打桩前应处理高空和地下障碍物。施工场地应平整处理,桩机移动的范围除应保证桩机垂直度的要求外,应考虑地面的承载力,施工场地及周围应保持排水畅通,以保证施工机械正常作业。
- (4) 桩基轴线的控制点和水准点应设在不受打桩影响的地点,开工前经复合后应妥善保护,施工中应经常复测。桩基轴线位置的允许偏差不得超过 20mm。
- (5) 筒桩工程施工前应进行试打桩,以检查设备、施工工艺、设计参数是否符合要求,数量不得少于 2 根。
- (6) 邻近原有建(构)筑物打桩时,应采取适当的隔振措施。
- (7) 供电:根据已选取的设备,单机电机功率 180KW。
- (8) 供水:主要用于成桩的砼搅拌,采用饮用水。
- (9) 施工机械配备:主要施工设备为:起重力 80-100T 特大型沉管桩架、DZ120 振动锤、外径 1000 内径 760 成孔器及其他辅助设备。

2. 筒桩施工工艺

筒桩施工工艺流程:桩位放样——桩尖埋设——桩机就位——振动沉管——浇注拔管——桩机移位。同一工点筒桩施工顺序:原则上先施工长桩后短桩,减少挤土效应。在施工过程中具体桩机施工走向则根据实际而定。筒桩施工工艺流程附图(见 P35 页图 1、图 2)。

(1) 桩位放样

根据设计图纸、业主提供的座标、尺寸、基准点,经计算、用全站仪或经纬仪测量建立起每个工点的桩位放样控制点,打入钢筋或木桩,插上保护标识。根据施工区内的控制点再测放每个桩位中心,插上竹筷或用石灰粉撒上“十字形”标志以示桩心位置。

(2) 桩尖预制及埋设

1) 桩尖的制作质量应符合下列规定:

① 桩尖的表面应平整、密实,掉角的深度不应超过 20 毫米,且局部蜂窝和掉角的缺损总面积不得超过该桩尖表面全部面积的 1%。

② 桩尖内外面圆度偏差不得大于桩尖直径的 1%,桩尖上端内外支承面平整度不超过 5mm。

③预制桩尖上应标明编号、制作日期,桩尖养护时间一般应达到28天,使用前混凝土强度应达到设计要求。

2) 桩位放样后,先清除桩位上的 $\text{O}1.0\text{m}$ 范围内的填碴,再埋设桩尖,桩尖定位采用拉十字线法检验、检查,桩尖中心和桩位中心偏差要小于20mm,埋好桩尖后的现场如图1所示。

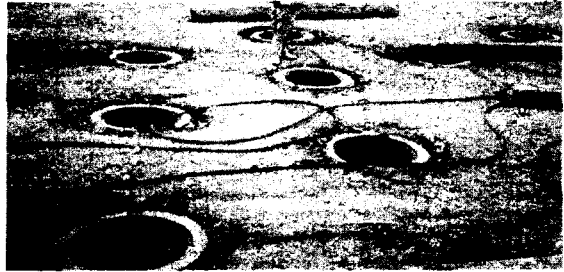


图1 桩尖埋设

(3) 桩机就位

桩机底座架坐在钢管上,钢管下垫机台枕木,依靠桩机配备的卷扬拉动钢绳实现向前在枕木上滚动钢管而前移,横向底座在钢管上滑移而横向移动。位置初步对中后,下放成孔器,使成孔器的内外钢管底端接近桩尖顶面,再调整纵横相对位置,使桩尖顶面凸台嵌入成孔器内外管间的腔内,桩尖中心应与成孔器中心线重合。为了不使地下水和淤泥从桩尖与内外管下端接角面挤入内外之间的空腔中,对中后在桩尖的内外台阶上铺纸袋或纤维性布料,作为密封材料。



图2



图3

(4) 振动沉管

在振动锤的激振力作用下,作用力经成孔器传至桩尖,桩尖即随外成孔器进入土层,被成孔器排挤的泥土则进入内护壁套管,随桩尖不断进入土层,内护壁管内的土逐渐向上顶移而从内管顶端排出。

① 开始激振时应使机架和成孔器均垂直,垂直度偏差不大于1%。

② 在打桩过程中如发现地下障碍应及时拔出成孔器,清除后继续施工。

③ 成孔终止应符合下列要求:

④ 桩端位于坚硬、硬塑的粘性土、卵砾石、

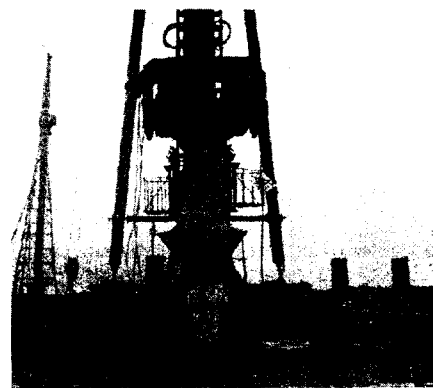


图4

中密以上的砂土或风化岩等土层时，以贯入度控制为主，桩端标高控制为辅。

⑤ 桩端标高未达到设计要求时，应连续激振 3 阵，其每阵持续 1 分钟的平均贯入度不应大于规定的数值。

⑥ 桩端位于软土层时，以桩端设计标高控制为主。

⑦ 打桩时如出现异常应会同有关单位研究处理。

⑧ 桩架或成孔器上应设置控制深度的标尺，以便准确控制成孔深度。

⑨ 成孔达到设计要求后，应验收深度并做好记录。

(5) 灌注混凝土及振动拔管

成孔器下沉至标定（设计）深度后，从设在外护壁套管的灌注口向筒孔中灌注混凝土，并在振动的同时将外护壁套管和内护壁管向上逐渐拔出，拔出成孔器时及时添加混凝土（俗称“补料”），最后桩尖与灌注形成的混凝土筒体连成一体形成筒桩。振动、拔管和浇注过程中控制设计桩顶标高处砼的质量，按沉管桩质量控制要求，桩顶实际浇注面高出设计要求 50cm。

① 检查成孔质量合格后应尽快浇注混凝土，灌注混凝土前，先检查成孔器内有无吞桩尖或进泥、进水。

② 从设在外护壁套管的灌注口向筒孔中灌注混凝土，混凝土灌满成孔器后开始振动拔管，提拔速度一般为 0.6-1.5m/分钟，同时进行添加混凝土。振拔浇注过程中控制混凝土用量使桩顶混凝土标高满足设计标高要求。

③ 混凝土坍落度：80~100mm。浇注混凝土时制作试件每台班应不少于 1 组试块。

④ 混凝土超灌应大于 200mm，使桩顶混凝土强度在凿除桩顶浮浆后满足设计要求。

混凝土灌注应连续进行，桩混凝土的充盈系数不得小于 1。

⑤ 在施工过程中应及时作好施工记录。

(6) 桩顶处理

成桩浇注完成后，移开桩机，立即开挖、清理桩头至设计标高，挖出内孔中碴土。筒桩实际成型如图：

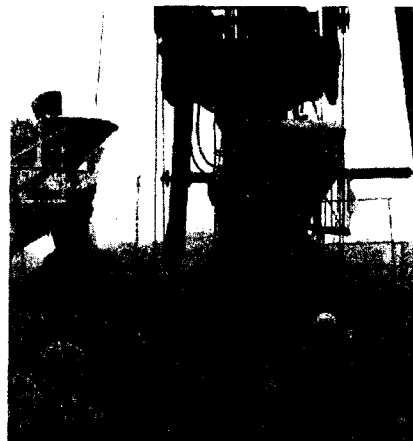


图 5



图 6

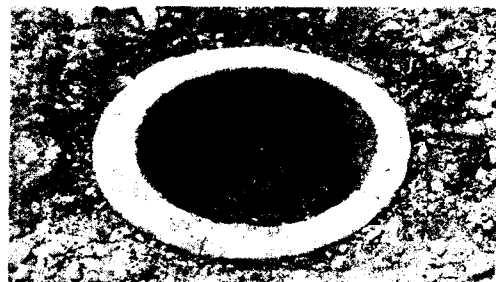


图 7

(7) 浇筑盖板

准备钢模 20 付, 凿桩清土, 经检测合格后, 即可进行支模并扎筋, 盖板的钢筋网预先制作好, 安放后浇筑混凝土, 设计砼标号 C30。



图 8

成桩质量检测方法

筒桩作为新桩型、新工艺, 质量控制要求较严格。除严格执行筒桩施工要求外, 成桩以后检测显得非常重要。成桩质量检测主要手段有:

1. 低应变反射波法

要求按照一定比例进行抽检, 主要目的是检测桩身完整性和成桩混凝土质量。由于筒桩桩型不同于实心桩, 要求桩顶至少均匀对称测试四点, 击发方式采用尼龙棒、铁锤两种方式, 选择最佳击发与接收距离, 采集测试波曲线。

2. 高应变检测法

主要用于工程桩承载力测试, 由于筒桩承载力以摩擦力为主, 锤击时易产生较大贯入度, 因此测试要求进行桩顶加固, 挖除筒内 1.2m 土层, 灌以 1.2m 的实心混凝土, 方可进行高应变测试。

3. 静载试验检查及要求

试验目的: 通常用来确定试桩单桩极限承载力, 对于重要地段、地质复杂地段, 要求进行 2~3 根试桩静载试验, 试验方法采用慢速维持荷载法。最大荷载采用设计荷载 2.0 倍。试桩前应进行下列准备工作, 凿除桩顶有被损或强度不足处, 挖空桩顶筒内土 1.5m, 灌以实心混凝土, 修补平整桩顶。

4. 筒桩内壁直接观察法

现场开挖是检测筒桩质量最直观、最有效的方法, 它不同于其它桩, 因其中心为原土, 故可以采用人工开挖, 自上而下直接观察混凝土的桩身完整性。每个工地, 可选择低应变检测有缺陷的或在施工过程中出现异常的桩顶开挖。

☆ 欢迎投稿 ☆

大直径现浇混凝土薄壁筒桩的施工、质量检查及验收*

张铁柱¹ 郑尔康²

(1.浙江海桐投资管理有限公司 杭州 310014; 2.铁道第四勘察设计院软土研究所 杭州 310014)

【摘要】系统介绍了大直径现浇混凝土薄壁筒桩施工准备,桩尖制作,成孔工艺,安放钢筋笼,灌注混凝土等工艺并阐述筒桩质量检查及竣工验收的具体方法和标准。

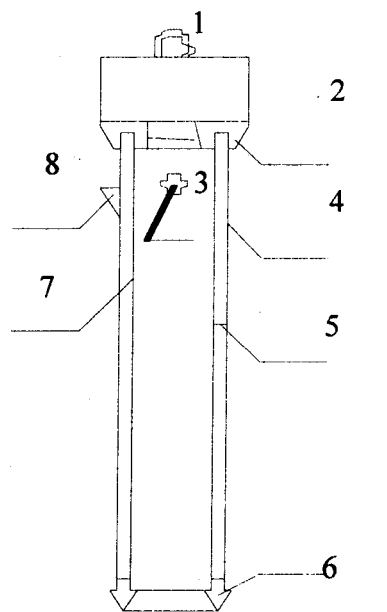
【关键词】大直径现浇薄壁筒桩;施工工艺;质量检查;验收标准

简介

大直径现浇混凝土薄壁筒桩简称筒桩,是指采用专用施工机械在地基中形成大直径筒形孔,然后配置钢筋笼并就地灌注混凝土而成型的筒形桩。不配置钢筋笼的称为大直径现浇素混凝土薄壁筒桩,简称素筒桩。

筒桩的施工设备主要由桩架与成孔器组成。成孔器是筒桩的主要成孔设备,由振动锤、双层钢管、夹持器、出泥孔、环形桩尖等部件组成(见图1)。其中振动锤尤为重要,工程中一般采用中高频振动锤将带预制桩尖的内外钢管同时打入地基土中,形成桩体所需的环形空间。施工单桩的成孔器称筒桩成孔器,施工联体筒桩的成孔器称联体筒桩成孔器。筒桩可以直接在陆地上施工,也可以在海上用船打或排架上施工;筒桩直径一般为1m、1.5m,正在向更大直径发展;壁厚一般为12cm、15cm、18cm、20cm、25cm。根据已施工的工程实例,素筒桩多为直径1m、壁厚12cm;钢筋混凝土筒桩多为直径1.5m、壁厚200cm。采用接桩的方法,桩长可达数十米。

筒桩的质量检查,包括筒桩施工过程中检查和成桩后检测。施工过程中检查可以通过测成孔器长度、测成孔器垂直度、测混凝土充盈系数等进行保障。成



- | | |
|-----------|-----------|
| 1. 中高频振动器 | 2. 夹持器 |
| 3. 出孔 | 4. 外管 |
| 5. 环形空隙 | 6. 环形桩尖 |
| 7. 内管 | 8. 混凝土受料槽 |

图1

* 收稿日期:2008年9月

桩后检测可以通过现场开挖测量壁厚、低应变检测、高应变检测、单桩静载荷试验检测等方法进行检测,以确保筒桩的质量。

筒桩施工

1. 施工准备

(1) 筒桩施工前应具备场地岩土工程勘察报告,施工设计图纸,建筑场地及邻近建筑物结构与地基基础、地下管线、道路等相关资料;通过施工图会审、设计交底;编制施工组织设计及审核确认。

(2) 打桩前应处理高空和地下障碍物。施工场地平整处理。并保证施工机械正常作业条件,包括桩机移动范围内垂直度要求,地面的承载力要求,施工场地及周围排水畅通要求等。桩基轴线的控制点和水准点应设在不受打桩影响的地方,开工前经复核后应妥善保护,施工中要求经常复测。桩基轴线位置的允许偏差不得超过20mm。

(3) 振动锤应根据工程地质条件、桩径及施工条件等选择合适的中高频振动锤。筒桩施工前要进行试打桩,以检查设备、施工工艺、设计参数是否符合要求。打桩时如发现地质条件与勘察报告不符,应及时与有关单位研究处理。筒桩施工场地相邻有建(构)筑物时,应采取适当的隔振措施。

(4) 场地内三通一平,其中场地平整尤为重要,桩架如果是步履式,自重比较大,对场地的地耐力要求高,要适当合理考虑。以避免因地耐力不够,造成桩架歪斜,不能保证成桩质量,更要避免桩架歪倒引起事故。

2. 施工机械设备

筒桩施工设备主要包括桩架、成孔器、环形桩尖和振动锤,关键设备是振动锤。

(1) 桩架

桩架主要有滚筒式和步履式两种形式,不论采用何种形式的桩架,必须满足桩长、桩径、振动锤的形态和装载重量及其稳定性的需要,接地压力要满足地基承载力的要求,并且要移位机动性强,调整位置和角度方便,此外选择桩架时还要考虑地面坡度等因素。在水上施工时可把桩架设置在船体上或搭设的排架上。

(2) 成孔器

成孔器分为筒桩成孔器和联体筒桩成孔器,分别用于单体筒桩和联体筒桩的施工。筒桩成孔器包括:出泥孔、内管、外管、混凝土受料槽等部件。联体筒桩成孔器,由筒桩成孔器加上导接器构成。

(3) 设备及主要参数

a. 振动锤型号的选择

① 选择合适的振动锤往往是工程顺利进行的关键,考虑的因素是多方面的,包括发动机的功率、偏心力矩、振幅、振频、吊重、拔桩力、振动力等。其中振动力和最低可接受振幅是两个最关键的因素。

② 另外选择振动锤要考虑工程应用的土壤性质和筒桩埋深。各种类型的土质对最小振幅要求有所不同,在砂质的土体中,振动造成的液化程度较高,要求振幅比较小,只需要3mm。

在粘土中,由于土体会跟随桩壁运动,振幅要求达到6mm才能摆脱土体。在理想的情况下,如在水下的砂质土体中振幅只需要2mm。

③ 桩阻力在振动时因为土体液化的作用比静止时大幅度减弱,减弱程度根据振频大小和土质决定。

振动锤激振力 F 和振幅 A ,应按浙江省《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》中式 C.0.4-1、式 C.0.4-2 计算。

④ 目前工程上应用的振动锤可参考表 1。

桩锤选择参考表

表 1

锤 型		国 内				国 外	
		电 动 锤		液 压 振 动 锤		液 压 振 动 锤	
锤 的 动 力 性 能	偏心力矩 (kg·m)	35	57	40	83	50	230
	工作频率 (rpm)	1470	1470	2100	1800	1650	1400
	最大激振力(kN)	1800	2900	2400	3000	1800	4800
	最大空锤振幅 (mm)	20	22	24	36	—	—
	最大拔桩力(kN)	700	1150	1200	1200	1300	2200
适用的筒桩外径(mm)		1500 及以下		800~2000		800~6000	

b. 我国已生产出拥有完全自主知识产权的新一代桩工机械。国内液压振动锤设备主要技术参数可参见表 2。

HFA 系列大吨位高频液压振动锤主要性能参数表

表 2

项 目		单 位	HFA160—80	HFA160T—80	HFA240—120	HFA240—120
高 频 液 压 振 动 锤	偏心力矩	kg·m	32.5	40.5	48.6	82.7
	工作频率	Hz/rpm	35/2100	35/2100	35/2100	30/1800
	最大激振力	kN	1600	2000	2400	3000
	最大空锤振幅	mm	24	28	24	36
	最大拔桩力	kN	800	800	1200	1200
	发动机功率	KW/HP	448/600	522/700	550/740	670/900
	液压油最大流量	L/min	525	756	756	900
配 套 液 压 步 履 桩 架	最高工作压力	MPa	42	42	42	42
	筒桩最大有深度	m	26	26	32	32
	筒桩最大有效直径	m	1.5	1.5	2.0	2.0
	桩架最大拉压力	kN	800	800	1200	1200
	接地比压	MPa	≤0.6	≤0.6	≤0.6	≤0.6
	外形尺寸 (长×宽×高)	mm	12000×10000 ×31000	12000×10000 ×31000	12800×10800 ×37000	12800×10800 ×37000
	总重量(不含配重)	kg	95000	95000	115000	115000
配电总功率	kW	114	114	114	114	

c. 国外液压振动锤主要技术参数可参见表 3。

振动锤主要技术参数

表3

锤型	50	100	150	150T	200	200T	200-6T	300	400	600
偏心力矩(kg.m)	15	25	25	30	50	60	81	75	150	230
激振力(kN)	445	783	907	1067	1797	2126	2535	1841	3203	4830
振动频率(转/分)	1650	1670	1800	1800	1650	1800	1700	1500	1400	1400
最大拔桩力(kN)	534	534	711	711	1335	1335	1335	1335	2224	2224
整机重量(kg)	2220	2867	3970	4060	6577	6668	8006	7939	16670	20071
动力矩功率(kw)	260	260	350	455	630	630	630	630	1000	1000

3. 单体筒桩施工工艺流程

桩位放样 → 桩尖埋设 → 桩机就位 → 振动沉管 → 安放钢筋笼 → 浇灌砼 → 振动拔管 → 桩机移位。

(1) 桩位放样：根据设计图纸、业主提供的坐标、基准点，要求按图放样。

(2) 桩尖预制及埋设：桩尖质量及形状是筒桩施工工艺技术的关键点之一，桩尖刃口的形状决定筒桩施工排土量大小及沉管阻力。必须按施工现场工程地质条件、设计要求、筒桩排土量的具体情况来设计桩尖的刀口刃形状。一般桩尖砼强度应比筒桩体强度高一个等级，桩尖可场外预制，养护并达到强度后送至施工现场。

桩位放样后，先清除桩位上的1.5m×1.5m范围内的填碴，再埋设桩尖，桩尖定位采用拉十字线法检验、检查，桩尖中心和桩位中心偏差，误差要求小于20mm。

(3) 桩机就位：位置初步对中后，下放成孔器，使成孔器的内外钢管底端接近桩尖顶面，再调整纵横相对位置，使桩尖顶面凸台嵌入成孔器内外管间的腔内，实现完全对中（保证不扰动桩尖位置，且对中后校正桩机底座水平度和桅杆垂直度，垫实底座）。为了不使地下水和淤泥从桩尖与内外管下端接角面挤入内外之间的空腔中，对中后在桩尖的内外台阶上要求铺设纸袋或纤维性布料，或其他密封材料。

(4) 振动沉管：在振动锤的激振力作用下，作用力经内外钢管传至桩靴（桩尖），筒靴即随内外套管进入土层，被筒靴排挤的泥土则进入内护壁套管中，随桩尖不断进入土层，内护壁管内的土逐渐向上顶移而从内管顶端出泥孔排出。

(5) 制作安放钢筋笼：制作的钢筋笼，其接头要采用焊接并符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204。主筋净间距必须大于混凝土粗骨料粒径3倍以上。

沉管达到贯入度及设计标高后，检查成孔器内有无进水或进泥，然后安放钢筋笼。搬运、吊装时可以采取钢管临时加固钢筋笼以防止钢筋笼吊装引起的变形，安装后固定钢筋笼位置。钢筋笼上要设置垫块以保证保护层的厚度符合设计要求，保护层的允许偏差为±10mm。（如是素筒桩则无此步骤）

(6) 灌注砼及振动拔管：钢筋笼安放完毕后，从设在外护壁套管上端的混凝土受料槽向筒体中灌注混凝土，并在振动的同时将内外套管向上逐渐拉出。此时，桩靴将离开内外套管底端，并同灌注形成的混凝土连成一体，埋设在软地基中。最后，根据砼的实际方量和理论方量来计算其成桩充盈系数，初步检验成桩质量。振动、浇注砼和拔管过程中控制桩顶设计

标高, 桩顶实际标高应高出设计要求 50cm。

(7) 桩机移位: 完成振动拔管后, 按照施工组织的打桩顺序进行桩机移位, 重复上述步骤进行打桩。

4. 联体筒桩施工工艺

目前联体筒桩直径通常为 1000-2000mm, 咬合厚度 50-100mm, 咬合宽度 200-400mm, 最终形成地下空心连续墙, 即可抵抗水平推力又可充当防渗墙, 实现挡土和止水二墙合一。施工工序如下:

① 特制 3-5 个联体筒桩成孔器。先将第一个联体筒桩成孔器打入土中, 然后将第二个成孔器在入土前插入前者的导接器中, 再激振沉入设计土层深度。依此类推连续打入 3 到 5 个联体筒桩成孔器 (依土质状态决定联体筒桩成孔器的个数, 即挤土越明显, 则所用的成孔器越多)。浇注第一根时至少连续打入两根以上联体筒桩成孔器。

② 连续打入几个联体筒桩成孔器后, 在每个成孔器中安放设计要求的钢筋笼。

③ 在已经安放钢筋笼的成孔器内灌注混凝土后, 振动起拔。

④ 灌注后的所有联体筒桩连续成形, 最终形状设计要求的联体筒桩结构的空心连续墙。

⑤ 若用于简单的防渗结构, 亦可用素联体筒桩。

如果在施工期间遇到必须停顿时, 就要在已灌注混凝土的联体筒桩的后面留一个空成孔器, 以便在以后灌注后续联体筒桩时做到很好的相联。但还必须注意停顿过程不能超过 2 小时, 否则成孔器由于混凝土凝结无法拔起。当联体筒桩施工中发生咬合故障时, 可采取相隔的缝隙用高压喷浆方法进行修补, 保证其联体的良好性能。

筒桩质量检查及验收

确保筒桩质量行之有效的方法主要是在成桩的过程中对每个环节进行严格控制, 才能确保成桩后的质量要求。

1. 筒桩质量检查

(1) 桩尖制作

桩尖表面要平整、密实, 掉角深度不应超过 20mm, 且局部蜂窝和掉角的缺损总面积不超过该桩尖表面全部面积的 1%。桩尖内外面圆度偏差不得大于桩尖直径的 1%, 桩尖上端内外支承面高差不得超过 5mm。桩尖混凝土强度一般不小于 C30。预制桩尖上要标明编号、制作日期, 桩尖养护时间应达到 28d, 使用前混凝土强度要达到设计要求。

(2) 成孔

选择打桩顺序时要尽量减少挤土效应及其对周围环境的影响。桩机就位对中后, 根据地质条件在桩尖上端设置止水材料, 再用成孔器压紧桩尖, 桩尖中心要与成孔器中心线重合。开始激振时使机架和成孔器均保持垂直, 垂直度偏差不大于 1%。在打桩过程中如发现地下障碍物应及时清除后继续施工。桩架或成孔器上要设置控制深度的标尺, 以便准确控制成孔深度。

成孔终止要求: 桩端位于坚硬、硬塑的粘性土、卵砾石、中密以上的砂土或风化岩等土层时, 以贯入度控制为主, 桩端标高控制为辅。桩端标高未达到设计要求时, 要连续激振 3 阵, 每阵持续 1min, 再根据平均贯入度大小研究确定。桩端位于软土层时, 以桩端设计标

高控制为主。打桩时如出现异常要会同有关单位研究处理。成孔达到设计要求后,应验收深度并做好记录。

(3) 制安钢筋笼、灌注混凝土

① 钢筋笼制作允许偏差见表4。

钢筋笼制作允许偏差

表4

项次	项目	允许偏差(mm)
1	主筋间距	±10
2	箍筋间距或螺旋筋间距	±20
3	钢筋笼直径	±10
4	钢筋笼长度	±50

② 制作的钢筋笼,其接头应采用焊接并符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB50204。主筋净间距必须大于混凝土粗骨料粒径3倍以上。搬运、吊装时可以采取钢管临时加固,以防止吊装引起钢筋笼变形,安装后固定钢筋笼位置。钢筋笼上要设置垫块以保证保护层的厚度符合设计要求,保护层的允许偏差:±10mm。

③ 检查成孔质量合格后尽快灌注混凝土,灌注混凝土前,利用线坠检查成孔器内有无桩尖损坏或进泥、进水现象。混凝土粗骨料可选用卵石或碎石,其最大粒径不宜大于50mm,且不得大于钢筋间最小净距的1/3。混凝土灌注要连续进行,筒桩混凝土的充盈系数不得小于1.1。混凝土超灌要根据选用混凝土、工程条件适当超灌,使桩顶混凝土强度在凿除桩顶浮浆后满足设计要求。

④ 在施工过程中应及时作好施工记录。

(4) 海上筒桩施工质量检查

由于海上桩基施工的特殊性,其质量检测可按《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》并结合具体工程及工程现场的地形地貌,水文潮流及地质条件由设计单位提出具体要求后遵照执行。如果桩顶高出水平面时,可以按规程进行低应变检测,但海洋工程中往往海平面不能退出桩顶,而无法进行低应变检测,更无法进行静载荷试验。这是海洋桩基工程常遇到的难题。为了保证工程质量,尽量做到在施工过程中严加监管:

① 桩长,除了终孔时测量桩管长度(入土深度)外,还必须测量终孔时混凝土顶端的实际深度,如发现未达设计高程,要及时补灌混凝土,以确保桩身长度。

② 充盈系数必须>1.1。为了保证混凝土强度,除了试块取样达到实验室检测外,还必须做到在灌满混凝土后起拔桩管时应做好振动起拔工艺,不允许不振动就起拔或快速起拔,确保混凝土的密实质量。

③ 其他项目的工艺要求,按照规程中的要求进行施工,成桩质量能够得到保障。

④ 如果海洋工程的基础采用群桩复合地基加固,则桩身质量可以参照钻孔灌注桩或其他桩基工程的技术规程要求监测。

2. 筒桩质量验收

① 成桩14d后可开挖暴露桩顶,观测筒桩的壁厚和成型情况。

② 低应变检测桩身完整情况,不得少于总数的30%。

③ 采用单桩静载荷试验检测筒桩的承载力,检测数量由设计结合具体工程确定。

④ 具体验收可按《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》执行。

高频液压振动锤在筒桩施工中的应用研究*

王进怀¹ 王卫东²

(1. 中铁工程机械研究设计院 武汉 430062; 2. 北京复兴路9号 北京 100038)

现浇薄壁筒桩(以下简称筒桩)是谢庆道教授的专利。筒桩因其可大量节省混凝土,无泥浆污染,施工速度快捷,挤土效应相对较小,设计桩身不限制,桩身质量的保证,工程造价低等优点,已被社会越来越多的施工单位和业主所接受。高频液压振动锤作为筒桩的施工机械,相对其它传统桩工机械作基坑支护工程,更具高效、环保、节能等特点,目前,筒桩已应用于我国的一些重点工程建设领域和其它基础工程建设中,现已完成筒桩施工达25000多根,产生了非常好的社会效益和经济效益;高频液压振动锤和筒桩工艺,都是具我国自主知识产权的技术,在我国工程实践中得到应用和推广。

现浇薄壁筒桩及其特点

现浇薄壁筒桩是指外径800mm~2000mm,壁厚100~250mm,中心充满地基土,现浇灌注而形成的混凝土筒形桩体。它的施工原理是利用高频液压振动锤将双层钢护筒沉入地下,向夹层中灌入混凝土,启动振动锤拔出双层钢护筒,便形成了一根现浇薄壁筒桩。筒桩主要分为单体筒桩和联体筒桩,单体筒桩主要用作承载桩,也可用于基坑支护;联体筒桩主要用于具有止水功能的挡土墙。

筒桩的优点主要体现在以下几个方面:

1. 它克服了沉管灌注桩及预制桩等桩型对直径的限制,使桩径大大增加,充分发挥了大直径桩稳定和强度较优的作用。
2. 在施工过程中,原位土不是被挤向桩的周围而是被双层钢护筒的内筒套入其中,部分原位土可从内筒溢出,克服了桩身受挤土的影响,桩身质量有保证。
3. 如果将筒桩制成钢筋混凝土桩,既可承受巨大的压应力,也可承受巨大的剪应力;如果将筒桩制成低强度的素混凝土桩,组成复合地基的增强体,除能承受较大压应力外,还可有效的控制土的侧向变形,减少工后沉降,非常适用于高速铁路及公路的软地基处理。
4. 筒桩以最少的材料获得最有效的结构效应。在相同混凝土用量的情况下,圆筒形结构比圆柱形结构具有大得多的外表面积,具有大得多的惯性矩,作摩擦桩使用时,承载力会高出很多,作支护桩使用时,抗弯强度会高出很多。
5. 筒桩利用高频液压振动锤施工筒桩,可以在许多地质条件下成桩。又由于成桩时桩身

* 收稿日期: 2008年9月

混凝土处于高频振动状态,使混凝土分布更均匀密实,确保了桩身质量。

6. 如果利用配有降噪动力箱的高频液压振动锤施工筒桩,施工时噪音低于75分贝,可完全满足城区施工对振动及噪声的限制,可较好的满足施工时的环保要求。

7. 与其他灌注桩相比,筒桩一个很明显的优势就是不用做泥浆护壁,相对于人工成孔灌注桩极大地提高了工人施工的安全性,相对于旋钻机成孔的灌注桩则不会产生泥浆污染,非常环保。

高频液压振动锤的六大特点

高频液压振动锤一种发展于二十世纪八十年代、成熟于九十年代的新型液压桩工机械,它依靠柴油机提供强大动力,采用高频振动来实现沉桩和拔桩作业,高频液压振动锤在德国、美国、意大利、荷兰等西方发达国家,已是技术非常成熟的一种环保、高效的工程机械,已广泛应用于社会建设的诸多领域,社会效益和经济效益显著。它区别于其它桩工机械有以下六大特点:

1. 是一种环保型的桩工机械。高频液压振动锤与电动锤、柴油锤相比,它施工时振感小、噪音小,不扰民,如果配备降噪动力箱,工作时几乎无噪音,非常适合市区、人群较集中的地方和对周围有较严格限制的地方施工。

2. 是一种非常高效的桩工机械。一般来说,高频液压振动锤的施工效率是普通桩工机械的十倍,振动沉桩速度一般在4—7米/分钟,在非淤泥地质最快速度达到12米/分钟,若与振动专用桩架配套使用,则可缩短对桩时间,提高工作效率。

3. 是一种比较轻便的桩工机械。与静压桩机相比,在相同工况条件下,高频液压振动锤全部工作质量只有静力压桩机的二十分之一,整套设备运输只需2辆中型卡车,施工时转场非常方便。

4. 是一种相对比较价廉的桩工机械。国外在中国市场销售的高频液压振动锤,价格非常昂贵,其销售价是国产价格的二倍多,再加上售后服务等因素,我国进口数量非常有限;由中铁工程机械研究设计院研制成功、具有我国自主知识产权高频液压振动锤的销售价尽管比电动锤、柴油锤售价高,但相对于静压桩机和旋挖钻机来说,在完成相当工作的前提下,高频液压振动锤价格更便宜,不及进口产品售价的一半。

5. 是一种适用地质范围广的桩工机械。高频液压振动锤分常规型、高频率、无共振型三大系列,根据地质情况和工程需要可选用不同系列、不同激振力的高频液压振动锤作为施工机械,高频液压振动锤穿透卵石层、沙层、建筑垃圾等地质层的能力很强。

6. 是一种多功能的桩工机械。高频液压振动锤不仅可以沉拔混凝土预制管桩(PHC桩)、各类型钢板桩和钢护筒,还可作振动沉管灌注桩、薄壁防渗墙、地表压实和深层压实工程的施工,筒桩是目前在桩基础领域中,非常具有应用和推广前景的一种新型成桩工艺,用高频液压振动锤作筒桩施工,是当前一种经济、高效、环保的成桩工艺,它比当前旋挖钻机成孔的灌注桩更高效、更环保、更节能。

高频液压振动锤施工筒桩与旋挖钻机施工灌注桩之比较

用高频液压振动锤施工直径为 800mm 的筒桩对应旋挖钻机成孔 800mm 灌注桩(注:目前北京地区基础桩许多是由旋挖钻机作业完成),作业相同深度的基础桩,这两种成桩工艺及施工机械的性能比较如下:

1. 施工效率。一台高频液压振动锤下沉一根钢护筒的速度是一台旋挖钻机成孔灌注桩速度的若干倍,高频液压振动锤沉桩速度平均为 4—7 米/分钟,远远高于旋挖钻机成孔速度及成孔后的灌注速度。

2. 成桩效能。高频液压振动锤施工直径为 800mm 的筒桩与旋挖钻机成孔 800mm 的灌注桩,在相同抗弯强度下,筒桩和灌注桩的用料比为 1: 2.13,单节筒桩比单节混凝土灌注桩至少节省混凝土 50%,可大大降低工程投入成本,单桩的承载力和抗弯强度比灌注桩高出很多。

3. 适应的地质条件。高频液压振动锤施工筒桩,是全程钢护筒护壁,除了不能入岩,可以适应许多复杂的地质环境;而旋挖钻机施工灌注桩,遇到地下沙层坍塌则需要做护壁,防止沙层坍塌,这样,成孔灌注桩施工效率便会大大降低,施工成本会相应地增大。

4. 环保性能。高频液压振动锤施工筒桩时振感很小,机械噪音低于 75 分贝,符合城市符合环保要求,地面不会有地下土溢出,地面基本保持原来现状,不会出现泥浆污染、不会因噪音和振感强烈而扰民;旋挖钻机施工时需从地底下挖出大量地下土,堆积在地面上,给施工带来不便,遇有大风,甚至有灰尘随风飞扬,影响周围行人、车辆,甚至附近生活的居民和工作人员。

5. 销售价格。国外(如美国 ICE 公司和 APE 公司、德国 MGF 公司、KRUPP 公司和德国宝峨公司、荷兰 PVE 公司等)进口的高频液压振动锤价格非常昂贵,比国内同规格产品价格高出很多,在完成相同工况条件下,国产高频液压振动锤的售价比相同性能的旋挖钻机售价要便宜很多。

6. 应用前景。高频液压振动锤施工筒桩,分为单体筒桩和联体筒桩,单体筒桩可作为公路铁路软基处理、工业和民用建筑的基坑支护、填海工程、海洋工程等,联体筒桩可作挡水和防渗墙,要在许多苛刻的自然环境作业,如水上、海上等;当前,我国的旋挖钻机已具有一定规模,旋挖钻机的性能和施工效率,已在国内的工程建设领域发挥着重要作用,高频液压振动锤的发展在国内已开始起步,具备良好的市场发展前景,高频液压振动锤和旋挖钻机在工程建设中,都具有很广泛的应用前景。

筒桩与其他基桩技术之比较

现浇砼薄壁筒桩独特的技术构想是基于弥补现有的预制类、沉管类桩和钻孔灌注桩的缺陷为出发点,因而与上述桩相比具有如下的优势。

1. 与预制类桩、沉管类桩相比,筒桩的挤土效应减少、设计桩径不限、桩身整体质量连续且有保证,预制类桩和沉管类桩打入土层时产生严重的挤土效应,导致已施工桩的桩身受

施工桩的挤土作用而变形、断裂、错位、上浮,尤其是预制类桩的接头处更易破坏而导致严重的质量问题,且由于挤土严重,沉管和预制件打入中阻力很大,目前应用的设计口径受限于直径600mm以内,而现浇砼薄壁筒桩既克服了挤土,又使应用的设计口径适当扩大,因连续浇灌而成,桩身的整体刚度较预制类桩要好,且成桩可以全部在现场完成,施工方便又速度快。

2. 与钻孔灌注桩相比,筒桩节省混凝土至少45%,且无泥浆污染、桩身砼有质量保证,施工速度快,工程造价低。目前钻孔灌注桩竖向受力不需要全端面即实心断面,而从抗弯矩角度考虑,断面中心部位砼起作用可忽略不计。而且钻孔桩施工给环境带来严重污染,泥浆处置又是城市桩基施工的一个难题,每方土的泥浆处置费合计起来也是一个不小的投入。

从上述方面可见,钻孔桩存在严重的材料浪费问题,而现浇砼薄壁筒桩可以克服上述缺点,无泥浆处置又节省材料;施工速度提高几倍至几十倍,且更有效保证桩身砼质量,真正使桩基设计、应用达到优化的目标。

高频液压振动锤与普通振动锤之比较

振动锤按动力源可分为电动振动锤和液压振动锤两种,在我国,电动振动锤是市场较为普及的振动锤,在桩工机械市场占有较大的份额,而大吨位高频液压振动锤结构较为复杂,国内一些重点工程建设使用的大吨位高频液压振动锤为国外进口的产品。电动振动锤的主要优点有:

一是既可沉桩又可拔桩。由于振动锤是靠减小桩和土壤间的摩阻力而达到沉桩的目的,在桩和土壤间摩阻力减小的情况下,可以用稍大于桩和锤重的力即可将桩拔起。因此,电动振动锤不仅适于沉桩,同样适用于拔桩,沉拔桩的效率都很高。

二是施工操作较为方便。电动振动锤在施工中不用设置导向桩架,只要用起重机吊起即可作业,但需要较大功率的电源,工作时要拖着很长的电缆线。

三是具有环保功能。电动锤施工时噪音小,不产生任何有害气体,不损桩头,作业速度快,使用方便,维护简单,施工费用低。

电动振动锤与高频液压振动锤相比,电动振动锤有明显不足,主要有:

一是施工时振感强烈,电动振动锤较为适合郊外施工。电动振动锤虽然具有噪音小的环保优点,相对于高频液压振动锤,仍有很大差距,它施工时振感强烈,对周围建筑物、居民和工作人员有较大影响,电动振动锤在市内施工已逐渐被禁止。

二是带负荷启动时对附近电网有一定的影响。电动振动锤施工时需外牵很长的电缆线,它带负荷启动时功率很大,对附近外接的电网都有一定的冲击,影响周围地区的正常用电;高频液压振动锤不需外接电源,施工时机动性很强,功率大,适应地层地质范围广,施工中对周围没有任何影响。

三是不能进行水下施工作业。电动振动锤需外接大功率电源启动,锤头不能入水,高频液压振动锤由柴油机提供动力,锤头为全封闭设计,可以进行水下作业,尤其适合于海洋工程和水利工程。

四是频率低, 激振动力小, 适应地层地质有限, 施工效率低。由于电动振动锤自身的局限性, 适应地层地质较为有限, 稍复杂一点的地层地质结构对它性能的发挥制约很大, 德国MGF公司研制的高频液压振动锤最大激振力可达8000KN, 在香港沉2.8米直径预制桩深度达108米, 高频液压振动锤可克服电动振动锤这些方面的不足。

五是应用领域有限。电动振动锤自身的性能适用于围堰工程、基坑支护工程中的钢板桩施工, 施打“H”型钢桩、一定长度的钢管桩和混凝土灌注桩, 在地基改良工程中还可以用于排水砂桩、塑料排水板以及砂灰桩等施工, 高频液压振动锤除以上功能外, 还可以对地层进行深层密实; 进行地表压实, 应用于公路的“白改黑”工程; 水利工程中防渗墙的施工, 铁路公路的路基处理, 可以有效地解决工后沉降; 海洋工程中的围海造地等。

高频液压振动锤可以完全取代电动振动锤, 它具有电动振动锤的优点, 同时也具有电动振动锤不具备的其它功能。

高频液压振动锤施工筒桩在国内已有大量应用, 取得了非常明显的社会效益和经济效益, 得到了行内的普遍认可。筒桩已在以下一些工程实践中应用, 主要有:

1. 2000年, 杭宁高速公路二期工程长兴段, 共完成筒桩施工419根, 桩长15米, 施工质量优良。

2. 2001年, 杭州市绕城高速公路南段工程, 共完成筒桩施工3500根, 桩长20米, 施工质量优良。

3. 2002年, 绍兴市104国道南连北建续建工程, 共完成筒桩施工250根, 桩长20米, 施工质量优良。

4. 2003年, 申苏浙皖高速公路工程, 共完成筒桩施工1090根, 桩长14米, 施工质量优良。

5. 2003年, 浙江15省道彭余线公路改建工程, 共完成筒桩施工945根, 桩长10米, 施工质量优良。

6. 2004年, 杭州至千岛湖高速公路工程, 共完成筒桩施工1450根, 桩长25米, 施工质量优良。

7. 2004年, 07省道公路工程, 共完成筒桩施工2020根, 桩长18米, 施工质量优良。

国内还有一些公路工程均采用筒桩作为复合地基处理, 高频液压振动锤施工筒桩作为公路的承载桩, 不仅路基稳定, 而且沉降很小, 目前沪杭高速公路拓宽工程软基处理也大量应用筒桩。

当前, 高效、节能、环保已成为科技创新和时代发展的主题, 国家也在大力提倡和推广具有自主知识产权的新工艺、新技术应用于工程建设的诸多领域, 高频液压振动锤、筒桩在我国的推广应用, 必将极大地改变传统的施工技术和工艺, 为我国的经济建设做出新的贡献。

关于大直径现浇混凝土薄壁筒桩若干问题的探讨*

郑尔康

(铁道第四勘察设计院软土地基研究所 杭州 310012)

[摘要] 对筒桩适用的地层岩性,筒桩竖向力和水平向承载力计算,筒桩的有效长度,高频振动下土壤性质变化对承载力的影响,海洋工程中筒桩质量检测,提出筒桩深入研究和应用需解决的若干问题的探讨。

[关键词] 适用性; 竖向; 水平向极限承载力; 桩长; 桩径; 高频振动; 质量检测

大直径现浇砼薄壁筒桩简称筒桩,是一种新型的桩基。它具有承载力高,稳定性好,沉降小,性价比高,用途广泛等特点。能形成这些特点的主要原因是它形成一个特殊而庞大的内腔。它不仅具有较好的竖向承载能力,而且具有较好的水平向承受能力,因而在工程中用途广泛。现在筒桩已经成功的用于高速公路和高速铁路的地基处理,工民建的深基坑支护,水工建筑物的支挡,并且向桥梁的墩台基础,多层建筑的桩基发展。

对于这样一种新的桩基总有一个认识过程,筒桩有些优点可能还未挖掘出来,有些性能还未得到充分利用,也有些不足之处有待进一步改进和完善。下面就筒桩在设计和施工中的若干问题提出来与各位商讨。

1. 筒桩适用的地基土层。应该说筒桩适用于软弱土层及第四纪覆盖的松散地层,具体说适用于饱和的软粘土、粘土、砂粘土、松散的砂土或砾砂土,及严重风化成土状的岩层,特别适用于软粘土。对于嵌岩桩暂时是无能为力的,因为筒桩的桩头处有一个砼预制好的管靴,超过它硬度的地层如一基岩,它只能穿透风化成土状的部分,而无法进入中风化或微风化层,满足不了桩基嵌岩深度,对于一定要达到嵌岩深度的筒桩,目前只有将钢管内土体挖除,用人工下去掘岩扩底,达到要求后再一併浇筑成桩。对于胶结密实的砂砾土及卵砾石层也不适用。

另外,筒桩嵌岩桩可能会有一些问题,因为筒桩的承载机理还是符合地基机理(即充分发挥内部土芯作用),如果嵌岩变为端承桩,土芯就没有作用了。

2. 筒桩竖向承载力的确定。筒桩竖向承载力是筒桩的主要受力部分之一,正确评价筒桩的竖向受力性状,合理计算竖向力在设计中关系极大。应该说筒桩竖向力的研究相对比水平向力工作做得多,了解得深,因而得出的计算值趋合理。如浙江大学岩土工程研究所诸学者通过较长时间研究得出筒桩竖向力从定性到定量的结论意见。筒桩竖向力由三部分组成:外侧阻力、桩端阻力、土芯阻力。土芯阻力又可分为内侧阻力和土芯端阻。内侧阻力和土芯端

* 收稿日期: 2008年8月

阻力与土的性质、桩径大小、桩长及桩壁厚薄有关；大体呈现下部大，上部小的现象。河海大学岩土工程研究所通过室内试验，模拟筒桩的现场实际情况，并埋设仪器测出各部分受力数据，考虑内摩阻力情况的计算结果更接近实测数据，因而可以推测，对于大直径薄壁筒桩的内壁摩阻力应该是存在的。再从杭宁高速公路长兴试验段实例，从10根筒桩的静载试验，包括不同桩长、桩径、空腔内有土和无土、顶部有盖板和无盖板的结论来看实际的极限承载力大于理论计算值，土芯对承载力的贡献确实存在，而且这种增值与桩长等因素有关。人们从工程试验中得出，筒桩的极限承载力是相同混凝土方量，相同桩长的沉管灌注桩承载力的1.54~1.56倍，同桩径同桩长沉管灌注桩的极限承载力是筒桩极限承载力的1~1.15倍，而混凝土方量却是筒桩的2.36倍。筒桩竖向承载力确定在目前设计中准确计算还有困难，关键是土芯阻力的影响因素太多。现有计算方法中有三种形式：一是系数法，从实际经验出发以外侧摩阻力乘以一个系数定为内侧摩阻力，这比不考虑要好，但还是基于经验。二是理论分析法，包括有限元法、解析法等，该方法在理论上能达到比较好的精度，但实际工程设计中应用较少。三是通过现场静荷载试验确定。在今年实施的浙江省“规程”中，根据不同情况采用了一和三方法。应该采用现场试验确定是合适的。

3. 筒桩水平向承载力的确定。筒桩水平向的受力性状相对来说目前研究的还比较少，水平向的极限承载力试验做的更少，积累资料不多。但是越来越多的工程，应用筒桩的水平承载力收到很好的成效，如码头防波堤等水工建筑，深基坑支护等。素混凝土大直径薄壁筒桩单桩一般不易承受水平向荷载，当需要承受较大水平向荷载时，应采用大直径钢筋混凝土薄壁筒桩，在薄壁中安放钢筋笼，并进行单桩静力水平荷载试验，这是目前确定单桩水平极限承载力的主要方法。当缺少单桩水平静载试验资料时，可参照同类地质条件的试桩资料，或由桩身实际配筋率，按面积等效原则（只计算混凝土部分截面面积）由桩身配筋率小于0.65%的灌注桩的单桩水平承载力计算公式估算。应该说这种计算筒桩水平力的方法是很粗糙的，不能正确反映筒桩的真正水平受力性状，必须强调现场试验，但现场试验又不是容易的事，只有通过大量现场试验资料的总结，通过理论研究，得出合乎实际的计算方法，才是我们要做的工作。

到目前为止，筒桩作为桩基或作为复合地基的增强体仍没有一套完整、准确的快速计算方法和软件。建议加快此项工作的建设。

4. 筒桩向深度和宽度方向发展。在编写“规程”时曾有一位专家提出，为了保证筒桩的质量和施工安全，应该限制筒桩的长度，定为35m。但是在正式报批文件中这条意见并没有采纳。因为筒桩技术本身并没有受深度的限制，随着机械设备不断进步，筒桩可以不断向深度和宽度方向发展。随着筒桩技术不断向前推进，尤其在沿海深软地层中运用，35m深度已经不能满足需要了，必须向更深的方向发展。目前筒桩施工是一根一次成桩，如果这一状态不改变，筒桩再向深部发展成为非常困难，于是就产生了采用“接桩”的办法。也就是采用一种稳妥便捷的方法将两根不同直径而又平行套在一起的钢管连接起来，这有一定的难度也需要一定的接桩时间，目前在实践中已获得成功。另一方面，为解决施工中机架过高，移动速度慢等问题，可采用履带吊机吊打的方式。试验结果一半成功一半失败，成败各占50%。凡采

用控制导向的都成功,否则失败。原因是没有控制方向使筒桩偏斜不正,成桩质量差。我们从接管和吊打成功实例中找到了筒桩向深部发展的方法,能适应工程的需要,但是还有缺点需要在实践中不断改进和完善。

现在筒桩在施工中最大直径为1.5m,并且正在向2m和更大的方向发展,有的单位已成功的打出2m直径的筒桩,这是一个很大的进步,要知道在此基础上在增加0.5m直径在设备和动力上要付出多少的精力。从设计的理念看,筒桩之所以能有较好的稳定性,很大的功劳在于大直径。直径的增加与桩面积成平方的关系,与桩周长成一次方的关系,桩径增加桩的承载力将大幅度提高,然而增加的混凝土方量却不多,是非常划得来的事,应该向再大的直径方向发展。笔者认为筒桩的最大直径以2m为宜,能真正起到大直径桩的作用,若再加大直径,设备动力庞大费用高,得不偿失。

5. 激振会改变土的性质。从筒桩各部位检测到的各项指标之和,比总应力尚小,除了检测的指标有误差之外,主要的原因是在如此高频振动力作用下,桩端和钢管接触的土物理力学性质发生变化所致。例如端部为砂性土,在激振作用下很快会发生液化,但一旦停止振动后砂土会自然静止出现比原先更紧密的排列结构,此时砂土性质不同于原先,强度比原来值要高,对砂土来说这种变化完成时间比较短,反应明显。如果端部为粘性土,在激振作用下土体会发生蠕变,一旦停止振动后粘土的强度也会有变化,对粘性土来说这种变化完成的时间会比较长,所以反应不很明显,有时可能会降低,例如没有粉(砂)土夹层使孔隙水排出,则强度恢复及提高需要很长时间。如果桩打的比较密,他们之间也有一定的挤密作用这些变化在设计中是不考虑进去的,事实也无法计算,只是作为安全储备。

6. 海洋筒桩施工的质量检测。在“筒桩技术规程”中对筒桩质量检查及验收均有具体规定,我们在工作中按章执行就是了。但是现在用筒桩加固地基不仅在陆地而且大量的用到水下,如海港码头基础。当筒桩从水下埋深处直伸展至水面以上,按照规程做当然是可以的,但现在筒桩深埋于海底以下,桩头仅出露海底面,在海洋工程中往往海平面不会低于桩顶,在这样的情况下无法进行桩的动测,更不能进行桩的静载荷试验,这也是海洋所有桩基工程中常遇到的难题。为了保证工程质量,比较好的方法就是在施工过程中严加监管,质量问题在过程中确保,具体做法可按下列方法进行:

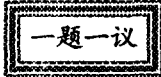
① 测量桩长,除了终孔时测量桩管长度(入土深度)外,还必须测量终孔时混凝土顶端的实际深度,如果发现未达设计高程,就要及时加灌混凝土,以确保桩身长度。

② 充盈系数必须大于1.1。为了保证桩身混凝土强度,除了试块取样进行实验室测试外,还必须做到在灌满混凝土后起拔桩管时应做到振动起拔工艺,不允许不振动就起拔,这样就保证了桩身混凝土的密度质量。

③ 其他项目的工艺要求,仍按“规程”中的要求,成桩质量均能得到满足。

④ 如果海洋工程的基础采用复合地基加固,则桩身质量可以根据钻孔灌注桩或其他桩基工程的规范要求。

当前国内外海洋工程中应用钻孔灌注桩亦无法要求动测或静载荷试验。所有的工程都是以加强监管过程作保证的,以满足海洋工程的特殊性,对筒桩复合地基也不例外。



主持人：龚晓南

关于筒桩竖向承载力受力分析图*

(龚晓南 浙江大学土木工程学系 310027)

近日参加一大直径现浇混凝土薄壁筒桩工程应用方案评审会，发现关于大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向承载力模型图如图1所示。该图所示受力分析是错误的。取筒桩作为分离体，筒桩上作用的竖向力如图2所示。大直径现浇混凝土薄壁筒桩一般由薄壁桩身和盖板组成。大直径现浇混凝土薄壁筒桩不同于一般预制管桩，大多数情况下，筒桩内土芯是充满内孔的。当大直径现浇混凝土薄壁筒桩充满土芯时，在桩顶荷载作用下，桩身外侧和内侧摩阻力、桩身端阻力和土芯对盖板的阻力四部分形成桩的竖向承载能力。取大直径现浇混凝土薄壁筒桩和筒桩内土芯作分离体时，分离体上作用的竖向力如图3所示。在桩顶荷载作用下，桩身外侧摩阻力、桩身端阻力和土芯端阻力三部分形成桩的竖向承载能力。此时桩身内侧摩阻力是分离体的内力，不应计算在内。再来分析土芯受力状况。土芯分离体竖向受力如图4所示。由图可知，土芯端阻力等于土芯侧摩阻力和盖板传递给土芯的荷载两者之和。图4中土芯侧摩阻力和图2中桩内侧摩阻力是作用力与反作用力，两者大小是相等的。

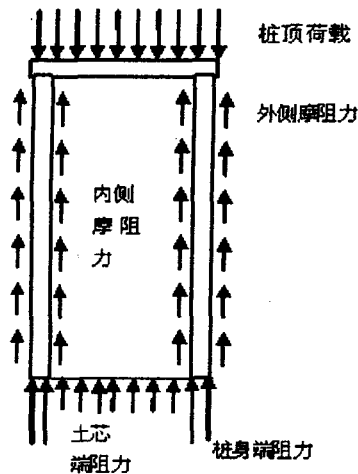


图1 筒桩竖向受力模型

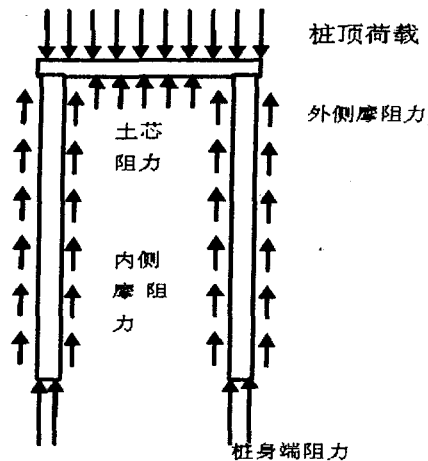


图2 筒桩分离体竖向受力模型

* 收稿日期：2008年8月

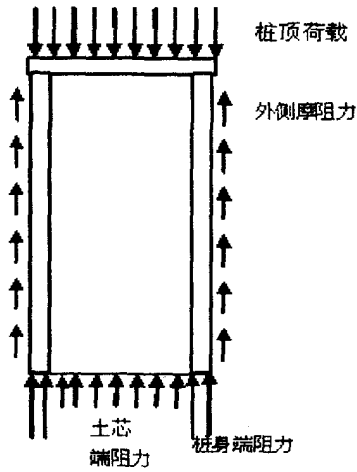


图3 筒桩加土芯分离体竖向受力模型

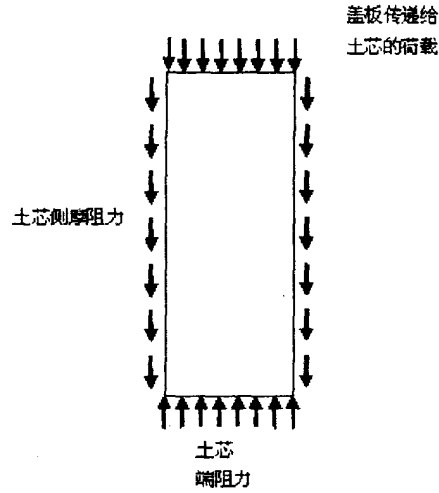


图4 土芯分离体竖向受力模型

由以上分析可知图1所示受力分析是错误的。图1中桩内侧摩阻力和土芯端阻力两项并不独立，夸大了桩的竖向承载能力。大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向受力模型既可用图2表示，也可用图3表示。浙江省工程建设标准《大直径现浇混凝土薄壁筒桩技术规程》(DB33/1044-2007)中大直径现浇混凝土薄壁筒桩竖向受力模型采用图3表示的模型，由桩身外侧摩阻力、桩身端阻力和土芯端阻力三部分形成桩的竖向承载能力。在规程中单桩竖向极限承载力标准值建议按下式计算：

$$Q_{uk} = \xi_1 Q_{sk} + \xi_2 Q_{pk} + \xi_3 Q_{psk} = \xi_1 U_p \sum q_{sik} l_i + \xi_2 q_{pk} A_p + \xi_3 q_{pk} A_{ps} \quad (1)$$

式中 Q_{uk} ——筒桩单桩竖向极限承载力标准值，kN；

Q_{sk} 、 Q_{pk} ——单桩总极限侧阻力、总极限端阻力标准值，kN；

Q_{psk} ——单桩总极限桩芯端阻力标准值，kN；

ξ_1 、 ξ_2 ——桩侧阻力和桩端阻力修正系数；

ξ_3 ——桩芯土柱承载力发挥度；

U_p ——桩身外截面周长；

q_{sik} ——第*i*层土的极限侧阻力标 kPa；

l_i ——桩身穿越第*i*层土的厚度值，度，m；

q_{pk} ——单桩的极限端阻力标准值，kPa；

A_p ——桩端环形截面面积， $A_p = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ ， D 、 d 分别为筒桩外、内直径；

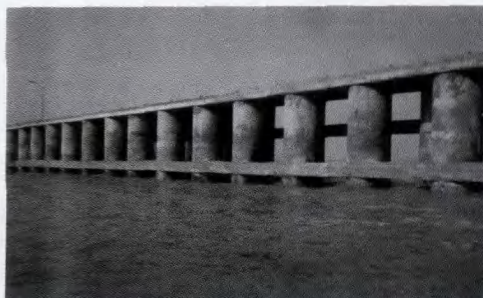
A_{ps} ——桩以内径计算的横截面面积， $A_{ps} = \frac{\pi}{4}d^2$ 。



唐山市曹妃甸石化工业区一期海堤工程

国家电力中南勘测设计研究院

唐山市曹妃甸石化工业区一期海堤工程



温州市鹿西岛筒桩结构透空型防波堤工程



上海金山卫筒桩疏导堤现场施工



上海金山卫联体筒桩疏导堤



福建漳州阳光都市酒店基坑支护



宁波商会大厦基坑支护



杭宁高速公路桥头软基处理



甬台温高速铁路台州站筒桩桩靴

(以上筒桩施工实例照片由浙江海桐投资管理有限公司供稿)